

MAZDA TECHNICAL REVIEW

マツダ技報 2022 No.39



マツダ技報

Mazda Technical Review

2022 No. 39

マツダ技報 第39号 (2022)

目次

巻頭言	今田道宏	1
特集：MAZDA CX-60		
1. CX-60 の紹介	和田宜之, 柴田浩平, 松井 央 後藤昌志	3
2. CX-60 のデザイン	玉谷 聡	7
3. 第2世代 SKYACTIV-D の燃焼技術	金 尚奎, 加藤雄大, 松尾 建 神崎 淳, 田所 正, 白橋尚俊 稲角 健, 皆本 洋, 志茂大輔	14
4. SKYACTIV-D 3.3 の開発 — 大排気量・直列6気筒と燃焼の理想追求による 提供価値の向上—	志茂大輔, 皆本 洋, 福田大介 岩田陽明, 松本大典, 旗生篤宏 岡澤寿史, 辻 幸治, 森永真一	21
5. SKYACTIV-D 3.3 の開発 — 軽量で低燃費, 低振動, 高信頼性を両立した直列6気筒 構造系技術—	岡澤寿史, 本田絢大, 青木 勇 詫間修治, 西岡勇介, 山内智博 山口正徳, 菊池正和, 小泉昌弘 内田 敦	28
6. SKYACTIV-D 3.3 の開発 — 大排気量エンジンとマイルドハイブリッドの協調による 提供価値の向上—	小林 徹, 高木健太郎, 杉本浩一 皆本 洋, 松尾 建, 山川裕貴 高橋康太郎, 大地晴樹, 齊藤忠志 五丹宏明, 錦織大悟, 中上信宏 久米章友	36
7. SKYACTIV-D 3.3 の開発における MBD プロセス革新と適用	宮崎正浩, 小林謙太, 角田良枝 加藤雄大, 村井亜樹, 久禮晋一 福田大介, 城 侑生, 山口能将 志茂大輔	43
8. e-SKYACTIV PHEV システムの開発	久米章友, 福岡泰明, 幸野徹也 楠 友邦, 後藤剛志, 岡崎真行 中上信宏, 春貝地慎太郎, 横手達徳 宮本圭一	51
9. 新型8速 自動変速機の紹介	篠塚 浩, 上田健輔, 山本真司 本瓦成人, 朝倉浩之	57
10. CX-60 のAWD システム開発	吉田 琢, 今村泰理, 梅津大輔 日高誠二, 嶋田克利	62
11. CX-60 のシャーシダイナミクス技術	豊島由忠, 本村浩一, 三宅 輝 虫谷泰典, 奥山和宏, 平松大弥 加瀬泰宏, 澤井 亮	68

12. CX-60 の回生協調ブレーキにおけるダイナミクス性能開発 …	田中繁弘, 丹後佑太, 梅津大輔 …… 今村泰理, 吉田 琢	74
13. CX-60 の NVH 開発について ……	住田英司, 毛利正樹, 服部之総 …… 唐津良平, 宮東孝光, 木下 晃 富士田拓也, 三小田哲也, 村上健太	78
14. CX-60 の空力開発に適用した車両後部の風向制御技術 ……	伊川雄希, 久我秀功, 岡本 哲 ……	83
15. CX-60 の軽量・高剛性ボディー開発 ……	棗 裕貴, 山崎 忠, 影山和宏 …… 川野晃寛, 後藤英貴	90
16. CX-60 の衝突安全性能 ……	辻 大介, 澤田庸介, 黒田一平 …… 谷本晃一, 松下幸治, 安藤 亮 水口浩爾	96
17. CX-60 クルージング&トラフィック・サポート (CTS) …… 開発	原田翔次, 川原康弘, 元谷章博 …… 福井聡一郎, 大岩根拓馬	102
18. CX-60 ドライバー異常時対応システムの開発 ……	濱田隆史, 山下良幸, 西條友馬 …… 休坂慎也, 辻 雄太, 高田淳平 中畑洋一朗, 山本直樹, 尾崎 昂 野中信宏	109
19. CX-60 ドライバー・パーソナライゼーション・システムの …… 紹介	末永修滋, 平田義人, 杉吉竜弥 …… 藤丸翔太, 中上千恵子, 前田真聡	116
20. CX-60 コックピット HMI 表示系進化 ……	常清悠介, 寺澤拓馬, 池田竜太 …… 松尾純太郎, 諸川波動	122
21. CX-60 のパワーリフトゲート開発 ……	杉島孝幸, 樋口圭太, 高田浩二 …… 伊藤 敦, 織田匡樹, 朴 吉友 松下将輝, 黒田智也, 青山麟太郎	128
22. CX-60 における車両ネットワークシミュレーターを用いた …… 開発効率化	佐藤陽平, 西原大樹, 日原圭祐 …… 新川 力, 村上龍馬	132
23. ロジウムホワイトプレミアムメタリックの開発 ……	松田隆臣, 岡本圭一, 藤本智宏 …… 山根貴和, 平野文美	139
24. 直列 6 気筒エンジン組立ラインの紹介 ……	永尾 篤, 宮田崇史, 松浪隆仁 …… 工藤聖広, 松浦 恭, 池田裕輝	145
25. 長尺アルミクラッチドラムの塑性加工, …… 及び異種材結合技術の獲得	野畑俊也, 河野弘和, 田中雄幸 …… 長野隼門, 椎野和幸, 新家泰平	152
26. 新型 CX-60 のボディー構造を実現する車体工程・工法開発 ……	王 強, 足立 圭, 井上 翼 …… 小林正治, 島内仁士	158
27. 高効率混流生産を実現する防府第 2 車両組立工場の進化 ……	岡林直道, 細木信吉, 越智元基 …… 山縣英雄	165
28. 生産工法の変革による魂動デザインと働きやすさの追求 ……	高田有弘, 川合敏之, 崎田 亮 …… 王 強, 川野晃寛	170

論文・解説

29. MAZDA CO-PILOT CONCEPT 技術試作車の紹介	榎岡孝宏, 山本康典, 岩下洋平 菅野 崇, 藤原由貴, 高橋英輝 岩瀬耕二, 桑原潤一郎, 吉岡 透 田内一志	176
30. CX-50 Mazda intelligent Drive Select の開発	今村泰理, 梅津大輔, 藤岡陽一 松尾純太郎, 諸川波動, 延谷尚輝	183
31. Kinematic Posture Control (KPC) の開発	平賀直樹, 緒方博幸, 加藤史律 梅津大輔	188
32. お客様の走行環境に応じた車両腐食環境予測手法の開発	喜久山良弼, 福田克弘, 中本尊元 山根貴和	194
33. 剛性・衝突・NVH の複数性能を同時に満たす車体の トポロジー最適化手法	和田尚美, 和田有司, 弓削康平 木崎 勇, 橋田光二, 寺田 栄	200
34. 1D 車両全体モデルを活用した EV 熱マネジメント システムの検討	波頭佑哉, 中村和博, 山岡祐也 松原孝志, 重森大輝	206
35. 高効率ホットスタンプ加工技術開発	平尾嘉英, 井上誠二, 大川 慧 當房 勝, 奥村聡志	213
36. 力学的エネルギー流れの動的可視化分析手法の開発	釘持寛正, 小平剛央, 岡本定良	219
37. 機械学習による衝突荷重伝達経路の解明	奥山智仁, 本田正徳, 目良 貢 雪田恭兵, 木崎 勇	225
38. 耐食性に優れた車体剛性用接着剤の開発	麻川元康, 古賀一陽, 福田克弘 渡邊伸明, 長友博之, 江崎達哉	230
39. 車載用リチウムイオン電池の開発 ～電池の異常時発熱挙動シミュレーション～	花岡輝彦, 樋口宗隆, 梶本貴紀 池田 卓, 藤田弘輝	235
40. EV 駆動用バッテリーのリユースに向けた取り組みの紹介	楊 殿宇, 高原慎二, 末富隆雅	241
社外への発表論文一覧表		248

Mazda Technical Review No.39

CONTENTS

Foreword

(M. Imada)	1
------------------	---

Special Edition for Mazda CX-60

1. Introduction of CX-60 (Y. Wada, K. Shibata, H. Matsui, M. Goto)	3
2. Design of CX-60 (A. Tamatani)	7
3. The Combustion Technology for 2nd Step Skyactiv-D (S. Kim, Y. Kato, T. Matsuo, J. Kanzaki, T. Tadokoro, N. Shirahashi, T. Inazumi, H. Minamoto, D. Shimo)	14
4. Development of the Skyactiv-D 3.3 —Increased Value Provided by Large Displacement In-line 6 Cylinders and Pursuing the Ideal of Combustion— (D. Shimo, H. Minamoto, D. Fukuda, K. Iwata, D. Matsumoto, A. Hatabu, H. Okazawa, K. Tsuji, S. Morinaga) ...	21
5. Development of the Skyactiv-D 3.3 —Technology of Inline Six-Cylinder Engine Structural Parts that Achieved Lightweight, Low Fuel Consumption, Low Vibration and High Reliability— (H. Okazawa, K. Honda, Y. Aoki, S. Takuma, Y. Nishioka, T. Yamauchi, M. Yamaguchi, M. Kikuchi, M. Koizumi, A. Uchida)	28
6. Development of the Skyactiv-D 3.3 —Cooperative Control Technology for Large Displacement Engine and 48V Mild Hybrid— (T. Kobayashi, K. Takaki, K. Sugimoto, H. Minamoto, T. Matsuo, H. Yamakawa, K. Takahashi, H. Ohji, T. Saito, H. Gotan, D. Nishikori, N. Nakagami, A. Kume)	36
7. MBD Process Innovation and Application in the Development of Skyactiv-D 3.3 (M. Miyazaki, K. Kobayashi, Y. Kakuda, Y. Kato, A. Murai, S. Kure, D. Fukuda, Y. Jo, T. Yamaguchi, D. Shimo)	43
8. Development of e-Skyactiv PHEV System (A. Kume, Y. Fukuoka, T. Kono, T. Kusunoki, T. Goto, M. Okazaki, N. Nakagami, S. Harugaichi, T. Yokote, K. Miyamoto)	51
9. Introduction of New 8 Speed Automatic Transmission (H. Shinozuka, K. Ueda, S. Yamamoto, N. Hongawara, H. Asakura)	57
10. Development of AWD System Technology for CX-60 (T. Yoshida, Y. Imamura, D. Umetsu, S. Hidaka, K. Shimada)	62
11. Chassis Dynamics Technology for CX-60 (Y. Toyoshima, K. Motomura, A. Miyake, Y. Mushitani, K. Okuyama, M. Hiramatsu, Y. Kase, R. Sawai)	68
12. Development of Vehicle Dynamics in Regenerative-Braking of CX-60 (S. Tanaka, Y. Tango, D. Umetsu, Y. Imamura, T. Yoshida)	74
13. NVH Development for CX-60 (E. Sumida, M. Mouri, Y. Hattori, R. Karatsu, T. Miyahigashi, A. Kinoshita, T. Fujita, T. Mikoda, K. Murakami)	78
14. Aerodynamic Development for CX-60 Adapting Flow Control Technology around Wake (Y. Ikawa, Y. Kuga, S. Okamoto)	83
15. Development of Light Weight and High-Rigidity Body Structure for CX-60 (H. Natsume, T. Yamazaki, K. Kageyama, A. Kawano, H. Goto)	90

16. Passive Safety of CX-60 (D. Tsuji, Y. Sawada, I. Kuroda, K. Tanimoto, K. Matsushita, R. Ando, H. Mizuguchi)	96
17. Cruising & Traffic Support (CTS) Development for CX-60 (S. Harada, Y. Kawahara, A. Motodani, S. Fukui, T. Oiwane)	102
18. Development of Driver Emergency Assist for CX-60 (T. Hamada, Y. Yamashita, Y. Nishijo, S. Kyusaka, Y. Tsuji, J. Takata, Y. Nakahata, N. Yamamoto, T. Osaki, N. Nonaka)	109
19. Driver Personalization System for CX-60 (S. Suenaga, Y. Hirata, T. Sugiyoshi, S. Fujimaru, C. Nakagami, M. Maeda)	116
20. CX-60: Improved Cockpit HMI Display (Y. Tsunekiyo, T. Terasawa, R. Ikeda, J. Matsuo, H. Morokawa)	122
21. Power Lift Gate Development for CX-60 (T. Sugishima, K. Higuchi, K. Takada, A. Ito, M. Oda, J. Piao, M. Matsushita, T. Kuroda, R. Aoyama)	128
22. Development Efficiency Improvement by Network Simulator in the CX-60 (Y. Sato, H. Nishihara, K. Hihara, T. Shinkawa, R. Murakami)	132
23. Development of Rhodium White Premium Metallic (T. Matsuda, K. Okamoto, T. Fujimoto, T. Yamane, F. Hirano)	139
24. In-Line 6-Cylinder Engine Assembly Line (A. Nagao, T. Miyata, T. Matsunami, K. Kudo, T. Matsuura, Y. Ikeda)	145
25. Development of Plastic Forming and Clinching Dissimilar Material Technology for Long Aluminum Clutch Drum (T. Nobata, H. Kouno, T. Tanaka, H. Nagano, K. Shiino, T. Shinke)	152
26. Body Assembly Process and Method Development Realizing Body Structure for CX-60 (K. Ou, K. Adachi, T. Inoue, M. Kobayashi, H. Shimauchi)	158
27. Evolution of Efficiency Mixed Production at Hofu No2 Vehicle Assembly Plant (N. Okabayashi, N. Hosogi, M. Ochi, H. Yamagata)	165
28. Innovation of Production Method for “KODO Design” and “Workability” (K. Takata, T. Kawai, R. Sakita, K. Ou, A. Kawano)	170

Technical Reports

29. Introduction of Technology Prototype Vehicle Based on Mazda Co-Pilot Concept (T. Tochioka, Y. Yamamoto, Y. Iwashita, T. Sugano, Y. Fujihara, H. Takahashi, K. Iwase, J. Kuwahara, T. Yoshioka, K. Tauchi)	176
30. Development of Mazda intelligent Drive Select for CX-50 (Y. Imamura, D. Umetsu, Y. Fujioka, J. Matsuo, H. Morokawa, N. Nobutani)	183
31. Development of Kinematic Posture Control (KPC) (N. Hiraga, H. Ogata, F. Kato, D. Umetsu)	188
32. Development of Quantification Technique and Analysis Method According to Corrosive Environment of Customers' Vehicles (R. Kikuyama, K. Fukuda, T. Nakamoto, T. Yamane)	194
33. Topology Optimization Method for Vehicle Body Structure to Meet Multiple Performance Requirements for Body Stiffness, Crashworthiness and NVH Simultaneously (N. Wada, Y. Wada, K. Yuge, I. Kizaki, K. Hashida, S. Terada)	200

34. Study of Thermal Management System for Electric Vehicle Based on Vehicle System 1D Simulation Model (Y. Hato, K. Nakamura, Y. Yamaoka, T. Matsubara, T. Shigemori)	206
35. Development of High-Efficiency Hot Stamping (Y. Hirao, S. Inoue, C. Okawa, M. Tobo, S. Okumura)	213
36. Development of Dynamic Visualization Method of Mechanical Energy Flow (H. Kemmotsu, T. Kohira, S. Okamoto)	219
37. Clarification of Impact Load Transfer Path Using Machine Learning (T. Okuyama, M. Honda, M. Mera, K. Yukita, I. Kizaki)	225
38. Development of Body Rigidity Adhesive with High Corrosion Resistance (M. Asakawa, K. Koga, K. Fukuda, N. Watanabe, H. Nagatomo, T. Ezaki)	230
39. Development of Automobile Lithium-Ion Battery Simulation of Heat Generation Behavior during Abnormal Conditions of Lithium-Ion Battery (T. Hanaoka, M. Higuchi, T. Kajimoto, S. Ikeda, H. Fujita)	235
40. Introduction of Initiatives for Reuse of EV Drive Batteries (T. Yan, S. Takahara, T. Suetomi)	241

List of Reports Published in 2021	248
--	------------

巻頭言



人が支え、人を理解し、人を活性化させる技術 Technologies Supported by People, and Understanding and Revitalizing People

執行役員

今田 道宏
Michihiro Imada

巻頭言にあたり、マツダが文化とするモデルベース開発（MBD）について、その中で私自身が取り組んできたエンジン制御系開発での MBD の振り返りから始めてみたい。

私が入社したのは 30 年以上前であるが、最初に配属されたエンジンの研究を行う職場の直属上司が「今田君、これからはソフトウェアの時代だよね。」とニコニコして話しかけてくださったのを覚えている。学生時代は電磁流体発電を研究対象とし、その設備や装置の規模の大きさゆえシミュレーションが主体で、電磁気学と流体力学の方程式を交互に解く、今で言えば MBD のコ・シミュレーションを、大型計算機を相手にコーディングしては実行する日々を過ごしてきた私は違和感を覚えたが、当時の自動車業界はマイコンを用いたエンジン制御のデジタル化が始まった頃であり、決して多くはない新入社員の中からこの領域にあて育成してくださったことが今に繋がっていると改めて感謝している。

マツダのエンジン制御における MBD 化が急速に進んだのは、2011 年に導入を始めた SKYACTIV エンジンの制御系開発からと言えるが、その試行が始まったのは 1990 年代後半だったと思う。制御工学で多用するブロック線図や状態遷移図を描くとシミュレーションができて、さらに実装用のソフトウェアコードも出力されるという画期的な手法であったが、エンジン制御用のマイコンはまだ非力だった頃に実際に試すことは容易ではなく、専用の ECU (Electronic Control Unit) の試作や開発環境作りに苦労しつつ実用化を進められた先輩諸氏の姿を思い出す。

その後 2000 年代半ば頃からは、商品開発の中での部分的な適用が少しずつ進められたが、2010 年を前に、SKYACTIV エンジンの新開発と同期して、制御系も開発手法とともに一新することを狙った。ここで、モデルだけでエンジン制御全体を扱おうとするとシミュレーションが遅過ぎて実機依存型に回帰する懸念があったが、主流になってきた PC のマルチコア CPU 化を活用し、自分達が作ったモデルの構造に応じてコアを割り当てることで並列処理度を高めたシミュレータを内製することで克服し、多くの制御開発者が手軽に扱えるようになって開発が加速したように思う。

エンジン本体の MBD 化も進んでおりそのモデルに沿った多くの新しい制御機能も実現したことで狙いのエンジン性能を達成でき、また品質面においても、ソフトウェア規模の増加を考慮すれば 7~8 倍良くなったと捉えている。またこの取り組みを通じて若手技術者に力がつき、ベテランや他領域の技術者との協働も進んだことで、さらに新しい開発ができるようになったことも大きな効果であった。

以上は1つの事例であるが、今ではエンジン制御やシャシ制御などの「走る・止まる・曲がる」ための制御系に留まらず、先進安全制御、また情報系の車載機器群の開発にも MBD が多用されるようになってきた。ここではエンジン制御と比べると一段と多く、また異なる誤差因子や標示因子の種類や水準を相手に、いかに口バストかつお客様にとって扱いやすくするかが課題であるが、進化する IT 技術を取り込み、AI との融合も図り、自分達自身でも日々の開発業務に密着したツール群を作りつつクルマ一台分を目指して対応を続けている。ベテランも若手もその効能を実感する手法の進化と、それを扱い開発もできる人財育成をセットで行うのと合わせ、将来への仕込みも進めていきたい。

さて本号の特集は CX-60 だが、その開発や生産準備期間の大半が新型コロナウイルス禍の中であった。モノ造りである以上、リアルな活動が必要なところを、並行して業務環境を整えながら入社率を細かく制御し、試験車両への乗り合わせにも厳しいルールを課して進めてきたが、逆にこれまで培ってきた MBD の真価が試され、また挙げればキリがない様々な現場の工夫を重ねて産み出した商品でもある。

マツダがラージ商品群と称する大柄なクルマでありながらその大きさを感じさせない取り回しや人馬一体感、2 クラス下のクルマと比べて遜色ない燃費、深化した魂動デザインと一段と高めた上質さに心を弾ませて頂き、MAZDA CO-PILOT CONCEPT の具現化第一弾となるドライバー異常時対応システムを含めてさらに進化させた先進安全技術群やドライバー・パーソナライゼーション・システム、使いやすさを増したコネクティビティシステムやコックピット HMI など、普段の生活から万が一の時まで、また一人一人に寄り添うことで安心して運転して元気になって頂ける商品に仕上がったと考えている。

嬉しいことに、日本自動車殿堂様より『ドライバーサポートと緊急時対応の技術：マツダ CX-60』および開発グループを「2022～2023 日本自動車殿堂カーテクノロジーオブザイヤー」に選定頂いた。対象技術は「ドライバー・モニタリング」「ドライバー異常時対応システム (DEA)」「ドライバー・パーソナライゼーション・システム」の3つであるが、これらに共通し基盤としているのが、ドライバー、つまり「人」やその状態を検出する技術である。

そしてここでも、わずかな種から始め、先例のない中で研究段階から開発を積み重ね、「人を知る」ことを車載機能にまで高めた先達がいる。

なおこれも含め先例のない取り組みにお付き合い頂いている各社や研究機関の皆様には密な協働のお礼を申し上げるとともに、異業種からキャリア採用された技術者達の活躍も忘れずにおきたい。

掲げてきた「人間中心開発」の一端が表彰されたことが感慨深いのと合わせ、魂動デザインやダイナミクス性能も「人を深く知る」ことに根差しており、CX-60 はその集合体と考えている。

また MBD と AI の融合においても、最初に問題を作る、そして最後に答えを出す、または決めるのは人であるので、人にとってわかりやすい処理になるよう注力している。

マツダはこの「人を深く知る」ことを基盤に、個人の自由な移動手段であるクルマを楽しんで頂き、また乗るほどに元気になる人が増えて地域や社会が活性化していくのと合わせ、国や地域の事情に応じた柔軟な環境性能の提供や事業インフラの整備によって地球環境の保全と持続的発展に貢献したいと考えている。

「CASE」「100年に一度の大変革」「VUCAの時代」といった言葉に向き合う中でも、自動車メーカーとしての本来の使命や目的を忘れず、お客様一人一人を含めて人をよく知り、社会や地球の課題を認識し、何を作るかを懸命に考える技術者達が編み出す今後の技術群に期待したい。

読者各位においても、本号を読んで頂きながら、また CX-60 に触れて頂きながら、マツダが実現してきたことを感じ、また仕込みを通じて実現しようとしていることを想像し、楽しみにして頂けると幸甚である。

特集：MAZDA CX-60

01

CX-60 の紹介

Introduction of CX-60

和田 宜之^{*1}
Yoshiyuki Wada柴田 浩平^{*2}
Kohei Shibata松井 央^{*3}
Hisashi Matsui後藤 昌志^{*4}
Masashi Goto

要 約

CX-60 は、マツダ独自のアプローチにこだわって進化させたミッドサイズのスUVである。現代のクルマに求められる高い安全性能と環境性能を兼ね備えながら、どんな道でも心昂ることができる走行性能に、マツダデザインとクラフツマンシップの上質さをまとわせた。マツダが目指す「走る喜び」の中核にある“自分で運転する愉しさ”に徹底的にこだわり、飛躍的に進化させた、CX-60 の商品コンセプトや特徴を紹介する。

Abstract

The CX-60 is a mid-size SUV that Mazda has evolved sticking to the Mazda's unique approach. While combining high safety performance and environmental performance required for modern cars, the CX-60 demonstrates exciting driving performance on any roads, showing off the high quality design and craftsmanship. The CX-60 is significantly evolved focusing on “joy of driving by myself” that is the core of the Mazda-pursuing “driving pleasure”. Here we introduce the product concept and features of the CX-60.

Key words : Driving entertainment, e-SKYACTIV PHEV, Safety, Design

1. はじめに

運転する愉しさを“エンターテインメント”といえるレベルまで高めること、それがCX-60のコンセプトである。CX-60を運転している時、自由で、自分らしく元気になり、ストレスの多い日々の中で忘れかけている情熱を取り戻して欲しい。そんな想いを込めてCX-60を企画／開発した。そして、制約が多く、息苦しい、こんな時代だからこそ、お届けすべきクルマであると確信している。そのために、CX-60で挑戦したのは、“人の気持ちに響くクルマづくり”である。マツダは、人間中心の開発哲学に基づきクルマづくりをしている。身体の領域に関する研究開発は、「人間のもつバランス保持能力」に加え、CX-60では、クルマを道具のように扱える「身体拡張能力」にも着目し、更に進化させた。その上で、CX-60では、新しい領域への挑戦として、“心”部分、つまり、“人の気持ちに響く”に徹底的にこだわった。

2. ターゲット顧客と商品コンセプト

CX-60では、“自分らしく人生を楽しみ、自分らしく挑戦する人達”に向け、彼らを元気づけるパートナーとして、運転すればするほど元気になり、行動範囲を更に広げ、これまで経験したことのない愉しさを味わえるクルマを目指した。そして、“時代をしなやかに生き抜く大人の情熱を解き放つドライビングエンターテインメントSUV”として、「走る喜び」のど真ん中を実現した。

マツダが目指す「走る喜び」は、クルマ好きのお客様だけの価値ではなく、「自分で運転する愉しさ」が中核の価値である。自分の力でクルマを運転し、意のままに操ることで得られる達成感、それが人の心と身体を元気にしていき、挑戦したり、自分の道を進む支えとなり、人生を輝かせることにつながっていく、と信じている (Fig. 1)。

*1～4 商品本部
Product Div.



Fig. 1 Joy of Driving by Yourself

これを実現するために、以下3つのKey Value (KV)を定義した。

KV#1 運転する楽しさ～運転すればするほど元気になる、同乗者と一緒にドライブが楽しめる～

KV#2 安心安全～いつまでも・どこまでも・もっと走りたくなる～

KV#3 デザイン～思わず走り出したくなる、いつまでも乗っていたくなる～

以下の「3. 商品特徴」で、各KVの特徴を順に紹介する。

3. 商品特徴

3.1 KV#1 運転する楽しさ

CX-60では、力強さと高い環境性能を兼ね備えた新開発のパートレインと安定した車両姿勢によって、積極的に加速が楽しめる車体構造「縦置型 SKYACTIV マルチソリューションスケラブルアーキテクチャー」を組み合わせた。加えて、新しい領域への挑戦として、心に響くクルマづくりに徹底的にこだわり、ドライバーの走りの期待にシンクロする加速のリズムとエンジンサウンドをつくり込み、心昂る疾走感を実現した。また、運転する楽しさと同乗者が車酔いしにくい快適性を両立させることで、乗員全員がドライブを愉しめる車両挙動を実現した。

特にこだわった2つの点を以下紹介する。

(1) 音とリズム

CX-60では、心を昂らせるパートレインの音とリズムに徹底的にこだわった。重層的に湧き上がる力強いサウンド、キレのある変速によるリズムを日常領域でも感じることができる。CX-60は、ドライバーが実際にアクセルを踏み込むと、加速と調律の取れた重層なサウンドを奏でる。アクセルワークによって、繊細に、時に力強く、あたかもオーケストラの指揮者のようにドライバーの心を表現するサウンドを奏でることができる。更に、新開発のトルクコンバーターレス8速オートマチックトランスミッションは、機械式クラッチ機構を採用し、エンジン応答の良さをダイレクトに伝え、変速応答や変速間隔をつくり込むことで、人の感覚に一致したリズム感のある軽快な走りを実現した。この心昂る音とリズムに

より、CX-60を運転することで、愉しく、元気になり、凝り固まった心を開放することを目指した。

(2) 意のままの加速

CX-60では、人が感じる「加速の質」までこだわった。ねらいは、「安心して、大きな力を、意のままに操る、愉しさ」である。大きな力を発揮する新パートレインと安心して運転できるベースとなるプラットフォームを開発した。車両挙動も、より一層、乗員が予測しやすくなっており、家族やペット、仲間などの同乗者が車酔いしにくい快適性を実現している。ドライブ中にドライバーは運転を愉しみながら、同乗者は快適に過ごすことができる。CX-60の加速する愉しさは、山の中の曲がりくねったワインディングロードだけではなく、高速道路への合流、追い越し加速などのシーンでも胸のすく“疾走感”を堪能できる。

① 3.3L直列6気筒ディーゼルエンジン「SKYACTIV-D 3.3」(Fig. 2)

2段エッグ燃焼室と高圧燃料噴射と大排気量化によって、実用運転域の広い範囲で高い熱効率を実現した。エンジンは多くの空気があるほど、高効率なリーンバーン(希薄燃焼)ができ、きれいに混ざった均質な混合気を低温で燃やせて、必要な時には大きな力が取り出すことができる。燃焼の理想を追求すること、そして大排気量化によるクリーン化と効率化とエンジントルクを向上させて走りの良さを高めた。

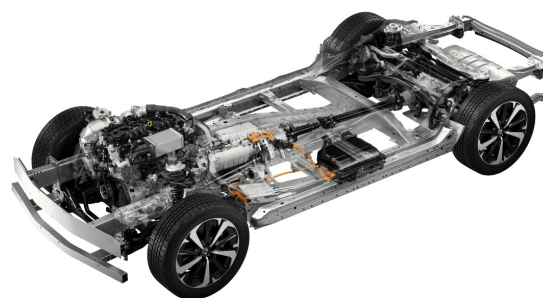


Fig. 2 e-SKYACTIV D 3.3

② プラグインハイブリッドシステム「e-SKYACTIV PHEV」

マツダ初となるSKYACTIV-G 2.5直列4気筒エンジンに大きなモーターとバッテリーを組み合わせることにより、同じく今回新開発した3.3Lディーゼル並の力強い意のままの走りを実現した。マツダが今まで積み上げてきたエンジン、電気駆動、駆動系技術と、人間中心開発の全てを注ぎ込むことで、緻密な駆動力コントロールを実現し、人馬一体感を大きく高めた。

③ 縦置型 SKYACTIV マルチソリューションスケラブルアーキテクチャー

安心して加速を愉しむために、ベースとなるプラットフォームを鍛え上げた。プラットフォームは、エンジン

縦置き方式を採用し、理想的な前後重量配分によって、四輪のタイヤの性能を最大限に発揮しやすくした。更に、後輪駆動ベースならではの AWD により、走行状況に応じた緻密な制御により、四輪のポテンシャルを使い切り、動的性能を大幅に引き上げた。サスペンション方式は、フロントはダブルウィッシュボーン、リアはフルマルチリンクを採用し、タイヤが上下に動く方向を揃えることで、初動からスムーズにストロークし、クルマの曲がる力にキャビンがシンプルな動きで追従する、人の操作に安定してシンクロするクルマを実現した。人の操作に対するクルマからのフィードバックの遅れを徹底的に小さくすることにより、クルマがまるで体の一部になったかのようなドライビングフィールを実現している。

3.2 KV#2 安心安全

マツダの考える“走る喜び”は安心/安全の礎の上に成り立っている。さまざまな運転環境において、ドライバーの認知・判断・操作をサポートすることで、危険な状況に陥ってから対処するのではなく、危険自体を回避し事故のリスクを最小限に抑える、これがマツダの安全思想「MAZDA PROACTIVE SAFETY」である。“人間中心の設計思想”によって、最適なドライビングポジション、アクセルやブレーキの適切な配置、意識することなく知りたい情報をいつでも確認できる視認性の良さ、そしてそれらを人間の特性に合わせるといった、一つ一つの性能を徹底的に磨きあげることで、疲れにくくし、安心/安全に運転を存分に楽しんでいただけるクルマづくりを目指した。

(1) ドライバー・パーソナライゼーション・システム

ドライバー・パーソナライゼーション・システムは、自動ドライビングポジションガイド、自動設定復元、乗降支援の3つの機能から構成している。自動ドライビングポジションガイドは車内のカメラによって目の位置を検出、ドライバーの身長入力より計算しマツダのドライビング思想に基づく理想的なシートポジションに自動調整する。この調整と同時に、ステアリングと HUD、アウターミラーの角度も目の位置に合わせて自動調整を実現する。データは車両に記憶されており、ドライビングポジションを含む約 200 点の調整/設定項目を顔認識で読み出すことができ、ドライバーが変わってもすぐに自動設定復元する機能を備えている。更に乗降支援機能としてドライバーが乗り降りしやすいように、ステアリングとシートを自動でスライドさせる。これにより、誰でも、いつでも、そして簡単に、理想的なドライビングポジションの調整ができ、走り出せばすぐに“走る喜び”を体感できる。

(2) ドライバー異常時対応システム

ドライバー異常時対応システム (DEA: DRIVER EMERGENCY ASSIST) は、ドライバー・モニタリングと

連動し、ドライバーの異常を検知すると、音と表示でドライバーに警告し、注意を促す。ドライバーが運転に復帰できない場合には、ハザード点滅、ブレーキランプ点滅とホーン吹鳴で車外に異常発生を報知しながら、高速道路/有料自動車専用道路では可能な限り路肩に寄せながら減速停止^{*}、一般道では同一車線内で減速停止することにより、事故の回避・被害低減を図る。停車後は、ドア解錠やヘルプネット自動接続による救命要請も行い、早期のドライバー救護・救命に寄与する。

^{*} 路肩に寄せながらの減速停止には、ナビゲーション用 SD カードの挿入が必要になります。

(3) シースルービュー (新世代 360°ビュー・モニター)

シースルービューは、駐車場や細い路地といった狭い場所において低速で走行する際でも、周囲の状況をしっかりと確認できるよう 360°ビュー・モニターの機能を一層進化させたシステムである。画面上にドライバーのアイポイントからクルマを透かして見えるような映像を映し出すことを可能とし、ドライバーが見たい場所をより自然に、直感的に確認することができる。

<シースルービュー 3 つのポイント>

1. ぶつかるかもしれない対象を素早く見つけられる。
2. ぶつかるかもしれない対象が何かが分かる。
3. このまま進むとぶつかるかぶつからないかが分かる。

3.3 KV#3 デザイン

CX-60 のデザインのコンセプトは、“Noble Toughness”。ミドルクラスの SUV がもつ強さと、マツダの魂動デザインの知性とエレガンスを両立させる考え方である。

(1) エクステリア・インテリアデザイン

CX-60 のエクステリアデザインで一番大事にしたのは、“走りの良さがしっかりと伝わる骨格の表現”である。鍛え抜かれたアスリートの身体のように、ひと目見て、その運動性能の高さを感じ取れる、しなやかさで、力強い骨格を表現した。堂々としたその骨格の上には、シンプルなデザインテーマを、奇をてらわず、「美しさの正統」を表現した。

インテリアデザインも、空間構成の強さ、縦置きレイアウトならではの魅力が強く感じられるデザインとして、車幅を存分に生かしたワイドなインストールパネルとコンソールは、“贅沢さと安心感”を感じさせる (Fig. 3)。

(2) 個性豊かな世界観

お客様の多彩なライフスタイルニーズに合わせて選んでいただける、個性豊かな世界観を表現するトリムパリエーションを用意した。量販価格帯では、使える SUV を表現した Gallant と Active を、高価格帯には、個性が際立つモダンさとスポーティーさを表現した Premium Modern と Premium Sports を用意した。



Fig. 3 CX-60 Premium Modern Interior

(3) 匠塗 TAKUMINURI 「ロジウムホワイトプレミアムメタリック」

ボディカラーにおいても第三の匠塗カラーとしてロジウムホワイトプレミアムメタリックを新たに用意した。日本の美意識である引き算の美学や禅の世界の『無』から白を着想、マシンの精巧なイメージを意識し、金属の緻密な輝度感にこだわった。CX-60の力強さと気品を兼ね備える造形をより一層際立たせる色である。

4. おわりに

CX-60は、自分で運転することにこだわり、「運転は楽しい」と心の底から信じるマツダが造った、どんな道でも心昂ることができるSUVである。運転すればするほど元気になり、家族や仲間と新たな出会いや発見をすることを願っている。

“もっと遠くへ、もっと元気に”

CX-60が、お客様とともに走る「ドライビングエンターテイメントSUV」としてお客様の人生を輝かせる一助としたい (Fig. 4)。



Fig. 4 Driving Entertainment SUV CX-60

■著者■



和田 宜之



柴田 浩平



松井 央



後藤 昌志

特集：MAZDA CX-60

02

CX-60 のデザイン Design of CX-60

玉谷 聡^{*1}
Akira Tamatani

要 約

マツダは、ブランドを次なるステージへ躍進させるべく「意のままに走る喜び」と「地球環境を守る責任」を、より高い次元で両立させるラージ商品群を投入する。機能的な理想を追求する中で、縦置きパワートレイン、後輪駆動ベースのレイアウトを採用し、結果としてその外観にはロングノーズ、ショートデッキの骨格バランスが生まれた。そのバランスは魂動デザインの真髄である疾走する生命体の、後ろ足に荷重をかけて地面を蹴り、前に跳躍する生命感ある全身の動きの表現とも合致する。ラージ商品群の第一弾となる CX-60 は、その構造的なバランスを、積極的にデザインの骨格や空間構成に取り込み、造形における生命感とともに走りのポテンシャルの高さとして表現した。そしてその骨格や空間構成の上に、深化した魂動デザインによる日本の美意識「引き算の美学」を、一筋の強い動きである「反り」、余計な要素を削ぎ落した「余白」、光と影のゆらめきを映し込む「移ろい」の3つの造形要素で織り込んだ。

CX-60 のデザイン・コンセプトは『Noble Toughness』（ノーブル・タフネス）。これはミドルクラス SUV がもつべき、一目見て感じる車格の高さや骨格の強さと、魂動デザインの知性、エレガンスを両立させるというねらいを表したものである。

Abstract

Mazda, aiming to upgrade the brand value, launches a large product group that enhances “joy of driving with a car that moves as intended”, while committing to the global environment protection more than ever. Pursuing ideal functionality, the products adopt a vertically mounted powertrain and RWD-based layout, which generate a well-balanced framework with a long nose and a short deck in the appearance. The balance matches the KODO design’s essence suggesting full of vitality of a sprinting animal leaping with its hind legs bracing and kicking up the ground. The starter of the large products, CX-60, positively incorporates the structural balance into the design framework and space structure to express vitality residing in the form as well as high potential driving dynamics. And the Japan’s aesthetic, “ultimate simplicity”, expressed in the further refined KODO design, is incorporated in the framework and space structure with the three figurative essences including “curve” showing a continuous powerful motion, “margin” created by removing unnecessary elements, and “interplay” of light and shadow.

The CX-60’s design concept is “Noble Toughness”, which suggests the aim of achieving the intelligence and elegance of the KODO design as well as apparent classy feel and framework’s powerfulness that are the must-have for a middle-class SUV.

Key words : Vehicle development, Design, Exterior/interior, Color, Kodo

1. はじめに

ラージ商品群第一弾の CX-60 は、マツダブランドを次なるステージにけん引するため、これまでのマツダ車に対して一目で分かる車格の高さを表現する使命をもつ。そのために、CX-60 ではデザインの根本ともいえる外観

の骨格や、室内の空間の構成を意図して変えている。外観骨格ではこれまでのマツダ車に多くさび型のスポーティーなものから、厚いフェイスで、水平基調の、どちらかといえば後傾した重心をもつ威風堂々としたものとした。また室内空間ではドライバー中心の機能レイアウトをとりつつ、造形はクルマとの一体感を強調するより

*1 デザイン本部
Design Div.

もむしろ車格を表すワイド感や整然としたエレメントの配置を優先した。

これらにより上質な走りを生むラージプラットフォームの素性の良さをより純度を高めて車格として表し、お客様には、マツダらしさの中にもトレンドに左右されないひとクラス上の豊かさを体感いただけるレベルに仕上げられた。

2. デザイン・コンセプト

2.1 魂動デザイン

2010年に始まったマツダのデザイン・テーマ『魂動』は、クルマの形に美しく生命感を表しブランド価値を向上させてきた。そして2015年のビジョンモデル、RX-VISION以降は『Car as Art』をスローガンに魂動デザインをアートのレベルに高めるべく深化させている。そこには日本の美意識を礎とするエレガンス表現の「引き算の美学」、すなわち余分な要素を徹底的に排除することで本当に魅せたいものだけを研ぎ澄ませて魅せることを謳っている。CX-60のデザインでは、ラージプラットフォームのもつ走りのポテンシャルを骨格に表し、その上に、余分な要素を徹底的に廃し、後輪に強く荷重をかける力強い一筆のはらいのようなデザイン・テーマを研ぎ澄ませて魅せることに注力した (Fig. 1)。



Fig. 1 Exterior Overall

2.2 デザイン・コンセプト『Noble Toughness』

『Noble Toughness』これは、ミドルクラス SUV のもつべき車格の高さや強さと、魂動デザインの知性、エレガンスを両立させるといふねらいを表したものの。ここには、意のままの走りに昂ることと、地球環境を守る責任という、一見相反するものを知的に両立させる、という思いも込めている。

3. エクステリアデザイン

3.1 縦置きパワートレイン後輪駆動ベースの走りの骨格

ラージ商品群は、走りと環境対応を理想的に両立するため、縦置きパワートレインと後輪駆動ベースのプラットフォームを採用している。これによって生まれるロングノーズ、ショートデッキのバランスは、魂動デザインの真髄ともいえる走る生命体の動きの美しさ、すなわち後足で地面を蹴り、前方へ加速する動きを表すバランスと符合する。CX-60のデザインでは後輪に荷重をかける

動きを表すことで魂動デザインの生命感を表すのと同時に、エンジニアリング上の特徴もしっかりとデザインの骨格としてとらえ、形状のもつ意味をより深いものとした。

CX-60のデザインは、どのアングルから見ても堂々とした骨格的な魅力を感じられるように、バランスを緻密にコントロールしながら、以下の特徴を持たせた。

(1) 水平基調

強力なパワートレインが載るノーズにはしっかりとした厚みを持たせて車格を高め、前後を貫く背骨はウェッジを和らげた水平基調のものとした。ただしそれは単調なものにはせず断面の変化による光の動きで、前方へ突き抜ける加速感を表現している。

(2) 後輪荷重

ロングノーズに加えて、ぐっと後方に引いたキャビンの後端に溜めた力は後方に向けてなだらかに下げたルーフラインによってしっかりと後輪に荷重をかけるバランスにした。前方に跳躍しようとする生命体の構えのように次の動きを想起させる。

(3) 溜めた力を後輪に伝える強力なワンモーション

キャビン後端に溜めた力を、リアアクスルをかすめながら一気に地面まで突き抜く強力な動きを骨格全体の動きとして表現。前後を貫く背骨の加速感と、キャビン後端から地面に突き抜く動きで、シンプルで大胆な骨格的なテーマとした (Fig. 2)。



Fig. 2 Exterior Main Movement of Theme

3.2 デザイン・テーマ

CX-60のデザイン・テーマは、前述の骨格的なテーマを唯一のものとし、「引き算の美学」で、余分な要素を徹底的に廃しながら、奇をてらわず「美しさの正統」を追求した。そのためにシルエット、陰影、映り込む光の移ろいなど全ての細かな変化も全体の動きに緻密に連動させて、前後を貫く背骨の前方への加速感と、キャビン後端に溜めた力をリアアクスルにかすめて地面まで突き抜く大胆な動きの強さを完結させている。

CX-60は乗用車系に比べ、ホイールベースが長く全高も高いためボディサイド面は広大である。また、全幅はCX-5より50mm拡大したがそれはインテリアに不可欠であり、エクステリアデザインのための更なる拡幅は避けた。限られた寸法の中での魂動表現への挑戦は難易度を著しく高めたが、結果として仕上がった形には緊張

感が生まれ、「表現しすぎない知性」ともいえる知的な魅力を備えることもできた (Fig. 3)。



Fig. 3 Tense of Exterior Expression

3.3 エレメントデザイン

骨格全体で表現するデザイン・テーマの造形には大きく、おおらかな性質を持たせたが、各エレメントのデザインは、その大きな動きをしっかりと受け止め、引き締めるものとした。

(1) フロントフェイス

a. 表情

強力なパワートレインを擁するフロントフェイスにはしっかりと厚みを持たせ、水平基調の骨格の一端とした。その表情は、これまでのマツダ車の低く、薄く、切れ長の目を持ったシャープな強さとは違う、各要素に縦方向の厚みを持たせた大らかな強さをもつものとした。強い意志を表しながら、十分なパワーを擁するゆとりと自信から、他を威嚇はしないという強さを表現している。

b. シグネチャーウィングとライティングシグネチャーグリル、シグネチャーウィングやヘッドランプも彫刻的な立体感を強め、縦方向に厚みを増した強いバランスとした。シグネチャーウィング両端部のヘッドライトをかすめて後方に突き刺さっていく部分には、水平基調の細く鋭いライティング機能を組み込んだ。ポジションランプ、ターンランプ、そして、デイトタイム・ランニング・ライトの一部としての機能を持ちながら、ヘッドランプのL字型の発光部と連携して、ライティングシグネチャーとしての強い存在感と新しい表情を創り上げた (Fig. 4)。



Fig. 4 Front Lighting Signature

c. 縦基調のヘッドランプ

フェイスのおおらかな強さをもつ表情は、その機能構成も縦に重ねて凝縮した縦基調のヘッドランプによって

完結させた。穏やかに、しかし、まっすぐに前を見据える瞳の深さに、強い意志と自信を表した。

(2) ボディーサイド

a. ホイールアーチ上の三日月型のシャドー面

クルマのデザインは、ボディーに表現したダイナミックな動きを最終的にタイヤへと繋ぐことで、そのクルマの地面への踏ん張り感、スタンスを表現する。そしてそのタイヤへの形や光の繋げ方をどう処理するかで、スタンスの強さや前後のバランスの違いを表し、それぞれのクルマの特徴としている。SUVでは一般的にボディーに対してホイールアーチを外に出し、その寸法差によってタイヤに力を伝える筋肉質な造形を施す。

CX-60は競合車と比べ、全幅に対する室内幅が突出して広い。これは商品としての大きな優位点であり、またラージ商品群全体での共通化戦略からも重要だ。一方、そのためCX-60の外観の造形代、前述したホイールアーチとボディー面の幅方向の寸法差はこのクラスとしては小さく、通常的手法ではSUVとしての筋肉質な強いスタンスが表現しにくい。

試行錯誤の末、ボディー全体で表現するテーマ造形を全幅いっぱいまで広げて強め、それを一度三日月型にえぐってから、再度タイヤに繋げるという手法を導き出した。

これによって、ボディー全体で表現している大きな光の動きの強さを失うことなくタイヤに向けて繋ぐことができた。また、三日月型のえぐり形状のクオリティーを研ぎ澄ませることで、それらがおおらかなテーマ造形を引き締めるものとなり、CX-60全体のデザインの中で無くてはならないものになっている。

b. フロントフェンダーのサイドシグネチャー

「引き算の美学」を謳う魂動デザインだが、CX-60では一つだけ通常表現しないものを追加している。フロントフェンダーのホイールアーチの後ろ側に埋め込んだサイドシグネチャーだ。

ロングノーズ、ショートデッキの骨格のバランスの根源ともなるこのスペースはまさに強力な縦置きのパワートレインが収まる部分である。CX-60では、意のままの走りと環境を守ることを両立した誇れるパワートレインを、威風堂々とした骨格のこの部分に収めていることを象徴し、またオーナーにも誇りに感じてもらえるよう、このサイドシグネチャーの設定を決めた (Fig. 5)。



Fig. 5 Side Signature

黒色樹脂、漆黒クローム、クロームと素材を変え、上

級のパワートレインにはその技術ネームも表示してグレード表現とした。

(3) リアフェイス

水平基調の骨格を利用して、リアビューでは重心が低く安定した、大人っぽい表情を創った。造形や光の動きはリアタイヤに繋げてスタンスを表現しながら、水平基調として動きを抑えた。

リアランプのライティングシグネチャーも水平基調とし、遠くからでも瞳の存在を感じられる、強いグラフィックを創出した (Fig. 6)。



Fig. 6 Rear Design & Rear Signature

3.4 空力デザイン

CX-60は、世界の競争を押しえてトップクラスのCd値を実現した。これはデザイン開発初期からの空力開発チームとデザインチームとの協働の賜物に他ならない。ここでは空力開発チームの性能向上への強い意志と、関係全領域へのエミッション規制対応における空力性能の重要性の早期共有が奏功した。デザインとの協働でも最新のシミュレーション解析技術により、理想的な風の流れのバランスを追求しながら、デザインの造形に細かな変更が入るたびにその変更が具体的にどのように全体の風の流れに影響しているか、ビジュアル資料を共有し、デザインチームとともにネクストステップを協議した。「引き算の美学」を謳う魂動デザインは、空力性能向上のためにデザイン上意図しない要素を加えることを嫌う。空力開発チームもそれを熟知しており、自ずと協議は、そのような要素を加えずに同様の効果を引出すことに集中した。それらの積み重ねにより、引き算の美学とクラストップクラスの空力性能の両立を実現した。

3.5 新色 ロジウムホワイトプレミアムメタリック

マツダを代表するカラー、ソウルレッドクリスタルメタリックやマシーングレープレミアムメタリックに続く、第三の匠塗りカラーとなるスペシャルホワイト、『ロジウムホワイトプレミアムメタリック』を開発した。この新色は、「引き算の美学」や禅の世界の「無」から着想しており、マツダ独自の質感表現として、マシーンの精巧なイメージを意識し、金属の緻密な輝度感にこだわった。従来のホワイトパールとは異なり、より緻密な粒子感で硬質な輝きを実現し、CX-60の力強さと気品を兼ね備える造形をより一層際立たせるものとなった (Fig. 7)。



Fig. 7 Rhodium White Premium Metallic

4. インテリアデザイン

4.1 縦置きパワートレイン後輪駆動ベースの走りの空間

走り骨格レベルから表現したエクステリアデザインと同様、CX-60のインテリアデザインも、その空間構成から縦置きパワートレイン、後輪駆動ベースの魅力を全面に表すものとした。

車格を表すワイド感をインストゥルメントパネルの幅で、そしてマツダ車らしい前後方向のスピード感をドアトリムアップパーと、コンソールの動きで明確に表現した。最大の特徴はこのインストゥルメントパネルを前方に突き抜く強くワイドなコンソールの存在で、その下には強靱なトランスミッションの存在や、その前方にある縦置き強力なパワートレインの存在を想起させる (Fig. 8)。

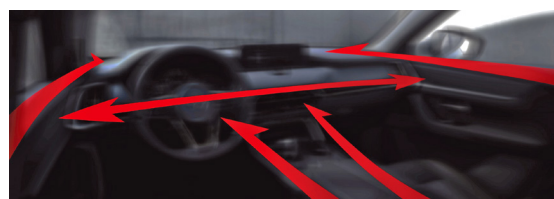


Fig. 8 Construction of Interior Design

これらワイド感、前後方向のスピード感などの、CX-60の空間構成の特徴となる部分にはアイキャッチになる素材や色を施し、全てのグレードでその空間の魅力を感じられるものとした。

インテリアデザインにおける『Noble Toughness』は、強い空間構成の中に、自然の光の移ろいを美しく映し出す断面形状や材質、コーディネーションの魅力などといった知性やエレガンスの表現を両立させるところにある。

4.2 ドライバー空間

機能配置、メーターグラフィックレイアウトなどにドライバーの中心軸はしっかりと感じさせながらも、ドライバーがワイドな車幅と高い車格を実感できる空間構成を創ることを優先し、インストゥルメントパネルの造形では左右の広がり重視した。両サイドのエアコンのルーバーは、構造上の限界まで外側に出してドアトリムアップパーにまで食い込ませ、ワイド感と同時にルーバー加飾の前後方向の立体の深さを持たせてドアトリムアップパーの前後方向のスピードに連携させた。センタールー

バーとヒーターコントロールパネルはすっきりと一体化してインストゥルメントパネルの中央に整然と置き、精緻感ある機能性を表しながら、CX-60の内装全体の端正さを象徴している (Fig. 9)。



Fig. 9 Driver View

4.3 コンソール

幅広いコンソールは、縦置きの変速ミッションや強力なパワートレインの存在を象徴し、空間構成の中で最も強くCX-60の特徴を表す。前方のインストゥルメントパネルに突き刺さる部分では更に前へ突き抜く強さを感じさせるやぐら形状がその剛性感を強調する。コンソール上面は、若干の張りを持たせた大きな面とし、あえてプレーンな印象を持たせ、その面上に機能スイッチをコンパクトに整然と配置することで、強い存在感の中にもすっきりとした印象を持たせた。その両サイドにはプレーンな面を引き締める額縁断面を施し、それを下から支えるコンソール本体からは少しフローティングした印象を持たせて、剛性感の中に軽快さも与えている。またこの上面全体に加飾をもつグレードでは、その豊かな量感に車格の高さを感じさせる。

コンソール後部は幅広いボックスとなり、その左右分割のリッドを兼ねるアームレストは、左右双方の乗員が余裕をもって肘を置くことができ、常に空間のゆとりを感じられる (Fig. 10)。



Fig. 10 Console

5. 新しい HMI (Human Machine Interface) のデザイン

ラージ商品群から、ハイグレードモデルのメーター、ヘッドアップディスプレイ、センターディスプレイのエアリアランスの全てをフルデジタルに統一した。また独自のマツダブランドフォントを一部の主要なグラフィックに取り入れて、新たなインテリアの顔として仕立てた (Fig. 11)。



Fig. 11 Mazda Brand Font

メータークラスターは、フルデジタルの特徴を活かし、ドライバーの好みで最適な文字サイズを選択を可能にし、より多くのお客様が見やすいメーターとした。更にエクステリアのスペシャルカラー専用のオープニング画像や (Fig. 12), PHEV 専用文字盤 (Fig. 13) を設定し、特別なクルマを手に入れたオーナーの愛着を高める。

フルディスプレイメーターとセットで本格導入される Mi-drive (Mazda Intelligent Drive Select) の HMI には、「心のスイッチを切り替える」をテーマに、一目で選択したモードのドライバビリティを直感的に感じられるメーターフェースを用意した。新しいパワートレインが生み出す走りの変化を、操作と視覚の両方で楽しめる、これまでのメーターにはない気持ちの高ぶりを誘うものだ (Fig. 14)。



Fig. 12 Special Color Expression



Fig. 13 PHEV Meter

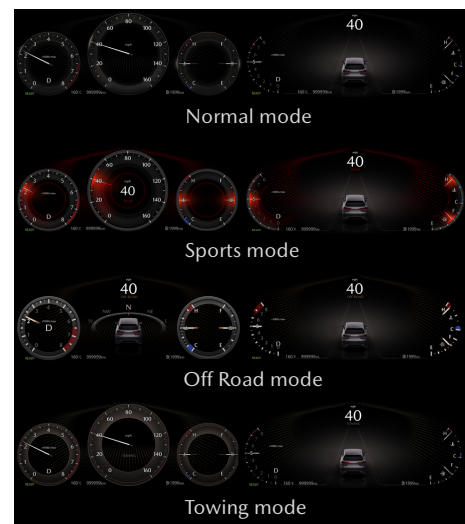


Fig. 14 HMI. Expression of Mi-drive

6. グレード展開

CX-60には、ひとつのネームプレートでノンプレミアムからプレミアムに届くエリアまでの広い価格帯をカバーするという、他に類を見ない挑戦課題があった。そのため、幅広いお客様の多様なニーズに明確な価値をもって応えられるよう、デザインを組み上げる中でも戦略的にグレード展開を構想した。

全てのグレードで、根幹となる骨格や空間構成、高い面質などに、『Noble Toughness』をしっかりと表現した上で、グレード展開は大きく距離を持たせ、主な3つのグループに分けて考えた。

1つはノンプレミアム価格帯のベースグレードとし、あとの2つはプレミアム価格帯に、CX-60の世界観を先鋭化した全く方向性の違うグレードを展開し、提供価値の幅を大きく広げた。

6.1 ベースグレード

素材は奢らず、内外装に積極的に材着素材も採用して、アウトドアユースやオフロード走行等にも気兼ねなくしっかり使えるSUVとしての価値を創出した。ただし、材着樹脂素材などが決して安っぽい存在にならないよう、その造形、表面処理の創り込みには一切の妥協を許さず、丁寧に仕上げた (Fig. 15)。



Fig. 15 Base Grade

6.2 プレミアムスポーツグレード

エクステリアはブラックパーツで精悍に引き締め、インテリアはタン色をブラックで引き締める、内外装に統一感あるスポーティーさを表現。内装のタン色部分にはスウェード調素材を、その一部にはキルティングも奢り、ラグジュアリーな上質さを濃密に創りあげた。端的にいえば高級スポーツカーのエモーションをSUVに表現したグレードといえる。しかしその表現は、アグレッシブで他を威嚇するようなものではなく、しっかりと品格と強さをバランスさせ、大人っぽく仕上げた (Fig. 16)。



Fig. 16 Premium Sports Grade

6.3 プレミアムモダングレード

エクステリアは知的でモダンに、インテリアには日本のものづくり、マツダの考えるジャパン・プレミアムを表現した。それは自然がもたらす変化の瞬間に美を見出す日本人の美意識を基にデザインを考えることや、人の手によって創り出された温か味を感じさせること。例えば、変わりゆく季節の光の移ろいの瞬間に美を見出す感覚を織物の素材に表し、造形と相まって季節や時間による変化に対して敏感に柔らかく反応する美しい瞬間を生み出すこと。また、織物を一定の間隔をあけて留める「掛け縫い」などに匠の技を表すことなどである。複数の素材の配色を絞り、整然と整頓、調和させる「諧調」と、その調和した空間にあえて一部異質なものを織り込んで心地よい変化を持たせ、空間にリズムやダイナミズムをつくる「破調」も取り入れた (Fig. 17)。



Fig. 17 Premium Modern Grade

7. 込めた思い

ミドルクラス SUV 市場は、これまで世界の名だたるブランドが威信をかけた製品を投入してきた、まさに強豪ひしめく市場であり、CX-60 はここにほぼ最後発として参入する。表現の強さや斬新さを競う競合に対し、「引き算の美学」「日本の美意識」を追求する CX-60 のデザインが表現しようと挑戦したのは、骨格や空間構成といった造形の根本から磨き上げる、いわば内面から滲み出る美しさであり、CX-60 のデザインチームはそれらを深く追求し、丁寧に組み上げ、研ぎ澄ませてきた。この、即席では組み上がらない根本からの美しさをもつ CX-60 を、ミドルクラス SUV の新たなスタンダードを示す気概を持って世に送り出した。

CX-60 が、マツダブランドを次なるステージへと押し進める確かな第一歩となることを願っている。

8. おわりに

デザイン出図がほぼ終わり、設計、生産部門とともに品質を確認するタイミングでは、世界に新型コロナウイルスの感染が拡大し、デザイン意図の後工程への伝達も Web 形式となっていた。そんな中、各プログラムで設計、生産、サプライヤー様とともに連携してフィジカルとデジタルの精度の相互確認を重ねてきた自主的活動、「面のアーティスト活動」は、フィジカルな集まりが持てないことから一時滞った。試作段階での面の出来栄えにその悪影響が現れはじめる状況にあったため、水際で呼びかけさせていただき感染対策をして活動を再開。キャッチアップを行う中で、やはりマツダの品質を最終レベルに到達させるのに不可欠なのはオフィシャルなプロセスを超えた、意識ある人による連携以外の何物でもないことを実感した。これからも同様の事例は起こるであろうが、動揺することなく最高の品質を確保する方法を模索し続けなければならないと強く感じた。

■著者■



玉谷 聡

特集：MAZDA CX-60

03

第2世代 SKYACTIV-D の燃焼技術

The Combustion Technology for 2nd Step Skyactiv-D

金 尚奎 ^{*1} Sangkyu Kim	加藤 雄大 ^{*2} Yudai Kato	松尾 建 ^{*3} Takeru Matsuo	神崎 淳 ^{*4} Jun Kanzaki	田所 正 ^{*5} Tadashi Tadokoro
白橋 尚俊 ^{*6} Naotoshi Shirahashi	稲角 健 ^{*7} Takeshi Inazumi	皆本 洋 ^{*8} Hiroshi Minamoto	志茂 大輔 ^{*9} Daisuke Shimo	

要 約

第2世代 SKYACTIV-D では、熱効率の制御因子の理想化を一段と推し進め、燃焼時期と燃焼期間を更に進化させた新燃焼コンセプトにより大幅な熱効率向上を実現した。新開発の2段エッグ燃焼室を用いた空間制御予混合燃焼 (Distribution Controlled partially Premixed Compression Ignition: DCPCI) により、従来は軽負荷領域に限られていた高効率でクリーンな予混合燃焼の考え方を、中・高負荷の実用域にまで拡張することができた。

本報では、第2世代 SKYACTIV-D の燃焼技術を中心に、熱効率改善に向けた機能開発プロセスと CFD 解析による新燃焼コンセプトの提案及び実機エンジンによる検証結果について報告する。

Abstract

For the 2nd generation Skyactiv-D, we have significantly improved thermal efficiency by pursuing the ideal-state of the predominant control factors of the thermal efficiency and by the new combustion approach of evolving combustion timing and duration. With the newly developed "Distribution Controlled partially Premixed Compression Ignition (DCPCI)" using a newly devised Dual Zone Egg-shaped piston bowl, we have succeeded in the extensive application of the highly efficient and combustion-clean Premixed-charge Compression Ignition (PCI) concept to the practical medium-high load range, which had been applied only to the light load range. Focusing on the combustion technology of the 2nd generation Skyactiv-D, here we report on the function development process for improving thermal efficiency, the proposed new combustion concept based on CFD analysis, and the verification results by engine experiments.

Key words : Diesel Engine, Combustion, Thermal Efficiency

1. はじめに

カーボンニュートラル社会に向けてさまざまな施策が世界規模で進行する中、内燃機関にはより一層の熱効率改善が求められており、その実現には燃焼技術の革新が重要である。本報では、高効率と低エミッションを両立する革新的な燃焼コンセプトである空間制御予混合燃焼 (DCPCI) を中心に第2世代 SKYACTIV-D に採用した燃焼技術について紹介する。

2. 熱効率改善に向けた機能開発

マツダは Fig. 1 に示すように究極の内燃機関を目指して、熱効率を支配する制御因子の理想化をガソリンエンジン、ディーゼルエンジン両面から追求してきた⁽¹⁾。1st step から更なる熱効率の改善を目指す 2nd step の第2世代 SKYACTIV-D の開発にあたって、まずゴールである 3rd step における各制御因子の理想状態を検討し、そこからのバックキャストで 2nd step の目標を定めた。この際には 0 次元サイクルシミュレーションモデルを用いたフィジビリティスタディにより、目標となる熱効率

*1~4,6,8,9 エンジン性能開発部
Engine Performance Development Dept.

*7 (株)マツダ E&T
Mazda Engineering & Technology Co., LTD.

*5 MBD 革新部
MBD Innovation Dept.

を達成するように各制御因子に定量的な改善目標を配分した。燃焼モデルにはディーゼル燃焼の特徴である空間的不均質さが及ぼす熱効率への影響を簡易的に模擬することを可能とするため、筒内を未燃領域と既燃領域に分けて表現する独自開発の2領域簡易燃焼モデル⁽²⁾(以下、2領域モデル)を用いた。また配分した目標に対する進捗・達成のエンジン実験での検証を、同じ2領域モデルを用いた実測指圧の熱力学的解析により行う。マツダではこのように目標設定と検証のループを回し、制御因子を作り込んでいく開発を機能開発と呼んでいる。

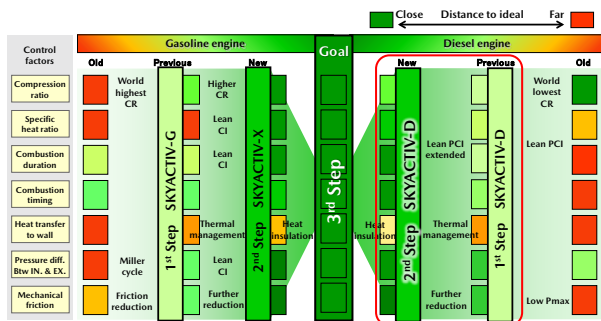


Fig. 1 Roadmap to Ideal Internal Combustion Engine

Fig. 2 に 1500rpm BMEP600kPa (エンジン諸元は Table 2 の現行型) を代表運転条件と定め、この回転負荷においてグロスの図示燃料消費率 (以下、G-ISFC) に関連する圧縮比、比熱比、燃焼期間、燃焼時期、壁面熱伝達の5つの制御因子に改善目標を配分した結果を示す。5因子のうち燃焼時期・期間の指標には等容度を、壁面熱伝達の指標には吸気温度と壁面熱伝達予測式にける補正係数 C_w を、比熱比の指標には吸気温度と2領域燃焼モデルの既燃領域における代表空気過剰率 λ_b を用いることで定量化した。各グラフは黒い縦線で示した1st stepにおけるステータス値をベースに各因子及びその関連指標を任意に変化させ G-ISFC の改善をスタディした結果である。Fig. 2 の緑の縦線は、ゴールとして正味熱効率 50%、G-ISFC 155g/kWh を仮目標値と置いて検討した3rd stepの各因子の目標を示し、赤の縦線は2nd stepの各因子の目標を示す。圧縮比と等容度のグラフには、G-ISFC に対する因子間の相互作用がある C_w をベースの 0.83, 0.6, 0.4 の3水準で計算した結果を示している。3rd stepでは全ての因子で大幅な改善が必要であることがわかる。一方、2nd stepでは等容度に大きな改善目標を配分した。この高い等容度目標は1st stepで軽負荷に適用したPCI燃焼の等容度に迫る目標である。これと併せて吸気温度と熱伝達補正係数 C_w の低減を行うことで大幅な G-ISFC 改善を狙った。これらの目標を達成するための燃焼技術の革新について以降に検討する。

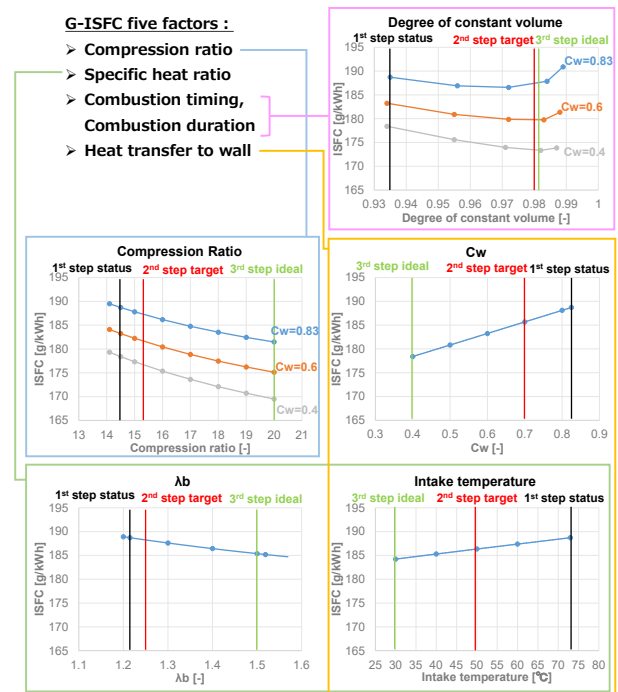


Fig. 2 Targets of Control Factors for Improving Thermal Efficiency

3. 新燃焼コンセプト

Fig. 3 に示すように、マツダの現行量産ディーゼルエンジンの軽負荷条件においては、燃焼期間の短いPCI燃焼が採用されている⁽³⁾。一方、中・高負荷領域においては主燃焼の前後に熱発生を伴う拡散燃焼が主体となっており、その長い燃焼期間のため等容度が低く燃費が犠牲になっている。そこで、中・高負荷域に適用可能な部分予混合燃焼を新たに開発し、燃焼期間短縮による等容度の向上を図った。TDC付近で短期間の燃焼を行いつつ、燃焼音やエミッションの性能目標を両立するためには、多段噴射の各噴射段を時間的・空間的に制御することで、前段噴霧によって形成される既燃部と後段噴霧との干渉を抑えることが重要である。

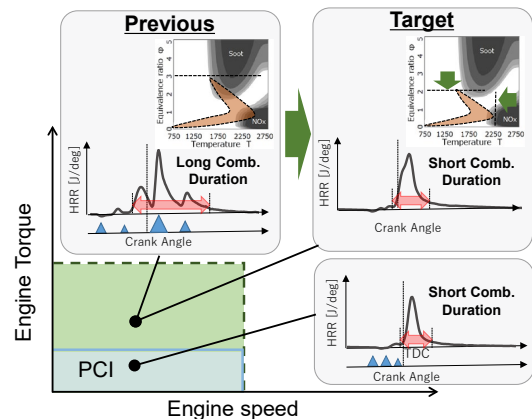


Fig. 3 Target of Combustion Duration and Mixture Distribution for Medium-load Conditions

Fig. 4 には、新たに考案した 2 段エッグ燃烧室を用いた混合気の空間分布制御による部分予混合燃烧の考え方を示す。前段噴霧を 2 段エッグ燃烧室の上下空間に分割配置させ、前段噴霧の既燃ガスと後段噴霧との干渉を抑えることで、後段噴霧があらかじめ混合した状態で着火・燃烧することをねらいとしている。本燃烧コンセプトを「空間制御予混合燃烧」(DCPCI: Distribution Controlled partially Premixed Compression Ignition) と称する。

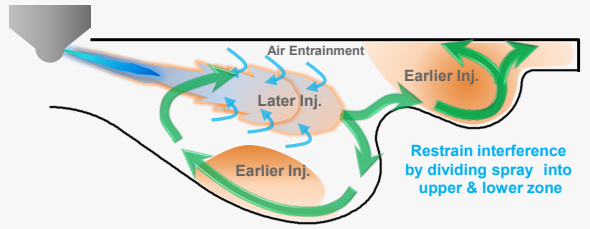


Fig. 4 New Combustion Concept by Means of Dual Zone Egg-shaped Bowl

新燃烧コンセプトについて CFD (CONVERGE ver.2.3) を用いて検証した。Table 1 にエンジン諸元及び計算条件を示す。ラベル名には、噴射パターンと燃烧室形状、噴孔仕様の各々について、従来仕様と新仕様を“CDC”と“DCP”, “SL” と “DZ”, “133” と “106” と略記している。EGR 率は各条件で同じ排出 NO_x レベルになるように調整した。Fig. 5 には、燃烧室形状とノズル仕様の比較を示す。

Table 1 Engine Specification and Calculation Condition

Label name	CDC_SL_133	DCP_SL_133	DCP_DZ_106
Bore × Stroke	φ 86mm × 94		
Compression ratio	14.4 : 1		
Engine speed [rpm]	1500		
Fuel amount [mm ³ /str]	22		
Temperature at IVC [K]	400		
Pressure at IVC [kPa]	135		
EGR rate [%]	38	45	
Combustion type	Conventional diesel combustion (“CDC” in label)	DCPCI (“DCP” in label)	
Inj. pressure [Mpa]	150		
Inj. timing (SOI) [deg.ATDC]/Inj. quantity [mm ³]	1st : -26/6 2nd : -16/2 3rd : 1/11 4th : 13/3	1st : -13/14.5 2nd : -4/1.5 3rd : 0/5 4th : 6/1	
Bowl shape	Stepped-Lip Egg-Shaped (“SL” in label)	Dual Zone Egg-Shaped (“DZ” in label)	
Nozzle type	φ 0.133 × 10 -155° (“133” in label)	φ 0.106 × 10 -157° (“106” in label)	

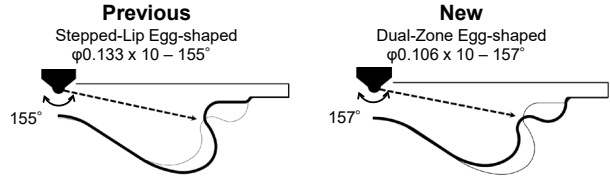


Fig. 5 Comparison of Piston Bowl Shape and Injector Specification

Fig. 6 には、計算結果の圧力及び熱発生率履歴を示す。従来燃烧の CDC_SL_133 では、遠隔パイロットやアフター噴射により、三つのピークをもつ熱発生率の波形となっており、燃烧期間が長くなっている。これに対して、DCPCI 用の噴射パターンを適用した DCP_SL_133 と DCP_DZ_106 では、TDC 付近での一山の熱発生率となっており、燃烧期間が短縮されていることが分かる。

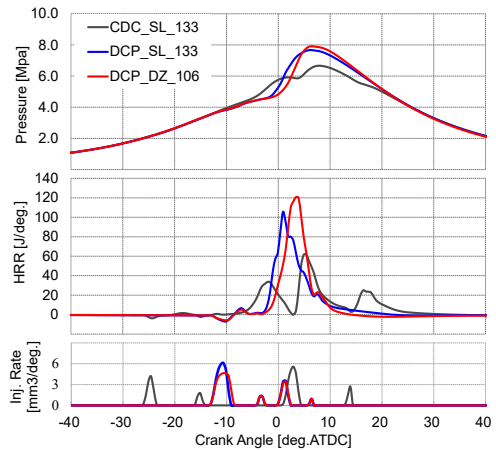


Fig. 6 Calculated Cylinder Pressure and Heat Release Rate

Fig. 7 には、燃烧期間の代表指標として燃烧率 (Mass Fraction of Burned-fuel: MFB) が 10% から 90% に達するまでの期間を表す MFB10-90 と Soot の計算結果を示す。従来の燃烧室形状とノズル仕様のまま DCPCI 用の噴射パターンを適用した DCP_SL_133 では、従来燃烧の CDC_SL_133 と比べて燃烧期間が短くなっている。また、2 段エッグ燃烧室と小径ノズルを適用した DCP_DZ_106 では更に燃烧期間が短くなっている。これは、DCP_DZ_106 では DCP_SL_133 と比べて着火遅れ期間が長く (MFB10 が遅く)、後燃え期間が短縮された (MFB90 が早い) ことに起因する。

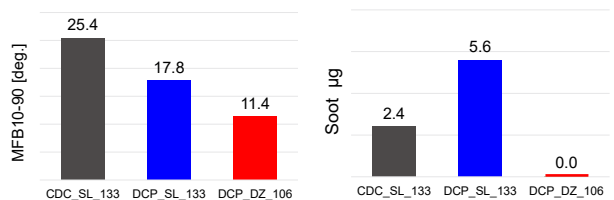


Fig. 7 Calculated Combustion Duration and Soot Emission

また、Sootの計算結果では、従来の燃焼室形状とノズル仕様のまま噴射パターンのみをTDC付近に寄せたDCP_SL_133の場合にはSootが悪化するのに対して、2段エッグ燃焼室と小径ノズルを用いたDCPCIではSootが大幅に低減できている。

Fig. 8には、当量比分布の計算結果を示す。各条件の各噴射段の噴射終了（EOI）時期における噴射軸断面である。噴射量が比較的に多い1段目と3段目の噴霧に注目して考察する。CDC_SL_133とDCP_DZ_106の1段目噴射から、従来の燃焼室で噴霧をスキッシュエリアとキャビティ領域に分配させるためには早期噴射を行う必要がある一方、新燃焼室ではTDC近傍の噴射でも噴霧が燃焼室の上下空間に分配できることが分かる。3段目噴射に注目すると、従来の燃焼室のまま噴射のみTDC付近に寄せたDCP_SL_133では、前段噴霧の大半が燃焼室キャビティに分布しており、そのリッチ領域と3段目噴射とが強く干渉している様子が見られる。これに対して、DCP_DZ_106では、前段噴霧が燃焼室の上下に分割され、3段目噴霧の前段噴霧との干渉が低減されている。この前段噴射と後段噴射の干渉は、Fig. 4の熱発生率における後燃えとFig. 7におけるSoot排出量増加の原因になっていると推察される。

Fig. 9には混合気の ϕ -Tマップ上の分布を示す。従来の燃焼室を用いたCDC_SL_133とDCP_SL_133では燃焼が活発な3deg~7degにSoot生成領域への分布が多くなっているのに対して、DCP_DZ_106ではSoot生成領域を回避できている。これらの傾向はSoot排出量

(Fig. 7)と定性的に一致している。

以上のことにより、新燃焼コンセプトにより燃焼時期と燃焼期間を理想状態に近づけつつ、クリーンな燃焼が実現できることが確認できた。

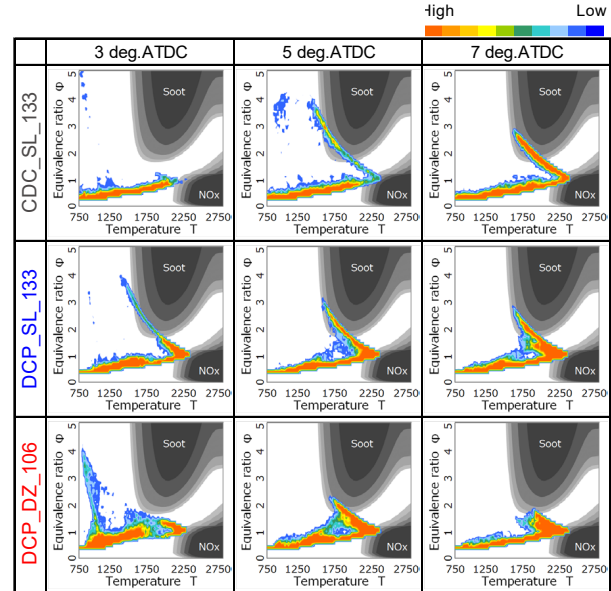


Fig. 9 Calculated Mixture Distribution on ϕ -T Map

4. 新燃焼コンセプトの実用化

新燃焼コンセプトの効果検証として、燃費、エミッション、NVHに関わる諸性能について旧型エンジンとの

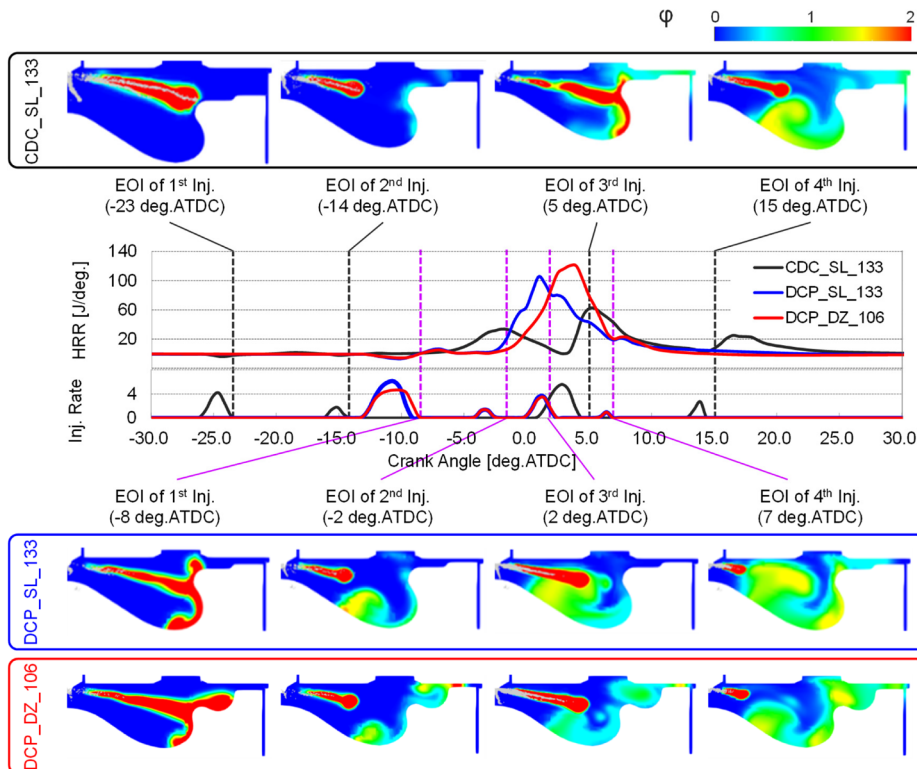


Fig. 8 Calculated Mixture Distribution

比較を行った。また、カーボンニュートラル燃料（以下、CN 燃料）への適用性についても検証を行った。

4.1 新燃焼コンセプトの性能評価

Table 2 に性能評価に用いた新開発の第2世代 SKYACTIV-D（以下、新型）と現行型の第1世代 SKYACTIV-D（以下、旧型）の諸元を示す。新型エンジンでは、4気筒から6気筒にして総排気量を拡大しているが、気筒あたりの排気量は旧型エンジンと同じである。吸気温度を低減するためにLP-EGRを採用した。また、熱伝達補正係数 C_w を低減するためにピストンを旧型のアルミ製よりも燃焼室壁温が高いスチールピストンを採用した⁽⁴⁾。圧縮比も14.4から15.2に高めている。これらは第2章で述べた各制御因子の機能目標設定に対応している。また燃料噴射ノズル仕様及び燃焼室形状については、第3章で述べた新燃焼コンセプトに基づいている。

Table 2 Engine Specification

	Previous Engine	New Engine
Engine Type	In-Line 4	In-Line 6
Bore/Stroke [mm]	86/94	←
Displacement per cylinder	547 [cm ³]	←
Compression ratio	14.4	15.2
Fuel injection system	Common Rail/ Piezo injector	←
Injector nozzle dimension	φ 0.133mm × 10hole	φ 0.106mm × 10hole
Piston material	Aluminum	Steel
Piston bowl shape	Stepped-Lip Egg-shaped	Dual Zone Egg-shaped
EGR System	HP-EGR	HP & LP-EGR

Fig. 10 に、軽負荷と中高負荷に対して各々の代表運転点における新型及び旧型エンジンの熱発生率を示す。縦軸は排気量差を除くため、図示平均有効圧（IMEP）としている。旧型エンジンでは、IMEP400kPa付近まではPCI燃焼によりTDC付近に燃焼が集まる高等容度燃焼（TDC燃焼）を実現しているが、それ以上の負荷条件では混合確保のため燃焼期間の長い拡散燃焼となっていた。新型エンジンでは、DCPCI燃焼を適用しIMEP1200kPa付近においても燃焼期間の短いTDC燃焼を可能にした。

新型と旧型エンジンの性能評価結果を Fig. 11 に示す。軽負荷から中高負荷域にかけて3点の代表点において、比較を示した。熱発生率とNO_x、Soot（SMOKE）、図示燃費（G-ISFC）、等容度（DCV: Degree of Constant Volume）、冷却損失割合（Qcool）、燃焼音（CPLF）を示している。NO_xについては、いずれのIMEP条件におい

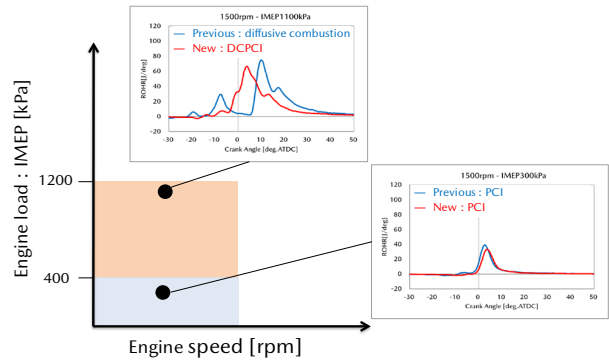


Fig. 10 Expansion of TDC Combustion Area

ても旧型から新型でおおむね同等となっている。Sootについては、いずれのIMEP条件においても低減されており、第3章で示したDCPCIによる多段噴射噴霧の干渉抑制の効果が確認できた。図示燃費については、いずれの条件でも改善し、IMEP700kPaと1100kPaにおいては10g/kWh以上の大幅な改善を達成している。これは、IMEP300kPaにおいては高圧縮比とスチールピストン採用による冷却損失改善の寄与が大きく、IMEP700と1100kPaにおいてはDCPCI燃焼を適用することで、PCI燃焼並みの高い等容度を実現したことの寄与が大きい。更に、燃焼室形状と噴射間隔の適正化により熱発生率の急峻な立ち上がりを抑制することで、TDC付近で燃焼期間を短縮しながらも、燃焼音を改善できている。

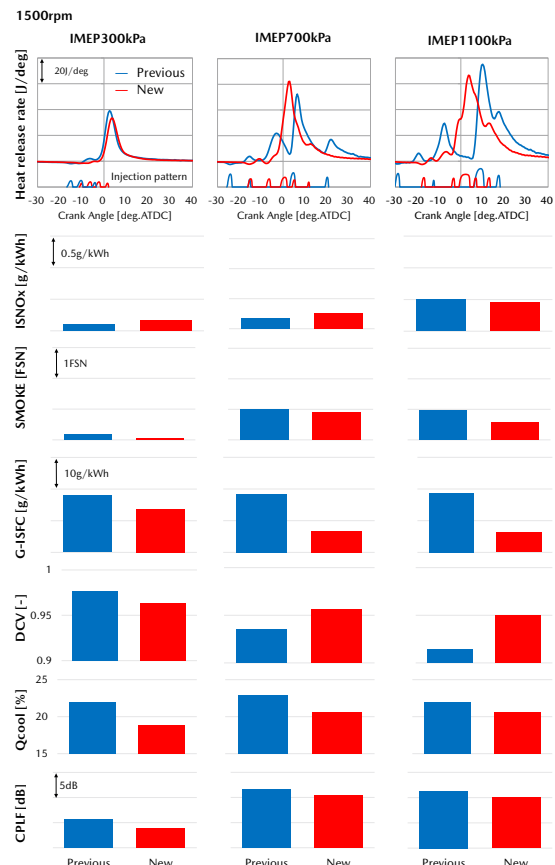


Fig. 11 Comparison of Combustion Performance between Previous and New Combustion Concept

以上のように、第2章で設定した熱効率制御因子の機能目標及び第3章で提案したDCPCI燃焼コンセプトによる大幅な燃費の改善を確認した。

4.2 カーボンニュートラル燃料の適用性

新型エンジンでは、次世代CN燃料への対応を念頭に置いて、燃料性状の差による燃焼影響を検証した。CN燃料として注目されている水素化処理タイプの次世代バイオ燃料（Hydro-treated Vegetable Oil: HVO）など、パラフィン系の炭化水素を主成分とする燃料はセタン価が高く、早期着火に伴う混合時間不足によるSoot悪化や、燃焼速度増大による燃焼音悪化等の懸念がある。このようなCN燃料対応においては、着火性、とりわけ高セタン価燃料に対するロバストな性能を確保することが重要である。供試燃料には、ディーゼル燃料の国際規格EN15940に準拠した水素化処理タイプの次世代バイオ燃料HVOと、国内JIS規格2号軽油（以下、軽油）を用いた。Table 3に燃料性状の比較を示す。バイオ燃料は軽油と比べてセタン価が高くなっている。バイオ燃料の評価については、市場においてドロップインで使用されることを想定し、特別に制御パラメーターを変更せず、軽油と同じ条件で行った。

Table 3 Specification of Test Fuel

	Diesel Fuel	Bio Fuel
Type	JIS #2 Diesel	100% of Hydro-treated Vegetable Oil
Cetane number	55.7 (Cetane index)	75.1
Density	0.83 [g/cm ³]	0.78 [g/cm ³]
Viscosity	3.66 [mm ² /s]	3.0 [mm ² /s]

Fig. 12に軽油とバイオ燃料を用いた性能評価結果を示す。燃料の低位発熱量の差を除くため、同一正味平均有効圧（BMEP）で比較している。BMEP200kPaはPCI燃焼、BMEP600及び1000kPaはDCPCI燃焼となっている。いずれの条件においても、バイオ燃料を用いた場合は高セタン価によって着火時期が早まっているが、NO_xとSootは、軽油と同等となっていることが判る。また、燃焼音については燃焼の進角に伴い僅かに増加しているが、車載状態で変化量が許容範囲内であることを確認した。熱効率に関しては、燃料の低位発熱量の差を考慮した上で同等となった。

以上のように、新型エンジンの燃焼では水素化処理タイプの次世代バイオ燃料をドロップインで使用した場合においても、軽油とおおむね同等の性能が得られることを確認した。

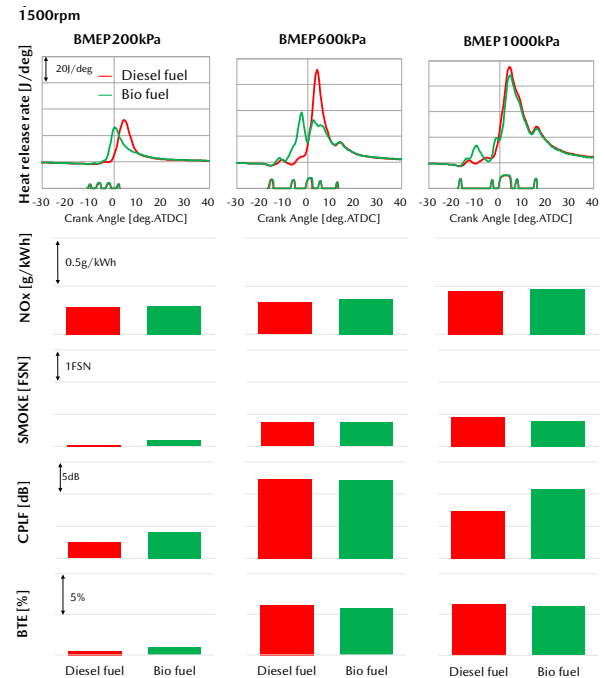


Fig. 12 Compatibility of New Combustion Concept with Biofuel

5. おわりに

第2世代SKYACTIV-Dでは、新開発の2段エッグ燃焼室を用いた空間制御予混合燃焼（DCPCI）により、熱効率の制御因子の理想化を一段と進化させ、既存エンジンでは軽負荷領域に限定されていた予混合燃焼の考え方を中高負荷領域において実現することで、実用域における大幅な燃費改善を達成した。更に、グローバル市場で普及が拡大しつつあるバイオ燃料に対する燃焼のロバスト性を確保した。今後、カーボンニュートラル社会に向けて内燃機関の更なる進化に挑戦しつつある所存である。

参考文献

- (1) M. Hitomi: “Both the Gasoline and Diesel Engines will be Winners” 26th Int. AVL Conference Graz, (2014)
- (2) Y. Kato, et al.: Heat Balance Analysis Using Cylinder Pressure Obtained by Engine Experiments Considering the Spatial Heterogeneity of Diesel Combustion, SAE Technical Paper, No.2019-01-2228 (2019)
- (3) 志茂ほか：予混合型ディーゼル燃焼による排気と燃費の低減，自技会論文集，Vol.42 No.42, pp.867-872 (2011)
- (4) 岡澤ほか：SKYACTIV-D 3.3の開発—軽量で低燃費，低振動，高信頼性を両立した直列6気筒構造系技術—，マツダ技報，No.39, pp.28-35 (2022)

■著者■



金尚奎



加藤雄大



松尾建



神崎淳



田所正



白橋尚俊



稲角健



皆本洋



志茂大輔

特集：MAZDA CX-60

04

SKYACTIV-D 3.3 の開発

—大排気量・直列 6 気筒と燃焼の理想追求による提供価値の向上—

Development of the Skyactiv-D 3.3
—Increased Value Provided by Large Displacement In-line 6 Cylinders
and Pursuing the Ideal of Combustion—

志茂 大輔 ^{*1} Daisuke Shimo	皆本 洋 ^{*2} Hiroshi Minamoto	福田 大介 ^{*3} Daisuke Fukuda	岩田 陽明 ^{*4} Kiyooki Iwata	松本 大典 ^{*5} Daisuke Matsumoto
旗生 篤宏 ^{*6} Atsuhiko Hatabu	岡澤 寿史 ^{*7} Hisashi Okazawa	辻 幸治 ^{*8} Kouji Tsuji	森永 真一 ^{*9} Shinichi Morinaga	

要 約

カーボンニュートラルに向けた再生可能エネルギー発電への移行期において、将来的な再生可能燃料の選択肢も考慮し、現実的な CO₂ 削減のためには電動化とともに内燃機関の効率改善によるマルチソリューションが有効であると考えられる。その一つの答えとして新世代クリーンディーゼルエンジン SKYACTIV-D 3.3 を開発した。排気量を従来の 2.2L から 3.3L に拡大することで高トルク・高出力化は元より、理想を追求したリーン予混合燃焼の拡大の手段としても大排気量化を用いることで、乗用車量産エンジン世界トップの実用域で広い熱効率、及び排気クリーン化を達成した。また低 Pmax（最大燃焼圧）対応の構造系を進化させて摩擦抵抗を抑制し、更に直列 6 気筒による低振動と心地よいエンジン音を創り込んだ。これらの技術によって運転者が愉しく元気になる「走る歓び」、及び抜群の燃費とクリーン排気による「優れた環境性能」の両方をこれまでにない次元にまで高めた。

Abstract

A new 3.3-liter inline six-cylinder diesel engine has been developed. In addition to the high power realized by its large displacement, the combination of the large displacement and a new combustion method devised in pursuit of ideal combustion has achieved the world's highest level of thermal efficiency and clean emissions in a wide operating range. The engine is therefore able to deliver "driving pleasure" enhanced by its six-cylinder sound and strong torque and "outstanding environmental performance" thanks to its distinguishingly low fuel consumption.

Key words : Heat engine, Compression ignition engine, Performance/fuel economy/efficiency, Emissions

1. はじめに

マツダは、初代 SKYACTIV エンジン導入時より「適正な排気量の選択」を提唱しており、ラージ商品群の開発にあたっては求められる高い商品性能と環境性能を同時に達成するため 3.3L への大排気量化、及び直列 6 気筒化を選択した。これによりお客様への提供価値としての「走る歓び」と「優れた環境性能」を以下のように高めた。

「走る歓び」:

✓どこまでもアクセルに追従する力強いトルクと心地よい直列 6 気筒エンジン音により運転する誰もが愉しく元気になる加速

「優れた環境性能」:

✓実用域での世界トップの熱効率による抜群の低燃費（Large クラスで従来 Small クラス並の燃費, Mild Hybrid との組み合わせで競合 Strong Hybrid 並の燃費）

*1~4,9 エンジン性能開発部
Engine Performance Development Dept.

*5~7 エンジン設計部
Engine Design Engineering Div.

*8 パワートレイン開発本部
Powertrain Development Div.

✓ NOx 後処理装置なしで国内 RDE (Real Drive Emission) 規制に余裕をもって対応するクリーン排気

本稿ではこれらを実現した SKYACTIV-D 3.3 の開発コンセプトと採用技術について紹介する。

2. 開発コンセプトと主要諸元

マツダでは初代 SKYACTIV エンジン導入以来、Fig. 1 のロードマップに示したように内燃機関の熱効率を支配する 7 因子の理想化に向けた取り組みを進めている⁽¹⁾。新型エンジンはディーゼルの 2nd Step であり、従来の 1st step^(2,3) からリーン予混合燃焼 PCI (Premixed Charge Compression Ignition) を拡大して燃焼期間と燃焼時期の理想化を狙う。これを実現するための技術開発コンセプトを Fig. 2 に示す。新型ではこの燃焼の進化を走り、燃費、排気の全ての機能強化につなげるための実現手段として排気量を 2.2L から 3.3L に拡大する。大排気量化によってラージクラス SUV 車両を力強く走らせるために十分なトルクと出力を確保しつつ、その上で最大平均有効圧を従来比で抑制することで高負荷まで十分な EGR を用いて NOx を大幅に低減する。また大排気量化による実用域の平均有効圧低下と、新開発の 2 段エッグ燃焼室⁽⁴⁾ を用いた空間制御予混合燃焼 DCPCI (Distribution Controlled partially Premixed Compression Ignition) によって、PCI 領域を実用中負荷域まで拡大する。大排気量化で通常は不利になる摩擦抵抗は低 Pmax (Maximum cylinder pressure) の踏襲及びスチールピストン採用などの構造系技術の進化⁽⁵⁾ により従来比で改善を図る。これを実現した新型エンジンの諸元を Table 1 に示す。次章以降で得られた性能と技術の詳細について紹介する。なお、構造系技術⁽⁵⁾ とハイブリッド&トランスミッションとの協調技術⁽⁶⁾ については別報にて紹介している。

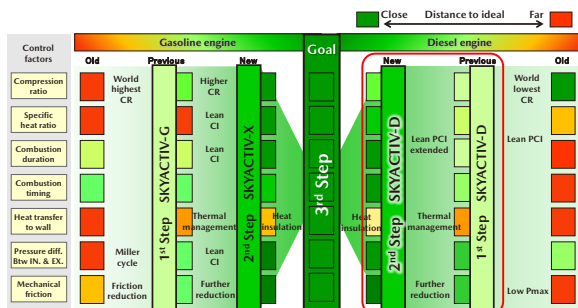


Fig. 1 Evolution Roadmap to Ideal of ICE

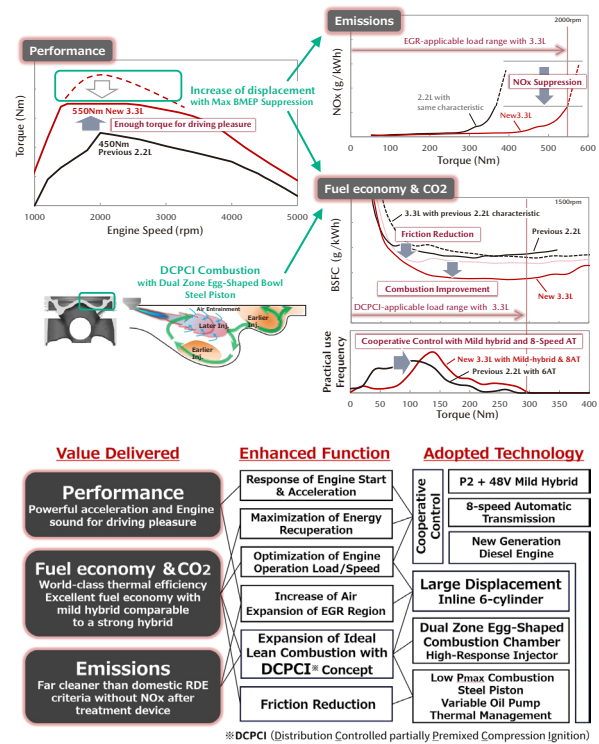


Fig. 2 SKYACTIV-D 3.3 Technology Concept

Table 1 Engine Specifications

	Previous 2.2 model	New 3.3 model Hi-power	New 3.3 model Lo-power
Engine Type	In-Line 4	In-Line 6	←
Displacement	2188cm ³	3283cm ³	←
Compression ratio	14.4	15.2	←
Fuel Injection System	Common Rail System G4P-1 (Piezo w/ i-ART [※])	←	←
Max. Injection Pressure	200MPa	250MPa	200MPa
Piston material	Aluminum	Steel	←
Combustion Bowl Shape	Stepped Egg-shape Combustion Chamber	Dual Zone Egg-shape Combustion Chamber	←
Thermal Management System	Coolant Control Valve	Coolant Switching Valve with Zero flow Water Jacket Spacer	N/A
Variable Valve Train System	N/A	Electrical Intake SVT	N/A
Engine Sound System	N/A	Induction Sound Enhancer	N/A
Turbocharger	2 Stage Turbocharger HP: FGT LP: Turbocharger with variable turbine geometry	Single Turbocharger with variable turbine geometry	←
EGR System	HP-EGR	HP & LP-EGR	←
After-treatment System	DOC+DPF	←	←
Max. Torque/rpm	450Nm/2000rpm	550Nm/1500-2400rpm	500Nm/1500-3000rpm
Max. Power/rpm	147kW/4000 rpm	187kW/3750 rpm	170kW/4000-4200rpm
Emissions	JPN H30 (WLTC)	←	←

※「i-ART」 is a registered trademark of DENSO CORPORATION

3. 性能パフォーマンス

3.1 トルク出力性能

新型は最高燃料噴射圧の違いによって Hi-power/Lo-power の 2 仕様のエンジンを国内向けに設定した。Fig. 3 に示すように、最大トルクは 550/500Nm を低回転域から幅広い領域で発生し、最大出力は 187/170kW を達成した。従来型に対し Hi-power では最大トルクを 22%、最大出力を 27% 向上させた。これらにより、ラージクラスの SUV 車両において実用域から高速域まであらゆるシーンでの力強くトルクフルな加速性能を実現した。

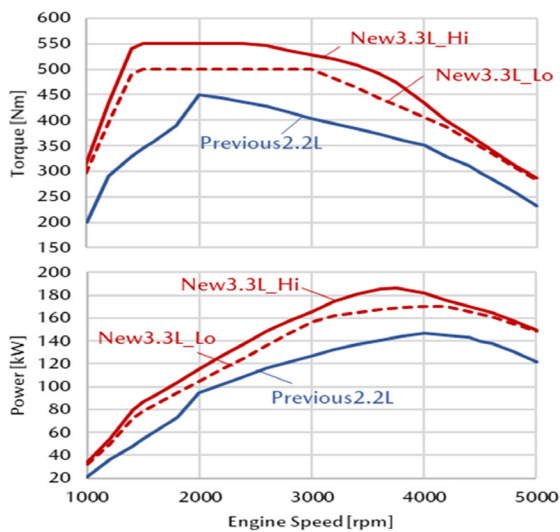


Fig. 3 Torque and Power Performance (Engine Only)

3.2 燃費性能と排気性能

新型は Fig. 4 に示すように、燃費率 BSFC (g/kWh) に関して、横軸を排気量で正規化した正味平均有効圧 BMEP (kPa) で、従来比 10% 以上改善した。従来と同じ車格の車両で大排気量化していることから、横軸を絶対値トルク (Nm) で整理した場合でも従来比で 8% 以上改善しており、極軽負荷を除いた実用域で広く競争を凌駕する世界トップの低燃費率を達成した。Fig. 5 に正味熱効率マップを示す。実用走行を代表する WLTC モード使用域の大部分で高熱効率 40% 以上を達成しており、また最高熱効率点も実用走行域としている。

次に Fig. 6 に横軸を絶対値トルク (Nm) で整理した NOx 排出量を示す。従来型に対して特に高負荷域まで大幅な NOx 低減を達成し、NOx 後処理装置なしで国内 RDE (Real Drive Emission) 規制に余裕をもって対応するクリーンな排気性能を実現した。

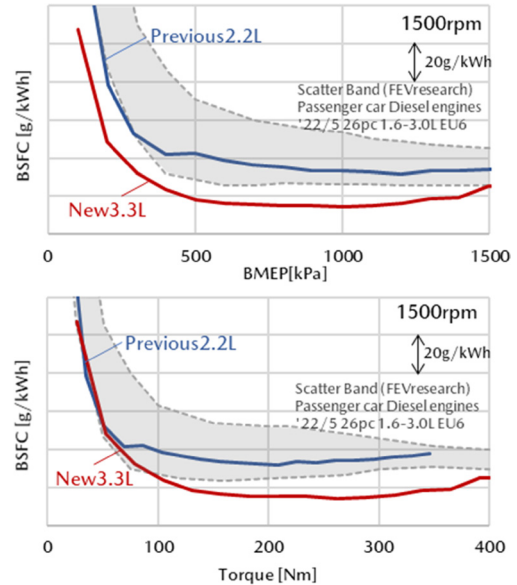


Fig. 4 Fuel Consumption Characteristic

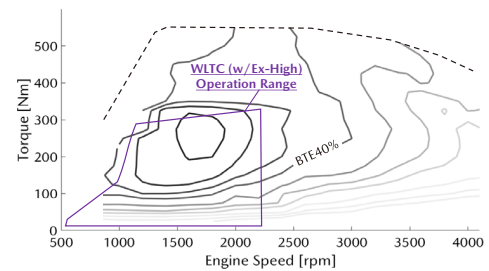


Fig. 5 Thermal Efficiency Map

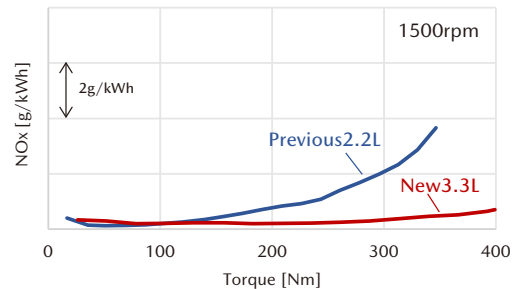


Fig. 6 NOx Characteristic

4. ブレークスルー技術

4.1 燃焼改善と大排気量化

燃料噴射後着火までに噴霧内に十分な空気を取り込んでリーン予混合気を形成し、多段噴射によって燃焼音の悪化を抑え、熱効率最良となる TDC (上死点) 付近でクリーンな燃焼を実現する予混合燃焼 PCI を従来型エンジンから採用している⁽⁷⁾。しかしながら、従来の燃焼系では燃料噴射量が増大してかつ着火遅れが短くなる中負荷ではリーン予混合気を形成できずに排気が悪化するため、適用は軽負荷に限られていた。これに対して新型エンジンでは Fig. 7 に示す 2 段エッグ燃焼室⁽⁴⁾を用いた新しい考え方の空間制御予混合燃焼 DCPCI を開発し、大排気量化を組み合わせることでこの課題の解決を図った。

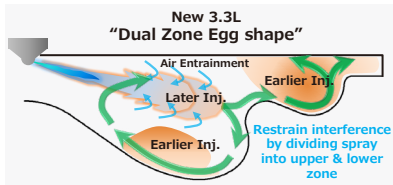


Fig. 7 Dual Zone Egg Shape Concept of Piston Bowl

新型エンジンにおける DCPCI 燃焼の燃料噴射率と熱発生率の実機試験結果、噴霧混合気の CFD 解析結果を従来型と比較して Fig. 8 に示す。運転条件は 1500rpm 中負荷 BMEP600kPa である。CFD 結果に示すように TDC 前に噴射する 1 段目と 2 段目の噴霧は何れも燃焼室リップへ衝突させてその後上下の燃焼室空間で予混合気を形成する。TDC 付近で 1&2 段目の噴霧予混合気が着火して熱発生が始まってから 3 段目を噴射するが、3 段目の噴霧が混合気を形成する空間には高温の燃焼ガスが存在しないため、3 段目の噴霧も十分に空気を取り込んで予混合気を形成してから着火に至る。3 段目の噴霧もリップに衝突させて上下の燃焼室空間に移動していく中で、混合気を形成する空間が確保できた所に 4 段目を噴射する。この時期の混合気Φ T マップ解析からは Soot 領域をかすめる程度まで予混合気をリーン化ができていたことが観察される。次に 4 段目の噴霧が移動してきた空間に 5 段目を噴射する。このように 2 段エッグ燃焼室と高応答燃料インジェクターによる噴射量&時期の最適化によって噴霧混合気分布を空間的に制御することで、3, 4, 5 段目の噴霧も空気を十分に取り込んで予混合気を形成できるようにしている。また噴霧予混合気を形成するための機能の一部を着火遅れへの依存から 2 段エッグ燃焼室に配分したことで、新型では従来の 14.4 から 15.2 への圧縮比向上を実現している。

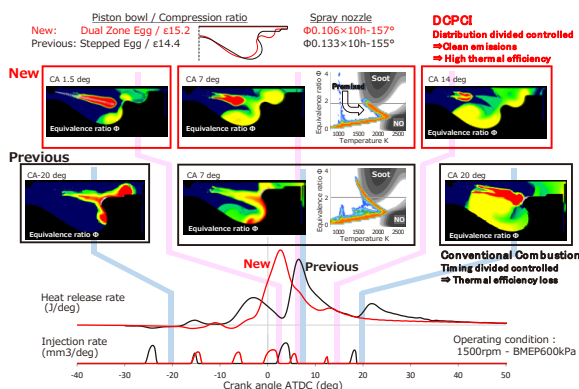


Fig. 8 Engine Test and CFD Results of DCPCI (Distribution Controlled Partially Premixed Compression Ignition)

一方、従来型エンジンは中負荷 BMEP600kPa において、排気の悪化を防ぐために早期パイロット噴射、リタードメイン噴射、更に大きくリタードしたアフター噴射によって

時間的に分割することで噴霧の干渉をできるだけ回避しているが、燃焼期間が長くなって熱効率の損失が大きかった。また混合気のΦ T マップ解析では拡散的な燃焼に伴うリッチな混合気が観察される。Fig. 9 に 1500rpm の負荷違いにおける熱発生率と各性能の実機評価結果について新型と従来型の比較を示す。負荷はトルク Nm と平均有効圧 kPa を併記している。トルク 79Nm において従来型は早期パイロット、メイン、アフター燃焼によって時間分割した拡散型燃焼であったが、新型は大排気量化の効果で DCPCI が適用できるようになり、図示燃費率を約 4% 改善し Smoke も大幅に改善している。中負荷 158Nm においても従来型は時間分割した拡散型燃焼であったが、新型は DCPCI を適用して図示燃費率を約 6.3% 改善している。更に中高負荷 263Nm においては、従来型はメイン燃焼を大きくリタードした拡散型燃焼としていたのに対し、新型は DCPCI を適用して TDC での燃焼を実現しており図示燃費率を約 9.5% 改善し、かつ NOx も大幅に低減できている。なおこれらの図示熱効率の改善には燃焼時期と燃焼期間の改善に加えて、圧縮比の上昇、予混合燃焼化による高温燃焼ガスと燃焼室壁面との接触部の流速低下、及びスチールピストンによる壁温上昇の効果⁽⁵⁾ も含まれる。

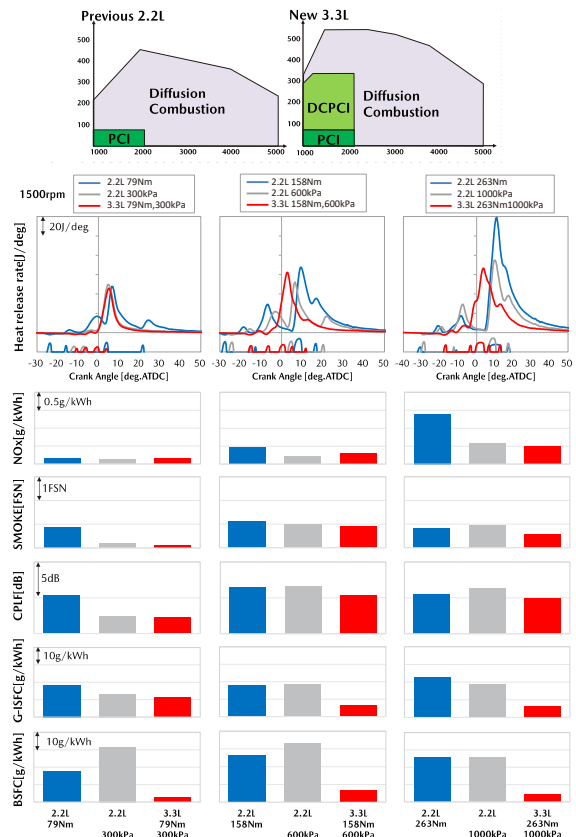


Fig. 9 Multiple Injection Control MAP and Test Results of Heat Release Ratio, Emissions, Noise, and FC

4.2 大排気量化と空気マネージメント

新型は加速性能、燃費性能、排気性能の全てにおいて

大幅改善を実現すべく、大排気量化を活用した最適空気マネージメントシステムを選定した。具体的には、従来型がワイドレンジ過給性能に特化した2ステージターボチャージャー+HPEGRを採用しているのに対し、新型では排気量による空気量アップと低速重視の過給システムを組み合わせ、シングル可変ジオメトリターボチャージャー（以下、VGターボチャージャー）+HP/LPEGRに変更した。VGターボチャージャーには従来型2.2Lの大型タービンに近い容量の新世代タービンを採用し、VGベーンとHP/LPEGRをコントロールするアクチュエーターをドライバー加速要求に応じて最適制御することで、高効率過給と高応答の両立を狙った。これにより Fig. 10 に示すように筒内吸入空気量増加に合わせてEGRを増量し、大幅なNOx低減を達成しながらも従来型並みのポンピングロスに抑制した。また、Fig. 11 に示すように加速要求が高まるとタービン流入量と膨張比を増大させることで過給を瞬時に立ち上げ、高応答なエンジントルク特性による加速レスポンスの大幅向上を実現した。

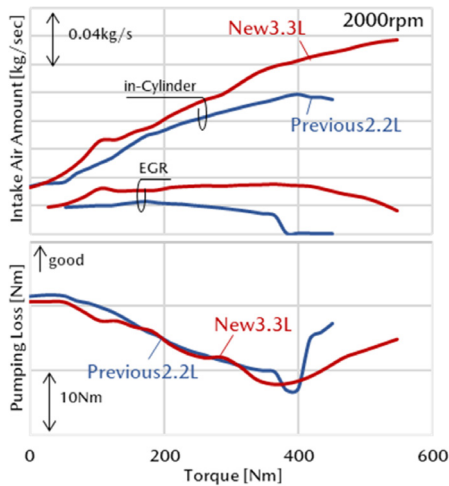


Fig. 10 Air Condition and Pumping Loss Characteristic

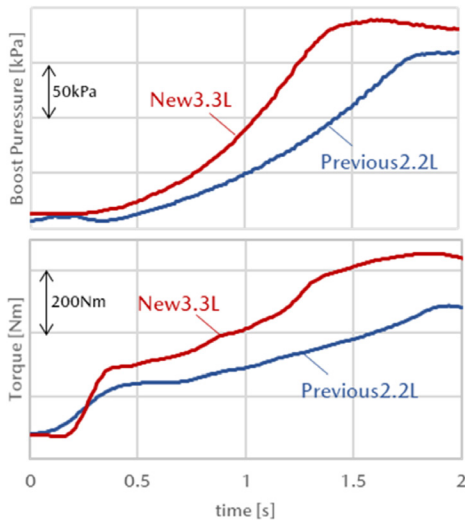


Fig. 11 Engine Torque Response

一方で、上述の大排気量化による筒内吸入空気量増加は排気ガス温度低下につながり、排気浄化システムであるDOC (Diesel Oxidation Catalyst) やDPF (Diesel Particulate Filter) の機能低下を招いてしまう問題が生じる。新型では、Fig. 12 に示すように、シングルターボチャージャー化や排気浄化システムとの締結構造小型化、及びDOC前の排気管鋼板を一体型化するなど、徹底した熱容量低減を実施した。加えて、放熱量低減策として放熱部位全体の遮熱構造強化や走行風に伴うエンジンルーム内風流れの最適化実施により、従来型同等以上の排気昇温（保温）性能を達成した。

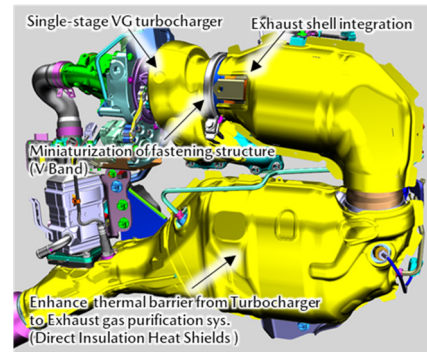


Fig. 12 Exhaust Sys. Appearance

4.3 大排気量での摩擦損失低減、サーマルマネージメント

新型では従来型からの筒内最高燃焼圧を低く抑えた低Pmax燃焼コンセプトの踏襲に加えて、スチールピストンと可変容量オイルポンプの採用、更には6気筒化によるバランスシャフトの廃止などにより摩擦損失の低減を図った。これにより大排気量化で通常は不利になる摩擦損失を Fig. 13 左図に示すように従来型から改善している⁽⁵⁾。スチール製ピストンはアルミ製シリンダーブロックとの線膨張係数の違いから実用温度帯でのクリアランスを十分に確保しつつ、小型のスカートを採用して摩擦面積を低減した。可変容量オイルポンプは各部品が必要とする要求油圧を明確にし、WLTCモードのような実用的な走行では各部品が必要とするだけの油圧を確保することで駆動ロスを低減し、高油水温の高負荷時にはアルミ製よりも温度が上がり易いスチールピストンを十分に冷却するためのオイルジェット流量を確保できる仕様としている。また Fig. 13 右図に示すように従来よりもせん断粘度を下げつつ、油膜強度や耐酸化性を向上した新開発の0W-20エンジンオイルにより更なる摩擦抵抗の低減を図っている。

サーマルマネージメントとして、筒内で発生した熱量を有効に活用して摩擦損失の大きい箇所を優先的に暖機するシステムを採用した。そのエンジン冷却水回路図を Fig. 14 に示す。摩擦損失が最も大きいピストンとシリンダーライナー部に対して、シリンダーライナー壁温を最優先で暖機する。ウォータージャケットへの熱移動を低減するために断

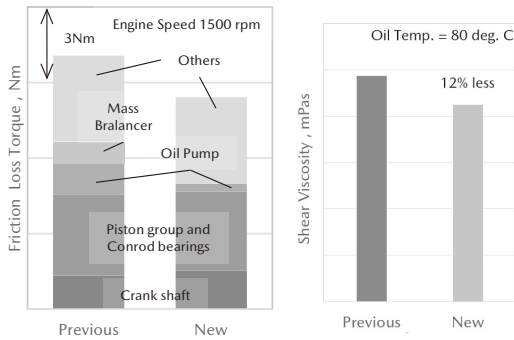


Fig. 13 Friction and Engine Oil Improvement

熱材付のWJS (Water-jacket spacer) を採用し、更にシリンダーライナーから冷却水を介した熱移動を低減するために回路のエンジン出口にCSV (Coolant Switching Valve) を採用して暖機初期にはブロック内の冷却水流れを完全に停止した。暖機中期にシリンダーライナー壁温が上昇するとオイルクーラーに冷却水を流して燃焼によって発生した熱をオイルに受け渡し、各部の摩擦損失を低減した。一方で、安定した排気性能と寒冷期の暖房性能を確保するために常時循環する経路にEGRクーラーとキャビンヒーターを設定した。WJSとCSVを採用したHi-power仕様ではFig. 15に示すようにWLTCモード平均でシリンダーライナー壁温を約10°C上昇することができた。

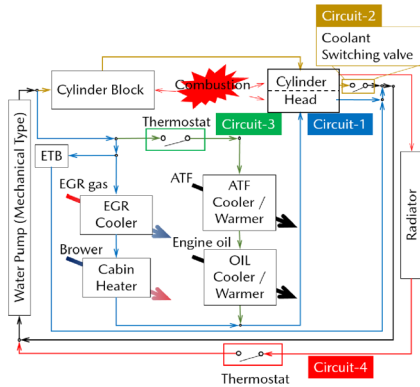


Fig. 14 Engine Coolant Control System

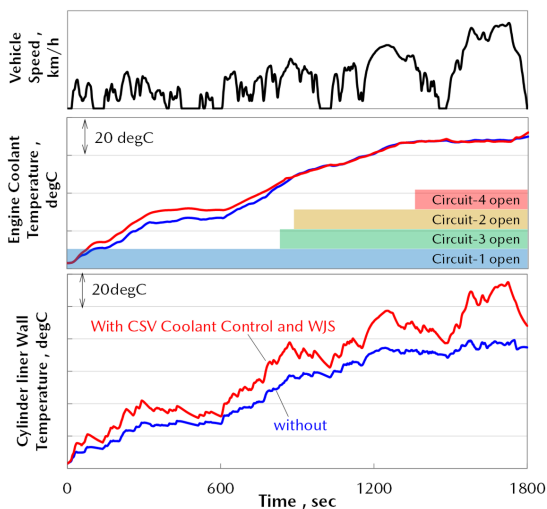


Fig. 15 Cylinder Liner Wall Temperature

4.4 直列6気筒による低振動・静粛性とエンジン音創り

新型3.3Lエンジンでは直列6気筒機能もつ低振動と静粛性を更に際立たせる技術と、直列6気筒の心地良いエンジン音をアクセルペダル操作量と連動させる技術により、「走る喜び」をより向上させるこだわりの音創りを行った。

静粛性については現行2.2L直列4気筒で開発してきた燃焼加振力制御やクランクシャフトと主軸受け構造の高剛性化及び個々の部品の共振周波数の分散配置を踏襲し、加えて、音源×主要経路を一か所で集中対応するべくFig. 16に示すカプセルカバーによる車体遮音強化を新たに採用した。カプセルカバーは、初期設定した遮音構造に対し、静粛性目標を達成した上でコスト・重量低減可能な遮音構造への最適化を行った。具体的にはエンジンの各経路から伝達される部分音圧に対し目標値を定め、どの経路もほぼ同等になるように遮音構造を選定した。Fig. 17に遮音機能を強化して部分音圧を改善した部位と部分音圧を増して最適化した部位を示す。

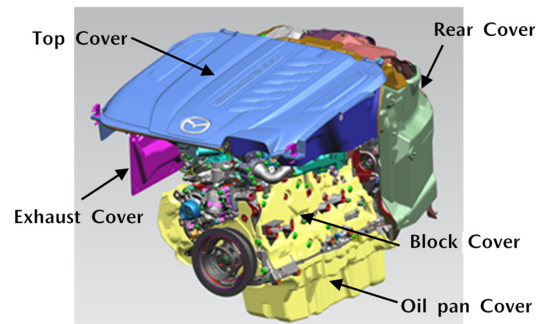


Fig. 16 Diagram of Capsule Cover

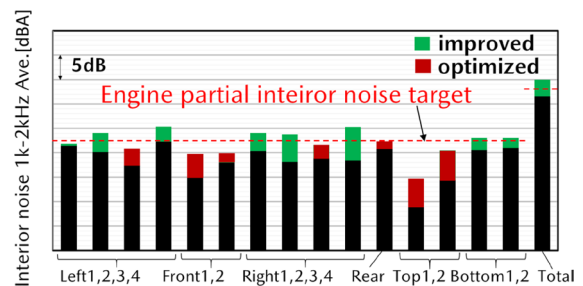


Fig. 17 Optimization of Capsule Cover

エンジン音については新型では吸気音強調技術を採用した。トルク変化に対して音源の感度が最も高いのは、Fig. 18に示すように吸気音である。そこでアクセル踏み込み時に積極的に吸気音を運転者に聞かせて新型エンジンの力強いトルクを感じさせるためにスポーツカーで実績のあるISE (Induction Sound Enhancer) を採用した。Fig. 19にその外観を示す。強調する音の周波数は直列6気筒の構造もつ回転にリニアできめ細やかな音の300~500Hzに対して力強く心地よい音となる250Hzに設定した。

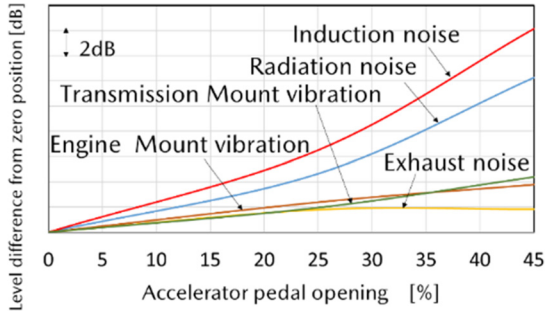


Fig. 18 Comparison of Noise Source Sensitivity

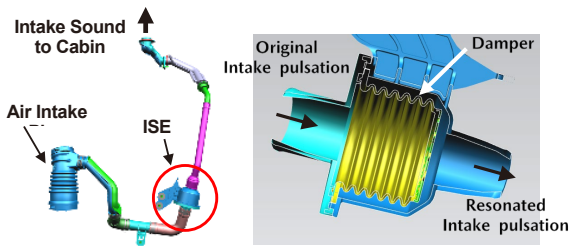


Fig. 19 Diagram of ISE (Induction Sound Enhancer)

これにより Fig. 20 に示すように運転者がアクセルを踏んだ瞬間から音を聞き取れるまでの時間を 53%短縮し、アクセル操作に対する明確なフィードバックを実現した。

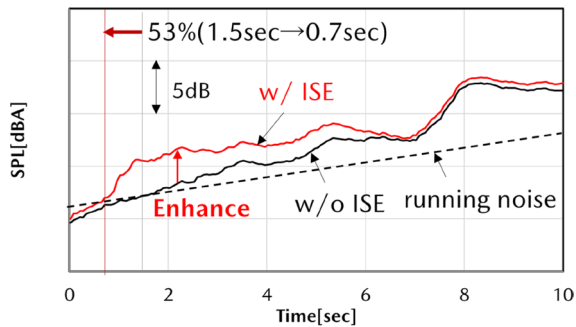


Fig. 20 Sound Effect with ISE at Accelerator Pedal Opening

5. おわりに

新型 3.3L ディーゼルエンジンは、初代 SKYACTIV エンジン導入時からの「適正な排気量の選択」の考え方を進化させて、新技術の採用と排気量 1.5 倍のアップサイジングによる筒内空気量増加を有効活用して、大排気量化と燃費の一般的な関係の概念を覆し、既存の 2.2L ディーゼルエンジンに対して燃費を大幅改善した。実用域の多くで熱効率 40%以上として現時点で量産されている乗用車ディーゼルエンジンで最高の熱効率を達成し、更に、走る喜びを提供する意のままに加速するレスポンス向上とトルクアップを実現した。また、クリーンな排気性能及び高い静粛性の中に気持ちのよいエンジンサウンドという新たな価値を提供することができた。カーボンニュートラル社会での一役を担うべく理想の内燃機関へ

向けてさらなる熱効率改善へ挑戦していく所存である。

参考文献

- (1) Mitsuo Hitomi: Both the Gasoline and Diesel Engines will be Winners, 26th International AVL Conference Graz, (2014)
- (2) 森永ほか：SKYACTIV-D エンジンの紹介, [マツダ技報, No.30, pp.9-13 \(2012\)](#)
- (3) 山谷ほか：クリーンディーゼルエンジン新型 SKYACTIV-D 2.2 の開発, [マツダ技報, No.34, pp.133-138 \(2017\)](#)
- (4) 金ほか：第 2 世代 SKYACTIV-D の燃焼技術, [マツダ技報, No.39, pp.14-20 \(2022\)](#)
- (5) 岡澤ほか：SKYACTIV-D 3.3 の開発—軽量で低燃費、低振動、高信頼性を両立した直列 6 気筒構造系技術—, [マツダ技報, No.39, pp.28-35 \(2022\)](#)
- (6) 小林ほか：SKYACTIV-D 3.3 の開発—大排気量エンジンとマイルドハイブリッドの協調による提供価値の向上—, [マツダ技報, No.39, pp.36-42 \(2022\)](#)
- (7) 志茂ほか：予混合型ディーゼル燃焼による排気と燃費の低減, 自技会論文集, Vol.44, No.6, pp.1335-1340 (2013)

■ 著 者 ■



志茂 大輔



皆本 洋



福田 大介



岩田 陽明



松本 大典



旗生 篤宏



岡澤 寿史



辻 幸治



森永 真一

特集：MAZDA CX-60

05

SKYACTIV-D 3.3 の開発
—軽量で低燃費，低振動，高信頼性を両立した
直列 6 気筒構造系技術—
Development of the Skyactiv-D 3.3
— Technology of Inline Six-Cylinder Engine Structural Parts that
Achieved Lightweight, Low Fuel Consumption,
Low Vibration and High Reliability—

岡澤 寿史 ^{*1} Hisashi Okazawa	本田 絢大 ^{*2} Kenta Honda	青木 勇 ^{*3} Yu Aoki	詫間 修治 ^{*4} Shuji Takuma	西岡 勇介 ^{*5} Yusuke Nishioka
山内 智博 ^{*6} Tomohiro Yamauchi	山口 正徳 ^{*7} Masanori Yamaguchi	菊池 正和 ^{*8} Masakazu Kikuchi	小泉 昌弘 ^{*9} Masahiro Koizumi	内田 敦 ^{*10} Atsushi Uchida

要 約

マルチソリューションによる本質的な環境貢献を実現するためには、電動化が進む現状においても、内燃機関の進化が継続して求められている。今回、内燃機関の進化ビジョンの 2nd Step を実現する新型直列 6 気筒の縦置きディーゼルエンジンを開発した。このエンジンはこれまでの SKYACTIV-D の特徴である低 Pmax 燃焼技術に加えて、これまで 4 気筒開発で培ってきた構造技術における機能の進化、最適化及び統合を行い、大排気量で課題となる重量と機械抵抗に対して、クラストップレベルの軽量化と従来 4 気筒エンジンを凌ぐ低機械抵抗を実現した。加えて 6 気筒の良さである低振動を確保しつつ、マツダの独自価値である魂動デザインや人馬一体といった人間中心のクルマ作りに求められるパッケージ要求を、高い信頼性を確保しながら実現した。本稿では、その実現に向けて導入した技術について紹介する。

Abstract

To realize essential contributions to the environment in a multi-solution approach, evolution of the ICE is continuously required even in the midst of electrification. Mazda has newly developed an inline six-cylinder diesel engine which embodies the 2nd step of the company's vision for ICE evolution. The Pmax-lowering combustion technology that characterizes Skyactiv-D was inherited from the previous four-cylinder engine, but the engine hardware was improved by evolving, optimizing and integrating the functions of structural parts. The combination of these technologies solved weight and friction loss issues associated with a large-displacement engine. As a result, the engine has achieved best-in-class lightness and even smaller friction loss than the former four-cylinder engine. It has also satisfied vehicle package requirements to realize KODO design and the human-centric car development represented by "Jinba Ittai", while maintaining low vibration of a six-cylinder engine and ensuring reliability. This article introduces the technologies adopted to achieve such results.

Key words : Heat engine, Compression ignition engine, Performance/fuel economy/efficiency, NVH lightness, Low friction loss

*1~4 エンジン設計部
Engine Design Engineering Dept.

*5~8 エンジン性能開発部
Engine Performance Development Dept.

*9,10 MBD 革新部
MBD Innovation Dept.

1. はじめに

クルマの電動化への移行期及び将来的なカーボンニュートラル液体燃料の選択肢を考慮し、マツダは内燃機関の理想を追求し続け⁽¹⁾、どのような時代でも、意のままの走りや環境性能の進化を両立するマルチソリューションの提供を目指している。

この度、ラージ商品群を支えるパワートレインの1つとして、力強いトルク特性に加えて、乗用車用ディーゼルエンジン実用域世界トップの熱効率、及び従来比で更なるクリーン排気を同時に実現した3.3L新型直列6気筒のクリーンディーゼルエンジンSKYACTIV-D3.3を開発した。

2. 開発コンセプトと主要諸元

新型エンジンの外観を Fig. 1 に、技術開発コンセプトを Fig. 2 に、及び主要諸元を Table 1 に示す。新型エンジンは Fig. 2 上段に示すように大排気量化と、2 段エッグ燃焼室と空間制御予混合燃焼 DCPCI による燃焼改善をコンセプトの中心に据えて、走りや排気の改善、及び燃費の大幅改善を達成している^(2,3)。この中で Fig. 2 下段に示すように特に軽負荷域の燃費については燃焼改善だけでなく機械抵抗改善がこのコンセプトを支えている。



Fig. 1 Engine General View

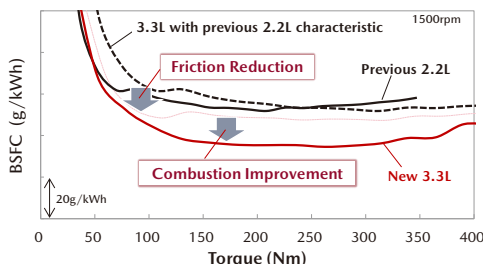
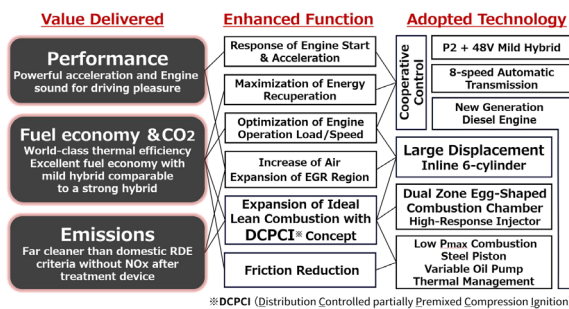


Fig. 2 Development and Technology Concept

Table 1 Main Dimension and Specification

Engine	Previous 2.2L	New 3.3L
Engine Type	In-Line 4	In-Line 6w/48V mild hybrid
Displacement	2188cm ³	3283cm ³
Compression ratio	14.4	15.2
Fuel Injection System	Common Rail System	←
	G4P-I (Piezo w/ i-ART [®] *)	←
Max. Injection Pressure	200MPa	250MPa
Piston material	Aluminum	Steel
Combustion Bowl Shape	Stepped Egg-shae Combustion Chamber	Dual Zone Egg-shape Combustion Chamber
Type of Combustion	Premixed Charge Ignition	Distribution Controlled partially Premixed Compression Ignition
Turbocharger	2 Stage Turbocharger HP: FGT LP: Turbocharger with variable turbine geometry	Single Turbocharger with variable turbine geometry
EGR System	HP-EGR	HP & LP-EGR
After-treatment System	DOC+DPF	←
Max. Torque/rpm	450Nm/2000rpm	550Nm/1500-2400rpm
Max. Power/rpm	147kW/4000rpm	187kW/3750rpm
Emissions	JPN H30 (WLTC)	←

*: 「i-ART[®]」 is a registered trademark of DENSO CORPORATION

しかし、排気量や気筒数を増やすと、エンジン本体の大型化による重量の増加と摺動部の増加による機械抵抗の増加、更にはマツダの独自価値である魂動デザイン及び人間中心を支える人馬一体を実現するためには、限られたスペースへの搭載性といった課題の解決が必要となる。新型ではこれらを従来からの低 Pmax (Maximum cylinder pressure) 軽量構造系^(4,5)の踏襲と6気筒化を含めた機能進化によって合理的に解決した。これら構造系技術の具体的な機能進化について紹介する。

2.1 重量の最小化

重量比でエンジンのおよそ半分を占めるシリンダーブロック・ヘッド等の構造部品とピストン・クランク・コンロッドの往復回転部品について、諸元を決めている共通因子を抽出し、関連する機能目標の適正化及び技術進化による重量低減を図った。

(1) 機能目標の適正化

SKYACTIV-D の大きな特徴である低 Pmax コンセプト^(4,5)を踏襲しつつ、往復回転系部品に作用する実働荷重が一定となるようにエンジン回転数に応じた保証筒内圧の適正化 (Fig. 3)、排気量拡大を燃費・エミッション

性能に機能配分することによる最大トルクの適正化，ゆとりあるトルク特性を活かしたエンジン保証回転数の適正化を行い，部品への作用力をミニマム化した。

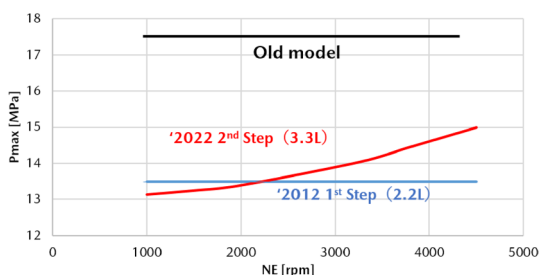


Fig. 3 Cylinder Pressure Limitation

(2) 技術進化

シリンダーライナーへの溝形状追加と冷却用クロスドリル径の縮小により，同製法のディーゼルエンジンではクラストップレベルであるボア間肉厚 8mm を実現し，エンジン全長の短縮化を実現した。また各構造部品は作用力に対して機能目標を制約関数とし，肉厚を徐変しながら最小重量で機能成立する最適化解析を行い仕様決定した (Fig. 4)。これらの結果，SKYACTIV-D3.3 はトルク vs 重量のトレンドラインに対して BIC (ベストインクラス) を，排気量 vs 重量のトレンドラインに対してクラストップレベルを実現した (Fig. 5)。

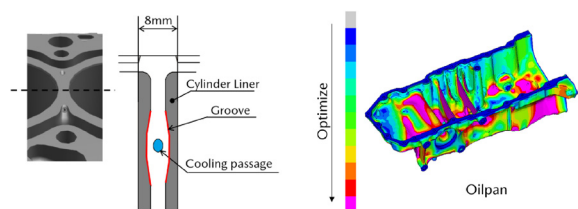


Fig. 4 Weight Reduction

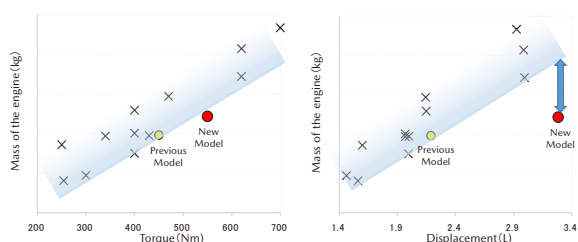


Fig. 5 Engine Mass

2.2 機械抵抗の最小化

ピストン材質をアルミからスチールへ変更し，冷却損失の低減だけでなく，ライナーとのクリアランスを最適に制御することで全体の約 1/3 を占めるピストンの摺動抵抗を低減した。また新開発した低粘度オイルを可変容量オイルポンプで緻密に油圧制御することで，各摺動部の信頼性を確保しながら機械抵抗低減を実現している。加えて冷却水制御バルブやウォータージャケットスパー

サーにより暖機性を改善することで実用領域も考慮した機械抵抗低減を実現している。更に，直列 6 気筒化によりバランスシャフトを廃止することができ，排気量増加にもかかわらず，前モデル比低減し，クラストップの低機械抵抗を実現した (Fig. 6)。

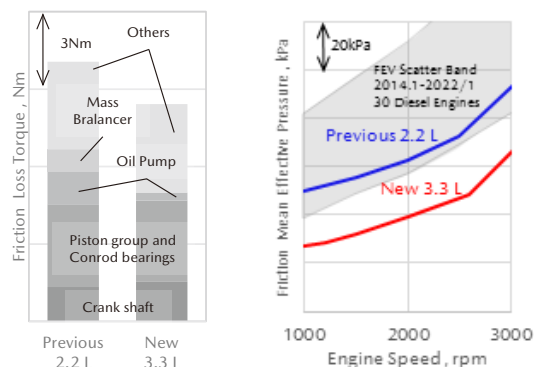


Fig. 6 Engine Friction

2.3 搭載性

直列 6 気筒縦置きのパッケージを実現するために，ボアピッチ縮小によるエンジン全長の短縮に加えて，クラッチャブルプーリーによる衝突安全性の確保，ドライブシャフトが貫通したオイルパン構造とすることで，AWD でも 2WD と同等のエンジン全高を実現した。また各部品の寸法を切り詰め，フロントデファレンシャル及びプロペラシャフトをエンジンセンターに限りなく寄せる構造とすることで，人馬一体の一丁目一番地であるアクセルペダル理想位置の確保を実現した (Fig. 7)。

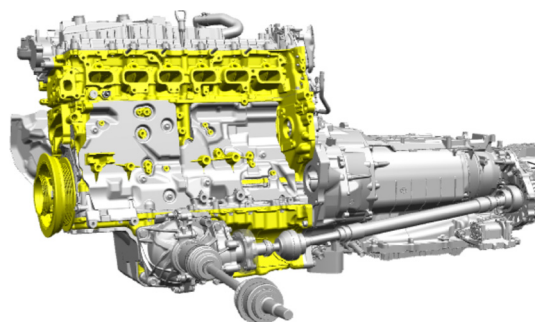


Fig. 7 Package

以降の章では，上記機能進化を実現したエンジン内部構造技術として，可変油圧システムの開発，スチールピストンの開発及びクランクシステムの開発を中心に紹介する。

3. ブレークスルー技術

3.1 可変油圧システムの開発

Fig. 8 に油圧システム回路を示す。ピストンのスチール化に伴う高負荷域でのピストン冷却性の強化 (ピストンクーリングオイルジェット流量増大) と，直列 6 気筒

化に伴うクランクシャフト軸受への供給油量増加により、従来比 250%の供給流量が必要となった。増加した要求流量を確保し、実用低負荷領域におけるエミッションや燃費をより向上させるため、可変容量オイルポンプで緻密に制御することで、現行 4 気筒ディーゼルエンジン同等以下のオイルポンプ駆動力で各種要求を実現した (Fig. 9)。

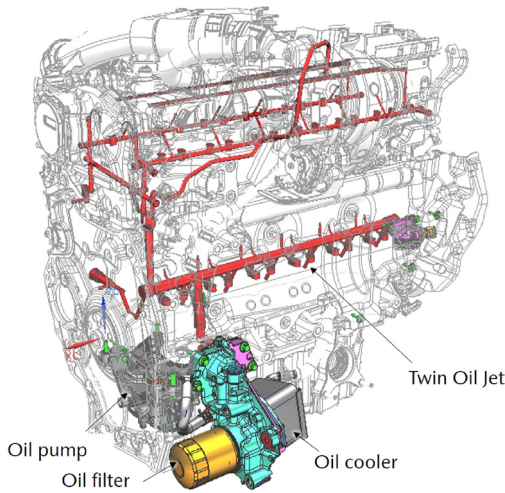


Fig. 8 Oil Circuit

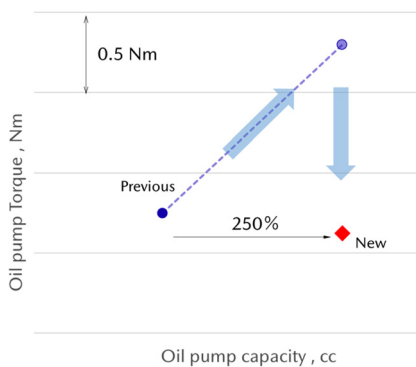


Fig. 9 Oil Pump Capacity vs Torque

Fig. 10 に目標油圧 MAP を示す。低油圧、中間油圧、高油圧の大きく 3 つの目標油圧を設定しており高負荷ほど信頼性に機能配分している。一方で常用回転域は低油圧制御にして常時噴射するサブジェットによりピストン信頼性を確保しつつ、ピストン表面温度は高くして冷却損失や未燃損失、オイルポンプの機械抵抗を低減させて燃費性能に機能配分した。ピストンに関する詳細については後述する。

また、登坂走行や高速走行により油温が高くなると、低油圧制御領域を縮小し、中間油圧制御の領域を拡大させた。それにより、負荷が低くてもメインジェットを噴射させてピストン冷却に必要な最小限の油圧となるよう制御した。このように運転シーンごとに可変容量オイルポンプによる緻密な油圧制御を行い、性能と信頼性を高次元で両立させた。

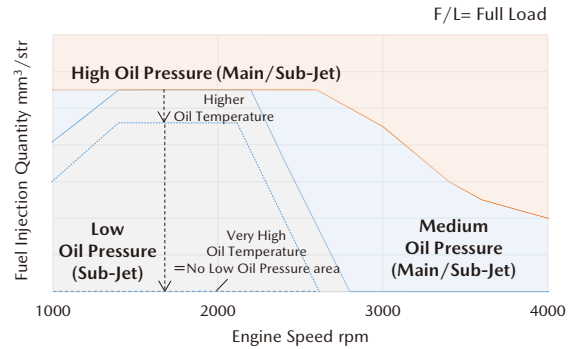


Fig. 10 Target Oil Pressure Map

3.2 スチールピストンの開発

(1) スチール製ピストンの採用

新型エンジンでは、燃費改善を目的にスチール製のピストンを採用した。改善の内訳は機械抵抗損失と未燃&冷却損失の低減による。Fig. 11 に新旧モデルのピストン外観を示す。各損失の低減メカニズムについて以下に説明する。



Fig. 11 Previous-Aluminum Piston (Left)
New-Steel Piston (Right)

a. 機械抵抗損失の低減

スチールピストンによる機械抵抗低減のメカニズムはスカートクリアランスの最適化によるものである。アルミピストンの場合、一定以上の温度域で運転すると、熱膨張によりシリンダボア径<ピストンスカート径となる。このときスカート部分はシリンダーに対し緊縛された状態となり、機械抵抗を増大させる。一方でスチールピストンの場合は線膨張係数が小さいため、極冷間の一部の条件を除いてスカートクリアランスを保つことができ、機械抵抗が低減できる。機械抵抗損失低減の効果でWLTC 国内モードの場合は 1.8%の燃費改善効果を得ている。

b. 未燃&冷却損失の低減

スチールピストンはアルミピストンと比較して熱伝導率が低く、耐熱性が高い。そのため燃焼室表面温度を高くすることができ、燃え残りによる未燃損失を低減することができる。また、材料強度が高いことにより TOP ランド部 (ピストン上面から TOP リング溝までの領域) の高さを小さく抑えることができ、クレビス部 (TOP ランドとボアの隙間の細長い空間で、燃焼火炎が届きにくい領域) の体積が小さくできることも未燃損失の低減に効果がある。また燃焼室表面の温度を高くして燃焼ガスとの温度差が小さくなることにより壁面熱流束を低減して、

冷却損失を低減できる。未燃損失と冷却損失の低減分を合わせ、WLTC 国内モードの場合は 0.4%の燃費改善効果を得ている。

(2) スチールピストン採用における技術課題への対応

スチールピストンの採用に際しては、メリットがある一方でいくつかの点で配慮を要する技術課題があった。以下よりその内容と新型エンジンのスチールピストンで実施した対策について解説する。

a. 温度設計

既述のように、低熱伝導の特性をもつスチールピストンでは局所的に温度が超高温になる信頼性懸念があるため、燃費と信頼性を両立するためにはピストン温度を精度良くモデルで予測し、ピストン冷却のための機能をハードと制御へ最適に配分する設計が重要となる。Fig. 12 にそのプロセスのフロー図を示す。本開発ではピストン熱流れに関する入熱と放熱のモデルと予実検証に用いる測温精度を向上させた。入熱は入熱タイミングの正確な把握のため、ピストンの上死点を正しく管理した上で行う高精度な筒内指圧計測とマツダ独自の熱勘定解析⁽⁶⁾によりピストンへの入熱量予測精度を向上した。ピストン入熱分布については噴霧燃焼に関する 3D-CFD により詳細に予測した。放熱はオイルジェット流量について往復運動しているピストンのクーリングチャンネル内に入るオイルジェット有効流量を定義することで予測精度を向上した。測温については計測前に CT スキャンにてピストンに手加工で埋めた測温センサーの壁面からの距離を正確に把握して、CAE と同じ座標位置で予実比較できるようにした。

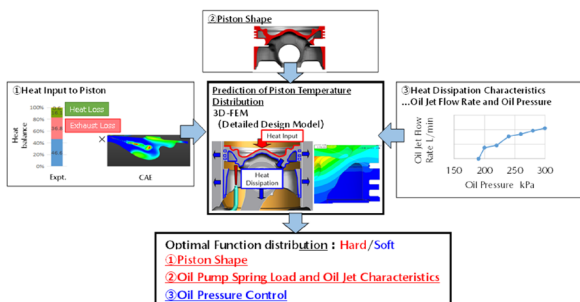


Fig. 12 MBD Environment and Function Distribution for both Performance and Piston Reliability

この取り組みで精度を向上させたモデルによる温度予測を用いて、Fig. 13 に示すようにピストン冷却のための機能強化を新型エンジンのスチールピストン形状に対して行った。リング溝部温度はオイル炭化抑制のためクーリングチャンネルの形状を最適化し、メインオイルジェット流量増加と合わせて従来型のアルミピストンと同じ信頼性基準温度に収まるように冷却性を高めた。ピンボス温度についても従来型と同じ基準温度に収まるようにピンボスからトップまでのコンプレッションハイト

と後述のサブオイルジェット流量を最適に設計した。一方、ピストンリップ温度に関しては材料をアルミからスチールにすることによる熱伝導率低下と耐熱性向上によって従来型から新型で大幅に上昇させている。

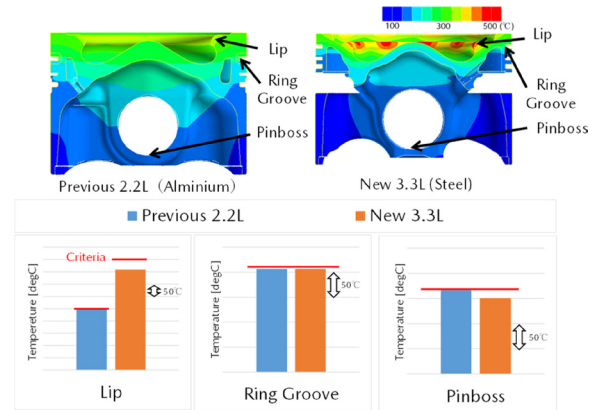


Fig. 13 Comparison of Piston Temperature Results with 3D-FEM CAE Model in Maximum Power Operating Conditions

b. スカート構造設計

スカート構造の設計に際しては、アルミピストンと異なる熱膨張特性とヤング率を考慮した。熱膨張に関しては、シリンダー素材のアルミと比較して線膨張係数が小さいため、シリンダー（アルミ）・ピストン（スチール）ともに冷えている時にはスカート部のクリアランスが小さくなり、温間では逆にクリアランスが大きくなる特性をもつ。またヤング率はアルミの 2 倍強であり、アルミピストンと同形状で設計した場合は剛性が高くなりすぎる。従って、下記条件を含むあらゆる使用環境で満足するように、スカート剛性、スカートプロファイルを最適設計した。

冷間時は、極寒環境における始動後からエンジンが温まるまでの限定的な期間でのみクリアランスが極小の緊縛状態となる。このとき緊縛力 (Fig. 14 の①) が発生し、スカートの剛性が高いと荷重が過大となり焼付きを生じる懸念があるため、適切な剛性にする必要がある。一方で温間時は、特に長期間の運転による劣化でシリンダーボアが拡大 (クリアランス増) する時、ピストンがピストンピンを中心に回転する 2 次運動が増大する。このピストンの傾きが過剰である場合 (Fig. 14 の②)、スカートの上下端部のエッジが接触し、スラップ音の発生、もしくは焼付きや異常摩耗に至るリスクが生じる。そのため、温間時のボア拡大量は、燃焼入熱分布、冷却の抜熱分布をモデル化し、構造体の FEM との連携で予測した。劣化拡大量の実験式をベースにしたモデル化は、あらゆる使用環境 (劣化含む) を考慮した最適設計に寄与した。

また焼付きや異音の原因となることから、ピストンとシリンダーボアの接触界面には適度な油膜が必要である。そのため、常に必要な油量が届けられるように油圧制御を行った。

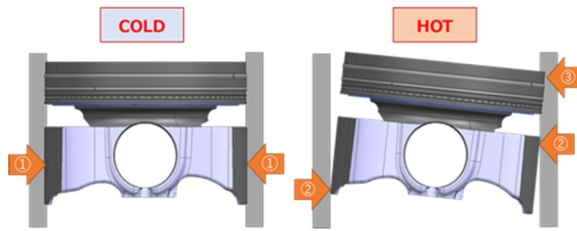


Fig. 14 Piston Skirt Clearances in COLD/HOT Situation, and Its Contact to Cylinder Bore

c. ディーゼルノック音の対策

ディーゼルノック音低減のため、これまで燃焼加振力の低減や、ピストンピン内部に装着しダイナミックダンパーとして機能するナチュラル・サウンド・スムーザーを採用してきた⁽⁷⁾。今回スチールピストンを新たに採用するにあたり、往復系部品の共振周波数コントロールによる対策を行った。ノック音は、燃焼圧による加振力がピストンからピストンピン、コンロッド、クランク、ブロックへと順に伝達し、最終的にブロックの外壁で放射音に変換されることで音として知覚されるようになる。その際ピストンからコンロッドまでの往復系部品がもつ伸縮モードの共振周波数とノック音の強度ピークが一致することが分かっており、ナチュラル・サウンド・スムーザーによる対策はこの共振周波数をねらったダンピングによるノック音レベルの低減であった。新型エンジンで行った対策は、音レベルを低減するのではなく、車内音として聞こえづらい周波数へと共振周波数をずらすことをねらいとしている (Fig. 15)。

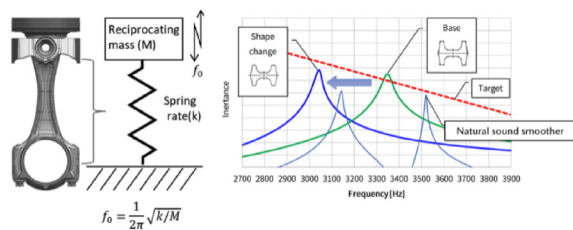


Fig. 15 Knocking Noise Reduction

往復系の共振はコンロッドをばね要素と見立てた単振動系と見なすことができる。このときばね定数はコンロッドの剛性により決定されるため、コンロッドI幹部の断面積を変化させることで共振周波数 f_0 を任意に調整することができる。一般に車内の暗騒音は低周波側で大きくなるため、I幹部の断面積を縮小しノック音の周波数を低周波側にシフトすることで、車内音の目標を達成した。これにより、往復系部品の重量とコストの増加を抑制しながらノック音を低減することができた。

3.3 クランクシステムの開発

直列6気筒エンジンとして高い静粛性の実現と衝突要件を含めたパッケージの成立が必要であり、これらの課

題を高次元で達成するためモデルを活用したクランクシステム全体での最適化を行った。

(1) クランクシステムの開発構想

直列6気筒化によるクランクシャフト全長拡大によりクランクシャフト自体のねじり共振周波数は低下するため (Fig. 16)、エンジンの常用回転領域内でねじり共振が励起される頻度は大幅に増加する。

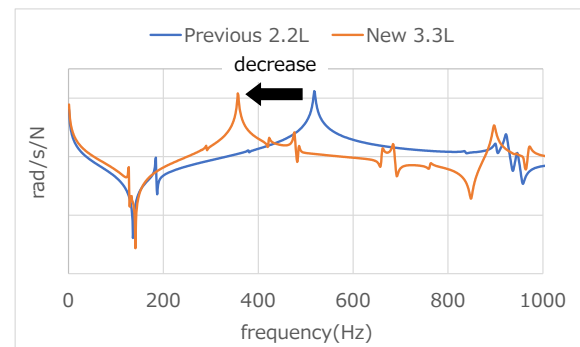


Fig. 16 Resonance Characteristics of Crank System

一方、ねじり共振周波数を常用域以外に配置するためにはクランクシャフトの剛性を大幅に変更する必要があるが、大幅な重量増加を伴うため現実的な解決策とはなりえない。このため、クランクシャフトの基本諸元は現行の4気筒ディーゼルエンジンを踏襲し、増大する角速度変動はダンパープリーで減衰することを基本構想として仕様検討した。また、衝突要件を成立させるため、ダンパープリーはクラッシュプルタイプのゴムダンパーを用いた構造を選択した。

(2) 角速度変動予測モデルを用いた最適システム的设计

今回の開発では、開発構想段階でモデルによる角速度変動を精度良く予測できるようにし、この結果を元に関連システムの信頼性や異音などの成立性/余裕度を検討することで、クランクシステム全体の最適化を行った。角速度変動の予測モデルは開発初期に試作6気筒エンジンを用いてクランクプリーやFEADシステム、フライホイールなどの詳細挙動の計測・分析を行うことで解析パラメーターの調整を実施するとともに、システム間の相互影響を検証し各システムのモデル化規模やモデルの連成範囲・条件の改善を実施した。この結果、各システム間の相互影響も含め高い精度による角速度変動の再現が可能となった (Fig. 17)。

高精度のモデルを用いてシステム各部位の信頼性や異音の成立性/余裕度を設定した上で (Fig. 18)、Table 2に示すように開発構想を具現化した設計諸元を決定した。

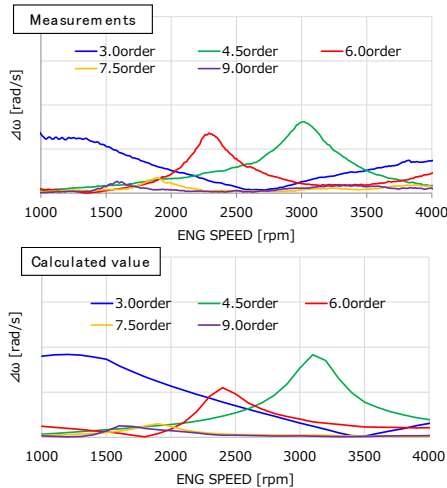


Fig. 17 Improved Model and Compare Results

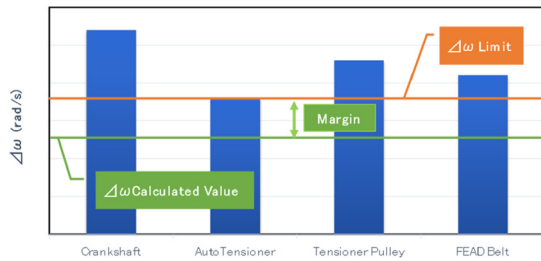


Fig. 18 $\Delta\omega$ Margin of Crank System

Table 2 Crank System Specifications

Engine	Previous 2.2L	New 3.3L
Pin dia.	$\phi 52\text{mm}$	←
Journal dia.	$\phi 52\text{mm}$	←
Counter Weight	Full	Half
Pulley Inertia: Main	$3.56\text{g}\cdot\text{m}^2$	$14.75\text{g}\cdot\text{m}^2$
Pulley Inertia: Sub	$1.00\text{g}\cdot\text{m}^2$	$5.76\text{g}\cdot\text{m}^2$

6. おわりに

新世代クリーンディーゼルエンジン SKYACTIV-D 3.3 は、低 Pmax コンセプトを踏襲した構造系の機能進化と最適化を行うことで、同排気量クラストップの軽量さを実現した。またスチールピストンや可変油圧システムなどの採用により、6気筒でありながら従来型4気筒のSKYACTIV-D 2.2よりも低い、クラストップの低機械抵抗を実現した。更に直列6気筒化による全長拡大で課題となるねじり共振に対してもロバストな諸元を決定した。マツダ初となる6気筒エンジン開発となったが、これまでのMBDで培ってきた予測・解析モデルを進化させながら適用することで、1クラス上のディーゼルエンジンに進化させることができた。手の内化した技術を今後の開発にも順次適用し、マルチソリューションによる本質的な環境貢献に繋げていく。

参考文献

- (1) Hitomi M.: Both the Gasoline and Diesel Engines will be Winners, 26th International AVL Conference Graz (2014)
- (2) 志茂ほか：新世代 3.3L クリーンディーゼルエンジンの開発 (第1報), 自技会秋季大会予稿集, (2022)
- (3) S. KIM: A New Concept for High Efficiency and Clean Diesel Combustion by Controlling Mixture Distribution with Dual Zone Combustion Chamber, Proceedings of 10th COMODIA, pp.177-186 (2022)
- (4) Nakai E.: MAZDA SKYACTIV-D 2.2L Diesel Engine, 20th Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology, pp.943-965 Aachen (2011)
- (5) 皆本ほか：新型 2.2L 低圧縮比クリーンディーゼルエンジンの開発, 自技会秋季大会予稿集, No.280, (2018)
- (6) Y. Kato: Heat Balance Analysis Using Cylinder Pressure Obtained by Engine Experiments Considering the Spatial Heterogeneity of Diesel Combustion, SAE Paper No.2019-01-2228 (2019)
- (7) 白橋ほか：SKYACTIV-D ディーゼルノック音の低減技術, マツダ技報, No.34, pp.29-34 (2017)

■著者■



岡澤 寿史



本田 絢大



青木 勇



詫間 修治



西岡 勇介



山内 智博



山口 正徳



菊池 正和



小泉 昌弘



内田 敦

特集：MAZDA CX-60

06

SKYACTIV-D 3.3 の開発
—大排気量エンジンとマイルドハイブリッドの協調による
提供価値の向上—
Development of the Skyactiv-D 3.3
— Cooperative Control Technology for Large Displacement Engine and
48V Mild Hybrid —

小林 徹 ^{*1} Toru Kobayashi	高木 健太郎 ^{*2} Kentaro Takaki	杉本 浩一 ^{*3} Koichi Sugimoto	皆本 洋 ^{*4} Hiroshi Minamoto	松尾 建 ^{*5} Takeru Matsuo
山川 裕貴 ^{*6} Hirotaka Yamakawa	高橋 康太朗 ^{*7} Kotaro Takahashi	大地 晴樹 ^{*8} Haruki Ohji	齊藤 忠志 ^{*9} Tadashi Saito	五丹 宏明 ^{*10} Hiroaki Gotan
錦織 大悟 ^{*11} Daigo Nishikori	中上 信宏 ^{*12} Nobuhiro Nakagami	久米 章友 ^{*13} Akitomo Kume		

要 約

マツダは、CO₂ 排出量削減の目標達成に向け、基本となる内燃機関の効率改善を進めながら、段階的に電動化技術を組み合わせていく「ビルディングブロック戦略」を推進している。今回のラージ商品群では、48V のハイブリッドシステムを新たに採用し、新規開発の 3.3L 直列 6 気筒ディーゼルエンジンと組合せた M Hybrid Boost を導入する。高い熱効率を広い範囲で達成したディーゼルエンジンと小型で低出力なハイブリッドシステムを効果的に組合せる独自の協調制御技術により、マイルドハイブリッドシステム (MHEV) でありながら減速時のエンジン切り離しを可能にし、回生エネルギーを最大化させた。またそれを走りと燃費に効率的に配分することによって、アクセル操作に忠実に追従する意のままの駆動カコントロールの進化と、同クラスのストロングハイブリッド並みの低燃費を達成し、更なる「走る喜び」と「優れた環境性能」の提供価値向上を実現した。

Abstract

Mazda has been promoting “Building Block Strategy” that involves making improvements to the base ICE technologies first and then adding in electric devices stepwise. For Large Product group, we have adopted a 48V hybrid system and introduced M Hybrid Boost in combination with a new 3.3-liter inline six-cylinder diesel engine. We have also developed cooperative control for the hybrid system using the new engine that achieved high thermal efficiency in a wide operating range. With this unique control technology, the system can disconnect the engine during deceleration, maximize regenerative energy and efficiently allocate the energy to acceleration and fuel consumption performance. As a result, the hybrid system has achieved further evolution of driving power control that faithfully follows accelerator operation, fuel economy of Strong Hybrid car and enhancement of the value delivered by “driving pleasure” and “outstanding environmental performance”.

Key words : Heat engine, Compression ignition engine, Design/control, HV systems, Cooperative control

*1~6 エンジン性能開発部
Engine Performance Development Dept.

*9~11 走行・環境性能開発部
Drivability & Environmental Performance
Development Dept.

*7,8,13 PT 制御システム開発部
PT Control System Development Dept.

*12 ドライブトレイン開発部
Drivetrain Development Dept.

1. はじめに

マツダは、基本となる内燃機関の効率改善を主体に、適材適所に電動化技術を組み合わせていくマルチソリューションによるCO₂削減に取り組んでいる。新開発のSKYACTIV-D 3.3は、実用域で世界トップの燃費率と、どこまでもアクセルに追従する力強いトルクを達成した。M Hybrid Boostは、この高効率なエンジンに48Vハイブリッドシステムのモーターと多段化されたトランスミッションを組み合わせている。これらを効果的に協調させることにより、ストロングエンジンのメリットを最大限に活かし、優れた走行性能と環境性能を更に向上させ、高い次元で両立させることをねらいとして開発し、アクセルに即応する意のままの走りの進化とストロングハイブリッド車両並みの低燃費を実現した。

本稿では、SKYACTIV-D 3.3をより際立たせるマイルドハイブリッドシステムとの独自の協調制御技術について紹介する。

2. ストロングエンジン+MHEV 開発のねらい

高効率なストロングエンジンと小型モーター、及びトランスミッションの組み合わせで、効果的に環境性能と走行性能を向上させることをねらって開発を行った。この提供価値向上をねらった技術コンセプトをFig. 1に、主要諸元をTable 1に示す。これらの提供価値と具体的技術について以降に説明していく。

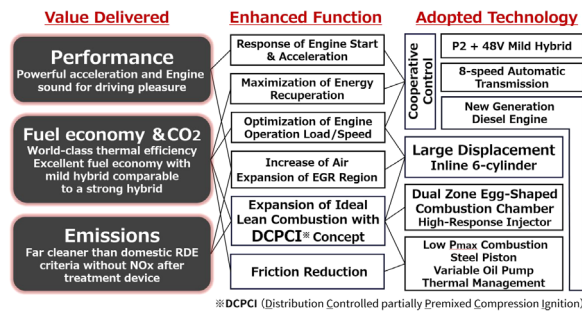


Fig. 1 Development and Technology Concept

Table 1 SKYACTIV-D and M Hybrid Boost Specifications

Engine	Engine	e-SKYACTIV D 3.3
	Engine Type	In-Line 6w/MildHybrid
	Displacement	3283cm ³
	EGR system	HP & LP-EGR
	Max Torque/rpm	550Nm/1500-2400rpm
Motor	Max. Power/rpm	187kw/3750rpm
	Max Torque/rpm	153Nm/200rpm
Lithium-ion Battery	Max. Power/rpm	12.4kw/900rpm
	Voltage	44.4V
Fuel Consumption	Energy density	0.33kWh
	e-SKYACTIV D	21.1km/L
	SKYACTIV-D	18.5km/L

2.1 M Hybrid Boost のシステム構成

新世代 3.3Lディーゼルエンジンは広い負荷領域で燃費が良いため、容量の小さい電気デバイスでも合理的なシステムが構築可能である。そこで小型のモーターを備えた48Vマイルドハイブリッドを選択し、低抵抗の8速オートマチックトランスミッション⁽³⁾を組み合わせている。具体的な構成をFig. 2に示す。極軽負荷領域でのモーター駆動と回生エネルギーを最大化するために、エンジン切り離し機構を備えた挟み込みタイプのモーターを新規に開発した。モーターは集中巻きタイプで新型トランスミッション内に配置し、ローター内側にエンジン切り離し用の湿式多板クラッチを搭載して全長をコンパクト化している。また電圧を48Vに抑えることで小型/軽量化を実現すると同時に、①大電流化、②送電ロス低減、③各コンポーネントの性能を限界まで引き出すことで出力目標を実現した。インバーターはモーター直上に搭載し、結線距離/端子数の最小化で送電ロスを抑えるとともに、ペダルワークスペース確保に貢献している。またパワーモジュールの寿命予測解析を行い、最大電流を極限まで高めることで短時間定格トルクUPを実現した。バッテリーはリチウムイオンの12セル直列でDC60V以下として、車室外後席床下に搭載することで居住性/荷室スペースを確保した。48Vでの出力性能/頻度を満足するために、冷却は冷媒方式を採用した。また、バッテリーの充放電性能の検証により、最大電流と実効電流値を極限まで高めている。

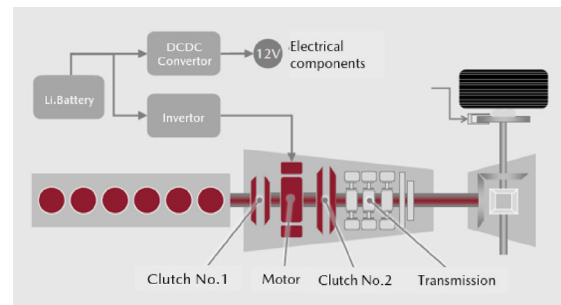


Fig. 2 System Configuration Diagram

2.2 協調制御のねらいと効果

効率のよいSKYACTIV-Dの特性を最大限に活かし、モーター容量の小さい電駆システムでありながらもストロングハイブリッド並みの燃費性能実現をねらった。減速時にはエンジン切り離しを行うことで回生エネルギーを最大化し、駆動時は効率上最適なエンジンとモーターのトルク配分となるようエネルギーマネージメントを行っている。また多段化されたトランスミッションのシフトパターンを低回転側に最適化することで、Fig. 3に示すように、エンジン効率の良い領域を最大限使えるようにした。特に極軽負荷領域でのエンジン切り離し走行を最大化するために、後述する Sequential Valve Timing

(以下 S-VT) と停止位置制御によりエンジンの再始動トルクを抑制し、モーターによる再始動に必要なトルクを最小化した。

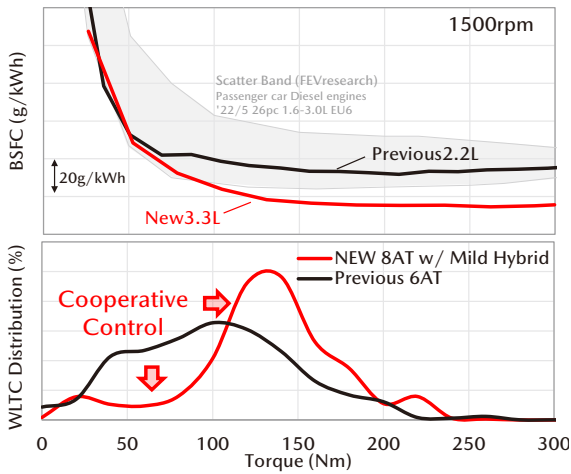


Fig. 3 SKYACTIV-D Fuel Consumption and Load Distribution by Cooperative Control with Motor and Transmission

これにより Fig. 4 及び Fig. 5 に示すとおり、WLTC モードにおいて、従来は停車時のみアイドルストップを作動させ、14%にとどまっていたエンジン停止頻度を、切り離しを行う事で 38%の停止頻度を達成している。切り離しをしない場合、6.5%の燃費改善にとどまるのに対し、エンジン切り離しを可能にすることで 12.6%の燃費改善を達成した。

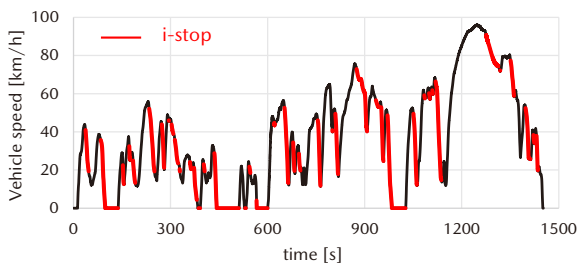


Fig. 4 i-stop Frequency @WLTC

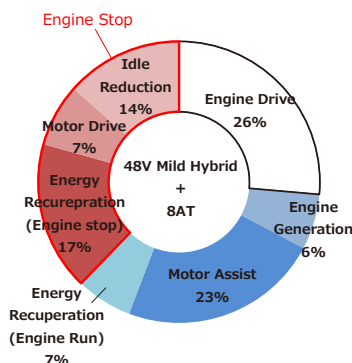


Fig. 5 Driving Pattern of 48V Mild Hybrid System + 8AT

また走行性能についても、これまで DE 精密過給制御として高めてきた空気量のきめ細やかなコントロールをベースに、高応答のモータートルクを効果的に配分させることで、過給機付きエンジンでありながらも、よりアクセル操作に忠実でダイレクトな駆動力コントロールを実現している。

これら性能を実現させるために key となる始動時クランキング抵抗低減制御を 3 章で、個別の協調制御について 4 章で具体的に紹介する。

3. ストロングエンジン+MHEV を具現化する技術

走行中の燃費改善のための技術として、エンジンの切り離し範囲を最大化するためのエンジン停止/再始動時のクランキング抵抗低減技術を新たに開発した。当シーンにおけるエンジン停止と再始動のチャート及びエンジン抵抗削減のための機能を Fig. 6 に示す。

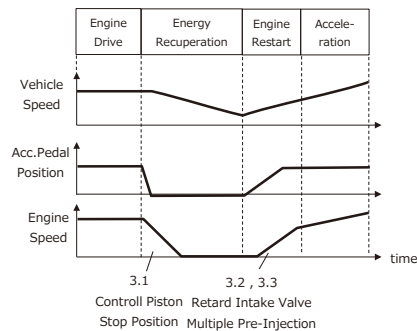


Fig. 6 Functions of the Reduce Restart Torque

3.1 ピストン停止位置制御

小さなモーターによる EV 走行範囲最大化のためには、エンジン再始動時の圧縮工程気筒が上死点を乗り越えるのに必要なモーターアシストトルクを最小化する必要がある。そこでモーターアシストトルクの最小化に有効な ①再始動時の回転系慣性力の最大化、②エンジン起動抵抗の最小化に取り組んだ。回転系慣性力はクランキング開始時のピストン停止位置に依存し、6 気筒エンジンでは圧縮行程気筒のピストンが下死点に停止した時に最も回転系慣性力が得られる。

ピストンが完全に停止する位置は停止直前の圧縮工程気筒の空気量と膨張行程気筒の空気量で決まり、両気筒の空気量を均等にできれば膨張と圧縮による釣り合いにより下死点に停止する。そこで新たに開発したピストン停止位置制御では、エンジンを切り離してから完全に停止するまでの間、インマニ圧力や S-VT 位相角をモニターして筒内の空気量状態からピストン停止位置を予測し、その結果を元に S-VT やスロットリング操作によって停止直前の圧縮・膨張気筒の空気量が均等となるようコントロールしている。停止位置制御を実施した場合の停止位置分

布を Fig. 7 に示す。再始動に必要なモーターアシストトルクが最小となる下死点（図中 180deg.BTDC）付近にピストン停止位置をコントロールできていることが分かる。

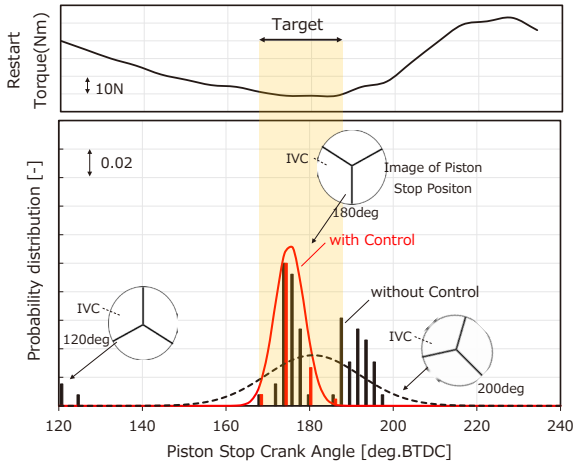


Fig. 7 Probability Distribution of Piston Stop Crank Angle

3.2 電動 S-VT によるエンジン起動抵抗の削減

再始動初期のエンジン抵抗は摩擦損失と圧縮行程気筒の圧縮抵抗で形成され、後者が支配的である。第 1 報にて報告した摩擦損失の削減⁽¹⁾に加え、Fig. 8 に示すように吸気 S-VT を用いて吸気バルブを最遅角の状態で保持してクランキングを開始することで、始動時の最初の圧縮行程となる気筒の圧縮抵抗を大幅に削減する。ピストンの上昇が進んで吸気バルブが閉じると同時に吸気 S-VT の進角を開始し、以降の気筒は圧縮抵抗の低減よりも吸入空気量の増加を優先させて燃焼トルクを確保する。これにより再始動に必要な応答性を確保している。

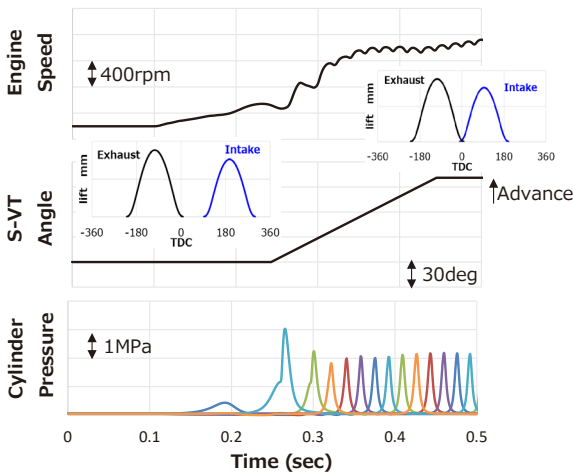


Fig. 8 Electrical S-VT Behavior at Engine Restart

3.3 少量多段プリ燃焼制御技術の拡大による着火性向上

前述の電動 S-VT によるリタード再始動により圧縮気筒の筒内温度・圧力は通常時に比べて低いいため燃料は着火

しにくい。このような筒内環境下で確実に着火させるには、燃料リッチな混合気を燃焼室内に長期間維持する多段プリ燃焼制御技術⁽²⁾が有効である。SKYACTIV-D 3.3 ではリタード状態から再始動を行うため従来機種よりも着火性が悪い。そこで従来の 3 段プリ燃焼を 7 段まで増加した。Fig. 9 に示すように従来よりもリッチ混合気を上死点まで長期間維持できている、リッチ混合気領域は緩やかに減少している。このように前段噴射の更なる多段化により再始動時の確実な着火を確保した。

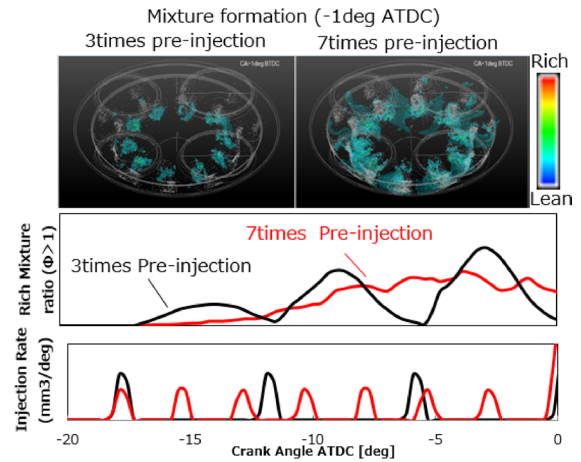


Fig. 9 Rich Mixture Formation by Multiple Pre-Injections

4. MHEV の DE への適用、個別技術

前述した MHEV による回生、EV 走行による CO₂ 改善に加え、DE ユニークの燃費ロス刈り取り並びに、ドライバビリティ向上にも MHEV48 技術を最大限活用した。

4.1 燃費改善：λコントロール、再生協調

(1) 過渡運転時λコントロール

SKYACTIV-D は高効率過給によってリーン燃焼を実現し燃費改善を図っているが、実運転状態によってはターボチャージャーの応答遅れが発生する。Fig. 10 に示すように、応答遅れが発生しているシーンでは、リーン燃焼の度合いを表す空気過剰率（以降、λ）が低下し、図示燃料消費率（以降、ISFC）が悪化する。SKYACTIV-D 3.3 では、大排気量へのアップサイジングコンセプトによって、こうしたシーンでもλを改善しリーン燃焼を進化させている。その上で、MHEV48 付き仕様においては、モーターアシストを活用し積極的にλをコントロールする技術を開発し実装した。Fig. 11 に緩加速時の動作概念を示す。加速中の空気量と目標燃焼トルクからλ悪化を予測し、λの悪化が大きい場合は、追加でモーターヘトルクを配分し、システムトルク同一のままエンジントルクを抑制する。その結果、同等過給圧（空気量）下で燃料噴射量を抑制し、λが上昇してリーン燃焼化することで、ISFC が改善している。なお、踏み込み量に応じて本制御

の介入量をリニアに制御し、強い踏み込み時はエンジントルクを最大限発揮させ、後述の過給応答アシストヘシームレスに切り替え、走り性能と燃費改善を両立した。

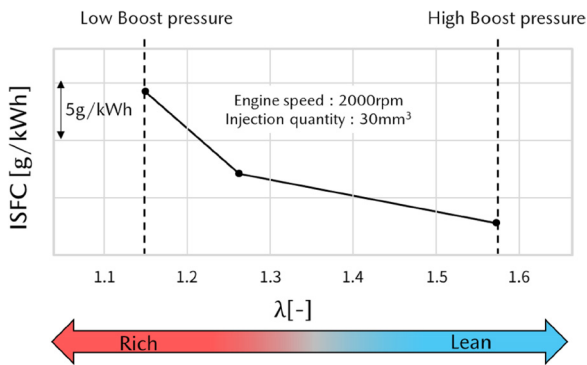


Fig. 10 Effect of Boost Delay on ISFC

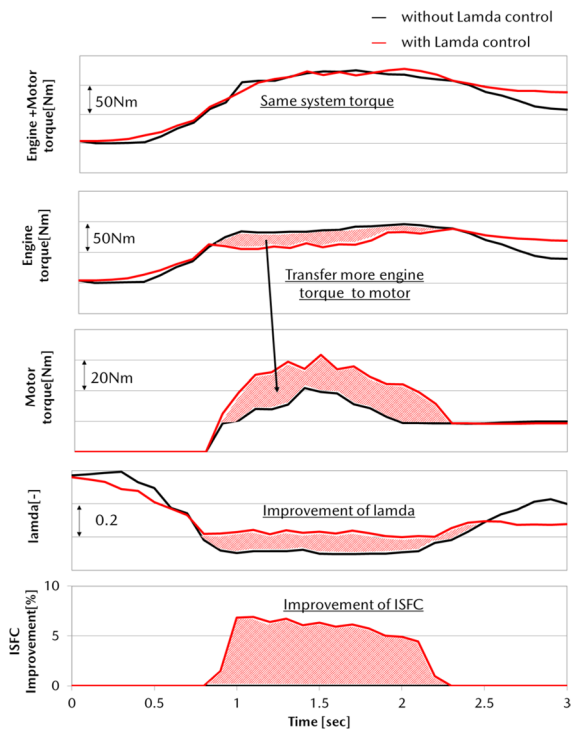


Fig. 11 Suppressing the Deterioration of Lamda at Transient Operating Condition

(2) DPF 再生との協調制御

DPF 再生制御は、堆積した煤 (スス) を燃焼させるための燃料が必要であり、通常時に比べ燃費悪化を伴う。煤の燃焼温度帯に急速昇温し、その温度帯を安定維持することが再生時間の短縮につながり、燃費悪化の抑制につながる。しかし、実際の走行シーンでは排気温度が下がる燃料カットを伴う減速シーンが多く、昇温や温度維持にロスが生じている。今回、条件を満たす減速シーンでは燃料カットは行わず、微小な燃焼トルクを発生させつつも、その燃焼トルクをモーター発電抵抗で相殺させることで、必要な減速度は確保しつつ、排気温度を確保することで、昇温早期化及び、温度の安定維持を実現さ

せた。これらにより、SKYACTIV-D 2.2 で進化させてきた DPF 再生効率を更に高め、CX-60 の優れた実用燃費性能の向上に貢献した (Fig. 12)。

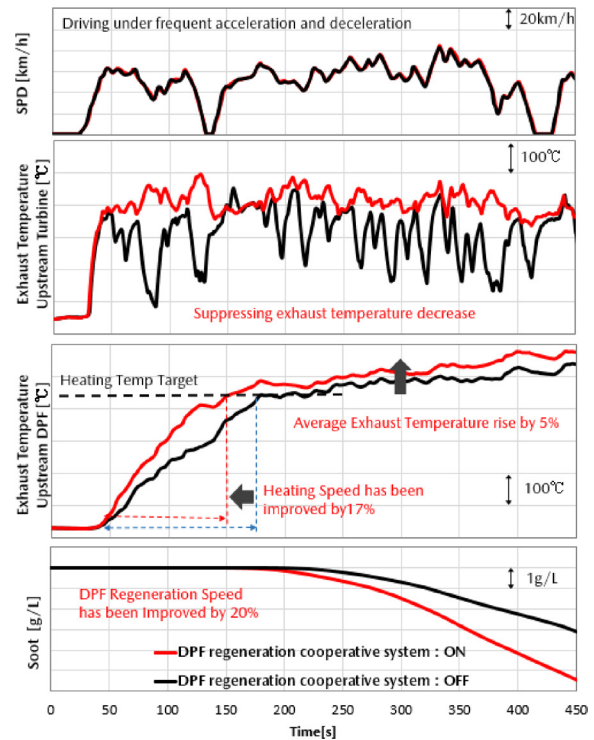


Fig. 12 Enhancing DPF Regeneration Speed and Temperature Stability

4.2 走り改善と過給応答アシスト

高応答モーターの特性を活かし、操作した瞬間から遅れなく先が予見できる初期応答と、操作に対する滑らかさ、及びコントロール幅の広さを深化させ、人間中心の走りを極めることをコンセプトに開発をおこなった。SKYACTIV-D では、大排気量化と VG ターボチャージャー + HP/LP-EGR の吸排気システムを採用しているが、これに合わせて空気系、噴射系、及びモーターの制御配分を見直し、従来制御からの刷新を図っている。

具体的には、要求加速度から定めた目標トルクに対して、まずは時定数の最も大きい空気系を主体にエンジントルクをコントロールし、過渡的に過給応答が不足する領域をモーターでアシストさせる制御構造とした。従来 HP-EGR システムに採用してきた踏み込みに応じて瞬時に適切な EGR バルブ開度へ動かすモデルベース制御を LP-EGR バルブにも適用拡大し、LP-EGR システムの課題である応答性を改善した (Fig. 13)。

またターボ制御についてもアクセル操作に応じて適切にベーンをコントロールし、定常走行時のポンプロス低減と加速時に必要な過給圧応答を確保し、燃費と応答性の両立を図っている。前述の EGR 制御との協調を効果的に使い、大排気量エンジンと組み合わせることでエンジン単体でもドライバーの意図に即応する過渡トルクを実

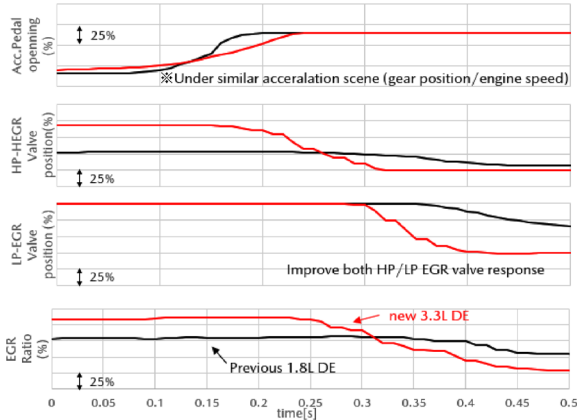


Fig. 13 HP/LP EGR Control Improvement at Transient Condition (vs 1.8L DE)

現させているが、M Hybrid Boost では、更に一段高い加速度目標を設定し、モーターでアシストさせることによって、Fig. 14 に示すとおり、より次元の高い駆動力特性を実現させている。(新型CX-60にはマツダDE初のスポーツモードを搭載しており、当モード選択時は目標加速度とともに、更に応答性に振った適合にしている。)

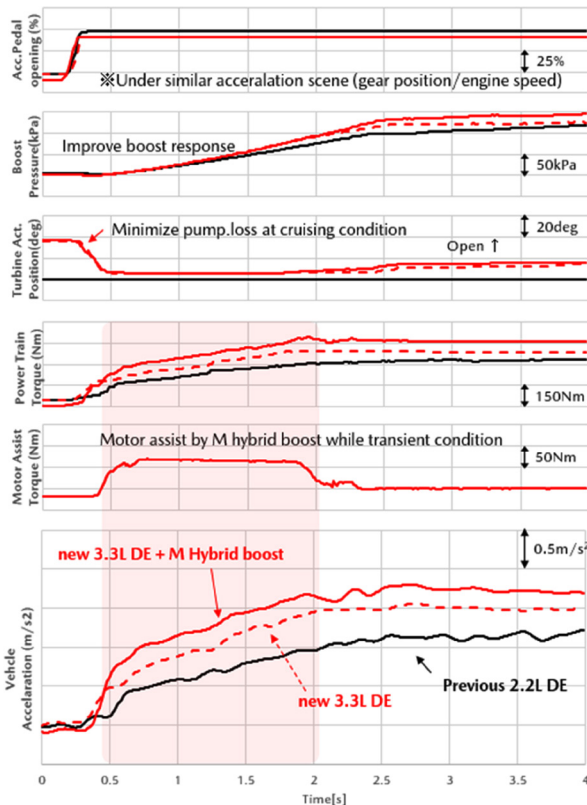


Fig. 14 Acceleration Performance Improvement with M Hybrid Boost Assist Technology (vs 2.2L DE)

なお、エネルギーマネージメントからも、必要最小限の加速アシストとし、エンジンポテンシャル以上のアシストはさせていない。またこれらトルクマネージメントをアクセル操作だけではなく、発進時や変速時のトラン

スミッションとのトルク協調シーンにも適用することで、さまざまなシーンにおいても高い応答性と連続的な駆動力特性を実現し、途切れることのない加速性能を実現した。

4.3 再始動制御

(1) 停車時再始動制御

モーターアシストと燃焼制御をドライバー操作に応じて協調させることで、迅速かつ低振動な再始動を可能にした。再始動時の振動は、エンジンの燃焼トルクによりPTの剛体共振が励起されることが主因であるが、特にディーゼルエンジンにおいては、ガソリンエンジン比イナーシャも大きく、燃焼トルクも大きいことから、この共振滞在回避が課題であった。M Hybrid Boostでは、S-VTをリタード状態で始動させ、圧縮トルク変動を低減しつつ、モーターにより共振領域以上にエンジン回転を上昇させてから着火させることで、大幅な振動抑制を達成した。またより発進応答性が求められるアクセルを踏みながら再始動させるシーンにおいても、必要最低限の燃焼トルクを与え、共振滞在を最小限に抑えつつ、クラッチ制御とも協調させることで、従来のスターター方式によるエンジン再始動に比べ大幅な応答性改善を実現すると同時に、振動のないスムーズな発進応答性を実現した (Fig. 15)。一方、エンジン停止時やアイドルストップ時にも圧縮トルク変動を入力としたPT剛体共振による振動が発生するが、S-VTとスロットル制御を組み合わせることでトルク変動を低減し、大幅な振動低減を実現した。

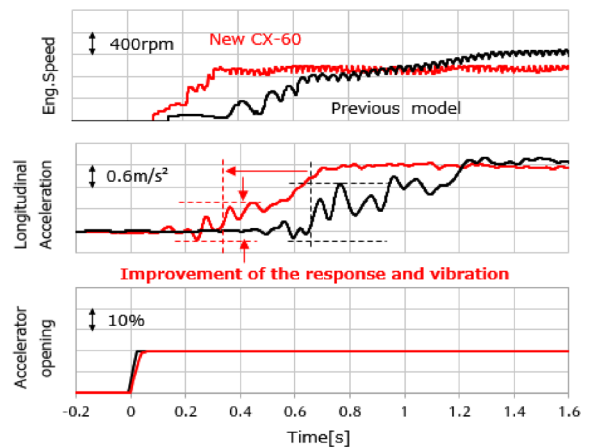


Fig. 15 Comparison of Re-Start Response from Idle Stop

(2) 有車速時再始動制御

限られたモーター出力であるため、走行エネルギーの一部を始動トルクとして使用することで、前述のエンジン始動トルク低減と合わせ、必要最小限の起動トルクで再始動させるとともに、エンジン、モーター及びクラッチとの協調制御によりショックと応答を両立した再始動

を実現した。

Fig. 16 に示すようにエンジン始動時は、No.2 クラッチをコントロールして駆動力変化を抑えつつ、必要最低限の走行エネルギーを始動に活用し、油圧制御性を高めた No.1 クラッチを高応答のモータートルクに最速で同期させながら、迅速に始動に必要な伝達トルクへの掛け替えを行う。更にはディーゼルならではの噴射量によるダイレクトなエンジントルクコントロールを合わせて行うことにより、始動応答と締結ショック抑制を両立させた。この際、主に回転を共通のターゲットとし、エンジン、モーター、クラッチの3者の協調制御を行っている。始動後はスムーズに駆動へつなげるべく、燃焼を開始したエンジントルクとモータートルクの掛け替えを行いつつ、No.2 クラッチも同期させて駆動力の連続性を確保している。特に、非駆動から駆動に遷移する再始動を実施する場合は、駆動系のガタをまたぐトルク伝達の非線形特性も考慮したコントロールも加えて実施している。また停車時同様に、操作に応じて各種トルクの高さと傾きを適切に変えることにより、アクセル操作に応じた応答性とショックのない再始動を両立させている。

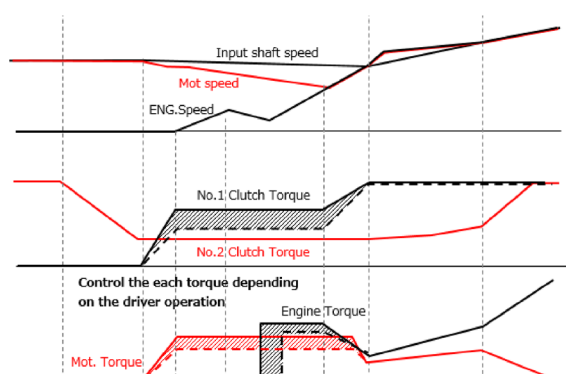


Fig. 16 Torque Control Image at Re-Start during Vehicle Travel

5. おわりに

新型 CX-60 の M Hybrid Boost では、新型 SKYAKTIV-D 3.3 との組合せにより、同クラスのストロングハイブリッド並み燃費である 21.1km/L を実現した。また、操作に応じたモーターやトランスミッションとの協調制御により、意のままの走りを進化させた。今後も内燃機関のさらなる効率改善を進めながら、電気デバイスとの協調技術を進化させ、マルチソリューションによるカーボンニュートラル社会の実現に向けて、マツダ独自の価値である「走る喜び」をとおして貢献していく。

参考文献

- (1) 志茂ほか：新世代 3.3L クリーンディーゼルエンジンの開発（第1報），自技会秋季大会予稿集（2022）
- (2) 中本ほか：新型ディーゼルエンジンのアイドルス

トップ技術，第 22 回内燃機関シンポジウム，No.71（2011）

- (3) 朝倉ほか：新型 8 速 自動変速機の紹介，[マツダ技報](#)，No.39，pp.57-61（2022）

■ 著 者 ■



小林 徹



高木 健太郎



杉本 浩一



皆本 洋



松尾 建



山川 裕貴



高橋 康太郎



大地 晴樹



齊藤 忠志



五丹 宏明



錦織 大悟



中上 信宏



久米 章友

特集：MAZDA CX-60

07 SKYACTIV-D 3.3 の開発における MBD プロセス革新と適用

MBD Process Innovation and Application in the Development of Skyactiv-D 3.3

宮崎 正浩^{*1} 小林 謙太^{*2} 角田 良枝^{*3} 加藤 雄大^{*4} 村井 亜樹^{*5}
 Masahiro Miyazaki Kenta Kobayashi Yoshie Kakuda Yudai Kato Aki Murai
 久禮 晋一^{*6} 福田 大介^{*7} 城 侑生^{*8} 山口 能将^{*9} 志茂 大輔^{*10}
 Shinichi Kure Daisuke Fukuda Yukio Jo Takayuki Yamaguchi Daisuke Shimo

要 約

CX-60 搭載の新世代クリーンディーゼルエンジン SKYACTIV-D 3.3 では大排気量化と燃焼の理想追及に加えて、48V マイルドハイブリッドとトルコンレス 8 速 AT を組み合わせた独創的な技術によって、「走る喜び」と「優れた環境性能」をこれまでにない次元にまで高めた。その開発を可能にしたのが 1D モデルを用いた MBD プロセスである。エンジン／電駆／Drive Train (DT)／車両の各ユニットを 1D モデルでつないで、走り／燃費／エミッションの全てを満足する機能をハードと制御に最適に配分する機能開発の理想を追及した。本稿ではこの MBD プロセスと代表的な適用事例について紹介する。

Abstract

The new clean diesel engine Skyactiv-D 3.3 equipped with the CX-60 offers through its unique technology with a large displacement volume and improved combustion, and combined with a 48V mild hybrid and torque converter-less 8-speed AT, has taken “driving pleasure” and “outstanding environmental performance” to an unprecedented level. What made this possible is the MBD process, which thoroughly pursues a hardware and control system that balances all of driving, fuel efficiency, and emissions by connecting the functions of each unit of the engine/electric drive/drive train/vehicle with a model. This paper introduces this MBD process and its applications.

Key words : Diesel Engine, MBD, MILS, Functional Development

1. はじめに

マツダが目指す Model Based Development (以下、MBD) は「走る喜び」と「優れた環境性能」の両立を実現するため、MBD を単なる効率化のツールとしてではなく、機能開発の理想を追求するツールとして用い、その結果として独創的な SKYACTIV テクノロジーを生み出すことである^(1,2)。その MBD プロセスの概念を Fig. 1 に示す。具体的には、モデル構築と精度確保、ハード／制御システムへの機能配分 (1D)、詳細設計 (3D) から成る

V プロセスの左バンクにおいて、目指す商品性能を達成するための機能すなわちメカニズムの理想を徹底的に追求し、それをコントロールするための有効な方法を、各ユニットのハードと制御に配分することに重きを置いている。そのためには、各機能をコントロールするハードや制御の設計因子の変化が、最上位にある車両性能としての価値に効率的につながるかどうかを把握しながら検討する必要がある。このためエンジン／電駆／Drive Train (DT)／車両の各ユニットの機能をつないだ 1D モデル環境を準備する。1D モデルで適切に配分した機能目標に

*1,4,7,10 エンジン性能開発部
Engine Performance Development Dept.

*3,6 PT 制御システム開発部
PT Control System Development Dept.

*9 走行・環境性能開発部
Drivability & Environmental Performance Development Dept.

*2,5 MBD 革新部
MBD Innovation Dept.

*8 エンジン設計部
Engine Design Engineering Dept.

対し、ハード側はそれを実現する仕様を 3D 設計モデルにより決定し、制御側は 1D モデルを用いた MILS (Model In the Loop Simulation) 環境上で評価して制御仕様を決定する。

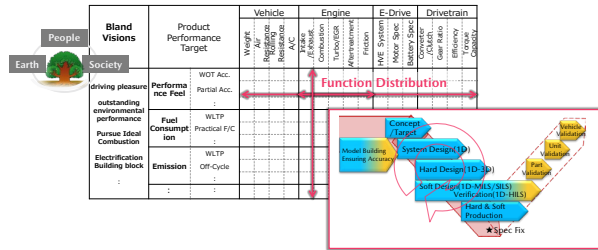


Fig. 1 MBD Process in Mazda

新世代クリーンディーゼルエンジンにおいては Fig. 2 に示すように大排気量と燃焼の理想追及に加えて、48V マイルドハイブリッドとトルコンレス 8 速 AT との組み合わせによって走りと環境性能を大幅に高める開発構想とした。本稿では、この構想をシステムとして具現化するために用いた MBD プロセスとモデル環境、その具体的な適用事例について紹介する。

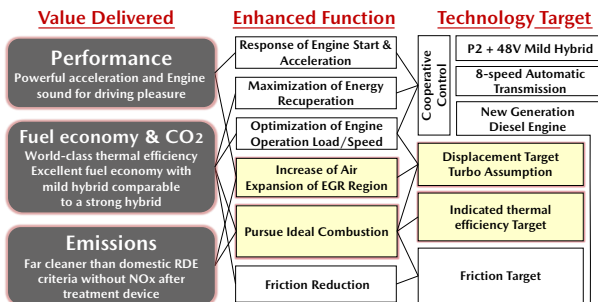


Fig. 2 Development Concept of New Generation Diesel Engine

2. モデル環境

2.1 つながる 1D モデル

提案する MBD プロセスにおいては車両としての性能目標とそれを確実に実現するシステムを決定するため、開発の初めにエンジン／電駆／DT／車両／制御の各ユニットの機能をつないだ 1D モデルを準備する。ここでの 1D モデルとは特に 1 次元であることを意味しているわけではなく、物事の本質を的確にとらえ、見通しの良い形式でシンプルに表現したモデル群を示す。走り、燃費、エミッションの各性能は相互に背反関係にあることが多く、また各ユニットのハード能力とその制御の相互影響で決まるため、それらを 1D モデルで考慮しながら各ユニットと制御への機能目標を配分していく。また、グローバルに商品展開する中で、多様な使い方（アクセル／ブレーキ操作）や使用環境（外気温度、高度、勾配、積載量）に対しての、ロバストな性能担保や信頼性の確

保が必要である。これについてハード能力と制御によってロバスト性を担保できるように 1D モデルで検証する。このようにして各ユニットのハードと制御に配分された機能目標に対して、詳細な 3D 設計や実装制御設計を行い実現手段となる技術の仕様を決定する。その過程でさまざまな制約によって機能目標の達成が難しくなった場合は 1D モデルに戻って機能の再配分や目標の見直しを行う。このようにして 1D モデルを開発初期から開発完了までの目標管理の規範モデルとして運用する。

検討に用いる「つながる 1D モデル」の概念図を Fig. 3 に示す。開発段階、検討目的によって必要なサブモデルとその詳細度が異なるため、必要十分な機能と粒度を備えたサブモデルを用いることが肝要となる。エンジンユニット、サーマルモデルには、空気流動・燃焼・伝熱等の過渡応答遅れを伴う物理現象に支配されるエンジンの過渡性能を再現するために、比較的粒度の細かいモデルをベースとし、必要に応じて機能的に抽出したマップモデルを用いている。更に、サーマルモデルにおいてピストンやシリンダーヘッド等の信頼性に関わる温度制約の考慮が必要な場合には 3D-FEM とも連携させる。一方で、電駆／DT／車両モデルには、機能の配分が可能で比較的粒度の粗いモデルを用いている。制御ユニットモデルは、開発初期は机上専用で作成した簡易モデルを、後期には MATLAB/Simulink で書かれた実装制御を用いている。これらサブモデルにおける注力点について、以降で説明する。

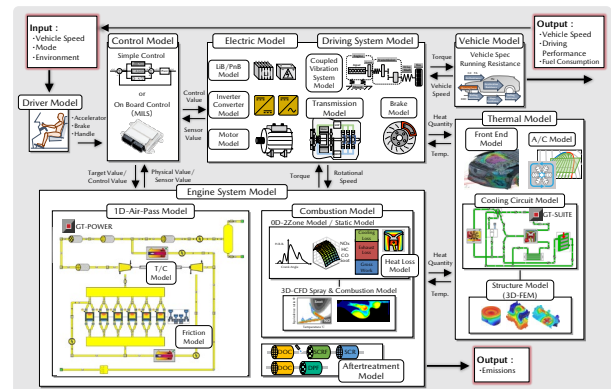


Fig. 3 Schematic of 1D Functional Model

2.2 エンジン吸排気モデル

マツダのディーゼルエンジンは、高過給、高 EGR と多段噴射によるさまざまな燃焼形式を用いることによって高いレベルで走りと排気性能の両立を目指しており、これを机上で検討するためには性能を支配する各部温度や圧力、流量といった状態量を過渡的に精度良く予測する必要がある。これを実現するために、エンジン吸排気の 1D ツールとして業界内で広く使われ、物理式を 1 次元的に解く GT-POWER を採用し、既存エンジンに対して

モデル改善を行ってきた。特に、過給モデルに対しては高精度なリグ計測により、タービン/コンプレッサの翼車効率と熱損失を切り分け、モデル化を行うことで高精度な性能予測を可能とした (Fig. 4)。また、燃焼モデルは GT-POWER 内の DIPulse モデル、マツダ内製の 2 領域簡易燃焼モデル⁽³⁾、既存エンジン特性を取り込んだ統計モデルを検討目的に応じて使い分けるが、新しい燃焼を扱う場合には 3D-CFD の予測を用いる場合もある。いずれにおいても熱効率を支配する因子を正しく切り分け、モデル化することで各々の機能への配分を可能としている。このように物理式に基づき、支配する機能因子ごとにモデル化することで新規のエンジン開発においても正しく性能を予測することが可能となる。

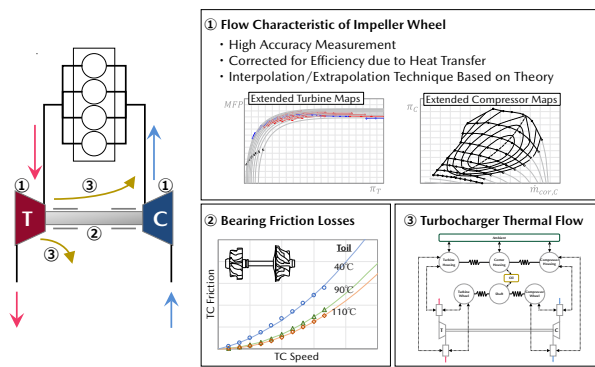


Fig. 4 Functional Modeling of Turbo

一方で、一般的に詳細な 1D モデルは計算コストが高く、他ユニットモデルとの連成や数多くの検討に対しては不向きである。この点は開発が進むほどにモデル活用の障壁となる。そこで、本開発においては、精度と計算コストの最適なバランスをとり簡素化した Fast Running Model (FRM) を構築し、更に GT-POWER をより高速に演算可能な GT-POWER-xRT ソルバーを適用することで、詳細モデル同等の精度を確保しつつ計算時間を 1/60 にまで短縮し実時間よりも速く演算可能とした。これにより開発上流から下流まで 1 つのモデルを再利用し続けることが可能となり、開発段階ごとのモデル精度確保を容易にし、モデル環境整備の効率化を実現した (Fig. 5)。

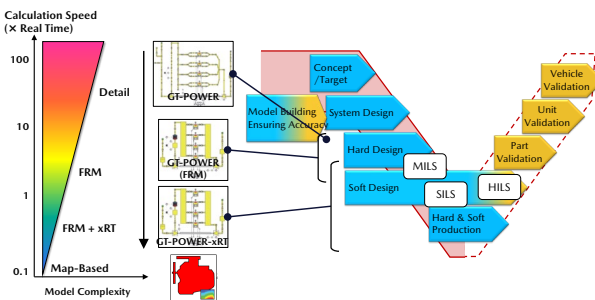
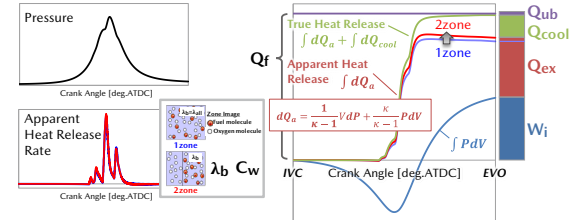


Fig. 5 Improvement of Calculation Speed and Model Application to V-Process

2.3 エンジン熱勘定モデル/サーマルモデル

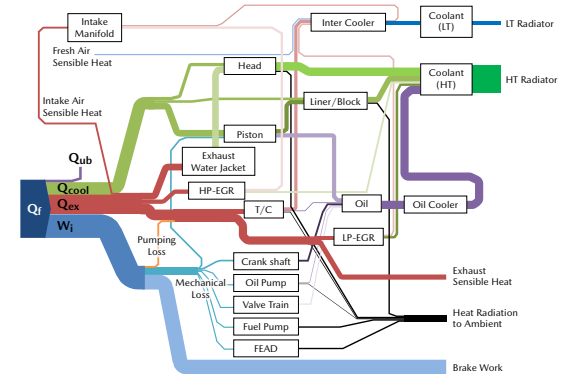
システム最大の発熱源であるエンジンの熱勘定モデルについての工夫を Fig. 6 に示す。ディーゼル燃焼によって発生する冷却損失と排気損失はエンジン筒内、LP-EGRクーラー、インタークーラーを介して高温、低温冷却水回路に入熱され、冷却水を通じて電駆デバイスやトランスミッションに影響を与える。従って、ディーゼル燃焼における熱勘定を正確に行うことは確度の高いサーマルマネージメント解析を実施する上での鍵となる。熱勘定については、計測されるトルクや指圧線図から正味仕事、ポンプ損失、機械損失を求めた上で、指圧線図の解析から得られる見かけの熱発生率の積算値と、投入熱量から未燃損失を除いた真の発熱量との差を冷却損失とする手法がある。この際、比熱比の扱いが結果に大きく影響するが、実際のディーゼル燃焼は燃料が空間的に不均質に分布するため、燃焼が起きている局所の当量比や比熱比の変化を模擬する必要がある。マツダはこのようなディーゼル燃焼の不均質さを簡単に模擬するための 2 領域簡易燃焼モデル⁽³⁾を構築し、計測データに基づく熱勘定推定の高精度化を図った上で、さまざまな運転条件において筒内冷却損失の推定を可能とし、これを用いてエンジンユニットモデルの筒内冷却損失に関する熱伝達率に掛かる係数 (Cw) を同定した。これに基づき式 (1) に示す回転数 (NE)、筒内状態量 (燃料噴射量: Qinj, 吸

In-Cylinder (Heat Balance Analysis)



$$C_w = a + b * NE + c * Q_{inj} + d * P_{in} + e * T_{in} + f * CA_{10} \quad (1)$$

In-Engine Unit (Thermal Flow Analysis)



- λ_b : representative excess air ratio of the burned zone
- C_w : heat transfer correction factor
- Q_f : fuel energy
- W_i : gross indicated work
- Q_{ex} : exhaust loss
- Q_{cool} : cooling loss
- Q_{ub} : heat loss due to incomplete combustion

Fig. 6 Heat Flow Model in the Engine

気圧：Pin, 吸気温度：Tin), 燃焼開始時期 (CA10) など説明変数とする Cw の重回帰式を構築し, あらゆる運転条件における冷却水回路に対する入熱量予測精度を向上させた。

新世代クリーンディーゼルエンジンの冷却システムの開発においては, お客様の多様な使い方や環境条件におけるエンジン本体の冷却性能の確保, エンジン燃焼に対する最適な吸気温度の実現, 電駆部品の効率最適化のための温度コントロールが求められた。このような冷却, 温調要求に対して最適な冷却システムの選定や各ユニット間における機能配分や機能成立性検証を効率的に実施するために, 車両全体における発熱や放熱などの熱流れを再現した 1D モデルを構築し, 開発に適用した。新世代クリーンディーゼルエンジンに採用している冷却システムを Fig. 7 に示す。空調用コンデンサーの後方に高水温回路と低水温回路のラジエーターが上下に分割された形で配置されており, それぞれエンジン本体, インタークーラーやモーターなどの電駆部品を冷却している。ATF に関しては高水温回路による昇温/冷却と, 低水温回路による冷却を 2 つのバルブによって切り替えることが可能である。また制御デバイスとしてはウォーターポンプや, 冷却水切替バルブ (CSV), グリルシャッターが存在し, 要求された温度を実現するための各部の流量や, フロントエンドの熱交換器に当たる風速を制御することができる。これらの熱交換器の特性や, 冷却回路の配管圧損, 冷却水熱容量などを 1D モデルで考慮した冷却回路システムモデルを前述の「つながる 1D モデル」に組み込んだ。

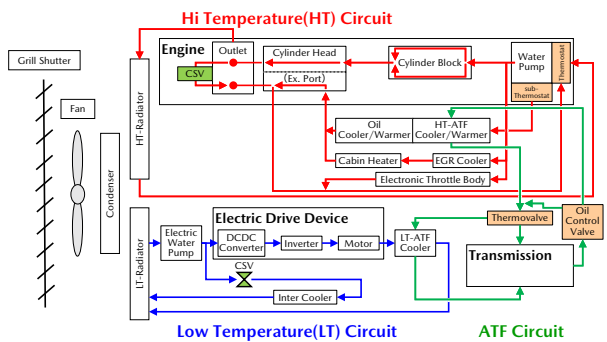


Fig. 7 Vehicle Cooling System

2.4 制御モデル

ディーゼルエンジンの性能は空気系や噴射系の制御によって大きく変化する。また, 電駆や DT との機能配分を行うためには各ユニットを協調させた状態での検討が必要となる。これを開発の早い段階で実現するために, 前述のエンジンユニットモデル, サーマルモデル等と制御モデルを連成させることで制御を含めた多くの机上検討を行えるようにした。開発初期のハードや制御システムの構想段階においては, 機能のつながりが分かりやすく,

ハードとの機能配分が容易である簡易的な制御モデルを作成し用いた。一方で, 開発が進んだ段階においては MATLAB/Simulink にて作成された量産ソフト向け制御モデルを用いた。この量産ソフト向け制御モデルは大規模であるため, C 言語化することで計算コストを抑える高速 MILS 環境⁽⁴⁾ というマツダ独自のシミュレーション環境を構築している (Fig. 8)。この際, 従来の高速 MILS では GT-POWER で作成されたモデルとの連成が難しかったため, Functional Mock-up Interface (FMI) という連成機能に対応させた。FMI とは, さまざまなツールベンダーが提供するモデルのやり取りや統合をツールに依存せずに行うためのオープンな規格に則った連成機能であり, この機能へ対応したことにより, 高速 MILS 環境は多くの CAE ツールとの連成が可能となった。

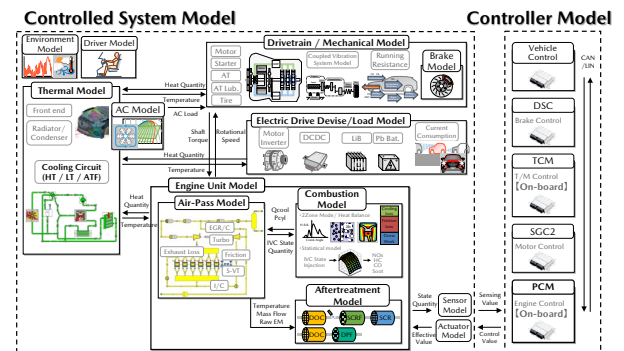


Fig. 8 Schematic of High Speed MILS

3. MBD 適用事例

3.1 走り, 燃費, エミッションを両立させる排気量検討

本項では, 新世代クリーンディーゼルエンジンの排気量選定における MBD 適用事例について紹介する。一般に過給ディーゼルエンジンにおいては, 燃費・エミッション (特に NOx) 性能と走り性能は背反する関係にあり, この関係をブレイクスルーする手段として新世代エンジンでは燃焼の機能強化と併せて大排気量化を採用している。この大排気量化について, 各性能目標を満たしうる最適値を開発初期に選定するために, 「つながる 1D モデル」による検討を行った。検討において, 燃焼の機能強化については Fig. 3 のモデル環境のうち, エンジンモデルに別報⁽⁵⁾ で紹介している熱効率の支配因子の機能配分を前提として反映した。また, 過渡的なガス流動変化の影響度が高く比較的短いモードが検討対象の走り性能には, モデル粒度が細かい GT-POWER を, 長いモード計算を対象とする燃費・エミッションの検討では計算コストを下げるために各特性をマップ化したモデルを用いた。このように, 検討に応じて適切なモデルを使用し効率的に検討を進める工夫をした。

燃費・エミッション検討において前提としたエンジン

ユニットのNOx 排出量，燃費率特性を Fig. 9, 10 に示す。NOx 排出特性は，排気量増加した分だけ EGR 導入が可能となるため，Fig. 9 のように大排気量ほど高負荷まで NOx を低くすることが可能である。一方で燃費率特性は，Fig. 10 左図のように，軽負荷側では排気量が小さいほど燃費率が良くなり，高負荷側では逆転し大排気量ほど燃費率が良くなる。これは Fig. 10 右図のように従来エンジンが中高負荷でフラットな燃費率特性であるのに対して，新世代エンジン燃費率目標は空間制御予混合燃焼 DCPCI (Distribution Control partially Premixed Compression Ignition) を BMEP 1200kPa 程度まで適用する前提で，中負荷に極小がある燃費率特性としていることによるものである⁽⁵⁾。これらの特性を用いた燃費・エミッションの検討結果例として Fig. 11 に RDE (Real Drive Emission) 走行における車両 NOx 排出量 (上段) と，WLTC 走行での車両燃費の既存エンジンに対する改善率 (下段) を示す。横軸は WLTC 走行時の必要走行エネルギーで，値が大きいほど重量や走行抵抗が大きいことを表し，新世代エンジンを搭載する Large 商品群で想定される幅を振って検討している。RDE 走行における NOx 排出量は，ユニットの NOx 排出特性が排気量に対して上述の Fig. 9 のような特性であるため，高負荷使用頻度が高くなる重い車両では大排気量ほど NOx を低減でき，排気量を 3.3L 以上にすることで重い車両まで含めて目標値を達成できることが分かる。一方で，WLTC 燃費は上述の Fig. 10 のユニット燃費率特性によって，軽負荷使用頻度が高い軽い車両側では排気量増加によって燃費が悪化するが，高負荷使用頻度が増加する重い車両側では排気量増加によって燃費が同等もしくは改善効果が

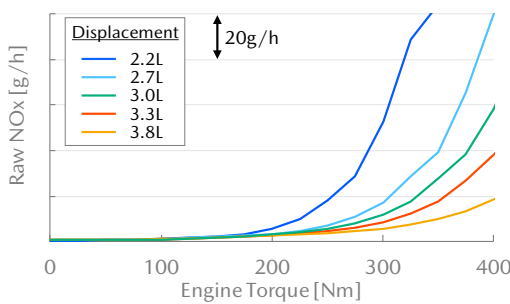


Fig. 9 NOx Characteristic with Different Displacement

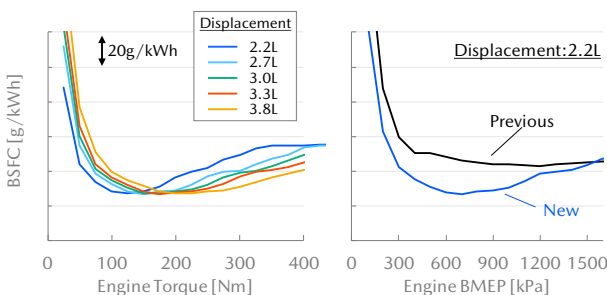


Fig. 10 BSFC Characteristic with Different Displacement

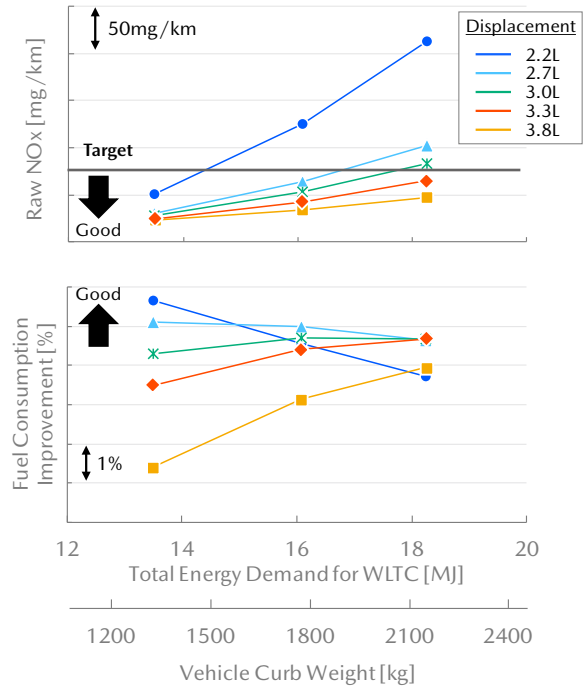


Fig. 11 Engine Displacement Study Results for NOx & Fuel Consumption

得られることが分かる。以上のように，Large 商品群で想定される車両走行エネルギーの幅をカバー可能な RDE の NOx 排出量と，WLTC の燃費のバランスから排気量 3.3L が最適値となる。

次に，走り性能の検討例として Fig. 12 に排気量 3.3L での 30km/h 定常走行からのパーシャル加速の予測結果を示す。排気量選定に併せて，目標加速度達成のために低速域の応答性を重視した仕様のシングル可変ジオメトリ (VG) ターボチャージャーを Fig. 4 で示した過給モデルを用いて選定している。排気量増加とシングル VG ターボチャージャーによって確保した空気を使うことで，NOx 低減のための十分な EGR を導入しながら，従来の 2.2L よりも大幅な加速度の向上が可能となっている。また，モーターとの協調により，目標とする走り性能の実現が可能であることが確認できた。以上のような検討を市場において重要であり，かつエンジンユニットにおいて各性能の両立が難しいいくつかのシーンで実施し，選定したシングル VG ターボチャージャーとの組み合わせによって，3.3L が各性能目標を満たすに必要な十分な排気量であることを確認した。

3.2 大排気量コンセプトのロバスト性検証

エミッション性能は環境や走り方に応じて EGR バルブや過給器などを制御して燃焼に適切な吸気ガス状態を作り出すとともに，緻密な噴射コントロールによって実現される。これに関わるハードデバイスには製造バラツキや使用による劣化が存在し，一方で先述のように市場においては多様な環境，走り方が存在する。これらの要素

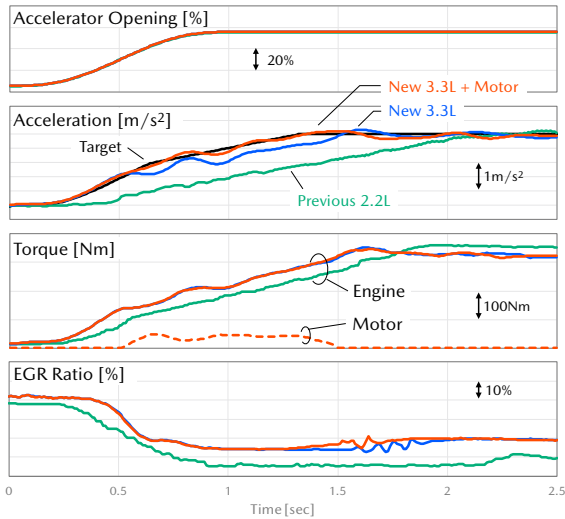


Fig. 12 Acceleration Performance Study Results

は当然のごとくエミッション性能に影響するが、どのような状況下であってもクリーンなエミッション性能が担保できていることが要求される。そこで、Fig. 8 に示した高速 MILS 環境を用いてエミッション性能のロバスト性検証を実施した。結果を Fig. 13 に示す。図下段に示すように、EGR バルブや過給器、インジェクターなどの製造バラツキの上下限での評価や、エミッションに対して最も厳しいと想定される環境、ドライバー操作での評価を実施している。このような評価は、バラツキによるハードの特性変化や、環境条件違いによる影響を正しくモデル上で表現することが肝要であるが、評価に用いた高速 MILS 環境は物理式ベースのエンジンモデルを採用することで、それを可能としている。評価結果として、図上段に示すように、あらゆるバラツキを加味しても、どのエミッション値も規制値以下となることが確認できた。

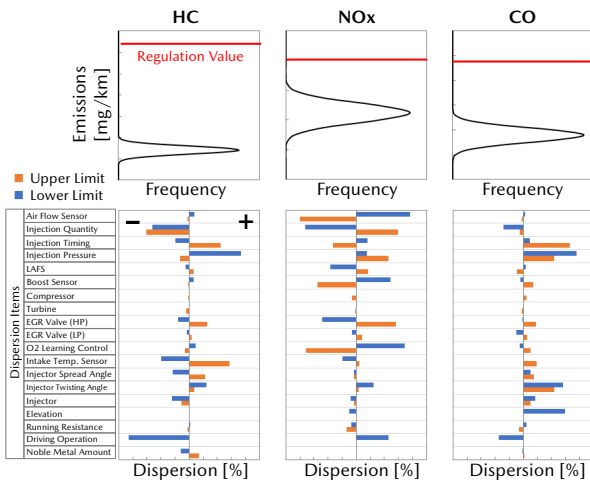


Fig. 13 Robust Study Results for Emissions

次に走りのロバスト性の検証事例について紹介する。マツダは「意のままの走り」を提供することに価値を置いているが、その実現のためにはあらゆるアクセル操作

に対して適切な加速度応答が求められる。このため、エンジンユニットはアクセルに応じたリニアなトルク応答を返す必要がある。この要求に対して、選定した排気量 3.3L+ 電駆システムの性能検証を Fig. 8 の高速 MILS 環境を用いて実施した。Fig. 14 にその結果の一例を示す。加速度とその微分値である躍度を走りの指標として整理している。アクセルの操作としては踏み込み量と速度をパラメーターとし、環境条件や製造ばらつきで最も悪影響を受ける条件も評価している。図のように、アクセル操作に対して、特異な点は認められず、アクセル操作量に対してリニアな応答が確認できる。

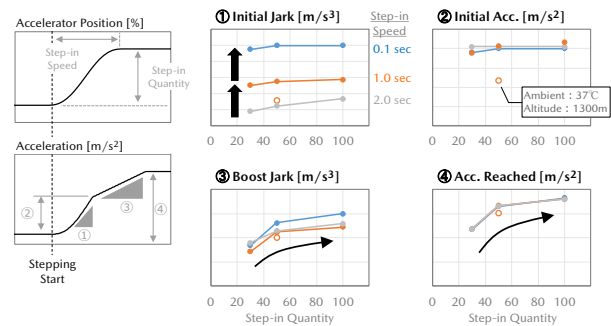


Fig. 14 Robust Study Results for Acceleration Performance

以上のような性能のロバスト性検証は、従来は全て実車を用いて行っていたが、上記のように 1D モデル環境を活用して実車ではポイントを絞った確認のみとすることで、試作車両台数と評価期間の短縮に貢献した。

3.3 ENG、電駆への LT サーマル機能の最適配分検討

ここでは WLTP における冷却システムに関連した機能開発事例を紹介する。前述のとおり新世代クリーンディーゼルエンジンの冷却システムに対してはエンジン燃焼や電駆部品の効率を最適化するための冷却水温度制御が求められており、制御デバイスとしてウォーターポンプ、CSV、グリルシャッターが存在する。ウォーターポンプ、CSV は要求された冷却水温度を実現するための冷却水流量、グリルシャッターはフロントエンドにおける必要熱交換を実現するための熱交換器通過風量を制御しているが、消費電力の増加や空気抵抗の悪化といった燃費悪化因子も持ち合わせあり、背反性能を考慮した協調的な制御が重要となる。そこでエンジン吸排気モデル、サーマルモデル、に加えてウォーターポンプ、CSV、グリルシャッターに関連する部分を抽出した制御モデルを連携させた「つながる 1D モデル」を活用し、エンジン燃焼や電駆部品から要求された低水温回路の冷却水温度を実現した上で、消費電力や空気抵抗悪化が最小となる制御デバイスの動かし方の机上検討を試みた。Fig. 15 に検討結果を示す。低水温回路の冷却水温度をエンジン燃焼や電駆部品の効率に加えて、エンジンから発生する凝

縮水も考慮し最適な温度を実現した上で、消費電力や空気抵抗悪化が最小化できていることが分かる。結果として0.55g/kmのCO₂改善を達成することができ、本検討で構築したウォーターポンプ、CSV、グリルシャッターの制御ロジックを実車制御に実装した。

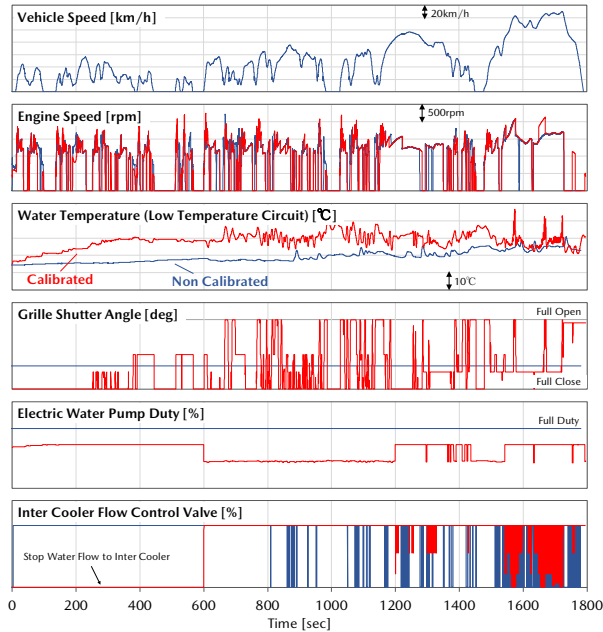


Fig. 15 LT Thermal Fuel Economy Development Study Results

3.4 高外気温度環境に対するロバスト性検証

高外気温度環境におけるシステム冷却系は重要な課題である。Fig. 7 に示した冷却回路によってエンジン、電動デバイス、トランスミッションの各々が信頼性限界温度に達しないよう設計が必要になる。加えて、市場での頻度は低いが高外気温度でかつ高負荷での使用条件に対してラジエーターなどのハードウェアだけで冷却性能を担保しようとすると巨大なラジエーターが必要となり、レイアウトや重量が問題になる。このため、通常環境条件においては必要十分な冷却性能をもつハードウェアを選定した上で、高外気温度特殊環境下での高負荷使用時には適切な保護制御を作動させることで、各ユニットの温度を制約内におさめることが肝要となる。しかしながら、特殊な環境での制御を実機で開発及び検証するためには膨大な工数がかかるだけでなく、オーバーヒートなどの危険を伴う。そこで Fig. 8 に示した高速 MILS 環境を用いた机上開発が重要となる。欧州を想定した仕様においてアクセル開度 100% 全開走行を 60 分行う場合の、高外気温度環境での保護制御の作動検証結果の例を Fig. 16 に示す。エンジン本体を冷却する HT 冷却水温、インタークーラーや電駆デバイスを冷却する LT 冷却水温、トランスミッションを冷却する ATF 温度それぞれが、限界温度に達しないように、グリルシャッター、

電動ファンの出力をまずは操作している。更に高温になった場合には HT 冷却水温、LT 冷却水温、及び ATF 温度それぞれが限界温度に達しないようにエンジントルクを徐々に制限することで、信頼性を担保しつつ最低限の最高速度低下となるように制御している。このような検討をさまざまな車速や勾配、トイーグ走行等で実施して、高外気温度特殊環境に対してロバストな冷却性保護制御を構築している。

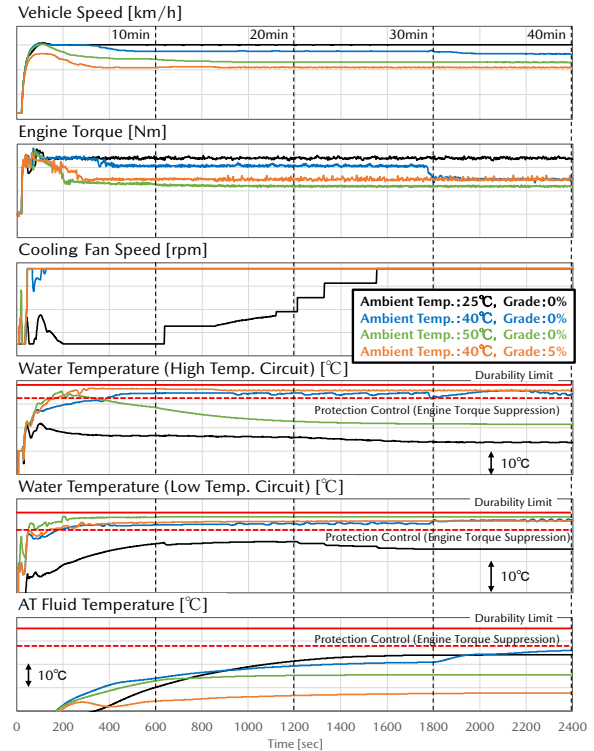


Fig. 16 Protection Control during Accelerator Fully Open in High Air Temperature Environment

4. おわりに

SKYACTIV-D シリーズの開発においては走り、燃費、エミッション各性能の背反とバランスを考慮しながら全ての性能を高めるため、1D モデルによる MBD に注力してきた。新世代 SKYACTIV-D 3.3 においてはそれを拡張して、開発初期の機能配分から開発後期のロバスト検証まで、一貫して 1D モデルを規範モデルとして用いて機能開発の理想を追求する MBD プロセスへと変革した。これによりエンジンの大排気量化と燃焼の理想追及に加え、48V マイルドハイブリッドとトルコンレス 8 速 AT を組み合わせた独創的な技術コンセプトをシステムとして具体化し、アクセルにどこまでも追従する力強い加速による「走る喜び」と国内 WLTC モードで 21km/L を達成する「優れた環境性能」の実現につなげた。カーボンニュートラルに向けた移行期において、電動モーターと高効率な内燃機関の両立を搭載した車両が CO₂ 削減の有効かつ現実的な方法となる中で、その開発のためのあ

るべき MBD プロセスの形を築くことができた。今後は更なる適用拡大を進めていく。

参考文献

- (1) 藤川智士：マツダの目指すモデルベース開発，[マツダ技報](#)，No.31，pp.44-47 (2013)
- (2) 志茂ほか：乗用車用ディーゼルエンジンのモデルベース開発，第1回1DCAE・MBDシンポジウム講演論文集，No.214 (2019)
- (3) Y. Kato, et al.: Heat Balance Analysis Using Cylinder Pressure Obtained by Engine Experiments Considering the Spatial Heterogeneity of Diesel Combustion, SAE Technical Paper, No.2019-01-2228 (2019)
- (4) 白田ほか：SKYACTIVのMBD検証環境について，[マツダ技報](#)，No.31，pp.48-53 (2013)
- (5) 金ほか：第2世代SKYACTIV-Dの燃焼技術，[マツダ技報](#)，No.39，pp.14-20 (2022)

■著者■



宮崎 正浩



小林 謙太



角田 良枝



加藤 雄大



村井 亜樹



久禮 晋一



福田 大介



城 侑生



山口 能将



志茂 大輔

特集：MAZDA CX-60

08

e-SKYACTIV PHEV システムの開発

Development of e-Skyactiv PHEV System

久米 章友 ^{*1} Akitomo Kume	福岡 泰明 ^{*2} Yasuaki Fukuoka	幸野 徹也 ^{*3} Tetsuya Kono	楠 友邦 ^{*4} Tomokuni Kusunoki	後藤 剛志 ^{*5} Tsuyoshi Goto
岡崎 真行 ^{*6} Masayuki Okazaki	中上 信宏 ^{*7} Nobuhiro Nakagami	春貝地 慎太郎 ^{*8} Shintaro Harugaichi	横手 達徳 ^{*9} Tatsunori Yokote	宮本 圭一 ^{*10} Keiichi Miyamoto

要約

マツダは、「サステイナブル “Zoom-Zoom” 宣言 2030」でクルマの魅力である走る歓びによって、「地球」「社会」「人」それぞれの課題解決を目指すとして宣言した。今回、CX-60 に向けてマツダ初のプラグインハイブリッドシステム「e-SKYACTIV PHEV」を開発した。e-SKYACTIV PHEV が目指したのは、余裕を感じるパワフルで気持ちのよい走りと優れた環境性能、デイリーからウィークエンドユースに応える実用性、新しい保有体験を感じる利便性である。そこで、2.5L ガソリンエンジン+8 速 AT の間に新開発のモーターを挟みこむことで大出力/トルクを実現かつ、8 速ギヤによる滑らかな加速を実現した。また、高容量の高電圧リチウムイオンバッテリーをスペース制約のある FR の車に効率搭載して室内空間を確保するとともに、これらを高精度で制御マネジメントすることで 75km の EV 航続距離を実現した。充電装置は、満充電時間を 4 時間以内の仕様とした。また、災害時に備えて急速充電機（CHAdemo 方式）を搭載して V2H に対応できるようにした（日本仕様）。

Abstract

Mazda announced that we will seek driving pleasure—a fundamental appeal of automobiles—to help resolve issues that the earth, society and people are facing, in “Sustainable Zoom-Zoom 2030,” Mazda’s long-term vision for technology development. Mazda’s first plug-in hybrid system “e-Skyactiv PHEV” has been introduced for CX-60. Its targets are powerful and comfortable driving, outstanding environmental performance, practicality for daily and weekend use and convenience allowing for new ownership experience. Mazda newly developed sandwich type electric motor is combined with the 2.5L gasoline engine + 8 speed AT. It achieved high power/torque and smooth acceleration with the 8th gears. High-capacity/high-voltage lithium-ion battery is mounted efficiently on a vehicle to secure roomy interior space. The e-Skyactiv PHEV achieves 75km EV range by managing these components with high accuracy. The full charging time of the charging device is 4 hours maximum. Quick-Charging (CHAdemo) is adopted to support V2H in case of a disaster (Japan spec).

Key words : Plug-in hybrid, Electric motor, Lithium-ion battery, Charger, CHAdemo, V2H, High power output, EV range, Full charging time

1. はじめに

マツダは、電動化技術を「ビルディングブロック戦略」に基づいて開発している。これは、各国・地域のエネル

ギー資源/発電設備/インフラ/法規を考慮して最適な電動化技術を組み合わせることで効率的・効果的に CO₂ 排出を削減する戦略である。e-SKYACTIV PHEV では、挟み込みタイプのモーターを新規開発し、これまでの電動

*1,4 PT 制御システム開発部
PT Control System Development Dept.

*5~7 ドライブトレイン開発部
Drivetrain Development Dept.

*2,3 走行・環境性能開発部
Driveability & Environmental Performance
Development Dept.

*8~10 電駆・PT 制御部品開発部
Electric Drive & PT Control Parts Development
Dept.

化技術と組み合わせて導入することで高性能なシステムを効率的に開発した。e-SKYACTIV PHEV で目指した主な目標は以下である。

- ・ 2.5L ガソリンエンジン+8 速 AT にモーターを組み合わせた滑らかかつ力強い加速性能
- ・ デイリーユースに対応する EV 航続距離
- ・ 実用性のある充電時間性能
- ・ V2H/V2L への対応
- ・ CX-60 の室内／荷室空間の確保

次章より、e-SKYACTIV PHEV で開発した主要技術の詳細を紹介する。

2. システムの特徴

2.1 システム構成

一般的にプラグインハイブリッドシステムの方式は、パラレル、シリーズ、シリーズ・パラレルの3つの方式が主流である。e-SKYACTIV PHEV は、内燃機関+モーターでの長距離巡航や加速のつながりと最高速度に優位性があるパラレル方式を採用した。Fig. 1 に e-SKYACTIV PHEV システムの構成を示す。2.5L ガソリンエンジンと新開発の 8 速 AT の間に新開発のモーターを搭載した。モーターのローター内側には、エンジンとモーター切り離し用の湿式多板クラッチを搭載し、EV 走行と減速回生時はエンジンを切り離すことで、EV 航続距離を高めている (Fig. 2)。高電圧リチウムイオンバッテリーは、FR の構造 (車体中央にプロペラシャフトが通る) に合わせて後席床下に左右 2 分割搭載することで 17.8kWh の容量を確保した。2.5L ガソリンエンジンとモーターを合わせたシステム最大出力は 241kW、最大トルクは 500Nm を実現した。EV 航続距離は、75km を実現した。充発電装置は 2 相 7.2kW の AC 充電+CHAdemo (日本仕様のみ) を後部に配置し、V2L/V2H に対応している。

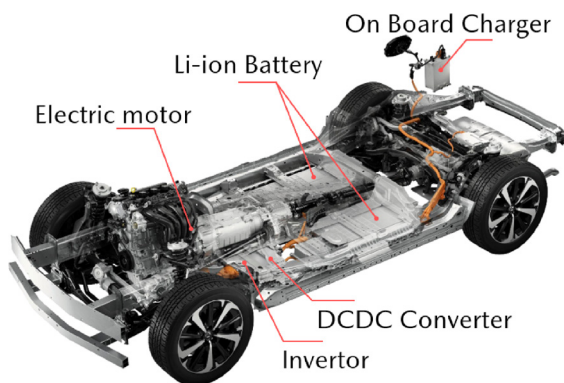


Fig. 1 Location of Main Components

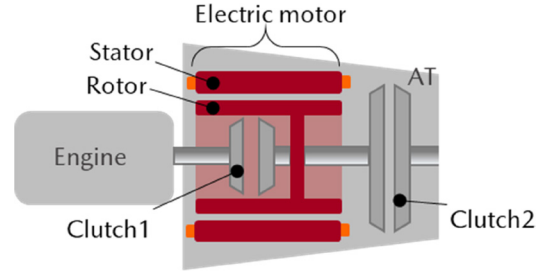


Fig. 2 Location of Engine Disconnecting Clutch

2.2 システム動作

(1) 内燃機関とモーターの動作

e-SKYACTIV PHEV の基本動作として、走り始めはガソリンエンジンを切り離して外部充電で蓄えたバッテリーのエネルギーでモーターによる EV 走行を行い、バッテリーのエネルギーがなくなった後はガソリンエンジンを始動して HEV 走行を行う。また、EV 走行中でもドライバーの要求加速度が大きければガソリンエンジンを始動し、ガソリンエンジンとモーターの出力を合わせて加速を行う (Fig. 3)。

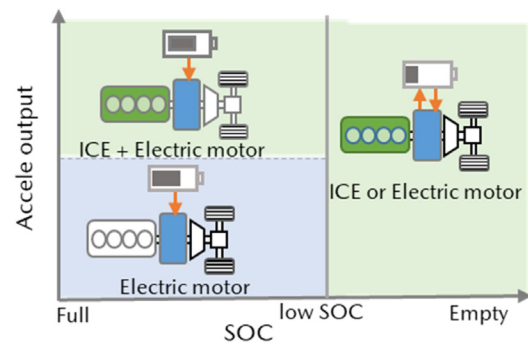


Fig. 3 Action of ICE and Electric Motor

(2) EV 走行からのエンジン始動

EV 走行からガソリンエンジンを使った走行に切り替える際のエンジン始動は、i-stop で開発したスターター始動とモーターでのクラッチ始動の 2 つの方式を導入した。スターター始動システムは、12V 鉛蓄電池からスターターに電力供給を行う。始動中の電装品の 12V 電源電圧保証は、サブバッテリーとスターター切離しリレーで行う (Fig. 4)。スターター始動の実施は、EV 走行中に最大出力での走行へ切替える要求が入った場合や高電圧リチウムイオンバッテリーの充電量低下時に行う。これにより、高電圧リチウムイオンバッテリーのエネルギーを始動用に保持しておく必要がないため、EV 走行時の航続距離及び最大出力性能を高めることができた。クラッチ始動システムは、Fig. 4 に示すクラッチ 1 でモータートルクをエンジンに伝達して始動する。また、クラッチ 2 を滑らせることで始動中のトルク変動が車両へ伝達するのを防いでいる。クラッチ始動は、主に HEV 走行や低出力 EV 走行から最大出力切り替え時に行う。作動頻度はこち

らがメインとなるよう設計しており、スターター始動システムの負担を抑えている。

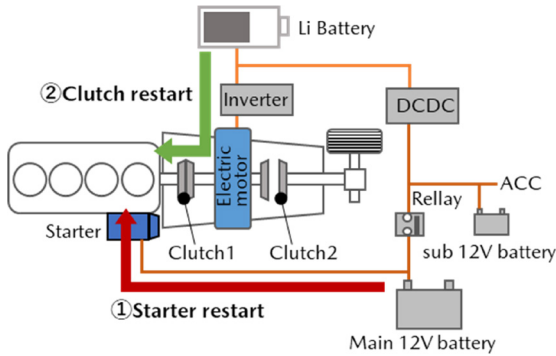


Fig. 4 Two Restart System

2.3 モーター

CX-60 のモーター設計では、M Hybrid Boost (直 6 内燃機関+8 速 AT に搭載した 48V マイルドハイブリッドシステム) と e-SKYACTIV PHEV に適した薄型のモーターが求められた。そこで、薄型モーターに適した集中巻タイプのモーターを開発し、新開発の 8 速 AT に搭載した (Fig. 5)。モーターの外径／幅を AT 本体と一体で設計することで、油路や冷却水路及び、ボルト固定点が最適化できたためモーター外周径の小型化が可能となり、ドライバーのペダルワークスペース確保に貢献した。インバーターは床下配置として、モーター下部にコネクタを配置することで線間距離を短縮して送電ロスを極力抑えている。これらと合わせ、最大出力 129kW/最大トルク 270Nm を達成した。

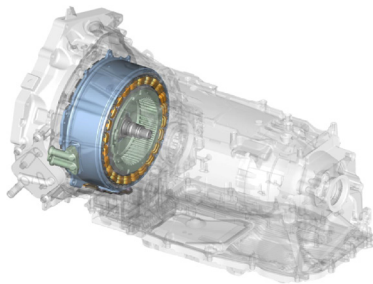


Fig. 5 Electric Motor

また、M Hybrid Boost と e-SKYACTIV PHEV 用のモーターを効率的に設計するためにスターター断面を共通化して外径を固定し、要求出力／トルクに応じて軸長を変動させる仕様とした (Table 1)。

Table 1 Adaptation of Electric Motor

	e-SKYACTIV PHEV	M Hybrid Boost
Max torque	270Nm	153Nm
Max Power	129kW	12kW
Stator diameter	266mm	266mm
Core active length	90mm	42.5mm
Cooling	Water jacket	Water jacket

2.4 高電圧リチウムイオンバッテリー

(1) 高電圧リチウムイオンバッテリー概要

CX-60 PHEV では、高容量リチウムイオンバッテリーセルを 96 個直列接続し、総容量 17.8kWh を有した高電圧バッテリーパックとして構成している。この高電圧バッテリーパックは、後席床下に搭載し、車両の低重心化と低慣性モーメント化により、マツダらしい人馬一体の運動性能に貢献している。

(2) 高電圧リチウムイオンバッテリー筐体

CX-60 PHEV の高電圧リチウムイオンバッテリーは、限られた車両空間に最大限のバッテリーを搭載するため、一般的に採用例の多い鋼板製ではなく、構造自由度が高いアルミダイキャスト製のバッテリー筐体を採用している。鋼板製のバッテリー筐体と比較して、固定構造部材の筐体活用や必要強度に応じて部分的に板厚を変更した一体成型を採用し、部品点数の 90% を削減した。

これまで、床下全面に搭載したバッテリーは衝突時の荷重影響を大きく受けるため、鋼板製に比べて低靱性であるアルミダイキャスト筐体は、不向きとされていた。そこで、モデルベースによるアルミダイキャストの破断予測手法 (Fig. 6) を確立し、一体成型による適切な板厚配分と材料選定を行うことで、アルミダイキャスト筐体の採用を実現した。採用したアルミダイキャスト材は、腐食成分が少ないため、床下被水による腐食耐性を大幅向上させている。また、バッテリーパックを車両に搭載する取付け部品に、エネルギー吸収機能をもつ押出アルミや、高張力鋼板を採用することで、衝突時にバッテリー筐体への入力を低減し、全体で最適化設計して、鋼板製バッテリー筐体に対して、質量 37kg の軽量化を実現した (Fig. 7)。

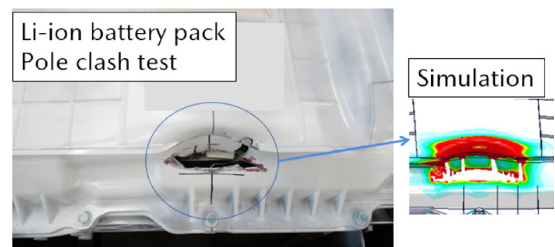


Fig. 6 Fracture Prediction for Aluminum Diecast

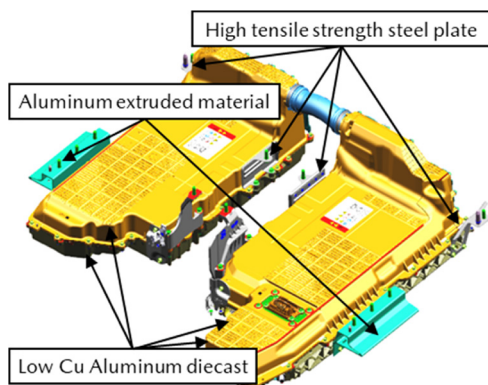


Fig. 7 Battery Pack

(3) バッテリークーリング

CX-60 PHEV では、バッテリーの温度を良好な入出力電力を発揮できる範囲に保つべく、室内空調システムと協調した、冷媒を用いるバッテリークーリングシステムを採用した。CX-60 のFR 駆動方式に合わせて、バッテリーパックは、プロペラシャフトで左右 2 分割する構造とした。左右のバッテリーパック間を接続するクーリングパイプは、排気管による高温エリアに配置されるため、バッテリークーリング用の冷媒が吸熱気化して左右バッテリーパック間で冷却能力に差が生まれないようにする必要がある。また、冷媒がコンプレッサーに液戻りしないよう熱交換器で完全に気化させることと、下流側のバッテリーモジュールまで均一に冷却することの両立が必要となる。

この課題を解決するために、CX-60 では、MX-30 で採用した電気式膨張弁に変えて、小型・シンプルな機械式の膨張弁を、左右のバッテリーパックそれぞれに搭載した。一方で機械式膨張弁は、電気式膨張弁と比較して、冷媒の流量を細かく制御できないため、バッテリーモジュールごとに 2 本の熱交換器を設定し、上流側と下流側の熱交換器を同じバッテリーモジュール下面にレイアウトするカウンターフロー方式を採用することで (Fig. 8), 冷却能力の向上及び均一化を実現した。

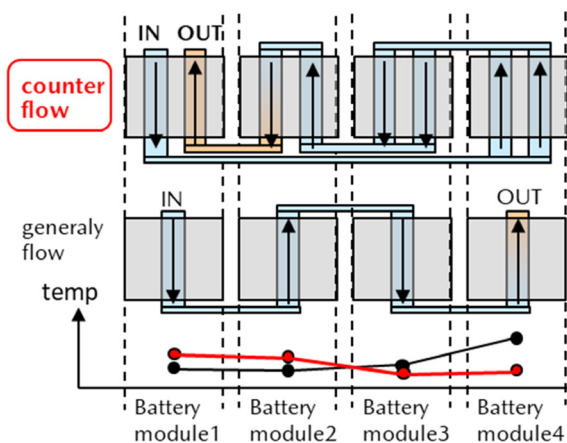


Fig. 8 Refrigerant Passage in Cooling Plate

2.5 充給電装置

(1) 充電

CX-60 PHEV では、充電時間の短縮及び小型軽量化を目的として新開発の充電器を採用した。PHEV 車両の普通充電に求められる市場のニーズを「欧州のデイリーユースにおける平均移動距離の 80% が EV 走行可能であること」と「電欠状態から就寝中または就業中に満充電になること」と定義した。上記より充電性能目標を「1 時間の充電で 20km 走行可能なこと」と「4 時間で満充電になること」と定め、2 相 7.2kW 充電器を採用した。CX-60 PHEV では 2 相対応したことにより、3 相 11kW 設備を使用した際の充電時間は、0%～満充電までを 2 時間 20 分、20～80% を 1 時間 30 分とした。また、充電器本体の小型化を行い、配置場所を従来 (MX-30) のトランク下からトランクのサイドトリム内に変更したことで荷室容量確保に貢献した。

(2) 給電

多様化するお客様のニーズに応えるため、CX-60 PHEV では 1500W の給電器をオプションで設定した。更に、災害の多い日本での緊急時の利便性を考慮し、CHAdeMO 方式の急速充電を搭載して V2H に対応させている。

3. e-SKYACTIV PHEV の特徴

3.1 ドライビングパフォーマンス

プレミアム車を操るドライバーの「大きな力を解き放ちたい」という期待に対し、同期が感じられるようにドライバーの操作に対するクルマのフィードバックの領域を拡大し、心の活性化を“昂る”レベルまで高めることを目指し以下の 2 点に注力した。

- (1) 大トルク／高出力
- (2) 緻密な駆動力制御

(1) 大トルク／高出力

2.5L ガソリンエンジンと最大出力 129kW / 最大トルク 270Nm のモーターの組み合わせで 3.3L/6 気筒ディーゼルエンジンを凌駕する駆動力を実現している。これにより、CX-60 のラインナップでトップレベルの性能を実現した (Fig. 9)。

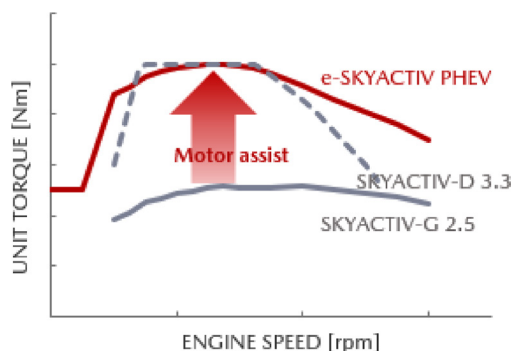


Fig. 9 UNIT TORQUE

(2) 緻密な駆動力制御

モーターの応答の良さとアクセルペダル操作精度の向上により緻密な駆動力コントロールを実現し、操作に対する車両挙動の一致性を高めている (Fig. 10)。

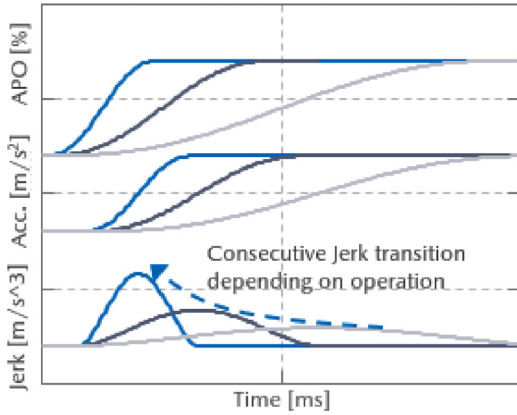


Fig. 10 Acceleration and Jerk

a. モーター応答性

PHEV では、モーターの応答性の良さを活かしてアクセル操作に対する加速度の立ち上がり応答時間をエンジンのみの場合の 150ms に対し 90ms まで短縮している。これにより緻密なコントロールの領域を拡大している (Fig. 11)。

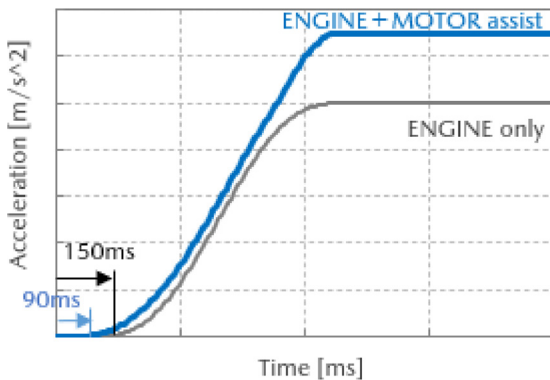


Fig. 11 Acceleration

b. アクセルペダル操作精度の向上

アクセルペダル操作精度の向上を実現するため、歩行運動に着目し、主動筋 (ふくらはぎの筋肉) による自然で滑らかな操作ができるペダルの踏力特性を目指した。CX-60 では踏み始めから主動筋のみによる操作を実現している (Fig. 12)。

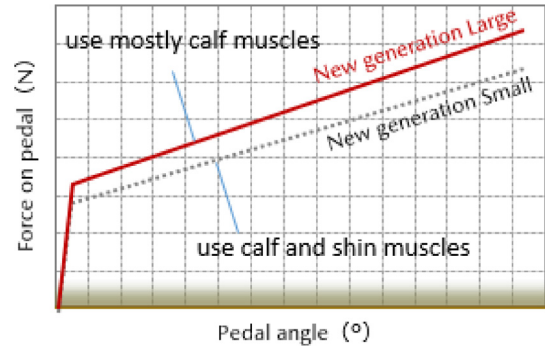


Fig. 12 Accelerator Pedal F-S Target

3.2 最適な走行モードの選択

CX-60 PHEV では、Mazda intelligent Drive Select (Mi-Drive) に NORMAL/ EV/ SPORT の走行モードを設定している。EV 走行と HEV 走行を両立したいお客様には NORMAL モード、日常での EV 走行を最大限活用されるお客様には EV モード、エンジンとモーターの動力性能を最大限楽しみたいお客様には SPORT モードを選択していただくことで、それぞれの楽しさを提供できるよう工夫した。

NORMAL モードでは、アクセル操作に応じてリニアにトルクがつながるように EV 走行と HEV 走行を切り替えて走行を行う。EV モードではバッテリーに十分電力がある際、アクセルを全開にしない限り EV 走行を続け、市街地や郊外などの一般的な走行シーンにおいて、お客様に電動走行を提供できる。これにより、平日の通勤や買い物等の近距離の使用において、電気自動車としての使用が可能となる。また、EV モード選択時には、モーターからタイヤまでの全体効率最適点を計算したシフトパターンを設定し電費の向上に貢献している。SPORT モードは自己主体感を高めることを目標に、ドライバーがアクセル操作で車を正確にコントロールする感覚を得るため、加減速の応答の速さや強さを高めている。また、NORMAL モードに対し、低速ギヤを使うことに加えて電動モーターアシスト量を増やすことで駆動力を高め、大トルクを思いどおりにコントロールするアクセル操作性を実現している (Fig. 13)。

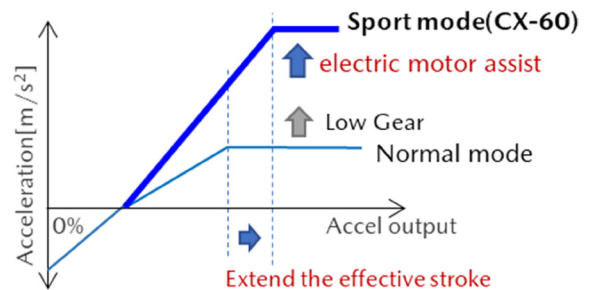


Fig. 13 Accelerator Pedal F-S Target

3.3 HEV 走行開始時の排気ガスのクリーン化

日常でのEV走行中にバッテリーの電力が減少し、HEV走行に切り替える際、エンジン始動から排ガスを浄化するための触媒が活性するまでの間、エンジンとモーターを協調させることで安定したクリーンな排ガス性能を実現した。新規開発要素としては、触媒暖機中のエンジン出力Up、走り/NVH（振動）との整合、燃焼切り替え（状態遷移）の対応である。

触媒暖機中のエンジン出力Upは吸入空気量が増え、排気ガスの絶対量も増えることから、規制成分である全炭化水素（THC）低減と背反してしまう。このブレイクスルーは従来の均質燃焼から成層燃焼に切り替えることで達成し、成層燃焼をベースから見直すことで、Fig. 14のようにエンジン出力として最大150NmまではTHCを従来比半減させることができた。

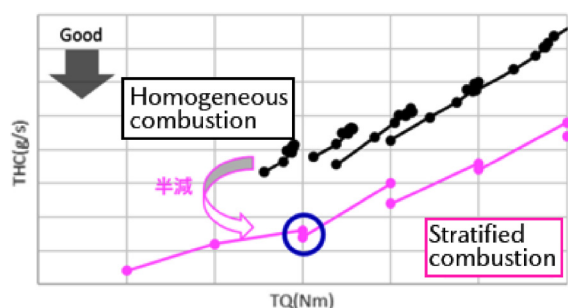


Fig. 14 Reduction of THC

更にTHCの排出量を低減した状態で安定させるために、エンジンは一定トルクをキープすることを基本とし、ドライバーが要求する出力を満足するためにモーターで過不足分を補い、協調させることで、排ガス性能と走りとNVH（振動）の各背反性能に対して、高い次元での成立解を見出した。

3.4 HEV 走行でのCO₂改善

CX-60は高出力モーターと大容量バッテリーを利用して、減速時には大きなエネルギーを蓄えることができるため、摩擦ブレーキと回生ブレーキを積極的に協調させることで回生率を向上させた。低速時のエンジンの燃費率が悪い領域では、バッテリーに蓄えたエネルギーでEV走行し、中高速時のエンジンの燃費率の良い領域では発電やモーターアシストを利用しエンジンがより効率の良い領域で動作するように制御した。これらの効果でHEV走行時のCO₂を改善した。

4. おわりに

e-SKYACTIV PHEVは、走る喜びと優れた環境性能において、CX-60のコンセプトであるドライビングエンターテインメントSUVにふさわしい性能を実現できた。マツダは2050年でのカーボンニュートラル化に向けて、ク

ルマのライフサイクルでのCO₂排出削減に取り組んでおり、今後も、マツダらしい電動化技術の進化に挑戦していく。

参考文献

- (1) 本橋ほか：サステイナブル“Zoom-Zoom”宣言2030, [マツダ技報, No.35, pp.3-8 \(2018\)](#)
- (2) 吉田ほか：新型デミオ向けバッテリーマネジメントシステムの紹介, [マツダ技報, No.29, pp.14-19 \(2011\)](#)

■著者■



久米 章友



福岡 泰明



幸野 徹也



楠 友邦



後藤 剛志



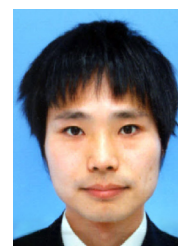
岡崎 真行



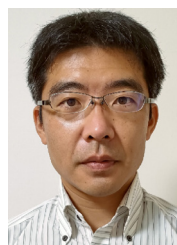
中上 信宏



春貝地 慎太郎



横手 達徳



宮本 圭一

特集：MAZDA CX-60

09

新型 8 速 自動変速機の紹介

Introduction of New 8 Speed Automatic Transmission

篠塚 浩^{*1}

Hiroshi Shinozuka

上田 健輔^{*2}

Kensuke Ueda

山本 真司^{*3}

Shinji Yamamoto

本瓦 成人^{*4}

Narihito Hongawara

朝倉 浩之^{*5}

Hiroyuki Asakura

要 約

現代のクルマに求められる高い安全性能と環境性能を兼ね備えながら、マツダブランドの醍醐味である走る喜びを体現したミッドサイズ SUV である CX-60 を発表した。この商品は新世代 Large 商品群のトップバッターであり、これからのマツダのブランド価値を 1 段高いステージにステップアップさせる重要な役割を担っている。優れた環境性能と人馬一体による走る喜びを両立させるべく、新型の縦置きオートマチックトランスミッション (AT) を開発した。

新型 AT の開発に当たり、断続・同期・伝達効率といったトランスミッション機能の劇的な向上を追求し、流体式トルクコンバーターの代わりにマニュアルトランスミッションのような機械式クラッチ機構を採用することで、ダイレクトな発進と高応答で滑らかな変速性能、そして抵抗低減による高効率化を目指した。併せてギヤ比設定と変速制御を最適に作り込むことで、人の感覚と一致したリズム感のある走りを実現するとともに、コンパクトな設計を行うことで理想的な運転姿勢を実現し、クルマとの究極の一体感を感じられるものとした。また、環境性能に対する幅広いニーズにお応えするために 48V マイルドハイブリッド及びプラグインハイブリッドの電駆システムを内蔵できる構造を採用した。

Abstract

Mazda announced the CX-60, a mid-size SUV that embodies the joy of driving, which is the real pleasure of the Mazda brand, while combining the high safety performance and environmental performance required of modern cars. This product is the top batter in the Large product lineup, and it plays an important role in taking Mazda's brand value management to the next level. As Mazda's unique approach, we have developed a new type of vertical automatic transmission (AT) in order to pursue a human-centered development philosophy and realize the joy of driving with "Jinba Ittai". In developing the new AT, we focused on dramatic improvements in transmission functions such as intermittent, synchronous, and transmission efficiency, and instead of using a fluid torque converter, we adopted a mechanical clutch mechanism like a manual transmission to create a direct start. We aimed for high response and smooth shifting performance, and high efficiency by reducing resistance. At the same time, by optimally incorporating gear ratio setting and shift control, driving with a sense of rhythm that matches human senses is realized, and by designing a compact design, an ideal driving posture is realized, and with the car. I made it possible to feel the ultimate sense of unity. In order to satisfy the environmental performance that is becoming more severe year by year, we have adopted a structure that can incorporate a 48V mild hybrid and plug-in hybrid electric drive system.

Key words : Power transmission, Drivetrain

*1~3 ドライブトレイン開発部
Drivetrain Development Dept.

*5 パワートレイン開発本部
Powertrain Development Dept.

*4 ドライブトレイン開発部
Drivetrain Development Dept.

(2022.7.31 時点)

1. はじめに

新世代ラージ商品群第一弾として発表したCX-60は、マツダらしい意のままに操れる走行性能と高い環境性能を両立させ、どんな道でも運転を楽しむことができるミッドサイズSUVとして開発された。その究極の人馬一体感を実現するために、新たに縦置きの8速ATを開発した (Fig. 1)。この新型8ATは、トルコンレスのクラッチ発進機構によるダイレクトな発進と、多段化による滑らかで応答の良い変速を実現するとともに、抵抗低減による高効率化により走りと環境性能を高い次元で両立した。

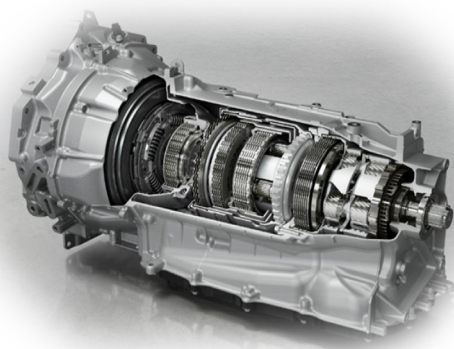


Fig. 1 Phantom View of 8AT

2. 開発のねらい

縦置き新型8ATは人間中心の設計思想を追求し、以下を開発のねらいとした。

2.1 理想の着座姿勢の実現

人馬一体の走りを支える理想的な着座姿勢を実現するためには、ペダルワークスペースの確保が不可欠である。縦置きAWDドライブトレインにおいては、前輪に駆動力を伝達するプロペラシャフトの配置が、センタートンネルの車室内への張り出し、及び、ペダルワークスペースに影響を与える。従い、プロペラシャフトに隣接するATの小径化が課題となる。課題解決の施策として、① ATユニット内部構造の最適化でケーシング側に窪みを設け、② 2軸小径のトランスファーギヤを採用しプロペラシャフトをケーシングの窪みにびたりと沿わせることでセンタートンネル部の小径化を図った。これらを開発初期から考慮に入れて車両全体での最適化設計を行い、理想のペダルワークスペースを実現した (Fig. 2)。

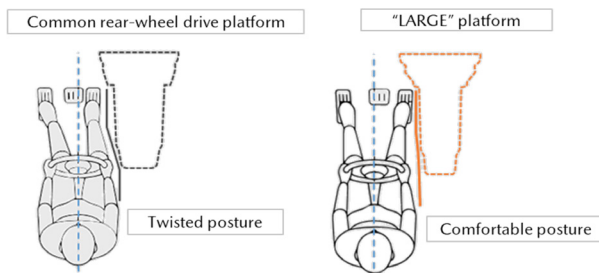


Fig. 2 Pedal Workspace Comparison

2.2 理想のAT機能の追求

ATの提供価値を定義し、従来のトルコン付きステップATの弱点を解消しつつ、熟練ドライバーによるマニュアル車操作のようなスムーズな発進/変速操作を緻密なクラッチ制御で作り込み理想のATを実現した (Fig. 3)。

Value provided by AT		Step AT with torque converter	Dual clutch transmission	Ideal AT
Practical fuel economy	Cold fuel economy		+	+
	Warm fuel economy	+	+	+
	Start responsiveness		+	+
Driving performance "Jinba Ittai"	Ease of starting	+	+	+
	Shift response	+	+	+
	Smooth shifting	+	+	++

Fig. 3 The Value Provided by AT and the Ideal AT Image

2.3 電動化対応

環境性能や走行性能に対する幅広いニーズにお応えするためには電動化技術の対応は不可欠である。新型8ATではモーターをエンジンとトランスミッションで挟み込む構造を採用し、48Vマイルドハイブリッド及びプラグインハイブリッドの2種類の電駆システムに適応した (Fig. 4)。エンジンとモーター/ジェネレーターを切り離して効果的にエネルギーを回生し、加速時や変速時に有効活用することで、環境性能だけでなく素早い加速応答や変速性能にも貢献している。

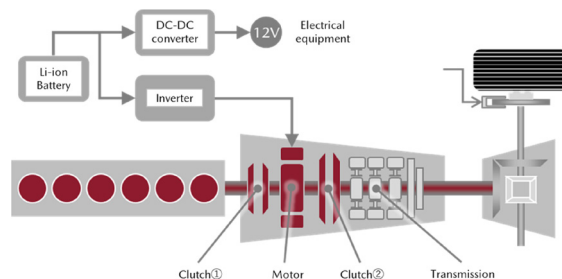


Fig. 4 Electric Transmission Layout of New AT

3. 技術コンセプト

新型8ATを開発するに当たり、トランスミッションの基本機能は駆動力を「素早く」「滑らかに」「無駄なく」路面に伝えることであると定義し、それらを軽量・コンパクトに実現することを目指した。この実現のために基

本機能に対して制御因子を明確にし、ATの各構成要素の技術進化のロードマップを具体化した (Fig. 5)。

Value delivered		Enhanced function	Adopted technology
Quickly	engage / disengage	Hydraulic characteristics	Hydraulic feedback control
Smoothly	Synchronize	Friction Inertial mass	Direct connection (Without torque converter)
		Ratio	Gear ratio optimization
Efficiently	transfer	Vibration damping	Resonance frequency control
		Fluid loss	Variable lubrication / reduction of oil amount
		Mechanical loss	Gear loss / sliding loss reduction
		Heat loss	Thermal management

Fig. 5 AT Basic Functions and Technical Concept

通常のATは発進装置（トルコン）と変速機構を直列に配置するが、新型ATではこれらの機能を変速機構に集約することで、エンジンと変速機構の間に電駆対応スペースを創出した。変速機構を大型化させないために、8速化に必要な最小要素数（プラネタリギヤ4組、湿式多板クラッチ5組）での構成としつつ、発進機能を1つのクラッチに集約的に配分できるギヤトレインとすることで、クラッチ発進に伴う制御・冷却システムの肥大も回避した (Fig. 6)。

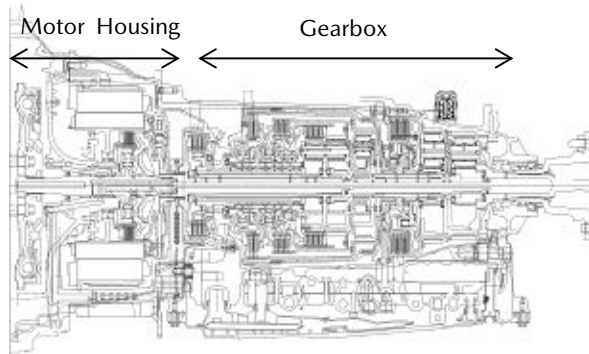


Fig. 6 Sectional View of New 8 Speed AT

4. クラッチ発進

究極の伝達効率とMTのようなダイレクト感を目指し、流体を介さないクラッチ発進方式を選択した。流体伝達はエンジン回転の吹きあがりや動力伝達の遅れのデメリットがある一方、ショック／振動を伝えにくく、発生した熱を効率よく放熱するというメリットもある。湿式多板クラッチをベースに以下のブレイクスルー技術を織り込むことで流体伝達のメリットを損なわずにMTのようなダイレクト感を実現した。

4.1 ショック・振動の低減技術

応答遅れなく滑らかな発進挙動が得られるよう、流体伝達並みの微小トルクを伝達できる構造を採用した。従来クラッチ構造では、微小トルク伝達をねらって押し付け油圧を下げると、クラッチが解放位置に戻りトルク伝達そのものができなくなるという課題があった。この課題解決の施策として、クラッチプレート間の遊びを詰めた状態で保持可能なばね構造の採用、及び油圧制御の緻密な作り込みにより、トルク抜けを生じることなく微小なトルク伝達を可能とした (Fig. 7)。

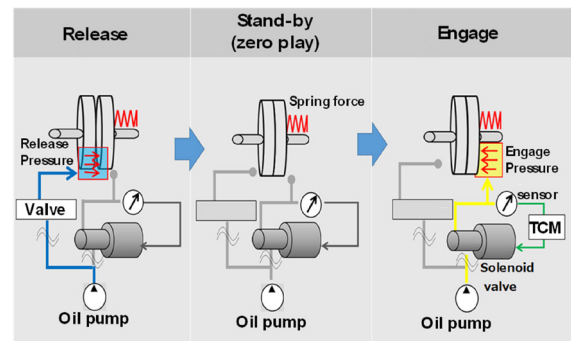


Fig. 7 Launch Clutch Concept

4.2 クラッチ冷却

登坂等の高負荷発進では半クラッチを継続しても摩擦材の耐久性を確保できるように、適切な潤滑冷却性能が求められる。油路の絞りの選択切り替え機構や電動オイルポンプによる潤滑ブースト機能を設け、必要時に必要量の潤滑ができるシステムを備えることでクラッチ冷却性能と燃費性能の両立を図った。

5. 油圧フィードバック制御

ショックを吸収するトルコンなしで優れた変速性能を実現するには、クラッチ油圧の精度・応答性を従来以上に高める必要があった。そこで、各クラッチに油圧センサーを設定し、油温や容積変化などの外乱影響をリアルタイムで油圧制御へ補正する機能をTCMに実装した。これにより、変速の進行状況ごとに変化する油圧要件を常時トレースできる緻密な制御が可能となった。

6. ギヤ比設定

トルコンレスに伴い、これまでトルコンのトルク増幅で実現していたローンチ性能も担保しつつ、最高段位での巡行性能やドライバー意図に応じた加速度の変化、リズムの心地よさといった変速による自己主体感を追求し、理想を実現するためのギヤ比設定を行った。以下、詳述する。

6.1 レシオレンジの拡大

駆動ユニットによらず求められる共通のパートレイ

ン性能目標から、レシオレンジの設定を行った。具体的には、1速の性能要件としてローンチ加速性能、登坂／トローイング性能を、8速に対しては余裕加速度、高速巡行燃費を考慮した。結果、従来 6AT のおよそ 1.4 倍のレシオレンジとすることで複数ある駆動ユニット全ての走行性能を実現することができた。

6.2 中間段位の要求性能と多段化

各段位に求められる走行性能と、隣り合うギヤ段の比率（ギヤステップ）によるつながりに加え、全体のギヤ比のつながりによる変速のリズムの要件を定義し、中間段位のギヤ比、必要なギヤ段数を明確にした。具体的には各々の変速での駆動力のつながりに加え、低段位の加速ギヤ段においては収束性を、中間ギヤ段以上の定常ギヤ段においてはドライバーの意図に応じた加速度を的確に実現できるギヤステップを明確にした。本要件と 6.1 項の要求レシオレンジを両立できるトルコンレス AT として前進 8 速、後退 1 速の 8AT を選定することで理想を実現した (Fig. 8)。

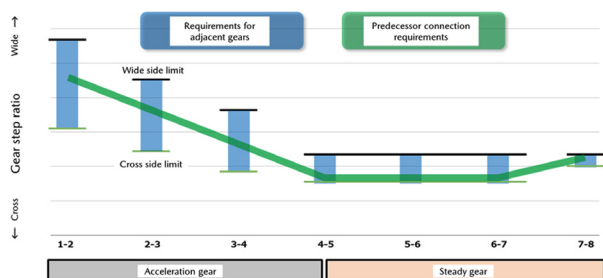


Fig. 8 Ideal Gear Ratio

7. 電駆対応

新型 8AT は環境性能に対応するために初期構想から電動化対応することを想定し、モーターを内蔵可能なトランスミッション構造を採用した。モーターをエンジンとトランスミッションで挟み込む構造とすることで、48V マイルドハイブリッドやプラグインハイブリッドに対応できる拡張性の高いシステムを採用しさまざまな環境ニーズに応えることを可能とした。

新世代ラージ商品群で電駆システム採用にあたり目指したのは、動力源がエンジンとモーターの 2 つがあることをドライバーに意識させることなく圧倒的な走りと燃費を実現することである。エンジンとモーターを切り離すクラッチを緻密にコントロールすることで、回生したエネルギーを加速時や変速時に有効活用し、環境性能だけでなく素早い加速応答や変速性能を実現した。

マイルドハイブリッド、プラグインハイブリッドのそれぞれのシステムに対して効率的で最適なソリューションを提供するために以下システムを採用した。

- ・48V マイルドハイブリッド：大排気量の 6 気筒エン

ジンとの組合せで、小排気量に比べて燃費性能の劣る極軽負荷領域を小型のモーターで効果的に補い、環境性能を高める (Fig. 9)。

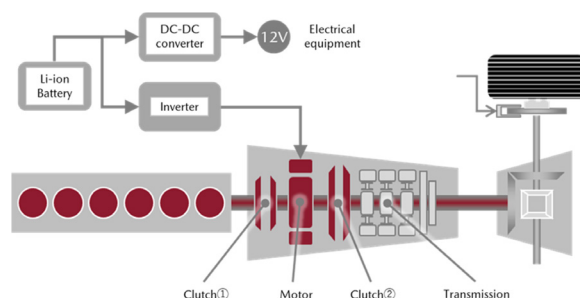


Fig. 9 48V Mild Hybrid Layout

- ・プラグインハイブリッド：中負荷まで高出力のモーターが担い、中高負荷燃費が良い SKYACTIV-G との組み合わせで環境性能と走りを高次元で両立させる (Fig. 10)。

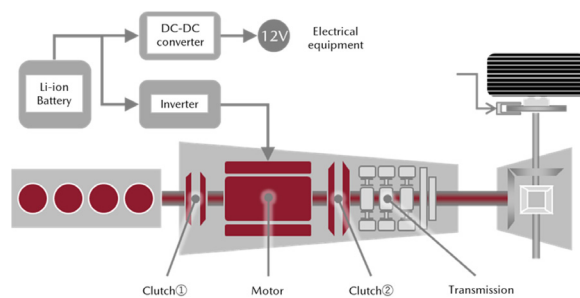


Fig. 10 Plugin Hybrid Layout

8. 損失低減

新型 8AT はスリップロスの少ない発進システムや走行中のクラッチ引きずりを抑制可能なスケルトンを採用したことで、基本構造レベルで損失を大幅低減している。オイルポンプは、高油圧が必要なクラッチ作動圧要件と大流量が必要な潤滑・変速要件をあらゆる走行状況で無駄なく満足できるように、機械式ポンプと電動ポンプに機能を最適配分し、無駄な吐出をさせない油圧供給システムとした。更に、オイルの低粘度化と潤滑システムへの変機構造追加によって、回転体の攪拌ロスを低減した。これらによって、従来ユニット比でトルクキャパシティを向上しつつ、約 22% の損失低減を実現した (Fig. 11)。

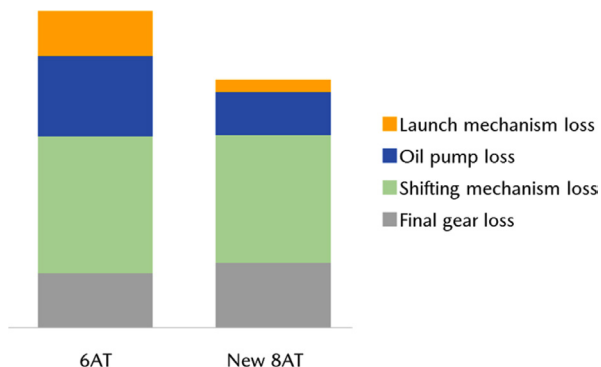


Fig. 11 Transmission Loss Torque Comparison @WLTC Mode

9. NVH

新型 8AT のトルコンレス構造の実現においては、流体伝達による振動減衰が見込めないため、特に低回転領域でのエンジンの回転変動がトランスミッション内部に伝わることで発生する駆動系ねじり振動性能の成立性が重要な課題であった。

駆動系ねじり振動モードをコントロールする主な因子としては、ねじり剛性と回転部品のイナーシャの 2 つがある。ねじり剛性が低いほど、あるいはイナーシャが大きいほど高い振動減衰効果が期待できる一方、大イナーシャは重量増大の弊害を招く。今回の新型 8AT では、従来、エンジン／トランスミッション間に配置しているねじりダンパーに加え、モーターとトランスミッション間にも小型の低剛性ねじりダンパーを配置した。これにより最小限の追加イナーシャで振動モードを最適化でき、トランスミッションの軽量化と NVH 性能の両立を実現した。

10. 開発・モノづくり進化

今回の新型 8AT は、さまざまなタイプのエンジンと電駆システムへの対応が求められている。全ての組合せに対して個別最適で開発をすると膨大な開発期間が必要になることから、システムとしての固定要素と変動要素を定め、基本構造を同体質化するコモンアーキテクチャー構想を立てて効率的な開発を実現した。具体的にはプラネタリギヤ及び油圧制御システムを固定要素として、全ての AT バリエーションに対して共通とした。他方、変動要素としては、エンジントルクによってダンパー容量及びクラッチ容量を 2 種類、電駆システムをモーターサイズ及びモーター有無で 3 種類、駆動システムとして 2WD/4WD の 2 種類を設定した。システム間の差分に着目しモデルベースでの機能検証を充実させることで、時間とコストのかかる実機検証を最小化した。

また、理想のペダルワークスペースを実現する縦置き 8AT とするために、大径長尺クラッチドラムの採用が必

要となった。大径部品を多用する構造を採用するとイナーシャ増加による走行性能課題や NVH 課題への対応が必要となる。今回、これらの課題を解決する手段として軽量なアルミ材を採用した。加えて、アルミプレス工法の採用により、省スペース、生産性向上を実現した (Fig. 12)。更に、異材 (鉄) 部品との塑性結合を選択することで、部品精度の向上を行いながら省スペースで 8AT スケルトンを実現した。

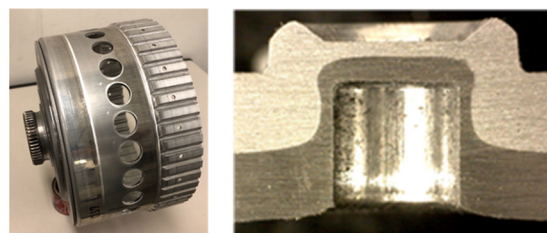


Fig. 12 Aluminum Press Drum/Dissimilar Material Joint

11. おわりに

今回の新型 8AT は、究極の人馬一体性能の提供により、心と体の活性化を通じた豊かなカーライフをお楽しみいただけることを目指し開発を行った。これまで培ってきたモデルベース開発の考え方、プロセスを更に進化／深化させ、多数の開発部門の連携と協力によって商品化を実現した。今後、ビルディングブロック構想に基づき、本技術と電動化技術の更なる進化に挑戦し、引き続き全てのお客様に優れた環境・安全性能と走行性能をお届けしていく。

■ 著 者 ■



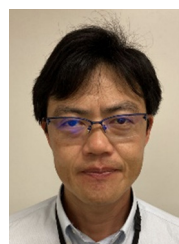
篠塚 浩



上田 健輔



山本 真司



本瓦 成人



朝倉 浩之

特集：MAZDA CX-60

10

CX-60 の AWD システム開発

Development of AWD System Technology for CX-60

吉田 琢^{*1} 今村 泰理^{*2} 梅津 大輔^{*3}
Taku Yoshida Yasumasa Imamura Daisuke Umetsu
日高 誠二^{*4} 嶋田 克利^{*5}
Seiji Hidaka Katsutoshi Shimada

要 約

CX-60 でマツダ初となる縦置きエンジンレイアウトの電子制御多板クラッチ式 AWD を採用した。高いトラクション性能と理想的なハンドリング特性を実現し、乗用車としてトップレベルの AWD を新開発した。

さまざまな路面で頼れる安心・安全の走破性に加え、ドライバーが高速・高 G の領域に至るまで意のままに操れる自然な車両挙動によって、より高いレベルの“走る喜び”を提供できた。

本稿では、それらを実現した AWD システムの技術紹介を行う。

Abstract

Mazda's first electronic controlled multi-plate clutch AWD for a longitudinal engine layout is adopted to the CX-60. This AWD realizes high traction and ideal handling performance, becoming one of the best passenger cars.

It provides safe and secure driving performance on any roads, increases “driving pleasure” thanks to the natural vehicle behavior that is maneuverable even in high speed and high-G range.

The article introduces the technical details of the AWD system.

Key words : Power transmission, All-wheel drive system, Drivetrain, Vehicle dynamics, Driving stability, Vibration, noise, and ride comfort, Full-vehicle simulation

1. はじめに

縦置きエンジン 4WD の歴史は古く、4 輪直結駆動のパートタイム式に始まり、前後トルク配分が常時固定配分となるセンターデフ式へと進化し、その後電子制御多板クラッチ式を採用する事例が増えるにつれて、前後トルク配分の最適化を模索する時代へと変化してきた。

CX-60 より採用した縦置きエンジンレイアウトの AWD システムは、後輪駆動ベースの駆動方式の特徴であるニュートラルな旋回性はそのままに、AWD ならではの安定性をバランスさせ、より高次元な人馬一体感を提供するフルタイム 4WD である。

雪上など低 μ 路での力強いトラクションによる安定した走りはもちろん、高速道路での直進安定性やワインディングにおける意のままのハンドリング性能について

も、これまでの前輪駆動ベースの i-ACTIV AWD を大きく凌駕するレベルに進化し、乗用車において世界トップクラスのトラクション性能を誇る AWD として、パワートレインの出力を余すことなく路面に伝達する。

また、ハイブリッドシステムにおいては、減速時に 4 輪のタイヤからより多くのエネルギー回収ができるよう、パワートレインやブレーキシステムと AWD の統合制御によって、さまざまな走行環境に対して 4 輪の駆動力配分を最適化することで、幅広い運転シーンにおいて、お客様に安心いただける走りの力強さと低燃費による高い経済性を提供する。加えて、4 気筒及び 6 気筒縦置きエンジンや床面バッテリー配置等への対応から、軽量・コンパクトかつ高い伝達効率を目指して開発した。

*1,2 電子基盤開発部
Electronic Platform Development Dept.

*4,5 ドライブトレイン開発部
Drivetrain Development Dept.

*3 操安性能開発部
Chassis Dynamics Development Dept.



Fig. 1 CX-60 AWD System

2. AWD システム

2.1 パッケージング

マツダが目指す「人馬一体」において、重要な項目の一つが「理想のドライビングポジションの提供」である。特に縦置きエンジンであるCX-60においては、AWDシステムを含む駆動系部品を小型化し、センタートンネルの車室内への張り出しを最小化することで、足元付近のスペースを最大化することがポイントであり、これを最重要項目として開発した (Fig. 2)。

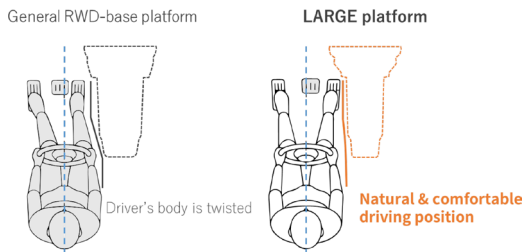


Fig. 2 CX-60 Driving Position

まず、主駆動軸から駆動力を分岐する「トランスファーユニット」(T/F) について、ねらいの軸間距離で最も軽量・高効率化が可能な2軸ギヤ式を選択した (Fig. 3)。

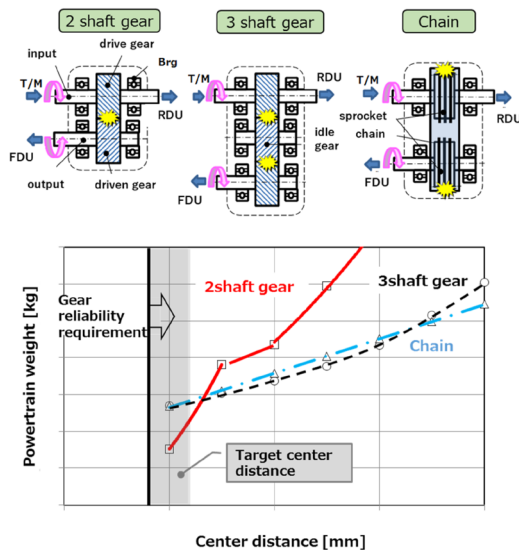


Fig. 3 Centerdistance vs Weight of Different Powertrains

また、「フロントデファレンシャルユニット」(FDU) については、ユニットベアリングを採用し軸受け部を小型化することで、ユニットの前後長及びエンジンからのオフセット量を最小化した (Fig. 4)。更に、T/FとFDUでそれぞれ減速比を設定して2段減速とすることで、プロペラシャフトの最高回転を下げ、軸径を最小化した。加えて、別述の新開発内製8速ATユニット内部の機能部品 (バルブボディー、電動オイルポンプなど) をユニット開発当初から、プロペラシャフトのレイアウトを考慮した構造とすることにより、軽量・コンパクトなレイアウトを実現した (Fig. 5, 6)。

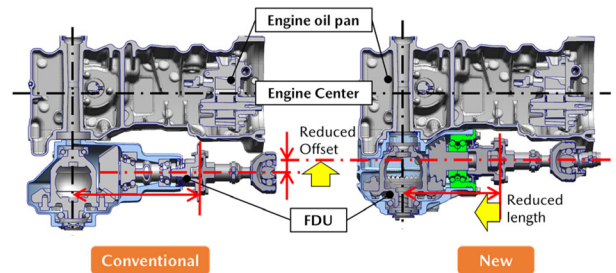


Fig. 4 Comparison of FDU Structure

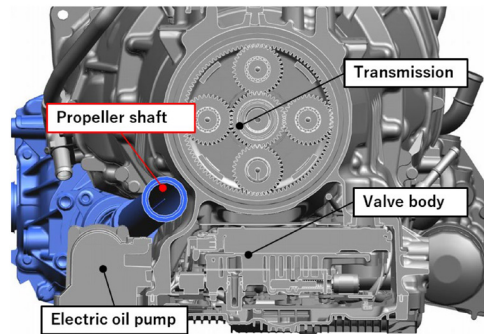


Fig. 5 Sectional View of Transmission and Propeller Shaft

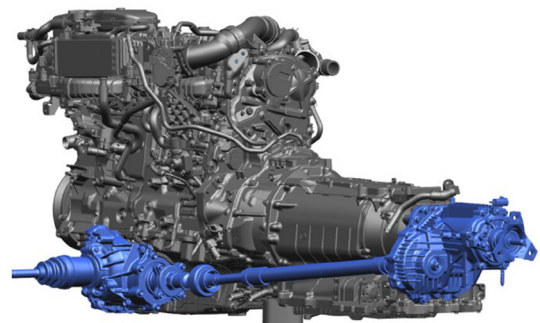


Fig. 6 CX-60 front Drivetrain

これらT/F、プロペラシャフト、FDU、ATは元より、車両構造を含めた一括開発により、縦置きエンジン車においてネックとなるセンタートンネルの車室内への張り出しを最小限に留め、「理想のドライビングポジション」の実現に貢献した。

2.2 高効率化

初代 CX-5 以降、マツダでは AWD 車の実用燃費向上を目的に、AWD ユニットの抵抗低減に継続的に取り組んでいる。

CX-60 では高トルク対応 AWD として、CX-5、CX-30 に織り込んできた回転抵抗低減技術に加え、新たに高トルク時のギヤ摩擦損失低減を目的とした、ハイポイドギヤの歯面平滑化技術を開発した。

(1) 歯面平滑化技術について

一般的にハイポイドギヤは、コンパウンド材を歯面に塗布しながらギヤ対を噛み合わせることで（ラップ工程）で、ねらいの相対歯形を実現している。その結果、歯面には噛み合い進行方向に筋目が付いており、歯面の油膜形成が阻害され、高トルク時のギヤの摩擦損失が増大する。本技術は、ラップ工程で発生する筋目を除去し、歯面をディンプル化（多数の小さなくぼみを形成）することで、油膜形成性を向上させ、高トルク時のギヤの摩擦損失低減を狙ったものである（Fig. 7）。

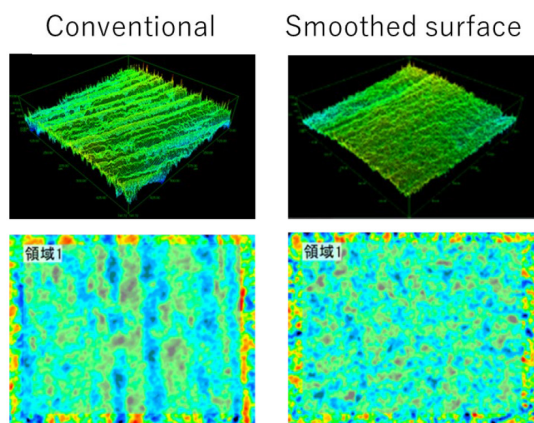


Fig. 7 Comparison of Tooth Surface

(2) 歯面平滑化技術による損失低減効果について

歯面平滑化技術によって、高トルク時のデフユニットのギヤの摩擦損失を約 35% 低減し、車両燃費及び CO₂ 排出量低減に貢献した（Fig. 8）。

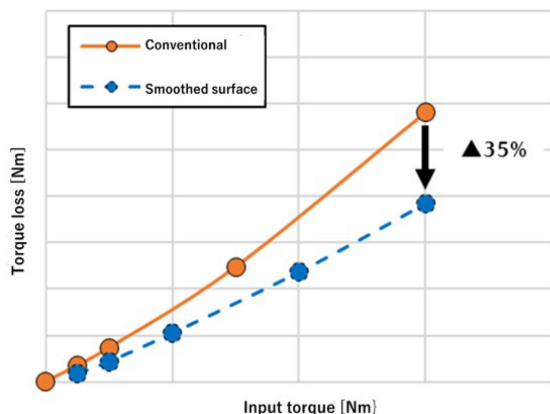


Fig. 8 Resistance Reduction Effect

3. AWD システムの機能

3.1 より高次元な人馬一体を目指して

CX-60 では、後輪駆動ベースの駆動方式がもつハンドリングの良さをそのままに、電子制御多板クラッチ式 AWD の採用によって安定走行領域を広げることでより高次元な人馬一体感を提供することを目指し、以下のポイントに注力した（Fig. 9）。

- ① AWD ならではの安定性
（低 μ 路や高速直進安定性の領域拡張）
- ② ニュートラルステア特性を維持できる領域の拡大
（高速・高 G の安心性能の拡張）
- ③ 雪上やオフロードでの高い走破性
（走行フィールド拡張）
- ④ 2WD に迫る実用燃費
（行動範囲の拡張）



Fig. 9 Extended Image

加えて、従来 RWD と 4WD が旋回性と安定性のトレードオフとなるという常識を AWD のトルク配分の最適化によって覆し、旋回性と安定性の両立をブレイクスルーする（Fig. 10）ことでダイナミクス全体を進化させた。乗用車において世界トップクラスのトラクション性能を誇る AWD として、パワートレインの出力を余すことなく路面に伝達するシステムを開発し、従来の前輪駆動ベースの i-ACTIV AWD を大きく凌駕するレベルに進化させた。

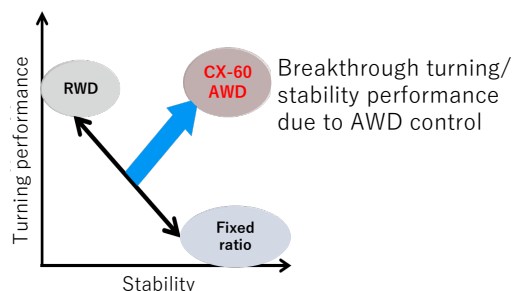


Fig. 10 Concept of AWD

3.2 後輪駆動ベース AWD 技術コンセプト

縦置きエンジンレイアウトの後輪駆動ベース AWD の特徴として、リヤトルク配分するほど旋回ポテンシャルが上がる前輪駆動ベースの AWD と違い、フロントトルク

ク配分するほど安定性は上がるがアンダーステアが発生し旋回性は下がるため配分比を決めにくいことがあげられる。また、クラッチを介してトルクを伝達する電子制御多板クラッチ式のトルク配分は、構造上出力側が入力側より遅い回転数である必要があるため、旋回状態を含めてフロント軸側を遅く回す必要がある。クラッチの引き摺りロスなどの燃費影響を最小化しながら理想の車両挙動と安定性を実現するために、以下2点に注力した。

- ① 前後ギヤ比差による AWD トルク伝達の最大化
- ② 前後トルク配分の後輪駆動ベースへの最適化

3.3 前後ギヤ比差による AWD トルク伝達の最大化

フロントデフ/トランスファのギヤ比の組み合わせにより、前後駆動系に微小な差回転を発生するギヤ比を設定した (Fig. 11)。これにより、常に前後差回転を発生させることで、フロントタイヤへすばやく・正確にねらいのトルクを伝達することが可能となり、必要最小限のトルク配分で車両安定性の向上を実現した。

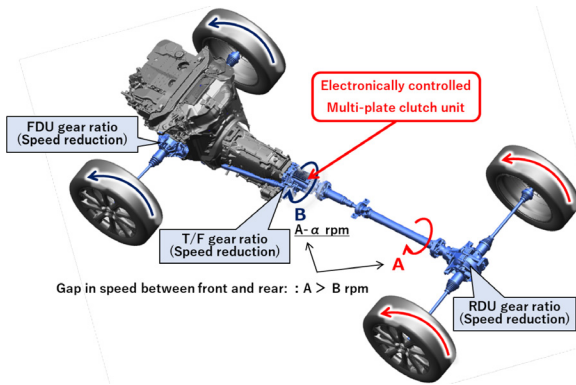


Fig. 11 Gap in Rotation between Front and Rear

3.4 前後トルク配分の後輪駆動ベースへの最適化

後輪駆動らしい旋回性と AWD らしい安定性を燃費への影響を最小化しながら実現するために、前述した前後ギヤ比差設定を前提として、制駆動力及びタイヤ荷重状態に応じてトルク配分を最適化した。タイヤ摩擦円内での走行においては、加減速に応じてトルク配分を緻密にコントロールすることで AWD としての安定性を確保しながら、旋回時は前輪から後輪へトルク配分を変化させることでピッチ姿勢をコントロールし後輪駆動ベースの素直な操縦性を実現した。また、高速・高Gや低μ路など旋回時のタイヤ摩擦円を超えるようなシーンにおいては、従来のタイヤ前後スリップ検知によるスリップ制御に加え、オーバーステア・アンダーステアを検知して駆動配分をコントロールすることで車両挙動を安定化した (Fig. 12)。更に回生ブレーキ時には、回生協調ブレーキシステムと連携しフロントへトルク配分する制御によって車両安定性を確保するとともに、より多くのエネルギー回収を可能にした。

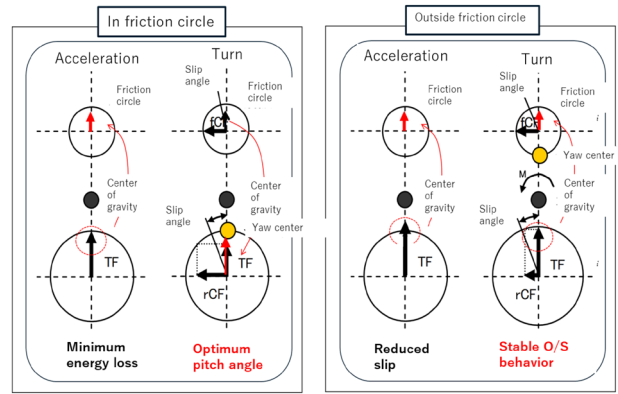


Fig. 12 AWD Torque Ratio

前述のトルク配分を実現する制御システムを Fig. 13 に示す。AWD 制御ロジックをパワートレインコントロールモジュール (PCM) 内に配置することで、エンジン・モーターが発生する駆動トルク情報を素早く検知し、目標とする前後駆動トルク配分比を演算、AWD の多板クラッチユニットに対してトルク指示を行う。また、後述する Mi-Drive やキネマティック・ポスチャー・コントロール (KPC) とも連携し、PCM 内で統合的に車両運動目標を決定して各ユニットへ指示することで、理想的な車両挙動と安定性を実現した。

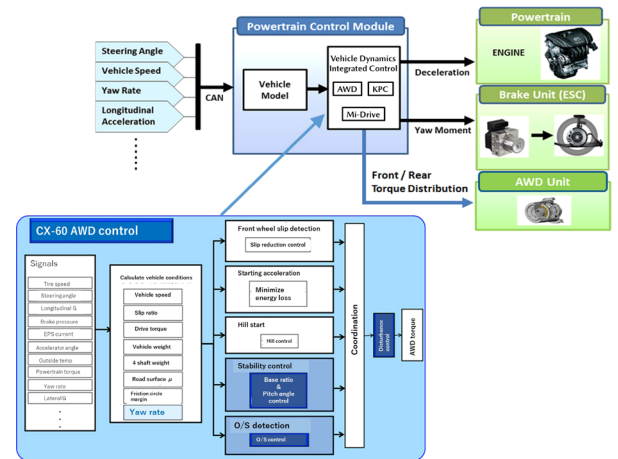


Fig. 13 AWD Control System

3.5 Mazda intelligent Drive Select (Mi-Drive)

CX-60 から採用する進化した Mi-Drive では、走行シーンに応じて「NORMAL」「SPORT」「OFF-ROAD」「TOWING」に「EV」を加えた5つのモードを設定した。ベースとなる「NORMAL」に対して、各走行モードそれぞれの特徴に合わせて AWD のトルク配分も最適化することで、走行条件が大きく異なるそれぞれのシーンで「人馬一体の走り」を実現した。

(1) SPORT

クルマの持てるダイナミクス性能のポテンシャルを最大限に引き出し、パワートレインの応答性を高めてより

積極的な走りをサポート。合わせてAWDの締結力を高めて操舵安定性を高めることで力強い走りを実現した。

(2) OFF-ROAD

未舗装路や深雪などの悪路を走行する際、AWDやトラクションコントロールシステム(TCS)をはじめとした走行システムをトラクション重視の特性に変更することで、より高い走破性を実現した。

(3) TOWING

トレーラーの牽引やバイクキャリア等の搭載時に、パワートレインの出力特性を重量増加状態に最適化することと合わせて、トレーラー牽引状態にAWDを最適化することで直進安定性を向上した。

4. CX-60のAWD性能

前述したAWDシステムにより、雪上など低μ路での力強いトラクションによる安定した走りはもちろん、高速走行時の直進安定性やワインディングにおける意のままのハンドリング性能を実現した。

4.1 低μ路 発進加速性能

低μ路での発進加速時の時系列データをFig. 14に示す。発進加速直後から遅れなく前輪側へトルク配分し、パワートレインの出力を余すことなく路面に伝えることでねらいの車両加速度を実現した。

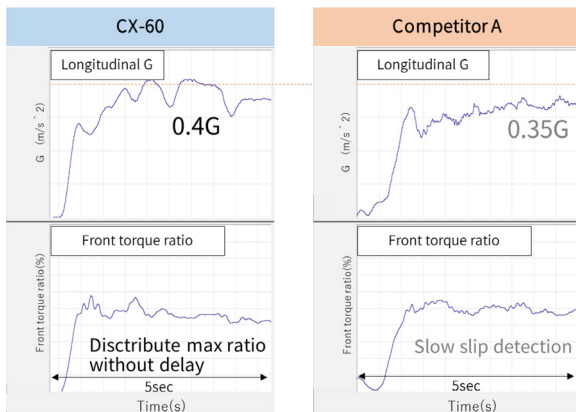


Fig. 14 Launch Acceleration on Snow Road



Fig. 15 Launch Acceleration on Snow Road

4.2 低μ路 旋回安定性

低μ路での旋回時の舵角とヨーレートの関係を表したデータをFig. 16に示す。CX-60は舵角とヨーレートの関係がリニアになっており、低μ路においてもニュートラルなステア特性を維持している。

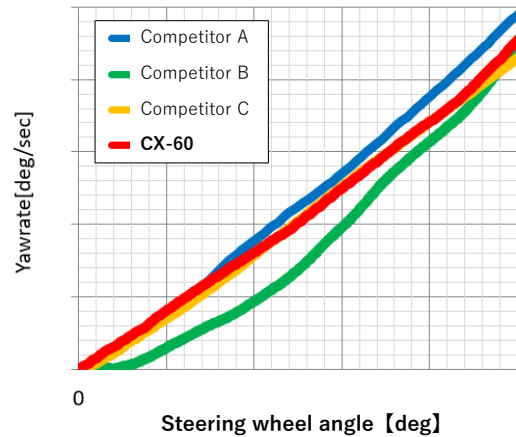


Fig. 16 Steering Characteristic on Snow

また、旋回加速時の時系列データをFig. 17に示す。点線のアクセル踏み込みタイミングの直後、競合車は強いアンダーステア傾向を示す一方、CX-60は後輪駆動らしく旋回方向に向きを変えながらしっかり加速しており、雪上においてもドライバーの意のままの挙動コントロール性を提供している。

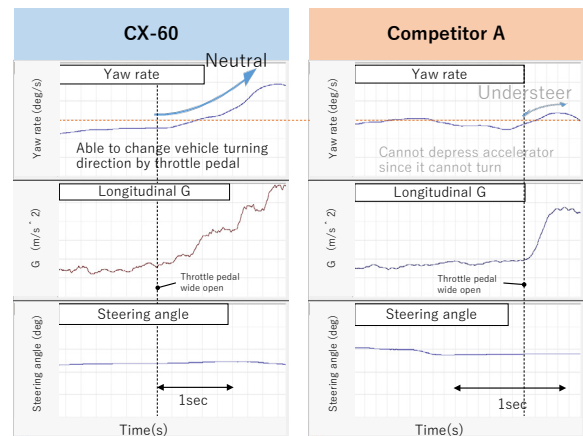


Fig. 17 Yaw Motion Controllability by Throttle Pedal



Fig. 18 Steady State Cornering with Wide Open Throttle on Snow

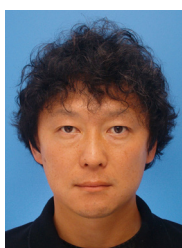
5. おわりに

マツダの乗用車史上、最大のパワートレイン出力となるCX-60のポテンシャルを最大限に引き出すAWDシステムを開発した。電子制御多板クラッチ式AWDシステムを存分に活かし、ハイパフォーマンスなフルタイム4WDとしてエンジンとモーターの大出力を常時前後輪に最適配分することで、従来の前輪駆動ベースのi-ACTIV AWDを凌駕する操縦安定性とトラクション性能を実現する。後輪駆動ベースAWDならではの意のままに操れる自然な車両挙動を、高速・高G領域まで一貫して実現することで、より高いレベルの人馬一体感を提供できた。

参考文献

- (1) 嶋田ほか：新世代i-ACTIV AWDの紹介，[マツダ技報](#)，No.37，pp.33-38（2020）

■著者■



吉田 琢



今村 泰理



梅津 大輔



日高 誠二



嶋田 克利

特集：MAZDA CX-60

11

CX-60 のシャシーダイナミクス技術 Chassis Dynamics Technology for CX-60

豊島 由忠^{*1} 本村 浩一^{*2} 三宅 輝^{*3} 虫谷 泰典^{*4}
 Yoshitada Toyoshima Kouichi Motomura Akira Miyake Yasuyoshi Mushitani
 奥山 和宏^{*5} 平松 大弥^{*6} 加瀬 泰宏^{*7} 澤井 亮^{*8}
 Kazuhiro Okuyama Masaya Hiramatsu Yasuhiro Kase Ryo Sawai

要 約

マツダが一貫して追求し続けていること、それはクルマが身体の一部になったかのようになじみ、意のままに気持ちまでも通じ合う「人馬一体」によって、ドライバーに感動や活力、自信を感じてもらうことである。そのための開発哲学が、人を徹底的に研究し人の本来もつ能力や感覚を最大限に活用する「人間中心の開発哲学」である。CX-60では、人が道具を体の一部のように同化する人間の能力「身体拡張能力」に着目した。

この能力を最大に発揮するためのポイントは、以下の3点である。

- (1) 人の操作に対するクルマの反応が素早くシンクロする、すなわち操作とクルマの挙動の時間変化が一致すること
- (2) 路面の凹凸などによる外乱や人の操作側の変化があってもシンクロが持続すること
- (3) クルマの反応を、五感で正確に感じ取れること

この3点について新設計のサスペンションを始め、力の伝達経路に沿ってシート骨格に至るまで徹底的に見直しシャシーダイナミクスを作り込むことで、あたかも「脳とクルマが直結」しているかのような感覚と従来商品を大幅に超える人馬一体を実現した。

Abstract

Mazda has been consistently pursuing “Jimba-ittai” feeling, a sense of oneness between a car and driver, allowing a driver to feel the car as a part of the driver’s body, and the car moves just as the driver intends, which delivers excitement, vitality and confidence to the driver. Our vehicle development philosophy is “human-centered” that makes full use of people’s innate ability and senses. For the CX-60, we focused on human’s “body expansion ability” with which people are able to assimilate a tool as a part of human body.

Keys to maximize the ability in driving are three mentioned below.

- (1) A vehicle quickly responds to driver’s input, in other words, the time change of driving operation and vehicle behavior coincides.
- (2) The concurrency endures disturbances on rough surfaces and some changes in driver’s operations.
- (3) Driver is able to catch vehicle’s response precisely through the five senses.

With the view of the above three key points, we thoroughly reviewed the seat frame including newly-designed suspension, along the transmission course of the power to improve chassis dynamics, and realized the feeling as if driver’s brain is directly connected with the car, and Jinba-ittai feel greatly exceeding the current PF.

Key words : Jimba-ittai, Development, Philosophy, A part of human body, Coincides, Concurrency, Precise, Chassis dynamics, Brain

*1~4 操安性能開発部
Chassis Dynamics Development Dept.

*5,6 シャシー開発部
Chassis Development Dept.

*7,8 装備開発部
Interior & Exterior Components Development Dept.

1. はじめに

マツダは、「人間中心の開発哲学」に基づき、人の普遍的な能力を最大限活用できるクルマ造りを進化させてきた。新世代スモール商品群では、クルマの理想状態として人の歩行における「動的バランス保持能力」に着目し、乗員が運転または乗車している時であってもこの能力を最大に発揮することで、頭部を安定させ疲れにくく安心して移動できる、車両の特性を作り込んだ。今回の新世代ラージ商品群では、スモール商品群までに具現化してきたモノ造りを土台とし、人が道具を体の一部のように同化する「身体拡張能力」に着目した。人が身体拡張能力を発揮する状態とは、体の動きを予測し調整するための〈身体図式〉と呼ばれる脳内モデルに、道具の特性が組み込まれることで、人の意識が道具そのものではなく道具が扱おうとする対象に向かう状態である。下記 (Fig. 1) は、箸を道具とした時と、車を道具とした時の人の意識の動きを示す。

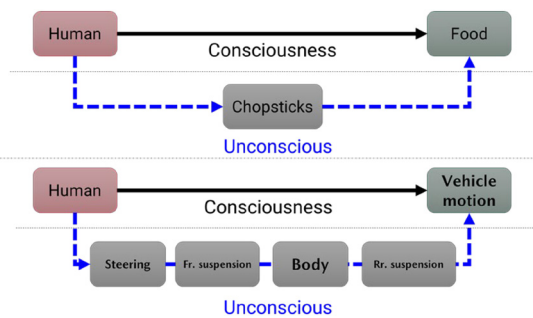


Fig. 1 Human Ability to Handle Tools Like Parts Own Body

クルマにおいては、体の動きに同調した道具の動きを運転中のいかなる場面でも五感で常に把握できることを理想状態と定めた。これを車両全体で統合的に作りこむことでまるで「脳とクルマが直結」しているかのような感覚と、それによって誰もが大きなパワー／サイズのクルマを、手足のように操れるクルマ造りに挑戦した。

2. 技術コンセプト

2.1 操作に対するクルマの反応が素早くシンクロ

着目したのは、人からクルマへの力の流れである。理想状態は、下図 (Fig. 2) に示すように、Input (操作) に対し Output (応答) が、応答遅れは存在しながらも応答波形が相似していることと定義した。

クルマにおいては、人の操作と応答の間に多くの部品が介在している。それらの部品の剛性で、Input と Output の関係が決まることから、その剛性配分に着目した。下図 (Fig. 3) は、フリクションをもつ2つの部品 (UNIT ①②) で直列に構成されたモデルの応答を時間軸で示したものである。力の流れる方向に順に剛性を高めていくバランスが理想状態である。

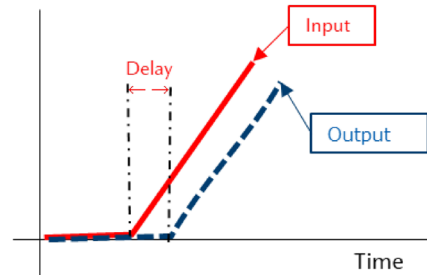


Fig. 2 Ideal State of Input and Output

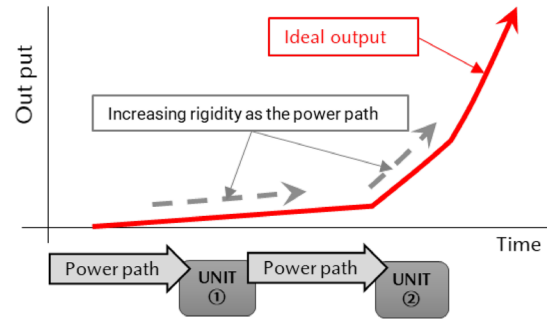


Fig. 3 Ideal Stiffness Distribution

クルマの旋回時において考えると、人の操作 (INPUT) は、ステアリングからフロントサスペンション、車体、リアサスペンションと順に伝わっていく。その結果として、ばね上運動を伴う平面運動が発生する。従来は、力に対する応答のみを追求しシステムごとに応答を高める設計をしていたが、今回 CX-60 では、力の伝達の連続性に着目し、下図 (Fig. 4) に示すように、各システムの応答を力の流れる方向に向かって、途切れることなく繋げるようにした。ポイントは、図中に示す2つである。①は、車両の初期応答を抑え整えるフロントサスペンションの技術。②は、リアサスペンションの応答を高めシンクロさせる技術である。それぞれ次項 3.1 と 3.2 で紹介する。

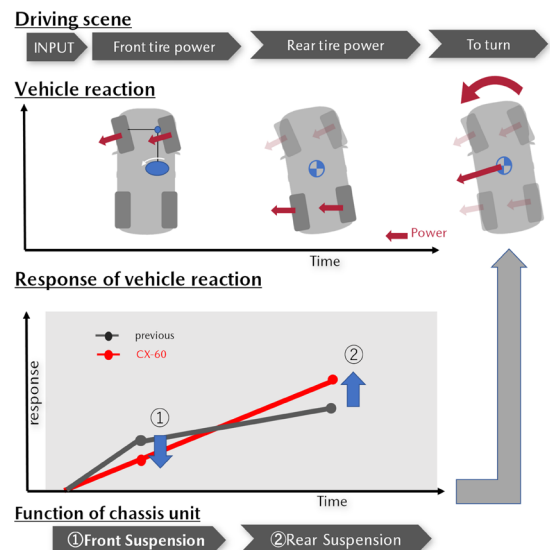


Fig. 4 Input Transmission Order and Response Modification

2.2 路面外乱や操作変化に対してシンクロが持続

素早くシンクロさせた後、これを持続させることが「脳と直結したような感覚」の実現には必要である。そのために、路面外乱に対して、バネ上を素直にバウンスさせながらも、不必要なピッチングを抑えることでシンクロが持続できることに着目した。従来、路面外乱に対しては、前後各輪それぞれで力を滑らかにバネ上に伝える技術を採用した。今回は、加えて前後輪の入力の向きを揃えることで、操舵に対するシンクロを、維持させた。この技術の一例を次項 3.3 で紹介する。

2.3 クルマの反応を、五感で正確に感じ取れる

脳に組み込まれた身体図式は、五感を通じて得られる情報によって常に更新され続けている。つまり、いかなるシーンでも、クルマ動き（情報）を人に正確に伝える必要がある。情報は、さまざまな部品を介して人に伝えているが、最終的にシートを介して伝わっている。CX-60 では、これまで以上に、人に正確な情報伝達が可能なシートを開発したので、その一例を次項 3.4 で紹介する。

3. 導入技術

3.1 人の操作を正確にフロントタイヤの横力に変える技術

まず着目したのは、フロントの転舵軸の最適化である。従来は、ハンドルを切った際にタイヤが元に戻る復元力を得やすく、高速走行での安定性を向上させるために、転舵軸の傾きを大きくする必要があった。しかし、その反面大きくすると、力の伝達順にかかわらず操舵と同時にヨー、ロール挙動を発生させていた (Fig. 5 赤矢印の部分)。

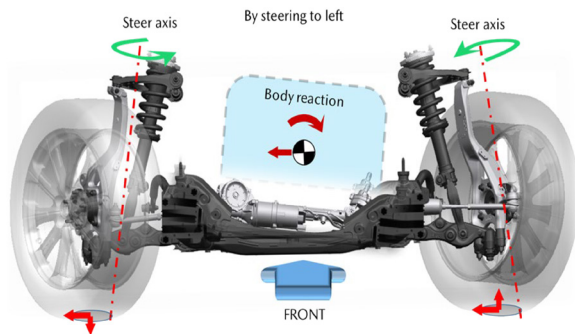


Fig. 5 Mechanism of Caster Action

そのため、従来車では操作初期において応答が高くなる傾向にあった。今回は、転舵軸の傾きによるばね上の動きを最小化するために、復元力による高速での安定性は、リアサスペンションの特性を最適化し補うことでバネ上の動きを従来比較で大幅に低減した。図 (Fig. 6, 7) は、その結果を示す。

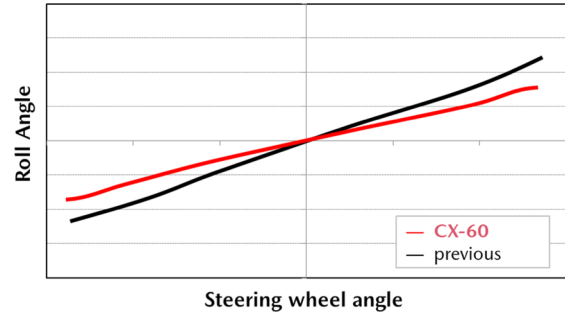


Fig. 6 Steering Angle vs. Roll Angle

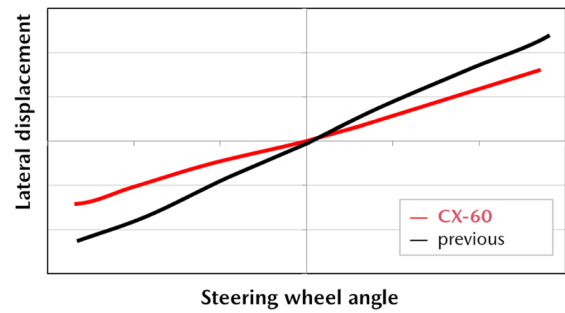


Fig. 7 Steering Angle vs. Lateral Displacement

3.2 リアサスペンションによる応答を高める技術

応答性を高めるには、サスペンションの剛性を高める必要があるが、一方でしなやかな乗り心地と NVH 性能のためには、一定以上のコンプライアンスが必要である。この背反をブレークスルーするために、下図 (Fig. 8) に示すとおり、サスリンクに支持剛性機能を集約し、サスクロスマウントに振動抑制の機能を集約した新しい剛性配分の最適化技術を紹介する。

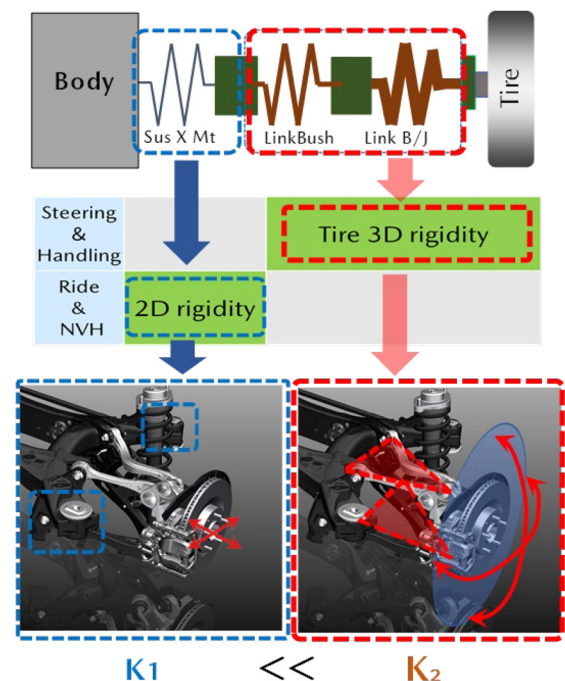


Fig. 8 New Function Sharing

(1) トラス配置のマルチリンクサスペンション

今回は、新設計のマルチリンクサスペンションを採用した。特に注力したのは、リンク配置である。図 (Fig. 9) に示すように上下に配置する 4 本のリンクを相似形でかつ、トラス (三角形) 配置とすることで、幾何学的剛性を高めた。加えて、タイヤ側にはボールジョイントを採用し、ボディー側のブッシュにおいても剛性を高めつつ、スムーズなストロークを実現した。これによりタイヤの支持剛性を高めた。

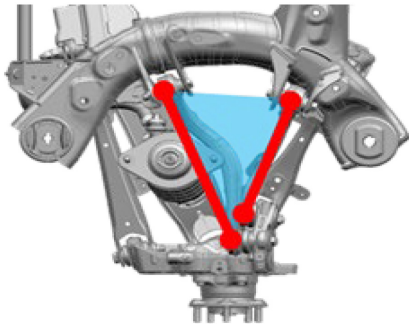


Fig. 9 Truss Layout Rr. Suspension

(2) サスクロスマウントでの乗り心地及び NVH との両立

サスクロスマウントは、ゴムボリュームも大きく、リンクブッシュに比べ振動抑制の機能効率が高い。下図 (Fig. 10) は、乗り心地に必要な理想コンプライアンスを維持しながらも 3D 指標でのタイヤ位置決め剛性実現した結果を示す。

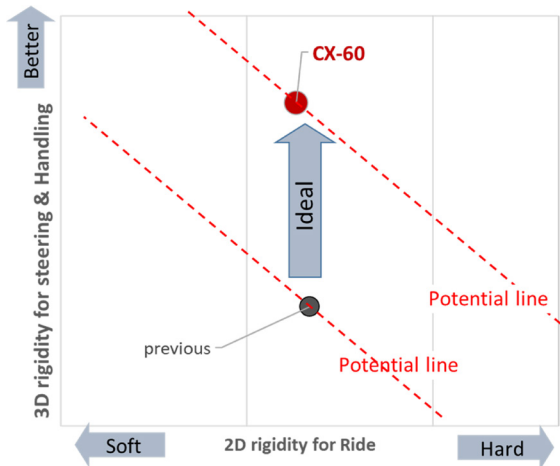


Fig. 10 Tire 3D Rigidity vs. 2D Rigidity

3.3 前後サスペンション作動軸の最適化

前後輪の入力の向きを揃えるために注力したのは、サスペンションの作動軸である。サスペンションには、さまざまな機能が求められており、その機能を満たすために全体バランスを考慮しながらアームやリンクの配置な

どを決定してきた。しかし、前後のサスペンションの作動軸を揃えることは難しく、一つのスロープを乗り越えるシーンで見れば、ピッチ挙動を誘発し、人のバランス保持を阻害する要因が残っていた。この作動軸の前後差を極限まで抑えることに挑戦した。その結果、フロントはダブルウィッシュボーン式、リアはマルチリンク式を採用し、前後輪のタイヤの上下軌跡の回転中心を結んだピッチングセンターを、車両の後方に配置させることで作動軸を一致させた。下図 (Fig. 11) は、その状態を示す。

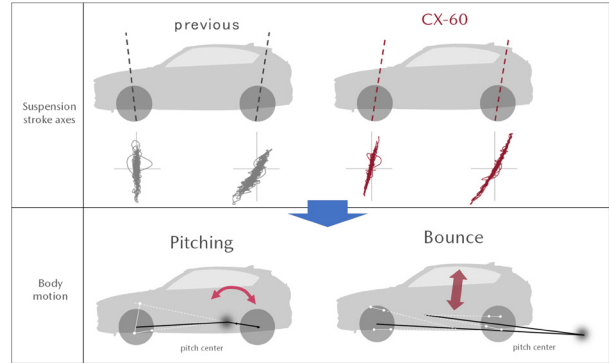


Fig. 11 New Suspension Stroke Axes

下図 (Fig. 12) は、バネ上がバウンス基調となる動きを実現したことで人がバランスを取りやすくなり、人の頭部の動きを大幅に減少させた結果を示す。

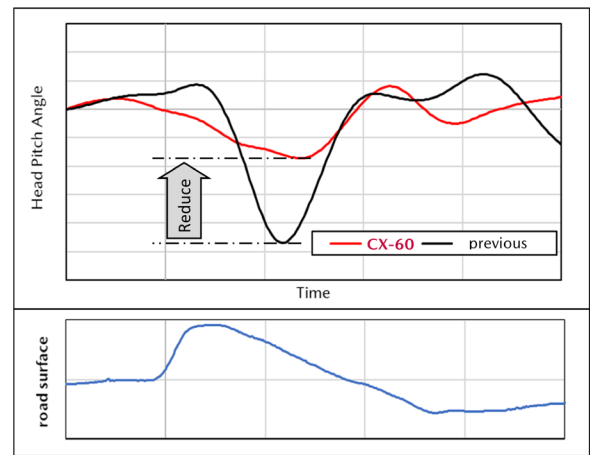


Fig. 12 Driver's Head Pitch Angle

3.4 シート剛性機能配分の最適化

(1) 力の伝達をストレート化

路面からの正確な情報伝達とは、力の変化を人へリニアに伝達することである。その力の伝達に大きく関わっているシート骨格は、図 (Fig. 13) に示すように大きく 3 つの領域で構成されている。シート骨格を構成する部品は、車体へ取り付け部も兼ねている「スライダー」とシート基本骨格である「フレーム」、そして「スライダー」と「フレーム」を繋ぐ「ブラケット」となっている。

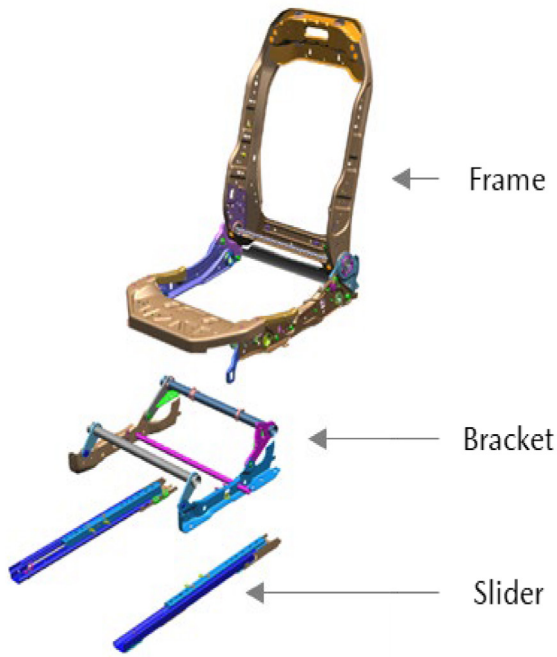


Fig. 13 Seat Structure

これらの部品の剛性が低いと、ボディからシートへ伝達された力が、異なる方向へ逃げたり遅れて伝わり、車両から人へ正確な情報伝達が損なわれる。下図 (Fig. 14 の赤枠) に示すとおり、シート骨格の左右剛性 (バネ定数) を強化し、入力に対して力の分散を抑制しリニアリティを高めた。

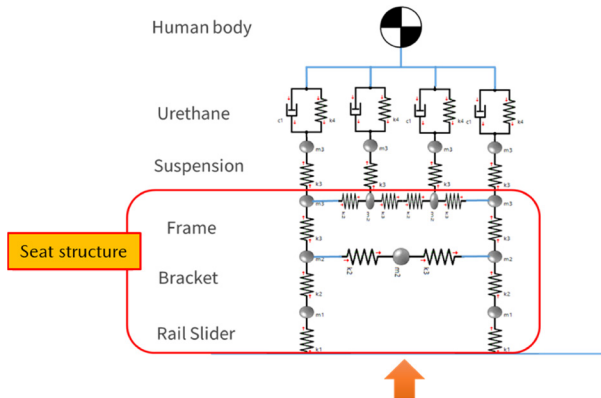


Fig. 14 Transmission Pathways of Seat

(2) シート骨格の剛性向上

CX-60 では、フレームの剛性向上だけでなく、力の流れる方向に順に剛性を高めていくバランスに注目し、シートの土台となっている部品である「スライダー」と「ブラケット」の剛性向上も行った。CAE により、シート骨格の剛性に感度の高い部品を抽出し、効率的にシート骨格の剛性を向上させた。その結果、下図 (Fig. 15) のとおりフレーム上部の左右方向のバネ定数は、現行と比較し約 2.5 倍となった。

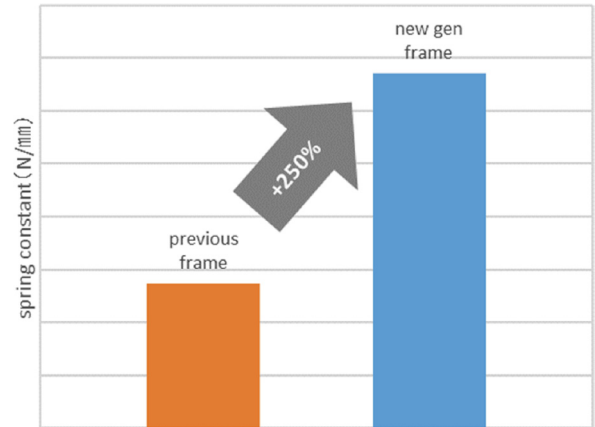


Fig. 15 Rigidity of Seat Frame

4. ダイナミクス性能の達成状況

以上の技術を車両に投入することで、目指した、シャシーダイナミクス性能、あたかも「脳とクルマが直結しているかのような感覚」を従来プラットフォームから大幅に向上させた。下図 (Fig. 16) は、その結果を示す。現行モデル比較で、操作に対するシンクロ度を示す「操作に対する車両挙動の一致度」が 39% 高まり、「凸路を乗り越えた時のドライバーの頭部の動き量」が 34% 減少した。

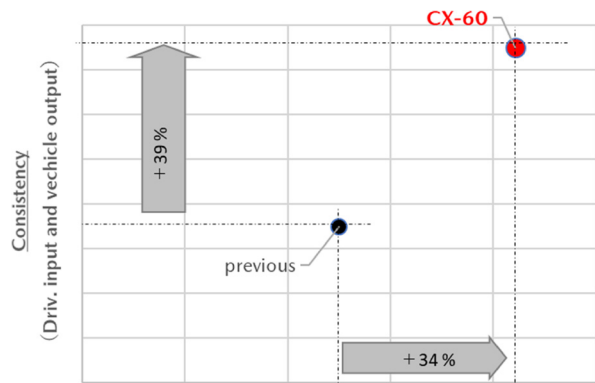


Fig. 16 Dynamics Achievement

5. おわりに

今回は、人が無意識にしている領域に踏み込み車との一体感を高めるという未知の開発に挑戦した。そして、人がどう感じるのかを突き詰めた結果、運転手だけでなく、後席の乗員までも一体となって楽しさを感じ、長距離を乗っても疲れにくいという新たな価値を実現した。これは、マツダ開発部門だけでは到底成しえるものではなく、生産技術部門、及び関係する多くの協力会社の方々と皆で成し得たものである。人の能力を活かす技術進化の余地は広く、理想状態の実現のために今後も愚直に研究を続けていく。

■著者■



豊島 由忠



本村 浩一



三宅 輝



虫谷 泰典



奥山 和宏



平松 大弥



加瀬 泰宏



澤井 亮

特集：MAZDA CX-60

12 CX-60の回生協調ブレーキにおけるダイナミクス性能開発

Development of Vehicle Dynamics in Regenerative-Braking of CX-60

田中 繁弘^{*1} 丹後 佑太^{*2} 梅津 大輔^{*3}
Shigehiro Tanaka Yuta Tango Daisuke Umetsu
今村 泰理^{*4} 吉田 琢^{*5}
Yasumasa Imamura Taku Yoshida

要約

ラージ商品群の第一弾として、CX-60を発売した。マツダ初のプラグインハイブリッドモデルをラインナップし、従来のM Hybrid（24Vマイルドハイブリッド）に比べて、より多くの減速エネルギーを回収し、環境性能を向上している。減速エネルギーの回収には、回生協調ブレーキシステムを採用した。回生協調ブレーキは、マツダとして初めて、i-ACTIV AWDと協調制御させ、AWDならではのより安定した走り、自然なブレーキペダル操作感を実現した。

Abstract

Mazda launched CX-60 as the first product of the large platform line-up. Mazda's first plug-in hybrid model included in the lineup features improved environmental performance with which more deceleration energy is recovered than the conventional M Hybrid. The regenerative-friction brake coordination system is adopted to recover the deceleration energy. For the first time in Mazda, regenerative-braking is coordinated with i-ACTIV AWD to achieve more stable AWD-specific driving performance and natural brake pedal operation feel.

Key words : EV and HV systems, Vehicle dynamics, Plug-in hybrid, Regenerative-friction brake coordination, Brake-by-wire, Energy regeneration, Motion control

1. はじめに

昨今のCO₂規制をはじめとする環境規制への対応や環境負荷の低減のため、自動車のエネルギー回収技術は重要度を増している。マツダは、商品ラインナップに電動化技術を段階的に導入し、これらの規制対応と更なる環境性能の向上を進めている。2019年には、M HybridをMAZDA3に搭載し、そして今回市場導入したCX-60には、e-SKYACTIV PHEVを搭載してエネルギー回収能力を更に向上させた。

エネルギー回収は、ジェネレーターを用いて、減速時に車両の運動エネルギーを電気エネルギーへと変換し、バッテリーで蓄電することで行われ、この仕組みを回生ブレーキという。回生ブレーキによって得られる減速の強さは、ジェネレーターの回転数やバッテリーの充電状態等によって変動するため、回生ブレーキだけではドライバーが意図する減速を実現することはできない。そこ

で、マツダは回生協調ブレーキシステムを採用することで、エネルギー回収とドライバーの意図に忠実なブレーキ操作感を両立している。回生協調ブレーキは、ドライバーがブレーキペダルを踏むと、必要な減速をシステムが判断し、制動力を回生ブレーキと摩擦ブレーキへ最適に配分することでドライバーが意図する減速を実現するシステムである。

一方で、回生ブレーキは主駆動輪に制動力が偏るため、本来4輪に適切に加わるべき制動力のバランスが崩れ、車両ダイナミクスへ影響を与えてしまう。本稿では、回生協調ブレーキによるエネルギー回収と車両ダイナミクス性能を両立する制御について解説する。

2. 目指す姿

CX-60は、人間のバランス能力を発揮できる車両運動を実現し、修正操作を最小化することで、誰もがストレスなく運転を楽しめることをコンセプトとしている。

*1~3 操安性能開発部
Chassis Dynamics Development Dept.

*4,5 電子基盤開発部
Electronic Platform Development Dept.

e-SKYACTIV PHEV 搭載車では、AWD ならではの安定した走り、自然なブレーキペダル操作感を実現しつつ、従来よりも高い効率でエネルギー回収を行い、意のままに操れる車両ダイナミクス性能と環境性能の両立を目指した。

3. システム構成と課題

3.1 損失エネルギーの回収と PT システム構成

減速時のエネルギー損失は、摩擦ブレーキ損失、Powertrain（以下、PT）抵抗損失、走行抵抗損失に大別される。このうち走行抵抗損失以外の摩擦ブレーキ損失、PT 抵抗損失が回生システムで回収可能なエネルギーである。e-SKYACTIV PHEV では、モーターをエンジンとトランスミッションの間に配置しており、クラッチによりエンジンを切り離すことで、エンジンの抵抗損失を回収できるシステム構成となっている（Fig. 1）。

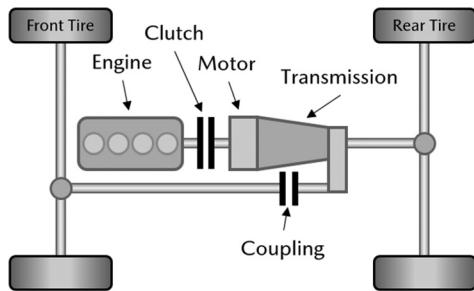


Fig. 1 Schematic View of e-SKYACTIV PHEV

また、CX-60 の AWD システムは、後輪駆動をベースとした i-ACTIV AWD で、電子制御多板クラッチ（以下、カップリング）を介して前輪に駆動力を伝達している。更に、前後のディファレンシャルギアの減速比に差をつけており、フロントの減速比を高速側に設定している。これにより、カップリングのクラッチに回転差を生じさせることで、トルク伝達の応答性を高め、シーンに応じたトルクコントロールを精度よく実現している。

3.2 回生協調ブレーキシステム

回生協調ブレーキは、ドライバーがブレーキペダルを踏んだ時に、ジェネレーターによる回生ブレーキトルクと摩擦ブレーキトルクの 2 つで制動トルクを発生させるシステムである。

このシステムでは、回生ブレーキトルクが変動しても、摩擦ブレーキトルクを調整することで、車両全体の制動トルクを変動なく発生させることができる。また、従来の倍力装置を介してブレーキペダルから制動トルクを発生させるシステムではなく、ペダルからホイールブレーキまでがつながっていないブレーキ・バイ・ワイヤを採用している（Fig 2）。そのため、摩擦ブレーキトルクが変動しても、ブレーキペダルの操作感に変化がなく、安定して制動力を自然なブレーキペダル操作感で実現できる。

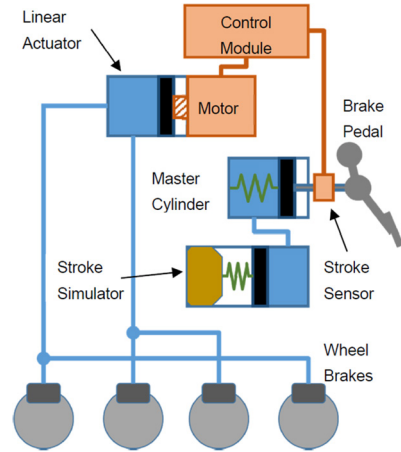


Fig. 2 Schematic View of Regenerative-Friction Brake Coordination

3.3 ダイナミクス性能の課題

(1) 制動配分の変化による後輪ロックの回避

Fig. 3 に、摩擦ブレーキと後輪駆動での回生協調ブレーキそれぞれの実制動配分と理想制動配分（前後輪が同時にロックする制動配分）を示す。また、後輪駆動ベースの AWD においても、実制動配分は後輪寄りとなる。そのため、主に雪道やアイスバーンといった低ミュー路における制動では、後輪からタイヤがスリップすることで、スピン挙動を誘発する。

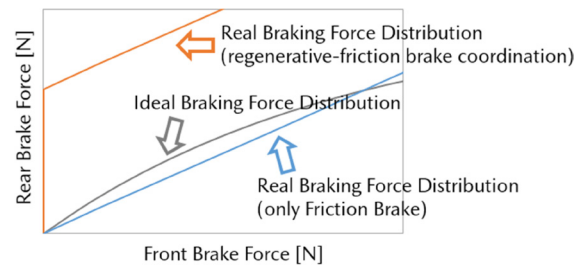


Fig. 3 Braking Force Distribution

(2) カップリング締結力の最適化による 4 輪同時ロックの回避

カップリングの締結力を強めていくと 4 輪が拘束され、1 輪ロックが他の輪のロックも誘発し、4 輪が同時にロックする懸念が高まる。そのため、トルク配分を前輪に伝達すること、カップリングの締結過多による 4 輪同時ロックを回避することを両立する必要がある。

(3) カップリング締結力の最適化によるヨー減衰効果の活用

また、カップリングの締結を強めていくと差動制限力が働き、旋回時に前後・内外輪の車輪速差がつきにくくなる。これにより、ヨー減衰効果が高まり、車両の“アンダーステア”傾向が強まる。そのため、前述の車両安定性を含め、カップリングによるトルク配分を最適化することが課題となる。

4. 回生協調ブレーキ時のダイナミクス制御

4.1 カップリング締結力のコントロール

カップリング締結による旋回特性への影響を検証した。回生協調ブレーキを作動させながら旋回するシーンにおいて、カップリングの締結力を変えて検証を行った。Fig. 4は、pattern1 から3の順でカップリング締結力を強め、ステアリング操舵角に対する車両のヨーレートの出方を示している。締結力の最も弱いpattern1では、操舵量に対してヨーレートが過剰でありスピン挙動となっている。Pattern3では、操舵量に対して、ある程度リアにヨーレートを発生しているが、舵を切り込んでいくとpattern2に比べ、若干のアンダーステア傾向を示している。したがって、カップリングの締結力を最適化することで、安定した旋回特性を得られることが分かった。

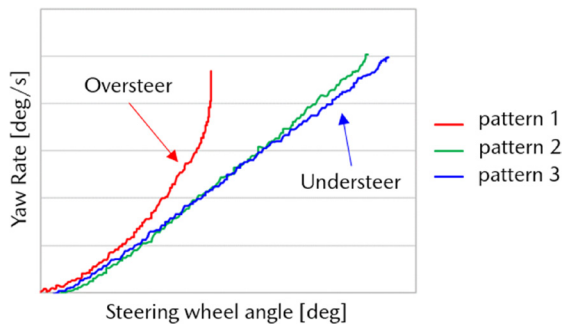


Fig. 4 Vehicle Stability

また、減速回生ブレーキ中には、モーター出力やギア変速などにより、トランスミッションのアウトプットトルクが変動する。そのため、前後ドライブシャフトのトルク変動を抑えるために、カップリングの締結力を制御し、前後のホイールトルクをコントロールする必要がある。そこで、コースティング及び回生実行時のPTトルクに対して、前後のトルク配分比が一定となるカップリング締結トルク制御を行った (Fig. 5)。

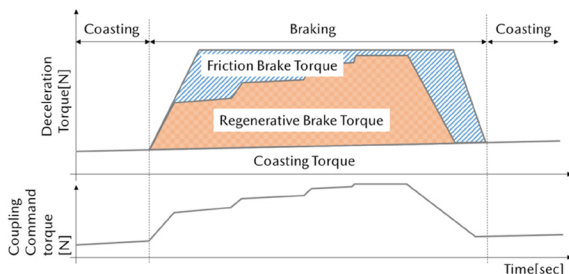


Fig. 5 Coordinated Control of Coupling and Regenerative Brake Torque

4.2 タイヤスリップ検知制御

(1) 制御ストラテジー

i-ACTIV AWD のハード特性及び回生協調ブレーキとの

AWD 協調制御を活かしたタイヤスリップ検知制御を開発した。i-ACTIV AWD は、前後のディファレンシャルギアにおいて減速比に差をつけることで、どこかにわずかな回転差が必ず生じる。この特性を利用して、4輪同時ロックが起こりやすい低ミュー路において、タイヤスリップを検知し、回生協調ブレーキを制限する機能を設けた。具体的には、Fig. 6に示すように、高ミュー路では、タイヤはほぼスリップせず、カップリングにおいて回転差 (以下、カップリング差回転) が生じる。一方で、低ミュー路では、主駆動輪であるリアタイヤがスリップすることで、カップリング差回転が少なくなる。これらの結果を利用して、PTトルクとカップリング差回転の関係からタイヤスリップを判定する閾値を設定し、4輪同時ロックの回避が可能となった。

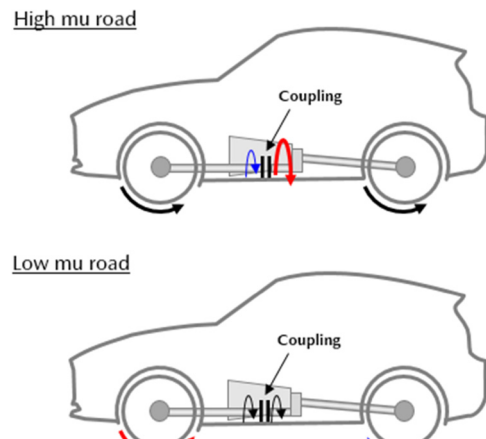


Fig. 6 Rotation Difference on the High and Low Mu Road

(2) 机上予測モデルによる仕様決定

今回のタイヤスリップ検知制御では、新しいアプローチで閾値を設定した。具体的には、机上予測モデルを構築し、タイヤスリップを検出したい路面ミューにおけるカップリング差回転を算出した。カップリング差回転は、路面ミューだけでなく、車速やPTトルクによっても変動する。そのため、それらを変数とするマップとして検知閾値を設定している (Fig. 7)。従来は、さまざまな走行条件で計測を行い、そのときのタイヤスリップ量から仕様を決定してきた。しかし、この手法では、実車を使用したテストで多くの時間が必要となる。更に今回、回生協調ブレーキとAWDとの協調制御により、制御条件がより複雑化している。そこで、予測モデルにより閾値を決定し、実車では代表シーンのみを確認とすることで、開発リードタイムの大幅な短縮が可能となった。

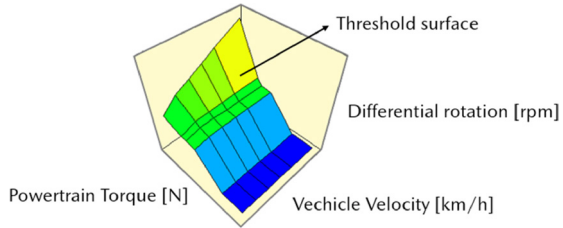


Fig. 7 Threshold Surface of Tire Slip

5. おわりに

CX-60の回生協調ブレーキは、各国の燃費規制対応だけでなく、市場環境での実用燃費についてもねらいとする減速エネルギーを回収できるシステムとなった。また、今回初めてAWD制御との協調制御を構築し、高い人馬一体感とAWDならではの安心感のある走りを実現した。今後、電動化や環境規制強化による、更なる減速エネルギーの回収量増加が想定され、車両ダイナミクス制御との連携が重要になると考えられる。電動化領域が拡大する中でもマツダらしい走りを提供できる車を目指していく。

参考文献

- (1) 森本ほか：新型 MAZDA3 M Hybrid 技術，[マツダ技報](#)，No.36，pp.66-70 (2019)
- (2) 池見ほか：新型 MAZDA3 のブレーキフィールの開発，[マツダ技報](#)，No.36，pp.107-112 (2019)

■著者■



田中 繁弘



丹後 佑太



梅津 大輔



今村 泰理



吉田 琢

特集：MAZDA CX-60

13

CX-60のNVH開発について NVH Development for CX-60

住田 英司^{*1} 毛利 正樹^{*2} 服部 之総^{*3} 唐津 良平^{*4} 宮東 孝光^{*5}
Eiji Sumida Masaki Mouri Yukifusa Hattori Ryohei Karatsu Takamitsu Miyahigashi
木下 晃^{*6} 富士田 拓也^{*7} 三小田 哲也^{*8} 村上 健太^{*9}
Akira Kinoshita Takuya Fujita Tetsuya Mikoda Kenta Murakami

要約

CX-60の開発コンセプトは、『どんな道でも、心昂ることができる Driving Entertainment』である。このコンセプトを実現させるために、(1) 不快な音や振動を排除し、お客様に安心感を提供する静粛性と、(2) 高揚感を呼び起こし、運転の楽しさを感じるきっかけとなるPTサウンドに目標を置いた。この目標を達成するために、音源を低減させ、振動伝達特性や空気伝ば音をコントロールするための考え方を構築し、それを具体化させるための新たな構造や材料を研究するとともに、CX-60に関わる全部門との共創活動を経て、この目標を実現させた。

Abstract

We've set the concept of CX-60 as "Driving Entertainment that can excite you on any road".

In order to realize this concept, We've set the goals, (1) quietness target on cabin to provide customers with sense of ease by eliminating noise and vibration (2) Engine sounds target to evoke an elation and the driving pleasure. In order to accomplish these goals, we have constructed a concept for reducing the sound source and controlling the vibration transfer characteristics and air-borne noise. Through co-creation activities with all related departments, we've accomplished these goals.

Key words : Vibration, Noise, and ride comfort, Body structure/body material, Acoustic material, Idling vibration/idling noise/acceleration noise, Road noise/pattern noise

1. はじめに

CX-60のNVH開発では、不快な音や振動を排除しお客様に安心感を提供する静粛性目標、高揚するような感情を起こし、運転の楽しさを感じるきっかけとなるエンジンサウンド目標を定めた。本稿において、人が音を感じるメカニズムを探求し、それを具現化するための考え方とその実現手段について報告する。

2. 静粛性

CX-60の静粛性においては、車室内の音圧目標に加えて、音に関する人間研究の成果から開発指標を定めて、開発を進めた。

2.1 静粛性の指標化

走行中の車内は、エンジン、タイヤ、風の音と振動、

周囲の車や街の騒音など過酷な音環境にある。その環境下でも不要な音を排除して、同乗者全員に快適性と安心感を提供するために静粛な室内空間の開発を続けている。

(1) 粗粒路ロードノイズ

私たちは変化を敏感に感じ取ることができる。音も例外ではなく、音の変化で環境が変わったことを認知し、判断、行動のステップを取る。音の変化が小さいと認知できず、変化が大きすぎると過剰なストレスを発生させることになる。ストレスなく認知できる、この適値を良路から粗粒路への路面変化を代表シーンとして検討した。

この検討は通常の音圧データに加え、注意の誘引度を示す指標を、時間で変化する周波数特性に用いて仮説を立て、実車フィーリングで検証した。この結果から誘引度は200Hzの周波数帯域が支配的であることが示され、この帯域における時間軸での音圧変化量からストレスなく認知できる物理量を導出し、目標とした (Fig. 1)。

*1~8 NVH性能開発部
NVH Performance Development Dept.

*9 車両実研部
Vehicle Testing & Research Dept.

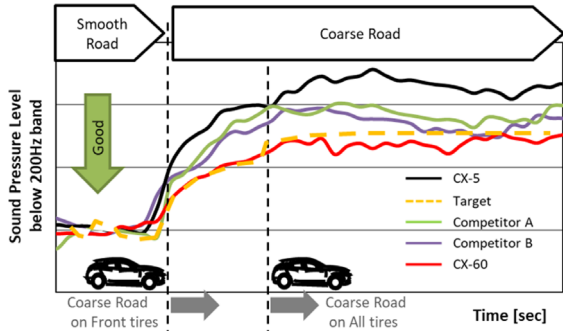


Fig. 1 Time Transition of Sound Pressure Level

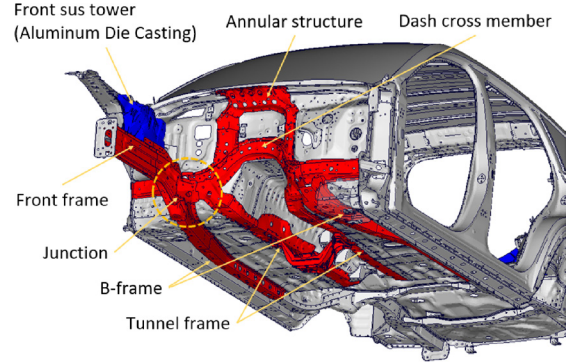


Fig. 2 Serial Cross Section of Structure Framework

(2) 風変動感

高速走行時は、走行風や自然風の影響を受け、バサバサと変化する耳障りな音（風変動感）を感じる。CX-60では、高速走行時の風変動感を抑え、快適で安心な室内空間を実現することをコンセプトとした。走行時の聴感評価点及び音圧の時間変化量と相関性が高い風洞での正対時と横風時の音圧レベル変化量を開発指標とし、その目標値を風の変化を感じにくいレベルとした。

(3) 静粛性を阻害しない振動性能

安心、快適な車室内空間で運転に集中できる環境を提供するため不要な振動は感じさせず、必要な振動は適切にフィードバックすることをコンセプトとし、振動知覚特性から感じないレベル、気にならないレベルを定量目標値とした。

2.2 走行中の安心を感じる静粛性向上技術

(1) 粗粒路ロードノイズの低～中周波音のコントロール

路面変化をストレスなく認知できる音の実現のため、タイヤからサスペンションを通して車体に入ってくるエネルギー量をコントロールし、車体に入ってきたエネルギーは音になりやすい車体モードの振幅レベルをコントロールする構想とした。

エネルギーコントロールは、エネルギーの伝達経路において剛性差があると反射する特性を利用し、サスブッシュと車体取り付け部の剛性差を、反射効率を算出して目標を設定した。実現手段はアルミダイキャストの高い構造自由度を活用し、軽量高剛性な構造とした。

車体モードコントロールの一例として、トンネルが左右に倒れるモードに着目し、その寄与が高いトンネル前端の剛性を、ダッシュクロスの環状化、Frフレームとトンネルフレーム、ダッシュクロスの骨格ジャンクションの結合部連続化によりコントロールすることで、ねらいの振幅レベルを実現した (Fig. 2)。

(2) 風変動感の低減

風変動感とは、車両周りの風の乱れ（渦）によって発生する空力騒音が車体で遮音・吸音され、車内音として乗員に伝わったものである。特に、Aピラーやドアミラーで発生する空力騒音は乗員への寄与が高く、車室内の静粛性向上のためにはこれらの部位で発生する渦を低減する必要がある。スモール商品群では、「3つの風流れ制御コンセプト」に基づいて渦を低減する形状をデザインに反映し、空力騒音を低減した。そのコンセプトを以下に示す。

- ① 沿わす：風を車体表面に沿わし、剥離渦を抑制する。
- ② 揃える：上下左右の速度を揃え、巻き込み渦を抑制する。
- ③ 減らす：剥離領域への流量を低減し、渦を抑制する。

一般的には車両サイズが拡大すると音源である空力騒音は悪化する。そこでラージ商品群では、上記3つの風流れ制御コンセプトを踏襲しつつ、ドアミラーに対しては、新たに(a)入力風の制御技術と(b)揃える制御コンセプトの定量化を導入することで、車両のサイズ拡大により悪化が予想される空力騒音の改善に挑戦した。以下に詳細を述べる。

(a) 入力風の制御

カウルサイドに設定したフェンダーモールドの形状により、ドアミラーへ向かう入力風の向きがドアミラーと正対するように、かつスピードが遅くなるように制御することで空力騒音（渦度）を低減した (Fig. 3, 4)。結果として、正面視の面積がスモール商品群比1割程度大きくなったドアミラーでも同等の性能を実現した。

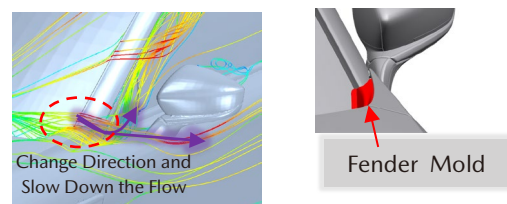


Fig. 3 Flow Streamline around Fender Mold

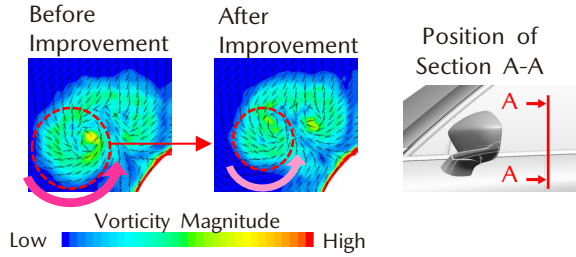


Fig. 4 Vorticity Distribution behind Door Mirror in Section A-A

(b) 制御コンセプトの定量化

デザインとの共創活動を円滑に推進にするため、風をドアミラー後端で揃えるという制御コンセプトの定量目標を設定した。定量化には、ドアミラー後端部での流速の標準偏差を「等速度指標」として用いた (Fig. 5)。また、流速が揃っていない箇所が見える化 (Fig. 6) することで、改善すべき箇所及びその方向性を容易に共有でき、効率的に目標達成形状を実現した。

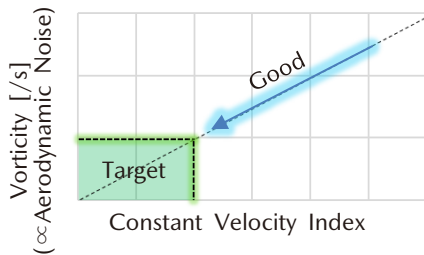


Fig. 5 Relationship between Constant Velocity Index and Aerodynamic Noise

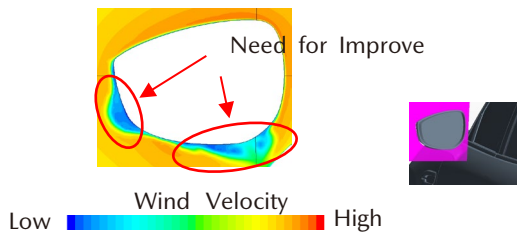


Fig. 6 Wind Velocity Distribution behind Door Mirror

(3) 低周波 NVH 性能実現構想

CX-60 は、さまざまな道で安心感のある力強い走りを実現するため、エンジンの大トルク化、高応答化を実現するためにトルコンレスが採用され、車体への振動入力が増加することが想定され、振動性能目標実現に対して大きな課題があった。

この課題に対して、既存システム共振を活用した振動打ち消しコンセプトにより、新たな付加物を追加せず、効率的に車体入力低減させた。エンジンマウントシステムに対しては、液封マウントの流体をダイナミックダンパーのマスとして活用することで減衰効果を最大化させた (Fig. 7)。

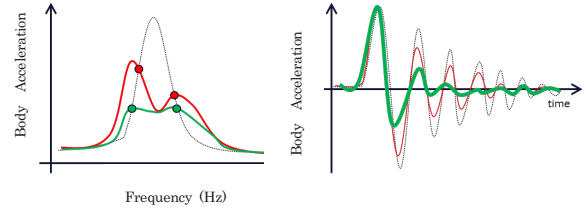


Fig. 7 Liquid Engine Mount Characteristic

リアサスペンションシステムに対しては、フルマルチリンクにデフユニット搭載のシステムを活用し、駆動系入力に対して、マウント特性で弾性主軸位置を制御し振動打ち消し設計として、車体入力を低減させた (Fig. 8)。

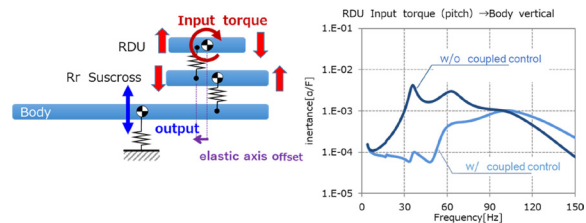


Fig. 8 Elastic Axis Decoupling in RDU (Rear Differential Unit) and Rr Suscross (Rear Sus Crossmember) System

3. サウンド

3.1 加速時の高揚感を感じる PT サウンド

(1) コンセプト

PT サウンドは、マツダの考える意のままの走りに欠かせない要素として、研究開発を行っている。近年では、人が道具を自在に扱えるメカニズムを研究し、意のままの運転と PT サウンドとの関係を解明してきた。具体的にはスモール商品群において、ドライバーが直接扱うトルクの大きさを音で伝えることで運転操作の精度が向上し、PT サウンドが意のままの走りにつながっていることを証明した⁽¹⁾。

CX-60 では、ガソリンエンジン、ディーゼルエンジン、プラグインハイブリッド (以下、PHEV) とさまざまなパワートレインが存在する。どのパワートレインにおいても、スモール商品群で培った意のままの走りをサポートする PT サウンドの特性は保った上で高揚感を呼び起こし、運転の楽しさを感じる PT サウンド特性を造り込み、走る喜びの 1 ランクアップを狙った。

(2) PT サウンドの指標化

ドライバーが直接扱うトルクの大きさを、PT サウンドの変化で伝える。そのための指標は、トルクに対する音の大きさの変化と定め、CX-60 もこの範囲に設定した (Fig. 9)。

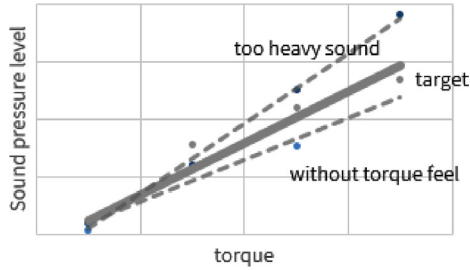


Fig. 9 The Target of Sound Pressure Level vs Torque

高揚感を感じる指標は、音色の変化とした。耳は外耳・中耳・内耳の3部位から成り、内耳には蝸牛と呼ばれる部位がある。蝸牛内にある基底膜が反応した後、聴覚系はある周波数ごとに信号を振り分ける。ここでは、聴覚フィルターと呼ばれる中心周波数の異なる帯域フィルター群がある。すなわち人間の聴覚は24個のフィルター群として、モデル化できる。その帯域幅は臨界帯域幅と呼ばれ、中心周波数が500Hz以下の帯域では約100Hz程度の幅で一定、500Hz以上では周波数とともに、その幅は増加していく。この聴覚フィルターの働きにより、聞いている音にどういった周波数の音が含まれているのかわかる。

この1つの聴覚フィルターに2つ以上の音が存在するときに音は干渉した音に聞こえ、音が別々の聴覚フィルターにある時は澄んだ和音に聞こえる。PTサウンドでこの干渉音が発生すると、ゴロゴロといった音に聞こえる。

ドライバーが意をもって加速する際、和音から干渉音へ音色の変化させることで、操作に対して車からの反応の変化がはっきりと感じ取れ、クルマとの一体感が増し高揚感につながると考えた。従って、高揚感を感じる音の指標は、トルクに対する干渉音の大きさとした。その目標は、意をもって加速する際に干渉音がはっきり感じ取れるように、非線形 (Fig. 10, 11) に変化させた。

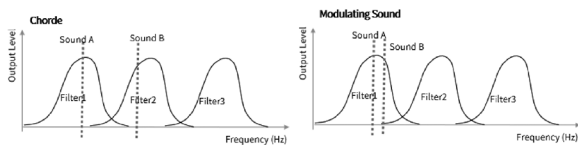


Fig. 10 Auditory Filter (2)

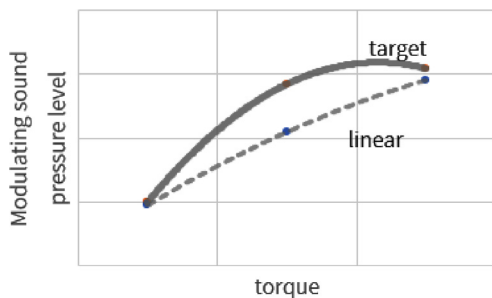


Fig. 11 The Target of Modulate SPL vs Torque

(3) PT サウンドの具体化

車内で聞こえるエンジンの音は、エンジンの振動がエンジンマウントなどのラバーを含んだつなぎ部品を伝達し、フレームに代表される車体部品を經由して乗員に届く。エンジンの振動は、基本的にトルクに対してリニアに振動が変化する。このトルクに対してリニアな振動変化を、できるだけそのまま車内へ伝えるように伝達部品や車体を造り込んだ。

また、エンジンとトランスミッションの重量と締結剛性により形成される主要な振動モードがある。このモードが発生する周波数ではエンジン振動に対して、動レベルが増幅するためエンジンマウントなどのPTを支える部品の配置は可能な限り、このような振動モードの節に当たる位置に配置し、モードにより増幅した振動を車体へ伝わりにくくした。更には、トルクによって変わる車両加速度に対して、エンジンマウントなどの変位を制御し、エンジン振動の伝達に急な変曲点を作らず、リニアに車体へ伝える特性とした (Fig. 12)。

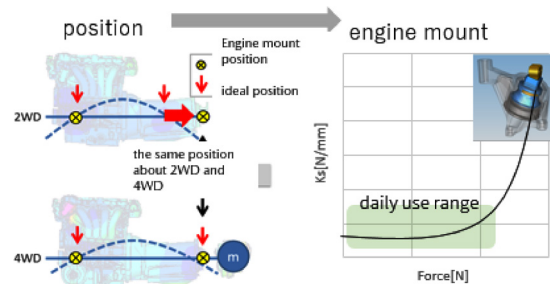


Fig. 12 Engine Mount Position and Rubber Characteristics

車体感度は、車室内の空間容積などで決まる共鳴周波数と、フレームやパネルで形成される骨格の共振モードの周波数を離間して配置させることで、周波数特性としてもフラットな車体感度を実現した (Fig. 13)。

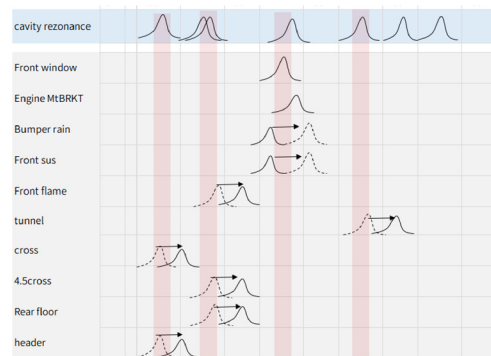


Fig. 13 Body Structure and Cavity Resonance

これらにより、日常の追い越しや、再加速のようなシーンでは主にリニアに伝わるPTサウンドを実現し、高速道路へ侵入するようなアクセルを深く、比較的長い時間踏み続けるようなシーンではオーディオからの補完だ

けでなく、吸気から分岐したサウンドクリエイターからの音も加え、踏み込むほどに変化を感じられ高揚感へつながるサウンドを実現した (Fig. 14)。

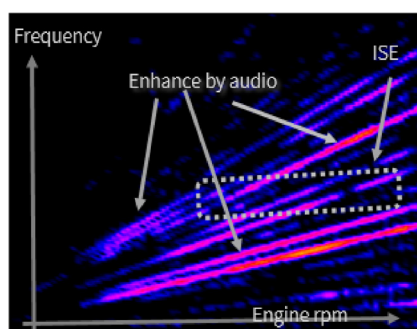


Fig. 14 Engine Sound while Accelerating

3.2 歩行者の安全に配慮した接近通報音の技術

(1) 車両接近通報音

電動車 (BEV, HEV, PHEV など) は低速でのモーター走行時に走行音が低く、歩行者は車両の接近に気づきにくい。このため、2019年以降の電動車には、自動車の接近を歩行者に知らせるため車両接近通報装置 (AVAS; 以下、接近通報音) の装着が義務化された。この装置から発せられる前進音と後退音の音圧レベルと周波数は法規で規定されており、各社で音色の工夫をしている。

(2) コンセプト

CX-60の接近通報音は、①乗員が気にならず、②歩行者が違和感なく気づきやすいこと、をコンセプトとした。このうち②では歩行者の安全性を向上させるため、人の記憶にある音 (=内燃車で聞いたことがある音) を用いることで、自動車の接近を違和感なく歩行者 (車外の人) に知らせることを目指した。

(3) 前進音

前進では、歩行者が振り返らなくても「自動車」と気づいてもらう音を研究した。結果、EV車や内燃搭載車に共通する音として「タイヤ」が回転する時の音に着目するに至った。

(4) 後退音

後退では、運転者からの死角も多く、歩行者自身に気がついてもらうことで、安全確保ができると考えた。気づきやすい音として間欠音を取り入れ、音の発生時間の間隔は、心臓の鼓動の間隔で音を吹鳴することで、歩行者が平常心で行動できるようにした。

(5) コンセプトの具体化

前進時のコンセプト実現のため、タイヤ起因の音をデータ化した。車速ごとの周波数特性を分析により、車速の変化に伴う周波数全体の音圧変化の中で、一部の帯域の周波数に変化に特徴があることを確認した。歩行者がタイヤ音と認識するには、車速に応じた周波数帯域ごとの変化を再現することが重要となる。つまり周波数を変化させる帯域とさせない帯域の音、これらを合成する

制御を織り込み、音圧と周波数を法規要件に適合させながら意図した自然な前進時の音を構築することができた。

後退時のコンセプト実現のため、前述のタイヤの音に加え、加齢による聴力の衰えが少ない周波数帯域を選択した。更に、前述した時間間隔を加えることで、歩行者に気づいてもらえる音を作成した。具体的には、人が落ち着いている平常時の心拍を参考にするすることで、歩行者に危機感を煽りすぎず、落ち着いて自動車から回避できる時間間隔とし、CX-60はねらいどおりのコンセプトを実現できた。

4. おわりに

以上、CX-60の静粛性開発について紹介した。今後とも、お客様にマツダ車を選び続けていただくために、人間中心の考えの基、お客様に喜んでいただく指標の研究と、その実現に向けたNVH性能開発技術の更なる向上に取り組んでいく。

参考文献

- (1) 森下ほか：MX-30 EV MODELのモーターペダル開発、[マツダ技報, No.38, pp.20-25 \(2021\)](#)
- (2) 岩宮眞一郎：よくわかる最新音響の基本と仕組み、日本、秀和システム、pp.36-39, p.46, pp.88-89 (2014)

■ 著 者 ■



住田 英司



毛利 正樹



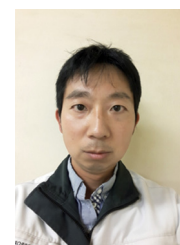
服部 之総



唐津 良平



宮東 孝光



木下 晃



富士田 拓也



三小田 哲也



村上 健太

特集：MAZDA CX-60

14

CX-60 の空力開発に適用した
車両後部の風向制御技術Aerodynamic Development for CX-60 Adapting
Flow Control Technology around Wake伊川 雄希^{*1} 久我 秀功^{*2} 岡本 哲^{*3}
Yuki Ikawa Yoshiatsu Kuga Satoshi Okamoto

要約

地球温暖化抑制に向けた CO₂ 削減の取り組みの一つとして、燃費向上させた商品をお客様にお届けすることが私たちの使命である。CO₂ 排出量は走行抵抗に比例して増大し、その構成要素である空気抵抗は車両形状に依存するため、商品開発においては魂動デザインと空気抵抗低減の両立が必須課題となる。私たちは、空気抵抗係数 (Cd 値 : Drag Coefficient) への寄与度が大きい車両後方の渦に注目し、簡易モデルを用いた風流のメカニズム解明と風流れ制御技術開発に取り組んだ。その結果、車両後端部の風向を制御することで、空気抵抗を決定づける風流の運動エネルギー損失を低減させるコンセプトを構築した。このコンセプトを具現化することで、従来同型比で Cd 値を 12% 低減できる新しい風流れ制御技術を確認した。これらの新技術を CX-60 の商品開発に適用し、高い次元で魂動デザインと両立させながら、クラストップレベルの Cd 値を実現させた。

Abstract

It is important to improve fuel economy for cutting CO₂ emission contributing to the environment. However, it is necessary to balance the aerodynamic drag reduction and the design in the automotive product development because the drag depends on the geometry of the vehicle. To achieve this goal, the technologies of the drag reduction were developed by using the simple shaped model. We made a concept to reduce the loss in the kinetic energy of flow by controlling the flow direction at the rear end of the vehicle. By realizing this concept, the new flow control technologies that can reduce the drag by 12% compared to the previous model were developed. By applying these technologies, the CX-60 achieved top level aerodynamic drag among the same class vehicles and realized the design concept.

Key words : Aerodynamics, Design

1. はじめに

地球温暖化の対応策として CO₂ 排出削減は重要であり、マツダでも商品・生産の両面から CO₂ 排出削減に取り組んでいる。CO₂ 排出量は、パワーソースの性能のみならず、走行抵抗に比例して増大する。走行抵抗は主に転がり抵抗と空気抵抗に分けられる。空気抵抗は車速が高まるほど走行抵抗に対する寄与度が大きくなり、時速 100km で走行する場合には、およそ 8 割を占める⁽¹⁾。空気抵抗は Cd 値に比例するため、Cd 値を小さくすることが走行抵抗低減のために極めて重要である。

Cd 値は車両周りの風流れによって決まる。マツダは、

風流れによって生じる渦を運動エネルギー損失で表し、これに比例して空気抵抗が増大することを提案し、その確からしさを検証してきた⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾。その活動の中で車両周りの風流れを制御し、渦を低減すれば風流の運動エネルギー損失を低減でき、結果として Cd 値を低減できることが分かってきた。渦を低減するためには、車両表面を平滑にするなどいくつか手法はあるが、既存技術に頼った制御は車両パッケージングやデザインをはじめとした他性能に対して大きな制約となる。本稿では、他性能と Cd 値の両立を目指して実施した車両後方の風流れ制御技術開発と、この技術を用いた CX-60 の空力開発について述べる。

*1~3 車両実研部
Vehicle Testing & Research Dept.

2. 新世代 SUV の空力開発課題

2.1 風流れ制御の考え方

これまでの研究⁽²⁾により、Cd 値を低減するためには風流れの運動エネルギー損失の低減が重要であることが分かった。運動エネルギー損失を発生させる渦は、三つに大別できる。一つ目は車両表面から風が剥離することにより発生する“剥離渦”，二つ目は異なる流れが合流して発生する“混合渦”，三つ目は車両後方で上下左右それぞれの流れが合流して発生する“後流渦”である。車両周りの各部で生じるこれらの渦 (Fig. 1) を抑制することで風流れの運動エネルギー損失を小さくできる。特に、混合渦と後流渦は、風流れが車両進行方向に対してなす角度である風向によって運動エネルギー損失が変化するため、風向の制御が重要となる。

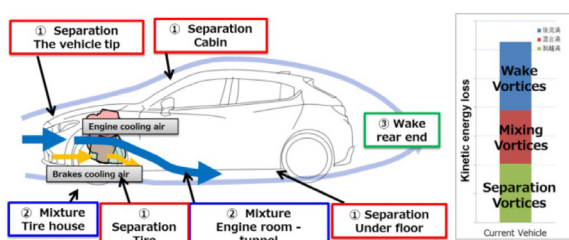


Fig. 1 Kinetic Energy Loss at Each Part of the Vehicle⁽²⁾

2.2 CX-60 の空力性能開発の課題

SUV において車両周り全体で発生する運動エネルギー損失のうち、約 3 割が後流渦に起因するため⁽³⁾、後流渦に着目し技術開発を行った。CX-60 ではスポーティーな SUV デザインコンセプトを実現するために、バックウィンドウが傾斜し、リアバンパーを丸い造形にすることが求められた。そのため、ルーフ上部やリアバンパーコーナーにおいて風流れが巻き込み、後流渦を強めてしまう。以上より、CX-60 のデザインと空力性能を両立するための課題は、車両周りの局所で発生する渦による運動エネルギー損失を低減しつつ、後流渦の運動エネルギー損失を低減することである。そのために後流渦の新たな制御技術を確認し、クラストップレベルの性能となる従来同型比 12% の Cd 値改善を実現することを目標とした。

本稿では、この課題解決に向けて取り組んだ後流渦の運動エネルギー損失の低減コンセプト (3 章)、制御コンセプト実現のための風流れ制御技術 (4 章)、CX-60 の空力開発への適用 (5 章) について報告する。

3. 後流渦の運動エネルギー損失の低減コンセプト

3.1 CFD の解析条件

本研究の Computational Fluid Dynamics (以下 CFD) は、汎用流体解析ソフトである Siemens 社の STAR-CCM+® を使い、乱流モデルには Detached Eddy Simulation (DES)

を適用し、非定常解析を行った。

3.2 運動エネルギー損失の発生メカニズム解明

後流渦によって生じる運動エネルギー損失の大小は、車両後端部を流れる風の向きによって決まると考えた。この風向は、後端部の形状だけではなく、後端部に至るまでの風流れにも依存して決まると仮説を立てた。この仮説を検証する。

検証に用いたモデルを Fig. 2 に示す。車両前方から流れてくる風と後流渦の関係、及び後流渦が空気抵抗に与える影響を確認するため、車両固有の要素を排除した涙滴形状 MODEL A と、自動車の床下は地面に平行であることを模擬して中心軸を下方に 8 度傾けた MODEL B の 2 つを用いた。

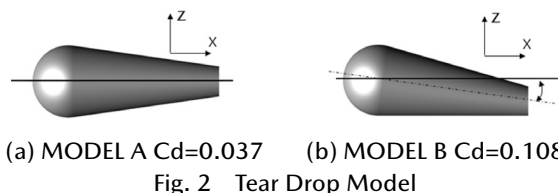


Fig. 2 Tear Drop Model

X 軸方向における運動エネルギー損失のグラフを Fig. 3 へ示す。このグラフは、モデルの前端の断面からモデル後方の運動エネルギーの減少がほぼ無くなった断面までの風流れの運動エネルギー損失を示す。MODEL B では、モデル後端以降で運動エネルギー損失が大きくなった。これは、後端上部の風が吹き下ろすことで後流渦が強まったと考えられる。

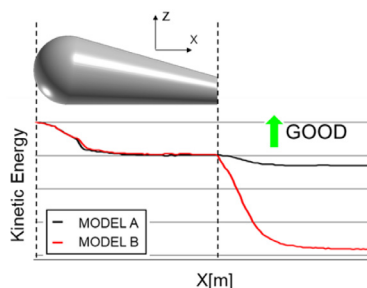
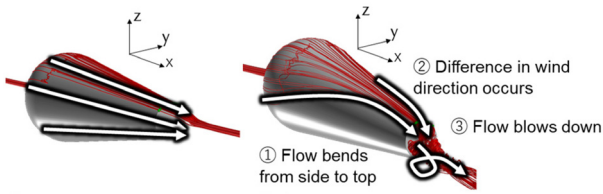


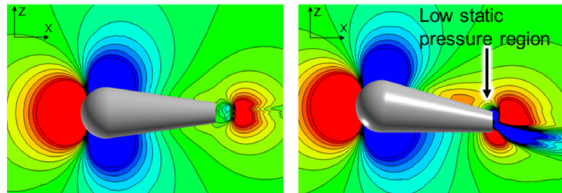
Fig. 3 Kinetic Energy of Flow around MODEL A and B

Fig. 4 にモデル表面近傍の流線を示す。両モデルとも、後端まで表面に沿って流れる。MODEL B では側面から上面に巻き込む風が発生することで (Fig. 4(b)①)、後端部で風向に差が生じ (Fig. 4(b)②)、吹き下ろす現象が確認された (Fig. 4(b)③)。

MODEL B においてモデル側面から上面に風が巻き込んだ要因を分析するため、Fig. 5 にモデル中心の Y 断面における静圧分布を示す。MODEL A では、後端部に生じた負圧が小さい。一方で MODEL B では後端部の上方に負圧が発生した。Fig. 4(b)①の流線は、この負圧に向かって巻き込んだと考えられる。

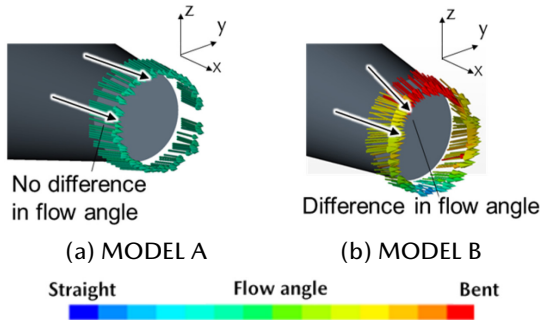


(a) MODEL A (b) MODEL B
Fig. 4 Streamlines at Body Surface and Wake



(a) MODEL A (b) MODEL B
Low Static Pressure High
Fig. 5 Static Pressure Distribution

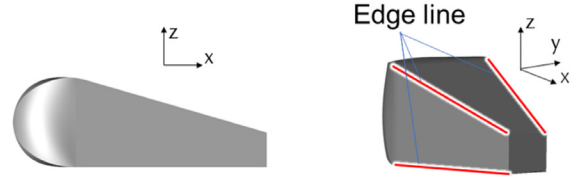
Fig. 6 にモデル後端部の X 断面の風向を示す。MODEL A では、後端部の風向は一定の角度である。一方 MODEL B では、斜め上を向く風がモデル後端までに生じるため後端部において風向差が発生し、Y 軸方向に流れが捻じれる。そのため上面の流れが押し下げられ、急激に吹き下ろす流れとなる。以上より、後流渦は後端部の形状だけでなく、後端部に至るまでの風流れにも影響されるといふ仮説は正しいことが証明された。



(a) MODEL A (b) MODEL B
Straight Flow angle Bent
Fig. 6 Velocity Distribution at Cross Section X

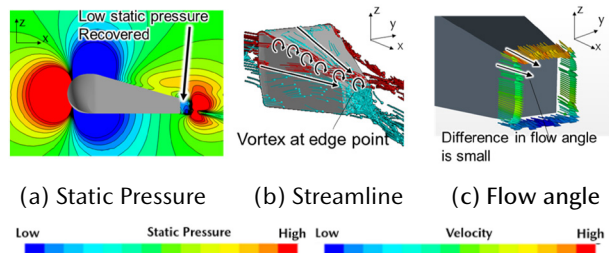
MODEL B においても、モデル上面と側面の風を後端部まで真っ直ぐに流せば、後端部での風向差が無くなり、後流の吹き下ろしが弱まるという仮説を立てた。この仮説を検証するために、丸い断面の MODEL B に対し、四面の平面にして直線のエッジ部をもつことで、上面と側面の風を真っ直ぐ流すことをねらった MODEL C を導き出した (Fig. 7)。

MODEL C の流れ場を Fig. 8 に示す。MODEL B に対し、MODEL C はモデル背面上部に生じる負圧が小さい (Fig. 8(a))。そのため側面から上面に巻き込む流れが発生しない (Fig. 8(b))。また、Fig. 8(c) に示すように、側面と上面のエッジ部で発生した渦により、側面と上面の流れ



(a) Side view (b) Diagonal view from behind
Fig. 7 MODEL C Cd=0.060

を真っ直ぐに制御できた。その結果、後流渦による運動エネルギー損失を低減できた (Fig. 9)。以上より、上面と側面の風を後端部まで真っ直ぐに流せば、後端部での風向差が無くなり、後流での吹き下ろしが弱まるという仮説は正しいことが証明された。



(a) Static Pressure (b) Streamline (c) Flow angle
Low Static Pressure High Low Velocity High
Fig. 8 Flow and Streamline at MODEL C

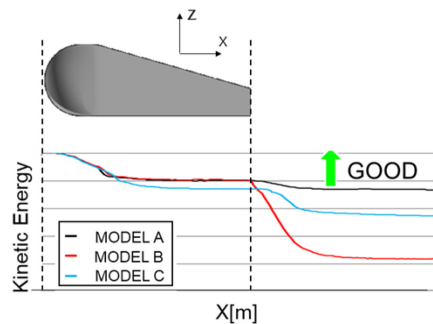


Fig. 9 Kinetic Energy of Flow at MODEL C

これを基に「四面の表面近傍を流れる風を真っ直ぐ流すことで、後端部での風向差をなくすこと」を後流渦による運動エネルギー損失を低減するコンセプトとした。

3.3 車両全体での運動エネルギー損失低減コンセプト

前節で導いたコンセプトを基に、目標とする運動エネルギー損失の低減を実現するため、車両の四面での圧力差を発生させずに速度差を低減することで後流渦の巻き込みを抑制し、後端は風向差なく流す (Fig. 10)。その風向目標を定義するため、それぞれの面の後端部における風向と運動エネルギー損失の関係を導き出した。そして、それぞれの面における風向が互いに影響し合う交互作用を考慮し、車両後方で一点収束する流れが実現できる風向を目標とした (Fig. 11)。

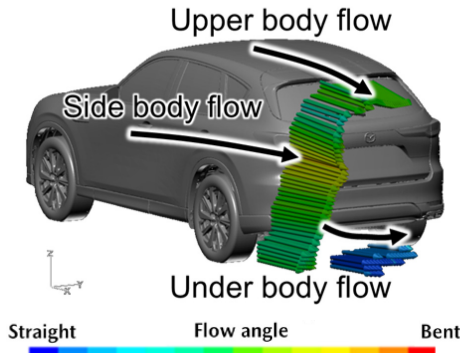


Fig. 10 Flow Angle around the Vehicle

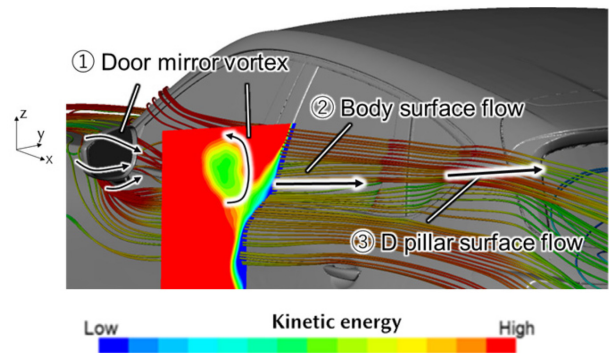


Fig. 13 Door Mirror Vortex and Body Side Flow

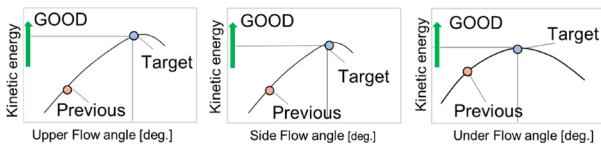


Fig. 11 Flow Angle and Kinetic Energy

4. 制御コンセプト実現のための風流れ制御技術

本章では制御コンセプト実現のための風流れ制御技術について述べる。具体的には車両後端部での風向目標を実現するために、ドアミラー・タイヤ周り・床下の個別箇所において適用したコンセプトと制御技術について述べる (Fig. 12)。

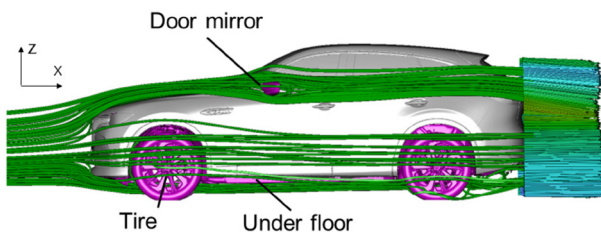


Fig. 12 Streamline around the Vehicle

4.1 ドアミラー周りでの風流れ制御技術

車両側面では、車両近傍の風を車両後端まで真っ直ぐ流すことで、ねらいの風向を実現させる。Fig. 13 にドアミラー周りの流れの模式図と、車両近傍の流線を示す。ドアミラー後方には渦が生じ (Fig. 13 ①)、その後方で流れる車両近傍の風 (Fig. 13 ②) がDピラー近傍で上方に曲った (Fig. 13 ③)。これはドアミラーとドアミラーベースの形状によって、ドアミラー後部の渦が車両表面に近づくことで、車両表面の風が巻きあげられたため、Dピラー近傍の風向が上方に曲ったと考えられる。

Dピラー及びリアサイドスポイラー部で流れの方向の模式図を Fig. 14(a) に示す。真っ直ぐ水平に流れる場合は A-A 断面に沿って流れる。巻き上がって流れる場合は B-B 断面に沿って流れる。ねらいは後端まで風を沿わせ

て流すこと (Fig. 14(b)) である。一方、Dピラー近傍で上方に曲がる流れになると、曲率が大きな断面 (Fig. 14(c)) を流れる。これによりDピラー近傍の流れが減速するため剥離が前方に移動し、ねらいの風向にできない。

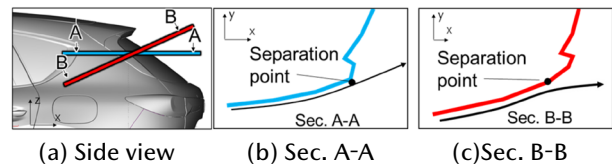


Fig. 14 Flow Image around Rear End

これを制御するため、「ドアミラー後方の渦を車両から遠ざけて車両表面の風を真っ直ぐ流すこと」をコンセプトとした。ドアミラー後方の流れを Fig. 15 に示す。ドアミラー後方の渦が車両に近づいている (Fig. 15(a)①)。これは、ドアミラーベースの外側の風向 (Fig. 15(a)②) と内側の風向 (Fig. 15(a)③) が揃わないためである。ドアミラーベースの形状で風向を揃えることで風向差を制御した (Fig. 15(b)④)。

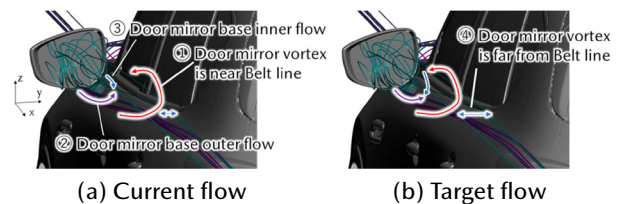


Fig. 15 Flow Image around Mirror

4.2 タイヤ周りの運動エネルギー損失低減技術

タイヤ周りでは、Fig. 16 に示す①～③の3つの混合渦によって運動エネルギー損失が生じる。これらの渦の大きさが不均一な場合、渦と渦の境界部で運動エネルギー損失が増え、その後方で渦が発達し、強まる。この渦は車両後端部で風向差を発生させ、後流渦による運動エネルギー損失が増大させる。そのため、タイヤ周りの Fig. 16 の①～③の混合渦は小さく・均一にすることが重要である。これを実現するため、タイヤ周りの各部位で渦を低減させた技術について述べる。

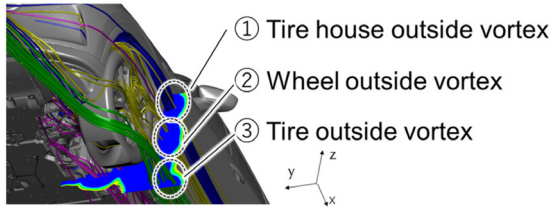
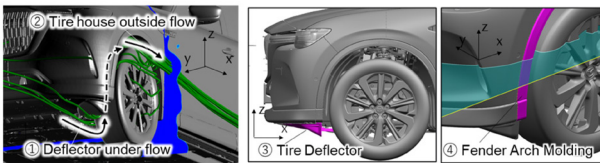


Fig. 16 Streamline around Front Tire

(1) タイヤハウスから吹き出す渦

タイヤハウスから吹き出す風流れの模式図を Fig. 17 に示す。タイヤ正面に入射した風 (Fig. 17 (a)①) が、タイヤハウス内で上方に向けて巻き上がり、バンパー側部の主流と合流するため、渦が発生する (Fig. 17 (a)②)。この渦を抑制するためにはタイヤ正面から巻き上がる風速を下げつつ、タイヤハウスから吹き出す風とバンパー側部の風を風向差なく合流させることが重要である。そのため、タイヤデフレクター (Fig. 17 (b)③) の面角度・高さでタイヤ正面からタイヤハウス内の上方に向かう風を制御し、タイヤハウスから吹き出す風の向きを真っ直ぐにした。また、フェンダーアーチモールルの断面形状でバンパー側部を通る風の向きも真っ直ぐにした (Fig. 17 (c)④)。これらにより風向差を制御した。



(a) Streamline and Tire House Vortex (b) Tire Deflector (c) Fender Arch Mole

Fig. 17 Flow Image around Tire House and Parts

(2) ホイールから吹き出す渦

ホイール周りの風流れの模式図を Fig. 18 に示す。エンジンルームからホイールに向かう風 (Fig. 18 ①)、バンパー下部からタイヤデフレクター内側を通った風がホイール内に入る風 (Fig. 18 ②)、それらの風がバンパー側部の主流 (Fig. 18 ③) と合流する際に渦が発生する (Fig. 18 ④)。

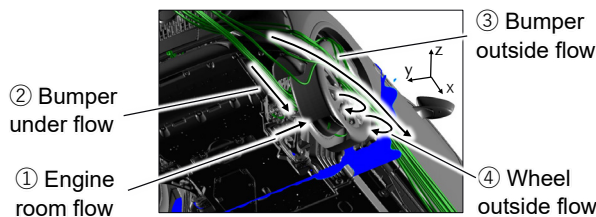
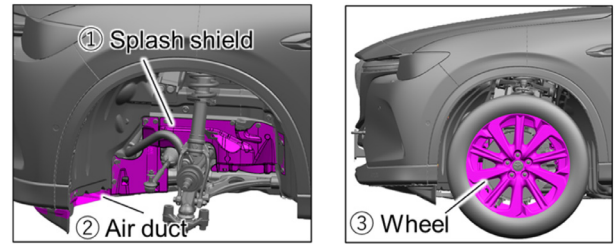


Fig. 18 Streamline and Tire Side Vortex

ホイール内に入る風は、タイヤハウス内から出てゆく風の速度と向きによって決まるため、この制御が渦の低

減に重要である。タイヤハウス内から出る風速と風向は、エンジンルームとタイヤハウスの空隙を閉塞しているスプラッシュシールドの開口面積を縮小することで制御した (Fig. 19 (a)①)。バンパー下部からタイヤデフレクター内側を通る風は、ダクト (Fig. 19 (a)②) を通ってエンジンルームから吹き出す風によって向きをまっすぐにし、ホイール内に向かう風を抑制した。ホイール内の風は、ホイール外周の形状 (Fig. 19 (b)③) を用いて、バンパー側部の主流との風向差を制御した。



(a) Tire house parts (b) Wheel

Fig. 19 Tire House Parts and Wheel

(3) タイヤ下部の外側で発生する渦

タイヤ下部の外側の流れを Fig. 20 に示す。バンパー下部を通過した風 (Fig. 20 ①) が、タイヤ正面に対し内側から斜めに入射する。これによりタイヤ側部に向かう風速が大きくなり、タイヤショルダ部で風が追従しきれず、渦が発生する⁽⁴⁾ (Fig. 20 ②)。

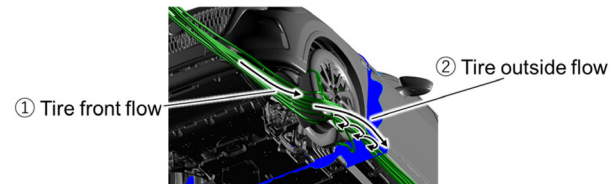


Fig. 20 Streamline and Tire Outside Vortex

タイヤショルダ部で風を沿わせるためには、タイヤ正面向かって真っ直ぐ風を入射し、タイヤ側部に向かう風向を真っ直ぐにすることが重要である。そこで、タイヤに沿わせるためにタイヤデフレクター形状 (Fig. 21) で風を真っ直ぐに入射させ、タイヤ下部の外側の風向を制御した。

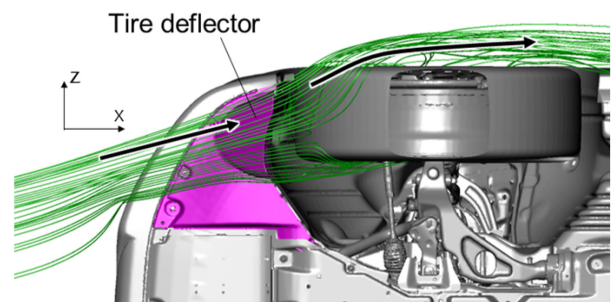


Fig. 21 Streamline and Tire Deflector

4.3 床下での運動エネルギー損失の低減技術

床下の流れを Fig. 22 に示す。エンジンルームからフロントタイヤ後方や床下に吹き出す風による混合渦が発生する (Fig. 22 ①)。これらの渦によって床下で風が曲げられ、ボディーサイドに吹き出す (Fig. 22 ②)。その風がリアタイヤに斜めに当たることで、リアタイヤ周りの混合渦を強める (Fig. 22 ③)。

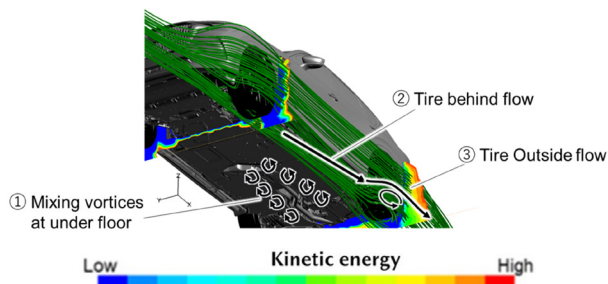


Fig. 22 Flow Image around Under Floor

リアタイヤに真っ直ぐ風を当てて混合渦を改善するために、以降の3点を要件化した。

- 1) エンジンルームからホイールハウスの内側に吹き出す風向をタイヤ周りの主流の風向に合わせて速度差を小さくする。
- 2) 床下は平滑化する。
- 3) 渦が発生しても真っ直ぐ流す。

特に、3) 渦が発生しても真っ直ぐ流す要件については、3.2 節の Fig. 8 (b) で述べたエッジ部で生じる渦による巻き込み抑制の現象を応用した。具体的には、マッドガード後端部の凹凸 (Fig. 23 (a) ①) で渦を発生させ (Fig. 23 (b) ③)、タイヤ内側を通った風を真っ直ぐにする。そしてフロアカバー外端部の側面から下面に巻き込む際にエッジ部 (Fig. 23 (a) ②) で渦 (Fig. 23 (b) ④) を活用し、床下からボディーサイドに向かう風を真っ直ぐ流した (Fig. 23 (b) ⑤)。

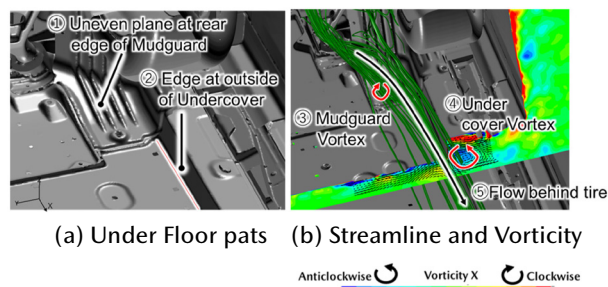


Fig. 23 Flow Image at behind the Front Wheel

4.4 後流部の風流れ

以上、車両後端に至るまでの個別箇所において適用したコンセプトと風流れ制御技術により、上面・側面・下面のそれぞれの面でねらった風向を実現でき、前モデル

比で Cd 値を約 12% 低減する技術を確立した (Fig. 24, 25)。

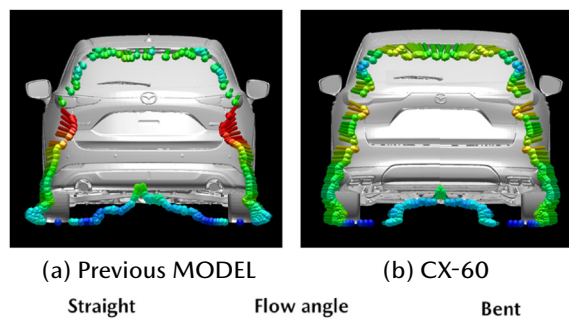


Fig. 24 Flow Angle Distribution at Rear End

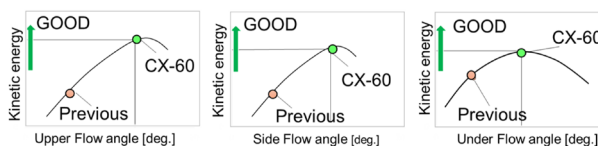


Fig. 25 Flow Angle and Kinetic Energy

5. CX-60 の空力開発への適用

5.1 後流渦を制御する技術の車両への適用

4 章で確立した風流れの制御技術を基に、CFD をベースとした開発によって魂動デザインと高次元で両立させつつ、車両周り全体で風流れの運動エネルギー損失を低減させる構造を CX-60 に織り込んだ (Fig. 26)。

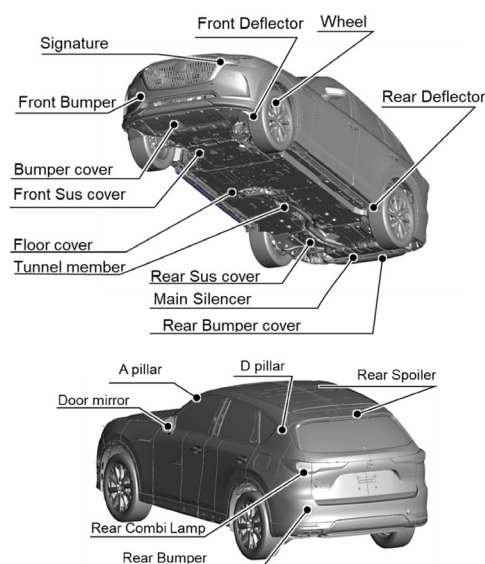


Fig. 26 Aerodynamic Parts of CX-60

5.2 最終性能の実機検証

シュツットガルト工科大学の FKFS 風洞にて、最終性能確認車両を用いて、車両後端部の風向及び風流れの運動エネルギーを計測し、CFD と比較検証した (Fig. 27,

28)。風向特性と運動エネルギーは、いずれも良く一致している。加えて、目標とするCd値が実現できていることを確認し、CFDを主体として導出したコンセプトが妥当であることを検証した。最終的に、従来同型比12%のCd値改善によりクラストップレベルのCd値を達成できた (Fig. 29)。

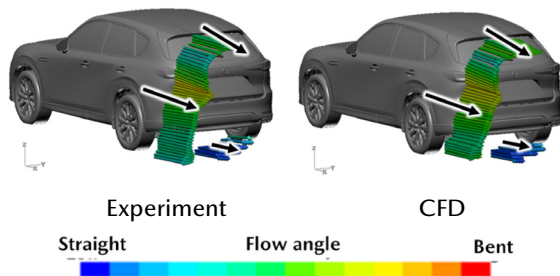


Fig. 27 Flow Angle around CX-60

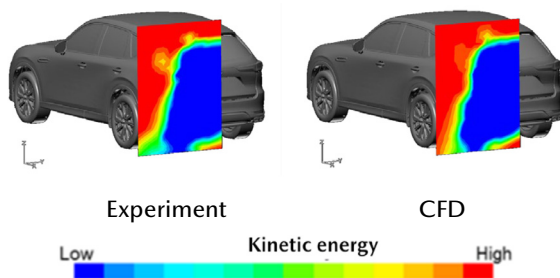


Fig. 28 Kinetic Energy behind CX-60

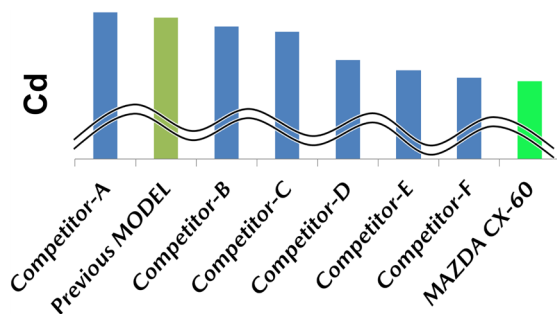


Fig. 29 Aerodynamic Drag Coefficient of CX-60 and Competitors Measured in Wind Tunnel

6. おわりに

風流れのメカニズム解明を通して制御技術を進化させ、デザイナーとの共創活動を行うことでCX-60デザインコンセプトとクラストップレベルのCd値の両立を実現できた。マツダは引き続き、熱や風流れの制御技術を追求しながら、共創活動の拡大により車両全体の性能を向上させ、お客様により良い商品を提供していく。

参考文献

- (1) 久我秀功ほか：新型MAZDA3の熱流体エネルギーマネジメント技術，[マツダ技報](#)，No.36，pp.102-

[106](#) (2019)

- (2) 岡本 哲ほか：次世代商品群の空力・空力騒音性能開発，[マツダ技報](#)，No.35，pp.21-25 (2018)
- (3) Irving Brown, et al.: Effect of Base Bleed and Rear Cavities on the Drag of an SUV, SAE Technical Paper 2010-01-0512 (2010)
- (4) 中田章博ほか：タイヤ周りの風流れ制御技術を適用したMAZDA CX-30の空力開発，[マツダ技報](#)，No.37，pp.19-26 (2020)

■ 著 者 ■



伊川 雄希



久我 秀功



岡本 哲

特集：MAZDA CX-60

15

CX-60 の軽量・高剛性ボディー開発

Development of Light Weight and High-Rigidity Body Structure for CX-60

梶 裕貴^{*1} 山崎 忠^{*2} 影山 和宏^{*3}
 Hiroataka Natsume Tadashi Yamazaki Kazuhiro Kageyama
 川野 晃寛^{*4} 後藤 英貴^{*5}
 Akihiro Kawano Hidetaka Goto

要 約

CX-60 は、MAZDA3 で採用した SKYACTIV-VEHICLE ARCHITECTURE⁽¹⁾ を進化させ、エンジン縦置き方式を採用したラージ商品群の第一弾モデルである。本稿では、ボディーの機能をエネルギー視点で開発する「エネルギーコントロールボディー」という新たな取り組みについて紹介する。エネルギーの伝達・吸収・流入抑制・減衰について理想を掲げ、それを実現するための3つのコンセプト「軸で受け途切れないロードパス」、「入力点剛性アップ」、「高歪部位への減衰特性付与」に基づき、環状構造や結合部の強化と材料・工法の進化を取り込み、具体構造化した。これらにより、ラージ商品群でボディーが目指す価値を実現できた。

Abstract

Mazda CX-60 is evolved Skyactiv-Vehicle Architecture which has been adopted in Mazda3, and is first model of Large product group to adopt longitudinal engine. This article introduces new initiative 「Energy Control Body Structure」 which we develop body shell function from energy perspective. We decided an ideal about energy transfer, reflection, absorption, damping. We enhanced ring structure and joint stiffness, and evolved material and construction method, based on three concept 「axial and continuous load path」 「rigidity improvement on load input point」 「damping at high strain part」. We realized aim value of body structure by these activities.

Key words : Vehicle development, Platform, Body structure/body Design

1. はじめに

初代CX-5 から採用したSKYACTIV-BODYは、MAZDA3 において SKYACTIV-VEHICLE ARCHITECTURE に進化し、飛躍的な性能向上を実現した。CX-60 では、それを更に凌駕するボディーの開発を行った。

CX-60 のボディーはエンジン縦置き、後輪駆動を前提とし、2列シート/3列シートや車幅違いといった幅広い商品スコープに対応可能としている。また、PHEVバッテリーの床下配置を可能とする構造とした上で、電駆方式（PHEV、Mild Hybrid、Hybrid 非搭載）によらず基本構造を共通とし、開発効率を向上させた。

2. 開発のコンセプト

2.1 ラージ商品群/CX-60 のボディーが目指す価値

CX-60 の開発において、マツダは以下3つの価値を軽

量なボディーで実現することを目指した (Fig. 1)。

- ・身体拡張能力を引き出す骨格剛性値の連続性
- ・快適な乗り心地と上質な静粛性
- ・世界最高レベルの衝突安全性能

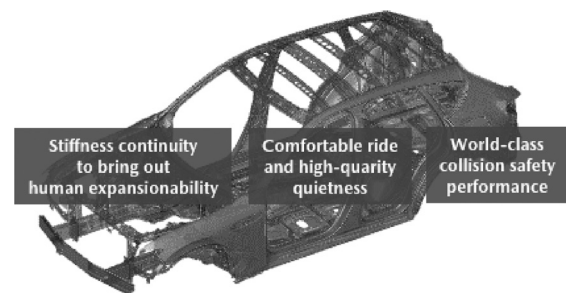


Fig. 1 Values of Body Structure

「身体拡張能力」とは、人間が道具を使う際に、道具を身体の一部のように使いこなす能力のことであり、大き

*1~5 ボデー開発部
Body Development Dept.

なパワーとサイズをもった車を、神経の通った手足のように自在に操れる状態が理想である。ボディー領域では、

- ・骨格各部位の剛性値に連続性をもたせることにより、操舵に対して遅れなくボディーを反応させること。
- ・車体微振動の抑制により、人間がボディーの反応を感じ取る際のノイズを小さくすること。すなわちクルマの挙動をクリアに感じ取れるようにすること。

が必要である。

また今後展開されるラージ商品群においても、同じコンセプトに基づく車体骨格の基本構造を「固定要素」、車格やデザインにより変えるべき領域を「変動要素」とすることで、共通の価値を提供することをねらいとし、開発を行った。

2.2 エネルギー視点での開発

2.1 節の3つの価値を実現するためにマツダが考えたキーワードは、ボディーがもつさまざまな機能をエネルギー視点で全体統合する「エネルギーコントロールボディー」である。クルマが使われるさまざまなシーンについて、エネルギーの状態（伝達・流入・吸収・減衰）がどのようになっているか明らかにした。それぞれの価値をエネルギー視点で考えると、

- ・骨格各部位の剛性値の連続性：走行時の弾性エネルギー
- ・衝突安全性能：衝突時の運動エネルギー
- ・乗り心地・静粛性：走行時の振動／音エネルギーをいかにコントロールするのが重要である。

2.3 構造決定へのアプローチ

クルマ全体でそれぞれのエネルギーをコントロールする上で、以下3つのポイントに注力した (Fig. 2)。

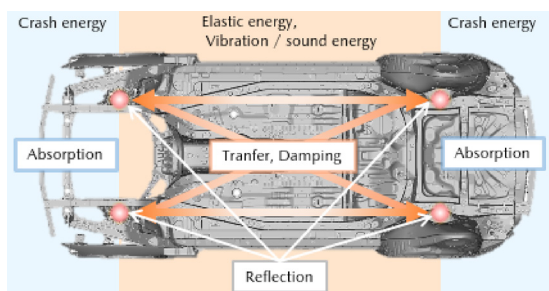


Fig. 2 Energy Flows of Body Shell

- ・走行時の弾性エネルギー：フロントサスペンションとリアサスペンションの間を伝わる骨格における剛性値の不連続部を作らず、ロスなく伝達する。
- ・衝突時の運動エネルギー：車両のもつ運動エネルギーを、ボディー骨格部材で吸収する際の効率を追求する。
- ・走行時の振動／音エネルギー：サスペンションから

のエネルギー流入を入力点で抑制させてボディーに伝えない。伝わってきた振動／音エネルギーを減衰（熱に変換）させる。

それらを実現するための構造化コンセプトの1つ目は「軸で受け途切れないロードパス」である。例えば、ボディーフレームを模擬したケーススタディにおいて、軸方向に荷重を加えた場合、曲げ方向に荷重を加えた場合に比べ、フレームに発生する歪エネルギーが約50分の1となる。エネルギーを効率よく軸で受け、かつそれを途切れさせないことを、構造検討する上でのコンセプトとした (Fig. 3)。

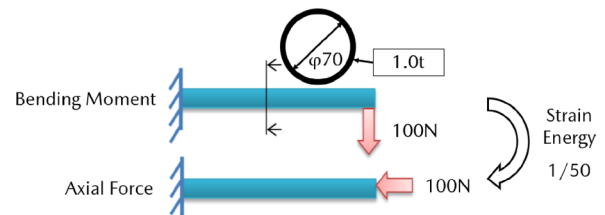


Fig. 3 Difference of Axial Force and Bending Moment

2つ目は「入力点剛性アップ」である。ボディー全体の剛性を高めるよりも、入力点の剛性を高める方が、エネルギー流入を抑制させる上で効率的であることが分かった。最適な剛性バランスによりエネルギー流入を抑制させるコンセプトとした。

3つ目は「高歪部位への減衰特性付与」である。ボディーに伝わってきた振動／音を発生させる歪みエネルギーをコントロールし、歪みエネルギーが集中した部位に減衰接着剤を設定することで効率的にエネルギーを減衰させるコンセプトとした。

これらのコンセプトにより、まず、「軸で受け途切れないロードパス」に基づき、エネルギーの流れを見ながら全体のフレームワークを決め、骨格が過剰になりすぎないように入力点剛性を高めてエネルギー流入を抑制させ、歪エネルギー分布に基づき減衰接着剤を設定した。

3. ボディーの進化

3.1 構造化コンセプトに基づいて設計した構造・材料

2.3 節で述べた3つの構造化コンセプトに基づいて設計した構造について述べる。

(1) 軸で受け途切れないロードパス（弾性、衝突、振動／音）

「軸で受けるコンセプト」を車体構造で実現するため、CX-60ではさまざまな入力に対して軸で受けるパスを配置した。更に「途切れないロードパス」実現のためにパス同士をスムーズに繋ぎ、多方向の環状構造配置⁽¹⁾とした。これにより、あらゆる方向からの入力に対してロードパスに受け止める構造の下地を作った。

しかし、パス同士の結合部でエネルギーロスが生じる。

今回、CX-60 では結合部剛性を改善するため、外板のボディーアッセンブリー工程を変更することで、質量を低減しながら CX-5 比同等以上の結合部剛性を確保した (Fig. 4)。

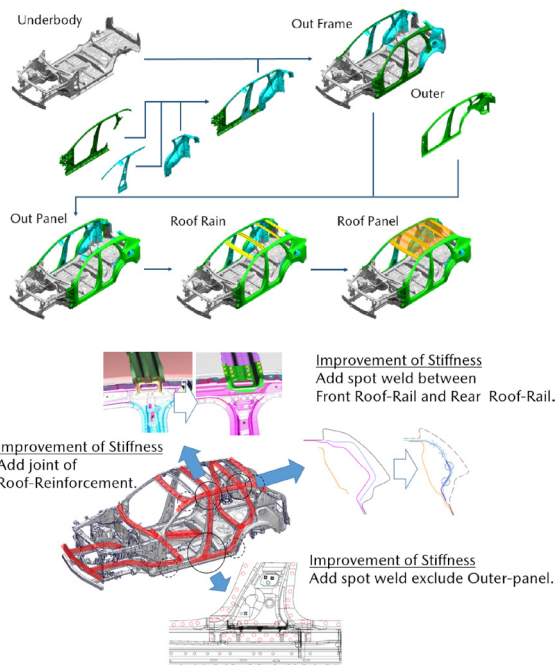


Fig. 4 Improvement of BOP & Joint Stiffness

同じく骨格剛性値の連続性を妨げているトンネル部について、高剛性部材であるトランスミッションメンバーを効率よく活用し、車体骨格であるフロアメンバー位置と一致するように配置することで、入力を軸方向に支える連続的なアーキテクチャーを実現した (Fig. 5)。

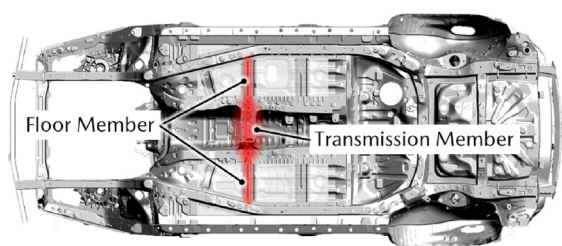


Fig. 5 Transmission Member & Floor Member Structure

軸方向に配置した各パスの具体的な仕様を決めるにあたり、複数の衝突モードに対して機能をもつ部品を中心に高強度材料を採用し、軽量化を図った。

また CX-60 に適用する材料強度自体も進化させるべく、技術開発テーマとして取り上げ、鋼材メーカーや生産部門を含めた共創活動で材料開発に取り組んだ。一般的に材料強度を高めた際の重要課題となる遅れ破壊への対応や、スポット溶接部の強度予測精度向上など、数多くの課題を開発日程内で解決し、1.8GPa 級ホットスタンプ材及び 1470MPa 級の冷間ハイテン材の車体適用を実現した。これらを含むドア開口周りの衝突骨格部品の材

料強度アップにより、32%の質量低減と乗員生存空間確保のブレークスルーを達成した (Fig. 6)。

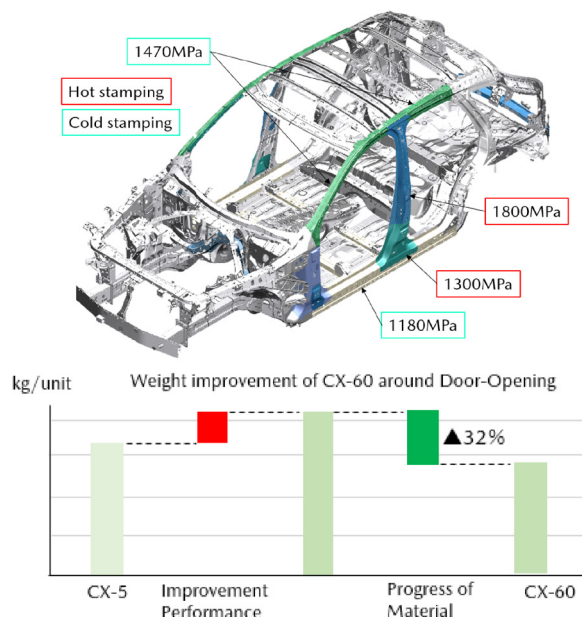


Fig. 6 Adaption of High Tensile Strength Steel

(2) 入力点剛性アップ (振動/音)

サスペンションからの入力点であるダンパートップ部において、サスペンションブッシュ (車両) -ダンパートップ (車体) 間の剛性比を大きくすることで、エネルギー流入を抑制した。入力点剛性アップのため、マツダのボディー領域に初採用となるアルミダイカストを前後ダンパートップ部に採用した (Fig. 7)。従来の鉄構造では、形状/板厚/接合の制約から剛性アップに限界があり、形状自由度の高いアルミダイカストを採用し、新開発の高耐食性剛性接着剤⁽²⁾と併用することで、ねらいの剛性比を確保した。

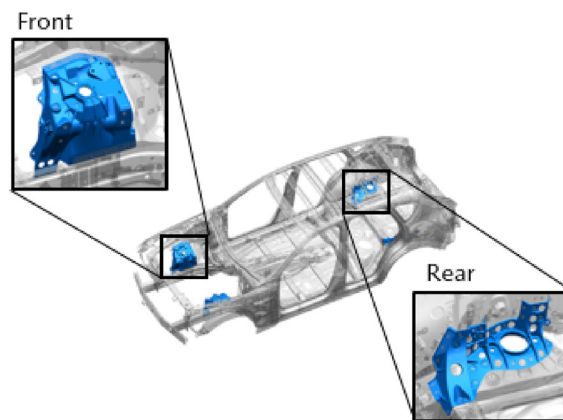


Fig. 7 Aluminum Die Casting

また、ダンパートップの支持剛性自体も CX-5 から大きく進化し、フロントが 52%，リアが 31%改善した (Fig. 8)。

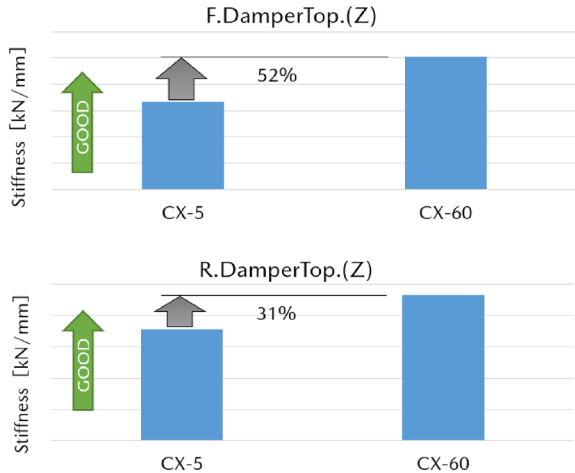


Fig. 8 Suspension Mounting Rigidity

(3) 高歪部位への減衰特性付与 (振動/音)

ボディに伝わった振動/音エネルギーを熱エネルギーに変換して減衰させるため、減衰節、減衰接着剤を適切に配置した。減衰接着剤の塗布長は、初めて適用した MAZDA3 の塗布長 7m から大幅に拡大させ、19m とした (Fig. 9)。

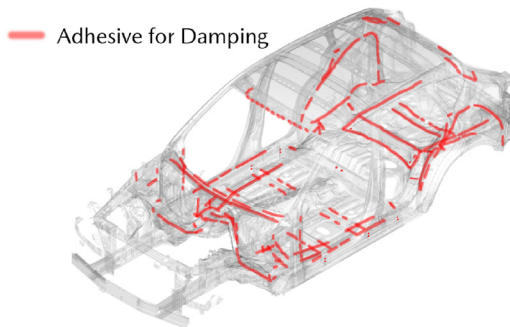


Fig. 9 Adaption of Adhesive for Damping

3.2 構造化コンセプトに基づいたエネルギーコントロール

(1) 走行時の弾性エネルギー

SKYACTIV-VEHICLE ARCHITECTURE の多環状骨格構造をベースに、ボディの結合部の進化を取り込むことで、剛性の連続性を強化した。これにより弾性エネルギーの伝達ロスを 24% 低減させた (Fig. 10)。

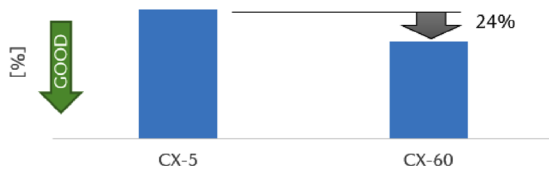


Fig. 10 Loss of the Energy Transmission

(2) 衝突時の運動エネルギー

衝突エネルギー制御の一例として、フロントフレームの事例を挙げる。フレームを軸圧縮させることにより、効率的にエネルギー吸収する構造とした。縦置きエンジンによ

る幅方向のスペースを活用し、フロントフレームをストレートに通し、かつ幅方向の断面を確保することでねらいの軸圧縮を実現した。これによりフロントフレームのエネルギー吸収量を CX-5 比で 2 倍に高めた (Fig. 11)。

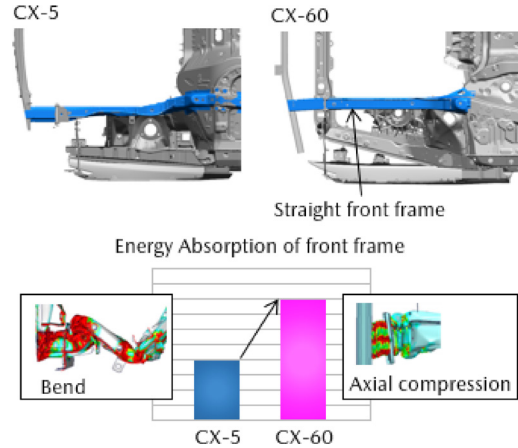


Fig. 11 Energy Absorption of Front Frame

(3) 走行時の振動/音エネルギー

ダンパトップのアルミダイキャスト化により、サスペンションブッシュとダンパトップの剛性比をねらいの値とすることで、振動/音エネルギー流入量を 50% 削減した。

減衰節、減衰接着剤の適用により、振動/音エネルギーから熱エネルギーへの変換率を 12% 向上した (Fig. 12)。

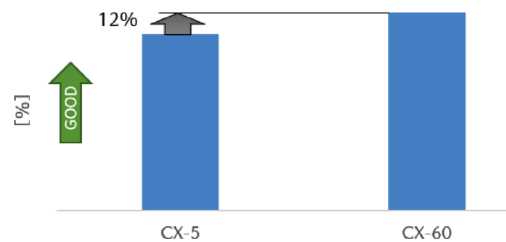


Fig. 12 Conversion Rate to Thermal Energy

3.3 エネルギーコントロールにより実現した性能

(1) 身体拡張能力を引き出す骨格剛性値の連続性 (操縦安定性能)

先述のエネルギー伝達のコントロールにより、人間がボディの反応を感じ取る際のノイズを小さくした。そして、クルマの挙動をより把握しやすく、身体拡張能力を高めることができた。

また、骨格剛性値の連続性を向上させたことで、ボディ骨格の 1 次振り共振を約 20% 改善した (Fig. 13)。

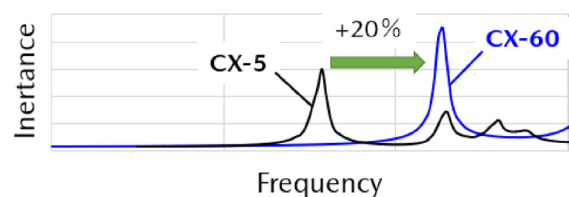


Fig. 13 Improvement of 1st Torsion-Resonance

(2) 世界最高レベルの衝突安全性

エネルギー吸収のコントロールにより、衝突時の運動エネルギーを効率的にボディー骨格で吸収し、乗員や歩行者を保護する構造とした。さまざまな状況を想定した安全性評価を実施し、世界最高レベルの衝突安全性を実現した（欧州の衝突安全アセスメントである EuroNCAP で、2022 年に最高ランクの 5★を獲得）。

また、フロントフロア下に配置した PHEV 用バッテリー保護においては、衝撃を効率よく吸収するエリアと軸で受け耐えるエリアを明確化し、側突時の車体の変形挙動をコントロールすることで、バッテリー筐体保護構造を確立した。これにより質量増を抑制しながらバッテリーの生存空間を確保し、衝突時の安全性を確保することができた。

エネルギー吸収効率を高めたことと高強度材料の適用により、CX-5 よりも大きな車体でありながら、質量は同等とすることができた (Fig. 14)。

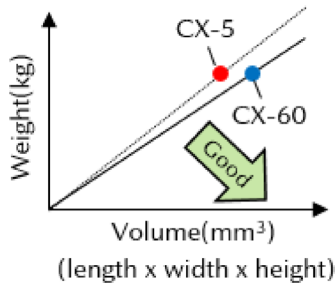


Fig. 14 Body Shell Weight per Volume

(3) 快適な乗り心地と上質な静粛性

振動／音エネルギーのコントロールにより、20-100Hz 帯のフロア振動は 25%低減、100-160Hz 帯の音圧レベルは 5%低減し、快適な乗り心地と上質な静粛性を実現した (Fig. 15)。

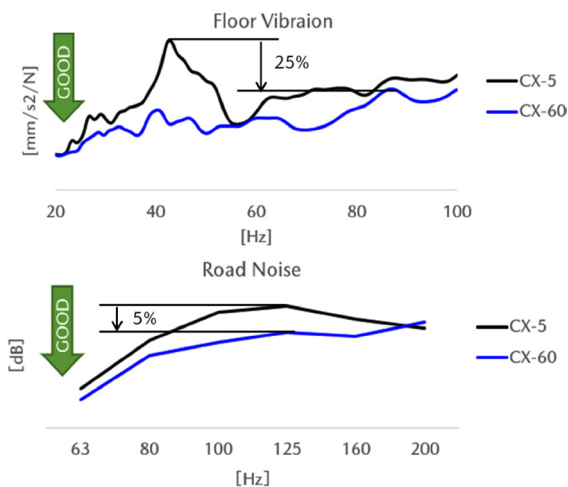


Fig. 15 Floor Vibration and Road Noise

また、CX-60 では SKYACTIV-X の開発で構築したコンセプト「カプセル構造によるエネルギーの統合制御」を基に、更なる効率アップと遮熱・臭気／雨水遮断・部品

保持の機能をねらいとしたエンジンルームカプセル構造を採用した (Fig. 16)。

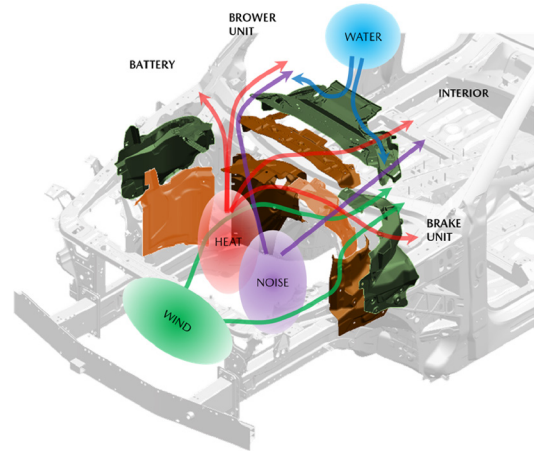


Fig. 16 Capsule Structure of Engine Room

これにより、エンジンノイズの吸遮音性向上による上質な車内静粛性の達成に加え、

- ・優れた実用燃費の達成
- ・高効率な熱エネルギーマネジメント
- ・フロア下の風流れ制御による Cd 値改善

など、1 ユニットでマルチな性能向上を担う多機能型構造を確立した。

4. おわりに

新型 CX-60 は、SKYACTIV-VEHICLE ARCHITECTURE をベースに、新世代ラージ商品群に相応しい機能進化を実現し、CX-5 から商品力を飛躍的に進化させることができた。この成果は企画やデザインをはじめ、関連部門と高い志を共有し、六位一体（開発・生産・購買・品質・物流・サプライヤー様）で活動を進めた結果である。今後もお客様の期待を上回り、喜んでいただけるよう、魅力ある商品開発に尽力していく所存である。

参考文献

- (1) 佐藤健一ほか：新型 MAZDA3 の軽量・高剛性ボディー開発, [マツダ技報, No.36, pp.78-82 \(2019\)](#)
- (2) 麻川元康ほか：耐食性に優れた構造用接着剤の開発, 自技会 2022 年春季大会前刷集, No.68-22 (2022)

■著者■



栢 裕貴



山崎 忠



影山 和宏



川野 晃寛



後藤 英貴

特集：MAZDA CX-60

16

CX-60 の衝突安全性能

Passive Safety of CX-60

辻 大介 *1 澤田 庸介 *2 黒田 一平 *3 谷本 晃一 *4
Daisuke Tsuji Yosuke Sawada Ippei Kuroda Kohichi Tanimoto
松下 幸治 *5 安藤 亮 *6 水口 浩爾 *7
Kouji Matsushita Ryo Ando Hiroshi Mizuguchi

要 約

マツダでは、「走る歓び」と「優れた環境・安全性能」を目標に、安全・安心なクルマと社会の実現を目指した商品開発を実施している。その中で、衝突安全性能開発は高い安全性能と軽量化という背反傾向の関係を高次元で両立させるために、MBD (Model Based Development) を駆使して車両構造を開発している。「SKYACTIV-VEHICLE ARCHITECTURE」に代表される車体開発では、高精度 CAE 技術を用いて衝突時の荷重を効率的に吸収し、分散して支えるマルチロードパスを進化させた新しいアーキテクチャーを作り上げた。

新型 CX-60 では、後輪駆動をベースとした新たなプラットフォームに、実際の事故・傷害形態の分析からバックキャストした衝突安全技術を高次元で融合し、高いエネルギー吸収効率を備えた車体構造、相手車保護及び歩行者保護を進化させ、欧州の衝突安全アセスメント (New Car Assessment Program: NCAP) である Euro NCAP で、2022 年に最高ランクの 5 星を獲得した。本稿では、代表的な衝突形態である前面衝突、側面衝突、後面衝突及び歩行者保護について織り込んだ技術を紹介する。

Abstract

Mazda has been developing products to realize safe and secure cars and society, aiming to achieve “outstanding environmental and safety performance” and “driving pleasure”. In crash safety development, Mazda uses MBD (Model Based Development) to develop vehicle structures with the aim to combine conflicting relationship, light weight and safety performance, at a high level. In vehicle body development characterized by Mazda Skyactiv-Vehicle Architecture, the new architecture was developed by using high-accuracy CAE technology. This is a structure evolved from the multi-load path structure with which a collision load is efficiently absorbed and dispersed to endure it.

The CX-60 combines a new platform based on rear-wheel drive with the crash safety technology that is backcast from the analysis of real-world accident/injury forms, at a high level. It won the best five-star rating in the 2022 Euro NCAP by evolving the technologies of high energy absorption efficiency-equipped body structure, partner and pedestrian protection. This report introduces the technologies incorporated in typical crash modes: frontal, side, and rear collision, and pedestrian protection.

Key words : Safety, Passive Safety, Crash Safety, Pedestrian Protection, Compatibility, Body Structure, Energy Absorption, Partner Protection, Platform, CAE

1. はじめに

交通事故による死者数は、日本では減少傾向にあるものの、世界的には依然として大きな社会問題であり、更なる安全性能の向上が求められている。そのため、MAZDA3 以降の新型車では、万が一の衝突事故における

乗員や歩行者の保護性能を向上するため、市場でのさまざまな事故・傷害形態の分析と人体における傷害発生メカニズム (人間研究) を開発の軸とした。

また、深化した魂動デザインと意のままに操る楽しさを実現するために、高効率な衝突エネルギー吸収技術を最軽量の構造として具現化するための進化にも取り組ん

*1~7 衝突性能開発部
Crash Safety Development Dept.

だ。この進化のポイントは、机上開発の段階において、衝突及び衝突に関連する他性能の進化の構想をエネルギーの状態（伝達・吸収・反射・減衰）で分類し、衝突と同体質なものを統合することで、全体最適・高効率なロードパスを創出・構造化する MBD 技術の高精度化と適用拡大である。

新型 CX-60 では、特徴である後輪駆動やエンジン縦置き方式、PHEV の大容量リチウムイオンバッテリーの床下配置などの技術と、MAZDA3⁽¹⁾ で衝突安全性能を大きく進化させた新世代車両構造技術「SKYACTIV-VEHICLE ARCHITECTURE」を融合させた。更に、大型化による車両質量の増加への対応として、高強度材料への置換や、車体骨格の結合部強化・断面形状工夫、フレームのストレート化による軸方向への荷重の伝達率向上により、衝突時の荷重を吸収・分散して支える機能を更に進化させた構造で、軽量化と衝突安全性能の向上に取り組んだ。

本稿では、衝突安全性能と新型 CX-60 の特徴を高次元で両立させた「SKYACTIV-VEHICLE ARCHITECTURE」の進化について、代表的な衝突形態である前面衝突、側面衝突、後面衝突及び歩行者保護の各観点から紹介する。

2. 前面衝突性能開発

2.1 Large 商品群における前面衝突対応車体技術の進化

前面衝突は、エンジンルームを潰して衝突エネルギーを吸収し、乗員の傷害を軽減するのが一般的だが、CX-60 は、6気筒エンジンの縦置きパワートレインとショートオーバーハングデザインにおけるクラッシュアブルゾーンの確保や、プラグインハイブリッドによる重量増加、高電圧保護など、多くの課題があった。CX-60 はこれらの課題に対し、マルチロードパスによる荷重分散、高エネルギー吸収構造及び骨格部材の高強度化という3つのブレークスルー技術によって、軽量かつ優れた前面衝突安全性能、そして CX-60 のデザインを実現するトップレベルのショートオーバーハング（852mm）を達成している。

(1) マルチロードパスによる荷重分散

CX-60 はあらゆる方向の入力に対して乗員に加わる衝撃を和らげ、客室の変形を最小限にとどめるため、前突時の入力をメイン系列（フロントフレーム）・アッパー系列（エプロン）・ロアー系列（サスクロス部品）の3つのロードパスで効率的にエネルギーを吸収する構造を採用した（Fig. 1）。更にフロントフレームからの入力は、従来の B フレームに加え、トンネルサイドやトルクボックス、アッパーロードパスに伝達するなど、各系列の入力をキャビンの各部材に分散させることで、客室変形を抑え乗員への直接的な被害の軽減を図った。

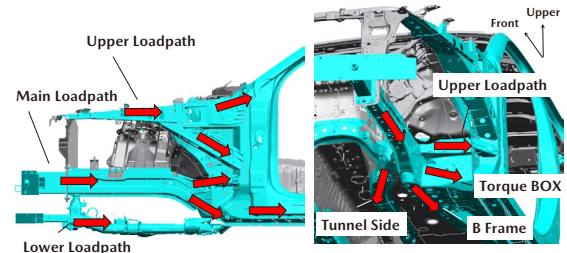


Fig. 1 Multi-Load-Path Structure for Frontal Crash

(2) 高エネルギー吸収構造

CX-60 は限られたスペースの中でより効率的に衝突エネルギーを吸収するために、縦置きエンジンのメリットを生かし、メインロードパスのクラッシュボックス〜フロントフレーム〜キックアップ〜B フレーム、ロアーロードパスのクラッシュボックス〜サスクロスなど、骨格部材を最大限ストレート化することで荷重の伝達率を上げ、質量効率の良い骨格を実現した（Fig. 2）。

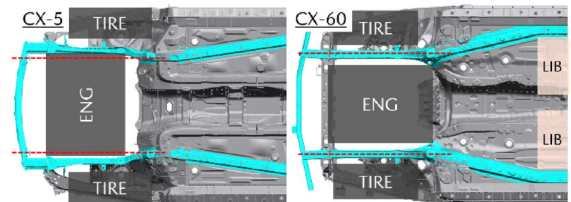


Fig. 2 Comparison of Body Structure

また、フロントフレーム部においては、安定的な軸圧縮変形を実現し、エネルギー吸収効率を倍増させながら省スペース化と軽量化を両立させる断面中心のストレート化や、変形周期コントロールの節、フレーム前部と後部で断面構造を変える稜線徐変構造を織り込んだ（Fig. 3）。これにより、CX-60 はひとつのボディで ICE と PHEV を搭載可能な構造としつつ、高い前面衝突安全性能と軽量化を実現している。

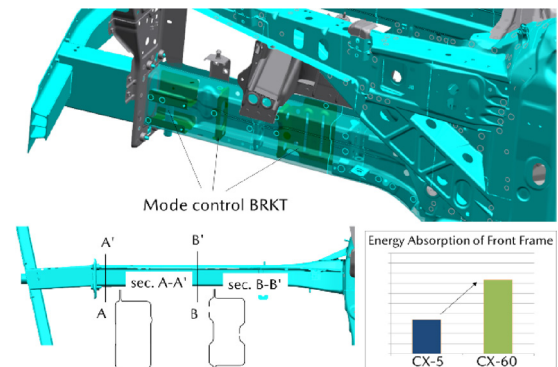


Fig. 3 Mechanism of Straight Frame

(3) 骨格部材の高強度化

CX-60 は前突時の客室エリアの変形抑制と軽量化のため、A ピラーからルーフサイドに冷延 1470MPa 級の超

高強度鋼板を、ヒンジピラーとダッシュクロスにはホットスタンプ材をマツダ車として初めて採用し、高強度化を図った (Fig. 4)。これにより、荷重入力に対して客室の変形を最小限にとどめ、乗員傷害の低減に繋がった。また、これらの構造化のために、新たに開発したホットスタンプのスポット溶接強度を高精度で評価できる CAE 技術を確立した。

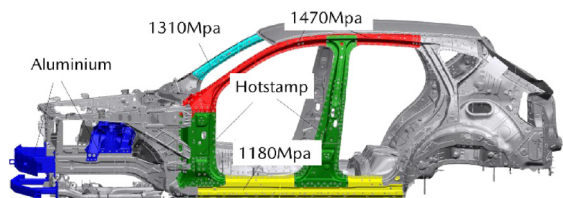


Fig. 4 High-Tensile

2.2 相手車保護構造の進化

CX-60 では万が一の車対車衝突時に相手車両も保護する技術として、車両フロント部の発生荷重均質化構造を採用した。相手車保護には、自車と相手車双方のエンジンルーム内におけるエネルギー吸収を最大化することが効果的である (Fig. 5)。これを実現するために、車両フロント部のサブフレーム前にペリメータービームを新たに設置し、バンパーレインとともにワイド化することで、自車と相手車双方のエネルギー吸収発生機会の最大化を実現した (Fig. 6)。

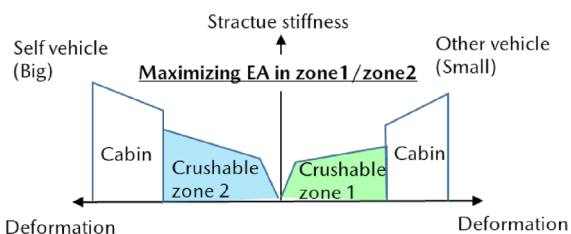


Fig. 5 Maximizing EA in the Two Vehicle's Collision

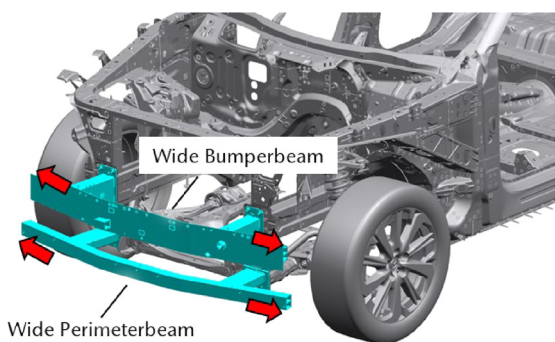


Fig. 6 Load Homogenization Structure of CX-60

本構造と従来構造にて、車対車衝突 (車両幅方向干渉量 3 水準) で効果確認を実施したところ、相手車における車体減速度は平均 10%、車体変形は従来構造よりも 30%改善した (Fig. 7, 8)。相手車保護構造の進化によ

り、自車及び相手車のエンジンルーム内におけるエネルギー吸収が増加し、衝突時の相手車に対する自車の進入挙動緩和傾向が確認でき、これが相手車両の車体減速度や車体変形の減少に寄与したと考えられる (Fig. 9)。

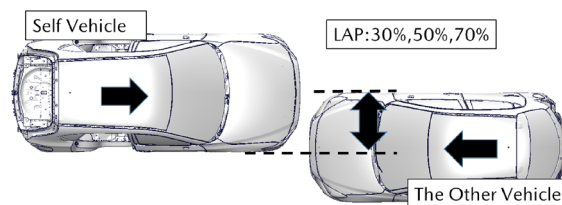


Fig. 7 Conditions for Confirming Load Homogenization Structural Effects in Vehicle-to-Vehicle Collision

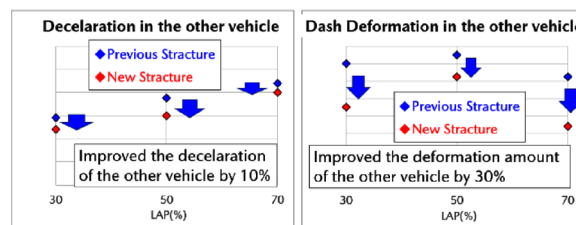


Fig. 8 Deceleration Speed and Deformation in the Other Side Vehicle at the Collision with or without Load Homogenization Structure

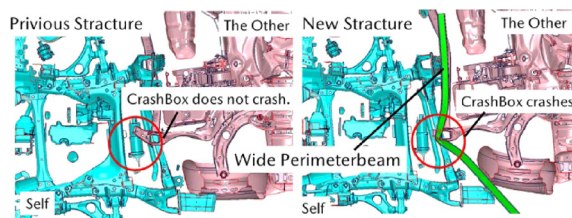


Fig. 9 Comparison of Behavior of Previous and New Structures in Vehicle-to-Vehicle Collision

3. 側面衝突性能開発

3.1 側面衝突時のバッテリー保護構想

法規 (UN-R135) や各国 NCAP でも採用されている電柱などへの衝突を想定したポール側面衝突時は、車両の局所変形が大きいため、車両搭載のバッテリーパックをポールや潰れ残った車体などに衝突させないことが必要である。特に、車両の中央部は、重心に近いので、高いエネルギー吸収性能が車両に求められる (Fig. 10)。

CX-60 では、動力源が異なる内燃機関・電気駆動方式 (PHEV, Mild Hybrid) のプラットフォームの基本構造を共通とした上で、床下に配置された PHEV の大容量リチウムイオンバッテリーの衝突安全性能を確保するため、主にサイドシルで衝突エネルギーを吸収する従来の構想から、トンネル部も併せて活用する構想に発展させ、エネルギー吸収量が 10%改善した (Fig. 11)。

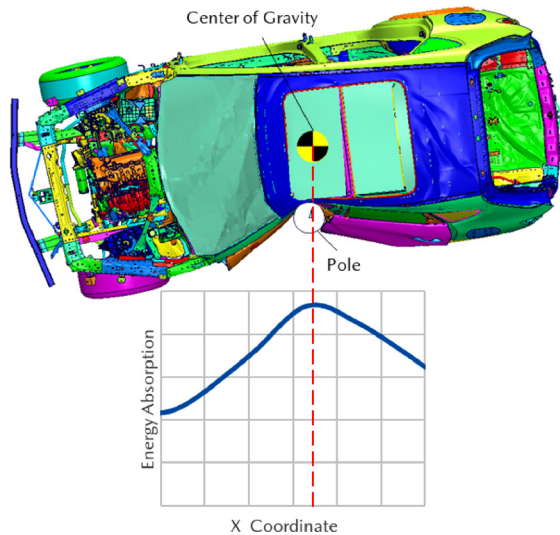


Fig. 10 Energy Absorption for Each Collision Position

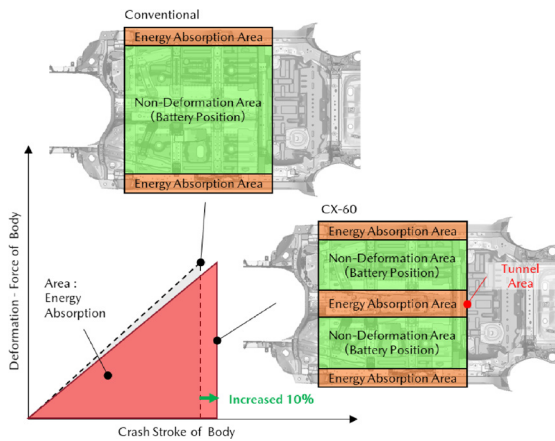


Fig. 11 Battery Protection Concept

3.2 バッテリー保護構造によるエネルギー吸収制御

トンネル部のエネルギー吸収機能を最大限に活用するため、一体型のバッテリーパックをトンネル部の左右に分割して配置し、フレキシブルチューブで左右のパック間を繋ぐマルチパック構造を採用した。これにより、左右のパックを一体の挙動から別々の挙動で制御することが可能となり、トンネル部で非衝突側パックのエネルギーを吸収させることで、衝突側パックの衝突エネルギーを50%低減した (Fig. 12)。

更に、車両に高いエネルギー吸収性能が求められる重心付近への衝突時に、バッテリーパックとポールとの衝突を防止するため、車体とバッテリーパックとの締結部品にエネルギー吸収機能を付与した (Fig. 13)。

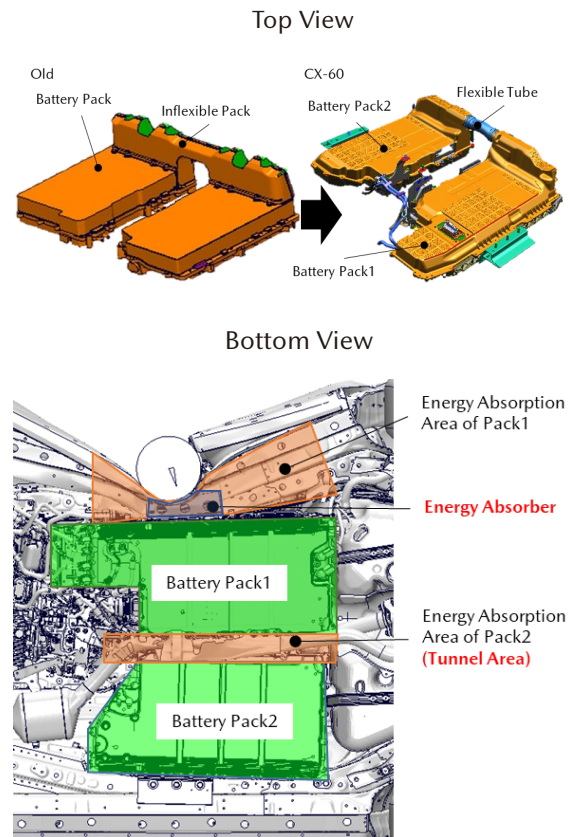


Fig. 12 Battery Pack Split Structure

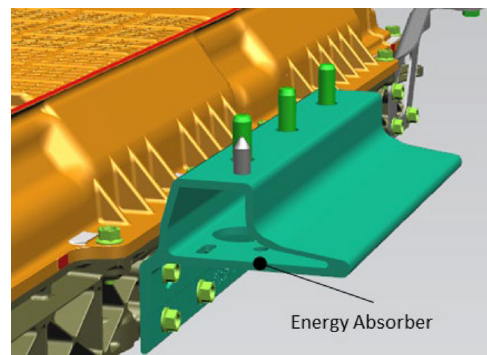


Fig. 13 Energy Absorber

4. 後面衝突性能開発

CX-60では、従来車と同様に時速80km/hで車幅70%に可動バリアが追突する衝突モードにおいて、キャビンの変形を抑え、衝突後もドアの開閉を可能とし、フロア下に配置した燃料タンクやバッテリーパックも保護することを目指した。そのために、荷室エリアで高効率に衝突エネルギーを吸収するリアフレーム構造を採用した。

従来まではリアフレームの曲げ変形を主体にエネルギー吸収させていたが、CX-60ではリアフレームをテーパ形状にすることで軸圧縮させて2倍のエネルギー吸収を可能とした (Fig. 14, 15)。また、高い効率の軸圧縮特性により、リアフレームの板厚を1ランク下げることでも実現し、軽量化に寄与した。

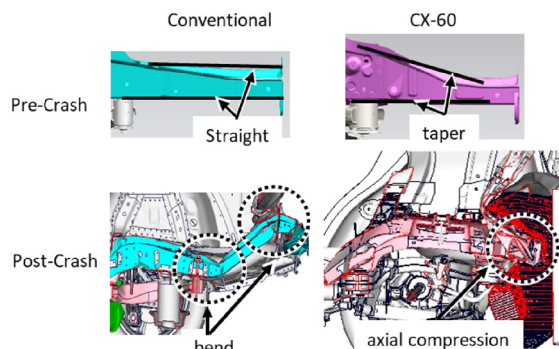


Fig. 14 Crash Behavior of Rear Frame

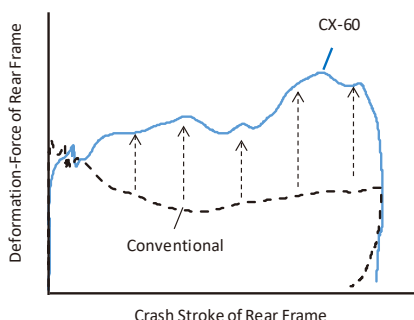


Fig. 15 Energy Absorption Performance of Rear Frame

5. 歩行者保護性能開発

歩行者の傷害を低減するためには、ボンネットやバンパーフェイスの強度を下げ、内部部品や車体骨格との間に衝撃吸収スペースを確保し、歩行者を軟らかく受け止める必要がある。

5.1 頭部保護

ボンネット中央部は、MAZDA3⁽¹⁾ から採用した頭部衝突時の初期エネルギー吸収効率を高めたボンネットインナーのフレーム構造 (Fig. 16 青部) を採用し、外周部 (Fig. 16 赤, 緑部) は車体との支持剛性と頭部衝撃吸収性を両立した新構造を採用した。この構造の特徴は、頭部衝突時にインナー断面を変形させて頭部を保護する領域と、ボンネットの開閉操作や高速走行時の振動抑制のための剛性を確保する領域に上下方向で分けたことである (Fig. 17)。変形させる領域のインナー面の角度を変えることで変形しやすくなり、頭部への衝撃を緩和できる。

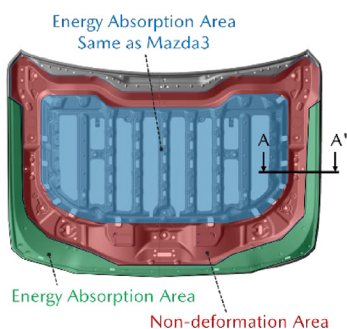


Fig. 16 Structure of Bonnet

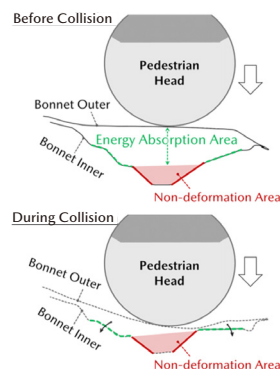


Fig. 17 Section A-A'

5.2 腰部/脚部保護

CX-60 は、新支持部品『サポートブラケット』により高いバンパーフェイス支持強度と低強度で傷害抑制する腰部・脚部保護性能の両立を実現した。

従来構造では、バンパーフェイスはフェイス上部の車体 (シュラウドアッパーメンバー) との固定部品 (グリルブラケット) の強度を上げることで、自重による垂れ下がりの変形を防止し、ボンネットとの隙間の外観品質を確保している。CX-60 では、バンパーフェイスサイズの大型化やセンサーなどの機能追加で重量が増加するため、グリルブラケットの更なる高強度化が必要であったが、歩行者腰部・大腿部保護と背反することから、機能の両立が課題であった (Fig. 18)。

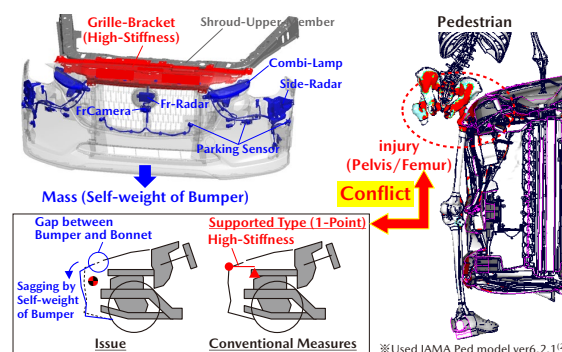


Fig. 18 Conflict between Supporting Self-weight and Pedestrian Protection

そのため CX-60 では、より効果的にバンパーフェイスの支持が可能なフェイス中部に新たな支持点 (以下、サポートブラケット) を追加して 2 点支持方式とした。フェイス中部は、バンパーフェイス全体の重心に近い位置で、高強度である①メッキシグネチャーウイング・グリルレインフォースを②バンパーレインフォースに固定できるため、上部の支持強度を大幅に下げることが可能である (Fig. 19)。これにより、グリルブラケットは歩行者腰部・大腿部の保護に最適な特性とすることができた (Fig. 20)。

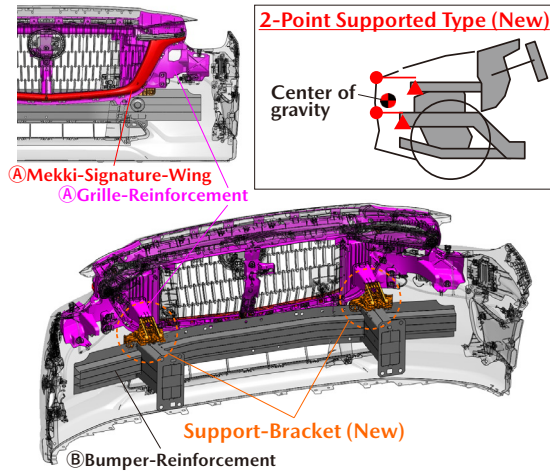


Fig. 19 New Bumper Supporting Structure

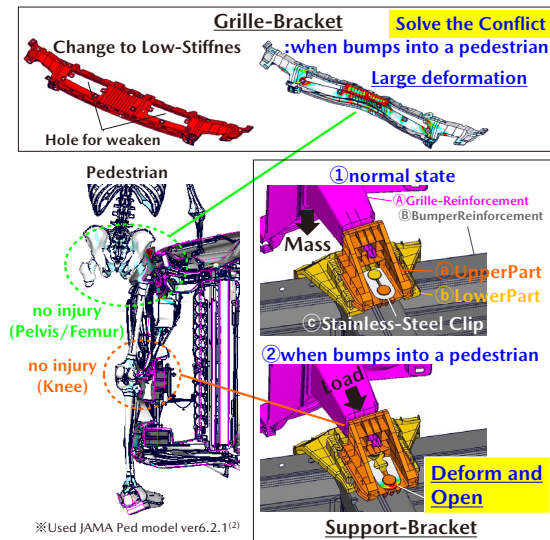


Fig. 20 Two Functions of Support-Bracket and Weakened Grille-Bracket

フェイス中部を支持するサポートブラケットには、①通常時は上下及び前後方向に強力な支持機能を発揮するが、②歩行者衝突時は前後への脱落機能を発揮することで歩行者膝部への反力を小さくする、という2つの機能を織り込んだ。

具体的な構造としては、高い支持機能のために本体の材料にはグラスファイバー配合強化樹脂を採用し、脱落機能のために本体を①アッパーと②ロアに分け、その間を前後方向の規定入力を受けると変形して開く③ステンレスクリップでつないだ。規定入力を歩行者衝突時に膝部に傷害を与えない荷重で設計することで、走行中や洗車などの通常使用時には脱落させず、歩行者衝突時にのみ③が開いて①と②を分離し脱落させることが可能となった (Fig. 20)。

6. おわりに

本稿では、新型CX-60の衝突安全性能について紹介した。カーボンニュートラルやCASEなど、車に対するニ-

ズが多様化する中で、市場におけるさまざまな事故・傷害形態の分析と人間研究を軸とした新型CX-60の取り組みに基づき、より高い衝突安全性能を実現する技術開発を進め、今後もより良い商品をお客様に提供していく所存である。

参考文献

- (1) 竹村征樹ほか：新型 MAZDA3 の衝突安全性能，マツダ技報，No.36，pp.113-118 (2019)
- (2) Kunitomi S et al. : The Development of the Lower Extremity of a Human FE Model and the Influence of Anatomical Detailed Modelling in Vehicle-to-Pedestrian Impacts, IRCOBI conference, pp.469-493 (2017)

著者



辻 大介



澤田 庸介



黒田 一平



谷本 晃一



松下 幸治



安藤 亮



水口 浩爾

特集：MAZDA CX-60

17

CX-60 クルージング & トラフィック・サポート (CTS) 開発

Cruising & Traffic Support (CTS) Development for CX-60

原田 翔次^{*1} 川原 康弘^{*2} 元谷 章博^{*3}
 Shoji Harada Yasuhiro Kawahara Akihiro Motodani
 福井 聡一郎^{*4} 大岩根 拓馬^{*5}
 Soichiro Fukui Takuma Oiwane

要約

マツダは、安全思想「MAZDA PROACTIVE SAFETY」に基づき、先進安全技術「i-ACTIVSENSE」を開発している。CX-60では、「人間中心」の考え方で、走る／曲がる／止まる全ての支援において、「安心で疲れないクルージング&トラフィック・サポート (CTS)」を目指し開発した。CTSは追従走行機能とステアリングアシスト機能で構成されるシステムであり、ステアリングアシスト機能においては、滑らか、かつ安定して車線の中央を走行する「センタートレース性」、及びステアリングアシスト制御中（以下、CTS制御中）にドライバーが操舵介入した際でも、意のままに操作可能な「ドライバー操舵特性」の両立に取り組んだ。センタートレース性は、新たにモデル予測制御技術を採用することにより、滑らか、かつ安定して車線の中央を走行する性能を実現した。ドライバー操舵特性は、ドライバー走行時とCTS制御時のドライバー操舵特性の一致性を高め、CTS制御中でも意のままの操作を実現した。本稿では、CX-60において2つの性能をより高い次元で両立させた。その開発経緯、及び、採用した技術について紹介する。

Abstract

Based on the Mazda's safety philosophy, "Mazda Proactive Safety", Mazda has been developing the advanced safety technology, "i-Activsense". For the CX-60, aiming at safe and stress-free driving, we have developed Cruising & Traffic Support (CTS) based on the human centric concept, which supports vehicle's running, turning, and stopping. The CTS system comprises a constant speed/ headway control function and a steering assist function. For the steering assist function, we aimed at smooth and stable lane-keeping "center traceability" and "driver's steering characteristic" that allows driver's operation as desired when CTS control.

For the center traceability, smoothness and stability in lane-keeping have been achieved by adopting Model Predictive Control. The "driver's steering characteristic during CTS control" has been also improved by enhancing consistency between driver's steering characteristic during driver driving and CTS control. High compatibility between the center traceability and driver's operability have been realized. This paper introduces the process and technologies adopted in the development that high compatibility between the center traceability and the driver's steering characteristic have been realized.

Key words: Safety, Vehicle dynamics, Active safety, Lane-keeping assistance system, Driving support, Vehicle dynamics control, Lane-keeping control

1. はじめに

マツダは、危険な状況に陥ってから対処するのではなく、危険自体を回避するという安全思想、「MAZDA

PROACTIVE SAFETY」の考え方にに基づき、さまざまな運転環境で、ドライバーの認知・判断・操作をサポートし、事故のリスクを最小限に抑えるための先進安全技術「i-ACTIVSENSE」を開発している。

*1~3 電子基盤開発部
Electronic Platform Development Dept.

*4,5 電子性能開発部
Electrical & Electronics Performance Development Dept.

クルージング&トラフィック・サポート (CTS) は、その技術群の1つであり、高速道路や自動車専用道路走行時の運転負担軽減を目的とし、加減速アシスト制御による前走車に対する追従走行機能と、車線に沿った走行、及び前走車の走行軌跡に沿った走行をアシストするステアリングアシスト機能で構成されるシステムである。CTSは2019年MAZDA3⁽¹⁾から市場導入を開始し、CX-30⁽²⁾、MX-30⁽³⁾など各車に搭載している。

CX-60では、「安心して疲れないCTS」を目標に掲げ、ステアリングアシスト機能では、「センタートレース性」と、ドライバー走行時と一致性の高い「CTS制御中のドライバー操舵特性」の両立に取り組んだ。本稿では、ステアリングアシスト機能の開発経緯と採用した技術について紹介する。

2. CTSの概要

2.1 システムの機能

CTSは高速道路や自動車専用道路走行時の運転負担軽減を目的とし、以下の追従走行機能とステアリングアシスト機能で構成される。

(1) 追従走行機能

前走車がない、もしくは前走車との車間距離が遠い場合は、ドライバーが設定した車速で定速走行を行う。また、自車より遅い前走車を検出すると、前走車の速度に応じて、パワートレイン及びブレーキによる減速制御を行い前走車との車頭距離を維持する。前走車がいなくなった場合は、設定車速まで加速し、定速走行を行う。

(2) ステアリングアシスト機能

システムが車線を検知している場合は、検出した車線に沿った走行をステアリングアシスト制御によってサポートする。システムが車線を検知できない場合は、追従走行している前走車の走行軌跡に沿った走行をアシストする。

2.2 システムの構成

車両運動制御に関わる領域のCTSのシステム構成をFig. 1に示す。

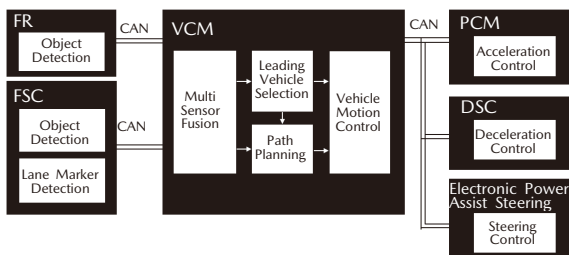


Fig. 1 Summary of CTS System Architecture

周辺環境認識センサーであるフロント・レーダー (FR)、及びフォワード・センシング・カメラ (FSC)、それらのセンサーの情報を統合、前走車や走行軌跡の判断、

加減速やステアリング制御指令値を演算するビークル・コントロール・モジュール (VCM)、駆動力を制御するパワートレイン・コントロール・モジュール (PCM)、制動力を制御するダイナミック・スタビリティ・コントロール (DSC) ユニット、操舵アシストトルクを制御する電動パワーステアリングユニットで構成される。各ユニットはCAN (Controller Area Network) で接続される。

3. ステアリングアシスト機能開発のねらい

「人間中心」の考え方で、走る／曲がる／止まる全ての支援において、「安心して疲れないCTS」を目指した。特に、人の感覚に合うように、CTS制御中でも①ベテランドライバーが運転しているような「安心感&快適性」と、②自分の思いどおりにクルマを操作できる「操作性 (自己主体感)」の実現をねらいとした。

3.1 センタートレース性

「安心感&快適性」の実現へ向けて、車線中央を精度良く、かつ滑らかな操舵で維持できるCTS制御を目標とした。例えば、Fig. 2のように、カーブを走行するシーンにおいて、青線のようにカーブ外側に膨らみながら走行すると、ドライバー、及び同乗者は車線逸脱のリスクを感じ、安心感が損なわれてしまう。赤線のように高い精度で車線中央を走行すると、車線から逸脱するリスクを最小化し、安心感を最大化することができる。

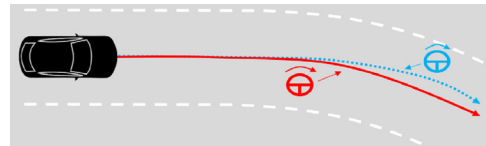


Fig. 2 Center Traceability for Deviation

また、上記の走行軌跡において、カーブ中に舵角の修正が極小となる制御とすることで、滑らかな車両挙動を実現し、乗員の快適性確保を開発のねらいとした (Fig. 3 赤線)。

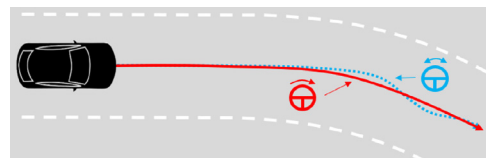


Fig. 3 Center Traceability for Stability

3.2 CTS制御中のドライバー操舵特性

「操作性 (自己主体感)」の実現へ向けて、CTS制御を理解しつつ、ドライバーの意図どおりに車両をコントロール可能なドライバー操舵特性の実現を目指した。

一般に制御の目標追従性を高め、センタートレース性を向上させる場合、自車走行位置と車線中央との偏差に

応じた CTS 制御量が増加する。その背反として CTS 制御中にドライバーが意図して車線中央から離れる際、少しの偏差でも CTS 制御量が大きいいため、それに抗うような過大な操舵感が必要となり、車線中央に近づく際は、CTS 制御が車線中央に戻そうと操舵するため、ドライバーは操舵感を得にくい状態となり、マツダが目指す操舵特性が失われてしまう。

CTS 制御中に隣接車線の車両との距離を確保するために、ドライバー操舵により車線内で隣接車線と反対側に寄って、走行するシーン (Fig. 4) を例に、ねらいとする「CTS 制御中のドライバー操舵特性」について説明する。

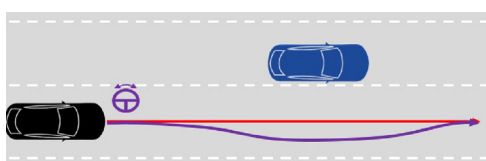


Fig. 4 Assumed Scene of Driver Steering

ドライバー操舵特性は、Fig. 5, 6 のようなドライバーの操舵トルクと操舵角のリサージュ曲線で表現する。Fig. 5 は、CTS 制御を優先し、ドライバー走行時の操舵特性と大きく乖離のある特性を示す。Fig. 6 は、ドライバー走行時と CTS 制御時で一致性の高い操舵特性を示し、マツダは Fig. 6 の特性をねらった。

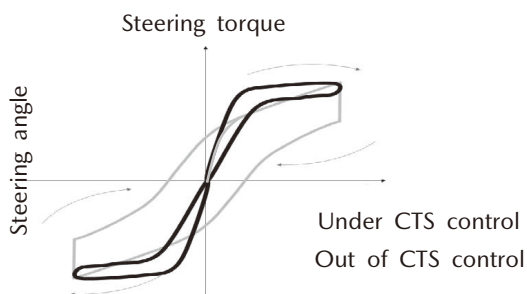


Fig. 5 Steering Characteristic that Prioritizes CTS Control

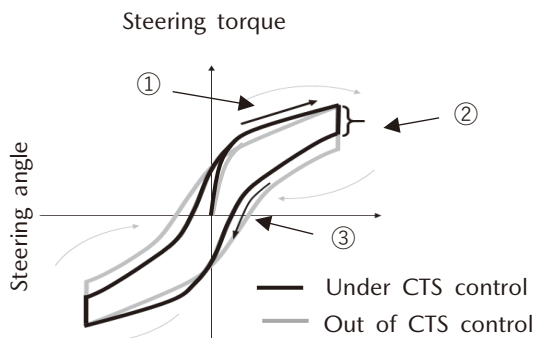


Fig. 6 Target Steering Characteristic

レー) を基準に、CTS 制御時のリサージュ曲線の理想形を下記①～③の特性にて定義した。

- ① 操舵の“切り込み”時の中央以降は、舵角の増加量と操舵トルクの増加量が一定比で変化すること。これにより、ドライバー操舵時に、リニアでスムーズな操舵フィールと車両挙動のコントロールを行うことができる。
- ② 操舵の“切り込み”時と“切り戻し”時の操舵トルクに幅を持たせること。これにより、操舵の“切り込み”から“切り戻し”へ変化する際、操舵(反)力の急変を抑え、滑らかで一定した操作感を確保することができる。
- ③ “切り戻し”操舵時の中央付近通過時にも所定の操舵トルクを持たせること。これにより、舵角ゼロ点付近でもドライバーに対しステアリングの操舵感を残すことができる。

4. センタートレース性の開発

4.1 技術課題

開発のねらいであるセンタートレース性を実現するためには、ベテランドライバーの運転と同等の技量を持った CTS 制御を実現する必要がある、以下ポイントを定めた。

- ① ベテランドライバーは通常、刻々と変化する交通環境を先読みし、横加速度が少なく、ふらつきのない走行軌跡を設定し、滑らかな運転を実現している。
- ② ベテランドライバーは「ハンドルにドライバー自身の操舵トルクを伝えてから、自車の走行軌跡が変化するまで」の応答特性を考慮し、最適な操舵量と操舵タイミングを判断することで、不必要な修正操舵を排除し、快適性を向上している。

つまり、CTS 制御において「①周辺交通状況と、②自車の運動特性に応じて最適な制御量を算出する最適操舵制御技術」を開発することが課題である。

4.2 技術施策

この課題を達成する施策として、モデル予測制御を採用した。この制御手法を用いて、自車の運動モデルに基づく状態方程式と、自車の挙動に対する評価式を定義することにより、最適な制御指令を算出する。この手法は以下の利点がある。

- ① 将来を先読みした行動予測から、現在の最適な挙動を算出可能である。
- ② 自車の運動モデルを内包することで、自車の運動特性に即した予測が可能である。

自車の運動モデルを Fig. 7, 使用する変数, パラメーターを Table 1 に示す。

実現に向けて、CTS 非制御時のリサージュ曲線 (グ

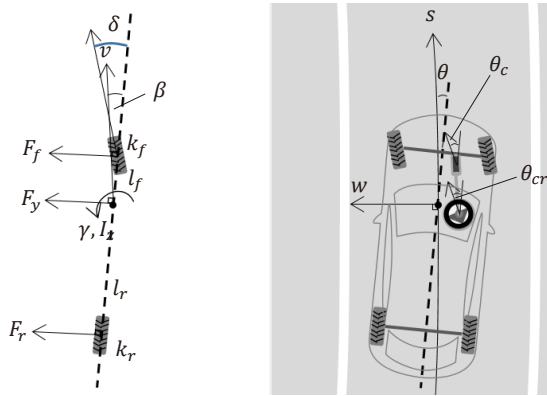


Fig. 7 Vehicle Dynamics Model

Table 1 Definition of Variables and Constants

SYMBOL	DEFINITION	UNIT
γ	yaw rate	rad/s
β	slip angle of vehicle	rad
F_f	front tire force	N
F_r	rear tire force	N
k_f	cornering force parameter of front tire	N/rad
k_r	cornering force parameter of rear tire	N/rad
m	mass of vehicle	kg
l_f	distance from gravity to front axis	m
l_r	distance from gravity to rear axis	m
l	wheel base	m
l_z	yaw moment of inertia	kgm ²
a	acceleration	m/s ²
v	velocity	m/s
s	longitudinal position on lane	m
w	lateral position from center of lane	m
δ	tire angle	rad
θ	orientation from lane	rad
θ_c	steering angle	rad
θ_{cr}	steering angle request	rad
s_f	stability factor	—
ϵ	slack factor	—

自車の運動モデルは、平面内の車両運動において、四輪に働くコーナリングフォースが左右輪で等しいと仮定した一般的な等価二輪モデルである。ここで、 β は横滑り角を示し、自車の中心軸に対し、進行方向の角度を示す。(反時計回りを正とする。)CTS制御中は横滑り角 β が十分小さいと仮定し、自車横力のつり合い、及びヨーモーメントのつり合いより、式(1)(2)を得る。

$$mv(\dot{\beta} + \gamma) = 2F_f + 2F_r \quad (1)$$

$$l_z \dot{\gamma} = 2l_f F_f - 2l_r F_r \quad (2)$$

更に、定常円旋回を仮定し、式(3)(4)(5)(6)を得る。

$$F_f = -k_f \left(\beta + \frac{\gamma l_f}{v} - \delta \right) \quad (3)$$

$$F_r = -k_r \left(\beta - \frac{\gamma l_r}{v} \right) \quad (4)$$

$$\beta = \frac{2l_r k_r - ml_f v^2}{2l^2 k_r (1 + s_f v^2)} \delta \quad (5)$$

$$\text{s.t. } s_f = \frac{m(k_r l_r - k_f l_f)}{2l^2 k_f k_r} l = l_f + l_r$$

$$\gamma = \frac{v \delta}{l(1 + s_f v^2)} \quad (6)$$

式(5)は、自車の速度 v と前輪の実舵角 δ より、横滑り角 β を算出し、式(6)はヨーレート γ を算出する。これらの式を中心として、前後方向、旋回方向の自車挙動の物理量は微分方程式でモデル化する。同様に、ハンドル角指令値 θ_{cr} に対する、ハンドル角 θ_c と前輪の実舵角 δ の応答は、前輪にかかるセルフアライニングトルク等を考慮して、一次遅れ系とキングピン周りの力のつり合いによりモデル化する。これらの微分方程式の記述は割愛する。モデル予測制御で使用する状態方程式は、これらの微分方程式を離散化する。車両モデルの制御因子 \mathfrak{u} 、状態因子 \mathfrak{X} を式(7)(8)で示し、モデル予測制御にて最適解を算出するための評価関数 \mathfrak{J} を式(9)で示す。

$$\mathfrak{u} = [\dot{a}, \dot{\theta}_{cr}, \epsilon]^T \quad (7)$$

$$\mathfrak{X} = [v, a, \theta_c, s, w, \theta, \theta_{cr}, \delta]^T \quad (8)$$

$$\mathfrak{J} = W_N (\mathfrak{X}_N - \mathfrak{X}_{refN})^2 + \sum_{i=0}^{N-1} \{ W_{xi} (\mathfrak{X}_i - \mathfrak{X}_{refi})^2 + W_{ui} (\mathfrak{u}_i - \mathfrak{u}_{refi})^2 \} \quad (9)$$

ここで N はモデル予測制御のホライズンを離散時間で分割した時のステップ数であり、 W は重み、 ref は目標値を示す。第一項は終端での状態因子の評価項であり、 \mathfrak{X}_{refN} は終端状態因子の目標を示す。同様に第二項は、終端以外の評価項である。

重み W は因子ごとに設定し、特に横移動に関連する4因子(ハンドル角指令値の微分値 $\dot{\theta}_{cr}$ 、前輪の実舵角 δ 、車線横位置 w 、車線と自車の角度 θ)をバランスよく重みづけすることで、快適性とセンタートレース性を両立した。

4.3 結果

自車が直線から旋回Rの小さい右カーブに進入するシーンにおける従来制御手法との比較結果をFig.8に示す。Fig.8からカーブ進入区間において、従来の制御手法では操舵タイミングが遅れ、車線中央から左側に膨らむ傾向にあった。CX-60では、より車線中央に近い位置を走行していることがわかる。

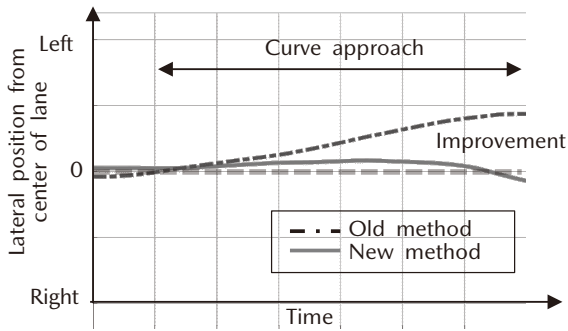


Fig. 8 Comparison of Center Traceability for Deviation

次に、自車がカーブ旋回中のシーンにおける比較結果を Fig. 9 に示す。Fig. 9 から従来比、ヨーレートの変化率の振幅や変化回数が減少しており、自車の車両挙動が滑らかで、かつ安定していることがわかる。

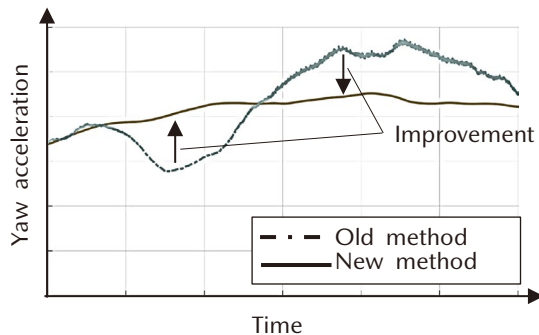


Fig. 9 Comparison of Center Traceability for Stability

5. CTS 制御中のドライバー操舵特性の開発

開発のねらいである高い「操作性（自己主体感）」の実現に向けた CTS 制御中のドライバー操舵特性開発における主な取り組みを紹介する。本開発では 3.2 節に記載した Fig. 4 のシーンにおいて、ドライバー切り込み操舵、及び切り戻し操舵に状態を分割し、それぞれの状態における制御を検討した。以下では、ドライバー切り込み操舵時、及び切り戻し操舵時の制御開発についてそれぞれ紹介する。

5.1 ドライバー切り込み操舵時の制御

ドライバー切り込み操舵時の特性のねらいは 3.2 節に記載した Fig. 6 の①のリニアな操舵特性である。ねらいの特性を実現する案として、ドライバー操舵トルクを検出し、そのトルク量に応じて CTS 制御量を減少させる制御が考えられる。この制御では、操舵トルクに応じた CTS 制御量の調整により、リニアな操舵特性を得られやすい。一方で、例えば、ステアリングを片手で把持するなどドライバーの操舵意図はないが、手や腕の自重等で操舵トルクが入力された場合、意図せず CTS 制御量が減少することで、センタートレース性が低下する（ドライ

バーの車線中央を維持走行してほしい期待値から外れる)。これを抑制するため、比較的大きな操舵トルクが入力されるまで CTS 制御量を維持すると、ドライバーが何かを避けようと意図して操舵する場合に、CTS 制御に抗うような操舵フィールとなってしまふ。

そこで、ドライバーの意図のある操舵と、意図のない操舵特性の違いの解明に取り組んだ。まず、意図のある操舵と、意図のない操舵を定義した。その一部を Table 2, 3 に示す。

そして、車両テストで各操舵パターンにおける操舵トルク特性をデータ計測した。結果、Fig. 10 のようなデータが得られた。本データより、操舵トルク情報のみを見ると同じ操舵トルク量でも意図のある操舵と意図のない操舵が混在し、これらを切り分けできないことがわかる。そこで、操舵トルク変化率の情報を加えることで、Fig. 10 のように意図のある操舵と意図のない操舵を切り分けることが可能と判断した。

Table 2 Intentional Steering

No.	Assumed scene	Image diagram
1	Avoid obstacles (falling objects etc.) on the road.	
2	Avoid continuous obstacles (pylon etc.) on the road	
3	Change lane to the next lane.	

Table 3 Unintentional Steering

No.	Assumed scene	Image diagram
1	Driver's hand hits the handle.	
2	Shake the handle to check steering assist control.	
3	Put the handle with one hand.	

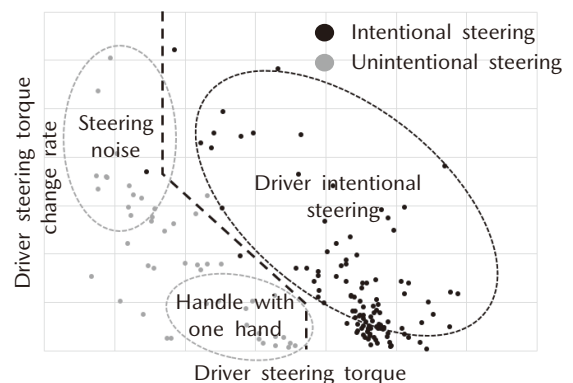


Fig. 10 Test Results of Intentional/Unintentional

上記より、Fig. 11 のように操舵トルクと操舵トルク変化率情報を用いて CTS 制御量を減少させる制御を開発した。そして、操舵トルク変化率を用いた CTS 制御減少量の調整により、ドライバーの意図、無意図の操舵を切り分け、しっかりセンタートレースしつつ、ドライバーが意図する操舵の場合にドライバーの意図どおりに操舵可能な性能を達成できた。

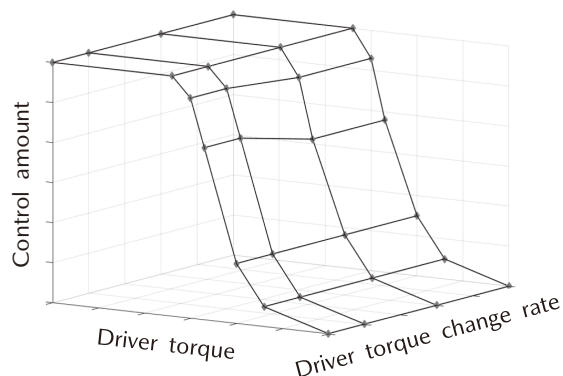


Fig. 11 Steering Assist Reduction Control with Steering Torque Change Rate

5.2 ドライバー切り戻し操舵時の制御

ドライバー切り戻し操舵時のシステムとドライバーの操舵親和性のねらいは 3.2 節に記載した Fig. 6 の②及び③である。②の切り戻し時の幅を持たせるため、切り込み時に減少させた CTS 制御量をドライバー操舵トルクに応じてすぐに復帰させず、復帰速度をコントロールする制御を開発した (Fig. 12)。また、③のステアリングの操作感を持たせるため、車線中央を外れようとする操舵であるか、車線中央に戻ろうとする操舵かによって、CTS 制御量をコントロール可能な制御を開発した。この 2 つの制御により、ドライバーが車線中央に戻るための切り戻し操舵時に、余計なアシストをしてしまい、ドライバーの思った以上に操舵され、無駄なアシストに感じる「引っぱられ感」や、車線中央に戻ろうとするが CTS 制御に抗って操舵しなければならない「抵抗感」のバランスがとれるようになった。

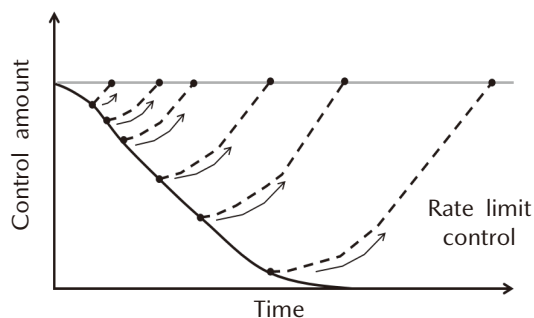


Fig. 12 Steering Assist Return Speed Control

5.3 結果

CX-60 の実車テスト結果を Fig. 13 に示す。ドライバー走行時のドライバー操舵特性と、CTS 制御時のドライバー操舵特性が近い特性を示すことがわかる。つまり、ねらいである 3 つのポイントを実現できており、「操作性 (自己主体感)」のある CTS を開発できたと考える。

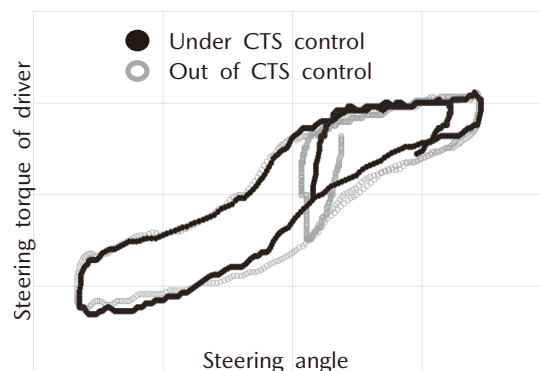


Fig. 13 Test Result of Steering Characteristics Under/Out of CTS Control

6. おわりに

CX-60 では「人間中心」の考え方にに基づき、CTS の「安心感 & 快適性」、及び「操作性 (自己主体感)」の向上に取り組んだ開発経緯と、採用技術を紹介した。2 章では CTS の概要、3 章ではステアリングアシスト機能のねらいを説明し、4 章ではセンタートレース性の開発、5 章では、システム制御中のドライバー操舵特性の開発経緯、採用技術について述べた。

参考文献

- (1) 別府ほか：新型 MAZDA3 の紹介、[マツダ技報, No.36, pp.3-10 \(2019\)](#)
- (2) 佐賀ほか：MAZDA CX-30 の紹介、[マツダ技報, No.37, pp.3-6 \(2020\)](#)
- (3) 竹内ほか：MX-30 の紹介、[マツダ技報, No.38, pp.9-12 \(2021\)](#)

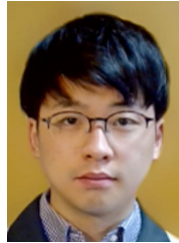
■著者■



原田 翔次



川原 康弘



元谷 章博



福井 聡一郎



大岩根 拓馬

特集：MAZDA CX-60

18

CX-60 ドライバー異常時対応システムの開発

Development of Driver Emergency Assist for CX-60

濱田 隆史^{*1} 山下 良幸^{*2} 西條 友馬^{*3} 休坂 慎也^{*4} 辻 雄太^{*5}
 Takashi Hamada Yoshiyuki Yamashita Yuma Nishijo Shinya Kyusaka Yuta Tsuji
 高田 淳平^{*6} 中畑 洋一朗^{*7} 山本 直樹^{*8} 尾崎 昂^{*9} 野中 信宏^{*10}
 Jumpei Takata Youichiro Nakahata Naoki Yamamoto Takashi Osaki Nobuhiro Nonaka

要約

マツダは、安全思想「MAZDA PROACTIVE SAFETY」に基づき、先進安全技術「i-ACTIVSENSE」を開発してきた。しかし、事故のない社会の実現には、超えるべき山が沢山ある。とりわけ運転中にドライバーが運転不能に陥った場合は重大事故につながり易く、社会的影響も大きい。このような事故の対策に対して、日本ではASV (Advanced Safety Vehicle) の枠組みに基づき検討が進み国土交通省により“ドライバー異常時対応システム基本設計書”が策定された。また国連法規でもリスク軽減機能 (Risk Mitigation Function) が策定されるなど開発が進展しつつある。今回、ドライバーの内因性疾患、体調急変時、すなわちドライバーが運転不能に陥った際の支援機能として自動車を緊急停車させるドライバー異常時対応システム (Driver Emergency Assist; DEA) を開発し、CX-60 に搭載したので、そのシステムの概要を紹介する。

Abstract

Based on Mazda's safety philosophy "Mazda Proactive Safety", Mazda has been developed advanced safety technology "i-Activsense". However, there are still many mountains to be climbed in order to realize an accident-free society. Especially, when a driver cannot drive a car due to falling a sudden sickness, it may cause a serious accident, and the social influence is big while aging advances. For the measures of such an accident, in Japan, technical requirement for Emergency Driving Stop System is established by MLIT, and also Risk Mitigation Function is issued as United Nations law. This time, we develop Driver Emergency Assist; DEA, and implement to CX-60. This paper introduces DEA system summary.

Key words : Safety, Driving support/driver support, Advanced Driver Assistance Systems (ADAS), Driver Emergency Sudden Sickness, Emergency Driving Stop System (EDSS), Driver Emergency Assist (DEA)

1. はじめに

マツダはドライバーを尊重する安全思想「MAZDA PROACTIVE SAFETY (マツダ・プロアクティブ・セーフティ)」に基づき開発した先進安全技術「i-ACTIVSENSE」を2012年より市場導入している。今回新たに、ドライバーの状態検知を基に運転継続が困難とシステムが判断した場合に、車両を減速・停車させる「ドライバー異常時対応システム (Driver Emergency Assist, 以後 DEA)」をCX-60より市場導入した。その技術内容について紹介する。

2. 開発のねらい

近年、自動車における先進安全技術の普及と進化により、日本では交通事故死者数は年々減少している (Fig. 1)⁽¹⁾。しかしながら、事故のない社会の実現に向けては、未だ多くの超えるべき山があり、日々悲惨な事故の報道が後を絶たない。特に、重大事故につながりやすいドライバーの体調急変に起因する事故が、大きな社会問題となっている。

*1~6,10 電子基盤開発部
Electronic Platform Development Dept.

*7,8 情報制御モデル開発部
Infotainment and Control Model Development Dept.

*9 電子性能開発部
Electrical & Electronics Performance Development Dept.

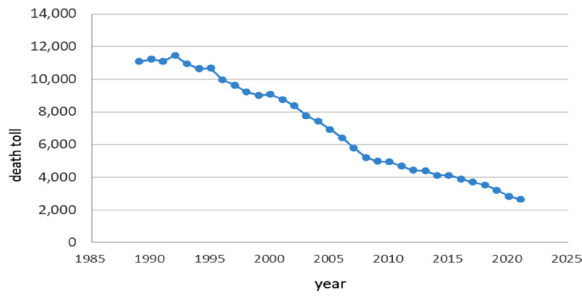


Fig. 1 Number of Fatalities in Traffic Accidents

体調急変（発作／急病）に起因する事故は、年間 200～300 件程度発生しており、年々増加傾向にある。‘発作／急病あり’における死者・重傷者の割合は、‘なし’と比較して約 14 倍となっており（Fig. 2）、事故を起こした際に重大事故になる危険性が高い。また、発作・急病などの体調急変の事故は、危険認知速度 60kph 以下での発生が全体の 95.8%を占めており（Table 1）、高速自動車国道を除く幹線道路及び一般道での発生が 98.4%を占めている（Table 2）⁽²⁾。

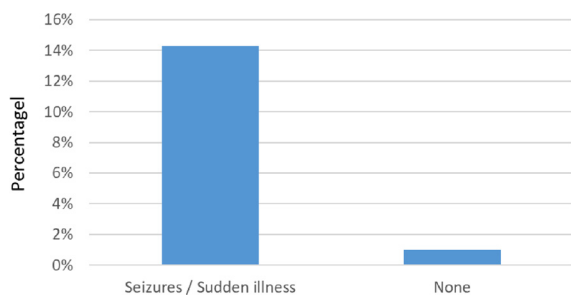


Fig. 2 Percentage of Accidents due to Seizures/Sudden Illness (Total of 2007-2012 Year)

Table 1 Number of Accidents by Danger Recognition Speed (Total of 2007-2012 Year)

Danger recognition speed	Number of accidents
Less than 10kph	151
～20kph	193
～30kph	259
～40kph	403
～50kph	241
～60kph	100
～70kph	25
～80kph	19
～90kph	6
～100kph	7
Greater than 100kph	2

Table 2 Number of Accidents due to Seizures/Sudden Illness by Road Type (Total of 2007-2012 Year)

Road type	Number
Expressway	24
National Route	930
General Road	520
Other	43

これら事故実態を踏まえ、国土交通省により策定された「ドライバー異常時対応システム 基本設計書 減速停止型及び路肩等退避型（高速道路版）」⁽³⁾に準じて DEA を開発した。

ドライバーの体調急変を想定した場合、ドライバー自身のスイッチ操作によるシステム作動は期待しにくく、また適切な車間や走行車線の維持など支援する運転支援システムの作動中とは限らない。そのため、今回開発した DEA は、ドライバーの異常を自動検知するシステムとし、運転支援システムの作動／非作動状態にかかわらず作動するシステムとして開発した。また体調急変による事故は一般道で発生するケースが多いことから、一般道での作動を可能とした。加えてシステムが高速自動車国道を含む自動車専用道路を走行していると判断し、かつ路肩に隣接する車線を走行していると判断できた場合は、可能な範囲で路肩に寄せながら、減速・停車させるシステムとして開発した。この間、周囲の交通流を乱すことで発生する二次衝突リスクを下げるため交通参加者への注意喚起報知を行う。

3. システム概要

3.1 機能

DEA はドライバー異常検知（機能①）、及び車両制御と車内外への報知（機能②、③、④、⑤）により構成される。機能概要を Fig. 3 に示す。

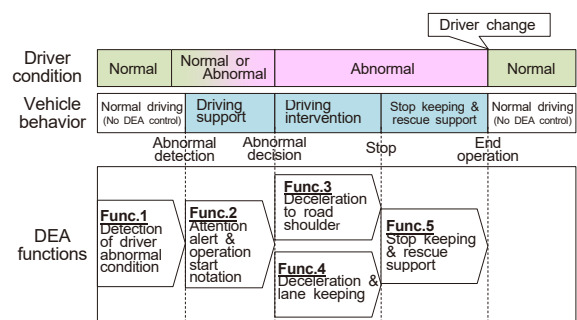


Fig. 3 Overview of DEA Functionality

機能① ドライバー状態検知：ドライバーモニタリングカメラから取得するドライバーの運転姿勢や目の開閉状態、及びハンドル操作状態からドライバーが正常運転で

きる状態であるかを常時判定する。ドライバーが正常運転できない状態に陥ったと判定した場合、自動的に DEA の車両制御機能と車内外への報知機能を作動させる。また、SOS スイッチ操作後に続けて電動パーキングブレーキ (EPB) スイッチを引き上げると手動でも作動できる。

機能② 注意喚起／作動開始通知：ドライバー異常検知後、自車周辺の交通参加者に対して非常点滅表示灯の点滅により注意喚起を行う。ドライバーや乗員に対してはセンターディスプレイ等への表示により、間もなく減速を開始することと、DEA のキャンセル方法を通知する。またこの時、車線維持可能と判断した場合は、車線維持する。

機能③ 路肩に寄せる：高速道路や自動車専用道路の路肩に隣接する車線を走行中であり、システムが路肩に寄せることが可能と判断した場合は、5kph まで減速後、左方向指示器を点滅させながら路肩に寄せ、その後減速・停止させる。

機能④ 減速／車線維持：路肩に寄せることができない状況の場合は、減速・停止させる。この時、車線維持可能と判断した場合は、車線維持しながら減速・停止させる。

機能⑤ 停止保持／救護支援：停止後は非常点滅表示灯と制動灯の点滅及びホーンの吹鳴を継続するとともに、自動的に電動パーキングブレーキの作動、ドアの解錠、エマージェンシーコールへの接続を行うことで、周囲への注意喚起とドライバーの救護支援を行う。

3.2 システム構成

DEA のシステムは、①外部環境、ドライバー状態、車両状態を検知するセンサー群 (フロント・レーダー (FR)、フォワード・センシング・カメラ (FSC)、フォワード／リア・サイド・レーダー (FSR/RSR)、超音波センサー (Sonar)、ドライバーモニタリングカメラ (OMS))、②検知情報から DEA の作動要否や作動目標を設定し、車両や報知の制御指令を出力する電子制御ユニット (VCM)、③制御指令に基づき車両挙動や車内外報知を制御するアクチュエータ群 (パワートレイン・コントロール・モジュール (PCM)、ダイナミック・スタビリティ・コントロール・ユニット (DSC)、電動パワーステアリングユニット、ボディー・コントロール・モジュール (BCM)、車載通信ユニット (TCU)、コネクティビティ・マスタ・ユニット (CMU)) で構成される (Fig. 4)。ハードウェア及びその構成は既存の i-ACTIVSENSE と共通として、DEA で新規となるドライバー異常検知機能、路肩に寄せる機能、車内外への報知機能などは ECU へのソフトウェア追加により実現している。

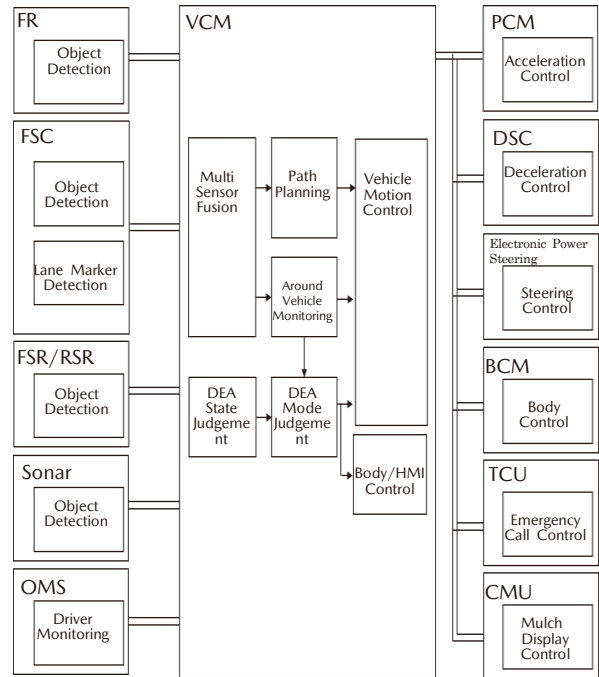


Fig. 4 DEA System Configuration

4. ドライバー異常検知

4.1 異常姿勢検知

「ドライバー異常自動検知システム 基本設計書」⁽⁴⁾ で定義されている姿勢崩れの検知パターンを示す (Fig. 5)。

Posture pattern	Image	Description
Fall forward		Driver's head fell forward near the steering wheel and maintains this posture.
Droop head		Driver's head faced down, and maintains this posture.
Lay back		Driver's upper body tilted backward with the head facing upward, and maintains this posture.
Rigid posture		Driver's upper body bended with the head facing upward, and maintains this posture.
Lean head		Driver's head is tilted to the left or right, and maintains this posture.
Flop side		Driver's upper body is tilted to the left or right, with the head tilted in the same direction, and maintains this posture.
Lean side		Driver's upper body is tilted to the left or right, and maintains this posture.

Fig. 5 Detection Target of Posture Pattern

ドライバー異常自動検知システムとして、とらえるべきドライバー異常には、ドライバー自身があらかじめ予測することが困難な体調急変である突然の脳疾患、心疾患、失神などがある。これらの体調急変に陥ったドライバー状態の一つとして急な意識消失があり、意識消失することで筋弛緩となり、姿勢が崩れるパターンがある。意識消失による姿勢崩れの発生メカニズムは、脳へ至る血流が乱れることによって脳の全体的な機能低下が発生し、その結果、脳幹部の姿勢維持機能が低下することで筋緊張が弛緩し、姿勢崩れに至る⁽⁵⁾。一方で、走行中は、ハンドル操作しながら、グローブボックスや助手席の床の荷物に触る等の、ドライバーの異常類似姿勢も発生する。よって、ハンドル無操作を組み合わせることで、異常姿勢とそれに類似する姿勢を区別している。

異常姿勢を検知するための評価指標は、「ドライバー異常自動検知システム 基本設計書」を基に、顔向き（ロール角、ピッチ角）、及び、顔位置（X、Y、Z方向）を用いて、異常姿勢を検知している。閾値に関しては、人間の骨格、関節の可動域や、順動力学による人体モデルシミュレーションである乗員安全解析ソフトウェアを使い、正検知（ドライバーの異常状態をシステムが異常と判定すること）と誤検知（ドライバーの正常状態を異常として判定すること）の双方を考慮した閾値を決定した。

4.2 居眠り検知

マツダでは、2018年に発表したMAZDA3から、ドライバーモニタリングカメラを用いた眠気警報機能を搭載している。今回、DEAの開発にあたり、新たにドライバーの居眠り状態の検知技術を開発した。眠気警報は、ドライバーの眠気が亢進した場合に警報でお知らせし、休憩取得をサポートする。一方、居眠り状態に陥ると、ドライバーは眠気に抗うことができず、運転を継続することが困難となる。このため、居眠り状態のドライバーに対してはDEA機能によるサポートを行う。

居眠り状態の検知技術を開発するにあたり、ドライビングシミュレーターや国内外の公道での走行データから、ドライバーの眠気の推移に伴う行動の変化や居眠り発生時の行動について分析した。また、国立大学法人東京農工大学で開発が進められているヒヤリハットデータベース⁽⁶⁾などの公道走行データから、居眠り起因の交通事故・ヒヤリハット事例におけるドライバー行動を抽出し、実際の交通環境におけるドライバーの居眠り行動の分析を実施した。この結果、居眠り運転時のドライバーは、その多くで数秒程度の閉眼を伴い、ハンドル操作などの運転行動が減少することがわかった。これらの分析結果に基づき、居眠り状態の検知には、ドライバーの閉眼状態と運転操作情報を用いている。

4.3 ドライバー異常検知性能評価

ドライバー異常検知性能について、正検知、誤検知の観点から性能評価を実施した。正検知性能については、試験場内での実車走行、ドライビングシミュレーターを使ったデータ計測と机上でのオフライン分析から性能を評価し、想定されるドライバー異常状態を検知可能であることを確認した。

一方、誤検知性能に関しては、お客様のさまざまな使われ方を考慮し、一般の被験者の運転行動データ群（被験者：約170名、総走行距離約40000km）の多様な運転シーンの計測データを用いて、オフライン検証モデルによる解析結果からドライバー異常の誤検知が発生しないように対策を講じた。具体的には、姿勢崩れの誤検知と居眠り状態の誤検知へ対策を施した。姿勢崩れに関しては、低車速や停車時には、運転に関する余裕度が高まり、異常姿勢類似行動が発生しやすくなることから、システム作動車速や判定時間を調整することで、誤検知を抑制する対策を実施している。また、居眠り状態の検知については、笑顔や眩しさなどによりドライバーが目を細める、下を見るなどの自然と目が細まる場面において、ドライバーの開眼状態を閉眼と誤検知するケースがあるため、そのようなドライバー行動を検出することで対策を施している。

5. 車両の制御

DEAはドライバー状態推定の結果及びドライバーとのインタラクションにより運転不能を判定し、運転不能状態においても、できる限り安全な制御の実現が必要となる。そのために以下の環境認識、車両制御、ユーザーインターフェースの技術を開発した。

5.1 環境認識

DEAは、フォワード・センシング・カメラ、フロント・レーダー、サイド・レーダー、超音波センサーを使って常に周囲を監視している。各センサーの認識性能の特徴を組み合わせることで走行リスクをとらえ、適切な判断を行う。フォワード・センシング・カメラでは車線境界線や道路の境界線や標識などを認識し、フロント・レーダー、サイド・レーダーで周辺車両や障害物などを認識する。カメラ画像とレーダー反射電波を組み合わせるフュージョン技術、更に自車が低速のときは超音波センサーも使用して障害物を認識することで、ロバスト性を高めている。特に路肩に寄せる時には、路肩に停車可能なスペースがあり、自車の進入ルートに障害物がないことや、後方から車両が接近していないことを監視し、安全に停車できるように設計している（Fig. 6）。



Fig. 6 Multi Sensor Fusion View

5.2 車両制御

DEA は、車両の走行状態、ドライバーの状態によるシステム制御状態、環境認識情報を基に、車両制御モードを決定し、縦横制御を行う。

(1) 車線維持、路肩に寄せる

車両の横方向制御は、自車の走行経路に基づき、滑らかな車両挙動となるような操舵量を算出し、ステアリング制御を実施している。

①両側白線があり、緩やかな道路で車線維持制御を開始し、可能な限り車線内を維持させることで、異常時の運転支援を行っている。DEA では、車線維持機能などをドライバーが使っていないときでも、車線逸脱抑制制御により、車線逸脱前にステアリングの反力がかかるようにしている。加えて交差点等、車線を維持することで危険になり得るシーンでは、そのシーンの手前で車線維持をキャンセルさせ、縦制御のみを行う。これらの制御をドライバー異常検知後から開始することで、運転不能時の運転支援を行っている。

②高速道路または自動車専用道路において第一走行車線や登坂車線など路肩に隣接する車線を 60kph 以上で走行している場合、可能な範囲で路肩に寄せる機能を作動させる。車線境界線の種類、周辺の交通参加者の有無、走行環境（工事、合流など）を監視し、路肩への移行開始を判断する。路肩に寄せる機能の横移動は、急な車両挙動とならないように制御している。

(2) 車速制御（アクセル無効化含む）、減速制御

車両の縦方向の制御は、自車の走行計画に基づき駆動制御と制動制御を行う。制動制御は、緊急時を除き、後続車両のドライバーの回避性を考慮して、減速度を設定した。

①ドライバー異常検知後、減速開始するまで速度抑制を実施し、ドライバーへの注意喚起及び、走行状態を維持する目的でアクセル操作の無効化を行う。また、緊急時に備え、ブレーキプレフィル機能を作動させる。

②路肩に寄せる場合は車速を 5kph（クリーブ相当）まで減速し、速度を維持する。

③減速・停車する機能が作動する時の減速度は、後続車に対する追突リスク回避と、早く救護するための減速停車までの時間を両立させることを考慮し、最大減速度

を 1.7m/s^2 に設定した。これは国内主要 4 都市の走行データ分布において、ドライバーが一般的に使用する減速度の 2σ の範囲内であることを確認しており、自車が速やかに減速停止できるとともに、後続車から追突されるリスクを最小限に抑えるねらいがある（Fig. 7）。

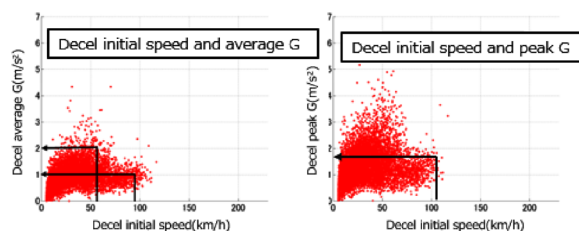


Fig. 7 Distribution of Deceleration in Japan

④路肩に寄せる時に、路上物及び交通参加者を検知した場合は車速維持をキャンセルし、速やかに減速を開始し停車する。

(3) 停車保持及び救護支援

自車が停車した後は、停車状態を維持するため電動パーキングブレーキ（EPB）を自動的に作動させる。その際、意図せず電動パーキングブレーキ（EPB）が解除しないよう、アクセル操作での解除は無効としている。くわえてエマージェンシーコールによる救助要請と、全席ドアとリフトゲートを自動で解錠することで救助活動を支援する。

5.3 ユーザーインターフェース (UI)

DEA 作動において、影響が及ぶドライバー、同乗者、周囲の交通参加者が適切な行動がとれるよう配慮する必要がある。また、緊急時におけるシステム作動解除の分かりやすさも重要と考え、UI を検討した。

(1) ドライバーに対する UI

DEA はドライバー状態推定によるドライバー異常検知と、その後のドライバーへの応答確認により、ドライバー異常を確定するシステムである。よって、ドライバー異常を誤って検知した場合への対処として確実にシステムを解除することも必要となる。

ドライバーの運転姿勢やステアリング操作などの運転操作の組み合わせでも解除できる仕組みに加え、確実に解除するための手動解除スイッチが必要と考えた。そこで、非常点滅表示灯が点滅時のドライバー行動を分析し、自然に操作しやすいハザードスイッチを解除スイッチとして選定した。加えて、確実な解除操作を実現するために、ディスプレイ上にスイッチの絵を図示し（Fig. 8）、その背景を明滅することで誘目性を向上させた。

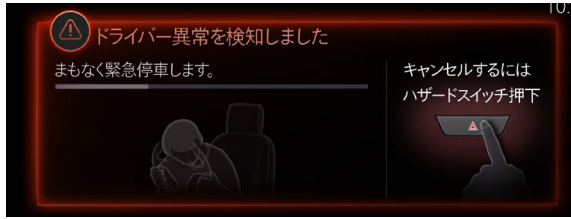


Fig. 8 Human Interface for Driver



Fig. 9 Indication for Passengers

ドライバー異常検知後、異常確定に要する時間については、ドライバー応答時間のデータ計測の結果から、初見のドライバーでも最大 13 秒あればキャンセル操作が可能と確認できた (Table 3)。そこで、高速道路または自動車専用道路を 60km/h 以上で作動する居眠り検知による DEA については、ドライバー異常検知後、異常確定前に 13 秒間のシステム介入及びキャンセル待機時間を確保した上で、応答がない場合のみ減速停止するようにした。

Table 3 Driver Response Time

Participant			Result (sec)
No.	gender	year	
1	woman	30s	7.0
2	man	30s	10.0
3	man	20s	4.0
4	man	20s	9.0
5	man	50s	6.0
6	man	50s	5.0
7	man	30s	4.0
ave + 3 Σ :			13.01

ただし、一般道でも作動するドライバー異常姿勢検知においては、速やかに停車させて救護することを優先し、キャンセル待機時間を 5 秒間に短縮している。

(2) 同乗者に対する UI

ドライバー運転不能時に車両を制御する DEA では、パニックに陥った同乗者による不必要な操作介入が発生する可能性がある。そこで同乗者に今後の車両挙動を予知させることで、安心感を与え、不要な操作介入を抑制する。そのために車両制御までの猶予時間及び今後の車両挙動を表示し、不要な運転操作の介入をしないよう促す。

また、ドライバーの異常確定後についても、同乗者による不要な操作介入と作動による不安を抑制することをねらい、車の制御状態と車の注意喚起の状態をセンターディスプレイにグラフィック表示をする (Fig. 9)。

(3) 周辺の交通参加者に対する UI

DEA は車外への報知により、自車周辺の交通参加者の回避行動に期待するシステムである。つまり交通参加者に対して、緊急事態が発生していることを知らせ、自車に近づかせない行動を促す必要がある。

そのためにドライバー異常検知後に非常点滅表示灯の点滅による報知を開始、異常確定後はこれに加えてホーンの断続吹鳴、制動灯の点滅による報知を行う。

DEA 作動後、路肩に寄せる機能が働くときは非常点滅表示灯の点滅から方向指示器の点滅へ切りかえるため、異常の発生していない一般の車と見分けがつかず、緊急事態発生に気付きづらいと考えられる。これにより後方の交通参加者が適切な回避行動をとれないことが懸念されるため、制動灯を点滅させることによって、自車の緊急事態を認知できる仕組みを採用した。

6. おわりに

本稿では、DEA の技術について紹介した。3 章では機能概要を説明し、4 章ではドライバー異常検知の技術をし、5 章では車両制御について述べた。DEA の開発では、これまで積み重ねてきた先進安全技術を最大限活用しつつ、ドライバーが運転不能に陥った際の事故被害の軽減を支援するという DEA ユニークな課題に対し、運転不能を検出するためのドライバー異常検知技術、また周囲の交通参加者の受容性を確保するために車外報知の開発に取り組んだ。加えて同乗者の安心感の醸成へも配慮したシステムとして設計した。

今後、対応可能なシーンの拡大のために、ドライバーの状態を正確に理解する技術の進化や自車周辺状況の検知性能、ロバスト性の向上が課題となる。また、効果を最大化するためには、自動車側の対応だけでなく、全ての道路ユーザーも含めた社会システムとして成立させることが重要であり、開発活動と並行して社会への周知活動についても検討していく。

参考文献

(1) 警察庁 HP: 令和 3 年中の交通事故死者数について、
<https://www.npa.go.jp/news/release/2022/20220104001jiko.html> (参照 2022.05.27)

(2) 疾患・服薬と事故の関係の調査分析、一般社団法人日本自動車工業会、公益財団法人 交通事故総合分

析センター

- (3) 国土交通省自動車局：国土交通省自動車局 先進安全自動車推進検討会，ドライバー異常時対応システム基本設計書 減速停止型及び路肩等退避型（高速道路版）
- (4) 国土交通省自動車局：国土交通省自動車局 先進安全自動車推進検討会，ドライバー異常自動検知システム基本設計書（2020）
- (5) 後藤淳：筋緊張のコントロール，特集1 理学療法基本技術 関西理学，pp. 21-31（2003）
- (6) 国立大学法人東京農工大学：スマートモビリティ研究拠点，ドライブレコーダデータセンター，<https://web.tuat.ac.jp/~smrc/drcenter.html>（参照2022.05.24）

■著者■



濱田 隆史



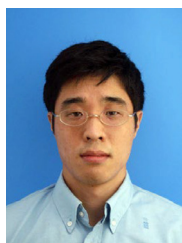
山下 良幸



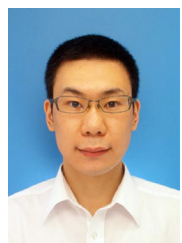
西條 友馬



休坂 慎也



辻 雄太



高田 淳平



中畑 洋一郎



山本 直樹



尾崎 昂



野中 信宏

特集：MAZDA CX-60

19

CX-60 ドライバー・パーソナライゼーション・
システムの紹介

Driver Personalization System for CX-60

末永 修滋 ^{*1} Shuji Suenaga	平田 義人 ^{*2} Yoshito Hirata	杉吉 竜弥 ^{*3} Tatsuya Sugiyoshi
藤丸 翔太 ^{*4} Shota Fujimaru	中上 千恵子 ^{*5} Chieko Nakagami	前田 真聡 ^{*6} Masato Maeda

要約

自動車業界では大きな変革期を迎えているが、人と車の関係が多様化しても、車はドライバーが操作するものであり続けるとマツダは考えている。人の感覚に合わせ、より運転しやすい車とするために、マツダは「人間中心」の Human Machine Interface (HMI) の技術を深化させることを目指した。その1つの形として、CX-60 からドライバー・パーソナライゼーション・システムを導入した。マツダ独自の機能として、ドライバー・モニタリングカメラ・システムを活用し、個々のドライバーに適切なドライビングポジションを推奨する機能を開発した。更に、顔認証機能を用い、ドライビングポジションと車両装備の細かな設定を自動復元する機能を備えつつ、エントリーアシスト機能にて車の乗降を容易にした。個々のドライバーへ運転に適した車内環境を提供することで、車を意のままに扱える人馬一体感による「走る喜び」をより多くのドライバーに体験していただく機会を創出した。本稿ではドライバー・パーソナライゼーション・システムとその要素技術について紹介する。

Abstract

The automobile industry is undergoing a major transformation, but Mazda believes that even if the relationship between people and cars diversifies, cars will continue to be controlled by drivers. In order to match the senses of driver and make the car fun to drive, we aimed to deepen the “human-centered” Human Machine Interface (HMI) technology. As one form of this, we introduced a driver personalization system for CX-60. Mazda has developed a unique function that uses a driver monitoring camera system to assist setting to ideal driving position for each driver. In addition, the face recognition function is used to automatically restore the driving position and detailed vehicle equipment settings, and the entry assist makes it easier to get in and out of the car. By providing each driver with an in-vehicle environment suitable for driving, we create an opportunity for more drivers to experience the “joy of driving” through the feeling of oneness like unity of rider and horse, which allows them to manipulate the vehicle at will. This paper introduces the driver personalization system and its elemental technology.

Key words : Human engineering, Driving position, Usability, Driver model/rider model, Human interface

1. はじめに

人と車の関係が多様化しても、車はドライバーが操作するものであり続けるとマツダは考えている。より運転しやすい車とするためには、「人間中心」の思想に基づく

HMIを新たな技術を用いて深化させることが必要と考え、CX-60 からマツダ独自のドライバー・パーソナライゼーション・システムを導入した。

このシステムは、①ドライバー・モニタリングカメラ・システムを用いた体格補正により高精度化した自動

*1,6 電子基盤開発部
Electronic Platform Dept.

*4,5 情報制御モデル開発部
Infotainment and Control Model Development Dept.

*2,3 車両実研部
Vehicle Testing & Research Dept.

ドライビングポジションガイド機能、②顔認証機能を用いた250項目以上の車両装備設定（ドライビングポジションや先進安全機能設定等）の自動設定復元機能、③車の乗降を容易にするエントリーアシスト機能の3つで構成される。これらの機能を簡単な操作だけで提供可能な様にマツダコネクットの画面構成を工夫することで、多くのドライバーに人馬一体感から生まれる「走る喜び」を体験していただく機会を創出した。

2. ドライバー・パーソナライゼーション・システム導入の背景とシステム概要

2.1 システム導入の背景

マツダでは従来からドライバーの感覚に合わせた、認知・判断・操作しやすい車を追求してきたが、更なる進化のために、達成すべき目標を2つ設定した。

1つ目の目標は、ドライバーが適切なドライビングポジションに設定できない場合への対応である。ポジションはドライバー自身で設定するため、適切なポジションへの調整法が分からない場合、オーナーズマニュアルの参照等の手間が必要となる。

2つ目の目標は、ドライバーの乗り換えに応じた車両装備の設定変更への対応である。車両装備の設定を車両で一とおりしか記録出来ないため、複数ドライバーで好みの設定が異なる場合、都度設定の変更の手間が必要となる。また、その手間により他人の設定のまま運転する場合もあった。

現状を分析した結果、目標達成のためには、車がドライバー個人の特徴の認識する仕組み、及び、その認識結果を踏まえ、ドライバーへドライビングポジションや車両装備の情報を提供する仕組みが必要との結論に至った。前者の仕組みは既に導入の見通しが立っていたため、後者の仕組みの実現に向け、今一度HMIを介した人と車の関わり方を整理し、カスタマイゼーションとパーソナライゼーションの2つの手法に大別した。

カスタマイゼーションは、人から車に働きかけ、車をもつコンテンツ（車両装備の設定等）を好みに設定する手法であり、パーソナライゼーションは、車から人に働きかけ、個人の特徴に合わせて車をもつコンテンツを提案・提供する手法である⁽¹⁾。これまでマツダは、カスタマイゼーションの手法を取り入れていたが、CX-60からパーソナライゼーションの手法も導入した。

この導入で、目標達成はもちろん、車から人にコンテンツを提供することで、人にとって新たな発見があり、より多くの人に人馬一体感から生まれる「走る喜び」の価値を認識いただく機会も提供できると考えた (Fig. 1)。

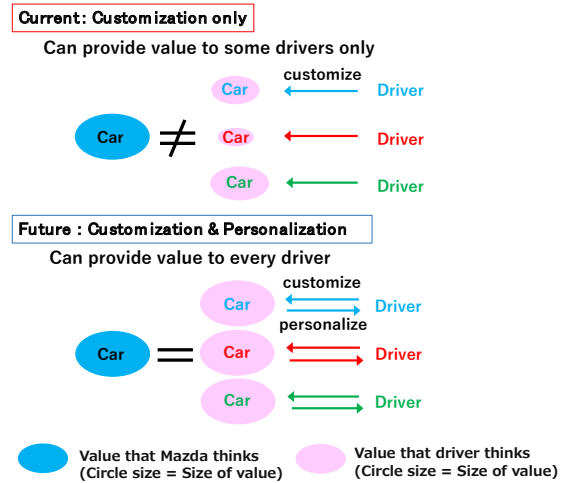


Fig. 1 Increase the Value of the Car by Personalization

2.2 システム概要

パーソナライゼーションの手法に基づいて、前述の目標を達成するためには、個々のドライバーに対し運転に適したドライビングポジションや車両装備の設定を提供する必要があります。実現する手段を次の3つの機能に集約した。

- ①自動ドライビングポジションガイド機能
- ②顔認証機能を用いた車内環境の自動設定復元機能
- ③エントリーアシスト機能

3つの機能を Fig. 2 の①②③のように乗車～走行～降車の流れの中で機能させることにより、適切なタイミングで運転に適した車内環境の提供を実現した。

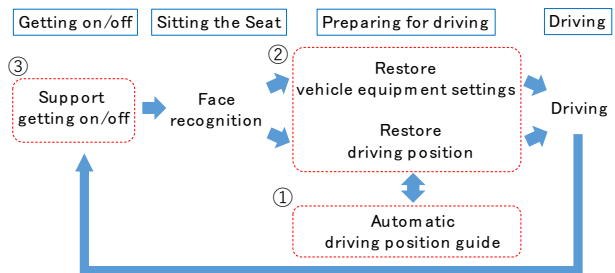


Fig. 2 Relationship between Use Cases and Each Function

更に、これらの機能を提供する際、視覚的に情報を伝達するマツダコネクットの画面構成を、認知・判断・操作しやすい「人間中心」の思想に基づき最適化し、簡単な操作だけで使用できるようにした。

以降でドライバー・パーソナライゼーション・システムを実現するための個々の機能の概要を説明する。

2.3 自動ドライビングポジションガイド機能

本機能は、難しい知識を必要とすることなく、誰でも容易に適切なドライビングポジションに調整できるよう下記2つの手順によりガイドする機能である。詳細は、

4.1 節で説明する。

- ・ドライバーによる身長入力と、カメラがセンシングした眉間の位置情報から体格を推定することで推奨位置に自動調整する
- ・マツダコネクトの画面のガイダンスに沿って姿勢を確認し微調整する

2.4 顔認証機能を用いた車内環境の自動設定復元機能

本機能は、顔認証機能を用いてドライバーを特定し、あらかじめ記録した車両装備の設定を復元することで、個人の好みに合った車内環境で運転していただくための機能である。

従来車種では、ドライビングポジション以外は車一台に一とおりの共通設定として記録され、複数ドライバーで好みの設定が異なる場合、ドライバー自身の操作で設定を変更していた。

これを解決するために、ドライバー・モニタリングカメラ・システムの顔認証機能を用いてドライバーを認証し、ドライバーごとに記録した設定と紐付け、設定を再現させた。

顔認証機能には、顔情報をドライバー・モニタリングカメラ・システムに登録する機能と、登録済みの顔情報と照合することで本人を認証する機能の2つがある。

登録する機能では、初めて使用するドライバーが迷うことがないように、マツダコネクトの画面上に「登録時の動作を示す画面」(Fig. 3)を載せている。また、認証する機能では、2種類の顔データを登録できるようにしている。例えば、眼鏡の装着ありと装着なしをそれぞれ登録できるようにして、使い勝手を向上させた。

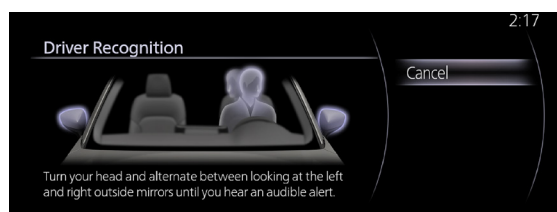


Fig. 3 Screen When Registering a Driver

自動設定復元機能は、ドライバーが着座後にドアを閉めることで顔認証を行い、ドライビングポジションや車両装備の設定を復元する機能である。これにより、運転前までに、登録した車内環境を提供可能な仕様とした。

車両装備の設定についてはドライバーの価値観に基づいて好みによって変更する項目と、ドライバーの価値観によらない普遍的な項目に分類した。前者に該当する250以上の項目の記録と自動復元に対応させることで、ドライバーの細かい好みの設定まで復元可能としている。なお、自動設定復元機能は家族や友人との車のシェアを想定し6人分まで対応している。

2.5 エントリーアシスト機能

本機能は、登録済のドライバーが楽に乗り降りできるよう、シートとステアリングホイール（以下ステアリング）を自動的に動かすことで下肢のスペースを確保する機能である。一般的に、運転しやすいシートとステアリング位置では、乗降時に靴先とトリムのスペースやステアリングコラムと膝のスペースが狭くなる。乗降時の動作を容易にするため、自動でシートスライドを後方に、ステアリングを上方に動かしてスペースを広げている。降車時にドアを開けるまでに下肢スペースの確保を完了するために、電源OFFかつシートベルトバックルを外した時に作動させる仕様とした。

3. システム構成とシステム動作の具体例

3.1 システム構成

ドライバー・パーソライゼーション・システムは11個のECU (Electronic Control Unit) で構成され、これらを車内通信ネットワーク (CAN/LIN) で接続している (Fig. 4)。

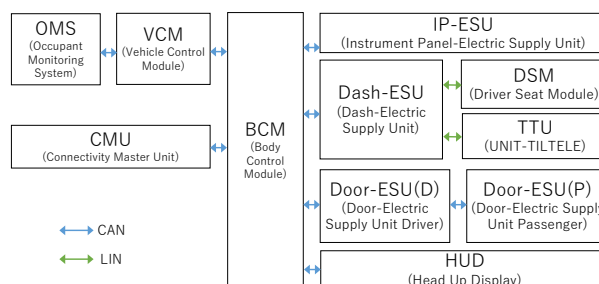


Fig. 4 Diagram of the Driver Personalization System

開発期間の短縮と設計品質の確保のため、既存のシステムを最大限活用することを念頭に置き、システムの機能配分は、制御領域（アクチュエータや関連ECUを動かす領域）の大半を司るBCM (Body Control Module) と、HMI領域（ドライバーと車が情報をやり取りする領域）の大半を司るCMU (Connectivity master Unit) とに大別し、新規開発要素はこれらのECUを中心に実装する構成とした。

BCMでは、CMUからのドライバー操作による要求やOMSからの顔認証結果を受けて、ドライバー・パーソライゼーション・システムを動作する制御指令を出力する。各ECUやESU (Electric Supply Unit) やHUD (Head Up Display) は、その指令を受信してサブシステムを動作させることでシステム全体として機能を実現している。

また、異常発生時のロバスト性を確保するため、関連するECUの多くが接続されるBCMが、異常箇所に応じ、全システムの停止や部分的に動作させる等を適切に判定する。更に、判定結果をCMUが常時監視することで、異常発生時にマツダコネクトの画面へ適切な情報を表示させ、ドライバーに不安や違和感を抱かせない仕様とし

ている。

Fig. 4 のとおり、制御を司る BCM に対し多くの ECU が接続されるが、マスターを BCM、スレーブを BCM 以外の ECU として機能配分を明確にすることで、並列開発を容易とし開発期間の短縮化を図った。

3.2 システム動作の具体例

顔認証機能を用いた車内環境の自動設定復元機能を例にシステムの具体的な動作を説明する (Fig. 5)。

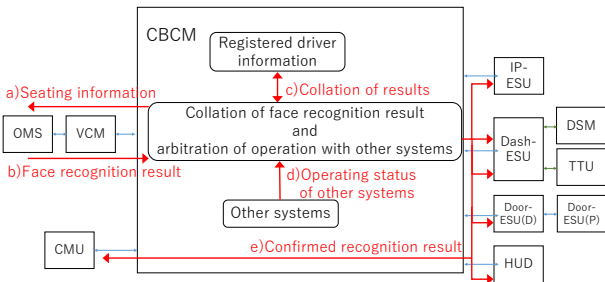


Fig. 5 Operation of the Restoration of the In-vehicle Environment Using the Face Recognition

ドライバー席のドアを閉めることでドライバーの乗車を認識すると OMS が顔認証を開始 (a)、認証結果は BCM へ送信される (b)。認証結果を受信した BCM は、登録済のドライバー情報と認証結果を照合し (c)、更には他のシステムとの競合動作の有無を確認する (d)。問題がなければ、確定した認証結果として各 ECU にこれを送信する (e)。認証結果を受信した各 ECU 及び BCM であらかじめ記録していた設定を復元する。

4. 要素技術

4.1 自動ドライビングポジションガイド機能

(1) 開発のねらい

マツダは、適切なドライビングポジションを通して、多くのドライバーに「走る歓び」へ直結する以下の価値を感じてもらえる商品を開発してきた。

- ・長時間の運転でも疲れにくく、運転を楽しめる
- ・狭い路地やワインディング、緊急回避時も車両の動きを正しく感じられ車両を正確にコントロールできる
- ・正しい位置に着座することで、衝突時の被害軽減できる

これまで、商品として、人間特性に基づきペダル配置やシートの調整量等を最適化してきた。サービスとして、適切なドライビングポジションに合わせる手順をディーラーで説明し、取扱説明書に記載してきた。しかし、外部の方を招いた社内イベントの調査では、自分のドライビングポジションの正しさに不安を抱く人が多くいることが窺えた。一般ドライバーを対象とした調査では、適切なドライビングポジションで運転する人は全体の約半

数程度であった。要因として、ステアリングテレスコピック (前後調整) などの調整機構の存在を知らない、調整の順番がわからない等である。

本機能は、ドライバーがガイダンスに沿って操作するだけで、容易に適切なドライビングポジションに合わせられることを目指し、以下の流れとした (Fig. 6)。

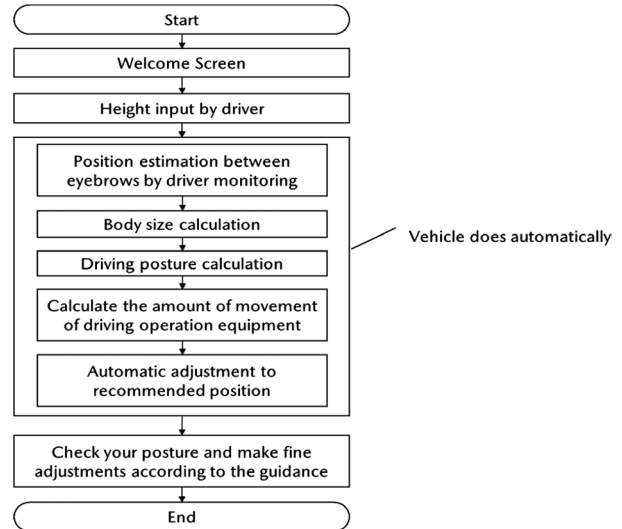


Fig. 6 Flow of Automatic Driving Position Guide

(2) 適切なドライビングポジションの定義

マツダが考える適切なドライビングポジションとは、楽で力を入れやすい姿勢と安心できる前方下方視界が両立している状態である (Fig. 7)。

1) 楽で力を入れやすい姿勢

楽で力を入れやすい姿勢では、体を安定させられるため車の動きを正しく感じとれ、ステアリングやペダルを負担なく操作できる。この姿勢は、関節の動かしやすさ (関節受動抵抗) と力の出しやすさ (関節発揮トルク) で決まる。動作するときに抵抗となる関節受動抵抗は低く、かつ関節発揮トルクは高い、関節角の範囲で操作できることがよいと定義している。

2) 安心できる前方下方視界

前方下方視界は、見え方により速度感や距離感、安心感が変わる。一般的に前方路面の不可視長が長いと高速での安心感が向上し、狭い道では距離感が低下する。この2つが両立する路面の不可視長範囲を、安心できる前方下方視界として定義している。

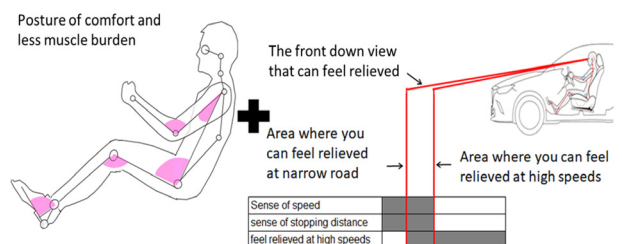


Fig. 7 Definition of Proper Driving Position

(3) 適切なドライビングポジションの算出及び移動

1) 身体寸法推定

ドライビングポジションを算出するためには、各関節間の寸法が必要である。しかし、各関節間の寸法は、同じ身長でも胴体と脚部の比率が一人ひとり異なる。提供すべきドライビングポジションは各関節間の寸法を把握した上で算出する必要がある。この課題に対して、マツダが所有するグローバルの身体データを基に、各関節間の寸法への分析をした結果、身長に対する胴体長比と各関節間の寸法に相関が高いことが分かった。本システムでは、身長と肩間の位置推定情報から身長に対する胴体長比を推定し、データベースと照合することで、身体寸法を算出するアルゴリズムを開発した (Fig. 8)。アルゴリズムにより、身長に対する胴体長比が異なる誰に対しても、適切なドライビングポジションを提供できる。また、シート高さなど自分の嗜好を持っている人にも、自分のドライビングポジションの近くまで自動的に移動しているため微調整で容易に調整できる。

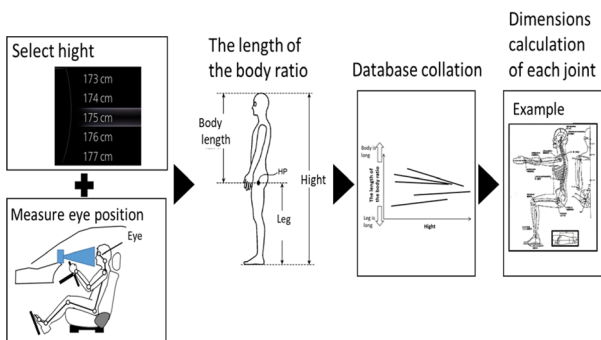


Fig. 8 Algorithm for Estimating Body Dimensions

2) 運転姿勢算出とユニット位置算出

身体寸法推定で求めた各関節間の寸法を用いて 4.1 項 (2) で定義している姿勢 (関節角) と前方下方視界 (明視距離) が両立する運転姿勢を算出する。算出した運転姿勢が取れるようシートとステアリング位置を決定する。ステアリング位置においては更にメーターが見えるように再計算して決定する。アクティブ・ドライビング・ディスプレイ表示高さは、肩間の位置推定を基に前を向いた状態で煩わしくなく、眼球移動のみで表示内容が認識できる位置を算出する。ドアミラー角度は、ミラーに写る物体 (車両) との位置関係を把握しやすくするため、上下角度は道路の映る位置がドアミラー中心になるように、左右角度は車体が写り込むように、角度を算出する。

3) 各ユニットの移動

2) で算出した位置情報を基に、BCM が各ユニットへ移動を指示する。移動前のステアリングやシート位置はさまざまであるため、挟まれや圧迫感等による不安を与えないように、空間を確保するように調整順序とした。例えば、シートを移動させた時にステアリングと前後方

向の空間が少なくなるケースでは、まずステアリングを移動させることでドライバー前後方向の空間を確保するようにした。以降に文面と図面 (Fig. 9) で代表例を示す。①ステアリング位置を最上端へ移動する。②ステアリング前方向を移動する。③シート/ドアミラー/アクティブ・ドライビング・ディスプレイを移動・回転させる。④シートの移動完了後に、ステアリングを下方へ移動する。

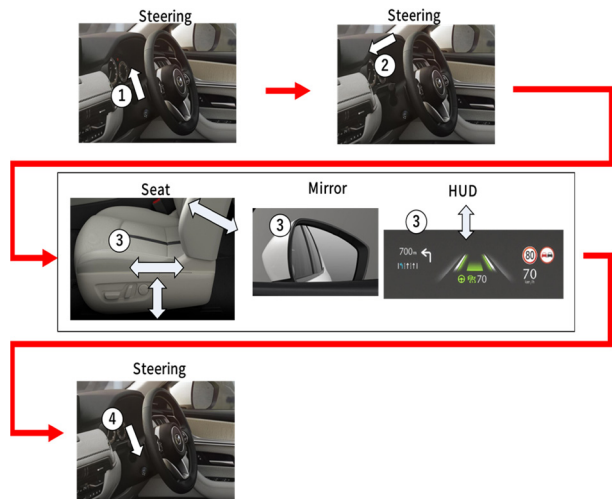


Fig. 9 An Example of the Movement Order in Automatic Driving Position Guide

4) 車のガイダンスによる調節

体の硬さ・柔らかさやシート高さの高い・低いなど嗜好の違いは一人ひとり異なる。マツダの推奨する姿勢、視界の合わせ方をマツダコネクトの画面に表示し、ドライバー自身でガイダンスに沿って調整できるようにした。

4.2 マツダコネクトの画面構成

ドライバー・パーソナライゼーション・システムの操作は主にマツダコネクトで行う。マツダの「認知・判断・操作」しやすい「人間中心」の思想に基づく HMI の一環として、安心感があり、簡単な操作だけで使いやすい画面構成を構築した。

(1) ドライバー認証時の出迎え画面

システムがカメラでドライバーを認証すると、マツダコネクトの画面に登録されているドライバー名を表示し、特別感と安心感を演出している。車がドライバーを認証したことを表現するため、スキャンする表現のアニメーションを採用した。また、マスクの着用や顔の向きなどによりシステムが正しくドライバーを認証できなかった場合、自ら正しいドライバーを容易に選択できる画面構成とし、快適性を向上させた (Fig. 10)。

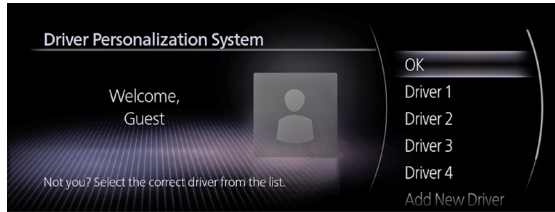


Fig. 10 Screen When Recognizing a Driver

(2) ドライビングポジションの確認・調整画面の操作

初めて車に乗るドライバーでも、迷いなく適切なドライビングポジションに調節できるよう、下記の点に注力した。

1) 調節手順のわかりやすさ

初めて車に乗るドライバーの3つの不安「どういう運転姿勢がよいのか分からない」、「調節機能をどこで操作するのか分からない」、「どういう順番で調節するのか分からない」を解消するため、難しい調節方法を文字だけではなく、順番ごとに調節するための操作機器や、調節する方向をイラストで表現した (Fig. 11)。

2) 操作手数の最小化

ドライビングポジションを調節する操作と、画面の操作を交互に行う。持ち替え動作を最小限にするため、表示している画面に必要な情報を集約することで、画面をスクロール操作する手間を省いた。

3) 操作タイミングの自由度

適切なドライビングポジションの調節に要する時間は、ドライバーによって異なる。画面を操作する際のタイミングに自由度を持たせるため、ドライビングポジション調節中にどのタイミングでも画面を切り替える操作を可能としており、ドライバーが納得のいくタイミングで画面を次に遷移できるようにした。

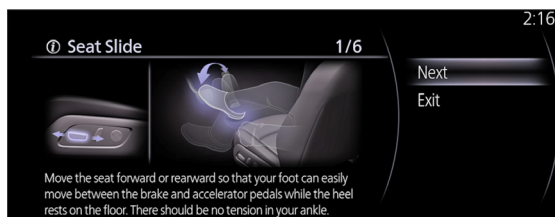


Fig. 11 Screen Driver Position Adjustment

5. おわりに

CX-60 向けドライバー・パーソナライゼーション・システムの開発では、「車が人の特徴を考慮した車内環境を提供する」というパーソナライゼーションの手法を導入した上で、人の感覚に合わせ、より扱いやすい車とするために「人間中心」の思想に基づく HMI を深化させた。

2章では、本システムの導入の背景とシステムの概要

を述べ、3章では、システム構成とシステム動作の具体例を示し、4章では、要素技術の詳細を説明した。

本システムの導入により、車を思いどおりに扱える人馬一体感による「走る喜び」の価値を多くのドライバーに体験していただく機会を創出した。

マツダは今後もこのシステムを進化させ、「走る喜び」をお届けし続けるとともに、CASE 時代における車の新たな価値を創出していく。

参考文献

- (株)ブレインパッド マーケティングブログ
パーソナライゼーションが重要な理由とは？マーケティングのためのコツや注意点も解説
https://www.brainpad.co.jp/rtoaster/blog/about_personalization/

■ 著 者 ■



末永 修滋



平田 義人



杉吉 竜弥



藤丸 翔太



中上 千恵子



前田 真聡

特集：MAZDA CX-60

20

CX-60 コックピット HMI 表示系進化

CX-60: Improved Cockpit HMI Display

常清 悠介^{*1} 寺澤 拓馬^{*2} 池田 竜太^{*3}
Yusuke Tsunekiyo Takuma Terasawa Ryuta Ikeda
松尾 純太郎^{*4} 諸川 波動^{*5}
Juntaro Matsuo Hado Morokawa

要 約

危険な状況に陥ってから対処するのではなく、危険自体を回避するマツダの安全思想「MAZDA PROACTIVE SAFETY (マツダ・プロアクティブ・セーフティ)」は、ドライバーの認知・判断・操作を車両がサポートすることで、事故のリスクを最小限に抑える考え方である。マツダのコックピットはこの安全思想に基づき、常に前方を見据えて運転することができるヘッドアップコックピットの考えで Human Machine Interface (以下、HMI) 開発を行っている。このヘッドアップコックピットは、2013年に市場導入された3代目アクセラから導入し、それ以降も常に進化を続けている。

CX-60では、ヘッドアップコックピット構想のベースにある人間中心の考え方で今まで追求してきた人間が共通でもつ「人間特性」に加え、新たに多様性を考慮した個人最適の考えを織り込むことで、個人の能力を発揮しやすい運転環境を作り出す開発を行った。

Abstract

MAZDA's safety philosophy, "Mazda Proactive Safety", aims at minimizing accidents through vehicle's supporting drivers in recognition, judgements, and operations, and by avoiding danger rather than responding to the situation when the driver faces danger. Based on the safety philosophy, MAZDA has been conducting Human Machine Interface (HMI) development, including "Heads-up Cockpit" that allows the driver to keep looking ahead while conducting driving operations. The Heads-up Cockpit was introduced to the 3rd generation Mazda3 (launched in 2013), which has been kept improving since.

For the CX-60, we incorporated the idea of "optimization for individual" reflecting customer diversity into the general "human characteristics" we have pursued so far based on the "human centric" concept, the base concept of the Head-up Cockpit, aiming for the driving environment that enables each driver to exert own driving ability.

Key words : Electronics and control, Human machine interface display, Human machine interface information provision system

1. はじめに

マツダは、人間中心の考えから人間特性を研究することで、ドライバーディストラクションを最小にし、より安心・安全に運転することができるクルマを開発してきた。ドライバーディストラクションとは、運転への集中

が阻害され、注意が散漫になることである。具体的には、「前方の道路から心が離れる」、「前方道路から目が離れる」、「ステアリングから手が離れる」の3つを指す。このドライバーディストラクションを最小にするために、マツダはさまざまな情報を扱いつつ、運転にも集中できるヘッドアップコックピットという考え方でコックピット

*1~3 情報制御モデル開発部
Infotainment and Control Model Development
Dept.

*4 車両実験部
Vehicle Testing & Research Dept.

*5 プロダクションデザインスタジオ
Production Design Studio

ト開発を行ってきた。またマツダは、今まで表示デバイスのコントラスト（表示部と背景部の輝度比）向上や、情報を明確に分けてゾーン配置するなど、人間が生物としても「人間特性」を考慮することで認知性／瞬読性の向上も図ってきた。この人間特性は、人間が共通でもつ領域と個々人で異なる多様性をもつ領域に分けられる。CX-60のHMIは、共通領域は今までの技術をベースに更に進化させ、新たに多様性領域にも積極的に対応することで、より一層クルマに乗ることを楽しみ、また、モードや状況に応じて最適な表示を行う状況の最適化も考慮し開発することで安心感と満足感を高めた。これは、搭載するHMIデバイスがもつ「表現の自由度」を向上させることで実現した。具体的には、スモール商品群よりも更に高画角化（表示エリアを拡大）したActive Driving Display（以下、ADD）と、表示面を全て液晶ディスプレイとする「フル液晶メーター」を採用した。本稿では、CX-60に採用したADDとメーターの進化ポイントを紹介する。

2. HMIの進化

2.1 高画角ADD

(1) ADDの進化について

マツダのADDは、2代目MAZDA CX-5よりフロントウィンドウ投影型を採用している。ADDの表示エリアの大きさは、見た目上の画面の大きさを表す指標である画角が用いられる。画角についての説明図をFig. 1に示す。スモール商品群（MAZDA3等）のADDは画角が $2 \times 5^\circ$ （Fig. 2）、CX-60のADDは画角が $3 \times 10^\circ$ （Fig. 3）となっている。CX-60の表示エリアは、スモール商品群比で3倍広い。この拡大した表示面積を最大限に活用した、ADDのHMIについて紹介する。ADDは、走行中にリアルタイムで情報の更新が必要な「走行情報」を表示するデバイスと位置付けているため、運転中に適宜確認する情報を多く表示している。CX-60では、より認知性／瞬読性を向上させるために、表示レイアウトを再構築した。具体的には、「最適配置」「表示のグルーピング強化」と「表示サイズの適正化」を行った。

以下、詳細について述べる。



Fig. 1 Image of Angle of View

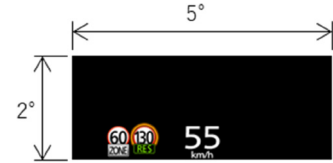


Fig. 2 MAZDA3 ADD Display

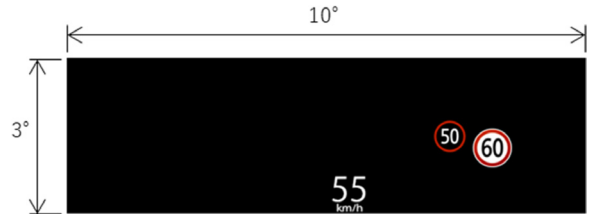


Fig. 3 CX-60 ADD Display

(2) 各シーンに応じた最適配置

CX-60のADDでは、通常運転時とマツダ・レーダー・クルーズ・コントロール（以下、MRCC）やクルージング&トラフィック・サポート（以下、CTS）などの運転支援システムを作動させている状態では、表示する情報の配置に変化を持たせている。通常運転時であれば、ドライバーは自らアクセルペダルとブレーキペダルを操作する。そのため、安全な車速を維持するために現在車速の視認頻度が最も高いと考える。一方で、MRCCやCTS作動時には、ドライバーが自ら設定した車速や先行車との車間距離に応じて、車速は自動制御される。そのため、ドライバーにとって現在車速の重要度は低下し、システムが制御するために必要な周辺環境のセンシング情報がより重要となる。よって、通常運転中は現在車速を最小な視線移動で視認可能な中央に表示し、MRCCやCTSを使用している際には、センサーが検知している周辺情報や設定車速情報を中央に表示することにした。この表示の具体的な例をFig. 4, 5に示す。これによって、ドライバーは車両の制御状態をより直感的に認識でき、シーンごとに情報視認時間の最短化を実現した。

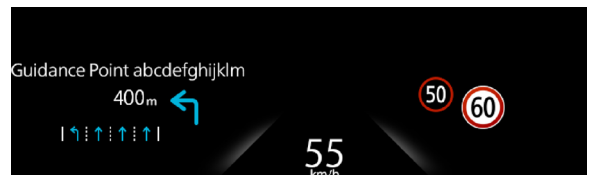


Fig. 4 ADD Display in Normal Mode

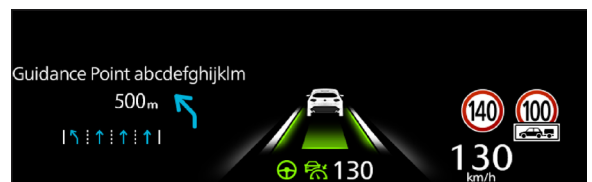


Fig. 5 ADD Display in ADAS Information Mode

(3) ADD 表示のグルーピング

表示のグルーピングとは、同種の情報は近接して配置し、情報を一つの塊として見える状態にすることである。CX-60 の ADD では、表示エリアのグルーピングを 3 分割して考えた。具体的なグルーピングは、車線情報やターン・バイ・ターンなどの「ナビ情報」、MRCC や CTS などの「運転支援システム情報」、車速標識情報や実車速表示などの「車速関連情報」の 3 つのグループとした。グルーピングの具体的な表示を Fig. 6 に示す。このグルーピングしたグループ内での表示は近付けて表示し、各グループ間の表示距離は離して表示することで、ユーザーはより明確にグループを認知できる状態にした。このようなグルーピングによって、ユーザーは情報の配置の学習が容易となり、画面内から欲しい情報を探索する時間を削減できる。

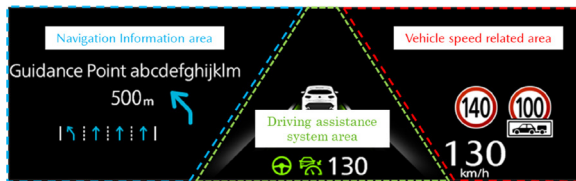


Fig. 6 Grouping in Case of ADAS Information Mode

(4) 表示サイズ

拡大した表示面積を活用し、ADD の表示認知性／瞬読性を向上させるために、各情報の表示サイズも検証した。

車速やナビゲーションの文字情報は、個々人の多様性対応の 1 つとして幅広い年齢のお客様に運転を楽しんでいただけるよう、平均的な 80 歳の視力でも読み取りが可能なサイズを“JIS S 0032”⁽¹⁾ を参考にして策定した。これはスモール商品群と比較して、文字サイズ比で 15% から 50% 程度拡大している。また、ADAS の検知及び制御状態を示すグラフィックも従来から大幅にサイズを拡大することで、ADD を注視しなくとも制御の変化に気が付きやすくした。この文字サイズに関する実際の比較図を Fig. 7 に示す。

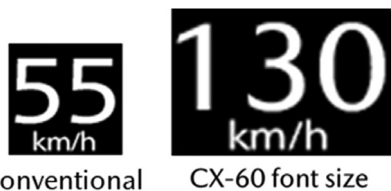


Fig. 7 Compare Conventional Models and CX-60 on Font Size

2.2 フル液晶メーター

(1) メーターの進化について

スモール商品群までのメーターは、7inch 液晶を中央に搭載し、それ以外の領域は、アナログ針でタコメ

ターや残燃料表示などを行っていた。CX-60 のメーターでは、表現の自由度を向上させるために 12.3inch の大型液晶（以下、フル液晶メーター）を採用し、メーター表示面の大部分を液晶表示とした。本項目では、このフル液晶メーター化により進化した HMI について紹介する。

(2) フル液晶メーターの表示モード

フル液晶メーターの表示は、大きく分類して通常モードと ADAS 情報画面の 2 種類を搭載している。通常モードとは、7inch 液晶メーターと同等の表示を液晶上で模擬しており、左にタコメーター、中央にスピードメーター、右に水温・残燃料表示をもつ 3 眼表示である (Fig. 8)。

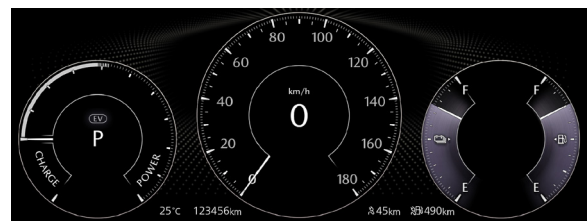


Fig. 8 Normal Mode of Full Display Meter Cluster



Fig. 9 ADAS Information Mode of Full Display Meter Cluster

もう 1 つの ADAS 情報画面は、タコメーターや残燃料表示を縮小しつつ、中心に自車を取り囲む環境を 3 次元的に大きく表現し、クルマが検知している物標や車両の制御状態をリアルタイムに表示する (Fig. 9)。これにより、ドライバーは車速制御やステアリング制御などの介入状態を直感的に認知できるだけでなく、クルマが自車周辺の何を検知しているのかを、直感的かつ客観的に認識することができ、その後の車両挙動をドライバーが予測できるようになる。これには、システムへの安心感を向上させるねらいがある。更に ADAS 情報画面では、制御状態の変化を直感的に理解できる表現にも注力した。具体的には、運転支援システムの ON/OFF に応じて、メーターに表示されるオブジェクトに色の変化を与えている。例えば、センサーが先行車や車線を検知している場合は、3D 空間に「白色」で車線を描画する。また、車両が車速やステアリングを制御している場合は車線の内側を「緑色」で表現する。また、各描画オブジェクトの表示面積を大きくとることで、前方注視中のドライバーでも検知状態や制御状態の変化を検知しやすい表現とした。これで、ドライバーが予期しない制御介入や制御停止の

発生リスクを低減し、車両の制御状態を正しく把握しながら適切に周囲の危険に注意を配分することができる。また、ドライバーが運転支援システムを ON にした際には自動で ADAS 情報画面に切り替わるため、ドライバーが自ら最適な表示モードを選択する手間を省く環境最適を実現することで、より運転に集中できる状態にした。

(3) 文字サイズのカスタマイズ

フル液晶メーターで表示するデフォルトの文字サイズは、新世代スモール商品群のサイズを踏襲している。これは、情報と余白のバランスがよいことで、平均的な視力保有者にとって最も認知性の良いサイズと考えている。この表示の具体例を Fig. 10 に示す。今までのメーターでは、この 1 サイズのみであったが、CX-60 では更に高齢者などメーターを視認する際に焦点調整が困難なドライバーでも、ストレスを感じにくいよう文字サイズを拡大したモードの選択を可能とした。このモードでは、一部単位などの走行中に読み取る必要のない情報を除き、メーター上の文字サイズを 30~40%程度拡大することで、一般的な 80 歳の視覚特性でも容易に視認できる文字サイズとした。この表示の具体例を Fig. 11 に示す。

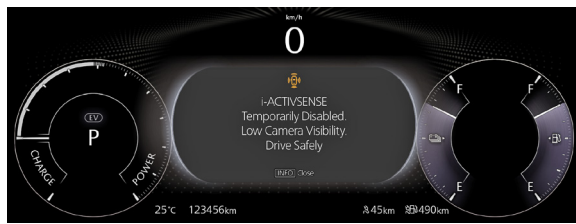


Fig. 10 Default Font Size

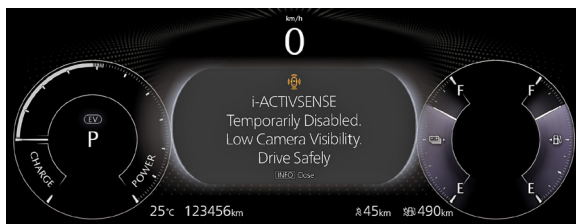


Fig. 11 Large Font Size

(4) Mazda Intelligent Drive Select の進化

CX-50 より導入した Mazda Intelligent Drive Select (以下、Mi-Drive)⁽²⁾ は、運転環境に応じて最適な車両制御を提供するシステムである。CX-60 では、従来のノーマルモード、スポーツモード、オフロードモード、トーイングモードに加え、EV モードを搭載し最大 5 つのモードをもつ (ただし、パワートレインによって搭載していないモードあり)。フル液晶メーターの Mi-Drive では、向上した表現の自由度を最大限に活かし各モードともモードの切り替わりを一目でわかる表示にすることで認知性/瞬読性を向上させた。更に、スポーティな運転が求められるスポーツモードではタコメーターを表示する等、各モードそれぞれに求められる表示へ自動で切り替える

事で環境最適を図った。また本機能は、「心のスイッチを切り替える」をコンセプトに開発を行い、ドライバビリティを想起させるアピアランスを付与することで、機能性のみならずクルマの所有感や運転体験の満足感の向上を図った。

以下、各モードについて述べる。

(4-1) スポーツモード

スポーツモードでは、クルマのドライバビリティをダイレクトに表現するためにキーカラーを赤色とし、また指針先端付近にもアニメーションを加えている。スポーツモードを選択した場合は、e-SKYACTIV PHEV であってもエンジンサウンドとエンジンの回転数を視覚的に感じられるように、左側の表示を電気駆動用のパワーメーターからエンジン駆動用のタコメーターへ自動で切り替え、更にスポーツモード選択中はエンジンを常に稼働させる。そして、体性感覚で認知する「車両の加速度」、聴覚で認知する「エンジンサウンド」に加えて、視覚で認知する「タコメーターの指針の動き」など、全ての感覚が一致して感じられることで、車両との一体感を演出した。このようにスポーツモードはスポーティなドライバビリティを直感的に感じられる HMI として開発した。

Fig. 12 にスポーツモードの表示を示す。

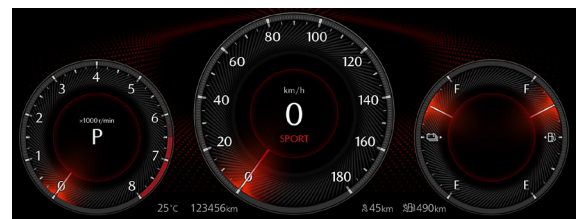


Fig. 12 Mi-Drive (SPORT MODE)

(4-2) オフロードモード

オフロードモードでは、未舗装の悪路をたくましく走り抜ける力強さを感じられるように、褐色とグレーをキーカラーとしている。また、凹凸のある表現をすることで、より一層オフロードを直感で感じられるデザインとした。このオフロードモードでは、目標物のない荒野を走行すると想定し、自車が走行している方向を示すコンパスを画面中央に表示している。このようにオフロードモードは、車両がアクティブに走破するイメージを感じとれる HMI として開発した。Fig. 13 にオフロードモードの表示を示す。

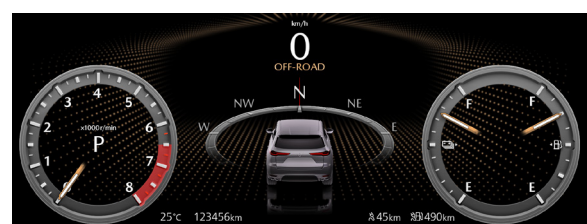


Fig. 13 Mi-Drive (OFF-ROAD MODE)

(4-3) トーイングモード

トーイングモードでは、CX-50 で搭載している Mi-Drive のイメージを踏襲した。しかしながら、3 眼表示の全てにデザインの追加や、連結イメージのグラフィックを 3 次元で表現する等、フル液晶の表現力を最大限に活用し進化させた。このようにトーイングモードは、既に搭載されている Mi-Drive のイメージを崩すことなく、更に進化を表現できる HMI として開発した。Fig. 14 にトーイングモードの表示を示す。



Fig. 14 Mi-Drive (TOWING MODE)

(4-4) EV モード

EV モードでは、MAZDA MX-30 で搭載しているパワーメーターのイメージを踏襲した。EV モードでは、バッテリー駆動のみで走行するため、クルマの走行能力の限界はバッテリー出力の限界に依存する。そのため、バッテリー出力の限界値を目盛りで常時表示している。それにより、上り坂走行や高速走行の際に、出力限界を認知することが出来、最適な Mi-Drive のモード選択が可能になる。この出力限界値の目盛り部分は、ノーマルモードでは、バッテリー駆動とエンジン駆動が切り替わる境目をゼブラゾーン（点線）として表現している。これは、エンジン駆動とバッテリー駆動が状況に応じ臨機応変に自動で切り替わるため、中間ゾーンとしてゼブラ表示としている。このように EV モードは、バッテリー出力のみで走行する際に知りたいユニークな情報も認知しやすい HMI として開発した。Fig. 15 に EV モードの全体表示を、Fig. 16 にノーマルモードとゼブラゾーンの差を示す。

(5) 特別塗装色との連動

フル液晶メーターではオープニング演出を一新し、外板色が特別塗装色の場合は連動する演出とした。ドアを開きクルマに乗り、エンジンを始動する過程で表示される車両グラフィック及びアニメーションの外板色を連動させることで、特別なクルマを所有する満足感の向上を

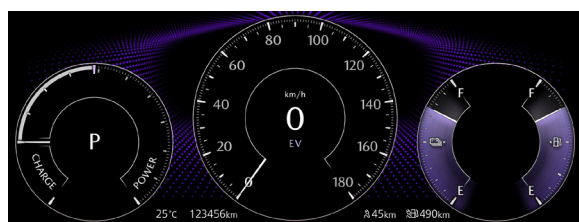
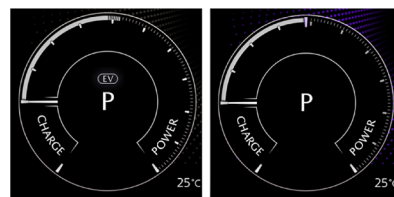


Fig. 15 Mi-Drive (EV MODE)



Normal mode (PHEV) EV mode

Fig. 16 Compare Normal Mode (PHEV) with EV Mode

図った。CX-60 で採用しているオープニングアニメーション内の外板色は、特別塗装色のソウルレッドクリスタルメタリック・マシーングレープレミアムメタリック・ロジウムホワイトプレミアムメタリックと、その他外板色のデフォルトカラーがある。一方で、オープニング画面以外の表示においては、表示情報に対する瞬読性／認知性への外乱となる懸念を考慮し、デフォルトカラーでの表示に統一した。オープニングアニメーションに表示する外板色を Fig. 17 に示す。



Fig. 17 BODY COLOR Variations of Opening Animation

3. おわりに

本稿では、表現の自由度を向上させることで進化させた、CX-60 で開発した最新の HMI を示した。

2.1 節では高画角化し、グルーピングなどの考えにより認知性・瞬読性を向上させた ADD の説明をし、2.2 節では、従来よりも大型の 12.3inch 液晶を採用し、また表示の大部分を液晶表示とすることで文字サイズカスタマイズやモードごとの表示に大きな変化を持たせることで認知性・瞬読性を向上させたフル液晶メーターを紹介した。

このように、CX-60 の HMI はヘッズアップコックピットの考えを踏襲し、共通となる安心・安全を突き詰めた上で、「多様性」や所有欲を満たす演出により、お客様に CX-60 の魅力をより一層感じて頂ける HMI を目指した。

今後も継続した「人間特性」の追求や市場でのフィードバックを活かして HMI の進化を通じて「人生の輝き」を提供していく。

参考文献

- (1) JIS S 0032：高齢者・障害者配慮設計指針—視覚表示物—日本語文字の最小可読文字サイズ推定方法 (2003)
- (2) 今村ほか：CX-50 Mazda Intelligent Drive Select の開発，[マツダ技報，No.39，pp.183-187 \(2022\)](#)

■著者■



常清 悠介



寺澤 拓馬



池田 竜太



松尾 純太郎



諸川 波動

特集：MAZDA CX-60

21

CX-60のパワーリフトゲート開発 Power Lift Gate Development for CX-60

杉島 孝幸^{*1} 樋口 圭太^{*2} 高田 浩二^{*3} 伊藤 敦^{*4} 織田 匡樹^{*5}
Takayuki Sugishima Keita Higuchi Kohji Takada Atsushi Ito Masaki Oda
朴 吉友^{*6} 松下 将輝^{*7} 黒田 智也^{*8} 青山 麟太郎^{*9}
Jiyou Piao Masaki Matsushita Tomoya Kuroda Rintaro Aoyama

要 約

「カーライフを通じて人生の輝きを人々に提供する」ために、荷室へのアクセス時に使用するリフトゲートは、荷物を持った状態でも思いどおりに開閉できる利便性や、開閉時の上質な動きが大切な要素であると考えられる。CX-60のリフトゲートでは、思いどおりに開閉し、特別な体験を提供するパワーリフトゲート、及びハンズフリーリフトゲートを従来車に続き搭載した。従来車に対して、パワーリフトゲートは、心地よい作動速度・作動音を追求し、利便性と開閉時の作動質感を向上させた。また、ハンズフリーリフトゲートはトローイングヒッチを装着する車両との両立を実現させ、全てのお客様の利便性を向上させた。本稿ではこれらの開発内容について紹介する。

Abstract

To demonstrate the Mazda vision, “we love cars and want people to enjoy fulfilling lives through cars”, it is important the convenience of being able to open & close as desired even with luggage and the high-quality movement when opening & closing a for lift gate used to access luggage compartment. Continuing from conventional cars, the lift gate of CX-60 was equipped with power lift gate & hands-free lift gate to support opening & closing as you want and to provide a special experience. Power lift gate and hands-free lift gate have been improved for the CX-60. We pursued comfortable operating sound/speed and improved quality feel, considering customers convenience and operating quality. The hands-free lift gate is compatible with towing hitch, improving convenience for all customers. This paper introduces the development contents of such systems and technologies.

Key words : Electronics and control, Electrical actuator, Package/assembly/packaging technology

1. はじめに

スイッチを押すだけで自動開閉ができるパワーリフトゲートを従来車に続き、CX-60に搭載した。2016年から採用しているスクリュウとナットで駆動させるスピンドルタイプは、左右のユニットともに小型モーターを内蔵し、リフトゲートを電動開閉作動させている⁽¹⁾。電動開閉作動機能は、開閉利便性や特別な体験を演出するのに大きく貢献してきた。CX-60では更なるシステムの小型化を行いつつ、上質な動きとすることを目指した。具体的には、小型モーターを片側のみに内蔵したタイプを開発することで作動音源を減らしつつ、思いどおりに開閉できるよう作動性能の向上にも取り組んだ。本稿では、

これらの開発内容について紹介する。

2. 開発構想

2.1 静粛性

電動作動音は、お客様が快適に使用していただくために重要な要素の一つと考えている。静かさを求めることに加え、電動作動していることを音で伝えることは安心・安全のためにも必要と考え、お客様が心地よく感じられる作動音圧・作動音質を目標とした。

作動音圧に関しては一般的に、人が静かに感じる音は50dB (A) 以下、うるさいと感じる音は65dB (A) 以上とされる。一方、生活騒音に関しては50dB (A) 前後の範囲で発生していることが多く (Table 1)、生活騒音にか

*1~7 ボデー開発部
Body Development Dept.

*8,9 車両実研部
Vehicle Testing & Research Dept.

き消されないことを考慮して、目標値を 50~60dB (A) の範囲で定めた。

Table 1 Noise Level

Noise level (dB(A))	Feeling	Example scene
60~	Noisy	<ul style="list-style-type: none"> • Washing machin • Conversation
50~60	Normal	• Air conditioner outdorr unit
~50	Quiet	• Library

作動音質に関しては、作動音周波数が一般的に 1kHz 以上であると耳触りに感じられる領域となる。従って、1kHz 以上にピークを作らず大きな振幅を持たせないこと、また、ピークをもつ周波数間幅を一定量確保して、うなり感をなくすことを目指した。

2.2 利便性

(1) 電動開閉速度

お客様が快適に使用していただくために重要な 2 つ目の要素が開閉速度である。じれったさを感じず、一方、速すぎて危険感・恐怖感を覚えさせず心地よく感じる速度を目標とした。机上評価モデルでの可視化と実車モデルで人がどのように感じるかモニター結果 (Fig. 1) から、目標速度を決めた。

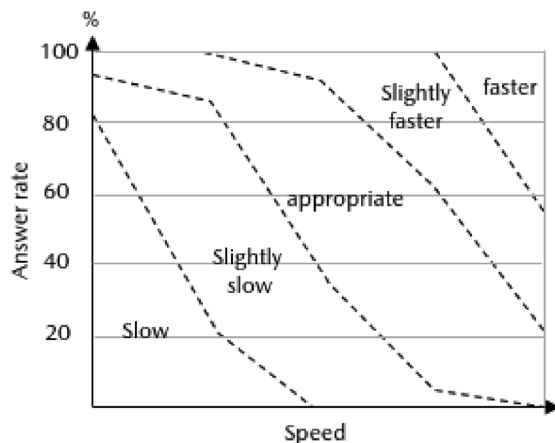


Fig. 1 Research of Feeling Lift Gate Speed

更に、開閉中、一定の速度にするのではなく、急緩をつけてお客様が心地よく感じていただける動きにすることを検討した。最も心地よく感じる動きを心拍変化の測定から検討した結果、作動の始めは速く、作動の終わりはゆっくりとさせる「ふすまを閉める際のような動き」を理想とした (Fig. 2)。

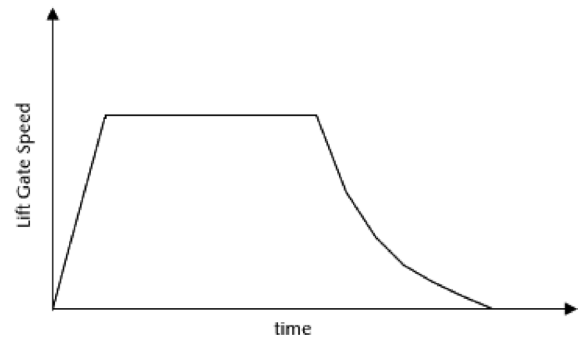


Fig. 2 Speed of Lift Gate at Each Time

(2) ハンズフリーリフトゲート

リアバンパー下部にレイアウトしたセンサーに足をかざすことで、両手がふさがった状態でもリフトゲートの開閉ができるハンズフリーリフトゲートを、従来車に続き採用した。バンパー部のデザイン・空力・操作安全性を満足させつつ、検知性能を確保するレイアウトが必要となり、トローイングヒッチを装着する車両では装着位置が重なることから、従来車ではハンズフリー、もしくはトローイングヒッチどちらか一方しか取り付けができなかった。CX-60 ではトローイングヒッチを装着されたお客様に対して、トローイングを行わない日常ユースでもハンズフリーリフトゲートを使用できることを目指した。

3. 課題の取り組み

3.1 片側駆動タイプの採用

前述の静粛性目標の達成には、音の発生源や構成部品点数を減らすことが必要で、駆動モーターを従来の両側から片側のみ内蔵した片側駆動タイプの採用に向けて取り組んだ。片側駆動を採用するにあたり、開閉時にリフトゲートシェルに加えられる人からの負荷や、左右のパワーリフトゲートユニットからの荷重が左右均等ではない場合、開閉作動時のばたつき、振じれによる閉まり不良が発生する。また、片側の取り付け部に過剰な負荷がかかることによる損傷等も懸念される。さまざまなお客様の使用シーンを想定し、電動作動方向と逆方向への強制的な作動や、手動で急作動させる意地悪的なモードにおいても品質不良が発生しないよう、後述する(1)、(2)でリフトゲートシェルへの負荷荷重を下げ、荷重を均一に分散する取り組みを実施した。(3)ではお客様に快適に使用していただくため、急緩の速度制御をする取り組みを実施した。それらを実施する中で、作動音・作動音質の目標を達成させた (作動音圧は従来モデル比 15% の低減)。

(1) パワーリフトゲートユニットからの入力荷重の低減

① 構造での取り組み

パワーリフトゲートユニットからリフトゲートシェルに加わる荷重そのものの低減に取り組んだ。パワーリフトゲートユニット取り付け部に加わる荷重は、レイアウト

トによってコントロールができる。荷重を下げるために、ヒンジ中央からパワーリフトゲートユニット間距離 L を大きく取り、相反する開度保持のための反力モーメントを確保しつつ、パワーリフトゲートユニットから加わる荷重を小さくした (Fig. 3)。エクステリアデザインに関わる内容のため、開発早期に必要な要件を明確にして確定させる必要がある。3D データがない状態でケーススタディを早期に実施して必要要件を出すことができる机上検討モデルを活用し、解決に導いた。

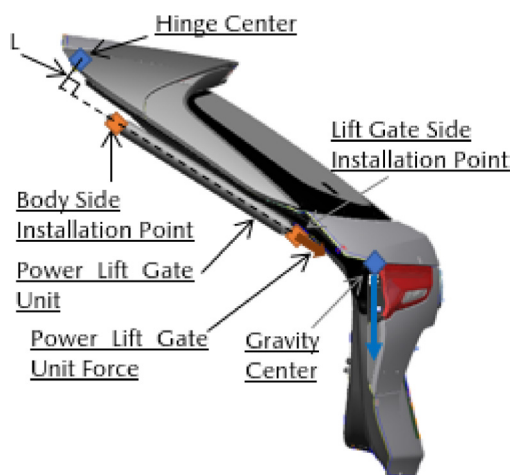


Fig. 3 Moment of Lift Gate

また、デザインとの共創で、外装樹脂部品の削減による軽量化を行い（従来モデル比で単位面積当たり 9%低減）、荷重を低減した。軽量化により、安心・安全で快適に使用していただけることにつながる保持力、及び手動操作力にも有利な方向に寄与している。

② 制御での取り組み

安心・安全のため、電動作動時、物が接触する等で一定以上の負荷がかかると停止させる。その後、接触し続けることを回避するため、反対方向に一定量作動して、最終停止する制御としている。反転作動する際、モーターは一時的にブレーキがかかる状態になり、その際、外部から入力荷重がかかると、片側が突っ張ることになり、特定の箇所にも負荷が集中することにもなる。そのため、ブレーキがかかる時間を最小化する必要があるが、速やかに停止・反転する作動に影響を及ぼさない点を追求し、ブレーキがかかる時間を短縮した。

(2) リフトゲートシェルにかかる荷重の左右均等分配

① リフトゲートシェル構造での取り組み

リフトゲートシェルに荷重が加わった際、シェルが捻じれると、特定の箇所にも負荷が集中してしまうため、剛性を確保して均等に荷重を伝達させることが大切である。

まず、剛性の寄与が高い取り付け部箇所にて、取り付け面剛性向上のため、荷重が加わる向きを考え、効果が高い引張/圧縮方向で荷重を支えられるよう補強部材を配置した。

次に、エクステリアデザインとインテリアデザインで挟まれた制約のある空間内で、机上検討モデルを使ってデザイン・関連部品と要件が成立する点を早期に発見することで、外周骨格を連続して配置でき、ヒンジとユニット取り付け部にかかる入力荷重を「連続体」にて途切れなく伝達させた (Fig. 4)。その結果、剛性を従来モデル比 20%向上させた。

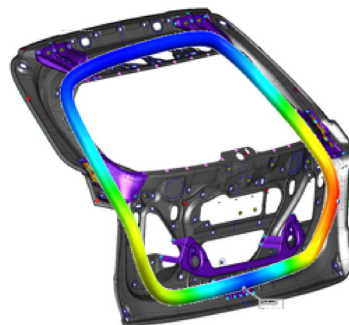


Fig. 4 Structure of Lift Gate Shell (Inner)

② ユニット構造での取り組み

モーターが内蔵されていない側のユニットに関して、モーター内蔵側と同じ荷重応答が出るように、スプリングとスクリュー/ナットの基本構造は共通にした。また、モーターの代わりとして、モーターコギング抵抗と同程度のフリクショントルクを発生することができ、小型化が容易で高耐久なコイルスプリング式のフリクションユニットを採用した (Fig. 5)。フリクションユニットは金属摺動で、温度影響を受けにくい強みがあり、さまざまな環境下で荷重応答差が拡大しないようにした。

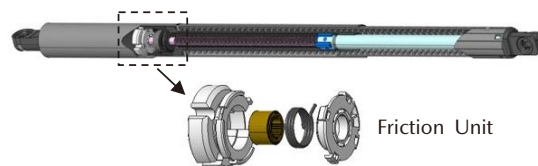


Fig. 5 Structure of Power Lift Gate Unit

(3) 急緩の速度制御

ねらいの急緩速度制御を加える場合、加速初期から定常速度に移行する際の速度変化が大きくなり、定常速度移行時、すぐに速度収束しないこと、また、全開位置に向けてゆっくり止めようとする全開停止位置のずれや、ばたつきが目立ちやすい。それらを発生させないように、モーター特性を踏まえた出力調整や、緩やかに停止させる抑制制御を追加し、お客様が心地よいと感じていただける急緩制御を実現した。

3.2 ハンズフリーとトーイングヒッチの両立

ハンズフリーリフトゲートとトーイングヒッチの両立を実現するために、装着位置が重なる問題の解決が必要である。トーイングヒッチの箇所ハンズフリーセン

サーを迂回させつつも機能させることを目指した。2本のセンサー間距離が変わることで、検知精度が悪化する課題があったが、検知パラメーターの感度設定をチューニングした。更にトローイングヒッチ有無で設定パラメーターの切り替えを行うことで、トローイングヒッチがある車両においても同等の検知性能を発揮できるようにし、利便性を向上させた (Fig. 6)。

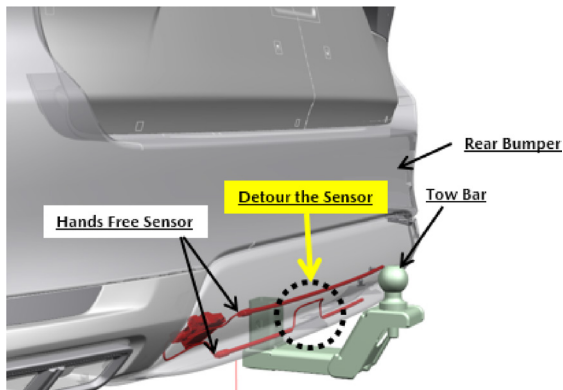


Fig. 6 Layout of Hands Free Sensor Unit

4. おわりに

新開発したCX-60のパワーリフトゲートは以下の取り組みにより、片側駆動タイプを採用し、作動音・作動音質の向上、急緩制御を実現させ、商品化できた。

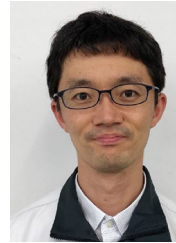
- ・リフトゲートシェルへの負荷荷重を低減させるため、机上検討モデル活用によるレイアウトのコントロール、デザインとの共創による外装樹脂部品の削減、ブレーキ制御時間の最小化を実施。
- ・リフトゲートシェルにかかる荷重を左右均等に分散するため、取り付け面剛性の向上と外周骨格の連続配置を実施。また、ユニット左右で荷重応答が同程度となる構造を採用。
- ・急緩制御を実現するため、モーター特性を踏まえた出力調整を実施。

今回の開発がゴールではなく、更なる高みを目指して、お客様の期待を超える、思いのままに開閉ができる商品を提供し、感動を届けられるよう、今後も開発に勤んでいく。

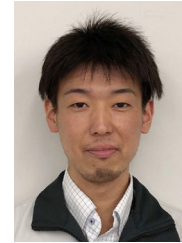
参考文献

- (1) 山内寛和ほか：新型CX-9のパワーリフトゲート開発，[マツダ技報](#)，No.33，pp.56-59 (2016)

■著者■



杉島 孝幸



樋口 圭太



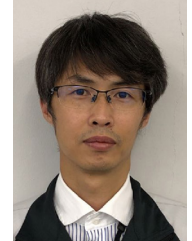
高田 浩二



伊藤 敦



織田 匡樹



朴 吉友



松下 将輝



黒田 智也



青山 麟太郎

特集：MAZDA CX-60

22

CX-60 における車両ネットワークシミュレーターを用いた開発効率化

Development Efficiency Improvement by Network Simulator in the CX-60

佐藤 陽平^{*1} 西原 大樹^{*2} 日原 圭祐^{*3}
Yohei Sato Hiroki Nishihara Keisuke Hihara
新川 力^{*4} 村上 龍馬^{*5}
Tutomu Shinkawa Ryoma Murakami

要 約

近年、自動車業界は、環境問題への対応やそれに伴う電動化や自動運転技術の登場により大きく変化しており、マツダではこの変化に対応しつつお客様に“走る喜び”を提供し続けるために新たな機能開発を進めている。機能の高度化及び多様化に伴い、クルマに搭載されるソフトウェアの開発規模は増大し、かつ車両内での通信量も増加している。このような状況で、いかにソフトウェア開発の効率を上げ、短期間に高品質なモノ造りを実現するかが我々マツダの技の見せ所である。本稿では CX-60 において効率的なソフトウェア開発を実現した、車両ネットワークシミュレーターによる機能の先行妥当性確認、先行動作検証について、その考え方と成果を紹介する。

Abstract

In recent years, the automobile industry has undergone major changes due to “Responding to environmental problems through electrification” and “Autonomous driving technology”. Mazda is developing new functions in order to continue to provide customers with the “Driving pleasure”. With the complication and diversification of functions, the development scale of software installed in cars is increasing, and the amount of communication in vehicles is increasing. Under these circumstances, it is a good opportunity to show our skills to improve the efficiency of software development and achieve high-quality development in a short period of time. This paper introduces the concept and results of the improvement of software development efficiency by the advanced verification and validation of the functions using the vehicle network simulator at the CX-60.

Key words : Electronics and control, Information, Communication, and control, Integration control, Controller area network, Simulation, Control system, Software, Vehicle network

1. はじめに

近年、クルマに求められる機能は高度化、多様化している。それに伴い、クルマの制御システムは複雑化している。これらの動きは今後ますます加速すると考えられる。

特に「CASE」と呼ばれる領域について革新が進んでいる。「CASE」とはコネクティッド (Connected)、自動運転 (Autonomous)、シェアリング (Shared) 及び電動化 (Electric) の頭文字を取った造語である。これらの領域

における革新によって、クルマの構成及び役割が大きく変化している。

マツダにおいてはこの変化に対応しつつお客様に走る喜びを提供し続けるために多くの機能開発を実現している。例えば、幅広い運転シーンにおいて、お客様により安心いただける力強い走りを提供する Mazda intelligent Drive Select (Mi-Drive) や、クルマをドライバーに合わせより快適にドライブを楽しむドライバー・パーソナライゼーション・システムのような機能開発である。

これらの機能は複数の電子制御ユニット (Electronic

*1～5 電子基盤開発部
Electronic Platform Development Dept.

Control Unit: ECU) 間の車両ネットワーク通信により実現される。例としてマツダでの ECU 数と通信信号数の遷移を示す (Fig. 1)。機能の高度化、多様化及び制御システムの複雑化に伴い、ECU に搭載されるソフトウェアの規模は大きくなり、かつ ECU 間のやり取りする通信量も増加している。それに伴いソフトウェア開発の負担も増大している。このような状況のため、いかにソフトウェア開発の効率を上げ、短期間に高品質なモノ造りを実現するかが重要になる。

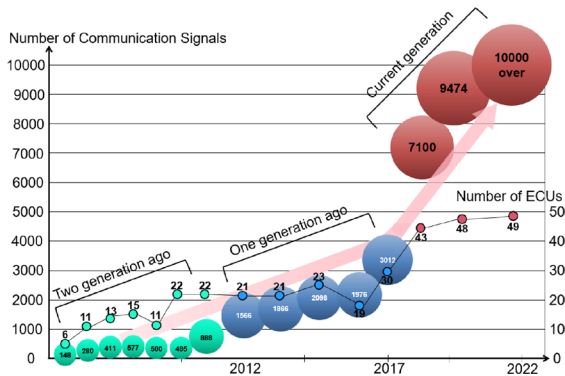


Fig. 1 Changes in the Number of Communication Signals and the Number of ECUs

2. ソフトウェア開発の効率化

2.1 ソフトウェアの開発プロセス

ソフトウェアを ECU に搭載する開発プロセスは一般的に Automotive SPICE® Process Assessment Model⁽¹⁾ (Automotive SPICE® は Verband der Automobilindustrie e.V. (VDA) の登録商標である) にて示される V 字プロセスが適用される。本稿では説明の簡単化のためシステムと各 ECU で開発プロセスが分かれている Version3.1 のプロセスではなく、Version2.5 のプロセスで説明する (Fig. 2)。

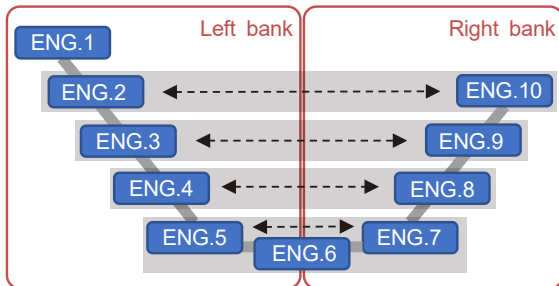


Fig. 2 V-Type Software Development Process

V 字プロセスでは左バンクにおいて次の工程を順に実施する。まずクルマとして機能で実現したいことである要件を収集する (ENG.1)。次にシステムとして必要な要件が何かを分析し (ENG.2)、その要件が実現できるようにシステムアーキテクチャを設計し、各 ECU に要件の配

分を決定する (ENG.3)。更に配分された要件を分析し (ENG.4)、各 ECU としての設計に落とし込む (ENG.5)。各 ECU 内のソフトウェアは複数の構成要素 (モジュール) から成り立っており、各構成要素間の機能配分を設計する工程と、各構成要素そのものの設計は ENG.5 で実施する。ソフトウェアの実装は (ENG.6) で実施する。

右バンクにおいては次の工程を順に実施する。まず、実装に対するソフトウェアの動作検証を行う (ENG.7)。その次に ECU が要件を満たしているかソフトウェアの妥当性確認 (ENG.8) を実施する。次にシステムの動作検証 (ENG.9) を行い、最後にシステムが要件を満たしているかの妥当性確認 (ENG.10) を実施する。

「動作検証」は設計 (仕様) のとおりシステム及びソフトウェアが動作するか検証するという意味である。また、「妥当性確認」とはシステム及びソフトウェアが要件 (要求) を満足するか確認することを意味している。

これらの各工程は Fig. 2 に示すように、それぞれ各層ごとに対構造になっている。つまり、各左バンクの工程での要件 (要求) 及び設計 (仕様) を対になる右バンクの妥当性確認及び動作検証時に確認、検証するプロセスとなっている。

2.2 マツダでの開発効率向上の考え方

左バンクの時点で早期に誤りを発見できた場合、右バンクにおいてシステム検証やシステムの妥当性確認にて誤りを発見した場合に比べて、改修にかかる時間を抑えることができる。Kelly, John C. らによる論文「An Analysis of Defect Densities Found During Software Inspection」⁽²⁾ では、左バンクで発見した誤りを修正する時間を 1 とした場合、右バンクで発見した誤りを修正する時間は 10~34 倍だと報告されている。

そこでマツダは左バンクでの仕様策定に注力し、ENG.4 のインプットとなるサプライヤーへの提示仕様の精度を向上する。それにより、右バンクの ENG.8 の段階でサプライヤーより成果物として受け入れる ECU のソフトウェアにおける提示仕様の誤りを撲滅することで、サプライヤー工程での実装不備による誤りの検証に集中できる状況を創り出す。この考え方を通じて、V 字プロセス全体で問題が流出しないことを保証できる無駄のない開発プロセスの構築を目標とした。

左バンクで行う要件収集 (ENG.1)、要件分析 (ENG.2/ENG.4)、仕様設計 (ENG.3/ENG.5) は、右バンクの動作検証 (ENG.7/ENG.9)、妥当性確認 (ENG.8/ENG.10) を実施することで仕様の正しさが初めて分かる。つまり、左バンクの精度を上げるためには右バンク相当の動作検証、妥当性確認を何らかの形で早期に実施する必要がある。そこで実現したい機能について要求のとおり動作するシミュレーターを左バンク時点にて作成する。実際に動くシステムで相互理解を行い、人によ

る理解の差異を抑えて開発プロセスを加速した上で先行妥当性確認、先行動作検証を行い左バンクの精度を向上する (Fig. 3)。

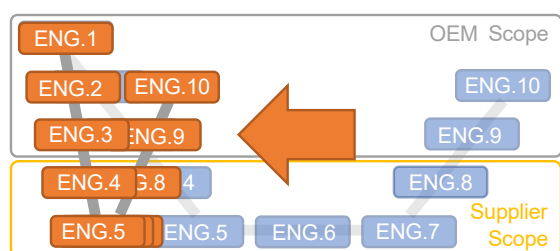


Fig. 3 Front Loading of Process Using Simulation

先行妥当性確認と先行動作検証は「目的指向と全体俯瞰」「抽象化・モデル化」「反復による発見と進化」の考え方をを用いることで早期に漏れなく効率よく実施できる環境を実現する。具体的には、要求の実現を最終目標として、システム全体の妥当性確認及び動作検証を実施することで誤った要求分析及び設計 (ENG.2/ENG.3/ENG.4/ENG.5) を防ぐ。そしてシステムの異常処理などを含む完全な模擬ではなく、確認すべきことに対し必要十分な模擬を行うことでシミュレーターの開発期間の短縮を実現しつつ、シミュレーター環境という利点を生かし、条件を変えた妥当性確認を高速に繰り返すことによって要求、仕様の高速育成を行う。

左バンクの開発プロセスについて、上記取り組みにて精度は上がるが、これはENG.2のアウトプットであるクルマとしての要求動作をシミュレーターに実装し、マツダの期待値に対する動作検証、妥当性確認を行っているわけではなく、そのため、右バンクではシミュレーターに対する動作検証と同等の動作検証が車載 ECU に対しても必要となる。

ここで動作検証 (ENG.7) をマツダの期待値と車載 ECU それぞれで実施し、同一であることが確認できれば、シミュレーターと車載 ECU が仕様設計 (ENG.5) に対して同一の動きとなっていることが確認できる。また本稿では ECU ごとにシミュレーターを作成し、車両ネットワーク通信でつなぐことで、タイミングの小さなズレやノイズに対してロバストでなければならないという車両ネットワーク通信の特性を生かし、シミュレーターと車載 ECU の差異を考慮しなくてよい構成としている。それにより ENG.7 より右バンク後段の工程における動作検証及び妥当性確認の結果はシミュレーターでの結果を流用できる (Fig. 4)。

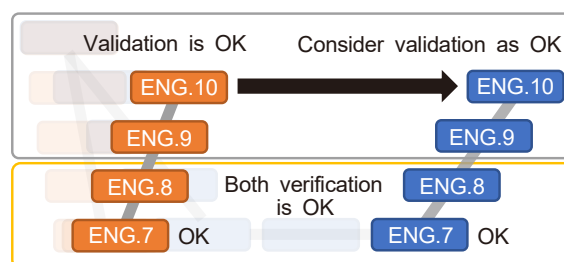


Fig. 4 Consider ECU Validation Result as OK

2.3 サプライヤーでの開発効率向上の考え方

ここまでの開発効率化の考え方により、元の左バンク完了前に「実現したい機能について要求のとおり動作するシミュレーター」を手に入れることができる。これは ENG.8 のサプライヤー成果物の先取りである。ここでソフトウェアの要求分析、設計及び実装 (ENG.4/ENG.5/ENG.6) の工程について考える。これらの工程は機能を実現するために配置された各 ECU で実施される。各 ECU はそれぞれ異なるサプライヤーにて開発されるため、いずれかの工程において誤りがあり機能全体として不整合が起きた場合、各 ECU を集めて実施するシステム検証 (ENG.9) まで問題を検出できない。例えばある ECU が起動中は機能が動いていないとして故障を意味する信号 A を一時的に出すが、通信相手の ECU はその仕様を誤解または見落とし初期値 B を出すものと理解しているような場合である。これはこの工程において、通信相手となる ECU の動きを相手 ECU の仕様書でしか確認できず、そこから仕様を解釈し、相手 ECU の実際の動きを確認できないので理解誤りを完全には防げないためである。ENG.4/ENG.5/ENG.6 の工程時にサプライヤーへ通信相手 ECU の「ENG.8 成果物相当のシミュレーター」を提供することで、システム検証の前に各 ECU 間の整合を取れるようにし、システム検証 (ENG.9) からの手戻りを撲滅する。

2.4 開発効率化の実現手段

2.2 節及び 2.3 節の開発効率化を下記 3Step で実現した。

(1) 左バンクでの仕様の妥当性確認

Controller Area Network (CAN) インターフェースのレベルでさまざまな ECU を模擬するために「ネットワークシミュレーター」(Network Simulator: 以下 NewS と呼ぶ) の作成/要件 (ENG.1) から仕様の作成/仕様のとおり動作するソフトウェアの実装により、実際の動作を再現し、要求が満たせていることを確認する「仕様の妥当性確認」を行う。模擬対象は設定値の変更や画面遷移のような入力と出力が明確に対応している機能である。この際の模擬は状態遷移による記述を用いてインターフェースのレベルで行う。これにより今までの Model Based Development (MBD)⁽³⁾ で活用してきたモデルと

インターフェースのレベルで接続し活用することができる。

CX-60 は MAZDA3 同様 Body Control Module (BCM)⁽⁴⁾ を中心とした車両ネットワークポロジを採用しており、この BCM がさまざまな機能を実現している。NewS は一番複雑な CAN インターフェースをもつ BCM を模擬できるように、Single board computer (SBC) に CAN インターフェースを多数接続し、構成している。また、BCM は一部 Local Interconnect Network (LIN) 及び専用配線での電源供給による制御を行っているため、NewS には LIN インターフェースマイコン、リレーを接続し制御できる機能をもたせている (Fig. 5)。

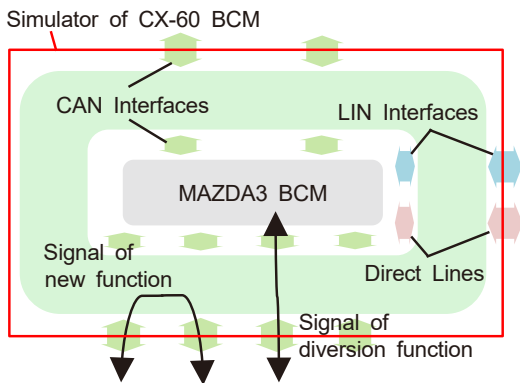


Fig. 5 Structure of Simulator of CX-60 BCM

この BCM は MAZDA3 より採用されている ECU である⁽⁴⁾。CX-60 でも同様の構想にて車両制御を実現するため、MAZDA3 から流用する機能と、CX-60 で新規に開発する機能が混在する。NewS を使って仕様の妥当性確認を行う際、BCM を模擬するためソフトウェアを作成するが、流用機能、新規機能両方の模擬ソフトウェアを作成することは、BCM の再開発が新規開発に追加され、その開発規模から動作検証を実施しての流用部分の等価性の保証が難しい。そのため、流用、新規が混在する ECU の模擬の際には Fig. 5 のように MAZDA3 のユニットを内部に抱え込む構成とし、流用機能は内部のユニットに通信を通過させ、処理するようにし、新規機能を SBC で処理を行うことで、流用機能の等価性と、新規機能の実装を両立した。

NewS で動作させるソフトウェアはライブラリなどの開発環境が整っており、人間が読んで理解しやすく、昨今よく使用されているプログラミング言語の Python (Python は Python Software Foundation の登録商標である) で作成する⁽⁵⁾⁽⁶⁾。CAN, LIN, 電源制御線は別途個別のモジュールで処理を行う。処理をモジュール化することで、モジュールごとの開発を可能とする。使用機会の多いプログラミング言語を選択すること、モジュールごとの開発とすることで、開発人員の調達を容易とし、各機能の並行開発を可能とすることで、車載 ECU そのもの

の開発をより容易かつ早く期待の動きを模擬することができる。

加えて、BCM の模擬の他に機能の実現のためには表示を行う ECU や車両各部を駆動する ECU など、その他の ECU も新規機能の模擬が必要である。その他の ECU の新規機能は PC 上のソフトウェアとして必要に応じた精度で実現する。例えばディスプレイ表示はそのまま PC 上に表示を行い、ドアの開閉やシート移動などはリスト選択やラジオボタンの選択にて動作の入力、ステータスの表示を行うようにするなどである (Fig. 6)。

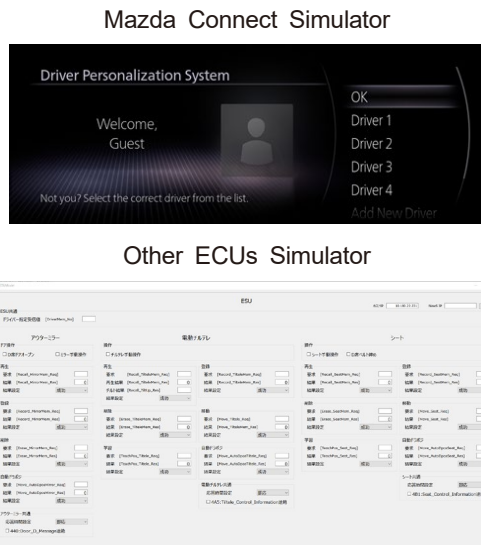


Fig. 6 Simulation of ECUs

このその他の ECU 模擬を行う PC 上のソフトウェアからは最終的に CAN 信号を出力する必要があるので、NewS にて CAN 信号と Ethernet 上の UDP パケットを相互変換し、PC 上ソフトウェアからの CAN 信号通信を実現する。PC 上での表示と NewS による CAN 通信処理を合わせたその他 ECU のシミュレーター全体を「Proof of Concept (PoC) by NewS」と呼ぶ (Fig. 7)。

Proof of Concept(PoC) by NewS

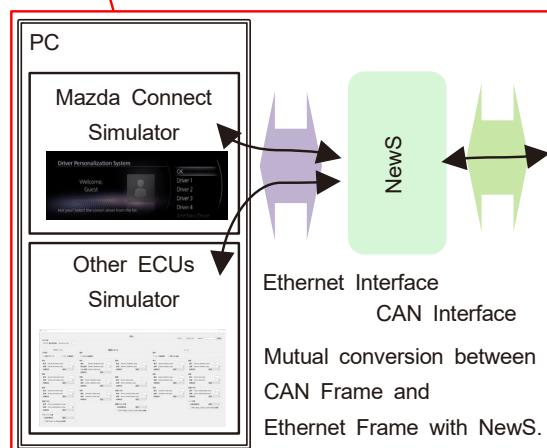


Fig. 7 Proof of Concept (PoC) by NewS

これらの要件 (ENG.1) とおり動作する NewS と複数の PoC by NewS を組み合わせることで、システム全体の動きを模擬し、仕様の妥当性確認を実現する (Fig. 8)。



Fig. 8 Entire Validation Environment

(2) 右バンクでの高速自動検証

2.2 節で述べたように、右バンクでは今まで妥当性を確認してきた仕様と、車載 ECU の挙動が等価であることを確認する必要がある。その確認に費やす費用と時間を最小とするため、車載 ECU での検証 (ENG.7) における検証範囲は維持したまま、可能な限り自動で検証を実施する手段を開発した。自動検証は検証シナリオの自動入力とマツダ期待値であるシミュレーター出力値と車載 ECU の出力値比較にて実現している。この自動検証システムを Straightforward test with equality by NewS : 以下 SweN と呼ぶ。SweN の構成を (Fig. 9) に示す。

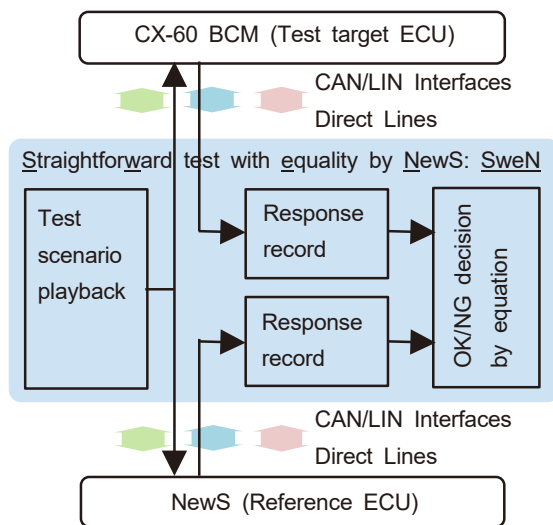


Fig. 9 Structure of SweN

車載 ECU に対して必要なことは「シミュレーターでの検証と同等の検証」を実施することである。そこで左バンクで行ったシミュレーターの検証を右バンクでも活用する。このシミュレーター検証時のシミュレーターを車載 ECU に置き換えることで、車載 ECU が仕様とおり動作しているか検証することができる。検証試験の入力は CAN インターフェース、LIN インターフェース、電源制御線のリレー制御インターフェースを介して実施し、ソフトウェア制御にて自動化する。

次に出力値の比較についてである。左バンクで作成し

たシミュレーターはこの時点で妥当性確認を完了しており、要件 (ENG.1) を満たしている。そこで、シミュレーターと車載 ECU に同時に上記の検証試験の入力を与え、出力が一致しているかを比較することで検証結果の自動判定を実現する。

この自動判定では出力のパターンにより、14 種の判定方法を使い分けることで出力のパターンに合った適切な判定を実現している。例として出力変化タイミングの一致を比較する判定方法や信号送出間隔を比較する判定方法がある。このように複数の判定方法を用いるのは、機能により値の何が一致すれば判定を OK とできるかが異なるためである。例えばカウンタ値であればシミュレーターと車載 ECU の起動タイミングによってその開始タイミングは変わりうる。そのため、絶対値の比較では誤って判定 NG としてしまう。この機能の本質は 1 ずつカウントアップすることであり、比較すべきはそれぞれの出力値における前回値との差分である。

(3) ENG.5/ENG.6/ENG.7 での開発効率化

(1)の妥当性確認にて準備した各 ECU のシミュレーター群は CAN を介して接続しているため、それらを車載 ECU に置き換えることが可能である。サプライヤーでは開発対象の置き換えた車載 ECU 以外は期待値のとおり動くシステムとしてシステム観点での開発を他の車載 ECU が開発、リリースされる前から効率的に進めることが可能である (Fig. 10)。

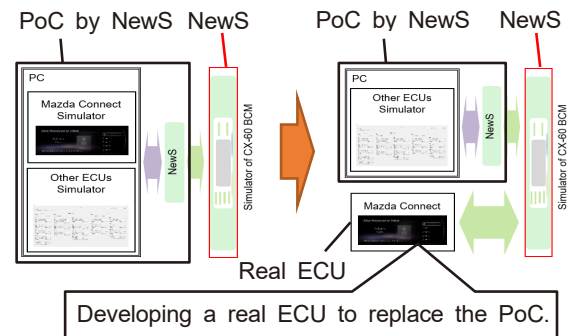


Fig. 10 Development Real ECU of Simulation Environment

3. CX-60 でのソフトウェア開発効率化

3.1 左バンクでの妥当性確認

まず、BCM に対する新規要求を収集、整理し明確化した (136 項目)。その後、要求に基づき各 ECU の仕様を設計し、各 ECU 間の通信インターフェースを合意した。これらの情報を基に、本稿のソフトウェア開発効率化を実施した。

各要件の仕様確定時期に合わせ、シミュレーターの動作検証及びシミュレーターでの妥当性確認は 3 サイクルに分けて実施した。動作検証ではシミュレーターに対し

てトータル 16515 テストを試験し、シミュレーターが仕様のとおりでできていることを確認した。妥当性確認ではトータル 580 テストを実施し、仕様書の確らしさを確認した (Fig. 11)。

Prior Verification in Left bank			
	Number of Test	OK	NG
Cycle1	11,247	11,247	0
Cycle2	4,687	4687	0
Cycle3	581	581	0
Total	16,515	16,515	0
Prior Validation in Left bank			
	Number of Test	OK	NG
Cycle1	64	64	0
Cycle2	209	209	0
Cycle3	307	307	0
Total	580	580	0

Fig. 11 Developing ECU in Simulation Environment

ここで具体例として CX-60 で新規搭載されたドライバー・パーソナライゼーション・システムでの成果を紹介する。BCM が外部センサーからの情報を基に、登録された「誰」が「ドライバー」として乗っているかを判断し、判断した「ドライバー」に合わせた設定を各 ECU に通知、設定するシステム⁽⁷⁾である。複数の ECU がドライバーや設定の情報をやりとりしながら機能を実現するため、本取り組みにより先行妥当性確認、先行検証を行うことで、このやりとりでの認識違いによる不具合を事前に潰し込むことができた。

3.2 右バンクでの高速自動検証

車載 ECU の検証では BCM の検証を対象とし、自動化により (Fig. 12) のような多数の検証を毎回の車載 ECU アップデートごとに実施し、以前実装していた機能が意図せず動作しなくなるデグレード不具合の流出を防ぐことができた。

CX-60 BCM ENG.7 Verification by SweN					
	Test Case	OK	NG	Concern	Issue
Ver.1	1,442	1,442	0	9	0
Ver.2	2,625	2,595	30	17	2
Ver.3	12,463	12,372	91	18	8
Ver.4	13,247	13,247	0	0	0
Ver.5	13,136	13,136	0	0	0
Ver.6	13,239	13,239	0	0	0
Ver.7	13,233	13,233	0	0	0

Fig. 12 BCM Verification Result

また自動化を行ったことにより、左バンクで実施に数か月かかっていた 13000 程度のテストケースを 1 週間程で実行可能とした。

3.3 ECU 設計及び実装の効率化

最後に、今回トライアルとして NewS をマツダから BCM とは異なる車載 ECU を開発するサプライヤーへ貸出し、ECU 設計及び実装時の対向動作確認に活用いただいた。これにより、各 ECU を持ち寄って試験を行うシステム検証まで BCM での新規機能の動作を見ていなくても、NewS での動きを元にシステムの動きを整合させ、7 件の不具合をシステム検証前に検出でき、計画どおりのシステム検証を実施できた。

4. おわりに

本稿では、2 章ではシミュレーターにて ECU の動きを模擬することで左バンク時点にて妥当性確認を実現することで手戻りを防止し、サプライヤーにはマツダの期待動作をするシミュレーターを貸出することでサプライヤーの開発効率を上げる考え方を説明した。3 章ではその考え方を実現するイネーブラである NewS と SweN の説明と、CX-60 での具体例を説明した。

今後、車はインターネットと接続し、ソフトウェアが Over the Air (OTA) でアップデートされ、機能が逐次提供される変化の速い時代となる。そのような時代においてはお客様の期待を確実に素早く実現し続けることができるよう、クルマの機能開発は確実に、効率よく実施できなければならない。

お客様に更なる“走る喜び”を実感頂けるようソフトウェア開発力を進化させていく所存である。

参考文献

- (1) Automotive SIG : Automotive SPICE® Process Assessment Model, https://www.automotivespice.com/fileadmin/software-download/automotiveSIG_PAM_v25.pdf (2010)
- (2) Kelly, Hon C., Joseph S. Sherif, and Jonathon Hops. : An Analysis of Defect Densities Found During Software Inspection, Journal of Systems and Software Vol.17, No.2, pp.111-117
- (3) 藤川智士：マツダの目指すモデルベース開発, [マツダ技報, No.31, pp.44-47 \(2013\)](#)
- (4) 薬師寺英明：新型 MAZDA3 の車両電子制御システム, [マツダ技報, No.36, pp.149-153 \(2019\)](#)
- (5) The RedMonk Programming Language Rankings: January 2022, <https://redmonk.com/sogradey/2022/03/28/language-rankings-1-22/> (2022)
- (6) 2021 Developer Survey : <https://insights.stackoverflow.com/survey/2021> (2021)

(7) 末永修滋ほか：CX-60 ドライバー・パーソナライゼーション・システムの紹介, [マツダ技報, No.39, pp.116-121 \(2022\)](#)

■ 著 者 ■



佐藤 陽平



西原 大樹



日原 圭祐



新川 力



村上 龍馬

特集：MAZDA CX-60

23

ロジウムホワイトプレミアムメタリックの開発 Development of Rhodium White Premium Metallic

松田 隆臣^{*1} 岡本 圭一^{*2} 藤本 智宏^{*3}
Takaomi Matsuda Keiichi Okamoto Tomohiro Fujimoto
山根 貴和^{*4} 平野 文美^{*5}
Takakazu Yamane Fumi Hirano

要 約

マツダは「カラーも造形の一部」という考え方の基、魂動デザインの造形をより美しく見せるための表現を追求し、これまでにブランドを象徴するカラーとしてソウルレッドプレミアムメタリック、マシーングレープレミアムメタリック及びソウルレッドクリスタルメタリックを量産化した。これらのカラー開発は、デザイナーと社内外の関係者が一同に集まり、デザインの意図を理解しながら材料開発と生産技術開発を同時に行うプロセス「TAKUMINURI 開発プロセス」により、実現してきた。これまで、マツダでは地球環境に配慮した塗装工程を目指してアクアテック塗装を展開することで、材料機能や工程機能を高めながら、工程集約を実現してきた。また、培ってきた材料や工法の技術の積み重ねを活かすことにより、塗膜層の数を増やすことなく高意匠カラーを実現している。

今回、魂動デザインの進化にあわせて新たな価値をお客様に提供するカラーとして「緻密な金属感」と「白さ」を両立させたロジウムホワイトプレミアムメタリックを開発した。デザイン、開発、生産技術及びサプライヤーが連携した「TAKUMINURI 開発プロセス」の進化、及び技術の進化を紹介する。

Abstract

Based on the idea that “Color is a part of design”, Mazda pursued expressions to make the Kodo Design look more beautiful. So far, we have mass-produced Soul Red Premium Metallic, Machine Gray Premium Metallic, and Soul Red Crystal Metallic as colors that symbolize the brand. These color developments have been realized by the “TAKUMINURI development process”, which is a process in which designers and related parties inside and outside the company gather together to develop materials and production technologies at the same time while understanding the intent of the designers. Until now, Mazda has developed Aqua-tec paint as a process that promotes the consolidation of processes while enhancing material functions and process functions, aiming for a painting process that is friendly to the environment. By applying established technologies to color development, we are developing sophisticated colors without increasing film layers.

We have developed Rhodium White Premium Metallic that has both “brightness” and “whiteness” as a color that provides customers with new value in line with the evolving Kodo design. This article introduces the evolution of “TAKUMINURI development process” and technical evolution by co-creation activities by Design, R&D, Production Engineering and suppliers.

Key words : Materials, Paint, Process, Design, Color, Development, Rhodium White Premium Metallic

1. はじめに

マツダデザインを象徴する「魂動デザイン」は、2012

年に国内導入した初代 CX-5 から新世代商品群を順次拡大してきた。また、新 MAZDA3 から始まった新世代のスマール商品群からは、魂動デザインの表現の幅を広げ

*1,5 車両技術部
Painting, Trim & Final Assembly Engineering Dept.

*3 ボデー開発部
Body Development Dept.

*2 デザイン本部
Design Div.

*4 車両実研部
Vehicle Testing & Research Dept.

ながら進化を続けている。この中で、カラー開発は「カラーも造形の一部である」という考え方の基に進めてきた。2012年にはマツダが歴代こだわってきた赤色について「鮮やかさ」と「深み」を両立させた「ソウルレッドプレミアムメタリック」を、2016年にはスカイアクティブテクノロジーなど「マシンの美学の追求」というマツダのヘリテージの表現として「緻密な金属質感」と「深み」を両立させた「マシーングレープレミアムメタリック」を市場導入した。更に、2017年には「鮮やかさ」と「深み」をより進化させた「ソウルレッドクリスタルメタリック」を市場導入した⁽¹⁾。今回、魂動デザインの進化にあわせて新たな価値をお客様に提供するカラーとして、ロジウムホワイトプレミアムメタリックの開発に着手した (Fig. 1)。



Fig. 1 Rhodium White Premium Metallic

2. マツダの塗装の取り組み⁽²⁾

自動車塗装は、電着・シーラー・中塗・上塗などの多様な材料の塗布と焼付乾燥を繰り返した複層膜で構成される。このため、塗料中に含まれるシンナーなどの揮発性有機化合物 (以下、VOC) の排出や、常時温湿度をコントロールしている塗装ブースなどの塗装設備で多くのエネルギーを消費 (CO₂ 排出) している。マツダの車両工場から排出する VOC の 95%、CO₂ の 60% を塗装工場が占めており、塗装工程の環境対策は非常に重要な課題である。

この課題に対して、マツダでは継続的な環境対策に取り組んでいる。2002年には中塗工程を上塗工程に集約し、中塗の塗装ブース及び乾燥工程を削減したスリーウェットオン塗装を開発、導入した。更に2009年には、中塗の塗膜機能を上塗に統合することで中塗工程を削減し、VOC と CO₂ を同時に削減可能な世界トップレベルの環境性能をもつアクアテック塗装を開発し、現在は各工場に水平展開を進めている (Fig. 2)。

アクアテック塗装は、各材料の機能を高めることで塗膜に必要な機能を集約している。中塗が担っていた耐チップング性などの機能を高機能なベースコート層、クリアコート層に分配、集約することで中塗層を削減可能にしている。

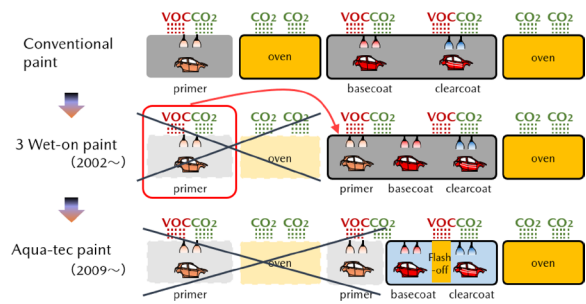


Fig. 2 Process Transition of Topcoat

また、工程面においては、各工程に求められる機能を高めることで省エネルギー・省スペースを実現している。つまり、材料・工程いずれも必要な機能を定義して、その機能を高めながら集約している。

カラー開発においては、スリーウェットオン塗装やアクアテック塗装で培ってきた材料設計、機能設計及び塗膜設計技術を活かして一層ごとの塗膜の機能を高めることで、塗膜数を増やすことなく意匠性と生産時の環境性能を両立させながら、技術を積み上げてカラーを進化させてきた (Fig. 3)。

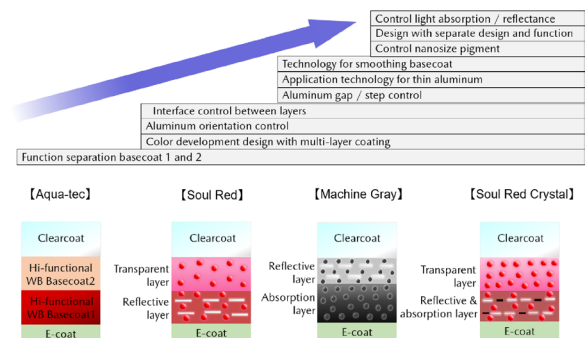


Fig. 3 Technology Expansion to Sophisticated Color

3. 実現に向けたカラー開発

3.1 開発ターゲット

魂動デザインの進化にあわせて新たに提供したいロジウムホワイトプレミアムメタリックの価値として、「金属質感と白さの更なる進化」を開発ターゲットとした。また、「お客様が車を見たときに感じていただきたい質感表現」を、以下のように定めた (Fig. 4)。

- ① 白くなめらか
- ② 緻密な金属感
- ③ 艶やかな潤い

特に、②の「緻密な金属感」については「粒子感がなく、面で金属的に輝く」というマシーングレープレミアムメタリックと共通の質感表現をターゲットとしている。更に、これまでの高意匠カラーと同様に塗膜数を増やす

ことなく、他色と同じ生産工程で意匠性と環境性能を両立させることを前提とした。

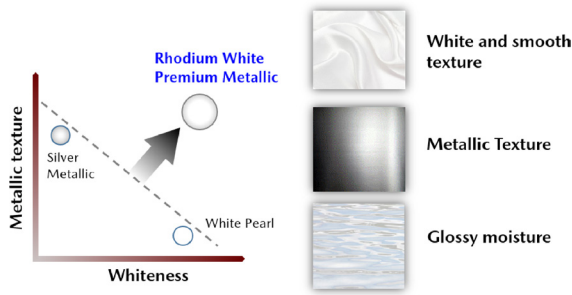


Fig. 4 Target Image of Rhodium White Premium Metallic

3.2 カラー開発プロセス

カラー開発は、デザイン部門、開発部門、生産技術部門が順番に業務をボタンタッチしていく従来のプロセスではなく、デザインや社内各部門の技術者と塗料サプライヤーが一同に集まり、材料開発と生産技術開発を同時に行う「TAKUMINURI 開発プロセス」を取り入れてきた (Fig. 5)。

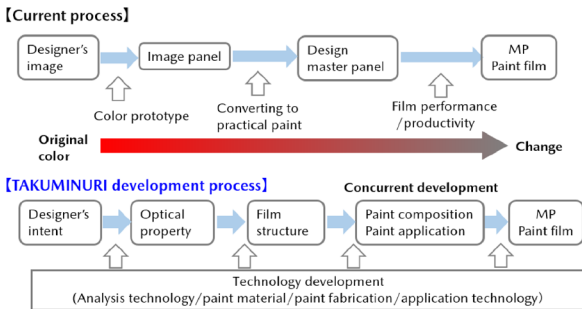


Fig. 5 Transformation of Color Development

これはデザインの意図を関係者が理解し、それを技術者が共有できるよう光学特性に変換し、塗膜構造の決定と並行して技術開発を進めていくプロセスである。今回も提供したい価値から表現したい特性を定義し、光学特性に変換した (Fig. 6)。

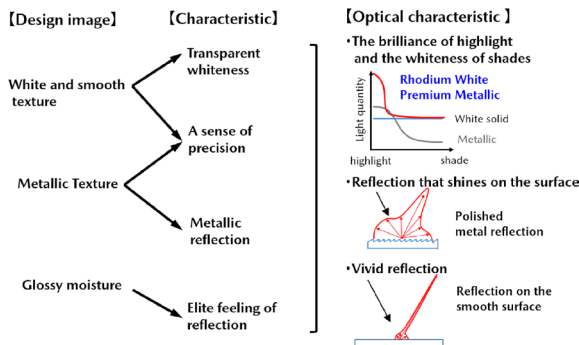


Fig. 6 Conversion to Optical Characteristics

3.3 塗膜構想

ねらいの光学特性を実現するため、塗膜内に入射する光の経路に沿って、各塗膜層の機能を構想設計した。具体的には第1ベースコート層を拡散反射層、第2ベースコート層を正反射層に機能分担した構想とした (Fig. 7)。

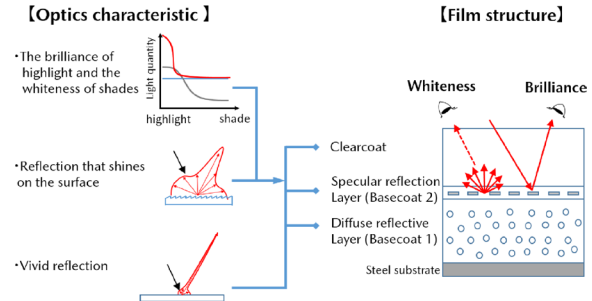


Fig. 7 Conversion to Film Structure

3.4 シミュレーション技術の活用

次に、塗膜構想を実際の塗膜構造に反映するプロセスに進む。従来は、実際に多数の試作 (イメージ板) により、評価と修正を繰り返し、最後はデザイナーの感性で塗膜構造を決定していた。今回の塗膜構造設計においては、モデルベース開発の考え方を取り入れ、光学シミュレーション技術を用いて、ねらいの光学特性を達成する塗膜中の制御因子を確認した。その結果、「輝き」と「白さ」の制御因子が光輝材であるアルミフレークの「大きさ」と「隙間」であることを確認できた。「輝き」重視の意匠の場合はアルミフレークを大きくする、もしくはフレーク間の隙間を狭くすることが有効で、「白さ」重視の意匠の場合はアルミフレークを小さくする、もしくはフレーク間の隙間を大きくすることが有効である (Fig. 8)。

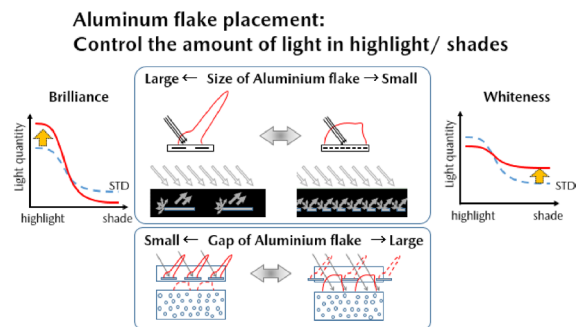


Fig. 8 Confirmation of Control Factor by Simulation

シミュレーション結果から、アルミフレークの大きさと隙間をコントロールした試作 (イメージ板) を最小限作製し、その中からカラーデザイナーの感性により最終カラーを決定した。これにより、デザイナーの意図を机上で作り込むことが可能となり、作製数も劇的に削減することができた。また、制御因子をあらかじめ明らかにすることで、技術的課題がより早期に明らかになり、これらのことから開発の効率化が可能となる (Fig. 9)。

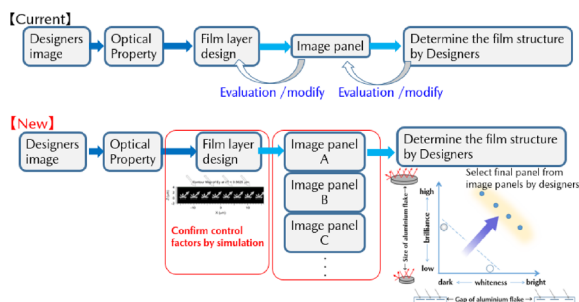


Fig. 9 Process of Decide to Final Film Structure

3.5 技術的課題解決の取り組み

上記プロセスによって設計した塗膜構造を実現するための技術的課題は以下の4点である (Fig. 10)。

- (1) 第1ベースコートの平滑化
- (2) アルミフレークの開発
- (3) 塗膜中のアルミフレークの配向制御
- (4) 塗膜中のアルミフレーク間の隙間制御

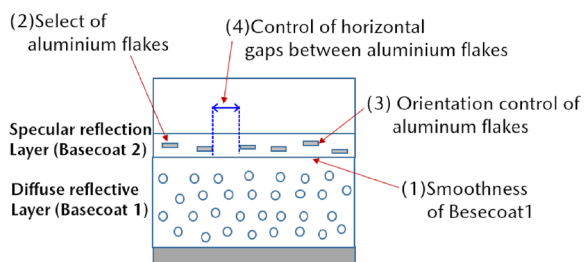


Fig. 10 Technical Challenges of Rhodium White Premium Metallic

各層でねらいの光学特性を発揮するには、この塗膜構造を材料と工法（塗り方）で高精度に再現することが必要である。つまり、理想の塗膜を実現するために、塗膜の構造因子のばらつきを従来よりも高いレベルで制御することが必要である。各課題への取り組みについて以下に述べる。

(1) 第1ベースコート層の平滑化

正反射層にアルミフレークを配列させるためには、その下層である第1ベースコート表層の凹凸形状を制御し、平滑にすることが重要である。表面を平滑にするには、塗装時の塗料粒子を小さくし、積み上げていくことが有効であると考えた (Fig. 11)。塗装時の塗料粒子を小さくするには、塗装時の吐出量を少なくし、塗料を霧化させるために塗装機から与えられるせん断力を効率的に塗料に与えることが有効である。塗料中の固形分を従来よりも増やすことと、下地（電着膜層）への紫外線透過を抑制する能力を高め、膜厚を薄くすることを開発要件として塗料開発を行った。この結果、従来のホワイトパール色の第1ベースコート膜よりも約20%薄膜化した塗料を開発した。更に、塗料使用量が削減できたことで、環境への配慮にも対応できている。

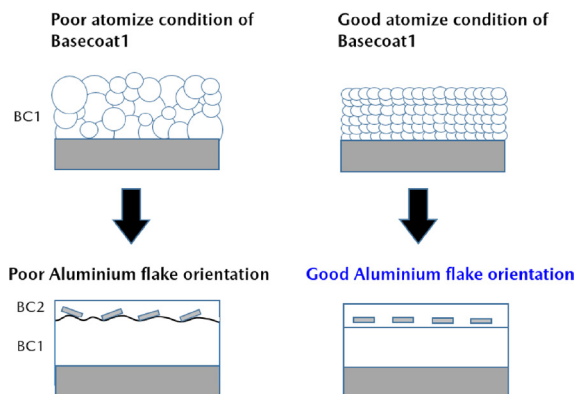


Fig. 11 Smoothness of Basecoat 1

(2) アルミフレークの開発

シミュレーション結果より、アルミフレークの大きさが「輝き」と「白さ」の制御因子であることを3.4節で述べた。アルミフレークは粒径、粒形分布、厚み及び表面形状（平滑性）などのさまざまなパラメーターを有しているが、これらのばらつきを制御することが重要である。マシーングレープレミアムメタリックやソウルレッドクリスタルメタリックの開発を通じて培った高輝度アルミフレークの技術を進化させ、表面が平滑で、粒形分布が狭く、人間が車両を見たときに視覚分解できる限界サイズよりも小さなアルミフレークを開発した (Fig. 12, 13)。

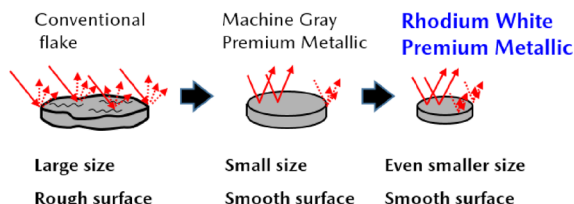


Fig. 12 Small and Smooth Aluminum Flake

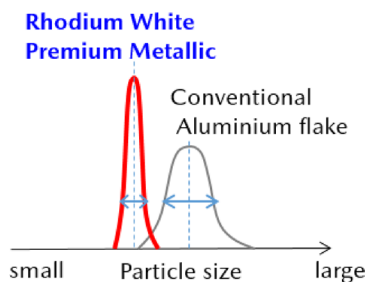


Fig. 13 More Uniform Particle Size Distribution of Aluminum Flake

(3) 塗膜中のアルミフレークの配向制御

ねらいの光学特性を発揮するには、塗膜中のアルミフレークの配向を制御し、並行に配列させる必要がある。この制御には、正反射層である第2ベースの膜厚を薄くすることが有効である。また、溶剤や水分などの塗料中の揮発成分の蒸発を利用した「体積収縮効果」を大きくすることが有効である (Fig. 14)。

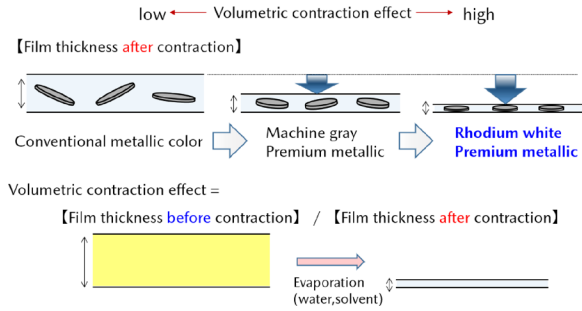


Fig. 14 Volumetric Contraction Effect

この効果を大きく得られるよう塗料開発を行った。具体的には、体積収縮後の膜厚を従来以上に薄くしながらも、体積収縮前の膜厚を厚くするため塗料中の固形分を低くした。固形分を低くすることにより、塗装中のタレなど不具合発生の懸念があるが、粘性を最適化することで品質を確保した。その結果、体積収縮効果を従来色の約4倍まで拡大した塗料を開発し、アルミフレークの高配列を達成した。また、第2ベースコート層を薄膜化することによる耐チップング性の低下が懸念されるが、塗膜の破断エネルギーを高める設計を織り込むことで意匠性と塗膜性能を両立させている。

(4) 塗膜中のアルミフレーク間の隙間制御

塗膜中のアルミフレークの隙間（水平方向における配置）を制御するには、「塗料状態でのアルミフレークの分散性が確保できていること」及び「塗料を均一に塗り重ねて塗膜にしていくこと」が不可欠である。塗料状態でのアルミフレークの分散性が確保できるよう塗料開発を行った。具体的には、アルミフレークと塗料中の成分である樹脂、溶剤及び添加剤などの相互作用を最適化することで分散性を確保した（Fig. 15）。

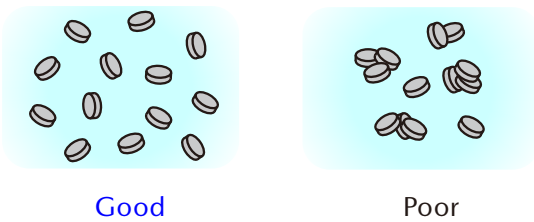


Fig. 15 Dispersibility of Aluminum Flake in Paint

塗料を塗り重ねていく工法については、以下のステップで決定した。まず、塗料が塗装機によって霧化されたときの塗装パターン中にアルミフレークが均一に配置できるよう塗装条件の最適化を行った。吐出量や塗装機のベル回転数など塗装時の設定パラメーターと、塗料の粒子径分布やアルミフレークの分散状態を確認しながら塗装条件を決定した（Fig. 16）。

次に、均一な塗料粒子を塗り重ねていく塗装軌跡について、これまでに培ってきた膜厚シミュレーション技術を使用し、軌跡の適正化を行った。

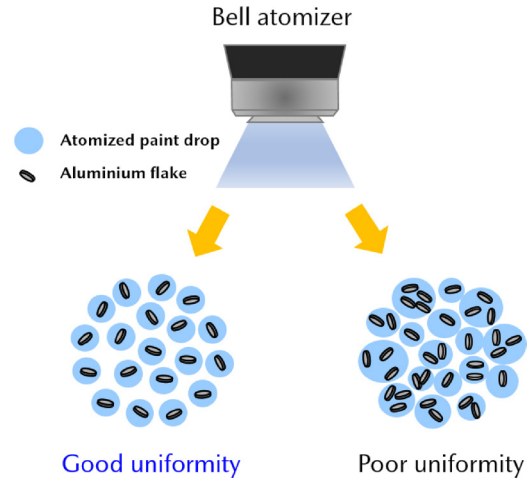


Fig. 16 Dispersibility of Aluminum Flake in Atomized Paint

また、これらの工法が安定して維持できる工程管理も重要である。例えば、塗装中の塗料吐出が安定せず、脈動した場合は、塗膜中のアルミフレーク間の隙間が変わってしまい、意匠に影響がでてくる。塗装パラメーターの常時モニタリング管理や定期的なメンテナンス項目などを設定し、工程管理方法を確立した。

更に、塗料の製造管理においては、前述のシミュレーション技術をつかって塗料中の顔料やアルミフレークの管理幅を決定し、原料サプライヤーや塗料サプライヤーの協力により原料レベルから高い管理を実施した。

4. 開発結果

今回開発したロジウムホワイトプレミアムメタリックは、ハイライト領域で従来のシルバーメタリック色を大幅に上回る金属質感（明るさ）を有し、かつ、シェード領域でもホワイトパール色同等の白さ（明るさ）を有している（Fig. 17）。更に、「緻密な金属質感」においては、従来のホワイトパール色と比較して粒子感が少なく、かつ、金属調の輝き（フリップフロップ）を高いレベルで表現できている（Fig. 18）。

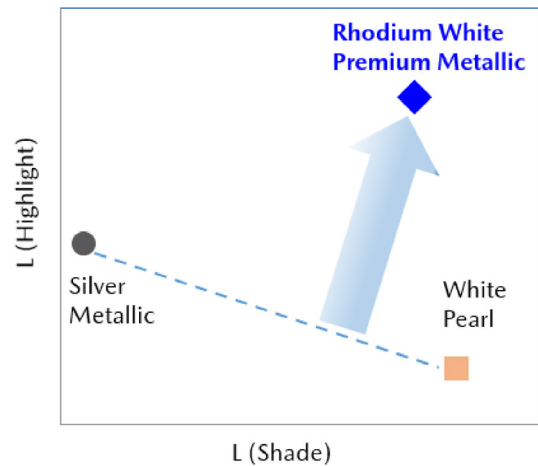


Fig. 17 Color Level of Rhodium White Premium Metallic

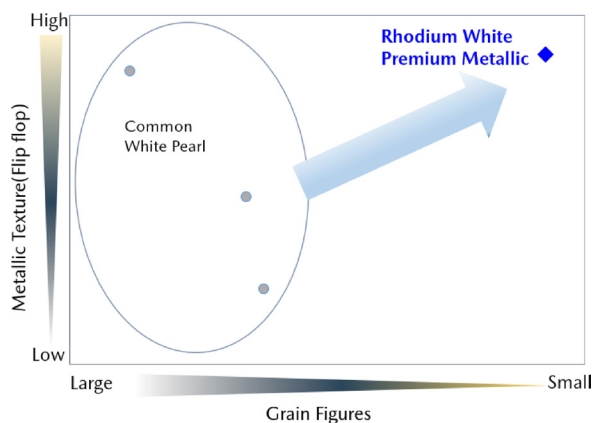


Fig. 18 Metallic Texture of Rhodium White Premium Metallic

このように、開発ターゲットとした、①白くなめらか、②緻密な金属質感、③艶やかな潤いを達成することができた。また、これまでの高意匠カラーと同様に塗膜数を増やすことなく、他色と同じ生産工程で意匠性と環境性能を両立させることができています。

5. おわりに

これまで培ってきた「TAKUMINURI カラー開発プロセス」に新規開発したシミュレーション技術を取り入れ、社内外の関係者が課題解決の共創活動を行ったことにより、デザイナーのイメージをそのままに、従来にない質感のカラーを市場導入できた。今後もさまざまな技術課題に取り組むことで技術レベルを引き上げながら、お客様に感動していただける新しい意匠性のカラーを継続的に開発していく。

最後に、ロジウムホワイトプレミアムメタリックの開発にご協力いただいたサプライヤー、関係者の皆様に感謝の意を表したい。

参考文献

- (1) 平野文美ほか：ソウルレッドクリスタルメタリックの開発，[マツダ技報](#)，No.34，pp.87-92 (2017)
- (2) 篠田雅史ほか：VOC と CO₂ を同時削減する新塗装技術「アクアテック塗装」，自動車技術，Vol.70，pp.77-82 (2016)

■ 著 者 ■



松田 隆臣



岡本 圭一



藤本 智宏



山根 貴和



平野 文美

特集：MAZDA CX-60

24

直列 6 気筒エンジン組立ラインの紹介

In-Line 6-Cylinder Engine Assembly Line

永尾 篤 ^{*1} Atsushi Nagao	宮田 崇史 ^{*2} Takashi Miyata	松浪 隆仁 ^{*3} Takahito Matsunami
工藤 聖広 ^{*4} Kiyohiro Kudo	松浦 恭 ^{*5} Takashi Matsuura	池田 裕輝 ^{*6} Yuki Ikeda

要 約

マツダで初となる直列 6 気筒エンジン導入に伴い、エンジン組立ラインを新設した。これまで、一括企画、コモンアーキテクチャー構想、フレキシブルライン構想により生産効率／フレキシビリティ／品質を両立した直列 4 気筒エンジン組立ラインを国内外の拠点に展開しており、同様な考え方を新ラインに織り込んだ。直列 6 気筒エンジン導入にあたり、多気筒化固有の生産上／品質保証上の課題を組立ラインの仕様にどう反映してきたのかという点を中心に紹介する。

Abstract

Mazda has newly constructed an engine assembly line according to the introduction of Mazda's first in-line 6-cylinder engine. Based on a bundled planning, a common architecture concept and a flexible line concept, we have deployed the in-line 4-cylinder engine assembly lines, which achieved both higher production efficiency & flexibility, to our domestic and overseas production bases. This new engine assembly line has been constructed by the same concepts. In addition to the above concepts, this paper focuses on how we reflected the solutions of the specific problems of in-line 6-cylinder engine production and quality assurance in this new assembly line.

Key words : Production • manufacture, Continuous production, Module, Flexible, Quality assurance

1. はじめに

CX-60 を手始めに展開していくラージ商品群の導入に伴い、マツダにとって初となる直列 6 気筒エンジン（以下、直 6 エンジン）を導入する。この直 6 エンジンは大排気量化と理想燃焼への進化を同時に実現させ、走り・燃費・エミッション・騒音・振動の全ての性能を高めた新世代ディーゼルエンジン「SKYACTIV-D」から生産を開始し、各国の市場のニーズに合わせ新世代ガソリンエンジン「SKYACTIV-X」、ターボチャージャー搭載のガソリンエンジンへとラインナップを追加していく予定である。

これまで、一括企画、コモンアーキテクチャー構想、フレキシブルライン構想により生産効率とフレキシビリティを両立した直列 4 気筒エンジン（以下、直 4 エンジン）組立ラインを国内外の拠点に展開してきている。直 6 エンジンにおいても、マルチソリューション戦略による電動化の推進と商品導入を実現するためにフレキシ

ブルかつ高効率な生産ラインを構築していく必要がある。本稿では、これら新規導入する直 6 エンジンの生産上、及び品質保証上の課題に対する取り組みを中心に紹介する。

2. 直列 6 気筒エンジン生産の課題

マツダでは、大排気量のエンジンとしては V 型 6 気筒エンジンを生産した経験があり、2011 年の SKYACTIV エンジン導入時には直 4 エンジンとの混流生産をしていた。この混流生産の考え方と知見を基に、直 6 エンジン組立ライン新設を検討したところ、以下の問題が顕在化し、新たな課題を抽出した。

(1) 高効率フレキシブル生産の進化

従来からフレキシブル生産構想の実現に向け取り組んできているが、人作業工程において、特定機種台数増や混流比率の変動に対して、作業工程の追加に大きな改造が必要となる、作業編成効率を高く維持できない問題を抱えている。また、自動化装置においても、機種追加の

*1～6 パワートレイン技術部
Powertrain Production Engineering Dept.

対応時にまだ大きな改造が必要な装置が残っており、更なるフレキシブル化と高効率化が課題である。

(2) 部品の大型化に対する作業工程の効率化

今回の SKYACTIV-D 3.3 は直 4 の SKYACTIV-D 2.2 に対して幅・高さに大きな差はないものの、長さについては約 180mm の違いがあり、また重量においては約 25kg も増加している。これらのサイズ拡大、重量増により、組立工程や部品供給工程において、作業時間が増加するという問題があり、いかに直 4 エンジン生産と同等な作業時間にしていかがが課題である。

(3) エンジン新機能に対する品質保証の確立

新開発の直 6 エンジンでは、走行性能と環境性能を高次元で両立させるために、大排気量化と燃焼進化を同時に実現させている。大排気量化をトルクアップだけではなく、クリーン排ガス、希薄燃焼による燃費低減へ合理的に機能配分し、お客様への提供価値を向上させている。

生産ラインにおいては、ねらいどおりの機能が造り込まれていることを確認した上で、お客様にお届けするために、生産工程内で、基本機能に加え新機能の品質保証技術の獲得に挑戦し、お客様へお渡しするユニット 1 台 1 台の機能保証を実現した。

本稿では、上記 3 つの課題への対応策を 3 章以降で紹介する。

3. 高効率フレキシブル生産の進化

Fig. 1 に今回の組立ラインの構成を示す。シリンダーブロック投入を初工程とし、ピストン・クランクシャフト等を組み付けるゾーン A、シリンダーヘッド・回転系部品を組み付けるゾーン B、燃料系・補器類部品を組み付けるゾーン C/D の 4 ゾーンとシリンダーヘッドサブ Assy ラインで構成される。

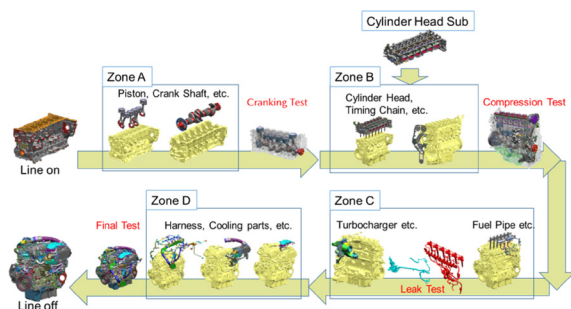


Fig. 1 Engine Assembly Flow

直 6 エンジンを生産するに当たり、将来の台数変動に対して既存の直 4 エンジンとの混流生産を前提としてライン設計を行った。その中で、機種混流をフレキシブルかつ高効率に対応した取り組み事例を以下に紹介する。

3.1 組立パレットの共通化

マツダのエンジン組立ラインでは、初工程のシリン

ダーブロックの搭載からエンジン完成まで、同一の治具パレット上で作業を行い、組立作業内容によって正立／倒立の姿勢変換をしながら生産を行う。一般的にはエンジンのサイズに合わせて治具パレットを設計するが、同一組立ラインに直 4 エンジンの混流を想定すると、搬送・締付等の設備も共用する必要がある。そのため、治具パレットの外寸と製品の位置関係であるクランクシャフトセンター及び気筒中心の配置に統一することで、治具パレット基準で動作する装置に適用した。この基準位置の統一により直 4 エンジンの混流が可能となり、将来の台数変動に対してラインの稼働率を高く維持できる。また、クランクシャフトの高さを直 4 エンジンと統一したこと、製品サイズの拡大により、治具パレットとオイルパンの干渉抑制のため、開発部門とのコンカレント活動にて治具パレットのモデルを共有し、オイルパンとの干渉を回避する形状とした。

しかし、治具パレットと製品の位置決めに使用する加工基準穴は、直 4 エンジンに対して約 200mm 長く、位置決めピンがパレットから飛び出す形となったため、直 4 エンジン混流時にはワンタッチ段替えで対応可能な仕様とした。一方、治具パレットは、締付や圧入反力にも耐えうる強度が求められる。位置決めピンが中心位置から離れることにより治具パレットが受ける反力が強くなり治具パレットに微小な変形があった。その変形を抑制するために、剛性解析を繰り返し、応力を分散させる最適な形状を導き出した。

Fig. 2 にエンジン搭載の治具パレットを示す。左から直 4 エンジン正立、直 6 エンジンの正立／倒立搭載状態の姿勢である。位置決め機構をフレキシブル対応することで、同一パレットに搭載可能としている。パレットを 90 度旋回することにより、正立／倒立の両方の姿勢で搭載できる構造とした。

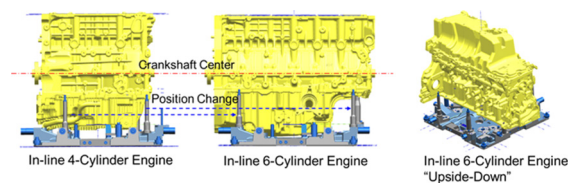


Fig. 2 Jig Pallet

3.2 機種間作業時間差に対する取り組み

通常、エンジン組立ラインでは 1 ライン当たり 60-80 名の作業者が組立作業を行っている。機種混流をフレキシブルかつ高効率化する場合の課題は、作業時間差への対応である。例えば同じエンジンのターボあり／なしでは 10 分以上の作業時間差が発生する。この時間差は、ターボなどの補機類を組み付けるライン後半の工程で多く発生し、従来のラインでは Fig. 3 のようなバイパスラインを用いて作業時間差を吸収してきた⁽¹⁾。

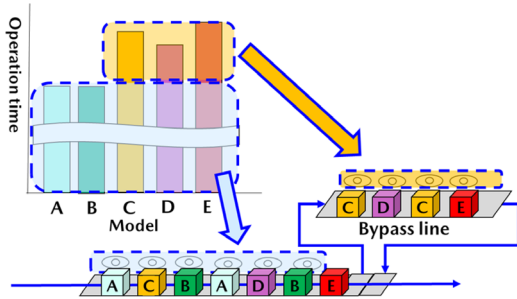


Fig. 3 Absorption of Work Time Differences

しかしながら、生産する機種種の追加や台数増に対しては、バイパスラインの延長／工程追加の改造工事を何度も実施し、大きな投資・準備工数を費やしてきた。更に、生産する機種種が複数になると、バイパスラインの中での作業時間差も発生し、機種種間の作業時間差を吸収する工程長さに限界があるため、機種比率の変動によって編成効率が悪化することがあった。これらの問題に対して生産環境の変化に柔軟に対応できるライン拡張性を持ち、複数機種種の作業時間差を吸収できる工程を実現することが課題であった。その解決手段として「低床フレキシブルAGV」を活用した工程づくりの事例を紹介する。

(1) 自在工程システムの構築

エンジン組立工程で最も機種種間の作業時間差が発生する最終ゾーンに対し、Fig. 4に示す柔軟性の高い工程を配置した。

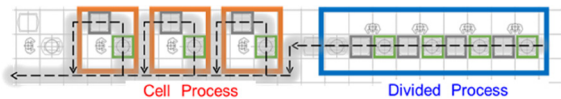


Fig. 4 AGV Model Area

本工程には機種種間で共通の作業を行う「分業工程ゾーン」と「セル工程ゾーン」を設けた。分業工程は、既存コンベアと同様に“連続した工程”とすることで、複数機種種間で編成効率を高く維持できる工程とし、複数設置したセル工程において編成効率を高く維持したまま、機種種間における作業時間差を吸収する。AGVは将来、他領域や物流での拡張性を考え、市販されている物流用AGVをベースに、前述の治具パレットの考え方を適用し、エンジン搬送と部品搬送をそれぞれアタッチメントで対応することにより、1種類のAGVで複数の作業を可能とした。

また、従来のコンベアを適用した工程配置からAGVに変更することで、レイアウト自由度を高くすることができた。この効果はコンベアでは生産機種が増えるたびに改造工事を必要としたが、AGVではレイアウトの自由度が高いことに加え、分業工程とセル工程の工程数比率を変化させることで、機種追加・生産比率の変動への追従性が大きく向上した。

Fig. 5に示すように、コンベアであれば部品容器もエンジンと横並びにレイアウトせざるを得なかったが、AGVを用いることで、作業者の横に部品容器を配置し、更にAGVを自転させることで部品容器の向きを任意に設定することができるため、部品取り出し性の向上にも大きく貢献した。

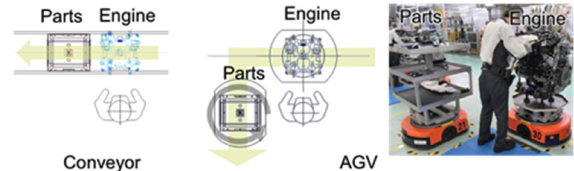


Fig. 5 AGV Layout

(2) AGV 要素動作パラメーター化

自在工程システムの操作性及び拡張性を確立するため、AGVの要素動作をパラメーター化した。要素動作として、走行／回転／リフター上下動作があるが、これらを走行経路や作業ゾーン、搬送物ごとに決められた固定の動作プログラムではなく、パラメーターとして動作を選択指示することで、機種追加や生産比率などに応じたレイアウト変更をプログラム変更レスで対応可能とさせた。更に、パラメーター化した要素動作を外部入力とすることで、生産状況に応じて短時間で工場スタッフによりレイアウト／作業編成を変更可能とした。

(3) 作業指示システムと締付ツール

自在工程システムは高効率フレキシブル生産を実現するために、2003年から内製で開発してきた作業指示システムを適用している。このシステムは、機種ごとに設定した作業手順とパラメーターに応じて、締付ツールや作業確認センサー等を制御しながら、機種ごとに異なる作業をナビゲートし、インターロックをとっていくシステムである⁽²⁾。また、今回、組立要素作業の締付けで使用する「手持ち締付ツール」は、AGV自在工程の柔軟性を最大限に生かすため、コードレスツールを採用し作業編成の変更時に即時対応可能とした。従来は有線式のため、編成替えやレイアウト変更のたびに締付制御コントローラーとツールの移設が必要となり、PLCとの配線工事も発生していたが、編成替えの容易化を目指し、コードレス化にすることでツールの移動のみで実現した。

品質保証に関しては、これまでと同様に締付トルクだけでなく締付過程を締付波形判定することで作業間違いや部品不良などの異常を検出し、作業指示システムと連携させることで確実な品質管理を行っている。これらの効果として、工程追加変更投資32%削減、編成効率15%向上を達成することができた。

3.3 自動化装置のフレキシブル度進化

エンジン組立ラインでは、“高い精度が求められる作業

や重筋作業にあたる作業は自動化する”を基本的な考え方としている。また、フレキシブル性の観点から動作変更のみで新機種対応できる設備仕様が必要条件である。これらの考え方からエンジン組立の作業の主要要素の中でも締付、シール塗布、検査についてはロボットを用いて自動化し、機種追加に柔軟な対応ができています。しかしながら、機種追加対応のたびに改造を伴うような装置が存在していることも事実である。今回ラインを新設するにあたり、そのようなフレキシブル性を向上させた設備事例を紹介する。

(1) ステムシール圧入、コッター組付装置

シリンダーヘッドサブラインでのバルブステムシールやコッターリテーナーの組付けを自動機で行っているが、直4エンジンではバルブ角度が異なる機種など新機種が設定されるたびに製品のチルト角度を増やす改造を行い、調整に時間がかかっている装置となっている。これに対して、製品チルト角度を、サーボモーターを用いて可変にすることでバルブ角度が変更されても数値制御だけで対応できるようにしフレキシブル性を高めた。更に、従来、鉛直方向の動作は全軸をまとめて動作させていたが、各軸単独構造とすることで圧入必要数や圧入高さに対するフレキシブル性を向上し、直6エンジンだけでなく直4エンジンにも対応できるようにしている。直6エンジンと直4エンジンに対して圧入動作をしている写真をFig. 6に示す。必要軸のみ下降して圧入動作ができるようにし、フレキシブル性を向上させた。

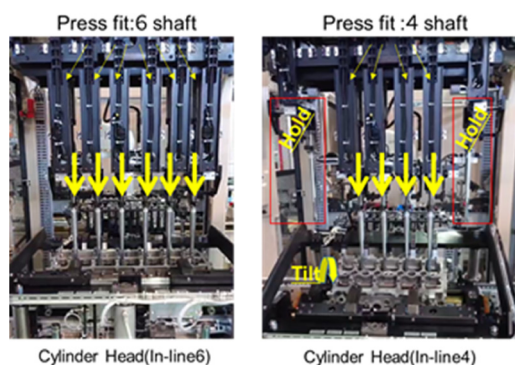


Fig. 6 Valve Stem Seal Press-fit Machine

(2) エンジン No. 刻印装置

マツダでの従来のエンジン No. 刻印は、テーキンによる打刻方式であり、大きな荷重がかかることにより機械的なバックアップ構造が必要となり、機種追加のたびに製品と接触する部分の設備改造が必要であった。また、刻印部位も強度が必要でFF車ではリア側の吸気面に統一されていた。リア側チェーン配置や長尺化、車載状態での周辺部品による視認性悪化の影響等により刻印位置の自由度が必要となり、マツダでは初となるドットペンでの刻印を品質検証、認証課題調整を行い採用した装置をFig. 7に示す。

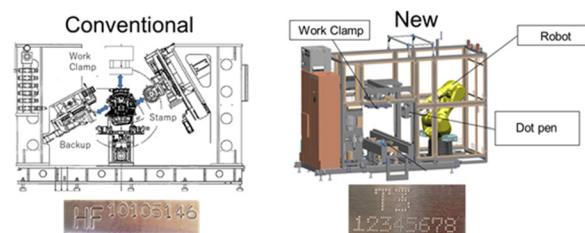


Fig. 7 Engine Number Engraving Machine

ドット方式に変更することで、荷重が大幅に軽減され、バックアップ構造が不要になり、また多関節ロボットを用いて、位置/角度が変更されても容易に追従可能になった。今まで直4のFFエンジン用とFRエンジン用で3台の刻印装置が必要となっていた装置を1台に集約させた。更に今後は、ロボットにレーザーセンサーを付け加え、刻印の検査を行うとともに、刻印の品質に関わるドットペン先も管理することにより、最適なタイミングでペン先交換を行う予定である。

(3) 外観検査装置

複数機種の混流における課題は、機種ごとに異なる部品が正しく組み付けられていることを保証することである。従来は、部品ごとに専用の検査装置を設けていたが、種類が増えるごとに確認装置が増え対応に多くの工数をかけていたため、現在は、ラインの5か所に多関節ロボットに画像処理カメラとセンサーを持たせたフレキシブル性の高い外観検査装置を設置し、専用検査装置を設けずに外観検査装置にて仕様確認を行っている。今回のラインにも同様に外観検査装置を5か所に設置している。5か所の装置では組み付け順序上検査できない部位については作業工程に影響を与えないように協調ロボットを使用し省スペースでフレキシブル性を持たせる装置を展開している。

4. 部品の大型化に対する作業工程の効率化

4.1 部品大型化、重量増に対する組立工程の取り組み

直6エンジンではオイルパンなど従来直4エンジンでは手作業で組み付けできていた部品については、直6エンジンにおいては長尺化による重量増により、エルゴノミクス評価において、手作業は不可である。ロアブロックにおいても、軸力アップと長尺化により10kg以上の重量増となった。このロアブロックは、クランクシャフト等の内臓部品を組み付けるため、分解と組み付けの2回の作業が必要となる。作業者の身体的負担を減らすために組付補助装置を用いるが、作業時間増加を最小限にすべく専用治具を開発した (Fig. 8)。

エア制御で重さを感じることなく移動できる組付補助装置を用いているが、製品を把持しているとき/把持していないときの制御の切り替えをチャック動作と連動して自然な操作をサポートしている。また、チャック/アンチャック/製品の回転等の操作用スイッチを集中させ、

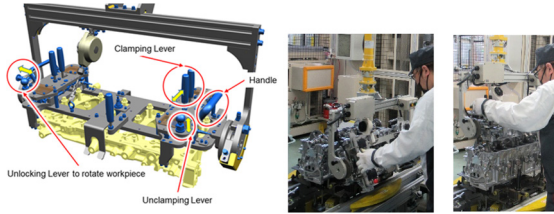


Fig. 8 Lower Block Hanging Fixture

作業性向上も考慮した仕様とした。

エンジンハーネスもエンジンの長尺化により、部品の体積が増大した。従来は、Fig. 1 で示すゾーンCの気密性テスト後に組み付け始め、コンベア上のエンジンの向きに応じて複数の工程で各コネクタに結合していた。この過程において他の部品の組み付け作業エリアを確保するため、ハーネスを束ねる、移動する等の付随作業を何度も行っている。開発構想段階においては、ハーネスのボリューム増加により移動させても他の部品組付けの作業空間が確保できなかった。このため、コンカレント活動を通じてハーネス構造の最適化を行い、従来よりも後工程の全方位組付け可能なAGV自在工程で組める構造とすることで不要な作業を排除することができた。

4.2 部品サイズ大型化に対する部品供給の取り組み

直4エンジンのSKYACTIV-D 2.2とSKYACTIV-D 3.3を構成する部品を比較すると、各々のエンジン1台当たりの部品の種類数は6点増えたに過ぎないが、部品の体積合計は、直6では直4比で37.4%増、供給作業時間に換算では25%増となる。部品供給は、組立工程に直接部品供給する一般供給、エンジンと同期して組付部品群を流すキット供給、1部品を生産順に供給する順序付け供給の3つに大別される。これらに対して部品大型化により、①順序付け供給部品が増え、部品庫スペースが不足する、②キット容器に部品が収まらない、③部品供給量の増大により、供給作業時間が増加するという3点の問題に対する課題解決を行った。

現在、直4エンジンラインは増産を重ね、国内では3本のラインで生産している。当初は各ライン個別に調達部品を受け入れていたが、3ライン共通使用部品も多いことから現在、調達部品の約7割は一括納入され、社内で各ラインへ巡回供給している。直6エンジンは直4エンジンとの共通使用部品は29%であるが、部品の製造輸送業者に大きな違いがなく、トラックの輸送効率向上のために「一括納入体制」に編入することとした。また、部品供給工程では組立ラインで収集している生産品質実績を活用し、生産計画と照合しながら必要なタイミングで必要な部品の供給量を指示するシステムを構築している。このしくみを直6エンジン組立ラインにも適用し、供給先へ必要最小限の部品のみを供給できるようにした。この一括納入の拡大による多回納入と部品供給指示シス

テムの導入により、①のスペース不足を荷受場とラインサイドで補完した。

②のキット容器へ収容化という課題に対しては、従来1セットだった容器を部品配置の自由度を高めるために、ゾーンCとゾーンDにキット容器を分けて、従来比2倍超体積の対象部品を供給できるようにした。更に2つに分けることにより、従来順序付け供給であったハーネスやEGRクーラーなどキット供給に取り込み、全体的な供給台車数を減らすことができています。

③の供給作業時間の極小化という課題に対しては、供給台車の収納数をそろえてライン全体としてサイクリックに複数の部品をまとめて供給するしくみ、上記の供給指示システムを適用して効率的に搬送を行うことで解決した。その結果、供給作業時間を8%増で抑えることができた。

5. ユニット機能保証における取り組み

ユニット機能保証の考え方は、エンジンの燃焼性能を機能特性に展開し、機能特性を全数計測し確認を行うことで、ばらつきなく燃焼性能を保証したエンジンユニットをお客様のクルマに搭載し、お届けする品質保証システムをライン全体で構築することである。そのため、Fig. 9に示すように組立ライン内の要所に検査工程を設け、組み立てた機能特性を定量的な指標で計測し、全数保証を実現した。

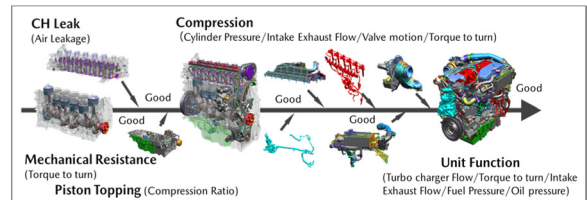


Fig. 9 Unit Function Assurance System

検査工程のシステムをFig. 10に示す。エンジン出力軸を、外部モーターで回転させ、電装部品を制御しながら模擬的に燃焼状態を再現させ、機能特性として、回転トルク/筒内圧力/吸排気流量/吸排気圧力/燃圧/油圧等の波形データを各センサーから取得し、特徴量を抽出することで良否判定を行っている。

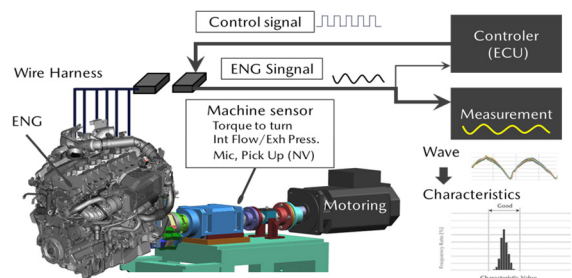


Fig. 10 Motoring Test System

このユニット機能保証の中で、性能向上のための新機能に対する機能保証技術の進化の取り組み事例を紹介する。

5.1 トルクアップと希薄燃焼を両立する吸入空気量保証

トルクアップと高効率な希薄燃料を両立するために、排気量アップと併せて空気を大量に取り入れる可変ジオメトリータボチャージャー（以下、VG ターボチャージャー）過給システムを採用した。この過給システムの機能保証をするために、VG ターボチャージャー過給システムに関わる全ての部品を組み立てた完成状態で、エンジンユニットの吸入空気量をモニターしている。Fig. 11 に示すように、VG ターボチャージャーのベーンノズル間の隙間を絞ることでタービンの回転速度を上げ過給流量が上昇し、吸入空気量が大きくなっていることを確認している。

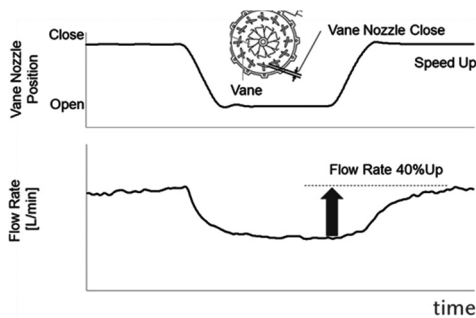


Fig. 11 Increased Intake Air Flow with Turbocharger with Variable Turbine Geometry

5.2 希薄燃焼のための高圧燃料システム保証

高効率でクリーンな希薄燃焼を追究するために、燃料噴射の圧力を高圧化した。組立直後のエンジンでは燃料経路は空気で満たされており、空気を燃料に置換する必要がある。検査装置で燃料置換を行うために、Fig. 12 に示すように、実際にエンジンへ軽油を入れて燃料ポンプを制御しながら空気と置換し、その上でねらいどおりの最高燃料圧力 250MPa まで昇圧することを燃料圧力センサーで確認している。

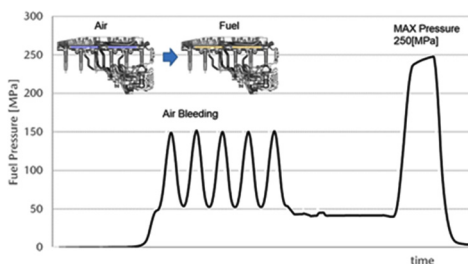


Fig. 12 Higher Fuel Pressure System

5.3 振動が小さい完全バランスの機能保証

直 6 エンジンのクランクシャフトの配置による構造的な強みである完全バランス機能の保証について紹介する。直 4 エンジンではクランクシャフト回転時に発生する二次振動は、直 6 エンジンでは完全バランスにより発生しない構造となっているため、静粛性が向上している。このユニット機能としての静粛性を NV（マイク、振動センサー）で保証することに加えて、振動の発生源であるピストンクランク機構の完全バランスを、機械抵抗トルクの波形で確認するプロセスはマツダ独自の取り組みである。

まず、量産中の SKYACTIV-D 直 4 エンジンにて、機械抵抗トルクの単気筒モデル式を確立させた (Fig. 13)。

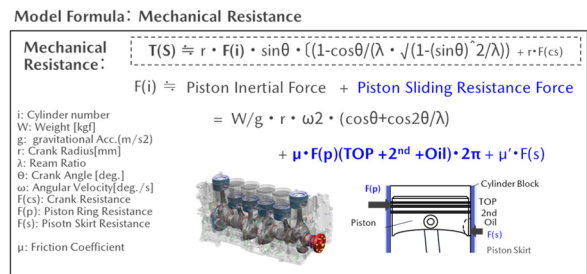


Fig. 13 Model Formula of Mechanical Resistance

このモデル式を使用して新開発の 6 気筒エンジンの諸元から理論波形を算出し、理論どおりになっていることを実エンジンで確認した。その上で、機械抵抗トルクの波形の振幅を指標として、この振幅が直 4 エンジンより 60% 小さくなっていることを定量化し、完全バランス機能を全数保証している (Fig. 14)。

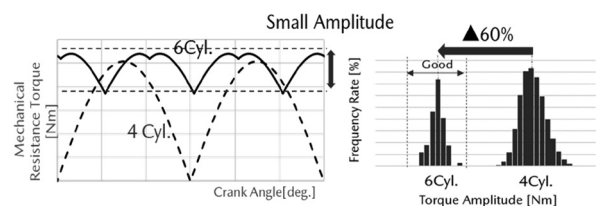


Fig. 14 Small Amplitude of 6-cylinder's Torque Curve

以上、3つの事例を紹介したが、今後は、市場のデータを活用し、更なる品質向上/機能進化へつなげる取り組みをしていく。

6. おわりに

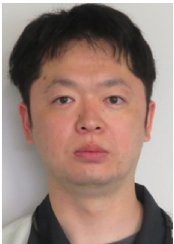
今後、カーボンニュートラル、CASE 対応と市場が激変していく中でマツダは 2030 年グローバルにて電動化 100% に向けて対応していく。内燃機関の規模は縮小していくが、マルチソリューション対応でいままでも以上にさまざまなニーズに応じた多機種の内燃機関をタイムリーに提供していく必要がある。このために、今回新設したエンジン組立ラインの高効率フレキシブル性を継続

して進化させていく。また、獲得してきた技術をエンジンだけでなく、他のユニット生産においても展開していく所存である。

参考文献

- (1) 野村ほか：エンジン組立ラインにおける多機種混流生産システムの開発，マツダ技報，No.19，pp.100-106 (2001)
- (2) 品川ほか：エンジン組立自己完結生産システムの開発，[マツダ技報，No.22，pp.178-182 \(2004\)](#)

■著者■



永尾 篤



宮田 崇史



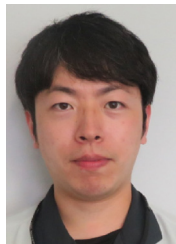
松浪 隆仁



工藤 聖広



松浦 恭



池田 裕輝

特集：MAZDA CX-60

25

長尺アルミクラッチドラムの塑性加工、 及び異種材結合技術の獲得

Development of Plastic Forming and Clinching Dissimilar Material Technology for Long Aluminum Clutch Drum

野畑 俊也^{*1} 河野 弘和^{*2} 田中 雄幸^{*3}
Toshiya Nobata Hirokazu Kouno Takeyuki Tanaka
長野 隼門^{*4} 椎野 和幸^{*5} 新家 泰平^{*6}
Hayato Nagano Kazuyuki Shiino Taihei Shinke

要 約

マツダのブランドエッセンスである“人馬一体”の走りを実現するため、後輪駆動（以下、FR）用オートマチックトランスミッション（以下、AT）には“理想のペダルワークスペース”の実現、NVH性能向上、優れた環境性能の実現が求められる。そのためには、ATユニットの細長化、軽量化及び変速機構の直列配置化が求められ、変速機能をもつATユニット内クラッチドラムを長尺化、軽量化していかなければならない。その手段として、クラッチドラムを鉄材からアルミニウム材（以下、アルミ）への材料置換を適用した。このアルミ化に対し、環境負荷を抑えることを狙った塑性加工技術開発を行い、金型形状、工法選定を最適化し、良品条件を確立した。加えて、アルミ塑性加工時のネッキングを机上で判定できる評価手法・指標を確立した。クラッチドラムは別の構成部品（鉄）と結合しAT内に組み込むが、その結合工法については精度確保のため、“絞り方式により母材同士を直接結合するカシメ結合”を選定した。これは、動力伝達機構領域で初採用となる工法のため、基礎実験から、車のさまざまな使用条件に対する耐久信頼性を評価し成立させた。本稿ではこの取り組みについて報告する。

Abstract

To achieve an ideal pedal-work-space and improved NVH with lower inertia, leading to improvement in driving pleasure as well as environment performance, AT for FR requires a lighter, long clutch drum with a large-diameter. With a purpose of replacing the steel drum with aluminum one that is lighter weight, we have developed aluminum plastic forming technology to realize environmentally-friendly products having Jinba Ittai driving feel (oneness feeling of horse and rider) as well. In the course of the development, we have established quality conditions by optimizing the die shape and production process, and achieved virtual evaluation index for aluminum forming. We applied clinching for joining the clutch drum with steel parts as an AT component for precision. As adopting the clinching joint in a drivetrain unit was unprecedented, we have started the development from the fundamental experiments. Through the co-creative efforts with the Testing and Research Group, our initiative succeeded in significant weight reduction of the AT unit. This report introduces our activities.

Key words : Automatic transmission, NVH, Plastic forming, Clinching dissimilar material, Clutch drum

1. はじめに

“人馬一体”の走りを実現する要素の1つとして、理想のドライビングポジションがあり、“理想のペダルワークスペース”の実現が必要である。そのためには、FR用AT筐体の幅を極小化することが求められ、AT内の変速機構

を直列に配置する必要があり、クラッチドラムは長尺形状となる。ここで、クラッチドラムにアルミを使用することを検討した。生産工程的にダイキャスト後に、機械加工を行うことが一般的であるが、この工法では歩留まりが低く、生産時の環境負荷が大きく、生産コストが高い。そこで、高い歩留まりと高速生産を実現できる塑性

*1～6 パワートレイン技術部
Powertrain Production Engineering Dept.

加工技術による環境負荷低減 ($\Delta 2.7\text{kg-CO}_2/\text{unit}$) 及び低コスト化を目指し、業界初のアルミ材を用いたクラッチドラム (Fig. 1) の塑性加工技術開発を行った。アルミは従来クラッチドラムに使用している熱間圧延鋼板 (以下、鉄) に比べ、ネッキング、割れ (以下、ネッキング) という局所的な板厚減少が発生しやすい。また、今回の長尺アルミクラッチドラムでは、従来の前輪駆動 (以下、FF) 用 AT 向けクラッチドラムと比較して L/D で 2 倍以上の絞り深さを必要とし (Fig. 2)、成形時に発生するネッキングを抑制するために緻密に工程設計を行う必要があった。そこで今回、高い成形難易度に対する塑性加工技術開発と、融点の異なるアルミクラッチドラムと鉄系材料の構成部品の異材結合技術開発を行った。

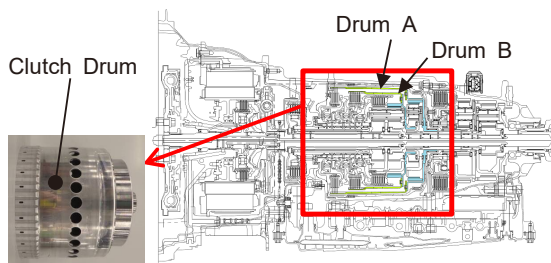


Fig. 1 Cross Section of AT for FR and Target Part

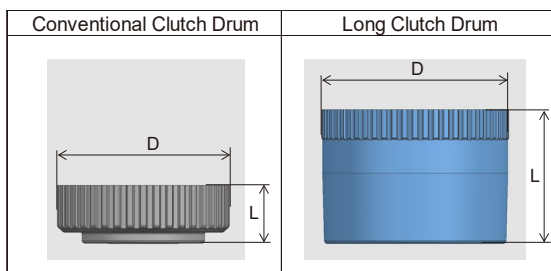


Fig. 2 Clutch Drum (Conventional, Long)

次章以降、具体的な取り組みについて述べる。

2. 長尺アルミクラッチドラムの課題

AT 内部には、クラッチプレートの締結、切離しを行い、動力を伝達、遮断するためのスプラインをもつ部品が多く組み込まれている。クラッチドラムはその代表的な部品である。従来クラッチドラムに使用している鉄の主な製造工程は、円板材からプレス加工、スプライン転造という塑性加工の後、別の構成部品 (鉄) と抵抗溶接により接合する生産性の高い工法の採用が一般的である。長尺アルミクラッチドラムは、従来品の鉄と鉄の接合から鉄とアルミの接合という機械的性質が異なることから、生産性の悪化や適用不可能な場合が予測された。

アルミ適用時の課題と解決のための視点を 3 つ挙げる。

(1) ネッキング予測技術の確立

成形性に大きく影響するのは「延性」である。鉄の伸び率約 40% に対しアルミは約 20% 程度で半減し、同一

形状の成形を行った場合、アルミの方がネッキングを起こしやすい。

(2) スプリングバック制御技術の確立

塑性変形後のスプリングバックに影響する「ヤング率」に着目した。スプリングバックとは、曲げ加工後に荷重を除荷すると、元の形にある程度戻る現象のことである。鉄のヤング率 (約 206GPa) に対しアルミは約 70GPa で、鉄と比べアルミの方がスプリングバックは大きくなる。スプリングバックが増加すると、製品形状の寸法バラツキが大きくなるのが分かっている。

(3) 異材結合工法選定プロセスの確立

接合に影響を及ぼす「融点」に着目した。鉄 1538°C に対しアルミ 660°C である。従来、鉄同士の動力伝達部品の接合にマツダが標準工程として採用している「抵抗溶接工法」は、塑性流動によるアンカー効果による高い接合強度を確保する工法である。しかし今回、アルミクラッチドラムと鉄の構成部品では、アルミが先に融点に達しアンカー効果を確保することができないため、抵抗溶接を成立させることが非常に難しい。代替工法の選定とプロセスの確立が必要であった。

長尺アルミクラッチドラムの塑性加工化実現には、これら 3 つの課題を解決する技術の確立が必要であった。

3. 課題解決にむけた取り組み

3.1 プレス成形時のネッキング予測技術の確立

(1) ネッキングを予測する評価指標としきい値

延性の低いアルミのプレス深絞り成形を手戻りなく実現するため、机上で工程設計、金型形状を評価し、最適な工程を導出することが有効である。

まず、アルミがネッキングを起こす条件を基礎実験 (右バンク) で検証する。基礎実験は、局所的な延性の評価ができる VDA 曲げ試験 (ドイツ自動車工業規格の板曲げ試験)⁽¹⁾ とし、Fig. 3 に示す曲げ型で試験を行う。ネッキング発生の判断は、パンチストローク中の荷重低下が発生した位置とした。Fig. 4 は試験中の変位 - 荷重曲線であるが、荷重低下発生位置でのネッキング発生が確認できた。また、パンチストロークを徐々に短くしたところ、ネッキング発生位置を基準として -2mm 付近でネッキング発生がなくなる状態を確認した (Fig. 5)。

次に、基礎実験の曲げ試験結果を CAE 上で再現させ、ネッキングの評価指標としきい値を決定した。ネッキングは、材料が引張により延性の限界に近づいたときに発生するものであるため、評価指標を「最大主歪」とした。このコンター図を Fig. 5 の CAE 結果に示す。実験と CAE の結果より、アルミのネッキングは最大主歪で評価可能であることを確認し、かつネッキングのしきい値を明確化した。

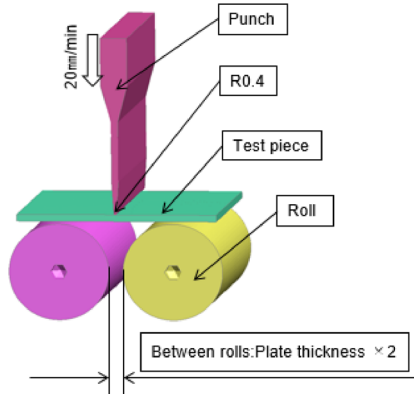


Fig. 3 Bending Test

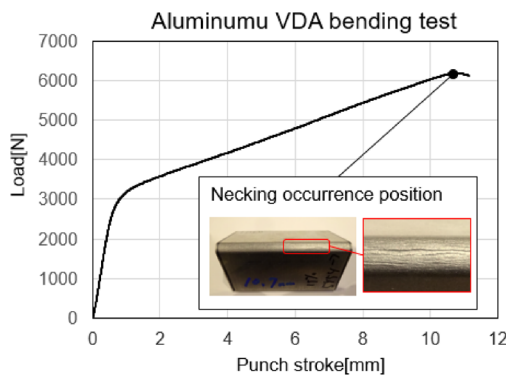


Fig. 4 Displacement and Load

Stroke	Aluminum(thickness 2.6mm)	
	Actual	CAE
necking occurrence position		
2 mm before the necking occurrence position		
4 mm before the necking occurrence position		
6 mm before the necking occurrence position		

Fig. 5 Bending Test Result

(2) ネッキングの評価指標としきい値の妥当性確認

Fig. 6 に示すアルミクラッチドラムの試作品でネッキングの評価指標としきい値の妥当性確認を行った。評価対象は、成形圧の高いフランジしごきの根本部とした。成形解析上で、成形に使用するパンチ R を R1 から徐々に大きく変化したときの製品の根本 R 部の最大主歪の値は、パンチ R が大きくなるにつれ局所的な延性が低減され、値が下がる傾向を確認できた。

また、パンチ R6 以上であればネッキングが発生しないことを確認した。机上検証結果から、パンチ R1, R3,

Measurement position	Punch R	CAE	Actual
	R1	Mesurmet position > X 	necking
	R3	Mesurmet position > X 	necking
	R6	Mesurmet position < X 	No necking

Fig. 6 Necking Evaluation Index/Validity Evaluation Result

R6 の成形パンチを製作し、実機確認を行った (Fig. 6 の実機結果参照)。この結果、机上で最大主歪のしきい値 (X) を越えるパンチ R1, R3 で成形した製品の根本 R 部はネッキングが発生し、しきい値以下のパンチ R6 ではネッキングが発生しないことを確認した。

以上により、今回導出したアルミ材のプレス成形時のネッキングの評価指標としきい値が妥当であることを確認した。また、同様のアルミ製品成形時の机上検証ツールとして、将来的にも幅広く活用できる目途を立てた。

3.2 スプライン転造時のスプリングバック抑制技術の確立

クラッチドラムのスプライン部成形工法は複数あるが、マツダでは成形精度とフレキシブル性を高次元で両立するスプライン転造を標準工法として採用している。スプライン転造とは、スプライン形状をもつマンドレルにお椀状のワークを設置し、マンドレルとワークを回転させて徐々に送りながら、マンドレルの回転に同期して回転する転造ローラーによってワーク外径から逐次的にワークを押し込み、ねらいのスプライン形状に成形していく回転塑性加工である (Fig. 7)。

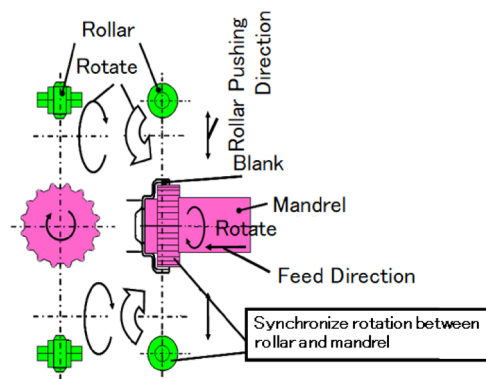


Fig. 7 Overview of Spline Forming

従来工法ではアルミは鉄に比べヤング率が小さく、スプリングバック量が約 1.5 倍大きい。スプリングバック量を抑制するためには、一般的に送り速度を下げる、あ

るいは転造量を減らすという対応がある。前者は生産性が落ち、ただし後者は、ねらいのスプライン形状が成形できないというデメリットがある。

今回、スプリングバック量を鉄と同等以下にするとともに、生産性と歯型成形性を高次元で成立させるため、転造時の塑性流動を従来工法以上に制御できる新工法開発に取り組んだ。

ここで、スプライン転造工程におけるスプリングバックの発生メカニズムは、転造時に材料が転造ローラーの回転方向ではなく周方向へ塑性流動することであると考えた。そのため、塑性流動の抑制を強化できる転造ローラーを検討・設計した。詳細設計のため、転造ローラーの軌跡を3D CADにより再現し、実際の転造中の現象と問題点を机上で再現した。

更に、転造ローラー回転方向への塑性流動と歯型成形性を両立できるローラー形状の検討を行い形状を決定した。具体的には、転造ローラー回転方向への塑性流動を強化するための材料押さえ構造を追加した。加えて、転造ローラーの軌跡を緻密に検討し、転造時に圧痕を発生させない押さえ構造とした (Fig. 8)。最終的に、新構造のローラーを採用することによって、アルミに対しても、鉄と同等以下のスプリングバック量と成形性向上の両立を確認した。併せて、机上検証の確からしさも確認した (Fig. 9)。更に本工法は材質に制約なく従来材料である鉄にも適用できる。

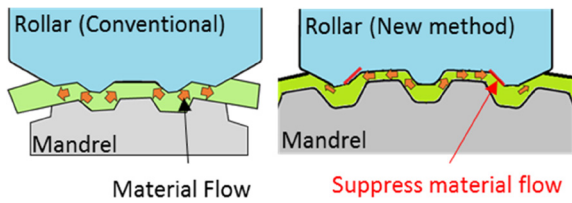


Fig. 8 Consideration of Material Flow

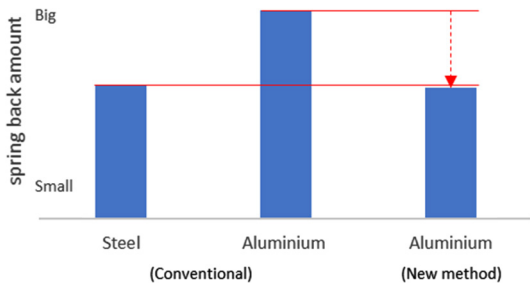


Fig. 9 Result of Spring Back

3.3 異材結合工法選定プロセスの確立

(1) 工法選定

アルミクラッチドラムにはATユニット上で動力伝達を行う機能が求められるため、クラッチドラムと高強度が要求されるスプライン、ギヤ等をもつ鉄の別の構成部

品と結合させる必要がある。従来工法の抵抗溶接は、上述のとおり、アルミ、鉄異材間には適用できない。

これに基づき、動力伝達機構として世界初採用となる“絞り方式により母材同士を直接結合するカシメ結合”の適用に挑戦した。カシメ結合は、実現難易度は高いものの、他工法に比べて生産性向上と低コストの実現可能性が高い。そこでまず、カシメ結合の形状をAT内のわずかなスペースへレイアウトできるようにするため、開発部門とのコンカレント活動を行った。

まず、工法選定にあたり、動力伝達機構以外にも視野を拡大した。薄板の異材結合工法としては、拡散結合、溶融結合、メカニカル結合及び接着が候補工法として挙げられた。

次に、これら候補工法の採否検討にあたり、動力伝達に必要な結合強度が求められるだけではなく、走る遊びへの貢献に向け、高精度な重量バランス達成のために必要な同軸度、軸長、外径 Min. 化によるユニットコンパクト化を高次元で両立させなければならない。要求機能と合わせて生産性やコスト、実現性も含めて候補工法に対して重みづけ評価を行い、カシメ結合を選定した (Fig. 10)。

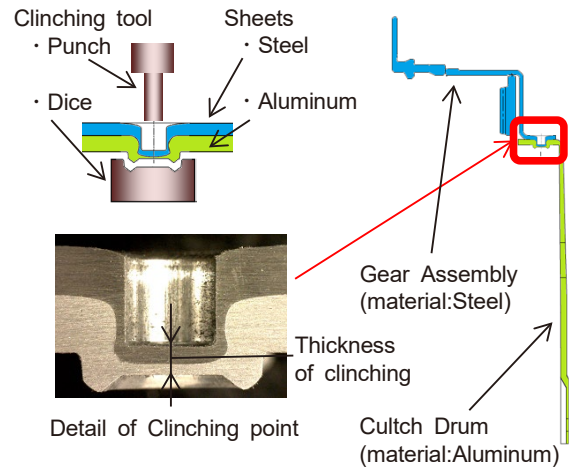


Fig. 10 Overview of Clinching and Cultch Drum

(2) 機能成立性の検証

カシメ結合部に求められる機能は、入力された動力をロスなく出力させることであり、変速時に動力のON・OFFが繰り返される耐久力も必要である。そのため、まず角材での単打点基礎実験 (Fig. 11) により、アルミと鉄の板厚、カシメツール径、押し込み量及びカシメ後厚み (Fig. 10) と結合強度 (抜き、せん断) との関係のデータベース化を行った。まず、実際のカシメレイアウトを模擬したテストピースでの一定のP.C.D.での多打点実験を行い、打点数と強度が比例関係にあることを確認した (Fig. 12)。その上で、基礎データをベースにツール径、打点ピッチ円径、打点数等に基づき、ユニット内レ

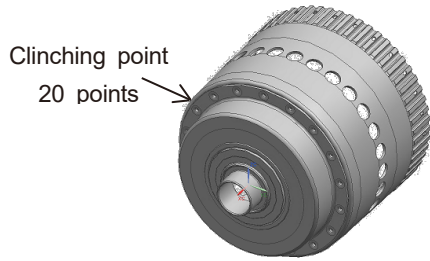


Fig. 11 Image of Multiple Point

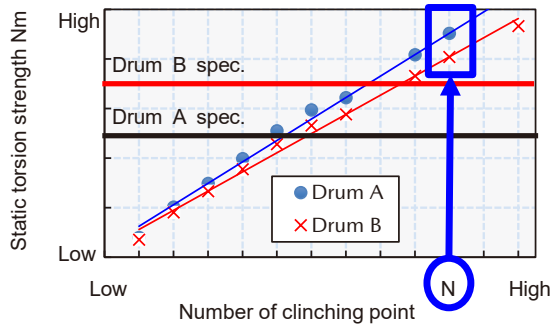


Fig. 12 Number of Clinching Point and Static Torsional Strength

アウト成立性と要求強度を満足できるかを並行検討した。

生産性を考慮した上で、安定して必要な強度を確保できるように、アルミと鉄のカシメ前板厚とカシメ後厚みに対して、量産での想定バラツキ幅以上のふらしテストを行い、鉄とアルミの板厚と公差、カシメツール径、カシメ後厚み、打点ピッチ円径及び打点数を決定した。これにより、最終ユニットレイアウトで静ねじり要求強度、静抜き要求強度を十分満足し、機能成立の目途がたった (Fig. 12)。

(3) 量産性を考慮した実機信頼性の獲得

実機形状での信頼性確保のためには、静的ねじり強度とねじり疲労強度の2特性を評価指標とした。

(3)-1 静ねじり強度

カシメ結合工程の原理原則から、制御因子、誤差因子を抽出し、実験の結果から、寄与率の高いカシメ後厚み、アルミと鉄のカシメ前板厚について、設定した管理幅以上の水準ふらしを量産設備でテスト加工を行い、静ねじり強度を実測した。寄与率の高い制御因子の振れ幅を考慮しても、ドラムA・Bいずれも規格を十分満足する結果が得られた (Fig. 13)。



Fig. 13 Actual Result of Static Torsional Strength

(3)-2 ねじり疲労強度

カシメ部周辺でのアルミ、鉄各部材の発生応力を解析し、平均応力と応力振幅の関係式を導出し、テスト結果が疲労限度線以下であることを確認した (Fig. 13)。まず解析モデル上でカシメ断面の全ての形状寸法 (Fig. 14) について、各寸法の規格中央値を基準としてふらし応力解析を行い (Fig. 15)、発生応力と相関の高いカシメ断面主要特性を抽出した上で、カシメ負荷面高さ H、カシメ負荷面外径 D、及び応力集中部 R に絞り込んだ。

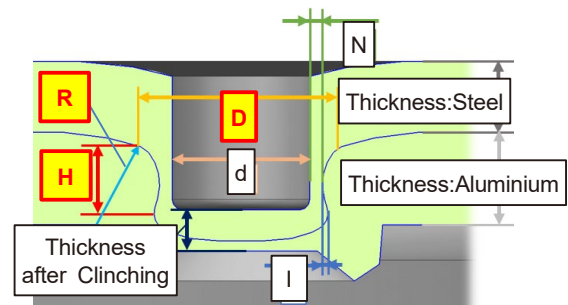


Fig. 14 Characteristic of Clinching Cross Section

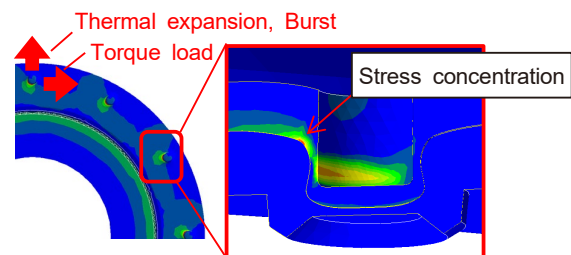


Fig. 15 Analysis Model and Generated Stress

全ての基礎実験で断面形状主要3特性を測定した結果を、データベース化し、これを基にモデル化と応力解析を行った。

その結果、疲労限度線以下であることが机上で確認できた。

実機疲労試験においても開発基準サイクル数をクリアしたことから、疲労限度線以下であることが実機でも実

証できた (Fig. 16)。これにより、お客様のあらゆる車の使用方法に対する機能保証ができていることが確認でき、同時に本取り組みにより動力伝達部品へ適用可能な結合工法の手の内化と、信頼性保証プロセスを構築できた。

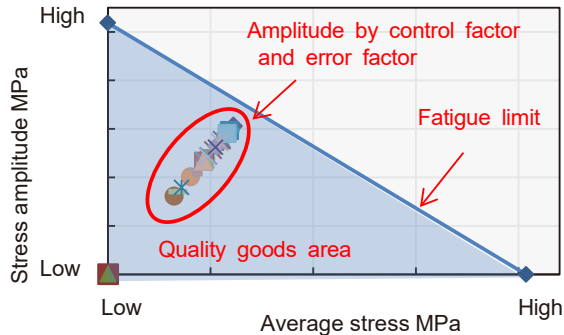


Fig. 16 Clinching Point Fatigue Strength at 10^7 Cycles

4. おわりに

以上の取り組みから、長尺アルミクラッチドラム Assy において、環境負荷 ($\Delta 2.7\text{kg-CO}_2/\text{unit}$) を抑えたものづくりに挑戦し、量産を実現した。これらの活動の成果により、“理想のペダルワークスペース” や NVH 性能向上による走る喜び、優れた環境性能の向上に貢献できた。今後も、カーボンニュートラルへの貢献と、“人馬一体”の走りを提供し続けるため、更なる技術革新への挑戦を続けていく。

アルミクラッチドラムに対する、アルミ合金材の材質選定、評価、試験方法に関して、ご協力いただいた (株) 神戸製鋼所様、及びカシメ結合のツール選定、条件設定、基礎評価実施に関して、ご協力、ご支援いただいたトックスプレソテック (株) 様に謝意を表す。

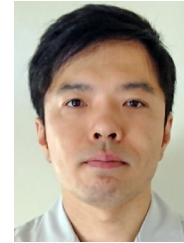
参考文献

- (1) 内藤純也ほか：ホットスタンプ部品の曲げ圧壊挙動と鋼材の機械的特性との相関，神戸製鋼技報，Vol.66, No.2, pp.69-75 (2017)

■ 著 者 ■



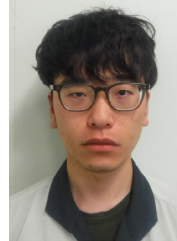
野畑 俊也



河野 弘和



田中 雄幸



長野 隼門



椎野 和幸



新家 泰平

特集：MAZDA CX-60

26 新型 CX-60 のボディー構造を実現する車体工程・工法開発

Body Assembly Process and Method Development Realizing Body Structure for CX-60

王 強^{*1}

Kyo Ou

足立 圭^{*2}

Kei Adachi

井上 翼^{*3}

Tsubasa Inoue

小林 正治^{*4}

Masaharu Kobayashi

島内 仁士^{*5}

Hitoshi Shimauchi

要 約

車の電動化による環境性能と走行性能の両立のため、軽量化は新型車開発における課題の一つである。新型車の CX-60 では、この課題解決とともに車の商品価値を飛躍的に向上させるため、ボディーのフレーム間を強固に接合し、ボディー質量低減が可能なインナーフレーム構造を開発部門と共創した。2019 年宇品工場で立ち上げた Flexible Module Line（以下、FML）⁽¹⁾ をベースにし、2021 年に新しいモジュールを追加した FML を防府工場に展開した。このインナーフレーム構造実現に向け、デジタルツールでの工程・品質の作り込みにより、新構造対応のための工程モジュールを開発した。また接合課題に対しては新しい片側接合法である“Closed Section Spot Welding”（以下、CSSW）を適用することで解決した。

これらの取り組みにより、お客様の期待を超える『商品価値の実現』と市場環境の変化に即応可能な『高効率でフレキシブルな生産』を両立できるグローバルな生産システムを実現した。本稿では、この実現に向けた取り組みを紹介する。

Abstract

To combine the environmental and driving performance with electrification of cars, body weight reduction is one of the key issues for developing new models. CX-60, we have co-created the Inner-frame structure, which connects body frame components more firmly, with R&D dept. It enables us to solve the issue and to improve the value of the model dramatically. And we have developed FML (Flexible Module Line) in Hofu plant in 2021 that was based on the FML developed in the Ujina plant in 2019 with added “New modules”. To realize the Inner- Frame structure, we developed new process module by building up the assembly process and body quality with digital tools for new architecture, then solved by adopting new one-side welding method “Closed Section Spot Welding” for body jointing problem.

With those activities, we have established the global assembly system which satisfies both “Product Value” beyond customer’s expectation and “Highly Efficient and Flexible Production” corresponding to the market change quickly. This article introduces the challenges for these activities.

Key words : Flexible Module Line, Mixed-Flow Production, Inner Frame Body, In-direct welding

1. はじめに

自動車業界を取り巻く環境は 100 年に 1 度の変革期を迎えている。「CASE (Connected・Autonomous・Shared・Electric)」に代表される環境変化に直面しており、電動化へのニーズが近年急速に高まっている。その中で、BEV, PHEV への駆動用バッテリーセルの搭載により、車

の質量は増加傾向となっている。

マツダは、車の環境性能と走行性能の両立のため、質量低減が大きな課題の一つととらえている。車体組立領域では、この課題解決に向け開発部門と共創し、CX-60 で新たなボディー構造を実現するとともに、机上での工程機能と品質の作り込みを行い、生産として QCD (Quality・Cost・Delivery) を最大化できる生産ラインを実現した。

*1～5 車体技術部

Body Production Engineering Dept.

2. 新世代ボディー及び新ライン概要

2.1 新世代ボディー

これまでのボディー構造において、基本骨格のストレート化、マルチロードパス構造、環状構造化に取り組み、軽量・高剛性なボディーを実現してきた。CX-60では、更なる性能向上の実現のため、各フレーム接合部の強化や部品板厚の最適化等によって、①身体拡張能力を引き出す剛性の連続性、②快適な乗り心地と上質な静粛性、③世界最高レベルの衝突安全性能という三つの価値をもつ軽量・高剛性ボディーを目指した。

これまでのボディー構造は、車体側面にあたるサイドフレーム、車体上部のルーフをそれぞれアウターパネルとレインフォースメントをサブアセンブリ後、ボディーフレーミング工程にてアンダーボディーと接合する。そのため、アウターパネルによって隠れるフレーム同士の接合ができなかった。そこでCX-60は、アンダーボディーに対してサイドフレーム、ルーフのレインフォースメントをボディーフレーミング工程で先に接合し、その骨格にアウターパネルを位置決め・接合するインナーフレーム構造へ変更した (Fig. 1)。アウターパネルセット前に溶接工程を追加することで、環状構造部に対してスポット溶接の自由度を高めることができる (Fig. 2)。そしてCAE解析によって導いた接合効率のより良いポイントに対して、重点的に接合点を追加でき、その結果としてプレス部品の板厚最適化による軽量化、車体強度・剛性アップを実現した。

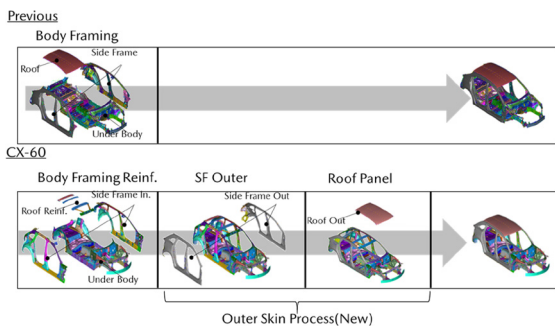


Fig. 1 New Module for Outer Skin Process

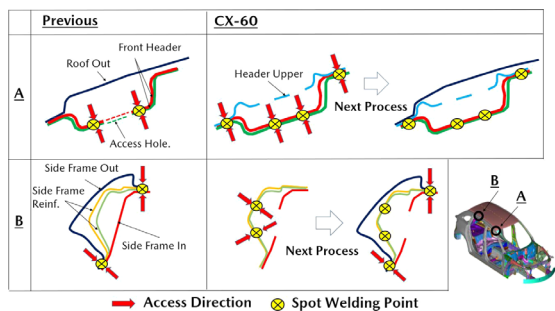


Fig. 2 Reference Section of Spot Welding

2.2 新ボディーフレーミングライン

ボディー性能と生産効率の向上を両立させるため、開発部門との共創を行った。これまでのボディー構造の車とCX-60を同一生産ラインで混流生産を実現するため、ボディーフレーミングラインに対して新コンセプトのアウターパネルの投入と位置決め・接合工程 (アウタースキン工程モジュール) の追加のみでグローバル拠点でも生産可能とした。

ここからは、CX-60の生産を高品質かつ短時間で実現するため、三つの取り組みについて各章にて紹介する。

(1) 3章では、フレキシビリティ進化と商品価値を高めるため、机上段階での加工効率 (加工速度・加工可能時間) 最大化の取り組みについて紹介する。

(2) 4章では、柔らかいアウターパネルをねらいの位置で接合し、滑らかにつながる面の連続性を実現させるボディー寸法精度保証の取り組みについて紹介する。

(3) 5章では、インナーフレーム構造における理想断面実現のため、新しい片側接合工法である Closed Section Spot Welding (以下 CSSW) を開発・適用について紹介する。

3. フレキシビリティ進化と生産効率向上の取り組み

3.1 フレキシビリティの進化

マツダは、多品種少量生産を実現する考え方の下、複数車種を同一ラインで混流し、少量でも効率の高い操業レベルを維持できる生産システムを構築してきた。その上で、更なるフレキシビリティ向上のためFMLを構築し、商品機能の進化、生産台数の変動により柔軟に対応できるようにしている。具体的には、生産設備を①治具モジュール、②セルモジュール、③工程モジュールの三つのモジュール概念で構成、モジュールの組み合わせや追加により構造進化への柔軟な対応を実現した。

①治具モジュールでは、車種専用の治具を切り替える仕組みを取ることで、製品形状の変動の吸収を可能にしている。②セルモジュールでは、スモールサブラインをセル化し増減することにより、加工量や部品点数の変動の吸収を可能にしている。また、ボディー構造の大幅な変更に対しても③工程モジュールを既設のラインに追加することで対応可能としている (Fig. 3)。

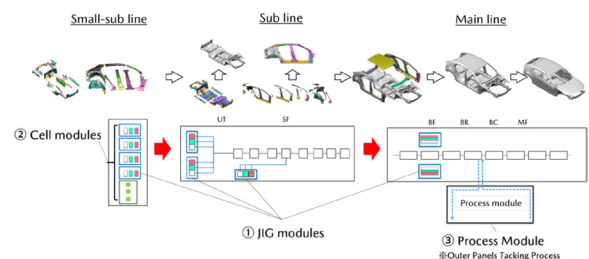


Fig. 3 Module Concept

更に、このモジュール構想を有したライン構成をグローバルに展開することによって、拠点間での生産車種移管が短期間で可能となり、台数比率変動に対する生産車種編成の変更を容易にした (Fig. 4)。

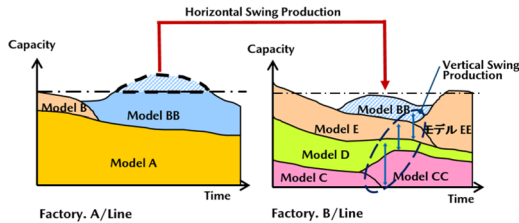


Fig. 4 Mazda Flexible Production Line Concept

CX-60 の導入にあたっては、接合強度向上のため、各フレーム部を接合する工程と、インナーフレーム構造へアウターパネルを組み付ける工程機能を追加する必要がある。

各フレーム部を接合する工程については、既存工程を最大活用するため、新構造に対応しつつこれまでの治具モジュールと入れ替え可能とする構造に進化させた。特に構造実現については、製品設計初期段階から開発部門と共創、各フレーム同士の接合位置や形状を工夫し、これまでの工程仕様が活用できる構造を製品形状に織り込んだ。

インナーフレーム構造にアウターパネルを位置決めする工程機能については、既存工程に工程モジュールとして追加できるようにするため、工程の小型化、汎用化を進めた。治具モジュールについては、4章で紹介する工程検証を実施し、必要最小限な加工基準ユニットに絞り込むことで小型・軽量化を実現した。更に、これまでのボディーフレーミング工程のような大型汎用装置での治具モジュール入れ替えではなく、汎用ロボット・NC装置を活用した治具入れ替えと、治具モジュールの位置決めを実現した。

これらの対策により、環状構造の閉断面化を実現し高剛性化に寄与するとともに、これまでのボディー構造の車とCX-60が混流生産できる生産ラインを実現した (Fig. 5)。

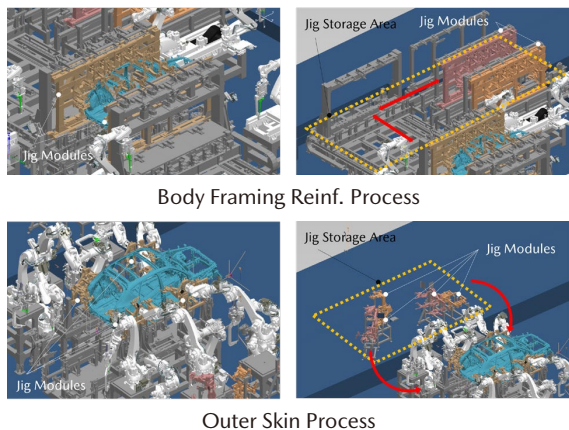


Fig. 5 Process Module Comparison

3.2 加工効率の追求

新たな構造や加工量の増加に対し、加工工程の追加が必要になるが展開スペースには制約がある。そこで、加工効率を向上させ、既存ラインと同等の展開スペースにするため、(1) 加工速度の向上と、(2) 加工時間の最大化の視点で取り組んだ。

(1) 加工速度の向上

溶接作業ロボット動作速度向上のため、通信速度に着目、これまで上位通信のPLC (Programmable Logic Controller) 経由だった溶接指令をロボットコントローラーからの直接指令に見直した。加えて、ロボットの動作を構成するサーボモーターの軸移動量最小を理想状態と定義、ロボットプログラムの教示要領を改定した。これらの取り組みにより、加工速度は33%向上した。

(2) 加工時間の最大化

以下三つの施策に取り組みし、加工可能時間を最大化した。

①ロボットインターロック待ち最小化：溶接工程においては複数のロボットが同時に加工作業を行うが、加工量そのものに差があれば待ち時間が発生する。また、動作範囲が干渉する領域においては相互インターロック回路を設定し、一方のロボットが干渉域での作業を完了するまで他方のロボットは干渉域外で作業完了を待たなければならない。これらの待ち時間を極小化するため、溶接機形状の標準化・小型化を進め、加工可能部位の選択肢を拡大した。

②密集配置化：加工密度を向上させるため、ロボット動作シミュレーションを活用しロボット動作範囲の干渉最小となるロボット配置を検討し、加工量の平準化と複数部位が同時加工できる密集配置レイアウトを実現した (Fig. 6)。

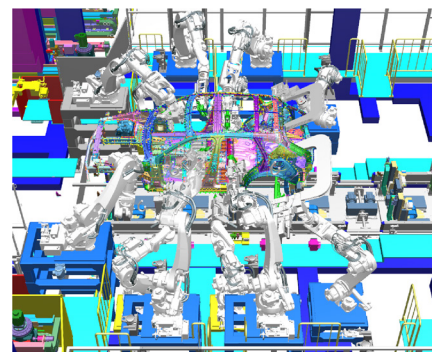


Fig. 6 Robot Concentrated Layout

また、搬送時間を短縮し、タクトタイム内の加工可能時間を拡大した。これまでの搬送措置は、スライド装置と昇降装置を一体化させた構造にてボディーを次工程へ搬送してきた。この昇降機能を位置決め機能装置側へ移管、搬送時間から昇降にかかっていた時間を削減した。加えて、昇降ユニット削減による軽量化により、搬送設

備の高速化を実現した。これらの三つの対策により、工程内の加工可能時間を 16%改善した。

加工速度の向上と加工可能時間最大化の取り組みにより、生産ラインの単位面積当たり加工量は 17%向上し、従来ライン同等のスペースへ設備展開を可能にした (Fig. 7)。

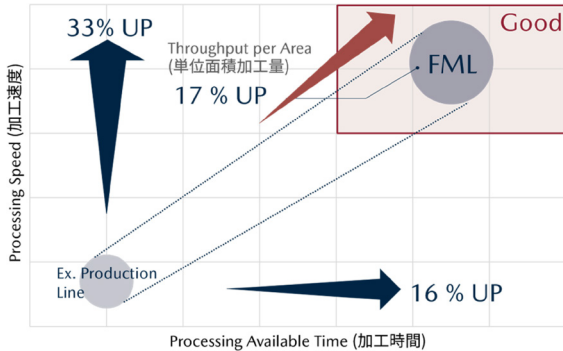


Fig. 7 Double Core Efficiencies Result

3.3 机上評価精度の向上

CX-60 の新車開発と並行し、工程のフレキシビリティと加工効率を突き詰めるためには、シミュレーションで検証をやりきり、これを実機で 100%再現できる検証プロセスが不可欠である。実現に向け、デジタルツイン環境を構築し、工程設計の精度向上を図った (Fig. 8)。

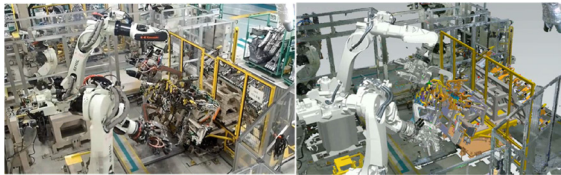


Fig. 8 Digital Twin Concept

3D モデルの再現精度向上については 3D スキャン技術を活用し、これまで机上再現が難しかった工場内の配線・配管やロボット付帯のケーブル類を評価環境に再現した。これにより干渉確認精度を向上させ、ロボット回避動作の最小化やタクトタイムの能力・精度向上を実現した。

これと並行し、設備を制御する PLC 動作環境についても机上に再現した。これまでは現場確認しかできなかったラインコントロール全体での動作成立性・タクトタイム検証が可能になった。本システムの活用により、製品設計と並行した工程設計が可能となった。今後は展開ラインを拡大させ、量産早期化によるお客様へのタイムリーな商品のお届けに貢献していく。

4. ボディー寸法精度保証の取り組み

魂動デザインを忠実に再現できるボディー寸法精度保証のため、ボディーの骨格であるインナーフレームに組み付けるアウターパネルの位置決め・拘束のための基準 (以下、加工基準)、治具解放後寸法精度保持に必要な溶

接打点位置と順序の適正化に取り組んだ。ボディー側面にあるサイドフレームアウターパネルは板厚 0.7mm の鉄板で作られた 12Kg を超える大型薄板部品である。また、ドア開口があり、部品自体の剛性が低いため、自重の影響により容易に変形する。この部品を 3 次元空間内で寸法精度保証するためには、重量・剛性を考慮した加工基準の設定が重要となる。これまでの車では、水平状態で治具にサイドフレームアウターパネルをセットし形状を整え、そこに剛性の高いレインフォースメントを投入・接合することで高い寸法精度 ($\pm 0.1\text{mm}$) を実現してきた (Fig. 9 左図)。一方、インナーフレーム構造の CX-60 は、サイドフレームアウターパネルを実車状態で保持し、インナーフレームに組み付ける構造であり、従来同等の寸法精度を確保するためには、加工基準と溶接打点位置と順序などの良品条件を新たに設定する必要があった (Fig. 9 右図)。

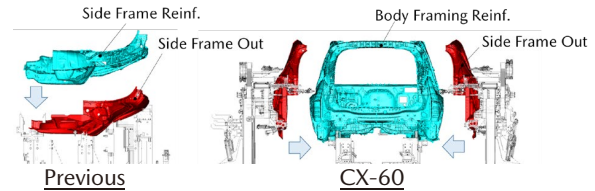


Fig. 9 Locating Method of Body Side Outer Panel

以降に事例を踏まえ、ボディー寸法精度をねらいどおりに作るための良品条件の決め方と工夫を記述する。

4.1 加工基準の位置と数の決め方

サイドフレームアウターパネルは車両側面の外板部品であり、ドアやリフトゲートなどと合わせ連続したデザインを構成しているため、その寸法精度が非常に重要となる。そのためには、ドアやリフトゲートを取り付けるヒンジ面は $\pm 0.1\text{mm}$ 、ドア開口、リフトゲート開口との境目であるパーティングラインの面精度は $\pm 0.2\text{mm}$ が目標となることを、蓄積した知見より導出した。この目標を達成する加工基準の位置と数を CAE 活用により決定した。CAE 検証の結果、位置決めした時点でリアドア開口のパーティングラインの面精度が重力の影響を受け、面の位置が車の下方向に 0.3mm、前後方向に 0.3mm 精度変化 (青色) した (Fig. 10 左図)。サイドフレームアウターの精度目標を達成させるために、寸法精度変化を抑制できる最も効果のある位置を CAE で再検証し、加工基準を設定した。その結果、Fig. 10 右図のカラーマップのように、実車状態 (組み付け姿勢) においても、寸法精度に変化がなく (緑色)、リアドア開口のパーティングラインの面位置を $\pm 0.1\text{mm}$ 以内で実現させることができた。

他の部位・部品・工程に関しても、同様のプロセスを踏むことで、精度目標を達成できる加工基準の位置と数を設定した。

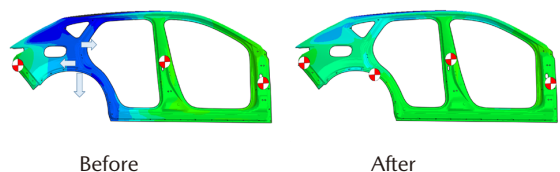


Fig. 10 Measures Against Self-Weight Deformation

4.2 寸法精度保持の溶接打点位置と順序の決め方

4.1で紹介した活動により、加工基準を机上にて決定し、治具内でねらいの寸法精度を保持することが可能となった。次のステップは、ねらいの寸法精度を保持したままサイドフレームアウターパネルをインナーフレームに組み付けられる溶接打点位置と順序を決定することである。ただし、1工程で加工できる溶接打点数には限りがあり、該当工程のタクトタイム、ロボット等の動作範囲も考慮し、かつねらいの寸法精度を実現できる打点位置と順序を検証し設定する必要がある。

ここでは、リフトゲート開口のパーティングラインの面精度保証を例として、CAEを用いて溶接打点位置と順序を決定した活動について紹介する。

Fig. 11に示すa, b, cの溶接打点はリフトゲート開口の寸法精度保証に寄与することがこれまでの車の検証結果より得られていた。一方、ラインタクトの制約から全ての溶接打点を同工程内で同時に加工することはできないため、CAEで溶接打点位置、順序による寸法精度保証の検証を行った。Fig. 12(1)のカラーマップに示すように、打点bを先に溶接した場合、リフトゲート開口部に0.3mm寸法精度変化があり(赤枠部)、治具解放前後で寸法精度が変化すること(青色)が分かった。逆にFig. 12(2)打点aを先に溶接した場合、精度変化がほとんどない(緑色)。また、Fig. 12(3)(4)打点cの有無で、リフトゲート開口部の寸法精度変化がなく(緑色)、この工程での寸法精度保証に関して、溶接打点cの寄与度が低く、その他の工程への移管を行った。

このような検証により、タクトタイム内の加工量の制約やロボット動作範囲を考慮した上で、ボディの寸法精度目標達成に必要な溶接打点位置と順序を決定し、工程設計へ折り込んだ。

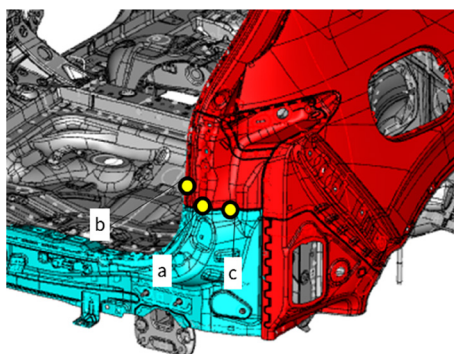
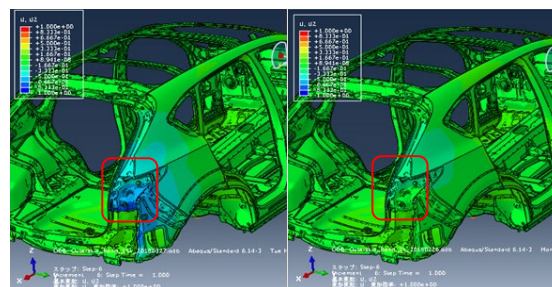
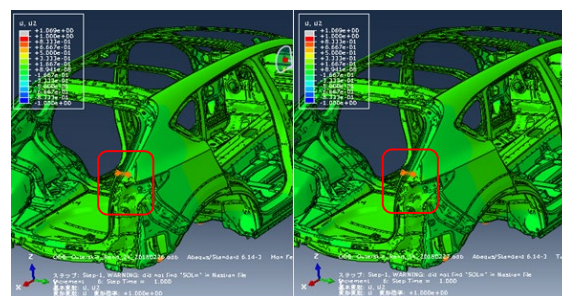


Fig. 11 Spot Welding Positions



(1) b⇒a (2) a⇒b



(3) a⇒b With c (4) a⇒b Without c

Fig. 12 Verification Result of Welding Sequence

4.3 ボディー精度作り込みの実機検証

机上で決めた寸法精度保証の良品条件に基づき、実機検証を行った。ボディ寸法精度の結果だけでなく、CAEへ入力する実測値や溶接打点ごとの寸法精度変化量等も合わせて実機計測した。その結果、サイドフレームアウターパネルのリアドア、リフトゲート開口部において、寸法精度変化が0.2mm以下であり(赤枠部)、机上で決めた加工基準、溶接打点位置と順序の有効性を確認できた(Fig. 13)。

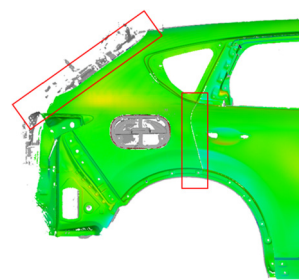


Fig. 13 Verification Result of Body Assembly

以上のように、実際の量産ラインでの現象を想定し、それを再現した解析モデルで机上検証することで、魂動デザインを忠実に再現できた。今後も、本活動により得た技術をベースに、更なるお客様の期待を超えるボディ実現に向けて挑戦し続けていく所存である。

5. ロバストな CSSW 溶接工法開発

5.1 インナーフレーム構造の接合課題

インナーフレーム構造の採用により、レインフォース

メント同士の強固な接合ができる。一方で、アウターパネルとレインフォースメント間の接合は閉断面となり、スポット溶接機での接合ができなくなる。通常の接合面を両側から挟み込むスポット溶接で加工するためには、アウターパネルを接合可能なフランジ位置まで延長させる必要があり、ねらいのサイドシル断面積がとれないこと、また質量増加につながる課題があった (Fig. 14)。

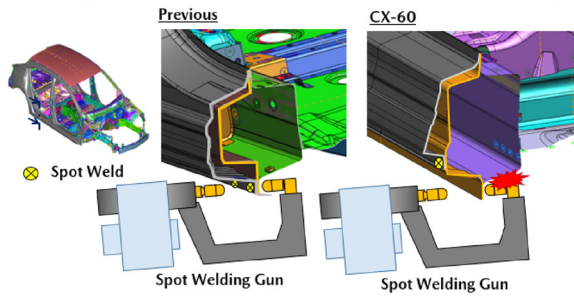


Fig. 14 Ideal Sill-Side Section

これを新たな片側接合法である Closed Section Spot Welding を開発することで解決した (Fig. 15 右図)。

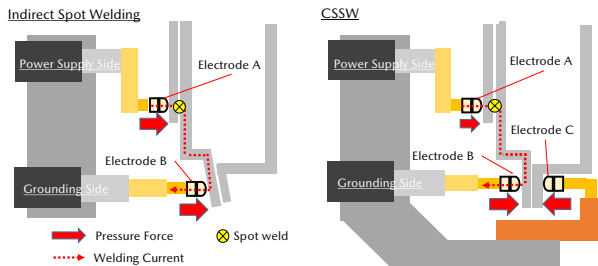


Fig. 15 Comparison of Indirect-Welding & CSSW

5.2 CSSW 工法について

インダイレクト溶接は、電極の両極を同一平面に配置した閉断面の抵抗溶接である (Fig. 15 左図)。これら抵抗溶接の品質は、3 大条件である①溶接電流、②通電時間、③加圧力で決まる。インダイレクト溶接は、通常のスポット溶接とは異なり、加圧力が部品剛性に依存するため、加圧力をいかにコントロールするかが課題となる。アース側での部品の弾性変形により溶通電経路が安定せず、溶接品質安定化のため溶接条件のチューニングが必要となる。結果、溶接品質が不安定となり、溶接部の防錆性能低下のみならず、溶接時間延長による加工効率の低下と無駄な電力消費につながる。

CSSW 溶接では、インダイレクト溶接の課題である加圧力の安定化のため、部品変形・溶接面のばらつきを抑制し、通電経路と電流密度の安定化を図った。コンセプトとして、アウターパネルをフレームと接合する給電側は低加圧力、サイドシルフランジのアース側は高加圧力のクランプ構造で安定した溶接品質が確保できるよう開発を進めた。品質工学手法を用いた基礎実験により、各

電極の先端形状・先端径や管理項目を決め、良品条件を明らかにした (Fig. 16)。スポット溶接同様、シンプルな管理で溶接性としてのロバスト性が確保できた。この導いた良品条件を基に、社外協力メーカーとともに、CSSW 溶接機を共同開発した。

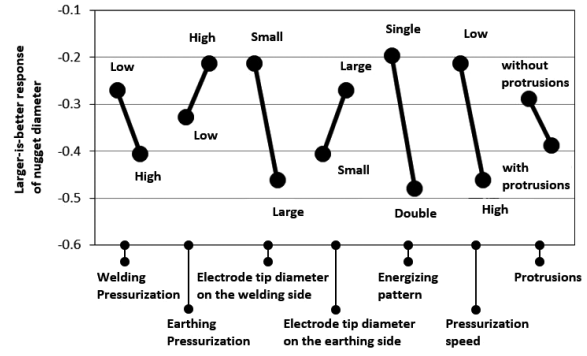


Fig. 16 Signal-to-Noise Ratio, S/N Ratio for CSSW

5.3 CSSW 工法の接合要件化

更なる CSSW 溶接品質のロバスト性確保のために、接合要件化と構造への織り込みを開発部門とコンカレントに進めた。CSSW は給電部からアース部の電極間に電流を分流させずに効率よく接合点を発熱させられるかがポイントとなる。そのため、CSSW の給電部とアース部のピッチを定義し、サイドシルフランジ内におけるスポット溶接位置と CSSW アース位置のピッチを定め、接合要件に反映した。

これらの取り組みの結果、電極と接合部品との接触面積、電流密度が安定し、従来のスポット溶接と同等レベルでの加工速度を実現できる工法を実現した。CSSW の採用は車の軽量化、高強度・高剛性化などの性能アップに貢献できる工法であり、CX-60 ではサイドシル部の適用としたが、良品条件の一般化を行い、更なる適応箇所の拡大に取り組んでいく。

6. おわりに

今回の取り組みにより、これまでのボディー構造と CX-60 の BOP 構造のボディーを同一ラインで高効率フレキシブルに生産する車体組立ラインを量産に結び付けることができた。多大な協力を得て H2 FML ラインを立ち上げることができ、今回ライン展開にご協力いただいた工場・開発・生産技術及び社外協力メーカー各位の方々へ深く感謝の意を表します。

参考文献

(1) 有泉雄一ほか：車体フレキシブル生産の進化、マツダ技報, No.37, pp.63-68 (2020)

■著者■



王強



足立圭



井上翼



小林正治



島内仁士

特集：MAZDA CX-60

27

高効率混流生産を実現する防府第2車両組立工場の進化 Evolution of Efficiency Mixed Production at Hofu No2 Vehicle Assembly Plant

岡林 直道^{*1} 細木 信吉^{*2} 越智 元基^{*3}
Naomichi Okabayashi Nobuyoshi Hosogi Motoki Ochi
山縣 英雄^{*4}
Hideo Yamagata

要約

ラージ商品群を全世界に提供するための生産体制を構築するべく、防府第2車両組立工場（以下、H2組立工場）をリニューアルした。

今回のリニューアルでは、これまでマツダが大切にしている働く人に優しい工程づくりを継承し、進化させながら、車両構造の電動化シフトや、少子高齢化による労働人口減少の中でも、お客様へ最新の車を、高品質でタイムリーに提供できる工場を目指した。

それを実現するため、三つの基本コンセプト、「1. 車両の変化に柔軟に対応できる根の生えない設備*」、「2. 作業者の能力を最大限発揮できる高効率混流生産ライン」、「3. 働きやすさを追求した作業者に優しいライン」の具体化に取り組み、マルチソリューション戦略の商品群を既存の車種も含めて効率的に混流生産できる工場へと一新した。

本稿では、その取り組みについて紹介する。

*：低投資かつ短期間でレイアウト変更できる設備に対する通称。

Abstract

In order to supply 7th Generation large products to all over the world, Mazda renovate Hofu No2 Vehicle Assembly Plant (H2). We think it is important to design the human friendly base line concept.

We estimate increasing EV structure, on the other hand labor shortage caused by decline of working population in near future. Mazda must produce state-of-the-art products with high quality, timely, and sustainably. New H2 can produce state-of-the-art products based on multi solution strategy and current products in high productivity.

This report describes Mazda's activity based on 3 concepts.

1. Non-fixed facility that can accept products diversity.
2. Flexible production line by maximum utilization of human power.
3. Human-friendly line that pursues ease of work.

And it describes their approaches and the effect obtained.

Key words : Production • Manufacture, Continuous production, Equipment, Human engineering, Physical burden, Environment • Energy • Resources, Environment-Oriented production design

1. はじめに

現在、自動車業界を取り巻く環境は100年に一度の大変革期と呼ばれるほど大きな変化を迎えている。CASEやカーボンニュートラルに代表される外部環境の変化の中で

も、将来も使い続けることのできるフレキシブルな生産ラインを目指して、理想の工程を描くことが重要と考えた。

H2組立工場は1992年の操業開始、当時最新の自動化技術によって大物部品の組み付けをロボットで自動搭載することにより作業者の負担を軽減する生産方式を続け

*1~4 車両技術部
Painting, Trim & Final Assembly Engineering Dept.

てきた。しかし、大物部品の組み付け自動化は設備が大がかりになるため、車両重量や車両サイズなど工程能力スペックを超えるクルマや部品に対応する際の多大な投資と長期の工事期間が問題となっていた。より広い居住空間を実現する大きなクルマや環境性能の高い電動車の需要が高まり、クルマのサイズと重量が上がる傾向にある中で、短期間に低投資で生産できる体制を構築し、また、お客様に喜ばれる価値のある車をお届けするとともに、組み立て作業員に対しては働きやすい作業環境を提供できる生産ラインを実現した。

2. 車両組立ラインの特徴と課題

2.1 車両組立ラインの特徴

車両組立ラインは、お客様に最も近い最終加工区であり、クルマ全体の品質を造り込む加工区である。車両組立ラインでは、2800点以上の多くの車両部品を取り扱っている。

組み立て作業の要素には、締結、嵌め込み、貼り付け等さまざまな組み付け方法の部品が混在しており、作業内容が多岐にわたり、自動化への課題が多い。そのため、作業員の技能を十分に発揮できることが重要になる。

また、多車種混流生産を行っていることがマツダの特徴である。エンジンレイアウトや使用燃料、駆動系及び車両サイズの異なるさまざまな商品を1つのラインで混流生産している。生産ボリュームの大きい自動車メーカーでは単一車種をラインに流して効率を上げることが一般的であるが、スモールプレイヤーのマツダは車両の構造違いによる作業時間差を吸収可能な混流生産によって生産ボリュームの大きいメーカーに匹敵する生産効率を実現している。

1つのラインの中で乗用車とSUVを混流生産することを「縦スイング」、同じ車種を国内や海外の複数の生産ラインにまたがって生産することを「横スイング」と呼ぶ。縦スイング、横スイングの混流生産により、需要の変動に柔軟に対応し、マツダの国内外複数の生産ラインがあたかも一体の工場のような生産システムを構築することで、世界中のお客様にお待ちいただくことなく、タイムリーにお届けできる生産基盤を整えている (Fig. 1)。

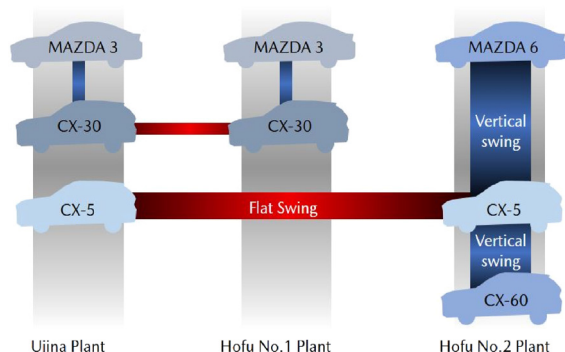


Fig. 1 Flexible Production by Swing

2.2 車両組立ラインの構成

車両組立ラインは、メインラインとサブラインで構成している。塗装工場で塗装されたボディーへ部品を組み付けて完成車へ仕上げるラインをメインラインとし、エンジンやサスペンション、インパネなどのメインラインで組み付ける前にあらかじめ大きなモジュールへ仕上げるラインをサブラインとしている。

混流生産において、車種間で発生する作業時間差はサブラインで吸収し、メインラインでは、あらゆるクルマを同一工程、同一設備で組み立てられる「シンプルベースライン」の考え方によって、混流生産での生産効率を高めつつ、縦横スイングを短納期かつ低投資で行うことが可能なライン構成としている。

2.3 車両組立ラインの課題

マツダは、多様なお客様の要望にお応えすることができ、BEVやPHEVなどマルチソリューション戦略の商品をタイムリーに提供し続けることを目指している。そこで、異なる構造のクルマを効率的に混流生産するために作業時間の差を吸収する必要がある。更には、労働人口減少に対応しながら、技能を発揮することができる、作業員にとって優しい工程を実現することが課題である。

その課題を解決する3つコンセプトを考え、H2組立工場のリニューアル工事に織り込んだ。

(1) 車両の変化に柔軟に対応できる根の生えない設備

1つ目は、車両構造の変化に即応すると同時に、投資を抑制するためのコンセプトである。クルマの大型化や、電駆化に伴う新機能部品の増加によって1工程当たりのスペースを拡張したり、既存の工程では不足し対策を行う場合、エンジン・サスペンション自動搭載などの大掛かりな設備における改造の工事が長期化することが問題となっていた。その問題を解決するため、工程数やレイアウトを柔軟に変更できる「根の生えない設備」をコンセプトとすることで、短期間かつ低投資で進化するラインを目指した。

(2) 作業員の能力を最大限発揮できる高効率混流生産ライン

2つ目は、混流する際の車種間の作業時間差によるロス問題を解決するコンセプトである。例えば、エンジンと電駆ユニットを両方搭載したPHEVでは既存の内燃機関と車両構造が大きく異なり、組み付け部品が多く、84分もの作業時間差があり、その差を効率的に吸収し、同時に、工程内でねらいの機能を造り込むことである。シンプルベースラインの考え方を、作業員のもつ能力を活かす観点で進化させる「作業員の能力を最大限発揮できる高効率混流生産ライン」をコンセプトとした。

(3) 働きやすさを追求した人に優しいライン

3つ目は、少子高齢化に加えて、定年延長による作業員の平均年齢の上昇などの人員構成変化の問題を解決す

るコンセプトである。若手からベテランまで、多様な作業員を受容できる「働きやすさを追求した人に優しいライン」をコンセプトとした。

以上に挙げた3つのコンセプトによるH2車両組立ラインの進化のポイントを、第3章で紹介する。

3. H2 車両組立ラインの進化

3.1 車両の変化に柔軟に対応できる根の生えない設備

車種によって構造が異なるサスペンションやパワートレイン、ホイールベースに対する設備の汎用性を低投資で高める「根の生えない設備」をコンセプトに工程設計を行った。その3つの事例を紹介する。

(1) 自動化ユニーク要件を排除した汎用性の高いライン

従来は、省人化のねらいからエンジン・サスペンション全自動搭載システムを採用していた。搭載隙要件を満たすため高い位置決め精度が必要であり、ボディー側、エンジン・サスペンション側の双方を設備で位置決め固定を行っていた。また、車種によってサスペンションをつかむ位置が異なるため、車両構造に対して専用の設備が多く必要であった。そのために、新車追加時に多額の投資や、長期の設備改造期間が発生し、また位置決めや固定方法に関して、車両構造側の制約条件が必要となっていた。そこで、自動搭載設備を重可搬AGVに変更し、ボディー側の搭載位置決めピン合わせや、サスペンションをボディー側締結位置へ誘導する作業を作業員が行えるようにしてフレキシブル性を高めた。

(2) ソフトのパラメーター変更で柔軟に対応できる設備

これまでの自動搭載設備は地下ピットを要するため、簡単に設置場所を変更することができなかった。そこで、AGVに搭載リフター機能を付与し、生産台数を増やしたい場合はAGVを追加し、工程レイアウトはソフトで簡単に変更できるようにした。

また、搭載AGVに非接触センサーを活用し、フロント側の搭載AGVがボディーハンガーの形状を読み取ることによって追従走行し、リア側のAGVがフロント側のAGVとの距離を認識し、リアルタイムでコントロールさせることで追従精度を高め、ホイールベース長の違いをソフトのパラメーター設定のみで変更できる設備を実現した (Fig. 2)。

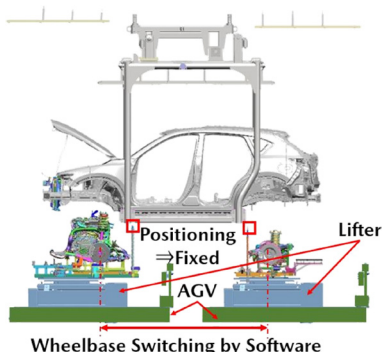


Fig. 2 Engine・Suspension Lifter AGV

(3) 多種のパワートレインを組み立てできる汎用設備

多種のパワートレインでも同一の設備で生産するため、部品を組み立てるための加工基準を車種間で共通の「固定」と定義し、車種ごとに造り分けたい諸元や性能の差を「変動」と定義し、車両設計と設備設計を同時に行っている。

具体的には、エンジンやサスペンションなどの大型モジュール部品のボディーへの取り付け方法を固定とし、パワートレイン間で共通化している。一方で、アクスルは車高や車幅、車両重量に合わせて変動とし、車種によって取り付け位置を変えている。変動部は、位置決め具の取り付け取り外しのみで簡単に切り替え可能な設備にすることで、同一工程での組み立てを可能とした (Fig. 3)。

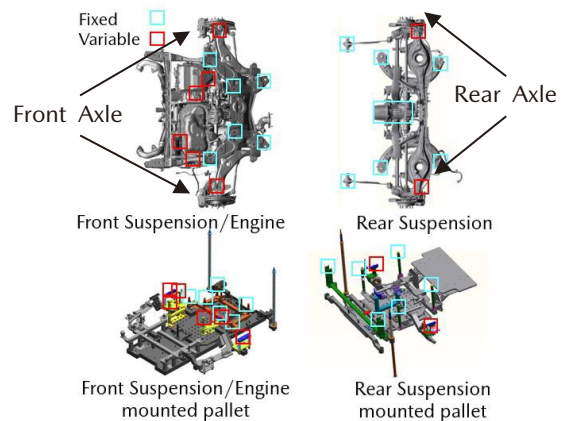


Fig. 3 Fixation and Change of Vehicle and Facilities

3.2 作業員の能力を最大限発揮できる高効率混流生産ライン

混流生産においては、商品仕様の違いにより、組み付けする部品点数が異なり、その作業時間差の吸収が効率生産の課題である。特に、従来の横置き内燃エンジンに加え、縦置きエンジンや、電気駆動のモーターでは、さまざまな部品のレイアウトや組み付け方向が異なり、適切な作業員配置が難しくなっている (Fig. 4)。

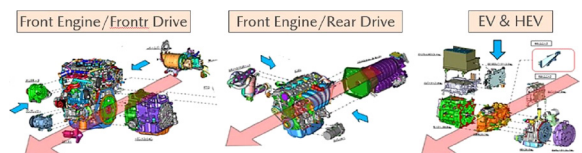


Fig. 4 Parts Layout of Various Power Trains

従来のコンベア搬送では、コンベアで作業員の動線が分断され、前後からの作業アクセスが困難であったが、AGVによるマルチアクセス搬送方式 (Fig. 5) に変えることで、作業員が左右に自由に行き来できるようになり、歩行ロスのない工程が可能となった。同時に全方位からの作業を可能とすることで、無理な作業姿勢を排除し、作業員の負担を減らして効率的な作業が実現した。

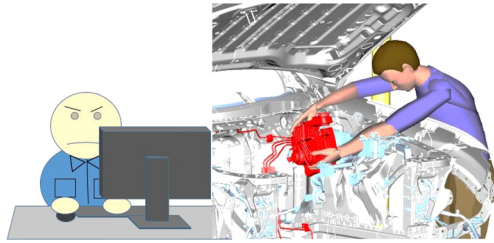


Fig. 8 Conventional Inspection Method

この課題を解決するため、MR (Mixed Reality) の技術を用いる手法確立に取り組んだ。具体的にはデジタルファクトリーで、実作業同等の環境再現により行った作業動作を、モーションキャプチャーシステムにより、デジタル人間モデルとして生成し、そのデジタル人間モデルから各関節可動角度を数値として抽出する手法である (Fig. 9)。

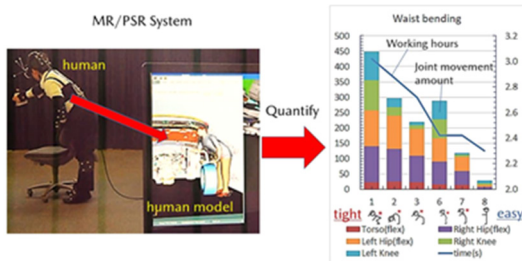


Fig. 9 The Latest Inspection Method by MR

この手法の確立により、検証者の経験や勘に頼らず、作業姿勢を数値化し、ストライクゾーンエンジニアリングによる効果を机上でシミュレーションすることが可能となった。

今後は、作業動作のデジタル人間モデル生成と作業負荷量の算出までを自動化する組み立て工程シミュレーションシステム (Fig. 10) を確立し、そのシステムを活用した効率的なエンジニアリングプロセスで、新たな工法を取り入れた働きやすさの追求を加速していく。

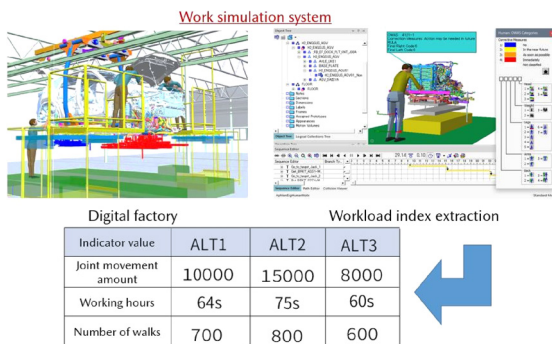


Fig. 10 Vehicle Assembly Process Simulation System

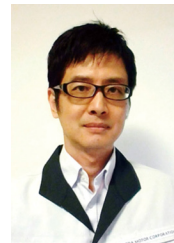
5. おわりに

本取り組みにより、H2 組み立てラインにおける既存車種とラージ商品群の混流生産効率を高め、同時に、将

来の車両構造変化へ柔軟に対応ができ、働く人にも優しいサステナブルな工場へ進化させることができた。

今後、カーボンニュートラル観点も加えて将来も使い続けることのできる工場へと更に発展させていく。具体的には、協調ロボット技術を活用し、複数の作業を同時にできるような工夫でマルチソリューション戦略の商品の混流生産効率を高める。加えて、作業者の能力を最大限発揮できる作業環境を追求していくことで、ライン長の短縮や作業に必要なスペースを縮小し、車両や大型部品の搬送エネルギー、空調や照明などのエネルギーを削減する。そのような、生産過程における CO₂ 排出量を極小化できる、世界最小のコンパクトファクトリーを実現していく。

■ 著 者 ■



岡林 直道



細木 信吉



越智 元基



山縣 英雄

特集：MAZDA CX-60

28

生産工法の変革による魂動デザインと働きやすさの追求 Innovation of Production Method for “KODO Design” and “Workability”

高田 有弘^{*1} 川合 敏之^{*2} 崎田 亮^{*3}
Kunihiro Takata Toshiyuki Kawai Ryo Sakita
王 強^{*4} 川野 晃寛^{*5}
Kyo Ou Akihiro Kawano

要 約

マツダの生産技術部門では、お客様の期待を超えるレベルで走る喜びを実現するために、独自価値の具現化を目指している。その一つとして、魂動デザインの忠実な造り込みに取り組んでおり、隣り合う意匠面が一枚の面であるかのように感じられる「面の連続感」の造り込みを行ってきた。また、グローバルで多様な人材にいきいきと働いてもらえる環境を目指し、働きやすい製造ラインへの変革に向けて活動しており、どんなクルマでも作業がしやすい生産工法の開発を行っている。本稿では、CX-60 で実施した「魂動デザイン」と「働きやすさ」をともに向上させた取り組みについて紹介する。

Abstract

Production engineering department of Mazda tries to supply unique value in order to realize the “Driving pleasure” that exceeds customer expectations, so, we are working on to meticulously develop the “KODO design” and have been building “Continuity in Surfaces” that makes the adjacent design surfaces feel as if they were a single surface. In addition, the company is working to transform its manufacturing lines to make them easier to work with, aiming to create an environment where a global and diverse workforce can work with vigor and enthusiasm, and is developing production methods that make it easier to work with any cars. This article introduces the efforts implemented in the CX-60 to achieve both “KODO design” and “Workability”.

Key words : Production ・ Manufacture, Assembly, Quality, KODO design, Workability, Front end

1. はじめに

マツダのクルマは、運転する楽しさを提供するために進化を続けている。中でも魂動デザインはマツダの重要な提供価値で、生産技術部門では、魂動デザインの忠実な造り込みに取り組んでおり、CX-60 では外観品質をこれまで以上に向上させる取り組みを実施した。

また、グローバルで多様な人材にいきいきと働いてもらえる環境を目指し、働きやすい製造ラインの変革に向けて活動しており、車両のフロントエンドにおいて、どんなクルマでも作業がしやすい、フロントオープンエンド工法（Front Open End 以下、FOE）を採用し、CX-60 の量産から実施した。

本稿では、CX-60 で取り組んだFOEを活用した魂動デザインの造り込みと作業性向上についての内容を紹介する。

2. フロントオープンエンド工法とは

従来のマツダの工程は、車体組立工程でボディー前端の左右を連結するバンパーレインを組み付け、ボディーを塗装後、車両組立工程へと移る。車両組立工程では、エンジンルームの中に作業が入れないため、部品組み付け時にフェンダー越しからの腰曲げ作業になっていた（Fig. 1）。そこで、どんな魂動デザインのクルマでも生産を可能にし、作業がしやすい製造ラインにするため、バンパーレインがない状態で、エンジンルーム内への作業

*1～3 車両技術部
Painting, Trim & Final Assembly Engineering Dept.

*5 ボデー開発部
Body Development Dept.

*4 車体技術部
Body Production Engineering Dept.

者の立ち入りが可能になる FOE の採用を決定し、マツダでは初めて CX-60 の量産から実施した。

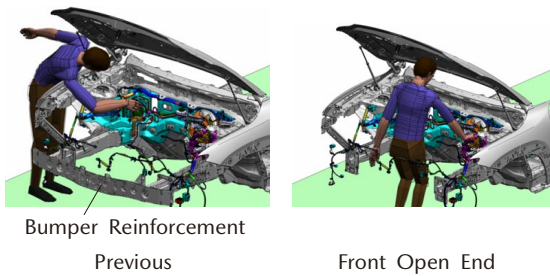


Fig. 1 Working Posture for Assembling Engine Room Parts

3. 魂動デザインの造り込み

マツダの生産技術部門では、お客様への提供価値をものづくりの技術で更に向上させる取り組みを行っている。その一つとして、魂動デザインのねらいである生物のもつ生命感や躍動感の表現、金属から削りだしたかのような塊感を量産車で実現し、これをお客様への提供価値としたクルマづくりを行っている。

魂動デザインの塊感は、バンパーとボンネットなど、隣り合う部品の意匠面に映り込む風景が滑らかに連続し、一枚の面であるかのように感じられる「面の連続感」(Fig. 2) と、部品間に存在する分割線に視線が留まった際に、作り方が想像できないほど細部の精緻さを感じさせる「精緻感」(Fig. 3) で表現できると考えている。従来車種では「面の連続感」を向上させるため、光の反射方向を左右する“法線ベクトル”を管理指標として、造り込みを行ってきた⁽¹⁾。



Fig. 2 Continuity in Surfaces

Gaps Between Parts Are Uniform and Narrow



Fig. 3 Exquisiteness

CX-60 では、「面の連続感」に加えて「精緻感」の取り組みを行い、魂動デザインの塊感の更なる向上をねらった。そのためには、バンパー等外装部品の組み付け精度向上とともに外装部品の位置決め基準となるボディー部品の位置精度を向上する必要がある。

従来のボディー構造は、バンパーレインを基準として部品を介して外装部品の位置決め機能を設定していたが (Fig. 4)、位置決め基準を一点集中させる構造にし、その基準部品の位置精度を高めるアプローチに変更した (Fig. 5)。CX-60 では、シュラウド UP メンバーに位置決め機能を集中させ、フロントボディー左右を連結するキーパーツとして、FOE 化に対応しつつボディー精度の向上を図った。また、シュラウド UP メンバーを高い精度で位置決めするため、シンプルなストレート断面にし、ボディーへの接合時にばらつきを抑制できるようにした (Fig. 6)。

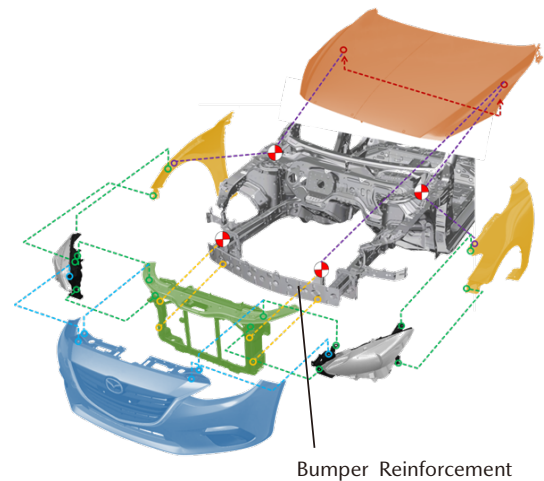


Fig. 4 Previous Concept of Assembly

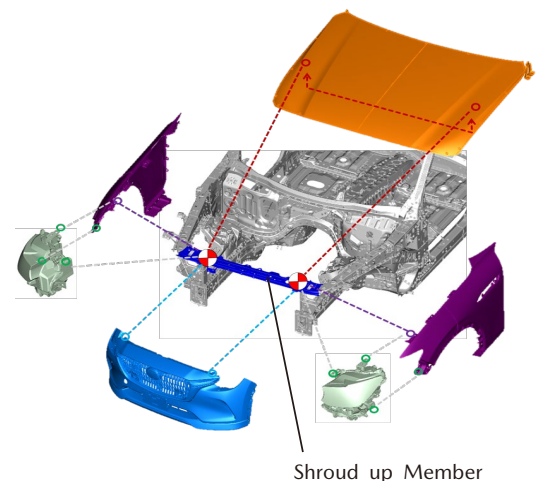


Fig. 5 New Concept of Assembly



Fig. 6 Structure of Shroud up Member

4. FOE における課題

FOE 化に向け、バンパーレインは車体組立工程から車両組立工程での組み付けに変更し、シュラウド UP メンバーは、車両組立工程のエンジンルーム内作業の前に一度外し、作業完了後に再組み付けする工法にした (Fig. 7)。ただし、シュラウド UP メンバーを一度外す際に応力が解放されることでフロントフレーム間のピッチが変化する懸念があり、車両組立工程ではシュラウド UP メンバー取り外しから再組み付けの前後でいかにピッチ変化を抑えるか、そして車体組立工程では FOE 状態でピッチ変化を抑制する構造、工法の開発が課題となった。

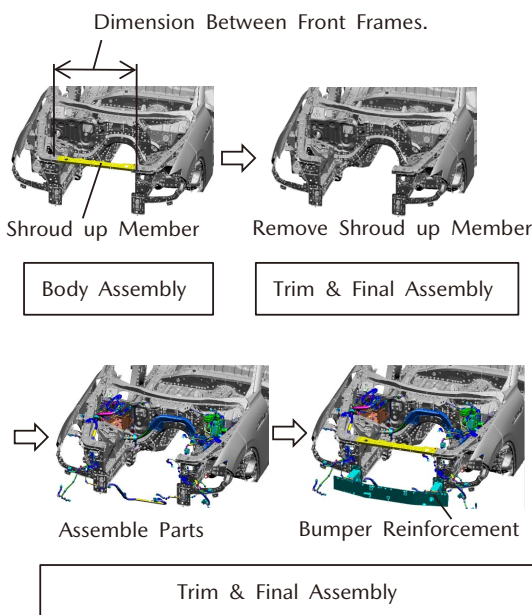


Fig. 7 CX-60 Front Open End

5. 課題解決の取り組み

5.1 構造面での取り組み

車両組立工程でシュラウド UP メンバーを再組み付けする際、取り外す前の寸法を再現するため、シュラウド UP メンバーの左右端に位置決めピンを設定した。位置決めピン先端には斜めのガイド形状を設定してシュラウド UP メンバーを組み付ける下方向の荷重を横方向の荷重に変換し、変化したピッチを元に戻す構造とした (Fig. 8)。

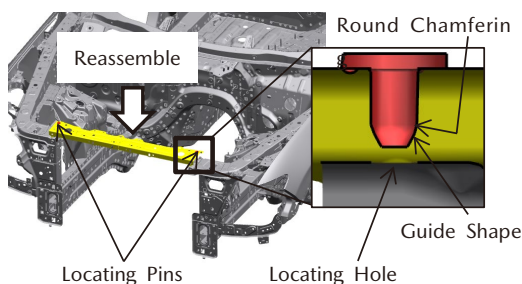


Fig. 8 Locating Pins of Shroud up Member

この構造では、ボディーが変化しようとする荷重を受けても、位置決めピンやシュラウド UP メンバーが変形しないような強度に設計する必要がある。そこで、左右の位置決めピン同士をストレート断面でつなぎ、1 部品で必要な強度を確保できるようにした上で、CAE 解析にて確認を行った (Fig. 9)。ストレート断面でつなぐ考え方は、車体剛性を高めることにも貢献している。加えて、シュラウド UP メンバー再組み付け時の挿入力を考慮し、位置決めピンのガイド形状や R の大きさを試作品にて検証し、最適な形状を織り込んだ。これらを実機で検証し、シュラウド UP メンバーの再組み付けにより、取り外す前の寸法を再現できることを確認した。

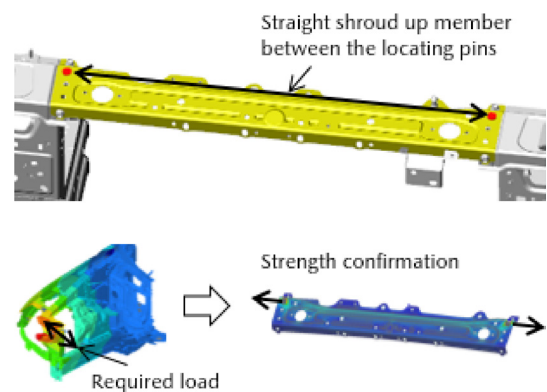


Fig. 9 Strength of Shroud up Member

5.2 フロントフレーム間ピッチの寸法精度保証の取り組み

量産の組み付け作業において、シュラウド UP メンバーを再組み付けするためには、左右端の位置決めピン挿入力を 50N 以下に抑制する必要がある。机上シミュレーションにより、目標とした位置決めピン挿入力を達成するためには、シュラウド UP メンバー取り外し前後のフロントフレーム間ピッチ変化を 0.9mm 以下に抑制する必要があることを導き、ボディーの寸法精度目標として設定した。

ボディーを製作する車体組立工程では、300 点以上の部品を基準ピンや基準面といった位置決め治具で拘束し、4000 点以上の溶接打点でつなぎ、ボディーを組み立てる。部品間の接合面に干渉や隙間があると、溶接による接合時に内部応力が発生し、位置決め治具の拘束を解いた際に応力解放により元位置を保てず、寸法精度の変化を生じる。フロントフレーム間のピッチ変化を抑制するためには、部品間の干渉や隙間による寸法精度変化を最小化できる溶接打点順番、位置決め治具の基準ピンや基準面 (以下、加工基準) 位置などの良品条件の検討が必要となった。

フロントフレーム間のピッチが決まるフロントボディー工程において、溶接打点 a と b は Part-A と Part-B の相対位置関係を決める溶接打点であるため、接合面の隙間を想定し、溶接打点順番の検討を行った (Fig. 10, 11)。Fig. 12 がその一例として溶接打点順番の差異によ

る結果を CAE 解析で比較し接合前後の寸法精度変化をカラーマップに表したものである。溶接打点後のフレーム後端（赤枠 1）の寸法精度変化量に 0.5mm の差があり、それによって、フレーム先端のシュラウド UP メンバー接合部（赤枠 2）で 0.3mm 寸法精度変化することが分かった (Fig. 12 (2))。そのためにフロントフレーム間ピッチ変化に影響の少ない溶接打点順番 (1) a→b を採用した。

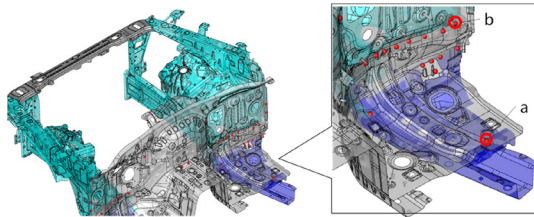


Fig. 10 Parts Condition and Spot-Welding Point

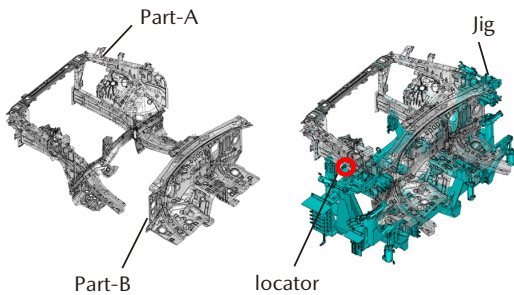


Fig. 11 Example of the Underbody Process

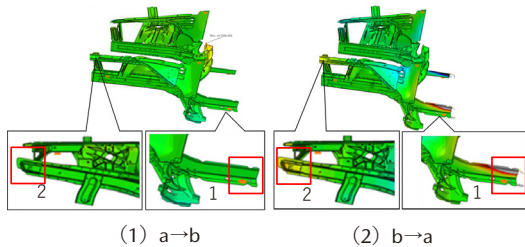


Fig. 12 Verification Result of Welding Sequence

また、加工基準について、フロントフレームの重心位置の影響で、従来設定した加工基準では部品が外側へ傾き、フロントフレーム間ピッチを変化させることが CAE 解析から分かった (Fig. 13 左図の赤枠)。そこで、フレームの傾き補正を考慮した加工基準を設定することにより、接合前後で寸法精度の変化が 0.1mm 以下となることが確認できた。その結果に基づき、決めた加工基準を工程設計に織り込んだ (Fig. 13)。

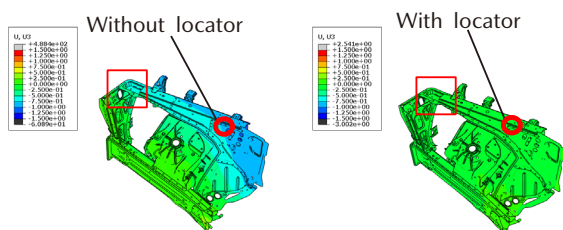


Fig. 13 Verification Result of Locating Concept

このように、FOE 化に向けたボディー精度保証の課題について、机上段階で対策・検証を実施した良品条件を設定し、実機確認によりその確からしさを確認することができた。その結果フレーム先端左右ピッチの変化を抑制し、シュラウド UP メンバー再組み付け時の位置決めピン挿入力の目標を達成できた。

以上、構造面の取り組み及び、ボディー寸法精度の造り込みにより、FOE の精度保証が可能となった。FOE の実現により、以下 3 点の効果を得られた。

- ①腰曲げ作業廃止による作業性向上
- ②作業性向上により可能となった部品一体化によるコスト低減
- ③作業効率向上

6. 外観品質向上の取り組み

CX-60 では、FOE 化によるボディー構造の進化を活用し、クルマの顔ともいえるフロントエンドのボンネットとバンパー合わせ部の隙を従来よりも狭くし、精緻な外観品質を目標とした。

従来のボンネットとバンパーの合わせ部では、部品の固定基準から外観の合わせ部までの寸法公差を積み上げると部品公差の集合体となるため、部品合わせ部の隙については製造上、大きくせざるを得なかった。そこで、バンパーの位置決め機能を集約させた部品を使い、車両組立工程でばらつきをキャンセルする工法を開発することで、従来よりも隙を 15% 縮小し、外観品質向上を図った。

具体的な手法は、バンパー位置決め機能を集約した鉄板部品（以下、バンパーブラケット）をボンネット先端基準で位置決めする治具を新規開発し、ボンネットとバンパーの隙をコントロール可能とした (Fig. 14)。治具の構想は、Fig. 15 に示すバンパーの上下方向の基準となるバンパーブラケット_A を治具_1 で取り付け後、Fig. 16 に示すバンパーの前後方向の基準となるバンパーブラケット_B を治具_2 により、ボンネット先端基準で位置決めすることとした。

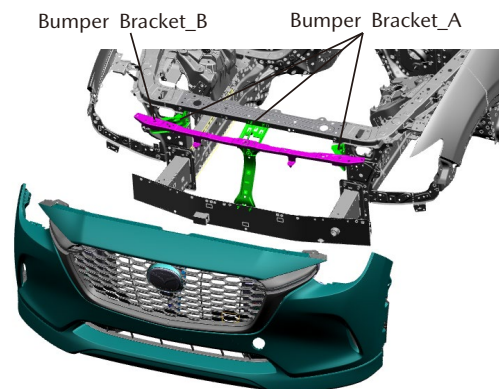


Fig. 14 Structure Around Bumper

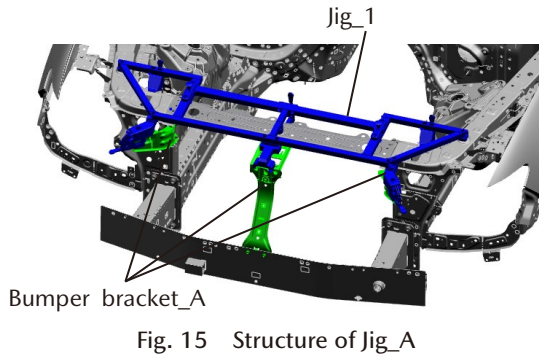


Fig. 15 Structure of Jig_A

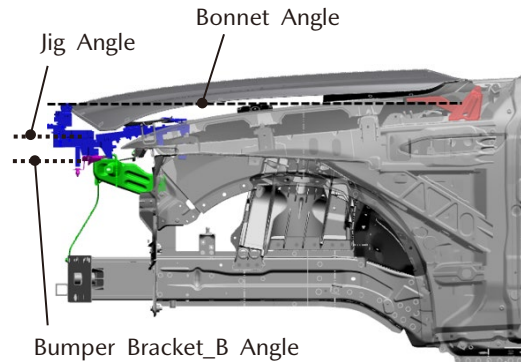


Fig. 17

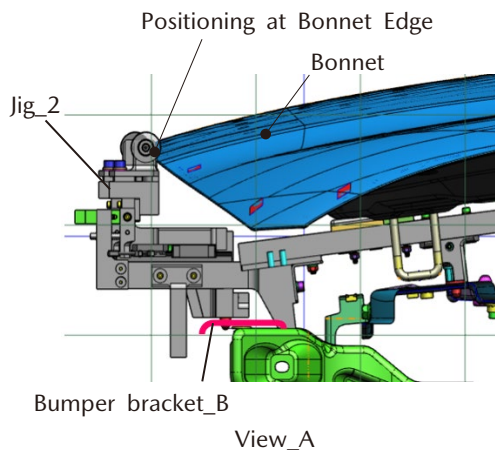
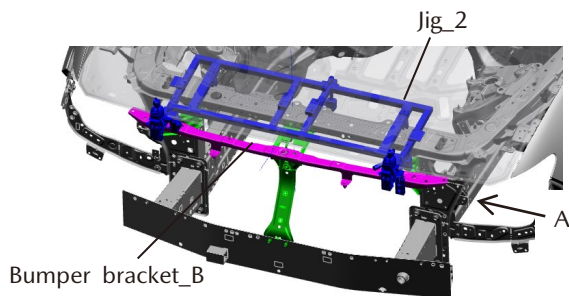


Fig. 16 Structure of Jig_B

前述した治具の位置決め精度に対しては、剛性や治具の組み付け再現性が非常に重要となる。そこで治具の着脱作業プロセスに沿ってCAE解析を行い、取り扱いや治具セットに起因する変形がないことを確認した。

中でも、特に重要なポイントは治具の姿勢であった。僅かな治具の回転により、バンパーブラケットの組み付け位置がねらいからずれるため、治具をセットするボディー面のばらつきが治具姿勢に与える影響の検証や、治具のセット位置が安定するクランプ位置の検証を行った。重心、基準点数及び、位置を考え、さまざまな治具形状を検討して最適な形状に決定した。また、ボンネット先端基準でバンパーブラケット_Bを位置決めする際、バンパーブラケット_B、ボンネット開度及び、治具のセット方向を合わせることで、角度差をなくして位置決め精度を出せる設計とした (Fig. 17)。

以上の取り組みにより開発した治具をCX-60の量産に導入し、ねらいどおりの位置にバンパーブラケットを組み付けることが可能となった。

7. 結果

CX-60ではボンネットとバンパーの合わせ部の隙について、前モデルの隙より15%縮小することを達成でき、より精緻な外観品質を実現できた。また今回FOEの導入によりエンジンルーム内の部品組み付け時に発生する腰曲げ作業が従来は74作業あったが、CX-60では廃止でき、作業時間も部品一体化が可能になった8部品について24%向上した。これにより生産現場の働きやすさと作業効率の向上を実現できた。

8. おわりに

魂動デザインの更なる向上と、生産現場での働きやすさについて、開発、生産技術及び、製造の部門横断で総力を挙げて取り組むことで、成果を上げることができた。今後も更なる魂動デザインの深化を工程・工法の変革で具現化し、お客様へ感動を提供し続けるための技術開発を継続していく。

参考文献

- (1) 田中慶和ほか：「魂動」デザインを際立たせる“面の連続感”実現の取り組み、[マツダ技報, No.34, pp.93-98 \(2017\)](#)

■著者■



高田 有弘



川合 敏之



崎田 亮



王 強



川野 晃寛

論文・解説

29

MAZDA CO-PILOT CONCEPT 技術試作車の紹介

Introduction of Technology Prototype Vehicle Based on Mazda Co-Pilot Concept

栃岡 孝宏 ^{*1} Takahiro Tochioka	山本 康典 ^{*2} Yasunori Yamamoto	岩下 洋平 ^{*3} Yohei Iwashita	菅野 崇 ^{*4} Takashi Sugano	藤原 由貴 ^{*5} Yoshitaka Fujihara
高橋 英輝 ^{*6} Hideki Takahashi	岩瀬 耕二 ^{*7} Koji Iwase	桑原 潤一郎 ^{*8} Junichiro Kuwahara	吉岡 透 ^{*9} Toru Yoshioka	田内 一志 ^{*10} Kazushi Tauchi

要約

マツダは、クルマを自ら運転することで元気になっていただきたいと考えている。そして、自分らしく心豊かな人生を送っていただきたい。だからこそ、万が一の事故を着実に減らしていくために、MAZDA CO-PILOT CONCEPTを開発した。ドライバーが元気に運転できている時には、人間の認知、判断、操作能力を発揮して、運転を楽しんでいただく。システムは常に副操縦士（CO-PILOT）のように人の状態を見守る。MAZDA CO-PILOT CONCEPTは、高齢者から若年ドライバーまで、常にドライバーの状態を見守り、一般道から高速道まで場所を選ばず機能することで、ドライバーが原因となる事故の削減、被害軽減に貢献する。これにより、ドライバーや同乗者だけでなく、ドライバーを送り出す家族や周囲の人々への安心をも提供できると考えている。本稿では、MAZDA CO-PILOT CONCEPTに基づく技術試作車について紹介する。

Abstract

Mazda wants people to feel energized by driving a car and also lead a rich life by being true to themselves. That is why we have developed the Mazda Co-Pilot Concept as one of the solutions to steadily reducing the number of accidents. When drivers are in normal condition, they can enjoy driving with their own recognition, judgment, and operation. The vehicle watches over drivers' condition like a co-pilot behind the scenes. The Mazda Co-Pilot Concept contributes to reducing accidents caused by drivers and mitigating damages, by monitoring the human condition, whoever the driver may be, anytime and anywhere including general roads and highways. Mazda believes that it can provide peace of mind not only to the drivers but also to their family and those around them. This article introduces a technical prototype vehicle developed based on the Mazda Co-Pilot Concept with its technologies being developed in various driving settings.

Key words : Advanced safety technology, Advanced driver assistance system, Autonomous driving technology

1. はじめに

マツダのブランドの核となるのは「走る喜び」である。クルマを運転することで、全てのドライバーに毎日いきいきと過ごしていただきたいと考えている。

安全技術においても、クルマづくりを貫く「人間中心」の考え方にに基づき、ドライバーを理解・信頼・尊重し、ドライバーが安全運転できる状態を最大限確保する中で

事故リスクの発生自体を抑制する安全思想「MAZDA PROACTIVE SAFETY」に沿って技術開発を行ってきた。

そして「安心・安全なクルマ社会」の実現に向けた「人間中心」の安全技術のビルディングブロックの3つめとして、高度運転支援技術のコンセプト「MAZDA COPILOT CONCEPT（マツダ・コ・パイロット・コンセプト）」を新たなブロックとして積み上げた（Fig. 1）。

*1,10 技術企画部
Technology Planning Dept.

*3 開発調査部
Technical Research Dept.

*2,4~9 統合制御システム開発本部
Integrated Control System Development Div.

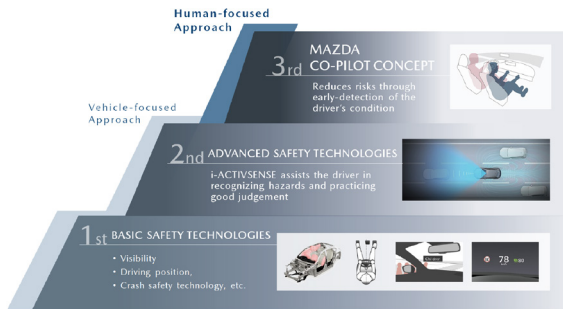


Fig. 1 Building Blocks toward the Realization of an ‘Accident-Free Society’

CO-PILOT とは、「飛行機の副操縦士」を意味する。副操縦士のように、一人で運転していても、もう一人の優れたドライバーが、いつも横で寄り添ってくれている。それにより、ドライバーは心から安心し、いつも自信を持って運転を楽しむことができる。MAZDA CO-PILOT CONCEPT は、機械が完全に人間に代わって運転するのではなく、あくまで「人による運転」をサポートする技術である。本稿では、MAZDA CO-PILOT CONCEPT とそれに基づく技術試作車 (Fig. 2), 及び主な構成技術について紹介する。



Fig. 2 Technology Prototype Vehicle Based on MAZDA CO-PILOT CONCEPT

2. 「安心・安全なクルマ社会」実現に向けた課題

死亡重症事故件数は年々減少している (Fig. 3)。しかし、安心・安全なクルマ社会の実現には多くの課題がある。例えば、78%のドライバーが運転中に眠気を感じているとのデータがある (Fig. 4)。重大事故の潜在的な要因として、この「眠気」が関与している可能性がある。また、周囲を巻き込むような重大事故につながりやすい、ドライバーの運転中の発作・急病などの体調急変による事故件数は増加を続けている (Fig. 5)。特に高齢ドライバーの疾患・体調急変による重大事故は大きな社会問題になっている。更に、発作・急病などの体調急変は、その 95.8%が速度 60 キロ以下で発生している (Fig. 6)。

従って、事故を減らすためには、このようなドライバーの体調急変や眠気に対応する技術が必要であり、対応する安全技術は、高速道路や自動車専用道路だけでなく、一般道路もカバーする必要がある。

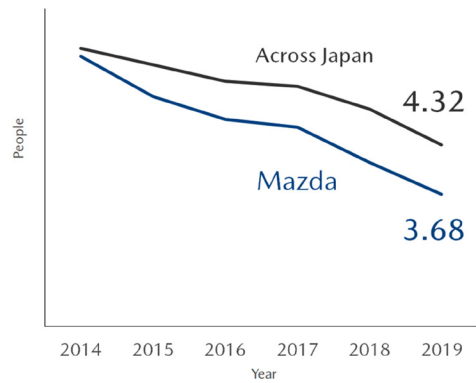


Fig. 3 Number of Deaths and Serious Injuries Per 10000 Units (Passenger Vehicles in Japan)
Source: Mazda’s Analysis Based on 2020 Research from Institute for Traffic Accident Research and Data Analysis

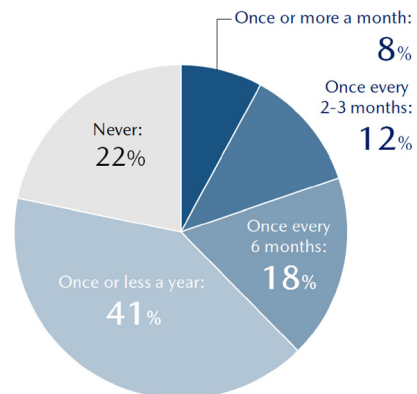


Fig. 4 Frequency of Drivers Feeling Drowsy when behind the Wheel
Source: Data Compiled by Mazda Based on the March 2015 Report on Public Countermeasures to Prevent Drowsy Driving on the Highway

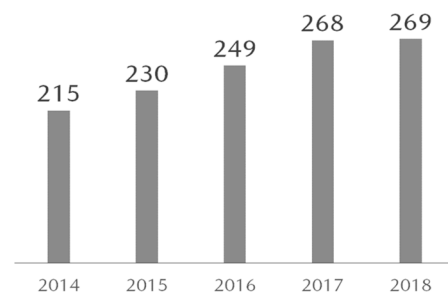


Fig. 5 Road Accidents Caused by Sudden Illness
Source: Road Traffic Statistics from Institute for Traffic Accident Research and Data Analysis (Public Interest Incorporated Foundation in Japan)

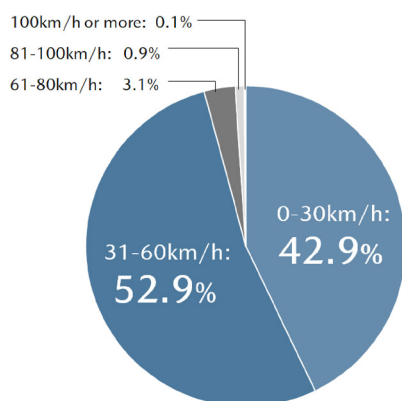


Fig. 6 Estimated Speeds for Accidents Caused by Sudden Illness

Source: Road Traffic Statistics from Institute for Traffic Accident Research and Data Analysis (Public Interest Incorporated Foundation in Japan)

3. MAZDA CO-PILOT CONCEPT について

3.1 提供価値

ドライバーの“状態”によるリスクを低減することは、人の能力を最大限に引き出すことにもつながり、走る喜びを支える。

MAZDA CO-PILOT CONCEPTは、高齢者から若年ドライバーまで、常にドライバーの状態を見守り、一般道路から高速道路まで場所を選ばず機能することで、ドライバーが原因となる事故の削減、被害軽減に貢献する。それは、ドライバーや同乗者だけでなく、ドライバーを送り出す家族や周囲の人々への安心も提供できると考えている。

3.2 基本機能

(1) ドライバーが通常の運転をしている時、(2) ドライバーに異常が発生した時、(3) ドライバーが運転出来ないと判断された時の3つの基本機能がドライバーの状態に応じて(1)~(3)の順に作動する。

(1) ドライバーが通常の運転をしている時

ドライバーが通常の運転をしている時は、ドライバーの状態を常にモニタリングし、姿勢の崩れ、視線や頭部の挙動、そして、ハンドルやペダルの操作をセンシングし、総合的にドライバーの状態を検知し、運転が継続できるか判断している (Fig. 7)。

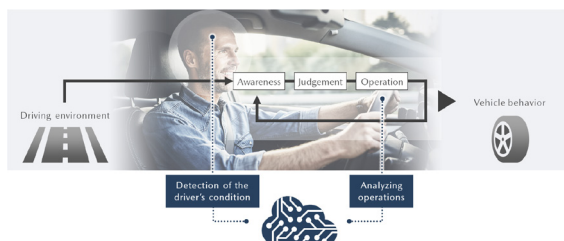


Fig. 7 Monitoring the Driver's State of Being and the Driver's Operations

(2) ドライバーに異常が発生した時

体調急変や眠気に襲われ、意識を失ってしまうなどのドライバー異常を検知すると、ドライバーだけでなく同乗者に対しても、ディスプレイやメーターによる表示、アラームによる警告や音声により、ドライバーの異常を検知したことを乗員に伝え、ドライバーに応答確認を行うと同時に、車線維持・車間維持・緩減速による車両の安定化などの運転支援及び衝突被害軽減機能などを自動で発動し、安全を確保する (Fig. 8)。



Fig. 8 Driver Assistance to Ensure a Safe Condition

(3) ドライバーが運転出来ないと判断された時

ドライバーが運転を継続できないとシステムが判断した場合は、クルマを安全に停車させた上で、必要に応じて緊急通報を自動で実施する (Fig. 9)。



Fig. 9 The System Drives and Deals with the Emergency Instead of the Driver

これらの基本機能がドライバーの状態に応じて順に作動することにより、事故発生リスク・被害を軽減し、早期のドライバーの救護・救命に寄与する。

4. 主な構成技術

4.1 ドライバー状態検知技術

内因性疾患による発作・急病などの体調急変や眠気・居眠りなど、ドライバーの状態に起因する事故発生リスクを軽減するため、システムが常にドライバーを見守るのがドライバー状態検知技術である。

2015年から車両のふらつきを統計的に判定することで運転操作のリスクを推定する機能を商品導入した。2019年に市場導入したMAZDA3以降は、ドライバーモニタリングカメラにより、視線・顔向きから判定する脇見検知、瞼の動きなどから眠気を判定する眠気検知を商品化し、ドライバーが要因となるリスクの低減に取り組んできた。

一方、ドライバーの意思では防ぎきれない運転中の体

調急変については、発作や疾患に伴う内因性事故の症例を分析した結果、脳機能の低下として症状が出る4疾患(てんかん、脳血管疾患、低血糖、心疾患)が事故の症例の約90%を占めることが分かった。そしてこれらに共通する症状である脳機能の低下を理解し、運転を継続できない状態になるリスクを、姿勢の位置・角度、視線や頭の動き、ステアリングやブレーキなどの運転操作から推定する技術に取り組んだ (Fig. 10)。また、居眠りを閉眼状態から判定する技術も積み上げた。



Fig. 10 How the System Monitors the Driver's Condition

(1) ドライバー異常検知技術

脳機能の低下の生じ方は、急激に運転機能が低下するケースと、徐々に運転機能が低下するケースと大きく2つに分かれる。

急激に運転機能が低下するケースにおいては、急激かつ全般的に脳機能が低下して意識消失に至る。このようなドライバー異常を検知する機能としては、意識が消失して運転姿勢が崩れた状態、及び閉眼が継続した状態を検知する。

姿勢崩れは、ステアリングを把持できていない状態や頭部の動き、姿勢の位置・角度から判定し、閉眼は、まぶたの開き度合いから閉眼状態を検知する。

(2) ドライバー異常予兆検知技術⁽¹⁾

徐々に運転機能が低下するケースの多くは、脳の機能がまず低下して、最後には脳幹という生命維持を司る機能が低下する。そのことから、まずは脳が担っている意識的な行動に変化が起こり、次第に脳幹が担っている無意識的な反応のみが残る。こうした人の内部の変化メカニズムに基づけば、異常の予兆を検知できると考えた (Fig. 11)。

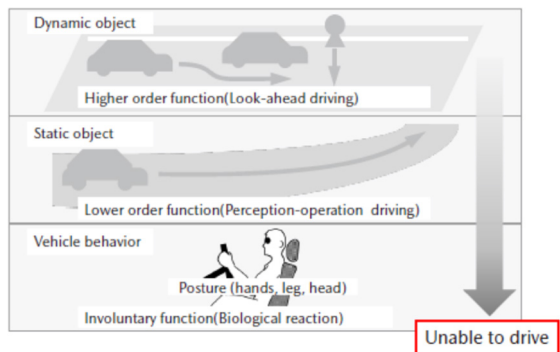


Fig. 11 Driving Functions

具体的には、以下 a, b, c, の3つのパラメーターで検知する。

a. 運転操作

運転操作は意識的な行動として見ているもので、その人の普段の操作から逸脱していないかという考え方に基づき、その人の運転シーンに応じたハンドルやペダル操作の予測値と、実際の運転操作の乖離度合いで推定する。

b. 頭部の挙動

頭部の動きについては、無意識的な行動変化として、正常な振動パターンから逸脱していないかという考え方に基づき車両挙動に応じて生じる顔向きの振動パターンの変化で推定する。

c. 視線挙動

視線挙動については、意識的・無意識的両方の側面があり、特定の箇所への視線の偏りが生じていないかという考え方に基づき、単に視線の動きを見るだけでなく、視覚的な情報を脳がどう感じているかをモデル化し、交通環境の変化に対する視線の動きと脳の反応モデルを組み合わせて推定する。

原理的に、人の視線挙動には、意識的に注意を向ける行動と、無意識的に注意が引かれる行動がある。

前者では、ドライバーが危険を予測したところに視線を向ける行動やミラーやメーターを確認する行動が該当し、後者では、色や輝度、動きなど、視覚的に目立つところに視線が向く行動が該当する。通常は、この2つがバランスを取りながら視線を動かしていると考えられる。

しかし、脳の機能低下が生じると、まずは脳の機能低下が生じ、意識的な視線挙動が消失し、無意識的に注意が引き付けられやすいところに視線が偏ってしまうと考えられる。この状態をとらえるためには、注意が引き付けられる箇所を特定する必要がある。そこで脳科学の知見を取り入れ、脳内の視覚情報処理のメカニズムを計算モデルに置き換え、運転中どこに注意が引き付けられやすいかをリアルタイムに特定可能なアルゴリズムを開発した。この注意の引き付けられやすさをサリエンシーと呼び、空間上に配置したものをサリエンシーマップと呼ぶ (Fig. 12)。

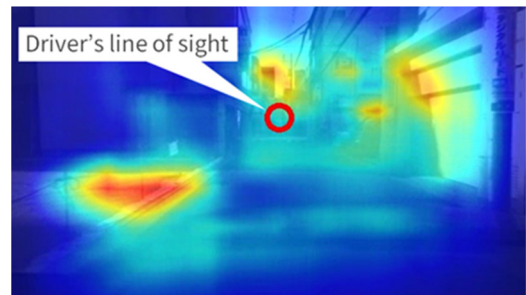


Fig. 12 Visualization of Visual Attention Characteristics by Saliency Map

ドライビングシミュレーターを用いて、健常者と脳疾患の患者から運転中の視線挙動のデータを取得した結果、健常者はサリエンシーの高いところだけでなく、周囲に視線を配っていた。一方で、脳疾患の患者は、運転に全く関係ない、ただサリエンシーの高いところに視線が偏る傾向がわかってきた (Fig. 13)。

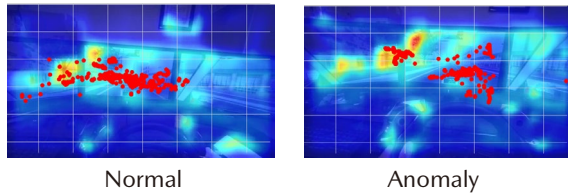


Fig. 13 Gaze Distribution of Normal and Anomaly

この傾向を使い、車両の前方をセンシングするカメラの情報からサリエンシーマップを生成し、ドライバーモニタリングカメラから得られたドライバーの視線を重ね合わせ、脳の異常発生時に受動的に注意が引かれる箇所へ視線が偏る変化をとらえ、ドライバーの異変をいち早く検知する。

運転中の速度増加に伴い有効視野が低下することや、ドライバーはリスク対象を見つけた場合その対象へ注意を残しつつ他の対象にも注意を向けて周辺状況を把握する。これらのことも考慮してモデルを構築した。

なお、交通環境のリスクの高さは自動走行の経路生成でも用いられるリスクポテンシャル (Risk potential method) で定量化している。

4.2 ヒューマン・マシン・インターフェース

ドライバーが運転を継続できなくなった場合、同乗者がパニックや不安になることが想定される。不安をできる限り解消し、システムの制御に安心して任せられることをねらいに、制御介入後のメーター、ディスプレイの表示や音声案内を作り込んだ (Fig. 14)。



Fig. 14 HMIs for Communicating with Passengers

同乗者が安心感を抱くには、2つの機能が必要だと考えた。

一つは、システムの作動状況が分かることである。具

体的には、バックアップとして待機していたシステムが、ドライバーの異常を検知して起動する際に、「ドライバーの異常を検知しました」という表示と音声案内で示し、それと同時にクルマに神経が宿り表出する様子をデザインし、制御が発動したことをアニメーションで示している。システム作動中は常にオレンジ色の輪環が回りながらクルマの周りを囲んでおり、クルマと乗員を守り続けている様子を伝えている。また、「赤信号を検知して停車する」などの状況判断をシステムから伝えている。

二つめは、同乗者が先を予測できることである。数秒先に何が起こるか、システムがどう動こうとしているかを表示と音声案内であらかじめ伝えている。具体的には、「車線変更します」「安全な場所へ移動します」「停車します」などをあらかじめ伝えた上で、同乗者の予測に符合した制御を実行している。

これらにより、同乗者にとって安心感の高いインタラクションを実現している (Fig. 15)。



a) Inform Passengers that the Driver's Abnormality was Detected



b) Inform Passengers that the Vehicle will Stop

Fig. 15 Reassuring Interactions

4.3 ドライバー異常時退避技術

MAZDA CO-PILOT CONCEPT 技術試作車は、高速道路/自動車専用道路では、車線変更して路肩や非常駐車帯などに移動する。一般道路では車線変更し、路肩等の安全な場所を探索し退避する技術を搭載している。特に一般道路では、路上駐車車両を避ける、赤信号の交差

点への侵入を回避する、自転車・歩行者を検知して停車するなど、同乗者や周囲の交通参加者にも安心できる車両の動かし方や、安全上ベストエフォートと感じられる停車を目指した。

ベース車両である MAZDA3 に対して、追加したセンシングデバイスを示す (Fig. 16)。

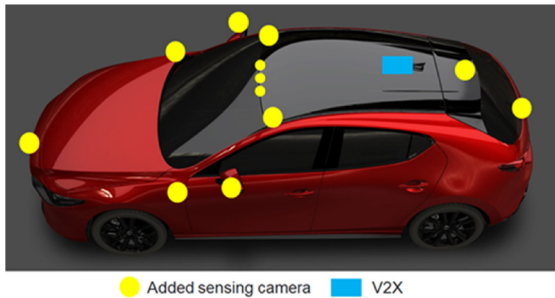


Fig. 16 Device that Realizes Advanced Driving Assistance

追加したカメラは合計 12 台である。一般道路において、他車両を検知しながら車線変更する機能、安全に停車できる場所を自律で探索する機能、道路端から脱出・救護のスペースを空ける精度の高い路肩退避機能、路上駐車車両を避ける機能、赤信号の交差点への侵入を回避するための信号検知機能、自転車・歩行者を検知して停車する機能などを実現するために、これらのカメラを用いて認識性能を向上させている。また高精度な自己位置推定を行うため、12 カメラを使って取得した画像を重ねあわせて学習させていくことで、運転支援に使える地図を自前で生成する機能も実装した。

追加した V2X の機能は、主に信号機より受信した信号切り替えタイミング情報を用いてジレンマゾーン（システムが進むべきか停止すべきか迷う状態）を解消する制御に活用している。

(1) 走行環境の特徴を利用した危険予測技術⁽²⁾

走行環境から潜在的危険を予測する技術として、他車の車線変更予測と、歩行者や自転車の飛び出し予測について開発してきた。

a. 他車の車線変更予測技術

従来の車線変更予測では、予測対象とする他車の予備動作や周辺車両との車間距離から車線変更を予測したが、予測対象が車線変更を決断する車間ギャップのモデル (Fig. 17) を応用することで、実際に車線変更を行う 2.0 秒前の予測が可能となり、他車の横方向からの衝突を回避可能とする目途が付いた。

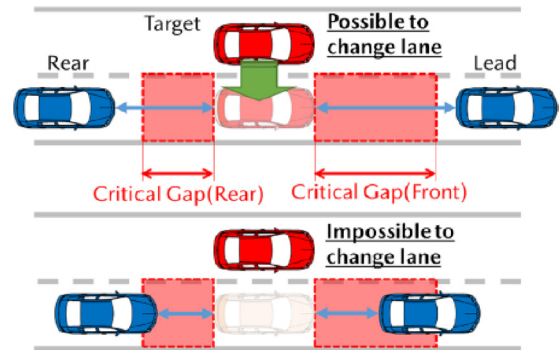


Fig. 17 Gap Acceptance Decision Model

b. 歩行者や自転車の飛び出し予測技術

飛び出し予測では環境の危険度を予測する先行研究があるが、飛び出す対象をあらかじめ把握する必要があった。そこで、飛び出すのが歩行者か自転車かを一方通行やビルの壁、歩道の有無などの環境特徴から予測する技術の研究に取り組んだ (Fig. 18)。



Fig. 18 Context Example
(Priority/Non-Priority, Road Width, etc.)

統計的に説明可能なモデル化を進めることで、環境特徴が歩行者、自転車の行動に影響を与えることが明らかになった。

環境特徴から飛び出してくるのが歩行者か自転車かを判別する機能を開発し、予測性能の向上の目途が立った。MAZDA CO-PILOT CONCEPT 技術試作車は、さまざまな交通環境でのデータ取得や実証実験を行っている (Fig. 19)。実走行環境の検証を積み重ねることで、優れた環境適合性を備えた技術に改良していく。

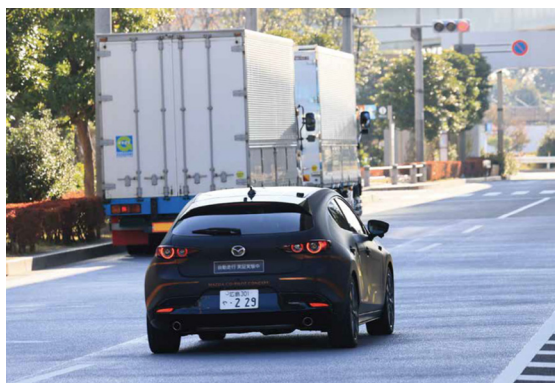


Fig. 19 MAZDA CO-PILOT CONCEPT
Technical Experience Meeting @ Odaiba (2021)

5. おわりに

本稿では、MAZDA CO-PILOT CONCEPTに基づく技術試作車と主な構成技術について紹介した。MAZDA CO-PILOT CONCEPTの実現は、安心していつまでも運転を続ける環境を作り出し、運転を続けることで人の心と体の健康維持や生活の質向上につながると考えている。

これからも全ての人に安心・安全な「走る喜び」を提供することで、お客さまの人生をより豊かにし、お客さまとの間に特別な絆を持ったブランドになることを目指していく。

参考文献

- (1) 桑原潤一郎ほか：視認行動と運転操作に基づくドライバー体調急変の早期検知技術，[マツダ技報](#)，[No.38](#)，pp.91-97 (2021)
- (2) 菅野崇ほか：走行環境の特徴を利用した危険予測技術，[マツダ技報](#)，[No.38](#)，pp.98-104 (2021)

■ 著 者 ■



榎岡 孝宏



山本 康典



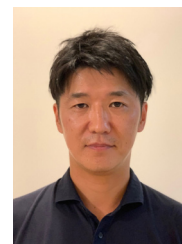
岩下 洋平



菅野 崇



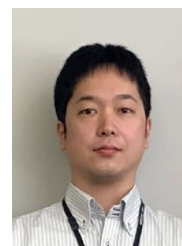
藤原 由貴



高橋 英輝



岩瀬 耕二



桑原 潤一郎



吉岡 透



田内 一志

論文・解説

30

CX-50 Mazda intelligent Drive Select の開発 Development of Mazda intelligent Drive Select for CX-50

今村 泰理^{*1} 梅津 大輔^{*2} 藤岡 陽一^{*3}
Yasumasa Imamura Daisuke Umetsu Yoichi Fujioka
松尾 純太郎^{*4} 諸川 波動^{*5} 延谷 尚輝^{*6}
Juntaro Matsuo Hado Morokawa Naoki Nobutani

要 約

CX-50 は、お客様にとって自信をもたらし、自然へと赴く冒険の相棒となってくれる存在になることを目指して開発した。今回、オンロードでの人馬一体の走りはそのままに、オフロードの多種多様な路面においても、高いコントロール性による安心・安全の走りを提供すべく、さまざまな走行シーン、環境でも人馬一体の走りを提供する新たに複数のドライブモードとその切り替えシステムである Mazda intelligent Drive Select (Mi-Drive) を開発した。本稿では、Mi-Drive システムと各ドライブモードに関する技術を述べる。

Abstract

The CX-50 was developed with the aim of giving customers confidence and becoming their partner in adventures in nature. In order to realize safe and secure driving performance with high controllability on any off-road surfaces while maintaining Jimba-Ittai performance (oneness between car and driver) on-road, we have developed new multiple driving modes and the switching system, Mazda intelligent Drive Select (Mi-Drive). The system delivers the Jinba-Ittai driving performance regardless of driving scenes and environment. This paper reports on the technologies of the Mi-Drive system and each driving mode.

Key words : Electronics and control, Transmission control, Chassis control, Control system, Vehicle dynamics, Driving stability, Human machine Interface display

1. はじめに

CX-50 は、マツダのデザインテーマ「魂動（こどう）-SOUL of MOTION」のエレガントな上質感と SUV に求められる力強さとタフな機能性を融合させた、自然の中でも際立った存在感を放つクロスオーバー SUV である (Fig. 1)。ガソリンターボエンジン「SKYACTIV-G2.5T」もしくはガソリンエンジン「SKYACTIV-G2.5」に全車「i-ACTIV AWD」を組み合わせ、マツダの SUV 共通の提供価値であるオンロードの人馬一体の走りはそのままに、オフロードでも安心な最低地上高と、多種多様な路面における高い走破性を付加することで、お客さまにアウトドアアクティビティを楽しんでいただけるクルマを目指して開発した。



Fig. 1 CX-50

これまでマツダは、近年のアウトドアアクティビティへの需要に応えるべく、悪路でのスタック脱出性を高める「オフロード・トラクション・アシスト」を CX-30 以降の SUV モデルに順次導入してきた。今回、更なる人馬

*1,6 電子基盤開発部
Electronic Platform Development Dept.

*4 車両実験部
Vehicle Testing & Research Dept.

*2,3 操安性能開発部
Chassis Dynamics Development Dept.

*5 プロダクションデザインスタジオ
Production Design Studio

一体の領域拡大を目指して、マツダ独自の技術をあらゆる環境/走行シーンで提供する新たなドライブモード「OFF-ROAD」、「TOWING」を開発した。更に、それらを統合的に制御してドライバーが直感的に操作選択できるドライブモード切り替えシステム Mazda intelligent Drive Select (Mi-Drive) を開発した。

2. Mi-Drive の概要

2.1 Mi-Drive のコンセプト

日常生活においては、オンロードでの走行が大半を占める。一方、アウトドアアクティビティを楽しむ際には、未舗装路や路面起伏の激しい悪路などさまざまな路面を走行する場合がある。加えて、トレーラーを牽引するシーンでは、トレーラーに起因する荷重状態変化によって車両が不安定になりやすく、ドライバーや同乗者へ不安を与える場合がある。Mi-Drive は、このようなアクティブなライフスタイルを楽しむ際のさまざまな使われ方において、ドライバーに任意のモード選択によってシーンに合わせた最適な走りを提供することを目指した。オンロードでの人馬一体の走りはそのままに、ダイナミクス性能に関わるさまざまな機能を統合して制御する SKYACTIV-VEHICLE DYNAMICS 技術を最大限に活かして、走行条件が大きく異なるそれぞれのシーンに最適化した「人馬一体の走り」を実現することをねらった (Fig. 2)。



Fig. 2 Image of Expanding Jinba-Ittai Performance

2.2 Mi-Drive のシステム概要

今回開発した Mi-Drive は、ドライバーとのインターフェイスに関わる Human Machine Interface (HMI) システムと走行性能に関わる車両運動制御システムと、それらを調停するボディー制御システムの3つのシステムから構成される。HMI システムにはドライバーからの入力を検出して選択モードの情報をドライバーに伝達する機能を配置し、車両運動制御システムには、車両運動に関連する各 ECU に各走行モードに関わる制御機能を配置した。ボディー制御システムがドライバーの入力情報と車両状態からモード調停を行い、HMI システムと車両運動制御システムへ指示を出すことで、各システムが連携してモード切り替えを実現するシステムとした (Fig. 3)。



Fig. 3 Conceptual Image of Mi-Drive

また、今回 CX-50 向けに開発した Mi-Drive には、「NORMAL」、「SPORT」、「OFF-ROAD」、「TOWING」の4つの走行モードを採用した。これらの走行モードは、エンジンや AT、AWD、G-Vectoring Control (GVC)、Traction Control System (TCS) などのさまざまな機能を統合して制御することで車両全体の特性を各モードのニーズに最適化している。各走行モードの概要を以下に示す。

- ・ NORMAL

舗装路での燃費と走行性能のベストバランスを追求したモード

- ・ SPORT

応答性を優先して積極的な走りをサポートし、リニアリティの高い走行性能を実現したモード

- ・ OFF-ROAD

アウトドアシーンにおける未舗装路や深雪等悪路走行時のトラクションを重視したモード

- ・ TOWING

走行時の安定性を最大化し牽引していないかのように楽に運転できる走行性を実現したモード

以降、今回の Mi-Drive 開発において注力した HMI 領域と新たに設定した「OFF-ROAD」と「TOWING」について詳細に説明する。

3. Mi-Drive の HMI

Mi-Drive の HMI は、運転に集中した走行状態でも安全かつ直感的にモード切り替えができるように、シンプルな操作と明確なフィードバックを実現した。更に、走行シーンに応じて積極的にモードを切り替えたいくなる、ドライバーへの走りの期待感醸成を目指し、リッチな視覚効果を実現した。

3.1 直感的でシンプルな操作方法

スイッチのレイアウトは、車両運動制御のスイッチとして容易に想起できるよう、シフトレバー近傍のコン

ソール上に配置した。ドライバーの目線移動を抑えるべく、物理的手掛かりのある前後トグルスイッチとし、スイッチを注視することなく認知、操作が可能な方式を採用した (Fig. 4)。



Fig. 4 Switch of Mi-Drive

トレーラーを牽引しない通常走行状態においては、選択可能なモードは SPORT, NORMAL, OFF-ROAD の 3 モードが選択できる。IG-ON 時は NORMAL モードから開始され、スイッチを前方向に動かすと SPORT モード、後ろ方向に操作すると OFF-ROAD モードが選択され、NORMAL モードに復帰したい場合には、それぞれ逆方向の選択操作を行う。併せて、操作中はメーター画面上に操作を補助するガイドを表示し、操作の方向を確認できるようにした (Fig. 5)。



Fig. 5 List Display to Assist Operation

3.2 注視を必要としないモード識別表示

思い通りの走り性能を実現するためには、環境や走り方に応じてドライバーに適切なモードを選択していただく必要がある。モードの選択ミスやノーマルモードへの戻し忘れを防止するために、メーターを注視しなくとも現在のモードを瞬時に把握できる表示を目指した。ドライバーが周辺視で認知しやすい光刺激の輝度と面積の関係を実験的に求め、各モードのグラフィックに反映した。

3.3 リッチな視覚効果

CX-50 の Mi-Drive HMI は、「心のスイッチを切替える」をテーマに開発を行ってきた。その中でも特にメーター Graphical User Interface (GUI) はユーザーのスイッチ操作と連動し、一目でモードごとのドライバビリティを想

起させ、気分を高揚させたりあるいは安心させるビジュアルコミュニケーションをテーマにメーターインターフェイスのデザイン開発を行った。具体的には以下に挙げる 2 つの静的・動的な情報伝達表現となる。

(1) 配色計画とビジュアルアイデンティティ

モードごとに変化する色彩要素を周辺視や主たる計器要素に集中させ、光刺激要件を効果的に達成させながらも煩わしさに配慮した。また、配色はモードごとに明快に色と質感を差別化し、走行シーンを想起させるグラフィックとした。例えばオフロードモードでは、褐色とグレーのキーカラーを凹凸ある色面で構成し、未舗装の悪路も逞しく走り抜ける力強さを表現している。これらを展開車種で一貫した表現様式に規定することで、ドライバビリティの変化という機能的価値にビジュアルアイデンティティ (ブランドの価値やコンセプトを可視化) という意味的価値を付与した (Fig. 6)。

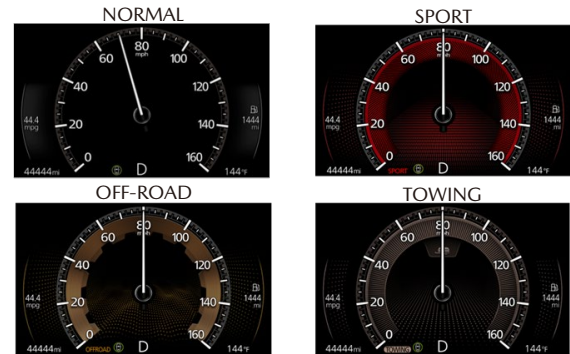


Fig. 6 Graphics for Each Mode

(2) 特徴的なアニメーションによる高揚感の醸成

操作補助として用意されているメニューリストとセットで、走行モードごとに走り味の変化を想起させる文字盤と背景のグラフィックのアニメーションを採用し、ドライバーのスイッチ操作と連動させることで、クルマの性能を操る自己有能感の満足さや、ドライバーとクルマの心的つながりを高めた。

走り味の変化の様子を車の挙動や音のみならず視覚的な認識で補足することで、運動性能の変化をより印象を強くし、操作を習熟したユーザーにも気持ちを切り替える瞬間につながることをねらった (Fig. 7)。

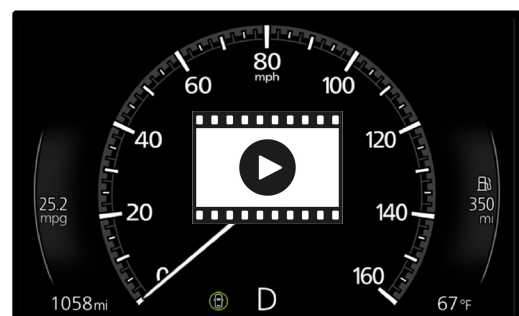


Fig. 7 Dynamic Interaction

これら運動性能の違いに連動した静的・動的デザインを通じ、計器としての車両状態情報の伝達性能向上に加え、視覚的なアイデンティフィケーションを突き詰め、人の感情への作用という付加価値を追求することで、独自の運動性能技術である Mi-Drive という商品性向上を両立した。

4. OFF-ROAD モード

スタック脱出時の一時的な機能であった従来のオフロード・トラクション・アシストから、今回、AWD、エンジン、トランスミッション、ブレーキをより総合的な協調制御とすることで、低速から高速まで幅広いシーンでの走行性能を高める OFF-ROAD モードへの進化を実現した。

4.1 AWD による高い走破性とトラクション性能の向上

OFF-ROAD モードでは、全車速域で AWD の後輪へのトルク配分を高めてトラクション性能を向上させる。実際にスリップ発生する前から AWD の締結力を高く保持するなど、低速ではより高い悪路走破性やスタック脱出性能を実現した。高速走行においても安定性を重視したハンドリング特性とした。

4.2 GVC による接地感の向上

マツダ独自のドライバー操舵に連系したエンジントルク制御である GVC では、接地荷重が不安定で滑りやすいオフロード路面に対する安定性を向上させるため、NORMAL モードに対してターンイン時のエンジントルクダウン制御のゲインを強めて応答性を高めつつ、制御終了のタイミングを早めることで定常旋回時のリヤスタビリティを高めた。これにより、直進安定性とリニアリティの高い旋回挙動を両立した (Fig. 8)。

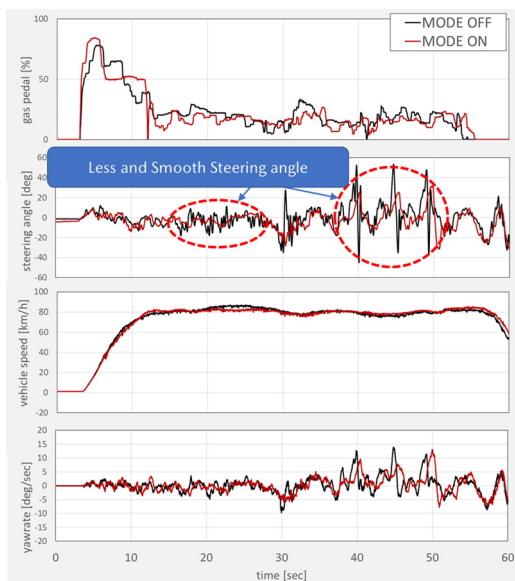


Fig. 8 Reduction of Corrected Steering Operation in High-Speed Gravel

4.3 オフロード路面用の TCS (トラクションコントロール)

オフロード路面に最低化した 4 輪のブレーキとエンジントルクの協調制御によってトラクションを最大化し、NORMAL モードよりも高い走破性とスタック脱出性能を実現した。タイヤの空転時に的確に接地輪に駆動力を伝達し、さまざまなオフロード路面 (土質、勾配、凹凸) に対応しながらも、ドライバーによるアクセルコントロール性も損なわないような特性とした。

4.4 アイドリング/クリープ制御による登坂発進性能向上

急斜面の登坂発進シーンでは、路面の勾配を検知して自動的にエンジンのアイドリング回転数を上げてクリープトルクを増強することで、ずり下がりや抑制して力強い発進を実現した。加えて、坂に対してクルマが斜めにアプローチする「キャンバー走行」のシーンでは、ハンドルの操舵角と車体の傾きから進行方向が登りか下りかを判断する。登りの場合にはアイドリング回転数を上げ、下りの場合はアイドリング回転数を下げることで、路面勾配状態に応じた発進性向上を図った (Fig. 9)。



Fig. 9 Slope Detection in Idle Speed-Up Function

4.5 AT 制御による滑らかで連続的なトルク伝達

AT のシフトアップポイントを高回転化することで、連続低速走行における余裕駆動力を増やすとともに、トルクコンバーターのロックアップクラッチの制御をより滑らかで連続的なトルク伝達特性とすることで、安定したトラクションを確保して高い登坂性能を実現した (Fig. 10)。



Fig. 10 Improved Hill Climbing Performance in Real Off-Road Environment

5. TOWING モード

トレーラー牽引時には、単に車両の総重量が増えるだけでなく、横風や不整路面による影響で横揺れが起きやすくなる。また、トレーラーとの接続部分に下向きの力が掛かることで（トングウェイト）、前輪の接地荷重が減少しハンドリング性能が悪化する。今回、マツダ純正用品のトバーコネクタを使用してトレーラー接続を行うことで選択可能となる「TOWING モード」を新たに開発した。各種制御の特性をトイーイング状態に最適化することで、非牽引時に近い安定した走行性能を実現した。

5.1 AWD による直進安定性とトラクション感の向上

トレーラーとの接続部分への荷重増加に合わせて後輪に配分するトルクを強化し、フリーウェイなどでの直進安定性、非舗装路や登坂路でのスリップ軽減を実現した (Fig. 11)。



Fig. 11 Test Scene of Hill Launch

5.2 GVC による接地感／ステアリング応答性の向上

トレーラー牽引時の前輪接地荷重の減少による操舵応答悪化を改善するため、ドライバーの操舵に応じてエンジントルクを低減する GVC 制御の特性を最適化した。具体的には、トングウェイトによる性能変化を補償するため NORMAL モードよりも制御ゲインを増加することで接地感を改善させた。直進においても修正操舵の応答性を高めることでハンドルの据わりを安定させつつ、旋回時にはアンダーステアを低減してリニアなステアリング特性を実現した。

5.3 トイーイング専用の AT シフトパターンによる余裕の走り

AT のシフトパターンも最適化、変速後の駆動力の余裕度を常に演算し、トイーイング時に必要なトルクを出せる回転数を維持することで、余裕のある走りを実現した。

6. おわりに

今回、CX-50 向けに新開発した Mi-Drive について、2 章では Mi-Drive の概要を説明し、3 章では HMI 領域を、4 章、5 章では新たに設定した「OFF-ROAD」と「TOWING」の 2 つの走行モードについて紹介した。ア

クティブなライフスタイルを楽しむお客様が、この Mi-Drive とともにさまざまなシーンで自信をもって運転を楽しみ、安心して自然の中へ入っていけることを目指して開発し、それが実現できたと考える。

今後もマツダは、さまざまなシーンでの人馬一体の走りの進化を追求していく。

参考文献

- (1) 嶋田ほか：新世代 i-ACTIV AWD の紹介、[マツダ技報, No.37, pp.33-38 \(2020\)](#)

■ 著 者 ■



今村 泰理



梅津 大輔



藤岡 陽一



松尾 純太郎



諸川 波動



延谷 尚輝

論文・解説

31

Kinematic Posture Control (KPC) の開発 Development of Kinematic Posture Control (KPC)

平賀 直樹^{*1} 緒方 博幸^{*2} 加藤 史律^{*3}
Naoki Hiraga Hiroyuki Ogata Fuminori Kato
梅津 大輔^{*4}
Daisuke Umetsu

要 約

一般的に、リアのロールセンター高はフロントに比べて比較的高めに設定されている。このようなリアのロールセンターが高い構成においては、旋回横加速度が大きいシーンで必要以上のジャッキアップ力をもたらし、旋回時に車体がもち上がるヒープ運動の発生により、ドライバーに不安感を抱かせることがある。そこで、旋回横加速度が大きいシーンに増大するヒープを抑制する手法を検討し、バネ上の車体姿勢を安定させる Kinematic Posture Control (以下、KPC) を開発した。本稿では、まず KPC の制御コンセプト及びシステム構成を紹介する。そして、KPC によって旋回中のヒープが抑制されることをフルビークルシミュレーションで確認した結果を紹介する。更に、KPC を搭載したロードスターを用いて、ドライバーの運転行動へ及ぼす効果を検証した実験結果を紹介する。KPC は旋回中のヒープを抑制することでドライバーが余裕をもった操作になることがわかった。

Abstract

Kinematic Posture Control (KPC) is the vehicle dynamics control concept that integrates suspension geometries and longitudinal tire force effect. At cornering, jack-up force occurs, enlarging the heave of a vehicle body, making the driver uneasy. KPC suppresses the heave and gives the driver a sense of ease. KPC controls the heave and stabilizes vehicle behavior by combining a rear suspension with anti-lift geometry incorporated and rear inner-wheel braking, which generates vehicle-body pull-down force. We propose the control concept, and report the evaluation results of the control effect using Roadster equipped with KPC.

Key words : Vehicle dynamics, Suspension system, Brake system, Motion control, Driving stability

1. はじめに

著者らは、Fig. 1 に示すように G-Vectoring Control Plus (以下、GVC Plus) の開発・適用を通して、コーナーターンインからターンアウトまでのバネ上の車体姿勢が、ドライバーの操作とフィーリングに影響を及ぼすことを明らかにしてきた⁽¹⁻³⁾。

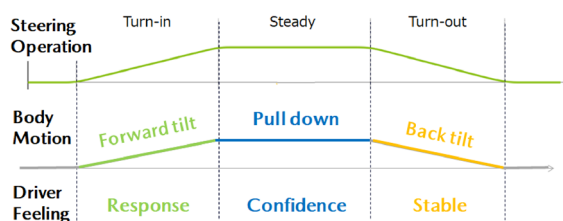


Fig. 1 Vehicle Dynamics Concept

ロードスターをはじめとする Rear-Wheel Drive (以下、RWD) 量産車のリアサスペンションジオメトリの一般的な特徴として、リアのロールセンター高がフロントに比べて比較的高くなっている。これにより、タイヤ横力による前後外輪のジャッキアップ効果に起因するもち上げ力が、フロントに比べて優勢となる。このジオメトリ効果を利用した結果として、Fig. 1 に示すターンイン時の前下がりピッチが自然に実現できる。しかし、リアのロールセンターが高い構成においては、旋回横加速度が大きいシーンで必要以上のジャッキアップ力をもたらされ、旋回時に車体がもち上がるヒープ運動が発生し、ドライバーに不安感を抱かせることがある。

そこで今回、RWD 車の旋回横加速度が大きいシーンに増大するヒープを抑制する手法を検討した。その結果、Fig. 2 に示すリアサスペンションのアンチリフトジオメ

*1~4 操安性能開発部
Chassis Dynamics Development Dept.

トリと旋回内後輪制動の組み合わせで発生するバネ上の車体を引き下げる力、アンチリフト力によりヒープを抑制し、バネ上の車体姿勢を安定させる新たな車両運動制御 Kinematic Posture Control (KPC) を開発した。本稿では、制御の概要とシステム構成に加え、KPC の効果を客観的・定量的に評価した結果について報告する。

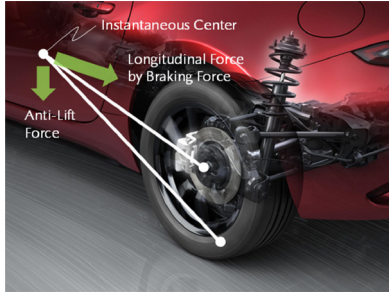


Fig. 2 Anti-Lift Force by Brake

2. KPC コンセプト

KPC は、サスペンションジオメトリと制動力の組み合わせによってヒープ抑制を実現する車両運動制御である。Fig. 3 に制御ロジックの概要を示す。コーナー旋回中のヨーレート r の発生に伴い、リアの左右車輪速 $V_{O,I}$ の差である V_{diff} が制御介入閾値 $V_{threshold}$ 以上となると、旋回内後輪へ制動力 F_{Rin} を付与することでヒープの抑制に必要なアンチリフト力 F_{AL} が車体に加わる。KPC で旋回内後輪に制動力を付与する制御は、Direct Yaw-Moment Control⁽⁴⁾ (以下、DYC：旋回内外輪の制駆動力差によってヨー運動を促進する制御) と類似しているが、制動力 F_{Rin} はヨー運動の促進効果がほとんど発生しない僅かな値に留めている。KPC は車両の平面運動を変えることなく、ヒープのみを制御するというコンセプトに基づいた制御である。

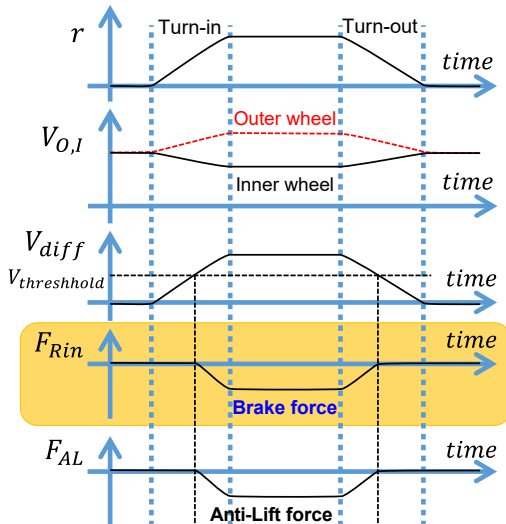


Fig. 3 Kinematic Posture Control Concept

車両に実装する際は、式(1)のように閾値を超えて左右の車輪速差 V_{diff} が発生した時に、旋回内輪の制動力 F_{Rin} を制御指令値とする。この制動力は、左右の車輪速差に対応して大小が決まる。

$$\begin{cases} V_{diff} = V_{Rout} - V_{Rin} & (V_{Rout} - V_{Rin} \geq V_{threshold}) \\ V_{diff} = 0 & (V_{Rout} - V_{Rin} < V_{threshold}) \end{cases}$$

$$F_{Rin} = \frac{C_{KPC}}{1 + Ts} V_{diff} \quad (1)$$

- V_{Rout} ：リア外輪の車輪速
- V_{Rin} ：リア内輪の車輪速
- T ：一次遅れ時定数
- C_{KPC} ：KPC の制御ゲイン
- $V_{threshold}$ ：制御介入を判断する閾値
- s ：ラプラス演算子

より具体的な走行シーンを例に説明すると、Fig. 4 (i) に示す旋回半径が大きいコーナーでは左右の車輪速差が小さく、車両に発生する横加速度も小さいため、車両のヒープも小さい。一方、Fig. 4 (ii) に示す旋回半径が小さいコーナーでは、左右の車輪速差が大きく横加速度も大きいため、車両のヒープも大きくなる。従って、左右の車輪速差を考慮した制御により、自動的に旋回半径の大小に応じた制御量の大小が適合可能となる。また、左右の車輪速差を用いることで、カウンタステアなど旋回方向と逆方向にドライバーのハンドル操作が行われた場合も、車両の旋回方向に対する適切な方向への制御実行が可能である。

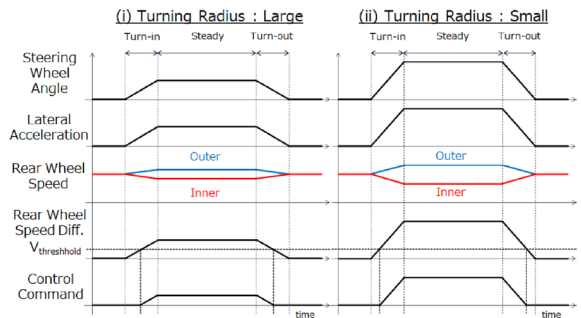


Fig. 4 Control Operating Concept Depending on the Turning Radius

また、左右の車輪速差は走行シーンだけでなく、車両の仕様差によっても異なる。例えば、Fig. 5 (i) に示す差動装置が搭載されたオープンデフ車に対して、Fig. 5 (ii) に示す差動制限装置である Limited Slip Differential (以下、LSD) 搭載車は左右の車輪速差が制限されるとともに、駆動力の左右差によってヨー運動が抑えられるため、安定性が高くヒープに対する不安感も低減される。そして、この車輪速差が小さくなる LSD 搭載車では、KPC は弱く作動する。車輪速差を参照することで、走行シーンだけでなく実装する車両特性も自然に考慮され、適切な制御量を演算することが可能となる。

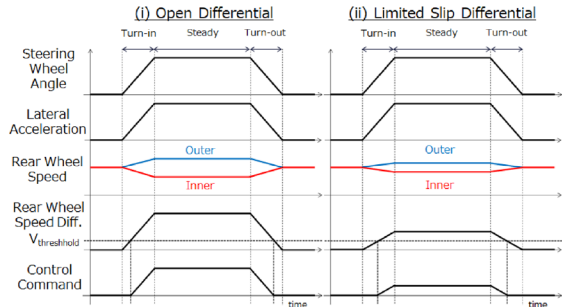


Fig. 5 Control Operating Concept Depending on the Different Configuration of Differential

3. KPC を搭載する車両と実装

3.1 車両諸元とサスペンションジオメトリ

KPC は、リアのサスペンションジオメトリに応じて、さまざまな車両に適用できる制御方法である。本稿ではその一例として、Table 1 の車両諸元であるロードスター (Fig. 6) に KPC を搭載して検証した結果について報告する。

Table 1 Vehicle Specifications

Dimension	Value	Unit
Vehicle mass	990	kg
Wheel base	2.310	m
Front tread	1.495	m
Rear tread	1.505	m
Height of C.G	0.480	m
Front anti-dive angle	3.7	deg
Rear anti-lift angle	22.2	deg



Fig. 6 Test Vehicle

3.2 KPC の実装

Fig. 7 に KPC のシステム構成図を示す。車両の Controller Area Network (CAN) 信号を通して車両の状態量を検出し、Powertrain Control Module (PCM) 内で式 (1) の KPC コンセプトに基づく演算を行い、Brake Control Unit (BCU) へ制御指令を出力する。市販車両に装着が義務化されている横滑り防止装置 Electronic Stability Control (ESC) を利用しており、KPC を搭載する上で追加が必要な装置はない。

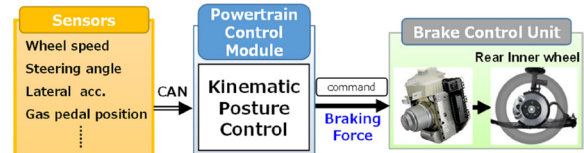


Fig. 7 Control System Configuration

4. フルビークルシミュレーションによる検証

4.1 フルビークルシミュレーションによる検証

(1) 車両運動モデル

2 章で述べた KPC コンセプトの有効性を検証するため、先行研究⁽⁵⁾ の車両運動モデルを用いて、フルビークルシミュレーションを行った。このモデルは、平面運動に加えてばね上の 3 次元運動を再現する力学モデルであり、サスペンション機構を考慮している。サスペンションを通して、タイヤの前後・横力が車体に伝わり、発生するバネ上車体のロール、ピッチ及びヒープを解析できる。なお、シミュレーションで用いた車両諸元は Table 1 と同じである。

(2) シミュレーション結果

シミュレーション条件は、Fig. 8 に示すように、車速 54 [km/h] で進入し、操舵角を 80 [deg] まで切り込んでから切り戻す U ターン旋回とした。KPC ありの場合は、実走行車両で発生する平均的な制御量として、ピーク値が約 30 [N] (ブレーキ液圧換算で約 0.1 [MPa]) の制動力を旋回内後輪に付与した。

KPC OFF に対する ON の切り込み操舵途中の過渡的な車両の平面運動とバネ上車体姿勢の変化を確認するため、切り込み側の操舵角 60 [deg] 時点における KPC OFF に対する ON の各車両運動パラメーター変化を Table 2 に示す。

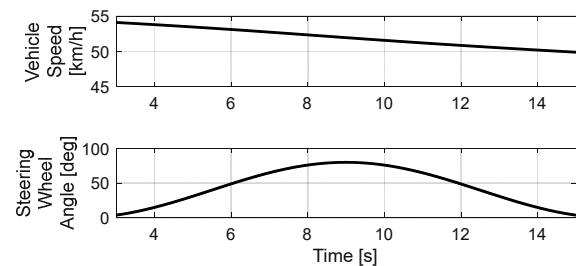


Fig. 8 Simulation Conditions

Table 2 Change of Response by KPC on Simulation at Steering Wheel Angle=60 [deg]

Parameters	Rear Inner Wheel
Yaw Rate	0.08% Increase
Roll Angle	0.34% Decrease
Pitch Angle	0.55% Increase
Heave	3.16% Decrease

操舵角 60 [deg] 時点のヨーレイトは 0.08% 増で、KPC ON/OFF での変化はほぼない。また、ロール角とピッチ角についてもそれぞれ 0.34% 減及び 0.55% 増であり、KPC ON/OFF でほぼ変わらない。一方、ヒープは 3.16% 減となり他の変化と比べて大きい。切り込み側の操舵に対するヨーレイトとヒープの関係をリサージュ波形でみても、ヨーレイトは KPC ON/OFF で差がほとんどないが、ヒープは KPC ON で小さくなっていることが分かる (Fig. 9)。このように、旋回中の操舵に対するヨーレイトの応答が小さい範囲で、旋回内後輪に制動力を発生させることにより、ヨー・ロール・ピッチ運動を変化させず、ヒープのみ抑制できることを確認した。

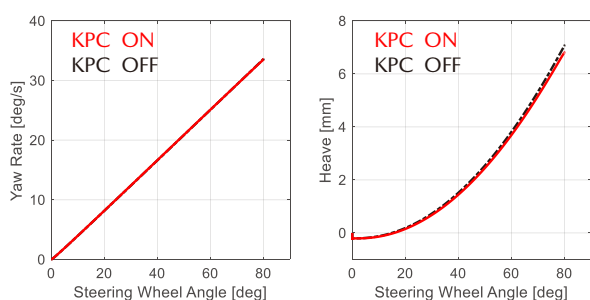


Fig. 9 Lissajous Graph of Simulation

ここで、KPC で制動力を付与する旋回内後輪以外の輪に、KPC 同様の制動力を発生させた場合のヨー・ロール・ピッチ及びヒープ運動について調べた結果を Table 3 に示す。旋回内外の前輪の場合、特にピッチ角が約 3~4% 増と大きく、ヒープ変化はほぼない。しかし旋回外後輪の場合、ヒープは 4.70% 減で Table 2 に示す旋回内後輪に比べて大きく (約 1.1 倍)、ヨーレイトも同様に 0.37% 減と大きい (約 4.6 倍) ため、旋回内後輪と同様にヒープの抑制が可能一方で、ヨー運動を減衰させる力が発生しやすいことが分かる。

Table 3 Change of Response by Each Wheel Braking on Simulation at Steering Wheel Angle=60 [deg]

Parameters	Front Inner Wheel	Front Outer Wheel	Rear Outer Wheel
Yaw Rate	0.08% Increase	0.36% Decrease	0.37% Decrease
Roll Angle	0.09% Decrease	0.54% Decrease	0.30% Decrease
Pitch Angle	4.15% Increase	2.96% Increase	0.93% Decrease
Heave	0.65% Increase	0.74% Decrease	4.70% Decrease

以上の結果より、制御輪が旋回内後輪の場合、ある制動力の範囲内であればヨー・ロール及びピッチ運動をほとんど変化させることなく、ヒープのみ抑制が可能であることを確認した。Table 1 に示すように、今回 KPC を実装する車両はリアのアンチリフト角が 22.2 [deg] と大きく設定されているため、僅かな制動力で大きなアンチ

リフト力が発生する。このため、ヨー運動を変化させることなく、車体のヒープを抑えることができる。

4.2 実走計測による検証

(1) 走行モード

4.1 節の机上シミュレーションと同様に進入車速 54 [km/h]、最大操舵角 80 [deg] 程度の U ターン旋回における実走行での KPC 効果検証を実施した。進入前の直進中に車速を合わせ、その後は計測用の専用装置でアクセル開度を一定に制御し、ドライバーはステアリング操作のみ行って旋回する。インフォームドコンセントを行った上で、できる限り同様の走行を被験者に指示し、実験を行った。実測した走行軌跡を Fig. 10 に示す。KPC ON を赤線、KPC OFF を黒線で示しており、KPC ON/OFF にかかわらず同様の軌跡で走行していることが分かる。

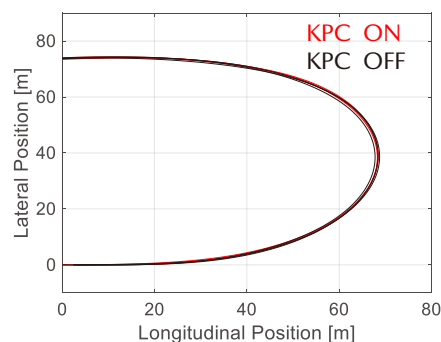


Fig. 10 Trajectory

(2) 計測結果

計測した結果を Fig. 11 に示す。なお、ヒープは車両の四隅に取り付けた対地車高計の計測値から求め、PCM 内の KPC フラグを他の計測値と同期して計測した。

Fig. 10 と同様に KPC ON を赤線、KPC OFF を黒線で示しており、図中の KPC フラグより 5~7 秒の間で KPC が作動していることが分かる。KPC 作動中のヒープを比較すると、KPC ON ではヒープが小さい。ヒープが抑制された後、7 秒以降の操舵角が KPC ON/OFF で異なる。KPC ON の場合滑らかに切り戻しているが、KPC OFF では切り戻し初期が急峻な操舵をしている。また、ヨーレイトについて 7 秒以降は操舵角が変わり違いが生じているが、KPC 作動前はほとんど差がない。Fig. 12 左図は、操舵角とヨーレイトの関係を示しており、KPC ON/OFF で差がないことが分かる。一方、右図のヒープは KPC ON/OFF で明らかな差が見られ、KPC によって 1 [mm] 程度ヒープが小さくなったことが分かる。

以上のように、U ターン旋回を KPC ON/OFF で比較した結果、4.1 節のフルビークルシミュレーション結果と同様に KPC によってヨーレイトはほとんど変わらず、ヒープは KPC ありで小さくなることを確認できた。また、ヒープの減少によりドライバーの操舵行動が変わり、

更にKPC作動により切り戻し操舵が滑らかになる効果もある。旋回中のヒープを抑えることで、ドライバーは高周波を含む急峻な操舵を行わず、余裕をもった操作が可能になることが確認できた。

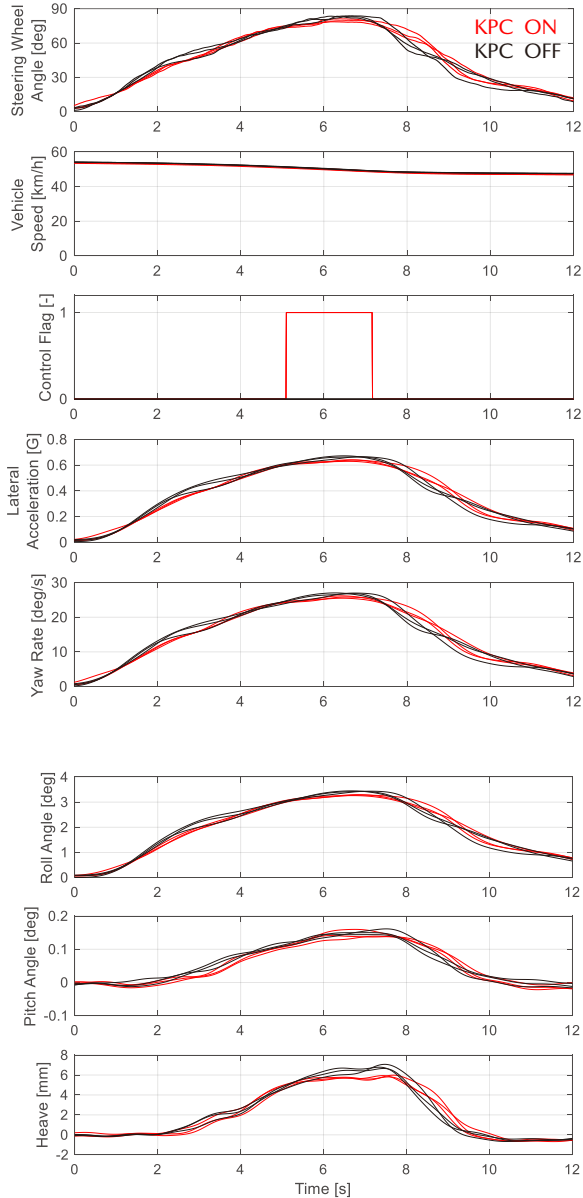


Fig. 11 A Vehicle Time History during Experiment

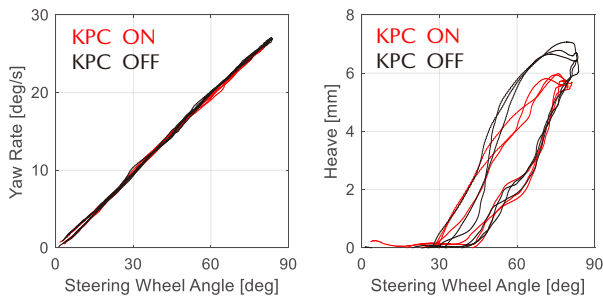


Fig. 12 Lissajous Graphs of Experiment

4.3 一般道走行での検証

4.2節と同様に、車両の四隅に対地車高計を取り付けヨーロッパ郊外のワインディング路での走行を実施した。コーナー旋回中（横加速度=0.45 [G] 時点）のパネ上車体姿勢を表したコンター図を Fig. 13 に、その時の車両中心点の上下動を Fig. 14 に示す。KPC によって車体の旋回姿勢が浮き方向から沈み方向へ逆転していることが分かる。一般道においてもねらいどおりのヒープ抑制効果があることを確認した。

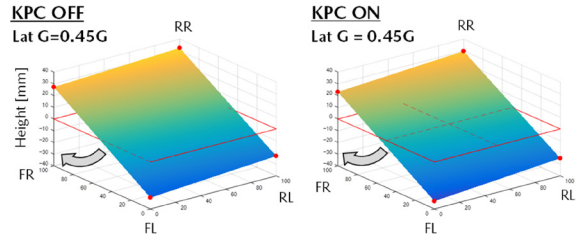


Fig. 13 A Vehicle Body Attitude at Public Road

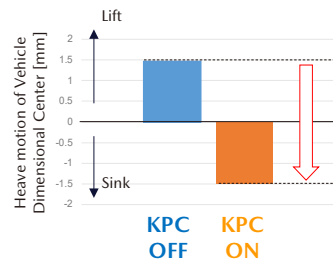


Fig. 14 Heave Motion of Vehicle Dimensional Center during Cornering

また、欧州一般道の厳しい道路環境を再現した車速や旋回横加速度が高く、路面アンジュレーションの多いNürburgringを走行した時の時系列波形をKPC ON/OFFで比較した結果を Fig. 15 に示す。図中A部において、黒線で示すKPC OFFでは車両の浮き上がりによってドライバーが不安に感じ、アクセルペダルを抜いてしまうシーンにおいても、赤線で示すKPC ONは制御の作動によるヒープ抑制によって接地感が高まり、アクセルペダルの修正操作なく、コーナー脱出に向けて加速できていることを確認した。

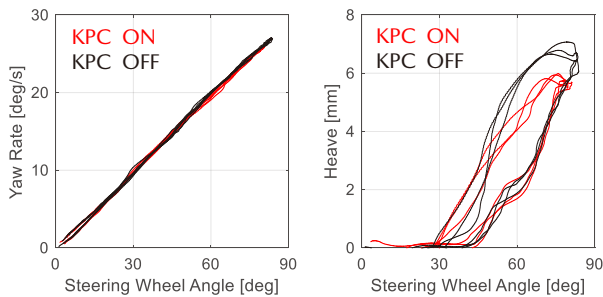


Fig. 15 A Vehicle Time History during Cornering at Nürburgring

これらの結果を受け、一般ドライバーを含めた多数の国内外ドライバーを対象に、KPC 有無比較による官能評価を行い、得られたコメントを以下に記す。Fig. 1 で示した車両運動コンセプトのねらいどおり、旋回中のヒープを抑制することでドライバーの操作に余裕が生まれ、自信をもった操作が行えるようになったことが確認できる。KPC 評価コメント)

- ・コーナーターンインから脱出にかけて、浮き方向のロールが抑えられ、接地感の改善効果を感じる。
- ・アンジュレーションのあるコーナーで内輪側の接地感が向上している。
- ・S 字コーナー切り返しでの操舵のつながりが良い。
- ・コーナー脱出にかけてリアが安定しているので、アクセルを踏んでいける。

5. おわりに

コーナー旋回中のリアでの左右輪速差に応じて車体姿勢を制御する KPC を開発した。DYC は左右輪の制駆動力差によってヨーモーメントを付与するが、KPC は制御によって発生させる制動力が著しく小さい。このため、車両に発生するヨーモーメントは僅かであり、ヨー運動はほとんど変化しない。一方でヒープについては、サスペンションジオメトリと組み合わせた増幅作用で、机上シミュレーション結果及び実車計測でも低減していることを確認した。KPC はヒープを抑制することで、ドライバーが体感する車両姿勢を安定させ、操舵を滑らかにする効果がある。先行研究⁽⁶⁾でも述べられているとおり、これまで検討してきた制駆動力制御による前後加速度やピッチに加え、ヒープもドライバー操作に影響することが確認できた。

参考文献

- (1) 梅津ほか：G-Vectoring Control の開発，[マツダ技報](#)，No.34，pp.99-104 (2017)
- (2) 梅津ほか：G-Vectoring Control Plus の開発，[マツダ技報](#)，No.36，pp.235-240 (2019)
- (3) 藪中ほか：G-Vectoring 制御が人の視線や身体挙動に与える効果に関する分析，自動車技術会 2020 年春季大会 学術講演会 講演予稿集，20215051 (2021)
- (4) 芝端ほか：ヨーモーメント制御による車両運動性能の向上について，自動車技術，Vol.47，No.12，pp.54-60 (1993)
- (5) 関谷ほか：ばね上 3 次元車両運動の簡易な記述式車両運動モデルによる運動評価，自動車技術会 2017 年秋季大会 学術講演会 講演予稿集，20176253 (2017)
- (6) 長島ほか：制駆動力制御によるヒープが操舵特性評価に及ぼす影響，自動車技術会 2019 年秋季大会 学術講演会 講演予稿集，20196026 (2019)

■ 著 者 ■



平賀 直樹



緒方 博幸



加藤 史律



梅津 大輔

論文・解説

32

お客様の走行環境に応じた車両腐食環境予測手法の開発 Development of Quantification Technique and Analysis Method According to Corrosive Environment of Customers' Vehicles

喜久山 良弼^{*1} 福田 克弘^{*2} 中本 尊元^{*3}
Ryosuke Kikuyama Katsuhiro Fukuda Takayoshi Nakamoto
山根 貴和^{*4}
Takakazu Yamane

要約

自動車の防錆性能を確保するためには、腐食環境を定量化し自動車の防錆処理の性能が環境に比べて高くなるようにする必要がある。自動車が曝される腐食環境を定量的に測定するために、無線化により簡易に装着可能な腐食環境計測システムを開発した。また測定データや気象データなどの大規模データを分析する技術確立し、腐食環境を予測することが可能となった。

Abstract

In order to ensure the anticorrosion performance of vehicles, it is necessary to quantify a corrosive environment and apply an anticorrosion treatment that surpasses what is required by the environment. To this end, we have developed a wireless device, which is easily detachable, for measuring the corrosive environment. We have also developed a methodology for analyzing big data such as measurement data, weather data, application amount of anti-freezing salt, etc. These enable us to infer the corrosive environment.

Key words : Materials, Iron and steel materials, Rust prevention, Anticorrosion, Measurement, Big data

1. はじめに

自動車は世界中で使用され、さまざまな環境に曝される。腐食に関しては、沿岸部の海塩粒子や冬期の凍結防止剤が自動車にとっては過酷な環境となる。どのような腐食環境でも世界中のお客様に満足していただける防錆性能を確保するためには、自動車の防錆処理の性能が腐食環境に比べて高くなるように設定する必要がある。自動車は、使用される地域や部位ごとに腐食環境は異なる。一方、防錆処理には、亜鉛めっき、リン酸亜鉛処理、電着塗装、防錆ワックス、等さまざまな方法があるが、亜鉛に代表されるように資源枯渇の懸念があり、過剰な使用は経済的リスクのみならず、人間社会や地球環境の持続性という問題もはらんでいる。したがって、防錆処理を適正に設定するには、自動車各部位の腐食環境を定量的に計測し、それを分析することで腐食環境の特定を行い、その腐食環境に見合った防錆処理を自動車各部位に施工することが必要である。そのために、定量計測技術及び測定データの分析技術の開発を行った。

まず、車載型の腐食環境計測装置を開発し、走行中の自動車各部位の腐食環境を定量的に測定できる腐食環境計測システムを構築した。このシステムを用いて、腐食に厳しい地域を実走行し環境データの収集を行えるようになった。実走行で得られた環境データと鋼板腐食量を紐づけるため、環境データから鋼板腐食量を予測する分析技術を開発した。更に、実走行では限られた地点のデータしか得られないため、走行している地域の気象データなどを因子として、環境データと気象データなどを関連付けて大規模データ分析する技術を開発した。本稿では、腐食環境計測システム及び計測データなどから腐食環境を予測し特定する分析技術について紹介する。

2. 腐食環境計測システムの開発

2.1 車両腐食環境計測の課題

自動車は移動体であり部位によって腐食環境が異なる。腐食環境計測のシステム要件として、定量的に計測ができること、複数の部位を同時に長期間測定ができることが求められる。この課題を、広く用いられている腐食セ

*1~4 車両実研部
Vehicle Testing & Research Dept.

ンサーと無線接続技術によって解決した。

2.2 腐食環境計測システムの詳細

開発した腐食環境計測システムの全体構成を Fig. 1 に、計測画面を Fig. 2 に示す。

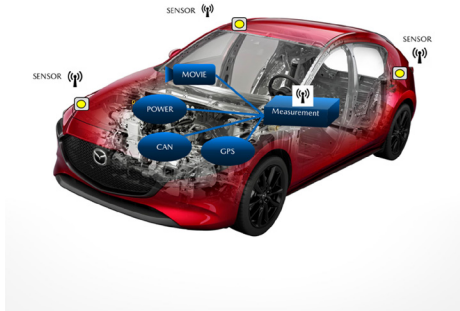


Fig. 1 Corrosive Environment Measuring System

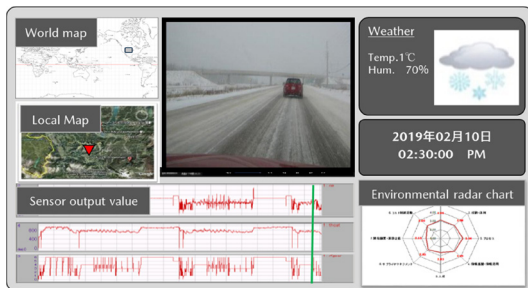


Fig. 2 Measurement Screen

(1) 腐食センサー

腐食センサーは、橋梁や建造物などの固定体の腐食環境を測定するツールとして広く活用されている ACM センサー (Atmospheric Corrosion Monitor Sensor) を用いた⁽¹⁾。ACM センサーは Fe 板の上に、絶縁ペーストと Ag ペーストが格子状に塗布され、Ag-Fe 間が結線されている (Fig. 3)。降雨や結露などの環境要因で格子部分に水分が付着すると、Ag-Fe が導通し電位差によって異種金属接触腐食 (ガルバニック腐食) が起こり、ガルバニック電流の挙動から腐食環境を定量的にとらえることができる。

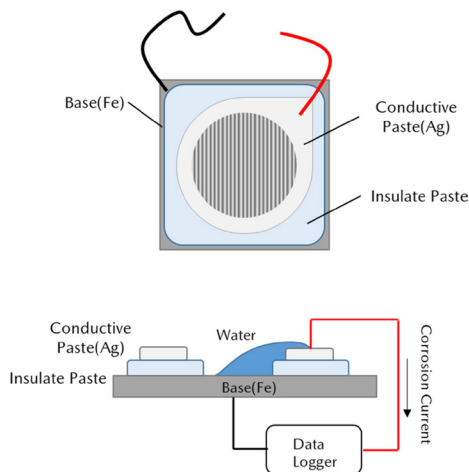


Fig. 3 Mechanism of ACM Sensor

(2) データロガー本体とセンサーの無線接続技術

ACM センサーを無線子機に接続し、無線親機に接続したデータロガーまでを無線で通信する技術を開発した。腐食は、走行中だけでなく夜間の駐車時間にも進行するため、エンジン停止後も連続して測定することが必要である。それに対応できるように子機にバッテリーを搭載した。

1) 無線化技術

無線化のための要件として、無線子機を自動車のどの部位に設置しても車内の親機まで無線でデータ送信が可能であることが挙げられる。

その対応技術として、送信周波数帯が 2.4GHz 周辺という障害物に強い、一般的には Wi-Fi と呼ばれる周波数帯で送信するようにした。Wi-Fi は消費電力が大きいいため、次の消費電力低下対策を行った。

2) 消費電力低下技術

Wi-Fi を使用すること、及び駐車中を含め最長約 6 か月の長期に渡って無給電で子機を稼働させる必要があった。そのために、以下の消費電力低下技術を開発した。

- ①計測データはメモリーに保管し、一定時刻ごとにデータの一括送信を行うようにした。
- ②送信時には、親機とデータ照合を行い、未送信のみ送信するようにした。
- ③送信データがない場合は送信しないようにした。

3) 測定可能な情報

収集した測定データの詳細分析のため、ACM センサー出力以外に、温度/湿度、走行場所を把握するための GPS、走行条件が分かる CAN 信号 (Controller Area Network: 車載通信規格) 及び走行中の動画を同時記録できるようにした (Table 1)。このうち、温度/湿度センサーは、腐食分析に必須であるため無線子機各々に搭載した。

Table 1 Measurement Items and Purpose

Measurement Items	Measurement Purpose
ACM sensor	Corrosion current
Temperature/Humidity sensor	Dew, Deliquescent of salt
GPS signal	Vehicle position, Time
Dashoboard camera	Weather & Road condition
CAN signal (Controller Area Network)	Vehicle condition

4) データのリアルタイム収集

親機にはインターネットへ接続する機能を装備しており、データ分析を行う場所から遠隔で走行車両の各センサーのデータをリアルタイムで確認及び収集を可能とした。

5) 無線子機の耐久性

無線子機がタイヤや前方車両からの被水や走行中の振動においても稼働する堅牢性をもつために、以下の対応を行った。

- ①無線送信用のアンテナ及び電源を内蔵した。
- ②無線子機を堅牢な樹脂で密閉した。
- ③完全密閉すると送信力低下やバッテリー性能低下があるため、一部は通気性かつ水密性をもつ構造にした。

3. 腐食環境の定量化及び予測技術の開発

腐食環境計測システムの開発により、実走行することで各地の腐食環境を計測することができるようになった。一方で、世界中を計測するには莫大な時間や費用がかかるという問題がある。

この問題を克服するため、市場の気象データなどの環境データから腐食環境を予測できるモデルを開発し、世界の腐食環境を予測し特定することとした。

車載した各センサーの出力及び同時に装着した鋼板試験片の腐食量を実測することにより、腐食量予測モデル開発を次のアプローチで取り組んだ。

- ① ACM センサーの出力と鋼板腐食量の関係を明らかにし、関係式を構築する。
- ② ACM センサーの出力と腐食環境データの関係を明らかにし、関係式を構築する。

この2つの関係式を繋げることで、腐食環境データから鋼板腐食量を予測することができるようにする。

3.1 ACM センサー出力と鋼板腐食量の関係

ACM センサーは Ag-Fe の電位差によるガルバニック腐食であるが、鋼板の腐食は鋼板の表面に微小な電位差が生じ、鉄単体で錆が発生する。このように ACM センサーと鋼板の腐食メカニズムは異なるが、大気腐食環境下では、ACM センサーからの電流値の時間積分である電気量と鉄の腐食速度の間に相関があることが知られている⁽¹⁾。

しかし、降雨や路面の水のタイヤの巻き上げによる濡れ量が多い時は鉄の腐食に対して過大な電流が発生する⁽²⁾。したがって、濡れ量が多い自動車の腐食環境では、ACM センサーからの電気量と鋼板腐食量の相関性が低くなる。この問題を解決する手段の1つとして、過大出力を補正するためのしきい値を設け、しきい値以上の出力を一定の値に補正する方法が知られている⁽³⁾。

しきい値は補正後の電気量が鋼板腐食量と相関性をもつように決められるものであるが、モデル化のためにはしきい値がどのような腐食因子に影響を受けるかを明確にする必要がある。

腐食因子としては主に水、塩、酸素があるが、車両にとって過酷な腐食環境は塩の由来によって2つに別けられる。海塩粒子が大気中に多く含まれる沿岸部、冬季に

凍結防止剤を多量に散布する豪雪地域である。日本国内において、海塩環境は沖縄、凍結防止剤環境は北海道が代表的な地域であるため、これら2地点においてしきい値を分析することで、国内の腐食環境と鋼板腐食量を予測できるようにする。

しきい値の分析にあたり、海塩環境としては沖縄県浦添市において1年間実走行し計測したデータを、また凍結防止剤の環境としては北海道札幌市において1年間実走行し計測したデータを使用した。

ACM センサーと鋼板試験片を、ホイールハウス内、ドア、ルーフ、トランクリッドなど Fig. 4 に示す計11か所に取り付け、データを測定した。



Fig. 4 Environment Measuring Point

(1) しきい値設定の課題

電流のしきい値の設定方法として、しきい値の水準としきい値以上の出力の補正方法をあらかじめ用意し、全てのパターンで電気量を計算して相関性が最も高いものを採用する方法が考えられるが、測定したデータは電流値約20000点×11部位×2地点と大規模であり計算コストが高い。そこで、電気量をしきい値ごとに区分し、区分した電気量と補正係数の線形和を腐食量に線形回帰することによって、相関性の高いしきい値及び補正手法を同時算出する手法を構築した。

(2) しきい値設定の手順

詳細を以下の3つのステップで示す。

- ①電気量は電流の時間積分であり、すなわち Fig. 5(a) に示す面積(斜線部分)になる。
- ②しきい値を電流値によって区分する。具体的には、Fig. 5(b)のように斜線部分の面積を電流方向に区別した長方形で近似する。
- ③区別した長方形の面積の和と鋼板腐食量に相関関係があると考え、Fig. 5(c)のように区別した長方形の面積の線形結合が鋼板腐食量となるような回帰式を作り、LASSO (Least Absolute Shrinkage and Selection Operator)⁽⁴⁾で回帰モデルを推定する。

Fig. 5(c)の例では LASSO による推定で係数 β_5, β_6 は 0 となっている。これは $4\mu\text{A}$ 以上の出力が降雨や路面の水のタイヤの巻き上げによって過敏に出力しており、腐食量に寄与しないと推定している。よって、しきい値は $4\mu\text{A}$ で設定し、 $4\mu\text{A}$ 以上の出力は全て $4\mu\text{A}$ に均す補正方法が腐食量と相関性が最も高いという結果が得られている (Fig. 5(d))。

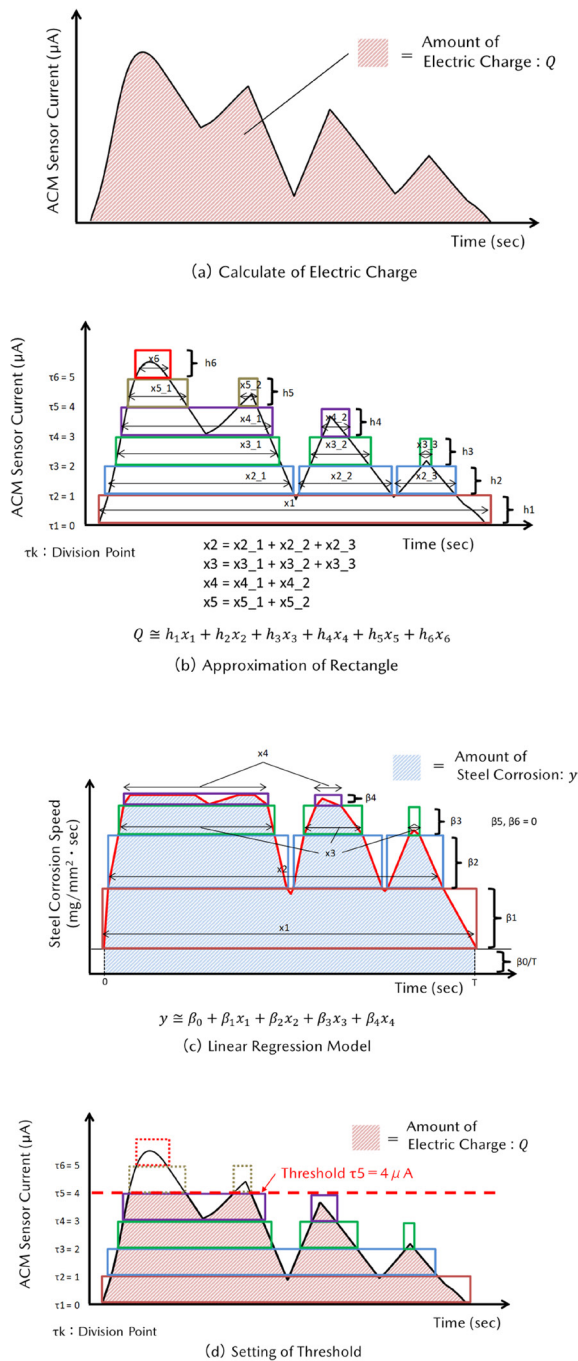


Fig. 5 Revising ACM Current with Regression Model

(3) しきい値による推定結果と検証

本分析手法により得られたしきい値を Table 2 に示す。海塩環境の沖縄のデータでは、しきい値として 0.1mA 以上を 0mA とする結果となった。また凍結防止剤散布環境の北海道では、散布量の多い冬期は $20\mu\text{A}$ 以上を $20\mu\text{A}$ に、それ以外の期間は 80nA 以上を 80nA とする結果となった。

また、しきい値で補正した電流量と鋼板腐食量の相関係数は、海塩環境で約 0.8、凍結防止剤環境では 0.9 以上であった。

以上より、ACM センサーのしきい値は腐食環境で大きく変わり、しきい値を推定する方法として本手法は有効であることが分かった。

Table 2 Threshold and Correlation

Region/Period	Threshold	Revised current over threshold	Correlation of revised electric charge and steel corrosion
Okinawa (All year)	0.1mA	0mA	0.78
Hokkaido (Winter)	$20\mu\text{A}$	$20\mu\text{A}$	0.96
Hokkaido (Other)	80nA	80nA	0.90

3.2 ACM センサー出力と腐食環境データの関係

2つのステップで関係式を構築する。まず、腐食環境データは因子数が多いため ACM 出力である電流値に寄与する腐食環境データを抽出する。次に、抽出した腐食環境データから回帰モデルを作り、関係式を構築する。

(1) ACM 出力に寄与する腐食環境因子の抽出

ACM センサーの出力挙動から自動車の腐食は走行時だけでなく駐車時の凍結防止剤の潮解などによって腐食が進行している。したがって腐食には気象条件の影響が高いため気象データを、更に凍結防止剤散布地域においては塩の散布量を車両計測データと関連付けて分析した。分析に用いるデータを Table 3 に示す。

分析データは、100 因子×100 万サンプル/年と大規模データとなった。これらの中から、腐食との寄与度の高い気象条件や凍結防止剤散布条件、その時の ACM センサー値などの複合関係を分析する必要がある。従来の重回帰分析手法などによる感度分析手法では、1つの因子に対する相関関係や感度を評価するのみなので、説明変数間の複合的な相関関係を評価するために、因子分析機能付き無教師型クラスタリング分析手法を適用した。この手法は、Fig. 6 に示すように、大規模データの 1 行を 1 本のベクトルと見なし、ベクトル間のユークリッド

4. まとめ

(1) 腐食環境計測システムの開発

腐食センサーとして ACM センサーを用い、データロガー本体とセンサー間の無線化により簡易に装着可能な腐食環境計測システムを開発した。

(2) 腐食環境の定量化及び予測技術の開発

海塩環境及び凍結防止剤散布環境において、

①ACM センサーの出力を鋼板腐食量に合わせて補正するしきい値を推定できる方法を構築した。

②市場腐食環境の大規模データから ACM センサーの出力に寄与する因子を選定し回帰モデルを構築できた。

以上より、市場を実走行して計測し、そのデータ及び気象データなどから腐食環境を予測し特定できるようになった。

今後は、国内だけでなく海外の腐食環境にも適用し、グローバル腐食マップを構築していく。また、コネクティッドサービスで得られた環境データの活用、市場の塩散布量の継続的な調査を行い回帰モデルの精度向上を図っていく。

参考文献

- (1) JFE スチール (株)：移動体の腐食環境計測方法および設計方法ならびに移動体材料の腐食試験方法および選定方法，特許第 4258352 号 (2009)
- (2) 元田慎一ほか：ACM 型腐食センサーで測定した海洋性大気腐食環境条件の年変化，材料と環境，第 44 巻，4 号，pp.218-225 (1995)
- (3) 福田克弘ほか：車両の腐食環境計測システムの開発，自動車技術会 2015 年春季大会学術講演会講演予稿集，1197 (2015)
- (4) Tibshirani, Robert: Regression shrinkage and selection via the lasso, Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological), 58.1, pp.267-288 (1996)
- (5) 山根貴和ほか：車両腐食環境の定量化技術と分析手法の開発，自動車技術，Vol.74, No.7, pp.104-109 (2020)

■著者■



喜久山 良弼



福田 克弘



中本 尊元



山根 貴和

論文・解説

33

剛性・衝突・NVHの複数性能を同時に満たす車体のトポロジー最適化手法

Topology Optimization Method for Vehicle Body Structure to Meet Multiple Performance Requirements for Body Stiffness, Crashworthiness and NVH Simultaneously

和田 尚美^{*1} 和田 有司^{*2} 弓削 康平^{*3}
Naomi Wada Yuji Wada Kohei Yuge
木崎 勇^{*4} 橋田 光二^{*5} 寺田 栄^{*6}
Isamu Kizaki Kohji Hashida Sakayu Terada

要約

魅力ある商品をお客様に届けるためには軽量かつ高性能な車両を開発する必要がある。軽量化と性能を両立させるための車体骨格検討においてトポロジー最適化は設計検討の一助となるが、衝突性能に代表されるような大変形を伴う非線形現象を目的にしたトポロジー最適化で骨格構造を得ることは難しい。そこで衝突時のエネルギー吸収を制御できる非線形トポロジー最適化と、線形問題である剛性とNVHを含めた複数性能を同時に扱える大規模トポロジー最適化手法を開発した。この手法を用いた剛性・衝突・NVHを同時トポロジー最適化することで、各性能指標を満足し、かつ最適化も十分に収束する車体骨格のトポロジーを得ることができた。

Abstract

Topology optimization helps realize highly-rigid yet lightweight vehicle bodies for lower CO₂ emissions. We have developed a large-scale nonlinear topology optimization method that simultaneously addresses linear (torsional stiffness and vibration) problems and nonlinear (crashworthiness) problems to control energy absorption by the vehicle body structure during a collision. The optimization of the entire vehicle body model produced a rigid truss-like structure, and all the objective functions converged to the desired level. Consequently, an optimal shape that can be used as a reference for designing a car body frame structure and that simultaneously satisfies stiffness, crashworthiness and NVH performance requirements was obtained.

Key words : Vehicle development, Design optimization, Topology optimization

1. はじめに

自動車業界を取り巻く環境として、地球環境の保全のために大幅なCO₂削減が求められており、その実現のための軽量化と商品の魅力を高めるための性能向上とを両立させることは必須課題となっている。「走る喜び」を高めるための車体剛性、「安全・安心」を高めるための衝突性能、「心地よさ、静粛性」を高めるためのNVH (Noise, Vibration, Harshness) 性能など、車両開発における代表的な複数の性能を満足する理想的な骨格構造の検討にはトポロジー最適化⁽¹⁻⁴⁾が有効な手段である。しかしなが

ら、現在の商用トポロジー最適化ツールのほとんどが、剛性・NVHしか扱えない線形領域の最適化に特化しており、衝突のような大変形を伴う非線形の問題を扱うことは難しい。そこで、衝突時のエネルギーを吸収する骨格構造を見つける非線形問題と、剛性やNVHの要件を満たす線形問題とを同時に取り扱うことができる最適化手法を開発した。

2. トポロジー最適化

2.1 トポロジー最適化手法

トポロジー最適化においては、要素内の各材料の仮想

*1,5,6 MBD革新部
MBD Innovation Dept.

*3 成蹊大学
Seikei University

*2 東京工業大学
Tokyo Institute of Technology

*4 衝突性能開発部
Crash Safety Development Dept.

的な密度を設計変数とする SIMP 法 (Solid Isotropic Material with Penalization⁽²⁻⁴⁾) を使用する。密度 ρ ($0 < \rho < 1$) を用いて、各要素の弾性率 E 、降伏応力 σ_y と降伏関数⁽⁶⁾ はペナルティ係数 $p=3$ 、重量密度 d は $q=1$ を用いてスケールリングする。

$$E = \rho^p E_0, \sigma_y = \rho^p \sigma_{y0}, d = \rho^q d_0 \quad (1)$$

ただし E_0, σ_{y0}, d_0 は母材の弾性定数、降伏応力及び重量密度である。3 性能最適化においては下記のように、設計変数 ρ 、目的関数 Θ で最小化、体積 V を制約条件 (質量制約) として、複数性能の目的関数を重み付け線形結合したものを使用する。

$$\text{find: } \rho, \text{ minimize: } \Theta, \text{ subject to: } \int \rho dV \leq V_0 \quad (2)$$

$$\Theta = \sum_k (w_k \theta_k^{\text{Static}}) + \sum_l (w_l \theta_l^{\text{Crash}}) + \sum_m (w_m \theta_m^{\text{NVH}}) \quad (3)$$

なお、複数性能の目的関数 ($\theta^{\text{Static}}, \theta^{\text{Crash}}, \theta^{\text{NVH}}$) は次元を揃えるために正規化する。静的剛性の目的関数は一般的な一定荷重 f に対するコンプライアンス最小化⁽²⁻⁴⁾ (ひずみエネルギーの最小化) を使用する。

$$\theta^{\text{Static}} = \frac{\mathbf{u} \cdot \mathbf{f}}{\mathbf{u}^{(i=1)} \cdot \mathbf{f}} \quad (4)$$

ただし、 \mathbf{u} は荷重 f に対する変位場とする。

衝突性能の目的関数に関しては、非線形現象であるため、エネルギー吸収制御を行えるようにする。すなわち、衝突変位区間を複数個の部分区間に分け、区間エネルギーと目標区間エネルギーとの二乗差分和を目的関数とする⁽⁵⁻⁷⁾。

$$\theta^{\text{Crash}} = \sum_j \frac{(e_j - \bar{e}_j)^2}{e_j^2} \quad (5)$$

NVH 性能の目的関数としては一般的な動剛性を最大化するものであり、指定した周波数範囲における動的コンプライアンスの絶対値の積分量⁽⁸⁾ とする。

$$\theta^{\text{NVH}} = \frac{\int |\mathbf{u} \cdot \mathbf{g}|^2 d\omega}{\int |\mathbf{u}^{(i=1)} \cdot \mathbf{g}|^2 d\omega} \quad (6)$$

ただし、 \mathbf{u} は元の加振荷重 f に対する変位場、 \mathbf{g} は受音側の観測範囲・観測方向を指定するための疑似荷重入力とする。

2.2 トポロジー最適化のフロー

Fig. 1 に独自に開発したトポロジー最適化のフローチャートを示す。計算メッシュ、設計空間の指定と初期密度を設定した上で、文献(9)の手段で剛性・衝突・NVH 性能の各荷重ケースの解析を実施し、得られた結果から式(3)の各荷重ケースに対応する感度^(2,7,8) を導出する。これらを式(2)の重み付き加算和から最適化全体の

感度を算出した上で密度の再分配を行う。最適化は並列計算機環境 (8 ノード, 28 コア/ノード) を用いて実施し、商用解析ソルバー LS-DYNA の実行は MPI 並列を用いて確保した全ノード資源を用いて実施する。

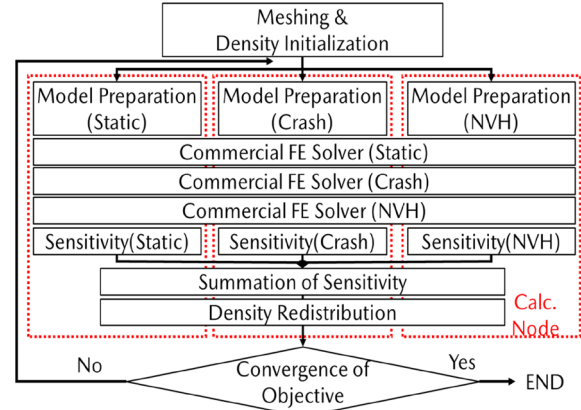


Fig. 1 Flowchart of Topology Optimization

感度算出など荷重ケースごとの操作は計算ノードの各プロセスで処理した後、MPI_Reduce 関数を用いてケース感度の合算、MPI_Bcast 関数を用いて更新した密度の同期をしている。

3. 車体構造のトポロジー最適化

3.1 計算モデルと最適化条件

Fig. 2 に車体の全体構造の最適化計算に用いた設計空間のモデルを示す、メッシュサイズ 20mm のボクセルメッシュで規模は 38 万節点, 32 万要素である。最適化初回計算モデル (Initial) は密度 $\rho=0.1$ を用いて式(1)でスケールリングしている。

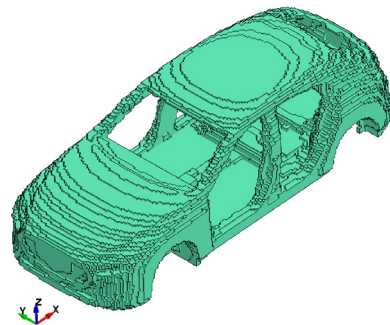


Fig. 2 Design Space of Vehicle Body Structure

Fig. 3 に操縦安定性に関わる 5 ケースの車体剛性の静荷重条件を示す。これらはダンパーやサスペンション部品の取り付け部をフロントサスペンション群とリヤサスペンション群とに分け、それぞれに対してタイヤ接地点の高さに荷重入力点を 1 点設定し、そこに前後力や左右力を 4 つの組み合わせで与える方法により、車体のねじり変形や曲げ変形などを発生させている。更に、シート

取り付け点に上下荷重を与えている。特定の箇所への拘束条件は与えておらず、慣性リリース条件で計算を実施する。目的関数は剛性の最大化をねらい、ひずみエネルギー最小化とする。

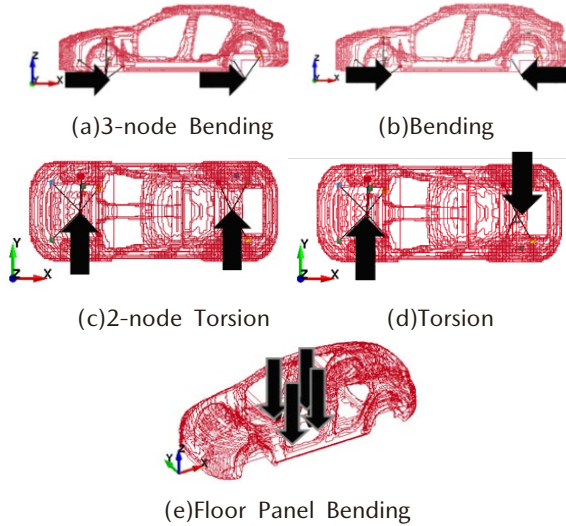


Fig. 3 Load Case for Vehicle Body Stiffness

Fig. 4 に衝突性能の 7 ケースの荷重条件を示す。なお、7 ケースのうち (g), (h), (i), (k) 4 ケースの目的関数を式(4)で、(f), (j), (l) の 3 ケースを式(5)で表現している。前面衝突では、剛体壁により一定の速度で動的に圧縮する非線形解析を行い、その際に必要となる潰れ荷重 (f) と潰れ変位の特性から決定した潰れ変位区間でのエネルギー吸収量を目的関数とする。Fig. 5 に前面衝突で目的とした荷重変位特性を示す。またサイドシル前端にはタイヤからの押し込み荷重 (g) を、ダッシュパネルの中央部にはエンジン上部からの押し込み荷重 (h) を、フロントサスペンション後部取り付け部近傍にはエンジン下部からの押し込み荷重 (i) を想定した静的荷重条件を与える。後面衝突では後突バリアのバンパー部を模擬した剛体壁 (j) により動的に圧縮し、潰れ変位区間でのエネルギー吸収量を目的関数とする。また、サイドシル後端にはタイヤからの押し込み荷重 (k) を想定した静的荷重条件を与える。側面衝突では、側突バリアのバンパー部を模擬した剛体壁 (l) で動的に圧縮し、潰れ変位区間でのエネルギー吸収量を目的関数とする。

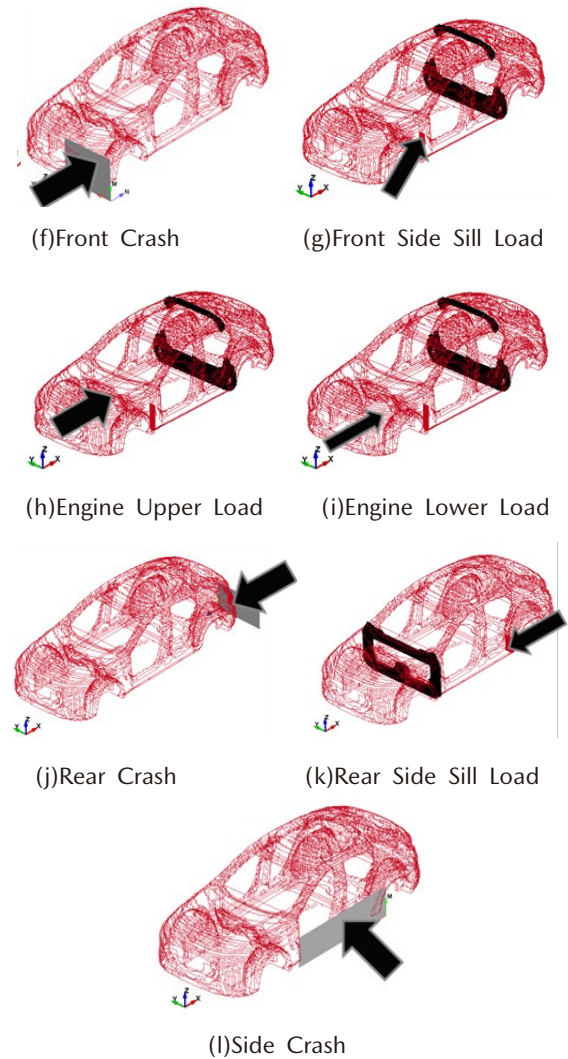


Fig. 4 Load Case for Vehicle Body Crashworthiness

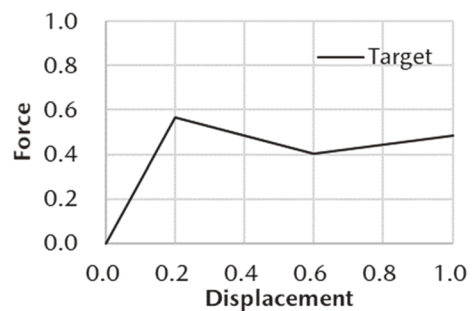


Fig. 5 Normalized Energy Absorption Target in Load-displacement Curve

Fig. 6 に NVH 性能に関する、2 ケースの車体の骨格振動応答の入力条件を示す。これらは走行時のサスペンションから車体への入力想定して、ダンパーやサスペンション部品の取り付け部をフロントサスペンション群とリヤサスペンション群とに分け、それぞれの 6 点の入力点に対して 3 方向の多点加振条件を与えた。目的関数は動剛性の最大化を狙って、2~300 Hz での応答の積分値の最小化とする。

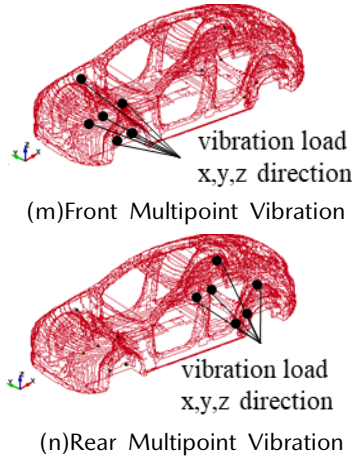


Fig. 6 Excitation Case of Vehicle Body NVH

これらの車体剛性の 5 ケース，衝突性能の 7 ケース，NVH 性能の 2 ケースの合計 14 ケースの性能を同時に向上させることを目的関数とし，残存体積を 10%以下とすることを制約条件として，トポロジー最適化計算を行った。各ケースに作用する重みについては，試行錯誤により適切な値を決定した。最適化手法は最適性規準法⁽¹⁰⁾を用い，最適化の反復回数は 95 回とする。

3.2 同時トポロジー最適化結果

Fig. 7 に最終イタレーションで得られたトポロジー形状を示す。車両の全体にわたって高密度となる構造がトラス状の骨格構造として導出されている。車体剛性に関しては全体的にトラス構造となっており，B ピラー周辺，C ピラー周辺の車体横断面が連続的な環状構造となっている。衝突性能に関しては車体前端部や後端部は比較的骨格が少なくエネルギー吸収しやすい構造となっており，フロア下にキャビンの前から後ろまで連続したフレーム構造が通っている。NVH 性能に関してはサスペンション取り付け部を起点としたトラス構造が車体全体に広がっている。結果として複数性能を同時に満たすトポロジー形状を得ることができた。これを基に体積制約下で高性能な車体構造を設計することが可能になる。

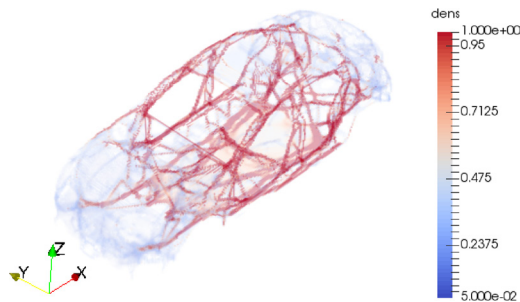


Fig. 7 Optimal Shape of Vehicle Body Structure

Fig. 8 にイタレーションごとの最適化の進行度合いを示す最適化品質 Q と各目的関数の総和の推移を示す。Q

は正規化した密度分布の標準偏差値であり下式で表すことができる。ρ_{ave} は平均密度，N は要素数である。

$$Q = \frac{\sqrt{\sum_i (\rho_i - \rho_{ave})^2 / N}}{\sqrt{\rho_{ave}(1 - \rho_{ave})}} \tag{7}$$

これらから目的関数も十分に収束し正常に最適化が進行していることがわかる。

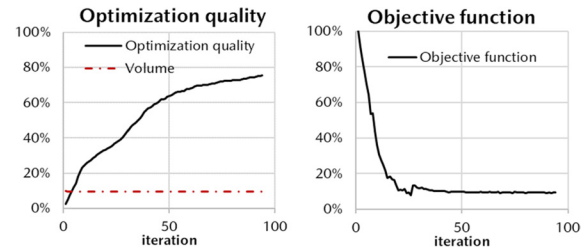


Fig. 8 Volume, Quality, and Objective Function History

Fig. 9 に最適化前後の車体剛性の各ケースの正規化したひずみエネルギーを示す。いずれのケースも最適化初回 (Initial) から十分にひずみエネルギーが減少しており剛性性能が向上していることが分かる。

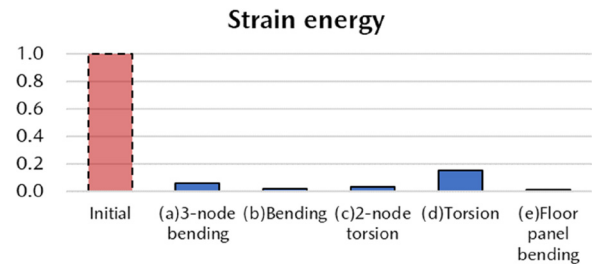
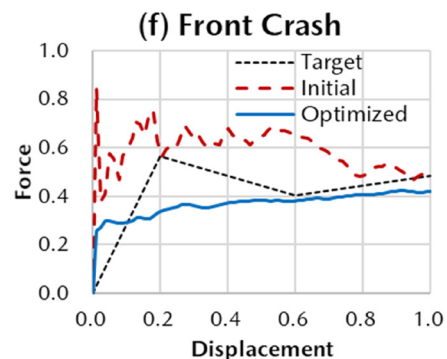


Fig. 9 Strain Energy of Stiffness Cases Before and after Optimization

Fig. 10 に最適化前後の前面衝突，後面衝突，側面衝突での剛体壁の荷重 - 変位特性の変化を示す。これらから最終的な骨格構造が目標の荷重 - 変位特性に，近づいていることが分かる。



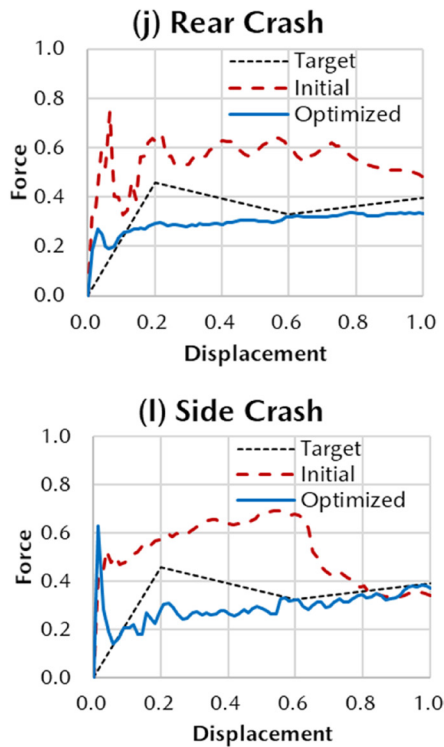


Fig. 10 Load-displacement Curve before and after Optimization

Fig. 11 に最適化前後の加振点応答の変化を示す。これらから、最適化により高密度なトラス状の骨格構造になることによって、車体剛性や NVH の性能が向上したことがわかる。

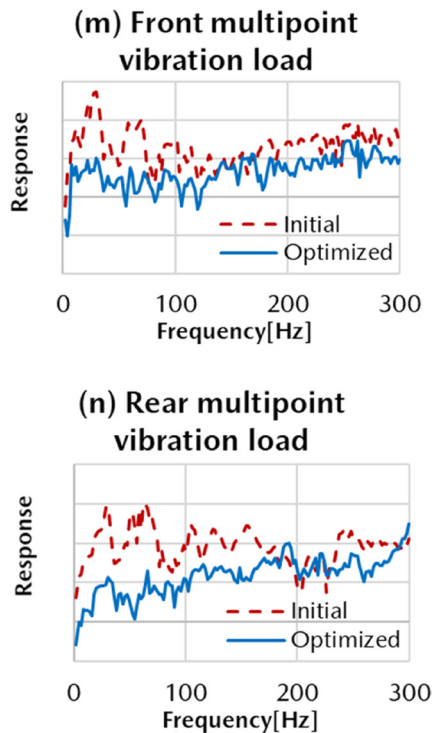


Fig. 11 Frequency Response of NVH Cases before and after Optimization

4. おわりに

本稿では、2章で線形（静剛性、動剛性）と非線形（動的）現象の同時最適化が可能なトポロジー最適化手法を開発し、剛性・衝突・NVH性能を同時に満たす構造検討手法を示した。3章では本手法を用いて、車体モデルでのトポロジー最適化を行い、高密度なトラス状の車体骨格構造が導出した。目的関数も十分に収束し正常に最適化が進行し、剛性・衝突・NVH性能を同時に満たすトポロジー形状を得ることができることを示した。

本手法により軽量化と性能を両立できる車体構造を設計することが可能になる。今後も高性能な魅力ある商品をお客様に届けるため、技術研鑽に努めていく。

参考文献

- (1) M.P. Bendsøe, and N. Kikuchi: Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol.71, No.2, pp.197-224 (1988)
- (2) M.P. Bendsøe, *Topology Optimization: Theory, Methods, And Applications*, Springer, 2003.
- (3) 藤井大地, パソコンで解く構造デザイン, 丸善, (2002)
- (4) 西脇真二, 泉井一浩, 菊池昇: トポロジー最適化 (計算力学レクチャーコース), 一般社団法人日本計算工学会 (編), 丸善出版 (2013)
- (5) K. Yuge, and N. Kikuchi: Optimization of a frame structure subjected to a plastic deformation, *Structural optimization*, Vol.10, No.3, pp.197-208 (1995)
- (6) 丹羽俊之, 飯塚直子, 仲村岳, 弓削康平: 薄肉鋼構造衝突部材への非線形トポロジー最適設計の適用, *自動車技術会論文集*, Vol.44, No.5, pp. 1249-1254 (2013)
- (7) 津金澤洋平, 小林薫, 弓削康平: 薄肉構造の衝突最適設計 (続報) - 荷重変位曲線に対する最適化 -, *計算工学講演会論文集*, Vol.12, pp.185-188 (2007)
- (8) Z.D. Ma, N. Kikuchi, and I. Hagiwara: Structural topology and shape optimization for a frequency response problem, *Computational Mechanics*, Vol.13, No.3, pp.157-174 (1993)
- (9) 境野勇作, 弓削康平, 梅津康義: 汎用動的解析プログラムを用いた衝突部材のトポロジー最適設計, *計算工学講演会論文集*, Vol.15, No.1, pp.313-316 (2010)
- (10) K. Suzuki, and N. Kikuchi: A homogenization method for shape and topology optimization,

Computer Methods in Applied Mechanics and
Engineering, Vol.93, No.3, pp.291-318 (1991)

■著者■



和田 尚美



和田 有司



弓削 康平



木崎 勇



橋田 光二



寺田 栄

論文・解説

34

1D 車両全体モデルを活用した EV 熱マネジメントシステムの検討

Study of Thermal Management System for Electric Vehicle Based on Vehicle System 1D Simulation Model

波頭 佑哉^{*1} 中村 和博^{*2} 山岡 祐也^{*3}
Yuya Hato Kazuhiro Nakamura Yuya Yamaoka
松原 孝志^{*4} 重森 大輝^{*5}
Takashi Matsubara Taiki Shigemori

要約

電動車両（以下、xEV）では、高電圧バッテリー（以下、バッテリー）やモーター、インバーターなどの電気駆動（以下、電駆）コンポーネントの信頼性を満たすために適切な温度管理が求められ、そのためのエネルギーが必要となる。しかし、バッテリー内の限られたエネルギーを動力及び空調と分け合う必要があり、これらの熱性能、航続距離、空調快適性の共立には、冷却・入熱のタイミングや熱の分配・移動を制御する熱マネジメント（以下、熱マネ）が重要である。そこで、xEV 車両内のマルチ・フィジックスの現象を解くことが可能な 1D 車両全体モデルを構築し、熱マネシステムの全体最適化の MBD（Model Based Development）手法を開発した。3D-CAE 及び機械学習を活用することでモデルの予測精度を向上し、実際の BEV（Battery Electric Vehicle）開発での適用を想定した熱マネシステムの検討を行った。

Abstract

Reliability of components such as high voltage battery (hereinafter referred to battery), motor, and inverter in the electric vehicle (hereinafter referred to as xEV) is satisfied by appropriate temperature management, which requires energy. However, the limited energy in the battery needs to be shared with driving power and air conditioning. Therefore, thermal management technology which controls the timing of cooling/heat input and heat distribution/transfer is important to balance thermal performance, driving range, and comfort performance of air conditioning. We developed a MBD (Model Based Development) method of the thermal management system for total optimization by constructing a vehicle system 1D simulation model which can calculate multi-physics behavior in the xEV. Improving analysis accuracy of the model with applying the 3D-CAE and machine learning, we studied the thermal management system, assuming that it is put into effect in the actual BEV (Battery Electric Vehicle) development.

Key words : Vehicle development, CAE, Design optimization, Thermal management, EV and HV systems, Motor, Battery, Vehicle systems, Air conditioning, Machine learning

1. はじめに

マツダでは、2030 年時点でマツダが生産する全ての車両に、電動化技術を搭載する⁽¹⁾。xEV では、特定の温度領域での電駆コンポーネントの出力低下や劣化などがあり、お客様の求める航続距離を満足しつつ、適切な温

度管理のためのエネルギーを確保する必要がある。また、空調作動時には、キャビンの冷却・創熱にエネルギーを分配する必要があるため、熱性能、航続距離、空調快適性の共立が求められる。

これらの背反課題を共立した車両を開発するためには、最適な熱マネが必要不可欠であるが、電動化に伴い複雑

*1,2 MBD 革新部
MBD Innovation Dept.

*4,5 装備開発部

Interior & Exterior Components Development Dept.

*3 ドライブトレイン開発部
Drivetrain Development Dept.

化するシステムにおいては、コンポーネントごとのモデルを用いた従来の個別最適化の MBD 手法では検討に限界がある。そこで、xEV 車両内のマルチ・フィジックスの現象を解くことが可能な 1D の車両全体モデルを構築し、V 字開発プロセスの左バンクでの熱マネシステムの全体最適化の MBD 手法を開発した。

本稿では、1D 車両全体モデルの概要と、モデルの予測精度の向上技術を述べた後、実際の BEV 開発での適用を想定したモデルでの熱マネシステムの検討例について紹介する。

2. 1D 車両全体モデルの概要

1D 車両全体モデルとは、車両を構成する各コンポーネントの熱流体、電気、化学、機械の機能を 1D で表現し、各系を強連成した状態で解析が可能な 1D モデルである。Fig. 1 に示すように、ハードウェア機能の車両モデル、EV ユニット／冷却回路モデル、空調モデルと、それらを動かすドライバーモデル、制御モデルから構成する。ハードウェアのモデル間は熱（赤線）、電気（黄色線）、機械（黒線）のつながりを持ち、各系のエネルギーの授受を示す。なお、解析ソフトは Gamma Technologies 社の GT-SUITE を用いている。以下に各モデルの機能を紹介する。

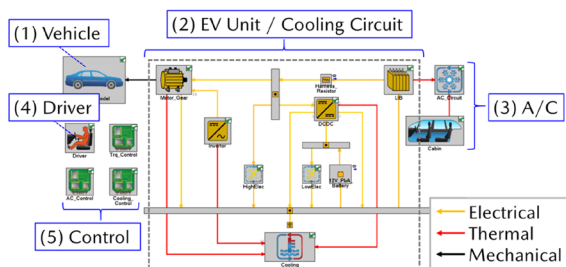


Fig. 1 Vehicle System 1D Simulation Model

(1) 車両モデル

パワートレインからの駆動力に応じて、車両前後方向に対する車両の加減速を計算する。車両の運動方程式に、モーターのシャフトから伝達した駆動力と車両側の走行抵抗や路面勾配抵抗、ブレーキなどの抵抗負荷を用いて、車速を算出する。

(2) EV ユニット／冷却回路モデル

モーターの駆動及び回生量に応じて、各電駆コンポーネントの電気の入出力と熱移動を計算する。電気の入出力の計算では、電気回路の状態方程式より、各コンポーネントの入出力の電力を算出する。また、熱移動の計算では、各電駆コンポーネントの熱伝導方程式に、発熱量と、冷却回路の流体モデルから求めた冷却部の熱伝達率を用いて、各部の温度を算出する。なお、バッテリーの冷却には空調冷媒を用いるため（第 3 章）、バッテリー冷却部の計算は下記空調モデルで行う。

(3) 空調モデル

コンプレッサーや膨張弁の制御及び、外気などの外部環境に応じて、キャビンの熱移動を計算する。キャビンの熱伝導方程式に、外部からの受放熱量と、冷凍／ヒートポンプサイクルの流体モデルからもとめた外気との熱交換量を用いて、キャビンの温度を算出する。なお、冷凍サイクルモデルはバッテリーへ分岐し、バッテリー冷却部の熱伝達率を算出する。コンプレッサーなどの電気負荷は、バッテリーの出力に追加される。

(4) ドライバーモデル

車両モデルの車速に応じて、パワートレインの操作を行う。目標の車速（検証する走行パターン）と車両モデルの車速を比較し、PI フィードバック制御によりパワートレインに指令する駆動力及び減速力とペダル操作量を算出する。

(5) 制御モデル

エネルギーマネージメント制御や熱マネ制御及び、空調制御など、車両システムの動作に必要な制御を実装している。各ハードウェアの消費電力や温度、そしてドライバー操作量の情報を用いて、モーターやコンプレッサーなどに制御値（モーター駆動力の上限値やコンプレッサー回転数など）を指令する。

3. 解析対象車両

xEV では電駆とエンジンを組み合わせた構成にする場合もあるが、本稿では電駆の熱マネに着眼し、BEV の MX-30 EV MODEL（以下、MX-30）を対象に行った、モデル開発（第 4 章）と熱マネシステムの検討例（第 5 章）を紹介する。

MX-30 の熱マネの特徴は、バッテリーの電力の入出力性能を最大化するために、空調システムの冷媒を用いたバッテリークーリングシステムを採用しているところである。Fig. 2 に示すように、空調システムからバッテリーに対して冷媒流路を分岐しており、バッテリーが高温になった際にバッテリー側の膨張弁を開き、冷媒を分配する。なお、その他の電駆コンポーネントは水冷システムとし、空調システムは冷房と暖房の両シーンで使用可能なヒートポンプシステムとなっている。

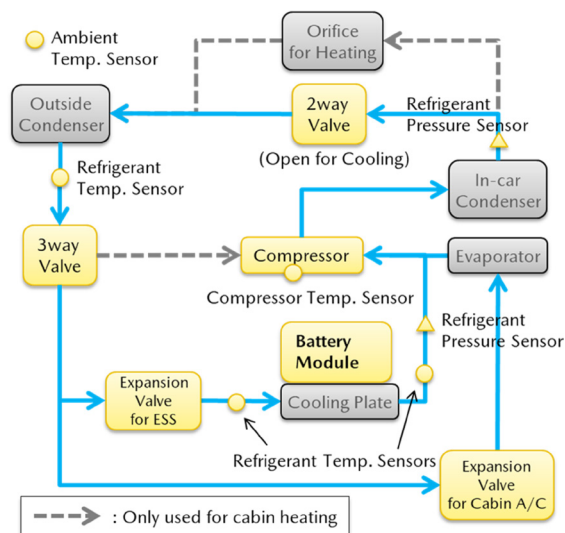


Fig. 2 MX-30 Cooling System for A/C and Battery

4. モデルの予測精度向上技術

1D 車両全体モデルでは、複雑な形状での流れや伝熱など、3D の異方向性が強い現象での挙動の再現性に課題がある。また、モデルに設定した特性データの前提条件から外れた入力に対しても、誤差が生じやすい。そこで本章では、BEV の中でも航続距離の確保に特に重要な動力変換とパワーソースの機能を担う、モーターとバッテリーを対象に、上記の課題に対する 3 点の予測精度の向上技術について紹介する。

4.1 モーター：3D-CAE によるコイル温度予測精度の向上

モーターでは、特にコイルについて、高温になると銅線の絶縁被膜の絶縁性の消失によるショートが生じてしまうため、温度管理が求められる。モデルでのコイル温度の予測が重要となる。本節では、3D-CAE を活用して、モーター熱モデルでのコイル温度の予測精度を向上させた手法について紹介する。

(1) モデルの構成

MX-30 のモーターは、埋込磁石型同期モーターであり、ハウジング内には冷却水が流れるウォータージャケットを設けている。Fig. 3 では、対象モーターの熱モデルを示しており、各構成部品の熱容量と各接点間を結ぶ熱抵抗からなる伝熱モデルと、冷却部での放熱量を計算する流体モデルで構成する。計算コストと予測精度を両立するために、温度分布を予測したいコイルについては複数の要素に分割し、その他の部品については単一の要素で表現している。なお、発熱部位はコイル、ステーター、ローター、磁石として、発熱量は磁場解析より算出した発熱特性とモーターの回転数及びトルクより算出する。

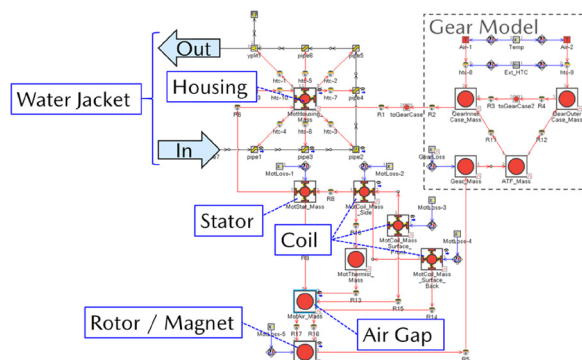


Fig. 3 Motor Thermal 1D Model

(2) 予測精度向上のアプローチ

熱モデルでは、対象部の熱容量と受放熱量から温度を計算する。ここでは、熱容量を部品の質量から求め、発熱量については磁場解析より精度を担保しているため、コイル温度の予測精度の向上方法として、コイルの放熱量に着目した。

コイルからの主要な放熱経路は、接触しているステーターを介してウォータージャケット内の冷却水に放熱する経路である。この経路上で想定される、ハウジングから冷却水への放熱量の予測精度の課題に対して、ウォータージャケットの流体モデルの詳細化による改善を図った。冷却水への放熱量は、ハウジングと冷却水の熱伝達率によって決まる。熱伝達率は流速に依存するため、冷却水の流速予測精度が重要となる。そこで、ウォータージャケット内の流速分布を 1D で再現可能な流体モデルの実装を行った。Fig. 4 に示すように、ウォータージャケットの形状 CAD から 1D に縮退し、3D-CAE での流速解析結果と同じ分布になるようにパラメーターの調整を行った。

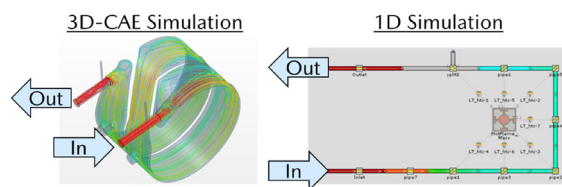


Fig. 4 Fluid Flow Simulation Result of Motor Water Jacket by 3D-CAE and 1D Model

(3) モデルの妥当性検証

Fig. 5 に、モデルの妥当性検証のため、評価ベンチを用いてモーターを定常駆動した際の、コイルの実測温度をモデルと比較した結果を示す。冷却水への放熱予測の妥当性を確認するために、冷却水の流量を複数条件設定している。黒色の実測に対して、改善前（赤色）は放熱を再現できておらず、最大で約 16% 高く温度を予測していた。一方で、改善後（青色）は約 2% まで予測精度が向上し、精度よく予測できていることを確認できた。Fig.

4 に示すような複雑な形状のウォータージャケットの場合、流速の分布がつきやすく、流速の変化をとらえて分割した流体モデルが有効といえる。

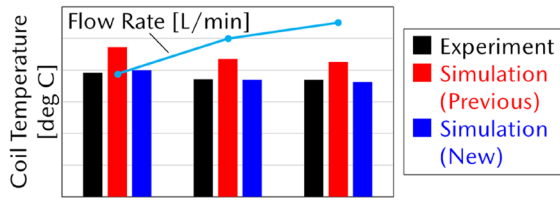


Fig. 5 Comparison Result of Motor Coil Temperature between Experiment and Simulation

4.2 バッテリー：3D-CAE によるセル間温度分布の予測

xEV で用いるバッテリーでは、高出力を実現するために、複数個のバッテリーセルを直列、並列に編成した構成を採用する。そのため、セルの位置ごとの冷却面積の違いにより、温度のばらつきが生じてしまい、セルごとの熱管理が必要となる。また、車両の駆動力や熱マネの制御には特定のセルの温度を用いるため、車両内でのエネルギーの流れや温度挙動を正確に予測するには、セル間の温度差を表現できるモデルが求められる。本節では、3D-CAE を活用して、バッテリー熱モデルでのセル間の温度分布を予測可能とした手法について紹介する。

(1) モデルの構成

MX-30 のバッテリーの構造を Fig. 6 に示す。MX-30 では、バッテリーパック内に 16 個のモジュールがあり、下面部に冷却機構として空調システムからの冷媒配管を配置している。なお、モジュールとは複数のバッテリーセルが集合した部品であり、1 個のモジュールあたり 12 個のセルから構成する。

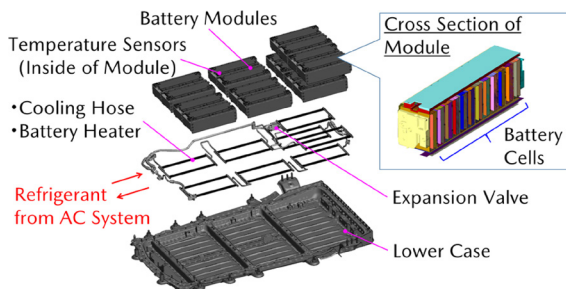


Fig. 6 Configuration of MX-30 Battery Pack

Fig. 7 に、対象バッテリーの熱モデルを示す。モデルの考え方はモーターと同様に、各構成部品の熱容量と各接点間を結ぶ熱抵抗からなる伝熱モデルと、冷却部での放熱量を計算する流体モデルから構成する。各モジュール、各セルに要素を分割し、それぞれのセルに対して発熱量を与えている。なお、発熱量はバッテリーの内部抵抗特性と入出力する電力により算出する。また、冷却部

は空調システムの冷媒を用いるため、相変化による熱伝達率など特性の変化を考慮している。

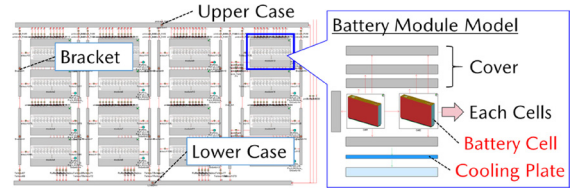


Fig. 7 Battery Thermal 1D Model

(2) 温度分布予測のアプローチ

バッテリーは複数個のセルから構成する性質上、構成部品数が多く、モデル構成が複雑になる傾向がある。そのため、各セルからの主要な放熱経路の特定が難しく、モデルの構成（分割数、要素間の接続など）や接触部の熱抵抗の決定に課題があった。その結果、セルごとの温度ばらつきの再現ができず、この課題に対して 3D-CAE を用いた改善を図った。バッテリー内の熱経路の把握を目的に、Fig. 8 に示すようにバッテリー全体の 3D-CAE モデルで熱伝導解析を行い、バッテリー内の温度分布を確認した。Fig. 9 に、3D-CAE での解析結果から再構成したモジュール内のモデルを示す。元のモデル構成に対して各部の要素数と熱経路を増やすことで、セルごとの熱移動量に差異が生じ、セル温度の分布を予測可能な構成とした。

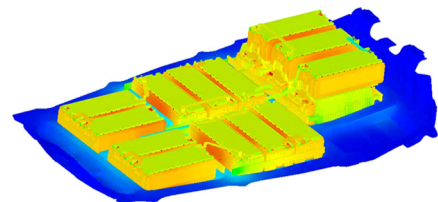


Fig. 8 Thermal Conductivity Simulation Result of Battery by 3D-CAE

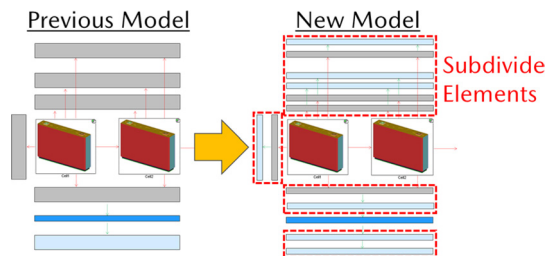


Fig. 9 Configuration Comparison of Battery Thermal 1D Model

(3) モデルの妥当性検証

Fig. 10 に、モデルの妥当性検証のため、実車走行時のセルの実測温度をモデルと比較した結果を示す。セル間の温度ばらつきの再現性を確認するために、車両に搭載した状態でバッテリー内の各セルの温度を計測した。セル No.1（濃線）はモジュール内の端側、セル No.2（薄

線)は中央側に配置されたセルの温度推移を示す。黒線の実測の温度分布に対して、改善前(薄赤線、濃赤線)は分布を再現できず、各セルの温度が近い値となり、差が大きかったセル No.1 では誤差が最大で約 8%あった。一方で、改善後(薄青線、濃青線)は約 4%まで向上し、温度分布を精度よく予測できていることを確認できた。

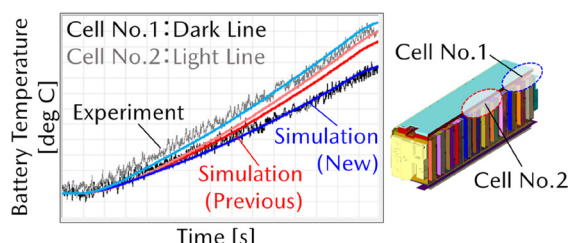


Fig. 10 Comparison Result of Battery Temperature between Experiment and Simulation

4.3 バッテリー：機械学習による電圧降下現象の予測

低温時のようなセル内の化学反応速度が十分確保できない状態で高出力の放電をした場合、電圧が急降下する現象が生じる。Fig. 11 では、単セルでの高レート(電池容量に対する電流の相対的な比率)の放電試験を行った結果を示しており、低温になるほど本来の充電容量を使い切る前に電圧が降下する。電圧降下によって保証電圧を下回った場合、走行を停止する必要があるため、目標の航続距離を満たすシステムの決定には、本現象をモデルで予測することが重要となる。

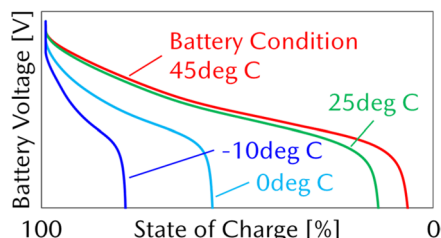


Fig. 11 Comparison Result of Battery High Rate Discharge Test

しかし従来の電圧予測手法では、Fig. 12 に示すように等価回路モデルを用いて特定のパルス試験の結果からパラメーターを同定していたため、特異な本現象の再現性に課題があった。そこで本節では、化学反応に着眼し、機械学習を活用して電圧降下現象を予測可能とした手法について紹介する。

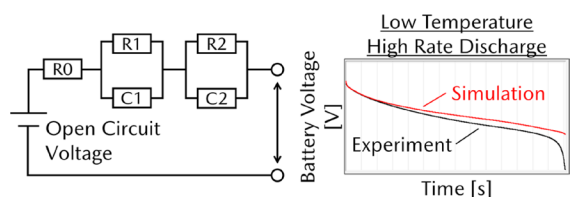


Fig. 12 Battery Voltage Equivalent Circuit Model

(1) 電圧降下現象予測のアプローチ

化学反応に基づいて電圧を予測するためには、電気化学反応とイオン輸送の方程式を連立して解く、Newman モデル⁽²⁾による計算手法を用いるが、電極の材料特性や形状などの詳細な情報が必要なため、セル内の構造がブラックボックスの状況下では精度を担保することが難しかった。また、複数の方程式を解く性質上、計算コストが高く、車両全体モデルでの使用に適していなかった。これらの課題に対する改善策として、機械学習の適用を図った。

Fig. 13 では、実装した機械学習モデルの概略図を示しており、バッテリーの入出力電流や温度など電圧の予測に必要な情報を説明変数に選定し、ニューラルネットワークを構築した。重みの学習には、単セルでの高レート放電時の実測の電圧データと、既存の等価回路モデルでのモード走行(WLTC など)の計算時の電圧予測データを用いた。その結果、特異な電圧降下と通常走行時の電圧の両挙動を高精度で予測可能とした。

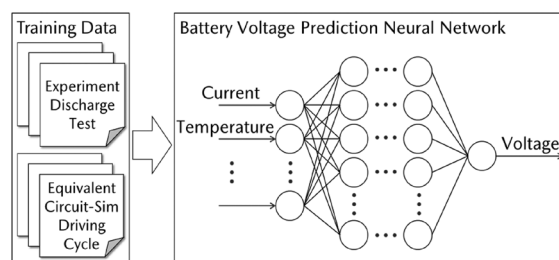


Fig. 13 Battery Voltage Prediction Neural Network

(2) モデルの妥当性検証

Fig. 14 に、モデルの妥当性検証のため、単セルでの高レート(低温)の放電とモード走行模擬(常温)の充放電時のセルの実測電圧をモデルと比較した結果を示す。黒線の実測の電圧挙動に対して、従来の等価回路モデル(赤線)ではモード走行時は高精度で再現可能だが、高レートの放電時には誤差が最大で約 18%あり、再現できていなかった。一方で、改善後の機械学習モデル(青線)では、高レートの放電時においても約 4%となり、両条件にて精度よく電圧挙動を予測可能なことが確認できた。さらに、計算コストを調べたところ等価回路モデルと同等であることが確認され、熱マネジメントシステムの検討に有効なモデルとなった。

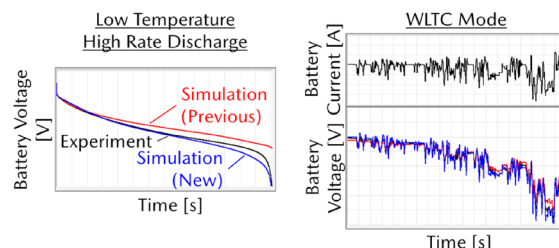


Fig. 14 Comparison Result of Battery Voltage between Experiment and Simulation

5. EV 熱マネージメントシステムの検討例

本章では、実際の BEV 開発での熱マネシステムの詳細を想定した 1D 車両全体モデルの適用例を紹介する。BEV においても外気温にかかわらず目標の性能を満たす必要があるが、本稿では、各コンポーネントが高負荷状態になる高速走行のシーンを対象に、高及び低外気温の条件にて解析を行った。

5.1 BEV の高速走行での焦点

BEV の高速走行では、まず高外気温時には、電駆コンポーネントが高温となり、所定の温度以下にあることの確認が求められる。昇温抑制のために冷却が必要な場合、特に、MX-30 のバッテリー冷却では、空調システムの冷媒を用いているため（第 3 章）、バッテリーの冷却性能と空調快適性の両立が必要となる。Fig. 15 では、冷房時にバッテリー冷却をする際のキャビンとバッテリーの温度推移を示しており、バッテリーの冷却のために冷媒を分配すると、キャビンの温度が上昇する。バッテリーへの冷媒の分配量が多いほど、空調快適性が損なわれるため、バッテリーの冷却性能を満たしつつ、空調快適性の悪化を許容できる最適な冷媒分配量の検討が求められる。

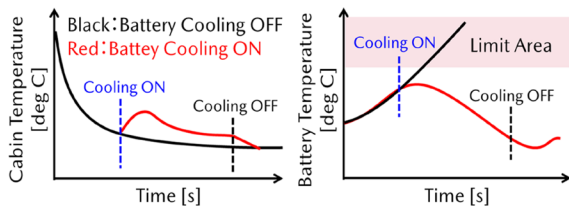


Fig. 15 Temperature Behavior of Cooling System for Air Conditioning and Battery

一方で低外気温時には、4.3 節で紹介したように、低温でのバッテリーからの高出力に伴い電圧降下が顕著となり、航続距離の低下のリスクがある。また、暖房用ヒーターの出力の低下により、空調快適性の悪化も想定され、電圧降下が所定の範囲内に抑えられることの確認が求められる。

5.2 1D 車両全体モデルの妥当性検証

5.1 節より、モデルでの電駆コンポーネントの温度とバッテリーの電圧挙動の予測が求められるため、第 4 章で紹介した予測精度の向上技術を取り入れた 1D 車両全体モデル内での、これらの予測精度の妥当性を検証した。Fig. 16 に結果を示す。モーターコイル温度、バッテリー温度、バッテリー電圧について、黒線の実測に対して、改善技術の実装前（赤線）は再現性が低かったが、改善後（青線）は最大誤差がそれぞれ従来比で約 26%、65%、61%改善し、再現性の向上が確認できた。また今回は、空調快適性と両立検討によりキャビンの温度の

予測も必要なため、実測との比較を行い、誤差が平均で約 3%と精度よく再現可能なことを確認した。なお、モーター駆動力についても高精度で予測できており、車両走行の再現性も良好である。

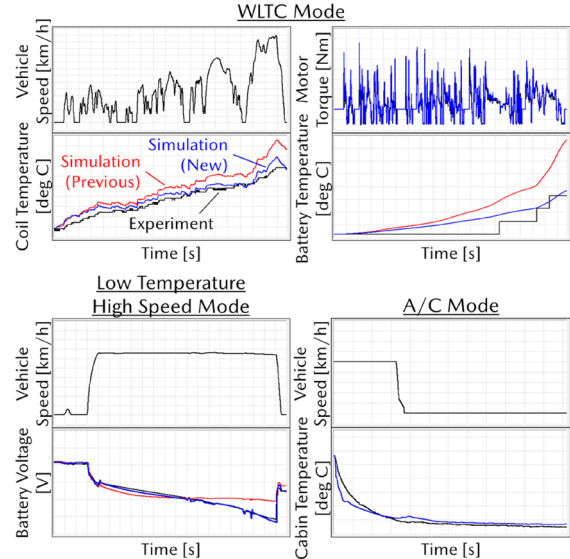


Fig. 16 Comparison Result of Vehicle System Behavior between Experiment and Simulation

5.3 熱マネシステム検討の解析結果

Fig. 17 に熱マネシステム検討の解析結果を示す。高外気温において、バッテリー冷却時の冷媒の分配量はバッテリー側の膨張弁のリフト量で制御を行う。そのため、モデル上でリフト量を複数条件設定して、各条件でのバッテリーとキャビンの温度の推移を比較した。リフト量の小さいピンク線と緑線では、空調快適性は保つことができるが、バッテリーとしては冷却エネルギーが足りず、目標の冷却性能を満たすことができなかった。一方で、リフト量の大きい青線ではバッテリーの冷却性能は満たせるが、空調快適性を顕著に損なう結果となった。以上の結果より、緑線と青線の間のリフト量にすることで（赤線）、バッテリーの冷却性能を満たしつつ、空調快適性を許容範囲内に保つことができることが分かった。また、モーターのコイル温度についても上限の温度以下を推移していることを確認した。

次に Fig. 17 のバッテリー電圧の結果では、低外気温時（暖房用ヒーター作動）の結果を追加しており（黒線）、高外気温時と比較すると電圧降下が顕著に生じていることが分かる。電圧降下は生じるが、目標の走行時間の間、暖房用ヒーターを作動しながら電圧を保つことができ、低外気温においても航続距離と空調快適性を満たせることが確認できた。

これらの検討工数を実車の実験で行った場合と比較すると、モデルを活用することで最大で約 90%の工数を削減できることが分かった。BEV では、バッテリーの充電

量を調整する必要があり、実験の準備時間が増大するため、モデル活用による工数削減効果が大きくなる。また、複数仕様の試作機を作成する時間とコスト削減のメリットも生じる。

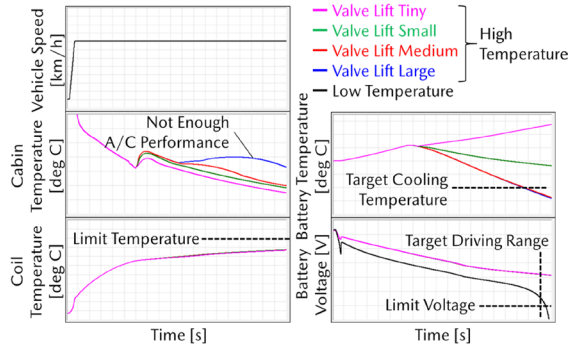


Fig. 17 Simulation Result of Thermal Management Study

■著者■



波頭 佑哉



中村 和博



山岡 祐也



松原 孝志



重森 大輝

6. おわりに

本稿では、xEVの左バンクでの熱マネジシステムの検討手法として、1D車両全体モデルを用いたMBD技術の紹介をした。

モーターのコイル温度やバッテリーのセル間温度分布、電圧降下について、3D-CAEと機械学習を活用して高精度に予測する技術を開発した。これらの技術を取り入れたモデルを用いてBEVの熱マネジシステムの検討を行い、背反課題に対して最適解を見つけ、開発効率を改善可能なことが分かった。

今後、これまで開発してきたエンジンの1Dモデルとの連成を行い、ハイブリッド車両での本モデルの活用を行う予定である。本検討手法の技術開発を更に進め、マツダの魅力ある電動車両をお客様に届けていきたい。

参考文献

- (1) MAZDA: ANNUAL REPORT (2021)
- (2) 加藤操: 1Dモデリングによる電気化学に基いたLiイオンバッテリーの高速シミュレーション手法, 第59回自動制御連合講演会講演論文集, pp.757-760 (2016)

論文・解説

35

高効率ホットスタンプ加工技術開発 Development of High-Efficiency Hot Stamping

平尾 嘉英^{*1} 井上 誠二^{*2} 大川 慧^{*3}
Yoshihide Hirao Seiji Inoue Chie Okawa
當房 勝^{*4} 奥村 聡志^{*5}
Masaru Tobo Satoshi Okumura

要約

ドライバーが意図するままに操ることのできる「人馬一体」のドライブフィールと安全性を兼ね備えた車を実現するため、乗員周りの骨格部品の強度確保と、徹底的に軽量化したボディー構造の両立に向けて日々取り組みを行っている。その主要技術のひとつであるホットスタンプは、プレス成形すると同時に焼入れを行い1800MPa級等の強度をもつ製品を造ることができる。加熱することにより成形時の材料強度が低くなるため、冷間の超高張力鋼板（超ハイテン材）の加工に比べて成形性が優位となることを利用し、これまでも形状が複雑な骨格部品にこの技術を適用してボディーを高強度・軽量化してきた。更なるボディー構造の進化及び適用部品の拡大を図るため、従来工法比4倍となる高効率な『直水冷ホットスタンプ技術』の開発を行った。本稿では、人馬一体と安全性を実現するために新世代ラージ商品群で取り組んだ高効率ホットスタンプ加工技術開発について紹介する。

Abstract

In order to realize a car that has a “Jinba Ittai” drive feel and safety, allowing a driver to experience predictable and responsive handling, Mazda has been making efforts to achieve a body structure that is thoroughly reduced in weight while ensuring the strength of the skeletal parts around an occupant. Hot stamping, which is one of the key technologies, can produce products with a strength of 1800MPa class by simultaneously press-molding and quenching the parts. Since heating lowers the material strength during molding, hot stamping has an advantage in formability compared to the process of cold forming of ultra-high tensile strength steel (ultra-high-tensile material), and it has been used for skeletal parts with complicated shapes to make the body lighter and stronger. In order to further evolve the body structure and expand the range of the applicable parts, a highly efficient “direct water-cooling hot stamping technology” that is four times as efficient as the conventional method has been developed. This paper introduces the development of high-efficiency hot stamping technology that realizes “Jinba Ittai”.

Key words : Materials, Production, High-Strength Steel Sheet, Forming process, Die, Stamping technology, Strength, Welding, Press, Hot stamping, Die quenching

1. はじめに

マツダがブランドエッセンスに掲げている「走る歓び」を体現した車をお客様にお届けするため、操縦安定性と衝突安全性はより高い次元での両立が求められている。また、地球環境への配慮にはLCA (Life Cycle Assessment) 視点でのCO₂排出量削減の取り組みが急務であり、これらの要求に応えるために自動車ボディーの更なる高強度

化と軽量化を進めている。コスト面で有利な鉄のポテンシャルを最大限に活用した上で、アルミなどの軽量材料を適材適所に採用する戦略を立てて技術開発に取り組んだ。

鋼板材料の高強度化工法の1つとしてホットスタンプがあり、マツダでもこれまで採用してきた。しかしながら、ホットスタンプ工法は冷間プレス工法と比べて生産性に課題があり、加工時のCO₂排出量削減の観点からも

*1～5 車体技術部
Body Production Engineering Dept.

生産性改善が求められる。そこで、日本製鉄(株)と共同で高効率ホットスタンプ技術の開発に取り組んできた。本稿では、この開発における部品構造の進化による軽量化及び生産性向上について紹介する。

2. ラージ商品群への適用に向けて

2.1 冷間プレスとホットスタンプ

高強度な材料を使用することで部品の板厚を薄くし、ボディ重量を低減する手法の適用拡大が進んでいる。MAZDA3 においては 980MPa 級以上の超ハイテン材の使用比率を約 30%と飛躍的に上げることで、衝突安全性と軽量化を両立した⁽¹⁾。

ボディの高強度化を達成するための技術には主に冷間プレスとホットスタンプの 2 つの工法があり、それぞれに特徴をもっている (Fig. 1)。このように生産方法に選択肢があり、部品の機能や形状ごとに適切な工法を採用することはマツダの車造りにおいて強みとなる。それぞれの工法の優位性を活かし、改善を積み重ねることで技術を深化させる取り組みが重要となる。

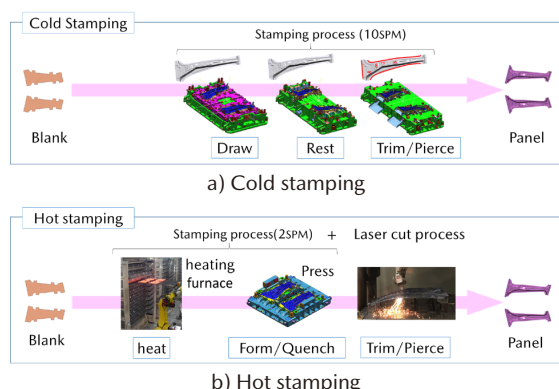


Fig. 1 Comparison of Cold Stamping and Hot Stamping

冷間プレスは鋼板の成形や穴あけ (以下、ピアス)、外形の切断 (以下、トリム) などを 3 工程程度に分けて加工している。また、Table1 に示すように生産性が非常に高い。MAZDA3 のボディでは 1310MPa 級超ハイテン材の量産化に世界で初めて成功しており⁽²⁾、更に今回のラージ商品群に向けては 1470MPa 級の量産導入を実現した。

一方でホットスタンプは、加熱炉で約 900℃まで熱した軟らかい状態の材料をプレス成形するため、複雑な形状にも対応できる成形性の良さをもつ。また、冷間プレス部品では成形した製品を金型から取り出すと、曲げた状態から元に戻ろうとするスプリングバックが発生するが、ホットスタンプではこの現象がないため形状凍結性に優れている。成形直後に金型内でパネルを急冷して焼入れを行うことで 1300MPa、1500MPa 及び 1800MPa 級の高強度を得ることができる。

Table 1 Characteristics of Stamping Method

	Strength (MPa)	Productivity	Formability	Shape fixability	Press machine capability
Cold	~1470	○	△	×	High
Hot	~1800	×	○	○	Low

2.2 ラージ商品群ボディ構造の進化

ラージ商品群では操縦安定性と衝突安全性の更なる向上を目指した。衝突性能においては各部品の受けもつ荷重配分が増えるため、従来ボディ構造のままでは性能を満足するには補強部品を追加し、製品の板厚を厚くするなどして重量が増加してしまう。そこで「性能」と「軽量化」を両立するため、開発部門との共創により材料の高強度化と部品の小型化を推進し、新たなボディ構造を造り込んだ。

Fig. 2 はラージ商品群の CX-60 における内製ホットスタンプ部品である。今回は B ピラーレイフォースメント (以下、B ピラーレイ) を例に説明する。この部品の衝突における要件は、上段部は乗員生存空間を確保するために変形させず、下段部は衝突エネルギーを吸収するために積極的に変形させることが必要である。これらを具現化する技術として、上段部へ稜線補強構造 (以下、パッチワーク構造)、下段部へテーラード構造を採用した (Fig. 3)。

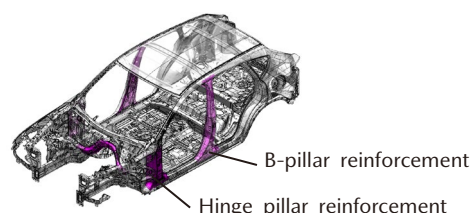


Fig. 2 In-house Hot Stamping Parts in CX-60

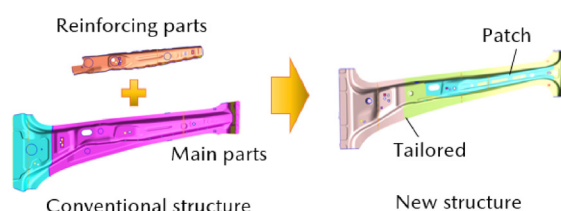


Fig. 3 Structure of B-pillar

これまでの上段部の稜線補強は、それぞれ成形された本体部品と別部品を SW 溶接することで対処してきた。これに対して Fig. 4 のパッチワーク構造は、材料段階でスポット溶接した後に成形することで溶接機の干渉等による制約を回避し、部品を小型化した (Fig. 5)。

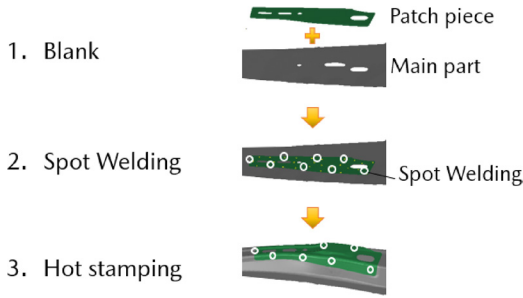


Fig. 4 Patched Hot Formed Steel

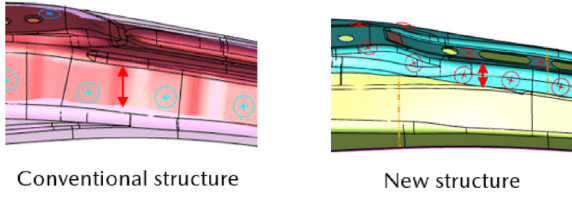
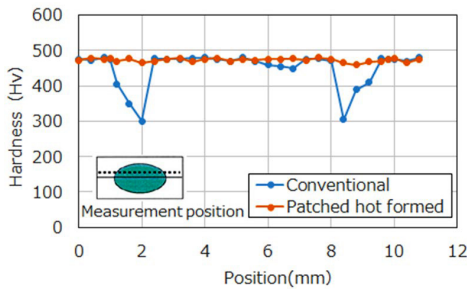
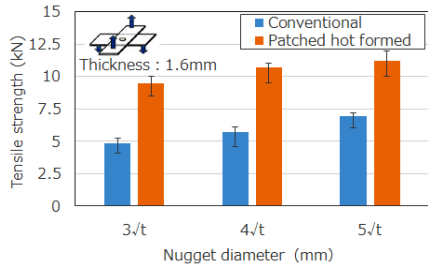


Fig. 5 Minimization of Reinforcing Parts

更に、パッチワーク構造のスポット溶接部については強度向上で性能に貢献した。一般的に、溶接する際の入熱により Fig. 6-a のような材料が部分的に軟化する現象が発生する (HAZ 軟化)。しかし、ホットスタンプ加工による再焼入れで組織が均一に変化し、HAZ 軟化がリセットされる。そのためパッチワーク溶接部の硬度は均一となり、強度が向上した (Fig. 6-b)。



a) Hardness distribution of nugget



b) Cross tensile strength of spot welds

Fig. 6 Prevent of Heat-affected Softening Zone

下段部のテーラード構造は、製品の上側と下側で強度レベルや板厚の異なる材料をレーザー溶接で繋いだテーラードウェルドブランクを用いたものである。これにより、衝突時におけるエネルギー吸収のための変形を制御した。

これらパッチワークとテーラード構造を採用すること

で、ホットスタンプの B ピラーレインでは衝突性能を向上しつつ、従来構造比 34%の軽量化を達成した。実際の量産化に向けては「工程集約による生産効率向上」と「直水冷方式採用による生産タクト向上」に重点を置いて、ホットスタンプの高効率化に取り組んできた。次章以降でこれらの課題と取り組みについて紹介する。

3. 工程集約の課題と取り組み

3.1 プレス・車体領域の工程集約

生産効率向上のため、プレス・車体領域において工程の廃止や集約に取り組んだ。パッチワーク構造は、前章の Fig. 4 で述べたように補強部品を材料段階で本体と一体化し、それをホットスタンプ成形する。この構造を採用し、車体領域の溶接工程をプレス領域に集約することにより、通常なら 4 工程で成形する補強部品のプレス工程を完全に廃止した。また、Fig. 7 に示すように一般的に後工程でレーザーカットしている製品のトリムやピースをホットスタンプ工程に取り込み、B ピラーレインで完全レーザーカットレスを目指した。次にパッチワーク構造採用とレーザーカットレスの工程集約における具体的な内容を説明する。

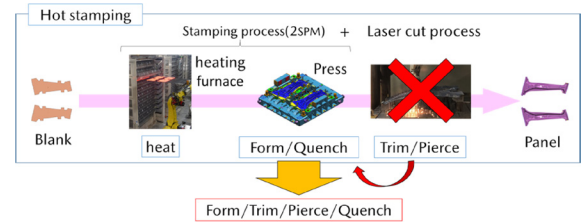


Fig. 7 Process Integration of Hot Stamping

3.2 工程集約におけるパッチワークの課題と取り組み

製品の性能確保と軽量化を達成し、工程集約を実現できるパッチワーク構造の採用には工程設計や CAE 解析手法に課題があった。

材料本体と補強部品をスポット溶接した後にホットスタンプ加工するため、成形時の板ズレ方向においてスポット溶接部にズレが発生する (Fig. 8-a)。これではねらいの溶接強度を得ることができず、衝突性能等を満足することができない。よって、スポット溶接部のズレを抑制することが工程設計時の課題であった。これに対しては性能を担保し、生産性を満足する適切なスポット溶接位置を開発部門との共創により決定した。成形で材料が引っ張られて溶接部に高応力が掛かる箇所を見極めることに加え、周りを変形させて溶接部への応力自体を減らす形状を織り込んだ。これらの取り組みにより、スポット溶接部のズレを抑制した (Fig. 8-b)。

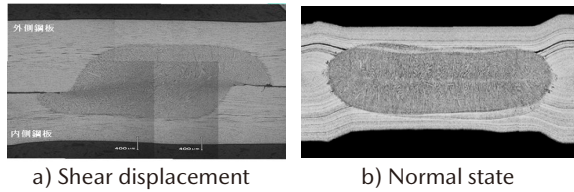


Fig. 8 Spot Welding

また、材料が2枚重なったパッチワーク状態で成形する際の製品のワレやしわ、外郭ラインの寸法精度、パッチワークスポット溶接部の位置精度の評価方法についても検討した。CO₂削減の観点から、実機を製作してのトライ&エラーではなくCAE解析を活用した机上評価は必須である。そこで、解析モデルや解析条件の検討を行い実際の成形をCAE解析に置き換える方法を確立することで、量産準備における各項目の評価を実施した (Fig. 9)。

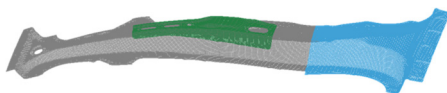


Fig. 9 Simulation of Patched Hot Formed Steel

3.3 工程集約した金型構造の課題と取り組み

レーザーカットレス実現に向けた課題は、成形工程とトリム・ピアス工程を集約した金型構造を実現することである。ホットスタンプ型では成形工程に加え、製品及び金型を冷却するための複雑な冷却水用配管などを金型内部に設定する必要がある。更にトリム・ピアス工程も1型に集約することで、レイアウトの成立性に加え、金型を破損させないための強度・剛性確保を両立する金型設計の難易度は大幅に上がった (Fig. 10)。そこで、主に2つのアプローチで金型構造を成立させた。

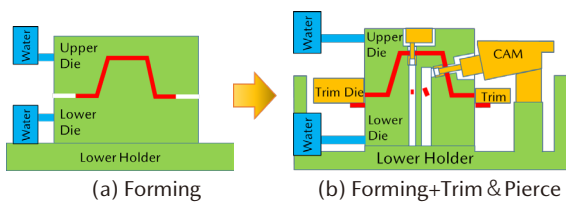


Fig. 10 Development of Hot Stamping Methods

1つ目は金型内での材料の位置決め性を向上させることである。金型での切断加工を減らすために、材料の段階で事前に切断しておくが、成形時にズレが生じると製品の寸法精度を満足できない。このズレを抑制するために位置決めを確実にを行う必要がある。具体的には製品形状内に設けた穴に対して、金型側にはピンを設定して位置決めを行った。しかし、ホットスタンプの場合は材料の熱膨張と収縮により穴径及び穴ピッチが常に変化する。更に、成形時に位置決め穴とピンが接触することにより穴変形(メクレ)を発生させてしまうと、赤熱したパネルが接触するためピンへのダメージが大きい。これらを

考慮し、製品形状及び金型構造で対策を講じた。

2つ目は金型剛性解析を活用した検討である。冷間プレスでの金型設計においてはこれまで積極的に工程を短縮しており、型強度等に懸念がある場合、CAE解析を行って金型強度を評価していた。ホットスタンプの金型設計では、更に成形解析の結果を用いた連成解析を行い (Fig. 11)、金型の強度・剛性不足箇所を漏れなく抽出した。この結果に対し、構成部品や金型材質の選定など金型構造を見直した。

これらのアプローチにより工程集約したホットスタンプ型の構造を成立させ、完全レーザーカットレスを実現した。

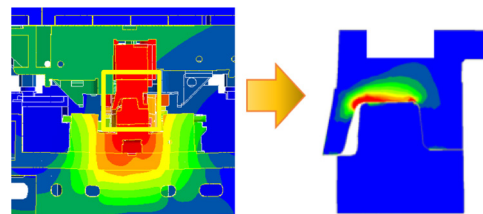


Fig. 11 Structural Analysis Results of Die

4. 直水冷方式採用の課題と取り組み

4.1 ホットスタンプの生産タクト

従来ホットスタンプ工法の課題であった生産タクトを向上するには、焼入れ冷却時間の短縮が鍵となる。パッチワーク構造の採用により、総板厚が厚くなるため冷却時間が長くなり、更なる生産タクトの悪化が想定される。そこでマツダでは、冷却性能を上げるため従来の型冷却方式ではなく直水冷方式⁽³⁾を適用すべく技術開発を行ってきた。型冷却方式とは Fig. 12-a に示すように製品を上下金型で挟み込んで抜熱する方法で、金型冷却用配管を型内に設定している。これに対して直水冷方式は直接製品に水を掛けて冷却する方法で、金型の形状面には冷却水の通り道 (以下、流路) を設定している (Fig. 12-b)。この方式を採用することにより、型冷却では冷え残っていたパッチワーク部についても時間を大幅に短縮して冷却できるため、生産性は従来工法比4倍以上の高効率を達成した (Fig. 12-a, b)。

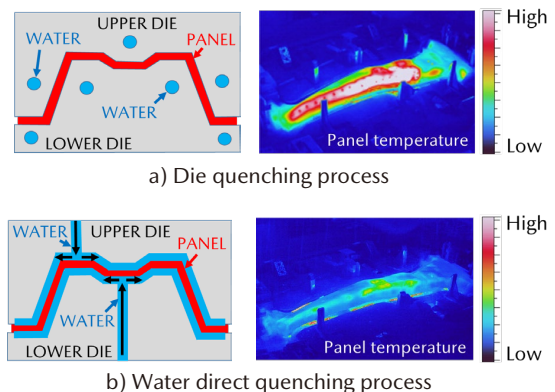


Fig. 12 Cooling Method of Hot Stamping

4.2 直水冷方式採用の課題

ホットスタンプにおける冷却の課題はパネルを均一に急速冷却することであり、これが不均一になると製品の強度低下と寸法精度の悪化を招いてしまう。ラージ商品群のBピラーレインは、性能向上のためにパッチワークとテーラード構造を採用しており、同一部品内で板厚の異なる箇所が混在する。これが不均一な冷却の原因となるため、パネルのもつ熱量が板厚によって異なることを考慮した流路設計が必要となる。更に、連続生産すると金型温度が上昇し (Fig. 13)、冷却が不均一な場合と同様の影響を製品に及ぼす。そのため、流路設計では製品だけでなく金型も冷却し、温度上昇を抑制することが求められる。

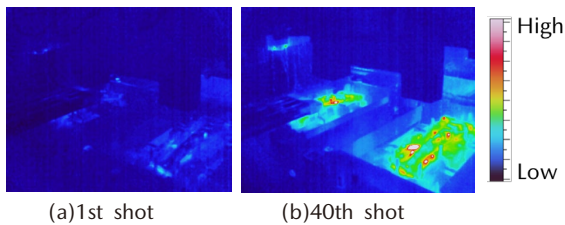


Fig. 13 Rise in Die Temperature by Production

4.3 直水冷方式採用の課題に対する取り組み

4.2 で述べた冷却課題の達成と、冷却性能を机上で評価して保証することを目指し、流体解析技術の構築に着手した。流路設計にあたっての冷却の基本的な考え方は、一般式ニュートンの冷却法則 (1) にあるように熱量 Q は、熱間パネル温度 T_p と冷却水温度 T_w の差に比例するというものである。

$$Q = Sh(T_p - T_w) \quad (1)$$

このとき、熱伝達率 h と熱間パネルと冷却水の接触面積 S の積が比例定数となる。ここで、熱伝達率に影響する冷却水の流速に着目し、机上での流速再現に取り組んだ。流速が遅い場合、長時間に及び熱間パネルと冷却水の間に蒸気の層が生じて冷却を阻害する (ライデンフロスト現象)。この影響を極力小さくするためには流速を一定値以上確保した上で、均一冷却を行うことが必要と考えた。

まず、実際の金型の型締め状態における冷却水の流れを可視化するため、製品を透明パネルに置き換えて金型に押し当て、冷間状態を模擬した流速の測定を試みた。水の中に粒子を添加し、時間ごとの粒子の挙動を測定することで流れを可視化した。この測定結果を基に実機と流体解析結果の合わせ込みを実施し、その過程においてメッシュサイズや壁面抵抗の影響を考慮した。これにより、流速が速い箇所と遅い箇所の傾向を机上で見極めることが可能となった (Fig. 14)。

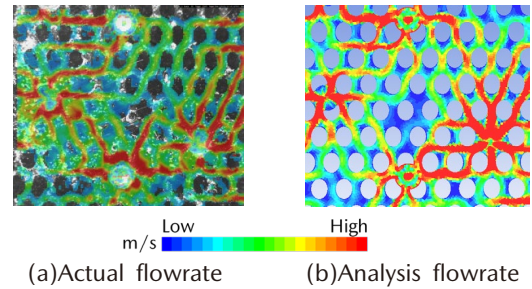


Fig. 14 Comparison of Flowrate

この流体解析技術を用いて冷却を制御するための検討を行い、流路レイアウトなどを改良した。流路内で水がぶつかり合うと流速が遅くなり、流速差が発生する。そこで、流速を妨げない流路レイアウトのパターンをいくつか構築した (Fig. 15)。パッチワークやテーラード構造の採用で板厚が異なる箇所については、それぞれに有効なレイアウトパターンを組み合わせ、更に流路間ピッチを最適化し、課題であった均一な冷却を達成した (Fig. 16)。

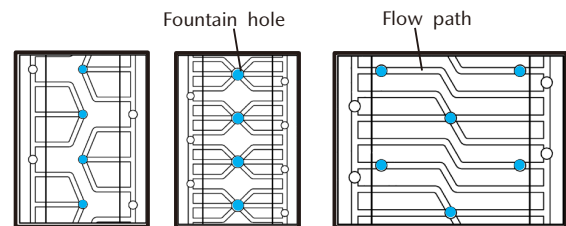


Fig. 15 Flow Path Layout

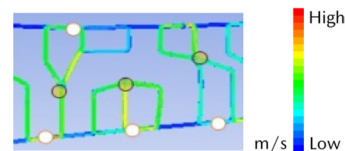


Fig. 16 Flow Velocity by Fluid Analysis

更に、連続生産時の製品強度と寸法精度を保証するため、金型表層部に仕込んだ熱電対とサーモカメラで実際金型温度を測定し、ねらいの温度以下で生産できることを確認した。

上記技術を用いて関連部門と共創し、金型設計前の製品形状検討段階において机上で均一に急速冷却するための評価を行った。そしてこの流路設計を量産金型に織り込むことで、ラージ商品群のBピラーレインに求められる製品強度と寸法精度を実現した。

5. おわりに

人馬一体と衝突安全性をより高い次元で両立した車をお客様にお届けするため、高効率ホットスタンプ加工技術の開発を行ってきた。この技術を織り込んだ製品をラージ商品群で採用できたのは、生産技術部門だけでな

く開発・工場部門と共創活動した成果である。今後も製品の性能向上や品質向上を目標に机上検証のレベルアップを図り、ホットスタンプ技術を深化させる挑戦を続け、お客様に喜んで頂ける商品を造っていく。

最後に、本技術開発は日本製鉄(株)との共同開発によるものであり、関係された皆様に感謝の意を表する。

参考文献

- (1) 佐藤ほか：新型 MAZDA3 の軽量・高剛性ボディ開発，[マツダ技報，No.36，pp.78-82 \(2019\)](#)
- (2) 酒井ほか：1310MPa 級高張力鋼板冷間プレス部品の開発，[マツダ技報，No.36，pp.192-198 \(2019\)](#)
- (3) 野村ほか：部材高機能化のためのホットスタンプ技術，日本製鉄技報，No.412，pp.21-27 (2019)

■著者■



平尾 嘉英



井上 誠二



大川 慧



當房 勝



奥村 聡志

論文・解説

36

力学的エネルギー流れの動的可視化分析手法の開発

Development of Dynamic Visualization Method of Mechanical Energy Flow

鈿持 寛正^{*1} 小平 剛央^{*2} 岡本 定良^{*3}
Hiromasa Kemmotsu Takehisa Kohira Sadayoshi Okamoto

要約

マツダでは、軽量かつ高性能な車体構造を効率的に開発するため、対話型設計支援技術を開発している。本技術は、軽量化に対し弱点となっている性能や構造の領域（以下、ボトルネック）を明確化し、それらボトルネックへの対策構造の導出を支援する技術である。これまで、ボトルネックの発見は可能となっており、更なる開発効率化のためには、その要因の深掘りにより性能向上に寄与する部位を特定し、効果的に対策につなげることが必要である。そこで、複雑な車体構造においても、静的なエネルギー状態だけでなく、動的なエネルギー流れを可視化することにより、設計者が性能向上に寄与する部位を効率的に発見し、エネルギー流れを形成させる視点から対策構造を導出できる技術として、力学的エネルギー流れの動的可視化手法を開発した。本手法を実構造に適用した結果、車体側面構造が性能向上に寄与する部位であることを明らかにし、車体側面構造にエネルギー流れを形成させる構造案を導出した。

Abstract

For the efficient development of lightweight and high-performance car body structure, Mazda has developed the interactive design support technology. This technology identifies the performance and an area of the car body structure that are bottlenecks in weight reduction (hereinafter referred to bottlenecks), and supports the derivation of an improved structure for them. In addition to the identification of bottlenecks in weight reduction, for further development efficiency, it is necessary to specify the part that can contribute to improving performance by thorough analysis of factors in the bottlenecks, and effectively leads to determination of countermeasures. Therefore, we have developed a dynamic visualization method of mechanical energy flow as a technique that enables designers to discover a contributing part for performance improvement, and derive a car body structure based on the concept of transferring dynamic energy by visualizing not only static energy states but also dynamic energy states even in the complex car body structure. As a result of applying this method to an actual car body structure, it was specified that the body side structure is the contributing part for performance improvement, and we derived a car body structure to transfer dynamic energy to the body side structure.

Key words : Vehicle development, Body structure, Body design, Weight reduction, Visualization analysis, Ustar, U*

1. はじめに

近年、多様化する顧客ニーズへの対応や商品力の差別化のため、自動車の構造や制御・安全システムは複雑化の一途を辿っている。一方、各国のCO₂規制強化に伴い、燃費に直結する自動車の軽量化も重要であるが、その両立は容易ではなく、開発費用や期間の増大化を招いている。そのため、自動車業界では、実験計測のデジタ

ル化、CAE (Computer Aided Engineering)、モデルベース開発 (MBD: Model Based Development)⁽¹⁾ などにより開発の効率化を図っているが、背反関係のある性能間のすり合わせや軽量化との両立に開発工数を要しており、軽量かつ高性能な車体構造を効率的に開発するためには、軽量化のボトルネックとなる性能や構造の領域を発見し、重点的に構造対策することが重要である。

そのための技術として対話型設計支援技術⁽²⁾⁻⁽⁴⁾を開

*1~3 技術研究所
Technical Research Center

発している。現在、対話型設計支援技術によりボトルネックの発見が可能になっており、効果的に構造対策するためには、その要因を探り性能向上に寄与する部位を特定することが必要である。これまで、軽量化のボトルネックとなる性能は、例えば、側面衝突、NVH、乗り心地に係る固有値（共振周波数）で、更に操縦安定性に係る自動車の剛性性能であることが分かっている⁽⁴⁾。衝突性能については、材料の高強度化、フレーム断面の多断面化⁽⁵⁾など、軽量化の対策構造が数多く提案されている。本論文では、構造対策が難しく、かつNVH、固有値に対しても寄与のある車体剛性性能を対象にする。

質量効率の高い剛性性能を実現するためには、車体構造全体が無駄なく機能している状態が望ましいと考えている。これに対し、歪エネルギーの変化から内部の構造状態を把握する荷重伝達指標（以下、 U^* ）⁽⁶⁾⁽⁷⁾が提案されている。しかし、車体構造は多層構造であるなど構造が複雑となっており、複雑構造への適用において、構造内部まで含めたエネルギー状態を可視化できる分析手法の開発が課題であった。

そこで、 U^* 値の 1.0 から 0.0 を十数個～数十個の領域に均等分割し、1.0（入力荷重に対して歪エネルギー変化が大きい領域）から、0.0（入力荷重に対して歪エネルギー変化が小さい領域）へ動的に可視化することでエネルギーの流れを疑似的に表現する可視化分析手法を開発した。これにより、車体全体のエネルギー流れを俯瞰でき、かつ特定の U^* 値の領域に着目することにより、性能向上に寄与する部位を効率的に発見できる。

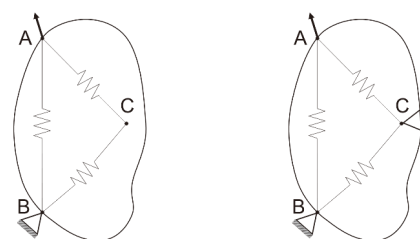
2. 構造内部のエネルギー流れを可視化する技術

2.1 従来手法とその問題点

U^* 解析により算出される U^* 値は、各節点に拘束を負荷し、拘束有無の歪エネルギー変化から疑似的な剛性変化量を算出するものである。Fig. 1 のような単純な系において、荷重負荷部の点 A、固定部の点 B、また任意の点 C を考える。Fig. 1 (a) はオリジナル構造で、Fig. 1 (b) は、点 C に拘束を付加したときのものである。点 A に強制変位を与えたときに系 (a)、(b) の内部に蓄えられる歪エネルギーをそれぞれ U 、 U' とすると、 U^* 値は点 C の拘束有無の歪エネルギーから式 (1) のように算出され、固定点 B で 0、荷重負荷点 A で 1 となる。仮に、任意の点 C が剛性に寄与する点の場合、強制変位させるために必要な力が大きくなり U' の増加に伴い U^* 値も大きくなる。このように U^* 値から入力荷重に対して寄与する部位を特定できる。

$$U^* = 1 - \left(\frac{U'}{U} \right)^{-1} \quad (1)$$

U^* 解析の有効性検証のため、Fig. 2 に示す四角断面の中空フレームを用いて U^* 解析を実施した。境界条件は、Fig. 2(a) に示すように長手方向の端点の一方を 6 自由度

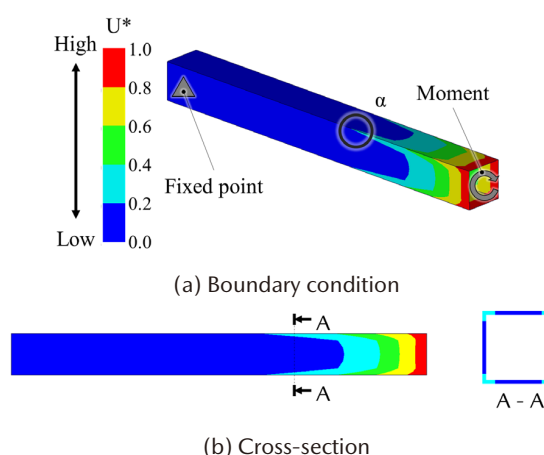


(a) Original structure (b) Restrained structure

Fig. 1 U^* Analysis⁽⁶⁾

完全固定し、もう片方の端点に軸中心まわりのねじり荷重を与えた条件である。なお、 U^* 解析は強制変位を付与する必要があるため、実際には、ねじり中心から半径方向に伸ばした剛体要素の端点に強制変位を与えている。Fig. 2 (b) は、A-A 断面における U^* 分布を示しており、稜線部が平面部と比較して U^* 値が高くなっていることが分かる。理論上、ねじり剛性は、横弾性係数とねじり係数の積で表され、ねじり係数は、ねじり中心軸からの距離に依存し、距離が遠くなるほど高くなり、中心軸から遠い距離にある稜線部が高い U^* 値を示した U^* 解析の結果と一致する結果である。この結果から、 U^* 値を用いることにより、ある入力荷重に対する各部位の寄与を算出でき、本モデルにおいては、稜線部に荷重伝達すると考えられる。つまり荷重伝達経路の予測には、Fig. 2 (a) の α 部のような山部を見つけることが重要になる。なお、本論文では、 U^* 値は、内部の歪エネルギー変化から算出されることから、荷重伝達をエネルギー流れと定義し呼称する。

しかし、数百点数もある自動車車体構造においては、フレーム部が多層、多角構造 (Fig. 3) であるなど構造が複雑で、 U^* 解析結果をそのままコンタ表示するだけでは U^* 値の山部を正確に判断できず、そこからエネルギー流れを予測するのは困難である。よって、複雑な車体構造においてもエネルギー流れを予測可能な可視化分析手法の開発が課題である。



(a) Boundary condition (b) Cross-section

Fig. 2 Result of U^* Analysis in Simple Frame

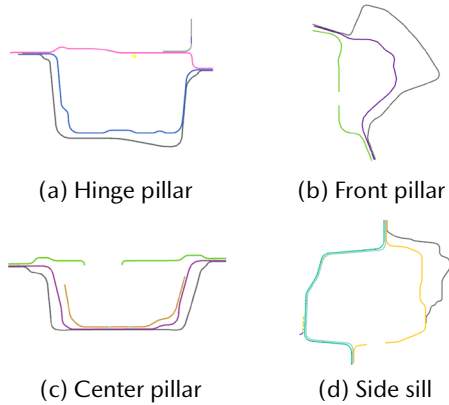


Fig. 3 Cross-section of a Car Body

2.2 力学的エネルギー流れの動的可視化手法の提案

自動車車体構造は、Fig. 3 に示したように多角断面を成しており、2.1 節でも述べたように稜線部（角部）が平面部と比較してエネルギー流れが形成される構造になっている。また、近傍の稜線部は、同時にエネルギーが流れるように設計されている。つまり、 U^* 解析によって、同時にエネルギーが流れているか否かを明示し、稜線部間の比較が可能になれば、剛性低下の要因となる構造の発見につながると考える。この考え方を基に考案した提案手法のフローを Fig. 4 に示す。本手法は、領域分割、動的可視化、エネルギー流れの予測、性能向上に寄与する部位の発見に大別でき、(1) 項より詳しく説明する。

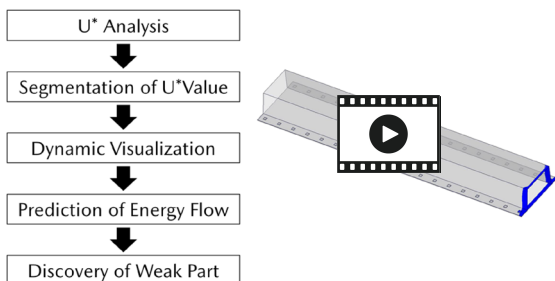


Fig. 4 Flowchart of the Proposed Method

(1) 分割手法と可視化手法

性能向上に寄与する部位を効率的に発見する技術として、 U^* 値を十数個～数十個の領域に均等分割し、動的に可視化する手法を提案する。本手法を用いて、点接合のフランジをもつハット型断面フレームに適用した事例を Fig. 5 に示す。これは U^* 値を 10 分割した時の結果を示しており、分割した各領域（青色部）を U^* 値の高い方から低い方に動的に表示することで入力点から固定点へのエネルギー流れを疑似的に可視化できる。本手法は、設計者がインタラクティブに操作できるようにするため、有償ポストプロセッサ Animator4 と連携させたシステムで構築しており、設計者が見たい領域だけを表示させて見ることも可能で、詳細分析による効率的な設計知見の発見を可能にする。

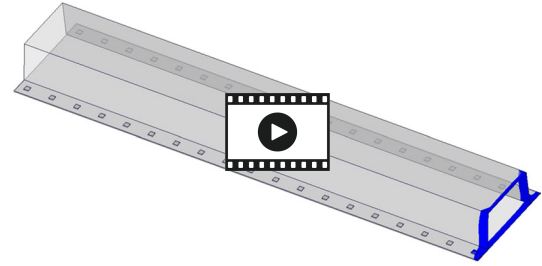


Fig. 5 Visualization Method

(2) エネルギー流れの予測

本項では、(1) 項で提案した可視化手法から、詳細にエネルギー流れの予測を試みる。Fig. 6 は、Fig. 5 の分割領域のうち、 U^* 値が 0.0-0.1 の区間を青色、0.1-0.2 の区間を赤色、0.2-0.3 の区間を青色で示したものである。フレーム稜線部の点 a では、周辺と比べ U^* 値が大きくなっているのが分かる。点 b も同様である。荷重は剛性の高い部分でより多くの荷重を受けもつと考えられるので、点 a → b のように周辺に比べ U^* 値、つまり剛性の高い山部を入力点から固定点に追っていくことでエネルギー流れを予測できる。今回の場合、エネルギー流れが形成される部位は各稜線部であり、2.1 節で説明した、ねじり剛性の理論と一致しており妥当であるといえる。

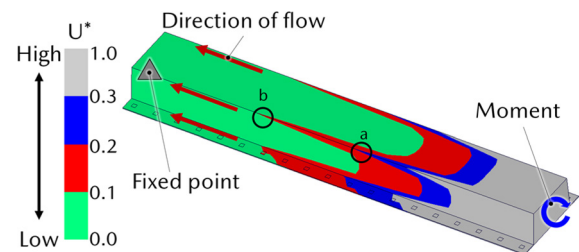


Fig. 6 Prediction Method of Energy Flow

(3) 性能向上に寄与する部位を発見する手法

本論文の目的である、性能向上に寄与する部位の発見のためには、エネルギー流れを把握しエネルギーが流れていない部位を特定する必要がある。ここでは、エネルギー流れの有無の判断方法と性能向上に寄与する部位を発見する着眼点について説明する。Fig. 7 は、自動車車体構造のフレームを単純化したアウターフレームとインナーフレームの二重構造をもつハット型断面フレームに、境界条件として、長手方向の端点の一方を 6 自由度完全固定し、もう片方の端点に軸中心まわりのねじり荷重を与えたものである。その時の提案手法の適用結果を Fig. 8 に示す。領域分割数は 40 で、0.200-0.225 の範囲を青色で示している。2 章で、エネルギー流れの予測には、周囲に対して剛性の高い山部を見つけることが重要であると述べた。それを基に、Fig. 8 を見ると、(a) のアウターフレーム (A 部) に比べ、(b) のインナーフレーム (A' 部) の山部が顕著になっていることが分かる。これ

は、アウターフレームにエネルギー流れが形成されていない、つまり、アウターフレームが機能していないことを意味しているといえる。通常、(設計者が求める機能として) 稜線部には同等にエネルギーが流れることが望ましく、期待されるエネルギー流れと、実際の流れとの差異に着目することで性能向上に寄与する部位を効率的に発見することができる。

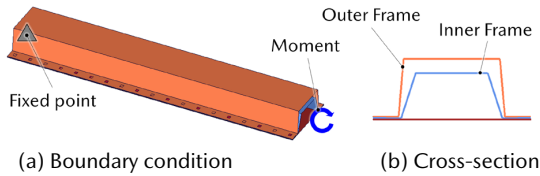


Fig. 7 Verification Model

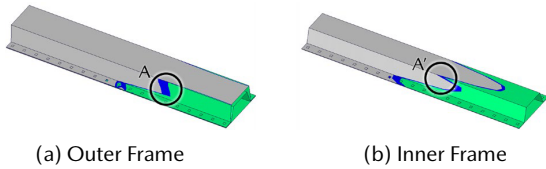


Fig. 8 Application Result of the Proposed Method

3. 自動車車体構造への適用事例

自動車車体構造への適用例として、MAZDA3 (有限要素モデル節点数: 約 60 万点) に本手法を適用した事例を紹介する。近藤らの研究⁽⁴⁾において、各性能で軽量化のしにくさ(軽量化阻害度)を算出した結果、軽量化のボトルネックとなる性能は、特に、乗り心地に係る固有値であることが分かっている (Fig. 9)。また、固有値を含むボトルネックとなる性能間の背反関係から、Fig. 10 に示す領域を含む車体の側面構造が重点的に構造対策する領域であることが分かっている。そこで、本検証では、性能として固有値を、領域として車体の側面構造を対象とする。なお、 U^* 解析は、有限要素法の静解析で行うため、Fig. 11 のように車体前側のサスペンションと車体との取り付け部にねじり荷重(強制変位)を与え、車体後方のサスペンションと車体との取り付け部を固定した境界条件で固有値のねじり変形モードを再現している。 U^* 値の領域分割数は 40 である。なお、自動車車体構造の各部位の名称は、ハンドブック⁽⁸⁾ から引用している。

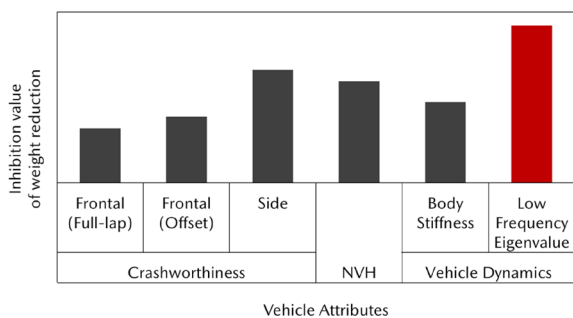


Fig. 9 Inhibition Value of Weight Reduction

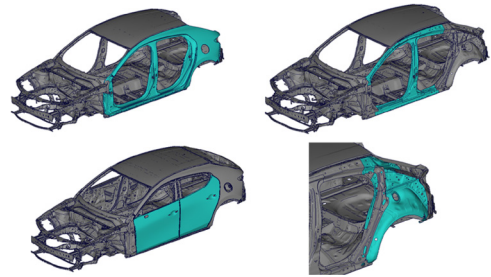


Fig. 10 Weakness Structures

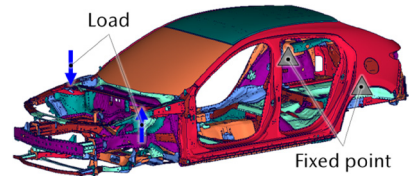


Fig. 11 Boundary Condition

3.1 適用結果

Fig. 12 に適用結果のうち、エネルギー流れの差異が顕著であったフロントピラーとサイドシルについて、アウターフレームとインナーフレームの U^* 値が同等の領域を示している。青色のコンタが同じ U^* 値の範囲を示しており、インナーフレームでは山部が顕著になっている状態 (図中○印) に対して、アウターフレームでは山部が見られない。自動車の車体構造の場合、同一フレーム内の稜線部に同時にエネルギーが流れるように設計されており、アウターフレームとインナーフレームで山部が顕著になるはずであるが、本結果では、アウターフレームにエネルギーが流れておらずアウターフレームが機能していないと考えられる。このように、本来、機能すべき部品が U^* 値の動的可視化によって、性能向上に寄与する部位として発見可能である。

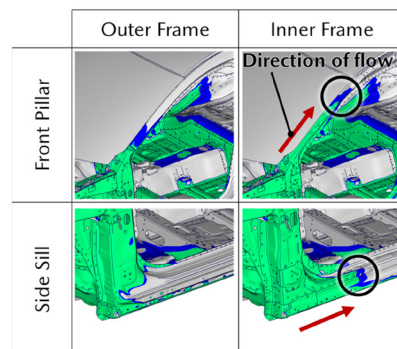
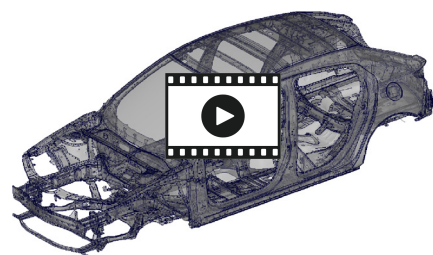
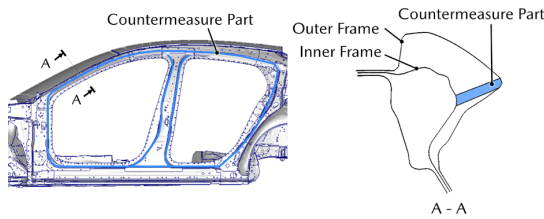


Fig. 12 Application Result of the Proposed Method

3.2 構造対策検討

3.1 節の妥当性検証として、機能していないアウターフレームへエネルギー流れを形成するため、Fig. 13 のようにアウターフレームとインナーフレームの稜線同士をつなぐ構造対策を行い、性能検証とアウターフレームへのエネルギー流れの検証を行った。まず性能について対策前、後のねじり固有値の性能を評価した結果を Fig. 14 に示す。対策前の性能を 100 % とした時、構造対策により 6 % 性能向上しており、対策により大幅に性能向上している。また、主要な車体骨格を対象とした軽量化検討により、約 14kg の板厚低減効果があることも分かっている (Fig. 15)。続いてエネルギー流れについて、対策構造に本手法を適用した結果のうちフロントピラーの例を Fig. 16 に示すが、Fig. 12 で山部が顕著でなかったアウターフレームに山部が形成されており (図中○印)、アウターフレームへエネルギーが流れていることが分かる。Fig. 17 に、本境界条件での対策前後の歪エネルギー分布と対策部位である車体側面構造の歪エネルギーの総和を示すが、対策前後で歪エネルギー量は 7% 以上と大幅に改善し、更には、対策前には発生していなかったアウターフレームのフロントピラー前部・後部に歪エネルギーが発生している (図中○印)。これは、アウターフレームにエネルギー流れが形成された結果であり、本結果からも、提案手法は性能向上に寄与する部位の効率的な発見が可能であるといえる。

また、Fig. 18 に、固有値の横曲げ変形モード、縦曲げ変形モード、側面衝突を含む性能評価結果を示すが、今回、対象とした全ての性能が向上しており、基本性能である剛性性能の向上に寄与する部位の発見により、複数の性能を同時に満足する車体構造を導出できる可能性があると考えられる。



(a) Setting area (b) Cross-section

Fig. 13 Countermeasure Structure

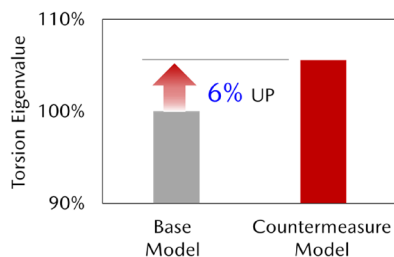


Fig. 14 Evaluation Result of Torsion Eigenvalue

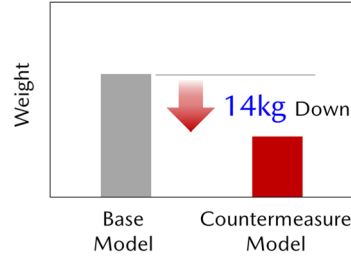


Fig. 15 Effects of Weight Reduction by Countermeasures

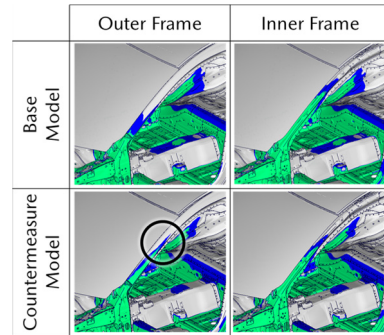


Fig. 16 Result of Energy Flow before and after Countermeasures

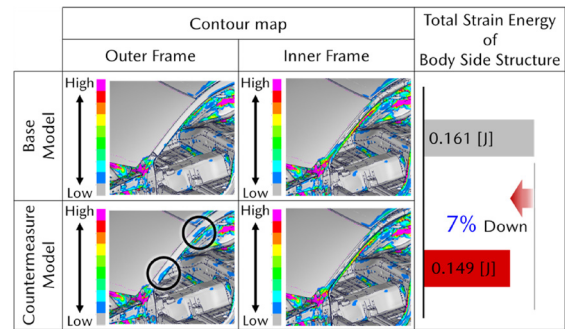


Fig. 17 Result of Total Strain Energy and Distribution

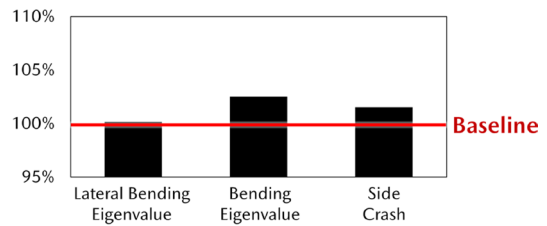


Fig. 18 Result of Other Evaluation

4. おわりに

今回、構造内部のエネルギー流れから性能向上に寄与する部位を効率的に特定する技術として、U* 値を等分割し、U* 値を動的に可視化する可視化手法を開発した。軽量化のボトルネックである固有値のねじり変形モードを対象に、本手法を自動車の実構造に適用した結果、フロントピラー、サイドシルのアウターフレームとインナーフレームとの周囲に対して剛性の高い山部の顕著性から性能向上に寄与する部位を発見した。更には、構造対策

により車体ねじり剛性、ねじり固有値が向上することを示し、本手法の妥当性も検証により明らかにした。また、車体ねじり剛性を改善させることで、側面衝突や他の固有値の改善も見られ、本手法の適用により、複数の性能を同時に満足する設計解を発想できる可能性を示した。

本研究を含む対話型設計支援技術は、Fig. 19(b)に示すプロセスに対応しており、Fig. 19(a)の従来プロセスに対して構造検討サイクルの極小化が期待できる。今後は、寄与分析などの分析技術との連携により弱点となり得る部位を明示し、より効率的に性能向上に寄与する部位を発見できる可視化分析手法を開発していく。また、大幅な計算工数、リソースを要するU*解析の計算短縮化を行い、更なる開発の効率化に向け取り組んでいく。

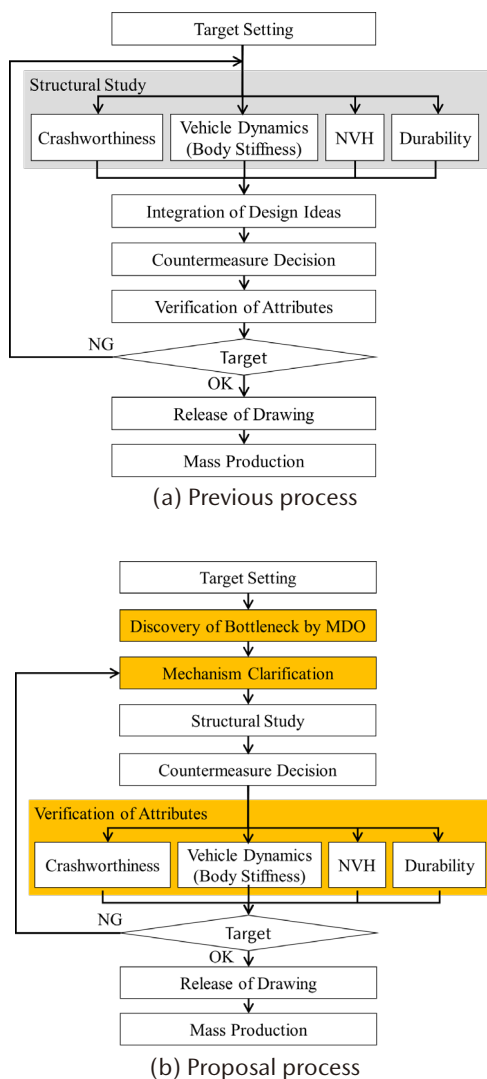


Fig. 19 Structural Design Process

参考文献

(1) 藤川智士：マツダの目指すモデルベース開発，[マツダ技報](#)，No.31，pp.44-47 (2013)
 (2) 小平剛央ほか：複合領域最適化とトレードオフ分析

による車体構造の軽量化に向けた設計知見の抽出，電気学会論文誌C（電子・情報・システム部門誌），Vol.134，No.9，pp.1348-1354（2014）

(3) 立川智章ほか：インタラクティブ散布図行列可視化ツール iSPM の開発，計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会 2015（SSI2015）講演論文集，pp.648-652（2015）
 (4) 近藤俊樹ほか：自動車車体における構造知見の効率的発見のための設計支援技術の開発(1) 進化的因子抽出と因子選択確率を利用した非線形スパースモデリングの提案，第31回設計工学・システム部門講演会前刷集，No.2202，pp.1-10（2021）
 (5) 本田正徳ほか：高強度・薄板中空フレーム曲げ強度の質量効率を向上させる断面形状の研究，日本機械学会論文集，Vol.87，No.900，pp.21-00096（2021）
 (6) 信夫学ほか：乗用車車体構造における荷重伝達とその経路，自動車技術会論文集，Vol.26，No.3，pp.126-131（1995）
 (7) 高橋邦弘ほか：構造物内部における荷重伝達経路の新たな表現方法，日本機械学会論文集A編，Vol.71，No.708，pp.1097-1102（2005）
 (8) 自動車技術会：自動車技術ハンドブック設計（デザイン・車体）編（第4分冊），pp.60-65（2016）

■ 著 者 ■



釘持 寛正



小平 剛央



岡本 定良

論文・解説

37

機械学習による衝突荷重伝達経路の解明

Clarification of Impact Load Transfer Path Using Machine Learning

奥山 智仁^{*1} 本田 正徳^{*2} 目良 貢^{*3}
Tomohito Okuyama Masanori Honda Mitsugu Mera
雪田 恭兵^{*4} 木崎 勇^{*5}
Kyohei Yukita Isamu Kizaki

要約

二酸化炭素の排出量削減を目的とした軽量化と高い安全性の両立を実現するため、従来は側面衝突時に荷重が集中する車体フレームの高強度化を図っていたが、新たに荷重を分散するドアパネル構造を考案した。ドアパネルから車体フレームへの荷重伝達は、ドアパネルの変形により車体フレームと接触することで生じる。そのため、荷重伝達経路の解明には、非線形な時系列データの分析が必要であり、機械学習を用いたグラフ構造化分析手法⁽¹⁾により明らかにした。荷重伝達経路のポイントは、リアボディー部におけるドアパネルと車体フレームの接触である。更に、接触に寄与するドアパネル部位は、リアドアだけでなく、フロントドアのサイドシル部であることを明らかにした。

Abstract

A door panel structure that disperses the load in a side surface collision is newly developed to achieve both weight reduction and high safety for reducing carbon dioxide emissions. The load transmission from the door panel to the vehicle body frame occurs when the door panel is deformed and comes into contact with the vehicle body frame. Therefore, it is necessary to analyze non-linear time series data to elucidate the load transmission path, and we clarified it using a graph structured analysis method. The key for the formation of the load transmission path is the contact between the door panel and the vehicle body frame in the rear body. It is also clarified that the door panel part that contributes to the contact is not only the rear door side sill but also the front door side sill.

Key words : Vehicle development, Safety, Computer aided engineering, Crash safety, Structural member analysis, Impact attenuation

1. はじめに

近年、二酸化炭素の排出量低減に向けて、さらなる車両の軽量化が必須となる一方、乗員の安全性を確保するため、高い衝突安全性能が求められている。

従来、側面の衝突安全性の確保は、車体フレームのBピラーに局所的な荷重が入力されることを起点に、ルーフやフロアへの荷重伝達や、変形モードを制御する骨格構造により実現している。そのため、Bピラーをはじめとした車体フレームの骨格部材は、高強度鋼板や樹脂に

よるフレーム補強構造⁽²⁾、薄板座屈理論に基づいた断面技術⁽³⁾を用いて、軽量化と高強度化を両立してきた。一方、荷重が伝達する経路形成は、車格による差異は多少あるが、大きく変わっていない。そこで、側面衝突時に最初に衝突体と接触するドアのパネルを活用し、車体フレームへの荷重を分散させるコンセプトを考案した。

ドアパネルは、衝突時に大きく変形し、車体フレームと接触しながら荷重を伝達するため、変形挙動の制御が荷重分散のキーとなる。また、車体フレームへ伝達する荷重の大きさやモードは、接触するタイミングや部位に

*1~3 技術研究所
Technical Research Center

*4 ボデー開発部
Body Development Dept.

*5 衝突性能開発部
Crash Safety Development Dept.

より異なるため、荷重伝達経路に影響すると考える。そこで、ドアパネルの強度分布と、ドアパネルから車体フレームへの荷重伝達経路との関係導出を課題とした。

衝突現象の解明は、車両各部位の発生荷重や変形量の複数因子、更に各因子の時間変動も含めたデータを仕様差異（今回の検討ではドアパネルの強度分布）から分析する方法がある。しかし、剛性観点では位相最適化と荷重伝達指標 Ustar を用いた報告⁽⁴⁾はあるが、衝突現象において扱う非線形な時系列データを分析する手法の報告は少ない。そこで、統計探索手法のひとつであり、データの離散化と標準化によりベイズ理論に基づいた分析が可能であるグラフ構造化分析手法⁽¹⁾に着目した。本稿では、グラフ構造化分析により、車体フレームの任意部位に荷重を伝達するためのドアパネルの主要部位の選出、及び荷重の伝達経路を明らかにしたので報告する。

2. 解析方法

2.1 解析フロー

分析手法の検討順序は、①衝突解析による教師データの取得、②応答曲面を用いたデータ補間、③グラフ構造化分析を用いたデータ解析の3段階で進めた。

入力因子は、21分割したドアパネルの板厚とした (Fig. 1)。説明変数は、ドアパネルと車体フレームの各断面における荷重やモーメント、及びドアと車体フレームとの接触荷重のそれぞれ 10ms ごとの各値とした。出力因子は、衝突後の残存距離 (Fig. 2)。シート着座中心から車体フレームが車室内に最大変形した位置との距離やドア移動量とした。因子数は、入力因子が 21 個、説明変数が 485 個、出力因子が 163 個の計 669 個とした。

衝突条件は、Insurance for Highway Safety (IIHS) の側面衝突プロトコルに基づき、ハニカムバリアの質量を 1900kg、衝突速度を 60km/h とした。衝突解析は、汎用非線形解析ソフトウェアである LS-DYNA を使用した。

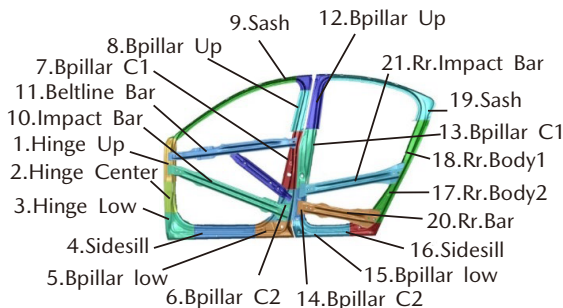


Fig. 1 Door Panel Parts of Input Factors

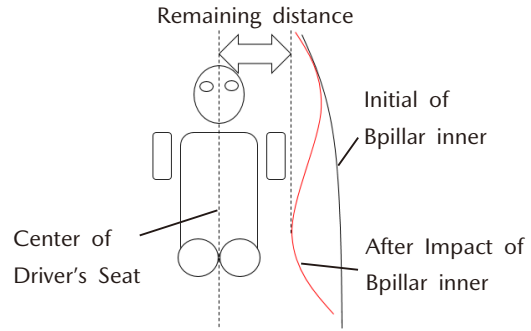


Fig. 2 Remaining Distance

2.2 グラフ構造化分析

グラフ構造化分析は、時系列データをはじめ連続量をもつような複数の因子のセットに対し、多水準系にカテゴリ化（離散化）した上でベイジアンネットワークの構造を BDeu (Bayesian Dirichlet equivalence uniform) スコア最大化に基づき学習するとともに、着目したい変数（子ノード）に辿り着く因子（親ノード）の階層構造を自動的に抽出可能な分析手法である⁽¹⁾。階層構造のイメージは、過去の因子を X11~1n と Y11、現在の因子を X21~2n と Y22、未来の因子を X31~3n と Y33 とするデータを例にとると、着目したい因子（親）Y33 に対して、関係をもつ因子（子）が X22 や X11 が選出され、因子間を線で結ぶことで視覚的に把握できる状態を示す (Fig. 3)。

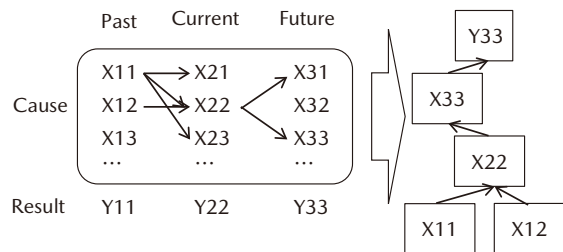


Fig. 3 Image of Hierarchical Structure

本解析においては、ドアパネル部位、ドアパネルや車体フレーム各部位の断面荷重やモーメント、ドアパネルと車体フレームの接触荷重、衝突後の残存距離やドア移動量の因子セットに対し、グラフ構造化分析を適用することで、着目したい出力因子である衝突後の残存距離やフロア断面荷重に対して時刻歴とともに因子のつながりを解析した。

3. 解析結果

3.1 衝突解析による教師データ取得

衝突解析による教師データは、ドアパネル各部位の板厚分布を 0.3mm から 3.0mm まで離散化幅を 0.1mm とし、ランダムに変動させた 220 パターンを LS-DYNA で解析した。

得られた解析結果は、ドアパネルの質量と衝突後の残

存距離との関係から適度な範囲でデータ取得できており、教師データとして使用できると判断した (Fig. 4)。また、車体フレームへの荷重伝達の 1 指標としたフロアの断面荷重は、ドアパネルの質量増加により大きくなる傾向を示すが、64~88kN と幅が大きくなる。これは、フロアの断面荷重に対して、ドアパネルの寄与度が高い部位を高強度化している、もしくはドアパネル全体の強度分布の適正化が重要と考えた (Fig. 5)。

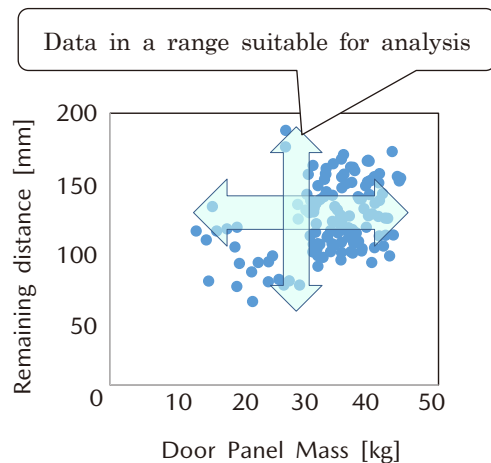


Fig. 4 Relationship Doors and Body Deformation

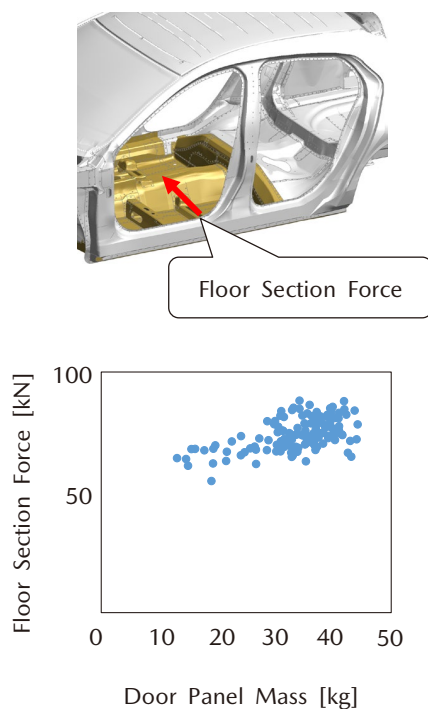


Fig. 5 Relationship Doors and Floor Section Force

3.2 応答曲面を用いたデータ補間

今回検討する題材のグラフ構造化分析の実行は、前述の衝突解析 220 仕様よりデータ数が多く必要である。そのため、汎用の設計者支援ツールである modeFRONTIER を用いて、応答曲面法を利用した最適化解析によりデータを補

間した。

応答曲面は、衝突解析を教師データとし、全因子に対して作成した。応答曲面を用いたデータは、目的関数を衝突後の残存距離が最大、ドアパネルの質量が最小、ドア侵入量が最小とする最適化解析を実行し、検討過程で得られた 20000 仕様の解析結果を示す。なお、機械学習に用いる教師データとして、応答曲面法を用いた最適化解析結果の補間方法は、定量性は劣るが、定性的な分析であることと計算コストを考慮して採用した。

応答曲面を用いたデータは、衝突解析のデータと比較し、決定係数 R^2 が 0.91 と高いことから、教師データとして使用できると判断した (Fig. 6)。

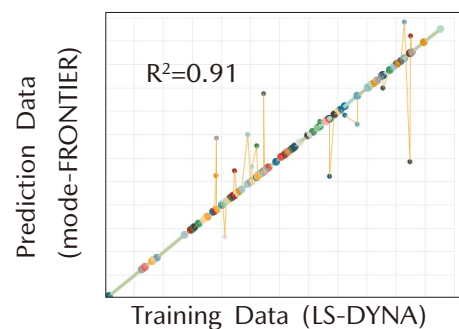


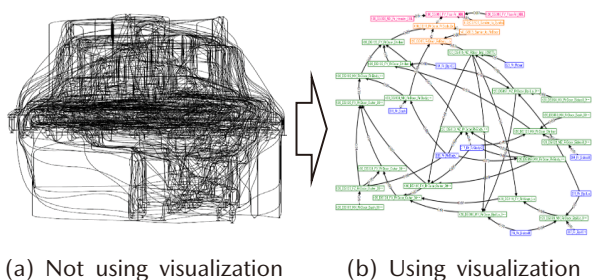
Fig. 6 Comparison of Training Data and Predicted Data for Body Deformation Amount

3.3 グラフ構造化分析を用いたデータ解析

グラフ構造化分析は、因子間の親子関係を 30ms, 40ms, 50ms の各因子を定義し、時刻歴の順番にシンプルなマルコフ性を考慮した制約条件を課した。すなわち、30ms の因子は 40ms の因子の親ノードにしかならず、40ms の因子は 50ms の親ノードにしかならない、といった制約条件を課しながら適用した。

分析結果は、全ての因子間のつながりを表記すると解釈が困難であるため (Fig. 7(a)), ネットワークを分かりやすく可視化し、着目する因子、かつ相関関係が強い因子のみを表記した (Fig. 7(b))。表記は、青色を入力因子、緑色をドアの断面荷重、黄色をドアパネルと車体フレームの接触荷重、桃色を車体フレームの断面荷重、赤色を出力因子とした。

フロア断面荷重を出力とした分析結果は、後席のドアパネルと車体フレームのリアボディー部の接触荷重が親子関係を持ち、ドアパネルの前側はサイドシル部と後側ほぼ全面が親子関係をもっていることが分かった (Fig. 8)。しかし、リアボディー部の接触荷重に対し、ドアパネル前側のサイドシル部が親子関係をもつ要因が分からないため、次節にて考察する。



(a) Not using visualization (b) Using visualization

Fig. 7 Effect of Visualization Method of Graph Structured Analysis

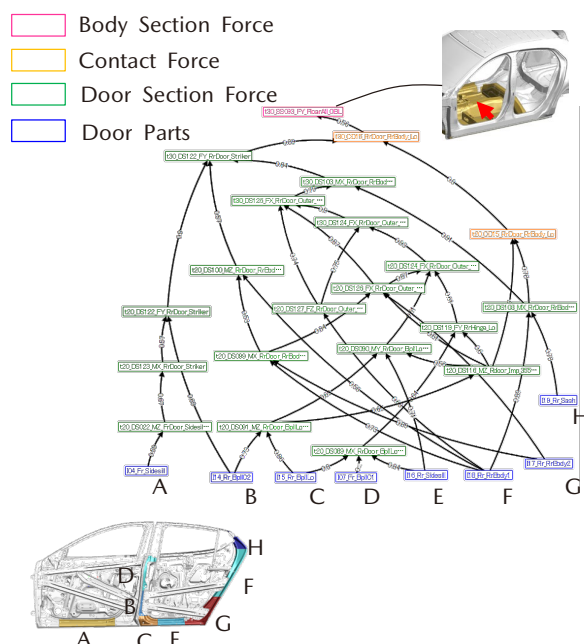


Fig. 8 Graph Structured Analysis for Floor Section Force

3.4 グラフ構造化分析結果の考察

ドアパネル前側のサイドシル部とフロア荷重との関係性は、衝突解析のデータ比較により明らかにした。比較した仕様は、フロア断面荷重に差異があり、かつ前側ドアパネルのサイドシル部の板厚に差異がある2仕様とした (Fig. 9)。

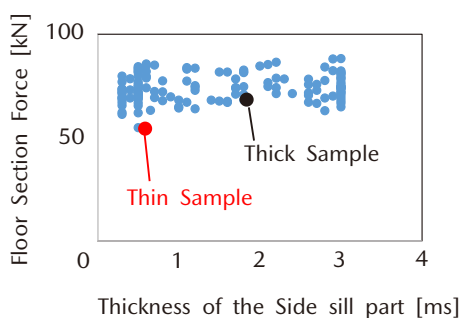


Fig. 9 Relationship between Floor Section Force at 30ms and Thickness of Side Sill of Front Door

前側ドアパネルの厚板仕様は、薄板仕様と比較し、20msにおけるサイドシル前端部及び後端部の接触荷重が大きい (Fig. 10)。また、30msにおいては、車体フレームのサイドシル部の曲げモーメントが厚板仕様の方が大きかった (Fig. 11)。よって、ドアパネルのサイドシル部の高強度化は、従来はBピラー部に集中していた接触荷重をサイドシル前後端に分散させ、車体フレームのねじり変形を抑制したことで、リアボディー部の接触荷重を大きくできたものと考察した (Fig. 12)。

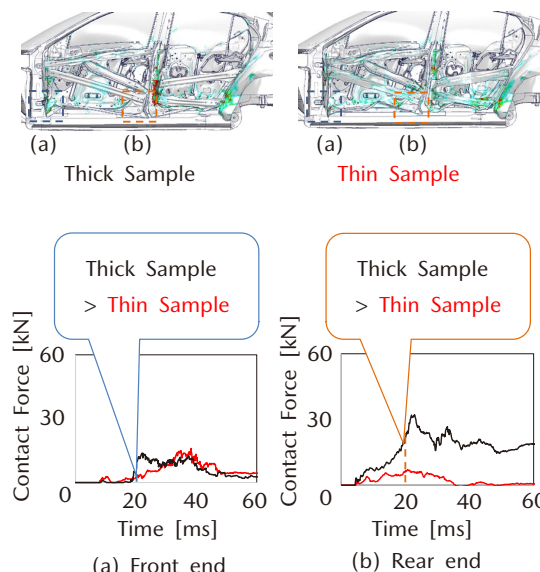


Fig. 10 Comparison of Contact Force between Front End and Rear End of Side Sill at 20ms Due to Different Specifications

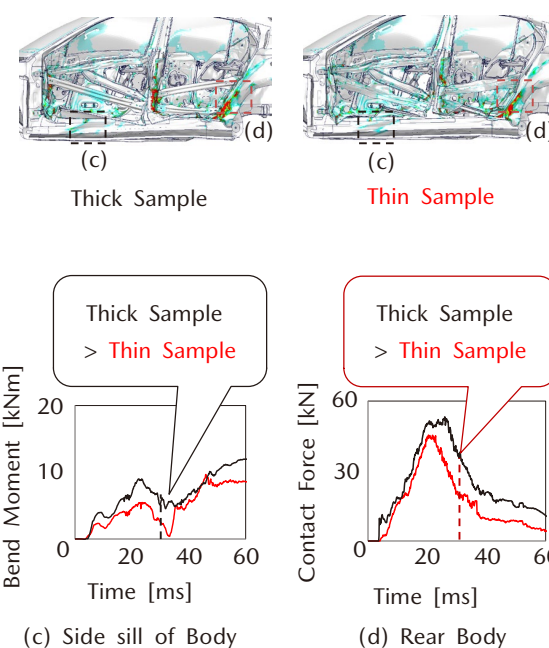


Fig. 11 Comparison of Contact Force between Front End and Rear End of Side Sill at 20ms Due to Different Specifications

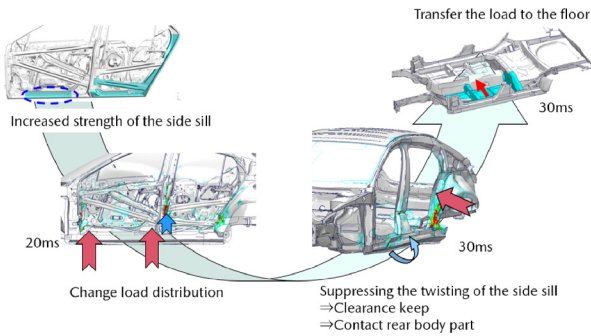


Fig. 12 Factors Influencing Floor Force due to Higher Strength of the Side Sill

4. まとめ

側面衝突時にドアパネルで荷重分散するコンセプトは、ドアパネルに強度分布を与えることで実現できる可能性を得た。ドアパネルの強度分布と分散する荷重の伝達経路との関係を、フロアへの荷重伝達を1例に、グラフ構造化分析により主要部位と因子間の結びつきを示し、明らかにした。

フロアへの荷重伝達は、リアボディー部の接触荷重との関係性が強く、前側ドアパネルのサイドシル部と後側ドアパネル全面の強度分布との関係性が強いことが分かった。グラフ構造化分析は、可視化手法を用いたポスト処理との組合せにより、非線形なデータをもつ因子間の親子関係を示すことができ、従来の時系列データの分析からは得られない着目すべき因子を明らかにできる手法であることを確認した。

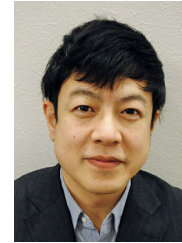
参考文献

- (1) 目良貢ほか：時系列データを解析するためのベイジアンネットワークの活用法に関する研究，日本応用数理学会論文誌，Vol.31，No.2，pp.76-104（2021）
- (2) 奥山智仁ほか：高強度発泡充填材フレーム，自動車技術会学術講演会前刷集，No.94，pp.1-4（2015）
- (3) 本田正徳ほか：高強度・薄板中空フレーム曲げ強度の質量効率を向上させる断面形状の研究，日本機械学会論文集，Vol.87，No.900（2021）
- (4) 幟振鐸ほか：構造階層化概念による荷重伝達指標Ustar (U*)を用いた自動車ドア構造の位相最適化，自動車技術会論文集，Vol.52，No.2（2021）

■ 著 者 ■



奥山 智仁



本田 正徳



目良 貢



雪田 恭兵



木崎 勇

論文・解説

38

耐食性に優れた車体剛性用接着剤の開発

Development of Body Rigidity Adhesive with High Corrosion Resistance

麻川 元康^{*1} 古賀 一陽^{*2} 福田 克弘^{*3} 渡邊 伸明^{*4}
Motoyasu Asakawa Kazuhi Koga Katsuhiro Fukuda Nobuaki Watanabe
長友 博之^{*5} 江崎 達哉^{*6}
Hiroyuki Nagatomo Tatsuya Ezaki

要約

車両の軽量化と乗り心地、操縦安定性の向上をねらった構造用接着剤の適用部位拡大のために、耐食性に加え耐劣化性に優れた、1液加熱硬化型エポキシ系の車体剛性用接着剤を開発した。接着の機能を、「接合面内を外界から遮蔽しながら被着体どうしを密着させること」ととらえ、これらによってウエット環境下での、耐食性及び接着強度を高く維持できると考えた。そこで、遮蔽性低下の要因となる接着欠陥の発生メカニズムを解明し、耐食性に優れた接着剤の要件を導出した。併せて密着性向上も検討し実用化した接着剤では、ガルバニック腐食も含めた耐食性及び、耐水・耐湿接着強度が向上していることを確認した。

Abstract

Aiming for realizing weight reduction, riding comfort, and steering stability, we developed a one-component heat-curable epoxy-based structural adhesive for vehicle body rigidity, which has excellent deterioration resistance as well as corrosion resistance. Taking the fundamental functions of adhesion as shielding and adhesion, we assumed that these functions enables both corrosion-resistance and adhesive-strength to be highly maintained in the wet environments. Therefore, we elucidated the mechanism of adhesive defects occurrence, which has a risk of lowering shielding performance, and derived the requirements of adhesives with excellent corrosion resistance. We have confirmed that corrosion resistance including galvanic corrosion and water/moisture resistance adhesive strength are improved in the practical adhesive.

Key words : Adhesive, Reliability, Defect-control, Viscosity, Rheology, Corrosion, Water resistance, Epoxy

1. はじめに

カーボンニュートラル社会の実現を目指し自動車からのCO₂排出量削減のため、さらなる車両の軽量化が求められている。その社会的責務に応えつつ、商品性の観点からは操縦安定性や乗り心地、静粛性の向上も重要である。これらの解決手段の一つとして、マツダは車体における剛性と減衰性を制御するための接着接合技術の開発に取り組んでいる。剛性については1990年代からウェルドボンド接合として実用化している。一方、減衰性に関しては、減衰制御構造（減衰節構造と減衰ウェルドボンド接合）及び、本構造に使用する減衰用接着剤を2019

年に実用化⁽¹⁾⁻⁽³⁾し、乗り心地と静粛性を大きく向上した。しかし、剛性及び減衰用途の接着接合は接着欠陥に起因した接合部の腐食リスクがあるため、被水環境が厳しい部位への適用は行っていない。接着欠陥は接着未硬化状態での、接着部の隙間の変動や、熱、湿度が要因となって発生する。例えば、部品組付けや抵抗スポット溶接（以下、RSW）、塗装といった複数の工程で板隙間の変動が生じる可能性がある。また、モジュール部品組み立て過程の、サプライヤーからの搬送・仮保管で梅雨時期には、多湿環境に暴露される可能性もある。

接着欠陥のうち、電着乾燥炉内での加熱硬化過程で、Fig. 1に示す溝形状のくぼみ（以下、溝欠陥）が重ね継

*1,6 技術研究所
Technical Research Center

*4 技術本部
Production Engineering Div.

*2,3,5 車両開発本部
Vehicle Development Div.

手の接着はみだし部に発生する場合がある⁽⁴⁾⁽⁵⁾。加熱中の欠陥形成を観察した結果、Fig. 1の②に示すように、加熱中100℃前後で明瞭に溝欠陥が形成する。Fig. 1の③に示す a-a 箇所にて溝欠陥部の断面を観察すると、上板側のめっきが存在しない鋼板端面では、腐食因子に対する保護性が低下している。それによって溝欠陥部は腐食起点となり、腐食が接合界面へ進展していくと、最終的には継手機能を損なう可能性がある。

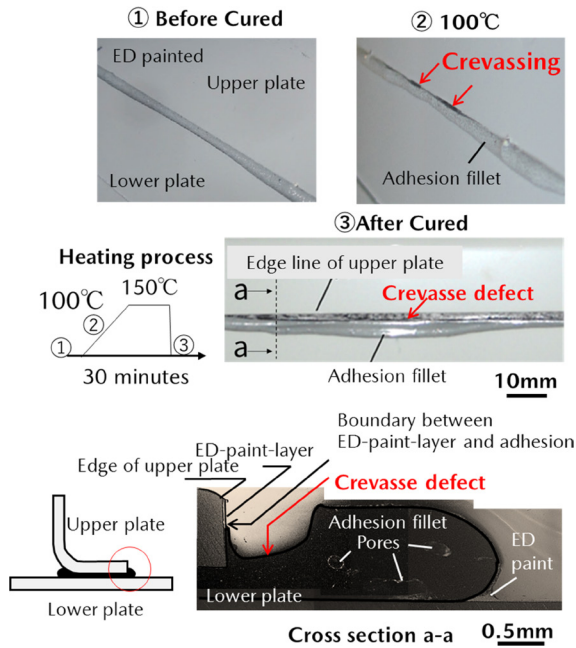


Fig. 1 Crevasse Defect at Adhesion Fillet⁽⁴⁾

そこで、塗膜における防錆モデルベース研究⁽⁶⁾を参考に、腐食の抑制期間と進展速度を評価指標とした接着欠陥抑制の研究に取り組んだ (Fig. 2)。本報では、これまでに解明した溝欠陥の発生メカニズムを基に、耐食性に優れた車体剛性用の1液熱硬化型エポキシ系構造用接着剤を開発した内容を報告する。

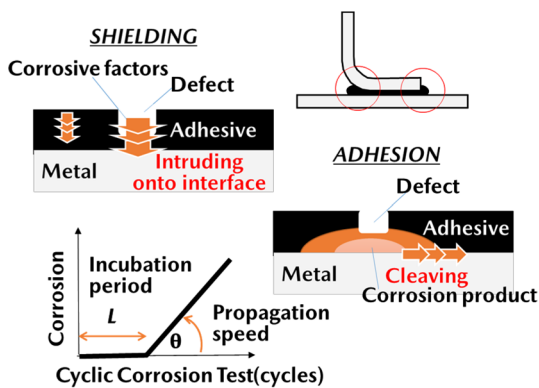
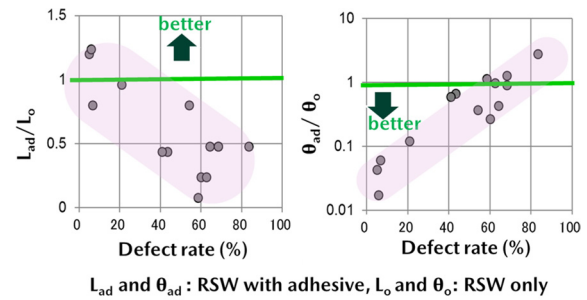


Fig. 2 Conceptual Function Model on Shielding and Adhesion against Corrosion

2. 接着剤開発

2.1 接着欠陥発生率と外観耐食性との関係

合金化溶融亜鉛めっき (以下、GA) 鋼板の平板に、接着剤を直線塗布後、GA 鋼板の L 形状の曲げ板を重ね合わせ、スポット溶接し、化成処理と電着塗装後、加熱し重ね継手試験片を作製した。この接着試験片を用いて、塩水噴霧と乾燥、湿潤の各モードを組み合わせた複合サイクル試験 (以下、CCT) で外観の腐食状態を評価した結果、溝欠陥の発生率が高いほど腐食抑制期間 L が短くなり、腐食進展速度 θ は速くなった。具体的には、従来の車体構造で多用している RSW のみの重ね継手試験片が示す L_0 と θ_0 に対して、接着剤を併用した場合での L_{ad} と θ_{ad} の各比率を Fig. 3 に示す。欠陥発生率が 0 に近づくほど、RSW のみより優れた L と θ を示している。そこで耐食性向上をねらいとして溝欠陥発生メカニズム解明に取り組んだ。



Defect rate = Length of crevasse defect / RSW pitch

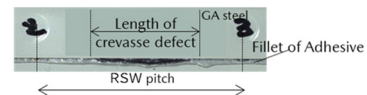


Fig. 3 Cosmetic Corrosion Performance against Crevasse Defect Rate

2.2 溝欠陥の発生メカニズム⁽⁴⁾⁽⁵⁾

(1) 欠陥発生要因

溝欠陥が発生する、ある接着剤を用いた簡易検討から、接着の「流動性」と「形状保持性」がポイントであることが分かった。

具体的には、接着のはみ出しを除去した状態で Fig. 1 の 20℃ から 100℃ へ昇温すると、2 枚の鋼板被着体間の隙間は昇温とともに狭まっていき、それに伴い接着剤が合わせ面から流出しはみ出しを形成する。一方、接着剤がはみ出した状態で硬化のため室温から昇温していくと、はみ出した先端部の形状をほぼ保持したまま流出していくことで溝欠陥が形成する。水平と垂直、加熱硬化時の試験片の向きはどの場合でも同等の溝欠陥が生じた。

暴露環境としては、接着剤を鋼板に塗布、未硬化状態で 40℃ 85RH% の耐湿環境に数日間仮置きし吸湿させた

後、相手部材を重ねてRSWで固定、Fig. 1の加熱を行うと、加熱硬化時の100°C前後において接着層内に発泡し溝欠陥は発生した。

簡易検討をもとに、接合部の構造（上板板厚、RSWのピッチ）と接着剤材料（粘度特性、吸湿放置日数）の各要因を組み替えた接合試験片を作成し加熱硬化させ溝欠陥を比較した。また、各接着剤の流動性を把握するため、20°Cから150°Cまで5°C/分で加熱しつつ、材料の微細構造変化への影響が小さいと考えた動的条件にて複素粘度（Fig. 4）を測定した。これらの結果から明らかになった、「流動性」「形状保持性」の観点から溝欠陥発生要因をFig. 5に示す。構造要因として2つあり、板厚が薄い場合と、スポット溶接ピッチが長い場合。一方、接着剤の材料要因として2つあり、加熱過程における20°Cから100°C以下の範囲で複素粘度が最も下がった時の値（Fig. 4）が高い場合（Fig. 6）と吸湿発泡の体積が大きい場合である。

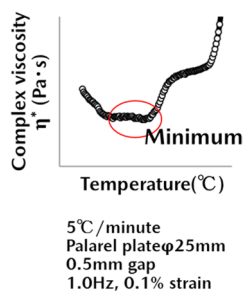


Fig. 4 Minimum Complex Viscosity

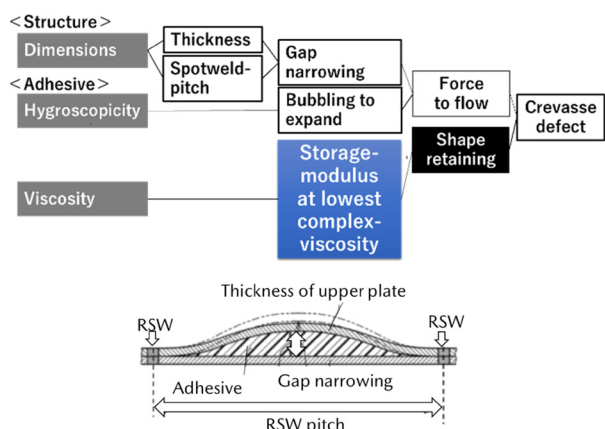


Fig. 5 Tree Diagram of Crevasse Defect

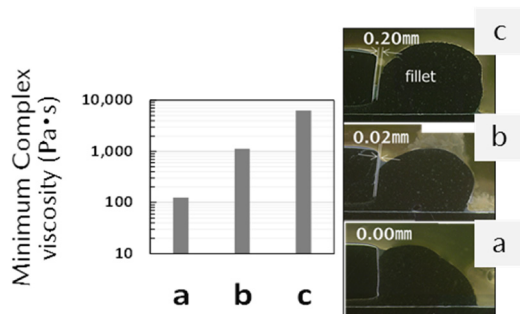


Fig. 6 Minimum Complex Viscosity (a: no defect, b and c: crevasse defect)

(2) 形状保持性に関するレオロジー比較

流動性の変化をとらえるために測定したFig. 4での複素粘度 η^* とは、角振動数 ω 、貯蔵弾性率 E' 、損失弾性率 E'' を用いて複素数表示すると式(1)、複素粘度の絶対値（本報内では、複素粘度と記している）は式(2)で表される。

$$\eta^* = E''/\omega - iE'/\omega \tag{1}$$

$$|\eta^*| = \sqrt{(E''/\omega)^2 + (E'/\omega)^2} \tag{2}$$

そして、貯蔵弾性は形状保持性の指標である。ある熱硬化型のエポキシ系接着剤を例に、加熱硬化時の複素粘度の絶対値、貯蔵と損失の弾性率についてそれぞれ、20°C時の値に対する保持率をFig. 7に示す。複素粘度(1)の保持率が最低を示す70°C近辺で、貯蔵弾性率(2)の保持率は0.9、損失弾性率(3)の保持率は0.12を示し、温度に対する複素粘度の低下は損失弾性率の温度に対する低下現象と言える。更に損失弾性率 E'' を貯蔵弾性率 E' で割った値（損失正接）について、最低複素粘度時は1より小さい値を示しているため、複素粘度自体の最低値は貯蔵弾性率自体の大きさに支配されていることが分かる。

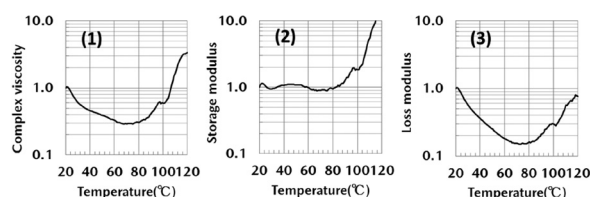


Fig. 7 An Example of Temperature Dependence of Rheology Normalized to the Value at 20°C

そこで、形状保持性の観点から貯蔵弾性率が変形に対してどう推移するのか把握した。具体的には、吸湿による発泡が生じる温度100°Cより低い90°Cにて、レオメーターを用いてせん断ひずみを1.0Hzで0.1%から100%へ増幅させながら貯蔵弾性率を測定した（Fig. 8）。溝欠陥を発生する接着剤は、欠陥を発生しない接着剤に対してせん断ひずみが0.1から5%の範囲で高い貯蔵弾性を示した。このことから、溝欠陥が発生する接着剤では、接着剤が流出しはみ出し部の変形が進行しているときに貯蔵弾性率が高いため、はみ出し部の外観を保持しやすい状態であることが分かった。

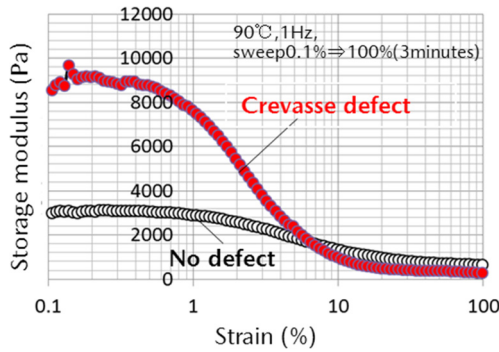


Fig. 8 Storage Modulus of Adhesive at 90°C (gap 0.5mm, parallel plate diameter 25mm)

(3) メカニズム推定

以上の事実から、欠陥発生メカニズムを以下のように推定した (Fig. 9)。2枚の鋼板被着体で挟まった接着層は、加熱硬化中に時間とともに流出する。これによって室温時には上板の端面に密着していた接着はみ出し部が、上板端面から離れる方向へ流動する。流動の構造要因は、スポット溶接ピッチと板厚で決まる鋼板のたわみに起因した弾性力である。一方、材料の要因は、発泡による見かけ体積の増加である。これらの要因で流動してくるときに、昇温過程で、はみ出し部の貯蔵弾性が高いとはみ出しの形状が保持されたままとなり溝欠陥を形成すると考える。

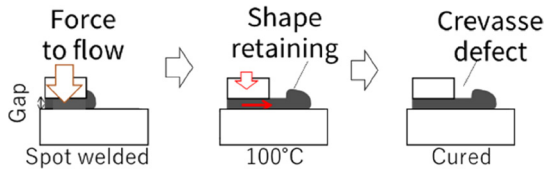


Fig. 9 Crevasse Defect Mechanism

2.3 材料開発

腐食抑制期間と腐食進展速度の両指標と相関をもつ溝欠陥を抑制するため、解明したメカニズムから以下2つの材料要件を導出した。それらを基に、最低複素粘度の適正化、吸湿発泡の抑制を配合物で具体化する接着剤開発を行った。

(1) 最低複素粘度の要件

複数の接着剤を用いて、加熱硬化過程での最低複素粘度と接着欠陥との関係を把握した結果、温間中最低複素粘度が 200Pa・s を下回ると溝欠陥は発生せず、はみだしは上板から下板へなだらかに密着する形状となることを確認した⁽⁷⁾。

(2) 吸湿発泡の要件

車体生産工程での搬送・仮保管の観点から、可能性がある未硬化放置日数時でも溝欠陥を抑制できる、発泡体積の増加量を特定した。

なお、最低複素粘度を下げた副次効果として、溝欠陥以外の複数の欠陥形態を耐食性が有利な方向へ導くことも確認した。具体的には、接着接合部の隙間が未硬化時

に変動すると形成する樹枝模様の空隙欠陥の起伏をなだらかにし⁽⁵⁾、また、RSW 時の中ちりによる接着貫通穴を狭める効果を示した。

3. 性能検証

3.1 耐食性

開発した接着剤を用いて、GA 鋼板どうしを接合し電着塗装を施した試験片にて、CCT による腐食の促進試験を 90 サイクル行った。試験後、接合部を分解し接着剤と腐食生成物を全て除去後、腐食によって最も深く浸食された深さを計測し腐食深さとした。その結果、RSW のみの接合仕様に対して、RSW と開発接着剤の併用仕様では溝欠陥が発生せず、腐食深さが改善した。一方、RSW と従来の接着剤を併用した仕様は溝欠陥から発生した腐食が接合内部にまで進行し、腐食深さが悪化した (Fig. 10)。

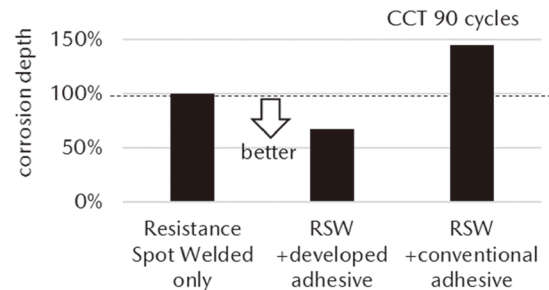
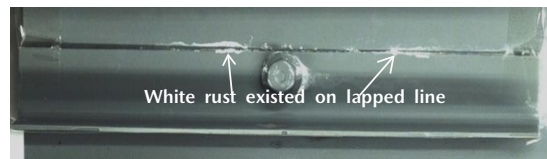


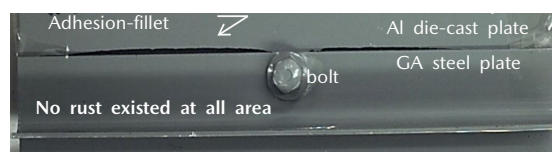
Fig. 10 Corrosion Depth at Joint of GA Steel Plates

また、アルミダイカスト板と GA 鋼板を接合し電着塗装した試験片において、ボルトと開発した接着剤を併用した接合仕様は、ボルトのみの接合仕様やボルトと従来の接着剤の併用仕様に対して、外観錆に優れ、ガルバニック腐食へも効果があることを確認した (Fig. 11)。

(a) Bolt only



(b) Bolt with developed adhesive



(c) Bolt with conventional adhesive

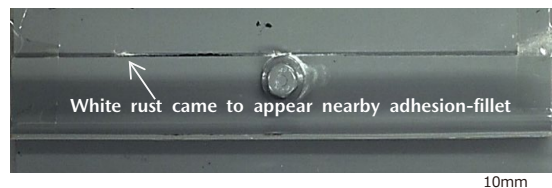


Fig. 11 Cosmetic Corrosion at Joint of Aluminum Die-Cast Plate and GA Steel Plate

3.2 耐湿接着強度

電着塗装を施工していないせん断接着試験片を 70°C 相対湿度 98% で 3 週間暴露した後、耐湿接着強度特性を確認した (Fig. 12)。開発した接着剤の仕様では、せん断接着強度は暴露後ほぼ低下せず、界面剥離面積率も従来の接着剤での仕様より少なくなった。同様の改善は、70°C 純水浸漬試験後でも確認できた。

耐湿・耐水接着強度を向上したことは、腐食生成物の成長による接着層と金属との界面割裂に対する抵抗力増加につながり、溝欠陥以外の欠陥 (樹枝模様の空隙欠陥, RSW 時の中ちりによる接着貫通穴) 発生時でも腐食進展速度の減速に寄与していると考えられる。

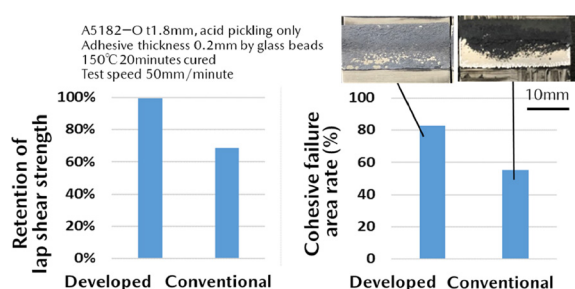


Fig. 12 Retention of Lap Shear Strength and Cohesive Failure Area Rate after 3 Week Exposure at 70°C, 98%RH

4. おわりに

接着の機能を、「接合面内を外界から遮蔽しながら被着体どうしを密着させること」ととらえ、これらによってウェット環境下での、耐食性及び接着強度が発現していると考えた。そこで、遮蔽性低下の要因となる接着欠陥のうち、加熱硬化過程で生じる溝欠陥の発生メカニズムを解明することで、以下 3 点の知見を得た。

- ① 溝欠陥は、加熱過程での硬化反応によって粘度増加が顕著に発現する温度より低温側で発生する欠陥である。
- ② 溝欠陥発生の材料的主要因は、100°C 以下での高い貯蔵弾性率と、100°C で生じる吸湿発泡による体積増加である。
- ③ 室温から昇温した時の複素粘度の最低値は、貯蔵弾性率が支配している。

これらの知見から、最低複素粘度値の適正化、吸湿発泡の抑制を具体化する配合開発を実施し、併せて密着性向上も検討することで、耐食性に加え耐湿・耐水劣化性に優れた 1 液加熱硬化型エポキシ系の車体剛性用の構造接着剤を開発した⁽⁸⁾⁽⁹⁾。

最後に、接着剤の共同開発先であるセメダイン(株)に厚く感謝の意を表します。

参考文献

- (1) 氷室雄也ほか：減衰性に優れた構造用接着剤の開発，自動車技術会学術講演会予稿集 (2019)，20195137
- (2) 中川興也ほか：車体の減衰制御構造の開発，自動車技術会学術講演会予稿集 (2019)，20195136
- (3) 山本研一ほか：構造接着を用いた車体振動減衰技術の開発，マツダ技報，No.36，pp.283-288 (2019)
- (4) 麻川元康ほか：自動車における車体構造部の接着欠陥発生に及ぼす粘弾性の影響，日本接着学会年次大会講演要旨集，pp.113-114 (2021)
- (5) 麻川元康ほか：自動車における構造接着技術の動向と課題，日本接着学会誌，Vol.57，No.5，pp.184-192 (2021)
- (6) 浅田照朗ほか：塗装部の耐食性迅速評価技術のモデルベース研究開発，マツダ技報，No.38，pp.133-138 (2021)
- (7) 日本国特許第 6191639 号
- (8) 麻川元康ほか：耐食性に優れた構造用接着剤の開発，自動車技術会学術講演会予稿集 (2022)，20225301
- (9) 村地勇佑ほか：耐食性に優れた構造用接着剤の開発，日本接着学会年次大会講演要旨集，P37B (2022)

■ 著 者 ■



麻川 元康



古賀 一陽



福田 克弘



渡邊 伸明



長友 博之



江崎 達哉

論文・解説

39

車載用リチウムイオン電池の開発 ～電池の異常時発熱挙動シミュレーション～

Development of Automobile Lithium-Ion Battery Simulation of Heat Generation Behavior during Abnormal Conditions of Lithium-Ion Battery

花岡 輝彦^{*1} 樋口 宗隆^{*2} 梶本 貴紀^{*3}
Teruhiko Hanaoka Munetaka Higuchi Takanori Kajimoto
池田 卓^{*4} 藤田 弘輝^{*5}
Suguru Ikeda Hiroki Fujita

要 約

近年、電気自動車に搭載されるリチウムイオン電池は高エネルギー密度化、高出力密度化が進んでおり、それに伴い異常時の電池の発火リスクが高まるなどの安全性低下が懸念されている。特に $\text{LiNi}_{0.8}\text{Mn}_{0.1}\text{Co}_{0.1}\text{O}_2$ 等のニッケル比率の高い層状岩塩型の活物質を正極に用いた電池セルは、エネルギー密度が高い一方で、内部短絡などの異常発生時において発熱量が大きいため安全性が低下することが報告されており、これら材料を含む車載用電池パックの安全性の確保が課題となっている。この課題に対して、電池の安全性をシミュレーションモデルで検証することで開発の手戻り削減などの効率化が期待できる。そこで本研究では活物質の組成の違いがセル異常時の発熱量に及ぼす影響を明らかにし、異常時の電池セル及びモジュールの温度挙動を素早く計算できる1次元シミュレーション技術を確立した。また、モジュールの安全性の向上を目的に、構築したモデルを用いてモジュール部材の材質変更による温度上昇抑制の効果検証を実施した。本稿ではその取り組みについて報告する。

Abstract

In recent years, in lithium-ion batteries mounted on electric vehicles, energy density and power density have increased, and there is a concern that safety of the batteries has deteriorated, such as an increase in the risk of battery ignition in the event of an abnormality. In particular, it is reported that the battery cell that uses the layered rock salt-type active materials with a high nickel ratio such as $\text{LiNi}_{0.8}\text{Mn}_{0.1}\text{Co}_{0.1}\text{O}_2$ for the positive electrode generates a large amount of heat when an abnormality such as an internal short circuit occurs, which lowers safety, while having high energy density. Ensuring the safety of in-vehicle batteries containing these materials has become an issue. To solve this issue, it is required that we verify the safety of the battery with the simulation model and perform safety design, realizing improvements in efficiency such as reduction of rework in the development. Therefore, in this study, we clarify the effects of the difference in the composition of the active materials on the calorific value at the time of cell abnormality, and construct a one-dimensional simulation technology that can quickly calculate the temperature behavior of the battery cell/module at the time of abnormality. In addition, for improvements of the safety of the module, we verify the effects of suppressing a rise of the temperature by changing the material of the module parts using the constructed model.

Key words : EV and HV systems, Battery technology, Lithium ion battery, Battery safety, Heat and temperature management, Simulation/Modeling

*1～5 技術研究所
Technical Research Center

1. はじめに

マツダは、2017年に、2030年を見据えた技術開発の長期ビジョン「サステイナブル“Zoom-Zoom”宣言2030」を公表し、車のもつ魅力である「走る歓び」によって、「地球」「社会」「人」のそれぞれの課題解決を目指している。CO₂排出量低減に向けて、電気駆動車の燃費、電力消費率を向上させるためには、車両に搭載される電池を高エネルギー密度化、高出力密度化することが有効である。一方で近年、電気駆動車に搭載されるリチウムイオン電池の高エネルギー密度化、高出力密度化に伴い、異常時の電池の発火リスクが高まるなどの安全性低下が懸念されている。特にLiNi_{0.8}Mn_{0.1}Co_{0.1}O₂等のニッケル比率の高い層状岩塩型の活物質を正極に用いた電池は、エネルギー密度が高いが、内部短絡などの異常発生時において発熱量が大きいため安全性が低下することが報告されており⁽¹⁾、これら材料を含む車載用電池パックの安全性の確保が課題となっている。車載用電池パックは、電池の最小単位であるセルが複数個にわたって直並列接続されたモジュールと充放電制御システムから構成されており、異常時において、セル1個の熱暴走を起点に隣接セルに熱連鎖が生じると、複数セルが燃焼し、車両火災に発展する可能性がある。従って車載用電池パックの安全性を確保するには、セル間の熱連鎖の抑制が重要である。昨今の法規要件としても、中国において、熱連鎖試験項目を含む車載用電池パックの安全性基準GB-38031-2020⁽²⁾が21年1月より施行されている。このような安全性確保の課題に対して、モデルシミュレーションを活用し、リアルワールドの多様なシーンを想定した電池の安全性を検証して机上設計を行うことで、開発の手戻り削減などの効率化が期待できる⁽³⁾。くわえて、その実現には材料～セル/モジュール/パックのマルチスケールで安全性を予測する技術と、多様なシーンを短時間で網羅的に検証できるよう計算を高速化する技術が必要である。そこでマツダでは上記技術開発に取り組んでおり、本稿ではその取り組みの成果として、活物質の組成の違いがセル異常時の発熱量に及ぼす影響を明らかにし、異常時の電池の温度挙動を素早く計算できる1次元シミュレーション技術を構築した事例を紹介する。

2. シミュレーション手法・実験方法

2.1 セル熱暴走シミュレーションモデル

Fig. 1に今回構築したセル熱暴走シミュレーションモデルの概略図を表す。セルの内部短絡抵抗を入力情報として、セル内部で発生するジュール熱、材料熱分解反応熱と、セル内部から表面へ固体伝熱を計算することで最終的にセル各部温度を出力するモデルである。

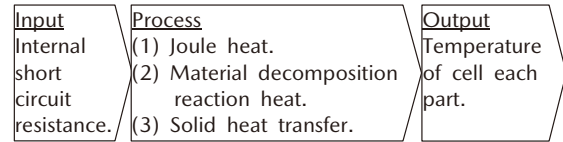


Fig. 1 Schematic Diagram of the Simulation Model

① ジュール熱の計算モデル

ジュール熱は式(1)のオームの法則、式(2)のジュールの法則を用いて計算している。

$$I = V \div R \tag{1}$$

$$Q_j = I^2 \times R \tag{2}$$

ここに、V:セル電圧 [V]

I: 短絡電流 [A]

R: 内部短絡抵抗 [Ω]

Q_j: ジュール熱 [W]

② 材料熱分解反応熱の計算モデル

材料熱分解反応熱は式(3)、式(4)の反応速度式で計算している。

$$\frac{da}{dt} = (1-a)Ae^{-\frac{E}{RT}} \tag{3}$$

$$Q_m = Mk \frac{da}{dt} \tag{4}$$

ここに、a: 反応物の比率 [-]

t: 時間 [s]

A: 頻度因子 [1/s]

E: 活性化エネルギー [J/mol]

R: 気体定数 [J/mol/K]

T: 温度 [K]

Q_m: 材料熱分解反応熱 [W]

M: 電極合材重量 [kg]

k: 単位重量当たりの発熱量 [J/kg]

今回、電極合材中の活物質種の違いによる反応熱の変化を考慮できるように、活物質固有の方程式パラメーター(A, E)を導出することを目的に、電極合材の熱安定性評価実験を実施した。具体的には、正極合材の活物質として、LiNi_{x/10}Mn_{y/10}Co_{z/10}O₂ (NMCxyz, x + y + z = 10)の組成違い、負極合材の活物質としてハードカーボン、グラファイトを対象に、各活物質種が異常時の発熱量に及ぼす影響を評価するための実験を行った。実験方法としては、Table 1に示す試作セルを作製し、セルの充電状態を調整後、グローブボックス内にてセルを解体して、セルから取り出した正極合材、負極合材それぞれの示差走査熱量 (Differential scanning calorimetry, DSC) 測定を実施した。

Table 1 Specification of Test Cells

Cell No.	A	B	C	D
Cathode	NMC532	NMC532	NMC622	NMC811
Anode	Hard carbon	Graphite	Graphite	Graphite
Separator	Polyolefin			
Electrolyte	Carbonate			

③ 固体伝熱の計算モデル

固体伝熱の計算は、熱伝導を式(5)のフーリエの法則、熱伝達を式(6)のニュートンの冷却則で計算している。今回、固体伝熱の計算実行モデルとして3次元、0次元、1次元の3種類のモデルをそれぞれ構築した。

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \nabla^2 T + Q \tag{5}$$

$$q = hS(T_{amb} - T) \tag{6}$$

- ここに、 ρ : 密度 [kg/m³]
- C_p : 比熱 [J/kg/K]
- λ : 熱伝導度 [W/m/K]
- Q : 内部発熱 [W/m³]
- q : 伝熱量 [W]
- h : 熱伝達率 [W/m²/K]
- S : 表面積 [m²]
- T_{amb} : 環境温度 [K]
- T : 温度 [K]

a. 固体伝熱の3次元モデル

実物のセルの形状に基づいてモデルジオメトリを作成するとともに3次元にメッシュ分割し、有限要素法を用いて熱伝導、熱伝達を計算する3次元モデルを構築した (Fig. 2)。

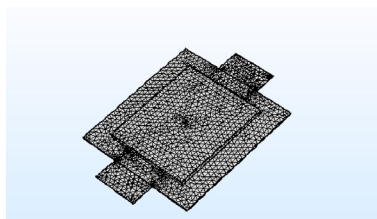


Fig. 2 Geometry of 3D Simulation Model

b. 固体伝熱の0次元モデル

セルの各部材を単一ブロックで模擬してブロック間の伝熱を計算するモデルを構築した (Fig. 3)。

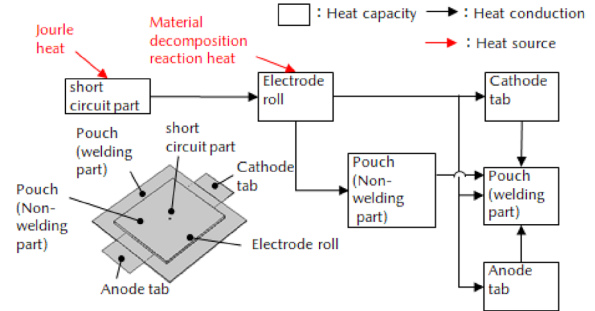


Fig. 3 Image of 0D Simulation Model

c. 固体伝熱の1次元モデル

③ b. に示すような0次元モデルは、③ a. に示す3次元モデルに比べ、一般的に計算所要時間が短いというメリットはあるが、計算精度は劣るというデメリットがある。そこで今回、計算時間の短縮と計算精度の向上の両立を目的に1次元モデルを構築した。具体的には0次元のモデルをベースに、熱源である電極体と、その他部材との熱伝導をより精密に計算できるように、電極体を3分割のブロックで表すことで伝熱挙動を1次元的に計算するモデルを構築した (Fig. 4)。

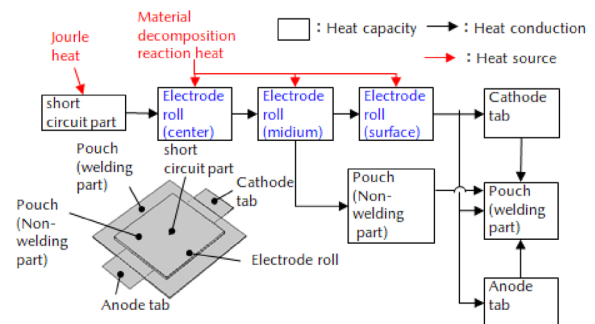


Fig. 4 Image of 1D Simulation Model

2.2 セル釘刺し内部短絡シミュレーション

構築したシミュレーションモデルを用いて、Table 2 に示す仕様のパウチ型セルを対象に釘刺し内部短絡シミュレーションを実施した。釘刺しの条件をTable 3に示す。今回、計算機には4コア4スレッド、定格クロック3.4 GHz、メモリー32GBのマシンを使用し、固体伝熱モデルが3次元、0次元、1次元モデルそれぞれの場合でシミュレーションを行って各モデルの精度と計算所要時間を比較した。また、シミュレーション結果の妥当性確認を行うために、同様の仕様のセル、条件にて実機の釘刺し試験を実施した。

Table 2 Specification of Cells

Cell No.	A	B
Type	Pouch	
Size [mm]	200×195	
Capacity [Ah]	20	
Cathode	NMC532	
Anode	Hard carbon	Graphite
Separator	Polyolefin	
Electrolyte	Carbonate	

Table 3 Nail Penetration Test Conditions

Nail position	Center of cell surface
Nail specifications	SUS, ϕ 3, Length 65mm
Nail depth	1/2 of cell thickness
Cell voltage before test	4.2V
Cell temperature before test	25°C
Test environment	atmosphere

2.3 モジュール内の熱連鎖シミュレーション

今回開発した1次元の固体伝熱モデルをモジュールスケールに拡張し、セルを3並列接続したモジュール (Fig. 5) を想定して、最端セルのみを釘刺した場合の熱連鎖シミュレーションを実施した。モジュール内のセルは Table 2 の No.B を想定した場合と、同セルの正極活物質を NMC622, NMC811 に変更した場合とでシミュレーションを実施し、正極活物質種の違いによる熱連鎖挙動の違いを検証した。更に、モジュールの安全性向上を目的にセル間の伝熱への寄与が大きいと想定されるセル間セパレーターの材質を変更した際の熱連鎖挙動の変化を検証した。

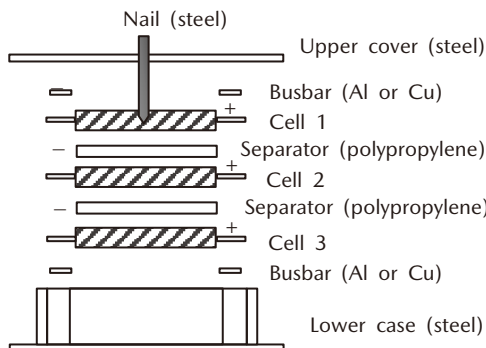


Fig. 5 Image of the Module Thermal Propagation Test

3. 実験結果・シミュレーション結果

3.1 電極材の熱安定性評価実験結果

今回計測した電極材の DSC 測定結果として各活物質

における発熱スペクトルと各発熱ピーク温度、単位重量当たりの発熱量の積算値を Fig. 6 に示す。正極材の結果について、活物質が NMC532, NMC622, NMC811 の場合を比較すると、Ni 比率が高まるにつれ、より低温で反応の発熱ピークを迎えることに加え、単位重量当たりの発熱量の積算値が大きくなることから、熱安定性が低下する傾向にある。特に NMC532 に対し、NMC811 の発熱量は 33% 増加することが明らかとなった。負極材の結果について、活物質がハードカーボンとグラファイトの場合で比較すると、単位重量当たりの発熱量の積算値はハードカーボンの方が約 2.6 倍大きい一方で、発熱ピーク温度はグラファイトの方が低いということが明らかとなった。

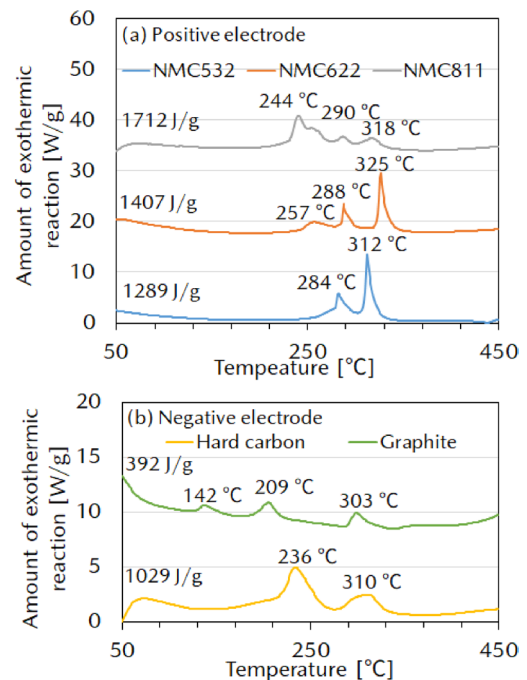


Fig. 6 Results of DSC Measurement (a) Positive Electrode Active Materials (b) Negative Electrode Active Materials

3.2 セル釘刺し内部短絡シミュレーション結果

今回開発したセル熱暴走シミュレーションモデルを用いて、セル釘刺し時の熱暴走挙動のシミュレーション結果の妥当性を確認した。Fig. 7 にセル A とセル B を対象に、固体伝熱モデルが 3 次元、0 次元、1 次元それぞれの場合でシミュレーションを実施して得られたセル表面平均温度の時間変化と、実機試験から得られた同時間変化の比較図を示す。また、Table 4 に各固体伝熱モデルのシミュレーション予実差と、シミュレーション所要時間を示す。

各固体伝熱モデルを用いた場合のシミュレーション結果をそれぞれ確認すると、まず 3 次元モデルでは実機試験結果との予実差が 1.7% と非常に小さく高精度な計算が可能一方で、計算所要時間は 540s かかるという結

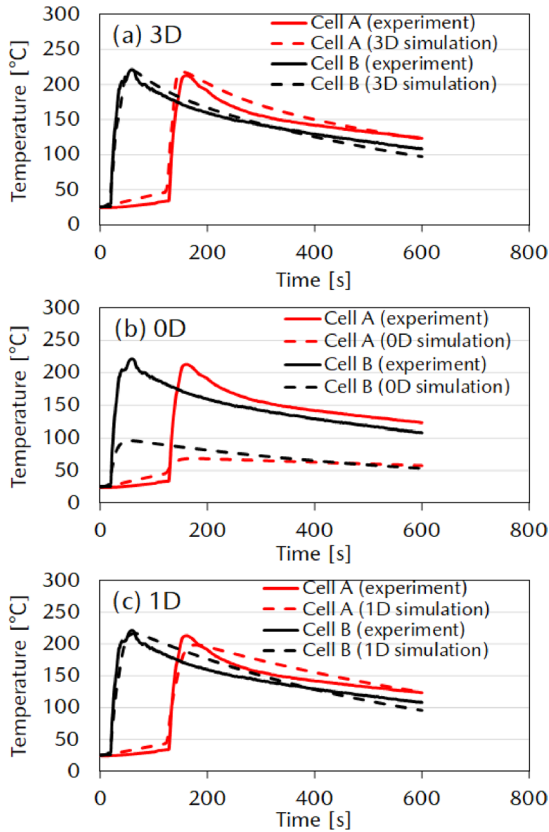


Fig. 7 Simulation Results of Cell Nail Penetration (a) 3D Simulation (b) 0D Simulation (c) 1D Simulation

Table 4 Simulation Difference and Time of Cell Nail Penetration

Thermal Conduction model	Difference [%]	Simulation time [s]
3D model	1.7	540
0D model	56	10
1D model	5.5	10

果であった。次に0次元モデルでは、計算所要時間が僅か10sと計算が高速である一方、予実差は56%と大きく精度は低い結果であった。これに対し1次元モデルでは、計算所要時間は0次元モデルと同様の10sと高速で、なおかつ予実差が5.5%と精度の高い計算結果が得られた。また1次元モデルは、負極活物質種が異なるセルA、セルBいずれにおいても実機試験結果に近い温度変化を予測できており、電極活物質が異なる条件においても対応可能なモデルであることが確認できた。1次元モデルで高速かつ高精度な計算が可能となったのは、電極体を必要最小限に分割したことで、釘からセルへのジュール熱の熱伝導の計算を、計算負荷を高めることなく精密に実行できるようになったためであると考えられる。

3.3 モジュール内の熱連鎖シミュレーション結果

① 正極活物質種の違いによる熱連鎖挙動変化の解析

Fig. 8 にモジュール内セルの正極活物質が NMC532, NMC622, NMC811 それぞれの場合におけるモジュール熱連鎖シミュレーションの結果より得られた各セルの表面温度の時間変化を示す。正極活物質が NMC532, NMC622 の場合は釘刺しセルであるセル 1 は熱暴走を起こし 230°C程度まで温度上昇しているものの、隣接するセル 2 の温度上昇は 140°C程度で留まっており、更に隣のセル 3 においては 50°C程度の温度上昇に留まっている。一方で正極活物質が NMC811 の場合は、セル 1 の温度上昇が 250°Cに高まっており、更に隣接するセル 2 においてもセル 1 釘刺し後の 730s の時点で 250°C近くまで温度が上昇しており、明確な熱連鎖挙動が見られる。これは Fig. 6 の DSC 測定結果にて、NMC532, NMC622 に比べ、NMC811 は発熱量が大きいことによるもので、NMC811 の場合、セル 1 で発生した熱がセル 2 に伝わる量が大きくなり、セル 2 においても正極、負極の材料熱分解反応の開始温度以上となり熱暴走が発生する。

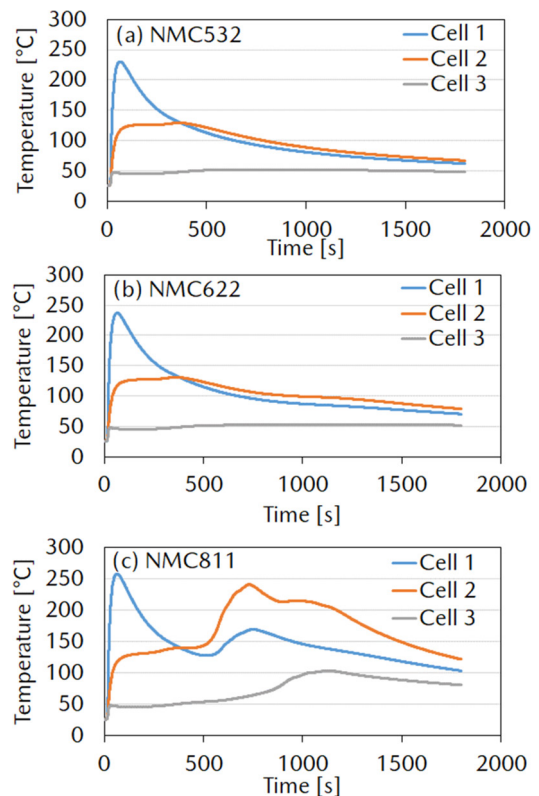


Fig. 8 Simulation Results of Module Thermal Propagation (a) NMC532 Cell (b) NMC622 Cell (c) NMC811 Cell

② NMC811 使用時のモジュール安全構造の検討

今回想定したモジュールにおいて、セルの正極活物質に NMC811 を用いた場合、セル 1 釘刺しから 730s 後に隣接するセル 2 で熱暴走が生じてしまうというシミュ

レーション結果を受けて、同モジュールの安全性向上の検討と、シミュレーションモデルによる効果検証を実施した。具体的な検討策として、セル1とセル2の間に設置するセパレーターの材料をポリプロピレンから断熱性に優れたエアロシリカゲルに変更した場合の安全性への効果を検証した。本検証結果として、セパレーター材料がそれぞれポリプロピレン、シリカエアロゲルの場合における隣接セル2の温度の時間変化を Fig. 9 に示す。それぞれの結果を比較すると、セパレーターがポリプロピレンの場合のセル2の温度がピークに達する時間が730sであるのに対し、シリカエアロゲルの場合は830sにピーク温度を迎えており、本材料の変更により熱連鎖の発生の100s遅延が期待できる結果が得られた。

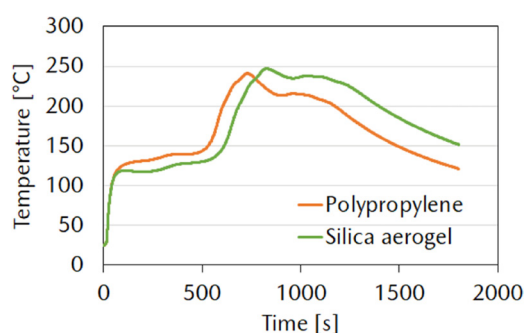


Fig. 9 Simulation Results of Module Thermal Propagation when the Material of the Separator is Changed

4. おわりに

今回、電極体を必要最小限に分割することで、セル内部短絡時の熱暴走挙動を高速で予測できる1次元シミュレーション技術を開発した。また、セル内部の正極、負極の発熱挙動を定量的に計測し、モデルパラメーターを導出することで、活物質の種類がセル熱暴走時の挙動に与える影響を予測できる技術も構築した。構築した1次元シミュレーションモデルはモジュールスケールに拡張することで、モジュールの熱連鎖挙動を予測するとともに、安全性向上に向けた検討の効果検証に活用可能である。

参考文献

- (1) J. Kasnatscheew et al.: Do Increased Ni Contents in LiNixMnyCozO2 (NMC) Electrodes Decrease Structural and Thermal Stability of Li Ion Batteries? A Thorough Look by Consideration of the Li+ Extraction Ratio, ACS Appl. Energy Mater., Vol.2, No.11, p.7733 (2019)
- (2) 中華人民共和国政府: Electric vehicles traction battery safety requirements, p.24 (2020)
- (3) D. Ren et al.: Model-based thermal runaway

prediction of lithium-ion batteries from kinetics analysis of cell components, Applied Energy, Vol.228, p.633 (2018)

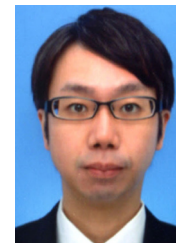
■ 著 者 ■



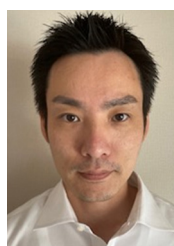
花岡 輝彦



樋口 宗隆



梶本 貴紀



池田 卓



藤田 弘輝

論文・解説

40

EV 駆動用バッテリーのリユースに向けた取り組みの紹介 Introduction of Initiatives for Reuse of EV Drive Batteries

楊 殿宇^{*1} 高原 慎二^{*2} 末富 隆雅^{*3}
Tenyu Yan Shinji Takahara Takamasa Suetomi

要約

マツダは、技術開発の長期ビジョン「サステイナブル“Zoom-Zoom”宣言 2030」に基づき、ライフサイクルアセスメント（LCA）の観点から、環境負荷低減に取り組んでいる。その中で、EV 駆動用バッテリーを定置型蓄電池として活用し、地産地消型の再生可能エネルギー利用拡大を目指した取り組みを、中国電力（株）、（株）明電舎と 3 社で行っている。本稿では、その事例について紹介する。まず、複数の EV 駆動用バッテリーを定置型蓄電池としてリユースした実証試験のシステム概要について述べる。次に、リユースバッテリーの課題、課題解決のための考え方とその試験方法を説明する。最後に、実証試験で得られた試験結果から二次利用における今後の課題と高効率な開発に向けた取り組みを提案する。

Abstract

Mazda has been working to reduce burden on the environment from the perspective of life cycle assessment (LCA), based on its long-term vision for technology development, the Sustainable Zoom-Zoom Declaration 2030. In this context, to expand the use of locally produced and locally consumed renewable energy, Mazda has jointly developed EV driving batteries which are used as stationary storage batteries with the Chugoku Electric Power Co. and Meidensha Corporation. Some of the case studies will be presented in this paper. First, we will discuss an overview of the demonstration experiment in which multiple EV drive batteries were reused as stationary storage batteries. Next, we will explain the issues regarding the reused batteries and our approach and test methods to solve these issues. Finally, we will explain future issues for the use of reused batteries that were identified in the demonstration experiment, and propose initiatives for highly efficient development.

Key words : Carbon neutral, Reuse battery, Electronic control

1. はじめに

マツダは、2017 年に「地球」「社会」「人」それぞれの課題解決を目指す新しいチャレンジ「サステイナブル“Zoom-Zoom”宣言 2030」⁽¹⁾を公表した。その中で特に地球環境問題の解決に関しては、温室効果ガスの大幅削減を目指し、再生可能エネルギーの導入などクリーンなエネルギーミックス（電気の発電に使用するエネルギー源の構成）の推進と、更なるエネルギー効率化が重要と考えている。しかし、太陽光、風力などの再生可能エネルギーは天候によって発電量が大きく変動し不安定である。そのため、再生可能エネルギーを最大限導入するためには、発電量の変動を吸収するための蓄電池が必

要となり、需要の増加が予想される。

一方、蓄電池を構成する部材の資源は有限であり、資源不足解消のため有効活用が求められる。その実現手段として、蓄電池の部材リサイクルも重要であるが、その前に長期利用やリユースができるのであれば、更に資源をより有効に活用できる。そこで、中国電力（株）、（株）明電舎及びマツダは、各社の保有技術の強みを活かし、EV 駆動用バッテリーの VPP（Virtual Power Plant＝仮想発電所）リソースとしての可能性を検証するため、実証試験を行い、地産地消型の再生可能エネルギー利用拡大を目指した取り組み⁽²⁾を行った。

本稿では、上記実証試験を通して得られた複数の EV 駆動用バッテリーを定置型蓄電池としてリユースした場合

*1 技術研究所
Technical Research Center

*3 統合制御システム開発本部
Integrated Control System Development Div.

*2 技術企画部
Technology Planning Dept.

の劣化特性の解析評価及びEV駆動用バッテリーのリユースに向けた今後の課題について説明する。

2. 定置型蓄電池システムの構成

2.1 蓄電システムの全体構成

今回の実証試験は、EV駆動用バッテリーのリユースによるコストメリットを最大化するため、ハード的な接続やソフトの変更規模を最小限に留めつつ、8台のEV駆動用バッテリーパック（以降パック）を、2台並列接続して4つの直流電源とした。それぞれの直流電源を、Power Conditioning System (PCS) とつなげる蓄電システム構成とした（Fig. 1）。

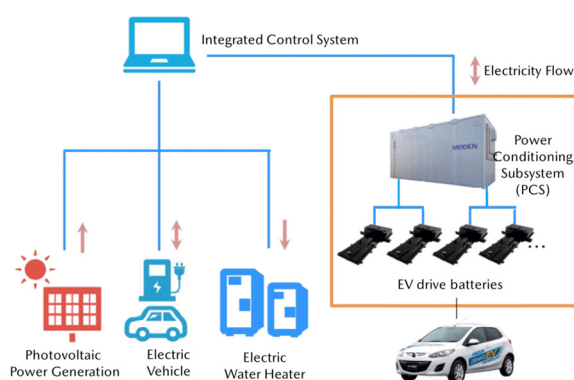


Fig. 1 Storage System Configuration

2.2 システム構成部品の紹介

(1) EV駆動用バッテリー

リユースに用いるEV駆動用バッテリーは、マツダが2012年10月に日本国内でリース販売した電気自動車「デミオEV」に搭載されたリチウムイオンバッテリーを使用することとした⁽³⁾。本パック（Fig. 2）は、総公称電圧346V、容量20kWh、空冷方式を採用している。

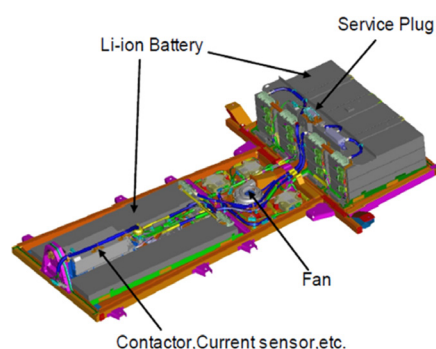


Fig. 2 Configuration of Battery Pack

今回リユースに使われるパックは、自社開発した遠隔操作システム⁽⁴⁾の情報より、パック全体の容量維持率が高いものから選別した。これらのパックは、新品パックほど性能均一ではないものの、バラツキは小さいことが分かった。従って、リユースするのに十分な性能がある

と判断した。

(2) 統合コントローラー

複数のパックを束ねてPCSと通信するため、各パックの状態を監視する統合コントローラーが必要であり、今回新たに作製した。本統合コントローラーは、CAN通信方式を採用しているパックとModbus/TCP通信方式を採用しているPCSを繋ぎ、CAN通信とModbus/TCPとの通信プロトコルを変換し送受信する機能をもつ。今回、その機能を満たすナショナルインスツルメンツ（NI）製PXIeシステムを採用した。

本統合コントローラーの主な仕様をTable 1に示す。統合コントローラーは、起動中にそれぞれのパックのState Of Charge (SOC) や電圧及び充放電可能電力などを読み込み、PCSに送信するとともに、各パックの故障診断を行う。また、各パックの状態及び故障種別をPCSに送信できる機能及び定置用システムとして運用していく中で重要なデータをロギングする機能も併せてもつこととした。

Table 1 Main Specifications of Integrated Controller

Item	Model / Specifications
controller	PXIe-8821
CAN	PXIe-8510, 6+2port
Ethernet	PXIe-8234, 2-Port Gigabit

(3) PCS

PCSの主な仕様をTable 2に示す。今回、リユースバッテリーとつなぐため、リユースするパックの特徴である異なる性能（劣化状態等）を加味し、パックの性能に応じた運用が求められる。そのため、最も望ましいシステム構成として、直流回路の構成では1つのDCDCコンバーター（以降：DCDC）に対し、1つのパックである。しかし、この場合では、DCDCの数が増え、リユースバッテリーの本来のコストメリットが小さくなる。一方で、1つのDCDCに対し複数のパックを繋げるシステムは、性能が最も悪いパックに引っ張られ、システム全体の効率が悪くなる。上記を鑑みて、状態に近い2つのパックを1つのDCDCにつなげる構成とし、効率とコストの両立を図ることとした。また、使用過程でパックに異常が起きてもシステムが稼働可能となるように、DCDC単位の切り離し及び並列する2つのパックの片方の切り離しを可能とした。更に、自然災害などの停電時においても、重要業務の継続ための備えとして自立運転機能も搭載した。

Table 2 Main Specifications of PCS

Item		Rating or Performance
Circuit Method		Voltage type self-excited PWM current control method
Cooling Method		Forced air cooling
AC Rating	Rated Capacity	400kVA
	Phase Number	Three-phase three-wire
DC Rating		240V ~420V

3. リユースバッテリーの特性評価手法の開発

3.1 リユースバッテリーの課題

3.1.1 車両用途と定置用の劣化傾向の把握

車両用途では、バッテリーの電欠に対応するため、低いSOC領域まで使われる頻度は少ない (Fig. 3 上図)。これに対し、定置用途ではさまざまな使われ方が想定される。例えば、ある特定の充放電深度で周期的に充放電を繰り返すような使われ方などが考えられる (Fig. 3 下図)。上記を踏まえると、EV 駆動用バッテリーを定置用としてリユースされる場合、異なる使い方によるバッテリーの劣化傾向を、事前に把握しておくことが重要と考える。

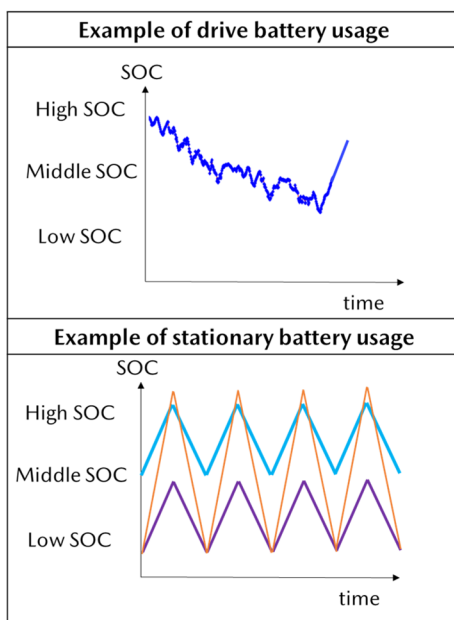


Fig. 3 Example of Battery Usage

3.1.2 有効容量の定量化

一般的に EV 駆動用バッテリーは、使用環境条件などにより同一パックであってもパック内のバッテリーセル (以降セル) 間で容量差が生じると考えられる。そのため、リユースするパックの有効容量を把握するには、リユースバッテリーの特徴であるパックごとの性能バラツキを考える必要がある。また、リユースバッテリーを定

置システムの蓄電池として用いる際に、より大規模な用途へ拡大するため、複数のパックを並列接続して用いることが想定され、このような使い方にも考慮する必要がある。そのため、長期使用したときに、パック内のセルの容量バラツキを踏まえた有効容量の定量化や異なる劣化状態で並列接続されるパックごとの有効容量の定量化を見極めることが、バッテリーをリユースする際の重要課題と考えた。

そこで、今回の実証試験では、パック内のセル容量バラツキと並列されたパックごとの容量バラツキを評価指標とし、定量評価を行った。それぞれの評価指標について以下説明する。

a) パック内のセル容量バラツキ

EV 駆動用バッテリーは、車載用途で充放電を繰り返されるため、リユース時のパック内のセル容量は、初期のように全てのセルは均一な容量を保たれなくなる。これによりパック内で直列接続された多くのセルに容量差が生じる。このようなセルの容量差によって、パックの使用可能なバッテリー容量が減少する (Fig. 4)。そのため、長期使用を想定した二次利用においてパック内セル容量を把握し、セルの容量差を評価指標とし、定量評価して、パック内の容量バラツキを明らかにする。

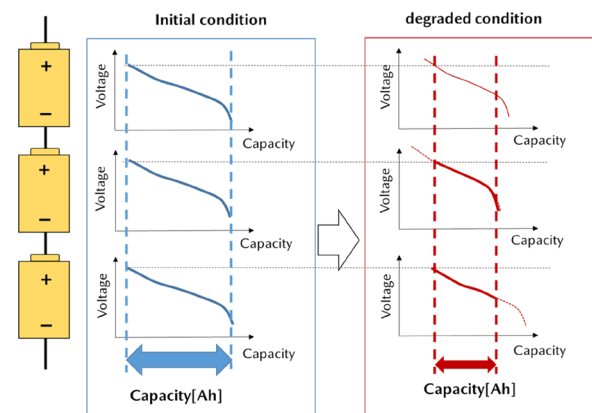


Fig. 4 A Condition of Battery Cell Balance

b) パック間の容量バラツキ

今回のシステムは、1つのDCDCに対し、2つのパックを並列接続して使用した。このように複数のパックで構成されるシステムでは、パックの制御電圧は同じであってもパックの劣化状態が異なるため、両パック間で容量差が生じる。例えば Fig. 5 に示すように容量の多いパック A と容量の少ないパック B を並列につなげて運用したときに、両パックでは、それぞれの受け入れられる充放電の量が異なる。このように、それぞれのパックに異なる負荷がある状態で長期使用した時の、両パックの間で生じる容量差の変化を定量評価して、パック間の容量バラツキを明らかにする。

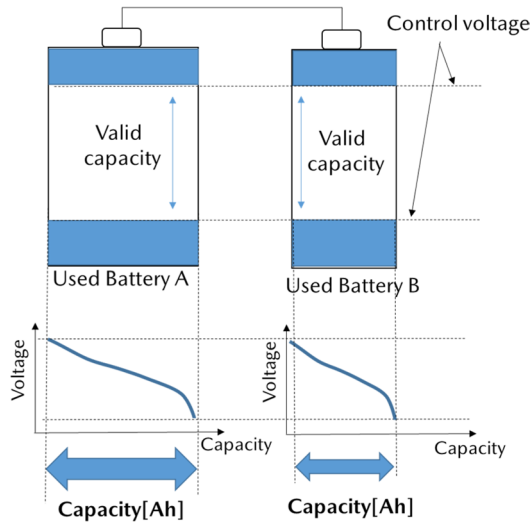


Fig. 5 Example of Parallel Pack Usage

3.2 特性評価試験

特性を明らかにするため、バッテリーの容量について定義を行い、これを基に評価試験及びデータ解析を行う。

3.2.1 バッテリーの容量定義

(1) パックの容量

パックの容量は、Fig. 6 に示すとおり、制御するパック電圧の V_h から放電し始め、 V_l まで放電した容量 (Ah) と定義する。なお、バッテリーは、繰り返し充放電することで容量低下するため、新品パックの容量を 100 とし、その後決められた同制御電圧範囲で測定された容量の相対値を用いてパック容量を算出した。

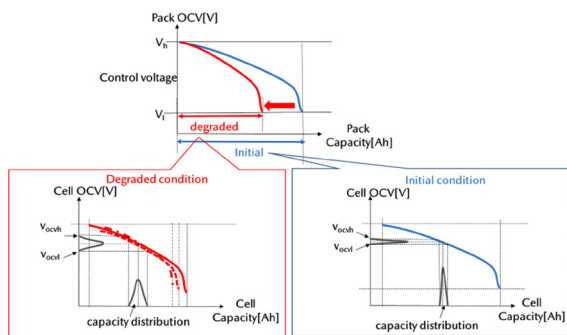


Fig. 6 Battery Pack Capacity

(2) セルの容量

セルの容量は、新品時の Open Circuit Voltage (OCV) と SOC との関係を終始同じとし、OCV から換算された SOC よりセル容量値を算出する。一方で、OCV は電流が流れているときに直接計測できないため、式(1)の端子電圧 V_{batt} と過電圧 V_{ov} から OCV を推定することとする。

$$V_{batt} = V_{ocv} + V_{ov} \quad (1)$$

ここでは、Fig. 6 に示すように、新品時のセルは均一

した OCV をもち、バッテリーセル間の容量バラツキが小さい。しかし、長期使用されることで、パックが同じ電圧であっても、各セル間で使用される OCV の範囲 ($V_{ocvh} \sim V_{ocvl}$) に差が生じる。その結果、各パック内のセル間で使用可能な SOC が異なり、パック内でセル容量が不均一となる。そこで、不均一なセル容量を求めるため、車載されている 96 個のセル端子電圧モニターで計測されたセル端子電圧 V_{batt} の最大/最小値を用いて最大/最小 OCV 推定して容量換算した。その換算方法は、式 (1) より、過電圧 V_{ov} 一定とすると、バッテリーセル端子電圧 V_{batt} の最大/最小値から各セルの OCV の最大/最小値が求められる。そして、換算された OCV から SOC を求め、SOC からセルの容量最大/最小が求まる。

3.2.2 データ解析方法

車載された 96 個のセル端子電圧モニターを用いて計測された V_{batt} からそれぞれの OCV 値を求め、SOC 換算してセルの最大容量 (CAP_{MAX}) とセルの最小容量 (CAP_{MIN}) を算出した。なお、 CAP_{MAX} と CAP_{MIN} の定義は下記のとおりである。

- CAP_{MAX} : OCV 変化が最小時の換算容量
- CAP_{MIN} : OCV 変化が最大時の換算容量

また、パック内のセル容量分布は正規とし、セル最大/最小容量より平均値 (CAP_{ave}) を求めた (Fig. 7)。 CAP_{ave} と CAP_{MAX}/CAP_{MIN} の差をバラツキ幅と呼び、解析評価を行った。

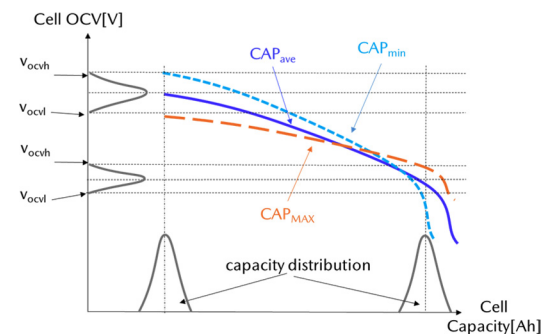


Fig. 7 Definition of Battery Capacity

3.2.3 劣化特性の評価試験条件

バッテリーの劣化特性を評価するため、バッテリーを劣化させる充放電サイクル試験と劣化させた状態での特性試験を実施する必要があり、以下にそれぞれの試験について説明する。

(1) 充放電サイクル試験

定置システムの蓄電池の使い方として、太陽光発電などの再生可能エネルギーによって得られた供給余剰となったエネルギーを蓄え、必要な時に蓄えた余剰エネルギーで仕事させることを想定する。このような用途では、決められた制御範囲において周期的に充放電を繰り返す。そこで、周期的な充放電の使い方を模擬するため、充放

電サイクル試験を 500 サイクルまで実施して、バッテリーを劣化させる試験とした。また、使い方によるバッテリーの性能差を見るため、異なる 3 つのパターンの充放電深度にて充放電サイクル試験を行った (Fig. 8)。

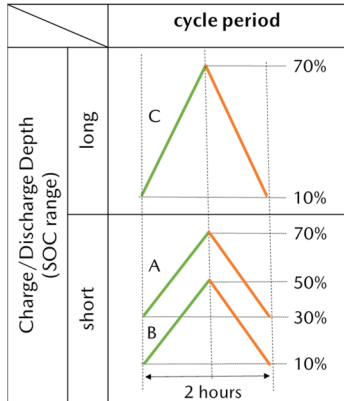


Fig. 8 Cycle Test Conditions

(2) 特性試験

バッテリーの特性を定量評価するため、エネルギー量であるバッテリー容量のほか、過電圧を求めるための抵抗測定を合わせて行った。容量の測定では、パックの制御電圧 $V_h=370V$, $V_l=298V$ とし、Constant Power (CP) 充放電を行った。なお、放電容量を測定する直前では、Constant Voltage (CV) 充電を 30 分ほど行い、放電開始時のバッテリー充電量調整を行った。一方、パックの抵抗測定は、Hybrid pulse power characterization (HPPC) テストマニュアル⁽⁵⁾ に基づいた制御サンプリング 1 分、最大パルス電力 80kW の条件で行った。

本特性試験は、充放電サイクル試験の開始 (0 サイクル目) と試験の終了 (500 サイクル目) 及び試験の中間点 (250 サイクル目) で 3 回を実施した。

3.2.4 劣化特性の評価試験結果

(1) 車両用途と定置用の劣化傾向の把握

まず、充放電サイクル試験を 500 サイクルまで実施し、3 回の特性試験の計測データの平均値 (CAP_{ave}) について解析した。その結果、容量低下の平均は 2% であった。電池パックの容量低下の傾向は、マツダが独自に作成した車載用劣化モデル⁽⁶⁾ による予測値と同等であった (Fig. 9)。本モデルは、車載用途において容量劣化が \sqrt{t} に比例して減少することが実験的に確かめられていたが、今回のような定置用途のシステムにおいても適用できることが分かった。上記より、パック単位での容量低下は、車載用途と定置用途では大きな差異はなく、従来の車載用途の劣化モデルを用いることで、事前に定置用として二次利用されるバッテリーの劣化特性を予測することが可能と分かった。

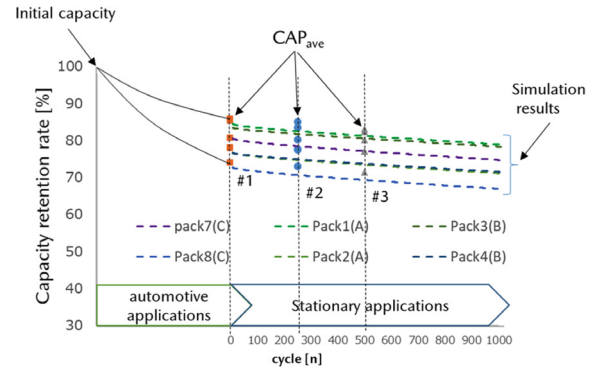


Fig. 9 Evaluation Test and Model Simulation Results

次に、異なる 3 つの充放電サイクルパターンにて、それぞれのパターン (B 及び C) ごとの 2 つのパックの容量バラツキを解析した。その結果、バラツキ幅の最大は B パターン (16%) であり、最小は C パターン (13%) であった (Fig. 10)。また、使い方によらず容量のバラツキ幅は、サイクル数の増加に伴って、増加傾向であった。この結果から定置用途も車載用途と同様、使い方や繰り返し充放電によってパック内の容量バラツキ幅が増加すると示された。

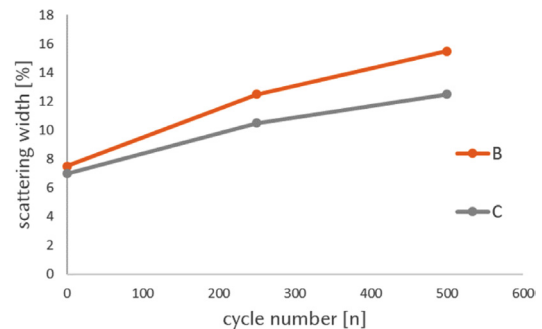


Fig. 10 Results of Variation Depending on Usage

(2) 有効容量の定量化

a) パック内のセル容量バラツキ

Fig. 11 に全ての充放電サイクルパターンのバラツキ幅を示す。パック内のセル容量バラツキ幅は、サイクル数の増加に伴って、増加傾向であった。また、リユース開始時の最大バラツキ幅は 7% であったが、500 サイクルの充放電試験終了後のセル容量の最大バラツキ幅は 12% ~ 17% となった。セル容量の最大バラツキ幅 17% は、最小バラツキ幅 12% の 1.4 (=17/12) 倍の差があった。

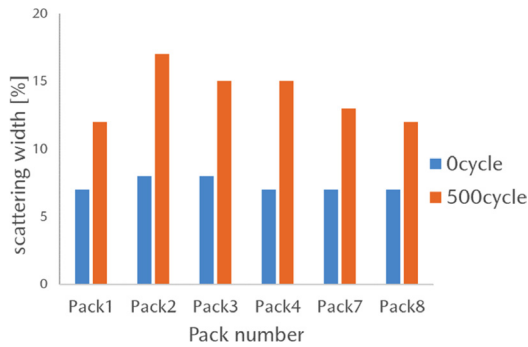


Fig. 11 Results of Variation in Battery Packs

b) パック間の容量バラツキ

Fig. 12 に同じ充放電サイクルパターンの異なる 2 つのパックのバラツキ幅を示す。パック間の容量の変化幅も、サイクル数の増加に伴って、増加傾向であった。一方、並列接続された 2 つのパック間でのバラツキについて、リユース始めたときの 2 つのパック (Pack3, Pack4) の容量バラツキはそれぞれ 7%, 8% であったが、その後 250 サイクル後は 12% と 13%, 500 サイクル後 15% と 15% となり、パック間に大きな差はないと確認できた。

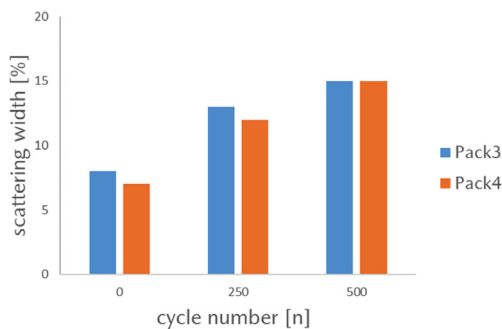


Fig. 12 Results of Variation between Battery Packs

3.3 評価試験結果に対する考察

EV 駆動用バッテリーを定置用システムの蓄電池としてリユースした場合、パック容量の平均値 (CAP_{ave}) について、車載用途も定置用途も同じ劣化傾向であった。また、 CAP_{ave} の劣化推移は、定置用途においても車両用途で構築した劣化予測モデルで予測できることを確認できた。これは、車載用途で構築した劣化予測モデルは、バッテリーの主劣化要因である電圧、温度、電流の物理法則をベースとしたことによる影響が大きいと示唆される。

一方、各パック内のセル容量のバラツキ幅は、繰り返し充放電に伴って大きくなることが明らかとなった。これは、使い方による影響が大きいと考えられる。今回のサイクル試験では、B パターンと C パターンの違いは SOC 範囲以外に、充放電レートの違いがある。一般的に環境温度一定の時は、電流レートが高いバッテリーの方は自己発熱が大きく、自己発熱の影響で劣化が進行しや

すい。しかし、今回の結果 (Fig. 10) は逆であった。その原因について充放電サイクル履歴を調査したところ、今回のような 1 サイクル 2 時間かかる (0.5C 以下) 試験においては、環境温度を一定にすることでバッテリーの自己発熱による劣化への影響が小さいことが分かった。一方、二次利用時のバッテリーの抵抗が大きいため、ゆっくり充放電した B パターンの方は、C パターンより過電圧 V_{ov} による影響が小さく、充放電サイクル中の休止時の電圧値から正極は低い電位、負極は高い電位まで放電したことが伺える (Fig. 13)。これにより、バッテリー電極の活物質の奥まで Li の挿入脱離した B パターンの使い方は、パック内で劣化進行しやすいセルが生じる可能性が高い。そのため、パック内のセル容量バラツキ幅が増加したと推測される。

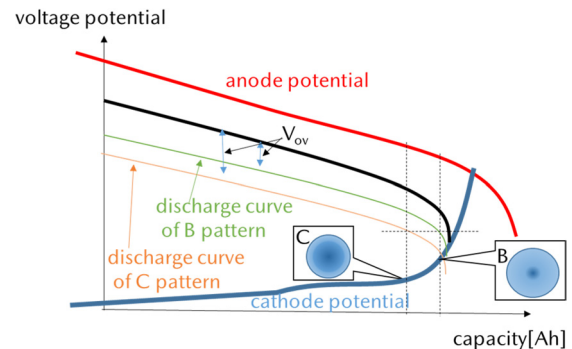


Fig. 13 Results of Variation between Battery Packs

また、並列接続されるパックでのバラツキ幅に大きな差が生じなかったことを確認した。これはバッテリーの劣化に伴って内部抵抗は増加し、相互の抵抗状態に応じてバランスを取りながらパックへ充放電できたと考えられる。その結果、両パックは、仕事分担に応じて劣化するため、それぞれのパックのバラツキ幅の増加も抑えられたと解釈できる。

4. 駆動用バッテリーのリユースに向けて

今回、EV 駆動用バッテリーをリユースして、定置用途の運用におけるバッテリーの劣化特性を把握することができた。今後、今回の実証試験での知見を活かし、より有効にバッテリーを使い切るための運用の仕方などを研究する必要があると考える。また、リユースする蓄電池システム構築のため効率化と低コスト化が必要と考える。そのため、車載部品の設計時に、リユースを想定した設計も求められる。特に、駆動用バッテリーにおいて、大規模な定置用蓄電システムに統合するための統合コントローラーや BMS (Battery Management System) とのインターフェースの統一化、更にフレキシブルなバッテリーの配置を目指した通信の無線化やモジュール単位でのリユース検討などが挙げられる。更に、リユースバッテリーの選別において、低コストかつ高効率で行う必要が

あるため、車両の状態での計測データの活用やモデルベース開発を活用した解析手法の構築など、リユース前により高精度に電池の状態を把握できるような技術構築をしておく必要があると考える。

5. おわりに

本論文では、複数のEV駆動用バッテリーを定置用蓄電池としてリユースした実証実験の概要及びリユースバッテリーの劣化特性について紹介した。実証実験で得られたデータを解析した結果、より有効にリユースバッテリーを活用するための以下の事項を明らかにした。

- ①パックの平均容量の劣化推移は車載用途でも定置用途でも同傾向であり、車載用途で構築してモデルで予測可能である。
- ②使い方と制御SOCの適正化によりパック内の容量バラツキを抑制できる。
- ③パックを並列接続して利用することでパック間のバラツキ幅の増加を抑制できる。

今後、さらなる高効率な開発を目指し、車載する駆動用バッテリーをリユースするための技術開発を加速していく。

謝辞

本論文及び実証試験において終始多大なご協力と支援を賜った中国電力(株)、(株)明電舎、パナソニック(株)には深謝する。

参考文献

- (1) 本橋ほか：サステイナブル“Zoom-Zoom”宣言2030, [マツダ技報, No.35, pp.3-8 \(2018\)](#)
- (2) EV駆動用バッテリーのリユース技術を活用したパワチャルパワープラント実証試験について, <https://newsroom.mazda.com/ja/publicity/release/2019/201910/191017a.pdf> (2019)
- (3) 松井ほか：デミオEVの高エネルギー密度Liイオンバッテリー開発, [マツダ技報, No.30, pp.125-129 \(2012\)](#)
- (4) 福庭ほか：デミオEVの制御開発, [マツダ技報, No.30, pp.130-134 \(2012\)](#)
- (5) U.S. Department of Energy (DOE): Freedom CAR Battery Test Manual For Power-Assist Hybrid Electric Vehicles. DOE/ID-11069, 40p (2003)
- (6) 藤田ほか：ビルディングブロックを支えるバッテリーモデルベース開発, [マツダ技報, No.32, pp.185-190 \(2015\)](#)

■著者■



楊殿宇



高原慎二



末富隆雅

社外への発表論文一覧表（2021年1月～12月）

1. 社外講演（海外）

*所属は原則発表時点を示す

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2021.3.30	アメリカ化学会 ACS Omega	Crack- and Shrinkage-Free Ethylene-Bridged Polysilsesquioxane Film Prepared by Hydrosilylation Reaction	濱田 崇 中西 祐樹 岡田 健太 大下 浄治	広島大学 広島大学／技術研究所 同上 広島大学
2021.4.6	American Chemical Society ACS Applied Polymer Materials	Antifogging Hybrid Materials Based on Amino-Functionalized Polysilsesquioxanes	前田 哲爾 濱田 崇 塚田 学 桂 大詞 岡田 健太 大下 浄治	技術研究所 広島大学 同上 技術研究所 同上 広島大学
2021.6.10	European chemical societies Electrochemical Science Advances	Enhanced Performance of a Li-ion Rechargeable Battery at Low Temperatures: Use of 3,3,3-Trifluoropropyl Acetate as an Electrolyte Additive	永野 裕己 Kim Hackho 池田 卓 三好 誠治 渡邊 源規 石原 達己	技術研究所 九州大学 技術研究所 同上 九州大学 同上
2021.6.15	ELSEVIER International Conference on Algal Biomass, Biofuels and Bioproducts	Transgene-free and highly efficient genome editing using removable all-in-one Platinum TALEN-ARS plasmids in microalga, Nannochloropsis	栗田 朋和 諸井 桂之 岩井 雅子 岡崎久美子 野村 誠治 斉藤 史彦 高見 明秀 坂本 敦 太田 啓之 佐久間哲史 山本 卓	広島大学 同上 東京工業大学 広島大学 技術研究所 同上 同上 広島大学 東京工業大学 広島大学 同上
2021.7.11	Association for Computing Machinery The Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO) 2021	Knowledge Discovery using Multidisciplinary design optimization and Data mining	小平 剛央	技術研究所
2021.7.15	American Chemical Society ACS Appl. Polym. Mater.	Thermal Insulating Property of Silsesquioxane Hybrid Film Induced by the Intramolecular Void Spaces	濱田 崇 中西 祐樹 岡田 健太 塚田 学 上殿 明良 大下 浄治	広島大学 技術研究所／広島大学 同上 千葉大学 筑波大学 広島大学
2021.7.19	Royal Society of Chemistry RSC Advances	Ethylene-Bridged Polysilsesquioxane/Silica Hollow Particles Hybrid Film for Thermal Insulation Material	塚田 学 中西 祐樹 濱田 崇 岡田 健太 三根生 晋 大下 浄治	千葉大学 技術研究所／広島大学 広島大学 技術研究所／広島大学 同上 広島大学
2021.7.22	Tech Science Press Computer modeling in Engineering & Science	Construction of design guidelines for optimal automotive frame shape based on statistical approach and mechanical analysis	本田 正徳 河村 力 木崎 勇 宮島 陽一 竹澤 晃弘 北村 充	技術研究所 同上 車両開発本部 同上 早稲田大学 広島大学
2021.8.1-5	The 50th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering (inter-noise2021)	Acceleration sound design for vehicles using distortion products	油木 悠 山際 納月 谷本 典之 石光 俊介 村上 泰樹 藤川 智士 松本 貢典	広島市立大学 同上 同上 同上 九州大学 パワーTRAIN開発本部 エンジン性能開発部

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2021.8.5	Elsevier Composites Part C	Estimation of axial compressive strength of unidirectional carbon fiber reinforced plastic considering local fiber kinking	上田 正人 田崎由之助 河村 力 西田 健二 本田 正徳 服部 公一 宮永 俊明 杉山 哲也	日本大学 同上 技術研究所 同上 同上 日鉄ケミカル&マテリアル(株) 同上 同上
2021.9.8-10	2021 International Research Council on the Biomechanics of Injury (IRCOBI)	Analysis of the effect of seated posture on vertebral compression fractures in frontal crashes using HBMs	柴原 多衛 西本 哲也 本村 友一 松本 尚 朝日 龍介 杉本 繁 福島 正信	衝突性能開発部 日本大学 日本医科大学千葉北総病院 同上 衝突性能開発部 同上 同上
2021.9.15-16	The 15th International Conference on Innovative Computing, Information and Control (ICICIC2021)	Improving the Comfort of a Car Engine Sound Using Auditory Masking	油木 悠 井ノ口 楓 石光 俊介 藤川 智士 松本 貢典 伊達 佑希	広島市立大学 同上 同上 パワートレイン開発本部 エンジン性能開発部 同上
2021.9.27-10.1	米国電気電子学会 (IEEE) IROS2021: International Conference on Intelligent Robots and Systems	Effect of Display Response Time on Brain Activity in Human-Machine Interface Commander Operation	大島健太郎 積際 徹 横川 隆一 成末 充宏 西村 啓人 武田 雄策 原 利宏	同志社大学 同上 同上 技術研究所 同上 同上 同上
2021.11.6-10	The 15th International Congress of the Asian Society Against Dementia	Relationship between driving and Quality of Life in "memory clinic outpatients"	熊居 慶一 藤原 由貴 鈴木利佳子 東海林美和子 葛西 真里 中村 馨 山口 智 厚東 知成 山本 康典 目黒 謙一	東北大学 統合制御システム開発本部 東北大学 同上 同上 同上 同上 統合制御システム開発本部 東北大学
2021.12.28	Combustion Institute Combustion and Flame	Measurements and simulations of ignition delay times and laminar flame speeds of nonane isomers	山田 眞平 下栗 大右 三好 明 進士 勇太 遠藤 琢磨 Yu-Chao LIAO Yi-Rong Chen Shenqyang SHY 八房 智顯 酒井 康行 乃生 芳尚 斉藤 史彦	広島大学 同上 同上 同上 同上 同上 台湾國立中央大學 同上 広島工業大学 福井大学 技術研究所 同上

2. 社外講演（国内）

*所属は原則発表時点を示す

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2021.1.20	広島県 AI・IoT・ロボティクス活用研究会 令和2年度第1回研究会	マツダの取り組む生産ラインの知能化 ～IVI 実証実験（Deep Learning, AI 適用） より～	市本 秀則	生産企画部
2021.2.10	イノベティブ・デザイン LLC システムズエンジニアリング/ Model-Based システムズエンジニア リング シンポジウム 2021	様々な分野におけるシステムズエンジニ アリングの導入	佃 厚典	統合制御システム開発本部
2021.2.18-19	東京大学モビリティ・イノベーション 連携研究機構 (UTmobl) 第11回 自動車技術に関する CAE フォーラム 2021	タイヤ回転を考慮した CFD 技術によるデ ザインと両立する空気抵抗低減技術の開 発	中田 章博 森川 陽介 岡本 哲 坂口 徳章	熱流体機能開発 Gr 同上 同上 同上
2021.3.2-4	日本工業出版（株） Grinding Technology Japan 2021	エンジン部品の研削加工の現状と今後の 課題	永田 亮平	パワートレイン技術部
2021.3.3	腐食防食学会 中国・四国支部 2021 年材料と環境研究発表会	人工アルミニウムさび粒子の生成に及ぼ すアニオンの影響	田中 秀和 樋口 大成 江崎 達哉 重永 勉	島根大学 同上 技術研究所 同上
		人工 γ -FeOOH さび粒子の生成に及ぼすケ イ酸イオンの影響	田中 秀和 松本 悠揮 江崎 達哉 重永 勉	島根大学 同上 技術研究所 同上
2021.3.3	日本機械学会中四国支部 第52回学生員卒業研究発表講演会	エンジン筒内を模擬した高温高圧下での エンドガス着火に与える窒素希釈の影響 の調査	浜崎 亨 常藤 飛鳥 西村 凌平 瀬尾 健彦 三上 真人 下栗 大右 河野 通治	山口大学 同上 同上 同上 同上 広島大学 MBD 革新部
2021.3.6	東京工業大学 未来社会デザイン機構 DLab Dialog Day Spring 2021	“未来共創の場”—企業との連携「Dlab パートナーズ」—パネルトーク	楠 信哉	技術研究所
2021.3.7-8	日本感性工学会 第16回日本感性工学会春季大会	聴覚マスキングを用いた自動車エンジン 音の快音化検討	井ノ口 楓 石光 俊介 油木 悠 藤川 智士 松本 貢典 岩田 陽明 伊達 佑希	広島市立大学 同上 同上 パワートレイン開発本部 エンジン性能開発部 同上 同上
2021.3.10-12	日本音響学会 2021 年春季研究発表会	サウンドテクスチャ統計量を用いた日常 音・感情値の推定	中谷 裕紀 渡邊 雅之 萬 菜穂子	技術研究所 同上 同上
2021.3.11-12	インダストリアル・バリューチェー ン・イニシアティブ (IVI) IVI 公開シンポジウム 2021-Spring-	AI による製造ラインの生産性向上 第4 弾	市本 秀則 田中 晋作 小森 悠一 影山 望	生産企画部 プラント技術部 パワートレイン技術部 同上
		人・モノの実績可視化—III（次世代 IE 追 究）	吉岡 新 大岩 義孝 長崎 博志	生産企画部 同上 同上
		工程能力の可視化による業務効率化	江草 秀幸 川北 光雄 久保 祐貴	ツーリング製作部 同上 同上
		ワーキンググループ報告 「搬送機器の遠隔操作による部品庫物流自 動化」	藤井 嘉治	車両技術部
2021.3.19	SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration Call for Papers SICE JCMSI Special Issue on SICE Annual Conference 2020	Influence of road environmental elements on pedestrian and cyclist road crossing behaviour	齊藤 裕一 高地 鳳真 伊藤 誠 伏間 文悟 菅野 崇 山本 泰典	筑波大学 同上 同上 統合制御システム開発本部 同上 同上

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2021.4.14-19	溶接学会 2021年度溶接学会春季全国大会	通電経路を制御因子に加えた抵抗溶接技術による鉄鋼材料接合部への熱処理技術	中井 正規 山口紘次朗 岩本 善昭 佐伯 修平	生産企画部 同上 電元社トーア(株) 同上
2021.4.18	自動車技術会 第7回ディーゼル部門委員会	熱効率改善に向けた機能開発に適用できる実測指圧の熱勘定解析	加藤 雄大	エンジン性能開発部
2021.4.20	Altair Engineering, Inc. 2021 ALTAIR ENLIGHTEN AWARD WEBINAR and PANEL DISCUSSION	PANEL DISCUSSION WITH PRIOR YEARS' PARTICIPANTS	小平 剛央	技術研究所
2021.5.21	日本材料学会 第6回マルチスケール材料力学シンポジウム	ZnDTP由来トライポフィルムのための原子間ポテンシャル開発	小林 森 榊間 大輝 波田野明日可 泉 聡志 河口健太郎 宮内 勇馬	東京大学 同上 同上 同上 技術研究所 同上
2021.5.25	日本伝熱学会 第58回日本伝熱シンポジウム	自動車向けヒートパイプ暖房システムの開発	小池 祐輔	技術研究所
2021.5.26-28	高分子学会 第70回高分子学会年次大会	シルセスキオキサン／トリアジン型ハイブリッド断熱材料の開発	高瀬咲生乃 濱田 崇 岡田 健太 三根生 晋 大下 浄治	広島大学大学院 同上 技術研究所 広島大学(技術研究所) 広島大学
		γ線グラフト重合による高分子材料のX線CT撮像の高コントラスト化に関する研究	中谷都志美 桂 大詞 駒口 健治 田邊 栄司 大下 浄治	広島大学 技術研究所 広島大学 広島県立総合技術研究所 広島大学
2021.5.26-28	自動車技術会 2021年春季大会学術講演会	G-Vectoring制御が人の視線や身体挙動に与える効果に関する分析	藪中 翔	技術研究所
		デジタル動作解析による技能伝承システム(TDS-DMA)の開発と実用化	江草 秀幸 久保 祐貴 須賀 実 佐伯 千春	ツーリング製作部 同上 同上 同上
		夜間雨天時の走行路視認性向上技術ーヘッドライト配光によるドライバの輝度対比弁別閾制御に関する検討ー	竹之内久美子 楠本 信平 藤原 由貴 山本 康典	統合制御システム開発本部 同上 同上 同上
		塗装部の耐食性迅速評価技術の開発とその実用化	浅田 照朗 佐々木将展 江崎 達哉 重永 勉 高見 明秀	技術研究所 同上 同上 同上 同上
		マイルドハイブリッドのシステム技術開発	楊 殿宇 吉田 勝正 湯原 将光 宇都宮 隆 庄司 明 三好 誠治	技術研究所 電駆・PT制御部品開発部 同上 技術研究所 同上 同上
		走行時の車体変形可視化技術の開発	中野 陽平 北原陽一郎 田中 裕充 伊藤 司 鄭 宏彬	技術研究所 同上 ボデー開発部 操安性能開発部 ボデー開発部
		モデルベースリサーチ(MBR)による熱マネ・NV制御材料モデル技術の開発 第1報	桂 大嗣	技術研究所

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2021.5.29-30	日本早期認知症学会 第 21 回日本認知症学会学術大会	専門医「もの忘れ外来」初診患者における 運転と QOL との関係	熊居 慶一 藤原 由貴 鈴木利佳子 東海林美和子 葛西 真里 中村 馨 山口 智 厚東 知成 山本 康典 目黒 謙一	東北大学 統合制御システム開発本部 東北大学 同上 同上 同上 同上 同上 統合制御システム開発本部 東北大学
2021.5.31	(株) 技術情報協会 高分子材料の劣化・変色と添加材の 選び方, 使い方	自動車用塗装の HALS による耐候劣化メカ ニズムの定量的な解明	河邊 光祥 駒口 健治	技術研究所 広島大学
2021.6.5	日本流体力学会 第 27 回日本流体力学会中四国・九 州支部講演会	リアルワールドを考慮したマツダの空力 研究	清水 圭吾	技術研究所
2021.6.14	ひろしま産業振興機構 カーテクノロジー革新センター e ラーニング	自動車の樹脂材料と加工技術	朝野 千明	技術研究所
2021.6.17	プラスチック成形加工学会 第 32 回年次大会	バイオエンブラ新意匠 2 層成形技術の開 発	一原 洋平	装備開発部
2021.6.24-25	品質工学会 第 29 回品質工学研究発表大会	プレス金型の高周波焼入れにおける作業 条件の最適化	有松 直弥 佐伯 千春 影山 貴大 久保 祐貴	ツーリング製作部 同上 同上 同上
		パネル外観検査手法の構築	影山 貴大 徳留 宏俊 久保 祐貴 大塚 宏明 竹重 伸秀 福本 康博	ツーリング製作部 同上 同上 同上 同上 同上
		機能性評価を用いたプレス金型における 理想せん断構造の追求	畑平 拓也 岡山 一洋 新矢 齊 江草 秀幸 横山 郁夫 福本 康博	ツーリング製作部 同上 同上 同上 同上 同上
		生体情報活用による金型仕上げ技能の品 質安定化手法の構築	佐伯 千春 有松 直弥 影山 貴大 久保 祐貴 須賀 実	ツーリング製作部 同上 同上 同上 同上
2021.6.24-25	日本接着学会 第 59 回日本接着学会 年次大会	自動車における車体構造部の接着欠陥発 生に及ぼす粘弾性の影響	麻川 元康 山本 研一	技術研究所 同上
2021.6.29	ASAM (Association for Standarization of Automation and Measureing Systems) ASAM Resional Meeting Japan 2021	OpenDRIVE Concept Project From an OEM Perspective	平田 篤識	電子性能開発部
2021.7.6	日本トライボロジー学会 第 2 種研 究会 自動車のトライボロジー研究 会 自動車のトライボロジー研究会 (第 104 回), 東海トライボロジー研究 会 (第 109 回) 合同研究会	エンジンしゅう動面の摩擦・摩耗マルチ スケール解析	宮内 勇馬	技術研究所
2021.7.7	広島大学 工学部 応用化学概論	卒業生によるセミナー“応用化学”と“も のづくり”	前田 哲爾	技術研究所
2021.7.9	日本デザイン学会タイムアクシスデ ザイン研究部会 デザイン塾	価値成長モビリティのタイムアクシスデ ザイン	古郡 了 加藤 健郎 松岡 由幸	技術研究所 慶應義塾大学 同上

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2021.7.10-31	PMI 日本支部 PMI 日本フォーラム 2021	コロナ禍におけるフルリモートでの地域 コミュニティ立上げ事例	茨木 浩司 山崎 仁	MDI&IT 本部 同上
2021.7.14	広島大学 有機材料化学論 2021	自動車材料の現状と課題 MBR・MBD に よる材料開発プロセスの革新	甲斐 裕之 遊川 秀幸	技術研究所 同上
2021.7.14	シーメンスデジタルインダストリー ズソフトウェア SIEMENS Realize LIVE Japan 2021	タイヤ回転を考慮した CFD 技術によるデ ザインと両立する空気抵抗低減技術の開 発	中田 章博 森川 陽介 岡本 哲 坂口 徳章	熱流体機能開発 Gr 同上 同上 同上
2021.7.16	自動車技術会 騒音振動部門専門委員会	材料モデルベースリサーチ (MBR) によ る多孔質吸音材微視構造設計技術と吸音 部品設計への適用事例の紹介	山川 啓介 桂 大詞 山本 崇史	技術研究所 同上 同上
2021.7.16	2021 年度ものづくり委員会 デジタルものづくり塾 合同開講式	自動車開発におけるプレス成形 CAE の活 用	森澤 誠	車体技術部
2021.7.16	自動車技術会中部支部 2021 年度 第 1 回 技術交流会 「ヒトの動的感性に訴えるクルマづ くり」	人馬一体を支える人間中心のダイナミク ス性能開発	吉岡 透	統合制御システム開発本部
2021.7.16, 11.11	山口大学 大学院研究科共通授業「研究開発戦 略論」	自動車メーカーの研究戦略	本田 正徳	技術研究所
2021.7.27-29	JMAAB JMAAB Open Conference 2021	MAZDA と MATLAB と MBD	小森 賢	電子性能開発部
2021.8.2	日本機械学会 エンジンシステム部門 A-TS 07-58 および A-TS 07-47 合同研究会	熱効率改善に向けた機能開発に適用でき る実測指圧の熱勘定解析	加藤 雄大	エンジン性能開発部
2021.8.3-4	広島大学 先進理工系科学研究科博士課程前期 先進理工系科学専攻スマートイノ ベーションプログラム	モデルベース演習 1 : X 線解析演習 1 / 音 響解析演習 1	桂 大詞 山川 啓介	技術研究所 / 広島大学デジタル ものづくり教育研究センター 同上
2021.8.4	広島大学大学院工学研究科生体シス テム論研究室 生体電気工学講義	生体電気工学に基づく自動車開発	西川 一男	技術研究所
2021.8.17	ひろしま感性イノベーション推進協 議会 消費者を魅了する価値ある商品一価 値のつくり方・伝え方	地元商品開発にみる感性の捉え方	西川 一男	技術研究所
2021.8.18	自動車技術会ガソリン機関部門委員 会 第 9 回ガソリン機関部門委員会	過渡運転に適用可能なガソリン HCCI のモ デリング	飯田 晋也	パワートレイン技術開発部
2021.8.24	日本金属学会・日本鉄鋼協会中国四 国支部 金属第 61 回・鉄鋼第 64 回中国四国 支部講演大会	自動車用薄板鋼板を用いた MAG 溶接部の 水素脆化評価法の検討	溝上 達志 深堀 貢	技術研究所 同上
2021.8.26	トライボロジー学会エンジン潤滑研 究会 令和 3 年度第 1 回エンジン潤滑研究 会	ピストン系摩擦損失低減と燃焼室のシー ル性向上	堀端 頌子	技術研究所
2021.8.27	日本自動車部品工業会 西日本支部 講演会	MAZDA MX-30 のチャレンジ及び電動化 ロードマップ	上藤和佳子	商品本部
2021.9.1-3	日本セラミック協会 第 34 回秋季シンポジウム	シラノールフリーオリゴシルセスキオキ サンの合成と断熱材料への応用	高瀬咲生乃 濱田 崇 大下 浄治 中西 祐樹 岡田 健太 三根生 晋	広島大学 同上 同上 広島大学 / 技術研究所 同上 同上

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2021.9.1-3	日本セラミック協会 第 34 回秋季シンポジウム	分子内空隙の誘起によるシルセスキオキサン断熱材料の開発	濱田 崇 中西 祐樹 岡田 健太 大下 浄治	広島大学 広島大学／技術研究所 同上 広島大学
2021.9.1-8	日本心理学会 第 85 回大会シンポジウム	感性の心理学・脳科学的理解とその可視化に基づく社会応用に向けて	西川 一男	技術研究所／広島大学
2021.9.2	兵庫県，高輝度光科学研究センター (JASRI)，SPring-8 利用推進協議会 第 18 回 SPring-8 産業利用報告会	NAP-HAXPES による金属表面のオイル劣化反応分析	百崎賢二郎	技術研究所
2021.9.5-8	日本機械学会 2021 年度年次大会	Flame propagation and end-gas autoignition behaviors of n-C7H16/air mixtures in a constant volume vessel	Akash Bandyopadhyay 寺島 洋史 下栗 大右 河野 通治	北海道大学 同上 広島大学 MBD 革新部
2021.9.6-8	高分子学会 第 70 回高分子討論会	水酸基を有するポリシルセスキオキサンの合成と防曇材料への応用	杉本 哲也 濱田 崇 前田 哲爾 桂 大詞 三根生 晋 大下 浄治	広島大学 同上 技術研究所 同上 広島大学 同上
		NR/BR ブレンドゴムの低温結晶性および運動性に対する架橋の効果	中谷都志美 大下 浄治 小林 一磨 三宅 祐也 大竹 恵子 甲斐 裕之	広島大学 同上 倉敷化工 (株) 同上 技術研究所 同上
2021.9.8	岡山県産業振興財団 EV 関連技術情報発信セミナー	『自然体』人を中心とした MX-30 の開発	上田 貴之 上藤和佳子	パワートレイン開発本部 商品本部
2021.9.8-11	日本ロボット学会 第 39 回日本ロボット学会学術講演大会	ステアリング操舵時における上肢姿勢が手先コンプライアンス特性に及ぼす影響	森岡 悠斗 積際 徹 横川 隆一 成末 充宏 武田 雄策 原 利宏	同志社大学 同上 同上 技術研究所 同上 同上
		HMI コマンドつまみ回転操作時における示指・拇指のコンプライアンス解析に基づく指先の運動特性評価	大岡 昂平 積際 徹 横川 隆一 成末 充宏 武田 雄策 原 利宏	同志社大学 同上 同上 技術研究所 同上 同上
		HMI コマンドを用いた入力操作時における画面表示応答時間が脳活動に及ぼす影響	染井 健吾 積際 徹 横川 隆一 成末 充宏 西村 啓人 武田 雄策 原 利宏	同志社大学 同上 同上 技術研究所 同上 同上 同上
2021.9.9-11	可視化情報学会 第 49 回可視化情報シンポジウム	オイルミストセパレータの壁面付着量および空気流速分布の測定	山本 翔太 西野 耕一 島 伸一郎 木村 優介 中島 聖 西村 真人	横浜国立大学 同上 兵庫県立大学 同上 MBD 革新部 同上
		全反射照明を利用したオイルミストの壁面付着挙動の可視化計測	渡瀬 航大 西野 耕一 中島 聖 西村 真人	横浜国立大学 同上 MBD 革新部 同上
2021.9.13	精密工学会 学生のための精密工学セミナー	マツダのモノ造り	古屋 頌一 高橋 宏和	パワートレイン技術部 同上

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2021.9.15-17	日本機械学会 第31回設計工学・システム部門講演会	自動車車体における構造知見の効率的発見のための設計支援技術の開発 (1) 進化的因子抽出と因子選択確率を利用した非線形スパースモデリングの提案	近藤 俊樹 小平 剛央 鋤持 寛正	技術研究所 同上 同上
		自動車車体における構造知見の効率的発見のための設計支援技術の開発 (2) 荷重伝達指標 (U*) を基にした動的可視化分析手法の提案	鋤持 寛正 小平 剛央 岡本 定良	技術研究所 同上 同上
2021.9.16	日本機械学会 M&M2021 材料力学カンファレンス	AI/CFRP 異材点接合継手の二段変動荷重下における疲労特性評価	峯岡誠太郎 中原 文哉 荒川 仁太 小川 裕樹 曙 紘之 菅田 淳 田中耕二郎	広島大学 同上 同上 神戸大学 広島大学 同上 技術研究所
2021.9.17	自動車技術会 第74回技術交流会	超高張力鋼板の精度初期品質向上への取り組み	川野 孟	車体技術部
2021.9.20	岡山県精密生産技術研究会 令和3年度岡山県精密生産技術研究会	「製造現場における検査工程のスマート化～IVI 実証実験より～」	市本 秀則	生産企画部
2021.9.21-23	日本機械学会 第34回計算力学講演会	自動車周りの渦同定技術の開発に向けた共同研究講座の取組み事例	中村 優佑 中島 卓司 平岡 武宜 清水 圭吾	広島大学大学院 同上 技術研究所 同上
2021.9.22	応用物理学会 第82回応用物理学会秋季学術講演会	ガス導入による NAP-HAXPES の帯電解消および試料表面の圧力測定 (2)	竹中 研人 足立 雄太 高原 光司 鈴木 哲 住田 弘祐	兵庫県立大学 同上 同上 同上 技術研究所
2021.9.22-24	日本味と匂学会 2021年度日本味と匂学会第55回大会	不快臭に対する末梢血管剛性応答と主観評価との関係解析	陳 崧志 曾 智 笹岡 貴史 峯松 優 百瀬 陽 西川 一男 松井 恵子 道田奈々江 農澤 隆秀 辻 敏夫	広島大学 同上 同上 三菱ケミカル(株) 同上 技術研究所/広島大学 技術研究所 同上 広島大学 同上
2021.9.24	自動車技術会 関西支部 2021年度講演会	新マツダコネク トコネクティッドサービスの開発	森田 晃之	情報制御モデル開発部
2021.9.24-25	電気・情報関係学会九州支部連合大会委員会 2021年度(第74回)電気・情報関係学会九州支部連合大会	可変界磁モータの磁力可変特性	板坂 直樹 池田壮一郎 椛蔭 寿行 三好 誠治 土方規実雄	技術研究所 同上 同上 同上 東京都市大学
2021.9.30	The Chemical Society of Japan Bulletin of the Chemical Society of Japan	Ethylene Carbonate (EC)-Propyl Acetate (PA) Based Electrolyte for Low Temperature Performance of Li-Ion Rechargeable Batteries	永野 裕己 Kim Hackho 池田 卓 三好 誠治 渡邊 源規 石原 達己	技術研究所 九州大学 技術研究所 同上 九州大学 同上
2021.10.9-10	日本機械学会 熱工学カンファレンス 2021	反応容積制限型高耐圧衝撃波管の開発	片山 明勇 八房 智顯 喬 懿敏 三好 明 原田 雄司 乃生 芳尚 斉藤 史彦 下栗 大右	広島大学 広島工業大学 広島大学 同上 技術研究所 同上 同上 広島大学

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2021.10.11-21	日経 BP 日経クロステック EXPO2021	『自然体』人を中心とした MX-30 の開発	上藤和佳子	商品本部
2021.10.12	公益財団法人 中国地域創造研究センター 中国地域におけるデジタル技術活用促進にかかわる懇談会	「企業等の課題解決に向けた AI・IoT ツールの活用促進」	市本 秀則	生産企画部
2021.10.12-15	型技術協会 第 35 回 型技術者会議 2021	工具摩耗予測を用いたプレス金型高精度加工への取り組み	嶋村 涼 中原 寛海 松永 明子 田中 貞夫	ツーリング製作部 同上 同上 同上
		金型仕上げ技能における匠の動作及び筋活動分析による技能伝承システム (TDS-DMA) の開発と実用化	久保 祐貴 佐伯 千春 須賀 実 大谷 卓史 江草 秀幸	ツーリング製作部 同上 同上 同上 同上
		ダイカスト鋳抜きピン曲り制御による寸法精度向上	佐々木大地 山本 綾人 藤井 祥平 小国 英明	パワートレイン技術部 同上 同上 同上
2021.10.13-15	自動車技術会 2021 年秋季大会学術講演会	機械学習を用いたロードノイズ予測手法およびメカニズム解明支援技術の開発	足立 崇勝 目良 貢 北村 光章 井上 諒 高橋 宗成 本田 正徳	技術研究所 同上 NVH 性能開発部 MDI 業務設計部 NVH 性能開発部 技術研究所
		自動車内装意匠設計のための投影型複合現実感技術による部材形状と質感の変調	義田遼太郎 岩井 大輔 佐藤 宏介 原 利宏 武田 雄策 村瀬 健二	大阪大学 同上 同上 技術研究所 同上 同上
		実験計画法による自動車衝突前の乗員挙動に対する誤差因子の影響評価	桐山 一郎 山内 一矢 小島 宏介 伊東虎太郎 横山 優太 杉山 裕文 岡澤 重信	山梨大学 MBD 革新部 同上 山梨大学 同上 同上 同上
		予測符号化理論に基づく深層学習モデルを用いた車載スピードメータの予測性評価	竹本 敦 寺田 哲也 岡崎 俊実 森 裕紀 尾形 哲也	統合制御システム開発本部 同上 同上 早稲田大学 同上
		THOR 50M のための胸リブ単体試験法の開発	増田 光利 谷口 昌幸 三上 秀則 杉田 鉄平 長谷 崇 村上 大介	トヨタ自動車 (株) 日本自動車研究所 本田技研工業 (株) 日本キスラー合同会社 衝突性能開発部 日産自動車 (株)
2021.10.23-24	日本複合材料学会 第 46 回複合材料シンポジウム	画像ベースの代表体積要素による CFRP の粘弾性マルチスケール解析	樋口 諒 横関 智弘 河村 力 西田 健二 本田 正徳 杉山 哲也 宮永 俊明	東京大学 同上 技術研究所 同上 同上 日鉄ケミカル&マテリアル (株) 同上

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2021.10.23-24	日本複合材料学会 第46回複合材料シンポジウム	放射光CTによる一方向CFRPのその場軸方向圧縮試験及び繊維配向を断層画像より再現した有限要素モデルを用いた圧縮破壊シミュレーション	高橋 拓也 轟 章 河村 力 樋口 諒 杉山 哲也 宮永 俊明 上田 政人 横関 智弘 本田 正徳	東京工業大学 同上 技術研究所 東京大学 日鉄ケミカル&マテリアル(株) 同上 日本大学 東京大学 技術研究所
2021.10.26	自動車技術会 インパクトバイオメカニクス部門委員会公開委員会	人体モデルを用いた前面衝突時の脊椎圧迫骨折に対する着座姿勢が及ぼす影響の分析	柴原 多衛	衝突性能開発部
2021.10.28	ケイ素化学協会 第25回ケイ素化学協会シンポジウム	水酸基を有するポリシルセスキオキサン防曇膜の開発	杉本 哲也 濱田 崇 前田 哲爾 桂 大詞 三根生 晋 大下 浄治	広島大学 同上 技術研究所 同上 広島大学 同上
2021.11.2-19	精密工学会/精密測定技術振興財団 第419回講習会	切削力センシング技術による高能率加工の追究	山崎 友揮	パワートレイン技術部
2021.11.6-7	鑄造工学会 第178回全国講演大会	「走る歓び」の実現に向けたシリンダーヘッド寸法のモデルベース開発	梅原 美友	パワートレイン技術部
2021.11.6-10	東北大学未来科学技術共同研究センター 第15回アジア認知症学会国際学術大会	Feelings (confidence, like, role) toward the driving and QOL of memory clinic outpatients	鈴木 邦典 熊居 慶一 藤原 由貴 鈴木利佳子 東海林美和子 厚東 知成 山本 康典 原 利宏 坂本 和夫 目黒 謙一	技術研究所 東北大学 統合制御システム開発本部 東北大学 同上 同上 統合制御システム開発本部 技術研究所 同上 東北大学
2021.11.8-10	日本機械学会 第99期流体工学部門講演会	水平矩形管内気流の脈動周波数が壁面熱伝達に及ぼす影響	神垣 雅也 郭 官明 加藤 由幹 藤本 健明 川口 幹裕 西田 恵哉 尾形 陽一 本郷 均 幸徳 正信 横畑 英明 山本 亮 寿美 眞治	広島大学 同上 同上 同上 同上 同上 同上 MBD革新部 同上 同上 同上 同上
2021.11.11-12	Hexagon HxGN LIVE Japan 2021	自動車の強度大荷重入力のMBD化	山口 香奈	MBD革新部
2021.11.18	日本機械学会 第29回機械材料・材料加工技術講演会	一方向CFRPのキンクバンド破壊の局所化を考慮した圧縮強度予測	上田 政人 田崎優之介 河村 力 西田 健二 本田 正徳 服部 公一 宮永 俊明 杉山 哲也	日本大学 同上 技術研究所 同上 同上 同上 日鉄ケミカル&マテリアル(株) 同上 同上
2021.11.18-19	型技術協会 第27回型技術ワークショップ 2021inひろしま	お客様の輝きにつなげるマツダのモノづくり ～魂動デザイン実現に向けた生産技術革新～ 走る歓びを実現する高精度ダイカスト部品の金型設計技術	安達 範久 杉浦 千尋	技術本部 パワートレイン技術部

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2021.11.18-19	型技術協会 第27回型技術ワークショップ 2021inひろしま	魂動デザインを支える金型磨きの進化	徳留 宏俊 安楽 健次 西山 剛史	ツーリング製作部 同上 同上
		ロバストな型構造の追究によるシンプル 金型の実現に向けた更なる進化	武田 将志 重松 光 澤田 義裕 岩本 道尚	車両技術部 同上 同上 同上
		CAEを活用した軽量・高剛性金型構造の 実現	近藤 剛志 丸山 秀幸 山口 大輔	車体技術部 同上 同上
2021.11.20	早稲田大学理工学術院総合研究所 第41回早大モビリティシンポジウム	過渡運転に適用可能なガソリン HCCI の モデリング	飯田 晋也	パワートレイン技術開発部
2021.11.22-24	日本燃焼学会 第59回燃焼シンポジウム	超音波振動により生成した微細液滴群の 円管流路内輸送特性	早川 浩樹 廣田 光智 斎藤 寛泰 佐藤 圭峰	室蘭工業大学 同上 芝浦工業大学 技術研究所
		定容容器を用いた高温高圧環境下におけ るエンドガス多段階着火現象の観察	常藤 飛鳥 浜崎 亨 瀬尾 健彦 三上 真人 下栗 大右 河野 通治	山口大学 同上 同上 同上 広島大学 MBD 革新部
		CRV 法を組み込んだ高圧衝撃波管の開発	下栗 大右 八房 智顯 三好 明 原田 雄司 乃生 芳尚 斉藤 史彦	広島大学 広島工業大学 広島大学 技術研究所 同上 同上
2021.11.25	長野県工業技術総合センター 科学技術週間特別講演会	マツダが推し進める人間中心の車づくり	西川 一男	技術研究所
2021.11.26	自動車技術会 No.12-21 シンポジウム「車体軽量 化と信頼性を支える疲労入力・接合 評価技術の新展開」	接着接合における疲労破壊メカニズムの 考察	巽 明彦 山本 研一 河村 拓昌 鈴木 崇弘 小林 敏雄 井上 敬章 坂井 英児 富永 秀和 野口 修平 服部 和男 川邊 直雄 西川 出 菅田 淳 植松 美彦 小熊 博幸	(株) 神戸製鋼所 技術研究所 トヨタ自動車 (株) トヨタ車体 (株) サンスター技研 (株) 同上 三菱自動車工業 (株) 三菱自動車エンジニアリング (株) 同上 アイシン化工 (株) JFE スチール (株) 大阪工業大学 広島大学大学院 岐阜大学 物質・材料研究機構
		Fe/Al 異材接着における被着体剛性の影響	川邊 直雄 山本 研一 河村 拓昌 鈴木 崇弘 小林 敏雄 井上 敬章 坂井 英児 富永 秀和 野口 修平 服部 和男 巽 明彦 西川 出 菅田 淳 植松 美彦 小熊 博幸	JFE スチール (株) 技術研究所 トヨタ自動車 (株) トヨタ車体 (株) サンスター技研 (株) 同上 三菱自動車工業 (株) 三菱自動車エンジニアリング (株) 同上 アイシン化工 (株) (株) 神戸製鋼所 大阪工業大学 広島大学大学院 岐阜大学 物質・材料研究機構

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2021.11.26	第 173 回塑性加工学講座 「板材成形の基礎と応用 ～応用編～」	自動車開発におけるプレス成形 CAE の活用	森澤 誠	車体技術部
2021.11.28-12.1	日本表面真空学会 The 9th International Symposium on Surface Science	Elimination of the Charging Effect in Near-Ambient-Pressure Hard X-ray Photoelectron Spectroscopy	竹中 研人 鈴木 哲 住田 弘祐	兵庫県立大学 同上 技術研究所
2021.11.30-12.2	電気化学会 電池技術委員会 第 62 回電池討論会	車載用リチウムイオン電池の開発～電池の異常時発熱挙動シミュレーション～ 車載用リチウムイオン電池の開発～瞬時電流供給を可能にする高出力化技術～	花岡 輝彦 梶本 貴紀	技術研究所 技術研究所
2021.11.30-12.6	(株) IDAJ IDAJ Conference Online 2021	モデルベースリサーチ (MBR) による車両と材料をつなぐ解析技術の開発の紹介	西田 健二	技術研究所
2021.11	日本ねじ研究会 第 3 回ねじ研究シンポジウム	線膨張係数差に起因するボルト軸力変動について	渡邊 忠俊 大宮 祐也	技術研究所 岡山大学
2021.12.1-3	映像情報メディア学会, Society for Information Display The 28th International Display Workshops (IDW'21)	Automobile Interior Design Support Using Projection Mapping onto Full-Scale Physical Mockup and Driving Simulator	義田遼太郎 岩井 大輔 佐藤 宏介 原 利宏 武田 雄策 村瀬 健二	大阪大学 同上 同上 技術研究所 同上 同上
2021.12.3-10	計測エンジニアリングシステム (株) 2021 COMSOL Simulations WEEK	モデルベースリサーチによる断熱・吸音性能を考慮した多孔質材料設計技術の開発	山本 崇史 山川 啓介 桂 大詞 遊川 秀幸 畠山 望 三浦 隆治 岡島淳之介 稲葉 賢二 石澤由紀江 石元 孝佳 大下 浄治	広島大学/工学院大学 技術研究所 同上 同上 広島大学/東北大学 同上 同上 広島大学 同上 同上 同上
2021.12.5	日本安全運転・医療研究会 第 5 回日本安全運転・医療研究会	半盲を呈した脳血管疾患患者への自動車運転評価について ～運転再開困難な 2 症例からの経験～	奥野 隆司 仲野 剛由 桐畑 将司 石黒 望 岩下 洋平 岩瀬 耕二 桑原潤一郎 一杉 正仁	近江温泉病院 同上 同上 同上 統合制御システム開発本部 同上 同上 滋賀医科大学
2021.12.7-9	自動車技術会, 日本機械学会 第 32 回内燃機関シンポジウム	NO2 添加の低温酸化・着火遅れに与える影響についての化学反応論的研究 第三報 ガソリンエンジン燃焼へのプレチャンパー技術適用に関する検討	葛 晰遥 三好 明 大野 諒平 原田 雄司 大野 諒平 原田 雄司 長津 和弘 内田 健司 飯田 晋也 藤川 竜也	広島大学 同上 技術研究所 同上 技術研究所 同上 パワートレイン技術開発部 技術研究所 パワートレイン技術開発部 技術研究所
2021.12.10	しまね産業振興財団, 島根県警察本部 島根県サイバーセキュリティセミナー2021	マツダにおけるデジタルを活用した業務プロセス革新について	松岡 正樹	MDI 業務設計部
2021.12.14-16	日本流体力学会 第 35 回数値流体力学シンポジウム	動的モード分解を用いた自動車周りの低周波変動流れ場の解析	末廣 隼一 中島 卓司 中村 優佑 平岡 武宜 清水 圭吾 小池 真人 本村 浩一	広島大学大学院 同上 同上 技術研究所 同上 同上 操安性能開発部

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2021.12.14-16	日本流体力学会 第35回数値流体力学シンポジウム	サロゲートモデルを併用した自動車空力性能の多目的最適化シミュレーション	濱田玄太郎 犬井 太一 清水 圭吾 平岡 武宜 大山 聖 中島 卓司 中村 優佑	神戸大学 同上 技術研究所 同上 宇宙航空研究開発機構 JAXA 広島大学 同上
2021.12.14	難燃材料研究会, フィラー研究会 フィラー研究会・難燃材料研究会合同シンポジウム 2021	パネルディスカッション「下流産業と材料との技術のギャップを埋める」	小川 淳一	技術研究所
2021.12.15	早稲田大学 創造理工学部 総合機械工学科 熱エネルギー・反応工学	第6章：企業におけるエンジン開発	養祖 隆	パワートレイン技術開発部
2021.12.16-17	日本液体微粒化学会 第30回微粒化シンポジウム	超音波による自由落下する液滴の微粒化	高山 祐平 廣田 光智 斎藤 寛泰 佐藤 圭峰	室蘭工業大学 同上 芝浦工業大学 技術研究所
		90°曲がり円管ノズル内流れのPODモードがオイルジェット界面へ与える影響	中山遼太郎 川口 幹祐 馬 立娟 西田 恵哉 幸徳 正信 西川 潤 中島 聖 尾形 陽一	広島大学 同上 同上 同上 MBD 革新部 同上 同上 広島大学
		燃料インジェクタ内キャビテーション流れとデポジットに関する考察	坂東 太郎 脇坂 優志 宋 明良 和田 好隆 植木 義治 横畑 英明	神戸大学 同上 同上 MBD 革新部 同上 同上
		ミニサックノズル内ストリングキャビテーションとホロコーン噴霧のX線高速画像解析	沈 東平 三輪 誠 宋 明良 和田 好隆 植木 義治 横畑 英明	神戸大学 同上 同上 MBD 革新部 同上 同上
		入口流速分布がミニサックノズル内非定常ストリングキャビテーション流れに及ぼす影響	木村 一至 宋 明良 和田 好隆 植木 義治 横畑 英明	神戸大学 同上 MBD 革新部 同上 同上
		多噴孔ディーゼル燃料インジェクタの内部流動と噴霧角の可視化計測実験	脇坂 優志 宋 明良 三輪 誠 川口 幹祐 松本 有平 西田 恵哉 中島 聖 和田 好隆	神戸大学 同上 同上 広島大学 同上 同上 MBD 革新部 同上
2021.12.17	広島テクノプラザ ものづくり人材育成研修	品質管理に役立つ材料分析	住田 弘祐 橋本 陽介	技術研究所 同上

3. 社外寄稿

*所属は原則発表時点を示す

寄稿誌名	巻・号・ページ	題目	発表者	所属
自動車技術会	2021年春季大会学術講演会予稿集 pp.1-4	デジタル動作解析による技能伝承システム (TDS-DMA) の開発と実用化	江草 秀幸 久保 祐貴 須賀 実 佐伯 千春	ツーリング製作部 同上 同上 同上
自動車技術会	2021年秋季大会学術講演会予稿集 No.137-21	実験計画法による自動車衝突前の乗員挙動に対する誤差因子の影響評価	桐山 一郎 山内 一矢 小島 宏介 伊東虎太郎 横山 優太 杉山 裕文 岡澤 重信	山梨大学 MBD 革新部 同上 山梨大学 同上 同上 同上
自動車技術会論文集	2021年 52 巻 2 号 pp.349-354	視野障害に起因する運転操作変容の検知方法の検討	桑原潤一郎 岩下 洋平 山本 康典 一杉 正仁 奥野 隆司 石黒 望	統合制御システム開発本部 同上 同上 滋賀医科大学 近江温泉病院 同上
	2021年 52 巻 2 号 pp.388-394	シートベンチレーションによる温冷感改善効果の解析—被験者実験によるシート伝熱量の分析—	江本 陸 岡部 力也 永野 秀明 白鳥 英 島野健仁郎 吉田 真 加嶋 利浩	東京都市大学 技術研究所 東京都市大学 同上 同上 装備開発部 同上
	2021年 52 巻 3 号 pp.568-573	湿式多板クラッチの高回転における引き摺りトルク上昇の検討	胡本 博史	技術研究所
自動車技術	vol.75, No.7 (2021), pp.6-7	世界中の腐食環境に対応できる腐食シミュレーション技術の開発	山根 貴和 福田 克弘 中本 尊元 丸山 慧 本延 愛梨	車両実研部 同上 同上 同上 同上
	vol.75, No.7 (2021), pp.8-9	高い開発効率を実現した多目的設計最適化とデータ分析を用いた知的発見的設計支援手法	小平 剛央 釘持 寛正 花田 裕 宮内 一行 岡沢 恭久	技術研究所 同上 MBD 革新部 同上 商品開発企画部
	vol.75, No.12 (2021), pp.92-98	タイヤ回転を考慮した CFD 技術によるデザインと両立する空気抵抗低減技術の開発	中田 章博 森川 陽介 岡本 哲 坂口 徳章	車両実研部 同上 同上 同上
自動車技術会関西支部ニュース	No.59, pp.1-3	「つながるクルマ」 新マツダコネク トコネクティッドサービスの開発	森田 晃之	情報制御モデル開発部
日本燃焼学会誌	vol.63, No.204 (2021), pp.125-132	気相・表面化学種の分析に基づく三元触媒表面詳細反応機構構築	下栗 大石 村上 浩 松本 有平 日隈 聡志 河野 通治	広島大学 走行・環境性能開発部 MBD 革新部 産業技術総合研究所 MBD 革新部
日本機械学会論文集	2021年 87 巻 896 号 p.20-00360	高圧燃料噴射を用いたガソリン HCCI 機関の燃焼モード切替支援燃焼の検討	藤川 竜也	技術研究所

寄稿誌名	巻・号・ページ	題目	発表者	所属
日本機械学会論文集	2021年87巻896号 p.20-00389	微細粒を用いた粒状体ダンパの振動減衰性に関する研究	市川 和男	技術研究所
	2021年87巻900号 p.21-00096	高強度・薄板中空フレーム曲げ強度の質量効率を向上させる断面形状の研究	本田 正徳	技術研究所
IVI 業務シナリオ集 2020 年度報告	2021年4月26日発行	AIによる製造ラインの生産性向上 第4弾	市本 秀則 田中 晋作 影山 望	生産企画部 プラント技術部 パワートレイン技術部
	2021年4月26日発行	人・モノの実績可視化Ⅲ（次世代IE 追究）	吉岡 新 大岩 義孝 長崎 博志	生産企画部 同上 同上
	2021年4月26日発行	搬送機器の遠隔操作による部品庫物流自動化	藤井 嘉治	車両技術部
塑性加工学会講座	第173回（2021）, pp.81-92	自動車開発におけるプレス成形 CAE の活用	森澤 誠	車体技術部
プラスチック成形加工学会	Vol.33, No.6（2021）, pp.205-207	バンパーにおける反り収縮変形予測精度向上のための、材料データコリレーション手法の開発	上西 宏幸 田中 慶和 阿部 光教 鈴木 広之	車両技術部 同上 同上 同上
第29回品質工学研究発表大会予稿集	pp.12-15	生体情報活用による金型仕上げ技能の品質安定化手法の構築	佐伯 千春 有松 直弥 影山 貴大 久保 祐貴 須賀 実	ツーリング製作部 同上 同上 同上 同上
	pp.56-59	プレス金型の高周波焼入れにおける作業条件の最適化	有松 直弥 佐伯 千春 影山 貴大 久保 祐貴	ツーリング製作部 同上 同上 同上
	pp.144-147	機能性評価を用いたプレス金型における理想せん断構造の追求	畑平 拓也 岡山 一洋 新矢 斉 江草 秀幸 横山 郁夫 福本 康博	ツーリング製作部 同上 同上 同上 同上 同上
	pp.252-255	パネル外観検査手法の構築	影山 貴大 徳留 宏俊 久保 祐貴 大塚 宏明 竹重 伸秀 福本 康博	ツーリング製作部 同上 同上 同上 同上 同上
型技術ワークショップ 2021in ひろしま講演論文集	pp.44-45	走る歓びを実現する高精度ダイカスト部品の金型設計技術	杉浦 千尋 河野 一郎 村岡 好彦	パワートレイン技術部 同上 同上
	pp.96-97	魂動デザインを支える金型磨きの進化	徳留 宏俊 安楽 健次 西山 剛史	ツーリング製作部 同上 同上
	pp.138-139	ロバストな型構造の追究によるシンプル金型の実現に向けた更なる進化	武田 将志 重松 光 澤田 義裕 岩本 道尚	車両技術部 同上 同上 同上

寄稿誌名	巻・号・ページ	題目	発表者	所属
型技術者会議 2021 講演論文集	pp.21-25	金型仕上げ技能における匠の動作及び筋活動分析による技能伝承システム (TDS-DMA) の開発と実用化	久保 祐貴 佐伯 千春 須賀 実 大谷 卓史 江草 秀幸	ツーリング製作部 同上 同上 同上 同上
	pp.144-145	ダイカスト鑄抜きピン曲り制御による寸法精度向上	佐々木大地 山本 綾人 藤井 祥平 小国 英明	パワートレイン技術部 同上 同上 同上
	pp.206-207	工具摩耗予測を用いたプレス金型高精度加工への取り組み	嶋村 涼 中原 寛海 松永 明子 田中 貞夫	ツーリング製作部 同上 同上 同上
精密工学会誌	2021Vol.87, No.2, pp.169-172	仕上げ技能における匠の動作及び筋活動分析による技能伝承システム (TDS-DMA) の開発と実用化	佐伯 千春 久保 祐貴 須賀 実 大谷 卓志 江草 秀幸	ツーリング製作部 同上 同上 同上 同上
日本複合材料学会誌	2021 年 47 巻 2 号 pp.65-72	成形温度と板厚が熱硬化CFRP 円筒部材の衝撃エネルギー吸収特性に及ぼす影響	河村 力	技術研究所
日本接着学会誌	Vol.57, No.5, 2021	自動車における構造接着技術の動向と課題	麻川 元康 山本 研一	技術研究所 同上
日本応用数理学会論文誌	2021 年 31 巻 2 号 pp.76-104	時系列データを解析するためのベイジアンネットワークの活用法に関する研究	目良 貢 中村 優佑 吉田 敏宏 清水 圭吾 菅原 翔 福永 雅喜 定藤 規弘 農沢 隆秀	技術研究所 広島大学 技術研究所 同上 東京都医学総合研究所 自然科学研究機構生理学研究所 同上 広島大学
日本ねじ研究協会誌	2021 年	線膨張係数差に起因するボルト軸力変動について	渡邊 忠俊	技術研究所
溶接学会誌	2021 年 90 巻 7 号 pp.497-500	マルチマテリアル車体の実現に向けたアルミニウム／鋼板抵抗スポット溶接技術の開発	田中耕二郎 深堀 貢 西口 勝也	技術研究所 同上 同上
PLOS ONE	16(7): e0254120 ※ Open Access	Analysis of individual differences in pelvic and spine alignment in seated posture and impact on the seatbelt kinematics using human body model	西田 周泰 泉山 朋大 朝日 龍介 蔣 飛 大木 順司 山縣 大樹 今城 靖明 鈴木 秀典 船場 真裕 杉本 繁 福島 正信 陳 献 坂井 孝司	山口大学 衝突性能開発部 同上 山口大学 同上 同上 同上 同上 同上 衝突性能開発部 同上 山口大学 同上

寄稿誌名	巻・号・ページ	題目	発表者	所属
月刊JETI	vol.69, No.5 (2021)	アルミニウム／樹脂異種材料点接合の強度特性に及ぼす表面処理の影響	田中耕二郎 小川 祐樹	技術研究所 広島大学
	vol.69, No.12 (2021)	人体研究に基づく傷害低減技術の開発	泉山 朋大 西田 周泰 朝日 龍介 山縣 大樹 鈴木 崇 澤井 亮 杉本 繁 福島 正信	衝突性能開発部 山口大学 衝突性能開発部 山口大学 装備開発部 同上 衝突性能開発部 同上
プラスチックスエージ	vol.67,2021/5, pp.33-35	バイオエンブラ新意匠 2 層成形技術の開発	一原 洋平	装備開発部
MATERIAL STAGE	vol.21, No.7 (2021), pp.1-4	バイオエンブラ新意匠 2 層成形技術の開発	一原 洋平	装備開発部
成形加工	vol.33, No.10 (2021), pp.351-353	バイオエンブラ新意匠 2 層成形技術の開発	一原 洋平	装備開発部
Journal of Fluid Science and Technology	Vol.16, No.2 (2021), JFST0011	Effect of flow in the circular 90-degree curved nozzles on ejecting oil jet behavior	川口 幹祐 新田 吾一 三村 溪太 西田 恵哉 幸徳 正信 山本 亮 中島 聖 尾形 陽一	広島大学 同上 同上 同上 MBD 革新部 走行・環境性能開発部 MBD 革新部 広島大学
	Vol.16, No.4 (2021), JFST0023	Effects of characteristic decomposed modes of the internal flow of a circular 90-degree bent nozzle on the behavior of the oil jet interface	川口 幹祐 中山遼太郎 馬 立娟 西田 恵哉 横畑 英明 幸徳 正信 西川 潤 中島 聖 尾形 陽一	広島大学 同上 同上 同上 MBD 革新部 同上 同上 同上 広島大学
TSUBAME 産業利用成果報告書 Web 掲載		車載レーダにおけるターゲット反射現象と受信特性の FDTD 法による詳細解析	奥木 友和	技術研究所
月刊マテリアルステージ	Vol.22, No.6 (2022), pp.1-4	車室内内装材から発生する VOC の特定と対策	山口 冬馬 市川 智士	車両実研部 同上
(株) シーエムシー出版 不織布の最新開発動向		自動車向け遮音・吸音材料の開発	山本 崇史 桂 大詞 山川 啓介 久保田 寛	工学院大学 技術研究所 同上 同上
日本アルミニウム協会誌 Aluminium		アルミニウム／異種材料の接合技術	西口 勝也	技術研究所
日刊自動車新聞		商品価値向上に向け設計指針の発想を支援するシミュレーション技術	小平 剛央 釘持 寛正 花田 裕 宮内 一行 岡沢 恭久	技術研究所 同上 MBD 革新部 同上 商品本部

寄稿誌名	巻・号・ページ	題目	発表者	所属
HiSOR ACTIVITY REPORT 2021年		Degradation Analysis of Automotive Oil with ZnDTP Additive by Fluorescence yield XAFS method	三根生 晋	技術研究所
月刊トライボロジー 10月号		自動車エンジン摺動面の潤滑技術の動向	河口健太郎	技術研究所
月刊車載テクノロジー 2021年11月号		アルミニウム／樹脂異種材料点接合の強度特性	田中耕二郎 小川 裕樹	技術研究所 広島大学
表面技術 2021年：72巻12号		アルミニウム／CFRP 摩擦攪拌点接合の継手強度に及ぼすアルミニウム前処理の影響	杉本 幸弘 西口 勝也	広島大学 技術研究所
Energies Vol.14, No.13 (2021), 3953		Experimental study and conjugate heat transfer simulation of pulsating flow in straight and 90° curved square pipes	Guanming Guo Masaya Kamigaki Yuuya Inoue Keiya Nishida Hitoshi Hongou Masanobu Koutoku Ryo Yamamoto Hideaki Yokohata Shinji Sumi Yoichi Ogata	広島大学 同上 同上 同上 MBD 革新部 同上 同上 同上 同上 同上 広島大学
Combustion Science & Technology Vol.193, 2021		Development of Surface Reaction Mechanisms of CO/O ₂ on Pd for Three Way Catalyst	下栗 大右 村上 浩 Set NAING 日隈 聡志 松本 有平 河野 通治 横畑 英明 三好 明	広島大学 走行・環境性能開発部 広島大学 産業技術総合研究所 MBD 革新部 同上 同上 広島大学

編集委員会

委員長	神八 俊夫	商品戦略本部 技術企画部
編集委員	山川 耕平	商品戦略本部 技術企画部
	野田 幸宏	商品戦略本部 技術企画部
	宮脇 優	商品戦略本部 技術企画部
	浅田 健志	商品本部 商品企画部
	岡崎 安昭	デザイン本部 デザイン開発推進部
	泉山 朋大	車両開発本部 衝突性能開発部
	伊藤 和樹	車両開発本部 装備開発部
	大室 朗	統合制御システム開発本部
	横山 哲也	パワートレイン開発本部 電駆・PT 制御部品開発部
	浅田 照朗	技術研究所
	杉山 裕基	技術本部 生産企画部
	柿沢 修成	コーポレートコミュニケーション本部 コミュニケーション企画部
編集幹事	温品 一雄	商品戦略本部 技術企画部

マツダ技報 第39号

Mazda Technical Review No.39

発行	2022年12月	December 2022
発行人	廣瀬 一郎	Publisher Ichiro Hirose
編集人	神八 俊夫	Editor Toshio Kamihachi
事務局	温品 一雄	Bureau Kazuo Nukushina
発行所	マツダ株式会社 商品戦略本部 技術企画部 〒730-8670 広島県安芸郡府中町新地3番1号 電話 082 (565) 2198	Publishing office Technology Planning Dept. Product Strategy Div. Mazda Motor Corporation 3-1 Shinchi, Fuchu-cho Akigun, Hiroshima 730-8670, Japan

©2022 マツダ株式会社 (禁無断転載)