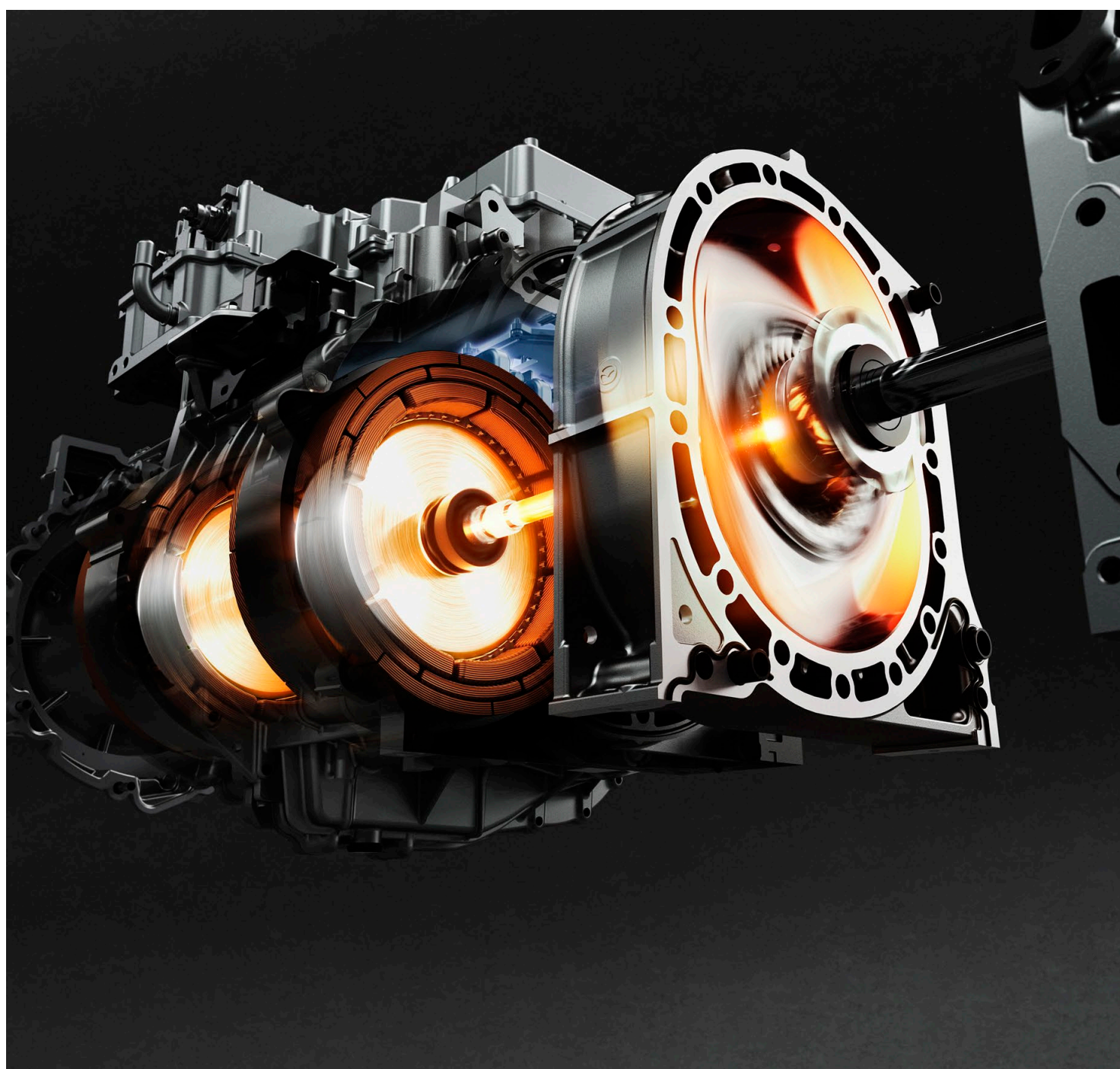


MAZDA TECHNICAL REVIEW

マツダ技報 2023 No.40



マツダ技報

Mazda Technical Review

2023 No. 40

マツダ技報 第40号 (2023)

目次

巻頭言	佐賀尚人	1
特集：MAZDA CX-90		
1. CX-90 の紹介	脇家 満, 岡沢恭久, 芦原友惟奈 伊藤宏明	3
2. CX-90 のデザイン	椿 貴紀	7
3. SKYACTIV-G 3.3T の開発	清水幸一, 山谷光隆, 山口直宏 松尾佳朋, 志々目宏二, 西村和浩	13
4. SKYACTIV-G 3.3T のパッケージ開発	谷所正彦, 濱詰嘉浩, 吉武勇人 徳島和宏, 山谷光隆	20
5. CX-90 のエンジンサウンド開発について	服部之総, 桂川貴弥, 大槻修平 河越三郎, 三宅昭範, 高崎神風 神谷 稔	25
6. CX-90 の衝突安全性能	木戸啓人, 本地宏昌, 澤田庸介 古賀俊之, 中桐涼平, 松下幸治 安藤 亮, 芦浦礼子	29
7. マツダ独自の塗装技術「匠塗」のさらなる進化	寶山修士, 三村夏海, 岡本圭一 山根貴和, 野中隆治	35
8. 高品質パネル取得に向けた金型製作領域の取組	守田雄一, 安楽健次, 長澄徹侍 村上義典, 吉川速人, 玉置周平	41
特集：MAZDA MX-30 Rotary-EV		
9. MX-30 Rotary-EV の紹介	上藤和佳子, 西河内研, 岡田譲太 松田陽一, 信本昇二, 佐藤雅哉	47
10. 新型ロータリーエンジン 8C 型の燃焼技術	森本博貴, 宮本 亨, 中嶋勝哉 菊地拓哉, 田中清喬, 砂流雄剛 野本哲也, 若林良努	52
11. 新型ロータリーエンジン 8C 型の開発 —軽量で低燃費, 高信頼性を両立した構造系技術—	横尾健志, 新井栄治, 坂井隆則 緒方佳典, 橋本真憲, 森永裕太 宮田晋輔	59
12. MX-30 Rotary-EV のパワートレイン制御	川田卓二, 添田征洋, 枝廣育実 白石卓也, 光永誠介	66
13. アルミサイドハウジング実現に向けた高速フレーム 溶射技術の開発	山本真司, 中田行俊, 高橋宏和 池田雄一郎, 岸田高穂, 岡田保彦	70

14. ロータリーエンジンの鋳鉄製ローターのアンバランス改良 …	坪井涼介, 刀祢英男, 曾根雅治 …… 小島仁志, 山光一央, 高垣真人	77
15. 新型ロータリーエンジン 8C 型向け高速クロムモリブデンめっき工法の開発 …	林 政男, 園田尊正, 春木佳奈 …… 高場宣弘	84

論文・解説

16. 排気吐出音の予測技術開発 ……	石原教示, 鶴本 徹, 廣部敏之 …… 土路生修, 住谷 章, 中村直樹 新川貴大	90
17. Neural Network を活用したバーチャルセンサー開発について ……	小林謙太, 矢野佑樹, 和田幸史朗 …… 森実健一, 柚木伸夫	98
18. 情報制御系ソフトウェアのモデルベース開発 ……	白 雪峰, 本城 創, 末富隆雅 ……	105
19. 車載ソフトウェア更新を行うための管理システムの構築 ……	三明祐大, 中丸和之, 坪山真之介 …… 國川 隆, 角本千恵, 坂本貴弘	111
20. 空調設備の効率・運用改善技術 ……	二宮 仁, 三好 滋, 安井尚志 …… 松下 洋, 山根克之, 田中博己 藤下祐司	116
21. 多段加圧スポット溶接によるエネルギー削減 ……	上川路太雅, 森田直輝, 水篠友哉 ……	123
22. リチウムイオン電池内部温度モデリング技術の開発 ……	大路 潔, 富岡沙絵子, 吉本 淳 …… 安永 亨, 庄司 明, 藤田弘輝	130
23. 湿式ペーパー摩擦材の動摩擦係数推定モデルの開発 ……	曾利 僚, 胡本博史, 為貝仁志 …… 吉末知弘	137
24. 塗装部の耐食性迅速評価法を活用した品質異常予知技術 ……	江崎達哉, 浅田照朗, 佐々木将展 …… 足立崇勝, 重永 勉, 高見明秀	145
25. 材料モデルベースリサーチ (MBR) による多孔質材料の振動制御モデル技術の開発 ……	山川啓介, 桂 大詞, 山本崇史 …… 井上 実, 畠山 望, 三浦隆治 岡島淳之介, 稲葉賢二, 石澤由紀江 遊川秀幸, 伊東博之, 石元孝佳 大下浄治	151
26. アルミニウムダイカスト/圧延材の摩擦攪拌点接合 ……	田中耕二郎, 島田聡子, 杉本幸弘 ……	158
27. 空力性能の向上を支援する低圧旋回渦同定手法の開発 ……	中村優佑, 清水圭吾 ……	162

受賞技術紹介 168

社外への発表論文一覧表 173

Mazda Technical Review No.40

CONTENTS

Foreword

(N. Saga)	1
-----------------	---

Special Edition for Mazda CX-90

1. Introduction of CX-90 (M. Wakiie, Y. Okazawa, Y. Ashihara, H. Ito)	3
2. Design of CX-90 (T. Tsubaki)	7
3. Development of Skyactiv-G 3.3T (K. Shimizu, M. Yamaya, N. Yamaguchi, Y. Matsuo, K. Shishime, K. Nishimura)	13
4. Package Development of Skyactiv-G 3.3T (M. Tanisho, Y. Hamazume, H. Yoshitake, K. Tokushima, M. Yamaya)	20
5. Engine Sound Development for CX-90 (Y. Hattori, T. Katsuragawa, S. Otsuki, S. Kawagoe, A. Miyake, K. Takasaki, M. Koya)	25
6. Passive Safety of CX-90 (H. Kido, H. Honji, Y. Sawada, T. Koga, R. Nakagiri, K. Matsushita, R. Ando, R. Yoshiura)	29
7. Further Evolution of Mazda's Unique Paint Engineering "TAKUMI-NURI" (S. Hozan, N. Mimura, K. Okamoto, T. Yamane, R. Nonaka)	35
8. High-Quality Panel Initiatives in the Tooling Department (Y. Morita, K. Anraku, T. Nagazumi, Y. Murakami, H. Yoshikawa, S. Tamaki)	41

Special Edition for Mazda MX-30 Rotary-EV

9. Introduction of MX-30 Rotary-EV (W. Uefuji, K. Nishigouchi, J. Okada, Y. Matsuda, S. Nobumoto, M. Sato)	47
10. Combustion Technology for 8C New Rotary Engine (H. Morimoto, T. Miyamoto, K. Nakajima, T. Kikuchi, K. Tanaka, Y. Sunagare, T. Nomoto, Y. Wakabayashi)	52
11. Development of the New Rotary Engine —Technology of Structural Parts that Achieved Lightweight, Low Fuel Consumption and High Reliability— (T. Yokoo, E. Arai, T. Sakai, Y. Ogata, M. Hashimoto, Y. Morinaga, S. Miyata)	59
12. Powertrain Control for MX-30 Rotary-EV (T. Kawada, Y. Soeda, I. Eda, T. Shiraishi, S. Mitsunaga)	66
13. Development of HVOF Thermal Spray Technology for Aluminum Side Housing (S. Yamamoto, Y. Nakata, H. Takahashi, Y. Ikeda, T. Kishida, Y. Okada)	70
14. Improvement of Imbalance in Cast Iron Rotor for Rotary Engine (R. Tsuboi, H. Tone, M. Sone, H. Kojima, K. Yamamitsu, M. Takagaki)	77
15. Development of High-Speed Chrome-Molybdenum Plating Method for New 8C Rotary Engine (M. Hayashi, T. Sonoda, K. Haruki, N. Takaba)	84

Technical Reports

16. Development of Prediction Technology for Exhaust Noise (K. Ishihara, T. Tsurumoto, T. Hirobe, O. Torobu, A. Sumitani, N. Nakamura, T. Shinkawa)	90
17. Virtual Sensor Development with Neural Network (K. Kobayashi, Y. Yano, K. Wada, K. Morizane, N. Yunoki)	98
18. Model Based Development of Infotainment Software (X. Bai, S. Honjo, T. Suetomi)	105
19. Management System Construction for On-Vehicle Software Update (Y. Miake, K. Nakamaru, S. Tsuboyama, T. Kunikawa, C. Kadomoto, T. Sakamoto)	111
20. Technologies for Improving the Efficiency and Operation of Air Conditioning Equipment (M. Ninomiya, S. Miyoshi, T. Yasui, H. Matsushita, K. Yamane, H. Tanaka, Y. Fujishita)	116
21. Energy Reduction by Multi-Step Force Spot Welding (T. Kamikawaji, N. Morita, T. Mizushino)	123
22. Development of LIB Internal Thermal Modeling Technology (K. Oji, S. Tomioka, A. Yoshimoto, T. Yasunaga, A. Shoji, H. Fujita)	130
23. Development of a Model for Estimating the Coefficient of Kinetic Friction of Paper-Based Wet Clutch Facing (T. Sori, H. Ebisumoto, H. Tamegai, T. Yoshizue)	137
24. Quality Abnormality Prediction Technology Utilizing Accelerated Evaluation Techniques for Corrosion Resistance of Painted Parts (T. Ezaki, T. Asada, K. Sasaki, T. Adachi, T. Shigenaga, A. Takami)	145
25. Development of Vibration Control Model Technology for Porous Materials by Material Model Based Research (MBR) (K. Yamakawa, D. Katsura, T. Yamamoto, M. Inoue, N. Hatakeyama, R. Miura, J. Okajima, K. Inaba, Y. Ishizawa, H. Yukawa, H. Ito, T. Ishimoto, J. Ohshita)	151
26. Friction Stir Spot Welding of Aluminum Die-Cast/Rolled Plate (K. Tanaka, S. Shimada, Y. Sugimoto)	158
27. Development of Identification Method of Low-Pressure Vortices with Swirling Motions to Support Improvement of Aerodynamic Performance (Y. Nakamura, K. Shimizu)	162

Introduction of Technical Award	168
----------------------------------------	-----

List of Reports Published in 2022	173
------------------------------------------	-----

巻 頭 言

2030 VISION に向けて Toward the 2030 Vision



執行役員

佐賀 尚人
Naohito Saga

マツダは創業以来平和都市広島に根差す企業である。今年 G7 広島サミットが開かれたことを契機に、私自身もこの意義を深く考え直す良いきっかけとなったと考える。創業者の「工業で社会に貢献する」という志の元、戦時下において一瞬で全てが失われた日から今日に至るまで、我々の奥底には幾つもの飽くなき挑戦をしてきた歴史が刻まれている。その思いを DNA として受け継ぎ、今日までバトンを繋いでいただいた諸先輩方に感謝の意を表すると共に、今後もマツダの存在意義を示し、社会に貢献すべく、価値あるものづくりの力を高めていきたい。

さて、今年マツダでは、我々の存在意義をあらためて確認し、マツダが大切にしてきた価値観とマツダが解決に貢献できる社会課題を踏まえパーパス「前向きに今日を生きる人の輪を広げる」を定めた。また、そのパーパス実現に向け、マツダの約束としてのプロミス「いきいきとする体験をお届けする」、実践するうえで大切にすべき振る舞いや価値観、行動様式としてのバリューズ「ひと中心」「飽くなき挑戦」「おもてなしの心」を定めた。これらをマツダの北極星とし、ここへ向かう一里塚として 2030 年に到達していきたい姿を 2030VISION として「走る歓び” で移動体験の感動を量産するクルマ好きの会社になる」とした。この背景には、デジタル革新をはじめとして生活者の行動形態や価値観が大きく変化していること、地球温暖化による気候変動や資源・エネルギー問題、また、世界的な社会の分断など地球規模での重要課題が山積していることなど、我々自動車業界も変わらなければならない 100 年に一度の大変革期に突入し、先が見えない中で、もう一度自分たちの居場所を定義する必要性があったからに他ならない。

技術に関しても同じことが言える。これまでのように、単に技術の高さを目指すものづくりから、お客様に実体験を通じて感じていただきたい価値とは何か？そのためにはどんな技術が必要であるか？を考えなければ、社会に貢献しているとは言えなくなってきていると感じる。語弊を恐れずに言うのであれば、技術は手段であり、その先にある生活者への価値提供こそが重要である。技術革新の中で自動車が提供できる価値範囲は拡大した。単に移動をするだけのものではなく、自動車の内外と繋がることにより様々なことが提供可能となってくる。今後もその範囲は広がってくるであろう。よって、既知の自動車業界の枠に囚われない発想や技術連携をしていかなければならない。既存のバリューチェーンやサプライチェーンも変化し、同時に技術難易度は確実に上がり、世の中の様々な技術や機能が融合していき、これまでにない生活者の行動変化や更なる価値観変化を起こしていくのである。

この考え方を念頭に、マツダのものづくりは技術（シーズ）起点から価値提供（ニーズ）起点に舵を切っ

た。お客様への提供価値を第一に考え抜き、それを実現するための保有技術、新技術を組み合わせ、融合させて実現させる、いわゆるソフトウェアファーストの考え方である。これを実行に移すには単一技術の追求をしているだけではバランスを失う。実現したい価値を全てのエンジニアが把握し、同じ方向を向き、互いの技術を理解し合いながら連携させていく必要があり、これまで以上に強固な連携作業は必須、既存のプロセスやツール・イネーブラーも同時に再構築していかなければならない、非常に大がかりな転換である。同時に、自動車業界に携わる責務として、社会課題であるカーボンニュートラルの実現をしていかなければならない。これを達成しなければ、マツダの存在意義は薄れ、パーパスの実現にも至らないことを覚悟しながら進めている。しかしながら、この変革は過去を否定するものでは決してない。マツダでは 2007 年に技術開発の長期ビジョン「サステイナブル“Zoom-Zoom”宣言」を策定し、その当時からライフ・サイクル・アセスメントの視点で CO₂ 削減が必要であり、その実現に向けた施策とし、マルチソリューションを掲げ、ぶれることなく具現化を進めてきた。その中核として、ビルディングブロック構想により技術革新とプロセス革新を両輪として完成させながら一つ一つ資産として積み上げ、向上させていくアプローチをとってきた。その過程で、2000 年初頭より進めていた社内デジタル革新としての Mazda Digital Innovation では、モデルベース開発、モデルベースリサーチが可能な人材育成と IT 設備の導入および進化を進めてきている。今後もこれら資産をベースに、積み上げていく技術の錬成による価値創造および、それを可能とするデジタルトランスフォーメーションを進めていくことに変わりはない。現在は新たなステージとして、複雑化・高度化する技術に対応すべく、モデルベース開発やモデルベースリサーチの進化と共に社内 IT 教育を進め、デジタルリテラシーの向上と実装を図っている段階である。

ここで、忘れてはならないことがある。技術進化・イネーブラーの進化があっても、それを使うのは人である。確かに生成 AI に代表されるように、様々なことが便利になってきている。1 週間かかっていた課題解決が、瞬時にできることもあるだろう。今後も進化を続け、エンジニアのアプローチも変わってくるであろうことは容易に想像がつく。しかしながら、この AI にどのようなデータを入れどのような結果を導くかは、人がその特性を理解し、熟考し、使い方を吟味する必要がある。つまり、これまで以上の知識、思考、エンジニアセンスが欠かせない。そういった意味では、いつの時代になっても技術は人が生み出すクリエイティビティー（価値創造）なのである。CASE 時代と言われて久しいが、こう考えると Connected, Autonomous, Shared, Electric 全てが手段であり、その先にある生活者の得る体験にどのような価値があるのか？これらを使い我々は社会にどんな貢献が出来るのか、そしてその結果として未来に我々が何を残すのか、100 年に一度の大変革期に自動車業界に身を置く一人として日々考えている。そして、いきいきとした体験として一人でも多くの方に喜んで頂けたらと切に願う。

本号では、マツダ最新の商品となる北米向け CX-90 ならびにロータリーエンジンを発電機とした MX-30 Rotary-EV を特集する。どちらの商品も、マツダがこれまでのビルディングブロック戦略および最新のモデルベース開発・モデルベースリサーチを駆使した技術を織り込んでいる。少しでも参考になれば幸いである。

最後に、寄稿頂いた全ての方々に感謝すると共に、本技報をご覧いただいている、同時代を生き抜く全てのエンジニアの方々にエールを送りたい。

特集：MAZDA CX-90

01

CX-90 の紹介

Introduction of CX-90

脇家 満^{*1} Mitsuru Wakiie
岡沢 恭久^{*2} Yasuhisa Okazawa
芦原 友惟奈^{*3} Yuina Ashihara
伊藤 宏明^{*4} Hiroaki Itou

要 約

CX-90 は、本質的な CO₂ 削減を実現するマルチソリューション戦略の下、マツダらしさを体現するどこまでも続く運転の愉しさを実現するパワートレイン&プラットフォームと、深化した魂動デザインに加え、3 列ミッドサイズ SUV に必要な家族全員がゆとりをもって過ごせる室内空間や、体験の幅を広げる利便機能、事故リスクを軽減させる進化した安全技術を備えた商品である。開発チームが取り組んだ、顧客像の特定から価値実現手段の内容や特徴までを紹介する。

Abstract

CX-90 is a product under the multi-solution strategy that aims to enable fundamental CO₂ reduction. The product is equipped with powertrain and platform that embody always-exhilarating driving pleasure and deepening KODO design, which are expected of Mazda product. In addition to those features, it offers an interior space enough to accommodate all occupants (family members, for example) comfortably in the 3-row mid sized-SUV, as well as convenient functions that can extend a range of their experience. It is also equipped with evolved safety technologies that reduce an accident risk. Here are what we, CX-90 Development Team, worked hard on, including identification of a target customer and details/characteristics of a way to achieve such product value.

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

1. はじめに

マツダは、各市場に最適な電動化技術を組み合わせるマルチソリューション戦略に基づいた商品投入を段階的に行い、本質的な環境貢献につなげていくことを目指している。CX-90 は、この戦略を加速する重要な商品として北米市場を中心に 2023 年 4 月から販売を開始した 3 列ミッドサイズ SUV である。ライトサイジングコンセプトに基づく最適な排気量を選択した新開発ガソリンエンジンと電気駆動デバイスの採用により、実燃費の向上や排気ガスのクリーン化などの環境性能を飛躍的に向上させた。更に、縦置きパワーユニットに対応した新開発車両アーキテクチャーは、高剛性かつ効率的エネルギーマネジメントが可能な骨格構造による優れた衝突安全性、操縦安定性、静粛性を実現する。どこまでも続く運転する愉しさと体験の幅を広げる機能性により、家族との絆

を深めていただきたいとの想いを込めて開発し、マツダのハイエンドモデルに相応しい機能を備える。

2. ターゲット顧客と商品コンセプト

CX-90 では、“日常を生き活きと過ごし、週末は家族や仲間、友人と一緒に自由にアクティブなライフスタイルを楽しんでいるファミリー”に向け、お客様自身とご家族に、人生の輝きと豊かさを、そして特別な時間を分かち合っていただけ、家族や仲間との絆を深めるよきパートナーになりたいとの想いを込めてきた。そして“For the voyage of your life”をコンセプトに掲げ、マツダ史上最高のファミリーカーを目指した。

CX-90 は、お客様が街に出かける時やご家族でクルマの長旅に出るときなど、「さまざまなシーンにおいて彼らの情熱や興味を満たし、行動範囲を広げ、新しい体験へ飛び込みたくなる気持ちにさせてくれること」がクルマ

*1~4 商品開発本部
Product Div.

の中核の価値である。

これを実現するために、以下の Key Value (以下、KV) を定義した。

- KV#1 新世代ファミリーカーとしての資質大幅向上
- KV#2 情緒価値を富裕層に響くレベルまでストレッチ
- KV#3 PHEV でマツダの新たな世界をつくる

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 新世代ファミリーカーとしての資質大幅向上

毎日のドライブから週末のロングトリップまで、クルマによって家族との体験の幅が広がり、思い出が増える、そんな価値を提供するために、家族のための機能を追求した。

(1) 3列ファミリーカーとしての基本機能の確保

米国ファミリーの期待に応えるサイズ感、室内の居住性について、従来よりも大柄なお客様でもゆったりと座っていただけるよう、前席の太もも周りや2列目席の肩回りの空間を拡大した。更に、快適性の向上として、3列目乗員用の空調吹き出し口を標準設定することで、乗車空間の改善と合わせ、3列目の乗員に対する快適性の向上を目指した。次に、市場から要望の声が大きかった3列目に3座仕様“8人乗車設定”を用意したことも大きなハイライトの一つである。通学やアフタースクール活動への子供の送迎、コミュニティ活動などファミリー用途としての多人数乗車ニーズに応える。他にも、全列USBポートの設定、乗車人数分のカップホルダー設定など、3列ミッドサイズSUVとしての基本機能を備えた。

(2) 日常の足としての使いやすさ

都会の喧騒を離れ休日には郊外で家族や大事なペットとゆっくり過ごしたい。そんな思いをしっかりと叶えるCX-90。郊外までのハイウェイの移動もストレスを感じにくく、より安心快適に、またハイウェイを降り、目的地の別荘やグランピングの場所までの山道や荒れた路面でもより安心して走行できる「あなたの頼れるSUV」になるために、CX-60から展開しているハイパフォーマンスi-ACTIV AWDをCX-90でも採用した。日常のさまざまなシーンにおいて、信頼できる安心・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が、より高いレベルの走る喜びを提供する。

(3) アクティブなファミリーのライフスタイルに応える

アウトドアアクティビティの多様なニーズに応えるため、トローリングキャパシティを5000lbsまで引き上げた。(※ガソリンターボのみ) それに伴い、トレーラースタビリティコントロール(TSC)の強化も行うなど、アウトドアで活躍できる機会を拡大した(Fig. 1)。オフロー

ド走行では、スタック脱出をサポートする“オフロード・トラクション・アシスト”機能も装備しており、さまざまなオフロード路面において、自信をもって道を進むことが可能である。AC150W電源では、走行中の給電が可能であり、ノートPCや目的地で楽しむ電動バイク(e-bike)用バッテリーの充電などへの活用を可能とした。



Fig. 1 Towing Capacity

(4) 安心・安全の進化

マツダは、走る喜びの実現は確かな安全の上に成立すると考えている。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。それが、マツダの安全思想、“MAZDA PROACTIVE SAFETY”である。CX-90では、関節に負荷をかけにくく、適切な筋力で操作できるステアリング及びペダルレイアウト、電動チルト&テレスコピック(※グレードにより異なる)、不快な横揺れを大幅に低減し頭部を安定させるシート設計、車両の視認不可エリアを減らし車両感覚をより掴みやすくした視界性能に加え、最適なドライビングポジションを自動で設定・再現できるドライバー・パーソライゼーション・システムにより、ドライバーに最適な運転環境を簡単に実現しやすいように開発してきた。シースルービューでは、360°ビュー・モニターの機能を一層進化させ、進行方向の先と進行方向側のタイヤの周辺の状況をモニター上の大きな表示でしっかりと確認できるようにつくりあげた。大きな車を扱うお客様に対し、直感的な画像によりしっかりと安全確認を行い、少しでも心を楽しみ、より安心して車を運転していただきたい。そんな思いからシースルービューを開発した。

3.2 KV#2 情緒価値を富裕層に響くレベルまでストレッチ

マツダは、“走る喜び”を通して心と体を活性化させたいと願っている。より大きなパワーのクルマでも自在に操る感覚を味わうことができ、これまでに味わったことのない心昂ぶる感情を存分に愉しんでもらいたい。そのために、人間のもつ普遍的能力を更に引き出せるよう車両全体を進化させた。

(1) “昂ぶる”レベルの心と体の活性化

CX-90は、家族を乗せる3列ミッドサイズSUVとして、日々のシーンでの扱いやすさを担保しながら、操る愉しさと疾走感、心昂るサウンドとリズムによるドライビングエンターテインメントが手に入るクルマである。

抜群の疾走感と操る愉しさを飛躍的に進化させ、環境性能も両立させた新開発の直列6気筒エンジンは、心昂りたい時に昂ることができ、自分らしく人生を愉しんでいただけるように、さまざまな走行シーンで自信を持ってアクセルが踏め、加速することや運転そのものの愉しさを心から実感できるよう、FRプラットフォームと新開発の直列6気筒エンジン（ガソリン、ディーゼル）を組み合わせた。上質で力強く伸びやかな直列6気筒エンジンにより、抜群の疾走感及び操る愉しさと環境性能を両立させた。ゆったりと一定の速度で走るような場面でも、トルクの大きさを予感させるサウンドを聴かせ、アクセルを踏み込みエンジンのもつ力を開放させると、低音から高音に一気に駆け上がるかのような官能的な音と、直列6気筒エンジンの燃焼音、機械音の重なりによって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。

(2) 別格感・上質感をもつ内外装 (Fig. 2)

美しく躍動的なフォルムと室内空間を両立させたデザインが見る人を魅了するCX-90は、引き算の美学を一層進化させ、エクステリアデザイン及びインテリアデザインに日本独自の“美”の思想を取り入れた。



Fig. 2 CX-90 Exterior/Interior

そんなCX-90のデザインコンセプトは、“DIGNIFIED BEAUTY”

凛とした風格と北米など大陸ならではの景観の強さに負けないダイナミックかつ堂々としたプロポーションを表現した。骨格から全体のプロポーションを見直し、過度なスタイリングを用いなくとも美しいシルエットをつくり上げた。これにより、今まで以上にシンプルな造形が可能となり、魂動デザインのもつ光や面の動きをよりダイナミックに魅せた。

インテリアは、幅広いインストルメントパネル、サイドルーバーからドアトリムへ連続する造形によりワイドでリッチな空間を表現した。コンソールは空間を前後に貫く力強い形状とすることで、FRらしい強力なトランスミッションとその先にある縦置エンジンの存在を感じさせ、構造的な強さを表現した。

これらの進化によって、見る人・乗る人の全てが快適

な時間を楽しむことができるような、他にはないプレゼンスを確立し、見るたびに自らの妥協のない選択眼と価値観を誇らしく感じていただけるよう開発した。

(3) 心の余裕をもたらす静粛性の高さ

CX-90は、お客様が不快に聴こえる音を軽減することにより、自然に運転に集中でき、乗員全員がリラックスできる環境を実現した。更に、エンジンサウンドなど心地良い音はしっかり届けることで、マツダらしい上質な静粛性を実現した。

3.3 KV#3 PHEVでマツダの新たな世界をつくる

(1) 電駆のもつ余裕のある走り高い環境性能

マツダが理想とする意のままの走りや環境性能の進化を実現させるため、日常の幅広いシーンでモーターのみで走行することができ、走行時に発生するCO₂排出量を減らすことができるPHEVを作り上げた。週末などのロングトリップにおいて、バッテリー充電が一定以下になった場合やモータートルクを超える加速が求められた際には、内燃機関（エンジン）を使うことができるため、航続距離の不安を軽減することができる。更に、バッテリーを床下に搭載したことで重心を低くでき、人馬一体の走りに寄与するだけでなく、荷室パッケージに影響を与えず、積みたものがしっかりと積める荷室容量を確保しているのも特徴である。CX-90のPHEVは、どこまでも走って行きたいという優れた経済性と環境性能に加え、力強いトルクによりアクセルを踏み込んだ瞬間から感じていただける走りの良さ、そして日常からレジャーまで使い勝手の良い積載容量を担保した。

(2) ファミリーの困りごとを解決する利便性

PHEVモデルだからこそ、新たな保有体験を届ける機能を追加した。まずはエンジンをかけずに車室内温度を調整できるプリ空調機構を採用している。炎天下での駐車時においても、MyMazdaアプリから事前に空調設定することで、乗車時には快適な車内空間を提供する。給電ではAC1500Wの電源を備えており、バッテリーに蓄えた電気でも、消費電力の大きい電化製品でも、バッテリー残量を気にせず幅広いシーンで快適に使い、趣味の幅をこれまで以上に広げることができる。例えば、アウトドアシーンでは照明やプロジェクター、音響機器、小型調理器具やドライバーを使うことができるため、キャンプやサーフィンへ出かける際には非常に便利な装備となる。更に車内をリモートオフィスとして使用するようなシーンで、役に立つ大容量の給電機能とした。

(3) ファミリーの日常、休日用途に応える実用性

CX-90は、ファミリーのロングトリップまでカバーする高い実用性を備えている。EVモードは、満充電でEPAモードにて約25mileを想定している。普通充電（AC充電設備の電力7.2kW以上、外気温25°C、バッテリー温度25°C）では2時間20分でゼロから満充電にすること

が可能。週末などのロングトリップにおいて、バッテリー充電が一定以下になった場合や、モータートルクを超える加速が求められた際には、内燃機関（エンジン）を使うことにより、航続距離の不安を軽減することができる。また、バッテリー配置の工夫により積載容量を確保しつつスペアタイヤを標準設定として、万が一の場合にも備えている。

4. おわりに

CX-90は、自由にアクティブなライフスタイルをもちたいと願うファミリーに満足いただくことを目指しながら、マツダが考える本質的な環境貢献を加速させるソリューションを兼ね備える、マツダのチャレンジを体現した新たな車である。“For the voyage of your life”をコンセプトに掲げ、お客様がさまざまなシーンで楽しんでいただけるよう、マツダらしい人の心や感覚を大切にしたりつくり込みの下、上質で快適かつ心地よく、より安心・安全にお客様が共に過ごせる商品を実現することができたと開発チームは確信している。この商品によって、お客様自身とご家族が、人生の輝きと豊かさを感じ、そして特別な時間を分かち合っていたただけることを強く願っている (Fig. 3)。



Fig. 3 CX-90

■著者■



脇家 満



岡沢 恭久



芦原 友惟奈



伊藤 宏明

特集：MAZDA CX-90

02

CX-90 のデザイン Design of CX-90

椿 貴紀^{*1}
Takanori Tsubaki

要 約

マツダが、2030年までの電動化戦略のフェーズ1として投入する、「走る喜び」と「環境安全性能」を両立させたラージ商品群の第二弾がCX-90である。基本プラットフォームや主要コンポーネントを先行導入したCX-60と共通としながら、ロングホイールベース化やボディ幅など、メインターゲットとなる北米ファミリー層にフィットする空間とデザインに仕立てあげた。特に、ラージプラットフォームの素性の良さを活かした、求められる室内空間と美しいプロポーションを両立したそのデザインは、CX-90の提供価値におけるハイライトのひとつである。

CX-90のデザインは、機能もスタイルも妥協しないオーナーの揺るぎない価値観と、賢く本質を見極める選択眼を体現する。そして、美しい光の動きを纏いながら駆け抜けるその姿は、街行く人の眼を奪い、心昂らせる。見るたびに心が躍り、自らの選択に誇りを感じられる。これが、CX-90のデザインにおいて提供したいと考えた価値である。

Abstract

Mazda will launch the CX-90 as part of Phase 1 of the electrification strategy toward 2030. While sharing the basic platform and main components with the preceding CX-60, the space and design were tailored to fit the North American family group, the main target, by adopting a long wheelbase and a wide body. One of the highlights of the value offered by the CX-90 is its design, which takes advantage of the features of the large platform and achieves both the desired interior space and beautiful proportions. It embodies the owner's unwavering sense of values that does not compromise on function or style, and his/her clever yet discerning eyes for the essence. The vehicle runs through the street with enchanting play of light on its body, which steals the hearts of passersby and uplifts their spirits. Every time I see it, my heart dances and I feel proud of my choice. This is the value we wanted to offer in the design of the CX-90.

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

1. はじめに

ラージ商品群の第二弾となるCX-90は、北米をメイン市場とする3列シートを備えたSUVである。現行CX-9の実質的な後継車種となるこの車は、プラットフォームの基本構造や主要コンポーネントをCX-60と共通としてラージ商品のスケールメリットを活かしつつ、ワイドボディ化やロングホイールベース化など、CX-90の市場環境とニーズに適合させる変更を織り込んだモデルとなる。内装は、前席エリアをCX-60と共通としながらも、2列目以降を新規開発して、CX-90として求められる空間とデザインの両立を目指した。

特に、ラージプラットフォームの特徴を活かした、美しくSUVらしいプロポーションと北米ファミリー層にとって必要十分な空間という二律背反の両立は、CX-90デザインにおけるハイライトのひとつである。そしてそれは同時に、お客様がご自身の妥協のない選択眼を誇らしく感じていただける、CX-90デザインの最も大きな提供価値であると考えている (Fig. 1)。

*1 デザイン本部
Design Dep.



Fig. 1 Exterior Overall

2. デザインコンセプト

2.1 デザインコンセプト『DIGNIFIED BEAUTY』

CX-90のデザインコンセプトは、『DIGNIFIED BEAUTY 一凛とした風格』とした。堂々かつ凛とした佇まいとダイナミックなプロポーションを実現し、北米をはじめとする大陸の広大な環境と、その競合達に負けない強さを表現したい、という想いをこの言葉に籠めた。

マツダの新しいフラッグシップモデルとして相応しい堂々たる存在感をもたせながら、2010年にスタートしたマツダデザインのテーマ『魂動』において一貫して大切にしてきた、生命感を感じる“動き”の表現もしっかりと進化させて表現したい、というねらいである。

2.2 デザインの勝ちシナリオ

そのコンセプトを基に実際のデザイン開発へと移るにあたり、CX-90のデザインにおいて「競合に対して、いかに優位性をもつか?」、「どうすればお客様に選んでいただけるか?」のシナリオを描くことから始めた。そのベースとなったのは、現行モデルであるCX-9のデザインにおける市場評価である。現行CX-9は、競合に対して圧倒的にスポーティーなスタイリングで好評を博した。しかしその半面、引き締まって見えるスタイリッシュさゆえに、「キャビンがコンパクトに見える」として購入検討段階の早期から敬遠されてしまうというジレンマを抱えていた。

では、CX-90としてデザインをどう進化させるべきか?単純な現行CX-9の延長線上、つまりスポーティーさの更なる強調だけでは、これまでもキャビンのコンパクトさを理由に敬遠されていたお客様からの支持が得られないのは明白である。逆に、たとえキャビンを拡大したとしても、そのために現行の強みであるスタイリッシュさを失ってしまったら、これまでマツダのデザインを高く評価していただいていたお客様を裏切ることになってしまう。では、その相反する要素である、キャビンを拡大させること、そして美しいスタイリング、の2つを同時に成立させるにはどうすればよいのか?これはカーデザインにおける二律背反の両立でもあり、通常とは異なる、何らかのブレイクスルーが必要である (Fig. 2)。

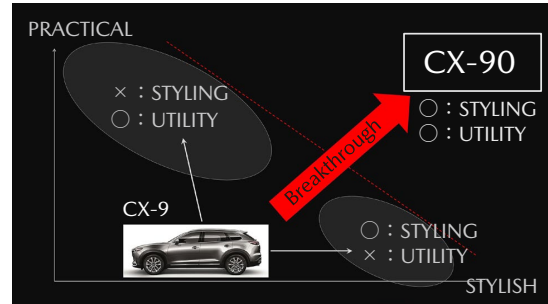


Fig. 2 “Breakthrough”

2.3 逆転の発想

そこでマツダが行ったのは逆転の発想である。まずキャビンを大きくした上で、それをどうにか美しく見せる手法を考えるのではなく、そもそもキャビンが大きいことそれ自体が美しく見えるデザインにしようと考えた。

その鍵となったのは理想のバランスである。そもそも、デザインとはバランスである。これは同時に、アートとデザインの違いであるともいえる。ある一点に特化して、たとえ作者の独り善がりであっても成立するアートと違い、複数の要素や課題を、より高い精度でバランスさせるのがデザインである。その意味で、カーデザインにおいても、さまざまな構成要素を適切な大きさに適切な場所に配置し、全てを巧くバランスさせることができれば、美しいデザインが実現できる。つまり、キャビンが大きいことがより美しく感じられる、構成要素の最適バランスを探求した。

3. エクステリアデザイン

3.1 プロポーションの重要性

カーデザインにおける構成要素のバランスは、プロポーション (=骨格) とも表現される。具体的には、ボンネット・キャビン・タイヤなどの、主要な構成要素の位置や大きさ、バランスで形づくられる、主に側面視におけるシルエットを指す。

そして、まさに魂動デザイン、ひいてはマツダデザインが、デザイン開発において最も重要だと考えているのが、この「プロポーション」である。そのプロポーションを、車種や車格、商品キャラクターに相応しい姿となるように見極める作業は、デザイン開発における第一歩であると同時に最も重要であり、より多くの時間と労力、そして試行錯誤が求められるプロセスでもある。したがって、このプロポーションが整っていること、つまりプロポーションを理想状態に近づけることは、美しいデザインを実現するための前提条件である。

3.2 理想プロポーション実現のために

魂動デザインが目指す理想のプロポーションとは、“動きを感じるプロポーション”である。

そこには、自動車とは動くものであり、動くものであ

る以上、その行為に対して理想を追求したプロポーションであるべきだ、という考えが根底にある。そのため、2010年の魂動デザインのスタートから一貫して4つのタイヤ、つまり4つ脚で動くための理想のプロポーションを追い求めてきた。自然界において高速移動する4つ脚動物の骨格を参考にし、後ろ脚＝リアタイヤに荷重をかけるプロポーションに拘ってきた。たとえ停まっているにも動き出しそうな、生命感あるプロポーションをその理想とした。

では、プロポーションに“動き”を与えるにはどうしたらよいか？見る人に“動き”を感じさせるためのひとつのヒントとして、「非対称」がある。「左右対称」や「前後対称」など、完璧に均整が取れている形状は、“安定感”や“安心感”を感じさせる反面、静的な印象を与えてしまう。逆に「非対称形」からは、“偏り”も感じる反面、どちらかへ動き出しそうな動的な印象を与えることができる。より身近な例を挙げるなら、正三角形と直角三角形の違いをイメージしていただけるとご理解いただき易い (Fig. 3)。

その視点で現行CX-9のプロポーションを振り返ると、動きを感じるプロポーションを実現する上で、改善すべき点が大きく2つあると感じた。それは、①前後のオーバーハング長 (※オーバーハング：車軸中心から前後ボディ端までの距離)、②キャビンの重心位置、の2つである (Fig. 4)。

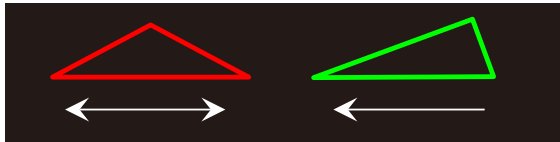


Fig. 3 Sense of Motion



Fig. 4 Sideview of CX-9

(1) 前後オーバーハング長

前輪駆動プラットフォームがベースとなるCX-9では、前輪へのトラクションやコンポーネント配置などの関係上、フロントオーバーハングが長くならざるを得ない。同時に3列SUVであるためリアオーバーハングにも長さが必要となり、結果的にオーバーハングがほぼ前後対称になっており、“動き”を表現するために必要な長短のリズム (非対称) を表現することができていなかった。

そこでCX-90では、フロントオーバーハングを短縮すると同時に、リアオーバーハングを延長して、前後オー

バーハング長に長短のリズムを設けた。それによって前後非対称感による動的な印象を生むとともに、多人数乗車時や荷物積載時に最適なトラクションとなるSUVらしさも表現した (Fig. 5)。

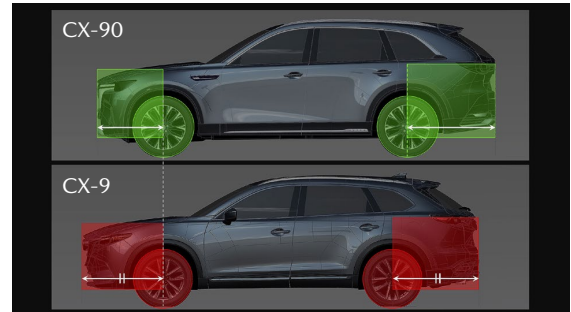


Fig. 5 Visual Rhythm of Overhangs

(2) キャビンの重心位置

キャビン重心も、前輪駆動プラットフォームの性格上、前後のタイヤに対してニュートラルな、ややスタティックさを感じる配置となっている。加えて、そのスタティックさを打ち消すために、キャビンを上下に圧縮するとともに、バックウィンドウの傾斜を強めるなどのスタイリング処理を加えている。そしてこれが、前述の「狭く見える」ことを助長させる要因であり、その軽快でスポーティーな印象と引き換えに、前後対称感によるスタティックな印象を助長させてしまっている。

そこでCX-90では、キャビンの上下・前後寸を拡大しながらも、その荷重がしっかりと後輪へ掛かる位置まで重心を後方移動させることで、全体バランスを最適化した。同時に、後ろ脚で力強く蹴り進む、魂動デザインの理想プロポーションを強調させている (Fig. 6)。

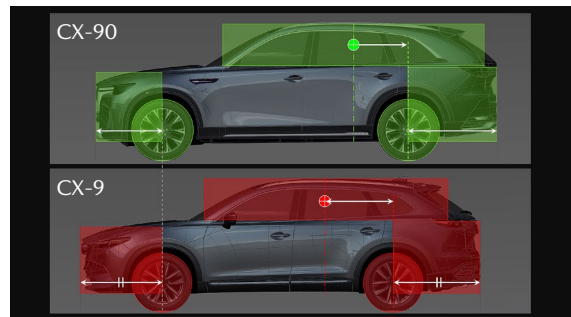


Fig. 6 Position of the Cabin Center

その結果、CX-90のプロポーションは、より前後の非対称形、及び後輪荷重の色合いを強めた、非常に“動き”を感じさせるものとなった。このキャビンが大きいこと自体がより美しく感じられるプロポーションの最適化を行ったことで、CX-90デザインの勝ちシナリオとして設定した、室内空間の拡大と美しいスタイリングの二律背反を両立させることができた (Fig. 7, 8)。

そこには、デザイン開発としての苦労はもちろんだが、

新規開発となる後輪駆動のラージプラットフォームにおける、走りや環境対応、安全性などの理想レイアウトと合致できたからこそ実現できた、という背景がある。もしこの新規プラットフォームがなければ、この二律背反の両立という高いハードルを越えることはできなかっただろう。

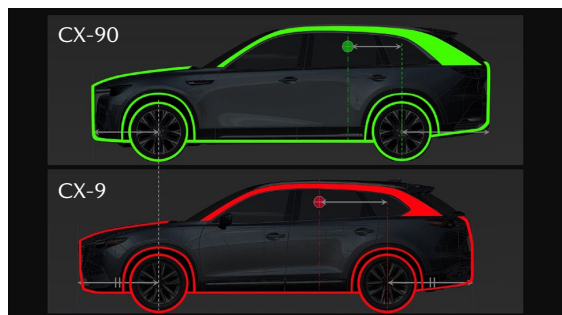


Fig. 7 Proportion with a Sense of Motion



Fig. 8 Sideview of CX-90

3.3 理想プロポーションの恩恵

前述したプロポーション変更は、主にキャビンを拡大させることと美しいスタイリングを纏わせることの両立を目指したもののだが、そこには副次的な恩恵もある。これらは実のところ、プロポーション変更に伴う恩恵として当初から意図していたものでもある。そしてそれらは、CX-90のデザインにおいて非常に重要な要素でもあるため、ここに紹介しておく。

(1) スタイリング要素に頼らないシンプルな造形

まず、デザインの基本となるプロポーションにおいて、求める“動き”を表現できたことで、キャラクターラインなど余計なスタイリング要素が不要となったことが挙げられる。これは魂動デザインが目指す、「引き算の美学」を、より一層研ぎ澄ませたとも言え換えられるだろう。実際にCX-90の基本造形は非常にシンプルなものであり、それゆえに力強さを感じさせるものとなっている (Fig. 9)。

特に、MAZDA 3のような、キャビンとボディをひとつの塊として魅せるDピラーの造形や、前後に明確に貫かれたベルトライン、大きく張り出したタイヤ周りなどは、CX-90デザインのハイライトであるとともに、同クラスの競合にも負けない、堂々とした存在感を感じていただけるだろう。



Fig. 9 Simple Form

(2) 光の動きの強調

上記(1)にも通じるが、基本造形をごくシンプルなものにできたことで、魂動デザインが目指すボディ表面の「光の動き」が、更に強調されたことも大きい。CX-90においても、他の新世代商品群と同様、周囲の光や環境を映り込ませ、絶えず変化し続ける光の動きを表現している。特に、フロントフェンダーからフロントドアにかけての、映り込みが円弧を描くような表現や、Dピラーからリアアーチにかけての力強い光の動きは、同サイズのSUVには見られない非常にユニークかつエモーショナルな処理であり、“ゆらぎ”や“移ろい”といった日本の美意識をも感じさせる、マツダブランドを体現する表現ともいえるだろう (Fig. 10)。



Fig. 10 Beautiful Motions

(3) フロントエンドの厚み

キャビン重心位置を後輪に近づけて“動き”が表現できた結果、ベルトラインのウエッジ（楔形＝前方へ向けて下がる表現）を弱めてもエモーショナルなアピランスを実現することができた。それによってフロントエンドの厚みを増すことができています。更には、フロントオーバーハングの短縮とタイヤ外径の拡大も相まって、CX-9比で最大40mm弱の物理的な厚み増を実現できた（※装着タイヤによる） (Fig. 11)。

加えて、堂々としたグリル形状や、エアカーテン用の縦型スリット開口をフロントバンパー両端に配したCX-90ユニークのデザイン処理も相まって、北米をメイン市場とするSUVとして必要な、堂々とした力強いプレゼンスが表現できた (Fig. 12)。

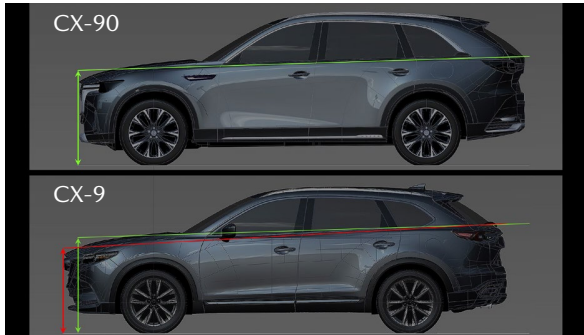


Fig. 11 Thick Face



Fig. 13 Uniformly Designed Interior



Fig. 12 Strong Stance and Wideness

4. インテリアデザイン

4.1 インテリアデザインに籠めた想い

CX-90の前席エリアは、その造形から表皮や加飾のコーディネーションまで、先行するCX-60と共通となる。その上で、後席以降を新規開発とした。ターゲットとなる北米ファミリー層を中心に、CX-90として求められる空間を確保しながら、その車格に見合うデザインと質感を表現した。

インテリアのデザインをする上で一番に心掛けたのは、“全ての乗員に等質な空間価値を提供すること”である。もちろん、それぞれの乗車位置による物理的な違い、つまり機能的価値の違いは当然あるものの、その意味的価値においては等質な空間を提供したい、という想いである。特に3列目は、通常、その空間のタイトさも相まって、狭い場所に押し込まれた感覚を受けることが多い。しかし、必要十分な空間を確保したCX-90のパッケージを存分に活かすため、シートデザインなどを3列全てで可能な限り統一させた。これによって車両全体の統一感を強調するとともに、乗車位置に関わらず上質かつ等質な空間を感じられるデザインとした (Fig. 13)。

4.2 2列目の進化

2列目については、純粋な機能的進化を始め、CX-90の多彩なシートレイアウトを考慮した要素を織り込んだ。

まず、リアコンソールには、ヒーターコントロールパネルを装備するとともに、USB-Cポートを追加し、後席乗員の快適性と空間質感を向上させながら、時代性も考慮したアップデートを行っている。またドアトリムには、前席との統一感を感じさせるアンビエントライトを装備し、夜間における質感の向上を実現した。

ユーザー自身の使用シーンに合わせて選んでいただける、多彩なシートレイアウトのなかでも、2-2-2のシート配置となる6人乗りには2つの仕様がある。シート間にコンソールをもつコンソール仕様と、それぞれのシートにアームレストを備えたキャプテン仕様、の2種類である。特にコンソールのデザインは、CX-9から大幅に洗練されたものとし、前席センターコンソールやドアトリムと同テイストの加飾を配置するなど、車内全体における統一感を強調させると同時に、より上質な空間の演出に寄与している。

4.3 パノラミックサンルーフ

大型パノラミックサンルーフも、2列目、3列目の乗員の開放感を演出するとともに、等質空間の提供にも大きく貢献する装備である。この装備によって、2列目以降のパASSEンジャーも、ドライバーと一緒に移動時間を楽しめるようになると同時に、ロングドライブにおける疲労感の抑制にも大きな効果を発揮すると考えている (Fig. 14)。



Fig. 14 Panoramic Sunroof

5. ホイール & 新色

5.1 ホイール

ホイールは、どちらも新規となる、大径の21インチと19インチ、2つの造形をデザインした。どちらも、外周リムからホイールセンターへと向かう奥行きを深さを強調した、立体感あるスポーク形状とし、エクステリアデザイン同様に、スポーティネスとSUVらしい力強さの融合を表現するとともに、空力を始めとした最新の機能と性能を織り込んだ造形としている。

加えて、21インチにおいては、2つの異なる表面処理を用意した。上級グレードには、ブラックメタリック塗装をベースに、シャープなグラフィックをもつ切削処理をリム外周に沿わせて配置した仕様を用意。大径を強調しつつ、先進感や上質さをも感じさせる表現とした。またその巧みな表面処理の違いによって、同形状でありながら全体がシルバー塗装となる仕様に対して、全く違う形状であるかのような印象を産み出すことに成功している (Fig. 15)。



Fig. 15 New Designed 21 inch Alloy Wheel

5.2 新色

北米市場においては新規導入となる外板色、「アーティザンレッドプレミアムメタリック」をラインアップに加えた。グローバルでは、2022年末のMAZDA 6の20周年記念車から導入された。更に、今後導入するラージ商品群および既存ラインアップの商品に、上級感を際立たせる色として導入する。CX-90においてはイメージカラーであるため、ここでも紹介しておきたい。

マツダ車における赤の表現としては、ブランドを代表するカラーでもある「ソウルレッドクリスタルメタリック」がある。それに対して「アーティザンレッドプレミアムメタリック」は、「ソウルレッドクリスタルメタリック」のようなビビッドな赤を感じるハイライト部と、ほとんど黒ともいえるほどに深く落ちるシャドウ部を併せもつ、マツダを象徴する赤の世界観を拓ける色である。まさに、熟成されたフルボディの赤ワインのような深みを感じる色となっており、CX-90の車格に相応しい新色である (Fig. 16)。



Fig. 16 Artisan Red Premium Metallic

6. おわりに

近年、自動車を取り巻く世界は劇的な変化を迎え、100年に一度、つまり自動車が発明されて以来の変革期ともいわれている。その中で、CX-90を始めとするラージ商品群が、どのように世界を走り抜けていくのかは、現時点では未知数である。それゆえに、関係者全員で苦勞に苦勞を重ねつつ、ようやく製品として世に出せたこの瞬間でさえ、決してゴールではない。そしてこのCX-90を、どこまで製品・ブランドとして成長させることができるか？またその過程で何を学び、何を未来へと活かすのか？は、チーフデザイナーとしての私の使命だと感じている。これからも決して立ち止まることなく、このCX-90とともに成長し続けていかなければならないと考えている。

■ 著 者 ■



椿 貴紀

特集：MAZDA CX-90

03

SKYACTIV-G 3.3T の開発 Development of Skyactiv-G 3.3T

清水 幸一^{*1} 山谷 光隆^{*2} 山口 直宏^{*3}
Koichi Shimizu Mitsutaka Yamaya Naohiro Yamaguchi
松尾 佳朋^{*4} 志々目 宏二^{*5} 西村 和浩^{*6}
Yoshitomo Matsuo Kouji Shishime Kazuhiro Nishimura

要約

カーボンニュートラル社会に向けた再生可能エネルギーによる発電への過渡期において、Well-to-Wheel 及びライフサイクル視点で CO₂ を現実的かつ効果的に低減するためには、マツダは地域のエネルギー事情に応じたパワートレインを用いるマルチソリューション戦略で進めている。そのためには電動化とともに、将来の再生可能燃料の普及も見据えた内燃機関の効率改善が重要である。その 1 つの取り組みとして、新型 3.3L 直列 6 気筒ガソリンターボエンジンを開発した。内燃機関の理想を追求した高圧縮燃焼技術と、排気量を現行の 2.5L から 3.3L に拡大することによって、高出力と中低速域の力強いトルクとレスポンスを実現し、同時に高熱効率での運転を広範囲で達成した。これらによって高次元の「走る喜び」と「優れた環境性能」を実現した。本稿では、その実現に向けて導入した技術を紹介する。

Abstract

In a transitional period to a carbon-neutral society with renewable energy power generation, it is necessary to apply a multi-solution strategy utilizing powertrains in line with regional power supply configurations, so that CO₂ emissions can be practically and effectively reduced from both “Well-to-Wheel” and Life cycle perspectives. With a view to the widespread use of renewable fuels in future, along with electrification, it is imperative to improve the thermal efficiency of internal combustion engines.

As part of initiatives, we have developed a new 3.3L in-line six-cylinder gasoline turbocharged engine (New-model 3.3T). With the high-compression combustion technology pursuing the ideal of an internal combustion engine and the increased displacement from 2.5L to 3.3L, this engine achieves high power, strong torque, and good acceleration response in the mid-to-low speed range as well as high thermal efficiency across a wide operating range. As a result, upgraded “driving pleasure” and “excellent environmental performance” have been realized. This paper introduces the technologies we have achieved.

Key words : Heat engine, Spark ignition engine, Performance/Fuel economy/Efficiency, High tumble ratio

1. はじめに

クルマの電動化の移行期において、Well-to-Wheel 及びライフサイクル視点で CO₂ を現実的かつ効果的に低減するために、カーボンニュートラル社会に向けた再生可能燃料の普及を見据えた内燃機関の効率改善が重要である。マツダは地域のエネルギー事情に応じたパワートレインを用いるマルチソリューション戦略をとっており、このたびラージ商品群のパワートレインの一つとして、「走る喜び」と「優れた環境性能」を実現した新型 3.3L

直列 6 気筒ガソリンターボエンジン（以下 新型 3.3T）を開発した。

2. 開発コンセプトと主要諸元

著者らのグループでは、Fig. 1 のロードマップに示したように、7 つの制御因子の理想化に取り組んできた⁽¹⁾。新型 3.3T は、従来のガソリンターボエンジンの 1st Step^(2,3) から、圧縮比を高めるとともに SI (Spark Ignition) 燃焼の燃焼期間と燃焼時期の更なる理想化をねらった 1.5 Step と位置付けている。

*1~2 エンジン設計部
Engine Design Engineering Dept.

*3~6 エンジン開発部
Engine Performance Development Dept.

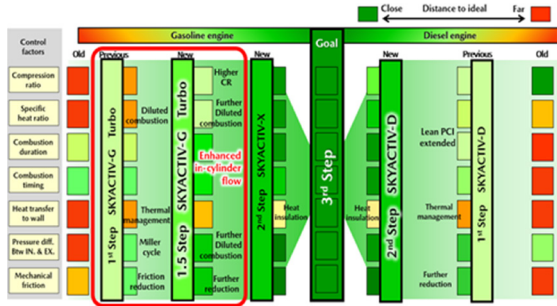


Fig. 1 Evolution Roadmap to Ideal of ICE

このロードマップを実現するための技術開発コンセプトを Fig. 2 に示す。コンセプトの柱となるのは、燃焼室内の流動強化、流動維持による SI 燃焼の進化、そして大排気量化である。現行 2.5L ターボエンジン（以下 現行 2.5T）から排気量を 3.3L へ拡大してトルクと出力を向上させるとともに、正味平均有効圧 BMEP（Brake Mean Effective Pressure）の最大値を現行よりも抑え、燃焼室内の流動強化によるノッキングを抑制し、圧縮比を 10.5 から 12.0 まで高めた。また、この流動強化によって燃焼期間を短縮化し、サイクルごとの燃焼変動を抑制した上で、外部 EGR（Exhaust Gas Recirculation）と内部 EGR 導入による希釈燃焼を拡大することにより燃費を改善しエンジン排出 NOx（以下 Raw NOx）を低減した。これらの技術により高負荷運転の広い範囲まで高効率な燃焼を実現した。ターボ過給機については、小型ターボで中低速域のレスポンスを重視している現行 2.5T に対して、排気量拡大により、中低速域のトルクが向上したことで大型ターボへ変更して高出力化を実現した。

また、排気量拡大と大型ターボによって得られた吸入空気量の増加分を、出力性能の向上とミラーサイクル領域の拡大に活用し、更にツインスクロールターボを採用することで低回転域からでも踏み込みに対して高応答でリニアな加速を得た。

加えて、新開発の燃焼アシスト始動技術によって、EV 走行範囲を拡大し、内燃機関の不得意な領域である極軽負荷域での燃費を改善した。

これらの技術によって、新型 3.3T は出力／燃費ともに優れるエンジンへと進化することができた。

マイルドハイブリッドと 8 速多段オートマチックトランスミッションとの組み合わせによって、車格の大きい CX-90 を力強く走らせるために十分なトルクと出力をクリーンかつ高効率に実現した。これらの取り組みにより得られた新型 3.3T の主要諸元を Table 1 に示す。

Table 2 に示す諸元内容やチェーンレイアウト・補機配置・車載吸気システムの配置などの基本骨格は、新世代 3.3L 直列 6 気筒クリーンディーゼルエンジン^(4,5,6)と共通設計とした。使用回転数や発熱量の違いからガソリンエンジンでは過剰品質になる部分や信頼性機能強化が必要な部分には、ユニークでの個別最適化を施し、最小限の開発要素とすることで、短期間での開発を実現した。

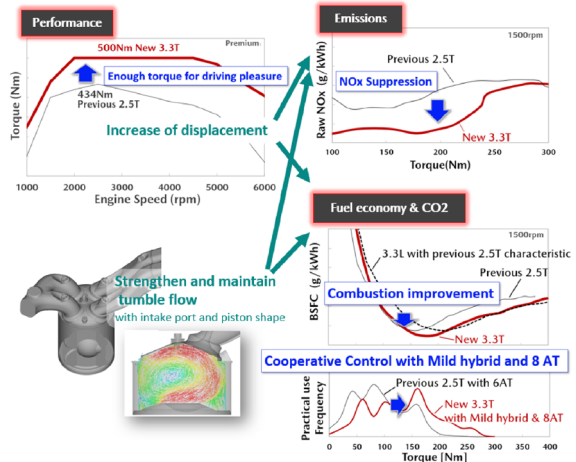
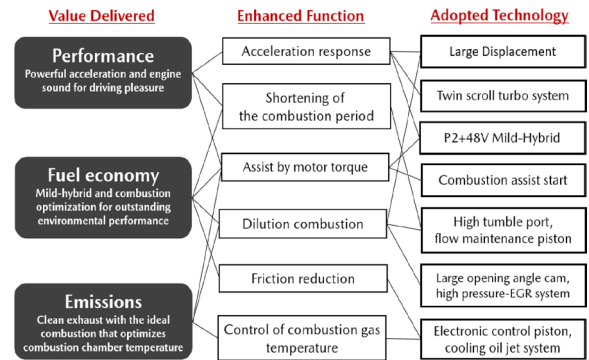


Fig. 2 Development and Technology Concept

Table 1 Engine Specifications

	Previous 2.5T (Regular)	New 3.3T Hi-power (Premium Recommend)	New 3.3T Std-power (Regular)
Engine Type	In-Line4	In-Line6 MHEV48	←
Displacement	2488cm ³	3283cm ³	←
Bore x Stroke	89mm×100mm	86mm×94.2mm	←
Compression ratio	10.5	12.0	←
Fuel Injection	DI (6 Hole Injector)	←	←
Turbocharger	Single Turbocharger "Dynamic Pressure Turbo"	Twin Scroll Turbocharger	←
EGR System	HP-Cooled EGR	←	←
Intake-Valve Timing	Open (BTDC)	-24~50	-10~45
	Close (ABDC)	100~26	100~45
Valve opening angle	256	270	←
Exhaust-Valve Timing	Open (BBDC)	50~5	68~30
	Close (ATDC)	2~47	3~41
Valve opening angle	232	251	←
Max.Torque /rpm	420Nm/2000rpm	500Nm/2000-4500 rpm	450Nm/2000-3500 rpm
Max.Power /rpm	169kw/5000rpm	254kw/5000-6000 rpm	209kw/5000-6000 rpm

Table 2 Common Basic Frame

In-Engine System	Bore	86mm
	Stroke	94.2mm
	Cylinder Block Height	228.05mm
	Bore Pitch	94mm
	Pin Journal Diameter	φ52mm
	Crank Journal Diameter	φ52mm
	Intercooler Size	2.7L: 213.6×153.8×82.9mm
In-Vehicle System	LT Radiator	570×229.5×31mm
	HT Radiator	570×397.5×31mm

3. 性能パフォーマンス

3.1 出力性能

新型 3.3T は、幅広いニーズに応えるため、Hi-Power と Std-power の 2 つのエンジン仕様を設定した。両仕様ともに幅広い領域で余裕のある走りを実現するために、排気量拡大とターボ大型化により高出力化を達成させながら、ツインスクロールターボにより低速トルクとレスポンスを向上させた。また、新型 3.3T を共通仕様で各国市場に展開できるよう E10 燃料に対応させた。

両者の出力性能を Fig. 3 に示す。最大トルクは 500Nm/450Nm を幅広い領域で発生し、最高出力は 254kw (340HP)/209kw (280HP) を達成した。現行 2.5T に対して、Hi-power 仕様では最大トルク 19%、最高出力 50% 向上、Std-power 仕様では最大トルク 7%、最高出力 23% 向上させた。これらにより低回転から高回転まで、どこからアクセルを踏み込んでも余裕のあるトルクと出力を体感できる加速性能を実現した。

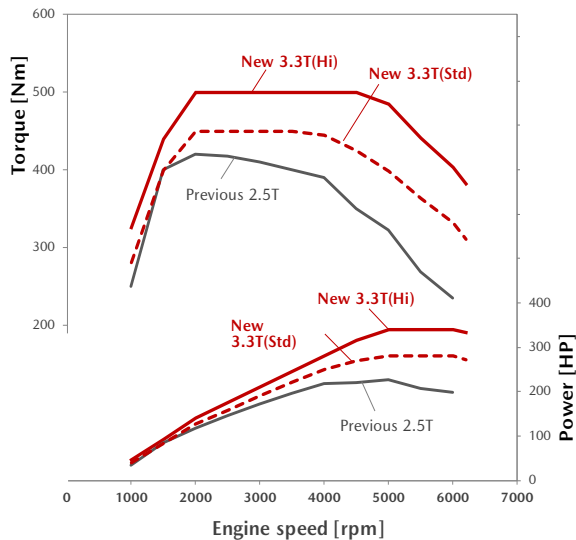


Fig. 3 Torque and Power Performance

3.2 燃費性能

Fig. 4 に正味燃料消費率 BSFC (Brake Specific Fuel Consumption) の比較を示す。エンジンの燃焼効率の視点として BMEP で比較すると、現行 2.5T に対して圧縮比を高めたことで低中負荷域での燃費性能を改善し、併せて高負荷域でのノッキングによる燃費悪化を抑制した。競合スカッターバンドと比較して、世界トップクラスの低燃費を達成した。排気量を拡大しているのにトルク軸で比較した場合、低トルク域の燃費を維持しつつ中高トルク域の大幅な燃費改善となる。現行 2.5T に対して、マイルドハイブリッドと 8 速多段オートマチックトランスミッションとの組み合わせで、走行頻度の高い領域をこの燃費改善域へとシフトさせ、車両燃費改善を施した。

Fig. 5 の BSFC マップに示すように、高効率な運転領域

を広い範囲で実現しているため、実用域と考えられる領域での燃費性能向上につながると考えられる。

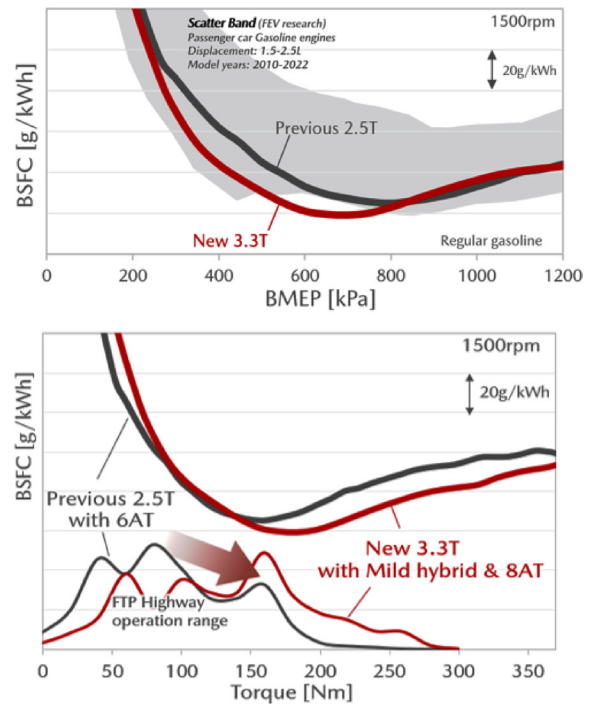


Fig. 4 Fuel Consumption Characteristic

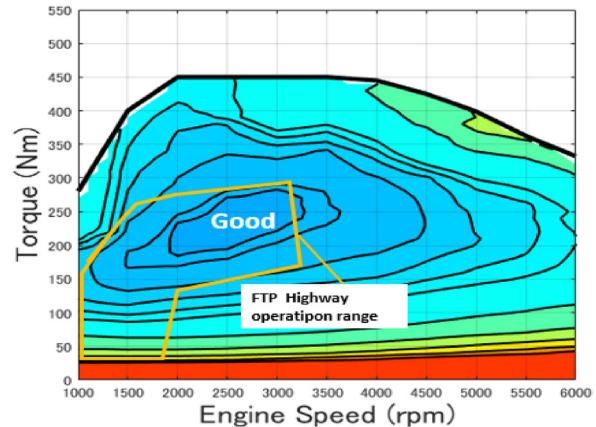


Fig. 5 BSFC MAP

4. 進化技術

4.1 筒内流動強化による燃焼改善

新型 3.3T は、熱効率向上のために流動強化による燃焼改善に取り組み、現行 2.5T に対して点火時の乱流エネルギーを向上させるため、タンブル流動を大きく強化した (Fig. 6)。タンブル流動強化のため、吸気ポート形状は、現行 2.5T から燃焼室流入直前のエッジ形状をシャープにし、ポート上面の曲面化とを組み合わせることで流れを更に剥離させ、筒内への流動の指向性を強化することで、吸気工程でのタンブル流動の強化を実現した (Fig. 7)。Fig. 8 に示すピストン形状は、現行 2.5T のバスタブ型キャビ

ティ形状から球型へと変更して、圧縮工程でのタンブル流動を維持させている。過剰なキャビティ径の拡大は、燃焼室排気壁側に流動が衝突し、タンブル形成を阻害する傾向にあるため、流動解析と燃焼解析を繰り返し、最適な球型のキャビティ形状を設計した。また、ピストン端部にはエッジカット加工を施し、空間を設けることでクレブス部に残る未燃ガスの低減を図った。

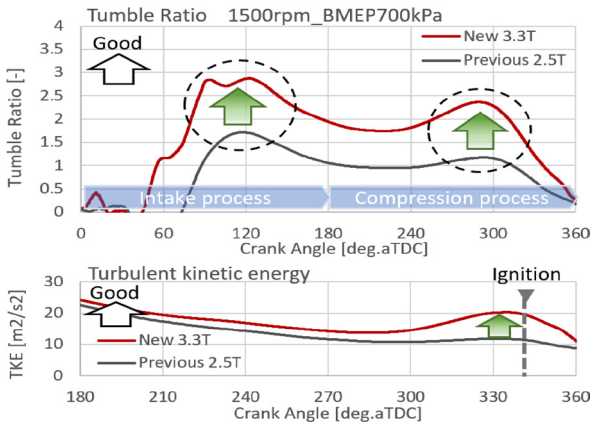


Fig. 6 Flow Strengthening from Intake to Compression Process

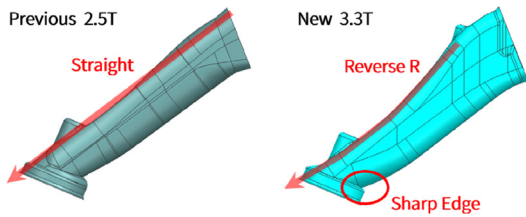


Fig. 7 High Tumble Port

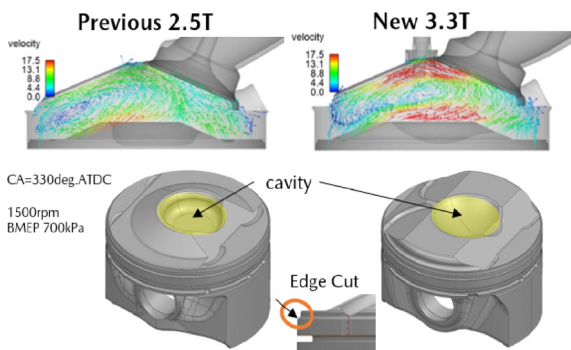


Fig. 8 Effect of Combustion Chamber Shape on Cylinder Flow

これらの流動強化により、新型 3.3T は現行 2.5T に比べ燃焼期間が短縮した (Fig. 9)。燃焼期間の短縮は、高圧縮比でありながら高負荷域でのノッキングの発生を抑制し、BMEP 軸で現行 2.5T と等価な範囲で MBT を実現した。更に排気量拡大によって、トルク軸で MBT の範囲の拡大を実現した (Fig. 10)。

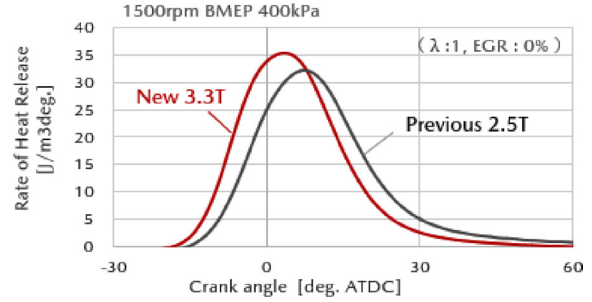


Fig. 9 Heat Release Curve

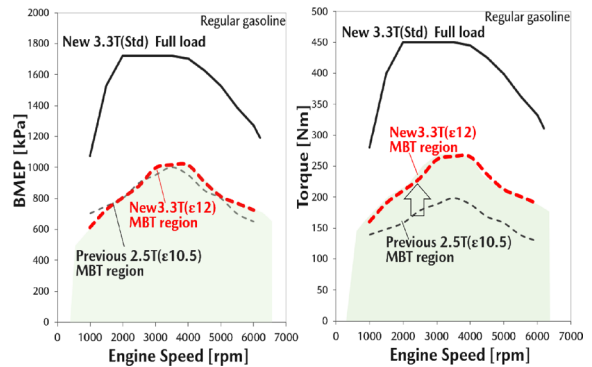


Fig. 10 MBT Region of BMEP-Axis and Torque-Axis

加えて、燃焼期間の短縮による燃焼サイクル変動の抑制は、内部 EGR 及び外部 EGR の増量による更なる希釈燃焼を可能とした。

Fig. 11 にバルブオーバーラップ量に対する燃焼サイクル変動率 COV (Coefficient of Variation) を示す。現行 2.5T に対して COV を維持してバルブオーバーラップ拡大、つまり内部 EGR の更なる導入を実現した。この燃焼低温化は、冷却損失を低減するとともに、Fig. 2 に示した Raw NOx の低減にも貢献しており、キャタリストの貴金属量低減も可能とした。希釈燃焼に加え、吸排気カムの開弁角を従来比拡大し、吸気遅閉じミラーサイクルによるポンプ損失を広範囲で改善した。これらの効率改善の内訳を Fig. 12 に示す。

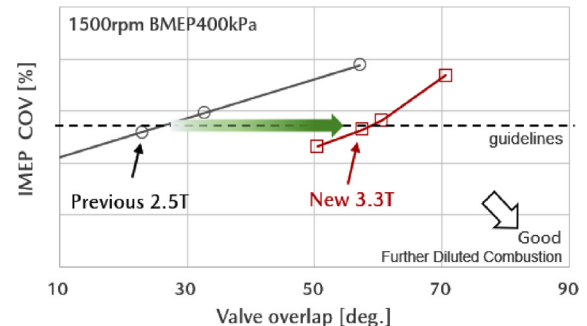


Fig. 11 Valve Overlap and IMEP Coefficient of Variation

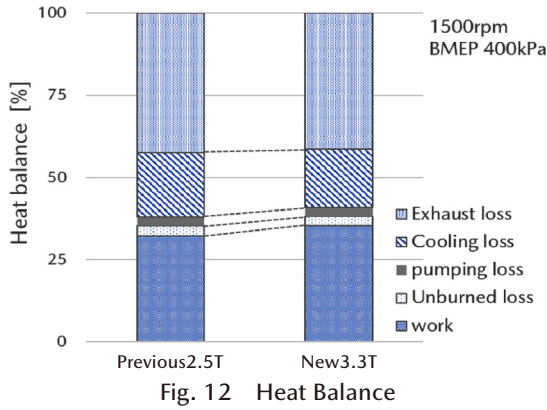


Fig. 12 Heat Balance

4.2 燃焼アシスト始動

マイルドハイブリッドを採用する新型 3.3T は、EV 走行状態からエンジン再始動時に、始動に必要なモータートルクを確保しておく必要がある。この始動用のモータートルクを低減させて EV 走行範囲を更に拡大して燃費改善を図るため、停止時膨張気筒を燃焼させ、始動用のモータートルクを燃焼トルクによって低減させる燃焼アシスト始動技術を開発した (Fig. 13)。

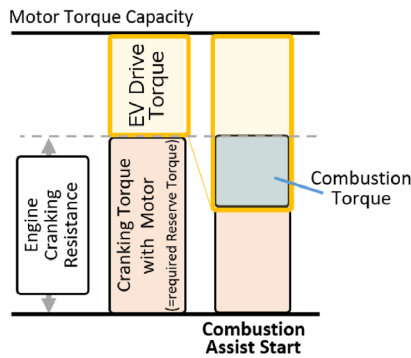


Fig. 13 Combustion Assist Start

燃焼アシスト始動は無圧縮の停止時膨張気筒を燃焼させるため、筒内流動に頼らない混合気形成と、無圧縮での低温低圧下で確実に火炎伝ばさせるための筒内残留ガスの低減が重要になる。

まず混合気形成は、噴霧噴射エネルギーによってスパークプラグ近傍に混合気を輸送する機能を、ピストン形状と燃焼室形状を最適化して実現した (Fig. 14)。

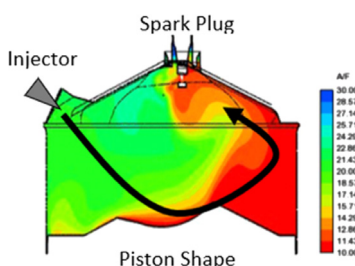


Fig. 14 Transportation of the Fuel Injection

更に噴射多段化により、燃焼噴霧の筒内壁面への付着を低減して混合気をリッチ化し、前段噴霧の混合気の流動を後段噴霧の噴射エネルギーで維持してスパークプラグへ輸送することで、着火に必要なリッチ混合気を早期に形成させた (Fig. 15)。

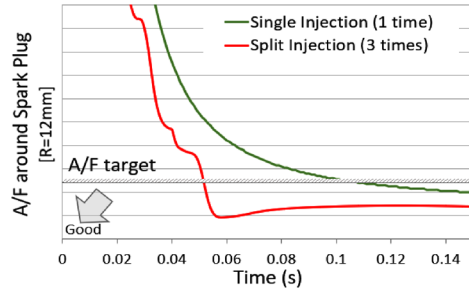


Fig. 15 CAE Result of A/F Around Spark Plug

次に筒内残留ガスの低減は、エンジン切り離し後からエンジン停止までの過程に掃気を行うことで実現する。単純にスロットルを開け、新気導入量を増やすと掃気が促進されて残留ガスの低減が可能となるが、新気導入量が増えることで圧縮反力によるクランク軸の角加速度変動が大きくなり、エンジン停止前のフロア振動が悪化する (Fig. 16-①)。

この背反を両立させるために、エンジン切り離し直後を掃気区間、エンジン停止前をフロア振動抑制区間として、まず掃気区間ではスロットルを大きく開けて新気導入量を増やすことに加え、吸気 S-VT を進角させて圧縮工程中の吸気閉タイミングを下死点側とすることで、吸気系への既燃ガス吹き返しを減らして残留ガスを低減させる。

次にフロア振動抑制区間では、圧縮反力が小さくなるようスロットルを閉じ、吸気 S-VT を遅角させることで有効圧縮比を下げてフロア振動を抑える。これらにより、残留ガス低減とフロア振動低減の両立した (Fig. 16-②)。

Fig. 17 に停止時膨張気筒の燃焼の有無でのエンジン再始動挙動の比較を示す。停止時膨張気筒を燃焼させることで、始動性能を損なうことなく始動時に必要なモータートルクを低減して EV 走行領域を拡大した。

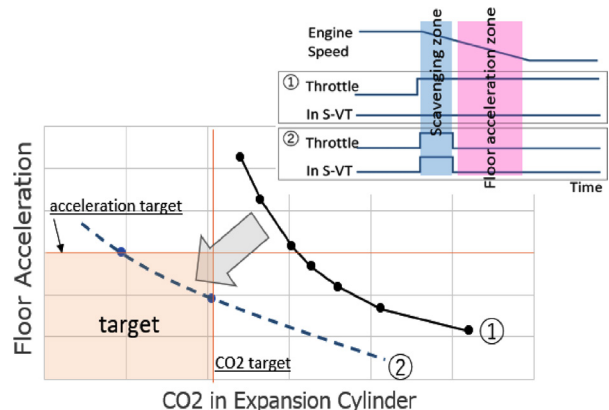


Fig. 16 Improvement of Scavenging and Floor Acceleration

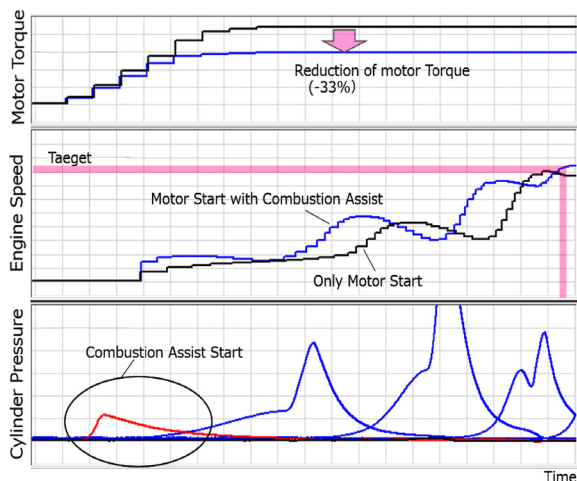


Fig. 17 Engine Restart Behavior by Combustion Assist

4.3 電子制御ピストンクーリングジェット噴射システム

ピストンクーリングジェットについては、現行 2.5T では一定油圧以上で噴射するチェックボール式噴射タイプを採用していたが、新型 3.3T では、電子制御ピストンクーリングジェット噴射システムを採用した。シリンダーブロック内のメインギャラリーとは別に、オイルジェット専用油路を配置し、オイル通路に油路を開閉できる電子制御バルブを設定している (Fig. 18)。

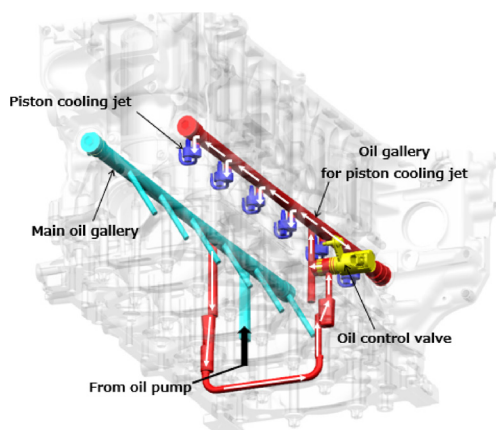


Fig. 18 Oil Jet Electric Control System

これにより、エンジン回転と負荷、油温に応じてオイルジェット噴射有無を適切にコントロールし、ピストン過冷却を抑制することで、ピストン付着燃料の低減、燃焼室の早期暖機によるクリーン排気に貢献している。

Table 3 にオイルジェット噴射を抑制した領域を示す。従来の一般的なチェックボール式のオイルジェットでは、開弁圧バラツキの影響で、閉弁/開弁時の要求油圧差が生じ、オイルポンプ吐出量を増加させていた。この開閉弁機構を電子制御バルブに置き換えることで、開閉弁時の要求油圧差を削減でき、大幅にオイルポンプ吐出量を抑制した。また、メインベアリング部に鋳鉄インサートを採用することで、温間時のエンドフロー量を抑制した

効果も併せて、オイルポンプ吐出量を現行 2.5T と同等に抑制して (Fig. 19)、機械抵抗低減に貢献した。

Table 3 Oil Jet Spray Mapping

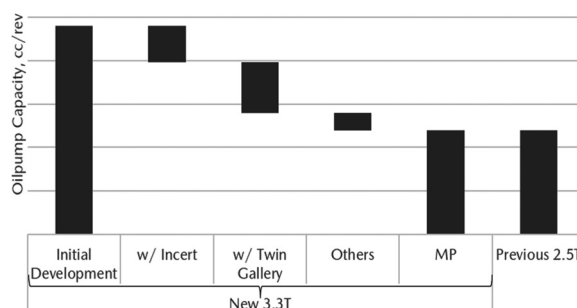
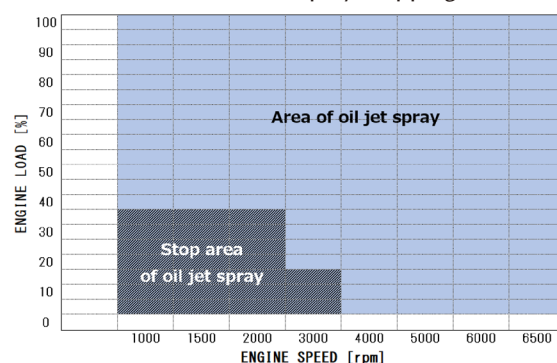


Fig. 19 Reduced Oil Pump Discharge

5. まとめ

1. SI 燃焼の進化とともに、排気量を 2.5L から 3.3L に拡大することで、車格の大きい CX-90 を力強く加速させるために十分なトルクと出力を達成した。
2. 排気量拡大かつ BMEP の最大値を現行より抑えることに加えて、燃焼室内の流動の強化と維持による SI 燃焼の進化によってノッキングを抑制し、現行 2.5T からの高圧縮比化を実現した。更に、SI 燃焼の進化は EGR を活用した希釈燃焼範囲の拡大を可能とし、吸気遅閉じミラーサイクルとともに、実用域の広い範囲で熱効率改善を実現し、世界トップクラスの低燃費を達成した。また、希釈燃焼による Raw NOx 低減、エッジカットを施したピストンによる Raw HC 低減でクリーン排気に貢献した。
3. マイルドハイブリッドの採用において、EV 走行状態からエンジン再始動時に、最初の膨張工程気筒を燃焼させて始動時に必要なモーター側のトルクを燃焼トルクに配分して低減させる燃焼アシスト始動技術を開発した。EV 走行範囲を拡大して、内燃機関の不得意な領域である極軽負荷域での燃費を改善した。
4. 電子制御ピストンクーリングジェット噴射システムを採用し、運転条件ごとにオイルジェット噴射を最適化して、ピストン付着燃料の抑制、及び燃焼室の早期

暖機によるクリーン排気に貢献し、従来のチェックボール式噴射タイプに比べてオイルポンプ最大吐出量を抑制し、機械抵抗低減を実現できた。

6. おわりに

新型 3.3L 直列 6 気筒ガソリンターボエンジンは、排気量拡大と燃焼の理想追求を柱にした技術コンセプトを、マイルドハイブリッドと 8 速多段オートマチックトランスミッションを組み合わせ、走り、燃費、排気の全ての提供価値を大幅に向上させて「走る歓び」と「優れた環境性能」を高次元で両立させることができた。

今後も内燃機関の更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、「走る歓び」と「優れた環境性能」を高次元で実現していく所存である。

参考文献

- (1) Hitomi M.: Both the Gasoline and Diesel Engines will be Winners, 26th International AVL Conference Graz (2014)
- (2) Hirose I.: Mazda 2.5L SKYACTIV-G Engine with New Boosting Technology, 37. Internationales Wiener Motorensymposium (2016)
- (3) 室谷 ほか: 新型ガソリンターボエンジン「SKYACTIV-G 2.5T」の開発, [マツダ技報, No.33, pp.16-22 \(2016\)](#)
- (4) 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)
- (5) 山川ほか: 新世代 3.3L クリーンディーゼルエンジンの開発 (第 2 報), 自技会秋季大会予稿集 (2022)
- (6) 岡澤ほか: 新世代 3.3L クリーンディーゼルエンジンの開発 (第 3 報), 自技会秋季大会予稿集 (2022)

■ 著 者 ■



清水 幸一



山谷 光隆



山口 直宏



松尾 佳朋



志々目 宏二



西村 和浩

特集：MAZDA CX-90

04

SKYACTIV-G 3.3T のパッケージ開発 Package Development of Skyactiv-G 3.3T

谷所 正彦^{*1} 濱詰 嘉浩^{*2} 吉武 勇人^{*3}
Masahiko Tanisho Yoshihiro Hamazume Hayato Yoshitake
徳島 和宏^{*4} 山谷 光隆^{*5}
Kazuhiro Tokushima Mitsutaka Yamaya

要 約

マツダは、技術開発の長期ビジョン「サステナブル “Zoom-Zoom” 宣言 2030」にて、クルマ本来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言明した。今回、マツダの技術開発ビジョンに基づき、走る歓びと優れた環境性能を高次元で両立することを目指して直列 6 気筒ガソリンターボ縦置きエンジン SKYACTIV-G3.3T を開発した。この新型エンジンは、SKYACTIV エンジン群の一括企画構想に基づき、さまざまな要件に適合させ CX-90 へ搭載した。本エンジンのパッケージ開発で注力したポイントは、マツダ独自の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貢献している。本稿では、SKYACTIV-G3.3T のパッケージ開発について紹介する。

Abstract

Mazda announced in “Sustainable Zoom-Zoom 2030”, Mazda’s long-term vision for technology development that we will aim for solving issues that the earth, society and people are facing, by providing driving-pleasure — a fundamental appeal of automobiles. Now, based on Mazda’s technology development strategy, we developed Skyactiv-G3.3T, a new gasoline engine which has straight 6-cylinders and is longitudinally mounded, to realize both fun-to-drive and excellent environmental performance at high level. This new engine firmly adheres to the bundled concept of the Skyactiv engine group, meets various package requirements, and is mounted on the All-New Mazda CX-90. The points we focused on package development of this engine contribute to human-centric car development represented by KODO design and Jinba-ittai that are Mazda’s unique values. This report introduces the package development of Skyactiv-G3.3T.

Key words : Engine Package, Car Package, Layout

1. はじめに

マツダは、走る歓びと優れた環境性能を両立するため、大排気量化、後輪駆動化、電動化を組み合わせる SKYACTIV マルチソリューションスケラブルアーキテクチャー、また固定と変動を定義し効率的にユニットを派生するコモンアーキテクチャー構想に基づいてラージ商品群を開発している。国ごとのエネルギー事情やお客様のニーズに応じた技術を展開し、既に 2.5L 直列 4 気筒ガソリンエンジン SKYACTIV-G2.5 や 3.3L 直列 6 気筒ディーゼルエンジン SKYACTIV-D3.3 などを CX-60 に搭載している⁽¹⁾。これらの優れた基本性能⁽²⁾⁽³⁾をベースに更なる進化を織り込み、マツダが開発した量産用ガソリ

ンエンジンとして史上最高となる高出力、中低速域の力強いトルクとレスポンス、高熱効率での運転を広範囲で達成する 3.3L 直列 6 気筒ガソリンターボ縦置きエンジン SKYACTIV-G3.3T を新開発し、CX-90 に搭載した。本稿では、この新型エンジンをパッケージする際のコンセプトとブレークスルー技術を紹介する。

2. 開発コンセプト

2.1 パッケージとは

パッケージとは、複数のシステムとその構成部品をそれぞれの機能目標や制約を満足した上で所定の空間内に収め、全体としてねらいの機能を発揮し、一つの商品として成立させることである。

*1～5 エンジン設計部
Engine Design Engineering Dept.

近年、環境性能の改善を目的に多気筒化や電動化技術、また各種センサー類の導入などによりシステムは複雑化し、エンジン寸法は拡大傾向にある。その一方でマツダは走る喜び、魂動デザイン、人間中心の空間設計や高い衝突安全性能等を両立したいと考えている。エンジン周辺の空間制約の厳しさが増し続ける中で、これらを高次元で達成することがエンジンパッケージに求められている。

2.2 エンジンシステム構成

Fig. 1 にエンジン単体図を示す。排気側に電子制御ウェイストゲート付きのツインスクロール式ターボチャージャーとキャタリストを備え、ターボチャージャー下流吸気経路に順にエレキスロットルバルブ、大容量水冷インタークーラー、インテークマニフォールドをもつ。またシリンダーヘッド内から排ガスを取り出して冷却後にインテークマニフォールドへ戻す High-pressure EGR (Exhaust Gas Recirculation) Cooler と冷却水用サブタンクをインテークマニフォールド上部に備え、エンジンの各電子部品と PCM (Powertrain Control Module) をつなぐ大型のハーネスシステムがエンジン長手方向に通る。更に Fig. 2 に示すように、優れた実用燃費性能と高い遮音性能を実現するため、エンジンルーム内カプセルカバーでエンジン全体を覆う構成となっている。

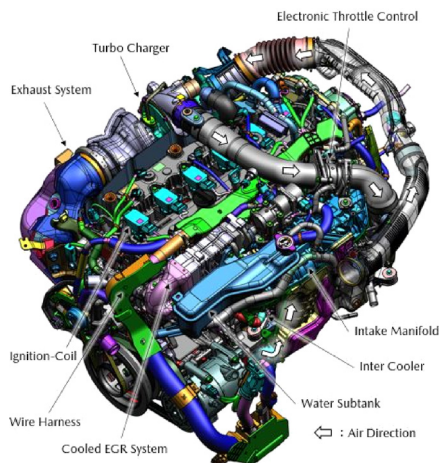


Fig. 1 Engine General View

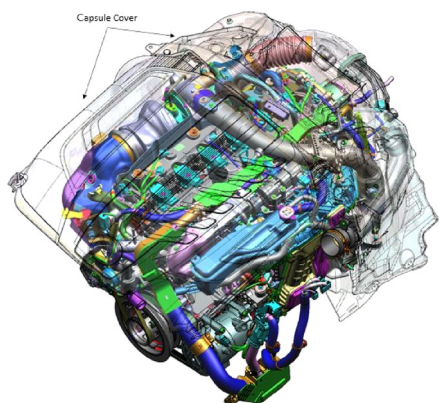


Fig. 2 Engine General View with Capsule Cover

2.3 エンジンパッケージ構想と課題

1. に述べたコモンアーキテクチャー構想により、SKYACTIV-D3.3 との共通/変動要素をあらかじめ定め、開発効率を最大化、投資を最小化しつつ、求められる高い出力性能と環境性能を限られた空間内で実現することが SKYACTIV-G3.3T のパッケージに求められた。

(1) 共通要素

a. エンジンユニット搭載位置

車両上の搭載位置、角度を SKYACTIV-D3.3 と合わせることでフロントデファレンシャル及びプロペラシャフト、エンジンマウントなどの大物構造系だけでなく、車両とエンジンを接続する燃料系、温水系、冷媒系、電気系の長尺物部品を共通化した。

b. エンジンユニット内部

シリンダーブロックなどの本体構造系、FEAD (Front End Accessory Drive) やクランクシャフトなどの回転系、オイルフィルターやオイルポンプなどの潤滑系及びウォーターポンプなどの冷却系基本構造や配置を共通化した。SKYACTIV-D3.3 同様、カムシャフトと燃料ポンプをリアチェーン駆動、ドライブシャフトをオイルパン貫通構造としエンジン全高を低減した。

c. エンジンユニット外部

Fig. 3 にエンジン周辺部品関係図を示す。エアクリナーなどの車両搭載部品と接続する吸気経路や排気経路も共通化した。例えばターボチャージャーは SKYACTIV-D3.3 と仕様は異なるが基本位置を合わせることで、ターボチャージャー上流で車両ダッシュパネルに固定される吸気経路を共通化した。また、左右ステアリングシャフトとはあらゆる走行シーンを想定したクリアランスを確保した。

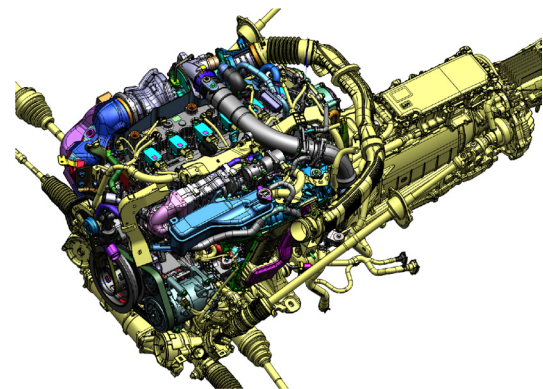


Fig. 3 Engine Package View

以上のように、SKYACTIV-D3.3 と共通骨格をもつガソリンターボエンジンを生み出した。単に部品共通化を図るだけでなくエンジンルーム内の衝突、熱害、防錆、NV (Noise, Vibration) 対策までも含めて効率的な開発を行った。更に、新設した直 6 エンジン組立ラインにおいてはディーゼル、ガソリンエンジンの高効率な機種混流フレ

キンプル生産も可能にした⁽⁴⁾。

(2) 変動要素

本エンジンはSKYACTIV-D3.3にはないユニーク要素ももつ。Fig. 4に示すようにSKYACTIV-G3.3Tのシリンダーヘッド内燃焼室はペントルーフ形でシリンダーヘッド高さやカム間ピッチ、吸気ポートの形状がSKYACTIV-D3.3と異なり、シリンダーヘッドが高く、その上に設置されるシリンダーヘッドカバーの位置が高い。また、Fig. 5に示すように吸気ポート形状、サージタンクの関係からインテークマニフォールド上面の位置も高く上部に残された空間は狭い。

更に、SKYACTIV-G3.3Tはイグニッションコイルやガソリンタンク内で気化した燃料を燃焼室へ取り込むパージシステム、またヘッドカバーにはベンチレーション経路/PCV (Positive Crankcase Ventilation) 経路を共用したオイルセパレータや吸気系と接続する換気用PCVホース、ブリーザーホースをもつため、ヘッドカバー上部に残された空間はSKYACTIV-D3.3よりも狭い。このように、ヘッドカバー上及びインテークマニフォールド上のパッケージが課題であった。

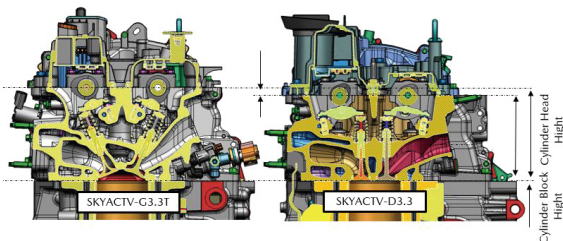


Fig. 4 Cross-Sectional Diagram of Cylinder Head

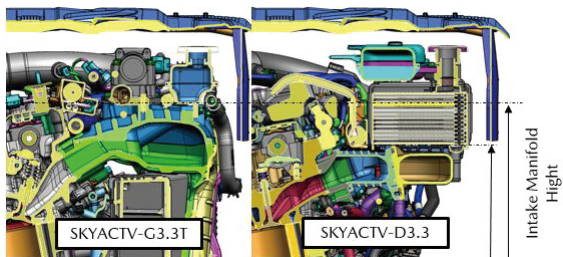


Fig. 5 Cross-Sectional Diagram of Intake Manifold

(3) カプセルカバー開発

2.2で述べたように、ラージ商品群はエンジンルーム内にエンジン全体を包み込む、車体固定のカプセルカバーをもつ。SKYACTIV-G2.5やSKYACTIV-D3.3と両立するカプセルカバーの基本構造共通化を進めるためには、上記(1)(2)の共通/変動要素を考慮しエンジンの輪郭を決めつつ、部品間公差とあらゆる走行条件におけるエンジン振動を考慮してカプセルカバーとのクリアランスを確保し、同時に他エンジンとの整合性も確認しなければならない。従来手法では、これら部品間公差、エンジン振動による部品位置変化、部品間クリアランスの計算

を一つ一つ手作業で繰り返す必要があった。SKYACTIV-G3.3Tのパッケージ開発にて、この解を見出す作業は極めて複雑なものであった。以降の章では、上記課題をブレークスルーするための技術を紹介する。

3. ブレークスルー技術

3.1 吸気パッケージ技術

インテークマニフォールド上のパッケージ問題を解決するため、Fig. 6に示すようにインタークーラーをインテークマニフォールド下に配置した。これにより空いたインテークマニフォールド上にEGRシステム、ターボチャージャー下流吸気経路、エレキスロットルを配置し吸気経路をスムーズにつなげた。インテークマニフォールド下に配置される燃料ポンプや燃料レールとの衝突安全性能との両立が課題であったが、Fig. 7に示すように燃料ポンプ、燃料レールとインタークーラー間のクリアランスを確保しつつ、それらの間に強固なプロテクタを斜め配置することでクリアした。万一の衝突時には荷重を受けたインタークーラーがプロテクタに沿って滑り、後方へスライドすることで、プロテクタ内側の燃料系に衝突荷重を与えず、これらを強固に保護する。このアイデアによりパッケージと機能を同時に満足し、課題解決した。

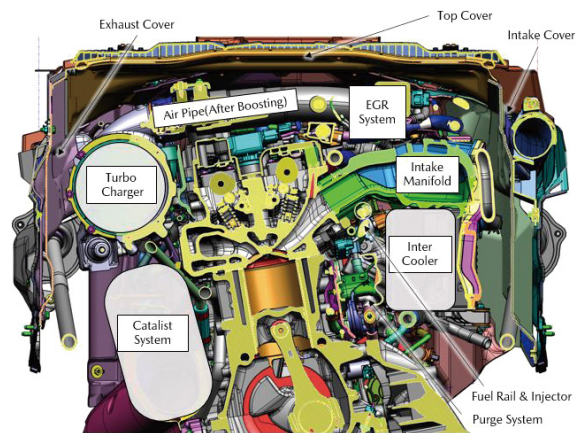


Fig. 6 Cross-Sectional Diagram of Engine (Longitudinal Direction View)

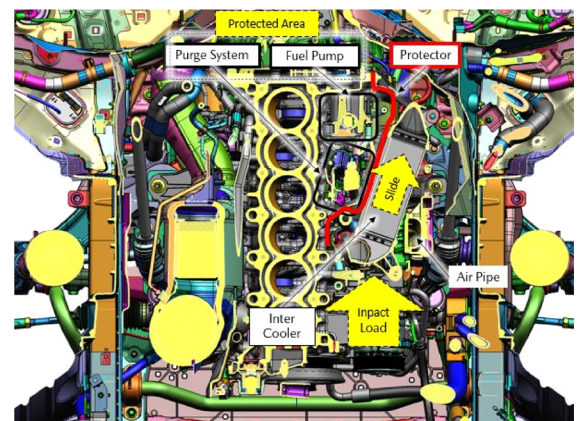


Fig. 7 Cross-Sectional Diagram of Engine (Plan View)

また、2.3(2)で述べたパーズシステムは従来のエンジンであれば、ヘッドカバー上やインテークマニフォールド上に配置されることが多いが、上述のインテークマニフォールド下プロテクタ内側へ内包した。近接する燃料レールとインジェクター及びそれらに接続されるハーネス、ロックセンサーなど周辺部品との緻密なクリアランスを確保することにより実現した。パーズバルブシステムを従来よりも短い経路でインテークマニフォールドへつなぐことで、パッケージと機能を両立した。

このように、さまざまなシステムや部品を一つ一つ整理し、無駄な空間を残すことなく合理的にパッケージしていくことで、機能を担保しつつエンジンと車両のパッケージを高次元にバランスした。

3.2 ヘッドカバー上パッケージ技術

ヘッドカバー上及びエンジンとカプセルカバー間のパッケージ検討を効率化するため、部品 3D モデルと公差値、エンジン振動データを入力することで部品周辺に必要な空間の 3D モデルを自動生成する簡易プログラムを開発した。これによりクリアランス計算や管理作業時間を 70%程度削減し、検討を大幅に効率化した。

ヘッドカバー上ハーネスシステムにおいても、パッケージ開発初期から経路のコンセプトを精度高く立て、分岐位置や固定個所を具体的に定めてばらつきデータを描くことで、機能要件や周囲の必要クリアランスを明確化した。ここでも上記プログラムを活用し効率化を図ることで従来比大幅に開発工数を削減できた。また、いくつかの技術アイテムを先行してパッケージしており、将来のエンジン技術進化に対応可能としている。

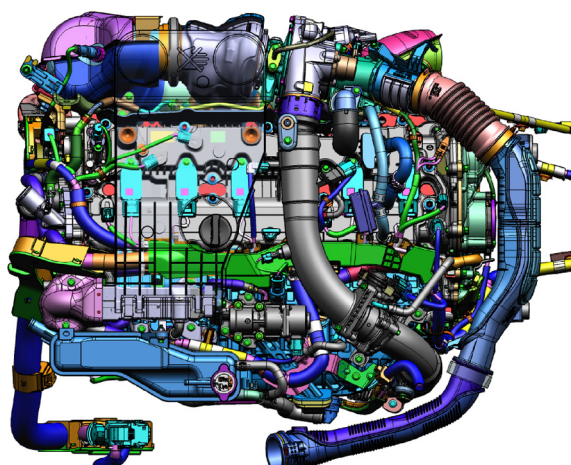


Fig. 8 Diagram Seen from Above Engine (Plan View)

Fig. 8 にエンジン全体を真上から見た図を、Fig. 9 にエンジンと車両の断面を示す。仮にターボチャージャー下流吸気経路として、ヘッドカバー上配置を選択しなかった場合、エンジンフロント側もしくはリア側を通過させる手段が考えられる。しかし前者はエンジン直付けの

キャタリストと干渉し、成立しない。後者はターボチャージャー上流経路と干渉する上、エンジンと車両のクリアランスが確保できずエンジン全体を車両前方へ移動させる必要がある。これはボンネット面の上昇や車両フロントオーバーハングの延長、更には乗員の視点にも影響を及ぼすことになり、車両パッケージやデザインを大幅に変更することにつながる。これらの理由により、ターボチャージャー下流吸気経路にヘッドカバー上配置を選択した。重量物であるエンジンを車両重心に近づけるパッケージは、車両のヨー慣性モーメントの低減により運動性能を向上でき、マツダらしい人馬一体の走りの提供に貢献している⁽⁵⁾。

このように、一つ一つの部品は小さなものであるが、細かいエンジンパッケージの知恵や工夫が魂動デザインや人馬一体、走る喜びをサポートし、マツダブランドを支えている。

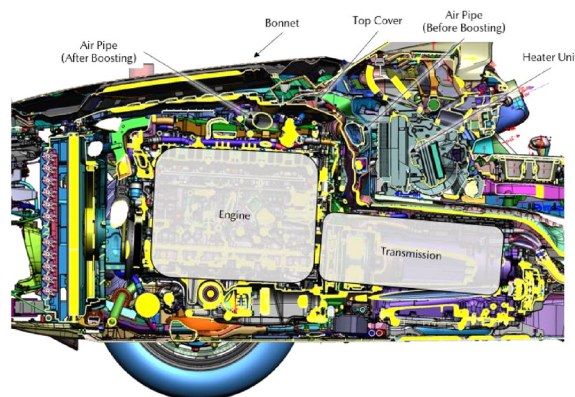


Fig. 9 Cross-Sectional Diagram of Car (Side Direction View)

4. おわりに

走る喜びと優れた環境性能を高次元で両立する SKYACTIV-G3.3T のパッケージ開発の事例を紹介した。ユニット内外のさまざまな課題をひとつひとつ解決し、実現したものである。

今後もマツダは独自の価値である魂動デザインや人馬一体、また人間中心のクルマ造りに求められるパッケージを進化させ、運転するたびにお客様の笑顔を生み出す商品を提供し続けていく所存である。

参考文献

- (1) 和田ほか：CX-60 の紹介，[マツダ技報](#)，No.39，pp.3-6 (2022)
- (2) 志茂ほか：SKYACTIV-D3.3 の開発，[マツダ技報](#)，No.39，pp.21-27 (2022)
- (3) 岡澤ほか：SKYACTIV-D3.3 の開発，[マツダ技報](#)，No.39，pp.28-35 (2022)
- (4) 永尾ほか：直列 6 気筒エンジン組立ラインの紹介，

[マツダ技報, No.39, pp.145-151 \(2022\)](#)

(5) 中村ほか：新型ロードスターのパッケージング, [マツダ技報, No.32, pp.108-113 \(2015\)](#)

■著者■



谷所 正彦



濱詰 嘉浩



吉武 勇人



徳島 和宏



山谷 光隆

特集：MAZDA CX-90

05

CX-90 のエンジンサウンド開発について

Engine Sound Development for CX-90

服部 之総^{*1} 桂川 貴弥^{*2} 大槻 修平^{*3} 河越 三郎^{*4}
Yukifusa Hattori Takaya Katsuragawa Shuhei Otsuki Saburo Kawagoe
三宅 昭範^{*5} 高崎 神風^{*6} 神谷 稔^{*7}
Akinori Miyake Kamikaze Takasaki Minoru Koya

要 約

CX-90 のエンジンサウンド開発では、6 気筒エンジンサウンドの共通コンセプトとして、トルクに対してリニアな音の変化と、干渉音の変化によって“高揚感”を呼び起こし、回転上昇に伴う加速感の続く伸びの良さを周波数上昇の変化で“伸び感”のあるエンジンサウンドを目指した。走りの開発部門も共創して、アクセルを踏み込むほどに走りとも一致した意のままの運転をサポートするサウンド開発に取り組んだ。

Abstract

In the development of the engine sound for CX-90, in order to convey driving pleasure to our customers, we aimed to provide not only elation which is a common concept of Mazda's six-cylinder engine sound, but also stretch feel which is a characteristic of gasoline engines.

Key words : Vibration, Noise, Engine sound, Sound quality evaluation, Driver behavior, Operational

1. はじめに

CX-90 では、新たに直列 6 気筒ガソリンターボエンジンを搭載し、CX-60 共通のコンセプトである“高揚感”に加えて、高回転域まで途切れなく加速感が続く“伸び感”のあるエンジンサウンドの開発に取り組んだ。本稿では、CX-90 のエンジンサウンド開発の考え方と実現手段について報告する。

2. コンセプト

エンジンサウンドは、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、意のままの運転とサウンドの関係を解明してきた。具体的には、MAZDA3、MX-30 等の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、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-90 を導入する北米環境では、①大小さまざまな加速度をコントロールして交通流に乗ったり、追い越しなど行うシーンと、②アクセル開度一定で、エンジン回転数の上昇とともにねらいの車速まで上げていくシーンと、

大きく 2 つの加速シーンがある。

①のシーンでは、加速度の違いをコントロールするために、CX-60 のディーゼルエンジンのサウンド開発⁽²⁾ の考え方を基盤に、ガソリンエンジンのトルク特性と変速パターンに合わせて、トルクに対する音の変化と干渉音を加えることで、加速度の違いを音でコントロールして“高揚感”につなげる。

また②のアクセル一定で加速するシーンでは、車速と回転上昇に対して途切れなく加速感が続く伸びの良さを、周波数上昇の変化で感じていただき、“伸び感”のあるエンジンサウンドを目指した。

これら干渉音による“高揚感”と、回転上昇に対する周波数の変化による“伸び感”が移り変わることで、北米環境において、アクセルを踏み込むほどに意のままの走りとも一致したエンジンサウンドを目指した。

3. 目標設定

①のシーンでは、トルクに対するリニアな音の変化と、トルクに対する干渉音の変化の目標を定義し、②のシーンでは回転上昇を周波数上昇の変化の目標を定義した。

*1~7 NVH 性能開発部
NVH Performance Development Dept.

3.1 トルクに対するリニアな音の変化

ゆったりと一定の速度で走る場面では、アクセル操作に対してドライバーが直接感じるトルクの大きさは、音の大きさの変化で定義し、トルクに対してリニアな音の変化を定義した (Fig. 1)。

あるトルクに対して音圧が大きいと騒々しく、音圧が小さいとトルクを知覚できないため、適度な音圧レベルを定義し、その範囲の中でリニアな変化となる目標を設定した。

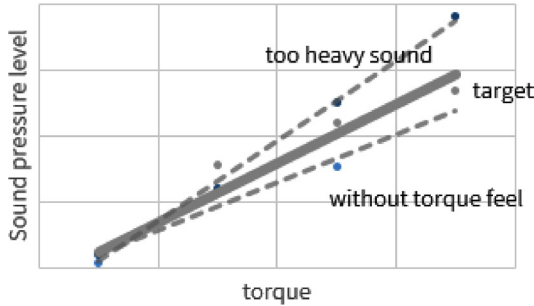


Fig. 1 The Target of Sound Pressure Level vs Torque

3.2 加速時に干渉音で感じる“高揚感”

高揚感は、上記に述べたトルクに対してリニアな音の変化に加えて、トルクに対して干渉音を非線形に変化させることで成立すると考えた。

人間の耳は、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 (Fig. 2)。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が分かる。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サウンドでは、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 (Fig. 3)。

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を変化させることで、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変化”と定義し、音色の変化をつけるために、低・中トルク域で干渉する音を非線形に変化させることとした (Fig. 4)。

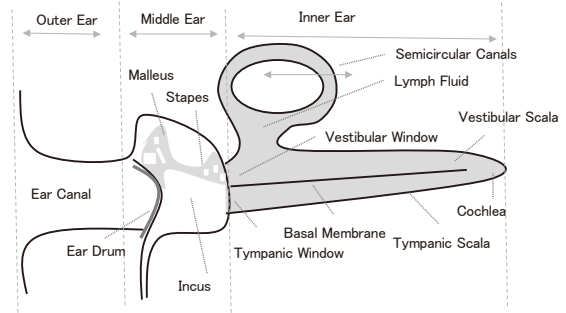


Fig. 2 Structure of the Ear

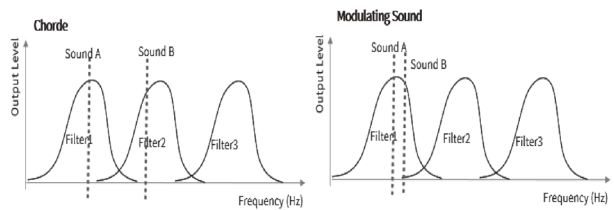


Fig. 3 Hearing Filter⁽³⁾

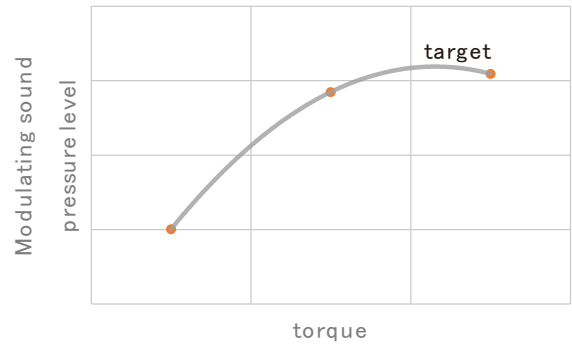


Fig. 4 The Target of Modulate SPL vs Torque

3.3 回転上昇とともに加速感のある“伸び感”

アクセル開度一定状態での加速度は、回転上昇とともに緩やかに減少していくが、回転や車速は上昇していくため、エンジンサウンドから「聞こえる周波数」を上げていくことで、実際には低下していく加速度を、あたかも加速度を維持しているかのように感じさせることで“伸び感”を実現できると考えた。

(1) “聞こえる周波数”の定義

加速中のエンジンサウンドは、多くの周波数で構成されている。この中で最大音圧は100Hz程度に相当する音となるが、エンジンサウンドとして人が感じる音の高さはもっと上の300~400Hz帯となる。この“人が感じる音の高さ”を指標化するために、最大音圧となる周波数の音と、エンジンサウンドとして感じ取れる最大周波数の音圧を線形に結び、基準線を作成した。この基準線から各周波数音の飛び出し量を算出して、飛び出し量最大となる周波数を“聞こえる周波数”と定義した (Fig. 5)。

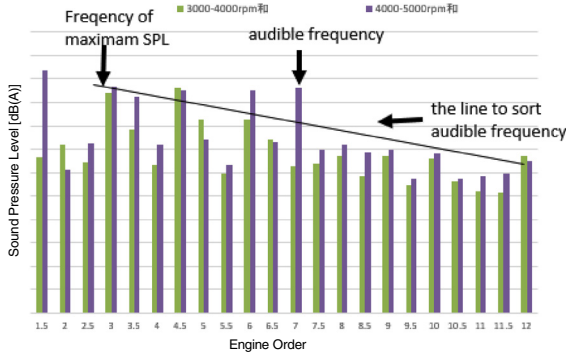


Fig. 5 Audible Frequency Line

(2) “伸び感”の定義

社内で走りの開発部門と共創し、アクセル開度一定の状態、回転数に対して加速度の仕様を3つ用意し、エンジンサウンドからも、回転上昇に対して聞こえる周波数の仕様を3つ用意した。走りは一定加速度からの乖離量を指標とし、エンジンサウンドは6気筒の基本次数であるエンジン回転に対して3倍に相当する周波数から持ち上げた周波数の変化分を指標とした。お互いの仕様を組み合わせて評価することで、ねらいの加速度が維持しているような加速感を実現する領域を定め、これが“伸び感を感じる領域”と定義した。合わせて、回転上昇の変化に対する聞こえる周波数の変化は、先行開発した6気筒ディーゼルエンジンを基準とし、高回転域において、聞こえる周波数の変化が下に凸に上昇変化するような領域を定義した (Fig. 6)。

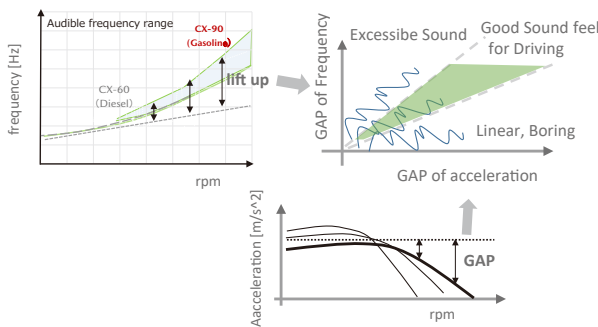


Fig. 6 Driving Feel with Audible Frequency and Acceleration

以上、トルクに対してリニアな音の変化と、干渉音の非線形な変化、及び回転に対して周波数上昇する音、これらの要件から、回転に対する各次数の音圧レベルを分配し、エンジン回転の1次～13次まで目標を設定した。

4. 具現化

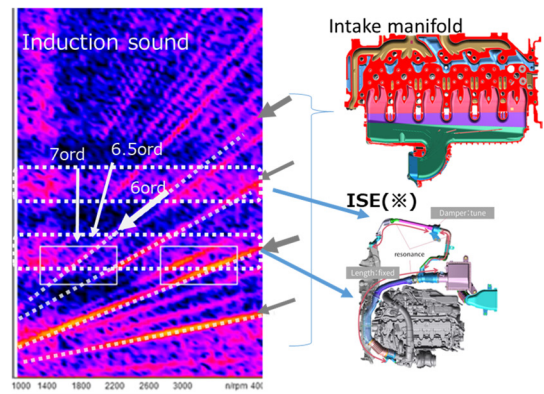
4.1 トルクに対するリニアな音の変化

トルクに対する音の大きさをリニアな変化にするために、回転に対する基本次数は、エンジン振動、トランスミッション振動、リアデフ振動をトルクに対してリニア

に伝わるように、伝達部品と車体を造り込んだ。実現にあたり、CX-60からの変化点、かつ寄与の高いリア周りの駆動系部品と車体パネルの最適化を行うことで、CX-60と同特性となるようにして実現した。

4.2 加速時に干渉音で感じる“高揚感”

トルクに対する干渉音の変化を非線形にするために、直列6気筒エンジンのレイアウトと組み合わせたマツダ独自となる長い吸気管長による周波数の特徴 (250Hz)を活かし、トルク変化の大きい回転数帯で、エンジン回転6次を基軸に、干渉する次数となる6.5次と7次を励起させるようにユニット特性を作り込んだ。よりダイレクトにドライバーに届けるために、吸気音を車室内に直接届ける吸気 ISE (Induction Sound Enhancer) を活用することで、ベースとなる干渉音を造りこんだ (Fig. 7)。



※ISE : Induction Sound Enhancer

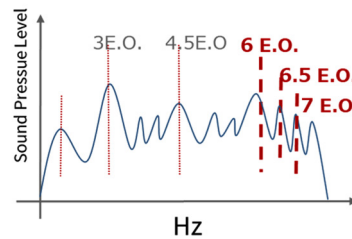


Fig. 7 Inline 6 Engine Characteristic

また、6気筒エンジンの回転基本次数と干渉する0.5倍となる次数の周波数バランスを確認し、吸気音や機械特性では実現できない領域は、オーディオスピーカーからも補完することで干渉音を造りこみ、小さなアクセル操作でも精密に呼応し、トルクに対して非線形に変化する干渉音を実現させた。

4.3 回転上昇とともに加速感のある“伸び感”

回転上昇に対する周波数上昇を作るために、6気筒エンジンの回転基本次数となる3次を基軸に、その倍音成分となる6次、9次、12次の周波数バランスを実現するため、エンジン振動と吸気音をベースに低-中周波数域の音を造り込み、聞こえる周波数で定義した次数成分を

確認した。伸び感で注力した高回転の間こえる周波数は、ハードで実現するためには、環境騒音や低回転とのバランスが難しいため、高次の回転次数の音は、オーディオから補完し、回転上昇とともに聞こえる周波数が上昇変化することで目標を実現した (Fig. 8)。

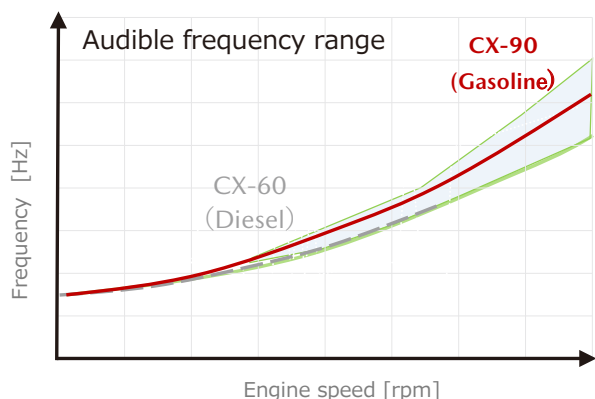


Fig. 8 The Target of Audible Frequency Range

以上、CX-90 は、北米環境での日常の追い越しや、再加速するシーンにおいて、トルクに応じた干渉音により“高揚感”を感じ、回転上昇に伴う加速感の続く伸びの良さを、周波数上昇の変化で感じていただき、アクセルを踏み込むほどに意のままの走り的一致したエンジンサウンドを実現した (Fig. 9)。

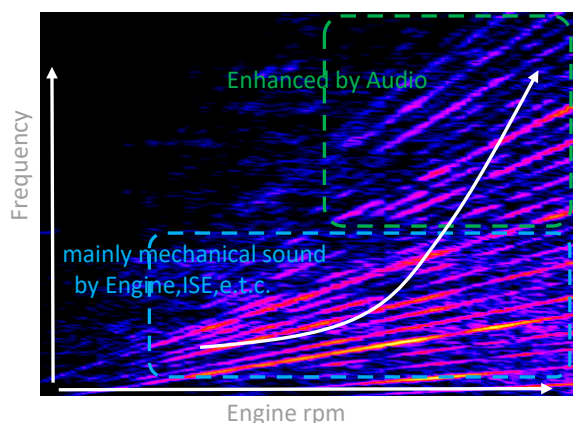


Fig. 9 CX-90 Engine Sound While Accelerating

5. おわりに

CX-90 のエンジンサウンド開発について紹介した。読者の皆様にもぜひ CX-90 を運転いただき、6 気筒ガソリンターボエンジンのサウンドに共感していただけると、開発陣として、この上ない喜びである。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、お客様に喜んでいただける商品づくりと、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) 住田ほか：CX-60 の NVH 開発について, [マツダ技報, No.39, pp.78-82 \(2022\)](#)
- (3) 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 ■



服部 之総



桂川 貴弥



大槻 修平



河越 三郎



三宅 昭範



高崎 神風



神谷 稔

特集：MAZDA CX-90

06

CX-90 の衝突安全性能 Passive Safety of CX-90

木戸 啓人^{*1} 本地 宏昌^{*2} 澤田 庸介^{*3} 古賀 俊之^{*4}
Hiroto Kido Hiromasa Honji Yosuke Sawada Toshiyuki Koga
中桐 涼平^{*5} 松下 幸治^{*6} 安藤 亮^{*7} 芦浦 礼子^{*8}
Ryohei Nakagiri Kouji Matsushita Ryo Ando Reiko Yoshiura

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に取り組んでいる。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。

CX-90 では、新しい後輪駆動方式をベースとしたラージ商品群で最大サイズの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として、高いエネルギー吸収効率を備えた車体構造、相手車保護性能及び歩行者保護性能を進化させ、米国の衝突安全アセスメントである US NCAP や IIHS でもトップレベルの性能評価を得ることを目標として開発した。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車両構造技術を紹介する。

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-90 combines a new rear-wheel drive-based maximum-sized platform (in Large line-up) with the crash safety technology that is back-cast from the analysis of real-world accident/injury forms, at a high level. It has achieved evolution of a body structure equipped with high energy absorption rate, protection of the other vehicle and protection of pedestrians. The car aims to get the top rating in the Insurance Institute for Highway Safety (IIHS) and New Car Assessment Program (NCAP). This report introduces the technologies incorporated in typical crash modes: frontal, side, and rear collision, and pedestrian protection.

Key words : Passive safety, MBD, Skyactiv-Vehicle Architecture, Multi-load path, Energy absorption, Light weight, IIHS, NCAP

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の研究を重ね、その成果を開発の軸としている。

CX-90 では、進化した魂動デザインや意のままに操る

*1～8 衝突性能開発部
Crash Safety Development Dept.

楽しさの実現、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車両大型化による重量の増加に対応するため、高強度材料への置換に加え、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、軽量化と高い衝突安全性能の両立に取り組んだ。

2. 前面衝突性能開発

2.1 ラージ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、乗員の傷害軽減を図るのが一般的だが、CX-90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ャブルゾーンの確保や、PHEVによる重量増加、高電圧保護などに、多くの課題があった。CX-90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を達成した。その結果、CX-90は3列シートの設定、ボディの全長、全幅、全高の拡大によりCX-60から200kg以上の車両重量の増加にもかかわらず、CX-60と同じショートオーバーハングデザイン(852mm)を達成した。

(1) マルチロードパス (Multi- Load Pass) による荷重分散

CX-90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、前面衝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)・ローア系列(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、各系列の入力を客室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。

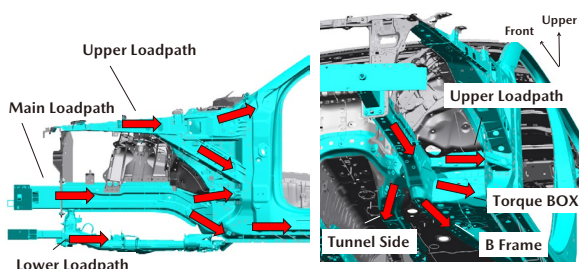


Fig. 1 Multi-Load-Path Structure for Frontal Crash

(2) 高エネルギー吸収構造

CX-90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からBフレーム、ローアロードパスのクラッシュボックスからサスクロスなど、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)。

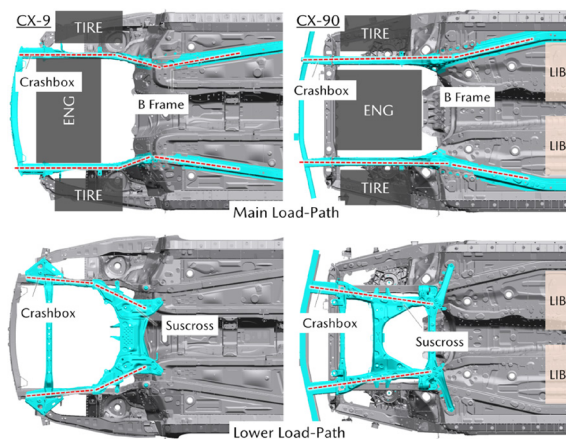


Fig. 2 Comparison of Body Structure & Suscross

特に、フロントフレーム部では長軸を安定的に軸圧縮変形させる課題に対し、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むこと(Fig. 3)で達成し、エネルギー吸収効率を倍増させながら省スペースでのエネルギー吸収効率と軽量化を両立させた。これらの技術により、CX-90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た。

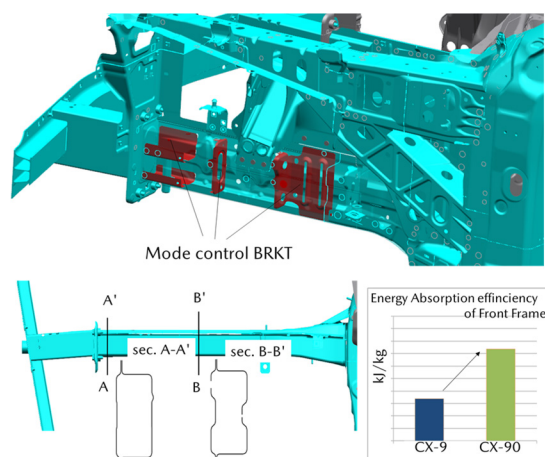


Fig. 3 Structure of Straight Frame

また、CX-90はCX-60からの車両重量の増加によりエネルギー吸収量を更に高める必要があるが、CAEによる最適化スタディにより、フロントフレームやサスクロスの必要最小限の強化で対応し、フロントフロア、サイドシルなどにおいて、CX-60と部品共通化を最大化してコスト低減にも貢献した。

(3) 骨格部材の高強度化

前面衝突時の客室エリアの変形抑制と軽量化のため、Aピラーに冷延1470MPa級の超高強度鋼板を、ヒンジピラーとダッシュクロスメンバー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)。

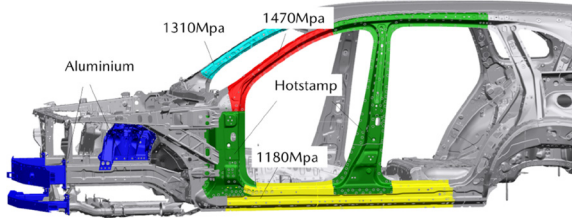


Fig. 4 Body Material of High Tensile

2.2 スモールオーバーラップ前面衝突モードにおけるグランスオフ挙動の実現

スモールオーバーラップ前面衝突とは、相手車もしくは障害物と少ないラップ量で衝突するモードであり、アメリカの市場事故の約20%⁽¹⁾の割合を占めている。このモードはフレームなどの骨格部材で効果的に衝突エネルギーを吸収できず、客室が大変形する傾向にあり、乗員死亡重傷者軽減のためにはこのモードへの対応が重要であり、IIHSはこのスモールオーバーラップ前面衝突を模した評価を採用している。

CX-90では、スモールオーバーラップ前面衝突と軽量化との両立化のために、以下のように車両挙動に注目して構造化を図った。Fig. 5に示すように、キャビンへの入力が大きくキャビン強度を高くする必要のあるエンゲージ挙動 (バリアに車両が引っ掛かる挙動) に対して、車両を横方向に動かしキャビンへの前後方向入力が抑えられ車体減速度が小さくできる傾向のあるグランスオフ挙動 (バリアに対して車両がすれ違う挙動) を実現して安全性の向上と軽量化の両立を図った。

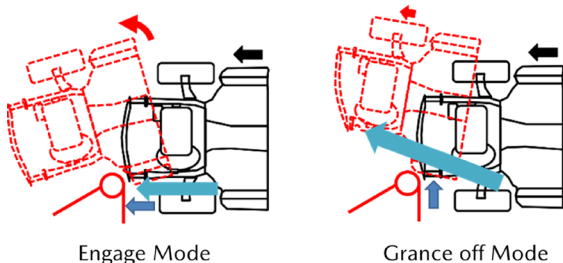


Fig. 5 Engage and Granceoff Mode

具体的には衝突初期から左右方向に荷重を発生、持続させるため、①ペリメータビームを左右方向に延長し、衝突時の荷重をペリメータビームからサスクロスメンバー経由で左右方向へ伝達 (Fig. 6 Part1) と、②サスクロスメンバー後方の左右間をトランスバースメンバーで

つなぎ、アルミ鍛造ロアーアームからサスクロスメンバー経由で左右方向へ荷重伝達 (Fig. 6 Part2) を行い、衝突初期から車両を横にずらす入力を継続的に与えてグランスオフ挙動を実現した。

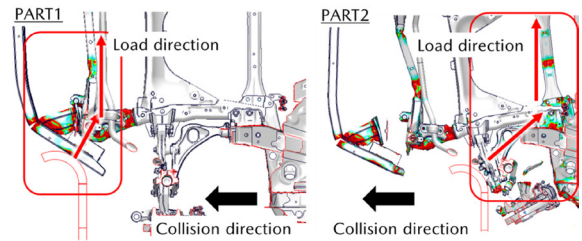
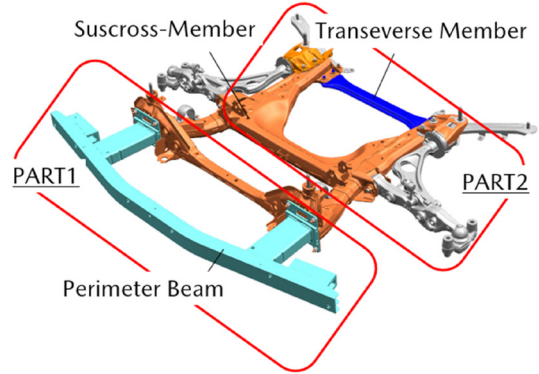


Fig. 6 Suspension Deformation Mode of Smalloverlap

3. 側面衝突性能開発

側面衝突は、客室の変形を抑えつつ、ドア外板から乗員までの狭い空間で、衝突エネルギーを吸収する必要がある。CX-90では、条件が強化されたIIHSの新しい側面衝突に対応することが課題となった (Fig. 7)。新プロトコルは、衝突エネルギーが従来比約80%増となり、車体変形を抑える中心的な役割を果たしてきたBピラーの高強度化に加え、ドア内のインパクトバーによるマルチロードパス構造を採用することで、高い側面衝突安全性能を実現した。

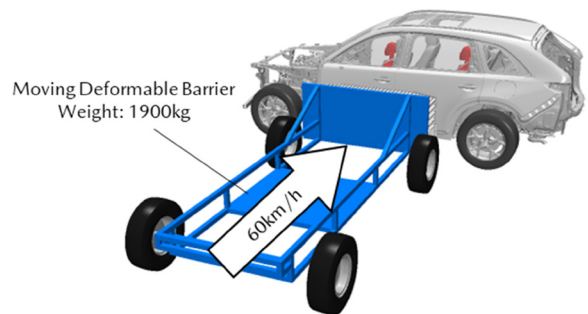


Fig. 7 Side Impact Moving Deformable Barrier for IIHS

Bピラーは、Fig. 8に示すように乗員の生存空間よりも下部に屈曲点を設定しており、これより下側を変形させることで、衝突エネルギーを吸収し、乗員生存空間を確

保する役割をもっている。CX-90では、Bピラーに材質や板厚が異なる鋼板をテーラードブランクで組み合わせたホットスタンプ材を採用することで、高強度化と衝突エネルギーの吸収を最適化した (Fig. 9)。更に、Bピラー上部は、応力集中する稜線部分を隙間なくレインフォースメントで補強することにより、効率的に曲げ耐力を向上させた (Fig. 10)。これらの構造により、単位質量当たりのエネルギー吸収量を従来比で 50%向上させることができた (Fig. 11)。

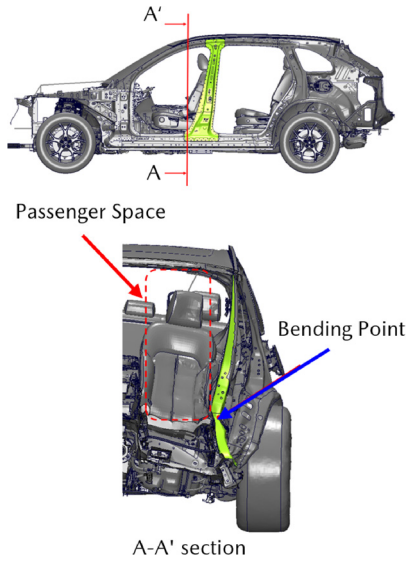


Fig. 8 B-pillar Deformation Mode

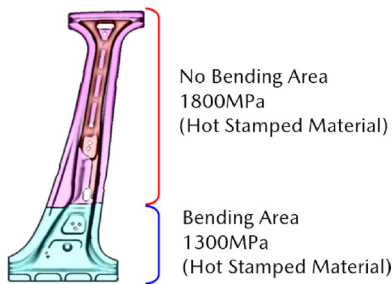


Fig. 9 B-pillar Material

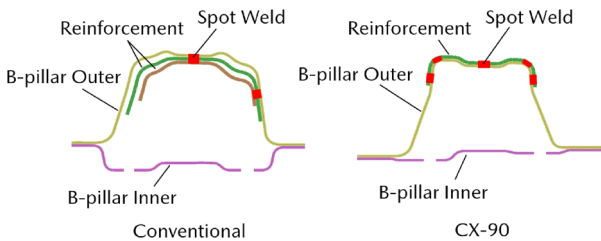


Fig. 10 Cross Section of B-pillar

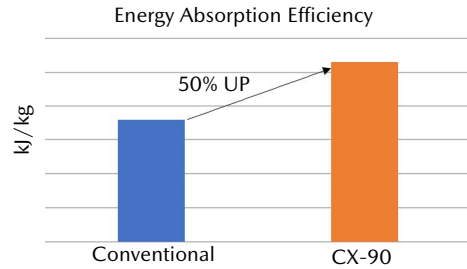
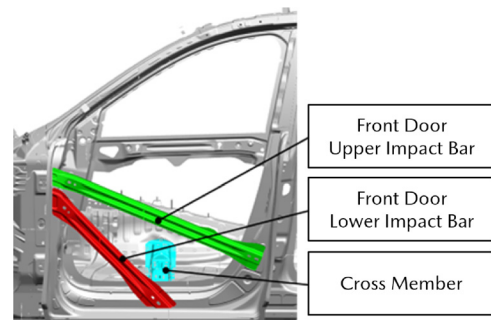


Fig. 11 Energy Absorption Efficiency of B-pillar

ドア内部のインパクトバーは、ドアの変形を抑制し、ドアから車体へのロードパスとしての役割がある。CX-90では、フロントドアに従来から設置している上部に加え、下部にもインパクトバーを設置した (Fig. 12)。下部のインパクトバーは、衝撃荷重をドアから強固なヒンジピラーやクロスメンバーへ直接伝達するロードパスとなるので、ドアの変形抑制と B ピラーの負担を軽減することができた。



Vehicle Side View

Fig. 12 Front Door Impact Bar

4. 後面衝突性能開発

後面衝突では、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、客室の変形を抑え、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-90ではCX-60で採用した軸圧縮により高いエネルギー吸収をするテーパ形状リアフレーム構造を踏襲した。また、CX-60に対してリアフレームが 108mm 長くなることでモーメントによる曲げ変形が起りやすくなる変化に対し、リアフレームの板厚と材質を調整して耐モーメント性を上げている。これにより、CX-60と同様にリアフレームをエネルギー吸収効率が低い軸圧縮を実現させ、従来車からリアフレームの板厚を下げながら、約 2 倍のエネルギー吸収を可能とした (Fig. 13, 14)。

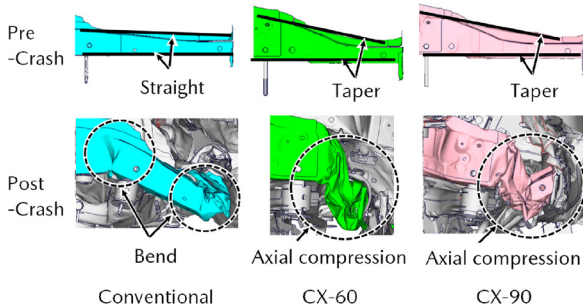


Fig. 13 Crash Behavior of Rear Frame

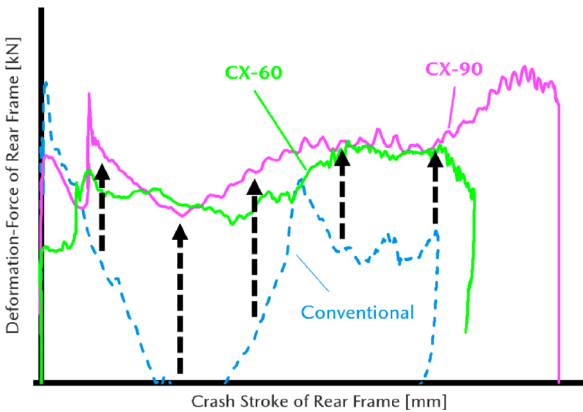


Fig. 14 Energy Absorption Performance of Rear Frame

5. 歩行者保護性能開発

NHTSA公表データ⁽²⁾によれば、米国では2021年で年間7388件の歩行者死亡事故が発生している。CX-90は、各国法規やNCAPの基準を基に、歩行者の頭部・腰部・脚部を保護するボンネット・サポートブラケット・グリルブラケット⁽³⁾などCX-60と共通の傷害軽減構造を採用しつつ、更に車幅の拡幅に伴う衝突リスク範囲の拡大に対応する傷害軽減構造を採用した。

5.1 頭部保護のためのフェンダー内部構造

CX-90は、CX-60からフェンダーを拡幅したデザインのため、その上面に頭部が衝突するケースまで想定し、フェンダーをクラッシュャブル化するS字型フェンダーブラケットを採用した。

フェンダーは、洗車やワックスがけシーンでの手押し・手つきによる変形を防止するために、従来構造では高強度のフェンダーブラケットを介してボディに締結しているが、歩行者が衝突した場合は、フェンダーブラケットが突っ張り、変形が不十分なため、頭部への衝撃が大きく、背反特性である (Fig. 15)。

そこで、手押し・手つき荷重には耐え、頭部衝突時の一定値を超える荷重でのみ変形するS字断面を、フェンダーブラケット形状に織り込むことで両立を実現した。具体的には、角部を設けず大きな曲率半径からなる湾曲断面とし、湾曲部を複数設定した。これにより、手押

し・手つきの入力では、応力集中を回避し変形を抑制できる一方で、一定以上の荷重が加わると、湾曲部が変形を誘発して潰れ、頭部の傷害軽減も可能とした (Fig. 16)。

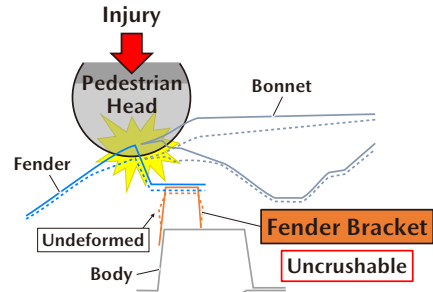


Fig. 15 Head Impact at Conventional Fender Bracket

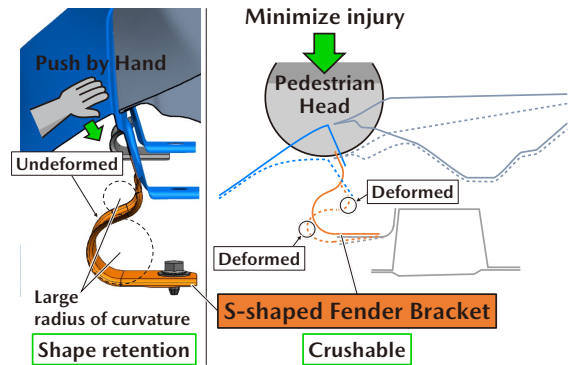


Fig. 16 S-shaped Fender Bracket of CX-90

5.2 腰部保護のためのヘッドランプ周辺構造

CX-90は、腰部とヘッドランプの衝突回避のために、先当たりで衝突エネルギーを吸収するクラッシュボックスを採用した。

一般にヘッドランプは、多機能で重く、その支持に高い取り付け強度を要するため、歩行者に衝突した場合に腰部の傷害リスクが高い。傷害軽減には、腰部と接触しない車両後方へのヘッドランプ配置が有効だが、SUVらしい力強さとシグネチャーウイング発光部との連続性を表現するデザイン思想と背反する。

そこで、デザイン思想との両立のために、ヘッドランプ前方の短いスペースの中で衝突エネルギー吸収を完了させることをねらいとして、従来構造のバンパーフェイスのみでは不足するエネルギー吸収量を補完するために、バンパーフェイスの内部にクラッシュボックスを設定した (Fig. 17, 18)。これにより、Fig. 19に示すように、腰部に傷害を与えない荷重以下かつエネルギー吸収効率の高い矩形波特性を得ることができ、デザイン思想のヘッドランプ配置で腰部の傷害軽減を実現できた。

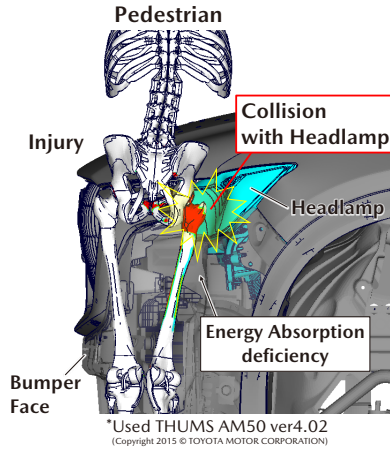


Fig. 17 Pelvis Injury by Headlamp Load

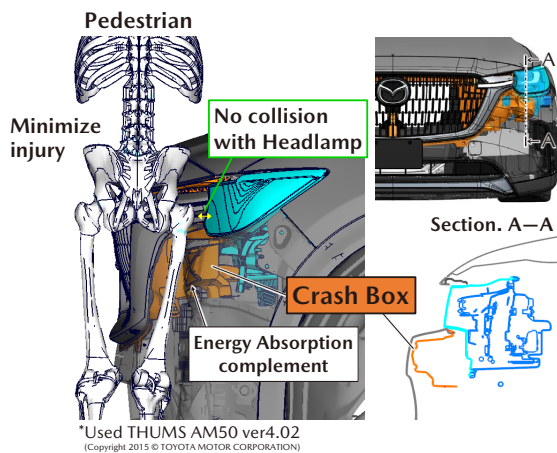


Fig. 18 Crash Box for Pelvis Load Alleviation of CX-90

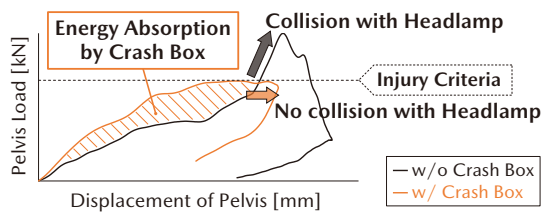


Fig. 19 Energy Absorption Performance and Pelvis Load

DOT HS 813458, pp.1-16 (2023)

(3) 辻大介ほか：CX-60の衝突安全性能，[マツダ技報](#)，[No.39, pp.96-101 \(2022\)](#)

■ 著 者 ■



木戸 啓人



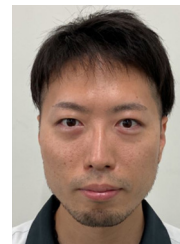
本地 宏昌



澤田 庸介



古賀 俊之



中桐 涼平



松下 幸治



安藤 亮



芦浦 礼子

6. おわりに

本稿では、CX-90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、車に対するニー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取り組みに基づき、今後も、より高い衝突安全性能を実現する技術開発と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) NASS-CDS (National Automotive Sampling System-Crashworthiness Data System), (2017-2021)
- (2) NHTSA: Pedestrians Traffic Safety Facts 2021 Data,

特集：MAZDA CX-90

07

マツダ独自の塗装技術「匠塗」のさらなる進化 Further Evolution of Mazda's Unique Paint Engineering “TAKUMI-NURI”

寶山 修士^{*1} 三村 夏海^{*2} 岡本 圭一^{*3}
Shuji Hozan Natsumi Mimura Keiichi Okamoto
山根 貴和^{*4} 野中 隆治^{*5}
Takakazu Yamane Ryuji Nonaka

要約

車両製造工程の中でも多くのCO₂を排出している塗装工程では、一貫して環境への取り組みを継続しており、更なる進化に向けた工程革新や生産技術開発に取り組んでいる。その中でマツダは「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カラーを追求してきた。職人が丁寧に手塗りしたような美しい塗装を量産ラインで実現する「匠塗」は、意匠性と環境性能を両立させながら、これまで多くの技術的な課題に取り組み、その進化を続けてきた。今回、「匠塗」カラー第1弾のソウルレッドプレミアムメタリックの生産開始から10周年の節目を迎えるにあたり、ブランドの熟成・深化をメッセージに込めた新たな「匠塗」カラーであるアーティザンレッドプレミアムメタリックを開発した。

本稿では、10年という年月の中で進化してきた匠塗技術の軌跡を振り返ると同時に、これまでの「匠塗」カラー開発で培ってきた技術を織り込んだアーティザンレッドプレミアムメタリックの取り組みについて紹介する。

Abstract

In our painting process in which a lot of CO₂ is emitted, we are making a challenge for process innovation and production engineering development to further accelerate environmental activities in the vehicle manufacturing process. Based on the idea that “Color is a part of design”, Mazda has been pursuing colors to make the KODO Design look even more beautiful. TAKUMI-NURI which realizes beautiful painting that looks like craftsman's meticulous hand painting in production line has continued to evolve, while making a lot of engineering efforts combining design and environmental performance. To celebrate the 10th anniversary milestone from the production start of the first TAKUMI-NURI color, “Soul Red Premium Metallic,” we developed “Artisan Red Premium Metallic” which is a new TAKUMI-NURI color that conveys a message as mature and deepened Mazda brand.

This article looks back on the TAKUMI-NURI technologies that have been evolving over the decade and introduces challenges in the “Artisan Red Premium Metallic” development that reflects skills we have cultivated through the TAKUMI-NURI color development to date.

Key words : Materials, Paint, Process, Design, Color, Development, Artisan Red Premium Metallic

1. はじめに

マツダは「カラーも造形の一部」という考え方に基づき、魂動デザインの造形を光の陰影によって際立たせる「匠塗 (TAKUMI-NURI)」カラーを開発し、お客様にお届けしてきた。2012年にアテンザへ導入した「ソウルレッドプレミアムメタリック」⁽¹⁾を皮切りに、「マシーング

レープレミアムメタリック」, 「ソウルレッドクリスタルメタリック」⁽²⁾, 「ロジウムホワイトプレミアムメタリック」⁽³⁾の量産を経て、匠塗10周年を迎えた2022年、新たな匠塗カラーである「アーティザンレッドプレミアムメタリック」を開発し、MAZDA 6へ導入した。続く2023年にCX-90へ導入した (Fig. 1)。

CX-90のデザインは、「引き算の美学」によるシンブ

*1 車両技術部
Painting, Trim & Final Assembly Engineering Dept.

*3 デザイン本部
Design Div.

*2,5 ボデー開発部
Body Development Dept.

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

ルな造形と、ダイナミックかつ堂々としたプロポーションが実現されており、深みと濃厚さを演出するアーティザンレッドプレミアムメタリックによって、この造形の強さと美しさを際立たせている。

アーティザンレッドプレミアムメタリックは、これまでの匠塗カラーの開発で培ってきた多くの技術が織り込まれており、マツダが歴代こだわってきた赤の世界観の幅を広げるべく開発されたカラーである。



Fig. 1 Artisan Red Premium Metallic

2. マツダの塗装の取り組み

自動車塗装工程は、電着・シーラー・中塗・上塗などの多様な材料を塗布する塗装ブースと、それらの塗膜を硬化させる乾燥炉で構成される。このため塗装工程では、塗料に含まれるシンナーなどの揮発性有機化合物（以下、VOC）と、乾燥炉などの塗装設備で多くのエネルギーを消費することによるCO₂を排出しており、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いる。塗装工程の環境対策は非常に重要な課題であり、継続的な取り組みを行っている。

マツダでは2002年に、中塗塗装ブースを上塗塗装ブースに集約し中塗乾燥炉を廃止したスリーウェットオン塗装を開発、導入した。更に、2009年には中塗工程自体を廃止し、VOCとCO₂を同時に削減可能とした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、導入した（Fig. 2）。アクアテック塗装における中塗工程の廃止は、中塗が担っていた耐チッピ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・機能集約することで実現した⁽⁴⁾。このように各層ごとの機能を定義し、材料や工程を設計することで相反をブレイクスルーする塗膜設計技術を確立してきた。2012年以降はその技術をカラー開発に応用し、匠塗技術として上質なカラーを提供してきた。

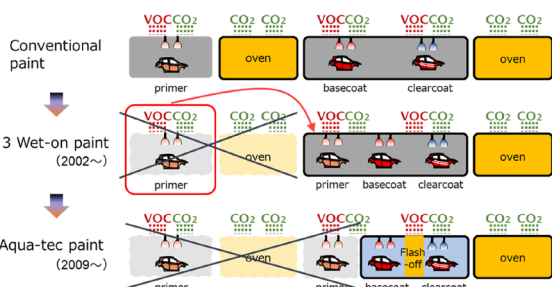


Fig. 2 Process Integration of Topcoat

3. マツダ独自の塗装技術「匠塗」

匠塗とは、カラーで造形を際立たせるため陰影感にこだわり、職人が丁寧に手塗りしたような美しい塗装を量産ラインで実現する、マツダ独自の塗装技術である。発色や質感を高める場合、塗膜層を増やしていく手法が一般的であるが、多くの塗料と工程が必要となり環境性能が低下する。これに対しマツダでは、意匠性と環境性能を両立させながら技術を積み重ねていくビルディングブロックの考え方を基盤とし（Fig. 3）、塗膜数を増やすことなく上質なカラーを作り出すことにこだわっている。これまでの匠塗カラーの意匠のねらいと、意匠を実現させるための取り組みについて振り返る。

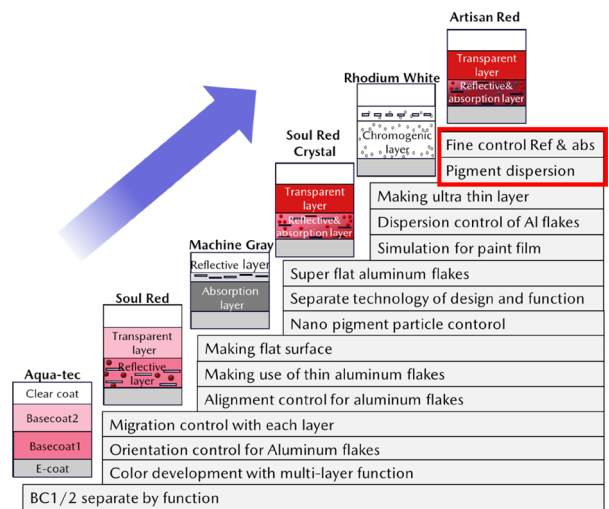


Fig. 3 Building Block of Sophisticated Color

3.1 ソウルレッドプレミアムメタリック

ソウルレッドプレミアムメタリックは、「内から発せられたような鮮やかな赤」をテーマとし、“ハイライトの鮮やかさ”と“深み”の両立を目指して開発した。ここで、“深み”とは陰影感のことであり、正反射付近の観察角度（ハイライト部）では光の反射が強く鮮やかな赤を感じるが、それ以外の観察角度（シェード部）では光の反射がほとんどなく暗く感じることであり（Fig. 4）。

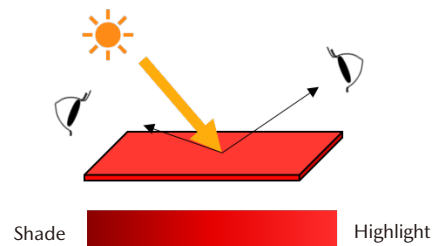


Fig. 4 Changing Light Intension

一般的なメタリックカラーのベースコート塗膜は、顔料やアルミフレークを含んだ1層の発色反射層で構成されているが（Fig. 5(a)）、鮮やかさと陰影感を出すために

顔料やアルミフレークの総量を増やすと、耐チップング性や耐候性を担う樹脂が相対的に減るため塗膜品質が低下する。また、顔料に対してアルミフレークを増やすと鮮やかさは失われていき、アルミフレークに対して顔料を増やすと陰影感は失われるという相反関係に陥る。そのため、1層のベースコート塗膜で、ハイライトの鮮やかさと陰影感を両立させるのは困難であった。

そこで、アクアテック塗装で培った塗膜の機能配分設計技術を元に塗膜構造を見直し、発色機能と反射機能を2層に分離することでこれを解決した。具体的には、第1ベースコート層はハイライトでの強い反射と強い陰影感が出る高輝度アルミフレークを含んだ反射層、第2ベースコート層は鮮やかな赤を発色する高彩度赤顔料を含んだ半透明な発色透過層とした (Fig. 5(b))。入射した光は第1ベースコート層の高輝度アルミフレークで反射され、反射した光は第2ベースコート層の透過層を通過することで、ハイライトでの鮮やかな赤の発色と、シェードでの陰影感が実現できた。

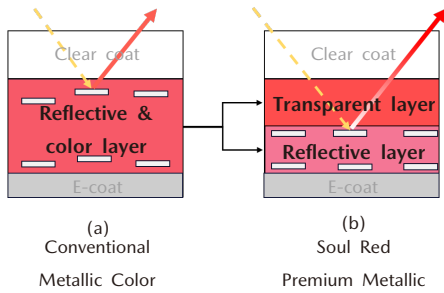


Fig. 5 Film Structure

また、圧倒的な高意匠を具現化した匠塗カラーの開発においては、デザイン意図をそのまま実用塗膜に変換するため、デザイン意図をエンジニアが理解し、物理特性へ変換、塗膜設計を行い、その実現のための技術開発を同時に行うというプロセス革新を行った。このプロセス革新が匠塗の実現に対し、技術的な側面に加えて極めて重要なファクターであり、これは以降の匠塗カラー開発においても一貫して継続している。

3.2 マシーングレー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は、「機械が放つ精緻な美しさの追求」をテーマとし、「緻密な金属質感」と「深み」の両立を目指し開発した。「緻密な金属質感」を、面で光る潤いのある鉄の黒光り感ととらえ、必要な反射特性と表面構造に落とし込み、塗膜構造を決定した。具体的には、ソウルレッドと同様にベースコート層は2層に機能分離した上、金属表面の微細な凹凸感をアルミフレークの水平な並びと段差で表現し (Fig. 6)、黒光り感をアルミフレークの間隙から漆黒顔料を投入した吸収層 (黒色カラー層) が覗くことで表現する塗膜構造とした (Fig. 7)。

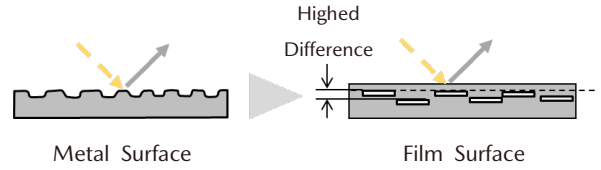


Fig. 6 Align Aluminum Flakes

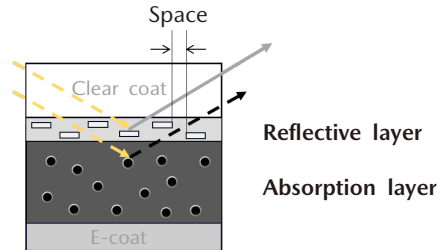


Fig. 7 Film Structure of Machine Gray Premium Metallic

課題は、アルミフレークをねらったとおりに制御することであった。アルミフレークの水平な並びを制御するために、下地となる吸収層の塗料粘性や塗料粒子サイズを最適化し、平滑さを向上させた。また、アルミフレークの段差及び隙間を制御するために、塗膜が乾燥工程で一気に収縮するよう体積収縮率を向上させた塗料を開発した (Fig. 8)。

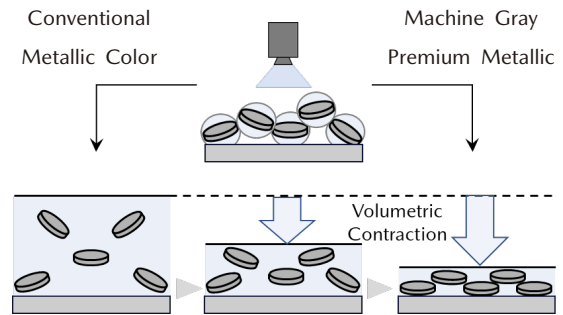


Fig. 8 Volumetric Contraction Effect

3.3 ソウルレッドクリスタルメタリック

ソウルレッドクリスタルメタリックは、ソウルレッドプレミアムメタリックから「鮮やかさ」と「深み」の更なる進化を追求し開発した。ねらいの光学特性を実現する塗膜構造はソウルレッドプレミアム、マシーングレーで培った反射層と吸収層の機能配分を見直し、再配置した構造となっている (Fig. 9)。

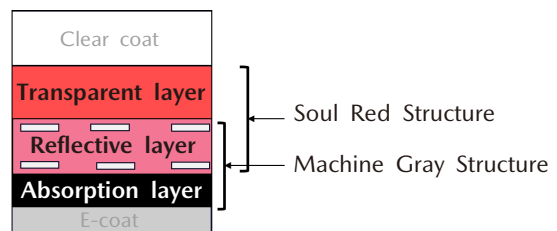


Fig. 9 Design of Film Structure

ここでの課題は2つあり、(1)“透明感ある鮮やかな赤”を実現する透過波長特性、(2)“更なる深み”を実現する反射特性である。(1)に対しては、既存の赤顔料の組み合わせでは実現が難しく、(2)に対しても従来のアルミフレークではシャープな反射強度が得られない上、単純にソウルレッドとマシーングレーの塗膜構造を重ね合わせたとしてもベースコート塗膜が透過層、反射層、吸収層の3層構造となり塗膜数が増えてしまう。

(1)の課題に対し、透過層の赤顔料を改良することで解決した。具体的には、赤顔料をナノサイズまで小さくし顔料表面で乱反射する光を抑え、ピュアな赤の波長のみを反射する顔料を新たに開発した。

(2)の課題に対し、アルミフレークの改良と、反射層と吸収層の機能を集約することで解決した。まずアルミフレークについては、従来よりも表面の平滑性を向上させ、よりシャープな反射強度をもつ高輝度アルミフレークを開発した。次に塗膜層の集約については、アルミフレークの反射を阻害することなく光を吸収する光吸収フレークを新規に開発し、反射層に投入した。

これによりハイライトでの“透明感ある鮮やかな赤”と、シェードでの“深み”を実現した (Fig. 10)。このようにソウルレッドクリスタルメタリックの開発では、これまで培った機能分離・集約技術に加え、原料レベルの開発にも着手し技術を進化させた。

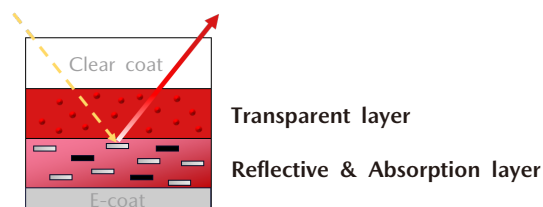


Fig. 10 Film Structure of Soul Red Crystal Metallic

3.4 ロジウムホワイト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は、「金属質感と白さの両立」をテーマとし、“白くなめらか”、“緻密な金属感”、“艶やかな潤い”の表現を目指し、デザイン意図を物理特性に落とし込み、塗膜構造を決定した (Fig. 11)。

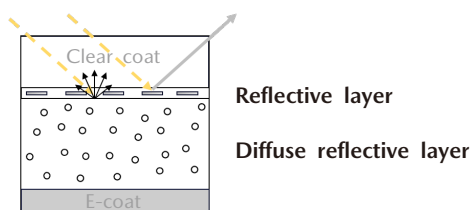


Fig. 11 Film Structure of Rhodium White Premium Metallic

第1ベースコート層は拡散反射層、第2ベースコート層はアルミフレークを含む極薄の反射層とする構想とし、第1ベースコート層の白色光をアルミフレークの間隙から反射させることで金属感と白さを両立させるねらいとした。

課題は、反射層中のアルミフレークの水平な並びと隙間の制御であり、アルミフレークを水平に並べるため、マシーングレーで用いた体積収縮制御技術を更に進化させた。具体的には、塗料中の固形分を少なくする塗料設計を行い、体積収縮率をマシーングレーの約4倍まで拡大することで反射層のアルミ配向制御を可能とした。また、アルミフレークの隙間を制御するため、アルミフレークの分散性を向上させた塗料を開発し、そのアルミフレークを均一に分布させた塗膜にする塗装工法を導入した。具体的には、塗料中のアルミフレークと樹脂や溶剤、添加剤などの成分との相互作用を最適化する塗料設計を行い、かつ塗装機によって噴霧された塗料中のアルミフレークが均一な分布になるよう塗装パラメーターを制御することによって、アルミフレークの分散性を向上した。均一に分布させる塗り方は、膜厚シミュレーション技術を活用し、塗装ロボットの動作設計を最適化することで解決した (Fig. 12)。

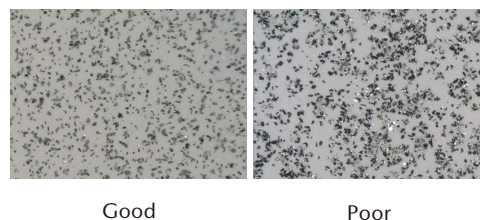


Fig. 12 Dispersivity of Aluminum Flakes

4. アーティザンレッドプレミアムメタリックの開発

4.1 デザイン意図

意匠と技術を進化させてきた匠塗カラーは誕生から10年の節目を迎え、更なるブランドの成熟・深化をメッセージに込め、より上質で成熟した大人の世界観を表現する赤として、匠塗カラー第4弾となるアーティザンレッドプレミアムメタリックを開発した。「最高峰の職人技で生み出される熟成されたワインのような赤」というテーマの基、ハイライトは“透明感が高く鮮やかな赤”に、シェードでは深く濃く変化する“濃厚さ”の両立を追求した。

4.2 物理特性変換と塗膜設計

“透明感の高い鮮やかな赤”と“濃厚さ”を両立させるため、匠塗開発プロセスに基づき、デザイン意図を物理特性に落とし込み、必要な3つの光学特性に変換した (Fig. 13)。

- ①高彩度な赤の反射特性
- ②ハイライトからシェードにかけての極端な反射の減衰
- ③金属のような反射強度分布

ここで①、②、③を定量的に評価するための指標を設けた。①と②の評価指標として、ハイライトとシェードの彩度変化を示す「彩度陰影感」という指標を作成した。

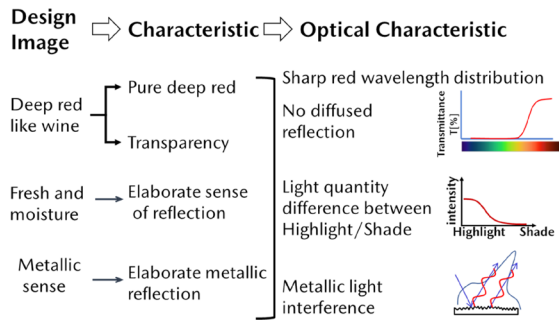


Fig. 13 Conversion to Optical Characteristics

③は面で光る緻密さに相当するため、粒子の大小を評価指標とした。

これらの光学特性を発現させる塗膜構造として、これまでの匠塗カラー開発で培った技術を織り込んだ。具体的には、ソウルレッドと同様、第1ベースコート層を反射吸収層、第2ベースコート層を発色透過層とした。①の特性を実現するため、ソウルレッドクリスタルで開発した高彩度赤顔料を発色透過層に投入し、②、③の特性を発現させるため、高輝度アルミフレーク、光吸収フレークを投入し、更に、分散性を向上させ黒さを増したマシーングレーの漆黒顔料を反射吸収層に投入した。また、反射吸収層でのアルミフレークの並びをより水平にするためロジウムホワイトのアルミフレーク分散技術を織り込み、緻密なアルミフレークの分布によって更なる陰影感を強調させた (Fig. 14)。

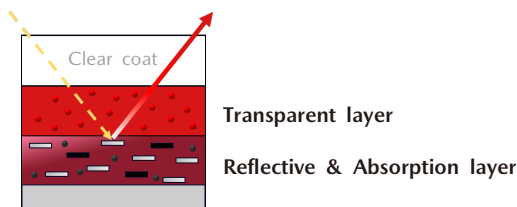


Fig. 14 Film Structure of Artisan Red Premium Metallic

4.3 課題への取り組み

主要技術課題は、上質感のある内板カラーの作り込みであった。内板カラーとは、ボンネットやドアなどの蓋物の裏面や、通常蓋物で隠れているボディー内板部のカラーのことである (Fig. 15(a))。マツダの上塗工程では、まず蓋物を開けて内板部を塗装し、次に、蓋物を閉め外板部を塗装している。そのため、外板塗装時に外板カラーが蓋物の隙間から内板部に入り込んでしまうと、部分的に異なるカラーになってしまう (Fig. 15(b))。

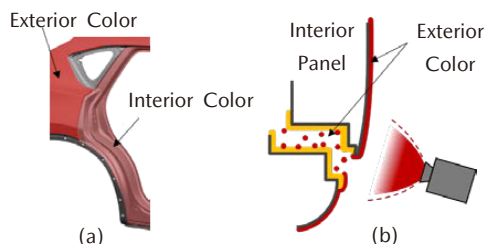


Fig. 15 Over Spray to Interior Panel

アーティザンレッドでは、入り込み部が明るくなり深みのある上質感が損なわれる懸念があった。そのため、塗装工程における内板部への入り込みを抑制する必要があった。

そこで、外板塗装時に発生しているオーバースプレー現象に着目した。塗装機でボディーを塗装する際、塗料を高速回転するお椀状のベルカップから空中に放出させることで細かく剪断し、そこで生成された塗料粒子をエアの流れによってボディーまで運び付着させている。この時、ボディーに衝突したエアは塗料粒子をボディー外へ運び去る気流を作ってしまう。この飛散をオーバースプレー (以下、O/S) と呼んでいる。O/Sは塗装ブースの空中を漂い付帯設備などに付着するものもあるが、一部はボディーの外板部や内板部に降りかかり意匠を損ねてしまう。そのため、内板部への入り込みを抑制するには、エアの気流を制御し、O/S量を最小限まで減らすことが必要と考えた。

エアによって発生するO/Sだが、単純にエア流量を下げた場合、O/S量は増加する。塗装機から吐出される塗料粒子には、高速回転するベルカップからの遠心力と、押し出されるエアによってボディーに対して直進方向の推進力が働き、釣鐘状の塗料パターンを形成している (Fig. 16(a))。エア流量を下げると直進性が失われ、相対的に遠心力の影響が強くなることでより広い釣鐘状になってしまう。広いパターン中に含まれる塗料粒子は、ボディーに付着する前に推進力が減衰することで拡散したり、ボディー表面の気流に流されてしまい、塗装範囲外へのO/S量が増えてしまう (Fig. 16(b))。

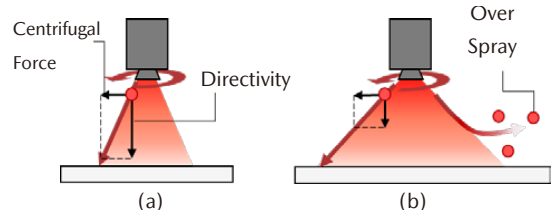


Fig. 16 Spray Pattern

ここで、その推進力が減衰してしまう前に効率よくボディーに塗料を届けるために、塗装機からボディーまでの距離である「塗装距離」を極限まで近づける方法が有効だと考えた。

O/Sが塗料粒子の運動量の減衰に起因することから、塗装距離を近づけることで減衰する前に、塗着させたいところに塗着させる発想で塗装条件を根本的に見直すことに取り組んだ (Fig. 17)。

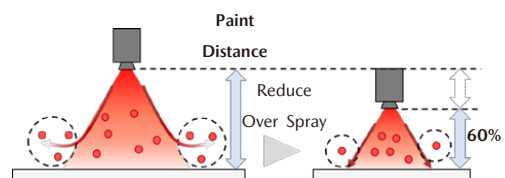


Fig. 17 Spray Particle Control

今回、塗装距離を従来の60%とし、かつエアフローを約15%下げて塗装する工法を導入した。これによりO/Sを減らし、内板部への入り込みを抑制することで、上質感のある内板カラーの作り込みを達成した (Fig. 18)。また、従来O/Sとして塗装範囲外に拡散していた塗料をボディに効率よく附着させることができたため、塗料の使用量を約10%削減でき、環境性能の向上にもつながった。



Fig. 18 Interior Panel Appearance in CX-90

5. 開発結果

アーティザンレッドプレミアムメタリックは、一般的なダークレッド色と比較して、粒子感が小さく、彩度陰影感が高くなっており、“透明感の高い鮮やかな赤”と“濃厚さ”を実現した (Fig. 19)。また、アーティザンレッドプレミアムメタリックはソウルレッドクリスタルメタリックに対し深みが増しており、赤の世界観を広げることができた (Fig. 20)。

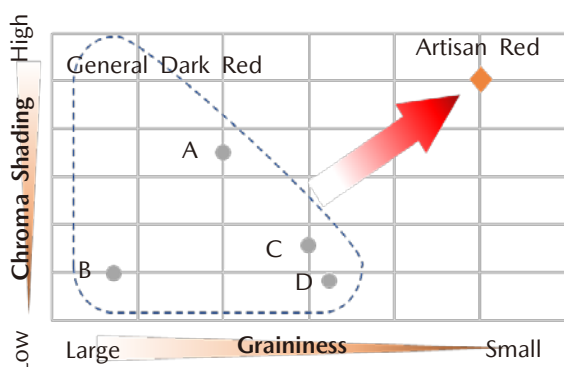
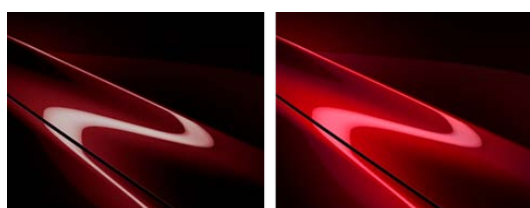


Fig. 19 Chroma Shading and Graininess



Artisan Red Soul Red Crystal

Fig. 20 Artisan Red Premium Metallic and Soul Red Crystal Metallic

6. おわりに

現在マツダでは塗装領域のCO₂排出の更なる削減に向けて、より低温で塗膜が硬化し、省エネを実現する塗装工法の開発などの環境対策を進めている。また塗装という工法に限定せず、最終的な塗装レスを目標にフィルムなどの工法にも取り組みを開始しており、直近ではMAZDA 2にてルーフィルムを量産を開始し上塗工程を2周させる2トーン塗装と比較して、CO₂排出量を半減した。このようにマツダでは、継続的な工程革新を行っており、今後も意匠性と環境性能を両立させるべく、より高度な課題を乗り越え、サステナビリティに貢献しながらお客様に更なる感動をお届けできるよう、関係各者が一丸となって本気のモノづくりを継続していく。最後に、アーティザンレッドプレミアムメタリックの開発・生産にご協力いただいた社内外全ての関係者の皆様に感謝の意を表したい。

参考文献

- (1) 中野さくらほか：「“SOUL RED”の開発」、[マツダ技報, No.30, pp.83-87 \(2012\)](#)
- (2) 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 \(2017\)](#)
- (3) 松田隆臣ほか：「ロジウムホワイトプレミアムメタリックの開発」、[マツダ技報, No.39, pp.139-144 \(2022\)](#)
- (4) 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 ■



寶山 修士



三村 夏海



岡本 圭一



山根 貴和



野中 隆治

特集：MAZDA CX-90

08

高品質パネル取得に向けた金型製作領域の取組

High-Quality Panel Initiatives in the Tooling Department

守田 雄一^{*1} 安楽 健次^{*2} 長澄 徹侍^{*3}
 Yuichi Morita Kenji Anraku Tetsuji Nagazumi
 村上 義典^{*4} 吉川 速人^{*5} 玉置 周平^{*6}
 Yoshinori Murakami Hayato Yoshikawa Shuhei Tamaki

要 約

まるで命が宿っているような、美しい表情を放つ、それが「魂動デザイン」。私たちはお客様に、このデザインが発する生命感から、愛馬と騎手のような特別な絆を感じていただきたいと考えている。ラージ商品群の第2弾となるCX-90ではクルマに光が当たった際のリフレクションによる連続した陰影表現を高品質な状態で実現することが必要となる。そこで本稿ではCX-90でプレミアム品質の量産化をプレス成形部品で実現するために、金型の製作とプレス成形工程の最適化を行った取組について紹介する。

Abstract

The “KODO Design” emits a beautiful expression as if it is filled with life. We want our customers to feel the special bond shared between a beloved horse and rider through the sense of life that this design emits. The CX-90, the second in our large product line, is expected to achieve a high-quality expression of continuous shading by reflection when the car is illuminated by light. This paper describes our efforts to optimize the die fabrication and stamping process to achieve premium quality mass production of press-formed parts for the CX-90.

Key words : Draw molding, Bending forming, Press forming CAE, 3D shape measurement, Quality engineering

1. はじめに

マツダは「魂動デザイン」により、見る人の心を揺さぶるような、命あるモノとしたクルマ造りを目指している。「魂動デザイン」を実現するために、開発から生産領域まで強いこだわりをもち、日々技術開発に取り組んでいる。私たちプレス金型製作部門も、「魂動デザイン」の忠実な再現に注力した取組を継続的に行っている。「魂動デザイン」は生き物が見せる一瞬の動きや美しさを究極の姿と考え、連続した面の流れやキャラクターラインにより、その生命感を表現したものである (Fig. 1)。ラージ商品群においては光のリフレクションによる連続した陰影表現をより高品質な状態で実現することが必要となる。そのためには滑らかに連続した面の流れをプレス成形で量産化する必要があり、要求される品質も高まっている。

デザイナーの意図とおりの製品パネルを量産するには、



Fig. 1 “KODO Design”

金型自体を高精度に造り、その金型形状とおりに成形する必要がある。そのため、プレス金型製作部門の課題は大きく分けると次の3点である。

- 1) 金型単体精度の向上 (機械加工精度, 手仕上げ精度)
- 2) 金型相対精度の向上 (組付け, 上下合わせ)
- 3) プレス成形時における金型の挙動制御

CX-90のプレミアム品質実現に向けて技術的な課題を洗い出した。1) 金型単体精度向上では、魂動削り (切削加工時の工具への負荷軽減による加工精度向上) / 魂動磨き (連続した面を崩さないための砥石や磨き手法の開

*1~6 ツーリング製作部
 Tool & Die Production Dept.

発)をはじめとする金型製作革新の取組により効果を出してきた。しかし、2) 金型相対精度と絞り成形、曲げ成形における3) 成形時の挙動制御技術を向上させる必要があり、これらの技術課題について、CX-90のサイドフレームで取り組んだ事例を紹介する。

2. 金型相対精度向上の取組

機械加工及び磨きの高品質化により、金型上下型単品での形状精度は向上してきた。一方で、金型は上下型一対で構成されるため、上下型構造部の誤差の累積が形状精度に影響する。そのため、金型組付け後の上下型の相対精度保証も単体精度同様に重要である。この上下型の相対精度を保証する際、デジタル上で金型の位置合わせを行い、実型での調整量を算出するベストフィットという手法を用いている。現物での確認、調整ではなくデジタル上で行うことで大幅な工数減を実現している⁽¹⁾。

ベストフィットでは、上型/下型をそれぞれ個別に計測し、その座標データをPCに取り込み、上下型の形状クリアランスが最適となる相対位置を算出する。この座標計測にこれまでは接触式3次元測定機を使用してきた。しかし、接触式3次元測定機は離散的な点測定であり、形状面の連続的な素性が把握できない (Fig. 2)。そのため、現場作業による切削調整が必要な箇所が生じ、高精度に仕上げた形状面を一部崩していた。よって、上下型の形状クリアランス精度のばらつきが発生しない金型合わせの手法に変える必要があった。

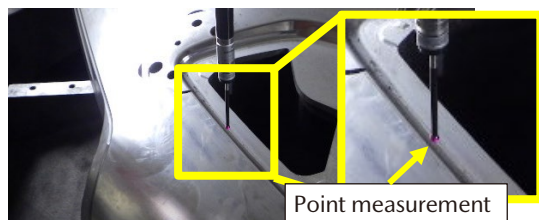


Fig. 2 DEA Measurement Issues

そこで非接触式3次元測定機を活用することにした。非接触式3次元測定機は形状面全体を連続して測定することが可能な一方で、撮影時の環境などの外乱により測定精度のばらつきが生じるため、魂動デザイン表現に求められる金型精度に対して測定精度が不足していた。上下型の相対位置を高精度に予測するためには、測定精度ばらつきを抑制し外乱に左右されない測定条件の設定が必要であった。測定条件を適正化するために、非接触式3次元測定機の測定原理から特に影響があると考えられるパラメータを抽出し寄与度の評価を行った。寄与度の大きかった対象物との距離やシャッタースピード、ハレーション防止剤の塗布適正化により測定精度を42%向上させ、要求精度を満足させた。これらの取組により、形状面全体を踏まえたベストフィットが可能となった。結果として、ねらい

となるCADデータに対して、魂動デザイン再現に必要な上下型の相対精度が実現できた (Fig. 3)。

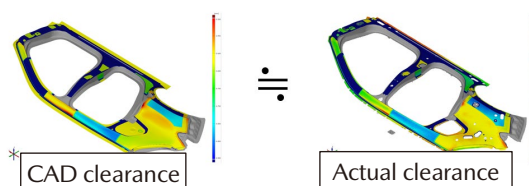


Fig. 3 Examples of Application of Countermeasures

3. 絞り工程における成形挙動制御の取組

3.1 絞り工程とその課題

プレス成形の絞り工程の成形過程を (Fig. 4) に示す。まず、①パネルをblankホルダーにセットし上型を降下、②クッションパッドからの成形荷重によって上型とblankホルダーにてパネルをホールドして張力を加える。③その状態で上型、blankホルダーとも降下しパネルを下型に押し当てて下死点で成形完了となる。上述のパネルは、ホールド状態による圧力によってパネルの流入をコントロールして張力を発生させる。この状態で成形Rによる曲げ応力が加わることにより塑性変形し形状が定まる。

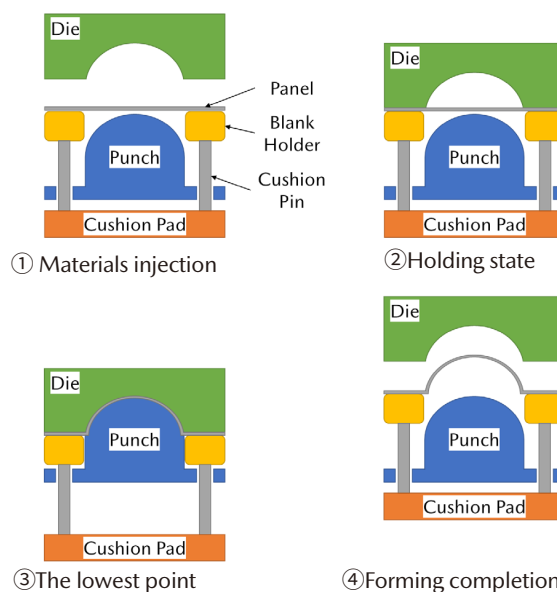


Fig. 4 Forming Process of a Drawing Mold

しかし、現状の絞り工程では、金型改善段階においてパネルデザイン形状に対して意図しない凹凸 (以下、シワと記載) が頻発している。このシワによって光のリフレクションが急激に変化してしまい、魂動デザインの面の塊感 (連続) を損なうため、金型の改善が必要となる。シワの発生状態はパネル形状などの特性によって車種ごとに発生仕方が異なり、匠作業でも複数回の改善によって品質を造り込む高難易度の作業である。

そこで、CAEを活用して匠の作業者の改善におけるノ

ノウハウを技術として手の内化し、高品質なパネルを量産可能な金型改善を一発で完了させるプロセスが必要であると考えた。そこで求める外観品質を一発で実現するためのプロセス実現のために成形CAEの予測精度向上に取り組んだ事例について紹介する⁽²⁾。

3.2 成形CAE精度の問題

CX-90の絞り工程の実パネルと成形CAEによる解析結果を比較した結果、成形CAEでは成形過程で引き延ばされてシワが抑制されており(Fig. 5)、実パネルでは成形初期に発生したシワが引き延ばされず残留している。これらについて調査した結果、下記の問題があることが判明した。
 (1) CAEと実パネルにおける材料流入量の違い
 (2) CAEでのシワ発生量/範囲の違い

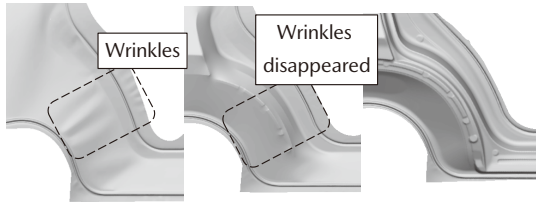


Fig. 5 Wrinkle Generation in the Molding Process

3.3 成形実態に合わせた解析条件と外観評価

シワの発生する大きな要因の一つとして、ホールド状態での張力不足があげられる。成形過程での張力状態によって変化する材料流入量が実パネルと大きく乖離しており、その一致率は30.3%しかない状態であった(Fig. 6)。現状のCAE精度ではシワの発生を正確に予測できないため、材料流入量を一致させることが最優先課題と考え、材料流入量±3mm以内、一致率80%以上を目標とした。

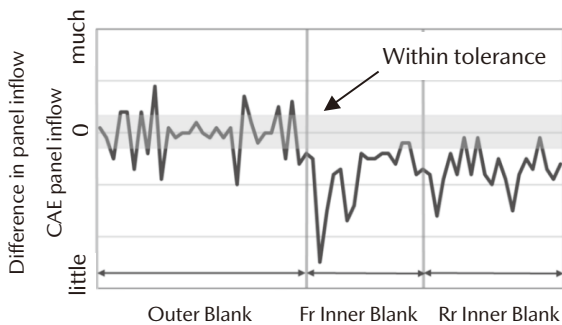


Fig. 6 Difference between CAE and Actual Panel Inflow

マツダの金型製作部門において金型改善で使用するプレス機で検証を行い、成形CAEとの予実差の要因を調査した。プレス成形の計測結果よりホールドから下死点までの間、プレス設備における左右のクッションパッドの中央が沈みV字に傾いていることが判明した。このクッションパッドの傾きにより blanksホルダーにかかるクッション圧が部位ごとで不均一となっていた(Fig. 7)。しかし、成形CAEでは1パッド構造を模した均圧条件の

ため、実際に型へかかっている圧力と乖離が生じていた。そこで対策としてクッションパッドの傾きによる不均一な成形圧力を再現させるために、圧力条件を部位ごとに数値設定できるように3分割制御とした。次に分割した部位ごとの圧力値を設定するため、ピンのレイアウト情報よりピン1本当たりの荷重を元に入力圧力を決定した。

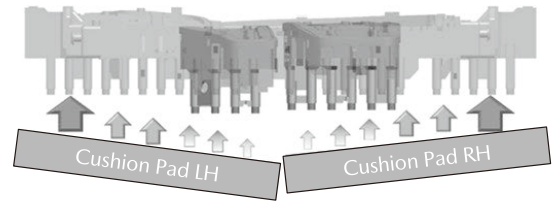


Fig. 7 Cushion Pad Tilt Phenomenon

3.4 CAEでのシワ発生量/範囲の課題解決

実パネルと成形CAEを比較した結果、実パネルで発生しているシワが成形CAEでは確認できなかった。これはCAEモデルの形状を表現するためのメッシュとシワの形状との乖離(以下、メッシュ誤差と記載)によってモデル上で正確にシワ形状を表現できない(Fig. 8)。そこで成形CAEモデルのメッシュ誤差を調べたところ±50μmとなるため、50μm以下のシワについては表現できないことが判明した(Fig. 9)。そこで、メッシュ誤差±15μm以下を表現できることを目標とした。

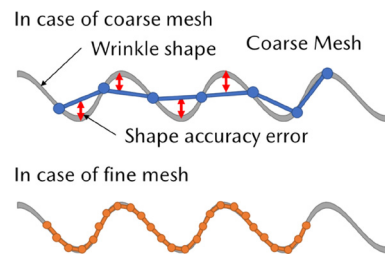


Fig. 8 Shape Error due to Mesh Quality

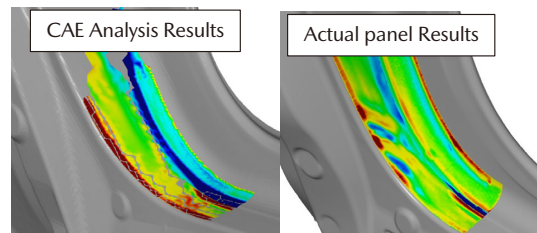


Fig. 9 Difference of Wrinkles between CAE and Actual Panel

成形CAEの3次元モデルを調査した結果、シワの形状を表現するにはモデルの形状を構成するメッシュのサイズが過大であると判明した。これは成形CAEにおいて計算実行時にメッシュのサイズを自動変更するシステムが組み込まれていることが要因と判明した。成形CAEでは成形過程において下型とパネルが接触し、パネルの曲げ成形が発生した際に、曲げ角度に応じてメッシュサイズが細分化

される。今回のシワの発生箇所は下死点に至るまで形状に接触しないため (Fig. 10), メッシュサイズは粗い状態を維持するため, メッシュ誤差が大きいままであった。

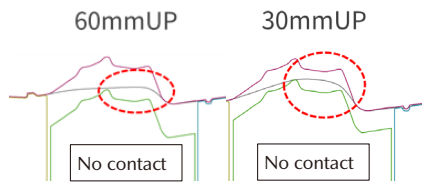


Fig. 10 Panel and Mold Cross Section in the Molding Process

そこで対策としてシワ発生箇所のメッシュサイズを細かくした結果, メッシュ誤差 $\pm 15\mu\text{m}$ 以下を満足させた上で, 成形過程から下死点に至るまでシワの発生を確認した (Fig. 11)。

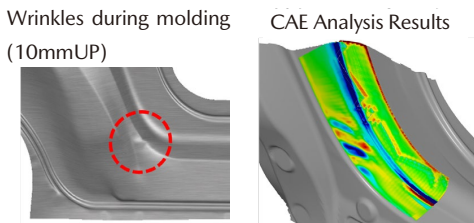


Fig. 11 Results of Application of Countermeasure Contents

3.5 成形 CAE による一発改善方案の策定

上述した施策を適用した CAE 最適条件による解析を実施した。結果として, 材料流入量は一致率 84%を実現しこれにより外観不具合の発生部位と量も一致率 85%を実現した。次に, 本施策を CX-90 におけるサイドフレームで再度検証を行った。結果, CAE 解析で導きだした改善方案でシワの発生量を 85%抑制し, 一発で要求品質を実現することができた (Fig. 12)。

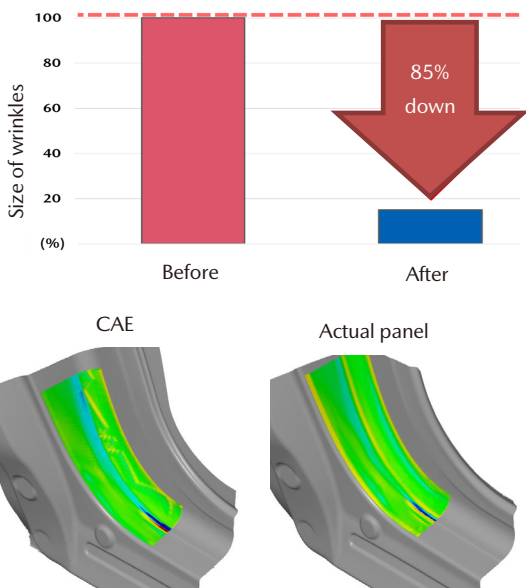


Fig. 12 Mold Modification Process Application Results

4. 曲げ工程における成形挙動制御の取組

4.1 曲げ工程とその課題

曲げ工程とは絞り工程で成形したパネルに曲げ加工を行い, パネルの稜線を成形する工程である。プレス成形における曲げ工程の成形過程を (Fig. 13) に示す。まず ①絞り工程を終えたパネルを金型にセット, ②上型及びパッドを降下させ, 金型内部につけられたガススプリングの荷重でパッドと下型にてパネルを保持, ③上型が下死点まで降下し曲げ成形完了となる。

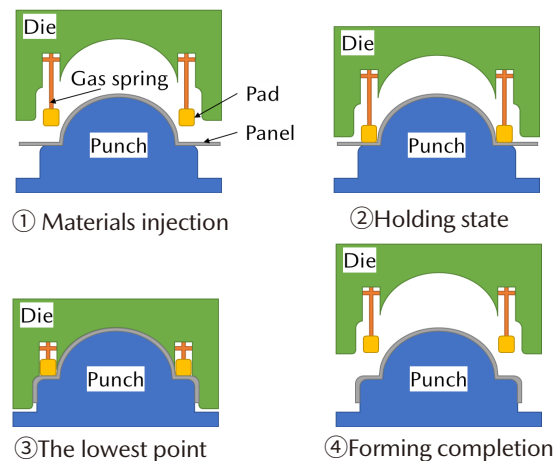


Fig. 13 Forming Process of a Bending Mold

成形中のパネルは, パッドからの保持圧がかかった状態で成形 R 部に曲げ応力が加わることで塑性変形し製品形状が定まる。この際パネルの成形 R 部に意図しない極小の凸 (以下, シャクレと記載) が発生することがある (Fig. 14a)。CAD データに比べ数十 μm の乖離ではあるが, これにより美しい光のリフレクションが部品間で寸断され, プレミアム品質実現に要求される繊細な光の陰影が表現できないことが判明した (Fig. 14b)。デザイナーの求める光のリフレクションを実現するには, 現状から 70%のシャクレ量の抑制が必要であった。

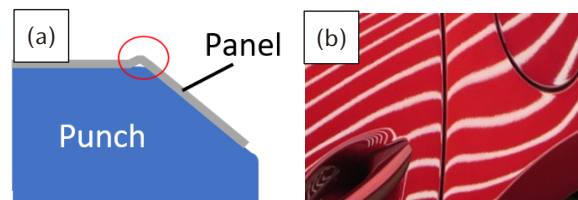


Fig. 14 Panel Malfunction (a) and Light Reflection (b)

4.2 曲げ工程における押さえ面圧の目標値決定

シャクレを抑制するには, 成形時における曲げ応力がデザイン面に伝搬するのを防ぐための十分な押さえ面圧でパネルを保持する必要がある。そのため, まず押さえ面圧の目標値の決定に取り組んだ。パネルを切り出した

CAEを用いて、押さえ面圧を変化させた際のシャクレ量をプロットした。魂動デザインを再現できるシャクレ量目標値及び形状や成形条件から押さえ面圧の目標値を決定した。

4.3 押さえ面圧の目標達成に向けた検証

実型で押さえ面圧を計測した結果、シャクレ発生部位に関して目標値に対して不足していることが判明した。押さえ面圧を増やすには伝達荷重のインプットとなるガススプリングの総荷重を増加させることが効果的だが、それではガススプリング費が上がってしまう。また、総荷重が増加すると金型破損を防止するため金型剛性を高める必要があり、鋳物重量UPに伴い鋳物費も上がる。そのため対策方針として、ガススプリング総荷重を維持したまま、必要な箇所に必要なだけ押さえ面圧を負荷することを理想とした。この考え方の基、ガススプリングからパネル押さえ部までの荷重伝達経路を整理した (Fig. 15)。

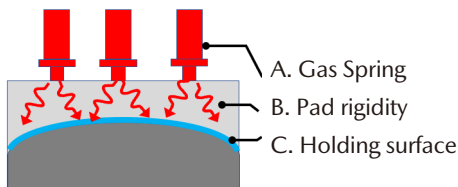


Fig. 15 Load Path from Gas Spring to Holding Surface

上記とエキスパート及び現場作業者の知見、ノウハウをもとに、特に影響の高い因子を抽出して品質工学を活用し取り組んだ。実験はサイドフレームの金型構造を模した簡易モデルを作成し、CAEにて行った (Fig. 16)。CAEを用いた理由は、制御因子に設計要素を取り入れた際に、実験ごとに異なる金型構造が必要となり、膨大な実験費用及び工数が必要となるためである。詳細モデルではなく簡易モデルを用いた理由は、金型の詳細構造によらない寄与度の大きい重要因子を絞り込むことを目的とし、計算の安定性/効率を考慮したためである。

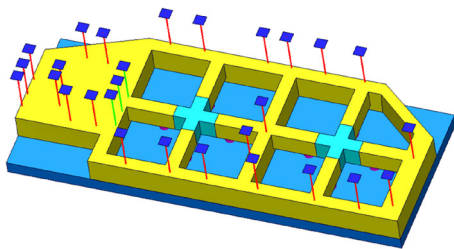


Fig. 16 CAE Model

検証の結果、パッドの高さ、パネルを押さえるパッドの押さえ面幅が特に寄与度の大きい重要因子であることが判明した。まず、パッド高さについては、高さが低い方が口バストかつ重要部位の押さえ面圧が高くなる結果

となった。これは高さが低いほど曲げ剛性が低くなるため、公差内で製作ばらつきが生じたとしても金型形状に沿いやすく、また荷重伝達ロスが少ないためと考えられる。またパッドの押さえ面幅については、狭い方が押さえ面圧が高くなり、選定した因子の中で最も寄与度が大きいという結果になった。これは幅を狭くすることで押さえ面積が小さくなり、押さえ面近傍における圧力の分散がMin化されたためと考えられる。以上の結果から最適条件を決定し、CAE解析による再実験を行った結果、130%の押さえ面圧向上を見込めることが判明した (Fig. 17)。

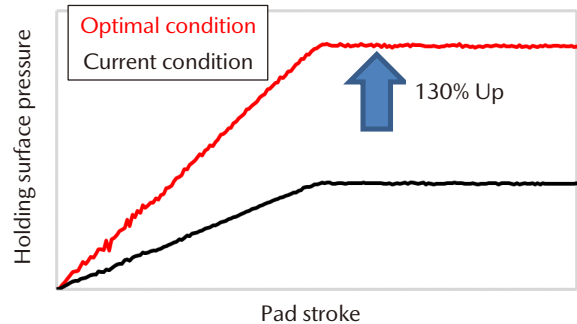


Fig. 17 Comparison of Holding Surface Pressure between Optimal Condition and Current Condition

4.4 CX-90での織り込み施策と効果確認

以上の結果を踏まえ、以下の二つの施策を織り込んだ。
 施策①：曲げ成形が行われる製品R部近傍にスロープを設定し、押さえ幅を狭めた (Fig. 18)。
 施策②：押さえ面圧不要部の上下型クリアランスを板厚クリアランスよりわずかに広めることで総押さえ面積を減らした。

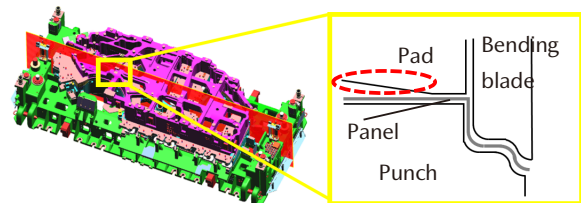


Fig. 18 Reducing Width of Holding Surface

これら二つの施策効果をCX-90の製品パネルにて効果確認、評価を行った。押さえ面圧を計測した結果、過去車種と比較して大きく増加し、目標値を満足していることを確認した。

また、シャクレ量も目標としていた70%改善を大きく上回る90%の改善を確認した。結果として、非常に良好な光のリフレクションを実現した製品パネルを得ることができた (Fig. 19)。

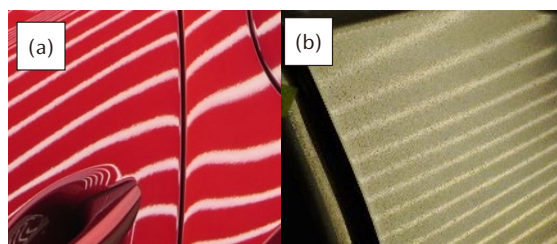


Fig. 19 Light Reflection (a) Old (b) CX-90

5. まとめ

本取組によって次の3点を達成した。

- ① 金型の静的な相対精度においてねらいとなるCADデータに対して、非常に良好な上下型の相対精度の保証が可能となった。
- ② 絞り工程において成形CAEの圧力条件を再現して、モデルの形状精度を $\pm 15\mu\text{m}$ 以下を実現することで、効率的なシワ改善プロセスを実現し、85%のシワ抑制を実現した。
- ③ 押さえ面圧の制御によってシャクレ量を90%改善し、良好な部品間の光のリフレクションを実現し、高品質な製品パネルを実現した。

今後もプレス金型製作部門として金型精度や成形技術の向上にこだわりをもって取り組んでいく。そして、進化し続ける「魂動デザイン」に込められた想いを、更に色濃く具現化し、お客様の人生の輝きにつながるクルマを提供していきたい。

参考文献

- (1) 影山貴大ほか：魂動デザイン再現に向けた金型製作部門の取組みと技術の深化，型技術，8月号，pp.22-25 (2023)
- (2) 玉置周平ほか：現場ノウハウを活用した新成形CAE解析の構築，型技術者会議2023講演論文集，No.108，pp.172-173 (2023)

■ 著 者 ■



守田 雄一



安楽 健次



長澄 徹侍



村上 義典



吉川 速人



玉置 周平

特集：MAZDA MX-30 Rotary-EV

09

MX-30 Rotary-EV の紹介

Introduction of MX-30 Rotary-EV

上藤 和佳子^{*1} 西河内 研^{*2} 岡田 譲太^{*3}
 Wakako Uefuji Ken Nishigouchi Jota Okada
 松田 陽一^{*4} 信本 昇二^{*5} 佐藤 雅哉^{*6}
 Youichi Matsuda Shoji Nobumoto Masaya Sato

要 約

MX-30 は、新しい価値の創造に挑戦し人とクルマの新しい関係を提案したモデルであると同時に、マツダの電動化戦略のリードも担っている。マツダ初の量産電気自動車、マイルドハイブリッド車に続き、第三弾として導入した新型ロータリーエンジン 8C 型（以下、8C 型 RE）で発電するプラグインハイブリッドモデルについて、提供価値や特徴を紹介する。

Abstract

MX-30 is a model that made a challenge creating new value, proposing new relationship between human and vehicle, taking leading role for electrification strategy within Mazda. After launching Mazda's first ever mass-produced electric vehicle and the following mild-hybrid model, we are here introducing the value and characteristics of our third variation – the Rotary featured PHEV model that can generate electricity.

Key words : Heat engine, EV and HV systems, Rotary engine, Lithium-ion battery, Plug-in hybrid, V2L, V2H

1. はじめに

MX-30 EV MODEL はマツダ初の量産電気自動車として 2020 年に導入、マイルドハイブリッドモデルもラインナップし、マツダの電動化をリードしてきたモデル⁽¹⁾ で、今回、新たな選択肢としてプラグインハイブリッドモデルの MX-30 Rotary-EV を導入した。3 つの異なるパワートレイン全てに電動化技術を搭載する MX-30 は、市場の特性やお客さまのライフスタイルに応じて最適な電動化モデルを選んでいただくことが可能である。まさに、マツダがカーボンニュートラルの実現に向けて推進するマルチソリューション戦略を体現するモデルである。また、「わたしらしく生きる」をコンセプトに、純粋で心地よい走り、親しみやすさを感じるデザインや、温かみがあり環境にやさしい素材使用による心整う室内空間などを通し、創造的な時間と体験をお客さまに提供してきた。MX-30 Rotary-EV は、MX-30 の基本的な提供価値はそのままに、BEV としての使い方を拡張したシリーズ式プラグインハイブ

リッドモデルである。

2. 提供価値

MX-30 Rotary-EV は、環境に負荷をかけないよう普段は BEV として使いたい、週末や休暇の際は遠出し日常から離れアクティブに過ごしたい、そしてデザインや走りも妥協したくない、というお客様の「日常生活における環境への貢献」と「アクティブなライフスタイル」を両立したいというニーズに応えることを目指して開発したモデルである。

これを実現するため、以下 3 つの Key value（以下、KV）を定義した。

KV#1 普段は BEV として使うことができる

KV#2 安心して長距離ドライブができ、出かけた先でもアクティブなカーライフを楽しめる

KV#3 デザインコンセプト「Human Modern」の新たな仕様

*1～3 商品開発本部
Product Development Div.

*5 車両開発推進部
Vehicle Development Promotion Dept.

*4 デザイン本部
Design Dept.

*6 パワートレイン企画部
Powertrain Planning Dept.

3. 商品特徴

(本稿記載のスペックは、国内仕様に準ずる)

3.1 KV#1 普段はBEVとして使うことができる

お客様の、「日々の生活の中でできる限り環境保全につながる行動をとりたい、でも、充電に対する不自由さやストレスを感じたくない」という思いに応えるべく、日常生活圏のEV走行と急速充電が可能な性能を備え、普段の生活の中でガソリンを消費しない、気軽でエコな移動の実現を目指した。また、MX-30 EV MODEL 同様の、シームレスで一体感のある心地よい走りも実現した。

(1) 日常生活圏はBEVとして移動できる大容量バッテリー

お客様の車の使用実態に関する調査を実施、その結果を踏まえ、「BEVとして使う」ことを主体とする考えの下、MX-30 Rotary-EVは17.8kWh^{*1}の大容量バッテリーを搭載し、1回の満充電でEV走行換算距離（等価EVレンジ）107km^{*2}を確保した。

(2) BEVとしての利便性を高める急速充電も備えた充電性能

MX-30 Rotary-EVではMX-30 EV MODELと同様に、普通（AC）充電と急速（DC）充電の両方の方式での充電を可能とした（Table 1）。欧州市場の普通充電においては3相11kWの充電設備にも対応させた。また急速充電へも対応することにより、外出先での短時間の充電が可能となり、17.8kWh^{*1}の大容量バッテリーの採用と合わせプラグインハイブリッドでありながらBEV車としての利便性を高めた。

Table 1 MX-30 Rotary-EV Charging Performance

Charge mode	Max charging capacity		Charging time [*]
Normal Charging	Single phase (Japan)	6.0kW	Approx. 1h50m
	3 Phase (Europe)	11kW	Approx. 50m
Quick Charging	Over 40kW		Approx. 25m

* SOC20~80%までの充電時間

(3) 100%モーター走行 — シリーズ式プラグインハイブリッド

MX-30 Rotary-EVはシリーズ式プラグインハイブリッドを採用しており、エンジンは発電専用で、8C型REを採用、駆動は常にモーターで行う。よって、MX-30 EV MODELと変わらないモーター駆動による「人馬一体」の走りを、走行中常に継続することを実現している。

また125kW/260Nmを発生する高出力モーターを搭載

することで、バッテリー残量にかかわらず、高速走行時や登坂時など8C型REによる発電中も含め、走行の全てをモーターで駆動、140km/hというMX-30 EV MODELと同等の最高速度も実現している。

(4) MX-30 EV MODEL同等の「人馬一体」の走りを実現する技術

MX-30 Rotary-EVにおいても、MX-30 EV MODELで培った車両運動制御技術を適用し、全方位につながったシームレスな車両挙動、常に路面に吸い寄せられているかのような落ち着きのある走りの質感、直感的に扱えて手足のように動かせるコントロール性を維持した。

その実現のため、MX-30 Rotary-EVでは、MX-30 EV MODELと同様に以下のような技術を採用した。

- 全方位につながったシームレスな動きによって人間にとって更に自然な操作感覚を実現する「エレクトリックG-ベクタリングコントロールプラス（e-GVC Plus）」
- 人間特性に基づいて高精度なトルクコントロールを可能にする「モーターペダル」
- パワーユニットが発揮するトルクの状態をドライバーが無意識に認知できることで、より正確な車速コントロールを可能にする「EVサウンド」
- ブレーキペダルの操作量からドライバーが必要とする制動力を判断し、その範囲内で最大限のエネルギー回生を行いつつ、不足分を摩擦による制動力で補うことで、ドライバーの意図どおりの制動力を実現しながらも高効率なエネルギー回生を可能にした「回生協調ブレーキ」
- さまざまな走行シーンにおいてドライバーに自由自在な車速コントロール性と、前後荷重コントロールのしやすさを提供する「ステアリングホイールパドル」。

3.2 KV#2 安心して長距離ドライブができ、出かけた先でもアクティブなカーライフを楽しめる

日常はBEVとして使うことでガソリンを使わない移動ができ、週末や休暇には8C型REによる発電によって電欠の不安を感じることなく安心して長距離のドライブができること。給電機能や走行モード切替機能によって、電気を気軽にもち出して、場所に縛られることなく自由に行動でき、自分の思うままに電気を使うことができること。この2つを通してお客様のアクティブなライフスタイルの実現を目指した。

(1) ロングドライブも安心の発電用8C型RE

MX-30 Rotary-EVは、EV走行換算距離（等価EVレンジ）107km^{*2}に加え、8C型REで発電することで駆動用バッテリーに電力を供給し、更なるロングドライブにも対応可能である。これを実現したのがREの特長の一つである「省スペース性」であり、排気量830ccで最高出力53kW（72PS）/4500rpmを発生する新開発の発電用

8C型 RE は、同程度の出力のレシプロエンジンと比べ、コンパクトである。

そのため、この8C型 RE を、薄型で高出力なジェネレーター、最高出力125kWを発生する高出力モーターと組み合わせて同軸上に配置し一体化することで、室内空間などを犠牲にすることなくモータールームに搭載することを可能とした。そして、このコンパクトな電駆ユニットと、17.8kWh^{*1}のリチウムイオン電池と50Lの燃料タンクを組み合わせることにより、普段はBEVとして使える107km^{*2}のEV走行換算距離（等価EVレンジ）をもちながら、更なる長距離ドライブも、8C型 RE による発電で電欠の不安なく運転を楽しむことを可能とした。

(2) 電気を持ち運ぶ一給電機能

電化製品への給電を可能とする「V2L (Vehicle to Load)」に対応させた。荷室に配置した1500Wまで使える電源コンセントと、日本仕様では可搬型の外部給電器も使用できる。

近年災害時におけるバッテリー搭載車による給電機能活用の議論が活発化しており、日本仕様においては「V2H (Vehicle to Home)」にも対応させた。クルマから建物に直接電力を供給することが可能となり、万が一の停電時にも普段と変わりなく自宅で電気を使用することができる。17.8kWh^{*1}のバッテリーが満充電であれば一般的な家庭の約1.2日分^{*3}の電力を、また燃料が満タンであれば8C型 RE での発電と合わせて約9日分^{*3}の電力供給が可能である。

(3) ドライバーの使用用途に対応する選択式の3つの走行モード

MX-30 Rotary-EV では、走行シーンや用途に応じてドライバー自身が選択できる「ノーマルモード」「EVモード」「チャージモード」の3つの走行モードを設定した。

a. ノーマルモード

ドライバーの操作に応じた加速性能をいつでも提供するモードとしてとして設定した。バッテリー残量が十分あればEV走行が可能で、その時のバッテリーの状態でもかなえる以上の出力が要求された場合には、8C型 RE で発電し、その電力を用いてこの車がかつ最大の加速性能を発揮できる。

b. EVモード

バッテリーに貯めた電力により基本的にBEVとして使用するためのモードとして設定した。バッテリー残量がなくなるまでEV走行が可能で、ドライバーがアクセルペダルを深く踏み込んだ場合（一般的なAT車におけるキックダウン）は、8C型 RE による発電で必要な加速性能を確保できる。

c. チャージモード

夜間の住宅地などBEVとして静かに走りたい時や、アウトドアでの給電機能の使用などに備えてバッテリー残量を確保しておきたい時に使うモードとして設定した。

バッテリー残量は10%単位で任意に設定が可能で、8C型 RE を用いた発電コントロールにより、設定したバッテリー残量を維持できる。

^{*1} 自社調べ

^{*2} 国内WLTCモードでの国土交通省審査値。

^{*3} 1日の一般的な家庭での使用電力量を基準にした場合の試算。V2H機器等の変換効率を除く。

3.3 KV#3 デザインコンセプト「Human Modern」の新たな仕様

発売以来、MX-30は「Human Modern」をデザインコンセプトに、大胆な塊そのものがもつ美しさを際立たせるため、シンプルな立体構成に徹したエクステリア、フリースタイルドアによる身軽さを体現したキャビンデザイン、親しみやすい表情、抜けの良い立体構成により「開放感に包まれる」インテリア空間、そしてサスティナビリティをテーマとした個性的な素材使い等、今までにない新しいアプローチにより、魂動デザインの可能性を示してきた。

環境に配慮した内装素材、フローティングコンソール、そしてタッチパネルディスプレイなどといった室内空間を演出する基本的な要素はそのままに、MX-30 Rotary-EVの追加によって、よりアクティブなライフスタイルをサポートできるようになったことをデザイン面でも表現するため、仕様のバリエーションを広げた。

今回のデザインを構想するにあたっては、「つねに自分らしくニュートラルでバイタリティにあふれ、環境問題など社会課題の解決にも積極的な現代のユーザーへのアプローチ」をコンセプトとして掲げ、「Human Modern」の新たな仕様を用意した。

(1) エクステリアアイテム

MX-30では、企画スタート時点で、全てのパワートレインを想定した基本のデザインテーマを設定した。MX-30 Rotary-EVでは、この基本テーマを崩さずに、技術をメッセージする2つのアイテムを採用した (Fig. 1)。

1つ目はパワートレインの存在をアピールするバッジ類である。リアにはe-SKYACTIV R-EV専用バッジを、フロントフェンダー上にはREの形状中央に発電を意味する「e」の文字をモチーフとしたバッジを配している。これらのバッジには、自らエネルギーを生み出すイメージのオレンジの差し色を用い、独自の電動化のテーマカラーとしている。

2つ目は、専用の空力性能に特化し性能をサポートするデザインのアルミホイールである。MX-30 EV MODELのアルミホイールも空力を重視したものであったが、この新デザインホイールは最新の空力解析を用いて、リム周辺の風の流れの最適化と軽量化を両立する形状にした。カラーはブラックベースの切削処理とすることで、ストレートでシャープにテクノロジーを表現している。



Fig. 1 MX-30 Rotary-EV Unique Design

(2) インテリアアイテム

新たにブラック系の「Natural Monotone」を追加した (Fig. 2)。この「Natural Monotone」は、より広いライフスタイルに対応し、かつ気兼ねなく使えることを目指した。素材には、ファブリックをメインに据えるというMX-30のカラートリムの考えに則り、シートボルスタはブラックの人工皮革、センター部分はデニム調ファブリックとし、ライトグレー系のアクセントを入れた。共通の呼吸感素材によるトリムやダークコルクと合わせて単調とまらない内装を実現している。



Fig. 2 MX-30 Rotary-EV Natural Monotone

(3) 「Spirit R」の思いを受け継ぐ特別仕様車「Edition R」

マツダが世界で初めて量産に成功したREは、マツダの歴史において「飽くなき挑戦」を象徴する特別な存在であり、2012年にRX-8「Spirit R」(RはRotary/Returnの意)として量産を終了してもなお、この技術の火を絶やさないという思いで研究・開発を続けてきた。それから約11年の歳月を経て、REはマツダの電動化をリードするモデルであるMX-30によってその可能性を拓げ、発電機として復活 (Return) を果たした。この機に、開発に関わる全てのメンバーの思いとしてメモリアル表現を随所に取り入れた特別仕様車が「Edition R」である。他のパワートレイン同様の、コルク、フリースタイルドア、そしてMXというカーネームと合わせ、そこに刻まれたマツダの歴史を、コアなファンの方々も含むより多くのお客様に感じていただく思いで設定したモデルである。

a. 専用外板色

「Edition R」専用の外板色として、ルーフサイドにマローンルージュメタリック、ベースカラーにジェットブラックを採用したマルチトーンを設定、ラインナップの中で最もスペシャリティー感を漂わせるコーディネートとした (Fig. 3)。マローンルージュメタリックはマツダ初の乗用車である「R360クーペ」のルーフ色を、2020年に発売した100周年特別記念車で復刻、これを今回採用した。



Fig. 3 Edition R Exterior

b. 専用キー FOB

「Edition R」専用のキー FOB は (Fig. 4)、シェル (キー表面のパネル) の表面を8C型RE内部のローター表面と同じ曲率とし、キーシェル表面の両端の段差を、ローターアベックス (頂点のシール溝) と同じ幅でデザインし、実際の車両では触ることができないREを疑似的に感じ取れるアイテムとした。



Fig. 4 Edition R Key Fob

c. 専用フロアマット

「Edition R」専用のフロアマットは (Fig. 5)、Rotary-EV専用バッジ、及びテーマカラーであるオレンジのステッチとタグで構成している。タグの中に一本引かれた白いラインは、キー FOB と同じくローターアベックス (頂点のシール溝) と同じ幅とし、ここにもREの存在をさりげなく感じ取れる表現を施した。



Fig. 5 Edition R Floor Mat

d. 専用ヘッドレスト

「Edition R」専用のヘッドレストは (Fig. 6)、乗り込むたびにその特別感を感じ取れるアイテムとして、運転席と助手席にMX-30 Rotary-EV専用バッジと同様のエンボス加工を施した。



Fig. 6 Edition R Head Rest Logo

4. おわりに

マツダは電動化の時代においてもこれまでと変わらず、マツダのDNAである「走る喜び」をお客様にお届けし続けたいと考えている。

MX-30 Rotary-EV は、BEVとしての使い方や強みを 8C 型 RE による発電で拡張したマツダ独自のプラグインハイブリッドであり、マツダは、この車が、お客様にとって、新しいライフスタイルを実現するパートナーになれると信じている。

この車には、唯一無二の技術の実現を目指してさまざまな形で携わってきた社員や、ご賛同とご協力いただいたお取引先さま全ての人の挑戦と希望が詰まっている。マツダの思いが車を通してお客様に伝わり、より多くの「わたしらしく生きる」という思いに寄り添える存在となり、お客さまが、いつでも、どこでも、どこまでも、もっと自由に、たくさんの心ときめく体験に出会えることを願っている。

参考文献

- (1) 竹内ほか：MX-30 の紹介，[マツダ技報，No.38，pp.9-12 \(2021\)](#)

■著者■



上藤 和佳子



西河内 研



岡田 譲太



松田 陽一



信本 昇二



佐藤 雅哉

特集：MAZDA MX-30 Rotary-EV

10

新型ロータリーエンジン 8C 型の燃焼技術 Combustion Technology for 8C New Rotary Engine

森本 博貴^{*1} 宮本 亨^{*2} 中嶋 勝哉^{*3} 菊地 拓哉^{*4}
Hiroki Morimoto Toru Miyamoto Katsuya Nakajima Takuya Kikuchi
田中 清喬^{*5} 砂流 雄剛^{*6} 野本 哲也^{*7} 若林 良努^{*8}
Kiyotaka Tanaka Yugo Sunagare Tetsuya Nomoto Yoshito Wakabayashi

要 約

マツダは、約 11 年ぶりとなる新型ロータリーエンジン 8C 型を開発した。小型高出力な本ユニットを MX-30 にシリーズ式プラグインハイブリッドの発電用として搭載することで、地球温暖化抑制という社会的課題へのマルチソリューション戦略の 1 つを体現する。8C 型は、理想的な燃焼を追求するために前モデル 13B 型から圧縮比を高め、燃料供給を直噴化及び Cooled EGR システムを採用、更に燃焼室形状を変更した。また、発電機専用ユニットとして排気量を最適化した。その結果、熱効率の大幅な改善と全域 λ (空気過剰率)=1 運転を実現したことで 13B 型からユニット燃費が最大 25% 向上し、最新のエミッション規制である欧州 Euro6d 規制にも適合した。

Abstract

Mazda has developed an 8C new rotary engine for the first time in about 11 years. The MX-30 embodies one of our multi-solution strategies for the social issue of curbing global warming, with use of this small, high-output engine as a generator for a series plug-in hybrid. In the 8C, ideal combustion was pursued with a higher compression ratio than a 13B previous model, direct fuel injection, cooled EGR system, and a change in the shape of combustion chamber. In addition, the displacement was optimized as a generator-dedicated unit. As a result, the 8C has achieved a significant improvement in thermal efficiency and λ (excess air ratio)=1 operation over the entire range, improving fuel consumption of the unit by up to 25% compared to the 13B. It also complies with Europe's Euro6d regulations, the latest emissions regulations.

Key words : Heat engine, Rotary engine/Rotary combustion engine, Performance/Fuel economy/Efficiency

1. はじめに

BEV 普及に向けた移行段階にある昨今、地域特性と環境ニーズに適した電動化技術が求められる。そこで、マツダが改めて着目したのがマツダのアイデンティティであるロータリーエンジンをシリーズ式プラグインハイブリッド用の発電機として活用することである。ロータリーエンジンは同排気量のレシプロエンジンよりも小型高出力であり、エンジンからモータージェネレーターまでを横一列に配置が可能で、MX-30 のエンジンルームに収まる (Fig. 1)。これまでロータリーエンジンは、その構造から燃費やエミッションに不利だと考えられてきたが、徹底的な性能改善と電駆ユニットとの協調により、飛躍的な進化をした。本稿では、約 11 年ぶりの復活と

なる新型ロータリーエンジン 8C 型 (以下、8C 型) の燃焼技術について紹介する。

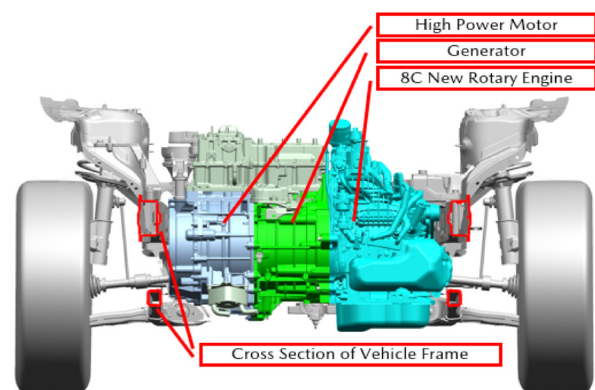


Fig. 1 Engine Room from Front of the Vehicle

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

*8 MBD 革新部
MBD Innovation Dept.

2. 8C型ロータリーエンジンの技術目標

2.1 熱効率の改善

8C型ではFig. 2のロードマップに示すように、エンジン効率に影響する7つの制御因子に対して前モデル13Bから改善に取り組んだ。

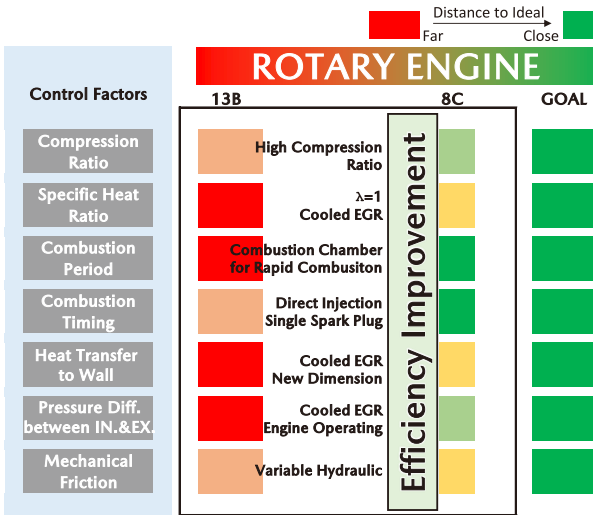


Fig. 2 Roadmap to Goal of Rotary Engine

7つの制御因子のうち、壁面への熱伝達（冷却損失）はその割合が大きく、これはロータリーエンジンがもつ2つの構造的な特徴に起因している。1つは燃焼室の表面積の差で、Fig. 3に示すように扁平な燃焼室形状のロータリーエンジンはレシプロエンジンよりも同じ燃焼ガスに対して冷える面積が約2倍（上死点）になる。もう1つはエンジン回転数と時間の関係で、温度が上昇する圧縮や膨張の行程時間が同じエンジン回転数でもレシプロエンジンの約1.5倍長く、冷やされる時間が長い。すなわち、表面積、時間ともにロータリーエンジンでは冷えやすく、壁面熱伝達が大きい（冷却損失が生じやすい）。

8C型では、これらの課題に対してマツダのレシプロエンジンで培った燃焼技術も融合させ、理想のロータリーエンジン燃焼を描き、13B型よりも急速燃焼化を目標とした。

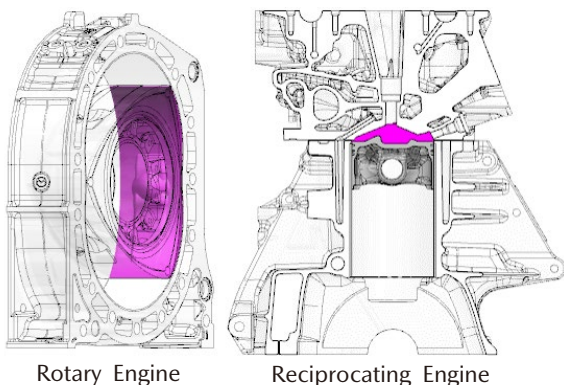


Fig. 3 Combustion Chamber at Compression Top

2.2 全域理論空燃比（全域 $\lambda=1$ ）の実現

供給する空気とガソリンの重量の実混合比を理論空燃比（過不足なく反応させるときの混合比）で除した比率を空気過剰率 λ という。 $\lambda=1$ では、触媒浄化前の排ガス中の有害な成分を低減でき、三元触媒での浄化率も向上する。

一方、出力からは $\lambda=1$ よりも小さい（燃料が濃い）側で最大トルク点となるが酸素不足での燃焼となり、排ガス中のHCやCOが増加し、更に三元触媒での同成分の浄化率が低下するため、エミッション（排出ガス性能）が悪化してしまう。

また、高負荷運転では排ガス温度が高く、排気系部品の耐熱性が厳しくなる課題がある。その対策として $\lambda=1$ より小さく（燃料を濃く）し、燃料の気化熱で燃焼室内の熱を奪って、排ガス温度を下げる手法があるが、前述と同様にエミッション悪化につながる。8C型では、昨今の厳しいガス規制をクリアし、クリーンな排ガスを実現するため、全域 $\lambda=1$ での運転を目標とした。

2.3 冷間時のエミッション改善（冷間時 $\lambda=1$ ）

排ガス中の有害な成分は、大半が冷間始動時に排出される（Fig. 4）。これは、三元触媒で有害ガスを浄化させるためには、触媒温度を所定値以上に上げ触媒を活性化させる必要があるが、冷間始動では触媒温度が低く、有害な成分が浄化できないためである。

この対応として、点火時期を大きく遅角することで排気温度を高め、触媒に大きな熱量を与え昇温する技術がレシプロエンジンでは一般的である。しかしながら、13B型においてはプラグ周りの混合気状態の制御が難しく、点火時期を大きく遅角した状態での安定した燃焼の確保ができなかった。

8C型では、冷間エミッションを改善するために冷間時も $\lambda=1$ 混合気を維持しつつ、点火時期を大きく遅角した状態での安定した燃焼を目標とした。これを実現するために直接噴射（以降、直噴）による燃料配置と燃焼室内の流動を組み合わせ、プラグ周辺及び燃焼室内に最適な混合気状態を作り込んだ。

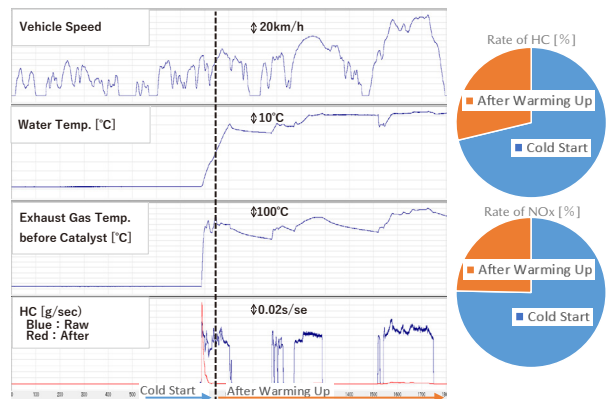


Fig. 4 Emission Rate during WLTC Mode

3. 8C型ロータリーエンジンの主要諸元

13B型と8C型の主要諸元をTable 1に示す。8C型では前述の技術目標を実現するために、大幅な燃焼改善に挑戦した。13B型より圧縮比を高め、燃料供給を直噴化し、Cooled EGRシステムも採用した。また、骨格を決めるディメンション（エンジン寸法）を一新するとともに、発電機専用ユニットとして排気量を最適化した。

Table 1 Specifications for Europe

Engine		13B (2008MY)	8C
Way to Use		For Drive	For Power Generation
Displacement	cc	654×2	830×1
e: Eccentricity R: Generating Radius b: Width	mm	e=15 R=105 b=80	e=17.5 R=120 b=76
Compression Ratio		10.0 : 1	11.9 : 1
Max. Power	kW (PS)/rpm	151 (205)/7,500 (Std.)	55 (74.8)/4,500
Max. Torque	Nm (kgfm)/rpm	211 (21.5)/5,500	117 (11.9)/4,000
Fuel Injection System		Port Injection	Direct Injection
Intake Type		Side/3 Port	Side/2 Port
Exhaust Type		Side/2 Port	Side/2 Port
Emission System		Secondary Air System (ElectricA/P+ACV) UF-3Way (2 BED)	Direct Catalyst +GPF
EGR System		—	Cooled EGR
Ignition System		2 Plug	1 Plug

4. 燃費・エミッションの改善技術

4.1 高圧縮比を実現するノッキング回避技術

高圧縮比化はオットーサイクルの理論式 (1) から熱効率の向上にも寄与し、高膨張比により排ガス温度も低減するが、ノッキングを誘発させるといった課題がある。

8C型では、燃焼室内の冷却効果のある直噴と冷却した排ガスを吸気に再循環させるCooled EGRシステムを採用し、ノッキングを抑制した。Cooled EGRは、ノッキング回避効果の他、比熱比の向上効果や燃焼温度の低減による冷却損失や排ガス温度の低減効果があり、更に部分負荷域ではポンピングロスの低減といった多岐に渡る燃費向上の効果が得られる。

Theoretical Thermal Efficiency of Otto Cycle

$$\eta_{otto} = 1 - \left(\frac{1}{\epsilon}\right)^{\kappa-1} \quad (1)$$

η : Thermal Efficiency

ϵ : Compression Ratio

κ : Specific Heat Ratio

(1) 直噴化によるノッキング抑制

Fig. 5に吸気系上流（スロットル直下）噴射と直噴を織り交ぜた場合と、直噴のみでの点火時期に対する正味燃料消費率の関係を示す。吸気系上流噴射と直噴の組合せは、同じ点火時期において未燃燃料が少なく燃費は良いが、ノッキングの影響で点火時期を進角できない。一方で、直噴は高圧に燃料噴射することで燃料の気化霧化を促進し、気化潜熱により燃焼室内を冷却する。これにより、ノッキングを抑制し燃費最良点になる点火時期（以降、MBT：Minimum Advance for Best Torque）まで点火時期の進角が可能で燃費が向上する。

また、実用の運転シーンでは燃料性状のばらつき、高外気環境、EGRを導入できない環境などノッキングに対して厳しいコンディションが存在するが、直噴にすることで幅広い領域でノッキングを回避しつつMBTにセット可能となり、実用的な燃費向上にも貢献している。

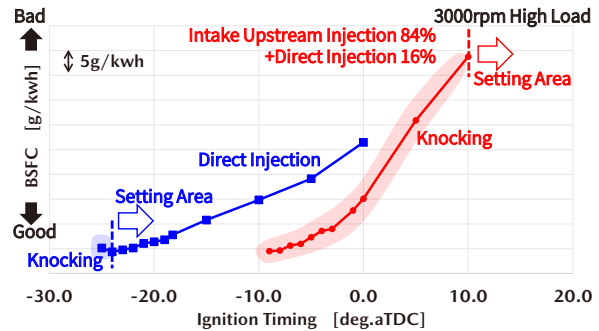


Fig. 5 Net Fuel Consumption for Different Injection System

Fig. 6に示すのは、燃焼解析におけるノッキング発生時の温度分布の結果である。リーディング側（以降、L側）における主燃焼による温度上昇とは別にトレーリング側（以降、T側）でノッキング発生による温度上昇が認められる。これに対して、混合気配置の自由度の高い直噴では、噴射タイミングを最適化し、Fig. 7の燃焼室断面に示すようにノッキング発生部に濃い混合気を配置し冷却することで、ノッキングを抑制した。

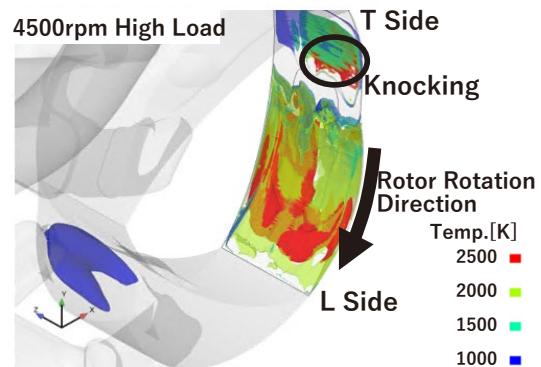


Fig. 6 Temp. Distribution when Knocking Occurs

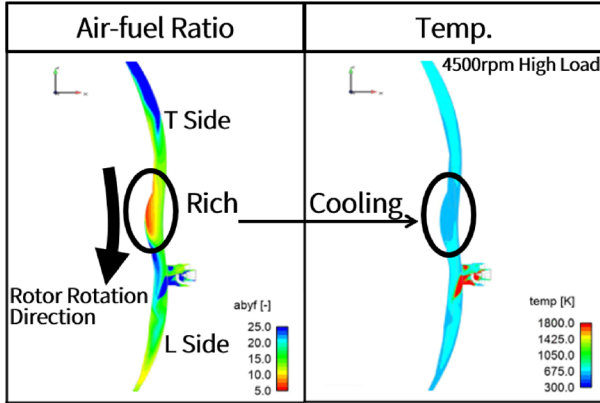


Fig. 7 Air-fuel Ratio and Temp. Distribution

(2) Cooled EGR による効果

Fig. 8 に 2300rpm 高負荷域における同一負荷での EGR 率違いでの各性能を示す。EGR を増量することでノッキングを回避できるため点火時期を進角できる。また、NOx の排出量の減少から EGR を増量することで熱容量の大きい CO₂ の増加に伴い燃焼温度が下がっていることが分かる。結果、EGR を増量することで燃費の向上だけでなく、排ガス温度を低下させた。高負荷運転域では、排ガス温度が低下することで $\lambda=1$ より小さく（燃料を濃く）する必要がなくなり、全域 $\lambda=1$ 運転を実現し燃費とエミッションを両方改善することができた。

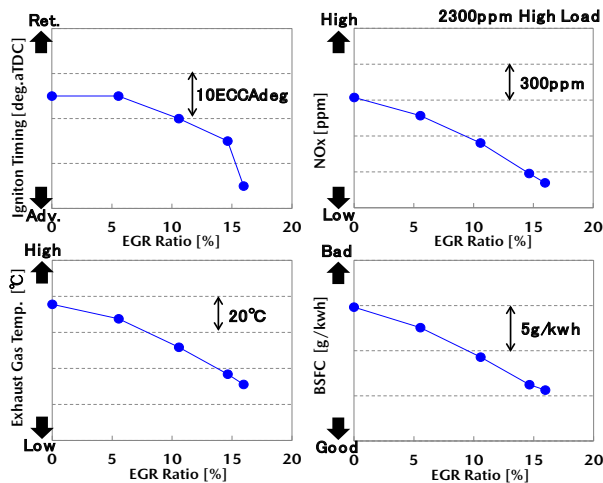


Fig. 8 Performance due to Difference in EGR Ratio

(3) 点火プラグ 1 本化による疑似ノックの抑制

ロータリーエンジンは燃焼させることで共鳴が起こりやすい特徴がある。これは、膨張行程にもかかわらず T 側は燃焼室容積が小さく高周波が減衰しないためであり、ノッキングのような音が発生する場合もある（以降、疑似ノック）。Fig. 9 に 13B 型における T 側の点火有無での燃焼室内の圧力を示す。T 側を点火させることで燃焼室内で圧力脈動が生じ、共鳴が認められる。8C 型では燃焼の作り込みによる L 側主体の急速燃焼と発電機ユニッ

トならではのエンジンの動かし方から T 側の点火プラグを廃止し、L 側の 1 本のみとした。これにより T 側で点火することで励起される疑似ノックを抑制し、圧縮比を高めることで熱効率を向上させた。

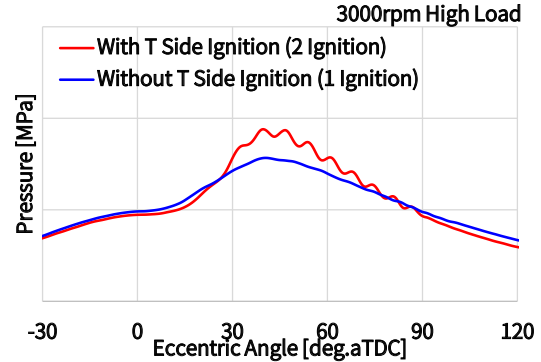


Fig. 9 Combustion Chamber Pressure of 13B (2 Ignition vs 1 Ignition)

4.2 理想のロータリーエンジンの燃焼を実現する技術

ロータリーエンジンの燃焼の特徴として L 側を主体に混合気が燃え、燃焼は 2 段燃焼になっている。これは、点火起点の火炎伝ばで燃える主燃焼と、主燃焼とは別の T 側からのスキッシュ流で促進される燃焼である。その特徴として、13B 型にて 1 点点火 (L 側のみ) で燃やした時の熱発生率を Fig. 10 に示す。熱効率を追求する上ではスキッシュ燃焼を早期化し主燃焼と合わせることで 1 段燃焼にすることが重要である。また、1 段で燃焼する上で燃焼速度を速める必要があるが、燃焼室容積の小さい初期燃焼の時期に急峻な燃焼をさせると壁面への熱伝達が大きくなる。8C 型では、2.1 節に記載したロータリーエンジンの構造的な課題を考慮した理想燃焼を描き、燃焼を作り込んだ。

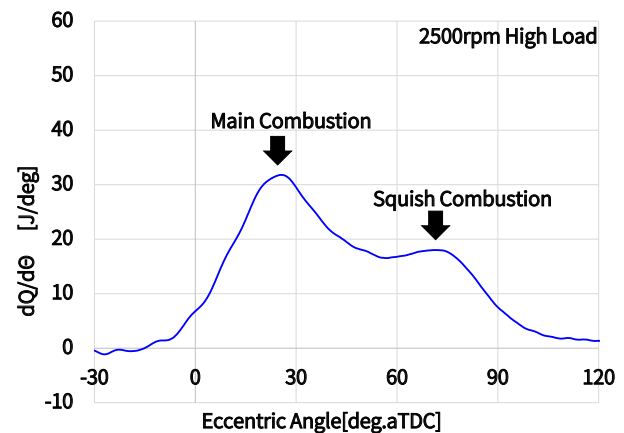


Fig. 10 Characteristics of Rotary Combustion (1 Ignition of 13B)

(1) 理想燃焼を実現する燃焼室形状

ロータリーエンジンの燃焼は、レシプロエンジンのように点火時期の進角に従い、リニアに急峻にならない。これはスキッシュ流で促進される燃焼によるもので、熱発生パターンは点火時期と燃焼室形状から生成される燃焼室内の流動で制御できる。Fig. 11 に 8C 型の燃焼室形状と主要部位のねらいをそれぞれ記載する。

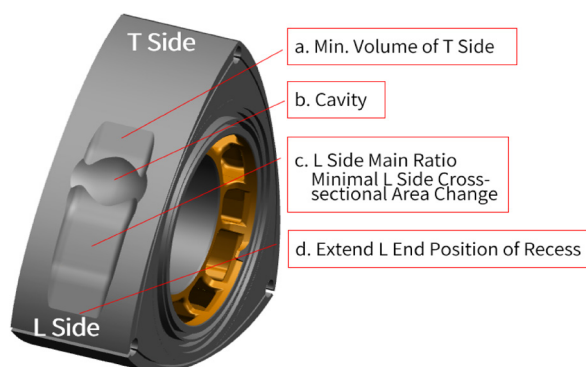


Fig. 11 Shape of Combustion Chamber

a. T側の容積の最小化（クエンチエリアの最小化）

- ・ 2 段燃焼を回避し、排ガス温度の低減
- ・ スキッシュ流動の発生時期と流速を制御（主燃焼を制御）

Fig. 12 に 8C 型の燃焼室と同燃焼室に追加工で T 側を拡大した燃焼室における回転数と排ガス温度の関係を示す。T 側容積を拡大することでスキッシュの流速が低下し、主燃焼で混合気を燃やしきれず、後燃えにより排ガス温度が上がる。

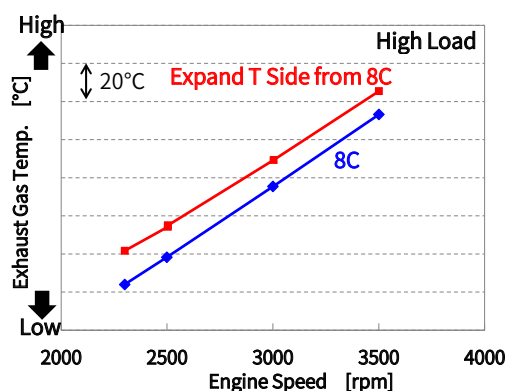


Fig. 12 Exhaust Gas Temp. at Different T End Position

b. キャビティ

- ・ 後期重心で燃焼させ、空気と燃料の混合時間を確保し未燃燃料を低減、ローターへの火炎接触も抑制（冷却損失の低減）
- ・ Cooled EGR のような不活性ガスを含んだ混合気は、反応速度の低下により火炎伝ばが不安定になるため、

燃焼室内に乱流を発生させ燃焼速度を向上し、火炎伝ばを安定化

Fig. 13 に 2300rpm 高負荷域の燃焼室内流動の解析結果を示す。キャビティにより乱流を発生させ放射状に火炎伝ばさせ、未燃燃料が低減する。

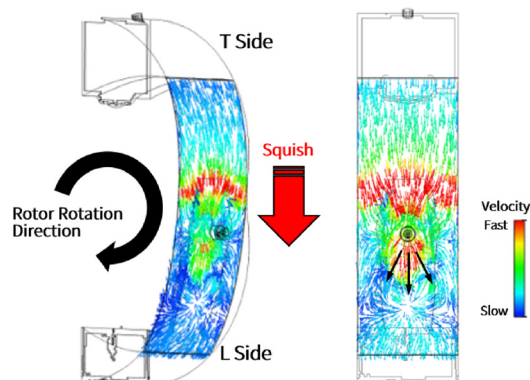


Fig. 13 Turbulence by Cavity

c. L側の燃焼室容積の確保と容積変化の抑制

- ・ L側のプラグ 1 本で燃焼させるため容積を L 側に集約
- ・ 回転方向の燃焼室容積変化の抑制により燃焼初期の流動を抑制することで、燃焼室容積の小さい燃焼初期での燃焼を緩慢にし、壁面への熱伝達を減少

d. リセス L 端位置の延長

- ・ EGR 導入により進角する点火時期において、プラグホール下に容積を設けプラグホール内を掃気

Fig. 14 は 13B 型と 8C 型の熱発生率を比較したもので、図中の英字は前述の形状と紐づけるものである。ロータリーエンジンは構造上、燃焼期間中に T 側は圧縮され、L 側は膨張する。従い、燃焼期間中の L 側は S/V 比（燃焼室表面積／容積）は減少傾向にあり、冷却損失に有利な空間となる。8C 型では L 側主体に 1 点火による 1 段の急速燃焼を実現したことで約 40% の冷却損失を改善した。また、等容度や排気損失の改善により熱効率を向上させるとともに、排ガス温度も低減した。

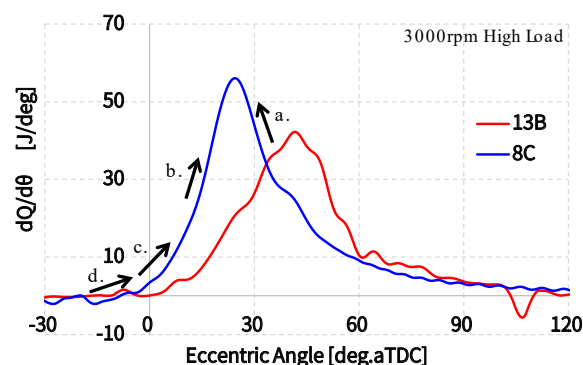


Fig. 14 Comparison of Heat Release at Setpoint

(2) 壁面への熱伝達の抑制

a. ディメンションの適正化

8C型は、発電機専用ユニットとして排気量を適正化し、排気量は1ローター830ccを選択した。その中で、Fig. 15 及び Fig. 16 に示すようにディメンションを見直し、ロングストローク化することでS/V比を12.3%小さくし、壁面への熱伝達を減少した。

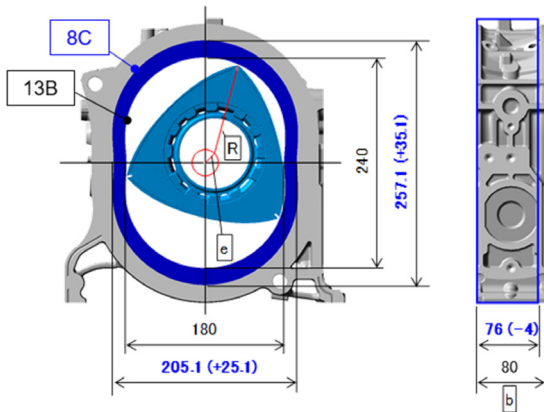


Fig. 15 Comparison of Dimension

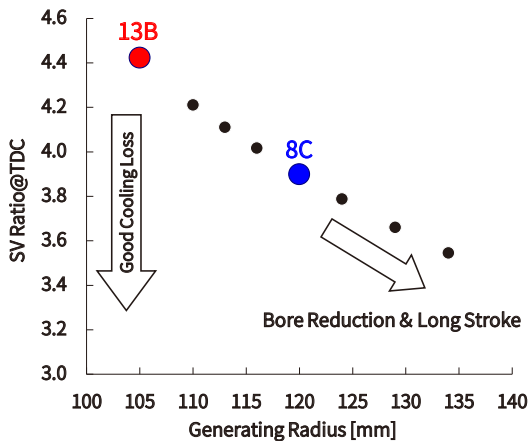


Fig. 16 Generating Radius vs S/V Ratio

b. EGR の導入

Fig. 17 に同一点火時期における EGR 量の違いによる熱発生率を示す。EGR の増量で初期燃焼を緩慢にし、壁面への熱伝達を抑制した。また、レシプロエンジンでは EGR の増量に伴い燃焼は緩慢になるのが一般的であるが、ロータリーエンジンのスキッシュ形成の特徴を活かし、熱発生率の最大値を落とさずに等容度の低下を抑制した。Fig. 18 に示すプラグ周辺の流速のようにロータリーエンジンのスキッシュはレシプロエンジンより燃焼行程で強い流れを生成し、L 側の容積が拡大するのと同方向に進み火炎伝ばの速度を高める。

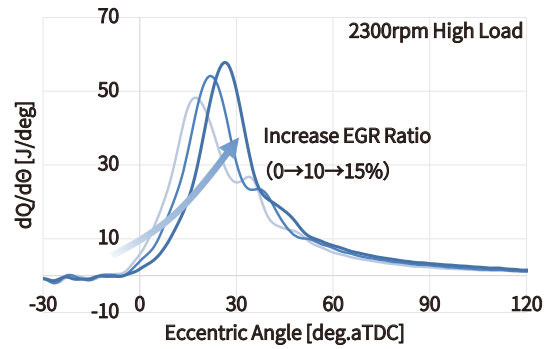


Fig. 17 Heat Release due to Difference in EGR Ratio

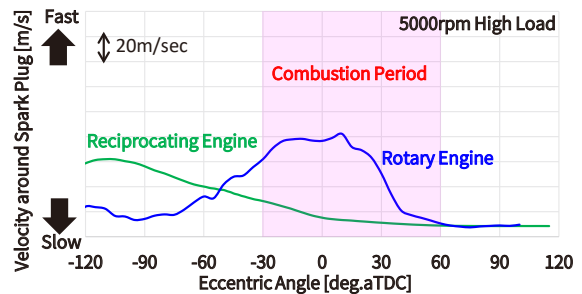


Fig. 18 Comparison of Flow Velocity

4.3 点火時期の大遅角を実現する混合気配置

燃料が気化霧化し難い冷間始動時に、三元触媒を早期に温める目的で点火時期を大幅に遅角するためには、プラグ周りの混合気状態の制御が重要となる。特にロータリーエンジンは扁平な燃焼室形状のため混合気の濃度の偏りができやすい。ポート噴射であった13B型ではT側にリッチ混合気が滞留しやすく(プラグ周辺の $\lambda > 1$)、着火性からプラグ周りの混合気を制御するために全体の混合気を濃く($\lambda < 1$)する必要があった。8C型ではFig. 19に示すように直噴で噴射を多段化することで空気層に燃料を噴き分け、扁平な燃焼室内でも燃料と空気の混合を促進した。これにより、点火時期にプラグ周辺及び燃焼室全体の λ の分布を最適に制御することで、点火時期を大幅に遅角しても出力変動を抑えた安定した燃焼を実現した。

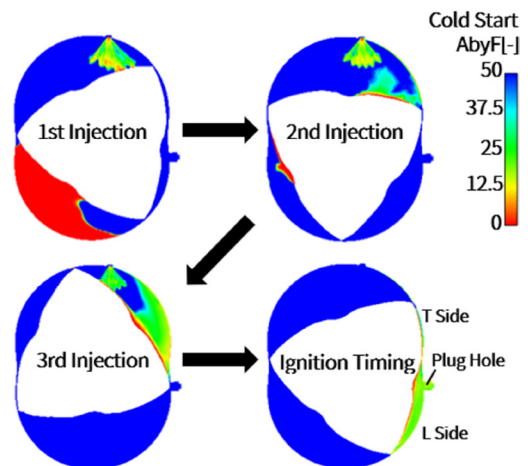


Fig. 19 Air-fuel Ratio in Combustion Chamber

13B型では、 $\lambda=1$ よりも燃料が濃い状態で燃焼させた既燃ガスと排気管内に供給した新気を反応させることで、三元触媒の早期活性化に必要な熱量を確保させる二次エアシステムを採用してきた。本燃焼技術の確立は、二次エアシステムの廃止を可能にし、後処理システムを簡素化したことで発電機ユニットとして車両への搭載性も向上させた。

5. 8C型ロータリーエンジンの性能進化

Fig. 20にて一例として3500rpmにおける出力と正味燃料消費率を13B型と比較した。8C型は、燃焼の改善と排気量の適正化により、ユニット燃費がトータルで最大25%向上した。また、Fig. 21に示す13B型の $\lambda=1$ で運転していた領域（黒枠内）に対して、8C型では排ガス温度の低減により全域 $\lambda=1$ 運転を実現し（図で示すと全域緑色となる）、大幅に $\lambda=1$ 域を拡大した。加えて、冷間の始動時には点火時期の大幅な遅角燃焼を可能としたことで、最新のエミッション規制である欧州Euro6d規制にも適合した。

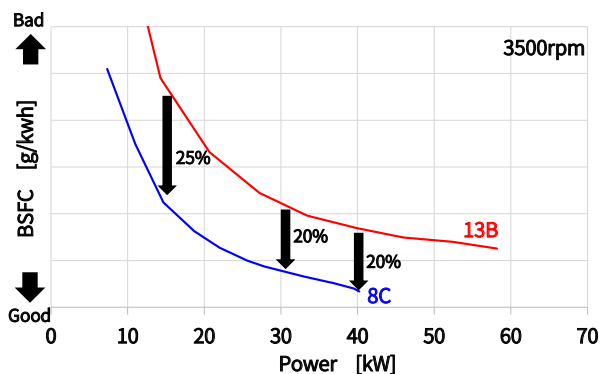


Fig. 20 Comparison of Net Fuel Consumption

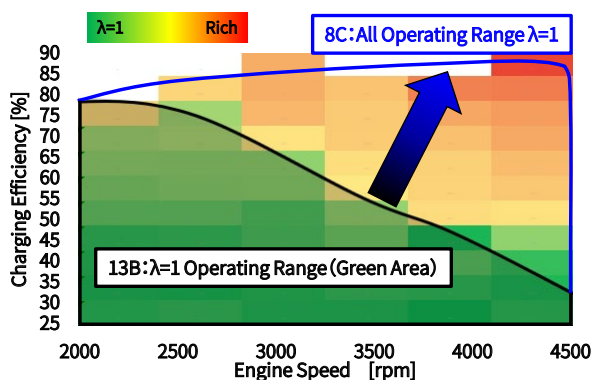


Fig. 21 λ for Operating Range of the 133B

6. おわりに

MX-30の車体フレーム内に収まるほど小型で高出力を実現できるロータリーエンジンをシリーズ式プラグインハイブリッド用の発電機として活用することは、電動化

技術の可能性を広げる新たな選択肢と考える。レシプロエンジンに対して構造的な特徴による課題のあるロータリーエンジンが飛躍的に性能向上し、復活を遂げたのはマツダのアイデンティティーである“飽くなき挑戦”の精神によるものである。これからも地球温暖化抑制に対する真の意味での地球環境へ貢献する技術を生み出すことで、世界各地のエネルギー事情やお客さまのライフスタイルに応じた商品を提供し続けたい。

■ 著 者 ■



森本 博貴



宮本 亨



中嶋 勝哉



菊地 拓哉



田中 清喬



砂流 雄剛



野本 哲也



若林 良努

特集：MAZDA MX-30 Rotary-EV

11

新型ロータリーエンジン 8C 型の開発

— 軽量で低燃費，高信頼性を両立した構造系技術 —

Development of the New Rotary Engine — Technology of Structural Parts that Achieved Lightweight, Low Fuel Consumption and High Reliability —

横尾 健志 *1
Takeshi Yokoo

新井 栄治 *2
Eiji Arai

坂井 隆則 *3
Takanori Sakai

緒方 佳典 *4
Yoshinori Ogata

橋本 真憲 *5
Masanori Hashimoto

森永 裕太 *6
Yuta Morinaga

宮田 晋輔 *7
Shinsuke Miyata

要 約

マツダは、約 11 年ぶりに復活となる新型ロータリーエンジン 8C 型を開発した。小型高出力な本エンジンを発電機として、シリーズハイブリッドで活用するものであり、地球環境を守るための施策として掲げているマルチソリューション戦略の 1 つである。本エンジンの開発でも「飽くなき挑戦」の精神を継承し、内燃機関の進化ビジョンを実現する熱効率改善技術、構造技術の進化と最適化に取り組んだ。ロータリーエンジンで課題となる冷却損失は、基本諸元を見直し最適化した。従来鋳鉄製であったサイドハウジングは材料をアルミに置換し軽量化した。また、燃焼進化にあわせて適宜レシプロエンジン構成技術の活用と高負荷燃焼に耐えうる構造強化を行った。レシプロエンジンと比べ、求められる出力性能をよりコンパクトなユニットで実現できる特長を活かし、サイズの大きな高出力モーター、ジェネレーターと組み合わせて同軸上に配置しながらも、MX-30 の車体フレームへの搭載を可能とした。

Abstract

Mazda has developed an 8C rotary engine, making a comeback after approximately 11 years. This compact and high-output engine is intended to be utilized as a generator in a series hybrid system, and it is one of the strategies in our multi-solution approach aimed at preserving the Earth's environment. The development of this engine also carried forward "the spirit of Never-Stop Challenging" focusing on improving thermal efficiency and evolving and optimizing structural technology to realize the vision of advancement in internal combustion engines. The challenge of cooling loss in rotary engines was addressed by reevaluating and optimizing basic specifications. The previously cast iron-made side housings were replaced with aluminum to reduce weight. Additionally, in line with the evolution of combustion, enhancements were made to leverage reciprocating engine enablement and strengthen the structure to withstand high-load combustion. Unlike reciprocating engines, the unique advantage of the rotary engine lies in achieving the required output performance with a more compact unit. This allowed for integration with larger, high-output motors and generators, positioned coaxially, while still enabling installation within the chassis frame of the MX-30 model.

Key words : Heat Engine, Rotary Engine, Design, Thermal Efficiency, Low Friction Loss

1. はじめに

クルマの電動化への移行期において、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、どのような時代でも、走る喜びと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、シリーズハイブリッドで活用するために、求められる出力性能をよりコンパクト

*1～7 エンジン設計部
Engine Design Engineering Dept.

トなユニットで実現した新型ロータリーエンジン 8C 型 (以下、8C 型) を開発した。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。

2. 開発コンセプトと主要諸元

8C 型エンジンの外観を Fig. 1 に、技術コンセプトを Fig. 2 に、及び主要諸元を Table 1 に示す。8C 型エンジンは構造課題である冷却損失の低減のため、ロータリーエンジンの基本諸元である創成半径・偏心量を見直し低 S/V 化し、燃焼改善による熱効率改善を実現した。これに加えて Fig. 3 に示す走行負荷によらない発電機の運転マップ設定によりポンプ損失を低減し燃費改善を得た。

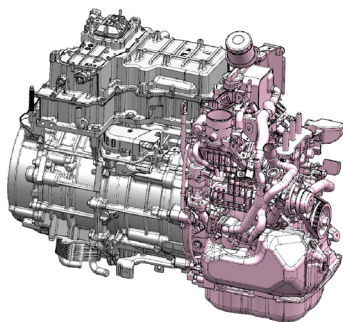


Fig. 1 Engine General View

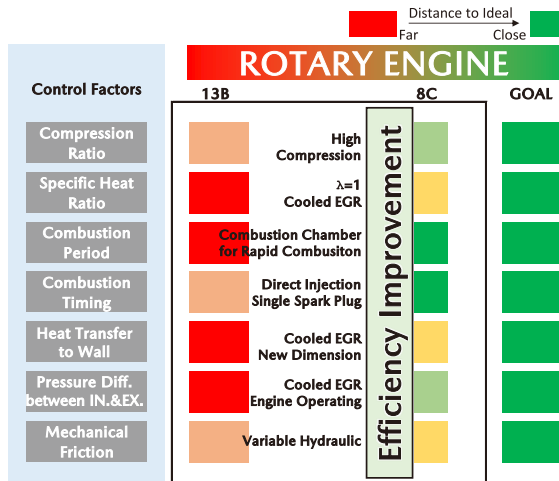


Fig. 2 Technology Concept

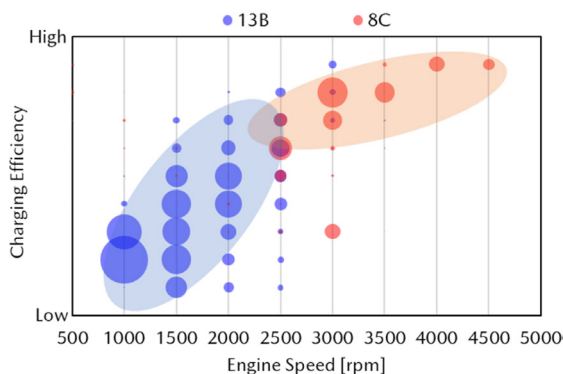


Fig. 3 Time Frequency Bubble Chart @WLTC Mode

Table 1 Specifications

Engine	13B RENESIS (Japan)	8C (Japan)
Number of Rotor	2 Rotor	1 Rotor
Basic Specifications e: Eccentricity R: Generating Radius b: Width	【B Dimension】 e=15 R=105 b=80	【C Dimension】 e=17.5 R=120 b=76
Displacement	654×2	830×1
Compression Ratio	10.0 : 1	11.9 : 1
Side Housing Material	Cast Iron+Gas Carbonitriding	Aluminum+ Cermet Thermal Spraying
Intake Type	Side/2port	Side/2port
Exhaust Type	Side/2port	Side/2port
Apex Seal Type	W=2.0 2 pieces Chilled Cast Iron	W=2.5 2 pieces Chilled Cast Iron
Fuel Injection System	Port Injection	Direct Injection
Max. Injection Pressure	0.4MPa	30MPa
EGR System	w/o	w/
Max. Power /rpm	158kW/7450rpm (Std.)	53kW/4500rpm
Fuel Type	Premium Gasoline	Regular Gasoline

加えて、出力高密度化に伴い、最大燃焼圧の上昇による構造系への荷重増加が課題となった。ロータリーエンジンの燃焼室はサンドウィッチ構造をしており、ローターハウジングのずれによる燃焼室保形性の改善が必要となる。また、マルチ電動技術コンセプトを実現するためには、発電機の軽量化と限られたスペースへの搭載性が必要となる。これらを解決する構造系の具体的な機能進化について紹介する。

2.1 熱効率の改善

(1) 諸元の適正化

基本諸元 (e: 偏心量, R: 創成半径) について示した図を Fig. 4 に示す。また、ロータリーエンジンのトロコイド係数は固定し、基本諸元 (e: 偏心量, R: 創成半径) の変更による機能影響を抽出した結果を Fig. 5 に示す。

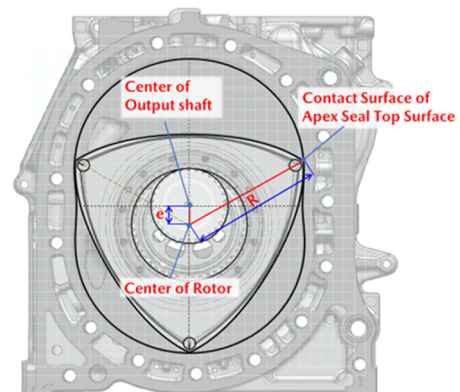


Fig. 4 Basic Trochoid Specifications (e, R)

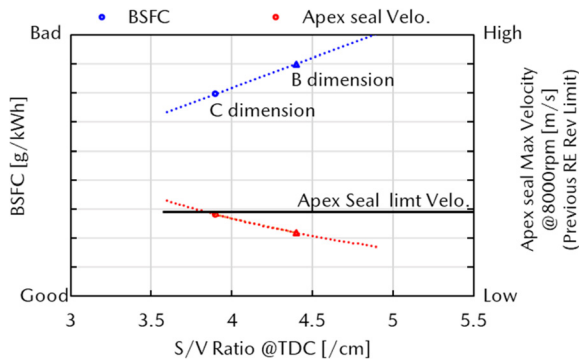


Fig. 5 Dimensions and S/V Ratio

燃焼室 S/V 比と機械抵抗による悪化及びアペックスシール周速限界から Table 1 に示す C ディメンションを選定し、熱効率改善を図った。

(2) 構造系の強化

Fig. 6 に示すようにロータリーエンジンは並んだハウジングをチューブラピンで位置決めし、テンションボルトで押さえつける構造となっている。燃焼圧による変形感度の高い制御因子は、チューブラ周り・短軸燃焼室側・袴部の剛性が挙げられる。ずれはじめの制御因子はテンションボルト総軸力と部品同士の合わせ面摩擦係数に依存する。

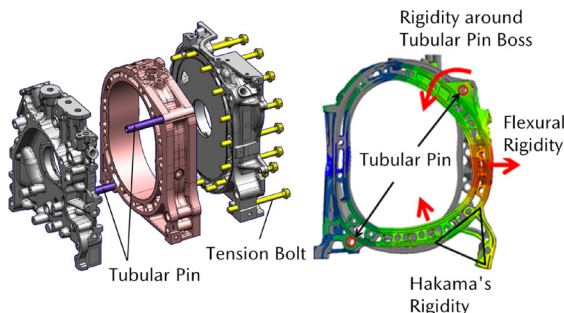


Fig. 6 Housing General View and CAE Analysis

燃焼改善に伴う最大燃焼圧増加は構造上、燃焼室変形を引き起こし、圧縮比の低下をもたらす。この対策として、生産制約を踏まえた各部剛性の最大化とテンションボルト総軸力の最適化を図り、変形量を半減させた (Fig. 7, 8)。

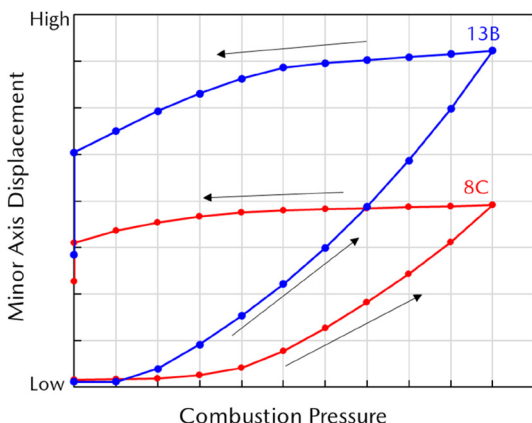


Fig. 7 Minor Axis Displacement @Combustion Cycle

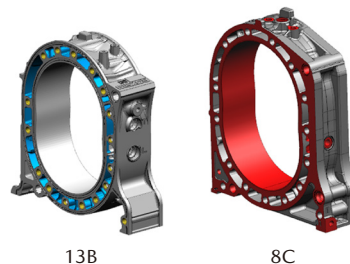


Fig. 8 Rotor Housing

2.2 重量の最小化

電動化に伴うパワートレイン総重量の増加から、発電機重量の最小化が求められ、排気量当たりの重量が軽量のロータリーエンジンにおいても更なる軽量化が必要となった。サイドハウジングを従来の鋳鉄からアルミに材料置換するため摺動面の強化を図った。

サイドハウジングの摺動面はサイドシール軌跡と燃焼圧による押付力で短軸部に負荷が集中し段付き摩耗が発生する (Fig. 9)。そこで、摺動面の耐摩耗性強化のため、レースエンジンで実績のあるサーメット溶射 (Cr3C2-NiCr) を高速フレーム溶射法にて量産化し解決した⁽¹⁾。

サイドハウジングのアルミ化により 8C 型で 15kg 以上の軽量化を実現している。

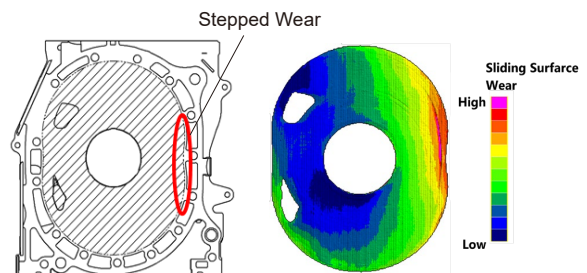


Fig. 9 Thermal Spraying Area and Wearing

2.3 搭載性

従来内燃車と電動車のパッケージを共通化するために、サスフレーム間のスペースにコンパクトな 8C 型をモーター・ジェネレーターと同軸上に配置し、車両前後方向 (Fig. 10) の最小化を図っている。これにより室内空間を犠牲にすることなく従来の内燃機関モデルと共通のエンジンルームに搭載を可能としている。

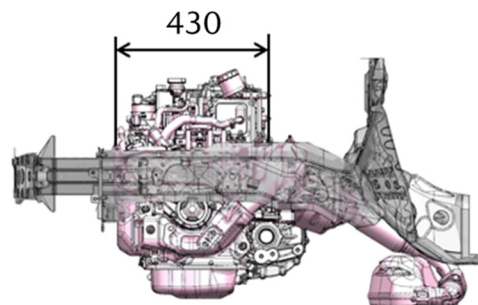


Fig. 10 Transverse Line Frame Direction Layout

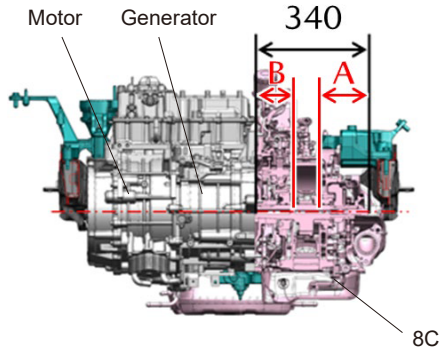


Fig. 11 Buttock Line Frame Direction Layout

8C型エンジン／ユニットとしては、回転系部品の構造を見直してエンジン軸端部長さを従来の13B型エンジン並みに抑えることで、上記のレイアウトへ収めた (Fig. 12)。

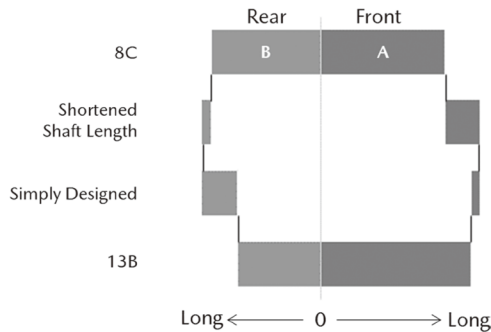


Fig. 12 Comparison of Shaft Lengths

(1) エンジンフロント側軸長 (Fig. 11 A 区間)

ロータリーエンジンでは、ローターの偏心質量に起因した不釣り合い慣性力を解消するために、ローターを挟んだエキセントリックシャフトの前後に釣り合いおもり (フロント側はバランスウェイト) を配置している。従来の2ローター・エンジンの場合、前後のローターの位相を180°ずらすことで、この不釣り合い慣性力をキャンセルすることが可能であるが、1ローター・エンジンの場合は、この不釣り合い慣性力を前後の釣り合いおもりで解消する必要があるため、8C型エンジンのバランスウェイト軸長は13B型比で1.5倍に拡大している。

そこで、エキセントリックシャフト内にあるローター冷却用のオイルジェット的位置をローターのリア側配置とすることでシャフト内油路をエンジン中心へ押し込み、フロントノーズ長を約15%短縮した。

(2) エンジンリア側軸長 (Fig. 11 B 区間)

8C型エンジンでは燃料の供給方式として直噴式を採用したため、エキセントリックシャフトのリア側に新たに燃料ポンプをチェーン駆動するためのスプロケットが追加となり、リア軸長の延長課題があった。

従来の13B型エンジンのシャフトリア側にはテーパ勘合でフライホイールを締結していたが、8C型エンジンでは、テーパ勘合部とはずみ車部を分離し、テーパ勘合部とスプロケットを一体化、はずみ車部はスプ

ロケットとの間にダイヤモンドワッシャーを挟み込むこと (Fig. 13) で必要なトルク容量を確保した上で軸方向に短縮でき、リア軸長の延長を約40%から30%へ抑えた。

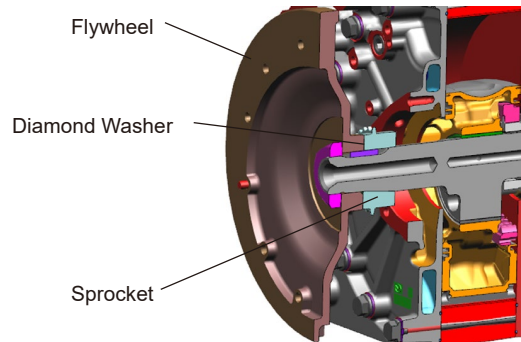


Fig. 13 Shortened Shaft Length (B Section)

3. 織り込み技術

3.1 ロータリーエンジン構成技術の改善

(1) オイルシール内圧低減

Fig. 14にローター断面及びオイル輸送経路を示す。ローターの側面には、ローター内部を冷却しているオイルの燃焼室への漏れに起因するオイル消費を抑制するため、リング状のオイルシールを設けている。ローターが大きくなったことにより、オイルシール径が拡大しシール長が増加した。加えて、偏心して回転するオイルシール内側のオイルに作用する遠心力の増加や、オイルのかき込み時に生じる動圧による圧力上昇により、オイル漏れ量の改善が課題となる。この対策として、オイルシール溝底からローター内部へオイルを排出するリリーフホールを設けた。穴位置はローター内部の冷却オイル循環の主経路を外して選定することで、オイルシール内部の圧力低下とオイル漏れ低減効果を得た (Fig. 15)。

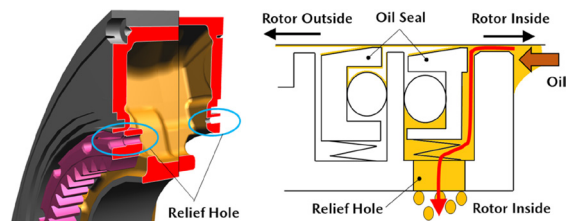


Fig. 14 Rotor and Oil Transport

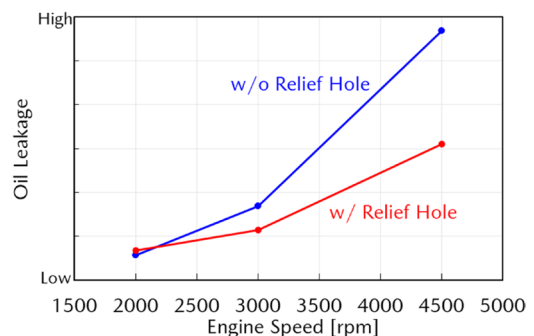


Fig. 15 Oil Leakage vs Engine Speed

(2) トロコイドめっき

Fig. 16 にトロコイドめっき部を示す。ローターハウジング摺動部のトロコイド面には、めっき浴へ触媒を添加する高速 Cr-Mo めっきを新たに開発し、低摩擦化を図った⁽²⁾。

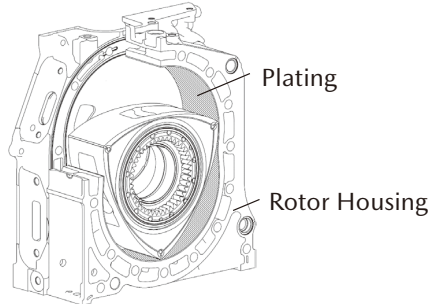


Fig. 16 Trochoid Plating

めっき被膜の低摩擦化により、従来から行っているトロコイド表面の油溜まり形成工程の簡素化や低摩擦コーティングの廃止ができ、生産性の向上にも寄与している。

(3) アベックスシール

アベックスシールとは、ローターの各頂点部に設けたガスシール部品であり、摺動面（トロコイド面）との接触面を第 1 次気密面、シール溝壁との接触面を第 2 次気密面と呼び、この 2 つの気密面を確保することがガスシール機能の基本となる。

この各気密面を確保するための押付力は主にガス圧力によって得ている。シリーズハイブリッドの発電用ユニットである 8C 型エンジンは、ガス圧力の大きな高負荷運転頻度が増えるため、押付力増加によるアベックスシールの摩耗抑制が課題となった。そこで、3.1. (2) のトロコイドめっきの採用に加えて、アベックスシール摺動面の揺動範囲 L を拡大することで耐摩耗性の向上を図った。Fig. 17 に示す様に、アベックスシールとトロコイド面との接触線（第 1 次気密面）は $\pm\phi$ の範囲で揺動し、この ϕ を揺動角と呼ぶ。揺動角 ϕ は基本諸元（Table 1）から決定されるため、アベックスシール摺動面の曲率を拡大することで揺動範囲 L を拡大した。しかし、揺動範囲 L を拡大するとアベックスシールの幅寸法も拡大してしまうため、摺動面への押付力増加によって潤滑状態の悪化を招いてしまう懸念があった。

そこで、アベックスシール摺動面の曲率（幅寸法）だけでなく、高さ寸法も含めた断面形状を見直す（Fig. 18）ことで各気密面の押付力/面圧を制御し、摺動面の潤滑状態を向上させた（Fig. 19）。また、第 2 次気密面のガスシール性向上を狙って、アベックスシール倒れ挙動も同時に抑制した（Fig. 20）。これは、アベックスシールがシール溝内で倒れ姿勢となった場合、第 2 次気密面は面接触から線接触へと変化するため、ガスシール機能の低下を招いてしまうことを防止する目的からである。

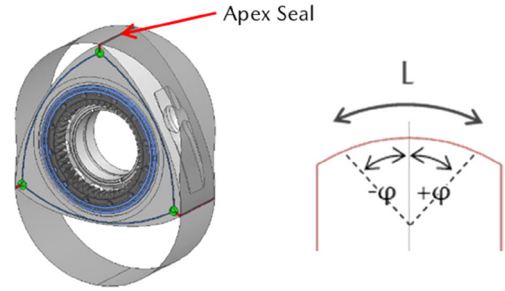


Fig. 17 Apex Seal

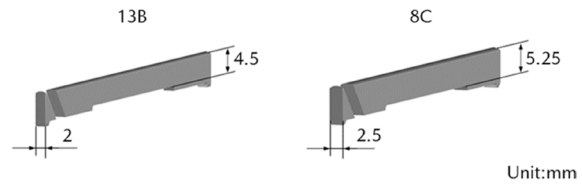


Fig. 18 Apex Seal Major Specification

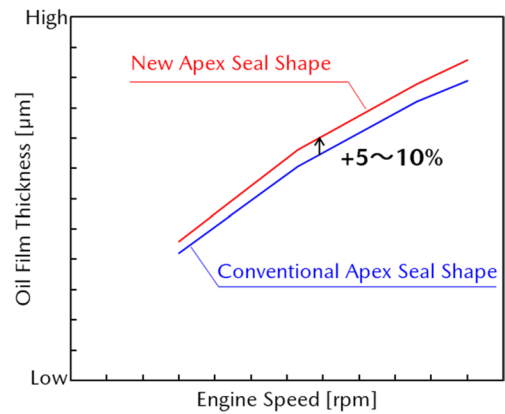


Fig. 19 Oil Film Thickness of Apex Seal

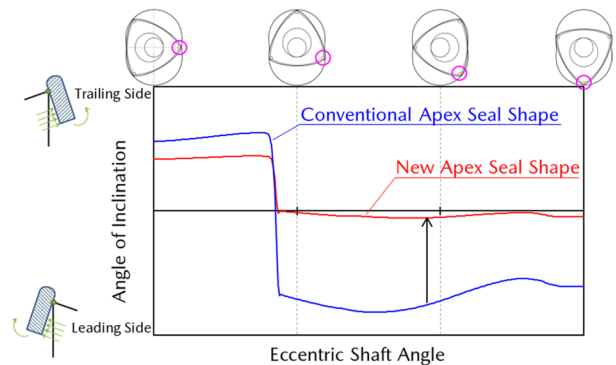


Fig. 20 Kinetic Analysis of Apex Seal at Low Speed

3.2 レシプロエンジン構成技術の展開

8C 型エンジンでは、既に確立された技術であるレシプロエンジン構成技術を水平展開することで開発期間を短縮した。以下にその技術を紹介する。

(1) DI ポンプ駆動

Fig. 21 に燃料ポンプ駆動システムを示す。排気ガス温と未燃 HC の低減、燃費改善を目的として、8C 型では従来のポート噴射 (PI) から直噴 (DI) に変更した。

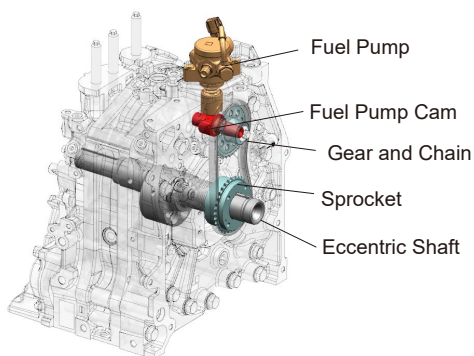


Fig. 21 DI Pump Drive System

一般にレシプロエンジンで使用される燃料ポンプシステムをロータリーエンジンで駆動するため、燃料ポンプカムハウジングをリアハウジングに搭載した。エキセントリックシャフト後端にドライブスプロケットを追加し、チェーン駆動するシステムとした。

(2) 可変油圧制御

Fig. 22 に油圧システム回路を示す。シリーズハイブリッド化により高負荷領域を主としたエンジン運転条件となっている。ローター冷却性の強化（クーリングオイルジェット流量増大）と水冷オイルクーラーでの放熱量強化のため、従来より多くの供給流量が必要となった。高負荷領域で増加する要求流量は確保し、実用低速領域における燃費を向上させるため、OCV（Oil Control Valve）を用いた可変油圧コントロールを行っている。OCV 採用により低回転域の機械抵抗を 14%低減した（Fig. 23）。

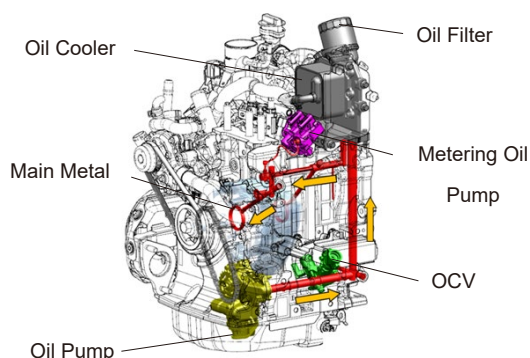


Fig. 22 Oil Circuit

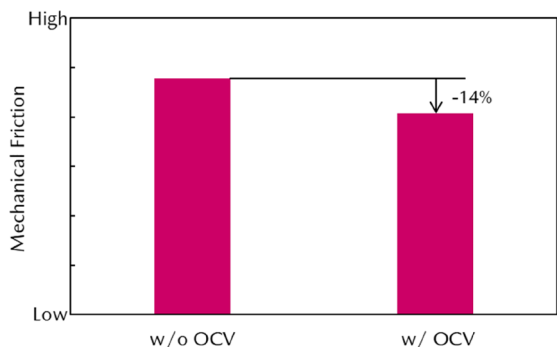


Fig. 23 Mechanical Friction @2500rpm Oil Temp.95°C

(3) Cooled EGR システム

Fig. 24 に EGR システムを示す。ロータリーエンジンの理想燃焼へ近づけるため高圧縮比化しているがノッキングが発生しやすくなる。ノッキング抑制手段として、排気ガスを吸気へ再循環する Cooled EGR システムを採用した。

Cooled EGR を導入することで、比熱比の向上、冷却損失の低減、ポンプロスの低減により燃費改善効果が得られる。

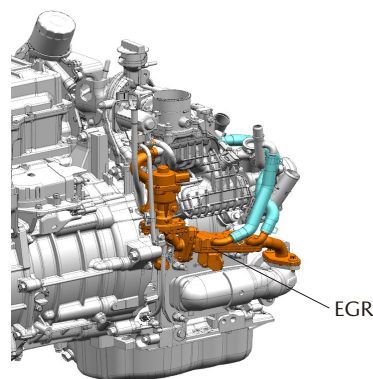


Fig. 24 EGR System

4. おわりに

8C 型エンジンは基本諸元の最適化と構造系進化により、RE 基盤技術の底上げを図った。マツダ初のマルチ電動化技術のエンジン開発となったが、レシプロエンジンの構成技術も活用し、コンパクトなロータリーエンジンの特長を活かしたパワートレインを量産化できた。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環境貢献につなげていく。

参考文献

- (1) 小田ほか：溶射技術によるアルミニウム合金鋳物の耐摩耗性向上, [マツダ技報, No.29, pp.110-114 \(2011\)](#)
- (2) 谷田ほか：エンジン摺動部材の低摩擦表面処理の開発, [マツダ技報, No.27, pp.148-152 \(2009\)](#)

■著者■



横尾 健志



新井 栄治



坂井 隆則



緒方 佳典



橋本 真憲



森永 裕太



宮田 晋輔

特集：MAZDA MX-30 Rotary-EV

12

MX-30 Rotary-EV のパワートレイン制御 Powertrain Control for MX-30 Rotary-EV

川田 卓二^{*1} 添田 征洋^{*2} 枝廣 育実^{*3}
Takuji Kawada Yukihiro Soeda Ikumi Edahiro
白石 卓也^{*4} 光永 誠介^{*5}
Takuya Shiraiishi Seisuke Mitsunaga

要 約

EV モデルの第一弾として 2020 年に量産開始した MX-30 EV MODEL（以下、EV MODEL）をベースに、マツダ独自の新型ロータリーエンジン 8C 型（以下、8C 型 RE）を発電機として搭載するプラグインハイブリッドモデル「MX-30 Rotary-EV」を開発した。パワートレイン制御開発の重要課題は、EV MODEL で好評を得た走行性能を継承し、航続距離を大幅に改善させることであった。本稿では、ハイブリッド走行モードにおいてエンジン運転頻度を減らして EV らしさを追求しながらも、発電時はドライバー操作に応じたりニアなエンジン回転数変化によって人馬一体感を実現した取り組みについて紹介する。

Abstract

Based on the MX-30 EV MODEL, whose mass production started in 2020 as Mazda's first EV model, we have developed the MX-30 Rotary-EV, a plug-in hybrid model equipped with a generator using Mazda's unique rotary engine. The key issue of the powertrain control development was to inherit the driving performance that has been well-received in the EV MODEL and significantly improve the cruising range. This paper introduces the efforts that achieved "Jinba Ittai" feel by reducing the engine operation frequency in hybrid driving mode to pursuit for EV-like feel, while linearly changing engine speed in response to driver operations during power generation.

Key words : Powertrain control, Energy management, Performance Feel, NVH

1. はじめに

マツダは技術開発の長期ビジョン「サステナブル“Zoom-Zoom”宣言 2030」に基づき、「SKYACTIV マルチソリューションスケラブルアーキテクチャー」（Fig. 1）の商品として 2030 年時点で生産する全ての車に電動化技術を搭載する計画である。

今回、2020 年に EV モデルの第一弾として量産開始した EV MODEL をベースに、マツダ独自の 8C 型 RE を発電機として搭載したプラグインハイブリッドモデル「MX-30 Rotary-EV」を開発した。

本稿では、MX-30 Rotary-EV がお客様に提供する 3 つの Key Value⁽¹⁾ (KV) のうち、特にパワートレイン制御開発で注力した下記 2 つの KV 実現の取り組みについて紹介する。

KV#1 普段は BEV として使うことができる

KV#2 安心して長距離ドライブができ、出かけた先でもアクティブなカーライフを楽しめる

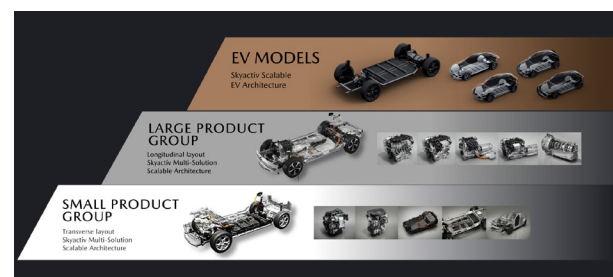


Fig. 1 SKYACTIV Multi Solution Scalable Architecture

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

*2~4 走行・環境性能開発部
Drivability & Environmental Performance
Development Dept.

*5 NVH 性能開発部
NVH Performance Development Dept.

2. e-SKYACTIV R-EV システムの概要

2.1 KV#1&2 を実現するためのシステム設計

(1) ハイブリッドシステム

室内空間を犠牲にせず、搭載性に優れる 8C 型 RE を採用した。また、高回転・高負荷領域の効率が良いロータリーエンジンの特性を活かすために、駆動系と機械的に切り離すことで車速に関係なくエンジンの運転領域を選択可能なシリーズハイブリッド方式とした。

また、普段は EV として使用可能な 107km^{*1} の航続距離を確保するため、バッテリー容量を 17.8kWh^{*2} とした。

(2) 駆動システム

EV MODEL で好評を得た電気リック G-ベクタリングコントロール プラス (e-GVC Plus) やモーターペダル⁽²⁾等の各種機能を継承するため、Fig. 2(1)で示すように e-SKYACTIV R-EV は EV MODEL と同様のモーター駆動システムを採用した。

*1 国内 WLTC モードでの国土交通省審査値

*2 自社調べ

2.2 制御システム

前述のように、e-SKYACTIV R-EV の発電システムは駆動システムと機械的に切り離されているため、Fig. 2(2)に示すように 8C 型 RE のエンジン制御 (ECM: Engine Control Module) と発電機制御 (SGCM: Starter Generator Control Module) を追加し、駆動システムとは完全に独立した構成とした。その結果、パワートレイン全体を統合制御する PCM (Power Control Module) は、高電圧バッテリーと燃料の 2 つのエネルギー源を走行シーンに応じて使い分けるエネルギーマネジメント制御と、ECM と SGCM に対するトルク・回転数指示制御を EV MODEL に追加する構成で実現した。

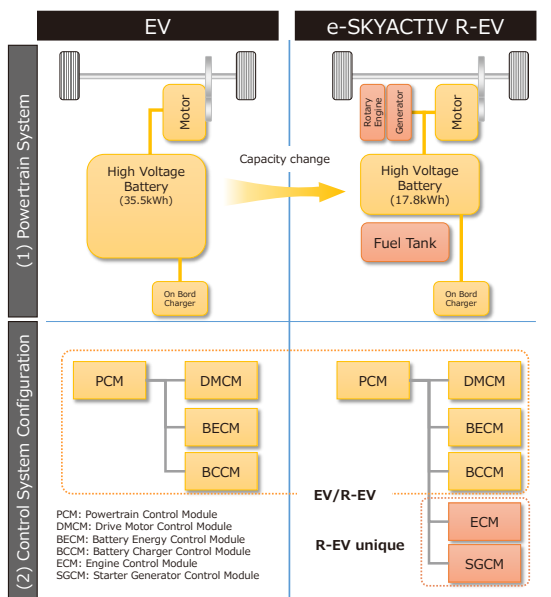


Fig. 2 Comparison of Powertrain System

3. パワートレイン制御の概要

3.1 ドライバーの使用用途に対応する選択式の 3 つのモード

プラグインハイブリッド車は、一般的にバッテリーに貯めた電力により BEV として使用し、SOC 低下後は発電・停止を繰り返しながら走行する。MX-30 Rotary-EV は、KV を実現させるため、ドライバーの使用用途に対応できるように以下に示す 3 つのドライブモードを設定し、8C 型 RE の発電動作を緻密に切り替える制御を織り込んだ。

(1) ノーマルモード

8C 型 RE を積極的に起動させることで、駆動電力を補いやすくし、EV MODEL と変わらない「人馬一体」の走りを実現する。

(2) EV モード

8C 型 RE の起動を抑え、極力バッテリーからの電力のみを使用して走行することで、「EV として使う」ことを主体に環境に配慮した使い方を可能にする。

(3) チャージモード

ユーザーの設定したバッテリー充電量 (State of Charge; 以下 SOC) の目標値に向けて発電量をコントロールすることで、出先での EV 走行や給電を可能にし、アクティブなカーライフをサポートする。

3.2 EVらしさを追求したハイブリッド制御

e-SKYACTIV R-EV システムは、SOC 低下後のハイブリッド走行中においても、EV らしく運転できる発電制御を織り込んだ。「EV らしさ」とは、発電時間を最小限にすることで、EV 走行を広く行うことができることと定義した。

ハイブリッド走行中の発電時間を最小限にするためには、1 度の発電量を大きく、かつ、発電時間を短くできればよい。8C 型 RE は、高回転・高負荷での発電効率が良いため、EV らしさの実現に適している。一方で、発電出力が高いと発電時の音も大きくなるため、走行音と発電時の音が同調するように、車速の上昇にあわせて発電出力を増加させる制御とした。Fig. 3 に、WLTC モード (欧州) での車速 - 発電出力のエネルギー頻度を示す。e-SKYACTIV R-EV は、車速が上昇するにつれて発電出力が増加する (青) ように、車速に応じた発電出力を設定している。

Fig. 4 に、WLTC モード (欧州) の各車速における発電時間の割合を示す。e-SKYACTIV R-EV では、高車速で高出力の発電を行うことで発電時間を短時間に抑えており、Fig. 4 で示す競合車 A に比べると、e-SKYACTIV R-EV の発電時間は WLTC モード (欧州) 全体で 4 割程度少ない。特に、低中車速となる市街地走行において、発電頻度を下げて EV 走行領域を拡大している。以上の制御により、ハイブリッド走行時でも EV らしさをもつマツダ独自のハイブリッド制御を実現した。

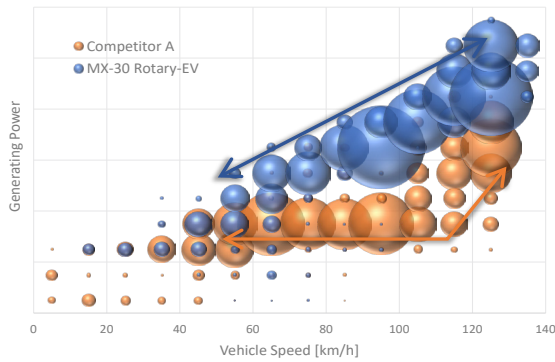


Fig. 3 Power Generation Output for Each Vehicle Speed in WLTC

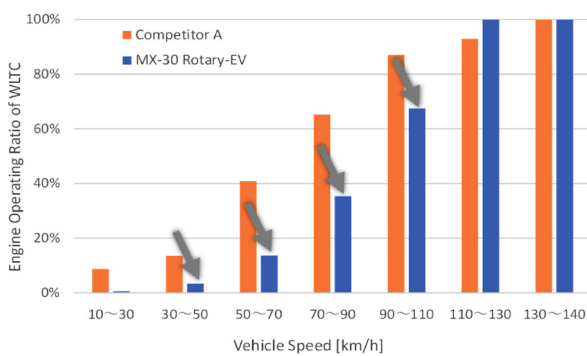


Fig. 4 Engine Operating Ratio for Each Vehicle Speed in WLTC

3.3 ドライバー操作に応じたエンジン回転数のリニア感

ここまで、e-SKYACTIV R-EVにおけるハイブリッド制御の基本的な考え方について述べてきた。実際の市場ではさまざまなシーンが存在し、ドライバー操作や車速、SOCが変化し続けている。

各状態の過渡領域に関しては人馬一体の考えから、ユーザーの操作に呼応して車の状態が変化するようなハイブリッド制御にすることで、違和感のない発電を実現した。前述3.2節のとおり、定常走行中は車速に対して発電出力のベースを決めているが (Fig. 5のConstantの回転ライン)、ドライバーがアクセルを強く踏み込んだ場合は、踏み込み量に応じて Fig. 5のAccelerationの回転ラインに向けて回転変化し、アクセルを離すと Fig. 5中のDecelerationの回転ラインに向けて回転変化を与える制御を織り込んだ。

更に、アクセルを踏んだ時のエンジン回転数の変化速度 ($\Delta\text{rpm}/\text{sec}$) の作り込みを行っている。 $\Delta\text{rpm}/\text{sec}$ は遅すぎると変化を感じられず加速感が得られない。一方で、早すぎると加速感と合わずに違和感となるため、加速度と一致させることが重要である。Fig. 6にe-SKYACTIV R-EVの車速に応じた $\Delta\text{rpm}/\text{sec}$ を示す。参考にICE (内燃機関) 車のギア段ごとの $\Delta\text{rpm}/\text{sec}$ を破線で重ね比較した。

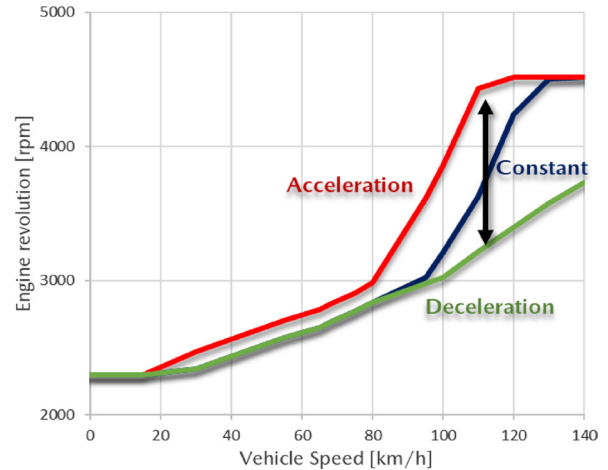


Fig. 5 Changes in the Engine Rotation Line with Vehicle Speed due to Acceleration/Deceleration

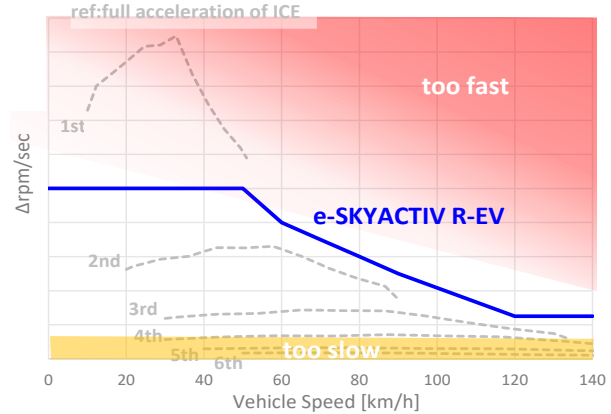


Fig. 6 Natural Change of Engine Revolution

ICEの場合、ギア段によって車速に対するエンジン回転数の傾きが変わるため、 $\Delta\text{rpm}/\text{sec}$ は加速度差以上にギア段によって変わってくる。具体的には、1stギアは車速に対する回転数変化が急峻 (too fast) で、4th以上は加速感が分かりにくくなる (too slow) のが一般的である。

これに対し、e-SKYACTIV R-EVでは $\Delta\text{rpm}/\text{sec}$ を任意に設定できる利点を生かして、加速感のリニアリティが得られるよう各車速で作り込んだ。この設定値は駆動用モーターのトルク特性に近似したものとなり、従来のICEよりも違和感のない加速感が得られ、より進化した「人馬一体」の走りを実現できた。

3.4 ドライバー操作・車両状態に応じたエンジン作動状態のリニア感

ハイブリッド車は、走行中にエンジンの始動・停止を繰り返しながらSOCを維持させている。このエンジン始動・停止のタイミングは、e-SKYACTIV R-EVのEVらしさの表現や発電ON・OFFの煩わしさに直結する重要な要素である。EV領域の広さを感じながらも、違和感のない発電タイミングを作り込む必要があった。

また、ドライバーはハイブリッド車の発電タイミングについて、低車速ではあまりエンジン始動せず、高車速ではすぐにエンジンが始動するようなイメージを持っていると考えた。発電のわずらわしさを感じづらくするために発電開始・停止のタイミングがドライバーの予想と合うような制御を設計した。EVらしさとドライバー予測との一致性の両面から検討した e-SKYACTIV R-EV システムの発電開始閾値ラインを Fig. 7 に示す。図中のラインは、各車速における発電を開始する加速度を示している。

低車速の領域では、市街地の一般的な GO-STOP 時の加速度をカバーできる 3m/s^2 以上の加速でも EV 走行を維持できるように設計し、EV 領域の広さを実感しやすくした。中車速域は、高速道路への合流など、パワーの必要な加速シーンではエンジンを始動させ、エンジン回転コントロールも合わせて力強い加速感を演出した。高車速領域では、高出力が必要なシーンが多いことに加え、前述の 3.2 節で決めた発電出力から車速が高い時は高出力での発電ができるため、積極的にエンジンを始動させて必要なパワーを瞬時に出せるような設計にした。

発電停止タイミングは、アクセル開度や減速加速度から、ドライバーが明確な意図で行う操作に合わせて停止するよう設計した。

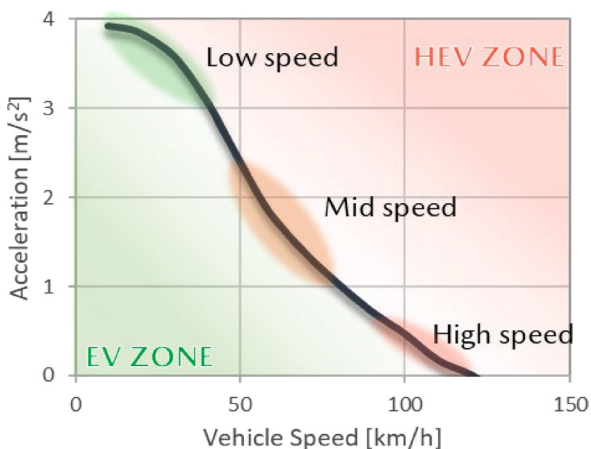


Fig. 7 Engine Operating Line for Vehicle Speed and Acceleration

また、SOC が低下した際には、目標 SOC への追従性をもたせるために発電頻度を増やす必要がある。Fig. 8 に SOC ごとの発電開始閾値ラインを示す。e-SKYACTIV R-EV では、SOC が下がっても Fig. 8 上での右肩下りの特性を維持しながら発電開始加速度を低下させている。

SOC 変化に対してエンジン始動ラインを滑らかに変化させることで、ドライバーが SOC 残量などの車両状態を感じ取りやすくなり、どの SOC でも違和感のない納得感のあるエンジン始動制御を実現した。

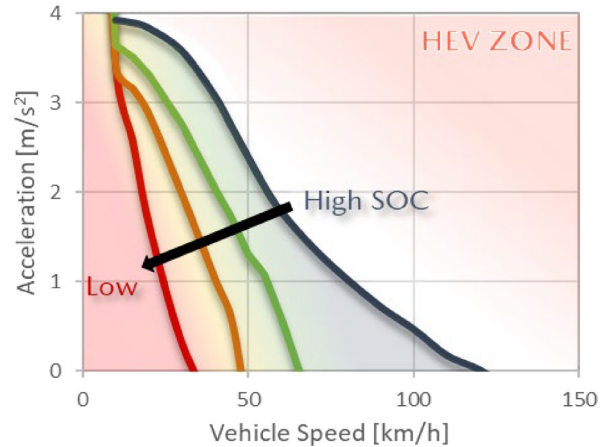


Fig. 8 Engine Operating Line for Vehicle Speed and Acceleration for Each SOC

4. まとめ

マツダの「飽くなき挑戦」の象徴であったロータリーエンジンは 2012 年に一度量産を終了したが、その役割を変えて発電機用のエンジンとして復活した。今後も環境性能を向上させて、この技術を絶やすことなく魅力的な商品開発を続けていく。

参考文献

- (1) 上藤ほか：MX-30 Rotary-EV の紹介、[マツダ技報, No.40, pp.47-51 \(2023\)](#)
- (2) 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 \(2021\)](#)

■ 著 者 ■



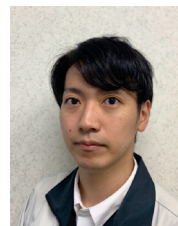
川田 卓二



添田 征洋



枝廣 育実



白石 卓也



光永 誠介

特集：MAZDA MX-30 Rotary-EV

13

アルミサイドハウジング実現に向けた 高速フレーム溶射技術の開発

Development of HVOF Thermal Spray Technology for Aluminum Side Housing

山本 真司^{*1} 中田 行俊^{*2} 高橋 宏和^{*3}
Shinji Yamamoto Yukitoshi Nakata Hirokazu Takahashi
池田 雄一郎^{*4} 岸田 高穂^{*5} 岡田 保彦^{*6}
Yuichiro Ikeda Takaho Kishida Yasuhiko Okada

要 約

マツダは走る喜びと優れた環境性能を実現する一つの選択肢として、マツダ独自の軽量、コンパクトなロータリーエンジン（以下、RE）によるバッテリーへの充電を可能とする e-SKYACTIV R-EV を開発し、お客様に提供している。従来の RE では、その大型構成部品であるサイドハウジング（フロントハウジング及びリアハウジング）は鋳鉄製であり、ユニットの軽量化による更なる運動性能と環境性能を追究するためには、この 2 部品のアルミニウム（以下、アルミ）への材料置換が重要課題となっていた。しかし、硬度の低いアルミでは、回転運動するローターに装着されたシール部材の摺動に対する耐久性が得られないため、高い耐摩耗性を有する硬化層を摺動面にコーティングする必要がある。そこで、摺動面の耐摩耗性を確保するコーティング手段として、高速フレーム（以下、HVOF）溶射技術を適用した。本技術の適用にあたり、摺動面に要求される機能と品質の関係、溶射皮膜の品質特性に影響する要因とそのメカニズムを明確にした。これらの検証を積み重ね、技術を手の内化することにより、要求機能、品質を確保しつつ、必要最小限の投資、コストで量産適用を実現した。本稿ではこの取り組みについて報告する。

Abstract

As one of the options for realizing both driving pleasure and excellent environmental performance, Mazda has developed and released e-SKYACTIV R-EV that enables Mazda's unique light-weight compact Rotary Engine (RE) to charge the battery. The conventional RE has cast-iron side housings which have been required to be replaced with aluminum for lighter weight and higher performance, but the aluminum side housing needs wear-resistant coating on its sliding surface to secure durability. We therefore developed High Velocity Oxy-Fuel (HVOF) thermal spray technology and verified the effects of the influential factors on its coating quality and required functions, while minimizing the cost and investment through a series of verifications. This paper reports our initiatives aiming to put the technology into production.

Key words : Heat engine, Rotary engine, Wear resistance, Thermal spray, HVOF

1. はじめに

走る喜びと優れた環境性能を両立させる選択肢の一つとして、マツダは独自の RE による発電と外部電源によりバッテリーを充電し、モーターで駆動するプラグインハイブリッド車を開発し、お客様に提供している。軽量、コンパクトな RE の特性を生かした e-SKYACTIV R-EV によるマツダ独自の優位性を確立するには、既存の RE の

更なる軽量化が必要であり、その最重要課題として、主要構成部品であるサイドハウジングの材料を従来の鋳鉄からアルミに置換することが求められていた (Fig. 1)。

フロントハウジングとリアハウジングのアルミ化により、15kg 以上/台の軽量化が可能になり、これによってマツダ独自の RE による電動駆動ユニットをより高い走行性能、環境性能とともに実現することができる。

*1~5 パワートレイン技術部
Powertrain Production Engineering Dept.

*6 本社工場第 2 パワートレイン製造部
Powertrain Production Dept. No.2

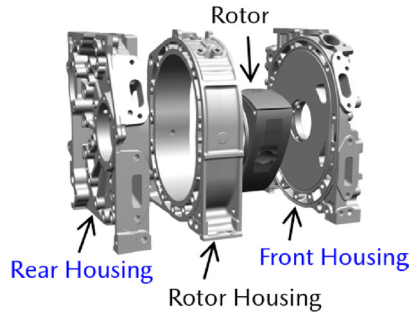


Fig. 1 Main Components of Rotary Engine

しかし、アルミは軽量である反面、材料硬度が低く、そのままサイドハウジングに使用すると、回転運動するローターに組み込まれたシール部材の摺動により削られて摩耗するため、摺動面としての機能を保持することができない。従って、アルミの摺動面に高い耐摩耗性を有する高硬度な材料をコーティングすることが必要不可欠となる。コーティングの工法としては、複合メッキ等、複数の表面硬化処理の耐久性を評価した結果、最も耐摩耗性が高く、かつ摺動抵抗や耐焼き付き性等にも優れた皮膜を形成できる Cr_3C_2 を主成分とするサーメット材を HVOF 溶射する工法を選定⁽¹⁾し、量産適用に向けた技術開発を行った。

2. HVOF 溶射技術の適用課題

2.1 HVOF 溶射の特徴

HVOF 溶射とは、プロピレン等の可燃ガスを高圧の酸素とともに溶射ガンのノズル内で燃焼させ、燃焼室の圧力を高めることで高速火炎（燃焼ジェット噴流）を発生させて、 Cr_3C_2 系サーメット材粒子を約マッハ 2.0（約 700m/s）の超音速でアルミ基材に衝突させることにより皮膜を形成する工法⁽²⁾である。Fig. 2 に示すように溶射ガンを左右にオシレートさせながら複数層を重ねることにより、摺動面に数百 μm の厚さで硬質かつ緻密な皮膜を形成することができる（Fig. 3）。

この技術は主に航空宇宙産業等で、極めて高い耐摩耗性や耐熱性が要求される少量生産部品に適用されることが多く、自動車用の大物部品としては世界初の量産適用となる。

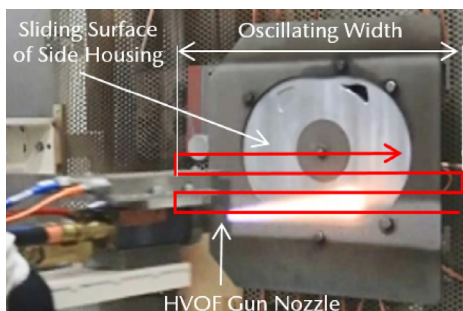


Fig. 2 HVOF Spray on Side Housing

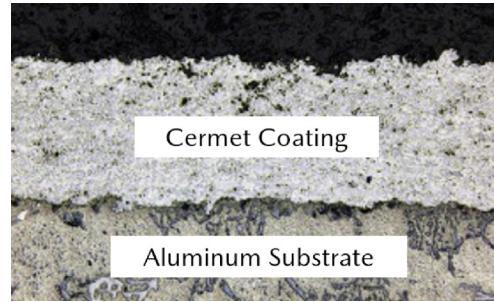


Fig. 3 Cross Section of HVOF Coating

2.2 HVOF 溶射技術の課題

アルミサイドハウジングへの量産適用においては、当初、摺動面に求められる機能（耐剥離性、耐摩耗性等）に対して、この新たな工法で得られる溶射皮膜が、どの程度の実力（マージン）をもっているかを明確に把握しきれていない状況であったため、要求機能の限界と品質の実力を一つ一つ見極めていく必要があった。そこで、摺動面に要求される機能、品質を満足するために必要な投資、コストを最小限に抑えることをねらいに、前処理工程の可否を検証しつつ、機能限界を明確にした上で、量産工程の仕様を決めることとした。

本仕様を決める上で、溶射範囲が摺動面全体の広範囲になることから、溶射によるワークの変形や、後工程となる硬質溶射皮膜の仕上げ研削における生産性の悪化が懸念された。

本技術適用における生産性の課題と解決に向けての視点、及び取り組み項目を以下に記す。

(1) 量産工程（前処理）の仕様決定

一般的な溶射処理においては、溶射前に基材表面を脱脂洗浄し、ブラスト等で粗面化することにより、溶射皮膜と基材間の密着力を高める必要があるとされている。ただし、これらの影響度は材料の組合せや溶射条件によって異なると考えられるため、摺動面の要求機能を確保するために必要となる、各工程の仕様、可否を見極める。

(2) 商品機能の確保（機能限界の見極め）

皮膜の品質特性の中でも特に重要かつ量産での管理が難しいと考えられる密着強度について、そのメカニズムと影響要因を明確にすることにより、意図的に下限品を製作し、あえて耐久評価に供試することで、機能限界を見極める。

(3) ワーク変形の抑制

溶射によるワークの変形メカニズムを明確にし、影響するパラメーターを適正に制御することにより、変形の最小化を図る。

(4) 皮膜の研削方式の決定

難削材である硬質皮膜を効率的に研削するため、溶射後の皮膜の表面粗さや被研削面の高さの変動（前加工精度、膜厚変動等を含む）にかかわらず、常に必要最小限の取り代で削る定量研削方式を確立する。

3. 課題解決に向けた取り組み

3.1 量産工程（前処理）の仕様決定

Fig. 4 に一般的に考えられている溶射とその前後加工の工程を示す。前工程として摺動面をフライス加工し、中間洗浄を行った後、溶射工程に入る。後工程では、皮膜の仕上げ研削等を行い、リークテスト工程にて品質を保証した後に、組立工程に送られる。通常の溶射工程では、まず脱脂洗浄して基材表面の油分や汚れを完全に除去した後、ブラスト等により表面に細かな凹凸形状を付与した上で溶射を行うことにより、溶射粒子を食い付きやすくすることが推奨されている。

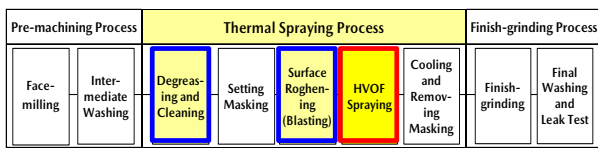


Fig. 4 Assumed HVOF Spraying Process for Side Housing

そこでこれらの前処理について、摺動面に求められる機能（耐剥離性）を確保する上で、どのような仕様でなければならないか、あるいはそれらの前処理が本当に必要かどうかという視点で、必要最小限の工程を見極めるために、前処理の仕様を振らした溶射テストを行い、密着強度への影響を検証した。密着強度は JIS H 8402 に準じて、試験片に溶射し、皮膜表面に強力な接着剤で相手材を接着し、引張試験で評価した (Fig. 5)。

Fig. 6 に脱脂洗浄工程で密着強度に影響すると考えられる要因を振らして溶射し、密着強度を測定した結果を示す。メーカー推奨の脱脂洗浄をした表面状態と、脱脂洗浄することなく、前加工工程の中間洗浄液や切削クーラントが付着したままの表面状態で、粗面化処理を行わずに溶射し、密着強度を評価した。その結果、全ての条件において接着剤で破断し、皮膜の密着強度は規格を満足することを確認できた。

また、Fig. 7 に粗面化工程の仕様を振らしたテストの結果を示す。メーカー推奨のブラスト面のほか、旋盤面、フライス面、溝加工やアンダーカット形状を加工した面を評価したが、これら全ての条件においても規格を満足することを確認できた。

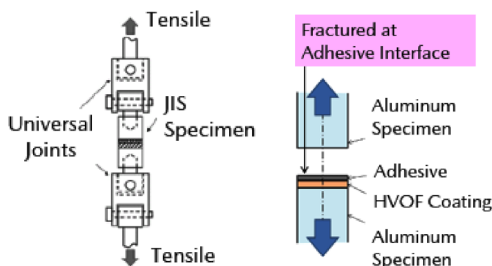


Fig. 5 Bond Strength Measurement

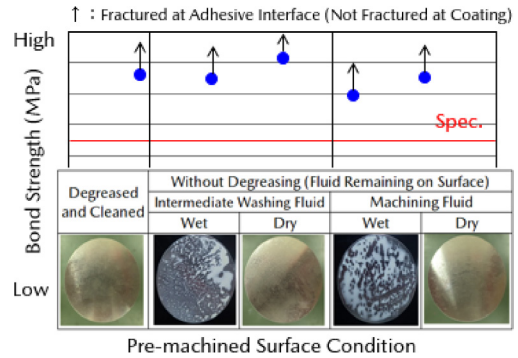


Fig. 6 Effect of Degreasing on Bond Strength

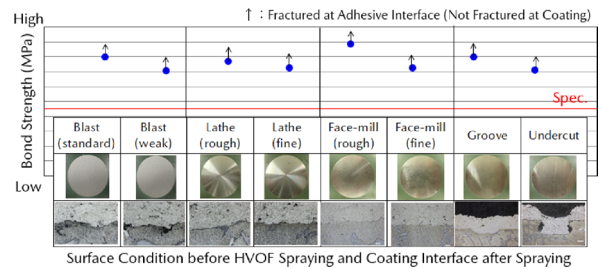


Fig. 7 Effect of Surface-roughening Type on Bond Strength

上記の結果を基に、脱脂洗浄、粗面化処理を行わず、フライス加工したままの状態でのN増しテストを行った結果、全て接着剤で破断し、なおかつ規格に対し、十分な密着強度を確保できることが分かった (Fig. 8)。更に試作品の耐久評価を行った結果、皮膜の剥離等の発生はなく、機能上問題ないことを確認した。

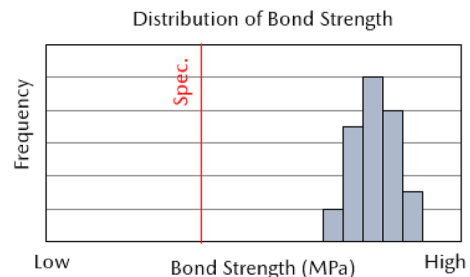


Fig. 8 Bond Strength without Degreasing or Roughening

以上の検証結果から、溶射用の前処理工程は不要と判断し、脱脂洗浄と粗面化工程を追加することなく、前工程のフライス品へ直接溶射することに決定した。これら2工程を不要としたことで、新工法に伴う設備投資をミニマムに抑えることができた。

3.2 商品機能の確保（機能限界の見極め）

これまでに社内で経験のない工法を量産適用するにあたり、お客様に提供する商品機能を確実に保証するには、機能限界を明確にし、新工法で得られる皮膜がその限界値に対してどれだけのマージンを確保できているかを把

握しておく必要がある。そこで、エンジン運転中の皮膜の剥離限界を知るためには、まず、意図的に密着強度を落とした皮膜を製作し、耐久評価により確認する必要があると考え、溶射皮膜の密着メカニズムの検証を行った。

アルミ表面をあえてバフで鏡面研磨し、その上から溶射した皮膜の断面を拡大観察した結果、平滑なアルミ表面に高速で衝突した溶射粒子が食い込んでおり、アルミ基材と皮膜の界面が凸凹形状を呈していることを確認した (Fig. 9)。これより、HVOF 溶射皮膜の高い密着強度は、その特徴である超高速 (約マッハ 2) で飛行する硬質粒子の基材への食い込みで生じたアンカー効果によるものと判明した。

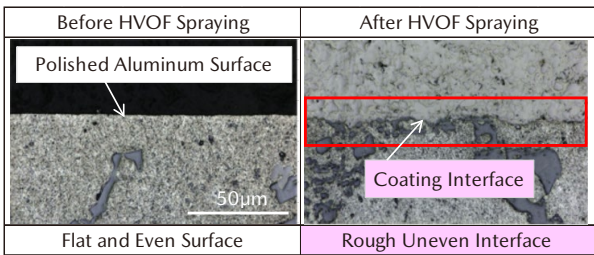


Fig. 9 HVOF Spraying on Polished Aluminum Surface

また、HVOF 溶射の場合、溶射距離 (溶射ガンから基材表面までの距離) が長くなると、粒子の飛行速度が低下することが分かっている (Fig. 10)。そこで、溶射距離と密着強度の関係性を調査した結果、接着剤強度より低い皮膜破断する領域においては、溶射距離が長い程、密着強度が低下することが分かった (Fig. 11)。

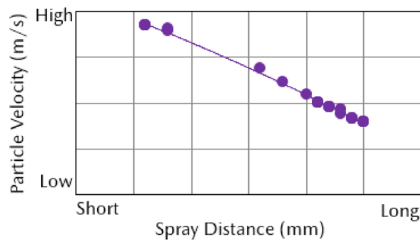


Fig. 10 Effect of Spray Distance on Particle Velocity

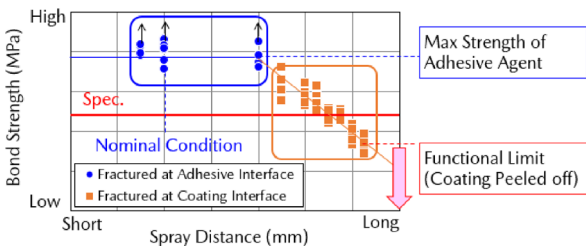


Fig. 11 Effect of Spray Distance on Bond Strength

以上の結果を基に、溶射距離を長く設定することにより、意図的に密着強度を落とした皮膜を製作した。下限品の皮膜は、標準品に比べて硬度が低く、気孔が占める

面積率も高いことから、機能限界を見極めるのにふさわしい下限品質が得られていると判断し、耐久評価に供試した。耐久評価の結果から、RE 運転中に皮膜の剥離が発生する機能限界を見極め、安全率を考慮した上で、密着強度の規格下限を最終決定した (Fig. 11)。

3.3 ワーク変形の抑制

耐久評価による機能検証を進める一方で、試作品による溶射テストを重ね、得られた品質を詳細に測定すると、溶射によりアルミ基材が大きく変形していることが分かった。

Fig. 12 に溶射前後及び仕上げ研削後の摺動面上の測定点 (14 点) における表面高さの測定結果を、溶射後に測定した膜厚と合わせて示す。溶射後の表面高さ (図中の ■) から膜厚分を差し引いた位置 (▲) が溶射後の皮膜とアルミ基材との界面となり、溶射前の基材表面高さ (◆) と比較すると、凸状 (上方向) に大きく変形していることが分かる。

この状態から皮膜表面を図中の×の高さに仕上げ研削すると、変形が大きい部位では研削後の最終膜厚が部分的に薄くなってしまふ。特にワーク中央部 (測定点 8~14) では変形がかなり大きいため、付けた皮膜の大部分を削り取らざるを得なくなり、変形によるロスが非常に大きいことが分かった。

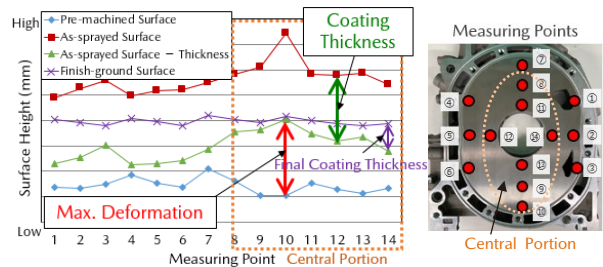


Fig. 12 Coating Thickness and Work Deformation

製品機能 (耐摩耗性) から要求される最終膜厚を確保するため、単純に必要な溶射膜厚を増やすと、その分コストが増加し、処理時間の延長に伴い生産性も低下してしまう。そこで、ミニマムコストで最終膜厚を確保するには、この変形 (=ロス) を最小限に抑えることが最も重要であると考え、以下の検証を行った。

(1) 要因振らしテストによる影響要因の絞り込み

まず、溶射パラメーターの中で、要求品質特性の一つである膜厚と、仕上げ研削時に膜厚のロスを招く原因となる変形量に影響を与える要因を明確にするため、振らしテストを行い、結果を重回帰分析することにより各要因の影響度を確認した。Fig. 13 に膜厚と変形量に対する各要因の標準偏回帰係数を示す。

Variables	Std. Partial Regression Coefficient	
	Thickness	Deformation
Overspray (mm)	N.S.	-0.659
Gun Traverse Speed (m/min)	-1.176	N.S.
Cooling Air Supply (L/min)	N.S.	-0.159
Spray Distance (mm)	-0.144	-0.633
Number of Spray Layers (cycle)	0.899	N.S.
Powder Feed Rate (g/min)	0.564	N.S.
Adjusted Contribution R ²	0.815	0.632

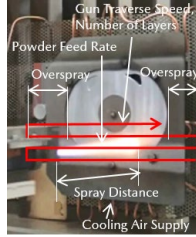


Fig. 13 Multiple Regression Analysis Result

これより、変形量に対しては、オーバースプレー（以下、OS）量，溶射距離，ワーク背面からの空冷エア流量の順で影響度が高いことが分かった。

このOS量とは、ガンを左右にオシレートさせながら溶射する際、ガンの移動速度を摺動面上で一定とするため、左右に幾分、摺動面幅より余分にオシレートさせる長さのことをいうが、これを長くする程、ワークが溶射フレームの熱源に照射されない時間が長くなり、その分だけ冷却時間が増えることで、ワークの温度上昇を抑えることができると考えられる。

Fig. 14 はアルミ材の平板（以下、TP）の背面に熱電対を取付け、溶射中の温度変化を測定した結果を示すが、OS量が大きい程、温度上昇が抑えられており、更に、最高到達温度が低い程、TPの変形量は小さくなることが分かった。

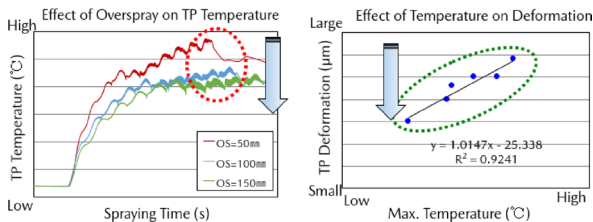


Fig. 14 Overspray vs. Temperature vs. Deformation

同様に、その他の有意な変形影響要因（溶射距離及び空冷）についても、ワークの温度上昇が抑えられる程、変形が抑制されることが確認された。

(2) 溶射変形のメカニズムの推定と対策の織り込み

これらの結果から、ワークの主たる変形メカニズムはアルミ基材と溶射皮膜（Cr₃C₂系サーメット材）の線膨張係数の差に起因するバイメタル変形であると推定した。Fig. 15 に示すように、溶射中にフレームによりアルミ基材が加熱され、熱膨張した状態で溶射皮膜が成膜された後、溶射後の冷却過程でアルミ基材と溶射皮膜は、それぞれの線膨張係数（α）に応じた比率で収縮しようとする。この時アルミはCr₃C₂系サーメット材に比べ、線膨張係数がはるかに大きい為、より大きく収縮しようとするが、溶射皮膜との界面部はアルミ表面に食い込んだ皮膜に拘束されるため、十分に収縮できない。これに対して、拘束のない背面側は大きく収縮するため、結果的にワーク中央部が上向きに凸状に変形する。

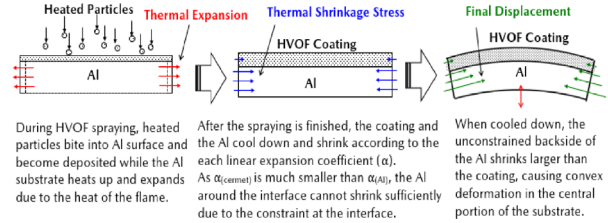


Fig. 15 Mechanism of Work Deformation

バイメタル変形は温度差と2種類の材料の線膨張係数の差（α_(Al) - α_(皮膜)）の積に比例すると考えられるが、αは材料固有の物性値であり変えることはできないので、溶射中の温度上昇（以下、ΔT）を抑えることが変形抑制のポイントになる。

ΔTを低減する方法としては、溶射距離を広げる（熱源である溶射フレームをアルミ基材から遠ざける）方法も考えられるが、この場合、要求品質特性である密着強度や膜厚の低下が懸念される。そこで、重回帰分析結果より、品質への影響度が低いと思われるOS量の拡大と空冷強化により対策することとした。

Fig. 16 に各要因とワーク変形量の関係を検証した結果を示す。これらにより、推定した理論どおりに変形抑制の効果が得られていることを確認した。

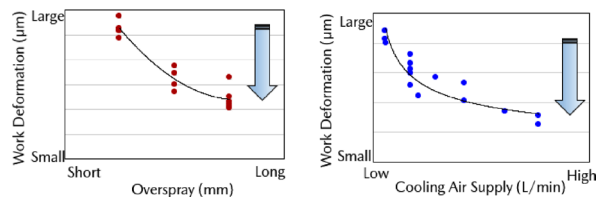


Fig. 16 Effect of Overspray and Cooling Air on Deformation

OS量の拡大については、生産性向上の効果も同時に狙うため、ワーク複数枚（4枚）を同時に連続溶射する方式（Fig. 17）を採用することとし、ワーク1枚当たりのOS量を拡大するとともに生産効率の向上を図った。これと合わせてワーク背面側の空冷エア流量を増加できるように、量産設備と治具の仕様を決定した。これらの対策を織り込むことにより、溶射変形を開発当初から大幅に（約70%）低減することができた（Fig. 18）。ロスを低減したことで、必要溶射膜厚も減らすことが可能となり、溶射コストを大幅に抑えることができた。

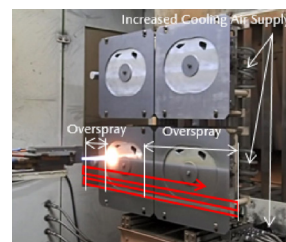


Fig. 17 Continuous Spraying on Four Works

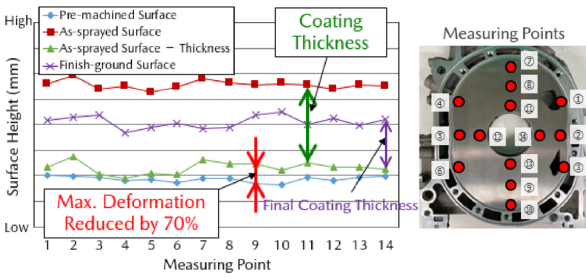


Fig. 18 Coating Thickness and Work Deformation

3.4 皮膜研削方式の決定

溶射後の皮膜表面は粗さが大きく、摺動面としてシール部材を滑らかに摺動させるためには、仕上げ研削で表面を高い精度で平滑に仕上げる必要がある。また、溶射皮膜は非常に高硬度な難削材であり、これを限られたサイクルタイム内で平滑に仕上げるには、粗残り（未研削部 = 品質不具合）が発生しない範囲で、必要最小限の取り代で研削することが望ましい。

しかし、溶射後の皮膜表面の高さは、上記の表面粗さに加え、膜厚自体の変動や溶射によるワーク変形、溶射前の摺動面のフライス加工の公差も含めて変動するため、通常の定寸研削方式（あらかじめNCで設定した寸法位置まで削る）の前提で、これらの変動を全て加味したねらい寸法を設定すると、研削代がかなり大きくなり、生産性の面から量産工程として成り立たせるのは難しい。

そこで、これまでシリンダーヘッド等の機械加工で構築してきた補正加工技術を研削工程に応用し、被研削面の高さに関係なく、常に必要最小限の取り代で研削できる定量研削の手法を新たに検討した。ドレスによる砥石径の変化や設備熱変位による研削精度の変動をNC上で補正する目的で平面研削盤内に導入した機内タッチセンサーを最大限活用することで、サイクルタイムと品質（粗残りなきこと）を両立できる方法を考案した。

Fig. 19 に従来の研削方法と、今回考案した方法を示す。

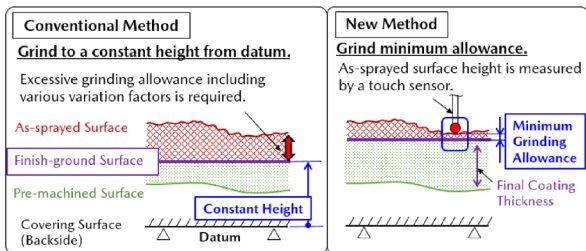


Fig. 19 Comparison of Grinding Methods

従来の研削では、被研削面の反対側のカバー面を基準に定寸研削を行っていたが、この方法では前述のとおり、溶射前の加工精度や溶射膜厚のバラツキ等を全て加味した、過剰な必要溶射膜厚及び研削取り代を設定する必要があるため、溶射コストや研削サイクルタイムが過大となる問題があった。これらのバラツキに対しては、前加工精度の向上や溶射膜厚の精密制御といった対策が考え

られるが、設備や工法の限界を考えると容易ではない。

そこで、前加工精度や膜厚変動によらず、研削取り代を最小化することが理想と考え、定量研削方式の適用を目指した。

定量研削の手順としては、まず溶射皮膜表面上の高さをタッチセンサーで多点計測し、研削盤基準で最も低い位置を割り出し、その位置における高さから一定の研削取り代を引いた値を研削終了高さとする。一連の平面研削を行った後、研削面の高さをタッチセンサーで再度測定し、NC上のねらい高さとの誤差を次サイクルで補正することで継続的に品質の安定化を図るとともに、研削後のワーク全高が図面公差内に入っていることを全数保証する。

この定量研削方式を適用する上での課題と、その取り組み結果を以下に示す。

(1) 溶射皮膜表面の凹凸に対する測定精度保証

溶射後の皮膜表面は粗く、凹凸が激しいため、その影響を受けない最適なタッチセンサーの先端径を決定した。検証テストの結果、実サイクルにて、ワーク脱着込みの繰り返し精度が十分確保できることを確認した。

(2) 測定ポイントの決定

被研削面の高さは前加工精度やワーク変形、膜厚バラツキにより変動する。タッチセンサーで比較的高い位置の高さを測定して定量研削の基準とした場合、相対的に低い位置で研削代が不足し、粗残りが発生してしまう。これは多点測定して最も低い位置を割り出すことで解決できるが、測定サイクルタイムを増加させないためには、測定点数を必要最小限に留める必要がある。そこで溶射によるワーク変形や前加工精度の傾向を詳細に分析した上で、Fig. 20 に示す 10 点の測定点に絞り込み、N 増しテストで粗残りが発生しないことを確認した。

(3) 研削取り代の決定

研削サイクルタイムを最小化するためには、粗残りが発生しない範囲で最小限の取り代に設定する必要がある。そこで、Fig. 20 に示す溶射皮膜表面の Rz 粗さの実力値を理論上の必要最小取り代と考え、これにバラツキを考慮した上で、量産における必要最小研削代を決定した。

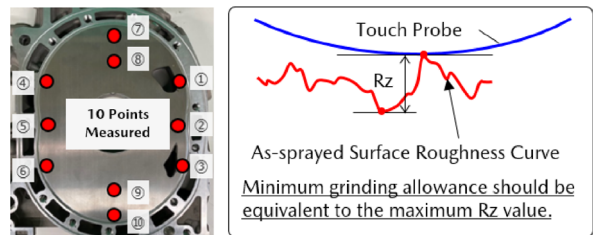


Fig. 20 Measuring Points and Grinding Allowance

上記の結果を織り込み、定量研削方式を適用することで、粗残りを発生させることなく、必要溶射膜厚及び研削サイクルタイムを大幅に削減することができた。

また、溶射変形の大幅な低減と仕上げ研削における取り代の最小化により、必要溶射膜厚を減らすことができた結果、溶射層数（重ねて溶射する回数）を低減しても最終要求膜厚を確保することが可能となり、ミニマムコストで本技術を量産に適用することができた。

4. おわりに

サイドハウジングのアルミ化に取り組み、15kg 以上／台の大幅な軽量化を達成することで、マツダ独自の進化を遂げた RE をお客様に提供するとともに、より高い環境性能と走る喜びの実現に貢献することができた。

今回開発した HVOF 溶射技術は、その皮膜の研削を含めて社内でも過去に量産経験が無く、全くの手探り状態からの開発であった。その中で、未知の課題一つ一つに対して基礎実験を積み重ね、データを定量的に掘り下げて検証し、理論的にメカニズムを明らかにするプロセスを地道に重ねることで、技術を手の内化し、量産化を実現することができた。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愚直に続けていく。

最後に今回の技術開発及び量産適用にご協力いただいた社外協力メーカー、関係者の皆様に感謝の意を表したい。

参考文献

- (1) 小田ほか：溶射技術によるアルミニウム合金鋳物の耐摩耗性向上，[マツダ技報, No.29, pp.110-114 \(2011\)](#)
- (2) 和田：高速フレーム（HVOF）溶射の現状と課題，表面技術，Vol.59, No.8 (2008)

■著者■



山本 真司



中田 行俊



高橋 宏和



池田 雄一郎



岸田 高穂



岡田 保彦

特集：MAZDA MX-30 Rotary-EV

14 ロータリーエンジンの鋳鉄製ローターのアンバランス改良 Improvement of Imbalance in Cast Iron Rotor for Rotary Engine

坪井 涼介^{*1} 刀祢 英男^{*2} 曾根 雅治^{*3}
 Ryosuke Tsuboi Hideo Tone Masaharu Sone
 小島 仁志^{*4} 山光 一央^{*5} 高垣 真人^{*6}
 Hitoshi Kojima Kazuhiro Yamamitsu Masato Takagaki

要 約

e-SKYACTIV R-EV の発電用動力として採用した新型ロータリーエンジン 8C 型（以下、8C 型）は、バッテリー EV のような快適な室内空間の実現を目指して静粛性の向上を図っており、それにはローターのアンバランスが大きく影響する。ローターサイズが従来モデルの約 1.3 倍に大型化された 8C 型は、その分素材の出来栄の影響も増大するため、より厳しい目標に挑戦した。鋳型から机上でアンバランスを求める解析ツールを開発し、改善効果を定量的に予測することで目標を達成する確度の高い対策を講じ、そのツールを応用することでタイムリーな金型の維持管理を実現した。これにより既存アセットを有効活用しつつ、鋳造ばらつきの極小化を究めた鋳造工程を確立した。

Abstract

The new 8C type rotary engine (RE) adopted as the power source for the e-Skyactiv R-EV's generator aims to improve quietness to achieve a comfortable interior space like a battery EV, and rotor imbalance has a major impact on this. The 8C type RE, which has a rotor size about 1.3 times larger than the previous model, has a greater impact on the quality of the formed material due to its larger size, so it has taken on more challenging goals. An analysis tool was developed to obtain the imbalance from the sand mold, and by quantitatively predicting the improvement effect, highly reliable measures to achieve the goal were taken, and by applying this tool, timely maintenance management of metallic pattern was achieved. As a result, a casting process that minimizes casting variations while effectively utilizing existing assets has been established.

Key words : Production, Casting, Rotary engine, Dynamic balance

1. はじめに

e-SKYACTIV R-EV は静粛で快適な室内空間を目指し、往復機構や動弁系のない RE を発電用動力として採用した。その中でも、自転しながら偏心半径で公転するローター (Fig. 1) にアンバランス (詳細は後述) があると、洗濯物が偏った状態で脱水する洗濯機のように音や振動が生じる。そのため全数計測して調整加工しているが、この調整量をゼロで製造できれば、素形材 (素材) に設けられている調整加工の削り代を廃止して、薄肉軽量化することも可能となる。

本稿では、素材製造ばらつきを大幅に改善した内容と、それを維持管理する仕組みを報告する。

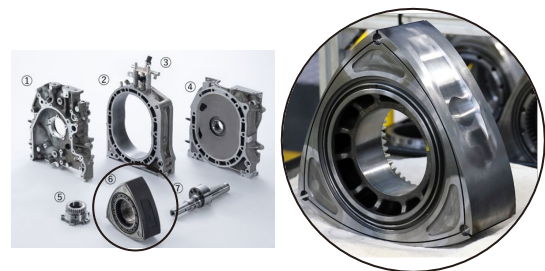


Fig. 1 Rotor of Rotary Engine

2. ロータリーの製造工程

ローターは最小肉厚 2mm のダクタイル鋳鉄で、素材の鋳造から、機械加工、めっき、組み立てを自社内で実施している。

*1~3 パワートレイン技術部
Powertrain Production Engineering Dept.

*4~6 第3パワートレイン製造部
Powertrain Production Dept. No.3

鑄造工程では、溶かした金属（溶湯）を砂で作る鑄型の空洞に流し込み、冷却後に凝固した素材部を取り出し、付着した砂等を取り除いて素材を製造する。ローターにはシェルモールド造型法を採用しており、270~300°Cに加熱した金型の空隙部に、樹脂を珪砂にコートした砂を吹き込み、100°C付近で一旦軟化した樹脂が熱硬化することで砂粒同士を結合させて鑄型を作る。これらは数ピースに分割されており、立体パズルのように組み合わせて鑄型を組んで空洞部を形成し、そこに流し込まれた溶湯が冷却されると同時に鑄型は加熱され、樹脂が炭化し崩壊することで凝固した素材を取り出しやすくしている。

ローターの鑄型は Fig. 2 に示すように、外郭面を形成する主型（Master mold）の中に、中空部や燃焼室の凹み形状を形成する中子（No.1~3 Core）を勘合しセットする。主型 1 段あたり素材 2 個分の空洞を設け、それらを 3 段に重ねて湯道（Sprue runner）を貫通させることで一式の鑄型から 6 個の素材が取れる構造としている。

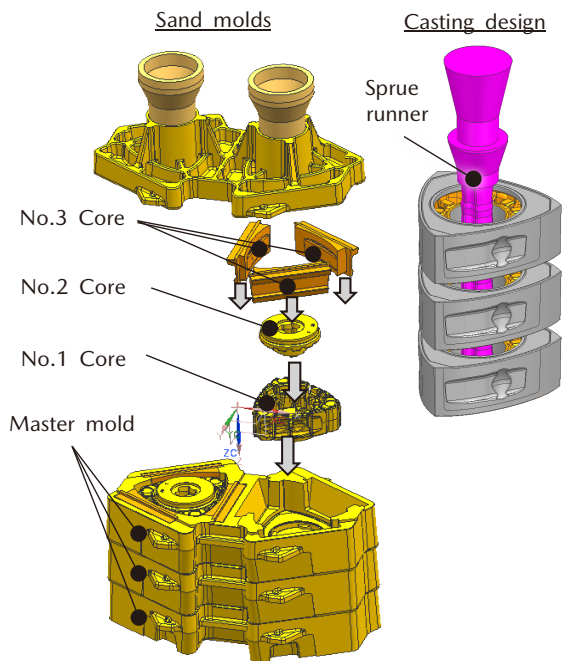


Fig. 2 Sand Molds and Casting Design

3. アンバランスの主要因と現状の対応

アンバランスは、回転する物体の重心と回転軸のずれ量（以下、偏重心距離）に質量を乗じたもので、 $g \cdot mm$ という単位で表わされる。アンバランスがあると、それに角速度の二乗を乗じた遠心力が発生し、異音や振動の原因となる。ローターは設計モデル上、丸みを帯びた正三角形であり、ある点の質量は 120°ごとに回転させた位置の 2 点と釣り合い偏重心距離を 0 としているが、実際は製造ばらつきで完全には釣り合わない。その要因は、形状が設計モデルと異なる場合と、同じでも重量が他の

2 点と異なる場合、つまり寸法と密度のばらつきである。

ローターは Fig. 3 に示すとおり外郭面に全て機械加工が入る一方、全体の表面積の半分近くは鑄肌面で、その大部分は No.1, 2 中子を転写して形成する中空部が占める。また、機械加工工程では、コンベックスメジャーを使う際、押し付けた先端を基準（0mm）として長さを測るように、素材の基準面を治具や定盤に押し付け、ここを基準とした寸法で加工するが、8C 型ローターは基準面全 7 か所（軸方向 3 か所、周方向 1 か所、径方向 3 か所）を、全て No.1 中子を転写して形成する面に持たせている（Fig. 4）。そのため、No.1 中子の出来栄が鑄肌・加工面どちらにも影響し、ローター全体の寸法ばらつきの主要因となる。

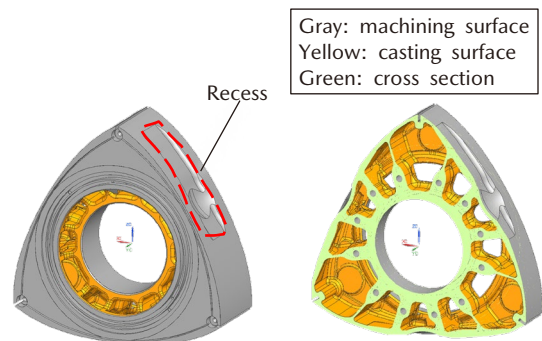


Fig. 3 Casting Surface and Machining Surface

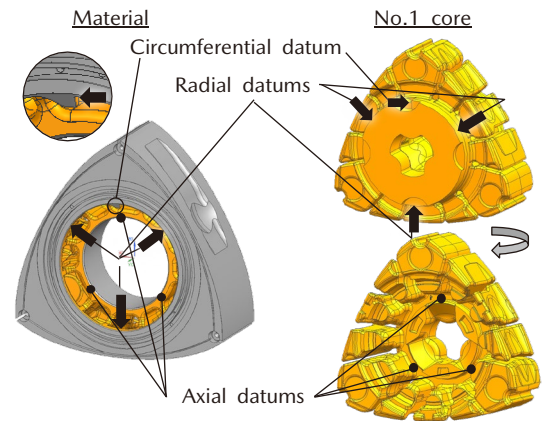


Fig. 4 Machining Datums for Rotors

球状黒鉛を晶出したダクタイル鑄鉄の密度は、黒鉛面積率や基地組成等の金属組織と、凝固収縮率等の欠陥により定まる。それらは溶湯の冷え方に大きく影響されるため、120°ごとの位置の冷却速度ばらつきが密度ばらつきの主要因となる。

これらから生じるアンバランスへの対応として、機械加工工程では、加工後にインターナルギアを組み付け、軸中心に回転させて重心の位置と質量を計測し、ギア・反ギア面両方のアンバランス量と角度を全数算出している。規格を満足しない場合は、Fig. 5 に示す各頂点の調

調整範囲を加工で除去し、重心の偏りを打ち消すことでアンバランスを調整する。調整量は除去する質量と、その偏重心距離の乗算で表されるが、加工範囲がシール溝で規制されるため偏重心距離は一意に定まる。そこで除去する質量をコントロールするが、密度と加工範囲が決まっているため、これは加工深さで調節する。その後再計測し、規格内であることを確認して次の工程に送る。

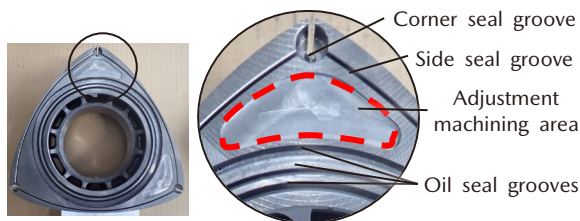


Fig. 5 Adjustment Machining Area (8C Type)

調整加工でバランス規格を満足できないワークは不良品として再溶解してその情報を素材工程にフィードバックし、金型摩耗等の経時変化によりアンバランス量や角度が変わると、Fig. 6 に示す No.1 中子金型のバランス調整座を都度、補整して調整範囲内に収め続けている。



Fig. 6 Adjustment Seat of Metallic Pattern (13B Type)

4. 目標設定

従来モデルの 13B 型エンジン⁽¹⁾ は 1973 年から生産を始め、新車への搭載は RX-8 (2012 年量産終了) が最後だが、リペアパーツやリペアエンジン供給のため、現在も毎月数百台単位で製造している。鋳造工程では生産設備の維持管理に努めているものの、金型の機構や鋳造方案が旧式であることや、設備・要具の劣化は否めない。そのローターはバランス調整加工で除去する質量が最大 24.8g/箇所、偏重心距離は 77.5mm のため、最大 1920g・mm/箇所まで調整できるが、規格を上回るワークが 1 割程度発生している。

8C 型エンジンは、燃費改善として冷却損失改善をねらったロングストローク化により偏芯量がアップ (15.0 → 17.5mm) したため、ローターの径方向サイズが 13%、質量も 26% 増加しており、素材が同精度の場合、調整前アンバランス量は 43% 増加する。一方、調整量もサイズアップにより偏重心距離が 14%、調整加工範囲が 6% 拡大できるため、あと 18% 深く加工することで

増加分をリカバーできる。しかし、それは加工サイクル延長や精度低下を誘発し、削り代としての素材肉厚の確保により重量が増加し燃費等の悪化を招く。そこで 8C 型では肉厚を 13B 型と同一の設定とすることで最大調整量を 21% アップの 2393g・mm にとどめ、不足分は素材ばらつき低減で補うこととした。それに加え、素材アンバランス量をより厳しく管理することで、調整加工サイクルタイムの短縮や調整後の回転バランス精度向上が可能のため、更に 30% 削減した 1675g・mm に対し Cpk1.33 を満足することを本活動の目標に定めた。

5. アンバランス予測技術の確立

5.1 既存解析の適用

要因の効果を机上で迅速かつ正確に把握するため、レシプロエンジンのクランクシャフト用に開発された既存のアンバランス解析ツールをローターへ適用した。これは素材の実物を 3D スキャンしてモデルを作成し、次に加工工程と同様、基準面を起点にした寸法でモデルを削り、最後にアンバランス測定を CAE (Hyperworks) 上で再現することで加工後のアンバランス量を算出するものである。

前述したようにローターでは No.1 中子の寸法精度がアンバランス量へ大きな影響を与える。また、3 章で述べたように調整量過多の対策として金型補整するが、その結果は機械加工の後に判明するため、確認に時間を要する。そこで、中子を 3D スキャン、モデル化し、素材設計モデルの中空部と置き換えてアンバランスを予測できると、量産移行後も No.1 中子の出来栄検査に活用することで、鋳造・加工・バランス計測せずともアンバランス量の把握が可能で、タイムリーな金型補整が可能になると考えた (Fig. 7)。

5.2 高精度化の取り組み

既存の解析では 3D スキャンした素材モデルをそのままアンバランス解析したが、ローターでは 3D スキャンした中子を素材中空部に精度良く置き換える必要がある。鋳型は注湯の際に熱膨張するが、素材は凝固収縮により常温の鋳型より小さくなるため、一般的な鋳鉄では、一定の倍率を乗じて中子を設計する。そのため、3D スキャンした中子モデルをその倍率で除することで素材中空部を再現できるが、実際の収縮量は素材・鋳型の形状や金属の種類、溶湯圧等に影響される⁽²⁾ ため、実測することでより高い精度でモデルを変換できると考えた。

そこで、中子を 3D スキャンし、それをを用いて鋳造した素材の中空部を CT スキャンした。それらから作成した 2 つのモデルに対し、同一点と原点の距離について、中子と素材の寸法関係を求めた (Fig. 8)。この結果、中空部は 1.000662 で中子寸法を除すると精度良く再現でき、この近似式ベースの倍率を採用することで高精度化

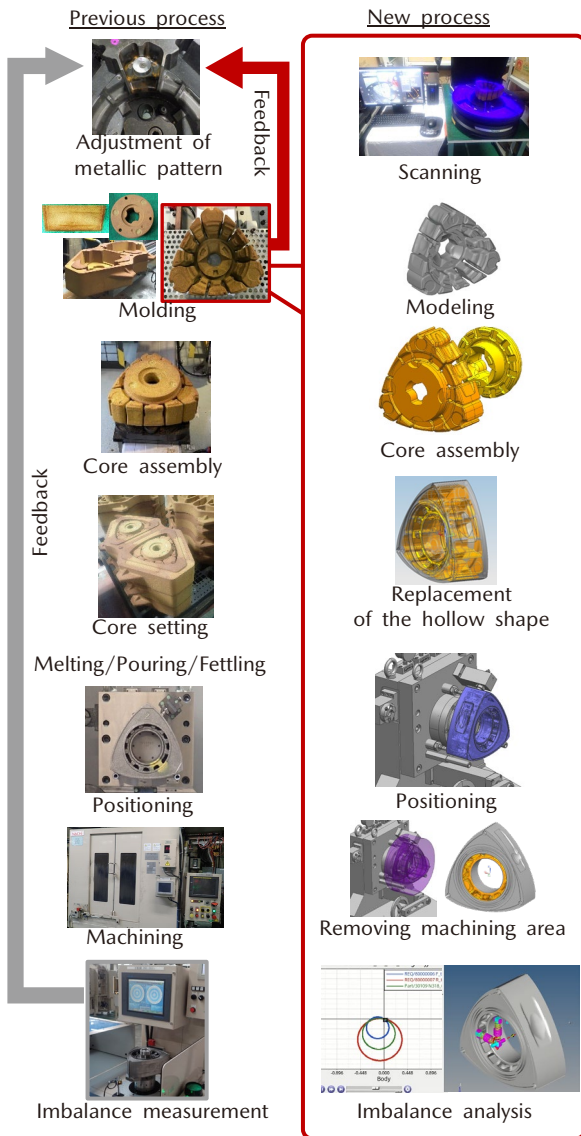


Fig. 7 Imbalance Analysis

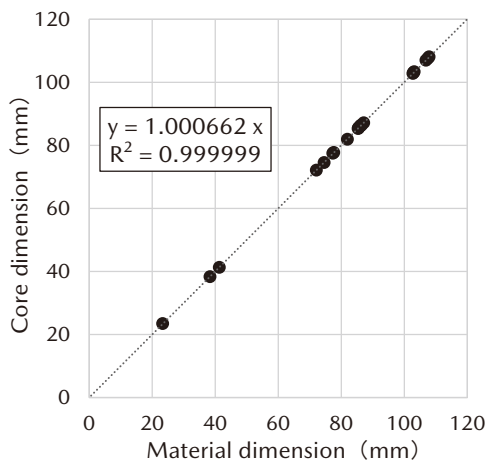


Fig. 8 Relationship between Core Dimensions and Material Dimensions

に寄与できると考えた。そして解析の結果は、アンバランス量 84~93%, 角度方向 98.5~99%の精度があり, 予実差が極小化され一致した (Table 1)。

Table 1 Expected Difference of Imbalance

		Predicted value	Measured value	Concordance rate (%)
imbalance (g・mm)	Gear-side	843	999	84
	Opposite gear-side	1643	1769	93
Angle (°)	Gear-side	214	210	98
	Opposite gear-side	191	196	97

6. ばらつき対策の検討と実施

6.1 対策の検討

3章で述べたように No.1 中子の出来栄がアンバランスの主要因であるため、造型から機械加工まで、中子と、その転写した素材面の形状を正確にキープし続けられればバランスの良いローターが製造できる。つまり①No.1 中子を精密に造型し、②No.2 中子と精度良く接着し、③溶湯が注がれても変形せず形状を転写し、④基準面を正確に起点として加工することである。そこで5章で開発したシミュレーションを活用して①~④の寸法ずれがアンバランス量へ与える影響を算出し、Cpk1.33 が成立する対策とその寸法管理値を個別に設定した (Table 2)。これらに対して取り組んだ内容を以下で紹介する。

Table 2 Measures against Imbalance

Measure	Imbalance (g・mm) per mm	Control value (±mm)	Predicted maximum imbalance (g・mm)
(1) Reduce pattern shift	897	0.20	179
① (2) Maintenance metallic pattern	741	0.20	148
② Improved core assembly precision	2190	0.30	657
③ Control the core deforming	1793	0.20	359
④ Reduction of machining standard deviation	7869	0.10	787
	Avg.		179
	σ		365
	Target level		1675
	Cpk (against target)		1.36

6.2 対策① No.1 中子の造型精度

(1) 金型機構の進化による型合わせ精度向上

No.1 中子型は上下の金型と、3つの側面の凹み部を形成する金型の計5つを合わせて空隙を形成する。8C型ローターではこれらの合わせ精度の向上を図った。

従来モデルの13B型ローターはNo.1中子金型を4セット、円形に備えており順繰りに回転させて造型し、ピンとブッシュで位置決めしていた。しかし、型合わ

せ前の位相精度に限界があり、それらが摩擦しやすい。また、回転式のため金型上に駆動源を搭載できず、側面型はリンク機構を用いて外力で抜き方向に動かした後には花びらが開くように倒して開閉していた。そのため0.4mmのクリアランスをもたせており、凹み形状の位置合わせ精度も±0.2mmのばらつきをもっていた。8C型ローターでは側面型も大型化しており、同様の機構を用いると開閉の際に中子と干渉する。その上、加熱機構を側面型内に設けられないため、13B型では上下型からの熱伝達でヒートアップさせていたが、大型化され熱容量の増えた8C型では必要な断面積が確保できず十分に加熱されない。そこでNo.1中子型には、回転機構を排したシンプルな造型機を導入し、エアシリンダーにより側面型を押し当てて位置決めするスライド方式とすることでゼロクリアランス化を実現し、精度を向上させるとともに加熱機構も内蔵した (Fig. 9)。上下型は、位置決めピンとプッシュの摩耗量0.1mmをそれぞれ交換基準とし、型ずれを±0.2mmで管理することとした。

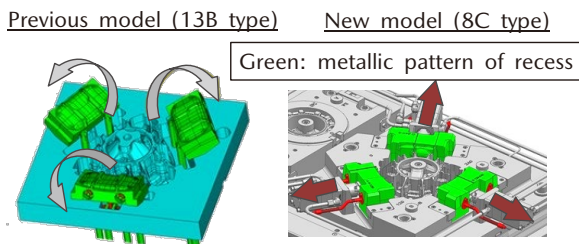


Fig. 9 Metallic Pattern Structure of No.1 Core

(2) 金型寸法精度維持管理

鑄砂の吹き込みや型合わせで摩耗が進む金型の寸法精度維持のため、従来は安価な鑄物のFC250材だった金型材質を変更した。表面硬度が高くより耐摩耗性が良い熱間工具鋼の中でも被削性がよく、切削で仕上げ加工でき、トータルコストに優れるSKD61材を選定し40%の耐摩耗性向上を実現した。

また、金型を定期的に3Dスキャンし、摩耗量0.2mm以内で整備することとした。更に、アンバランス量そのものも、製造ロットごとに中子を3DスキャンしCAEで予測することで管理と定点観測することとした。このように金型構造の精度向上と、CAEを活用した金型維持管理をすることで、No.1中子の出来栄をタイムリーに、そしてこと細かに維持管理できるシステムを構築した。

6.3 対策② No.1, 2 接着中子厚さ／主型へのセット精度

No.1, 2中子は接着剤を塗布し圧力をかけて接着する。上下の金型の合わせ不足や圧力不足があると厚くなるた

め、13B型では接着圧力を管理していた。一方、解析により厚さばらつきがアンバランスに影響を与えることが明らかになったため、8C型では高さ寸法そのものを管理することとし、接着装置に設置したレーザー変位計で全数検査し、±0.3mmで管理することとした (Fig. 10)。

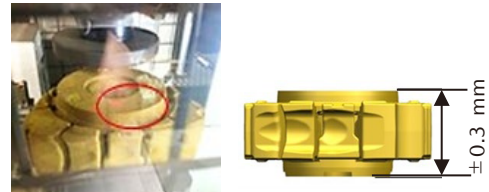


Fig. 10 Measuring Assembly Dimension for No.1, 2 Core

主型と中子のクリアランスは0.2mmに設定しているが、人の手で作業するため、セットの際に鑄型同士が接触し破損する懸念があった。作業者の習熟度に依存せず正確に作業できるよう、防止策としてFig. 11に示す樹脂製のガイド治具を製作し、鑄型同士の干渉を防止した。

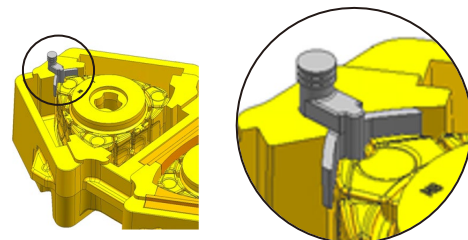


Fig. 11 Core Setting Jig

6.4 対策③注湯時の中子変形

注湯すると、中子は溶湯からの熱で膨張しつつ浮力が働き、凝固過程では素材の収縮にさらされて変形する。13B型ローターはNo.1, 2中子の合わせが平面で、接着剤の接着剤だけで変形に抗うため剛性が低く、素材CTスキャンの結果からも変形が認められていた。対策として8C型では噛み合わせ構造として剛性を向上させた (Fig. 12)。

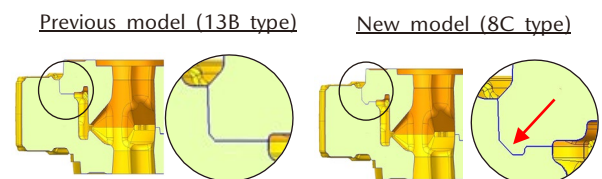


Fig. 12 Improvement of Assembly Structure

6.5 対策④加工の基準ずれ

加工面の径方向寸法は、加工基準3点を固定して中心軸を算出し、それを基準としている。固定治具に鑄バリ

等の異物を噛み込み基準がずれた状態で加工すると、外郭の加工面と中空部の鑄肌面の相対的な寸法、つまり肉厚がばらつき、アンバランスが生じる。13B型では径方向の加工基準近傍に鑄型の位置決め形状が存在し、Fig. 13のように固定治具の周り止め形状と垂直に鑄バリが出ていた（鑄バリサイズは4倍以上に拡大して表現）。そこでバリ残り基準を定め、治具に逃がし形状を設けることで対応していたが、抜本対策として位置決め形状を改良して治具に水平な鑄バリに変え、根本的な対策とした。

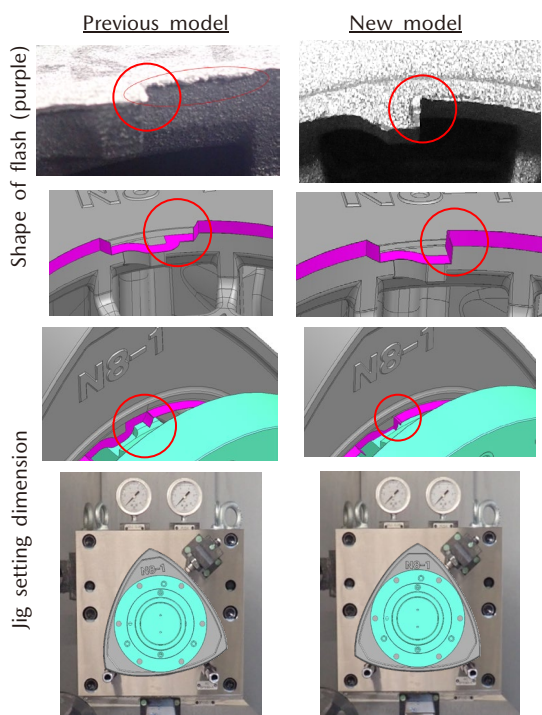


Fig. 13 Improvement of Flash Shape

また、機械加工時の基準ずれの管理値として±0.1mmを採用してずれ量を全数測定し、満足するワークのみ次の工程に送ることとした。

6.6 追加対策

(1) 冷却速度ばらつき

ローターは代々、量産性に優れた頂点ゲート方案を採用していたが、RX-8に搭載された13B型RENESISローターでは、120°ごとの冷却速度が均一で密度ばらつきを抑制したセンターゲート方案（Fig. 14）を開発した。これにより密度ばらつきは極小化されたが、8C型ローターではこの方案を踏襲しつつ更に厳しい充填温度ばらつき基準±10°Cに挑戦した。CAEで凝固解析し、湯道径や堰断面等の因子をチューニングし、基準を満足する鑄造方案を作りあげた。

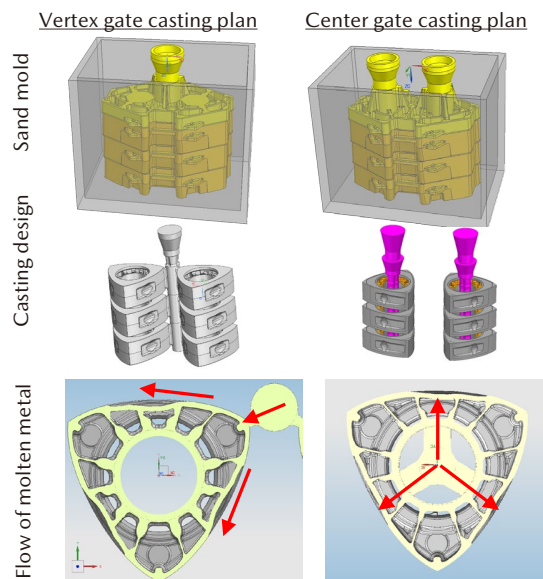


Fig. 14 Improvement of Casting Design

(2) パイロット生産での異常値

これらの対策を織り込み、36個のパイロット生産を行った結果、アンバランス量2416, 2186, 1532g・mmと、目標値を超過した異常値が3個発生した。現物を観取りしたところ、メタル挿入穴近傍に偏肉が認められ、寸法測定の結果、Fig. 15のようにNo.2中子に対し最大1.0mm傾いたことが判明した。そこでこの状態を模擬してアンバランス解析した結果、実測値と一致したため、これを原因と特定した。工程内で中子の傾きの原因を調査したところ、組んだ鑄型を搬送する際の振動や衝撃で主型が浮き、ずれた中子に浮いた鑄型が載ったときに同現象が発生することを突き止め、その対策として主型同士を接着することとした。より万全に対策するため、再度各工程を手順ごとにチェックし、漏れないことを確認したうえで量産を迎えた。

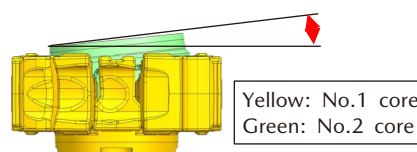


Fig. 15 Conceptual Diagram of Core Inclination

7. 効果確認

量産を開始し651台の加工完了時点のアンバランス量の計測値をTable 3に示す。自主管理値1675g・mmに対してCpk1.43を確保しており、図面規格に対してCpk2.32とばらつきを極小化した鑄造工程を実現できた。

Table 3 Result of Mass Production

	Imbalance (g・mm)	Cpk	
		Gear-side	Opposite gear-side
Target level	1675	1.80	1.43
Standard level	2393	2.84	2.32

8. 終わりに

8C型ローター素材ばらつきの極小化を究め、素材工程で管理が難しかったアンバランスにおいて、鑄造する前に予測する技術を作り上げ、それを活用することで新たな対策やタイムリーで確度の高い管理の実現につながった。このようなモデルベースと実生産の融合は特に鑄造工程で有効であり、次世代部品の量産準備に向け、今後も新しい目つきで挑戦する。

参考文献

- (1) 神原ほか：ロータリーエンジンの構造と歴史，[マツダ技報, No. 21, pp.3-10 \(2003\)](#)
- (2) 八島ほか：シェルモールド法による鑄物の寸法誤差，[鑄物, 第56巻, 第9号, pp.47-50 \(1984\)](#)

■著者■



坪井 涼介



刀裨 英男



曾根 雅治



小島 仁志



山光 一央



高垣 真人

特集：MAZDA MX-30 Rotary-EV

15 新型ロータリーエンジン 8C 型向け高速クロムモリブデンめっき工法の開発

Development of High-Speed Chrome-Molybdenum Plating Method for New 8C Rotary Engine

林 政男^{*1} 園田 尊正^{*2} 春木 佳奈^{*3}
Masao Hayashi Takamasa Sonoda Kana Haruki高場 宣弘^{*4}
Nobuhiro Takaba

要 約

ロータリーエンジンにおいて、ローターハウジング摺動部のトロコイド面には耐摩耗性向上を目的としたクロムモリブデンめっきを施している。ローターハウジングは緻密なめっき形成による高強度なめっき皮膜の確保とめっき表面の油だまり溝への潤滑油膜の保持により耐摩耗性を確保してきた。今回、ロータリーエンジンの復活にあたり、新しいめっき工法を適用しつつ CO₂ 低減を課題として取り組んだ。具体的には生産工程において、6.5 時間ものめっき処理時間を要し、更に油膜保持のため逆電処理による油だまり溝形成工程を要していた。めっき液中に触媒を添加することでめっきの析出効率を高め、処理時間を従来の半分以下の 3 時間に短縮しつつ、めっき処理と同時に油だまり溝を形成する工法案はあったが、複雑形状のワークへのめっき析出速度のバラツキを低減し、ねらいどおりの均一なめっき皮膜を得ることが量産化の課題であった。この課題に対し、CAE を活用して電極形状と処理条件を最適化することにより量産化を実現し、生産効率を大きく向上させ、同時にめっき処理の際に発生する CO₂ を 45% 低減することができた。

Abstract

The trochoid surface of the rotary engine's rotor housing is coated with a chrome-molybdenum alloy plating for the purpose of wear resistance. Wear resistance is achieved by maintaining a high-strength plating film and retaining a lubricating oil in the oil retention grooves on the plating surface. In the revival of the rotary engine, efforts were made to apply a new plating method while addressing CO₂ reduction. The previous plating method required a lengthy plating processing time of 6.5 hours and an additional step of forming oil retention grooves through reverse electroplating. Although there had been a method proposal to reduce the processing time to 3 hours by adding a catalyst to the plating solution while forming oil retention grooves, achieving a uniform plating film on complex-shaped workpieces remained a challenge for mass production. To address this issue, mass production was realized by utilizing CAE to optimize electrode shapes and processing conditions, significantly improving production efficiency, and reducing CO₂ emissions during the plating process by 45%.

Key words : Materials, Catalyst, Addition, Surface treatment/plating, Strength/stiffness/rigidity/wear resistance

1. はじめに

マツダ独自の技術であるロータリーエンジンは、これまで 60 年余りにわたり開発を進めてきている。今回、このロータリーエンジンの特徴であるコンパクトで高出力な特性を活かした新たな発電ユニット e-SKYACTIV R-EV

を開発した。

今回の発電ユニットに搭載されるロータリーエンジンも従来同様、高出力かつ高耐久の機能を追求している。耐久性の向上のため摺動部となるトロコイド面に耐摩耗性と低摩擦性を備えたクロムモリブデンめっきを析出させている。ゆっくりとめっき皮膜を形成することで緻密

*1~4 車両技術部
Painting, Trim & Final Assembly Engineering Dept.

なめっきを形成して耐摩耗性を確保し、逆電処理による油だまり溝形成を行うことで低摩擦性を付与してきた。しかしながら環境側面では、めっき処理設備の稼働(6.5h)、工程間の物流、逆電処理のそれぞれでエネルギーを要しており、カーボンニュートラルの達成に向け消費エネルギーの低減が急務であった。今回めっき液中に触媒を添加してめっきを行う高速クロムめっき工法⁽¹⁾を採用することにより、めっき時間の短縮とめっき構造の改善に加え、逆電処理という追加加工エネルギーの削減を同時に解決し、その課題であるめっき速度のバラツキ制御に取り組んだ。本稿では、高速クロムめっき工法の量産導入にむけた活動内容について報告する。

2. めっき皮膜の機能集約

ローターハウジングはアルミ材の内面に鉄板層を鋳込貼付した後、エンジン加工工場にてトロコイド面の内面研削加工を行い、めっき工場に搬入し硬質クロムめっきを行っている。従来の13B型ローターハウジング (Fig. 1 左) では、硬質クロムめっき処理後の内面研削後に、再度めっき工場に搬入し逆電処理にて油だまり溝の形成を行うことでエンジン性能を確保してきた。13B型の加工工程を Fig. 2 に示す。これに対し、8C型ローターハウジング (Fig. 1 右) で新たに採用した高速クロムめっき工法は、めっき液に触媒を添加し、電流密度を高めてめっき処理することで、めっき処理速度を速めると同時に皮膜中に油だまり溝を形成させることができるため、めっき時間の大幅な短縮かつ油だまり溝形成のための追加加工の廃止が可能となるめっき処理法である。8C型の加工工程を Fig. 3 に、13B型及び8C型の内面研削後の写真を Fig. 4 に示す。

一般的にこの工法では、めっき膜厚とめっき構造がバラツキやすいことがわかっており、めっき膜厚とめっき構造のバラツキを低減することが量産化の課題であった。課題解決に向けて、めっき構造の定量化をまず行った。次にねらいのめっき膜厚とめっき構造を実現するための工程因子の制御(めっき液成分管理、めっき液流量制御、電極形状の制御)を行った。

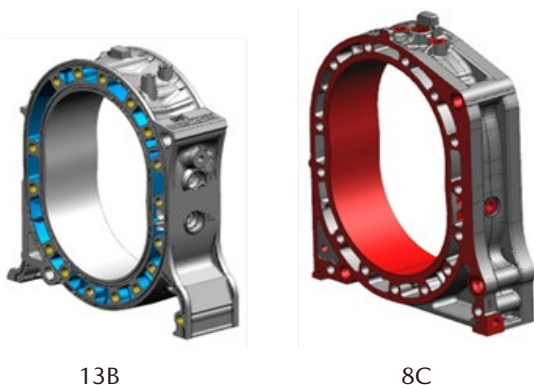


Fig. 1 Rotor Housing

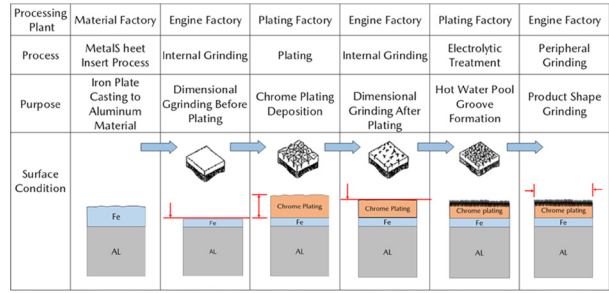


Fig. 2 13B Conventional Process

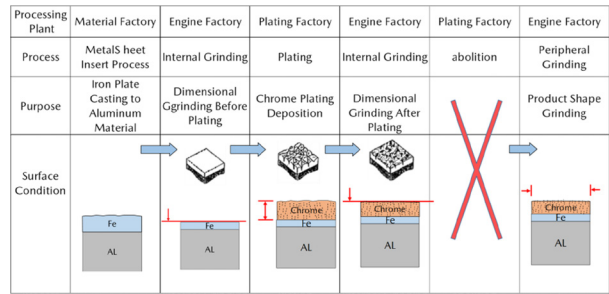


Fig. 3 8C New Process

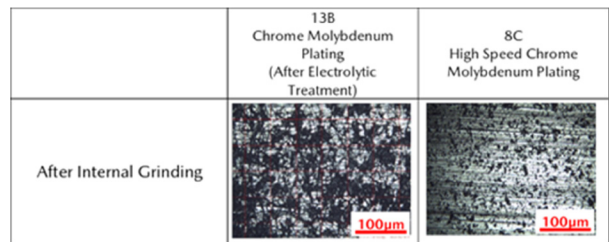


Fig. 4 Surface after Grinding

3. 主要取り組み

3.1 めっき表面観察システムの構築(めっき構造定量化)

めっき後のワークには約150μmのクロムめっきが析出されており、この皮膜中にはエンジン性能保証のために重要な役割となる油だまり溝が存在している。この油だまり溝の大きさは後工程の内面研削加工後の品質に大きく影響する。この油だまり溝の本数は1cmあたり約1000本と、とても細かい溝であることから、高精度で観察測定できる機器の選定及び測定方法の構築が課題であった。油だまり溝の観察測定は、量産ワークに対して垂直にレンズをあてて観察する必要があるが、ワークの内側は約205mm (Fig. 5) しかなく、市販されている顕微鏡やマイクロスコプでは観察することができない。このためレンズ先端にミラーを取付けた状態で観察する仕組みのマイクロスコプを製作しトロコイド面の全ての部位を隈なく観察できる装置を設計・導入した。導入したマイクロスコプを Fig. 6, 7 に示す。

この装置は撮影した写真 (Fig. 8 左) から画像解析にてめっき皮膜中の油だまり溝の数を測定できる。具体的

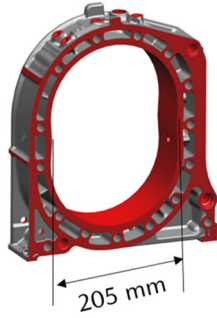


Fig. 5 Shape of Rotor Housing

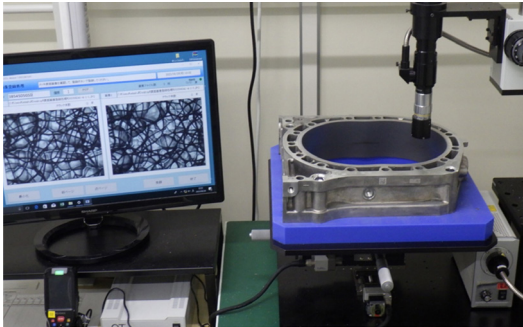


Fig. 6 Microscope System

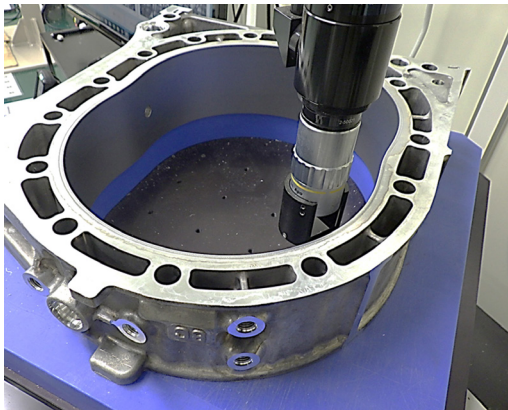


Fig. 7 Observation of Inside Surface of Work

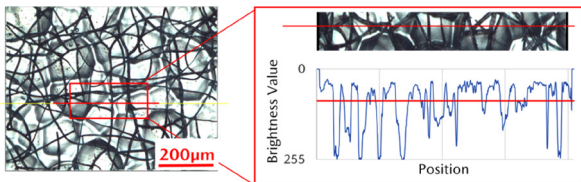


Fig. 8 Picture of Oil Retention Grooves in a Plating Film

には内面研削加工にて削り取られる深さでの1cmあたりの油だまり溝を観察画像中の交点数 (Fig. 8 右) から読み取り算出できるようになっている。このようにめっき処理工程の品質を定量的に判定する仕組みを構築し、これにより量産における制御因子の管理幅と良品条件を明確にする基盤ができた。

3.2 めっき析出速度のコントロール

ローターハウジング高速クロムモリブデンめっきで使用するめっき液は、クロム酸や硫酸、モリブデン酸ナトリウム、触媒などから構成されており、濃度や温度、電流密度、流量等の状況によりめっき品質は大きく変わる。めっき皮膜の硬さに対しては温度が重要であり、めっき皮膜の付きまわり性はクロム酸濃度や硫酸濃度が重要である。また油だまり溝は触媒濃度 (Fig. 9) と処理電流値 (Fig. 10) で制御できる。

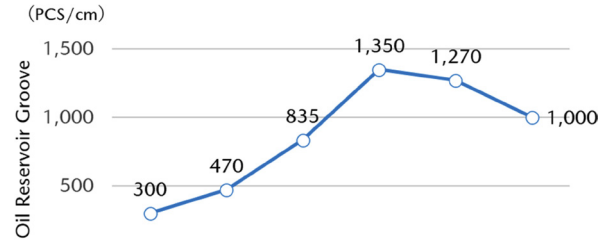


Fig. 9 Catalyst Concentration vs Oil Retention Groove Count Graph

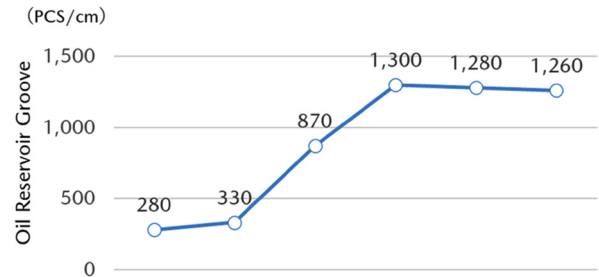


Fig. 10 Current Density vs Oil Retention Groove Count Graph

また、めっき液中の触媒濃度を適切に管理することが重要である。めっき液中の触媒濃度の違いによる皮膜構造の違いを Fig. 11 に示す。めっき液中の触媒濃度の違いによりめっき構造は大きく異なる。

	Low	High
Catalyst concentration		
Current density		

Fig. 11 Current Density and Plating Surface Structure

触媒濃度はめっき処理工程において徐々に変化するため、めっき構造の均一化のために、触媒濃度を精度よく頻りに管理する必要がある。そこで量産中、迅速かつ高

精度にめっき液中の触媒濃度を測定・管理できる方法を検討した結果、イオンクロマトグラフ法を採用し、ラインサイドに配備することとした。

3.3 めっき液循環流量コントロール

ローターハウジングめっき設備は下記 Fig. 12 に示す構造で、ローターハウジング生産開始時から基本構造は大きく変わっていない。1度でより多くのローターハウジングをめっき処理したいため、ワークを数枚積み重ねた状態でめっき設備に組付し、設備中央にセットされている電極とワークのわずかな隙間に下側からめっき液を送り込み上側から回収する仕組みの設備としている。めっき液を循環しながら通電することでクロムイオンを還元し、トロコイド面にクロムめっき皮膜を析出させる仕組みである。この時、電極表面（陽極側）からは酸素、ワーク表面（陰極側）からは水素ガスが大量に発生する（Fig. 13）。

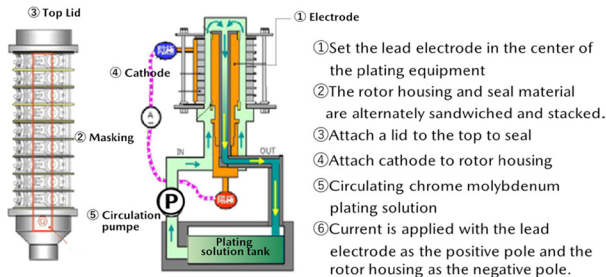


Fig. 12 Plating Equipment Configuration

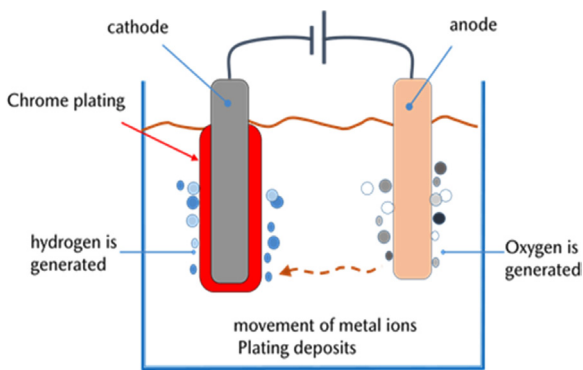


Fig. 13 Plating Mechanism

発生したガスはめっき液と一緒に上側から回収されるが、ワークを高く積み重ねて過ぎた場合には、上部に積み込まれたワークと下部に積み込まれたワークで表面のガスの付着量が異なり、めっき膜厚とめっき構造に差が生じてしまう。めっき析出時に発生するガスをめっき液循環流により回収することで、めっき速度の差を低減し、めっき膜厚とめっき構造のバラツキが低減できると仮定し、CAEにより循環流量変化によるワーク表面の流れを検証（Fig. 14）し、ワークの同時処理数とめっき液循環流量を決定した。

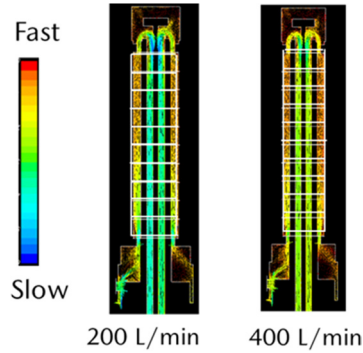


Fig. 14 Simulation of Work Surface Flow Velocity

また、この結果から数段積み重ねたワーク内のめっき液流量を調整する機構を設備仕様に織り込んだ。実機での検証では、9段積みされたワークの全てでねらいどおりのめっき膜厚 150 μ m が析出されていることを確認できた。実際に循環流量を増やすほど膜厚差が少なくなることが確認でき、めっき析出反応で発生するガスを積極的に離脱させることがめっき析出の均一化に効果的であることが立証できた。8C型ローターハウジングめっき設備を以下に示す（Fig. 15）。

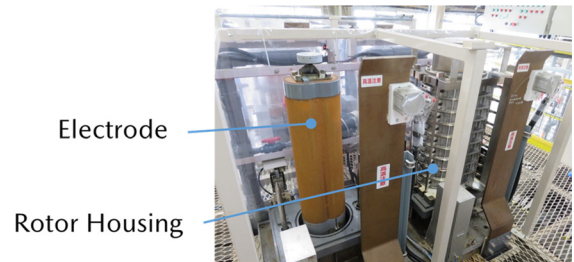


Fig. 15 8C Plating Equipment

3.4 めっき用電極のシミュレーション設計

ここまでの取り組みで、部位によるめっき析出速度の差を低減することが、めっき皮膜の品質確保に重要であることが分かった。そこで更なる品質改善のため、トロコイド面内のめっき析出速度均一化に取り組んだ。これまでの電極設計の考えを基にシミュレーション解析を行い、8C型ローターハウジングに対応した専用めっき電極の設計を行った（Fig. 16, 17）。

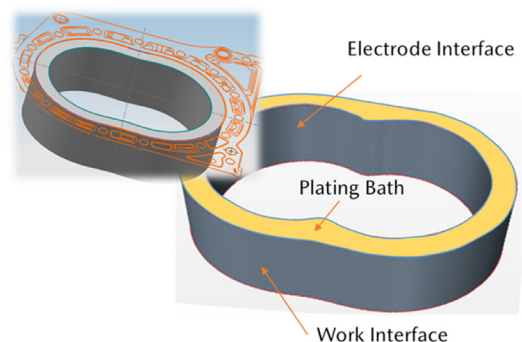
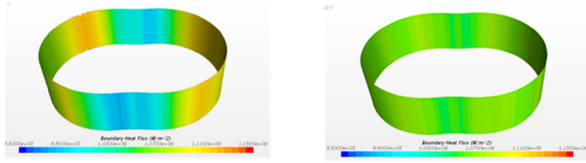


Fig. 16 Analytical Model Creation



Analysis Result of Existing Shape Deformed Trochoid Analysis Results

Fig. 17 Analysis Result

膜厚を指標に比較した結果、専用設計した電極を使った場合、シミュレーション解析で求められた状態と合致していることが確認でき、1枚のワークの中での膜厚差を従来の1/3に低減した。

3.5 品質保証システムの進化

本活動にて、めっき皮膜品質と制御因子である製造条件の関係が明確になってきた。また実際に量産導入していく中で製造時の管理項目を追加し、品質結果も統計的に品質保証できることが分かった。更に、ワークに二次元バーコード (Fig. 18) を打刻し、ワーク1枚1枚と、めっき処理条件 (Fig. 19) 及びめっき品質確認結果 (Fig. 20, 21) をデータベースに登録、確認できるシステムを整備した。量産ワーク全数の製造条件と品質結果をデータとして残し、一元管理することで、全てのワークを品質保証するようシステムを進化させた。

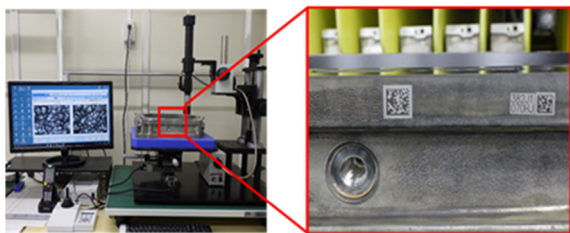


Fig. 18 2D Barcode

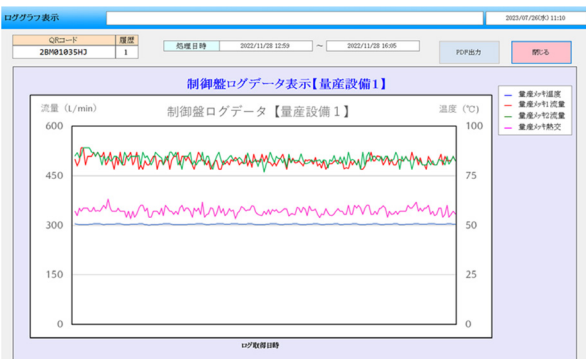


Fig. 19 Control Panel Log Data

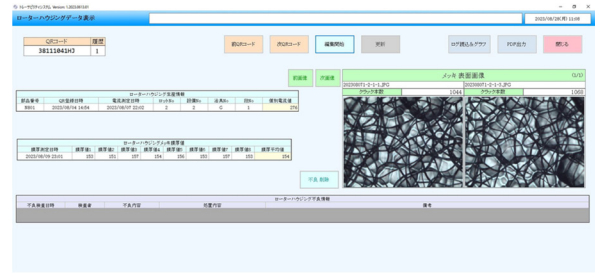


Fig. 20 Film Thickness Measurement Results



Fig. 21 Number of Oil Retention Groove

4. 効果

高速クロムモリブデンめっき工法の採用により、めっき時間を6.5hから3.0hと短縮し、かつ内面研削後の逆電処理工程を廃止した。この結果、年間61000kg-CO₂の削減を実現した。また、めっき皮膜の低摩擦化により、摺動部に接触するアベックスシールの摩擦性もねらいどおりに低減できていることが確認できた。

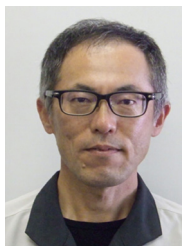
5. おわりに

本ユニットは開発、素材、加工、めっき、組立など多くの関連部門の連携と協力によって商品化を実現することができた。この関係性を継続しながら今後もお客様の期待を上回り、喜んでいただけるような魅力ある商品開発に尽力していく所存である。最後に、高速クロムモリブデンめっきの開発・生産にご協力いただいた全ての関係者の皆様に感謝の意を表します。

参考文献

(1) 谷田ほか：エンジン摺動部材の低摩擦表面処理の開発，マツダ技報，No.27，pp.148-152 (2009)

■著者■



林 政男



園田 尊正



春木 佳奈



高場 宣弘

論文・解説

16

排気吐出音の予測技術開発

Development of Prediction Technology for Exhaust Noise

石原 教示^{*1} 鶴本 徹^{*2} 廣部 敏之^{*3} 土路生 修^{*4}
Kyoji Ishihara Toru Tsurumoto Toshiyuki Hirobe Osamu Torobu
住谷 章^{*5} 中村 直樹^{*6} 新川 貴大^{*7}
Akira Sumitani Naoki Nakamura Takahiro Shinkawa

要約

近年、社会とクルマの共存の観点から、車外騒音規制の強化が進められており、内燃機関搭載車は、エンジン音の低減が求められている。特に、エンジン音の中でも排気吐出音は、この車外騒音規制に加えて、お客様が静粛性やサウンドといった車の価値を感じ取るための重要な要素の一つとなっている。こうした中、これまで開発効率化のために排気吐出音の予測技術開発に取り組んできたが、厳しい規制対応とサウンド進化を両立していくためには、これまでよりも綿密な排気吐出音のコントロールが必要であり、それには従来よりも高い予測精度が求められる。そこで、排気吐出音を構成する気流音と脈動音に対して、新たに計測結果の分析技術の構築や、CFD (Computational Fluid Dynamics) や音響解析モデルの改良により、予測精度を大幅に向上させた。本稿では、その取り組みについて報告する。

Abstract

In recent years, from the perspective of the coexistence between society and cars, regulations on vehicle exterior noise have been tightened. Vehicles with internal combustion engines are required to reduce engine noise. Among engine noises, exhaust noise is an important factor for customers to perceive the value of the vehicle, such as quietness and sound, in addition to external noise regulations. Under these circumstances, we have been working on the development of prediction technology for exhaust noise in order to improve development efficiency. To achieve both regulation compliance and sound evolution, it is necessary to control the exhaust noise more closely than before, which requires higher prediction accuracy than before. Therefore, we improved the prediction accuracy of the airflow and pulsation noises contained in the exhaust noise by newly developing analysis technology for measurement results and improving CFD and acoustic analysis models. This report explains the efforts on our achievement.

Key words : Vibration, Noise, Ride comfort, Exhaust system, CAE, Simulation, Exhaust noise

1. はじめに

大きな転換期にある自動車産業においては、デジタル技術の進化や新たなプレイヤーの参入で、多種多様な商品が導入されている。そして、IoTによりつながることでさまざまな機能やサービスが提供されるようになり、自動車が社会に提供できる価値も今後変化し拡大していくことが予想される。

その中で、マツダは、走る歓びというブランドエッセンスを磨き、進化させ続けており、ブランド価値経営を貫き、マツダらしい独自価値をお客様に提供することを

目指している。特に、本稿で述べる排気吐出音に関係する内燃機関搭載車は、今後も進化を続けていく上で、エンジン音の静粛性やエンジンサウンドといった独自価値の向上と、社会と自動車の共存の観点から、自動車交通騒音低減のための車外騒音規制との両立が必須となる。

こうした中、マツダでは効率的な開発の実現のためにモデルベース開発 (MBD: Model Based Development) によるプロセス革新を進めており、これまで排気吐出音の予測技術開発に取り組んできた。しかし、今後強化される騒音規制への対応と排気サウンドの両立には、これまでよりも綿密な排気吐出音のコントロールが必要で、

*1~5 MBD 革新部
MBD Innovation Dept.

*6,7 (株)ヒロテック
HIROTEC Corporation

それには従来よりも高い予測精度が求められる。

そこで、排気吐出音に対して、実機検証を交えながらモデル精度改善を積み上げていき、予測精度を向上させた。

2. 排気吐出音に含まれる気流音と脈動音

2.1 排気吐出音とは

吐出音とは排気マフラー終端から大気空間へ放出される音をいい、排ガス流れにより発生する気流音と、エンジン燃焼時に排気バルブの開閉により発生する脈動を起因とする脈動音を含んだものである。排気部品の開発においては、この吐出音に対して、主に気流音の評価を目的とする中高周波領域と、主に脈動音を評価する低中周波領域に管理指標を置いている。そのため、モデルを用いた効率的な排気吐出音の開発には、各周波数帯において、気流音と脈動音それぞれを正確に予測する必要がある。

2.2 吐出音の実験的な分析手法

気流音や脈動音の予測モデルを構築する上で、吐出音に含まれる両音の寄与度の把握が重要となる。そこで、上で述べた吐出音のうち、低中周波領域の管理指標としているエンジン回転数に比例する周波数の音で構成される次数音の計測結果に対して、気流音の寄与度を見積もる手法を構築した。

Fig. 1 に、あるエンジン回転数の吐出音計測結果を示す。Fig. 1 の青実線に示すとおり、4気筒エンジンの場合、基本次数は2次であり、基本次数の高調波成分である4次、6次、8次というように各次数の周波数を中心に脈動音を主とする音圧のピークが存在する。一方、これらのピークが存在する周波数帯以外では、Fig. 1 の緑実線に示すような比較的周波数変動が小さい音が広帯域で存在している。本稿では、エンジン回転数に比例する特定の周波数で発生するのではなく、このように広帯域に存在する音を気流音ととらえ、各次数の吐出音における気流音成分を推定する。

Fig. 2 は、Fig. 1 の横軸の周波数を拡大したものである。基本次数とその高調波成分の周波数に存在する脈動音成分は、僅かに周波数的な広がりがあるが、これはFFT処理時の窓関数の影響によるもので、ある次数幅 $\pm X$ 次の周波数範囲（ピンク色の領域）に収まることが分かる。したがって、この $\pm X$ 次の周波数範囲より外側の領域は、脈動音の影響がなく気流音のみが観測されていると考えられる。また、吐出音には2, 4, 6次といった基本次数の N 倍次数成分以外にも、 0.5 次 $\times N$ 次成分や1次 $\times N$ 次成分が存在する可能性があるため、吐出音の各次数成分に影響する気流音を推定する周波数範囲は、各次数の周波数になるべく近い範囲であるべきである。これらを踏まえて、次数ごとに、脈動音に影響する周波数範囲を $\pm X$ 次とし、その前後の幅 Y 次の周波数範囲（黄色の領域）のデータを用いて各次数成分に影響する気流音のレ

ベルを推定した。

Fig. 3 に、吐出音計測結果を次数音として処理したものの（黒実線）と、上記の考えに沿って推定した気流音（赤実線）を示す。ここで、推定気流音のレベルは右肩上がりの傾向を示しているが、これは流速に比例する気流音の特性と一致することから、妥当な推定方法といえる。また、Fig. 3 の青破線枠域に示すように、両者のレベルの一致を確認することで、気流音が支配的な領域の判別も可能となった。

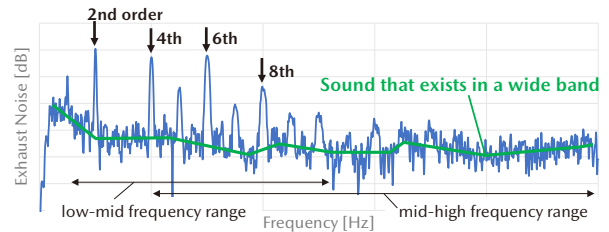


Fig. 1 Measurement Result of Exhaust Noise at a Certain Engine Speed

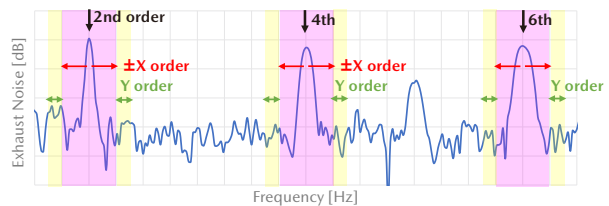


Fig. 2 Concept of Extracting of Airflow Noise Components

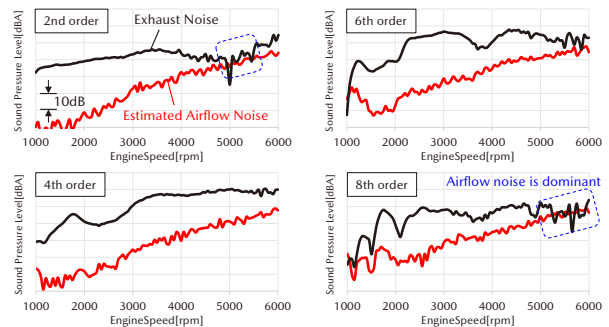


Fig. 3 Comparison of Exhaust Noise and Estimated Airflow Noise

3. 排気気流音予測モデルの概要

3.1 解析フロー

気流音の予測手法として、流体音の発生・伝ば・反射・放射を圧縮性ナビエ・ストークス方程式により直接解く直接法（DNS: Direct Numerical Simulation）と、音源となる流れ変動と音の伝ばを別々に解く分離法がある。両者の計算時間は倍程度の差があるため、量産開発における複数回のCFD解析を用いた評価では、計算コストに優れた分離法を採用している。この分離法の解析フローをFig. 4に示す。まず、1Dシミュレーション（Gamma

Technologies 社の GT-POWER) や実験から得られた排ガス流量を元に、CFD 解析 (IDAJ 社・Icon Technology & Process Consulting 社の iconCFD) で流速と密度の時間変動を求め、音源データを生成する。生成した音源を入力として、周波数軸の音響解析 (Hexagon 社の Actran) で計測位置までの音の伝達 (音響伝達) を解き、評価点の音圧を算出する。

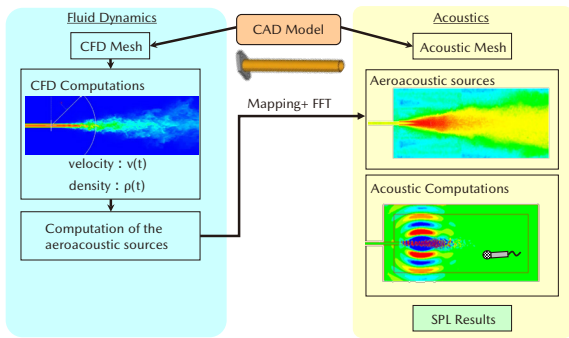


Fig. 4 Analysis Flow of Airflow Noise Prediction

3.2 従来の予測精度

これまで排気吐出音開発では、上記手法にて気流音の予測を行ってきたが、製品形状のような複雑な構造に対しては、音圧レベルがピークとなる周波数や音圧レベルの絶対値の再現性に課題があった。また、製品形状のマフラー内部は複雑な流れが発生しているため現象把握が難しく、予実差が生じる原因を特定することが困難であった。

そこで、Fig. 5 に示すように製品形状に含まれる内部構造を模擬した基礎形状に対する予測精度改善を STEP1 とし、STEP2 で基礎形状を組み合わせた簡易マフラー、STEP3 で製品形状マフラーというように段階的にモデル構築を実施した。

STEP1 の基礎形状に対し、送風機により一定流速を与えた条件でのマイク位置音圧の従来の予測精度の一例を Fig. 6 に示す。Fig. 6 左図に示すマフラー内の曲げパイプとその長さの気柱共鳴の強さを調整するために連通孔を配置した基礎形状は、実測 (黒実線) と従来の予測結果 (赤実線) は大きな差がある。この予実差に対し、分離法の音源生成と音響伝達のそれぞれ計算段階に対して分析した。

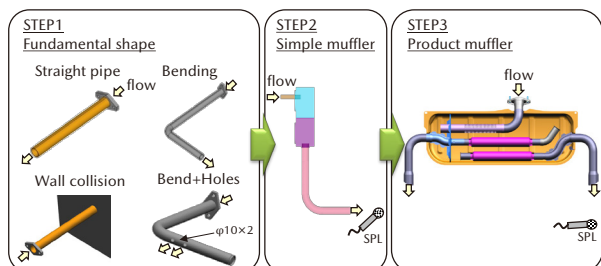


Fig. 5 Flow of Development of Airflow Noise Prediction Model

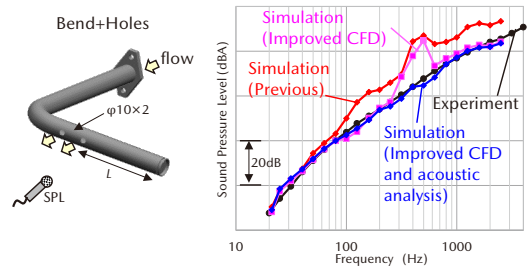


Fig. 6 Airflow Noise Prediction Results for Fundamental Shape

3.3 課題抽出と解決の取り組み

(1) 分離法 音源生成段階の課題解決

Fig. 7 に CFD 解析結果の流速分布と、そこから生成した音源分布を示す。従来のモデルは連通孔部で異常音源が発生しているが、元となった流速分布をみると、連通孔エッジ付近の特定要素の流速が、隣接する要素に比べて著しく大きくなっており、CFD 解析が不安定になっている可能性がある。そこで、音源生成に寄与する流速分布に則して、CFD 解析のメッシュサイズを最適化し、過度な流速による異常音源生成を是正したところ、Fig. 6 のピンク実線に示すとおり精度が改善した。

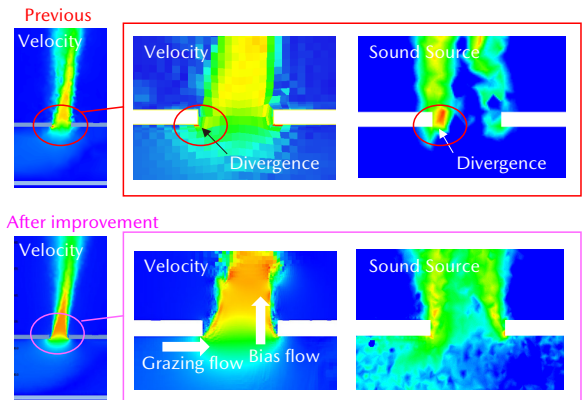


Fig. 7 Distribution of Velocity and Aeroacoustic Source

(2) 分離法 音響伝達計算段階の課題解決

CFD 解析の改善後においても、Fig. 6 のピンク実線に示すとおり、予測結果には 500Hz 付近に実験にはないピークが残る。そこで、更なる改善に向けて音響伝達計算段階の分析を実施した。その結果、500Hz のピークは、Fig. 6 の左図に示す右孔部から管先端までの距離 L から決まる共鳴周波数と一致しており、計測結果には顕著なピークはないことを踏まえると、解析上は、管内の共鳴の影響により増幅された音が、連通孔を通じて外部空間に過度に伝わっていることが考えられる。

そこで、孔部の音響伝達計算を改善するために、式 (1)~(6) に示す微小すき間部に生じる音響伝達に対する抵抗 $Z = \theta + j\chi$ (粘性や、Fig. 7 下図の矢印に示すような隙間部周辺のガス流速等により発生)⁽¹⁾ を Transfer Admittance (すき間により連通しているそれぞれの空間

の状態量である圧力と粒子速度を結び付ける係数)として、孔部に定義することで、Fig. 6 の青実線に示すように精度改善を実現した。

$$\theta = \operatorname{Re} \left\{ \frac{jk}{\sigma C_D} \left[\frac{t}{F(\mu')} + \frac{\delta_{re}}{F(\mu)} f_{int} \right] \right\} + \frac{1}{\sigma} \left[1 - \frac{2J_1(kd)}{kd} \right] + \frac{0.3}{\sigma} M_g + \frac{1.15}{\sigma C_D} M_b \quad (1)$$

$$\chi = \operatorname{Im} \left\{ \frac{jk}{\sigma C_D} \left[\frac{t}{F(\mu')} + \frac{0.5d}{F(\mu)} f_{int} \right] \right\} \quad (2)$$

$$K = \sqrt{-\frac{j\omega}{\nu}}, K' = \sqrt{-\frac{j\omega}{\nu'}} \quad (3)$$

$$F(Kd) = 1 - \frac{4J_1(Kd/2)}{Kd \cdot J_0(Kd/2)} \quad (4)$$

$$\delta_{re} = 0.2d + 200d^2 + 16000d^3 \quad (5)$$

$$f_{int} = 1 - 1.47\sqrt{\sigma} + 0.47\sqrt{\sigma^3} \quad (6)$$

ここに、 t : 連通孔の厚さ [m]

d : 連通孔直径 [m]

σ : 多孔度 [-]

k : 波数 [rad/m]

c : 音速 [m/s]

C_D : 流量係数 [-]

J : ベッセル関数

ν : 動粘度 μ/ρ_0 [m²/s]

ρ_0 : 媒質密度 [kg/m³]

μ : 断熱動粘度 $\mu' = 2.179\mu$ [Pa s]

M_g : マッハ数 (孔近傍の grazing 方向の流れ) [-]

M_b : マッハ数 (孔近傍の bias 方向の流れ) [-]

(3) 製品形状への適用

STEP1 で得た CFD 解析のメッシュ最適化による異常音源生成の抑制と、音響解析における微小すき間部の音響伝達に対する抵抗定義の2つの精度改善ノウハウをSTEP2, 3の簡易マフラーと製品形状マフラーに適用した結果を Figs. 8, 9 に示す。簡易マフラー及び複雑な内部構造をもつ製品マフラーにおいても精度よく予測できることを確認した。

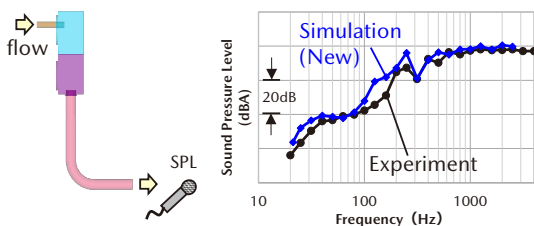


Fig. 8 Airflow Noise Prediction Results for Simple Muffler

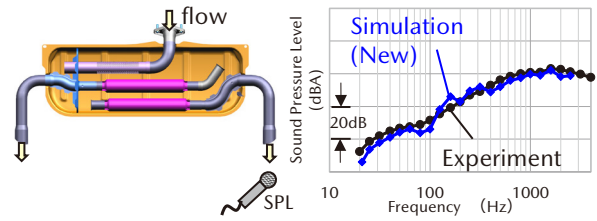


Fig. 9 Airflow Noise Prediction Results for Product Muffler

4. 排気脈動音予測モデルの概要

4.1 解析フロー

脈動音の解析フローを Fig. 10 に示す。まず、排気システムに流入する排気脈動を 1D シミュレーション (GT-POWER) で算出する。次に、排気システム内から管外の計測位置までの音の伝達を 3D 音響解析ツール (Actran) で求め、入力と伝達を合わせて予測する。なお、本稿では、この伝達特性をマフラーの機能である消音特性と言い換えて説明する。また、いくつかある消音特性を表す指標のうち、Fig. 11 に示す NR (Noise Reduction : 2 点間の圧力の比、以降 NR と表記) を用いる。

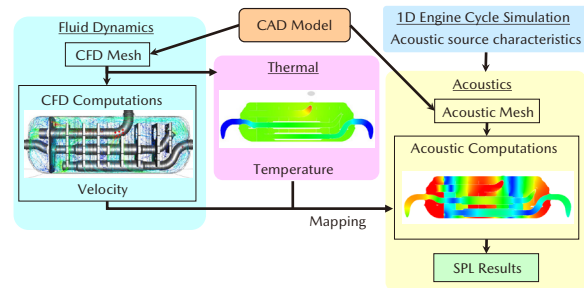


Fig. 10 Analysis Flow of Exhaust Pulsating Noise Prediction

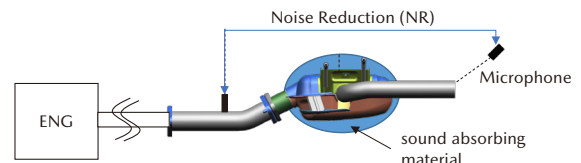


Fig. 11 Schematic Diagram of NR Measurement

4.2 従来の予測精度

脈動音予測における入力について、1D シミュレーションで求まる ENG 本体近傍の排気脈動の予測精度は、Fig. 12 に示すとおり、おおむね良好であることが分かっている。一方、排気システムの消音特性 NR については、特にマフラーに関しては、Fig. 13 に示すとおり、流れがない状態、すなわち音響加振時は予測精度が高い。対して、Fig. 14 に示すとおり、4 気筒エンジン実稼働時の代表的な次数成分の NR は、予実差が大きく、高次高回転になるほど予実差が拡大する傾向にあった。

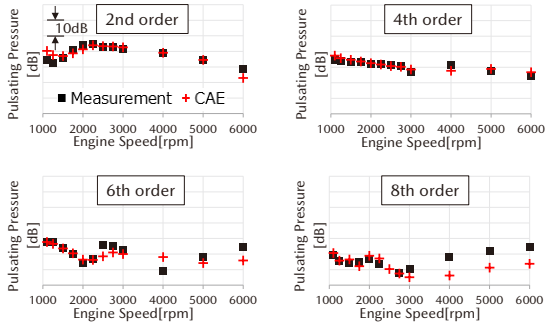


Fig. 12 Exhaust Pulsation Prediction Accuracy

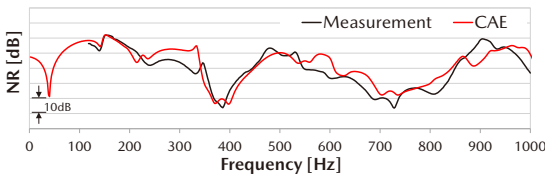


Fig. 13 Prediction Accuracy of NR without Flow

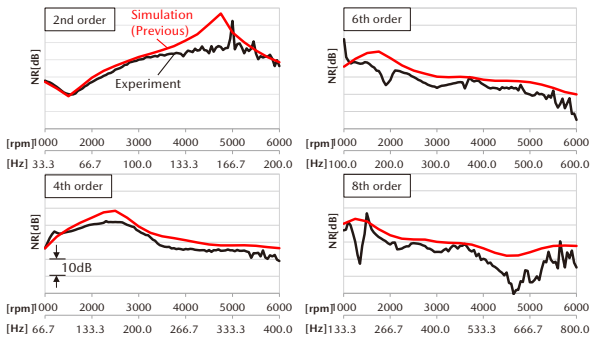


Fig. 14 Prediction Accuracy of NR during Engine Running

4.3 課題抽出と解決の取り組み

マフラー内は、高温・高流速のガスが流れる場であることを踏まえると、実稼働時のNRに予実差が生じる要因は、従来の解析では、音の伝ばを解く上で必要な媒質の温度や、媒質の粘性の影響をモデル化できていないことと、高速な流れによりマフラー内部で2次的に発生する気流音を考慮できていないことにあると考える。そのため、NRの予実差改善に向けて、以下の3つの検討課題を抽出し解決を試みた。

課題①：吐出音（次数音）に含まれる気流音成分の考慮

課題②：媒質の物性値の温度依存性の厳密な考慮

課題③：粘性減衰を模擬する音響減衰値の適正化

(1) 吐出音（次数音）に含まれる気流音成分の考慮

気流音は3章で述べた方法で予測できる。しかし、商品開発時に吐出音を評価する際は、エンジン回転を単位時間当たり一定の速度で上昇させるスイープ運転で評価するため、回転数上昇に伴い排ガス温度や質量流量が変化する。ゆえに、各回転数の次数音に含まれる気流音成分を厳密に予測するには、数十回のCFD解析が必要となり、計算コストに優れた分離法であっても現実的では

ない。そこで、低回転と高回転の2条件（2回のCFD解析）の気流音予測データから、その中間回転数の気流音を流体騒音のべき乗比例則に従って推定する手法を考案した。一般的に流体騒音の音源は、純粋な流れの乱れに起因するものと、流れの乱れと固体壁面の相互作用に起因するものに大別され、これらの音源モデルの表記から、前者は4重極音源、後者は2重極音源と呼ばれる。前者はLighthill^(2,3)により、音の強さ*I*が流れの速度の8乗、後者はCurle⁽⁴⁾により6乗に比例することが導かれている。これらの考えに沿って、気流音の強さ*I*が流速*U*の*N*乗に比例（ α は係数）するものとする、以下の式(7)~(11)が得られる。

$$I = \alpha U^N \tag{7}$$

$$p^2 = \alpha \rho c U^N \tag{8}$$

$$10 \log \frac{p^2}{\rho_0^2} = 10 \log \left(\frac{\alpha \rho c}{\rho_0^2} U^N \right) \tag{9}$$

$$SPL_{pred.} = 10 \log \left(\frac{\alpha \rho c}{\rho_0^2} \right) + 10 \log (U^N) \tag{10}$$

$$SPL_{pred.} = N * 10 \log (U) + \alpha', \alpha' = 10 \log \left(\frac{\alpha \rho c}{\rho_0^2} \right) \tag{11}$$

ここに、*I*：音の強さ（インテンシティ）= $p^2/\rho c$ [W/m²]

ρ ：観測音圧 [Pa]

ρ_0 ：最低可聴音圧 (20 μ Pa)

ρ ：媒質密度 [kg/m³]

c：音速 [m/s]

L：代表長さ [m]

U：流れの代表速度 [m/s]

M：マッハ数 [-]

このように比例定数*N*は、dB表示した音圧と対数表示した流速の関係から算出することができる。この関係を用いて、Fig. 15に示す手法で気流音成分を求める。まず、STEP Iとして、気流音を予測する最大・最小の2つの回転数条件について、分離法による予測を行い、式(12)に従いそれぞれの回転数のオーバーオールレベルを算出する。次に、STEP IIとして、2つの回転数のオーバーオールレベルと流速の関係から、式(13)に従い比例定数*N*を算出する。最後に、STEP IIIとして、中間回転数の流速*U*から式(14)に従い、狭帯域バンドごとの気流音レベルを推定した後に、次数に該当する周波数成分を抽出する。この手法の妥当性確認として、Fig. 16に示すとおり、STEP I~IIIの手法で推定した気流音（2回転数分の気流音データは実験結果を使用）と、2章にて推定した気流音を比較し、両者が一致することを確認した。なお、気流音と脈動音のモデル開発を同時に進めていた都合上、本章最後のFigs. 18, 19に示す最終的なNRの精度改善結果は、STEP Iの2回転数分の気流音は実験結果で

代用した。この方法で求めた気流音成分を考慮した実働時のNRは以下の方法で算出した。まず、マフラー上流の管内圧実験結果と予測したNRからマイク位置音圧を算出し、推定した気流音と和をとる。次に、和をとったものとマフラー上流の管内圧実験結果からNRを算出する。

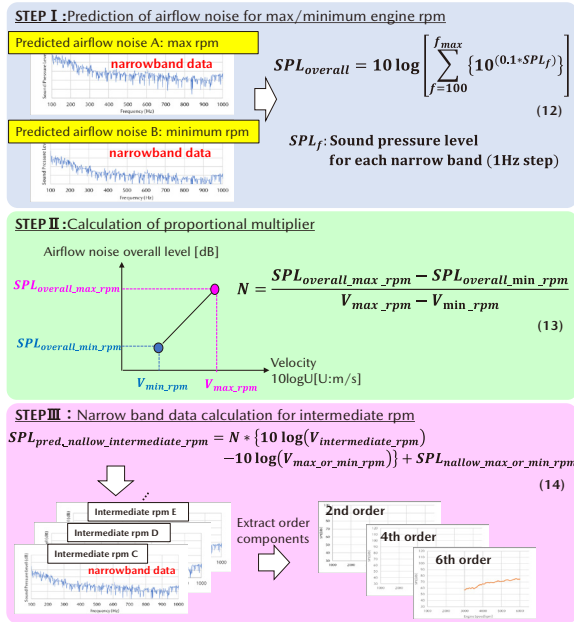


Fig. 15 Prediction Method of Airflow Noise Component

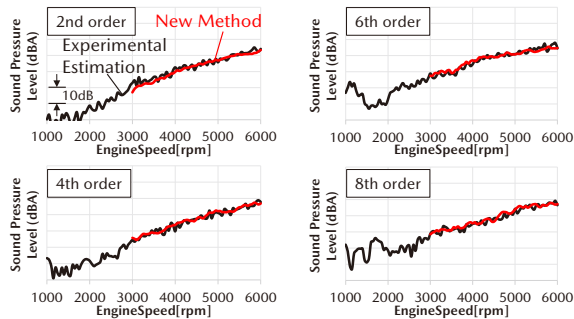


Fig. 16 Prediction Result of Airflow Noise Component

(2) 媒質の物性値の温度依存性の考慮

排気系は高温かつ上流から下流にかけて大きな温度勾配をもつ場である。そのため、NRの正確な予測には、モデル上で実機相当の温度場を再現した上で、媒質物性の温度依存性を厳密に考慮して音響伝達特性を解くことが必要である。これまで、音速や密度については温度依存性を考慮して予測してきたが、本稿では、音速や密度の他に、定圧比熱・定積比熱⁽⁵⁾、熱伝導率⁽⁶⁾、粘性係数⁽⁷⁾、体積弾性率に対して、温度依存性が解析結果に与える影響を検証し、温度依存性を考慮する物性値を決定した。

(3) 粘性減衰を模擬する音響減衰値の適正化

音とは空気の微小振動であることを踏まえると、音は音が伝わる媒質のもつ粘性により、伝ば時に媒質同士、媒質と固体壁（排気管壁面）間で摩擦が生じる。この摩

擦により音のエネルギーの一部が熱エネルギーとなって拡散し減少する。したがって、音響解析時には通常これらの摩擦によるエネルギーの損失を考慮するために減衰を定義する。音響解析における減衰は、 $\tilde{c} = c' + jc''$ のように、場の音速 c を複素音速として与えることで定義し、虚部/実部 (c''/c') が減衰（臨界減衰比 ξ に相当）を意味する。

次に、定義する減衰値の考え方について述べる。別途、内部構造違いの複数のマフラーに対し、周波数一律の減衰を複数水準設けてNRの予測の変化をみたところ、周波数によって予測差が最小となる減衰値が異なることが分かったため、本稿では、周波数依存減衰を適用した。周波数依存値の決定においては、減衰発生の物理的なメカニズムを元に、周波数軸に対する固定の減衰の変化率を決定し、その変化率に予測差が最小となる係数を掛け合わせて、最終的な減衰値を決定している。この周波数に対する減衰の変化率については文献⁽⁸⁾の式(15)、(16)を参考とした。Fig. 17は、式(16)から求めた臨界減衰比 ξ をグラフ化したもので、粘性による摩擦に起因して生じる減衰は、理論上 $1/\omega$ 、つまり $1/f$ に比例することが分かる。

$$\tilde{\rho} = \rho' - j\rho'' = \frac{4\rho}{3} - j \frac{8\mu}{\omega a^2} \tag{15}$$

$$\tilde{c} = c' + jc'' = \sqrt{\frac{K}{\rho' - j\rho''}} = \sqrt{\frac{K(\rho' + j\rho'')}{\rho'^2 + \rho''^2}} \tag{16}$$

- ここに、 $\tilde{\rho}$: 複素密度 [kg/m³]
- ρ : 媒質の密度 [kg/m³]
- μ : 媒質の粘性係数
- ω : 角速度 [rad/s]
- a : 管半径 [m]
- K : 体積弾性率 [Pa]
- ξ : 臨界減衰比 [-]

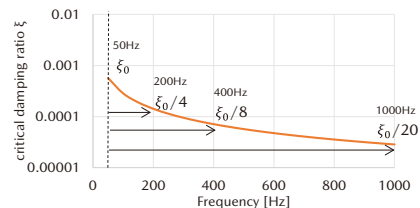


Fig. 17 Theoretical Value of Attenuation

4.4 成果

前節までの各課題に対する検討結果を踏まえ、吐口音（次数音）に含まれる気流音成分、物性値の温度依存性、周波数依存の音響減衰を考慮した最終的な4気筒エンジン実働時のマフラーのNRの予測精度をFig. 18に示す。加えて、マフラーの内部構造が異なる6気筒エンジン実働時のNRの予測精度をFig. 19に示す。Figs. 18, 19に示すとおり、マフラーの内部構造に依らず、大幅な精度改善を実現した。

一部、Fig. 19 の 6 次の青矢印で示す領域で予実差が残るが、これは Fig. 20 左図に示すように、その周波数帯は、アウトレットパイプの実質的な入口であるパンチング端部において、逆位相の音波が打ち消し合う効果、いわゆるサイドブランチ共鳴の周波数 f (距離 l が波長の $1/4$ となる周波数) と一致していることから、音響解析ではその効果代を再現できていないと推定される。また、更なる分析のために、Fig. 20 右図に示すサイドブランチ構造を模擬した簡易形状マフラーにて、送風機による定常流れ有無の 2 つ条件に対して、非定常 CFD 解析による NR の精度検証を実施したところ、Fig. 21 に示すとおり、その効果代を定量的に再現することが分かった。以上を踏まえると、音響モデルの更なる改善の着目点は、非定常 CFD 解析と、粘性なし・圧力の変動振幅が微小等の仮定の基、ナビエ・ストークス方程式から導出できる波動方程式を解く音響解析の解法の違いにあると考えられる。今後、音響解析にて同効果を再現するモデル化に取り組む予定である。

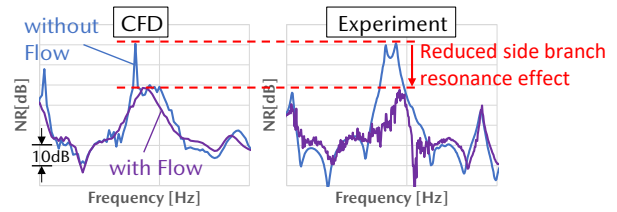


Fig. 21 NR Prediction Accuracy by CFD Analysis

5. おわりに

お客様が魅力を感じるサウンド等のマツダの独自価値創造や将来の厳しい規制への対応を効率的に進めるために、計測結果の分析技術の構築や、CFD 解析や音響解析モデルを新たに改良することで、排気吐出音の予測精度を大幅に向上させた。それらは、着実にモデル改善を行えるように基礎形状・簡易マフラー・製品形状というようにステップアップしたことや、流れ場内の気流音計測や音響加振試験などの基礎試験や実機計測に及ぶ試験実施により、現象把握・からくり解明・モデル化を進めたことによるものである。今後も基本・着実の精神を貫き、技術開発を推進する所存である。

最後に、本技術開発は(株)ヒロテック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。

参考文献

- (1) Elnady T.: On the modeling of the acoustic impedance of perforates with flow, AIAA 2003-3304, 9th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, May 2003, Hilton Head, SC, USA. (2003)
- (2) M.J. Lighthill: On sound generated aerodynamically. Part I: General theory, Proc. R. Soc. Lond., A221, 564-587 (1952)
- (3) M.J. Lighthill: On sound generated aerodynamically. Part II: Turbulence as a source of sound, Proc. R. Soc. Lond., A222, 1-32 (1954)
- (4) N. Curle: The influence of solid boundaries upon aerodynamic sound. Part II: Turbulence as a source of sound, Proc. R. Soc. Lond., A222, 1-32 (1954)
- (5) E.W. Lemmon: Thermodynamic Properties of Air and Mixtures of Nitrogen, Argon, and Oxygen From 60 to 2000K at Pressures to 2000MPa, J. Phys. Chem. Ref. Data, Vol. 29, No.3, pp.331-385 (2000)
- (6) NOAA, NASA, and US Air Force: U.S. Standard Atmosphere (1976)
- (7) W. Sutherland: The viscosity of gases and molecular force, Philosophical Magazine, S. 5, 36, pp.507-531 (1893)
- (8) 宇津野秀夫：音・振動の減衰理論と応用例，日本音響学会誌，66 巻 10 号，pp.513-520 (2010)

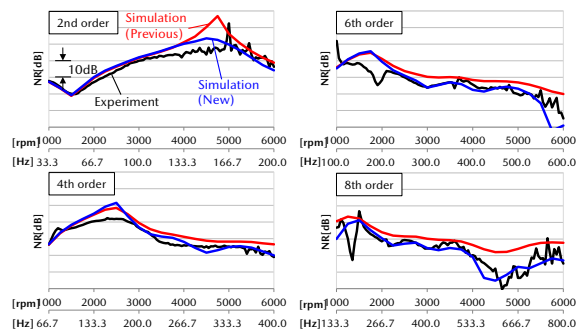


Fig. 18 Prediction Accuracy of NR during I4 Engine Running

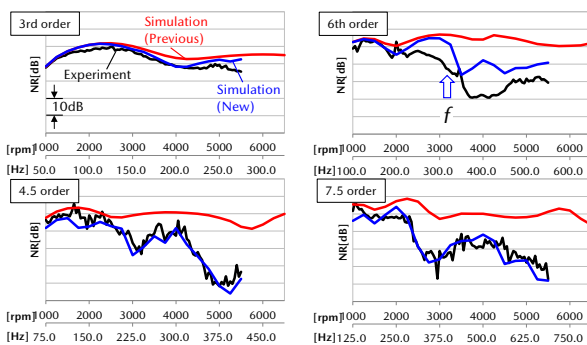


Fig. 19 Prediction Accuracy of NR during I6 Engine Running

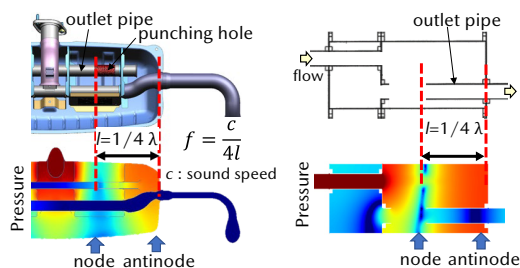
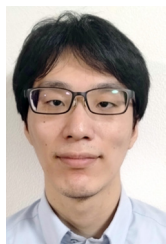


Fig. 20 Side Branch Resonance

■著者■



石原 教示



鶴本 徹



廣部 敏之



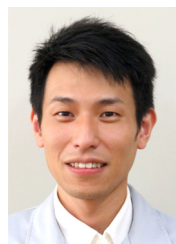
土路生 修



住谷 章



中村 直樹



新川 貴大

論文・解説

17 Neural Network を活用したバーチャルセンサー開発について

Virtual Sensor Development with Neural Network

小林 謙太 *¹ 矢野 佑樹 *² 和田 幸史朗 *³
Kenta Kobayashi Yuki Yano Koshiro Wada
森実 健一 *⁴ 柚木 伸夫 *⁵
Kenichi Morizane Nobuo Yunoki

要約

マツダは従来から取り組んできた MBD プロセスに加えて、機械学習を活用することによるクルマの進化に挑戦している。具体的な取り組みとして、エンジンに搭載されているセンサーが抱える課題を解決するために、物理量を Neural Network モデルで予測することで、センサーと置き換える「バーチャルセンサー開発」がある。本稿ではディーゼルエンジンのインテークマニフォールド温度とターボチャージャー回転数を予測するために、Neural Network モデルを開発するプロセスを紹介する。また、多種多様な条件下で使用されるクルマへの適用を想定し、入力パラメーターが学習領域外に存在する場合の対応についても示す。

Abstract

Mazda is taking up the challenge to evolve vehicle performance by utilizing machine learning in addition to the MBD process that we have continued to work on. What we specifically have done to solve the issues related to the sensors mounted on the engine is “virtual sensor development” that replaces sensors by predicting physical quantities with a Neural Network model. This paper introduces the process of developing the Neural Network model to predict the intake manifold temperature and the turbocharger rotational frequency of a diesel engine. Additionally, this paper shows how to deal with the situation when the input parameter falls outside the learning domain, assuming practical applications to vehicles that will be used under a wide variety of conditions.

Key words : Electronics and control, Engine control, New measuring technique, Neural Network

1. はじめに

マツダは「2050年カーボンニュートラルへの挑戦」に向けて、各国の電動化政策や規制強化の動向、お客様のニーズや受容性を踏まえたマルチソリューション戦略を実現するために、パートナー企業とともに段階的にパワートレインの電動化を進めていくことを表明している。電動化に対応した上でお客様に「走る歓び」と「優れた環境性能」を提供し続けるためにはエンジンを含めた複雑なパワートレインシステムの構成や制御の最適化を効率的に行うことが必要不可欠であり、マツダではVプロセスの左バンクにおいて流体や熱流れ、化学反応などの物理現象が数式化されたモデルを用い目指す商品性能を達成するための機能を徹底的に追求する Model Based

Development (以下、MBD) を実践してきた⁽¹⁾ (Fig. 1)。

他方で、車載 Electronic Control Unit (以下、車載 ECU) の能力向上により自動車開発における機械学習、特に Neural Network (以下、NN) は、自動運転における画像処理、モデルの代替⁽²⁾⁽³⁾、制御モデルの研究⁽³⁾ 等への活用が進められている。NN は非線形の複雑な現象を高い精度で再現することができ、実時間よりも高速に演算可能である⁽⁴⁾。これらの NN の特性に着目し、マツダではこれまで実践してきた従来型の MBD による機能開発に加えて、NN を活用したパワートレインの更なる進化に向けた取り組みを進めている。その一例として、エンジン内部の物理量を NN で予測することで、既存のセンサーを削減する取り組みがある。マツダは電動化が進む 2030 年においても大半のクルマへのエンジン搭載

*1~3 MBD 革新部
MBD Innovation Dept.

*5 PT 制御システム開発部
PT Control System Development Dept.

*4 パワートレイン技術開発部
Powertrain Technology Development Dept.

を想定しているが、エンジンには物理量を計測するために多数のセンサーが搭載されており、コスト高、レイアウトへの制約、重量増加等の幾つかの課題を抱えている。計測された物理量はエンジン制御に反映されるため正確な数値の把握が重要であるが、仮に他の計測された物理量から対象の物理量を予測することでセンサーを削減できれば前述の課題の解決策となり得る。またクルマはさまざまな環境条件下で使用されるため、NN に対する入力パラメーターが事前の学習領域外に存在する状況も考慮すべきである。そこで本稿では、ディーゼルエンジンに搭載されているインテークマニフォールド（以下、インマニ）の温度とターボチャージャー回転数（以下、TC 回転数）を題材として、NN による物理量の予測手法と、入力パラメーターが学習領域外に存在する場合の対応を紹介する。

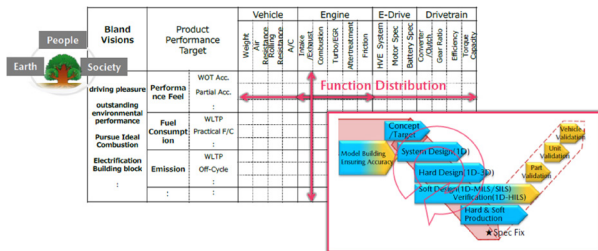


Fig. 1 MBD Process in Mazda

2. NN によるセンサー値予測

2.1 研究概要

本研究では 1.8L のディーゼルエンジンである SKYACTIV-D 1.8 を題材とした。SKYACTIV-D 1.8 のエンジンシステム図を Fig. 2 に示す。SKYACTIV-D 1.8 の吸排気システムには低圧、高圧の 2 系統で構成される排気ガス再循環装置（以下、EGR）や水冷式インタークーラー、シングル可変ジオメトリー（VG）ターボチャージャーなどが採用されており、インマニ温度や TC 回転数はこれらの部品間で発生するエネルギー収支の結果として決定される。

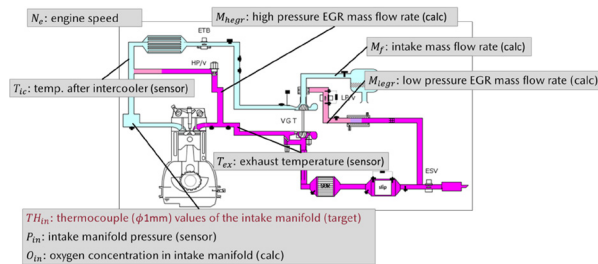


Fig. 2 System Diagram of SKYACTIV-D 1.8

次に NN による物理量予測の工程を Fig. 3 に示す。学習データの収集、入力パラメーターの選定、NN の作成

や学習を実施し、NN の精度や寄与度を分析するプロセスを繰り返すことで精度の高い NN を構築し、最後に開発車両を用いたテストを行うため Simulink モデルに統合した。以降に各工程の詳細について述べる。

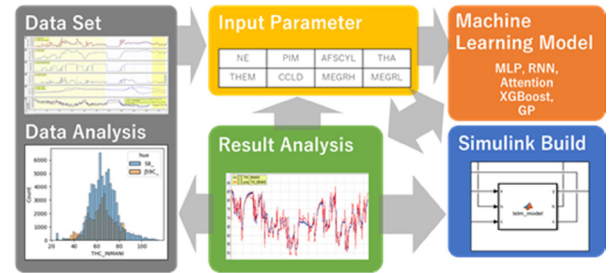


Fig. 3 Procedure of Virtual Sensor Development

2.2 学習データ収集

機械学習において重要である学習データの収集には、車載 ECU 内の計測・計算値を取得することが可能な開発車両を用いた。開発車両でマツダ本社内やテストコースを実際に走行し、市街地走行や高速走行を模擬した計 23000 秒分の学習データを収集した。またインマニ温度に関しては市販されている車両に搭載されるサーミスタ型センサーではなく、計測精度や応答性の観点から $\phi 1\text{mm}$ のシース型熱電対を採用し、こちらも学習データとして活用した。

2.3 入力パラメーター選定

NN の入力パラメーターは機械学習の予測精度に大きく影響する。そこでインマニ温度に関係するパラメーターを機能展開図から選択する工学的経験からの手法、インマニ温度を物理式で導く際のパラメーターを選択する数値流体力学からの手法、共分散等のデータ分析からインマニ温度に相関のあるパラメーターを選択する統計的な手法の三手法を組み合わせることで最も高い予測精度となる入力パラメーターを選定した。予測対象を現在のインマニ温度の熱電対値として、入力パラメーターはセンサー値と ECU 内の計算値からエンジン回転数、インマニ圧力、吸気流量、インタークーラー後ガス温度、タービン前排気温度、インマニ内酸素濃度、高圧 EGR 流量、低圧 EGR 流量を設定した。TC 回転数に関しても同様の手法により入力パラメーターの選定を実施した。

2.4 検証環境と NN モデル

机上検証は Python により実施しており、NN の作成と学習には代表的な機械学習のフレームワークと NN ライブラリである Tensorflow と Keras を使用した。また、開発車両の走行中に 0.1 秒間隔で ECU 適合ツールと車両間の通信をしてリアルタイム予測を行える環境も Simulink 上で構築した。

インマニ温度や TC 回転数を求めるためには過去から

現在までのエネルギー収支を計算する必要があり、NNはRecurrent Neural Network (以下、RNN)の採用が一般的である。ただし、RNNは長期の時系列データを処理する際の勾配消失という問題を抱えているため、今回は記憶セルの導入によって長期の過去情報を記憶可能なLong Short Term Memory (以下、LSTM)を用いた (Fig. 4)。今回のLSTMはユニット数が10で活性化関数をtanhとsigmoidとしたLSTM層が一層のモデルを使用している。また、出力層は活性化関数を恒等写像とした全結合層である。学習の設定は誤差関数として平均二乗誤差を、最適化アルゴリズムとしてAdam⁽⁵⁾を採用した。

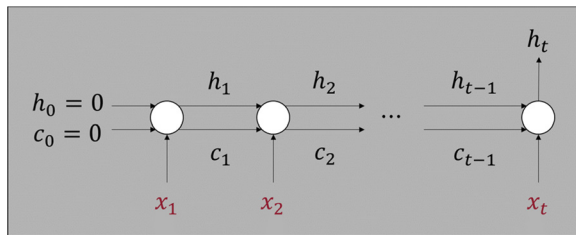


Fig. 4 Structure of LSTM

2.5 結果

学習領域内の入力データによってインマニ温度とTC回転数を予測した結果を Fig. 5, 6 に示す。ここでNeはエンジン回転数、TH_{in}はインマニ温度、TCはTC回転数である。実測値は実線で、予測値は破線で表している。Fig. 5は145km/hまで加速する開発車両の走行データを基に机上予測した結果であり、実測と一致していることが確認できる。また、Fig. 6は開発車両の走行中にリアルタイム予測を145km/hまで複数回加速する走行において実施した結果である。開発車両によるリアルタイム予測においても遅延なく演算できていることに加え、予測精度の許容誤差であるインマニ温度±5℃以内、TC回転数±10000rpm以内を全予測期間のうち97%の領域で達成している。

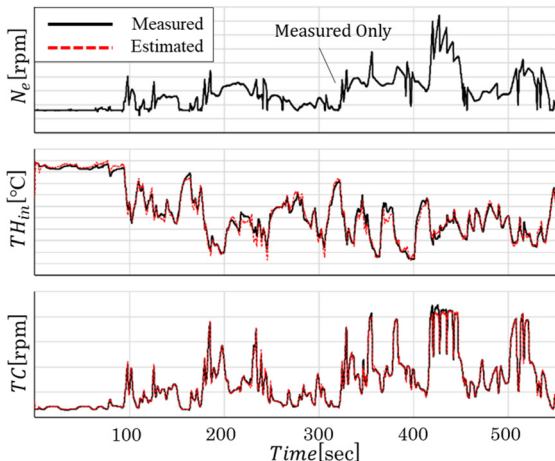


Fig. 5 Prediction for Training Data by LSTM

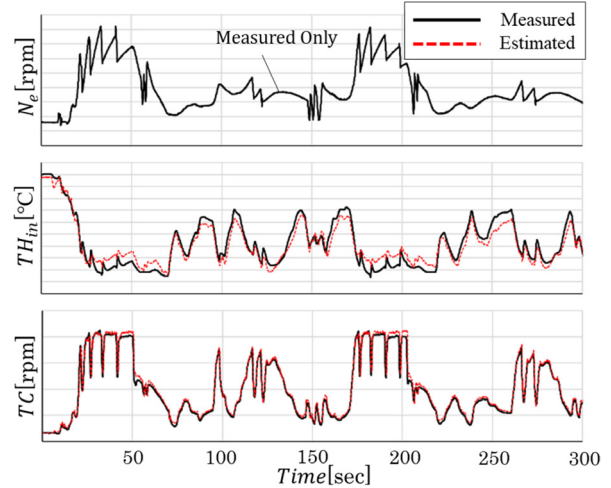


Fig. 6 Real-Time Prediction by LSTM

次に学習領域外における予測精度を検証するために、学習データに高車速走行を加えずに、高車速走行を含む走行パターンを予測した机上検証結果を Fig. 7 に示す。実測の傾向はとらえているものの高車速走行時は絶対誤差が大きくなっている。一般論として、NNは学習領域外において予測精度が低下する傾向が見られる。しかし、実際の市場では多種多様な走行パターンや環境条件が存在し、全ての学習データを事前に収集することは困難である。そこで次項では、学習領域外における予測精度の信頼性を保証するための対応について紹介する。

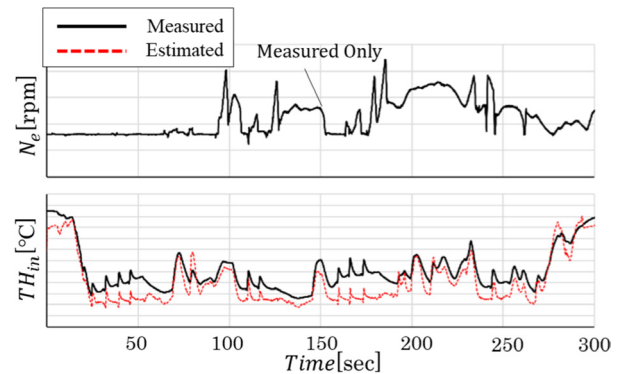


Fig. 7 Prediction for Outside Learning Domain by LSTM

3. バーチャルセンサーの外挿対策

3.1 外挿対策の必要性

NNが学習領域外において精度が悪化する問題を Fig. 8 で説明する。青点はNNの学習領域内のデータ、赤点は学習領域外のデータを表している。実線で示すように、学習領域内のデータに対する予測(内挿)はよく合うが、学習領域外のデータに対する予測(外挿)は信頼性が失われる。これはNNが学習領域内のデータのパターンを学習し、その高い表現力で近似する一方で、学習領域外のデータのパターンは学習時に把握できないためである。

NNの学習時に市場で想定される極冷間や高地といった環境条件下で収集したデータを使用して、可能な限り広い範囲のデータを学習領域内に含めるという方法はあるが、データ収集に莫大な工数とコストがかかる上、全ての条件下で内挿とするのは困難である。そこでNNの外挿を補間するために、以下の手順をとる。

- 1) 高精度予測が可能な NN モデルの学習
- 2) NN の寄与度分析による入力パラメータ絞り込み
- 3) 絞り込み入力パラメータによる重回帰予測
- 4) 学習領域外での重回帰予測への切り替え

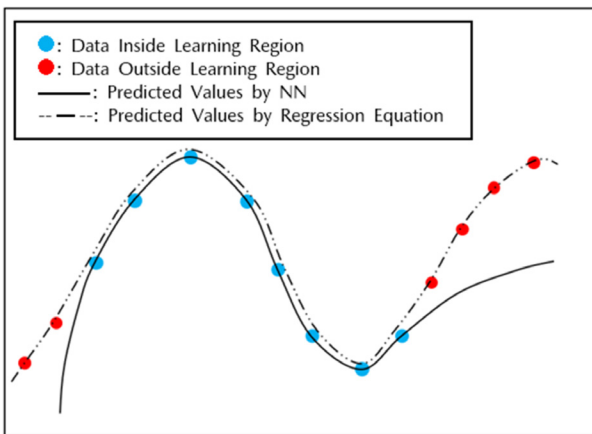


Fig. 8 Schematic Diagram of a Prediction

1) では実車走行で種々の物理センサーから得られたデータ及び2章で構築したNNモデル構造と入力パラメータを活用しNNに学習させる。

2) では予測に対する寄与度の小さい入力パラメータを削除する、特徴量選択を実施する。機械学習における特徴量選択の主な効用には、ノイズの削減、過学習の防止、計算量の削減、モデルの解釈可能性の向上などがある。特徴量選択の手法はさまざまなものがあるが、今回は既に精度よく予測できるNNがあるので、SHAP⁽⁶⁾とデータの相関、分布を使って、NNから高精度予測に必要な入力パラメータを絞り込む。ここでSHAPとは機械学習モデルを局所的に線形モデルで近似することで、各入力パラメータの予測への寄与度をデータごとに定量化するツールである。

3) では2)で絞り込んだ入力パラメータを使ってロバストな予測数式を重回帰により立式する。そのような数式は前提をみれば外挿でも精度を確保できる。そのアイデアをFig.8の模式図で説明する。Fig.8ではNNの学習領域内のデータは、sin関数のような数式で近似できる。このとき数式は学習領域内のデータの法則を表現している。この法則が学習領域外でも成り立つ前提がみれば、NN予測の信頼性が失われる学習領域外のデータに対しても、点線のような信頼できる予測結果を出力できる。

4) は予測モデルを実車に搭載する際の方針である。学習領域内での予測精度は基本的にNNが最も優れているため、走行時に学習領域外のデータが入力された場合のみ、予測モデルをNNから3)で構築した重回帰式に切り替え、外挿の信頼性を担保する。

本研究では、高地における性能変化が大きいTC回転数の予測に対して、以上の手法による大気圧に対する外挿対策を適用する。大気圧は高度上昇に対して指数関数的に減少していく法則があり、特に本研究で使用するデータの範囲内では線形に近い形で減少していくため、3)で言及した法則の前提をみている。

3.2 TC回転数の外挿対策

(1) 高精度予測が可能な NN モデルの学習

まずNNモデルとして、1層10ユニットのLSTMに、出力層として1ユニットの全結合層を加えたものを用意した。入力パラメータはTC回転数に物理的に関与するであろうものを(1)式のように12個選んだ。

$$\hat{x} = (M_{air}, P_{atm}, P_{in}, P_{ex}, T_{ic}, T_{bic}, T_{ex}, T_w, L_{tc}, Q_{fuel}, M_f, O_{ex}) \quad (1)$$

ここで M_{air} は新気流量, P_{atm} は大気圧, P_{in} はインマニ圧力, P_{ex} はタービン前圧力, T_{ic} はインタークーラー後ガス温度, T_{bic} はインタークーラー前ガス温度, T_{ex} はタービン前ガス温度, T_w はエンジン水温, L_{tc} はVGタービンのベーン開度, Q_{fuel} は燃料噴射量, M_f はインマニガス流量, O_{ex} は排気酸素濃度である。

学習には標高0m, 1000m, 1500m, 2000m, 2500m, 3000mに相当する大気圧下の開発車両走行データを使用した。データのサンプリングレートは0.1秒とし、NN学習時に使用するデータのタイムステップ数は100とした。全学習データ点の合計個数は約13万点だった。Fig.9にモデルの模式図を示す。

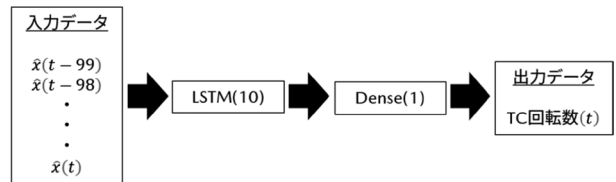


Fig. 9 Schematic Diagram of the Model

Fig.10に標高0mにおけるTC回転数の予測結果を示す。横軸が時間、縦軸がTC回転数で、黒い実線がTC回転数の実測値、赤い点線がNNモデルによるTC回転数の予測値を表す。学習領域内であれば高い予測精度であることが分かる。

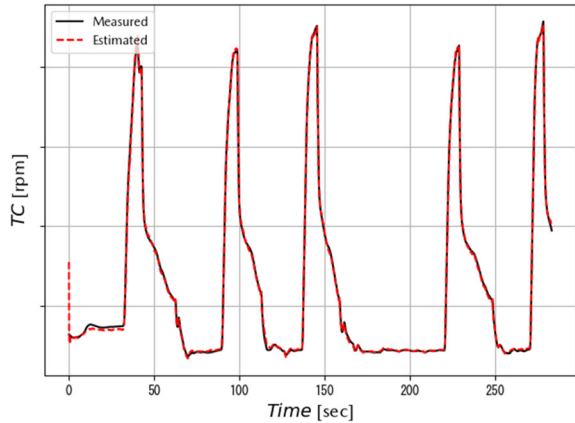


Fig. 10 TC Prediction Results from the NN Model with 12 Inputs

(2) NNの寄与度分析による入力パラメーター絞り込み
次に重回帰式を立式するために、入力パラメーターの絞り込みを行った。まず学習したNNモデルに対してSHAPによる寄与度分析を適用した。先述したようにSHAPは各入力パラメーターの予測への寄与度をデータごとに定量化するツールであり、今回のような入力パラメーターの絞り込みにも適用可能である。Fig. 11に標高0m相当の大気圧下におけるデータにSHAPを適用した結果を示す。

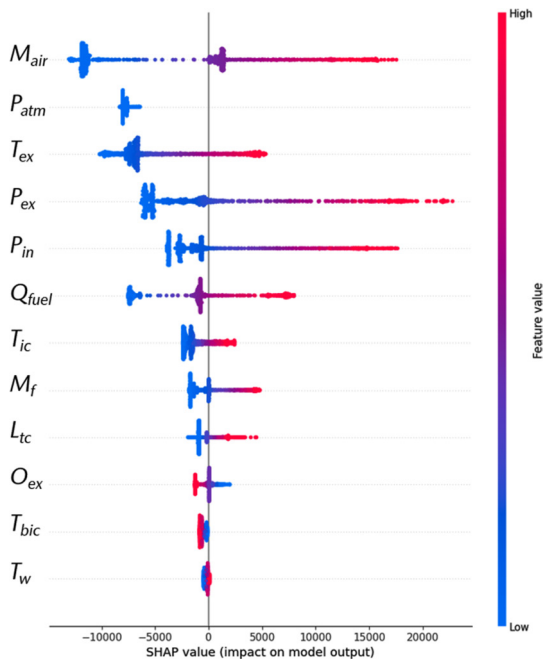


Fig. 11 SHAP Summary Plot under 0m Atmosphere Pressure

図は各タイムステップの各入力（図中の1点が1つのデータに対応する）が、TC回転数予測に与える寄与を表している。例えばタービン前圧力 P_{ex} の行では、赤いplotが図の横軸 SHAP value が1万から2万の間に分布しているのが見てとれる。これはタービン前圧力が大きいと

きに、TC回転数の予測が平均値より1万から2万回転程度上昇することを意味する。実際に今回解析したエンジンでのタービン前圧力とTC回転数の間には強い正の相関があるので、NNは入力パラメーターを正しく考慮して予測を行っていると解釈できる。

ただしSHAPの結果はモデルの入力パラメーター間の相関に強い影響を受ける。これは線形回帰モデルが多重共線性に強い影響を受けるのと同様であり、個々のパラメーターが独立でない場合、SHAPの出力をそのままモデルの予測に対する寄与度と解釈することはできない。したがって実際にはデータの入力パラメーターと出力パラメーターの分布や、パラメーター間の相関関係に注意してSHAPの結果を解釈する必要がある。

例えば Fig. 11では新気流量 M_{air} の寄与度が大きいですが、 M_{air} はタービン前圧力 P_{ex} と強い相関をもち、かつTC回転数に対するデータ分布の形状は P_{ex} の方が素性がよいため、 M_{air} は入力パラメーターから削除できる。

以上のようなSHAP、相関、データ分布を合わせた解析により、TC回転数予測に最も寄与するパラメーターを以下の4つに絞り込んだ。

$$\hat{x} = (P_{ex}, P_{atm}, O_{ex}, L_{tc}) \tag{2}$$

実際にこれらのパラメーターを入力として3.2(1)と同様の構成のNNモデルを学習させ、Fig. 10と全く同じ学習領域内のデータのTC回転数を予測した結果をFig. 12に示す。4個のパラメーターによって高い精度で予測できている。

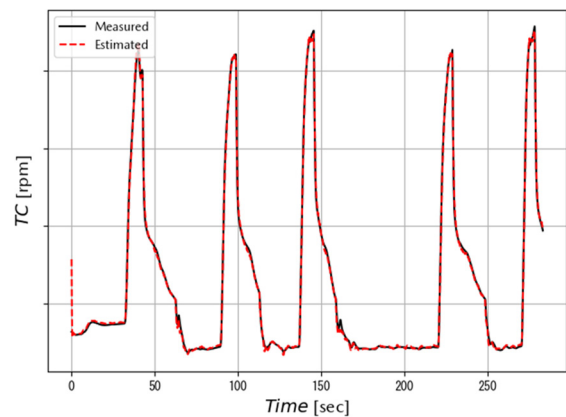


Fig. 12 TC Prediction Results from the NN Model with 4 Inputs

(3) 絞り込み入力パラメーターによる重回帰予測

以下の解析にはPythonの機械学習ライブラリであるscikit-learnを使用した。標高0m~2000mのデータを学習に使い、2500m~3000mのデータを大気圧の外挿検証に用いた。絞り込んだ(2)式の4個のパラメーターを入力とし、TC回転数を予測する重回帰モデルを作成した。具体的にはL2正則化を含むリッジ回帰モデルを採用

した。フィッティングの際にはパラメーターのデータ分布などの考察から、4個のパラメーターを3次(交互作用項含む)まで展開した。結果的に重回帰式は定数項を含めて合計35項となった。式(3)に求めた重回帰式の一部を示す。ただし式(3)の両辺の各項は標準化している。

$$TC \text{ 回転数} = 1.33 P_{ex} - 1.28 P_{ex}^2 * P_{atm} + \dots \quad (3)$$

(4) 学習領域外での重回帰予測

式(3)によって学習領域内である標高0mと領域外である標高3000mのTC回転数を予測した結果をFig. 13とFig. 14に示す。Fig. 13の内挿の精度と同様に、Fig. 14で示す外挿の精度も高いことが分かる。

一方数式ではなくNNで、学習領域外の標高3000mでのTC回転数を予測した結果をFig. 15に表す。高回転側でTC回転数の予測と実測の誤差が大きくなっており、学習領域外ではFig. 14で示した(3)式の予測結果の方が高い精度であることが分かる。実際にFig. 14の重回帰式による外挿は、TC回転数±10000rpm以内の要求精度を94%のデータで達成できている。一方Fig. 15のNNによる外挿では、高回転側の精度が低いため、同要求精度を79%のデータでしか達成できていない。以上の結果から、外挿の精度悪化をNN予測から数式予測に切り替えることで補間する、今回採用した手法は有効であるといえる。

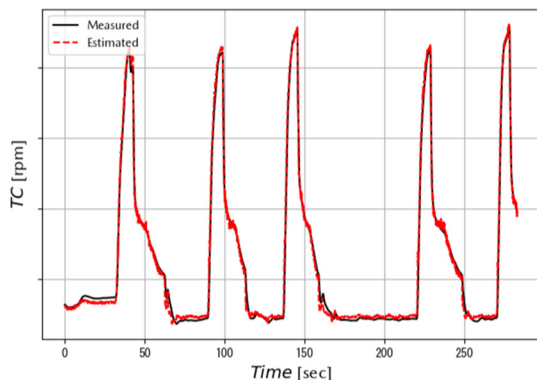


Fig. 13 Interpolate TC Prediction Results from the Multiple Regression Equation

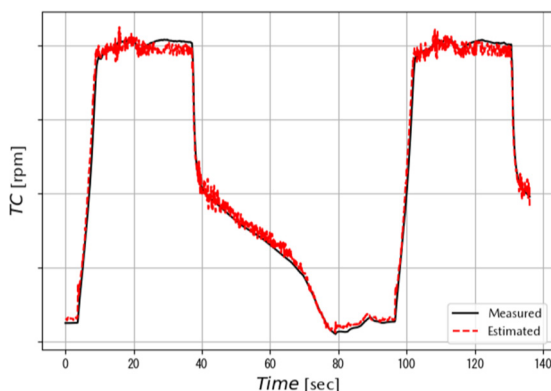


Fig. 14 Extrapolate TC Prediction Results from the Multiple Regression Equation

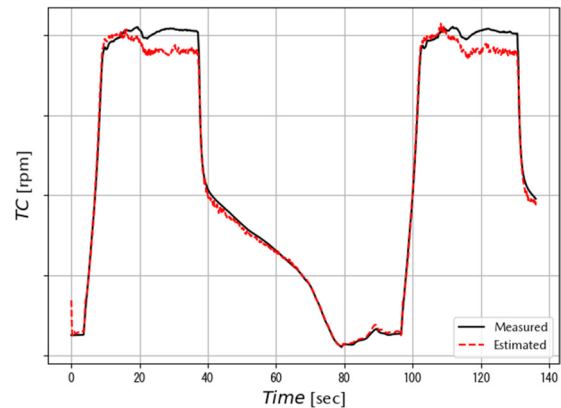


Fig. 15 Extrapolate TC Prediction Results from the NN Model

4. おわりに

本研究ではディーゼルエンジンのインマニ温度とTC回転数に対して、NNを活用することによって精度良く、かつリアルタイムに予測できることを示した。また市場におけるさまざまな使用環境下を想定し、入力パラメーターが学習領域外に存在する場合に重回帰式による予測に切り替える手法を提案した。これらの技術は他の物理量に対しても応用可能である。今後はコスト低減、レイアウト自由度の向上、車両重量の削減などのバーチャルセンサー化によって得られる価値を考慮し、対象センサーの選定を実施する予定である。またバーチャルセンサーの実用化に向けて、高精度なCAEなどを用いたより広範囲な学習データの生成技術や、実際のECU上での検証、2章で紹介したインマニ温度予測に対する外挿対策の適用も併せて進めていく。

参考文献

- (1) 宮崎ほか：SKYACTIV-D 3.3の開発におけるMBDプロセス革新と適用, [マツダ技報, No.39, pp.43-50 \(2022\)](#)
- (2) 池戸ほか：機械学習によるモデリング手法を活用した後処理状態推定 第2報, 第33回内燃機関シンポジウム予稿集, (2022)
- (3) 森安ほか：機械学習によるディーゼルエンジン吸排気系の実時間MPC設計, 計測自動制御学会論文集, Vol.3, No.3, pp.172-180 (2019)
- (4) 和田ほか：Neural Networkモデルによるセンサー値予測, 自動車技術会春季大会前刷集, No.227 (2023)
- (5) Diederik P. Kingma, Jimmy Ba: Adam: A method for stochastic optimization, In International Conference for Learning Presentations, (2015)
- (6) Scott M. Lundberg, Su-In Lee: A Unified Approach to Interpreting Model Predictions, (2017)

■著者■



小林 謙太



矢野 佑樹



和田 幸史朗



森実 健一



柚木 伸夫

論文・解説

18

情報制御系ソフトウェアのモデルベース開発 Model Based Development of Infotainment Software

白雪峰^{*1} 本城 創^{*2} 末富 隆雅^{*3}
Xuefeng Bai So Honjo Takamasa Suetomi

要 約

CASE (Connected, Autonomous, Shared, Electric) を代表とする 100 年に一度の変革を迎え自動車のシステムはますます複雑となり、そのソフトウェアの規模は増大している。開発規模が増大し、開発が破綻しないためには開発の効率化が必須となっている。これまでエンジン制御や運転支援システムなどの動的制御系に対してはモデルベース開発を適用してきたが、今後もソフトウェア規模が増大するインフォテインメントなどの情報制御系において、モデルベース開発による早期の仕様検証と、自動コード生成によるソフトウェア実装の効率化に取り組んだ。本稿では、情報制御系のモデリング手法及びモデル交換や検証の開発環境について述べる⁽¹⁾。

Abstract

In the age of CASE (Connected, Autonomous, Shared, Electric), automotive software has been growing in size with systems becoming more and more complex, making it crucial to improve development efficiency to avoid the collapse of development caused by expanded development scales and post-implementation reworks. So far, model based development has been applied to dynamic control systems such as engine controls and advanced driver assistance systems, and from now on, such development will also be required for information control systems, including infotainment systems that will further grow in the software scale to perform specification verifications at an early stage. Also we challenged efficient software implementation using automatic code generations. This paper describes the models of information control systems and the development environment of the model exchanges and verifications.

Key words : Model based development, Infotainment, SysML, MILS, SILS

1. はじめに

自動車の CASE (Connected, Autonomous, Shared, Electric) 技術の進化に伴い、システムは複雑化し、ソフトウェアの規模は増大し、開発の難易度が上がってきている。また、CASE 技術は急速に進化しており、市場競争が激化している。自動車メーカーは常に最新の技術を採用する必要があるが、新しい技術はソフトウェアの規模を増大させるため、開発の失敗リスクが高まる。更に、自動車のソフトウェアは複数のパートナー企業によって開発される場合がある。例えば、自動運転の開発には、自動車メーカー (OEM)、ソフトウェアメーカー、センサーメーカーなどが関わることもあり、コミュニケーションや調整不足の問題が生じる懸念が高まる。

以上のような要因により、自動車の CASE 技術に関するソフトウェア開発が破綻するリスクがあるといえる。

OEM は、ソフトウェア開発の品質管理やリスク管理に十分な注意を払う必要がある。また、パートナー企業とのコミュニケーションや調整を円滑に行うことが重要であり、抜本的な開発の効率化が求められている。

2. ソフトウェア開発プロセス

2.1 自動車ソフトウェア開発プロセス概要

自動車ソフトウェア開発において、一般的な開発形態として V 字モデルの各プロセス内の作業が全て完了して、次プロセスに進むウォーターフォール型開発プロセスが採用されている。ウォーターフォール型開発プロセスは、ソフトウェア開発の上流活動から下流活動とテスト活動が行われ、段階的に進める手法である。

ソフトウェア開発の上流活動では、ハードウェアも含むシステムとしての要件定義やシステムアーキテクチャ設計が行われる。ユーザー要件を明確化し、システムの

*1~3 統合制御システム開発本部
Integrated Control System Development Div.

機能や性能要件を洗い出す。非機能要件も加味しシステムのアーキテクチャやモジュールの設計を行い、要件に基づいたシステム仕様書を作成する。

下流活動では、上流活動で作成されたシステム仕様書で定義されたソフトウェア要求に基づいて、ソフトウェアの詳細設計が行われ、分割したモジュールやコンポーネントの詳細な設計を行い、実装するソースコードを開発する。

テスト・結合活動では、おおよそ単体テスト、結合テスト、システムテストの3つのレベルでソフトウェア及びシステムの検証が実施される。

単体テストでは、下流活動で作成された各モジュールやコンポーネントに対して、個々のモジュールが正しく動作し、要件を満たしていることを確認する。結合テストでは、単体テストが完了したモジュールやコンポーネントを結合し、システム全体の動作、モジュール間の相互作用やインターフェースの正常性を確認する。システムテストでは、システムが要件を満たしており、ユーザーの期待に沿った動作をすることを確認する。実際の環境でのテストやユーザビリティテストを実施し、システムが要求された機能を適切に提供することを確認する。

2.2 ソフトウェア開発のワークシェアパターン

プロジェクトや対象システムによってOEMとサプライヤーでの作業分担は異なる。以下に一般的なワークシェアパターンを示す (Fig. 1 参照)。

①インハウス開発パターン：OEMが自社内の開発チームをもち、ソフトウェア開発を自社で行うパターンである。OEMはソフトウェアの設計、開発、テスト、保守などの全てのプロセスを自社内で管理する。メリットとしては、直接的なコントロールが可能であり、セキュリティや知的財産の保護が容易である。

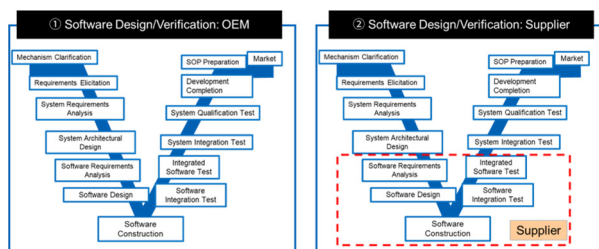


Fig. 1 Work Sharing Patterns in Software Development

②ソフトウェアサプライヤーへの委託パターン：OEMがソフトウェア開発をサプライヤーに委託するパターンである。サプライヤーはソフトウェアの開発、テスト、保守などを担当する。メリットとしては、OEM内部の開発コストやリソースの削減が可能であり、外部の専門知識や技術を活用できる。

2.3 現状の開発プロセスの課題

自動車ソフトウェア開発における現状の問題として、手戻りの発生による開発効率の低下がある。特に、ソフトウェア要求定義に関連する手戻りが多いことが社内調査で判明している。ソフトウェア要求の正確性や一貫性は、ソフトウェア開発全体の品質に大きな影響を与えている。要求定義の不備や不明瞭さが後の開発段階で判明し、手戻りや修正が発生することはよくある問題である。

3. 目指す開発の姿

3.1 次世代の開発手法

従来の開発手法では要求、要件を自然言語による文章の仕様書に記載しており、内容の確認を人手によるレビューで行ってきた。このような従来の開発では仕様書の記載内容に曖昧さや間違いが混入しやすいため、Fig. 2に示すとおりソフトウェア実装後にテストで要求と異なる動きが発覚し、元の要求の間違いに気づき大きな手戻りとなることがある。

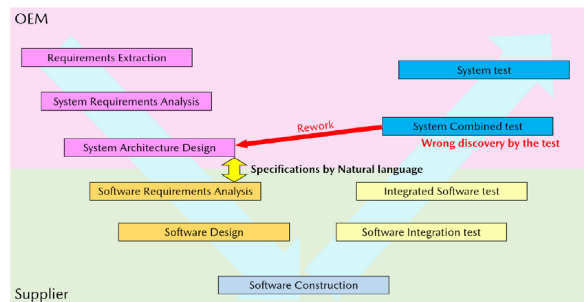


Fig. 2 Development Method (As is)

そこで次世代の開発手法として Fig. 3 に示すとおり、各工程ごとに検証を実施した後に、次工程を行うことで手戻りを少なくできると考える。また、要求や要件を曖昧さが無い形式的に記述することで機械的にモデル化及びコード生成することで、人手による間違いの混入を防ぐことができる。先行してエンジン制御開発では、ソフトウェア設計の工程において形式的なモデルによるソフトウェア開発を行っており、品質改善や効率化で大きな成果を上げている⁽²⁾。

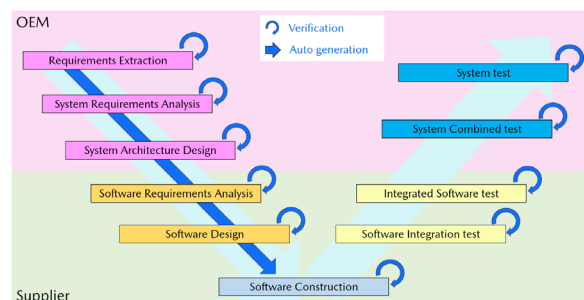


Fig. 3 Development Method (To be)

3.2 モデルでの事前検証 (モデル検査, MILS)

各工程においてモデルで記述した要求, 要件, 仕様を検証するために, MILS (Model in the Loop Simulation), 及び形式検証の一つであるモデル検査による検証がある。シミュレーションは, モデルを実行した結果が入力に対して期待される出力が得られることを検証する。一方, モデル検査は, 要求されていない状態 (出力) となる入力の有無を網羅的に検査し, そうなる条件を検出, もしくは要求されていない状態にはならないことを保証するものである。Fig. 4 にシステムアーキテクチャ設計における MILS 及びモデル検査の概要を示す。

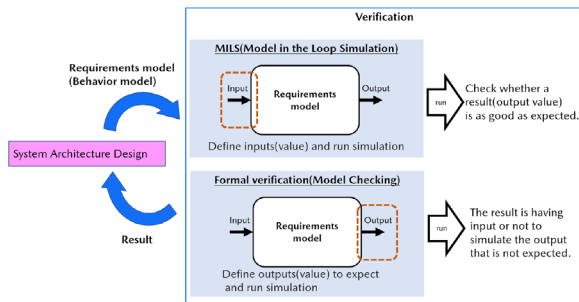


Fig. 4 MILS and Model Checking Overview

3.3 モデルからコード生成

モデルはシミュレーション検証環境へのコード実装が可能であると同時に, 実機環境へのコード実装も可能である。これによりモデルで定義された情報から機械がソフトウェアの詳細設計を実施し自動でソフトウェアコードを生成することで大幅な効率化と実装期間短縮を期待できる。

4. 情報制御系モデル

4.1 情報制御系の特性

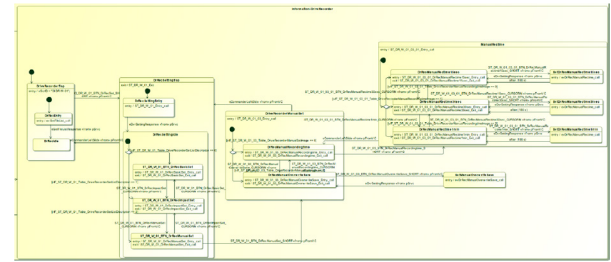
エンジン制御や ADAS 等の動的制御系モデルは, エンジンや車両など動的な制御対象をプラントモデルとして, それを制御するソフトウェアをモデルで開発している。センサーなどの情報を入力として, 望ましい状態にできるアクチュエータ制御操作量を決定する演算を繰り返す行う。

一方, 情報制御系は, 通信装置や表示装置などソフトウェアで動く制御対象をソフトウェアで制御することになり, ソフトウェアモジュール間のメッセージなどのイベントで次の処理が駆動され, 他のモジュールとのやり取りは定められたシーケンスで行うなど, 処理の手順を決定する。また, そこで伝えられる情報は動的制御系のような固定長のデータではなく, 状況に応じて長さの変わるデータとなる。

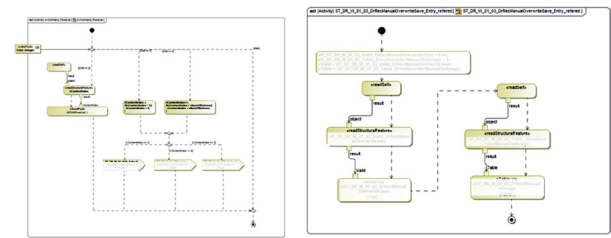
4.2 モデリング言語

動的制御系モデルでは, データの流れが主となるため,

Mathworks 社の Simulink/Stateflow が制御モデリング言語として自動車では標準的に用いられているが, 情報制御系では, 処理の手順が主となるため, 状態遷移, メッセージのやり取りを定義できる, オブジェクト指向開発で使われる OMG UML (Unified Modeling Language) をシステム設計に拡張した OMG SysML (System Modeling Language) を採用した。Fig. 5 に SysML で (a) 状態の遷移を表す状態機械図, (b) 処理の流れを表すアクティビティ図の一例を示す。



(a) State Machine Diagram



(b) Activity Diagram

Fig. 5 Example of SysML Model Representation

4.3 モデル規約

OEMであるマツダは車に求められる要求からシステム要件を定義し, それをアーキテクチャ設計と検証をしながら, ユニット, 部品に要件を分解/詳細化していくシステム設計に適したモデリングを行う。一方, サプライヤーでは, 品質がよく, 少ない計算リソースで効率的に処理を実行するソフトウェアソースコードを生成することのできるモデルが必要となる。

SysML でも, システム設計に記述するモデル要素と, 効率的なコード生成を行うモデル要素が異なるため, 両目的で共通に使うモデル記述を定義し, システム設計からコード生成まで利用できるモデル要素を定義したモデル規約を定めた。このモデル規約を OEM とサプライヤーでモデル交換ガイドラインとして定め, これに従ったモデルの作成と, 5 章以降に述べるモデル変換ツールの開発を行った。

5. モデル自動変換

5.1 モデル変換概要

4 章で定義したモデルを後工程で利用するために, ①シミュレーションのためのモデル変換 (SysML モデルが

ら MATLAB Simulink モデルへの変換) と②実装コード生成のための変換 (SysML モデルからモデル交換ガイドラインに準拠した SysML モデルへの変換) の 2 つの変換と、変換に伴うモデルの振舞いの等価性確認を行った。Fig. 6 にシステムアーキテクチャ設計にて実施したモデル変換と検証の概要を示す。

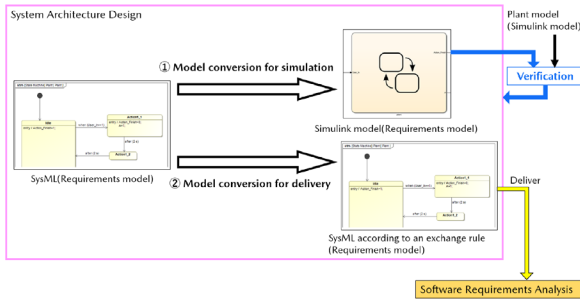


Fig. 6 Overview of Model Transformation

5.2 検証用モデル変換と等価性確認

シミュレーションのためのモデル変換 (SysML モデルから MATLAB Simulink モデルへの変換) について述べる。SysML モデルから Simulink モデルへ変換できないモデルの要素に対しては、変換可能なモデル要素を用いた SysML モデルを生成できるモデリングルールを作成した。Table 1 にモデリングルールの一例を示す。

Table 1 Example of Modelling Rules

Modeling rule	Reason
When plural transition exists from one state of the state machine diagram, Define the transitional priority on SysML.	Because a drive form of the simulation is different from SysML model in the Simulink model, a turn may be mixed up about the transition that a transition turn is not defined.
Use JavaScript for a programming language.	Because, by the program by JavaScript, We were able to confirm that simulation changed definitely.
Do not use Signal Event for a transition condition and use Change Event or Time Event.	Because, in Signal Event, the conversion by the conversion function of the SysML modeling tool is impossible.

作成したルールに従い SysML モデルを構築すると同時に、変換前後での等価性を確認するためのシミュレーションを実行した。Fig. 7 に実行した SysML モデルを示す。ここでのテストケースの SysML モデル (Fig. 7 中の左側) とは、例えばユーザー操作の様な要求の SysML モデル (Fig. 7 中の右側) を実行するための一連の入力である。

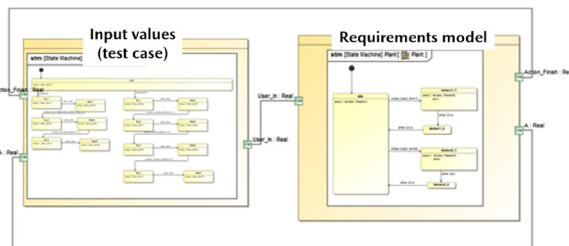


Fig. 7 SysML Simulation Execution Model

Table 1 に示すモデリングルールでは対応できなかった一部の交換については Simulink モデル変換後に手動でモ

デルを修正する必要があった。Table 2 にモデルの修正例を示す。

Table 2 Examples of Manual Modifications After Simulink Model Transformation

Modified item	Contents	Method to Modify
Evasion of the Algebraic Loop	The concept of the Algebraic loop does not exist by the simulation of SysML.	Insert a delay block in the point that is an Algebraic Loop.
Correction of the garbled text	The converted Simulink model may include "null" in a description.	Delete "null".
Designation of the model step time	When the simulation step time of the Simulink model after the conversion is longer than time of Time Event setting in SysML model, it is for an error at the time of simulation.	Set below the simulation step time of the Simulink model at time of Time Event.

こまでの手順で、要求とテストケースの SysML モデルを Simulink モデルに変換し、シミュレーション可能となった。次に、要求の SysML モデルと Simulink モデルの等価性を確認するため、同じテストケースを用いて Simulink モデルのシミュレーションを実行し、SysML モデルのシミュレーション結果との比較を行う。この比較には MATLAB Simulink TEST を用いた。Simulink TEST では、対象モデル、入力、評価する出力、評価基準を登録したテストを作成し実行することで、入力に対して指定した出力が評価基準を満たしているかを自動判定できる。そこで、対象モデルを変換後の Simulink モデル、評価基準を SysML モデルのシミュレーション結果との各値の変化の順番の一致とし、全てのテストケースに対して出力が評価基準を満たしていれば変換後の Simulink モデルは SysML モデルと等価であるといえる。Fig. 8 に Simulink TEST による評価結果を示す。等価性があれば Fig. 8 中赤枠の表示が緑色になる。

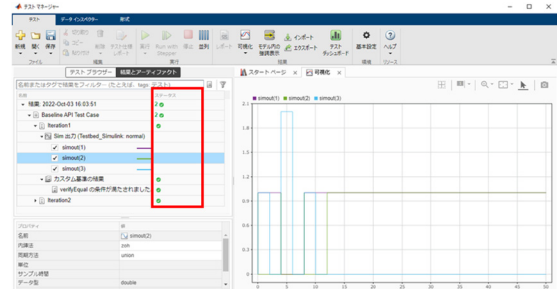


Fig. 8 Evaluation Results from Simulink TEST

こまでのモデル変換及び等価性確認における SysML モデルの構築ルールや Simulink モデルでのモデル修正については人手によるミスの混入を回避するためにそれぞれ SysML モデルを作成する Dassault Systems 社の Cameo Systems Modeler (以降、CSM) のプラグインと MATLAB プログラム (m スクリプト) により自動修正を行う。以上でシミュレーションのためのモデル変換は完了であり、他の車両モデルと接続した MILS シミュレーションやモデル検査による検証が可能となる。

5.3 実装コード生成用モデル変換と等価性確認

次に実装コード生成のためのモデル変換について述べる。

これは要求の SysML モデルを 4 章で述べたモデル交換ガイドラインに沿った SysML モデルに変換する。Fig. 9 に変換の一例を示す。これは Change Event（値の変化をトリガとするイベント）を Signal Event（信号の受信をトリガとするイベント）に変換する例である。本変換による SysML モデルの検証は 5.2 節で述べた変換と同様の手順で実施した。具体的には Excel VBA を用いたテスト結果の比較ツールを構築し変換前後の SysML モデルの等価性を確認した。このモデル変換と等価性確認により実装コード生成可能な SysML モデルへの自動変換が可能といえる。

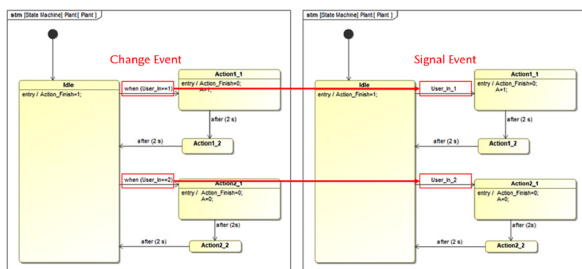


Fig. 9 Example of Model Transformation for Implementation Code Generation

6. MILS-SILS 統合検証環境

6.1 MILS-SILS 統合検証環境の概要

3.1 節で述べたとおり、従来の開発では、ソフトウェア詳細設計の結果であるソフトウェアソースコードが ECU に実装された後に検証が実施されるため、万が一要求、要件に間違いがあった場合、大きな開発の手戻りを発生させてしまう。

ここでは生成後のコードの検証環境である、MILS と SILS (Software in the Loop Simulation) を統合した検証環境（以下、MILS-SILS 統合検証環境）について述べる。

ECU への実装前のソフトウェアソースコードを SILS によるソフトウェアの単体検証の完了後に、MILS-SILS 統合検証環境を構築し、実装前に要求、要件の検証を行う方法を構築した。Fig. 10 に MILS-SILS 統合検証環境の概要を示す。

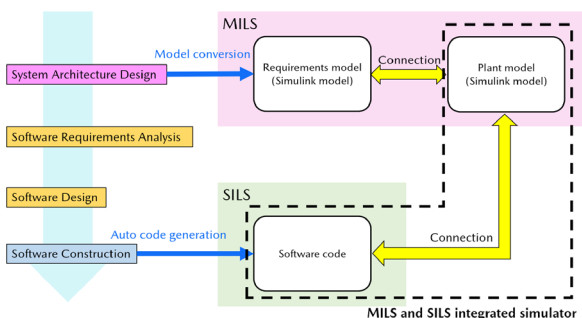


Fig. 10 MILS-SILS Integrated Simulator

6.2 MILS-SILS 統合検証環境の詳細

MILS-SILS 統合検証環境を構築するに当たり問題になったのが、プラントモデルの MILS と情報制御モデルの SILS の検証環境としての性質の違いである。

MILS は、自動車のエンジン制御の検証にも用いられており、熱や運動に関する連続系モデルを周期的な時間同期でシミュレーションを駆動するという性質をもつ。一方 SILS は、情報処理領域を離散事象系としてモデル化しており、非同期でシミュレーションを駆動するという性質をもつ。MILS, SILS を連携するに当たり、同期、非同期で駆動される両検証環境の信号を相互変換するインターフェース（以下 MILS I/F）を構築し、この MILS I/F を介して両検証環境を連携させた。Fig. 11 に MILS I/F の概要を示す。今回、MILS I/F を TCP (Transmission Control Protocol) 通信により実現し、MILS と SILS の信号の相互変換と受け渡しを行った。

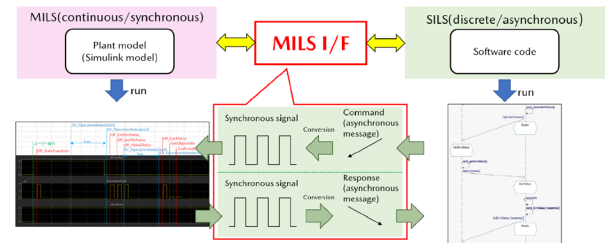


Fig. 11 MILS I/F

7. おわりに

OEM/サプライヤー間での仕様の曖昧さによる手戻り工数増大に対し、曖昧さの要因となる文書ベースの仕様書をモデルに置き換え、開発工程の各段階で仕様をモデルで詳細化し、検証して後工程に品質の高い仕様を提供することを可能とする、ソフトウェア開発へのモデル適用を行った。

OEM/サプライヤー間で、ツール間でのモデル流通を保証するためモデル交換ガイドラインを定義し、離散事象系 (MDD)/連続系 (MBD) をつなぐための I/F を定義し、OEM とサプライヤーのツール間を連携させたシミュレーション環境を構築し、シミュレーション実行可能なモデルを共有するなど共通基盤を構築した。本手法を用いて CX-60 以降に搭載されたマツダコネクトのドライブレコーダー連携機能の実装を行った。モデルをシミュレーション実行することでユーザビリティ改善案を仕様に織り込む等、特に SW 詳細設計、実装、テストでの工数削減の効果があった。

さらなる効率化のためには、モデル開発環境の整備や、業界内でのモデルの標準化、モデル設計・ソフトウェア設計を推進する人材育成が必要と考えている。

なお、本技術開発は、パナソニックオートモーティブシステムズ(株)と共同で開発したもので、関係諸氏にお

礼を申し上げる。

参考文献

- (1) 末富隆雅，齋藤雅彦：OEM／サプライヤ間に跨るモデルベースシステムズエンジニアリングの実践と評価，2022年度MBD推進センター（JAMBE）年度末報告会（2023/3/15）
- (2) 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）

■著者■



白雪峰



本城 創



末富 隆雅

論文・解説

19

車載ソフトウェア更新を行うための管理システムの構築

Management System Construction for On-Vehicle Software Update

三明 祐大^{*1}

Yudai Miake

中丸 和之^{*2}

Kazuyuki Nakamaru

坪山 真之介^{*3}

Shinnosuke Tsuboyama

國川 隆^{*4}

Takashi Kunikawa

角本 千恵^{*5}

Chie Kadomoto

坂本 貴弘^{*6}

Takahiro Sakamoto

要約

近年、自動車はCASE領域（コネクテッド技術、自動運転技術や電動化技術）での進化が著しく、ソフトウェアが自動車の価値に大きな影響を与えるようになってきた。更に、通信技術やITシステムの進歩により、既販車に対してソフトウェアを更新できるようになり、それによりお客様に最新の機能／性能を提供することが可能となってきている。

マツダでは、スモール商品群から出荷前の工場や出荷後の市場において、品質よくソフトウェア更新を行う基盤を整えている。そして、2021年9月にはソフトウェア更新による既販車の性能向上を行う「MAZDA SPIRIT UPGRADE D1.1」のサービスを開始した。その後、UN-R156 Software update and software update management system（以降、UN-R156）が施行されたことに伴い、法規としてもソフトウェア更新の確実な実施と管理が求められるようになったため、スモール商品群で構築したプロセス及びITシステムを拡張し、UN-R156の能力証明書及び、型式認可を取得した。

本稿では、上記のマツダにおける車載ソフトウェア更新に関する取り組みと、UN-R156対応に向けて構築したプロセス及びITシステムを紹介する。

Abstract

Due to the recent advancement of communication technologies and IT systems, it becomes possible to provide new functions and performances only by updating the software of existing marketed vehicles.

Mazda has established high-quality environment for updating software in plants/markets for Small products and later, and implemented the service called “MAZDA SPIRIT UPGRADE D1.1” in September 2021, which improved the performance of existing marketed vehicles by updating software.

Afterwards, “UN-R156 Software Update and Software Update Management System” (called UN-R156) was enforced, which requires secure implementation and control of software update. Therefore, we have expanded the process/IT systems constructed for the small products and obtained approval of the UN-R156.

This article introduces our initiatives, process, and IT systems for the vehicle software updates and UN-R156 approval.

Key words : Information communication and control, Cloud system, Information system, Traceability

1. はじめに

技術進化によって、クルマの価値に対してソフトウェアが大きな影響を及ぼすようになってきている。

更に、通信技術やITシステムの進歩により、既販車に

対して、車載ソフトウェア（以降SW）を更新することでお客様に最新の機能と性能を提供することが可能となってきている。今後、クルマを乗り換えなくとも新たな機能／性能を手軽に手に入れられるようになり、販売後も新たな価値を提供可能なビジネスへ変革することが、

*1,2 統合制御システム開発本部
Integrated Control System Development Div.

*4,6 カスタマー・品質システム部
Customer & Quality Systems Dept.

*3 環境安全技術部
Environmental & Safety Engineering Dept.

*5 エンジニアリングシステム部
Engineering Systems Dept.

求められると考える。そこで、マツダではSW更新によるクルマの価値を向上するビジネスの実現に向けた活動を進めている。その第一歩として、2017年よりSW更新に関連した管理基盤構築活動を開始し、スモール商品群の開発に合わせて推進した。この基盤を用いて、「おクルマを最新スペックにアップグレードすることで、いつものドライブをもっとラクに、もっと楽しく」という願いを込め、2021年9月にクルマを最新のスペックにアップグレードする「MAZDA SPIRIT UPGRADE D1.1」のサービスを開始し、お客様にこれまでにない保有体験をお届けしている。

一方、SW更新に関する法規整備もGlobalで進んでおり、UN-R156が制定された。そのため、2022年7月以降「MAZDA SPIRIT UPGRADE D1.1」のような、SW更新を今後も実現していく上で、UN-R156の対応をしなければならない。

UN-R156に対応する上で、特に重要になるのが、クルマのライフサイクル全体（企画→開発→生産→市場→廃棄まで）を視野に入れたSWのトレーサビリティ管理である。マツダでは、スモール商品群までに構築した基盤を拡張することで、ラージ商品群にてUN-R156への対応を完了した。

本稿では、マツダのこれまでのSW管理の取り組みと、UN-R156対応にあたって拡張した仕組みについて紹介する。

2. スモール商品群までのマツダの取り組み

2.1 SWの構成管理

SWを全社で管理するためのプロセスやITインフラを構築するに当たり、全く新しい管理基盤構築するのではなく、SWも車載部品の一つとして既存の枠組みの中で扱うこととした。

こうすることで、既存のプロセスとの親和性を確保し、開発、生産、市場の関係者が運用しやすくすることを目指した。

マツダでは以前から、MIDAS (Mazda Integrated Database and Application System) と呼ばれる、車両製造のための部品管理データベースを運用している。

MIDASでは車両の種類を特定するための仕向けや装備等情報（以降「車種情報」）に対し、車両1台分の部品を機能ごとのグループに大別し、その下に構成部品をツリー状に設定することで部品構成を表現している。このMIDASにてSWを車載部品の一部として管理することで、SWの構成管理を行っている。

以下では、MIDASを活用したSWの構成管理を行うための取り組みを説明する。

(1) 管理粒度の定義

SWの管理単位をMIDASでは、各SWのビジネスや設計上の制約を考慮して、サプライヤー様やベンダー様か

ら提供（納品）頂く単位や、機能単位に分別した単位で設定できるようにしている。例えば、更新対象のハードウェア（以降HW）ごとに管理することや、複数のSWを機能単位でまとめて、管理することも可能としている。

(2) 部品番号（識別子）の設定

SWを管理するに当たり、従来から部品の管理に用いていた既存の部品番号をSW管理の識別子として適用している。これは、既存の部品番号の採番方法でSWを一意に特定することが十分可能であると考えたためである。

マツダの部品番号は、10桁の英数字を4桁-5桁-1桁に分割し、それぞれに以下のような意味のフォーマットとしている。

●部品番号フォーマット（例）：X001-Y0001-A

-X001（4桁）：種類番号、バリエーション

（例）車種、仕向け、装備による違い

-Y0001（5桁）：機能番号、部品がもつ機能

（例）エンジン制御、ADAS制御、等制御する車両内での機能

-A（1桁）：改訂履歴番号、バージョン

(3) 互換性情報管理

市場にてSWを更新する際、関連するSWやHWに対する互換性が保証できるSWのみを確実に更新する必要がある。加えて、SWの種類や改訂履歴に応じて適切なSWを選択し更新を行う仕組みが必要不可欠である。これらの互換性や種類、改訂履歴を考慮し、SWの更新可否を表現した情報をリプロチェン情報と定義し運用している。

リプロチェン情報には、更新前のHWとSWの保証できる組み合わせ情報と、それらに対して更新可能なSWの情報が紐づけて管理されている。SW更新前に車両に搭載されているSW/HW Verを取得し、このリプロチェン情報と照合することで適切なSWを特定し、更新内容を保証している。またこの、リプロチェン情報を市場のサービスツールへ確実に配布するシステムとして、RCMS (Repro Chain Management Systems) をスモール商品群から導入した。

2.2 SW流通プロセスの確立

次にスモール商品群までの取り組みとして、SW本体の管理基盤を説明する。

(1) SW管理システムの構築

前世代商品群から工場におけるSW書込みに関して、更新対象のSWを管理するため、MIRS (MIDAS Intangible products Release System) と呼ばれるシステムを構築していた。スモール商品群では、このMIRSによる管理対象を一気に全車載ECUに拡大し一元管理を開始した。

更に、市場サービスツールや工場の設備とMIRSを連携させることで、SWに関して人手を介さずに車両に書き込むことを可能としている。

(2) 公開承認プロセスの定義

次に、SW 管理を行う上での品質確保の取り組みとして、MIRS の機能を用いた SW リリース承認プロセスを記載する。

このプロセスは、サプライヤーから納入された SW をリリース前にマツダ社内で確実に品質確認を行い、関係部門間で合意を得られてから、工場や市場に SW をリリースすることを保証するプロセスである。

具体的には、サプライヤーから納入された SW を開発部門で、仕様に基づく品質確認を行った後に、SW と品質確認のエビデンスを MIRS に登録する。品質部門は MIRS 上でこれらのエビデンスや品質要件を踏まえて承認を行う。この品質部門の承認によって SW が工場や市場で利用可能となる。

なお、上記エビデンスとは、SW 本体、結合テスト、車両評価結果等、品質確認の根拠となるデータのことを指す。

2.3 スモール商品群までの取り組みのまとめ

スモール商品群までに構築していた仕組みを Fig. 1 に記載する。なお、Fig. 1 中の OTA center の OTA とは Over The Air の略であり、無線でソフトウェア更新を行う IT システム全般を指している。

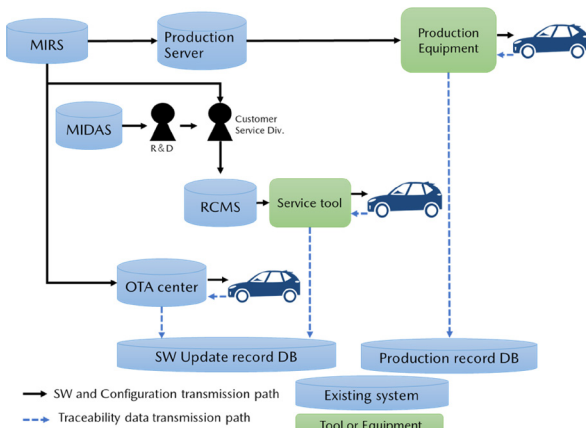


Fig. 1 System Overall~The Small Products~

以上のとおり、UN-R156 が施行される前から、SW 更新を確実に行うために必要な基盤整備を進めていた。

UN-R156 対応ではこれらの資産を最大限活用し、法規対応し更に SW 更新を確実かつ効率的に行うために、改善すべきポイントを定めて活動したことで、現行の仕組みを大きく変えずスムーズに導入することができた。

3. UN-R156 へ対応する上での課題と方針

UN-R156 に対応するに当たり、前述の業務基盤を基に法規要件に適合しつつ、継続して運用するべく以下 3 つの課題を抽出した。

3.1 車両法規と HW-SW の紐づけ管理に関する課題

UN-R156 では、「車種情報」「HW 部品番号」「SW 部品番号」に加えて、「各国/地域において車両が型式認可を取得するために順守すべき法規（以降、車両法規）」を、紐づけて管理し続ける必要がある。近年の自動車は、数多くの車種、数多くの車両法規に対し、複数の車載 ECU が連携して要求事項を達成しており、紐づけ管理の品質を手で継続して担保し続けることはリスクあった。そのため、Should Build と呼ばれる構成管理システムを構築し、車両法規ごとに HW 及び SW の紐づけ情報を管理することとした。

3.2 リプロチェン情報管理に関する課題

市場での SW 更新作業を正しく確実に実施することが求められている。マツダでは、スモール商品群からリプロチェン情報を用いて、この要件を保証していた。

しかし、このリプロチェン情報は ECU 開発者が手作業で作成しており、確認作業含めて膨大な時間を割いていた。既に、SW の種類数が増え、HW と SW の組み合わせ情報も複雑化してきたことから、手作業でのリプロチェン情報生成では業務品質や業務効率の視点でリスクを抱えていた。

この問題に対応するため、リプロチェン情報を IT システムにて自動生成することとした。2.1(3)項の記載のとおり、リプロチェン情報の管理や配信機能は RCMS に備わっていた。この RCMS に対し自動生成に必要な情報を MIDAS や Should build から取得し、自動でリプロチェン情報を生成する機能を追加した RCMS2 (Repro Chain Management Systems 2) を開発した。

3.3 トレーサビリティ情報管理に関する課題

個車単位 (VIN 単位) で、工場から市場における SW 更新の実施記録を管理し、市場の車両に対し開発者の意図する SW が織り込まれていることと、不正な SW 更新が実施されていないことを把握しておく必要がある。

そのため、クルマライフサイクル全体を通じて SW 更新に関する履歴を、VIN 単位で蓄積し、SW や HW の組み合わせが正しい状態であるかを照合するシステムを構築した。

この SW 更新に関する一連の履歴情報を管理するシステム As Latest を開発した。

4. ソフトウェア管理システム構築

本章では、3 章へ記載した課題及び方針に対し、構築したプロセス、IT システムの仕組みを具体的に記載する。

4.1 全体像

(1) 関連するシステムのつながり

UN-R156 に向けて構築したシステムの全体像として Fig. 2 にて各システム間のつながりを示す。

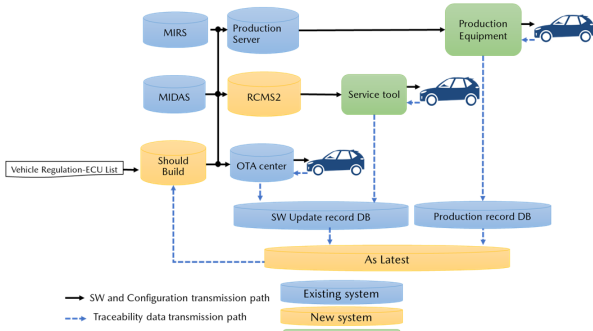


Fig. 2 System Overall ~UN-R156~

4.2 車両法規と HW-SW の紐づけ管理

本節では、3.1 節に記載した課題に対して、システム化に向けて必要な情報を集約するため、4.2(1)項で構築したプロセスを説明した上で、4.2(2)項でシステム化の内容を説明する。

(1) 車両法規 -ECU List について

2.1(1)項に記載のとおり、MIDAS では車に搭載される全ての部品（メカ部品、HW 部品、SW 部品の全て）を管理している。

Should build で SW 更新に特化して処理を行うためには、MIDAS から「HW 部品番号」と「SW 部品番号」のみを抽出し「車両法規」と紐づけて管理する必要がある。その抽出処理に必要な情報の取りまとめ及び、データを生成するプロセスを構築する必要があった。この対象データを車両法規 -ECU List (Vehicle-Regulation-ECU List) と定義し、そのリストの運用プロセスの検討を行った。

また、2.1(2)項に記載のとおり、マツダで運用している部品番号の構成要素のうち、HW と SW の「機能番号」と「車両法規」の紐づけを行っている。

このリストを Should build へのインプット情報にすることで、MIDAS 構成から車両法規ごとに関連する HW 部品番号と、SW 部品番号を抽出することを可能とした。

Fig. 3 に車両法規 -ECU List で管理している情報イメージを記載する。Fig. 3 では法規を「UN-RXX」のように示し、法規に紐づく ECU の HW と SW の機能番号を、「HW001」、「SW001」と表現している。また、各法規に関係しない ECU は「irrelevant (関係なし)」と表現している。

Regulation	ECU							
	ECU # 1		ECU#2		ECU#3		...	
	HW Part No	SW Part No	HW Part No	SW Part No	HW Part No	SW Part No	HW Part No	SW Part No
UN-RXX	HW001	SW001	irrelevant	irrelevant	HW003	SW003	...	...
UN-RYY	HW001	SW001	irrelevant	irrelevant	irrelevant	irrelevant	...	...
UN-RZZ	HW001	SW001	HW002	SW002	irrelevant	irrelevant	...	...

Fig. 3 Vehicle Regulation-ECU List Image

(2) Should build

Should build は、車両法規 -ECU List に記載された「機能番号」の情報を元に、MIDAS から 10 桁の部品番号を

抽出し、車種情報ごとに組み合わせの保持/管理を行う。

Fig. 4 に Should build で管理している情報のイメージを記載する。Fig. 4 は各車両法規 (Regulation) に対し、可能な限りとりうる組み合わせ情報を全て生成している。

Regulation	ECU								Model Information
	ECU # 1		ECU#2		ECU#3		...		
	HW Part No	SW Part No	HW Part No	SW Part No	HW Part No	SW Part No	HW Part No	SW Part No	
UN-RXX	X001-HW001-A	X001-SW001-A	X001-HW003-A	X001-SW003-A	irrelevant	irrelevant	...	...	Model#001
	X001-HW001-A	X001-SW001-A	X002-HW003-A	X002-SW003-A	irrelevant	irrelevant	...	...	Model #002
UN-RYY	X001-HW001-A	X001-SW001-A	X001-HW003-A	X001-SW003-A	X001-HW002-A	X001-SW002-A	...	...	Model #004
	X001-HW001-A	X001-SW001-A	irrelevant	irrelevant	X002-HW002-A	X002-SW002-A	...	...	Model #005
UN-RZZ	X001-HW001-A	X001-SW001-A	irrelevant	irrelevant	irrelevant	irrelevant	...	...	Model #006

Fig. 4 Should Build Structure Image

設計変更等により SW もしくは、HW が改訂され「改訂履歴番号」が変更になった場合は、法規ごとに関係している SW と HW の「改訂履歴番号」の組み合わせを再計算し、車両法規ごとに品質保証できる SW や HW の組み合わせを MIDAS 情報から取得することで、一元管理し続けることができる。Fig. 5 には、Should build での構成追加された場合のイメージを示す。

Fig. 5 では Fig. 4 の構成のうち、UN-RZZ にて ECU # 1 の SW が設計変更を 2 回行い、Suffix B, C が追加されたと仮定している。

この場合、Should build では UN-RZZ に対して、Suffix B, C を組み合わせとして追加する処理を行っている。

Regulation	ECU								Model Information
	ECU # 1		ECU#2		ECU#3		...		
	HW Part No	SW Part No	HW Part No	SW Part No	HW Part No	SW Part No	HW Part No	SW Part No	
UN-RZZ	X001-HW001-A	X001-SW001-A	irrelevant	irrelevant	irrelevant	irrelevant	...	...	Model #006
	X001-HW001-A	X001-SW001-B	irrelevant	irrelevant	irrelevant	irrelevant	...	...
	X001-HW001-A	X001-SW001-C	irrelevant	irrelevant	irrelevant	irrelevant	...	...

Fig. 5 Should Build Structure Add Image

4.3 リプロチェン情報の自動生成

本節では、3.2 節に記載した課題に対して、どのように対応を行ったか記載する。

RCMS2 は Should build における SW や HW の組み合わせ変更/追加をトリガーに、変更/追加された部品番号を特定する。

その後、変化があった部品番号に関する、部品の互換性情報を MIDAS から取得し、SW 更新可否の判断後にリプロチェン情報を生成する。

また、MIDAS から関連する複数の ECU の設変情報を抽出し、複数 ECU の SW 更新を実施可能としている。

4.4 システムによるトレーサビリティ情報管理

本節では、3.3 節に記載した課題に対して、どのように対応を行ったか記載する。

マツダでは、工場出荷時に搭載されている SW と HW の部品番号を VIN 単位で全て取得している。工場取得された情報は、生産履歴データベースを経由して As

Latest に入力されている。

市場でも、サービストールによって、SW と HW の部品番号を取得し、以前取得した履歴と差分がある場合のみ、As Latest に入力され更新履歴を保持している。

Fig. 6 に、VIN と部品番号を紐づけて管理しているデータのイメージを記載する。なお、実際は更新日時等も含め管理している。

VIN	Part No	HW or SW
JX0XXXXXXXX6P0000000	X001-HW001-A	HW
	X001-SW001-A	SW
	X001-SW001-B	SW
	X001-SW001-C	SW
	X001-HW002-A	HW
	X001-SW002-A	SW

Fig. 6 As Latest Record Data Image

また、As-Latest は、VIN と車種情報とを紐づけたデータも保管している。Fig. 7 に、VIN と車種情報を紐づけ管理しているデータのイメージを記載する。

VIN	Model Information
JX0XXXXXXXX6P0000000	MABCDEA
JX0XXXXXXXX6P0000001	MABCDEB

Fig. 7 VIN-Model Record Data Image

「VIN-部品番号」と、「VIN-車種情報」を別々に管理しているのは、別々に管理することでデータベース正規化を行い、データベースの管理を効率化している。

また、As Latest では、取得した部品番号とその組み合わせ情報が、開発段階で保証する SW の情報と一致しているか、Should build に照合している。

As Latest は、Fig. 6, 7 の情報を元に、VIN ごとに最新の車両 1 台分の情報を取り出し、Fig. 8 に示すデータ形式にして、Should build に送付している。

Model Information	Part No
MABCDEA	X001-HW001-A
	X001-SW001-A
	X001-SW001-B
	X001-SW001-C
	X001-HW002-A
	X001-SW002-A

Fig. 8 Should Build⇔As Latest Cross Check Data Image

As Latest と Should build 間の構成情報照合時に、結果が一致しなかった場合は照合エラーとし、社内の関連部門へアラートを発報し、アラートを受けた関連部門にて、内容を精査し問題の解決活動を行う。そうすることで、万が一 SW 更新に問題があった場合でも、その問題を迅速に察知し全社で早急に対応することができる仕組みとしている。

5. おわりに

マツダはこれまでの取り組みによって、UN-R156 対応含めて SW を更新するために必要な SW 管理の基盤を整備することができた。しかし、SW 管理のプロセスやシステムは一度構築したら終わりではなく、常に進化し続ける必要がある。

具体的には、法規含めた市場の動向に合わせた改善に加えて、OTA の積極的な活用や業務効率化といった幅広い課題に対応していく必要があると考える。

参考文献

- (1) 岡村ほか：部品構成作成支援システム (v-DESIGN) の開発, [マツダ技報, No.23, pp.93-97 \(2005\)](#)
- (2) E/ECE/TRANS/505/Rev.3/Add.155
UN Regulation No.156 – Software update and software update management system
HP: <https://unece.org/transport/documents/2021/03/standards/un-regulation-no-156-software-update-and-software-update>

■ 著 者 ■



三明 祐大



中丸 和之



坪山 真之介



國川 隆



角本 千恵



坂本 貴弘

論文・解説

20

空調設備の効率・運用改善技術

Technologies for Improving the Efficiency and Operation of Air Conditioning Equipment

二宮 仁^{*1} 三好 滋^{*2} 安井 尚志^{*3} 松下 洋^{*4}
Masashi Ninomiya Shigeru Miyoshi Takashi Yasui Hiroshi Matsushita
山根 克之^{*5} 田中 博己^{*6} 藤下 祐司^{*7}
Katsuyuki Yamane Hiromi Tanaka Yuji Fujishita

要約

マツダは、2050年までに自動車のライフサイクル全体においてカーボンニュートラル（以下CN）を達成することを目指している。CNの実現には、革新的な技術を開発・導入するだけでなく、現時点で利用可能な技術を最大限に活用し、即座に取り組みを開始することも不可欠である。本稿では、CN実現に向けた基盤となる「省エネ」に関して、全社的な取り組みの中で重要な影響をもつ空調設備の事例を紹介する。オフィスビルや工場の空調に使用される冷凍機や冷却塔などの設備が能力低下する課題に対し、単一の設備内で洗浄薬品を循環させる局所洗浄技術を導入することで、低コストかつ容易にエネルギー「効率」を改善させた。更に、温度設定などの季節変動を考慮して空調設備の運転方法を工夫することで、「運用」の改善を実現した。また、これらの取り組みを定着させるために、改善効果を可視化し、PDCAサイクルを回す仕組みを導入した。

Abstract

Mazda aims to achieve carbon neutrality (CN) throughout the entire vehicle life cycle by 2050. In order to realize CN, it is essential not only to develop and introduce innovative technologies, but also to make maximum use of currently available technologies and start working on them immediately. This paper introduces an example of air conditioning equipment, which has an important impact on company-wide efforts to save energy, which is the basis for achieving CN. To address the problem of reduced capacity of equipment such as refrigerators and cooling towers used for air conditioning in office buildings and factories, we have introduced local cleaning technology that circulates cleaning chemicals within a single piece of equipment, making it easy and cost-effective. improved energy efficiency. Furthermore, improvements in operation were achieved by devising ways to operate air conditioning equipment that take into account seasonal fluctuations in temperature settings and other factors. Additionally, to ensure that these initiatives take hold, we have introduced a system that visualizes the effects of improvements and runs a PDCA cycle.

Key words : Carbon neutrality, Energy saving, Efficiency, Operation, Visualization of effects

1. はじめに

マツダは、「クルマ」、「人」、美しい「地球」が共存できる未来を築いていくため環境に配慮した方法でクルマのライフサイクル全体を見据えた商品開発を行っており、クルマの製造・使用・廃棄／リサイクルまで網羅し環境負荷の最小化を目指している。CN領域では、2035年グローバル自社工場でのCN実現を目標として定め、「省エネ」「再エネ導入」「CN燃料導入」を3本柱として段階的に進めている（Fig. 1）。その中でまずは「省エネ」が

最優先の取り組みと考える。「再エネ導入」「CN燃料導入」は技術革新が急激に進みつつあるが、価格や導入時期などまだ不透明な段階にあることに対し、「省エネ」は、今すぐに取り組めるアイテムであり、省エネすることにより使用エネルギーを最小限にでき、必要な「再エネ導入」「CN燃料導入」を低減できるためである。

マツダで使用する総エネルギーのうち、空調設備は約25%と大きな割合を占めている。事務所ビルに使われている空調設備は、世の中で一般的に普及している設備であることから、この設備で踏み込んだ省エネ活動が確立

*1～7 プラント技術部
Plant Engineering Dept.

できれば、水平展開することでより多くの効果が見込まれるとともに、熱のコントロール技術として生産系設備に応用することも考えられる。

本稿では、マツダがこれまで取り組んできた空調設備の省エネ技術について紹介する。

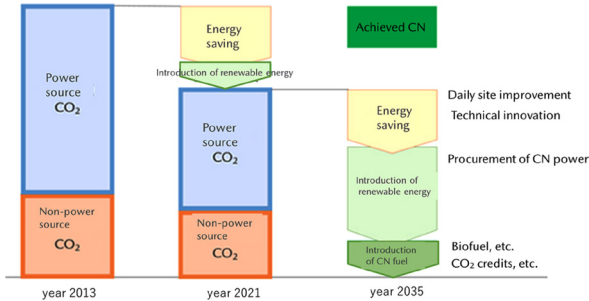


Fig. 1 Mazda's Roadmap for Reducing CO₂ Emissions

2. 空調設備の目指す姿と課題

マツダが考える空調設備の目指す姿は、「空調品質」と「環境性能」の両立であり、空調品質は「一人ひとりが最高のパフォーマンスを発揮でき、クルマづくりに専念できる快適な空間であること」、環境性能としては「貴重な資源・エネルギーを価値あるものとして使い切ること」と考えている。これを実現するコンセプトとして、大切なエネルギーを「必要な時に、必要な場所へ、必要な量だけ」使用することと設定した。

空調は、大きく4つのプロセスで構成されている (Fig. 2)。①熱製造：冷凍機や熱交換器などの設備で夏は冷水を冬は温水を製造する。②液体搬送：冷温水にポンプで圧力を与え、各フロアまで搬送する。③熱交換：冷温水を冷風・温風に熱交換する。④気体搬送：ダクトを通過して送風する。この中の、①熱製造・③熱交換プロセスで、エネルギー消費の85%を占めることから、冷凍機・冷却塔に、空調機など熱交換を行う設備の「効率」を維持していくことが重要である。

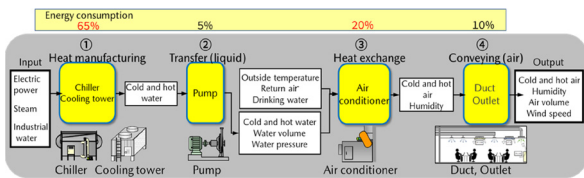


Fig. 2 Air Conditioning Process

一方で、効率を維持するためのメンテナンスは、労力やコストが掛かることから不十分な箇所もある。また、コロナ禍の在宅勤務などでオフィスでの働き方も大きく変わり、事務所の使われ方の変更による熱バランスの変化に加え、猛暑や気候変動により、「快適性」性能の維持が難しく、空調設備の「運用」改善も重要な課題となっ

ている。また、これら「効率」「運用」改善には多くの因子が絡むため効果の確認が難しくなっており、自立・定着化には「見える化」にも大きな課題があった。

上記課題に対し、マツダは①経年劣化により低下した既存設備の性能を回復する「効率改善」、②こまめなコントロールで省エネと快適性を両立する「運用改善」、③取り組みのPDCAを加速させるための「効果の見える化」について取り組んだ。

3. 効率改善技術

3.1 効率悪化の要因と課題

空調設備をはじめ生産設備においても、水を使用した熱交換器は多く存在している。その中で、主に冷房用(冷却)に使用する冷水を製造する冷凍機・冷却塔での効率低下の大きな要因は、熱交換部分に付着するスケールやスライムであり、このうち空調設備の水系設備の汚れはスライムが支配的である。スライムとは、バクテリアや真菌が形成する粘液状のもので、触るとヌルヌルした感触がある。スライム層による効率低下の主な要因は、水と熱交換器の間の熱伝導を阻害すること、また管路内の流れを減衰させ通水量が減少することである。したがって、定期的なメンテナンスや洗浄、水質の管理など適切な環境づくりで、まずはスライムを抑制することが重要である。

3.2 効率改善の課題と取り組み

冷凍機・冷却塔の能力低下について、これまでもスライムを除去することで効果を確認してきたが、従来の代表的な洗浄方法には以下の課題があった。

- ①高圧洗浄：高圧洗浄機を使って充填剤表面や水槽内のスライム(泥・藻)を洗浄する。この方法は比較的簡単で安価であるが、充填剤内部に詰まった汚れまで落とすことが困難である。
- ②薬品洗浄：薬品を使って充填剤や水槽内の汚れを落とす。この方法は充填剤内部まで効果的に洗浄できるが、冷凍機・冷却塔、それらを結ぶ配管まで含めた一括での洗浄が必要であり、大量の薬品投入や、洗浄後の廃液処理にバキューム車による対応が必要でコストが掛かり、大きな課題があった (Fig. 3)。

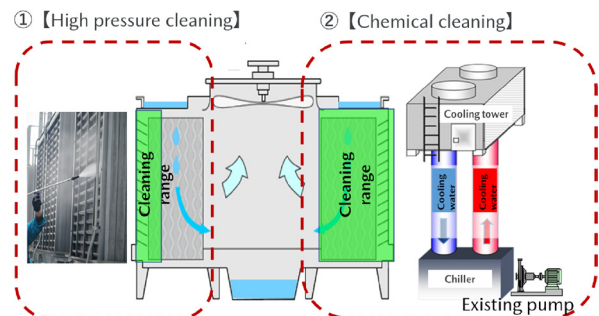


Fig. 3 General Cooling Tower Cleaning

更に、近年 35°C を超える猛暑日の増加（地球沸騰化の時代に突入）による影響で冷却水温度が下がらず冷却効率が低下し、設備が停止するなど冷却水温度の上昇が新たな課題として加わった。冷凍機・冷却塔の経年汚れに、外的要因も加わったことで冷凍機の熱交換器内部のブラシ洗浄のみでは能力維持が難しく、熱交換器内部を流れる「冷却水」自体の温度を下げる対策が必要であった。冷却塔充填剤内部の汚れを落とし能力を回復させるためには、大量の薬品を使用せず、少量の薬品で洗浄を可能にすることが重要な課題であり、冷却塔のみで薬品を循環させる方法に着目した。

(1) 新しい洗浄方式の基本原理や技術的な詳細

今回、洗浄効果の高い薬品洗浄を採用し、洗浄範囲を限定させることで、洗浄効果と作業コスト低減が両立できる方式を検討し、単体で洗浄薬品を循環させる「冷却塔局所洗浄」技術を開発した。この局所洗浄技術については、冷却塔の下部水槽を循環槽として使用して、水中ポンプを用いて散水槽まで送水する。洗浄薬品は、散水槽の底に開けられた無数の小さな穴から充填材に散水し、汚れを落としながら下部水槽へと戻ることによって冷却塔内のみで循環を可能にした (Fig. 4)。

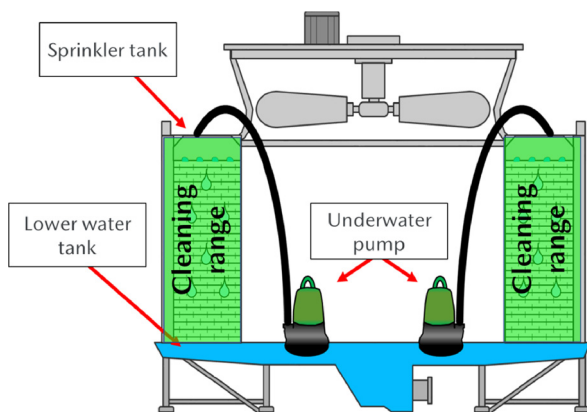


Fig. 4 Localized Cleaning of Cooling Towers

角形冷却塔については、最大規模の散水槽を想定して水中ポンプを選定した。能力は 10.8m³/h あり、上部水槽からの散水は 10.0m³/h のため、1 ユニットのの場合、水中ポンプ 2 台で満遍なく散水可能である。また、冷却塔の大きさ（ユニットの増加）については、水中ポンプを増やすことで臨機応変に対応できる。

スライム除去に使用する薬品については、過酸化水素 30% 洗浄液を採用した。過酸化水素は強力な酸化剤であり、有機物や微生物を分解する作用がある。スライム（バクテリアや真菌が生成する粘性物質）や、汚れが付着した設備や器具を洗浄する際に、スライムを分解し除去する効果的な洗浄剤として利用できる。更に、安全性が高く、分解された後は水と酸素になるため、多くの産業分野で広く使われている。洗浄後の廃液は過酸化水素処

理剤（酵素）で無害化することができ、排出する前には試験紙で過酸化水素残存濃度「0」を自ら確認することで、安全かつ容易に排水処理が可能となった。

この新しい局所洗浄技術は、従来の洗浄方法では解決できなかった課題を解決し、冷却塔充填剤内部の汚れを落とし能力を回復させることができる技術である。

(2) 冷却塔局所洗浄方式の効果

マツダでは、100 台以上の冷却塔に、この技術を導入しており、2022 年は冷却塔 22 台、冷凍機・モジュールチラー・空調機など 80 台に局所洗浄技術の水平展開を実施し、蒸気・電力などエネルギー消費量を算出した結果、原油換算で前年比 1904kL/年 (CO₂ 削減：6047t) 改善した。2023 年は 30 台の冷却塔洗浄に、その他熱交換設備の洗浄で早期刈り取りを計画している。

一方「冷却塔局所洗浄」では、熱交換に関係ない中間の配管は洗浄対象から除外でき、必要な薬品量や排水量を 90% 削減したことでコストも抑え、廃液処理も安全に行えるようになった。

(3) 冷却塔局所洗浄方式の適用展開

今回開発した冷却塔の局所洗浄を、自社保有の火力発電所の大型冷却塔に適用した。今まで空調用の冷却塔では保有水量 3m³ 程度の冷却塔で局所洗浄技術を磨いてきた。その施工方法を使って西浦工場にある自家発電 (25000kW) の冷却塔 (保有水量 395m³) へ水平展開を行った。規模は大きいですが、流入槽を循環槽として使用することで、保有水量を 22m³ まで下げることができ、薬品 2840kg (従来は 39500kg) で冷却塔局所洗浄作業を安全に施工できた。

効果については、机上計算上ではあるが冷却水温度を 2°C 低下させることで、タービン復水器の真空度が -94.5kPa から、設計値である -96.5kPa に近づき、冷却効率が上がることで発電量が年間 40320kW 増加となる。今後は、実機での確認を行い評価する (Fig. 5)。

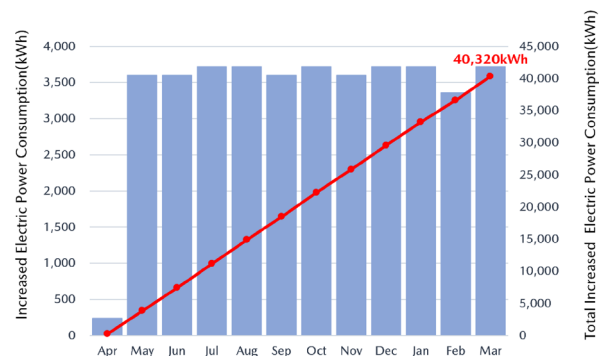


Fig. 5 Monthly Electric Power Generation Increase Effect by Cooling Tower Cleaning

(4) 効率改善技術のまとめ

今回開発した冷却塔局所洗浄技術は、熱交換設備の効率を高めるために重要なメンテナンス方法である。この

技術は、冷却塔や冷凍機など設備の熱交換器のみに洗浄薬品を循環させて汚れを除去するもので、定期的に行うことで省エネ効果を持続させることができる。また、この洗浄技術は冷水・冷却水など、水を循環させ熱交換器で冷却する設備について、設備構造が同様であり展開可能である。具体的には冷凍機・モジュールチラーなど「熱源製造設備」や、空調機・ファンコイルなど「空調設備」、コンプレッサーに金型温調器・プレート熱交換器など「生産設備」にも展開可能である。また、サプライヤーにもこの技術の展開を進めており、設備更新時には熱交換器入口・出口配管それぞれに洗浄用の取り出し口設置を標準化している。

このように、「局所洗浄技術」は、容易に熱交換設備のメンテナンスを行うことができる技術である。省エネは一度ではなく、継続的かつ計画的に行うことが重要であり、スピード感をもって展開していきたいと考えている。

4. 運用改善技術

4.1 空調運用の問題点と課題

空調運用は、室内の人やOA機器などの熱負荷に対し、冷温風を適正に送風することで室内全体の温度を目標値に制御することである。しかし、近年の気候変動による外気温の変化や、働き方改革による室内の熱負荷分布の変化などによって、室内環境にもばらつきが生じて、都度調整しないと空調品質の維持が難しくなっている。その状況の中、マツダは創意と工夫で運用の改善を進めてきたが、現在の設備優先から、人優先のきめ細かい制御に変更することや、中間期自然エネルギーの有効活用が重要な課題となる。

4.2 空調シミュレーションによるばらつき改善

空調運用においては、室内の温度・湿度や風量などの制御が重要となる。しかし、現場では室内レイアウトの問題や人員、窓からの入熱が影響して温度や湿度にばらつきが生じている。このような状況では、快適な環境を維持するために多くのエネルギーが必要となり、コスト増加の問題を引き起こすこともある。しかし、現場で温度を確認しながら調整することは手間が掛かり現実的ではない。そこで、机上で室内の温度と気流環境を再現することができる空調シミュレーション解析（以下空調SIM）により、実際の状況に合わせた最適な空調制御方法を検討することが可能であり、室内温度や湿度など、ばらつきを特定することもできる。例えば、各部屋の断熱性能の違いや、冷風・温風の送り方による風量の違いなどの情報を基に、空調設備の改善策を提案することが可能である。実際に空調SIMを活用してばらつき改善を行い、コスト削減にもつながった事例を紹介する。

4.3 熱源エネルギー最小化に向けた最適制御

(1) 冷温水温度の最適化

一般的なビルでは、熱源設備で製造された冷温水を冷房時 8°C、暖房時 50°C 一定で送水しているため、季節の変わり目にはエネルギーロスが生じている。猛暑日は、昼の外気も上昇するため、冷房時の水温を上げるのが難しいが、冬は室内負荷や外気温度も始業と同時に上昇するため、比較的溫度を制御し易く、暖房時の水温を 1°C 下げることによって、約 3~10% の電力削減効果がある。温水温度を 1 日の時間帯で必要な温度に管理できれば、更に効果が上がる。ビル空調の暖房運転で、一番熱負荷が集中するのは朝の始業時で、その後は室内温度が落ち着き始め熱源設備の熱負荷も安定する (Fig. 6)。

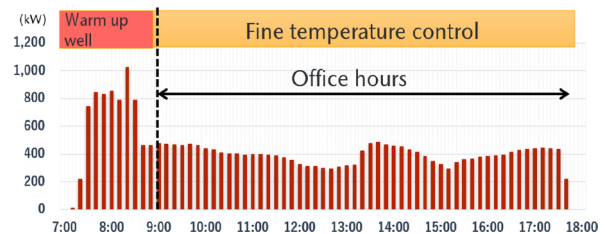


Fig. 6 Heating Heat Amount Over Time

次に、空調SIMを活用し、暖房時の温水温度を実機で検証した。改善前は黒線で示すように 35°C 一定に設定していたが、10 時前には室内温度が目標温度帯を越えていることが分かる。これに対し、赤線で示すように、時間帯でのきめ細かい制御を行うことで、室内温度を目標温度帯に保つことができ、この問題を解消した。その結果、エネルギー使用量を前年比で電力 10%、蒸気 22% 削減した (Fig. 7)。

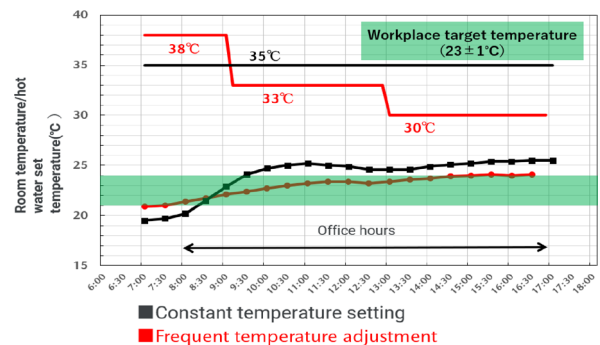


Fig. 7 Set Temperature and Temperature Change

(2) 中間期における外気エネルギーの最大活用（加湿冷房）

春秋の期間（中間期）は、20°C 以下の外気を室内に送風することで、室内温度は 24°C 付近になることが多い。しかし、外気が 20°C を超えると内部発熱の影響で暑くなる傾向にあり、冷凍機を運転している。短時間の運転時間ではあるがエネルギー増加の原因となっていたため、冷凍機の運転を最小限とする「気化熱」を利用した温・

湿度制御方法を開発した。具体的な内容としては、空調機には加湿器があり水を使用しているため、この加湿器を使用することで、「気化熱」を活用して空調機の吹き出し温度を下げることをねらった。しかし、加湿器はインターロックにより暖房時しか運用できない課題があったため、季節に関係なく加湿できるように改善することで解消した。更に机上で、加湿による室内の温度変化を検証した。中間期の温湿度基準 $24^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ 、 $50\% \pm 5\%$ で管理するためには、過去の運用実績から空調機の吹き出し温度を 21°C 以下に保つ必要がある。一方、加湿器の仕様より能力を確認した結果、気化熱の利用で、約 3°C 温度が下がることが分かった。併せて、空気線図 (Fig. 8) を用い、気化熱を利用できる範囲を検証した結果、青く囲んだ目標値の範囲で運用するには、外気は 24°C が上限、その時の湿度が 50% 以下であれば赤い斜線、気化熱の利用が可能なエリアに入ることが明確になった。

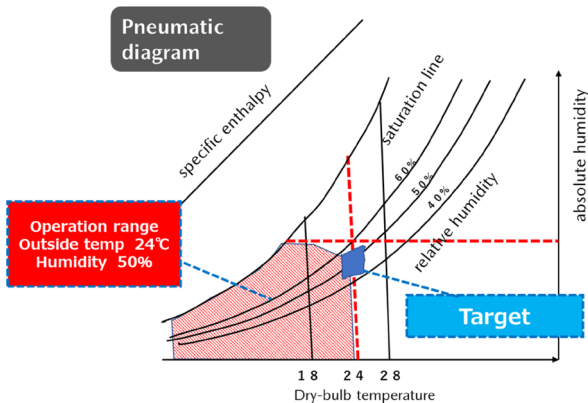


Fig. 8 Psychrometric Chart

そこで、限界値を基に気化熱利用の有無について、空調 SIM で解析した結果、室内温度を基準値の $24^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ 以内で管理可能であることが確認できた (Fig. 9)。更に各フロア複数点の温度・湿度を実測し、空調 SIM との整合性も確認した結果、外気 24°C 、 50% までは、「気化熱」を冷房として使用可能で、これまでカン・コツに頼っていたが、誰でも同じ運用が可能となった。また、中間期の湿度も制御可能となり快適性も向上した。その結果、エネルギー使用量を前年比で電力 18%、蒸気 30%削減した。

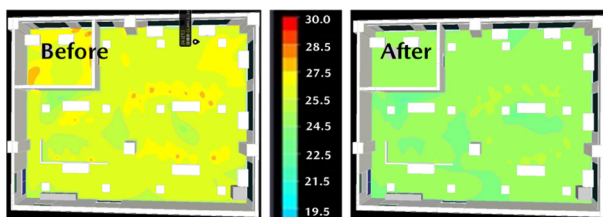


Fig. 9 Comparison Before and After Humidification Operation

このように、運用改善での空調 SIM は有効であり、結果を基に管理することで、年間通じて安定した室内環境の提供が実現でき、快適性の向上と省エネの両立が可能である。

5. 効果の見える化

省エネ改善の PDCA サイクルを回すためには、Check (効果確認) が重要であるが、これまでの章で取り上げてきた熱源設備の省エネ取組では、定量的な効果確認が行えないためにサイクルが回らない事例が多かった。そこで、熱源設備における省エネ取組の効果を定量的に「見える化」する手法を考案した。

5.1 熱源設備のエネルギー使用量の特徴, 課題, 対策

熱源設備でのエネルギー使用量は、運転時の外気条件 (温度, 湿度等) や稼働条件 (生産量, オフィスの使用時間等) などの要因によって変動する。これまで、熱源設備の省エネ取組の評価は、前年同月比較で行っていたが、外気/稼働条件の違いが考慮できておらず、一般的に数%程度とされる省エネ取組によるエネルギー削減量を定量評価できる精度は有していなかった。そこで、前年における熱源設備のエネルギー使用量と外気/稼働条件の相関を数式化することで、これらの影響を補正し省エネ効果のみを定量評価できる指標を作成した。

5.2 オフィスビル空調設備での見える化事例

Fig. 10 に 2018 年と 2019 年の 9 月における当社オフィスビル空調設備における日ごとの電力使用量と平均気温の推移を示す。9 月 10 日の平均気温に注目すると、2018 年の 23°C に対し、2019 年は 30°C と 7°C 高く、この日の電力使用量は、2018 年の $10\text{MWh}/\text{日}$ に対し、2019 年は $13\text{MWh}/\text{日}$ と約 30% 多い。稼働条件として平日と休日の電力使用量に着目すると、両者には 3 倍程度の差があり、休日の寄与は小さい。平均的な 1 か月間の平日数は約 20 日であるので、曜日の関係で平日数が 1 日増減した場合、月間エネルギー使用量には約 5% 程度の増減が生じると考えられる。

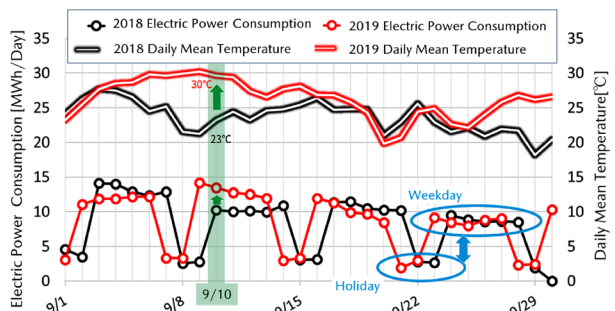


Fig. 10 Changes in Daily Electric Power Consumption and Mean Temperature of Office Building Air Conditioning Equipment in September 2018 and 2019

これらの条件の違いによる変動を補正するため、以下手順でベンチマークを算出する。なお、本事例のオフィスビル熱源設備では、電力と蒸気を併用している。そこで、電力使用量と蒸気使用量それぞれについて同様の分析を行う。

- ① 2018年の1日ごとのエネルギー使用量データを平日と休日に分類する。
- ② 1日ごとのエネルギー使用量を縦軸 y 、外気条件を示す物理量（最高／平均／最低気温、不快指数等）を横軸 x として散布図を描き（Fig. 11）、最も良い相関を示す物理量を探す。本事例では不快指数を採用した。
- ③ ②で描いた散布図の相関を説明できるモデル式 $f(x)$ を考える。電力、蒸気ともに不快指数が60の所で折れ曲がるV字型になっている。これを再現する式として Fig. 11 内のモデル式を考えた。電力には換気設備による固定消費電力があるため、外気不快指数に依存しない定数を仮定している。また、不快指数 >60 の領域で運転する冷熱源機器には、成績係数が不快指数の上昇に伴い低下するという特性があるため、エネルギー使用量が非線形に増大する式を仮定した。
- ④ 最小二乗法により、2018年の実績を最もよく再現するパラメーター（ $a \sim m$ ）を決定する。求めたモデル式を Fig. 11 内に実線で示す。
- ⑤ ④で求めた数式 $f(x)$ に2019年の外気条件 x' を代入し、ベンチマークを算出する。

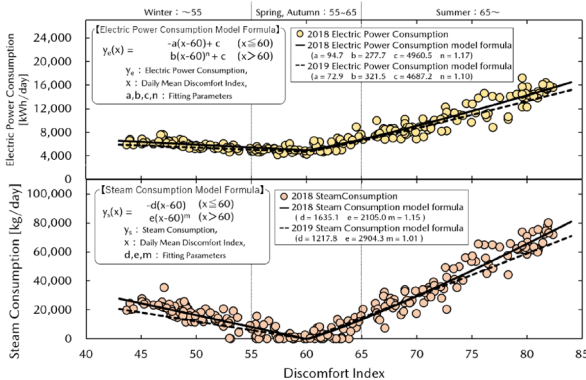


Fig. 11 Dependence of Power/Steam Consumption on Weekdays on Discomfort Index

2019年9月は、2018年9月に比べて月間平均気温が2.6℃高く、平日数は1日多かった（Fig. 12）。単純な月間エネルギー使用量の比較では、原油換算量で12kL/月の増加であり（Fig. 13）、従来の評価方法では、2019年に各種省エネ取組を行ったものの運転効率は悪化という評価結果となる。一方、ベンチマークと比較すると11kL/月の省エネ改善という結果となる。このように、前年からの外気／稼働条件の変化の影響を補正し、省エネ効果を定量的に評価することが可能になった。

また、Fig. 11 に2019年度のモデル式を破線で示す。いずれの不快指数でも2018年のモデル式よりも下方に位置しており、運転効率が向上したことが分かる。

	2018	2019	year on year change
Monthly Mean Temperature[℃]	23.7	26.3	+ 2.6 ℃
Working Days[Days/Month]	20	21	+ 1 Day

Fig. 12 Comparison between September 2018 and September 2019

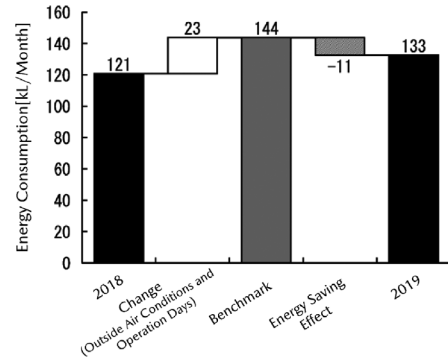


Fig. 13 Comparison of September 2018 Energy Consumption, Benchmarks, and September 2019 Energy Consumption

5.3 生産設備での見える化事例

プラスチックバンパー成型機や金型温調器などの生産に使用する熱源設備では、エネルギー使用量は生産量に大きく影響され、外気条件の影響は相対的に小さいと考えられる。そこで、以下手順でベンチマークを算出した。

- ① 2021年の月間電力使用量を月間生産量で割り、月ごとの台当たり電力使用量を算出する。
- ② ①で求めた台当たり電力使用量に2022年の月間生産量を掛けることでベンチマークを算出する。

Fig. 14 に金型温調器における2022年の月間電力使用量、ベンチマーク、4月からの累積削減電力量の推移を示す。本設備では、金型の冷却に冷却塔を用いている。省エネ取組として4月に冷却塔の薬品洗浄を、7～8月にかけて温調器熱交換器の薬品洗浄を実施した。7月頃から省エネ効果が表れ始め、年間の電力削減量は675MWhという評価結果となった。

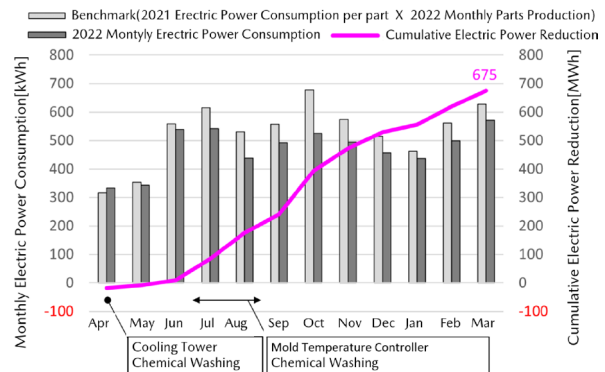


Fig. 14 Changes in Electric Power Consumption, Benchmarks, and Cumulative Reduction in Electric Power Consumption in 2022 for Mold Temperature Controllers

これらの評価指標を導入した職場では、「前月の省エネ成果の評価」と「翌月の運用改善アイデア出し」を行う定例会議を開催し、省エネ改善取組を継続的に進化させている。活動の成果が定量的に評価できるようになったことでメンバーのモチベーションが高く保たれ、さまざまな省エネ改善施策に意欲的に挑戦する風土が実現している。

6. おわりに

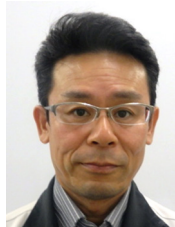
2035年グローバル自社工場でのCN実現を目標として定め、「省エネ」「再エネ導入」「CN燃料導入」を3本柱として段階的に進めている中で、「汚れを落とすだけで省エネ・CO₂削減」につながるこの取り組みは、あらゆる熱交換設備に適用できるため汎用性が高く、CN実現に向けて大きな効果を上げることができた。効率を追求する技術を核に、効率改善で生まれたエネルギーを必要な時に、必要な場所に、必要な量だけ使うことで、更なる省エネ・CO₂削減も可能である。

省エネは一度ではなく、継続的かつ計画的に行うことが重要であることを忘れずに、技術のアップデートやスピード感を持って全社、サプライヤー、地域のみならずへ展開していきたいと考えている。

■著者■



二宮 仁



三好 滋



安井 尚志



松下 洋



山根 克之



田中 博己



藤下 祐司

論文・解説

21

多段加圧スポット溶接によるエネルギー削減 Energy Reduction by Multi-Step Force Spot Welding

上川路 太雅^{*1} 森田 直輝^{*2} 水篠 友哉^{*3}
Taiga Kamikawaji Naoki Morita Tomoya Mizushino

要約

カーボンニュートラルの実現に向け、車体組立領域において消費エネルギーの占める割合が大きいスポット溶接のエネルギー削減を進めている。しかし高強度材料の適用拡大等を背景に、溶接品質の安定確保のためスポット溶接のエネルギーは増加傾向にある。そこで品質安定確保と消費エネルギー削減を両立させるため溶融プロセスを必要エネルギーの観点で見直し、加圧力をナゲット形成過程に合わせて変えることが有効であることを明らかにし、多段加圧スポット溶接システムを開発した。このシステムは既存設備を活用し低コストで展開が可能なシステムとして開発し、量産導入した。本稿では溶融プロセス最適化の内容と、これを実現するための設備の開発について紹介する。

Abstract

To achieve carbon neutrality, I am working on reduction of energy consumption of the bodywork process, because the ratio that the energy of the spot welding accounts for is substantial in the process. However, with increasing application of high strength materials as background, the energy of spot welding is increasing to keep welding quality stable. Therefore, I paid attention to why energy was needed from a melt process point of view to balance secure welding quality and reduction of energy consumption then clarified that it was effective to change the pressurization power according to the nugget formation process. This is called Multi-step force spot welding. In addition, it is developed to utilize existing facilities and introduced a mass production with less investment. In this report, I introduce the optimization of the melt process and the development of facilities to achieve the innovation.

Key words : Spot welding, Body production development, Energy reduction

1. はじめに

世界的な平均気温上昇を抑えるため、世界共通の目標として温室効果ガスの排出量と吸収量の均衡を掲げ、日本としても2050年までにカーボンニュートラルを目指すことを宣言した。マツダはこれに対し2035年までの自社工場でのカーボンニュートラルを掲げており、車体組立領域としても消費エネルギーの削減を進めている⁽¹⁾。車体組立領域の消費エネルギーの内訳のうち約25%を溶接が占め、その大半がスポット溶接であることから、スポット溶接の消費エネルギー削減が必須である。しかしボディーの軽量化に向け、材料の更なる高強度化を進めていることで、後に説明するように、スポット溶接の消費エネルギーは増加傾向にある。これまで溶接打点ごとの溶接条件改善により消費エネルギーの削減を図ってい

るが、現状の溶接システムで制御可能な溶接条件だけでは限界がある。目標達成に向けては、抜本的な工法の進化が必要である。スポット溶接については、高張力鋼板に適した通電パターンを実現する技術⁽²⁾や、加圧力を溶接中に変化させる技術⁽³⁾等、多くの研究開発が報告されている。しかしあらゆる板組全般に消費エネルギーを低減させる技術で、かつ低コストに量産導入を実現させたシステムとしての報告は少ない。この技術開発では、量産におけるあらゆる板組の溶接条件、実態をベースに、CAEを用いて溶融メカニズムを詳細に分析したことで確立できた。またシステム開発としては、溶接タイマーメーカー、ロボットメーカーと三社で開発することで実現できた。本報告では溶融プロセスに着目し確立したスポット溶接技術と、量産で安定的にこれを実現するシステムの開発について報告する。

*1,2 車体技術部
Body Production Engineering Dept.

*3 車体製造部
Body Production Dept.

2. スポット溶接とは

スポット溶接は被溶接材料を水冷銅電極で挟んで加圧し、ここに大電流を流し、溶接部に生成するジュール発熱を熱源とする溶融接合方法である⁽⁴⁾。溶接中の通電面積が時間的に増大しながら溶接が進行する。この溶融凝固部の径をナゲット径とする (Fig. 1)。このとき生成する熱量 Q [J] は、ジュールの法則に従い、抵抗値 R [Ω]、電流値 I [A]、時間 t [s] によって式(1)で示すことができる。更にこの抵抗値 R は材料固有抵抗値 ρ [$\Omega \cdot m$]、通電長さ L [m]、通電面積 S [m^2] によって式(2)に置き換えることができる。

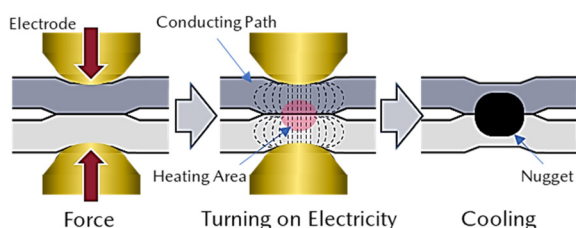


Fig. 1 Schematic of Spot Welding Process

$$Q = \int RI^2 dt \quad (1)$$

$$= \int \rho \frac{L}{S} I^2 dt \quad (2)$$

通電面積は材料の降伏強度と、加圧力、及び電極先端形状によって変化するため、電流値、通電時間、加圧力、電極先端形状はスポット溶接の4大制御因子である。

スポット溶接継手品質は、多くの場合ナゲット径を基準に議論され、スポット溶接性については、基準となるナゲット径を取得できる電流値から、入熱過多により散り(溶融金属が飛散すること)が発生する直前の電流値までの範囲(適正電流範囲と呼ぶ)の広さで評価している。

スポット溶接は他の接手法と比較して初期投資、ランニングコストの両面で安価で、溶接対象に対する表裏両面からの加圧により安定して品質を得られるため広く使われている⁽⁵⁾。

3. 消費エネルギーを増加させる要因

消費エネルギーが増加傾向にある主な原因として、①材料の高強度化に伴う高加圧力化と、②材料強度差の大きい板組における高電流長時間化、の2点がある。この2点について説明する。

3.1 高加圧力化に伴う増加

高強度な材料では板間隙等のノイズを抑え、必要なナゲット径を得られる通電面積を得るための必要加圧力は材料の降伏強度の増加に伴い大きくなる。Fig. 2に2枚組におけるノイズを加味した適正電流範囲を示す。

440MPaの鋼板2枚組と1310MPaの鋼板2枚組を比較する。縦軸に示す力は加圧力である。通電時間は300ms、ノイズとしてFig. 3のように評価した。

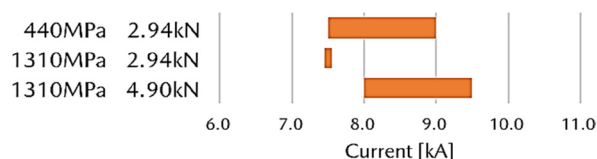


Fig. 2 Weldability Differences between Steel Grades

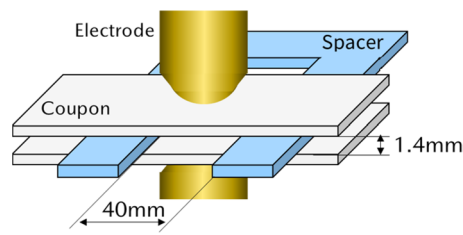


Fig. 3 Schematic of Noise Test

1310MPaの鋼板で440MPaの鋼板と同等の溶接性を確保するためには、加圧力を約2kN上げる必要がある。

加圧力の増加により通電面積が大きくなると式(2)より発熱量 Q が小さくなるため、それを補うために大きな消費エネルギーが必要となる。

3.2 材料強度差の大きい板組適用に伴う増加

例えばAピラーのような外板とつながる部分では、外板は薄肉軟鋼板に対し、中の補強材及び内板は厚肉高張力鋼板となり、板厚比・強度比の大きな3枚重ね板組となる (Fig. 4)。高張力鋼板は一般的に高強度になるにつれ炭素含有量等が増えることにより、固有抵抗値が高くなる傾向にある。固有抵抗値の異なる材料の組合せにおいては、固有抵抗値の高い材料から発熱溶融する。従ってTable 1のような板組においては高張力鋼板の板間から発熱溶融し、拡大し軟鋼板に到達するというような溶融プロセスとなる (Fig. 5)。

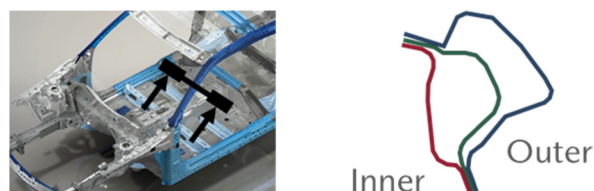


Fig. 4 Example of Sheet Combination

Table 1 Sheet Combination

Sheet1	Thin mild Steel
Sheet2	Thick high tensile steel
Sheet3	Thick high tensile steel

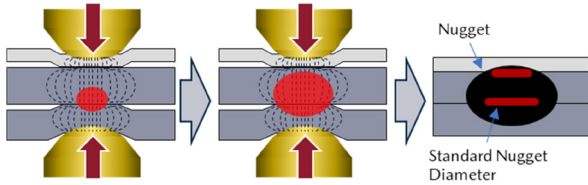


Fig. 5 Schematic of Spot Welding Process

本来、薄肉-厚肉のナゲットを形成するためには電極近傍の通電面積を狭くすることが有効である。一方で厚肉-厚肉間は基準ナゲット径まで拡大させるため通電面積を広くする必要がある。そのため現状、溶接品質を担保するため、高加圧力を設定し、広い通電面積を確保している。

Fig. 6 に薄肉-厚肉間のナゲット径 (Diameter between 1 & 2) と厚肉-厚肉間のナゲット径 (Diameter between 2 & 3) の電流値との関係を示す。この結果は板間隙 1.4mm を付けた 1 回の通電 (5.39kN, 500ms) での結果である。Fig. 5 のような溶融プロセスとなるために薄肉-厚肉間のナゲットを作るために、厚肉-厚肉間のナゲットが過大に形成されていることが分かる。そのため、厚肉-厚肉間の散りを抑えるために更に高加圧が必要となり、薄肉-厚肉間のナゲットを形成するために、長時間高電流が必要となっている。

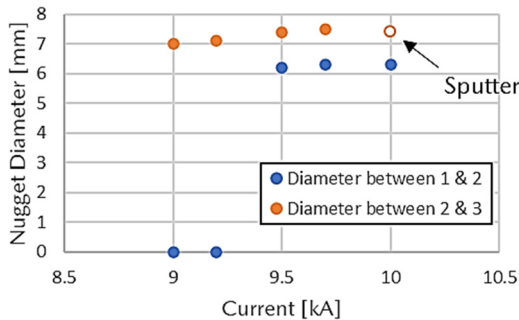


Fig. 6 Relationship between Nugget Diameter and Current

結果として上記のような非効率な溶融プロセスとなり、不必要なエネルギー消費を招いている。

4. 目指す溶融プロセス

上記より溶接品質の安定確保と消費エネルギー削減を両立させるためのキーとして、発熱量を決める要素の一つである通電面積に注目した。従来は必要なナゲット径やノイズ等から決めた加圧力で通電面積が決まっているが、ナゲットの形成過程に合わせて通電面積を適切にコントロールすることで効率的なナゲット形成につながると考えた。そしてこの通電面積のコントロールを加圧力によって行うことを考えた。

2つの板組を事例にしてねらいのプロセスを説明する。1つ目として厚肉高張力鋼板の2枚重ねについて説明

する。溶接の序盤では低い加圧力で通電面積を狭くし通電密度を高めることにより、電流値を下げる。後半は基準ナゲット径まで拡大させるために高い加圧力で広い通電面積とする (Fig. 7)。

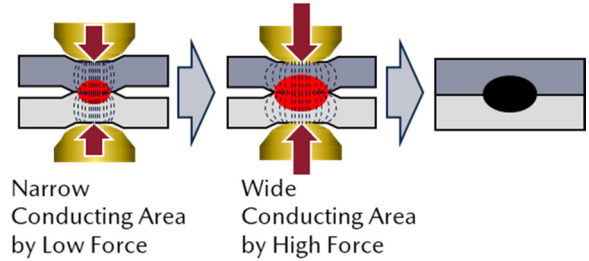


Fig. 7 Schematic of Conducting Area Control

2つ目として Table 1 に示すような3枚組について説明する。ねらいとする溶融プロセスは、薄肉-厚肉間のナゲットを形成した上で、厚肉-厚肉間のナゲットを基準ナゲット径まで拡大することである。薄肉-厚肉間のナゲットを形成するために、電極近傍の発熱を促すべく、低い加圧力で通電面積を狭くする。そして厚肉-厚肉間のナゲットを基準ナゲット径まで拡大させるために高い加圧力で広い通電面積とする (Fig. 8)。

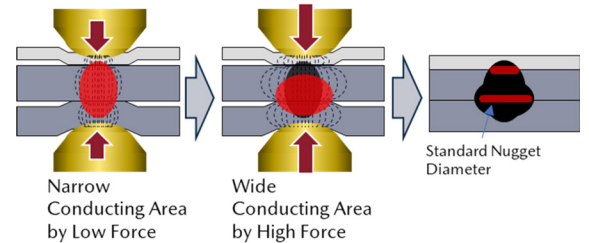


Fig. 8 Schematic of Conducting Area Control

上記のように加圧力を変化させることで通電面積をコントロールし溶融プロセスを最適化させることを考えた。

5. 多段加圧スポット溶接による理想プロセス実現

まず加圧力を変化させることで通電面積のコントロールが可能かどうかについて、CAEにより机上評価を行った。サンプルは、板厚 2.0mm、材質 1180MPa 非メッキの2枚組を使用し、加圧力一定の溶接 (Normal Force) と多段加圧スポット溶接 (Multi-step Force) で、通電面積の変化を比較した。溶接条件を以下に示す (Fig. 9, 10)。

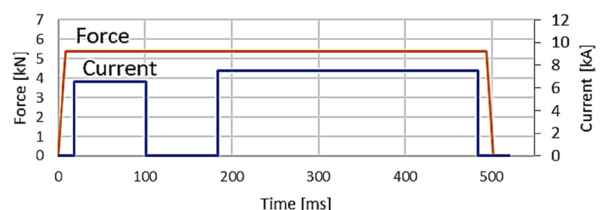


Fig. 9 Welding Condition of Normal Force

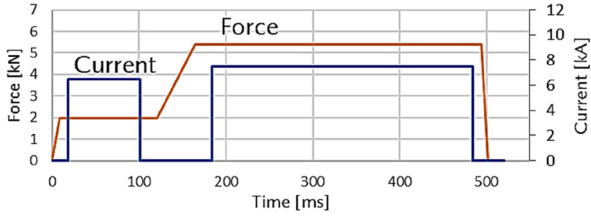


Fig. 10 Welding Condition of Multi-Step Force

Fig. 11 に示すように加圧力一定の溶接では通電面積は通電初期からなだらかに拡大しているのに対し、多段加圧スポット溶接では低加圧力時に、通電面積を小さく抑えることができていることが分かる。

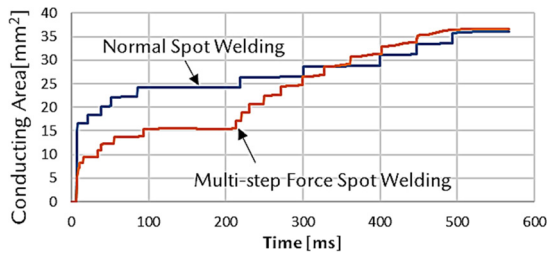
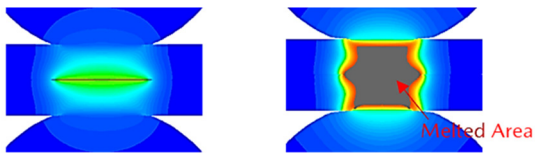


Fig. 11 Change of Conducting Area

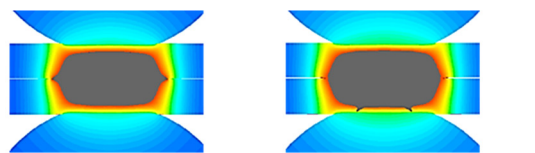
また同電流値 (6.5kA) において加圧力一定 (5.39kN) の溶接での通電では 115ms 時点では溶融部は微小であるのに対し、多段加圧 (初期 1.96kN) での通電では 4mm までナゲット径が確保できる (Fig. 12)。



Normal Spot Welding Multi-step Force Spot Welding

Fig. 12 Nugget after Initial Current Carrying

その後 500ms 時点では多段加圧スポット溶接の方が大きなナゲットを確保することができた (Fig. 13)。



Normal Spot Welding Multi-step Force Spot Welding

Fig. 13 Nugget of the End

これらより多段加圧により通電面積をコントロールすることができ、それにより溶融プロセスを変化させ、ナゲット径を拡大できることが分かった。

そこで実際にテストピースを用いて、多段加圧スポット溶接により消費エネルギーの削減が可能か実験にて確

認した。Fig. 14 に消費エネルギーとナゲット径の関係を示す。この結果より、同じナゲット径を確保するための消費エネルギーは多段加圧スポット溶接の方が 13%以上低く、厚肉 2 枚組において多段加圧スポット溶接により消費エネルギーを削減できることが分かった。

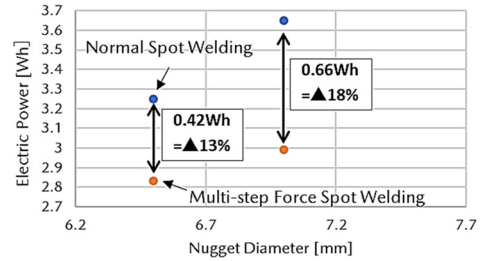


Fig. 14 Relationship between Electric Powers and Nugget Diameter

次に上記を薄肉軟鋼板と厚肉高張力鋼板 2 枚の 3 枚重ねに応用した。3 枚重ねの板組を Table 2 に、溶接条件を (Fig. 15, 16) に示す。

Table 2 Sheet Combination

Sheet1	270MPa Thickness: 0.65mm
Sheet2	1180MPa Thickness: 2.0mm
Sheet3	1180MPa Thickness: 2.0mm

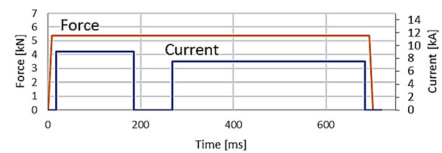


Fig. 15 Welding Condition of Normal Force

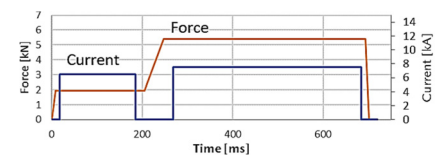


Fig. 16 Welding Condition of Multi-Step Force

2 枚組と同様に加圧力によって薄肉-厚肉間、厚肉-厚肉間ともに通電面積が変化することが CAE の結果から分かる (Fig. 17, 18)。

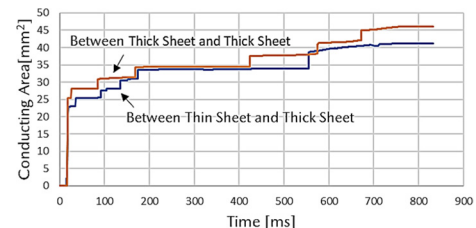


Fig. 17 Conducting Area of Normal Spot Welding

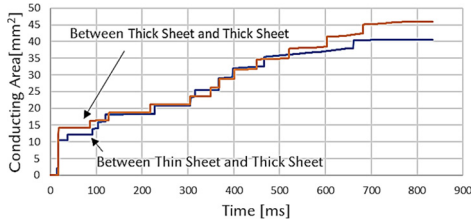


Fig. 18 Conducting Area of Multi-Step Force Spot Welding

これによって多段加圧では、通電初期で薄肉-厚肉間の発熱を促すことができ、溶融部を電極近傍まで形成でき、その後高加圧力時で厚肉-厚肉間のナゲットを拡大できた (Fig. 19, 20)。

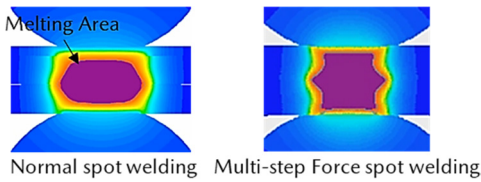


Fig. 19 Nugget after Initial Current Carrying

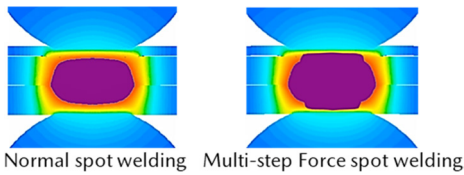


Fig. 20 Nugget of the End

これを実際のテストピースを用いて実験を行った結果、CAE で確認したようにナゲットの形成過程が加圧力一定の溶接と多段加圧で異なり、多段加圧によりねらいとする溶融プロセスが実現できることを確認できた (Fig. 21, 22)。

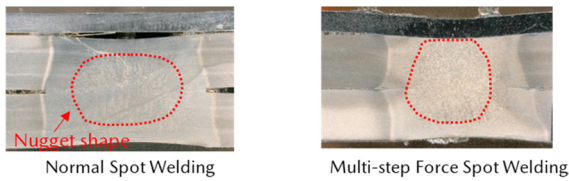


Fig. 21 Nugget after Initial Current Carrying

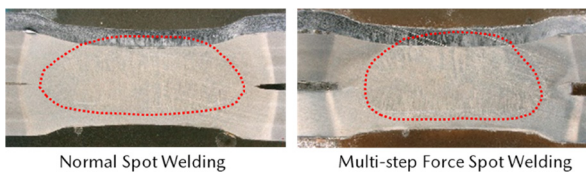


Fig. 22 Nugget of the End

上記のように多段加圧により厚肉-厚肉間のナゲットを過大にすることなく、薄肉-厚肉間のナゲットを形成できるようになった。その結果、Fig. 23 に示すように適正電流

範囲が拡大し、Fig. 24 に示すように消費エネルギーを30%以上削減することができた。

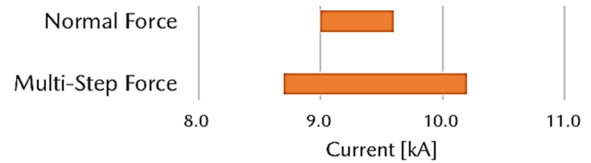


Fig. 23 Weldability of 3 Sheets Welding

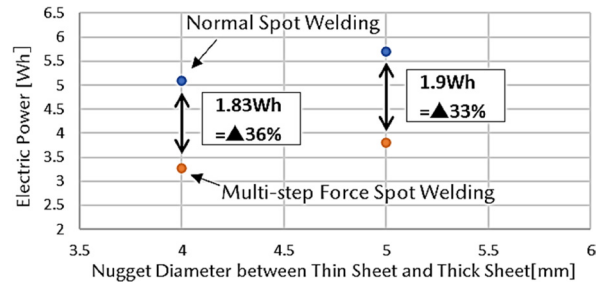


Fig. 24 Relationship between Electric Powers and Nugget Diameter

6. 多段加圧スポット溶接システムの開発

ねらいの溶融プロセスを工場量産の中で安定的に実現するためには、加圧力と通電の同期制御を行うことが重要となる。前述の評価ではマツダの量産では使用されていない特殊な設備を使っており、コストの高さや、溶接のさまざまな姿勢への対応等の難しさがあった。一方で従来の量産の制御では、加圧力と通電は、制御する設備が異なることから緻密に同期制御を図ることができなかった。そこで上記を解決するシステムの開発を行った。カーボンニュートラルのためには多段加圧スポット溶接を広く使っていくことが必要であるため、低コスト、低工数での量産導入実現を目指し、既存設備の活用を前提とした。

6.1 現行設備構成と同期性の課題

一般的なスポット溶接の設備ではロボットにより加圧力、溶接タイマーにより電流値、通電時間を制御している。加圧力と通電を同期させることが難しい原因はこの役割分担にある。Fig. 25 に示すようにロボットと溶接タイマーで、通電開始と終了のみ信号をやり取りし、通電途中は互いの動作を切り離している。

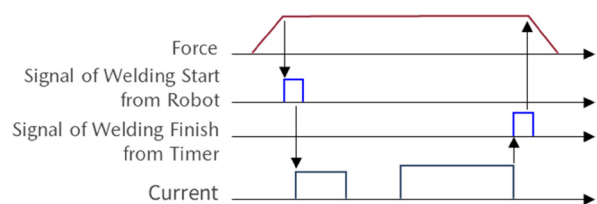


Fig. 25 Current Welding Sequence

通電途中に同期を図る場合、どちらか片方で両者を制御すればよいが、それでは設備自体を交換する必要があり、また工場全体の制御システムの改造も必要となるため、コスト、工数ともに大きくなってしまふ。そこでこの役割を変えずに同期制御を実現するシステムの開発をすることとした。

6.2 高速通信による同期制御システムの実現

加圧力と通電を同期させるため、通電途中においても、加圧力変更時にロボットと溶接タイマーで信号をやり取りさせることで同期を担保するようにした。まず品質の安定のため加圧力の切り替えは通電間の時間（クールタイム）内のみ実施することを前提とした。加圧力を変更するとき、溶接タイマーからロボットへ信号“Force Switching”を送る。この信号をトリガーとしてロボットは加圧力を切り替え始める。そして切り替え完了した後ロボットから溶接タイマーへ信号“Force complete”を送る。溶接タイマーは設定されたクールタイム経過時に、この信号がONしていることを確認して次の通電を実行するようにした（Fig. 26）。

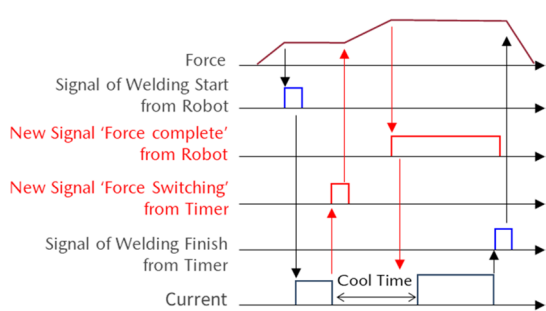


Fig. 26 New Welding Sequence

この信号のやり取りはクールタイムの間で行うため、通信時間が長期化することはクールタイムを延ばすことにつながる。それは加工時間の長時間化、エネルギーのロスにつながるため、高速かつ安定した信号品質が必要である。そこで通電間に使う通信として、デジタル入出力（DIO）通信を採用した。DIO通信は汎用的に使われている通信の一つであり、1つの線に1つの信号を割り当て、電圧によってON/OFFを検出する通信である。そのためDIO通信により高速かつ安定した通信を実現できる上、既存のロボット、溶接タイマーに実装することが容易であることから、コストを抑えることもできる。

これらにより多段加圧スポット溶接システムを、既存ロボット、溶接タイマーを現地改造することで実装できるシステムとした。

7. 量産工程への適用

今回開発した多段加圧スポット溶接システムを、MX-30のアンダーボディー領域に適用した。アンダーボ

ディーから適用した理由は、厚肉、高張力鋼板を含む板組が多くあり、消費エネルギーが高いためである。この領域で、従来相当のナゲット径を確保しながら消費エネルギーの低減を実現した。

7.1 工場量産における効果

導入効果の事例として2板組の効果を紹介する。

(1) 高張力鋼板の2枚重ねの例

Table 3に示す板組において、Fig. 27に示すような溶接条件を適用した。通電初期を低加圧力とすることで通電初期の電流値を落としても現行同等のナゲット径が確保できた。これにより従来の溶接条件から25%の消費エネルギーの低減を実現した。

Table 3 Sheet Combination

	Strength	Coated/Uncoated	Thickness
Material 1	590MPa	Uncoated	0.9mm
Material 2	590MPa	Coated	0.9mm

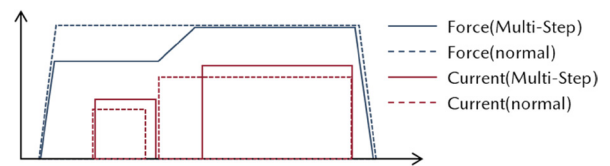


Fig. 27 Welding Condition

(2) 材料強度比板厚比の大きい3枚重ねの例

Table 4に示す板組において、Fig. 28に示すような溶接条件を適用した。現行の溶接条件と比較して通電初期を低加圧力とすることで低電流化することができ、より薄肉の発熱を促すことができたことで、2段目の電流値を下げる事ができ、従来の溶接条件から30%の消費エネルギーの低減を実現した。

Table 4 Sheet Combination

	Strength	Coated/Uncoated	Thickness
Material 1	590MPa	Coated	0.65mm
Material 2	980MPa	Coated	1.0mm
Material 3	980MPa	Coated	1.8mm

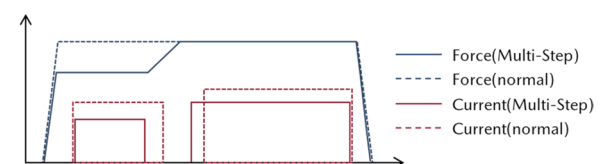


Fig. 28 Welding Condition

7.2 今後に向けた取り組み

今後は板組、打点状況等から多段加圧スポット溶接の最適条件を導出するための標準を確立し、円滑に多段加圧スポット溶接を量産適用できるようにする。更に溶融プロセスに着目した今回の取り組みの知見を活かし、従来の加圧力一定の溶接における消費エネルギー削減も進めていく。多段加圧スポット溶接を広く活用していきながら、この多段加圧スポット溶接をひとつの新たな手段として、溶接条件の最適化を図ることで車体組立領域の消費エネルギーを削減し、カーボンニュートラルに貢献していく。また、この多段加圧スポット溶接によってこれまで以上の板厚比、高強度材料、板組枚数の適用を可能とする知見が得られた。これにより構造の点での軽量化が見込める。設計とともにさらなるボディーの軽量化を実現し、クルマの製造、使用を含めた全体のカーボンニュートラルに貢献する。

8. おわりに

スポット溶接の溶融プロセスに着目し、加圧力により通電面積をコントロールする多段加圧スポット溶接を開発する中で以下の成果を得た。

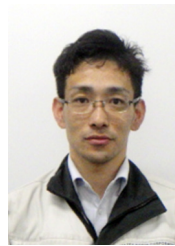
- (1) 加圧力を変化させることで通電面積が変化し得ることが分かった。溶融プロセスの中でこのコントロールを適切に行うことで溶融プロセスの最適化が図れた。
- (2) 板組によって効果の差はあるが、多段加圧スポット溶接によって溶接品質ロバスト性の向上と消費エネルギーの低減を両立することができた。
- (3) DIO 通信を使うことで高速かつ安定した通信を実現でき、加圧力と通電の同期を図りながら最小限のクールタイムとしたことでロバストな溶接品質につなげられた。

最後に本開発は川崎重工(株)、(株)ナ・デックスとマツダの3社での共同開発である。川崎重工(株)、(株)ナ・デックスの皆様には深くお礼申し上げます。

参考文献

- (1) MAZDA INTEGRATED REPORT 2022, P28
- (2) 安江ほか：高張力鋼板の最新スポット溶接技術，溶接学会誌，第84巻，第6号（2015）
- (3) 池田ほか：通電中の加圧力および溶接電流制御を活用した抵抗スポット溶接技術の開発，溶接学会論文集，第28巻，第1号（2010）
- (4) 松山ほか：薄鋼板及びアルミニウム合金の抵抗スポット溶接，p.7（2008）
- (5) 近藤：溶接・接合技術の適用，溶接学会誌，第79巻，第8号（2010）

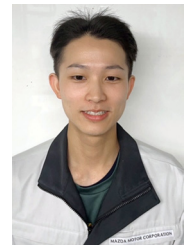
■著者■



上川路 太雅



森田 直輝



水篠 友哉

論文・解説

22

リチウムイオン電池内部温度モデリング技術の開発 Development of LIB Internal Thermal Modeling Technology

大路 潔^{*1} 富岡 沙絵子^{*2} 吉本 淳^{*3}
Kiyoshi Oji Saeko Tomioka Atsushi Yoshimoto
安永 亨^{*4} 庄司 明^{*5} 藤田 弘輝^{*6}
Toru Yasunaga Akira Shoji Hiroki Fujita

要 約

電動車両においては、リチウムイオン電池の充放電能力を引き出すことが車両性能に直結することから、電池マネジメント技術の開発が進められている。特に、電気化学反応が発生している電池セル内部の温度挙動を推定するモデル化手法は、電池能力を引き出す重要な技術である。一方、モデルベース開発を実現するには、高い推定精度を持ちつつ、高速に演算できる温度予測モデルが求められている。そこで、車載用リチウムイオン電池セルを対象に、車載で想定される温調環境下においても内部温度を推定可能なモデリング技術を開発した。内部熱特性の計測/同定、及び内部熱流れを解明することで、高速かつ高精度化を実現し、電池内部温度の実測値と予実差検証を行った。

Abstract

In electric-powered vehicles, development of a battery management technology is underway because the ability to draw out capabilities of lithium-ion batteries is directly linked to vehicle performance. In particular, the modeling method for estimating the temperature behavior inside the battery cell where the electrochemical reaction occurs is an important technique for bringing out the battery performance. On the other hand, in order to realize Model Base Development, a temperature prediction model that can be operated at high speed while maintaining high estimation accuracy is required. Therefore, a modeling technology that can estimate the internal temperature of automotive lithium-ion battery cells even in the temperature-controlled environment expected in the vehicle was developed. By measuring/identifying the internal thermal characteristics and clarifying the internal heat flow, we achieved a high-speed and high-accuracy modeling technology, and verified the difference between the measured value and the predicted temperature inside the battery.

Key words : EV and HEV systems, Battery technology, Lithium ion battery, Cooling/Heat and temperature management

1. はじめに

近年、環境問題への対応として、車の電動化が加速している。電動車両においては、リチウムイオン電池（以降、LIB）の充放電能力を引き出すことが、車両性能に直結することから、電池マネジメント技術の開発が進められている。特に、その電気化学反応の温度依存性が大きいことから、各社でLIBの温度管理は、要の技術となっている^{(1)~(4)}。更にその中でも、電気化学反応が発生している電池セル内部の温度挙動を推定する手法は、電池能力を引き出す重要な技術である。既に、電池セル内部の

温度を推定する技術構築の取り組みもなされている⁽⁵⁾⁽⁶⁾。しかし、これら取組の対象は、車載用に比べ、小型の電池セルであり、電池セル全体に風を当てるなど、車載とは異なる温調状態での検証にとどまっている。一方、車両の開発効率化には、モデルベース開発（MBD）を行うことが有効であり、車載条件下で、高速、かつ高精度に演算可能なモデルが求められている。そこで、本取り組みでは、車載用の大型電池セルを対象とし、車載を想定した温調環境において、内部の温度挙動を高速、かつ高精度に推定可能な電池セル内部温度モデル化技術の開発を目的とする。

*1,2,5,6 技術研究所
Technical Research Center

*3,4 電駆・PT制御部品開発部
Electric Drive & PT Control Parts Development Dept.

2. LIB 内部温度管理とモデル構築方法について

2.1 LIB 内部温度管理とモデル構築方法について

LIB の温度依存性の一例を、Fig. 1 に示す。LIB の出力や、容量維持率 (SOH-C) はその温度によって、大幅に変化する。これは、1 章で述べたように、電池セル内部の電気化学反応に伴うものである。温度が低い場合は、Li イオンの移動速度が低下するため、出力が低下する。一方、温度が高い場合は、電解液の分解速度が上がる等により劣化が促進し、容量維持率が低下する。このため、容量を維持しつつ、高出力を可能となる温度域は、例えば約 10°C から 40°C といったようにとても狭い範囲となる。また、電池セル内部温度 (以降、内部温度) は、電池セルサイズや、内部熱特性によって、電池セル表面温度 (以降、表面温度) と乖離する場合がある。その温度差は、式(1)に示すように、内部と表面間の移動熱量と、内部熱伝導率、内部寸法によって見積もることができる。本式を用いて机上計算した結果例を Fig. 2 に示す。ここでは、車載を想定し、電池セル底面を冷却面としている。また、発熱量を移動熱量として計算している。電流レートに応じて、温度差は拡大していくことが分かる。電流レートが 2C (30 分で SOC100% 使用する電流値) 超では、内部温度と表面温度差は 10°C に到達した。このように、調温目標値は狭いことに加え、内部と表面の温度差が発生することから、その充放電能力を引き出すには内部温度の緻密な管理が必要であり、その実現のために、電池セル内部の温度推定の高精度化が求められる。

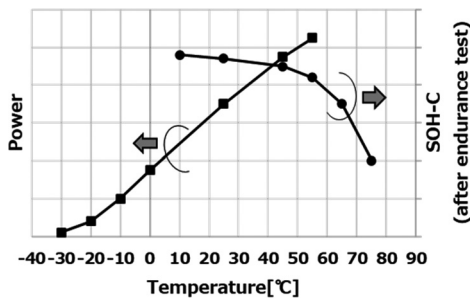


Fig. 1 Temperature Dependence of the LIB

$$\Delta T_{inner-surface} = Q_{inner-surface} \frac{L}{\alpha A} \quad (1)$$

- $\Delta T_{inner-surface}$: 内部表面温度差
- $Q_{inner-surface}$: 内部表面移動熱量
- L : 熱移動距離
- α : 内部熱伝導率
- A : 熱伝導面積

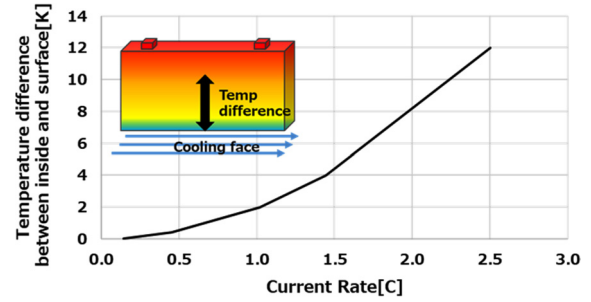


Fig. 2 Example of the LIB Temperature Difference between Inside and Surface

2.2 高速高精度モデル構築方法について

環境温度や、温調制御の変化に対応し、高速、かつ高精度な内部温度モデルを実現するには、式(1)で示した温度差発生メカニズムに基づき、定量的に、かつ必要最小限な構成で表現できていなければならない。そこで、まず、電池セル内部の発熱、伝熱特性を把握し、3次元解析で熱流れによる温度差発生メカニズムを解明する。次に、メカニズムを踏まえた主要な熱流れのみを抽出し、簡易的な 1D 伝熱等価回路に縮退することで、高速、かつ高精度モデルを実現することとした。更に、モデル化を容易化するために、電池内部の材料特性など、詳細な材料分析が必要な情報は用いず、実験データとモデルを組み合わせた内部熱特性取得を行うこととした。本モデル作成プロセスを Fig. 3 に示す。初めに、発熱特性と、伝熱特性の一つである内部熱容量の同定を行う。次に、3次元モデルを構築し、内部熱流れを分析、それに基づき、1D 熱等価回路に縮退し、最後に実験データと構築した等価回路を用い、残された未知パラメーターの同定を行う。これらの詳細を、3 章と 4 章に述べ、構築したモデルの精度検証を 5 章に述べる。なお、本取り組みでは、車載用の角缶形状で、内部電極体は積層タイプの LIB を対象とした。

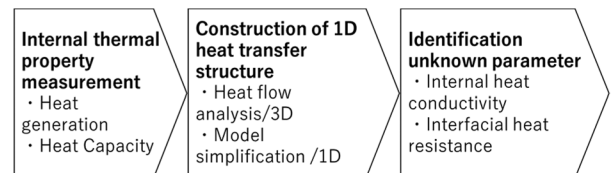


Fig. 3 Process of Thermal Model Construction

3. 電池内部熱特性取得方法

3.1 電池ジュール熱、分極熱発熱量

電池発熱量の式を式(2)に示す。今回対象とした発熱要素は、電子移動抵抗に伴うジュール熱、イオン移動に伴う分極熱、及びエントロピー変化熱とした。

ジュール熱、分極熱は、電気挙動を再現した等価回路モデルを用いて表現している。等価回路を Fig. 4 に、

ジュール熱、及び分極熱の合計熱量の算出式を式(3)に示す。等価回路中の抵抗成分、コンデンサパラメータは、温度、SOC 依存性をもっており、各条件において、電流パルスを与えた際の電圧挙動から、同定を行い、マップ化して使用している。本等価回路にて、モード走行時の電圧再現性を確認した結果を Fig. 5 示す。電圧変動の予実差は、最大でも 8% とよく一致することを確認している。低温や、低 SOC、大電流では、誤差は拡大するものの、EV 常用域では、同レベルでの精度を確保することが可能である。

$$Q_{bat} = Q_{joule} + Q_{polariz} + Q_{entropy} \quad (2)$$

Q_{joule} : ジュール熱

$Q_{polariz}$: 分極熱

$Q_{entropy}$: エントロピー変化熱

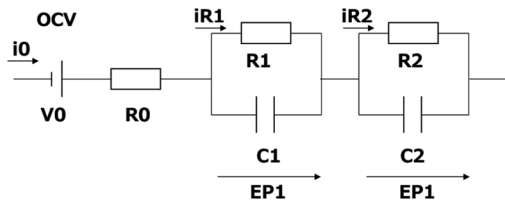


Fig. 4 Equivalent Circuit Model

$$\begin{aligned} Q_{jule} + Q_{polariz} &= i_0^2 R_0 + i_{R1}^2 R_1 + i_{R2}^2 R_2 \\ &= i_0^2 R_0 + \frac{EP_1^2}{R_1} + \frac{EP_2^2}{R_2} \end{aligned} \quad (3)$$

i_0 : 電流 EP_1 : $R_1 C_1$ 並列回路部電位

i_{R1} : R_1 通過電流 EP_2 : $R_2 C_2$ 並列回路部電位

i_{R2} : R_2 通過電流

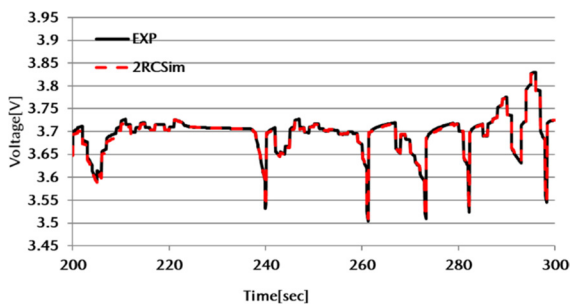


Fig. 5 Validation Result of Equivalent Circuit Model

3.2 エントロピー変化熱

エントロピー変化熱は、リチウムイオンの挿入脱離によるエントロピー変化に伴う吸発熱であり、その熱量による温度変化の影響は、数°C程度ではあるものの、発熱のみならず、吸熱現象もあるため、傾向の再現性や、予実差数°Cレベルの高精度化を行うには、無視できない。また、電池内部の構造や材料の改良により、ジュール熱、分極熱は、低減が進んでいくことが考えられるため、相

対的に、エントロピー変化熱の占める割合が大きくなることから、考慮する必要性が高まることが考えられる。

エントロピー変化熱の SOC 依存性は、式(4)に示しているように、エントロピー変化マップ ΔS (SOC) によって表現される。エントロピー変化 ΔS の取得方法にはいくつかの報告例^{(7)~(10)}があり、起電力の温度依存性からエントロピー変化 ΔS 値を導出する方法 (①起電力計測法) と、低レートで充放電させて、直接熱量を計測する方法 (②熱量計測方法) である。Table 1 に、それぞれの概要と特徴を示す。

$$Q_{entropy} = \frac{T_{bat} \cdot I \cdot \Delta S(SOC)}{F} \quad (4)$$

T_{bat} : 電池セル内部温度 I : 電流

ΔS : エントロピー変化 F : ファラデー定数

Table 1 Identification Method of Entropy Change

Method	Howto	Required time	Precedents
① Method of OCV measurement	Measure OCV Change when Temp changes $\Delta S = \frac{\partial V_{ocv}}{\partial T_{bat}}$	~10days SOC 20point SOC adjustment 1h/SOC Temp Control 10h/SOC	General method
② Method of Heat Measurement	Measure the Amount of Heat at Low Rates $\Delta S = \frac{F \cdot I_{bat} \cdot Q_{bat}}{T_{bat}}$	~1days SOC Continuous Heat Measurement 20h (0.05C)	Netzsch (Coin Cell) Several research institutes (Large Cell)

OCV 計測法 (Table 1 中①) は、計測作業は比較的容易ではあるが、数 mV ~ 数十 mV レベルの微小な電圧挙動を計測できる環境と、計測時間を要する。特に、計測時間は、内部温度が安定していると判断できるように、十分な時間を取る必要がある。このため、計測 SOC ポイントが多くなると多くの装置時間が必要となる。一方、熱量計測方法 (Table 1 中②) では、低レートでの充放電を行うことで、エントロピー変化値の SOC 依存性を連続的に計測することが可能である。結果、前者の手法に比べて、計測時間を短縮することが可能である。本取り組みでは、熱量計測方法を用いることとしたが、極低レートでの微小熱量を漏らすことなく計測する環境構築はせず、比較的低レートで計測しつつ、混入するジュール熱、分極熱を 3.2. で示したモデルを用いて補正し、エントロピー変化熱を導出するハイブリッド同定を行った。

用いた計測環境を Fig. 6 に、エントロピー変化熱導出式を式(5)に示す。

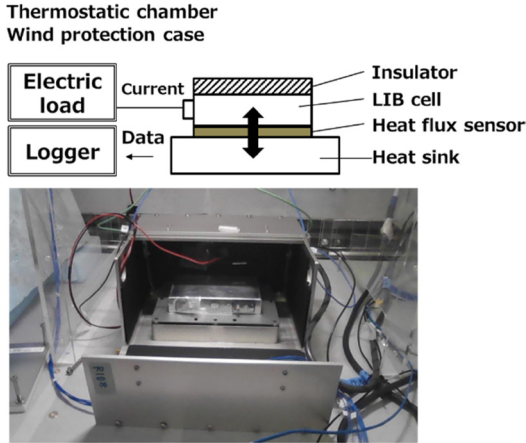


Fig. 6 Test Configuration of LIB Thermal Measurement

$$Q_{entropy} = Q_{measure} - (Q_{joule} + Q_{polariz}) \quad (5)$$

$Q_{measure}$: 熱流センサー計測熱

この方法では、熱量計測値とモデル双方に誤差要因があるため、総合的に誤差を最小化させる適切な電流レート選定が必要である。考え方を Fig. 7 に、導出式を式(6)(7)(8)に示す。熱量計測誤差は、熱流センサーの感度と用いたロガーの分解能から導出し、ジュール熱、分極熱誤差は、モデルの抵抗誤差から演算した。結果、約 0.04C が適切であることを導出した。以上より、取得したエントロピー変化を Fig. 8 に示す。導出したターゲット値に近い 0.05C において、OCV 計測法と同等の値を連続的に得ることができた。また、本エントロピー変化を用いた電池温度挙動の予実差を Fig. 9 に示す。エントロピー変化を考慮することで、後半の定レート充電における吸熱と発熱反応が切り替わることで上下限する温度挙動を再現できることを確認した。

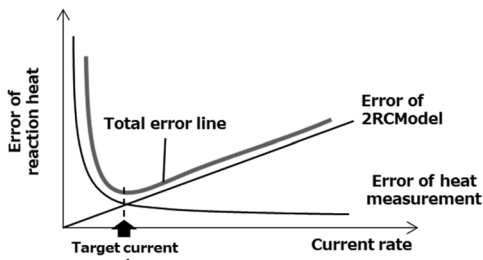


Fig. 7 Concept of Identification Accuracy

$$\Delta S_{error} = \left(\frac{Q_{measure_error}}{I} + R_{error} \cdot I \right) \cdot \frac{T}{F} \quad (6)$$

$$\frac{d|\Delta S_{error}|}{dI} = 0 \quad (7)$$

$$I_{target} = \sqrt{\frac{Q_{measure_error}}{R_{error}}} \cong 1.8[A] \cong 0.04[C] \quad (8)$$

ΔS_{error} : エントロピー変化誤差

$Q_{measure_error}$: 熱量計測誤差

R_{error} : 等価回路抵抗誤差

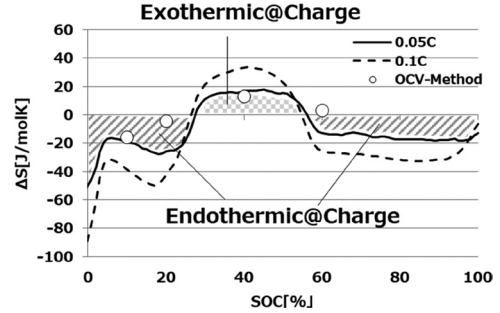


Fig. 8 Curve of the Entropy Change

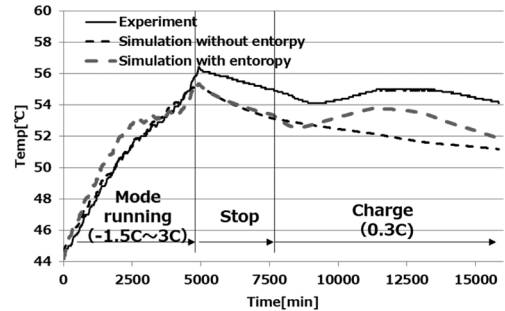


Fig. 9 Effect of Entropy Change Consideration

3.3 内部熱容量

次に、電池内部熱容量の導出方法について述べる。電池セルケースや端子の熱容量は、形状や材料特性から導出できるものの、内部の熱容量は、設計情報が入手できない場合、導出が困難である。そのため、電池セル全体の熱容量を計測し、ケースや端子の熱容量を差し引くことで、内部熱容量を導出することとした。また、電池セル全体の熱容量計測には、計測の容易化をねらい 3.2. にて示した熱流計測装置を用いることとした。式(9)に導出式を示す。熱流計測装置を恒温槽内に入れ、槽内設定温度を変化させる。このときに電池セルとヒートシンク間の熱流センサーが検出した通過熱量を積算し導出する。検証用にアルミニウムの熱容量計測を実施し、物性値から導出される値との差異を確認した。電池セル計測値とともに結果を Fig. 10 に示す。大きさを違えた 2 つのアルミニウムにおける推定誤差は、平均 5% であることから、本簡易的手法でも熱容量計測が可能であることを確認した。前述のように、得られた電池セルの熱容量から、ケースや端子の熱容量を差し引くことで、内部熱容量導出を実現した。なお、本手法は、一部で実施されており⁽¹²⁾、本取り組みでは、電池セルとヒートシンク間以外の電池セル面にも熱流センサーを取り付けることで、高精度化を試みた。

$$C_{inner} = \frac{\int Q_{measure} dt}{\Delta T_{bat}} - (C_{case} + C_{terminal}) \quad (9)$$

C_{inner} : 電池セル内部熱容量

C_{case} : 電池セルケース熱容量

$C_{terminal}$: 電池セル計測誤差

ΔT_{bat} : 電池セル温度変化量

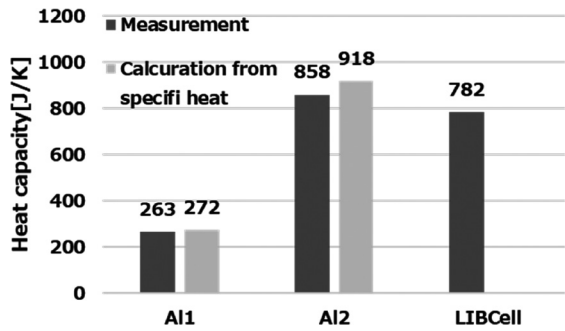


Fig. 10 Heat Capacity of Al-Block and LIB Cell

4. 1D 熱等価回路モデルの構築

4.1 電池内部熱流れ分析による縮退

2章で述べたように、3章で取得した熱特性を用い、3次元解析を行い、電池内部の熱流れを分析した。この時、モジュール化されて搭載した状態を想定し、底面を冷却面、電池セルの広いケース側面は断熱とした。3次元熱解析による熱流れ分析結果の一例を Fig. 11 に示す。電池内部で発生した熱量は、冷却面であるケース底面に伝わり上下の温度分布を発生させている。それとともに、広いケース側面に伝わり、ケース伝いにケース底面に伝熱し、放熱されていることが分かった。これを踏まえ、構築した熱等価回路を Fig. 12 に示す。温度分布と熱流れを表現可能なように最小要素で構築した結果、熱容量、熱抵抗を合わせて 30 個の 1D 熱等価回路とすることができた。なお、電池内部の熱抵抗は、後に同定しており、ここでは、仮の値を使用している。

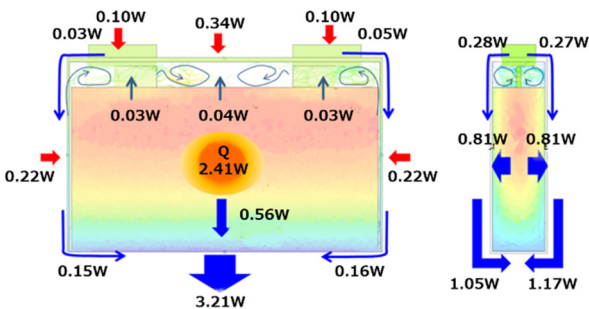


Fig. 11 Results of Internal Heat Flow 3D Analysis

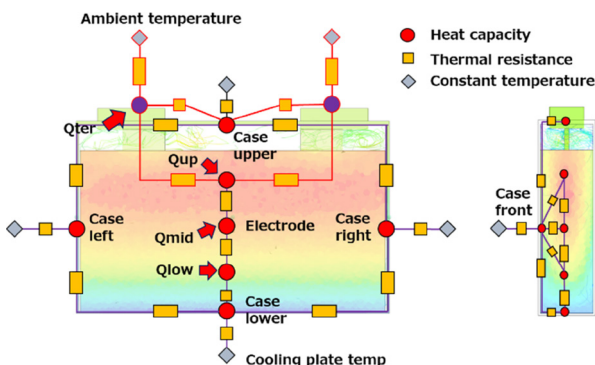


Fig. 12 LIB Cell Thermal Equivalent Circuit

4.2 内部未知パラメーター同定

これまでに、電池セル内部の発熱量、熱容量の同定を行ってきた。ここでは、残った内部未知パラメーターである、内部熱抵抗成分の同定について述べる。

Fig. 13 に同定の全体像を示す。特定の電流モードで充放電を行った際の温度上昇と表面熱流束を利用して、前節に構築した熱等価回路中の内部熱抵抗値の同定を行った。今回対象とした熱抵抗は、電解液、正負極の活物質、集電体、バインダーで構成された電極体、その周囲の絶縁材料の熱抵抗、そして、其々の界面熱抵抗に当たる。前節にて述べたように、熱等価回路は熱流れを再現するために最小化されており、この部分の熱抵抗は、LIBセル高さ／奥行き軸ごとに1つの熱抵抗で表現されている。それに従い、個別部材や、材料ごとに同定はせずに、一体として同定を行った。これにより、同定時間の短縮が可能であるとともに、1Dモデル固有である、「離散化した熱容量で平均温度を表現しつつ、局所温度の再現を行う相反問題」の解消につながっていると考える。なお、本同定作業には、5.1に述べる電池内部温度結果も同定に使用しており、精度向上につなげている。以上により、1D熱等価回路の構築を実現した。

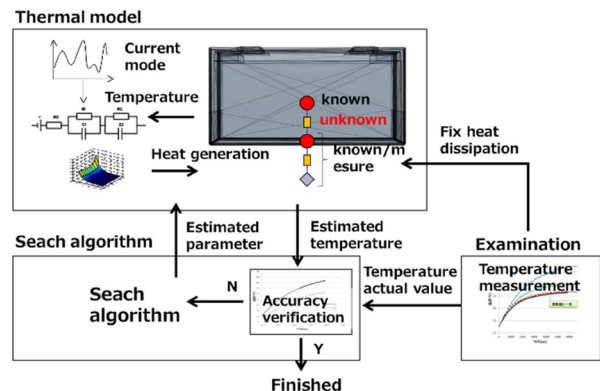


Fig. 13 Identification Structure of Unknown Parameter

5. 予実差検証

5.1 内部温度計測

対象電池セルの内部温度計測を行い、予実差検証を行った。温度計測点、及び実験構成を Fig. 14 に示す。温度計測は、電池セル内部の下部、中央部、上部、各表面とし、表面熱伝達係数を把握するために、熱流束センサーを表面に設置した。また、モジュール状態を想定し、側面に断熱材を当てるとともに、底面に水冷冷却プレートを設置した。この装置を恒温槽内に設置することで、任意の環境温度と冷却温度条件での検証を可能としている。実験条件一覧を Table 2 に示す。このうち環境温度 25°C、冷却水温度 15°Cでの温度、熱流束データを 4.2 で述べた未知パラメーターの同定データとして使用し、他条件でのデータを、検証データとした。温度条件ごとに、

複数の電流レートの充放電パルスを加えて、各レートにおいて温度が収束するまで計測している。Fig. 15 に、計測データの一例を示す。最高環境温度と最低冷却水温度の条件で表面と内部の温度差は 10°C を超え最大となった。

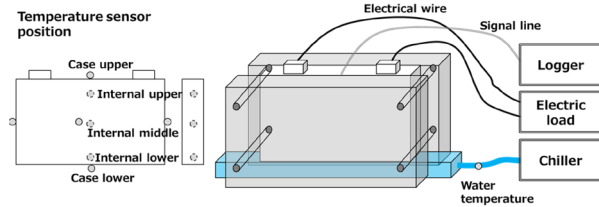


Fig. 14 Experimental Apparatus of LIB Temperature

Table 2 Condition List of Examination

		Cooling water temperature			
		Without cooling water	5°C	15°C	25°C
Ambient temperature	10°C	—	—	—	○
	25°C	○	—	Training data	—
	45°C	—	○	○	—

○ : Measured
 — : Not measured

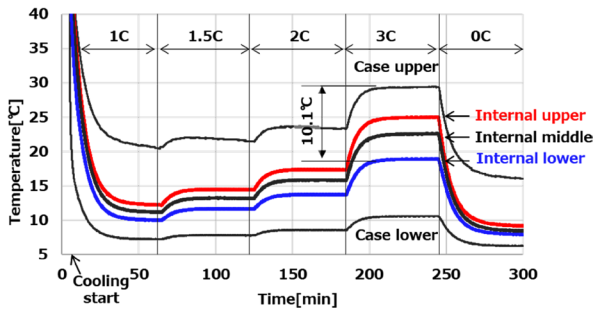


Fig. 15 Results of Temperature Measure

5.2 予実差検証結果

5.1 で述べた実験データとモデルとの予実差について、時系列で示したものを、Fig. 16 に、条件ごとに集計したものを Fig. 17 に示す。時系列のグラフでは、発熱量を変化させていった際も、各部の温度傾向がよく再現できていることが確認できた。また、各条件一覧では、予実散布グラフで示しているように、環境温度、冷却温度が変わっても、モデル値の予実差は最大で 3°C 台、平均では、1°C と精度が高いことが確認できた。

なお、本パルス充放電試験で SOC 変動は小さく、前述の電池エントロピー変化熱の影響は含まれていないため、モード走行などの実用状態での予実差は多少拡大すると考える。

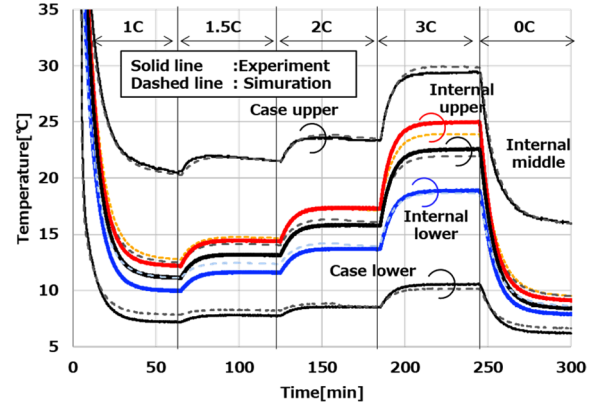
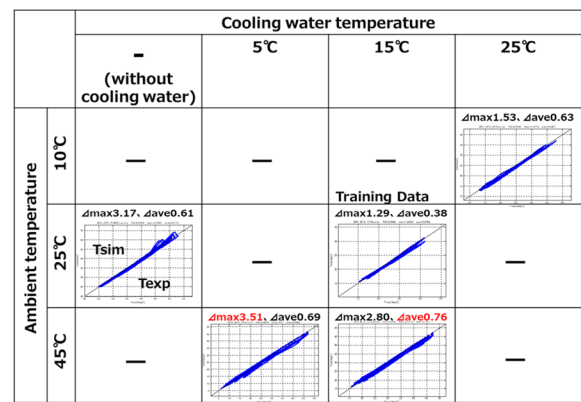


Fig. 16 Comparison Experiment with Simulation (Ambient Temp=45°C Cooling Water Temp=5°C)



- : Not measured

Fig. 17 Validation of LIB Temperature

6. おわりに

1) LIB セル内部のエントロピー変化や熱容量、熱抵抗を表面温度、表面熱流値、モデルを組み合わせ、内部の詳細設計情報を得ずとも、同定できる手法を構築し、電池内部温度モデル化技術を開発した。

2) 取得した内部熱特性を用いた 3 次元解析により、LIB セル内部の熱流れを解明し、角型セルの場合、ケースを伝わる熱流れが大きく影響していることを示した。

3) 3 次元解析で明らかにした主要熱流れを踏まえ縮退した 1D 熱等価回路にて、予実差検証を行い、車載用の大型セルで、車載を想定した温調環境においても、内部の温度挙動を高精度に推定できることを示した。

なお、本内容は、公益社団法人自動車技術会「2023 年春季大会学術講演予稿集」に掲載されたものである。

参考文献

- (1) 長島富雄ら：電動車バッテリーモジュール向け熱伝導シート部材の熱抵抗保証方法確立，自動車技術会 2021 年秋季大会学術講演会 (2021)
- (2) 松本貴郁ら：冷媒 2 次ループを用いたサーモサイフォン式電池冷却システムの開発，自動車技術会

2020年春季大会学術講演会 (2020)

- (3) 山添孝徳ら：電気自動車用電池パック冷却技術 相変化材料を用いた冷却方式，自動車技術会 2019 年秋季大会学術講演会 (2019)
- (4) 浮田哲嗣ら：空冷システムにおける電池温度変化予測手法の開発，自動車技術会 2017 年秋季大会学術講演会 (2017)
- (5) 加藤啓路；山本祐介；林 磊；福井正博：リチウムイオン蓄電池の熱特性解析モデルの構築と内部温度推定手法，第 54 回電池討論会 (2013)
- (6) 乾義尚ら：リチウムイオン蓄電池の熱特性解析モデルの構築と内部温度推定手法，電気学会論文誌電学論 B124 巻 8 号 (2004)
- (7) 齋藤喜康ら：開回路電圧の温度依存性評価によるリチウムイオン電池の反応エントロピー変化の評価，第 58 回電池討論会 (2017)
- (8) 川瀬誠ら：宇宙用リチウムイオン電池の吸発熱および構造変化の相関把握，第 58 回電池討論会 (2017)
- (9) 塚本修ら：リチウムイオン電池の充放電における熱的安定性評価，第 55 回電池討論会 (2014)
- (10) 山内悟留ら：リチウムイオン二次電池の熱量および熱容量測定，第 58 回電池討論会 (2017)

■著 者■



大路 潔



富岡 沙絵子



吉本 淳



安永 亨

庄司 明



藤田 弘輝

論文・解説

23

湿式ペーパー摩擦材の動摩擦係数推定モデルの開発

Development of a Model for Estimating the Coefficient of Kinetic Friction of Paper-Based Wet Clutch Facing

曾利 僚^{*1}

Tsukasa Sori

胡本 博史^{*2}

Hirofumi Ebisumoto

為貝 仁志^{*3}

Hitoshi Tamegai

吉末 知弘^{*4}

Tomohiro Yoshizue

要約

自動変速機（以下、AT）を搭載した車両のドライバビリティ向上のため、湿式多板クラッチ（以下、クラッチ）の高精度制御が求められている。実現には荷重・速度・摩擦面温度依存性をもつ、クラッチの摩擦係数（以下、 μ ）を正確に推定する必要がある。しかし、逐次発生する摩擦熱によって変化する摩擦面温度の考慮は困難である。そこで、クラッチの摩擦現象が流体摩擦と境界摩擦で構成されると考え、物理モデルを構築することで各種依存性を考慮可能な高精度 μ 推定を実現した。モデル構築のため、従来、外乱の影響により実測が困難であったAT実装環境下でのクラッチ摩擦特性を、AT内部の運動方程式に基づいた計測手法を構築することで明らかにした。次に、取得したクラッチ摩擦特性を基に、流体摩擦は3D-CFD、境界摩擦は分子吸着膜のせん断応力の実験式、摩擦面温度変化は熱等価回路でモデル化し、これらを連成することで物理モデルを構築した。モデル連成は、各モデルの共通因子である摩擦対の面間距離 h をタイムステップごとに計算し、計算結果を各モデルへ入力することで実現している。本稿ではこれら取り組みについて報告する。

Abstract

To improve the drivability of vehicles equipped with an automatic transmission (hereafter referred to AT), high-precision control of multiple wet clutch (hereafter referred to clutch) is required, which requires accurate estimation of friction coefficient, μ (hereafter referred to μ) of the clutch. However, it is difficult to estimate the μ of a clutch because it is dependent on load, speed, and friction surface temperature, and changes sequentially with each operating condition. For this reason, estimation needs to be done based on its mechanism. Therefore, considering that the friction phenomenon of the clutch consists of fluid friction and boundary friction, we realized a highly accurate μ estimation that can take various dependencies into account by constructing a physical model. Specifically, fluid friction is modeled by 3D-CFD, boundary friction is modeled by the experimental equation for shear stress in adsorbed films, and friction surface temperature change is modeled by a thermal equivalent circuit, and these are coupled with the model starting from the calculation of the interplane distance, h of the friction partner. Also, the equations of motion inside the AT enabled us to measure the clutch friction characteristics under the AT mounting environment where actual measurements had been difficult due to the influence of external disturbances, and we confirmed the validity of the model through comparison with the measured results. This paper reports on that effort.

Key words : Power transmission, Automatic transmission, Clutch system, Lubricating oil, Computational fluid dynamics, Modeling, Measurement, Friction, Powertrain oscillation, Tribology

1. はじめに

自動車のATに内蔵されるクラッチは、伝達するトル

クを調整する機能を持ち、その制御によって発進、変速及び駆動源からのショックを駆動輪への伝達抑制を実現している。特に、昨今はモーターを動力源とするEVや

*1~4 技術研究所

Technical Research Center

HEVが増加しており、モーター走行はエンジン走行以上に滑らかであることから、クラッチによるショック抑制機能も従来以上に高い性能が求められる。

これら機能の高性能化には、クラッチ伝達トルクの制御性向上が必要である。クラッチ伝達トルクの制御は、クラッチ押し付け力をAT内の油圧機構を用いてコントロールし、実現している。この押し付け力は所望の要求から決まるクラッチ摩擦力をクラッチの μ で除算することで導出しており、高精度な制御の実現には、正確なクラッチの μ を計算に使用する必要がある。

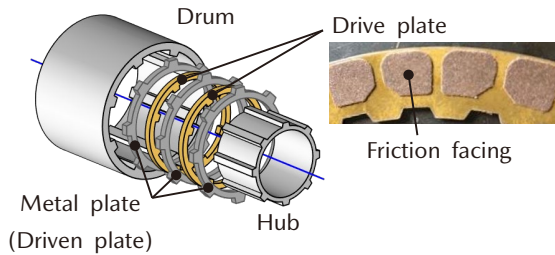


Fig. 1 Multiple Wet Clutch

クラッチは Fig. 1 に示すように、複数の湿式ペーパー摩擦材（以下、摩擦材）⁽¹⁾ を張り付けたドライブプレートと、金属製のプレート（以下、ドリブンプレート）を潤滑油中で摩擦させることで、トルクを伝達している。そのため、クラッチの μ は摩擦材の μ によって決まる。この摩擦材の μ は、特に荷重・滑り速度（以下、速度）・摩擦面温度によってその値が変化することが知られている^(1,2)。通常、クラッチの制御に用いる μ は、自動車規格（JASO-M349）の台形波試験の結果から導出する。台形波試験では設定荷重ごとの速度に対する μ 特性を計測するため、計測した μ の荷重・速度依存性は考慮できるが、温度依存性の考慮は困難である。試験結果の一例を Fig. 2 に示す。 μ の計測値である破線に着目すると、0~1秒では一点鎖線で示した速度の増加に伴い μ が変化する速度依存性と、1~2秒の速度の変化に依らない μ の変化が見られる。そのため、 μ の荷重・速度依存のみに着目したモデル化では、実特性と誤差が生じる。今回、この速度変化に依らない μ の変化は、摩擦面温度依存性に起因すると考える。これは、速度一定であってもスリップによって発生する摩擦熱により、摩擦面温度が変化するとの考えによる。

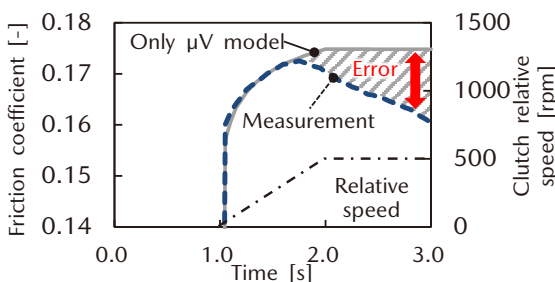


Fig. 2 Current State of μ Model

そこで本報告では、逐次変化する摩擦材の μ を高精度に推定可能とするモデルの構築を目的とし、 μ の摩擦面温度依存性を考慮可能な物理モデルを構築する。その取り組みとして、2章ではAT実装環境下での摩擦材の μ の荷重・速度・摩擦面温度依存性について、3章ではモデル構築について報告する。

2. AT 実装環境下における摩擦材の動摩擦特性

2.1 実験環境

AT実装環境下における、摩擦材の動摩擦特性計測に用いた実験環境の概略図を Fig. 3 に示す。計測には、マツダ製 FF6 速ATを使用し、実車代替ベンチへ搭載することで図に示す実験環境を構築する。計測対象としたクラッチの構成は、ドライブプレート3枚、ドリブンプレート4枚である。また、ドリブンプレートにはサーミスターを取り付け、得られた温度を摩擦面温度とする。

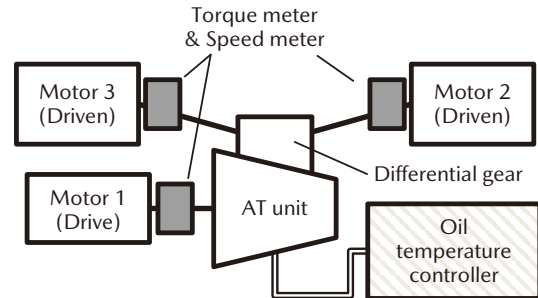


Fig. 3 Experiment Environment

2.2 AT実装環境下における動摩擦特性の計測手法開発

AT実装環境下における、動摩擦特性の荷重・速度・摩擦面温度依存性を明らかにするため、台形波試験を参考にす。実施する計測条件は、計測中荷重を一定とし、クラッチの速度は Fig. 4 に示す試験パターンとする。この計測条件は、摩擦面温度の計測を同時に行った場合、加速領域では速度変化による μ 変化が、保持領域では摩擦面温度の上昇による μ 変化が顕著となるため、複合的な μ の各種依存性の切り分けが可能となる。

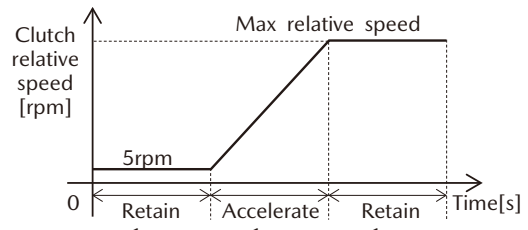


Fig. 4 Test Pattern

SAE No.2 試験機を始めとした一般的なクラッチ単体での摩擦特性試験機は、クラッチと計測用モーターが直結されており、直接的にクラッチ伝達トルク T_d と速度 V を計測することが可能である。しかし、Fig. 5 に示すよう

に、AT 実装環境下では、計測用モーターとクラッチとは、遊星歯車やトルクコンバーター、油圧ポンプ等のさまざまな機械要素（青枠部）を介して接続されている。そのため、摩擦特性計測時には、各要素の慣性トルクや定常トルクがロストトルクとなる。

AT の基本方程式は式(1)に示すとおり、AT 入出力トルク T_{in} , T_{out} とロストトルク L が 1 本の式で記述されるため、クラッチ伝達トルクとロストトルクの切り分けは困難であり、従来の計測ではロストトルクの原因となる機械要素を物理的に取り除く他なかった。

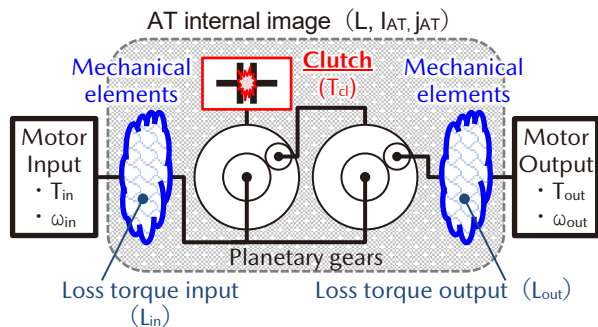


Fig. 5 Image Diagram of AT Internal Structure

$$I_{AT} \frac{d}{dt} \omega_{in} = T_{in} - L - j_{AT} T_{out} \quad (1)$$

ここで、 I_{AT} は AT 全体のイナーシャ [kgm²]、 ω_{in} は AT 入力回転数 [rad/s]、 j_{AT} は AT 全体のギア比 [-] である。

この機械要素を物理的に取り除いた計測では、クラッチの周辺環境が実際の AT 実装状態から変化してしまうため、機械要素を取り除くことなく、クラッチ摩擦特性計測を実現する手法が必要である。手法構築にあたり、僅かでもクラッチに速度が生じている場合、AT 内の運動方程式が式(2)、(3)の 2 本となることに着目する。この場合、AT 入出力トルク T_{in} , T_{out} ごとに AT 入出力とクラッチ間の定常トルク L_{in} , L_{out} 及び慣性トルクが足し算の関係となり、以下の手法にてロストトルクを補正できる。

$$T_{in} = I_{in} \frac{d}{dt} \omega_{in} + L_{in} + j_{in} T_{cl} \quad (2)$$

$$T_{out} = j_{out} T_{cl} - I_{out} \frac{d}{dt} \omega_{out} - L_{out} \quad (3)$$

ここで、 I_{in} , I_{out} は AT 入出力とクラッチ間のイナーシャ [kgm²]、 ω_{out} は AT 出力回転数 [rad/s]、 j_{in} と j_{out} は AT 入出力とクラッチとのギア比 [-]、 T_{cl} はクラッチ伝達トルク [Nm] である。

補正対象であるロストトルクのみを計測するため、クラッチ完全開放状態にて、摩擦特性計測と同パターンの計測を行う。この計測では、 T_{cl} をほぼ 0 と考えられるため、AT 内の機械要素を取り除くことなく、ロストトルク T'_{in} を取得可能となる。ロストトルク計測時の AT 入力側の運動方程式は式(2)より、式(4)となる。

$$T'_{in} = I_{in} \frac{d}{dt} \omega_{in} + L_{in} \quad (4)$$

また、本計測は AT の計測法として一般的ではない AT 入出力モーターの同時速度制御を用いることで、クラッチの開放・締結の状態によらず、計測モーターとクラッチの速度との関係を AT 内のギア比のみで決まるようにする。これにより、Fig. 4 の試験パターンをクラッチ伝達トルクに依らず実現できる。

式(2)と式(4)の差を取り、ギア比を考慮することで、AT 実装環境下における T_{cl} を取得できる。AT 出力側についても同様の考えを適用することで、式(5)を得る。

$$T_{cl} = \frac{1}{j_{in}} (T_{in} - T'_{in}) = \frac{1}{j_{out}} (T_{out} - T'_{out}) \quad (5)$$

また、 T_{cl} にクラッチの有効半径 r 、荷重 N 、ドライブプレート枚数 d 、ドライブプレート 1 枚当たりのスリップ面数: 2 を考慮することで、AT 実装環境下におけるクラッチの μ を導出できる。

$$\mu = \frac{T_{cl}}{2drN} \quad (6)$$

2.3 計測手法の妥当性確認

クラッチ締結状態での T_{in} 計測結果、ロストトルク T'_{in} の計測結果及び推定した AT 実装環境下におけるクラッチ伝達トルク T_{cl} の一例を Fig. 6 に示す。ロストトルク T'_{in} に着目すると、クラッチの角加速度が 0 である 0~1 秒、2~3 秒の区間では、ロストトルクの定常成分 L が現れている。また、定常トルクの大きさが区間ごとに異なっていることから、 L の速度依存も計測できている。

角加速度をもつ 1~2 秒の区間では、他区間よりも T'_{in} が大きくなっており、式(4)から慣性トルクが表れていることが分かる。

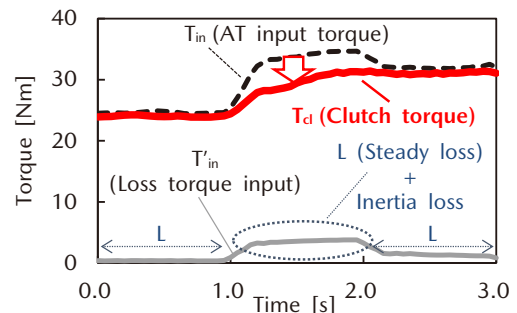


Fig. 6 AT Input Torque and Loss Torque

AT 入出力それぞれから推定したクラッチ伝達トルクを比較した結果の一例を Fig. 7 に示す。AT 入力側から補正した結果（実線）と AT 出力側から補正した結果（破線）の誤差は 3.3% 以下と十分小さく、対象とするクラッチ伝達トルクを、異なるトルク経路から計測、補正した結果が良く一致している。これは、式(5)を満たしており、本計測手法の妥当性を確認できた。

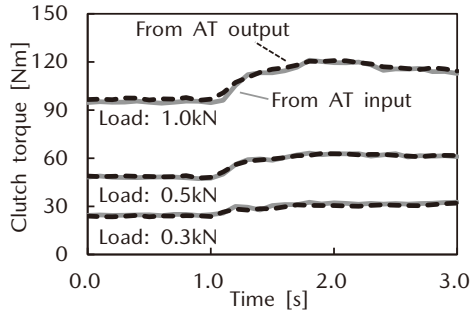


Fig. 7 Comparing Correction Values between AT Input and AT Output

2.4 AT 実装環境下における動摩擦特性の計測

AT 実装環境下における動摩擦特性を広い条件にて明らかにすることを目的とし、自動車に搭載された際の AT 実使用領域を参考に、計測条件の設定を行う。計測条件を Table 1 に示す。

計測したクラッチ伝達トルク T_{cl} から式(6)を用いて μ を導出し、その荷重・速度・摩擦面温度との関係について整理した (Fig. 8)。これにより、従来困難であった AT 実装環境下における、摩擦材の μ の荷重・速度・摩擦面温度依存性を明らかにした。

Table 1 Measurement Conditions

Load [kN]	: 0.1, 0.3, 0.5, 1.0, 1.4
Oil temperature [°C]	: 40, 80
Max relative speed [rpm]	: 100, 500

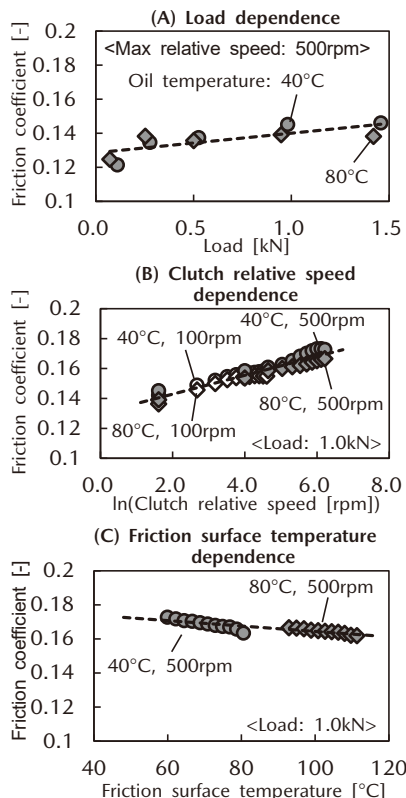


Fig. 8 Experimental Result of μ

3. μ 推定モデルの構築

3.1 μ 推定モデルの構築方針

2章にて得た AT 実装環境下での、 μ の荷重・速度・摩擦面温度依存性を考慮可能な μ 推定モデルの構築を行う。モデルの構築にあたり、摩擦材の摩擦現象について、その全体像を整理し、概念図を作成する。概念図を Fig. 9 に示す。

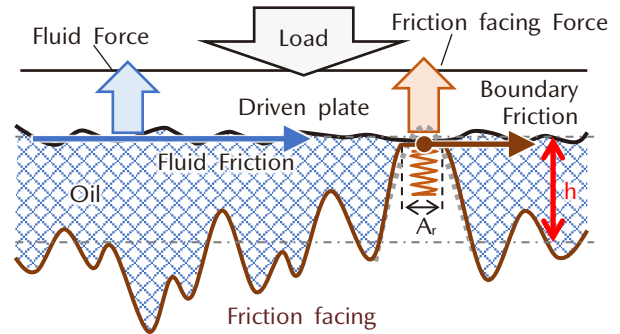


Fig. 9 Conceptual Diagram of Friction Facing Surface

作成した概念図より、摩擦力はスリップ面の潤滑油に起因する流体摩擦力と、摩擦材とドリブプレートとの接触に起因する境界摩擦力の足し合わせであると考えられる。流体摩擦のせん断応力 s_f 、境界摩擦のせん断応力 τ 、見かけの接触面積 A 、粗さ突起によるミクロスケールでの接触面積である真実接触面積 A_r を用いて、摩擦材の摩擦力 F は式(7)となる。

$$F = (A - A_r) s_f + A_r \tau \tag{7}$$

式(7)より、 μ 推定モデルの構築には流体摩擦力、境界摩擦力それぞれのモデルを構築し、適切に連成させる必要がある。そこで、流体・境界摩擦力共通の制御因子である摩擦対の面間距離 h を連成の起点とする。具体的には、押し付け荷重と、流体・摩擦材それぞれの反力との力のつり合いから、押し付け荷重に対応する h を導出する。導出した h を用いて、流体・境界摩擦力をそれぞれ計算することで、 μ の荷重依存性を考慮可能とする。

また、 μ の摩擦面温度依存性を考慮するため、摩擦熱によるスリップ面周辺の温度変化をモデル内にて再現する必要がある。そこで AT 実装環境下の熱等価回路を構築し、摩擦力とクラッチの速度から計算した発熱量を入力として、摩擦面温度の計算を行う。計算した摩擦面温度を h の計算と摩擦力の計算へフィードバック (F/B) させることで、摩擦状態により逐次変化する摩擦面の温度を考慮可能とする。

以上の考え方にて構築した摩擦力計算ブロックを、Fig. 10 に示す。図中の各構成要素の詳細な計算方法と、その統合方法について、以降で説明する。

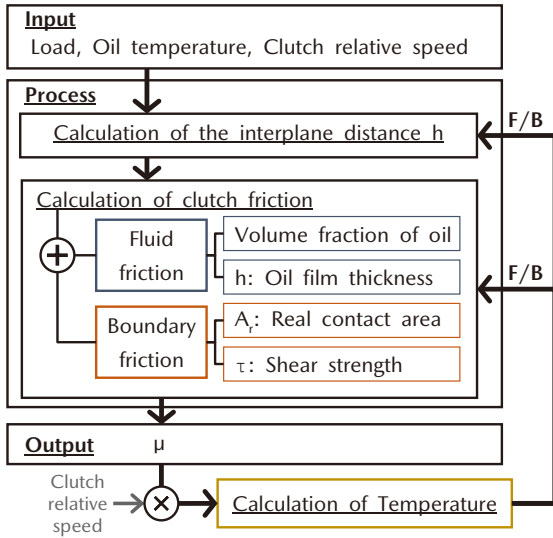


Fig. 10 Block Diagram of μ Model

ここで、 μ の速度、摩擦面温度依存性の再現にあたり、式(6)中の流体せん断応力 s_f が式(7)に示すニュートンの粘性法則に則ると仮定する。すると、 s_f は速度依存性を持ち、かつ粘度 η は温度依存性をもつ。また、見かけの接触面積 A が真実接触面積 A_r よりも十分に大きい⁽³⁾ ことから、摩擦材の摩擦現象における流体摩擦力の寄与率が大きく、 μ の速度、摩擦面温度依存性を説明できる可能性がある。そこで、寄与率が大きいと考えられる流体摩擦力について、摩擦材の形状を考慮可能な 3D-CFD のモデル構築と、解析を実施し、 μ の荷重・速度・摩擦面温度依存性を考慮可能な μ 推定モデルの構築を試みる。

$$s_f = \frac{\eta V}{h} \tag{8}$$

3.2 流体摩擦力モデルの構築

摩擦材の形状を考慮した流体摩擦力を計算可能とするため、3D-CFD モデルを構築する。モデル構築にあたり、面間距離 h の導出が必要である。そこで Fig. 9 より、スリップ面では摩擦対それぞれの表面粗さの間に油膜が形成されると考え、表面粗さの中央値から h を導出する。そこで、摩擦材とドリブンプレートの表面粗さと圧縮特性の計測を行う。表面粗さの計測結果を Fig. 11 に示す。計測結果より、クラッチへ印加する荷重が小さい場合は、摩擦材とドリブンプレートの表面粗さの中央値の和より、 h は $24.2 \mu\text{m}$ ($23.8 \mu\text{m} + 0.4 \mu\text{m}$) とし、荷重が高い場合は、表面粗さと圧縮特性から計算した値: $20.0 \mu\text{m}$ となる。

導出した h とドライブプレートの形状から構築した 3D-CFD モデルを Fig. 12 に示す。CFD ツールは Simcenter STAR-CCM+^{*} を用いる。Fig. 12 のカウンター図はシミュレーション領域における潤滑油の体積分率である。解析条件は、 h : $20 \mu\text{m}$ 、潤滑油温: 80°C 、クラッチ差回転: 500rpm である。なお、モデルの解法、メッシュ条件等については文献(4)に示す。

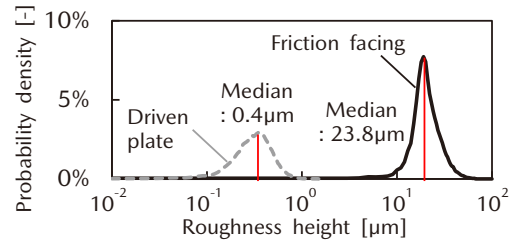


Fig. 11 Measurement Results of Surface Roughness

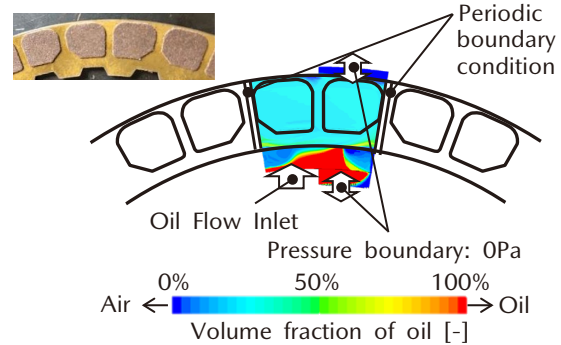


Fig. 12 CFD Model

今回モデル化対象としたクラッチは、2枚の摩擦材のペアが線対称に配置されており、そのペアが等間隔でリング状のプレートに貼り付けられたものである。そこで摩擦材のペア 1 対とその周辺のみをモデル化対象とし、周期境界条件を設定することで、ドライブプレート全体を表現する。また、クラッチ内周側の境界条件はクラッチ面間へ潤滑油を供給する流量境界と、大気開放を想定した 0Pa の圧力境界を並列に配置する。外周側は大気開放を想定した 0Pa の圧力境界を配置する。

構築したモデルの解析結果より、流体摩擦力は速度、温度依存性をもつこと、 h による変化から荷重依存性をもつことを確認した。解析結果を Fig. 13 に示す。Fig. 13 はクラッチ伝達トルクとの比較のため、流体摩擦力をトルクに変換して示す。

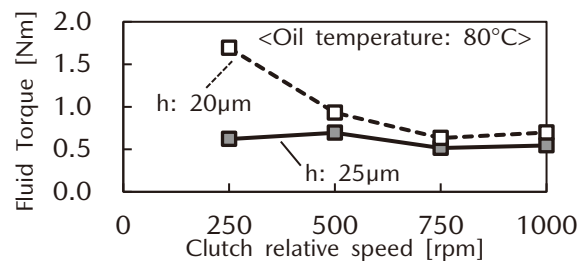


Fig. 13 Simulation Result of CFD Model

また、流体摩擦力にて μ の各種依存性を説明できるか検証するため、2章での計測結果における流体摩擦力の寄与率を導出し、Fig. 14 に示す。その結果、今回の計測範囲においては流体摩擦力の寄与率は最大でも 6% 程度と非常に小さく、 μ の各種依存性を流体摩擦力のみで説

明できない。

この結果より、摩擦材の摩擦現象では境界摩擦の寄与が支配的である。つまり、高精度な μ 推定の実現には、境界摩擦力の荷重・速度・摩擦面温度依存性のモデル構築が必要である。

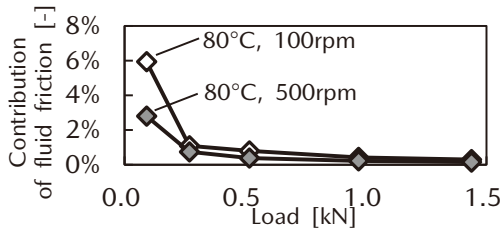


Fig. 14 Contribution of Fluid Friction Force to μ

3.3 真実接触面積の計測

境界摩擦モデルを構築するにあたり、式(7)の右辺第2項より、境界摩擦力は真実接触面積 A_r とせん断応力 τ との積で決まる。ここで、 A_r は荷重によって変化することが報告⁽³⁾されていることから、境界摩擦力が荷重依存性をもつことが考えられる。そこで、 A_r の荷重依存性について計測を行う。計測は、摩擦材をサファイアガラスに押し付け、接触面の画像をレーザー共焦点顕微鏡にて取得する。得られた画像データを二値化し、接触部の積算を行う。 A_r を見かけの面積 A で除した、真実接触面積割合の荷重依存性をFig. 15に、二値化画像の一例をFig. 16に示す。

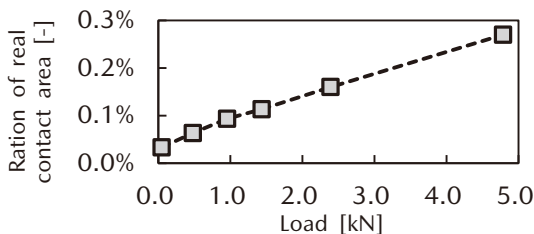


Fig. 15 Load Dependence of Real Contact Area Ratio

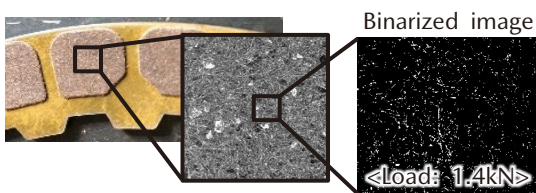


Fig. 16 Binarized Image of Friction Facing Contact Area

3.4 境界摩擦のせん断応力モデル構築

境界摩擦におけるせん断応力 τ は、母材同士での接触のみならず、潤滑油中に含まれる添加剤分子等が形成する境界潤滑膜を介した接触も考慮する必要がある。ここで、3.2節で示したように、摩擦材の摩擦現象では境界摩擦の寄与が支配的であるため、せん断応力 τ が荷重・速度・摩擦面温度依存性をもつと考える。そこで、 τ が

これら依存性をもつとしたBriscoeとEvansのLangmuir-Blodgett膜に対する実験式⁽⁵⁾を参考にモデル構築を行う。Briscoeらの実験式を式(9)~(11)に示す。

〔出典：文献(5)〕

$$\tau = \tau_0 + \alpha P \quad \text{at constant } V, T \quad (9)$$

$$\tau = \tau'_0 - \beta T \quad \text{at constant } V, P \quad (10)$$

$$\tau = \tau''_0 + \theta \ln(V) \quad \text{at constant } P, T \quad (11)$$

ここで、 P は荷重を見かけの面積で除した圧力、 T は摩擦面温度、 V は速度、 τ_0 、 τ' 、 τ''_0 、 α 、 β 、 θ は定数である。

Briscoeらの実験式は、ステアリン酸等によって形成される分子膜のせん断応力の実験結果より導出している。また、Briscoeらは、文献(5)中でEyringの絶対反応速度論を基に、式(12)に示す理論式を構築することで、式(9)~(11)を説明している。

$$\tau = \frac{kT}{\phi} \ln\left(\frac{V}{V_0}\right) + \frac{1}{\phi}(Q' + P\Omega) \quad (12)$$

ここで、 k はボルツマン定数、 ϕ 、 Ω は体積の次元をもつ定数、 V_0 は速度の次元をもつ定数、 Q' は活性化エネルギーである。

このBriscoeらの理論式より、せん断応力 τ の速度、温度依存性は、潤滑油中の添加剤が構成する分子膜の剥離と再吸着のバランスに起因すると考える。概念図をFig. 17に示す。

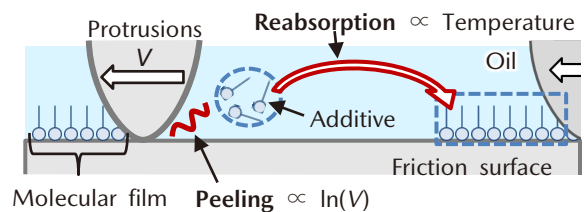


Fig. 17 Conceptual Diagram of Peeling and Adsorption Molecular Film

Fig. 8に示すAT実装環境下での μ の荷重・速度・摩擦面温度の依存傾向は、Briscoeらの実験式(式(9)~(11))と一致していることから、境界摩擦のせん断応力のモデル式は、それらを集約し、式(13)の形とする。式中の a 、 b 、 c は荷重依存性をもつ。

$$\tau = a_{(P)} + b_{(P)} \ln(V) - c_{(P)} T \quad (13)$$

式(13)は厳密にはオリジナルのBriscoeらの実験式と異なっている。具体的には、速度と摩擦面温度の関係において、式(12)では速度と温度とが積の関係であるのに対して、式(13)では差の関係となっている。これは、今回計測したクラッチの速度が、Briscoeらの実験における速度に対して桁違いに大きいため、式(12)の右辺第1項にある自然対数の効き方が逆方向となり、そのままの形では用いることができなかったためである。これにつ

いては、更に物理的意味合いに踏み込んだ、より適切なモデル適用法の検討が今後の研究課題と考える。

3.5 摩擦面温度推定モデルの構築と統合計算への反映

μ の温度依存性を考慮するには、スリップにより逐次変化する摩擦面温度を推定する必要がある。そこで、Fig. 1 のクラッチの構造から、AT 実装環境下の熱等価回路モデルを構築する。モデル構築には、マルチドメイン 1D シミュレーションツールである ESI ITI 社の SimulationX を用いる。Fig. 18 にモデルの構成を、Table 2 に計算条件を示す。

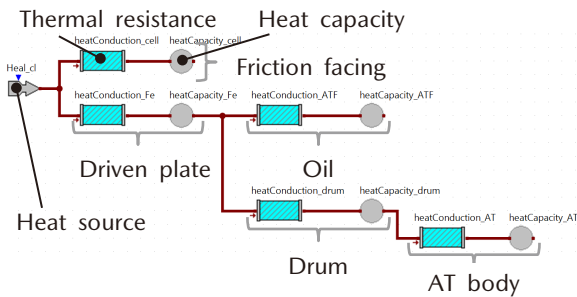


Fig. 18 Clutch Feat Flow Model

Table 2 Analysis Condition

	Thermal resistance [K/W]	Heat capacity [J/K]
Friction facing	8.6	80.1
Driven plate	0.67	0.7
Oil	24.2	0.9
Drum	166.7	1.0
AT body	166.7	9.9

計算の結果、Fig. 19 に示のように、構築したモデルにてスリップにより逐次変化する摩擦面温度を再現することができている。

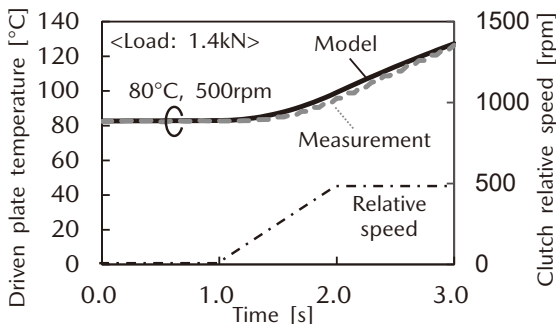


Fig. 19 Measurement and Simulation Result of Driven Plate Temperature

Fig. 10 に示すように、本モデルから得られる摩擦面温度を摩擦力計算、荷重分担計算へフィードバックする統合計算モデルを構築することで、 μ の摩擦面温度依存性を考慮可能とする。

4. 構築した μ 推定モデルの妥当性検証

3 章にて構築した μ 推定モデルの妥当性を検証するため、計測結果との比較を行う。計算条件は計測条件 (Table 1) と同一とする。比較の結果、Fig. 20 に示すとおり、構築したモデルが逐次変化する μ 特性をよく再現している。特に、本モデルは、従来困難であった μ の摩擦面温度依存性を考慮可能することで、2~3 秒の区間における μ の低下を再現できている。また、2 秒付近では、速度依存性と摩擦面温度依存性の双方を考慮することで、計測結果をよく再現することができている。

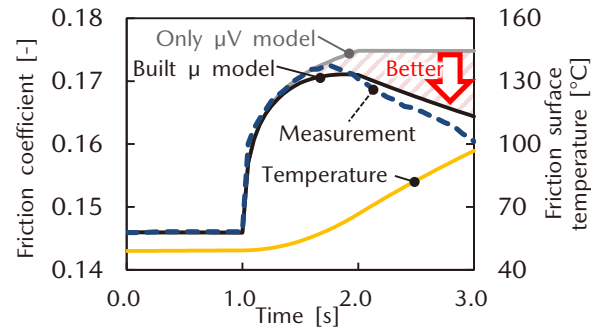


Fig. 20 Comparison of Model and Measurement Results

次に、Table 1 に示す広い計測条件全体でのモデル妥当性検証を行う。検証は、当初の目的であったクラッチの制御性向上への効果に着目するため、クラッチ伝達トルクにて実施する。クラッチ伝達トルクの予実差の最大値を計算条件ごとに取得し、横軸に荷重を取り整理した結果を Fig. 21 に示す。予実差は全域で $\pm 4\text{Nm}$ 以内に収まっており、モデルが精度よく実測値を再現している。これは駆動源からのショックをドライバーに感じさせない制御の実現に対して十分な精度である。

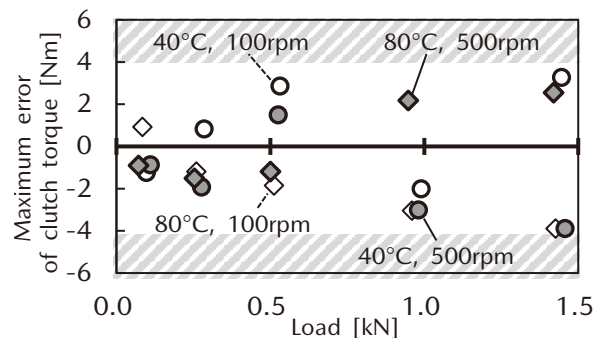


Fig. 21 Model Validation Results

5. 結論

本報告では、AT 実装環境下における摩擦材の高精度 μ 推定を目的とし、実験から μ の荷重・速度・摩擦面温度依存性を明らかにし、 μ の温度依存性を考慮可能な物理

モデルを構築した。その成果と得られた知見は以下のとおりである。

1. AT実装環境下において、周囲の部品の影響を受けることなくクラッチ摩擦特性のみを計測する技術を構築した。
2. 荷重・速度・摩擦面温度依存性をもつ摩擦材の μ 特性について、その摩擦現象は流体摩擦と境界摩擦で構成されると考え、それぞれの各依存性のモデル化と、共通の制御因子である面間距離 h の計算によるモデル連成、及び逐次発生する摩擦熱の各モデル計算への反映によってモデルを構築した。
3. 構築したモデルにて、ATの実使用領域を参考に設定した広い範囲での高精度な μ 推定を実現した。

6. 謝辞

今回の成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の助成事業（JPNP12004）の結果得られたものです。この場を借りて、御礼を申し上げます。

参考文献

- (1) 三好：湿式クラッチ，トライボロジスト，Vol.47，No.9，pp.699-704（2002）
- (2) 釘宮：ATF添加剤および摩擦材構成成分の μ - v 特性に及ぼす影響，トライボロジスト，Vol.45，No.5，pp.387-395（2000）
- (3) 江口ほか：湿式ペーパー摩擦材の真実接触部解析（第1報），トライボロジスト，Vol.57，No.11，pp.768-776（2012）
- (4) 胡本ほか：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，自動車技術会論文集，Vol.52，No.3，pp.568-573（2021）
- (5) B. J. Briscoe et al.: The shear properties of Langmuir-Blodgett layers, Proc. R. Soc. Lond. A380, pp.389-407（1982）

*©2023 Siemens

Simcenter STAR-CCM+ 製品は Siemens の登録商標です。

■著者■



曾利 僚



胡本 博史



為貝 仁志



吉末 知弘

論文・解説

24

塗装部の耐食性迅速評価法を活用した品質異常予知技術

Quality Abnormality Prediction Technology Utilizing Accelerated Evaluation Techniques for Corrosion Resistance of Painted Parts

江崎 達哉^{*1} 浅田 照朗^{*2} 佐々木 将展^{*3}
Tatsuya Ezaki Teruaki Asada Katsunobu Sasaki
足立 崇勝^{*4} 重永 勉^{*5} 高見 明秀^{*6}
Takamasa Adachi Tsutomu Shigenaga Akihide Takami

要約

自動車の防錆品質は、お客様の安全・安心に、直結し非常に重要である。自動車には世界のさまざまな過酷な環境でも腐食しないように、塗装などの防錆対策が施される。これまで著者らは、塗装部の耐食性を迅速に定量評価する技術を開発した。この技術の活用により、防錆品質を閾値によって定量的に管理できることに加えて、耐食性の定量評価により得られる電流と電圧からなるプロファイルの解析に機械学習を適用することで、品質異常の予兆を検知することが可能となった。

Abstract

The rust prevention quality in vehicles is extremely important for the safety and security of customers. Rust preventive measures such as painting, etc. are taken to prevent corrosion even in various harsh environments around the world. We have developed the accelerated evaluation techniques to assess corrosion resistance quantitatively. Utilization of this developed technology enables us to detect signs of quality abnormalities by using machine learning for analysis of the profiles that consist of current and voltage obtained by corrosion resistance evaluation, in addition to being able to quantitatively control the rust prevention quality with a threshold value.

Key words : Materials, Paint, Test/Evaluation, Corrosion resistance, Coating

1. はじめに

2050年カーボンニュートラルの実現に向けて、自動車業界では電動化とそれに伴う軽量化が加速している。特に、市場実績のない車両構造や部品の適用、マルチマテリアル化の拡大が著しい。更に、ライフサイクルアセスメント(LCA)削減のために製造設備や製造方法の変更も急速に進んでおり、商品開発プロセスの変革による開発の効率化がより一層求められている。安全・安心を担保する基本品質と社会生活をいきいきと送るための魅力品質を向上させることが、人とクルマの共生には必須である。そのため、自動車には世界のさまざまな過酷な環境でも腐食しないように、塗装に代表される防錆対策が施される。従来の防錆評価は、市場の代表的な腐食環境に基づき試験槽内で腐食を促進することで、市場15年相当分の耐久性を2~4か月程度かけて試験するが(以降、実腐食試験と記載)、材料、工法、生産条件などに影

響する因子が多岐にわたり防錆品質を造り込むためには複数回の試験が必要で、ひとつの技術を開発するために少なくとも数年を要するといった課題がある。自動車の防錆技術の更なる発展、カーボンニュートラル対応やLCA削減をタイムリーに実現するためには、耐食性(防錆機能)を迅速に定量的に評価する技術が必須であり、それを活用した効率的な品質管理も重要である。

これまでに著者らは、塗装部の腐食は、水やイオン物質などの腐食因子が防錆塗膜を透過して素地金属に到達することで始まり、素地金属の溶出に伴い発生した電子を消費する電気化学反応で腐食が進展するというメカニズムから、塗装部の防錆機能を①腐食抑制期間と②腐食進展速度の2つで整理し(Fig. 1)、その双方を電気化学的な手法で数分~数時間程度と迅速に定量評価する技術を実用化した^(1~5)。本研究では、防錆機能の迅速評価法の中で、①腐食抑制期間を評価した際の分極プロファイル(電流/電圧プロファイル)について、電着塗膜の故

*1~6 技術研究所
Technical Research Center

障モードとの関連性を明らかにする。更には、塗膜の品質異常を予測することをねらい、データ解析に機械学習を活用した技術の開発にも言及した。

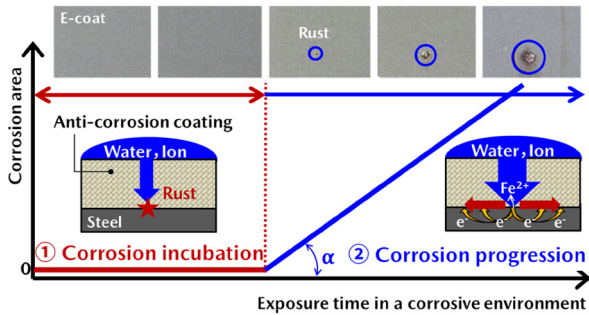


Fig. 1 Functions of Anti-corrosion Coating

2. 電着塗膜の故障モード

自動車用の電着塗料は、主にエポキシ樹脂により構成される。膜厚が厚く、膜質がよいものほど、腐食因子である水やイオン物質の遮断性が高く、錆の発生が遅いと考えられる。このことから電着塗膜の故障モードは、膜厚異常と膜質異常に大別できると考えられた。膜厚異常を細分化すると、素材自体（鋼板）の表面凹凸により凸部で有効膜厚が減少する場合、塗膜中のコンタミ（溶接スパッタや鉄粉など）で有効膜厚が減少する場合、塗料や塗装条件が悪くガスピンホールが発生して有効膜厚が減少する、の3つに分類できる。膜質異常の原因は、塗料中に含まれる硬化触媒の不足や炉内での加熱不足により樹脂の架橋密度が低下する、市場において紫外線の影響によって電着樹脂の架橋が切れる⁽⁶⁾ことが考えられた (Fig. 2)。

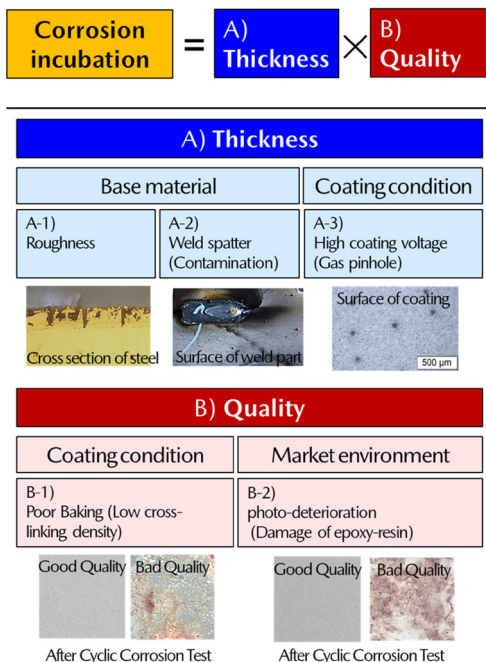


Fig. 2 Failure Mode of Anti-corrosion Coating

3. 実験手法と機械学習手法

3.1 腐食抑制期間（分極プロファイル）の評価・解析方法

塗装面上に電解質溶液を保持した状態で、塗装金属材料の鋼板と塗膜表面との間に時間に対して徐々に増大する電圧を印加し、水とイオン物質を強制的に塗膜に透過させる。あらかじめ設定した電流値に到達した時の電圧値に基づいて耐食性を評価する。この電圧値と従来の実腐食試験で塗装金属材料に錆が出始めるまでの期間との関係をあらかじめ求めておくことで、塗装金属材料の絶縁電圧から腐食抑制期間を求めることができる^(1~5)。本研究では、第2章で示したあらかじめ故障モードの分かっている電着塗装試験片を使用した (Fig. 2)。また、電解質溶液として 5wt% 塩水を用い、1V/s の速度で昇圧を行った。その際に得られた分極プロファイル（電流/電圧プロファイル）を解析した (Fig. 3)。

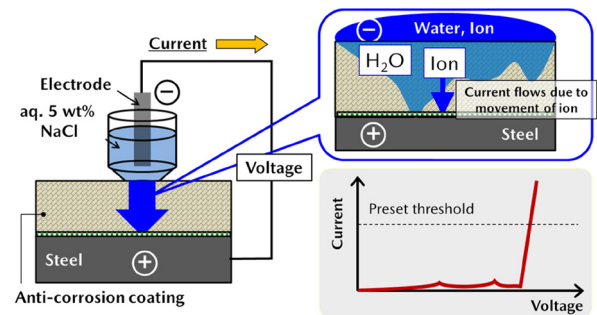


Fig. 3 Evaluation Method of Corrosion Incubation

3.2 分極プロファイルの機械学習

正常塗膜、及び代表的な故障モードの試験片を用いた試験から得られた分極プロファイル（電流/電圧プロファイル）を入力として、正常、異常（膜厚異常、膜質異常）の分類を出力とした多クラス分類モデルをランダムフォレスト分類器⁽⁷⁾で構築した。教師データは、分極プロファイルとその判定ラベルをセットとした合計 62 仕様の試験結果を使用した。その内訳は、正常塗膜 19 仕様、異常塗膜 43 仕様（膜厚異常 19 仕様、膜質異常 24 仕様）である。

4. 実験結果と考察

4.1 電着塗膜の代表的な故障モードと分極測定における通電モデル

電着塗膜の代表的な故障モードと腐食抑制期間評価における通電モデルを示す (Fig. 4)。正常塗膜では、塗膜内へ水やイオン物質が浸透し難く、塗膜内の最も脆弱な部位で高い電圧で絶縁が破壊され通電すると考える (Fig. 4 上段)。従って、分極プロファイルは電圧が上昇しても初期には電流が流れず、数百Vの高い電圧で絶縁が破壊され急激に電流が増加する傾向を示すことが分かっている。

次に、膜厚異常の代表例として、塗膜内に溶接スパッタや鉄粉などのコンタミが存在する場合について考える。溶接スパッタや鉄粉が存在する部位は局部的に塗膜の有効膜厚が減る。水やイオン物質は正常塗膜と同様に塗膜内へ浸透し難いが、水とイオン物質がスパッタや鉄粉に接触すると低い電圧で通電が起こる (Fig. 4 中段)。その際に閾値として設定した電流値以下の通電が起こる場合、水の電気分解で発生したガスが通電起点を一時閉塞し、分極プロファイルに一つの凸形状が形成される。大きさの異なる複数のスパッタや鉄粉が塗膜中に存在すれば、分極プロファイルは幾つもの凸形状をもつことが分かっている。

最後に、膜質異常の代表例として、加熱不足で樹脂同士が十分に架橋していない場合について考える。この場合には塗膜全体に水とイオン物質が容易に浸透して素地金属に到達するため、膜厚が同等であれば、正常塗膜と比較すると低い電圧で塗膜内全体に微弱な電流が流れ始めると考えられる (Fig. 4 下段)。このことから、膜質の悪い塗膜の分極プロファイルは、正常塗膜と同様に初期には電流が流れない状態が続く、正常塗膜よりも低い電圧で通電し、その立ち上がりの傾きは緩やかになる。

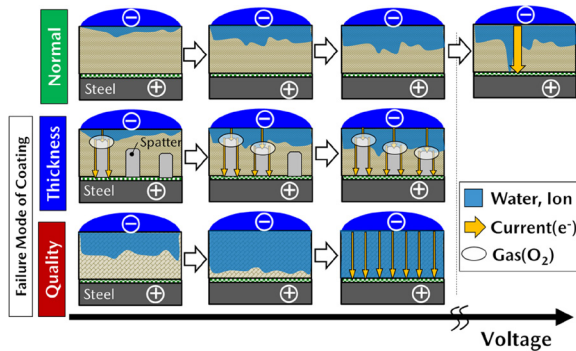


Fig. 4 The Energization Model in Evaluation of Typical Failure Mode and Anti-corrosion Coating

4.2 電着塗膜の膜厚と分極プロファイル

溶接部近傍において鋼板表面に存在するスパッタの個数が異なる試験片に電着塗装を行った。何れの試験片も電着塗装時の加熱温度は 423K、加熱時間を 1200s とした。塗装前の溶接ビード周辺のスパッタの存在状態、及び塗装後の分極測定の結果を示す (Fig. 5)。写真は代表的な部位について示したものである。図中のスパッタ個数はデジタルマイクロスコープ ((株)キーエンス製, VHX-5000) を用いて 10 倍で 5 視野を観察した結果を基に試算した。分極測定は、電解質溶液 (5wt% 塩水) を用い、電解質溶液と電着塗膜の接触面積は $1 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ とした。スパッタの個数が多い試験片ほど分極プロファイルに凸形状が多いことが分かる。一方、鋼板表面にスパッタの存在しない試験片では凸形状は認められなかった。凸形状が発生する理由は 4.1 節の通電モデルで示し

たように、溶接スパッタが存在する部位で局部的に塗膜の有効膜厚が減ることに起因すると考えられた。塗膜内への水やイオン物質が浸透し、スパッタや鉄粉に接触すると通電が起こる。その際に閾値として設定した電流値以下の通電が起こる場合には、水の電気分解で発生したガスが通電起点を一時閉塞し、分極プロファイルに一つの凸形状が形成される。また、この凸形状の数と単位面積当たりのスパッタ数は良い相関を示した (Fig. 6)。ガスピンホールが存在する試験片においても同様の傾向が認められた。以上のことから、電着塗装面における局所的な膜厚異常の検知には、分極プロファイルの凸形状の数を分析することが効果的であると考えられた。

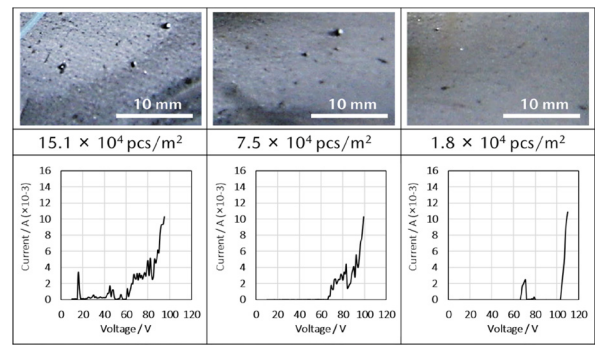


Fig. 5 Polarization Profile of Test Pieces with Different Spatter Amounts, Baking Temperature: 423K, Baking time: 1200s, Thickness: $30 \times 10^{-6} \text{ m}$

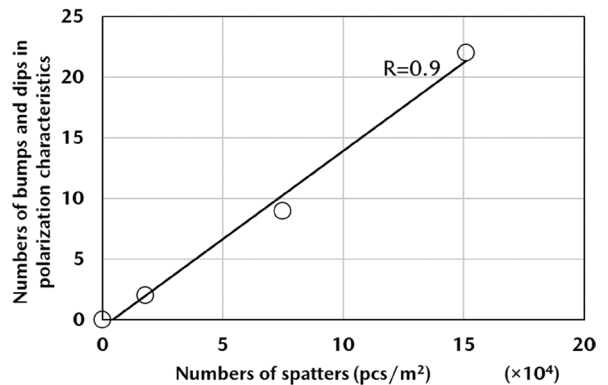


Fig. 6 Relationship Between the Number of Spatters and the Number of the Convex Shapes in the Polarization Profile, Baking Temperature: 423K, Baking time: 1200s, Thickness: $30 \times 10^{-6} \text{ m}$

4.3 電着塗膜の膜質と分極プロファイル

加熱によって樹脂の架橋反応を進行させる自動車用の電着塗料において、樹脂の熱劣化が起こらない加熱温度範囲 (408~463K 程度) であれば、樹脂の架橋密度は加熱温度が高く、加熱時間が長いほど高くなる。樹脂の架橋レベルの代用評価法として、一般にゲル分率 (%) が用いられる。ゲル分率 (%) は、未硬化の樹脂分をアセトンで還流して溶出させ、その際の塗膜の重量変化から未硬化の樹脂量を試算することで算出できる。今回、電

着塗装時の加熱温度を 408~433K, 加熱時間を 900~1200s とし, ゲル分率が 78.4~95.3% の試験片を作製して分極プロファイルの解析を行った。ゲル分率が 90% 未満は本電着塗料の適正使用範囲から外れる領域である。分極測定の結果, ゲル分率が低くなるに従い, 通電開始電圧が低下した (Fig. 7)。この通電時の立ち上がりの傾きを, 視覚的にわかり易くするために, 測定時の最大電流値と最大電圧値でまとめた (Fig. 8)。ゲル分率が 90% 以上の正常な塗膜の分極プロファイルは, 初期には電流が流れず, 高い電圧で急激な立ち上がりを示した。

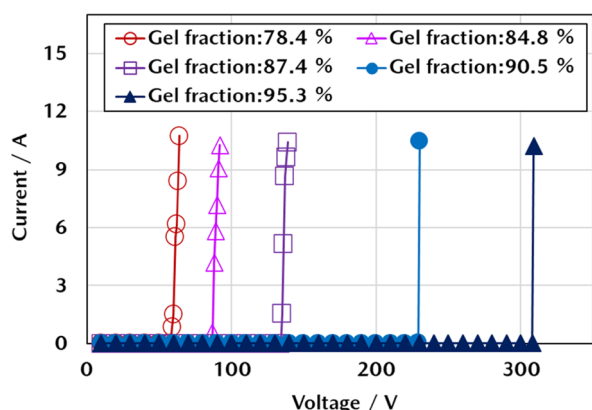


Fig. 7 Polarization Profile of Test Pieces with Varying Gel Fractions, Baking Temperature: 408-433K, Baking Time: 900-1200s, Thickness: 10×10^{-6} m

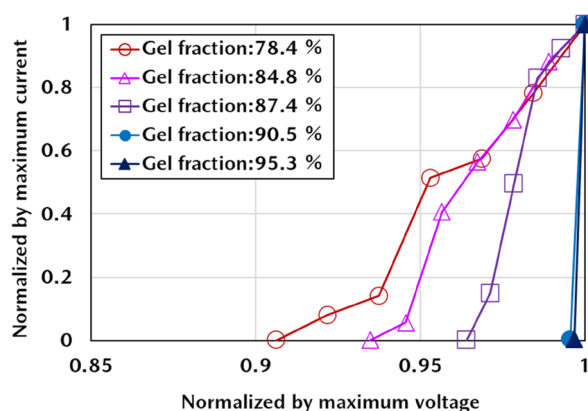


Fig. 8 Polarization Profile Normalized by Maximum Current Value and Maximum Voltage Value, Baking Temperature: 408-433K, Baking Time: 900-1200s, Thickness: 10×10^{-6} m

これは前述したように, 正常塗膜では, 塗膜内へ水やイオン物質が浸透し難く, 高い電圧に到達した際に最も脆弱な部位で急激に絶縁破壊 (通電) が起こるためであると考えられる。一方, ゲル分率が 90% 未満と低く膜質が悪い塗膜では, 正常塗膜と比較すると低い電圧で通電が開始し, 緩やかな傾きの立ち上がりを示した。塗膜全体に水とイオン物質が浸透して素地金属に到達し, 微弱な電流が塗膜全体を介して流れたためであると考えられる。紫外線を照射して劣化させた塗膜においても同様の

傾向が認められた。これらのことから, 電着塗膜の分極プロファイルの解析から, 膜質変化をとらえるためには, 通電開始の電圧値に加え, 分極プロファイルの立ち上がりの傾きを分析することが重要であると考えられた。

4.4 分極プロファイル解析に対する機械学習の適用

通電モデルを基に解析した分極プロファイルとその特徴から, 電着塗膜の故障モードの判定に機械学習を適用した。機械学習手法はランダムフォレスト分類を使用した。構築した分類モデルの精度は, 一点除外交差により評価した。

まず, 正常塗膜・異常塗膜の 2 クラス分類のモデルを構築し, 分類精度を確認した結果, 100% であった。すなわち, 正解ラベルが正常塗膜である 19 仕様は全て正常塗膜と判定され, 正解ラベルが異常塗膜である 43 仕様は全て異常塗膜と判定された。次に, 異常塗膜の中で異常原因を細分化し, 塗膜の故障モード別 (膜厚異常, 膜質異常) に分類し, 3 クラス分類のモデルを構築した。分類精度は, 正解ラベルが正常塗膜の仕様が 100%, 膜厚異常の仕様が 100%, 膜質異常の仕様が 95% であった。すなわち, 正解ラベルが膜質異常である 24 仕様のうち, 1 仕様のみ膜厚異常と判定された (Fig. 9)。

Failure mode	Classification accuracy	Example of Cyclic Corrosion Test results
Normal	100 %	
Abnormal	100 %	Abnormal of thickness
		Abnormal of quality

Fig. 9 Failure Mode of Coating, Classification Accuracy in Machine Learning, Example of Cyclic Corrosion Test (CCT) Results

図の右列 (Fig. 9) に各故障モードの試験片における実腐食試験後の腐食状態の一例を示した。正常塗膜に錆の発生はないが, 同条件で実腐食試験を行った膜厚異常の塗膜には局所的な腐食が認められた。膜厚が薄い部分が局所的に存在し, その部分が早期に錆びたと考える。膜質異常の塗膜では全面に腐食が認められた。膜質が悪い塗膜では, 塗膜全体に水とイオン物質が浸透して素地金属に早期に到達し, 全面が腐食したものと考えられ, これらの現象は分極測定における通電モデルと合致する。以上のことから, 分極プロファイル解析に機械学習を適用することで, 専門家が都度データを詳細に解析することなく, 正常から異常な状態へ変化していく早期の段階で問題を発見できると考えられた。

4.5 耐食性迅速評価法の品質管理での活用

防錆品質管理システムの例を示す (Fig. 10)。工場ごと

に本評価装置を配備し、製品検査工程で耐食性評価を行い分極プロファイルデータを得る。この分極プロファイルデータをデータサーバーに集約して一元管理するとともに、事前に機械学習により構築した分類モデルを用いて分極プロファイルの解析を行うことで、一般的な閾値管理に加え、品質が正常から異常な状態へ変化していく早期の段階で、問題発生の有無を発見できる。解析の結果、異常の予兆を検出した場合には工場に品質異常アラートを送信し、工程を点検することで品質異常を未然に防ぐことが可能となる。このように、品質管理に未然防止の仕組みを導入することができると考えられた。

本技術はエポキシを主とする自動車の電着塗装以外に、幅広い塗装系にも適用可能であることから、自動車業界のみならず、塗装鋼板を取り扱う他業界への展開も期待できる。

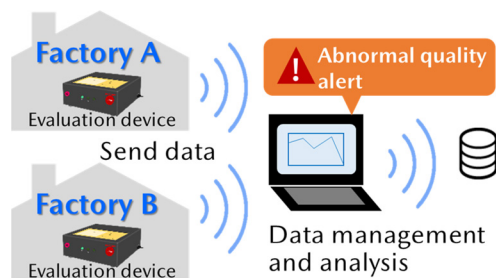


Fig. 10 System to Control the Rust Prevention Quality

5. まとめ

(1) 防錆定量法の分極プロファイルを分析することで、電着塗膜の異常原因を推察できることを明らかにした。

(2) 正常な電着塗膜の場合には、塗膜内へ水やイオン物質が浸透し難く、腐食抑制期間の分極測定において、数百Vの高い電圧に到達した際に最も脆弱な部位で絶縁が破壊され急激な通電が生じることが分かった。

(3) ゲル分率が90%未満と低く膜質に異常のある塗膜では、塗膜全体に容易に水とイオン物質が浸透して素地金属に到達するためであると考えられるが、正常塗膜と比較して低い電圧で通電が開始し、緩やかな傾きの立ち上がりを示すことが分かった。

(4) スパッタなどのコンタミにより局所的な有効膜厚低下が生じている塗膜は、分極プロファイルに複数の凸形状を生じることが分かった。また、凸形状の数と単位面積当たりのスパッタ数は高い相関 ($R=0.9$) があることを見出した。分極プロファイルに凸形状が生じる理由は、塗膜内へ浸透した水やイオン物質がスパッタに接触すると通電が開始し、この時の電流値が閾値として設定した値以下であれば、水の電気分解で発生するガスが通電起点を一時閉塞して電流が流れなくなることに起因すると推定した。

(5) 分極プロファイルの特徴を基に機械学習モデルを構築し、電着塗膜の故障モードを自動判定する技術を開発した。

(6) 正常塗膜、及び代表的な故障モードの試験片を用いた試験から得られた分極プロファイルから、まず、正常・異常の2クラス分類を実施した。その結果、分類精度は100%であることがわかった。

(7) 異常塗膜の中で原因を更に分類すると膜厚異常の分類精度は100%、膜質異常は95%であった。分極プロファイル解析に機械学習を適用することで、専門家が都度データを詳細に解析することなく、品質異常を予知することが可能となった。

本技術を活用した防錆品質管理システムにより、品質管理に未然防止の仕組みを導入することが期待される。

参考文献

- (1) 浅田照朗ほか：モデルベース研究による防錆定量評価法を活用した品質異常予知技術，自動車技術会春季大会 学術講演会講演予稿集，ROMBUNNO.284 (2022)
- (2) 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)
- (3) 浅田照朗ほか：高電圧印加法を用いた電着塗装鋼板の耐食性評価，材料と環境，Vol.68，No.4，pp.92-97 (2019)
- (4) 浅田照朗ほか：塗装部の新規耐食性短期評価法の開発，及び防錆技術開発・品質管理への活用，自動車技術会春季大会 学術講演会講演予稿集，pp.1148-1151 (2017)
- (5) 浅田照朗ほか：塗装部の耐食性評価法とその活用事例，第63回材料と環境討論会 講演集，pp.175-176 (2016)
- (6) 矢部政実ほか：各種耐光性試験による塗膜の劣化メカニズムの解析，塗料の研究，No.146，pp.8-15 (2006)
- (7) 川久保秀子：重みつきランダムサンプリングによるランダムフォレスト法，情報処理学会研究報告 数理モデル化と問題解決 (MPS)，Vol.2011-MPS-86 No.33，pp.1-2 (2011)

■著者■



江崎 達哉



浅田 照朗



佐々木 将展



足立 崇勝



重永 勉



高見 明秀

論文・解説

25

材料モデルベースリサーチ (MBR) による多孔質材料の 振動制御モデル技術の開発

Development of Vibration Control Model Technology for Porous Materials by Material Model Based Research (MBR)

山川 啓介^{*1}
Keisuke Yamakawa

桂 大詞^{*2}
Daiji Katsura

山本 崇史^{*3}
Takashi Yamamoto

井上 実^{*4}
Minoru Inoue

畠山 望^{*5}
Nozomu Hatakeyama

三浦 隆治^{*6}
Ryuji Miura

岡島 淳之介^{*7}
Junnosuke Okajima

稲葉 賢二^{*8}
Kenji Inaba

石澤 由紀江^{*9}
Yukie Ishizawa

遊川 秀幸^{*10}
Hideyuki Yukawa

伊東 博之^{*11}
Hiroyuki Ito

石元 孝佳^{*12}
Takayoshi Ishimoto

大下 浄治^{*13}
Joji Ohshita

要約

マツダでは、クルマの価値を向上させる革新的な材料を効率的に開発する材料モデルベースリサーチ (MBR) の考え方にに基づき、多機能同時制御モデル技術の開発を進めている。これまでに、車室内の静粛性や快適性に寄与する多孔質材料に対して、限られた質量と容積の中でねらいの吸音機能、断熱機能を実現するために、その微視構造を効率的に設計する技術を開発した。今回、これまで構築した技術を応用して、新たに防振機能設計のための基礎的な微視構造モデルを構築し、主要因子である弾性の発現メカニズムを検討したので報告する。

Abstract

Mazda has been developing multi-functional simultaneous control model technology based on the concept of material model-based research (MBR), which efficiently develops innovative materials that lead to enhance vehicle value. Up to this point, for porous materials that contribute to quietness and comfort in the cabin, we have developed a technology to efficiently design their micro-structures in order to achieve the targeted sound absorption and heat insulation functions within a limited mass and volume. In this paper, we report on the development of a new fundamental microstructure model for controlling vibration isolation function by applying the technology we have developed so far, and on the mechanism of elasticity, the main factor in the design of vibration isolation functions.

Key words : Vibration isolation, Quietness, Porous material, CAE simulation, Homogenization method

1. はじめに

2050年カーボンニュートラルに向けて、マツダでは更なるエネルギー効率向上や軽量化のための技術開発を加速している。その一方で、自動車の室内においては、お客様にとって安全・安心かつ快適な移動環境をサポートする静粛性、空調性能、乗り心地などの快適性も同時

に高次元で成り立たせなければならない。限られた質量・空間・コストの中でこの要求を満たすためには、防音、断熱、防振などの複数機能を高いレベルで統合した部品を設計・製造する必要がある。

このような中マツダは、平成30年度地方大学・地域産業創生交付金事業に採択された「ひろしまものづくりデジタルイノベーション創出プログラム」に参画し、モ

*1,2,10 技術研究所
Technical Research Center

*4 装備開発部
Interior & Exterior Components Development Dept.

*11 (株)東洋シート
TOYO SEAT Co., Ltd.

*3 工学院大学
Kogakuin University

*5~9 東北大学
Tohoku University

*12,13 広島大学
Hiroshima University

データベースリサーチを活用した材料の研究開発プロジェクトに取り組んでいる⁽¹⁾。

材料のデータベースリサーチとは、必要機能からのバックキャストにより材料開発を効率的に行う研究手法⁽²⁾のことで、材料の微視構造内部で生じている現象をそのメカニズムに基づいた数式でモデル化し、所望の部品特性に対する微視構造レベルでの材料の制御因子を明らかにして、必要機能を発現する微視構造設計を行うものである。

著者らは、吸音材、断熱材及び防振材料として活用されている多孔質材料に焦点を当て、三つの性能が背反することなく高い次元で成立する材料制御モデル技術の開発を目指している (Fig. 1)。これまでに、多孔質材料を周期構造と仮定し、その微視構造で生じる現象からマクロ構造における特性を導出する手法である均質化法⁽³⁾を用い、多孔質材料の微視構造から吸音特性と断熱性能を予測する手法を構築した⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾。微視構造スケールとしては一般的な吸音材、断熱材として用いられる多孔質材の空隙サイズである数 μm ～数百 μm を対象としている。吸音特性については、この手法を利用して、所望の特性を得るのに必要な多孔質材の微視構造を低計算コストで効率的に設計する手法⁽⁷⁾⁽⁸⁾を構築し、自動車のエンジンカバーの吸音部品に適用した⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。

今回、多孔質材の防振機能設計のための基礎的な微視構造モデルを構築し、主要因子である弾性の発現メカニズムを検討した⁽¹¹⁾ので報告する。

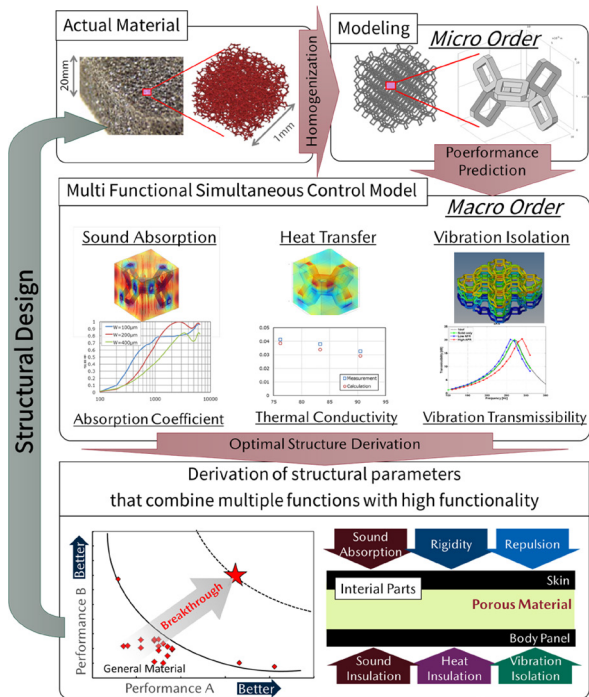


Fig. 1 Approach to Development of High Performance and Multi-functional Material by Model Based Research

2. 多孔質材の微視構造モデル構築

本研究の対象とする振動現象は二つである。一つはフロアパネルなどの車体パネルに伝わる数十 Hz から数百 Hz の現象で、車室内へ音を放射するもしくは足裏で直接感じる振動である。もう一つはシートを介して乗員の身体に伝搬する乗り心地性能に関わる現象で、数 Hz から十数 Hz の振動である。

前者は繊維や発泡樹脂で構成されたフロアマットをばね、表皮をマスとしたばね-マス系、後者は発泡樹脂製シートをばね、人体荷重をマスとしたばね-マス系の防振構造により振動が抑制されている。ばね-マス防振系の振動伝達率の理論式⁽¹²⁾と周波数特性グラフを式 (1) と Fig. 2 に示す。

$$\tau_{\text{vib}} = \sqrt{\frac{1 + \left(2\zeta \frac{f}{f_0}\right)^2}{\left(1 - \frac{f^2}{f_0^2}\right)^2 + \left(2\zeta \frac{f}{f_0}\right)^2}} \quad (1)$$

ただし、 f : 周波数、 $f_0 = (1/2\pi)\sqrt{k/m}$: 系の共振周波数、 ζ : 臨界減衰比、 m : 質量、 k : ばね定数である。

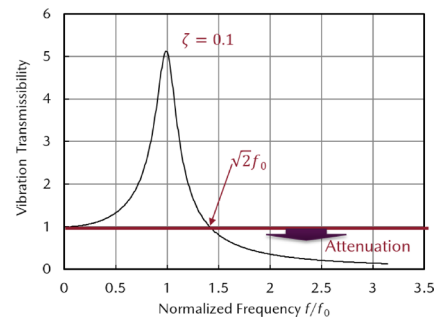


Fig. 2 Vibration Transmissibility Normalized by Resonance Frequency: Critical Damping Ratio $\zeta=0.1$

Fig. 2 から分かるように、防振のコンセプトは、系の共振周波数をできるだけ低くして、防振される周波数帯域を広くとることである。振動を大きく増幅する共振周波数 f_0 が車室内音場やシートの骨格構造、人体などの他の系の共振周波数と重ならないように正確に制御することが重要である。したがって、多孔質材による防振設計をする場合、その弾性を正確に予測することが重要である。

多孔質材中を伝わる振動現象を正確に予測するためには、その骨格部分に伝わる振動と流体に伝わる空気振動の相互作用を考慮する必要がある⁽¹³⁾。また、シートのように人が座ることにより比較的大きな歪みが生じた状態での弾性は無荷重の時とは異なるため、大変形を考慮した非線形な弾性特性も考慮する必要がある。

以上より、本研究では、骨格と流体との相互作用を考慮した線形領域の振動モデルと大変形を考慮した非線形領域の振動モデルの構築を行った。

2.1 固体相と流体相の相互作用を考慮した線形振動モデル

多孔質材内部を伝搬する振動は固体相である骨格部に生じる振動と流体相に生じる振動が相互に影響しながら伝わっていく。前述のように、これまでに音響エネルギーが多孔質材内部で熱エネルギーに変換される吸音現象を模擬するために、材料を周期構造と仮定して均質化法によって固体相と流体相の相互作用を考慮したモデル化を行った⁽⁴⁾。吸音現象と今回取り扱う振動伝搬現象との違いは、入力音が音響加振であるか構造加振であるかの違いであり、エネルギー伝搬のメカニズムは同じである。そこで加振条件のみを構造加振に変更し、同じモデルを用いて振動伝搬現象を模擬した。Fig. 3 にモデル化の概要を示す。

まず微視構造における骨格と流体の相互作用を考慮した定式化 ((1) 固体相弾性場, (2) 流体相流れ場, (3) 流体相熱伝導場 (対流, 輻射はなし), (4) 固体-流体間の界面での変位・応力・温度の連続条件) を行う。これを有限要素法 (FEM) によって解いて、マクロな等価弾性率などの均質化特性を導出する。その均質化特性を用いた多孔質材料とパネル等で形成される巨視的なばね-マス系を有限要素法によってモデル化する。これを解いて系の振動伝達特性が求められる。

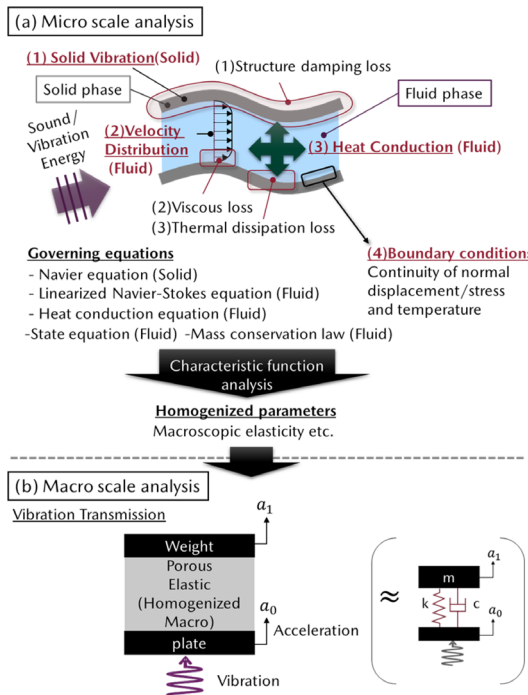


Fig. 3 Schematic View of Linear Vibration Analysis Model by Homogenization Method

今回の検討では一般的な防振材に使われる発泡ウレタンを対象とする。微視スケールでの構造モデルとして、その骨格モデルとして良く用いられる Kelvin セルを採用する (Fig. 4)。

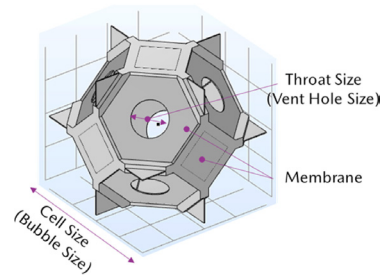


Fig. 4 Kelvin Cell Model for Linear Vibration Analysis of Foamed Porous Material in Micro Scale

また、振動伝達率 τ_{vib} を次式のように伝達側パネルの加速度と加振側パネルの加速度の比で定義する。

$$\tau_{vib} = \frac{a_1}{a_0} \tag{2}$$

2.2 大変形を考慮した非線形静解析モデル

シートのように人間が座ることを前提とした部材の振動伝達制御を考える場合、荷重により多孔質材が圧縮された状態での弾性特性が重要である。共振周波数を高精度に制御するには、歪みに応じた基材の弾性率を予測する必要がある。線形領域外の大変形を考慮した非線形解析を行い、準静的な応力歪み特性を得なければならない。また、発泡樹脂材のような多孔質材の場合、大きな荷重が加わると骨格部分が座屈しながら他の骨格部分と接触をしつつ変形をしていくため、座屈や多数点での接触解析を行う必要がある。このためこのような現象を取り扱える汎用有限要素法解析ソフト Abaqus⁽¹⁴⁾ を用いることとした。材料と形状の非線形性を考慮し、かつペナルティ法による一般接触の定義によって接触発生箇所・順序及び複雑な変形による相互接触状態を予測できるよう静解析を行う。Fig. 5 に概要を示すように、この非線形静解析により得られる応力歪み特性から必要な荷重域での弾性率を求め、振動伝達率の解析を行う。

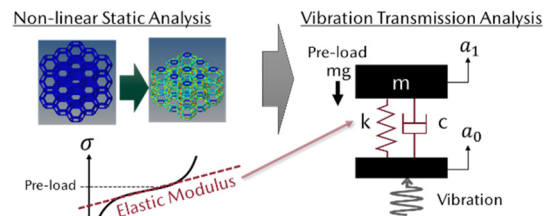


Fig. 5 Schematic View of Non-linear Vibration Analysis Model

対象とする材料は、シート用基材として一般的な軟質発泡ウレタンである。セル構造としては 2.1 のモデルと同様 Kelvin セルを用いるが、シート用のウレタンの骨格には膜がほとんど残っていないため、Fig. 6 のように骨格だけの Kelvin セルを用いる。

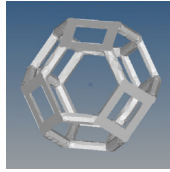


Fig. 6 Kelvin Cell Model for Nonlinear Compressive Analysis (Porous Foam without Membrane)

3. 解析結果

3.1 固体相と流体相の相互作用を考慮した線形振動解析

前述のように多孔質材中を伝搬する振動を正確に予測するためには、固体相と流体相の相互作用を考慮しなければならない。ここでは振動伝達の主要な制御因子である多孔質材の弾性に対して、固体相と流体相がどのように影響するかを検討する。まず最初に流体相の有無による影響検討を行う。続いて多孔質材料の吸音機能の主要な制御因子の一つである流れ抵抗⁽¹³⁾が振動伝達に与える影響検討を行う。Fig. 7 に巨視スケールでの振動伝達率の解析モデルを示し、Table 1 に微視構造の固体相（ポリウレタン）の物性値を示す。

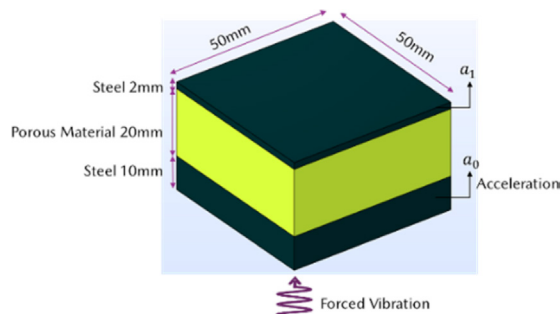


Fig. 7 Vibration Transmission Analysis Model of Foamed Porous Material in Macro Scale

Table 1 Material Properties of Solid Phase (Polyurethane) for Analysis in Micro Scale

Young's Modulus [MPa]	Poisson's Ratio	Density [kg/m ³]	Loss Factor
24	0.35	1280	0.1

まず、流体相がある場合とない場合（真空相当）で多孔質材のマクロな振動伝達特性がどのように変化するかを検討した。ユニットセルサイズは防振材として一般的なサイズの400 μ m、骨格サイズは27 μ mとした。六角形の膜部分のみに5 μ mの通気孔が空いているものとした。このときの空隙率（流体相の割合）は0.95である。

微視スケールでの均質化特性解析結果をTable 2に、巨視スケールでの振動伝達率解析結果をFig. 8に示す。流体相がない場合は10%程度共振周波数が低下しており、マクロな弾性率の低下が伺える。つまり、多孔質材のマ

クロな弾性率には固体相の弾性だけでなく流体相の等価体積弾性率も影響しており、本モデルのように両相の相互作用を考慮しなければ正確な弾性率が予測できないことが示唆される。

Table 2 Analysis Results of Homogeneous Properties of Kelvin Cell (Cell Size: 400 μ m, Throat Size: 5 μ m, Porosity: 0.95)

Solid Phase	Effective Elastic Modulus [MPa]	0.449
Fluid Phase	Flow Resistivity [Pa \cdot s/m ²]	2.06 $\times 10^6$
	Effective Bulk Modulus [MPa]	0.102

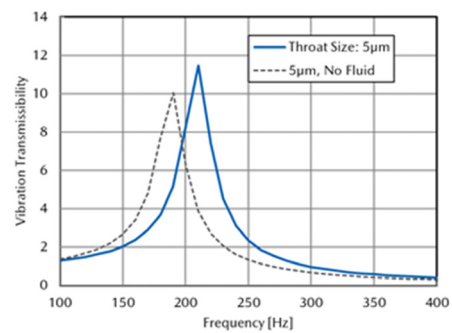


Fig. 8 Analysis Results of Vibration Transmissibility: Comparison between With and without Fluid Phase

この影響を考察するために式(1)の振動伝達率の解析解を用いて検討を行った。固体相と流体相の等価弾性率からそれぞれのばね定数を算出した。固体相のばねのみを考慮した場合及び固体相と流体相のばねの並列ばねとして表した場合の解析結果をFig. 9に示す。解析解の結果と均質化法によるマクロ解析の結果は一致しており、流体相も考慮した多孔質材のマクロな弾性率は、固体相と流体相の等価弾性率の和になっていることが分かる。

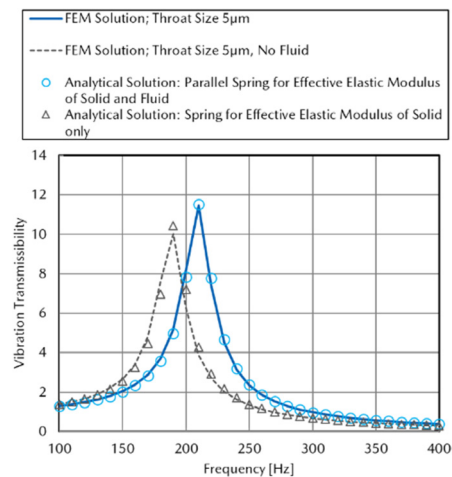


Fig. 9 Analysis Results of Vibration Transmissibility: Comparison of FEM Solution and Analytical Solution with and without Fluid Phase

続いて吸音機能の制御因子である流れ抵抗がマクロな弾性率に与える影響を検討する。これまでの研究⁽⁹⁾から、Fig. 4 に示すユニットセルの膜の通気孔のサイズの違いにより、固体相の弾性率や流体が通り抜けるときの通気抵抗が変化することが分かっている。ユニットセルサイズは 400 μm 、骨格サイズは 27 μm で固定とし、六角形の膜部分のみに 5 μm 、50 μm 、100 μm 、200 μm の通気孔が空いているときの計 4 ケースについて解析を行った。

微視構造解析により算出された均質化特性（固体相の等価縦弾性率、流体相の単位厚流れ抵抗及び等価体積弾性率）を Table 3 に示す。固体相の等価縦弾性率及び流体相の流れ抵抗は孔径が大きくなるほど低下しており、これは孔径が大きくなることにより、それぞれ構造としての強度が低下したこと及び通気がしやすくなったことに起因するものと考えられる。一方、流体相から固体相への熱伝導によって変化する流体部の等価体積弾性率⁽¹³⁾の値は通気孔径によらずほぼ同じである。これは流体と固体の接触面である固体相の表面積に大きな差が無かったためと考えられる。

Table 3 Analysis Results of Homogeneous Properties of Kelvin Cell (Cell Size: 400 μm)

Throat Size [μm]		5	50	100	200
Porosity		0.950	0.951	0.953	0.960
Solid Phase	Effective Elastic Modulus [MPa]	0.449	0.422	0.363	0.245
	Flow Resistivity [$\text{Pa} \cdot \text{s}/\text{m}^2$]	2.06×10^6	5.11×10^5	6.84×10^5	7.51×10^3
Fluid Phase		0.102	0.102	0.102	0.102

次に巨視スケールでの振動伝達率解析結果を Fig. 10 に示す。気孔径が大きいほど振動伝達の共振周波数が低下している。ここでこの共振周波数変化に対する固体相の等価縦弾性率と流体相の流れ抵抗の寄与度を確認するために、通気孔径 200 μm の等価縦弾性率が 5 μm の場合と等しくなるように、初期値として与える骨格の弾性率を調整したときの振動伝達率解析を行った。解析結果を Fig. 11 に示す。両者の解析結果は一致しており、多孔質材のマクロな弾性率は、流体相の流れ抵抗には依存せず、流体相及び固体相の等価縦弾性率で決まることが分かる。

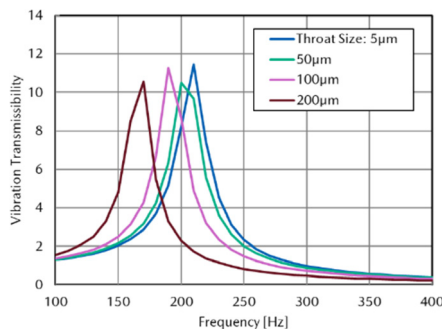


Fig. 10 Analysis Results of Vibration Transmissibility: Comparison of Different Throat Sizes

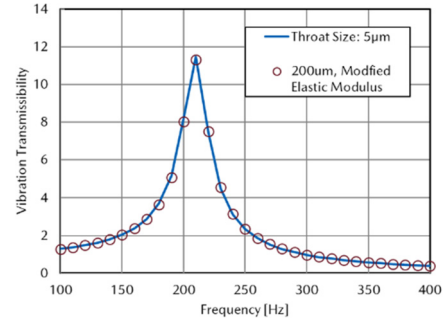


Fig. 11 Analysis Results of Vibration Transmissibility: Modified One Input Young's Modulus so that Homogeneous Effective Elastic Modulus is the Same

以上より、防振設計に重要な共振周波数を決める多孔質材のマクロな弾性率は、固体相と流体相の等価弾性率の和となっており、流体相の流れ抵抗は寄与していないことが分かった。

3.2 大変形を考慮した非線形静解析

シートに人が座るときのような大きな荷重が多孔質材にかかる場合、そのマクロな弾性は非線形な挙動を示すことが知られている。ねらいの荷重がかかったときに想定した弾性になるかどうか、防振設計においては非常に重要となる。ここでは構築した非線形静解析モデルを用いて、弾性の非線形な挙動の予測とそのメカニズムの推定を行う。

Fig. 6 に示す Kelvin セルに対して、固体相の座屈や固体相同士の接触が生じるような大荷重がかかった圧縮時のマクロな見かけ弾性率を導出するために、非線形圧縮解析を行う。固体相の微視的な弾性率としては、市販の熱可塑性ポリウレタンの応力歪み特性の実測結果 (Fig. 12) を用いた。

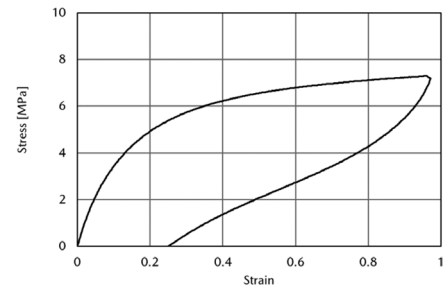


Fig. 12 Measured Nominal Stress-strain Properties of Thermoplastic Polyurethane Used in Analysis

座屈と多数の接触を考慮する解析を安定的に行うには高い計算コストがかかるため、できるだけセルの数を減らす必要がある。そこで面内方向への変位の伝わり方も最低限観察できるよう、面内方向には 3 \times 3=9 個だけのセルを配置し、その側面の境界面にのみ対称境界条件を設定することとした。また、高さ方向については事前にセルの数を 1 段、3 段、24 段、100 段と変化させたとき

の応力歪み特性を解析した。100段というのは実測で用いるテストピースの最大厚（ $500\mu\text{m} \times 100 = 50\text{mm}$ ）を想定した高さである。解析結果を Fig. 13 に示す。このように、3段ではほぼ100段と同じ値に収束することが分かった。この結果と計算時間も考慮して、今後の解析は $3 \times 3 \times 3 = 27$ 個のセルに対して行うこととした。

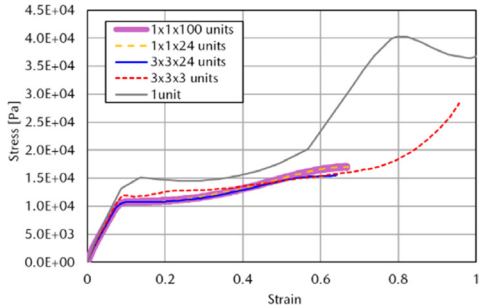


Fig. 13 Analysis Results of Stress-strain Properties: Comparison of the Number of Cells in Height Direction

解析するユニットセルのサイズは後述のテストピースとほぼ同等の $500\mu\text{m}$ で固定とし、骨格の太さを変えて空隙率を 85%, 90%, 95% と変化させたときの応力歪み特性の解析結果を Fig. 14 に示す。またウレタンテストピース（平均気泡径 $450\mu\text{m}$ 、空隙率 94%、直径 100mm、厚さ 50mm）の応力歪み特性の実測結果を Fig. 15 に示す。

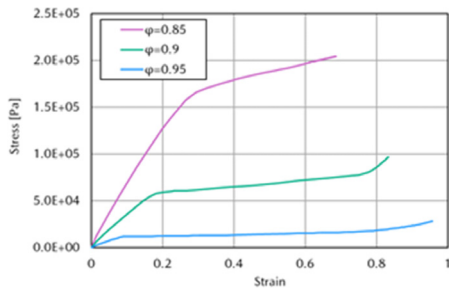


Fig. 14 Analysis Results of Stress-strain Properties: Comparison of Porosity ϕ Differences (Cell Size: $500\mu\text{m}$)

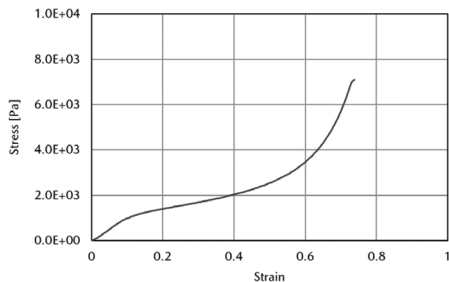


Fig. 15 Measurement Results of Stress-strain Properties: Polyurethane Foam (Average Cell Size: $450\mu\text{m}$, Porosity: 0.94, Diameter: 100mm, Thickness: 50mm)

Fig. 14 より、解析結果は空隙率が大きくなる、すなわち骨格が細くなるにしたがって材料の見かけ弾性が下がっていることが分かる。また、空隙率 0.9 及び 0.95 の応力歪み特性は、大きく三段階に分かれて変化していることが分かる。すなわち、歪み量がゼロから増えていくにしたがって最初はほぼ一定傾きで推移していくが、ある歪み量になったときに急激に傾きが小さくなってある程度一定傾きのまま推移し、またある歪み量になったときに傾きが大きくなっている。この傾向は Fig. 15 に示す実測値の傾向と定性的に一致している。このように大変形を生じさせたときの多孔質材のマクロな見かけ弾性は歪み量に応じて大きく変わるため、振動特性を評価する前に、対象部材の評価荷重に対応した弾性率を把握する必要がある。

一方で、Fig. 14 の空隙率 0.95 の解析結果と Fig. 15 の実測結果（空隙率 0.94）を比較すると、縦軸のスケールが一桁異っており、解析結果の弾性率（グラフの傾き）の方が数倍から 10 数倍程度大きい傾向を示し、定量的な予測精度には課題を残す。原因としては、まず骨格の応力歪み特性を Fig. 12 のように発泡していない熱可塑性ポリウレタンの特性で代用していることが考えられる。また実物の気泡形状と Kelvin セルの形状に差異があることなども考えられる。今後の課題として、前者については発泡ウレタンの実物の弾性率を測定する方法を、後者については実形状をどのように単純化してモデル化するか検討中である。

弾性が三段階に変化するメカニズムを推定するために、空隙率 95% の時の応力歪み特性解析結果と変形モード・応力分布・接触面分布を合わせて Fig. 16, 17 に示す。最初の傾き（図中の①）ではセルが線形に圧縮されているが、最初の変曲点において 2 段目のセルに応力が集中しはじめ（図中の②）、座屈が始まる様子が伺える。更に変形が進むと上下段のセルも座屈し、骨格がつぶれて他の骨格と接触し始め（図中の③）、完全に骨格がつぶれた（図中の④）後に、また曲線の傾きが大きくなっている（図中の⑤）。

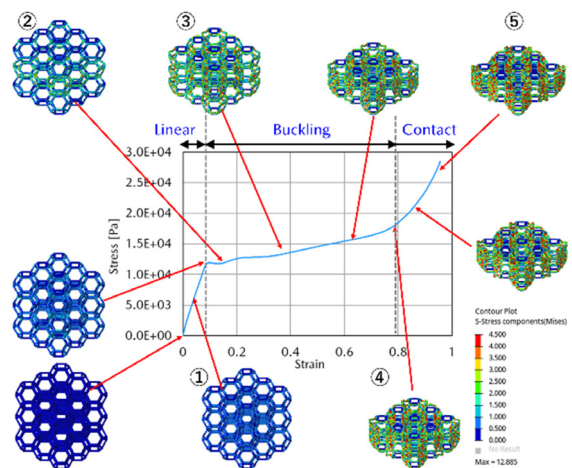


Fig. 16 Stress-strain Properties and Deformation by Analysis (Cell Size: $500\mu\text{m}$, Porosity: 0.95)

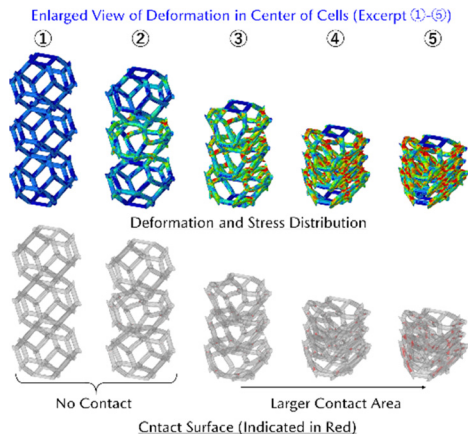


Fig. 17 Deformation and Contact Surface Distribution of Cells According to Stress Values by Analysis
(① to ⑤ Correspond to Those in Fig. 16)

今後モデルの精度を高めて、想定される荷重範囲に対してねらいの弾性をロバストに発現できるように、変曲点の位置を制御できるような因子を導出できるようにする。そして別途構築中の発泡樹脂材料の工法モデル⁽¹⁵⁾と組み合わせ、ねらいの特性をもつ材料開発を行っていく。

4. おわりに

本稿では、材料モデルベースリサーチのアプローチにより、静粛性に関わる低中周波域の微小線形変形領域及び乗り心地性能に関わる低周波域の大変形領域における振動を制御する多孔質材料の微視構造設計のための基礎モデル技術について報告した。今後、本技術の精度の検証と向上を実施するとともに、これまで構築してきた吸音・断熱特性予測モデルと組み合わせ、吸音・断熱・防振機能の同時制御モデルを構築して、質量・空間・コストの要件も満たしながら、全機能を高い次元で両立させる革新的多孔質材料の開発に活用していく。

参考文献

- (1) 広島大学 デジタルものづくり教育研究センター,
<https://hudmerc.hiroshima-u.ac.jp/>
- (2) 坂手：自動車の革新を支える材料技術への期待と課題～材料モデルベースリサーチによる挑戦～, 自動車技術会春季大会フォーラム (2019)
- (3) 寺田ほか：均質化法入門, 丸善 (2003)
- (4) T. Yamamoto, et al.: A generalized macroscopic model for sound-absorbing poroelastic media using a homogenization method, *Comput. Methods in Appl. Mech. Eng.*, Vol. 200, pp.251-264 (2011)
- (5) 山本ほか：均質化法による多孔質吸音材の等価特性の導出, 日本機械学会論文集 C 編, 77 巻, pp.75-88 (2011)
- (6) 桂ほか：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, 自動車技術会学術講演会予稿集 (2021)
- (7) 山本ほか：均質化法による吸音材微視構造の最適設計法, 自動車技術会学術講演会予稿集 (2018)
- (8) 山川ほか：均質化法による発泡樹脂吸音材の材料内部構造モデル化技術の開発, 自動車技術会学術講演会予稿集 (2019)
- (9) 山川ほか：材料モデルベースリサーチによる多孔質吸音材微視構造設計技術の開発と吸音部品設計への適用, [マツダ技報, No.37, pp.75-80 \(2020\)](#)
- (10) 神田ほか：SKYACTIV-X NVH 技術, [マツダ技報, No.36, pp.38-43 \(2019\)](#)
- (11) 山川ほか：モデルベースリサーチ (MBR) による振動制御材料モデル技術の開発, 自動車技術会論文集, Vol.53, No.5, pp.886-891 (2022)
- (12) 前川ほか：建築・環境音響学, 共立出版, 2011, p.137
- (13) J.F. Allard, et al.: *Propagation of sound in porous media*, Chapter 6, Wiley (2009)
- (14) Dassault Systems: *Abaqus United FEA* (2021)
- (15) 石澤ほか：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 3 報)～発泡樹脂材の気泡制御工法モデル技術の構築～, 自動車技術会学術講演会予稿集 (2023)

論文・解説

26

アルミニウムダイカスト／圧延材の摩擦攪拌点接合 Friction Stir Spot Welding of Aluminum Die-Cast/Rolled Plate

田中 耕二郎^{*1} 島田 聡子^{*2} 杉本 幸弘^{*3}
Kojiro Tanaka Satoko Shimada Yukihiro Sugimoto

要約

摩擦攪拌点接合のアルミニウム製車体骨格部材への適用性を明らかにするため、接合パラメーターの強度への影響を調査した。A6111/ADC3 ダイカストの板組みでは、プローブ径が大きいほど強度が高く、安定的に抵抗スポット溶接 JIS A 級平均を超えるせん断強度が得られることを確認した。断面観察の結果、安定して強度を得るためには、塑性流動状態や上板残厚、それらを決定付ける接合ツールの実挿入量を適切に管理することが重要であることが分かった。

Abstract

In order to clarify the applicability of friction stir spot welding method to aluminum car body frame members, the effect of joining parameters on strength was investigated. In A6111/ADC3 (die-cast material), it was confirmed that the larger the probe diameter is, the higher the strength is, and the shear strength stably exceeding the JIS A grade average for resistance spot welding can be obtained. From the cross-sectional observation result, it was found that it is important to appropriately control the plastic flow state, the residual thickness of the upper plate, and the actual insertion amount of the joining tool that determines them in order to obtain stable strength.

Key words : Materials, Aluminum alloy, Joining, Die-Cast

1. はじめに

カーボンニュートラル、脱炭素社会を目指すため、自動車や航空機などの輸送機器では大幅な CO₂ 排出削減に向けた研究開発が進められており、その中で燃費改善につながる軽量化は有効な手段である。自動車においては、質量割合が大きく車両性能の向上にもつながる車体の軽量化が重要であり、これまで筆者らは軽量車体構造を実現するための重要な要素技術の一つである点接合技術の開発を進めてきた⁽¹⁾⁻⁽³⁾。この中でアルミニウム／鋼板やアルミニウム／熱可塑性繊維強化樹脂 (FRTP) などの異種材料の接合と併せて進めているのが、車体骨格部材への適用を想定した比較的厚肉の展伸材やダイカスト板材を組合せたアルミニウム同士の接合技術の開発である。

アルミニウムの接合への一般的な抵抗スポット溶接の採用は、その材料特性に起因して大電流が必要であることや製造工程で重要となる生産性の確保につながる連続打点性についてなど、課題が多い。また、リベットなど

の副資材を使用する機械締結では重量、コスト増や接触腐食の課題もある。そこで開発されたのがアルミニウム同士の摩擦攪拌点接合 (Friction stir spot welding, FSSW) であり、マツダが 2003 年に実用化して以降、ボンネットやドアなどのパネル部材を対象に板厚 1mm 程度の薄板の接合法として定着している (Fig. 1)^{(4),(5)}。

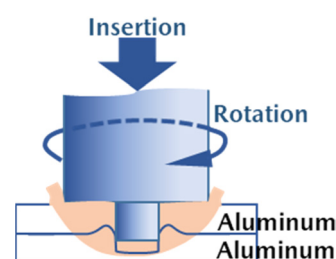


Fig. 1 Aluminum Joining by FSSW

本報では摩擦攪拌点接合のアルミニウム製車体骨格部材への適用性を明らかにするため、抵抗スポット溶接では電気抵抗や融点の違いにより健全なナゲットの形成が難しい

*1~2 技術研究所
Technical Research Center

*3 広島大学
Hiroshima University

ダイカスト板材を含む板組みを中心に、その接合強度に及ぼす接合パラメーターの影響を調査するとともに、断面観察から強度影響因子を検討した。また、実用化時の継手の設計や施工のデータベースとして活用するための、一般的な車体骨格部材を想定した板組みにおける強度評価や、強度予測のための接合 CAE の取り組みについて示す。

2. 実験方法

2.1 評価材料

アルミニウムダイカスト板材には板厚 2.5mm の ADC3 相当材 (T7 処理) を使用し、離型剤などの除去のため 240 番研磨紙により荒研磨したものを供試した。アルミニウム圧延材には板厚 2.0mm の A6111-T4, A5052-H34 を使用した。

2.2 接合試験片の作製

位置制御接合装置を使用した場合のツール形状を含む主要な接合パラメーターを Fig. 2 に示す。今回はこの中のツールの挿入速度、回転速度、プローブ径の影響を見るため、Table 1 に示す接合条件とした。上記 3 種の 100 × 30mm サイズのアルミニウム板材を使用し、圧延材同士の組合せを含む板組み (以下、上板/下板で表記) について、ツール挿入量を変動させながら 30mm ラップの重ね部中央を接合した。

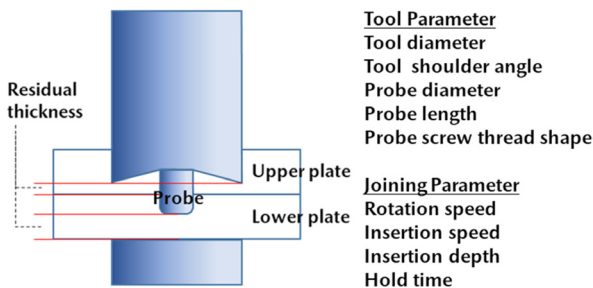


Fig. 2 Tool and Joining Parameter of FSSW

Table 1 Joining Condition

Parameter	Condition
Tool diameter	10mm
Probe diameter	3or5mm
Probe length	2.8mm
Probe screw thread	With
Rotation speed	1500or3000rpm
Insertion speed	12or30or60mm/min
Insertion depth	Change for weld lobe

2.3 評価方法

評価方法の詳細を以下に示す。

(1) ウェルドローブの作成 (せん断強度試験)

Table 1 の条件をベースにツール挿入量を変動させて接合した継手試験片について、Fig. 2 に示す接合点中央の下板残厚をマイクロメータで実測し、接合装置のたわみを含めたツールの実挿入量及び上板残厚を算出した。そ

の後、はく離方向の負荷を抑える治具を使用した引張せん断強度試験を試験速度 10mm/min にて実施した。

測定した上板残厚とせん断強度の関係から、各種板組み、条件におけるウェルドローブを作成した。

(2) 断面観察

せん断強度試験後も含めた接合部断面を光学顕微鏡、走査電子顕微鏡 (SEM) 及び電子線マイクロアナライザー (EPMA) 成分分析により観察し、板組み、接合条件の違いによる被接合材料の塑性流動状態の変化を見るときに、界面の接合領域及び破壊時の亀裂進展経路を調査した。

3. 実験結果及び考察

3.1 接合パラメーターの影響

(1) ツールプローブ径

A6111/A6111, A6111/ADC3, ADC3/A6111 の 3 板組みについて、ツール回転数 3000rpm, 挿入速度 30mm/min 一定でプローブ径を変えた場合のウェルドローブの比較を Fig. 3 に示す。プローブ径が大きい方がピーク強度は高く、そのピーク強度を示す上板残厚は増える方向にシフトした。また、プローブ径 5mm の場合、施工時に生じるツールの設定挿入量に対する実挿入量のバラツキに対し、JISA 級平均の強度をより安定的に得られることが分かった。

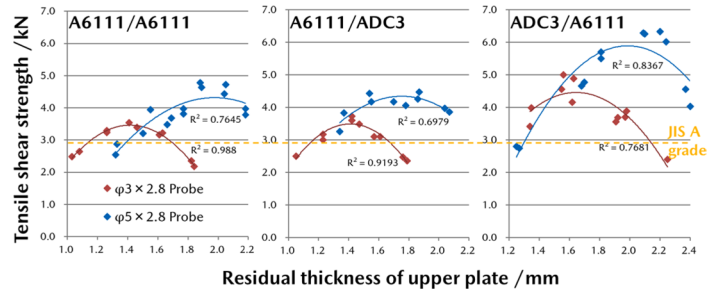


Fig. 3 Comparison of Weld Lobes by Probe Diameter⁽⁶⁾

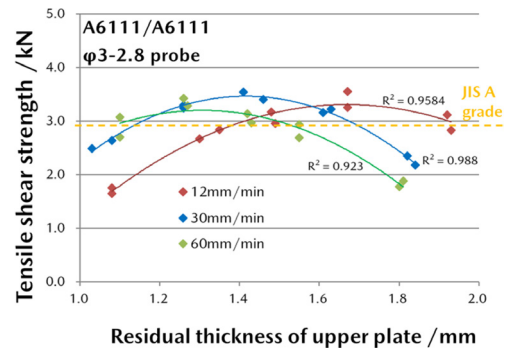


Fig. 4 Comparison of Weld Lobes by Tool Insertion Speed⁽⁶⁾

(2) ツール挿入速度

上記 3 板組みのうち、A6111/A6111 においてプローブ径 3mm, ツール回転速度 3000rpm とし、ツール挿入速度を変化させた場合のウェルドローブ比較を Fig. 4 に

示す。ピーク強度を示す上板残厚は変化するが強度に大きな差は見られず、他の板組みでも同様の傾向であった。接合中の材料の発熱量に影響を与えるツール-材料間の面圧と接合時間はツール挿入速度により相対的に変化することが影響し、今回の調査範囲では強度レベルに大きな差が表れなかったと考えられる。

(3) ツール回転速度

ADC3/A6111においてプローブ径3mm, ツール挿入速度30mm/minとし、ツール回転数を変化させた場合のウェルドローブ比較をFig. 5に示す。回転速度が速いほどピーク強度を示す上板残厚は増える方向にシフトするが、強度レベルに大きな差はない結果となり、これは他の板組みも同様であった。

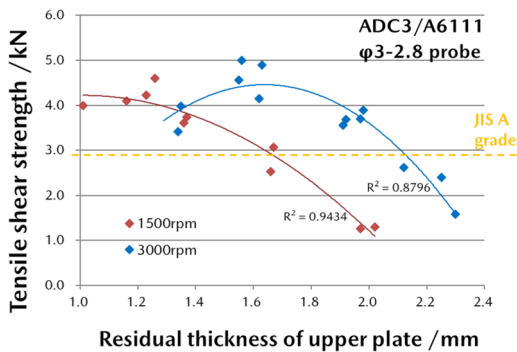


Fig. 5 Comparison of Weld Lobes by Tool Rotation Speed⁽⁶⁾

3.2 断面観察による強度影響因子の検討

A6111/ADC3において、ピーク強度を示した接合条件で作製した継手断面のSEM観察を行った (Fig. 6)。板間に塑性流動して混ざり合った領域は存在せず、プローブ周囲において下板材料が大きく巻き上がるように接合界面が変形していた。また、下板の巻き上がりの頂点から接合部外周側に向けての途中に接合/未接合領域の境界が存在しており、その境界間が接合ナゲット径となる。塑性流動した領域では上板、下板ともに結晶粒が微細化しており、プローブ近傍及び界面近傍に材料の流動方向への粒子の変形が観察された。

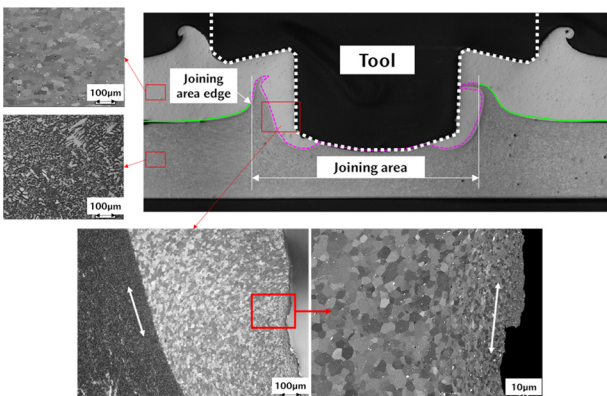


Fig. 6 SEM Survey Results on Cross-Section

ツール挿入量の違いにより破断形態が変化した継手3種について、材料の境界が見えやすいようEPMAによるSi成分の面分析で断面を可視化した結果と、破断後の継手外観の比較をFig. 7に示す。挿入量が増えるほど上板残厚が減少し、破断形態は界面→部分プラグ→プラグと変化する。また、ピーク強度は部分プラグ破断時に示した。継手強度は破断亀裂が走る際の材料強度と進展距離(面積)によって決まる。そして、亀裂の進展経路は材料の塑性流動状態、材料界面における接合/未接合の境界位置、上板残厚、熱影響後の材料強度などの影響を受けて変化すると考えられる。

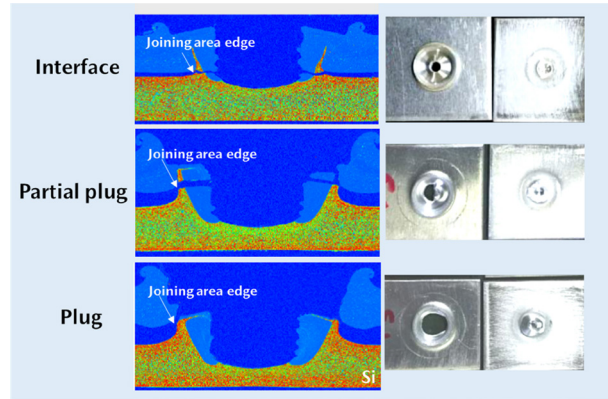


Fig. 7 Comparison of Fracture Form

3.3 実用化を想定した取り組み

実用化時の継手の設計や施工のデータベースとして活用することを目的に、一般的な車体骨格部材を想定した板組みに対し、ここまでの調査結果をベースとした適正条件下におけるウェルドローブを取得した。A6111, A5052, ADC3を含む各板組みにおけるウェルドローブをFig. 8に示す。これらの板組みでは安定的にJISA級平均強度を確保できることを確認した。

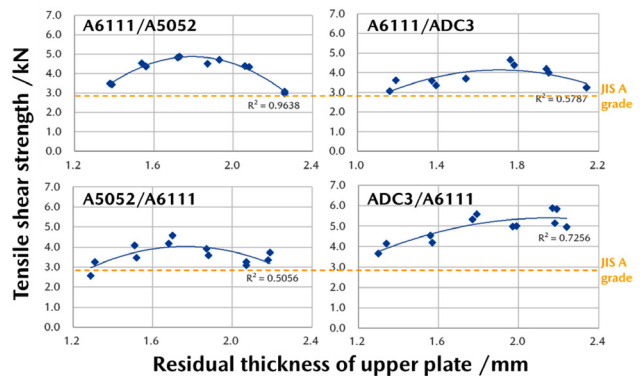


Fig. 8 Weld Lobes of Each Material Specification

A6111/A5052及びA6111/ADC3におけるピーク強度を示す継手のマクロ断面観察結果をFig. 9に示す。接合界面を破線で表示した。異なる強度特性をもつ材料の組合せによりプローブ周囲の下板の巻き上がりの形状は大きく変化する。その中でツール挿入量を制御し、各板組みごとに材料の塑性流動状態及び上板残厚を適正にすることが重要となる。

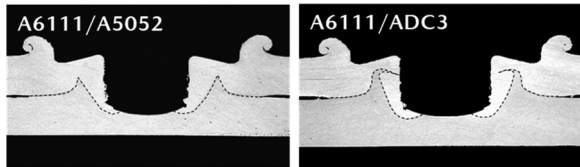


Fig. 9 Macro Survey Results on Cross-Section

実用化にあたり確立すべき強度予測技術においては、粒子法 CAE を用いてツール形状、接合条件、材料特性から接合後の塑性流動状態（接合界面形態）を解析することをはじめとして、破壊メカニズムを考慮した強度、信頼性が予測可能なモデルを構築する取り組みを進めている。プロメテック・ソフトウェア（株）製の流体解析ソフトウェアである Particleworks を使用した粒子法 CAE による塑性流動状態の解析結果の一例を Fig. 10 に、検討中の接合継手モデルを用いたせん断引張時の応力解析結果の一例を Fig. 11 に示す。

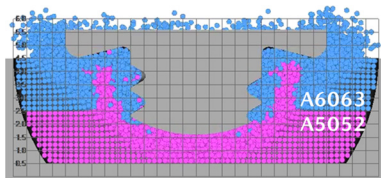


Fig. 10 Analysis Result Sample by Particle Method CAE

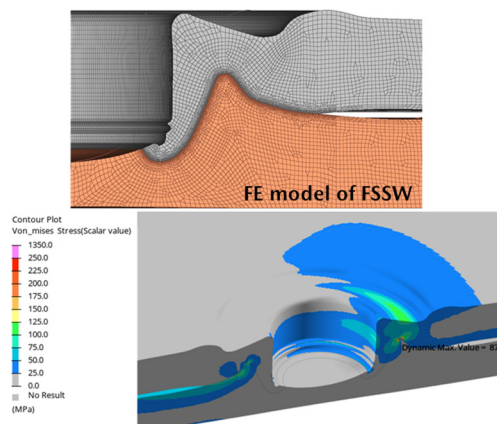


Fig. 11 Stress Analysis Result Sample of Shear Tensile Test

4. まとめ

車体軽量化のための重要な要素技術としてさまざまな材料の組合せでの点接合技術の開発を進めている。本報では摩擦攪拌点接合のアルミニウム製車体骨格部材への適用性を明らかにするため、ダイカスト材を含む板組みを中心に、その接合強度に及ぼす接合パラメーターの影響を調査した。また、強度予測のための接合 CAE を含めた実用化に向けた取り組みについて示した。

接合パラメーターの影響

A6111 と ADC3 の組合せにおける調査では、直接的に接合ナゲット径に影響を与えるツールプローブ径が大きいほど強度が高く、プローブ径 5mm のツールにおいて、

安定的に抵抗スポット溶接 JISA 級平均を超えるせん断強度が得られることを確認した。

断面観察による強度影響因子の検討

断面観察を行い、接合状態、亀裂進展部から強度影響因子を検討した。プローブ周囲において下板材料が上板側に巻き上がるような塑性流動が生じており、その形状、界面間の接合領域、接合／未接合境界位置の上板残厚により、破断時の亀裂進展経路は複雑に変化し強度に影響を与える。位置制御式装置を使用する上で強度を確保するためには、塑性流動状態や上板残厚を決定付ける接合ツールの実挿入量を適切に管理することが重要といえる。

実用化を想定した取り組み

パラメーター影響調査の結果を基に、データベースの構築を目的に実施した一般的な車体骨格部材を想定した種々の板組みでの強度評価では、全ての板組みのせん断荷重は JISA 級平均を上回り、本接合技術が JIS の「特に強さを要する溶接部」に適用できる水準にあることを確認した。これら実用化時の継手の設計や施工のためのデータベースをばく離強度や強度バラツキ要因の影響も含めて構築する他、接合 CAE を活用した強度、信頼性予測モデルの開発など、引き続き実用化に向けた取り組みを進めていく。

本成果は国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託業務（JPNP14014）の取り組みで得られた。

参考文献

- (1) 西口勝也，田中耕二郎，森田泰博，杉本幸弘：アルミニウム／CFRP の異種材料点接合技術，自動車技術会 2018 年秋季大会学術講演会講演予稿集，文献番号 20186086（2018）
- (2) 田中耕二郎，杉本幸弘，西口勝也，小川裕樹：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，自動車技術会 2019 年秋季大会学術講演会講演予稿集，文献番号 20196111（2019）
- (3) 田中耕二郎，深堀 貢，西口勝也：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，溶接学会誌，第 90 巻，第 7 号，pp.497-500（2021）
- (4) 村上士嘉，山下浩二郎，妹尾安郎，橋 昭男：アルミ材新接合技術の開発，マツダ技報，No.21，pp.86-91（2003）
- (5) 藤本光生，附柴祐一，野村浩二：ハイブリッド車における FSSW 技術，溶接学会誌，第 80 巻，第 3 号，pp.227-230（2011）
- (6) 杉本幸弘，田中耕二郎：アルミニウム合金ダイカストと圧延材の摩擦攪拌点接合，軽金属，第 70 巻，第 1 号，pp.8-13（2020）

論文・解説

27

空力性能の向上を支援する低圧旋回渦同定手法の開発

Development of Identification Method of Low-Pressure Vortices with Swirling Motions to Support Improvement of Aerodynamic Performance

中村 優佑^{*1} 清水 圭吾^{*2}
Yusuke Nakamura Keigo Shimizu

要約

空気抵抗低減とデザインの両立のために、空気抵抗に寄与する低圧旋回渦を同定する手法を開発した。自動車空力の分野で用いられる従来の渦同定手法は、煩雑な同定結果を与え、更に必ずしも低圧旋回渦を同定しているとは限らなかった。そこで、筆者らは、乱流の基礎研究において、低圧旋回渦の渦中心軸を同定する圧力断面極小旋回法に着目し、自動車周りの流れ場にも適用できるように拡張した。具体的には、既存手法を自動車空力のシミュレーションで用いられる非構造格子にも対応できるよう理論を拡張した。更に、煩雑な同定結果をもたらす渦中心軸の断片化を抑制するために、渦中心点の物理的情報を考慮した渦中心軸構築アルゴリズムを開発した。本手法を自動車周りの流れ場に適用した結果、自動車周りに発生する既知の特徴的な渦を同定することができた。更に、本手法は従来手法と比較して、渦中心軸の断片化を抑制することができた。これらの結果から、本手法は自動車周りの低圧旋回渦を同定するのに有効であるといえる。今後は、渦が定量的に評価できるように本手法を進化させ、空気抵抗と渦のモデル式を構築することで、空気抵抗低減とデザインの両立に貢献していく。

Abstract

To achieve both less aerodynamic drag and design, a method to identify low-pressure vortices with swirling motions around a vehicle has been developed. Previous vortex identification methods are generally used in the field of vehicle aerodynamics, which give complex identification results and do not always identify low-pressure vortices with swirling motions. Therefore, we focused on the sectional-pressure-minimum-and-swirl method that visualizes vortex core lines of low-pressure vortices with swirling motions, and extended the method to be applicable to flow fields around a vehicle. Specifically, the existing method was extended to be applied to unstructured grids used in vehicle aerodynamics simulation. In addition, we have developed a vortex core line construction algorithm that uses the physical information of the vortex center point to suppress the fragmentation of the vortex core lines. By applying the new method to the flow field around a vehicle, the known vortices that occur around a vehicle was identified. Moreover, the new method is able to suppress the fragmentation of vortex core lines, which the previous methods cannot. From these results, the new method is proved to be effective to identify low-pressure vortices with swirling motions around a vehicle. In the future works, this method will be extended to be evaluated vortices quantitatively and a model relating vortices and aerodynamic drag will be constructed. This model will be used to contribute to both less aerodynamic drag and design.

Key words : Heat • fluid, Aerodynamic, Computational fluid dynamics, Vortex Identification

1. はじめに

自動車からの二酸化炭素排出量削減や電気自動車の航続距離増加に対して、空気抵抗の低減がますます重要に

なっている。空気抵抗は、空気と物体表面間の摩擦による摩擦抵抗と空気が物体から剥離し渦が形成され、物体背面の圧力の低下による圧力抵抗に分けられる。自動車の場合、空気抵抗の約9割が圧力抵抗であるため⁽¹⁾、そ

*1,2 技術研究所
Technical Research Center

の発生原因である渦をいかに制御するかが重要である。特に、自動車の空気抵抗増大に関連する渦は、渦の中心で圧力が周囲より低く、旋回運動を伴う特徴をもつ低圧旋回渦であることが実験的に観察されている⁽²⁾。一方で、空気抵抗は自動車の外形形状と関連が強いため、デザインと両立しながら空気抵抗を低減することが重要な開発課題となっている。

この課題に対して、筆者らは渦と空気抵抗のモデル式を構築することで、解決を目指している⁽³⁾。具体的には、渦の場所を特定し、個々の渦を空気抵抗に関連する物理量で定量化し、データ分析手法を用いて、

$$C_D = f(\dots, V_{i-1}, V_i, V_{i+1}, \dots) \quad (1)$$

と表すことである。ここで、 C_D は空気抵抗係数、 V_i は*i*番目の渦の定量化値である。このようなモデル式ができれば、デザイン形状により発生する渦は触らずに、目標の空気抵抗を達成するためにどの渦をどれだけ制御すればよいか分かる、つまりデザインと空気抵抗低減の両立を実現する空力開発の戦略立てに役立つことが期待される。更に、空気抵抗に寄与する大きな渦を小さくする効果をもつ渦の発見や、渦同士の複雑な相互作用を逆に利用し、あえて渦を作るという新しい発想ができることで、流線形の外形形状でなくても低空気抵抗を実現できる可能性がある。

渦と空気抵抗のモデル式を構築するためには、まず自動車周りの複雑な流れ場から渦の場所を特定する渦同定手法が必要である。モデル式の構築のために、渦同定手法は以下の三つの要請を満たす必要があると考えられる。一つ目は、低圧旋回渦を同定できることである。これは前述にあるように、低圧旋回渦は自動車の空気抵抗に関連するためである。二つ目は、自動車が走行する状態と風洞状態で同定された渦が同じである、つまり同定された渦がガリレイ変換に対して不変である。ガリレイ変換は、静止または等速度運動している二つの座標系の変換であり、流体の運動方程式であるナビエストークス方程式はガリレイ変換を施しても方程式の形が変わらず不変である。この性質を利用して、自動車空力の研究開発では、再現性や簡便性の観点から、地上に固定した座標系、すなわち空気が静止して自動車が走行する環境でなく、自動車とともに等速運動する座標系、つまり空気を動かして自動車を固定する風洞状態を用いることが多い。しかし、渦同定手法によっては、同定された渦がガリレイ変換に対して不変でないことが指摘されている⁽⁴⁾。三つ目は、渦の個別同定である。これは、モデル式において、空気抵抗の説明変数として定量化された個々の渦を用いるためである。

一方で、さまざまな流体现象下で渦を同定するために、これまでに多くの渦同定手法が提案されている⁽⁵⁾。しかし、これらの従来手法は、モデル式の構築に必要な渦同

定手法の要請を満たしていない。渦同定手法は、大きく分けて領域型と渦中心型の二種類に分けられる。まず、領域型の可視化事例を Fig. 1 に示す。領域型は、スカラーの物理量の等値面を用いて渦の領域を同定する手法であり、三次元空間の大規模な渦の同定に適する。しかし、ユーザーが選択する等値面の閾値によって渦の同定結果が変わること、本来個別に存在する渦同士が連結し、塊として可視化されることから、渦の個別同定が困難である。次に、渦中心型の可視化事例を Fig. 2 に示す。渦中心型は、線を用いて旋回する渦の中心軸を同定する手法であり、小規模な渦の把握に適する。しかし、渦の中心軸が断片的になり、多数の渦が可視化されるため、複雑な流れ場での渦の個別同定が困難である。

そこで、筆者らは、ガリレイ変換に対して不変で、かつ低圧旋回渦の渦中心軸を同定できる渦中心型の圧力断面極小旋回法⁽⁴⁾⁽⁶⁾に着目した。しかし、この手法を自動車周りの流れ場に応用するためには、二つの課題がある。一つ目は、さまざまな形の計算格子で使用できるよう手法を拡張することである。圧力断面極小旋回法は、乱流の基礎研究で用いるため、規則正しく並んだ立方体の計算格子を前提としている。自動車周りの流れ場のシミュレーションでは、自動車の複雑な形状を再現するため、四面体や三角柱などのさまざまな形の計算格子、いわゆる非構造格子を用いることが多い。二つ目は、渦中心軸の断片化を抑制するアルゴリズムの開発である。渦中心型の手法は、渦中心軸が断片化しやすく、渦の個別同定が困難になりやすい⁽⁵⁾。

そこで、本稿は圧力断面極小旋回法を自動車周りの流れ場に応用し、その有効性を示すために、筆者らが行った手法の拡張内容及びその検証結果⁽⁷⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾について解説する。

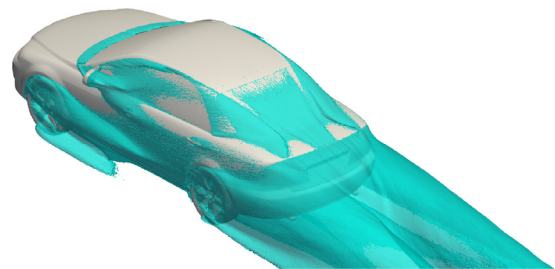


Fig. 1 Vortex Region Method



Fig. 2 Vortex Core Line Method

2. 方法

2.1 圧力断面極小旋回法

まず、渦同定手法のベースとなる圧力断面極小旋回法⁽⁴⁾⁽⁶⁾について解説する。この手法は、圧力の二次元的な極小点であり、かつ旋回条件を満たす渦中心点を求め、それらを線でつなぐことで低圧旋回渦の渦中心軸を同定する手法である。

はじめに、圧力が二次元的な極小値となる点を求める。任意の位置 x における圧力 p を求めるために、格子点 X まわりでのテイラー展開による二次近似式、

$$p(x) = p(X) + \frac{\partial p}{\partial x_i}(x_i - X_i) + \frac{\partial^2 p}{\partial x_i \partial x_j}(x_i - X_i)(x_j - X_j) \quad (2)$$

を用いる。ここで、同じ添え字の繰り返しについては、1 から 3 まで和をとる。式(2)の右辺第三項は、圧力を空間で二階偏微分した圧力ヘシアンである。圧力ヘシアンは対称行列であるため、その固有値 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ は実数(ただし、 $\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3$)となり、対応する固有ベクトル e_1, e_2, e_3 は正規直交基底となる。式(2)は圧力ヘシアンの固有ベクトルで座標変換することで、

$$p(x') = \frac{\lambda_i}{2}(x'_i - C_i)^2 + \text{const.} \quad (3)$$

と標準形に変形できる。 x' は座標変換後の基底で表現した位置ベクトル、 C' は定ベクトルである。 $\lambda_2 > 0$ のとき、 e_1-e_2 平面上において、圧力は下に凸の二次曲面となり、点 C' で極小値をもつ。このときの計算格子と格子点 X 、極小点 C' の関係を Fig. 3(a) に示す。ここで、固有ベクトル e_3 を渦軸の向きと定義する。Fig. 3(b) に示すように、 e_3 に平行で点 C' を通る直線上で、格子点 X との距離が最短になる点 C を渦中心点の位置とする。このとき、式(2)の近似精度を保つためには、格子点 X と渦中心点 C の距離が近いことが必要である。そのため、渦中心点は計算格子の内部にあるもののみを抽出する。具体的には、立方体の一辺の長さが Δ の計算格子であれば、全ての $i=1, 2, 3$ に対して、

$$|X_i - C_i| < \frac{1}{2}\Delta \quad (4)$$

が成り立つという条件を課す。

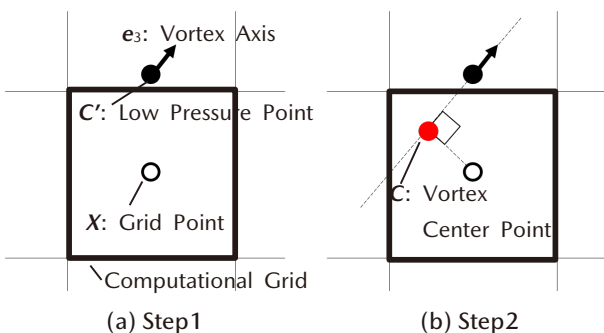


Fig. 3 Procedure for Finding the Vortex Center Point

次に、旋回条件を満たす点のみを抽出する。その条件として、 e_1-e_2 平面において、流線が楕円であることを課す。具体的には、 e_1-e_2 平面での速度勾配テンソル W が複素固有値をもつこと、すなわち判別式 D が負、

$$D = \frac{1}{4}(W_{11} - W_{22})^2 + W_{12}W_{21} < 0 \quad (5)$$

であることを課す。

全ての計算格子において、渦中心点の位置決定と旋回条件の判定を行い、最短距離にある渦中心点同士を線で結合することで、渦中心軸を構成する。

2.2 自動車周りの流れ場への応用

圧力断面極小旋回法を自動車の流れ場に応用するためには、一章で述べた課題を解決する必要がある。本節では、筆者らが行った圧力断面極小旋回法の拡張⁽⁷⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾について解説する。

(1) さまざまな形の計算格子への対応

圧力断面極小旋回法では、テイラー展開による近似式(2)の精度を保つため、渦中心点が計算格子の内部にあるという条件を課している。立方体の計算格子の場合、式(4)を用いて容易に判定できる。しかし、自動車周りの流れ場のシミュレーションでは、さまざまな形の計算格子を用いるため、それらの計算格子においても、渦中心点が計算格子の内部にあるか判定する必要がある。

そこで、筆者らは、任意の多面体において、点が内部にあるか外部にあるかを判定する球面投影法⁽¹⁰⁾を採用し、実装した。この方法について簡単に解説する。Fig. 4 に示すように、 n 個の多角形で構成される多面体において、 i 番目の多角形を、判定したい点 Q を中心とする半径 1 の球面に投影する。このとき、投影された球面での表面積を S_i とする。なお、表面積の正負は、点 Q が多角形の表側に位置するか裏側に位置するかで決定する。全ての多角形において、投影された表面積の総和を求め、総和が 0 であれば点は外部、 4π であれば内部にあると理論的に決定できる。ただし、演算中に発生する数値誤差を考慮し、点が多面体の内部にある条件式として、

$$\sum_{i=1}^n S_i > 2\pi \quad (6)$$

であることを課す。

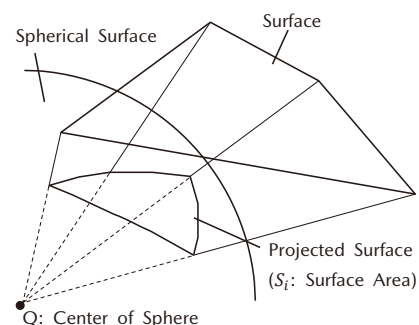


Fig. 4 Projected Surface onto a Sphere with a Radius of 1

(2) 渦中心軸の断片化の抑制

渦の個別同定のためには、渦中心軸の断片化を抑制する必要がある。断片化の原因の一つとして、渦中心軸の構築の際に、渦中心点の物理的情報を考慮していない点が考えられる。圧力断面極小旋回法は、最短距離同士の渦中心点を結合するため、数値誤差などによる誤った渦中心点と結合し、渦中心軸の断片化を引き起こす可能性がある。

そこで、筆者らは、渦中心点の物理的情報を考慮した渦中心軸構築アルゴリズムを開発した。具体的には、結合される渦中心点同士は、類似する物理的情報をもつことが考えられるため、以下に示す二つの角度に着目し、その角度条件を満たす最短距離にある点と結合するとした。Fig. 5 に示すように、各渦軸方向間の角度を θ 、渦軸方向と渦中心軸間の角度を η とし、角度ごとに最大許容角度 θ_{\max} と η_{\max} を設定する。 θ_{\max} を導入する目的は、同じ渦中心軸を構成する渦中心点同士の渦軸の角度の差は、さほど大きくないという点を表現するためである⁽¹¹⁾。 η_{\max} を導入する目的は、数値誤差による渦の中心点の密集によって引き起こされる渦中心軸の非物理的な曲線を防ぐことである。角度の基準である θ_{\max} と η_{\max} を理論的に決定することは困難なため、単純な渦構造である角柱のカルマン渦を用いてパラメータスタディを行い、 $\theta_{\max}=20^\circ$ と $\eta_{\max}=40^\circ$ と決定した。

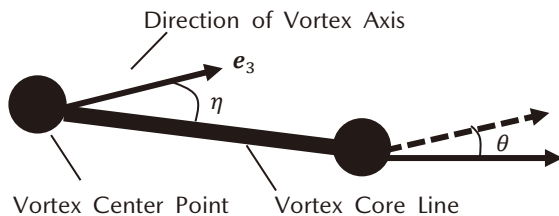


Fig. 5 Definition of Angular to Prevent the Fragmentation of the Vortex Core Lines

3. 結果・考察

圧力断面極小旋回法を拡張した手法（以下、本手法）が、従来手法と比較して有効か検証した結果⁽⁷⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾を解説する。なお、検証に用いる流れ場のデータセットは、数値計算により得られたセダンタイプ周りの時間平均された流れ場とした。

3.1 低圧旋回渦の同定

本手法によって同定された渦中心軸が、低圧旋回渦であるかについて検証を行った。

Fig. 6 に、フロントピラーから発生した渦の可視化結果を示す。コンター図は圧力、矢印は平面上における2次元の速度ベクトル、線は本手法で同定した渦中心軸である。Fig. 6 の赤枠内を見ると、渦中心軸は周囲より圧力が低い部分を通過していることが分かる。更に、渦中心軸近傍の速度ベクトルが回転を表していることから、渦中心軸

近傍の流れは旋回運動をしていることが分かる。これらの結果から、本手法は低圧旋回渦を同定できるといえる。

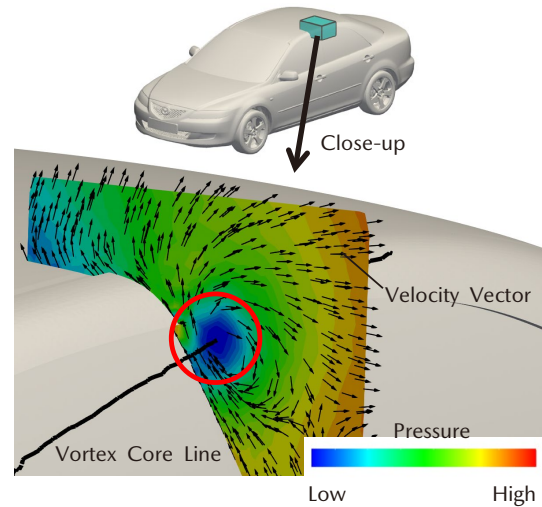


Fig. 6 Pressure Distribution, Velocity Vector and Vortex Core Line around the Front Pillar Vortex

3.2 既知の特徴的な渦の再現性

本手法で同定された渦は、既知の特徴的な渦を再現しなければならない。そこで、本手法がそれらの渦を同定できているか検証を行った。

まず、自動車周りに発生する既知の特徴的な渦を対象に行った検証結果を示す。Fig. 7 に領域型である速度勾配テンソルの第二不変量 $Q^{(12)}$ の等値面と本手法による渦中心軸の同定結果を示す。管状となる Q の等値面は、自動車周りに発生するフロントピラー渦、ボディサイド渦、床下渦、後引き渦といった四つの特徴的な渦⁽²⁾を再現することが知られている。渦中心軸は、特徴的な渦に対応する管状の等値面の中に存在していることが分かる。したがって、本手法は自動車周りの特徴的な渦を同定できるといえる。

次に、フロントタイヤ周りにおける発生する既知の特徴的な渦を対象に行った検証結果を示す。Fig. 8 にフロントタイヤハウス外側における、本手法による渦中心軸の同定結果を示す。渦中心軸の色は回転方向を表しており、主流方向（ x 方向）の渦度が正の場合は赤、負の場合は青で示している。大文字で示す渦は、主流方向に伸びる渦、小文字で示す渦は主流方向に対して直交する方向に伸びる渦である。主流方向に伸びる渦の位置は、先行研究⁽¹³⁾で同定された渦と定性的に一致し、回転方向も一致することが確認できた。よって、本手法により同定された渦中心軸は、フロントタイヤ周りの特徴的な渦を同定できるといえる。

更に、フロントタイヤ周りの渦と関連する既知の流れ構造を再現しているか検証を行った。渦と関連する流れ構造の抽出には、流線による手法がよく用いられる。その際、シード点とよばれる点を空間に配置することで、

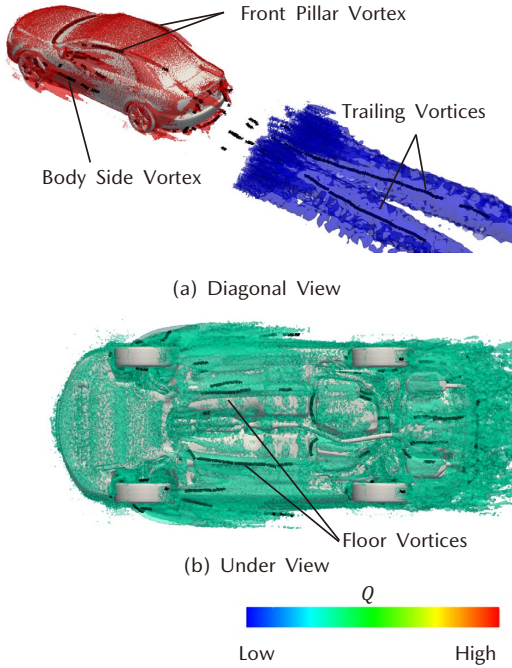


Fig. 7 The Iso-surfaces of Q and the Vortex Core Lines Obtained Using the New Method

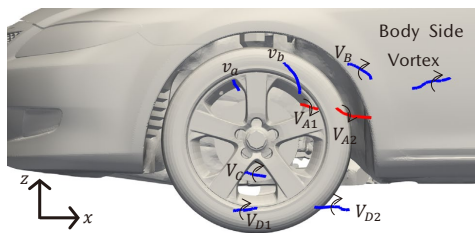


Fig. 8 Vortex Core Lines outside the Front Wheelhouse

シード点を通る流線が可視化される。しかし、シード点の配置には任意性があるため、必ずしも渦に関連する流れ構造を抽出しているとは限らない。そこで、渦中心軸を構成する渦中心点をシード点として流線を可視化する手法を用いた⁽¹⁴⁾。

Fig. 9 に渦 V_{A1} , V_{A2} の渦中心点をシード点とする流線の可視化結果を示す。これらの流線は、タイヤ後方とホイールハウスの隙間から始まっており、タイヤとホイールハウスからの吹き出しを示している。この結果は、先行研究⁽¹³⁾ での結果と一致していることから、本手法は渦に関連する既知の流れ構造を再現できることが確認された。

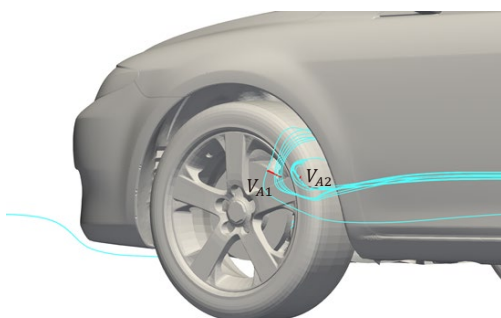
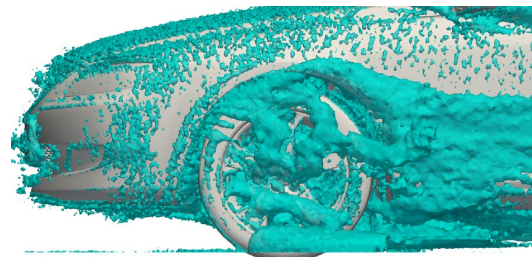


Fig. 9 Streamlines Passing through Vortices V_{A1} and V_{A2}

3.3 本手法と従来手法の比較

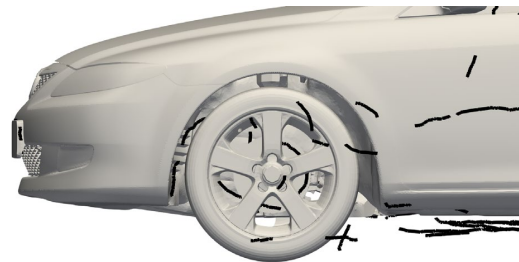
Fig. 10 に、従来手法である領域型の速度勾配テンソルの第二不変量 Q 、渦中心型でよく用いられる Reduced Velocity 法⁽¹⁵⁾ 及び本手法をフロントタイヤ周りに適用した結果を示す。領域型である Q の等値面は、自動車の表面にまばらに分布し、更に管状の等値面同士が連結していることが分かる。渦中心型の Reduced Velocity 法は、渦中心軸が断片的に分布していることが分かる。更に、ボディサイドの渦を同定することができていない。この原因として、Reduced Velocity 法は速度をそのまま渦の定義に用いているため、ガリレイ変換不変性を満たさず、一様流中の渦の同定が困難なためと考えられる。一方、本手法はボディサイド渦を同定できている。また、本手法の渦中心軸の本数は、Reduced Velocity 法に対して 8% であった。よって、本手法は、渦中心軸の断片化を抑制できているといえる。



(a) Q -criterion Method



(b) Reduced Velocity Method



(c) New Method

Fig. 10 Results of Vortex Identification around the Front Wheel by Previous and New Methods

4. おわりに

本稿では、空気抵抗に関連する低圧旋回渦の同定手法を開発するために、圧力断面極小旋回法を自動車周りの流れ場に適用できるよう拡張し、その有効性を検証した結果について解説した。時間平均された自動車周りの流

れ場に本手法を適用し、以下の結果を得た。

- ・本手法で同定された渦中心軸は、周囲より圧力の低い領域を通過し、その近傍流れは旋回運動を伴っていた。よって、本手法は低圧旋回渦を同定できることが確認できた。
- ・本手法は、自動車周り及びフロントタイヤ周りに発生する既知の特徴的な渦を同定できることが確認できた。また、渦中心点をシード点とする流線を可視化することで、渦に関連する特徴的な既知の流れ構造を再現できることが分かった。
- ・従来手法と比較した結果、本手法で同定された渦中心軸は、渦同士が連結することなく、渦中心軸の断片化が抑制されていることが確認できた。

以上の結果より、本手法は、自動車空力の分野で一般的に用いられる従来手法と比較して、空気抵抗に関連する渦をよりよく同定できる手法といえる。

今後の課題は、空気抵抗に影響を与える物理量を用いて、各渦を定量化することである。そして、データ分析手法を用いることで、渦と空気抵抗のモデル式を構築し、デザインと空気抵抗低減の両立をサポートしていく。

なお、本手法に関する一連の研究は、広島大学次世代自動車技術共同研究講座・空気力学研究室のテーマとして実施されたものであり、多大なご協力をいただいた中島卓司准教授、ご助言頂いた陸田秀実教授、農澤隆秀客員教授に感謝申し上げます。

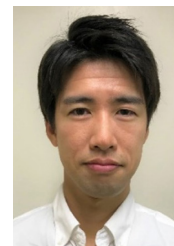
参考文献

- (1) 自動車技術ハンドブック編集委員会：自動車技術ハンドブック 1 基礎・理論編，東京，自動車技術会，p.250 (2004)
- (2) 農澤隆秀ほか：自動車の空気抵抗を増大させる車体周りの流れ構造 第二報 セダン車体の特徴的な流れ構造，日本機械学会論文集 B 編，Vol.75，No.757，pp.1807-1813 (2009)
- (3) 中村優佑ほか：デザインと空気抵抗低減の両立に向けた新しい渦同定手法，自動車技術，Vol.74，No.4，pp.30-35 (2020)
- (4) 三浦英昭ほか：一様等方乱流における低圧力旋回渦の同定と可視化，ながれマルチメディア，Vol.17，No.3 (1998)
- (5) Tobias Günther et al.: The state of the art in vortex extraction, Computer Graphics Forum, Vol.37, No.6, pp.149-173 (2018)
- (6) Shigeo Kida et al.: Swirl condition in low-pressure vortices, Journal of the Physics Society of Japan, Vol.67, No.7, pp.2166-2169 (1998)
- (7) Yusuke Nakamura et al.: Identification of the vortex around a vehicle by considering the pressure minimum, Journal of Visualization, Vol.5, No.23, pp.793-804 (2020)
- (8) Yusuke Nakamura et al.: Visualization of vortex core lines around automobile front wheels using the sectional-pressure-minimum-and-swirl method, 19th International Symposium on Flow Visualization (2021)
- (9) 中村優佑：自動車周りに発生する低圧旋回渦の同定手法に関する研究，広島大学大学院工学研究科博士論文 (2022)
- (10) 長島忍：球面投影法による多面体の内外判定方法，情報処理学会論文誌，Vol.27，No.7，pp.744-746 (1986)
- (11) David C. Banks et al.: A predictor-corrector technique for visualizing unsteady flow, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol.1, No.2, pp.151-163 (1995)
- (12) J. C. R. Hunt: Vorticity and Vortex Dynamics in Complex Turbulent Flows, Transaction of the Canadian Society for Mechanical Engineering, Vol.11, No.1, pp.21-35 (1987)
- (13) Keigo Shimizu et al.: Visualization of flow structures around the front wheel of a sedan-type automobile, 11th Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing (2017)
- (14) Alexander Wiebel et al.: Eyelet Particle Tracing - Steady Visualization of Unsteady Flow, Proceedings of IEEE Visualization, pp.607-614 (2005)
- (15) David Sujudi et al.: Identification of swirling flow in 3-D vector fields, 12th Computational Fluid Dynamics Conference, pp.792-799 (1995)

■ 著 者 ■



中村 優佑



清水 圭吾

受賞技術紹介

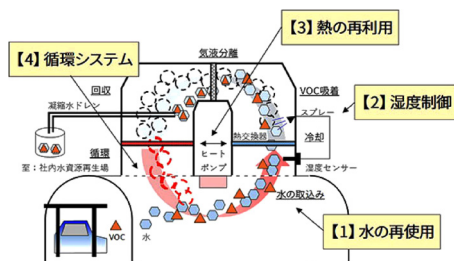
代表的な受賞技術をご紹介します（2022年1月～2023年5月）

第54回 市村地球環境産業賞 貢献賞

受賞テーマ：自動車塗装工程における凝縮水を用いた VOC 回収技術

受賞者：加藤 雄，篠田 雅史，寺本 浩司

概要：自動車の塗装乾燥工程において発生する VOC を，ヒートポンプを利用し回収処理することにより，環境負荷低減および省エネルギーを実現する技術です。今回の技術は，燃焼によって VOC を除去する従来の方法に代えて，ヒートポンプで水蒸気を凝縮させた水（凝縮水）に VOC 成分を吸着させ，水とともに回収するシステムを採用することにより，塗装乾燥炉からの排気ゼロを実現。従来比 63% の CO₂ 削減（年間で約 710 トンの削減）を見込んでいます。また，システム内の熱や水を再利用することにより，水資源や電力の節減にも貢献します。



VOC回収式乾燥システムの仕組み

マツダ技報：[No.38 \(2021\) pp.117-119](#)

CO₂ と VOC を同時に削減する VOC 回収技術の実現

第72回 自動車技術会賞

■技術開発賞

受賞テーマ：防錆開発プロセスを変革する防錆機能迅速評価技術

受賞者：浅田 照朗，佐々木 将展，江崎 達哉，重永 勉，高見 明秀

概要：塗装部の防錆機能を電気化学的な手法で迅速に定量評価することによって，防錆開発プロセスを変革する技術である。本技術の活用により，①市場での使用条件・環境を踏まえた要求性能を数値化，②高機能技術開発の効率化，③防錆性能をリアルタイムに定量管理して品質異常を予知，④得られたビッグデータから最適材料・工程の机上検討による試作レスの道が開け，防錆モデルベース開発による商品開発プロセスの革新を実現できる。



評価機器

マツダ技報：[No.38 \(2021\) pp.133-138](#)

塗装部の耐食性迅速評価技術のモデルベース研究開発

■浅原賞技術功労賞

受賞テーマ：自動車用溶接技術の研究開発及び軽量化技術開発における永年の功績

受賞者：深堀 貢

概要：受賞者は，自動車の溶接技術を中心とした研究開発や軽量化技術の研究に携わり，その実用化に尽力してきた。車体軽量化については，車体の各部材の機能分析に基づいた軽量化を推進し，車体フランジ部へのレーザ溶接技術や接着剤とスポット溶接を併用したウエルドボンドの適用，フレーム内部への発泡樹脂充填材の適用等により操縦安定性や衝突性能などの車両性能の大幅な向上を合わせて実現した。シャーシーなどの足回り部品の軽量化については，溶接として多用されているアーク溶接部の耐食性向上技術の開発に注力し，MBR (Model Based Research) 視点での工法研究を推進し，信頼性向上による軽量化だけでなく，広く業界の技術の発展に寄与した。

令和4年度 全国発明表彰 日本弁理士会会長賞

受賞テーマ：火花点火制御圧縮着火エンジン技術の発明（特許第 6262164 号）

受賞者：松本 浩太，漆原 友則，井上 淳，河合 佑介，宮本 亨，神代 雄大

概要：火花点火燃焼の火炎球によって、ガソリンエンジンでありながらディーゼルエンジンのような圧縮着火燃焼を制御する火花点火制御圧縮着火燃焼（SPCCI）方式の燃焼制御技術です。量産ガソリンエンジンとしては世界初の技術であり、走りの楽しさと燃費・環境性能の両立を実現する技術として高く評価されています。



新世代ガソリンエンジン「SKYACTIV-X」

マツダ技報：[No.36 \(2019\) pp.24-31](#)

SKYACTIV-X を実現する燃焼技術

2022～2023 日本自動車殿堂 カーテクノロジーオブザイヤー

受賞テーマ：ドライバーサポートと緊急時対応の技術：マツダ CX-60

概要：赤外線付きカメラでドライバーを見守り、閉眼状態等による眠気・居眠り検知、姿勢や頭部位置の変化等により体調急変を高い精度で検出する「ドライバー・モニタリング」、心臓、脳の血管、てんかんなど脳神経や低血糖等の疾患による意識喪失に対して、ドライバーの運転が継続できないと判断した場合にクルマが自動で減速停止し、緊急通報まで繋げる先進安全技術「ドライバー異常時対応システム（DEA）」、安全な運転や衝突時の乗員被害の軽減に繋がる自動ドライビングポジションガイドにより、シート・ステアリング・アウターミラーなどを自動で調整し、推奨するドライビングポジションに誰でも簡単に合わせられるようサポートする「ドライバー・パーソナライゼーション・システム」が評価されました。



ドライバー・パーソナライゼーション・システム



DEA を搭載する「MAZDA CX-60」

マツダ技報：[No.39 \(2022\) pp.109-115](#)

CX-60 ドライバー異常時対応システムの開発

[No.39 \(2022\) pp.116-121](#)

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

第57回 機械振興賞 経済産業大臣賞

受賞テーマ：みんなが走る喜びを共有できる新コンセプト自操車の開発

開発担当者：栃岡 孝宏，井上 政雄，田内 一志，前堂 勝久^{*1}，山本 友也^{*1}，佐々木 剛史^{*1}，殿原 恭幸^{*1}
^{*1} 株式会社マツダ E&T

概要：MX-30 SeDVの開発では、ベース車の開発と連携して補助装置の設計を進め、生産体制を工夫することにより、運転席の空間を確保しながら乗降性を高め、価格も抑えることができました。また、リング式アクセルを採用することによりアクセルの操作性を高めて、速度維持が容易になり、コーナリング時でも安定した速度で運転できます。さらに、手動通常運転機能を電子制御で切り替えを容易にして、足の不自由な方がご友人やご家族と共に1台の車で一緒にドライブを楽しめるようにしたことが高く評価されました。



MX-30 Self-empowerment Driving Vehicle (SeDV)

マツダ技報：No.38 (2021) pp.79-85

Self-empowerment Driving Vehicle の開発

第9回 ものづくり日本大賞

■製品・技術開発部門「経済産業大臣賞」

受賞テーマ：商品性と環境性と経済性を両立できるバイオエンブラ新意匠 2層成形技術の開発

受賞者：一原 洋平

概要：環境に優しく透明性の高い植物由来材料であるバイオエンブラを使用した表層樹脂と、基材表面に柄を刻み込んだ基材樹脂との2層成形により、深みのある色合いと精緻感、陰影感など、従来技術では実現困難な意匠を実現できるバイオエンブラ新意匠 2層成形技術を開発した。従来は意匠性を向上させるために必要だった塗装工程やフィルム工程などの製造工程を廃止することで、環境負荷低減と部品レベルでのコスト改善を可能にした。



表面模式図

マツダ技報：No.36 (2019) pp.225-228

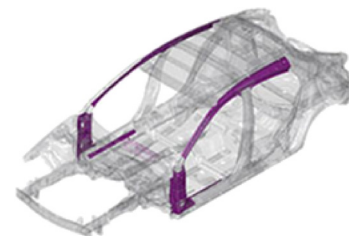
バイオエンブラ新意匠 2層成形技術の開発

■製造・生産プロセス部門「中国経済産業局長賞」

受賞テーマ：自動車安全性能向上とカーボンニュートラルを両立する次世代超高強度鋼板成形技術開発

受賞者：弘中 武都，安達 範久，深井 隆文，玉井 良清^{*1}，新宮 豊久^{*1}，田中 康治^{*2}，小川 操^{*2}
^{*1}JFE スチール株式会社，^{*2} 日本製鉄株式会社

概要：自動車ボディ製造に使用する素材の中でも、高強度軽量かつCO₂排出量を抑制できる超高強度鋼板の量産適用において従来は製品精度の課題があった。この課題に対し、「スプリングバック（以下S/B）量を精度良く予測する方法」から「S/Bそのものを抑制する方法」へ業務プロセスを変革、S/B量を低減できる成形技術を開発し課題を解決した。また、新規鋼板開発から新型車量産までの基礎技術開発を鉄鋼メーカー／開発／生産部門の三位一体活動により、2019年には1310MPa級高張力鋼板を適用した「MAZDA3」のボディ量産化に成功した。



1310MPa 鋼板を適用した「MAZDA3」

マツダ技報：No.36 (2019) pp.192-198

1310MPa 級高張力鋼板冷間プレス部品の開発

2022年度 NEDO 省エネルギー技術開発賞 理事長賞

受賞テーマ：自動車用モータ可変界磁技術の開発

概要：従来は一定であった界磁（磁石磁力）の大きさを運転条件に応じて変化させ、各運転条件に適したモーター性能を確保することにより、モーターの発電量向上を実現した。本技術の導入により、モーター実用域の効率改善と減速エネルギー回生量の増加が可能になり、高効率内燃機関との組み合わせで、従来のモーターを用いたハイブリッド車に対して15%の燃費向上（WLTCモード燃料消費率）を見込んでいます。今後は、プラグインハイブリッド車や電気自動車にも当該技術を適用して、モーター駆動による走行距離を延長しつつ、使用エネルギーの効率を改善することにより、環境負荷低減を図ります。

第55回 市村産業賞 功績賞

受賞テーマ：運転者の体調を見守り安全を支えるドライバー異常時対応システム

受賞者：栃岡 孝宏，中島 康宏，岡野 英紀

概要：事故を誘発したドライバーの発作や疾患の症例を分析、人体や脳のメカニズムを理解・モデル化することで、意識喪失などの体調変化を高精度に検知することを可能にしました。これにより、一般道においても迅速なドライバー異常の自動検知から車両の減速停止させることにより、周囲の歩行者や車両への被害軽減を図ります。



DEAを搭載する「MAZDA CX-60」

マツダ技報：[No.39 \(2022\) pp.109-115](#)

CX-60 ドライバー異常時対応システムの開発

令和5年度 科学技術分野の文部科学大臣表彰 科学技術賞（開発部門）

受賞テーマ：防錆開発プロセスを変革する防錆機能迅速評価技術の開発

受賞者：浅田 照朗，佐々木 将展，江崎 達哉，重永 勉，高見 明秀

概要：防錆開発プロセスを変革する技術として開発されました。塗装部分の防錆機能を電気化学的な手法で評価することにより、要求性能の数値化やそれに伴う技術開発の効率化が可能となり、試作品を使うことなく材料や工程を机上検討すること（モデルベース開発）を実現します。



評価機器

マツダ技報：[No.38 \(2021\) pp.133-138](#)

塗装部の耐食性迅速評価技術のモデルベース研究開発

第 73 回 自動車技術会賞

■技術開発賞

受賞テーマ：独自の大排気量コンセプトと燃焼の理想追求に拘った 3.3L ディーゼルエンジンの開発

受賞者：志茂 大輔，森永 真一，岡澤 寿史，金 尚奎，小林 徹

概要：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ける現実的かつ有効な Well-to-Wheel 視点での CO₂ 削減には、電動化と合わせて、内燃機関の効率改善および将来的な再生可能燃料の普及を考慮したマルチソリューションが必要である。このたび開発したディーゼルエンジンは、排気量を従来の 2.2L から 3.3L に拡大し排気量当たりの最大負荷を抑えながらも高トルク・高出力化を達成した。これに段エッグシェイプ燃焼室を用いて燃料噴霧と空気のリーン予混合気を形成して理想の燃焼を追求した DCPC（空間制御予混合燃焼）と、摩擦低減技術を組み合わせることで、乗用量産エンジンで最高レベルの実用域熱効率、および国内 RDE（実路走行排気試験）規制に余裕を持って対応するクリーン排気を実現した。



SKYACTIV-D 3.3

マツダ技報：[No.39 \(2022\) pp.14-20](#)

第 2 世代 SKYACTIV-D の燃焼技術

[No.39 \(2022\) pp.21-27](#)

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 —

[No.39 \(2022\) pp.28-35](#)

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 —

[No.39 \(2022\) pp.36-42](#)

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 —

[No.39 \(2022\) pp.43-50](#)

SKYACTIV-D 3.3 の開発における MBD プロセス革新と適用

■浅原賞学術奨励賞

受賞テーマ：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

受賞者：足立 崇勝

概要：自動車業界ではシミュレーション技術が高度化し、様々な特性や性能の膨大なデータが短時間で得られるようになった。一方で、データの的確な解釈と、本質的なメカニズム解明に向けたデータ分析技術の必要性が高まっている。受賞者は、膨大なデータから重要因子を抽出し因子間の連鎖関係を可視化する独自の機械学習手法を着想し、メカニズム解明支援技術を開発した。結果、ロードノイズという多くの部品の構造と振動特性が複雑に相互作用する現象を、技術者が解釈可能なネットワーク図として短時間で可視化できることを実証した。また、軽量化とロードノイズ性能を考慮した車両開発プロセスを効率化できることを示した。

社外への発表論文一覧表（2022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
2022.1.18	Fahrzeug-Aerodynamik - Haus der Technik	Multi-Objective Aerodynamic Shape Optimization of Simplified Automobile Using HPC	中島 卓司 清水 圭吾 平岡 武宜 犬井 太一 坪倉 誠 福本 浩章 大山 聖 中村 優佑 農澤 隆秀	広島大学大学院 技術研究所 同上 神戸大学大学院 同上 JAXA 同上 広島大学大学院 同上
2022.1.25-27	27th International Symposium on Artificial Life and Robotics	Human arms' compliance properties based on upper limb posture and muscle activity analysis in steering wheel operation	杉本帆乃香 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
2022.3.15	The 7th International Conference on Jets, Wakes and Separated Flows 2022	Identification of wake vortices in a simplified automobile model under parallel running truck and crosswind condition	中村 優佑 中島 卓司 陸田 秀実 金平 大河 農澤 隆秀 平岡 武宜 清水 圭吾	広島大学大学院 同上 同上 同上 同上 技術研究所 同上
2022.5.23	Materials Research Society 2022 MRS Spring Meeting & Exhibit	Numerical investigation of influencing factors of slag transportation process during metal active gas welding using particle method	深澤 孝公 古免 久弥 田中 学 茂田 正哉 深堀 貢 斉藤 直子 山田 哲生	大阪大学 同上 同上 東北大学 技術研究所 同上 パワートレイン技術開発部
2022.5.25	Asian Congress of Structural Multidisciplinary Optimization 2022 (ACSMO2022)	Design of Sandwich Panel Structure by 2 Step Optimization of Fully Stressed Design and Genetic Algorithm	佐々木 伸	技術研究所
2022.7.5-8	The Japan Society of Mechanical Engineers The 10th International Conference on Modeling and Diagnostics for Advanced Engine Systems (COMODIA2022)	Comprehensive Surface Reaction Mechanism of C ₂ H ₄ / C ₃ H ₆ Oxidation on Pt/Al ₂ O ₃ , Pd/Al ₂ O ₃ and Rh/Al ₂ O ₃ for Three Way Catalysts Modeling of C ₃ H ₈ Oxidation on Pt/Al ₂ O ₃ Surface for Monolith Honeycomb Catalysts A New Concept for High Efficiency and Clean Diesel Combustion by Controlling Mixture Distribution with Dual Zone Combustion Chamber Modeling of the turbulent burning velocity considering the effect of fuel composition in EGR condition	松本 有平 Set NAING I PUTU ANGGA KRISTY 日隈 聡志 村上 浩 河野 通治 三好 明 下栗 大右 鏡原 匠人 松本 有平 日隈 聡志 Set NAING 大森 智仁 村上 浩 河野 通治 三好 明 下栗 大右 金 尚奎 岡田晋太郎 李 魁春 松尾 建 神崎 淳 志茂 大輔 崎間 俊明 原田 雄司 大野 諒平 工藤 毅暁 山下 洋幸	MBD 革新部 広島大学 同上 産業技術総合研究所 走行・環境性能開発部 MBD 革新部 広島大学 同上 広島大学 MBD 革新部 産業技術総合研究所 広島大学 同上 走行・環境性能開発部 MBD 革新部 広島大学 同上 エンジン性能開発部 同上 同上 同上 同上 同上 技術研究所 同上 同上 同上 同上

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2022.7.5-8	The Japan Society of Mechanical Engineers The 10th International Conference on Modeling and Diagnostics for Advanced Engine Systems (COMODIA2022)	Tribological Properties of Various DLC Coatings under Boundary Lubrication Conditions	藪水 暁 星屋 利旗 堀端 頌子 河口健太郎 宮内 勇馬 崔 俊豪	東京大学 同上 技術研究所 同上 同上 東京大学
2022.7.17-22	日本溶接会議 (JIW) IIW2022 年次大会・国際会議	Numerical investigation of influencing factors of slag transportation process during metal active gas welding using incompressible smoothed particle hydrodynamics method	深澤 孝公 古免 久弥 茂田 正哉 田中 学 深堀 貢 斉藤 直子 山田 哲生	大阪大学 同上 東北大学 大阪大学 技術研究所 同上 ドライブトレイン開発部
2022.7.23-27	20th International Conference on Cognitive Modeling (ICCM 2022)	Modeling Optimal Arousal by Integrating Basic Cognitive Components	長島 一真 西川 純平 米田 凌 森田 純哉 寺田 哲也	静岡大学 同上 同上 同上 統合制御システム開発本部
2022.7.27-30	44th Annual Meeting of the Cognitive Science Society (CogSci 2022)	Analyzing the Effect of External Environments on Mind Wandering during a Perceptual-Motor Task	米田 凌 長島 一真 西川 純平 森田 純哉 寺田 哲也	静岡大学 同上 同上 同上 統合制御システム開発本部
2022.7.31-8.2	International ASET Inc. (国際理工学アカデミー) 9th International Conference on Heat Transfer and Fluid Flow (HTFF'22)	Correlation between wall heat transfer and characteristics of pulsating flow in a rectangular tube toward an automobile exhaust system	加藤 由幹 郭 官明 神垣 雅也 藤本 健明 川口 幹祐 西田 恵哉 尾形 陽一 本郷 均 幸徳 正信 横畑 英明 山本 亮 寿美 真治	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
2022.9.6-9	SICE ANNUAL CONFERENCE 2022	Study on Estimation of Air Charging Efficiency using Gaussian Process toward Soft Sensors A Study of Retraining-free Pruning for Deep Neural Networks	小川 史恵 高野 靖也 川口 貴弘 朝見 聡 佐々木理沙子 進矢 義之 足立 修一	技術研究所 慶應義塾大学 群馬大学 統合制御システム開発本部 同上 同上 慶應義塾大学
2022.9.12-15	15th International Symposium on Advanced Vehicle Control (AVEC'22)	Development of Kinematic Posture Control	平賀 直樹 加藤 史律 梅津 大輔 山門 誠 安部 正人	操安性能開発部 同上 同上 神奈川工科大学 同上
2022.9.14-16	2022 International Research Council on the Biomechanics of Injury (IRCOBI)	Analysis of Individual Variabilities for Lumbar and Pelvic Alignment in Highly Reclined Seating Postures and Occupant Kinematics in a Collision	泉山 朋大 西田 周泰 山縣 大樹 朝日 龍介 陳 献 大木 順司 杉本 繁 福島 正信	衝突性能開発部 山口大学医学部 同上 衝突性能開発部 山口大学工学部 同上 衝突性能開発部 同上
2022.10.11-13	SIP-adus Workshop 2022	V2X Communication for Cooperative Driving Automation and Next Step	岩下 洋平	開発調査部

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2022.10.25	Visual-JW 2022	Particle-based Simulation of Slag Transfer Process During Metal Active Gas Welding	深澤 孝公 田中 学 茂田 正哉 山田 哲生 深堀 真 斉藤 直子	大阪大学 同上 東北大学 ドライブトレイン開発部 技術研究所 同上
2022.10.28-30	ILASS Asia 2022	Vortex Flow Patterns with Single or Twin String Cavitation in Multi-Hole Mini-Sac Diesel Fuel Injectors and Sprays	Dlukha Nurcholik 三輪 誠 宋 明良 西田 恵哉 川口 幹祐 松本 有平 和田 好隆	神戸大学 同上 同上 広島大学 同上 同上 MBD 革新部
		Single String Cavitation and Swirling Flow in a Nozzle and a Hollow-Cone Spray	Dongping Shen 三輪 誠 宋 明良 横畑 英明 和田 好隆 植木 義治	神戸大学 同上 同上 マツダ (株) MBD 革新部 同上
2022.11.2-3	11th Automotive Passive Safety Technology and Regulation Symposium (11th PSTARS)	A study on the relationship between pedestrian thorax injury and head injury criterion at passenger car to pedestrian collision.	曾我部 洋	衝突性能開発部
2022.11.9-12	2022 The 10th International Conference on Control, Mechatronics and Automation (ICCMA 2022)	Active reduction of transient driveline oscillations with fuzzy update timings of control input	米沢 平成 米沢 安成 梶原 逸朗 波多野 崇 平松 繁喜 西留 千晶	北海道大学 同上 同上 統合制御システム開発本部 同上 キャテック (株)
2022.11.10	Executive Committee of International Conference on Flow Dynamics	Flow topology on ahmed body with a deflector by a sub-grid global skin-friction measurement method	Tran the Hung 土黒 聖斗 安養寺正之 内田 孝紀 中島 卓司 清水 圭吾	九州大学 同上 同上 同上 広島大学 技術研究所
2022.11.12-16	Neuroscience 2022, the Society for Neuroscience's 51st Annual Meeting	Temporal attention-mediated enhancement of N60 toward facial affect: From the perspectives of awareness and trait anxiety	M. Suzuki T. Urakawa T. Imani O. Araki	東京理科大学 統合制御システム開発本部 東京理科大学 同上
		Effect of change-related response on access processing to visual awareness	Y. Kurita T. Urakawa K. Ueno M. Mitani O. Araki	東京理科大学 統合制御システム開発本部 東京理科大学 同上 同上
		Cortical synchronization at the theta-band is relevant to exogenously-driven perceptual alternation of the binocular rivalry: A transcranial alternating current stimulation study	H. Goto T. Urakawa Y. Kurita K. Ueno O. Araki	東京理科大学 統合制御システム開発本部 東京理科大学 同上 同上
2022.11.19-22	10th Annual Conference on Advances in Cognitive Systems (ACS 2022)	Representing Motivation in a Simple Perceptual and Motor Coordination Task based on a Goal Activation Mechanis	西川 純平 長島 一真 米田 凌 森田 純哉 寺田 哲也	静岡大学 同上 同上 同上 統合制御システム開発本部
2022.11.28-30	15th Airbag2022	Improvement of safety in the deep oblique crash	竹下 弘明 岡田 慎二 晝田 輝彦	衝突性能開発部 同上 同上
		Split tether to position the driver's airbag between the steering wheel and the driver's body	宮島 陽一 晝田 輝彦 越川 公裕 小川 誠	衝突性能開発部 同上 Joyson Safety Systems Japan G.K. 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
2022.2.1	軽金属学会 軽金属学会 70 周年中国四国支部記念事業	アルミニウム／異種材料の点接合技術	西口 勝也	技術研究所
2022.2.9-10	東京大学モビリティ・イノベーション連携研究機構 (UTmobl) 自動車技術に関する CAE フォーラム 2022 オンライン	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	技術研究所
2022.2.10	日本機械学会 第 22 回 日本機械学会傷害バイオメカニクス研究会	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 岡澤 重信 山内 一矢 小島 宏介	山梨大学 同上 MBD 革新部 同上
2022.2.14-25	NTT コミュニケーションズ カーボンニュートラル (GX), セキュリティ, DX で実現する社会貢献と企業経営を支える ICT のトレンド	人間中心のクルマ作り	上藤和佳子	商品開発本部
2022.2.17	中産連×愛知県 自動車産業フォーラム 2022	「メーカーの垣根を超えた日本の自動車産業の国際競争力向上のために」	足立 智彦	統合制御システム開発本部
2022.2.18	熊本大学大学院 第 1 回データ駆動型社会における産学連携シンポジウム	多目的設計最適化とデータ分析を用いた自動車車体構造の設計支援手法	小平 剛央	技術研究所
2022.2.18	産総研中国センターシンポジウム 「カーボンニュートラル社会に向けて」	「将来自動車技術におけるカーボンニュートラルへの取り組み」	山本 寿英	技術研究所
2022.2.24	CAE 懇話会 第 10 回中四国 CAE 懇話会	「設計プロセスの変革への挑戦」～多目的設計最適化技術×データマイニング技術の賢い使い方～	小平 剛央	技術研究所
2022.2.24-25	(株) インプレス 第 7 回オートモチブ・ソフトウェア・フロンティア 2022	「MBD 推進センター (JAMBE: ジャンビー) 設立」	足立 智彦	統合制御システム開発本部
2022.2.28	女性学生対象セミナー	自分らしく働く～博士号取得後の女性キャリアパス～	福岡 早紀	技術研究所
2022.3.3	日本規格協会 2021 年度 QRG 技術開発フォーラム 特別講演 2	お客様の輝きにつなげるマツダのものづくり。 一魂動デザイン実現に向けたプレス金型製作プロセス革新	安達 範久	技術本部
2022.3.3	日本機械学会 中国四国学生会 第 52 回学生員卒業研究発表講演会	定容容器を用いたエンドガス自着火に与える一酸化窒素添加の影響の調査	平松 弦 浜崎 亨 常藤 飛鳥 瀬尾 健彦 三上 真人 下栗 大石 河野 通治 本田 雄哉	山口大学 同上 同上 同上 同上 広島大学 MBD 革新部 同上
2022.3.4	日本機械学会 中国四国支部 第 60 期総会・講演会	水平矩形管内気流の脈動周波数が壁面熱伝達と流動形態に及ぼす影響	藤本 健明 郭官 明 加藤 由幹 神垣 雅也 川口 幹祐 西田 恵哉 尾形 陽一 本郷 均 幸徳 正信 横畑 英明 山本 亮 寿美 真治	広島大学 同上 同上 同上 同上 同上 MBD 革新部 同上 同上 同上 同上 同上

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2022.3.4	日本機械学会 中国四国支部 第 60 期総会・講演会	矩形管内の定常・脈動気流を受ける液膜 飛散分裂挙動の研究	丸岡 朋貴 謝 哲也 西田 恵哉 川口 幹祐 長野 祥江 中島 聖 幸徳 正信 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
		矩形管路内の混合促進に及ぼすノズル配 置に関する実験的研究 Experimental study of nozzle arrangement on mixing enhancement in a rectangular duct	井上 健 望月 信介 幸徳 正信 本郷 均 宮川 弘基 中村 和博	山口大学 同上 MBD 革新部 同上 同上 同上
		自動車の企画構想プロセス補助アルゴリ ズムの精度向上について	原田創之介 宇根崎 弘 近藤 秀一 波多野 崇 平松 繁喜 荒川 雅生	香川大学 統合制御システム開発本部 電子基盤開発部 統合制御システム開発本部 同上 香川大学
		ステレオ PIV を用いた簡易車両模型に生 じる後流構造の変遷過程の可視化	加藤 滉大 中島 卓司 中村 優佑 清水 圭吾 平岡 武宜	広島大学大学院 同上 同上 技術研究所 同上
		お客様の輝きにつなげるマツダの金型づ くり	安楽 健次	ツーリング製作部
2022.3.10-11	インダストリアル・バリューチェー ン・イニシアティブ IVI 公開シンポジウム 2022-Spring-	AI による発電効率とエンジン検査精度の 向上	市本 秀則 藤山 佳宏 影山 望 小森 悠一	生産企画部 プラント技術部 パワートレイン技術部 同上
		シリンダーヘッド鑄造用砂型の品質管理	福本 豊 三浦 直洋	パワートレイン技術部 同上
2022.3.22	福岡県産業・科学技術振興財団, 北 九州産業学術推進機構 MBD (モデルベース開発) 入門セミ ナー	「MBD 推進センター (JAMBE: ジャン ビー) 設立」	足立 智彦	統合制御システム開発本部
2022.3.23-25	エレクトロニクス実装学会 第 36 回エレクトロニクス実装学会 春季講演大会	自動車における構造接着技術の動向と課 題	麻川 元康	技術研究所
2022.3.25	スマートプロセス学会 第 12 回 有機/無機接合研究委員会	自動車における構造接着技術の動向と課 題	麻川 元康	技術研究所
2022.3.25	自動車技術会 第 75 回 技術交流会	魂動デザインの忠実な再現に向けた金型 の高精度・高品位加工の取り組み	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
2022.3.29	自動車技術会 生産加工部門委員会 技術交流会 #77 樹脂	車両樹脂部品軽量化のための工法・機能 モデルの開発	荒井 知夢	車両技術部
2022.4.13-15	RX Japan (株) 名古屋ものづくりワールド基調講演	マツダのモノ造り ～モノ造りの志と挑戦～	向井 武司	マツダ (株)
2022.4.21	産総研コンソーシアム 「フレキシブルエネルギーデバイス」 第 1 回講演会	モデルベースによる自動車の熱マネージ メント技術開発	種平 貴文	技術研究所
2022.4.22	自動車技術会 中部支部 第 1 回技術講習会	人間中心のクルマ作り ～MAZDA MX-30 の開発～	上藤和佳子	商品開発本部
2022.5.25-27	自動車技術会 2022 年春季大会 学術講演会	深層学習を用いたアルミ押出部品のエネ ルギ吸収特性予測	西原 剛史 長谷 崇 鈴木 香織 大嶺 慶太	衝突性能開発部 同上 同上 同上

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2022.5.25-27	自動車技術会 2022 年春季大会 学術講演会	Kinematic Posture Control (KPC) の開発	平賀 直樹 加藤 史律 梅津 大輔 山門 誠 安部 正人	操安性能開発部 同上 同上 神奈川工科大学 同上
		塗装部の防錆機能の迅速評価技術に基づく品質革新技術の開発	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
		防錆開発プロセスを変革する防錆機能迅速評価技術	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
		グラフ構造化分析を用いた側突時の荷重伝達経路の解明	奥山 智仁	技術研究所
		耐食性に優れた構造用接着剤の開発	麻川 元康 古賀 一陽 福田 克弘 渡邊 伸明 長友 博之 江崎 達哉 牧野 大輔 村地 勇佑 東出 勇毅	技術研究所 車両実研部 同上 車体技術部 ボデー開発部 技術研究所 セメダイン (株) 同上 同上
		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2報)	山川 啓介 桂 大詞 井上 実 遊川 秀幸 山本 崇史 伊東 博之 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	技術研究所 同上 装備開発部 技術研究所 広島大学/工学院大学 (株) 東洋シート 広島大学/東北大学 同上 同上 広島大学 同上 同上 同上 同上
		繊維強化樹脂複合材の耐火性能向上に向けた検討	杉浦 拓実 後藤 悠人 仲井 朝美 大越 雅之 中村 晴彦 村井 誠 小川 淳一 谷川 卓矢 安田 周平	岐阜大学 同上 同上 同上 ダイキョーニシカワ (株) 同上 技術研究所 同上 同上
		筒内状態量制御による直噴ガソリンエンジンの冷間エミッション低減に関する研究 (第1報)	工藤 毅暁 堀 隼基 瀬戸 祐利 原 亮介 藤川 竜也 山川 正尚	パワートレイン技術開発部 同上 同上 同上 同上 技術研究所
		高速運転時の異常燃焼対応のための制御技術開発	中本 仁寿	技術研究所
		ガソリンエンジンにおける燃焼形態が熱損失分布に与える影響	松田 啓嗣 内田 健司 原田 雄司 山下 洋幸	技術研究所 同上 同上 同上

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2022.5.25-27	自動車技術会 2022 年春季大会 学術講演会	アルミニウムダイカスト／圧延材の摩擦攪拌点接合	田中耕二郎 西口 勝也 島田 聡子 杉本 幸弘	技術研究所 同上 同上 広島大学
		機械学習を用いた曲げ板部材の塑性変形時の応力分布予測	鈴木 寛太 桐山 一郎 伊東虎太郎 杉山 裕文 横山 優太	山梨大学 同上 同上 同上 山梨大学／ダイバーテクノロジー（株）
		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	岡澤 重信 山内 一矢 小島 宏介 和田 尚美 和田 有司 弓削 康平 木崎 勇 橋田 光二 寺田 栄	同上 MBD 革新部 同上 MBD 革新部 東京工業大学 成蹊大学 ボデー開発部 同上 MBD 革新部
2022.5.29-31	日本材料学会 第 71 期学術講演会	ガラス短繊維 PP のき裂発生および進展に及ぼす繊維配向の影響	酒井 宙也 荒川 仁太 曙 紘之 菅田 淳 大下 浄治 谷澤 浩樹 志水 克教 小川 淳一	広島大学 同上 同上 同上 同上 同上 同上 技術研究所
2022.5.30-31	日本ゴム協会 2022 年年次大会	NR/BR ブレンドゴムの架橋密度と低温結晶性に関する研究①	小林 一磨 三宅 祐矢 中谷都志美 大下 浄治 大竹 恵子 甲斐 裕之	倉敷化工（株） 同上 広島大学 同上 技術研究所 同上
		NR/BR ブレンドゴムの架橋密度と低温結晶性に関する研究②	中谷都志美 大下 浄治 小林 一磨 三宅 祐矢 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
2022.6.1-3	日本計算工学会 第 27 回計算工学講演会	車体における剛性・衝突・振動の複数性能トポロジー最適化	和田 有司 和田 尚美 弓削 康平 木崎 勇 橋田 光二 寺田 栄	東京工業大学 MBD 革新部 成蹊大学 ボデー開発部 同上 MBD 革新部
2022.6.6-8	日本ゲノム編集学会 第 7 回大会	微細藻類 Nannochloropsis における脱落可能プラチナ TALEN ベクターとキャリア DNA フリーのエレクトロポレーションを利用した外来遺伝子フリーゲノム編集	栗田 朋和 諸井 桂之 岡崎久美子 坂本 敦 佐久間哲史 山本 卓 太田 啓之 岩井 雅子 野村 誠治 前田真一郎 高見 明秀	広島大学 同上 同上 同上 同上 同上 東京工業大学 同上 技術研究所 同上 同上
2022.6.14-17	人工知能学会 2022 年度人工知能学会全国大会 (第 36 回)	思考のゆらぎと自律神経の変化を対応させたマインドワンダリングのモデル	西川 純平 長島 一真 米田 凌 森田 純哉 寺田 哲也	静岡大学 同上 同上 同上 統合制御システム開発本部

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2022.6.14-17	人工知能学会 2022年度人工知能学会全国大会 (第36回)	記憶活性化・運動学習・時間認知を統合することによる最適覚醒水準理論のモデル化	長島 一真 米田 凌 西川 純平 森田 純哉 寺田 哲也	静岡大学 同上 同上 同上 統合制御システム開発本部
2022.6.22	(株)アールジーン IoTNEWS勉強会	MBD (CAE) を活用したマツダの自動車開発変革	横畑 英明	マツダ (株)
2022.6.23-24	日本接着学会 第60回 (2022年度) 年次大会	耐食性に優れた構造用接着剤の開発	村地 勇佑 牧野 大輔 東出 勇毅 麻川 元康 山本 研一	セメダイン (株) 同上 同上 技術研究所 同上
2022.6.23-24	型技術協会 型技術者会議 2022	魂動デザイン忠実再現への挑戦	大西 裕也	車体技術部
		ダイカストの金型温度を安定化するモデルベース型設計の確立	藤井 祥平 住吉 孝弥 小関 孝 杉浦 千尋	パワートレイン技術部 同上 同上 同上
2022.6.23-24	品質工学会 第30回品質工学研究発表大会	パラメータ設計を用いた理想動力伝達構造の実現	畑平 拓也 岡山 一洋 中原 孝善 江草 秀幸 横山 郁夫	ツーリング製作部 同上 同上 同上 同上
		パラメータ設計を用いた側面加工精度向上の取組み	嶋村 涼 中原 寛海 宇都宮 誠	ツーリング製作部 同上 同上
		高硬度材荒取り加工効率化	川口 元志 白川 真也 有松 直弥 上村 勝利 叶井 貫	ツーリング製作部 同上 同上 同上 同上
		プレス金型部品のフレームハード工程における冷却条件の最適化	吉川 速人 川口 元志	ツーリング製作部 同上
		バンパー金型リブ形状切削加工の切削条件最適化	白川 真也 川口 元志 有松 直弥 久保 祐貴 江草 秀幸 影山 貴大	ツーリング製作部 同上 同上 同上 同上 同上
		金型製作検討におけるエキスパートの思考の予測手法開発	有松 直弥 白川 真也 川口 元志 久保 祐貴	ツーリング製作部 同上 同上 同上
2022.6.28-29	日本交通科学学会 第58回日本交通科学学会総会・学術講演会	シート着座時の人体骨格アライメント個体差分析と衝突時のシートベルト挙動への影響因子特定	泉山 朋大 朝日 龍介 杉本 繁 福島 正信 西田 周泰 山縣 大樹	衝突性能開発部 同上 同上 同上 山口大学 同上
2022.6.29-7.1	日本航空宇宙学会, JAXA 第54回流体力学講演会/第40回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム	蛍光油膜法の適用によるアハメド模型の剥離泡構造に対するレイノルズ数効果の解明	土黒 聖斗 中島 卓司 清水 圭吾 The Hung Tran 内田 孝紀 安養寺正之	九州大学 広島大学 技術研究所 九州大学 同上 同上
2022.6.29	超スマート社会推進コンソーシアム 2022年度SSSマッチングワークショップ ニーズラウンド (第1回)	超スマート社会に向けた活動状況やニーズのご紹介 (2022年度)	武田 雄策	技術研究所

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2022.6.30	薄鋼板成形技術研究会 2022 年度第 1 回 研究討論会	魂動デザインの忠実な再現に向けた金型 の高精度・高品位加工の取り組み	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
2022.7.8	ニュートワークス (株) NWC CAE WORLD2022	パワーリフトゲートシステムにおける 1D 解析モデル開発の取り組み	高田 浩二 松下 将輝 朴 吉友	ボデー開発部 同上 同上
2022.7.11-14	自動車技術会 フォーラム 2022	自動車技術会 FMI 活用・展開検討 WG 活 動について	小森 賢	統合制御システム開発本部
		モデルベース開発とモデル流通による自 動車開発の革新に向けて『JAMBE 活動報 告 (1) MBD 推進センターの概要』	足立 智彦	統合制御システム開発本部
		2025 年のモビリティづくりを実現する工 場	染谷 諒 市原浩一郎	車両技術部 パワートレイン技術部
		アルミニウム/異種材料の点接合技術	深堀 貢	技術研究所
2022.7.13-8.12	シーメンスデジタルインダストリー ズソフトウェア Realize LIVE Japan 2022 (オンデマンド配信)	車体組立領域の量産準備における DX 化推 進	市川 道也	車体技術部
2022.7.22	広島経済同友会 ものづくり委員会 実践活動合同開講 式	自動車開発におけるプレス成形 CAE の活 用	久万 徹郎	車体技術部
2022.7.25-28	電子情報通信学会パターン認識・メ ディア理解 (PRMU) 研究専門委員会 第 25 回 画像の認識・理解シンポジ ウム (MIRU2022)	機械学習を用いた流体解析の時間効率改 善に関する研究	笹口 翔伍 Bisser Raytchev 川口 幹祐 佐藤 圭峰 植木 義治 小林 謙太 和田 好隆 上村 匠	広島大学 同上 同上 MBD 革新部 同上 同上 同上 同上 同上
		深層学習を用いた脈動・定常気流中の Bag-breakup の検出	森田 大貴 Bisser Raytchev 丸岡 朋貴 川口 幹祐 中島 聖 尾形 陽一 檜垣 徹 金田 和文	広島大学 同上 同上 同上 MBD 革新部 広島大学 同上 同上
2022.7.27	自動車技術会 ヒューマンファクタ 部門委員会	ドライバー体調急変の早期検知技術	岩下 洋平	開発調査部
2022.8.31	SPring-8 利用推進協議会 第 19 回 SPring-8 産業利用報告会	ベイズ推定を用いた NAP-HAXPES スペク トル解析法	山本 知樹 百崎賢二郎 國府田由紀 住田 弘祐 鈴木 哲 横山 和司 水牧仁一朗 横山 優一	技術研究所 同上 同上 同上 兵庫県立大学 放射光研究センター 高輝度光科学研究センター 同上
2022.8.31-9.3	電気学会 電子・情報・システム部門 2022 年度電子・情報・システム部 門大会	日本の製造業再生に向けた処方箋 —MAZDA の生き方から—	足立 智彦	統合制御システム開発本部
2022.9.1	CAE 懇話会 第 11 回中四国 CAE 懇話会	MBD/CAE の価値最大化に向けて：1D/3D モデルとその役割	井上 実	装備開発部
2022.9.5	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	上田 尚輝 山崎 友揮	パワートレイン技術部 同上
2022.9.5-8	日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2022 (D&D2022)	モーダルエネルギー伝搬解析における縮 小モデルについて	本田 巖 山下 亘貴 宇都宮昭則	長崎総合科学大学 技術研究所 同上

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2022.9.5-8	日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2022 (D&D2022)	自動車駆動系の振動制御における離散値 制約への対応の検討	平田 将規 梶原 逸朗 米沢 平成 波多野 崇 佐藤 昌太 平松 繁喜 西留 千晶	北海道大学 同上 同上 統合制御システム開発本部 同上 同上 キャテック (株)
2022.9.8-10	溶接学会 2022 年度秋季全国大会	粒子法シミュレーションを用いたマグ溶 接中のスラグ形成・輸送過程の調査	深澤 孝公 田中 学 古免 久弥 茂田 正哉 深堀 貢 斉藤 直子	大阪大学 同上 同上 東北大学 技術研究所 同上
2022.9.9-11	日本認知科学会 2022 年度 日本認知科学会第 39 回 大会	知覚運動課題に対する飽きの生起と抑制 に関する環境要因の検討	米田 凌 西川 純平 長島 一真 森田 純哉 寺田 哲也	静岡大学 同上 同上 同上 統合制御システム開発本部
2022.9.11-14	日本機械学会 2022 年度年次大会	ボルト締結部にせん断負荷を与えた際の ボルト変形状態について	渡邊 忠俊 福田 真弘 村井 絢香 橋村 真治	技術研究所 芝浦工業大学 同上 同上
		「MBD 推進センター (JAMBE: ジャン ビー) 設立」	足立 智彦	統合制御システム開発本部
2022.9.13	計測自動制御学会 (SICE) 第 2 回モデル予測制御の理論と応用 調査研究会	モデル予測制御 (MPC) のさらなる普及 に向けた産業界のニーズ・課題	波多野 崇 赤阪 大介	統合制御システム開発本部 MathWorks Japan
2022.9.14	東京大学モビリティ・イノベーション 連携研究機構 (UTmobl) 第 14 回自動車技術に関する CAE フォーラム 2022 オンライン秋	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	技術研究所
2022.9.14	日本セラミックス協会 第 35 回秋季シンポジウム	ダブルデッカーかご型オリゴシルセスキ オキサンを架橋ユニットとするポリシル セスキオキサンの合成と耐熱性断熱材料 へ応用	高瀬咲生乃 田中 新 大下 浄治 濱田 崇 岡田 健太 三根生 晋	広島大学 同上 同上 早稲田大学 技術研究所 同上
2022.9.16	自動車技術会 関西支部 2022 年度 講演会	新型 MX-30 の衝突安全性能	濱田 隆志	衝突性能開発部
2022.9.20-21	日本複合材料学会 第 47 回複合材料シンポジウム	樹脂表面の連続繊維 FRP 被覆が燃焼性に 及ぼす影響	杉浦 拓実 後藤 悠人 仲井 朝美 大越 雅之 中村 晴彦 重田 裕人 谷川 卓矢 安田 周平 小川 淳一	岐阜大学 同上 同上 同上 ダイキョーニシカワ (株) 同上 技術研究所 同上 同上
2022.9.21-23	日本鉄鋼協会 2022 年秋季 (第 184 回) 講演大会	粒子法シミュレーションを用いたマグ溶 接中のスラグ形成・輸送過程の調査	深澤 孝公 田中 学 古免 久弥 茂田 正哉 深堀 貢 斉藤 直子	大阪大学 同上 同上 東北大学 技術研究所 同上
2022.9.22	VI-GRADE 社 2022 ZERO PROTOTYPES SUMMIT	NV シミュレータを活用したパワートレイン 騒音のモデルベース開発	神田 靖典	NVH 性能開発部
2022.9.28-30	鑄造工学会 第 180 回全国講演大会	高精度ダイカストによる機械加工レス成 形の実現	佐々木大地 重里 政考 山本 綾人 河野 一郎 藤井 祥平 小国 英明	パワートレイン技術部 同上 同上 同上 同上 同上

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2022.10.5-7	RX Japan (株) 第 25 回関西ものづくりワールド 特別講演	マツダのモノ造り～フレキシブル生産の進化を可能とする生産ビルディングブロック構想	向井 武司	マツダ (株)
2022.10.8-9	日本機械学会 熱工学コンファレンス 2022	レーザー干渉法を用いた定容容器での高温高圧環境下におけるエンドガス自着火前のエンドガス温度計測	浜崎 亨 瀬尾 健彦 三上 真人 下栗 大右 河野 通治	山口大学 近畿大学 山口大学 広島大学 MBD 革新部
2022.10.12-14	自動車技術会 2022 年秋季大会学術講演会	実験によるサーマルマネキン各部位の総合熱伝達率の挙動検討及び等価温度に与える影響	永野 秀明 森下 正浩 尾関 義一 大井 元 六嶋 公平 吉田 真 加藤 信介	東京都市大学 ハイリマレリジヤパン (株) AGC (株) 日産自動車 (株) (株) デンソー 装備開発部 東京大学
		新世代 3.3L クリーンディーゼルエンジンの開発 (第 1 報) — 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 松尾 建 宮崎 正浩 旗生 篤宏 松本 大典 金 尚奎 岡澤 寿史 辻 幸治 森永 真一	エンジン性能開発部 同上 同上 同上 同上 エンジン設計部 同上 エンジン性能開発部 エンジン設計部 パワートレイン開発本部 エンジン性能開発部
		新世代 3.3L クリーンディーゼルエンジンの開発 (第 2 報) — 大排気量エンジンと 48V マイルドハイブリッドおよび 8 速オートマチックトランスミッションの協調制御技術 —	山川 裕貴 小林 徹 久米 章友 皆本 洋 高木健太郎 松尾 建 齊藤 忠志 高橋康太郎 五丹 宏明 錦織 大悟 篠塚 浩 志茂 大輔	エンジン性能開発部 同上 PT 制御システム開発部 エンジン性能開発部 同上 走行環境性能開発部 PT 制御システム開発部 走行環境性能開発部 同上 ドライブトレイン開発部 エンジン性能開発部
		新世代 3.3L クリーンディーゼルエンジンの開発 (第 3 報) — 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 内田 敦 菊池 正和 小泉 昌弘 志茂 大輔	エンジン設計部 同上 同上 同上 エンジン性能開発部 同上 同上 MBD 革新部 エンジン性能開発部 MBD 革新部 エンジン性能開発部
		人体モデルを用いた衝突時の乗員股関節傷害要因の分析	北田 芳光 西本 哲也 本村 友一 原 義明 柴原 多衛 朝日 龍介	衝突性能開発部 日本大学 工学部 日本医科大学千葉北総病院 同上 衝突性能開発部 同上
2022.10.13	インダストリアル・バリューチェーン・イニシアティブ IVI 公開シンポジウム 2022-Autumn-	製作管理情報の企業間データ連携	中原 孝善 江草 秀幸 岡山 一洋	ツーリング製作部 同上 同上
2022.10.19	中部品質管理協会 2022 年中部品質管理大会 基調講演 1	お客様の輝きにつなげるマツダのものづくり — 魂動デザイン実現にむけた生産技術革新 —	安達 範久	技術本部

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2022.10.21	日本鑄造工学会 第2回 ダイカスト研究部会	高精度ダイカストによる機械加工レス成形の実現	佐々木大地 重里 政考 山本 綾人 河野 一郎 藤井 祥平 小国 英明	パワートレイン技術部 同上 同上 同上 同上 同上
2022.10.22	電気・情報関連学会各中国支部 2022年度(第73回)電気・情報関連学会中国支部連合大会	可変界磁モータの磁力制御特性	松井 雄輝 板坂 直樹 藤田 弘輝 土方規実雄	技術研究所 同上 同上 東京都市大学
2022.10.28	(株)JSOL 生産技術セミナー広島 2022	1470MPa 冷間ハイテン材の量産準備をMIN コスト・期間で実現する MBD プロセスの進化	酒井 明	車体技術部
2022.11.5	スマートプロセス学会 2022年度 学術講演会	魂動デザイン忠実再現への挑戦	岡田 又治	車体技術部
2022.11.5	スマートプロセス学会 2022年度 学術講演会	粒子法シミュレーションを用いたマグ溶接中のスラグ形成・輸送過程の調査	深澤 孝公 田中 学 古免 久弥 茂田 正哉 深堀 貢 山田 哲生 斉藤 直子	大阪大学 同上 同上 東北大学 技術研究所 ドライブトレイン開発部 技術研究所
2022.11.9-11	日本トライボロジー学会 トライボロジー会議 2022 秋 福井	湿式ペーパー摩擦材の動摩擦特性に及ぼす荷重・速度・摩擦面温度の影響	曾利 僚	技術研究所
2022.11.12-13	日本化学会 2022年 日本化学会中国四国支部大会 広島大会	親水基を有するポリシルセスキオキサン膜の防曇特性	杉本 哲也 前田 哲爾 濱田 崇 大下 浄治	広島大学 技術研究所 広島大学 同上
2022.11.12-13	日本機械学会 第100期 流体工学部門 講演会	簡易車体模型のタイヤ周りの流れ場に対する光学的摩擦応力場計測の適用	土黒 聖斗 Tran the Hung 中島 卓司 清水 圭吾 安養寺正之	九州大学 同上 広島大学 技術研究所 九州大学
		自動車エンジン排気を想定した脈動気流における矩形管壁面熱伝達	藤本 健明 加藤 由幹 川口 幹祐 西田 恵哉 尾形 陽一 本郷 均 西川 潤 中村 和博 寿美 真治	広島大学 同上 同上 同上 同上 MBD 革新部 同上 同上 同上
		モード分解手法を用いた90°曲がりをも有する円形断面ノズル内の非定常流特性分析	中山遼太郎 川口 幹祐 岩崎 誠人 西田 恵哉 尾形 陽一 西川 潤 中島 聖	広島大学 同上 同上 同上 同上 MBD 革新部 同上
		90°曲がりをも有する円形断面ノズル内の非定常流がオイルジェット挙動へ与える影響	川口 幹祐 中山遼太郎 岩崎 誠人 西田 恵哉 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 広島大学
		水平矩形管の曲がり気液界面の飛散・分裂に及ぼす影響	丸岡 朋貴 西田 恵哉 川口 幹祐 長野 祥江 中島 聖 西川 潤 尾形 陽一	広島大学 同上 同上 MBD 革新部 同上 同上 広島大学

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2022.11.12-13	日本機械学会 第 100 期 流体工学部門 講演会	自動車の車体振動が作用空気力の低周波変動特性に与える影響	水成 元紀 中島 卓司 平岡 武宣 中村 優佑 清水 圭吾 農澤 隆秀 陸田 秀実 金平 大河	広島大学 同上 同上 技術研究所 同上 広島大学 同上 同上
2022.11.12-13	日本機械学会 第 14 回最適化シンポジウム (OPTIS2022)	自動車の企画構想プロセス補助アルゴリズムの開発と検証	原田創之介 荒川 雅生 宇根崎 弘 近藤 秀一 波多野 崇 平松 繁喜	香川大学 同上 統合制御システム開発本部 電子基盤開発部 統合制御システム開発本部 同上
2022.11.12-13	日本機械学会 第 65 回 自動制御連合講演会	制御性能と計算負荷低減を両立する可変周期モデル予測制御	山口 晃 進矢 義之 波多野 崇 大石 潔 横倉 勇希	統合制御システム開発本部 同上 同上 長岡技術科学大学 同上
		制御バリア関数を用いた入力制約付きシステムのためのヒューマンアシスト制御	手塚 一成 中村 文一 波多野 崇 上條 賢治 佐藤 晶太	東京理科大学 同上 統合制御システム開発本部 同上 同上
2022.11.15	塑性加工学会 板材成形分科会 第 85 回 SMF セミナー	1310MPa 級高張力鋼板のせん断成形における上刃刃先の塑性変形対策	兼次 祐司	車体技術部
2022.11.16-18	日本機械学会 第 35 回計算力学講演会 (CMD2022)	純鉄の粒界凝集エネルギーに及ぼす水素の影響に関する分子動力学解析	福本 零 武富 紳也 萩原 世也 溝上 達志 深堀 貢	佐賀大学 同上 同上 技術研究所 同上
2022.11.17-18	型技術協会 型技術ワークショップ 2022 in ぎふ	ガス不良撲滅に向けたロバストな型設計プロセスの追究	阿部 光教 澤田 義裕 岩本 道尚	車両技術部 同上 同上
		機械加工精度ばらつき安定化の取組み	林 祥乃介 中原 寛海	ツーリング製作部 同上
		CAE を活用した軽量・高剛性金型構造の実現	今野 佑亮 吉崎 真吾 村上 健士	車体技術部 同上 同上
2022.11.18	品質工学会 第 15 回 品質工学技術戦略研究発表大会	お客様の輝きにつなげるマツダのものづくり。 —魂動デザイン実現に向けたプレス金型製作プロセス革新—	安達 範久	技術本部
		マツダの金型製作部門における技能伝承の取り組み	久保 祐貴 佐伯 千春 有松 直弥 影山 貴大 須賀 実	ツーリング製作部 同上 同上 同上 同上
2022.11.19	早稲田大学理工学術院総合研究所・早大モビリティ研究会 第 42 回早大モビリティシンポジウム	新世代クリーンディーゼルエンジン MAZDA SKYACTIV-D 3.3 の開発	志茂 大輔	エンジン性能開発部
2022.11.21	型技術協会 第 147 回 型技術セミナー	自動車メーカーのありたい金型加工と要素技術メーカーが提供する金型加工 —マツダのありたい金型加工—	大田 敦史	ツーリング製作部
2022.11.21-24	日本燃焼学会 第 60 回燃焼シンポジウム	超音波の効果を利用したスパークノック及びブレイグニッションの抑制に関する研究	小笠原日向子 廣田 光智 斎藤 寛泰 佐藤 圭峰 畠中 和明	室蘭工業大学 同上 芝浦工業大学 技術研究所 室蘭工業大学

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属		
2022.11.21-24	日本燃焼学会 第 60 回燃焼シンポジウム	超音波によるすす微粒子の固体壁面への付着抑制	松本 峻我 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		
		自動車用 Pt 触媒の C3H6/C2H4 包括表面モデル構築と Pd, Rh への拡張	松本 有平 Set Naing 日隈 聡士 村上 浩 河野 通治 三好 明 下栗 大右	広島大学 同上 産業技術総合研究所 走行・環境性能開発部 MBD 革新部 広島大学 同上		
		ピストンキャビティがノックに及ぼす影響	林 優樹 江崎 大護 原 孝弥 本田 雄哉 河野 通治 寺島 洋史 三好 明 下栗 大右	広島大学 同上 MBD 革新部 同上 同上 北海道大学 広島大学 同上		
		高温高压条件における定容容器内自着火現象に及ぼす点火エネルギー変化の影響	田邊 稜志 立石 徳垂 原 孝弥 本田 雄哉 河野 通治 寺島 洋史 三好 明 中原 真也 下栗 大右	広島大学 同上 MBD 革新部 同上 同上 北海道大学 広島大学 愛媛大学 広島大学		
		モノリスハニカム触媒に担持された Pt/Al2O3 表面における C3H8/O2 反応機構の開発	鏡原 匠人 長井 理香 日隈 聡士 松本 有平 村上 浩 河野 通治 三好 明 下栗 大右	広島大学 同上 産業技術総合研究所 広島大学 走行・環境性能開発部 MBD 革新部 広島大学 同上		
		Rh/CeOx 触媒の酸素吸蔵/放出・スピルオーバー現象を考慮した包括表面反応機構構築	長井 理佳 鏡原 匠人 日隈 聡士 松本 有平 村上 浩 河野 通治 三好 明 下栗 大右	広島大学 同上 産業技術総合研究所 広島大学 走行・環境性能開発部 MBD 革新部 広島大学 同上		
		炭化水素燃料の層流燃焼速度予測モデルの構築	村田 淳矢	技術研究所		
		2022.11.21-24	日本機械学会 第 33 回内燃機関シンポジウム	液膜上における高速微小液滴の衝突挙動に関する実験的研究	野々山 聖士 宮本 大志 小田 哲也 和田 好隆 大西 謙斗 山本 啓介	鳥取大学 同上 同上 MBD 革新部 同上 同上
				ディーゼルエンジンの高熱効率化のための噴霧予混合気の空間制御による新燃焼コンセプト	松尾 健 加藤 雄大 白橋 尚俊 田所 正 角田 良枝 神崎 淳 皆本 洋 金 尚奎 志茂 大輔 森永 真一	エンジン性能開発部 同上 同上 MBD 革新部 PT 制御システム開発部 エンジン性能開発部 同上 同上 同上 エンジン性能開発部

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2022.11.21-24	日本機械学会 第 33 回内燃機関シンポジウム	筒内状態量制御による直噴ガソリンエンジンの冷間エミッション低減に関する研究 (第 2 報)	瀬戸 祐利 堀 隼基 工藤 毅暁 藤川 竜也 山川 正尚	パワートレイン技術開発部 同上 同上 同上 技術研究所
		高圧縮比エンジンにおけるピストントップリングの挙動説明とガスシール性の向上	大澤 駿	技術研究所
		火花点火エンジンにおける火炎核の成長を予測する無次元量の提案	堀越 政寛	技術研究所
2022.11.24-25	日本塑性加工学会 第 177 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	久万 徹郎	車体技術部
2022.11.25	日本ねじ研究協会 第 4 回ねじ研究シンポジウム	ねじ込み式締結構造における併せ面の応力分布 1 (実験値と理論値の比較および感圧紙の影響)	渡邊 忠俊	技術研究所
2022.11.26	山口大学大学院 研究開発概論	自動車メーカーの研究戦略	本田 正徳	技術研究所
2022.11.28-29	プラスチック成形加工学会 第 30 回秋季大会	車両樹脂部品軽量化のための反り変形予測手法の開発	鈴木 広之 田中 慶和 寺内 雅典 古川 智司	車両技術部 同上 同上 同上
		ポリプロピレンの非等温過程における結晶化キネティクス	安田 周平 宮本 嗣久 田口 健 戸田 昭彦	技術研究所 同上 広島大学 同上
2022.11.25	自動車技術会 シンポジウム「動力伝達系の最新技術 2022」	CX60 用新型 FR8 速 AT の開発	景山慶太郎	ドライブトレイン開発部
2022.11.30-12.20	(株) 電通国際情報サービス ISID HUMANOLOGY FORUM ONLINE (オンデマンド配信)	車体組立領域量産準備における デジタルトランスフォーメーション (DX) 化 推進の事例紹介	市川 道也	車体技術部
2022.12.2	自動車技術会 インパクトバイオメカニクス部門委員会	リクライニング姿勢における腰椎・骨盤骨格アライメント個体差と衝突時の乗員挙動解析	泉山 朋大 西田 周泰 山縣 大樹 朝日 龍介 陳 献 大木 順司 杉本 繁 福島 正信	衝突性能開発部 山口大学医学部 同上 衝突性能開発部 山口大学工学部 同上 衝突性能開発部 同上
2022.12.2	ネオリウム・テクノロジー (株) 第 8 回 Dymola/Modelica/FMI セミナー2022	Dymola・Modelica・FMI の活用意義と今後の展望	小森 賢	統合制御システム開発本部
2022.12.7-8	(株) JSOL JMAG ユーザ会 2022	電流/磁気回路と構造伝達系の連成による、モータ電磁音予測プロセスの構築	川口 真 山田 眞平 安達 亮一 楠見 隆行 玉田 嘉彦 三浦 昂彦	MBD 革新部 同上 同上 技術研究所 同上 同上
2022.12.8	ひろしま産業振興機構 2022 年度 自動車工学基礎講座	「自然体」～人を中心とした MAZDA MX-30 の開発～	上藤和佳子	商品開発本部
2022.12.9	IAV (株) IAV TOKYO Powertrain Conference 2022	マイルドハイブリッド (M Hybrid) のバッテリーマネジメントシステム (BMS) 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 藤田 弘輝	技術研究所 電駆・PT 制御部品開発部 パワートレイン技術開発部 技術研究所 同上 経営戦略室 技術研究所

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2022.12.9	日本機械学会 連続講習会（全4回）「機械 - 電気 の統合モデルによるモデルベース開 発」第1回 物理機能モデルの概要及 び適用事例発表	マツダ（株）における適用事例	平松 繁喜	統合制御システム開発本部
2022.12.13	自動車技術会 次世代モビリティ社会部門委員会	MAZDA CO-PILOT CONCEPT の紹介	岩下 洋平	開発調査部
2022.12.15	東京農工大学 ヒヤリハットデータ研究会	MAZDA CX-60 ドライバーサポートと緊 急時対応技術の紹介	山本 直樹	情報制御モデル開発部
2022.12.15-16	日本液体微粒化学会・日本エネル ギー学会 第31回微粒化シンポジウム	燃料インジェクタ内壁面でのデポジット の堆積抑制と除去促進	坂東 太郎 宋 明良 和田 好隆 植木 義治	神戸大学 同上 MBD 革新部 同上
		矩形流路実験による旋回流を誘起する燃 料インジェクタの提案	松尾 萌花 宋 明良 和田 好隆 植木 義治	神戸大学 同上 MBD 革新部 同上
		ミニサックノズルの閉弁過程における旋 回流の数值解析	片山 智貴 宋 明良 和田 好隆 植木 義治	神戸大学 同上 MBD 革新部 同上
		超音波の援用による複雑形状を有する表 面に対する新規塗装技術の提案	早川 浩樹 廣田 光智 斎藤 寛泰 和田 好隆 佐藤 圭峰	室蘭工業大学 同上 芝浦工業大学 MBD 革新部 同上
2022.12.19	日本船舶海洋工学会 西部支部シンポジウム	「モデルベース開発」	足立 智彦	統合制御システム開発本部
2022.12.21	早稲田大学 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

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
Powder Technology	Volume 396, Part B, January 2022, Pages 696-709 https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.11.029	Numerical and Experimental Analysis of Additively Manufactured Particle Dampers at Low Frequencies	Honghu Guo, Kazuo Ichikawa, Hiroyuki Sakai, Heng Zhang, Xiaopeng Zhang, Kenji Tsuruta, Kanjuro Makihara, Akihiro Takezawa	早稲田大学 技術研究所 同上 上海理工大学 大連理工大学 岡山大学 東北大学 早稲田大学
Advanced Composite Materials	2022, Vol.289-115458	Unidirectional CFRP kinking under uniaxial compression modeled using synchrotron radiation computed tomography	高橋 拓也 轟 章 河村 力 樋口 諒 杉山 哲也 宮永 俊明 服部 公一 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 C&M 同上 日本大学 東京大学 技術研究所
Journal of Visualization	2022, 25(5), 983-997	Identification of wake vortices of a simplified automobile model in significant aerodynamic drag increase in crosswind condition	中村 優佑 中島 卓司 鄒 超 清水 圭吾 平岡 武宜 陸田 秀実 金平 大河 農澤 隆秀	広島大学 同上 同上 技術研究所 同上 広島大学 同上 同上
ACS Applied Polymer Materials	2022, 4, 2851-2859	Structure – Thermal Property Relationships of Polysilsesquioxanes for Thermal Insulation Materials	濱田 崇 後藤 拓 高瀬咲生乃 岡田 健太 上殿 明 大下 浄治	広島大学 同上 同上 技術研究所 筑波大学 広島大学
Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena	Volume 257, May 2022, 147192	Effects of sample-aperture cone distance on the environmental charge compensation in near-ambient pressure hard X-ray photoemission spectroscopy	鈴木 哲 竹中 研人 高原 光司 住田 弘祐	兵庫県立大学 同上 同上 技術研究所
Communications Express	Vol.11, No.4, pp.165-170	High-speed FDTD calculation method specialized for automotive radar analysis	奥木 友和 大久保 寛	技術研究所 東京都立大学
Materials Transactions	Vol.63 No.10, pp.1452-1461	Effects of 0.2Mo+0.2Zr Addition on Microstructure and Tensile Properties of Al-9Si-0.3Fe-0.15Mn Casting Alloy	Zeze Xiao Kazuhiro Matsugi Zhefeng Xu Nobuyuki Oda Hironobu Kominato Yasuo Uosaki	広島大学 同上 燕山大学 技術研究所 同上 同上
ACS Applied Polymer Materials	2022, 4, 10, 7599-7606	Highly Durable Antifogging Materials Based on Polysilsesquioxane with Double Hydrophilic Groups: Effect of Bridged Tetraethylene Glycol Chains in Polysilsesquioxane Films	前田 哲爾 杉本 哲也 濱田 崇 桂 大詞 三根生 晋 大下 浄治	技術研究所 広島大学 早稲田大学 技術研究所 同上 広島大学

寄稿誌名	巻・号・ページ	題目	発表者	所属
Scientific Reports	vol.12, No.1 (2022), p.10732 ※ Open Access	A radiographic and physical analysis of factors affecting seat belt position in sitting car seat	山縣 大樹 西田 周泰 泉山 朋大 朝日 龍介 小池 正紘 三原 惇史 今城 靖明 鈴木 秀典 船場 真裕 杉本 繁 福島 正信 坂井 孝司	山口大学 同上 衝突性能開発部 同上 山口大学 同上 同上 同上 同上 衝突性能開発部 同上 山口大学
Mechanism and Machine Theory (ELSEVIER)	Vol.175 (2022), 104957	Fuzzy-reasoning-based robust vibration controller for drivetrain mechanism with various control input updating timings	米沢 平成 米沢 安成 波多野 崇 平松 繁喜 西留 千晶 梶原 逸朗	北海道大学 同上 統合制御システム開発本部 同上 キャテック (株) 北海道大学
IEEE Access	IEEE Access, 10, 10160-10175.	Auditory spatial saliency and its effects on perceptual noisiness	中谷 裕紀 渡邊 雅之 萬 菜穂子	技術研究所 同上 同上
IEEE Transactions on Intelligent Vehicles (オンライン版)		Goal-Aware RSS for Complex Scenarios via Program Logic	Ichiro Hasuo Clovis Eberhart James Haydon Jeremy Dubut Brandon Bohrer Tsutomu Kobayashi Sasinee Pruekprasert Xiao-Yi Zhang Erik Andre Pallas Akihisa Yamada Kohei Suenaga Fuyuki Ishikawa Kenji Kamijo Yoshiyuki Shinya Takamasa Suetomi	国立情報学研究所 同上 同上 同上 Worcester Polytechnic Institute 国立情報学研究所 同上 同上 University of Augsburg 国立情報学研究所 同上 同上 統合制御システム開発本部 同上 同上
応用数理	Vol.31, No.4, pp.23-27	自動車産業と応用数理	鈴野 浩大	技術研究所
JSPS・卓越大学院パンフレット	2022.3 版, P.19	(企業メッセージ掲載)	高見 明秀	技術研究所
ながれ	第 41 巻 (2022) 第 2 号 pp.77-80	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	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 坪倉 誠	神戸大学 同上 技術研究所 同上 JAXA 広島大学 同上 神戸大学
東京工業大学学術国際情報センター HP (令和 3 年度採択実績および利用終了課題報告書)	https://www.gsic.titech.ac.jp/kyodou/kadai_r3 令和 3 年度採択利用課題一覧 (産業利用) 番号 1	車載レーダにおけるターゲット表面電流分布の FDTD 法による数値解析	山本 雅史	技術研究所

寄稿誌名	巻・号・ページ	題目	発表者	所属
映像情報メディア学会誌	Vol.76, No.3, pp.408-415 (2022)	偏った視線方向における心理物理的ホロプターの同定	村瀬 健二 原 利宏 武田 雄策 吉海 亮介 金子 寛彦	技術研究所 同上 同上 東京工業大学 同上
「材料」	Vol71, No.5, pp.453-460	最外層に熱可塑性樹脂層を有する CFRP 積層板を利用した CFRP/AI の摩擦攪拌点接合	田中 和人 川上 将司 西口 勝也	同志社大学 同上 技術研究所
日本放射光学会誌「放射光」	Vol.35, No.3 (2022) 200-207	時空間分割角度分解 AP-XPS 法による多層積層薄膜界面の深さ方向解析	豊田 智史 吉村 真史 住田 弘祐 三根生 晋 町田 雅武 吉越 章隆 吉川 彰 鈴木 哲 横山 和司	東北大学 兵庫県 技術研究所 同上 シエンタオミクロン (株) 日本原子力開発機構 東北大学 兵庫県立大学 同上
自動車マルチマテリアルに向けた樹脂複合材料の開発	pp.53-64	第 1 章 第 5 節 マルチマテリアル化車体の動向と異種材料接合技術	高見 明秀	技術研究所
日本機械学会論文集	2022 年 88 巻 905 号 p.21-00289	スパースモデリングを用いた構造物の設計形状における重要部位の抽出手法に関する研究	本田 正徳 目良 貢 河村 力 竹澤 晃弘 北村 充	技術研究所 同上 同上 早稲田大学 広島大学
	2022 年 88 巻 916 号 p.22-00189	剛-柔構造結合系のモーダルエネルギー伝搬解析法の研究	山下 亘貴 宇都宮昭則 本田 巖	技術研究所 同上 長崎総合科学大学
第 33 回内燃機関シンポジウム予稿集	No.38, pp.1-10	筒内状態量制御による直噴ガソリンエンジンの冷間エミッション低減に関する研究 (第 2 報)	瀬戸 祐利 堀 隼基 工藤 毅暁 藤川 竜也 山川 正尚	パワートレイン技術開発部 同上 同上 同上 技術研究所
自動車技術会 2022 年春季大会学術講演会予稿集	20225223	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 2 報)	山川 啓介 山本 崇史 桂 大詞 井上 実 畠山 望 三浦 隆治 岡島淳之介 稲葉 賢二 石澤由紀江 遊川 秀幸 伊東 博之 石元 孝佳 大下 浄治	技術研究所 広島大学・工学院大学 技術研究所 装備開発部 広島大学・東北大学 同上 同上 広島大学 同上 技術研究所 東洋シート 広島大学 同上
	No.156, pp.1-6	筒内状態量制御による直噴ガソリンエンジンの冷間エミッション低減に関する研究 (第 1 報)	工藤 毅暁 堀 隼基 瀬戸 祐利 原 亮介 藤川 竜也 山川 正尚	パワートレイン技術開発部 同上 同上 同上 同上 技術研究所

寄稿誌名	巻・号・ページ	題目	発表者	所属
自動車技術会論文集	2022年53巻1号 pp.138-144	型抜き面を指定しない両側铸造制約を考慮したトポロジー最適化	和田 有司 弓削 康平 木崎 勇 三浦 広樹 寺田 栄	東京工業大学 成蹊大学 ボデー開発部 ドライブトレイン開発部 MBD 革新部
	2022年53巻5号 pp.886-891	モデルベースリサーチ (MBR) による振動制御材料モデル技術の開発	山川 啓介 山本 崇史 桂 大詞 井上 実 畠山 望 三浦 隆治 岡島淳之介 稲葉 賢二 石澤由紀江 遊川 秀幸 伊東 博之 石元 孝佳 大下 浄治	技術研究所 広島大学・工学院大学 技術研究所 装備開発部 広島大学・東北大学 同上 同上 同上 広島大学 同上 技術研究所 東洋シート 広島大学 同上
	No.54.vol.2 pp.376-381	人体モデルを用いた衝突時の乗員股関節傷害要因の分析	北田 芳光 西本 哲也 本村 友一 原 義明 柴原 多衛 朝日 龍介	衝突性能開発部 日本大学 工学部 日本医科大学千葉北総病院 同上 衝突性能開発部 同上
日刊工業新聞 第72回自動車技術会賞 受賞者の声企画	https://www.nikkan.co.jp/articles/view/00638269	防錆開発プロセスを変革する防錆機能迅速評価技術	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
自動車技術会関西支部ニュース	No.61, pp.6-7	新型 MX-30 の衝突安全性能	濱田 隆志	衝突性能開発部
会誌「自動車技術」	Vol.76, No.2 (2022)	IOTを活用したマスカラフツマンシップへの取り組み	安達 範久	技術本部
	Vol.76, No.7 (2022), pp.6-7	防錆開発プロセスを変革する防錆機能迅速評価技術	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
	vol.76, No.9 (2022), pp.30-36	人体個体差を考慮した傷害研究および傷害低減技術の開発	泉山 朋大 朝日 龍介	衝突性能開発部 同上
	Vol.76, 年鑑号 (2022), pp.178-184	生産技術・生産システム	市本 秀則 山野 哲司 梶川 伸司 長澄 徹侍 岩本 道尚 常岡 辰夫 後藤 憲吾 丸尾 幸治 今野 康之 河野 弘和 粕井 翔 小川 耕平 野村 直彦 鶴田 秀一	生産企画部 車体技術部 同上 ツーリング製作部 車両技術部 同上 同上 パワートレイン技術部 同上 同上 同上 同上 市場品質部
モーターファン・イラストレーテッド	Vol.190, pp.80-84	エンジンはなくなる (結言)	山本 博之 山川 正尚	技術研究所 同上

寄稿誌名	巻・号・ページ	題目	発表者	所属
素形材	2022年6月21日発行	お客様の輝きにつなげるマツダのモノづくり ～デジタル技術を活用した金型製作～	安達 範久	技術本部
IVI 業務シナリオ集 2021 年度報告	2022年7月16日発行	AI による発電効率とエンジン検査精度の向上	市本 秀則 藤山 佳宏 影山 望 小森 悠一	生産企画部 プラント技術部 PT 技術部 同上
		シリンダーヘッド 鋳造用砂型の品質管理	福本 豊 三浦 直洋	PT 技術部 同上
鋳造工学会 第 180 回全国講演大会	2022年9月28日発行	高精度ダイカストによる機械加工レス成形の実現	佐々木大地 重里 政考 山本 綾人 河野 一郎 藤井 祥平 小国 英明	PT 技術部 同上 同上 同上 同上 同上
型技術者会議 2022 講演論文集	2022年6月23日発行	ダイカストの金型温度を安定化するモデルベース型設計の確立	藤井 祥平 住吉 孝弥 小関 孝 杉浦 千尋	PT 技術部 同上 同上 同上
型技術ワークショップ 2022 in ぎふ講演論文集	vol.37, No.13 (2022) pp.92-93	CAE を活用した軽量・高剛性金型構造の実現	今野 佑亮 吉崎 真吾 村上 健士	車体技術部 同上 同上
	pp.66-67	機械加工精度ばらつき安定化の取組み	林 祥乃介 中原 寛海	ツーリング製作部 同上
型技術	vol.37 No.8 (2022) pp.120-121	「魂動デザイン」忠実再現への挑戦	大西 裕也 小松 誠司 浅籬 尊 三浦 康博	車体技術部 同上 同上 同上
塑性加工学講座	第 177 回 (2022) pp.79-91	自動車開発におけるプレス成形 CAE の活用	久万 徹郎	車体技術部
ファインケミカルシリーズ 塗料開発の新展開 (CMC 出版)	2022 (2022年10月31日第1刷発行) pp.285-296	鮮やかさと深みを高次元で両立するソウルレッドクリスタルメタリックの開発	平野 文美	車両技術部
第 15 回 品質工学技術戦略研究発表大会予稿集	pp.88-138	マツダの金型製作部門における技能伝承の取り組み	久保 祐貴 佐伯 千春 有松 直弥 影山 貴大 須賀 実	ツーリング製作部 同上 同上 同上 同上
第 30 回 品質工学研究発表大会予稿集	pp.82-85	パラメータ設計を用いた理想動力伝達構造の実現	畑平 拓也 岡山 一洋 中原 孝善 江草 秀幸 横山 郁夫	ツーリング製作部 同上 同上 同上 同上

寄稿誌名	巻・号・ページ	題目	発表者	所属
第 30 回 品質工学研究発表大会予稿集	pp.86-89	高硬度材荒取り加工効率化	川口 元志 白川 真也 有松 直弥 上村 勝利 叶井 貴	ツーリング製作部 同上 同上 同上 同上
	pp.90-93	プレス金型部品のフレームハード工程における冷却条件の最適化	吉川 速人 川口 元志	ツーリング製作部 同上
	pp.94-97	パラメータ設計を用いた側面加工精度向上の取組み	嶋村 涼 中原 寛海 宇都宮 誠	ツーリング製作部 同上 同上
	pp.98-101	バンパー金型リブ形状切削加工の切削条件最適化	白川 真也 川口 元志 有松 直弥 久保 祐貴 江草 秀幸 影山 貴大	ツーリング製作部 同上 同上 同上 同上 同上
	pp.162-165	金型製作検討におけるエキスパートの思考の予測手法開発	有松 直弥 白川 真也 川口 元志 久保 祐貴	ツーリング製作部 同上 同上 同上
人工知能学会誌	Vol.37 No.3 (2022 年 5 月号)	特集「スマートファクトリーと AI」 マツダで実証実験した AI 活用事例 (IE, 物流, 検査) ~IVIでの取り組みを中心とした AI 手の内 化アプローチ~	市本 秀則	生産企画部
PLASTICS SCIENCE	April. 2022, pp.103-106	変換期の自動車とプラスチック-バイオ エンブラ新意匠二層成形技術の開発	一原 洋平	装備開発部

編 集 委 員 会

委員長	佐賀 尚人	R&D 戦略企画本部
編集委員	宮脇 優	R&D 戦略企画本部
	下野 博典	商品開発本部 商品開発企画部
	森 敦紀	デザイン本部 デザイン開発推進部
	北村 光章	車両開発本部 NVH 性能開発部
	雪田 恭兵	車両開発本部 ボデー開発部
	中島 聖	統合制御システム開発本部 MBD 革新部
	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
	渡邊 雅之	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
	米盛 敬	R&D 戦略企画本部 企画設計部
	増田 巧	R&D 戦略企画本部 企画設計部
	山本 研一	R&D 戦略企画本部 開発戦略企画部
	寺田 哲也	R&D 戦略企画本部 開発戦略企画部
	伊藤 剛	R&D 戦略企画本部 開発管理部
編集幹事	温品 一雄	R&D 戦略企画本部

マツダ技報 第40号

Mazda Technical Review No.40

発行 2023年12月
発行人 廣瀬 一郎
編集人 佐賀 尚人
事務局 温品 一雄
発行所 マツダ株式会社
R&D 戦略企画本部
〒730-8670
広島県安芸郡府中町新地3番1号

December 2023
Publisher Ichiro Hirose
Editor Naohito Saga
Bureau Kazuo Nukushina
Publishing office R&D Strategy Planning Div.
Mazda Motor Corporation
3-1 Shinchi, Fuchu-cho Akigun,
Hiroshima 730-8670, Japan

©2023 マツダ株式会社 (禁無断転載)