



マツダ技報 2016 No.33
MAZDA TECHNICAL REVIEW



ZOOM-ZOOM

マツダ技報

Mazda Technical Review

2016 No. **33**

マツダ技報 第33号 (2016)

目次

巻頭言	廣瀬一郎	1
特集：新型CX-9		
1. 新型CX-9の紹介	大塚正志, 佐々木克明, 伊藤正城 富永晋三, 金納賢治	3
2. 新型CX-9のデザイン	木元英二	9
3. 新型ガソリンターボエンジン「SKYACTIV-G 2.5T」の開発	室谷満幸, 末國栄之介, 藤山智彰 山形直之, 岩井浩平, 沖田齡次	16
4. 新型2.5Lターボチャージャーエンジン制御技術の紹介	西尾貴史, 東尾理克, 砂流雄剛 足利謙介, 坊田亮郎	23
5. 新型CX-9の低圧燃料供給制御システムの制御技術	鈴木健一郎, 櫻谷幸弘, 田中憲一郎 清水 功, 西森洋生, 本郷 均	28
6. 新型CX-9の静粛性開発について	清水勝矢, 楠木大地, 熊本和矢 粟根正浩, 中山博資, 山本晃平	33
7. 新型CX-9のシャシーダイナミクス性能	小沼真一, 大久保悟, 中村 聡 大久保英崇, 中山博資	39
8. 新型CX-9の軽量・高剛性ボディーシェル	吉武晃司, 清下大介, 兼森正英 川野晃寛, 中内 繁	44
9. 新型CX-9の空力性能開発	油目雅史, 中田章博	50
10. 新型CX-9のパワーリフトゲート開発	山内寛和, 杉島孝幸, 佐久間稔 石塚耕三	56
11. 新型アクティブドライビングディスプレイの開発	中島英信, 岡田健治, 谷本智弘	60
12. 新型CX-9でのボディー寸法精度育成技術の開発	島田知広, 高橋大樹, 岡田又治	66
論文・解説		
13. 車両腐食環境の定量化技術と解析手法の開発	福田克弘, 落岩克哉, 園田賢司 山根貴和	72
14. 無塗装・高質感の内外装意匠部品用 バイオエンジニアリングプラスチックの開発	一原洋平	78
15. 高圧縮比ガソリンエンジンにおける触媒早期暖機のための 燃焼技術開発	藤川竜也, 内田健児, 中山佳映 山川正尚	83

16. 直噴ガソリンエンジンのプラグくすぶり性評価法の開発	内田健児, 藤川竜也, 榎山謙二 小野裕史, 山川正尚	88
17. バイオ燃料と人工光合成	岩国秀治	94
18. 高応答遮熱壁面が速度境界層内現象に及ぼす影響	田中達也, 原田雄司, 中尾裕典 服平次男, 山下洋幸, 山本寿英	100
19. 人間の反力知覚特性の解明と操作機器の反力設計への適用	竹村和紘, 山田直樹, 新部忠幸 岸 篤秀, 西川一男, 農沢隆秀	106
20. 車車間通信のLCR・AFDモデルの開発	山田秀行, 強矢昌宏, タンザカン 荒木純道	112
21. 曲げ変形における高エネルギー吸収フレームの開発	河村 力, 本田正徳, 児玉悠貴 元木正紀, 片岡愉樹, 亀井丈広 若林 充, 寺田 栄	118
22. 鋼板/アルミ異材抵抗スポット溶接技術の開発	田中耕二郎, 杉本幸弘, 西口勝也	124
23. 微細気泡構造制御による高機能発泡体の開発	宮本嗣久, 小林めぐみ, 金子満晴 大嶋正裕	130
24. 品質機能展開を活用した技術開発プロセス	山田洋史	135
25. ナチュラル・サウンド・スムーザー量産工法の開発	田中宏明, 船津昌幸, 本室武志	141
26. ボンゴ生誕50周年を迎えて	田中賢二, 稲田紀親, 榮谷 章	147
27. マツダの特装車(教習車・福祉車)の紹介	田中賢二, 松本真吾, 縄田光浩 下宮康裕	153
特許紹介		159
社外への発表論文一覧表		160

Mazda Technical Review No.33

CONTENTS

Foreword

<i>(I. Hirose)</i>	1
--------------------------	---

Special Edition for New CX-9

1. Introduction of New CX-9 <i>(M. Otsuka, K. Sasaki, M. Ito, S. Tominaga, K. Kinno)</i>	3
2. Design of New CX-9 <i>(E. Kimoto)</i>	9
3. Newly Developed Gasoline Engine "SKYACTIV-G 2.5T" <i>(M. Murotani, E. Suekuni, T. Fujiyama, N. Yamagata, K. Iwai, R. Okita)</i>	16
4. Introduction of New 2.5L Turbocharger Engine Control Technology <i>(T. Nishio, M. Higashio, Y. Sunagare, K. Ashikaga, A. Boda)</i>	23
5. Low Pressure Fuel Supply System Control Technology for New CX-9 <i>(K. Suzuki, Y. Sakuradani, K. Tanaka, I. Shimizu, Y. Nishimori, H. Hongo)</i>	28
6. Quietness Development for New CX-9 <i>(K. Shimizu, D. Kusuki, K. Kumamoto, M. Awane, H. Nakayama, K. Yamamoto)</i>	33
7. Chassis Dynamics Performance of New CX-9 <i>(S. Konuma, S. Ohkubo, A. Nakamura, H. Ohkubo, H. Nakayama)</i>	39
8. Light-weight · high-rigidity Body Structure of New CX-9 <i>(K. Yoshitake, D. Kiyoshita, M. Kanemori, A. Kawano, S. Nakauchi)</i>	44
9. Aerodynamic Development of New CX-9 <i>(M. Aburame, A. Nakata)</i>	50
10. Power Lift Gate System for New CX-9 <i>(H. Yamauchi, T. Sugishima, M. Sakuma, K. Ishizuka)</i>	56
11. Development of New Active Driving Display <i>(H. Nakashima, K. Okada, T. Tanimoto)</i>	60
12. Development of Virtual Dimensions Precision Control Technology <i>(T. Shimada, D. Takahashi, M. Okada)</i>	66

Technical Reports

13. Technology Development of the Vehicle Corrosion Environment Quantification and Analysis Method <i>(K. Fukuda, K. Ochiwa, K. Sonoda, T. Yamane)</i>	72
14. Development of Bio-based Engineering Plastic Featuring High-quality Finish without Paint and Suitable for Interior and Exterior Vehicle Parts <i>(Y. Ichihara)</i>	78
15. Development of Combustion Technology for Reducing Catalyst Warm-Up Time in a High-Compression-Ratio Gasoline Engine <i>(T. Fujikawa, K. Uchida, Y. Nakayama, M. Yamakawa)</i>	83

16. Development of the Measurement Method for the Spark Plug Fouling in a DI Gasoline Engine (<i>K. Uchida, T. Fujikawa, K. Kashiyama, H. Ono, M. Yamakawa</i>)	88
17. Biofuel and Artificial Photosynthesis (<i>H. Iwakuni</i>)	94
18. The influence of high-response heat insulation wall surface on the velocity boundary layer phenomena (<i>T. Tanaka, Y. Harada, Y. Nakao, T. Fukube, H. Yamashita, T. Yamamoto</i>)	100
19. Analysis of the Human Ability to Perceive Reaction Force and its Application to a Reaction Force Design for an Operational Device (<i>K. Takemura, N. Yamada, T. Niibe, A. Kishi, K. Nishikawa, T. Nouzawa</i>)	106
20. Development of the LCR・AFD Model of the V2V (<i>H. Yamada, M. Suneya, Gia Khanh Tran, K. Araki</i>)	112
21. Development of High-Energy Absorbing Frame Structure (<i>C. Kawamura, M. Honda, Y. Kodama, M. Motoki, Y. Kataoka, T. Kamei, M. Wakabayashi, S. Terada</i>)	118
22. Development of Steel/Aluminum Resistance Spot Welding Process (<i>K. Tanaka, Y. Sugimoto, K. Nishiguchi</i>)	124
23. Development of Highly Functional Foams by Microcellular Structure Control (<i>T. Miyamoto, M. Kobayashi, M. Kaneko, M. Ohshima</i>)	130
24. Technology Development Process Using QFD (<i>Y. Yamada</i>)	135
25. Development of New Manufacturing Process for Natural Sound Smoother (<i>H. Tanaka, M. Funatsu, T. Motomuro</i>)	141
26. 50th Anniversary of MAZDA BONGO (<i>K. Tanaka, N. Inada, A. Sakaedani</i>)	147
27. Introduction of Mazda Specially Equipped Vehicles (Driving School Vehicle・Welfare Vehicle) (<i>K. Tanaka, S. Matsumoto, M. Nawata, Y. Shitamiya</i>)	153
Introduction of Patents	159
List of Reports Published in 2016	160

巻頭言

日本人的気質が紡ぐものづくり

MONOTSUKURI cultivated by Japanese philosophy



執行役員

廣瀬 一郎

Ichiro Hirose

日本の得意技といえば、摺り合わせ、ものづくりの世界でいえば、摺り合わせ開発が真っ先に頭に浮かぶ。摺り合わせという言葉は、どこか相互妥協を連想される方が居られるかもしれない。この言葉自身に、互いの突出から生じる不整合を、削り合わせる相互妥協的な響きを感じるからだが、こと「日本の」と冠がつくと否定をせねばなるまい。

日本のもの作りにおける「摺り合わせ」は、相互貢献を生み出す所作であらねばならないと思っているからだ。

日本の摺り合わせ開発は、相互貢献がもたらす「全体」に対する価値のため、「個」の各々が主張より調和を重んじ合わせていく手法。従って、この全体価値の置きようが、相互妥協と相互貢献の分水嶺になるはずである。これをクルマ造りが求める価値という軸で振り返ってみると、「当たり前機能し故障しない製品を、短期に省資源で生み出す。」ことに価値を置いた市場成長の時代には、摺り合わせ開発によって高められた機能的価値が、日本車の存在感となり、これが時代とマッチし、工業製品としてのプレゼンスを高めてきた。

その道を進み続け、機能的価値を追求する日本車の傍らで、これを倣い、見栄えによる差別化と外交手腕を駆使し追従する近隣諸国の作り手が、日本車の存在を揺るがす時期も経てきた。しかし、機能的価値の追求だけでは独自の絶対性能軸に基づき、独善的と思えるほどの信念で、クルマの基本性能を究める欧州プレミアムに及ぶに至っていない。

彼らに比肩し選ばれ続ける存在であるためには、確固とした特徴、人格ともいえるクルマ自身の個性を示しながらも、お客様に寄り添いその特徴ある性格を磨き続けること。その磨き込みがお客様の感性を研ぎ、その研がれた感性が欲するであろう次への期待を、作り手が上回っていく。こうしてお客様と一緒に紡いでいく期待の連鎖が、機能的価値を超える独自のクルマ文化と世界観を作り、それが互いに離れ難い強固な関係、ブランドを共創していくのだと考える。こういった世界観の作り方こそが、日本固有のクルマ造りの文化であり、広い意味での摺り合わせによってこそ成るものであると信じる。

摺り合わせがもたらす世界観は、これまでが全体価値、「全」のための相互貢献であるとすれば、今後は個別価値、「個」の存在感を高めつつ、「全」の価値をもともに高める考え方の進化だととらえたい。「紡ぐ」という言葉には、糸を紡ぐ他に、細やかな作業によって、言葉や作品を形にしていく意もある。糸を紡ぎ織り成すことで、独特の肌理（きめ）を現わしながらも、全体の風合いや質感を同時に創造していく。人と技術を織りなし、各々が個を究め尖らせつつも全体を調和させ、新たな世界観を紡ぎだすことこそが、日本の摺り合わせが追求すべき世界観であり、もの作りの形だと考える。

この摺り合わせには、日本人の気質が大きく寄与していると考え、その所以は、調和と他者貢献に美徳と喜びを感じるところに有る。こうした気質の織り重なりが、各々が個を究め尖らせつつも全体を調和させ、お客様に寄りそう日本の摺り合わせ開発を実現させる文化を根付かせているのだと考える。

摺り合わせの過程では、互いの特徴や良さの相互理解が促進されることで、新たな価値の糸口が見つかり、それが共創の場で紡がれ技術として格上げされていく。まるで縦糸と横糸が、一目の狂いなく繊細かつ大胆に織り込まれた反物のように、全ての織り目で互いを活かしあう重なりが考えられた、つくり手の意思が綿密に紡がれたものになっていく営み、それこそが我々が追求すべきモノ造りの姿なのだと信じている。

さて、それをマツダに重ねてみる。2012年、ベース技術の刷新を段階的に進めるという宣言を実行に移した。技術は勿論、同時に開発革新によって、革新的な技術をアフォードダブルに、そして全ての商品に次々に導入していくと宣言もした。これがビルディングブロック戦略の実行策、SKYACTIVテクノロジーの導入宣言であった。2010年の公表当時は、本当にこんな展開が可能なのか、全員が確信を持ってはいなかったかもしれないが、実行を進める中、それは自負と自信に変貌してきた。そして実際に、この3年間で、CX-5を皮切りに、アテンザ、アクセラ、デミオ、CX-3、ロードスターと、6車種をグローバルに導入し、そしてこのたびのCX-9で7つ目の車種導入を果たした。モデルチェンジなどのタイミングにとらわれず大幅商品改良によって、常に最新の技術進化が車種群に展開されている状況もお届けできている。

これは、生産、調達、開発、各々がしっかりと目指す価値を腹に落とし、これまでにない価値創造型の摺り合わせを実現した結果だと考えている。このような、全てのシステムの同時刷新を、商品競合力の飛躍的向上と、開発効率の革新とともに実現したことは、日本の摺り合わせ開発の正常進化であると考えたい。

これを進める上で中心に置いた、モノ造り革新、コモンアーキテクチャの実行は、全ての商品に共通特性を与えるという当初の狙いを良い意味で超え、常に直近の商品がマツダ渾身の思想と技術をお届けする状態ができて上がった。また、開発、生産、調達が、各持ち場で共通の価値を持ち、その実現に部門一貫通貫で取り組むスタイルは、良い意味で風土や文化と呼べるレベルになりつつある。各持ち場で作り上げる共通特性、それを適用しクルマとして作りこむうち、持ち場の周辺との相互理解とより深い気付きを得、共創のアイデアが生まれ、その実行の場が次の車種で与えられる。こうして次々と直近の車種で気付きを実行する中で、各車種はどんどん自律的に進化が加速していく。互いの摺り合わせによる相互貢献、その過程で生まれたアイデアを次のモデルで実装する。クルマの最終仕上げに腐心する中で、自然にそのスパイラルが加速していく。

それが各商品投入の短いサイクルで進み続けることから、絶え間ない技術進化が着々と進み、しかもそれが人とクルマを俯瞰した、人間中心という一貫した哲学に沿って、組織を超えた共創によって実行される、目の離せない存在であると認められつつあるように感じる。クルマの最終仕上げに余念なく、心血を注いで対応できることが、こういった進化を可能にすると実感する。自分たち自身が日々高め行くハードルと、それを超えるコミットメントによる技術の進化、それがマツダとつながり、マツダを支持する意味と価値となり、この継続がお客様との絆を深めていく、私たちならではの、独自の約束になると本気で思えてきた。

ブランドとは、この独自の約束を守り続け、確固たる信頼に替えることなのだろう。こういったコツコツとした進化を地道にかつ広範に続け、次なるジャンプをも同時に果たし、やはりマツダは本物だったと約束を果たす。高いハードルだが、世間のマツダを見る見方が少しずつ変わり、自分たちでお客様の期待を超えるべくハードルを上げることを許されたと考えたい。こうした営みの継続で人と技術を紡ぎ、日本のクルマ文化ここにあり、と世界が認めるその日をめざし、愚直に歩み続けたい。

今回発表した新型CX-9には、この思考をしっかりと詰めたつもりである。しかしこれも世に出した瞬間から、次の頂きを目指した進化が始まっている。この作品によって研がれたお客様の感性とともに、離れ難い強固な絆を確かにし、固有の世界観を作り上げるために。培ってきた気質を紡ぎ、日本の、そしてマツダならではのクルマ文化を確立すべく尽力を続けたい。

遠い昔になるが、小職が当時の東洋工業(株)、現在のマツダ(株)に採用が決まったのち送られてきた技報がこの創刊号であった。高度で広範な内容に、果たしてこの自分がここに加わった時、技術者として仕事果たせるのか、大いに不安になり、また、決意を新たにすることを昨日のここのように思い起こしている。本技報が、今現在も技術を志す方々に、そういった畏怖と野心を掻き立て、ともに日本のモノ造りのプレゼンスを高める機運向上に役立てばと願って止まない。

特集：新型CX-9

1

新型CX-9の紹介 Introduction of New CX-9

大塚 正志*¹ 佐々木 克明*² 伊藤 正城*³
Masashi Otsuka Katsuaki Sasaki Masashiro Ito
富永 晋三*⁴ 金納 賢治*⁵
Shinzo Tominaga Kenji Kinno

要 約

初代CX-9は2007年に発表され、箱形が主流だったミッドサイズSUVセグメントに、流麗なデザインと優れたダイナミック性能等を新たに提案した。従来のSUVから脱却した革新的なクロスオーバーSUVとしてお客様に高く評価され、また北米で最も権威ある自動車賞のひとつである「北米トラックオブザイヤー2008」を受賞した。ここに紹介する新型CX-9はその後継モデルである。

二代目となる新型CX-9は、マツダにとって最重要市場の一つである北米市場の戦略車種として、米国の開発拠点であるMazda North American Operations (MNAO) が中心となって企画やデザインを行った。ファミリーの多様な要求に応えるとともに、マツダの新世代商品群の頂点として走る歓びと優れた環境・安全性能及び、ハイエンドとしての品格を併せ持つスタイリングデザインを実現し、初代CX-9同様にこのセグメントに革新的な商品を提供することを目指した。

Summary

The first generation CX-9 was launched in 2007, and provided the sleek/elegant design and the outstanding dynamic performance. This was really innovative to the segment of the Medium SUV 3row, and highly evaluated as the breakthrough Crossover SUV from the conventional SUVs. The first CX-9 won the first prize of "North America Truck of the Year 2008", one of the most authoritative award in the US. New CX-9 is the successor.

The second generation CX-9 has been planned and designed mainly by Mazda North American Operations, as the strategic program for North America, one of Mazda's important markets. New CX-9 is the high-end model of our new generation programs, and offers fun to drive and outstanding safety and high environment performance. This program completely meets various family needs and on the other hand, offers prestige feeling as our high-end. Finally new CX-9 is another breakthrough to this segment as the first CX-9 did.

1. はじめに

初代CX-9は2007年に発表され、優れたダイナミック性能と流麗で力強いデザイン等をミッドサイズ3列SUVセグメントに新しく提案した。お客様からは、従来のミッドサイズSUVの常識から脱却した革新的なクロスオーバーとして高い評価を得た。また、このモデルの主要仕向けの北米では、最も権威ある自動車賞のひとつである「北米トラックオブザイヤー 2008」を受賞した。二代目となる新型CX-9は初代と同様に現在のミッドサイズSUVの常識を

再び打ち破り、革新的な価値をお客様に提供することを目指した。マツダの米国の開発拠点が中心となり、北米のお客様の生活様式や嗜好を積極的に取り込みながら企画やデザイン活動を行い、今までのミッドサイズSUVでは感じることができない新しい価値を創造した。

新型CX-9はマツダの新世代技術「SKYACTIV技術」及び「魂動（こどう）デザイン」を全面的に採用した新世代商品群の頂点となる車種である。

*1～3 商品本部
Product Div.

*5 企画設計部
Architecture Design Dept.

*4 商品企画部
Product Planning Dept.

2. ターゲットカスタマーと商品コンセプト

ミッドサイズSUVはお子様を持つ家族の方々に選んでいただくファミリーカーである。初代CX-9開発時、マツダのSUVはCX-9だけであり、ターゲットカスタマーはヤングファミリーを中心にファミリー層全体をねらっていた。現在、マツダのSUVにはCX-5が加わり、多くのヤングファミリーの方々にはCX-5を選んでいただいている。従って、新型CX-9はより大きなお子様がいらっしゃる家族に選んでいただけるように、よりMatureでAffluentな（年齢を重ねることで生活にこだわりやゆとりが生まれた）ファミリー層をターゲットにした。良き親としてだけでなく、自己表現に富んだ職業人や趣味人、妻や夫など人生の多様な側面を輝かせたいと心掛ける人達がターゲットユーザーである。言い換えれば、親としての自分と個人としての自分の両立を願う、人生に意欲的な大人達である（Fig. 1）。これらターゲットユーザーに訴求する商品コンセプトをSmart Indulgence（スマートに心を動かされる）と定義し、キーとなる4つの商品価値を決めた。

- ① **Personal Aspiration**：個人としての願望を感情的に結び付ける精巧さや造り込み。
- ② **Effortless Transition**：親としての自分と、一個人としての自分を簡単に切り替えられる実用性とドライビングダイナミクス。
- ③ **Easy Parenting**：子育てを楽に感じる、家族が楽しめる多用途空間。
- ④ **Couples Retreat**：夫婦の時間をより親しく寛げる空間と環境。

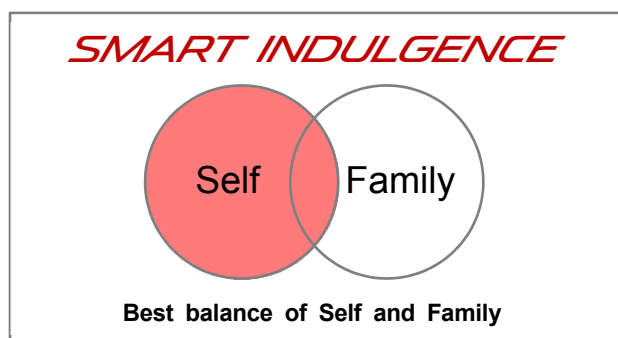


Fig. 1 Product Concept

3. 商品特徴

ファミリーカーとしての十分な実用性を備えつつ、一個人として心を動かされる情緒的でプレステージな魅力を持つように、前述の4つの商品価値を商品特徴として造り込んだ。またマツダのハイエンドモデルに相応しく、視覚や聴覚、嗅覚、触覚等の身体感覚を通じて得られる体験の質を、あらゆる使用シーンにおいて劇的に進化させることで、

真の上質さを知るお客様にこそ自信をもって選択いただける商品を実現した。

3.1 デザイン

マツダの新世代商品群の頂点となる新型CX-9は、CX-5以降の新世代商品群で採用してきた魂動デザインを更に深化させることを目指した。魂動デザインがねらう生命感を持ちながら、マツダのハイエンドとして品格を表現した。ダイナミックで力強い骨格を持ち、細部においては職人がひと手間をかけることにより精緻なデザインや高い品質を造り込んだ。

(1) エクステリアデザイン

北米の雄大な景色に負けないデザインとするために、強い骨格を作り上げた。下半身となるボディー部分は、直線基調のラインと台形フォルムにより安定感を与えた。そのボディーの上に、3列シートを持つ前後方向に長いキャビンの特長を活かしてスピード感を感じるプロポーションとした。これにより、逞しい前進感を持った品格があるエクステリアデザインを実現した（Fig. 2）。

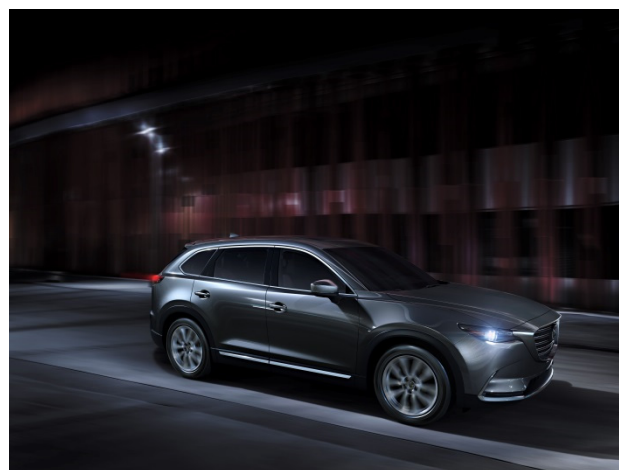


Fig. 2 Exterior Design

(2) インテリアデザイン

インテリアも、エクステリアに相応しい強い骨格作り注力した。インテリアの下半身に当たるセンターコンソールとアームレストを大型化・低重心化して安定感のある土台を前後方向に走らせた。その上に、横方向に広がる薄くて軽いインストゥルメントパネルを乗せた。これにより、腰から下はしっかりとホールドされながら、開放感がありリラックスできる室内空間を実現した。

またインテリアには、ウッドパネルやアルミなど本物の素材を使った。それら各素材の良さを際立たせるために、職人が無垢の素材から削り出して形を決めた。ウッドパネルは木目が美しく、かつ触れた際の木の暖かさや肌触りを考慮してローズウッドを採用した。これにより、アルミが持つ金属の冷たさとのコントラストを持たせた（Fig. 3）。



Fig. 3 Interior Design

3.2 新型2.5リッター直噴ガソリンターボエンジン

マツダの新世代商品群の中で、最も大きなサイズの新型CX-9においても走る喜びと優れた環境性能を提供するため、SKYACTIV-GのDNAを継承する新開発2.5リッター直噴ガソリンターボエンジンを搭載した。ドライバーが意のままに操れるようにターボラグを感じさせない速い加速レスポンスと、低回転から圧倒的に高く持続する加速感を実現している。同時に、ミッドサイズSUVセグメントの常識を打ち破る優れた燃費性能も実現している (Fig. 4)。



Fig. 4 SKYACTIV-G 2.5T

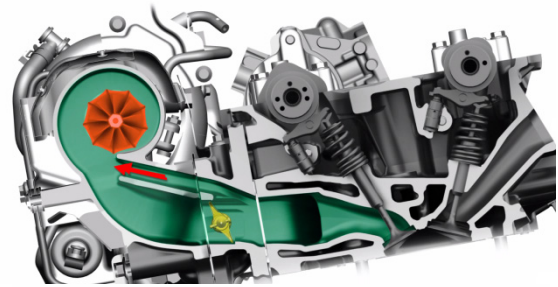
そのキーは、世界初技術であるダイナミック・プレッシャー・ターボ (Dynamic Pressure Turbo) システムと、クールドEGR (Cooled EGR) である。

ダイナミック・プレッシャー・ターボは、2つの特筆する技術要素を持つ。1つ目は排気通路にバルブを設け、排気の圧力パルスを高流速に変換することであり、エンジンの回転数に合わせてバルブを開閉する (Fig. 5)。

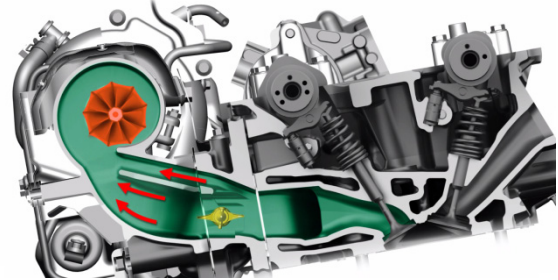
2つ目は排気管を3-1配管としてその集合部で、排気気

筒の排気ガスを利用し、他気筒の残留ガスを積極的に掃気することにある (Fig. 6)。これら2つの技術により、低回転から十分に吸気し、従来のターボエンジンでは実現できなかった低回転域での大きなトルクを実現した。

クールドEGRは、高負荷領域の燃焼温度を低下させ、ノッキングの発生を低減する技術である。クールドEGRの採用により、お客様が実際の走行で使用される頻度の高い負荷領域で、ほぼ理想的な燃焼を維持することができ、燃費を大幅に向上させた。



Low Revolution Area



High Revolution Area

Fig. 5 Dynamic Pressure Turbo System

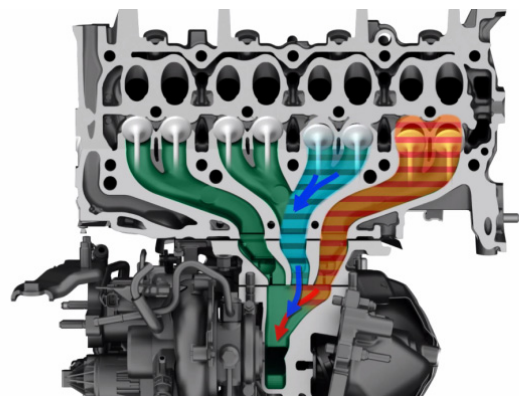


Fig. 6 Dynamic Pressure Turbo System

3.3 上質な乗り心地と卓越した静粛性

ファミリーカーとして、また個人で運転する時間を楽しむクルマとして、運転席だけでなく2列目や3列目に座るお客様へも上質な乗り心地を実現した。このため、しっかりと安定した車両の挙動と路面変化に対する優れた減衰を目指し、マツダが持つ新世代技術を全て投入した。

ボディーやシャーシ、パワートレインそれぞれに理想的なレイアウトや構造を採用すると同時に、車両性能という

視点で統合的に最適化した。例えば、サスペンションの入力に対するボディー構造を最適化することで車体の減衰感を大幅に向上しつつ、ダンパーレイアウトを変更して微小なストロークの動きを滑らかにした。更に、シートの剛性・振動特性を向上するため、シートクッションには新世代商品群の中で最も高い減衰率の新素材を採用した。それらを統合的に最適化することで、乗り心地の代表特性の一つとして車両シェイクで見ても、ブルブルとした人間が不快に感じる振動を格段に抑えることができた (Fig. 7)。

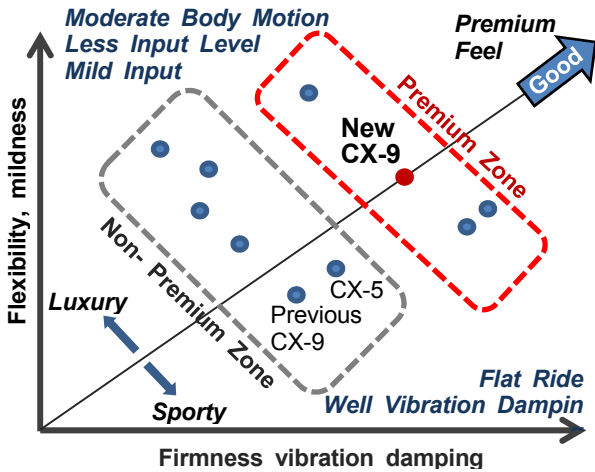


Fig. 7 Ride

家族との旅行・送迎や職場への通勤の途中、クルマの中でも家族との会話を楽しみ、また好みの音楽を楽しみリラックスできるように、静粛性には特に注力した。北米では日常の移動でもハイウェイを走ることが多く、またハイウェイの路面の材質はさまざまである。高い車速での走行時に荒れた路面でも快適に会話が楽しめ、不快な音を抑えた静かな空間を提供することを目指した。騒音の侵入経路に対して基本設計から見直し、特にドア断面やフロア断面については全く新しい構造や素材を採用することで、従来のマツダ車と比べて格段の静粛性を実現した (Fig. 8)。

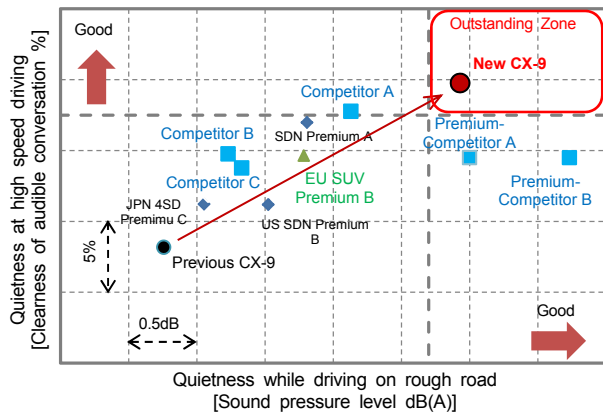


Fig. 8 Quietness

また走行時だけでなく、クルマに乗り込みシートに座りドアを閉めた瞬間に、外界と遮断された静粛な空間を感じられることを目指した。クルマに乗り込んだ瞬間にパーソナル空間を感じることで、一個人としての新たな意気込みや活力が湧く、スイッチを起動できる演出を目指した。

3.4 爽快なドライビング体験～操縦安定性能

ファミリーカーとして家族を乗せて運転する際には、大切な家族を守るため安全・安心が実感できること、またパーソナルカーとして自分一人で運転する際には、クルマのサイズを気にせず走る喜びが実感できること、それぞれ高いレベルでの両立を目標とした。

先代CX-9に比べて、ホイールベースを長くしたため、タイヤを入力源とする車体への外乱が大きくなる。外乱に対するボディーのねじれを抑えるため、車体の構造を見直し全体剛性を上げた。特にリア周りには、Cピラー環状構造とよぶ新構造を採用し、先代車比でねじり剛性を45%向上した。

また操舵時の回頭性を上げ、かつ収まりやすい車両特性を目指した。前後分担荷重を改善するため、フロント軸重にかかる部品を軽量化した。エンジンルーム廻りの部材を軽量のアルミに変更し、またエンジンルームの最重量物のエンジンをV6からI4ターボに変更することで約60kgを超える軸重を軽量化した。

3.5 パッケージング/乗降性

大切な家族を乗せて走るファミリーカーとして、ドライバーが道路状況を正しく認知・判断し、クルマを的確に操作できる空間を実現した。また、マツダのハイエンドモデルとして伸びやかな外観デザインと同時に、ファミリーにとっての実用性を兼ね備えた理想的なライフスタイルをおくることができるパッケージを実現した。

(1) ドライビングポジション：新世代商品として一貫してこだわるドライビングポジションは、運転に集中でき運転を楽しめる空間を目指した。ドライバーが自然な姿勢で運転できる空間を実現するため、コックピットはドライバーに正対した位置に配置した。またシフトやペダル等操作機器は、人体の寸法や関節の動きに加え、運転動作の動線に配慮した最適な位置と角度に配置した。

(2) 居住空間/乗降性：米国では、子供が一定の年齢に達するまでは、学校他への子供の送迎は親の義務であることが多い。自分の子供に加えて友人の子供達を乗せる機会を考慮して、3列目でも中学生の子供が快適に過ごせる空間を確保した。また子供の乗り降りの際には、子供が自分で乗り降りができる機構を提供することを目指した。具体的には、2列目シートにチャイルドシートを載せたままでも、3列目シートに子供が一人で乗り降りできるよう、軽い操作力で乗降空間が確保できるチルトダウンするウォー

クインシート構造を採用した (Fig. 9)。

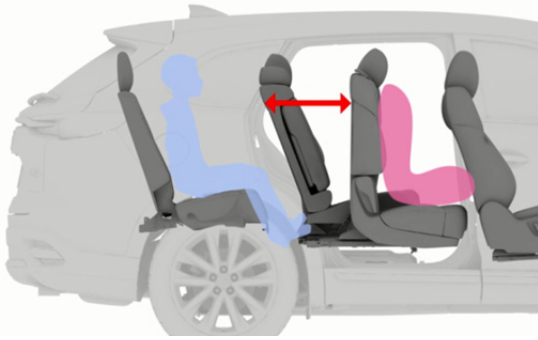


Fig. 9 Tilt Down 2nd Seat

ファーストカーとして、子供を学校へ送迎した後は職場に向かう場面が多くある。職場での外出の際は、後席に職場の同僚が座る頻度も高いため、2列目・3列目の室内空間は、子供だけでなく大人が座っても自然な姿勢で着席できる空間を確保している (Fig. 10)。



Fig. 10 Interior Packaging

運転席と助手席は、夫婦にとって特別の場所である。助手席にパートナーが同席する時は、一緒に過ごす時間を楽しむ場所である。加えて、このクルマに乗ることの喜びを感じていただけるように、ミッドサイズSUVに相応しい豊かな空間を実感できる空間とした。特に、センター・リアコンソール周辺は、運転動作の動線に配慮したシフト/コマンダー、アームレストを配置すると同時に、ゆとりある空間を感じさせる広さ・高さを両立する居住空間とした (Fig. 11)。



Fig. 11 Driver & Passenger Space

(3) 室内照明：ハイエンドモデルに相応しい居心地の良さを実現し、洗練された上質な室内空間を演出するため、室内照明の配置や配光にも配慮し、新しい照明を設定した。まず、室内空間の奥行き感や豊かさを感じられるようにドアグリップやセンターコンソール部分に間接照明を配置した。また、造形や素材の美しさを際立たせるダウンライト照明をオーバーヘッドコンソールに配置した。同時に乗員の乗降時の動線や乗員の操作に配慮して、安全・安心に乗り降りやすスイッチ等の操作を支援する照明とした。

(4) 荷室：活動的なファミリーの多様な要望に応える荷室空間を確保した。積載性に配慮し、段差がなくフラットでクリーンな荷室でありながら、使い勝手に工夫を施した。また荷室周りの利便性向上として、パワーリフトゲート (PLG) を採用した。PLGは夫婦の体格差があっても使いやすいように、開度調整機能を付けた。

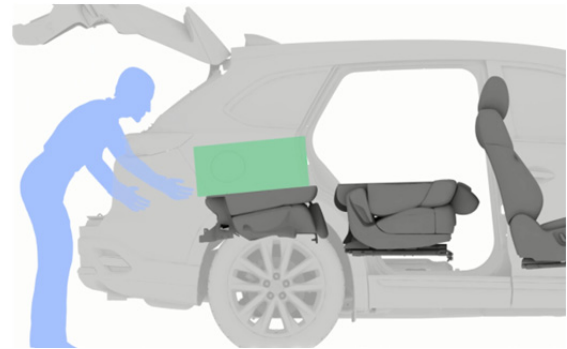


Fig. 12 Luggage Space

3.6 i-ACTIV AWD

あらゆる道路や路面環境でも、安心と走る喜びを提供することを目指し、i-ACTIV AWDを採用した。多数の車両センサーを用いて路面状況をいち早くクルマが検知し、更にドライバーの意図を予測することで、不安定な状況に備える駆動力配分を行っている。これにより、状況変化に瞬時に反応して車両を安定させることができる。またAWDの駆動損失を最小化する制御を加えることにより、FW Dに迫る燃費性能を実現した (Fig. 13)。

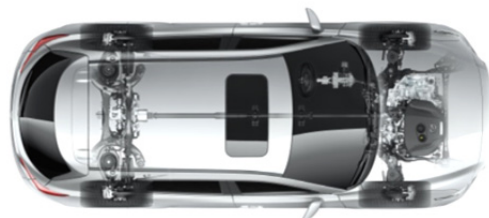


Fig. 13 i-ACTIV AWD

3.7 安全・i-ACTIVSENSE・HMI

ファミリーカーとして安全・安心には特に注力した。世界トップレベルの衝突安全性能を実現し、家族の安全を守る充実した先進安全装備を幅広く採用した。

まず、ドライバーが安全に運転できる状態を最大限確保するため、見通しの良い視界や視認性の良い運転環境を実現した。また、新型CX-9では、走行情報への視線移動を最小化するアクティブドライビングディスプレイ (Active Driving Display) に、フロントウィンドシールドに投射するタイプをマツダとして初めて採用した。従来のコンパインタイプに比べて、より高く遠い位置に虚像を作ることにより、ドライバーが焦点を合わせる時間を更に短縮できる。安全に走るための走行情報の表示コンテンツを増やしながらも、直感的に認知しやすい位置に配置し、表示をカラー化することで、走行情報を迷いなく認知できるようにした (Fig. 14)。



Fig. 14 Active Driving Display Front Window Shield Type

次に安全への懸念が迫る際には、ドライバーに危険を気付かせ安全運転をサポートすることを目指した。レーンキープ・アシスト・システム (LAS) は、北米の道路状況や運転特性に合わせて新しく開発し、マツダとして初めて北米市場に導入する。LASはドライバーの不注意により車線逸脱リスクが高まっている場合、システムが介入し、ステアリング操作を行うことで自然な車線逸脱回避操作をサポートする。

また、マツダ・レーダー・クルーズ・コントロールは、全車速追従機能付をマツダとして初めて採用し、豪州に導入する。停止まで減速制御を行うことで、高速道路のみならず、市街地・渋滞シーンでの追従走行も可能にし、ドライバーの疲労を軽減する。

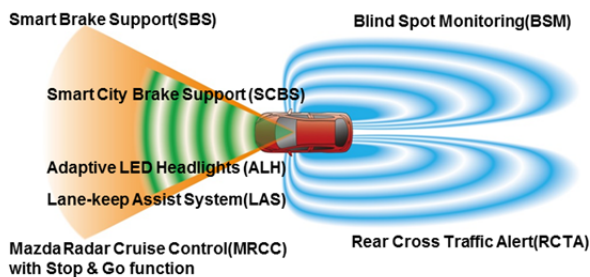


Fig. 15 i-ACTIVSENSE

最後に世界トップレベルの高い衝突安全性能を実現するための基本となるボディー構造は、フレームワークや断面構造を見直してハイテン材などの高強度材料を最適に配置した。これにより高い衝突安全性能とセグメントトップの軽量ボディーを両立した (Fig. 16)。

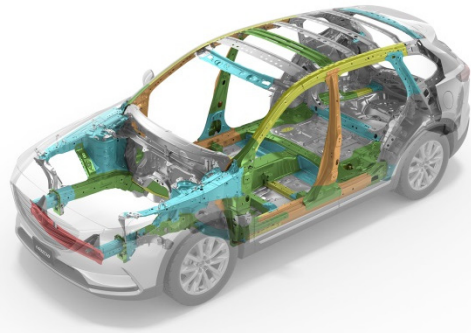


Fig. 16 Body Rigidity

4. おわりに

新型CX-9の開発に当たっては、企画段階からMNAOとともに北米のお客様の実態調査から入り、コンセプト立案、ターゲット設定を経て、現在に至っている。その結果、市場ニーズを十分に踏まえた上で、マツダがこれまでに培ってきた技術を総動員し、マツダらしいファミリーカーに仕上げる事ができたと考えている。これは、開発に携わった全てのメンバーの成果である。その協力に感謝申し上げたい。

また、新型CX-9は、マツダブランド及び新世代商品群のハイエンドモデルとして、マツダが貫いている一貫したクルマ造りの哲学も具現化できたと考えている。

今後ともマツダのクルマ造りに期待していただきたい。

■ 著 者 ■



大塚 正志



佐々木 克明



伊藤 正城



富永 晋三



金納 賢治

特集：新型CX-9

2

新型CX-9のデザイン Design of New CX-9

木元 英二*¹
Eiji Kimoto

要 約

新型CX-9をデザインするにあたりマツダらしいプレミアム像を考えた。プレミアムといっても色々なプレミアムがある。今回ねらったのはマツダ流の“おごそかで品格のあるプレミアム”である。これを実現するために骨格の完成度を上げ磨きあげた。大陸の大自然に負けないダイナミックで力強い骨格を全精力を上げて作り込んで本物を追求した。また3列シートでありながら魂動デザインで追求しているロングノーズやコンパクトなキャビンも実現した。インテリアも骨格を重視。センターコンソールとドアトリムのSWボックスを大型化して土台とし、その上に薄くて軽快なインストゥルメントパネルを配置して低重心で安定感のあるダイナミックなインテリアとした。また本物素材を使ったエレメントを精緻なクラフトマンシップによって配置し、精緻感と高級感を表現。これらの施策により、これまでマツダが経験したことのない高質を知る顧客にも満足していただけるデザインが完成した。

Summary

We first thought about a Mazda-like premium image when we began designing the New Mazda CX-9. Among the many kinds of premiums, we aimed at Mazda's way, stately and dignified premium. In designing the New Mazda CX-9, we put priority on refining its powerful and dynamic framework, eliminating all excess elements, and maximizing its potential in order to make it a genuine machine. And we were able to realize a long nose and a compact cabin, which KODO design is intended to achieve, despite being a 3-row seat model. For the interior, too, we put a focus on the framework. The stable and dynamic interior was realized by a low center of gravity, with a light, thin instrument panel laid out over the foundation formed by a large center console and large switch boxes on the door trim on both sides. In addition, refined elements made of genuine materials were adopted in the interior with precise craftsmanship. All these efforts made it possible to achieve a premium-quality design Mazda had never experienced before.

1. はじめに

初代CX-9は、2008年北米トラックオブザイヤーを受賞し、3列シートのスタイリッシュなミッドサイズSUVのパイオニア的存在で市場評価も高い。新型CX-9はそのサイズ、車格からマツダのフラッグシップであり、マツダ新世代商品群の最後であると同時に次世代に橋渡しする商品でもある。

北米市場では、ミッドサイズSUVは家族とともに移動を楽しむためのクルマであり、学校への送り迎えやスーパーへの買い物に使うなど生活に密着したクルマでもある。そのためミッドサイズSUVは、3列シートを確保するため

大きなキャビンとなることとなり、全体に洗練さが失われて生活臭さがにじみ出たスタイルになりがちである。そこで新型CX-9は、生活から離れたシーンにおいてもセンス良く使うことができるクルマに仕立てることにより、先代で高く評価されたスタイリッシュなミッドサイズSUVを市場で再定義するようなクルマ造りを目指した。

現在、マツダブランドの置かれる立場や状況、目指すべき方向性は、先代CX-9開発当時とは大きく変わってきた。新型CX-9は、ニアプレミアム領域に挑戦する商品として、デザイン領域では、意味的価値（エモーショナルバリュー）を重視し、真のプレミアムレベルに挑戦した。マツダが経験したことがない領域に対して、これまでのマツダの“あ

*1 デザイン本部
Design Div.

たりまえ”な部分を一つ一つ問い直しながら、感度の高い顧客を惹きつけられるよう理想を追求した。これまでの最上級グレードであったGTよりも、さらに上質をねらったSIGNATUREグレードを新設して、本物を知る上質な顧客を満足させるクルマ造りを目指した。

2. デザインコンセプト

2.1 おごそかで品格のあるプレミアム

プレミアムと一言でいっても、いろいろなプレミアムがある。マツダは新型CX-9をデザインするにあたり、「どんなプレミアム性をこのクルマに持たせるのか？」というプレミアムのあるべき姿の方向性から考えた。試行錯誤の末に至った結論は、“おごそかで品格のあるプレミアム”というコトバである。これは日本の企業としてマツダが、世界に発信するプレミアムとしてデザインの方向性を示す基軸となるコンセプトである (Fig. 1)。

豪華なものを付け足すプレミアムではなく、職人が魂を込めて磨き込んでいくうちに光り輝くようなプレミアムを目指した。これ見よがしな豪華パーツで飾ったり、派手な造形でアピールするのではなく、開発者一人一人が職人となってしっかりと丹念なもの作りを行う。結果それが上質を知る人々に感動を与え、また虚飾を廃した本物のクルマとして受け入れられると考えた。

2.2 本物素材

今の世の中は、〇〇調や〇〇風といった、フェイクで溢れている。これは自動車のデザインの世界でも同じであり、開発や管理の容易なフェイク素材が主流になっている。このような〇〇調や〇〇風を排除することは、本物のマシンを目指す魂動デザインにおいて非常に重要である。ともすれば時代とともに規制は増えていき、正真正銘の本物が作り難くなっている中で、マツダはあえて本物のモノ造りを目指した。

木目調パネルやアルミ風加飾を廃し、それぞれ本柵パネル、本アルミを用いた。本柵や本アルミの使えないグレードでも、フェイク素材を使わずに塗装だからこそこできる仕上げを追求した。更には、本柵・本アルミを使うだけではなく素材の特性を活かす形状にもこだわった。

2.3 フィット&フィニッシュ

上質を表現するには、形状の良し悪しと同時に、それが「いかに精緻に組み合わせられているか？」が重要である。どんなに精巧に作られたパーツも、フィット&フィニッシュが雑ではプレミアムの精緻な感動が生まれない。ダイナミックで力強い骨格に本物素材。そこに精緻なフィット&フィニッシュが加わった時に、初めて感動を生む“おごそかで品格のあるプレミアム”の価値が生まれる。



Fig. 1 Design Concept Image

3. エクステリアデザイン

3.1 “プレミアム魂動”への進化

新世代商品群は、コンセプトカー「Shinari」から始まりこれまで数々の量産車で進化を続けながら魂動デザインを展開した。新型CX-9は、Mazda6以来の大型車における魂動デザインのクルマである。「大型車への魂動デザインの展開はどうすべきか？」を考え抜き、大型としてのプレミアムな価値を創造し、“プレミアム魂動”とすることに挑戦した。

3.2 ダイナミックで強い骨格

CDセグメント以上のサイズの大きなクルマ、特にプレミアム領域のクルマでは、そのサイズの余裕から骨格でダイナミックな動きを表現しやすい。新型CX-9は、ダイナミックな骨格やプロポーションを表現し、洗練させることがデザインが一番の見せどころになる。また、このクルマの骨格の動きの洗練度が、プレミアム表現の重要な要素である。

新型CX-9のマーケットは、北米やオーストラリア、サウジアラビアなど、いずれも大陸の国々である。これら雄大な大陸の景色の中で走るクルマには、その景色に負けぬ強いデザインが必要不可欠である。これを表現する軸となるのが強い骨格であり、新型CX-9では、大陸の強さに埋もれない強くダイナミックな骨格を作り込んだ。

ヘッドライトからリアコンビランプまで一直線につながる軸を感じるように、面のハイライトやテンションを調整した。この軸を中心にして、ボディ、キャビンへの流れを作りダイナミックで力強い骨格を組み立てた (Fig. 2)。



Fig. 2 Axis

ボディ造形は、力強い下半身の重量感とスピード感の両立をねらった。サイドシルにボリュームを持たせて、あえて上下方向の動きを抑え前後方向の直線基調のラインとすることで安定した土台とした。ボディサイドのショルダークャラクターは、小型車系の魂動デザインを持つ上下方向の躍動感を抑えて、前後方向のスピード感あるラインとした。

力強いボディの上部に、3列シートゆえの長さを生かして、前後方向のスピード感を持たせた薄いキャビンをもたせた。これにより、下半身が安定して上半身にいくほどスピード感があり、少々横風ではびくともしないような力強さと前進感を併せ持った逞しいボディが完成した。また、上下の動きを抑制した造形は、新型CX-9のマチュアな顧客の好みにマッチした強く落ち着いた造形に寄与している。これまでの魂動デザインで追求してきた、Aピラーを後ろに引いてフロントノーズを長く見せつつ、キャビンをコンパクトに見せる造形を踏襲し、大型車における魂動デザインの理想形を体現した (Fig. 3)。



Fig. 3 Structure & Form

3.3 スタンス

スタンスは骨格と並んで魂動デザインを表現する上で非常に重要な要素である。スタンスはクルマの俊敏な運動性能と安定した走行を予感させ、見る人にそのクルマの魅力を伝える。北米などの大陸国家では、直線の多いフリーウ

エイを、前車の後姿を見つめたまま走り続けるといったシーンがよくある。この場面で、いいなと思わせる安定したスタンスを持つことは大変重要である。この安定感は安心感にもつながり、同乗者の信頼感が得られる。

優れたスタンスを得るためにマツダは、タイヤの位置からヘッドランプなどの各パーツを通過してキャビンに至るまでの造形を、安定感ある台形フォルムになるように作り込んだ。丹念に各パーツのレイアウトと造形を作り込み、台形スタンスを磨き上げた。更には、真正面、真後ろだけではなく、コーナリング中など実際に走行している時でもスタンスを失わないように注力して各パーツやボディー面を造形している (Fig. 4)。



Fig. 4 Stance

3.4 ブランドフェイス

強力な競合車がひしめく市場環境の中でプレミアムの存在感を示すためにはブランドフェイスが重要である。

見る者にひと目でマツダ車と分かる強い印象を与えるブランドフェイスはプレミアムな価値を語る上で重要である。そのためグリルの大きさと位置にこだわった。威厳のあるクルマの多くがグリルの構えが大きく立派であるように、マツダの中で最も大きなグリルとシグネチャーウイングを与えた。また、その高さをヘッドランプと同じか、やや高いところまで持ち上げ、背筋を伸ばして胸を張っているような、堂々とした顔立ちにした。ヘッドランプはLEDとして小型薄型化してグリルの主張をより強くした。

リアにもシグネチャーウイングをあしらい、リアコンビネーションランプとの3次元的なエレメントの組み合わせ

で、ブランドをアピールした (Fig. 5)。



Fig. 5 Brand Face & Rear Combination Lamp

3.5 ホイールデザイン

CX-5以降、新世代商品ではセンターハブからタイヤにつながるダイナミックかつ立体的な動きを表現しながら、全体として軽量に見えるホイールを追求してきた。塗装や造形の工夫により、厚みのある金属の質感を持たせることにもこだわった。新型CX-9では、この考え方をベースとして、よりプレミアムな表現に挑戦した。

上級グレードには20インチホイールを採用し、径がより大きく見ると同時に、奥行きや深さを感じるホイールデザインとした。立体感が出るようにスポークをややラウンドした断面にし、それをシャープなキャラクターで構成して、シャープでありながら存在感のあるダイナミックな造形を実現した。また他のグレードには18インチホイールを採用、凄みのある塊感を表現した。

造形の立体感をより強く感じさせるため、20インチ全車に、また18インチでもTouringグレードに高輝度塗装を採用した (Fig. 6)。



Fig. 6 20inch Wheel

4. インテリアデザイン

4.1 骨格

インテリアデザインにおいてもプレミアムな価値の創造を追求した。新型CX-9は、奇をてらった造形は避け、プレミアムな価値を持つ大型車ならではの空間の上質さを重視した。

通常、インテリアデザインではインストゥルメントパネルのデザインが主役になりがちであるが、新型CX-9ではよりラグジュアリーな空間づくりをねらって骨格作りをメインにデザインをはじめた。乗員が快適に包まれて運転に集中でき、かつ開放感がありリラックスできる、そんな相反した要求を満たす空間を土台から組み立てることで実現した。



Fig. 7 Interior Structure

具体的にはインテリア中心部のセンターコンソールと両サイドのドアトリムのスイッチボックスを大型化して、低重心で安定感のある土台を設置し、その上に薄くて軽い印象の、横方向に広がるインストゥルメントパネルを設置する構成とした。これにより、下半身はしっかりとホールドされながら、腰からは自由な空間が広がる、ラグジュアリーでリラックスできる空間を完成させた (Fig. 7)。

ミッドサイズSUVの 카테고리では、コンソールの立派さ、トリムの厚み、シートクッションの厚みが格付けを決める。新型CX-9は、センターコンソールの幅、ドアトリムの厚みを空間の中で吟味して、格の高さを表現する造形とした。

インテリアの造形は可能な限りセンターシンメトリーとし、強固で端正なたたずまいを表現した。一方、大型のセンターコンソールとドライバー側のスイッチボックスに囲まれた空間は、マツダ車共通のテーマでもある“ドライバーオリエンテッド”が表現できるよう、各パーツの配置や角度の吟味を重ねた。これらにより、端正なセンターシンメトリーとしながらも、ドライバーオリエンテッドの思想も同時に表現することに成功した (Fig. 8)。



Fig. 8 Driver Oriented

4.2 エレメントデザイン

確りとした骨格で構成された空間に、正確で緻密な本物のエレメントを組み込む。この組み合わせこそがデザインコンセプトである“おごそかで品格のあるプレミアム”を実現する鍵であると考えた。そこで、エレメントは正確で精密に見えるようにデザインした。配置されるスイッチ類はその周囲にメッキリングを配し、内機はより正確で緻密に見えるよう処理した。

最上級グレードであるSIGNATUREグレードでは、ローズウッドと本アルミの加飾を設定した。こだわりを持って作られた本物の素材が持つ威厳は、高級感を表現する上でもっとも有効な手段の一つである。素材の持つ特性を最大限に活かしたカタチとした。本杢は、木の良さを表現できる無垢の木の塊を表現し、本アルミ加飾はアルミの塊を削り出した時にできる切削跡のようなヘアライン処理を施し、アルミが本来持っている塊の美しさを表現した。

また、実際にカタチを決める作業にも本物の木やアルミの職人と一緒に削りながら形状を作り、見映えだけではなく、触った時の触感、手触り、使い込んでいったときの風合いの変化など、使う人に長く愛着を持っていただけることにこだわった (Fig. 9)。



Fig. 9 Real Material Decoration Panel

4.3 シート

ミッドサイズSUVでは、シートの見た目の厚みが生み出す乗り心地の良さへの期待感が、プレミアムな価値を表現する上で非常に重要である。シートは乗員との最も大きなタッチングポイントの一つであり、見た目と同時に触感や手ざわり、におい、座り心地など、多くの要素で乗員に最高の満足感を与えなければならない。

新型CX-9のシートは、質感と触感の向上と座り心地の更なる向上を目指し、最上級グレードであるSIGNATUREグレードに、ナッパレザーという、これまでのスムースレザーよりも上級な革を採用した。これは単に質感や触感の向上をねらっただけではなく、従来の革素材よりも伸びる特性を活かして、リッチでゆったりとしたシート形状を実現することにも貢献した。角に強い張りを持たせることができ、一番張りのある部分に乗員とのタッチポイントを設定して、きめ細かくてスムースなナッパレザーの特性を十分に生かしたシートとした。ステッチのピッチは、従来の5mmピッチから4mmピッチに詰めており、黒のワンポイントやパイピングを用いることによりプレミアムな質感を実現した。

GTやTuringグレードではスムースレザー表皮でさりげない上質感を表現し、またEntryグレードではファブリック素材でカジュアルな室内空間を演出している (Fig.10)。

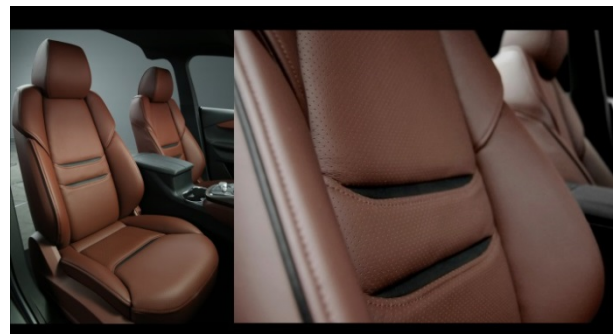


Fig. 10 Nappa Leather Seat

4.4 ステアリング

新型CX-9においてプレミアムの価値を追求するにあたり、ドライバーに正対するステアリングホイールの質感向上は必須と考え、新デザインを採用した。

軽快な操作性を予感させるために、センターパットの径を従来品に比べて小型化し、形状も真円に近づけるとともに、センターパットにメッキリングを配して、視覚的に小型に見せた。スポークは、骨格表現を施した金属調パーツを用いて剛性感を表現し、高い質感と造り込みを感じさせるディテールとした。そこに、最小限かつ自然な指の動きで操作するスイッチを配置した。自然に置いた指の位置から、上下に動かすだけで3つの操作がスムーズにできるようにデザインした。グリップは、人間工学に基づいた正

確で快適な操作をサポートする次世代グリップ断面形状を採用し、しっかりと握れ、かつ回転時にストレスなく手のひらを滑らせることができるグリップ断面とスポーク付け根形状を実現した。SIGNATUREグレードは、室内カラーコーディネーションを考慮したカラードスペシャルステッチをあしらい、その他のグレードにもベースボールステッチを施して上質感を表現した (Fig. 11)。



Fig. 11 Steering Wheel

5. クラフトマンシップ

空間設計、骨格、エレメントにおいてデザインコンセプトである“おごそかで品格のあるプレミアム”にふさわしいデザインを創り込んだ。従来であれば、ここでデザイン作業は終わり後工程にゆだねることになる。しかし、それぞれのパーツが正確にかつ精緻に組み合わせられて初めてプレミアムな価値が生まれると考えた。我々は、これまでデザインが手を伸ばしてこなかった後工程の領域にも範囲を広げて活動した。技術本部との協業により隙間の生産バラツキ管理の活動に参画し、フィット&フィニッシュによる精緻さが表現できるまで妥協することなく活動した。これまで以上に準意匠面の見映えを精査して、お客様の目に入るところすべての領域において見映え、品質を向上した。

6. カラーデザイン

6.1 ボディーカラー

ミッドサイズSUVの主な購買層である成熟したユーザー層は、シックでかつ上質を感じやすい色を好む。新型CX-9は、ソニックシルバー、ジェットブラック、スノーフレイクホワイトを中心に、たくましさや強さを表現できる暖色系のチタニウムフラッシュと寒色系のディーブクリスタルブルー、ブランドカラーであるソウルレッドと新型CX-9のために開発した匠塗りシリーズ第2弾となる新色、マシングレイをテーマカラーとして加えた全7色とした (Fig. 12)。

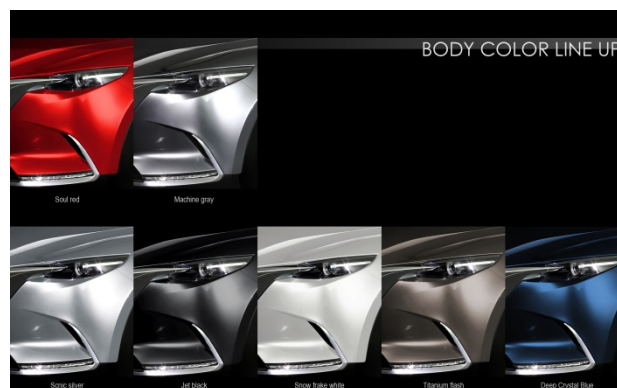


Fig. 12 Body Color

ボディーカラーでも、“おごそかで品格のあるプレミアム”そして“本物”をねらった。奇をてらうことなく、また、派手で豪華な方向に走らずに、デザインの形状や意図を際立たせる色、より魅力を深める色としてマシングレイをテーマカラーとして開発した。

マツダは古くからクルマのマシンとしての魅力を真面目に追求してきた歴史を持つ。また、魂動デザインの根底には、マシンとしてのクルマの魅力を動きで表現するという考え方がある。新型CX-9は、このマシングレイでクルマという機械の塊が高速で動くという感動や喜びを表現しようと考えた。あたかも本物の金属の塊から削り出されたような質感を表現した。光を浴びている明るい部位から影の暗い部位への明度の変化が強く、明るいところはとことん明るく、暗いところは真黒に見えるほど暗く見えるこれらの特性を生かすことで、ボディー形状をより際立たせて魅力を引き出している。この新開発のボディーカラーでより一層のプレミアム価値の向上が図れたと自負している。

6.2 インテリアカラー

最上級グレードであるSIGNATUREグレードでは、よりラグジュアリーで色気のある雰囲気醸し出すため、専用のカラーコーディネーションを設定した。温かみのある豊かさの表現、本杢や本物アルミ素材とのマッチング、またナッパレザーのしなやかさ、きめの細かさを活かす色としてAuburn色を開発した。黒色天井を採用した漆黒の空間の中に浮かびあがらせることにより、シンプルで活動的な雰囲気を表現しながら、同時に品格やプレミアムを表現した。

Auburn仕様を頂点として、GTグレードでは、黒の空間の中にDeep-Redのインパネ色を採用し、黒との組み合わせによりさりげない色気を表現した。TouringとEntryグレードでは、グレー天井の明るい空間の中で黒とサテンメッキの組み合わせによるクールでシックなコーディネーションを展開し、洒落た大人から、明るい家族までもマッチできるカラーコーディネート展開とした。

7. おわりに

新型CX-9は、プレミアムや上質という実態が見えにくい領域を表現する必要があり、斬新さよりも普遍的な美しさ、奇抜さよりも深みを重視したデザインに挑戦した。

洗練、品格というプレミアムを表現するキーワードでデザインを創り込み、開発に携わったデザイナーの一人一人が挑戦した結果である。しかし、この領域はデザインチームだけでは達成できない。デザインテーマの「魂動」に触発された職人気質のメンバー全員の本物を追求するひと手間が、このクルマを磨き上げるのにつながったと感じている。その手間が新しい価値を創造してクルマの魅力に変わっていった。この魅力が市場のお客様に伝われば幸いである。

新型CX-9が先鞭をつけたマツダのオルタナティブプレミアム路線が市場に受け入れられ、今後のマツダのラインナップのクオリティーの底上げにつながり、ブランド価値がより高く認知されるようにブランドが成長していくことを願ってやまない。

■ 著 者 ■



木元 英二

特集：新型CX-9

3

新型ガソリンターボエンジン「SKYACTIV-G 2.5T」の開発 Newly Developed Gasoline Engine "SKYACTIV-G 2.5T"

室谷 満幸*¹ 末國 栄之介*² 藤山 智彰*³
Mitsuyuki Murotani Einosuke Suekuni Tomoaki Fujiyama
山形 直之*⁴ 岩井 浩平*⁵ 沖田 齡次*⁶
Naoyuki Yamagata Kouhei Iwai Reiji Okita

要 約

マツダの技術開発の長期ビジョン「サステイナブル”Zoom-Zoom”宣言」に基づき、走る歓びと環境性能を高次元で両立することを目指して新シリーズガソリンエンジン「SKYACTIV-G」を開発した。このエンジンを更に進化させ新たに2.5Lターボチャージャーエンジンを開発し、新型CX-9に搭載した。新型エンジンは、従来のダウンサイジングターボとは一線を画し、ターボエンジンの弱点であるターボラグを克服して、大排気量NA並の過渡レスポンスとトルクコントロール性を実現し、意のままの走りと実用領域の分厚い低中速トルクによる余裕の走りを提供するとともに、エンジンの低燃費率領域を拡大することでクラストップレベルの低燃費性能を達成している。本稿では、このエンジンのコンセプトと導入した新技術について紹介する。

Summary

Based on Mazda's long term technology development strategy (Sustainable Zoom-Zoom), a new series of SKYACTIV-G gasoline engines were developed to realize both fun-to-drive and environmental performance at high level. As a further evolved form of SKYACTIV-G, new 2.5L turbocharged engine was developed to be mounted on the All-New Mazda CX-9. In the process of developing the new engine, as a fresh departure from the current downsizing engine, turbo-lag, which is the weak point of a turbocharged engine, was overcome, and transient response and torque controllability equivalent to a large-displacement natural aspiration engine were realized. As a result, lively driving and more torqueing-full performance were brought into reality and class-top fuel economy was achieved with an expanded low specific fuel consumption area. This article introduces the concept and the technologies applied to this engine.

1. はじめに

SKYACTIV-Gは、優れた環境性能と走行性能を高次元でバランスさせ「サステイナブル “Zoom-Zoom” 宣言」を具現化した商品をお客様に提供してきた⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾。

この優れた基本性能をベースに更なる進化を織り込み、新型CX-9のためのパワーソースとして新たに2.5Lターボチャージャーエンジンを開発した (Fig. 1)。この開発では、世界のベンチマークとなるユニットになるよう以下の3つの特筆した性能を目指した。①自然吸気4L並みの圧倒的なトルク、②ターボラグを感じさせない加速レスポンス、③SKYACTIV-Gの高圧縮比と低抵抗構造コンセプトを継承して卓越した燃費・環境性能の達成。本稿では、この新

型エンジンの開発コンセプトと、その実現のために導入した新技術を紹介する。



Fig. 1 SKYACTIV-G 2.5T

*1, 2 エンジン設計部

Engine Design Engineering Dept.

*4 パワートレイン技術開発部

Powertrain Technology Development Dept.

*3 エンジン開発部

Engine Performance Development Dept.

*5 パワートレイン企画部

Powertrain Planning Dept.

*6 パワートレイン開発本部

Powertrain Development Div.

2. エンジン開発コンセプト

新型CX-9に搭載するエンジンとして、Mazdaブランド戦略である「走る歓び」と「優れた環境安全性能」を実現させる理想のパワートレインを目標に掲げ、以下のコンセプトで開発した。

- ・ 競合V6同等以上の実用域トルクと加速レスポンス
- ・ カタログ燃費及び高負荷実用燃費の大幅改善
- ・ 軽量コンパクト
- ・ 現行プラットフォームへの搭載性確保

既存のダウンサイジングターボチャージャーエンジンでは、加速初期の過給遅れ（ターボラグ）がありマツダの目指す“意のままの走り”を阻害する要因になっていた。そこで、加速初期のレスポンスと加速後半から最大加速にスムーズにつながる必要トルクを得るために、新型CX-9の大きさ・重量を考慮して、最適な排気量“ライトサイジング”と最適な構造“ライトアーキテクチャ”を選択した。それが2.5Lの排気量とマツダ独自の新技术であるダイナミック・プレッシャー・ターボ（Dynamic Pressure Turbo）システムの組み合わせである。また、新型エンジンは、カタログ燃費値だけでなく実用領域の燃費を改善するため、中高負荷領域にCooled EGRを導入することで空燃比リッチゾーン縮小と高負荷時のノックリタードを抑制し、幅広い低燃費領域を実現した。このCooled EGRシステムは、高回転高負荷領域の燃焼温度を低下させる効果もあり燃焼室周辺の熱負荷を低減させることで、クロスドリル加工等の冷却対応を不要としボアピッチを拡大せずにターボ化に対応することができた。その結果、既存SKYACTIV-Gの基本構造を維持するとともに軽量コンパクトと既存プラットフォームへの搭載性を確保し、更に加工や組立設備の多くを流用して生産設備の変更を最小限に抑えることができた。

3. エンジン諸元とシステム

マツダでは、究極の内燃機関を目指し、Fig. 2に示した7つの制御因子を理想状態に近づける取り組みを進めている。

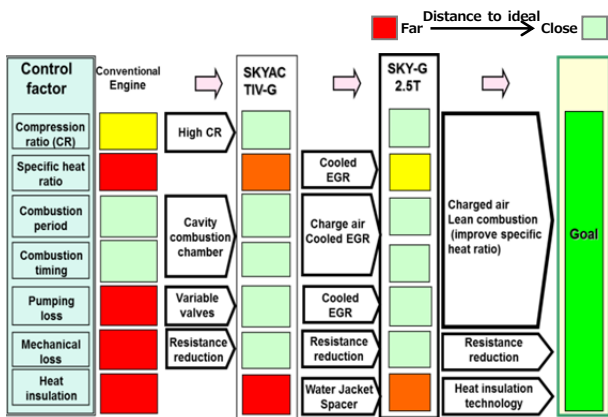


Fig. 2 Vision for Evolution of Internal Combustion Engine

新型2.5Lターボチャージャーエンジンでは、高過給とCooled EGRの採用でポンプ損失の更なる低減と比熱比の改善を進化させ理想に近づけている。

Table 1に主要諸元を示す。ベースとなるSKYACTIV-G 2.5L NAエンジンとボア、ストローク、ボアピッチなどの基本諸元およびインジェクターや燃料ポンプなどの燃料系部品を共通化してSKYACTIV-Gの高効率燃焼ポテンシャルを踏襲しながらダイナミック・プレッシャー・ターボシステムとCooled EGRシステムを新規導入した。また、圧縮比は、高過給時の圧縮上死点における圧縮圧力と混合気状態が2.5L NAの圧縮比13と同等になるよう圧縮比10.5に調整しており、89mmボアサイズかつレギュラー燃料使用の過給エンジンではベストインクラスの高圧縮比を達成した。

Table 1 Dimension and Specifications

Engine	SKYACTIV-G 2.5	NEW SKYACTIV-G 2.5T
Engine Type	In-Line4	←
Displacement	2488cm ³	←
BorexStroke	89mmx100mm	←
Compression ratio	13	10.5
Combustion chamber	Small Cavity Piston	Large Cavity Piston
Fuel Injection	DI (6Hole Injector)	←
Intake-Valve	Open(BTDC)	-32~42
Timing	Close(ABDC)	110~36
Exhaust-	Open(BBDC)	58~13
Valve Timing	Close(ATDC)	6~51
Int.S-VT	Electric	←
Ex.S-VT	Hydraulic	←
Valve train	HLA+Roller follower	←
Crank main/pin journal dia	φ50mmxφ50mm	←
Chain type: valve train	Roller	←
:Oil	Silent	←
Oil Pump	Electric control (2stage)	Electric control (Variable)
Water Jacket spacer	w/o	Plastic spacer
EGR System	w/o	HP-Cooled EGR
Turbocharger System	w/o	Dynamic pressure turbo System
Max.Power	138kW(188PS) ^{*1} /5700rpm 142kW(192PS) ^{*2} /5700rpm	169kW(230PS) ^{*1} /5000rpm 186kW(253PS) ^{*2} /5000rpm
Max Torque	250Nm ^{*2} /3250rpm 256Nm ^{*1} /3250rpm	420Nm/2000rpm

*1: Regular Gasoline
*2: Premium Gasoline

4. パフォーマンス

4.1 出力性能

新型CX-9の過渡レスポンスには、ターボラグを感じさせない加速感をねらいとして、Fig. 3に示した時間ごとの加速度目標を設定した。このねらいの加速度を可能にし、かつ実用領域で主に使用される低中速領域での余裕の走りを確保するためにFig. 4のトルクカーブを実現した。レギュラーガソリン使用で1250rpmという低回転にて350Nmを発揮し、最大トルクは420Nm/2000rpm、最高出力は169kW(230PS)/5000rpm（プレミアムガソリン使用時は186kW(253PS)）を達成した。その結果、発進時の力強さと実用域でのリニアで軽快な反応、そして高回転までの伸びやかな加速を実現している。

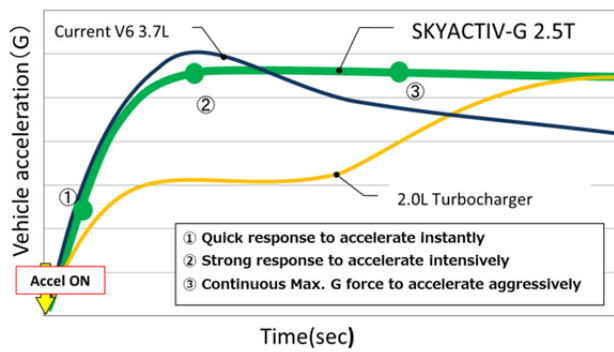


Fig. 3 Vehicle Transient Acceleration

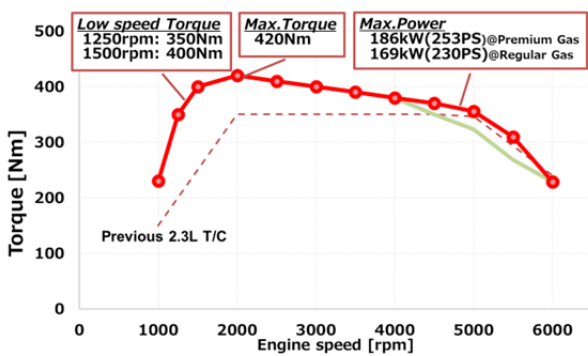


Fig. 4 Engine Performance

4.2 燃費性能

ユーザー使用頻度の少ない5000rpm以上の高出力領域を169kW（プレミアムガソリン使用時は186kW）に抑え、かつCooled EGR導入による熱負荷低減効果により2.5L SKYACTIV-Gの高効率低抵抗構造を踏襲した結果、NA同等のエンジン機械抵抗と重量を実現した。また、高負荷領域においてもSKYACTIV-Gの高効率燃焼とCooled EGRによるノック発生回避によりエンジンの低燃費領域を広くしている（Fig. 5）。

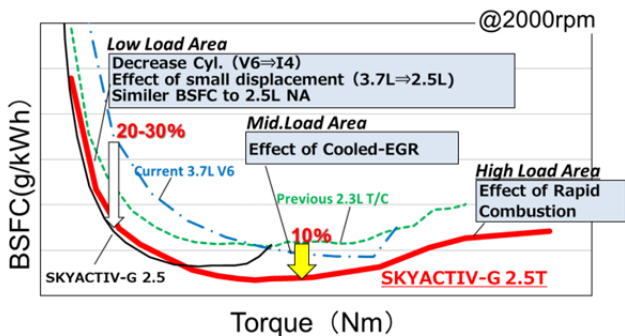


Fig. 5 Fuel Consumption Characteristics

その結果、低回転高負荷の加速領域から190km/hの高速度領域まで理論空燃比（ $\lambda=1$ ）でのエンジン運転が可能となり（Fig. 6），従来のダウンサイジングターボエンジンの弱点であったカタログ燃費と実用燃費の差を少なくすることができた。

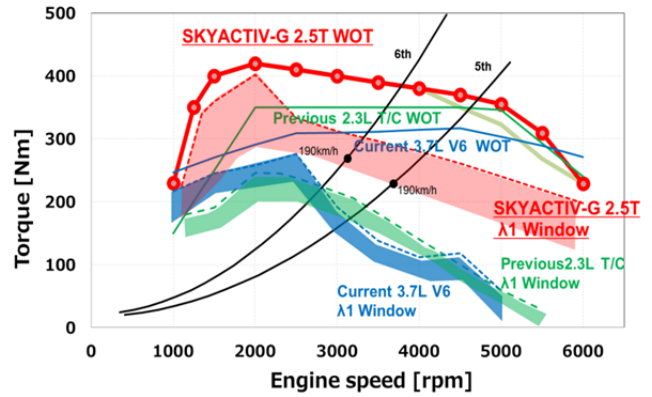


Fig. 6 $\lambda=1$ Area of Engine Operation

5. ブレークスルー技術

5.1 ダイナミック・プレッシャー・ターボ システム

ダウンサイジングエンジンとは一線を画す、大排気量NA並の加速レスポンスを実現するブレークスルー技術が、ダイナミック・プレッシャー・ターボシステムである。このシステムは、排気の脈動状態を運転条件に合わせて変化させる機能をもつ。低回転域では排気圧力脈動の振幅を強調させることでシリンダー掃気効果と高いタービン駆動力が同時に得られ、高回転域では脈動振幅を低減してタービンの高効率率を維持できる。排気干渉低減の効果をねらったツインスクロールターボやタービンに流れ込む排気ガス流速や方向を調整する可変ジオメトリターボとは異なり排気脈動の制御に着目したマツダ独自の新技术である（Fig.7）。

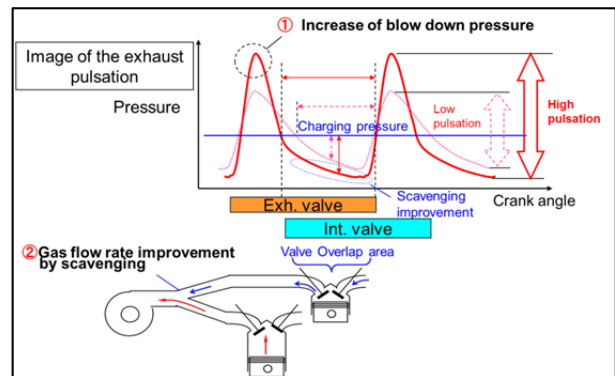


Fig. 7 Theory of Dynamic Pressure Turbo

ターボチャージャーは、排気ガスを回転力に変換する装置である。そのタービンの駆動エネルギーQは下記の式で表され、エンジンから排出される排気ガス圧力を拡散膨張させずに高圧力かつ高流速の状態ですタービン入口に導きPiを大きくすることで、高いタービン駆動力を得ることができる。

$$Q = Cp \cdot G \cdot Ti \cdot \eta_t \cdot \left(1 - \left(\frac{Po}{Pi}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}\right)$$

Q:タービン駆動エネルギー Cp:定圧比熱

Ti:タービン入口温度 ηt:タービン効率

Pi :タービン入口圧力 Po :タービン出口圧力

κ : 比熱比

この原理から導き出した、排気ポートを含む通路容積が最小かつ等容積で排気干渉を抑制した新開発の排気マニフォールドをターボチャージャー前に搭載している。

1620rpm以下では排気マニフォールドの可変バルブをコンピュータ信号で作動する負圧アクチュエータにより閉状態にして排気気筒の排気ガスが他の気筒へ拡散することを防止し、シリンダーヘッドからの高圧排気ガス脈動流を直接ターボチャージャーに導く。加えて、排気ガスの拡散防止効果は他気筒に低い排気圧状態を発生させ、掃気効果によってシリンダー内の残留ガスが低減し充填効率が向上する。これら2つの効果で15%のトルクアップを可能にしている (Fig. 8)。

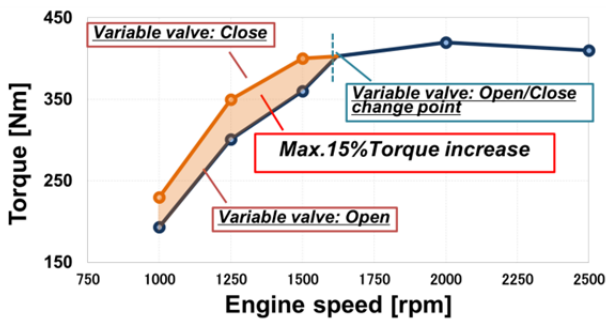


Fig. 8 Effect of Dynamic Pressure Turbo System

1620rpm以上では、排気マニフォールドの可変バルブを開にして以下の二つの効果を得ている。①排気脈動を他気筒通路に拡散させることで排気抵抗を低減させる効果、②必要な排気ガス通路径が確保され大きなA/R（通路面積Areaとタービン半径Radiusの比率、この値が大きいと高回転タイプのターボチャージャーになる）をもつターボチャージャーと等価な過給効果。これに電子制御のエアバイパスバルブとウェイストゲートを採用したことにより、過渡の過給圧コントロール性の向上および低回転から高回転の広い範囲でトルクとレスポンスの向上を実現した。

このダイナミック・プレッシャー・ターボシステムは従来のシングルスクロールターボやツインスクロールのター

ボに比べ、20~25%の低速トルク向上効果が得られている。

次に、ダイナミック・プレッシャー・ターボシステムの構成を説明する。シリンダーヘッドは排気干渉のない4-3排気ポートとし、ウォータージャケットを配したヘッド一体の水冷排気マニフォールド構造を採用している (Fig. 9)。これにFig. 10の上を示す排気通路ごとに絞りノズル形状にした低速ポート、Fig. 10の下に示す可変バルブをもつ高速ポートを備えた排気マニフォールド、低速ポートと高速ポートに仕切られたFig. 13の2段A/Rのツインフローターボチャージャーを組み合わせている。

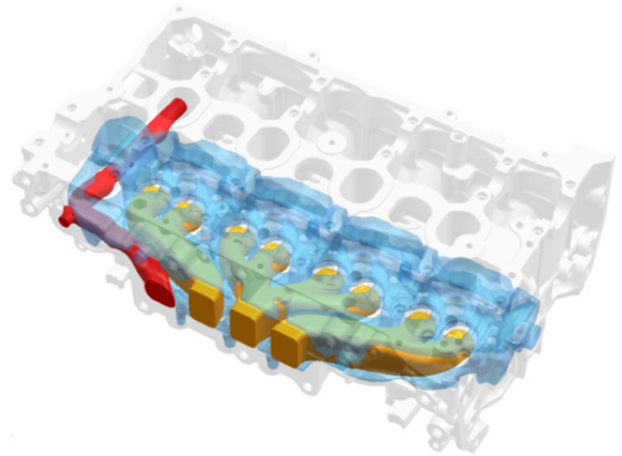


Fig. 9 Cylinder Head Exh. Port and Water Jacket

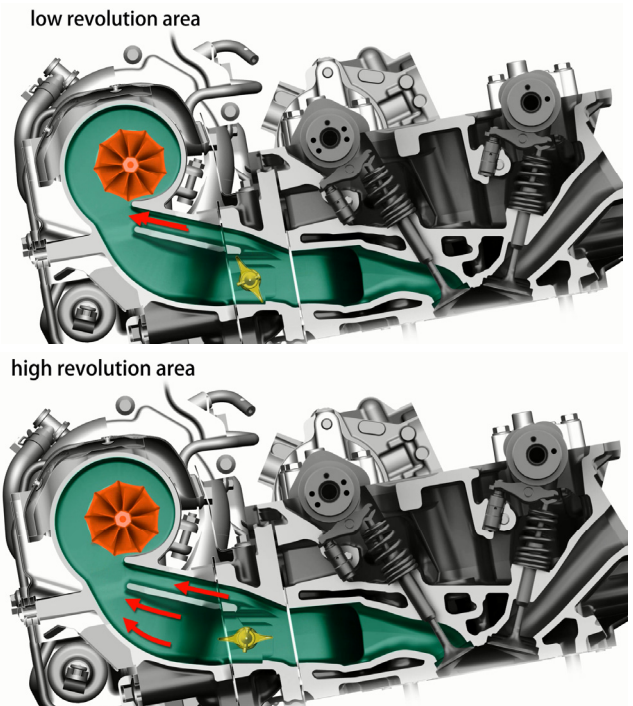


Fig. 10 Dynamic Pressure Turbo System

一方で、900℃を超える排気ガス雰囲気でのバルブ作動と耐久性を確保するために排気マニフォールドの可変バルブに高耐熱材料を採用した。また、排気マニフォールドとターボチャージャーは複雑な排気ガス通路形状となっているが、CAE熱応力解析を駆使した肉厚や形状の最適化により高温での熱応力を低減するとともに、高温強度の高いオーステナイト系鋳鋼を用いることで、信頼性を確保している。

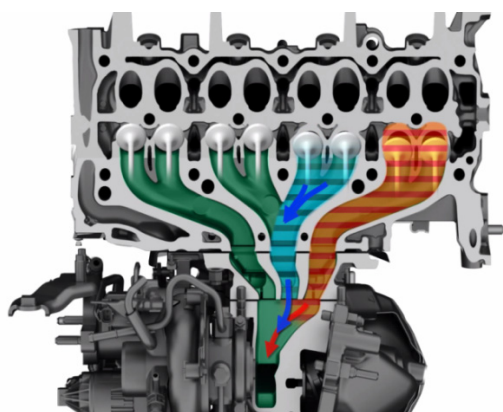


Fig. 11 Dynamic Pressure Turbo System

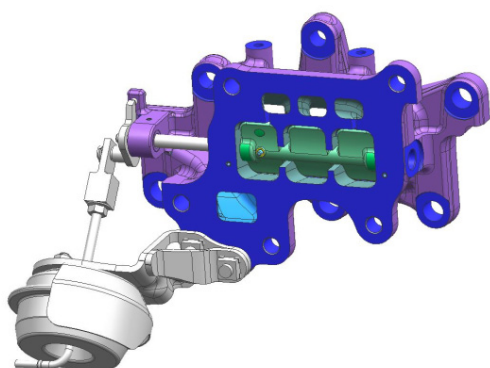


Fig. 12 Exhaust Manifold with Variable Valve

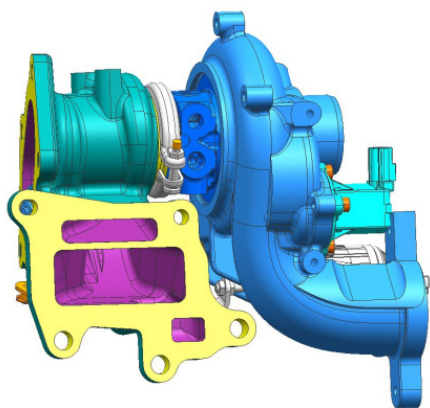


Fig. 13 Twin Flow Turbocharger

5.2 Cooled EGR システム

このエンジンのもう一つのブレークスルー技術がHigh-pressure Cooled EGRシステムである (Fig. 14)。

既存のダウンサイジングターボエンジンは、高負荷領域でのノッキング防止のための燃料増量と点火タイミングのリタードを採用せざるを得ず熱効率が悪化し、低負荷走行の多いカタログ燃費と高負荷走行の多い実用燃費との差が大きい。この課題を解決するため、新型エンジンでは、Fig. 15に示すように高回転全開領域を含む中高負荷領域にEGR Cooler後の低温不活性ガスを導入して燃焼温度を低減させノッキング発生を防止し、理論空燃比領域の拡大と点火タイミングのリタード量を抑制した。この結果、広い低燃費率領域と実用燃費の改善を可能にしている。

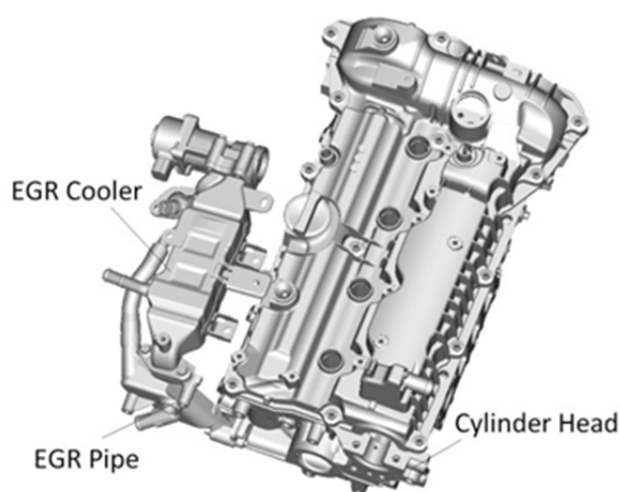


Fig. 14 Cooled EGR System

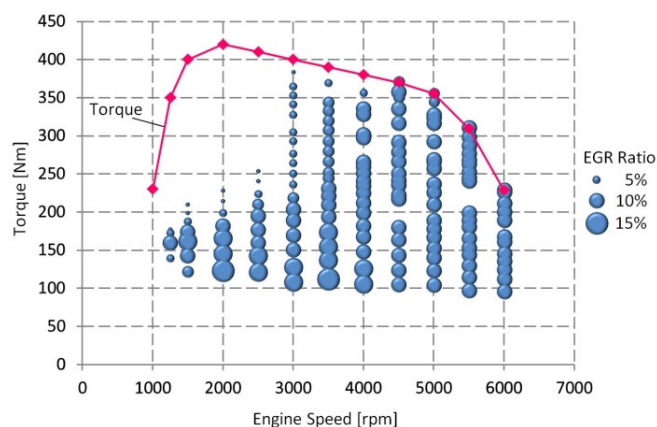


Fig. 15 EGR MAP

また、全開領域を含む高温の排気ガスを効率的に冷却するため、EGRガスは、排気マニフォールドの可変バルブ下流からシリンダーヘッド内部を通りウォータジャケットをもつアルミ製のEGRパイプを通過する壁面冷却とEGR Coolerの冷却で2段階に温度低下させる。この多段階冷却

システムを採用することで、コンパクトかつ低圧損なEGR経路としながら排気ガス温度を950℃から150℃以下まで冷却した。このCooled EGRシステムは、全開領域でのボア間温度を約10℃低下させる効果があり、クロスドリルなどの冷却構造を不要としてNAエンジンと同じボアピッチでターボ化を実現させることに貢献している。

6. エンジン本体、NVH、エミッション対応

新型2.5Lターボチャージャーエンジンは、過給エンジンでありながらも基本諸元や燃料システムはSKYACTIV-G 2.5を踏襲している (Table 1)。一方で、ターボ化による高出力対応や更なる燃費改善の進化も織り込んでいる。

6.1 ピストンと高タンブル吸気ポート

新型エンジンは、SKYACTIV-Gの高効率燃焼を踏襲するためピストンを相似形状のCavity Pistonとし、クラウン形状で圧縮比を10.5に調整している (Fig.16)。また、高過給時の燃焼室内流動を2.5L NAエンジンと同等にするためシリンダーヘッド吸気ポート上側のデッドボリューム低減で吸気流動の指向性を強化し、ポート下部にエッジ加工を施した2段加工の高タンブルポートによりタンブル比を12%強化した (Fig.17)。

SKYACTIV-G 2.5 NA $\epsilon=13$ SKYACTIV-G 2.5T $\epsilon=10.5$



Fig. 16 Large Cavity Piston

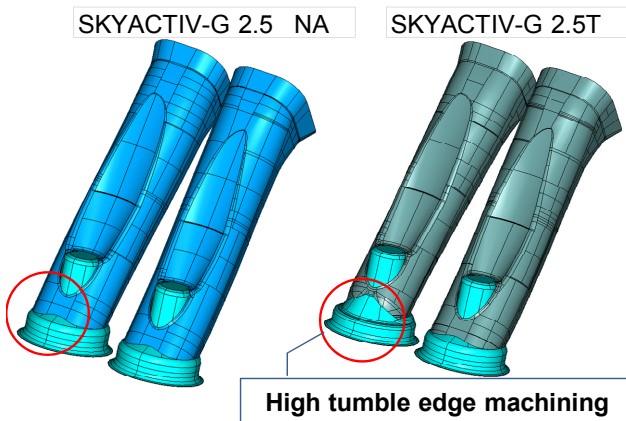


Fig. 17 High Tumble Port

6.2 連続可変容量オイルポンプ

新型エンジンでは、ターボ化によるターボチャージャーへのオイル供給やピストン冷却オイルジェット流量増などでオイルポンプの最大吐出量の増加が必要になった。一方で、低燃費を維持するため不必要な領域でのオイル供給量を減らし機械抵抗を低減することが求められた。この相反する要求を両立させるためベーンタイプの連続可変容量オイルポンプを開発した (Fig.18)。コンピュータがエンジン回転と負荷に応じて最適なオイル供給量を算出し、油圧センサーでモニターしながらソレノイドをリニア制御することでオイルポンプの吐出室容積を無段階に変化させることができる。

このオイルポンプでエンジンオイル供給量を最適化し、従来のトロコイドタイプ2段可変オイルポンプに比べて最大吐出量を従来比75%増加させながらモード領域のオイルポンプ抵抗は2.5L NA同等を実現している。

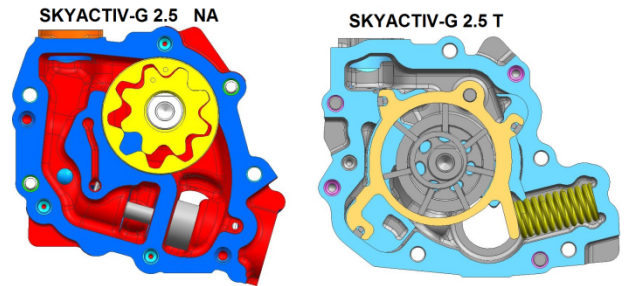


Fig. 18 Comparison of Oil Pump

6.3 ウォータジャケットスペーサー

新型エンジンは、ボア間冷却性を高めるためシリンダーブロックのウォータジャケットに樹脂性のスペーサーを挿入した (Fig.19)。併せてシリンダーライナー周辺の冷却水量と流速を制御して、シリンダーライナー上部に高流速の冷却水を集中させることでシリンダーライナー温度上昇を抑制し、熱負荷増加に対する信頼性を向上させた。

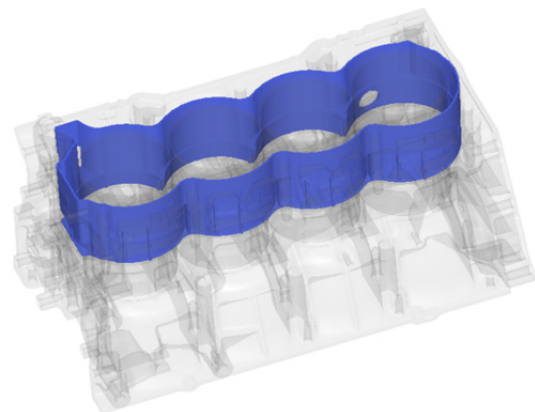


Fig. 19 Water Jacket Spacer

このウォータージャケットスパーサーは、ボアピッチを拡大することなくターボ化できた要因のひとつであり、軽量コンパクト化に大きく貢献している。

6.4 NVHとエミッション対応

ターボ化による燃焼圧力増加と回転系の慣性質量増加により悪化するNVHは、シリンダーブロックやクランクシャフト形状の最適化で抑制した。低回転域を高過給化することで生じるキャビティーンノイズ（ターボチャージャーのエアバイパスバルブからの吸気気流音）を抑制するためエアバイパスバルブ通路断面積と通路容積の比を最適化し、吸気システムの固有振動数と吸気脈動周波数をチューニングすることで周波数の近接を防止して静粛性を高めている。冷間始動時は、電動ウェイトゲートを開弁制御して排気ガスをバイパスさせることで、タービン回転数を6万回転から3万回転に低減させて回転1次音の発生を抑制した。

また、始動時のエンジン回転数を上昇させてキャタリストへ供給する排気ガスを増やすことで触媒の早期活性化を促し、燃焼室内の燃料分布均質化、点火タイミング制御の緻密化と合わせて排気ガスの浄化性能を高め、USA LEV IIとEU Stage6規制をクリアしている。

7. まとめ

SKYACTIV-Gの進化版として新型2.5Lターボチャージャーエンジンの新技術を紹介した。既存のダウンサイジングターボとは一線を画すマツダ独自のライトサイジングターボエンジンを実現させることを目標にして、One Mazdaで取り組み立ちはだかる課題をひとつひとつ解決しブレークスルーを実現したものである。個々の技術をうまく組み合わせることでいくつかの機能を持たせ進化した技術として新型CX-9に搭載し、世界のお客様に「走る歓び」と「優れた環境性能」を届けることができた。

今後も、マツダは内燃機関の理想を求めて技術の進化と深化を目指していくとともに、お客様の期待を上回るサブライズを提供し続けていく所存である。

参考文献

- (1) 富澤ほか：新型デミオのエンジン技術，マツダ技報，No.29，pp.8-13（2011）
- (2) 長谷川ほか：CX-5 SKYACTIV-Gのエンジン技術，マツダ技報，No.30，pp.3-8（2012）
- (3) 星野ほか：新型ロードスターのエンジン技術，マツダ技報，No.32，pp.124-127（2015）

■ 著 者 ■



室谷 満幸



末國 栄之介



藤山 智彰



山形 直之



岩井 浩平



沖田 齡次

特集：新型CX-9

4

新型2.5Lターボチャージャーエンジン制御技術の紹介 Introduction of New 2.5L Turbocharger Engine Control Technology

西尾 貴史*¹ 東尾 理克*² 砂流 雄剛*³
Takafumi Nishio Masayoshi Higashio Yugou Sunagare
足利 謙介*⁴ 坊田 亮郎*⁵
Kensuke Ashikaga Akio Boda

要 約

新型2.5Lターボチャージャーエンジン（以下SKYACTIV-G 2.5T）において、SKYACTIV-Gの特長である優れた環境性能と動力性能を継承しつつ、ターボシステムの追加による更なる余裕の走りを最大限に発揮できる制御を開発し、新型CX-9に採用した。核となるコンプレッサー／タービンの仕事量（駆動力）を物理モデル化することで、ドライバーのアクセル操作に応じた目標過給圧を設定し、電動ウェイトゲートバルブと可変バルブタイミング機構（以下S-VT）や外部EGRとの協調制御により過給圧の追従性を高めた。更に、電動エアバイパスバルブ制御により過給圧を保持する運転領域を拡大し、新気吹き抜け推定制御を用いた空燃比の精度向上により優れたトルク応答性・コントロール性を実現した。また、SKYACTIV-Gから本格的に導入したモデルベース開発を進展させ、過給圧制御や新気吹き抜け推定制御などのロジック構築の効率及び設計検証の充実度を高めた。

Summary

For new 2.5L turbocharger engines, Mazda developed a new control technology that maximizes the effects of the turbo system while inheriting the excellent environmental and power performances of SKYACTIV-G, and applied it to the new Mazda CX-9. Physical modeling of the compressor/turbine workload (driving force) enabled cooperative controlling of an electric wastegate valve with variable valve timing mechanism and an external EGR, consequently improving the followability of the actual boost pressure with respect to the target boost pressure set according to the accelerator operation by a driver. In addition, excellent torque responsiveness and controllability were realized by expanding the boost pressure holding operation zone through the electric air bypass valve control and by optimizing the air-fuel ratio through fresh air blow-by quantity estimation control. Furthermore, advancement of the model-based development, which was fully introduced in SKYACTIV-G, made the review of a logical configuration of, for instance, boost pressure control and fresh air blow-by quantity estimation control more effective and enhanced the quality of design verification.

1. はじめに

SKYACTIV-Gは、優れた環境性能と動力性能を両立し、低燃費でありながらガソリン自然吸気エンジンならではのリニアな加速感を磨きあげ、マツダブランドの要である人馬一体のパワーフィールを具現化している。

その根幹となる技術は、4-2-1排気システムやキャビティピストンなどにより世界に先駆け圧縮比14.0を実現した

ハード設計構造に加え、吸排気S-VTやエレキスロットルなどのデバイスを常に最適なエンジン効率に維持するよう構築したソフト制御構造にある。

SKYACTIV-G 2.5Tでは、SKYACTIV-Gの特長を継承しつつターボシステムの効果を最大限に発揮できる制御を開発した。

本稿では、このSKYACTIV-G 2.5Tに織り込んだ主要な制御技術について紹介する。

*1 PT制御システム開発部
PT Control System Development Dept.
*3 エンジン性能開発部
Engine Performance Development Dept.

*2, 4 パワートレイン技術開発部
Powertrain Technology Development Dept.
*5 走行・環境性能開発部
Driveability & Environmental Performance Development Dept.

2. ガソリンターボエンジンの制御技術

2.1 ターボシステム

SKYACTIV-G 2.5Tの制御システムとして、電動式のウェイトゲートバルブとエアバイパスバルブをマツダで初採用した。

どちらのバルブも、従来の機械式では吸気管内の圧力設定値によって作動させるが、電動式はその制約がなく作動の自由度を大幅に広げることが可能である。

また、インタークーラーとスロットル間に圧力センサーを設け、コンプレッサー下流圧力をセンシングしており、これらにより、ねらいの過給圧と排気圧力に制御している。

2.2 制御技術

SKYACTIV-G 2.5Tの制御において新規開発したコンプレッサー／タービンモデルを用いた過給圧制御、過給圧とS-VT・EGRバルブの協調制御、エアバイパスバルブ制御、新気吹き抜け推定制御について以下に記述する。

(1) コンプレッサー／タービンモデルを用いた過給圧制御

SKYACTIV-Gは、ドライバーのアクセル操作に応じて適切な車両駆動力となるよう制御し、目標の車両駆動力は動力源であるエンジンの目標トルクに置き換える。また、目標トルクから目標充填効率を求め、更に目標のインテークマニフォールド内空気量を求める。すなわち、ターボエンジンでは目標のインテークマニフォールド内空気量になるようコンプレッサー下流圧力及びインテークマニフォールド内圧力をコントロールすることで、適切な駆動力を実現できる (Fig. 1)。

今回、コンプレッサー下流圧力をコントロールするためのコンプレッサー／タービンモデルを作動理論に基づいた物理モデルとして構築した。

コンプレッサー下流圧力はコンプレッサー仕事量で決定し、コンプレッサー仕事量はタービン仕事量とバランスする。

ここで、コンプレッサー仕事量 L_{cd} は式①、タービン仕事量 L_{td} は式②、コンプレッサー仕事量とタービン仕事量のバランスは式③で表せる。

$$L_{cd} = R_a \times \frac{\kappa_a}{\kappa_a - 1} \times T1 \times G_a \times \left\{ \left(\frac{P2}{P1} \right)^{\frac{\kappa_a - 1}{\kappa_a}} - 1 \right\} \quad \text{①}$$

R_a : 空気のスガ定数 κ_a : 空気のス比熱比
 $T1$: コンプレッサー上流温度 G_a : コンプレッサー流量
 $P2$: コンプレッサー上流圧力 $P1$: コンプレッサー下流圧力

$$L_{td} = R_g \times \frac{\kappa_g}{\kappa_g - 1} \times T2 \times G_g \times \left\{ \left(1 - \frac{P3}{P4} \right)^{\frac{\kappa_g - 1}{\kappa_g}} \right\} \quad \text{②}$$

R_g : 排気スガのスガ定数 κ_g : 排気スガのス比熱比
 $T2$: タービン上流温度 G_g : タービン流量
 $P4$: タービン上流圧力 $P3$: タービン下流圧力

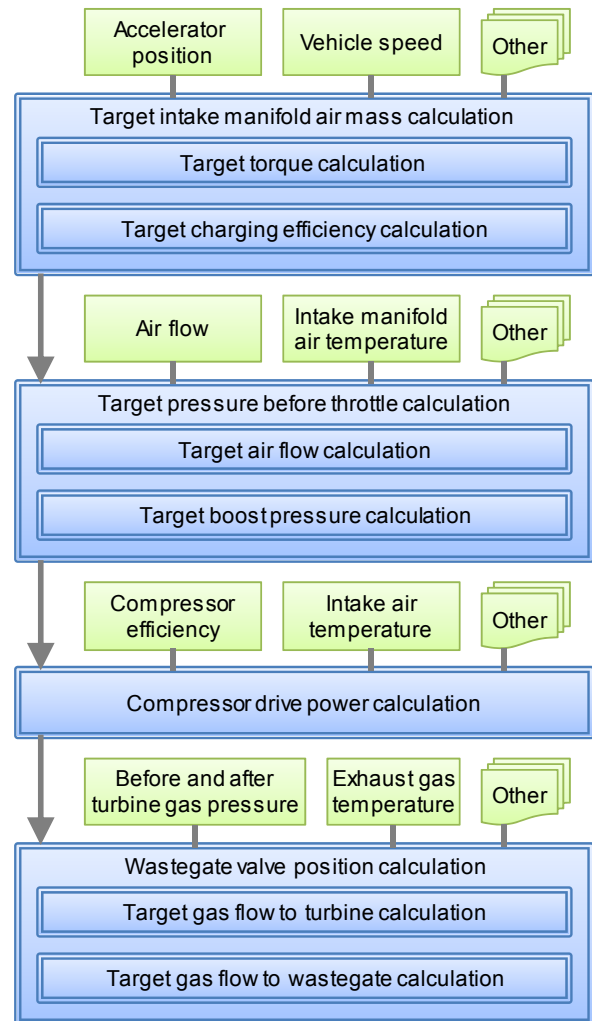


Fig. 1 Target Charging Pressure and Wastegate Valve Position Flow

$$\frac{L_{cd}}{\eta_c} = L_{td} \times \eta_t \quad \text{③}$$

η_c : コンプレッサー効率
 η_t : タービン効率

目標とするコンプレッサー下流圧力が与えられれば、これら式①,②,③からタービンの仕事量に必要となる目標のタービン排気スガ流量が決定する。この算出した排気スガ流量に比べ実際の排気スガ流量に過剰分があれば、ウェイトゲートにバイパスさせる流量としてウェイトゲート開度を算出する。予実差については、圧力センサーを用いて目標過給圧に調整するようフィードバック制御する。

本制御構造により、ドライバーが要求する駆動力に応じた目標コンプレッサー下流圧力を自動的に演算し、その目標達成に向けウェイトゲートを制御することで筒内の空気量を調整するため、標高や外気温度に左右されない過給

圧のコントロールを実現し、後述のS-VTや外部EGRとの協調を可能にした。

更に、過給を必要としないクローリング運転領域では、ウェイストゲートを開弁側に制御することで排気圧力を低減し、ポンピング損失の増加を抑え燃費性能を高めた。一方、オートマチックトランスミッションの変速時やドライバーの減速要求時には、ウェイストゲートを閉弁側に制御することでコンプレッサー下流圧力を必要以上に低下させないようにし、直後の加速応答性を向上させた。

(2) 過給圧とS-VT・外部EGRとの協調制御

ドライバーの加速要求の大きさと運転条件によっては、目標とするコンプレッサー下流圧力が高くなるため、目標のタービン排気ガス流量に対して実際の排気ガス流量が不足する場合がある。前項(1)の手順で求めた排気ガス流量の不足量を補うため、S-VTとEGRバルブの作動を定常運転時とは異なる制御を実施している。

a. S-VTとの協調制御

排気ガス流量の不足量情報から、バルブタイミングの変化によるシリンダーへの吸入空気量の増加量を算出し、追加が必要な吸入空気量を補うようにS-VTタイミングを補正する (Fig. 2)。

また、吸入空気量の増加により有効圧縮比が高くなるため、要求の点火時期が遅角し排気ガス温度が上昇する。この排気ガスのエネルギー増加を利用してタービン仕事を高める。ただし、点火時期の遅角による熱効率低下からトルク低下の弊害を発生しないようにS-VTタイミングの変化量に制限を設定している。

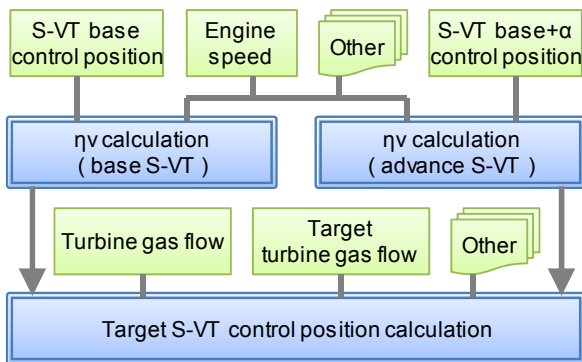


Fig. 2 Target S-VT in Acceleration Flow

b. 外部EGRとの協調制御

外部EGRを導入している運転領域では、通常、排気ポートからの排気ガスをタービンへの流路とEGRへの流路に分配する。目標とするタービン排気ガス流量が不足する場合は、EGRへ流れる排気ガス流量の内、タービン排気ガス流量の不足分を抑制するようEGRバルブ開度を算出し、EGR流量を補正する (Fig. 3)。

以上の過給圧とS-VT・外部EGRの協調制御により、ド

ライバーの加速要求に応じた目標過給圧に対する実過給圧の追従を短期に実現した (Fig. 4), (Fig. 5)。

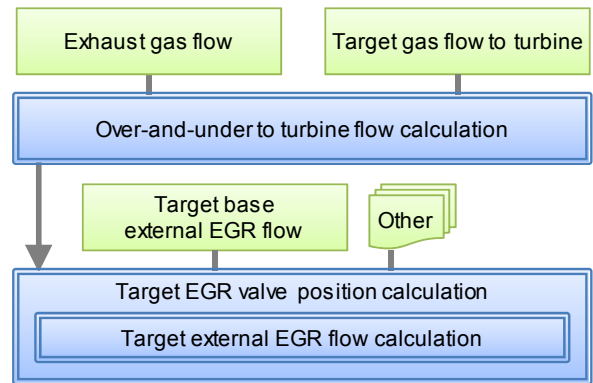


Fig. 3 Target EGR Valve Position in Acceleration Flow

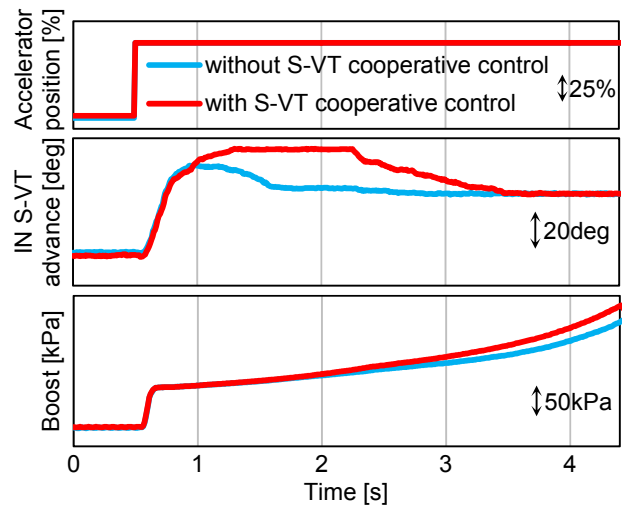


Fig. 4 Effect of S-VT Cooperative Control

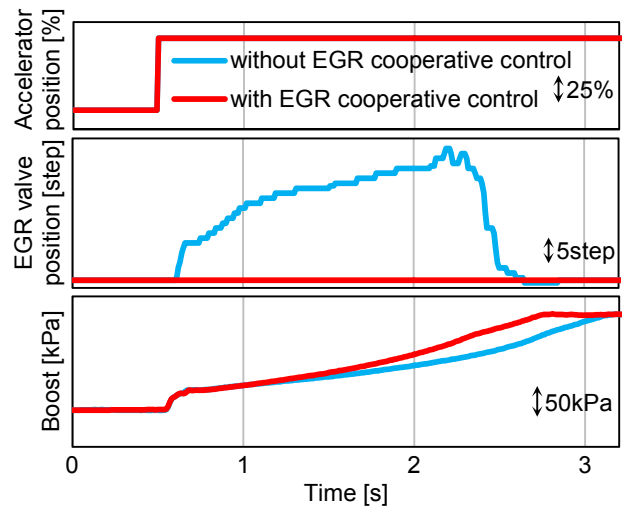


Fig. 5 Effect of External EGR Cooperative Control

(3) エアバイパスバルブ制御

エアバイパスバルブの最大の機能は、コンプレッサーのサージングによるメカニカルノイズとコンプレッサーの損傷を防ぐことである。サージングは経路の流れが不安定になった場合に発生する自励振動が原因であり、その発生の主要因子はコンプレッサー前後の圧力比及びコンプレッサーを通過する空気流量である。

よって、SKYACTIV-G 2.5Tでは、従来の吸気管内の圧力ではなく、これらの発生因子によりエアバイパスバルブを作動させるよう制御を構築することで、従来機種よりコンプレッサー下流の圧力を高く維持することを可能とし、アクセルワーク時のトルク応答性を向上した。

(4) 新気吹き抜け推定制御

SKYACTIV-G 2.5Tは、4-3-1排気ポート構造と可変バルブ機構を用いたDynamic Pressure Turbo システムにより、低エンジン回転速度の全負荷トルクを大幅に向上させている（詳細は本稿掲載の**新型ガソリンターボエンジン“SKYACTIV-G 2.5T”の開発**を参照）。これは、バルブオーバーラップ中に吸入空気を排気管に吹き抜けさせることによる掃気効果を積極的に利用したことにより得られる。

筒内の空燃比をコントロールするためには、この排気管に吹き抜ける吸入空気量（以下新気吹き抜け量）を把握する必要がある。そのため、新気吹き抜け量を決定するバルブオーバーラップ量（バルブ通路面積）と吸排気圧力のバランス、オーバーラップ時間、大気圧の因子を一部、代用特性も用いて高精度に推定する制御を構築した。

3. モデルベース開発

SKYACTIV-G 2.5Tで適応した、過給圧制御と新気吹き抜け推定制御のモデルベース開発について紹介する。

(1) 過給圧制御開発への適応

マツダの制御系の開発では、主に制御モデルの作動検証用としてエンジンやセンサー、アクチュエーターなどをモデル化したプラントモデルを用いていた。SKYACTIV-G 2.5T制御技術の開発では、ある入力を与えた際の実出力（例えば、過給圧やウェイストゲート、タービン回転など）が実機と等価となるようプラントモデルの同定を行い、机上のみで過給圧制御モデルの開発を行った。

また、網羅的に性能検証を行うためにはターボシステムの影響因子（具体的には、タービン効率、ウェイストゲート流量特性など）の特性を変化させる必要がある。それに加えて、さまざまな運転モードで評価しなければならず、評価期間が膨大になる。SKYACTIV-G 2.5T制御技術の開発では、上述したプラントモデル内のパラメーターを変更することで影響因子の特性変化を模擬して、多くの性能検証を机上で実施することで実車での検証期間を大幅に短縮した。

(2) 新気吹き抜け推定制御への適応

新気吹き抜け量は、非分散赤外線吸収法（NDIR : Non-dispersive infrared absorption method）を用いた実機のガス計測とプラントモデルでの計算を併用した。

実機での計測は信頼性の高い結果を得られるが、計測時間が長くなる点がネックとなる。そこで、エンジンシステム全体のプラントモデルではなく、吸気ポートから排気ポートまでを抜粋した専用のモデルを作成し、そこに各条件で実測した吸排気ポートの圧力と温度を入力し算出した。この専用モデル化により、シリンダーへ送り込まれた空気量に対する吹き抜けた空気量で算出される吹き抜け率を、NDIRと同特性かつ誤差1%程度の高い精度で再現することができ、実験評価時間の大幅短縮に貢献した（Fig.6）。

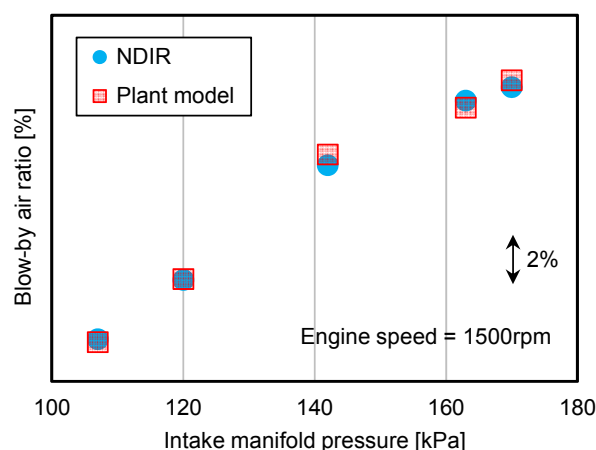


Fig.6 Comparison between NDIR and Plant Model

更に、プラントモデルを用いることにより、吸気弁・排気弁それぞれを通過する空気流量などを個別に算出することで吹き抜け現象を見える化でき、制御に必要な要件及び制御ロジックの構築に有効活用した (Fig. 7)。

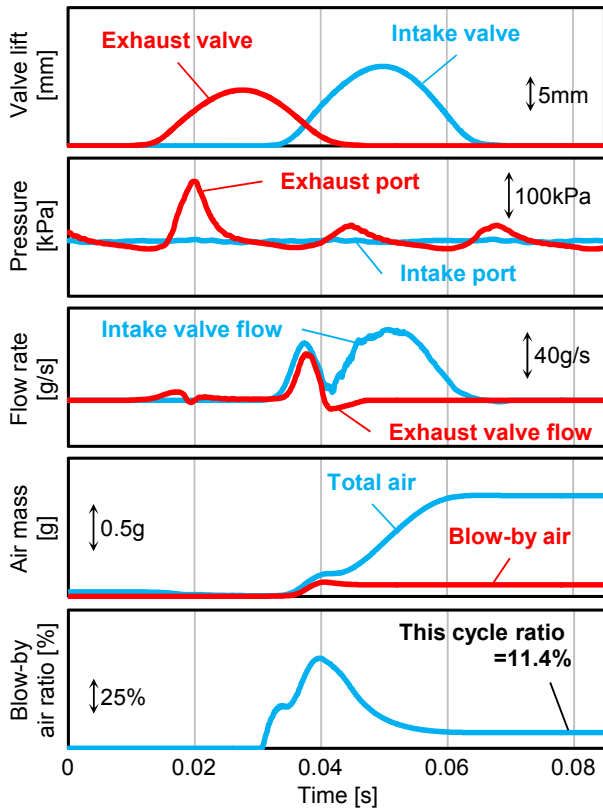
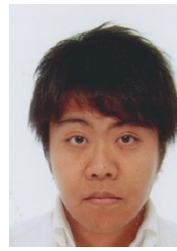


Fig.7 Calculation Result of Plant Model

■ 著 者 ■



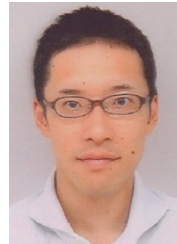
西尾 貴史



東尾 理克



砂流 雄剛



足利 謙介



坊田 亮郎

4. おわりに

量産ガソリンエンジンとして、世界で初めて14.0の高圧縮比を実現したSKYACTIV-Gの開発で培ったエンジン制御及びその開発手法を、SKYACTIV-G 2.5Tの開発で進化させ、新型CX-9のクラストップレベルの低燃費かつ高次元の走りの実現に貢献した。

引き続き、理想のパワートレインに向け邁進し、走る歓びと優れた環境性能を携えたマツダらしい商品をお客様に提供し続けていきたい。

参考文献

- (1) 江角ほか：SKYACTIV-G制御技術の紹介，マツダ技報，No.29，pp.36-40 (2011)
- (2) 小林：ターボ機械-入門編-，日本工業出版，pp.186-189 (2005)

特集：新型CX-9

5

新型CX-9の低圧燃料供給制御システムの制御技術 Low Pressure Fuel Supply System Control Technology for New CX-9

鈴木 健一郎*1 櫻谷 幸弘*2 田中 憲一郎*3
Kenichiro Suzuki Yukihiro Sakuradani Kenichiro Tanaka
清水 功*4 西森 洋生*5 本郷 均*6
Isao Shimizu Yosei Nishimori Hitoshi Hongo

要 約

新型CX-9に搭載したERFS (Electronic Return-less Fuel System) は、2.5L直噴ターボエンジンの高圧燃料噴射システムに最適な燃料圧力 (燃圧) と燃料量を供給するための低圧燃料供給制御システムであり、最小限の投入エネルギーで効率的に燃料供給できる優れたシステムである。熱間始動時、燃料配管内に発生している燃料ベーパーを瞬時に圧縮し、液化させるために必要な高い燃圧、及びW.O.T. (Wide Open Throttle) 時に求められる大流量の燃料供給を両立させるために不可欠な低圧燃料供給制御システムの消費エネルギーの最小化の課題をシステムのハードウェア構成と制御ソフトウェアを新規に構築することで解決した。新型CX-9は、SKYACTIV-Gに適用してきた低圧燃料供給制御システムを進化させ、マツダのフラッグシップモデルに相応しい制御システムを搭載した。本稿では、新規開発した制御システムの技術について紹介する。

Summary

ERFS (Electronic Return-less Fuel System) installed on the new CX-9 is a low pressure fuel supply control system which supplies the optimal fuel pressure and fuel quantity to the high pressure fuel injection system in the 2.5L turbo engine. The excellent system can efficiently carry out fuel supply with the minimum input energy. Minimization of energy consumption of the low pressure fuel supply control system, which is essential for satisfying both high pressure required for instantaneously compressing and liquefying vapor generated in a fuel pipe at hot start and high flow fuel supply required at W.O.T. (Wide Open Throttle), was achieved by developing a new system hardware configuration and a new control software. The new CX-9 is equipped with a control system that evolved from the low pressure fuel supply control system applied to SKYACTIV-G, which is appropriate for the Mazda's flagship model. This article introduces new technologies for the control system developed for the new CX-9.

1. はじめに

新型CX-9は、「走る歓び」を実現する強いトルクと「優れた環境性能」を実現する低燃費を高い次元で両立した。これには、新規に開発した燃料供給制御システムも貢献している。燃料供給制御システムは、低圧燃料供給制御システムと高圧燃料供給制御システムから構成される。前者の低圧燃料供給制御システムは、エンジンの高圧燃料噴射システムの燃料噴射圧と噴射量を実現するために低圧燃料配管内を最適な燃料圧力 (燃圧) に制御し、高圧燃料供

給制御システムに燃料を供給する。新型CX-9は、燃圧を最適に制御する技術を新規開発したことにより、省燃費性に加えて、車室内の静粛性や耐燃料ベーパーロック性なども大幅に改善した。本稿では、新規開発した低圧燃料供給制御システムを構成するハードウェア及びソフトウェアの機能について紹介する。

2. 開発の狙い

2.1 低圧燃料供給制御システムによる燃費改善

SKYACTIV-Gは、省燃費化を目的として、低圧燃料供

*1~3 PT制御システム開発部
PT Control System Development Dept.

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

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

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

給制御システムの電源供給ラインにFPC (Fuel Pump Controller) を搭載し、燃料タンクに搭載されたFDM (Fuel Delivery Module) の構成部品である低圧燃料ポンプへの印加電圧をPWM (Pulse Width Modulation) コントロールして、エンジンの運転状態に応じた高圧燃料噴射システムが要求する燃料量を一定の燃圧で供給する制御システムを搭載した。この制御システムは、①バッテリーの電圧を直接、低圧燃料ポンプに印加するシステムや、②バッテリーの電圧をレジスターを介して、低圧燃料ポンプに印加する電源供給ラインとレジスターを介さない電源供給ラインの2系統を切り替えて制御するシステムに比べて消費電力を大幅に抑制し、CX-5、アテンザ、アクセラ、デミオなどの車両燃費の改善に貢献してきた。

2.2 低圧燃料供給制御システムの開発課題とその対応

新型CX-9は、2.5L直噴ターボエンジンを搭載し、CX-5等に搭載している2.5L直噴NA (Natural Aspiration) エンジンと比べて高出力化しているため、エンジンルーム内部の雰囲気温度が高い。そのため、エンジンルームにレイアウトされた低圧燃料配管の内部の燃料温度 (燃温) が高くなるため、低圧燃料配管内の燃圧を高めて燃料ベーパーの発生を抑制しなければならない。また、従来のNAエンジンでは、あらかじめ、低圧燃料配管内の燃温が最大となる条件で、低圧燃料配管内で燃料ベーパーを発生させないような燃圧を制御燃圧とし、FDM内の燃圧制御機構によって一定の燃圧に制御している。そのため、通常の運転では低圧燃料配管内の燃温に対して、過剰な高い燃圧で制御しており、低圧燃料ポンプは必要以上の仕事をしている。今回、従来のNAエンジンより高い燃圧が必要になったため、このいわば不必要な仕事は増大する。

一方、エンジンの高出力化に伴い、高圧燃料噴射システムの燃料噴射量要求が増加するため、NAエンジンよりも、大流量の燃料を供給する必要がある。

以上より、低圧燃料ポンプの燃料吐出能力を従来比大きく向上させることが必要となり、燃料ポンプの仕事量が増大することにより、NAエンジンよりも燃費・車室内静粛性を悪化させることになる。

今回、燃圧制御機構の構造を変更して、低圧燃料配管内の燃温に応じて、燃圧を最適制御できるようにすることで、低圧燃料供給制御システムにおける仕事量を大幅抑制し、課題を克服した。

3. 実現手段

新型CX-9は、MBD (Model Based Development) を導入して、低圧燃料供給制御システムを2.5L直噴ターボエンジン専用開発した。ここでは、その内容を紹介する。

3.1 ハードウェア

低圧燃料供給制御システムのハードウェア構成をFig. 1に示す。まず始めに、構成する主要部品の機能を説明する。①高圧燃料ポンプは、直噴インジェクターが高圧燃料噴射するために低圧燃料を高圧化する。また、低圧燃料流路の一部を構成する。②FDMは、燃料タンク内の燃料を濾過するとともに、所定燃圧に昇圧し、低圧燃料配管経由で高圧燃料ポンプに供給する。③FPCは、低圧燃料ポンプに印加する電圧を制御する。④センサーとして、低圧燃温センサーは、低圧燃料配管内の燃温を検出する。低圧燃圧センサーは、低圧燃料配管内の燃圧を検出する。⑤PCM (Powertrain Control Module) は、エンジンや車両の状態とセンサーの検出値から、低圧燃料供給制御システムへの要求燃料量と燃圧を設定し、それを実現するために必要なFDMへの印加電圧を演算する。更に、その演算結果をFPCに指示する。

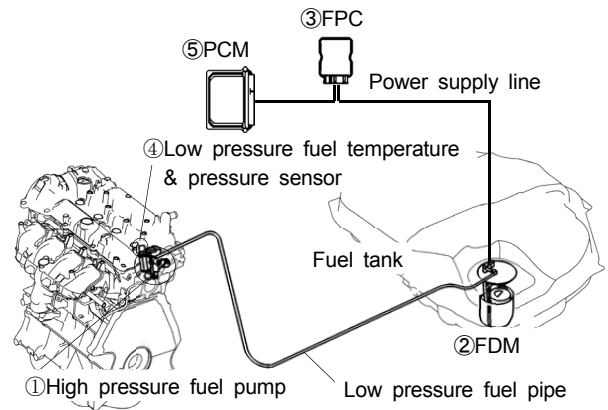


Fig. 1 Hardware Configuration of Low Pressure Fuel Supply Control System

(1) 高圧燃料ポンプ

高圧燃料ポンプ (Fig. 2) は、エンジンに直付けされており、エンジンとの固体伝導により、熱を受けやすく、低圧燃料流路の中で最も高温になる部位である。従い、高圧燃料ポンプ内部の低圧燃料流路で燃料ベーパーが発生しないようにFDMで燃圧を供給する。つまり、高圧燃料ポンプ内部の低圧燃料流路の燃温がFDMで供給すべき燃圧を決めている。新型CX-9の開発では、新たに高圧燃料ポン

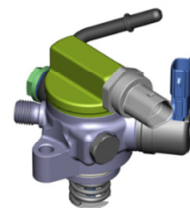


Fig. 2 High Pressure Fuel Pump

プ内の燃温推定モデルを構築した。高圧燃料ポンプ内の燃温は、高圧燃料ポンプ内に流入する燃料の温度と流入量、流出した燃料の温度と流出量および、高圧燃料ポンプ壁面からの受熱量で決まる。それぞれの入出力の関係は、Fig. 3に示す簡易熱移動モデルで表現できる。Fig. 3のモデルから、高圧燃料ポンプ内の燃温 T_P を導いた。

$$T_P = \frac{Q_{P2}}{m_p} = \frac{Q_{P1} + Q_{in} - Q_{out} + Q_w}{m_p} \quad (1)$$

燃料タンクからの低温燃料が高圧燃料ポンプ内に多く流入すると、高圧燃料ポンプ内の燃温の低下速度が速くなる関係に着目して低圧燃料ポンプに要求される燃料吐出能力を検証した。

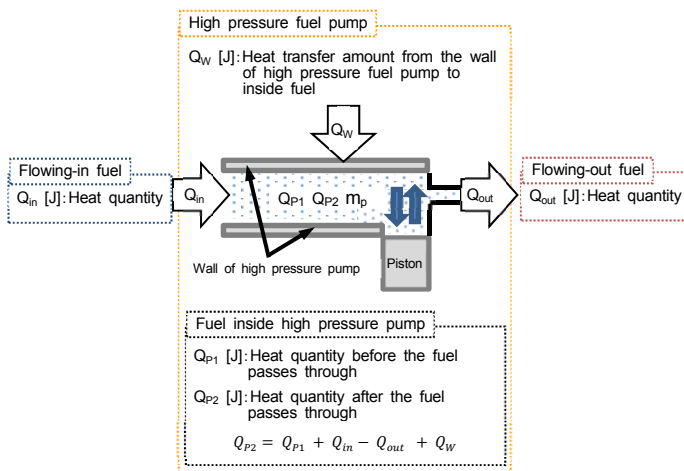


Fig. 3 The Model for Estimating the Temperature of Fuel in a High Pressure Fuel Pump

(2) FDM

新型CX-9は、燃圧と燃料量の可変制御に対応したFDMを専用設計した (Fig. 4)。ここでは、FDMを構成する低圧燃料ポンプと燃圧制御機構について紹介する。

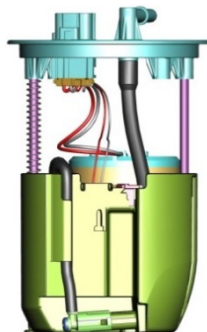


Fig. 4 FDM

a. 低圧燃料ポンプ

高圧燃料噴射システムの燃料噴射量要求と低圧燃圧要求から低圧燃料ポンプに必要な仕事量が決まる。この燃圧の

制約条件は、低圧燃料配管内で燃料ベーパーを発生させないことである。燃料噴射量ごとに、式(1)から高圧燃料ポンプ内の燃温を導出し、燃圧の制約条件を満足させる低圧燃料ポンプの要件を決定した。

NAエンジン用の低圧燃料供給制御システムは、制御燃圧を一定にしかできないので、エンジンの熱間始動時に要求される最大の燃圧を制御燃圧とし、その制御燃圧において、W.O.T. (Wide Open Throttle) 時の最大燃料噴射量を供給できる低圧燃料ポンプを設定する必要があり、低圧燃料ポンプの燃料吐出流量サイズが大型化する。

新型CX-9は、NAエンジン用の低圧燃料供給制御システムに対して、制御燃圧を一定とする制約を排除し、制御燃圧をリアルタイムで可変させたことにより、W.O.T.時の燃圧を低減し、低圧燃料ポンプの要求最大仕事量を抑制することができた。これにより、NAエンジンを搭載したCX-5やアテンザと同じ小型の低圧燃料ポンプの共用を可能とし、開発効率化にも大きく寄与した。

b. 燃圧制御機構

新型CX-9は、従来のNAエンジン用に採用してきた機械的な燃圧制御機構であるダイヤフラム式プレッシャーレギュレーターを廃止し、代わりにFDMの燃料流路に絞りを入れ、絞りを通る燃料量を制御することで燃圧の可変制御を可能にした。

構造モデルを用いたCFD (Computational Fluid Dynamics) や燃圧制御機構を含むハードウェアシステムのプラントモデルと制御モデルを用いた燃圧制御性検証、タグチメソッドを用いたパラメータ設計により絞り形状を含む燃料流路の設計諸元検証を実施し、仕様の最適化を実施した。Fig. 5に燃料流路の絞り部のCFDの結果を示す。異常な乱流の発生はなく、ばらつきの少ない安定した調圧を可能とした。

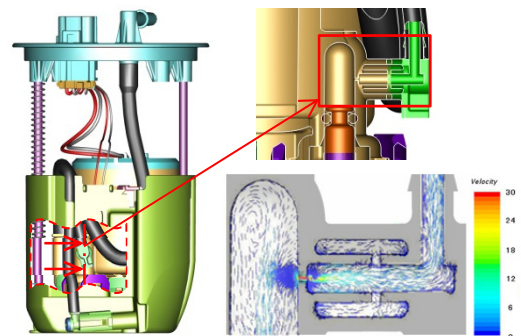


Fig. 5 Computational Fluid Dynamics of Orifice

(3) 低圧燃温センサー

低圧燃温センサーは、低圧燃料流路で最も温度が高くなり、燃料ベーパーが発生する高圧燃料ポンプに取り付けた。新型CX-9は、車載レイアウトや高圧燃料ポンプの構造により、高圧燃料ポンプ内でのセンサー測温部の配置場所

に制約があったため、高圧燃料ポンプの低圧燃料流路を分岐させ、センサー測温部を配置可能な場所まで燃料流路を延長させた。そのため、センサー測温部が分岐した燃料流路の袋小路部に配置される。ところが、袋小路部は燃料が滞留しやすく、FDMから供給される燃料タンクの比較的低温の燃料の影響を受けた主流の燃温より高い燃温を検出するため、最適な燃圧制御ができない。そこで、流れ解析モデルを用いてセンサー測温部に燃料流れを引き込むように構造を最適化した。Fig. 6に解析結果を示す。青色部は燃料よどみ部、赤色部は燃料流れが活発であることを示しており、改善後は測温部周辺において燃料よどみは発生していないことが分かる。その結果、主流と同等の燃温を検出できるようになり、低圧燃料供給制御システムの消費エネルギーの低減に貢献した。

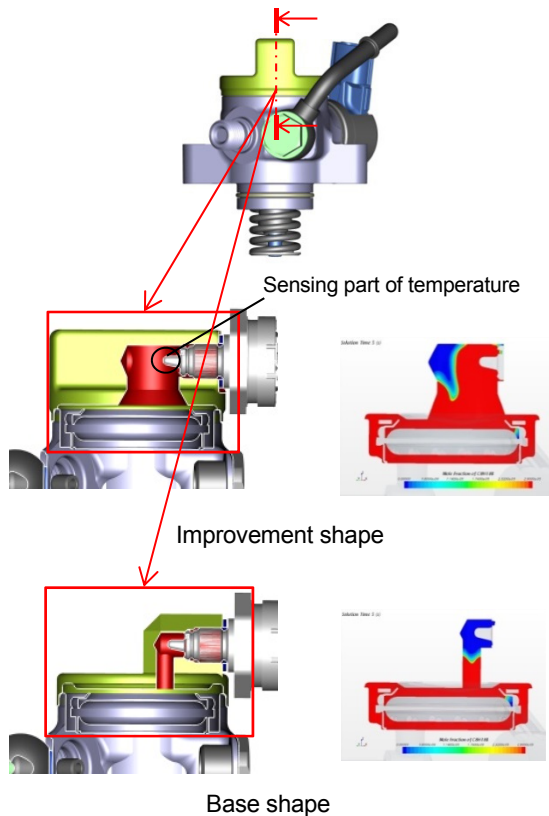


Fig. 6 Computational Fluid Dynamics of High Pressure Fuel Pump

3.2 ソフトウェア

低圧燃料供給制御システムの制御ソフトウェアのフローチャートを Fig. 7に示す。ここでは、制御の肝となる燃圧フィードバック制御と燃料ベーパー検出制御を取り上げて説明する。

(1) 燃圧のフィードバック制御

燃料の飽和蒸気圧特性より、燃温に応じた低圧燃料配管内で燃料ベーパーの発生を抑制できる最低限の燃圧を参照して、低圧燃料供給制御システムの制御コントローラー

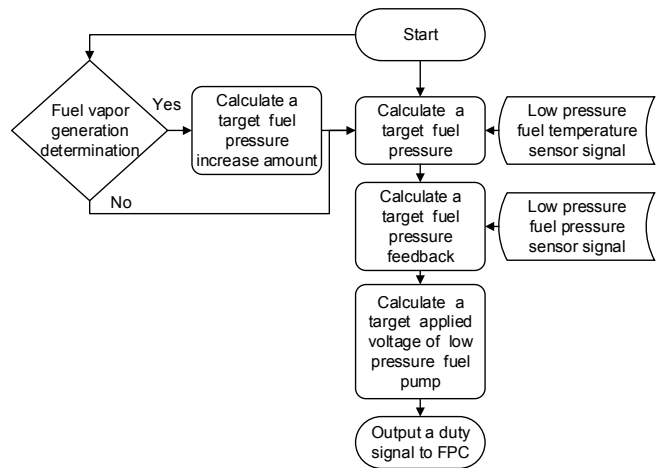


Fig. 7 Flowchart of Software

の目標値を設定した。さらに、この目標値と低圧燃圧センサーの出力値が一致するように燃圧をフィードバック制御することで制御精度を高めた。

制御コントローラーは、プラントモデルや実車にて制御性を検証し、フィードバック制御とフィードフォワード制御を組み合わせた。目標燃圧より低い燃圧では燃料ベーパーが発生するため、目標燃圧より実際の燃圧を低下させてはならない。外乱の影響に強く、確実に所定値以上の燃圧を応答よく出力させるフィードフォワード制御をベースとして、アンダーシュートさせないようにゲイン設定したフィードバック制御を組み合わせることにより、応答性と制御性を両立させた。

(2) 燃料ベーパーの検出と制御

低圧燃料配管内で燃料ベーパーが発生すると高圧燃料噴射システムが所定圧力の燃料を噴射できず、ドライバビリティの不調やエンジントールを引き起こしてしまうため、エンジン作動中はどのような状況下であれ、燃料ベーパーを発生させてはならない。マツダは、全世界の燃料性状を継続的に調査しており、世界中のどのような燃料に対しても、燃料ベーパーが発生しないような燃圧で制御している。しかし、市場状況は刻一刻と変化しており、マツダが想定していないような性状の燃料が流通する可能性もある。

新型CX-9は、そのような状況でも、各種センサー信号や制御状態から、いち早く燃料ベーパーの発生を検出して、システムが許容する範囲で燃料ベーパーの発生を抑制するよう燃圧制御することで、低圧燃料供給制御システムのロバスト性を向上させた。

4. 低圧燃料供給制御システムの効果

最後に新型CX-9で達成した代表的な性能を紹介する。

4.1 制御システムの消費電流

低圧燃料供給制御システムの消費電流を約40%低減することができ、オルタネータの発電負荷低減による省燃費化に貢献した。

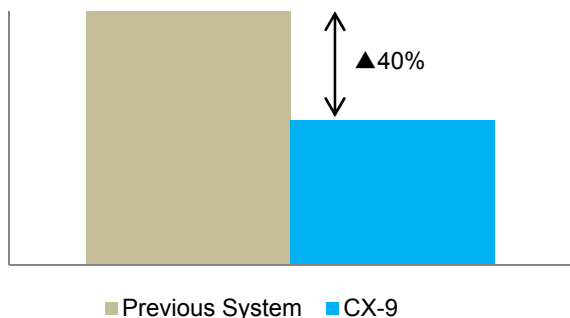


Fig. 8 Current Consumption of Low Pressure Fuel Supply Control System

4.2 低圧燃料ポンプの信頼性

低圧燃料ポンプの仕事量を最適化したことにより、モーター部のブラシ摩耗量を約半減することができ、モーターの信頼性向上に大きく貢献した。

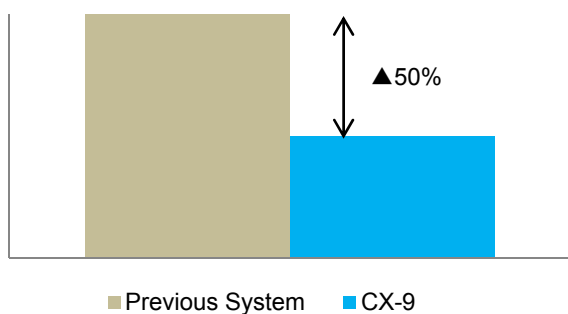


Fig. 9 Amount of Friction the Carbon Brush in Low Pressure Fuel Pump

4.3 低圧燃料ポンプの作動音

低圧燃料ポンプは2列目のシート下の燃料タンク内に配置されており、燃料ポンプ内部のモーターの回転による振動が燃料タンク及びフロアパネルへ伝搬し、乗員に可聴ノイズとして認知されることがある。燃圧と燃料量を必要最小限に制御するためにモーターの回転数を抑制した結果、可聴ノイズの主因であるモーターの回転1次・2次振動を低減し、車室内の静粛性向上に貢献することができた。

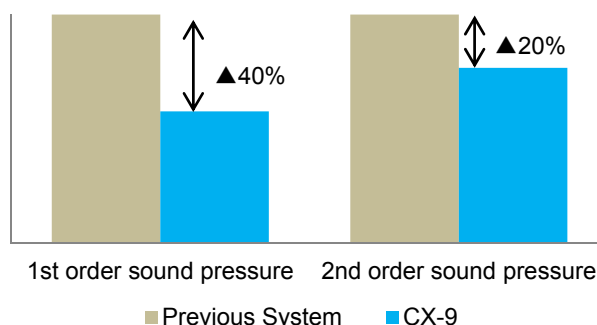


Fig. 10 Sound Pressure Inside the Vehicle Cabin

5. おわりに

2.5L直噴ターボエンジンを搭載した新型CX-9は、可変燃圧に対応した低圧燃料供給制御システムを搭載した。低圧燃圧を可変制御することにより、要求に応じた最適な仕事ができるようになり、省燃費化、信頼性向上と車室内静粛性向上を実現した。今後更にMBDで重要となるプラントモデルの精度向上を進め、ハードウェアとソフトウェアの機能を進化させることで、システムのエネルギー効率を向上させ、「走る喜び」と「優れた環境性能」を高いレベルで両立する商品の実現に貢献していく所存である。

■ 著 者 ■



鈴木 健一郎



櫻谷 幸弘



田中 憲一郎



清水 功



西森 洋生



本郷 均

特集：新型CX-9

6

新型CX-9の静粛性開発について Quietness Development for New CX-9

清水 勝矢*1 楠木 大地*2 熊本 和矢*3
Katsuya Shimizu Daichi Kusuki Kazuya Kumamoto
粟根 正浩*4 中山 博資*5 山本 晃平*6
Masahiro Awane Hiroshi Nakayama Kohei Yamamoto

要 約

新型CX-9のNVH性能では“安心／快適”をお客様への提供価値として、マツダのハイエンドモデルにふさわしい性能を実現した。特に、近年お客様の期待が高まっているクルージング走行時の静粛性に対して、開発初期段階からお客様視点を重視した新たな取り組みを行った。静粛性指標を新たに作成し、新型CX-9のメイン市場である米国現地のメンバーとともに、人の感じ方を重視した“突き抜けた静粛性”を定義し、新型CX-9の静粛性目標とした。静粛性に関連するロードノイズ・風騒音・遮音性能のメカニズムを基に、質量効率を向上させながら、新たな構造を関連部門と共創することにより新型CX-9で“突き抜けた静粛性”を実現した。

Summary

As Mazda's flagship model, the new CX-9 achieved high NVH performance that is appropriate for its class with “safety and comfort” as our customer values. Especially, we focused on the quietness at cruising speed to meet the rising customer expectations from the early development stage using our new approach for customer satisfaction. We defined the “Outstanding Quietness” together with our local members in the U.S., which is the main market for our new CX-9, by focusing on the human senses (how customers perceive quietness) and creating a new set of indices for quietness. Then those were set as the new CX-9 targets for quietness. The new CX-9 achieved “Outstanding quietness” by a brand new noise structures with improved weight efficiency based on road noise, wind noise, and isolation mechanisms.

1. はじめに

新型CX-9では、近年お客様の期待が高まっている静粛性に対し、開発初期段階から新たな取り組みを行った。

お客様視点をより考慮し、「会話のしやすさ」の指標を取り入れ、人の感じ方を重視した目標設定を行った。また、開発初期段階に、その目標を具現化した試作車の評価をメイン市場である米国市場で行い、競合車を凌駕する静粛性目標であることを確信した。開発段階では、この高い目標の達成を目指し、関連部門一体となり開発を行った。

本稿では、静粛性に関連するロードノイズ・風騒音・遮音性能を向上し、新型CX-9で“突き抜けた静粛性”をどのように実現したか、その手段と達成性能を紹介する。

2. 開発の狙い

新型CX-9の静粛性開発では、人の感じ方を重視した静粛性を開発の狙いとした。

“安心／快適”をお客様への提供価値とし、高速クルージング走行で“快適”を感じられる「会話のしやすさ」と、路面変化に対しても“安心”を感じられる「荒れた路面での音圧」を用い、静粛性指標を作成した。

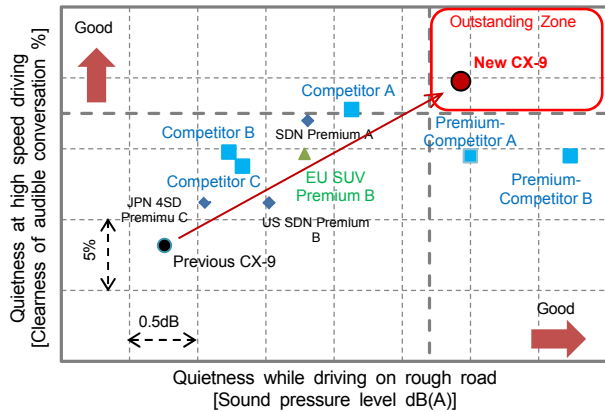
会話のしやすさとは、走行中にお客様が風騒音やタイヤ音のために声を上げることなく、どれだけ快適に会話ができるかを示す。荒れた路面での音圧は、路面環境が変化してもお客様がロードノイズの変化に煩わしさを感じることなく、どれだけ安心して運転できるかを示す。

この指標において、米国現地のメンバーとともに、人の感じ方を重視した目標設定を行った。具体的には、「会話

*1～6 NVH性能開発部
NVH Performance Development Dept.

のしやすさ」の軸に会話が十分に楽しめ快適を感じられるレベル、「荒れた路面での音圧」の軸へ安心を感じられるレベルを定義し、ともにそのレベル以上にあるZoneを、「突き抜けた静粛性」として定義した。

新型CX-9では、そのZone内に目標を設定し、「突き抜けた静粛性」を実現した (Fig. 1)。



3章では、この静粛性指標上の「会話のしやすさ」と「荒れた路面での音圧」をどのように性能向上したかを達成性能と達成手段で示す。

3. 達成性能と達成手段

3.1 会話のしやすさ

(1) 達成性能

新型CX-9では、高速クルージング走行時のあらゆるシーンにおいてお客様が「快適」を感じられる性能を目指した。Fig. 2は、静粛性指標上の「会話のしやすさ」を示している。人の感じ方から、会話を楽しめる快適なレベルを定義し、その実現を目指した新型CX-9は、プレミアム競合車も含めてトップクラスを実現した。

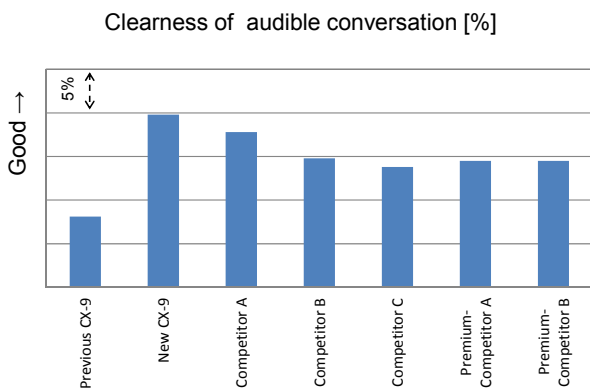


Fig. 2 Clearness of Audible Conversation Comparison

また、あらゆるシーンで「快適」を感じられるために、お客様の使用シーンを考慮し、車速変化や、横風変化にも

安定した静粛性を実現した。会話のしやすさの車速に対する変化をFig. 3に、横風の強さに対する変化をFig. 4に示す。

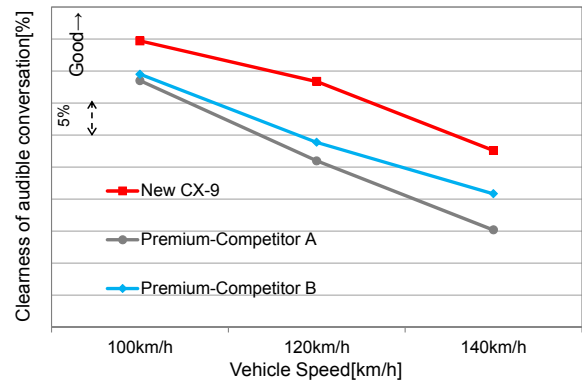


Fig. 3 Quietness Characteristics on Vehicle Speed

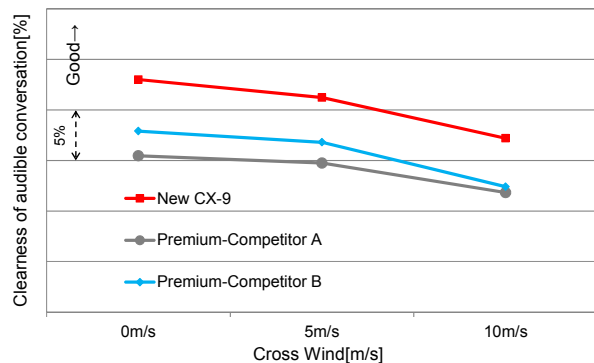


Fig. 4 Quietness Characteristics on Cross Wind

(2) 達成手段

会話をしやすくするためには、高速クルージング走行時に支配的となる風騒音とタイヤ音を車室内において低減する必要がある。音源が伝達特性の影響を受け車室内での音となる空気伝播の現象において、音源低減と伝達特性改善 (遮音性能向上) を図ったので、その開発内容を紹介する。

a. 音源低減

音源低減の事例として風騒音の空力音源低減の達成手段を以下に示す。

風騒音の音源低減に対し、車両前側と後側で各エリアの寄与度分析を行った。

車両前側ではフロントドアサッシュのパーティング部とフロントドアガラスの寄与度が大きい結果となった。そのフロントドアへの性能向上を行った例を Fig. 5に示す。

Aピラーとフロントドアサッシュの隙間と段差によって気流の渦が発生し、これが騒音となっていることが大きな要因であった。CFD (Computational Fluid Dynamics) を用いて気流の渦を可視化し、騒音が発生する部位を明確にした。車両表面の隙や段差を抑制し、流れをスムーズに

Area contribution of wind noise.

(140km/h,3150Hz Previous CX-9 Front seat outboard ear.)

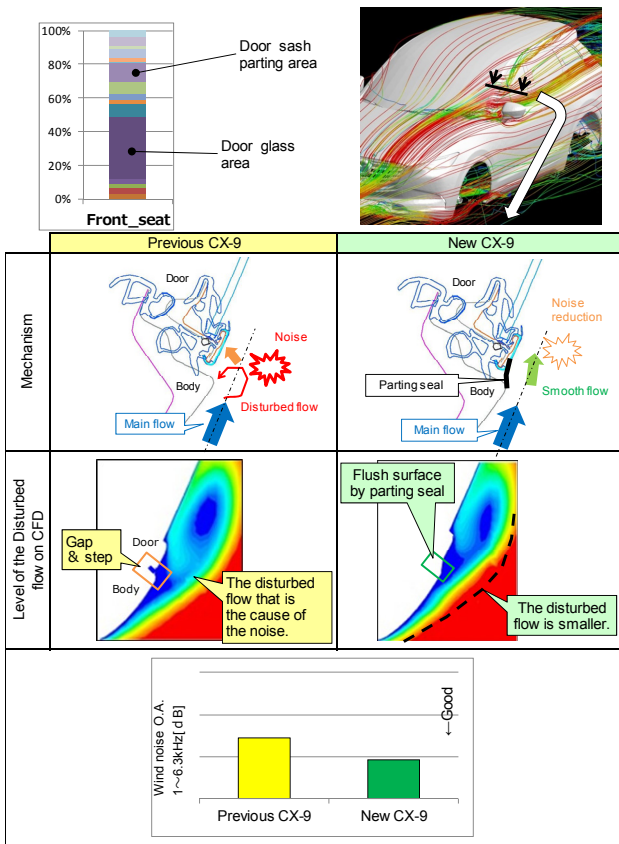


Fig. 5 Improvement of Front Door Seal

Area contribution of wind noise.

(140km/h,3150Hz Previous CX-9 2nd seat outboard ear.)

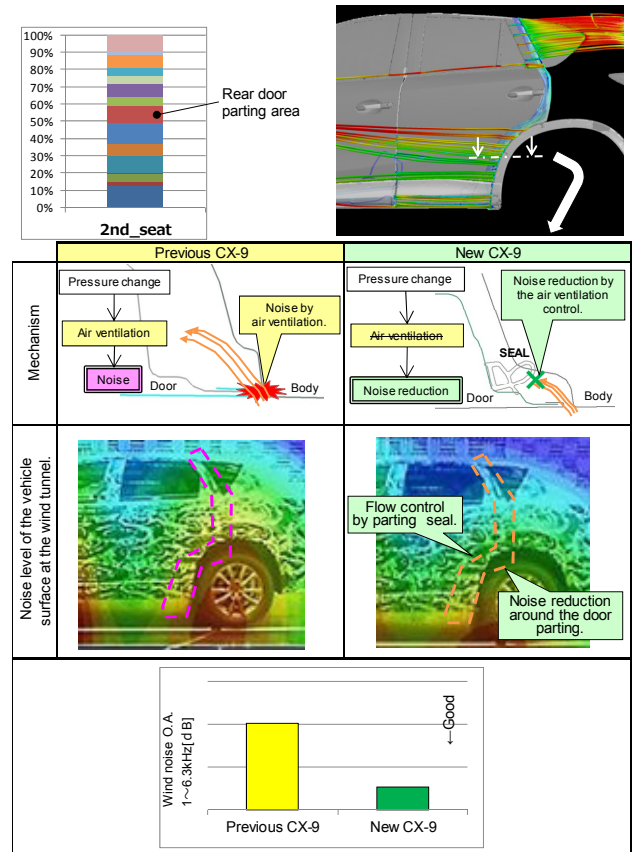


Fig. 6 Improvement of Rear Door Seal

することで渦による騒音を低減することができる。この結果から、新型CX-9では新たな構造としてフロントドアサッシュのパーティング部にシール部品を設定した。

この他に寄与が大きいフロントドアガラスについては3.1-(2)-b.で紹介する。

次に車両後側ではリアドア後方のパーティング部も寄与度が高い結果となった。そのリアドアへの性能向上を行った例をFig. 6に示す。リアドアとボディーの狭い隙間を空気が流れることによって発生する騒音が大きき要因であった。実車の発煙検証やCFDを用いてリアドアとボディーの狭い隙間を流れる空気の経路を解明した。狭い隙間を流れる空気を抑制することで騒音を低減することができる。

この結果から、新型CX-9では空気の出入り口であるリアドア後方のボディーとのパーティング部にシール部品を設定した。

b. 伝達特性改善

伝達特性の性能向上事例として遮音性能向上の達成手段を以下に示す。

風騒音に対しては、音源低減に加え、風騒音音源に対する遮音性能を旧モデル比大幅に向上した。

Aピラーやドアミラー周りに発生する大きな空力騒音に対して、新型CX-9ではフロントドアガラスに現行ガラス

よりも板厚を上げた遮音ガラスを採用し、車室内への音源伝達効率を抑制した。

タイヤ音に対してはタイヤ音源に対する遮音性能を旧モデル比大幅に向上した。新型CX-9の開発においては、このタイヤ音源に対して、まず車室内のインパネ部、ドア部等、音がどこから伝達されているかについて徹底的に解析を行った。

解析の結果から、ダッシュ下部を含むフロア周りから放射音を大幅に低減させる必要があることが分かり、音を通過させない特性である透過損失を飛躍的に高めることを目指した。一方で、透過損失は単純に質量則（質量に比例して透過損失が高くなる）で改善させると重量インパクトが大きくなることから、効率的に改善できる工夫が必要となる。そこで新型CX-9では、フロアマットの非通気層と鉄板の質量配分をコントロールすることで2重壁構造を強化した (Fig. 7)。

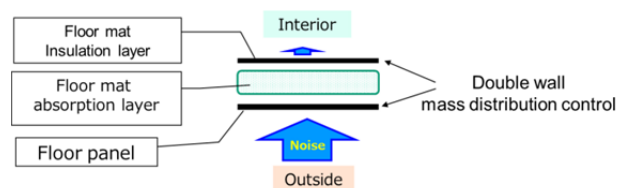


Fig. 7 Double Walled Structure

この結果、透過損失を大幅に強化し、かつ、重量と会話のしやすさ効率では、プレミアム車を含め競合車中トップレベルを実現した (Fig. 8)。

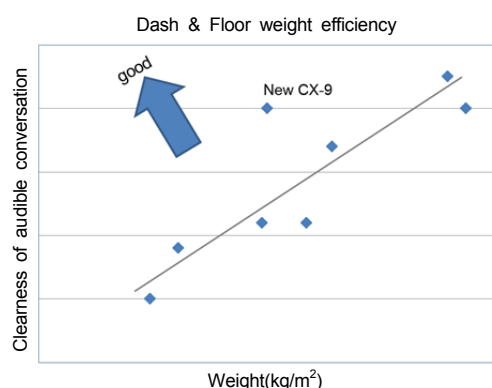


Fig. 8 Weight Efficiency of Insulator

車両後周りの伝達特性低減には、フロア後側の透過損失を向上したことに加えて、(A) トランクサイドエリアの透過損失強化と、(B) エキストラクターからの侵入音低減を行った (Fig. 9)。

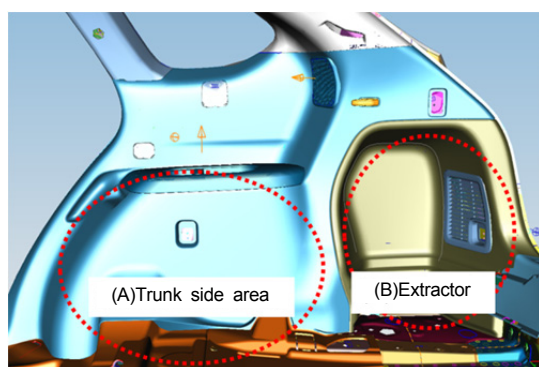


Fig. 9 Rear Area Improvement

まず、(A) については、旧型CX-9のトリム裏面に吸音材を設定し、ホイールハウスパネルから放射されるタイヤ音を吸収させる構造に対し、新型CX-9では吸音材の透過損失を高め (Fig. 10)、配置を工夫することで、このエリアの透過損失を大幅に強化させた。

次に (B) については、空気を通しかつ、エキストラクターからの侵入音をいかに効率良く吸音させるかがポイントとなる。そこで、CX-5以降の新世代商品群から導入している経路遮断と集中吸音構造に、今回更にエキストラクター本体にダクト状ユニットを追加したことで、集中吸音性能を向上した。また、このダクト状のユニットの開発においては、車室内の風流れを徹底的に分析し、エキストラクター本来の機能である空調性能及びドア閉まり性能のための通気抵抗を悪化させないことに注力している。

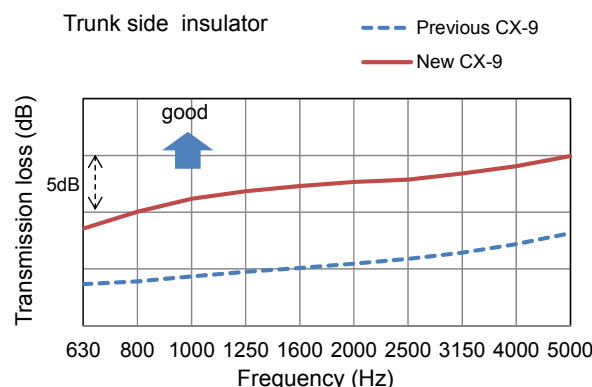


Fig. 10 Transmission Loss of Trunk Side Insulator

上記の例に加えて、新型CX-9の開発では車両全体で透過損失と吸音性能を強化することで遮音性能を大幅に向上し、かつ質量効率を高めることができた。

3.2 荒れた路面での音圧

(1) 達成性能

新型CX-9は、あらゆる路面でお客様が“安心感”を感じられるロードノイズ性能を目指した。

Fig. 11は、静粛性指標上の「荒れた路面での音圧」を示している。人の感じ方から、安心を感じられるレベルを定義し、その実現を目指した新型CX-9は、競合車トップレベル、プレミアム群とも肩を並べるレベルを実現した。

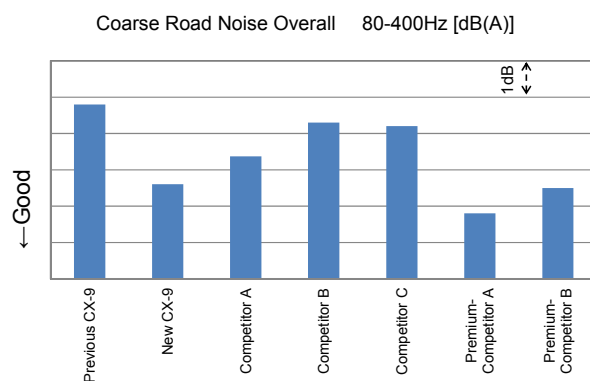


Fig. 11 Coarse Road Noise Comparison

(2) 達成手段

新型CX-9の開発においては、新世代商品群で採用しているSKYACTIV TECHNOLOGYの一括構想の構造を引き継ぎながら、ロードノイズを大幅に低減する必要があった。またSKYACTIV TECHNOLOGYの利点である軽量化との両立を図るため、車体領域では新たな解析手法を適用した。また、サスペンション領域では各 부품のメカニズムを詳細に分析することで、重量効率を最大限に高めた構造を織り込んだ。

a. 車体最適構造実現に向けた新開発手法の適用

車体音響感度を低減させるためには、各パネルの振動レベルを低減させる必要がある。

これまでの開発では、各部位につき代表点を1点設定し、その点での加速度応答 (A/F: Acceleration/Force) を開発指標としていたが、新型CX-9の開発においては、新指標としてパネル等価放射パワー (ERP: Equivalent Radiated Power) を採用した。Fig. 12に示すように、点指標による管理から面指標による管理へと置き換え、点指標ではとらえきれない局所的なモードまでを網羅可能とすることで、より詳細な現象把握を実現し、適切な改善要件の提案へとつなげた。

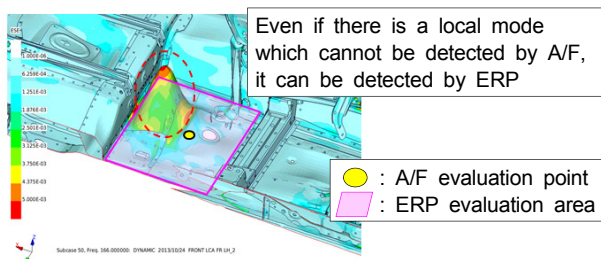


Fig. 12 Comparison between A/F and ERP

更に開発過程では、車体音響感度に影響の大きい部位・周波数帯域をあらかじめ網羅的に明らかにしたうえで、ERP目標を設定し、開発を進めた。その結果、性能レベルを大幅に引き上げつつも、重量増加を最小限とする構造を織り込むことができた。

例えば、センターフロアでは、性能を向上させる部位・周波数帯域を絞り込むことにより、Fig. 13 のとおり、最終構造決定時点まで、基本的にはフロアパネルの形状変更のみで性能を向上させた。その結果、コストや重量をかけることなく、ロードノイズ性能の目標を実現できた。

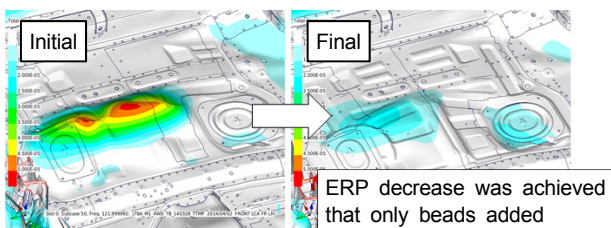


Fig. 13 Modification of the Shape of the Center Floor

b. サスペンション伝達特性の向上手法

サスペンションについては、以下の2つを基本コンセプトとして開発した。(A) 主要モード共振周波数の離間によるモード連成防止、(B) 実走時の特性を考慮したブッシュ開発による伝達特性向上、である。

(A) のサスペンション主要モードのアライメントについては、新世代商品群開発で管理している寄与の高い主要

モードに加え、新たに複数のモードを管理対象として追加することで、より確実にモードの連成を防止することができた (Fig. 14)。

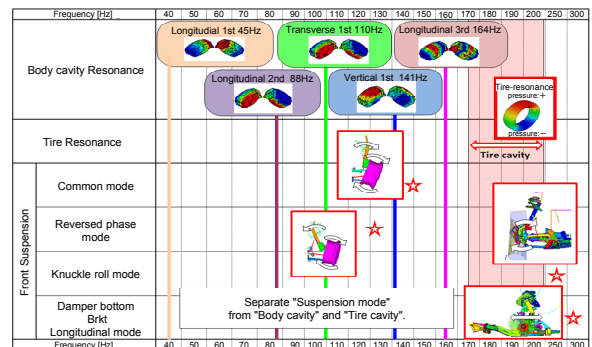


Fig. 14 Suspension Modal Alignment

また、他性能とのバランスや重量効率面から、各サスペンション共振周波数の分散が困難と判断した箇所については、ダイナミックダンパーを設定した。このうちリアトレーリングアームのダイナミックダンパーは、2つの異なる共振に対し効果を持たせることで、重量効率を最大化させた (Fig. 15)。

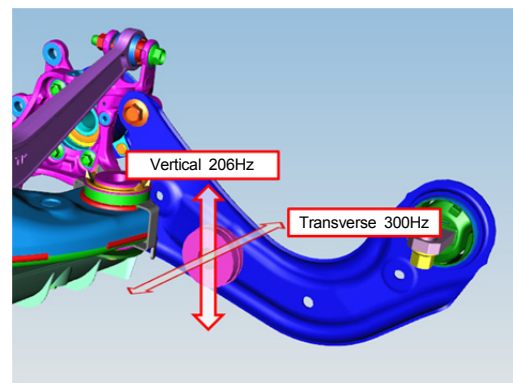


Fig. 15 Dual Direction Dynamic Damper

(B) の伝達特性向上に当たっては、ブッシュ特性の設定方法を進化させた。経路寄与が高く、構造上、実走時に大きなプリロードがかかるフロントロアアーム後側ブッシュに対しては、既存の静止状態における管理指標では不十分である。新型CX-9では、走行抵抗による変位量を計測し、実走時の動バネ特性が最適となるようにブッシュメーカーと協働で管理する特性の計測条件を再構築した。

4. おわりに

以上、新型CX-9の静粛性開発について紹介した。お客様に安心、快適を提供するために、社内の開発、生産、品質管理部門、及び社外協力関係者が一丸となって、各製品の最適化と改良に取り組み、現行モデルに対して静粛性を大きく向上できたと自負している。今後もお客様視点での

静肅性の向上に取り組んでいく。

■ 著 者 ■



清水 勝矢



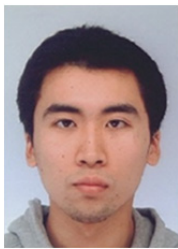
楠木 大地



熊本 和矢



粟根 正浩



中山 博資



山本 晃平

特集：新型マツダCX-9

7

新型CX-9のシャシーダイナミクス性能 Chassis Dynamics Performance of New CX-9

小沼 真一*1 大久保 悟*2 中村 聡*3
Shinichi Konuma Satoru Ohkubo Akira Nakamura
大久保 英崇*4 中山 博資*5
Hidetaka Ohkubo Hiroshi Nakayama

要 約

SKYACTIV-シャシーは走る喜びの更なる進化と環境性能に貢献する大幅な軽量化を実現した上で「人馬一体のドライビングプレジャー」と快適性や安心感改善による「走りの質」の向上を実現した。新型CX-9はこのブレークスルー技術を継承した上で更なる進化を織り込むことにより、ハイエンドモデルとしてマツダブランドを牽引する「走りの質」と「人馬一体感」を実現した。

Summary

Mazda SKYACTIV-chassis improved driving quality by enhancing “Jinba-Ittai” driving pleasure (oneness feel between a car and a driver), comfort and safety feeling, in addition to evolved fun-to-drive and significant weight reduction that supports environmental friendliness. Inheriting this breakthrough technology and introducing additional innovations, the New CX-9 further upgrades the driving quality and Jinba-Ittai feeling to lead the Mazda brand as a high end model.

1. はじめに

SKYACTIV-シャシーは「人馬一体のドライビングプレジャー」の向上、安心感や快適性の向上による「走りの質」の向上をねらい、サスペンション・ステアリング機能を根本から見直したブレークスルー技術で、一体感・安心感・快適性の間にある背反性能を高次元で成立させ、走る喜びの進化を実現するとともに、環境性能に貢献する大幅な軽量化も達成した⁽¹⁾。

本稿では、SKYACTIV-シャシー採用商品のハイエンドモデルである新型CX-9について、SKYACTIV-シャシーのブレークスルー技術を継承・進化させながら、操縦安定性に加えて乗り心地とNV (Noise & Vibration) 性能を融合させた人馬一体感を、ミッドサイズSUVの車両でどのように具現化したか、その手段と達成性能を報告する。

2. 開発のねらい

SKYACTIV-シャシーは以下の背反性能の両立に取り組み実現してきた。

- ・ 中低速域の軽快感と高速域での安心感の両立
- ・ 中低速域の軽快感と乗り心地の両立
- ・ 軽量化とダイナミクス性能、NV性能の両立

新型CX-9は、このSKYACTIV-シャシーを採用したCX-5・アテンザ・アクセラのダイナミクス性能を継承しながら、「マツダらしい価値を作り込み、クルマとヒトの関係をより強固なものにする」ために、人馬一体感を更なる高みへ引き上げる上質な乗り心地とNV性能の劇的な進化を目指した。乗り心地においては、人が不快と感じる周波数の振動を徹底して排除及び減衰させることで上質な乗り心地を提供し、ドライビングに必要な路面情報を伝える振動は適度に透過させ、人（ドライバー、同乗者）が常にリラックスした状態で、人と車が一体となれる性能を目指した。NV性能は「突き抜けた静粛性」をコンセプトとし、シャシー領域ではUSA市場におけるフリーウエー走行や厳し

*1~2 シャシー開発部
Chassis Development Dept.

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

*3~4 操安性能開発部
Chassis Dynamics Development Dept.

い路面が多い環境下においても、あらゆる速度域で快適に会話ができるロードノイズ性能の実現に注力した。特にフリーウェーの良路静粛性性能とともに、乗員へ不快感を与える粗粒路ロードノイズ性能に対しては、コンセプトを実現するための理想音圧（人が不快と感しないレベル）を設定し、開発を進めた。

3. 達成手段

3.1 サスペンション、ステアリングの構造

新型CX-9ではCX-5・アテンザ・アクセラと同形式となるフロントがマクファーソンストラット式サスペンション、リヤはE型マルチリンク式サスペンション、ステアリングにはコラムアシストタイプの電動パワーステアリングを採用した(Fig. 1, 2)。



Fig. 1 Front Suspension and Steering



Fig. 2 Rear Suspension

3.2 人馬一体感

SKYACTIV-シャシーのフロントサスペンションは「人馬一体感」に必要な「手応えと車両応答のバランス」と「直進安定性」を得るために、キャスター角とキャスタートレールを増加することでセルフライニングトルクを増やしてステアリングホイールの手応えを増加し、外乱に動じない安定性を確保した。新型CX-9においてもこの技術を継承し、前モデルからキャスター角を約3度、キャスタ

ートレールを約20mm増加した(Fig. 3)。

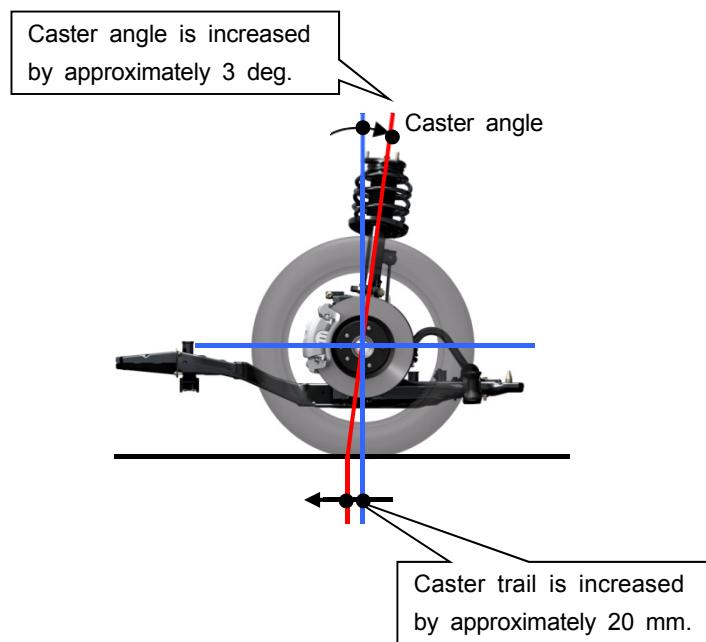


Fig. 3 Caster Angle and Trail

リヤサスペンションは旋回時の安心感や操舵の正確性を得るため、各リンクのブッシュの剛性やアクスル側の取り付け位置を見直すことにより、サスペンションストローク時のトーの変化を最適化した(Fig. 4)。

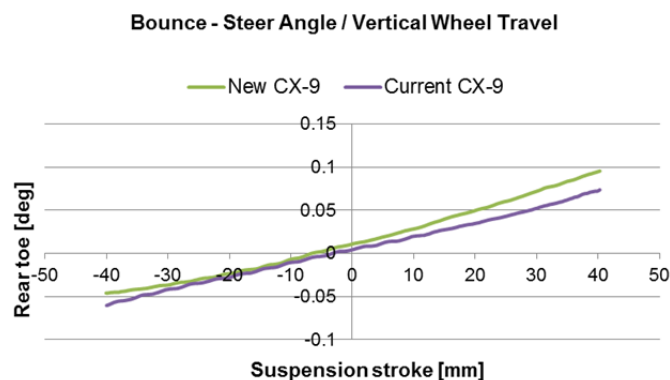


Fig. 4 Suspension Stroke vs. Rear Toe

ステアリングギアは、ステアリングホイールの回転角とタイヤの舵角(トー角)の関係をドライバーの期待値に近づけるために、ステアリング系の支持剛性を見直すことでステアリング操舵時の剛性感を向上させた。

3.3 快適性

(1) 乗り心地

SKYACTIV-シャシーではリヤサスペンションのトールリンクアームのブッシュの取り付け位置を上げることによ

り、突起乗り越え時のショックの低減と制動時の姿勢変化の低減を実現した。新型CX-9においてもこの技術を継承し、トレーリングアームブッシュの取り付け位置を前モデル比で約35mm上方移動し、上記性能の向上を実現した(Fig. 5)。

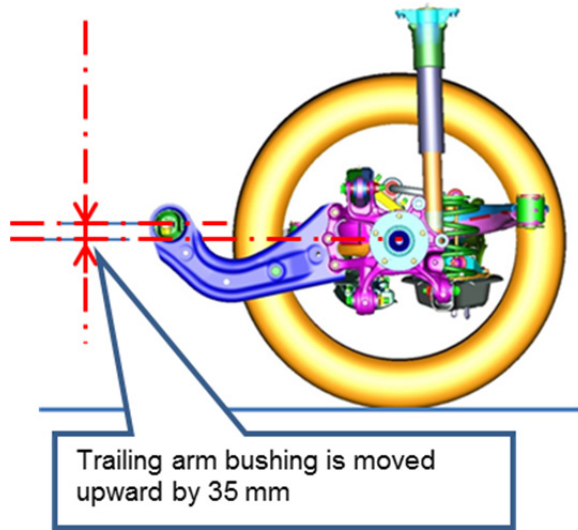


Fig. 5 Position of Trailing Arm Bushing

また、リヤダンパーの取り付け角度をより直立に近づけ、サスペンションの稼働軌跡の接線方向に近づく方向にすることにより、特に微小ストローク領域の動きやすさを確保した(Fig. 6)。



Fig. 6 Angle of Rear Damper

その他、新型CX-9の進化として、①フロントのロアアームには液封ブッシュを採用し、「低動バネ化」と「高減衰特性」を両立させて大入力時のショックの低減と不快な振動を抑え、②フロントダンパーには摩擦特性を向上させた構造を採用し、スムーズなサスペンションの動きを更に向上させている。

(2) ロードノイズ性能

新型CX-9のロードノイズ性能は、今までにない「突き抜けた静粛性」をお客様に提供することを目指し、高いレベルを目標として設定した(別稿“新型CX-9の静粛性開発について”を参照)。

その達成に向け、開発の初期段階でCAE技術を駆使し、各サスペンション部品の共振周波数を適切に管理し、車室内空洞共鳴とも離間すること(=モーダルアライメント)によりロードノイズを低減した。モーダルアライメント管理にあたっては、CX-5以降の商品開発で確立した寄与の高い主要モードの管理に加え、新たに複数のモードを管理指標として追加することにより、CAE解析によるサスペンション部品構造の最適化をより精度高く行うことができた。

また、経路寄与が高く変位量も大きいフロントロアアーム後側ブッシュについて、走行時には走行抵抗による変位発生とそれに伴う動特性上昇が起きることに着目し、走行時の動特性が最適な値になるように、ブッシュメーカーと協働で特性計測方法を新規に設定した。これにより、走行時のブッシュ動特性を最適化することでロードノイズ性能を改善した。

また、他性能とのバランスや重量効率を考慮し、サスペンション共振と車室内空洞共鳴の離間が困難と判断した箇所については、重量対効果で効果が最大となるアイテムとしてダイナミックダンパーを設定した。このダイナミックダンパーは、共振を二方向で管理することにより、異なる二つのサスペンション共振を一つのダイナミックダンパーで低減するように設定し、重量効率を最大化した。

4. 達成性能

新型CX-9で実現した達成性能の代表例を紹介する。

4.1 人馬一体感

SKYACTIV-シャシーで実現してきた軽快感と安心感の両立について、ミッドサイズSUVでの達成性能を説明する。

新型CX-9では、まずメイン市場である米国の現地において、車両応答と手応えの最適なバランスを検討し、そのバランスを実現すべくサスペンションの特性を見直し、及び電動パワーステアリングの制御パラメータの最適化を実施した。

Fig. 7は車両の応答と手応えの変化を表している。ステアリングホイール上の操舵トルクとヨー運動をよりニアにすることで、人が最も自然に感じ、人馬一体感を感じられる車両応答と手応えのバランスを実現した。

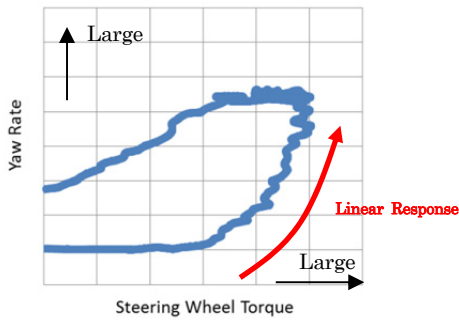


Fig. 7 Steering Wheel Torque vs. Vehicle Yaw Rate

Fig. 8は、ステアリング操作に対する車両のヨー運動と横G発生までの位相遅れを表している。それぞれの位相遅れを理想のバランス（グラフ上の赤枠の範囲）にすることを実現するため、ステアリング系の支持剛性を向上させることでヨー運動の遅れを低減し、リヤサスペンションのジオメトリーや各剛性の最適化によって理想のトー変化を持たせ、横G発生の位相遅れを低減させることで、軽快さと安定感の両立を実現した。

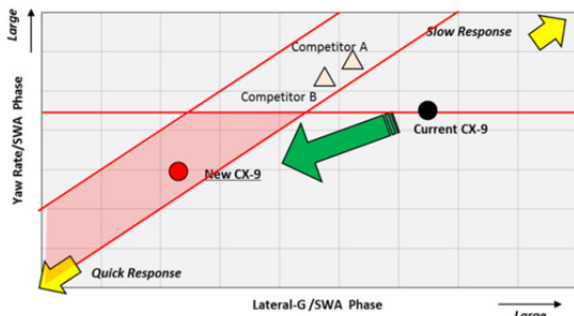


Fig. 8 Phase Lag of Lateral Acceleration / Yaw

4.2 快適性

(1) 乗り心地

Fig. 9は、人がブルブルとした振動を感じる周波数のエネルギー総和（シェイク性能）を表している。車両トータルでの振動について、フロントロアアームブッシュの液封化、リヤトレーリングブッシュの特性見直し、エンジンマウントの配置および特性見直しによる振動モーダルアライメントを行うことで大幅な振動低減を実現した。

Fig. 10は、段差を乗り越えた時の入力レベル（インパクトショック）と上記で示したシェイク性能のバランスを表している。一般的にこの二つの性能は背反しており、シェイク性能をひき上げるためサスペンションの振動減衰を上げると路面からの入力が増加しインパクトショック性能が悪化する。この背反する二つの性能について、車両全体での振動モーダルアライメントとリヤダンパー傾角の最適

化およびダンパー内部構造の見直しによりブレークスルーし、性能向上を実現した。

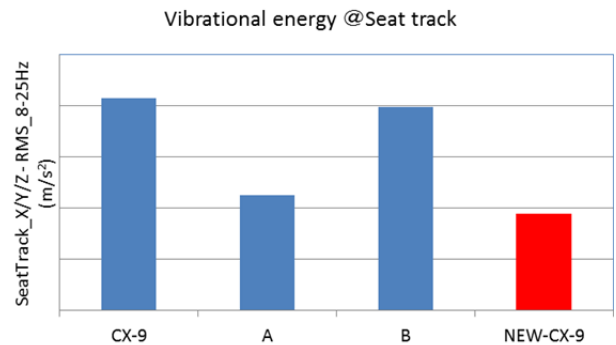


Fig. 9 Result of Shake Measurement

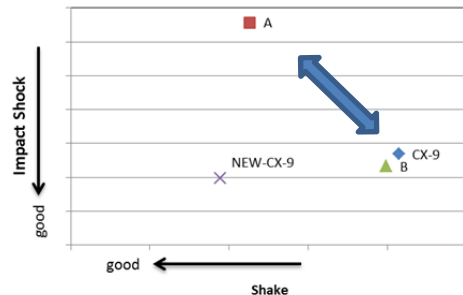


Fig. 10 Impact Shock vs. Shake

(2) ロードノイズ性能

Fig. 11は荒れた路面を走行時のロードノイズの音圧を表している。新型CX-9では、達成手段の項で述べたモーダルアライメント、走行時のブッシュ動特性最適化、重量効率を最大化したダイナミックダンパーの設定などにより、同セグメント競合車群の中でTopの性能を実現しつつ、一般的に相反する軽量化やダイナミクス性能とも両立することができた。

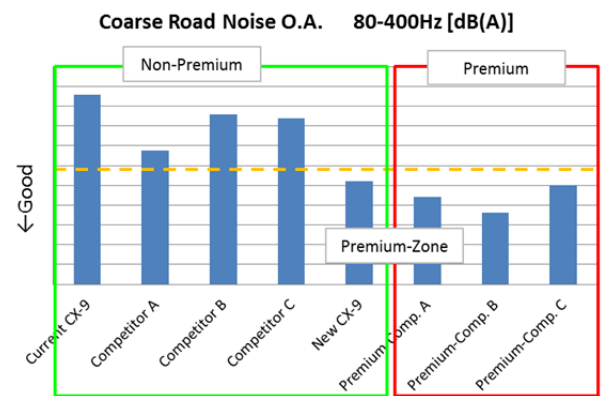


Fig. 11 New CX-9 Result of Road Noise Level

5. おわりに

新型CX-9のシャシーダイナミクス性能について紹介した。SKYACTIV-シャシーの技術をCX-5・アテンザ・アクセラの開発により得られた経験をもとに更に進化させ、現行モデルに対してダイナミクス性能を大きく向上することができ、ハイエンドモデルとしてふさわしい性能を達成することができた。今後もSKYACTIV-シャシーが進化し続けることを目指して取り組んでいく。

参考文献

- (1) 山本忠信ほか：SKYACTIV-シャシー，マツダ技報，No.29, pp.53-60 (2011)

■著者■



小沼 真一



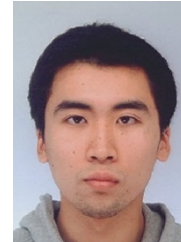
大久保 悟



中村 聡



大久保 英崇



中山 博資

特集：新型CX-9

8

新型CX-9の軽量・高剛性ボディーシェル Light-weight・high-rigidity Body Structure of New CX-9

吉武 晃司*¹ 清下 大介*² 兼森 正英*³
Koji Yoshitake Daisuke Kiyoshita Masahide Kanemori
川野 晃寛*⁴ 中内 繁*⁵
Akihiro Kawano Shigeru Nakauchi

要 約

新型CX-9は、マツダのハイエンドモデルであり、マツダ技報29号で発表したSKYACTIV-BODY⁽¹⁾技術を基に、ホイールベースを延長し、3rdシートを搭載したパッケージに発展させた商品である。このパッケージの実現とともに、高い操縦安定性と衝突安全性、突き抜けた静粛性を、先代モデルからの質量増加なしで実現することを目指した。この達成手段として、各性能の寄与度が高い部位を見極め効率的に強化し、各ロードパスの分担荷重が車両トータルで最も効率的となるように配分を決めて強化した。これらを、CAE検証を繰り返して行うことで適正構造にした。

この結果、先代モデルに対して、ねじり剛性60%向上、市場評価で最高ランクを獲得可能なボディー強度の確保(社内テストによる)、静粛性向上を果たした。また、7.3kgの軽量化を実現し、ベストインクラスに肉薄するボディーシェル質量も達成した。

Summary

The All-New CX-9 is Mazda's high-end model, based on the SKYACTIV-BODY technology that was presented at the Mazda Technical Review No.29, extending the wheelbase, is a commodity that has developed long wheelbase and the layout package the 3rd sheet. CX-9 is aimed at realization of package and high steering stability, high crash safety and extremely high quietness performance without the weight increase from the previous model. To realize them, to strengthen effective area seeking the high contribution of each performance, to strengthen the amount needed each part that reconsider the load path, an optimal structure was developed by repeated CAE studies.

As a result, the torsional stiffness has increased by 60%, ensuring of body strength that it's capable to getting the best rank by a market evaluation (according to the internal test), and silence performance has improved from the previous model. Furthermore, while reducing the weight approximately 7.3kg, was closely achieved a body shell weight Best-In-Class.

1. はじめに

マツダのボディーエンジニアの使命は、「高性能なボディーを軽く設計すること」である。新型CX-9も「人馬一体」を感じていただける商品を目指して、SKYACTIV-BODYで初めての3列シート車に挑戦し、ハイエンドモデルに相応しい性能をもちながらも、先代モデルより軽量のボディーを実現した。この過程には、さまざまな問題の発生と解決の繰り返しがあったが、その都度、原理・原則に立

ち返って検討し、一つ一つの部位に命を吹き込んできた。本稿では、各性能開発に焦点を当て、軽量化しながら劇的な進化を可能にした設計手法や構造について紹介する。

2. 3列シート専用プラットフォーム

新型CX-9は、生産設備の共通化とボディーの軽量化を実現するため、先代モデルで採用しているラダーフレーム構造ではなく、CX-5から踏襲してしたSKYACTIV-

*1~5 ボデー開発部
Body Development Dept.

BODYを派生させて新設した(Fig. 1)。具体的には、3rdシート導入の影響を受けないNo.3クロスメンバーより前方は、部品自体や形状の共通化を積極的に行い、板厚や材質の変更と部分的な強化により各性能の向上を図った。No.3クロスメンバーより後方では、リアフレームの高さを下げて3rdシート乗員の居住空間を確保することをはじめ、CX-5からの諸元変更量に合わせて部材を新設し、質量やコスト、機能の適正化を図った。

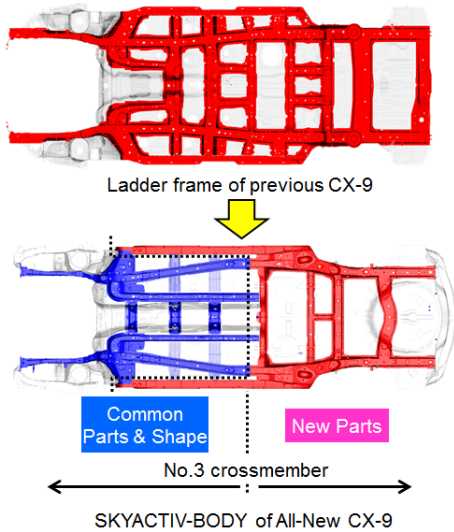


Fig. 1 Derivation of Platform

3. NVH性能 (静粛性)

新型CX-9は、本技報の特集6でも紹介した突き抜けた静粛性の実現を目指して開発を進めてきた(Fig. 2)。ここではボディー領域での貢献事例を3つ紹介する。

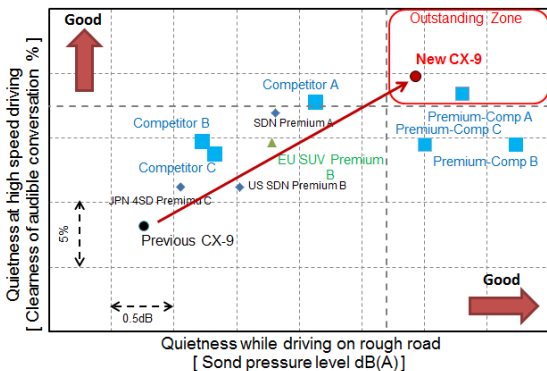


Fig. 2 Balance Chart of Quietness

3.1 板厚適正化による「会話のしやすさ」の向上

新型CX-9では、高速走行域の「会話のしやすさ」を向上させるため、特集6で紹介した内装領域の工夫と並行し、ボディーパネルの板厚アップにより遮音性を高めた。各パネルの板厚は、フレキシブル生産性への影響の有無と、衝

突性能や操縦安定性といった他機能への寄与度も明確にしながらか決定した(Fig. 3, Table 1)。

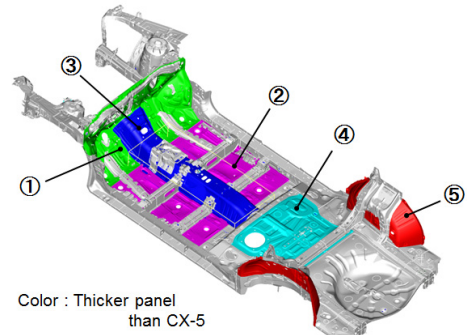


Fig. 3 Widening the Panel Thickness

Table 1 Effect by Widening the Panel Thickness

	Noise Insulation	Crash Safty	Steering Stability	Strength
① DASH LOWER	○	○	×	×
② FRONT FLOOR	○	○	○	×
③ TUNNEL	○	○	○	×
④ CENTER FLOOR	○	×	○	×
⑤ RR WHEEL HOUSE	○	×	×	○

3.2 パネル等価放射パワー (ERP)改善による

「荒れた路面での音圧」の低減

荒れた路面での音圧低減は、特集6で紹介したとおり、ERPという指標を用いて開発を進めてきた。ボディーでは、ダッシュロアやフロア、ルーフなどの領域ごとに、寄与度の高い周波数帯におけるERP目標を設定し、遮音性を高めるためのパネルの板厚アップに加えてパネル形状や塗布型制振材^②を最適化したことで、先代モデルからの性能改善に貢献した。

パネル形状は、ビードと面剛性を高める曲面形状を適正に配置した (Fig. 4)。各部位において、ねらいとする周波数帯は複数存在し、周波数帯によってパネル振動は異なる挙動をするため、それぞれの周波数帯の挙動を確認し、最も効果的なパネル形状とした。

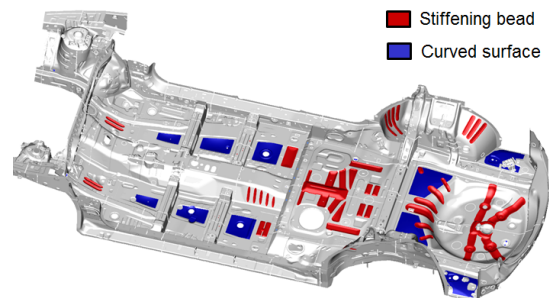


Fig. 4 Optimization of Body Panel

次に塗布型制振材の最適化事例を紹介する。トランクフロアパンへの塗布パターンはCAEの最適化計算で求め、重量効率を最大限に高めた。これにより最適化前の仕様に比べ、0.2kgの質量低減をしながらERPを改善した(Fig. 5)。

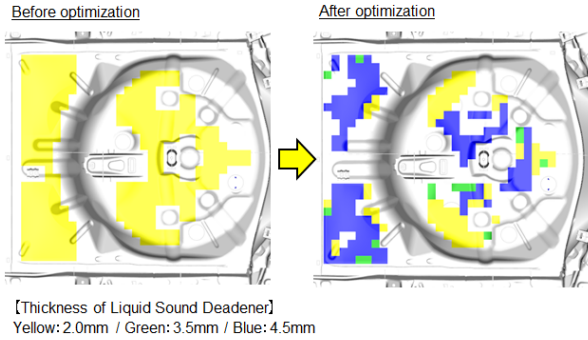


Fig. 5 Optimization of Liquid Sound Deadener

3.3 材料の見直しによる軽量化と

「会話のしやすさ」の向上

空力性能の要求が高まるにつれ、アンダーカバーの設定範囲が増え、質量も増加の一途を辿っている。先代モデルはフロア下カバーにPP材を用いていたが、新型CX-9では、軽量で吸音機能を有するガラス繊維入りPP材を採用した。またその前後分割部の構造では、前側のフロア下カバーをフロア面近くまで持ち上げて、ボディーとの隙間を減らすことで遮音性を高める工夫も施した(Fig. 6)。これによりPP材比で約2.0kgの軽量化を達成しながら、高速走行域での「会話のしやすさ」を向上させた。

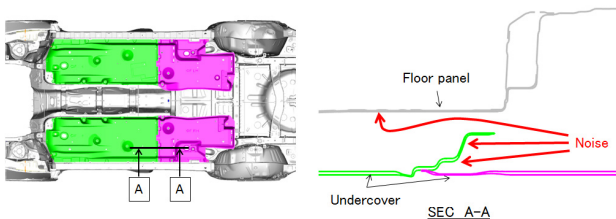


Fig. 6 Section on Division Part of Undercover

4. 操縦安定性

新型CX-9は、CX-5比でホイールベースを230mm延ばして3列シート化したことで、フロントの軸重が10%、リアの軸重が30%増加し、タイヤの大径化に伴うトレッドの拡張で横力も増加する。このホイールベース延長と入力増加により、操縦安定性の指標にした箱感⁽³⁾を測る部位の変位が、CX-5比で約2倍にも大きくなることを、同等以下に抑える構造を検討してきた。本章では、車体剛性と各部位の支持剛性の向上により、箱感の目標達成とねじり剛性をCX-5比で20%、先代モデル比で60%以上向上させた構造事例を4つ紹介する。

4.1 フロントサスペンションタワー部の支持剛性向上

フロントサスペンションタワー部は、前面衝突性や強度・信頼性の確保にも効果的なサスペンションハウジングアッパー・ロアの板厚アップに加え、カウルメンバー固定

BRKT, レインフォースメントの板厚アップ, ボディーとの固定点を増加することで支持剛性を向上させた(Fig. 7)。

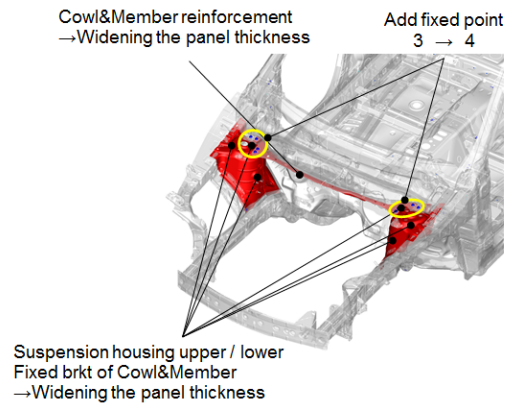


Fig. 7 Rigidity Improvement of Front Suspension Tower

4.2 ドア開口変形の抑制

ホイールベース延長に伴い、フロントとリアボディーの変形位相差が増加することも課題であった。これについては、ドア開口の変形を抑制することで改善した。

まずヒンジピラー下部は、衝突対策も兼ねたレインフォースメントを追加して(Fig. 8①), Bピラー上部はコーナーRの寸法拡大で強化した(同②)。リアドア開口後部下側のコーナーは、厚板のサイドシルレインフォースメントを上へ引っ張り(同③), ホイールハウスの最小断面になる部位にはガセットを追加し、断面崩れを抑制した(同④)。Cピラー上部は、レインフォースメント同士を重ね合わせ、開口部のコーナーRを強化した(同⑤)。この各コーナー部の強化でドア開口の変形を抑制し、フロントとリアボディー間の変形位相差を低減させた。

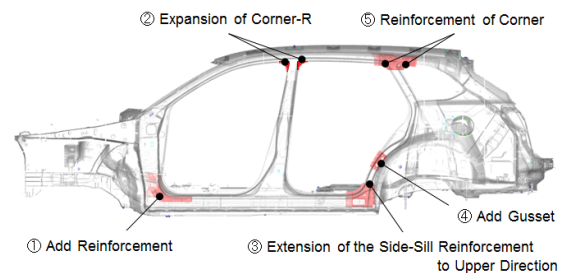


Fig. 8 Reinforcement of Door Opening

4.3 リアボディーのボックス変形の抑制

リアの軸重増加に加え、商品性目標としてCX-5同等のロール率を確保するために、スプリングのバネレートも上げた。この対応として、CX-5以降車体剛性確保の肝として踏襲してきたCピラー環状構造の機能配分を見直した。具体的には、リアフレームからCピラーに向け連続断面を通し(Fig. 9①), これをNo.4クロスメンバーと結合し(同

②), これらを3rdシートの下, 横の空間の中に直線的に配置したブレイスで結合することで, 環状構造の機能を向上させた(同③)。更に, ダンパートップとクォーターウィンドウのガゼットを, Cピラー方向へ直線的に向け直し, ダンパートップの支持剛性を高めた(同④)。これらの構造の見直しにより, 箱感に効果が高い部材でも1%/kg程度の質量効率である中, 約2.7%/kgの質量効率を誇る新環状構造を実現した。

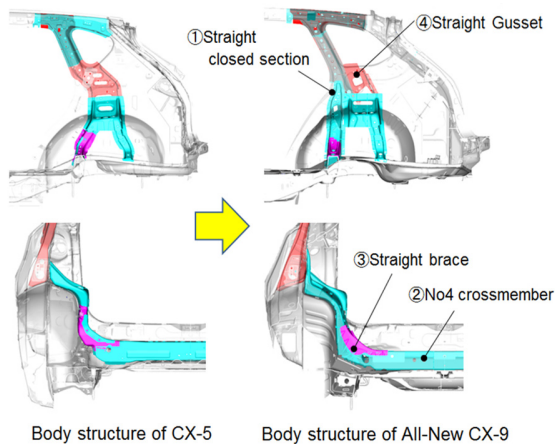


Fig. 9 Ring Structure of C-Pillar

次に, リフトゲート開口部は断面を拡大して, 断面内のレインフォースメントをリアヘッダーへつなげて連続断面化した(Fig. 10①)。更に, クォーターウィンドウ上部を強化するアウター側のレインフォースメントと, リフトゲート開口上部のコーナプレート稜線が通るように, この結合部を節化した(同②)。クォーターウィンドウ下部は, リアピラーインナーの形状に稜線を入れ, リフトゲート開口断面へと通した(同③)。これらの構造の適正化に加え, 主要となるレインフォースメント同士の結合部に, 高剛性発泡充填材を配置して断面崩れを抑制することで, リフトゲート開口の対角変位も抑制しながら, 新環状構造とでリアボディーのボックス変形を抑制した。

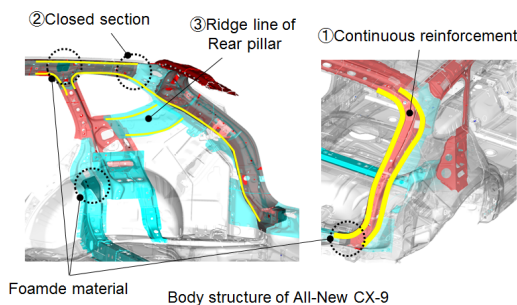


Fig. 10 Change of Rear Body Structure

4.4 トレーリングリンク固定部の変形抑制

No.3クロスメンバーの下には, 側突のロードパスの機

能もたせたトンネルメンバーを追加した。トンネル下を左右に橋渡することで, No.3クロスメンバー付近でのボディーの上下変形を抑制でき, 更にトレーリングリンク固定部を2階建て構造化し, ボルトを上下2点支持に変更することで, 支持剛性も向上させた(Fig. 11)。

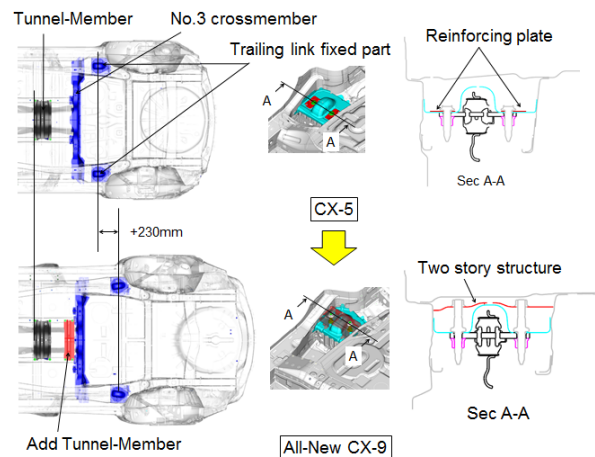


Fig. 11 Body Structure of Trailing Link

5. 衝突安全性

新型CX-9は, 市場評価で最高ランク獲得を目指し開発を行った。CX-5比で290kgの車重アップをエネルギー吸収するために, SKYACTIV-BODYを更に進化させたフロントキャビン, リアボディー周りの開発事例を紹介する。

5.1 米道路安全保険協会 (IIHS) のスモール

オーバーラップ評価最高ランク獲得に向けて

CX-5からの車重アップにより増加した衝突エネルギーを全てキャビンで受けた場合, 2倍程度の耐力が必要であった。そのため, 衝突時の車両挙動のコントロールや, 荷重の分散構造 (マルチロードパス化) によりキャビンが受ける衝突エネルギーを減らした。こうして, キャビン各部位の必要な耐力増加量を最小限に抑えた上で, 各部位の詳細設計に着手した。

(1) Aピラー断面の適正化

AピラーはCX-5比で1.2倍程度の耐力向上が必要であった。板厚やハイテン率をCX-5から据え置くと, 断面の幅と厚みを約10mm以上拡大する必要があり, 視界の悪化だけでなく, Aピラーを細く見せたいデザイン意図を実現できない問題があった。しかし, 板厚やハイテン率を上げると質量とコストがかかるだけでなく, 成形性の難易度も上がってしまう。そこで, 前面衝突・側面衝突・ルーフラッシュ性能に寄与する必要な軸を定義し, その軸周りに発生するモーメントに耐えるように, 各部品の断面形状や板

厚, 材質をユニットCAB評価により最適化した。その結果, 断面の拡大量は厚み方向に3mmで抑えられ, 視界とデザイン意図を実現した(Fig. 12)。

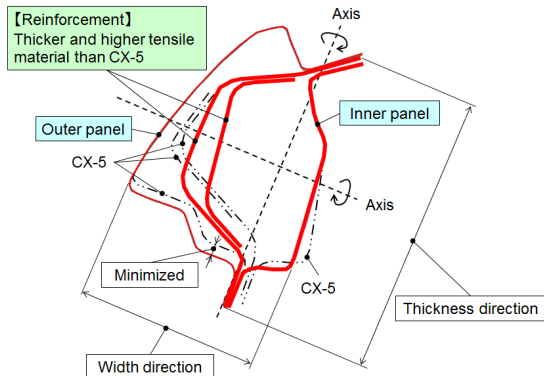


Fig. 12 A-Pillar Section

(2) 乗員生存空間を保つためのヒンジピラー二分割構造
 バリアに押し込まれたホイールにより, ヒンジピラー断面のドアヒンジ取付部へ局所的な入力加わり, ヒンジピラー断面が崩れ, 内倒れを引き起こし, キャビンの変形量を増幅させる要因となる。ヒンジピラー断面からドアヒンジ取付構造(Fig. 13①)を, ドア保持剛性や取付強度を確保したまま, 二分割構造とすることで, 衝突時の断面崩れをドアヒンジ取付部に留め, 断面本体(同②)の崩れを抑制した。また, ヒンジピラー自体も板厚アップや高ハイテン化し, ダッシュロアとヒンジピラー結合部をガセットやレインフォースメント(同③)で強化し, キャビンの変形量を抑制した。

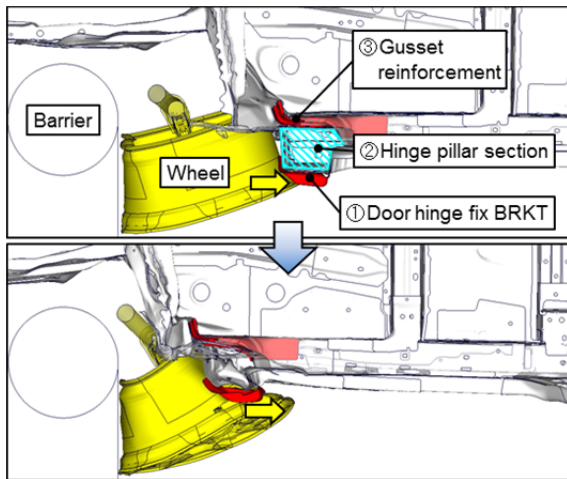


Fig. 13 Deformation Mode of Hinge Pillar

(3) 前面衝突時に側面衝突ロードパスを有効活用したサイドシル

ロードパスを有効活用できるように, サイドシルとフロアの各結合部に配置したレインフォースメントの形状を見

直すことで, 材質と板厚のアップ量を必要最小限に抑えることもできた。先述したヒンジピラーによって, 車両側面に押し出されたホイールはサイドシルを車両内側へ押し込む。それにより, サイドシルは正面のバリアと側面のホイールの二方向から荷重を受け, 内折れを引き起こす。これもキャビンの変形量を増幅させる要因となる。側面衝突ロードパスであるサイドシルとNo.2クロスメンバーの結合部を強化し, ホイールによりサイドシルに入る荷重を側面衝突ロードパスに効率よく伝達させることでサイドシルの内折れを抑制した(Fig. 14)。

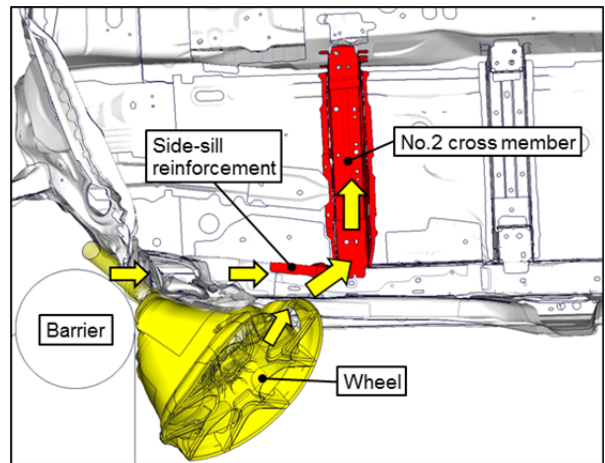


Fig. 14 Detailed Design of Side-Sill

5.2 後面衝突時における3rdシート保護

新型CX-9のリアボディ開発においては, 後面衝突時にSKYACTIV-BODYで初搭載となる3rdシートを保護するために, 二つのポイントに注力した。

一つ目は, 3rdシート後方での高いエネルギー吸収の実現である。サスペンションクロスメンバー締結部より前方のリアフレームのくびれをなだらかにし, 断面を確保することで耐力を上げるとともに, 延長したリアフレーム後方のWハット断面をストレート化することで, 高いエネルギーを効率的に吸収できる構造とした(Fig. 15)。

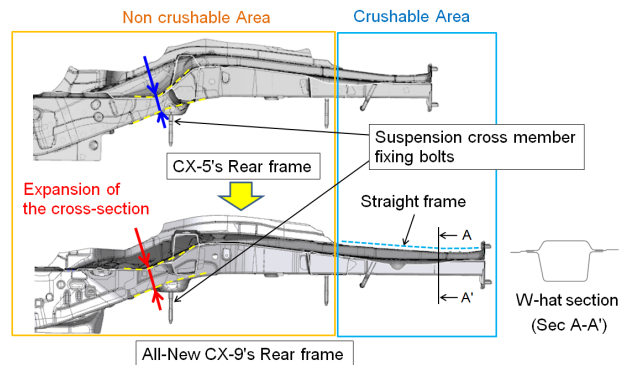


Fig. 15 Changed of Rear Frame

二つ目は、3rdシートにアタックしにくいスペアタイヤの搭載姿勢である。タイヤを前傾搭載し、後面衝突時には3rdシートとサスペンションクロスメンバー間に設けた空間に潜りこませることで、3rdシートのクッションを下から突き上げない構造とした(Fig. 16)。

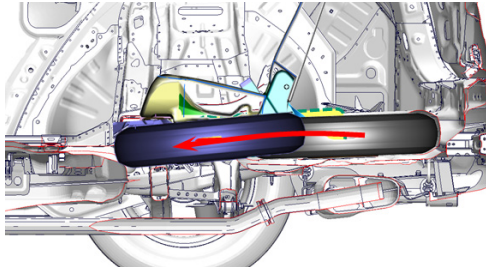


Fig. 16 Concept of Moving Spare Tire

6. 質量

新型CX-9のホワイトボディは、先代モデルと同等のサイズながら各性能を大幅に向上させた上で、7.3kgの軽量化を実現し、ベストインクラスのボディーシェル質量に近づけた(Fig. 17)。この軽量化は、先述したような構造の適正化に加えて、高ハイテン化やフロントフェンダーのアルミ化により実現することができた (Fig. 18)。

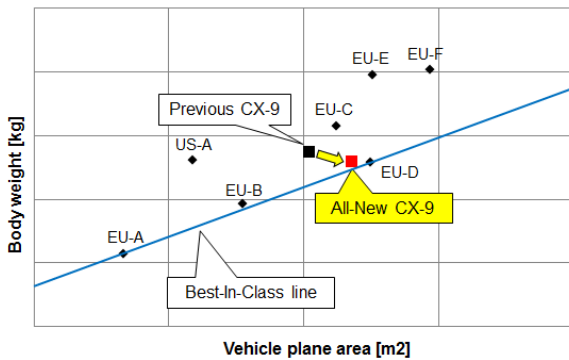


Fig. 17 Vehicle Weight per Projected Area

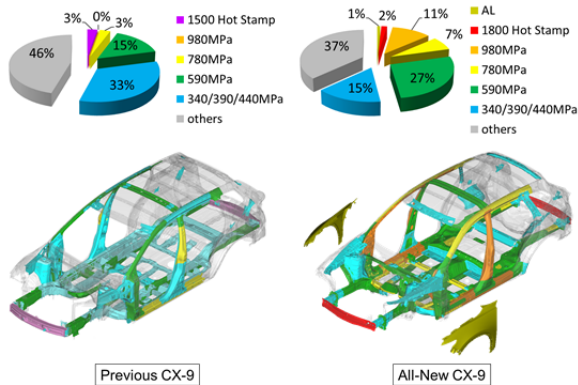


Fig. 18 Application Rate of Sheet Metal

7. おわりに

新型CX-9は、次世代を見据えた新技術を取り入れながら、ハイエンドモデルに相応しい性能を実現することができた。これらの成果は、企画・デザイン・設計・実研・生産技術及び製造部門が同じ志をもち、ONE MAZDAで活動することにより成し得ることができたと考える。今後もお客様により喜ばれる商品を提供するため、ONE MAZDAで商品開発を進化させていく所存である。

参考文献

- (1) 木村隆之ほか：SKYACTIV-ボディ，マツダ技報，No.29, pp.61-67 (2011)
- (2) 高崎政憲ほか：塗布型制振材の高精度塗布工法，マツダ技報，No.30, pp.234-239 (2012)
- (3) 松岡秀典ほか：新型デミオ・CX-3の軽量ボデーシェル開発，マツダ技報，No.32, pp.48-55 (2015)

■ 著 者 ■



吉武 晃司



清下 大介



兼森 正英



川野 晃寛



中内 繁

特集：新型マツダCX-9

9

新型CX-9の空力性能開発 Aerodynamic Development of New CX-9

油目 雅史*¹ 中田 章博*²
Masafumi Aburame Akihiro Nakata

要 約

新型CX-9は3列ミッドサイズクロスオーバーSUVとして、CX-5のプラットフォームをベースに開発した。空力性能はクラストップレベルを目指した。そのうちプラットフォームについては、CX-5以降の新世代商品群と同様の床下整流に加えて、新型CX-9では特にフロントタイヤ周り及びリアサスペンション周りの整流に注力した。またアッパーボディーについては、新型CX-9のデザインコンセプトである「おごそかで品格のあるプレミアム」の表現を実現しながらリア周りの風流れの巻き込みを抑制することに注力した。更に、高速走行時にお客様が“安心／快適”を感じられる卓越した静粛性の実現のために、風流れにより発生する渦を起因とする空力騒音の低減にも注力した。本稿では、デザイン部門、各設計部門と一体となって共創し、前モデルから11%の空気抵抗低減及び空力騒音の低減を実現した事例を紹介する。

Summary

The new Mazda CX-9 was developed as a mid-size crossover SUV based on the platform of the Mazda CX-5. The target of aerodynamic development was achieving top level among the same class vehicles. In aerodynamic development for the platform, a focus was placed on improvement of the air flow in the rear suspension area and around front tires in addition to improvement of the air flow in the floor same with the Mazda CX-5 and the following new-generation vehicles. In the development of upper body, we aimed at improving the air flow in the rear body with realizing the design concept of the new Mazda CX-9 for expressing “stately and dignified premium”. In addition, for the realization of outstanding silence in the situation of high speed driving so that customers are able to feel “peace of mind/coziness”, we focused on the reduction of aerodynamics noise. This paper introduces the case of realizing an 11 % aerodynamics drag from the previous model and reducing of aerodynamics noise.

1. はじめに

近年、燃費性能向上のための空気抵抗低減が商品開発の重要項目となっている。空気抵抗は車体形状に依存するため、デザインや他機能との両立が重要課題となる。今回開発した新型CX-9は米国市場のハイエンドモデルと位置付けられており、魂動デザインを実現しながらSKYACTIV TECHNOLOGYとしてふさわしい燃費性能を高次元でバランスさせるため、空力性能を前モデルから大幅に進化させた。更に、今回の空力開発では高速走行時にお客様が“安心／快適”を感じられる卓越した静粛性の実現のため

に、風流れにより発生する渦を起因とする空力騒音の低減にも注力した。本稿では、2章～6章にて前モデルから11%空気抵抗低減を実現した技術について述べ、7章で空力騒音低減技術について述べる。

2. 空気抵抗低減コンセプトと空力性能開発プロセス

2.1 空気抵抗低減コンセプト

空力開発では、CX-5以降の新世代商品群の空気抵抗低減の共通コンセプトを踏襲した⁽¹⁾。これは(I)床下領域、(II)ボディサイド領域、(III)アッパー領域それぞれの渦を

*1,2 車両実験部
Vehicle Testing & Research Dept.

抑制し、車体後方で上下左右の風流れを1点に収束させる風流れを作り空気抵抗を低減するねらいである (Fig. 1)。(I)については床下にフロアラインを定義し、床下基本構造を基に各パーツをそのラインに沿ってレイアウトすることで、1点に収束する風流れを実現した²⁾ (Fig. 2)。(II)と(III)についてはデザイン開発要素が多いため新型CX-9ユニークで開発を進めた。

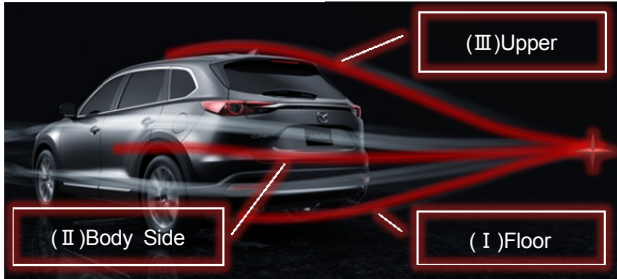


Fig. 1 Flow Structure around a Vehicle

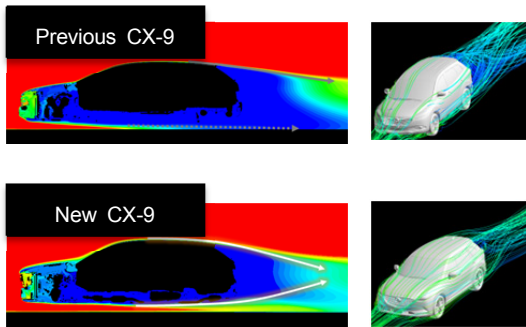


Fig. 2 Aerodynamic Optimization by Modifying Underbody Geometry

2.2 新型CX-9の空力性能開発プロセス

新型CX-9の空力開発では、ミッドサイズSUVセグメントの常識を打ち破る優れた燃費性能を実現するため、極限まで空力性能を高めることを目指した。ファミリーカーとしての十分な実用性を備えるため、必要な前面投影面積を確保しつつ空気抵抗係数(以下、Cd値)低減を目指した。従来の一括企画開発の考え方³⁾に加え、新型CX-9では特に空力性能向上に重要な部位を空力シミュレーション(以下、CFD: Computational Fluid Dynamics)を用いて特定し、固定要素・変動要素を問わず注力点を絞り込み、それぞれの領域に機能配分をした (Fig. 3)。前節の考え方を基にした床下、ボディサイド、アッパーの3領域の流れに加えて、エンジンルームの流れを追加し計4領域で検討した。それぞれの領域について個別目標を設定し空力開発を進めることで、クラストップレベルの空力性能を目指した。これまでの車種の開発では冷却性能と空力抵抗低減の両立は最も開発が難航したため、特にエンジンルームの流れに開発初期段階から注力した。3章から6章では各領域の検討の詳細について述べる。

Previous CX-9 Cd=100%



CX-5 Cd=93%

Cooling : -1% Upper : -2% Body Side : -2% Floor : -2%



Change Element

- Design
- Full Flat Floor
- Tire Size Down
- Full Duct



New CX-9 Target Cd=89%

Cooling : -3% Upper : -2% Body Side : -2% Floor : -4%



Change Element

- Design
- Full Flat Floor + Lateral Link Cover
- Tire Size UP + Optimized around Front Tire
- Full Duct + Active Air Shutter

Fig. 3 Target Cascade

3. 床下領域の空力開発

3.1 床下領域の開発コンセプトと課題

1点に収束する風流れの実現に向けて、床下領域の開発コンセプトは「風をまっすぐスムーズに後方へ流す」とこととした。これに対し、CX-5以降の新世代商品群は一括企画開発によりほぼフラットな床下領域を実現していたものの、4章で述べるようにエンジンルームからの排出風と可動部位であるリアサスペンション周りについてより緻密な配慮をする必要があった。

また、新型CX-9では静粛性向上のためフロア下アンダーカバーを従来の樹脂材料から不織布材料に変更することに伴い新規設計となったため、風がスムーズに流れるよう最適化を図った。しかし、カバー成型時の端部曲率が拡大することで風をスムーズに剥離させることができず、リアサスペンションへ従来以上に風流れが向かい抵抗となっていた (Fig. 4)。これをカバーの剛性と両立を図りながら低減した。

3.2 床下領域の空気抵抗低減技術

フロアアンダーカバーは後端部に風流れを剥離させる形状を設定したことに加え、地上高が低くなる部分について

は縁石衝突時などの破損を回避するため、変形可能なラバー部品とし両立を実現した (Fig. 5)。更に、床下領域での更なる空気抵抗低減のため、従来のフロアアンダーカバーだけでなく可動部位であるリアサスペンション周りの整流も検討した。その結果、新たにマツダ車初となるリアサスペンション前部のラテラルリンクに新設計のカバーを装着し、リアサスペンションへ風流れが衝突することなくスムーズに風を流せるような構造を見出した (Fig. 6)。また、FWDをベースに進めてきたこれらの施策は、トンネル下やデファレンシャルギア周りの構造が違うAWDにも踏襲し、フロアカバーはAWDのレイアウトに合わせてユニーク要素として開発し最適化した。これにより、空力性能を同等とすることができFWDとAWDともに旧型CX-9比Cd値を約4%低減することができた。

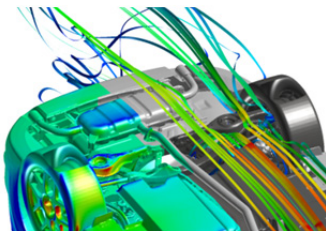


Fig. 4 Flow Streamline around Rear Floor before Optimizing Covers

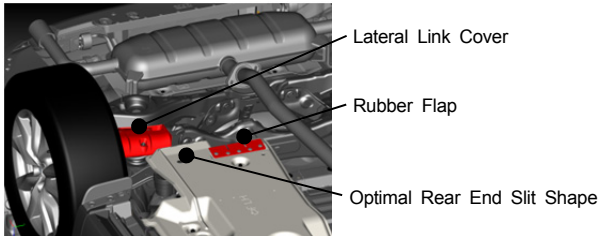


Fig. 5 Optimal around Rear Suspension

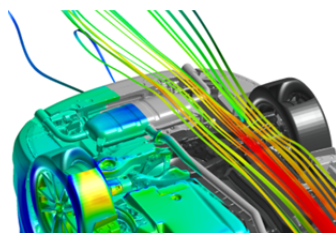


Fig. 6 Flow Streamline around Rear Floor after Optimizing Covers

4. ボディサイド領域の空力開発

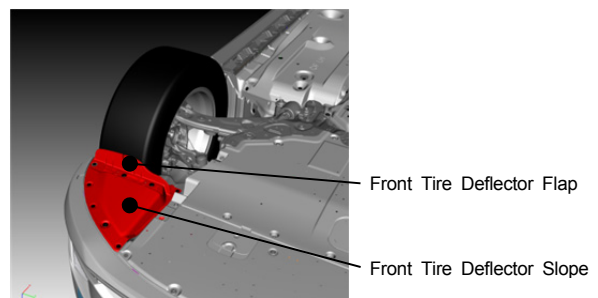
4.1 ボディサイド領域の開発コンセプトと課題

ボディサイド領域の開発コンセプトは、「ボディサイドの風流れを乱さず、フロントバンパーコーナーからホイールハウスにかけて発生する渦を抑制する」こととした。新型CX-9の課題として、フロントバンパーコーナー部のデザインについて従来比凹凸が深くなったことに加え、幅

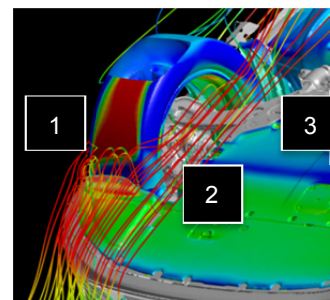
広・大径タイヤによりボディサイドが大きく乱れていたため、剥離渦の抑制が必要であった。

4.2 ボディサイド領域の空気抵抗低減技術

前述の剥離渦を抑制するため、フロントタイヤ周りの各部位それぞれに対して風をスムーズに流すための検証をした。まず、フロントタイヤディフレクタについて、フロントタイヤへ流れを沿わせるため、従来のフラップタイプのディフレクタに加え、ディフレクタ前方にスローブ形状を追加した (Fig.7-(a))。これにより、ディフレクタ自体へ風が衝突し発生していた渦を抑制し、よりスムーズに風をタイヤへ沿わせることができた。ディフレクタフラップ面については、車両外側の面構成はデザイナー、設計者一体となって、Fig. 7の①に示すようにフロントバンパーからの面のつながりを維持しながら確実にタイヤ外側へ風を導くよう最適化した。車両内側の切り上げ形状については、Fig. 7の②に示すようにディフレクタフラップ面自体の抵抗を抑制しつつ、ホイールハウス内へ風が巻き上がることをないように長さ・形状を最適化し、風流れをフラップ部分で剥離させまっすぐ流れるようにした。次に、3.1節で述べた課題の一つであったエンジンルームからホイールハウスへの排出風を抑制すべくスブラッシュシールド形状を最適化した。Fig. 7の③に示すように、ホイールハウスからの排出風についてはボディサイドへ排出せず、床下へまっすぐ風を導くためにマッドガード後端部とセンターフロアカバー前端部のつながりをスムーズにした。その結果、旧型CX-9の構造からCd値を約2%低減し、幅広・大径タイヤによるボディサイドの乱れを抑制することができた (Fig. 8)。

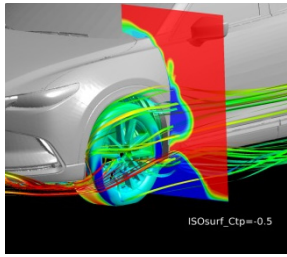


(a) Front Tire Deflector

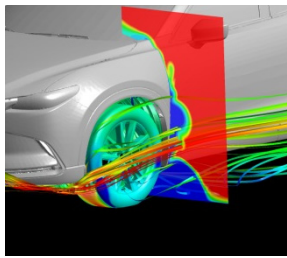


(b) Stream Line around Front Tire Front Tire Deflector

Fig. 7 Flow Streamlines around Front Tire



(a) Before Front Tire Optimization



(b) Optimized Front Tire

Fig. 8 Body Side Flow around Front Tire

5. エンジンルームの空力開発

5.1 エンジンルームの開発コンセプトと課題

エンジンルームに入る風流れは、フロントグリルから必要最小限の風を取り込みまっすぐインタークーラー・ラジエーターに流し、他のエリアへ漏れる風流れを最小限にした。

新型CX-9の開発初期においてはグリル～ラジエーター間の損失が増大し、必要以上の風を取り込んでいたため、ラジエーターまでの導風ダクト構造を見直し、不要なエリアへの漏れを抑制することが課題であった。

5.2 エンジンルームの空気抵抗低減技術

新型CX-9でもCX-5以降の新世代商品群と同様の考え方により、導風ダクト構造を設計者との共創により他性能やレイアウト、組み付け性は満足しながら、バンパー内のセットプレートとインタークーラーダクト構造を最適化した (Fig. 9)。その結果、開発初期段階と比較し冷却に不要な漏れ量を約20%低減することができた。一方で、更なるグリル～ラジエーター間の損失低減のため、アクセラなどに採用しているアクティブエアシャッターの採用を検討した。しかし、アクセラにレイアウトされている位置にはインタークーラーがレイアウトされているためそのままでは設定が困難であった。そこで新型CX-9ではアッパーグリル後方へレイアウトすることを検討した。このエリアはホーンやミリ波レーダーの性能を確保した上でこれらをレイアウトしつつ、衝突性能も満足する必要がある。そのため、アクチュエーターやシャッター外枠形状を最適化し、空力性能と他性能を損なわずにレイアウトを成立させた。これらの結果、マツダ車では初となるアッパーグリル後方へのアクティブエアシャッター搭載を実現し (Fig. 9)、旧型CX-9の構造からCd値を約3%低減することができた (Fig.

10)。

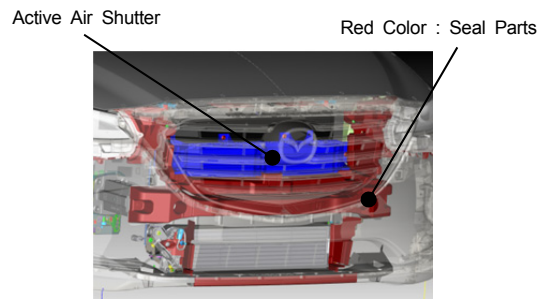
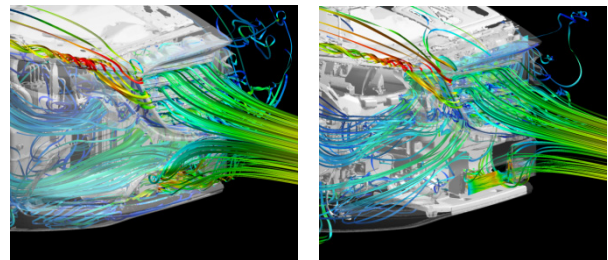


Fig. 9 Seal Plate and Active Air Shutter



(a) Before Front Grill

(b) Optimized Front Grill

Optimization

Fig. 10 Flow Streamlines Around Front Grill

6. アッパー領域の空力開発

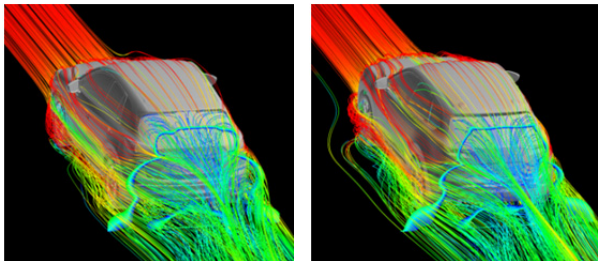
6.1 アッパー領域の開発コンセプトと課題

アッパー領域の開発コンセプトは、2.1節を踏まえて上下左右の流れを巻き込ませず、後方で1点収束する流れを実現することとした。新型CX-9の初期デザイン案はスタンスの良さを表現するため、安定感のある台形フォルム (タイヤからランプ、キャビンにかけて幅が絞られている形状) になっている。このフォルムを実現するためキャビンが丸みを帯びていることに加え、バックウィンドウの角度が先代モデルより倒れていることで車両後方で風の巻き込みが強くなり空力性能の悪化につながっていた。この風の巻き込みを、デザイン表現を損なうことなく実施していくことが重要な課題であった (Fig. 11-(a))。

6.2 アッパー領域の空気抵抗低減技術

新型CX-9では、車両の各部位についてデザイナーと共創した。具体的に風流れを向上した部位をFig. 12に示す。ここでは、特に車体上部から風流れが吹きおろすことにより発生する渦の抑制に注力し、リアスポイラーとリアサイドスポイラーで後流渦の低減を実現した事例について報告する。リアスポイラーを設計者、デザイナーと構造、性能、デザインが成立する形状を見出し、上部からの吹き降ろしを抑制した。リアサイドスポイラーについても同様に車両後方で流れを1点収束させるべく剥離位置、流れの収束角度を最適化し空力性能とデザイン性を高次元でバランスさせることができた。車両後方は上下左右の流れのバランス取りが重

要であるため、床下からの吹き上がりについてもリアバンパー下面形状を最適化し流れを制御した。その結果、デザイン表現のポイントであったスタンスの良さを損なうことなく上下左右の風流れを車両後方で1点収束させることができた (Fig. 11-(b))。これにより、旧型CX-9からCd値を2%低減した。



(a) Before Upper Design (b) Optimized Upper Design Optimization

Fig. 11 Flow Streamlines around Upper Design

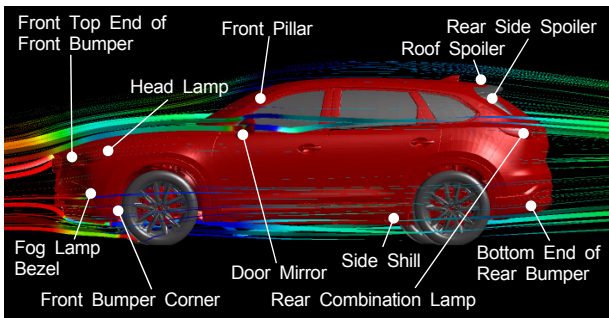


Fig. 12 Aerodynamic Optimization on Upper Body of the New Mazda CX-9

7. 空力騒音の開発

7.1 空力騒音低減のねらい

ここでは、1章で述べた空力騒音低減について紹介する。新型CX-9では、高い車室内静粛性を実現するために、人の感じ方を重視した静粛性を開発のねらいとし“突き抜けた静粛性”を定義し目標を設定した (Fig. 13)。車室内の静粛性について、高速走行時はタイヤ音と風騒音が会話を妨げる音として支配的であるため、風騒音の低減はとても重要である。そこで新型CX-9では、風騒音の音源となる空力騒音の低減に注力して開発した。次節では空力騒音を低減した事例を述べる。

7.2 空力騒音低減技術

車室内の静粛性に寄与する空力騒音の音源は複数あり、その寄与度は距離減衰と透過損失によって変化する (Fig. 14)。そこで、それらを明確にしたところ①ボンネット後端部からワイパー、②Aピラーからルーフ周り、③ドアミラー形状、④B・Cピラーガーニッシュの4か所に注力して開発を進めることとした。まず①のボンネット後端部

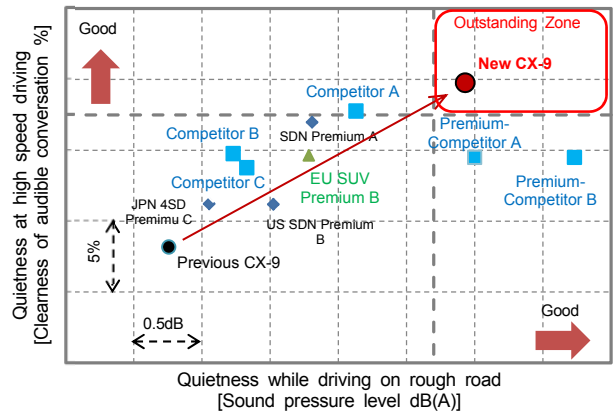


Fig. 13 Quietness Chart

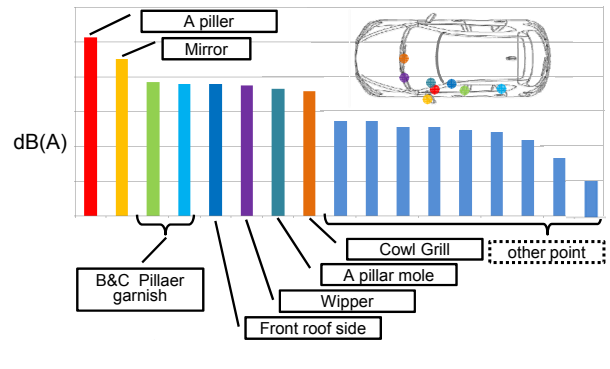


Fig. 14 Sound Pressure Level Transferred from Exterior Regions to the Driver Position

はワイパーへ風が衝突し音が発生するため、衝突による音の発生を抑制すべくワイパーを最適配置した (Fig. 15)。②のAピラーについては、先端で剥離した流れが渦となることで音が発生するため、魂動デザインを損なうことなくAピラー先端部の形状を最適化し、Aピラーとドアサッシュ段差による渦も抑制すべく段差を最小化した。更に、Aピラーとルーフの隙にマツダ車初となるリップ付モールを採用し、段差と隙間による風切音の発生を抑制し、Aピラーからルーフ周りにかけての縦渦発生を抑制した (Fig. 16)。③のドアミラー形状については、ミラーの後流渦により音が発生するため、ミラーヘッド外側からの巻き込み渦の抑制とミラー上下左右での流れの収束をミラー外形のデザイン性を生かしながら最適化した (Fig. 17)。④のB・Cピラーガーニッシュは前後の端部で風の乱れによる音が発生するため、端部断面に角度をつけることで剥離を抑制した。これら各部位ごとの最適化により、フロントウィンドウ周りの空力騒音の音源を旧型CX-9からFig. 18に示すように低減し、高い静粛性の実現に貢献した。

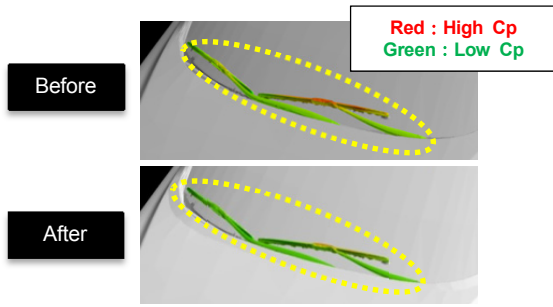


Fig. 15 Surface Pressure around Wiper

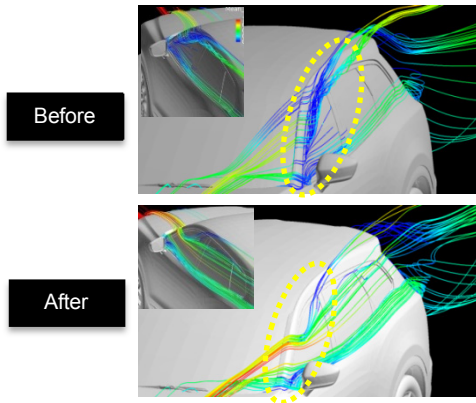


Fig. 16 Flow Streamlines Around Upper Design

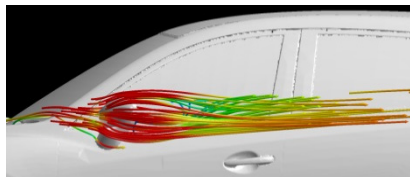
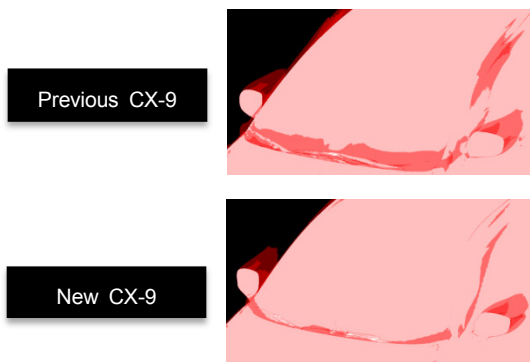


Fig. 17 Flow Streamlines Around Optimized Mirror



Sound source of each part

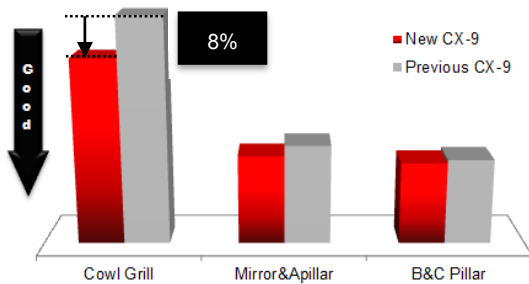


Fig. 18 Aerodynamics Noise CFD Result

8. まとめ

新型CX-9の開発は、デザイナー・設計者と密にコミュニケーションをとりながら共創し、新たな風流れ制御技術を織り込むことで旧型CX-9比11%の大幅な空気抵抗低減と魂動デザインを両立させ、クラストップレベルの空力性能を実現した。また、お客様が“安心／快適”を感じられる卓越した静粛性の実現にも貢献することができた。今後の開発においても飽くなき挑戦を続け、走る歓びと優れた燃費性能、魂動デザインを空力性能によりブレイクスルーさせ、より良い商品をお客様へ届けていきたい。

参考文献

- (1) 中田ほか：新型デミオとCX-3の空力性能開発，マツダ技報，No.32，pp.85-92(2015)
- (2) 木村ほか：SKYACTIV-ボディ，マツダ技報，No.29，pp.61-67 (2011)
- (3) マツダの構造改革とブランド価値の向上に向けた取り組み，MAZDA ANNUAL REPORT，pp.16-27 (2008)

■ 著 者 ■



油目 雅史



中田 章博

特集：新型CX-9

10

新型CX-9のパワーリフトゲート開発 Power Lift Gate System for New CX-9

山内 寛和*¹ 杉島 孝幸*² 佐久間 稔*³
Hirokazu Yamauchi Takayuki Sugishima Minoru Sakuma
石塚 耕三*⁴
Kozo Ishizuka

要 約

新型CX-9のドア・リッド領域開発は「意のままに操作できる／人馬一体の操作フィールをお客様へ提供する」コンセプトで開発を行った。その中でもパワーリフトゲートシステムは第6世代商品群では初採用の技術であり、前モデルから大幅な軽量化を実現しつつ、安心して快適に開閉できるシステムを開発した。本稿ではこれらの達成手段や開発経緯について紹介する。

Summary

For New Model CX-9, the doors and lids were developed with the concept of “Jinba-Ittai operation feeling (oneness between a driver and a car)”. New Power Lift Gate System is adopted for the first time to the 6th generation product, which makes opening and closing operations easier and safer, while achieving 30% lighter weight than the previous model. This paper introduces the development process and achievement measures.

1. はじめに

北米市場を中心にニーズが高く、利便性の高いパワーリフトゲートシステムを新型CX-9にも搭載する。前モデルにもパワーリフトゲートシステムは搭載しているが、当時のユニット開発から10年の時を経ており、今回新型CX-9に搭載したユニットは軽量化／利便性を高次元でバランスさせるため、新しく開発を行った。本稿ではこの開発の内容について紹介する。

2. 開発構想

2.1 軽量化

前モデルのユニットは2006年に量産を行い、2013年に構造を見直すことで、25%の軽量化を実現した。今回搭載する新ユニットはそこから更に30%の軽量化を行うことを目標とした (Fig.1)。

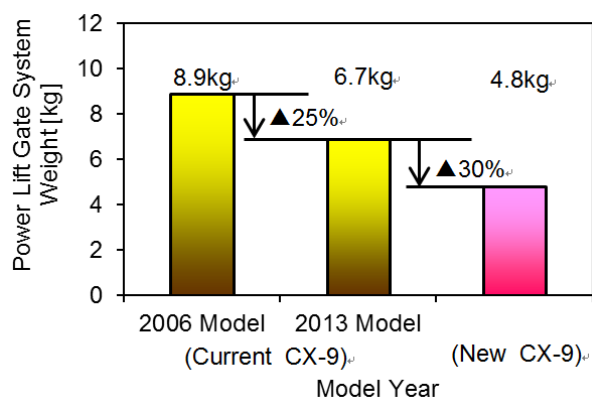


Fig. 1 Relationship between Power Lift-gate System Weight and Model Year

*1~4 ボデー開発部
Body Development Dept

2.2 利便性向上

前モデルから大きく以下の3点に取り組むことで利便性を向上させることを目標とした。

(1) オート開閉速度

リフトゲートをオート作動させる際は、機敏で滑らかな動きを実現するため、特に開度中間域を早め、ボタンを押してリフトゲートが全開するまでの時間を前モデル比25~30%短くすることで使い勝手を向上させる。

(2) 全開開度調整機能

ガレージの高さや操作するお客様の身長によって、リフトゲートの全開位置を任意に調整できる機能を追加することで、お客様の使い勝手に合わせて、快適にリフトゲートを開閉できるようにする。

(3) 荷室収容性拡大

前モデルは荷室内左側に大型モーター&スライダの駆動ユニットを配置し、荷室スペースの一部を圧迫していた。新型CX-9では、駆動ユニットを荷室外に配置することで荷室スペースをより広くし、荷室の使い勝手を向上させる。

2.3 相反性能

(1) 安全性

一般的にリフトゲートの開閉速度を速くすると、お客様や障害物等に当たった際、停止させるまでの荷重が高くなる。安全性は前モデルの挟み込み停止荷重をキープすることを目標とした。

(2) 作動音

開閉速度を速くするため、ユニットのモーター回転数を高くすると、それに比例して作動音圧が高くなる。お客様の耳元に届く位置で違和感のない音とし、音圧は58dB以下とすることを目標とした。

2.4 達成手段

(1) オート開閉速度と安全性の両立

駆動ユニットは左側1箇所から左右に分配し、挟み込みを検知するパルスセンサーも左右に配置することで感度を高め、速度向上と挟み込み停止荷重の両立を実現した。

(2) オート開閉速度と作動音の両立

作動音については作動時間 (Fig.2) と作動音圧が最もバランスするよう減速比を調整し、モーター回転数をコントロールした (Fig.3)。

(3) 開度調整機能と荷室拡大の達成手段

リフトゲートを全開保持する機能を有するステアダンパーと統合させ、開度中間域でもリフトゲートを保持できるようコイルスプリングを内蔵し外観をコンパクトにまとめたことで、室外 (レインレール部) への配置と開度調整機能を可能とした。

(4) 軽量化の達成手段

駆動ユニットの小型化、タッチセンサー取り付けブラケットの材料置換 (鉄⇒樹脂)、ラッチ部品の高張力鋼板採用

による板厚低減により、質量目標4.8kgに対して4.76kgと30%の軽量化目標を達成した。

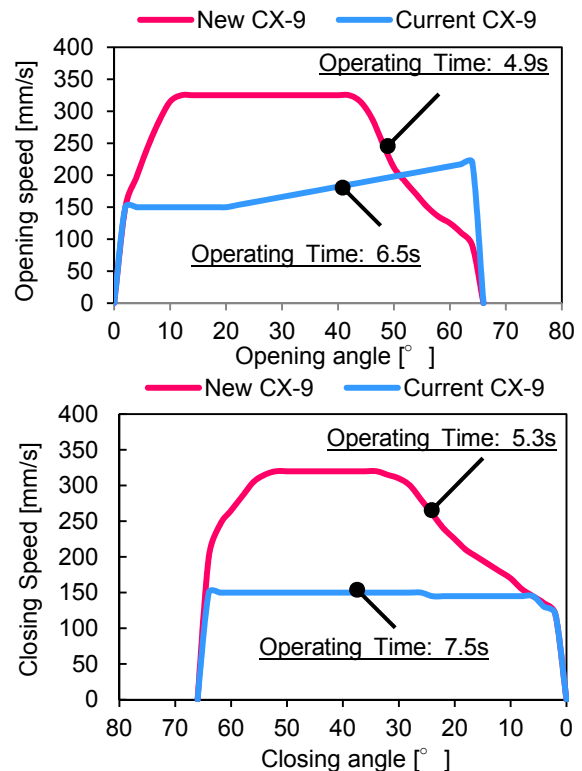


Fig. 2 Relationship between Opening / Closing Speed and Opening / Closing Angle.

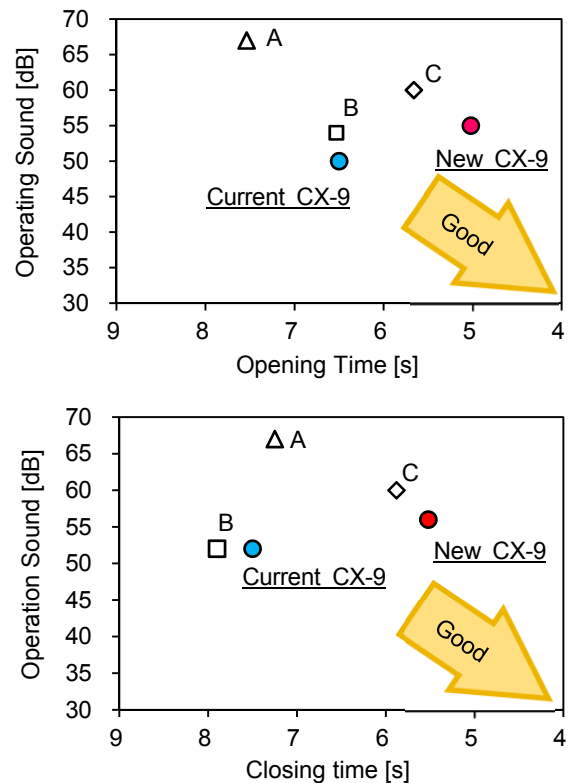


Fig.3 Relationship between Opening / Closing Time and Operation Sound

3. システム構成

上述の軽量化/利便性/安全性を達成させるシナリオから機能配分を行い、システム構成は以下のように設定した (Fig.4)。

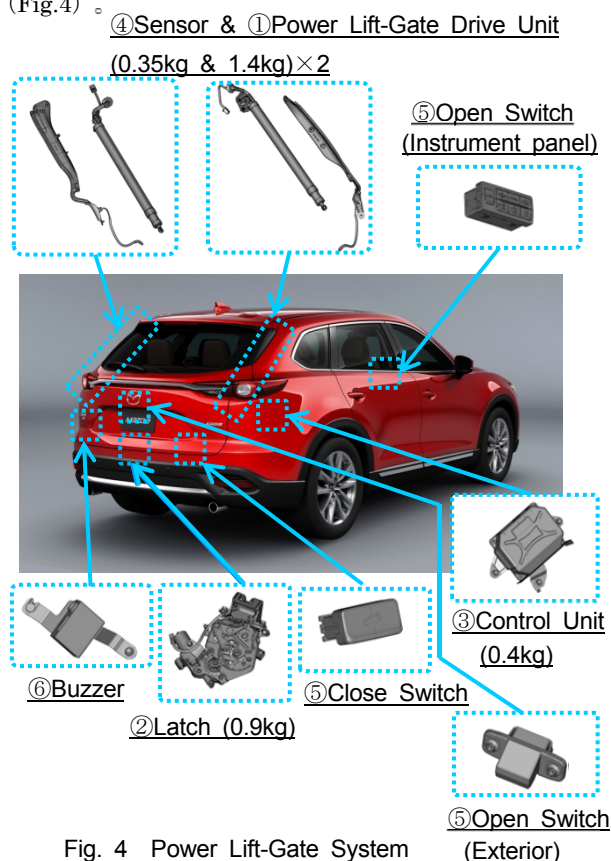


Fig. 4 Power Lift-Gate System

(1) パワーリフトゲート (駆動) ユニット

スクリューとナットで駆動させるスピンドルタイプを採用した。左右に小型モーター&パルスセンサーを内蔵し、リフトゲートをオート開閉作動させる。リフトゲートの全開保持と途中保持のため、コイルスプリングを内蔵させた。

(2) オートクローザー機構付きラッチ

アクチュエーターでリフトゲートのアンラッチとクロージングを行う。また全閉した状態を保持する。

(3) ECU

お客様のボタン操作情報が入力されると、車両停止状態/ドアロック状態を判断し、各ユニットを動かす。またリフトゲート位置をパルスで監視し、障害物等の挟み込み判断を行い、リフトゲートを停止させる。

(4) タッチセンサー

お客様の指や障害物の挟み込みを検知する。パルスの検出では荷重が高くなる部位 (ヒンジ付近~リフトゲートサイド部) に設定した。

(5) 操作スイッチ

以下の4カ所に操作スイッチボタンを設定した。スイッチ操作によりオート作動を開始し、作動中に危険を察知し

た際にどのスイッチを押してもリフトゲートを停止させる。

- a. 運転席
 - b. リモートトランスミッター
 - c. リフトゲートガーニッシュ (室外用)
 - d. リフトゲートリセス (閉め操作用)
- (6) ブザー

作動開始時、停止時にお客様に警報音を伝える。リフトゲート内に配置し、室内/室外で適切な音圧を確保した。

4. 課題の取り組み

4.1 レイアウトと開閉操作性の両立

新型CX-9に装着されるパワーリフトゲートは、オプション選択のため、パワーリフトゲート非装着車とレイアウトを両立させる必要があった。ボディー取り付け構造は共通という制約の中で、取り組んだ内容を説明する。

Fig.5にリフトゲートの開度と開閉操作にかかわるエネルギーの関係を示す。グラフの左端は、リフトゲート全開状態 (Fully Open Condition), 右端は全閉状態 (Fully Close Condition) を表しており、リフトゲートを閉める時に手を放す位置をRelease Point, ステアダンパーの作用の有無が切り替わる位置を思案点 (Change Point) と定義する。

パワーリフトゲート非装着車(ステアダンパー設定)では、閉め操作性を良くするために思案点からの加速エネルギーを多く確保することが重要である。

一方、パワーリフトゲート装着車においては、途中での開度保持を実現させるためには思案点が存在しない特性にする必要がある。

これらを、ユニットのレイアウトで説明すると、開き方向に働くモーメントが操作性にかかわってくるが、ヒンジセンターとのオフセット量Lがポイントとなる (Fig.6)。パワーリフトゲート非装着車ではLを小さくすることで閉め操作力が低減できる。一方、パワーリフトゲート装着車では、車体への入力荷重を下げるためにLを大きく取り、開度保持するための反力モーメントを保持しつつ、ユニットの反力を小さくする必要がある。

パワーリフトゲート装着ありなしでヒンジセンターとのオフセット量Lを変更した結果、アクチュエータ (またはステアダンパー) のピボット位置 (Fig.6) で15mmの差が発生した。そのため、開発当初は、デザイン意匠面に対して、スペース内に収めることができなかった。新型CX-9のデザインは強く前傾し、両サイドが絞り込まれた流線形の特徴を持ち、本部位のレイアウト制約が大きい。デザインを守った上で、性能要件も満足させる解決策として、サイドスポイラー内の使用されていない空間を活用することで、ユニットの生存空間を拡大させ (Fig.7), デザインへの影響を与えずに、性能を満足させることができた。

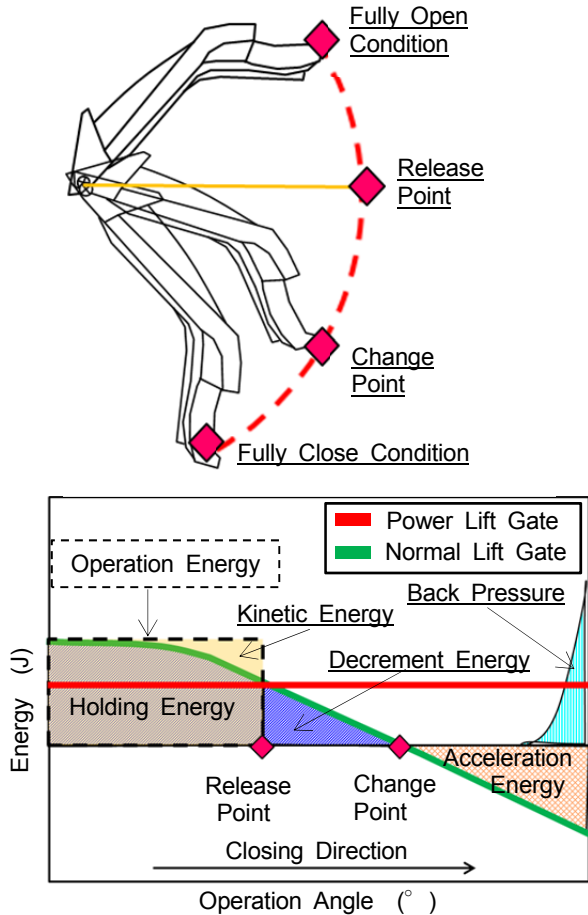


Fig. 5 Operation Force Line

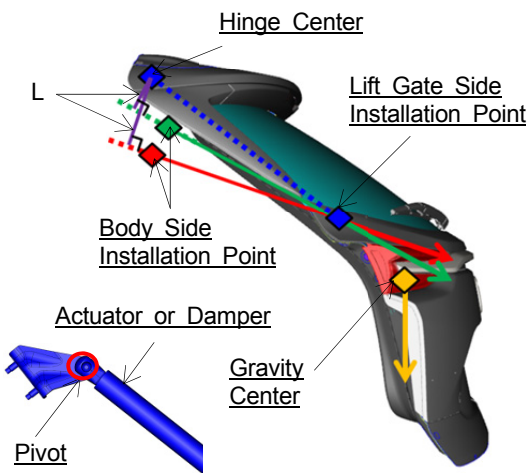


Fig. 6 Moment of Lift Gate

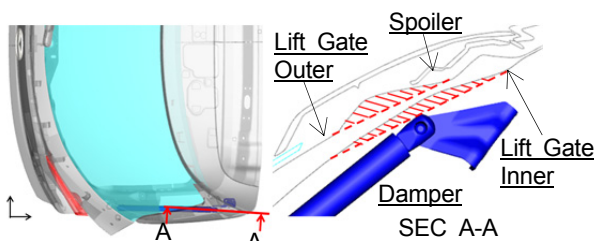


Fig. 7 Balance Design and Gate Operability

5. おわりに

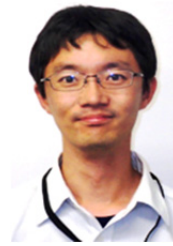
大幅な軽量化を実現し低燃費に貢献し、マツダらしいデザインシルエットも実現した上で、快適に操作できるリフトゲートへ仕上げることができた。お客様に見て触って操作して共感していただけることを期待している。

また本ユニット開発に多大なご協力をいただいた(株)ハイレックス殿に誌面をかりてお礼申し上げます。

■ 著 者 ■



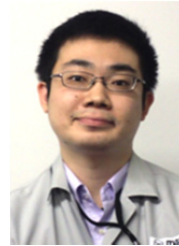
山内 寛和



杉島 孝幸



佐久間 稔



石塚 耕三

特集：新型CX-9

11

新型アクティブドライビングディスプレイの開発 Development of New Active Driving Display

中島 英信*¹
Hidenobu Nakashima

岡田 健治*²
Kenji Okada

谷本 智弘*³
Tomohiro Tanimoto

要約

マツダは、更なる走行安全の確保を目指し、新たな情報表示機器としてアクティブドライビングディスプレイを開発し、市場導入している。アクティブドライビングディスプレイの表示方式としてコンバイナータイプを選択したが、安全情報表示の増加による表示サイズの拡大と更なる視認性と認知性の向上を目指し、遠方上方表示を実現させるためにフロントウィンドウシールドタイプのアクティブドライビングディスプレイを新たに開発した。

Summary

Active Driving Display is a product developed as a vehicle information display device. We selected Combiner type as means of displaying of the Active Driving Display. We aimed at the extension of the display size by the increase of the future safety information display and further visibility and the cognitive improvement and developed the Active Driving Display of the Windshield type newly to realize distant place upper side display.

1. はじめに

2013年に発表した新型アクセラからアクティブドライビングディスプレイを初導入⁽¹⁾し、その後の発売モデルにも順次拡大展開している。アクティブドライビングディスプレイは、不注意運転のリスクの最小化を目指す『ヘッズアップコックピット』コンセプトに基づき、前方注視時の『見るわき見』を最小化するために導入したデバイスである。『刻一刻と変化する、走るための情報』を、前方注視時の有効視野内に投影できるこの技術は、視線移動時間を最小限にするだけでなく、前方道路から表示へ目を移す際の焦点調節負荷も軽減でき、前方の視界を見ながら安全に表示を視認できるため、市場からも高い評価を得ている。

このアクティブドライビングディスプレイは、できるだけ多くのお客様に提供するために、一度開発したユニットを『複数の車種に容易に展開できる』点を重要視し、コンバイナータイプ（以下、Cタイプ）を選択したため、数々の設計制約があった。その結果、理想実現のために求められる表示仕様が一部達成できない仕様も存在した。そこで今回、更に理想に近い表示を実現する手段として、フロン

トウィンドウシールドに投影するタイプ（以下、WSタイプ）のアクティブドライビングディスプレイを新たに開発した（Fig.1）。

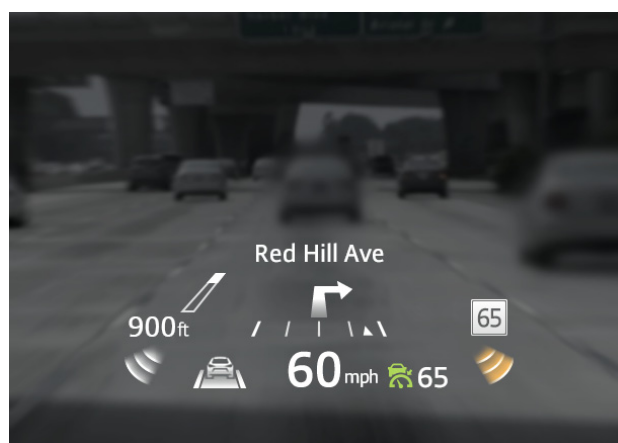


Fig. 1 New Active Driving Display

本稿では、新型アクティブドライビングディスプレイ（WSタイプ）のメカニズムと、従来のCタイプからの進化ポイントについて説明する。

*1~3 電子開発部

Electrical & Electronics Development Dept.

2. WSタイプのメカニズム

まず、光学的な基本メカニズムは従来型Cタイプと同じである。内蔵された光源ディスプレイユニットで作られた実像をミラーで折り返し、ドライバーの前にあるハーフミラーのパネルに反射させることで、そのパネル越しに虚像が映し出される仕組みである。従来型CタイプとWSタイプの概念図をFig.2に示す。

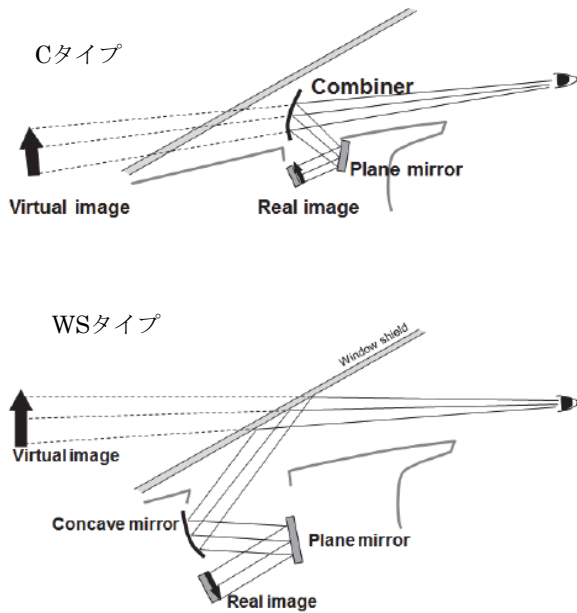


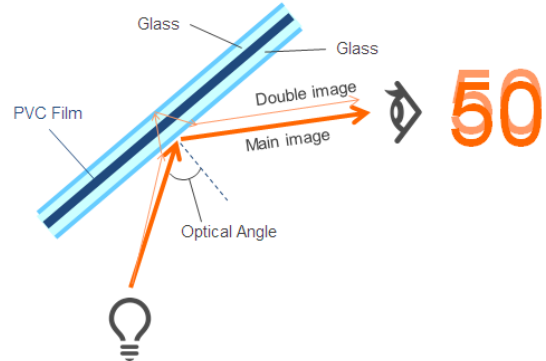
Fig. 2 Mechanism of C-Type & WS-Type

これら2つのタイプの大きな違いは、Cタイプがユニット内蔵のコンバイナーに表示像を投影するのに対し、WSタイプは車両側のWSに表示像を投影する点である。この仕様違いより、WSタイプでは、ウィンドウシールドへ投影するための凹面鏡をアクティブドライビングディスプレイ本体に内蔵する構造となっている。この凹面鏡の機能は、①表示画像の拡大、②表示距離の遠方化、③表示位置の上下移動である。加えて、WSタイプは、ドライバーが見る表示面は複雑な曲率を持ったウィンドウシールド面であるため、この曲面に歪のない表示を出すための表示補正機能も有する。その機能を実現するため、凹面鏡の面形状は、自由曲面としている。

また、表示を投影するウィンドウシールド側も2つの変化点がある。1つが、虚像の表示品位を確保するため、投影面の公差を約1/3に従来、もう1つが、虚像の二重像を解消するためウィンドウシールドの中間膜を楔（くさび）形状にしたことである。表示をそのままウィンドウシールドへ投影してしまうと、Fig.3に示すように投影光がウィンドウシールドの2つの界面で反射し、異なる光路をたどってドライバーの眼に到達することで、虚像が二重に見え

る。よって、表示像が二重にならないように、すなわちドライバーの眼に到達する光路を1つにするように中間膜を楔型にし、2つの界面の反射角を最適設計した。

《Normal Windshield type》



《Wedge Windshield type》

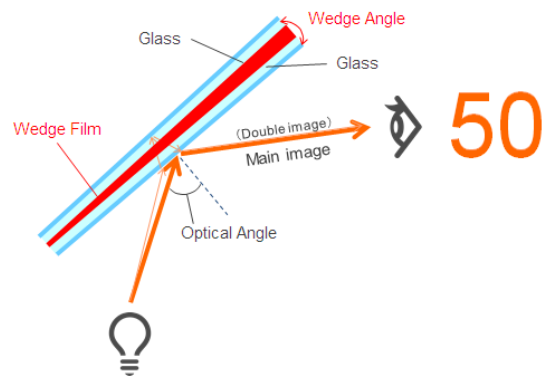


Fig. 3 Mechanism of Double Image

3. 進化のポイント

3.1 見やすさの追求：『見るわき見の最小化』

今回新型WSタイプを開発するにあたり、従来型Cタイプで取り組んだ『焦点調節時間』と『視線移動時間』の最小化を更に進化させ、『見やすさ』を追究した。焦点調節時間を最小化するために表示距離の遠方化、視線移動時間を最小化するために表示位置の上方化を目指した。

また、今回選択したWSタイプはCタイプよりも外部環境からの影響を受けやすい。これまでと同等以上の見やすさを確保するために表示の輝度も最適に再設計した。

(1) 表示距離：表示位置の遠方化

人間特性上、遠方から近傍に視焦点を移動させる場合、近傍側の距離が2m以上であると焦点調整時間が最小化になる。そこで新型WSタイプの表示距離目標値として2m以上であること、かつ虚像表示が前方車に埋没しないことも考慮し、車両ボンネット先端位置付近に表示させることを目指した。その結果、ドライバーの目の位置から2.5m前方に虚像を表示する表示距離要件を定めた。

光学設計上、限られたスペースで視距離を遠方にするためには、ユニット内の光路長に対し凹面鏡の拡大率を上げることが必要である。しかし、拡大率を上げると『表示歪み』の背反事象が発生する。新型WSタイプの光学設計は、凹面鏡の拡大率と表示の歪みを最適に制御し、凹面鏡の拡大率を5.9倍にすることで、表示距離要件2.5mの遠方表示と表示歪みの最小化を実現した。

Visual distance $L1+S' = 2500\text{mm}$
Magnifying power $m = S'/S = 5.9$

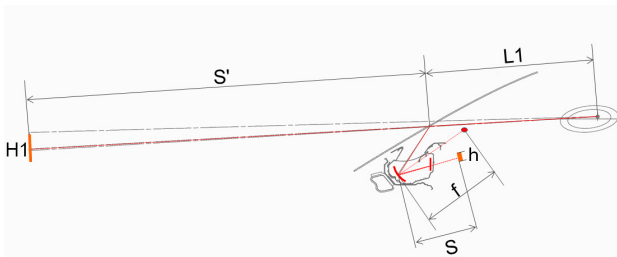


Fig. 4 Actual Light Path of New Active Driving Display

(2) 表示位置（見下ろし角）：表示位置の上方化

運転中の『わき見時間最小化』の進化として、車両前方の視認ポイントから虚像表示を見るまでの視線移動時間の最小化にも取り組んだ。Cタイプではインパネのすぐ上に表示エリアを設定したが、WSタイプでは表示エリアをCタイプより上方に配置し、視線移動時間の最小化を実現した。ただし、表示位置を上方にすれば、①前方視認に対するHUD表示の煩わしさ、②前方車両との表示の重なり等の課題が発生し、これらの課題を克服するために、あらゆる外部環境の変化を想定した誤差因子に対する仮説を立て、実車検証で立証するプロセスを重ね、視認移動時間の最小化と上記2つの課題を克服して最適な表示位置を決定した。

(3) 表示輝度：表示コントラスト比の確保

CタイプとWSタイプのもう1つの大きな違いは『外部環境の変化による表示の見え難さ』である。

Cタイプは透過率50%のコンパイナが緩衝材となり、外部環境の輝度変化の影響も半分になっている。しかしWSタイプにはそれがいないため背景輝度変化の影響をダイレクトに受ける。

そこで、以下に示す2つの進化を採用することで、環境変化に影響されない視認性を確保するための表示コントラスト比を実現した。

(A) 最大表示輝度値の進化（Cタイプ比2.5倍）

WSタイプで必要な輝度を確保するために、Cタイプから大幅な輝度UPを行った。単純に光源本体の輝度を上げると、それに伴って光源の発熱量も比例して増加し、周辺部品へ熱的影響を与えることとなる。加えて、WSタイプはユニット内部へ太陽光が入光しやすく、更なる温度上昇につながる構造である。そこで、今回のWSタイプでは、以下の2つの工夫を実施し、太陽光による温度上昇を抑えながら光源輝度をより効率よくウィンドウシールドへ伝達することで、必要な表示輝度を確保した。工夫点の1つが、平面鏡に“コールドミラー”と呼ばれる、赤外線透過し可視光を反射する光学薄膜を施した鏡を採用し、温度上昇の元となる赤外線の影響を最小化した。もう1つが、凹面鏡サイズを最適化し、太陽光の熱影響を下げる対応を行うとともに、光の偏光成分をコントロールすることで、視認輝度を効率的に確保し光源本体の輝度UPを実現した。

(B) 自動調光制御の進化

自動調光制御は、外部環境の明るさを測定し、それに最適な表示輝度を自動計算し反映する機能である。従来のCタイプでは外部環境照度をアクティブドライビングディスプレイに内蔵したフォトセンサーのみで測定していたが、WSタイプではそのセンサーに加えてレインライトセンサー（以下、RLS）の入力も活用した。内蔵センサーは、レイアウト制約によって虚像位置よりも上方範囲の照度を測定している。よって、走行環境によっては表示背景照度と測定照度に誤差が生じる場合がある。そこで、垂直方向と水平方向の2軸で照度計測を行っているRLSの水平側のセンサー入力値を活用した。内蔵センサーとRLSセンサー（水平方向）の2つのセンサー測定値の関係から表示背景輝度を計算することで、今までよりもさらに精度高い外部環境照度推定を実現した。

また、Cタイプの開発時同様、より確実に視認性を確保できる『自動調光マップ』を作成するために国内外のあらゆる環境で走り込んだ。自動調光マップとは、(a)背景輝度に対する表示輝度設定値、(b)背景輝度変化に対する表示輝度変化スピード値を定義したものである。自動調光マップの作り込みでは、単に視認性を確保することだけではなく、運転中にお客様が違和感や不快感を覚えない点も重視した。

3.2 分かりやすさの追求：『意識のわき見の最小化』

マツダは、意識のわき見を最小化することは、『迷い』を最小化することであると考える。

昨今のセンシング技術やカメラ認識技術に代表される安全技術の進化に伴い、ドライバーが走行中に認知すべき情報は増加の一途をたどっている。運転中にドライバーが扱

う情報が複雑化する状況下にあっても『ドライバーに伝えるべき情報』を取捨選択し、必要な情報だけを、タイムリーに、分かりやすく提示することで、ドライバーの運転中の『迷い』を最小化することを目指した。一つ一つの認知・判断を、迷いなく安心して実行いただくための最適な情報環境を提供することは、お客様の安全を確保する上で非常に重要な意味を持つ。そこでまず、表示するコンテンツ、およびその配置の考え方を再点検した。

(1) 表示コンテンツとその配置

従来のCタイプ開発時から、アクティブドライビングディスプレイに表示するコンテンツは『走行環境に応じて刻一刻と変化する安全に走るための情報』に限定している。

今回、その情報の中身を再考し、以下の2つに大分類した。

- (A) 自車情報：運転判断に必要な自車の情報
(例：現在車速、クルーズ設定車速)
- (B) 走行環境情報：走行中に必要な走行環境の情報
(例：経路誘導、制限速度情報)

この情報分類の考え方に基づいて、今回2つの新たな表示コンセプトを定義した。

表示コンセプト①：実像と情報の対応付け

人間が物事を知覚するときの脳のはたらきに関する『ゲシュタルト心理学』の中心概念である『プレグナンツの法則』の1つに『近接の要因』がある。これは、距離が近いものは離れているものよりも関係が深いと知覚されるというものである。つまり、実際の対象物の近くに表示を対応付ける（近接させる）ことで、各表示の属性や種類を迷わず知覚しやすくなると考えた。

この考え方にに基づき、上述した(A)自車情報は自車の近傍に、(B)走行環境は前方視界の近傍に配置した。結果、Fig.5に示す表示配置とした。また、各エリア内においても、対象物との距離を考慮し各コンテンツの配置を決定している。例えば、制限車速表示位置は各仕向けにおける車両と道路標識の位置関係に着目し、左ハンドル車は画面右に、右ハンドル車は画面左に配置した。



Fig. 5 Concept of Contents Layouts

表示コンセプト②：コンテンツ配置の固定化

従来のCタイプは、限られた表示エリアに、複数の表示コンテンツを各走行シーンに応じた最適表示配置を採用したため、画面内の変化量が大きく、変化する頻度も高かった(Fig.6)。よって、ドライバーはその変化を煩わしく感じることに加え、画面が切り替わる都度、各表示の属性や種類の識別が必要になり、見るわき見、意識のわき見を誘発していた。

今回のWSタイプでは、一貫したコンセプトに基づいて虚像全体の表示パターンを減らすことで情報変化量を低減し、ドライバーが煩わしさを感じないように配慮した。また、虚像投影位置をドライバー正面にしっかり配置し、表示全体を左右対称かつ奥行きを感じられる意匠とすることで、『ドライバーの中心軸』にこだわったコックピットから視認しても、しっかりその軸が形成され、運転視界が安定するようにも配慮した。




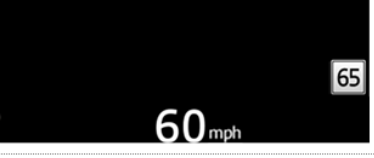

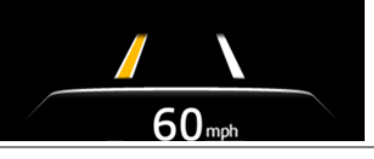
Vehicle Speed	
Navi Guidance	
Active Safety	
Speed Limit Notification	
Emergency	
Warning	

Fig. 6 Contents Sample

来の単色表現ではなく、複数の表示色を用いた色調表現が使用可能になったことを受け、表示配色の考え方を再構築した。なお、この考え方はアクティブドライビングディスプレイだけではなく、他のコックピット表示デバイスも併せた統合的な考え方としている。一定のルールを規定し、一貫性をもって各表示デバイスを実現することも、ドライバーの『迷い』を最小化することにつながる考えた。

① 基本色

従来型のCタイプでは、背景に埋没しにくく視認しやすい表示色として『ブルーホワイト』を選定した。WSタイプでは、上記の考え方に加え、コックピット内の『表示の統一感』も考慮し、基本色を『ホワイト』へ変更した。前者の視認条件については、表示を高輝度とし『輝度差』でコントラストを確保し、要求視認性を達成する考え方としている。

② 警報色

色調表現が使用可能になった最大のメリットは、警告情報や注意喚起情報を『色情報』を付加してドライバーへ伝達可能になった点である。ISO 2575⁽²⁾に定義された『路上走行車-制御装置、インジケーター及び自動表示装置の記号』の考え方とISO 16951⁽³⁾に定義された『複数情報を運転者に提供するための優先順位決定手法』の考え方をもとに、ドライバーへ提示すべき情報を『緊急度』と『重要度』という2つの軸で整理し、情報種別に情報の提示種類を整理し、ルール化した。

(2) 文字と表示のサイズ

文字サイズの設計方針は、基本Cタイプの仕様を踏襲した。人間が見やすいとされる文字サイズはISO⁽³⁾にも記載されていて、推奨値が20~22分となっているが、アクティブドライビングディスプレイの表示では、常に数字が動いている車速はそれよりも大きいサイズで最小24分としている。

今回WSタイプではこの考え方に加えて、煩わしさの低減にも配慮した。運転視界に入る限られたスペースでさまざまな文字情報が表示されると煩わしく感じる。そこでWSタイプでは文字高の種類を3種類に集約し、情報配列に従ってそれぞれの文字高を定義することで表示全体に統一感を持たせ、一つ一つの情報の読みやすさにも配慮した。

(3) 表示色

WSタイプは表示デバイスとしてTFT液晶を採用した。従

4. おわりに

今回新開発したWSタイプのアクティブドライビングディスプレイは、お客様の安全を最優先に考えるヘッズアップコックピットの理想表示を実現するために必須であると考へ、視認性と認知性の向上を軸に具現化した。ただし、マツダとしては、理想実現に向けて更に機能を進化させ続ける必要があると考えている。

アクティブドライビングディスプレイの表示においては、前述したとおり、『視認性/認知性向上』と『煩わしさ低減』は背反関係にある。今後のITSインフラやカメラ認識技術の進化に伴い、安全に走るための情報がより多彩になることが予想される。その情報を『煩わしさを排除した状態で見やすく、分かりやすくドライバーへ伝達すること』がアクティブドライビングディスプレイに課せられた最大の課題だと考えている。

今回の新型アクティブドライビングディスプレイの開発

での経験、および新型CX-9でのお客様の評価フィードバックを得ながら、上記課題解決に向けて、次のステップアップに邁進していく所存である。

参考文献

- (1) 中島英信ほか：アクティブドライビングディスプレイの開発、マツダ技報, No.31, pp.34-37 (2013)
- (2) ISO 2575:2010 : Road vehicles -- Symbols for controls, indicators and tell-tales
- (3) ISO/TS 16951:2004 : Road vehicles -- Ergonomic aspects of transport information and control systems (TICS) -- Procedures for determining priority of on-board messages presented to drivers

■ 著 者 ■



中島 英信



岡田 健治



谷本 智弘

特集：新型CX-9

12

新型CX-9でのボディー寸法精度育成技術の開発 Development of Virtual Dimensions Precision Control Technology

島田 知広*¹ 高橋 大樹*² 岡田 又治*³
Tomohiro Shimada Daiki Takahashi Mataharu Okada

要 約

車体技術部では、軽量・高強度ボディーを実現するため、精度・成形難度の高い高張力鋼板の生産技術開発に取り組み続けている。新型CX-9のボディーを構成する高張力鋼板の使用率は62%となり、精度品質の造り込みがより難しくなることが予測された。そこで、プレス部品から車体アッセンブリー領域までをCAEでつなぎ、量産準備を実機と机上で効率よく行う精度造り込み技術の開発を行った。この技術では車体アッセンブリー精度を計算できるシミュレーションが不可欠で、実機での検証結果とシミュレーション結果を比較しながらシミュレーションの精度を向上する必要があった。このシミュレーション開発とCX-9で行ったボディー寸法精度の造り込みをプレス領域から工程を追って紹介する。

Summary

We continue wrestling for the production engineering development of the high tension steel sheet having high precision, molding relative difficulty to realize light weight, a high strength body in the we bodies technology. The high tension steel sheet (more than 590MPa) utilization of new CX-9 became 62%, and it was predicted that a finish of the precision quality became difficult more. Therefore I connected the body assembly domain from press parts in CAE and developed the precision finish technique to perform mass production preparations efficiently at an actual machine and on desk. The simulation that could calculate body assembly precision was indispensable in this technique, and it was necessary to improve precision of the simulation while comparing the simulation result with the inspection result with the actual machine. I chase a process from the press domain and introduce a finish of the body dimensions precision that reached in this simulation development and CX-9.

1. はじめに

クルマでまず目に留まるのがデザインであり、マツダは魂動デザインと称して、今にも動き出しそうな生命感や日本の美を形にしている。同時に、ボディーは走りと安全性を実現する骨格でもある。走る、曲がる、止まるといった基本性能はもちろん、安全性能、軽量化においても、ボディー構造が重要となる。これらの性能をねらいどおり実現するためには、ボディー骨格の精度やエンジンやシャシー、サスペンションの取り付け位置精度を保証することが不可欠である。近年、地球環境や安全性に対する要求が高まっており、それを実現するためには、高強度・高剛性と軽量化を両立したボディーにしなければならない。年々高まるこれらすべての期待に応えるために、寸法精度育成技術の開発に取り組んだ。本稿では、車両性能を最大限引き

出すために、ボディー構造と造り方の追及による技術開発を紹介する (Fig. 1)。

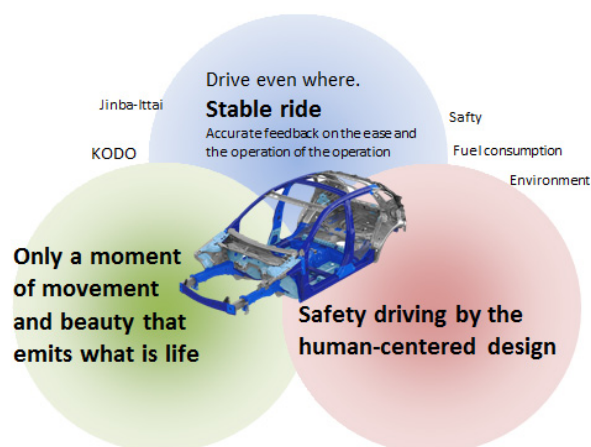


Fig. 1 Vehicle Performance of Body

*1~3 車体技術部 Body Production Engineering Dept.

2. 車両性能とボディー精度保証

2.1 車両性能とボディー精度のつながり

ボディーが実現すべき3大性能は、操縦安定性、衝突安全性、NVH性能である。これらの性能に加え、外板パネルの面品質と寸法精度は、ダイレクトにデザイン意匠に影響する。これらの車両性能とデザインは、寸分の狂いもないボディー精度の良さがないと成立しない。ボディーを構成するプレス部品一つ一つの精度と、それらを接合する車体アッセンブリー精度が重要で、接合時の応力、自重からくる変形を最小限に抑えるように、寸法精度を造り込んでいく必要がある。

2.2 ボディー精度保証プロセスの進化

従来のプロセスでは、プレス部品・車体アッセンブリーそれぞれでの並列育成及びゲート管理を実施し、CAEも活用するが実パネルの精度に応じた修正ありきの品質の造り込みを行ってきた。今回のプロセスでは、従来よりも早い工程設計段階からCAE技術を活用し、プレス部品、車体アッセンブリーをそれぞれ並列育成することに加え、ボディー領域全体としてつながりを持たせ、相互補完しながらねらいの寸法精度を実現していくプロセスとした (Fig. 2)。

このプロセスに沿って、3章で「プレス部品のCAE精度向上」、4章で「接合部のすり合わせ精度向上」、5章で「車体アッセンブリー精度向上」について述べる。

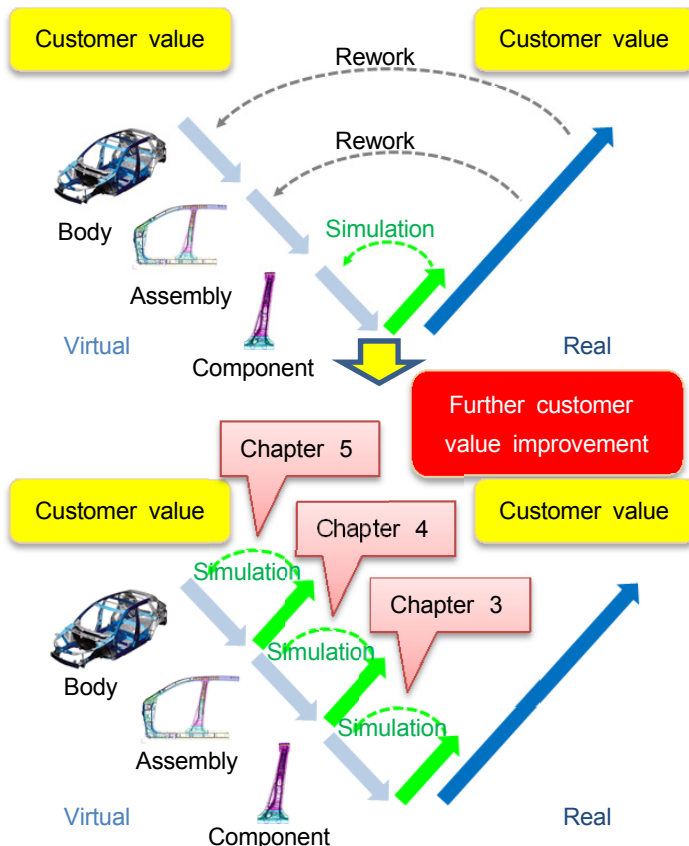


Fig. 2 Dimensional Control Process

3. プレス部品のCAE精度向上

3.1 CAE検証における寸法精度保証に対する課題

ボディーへの高張力鋼板の適用において、軟鋼板と比較した場合の一般的なプレス成形上の課題は、延性の低下による割れやしわなどの成形性の劣化にはじまり、降伏応力が高いことでスプリングバック量の増大に伴う寸法精度悪化、また材料硬度による金型の成形面における耐摩耗性低下などがある。なかでも寸法精度の悪化については、アッセンブリー時の溶接組立工程において接合面に隙間が生じ、外観に対する品質や衝突性能の低下などボディー全体に影響を及ぼしかねない点で重要な課題として捉えている。

スプリングバックは弾性変形によるものと仮定し、その量を板曲げ半径Rにおける曲げ角 θ_0 とその戻り量 $\Delta\theta$ で表すと、弾塑性力学計算によりヤング率E、降伏応力 σ 、板厚tでは次式になる⁽¹⁾。

$$\text{スプリングバック量} = \frac{\Delta\theta}{\theta_0} \approx 3 \left(\frac{\sigma}{E} \right) \left(\frac{R}{t} \right)$$

この式から高張力化と薄肉化の併用により軽量化を図ろうとすると、スプリングバック量は総じて増大する方向に変化することがわかる (Fig. 3)。

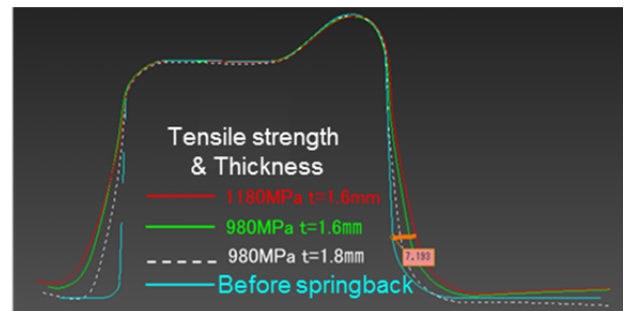


Fig. 3 After Springback Shapes

高張力鋼板におけるCAE検証時の課題についても、軟鋼板と比較して割れやしわなどの成形性に対する検証回数は増加し、それ以上にスプリングバックに対する寸法精度の保証に多くのリソースを要する。例えば、スプリングバックの量や範囲をあらかじめ方案面に織り込むことで対処する見込み形状を作成し、スプリングバックの低減を確認する検証サイクルが新たに加わるなどである。

そして、引張強さの増大は更なる検証の繰り返しや対策立案の検討工数の増加を招く。成形性よりも寸法精度に対する検証回数、対策工具形状作成工数の比率が大幅に増大するとともに、成形性を確保した後も見込みによる工具形状変更などにより、寸法精度の対策確認とともに成形性の再確認のための検証が上積みされる。また、スプリングバック量の増大に比例して、CAE検証結果と実パネルとの一致度もバラツキが大きくなる。

3.2 工法、見込みによる寸法精度への対策

高張力鋼板のスプリングバック対策には主に以下の3つ

が考えられる。

- ① 工法による曲げモーメントの低減
- ② 製品形状の変更による形状凍結性の向上
- ③ 方案形状への見込みによる織り込み

当初、軟鋼板から高張力鋼板の材料置換に対してはこれまでの経験則をもとに主に②による対策が取られてきたが、高張力化に伴い、①や③による対策を拡大してきた。例えば工法では、主に成形工程を2つに分け、初工程で浅く成形したのち、次工程で正規位置まで成形する方法を用いている^②。この意図は、

- (1) 寸法精度に対して

初めに浅く成形することで、与歪量変化を低減し寸法精度のバラツキを抑制する。また、残りを折り曲げ成形することで、壁そりの発生や寸法精度変化を低減させる。

- (2) 成形性に対して

割れ懸念箇所などにオーバードローを設置でき、成形余裕を確保しやすくする。また、しわについては二つの工程で成形量のバランスをとりながら発生の低減を図る。

- (3) 生産性に対して

成形荷重と材料の流入量を低減することで金型への負荷を下げ、型かじりの発生を防ぐ。また、成形方向と同じ方向でトリム加工が行えるようにすることで、トリム型の負荷軽減と製品端精度の向上を図る。これらをCAEによる検証を進め工法の最適化を行い、実型の製作を行う取り組みを進めてきた。また、見込みについては、CAE解析結果より妥当性の高い見込み情報を導出しシームレスに見込み形状を作成する検証要領を確立した^③。これは、スプリングバックの原因となる離型前の残留応力を用い、この応力のベクトルを反転しスプリングフォワード情報を算出しこれを見込み量に用いる。また、複数の曲面で構成される工具形状を大域変形技術の適用によりトポロジーを変更することなく、滑らかにかつ見込み量を正確に織り込んだ見込み形状の作成を実現し、寸法精度検証期間の短縮を実現した。

しかし、更なる引張強さの高張力鋼板を適用するとなると、スプリングバックの絶対量や材料特性のバラツキがより大きくなることから、対処療法的な①や③の取り組みの延長線上では限界が見えてきた。そこで、今一度②の視点に立ち返り、製品形状が持つ本来の機能に併せて形状凍結性を向上する機能を備えることで、スプリングバックの発生を低減させる点に着目した。

3.3 形状凍結性向上の取り組み

新たな着目点は経験則のみに沿った製品形状変更による検証の繰り返しではなく、離型前の残留応力の分布状態を解析することでスプリングバックの発生要因を特定し、各要因に応じた形状凍結性を向上する形状付与や変更による確認検証を繰り返すことで寸法精度のスパイラルアップを図る点にある。

この検証の大まかな流れは以下のとおりである。

- ① 最初にスプリングバックの状態を大別し、最も製品形状全体に影響を及ぼしている状態、多くの場合は稜線そりやねじれなどに着目し、応力の分布状態を確認する。
- ② パネルの応力を引張は符号+、圧縮は符号-によりカラーマップを用いて表現し分布状態を確認する。しかし、製品全体の複雑な応力状態のままから、着目した状態との関連性のある個所を即座に見出すのは難しく、大抵の場合は検証領域の絞り込みを行う。
- ③ 例えば、稜線そりの場合は稜線方向に形状全体を数分割し、各分割領域の応力をゼロにしてスプリングバックの計算を行う。各結果での稜線そりの状態を確認し最も変化が大きい領域を関連性が高いと想定し該当領域内で更に詳細に応力の分布状態を確認する。
- ④ ある程度領域が狭められてからの要因応力の特定では、応力の存在有無のみならず、引張応力と圧縮応力の位置関係や大きさによるバランス、成形過程での応力発生の様子などを勘案する。これらの手順により検証を進め、スプリングバックの状態と関連する応力の存在箇所や状態を明らかにし、対策に向けた形状や工法を検討する。この検証要領を適用した部品Bピラーインナーでは、主に稜線そりのスプリングバック量を検証着手前から70.4%低減することができた (Fig. 4)。

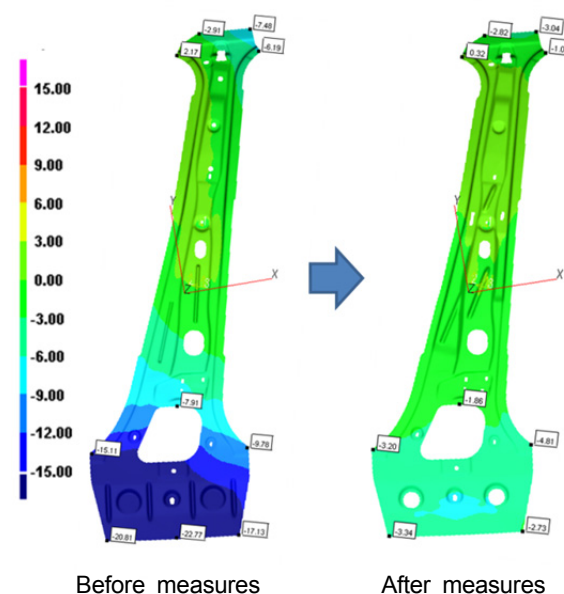


Fig.4 Amount of Springback

また、この検証要領の適用により事前検証期間の短縮も実現することができた。従来は事前検証期間の終末期に見込みによるCAE解析を繰り返し、部品によっては検証期間の延長が必要であったが、形状凍結性向上による寸法精度保証を事前検証期間の前半部分に収束させることで、最終的な補正量を小さくし、補正形状作成工数や検証回数を低減することができた (Fig. 5)。

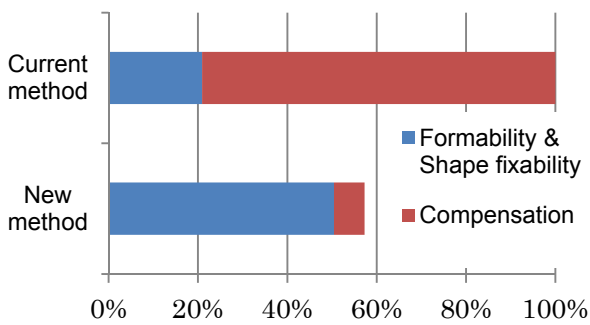


Fig. 5 Rate of Modeling Hour Rate

4. 接合部のすり合わせ精度向上

4.1 接合部のすり合わせが必要な理由

3章で紹介した製品形状による形状凍結向上の後、CAE解析によるスプリング量に応じた見込みを金型形状に入れていく。この寸法精度の最終補正段階においてはプレス部品の精度を設計公差内に入れるのと同時に、複数の部品にまたがる接合部のすり合わせを行う必要がある。ボディーは多数のプレス部品が複雑な接合部で組み合わされて構成されており、ここで述べる「すり合わせ」とは、接合部の各部品の部品素性に合わせて0.1mm単位での接合面精度の調整を行い、高精度なボディーを短期間で造り込む方法である。複数部品の連続した面からなる接合隙を0にするには2つの方法がある。1つは全部品をゼロねらいの図面寸法に保証する方法である。この手法はプレス部品の加工後の弾性回復による変形・加工のバラツキを考慮するとコスト・納期の面から考えても現実的ではない。そこで、次で紹介する接合部のすり合わせを行うことで、効率的にボディーに要求される0.1mm単位の精度を造り込んでいる。

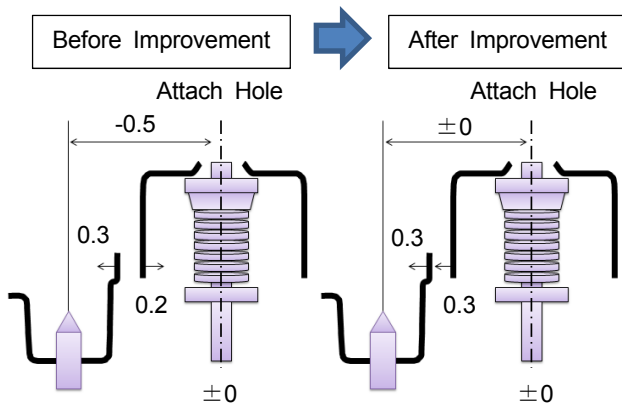


Fig. 6 Adjustment of Dimensional Accuracy

すり合わせのイメージをつかむために、走りに大きく影響を与えるボディーとサスペンションの相対位置を例にとってFig. 6で説明する。ボディーのサスペンションの取り付け穴がプレス単品で±0の穴位置できていたとする。プラットフォームを構成する部品を成り行きでアッセンブ

リーしていくと、接合面の影響によりサスペンション取り付け穴位置が実車のセンター位置からピッチで0.5のズレが発生してしまう。最高の走りのパフォーマンスを發揮できる取り付けピッチが±0だとすると、このズレが最小になるよう片方の接合面精度を凍結し、もう一方の接合面を相手精度に合わせて修正を行い、サスアライメントとして中心値をねらったピンポイントの造り込みを行う手法が「すり合わせ」である。

4.2 CAEを活用したすり合わせプロセスの革新

従来、接合部のすり合わせは、PCF (Parts Coordinate Fixture)と呼ばれるハードツールと実パネルを用いて行ってきた。PCFは車体工程での溶接による精度変化や車体アッセンブリー治具の工程起因による精度変化の要素を排除し、プレス部品精度と車体工程を並行して育成するためのツールである。従来のプロセスでは、このPCFを用いた実パネル検証により接合部の板間隙・干渉量を抽出し、部品の修正量を決定後、金型修正の対策を織り込んできた。しかしながら、現物ができてしまった後の対策はスプリングバック量を金型で見込むトライ&エラーの対策となっており、金型修正によるコスト増加・精度造り込み期間の長期化の要因となっている。そのため、新プロセスではプレス部品のCAE結果を用いて接合部の隙・干渉量を机上で予測することで、ボディーの精度を保証できる成形方案や製品図面への源流対策に結び付けることを目的としている (Fig. 7)。

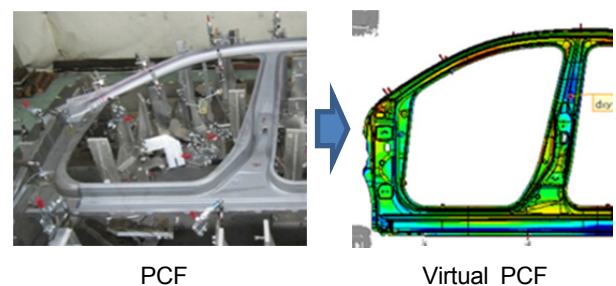


Fig. 7 Parts Coordinate Fixture

4.3 机上での品質造り込み課題と取り組み

机上で接合部のすり合わせを行う上での課題は大きく2つある。1つ目は、CAEによるプレス部品の机上予測精度の向上である。これについては、前述の3.3 形状凍結性を向上する取り組みで紹介した。2つ目は、CAEによるアッセンブリー時の位置決めと拘束状態 (クランプ状態) の再現である。従来はプレス部品単品の育成目的で使われていたスプリングバック後のCAEデータを使って、車体溶接前のクランプ状態を机上で再現することに取り組んだ。この検証の大まかな流れは以下のとおりである。

① CAEでスプリングバックさせたデータを、アッセンブリー時の部品位置決め主基準の2つの穴と3つの面で位置

決めを行う。

② 次にスプリングバックの矯正や自重ダレを補助する基準面を、図面上の正規位置になるよう解析ソフトで変形解析を実施する。

このクランプシミュレーションの確からしさを確認するため、実パネルを用いてCAEクランプ状態と検査具クランプ状態の一致度を確認する実験を行った。実パネルで①の状態を検査具上で作り、非接触測定器で実パネルの3Dデータ化を行った。このデータを②の状態になるようにCAEと検査具でクランプを行い、それぞれの寸法精度の差異を確認した(Fig. 8)。

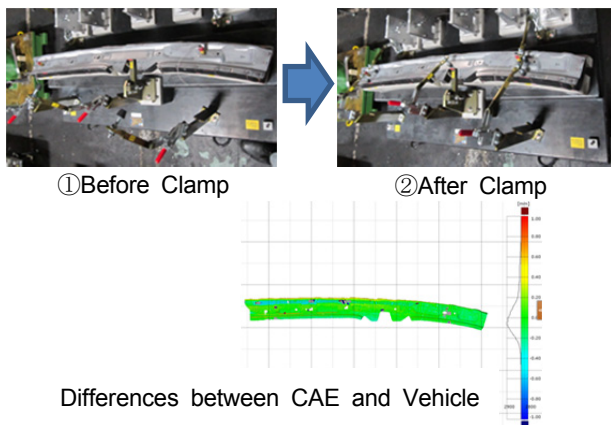


Fig. 8 Clamp Simulation

カラーレンジは緑色が0近傍を示しており、CAEと実パネルのクランプ状態の寸法精度の差異を $\pm 0.3\text{mm}$ 以下に収めることができた。この取り組みによりアッセンブリー時の拘束状態をCAEで再現することが可能となった。この検証要領を適用したBピラーレイン部の机上と実車の接合部の隙・干渉量をFig. 9に示す。机上と実車の隙・干渉量の一致度(接合部の机上と実車の差異が $\pm 1.0\text{mm}$ の中に入る率)は87.5%となり、机上で隙・干渉量の予測ができるようになってきた。

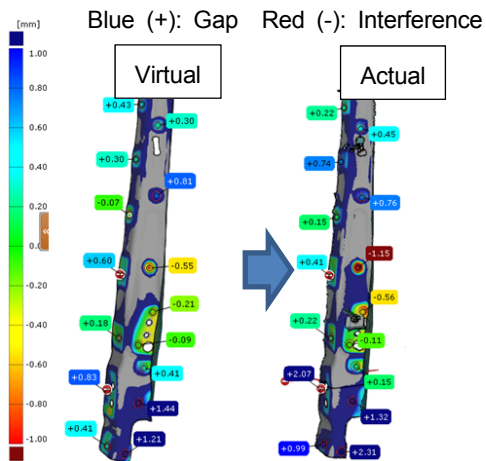


Fig. 9 Gap and Interference between Panels

4.4 すり合わせプロセスの今後に向けた取り組み

今回の取り組みは、ボディー骨格として最重要となる高張力鋼板の部品を主体で取り組んだ。今後は、外板部品や軟鋼板部品へ取り組みを拡大することで車両性能とデザインのお客様価値向上に貢献していく。

新プロセスの活用により実車を介さず机上で部品精度の造り込みが可能となりつつある。これまでは、主にモノができた後に部品精度の造り込みを行ってきたが、この活動により実車では机上結果の確認のみとする部品精度育成プロセスに進化させていく。

5. 車体アッセンブリー精度向上

更なる精度向上のためには、各要素においてアッセンブリー工程で起きている現象を正しくつかみCAEモデルに再現する必要がある。部品については、これまで述べてきたので本章ではアッセンブリー工程について以下に紹介する。

5.1 車体アッセンブリー工程での精度予測技術

車体の溶接工程は、複数のプレス部品同士を接合するサブアッセンブリー工程から始まり、サブアッセンブリー同士を接合しボディーを形づくるボディーシェルアッセンブリー工程等、約50超の工程でつながっている (Fig. 10)。

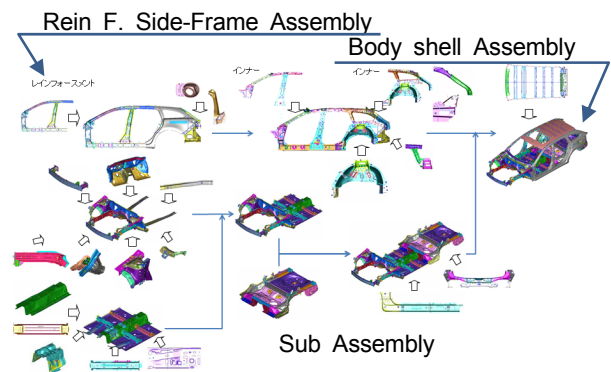


Fig. 10 Line of Body Assembly

初工程の溶接加工前は、各々のプレス部品はまだ閉断面を形成しておらず、自重だけでも変形するため、自剛性と重力の向き、打点位置を加味してプレス部品を保持する必要がある。また、スポット溶接は鉄の溶解凝固における応力を最小にした溶接方法だが、それでも多少の引張応力が生じるため、応力の向きと影響に打ち勝つように、拘束力と打点順序を決定しなければならない。これらをCAEで解析するため、まず、プレス部品の自重撓みを変形解析で明らかにし、保持位置を最適化してきた。この解析をサブアッセンブリーへ応用することで、0.1mm単位での接合面撓みが部位ごとに解析できるようになり、各工程での精度予測を向上させることができる。次に、溶接による熱応力の解析を加え、必要保持力を導けるようにして、スポ

ット溶接による接合部の変形解析に展開している。CX-9ではドアの取り付け面であるヒンジ面の構造がこれまでと異なるため、4つのヒンジ面精度をつかさどるサイドフレームレインFアッセンブリーを重点管理部品として、精度予測技術向上に取り組んだ。

5.2 治具モデル化の取り組み

従来、CAEモデル上では、効率を重視し複数の打点を同時に発生させており、打点順番を考慮していなかった。

今回計算速度を改善させることで、打点1点1点に順番をつけ、打点ごとの応力による変形がわかるようにした。更に、保持面もモデル化することで、溶接時の必要保持力も計算できるようにした。具体的には、従来、治具保持面附近のノード自体を4点拘束する方法を取っていたが、この方法では保持面内の変形が再現できない。そこで、保持面の3Dモデルを作成し、プレス部品との境界に条件を与え微小な変形やクランプと受け面によって生じる保持力をより詳細に表現できるようにした。

5.3 CAE精度向上の取り組みと結果

こうして作成したCAE手法を、実機と比較検証し、解析精度の向上に努めた。1点1点溶接するごとに非接触の三次元形状測定器で全体形状を計測、打点毎の精度変化を把握した。そして実機での測定結果とCAE結果を比較し、解析方法を見直していった。結果、精度を決定する影響因子として、プレス部品の精度、接合による応力、打点位置、治具の拘束力、部品の剛性等を、解析条件に反映させることにより、サブアッセンブリーの机上予測精度と実機精度の一致度において、これまでは0.7mm以内のところ0.3mm以内を実現した (Fig. 11)。

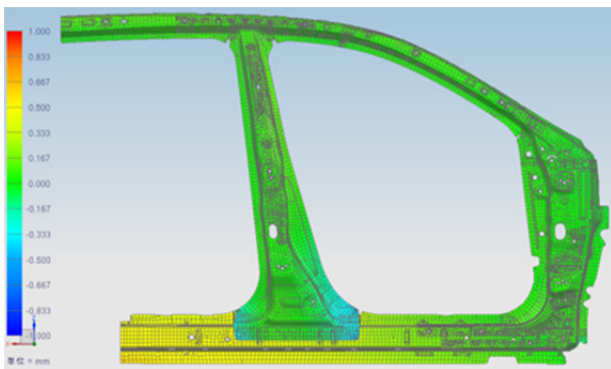


Fig. 11 Result of CAE

5.4 CX-9での成果と今後の課題

この手法を他のアッセンブリー工程へ展開することで、CX-9の初期精度向上に貢献した。まだ車体全体の精度解析ができるようにはなっていないが、プレス部品のメッシュの貼り方、解析方法、閾値等結果の判断を見直すことで、計算時間を短縮し、業務プロセスとリンクさせる。

6. おわりに

今後は、開発した寸法精度予測技術をもとに、寸法精度をコントロール可能な技術に発展させ、デザインや三大性能上最適な寸法精度をピンポイントでねらえるクルマづくりを実施していく。数々の技術革新から生まれた新型CX-9を早くお客様にお届けし、お客様の声に耳を傾けながら次世代のクルマづくりを日々進化させることで、世界中にいるマツダを愛してくださるお客様の笑顔へつなげることを目指していく。

参考文献

- (1) 吉田総仁：弾塑性力学の基礎／第9章，共立出版（1997）
- (2) 田丸ほか：980MPa級ハイテン部品の成形性改善と寸法精度の向上を両立させる新工法，型技術，Vol.28, pp.18-19（2013）
- (3) 岡田ほか：高ハイテン部品における見込み・事前検証—金型への転写に関する取組み事例—，型技術，Vol.29, pp.70-71（2014）
- (4) 中野ほか：新型アクセラにおけるボディー造り革新デザインを際立たせるクルマ造り，2013年マツダ技報，pp.41-42（2013）

■著者■



島田 知広



高橋 大樹



岡田 又治

論文・解説

13

車両腐食環境の定量化技術と解析手法の開発 Technology Development of the Vehicle Corrosion Environment Quantification and Analysis Method

福田 克弘*¹ 落岩 克哉*² 園田 賢司*³
Katsuhiko Fukuda Katsuya Ochiwa Kenji Sonoda
山根 貴和*⁴
Takakazu Yamane

要 約

近年の自動車開発においては、車体の軽量化と高剛性の両立のための新金属材料や、電子制御デバイスの増加により腐食評価が必要な部品点数は大幅に増加している。自動車は移動体であるため世界中のさまざまな環境で使用される。このような状況下で個々の部品に対し、確実にねらいの防錆性能を発揮できるようにするには、従来の特定市場を想定した実車促進腐食試験だけでなく、車両がさらされる腐食環境をコンピュータ上で再現できる「市場環境モデル」を柱とするモデルベース開発の適用が有効である。そこで腐食環境を定量化するため、腐食センサーの出力と環境因子を一括で記録可能な計測システムを構築した。市場の融雪塩散布地域や海塩地域で使用される車両に、このシステムを搭載して計測し、市場の腐食環境を正確にとらえるデータ解析方法を開発した。更に、開発した計測システムとデータ解析方法を車種開発に反映していく活動を行ったので、これらの取り組みについて紹介する。

Summary

In recent automobile development, the number of parts which require corrosion evaluation has been significantly increased due to an increase of new metal material or electronic control device to achieve both weight reduction and high rigidity of a vehicle body at the same time. Automobiles, moving objects, are used in different environments all over the world. Under the circumstances, not only accelerated corrosion test on-vehicle in the conventional particular market, but also adoption of model-based development focused on “market environment model” to reproduce corrosion environment to which vehicles are exposed on a computer are effective to certainly exhibit aimed anti-corrosion performance. We have built a measuring system which enables batch recording of corrosion sensor output and environmental factors to quantify corrosion environment. We have also developed a data analysis method to obtain corrosion environment in the market precisely by mounting that system to the vehicle used in area in which snow-melting salt is scattered or areas which are exposed to sea salt. Additionally, we have engaged in activities to reflect the measuring system and the data analysis method we developed to model development. In this paper, those activities are introduced.

1. はじめに

自動車は移動体であり、さまざまな天候や気温変化にさらされるため、車両周辺の腐食環境は時々刻々に変動する。しかも部品の構成や形状の複雑さから腐食条件が多岐にわたり、かつ複雑に絡み合うため、部位によって腐食環境は大きく異なる。海水がかかる島嶼地域や冬季の融雪塩の散布が多い豪雪地域など、世界中のどのシーンで使用されても全ての部品がねらいの防錆性能を発揮できるようにする

には、従来の特定市場を想定した実車促進腐食試験だけでなく、地域の特徴を網羅した「市場環境モデル」と、それを柱とする腐食モデルベースを適用した車種開発が有効と考えた。「市場環境モデル」を構築するためには、市場において移動中の自動車の必要な各部位の腐食環境を同時に測定できる計測システムの開発が必須である。

この課題の解決策として、橋梁や建造物の固定体の腐食環境を測定するツールとして幅広い分野で活用されているACMセンサー (Atmospheric Corrosion Monitor Sensor)

*1~4 車両開発本部
Vehicle Development Div.

と呼ばれる、鉄の化学反応によって生じる電流をとらえることができる腐食センサーを用いた計測システムを構築した。本報では、自動車用の計測システム構成と得られたデータの解析手法および「市場環境モデル」への適用について報告する。

2. 車載型腐食環境計測システムの構築

2.1 腐食環境計測に対する取り組みの考え方

これまでの防錆開発は、特定の市場を想定した車両腐食を短時間で再現させる促進腐食試験を実車でを行い、実際に発生した腐食に対して定性的な評価結果により良否判断を行っていた。また実車評価の場合、ボディー形状やパートレインのラインナップを全て網羅することが難しく代表的な機種で評価を代用することがある。今後は軽量化のための新規材料の採用が拡大する見込みであり、腐食挙動が異なる複数の材料や仕様に対し、正確な防錆性能評価を行うためのプロセス開発が不可欠である。図面段階で市場の腐食環境に耐える防錆仕様を決定するには、世界の各地域の腐食環境と車両の各部位が受ける腐食環境条件を数値でとらえることができる自動車用の腐食環境システムを構築し仕様決定のプロセスを開発の初期段階に前倒しするモデルベース開発の適用が有効である (Fig. 1)。

腐食環境計測システムに使用するセンサーは、自動車の複数の箇所でも長期の計測が可能であることが条件となる。そのため下記の要件を満たしているACMセンサーを選定した。

- ・薄型／小型で車両への設置性が優れる
- ・車体への固定が容易である
- ・入手性が優れる
- ・ランニングコストに優れる

Battery

ACMセンサーを用いることで、腐食環境は電荷量での定量化が可能となる。更に、このデータと各地域における気象データ (温度/湿度など) との関係を確認することで、気象データから各地域の腐食レベル予測が可能になると考えた。これに走行エリアが分かるGPS、走行条件が分かるCAN信号 (Controller Area Network : 車載通信規格) を同時記録するためにTable 1に示す項目の計測を

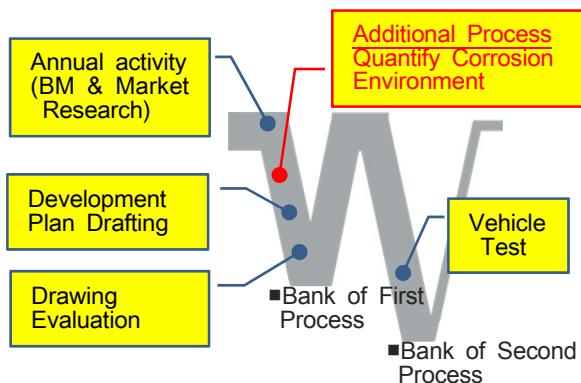


Fig. 1 V Process of the Rust Prevention Development

Table 1 Components of On-board System

Monitoring Items	Purpose
ACM Sensor	Corrosion Speed (Multi Channel)
GPS Signal	Environmental Condition
Onboard Camera	Weather / Road Condition
Temp/Hum Sensor	Condensation / Deliquescence
CAN Signal	Driving Cndition

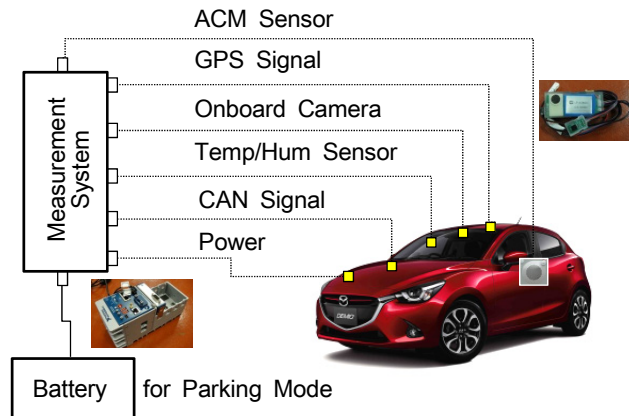


Fig. 2 Corrosion Environmental Measurement System

前提にシステムを構築した。また腐食は、走行中だけでなく、駐車中も進行するため、エンジン停止後も連続して計測することが必要である。それに対応できるようにバッテリーを搭載したシステムとした。Fig. 2に全体の腐食環境計測システムの概要を示す。

2.2 車載型腐食環境計測システムの構築

市場の腐食環境は天候による気温、湿度の変動や降雪時の融雪塩散布などの影響を強く受けることが分かっている。世界中で長期間のデータ収集を行うため、本システムは、下記の要件を満たす計測システムの構築を行った。また計測データは、Fig. 3に示すように複数の情報が一画面で比較表示可能とした。

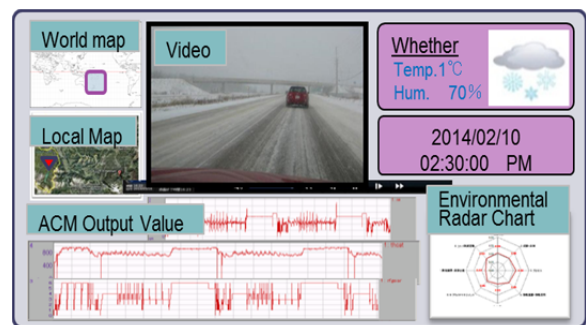


Fig. 3 Data Analysis Windows

〈計測システムの開発要件〉

- ・腐食メカニズム解明のため、市場で発生する腐食に関

係する信号（腐食電流、温湿度、CAN 信号、走行動画等）の同期記録が可能であること

- ・自動車の部位ごとに異なる車両の腐食環境をとらえるため複数の ACM センサーが接続できること
- ・計測車両への計測器搭載が車両運行の妨げにならないようなシステムの小型化と操作が簡便であること
- ・ACM センサーにつながる配線が車外に露出させないためセンサーからロガー間は無線であること
- ・腐食は、走行中だけでなく、駐車時の腐食進行もとらえられるよう外部電源での連続計測が可能であること
- ・腐食環境条件を網羅するため、四季を通じて長期間モニタできること

3. 腐食環境定量化手法の開発

3.1 腐食環境定量化手法の技術課題

橋梁等の大気曝露による腐食環境の定量化に用いられている ACM センサーは、両金属間に水膜が形成される時に発生するガルバニック電流を直接データとして取り込む構造である (Fig. 4)。

そのため、降雨などによって電極間に水膜が形成された場合は、実際の腐食環境よりも過大に出力する特性があることが知られている⁽¹⁾⁽²⁾。しかし、過大に出力する特性への補正方法などは確立されていない。

自動車への活用は、ACM センサーが出力した電流値を電荷量 (クーロン (C)) に換算し腐食環境の指標にする手順としている (Fig. 5)。自動車は降雨などで濡れた路面を走行するため、大気曝露に比べ濡れ時間の割合、および濡れ量が圧倒的に大きいといえる。

そこで、自動車の使用環境を想定した ACM センサー出力の補正方法について検討を行った。

3.2 腐食環境データの解析手法

(1) 実験方法

鋼板腐食量と ACM センサー出力から得られる積算クーロン量 (経過時間で変化する電荷量を積算したもの) の相関性を得るための補正方法として、ACM センサー出力の過大出力のしきい値 (A) を明らかにするため、ACM センサーと裸鋼板を同じ場所にセットし、積算クーロン量と鋼板腐食速度の比較を行った。腐食環境は、ACM センサーと裸鋼板の濡れ条件を一定にするため、塩水の散布と、高温恒湿の曝露を繰り返す実車の腐食試験にて実験を行った (Fig. 6)。

(2) 実験結果と考察

腐食試験車両を用いた一定期間の評価後、Fig. 7 に示す場所 6 点の ACM センサー出力から得られる積算クーロン量と鋼板の板厚減少量を比較したところ、濡れ量大と濡れ量小で二つのグループに分かれた (Fig. 8)。センサーの貼り付け部位を設定する際に、濡れ量の大小で比較ができ

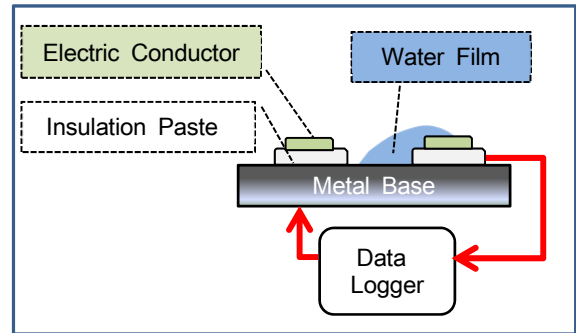


Fig. 4 Operating Principle of the ACM Sensor

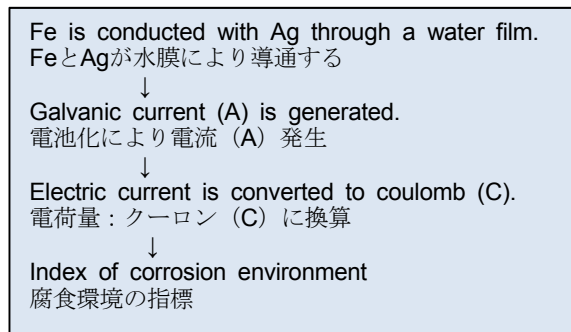


Fig. 5 Flow of the Environmental Index

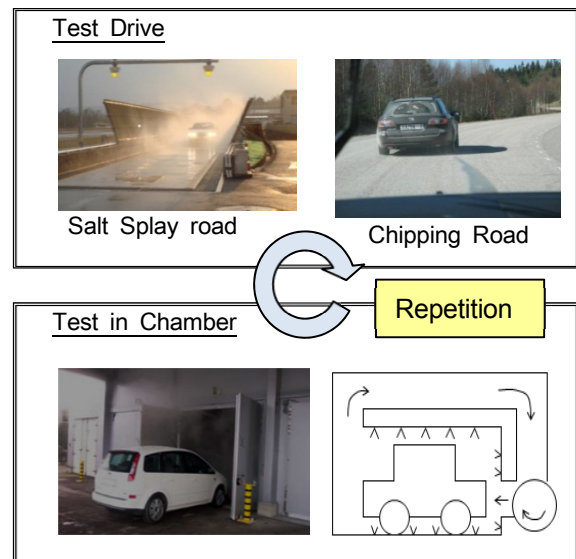


Fig. 6 Total Vehicle Accelerated Corrosion Cycle

る場所を選んでおり、この場所と二つのグループが一致したことから、濡れ量の大小が積算クーロン量に影響を与えたことは明らかである。そこで、実際の鋼板腐食速度に対し積算クーロン量が過大になったと考えられる濡れ量大のグループ B が、濡れ量小のグループ A と同レベルの積算クーロン量になる ACM センサー出力値の補正方法を検討した。ACM センサーの出力 (A) に対する水膜厚さの影響を確認するため、実験的に、ACM センサーの出力 (A) とセンサー表面に形成する水膜厚さの関係を検証した。なお水膜厚さは ACM センサー表面積に対しての水重量で換算している。

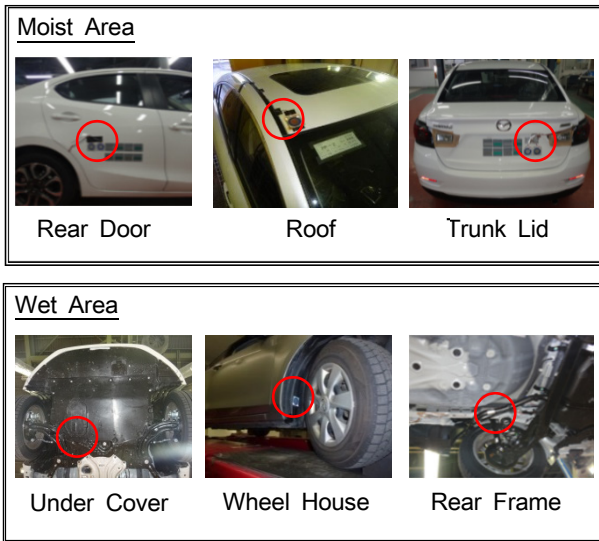


Fig. 7 Location of ACM Sensors and Exposed

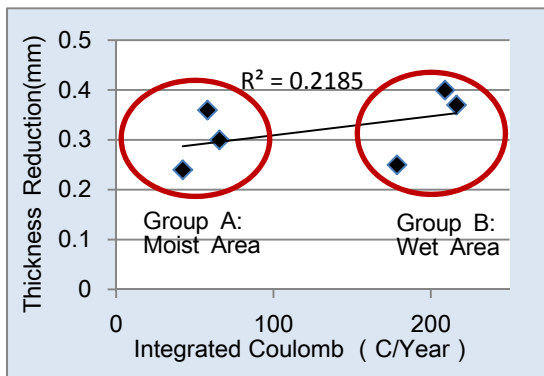


Fig. 8 Relation of Coulomb and the Reduction of Steel Thickness

その結果、水膜の厚さと、ACM センサーの出力は比例の関係にあることが確認できた。一般的に、水膜が厚くなる雨天時（濡れ環境）よりも霧などの細かい水の粒子で薄い水膜形成する条件（湿り環境）で腐食は進行するといわれている⁽³⁾。次に Tomashov モデルで湿り腐食と濡れ腐食の境界とされる水膜約 50 μm ⁽⁴⁾ との関係を見ることにした。n=3 のサンプルデータ平均値から得られた近似線と ACM センサー出力をみたところ濡れ量過大の境界は 0.1mA にあることが分かり、これをしきい値とした (Fig. 9)。そこで ACM センサーの出力に対し「しきい値=0.1mA」とすることの妥当性について検証するため、しきい値を 0.05mA、0.15mA および 0.20mA とした場合の計算も合わせて行った。その時に、しきい値を超えた部分の出力値のみを取り除いたケース A としきい値を超えた時間帯の出力値を全て取り除いたケース B について分析した (Fig. 10)。その結果、しきい値は 0.1mA でケース B の場合が最も良い相関が得られたことから、ACM センサー出力値における濡れと湿りの境界値 0.1mA は妥当と判断した (Table 2)。このしきい値：0.1mA でケース B とした場

合における積算クーロン量と鋼鉄の板厚減少量の関係を Fig. 11 に示す。Fig. 8 で見られたグループ化の傾向が改善しているのが分かる。

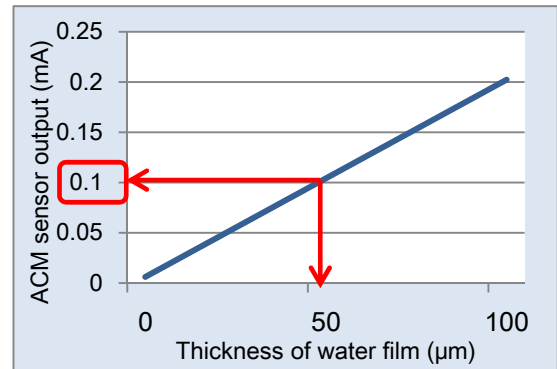


Fig. 9 Relation of the ACM Output and Thickness of Water

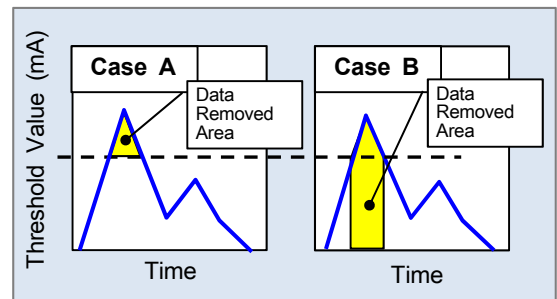


Fig. 10 Verification Image of the Threshold

Table 2 Relation of Verification Condition and Substitution Value

Threshold Value	Case	Substitution Value (R ²)
0.05mA	A	0.5451
	B	0.5948
0.1mA	A	0.5045
	B	0.701
0.15mA	A	0.4895
	B	0.4254
0.2mA	A	0.4779
	B	0.4328

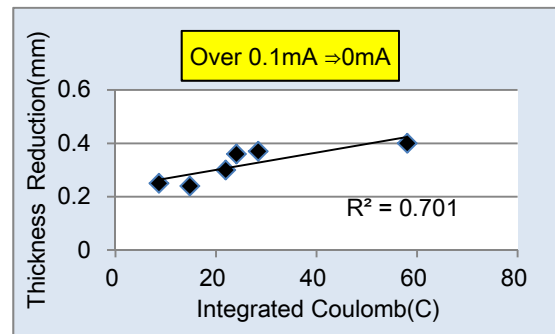


Fig. 11 Relation of Coulomb and the Reduction of Steel Thickness (with Data Revision)

この結果の要因について考察する。水膜厚さと腐食速度の関係が水膜中の溶存酸素量によって左右されるのであれば、厚い水膜でも腐食は進行するため 0.1mA を超えた場合の ACM センサー出力値はケース A のように一定値で残すのが妥当と考えられるが、実際には異なった結果が得られた。これは実験室の静的環境で作り出される水膜と、自動車走行環境下の動的な水膜に異なる条件があること、つまり自動車走行環境下の水膜中では腐食速度が停滞し腐食が進行しにくいことが考えられる。この原因として、走行中の激しいスプラッシュによって水膜の厚さが厚くなることと、表面の腐食因子が洗い流されるため、酸化還元が発生するポイントが常に変動し定着しないためと判断した⁴⁾。

(3) 検証結果

これまで市場を模擬した促進腐食試験による実験を行ってきた。実際に自動車が使われる市場条件においても 0.1 mA がしきい値で問題がないことを明らかにするため、国内市場で最も腐食環境が厳しい沖縄を実走した時のデータを分析する。

2014 年の沖縄における温湿度のデータを、2014 年の札幌と山形のデータと比較して示す (Fig. 12)。沖縄の気温は年間を通して 15°C 以下にならないために化学反応が起こりやすく、相対湿度が低い真冬を除き、ほぼ一年中、海塩粒子が潮解する湿度条件にあり、過酷な腐食環境であるといえる⁵⁾。

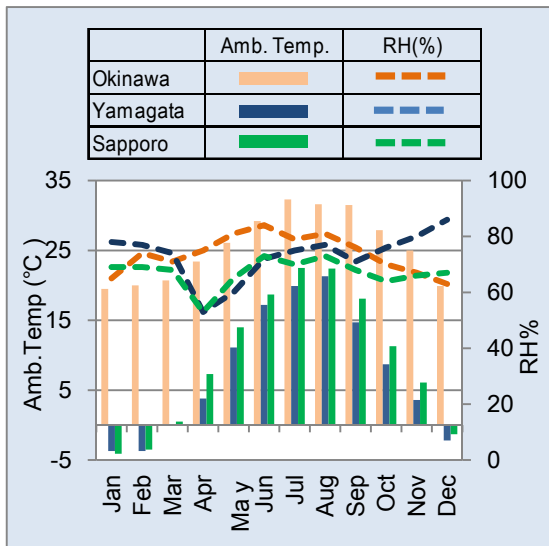


Fig. 12 Temperature-Humidity Data of Okinawa

1) 市場腐食環境データとしきい値 0.1mA の関係

沖縄で収集した腐食環境データと腐食試験車両と同じ部位に貼り付けた裸鋼板の板厚減少量のデータを使い、しきい値 0.1mA の妥当性を検証した。なお裸鋼板の板厚減少量は一様条件の腐食試験から算出したクーロン (C) に置き換え、目標値とした。0.1mA をしきい値とする補正前と補正後と目標クーロン (C) の関係を Fig. 13 に示す。補

正を行うことで目標クーロン (C) に近づいており、しきい値 0.1mA は妥当である。

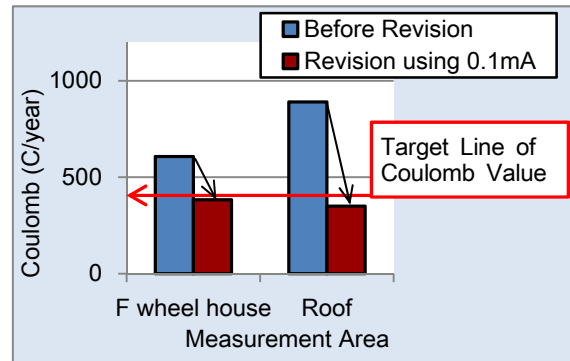


Fig. 13 Validity of the Revision by Threshold 0.1mA

2) ACM センサーの出力値と走行の関係

次に ACM センサーの出力値がどのような環境条件で 0.1mA を超えているのかを検証するため CAN 信号から得た車速との関係性を調べた。Fig. 14 に沖縄県名護市のある 1 日 (24h) の ACM センサー出力を示す。走行中に出力する条件は、ほとんどが雨天や水たまりへの侵入時である。一方で、停車中の出力は、雨天を除き 0.1mA 以下であることが分かった。

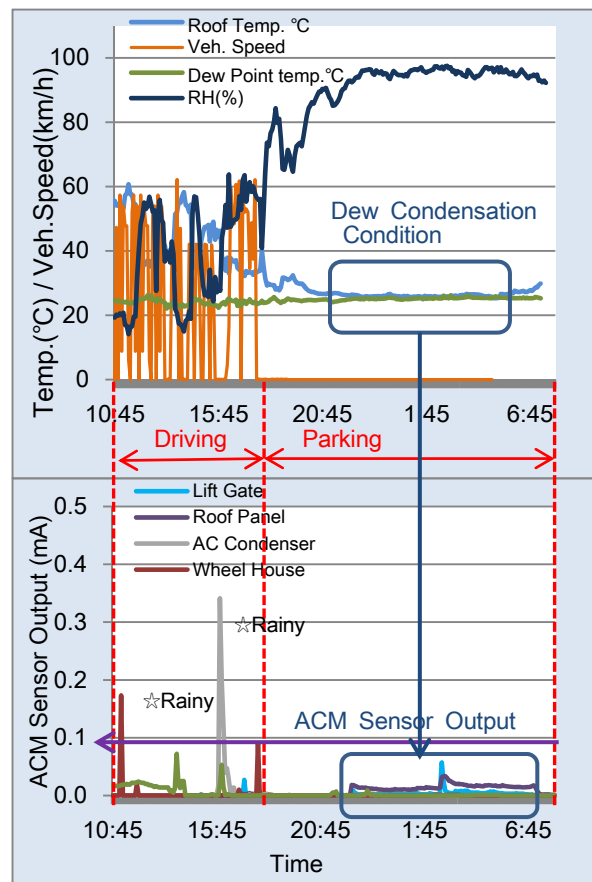


Fig. 14 ACM Output Data of Okinawa (24h)

また東北地方のデータに関して同じ傾向が見られることを確認できている。このことから、融雪塩、海塩粒子環境を問わず、0.1mA を境界に走行と停車を大別できるため、0.1mA のしきい値は妥当性がある。つまり走行中の ACM センサー出力値は実際の腐食環境より過大であり、停車中のデータのみが有効であるといえる。

3) ACM センサーの出力値と温湿度の関係

次に停車中に ACM センサーから信号が出力される理由について温湿度との関係を調べた。一般的に気象学では気温上昇⇒湿度低下、気温低下⇒湿度上昇の関係にあるといわれており、夜間は湿度が上昇している。車体に付着した塩分が、夜間の結露／潮解により水分を吸着し腐食を進行させていると考えた。その結果、外気温は露点より低くなった際の結露条件で ACM センサーが出力しており、潮解により腐食が発生していることがデータで確認できた (Fig. 14)。

4. 市場腐食環境データの今後の展開

腐食環境計測システムで得られたデータは今後、ユニットごとのバーチャル評価につなげていく。腐食のバーチャル評価は、市場モデルとして腐食環境条件を正確に把握し、それをベースに腐食モデルベースを構築する (Fig. 15)。今回、定量化に成功した腐食環境データをデータベースに集約することで各市場の特徴を容易に分析することが可能となった。一例として沖縄と東北地方のデータを比較分析した結果を紹介する。それぞれ腐食環境が異なる部位に ACM センサーを設置し検証した結果、アッパーボディーは沖縄、アンダーボディーは東北の腐食環境がより過酷であることが実証できた。

これは海塩粒子が飛来する沖縄の環境と融雪塩を含んだ水をタイヤで跳ね上げる東北の地域の特徴を正確にとらえることができおり、腐食モデルベースのインプット情報となる市場モデルとして十分に活用できるレベルのデータとなっている。

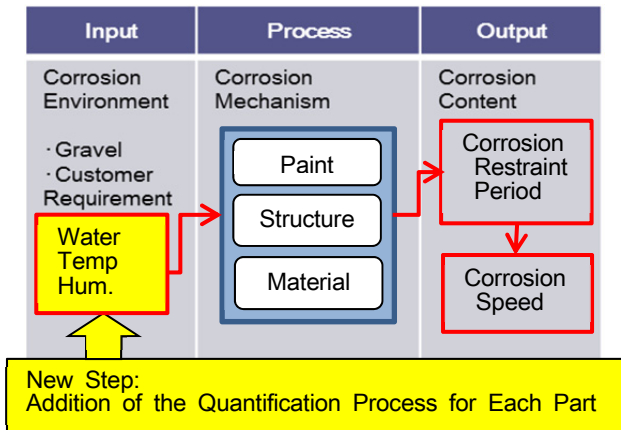


Fig. 15 IPO Chart of the Corrosion CAE

5. おわりに

(1) 車載型腐食環境計測システムの構築

ACM センサーを用いた自動車用の車載型腐食環境計測システムを構築した。

(2) 腐食環境データ解析手法の開発

ACM センサーは、降雨等によってセンサー上に水膜が形成される場合、実際の腐食環境よりも過大に出力する特性があるため、以下の補正方法が有効であることが分かった。

・濡れ量が多い (水膜 50µm 以上) 環境においては、0.1mA を超える場合の ACM センサー出力値を 0 にすることで試験データの腐食速度と積算クーロン量の相関性が得られる

(3) 実際に自動車の腐食が進行するのは走行中ではなく、夜間の結露／潮解現象により発生している

(4) 車載型腐食環境計測システムで得たデータは、市場の腐食環境を正確にとらえており、腐食モデルベース開発のインプット情報として十分に活用できる。

参考文献

- (1) 押川：沖縄における金属の腐食と環境評価、ウェザリング技術研究成果発表会, pp76-77 (2013)
- (2) 篠原：大気腐食評価技術に関わる最近の進歩と今後の展望, 材料と環境, 63, pp116-120 (2014)
- (3) 増子：さびのおはなし, pp74-75 (2014)
- (4) 細矢ほか：炭素鋼の腐食速度と海塩を含む水膜の厚さの関係, 材料と環境, 54, pp391-395 (2005)
- (5) 過去の気象データ検索, 国土交通省 気象庁 HP <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php> 調査日：2015/10/20

■ 著 者 ■



福田 克弘



落岩 克哉



園田 賢司



山根 貴和

論文・解説

14

無塗装・高質感の内外装意匠部品用

バイオエンジニアリングプラスチックの開発

Development of Bio-based Engineering Plastic Featuring High-quality Finish without Paint and Suitable for Interior and Exterior Vehicle Parts

一原 洋平*1
Yohei Ichihara

要 約

「優れた環境性能」に貢献できる技術の一つとして植物由来材料である「バイオプラスチック」がある。しかしながら、従来の石油系プラスチックに比べて材料コストが高く、自動車部品への採用が拡大していない。今回開発したバイオエンジニアリングプラスチックは、「透明性」「耐傷つき性」「耐光性」に優れた特徴を持っている。本開発材料の特徴を活かした内外装意匠部品の無塗装化技術開発を行い、材料の持つ優れた環境性能だけでなく、従来の塗装では実現できない高質感と、塗装工程廃止による環境貢献およびコスト改善を実現することができた。本技術は、新型ロードスターの内装意匠部品で既に採用しており、新型CX-9では内装意匠部品だけでなく、外装意匠部品にも採用した。今後、「環境性」「商品性」「経済性」を両立できる本技術の適用を拡大させていく。

Summary

Bio-plastic is one of the technologies contributing to “outstanding environmental performance”. However, as the material cost is higher than that of petroleum plastics, it was difficult to use the bio-plastic for vehicle parts. The newly developed bioengineering plastic is high in transparency, scratch and fading resistance. Taking advantage of the material’s properties, non-coating technology was developed for interior/exterior design parts, which achieves not only outstanding environmental performance but also high quality finish which is not possible by conventional coating as well as cost improvements due to the elimination of coating processes (molded-in-color). This technology was already adopted to the interior design parts of the all-new Mazda MX-5 as well as the interior and exterior design parts of the all-new CX-9. Application of this technology of high “Environmental”, “Marketability”, and “Economy” performance will be expanded from now.

1. はじめに

1.1 バイオエンジニアリングプラスチックとは

バイオエンジニアリングプラスチックとは、植物由来原料を用いて製造したエンジニアリングプラスチックのことである。今回開発したバイオエンジニアリングプラスチックは、植物由来のイソソルバイトが主原料で、その他の原料と重合してカーボネート結合させることで作っているため、バイオポリカーボネート（以下、バイオPC）と記載する（Fig. 1）。本開発材料は特殊な分子構造を持つため、従来の石油由来のエンジニアリングプラスチックであるポ

リカーボネート（以下、PC）に比べて、耐傷つき性や耐光性が優れている特徴を持っている。また、透明性が高いため、着色剤を添加することで、さまざまな色に着色することが可能である。

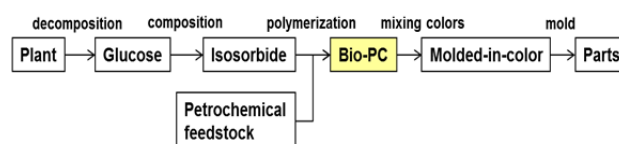


Fig. 1 Production Process

*1 装備開発部
Interior & Exterior Components Development Dept.

1.2 本技術開発の位置づけ

マツダの技術開発の長期ビジョンとして「サステナブル “Zoom-Zoom” 宣言」があり、本技術開発の原点は「優れた環境性能」に貢献するための技術開発である (Fig. 2)。「優れた環境性能」に貢献できる技術の一つとして、植物由来材料である「バイオプラスチック」があり、バイオPCはその中の一つとして開発を進めてきた。しかし、バイオプラスチックは従来の石油系プラスチックと製造方法が異なるため材料コストが高く、自動車部品への採用が拡大していない。そこで、バイオプラスチックならではの特徴を見出し、その特徴を活かすことで、部品レベルでコスト同等を目指し、自動車部品への採用拡大を目指した。

本開発材料の特徴として、「透明性」「耐傷つき性」「耐光性」が良い特徴を持っている。そこで、ピアノブラック塗装の代替えとして、本開発材料を着色し、塗装では実現できない高質感の実現を目指した。

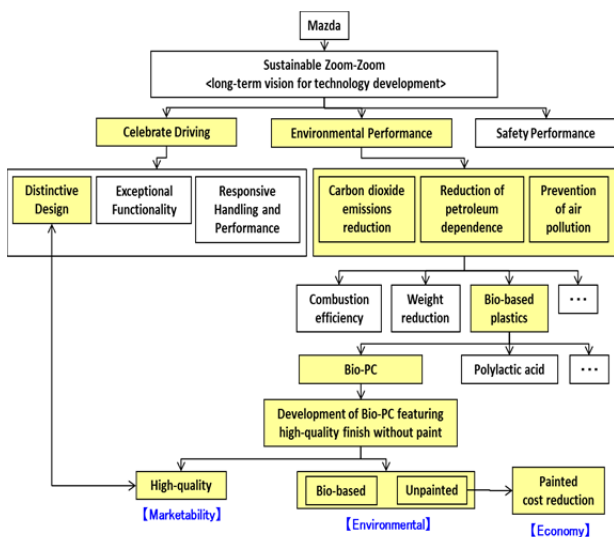


Fig. 2 Main Purpose

1.3 本技術開発の特徴

本技術は、ピアノブラック塗装の代替え技術として、「環境性」「商品性」「経済性」を高いレベルで実現できる技術である。

(1) 環境性

植物由来原料を使用していることからCO₂排出量の削減や石油資源使用量の削減、更に塗装工程廃止によるVOCの削減により、優れた環境性能に貢献することができる。

(2) 商品性

従来の塗装の膜厚は数十μmであり、その厚さで深み感を演出してきたが (Fig. 3)、本技術は数mmの製品厚で深み感を演出することが可能であり、従来の塗装を上回る深み感を実現できる (Fig. 4)。更に、従来の塗装では、塗装ならではの表面のゆがみ、いわゆる「ゆず肌」が大

り小なり発生するが、本技術は成形圧力により鏡面のような平滑感を実現することができる。つまり、本技術は「深み感」「平滑感」において、従来の塗装を超える質感を実現できる技術であり、際立つデザインに貢献することができる。

【Conventional technology】

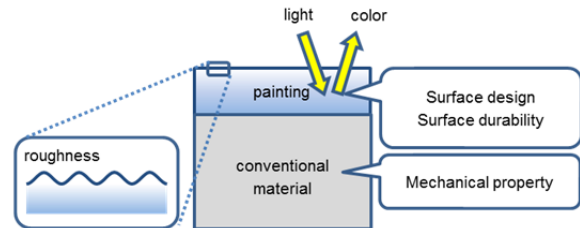


Fig.3 Conventional Technology

【Developed technology】

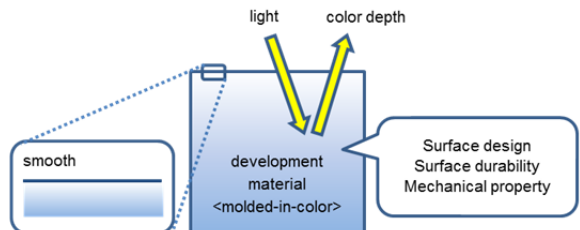


Fig. 4 Developed Technology

(3) 経済性

本開発材料を着色し、塗装では実現できない高質感を実現することで、従来必要だった塗装工程を廃止し、部品レベルでコスト改善に貢献することができる。

2. 技術課題

ピアノブラック塗装レス化の技術課題は、塗装することなく、自動車内外装意匠部品に要求される「表面意匠性」「表面意匠耐久性」「基材機械物性」を成立させることである。それぞれの代表的な要求性能として、表面意匠性は「漆黒感」と「平滑感」、表面意匠耐久性は「耐傷つき性」と「耐光性」、基材機械物性は「耐熱性」と「耐衝撃性」がある。従来は、これらの要求性能を塗装と基材の樹脂で満足させてきた。しかしながら、今回は塗装レス化技術開発であり、塗装を使うことなく、基材の樹脂だけでこれらの要求性能を満足させなければならない。よって、今回の目標は、Fig. 5の要求性能図に示した塗装品と同等以上を目指すこととした。

まず単純に塗装をなくした場合で、基材樹脂としてよく使用されるABS樹脂では、基材機械物性の要求性能は満足させることができるが、表面意匠性と表面意匠耐久性の要求性能は満足させることができない (Fig. 5)。

従来の石油由来材料で透明性が高く、発色性の良い材料として、アクリル（以下、PMMA）やPCがある。PMMAは表面意匠性と表面意匠耐久性の要求性能を満足させることができるが、基材機械物性の要求性能を満足させることができない。一方、PCは表面意匠性と基材機械物性の要求性能を満足させることができるが、表面意匠耐久性の要求性能を満足させることができない（Fig. 6）。

以上のように、既存の材料では、「表面意匠性」「表面意匠耐久性」「基材機械物性」の要求性能を成立させることができなかった。

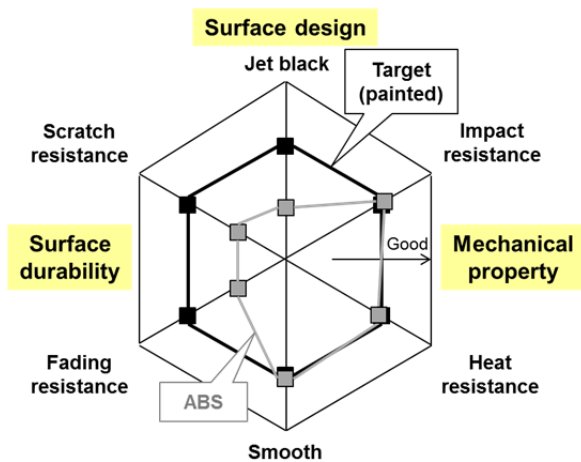


Fig. 5 Demand Performance

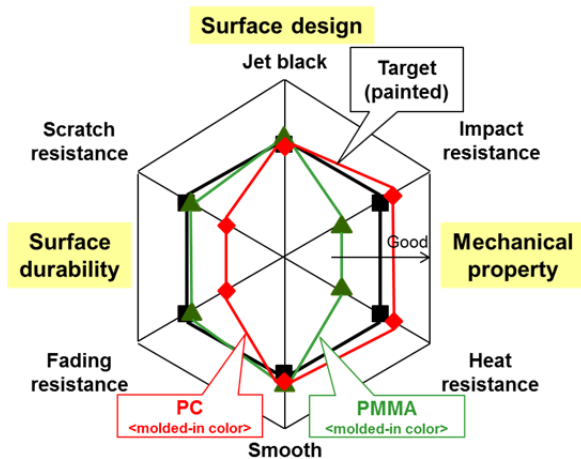


Fig. 6 Conventional Material

3. 解決手段

樹脂部品性能に大きな影響を与える因子として、「材料」「工法」「構造」があり、これらの3つの因子を用いることで、樹脂部品性能をコントロールすることができる。今回は「材料」と「工法」に着目し、材料からのアプローチとして「バイオPCの材料組成の最適化」、工法からのア

プローチとして「バイオPCの成形方法の最適化」を行うことで、「表面意匠性」「表面意匠耐久性」「基材機械物性」の要求性能の成立を図った。

3.1 表面意匠性

表面意匠性として、「深みのある漆黒感」と「鏡面のような平滑感」を挙げているが、これらを実現させるためには、大きく3つのポイントがあり、「表面の微細形状」と「樹脂の透明性」と「着色剤の分散性」が大きな影響を与えている。表面の微細形状については、表面が粗いと鏡面のような平滑感を実現できないことはもちろんのこと、表面で光が拡散することで、白ぼけてしまい、深みのある漆黒感を実現することができない。樹脂の透明性については、樹脂の透明性が低いと光が内部まで届かないため、表面近傍で白ぼけてしまい、深みのある漆黒感を実現することができない。着色剤の分散性については、着色剤の分散性が悪いと着色剤が凝集してその部分で光を遮断してしまうため、深みのある漆黒感を実現することができない。そこで、表面の微細形状と樹脂材料で光をコントロールすることで、塗装を上回る表面意匠性の実現を試みた。

(1) 工法からのアプローチ

工法からのアプローチとして、「金型仕様」と「成形条件」に着目し、金型内の樹脂流動をコントロールすることで、樹脂表面の外観不良をなくし、鏡面のような平滑感の実現を試みた。

樹脂成形で発生しうる表面外観不良として、シルバー、ウェルド、ヒケなどがある。シルバーは、金型内で流動中の樹脂がガスを巻き込み、表面で破泡することで銀状のスジが発生する現象である。ウェルドは、金型内で流動中の樹脂同時がぶつかり固化することで、表面にスジが発生する現象である。ヒケは、製品厚さが異なる部分などで樹脂の固化速度が異なり、部分的に収縮率が異なることで、表面が凹状になる現象である。

金型仕様として、金型内の樹脂流動解析を行うことで、樹脂の流れ方や圧力分布や温度分布などの検証を行い、金型のゲート、ランナー、リブ形状などの最適化を行った。具体的には、シルバーの改善として、金型流動中の樹脂のせん断発熱を抑え、樹脂の熱分解ガスの発生を抑制させるために、ゲート径やランナー径の最適化を行った。ウェルドの改善としては、金型流動中の樹脂の会合角度をコントロールするために、製品板厚やゲート位置の最適化を行った。ヒケの改善としては、金型内の樹脂の固化速度をコントロールするために、リブ形状などの最適設計を行った。

成形条件として、本開発材料の特徴および表面外観不良のメカニズムをしっかりと把握し、可塑化条件や射出条件などを最適化して、樹脂の熱劣化や金型流動中の樹脂のせん断力を抑制することで、表面外観不良の発生しない成形条件を作り込んだ。

以上のように、金型仕様と成形条件を最適化し、樹脂の

流動・圧力・温度・時間条件をコントロールすることで、表面外観不良を抑え、鏡面のような平滑感が実現できた。

(2) 材料からのアプローチ

材料からのアプローチとして、「樹脂の透明性」と「着色剤の分散性」に着目し、樹脂材料の光学特性をコントロールすることで、深みのある漆黒感の実現を試みた。

樹脂の透明性については、耐熱性や耐衝撃性などの材料物性を向上させるために投入した添加材により透明性が低下することがある。これは、添加材により樹脂全体の光学特性が乱れるためである。

そこで、主原料として使用している植物由来のイソソルバイトの分子構造を活かし、添加材の配合を最適にした材料設計を行うことで、透明性と材料物性を両立させたバイオPCを開発した。特に透明性については、本開発材料の光線透過率は92%で、従来のPCの光線透過率の89%に比べて透明性が高い。これは、従来のPCは分子構造にベンゼン環があるため光を遮断するが、本開発材料はベンゼン環がないため透明性が高くなっている (Fig. 7)。更に着色材の分散性についても、従来のPCに比べて、本開発材料は着色材の分散性が良い (Fig. 8)。

以上のように、本開発材料の透明性と着色剤の分散性が良い特徴を活かし、調色して光をコントロールすることで、深みのある漆黒感を得ることができた。

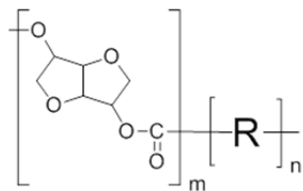


Fig. 7 Molecular Structure (1)

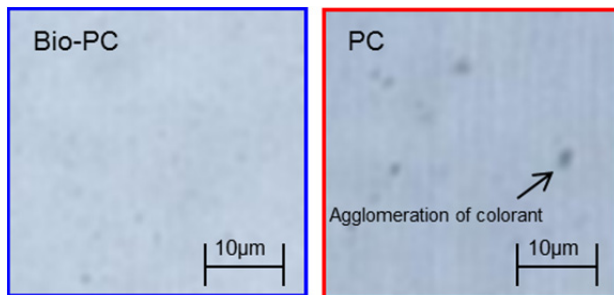


Fig. 8 Dispersion Performance

(3) 表面意匠評価結果

表面意匠性の評価として、光学測定装置を用いて、漆黒感と平滑感を評価した。評価サンプルは、バイオPC開発品（塗装レス品）と、比較のために従来の塗装品を用いた。評価結果をFig. 9に示す。バイオPC開発品は、従来の塗装品に比べて、漆黒感・平滑感ともに優れていることが確

認できた。写真で漆黒感を伝えるのは難しいが、平滑感については写真でも確認できる。Fig. 10は、部品の表面に蛍光灯を映して、その蛍光灯の反射像の鮮明さで平滑感の優劣を評価した結果である。塗装品には塗装ならではのゆず肌が発生し蛍光灯の反射像が歪んでいるが、バイオPC開発品は成形圧力により鏡面がしっかり転写され、蛍光灯の反射像がしっかり映っており平滑感の高さが確認できた。

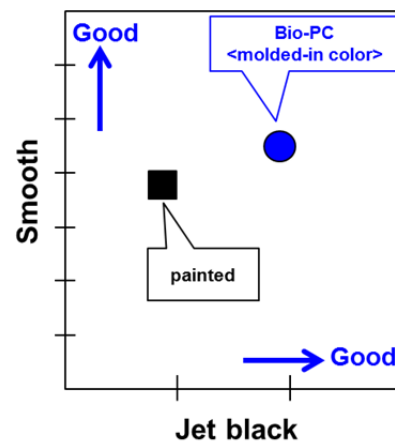


Fig. 9 Appearance Evaluation

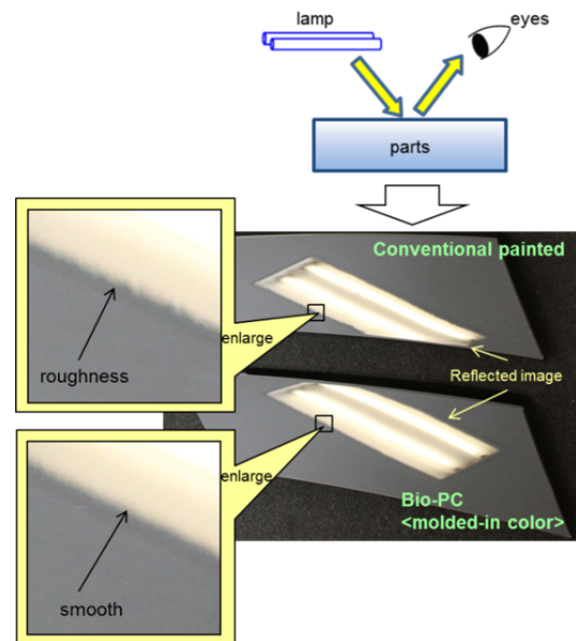


Fig. 10 Surface of Parts

3.2 表面意匠耐久性

(1) 耐傷つき性

耐傷つき性の向上には、「微小面の塑性変形のしにくさ」と「表面の滑りやすさ」に着目した。微小面の塑性変形のしにくさについては、イソソルバイトの剛直性の高い分子構造 (Fig. 7) を活かした材料設計を行うことで、従来のPCより変形しにくくした。更に、表面の滑りやすさにつ

いても、本開発材料は従来のPCに比べて滑りやすい。以上のように、本開発材料の特徴を活かし、表面状態をコントロールすることで、耐傷つき性を向上させた。

(2) 耐光性

耐光性の向上には、「樹脂の耐光性」と「着色剤の耐光性」に着目した。樹脂の耐光性については、本開発材料は分子構造にベンゼン環がないため従来のPCより紫外線を透過しやすく、耐光性が良い。更に、着色剤の耐光性については、耐光性安定剤を添加するとともに、耐光性の高い着色剤を使用することで改良した。

(3) 表面意匠耐久性評価結果

表面意匠耐久性の評価として、耐傷つき試験と耐光性試験を実施した。評価サンプルには、バイオPC開発品（塗装レス品）と、比較のために従来の塗装品と、従来のPCの塗装レス品を用いた。評価結果をFig. 11に示す。従来のPCの塗装レス品では要求性能を満足することはできないが、バイオPC開発品は、従来の塗装品と同等の耐傷つき性と耐光性を実現できていることが確認できた。

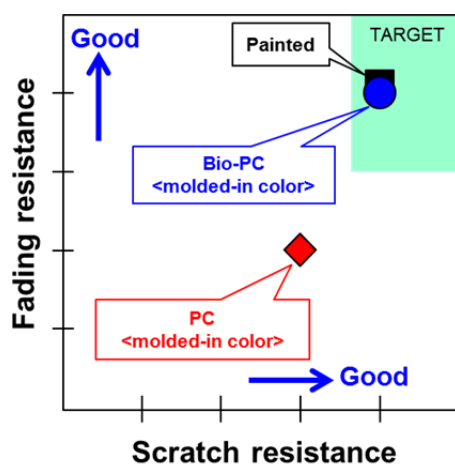


Fig. 11 Durability Performance

3.3 基材機械物性

基材機械物性として、「耐熱性」と「耐衝撃性」を挙げているが、これらの物性は一般的に背反することが知られている。そこで、「耐熱性」と「耐衝撃性」を両立させるために、適用する部品の機能に併せた物性のバランス取りを行った。具体的には、本開発材料の組成をコントロールすることで、「耐熱性」と「耐衝撃性」を両立させた。

4. 結果

材料からのアプローチとして「バイオPCの材料組成の最適化」、工法からのアプローチとして「バイオPCの成形方法の最適化」を行うことで、「表面意匠性」「表面意匠耐久性」「基材機械物性」の要求性能を成立させることができた (Fig. 12)。特に「表面意匠性」については、

目標である従来塗装品を上回る質感を実現することができた。

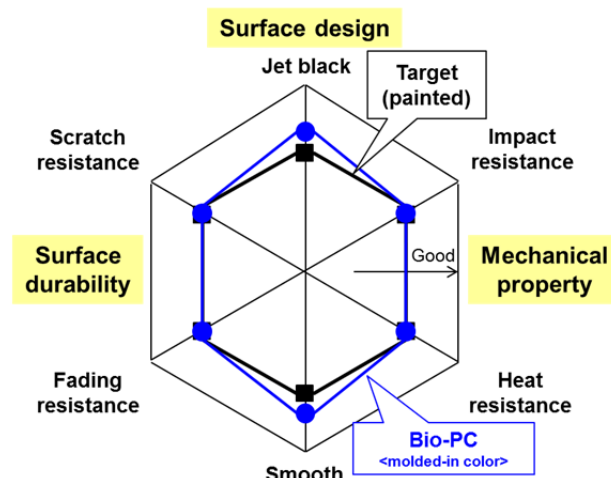


Fig. 12 Evaluation Result

5. おわりに

本開発材料は、三菱化学（株）と共同で開発したものである。本技術は、新型ロードスターのカップホルダーベゼルと用品のナンバープレートフォルダで既に採用している。新型CX-9では、内装意匠部品として、シフトパネル、カップホルダーベゼル、メーターフードベゼル、ドアスイッチパネル、リヤエアコンルーバーベゼル、外装意匠部品として、セールガーニッシュ、ドアピラーガーニッシュ、Cピラーガーニッシュに採用した。

今後、「環境性」「商品性」「経済性」を高いレベルで成立できる本技術の適用を拡大させていく。更に、際立つデザインに貢献できる新たな意匠の開発にも取り組んでいく。

参考文献

- (1) 三菱化学：新規バイオエンブラ「DURABIO」,
http://www.m-kagaku.co.jp/grproduct/company/mcc/sustainable/product/1194236_4306.html?category=plastics (2015)

■ 著 者 ■



一原 洋平

特集：解説

15

高圧縮比ガソリンエンジンにおける
触媒早期暖機のための燃焼技術開発

Development of Combustion Technology for Reducing Catalyst Warm-Up Time in a High-Compression-Ratio Gasoline Engine

藤川 竜也*¹ 内田 健児*² 中山 佳映*³
Tatsuya Fujikawa Kenji Uchida Yoshiteru Nakayama
山川 正尚*⁴
Masahisa Yamakawa

要 約

火花点火ガソリンエンジンにおいて、高圧縮比化は熱効率の改善に有効な手段である。しかしながら、高い熱効率ゆえに排ガス温度が低下し、冷間始動時の触媒暖機時間が長くなる。更に高トルク化をねらって掃気効果を持つ排気系は、一般的にロング排気系となり触媒上流の熱容量が増加し、ますます触媒暖機時間が長期化する。そこで、本研究では高圧縮比エンジンで触媒早期暖機に有効な排ガス温度上昇を実現する燃焼技術を開発した。

Summary

The high compression ratio is effective in improving the thermal efficiency for a spark-ignited gasoline engine. However, the exhaust emissions are deteriorated by the increased catalyst warm-up time, which results from (1) the reduced exhaust gas temperature caused by the elevated expansion ratio and (2) the elongated exhaust pipe for increasing the engine torque. The technology development was conducted for retarding the combustion phasing. The results show that high environmental performances are achieved.

1. まえがき

これまでのエンジンに加え、ハイブリッドやモーターを用いた自動車の研究開発が近年盛んに行われている。しかしながら、燃費改善効果予測⁽¹⁾では2020年のCO₂削減目標25%の中で11%をエンジンが担い、2050年の削減目標78%の中で21%をエンジンが担うなど、長期的な視点においてもエンジンの燃費改善が負うところは非常に大きい。とりわけ、台数、モデル数の多いガソリンエンジンの燃費改善はCO₂削減及び国際競争力強化の観点から極めて重要である。そこで、マツダはガソリンエンジンの熱効率を向上させるために高圧縮比化に取り組み、それに伴い現れる点火前の低温酸化反応に新たに着目し、従来からのノッキング改善手法である急速燃焼と混合気冷却のための新たな技術を導入することでガソリンエンジンの高圧縮比化を実現した⁽²⁾。

しかし、高圧縮比ガソリンエンジンでは高い熱効率ゆえに排気損失が低下、すなわち排ガス温度が低下し、冷間

始動時の触媒暖機時間が長くなる課題がある。また、高圧縮比ガソリンエンジンにおいて、更なる高トルク化の実現手段としては残留ガスの掃気でノッキングを回避しつつ体積効率を向上させることが有効である⁽³⁾が、このような排気系は一般的にロング排気系となり触媒上流の熱容量が増加し、更に触媒暖機時間が長期化してしまう。そこで、本研究では高圧縮比ガソリンエンジンにロング排気系を装着しても短時間で触媒暖機可能とする燃焼技術を開発した。

2. 供試機関及び実験条件

本研究に用いた供試エンジン仕様をTable 1に示す。直噴ガソリンエンジンをベースに圧縮比を14まで高め、燃焼室形状はキャビティ付き燃焼室とした。また、インジェクターには噴射方向に自由度のあるマルチホールインジェクターを用いた。Fig. 1に燃焼室形状を示す。実験条件は冷間からの始動を想定し、冷却水温40℃、エンジン回転速度1200rpm、正味平均有効圧 (BMEP) 100kPaとした。

*1,2,4 パワートレイン技術開発部
Powertrain Technology Development Dept.

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

Table 1 Engine Specifications

Engine Type	In-line 4, DOHC
Bore X Stroke	87.5mm X 83.1mm
Displacement	1998.8cm ³
Combustion Chamber	Pent-roof
Compression Ratio	14
Fuel System	Direct Injection
Injector Type	Multi Hole Injector
Number of holes	6 holes
Fuel Pressure	13MPa

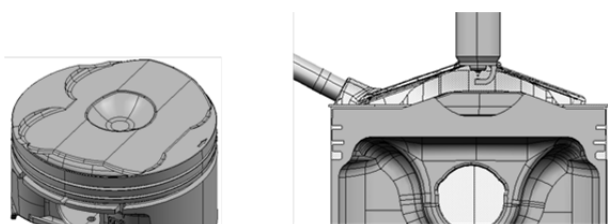


Fig. 1 Shape of Piston Top

3. 高圧縮比に伴う触媒暖機への影響

はじめに高圧縮比とロング排気系による排ガス温度低下を把握した。Fig. 2に従来圧縮比エンジンCompression Ratio=11.2 (CR11.2)と高圧縮比エンジンCompression Ratio=14 (CR14.0)における触媒暖機試験の同一点火時期での排ガス温度を示す。高圧縮比エンジンの排気ポートでの排ガス温度は高圧縮比化により排気損失が低減したため従来圧縮比エンジンに比べ30℃低下している。排ガス浄化の観点から主流となっている4-1集合タイプの排気系では触媒までの距離が短いため排気ポート温度に対して触媒入口温度はほとんど変化しないが、ロング排気系の触媒位置を想定した750mm下流の点においては更に80℃低下している。したがってロング排気系を用いた高圧縮比エンジンで従来圧縮比エンジン以上の触媒早期暖機を実現するには、冷間始動時に合計110℃以上の大幅な排ガス温度上昇が必要なることがわかった。

4. 触媒早期暖機のための成層燃焼コンセプト

排ガス温度を上げる手段として一般的には点火時期リタードをしている。点火時期リタードは同時に燃焼安定性を損なうため、点火時期大幅リタード時でも安定した燃焼を実現できる手段として成層燃焼が有効である。従来の成層燃焼コンセプトは、一塊のリッチ混合気を点火プラグ周辺に滞在させるようにピストン上部に比較的大型のキャビティを形成することで安定したリタード燃焼を実現している⁽⁴⁾。しかし、高圧縮比エンジンでは高い圧縮比を得るために燃焼室設計の自由度が低く従来のコンセプトをそのまま適用することは困難である。更に、高効率、高出力を実

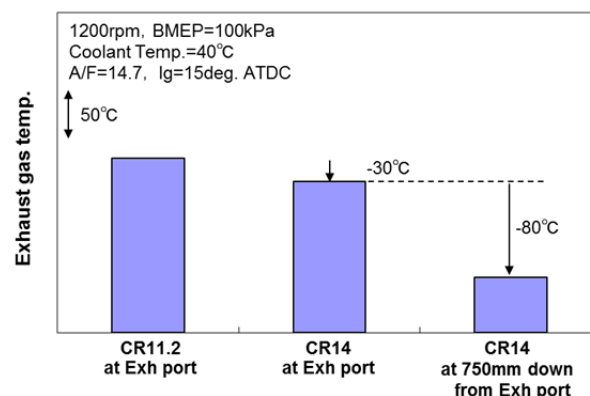


Fig. 2 Comparison of Exhaust Gas Temperatures

現するためにピストンキャビティやマルチホールインジェクターの機能を開発しており、これらの機能と両立できる新たな成層燃焼コンセプトを構築する必要があった。

そこで、本研究ではFig. 3に示すような新しい成層燃焼コンセプトに取り組んだ。新成層燃焼コンセプトのポイントは、マルチホールインジェクターを使って点火プラグ周りに長期間安定して可燃範囲の混合気を供給し続け、かつ、くすぶりの原因となる点火プラグへの液滴飛散を防ぐことである。

具体的には、上段噴霧①をキャビティに入れるように配置し、排気側のキャビティ側面を利用して点火プラグ方向に噴霧を巻き上げる。中段噴霧②、③は吸気バルブ下の斜面に衝突させ、斜面に沿って点火プラグの方向に噴霧を運ぶ。下段噴霧⑥は吸気側の平面に衝突させ、中段噴霧②、③に追従して点火プラグ周りに混合気を補充する。このように噴霧を三つの塊に分割して時間差で混合気を点火プラグに到達させることで、点火プラグ周りに上死点 (TDC) 後長い期間安定した可燃混合気を存在させることを可能にする。

また、点火プラグくすぶりに対しては、吸気バルブ下の斜面を延長した線と点火プラグの距離を確保することにより、点火プラグへの液滴飛散を防止する。

5. 実機検証

5.1 点火プラグ型A/Fセンサーによる検証

本研究では、点火プラグ周りの混合気形成と液滴飛散有無を検証するため、実機エンジンに大きな改造なしで取り付けることができる赤外線吸収法を利用した点火プラグ型A/Fセンサー (LaVision製) を用いた。点火プラグ型A/Fセンサーの計測部分をFig. 4に示す。点火プラグの横に計測部を設け、サファイアファイバーを用いて光源からの光を導き、サファイアガラス窓を介して計測部に入射しミラーで反射させて再度サファイアファイバーを通じて受光部に導かれる。

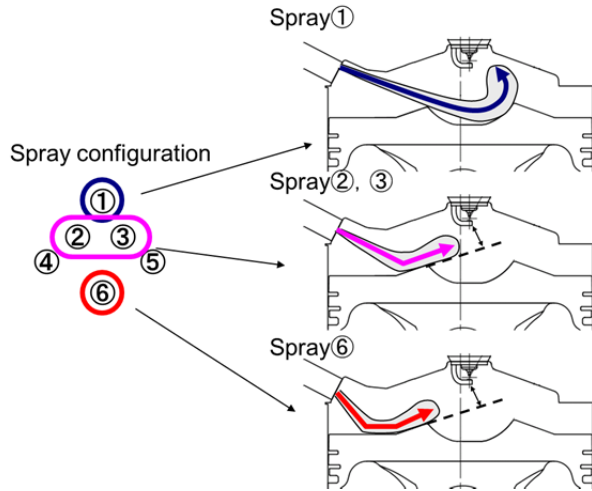


Fig. 3 Conceptual Schematic of Charge Stratification

(1)点火プラグ近傍A/Fの計測原理

計測部に燃料蒸気が存在すると燃料の炭素と水素結合の振動による光の吸収により透過光が減衰する。この減衰の度合いから式(1)に示すBouguer-Lambert-Beerの法則により燃料の炭化水素分子のモル濃度を算出できる⁽⁵⁾。ここで、 C はモル濃度[mol/l]、 I_0 は計測部に燃料蒸気が存在しないときの透過光強度、 I は燃料蒸気が存在するときの透過光強度、 ϵ_λ はモル吸光係数[l/(mol·cm)]、 L は光路長[cm]である。

$$C = \frac{-\ln\left(\frac{I}{I_0}\right)}{\epsilon_\lambda \cdot L} \quad (1)$$

また、筒内ガスの状態方程式(2)において、一般的にガソリンエンジンでは筒内の燃料炭化水素のモル数 n_f [mol]は空気のモル数 n_a [mol]に比べ微少であることから n_f を消去して式(1)に代入することにより式(3)が導かれる。なお、使用する燃料の ϵ_λ が未知であるため、あらかじめ均質混合気を供給してキャリブレーションすることで ϵ_λ を求め点火プラグ近傍の相対的なA/Fを算出した。

$$p \cdot V = (n_a + n_f) \cdot R \cdot T \quad (2)$$

$$A/F \propto \frac{n_a}{n_f} = \frac{\frac{p}{T} \cdot \epsilon_\lambda \cdot L}{-\ln\left(\frac{I}{I_0}\right) \cdot R} \quad (3)$$

ここで p は筒内圧力[Pa]、 V は燃焼室容積[m³]、 T は筒内温度[K]、 R は気体定数[J/(K·mol)]

(2)飛散液滴の計測原理

点火プラグ型A/Fセンサーの計測原理から点火プラグへの液滴飛散有無が計測できると考えられる⁽⁶⁾。すなわち燃

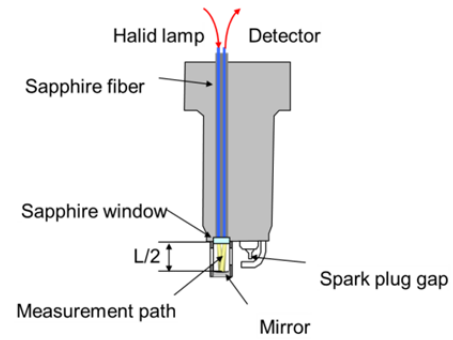


Fig. 4 Schematic of Spark Plug A/F Sensor

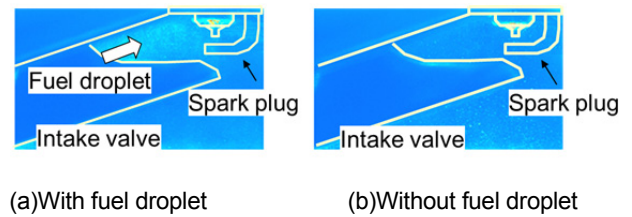


Fig. 5 Images with and without Fuel Droplet Obtained in Optical Research Engine

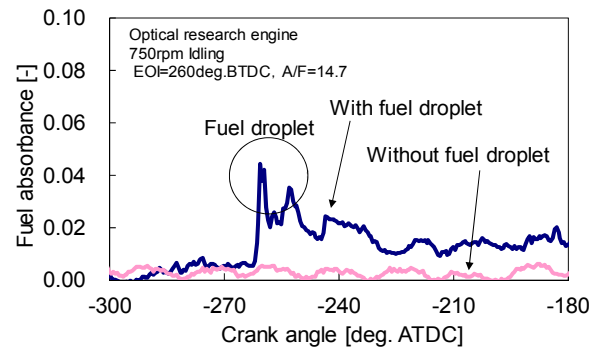


Fig. 6 Fuel Absorbance for with and without Droplet

料液滴が計測部を通過すると燃料液滴の散乱により透過光が不連続に大きく減衰し、吸光度にスパイク状の波形となって現れると予想される。よって、サイクルごとに吸光度のスパイク状の波形を観察することで点火プラグ型A/Fセンサーで液滴飛散有無を検証できると考えた。そこで、事前に可視化エンジンを用いて点火プラグ型A/Fセンサーによる吸光度の計測と噴霧の挙動撮影を同時に行うことで、液滴飛散の計測可能性を判断した。Fig. 5に噴霧の散乱光撮影画像、Fig. 6に点火プラグ型A/Fセンサーで計測した吸光度を示す。その結果、噴霧を吸気バルブに衝突させ点火プラグに液滴を飛散させた条件では吸光度にスパイク状の信号が見られ、点火プラグ型A/Fセンサーで点火プラグへの液滴飛散が計測できることが確認できた。

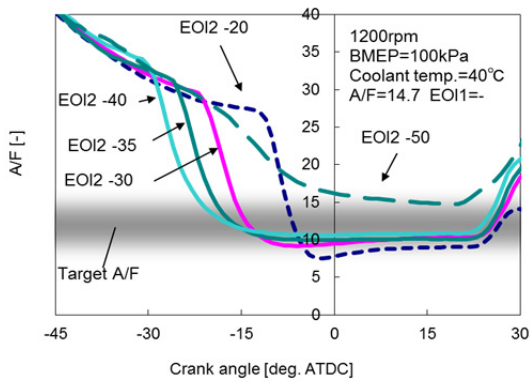


Fig. 7 Measured Air-Fuel Ratios for Different Timings of EOI2

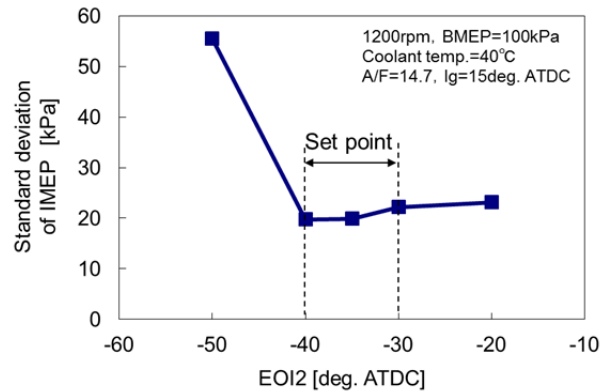


Fig. 9 Standard Deviation

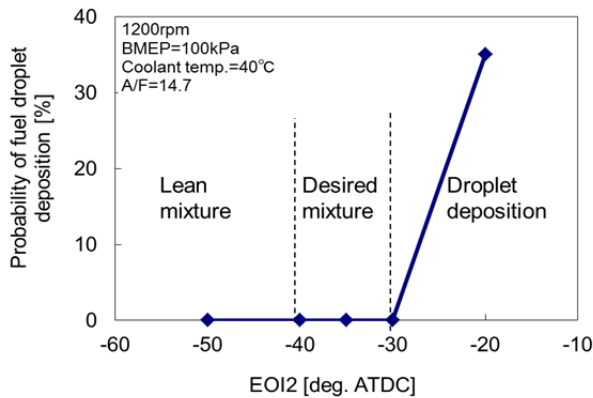


Fig. 8 Probability of Fuel Droplet Deposition

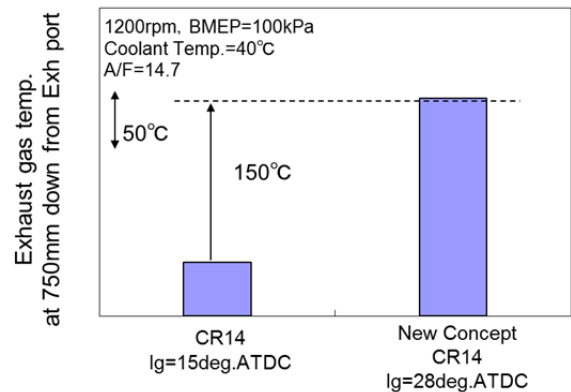


Fig. 10 Improvement of Exhaust Gas Temperatures for New Concept of Charge Stratification

5.2 点火プラグ型A/Fセンサーによるコンセプトの検証
 点火プラグ型A/Fセンサーを用いて新成層燃焼コンセプトでねらいどおりの混合気形成ができていないか検証した。

Fig. 7に触媒暖機試験条件における点火プラグ近傍A/Fの計測結果を示す。試験では噴射量割合1:1で吸気行程と圧縮行程に分割噴射を行った。圧縮行程の噴射終了時期(EOI2)-50deg.ATDCでは上段の噴霧がキャビティの上を通過し、キャビティでトラップすることができずに点火プラグ近傍A/Fが薄くなったと考える。

一方、EOI2 -40~-20deg.ATDCにおいては、それぞれ噴射終了15deg.後から25deg.ATDC程度まで安定して可燃混合気が供給されており、ねらいどおりの混合気が点火プラグに供給できたことが確認できた。

点火プラグのくすぶり懸念に対して、点火プラグへの液滴飛散を確認した。ここでは点火プラグ型A/Fセンサーで計測した吸光度に前項で述べたスパイク状の波形が見られたサイクルを液滴飛散サイクルとして、計測した連続300サイクルに対する液滴飛散サイクルの割合を液滴飛散率と定義した。Fig. 8に各EOI2における点火プラグへの液滴

飛散率を示す。EOI2 -50~-30deg.ATDCでは点火プラグに液滴飛散は認められない。これはピストンの吸気バルブ下の斜面の延長線と点火プラグの距離が確保できているため液滴飛散が防止できたと考える。一方、EOI2 -20deg.ATDCまでリタードするとピストンが上昇し吸気バルブ下の斜面の延長線と点火プラグが近接するため、点火プラグに液滴飛散するサイクルが発生したと考えられる。これらの結果から、新成層燃焼コンセプトが成立するEOI2 -40~-30deg.ATDCで安定して可燃混合気を点火プラグ周りに供給できていること、かつ液滴飛散がないことが確認できた。

5.3 燃焼安定性と排ガス温度上昇の検証

新成層燃焼コンセプトを適用した大リタード燃焼の実現性を実機運転により確認した。Fig. 9に触媒暖機試験でEOI2を-50~-20deg.ATDCまで変化させた際の燃焼安定性を示す。点火プラグ型A/Fセンサーの計測結果のとおり新成層燃焼コンセプトが成立するEOI2 -40~-30deg.ATDCにおいて良い燃焼安定性を示している。また、

Fig. 10に燃焼安定性の確保できているEOI2 - 35deg.ATDCにおいて、点火時期をリタードした際の排ガス温度を示す。成層燃焼していない点火時期15deg.ATDCに対して新成層燃焼コンセプトにより点火時期28deg.ATDCまでの大幅なリタード燃焼を可能とし150℃以上の昇温を実現できている。これらの結果から、高圧縮比エンジンでロング排気系を使用しても従来圧縮比エンジン以上の触媒早期暖機を実現できる燃焼技術が確立できた。

6. 結論

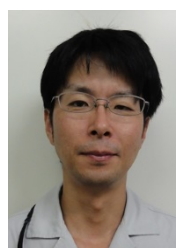
高圧縮比エンジンで冷間始動時の触媒早期暖機を実現する燃焼技術の開発を行った結果、以下の結論を得た。

1. リタード成層燃焼技術の開発において、点火プラグ型A/Fセンサーを用いることで実機エンジンに大きな改造を施すことなく成層燃焼時の混合気形成と点火プラグへの液滴飛散の有無を同時に計測できることを確認した。
2. 混合気を3段階に点火プラグ周りに送り込む新しい成層燃焼コンセプトにより、大幅なリタード燃焼を実現し高圧縮比でロング排気系を採用したエンジンで触媒早期暖機が可能な燃焼技術を確立した。

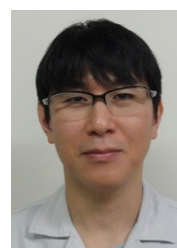
参考文献

- (1) 環境対応車普及方策検討会：環境対応車普及によるCO₂削減予測、環境対応車普及戦略, p.129 (2010)
- (2) 山川ほか：高圧縮比ガソリンエンジンの燃焼技術の開発、自動車技術会学術講演会前刷集, No.27-11, pp.11-16 (2011)
- (3) 佐々木ほか：高圧縮比エンジンの出力改善技術について、第21回内燃機関シンポジウム講演論文集, No.10-17, pp.99-104 (2010)
- (4) 山本ほか：直噴ガソリンエンジンの混合の自由を活用したコールドエミッション低減のための燃焼制御、自動車技術会学術講演会前刷集, No.2-01, pp.5-8 (2001)
- (5) Alexander Grosch, et al.: Crank Angle Resolved Determination of Fuel Concentration and Air/Fuel Ratio in a SI-Internal Combustion Engine Using a Modified Optical Spark Plug, SAE Paper 2007-01-0644 (2007)
- (6) 山川ほか：ガソリン噴霧内混合気濃度分布計測のための2波長レーザー吸収散乱(LAS)法、日本液体微粒化学会誌, vol.11, pp.142-150 (2002)

■ 著 者 ■



藤川 竜也



内田 健児



中山 佳映



山川 正尚

論文・解説

16

直噴ガソリンエンジンのプラグくすぶり性評価法の開発 Development of the Measurement Method for the Spark Plug Fouling in a DI Gasoline Engine

内田 健児*¹ 藤川 竜也*² 檜山 謙二*³
Kenji Uchida Tatsuya Fujikawa Kenji Kashiyama
小野 裕史*⁴ 山川 正尚*⁵
Hiroyumi Ono Masahisa Yamakawa

要約

ガソリン筒内直接噴射は、熱効率を改善するための高圧縮比エンジンや過給エンジンにおいて、広く採用されている。これらのエンジンにおける重要な品質問題の一つに、空燃比が濃い冷間始動時や暖機運転時に、点火プラグに燃料液滴が飛散、付着することにより引き起こされるくすぶり失火が挙げられる。そこで、マツダは、透過光減衰を利用した点火プラグ型光学センサーを用いて、点火プラグ近傍の燃料液滴量を評価するための新しい計測方法を開発した。この計測方法を用いて、点火プラグ近傍の液滴量は、プリデリバリー試験におけるエンジン始動不能に至るまでのサイクル数や暖機運転時における失火回数と強い相関があることを明らかにした。本研究で開発した性能評価法により、点火プラグに飛散する燃料液滴量を抑制することで、点火プラグの耐くすぶり性を向上させることを実証した。

Summary

Gasoline direct injection (DI) has been widely applied to high-compression-ratio and supercharged engines for better thermal efficiency. One of the major quality concerns of a DI gasoline engine is spark plug fouling caused by dispersed fuel droplets at cold starts and warm-up operations in fuel-rich conditions. To solve this problem, a new method to measure the amount of the fuel droplets attached around the spark plug was developed, by means of a spark-plug-type optical sensor using optical transmission attenuation. It was found that the amount of the fuel droplets was strongly correlated with the number of cycles until the engine became unable to restart at a pre-delivery test and the number of misfires at a warming-up operation. As a result, the antifouling performance of the spark plug was able to be improved by controlling the amount of fuel droplets around the spark plug.

1. まえがき

近年、ハイブリッド車や電気自動車などの新しい電気デバイスを搭載した自動車の研究開発が盛んに行われ、市場への導入も活発化している。しかしながら、2030年においても自動車の大半は内燃機関を搭載していると予測されており⁽¹⁾、CO₂の総排出量を削減するためにも、内燃機関、とりわけ、広く普及しているガソリンエンジンの熱効率改善が極めて重要である。ガソリンエンジンの熱効率改善の手段として、高圧縮比化⁽²⁾や過給ダウンサイジング⁽³⁾などの技術が開発され、これらの多くのエンジンではノッキング改善のために筒内直接燃料噴射（以下、直噴）が採

用されている。

直噴ガソリンエンジンにおいては、冷間時にエンジンの始動停止を繰り返す場合や暖機中に、くすぶりによる失火を引き起こすことがある。この失火の原因は、冷間始動時や暖機中は燃焼場の温度が低く点火プラグが自己清浄温度に到達していないため、点火プラグに付着した燃料液滴がカーボンとなり、絶縁体表面に堆積し、絶縁抵抗が低下することによるものといわれている⁽⁴⁾。したがって、カーボン堆積の原因となる液体燃料の付着を防止できれば、失火は起こらないことになる。しかしながら、従来の評価法では、点火プラグの仕様や燃料噴射制御を変更しながら繰り返してモード試験するため、耐くすぶり性確保に多くの開

*1,2,5 パワートレイン技術開発部
Powertrain Technology Development Dept.

*3,4 エンジン性能開発部
Engine Performance Development Dept.

発時間を要していた。そこで、本研究では、点火プラグに飛散する燃料液滴量に着目し、直噴ガソリンエンジンの耐くすぶり性を短期間で評価できる定量的な手法を開発した。

2. 点火プラグ近傍の燃料液滴検出法の開発

2.1 計測装置概要

本研究では、点火プラグに飛散する燃料液滴量を計測するために、実機エンジンに大きな改造なしで取り付けることができる点火プラグ型光学センサー（LaVision社製。以下、プラグセンサー）を用いた。プラグセンサーの概略図をFig. 1に示す。計測部は点火プラグの中心電極の横に設置されている。光源からの光はサファイアファイバーを通り、サファイアウィンドウを介して計測部に入射する。その光は計測部先端のミラーで反射され、再度サファイアファイバーを通り受光部に導かれる。なお、光源にはハライドランプを用い、受光部には光学フィルターを取り付けた。

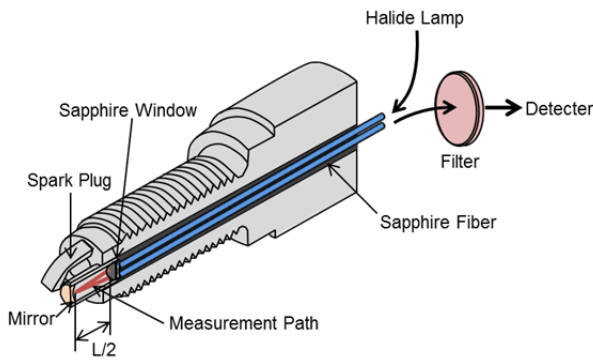


Fig. 1 Schematic of the Spark-Plug-Type Optical Sensor

2.2 計測原理

燃料液滴を検出するために、本研究では波長 λ が $2.7\mu\text{m}$ の赤外光を使用した。Fig. 2にメタンと二酸化炭素、水の赤外吸収スペクトルを示す⁽⁵⁾。赤外吸収スペクトルは原子間の結合の種類により決まるため、炭化水素燃料のC-H結合を持つメタンを代表として示している。図より、 $2.7\mu\text{m}$ の波長帯では燃料による光の吸収は起こらない。したがって、燃料液滴が存在するガソリン混合気中にハライドランプの光を照射し、光学フィルターにより $2.7\mu\text{m}$ の波長帯の光のみを取り出すと、その赤外光は混合気中に存在する二酸化炭素および水による吸収と燃料液滴による散乱によって透過光強度が減衰する。このとき、あるクランク角 θ において観測される入射光強度 I_0 [$\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]と透過光強度 $I(\theta)$ [$\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]の関係は、Bouguer-Lambert-Beerの法則⁽⁶⁾により次式で表される。

$$\ln\left(\frac{I(\theta)}{I_0}\right) = -\left\{\varepsilon_{\text{CO}_2} C_{\text{CO}_2}(\theta) + \varepsilon_{\text{H}_2\text{O}} C_{\text{H}_2\text{O}}(\theta)\right\}L - Q_{\text{ext}} A_f(\theta)L \quad (1)$$

ここで、 ε は気体のモル吸光係数 [$\text{m}^2/(\text{mol} \cdot \text{m})$]、 $C(\theta)$ はあるクランク角 θ における気体のモル濃度 [mol/m^3]、 L は光路長 [m]、 Q_{ext} は燃料液滴による減衰係数、 A_f は単位体積当たりの液滴表面積 [m^2]である。また、添え字 CO_2 と H_2O はそれぞれ二酸化炭素と水に対する値を表している。

式(1)の右辺第2項は、計測部を通過する燃料液滴で光が散乱することにより起こる透過光の減衰を表しており、粒径分布を持った液滴群に光が通過する場合、次式で表される⁽⁷⁾。

$$\ln\left(\frac{I(\theta)}{I_0}\right)_{\text{ext}} = -Q_{\text{ext}} A_f(\theta)L = -\sum\left\{R(\alpha_i, \phi) Q_{\text{ext}}(\alpha_i) \times \frac{\pi}{4} D_i^2 \Delta N_i(\theta)L\right\} \quad (2)$$

ここで、 R は光学定数、 α は粒子パラメーター ($=\pi D/\lambda$)、 D は粒子直径 [m]、 ϕ は透過光の検出角 [deg.]、 N は粒子数密度 [$1/\text{m}^3$]を表している。

Fig. 3に波長 λ が $2.7\mu\text{m}$ の時の粒子直径 D と減衰係数 Q_{ext} の関係の計算結果を示す⁽⁸⁾。減衰係数は燃料液滴の屈折率と粒径、光の波長により求まるが、ガソリンはさまざま

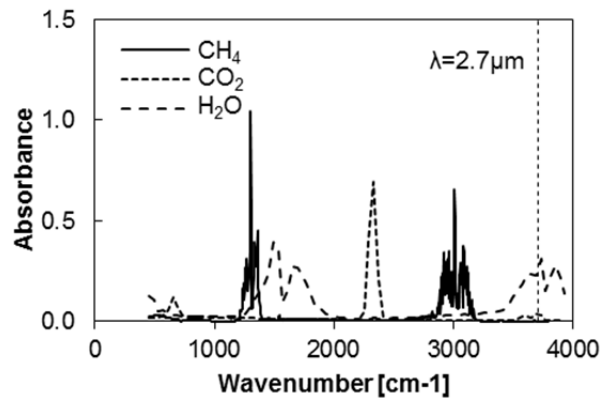


Fig. 2 IR Spectra of Methane, Carbon Dioxide and Water⁽⁵⁾

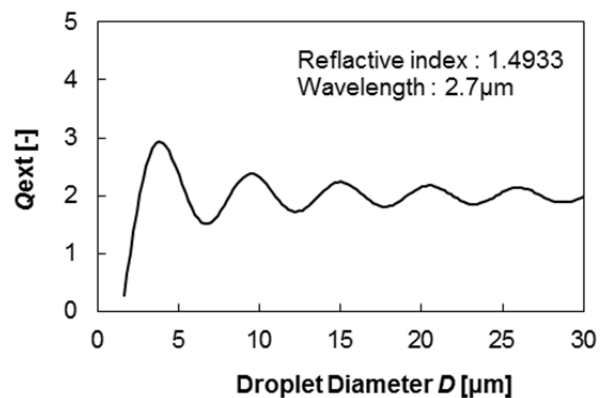


Fig. 3 Dependence of the Extinction Coefficient on the Droplet Diameter

まな炭化水素の混合物であるため、イソオクタン屈折率を代表値とした。今回計測を行った運転領域における噴霧の粒径は、位相ドップラー法を用いた粒径計測よりザウター平均粒径 D_{32} が $22\mu\text{m}$ 以上であることがわかっている。

したがって、 $Q_{\text{ext}} = 2.0$ とすることができ、 α_i は ϕ の変化に対して小さいので⁽⁷⁾ $\bar{\alpha} = \pi D_{32} / \lambda$ として、 $R(\alpha_i \phi) = R(\bar{\alpha} \phi)$ とおくことができる。更に、 $\gamma(\theta)$ をあるクランク角 θ における液滴質量濃度 $[\text{g}/\text{m}^3]$ 、 ρ を液滴の密度 $[\text{g}/\text{m}^3]$ とすると、

$$\gamma(\theta) = \rho \sum \frac{\pi}{6} D_i^3 \Delta N_i(\theta) \tag{3}$$

とおけるので、式(2)は

$$\ln \left(\frac{I(\theta)}{I_0} \right)_{\text{ext}} = -R(\bar{\alpha} \phi) Q_{\text{ext}} \frac{3}{2} \frac{\gamma(\theta) L}{\rho D_{32}} \tag{4}$$

となる。一方、点火プラグに飛散する全燃料液滴量 M_d $[\text{g}]$ は次式で表される。

$$M_d = V_{\text{sens}} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \gamma(\theta) d\theta \tag{5}$$

ここで、 V_{sens} はセンサーの計測部体積 $[\text{m}^3]$ 、 θ_1 は燃料液滴が計測部に到達するクランク角、 θ_2 は燃料液滴が通過し終わるクランク角である。更に、式(4)と式(5)から点火プラグへの燃料飛散量 M_d と透過光減衰には次の関係が成り立つ。

$$M_d \propto \int_{\theta_1}^{\theta_2} -\ln \left(\frac{I(\theta)}{I_0} \right)_{\text{ext}} d\theta \tag{6}$$

よって、式(6)より点火プラグへの燃料飛散量 M_d は透過光減衰を液滴の通過した範囲で積分したものに比例するため、プラグセンサーの透過光減衰信号から点火プラグへ飛散する燃料液滴の傾向をつかむことが可能である。そのため、この燃料飛散量は点火プラグに付着する燃料液滴量と相関があると考えられる。

2.3 液滴信号の抽出方法

Fig. 4に本研究で使用したプラグセンサーから得られた透過光減衰波形の一例を示す。図中のスパイク状の信号が計測部を燃料液滴が通過した信号である⁽⁹⁾。式(1)で示したように、本研究で用いる波長帯では混合気中に存在する二酸化炭素と水蒸気により光の吸収が起こる。そのため、これらの気体の吸光による透過光減衰と燃料液滴の散乱による透過光減衰を切り分けなければならない。そこで、本研究では燃料液滴が通過する際に透過光が急激に変化する特徴を用いて、プラグセンサーから得られた信号を2階微

分した波形より燃料液滴の通過の検出を試みた。2階微分は信号の変化量が極端に大きくなっている部分を検出できるため、スパイク状の信号の立ち上がり位置を見つけるには有効である。Fig. 4には透過光減衰波形を2階微分した波形も同時に示している。図より、2階微分値が最大の位置でスパイク信号が立ち上がっていることがわかる。したがって、本研究ではこの位置を燃料液滴が計測部に到達するクランク角 θ_1 と定義した。一方、燃料液滴が通過し終わるクランク角 θ_2 は、モータリング時の2階微分値が ± 0.001 の範囲に収束していることから、 θ_1 以降で ± 0.001 の範囲に収束する最小のクランク角を θ_2 と定義した。この2点により燃料液滴信号の切り分けを行った。更に、この直線とスパイク信号で囲まれる領域を本研究では点火プラグへの燃料飛散量 M_d' と定義した。

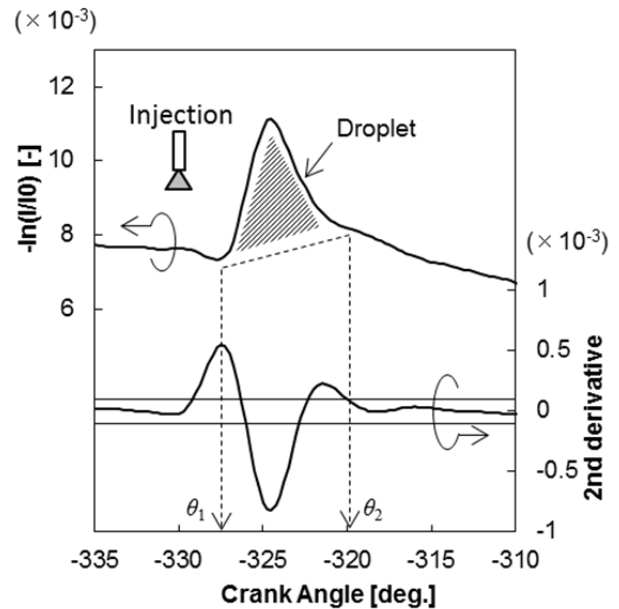


Fig. 4 Droplet Signal from the Spark-Plug-Type Optical Sensor and Detection Method of the Droplet Signal

2.4 可視化エンジンを用いた検証

プラグセンサーから得られる燃料液滴信号の妥当性を検証するために、可視化エンジンを用いて、噴霧を吸気バルブに当てることで意図的に点火プラグ近傍に燃料液滴を飛散させて撮影を行った。Fig. 5に噴霧の散乱光画像を示す。各クランク角における燃料液滴量は、プラグセンサーの計測部(φ3.3×6.5)が位置する場所に存在する燃料液滴の散乱光から、直接液滴の粒径と数を計測し、その粒径と液滴数をもとに算出した。Fig. 6に10枚の画像から得られた燃料液滴量の平均値とプラグセンサーから得られた信号を示す。両者の波形を比較すると、燃料液滴が検出される期間が一致しており、プラグセンサーの信号強度と可視化から得られた燃料液滴量の間に関連があることがわかる。したがって、プラグセンサーから得られる液滴信号を点火プ

ラグへ飛散する燃料液滴量と考えた。

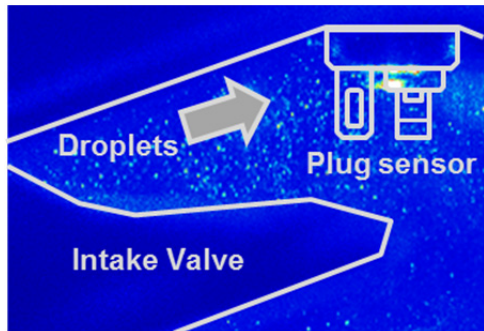


Fig. 5 Image from the Optical Research Engine

死点前320度の一括噴射であり、燃料噴射圧力は4MPaである。図より、燃料液滴が観測されるのはクランキング時

Table 1 Engine Specifications

Engine Type	In-line 4, DOHC
Bore x Stroke [mm]	83.5 x 91.2
Displacement [cc]	1,997
Combustion Chamber	Pentroof
Compression Ratio [-]	14
Fuel	Gasoline
Fuel Supply System	Side Direct Injection
Injector Type	Multi Hole (6H)
Spark Plug Type	Iridium Platinum Electrode
Heat Rating of Spark Plug	6

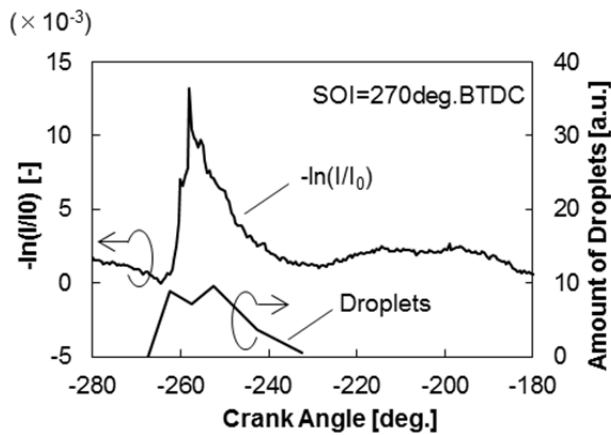


Fig. 6 The Amount of Fuel Droplets around the Spark Plug Estimated from Images and the Light Extinction Signal from the Plug Sensor

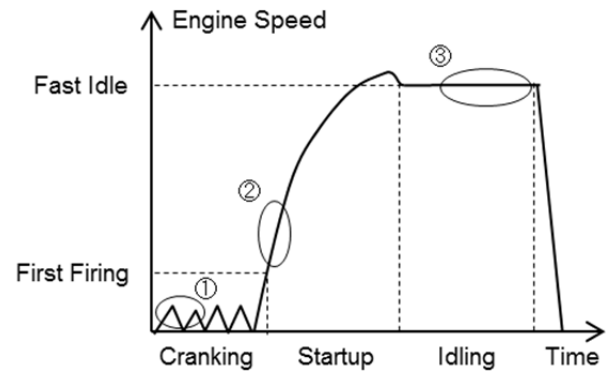


Fig. 7 Example of the Pre-Delivery Test Mode

3. 実機での点火プラグ耐くすぶり性開発

3.1 冷間始動運転時における耐くすぶり性開発

これまで、点火プラグの耐くすぶり性の品質確認として、くすぶりに最も厳しい冷間時において、エンジンの始動停止を繰り返すことにより始動不能に至るまでのサイクル数を評価する試験（プリデリバリー試験）を行ってきた。今回、プラグセンサーを用いて、プリデリバリー試験で点火プラグへの燃料飛散量 M_d' と始動不能に至るまでのサイクル数を調査した。Table 1に本研究で用いたエンジンの主要緒元を、Fig. 7にこの試験モードの一例を示す。図より、プリデリバリー試験モードは①クランキング、②スタートアップ、③アイドリングの3つの領域に分けられるので、それぞれの領域における点火プラグへの燃料飛散量を調査した。この時、プラグセンサーから得られるデータの①～③の所定サイクルの平均値を各領域における燃料飛散量 M_d' とした。

はじめに、空燃比の異なる3つの条件における燃料飛散量の計測結果をFig. 8に示す。噴射条件はいずれも圧縮上

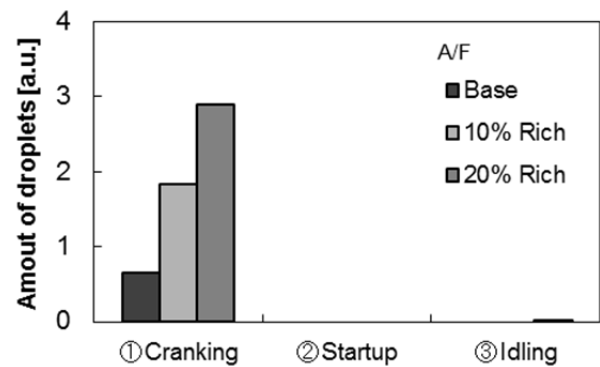


Fig. 8 The Amount of Fuel Droplets around the Spark Plug at the Pre-Delivery Test

のみで、スタートアップおよびアイドリング時にはほとんど観測されない。これは、クランキング時はスタートアップ時およびアイドリング時と比較して燃料の蒸発量が少なく、着火性を確保するために極めて空燃比の濃い条件で運転しているためと考えられる。したがって、プリデリバリー試験においてはクランキング時の燃料飛散量を管理すれば良い。

次に、噴射開始時期および空燃比を変えて燃料飛散量を計測した。この時の運転条件をTable 2に示す。燃料噴射圧力はいずれも4MPaである。また、Fig. 9にクランキング時の点火プラグへの燃料飛散量 M_d' と始動不能に至るまでのサイクル数との関係を示す。この図より、点火プラグへの燃料飛散量が少ないほど始動不能に至るまでのサイクル数は直線的に長くなるのがわかる。また、分割噴射することにより始動不能に至るまでのサイクル数も改善した。これは、空燃比を一括噴射に比べ薄くできたため燃料飛散量が減少したことと、分割噴射を行うことにより燃料の気化霧化が改善したことによると考えられる。一方、3分割噴射は始動不能に至るまでのサイクル数が悪化した。これは、ピストンが上死点に近い位置で燃料を噴射したため、ピストンに当たり跳ね返った噴霧が点火プラグ近傍に飛散したためと考えている。

最後に相似形で設計した排気量違いの燃焼室での影響を確認した。同様の条件で計測した結果をFig. 9に同時に示している。図より、点火プラグへの燃料飛散量 M_d' と始動不能に至るまでのサイクル数は排気量に関係なく成立していることがわかる。

以上の結果から、点火プラグへの燃料飛散量 M_d' を評価することで、相似形で設計した排気量違いのエンジン（コモンアーキテクチャー設計⁽¹⁰⁾）の始動不能に至るまでのサイクル数を予測することができる。これにより、燃料飛散量が少なかった条件で確認のためのプリデリバリー試験のみで済み、エンジン開発期間の短縮が可能となった。

Table 2 Operating Conditions during Cranking

ID	Start of Injection [deg.BTDC]		Split Ratio	A/F
1	250	-	-	Base
2	250	-	-	10% Rich
3	320	280	-	5:5 ±0%
4	320	280	-	5:5 30% Lean
5	340	310	280	3:3:4 ±0%

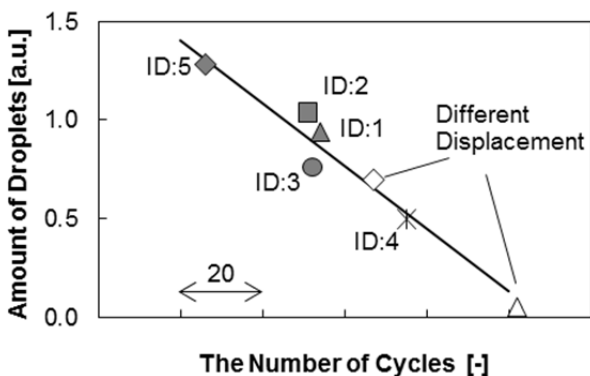


Fig. 9 Relationship between the Amount of Fuel Droplets

around the Spark Plug during Cranking and the Number of Cycles until the Engine couldn't Restart.

3.2 暖機運転時における耐くすぶり性開発

油水温が適正温度になるまでの負荷の低い暖機時は点火プラグ電極温度も低いため、液体燃料付着によるくすぶり失火が起きる条件となる。そこで、本研究では油水温が適正温度になるまでの各水温において、プラグセンサーを用いて点火プラグへの燃料飛散量 M_d' を計測した。計測に使用したエンジンは3.1節で用いたエンジンと同仕様である。

はじめに、エンジン回転数1000rpmの無負荷条件下で、噴射開始時期を圧縮上死点前350度、燃料噴射圧力を20MPaに固定し、水温を25、40、55、70℃に設定し、空燃比を変えて計測した。Fig. 10に点火プラグへの燃料飛散量 M_d' と200サイクル中の失火回数の関係を示す。図より、燃料飛散量がある値を過ぎた辺りから失火回数が増加する傾向が見られた。このことから、点火プラグへの燃料飛散量が所定の閾値以下になるように燃料噴射制御すれば、くすぶりによる失火を防ぐことが可能である。

次に、空燃比と噴射開始時期の影響を見るために、エンジン回転数1000rpmの無負荷条件下で、水温を40℃に固定し計測した。燃料噴射圧力はすべて3MPaである。そ

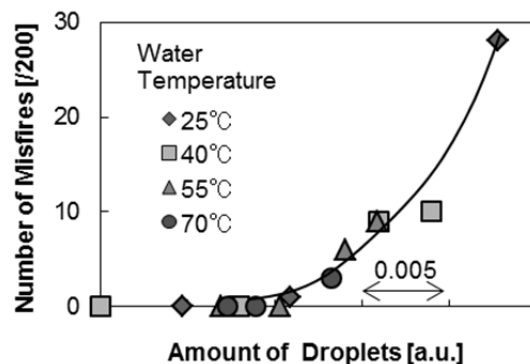


Fig. 10 Relationship between the Amount of Fuel Droplets around the Spark Plug and the Number of Misfires

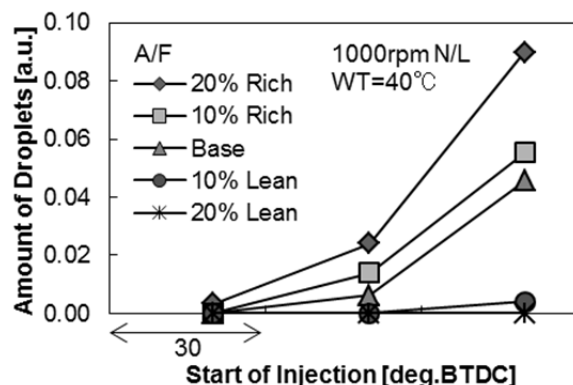


Fig. 11 Dependence of the Amount of Fuel Droplets around the Spark Plug on the Injection Timing

の結果をFig. 11に示す。図より、空燃比がBaseよりも薄い場合には噴射開始時期によらず点火プラグに飛散する燃料液滴はほとんど見られなかった。しかしながら、空燃比がBase以上の濃い条件では、噴射開始時期が上死点に近づくにつれ、燃料飛散量が増加する傾向が見られた。これは、ピストン位置が上死点に近づくに従い、ピストンと点火プラグの距離が短くなり、同時に、インジェクタとピストンの距離も短くなるため、噴霧がピストンで強く跳ね返りやすくなったことと、燃料噴射量の増加に伴い、噴射期間が延びたことによるものと考えられる。

開発した評価技術を用いて、点火プラグに飛散する燃料液滴量を所定の閾値以下になるように噴射開始時期と空燃比を調整することで、くすぶりによる失火が防げることを検証した。

4. まとめ

直噴ガソリンエンジンで点火プラグの耐くすぶり性評価方法を開発した結果、以下の結論を得た。

1. 透過光減衰を利用した点火プラグ型光学センサーを用いて、点火プラグに飛散する燃料液滴量を検出する方法を確立した。可視化エンジンで検証した所、このセンサーから得られる信号強度は、可視化から得られた燃料液滴量と良い相関を示した。
2. 点火プラグへの燃料飛散量を定量化することで、冷間時の始動不良と、暖機時の失火回数を予測可能にした。冷間時においては、燃料飛散量が減少するに従い、プリデリバリー試験でエンジンが始動不能に至るまでのサイクル数が延びることを明らかにした。一方、暖機時では、点火プラグへの燃料飛散量が所定の量を超えると失火回数が増加することを明らかにした。
3. くすぶり性評価法を用いて、燃料飛散量を所定の閾値以下になるように噴射開始時期、空燃比を制御することで、冷間時の始動不良や暖機時の失火を抑制できた。したがって、開発した評価法を今後のエンジン開発に適用することで、点火プラグくすぶり性能の開発期間を大幅に短縮できる可能性がある。

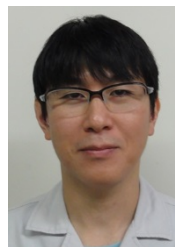
参考文献

- (1) 人見：内燃機関の将来展望，第21回内燃機関シンポジウム基調講演資料，p.7 (2010)
- (2) 山川ほか：高圧縮比ガソリンエンジンの燃焼技術の開発，自動車技術会論文集，Vol.43，No.1，pp.81-87 (2012)
- (3) E. Curtis, *et al.* : EcoBoost:Downsized Gasoline DI Turbo Engines as the Backbone of Ford's CO₂ and Fu

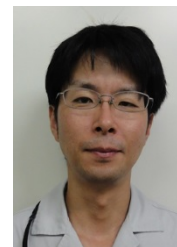
el Economy Product Strategy, FISITA2010 Proceeding s, F2010A130, pp.1-13 (2010)

- (4) 西尾：くすぶり汚損で機能消失，スパークプラグ，東京，山海堂，pp.65-78 (1999)
- (5) <http://webbook.nist.gov/chemistry/> (National Institute of standards and Technology Chemistry Web Book)
- (6) W.C. Hinds：光学的性質，エアロゾルテクノロジー，東京，井上書院，pp.303-333 (1985)
- (7) レーザ計測ハンドブック編集委員会：透過光減衰法，レーザ計測ハンドブック，東京，丸善，pp.235-238 (1993)
- (8) H. C. Van de Hulst, Formula for Practical Use, Light Scattering by Small Particles, United States, John Wiley & Sons, Inc., p.129 (1957)
- (9) 藤川ほか：高圧縮比ガソリンエンジンの掃気性改善と触媒早期暖機のための燃焼技術開発，自動車技術会論文集，Vol.43，No.2，pp.351-356 (2012)
- (10) 長津ほか：高圧縮比ガソリンエンジンにおける燃焼のコモンアーキテクチャー技術，自動車技術会学術講演会前刷集，No.30-12，pp.23-26 (2012)

■ 著 者 ■



内田 健児



藤川 竜也



榎山 謙二



小野 裕史



山川 正尚

論文・解説

17

バイオ燃料と人工光合成 Biofuel and Artificial Photosynthesis

岩国 秀治*¹
Hideharu Iwakuni

要 約

バイオ燃料と人工光合成の研究動向を概観したうえで、マツダの人工光合成の研究について報告する。

バイオ燃料の課題は、ライフサイクルでの温室効果ガス排出量削減、供給安定性、経済性確保、食料との競合回避である。これらを解決するため、微細藻類バイオ燃料が注目されている。

一方、植物のエネルギー変換効率 (0.2%) を低コストで上回る可能性がある技術として人工光合成がある。国家プロジェクトの人工光合成プロジェクトでは、太陽光エネルギー変換効率目標 10% (2021 年) に対し、2015 年時点で 2.2% まで達している。

マツダも大阪市立大学と共同研究を行い、光エネルギーを用いて酢酸からエタノールを合成する新しい人工光合成技術を開発したので報告する。

Summary

Mazda overviewed recent research trends in biofuel and artificial photosynthesis in Japan.

The biofuel, which derives from edible biomass, presents such challenges as improvement in effectiveness of CO₂ emissions cut, stable supply and economic efficiency, and competition with food stuffs. As a means to resolve these challenges, inedible and high energy producing microalgae biofuel has attracted a lot of attention in recent years.

On another front, artificial photosynthesis is available as a technology to greatly improve energy conversion efficiency. In the NEDO project, 2.2% solar energy conversion efficiency has been attained in 2015, with respect to 10% target for 2021.

In collaboration with Osaka City University, Mazda developed a new artificial photosynthesis system to synthesize ethanol from acetic acid using light energy, which is detailed in this article below.

1. はじめに

自動車や航空機等の移動体の燃料は、エネルギー密度や貯蔵・輸送等の点から液体燃料が望ましい。便利で貴重な液体燃料を使い続けながら、二酸化炭素 (CO₂) 削減と石油需要の抑制を実現するには、太陽光エネルギーや自然エネルギー等の再生可能エネルギーのみを用いて製造した再生可能液体燃料の比率を高め、普及させていく必要がある。

再生可能液体燃料実現のため、マツダでもバイオ燃料や人工光合成等の将来技術についていろいろな観点から検討している。本稿では、バイオ燃料と人工光合成の研究動向を概観したうえで、マツダが大阪市立大学と共同で研究している人工光合成の研究成果について述べる。

2. 再生可能液体燃料の取り組みの必要性

2.1 再生可能液体燃料の意義

経済産業省は「次世代自動車戦略 2010⁽¹⁾」において、次世代自動車 (ハイブリッド、電気自動車、燃料電池車、クリーンディーゼル) の普及目標を政府目標として設定している。これによると、2030 年においても、内燃機関搭載車が主流となっている。すなわち、2030 年時点も、自動車燃料の大半はガソリンや軽油といった液体燃料が占めていることになる。

一方、地球温暖化防止の観点から、化石資源由来の液体燃料の使用量はできる限り削減したい。これらの要求を満足するには、内燃機関や車両の効率改善に加え、再生可能液体燃料の比率を上げていくことが重要と考える。

*1 技術研究所
Technical Research Center

2.2 エネルギーの種類とエネルギー変換技術

エネルギーの種類とエネルギー変換技術を Fig. 1 に示す。太陽光発電と電解技術を組み合わせて水素やメタン等の高エネルギーな化学物質を製造することが技術的に可能である。目的とする再生可能液体燃料を得るには、複数のプロセスを組み合わせることとなるが、エネルギー変換プロセスが増えるほど効率は低下する。これらのプロセスの選択には、プロセス全体で投入エネルギー、コストが最少で、CO₂削減量が最大となる観点で検討することが望まれる。このような視点から、将来のエネルギー創成技術として、光エネルギーを化学エネルギーに直接変換できるバイオ燃料と人工光合成が有望と考えられる。以下、バイオ燃料と人工光合成の日本での研究動向について総説する。

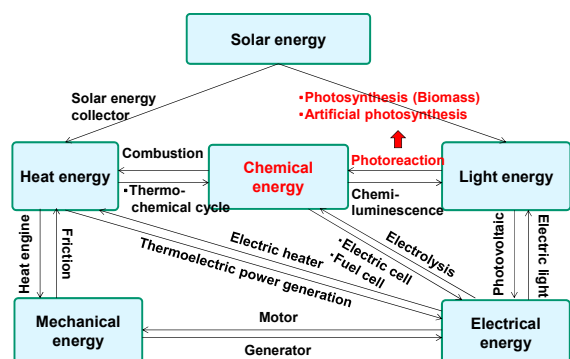


Fig. 1 Energy Conversion Technology

3. バイオ燃料の研究動向

CO₂ 排出量の削減に加え、エネルギー安全保障、地域経済活性化という観点からもバイオ燃料が注目されている。

3.1 第一世代バイオ燃料（可食バイオマス由来）

バイオ燃料は、植物が生育する際に大気中の CO₂ を吸収するので、CO₂削減効果があると考えられている。

(1) バイオエタノール

ガソリンに混ぜて自動車用燃料として使う植物由来のエタノールのことを「バイオエタノール」と呼ぶ。ブラジルではサトウキビの糖質、米国ではトウモロコシのデンプン質を原料に、発酵法で生産している。

米国では 2007 年にエネルギー政策法が改定され、バイオエタノールの生産を 2022 年までに自動車燃料の 20% に当たる 360 億ガロンとしようとしている。米国、ブラジル、欧州の一部では 10vol% を超えるバイオエタノールをガソリンに含有した E10 燃料を、日本では 3vol% 混ぜた E3 燃料を使用している。

(2) エチルターシャリーブチルエーテル (ETBE)

ETBE は、バイオエタノールとイソブテン（石油精製時の副産物）から合成される。バイオエタノールを原料と

する ETBE は 8vol% 以下でガソリンに混合され、日本では 2007 年からバイオガソリンとして販売が始まった。

エタノールは水との親和性が高く、空気中の水分を吸収するため取り扱いが難しいが、ETBE は水に溶けないのでガソリンと同じように取り扱える利点がある。

(3) バイオディーゼル燃料

植物あるいは動物から採れる油脂にメタノールを加えてメチルエステル化すると、軽油に近い物性をもつ脂肪酸メチルエステル (FAME : Fatty Acid Methyl Ester) ができる。FAME は原料によって性状が異なるので、ディーゼル燃料への混合は 5wt% 以下と定められている。

粗パーム油を水素化処理によって脱炭素・分解し、ディーゼル燃料として利用する水素化バイオ軽油 (BHD : Bio Hydro-fined diesel) の研究開発や実証実験が進められている。BHD は石油系燃料と同等性能なので添加量制限はなく、次世代バイオディーゼル燃料として期待されている。

3.2 第二世代バイオ燃料（非可食バイオマス由来）

食糧と競合しない農業残渣や建築廃材、製材残材等の廃棄物系バイオマスから製造されるバイオ燃料を第二世代バイオ燃料と呼ぶ。第二世代バイオ燃料は、研究開発段階にあり、実用化には至っていない。

(1) バイオエタノール（非可食）

木材をチップや粉状にし、濃硫酸法、希硫酸法、酵素糖化法等で前処理した後、セルロースやヘミセルロースを発酵プロセスで糖化してバイオエタノールを製造する研究が進められている。セルロース由来エタノールは、原料に廃棄物系バイオマスを用いるため、生産時にエネルギーを大量投入する可食バイオマス、特にトウモロコシ由来のバイオエタノールに比べて CO₂ 排出量の削減効果が大きい。

(2) バイオマス・ツー・リキッド (BTL)

ガス化炉を用いて廃棄物系バイオマスを一酸化炭素 (CO) と水素に分解し、この合成ガスを「フィッシャー・トロプシュ (FT) 合成」で反応させると、軽油相当の炭化水素系液体燃料が製造できる。

BTL ディーゼル燃料は、硫黄や芳香族炭化水素を全く含まないため、すすや窒素酸化物がほとんど生成しないクリーンな排出ガスになる。

3.3 第三世代バイオ燃料（藻類由来）

藻類とは、淡水または海水に生育し、体内の葉緑素で酸素発生を伴う光合成を行い、陸上植物のように明確な根、茎、葉の区別がない生物の総称である。大型藻類（ノリ、ワカメ等）と微細藻類に大別される。

微細藻類は光合成により炭水化物を合成するが、その副産物として油脂を生産する。微細藻類は光合成能力が高く、その多くは 24 時間以内で倍増するため、陸上植物の 10 倍以上の CO₂ 固定能力をもっている²⁾。

日本の主な微細藻由来バイオ燃料開発事業を Table 1 にまとめた³⁾。実用化段階に近い (1) 油生成微細藻類のシュードコリスチス, (2) 炭化水素生成微細藻類のボトリオコッカス, (3) パラミロン生成微細藻類のユーグレナについて以下で詳細に述べる。これらに加え, バイオ燃料の課題である耕作地や水資源問題の本質的解決のため, 海洋微細藻類の基礎研究も行われている。

(1) 油生成微細藻類

シュードコリスチス (*Pseudochoricystis ellipsoidea*) は, 5 μ m 程度の緑色単細胞の軽油産出微細藻類⁴⁾である。光合成により増殖するが, 窒素が不足すると軽油相当の炭化水素を成分とする油を作り, 細胞内に蓄積する。(株)デンソーが中心となり, 中央大学・(株)クボタ・出光興産(株)らと研究開発を進めている。

(2) 炭化水素生成微細藻類

ボトリオコッカス (*Botryococcus braunii*) は淡水に生息する緑色から赤色の藻類で, 30~500 μ m のコロニーを形成する⁴⁾。光合成により炭化水素を生産し, 細胞及びコロニー内部に乾燥重量の 20~75%の炭化水素を蓄積する。植物油の中でも生産性が高いパーム油と比較して 3 倍以上の生産性がある。(株)IHI が保有するボトリオコッカスの稈本藻は, 増殖速度が速く, 雑菌にも強いという特徴をもっており, 屋外培養に有利である。

(3) パラミロン生成微細藻類

和名「ミドリムシ」で馴染みのあるユーグレナ (*Euglena*) は, 湖沼などの淡水に広く分布する微細藻類の一種である。葉緑体で光合成を行うとともに鞭毛を使って水中を移動することから, 植物と動物の両方の分類に属する。温度, pH などの環境条件に対して適応能力が高く,

CO₂ 固定能力に優れている。ユーグレナは, 酸素が存在する好気的な培養条件下において光合成によりパラミロンを蓄積し, これを酸素が存在しない嫌気的条件下に移すと, パラミロンを細胞内で貯蔵脂質ワックスエステルへと変換する特異な代謝経路を有している⁵⁾。

3.4 バイオ系再生可能液体燃料の課題と解決法

第一世代バイオ燃料には, ライフサイクルでの温室効果ガス排出量削減, 供給安定性確保, 経済性確保(化石燃料同等コスト)に加えて, 食料との競合回避という課題がある。バイオ燃料でも現在注目を集めているのが, 微細藻類由来バイオ燃料である。藻類は単位面積当たりのエネルギー生産量が高く, 海洋性藻類であれば土地や水で食糧作物と競合することもない。ただし, 光合成の太陽光エネルギー変換効率は 1~2%前後で, 燃料等への化学処理で更に効率は低下する。この課題を解決するには, バイオマスの育成と燃料製造プロセスを低エネルギーにするだけでなく, 微細藻類そのものの太陽光エネルギー変換効率を大幅に向上することが必要となってくる。

4. 人工光合成の研究動向

近年, 光触媒を用いた水分解による水素製造や CO₂ 固定のような人工光合成の研究に関心が高まっている。

4.1 人工光合成の定義

光合成とは, 光合成細菌や植物など光合成色素(葉緑体)をもつ生物が行う光エネルギーを化学エネルギーに変換する生化学反応のことである。一般には太陽光エネルギーと CO₂ と水を用いて, 糖と酸素を生産する反応をいう。

Table 1 Main National Projects of the Biofuel from Microalgae

	Company / University	Stage	Kind of microalgae	Environment	Product	Purpose alternative fuel	Fund
(1)	DENSO・Kubota・Idemitsu・Chuo Univ.	Application	<i>Pseudochoricystis ellipsoidea</i>	Fresh water	・Hydrocarbon ・Triglyceride	Jet fuel Diesel oil	NEDO 2011~
(2)	IHI・Chitose Lab.・Kobe Univ.	Application	<i>Botryococcus braunii</i>	Fresh water	Hydrocarbon	Jet fuel	NEDO 2012~
(3)	euglena・JX・HITACHI・Keio Univ.	Application	<i>Euglena</i>	Fresh water	Wax ester	Jet fuel	NEDO ~2015
(4)	DIC・Kobe Univ.	Basic	<i>Chlamydomonas</i>	Salt water		Jet fuel	NEDO 2012~
(5)	J-POWER・JGC・TAT ^{a)}	Basic	Marine diatom <i>Fistulifera solaris</i>	Salt water	・Triglyceride ・Hydrocarbon	Jet fuel	NEDO 2013~
(6)	IIT ^{b)} ・Saitama Univ.・Univ. of Tokyo・Tohoku Univ.・Kao	Basic	<i>Nannochloropsis</i>	Fresh & Salt water	Triacylglycerol	Jet fuel	CREST 2011~
(7)	Kobe Univ.	Basic	Marine algae <i>A.platensis</i>	Salt water	Glycogen	Bioethanol	CREST ~2015
(8)	TAT・Nihon Univ.・Yamaha Motor・J-POWER	Basic	Marine diatom <i>Fistulifera solaris</i>	Salt water	Triacylglycerol	Diesel oil	CREST ~2015
(9)	Shimane Univ.・Kinki Univ.・euglena	Basic	<i>Euglena</i>	Fresh water	Wax ester	Diesel oil	CREST 2011~

a)TAT : Tokyo Univ. of Agriculture and Technology

b)TIT : Tokyo Institute of Technology

光合成は大きく二つの反応系から成る。一つは太陽光を利用した光化学反応（明反応）で、もう一つはエネルギーを利用して糖を合成するカルビン回路（暗反応）である。

光化学反応（明反応）では、水から電子が引き抜かれ、Z 機構と呼ばれる複雑な電子伝達経路を経て、太陽光エネルギーが電子伝導体のニコチンアミドアデニンジヌクレオチドリン酸（NADPH）に蓄積される。また、チラコイド膜を隔てた水素イオンの濃度差を駆動力にしてアデノシン三リン酸（ATP）が合成される。

カルビン回路（暗反応）では NADPH と ATP を使って CO_2 と水から糖を合成する。このように光合成では、光エネルギーは最終的に化学エネルギーとして蓄積される。

人工光合成とは文字どおり光合成を人工的に行うことであるが、一般的には、光エネルギーを化学エネルギーに変換する人工的な物質システムと定義できる。人工光合成を広い意味でとらえれば太陽光エネルギーの高エネルギー物質（水素や CO_2 還元物）への変換であり、光触媒による水素製造のほか、光電極と電解還元、または太陽光発電と電解還元を組み合わせた化学物質製造もその範疇に入る。

人工光合成の研究テーマは、光合成メカニズムの理解に始まり、光合成の模倣、高付加価値物質の合成、燃料のような高エネルギー化学物質の生成まで多岐にわたる。本稿では、エネルギー生産関連テーマに絞って解説する。

4.2 人工光合成の原理（光触媒による水分解）

世界初の「人工光合成」は、1972年に科学雑誌“Nature”に発表された“本田-藤島効果”である。酸化チタン（ TiO_2 ）の単結晶を陽極に、白金を陰極に配置し、波長 400nm 以下の紫外線を照射すると、わずかなバイアス電流で水を水素と酸素に分解できることから、水から燃料を得るブレイクスルー技術として世界的に注目された。

TiO_2 の伝導体の下端電位が H^+/H_2 の酸化還元電位（標準水素電位 SHV で 0V）よりも負、 TiO_2 の価電子帯の上端電位が水の酸化電位（1.23V SHE）よりも正のとき、“本田-藤島効果”が発現する（Fig. 2）。 TiO_2 が電解液に接触すると TiO_2 表面付近のバンドが曲がって空間電荷層が形成される。光照射で電子-正孔対ができると、空間電荷層による電場勾配によって電子はバルク側へ、正孔は表面へと電荷が分離される。

伝導体の下端電位と価電子帯の上端電位の差であるバンドギャップエネルギー（ E_g ）は、アナタース型 TiO_2 では 3.2eV となる。 E_g に相当する波長の光より短波長の光を当てると、 E_g 以上のエネルギーが供給され、価電子帯の電子は伝導帯に励起される。価電子帯には正孔が生じて光反応が進む。励起電子は、伝導帯の下端電位が基質の酸化還元電位よりも-に大きい場合、還元反応が起こる。一方、価電子帯に生成した正孔は、基質の酸化還元電位よりも+に大きい場合、電子を奪い取って酸化反応が起こる。

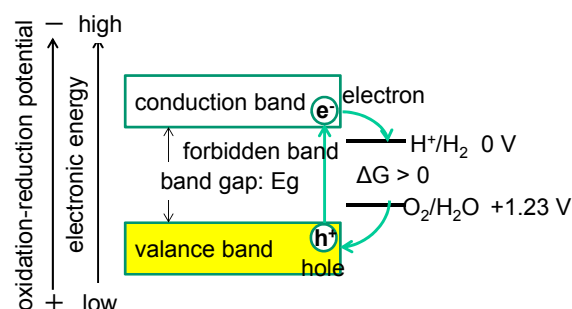


Fig. 2 Oxidation-Reduction Reaction of Photocatalyst

4.3 人工光合成技術の開発状況

米国エネルギー省「エネルギー・イノベーション・ハブ」プログラムや欧州の第7次技術開発枠組計画（FP7）公募型研究及び日本の新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の「人工光合成プロジェクト」といった国家プロジェクトの支援もあり、米国、欧州、日本等では人工光合成の研究開発が加速している。NEDO“人工光合成プロジェクト”は、2021年時点で10%の太陽エネルギー変換効率を目標に掲げている。この変換効率10%は、経産省水素供給価格目標値（40円/Nm³@2020年）を満たすための実用上の必須条件とされている。

日本における人工光合成研究のトップランナーの研究開発状況を以下に述べる。

(1) 半導体/金属錯体ハイブリッド光電極

(株)豊田中央研究所は、2011年9月、太陽光エネルギー（可視光）を利用し、外部アシストなしで水と CO_2 のみを原料にして有機物（ギ酸）を合成する人工光合成の実証に世界で初めて成功と発表した⁽⁶⁾。太陽エネルギー変換効率は0.04%で、これは一般的な植物であるスイッチグラス（0.2%）の1/5程度である。

本システムは、生成酸素による触媒被毒防止用に設けたプロトン交換膜で仕切られた CO_2 還元光電極と H_2O 酸化電極を導線をつないだ電気化学セル構造をとっている。 CO_2 還元電極の光触媒には Rh 錯体と半導体 InP から成る InP/Rh 錯体を、 H_2O 酸化電極の光触媒には TiO_2 を用いている⁽⁷⁾。2015年には、光吸収層にシリコンゲルマニウム（SiGe-jn）を用い、太陽光変換効率4.6%に達する1チップ人工光合成デバイスを開発した⁽⁸⁾。

(2) 半導体光電極と金属触媒電極の組み合わせ

パナソニック(株)は、窒化物半導体（窒化ガリウム：GaN）と金属触媒インジウム（In）を導線をつないだ電気化学セルで、 CO_2 から有機物のギ酸を生成する人工光合成システムを開発した^{(9),(10)}。2014年には、GaN に In を混ぜた半導体と銅（Cu）触媒電極を組み合わせ、太陽エネルギー変換効率0.3%で CO_2 をメタン等に還元した⁽¹¹⁾。

(株)東芝もパナソニック(株)と類似した人工光合成システムを2014年11月の国際学会で報告した⁽¹²⁾。

(株)東芝とパナソニック(株)の大きな違いは、カソード極の触媒材質にみられる。パナソニック(株)は Cu 触媒で CO₂ をメタン等に還元したのに対し、(株)東芝はナノサイズの金 (Au) 触媒で CO₂ を CO に還元している⁽¹³⁾。

(株)東芝はアノードに助触媒の酸化コバルトを担持した多接合型太陽電池を使用している。このアモルファスシリコン太陽電池は、アモルファスシリコン及びアモルファス・シリコンゲルマニウムから成る 3 層構造の太陽電池で、紫外線から赤外線まで波長が異なる光を幅広く吸収できる。

(3) 水素発生用光触媒と酸素発生用光触媒の組み合わせ NEDO 人工光合成化学プロセス技術研究組合 (ARPCHEM) は、太陽エネルギーを利用した光触媒による水からの水素製造で、エネルギー変換効率が世界最高レベルとなる 2.2% を達成したと発表した⁽¹⁴⁾。酸素発生用触媒に BiVO₄、水素発生用触媒には可視光領域の光を吸収できる Cu(In,Ga)Se₂ を採用し、これらを塗布した電極を導線をつないでタンデムに配置した。

各研究機関で研究開発された人工光合成システムの太陽光エネルギー変換効率を Fig. 3 に示す。

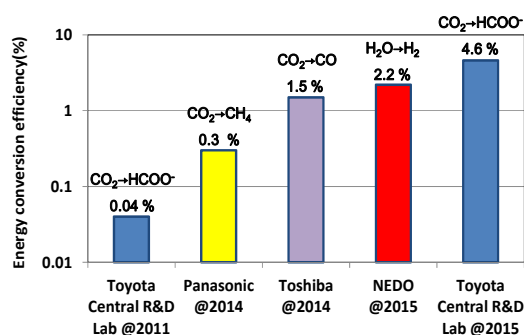


Fig. 3 Energy Conversion Efficiency of latest Artificial Photosynthesis

5. マツダの人工光合成の研究

大阪市立大学人工光合成研究センター天尾教授とマツダは、酢酸から自動車の燃料になるエタノールを作り出す新規の人工光合成技術を開発した⁽¹⁵⁾。

5.1 研究コンセプト

光触媒あるいは人工光合成による CO₂ 還元生成物として、CO、ギ酸、メタノール等が報告されている。メタノールについては、天尾教授らによって原理検証が行われている^{(16),(17)}。このように CO₂ を炭素数 1 のメタノールに変換する人工光合成系は報告されていたが、炭素数を更に一つ増やしたエタノールを作り出す技術には至っていなかった。光エネルギーのみで CO₂ から一段でエタノールを人工的に合成することが可能かどうかは現時点では分からないが、酢酸を出発原料にすれば天尾教授の CO₂-メタノール

ール変換技術を応用し、CO₂→酢酸→アセトアルデヒド→エタノールの経路でエタノール合成が可能ではないかと考えた。CO₂ からの酢酸合成は、CO₂ と水素と酢酸生成菌で成立する可能性がある。この反応の原料となる水素は、再生エネルギーや光触媒等を用いて製造することができるので、化石燃料を一切用いないシステムを構築できる可能性がある。上記のコンセプトを Fig. 4 に示す。

天尾教授の人工光合成による CO₂ からのメタノール合成の知見をベースに、CO₂ を酢酸に変換する酢酸生成菌を組み合わせることを前提に、酢酸-エタノール合成人工光合成システムを検証した。

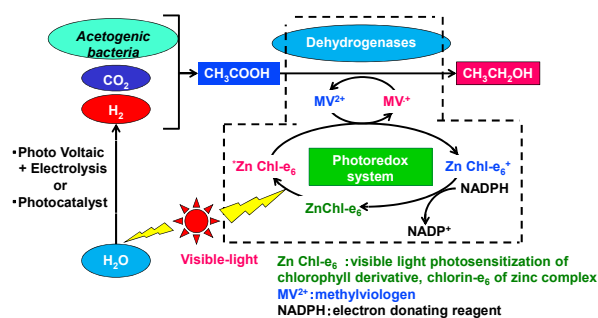


Fig. 4 Concept of Visible-light Induced Ethanol Synthesis from Carbon Dioxide, Water

5.2 実験結果と考察

酢酸-エタノール合成人工光合成システムは、電子供与体 NADPH、光増感剤クロリン-e6 亜鉛錯体、電子伝達体メチルピオローゲン及びアルデヒド脱水素酵素、アルコール脱水素酵素から成る (Fig. 5)。

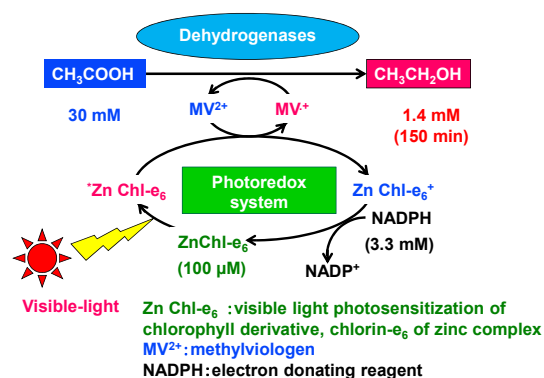


Fig. 5 Experimental Condition

このシステムに可視光を照射し、150 分後に反応溶液を分析した結果、エタノールが生成した (Fig. 6)。生成エタノール濃度を原料の酢酸の濃度で除した変換効率は、4.7% となった。電子伝達体メチルピオローゲンの濃度が高くなるほど、エタノールの生成濃度・効率が向上することを見出した。一方、光照射が無い条件では、エタノール

は生成しなかった。

光照射によりメチルビオローゲンが還元され、還元型のメチルビオローゲンがアルデヒド及びアルコール脱水素酵素の基質となり、酢酸がアルデヒドを經由してエタノールに変換することを確認した。光合成のカルビン回路に相当する物質変換系に酵素系触媒を用いた高効率・高選択性をもつ人工光合成システムの可能性が検証できた。

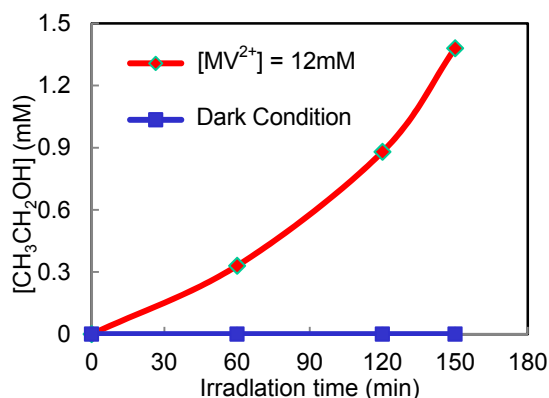


Fig. 6 Time Dependence of Photochemical Ethanol Synthesis under Steady State Irradiation with Visible Light

6. まとめ

大阪市立大学人工光合成研究センターと共同研究を行い、酢酸から光エネルギーを用いてエタノールを合成する新規反応系を世界で初めて見出した。これまで人工光合成によるCO₂還元反応の生成物は、CO、ギ酸、メタノール等炭素数が1のものに限られていたが、Fig. 4に示した技術が達成できれば、炭素数が2のエタノールを太陽光とCO₂から作り出すことが可能になる。

この技術を発展させると、CO₂と水を原料に太陽光エネルギーのみを使ってガソリン、軽油相当の液体燃料も合成可能になる。再生可能液体燃料の実現・普及によって、内燃機関自動車が永遠に存在し続け、エンジンの鼓動を感じながら走る喜びを未来のお客様と共有していきたい。

参考文献

- (1) 次世代自動車戦略研究会：次世代自動車戦略 2010, p.9 (2010)
- (2) 池島ほか：微細藻類からの潤滑油, PETROTECH, Vol.35, No.5, pp.47-55 (2012)
- (3) 産業技術総合開発機構：NEDOにおけるバイオ燃料製造技術開発の取り組み (2015)
- (4) 石油エネルギー技術センター：JPEC レポート 2011年度第5回 (2011)
- (5) 中央大学研究開発機構：微細藻類バイオマス利用シンポジウム予稿, 2015年9月3日 (2015)
- (6) TOYOTA CRDL, INC. NEWS, 2011年9月20日
- (7) S. Sato et al.: Selective CO₂ Conversion to Formate Conjugated with H₂O Oxidation Utilizing Semiconductor/Complex Hybrid Photocatalysts, *J. Am. Chem. Soc.*, 133, pp.15240-15243 (2011)
- (8) T. Arai et al.: A monolithic device for CO₂ photo-reduction to generate liquid organic substances in a single-compartment reactor, *Energy Environ. Sci.*, 8, pp.1998-2002 (2015)
- (9) Panasonic プレスリリース, 2012年7月30日
- (10) M. Deguchi et al.: Enhanced Capability of Photoelectrochemical CO₂ Conversion System Using an AlGaIn/GaN Photoelectrode, *Japanese Journal of Applied Physics*, 52, 08JF07 (2013)
- (11) 日本経済新聞電子版 2014年9月15日
- (12) Y. Sugano et al.: Solar-to-Conversion Efficiency by Wired PV Cell System with Cobalt Oxide and Gold Nanoparticles catalyst, 2014 International Conference on Artificial Photosynthesis, P5-08, p.236 (2014)
- (13) TOSHIBA 研究開発センターHP, 2014年12月
- (14) NEDO News Release, 2015年3月31日
- (15) Y. Amai et al.: Ethanol Synthesis based on the Photoredox System Consisting of Photosensitizer and Dehydrogenases, *Applied Catalysis B: Environmental*, 180, pp.403-407 (2016)
- (16) Y. Amai et al.: Photochemical and Enzymatic Synthesis of Methanol from HCO₃⁻ with Dehydrogenases and Zinc Porphyrin, *Chemistry Letters*, 33 (12), pp.1544-1545 (2004)
- (17) Y. Amai et al.: Photochemical and enzymatic methanol synthesis from HCO₃⁻ by dehydrogenases using water-soluble zinc porphyrin in aqueous media, *Applied Catalysis B*, 86, pp.109-113 (2009)

■ 著 者 ■



岩国 秀治

論文・解説

18

高応答遮熱壁面が速度境界層内現象に及ぼす影響 The influence of high-response heat insulation wall surface on the velocity boundary layer phenomena

田中 達也*1 原田 雄司*2 中尾 裕典*3
Tatsuya Tanaka Yuji Harada Yusuke Nakao
服平 次男*4 山下 洋幸*5 山本 寿英*6
Tsugio Fukube Hiroyuki Yamashita Toshihide Yamamoto

要 約

エンジンの熱効率向上が強く求められており、その向上策の一つとして、低熱伝導・低比熱の遮熱材を燃焼室壁へ塗布することで、壁温がガス温に追従して振幅し、冷却損失低減により熱効率の向上を図る方法が期待されている。ここでは遮熱材を最適化し、冷却損失の低減を最大化することを目指して、遮熱壁近傍の熱流体現象に起因する伝熱メカニズムを明らかにすることを目的としており、本報では、二次元流速計測法と薄膜積層熱電対を急速圧縮膨張装置に適用し、遮熱材を塗布した壁近傍の境界層内のガス速度と遮熱壁面温度を計測することで、各種乱流特性値が伝熱メカニズムへ及ぼす影響について明らかにした。

Summary

Improvement of thermal efficiency is strongly required for automotive engines. To reduce heat loss, heat insulation coating of low heat conductivity and capacity to combustion chamber walls is proved to be effective. To optimize the specifications of the heat insulation coating, it is necessary to find the heat transfer mechanism between gas and the wall surfaces as well as the wall temperatures. For that purpose, the heat loss process originated in thermal fluid near the wall was investigated. To clarify the effects of turbulent characteristics on heat transfer mechanism, a micro-particle image velocimetry method and a thin film thermocouple were applied to a rapid compression and expansion machine, and the gas velocity in the boundary layer near the heat insulated wall and the wall temperature were measured.

1. はじめに

温暖化やエネルギーセキュリティ等の地球規模の課題に対応するため、内燃機関の熱効率向上が強く求められている。その内燃機関の熱効率向上策の一つとして、低熱伝導かつ低比熱の遮熱材を燃焼室壁へ塗布することで、壁温がガス温に追従して振幅し、冷却損失低減により熱効率の向上が期待できる方法^{(1)~(6)}が知られている。そこでは、遮熱壁近傍の熱流体現象に起因する伝熱メカニズムを明らかにすることで、遮熱材の仕様を最適化し、冷却損失の低減を最大化する必要がある。

壁近傍の熱流体現象に関しては、トルエンのレーザー誘起蛍光法により加熱壁上での境界層内温度分布の詳細な計測を行った例⁽⁷⁾や、抵抗線温度計を用いて急速圧縮膨張装置の燃焼室壁近傍のガス温度を直接測定した研究⁽⁸⁾がある。しかしながら、遮熱壁近傍の伝熱メカニズムにおいて重要

になるのは、ガスと壁間の界面（壁面）の温度とその界面に対して熱エネルギーを輸送する流動の状態であり、ガス温度の情報だけでは不十分である。遮熱壁の壁面温度に関しては、薄膜積層熱電対によって遮熱材を塗布した急速圧縮膨張装置の燃焼室壁の表面温度の計測および熱流束の算出を行った研究^{(9),(10)}や、燐光体寿命法による可視化ディーゼルエンジン内のピストン遮熱壁の表面温度の計測を行った報告⁽¹¹⁾がある。薄膜積層熱電対は熱電対の熱容量を低減することで、遮熱材の温度振幅に追従した高応答計測ができるが、燐光体寿命法は、燐光体の塗布厚さおよび燐光体温度と遮熱材温度の関係が明確になっておらず定量的な壁温計測には更なる研究が必要である。一方、壁近傍の流動計測に関しては、可視化エンジンに μ PIV計測法を適用し、壁から $50\mu\text{m}$ レベルの分解能でガス速度の計測を行った例⁽¹²⁾があるが、ガス速度分布を壁関数⁽¹³⁾の校正に適用するに留まり、壁近傍の乱流特性量と伝熱メカニズムと

*1~6 技術研究所
Technical Research Center

の関係については踏み込んでいない。

本研究では、非接触な高速 μ PIV計測法と薄膜積層熱電対を急速圧縮膨張装置 (Rapid Compression and Expansion Machine 以下“RCEM”) に適用し、遮熱材を塗布した壁 (以下“遮熱壁”) 近傍の境界層内のガス速度と遮熱壁の表面温度の計測を行い、各種乱流特性値が伝熱メカニズムへ及ぼす影響について調査を行った。

2. 実験装置および実験解析手法

2.1 急速圧縮膨張装置

本研究で用いたRCEMは、エンジンと比較して構造が単純であるために内部の現象可視化が行いやすいこと、一回のみの圧縮膨張しか行わないために耐久性の低い新材料であっても評価が行えることなどの特徴をもつ。

Fig. 1にRCEMの全体図を示す。また、Table 1にRCEMの諸元及び実験条件を示す。

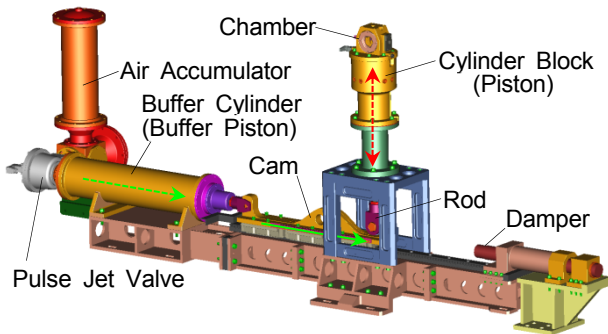


Fig. 1 Overview of Rapid Compression and Expansion Machine (RCEM)

Table 1 RCEM Specifications and Experimental Conditions

Bore x Stroke	89mm x 95mm
Compression Ratio	14.2:1
Compression / Expansion Time	98ms / 132ms
Infill Gas	Dry Air
Initial Gas Temperature	298K
Initial Wall Temperature	298K
Initial Gas Pressure	Atmospheric Pressure

RCEMは、主に空気蓄圧室、緩衝シリンダー、カム、ピストン・ロッド、シリンダーブロック、チャンバー、ダンパーから構成される。任意のタイミングでパルスジェットバルブ (CKD製 PDV3-80A) を開放することで、空気蓄圧室内の加圧された空気が緩衝シリンダー内に流入し、緩衝シリンダー内の緩衝ピストンを図の右方向に押す。緩衝シリンダー内の緩衝ピストンに連結されたカムが移動することで、このカムの形状に沿ってロッドに連結されたシ

リンダーブロック内のピストンが上昇下降し、チャンバー内の空気を加減圧する。ピストンが下死点の時点でフォトセンサーの信号をデジタルディレイパルスジェネレーター (Stanford Research製 DG645) に取り込み、この出力信号を計測用トリガー信号として、レーザー、高速度ビデオカメラおよびデータ記録用のADコンバーター等を同期させた。

Fig. 2にRCEMのチャンバー内の概略図を示す。

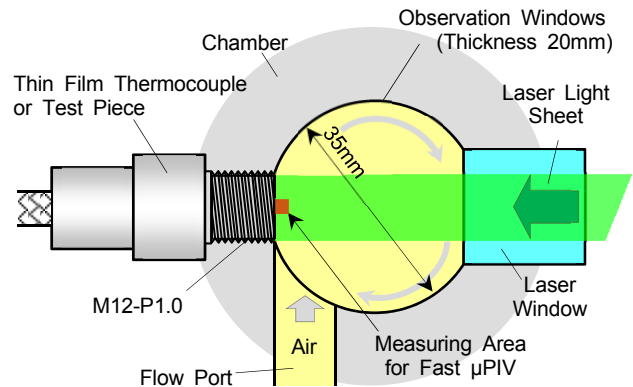


Fig. 2 Schematic of RCEM Chamber

チャンバーは、直径が約35mm、厚さが17mmの縦型の円筒形状である。ピストン上昇によって圧縮された空気が、フローポートを通してチャンバー内の平板部において壁乱流を形成するようにした。平板部にはM12の雌ネジを設置して、薄膜積層熱電対^{(9),(10)}、遮熱材付テストピース等の取り付けを可能とした。高速 μ PIV計測は、テストピースの表面の中央位置において実施した。レーザーシート光は、薄膜積層熱電対あるいはテストピースと対向した位置に設置したレーザー窓を介して入射した。チャンバー両側には、厚さ20mmのサファイアガラスの観察窓を取り付けている。他にチャンバーには、圧力変換器 (Kistler製 Type6125) を設置し、チャンバー内の平均ガス圧力の計測を行った。

Fig. 3に、Table 1の条件においてRCEMを動作させた時のチャンバー内の平均ガス圧力 P と平均ガス温度 T_g のカムの移動量 L_{cam} に対する履歴を示す。

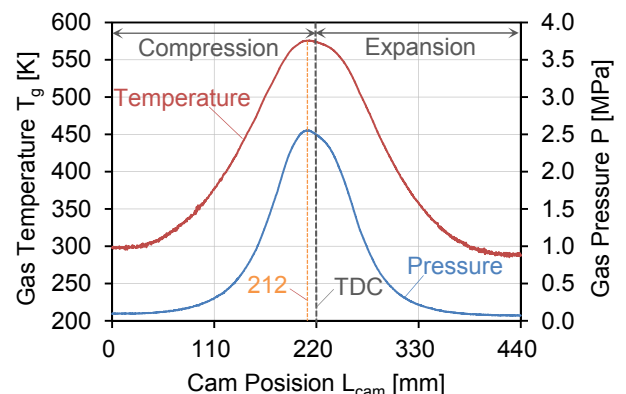


Fig. 3 In-Chamber Pressure and Temperature Traces

平均ガス温度 T_G は、圧力変換器から得られたチャンパー内の平均ガス圧力 P から気体の状態方程式により算出した。ピストンが $L_{cam} = 0$ (下死点) から圧縮を開始して、 $L_{cam} = 212mm$ において最高圧力2.55MPa、最高温度576Kに達する。その後、ピストンは $L_{cam} = 220mm$ において上死点 (TDC) に到達し、 $L_{cam} = 440mm$ において再び下死点に戻る。

2.2 高速 μ PIV計測システム

Fig. 4に、遮熱壁近傍のガス速度分布計測のための高速 μ PIV計測システムを示す。光源である532nmの発振波長をもつダブルパルス・半導体励起Nd:YAGレーザー (Lee Lasers製 LDP-100MQG) のレーザー光をシート状にして10kHzの繰り返し周波数でチャンパー内に導入した。計測エリア内の所定の流速範囲に対応できるように二つのパルス間の時間差を7 μ sとした。トレーサー粒子からの側方散乱光を明視野用対物レンズ (ミットヨ製 M Plan Apo 5 \times) を通して、高速度ビデオカメラ (フォトロン製 FASTCAM SA-X2) によって、壁から約3mmまでのエリア内において毎秒20,000フレームで撮影を行った。

トレーサー粒子には、多孔質中空シリカ粒子 (鈴木油脂工業製 ゴッドボールB-6C) を用いた。この粒子は、平均粒子径が2.0~2.5 μ m、かさ密度が180~450kg/m³と微小かつ軽量である。トレーサー粒子は、所定量をあらかじめRCEMのピストン頂部にセットした。

Fig. 5に、本計測システムで撮影したトレーサー粒子の典型的な散乱光画像を示す。レーザーシートの反射光が観察されている部分がチャンパーの壁位置に相当する。図より、壁の極近傍においてもトレーサー粒子が良く補足されている様子が分かる。このようにして得られたトレーサー粒子の散乱光画像に対して、汎用PIV解析プログラム (西華デジタルイメージ製 Koncerto II) を使い、 x 方向および y 方向の瞬時速度 u および v の分布を算出した。この時の検査領域のサイズは、縦24pixel \times 横16pixel、検査領域のオーバーラップは縦66% \times 横50%とした。

変動速度 u' および v' は、式(1)に示すように、 μ PIV計測による瞬時速度 u および v とカットオフ周波数以下の低周波速度成分である平均速度 U および V の各差分として定義した。ここでカットオフ周波数は、速度エネルギースペクトルが変曲点を示す周波数⁽¹⁴⁾である150Hzとした。

$$u' = u - U, \quad v' = v - V \quad (1)$$

壁面せん断応力のうちで乱流寄与項に相当するレイノルズ応力 $\overline{u'v'}$ は、式(1)を用いて以下の式(2)のように表せる。

$$\overline{u'v'} = \frac{1}{N} \sum (u - U)(v - V) \quad (2)$$

N は平均区間内データ数であり、ここでは $N = 30$ である。また、乱流エネルギー k は、次の式(3)により算出した。

$$k = \overline{u'^2} + \overline{v'^2} \quad (3)$$

ここで、 $\overline{u'^2}$ および $\overline{v'^2}$ は、次の式(4)、式(5)でそれぞれ表すことができる。

$$\overline{u'^2} = \frac{1}{N} \sum \frac{1}{2} (u - U)^2 \quad (4)$$

$$\overline{v'^2} = \frac{1}{N} \sum \frac{1}{2} (v - V)^2 \quad (5)$$

以上の解析処理に当たっては、市販の数値解析ソフトウェア (MathWorks製 MATLAB) を使用した。

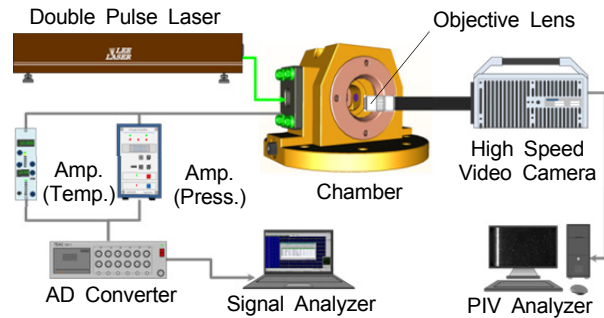


Fig. 4 Schematic Diagram of Fast Micro-PIV Measuring System

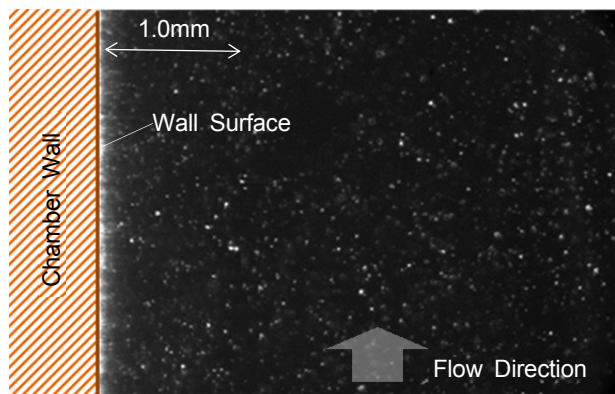


Fig. 5 Typical Scattering Light Image from Silica Particles

3. 実験結果および考察

3.1 遮熱壁における壁温計測結果

Fig. 6に、薄膜積層熱電対による壁温計測結果を示す。圧縮上死点である $L_{cam} = 220mm$ の位置では、金属壁の場合の壁温が303Kまでしか上昇していないのに対して、遮熱壁の場合の壁温が353Kとなっており、遮熱壁の場合が金属壁に対して50Kほど高い壁温上昇を示している。これは遮熱材が持つ低熱伝導かつ低比熱の効果が現れたためであり、この壁温上昇分だけ平均ガス温度との差が縮小するために熱損失の低減に有利であるといえる。

Fig. 7に壁温計測結果から求めた熱流束の算出結果を示す。熱流束は非定常1次元熱伝導方程式をコントロールボリューム法の完全陰解法に離散化方程式解法を用いて算出

した。熱流束は、遮熱壁および金属壁の双方で、圧縮上死点前付近でピークを取り、その後、膨張にともなって減少する。圧縮上死点前付近で熱流束がピークをとるのは、対流熱伝達に強い影響を及ぼすピストン速度の影響が強いためと思われる。遮熱壁と金属壁の熱流束の値に最も差が生じているのは、 L_{cam} が198mm付近である。この時、遮熱壁の場合の熱流束が0.13MW/m²、金属壁の場合が0.23MW/m²となっており、遮熱壁の場合は金属壁の場合の約56%の熱流束に留まっている。以降の高速 μ PIV計測では、遮熱壁と金属壁の間で熱流束値に最も差が生じる $L_{cam} = 198mm$ における流れの現象について説明を行う。

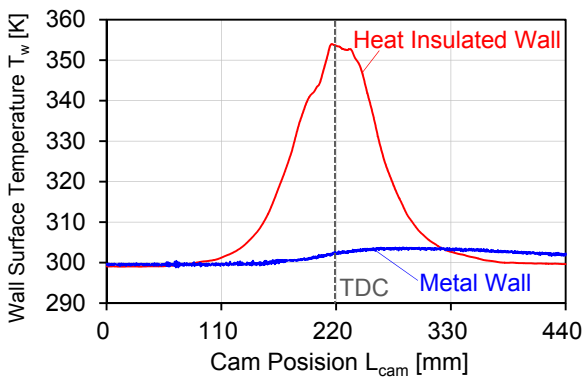


Fig. 6 Wall Surface Temperature via Thin Film Layered Thermocouple

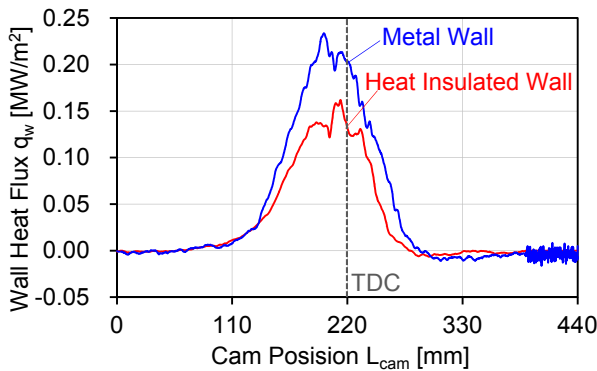


Fig. 7 Wall Heat Flux Calculated from Wall Surface Temperature

3.2 遮熱壁近傍の流動場の計測結果

(1) 遮熱壁近傍の乱流境界層

Fig. 8に高速 μ PIV計測システムにより得られた、 $L_{cam} = 198mm$ における遮熱壁近傍の一次元ガス速度分布を示す。壁に近づくにつれて速度の急激な降下が見られる。この速度の降下領域は、速度境界層に相当するものであり、本計測システムによって、壁近傍の境界層内の速度分布を十分に捉えられていることが分かる。

Fig. 9に、Fig. 8のガス速度を摩擦速度で無次元化した一次元ガス速度 u^+ の分布を示す。横軸は、摩擦速度と動

粘性係数によって無次元化した距離 y^+ に変換している。壁から $y^+ = 5$ 付近までは、 $u^+ = y^+$ の線形関係が成立する粘性低層に相当し、 $y^+ = 5$ 付近から $y^+ = 30$ 付近までは対数則をとる遷移的なバッファ域、 $y^+ = 30$ 以降は乱流域であるといわれている⁽¹⁵⁾。今回の計測では、 $y^+ = 10$ 以降のデータしか得られていないものの、典型的な壁乱流境界層内の現象を示していることが分かった。

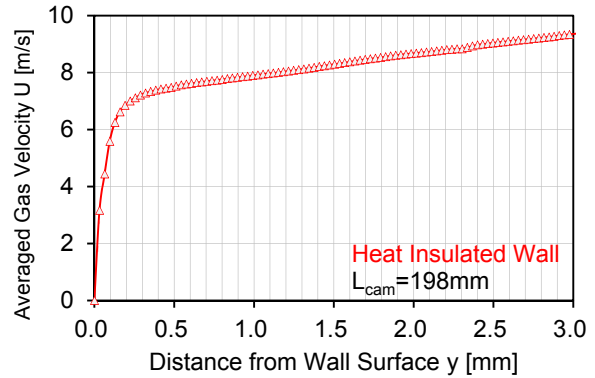


Fig. 8 Averaged Gas Velocity Distribution near Heat Insulated Wall ($L_{cam}=198mm$)

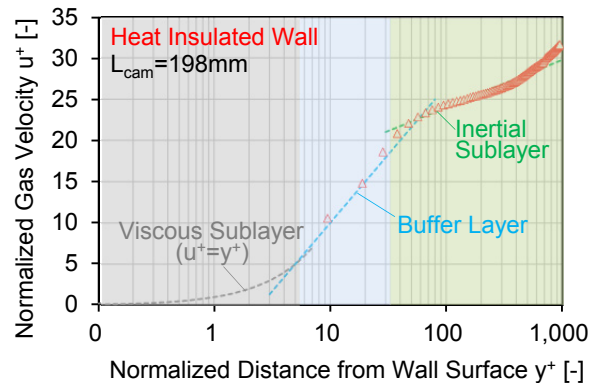


Fig. 9 Normalized Gas Velocity Distribution near Heat Insulated Wall ($L_{cam}=198mm$)

Fig. 10に壁近傍の境界層内におけるガスの流動状態を可視化した結果を示す。あわせて壁近傍を更に拡大した結果も示す。計測には μ シャドウグラフ法を用いた。計測点は、高速 μ PIV計測の場合と同じく、 $L_{cam} = 198mm$ である。これから、複数の筋状の模様（密度の二回微分値）が壁の極近傍まで分布している様子が見取れる。このような筋構造は、低速および高速域の流れが筋状に並んだ乱流渦の微細構造によるものであり、このことは、壁近傍では乱流の影響が無視できるとしていた従来の考え方に対して、乱流によるエネルギー輸送の観点で壁近傍の伝熱メカニズムの考察を行う必要性を示唆している。

(2) 遮熱壁近傍の乱流エネルギー分布

Fig. 11に、 $L_{cam} = 198mm$ における無次元化した乱流エネルギー k^+ の壁からの分布を示す。無次元化した乱流エ

エネルギーは、壁近傍の粘性の影響を排除して乱流起因の乱れの影響について考察するために、式(3)に示す乱流エネルギーを摩擦速度の二乗で除したものである。遮熱壁の場合の k^+ は、金属壁の場合のそれと比較して、粘性低層外縁部からバッファ域、乱流域にかけてその値が低いことが分かる。加熱壁上における壁乱流境界層の実験結果⁽¹⁶⁾、⁽¹⁷⁾では、壁温度の上昇によって周囲の流体の密度の減少と動粘性係数の増加が同時に起こるが、密度の減少は速度の乱れ強さを増加させる方向に働き、逆に動粘性係数の増加は乱れ強さを減少させる要因として働くとしている。したがって、遮熱壁の近傍で無次元化した乱流エネルギーが減少したことから、壁温度の上昇に伴う壁近傍のガス密度の低下よりも動粘性係数の増加の寄与が大きいことが推察される。

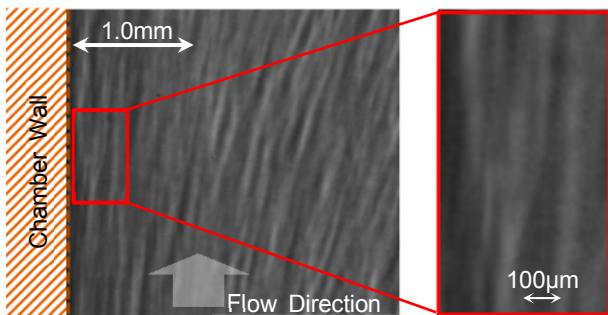


Fig. 10 Micro Shadowgraph Image near Wall

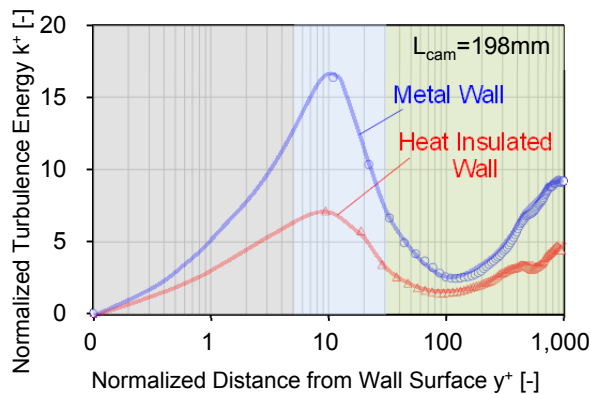


Fig. 11 Normalized Turbulence Energy Distribution near Wall ($L_{cam}=198mm$)

(3) 遮熱壁近傍のレイノルズ応力分布

前項において、壁近傍の境界層内においても乱れの影響があること、そして遮熱壁の場合は壁近傍の乱流エネルギー k^+ が抑制されることを示した。最終的にガスから壁へ熱が伝わる際には、ガスと壁の界面に生じる壁面せん断応力が重要な因子となる⁽¹⁸⁾。壁面せん断応力は、層流寄与項と乱流寄与項から構成され、乱流寄与項に相当するのが、式(2)に示すレイノルズ応力である。レイノルズ応力は、壁からの距離の重みづけ積分により、壁面せん断応力への寄与を表すことができる⁽¹⁹⁾。

Fig. 12に、 $L_{cam} = 198mm$ におけるレイノルズ応力の壁からの分布を示す。これから、粘性低層外縁部からバッファ域にかけては、遮熱壁及び金属壁とではレイノルズ応力に差は見られないが、乱流域では遮熱壁の場合が金属壁に比較して低い値を示している。粘性低層からバッファ域にかけては、壁の摩擦の影響が強いため粘性によるせん断応力の影響が支配的となり、遮熱壁と金属壁の双方でレイノルズ応力に差が現れなかったものと思われる。しかしながら乱流域に入ったところから、粘性によるせん断応力の影響が相対的に低下するため、乱流起因のレイノルズ応力分布に差が出たものと思われる。前述のように、レイノルズ応力は壁からの距離の重みづけ積分により壁面せん断応力へ寄与するために、遮熱壁上の壁面せん断応力は金属壁上のそれに対して低下すると推測される。その結果、遮熱壁の場合は金属壁に比較して熱伝達率が低下し、壁温上昇も付加されることで熱流束が低減されたと考えられる。

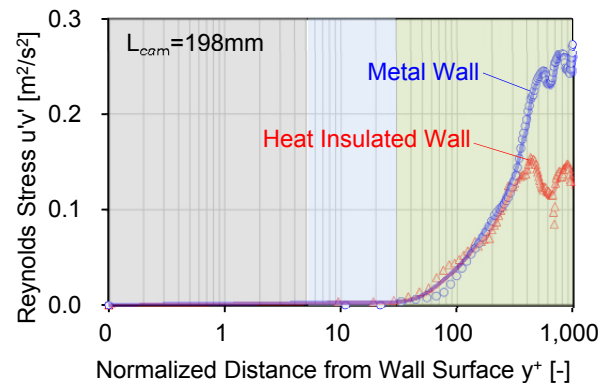


Fig. 12 Reynolds Stress Distribution near Wall ($L_{cam}=198mm$)

4. おわりに

遮熱壁近傍の境界層内のガス速度の計測を行い、ガス速度から各種乱流特性値の算出を行うことで遮熱壁近傍の乱流構造が伝熱プロセスへ及ぼす影響について調査した。以下に得られた結果をまとめる。

- (1) 高速 μ PIV計測法により、壁近傍の粘性低層外縁からバッファ層、乱流層におけるガス速度分布の計測が可能となった。
- (2) 固体摩擦の影響が強い壁近傍でも微細な乱流構造が見られ、乱流起因の伝熱プロセスを検討する必要がある。
- (3) 遮熱壁の近傍では、遮熱効果による壁温度の上昇に伴って壁近傍のガス温度が上昇し、壁近傍のガスの密度の低下よりも動粘性係数の増加の寄与が大きくなることで壁近傍の乱流エネルギーが低下する。
- (4) 金属壁に対する遮熱壁近傍の乱流エネルギーの低下

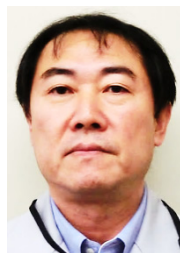
分は、乱流域のレイノルズ応力分布の低下に起因する。この結果、遮熱壁近傍の壁面せん断応力が減少することで熱流束が低減される。

最後に、本研究で使用したRCEMの設計製作および運用では、九州大学大学院 工学研究院 機械工学部門の村瀬英一教授に多大なご協力をいただいた。また本研究の一部は、2012年～2015年に新エネルギー・産業技術総合開発機構の支援を受け、戦略的省エネルギー技術革新プログラムの一環で実施したものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- (1) D. A. Assanis et al.: Transient Heat Conduction in Low-Heat-Rejection Engine Combustion Chambers”, SAE Paper, No. 870156 (1987)
- (2) H. Yamashita et al.: Thermal Efficiency Improvement by Increasing Compression Ratio and Reducing Cooling Loss”, COMODIA 2012, pp.36-42. (2012)
- (3) H. Kosaka et al.: Concept of “Temperature Swing Heat Insulation” in Combustion Chamber Walls, and Appropriate Thermo-Physical Properties for Heat Insulation Coat, SAE Paper, No. 2013-01-0274 (2013)
- (4) 脇坂ほか：壁温スイング遮熱法によるエンジンの熱損失低減(第2報)単筒エンジンによる遮熱効果の先行検討, 自動車技術会春季大会学術講演会講演予稿集, No. 20155027, pp.154-159 (2015)
- (5) 川口ほか：壁温スイング遮熱法によるエンジンの熱損失低減(第3報)列型過給直噴ディーゼルエンジンへの適用, 自動車技術会春季大会学術講演会講演予稿集, No. 20155028, pp.160-165 (2015)
- (6) 西川ほか：壁温スイング遮熱法によるエンジンの熱損失低減(第4報)スイング遮熱膜の材料, 自動車技術会春季大会学術講演会講演予稿集, No. 20155029, pp.166-171 (2015)
- (7) T. Fuyuto et al.: Laser-based temperature imaging close to surfaces with toluene and NO-LIF, Journal of Physics, Conference Series 45, pp.69-76 (2006)
- (8) 小堀ほか：内燃機関の燃焼室壁面近傍における境界層温度分布と消炎距離の測定, 日本機械学会論文集(B編), 77巻 784号, pp. 250-259 (2011)
- (9) 中尾ほか：高応答遮熱壁面における瞬時熱流束計測技術, マツダ技報 No.32, pp. 222-227 (2015)
- (10) O. Aoki et al.: Analysis of Heat Transfer Phenomena on High Response Heat Insulation Coatings by Instantaneous Heat Flux Measurement and Boundary Layer Visualization, SAE Paper, No. 2015-01-1996 (2015)
- (11) 福井ほか：レーザー誘起燐光法を用いた高応答温度計測技術 壁温スイング遮熱膜への応用, 自動車技術会春季大会学術講演会講演予稿集, No. 20155232, pp.1195-1200 (2015)
- (12) C. Jainski et al.: High-speed micro particle image velocimetry studies of boundary-layer flows in a direct-injection engine, International Journal of Engine Research, 14 (3), pp. 247-259 (2012)
- (13) B. E. Launder et al.: The numerical computation of turbulent flows, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 3, Issue 2, pp. 269-289 (1974)
- (14) 大倉ほか：高速 PIV によるエンジン燃焼室内の乱流計測, 日本機械学会論文集(B編), 79巻 806号 pp. 2193-2206 (2013)
- (15) 笠木ほか：乱流工学ハンドブック, 朝倉書店, pp. 193-194 (2009)
- (16) 松島ほか：高熱負荷を受ける平板乱流境界層の構造, 日本機械学会論文集(B編), 49巻 439号, pp. 646-655 (1983)
- (17) 繁富ほか：平板上に発達する温度境界層内の乱れの挙動および乱流プラントル数, 日本機械学会論文集, 39巻 323号, pp. 2137-2150 (1973)
- (18) 斎藤ほか：例題演習 伝熱工学, 産業図書 (1985)
- (19) K. Fukagata et al.: Contribution of Reynolds stress distribution to the skin friction in wall-bounded flows, Physics of Fluids, vol.14, L73-76 (2002)

■ 著 者 ■



田中 達也



原田 雄司



中尾 裕典



服平 次男



山下 洋幸



山本 寿英

論文・解説

19

人間の反力知覚特性の解明と操作機器の反力設計への適用 Analysis of the Human Ability to Perceive Reaction Force and its Application to a Reaction Force Design for an Operational Device

竹村 和紘*¹ 山田 直樹*² 新部 忠幸*³
Kazuhiro Takemura Naoki Yamada Tadayuki Niibe
岸 篤秀*⁴ 西川 一男*⁵ 農沢 隆秀*⁶
Atsuhide Kishi Kazuo Nishikawa Takahide Nouzawa

要 約

ドライバーがコーナリング走行時にステアリングホイール（以下、ステアリング）を操作し、目標地点に向かって車を制御する時、車の進む方向が予見しやすければ、「意のままの運転」が可能になると考えられる。また、「意のままの運転」ができていた時のドライバーの感覚を、リニアなフィーリングと呼んでいる。ここで、リニアなステアリングの操作フィーリングを実現するためには、操作入力に対する車両応答の関係を線形にすればよいという仮説を持っていたが、実際にはリニアなフィーリングが得られない問題が生じる。これは、物理特性どおりに人間が感じていないためである。従って、操作入力と車両応答の知覚特性をモデル化することで、感覚量と物理量の関係を明らかにしなければ、リニアなフィーリングは設計できない。このような考えに基づき、「意のままの運転」の実現にあたり、コーナリング走行における車の「走る・曲がる・止まる」で必要となる操作に関わる各基本特性において、本稿では、リニアを表現するための操作入力に関する反力知覚モデルの解明と操作機器の反力設計への適用について報告する。

Summary

When a driver operates a steering wheel (hereinafter, is steering) a car while turning a corner and controlling the car toward a target point, it is commonly assumed that a driver feels in control of the car when the car's steering characteristics allow them to easily foresee the direction in which the car will move. This sense is known as a linear feeling. The authors have hypothesized that the relationship of a vehicle's response to an operational input must be linear to realize the operational feeling of linear steering. However, in reality, a problem occurs in which the linear feeling is not felt. This problem occurs because human beings do not entirely experience any feeling through its physical properties alone. Accordingly, a linear feeling cannot be integrated into the design if a mutual conversion between a steering sense and a physical characteristic is not enabled by modeling the perception properties between the operational input and the vehicular response. Based on the above hypothesis, to truly experience the joy of driving, the authors will analyze reaction force perception models and apply the results to a reaction force design for an operational device with reference to operational inputs for all basic actions, such as driving, turning, and stopping, related to driving that a driver carries out while turning a corner.

1. はじめに

私たちは、「走る歓び」と「優れた環境・安全性能」が調和した車を実現することを目指している。例えば、お客様の「走る歓び」（ワクワク感）を実現するため、新型ロードスターでは「意のまま感」といった感性ワードを軸にして、設計パラメータを決定するような商品開発が行われ

ている^①。具体的には、そういった感性ワードについて、人間がフィーリング評価を行い、自動車の機械特性にまで落とし込んでいる。

これまで、「意のまま感」を感じさせる操作機器を実現するために、テストドライバーのフィーリング評価とチューニングを納得いくまで繰り返してきた。しかし、試作とフィーリング評価を繰り返すことで多くの時間が必要とな

*1~6 技術研究所
Technical Research Center

ルガン式)を用いて、事前にF-S (Force Stroke) 特性を調べておき、ペダルのストローク量からその時に生じたペダル反力が算出できるようにした。なお、ペダルのストローク量は車両のController Area Networkの信号から計測し、実験ではマグニチュードプロダクションを用いた。まず、ドライバー席に座った被験者に、事前にストローク量が50%における反力を基準100%であることを体感させ、覚えてもらう。そして、実験者はFig. 3の点線で示す50~200%までの50%刻みの反力をランダムに指示し、被験者には指示された反力とを感じるまでペダルをストロークさせる。結果をFig. 4に示す。この図は被験者2名(エキスパートドライバー1名、一般ドライバー1名)の結果であり、横軸が提示した力 F_t 、縦軸が知覚した力 F_p で、実線は最小二乗法で求めた式(1)である。なお、係数 a 、 b 、および決定係数 R^2 を図中に示す。

$$F_p = aF_t + b \quad (1)$$

この図から、実際に生じた反力に対する知覚した力の関係は、2名とも線形となり、生じた反力を線形的にそのまま感じていることが確認できる。

一方、ペダルAよりも重いペダルや軽いペダルについても、同様の知覚特性であるかを検証した。用いたペダル特性をFig. 5に、各ペダルにて計測した知覚特性の結果をFig. 6に示す。

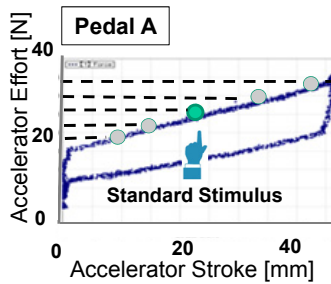


Fig. 3 Relation between Accelerator Pedal Effort and Stroke in Pedal A

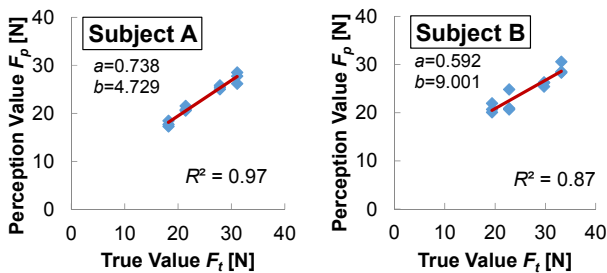


Fig. 4 Relation between True and Perceived Force in Pedal A

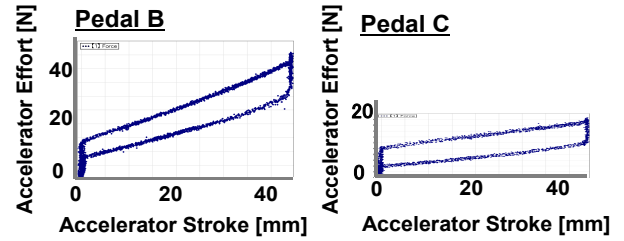
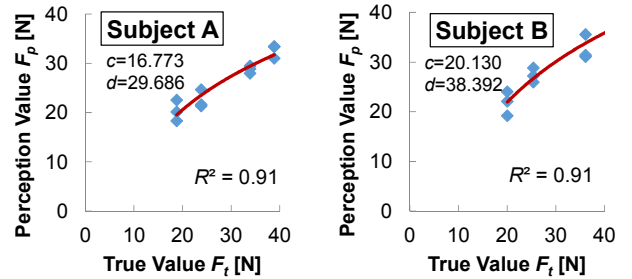
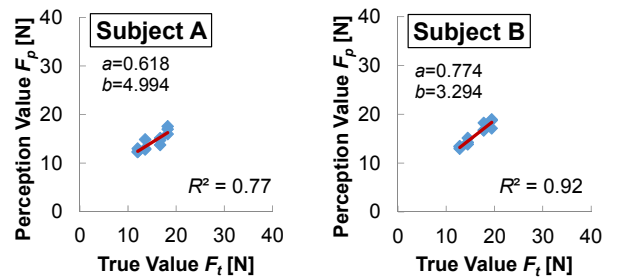


Fig. 5 Relationship among Accelerator Pedal Efforts, Stroke in Pedal B, C



(a) Pedal B



(b) Pedal C

Fig. 6 Relation between True and Perceived Forces for Two Different Pedal Weights

Fig. 6のペダルBの実線は最小二乗法で求めた式(2)であり、ペダルCの実線は最小二乗法で求めた式(1)である。なお、係数 a 、 b 、 c 、 d 、および決定係数 R^2 を図中に示す。

$$F_p = c \log(F_t) + d \quad (2)$$

反力が重いペダルBでは、Fig. 6(a)に示す赤い太線のように、実際の反力と感ずる力の関係は対数関数的な傾向を示した。すなわち、反力が大きくなるに従い鈍感となり力の大きさが分かりにくくなることから、ペダルBで調べた範囲まで反力を大きくするとウェーバー・フェヒナーの法則に従った特性が現れることが分かる。このように反力が重いペダル操作では、受動的なペダル操作にて報告された反力知覚特性⁽⁴⁾と同様の傾向であることが確認できた。一方、Fig. 6(b)に示す反力が軽いペダルCでは、ペダルAと同様に実際の反力と感ずる反力の関係は線形となったが、

被験者のコメントから、ペダルAと比べて操作時に踏み込めがなく、操作した感覚が分かりにくいことが判明した。これは、ペダルから生じる反力の刺激量が小さく、被験者がペダルを操作した際に生じる反力の変化が感じ取れないことが原因と推測される。すなわち、ペダルの操作性を向上させるには、操作時に反力変化が感じ取れるようなストローク操作量に対する反力の勾配を大きくした機器特性を検討する必要があると考えられる。

3.2 ステアリング操作における反力の知覚結果と考察

「曲がる」シーンにおいて、例えば十字路口や山道のコーナリングでは、ドライバーはステアリングを操作することで車両の向きを変えている。これまで、ステアリング操作時の反力知覚特性は、マグニチュード推定法を用いた実験から、ウェーバー・フェヒナーの法則に従うことや、操舵角が大きくなるに従い生じるステアリングの接線方向にかかる腕の自重の影響から、反力が軽く感じられることを明らかにしてきた²⁾。しかし、反力の小さな不感帯近辺を含めた、詳細な知覚特性は解明しておらず、今回は、ステアリングの反力を1Nずつ増加させた時の人間の弁別閾を計測することにした。

実験は、Fig. 7に示すドライビングポジションにて被験者を座らせて実施した。ステアリングの反力については、調整可能な反力発生装置を用いており、被験者にはステアリングを両腕で持たせることで、ステアリングから生じる反力を感じさせる。まず、基準となる反力を感じさせた後に、1N刻みで反力を増加させ、反力の大きさが変わったと感じたタイミングを回答させた。ここで、基準は0~35Nまでの反力を5N刻みで提示した。被験者は、エキスパートドライバー2名と一般ドライバー3名の計5名（30代~50代）の男性である。結果をFig. 8に示す。横軸が基準の反力、縦軸が弁別閾で、5名の平均値をプロットした上で標準偏差をエラーバーで示す。この結果を見ると、5N未満の小さな反力は弁別がしにくく、そこから反力が大きくなるに従い弁別がしやすくなるが、30N以上の反力になると再度弁別がしにくくなるのが分かる。

ウェーバーの式をもとに得られた弁別閾の値から感覚量を求め、一般的な手法を用いて、横軸を実際の反力、縦軸を感じた力の大きさとして、Fig. 9のグラフを作成した。この図から、知覚特性の全体形状はおおむね対数関数的であり、ウェーバー・フェヒナーの法則に従うが、微小な反力ではべき乗則に従う知覚特性となり、その変化は15N付近で生じていることが分かる。この変化が生じるメカニズムを調査するため、実験時の両腕の筋活動を計測した。計測箇所はFig. 10に示す、上腕二頭筋、上腕三頭筋、尺側手根屈筋で計6ヶ所である。反力の大きさに応じて筋活動量が変化している部位を調べたところ、右腕（引手）の上腕二頭筋と左腕（送り手）の尺側手根屈筋のみであった。

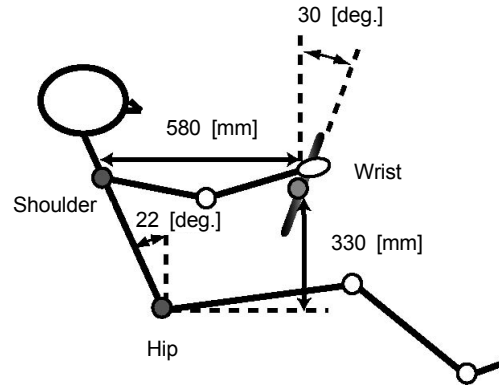


Fig. 7 Experimental Conditions²⁾

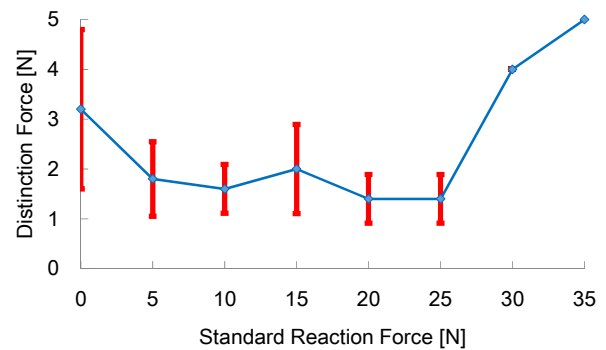


Fig. 8 Relation between Standard and Distinction Forces

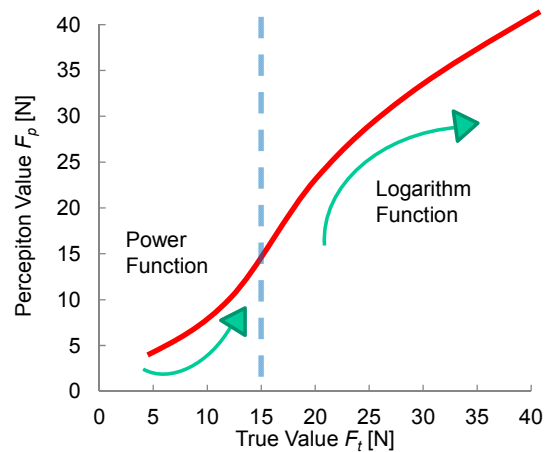


Fig. 9 Relation between True and Perceived Force

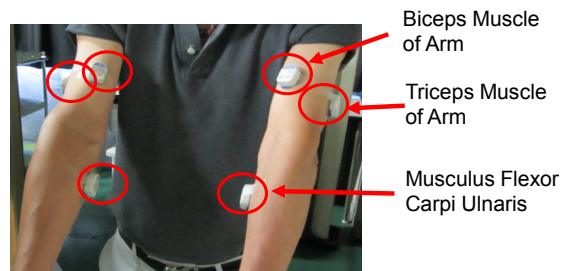


Fig. 10 Attachment Position of the Myoelectric Sensor

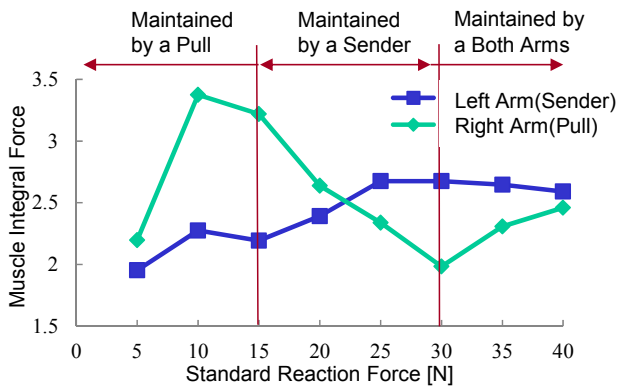


Fig. 11 EMG Contraction Level Every Reaction Force

それぞれの筋電値を積分し反力ごとにプロットしたものをFig. 11に示す。15N未満では引手の筋活動が大きく、15N以上から30N未満では引手から送り手に筋活動が移り変わり、30N以上になると両腕の筋活動がともに上昇していることが分かる。つまり、被験者1名の結果ではあるが、弁別閾の変化は引手から送り手への腕と筋活動の移り変わりが知覚変化の要因として考えられる。ドライバーに提供したいステアリングの反力を検討する際は、こうした変化点を考慮した設計が望まれる。

3.3 ブレーキ操作における反力の知覚結果と考察

「止まる」シーンにおいて、ドライバーが自動車を減速させたい時、ブレーキペダルを操作する。ここでのペダル操作では、加速時と同様に、ドライバーはペダルから生じる反力を感じながら操作量を決定している。しかし、ブレーキペダルの形状は多くが吊り下げ型であり、オルガン式のアクセルペダル操作と同様の知覚特性であるかは分からない。そこで、今回は、吊り下げ型のブレーキペダルを反力生成装置に取り付け、ペダル反力を自在に変化させながら、ペダルから感じた力の大きさを回答させた。

ここで、実際の運転時のペダル操作に近づけるため、ペダル反力はストローク量に応じて増加するように設定し、被験者が能動的にペダルを動かす、あるストローク量にて感じた反力の大きさを答えてもらうマグニチュード推定法を実施した。被験者にFig. 12のドライビングポジションとなるような姿勢で座らせ、ブレーキペダルから生じる反力20Nを基準である100%と覚えさせた後、実験車が5~45Nの反力を5N刻みでランダムに変化させ、基準に対して感じた反力の大きさを%で回答させた。被験者はエキスパートドライバー2名と一般ドライバー2名の計4名(20代~50代)の男女各2名で実施した。結果をFig. 13に示す。横軸が提示した力 F_t 、縦軸が知覚した力 F_p で、実線は最小二乗法で求めた式(1)である。係数 a 、 b 、および決定係数 R^2 を図中に示している。この図から、実際のペダル反力と知覚した力の関係は、アクセルペダルA、Cと同様に線形

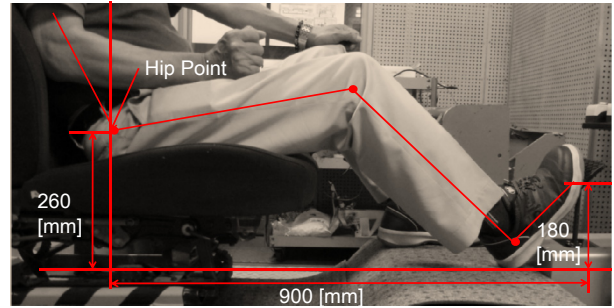


Fig. 12 Experimental Conditions

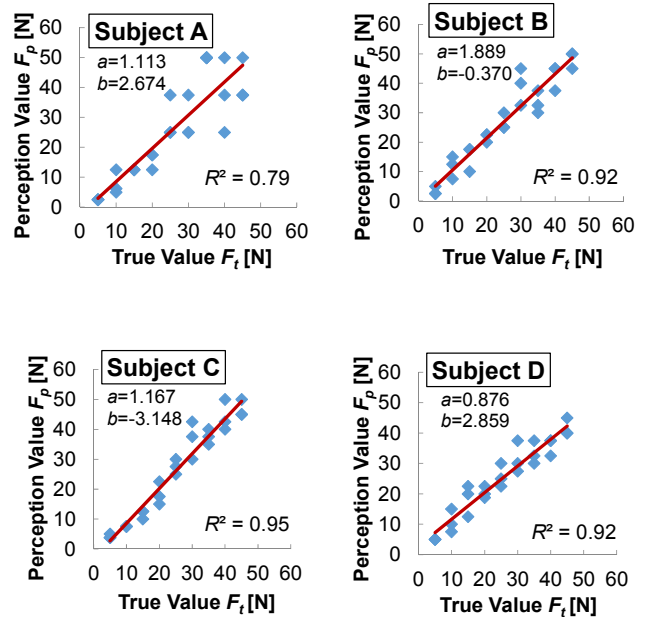


Fig. 13 Relation between True and Perceived Force in Brake Pedal

な特性となり、ペダルの反力をそのまま感じる線形的な結果になった。アクセルペダルBとは知覚特性が異なるが、ブレーキに比べてアクセルは使用する反力が小さく、日常ではともに線形な領域を使用していると考えられる。知覚の差が生じる原因は次節にて考察する。

3.4 四肢における反力知覚の考察と設計への適用

人間の四肢における反力知覚特性は、反力の大きさに応じて異なることが分かった。ここで、上肢と下肢において感じる力の大きさは、どのように異なるかを分析した。分析内容は、3.1節~3.3節で得られた実際の反力 F_t と人間が感じた力 F_p の関係式をそれぞれ並べ、感じた力 F_p を横軸にしたとき、各操作機器で必要となる反力の大きさを縦軸にとった主観的等価値(Point of Subjective Equality; PSE)を求めた。結果をFig. 14に示す。30N以下では、上肢で操作した反力を感じるステアリングに対し、下肢で操作した反力を感じるアクセルやブレーキでは、同じよう

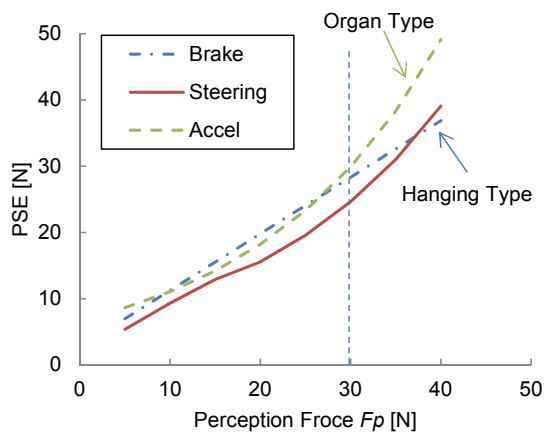


Fig. 14 Change of PSE Depending on the Perception Force

に感じている。このことから、下肢のほうが必要となる反力が大きいことが分かる。つまり、この結果から、下肢は上肢に比べて力の感受性が鈍感であると推測される。

一方、アクセルとブレーキにおいて30N以上の大きな反力では、同じ反力と感ずるために必要な反力量が異なっており、ブレーキの吊り下げペダルはアクセルのオルガンペダルに比べて踵位置が固定されないため常に足全体で反力を感じ取れず、踏み込み量の増加に伴い踵浮きや踵位置の移動による足首角度の違いから、反力を感じ取る部位が異なり、力の感じ方に差が生じているものと推測される。

以上より、各操作において同じ反力を感じさせたい場合は、操作する四肢の部位による知覚特性の違いや、30N以上の反力知覚特性を踏まえた反力設計を行う必要がある。また、電子制御技術を用いることで、異なった操作機器でも感じさせたい反力の感覚量から物理量を逆算して生成することで、同じような操作感覚を体感させることが可能になると考えられる。

4. おわりに

「走る・曲がる・止まる」の各シーンにおいて、ドライバーが操作機器を操作する際の反力知覚特性を明らかにした。ステアリングでは15N付近で知覚に変曲点があることが分かり、アクセルやブレーキでの知覚特性は小さい反力では同様な傾向であるものの、生じる反力が大きくなると機器の方式ごとに知覚特性が変化することが明らかとなった。また、ドライバーに感じて欲しい操作機器の反力特性を検討する際、3章で得られた式(1)(2)の係数を被験者の平均値とした上で、感じて欲しい力の大きさを F_p に入力すれば、必要となる機械特性の物理値 F が導出でき、作り手のイメージどおりの操作反力が設計可能となる。

本手法は、他の操作機器にも適用可能であり、人間の反力知覚特性をモデル化することで、提供したい感性が実現

できると考えられる。「意のままの運転」を可能にするリニアなフィーリングを実現するためには、操作入力のみではなく車両応答との組み合わせを考慮した知覚特性の解明が必要となる。加えて、ダイナミック状況下におけるフィーリングと生体反応との関連性については今後の課題である。

最後に本研究にご協力いただきました広島大学 辻敏夫教授をはじめ関係者の皆さまに深く感謝いたします。

参考文献

- (1) 山本ほか：新型ロードスターの紹介, *マツダ技報*, No.32, pp.93-98 (2015)
- (2) 竹村ほか：人間の主観的な力知覚モデルの提案とステアリング操作系への応用, 日本機械学会論文集, No.795, pp.64-73 (2012)
- (3) 福田ほか：増補版 人間工学ガイド, サイエンス・ト社 (2009)
- (4) 山田ほか：反力知覚特性に基づく自動車操作機器特性に関する考察, 第47回日本人間工学会中国・四国支部大会講演論文集, pp.96-97 (2014)

■ 著 者 ■



竹村 和紘



山田 直樹



新部 忠幸



岸 篤秀



西川 一男



農沢 隆秀

論文・解説

20

車車間通信のLCR・AFDモデルの開発 Development of the LCR・AFD Model of the V2V

山田 秀行*1 強矢 昌宏*2 タン ザ カン*3
Hideyuki Yamada Masahiro Suneya Gia Khanh Tran
荒木 純道*4
Kiyomichi Araki

要 約

車車間通信：V2V (Vehicle to Vehicle Communication) による安全運転システムの性能を向上するには、受信信号特性を高精度に把握し、通信品質を高めていくが必要になる。時々刻々と移動しながら行うV2Vの動的な品質指標としては、単位時間あたりに受信信号レベルが閾値を下回る回数として定義されるLCR (Level Crossing Rate) と、受信信号レベルが閾値を下回る平均持続時間として定義されるAFD (Average Fade Duration) が重要となるが、実走行環境下におけるV2V特有のLCR・AFD推定モデルは確立されていない。本稿では、V2VのLCR・AFDをシミュレーションとフィールド実験により検証し、走行環境に依存する到来波角度プロファイルに着目することで、LCR・AFDを高精度に推定可能なモデルを開発した。これにより、目的とするLCR・AFDを達成するために必要となる信号レベル：SNR (Signal to Noise Ratio) の設計精度を従来に比べ3dB程度向上し、誤差1dB以内に行うことができることを確認した。

(第13回ITSシンポジウム2015投稿論文を一部編集し掲載、特定非営利活動法人ITS Japan許諾済)

Summary

To realize a safety driving system by V2V, it is essential to understand signal propagation properties for the purpose of improving communication performance. As indices of performance, LCR and AFD are two important factors to be evaluated in V2V. But, LCR・AFD estimate model peculiar to V2V under the run environment is not established. In this article, we theoretically derive LCR・AFD of the V2V to enable the estimation of LCR・AFD with high accuracy using the angle of arrival profile in the established model. Then, it is able to determine design parameter necessary to realize desired LCR・AFD within an error of 1dB. This is equivalent to 3dB improvement as compared with the conventional.

1. はじめに

交通事故低減を目的としてV2Vや路車間通信：V2I (Vehicle to Infrastructure Communication) などを活用した協調型安全運転支援システムの市場導入へ向けた動きが加速している。国内の700MHz帯V2Vシステムでは、出会い頭交差点など代表的な走行シーンに対して、事故防止支援を成立させるために必要な支援開始タイミングを元に、通信品質・通信エリア要件が共通ガイドライン⁽¹⁾として設定されている。しかし、実用システムではあらゆる走行環境でも要件を満足できる高いロバスト性が必要になる。一方、V2Vの電波伝搬特性は走行環境により大きく変動

する。そのため、走行環境ごとの受信信号特性を高精度に把握し、環境変化を考慮した通信品質設計が重要となる。これまでも、V2Vにおける平均受信電力特性^{(2),(3)}、シャドーイング特性^{(4),(5)}、フェージング特性^{(6),(7)}などの推定モデルは提案されているが、これらでは車両の速度・移動方向など動的挙動が考慮されていないため、実走行条件に適合した通信品質向上設計は困難である。車両の動的挙動まで考慮すると、受信信号の時間変動特性を把握する必要がある。この特性を表す指標としてLCRとAFDがある。これらを把握することで、走行環境変化に対する静的な特性変動に加え、走行環境ごとに、速度変化に伴い変動する通信品質特性の把握も可能となり、より信頼性の高いシステ

*1~2 技術研究所
Technical Research Center

*3~4 東京工業大学
Tokyo Institute of Technology

ム設計が可能となる。

2. LCR・AFDモデル化アプローチ

研究開発が先行しているセルラー系通信分野では、LCRとAFDは式(1)~(4)のようにモデル化されている⁽⁸⁾。式(1), (2)はLCRを表し, (1)はフェージング特性を, 一様に乱れた分布とされるレイリー分布とした式で, (2)は一様な乱れから外れた分布も広く表現できる仲上m分布とした場合の式である。式(3), (4)はAFDを表し, (3)はフェージング特性をレイリー分布とした式, (4)は仲上m分布とした場合の式である。

$$LCR_r(\rho) = \sqrt{2\pi}f_d\rho \exp(-\rho^2) \quad (1)$$

$$LCR_n(\rho) = \sqrt{2\pi}f_d \frac{m^{m-\frac{1}{2}}}{\Gamma(m)} \rho^{2m-1} \exp(-m\rho^2) \quad (2)$$

$$AFD_r(\rho) = \frac{\exp(\rho^2)-1}{\sqrt{2\pi}f_d\rho} \quad (3)$$

$$AFD_n(\rho) = \frac{\Gamma(m, m\rho^2) \exp(m\rho^2)}{\sqrt{2\pi m^{2m-1}} f_d \rho^{2m-1}} \quad (4)$$

ここで, f_d は速度 v と通信に用いる電波の波長 λ によって決まる最大ドップラー周波数 ($f_d = v/\lambda$ [Hz]), m は仲上m分布におけるフェージングの度合いを示すパラメータであり, $m=1$ のときがレイリー分布に相当する。 ρ は受信振幅 A を振幅のRMS (Root Mean Square) で正規化したもの ($\rho = A/\sqrt{A^2}$), $\Gamma(\cdot)$ はガンマ関数, $\Gamma(\cdot, \cdot)$ は不完全ガンマ関数である。更に, 式(1)~(4)では到来波角度プロファイルが一様分布であることも前提としている。一方, V2Vでは見通し外道路での到来波角度プロファイルは一様分布にはならず, Fig. 1に示すような2つのピークを持つような偏った分布となり, このモデルは式(5)のように表せることを著者らが報告している⁽⁹⁾。

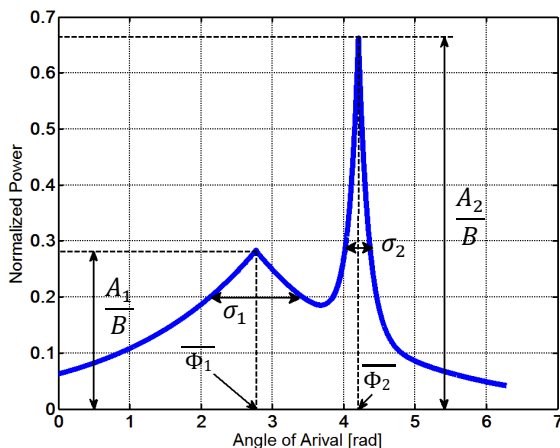


Fig. 1 Conception Diagram of the Parameter of the Equation (5)

Fig. 1において A_1/B は第1ピークの大きさ, A_2/B は第2ピークの大きさ, σ_1 , σ_2 は各山の角度拡がり, Φ_1 , Φ_2 は各山の中心角度を表している。

$$S(\phi) = \frac{A_1 \exp\left(-\frac{\sqrt{2}|\phi - \Phi_1|}{\sigma_1}\right)}{B} + \frac{A_2 \exp\left(-\frac{\sqrt{2}|\phi - \Phi_2|}{\sigma_2}\right)}{B}$$

$$B = \int_0^{2\pi} \left[A_1 \exp\left(-\frac{\sqrt{2}|\phi - \Phi_1|}{\sigma_1}\right) + A_2 \exp\left(-\frac{\sqrt{2}|\phi - \Phi_2|}{\sigma_2}\right) \right] d\phi \quad (5)$$

式(5)の各パラメータは環境に依存して変化するため, 到来波角度プロファイルが一様分布として表された式(1)~(4)から推定したLCR・AFDでは, 走行環境条件により推定精度がばらつく問題があると考えた。そこで, 任意の到来角度プロファイルをパラメータに考慮できることを課題とし, LCR・AFDモデルの開発に取り組んだ。

3. V2VにおけるLCR・AFDの検証

シミュレーションとフィールド実験により, V2VのLCR・AFDを検証した。シミュレーションには, 電波伝搬特性を幾何光学近似に基づいて光線の軌跡上の反射, 回折, 透過, 距離減衰, 干渉などを計算するレイトレース手法を用いた。

3.1 検証条件

送信車両は停止し, 受信車両が移動しているケースについて, 速度とLCR・AFDの関係につき検証した。Fig. 2, 3に示すように送信車両の位置と受信車両の移動軌跡を変えた2種類の環境を設定し検証を行った。受信車両の移動速度は, シミュレーションでは, 環境Aで30km/h, 60km/h, 環境Bで10km/h, 30km/hのそれぞれ2水準とし, フィールド実験では, 環境Aで10km/h, 20km/h, 30km/hの3水準, 環境Bで10km/h, 15km/hの2水準とした。その他の条件はTable. 1に示すとおりとした。シミュレーションおよびフィールド実験によって得られた距離に対する受信電力を20mごとに分割することで, 電波伝搬特性の定常性を確保した条件でLCR・AFDの検証を行った。

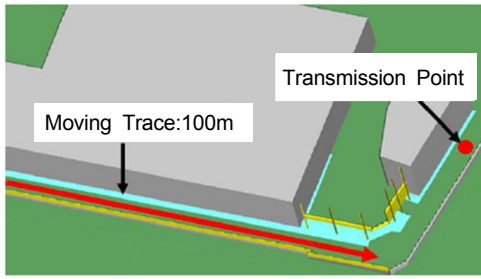


Fig. 2 Environment A

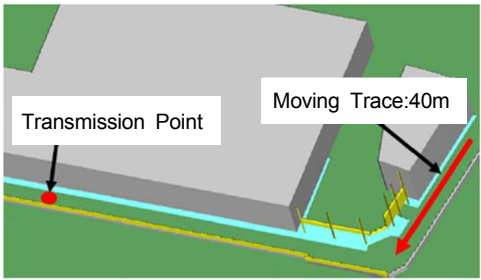


Fig. 3 Environment B

Table. 1 Inspection Condition

Item	Specification
Center Frequency	760MHz
Band Width	10MHz
Antenna Type	Monopole
Antenna Length	1/4 λ
Polarization	Vertical Polarized Wave No Directivity in Horizontal Plane

3.2 検証結果

シミュレーションによって得られた環境AのLCR・AFDの結果例をFig. 4に、環境Bの結果例をFig. 5に示す。Fig. 4(a), Fig. 5(a)より、LCRは速度に比例して増加していることが分かる。一方、Fig. 4(b), Fig. 5(b)より、AFDは速度に反比例して減少していることが分かる。これらは、式(1)~(4)に示すように、速度により変化する f_d に起因していると考えられる。また、Fig. 4とFig. 5を比較すると、同じ速度であっても走行環境が異なることでLCR・AFDの ρ に対する特性（傾き）が変化することも分かる。

次に、フィールド実験結果をFig. 6, 7に示す。フィールド実験結果でも、ばらつきは大きいですがシミュレーション結果と同様の傾向が得られた。実験結果がシミュレーション結果よりもばらつくのは、走行速度の変動が原因と考えられる。低速度ほど一定速度でのコントロールは難しいため変動は大きくなる傾向となる。また、 ρ の範囲がシミュレーションに対して狭くなっているのは、シミュレーションでは車体を考慮していないことに加え、実験では、フェ

ージング特性が走行環境により異なっていることなどが原因と考えられる。

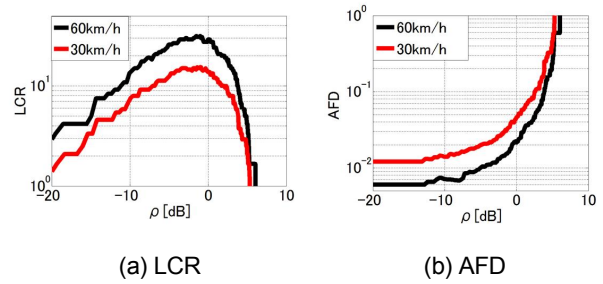


Fig. 4 Simulation Result of Environment A

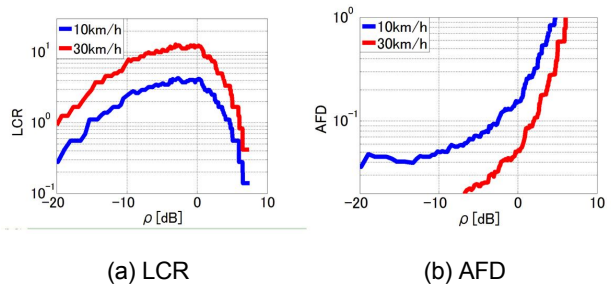


Fig. 5 Simulation Result of Environment B

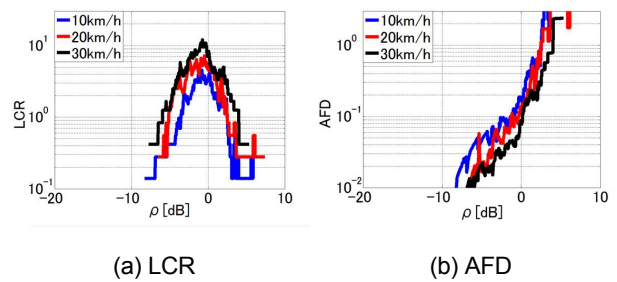


Fig. 6 Experimental Result of Environment A

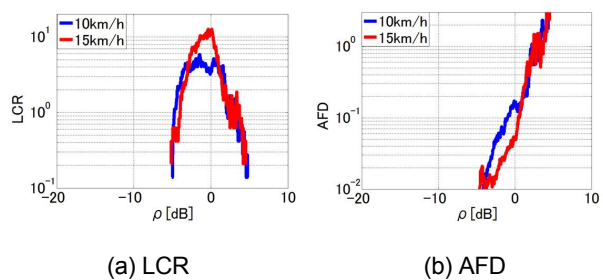


Fig. 7 Experimental Result of Environment B

4. V2Vへの従来モデル適用時の課題

3章で検証したLCR・AFDを式(1)~(4)に示す従来モデルと比較することで従来モデルの有用性を検証した。式(2), (4)の中の仲上m分布におけるmパラメータはシミュレーションおよびフィールド実験結果の受信信号強度から最尤推定⁽¹⁰⁾にて求めた値を用いた。車速30km/hにおける、

環境Aでのシミュレーション結果とモデル式の結果との比較をFig. 8に、環境Bでの比較をFig. 9に示す。Fig. 8, 9より、フェージング特性をレイリー分布と仮定したモデル(式(1), (3))での結果は、シミュレーション結果に対して傾きが異なっていることが分かる。一方、仲上m分布と仮定したモデル(式(2), (4))では、傾きがシミュレーション結果と良く一致している。これらのフェージングモデルによる差はLCRの方がAFDよりも顕著に表れている。以上から、V2Vでは、フェージング特性を仲上m分布で表現する方が有用であるといえる。

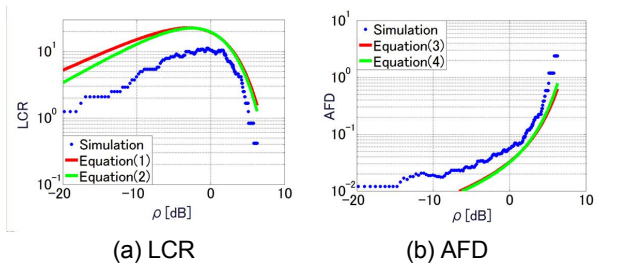


Fig. 8 Simulation Result of Environment A

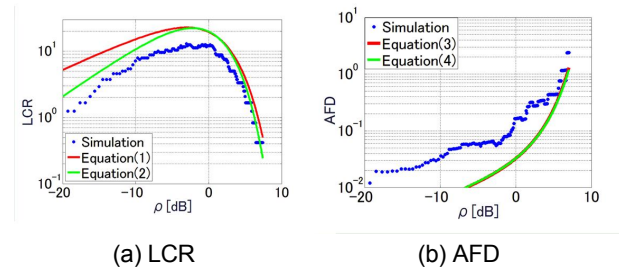


Fig. 9 Simulation Result of Environment B

また、従来モデル式(1)~(4)から求まる全ての結果において、シミュレーション結果に対するオフセットがあり、その量は環境A, Bで異なっている。この原因は、従来モデルでは到来波角度プロファイルを一様分布と仮定しているが、V2V環境では一様分布に従っていないことにあると考えられる。また、環境によりオフセット量が異なるのは、到来波角度プロファイルが環境により変化するためと考える。また、従来モデルから求まる結果とフィールド実験結果を比較しても、Fig. 10, 11に示すようにシミュレーション結果と同様の傾向となることが分かった。

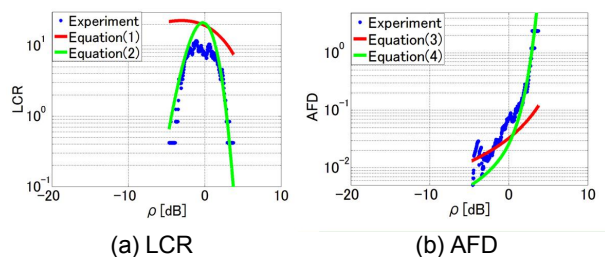


Fig. 10 Experimental Result of Environment A

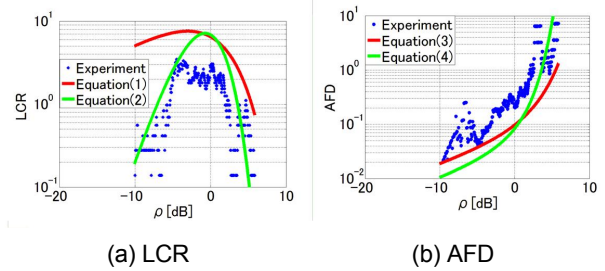


Fig. 11 Experimental Result of Environment B

5. 到来波角度プロファイルを考慮した LCR・AFDモデル

任意の到来波角度プロファイルを考慮できるモデル開発にあたっては、式(6)に示すLCRモデル⁽¹¹⁾を参照した。

$$LCR(\rho) = pdf(\rho) \frac{\sqrt{|r_2''(0)|}}{\sqrt{8\pi m}} \tag{6}$$

ここで、 $r(t)$ は自己共分散、 $pdf(\rho)$ は ρ の確率密度関数を表す。式(6)は受信信号強度の時間変動特性 $R(t)$ と、 $R(t)$ の時間微分 $R'(t)$ が独立の場合に成立することが証明されている⁽¹¹⁾。また、到来波の自己共分散は式(7)で表される⁽¹²⁾。

$$r(t) = \int_0^{2\pi} S(\phi) \exp(j2\pi f_d t \cdot \cos(\phi)) d\phi \tag{7}$$

ここで、 $S(\phi)$ は到来波角度プロファイル、 t は時間を表す。式(6), (7)の2つの式を展開することでLCRを到来波角度プロファイルで表現できる。しかし、式(6)が成立するには $R(t)$ と $R'(t)$ が独立であることが前提となるため、V2Vにおいて $R(t)$ と $R'(t)$ の独立性につき、以下のように検証した。LCRの定義式は式(8)で示される。

$$LCR(R) = \int_{-\infty}^{\infty} R' pdf(R, R') dR' \tag{8}$$

ここで、 $pdf(R, R')$ は $R(t)$ と $R'(t)$ の結合確率密度関数を表す。 $R(t)$ と $R'(t)$ が独立であれば、式(8)は式(9)に変形できる。

$$LCR(R) = pdf(R) \int_{-\infty}^{\infty} R' pdf(R') dR' \tag{9}$$

式(9)より $R(t)$ と $R'(t)$ が独立なら、 $LCR(R)$ と $pdf(R)$ は比例関係にあることが分かる。つまり $LCR(R)$ 、および $R(t)$ の正規化累積確率分布cdfが一致することを意味する。そこで、シミュレーションおよびフィールド実験結果の $LCR(R)$ と $R(t)$ のcdfについて検証

した。検証には、 $R(t)$ と対の関係にある $\rho(t)$ について行った。結果をFig. 12に示す。

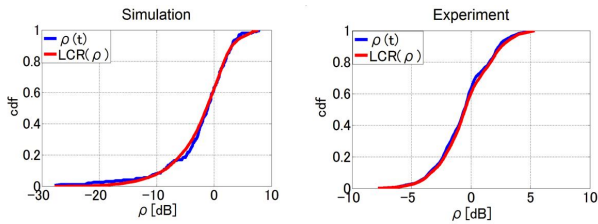


Fig. 12 cdf of LCR(ρ) and ρ(t)

Fig. 12より、シミュレーションおよびフィールド実験結果のLCR (R) と $R(t)$ のcdfは良く一致していることが分かる。従って、V2V見通し外環境での $R(t)$ と $R'(t)$ は独立であるといえる。

以上、V2Vにおける $R(t)$ と $R'(t)$ の独立性が証明できたことから式(6)は V2V にも適用可能であることが分かった。式(6)に(7)を代入し展開することで式(10)のように整理できる。これが、任意の到来波角度プロファイルを考慮できる V2V の LCR モデルとなる。また、AFD は定義より式(11)のように表される。

$$LCR(\rho) = pdf(\rho)2\pi f_d \sqrt{2\{\eta - (\zeta)^2\}} \frac{1}{\sqrt{8\pi m}} \quad (10)$$

$$\eta = \int_0^{2\pi} S(\phi) \cos^2(\phi) d\phi$$

$$\zeta = \int_0^{2\pi} S(\phi) \cos(\phi) d\phi$$

$$AFD(\rho) = \frac{cdf(\rho)}{LCR(\rho)} \quad (11)$$

式(10), (11)から LCR・AFD を求めるためには、参考文献(9)に示されているレイトレースシミュレーションによる到来波角度プロファイル検証手法を用い、以下のように $S(\phi)$ を求めた。まず、微小エリア内に規則配置した観測点における受信信号強度と位相情報を式(12)に適用し、この微小エリア内の各観測点における $S_i(\phi)$ を導出した。

$$S_i(\phi) = \left| \int_{-\frac{x}{2}}^{\frac{x}{2}} \int_{-\frac{y}{2}}^{\frac{y}{2}} H_i(x, y) \exp\left(-j\frac{2\pi}{\lambda}(xcos\phi + ysin\phi)\right) dx dy \right|^2 \quad (12)$$

ここで、 $H(x, y)$ は各観測点の座標 (x, y) における複素振幅を表す。微小エリアは 2m 四方とし、その中に $33 \times 33 = 1089$ 点の観測点を配置した。LCR・AFD を導出する 20m 区間には 10 個の $S_i(\phi)$ があり、これらを

平均することで式(10), (11)に適用する $S(\phi)$ とした。本手法により導出した $S(\phi)$ の一例を Fig. 13 に示す。角度軸は、受信車両の進行方向を 0rad とし、反時計回りに角度が増加するように設定した。

上記手法により決定した $S(\phi)$ を式(10), (11)に代入することで LCR・AFD を導出した。環境 A, 車速 30km/h の結果を Fig. 14 に、環境 B, 30km/h の結果を Fig. 15 に示す。

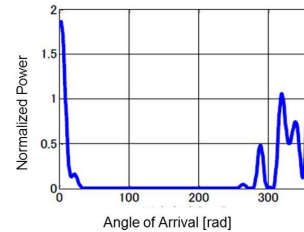
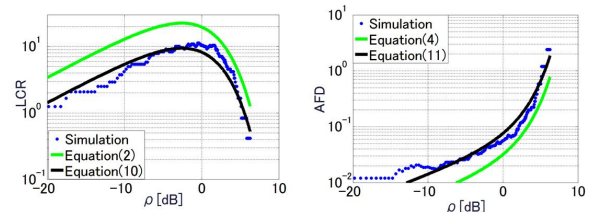


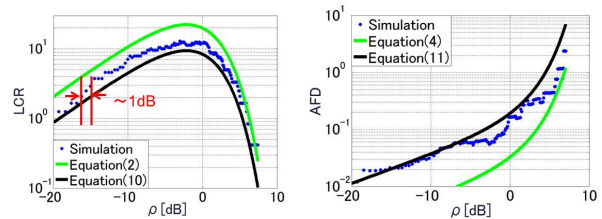
Fig. 13 Incoming Wave Angular Profile



(a) LCR

(b) AFD

Fig. 14 Inspection Result of Environment A



(a) LCR

(b) AFD

Fig. 15 Inspection Result of Environment B

Fig. 14, 15より、式(10), (11)の特性では、式(2), (4)で発生していたシミュレーション結果に対する上下のオフセットが小さくなり、シミュレーション結果の再現精度が高いことが分かる。この定量的検証のため、目的のLCRおよびAFDを実現するために必要となる ρ の値について比較した。式(2), (4)のモデルではシミュレーション結果に対して、3~5dBの差があったが、式(10), (11)では、おおむね1dB以下であり、高い精度が得られることが分かった。一方、式(10), (11)を用いても、環境AとBではシミュレーション結果との差の程度が異なる。これは、式(10),

(11)に適用した $S(\phi)$ の精度に起因したものと考える。今回は、20m区間における $S(\phi)$ は定常的であるという前提を置き、20m区間の平均的な $S(\phi)$ を用いているが、フィールド実験環境では20m区間を移動する間にも $S(\phi)$ の性質が変化するような非定常性があることが原因と考えられる。

6. まとめ

V2VにおけるLCR・AFDは車速だけでなく、走行環境によっても変動することをシミュレーションおよびフィールド実験により明らかにした。走行環境により変動する原因は、到来波角度プロファイルが変化することであると考える。任意の到来波角度プロファイルを考慮できるLCR・AFDのモデリング手法を構築した。開発したモデルを適用することで目的とするLCR・AFDの実現に必要な受信信号振幅 ρ [dB]を誤差1dB程度の精度で設計できることを確認した。今後は、本モデルを任意の走行環境に適用可能とすることで、実走行条件に適合性の高い安全運転支援サービスの実現に貢献していきたい。

参考文献

- (1) 国土交通省自動車局先進安全自動車推進検討会：先進安全自動車 (ASV) 推進計画報告書, pp.89-184 (2011)
- (2) 伊藤ほか：車々間通信環境における見通し内伝搬損失推定, 信学技報, A・P2006-126 (2007)
- (3) 伊藤ほか：車々間通信環境における見通し外伝搬損失推定, 2008信学総大A, B1-1-61 (2008)
- (4) 伊藤ほか：周辺車両が車車間伝搬損失特性に及ぼす影響に関する一検討, 信学論, J94-B-3, pp.445-467 (2011)
- (5) 山口ほか：車車間通信におけるNLOS交差点道路環境でのパス遮蔽確率推定, 2009信学総大, B-1-23 (2009)
- (6) M.Suneya et al. : Fading Characteristic Modeling of V2V Communication at 700MHz Band and the System Margin Design, ITS World Congress2013 (2013)
- (7) I.Sen et al. : Vehicle-Vehicle Channel Models for the 5-GHz Band, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 9, Issue 2, pp.235-245 (2008)
- (8) Ali Abdi et al. : Comparison of the level Crossing Rate and Average Fade Duration of Rayleigh, Rice, and Nakagami Fading Models with Mobile Channel Data, IEEE-VTS Fall VTC 2000. 52nd, 1850-1857 vol.4 (2000)
- (9) K.Matsumoto et al. : Angular Profile Modeling of V2V Communications, 信学技報, 2014-1-SR (2014)
- (10) S.Oguchi et al. : Performance Evaluation Method for Body Area Networks Based on Nakagami-m Channel Simulation, KJMW2011 FR2-5-1, 10-11 (2011)
- (11) N.Youssef et al. : Fade Statistics in Nakagami Fading Environments, IEEE 4th International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications Proceedings, vol.3, pp.1244-1247 (1996)
- (12) A.Goldsmith : WIRELESS COMMUNICATIONS, Cambridge University Press (2005)

■ 著 者 ■



山田 秀行



強矢 昌宏



タン ザ カン



荒木 純道

論文・解説

21

曲げ変形における高エネルギー吸収フレームの開発 Development of High-Energy Absorbing Frame Structure

河村 力*1 Chikara Kawamura	本田 正徳*2 Masanori Honda	児玉 悠貴*3 Yuki Kodama	元木 正紀*4 Masaki Motoki
片岡 愉樹*5 Yuki Kataoka	亀井 丈広*6 Takehiro Kamei	若林 充*7 Mitsuru Wakabayashi	寺田 栄*8 Sakayu Terada

要 約

低燃費実現のための車体軽量化と人命保護のための衝突安全性能の両立が求められている。そのためには、車体フレームのエネルギー吸収（Energy Absorption, 以降EA）の質量効率向上が必要である。そこで、前突時の主要なEA部材であるフロントフレームを対象に、曲げ変形におけるEA質量効率向上技術の開発を行った。

過去、変形初期における座屈を断面形状により抑制し、フレーム曲げ強度質量効率を向上させる「鉄使い切り技術」を開発してきた。本開発では、変形初期に加え、変形過渡の座屈も制御することにより、EA質量効率の向上をねらった。そのため、フレーム曲げ変形時に圧縮荷重が作用する板と、曲げ荷重が作用する板の座屈周期の連成に着目した。座屈周期を支配する各板幅の比により、座屈後まで含めた変形挙動を制御することで、単位体積あたりの歪エネルギー量を高め、フレーム曲げ変形時のEA質量効率の向上を実現した。これにより、従来フロントフレーム構造に比べて、EA質量効率を大幅に向上できるフレーム構造を導出した。

Summary

There is an increasing need for compatibility between a lighter vehicle body for lower fuel consumption and life-saving crash safety performance. To achieve this, it is necessary to increase energy absorption efficiency with respect to the weight of steel-sheet body frame. In light of such circumstances, Mazda developed a technology for improving energy absorption efficiency versus bending deformation for the front frame, which is largely involved in energy absorption upon frontal crash.

In this development, the focus was placed on coupled cycles between the plane under a compressive load and the plane under a bending load upon deformation of the frame. By controlling the deformation behavior, including that after buckling, by plane-width ratio, the density of strain energy increased, which then improved energy absorption efficiency with respect to the weight upon deformation of the frame. As a result, a frame structure for greatly improving energy absorption efficiency, compared with the conventional front frame structure, was brought into reality.

1. はじめに

自動車のCO₂規制強化から、車両の運動効率改善が必要である。そのためにはパワートレインのエネルギー効率改善と同時に、車体重量を大幅に低減させる必要がある。一方、衝突安全性能の向上要求はより一層高まっており、車両軽量化と衝突安全性能の両立が課題である。

車体の衝突安全性能は主にキャビン領域の耐力部材と、フロントやリアエンドでのEA部材に大別される。耐力部

材に対しては、材料領域では鋼板のハイテン化が進み、構造領域では座屈抑制をねらった断面形状⁽¹⁾や発泡充填剤等の耐力向上技術の確立を行ってきた。一方、EA部材に対しては、軸圧縮部材の研究は盛んであるが、曲げ変形部材に対しては、まだまだ研究されていない。

しかし、前輪駆動の自動車において、前面衝突時や後面衝突時の主要なEA部材であるフロントフレームやリアフレームは、主に曲げ変形部材であり、曲げ変形におけるEA質量効率の向上が必須である。

*1~3 技術研究所
Technical Research Center

*4,5 衝突性能開発部
Crash Safety Development Dept.

*6,7 ボデー開発部
Body Development Dept.

*8 CAE開発部
CAE Technology Development Dept.

自動車の骨格構造を構成するフレームの多くは、薄板大断面の中空部材であり、座屈を伴う変形挙動をとる。この座屈現象のふるまいにより、フレームの耐力や変形挙動は大きく変わる。座屈現象は板幅や板厚等の構造要因に支配される。

そこで本開発では、この座屈現象を制御することにより、曲げ変形時における、単位体積あたりの歪エネルギー量を向上させ、フレームのEA質量効率を向上させる構造技術開発を行った。

2. 構造要件の導出

2.1 フレーム座屈現象の分析

フレームの曲げ変形現象と座屈の関係性を明確にするため、フロントフレームを想定した一定断面フレームを対象に解析と実験にて現象分析を行った。

試験体仕様をFig. 1に示す。断面形状は内寸100×50mm、フレーム長445mm、板厚1.2mmとした片ハットフレームであり、フランジ部をスポット溶接にて接合している。材料は980MPa級の高張力鋼板を用いている。

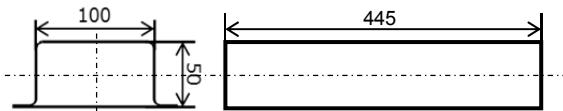


Fig. 1 Dimension of Specimen

実験評価方法と、解析での検証方法をFig. 2に示す。実車衝突時の曲げ変形を再現するため、フレーム両端部をピン固定し、断面中心に対し偏芯させたフレーム軸方向に準静的荷重を負荷した。この際の並進方向の発生荷重と曲げ変形時の現象を観察する。

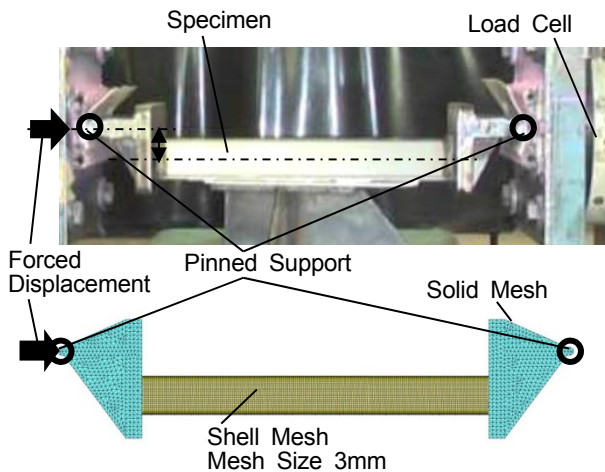


Fig. 2 Test and Analysis Condition

実験の観察結果から、変形初期にフレームを構成する各板の内、圧縮荷重と曲げ荷重が作用する板（以降、圧縮板

と曲げ板）に弾性座屈波が発生した。この座屈波が進展し、お互いに干渉しながら、フレームを構成する板を折りたたむように変形させ、面外変形が起きていることが分かった（Fig. 3）。また解析から、この変形によって、材料降伏点までの歪を発生することなく、曲げ変形が進み、最大荷重以降急激に荷重が低下していることを確認した。

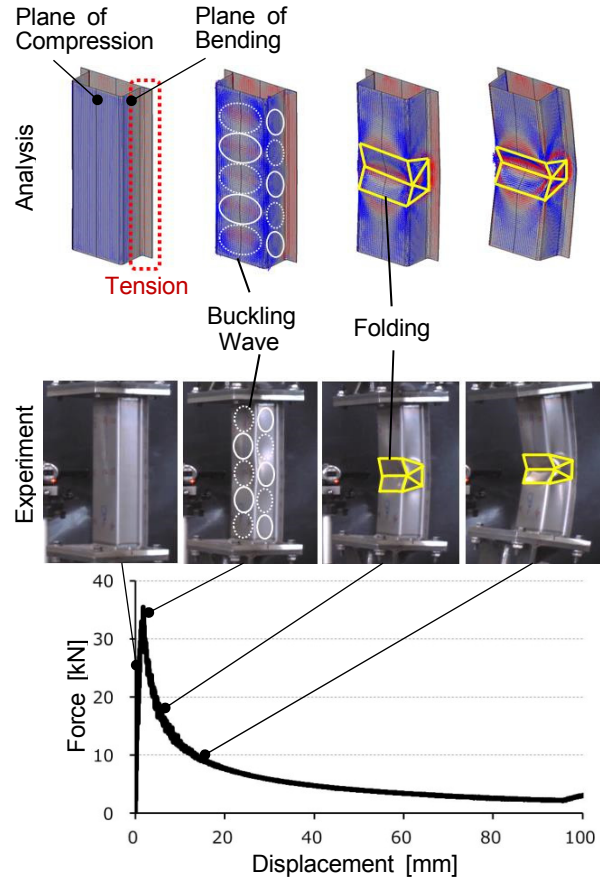


Fig. 3 Deformation Process of Frame Bending

2.2 座屈制御のための仮説検証

現象観察と座屈理論から座屈抑制の方法を以下のように考えた。Fig. 4に示すように、圧縮荷重により座屈する曲げ変形領域を極小化することで、圧縮側板の折りたたみ現象によるフレーム長短縮を抑制する。これにより引張側板に面内引張荷重を発生させ、歪エネルギーを発生させることにより、EA量を向上させることをねらう。

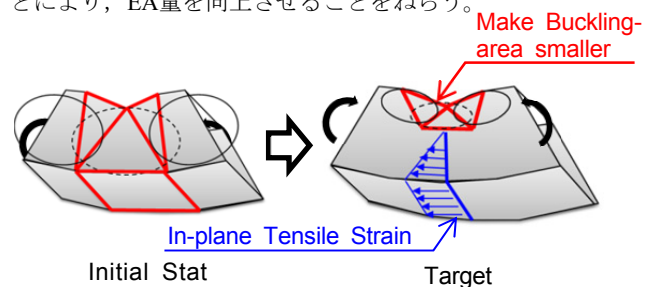


Fig. 4 Target of Bending Mode

最大荷重後の急激な荷重落ち込みは、圧縮板と曲げ板の面外変形によって起きている。その面外変形は圧縮板の弾性座屈波と、曲げ面の弾性座屈波が連成し、発生している。この座屈波の波長を小さくし、座屈変形部を極小化することで、引張荷重作用部に塑性歪を発生させることが期待できる。

すなわち、座屈変形領域を極小化することで圧縮板の折りたたみを抑制し、EA量を向上できると考えた。

上記仮説の妥当性を検証するため、理想状態を圧縮板の面外変形がない状態と定義し、解析にて検証した。

理想状態を解析にて模擬するため、単点拘束 (SPC) にて曲げ板の並進方向の面外変形のみを拘束した。拘束条件と解析結果をFig. 5に示す。解析条件はFig. 3と同様である。

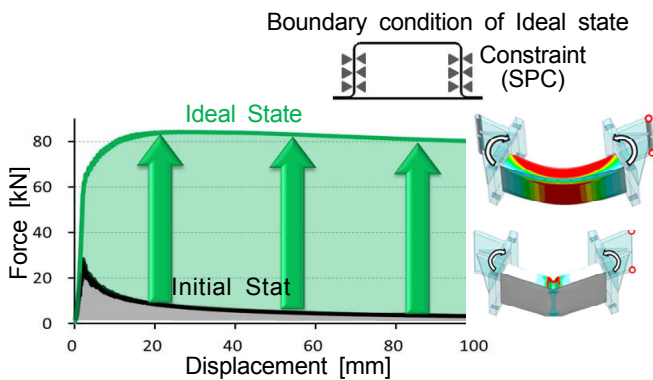


Fig. 5 Theoretical Limitation of Buckling Suppression

フレーム縦板の面外変形を拘束し、座屈を完全に抑制することにより、既存フレーム比EA量を12倍まで向上できることが分かった。この結果から、圧縮側座屈を抑制・極小化しEA量を向上させるという仮説の妥当性を確認できた。

2.3 制御因子の抽出と分析

座屈理論から座屈周期は圧縮荷重作用部の構成板の板幅によって決定し、面外変形量の変位は板厚 t により決定する。今回の曲げ変形フレームを構成するパネルに、座屈理論を適用するとFig. 6となる。

圧縮板は板幅全域に圧縮荷重が作用するため、板幅 b が座屈周期となる。曲げ板は、板幅 h の半分に圧縮荷重が作用するため、 $h/2$ が曲げ板の座屈周期となる。これに対し、実験での座屈周期をFig. 7に示す。

圧縮板は本来の座屈周期となっているが、曲げ板は本来の座屈周期ではなく、圧縮板の座屈周期と同じ周期で座屈している。このことから、各座屈周期を決定する、板幅 b と板幅 h の比率である b/h の適値があると推察した。以降、 b/h を制御因子として取り扱い検証を行った。

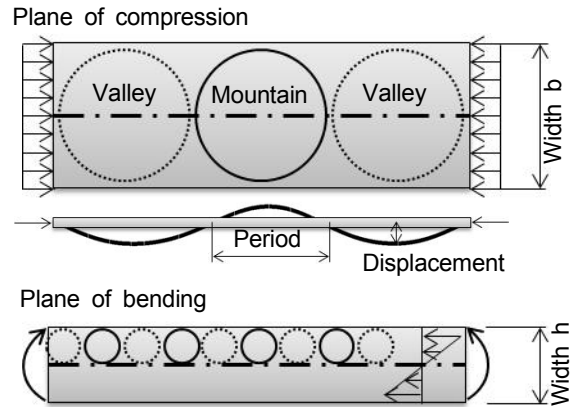


Fig. 6 Period-Buckling from Buckling Theory

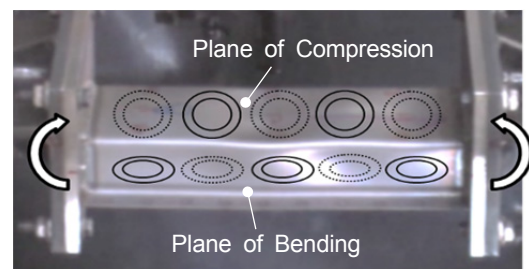


Fig. 7 Period-Buckling of Experiment

制御因子 b/h のEA量に対する影響を検証するため、Fig. 8のとおり矩形一定断面フレームにて検証を行った。

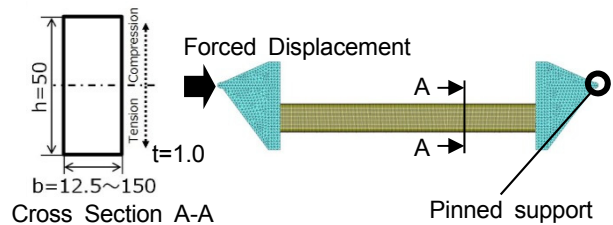


Fig. 8 Verification Model of Controllable Factor

まず圧縮板の板幅 b と曲げ板の板幅 h の比である b/h と、EA量の関係を図. 9に示す。

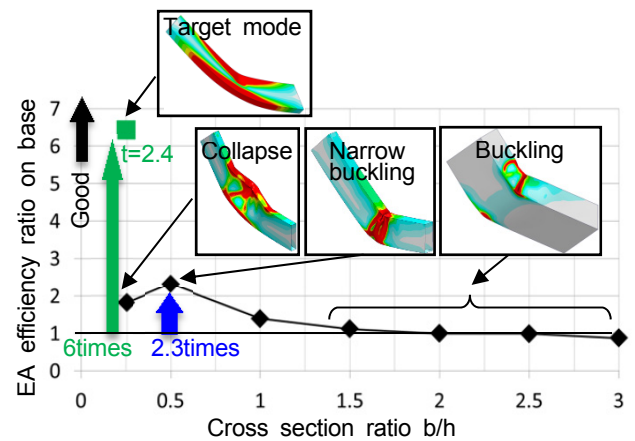


Fig. 9 Relation between EA and b/h

b/h を小さくすることにより、EA量が向上する傾向にあり、歪分布をみても座屈部を極小化できていることが確認できた。しかし、 b/h を0.25まで小さくするとフレームの横倒れが生じ、EA量を向上できないことが分かった。これに対し、板厚 t を1.0mmから2.4mmへ上げると、横倒れを抑制でき、ねらいの変形モードを実現できることを確認した。

車体フレームにおいて、2.4mmもの厚板は適用可能部位に限られる。そこで、板幅や板厚同様に、座屈現象の制御因子である、支持条件の検証を行った結果をFig. 10に示す。本検証ではFig. 10のとおり拘束点を曲げ板に設定し、その拘束位置を変化させることで支持条件とEA量の関係を検討した。その結果、稜線部を除いた圧縮荷重作用部に拘束位置を設けることで、⑦のようなフレームの横倒れを抑制でき、なおかつ、②のように弾性座屈領域から塑性座屈領域へ移行でき、EA量を向上できることが分かった。

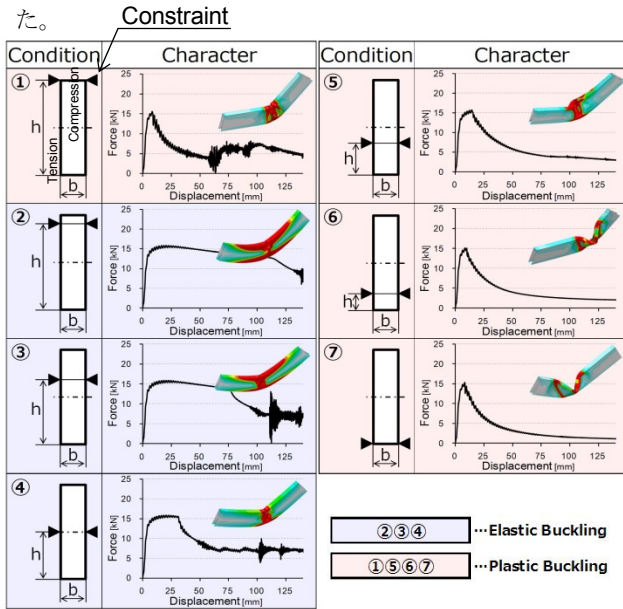


Fig. 10 Verification Model of Controllable Factor

本結果を基に、断面中央部に拘束を付与した場合の b/h とEA量の関係をFig. 11に示す。検証の結果、 b/h を1以下とし、縦板に拘束を付与することで、EA量を4.3倍向上できることを確認した。

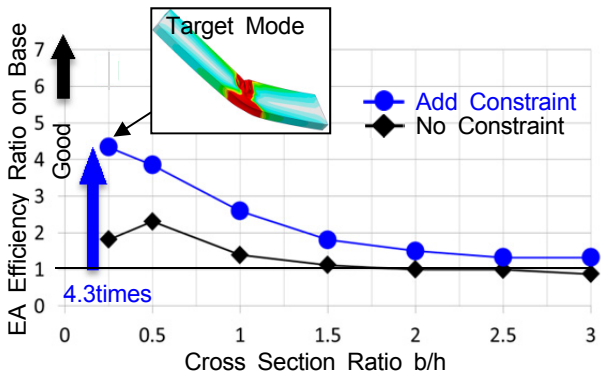


Fig.11 Relation between EA and b/h with Constrains

前述の検証結果から、Fig. 12に示す構造要件を導出した。

要件1) 断面縦横比 $b/h \leq 1$

要件2) 縦板に拘束機能を付与

※ $b/h \leq 0.25$ の場合、拘束機能必須

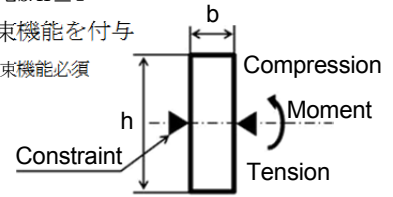


Fig. 12 Requirements of High EA Structure

3. 実車への適用

3.1 フロントフレームの要求特性

導出した構造要件をもとに、実車フロントフレームへの適用検討を行った。フロントフレーム適用に際しては、本部品特有の課題である以下2点への対応についてもFig. 13のとおり検討した。

- (1) 衝突時のパルス制御のため、最大発生荷重を維持しながら、EA量を上昇させる
- (2) 衝突時に、所定の位置で必ず曲げる

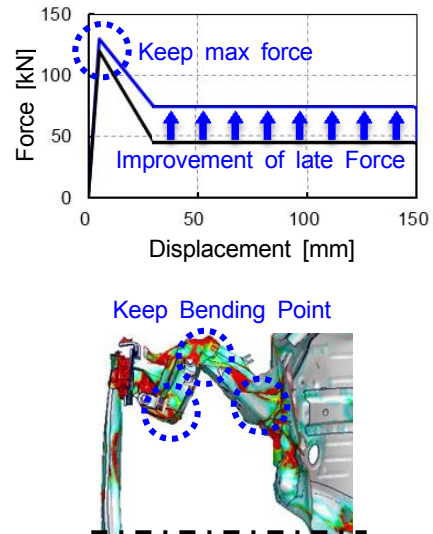


Fig. 13 Task of a Front-Frame

3.2 フロントフレームの基本構造導出

操安性等の制約から、フロントフレーム断面寸法の大幅な変更は不可能である。そのため、断面外形を維持したまま、構造要件を満足させる構造を検討した。

そこで、Fig. 14のとおり、フロントフレーム内に別途EA部材を設け、EA部材とフレームとが成す断面により、断面縦横比 $b/h \leq 1$ を実現させた。拘束機能については、フロントフレームでの実現が困難なため、 $b/h > 0.25$ とすることで拘束機能がなくともEA量を向上できる構造とした。更に、最大発生荷重の制御をEA部材板厚により行い、曲げ変形の安定性は折れビードを設けることで実現をねらった。

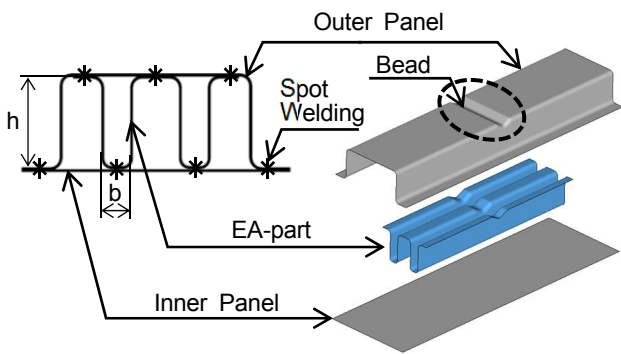


Fig. 14 Initial Structure of the Front-Frame

本構造での荷重特性と断面変形の挙動をFig. 15に示す。

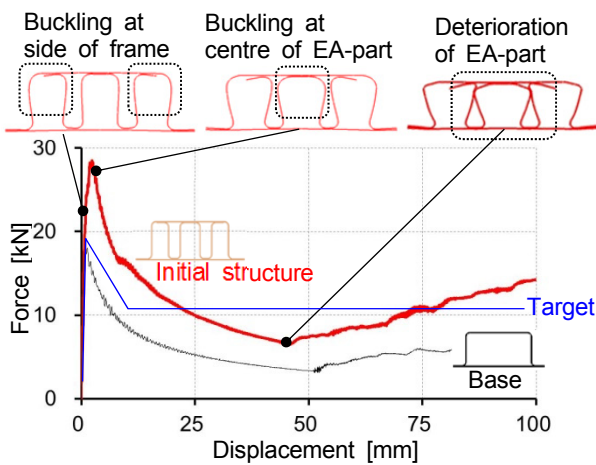


Fig. 15 Results of Initial Structure

アウターパネルの座屈をEA部材が阻害することで初期の荷重の上昇を招いた。またアウターパネルの座屈がEA部材へ伝ばすることにより、EA部材の断面が早期に崩壊し、フレーム全体の座屈後の荷重低下を引き起こしていることが分かった。

上記の検証結果から、最大発生荷重の上昇を抑制するため、フレーム全体の座屈現象を、EA部材が阻害しないよう、フレーム圧縮荷重作用部と独立させる。更に、変形後期の荷重を上昇させるため、フレーム全体の座屈がEA部材へ伝ばすることを遮断し、EA部材の断面崩壊の抑制をねらうこととした。

以上から、Fig. 16に示すとおり、EA部材をアウターパネルと完全に独立させた状態で、フレーム引張側に配置する構造とした。

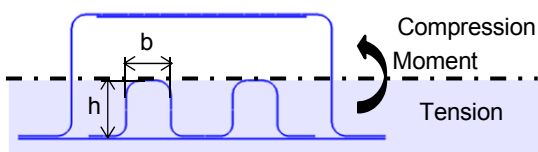


Fig. 16 New Structure with Isolate EA-Parts

本構造での荷重特性と、断面変形挙動をFig. 17に示す。

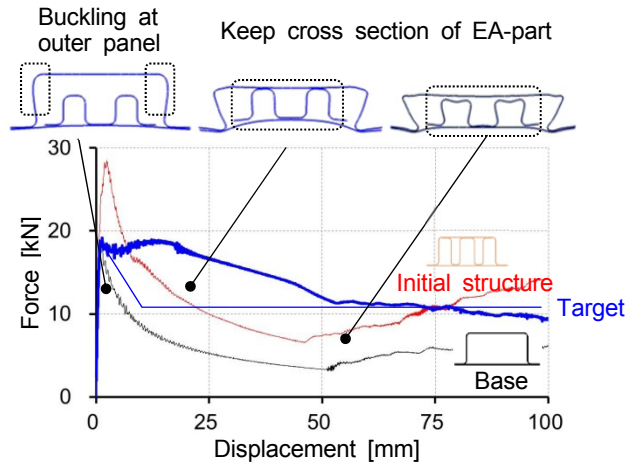


Fig. 17 Results of New Structure

EA部材の引張側独立配置により、EA部材が最大発生荷重を決めるフレーム全体の座屈を阻害することなく、同時にフレーム全体の座屈がEA部材へ伝ばしないため、EA部材が変形後期も断面形状を維持することにより、変形後期の荷重を高くすることができた。

3.3 具体構造化

導出したフロントフレームの基本構造を、実車のフロントフレームへ適用した。適用部位はエンジンマウント直後の曲げ変形部位である。

適用した際の実験結果をFig. 18に示す。最大発生荷重はベースを維持したまま、変形後期の荷重を向上でき、従来比EA量を93%向上できた。これによりフロントフレームのEA量質量効率を72%向上した。

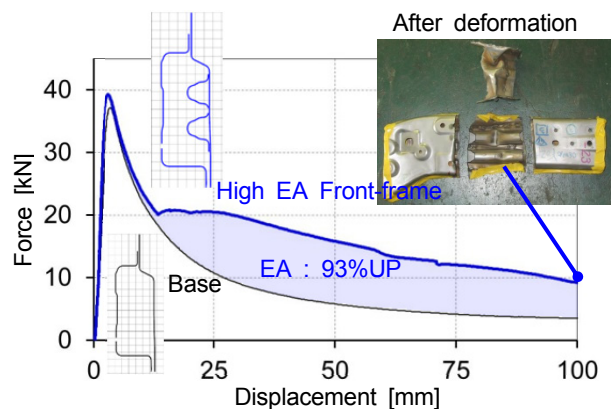


Fig. 18 Results of the Real Front-Frame Structure

4. おわりに

フレーム構成板の座屈周期を断面形状により制御し、高いEAを実現する構造を開発した。これにより、圧縮板と曲げ板の座屈連成を抑制し、引張荷重作用部の広域に塑性

歪を発生させることで高いEA量を実現できた。

本構造をフロントフレームに適用し、座屈現象の伝ばを断面形状の工夫により制御することで、最大発生荷重を維持しながら、EA質量効率を従来比72%向上するフロントフレームが得られることが分かった。

参考文献

- (1) 本田ほか：薄肉中空フレームにおける曲げ強度の質量効率を向上させる断面形状の研究 自動車技術会 学術講演会前刷集（2014）

■ 著 者 ■



河村 力



本田 正徳



児玉 悠貴



元木 正紀



片岡 愉樹



亀井 丈広



若林 充



寺田 栄

論文・解説

22

鋼板／アルミ異材抵抗スポット溶接技術の開発 Development of Steel/Aluminum Resistance Spot Welding Process

田中 耕二郎*¹ 杉本 幸弘*² 西口 勝也*³
Kojiro Tanaka Yukihiro Sugimoto Katsuya Nishiguchi

要 約

年々高まる自動車の軽量化の要求に対し、マルチマテリアル車体を想定した鋼板とアルミニウムの抵抗スポット溶接技術の開発を進めている。その中で、鋼板に低融点で必要最小限の目付量の亜鉛めっきを施すことで、より高い強度が得られることが分かった。

鋼板表面にめっきを施すことで、強度低下の要因となる鋼板の酸化被膜の影響をなくし、接合中のめっき成分の除去により健全に接合ができる。接合界面を詳細分析した結果、低融点、低目付量めっき材の場合、強度向上に適しているとされる厚さ1~2 μ mの金属間化合物層が、非めっき材や高融点めっき材に比べてより広範囲に形成していることを確認した。

Summary

In response to growing demand for lighter vehicles, we are developing steel/aluminum resistance spot welding technology for the multi-material bodies. In that, the joint strength was found to be increased by the application of zinc coating with a low melting point and minimum necessary amount on the steel sheet.

Influence of the oxide film of steel sheets that have strength-weakening factors can be eliminated by coating on steel sheets surface, and it can be obtained good joining by removing coat components at welding. In case of low-melting-point and small amount coated steels, detailed analysis of the joint interfaces shows that the strength-improving intermetallic compound layer in 1-2 μ m thickness was confirmed to be formed in wider areas than those in cases of uncoated steels and high-melting-point coated steels.

1. はじめに

1.1 背景

排ガス規制や燃費向上の観点から自動車の軽量化の要求が年々高まっており、車体のマルチマテリアル化技術の確立が必要となっている。マルチマテリアル化における主要課題の一つに異種材料の接合があるが、特に軽量材料として使用量の増加が予想されるアルミニウム（以下、アルミ）と鋼板との異材接合技術が重要となる。

これまでに、マツダでは鋼板とアルミの摩擦攪拌点接合技術（Spot Friction Welding, 以下SFW）を世界で初めて開発し、クロージャール部品に適用した。SFWはFig. 1に示すように回転ツールを金属表面に押し当てることで摩擦熱を発生させ、その熱と圧力により異材金属同士を固相

接合する技術である。この方法の場合、鋼板表面の酸化被膜がアルミの直接接触を妨げるため、めっき鋼板を使用し、接合中にそのめっきを溶融させて界面から排除することで、鋼板酸化膜の悪影響を回避した⁽¹⁾。参考として各種めっき材を使用した場合の接合強度の比較をFig. 2に示す。特定のめっき材を用いることで接合強度が大幅に向上することが分かる。

一方、ボディーシェルを想定した場合、アルミ／鋼板／鋼板などの3枚組やウエルドボンドにも対応できる異材接合技術が必要との観点から、SFWの知見を活かしつつ、新たに鋼板とアルミの抵抗スポット溶接技術の開発に取り組んだ。

*1~3 技術研究所
Technical Research Center

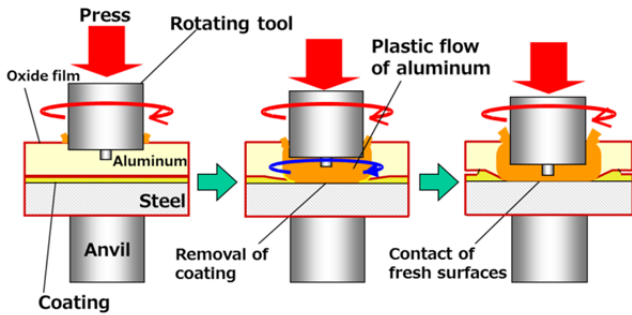


Fig. 1 Schematic View of Steel/Aluminum SFW Process

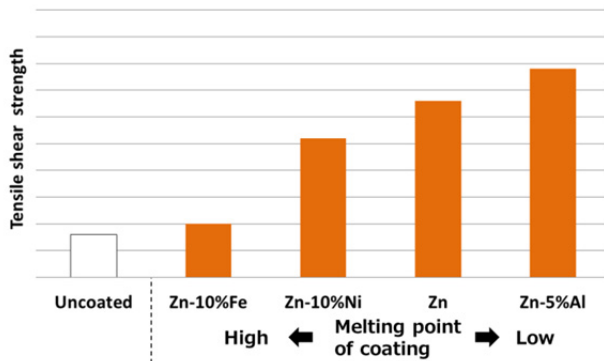


Fig. 2 Effect of the Type of Coating on Steel to SFW Joint Strength

1.2 鋼板／アルミ抵抗スポット溶接技術の概要

抵抗スポット溶接は溶接電極で板組みを挟み、通電することで生じる抵抗発熱を用いた接合手法である。アルミ／鋼板及びアルミ／鋼板／鋼板の板組みでの、発熱状態、接合後の断面写真及び断面の概略図をFig. 3に示す。鋼板とアルミのスポット溶接では、接合界面におけるもろい金属間化合物 (Inter Metallic Compound, 以下, IMC) の形成を抑制するため、直流インバーター方式の抵抗溶接機を用いてアルミのみが溶融するように通電制御する。3枚組の場合には中板と下板の鋼板間に溶融ナゲットを形成するとともに、上板のアルミが溶融するよう通電条件を設定する。

この場合、アルミの表面酸化膜はアルミが溶融することで破壊されるが、アルミに接する鋼板は固相のままであり、その表面酸化膜が接合性を阻害する。そこで、SFWと同様にアルミと接する鋼板にめっき材を用い、その酸化膜の悪影響を回避している。

アルミに接する鋼板種を変えた場合の3枚組での剪断強度の比較をFig. 4に示す。なお、3枚組は鋼板間の発熱によりアルミの溶融域が広くなりやすく、総じて2枚組の場合よりも強度が高くなる傾向を示す。

鋼板には非めっき鋼板 (以下SPCC) の他、自動車用として使用頻度の高い合金化溶融亜鉛めっき鋼板 (以下GA, 目付量: 55g/m², めっき融点: 約700℃), GAと目付量

やめっき融点が大きく異なる電気亜鉛めっき鋼板 (以下EG, 目付量: 10, 20, 30g/m², めっき融点: 約420℃) を用いた。SPCCに比べてめっき材を使用することで剪断強度が向上し、めっきの中でも目付量が少なく、低融点であるEGがGAより高くなる。また、EGの中でも目付量が少ない程、より強度が高くなり、SPCCの2倍近い実用レベルの剪断強度が得られる。

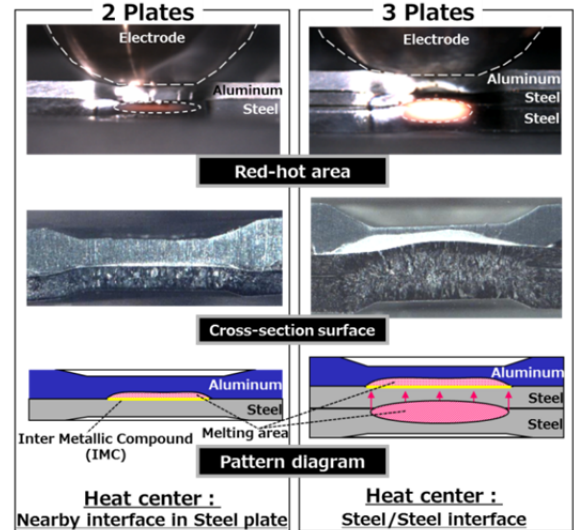


Fig. 3 Schematic View of Steel/Aluminum Resistance Spot Welding Process

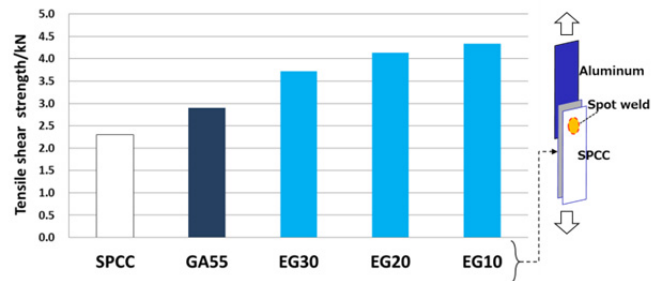


Fig. 4 Effect of the Type of Coating on Steel to Resistance Spot Welding Joint Strength

以上のように、鋼板とアルミの異材接合では鋼板の亜鉛めっきが重要な役割を果たすことは明白であるが²⁾、その作用や接合強度向上のメカニズムについては十分に解明されていない。そこで、抵抗スポット溶接の接合過程におけるめっき成分の挙動や、接合界面に生成するFeとAlのIMCの状態を詳細調査し、その結果を元にめっきが異材接合に及ぼす作用や強度向上のメカニズムを検討した。

2. 試験方法

2.1 供試材及び接合試験

アルミは6000系合金板 (1.2t) とダイカスト板材 (以下DC材, 2.0t) を用いた。鋼板には厚さ0.8tのGA (目付量: 55g/m²), EG (目付量: 10g/m²), SPCCの3種を供

試した。接合試験はアルミと鋼板の2枚組または3枚組（アルミ／鋼板／鋼板）とし、先端径6mmのR8電極を用いて抵抗スポット溶接した。溶接時間は一定とし、電流値はめっき種、板組みごとに溶接チリが発生しない範囲で設定した。

2.2 断面観察

接合過程におけるめっきの挙動や接合界面のIMC形成状態を明らかにするため、光学顕微鏡、電子線マイクロアナライザー（EPMA）、走査型電子顕微鏡（SEM）、透過型電子顕微鏡（TEM）を用いて接合界面の組織観察と成分分析を行った。

3. 試験結果と考察

3.1 接合中のめっきの挙動

Fig. 5にDC材とGAを用いた3枚組接合試験片の断面マクロ分析結果を示す。接合時間は最大30cyc（=0.5sec）とし、時間経過による変化を観察した。時間の経過とともにDC材の熔融域が拡大し、その熔融域内にGAめっき層に含まれるFe成分とZn成分が拡散していくことが分かる。通常、熔融しためっき成分は加圧とともに接合部外へ排出されると考えられるが、併せて、アルミ内部へ拡散することが確認できた。

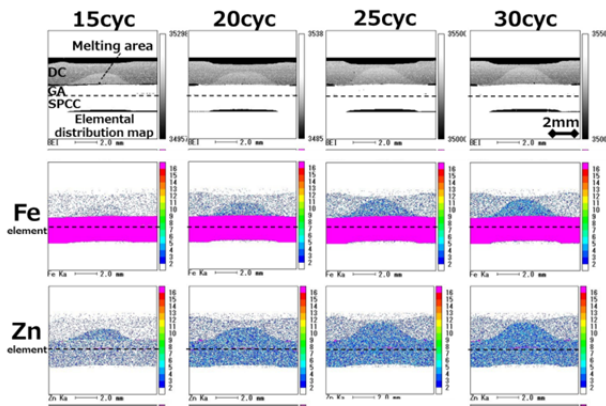


Fig. 5 Result of Macro EPMA Analysis of GA/DC Joint Cross-Section Surface

更に接合部中央の界面近傍における組織変化を光学顕微鏡観察と面分析結果を元に模式図化した（Fig. 6）。めっきに含まれるFe成分はDC材内部へ徐々に拡散するが、短時間側では界面近傍にFe成分が層状に残存し、Fe濃化層とDC母材との際が起点となり接合後に割れが発生している。一方、30cyc時点で界面近傍に濃化した領域はなく、めっき成分はほぼDC材側に拡散している。

以上、めっきは接合中に熔融して鋼板の新生面を露出させるが、その後のアルミ側への拡散が不十分な場合は接合強度を低下させることが分かった。

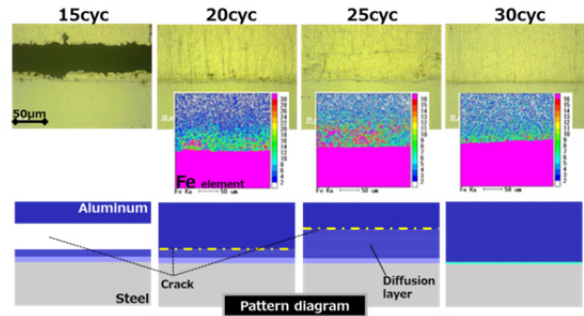


Fig. 6 Result of Optical Micrograph and EPMA Analysis nearby GA/DC Interface

3.2 IMC層の分布調査

鋼板／アルミ異材抵抗スポット溶接では、IMC層厚さが1～2µm程度の場合に高い接合強度が得られるとの報告がある②。そこでアルミに6000系合金板を使用し、接合界面にあるIMCの厚さを光学顕微鏡により計測した。鋼板がGAの場合はZn-Fe合金層とIMCの判別が困難なため、IMCを含む中間層の厚さを測定した。接合中心からの距離を横軸とした厚さの分布図をFig. 7に示す。また、Fig. 7中の①，②，③の各範囲の断面写真を鋼板別にFig. 8に示す。

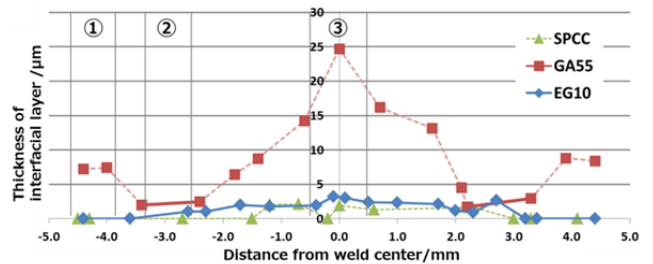


Fig. 7 Thickness Distribution Chart of Interfacial Layer on Steel/6000 Series Aluminum Joint Cross-Section Surface

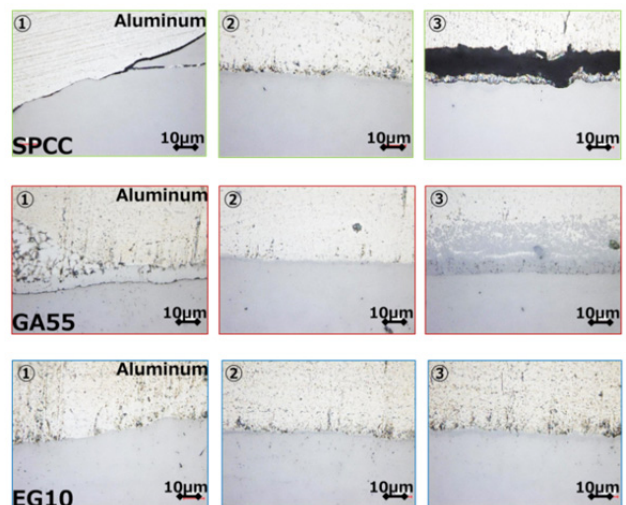


Fig. 8 Optical Micrograph of Steel/6000 Series Aluminum Joint Cross-Section Surface

鋼板がSPCCの場合、厚さが1~2μm程度のIMCが形成されているものの、不連続であり、写真①や③のように観察時点で界面の広い範囲で剥離が生じている。これは鋼板の酸化被膜の影響によりアルミとの直接接触が部分的にしか生じなかったためと考える。

GAの場合は、最外周部分に入熱不足によるめっき層の残留が見られる。中心部分には元のめっき層厚さよりも厚い、拡散途中のめっき成分を含む化合物層がアルミ内部に形成されている。厚さ1~2μmに近いIMC層はFig. 7 ②の付近にドーナツ状に形成していた(実線部分)。

一方、EGの場合は接合界面の全域に厚さ1~2μm程度の均一なIMC層を形成している。これはめっき自体が薄く、融点もGAより低いことで、接合部外への排出とアルミ内部への拡散が容易になったためである。より広範囲で鋼板新生面とアルミの直接接触が達成され、剥離の生じない健全な接合部が形成されることで、高い接合強度が得られると考えられる。

3.3 IMC層の成分分析

接合により生成したIMC自体のめっき種による違いを調査するため、GAとEGのIMC層 (Fig. 7 ②付近) についてSEM観察とEDXによる成分ライン分析を行った。結果をFig. 9に示す。IMC層内はAl及びFeが厚さ方向に同程度の成分比率で存在しているが、GAでは微量のZnが認められる。

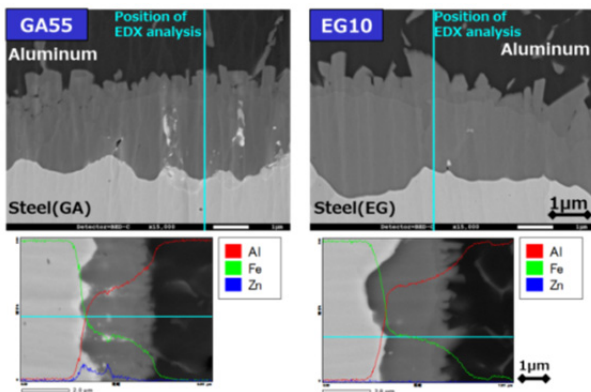


Fig. 9 Result of EDX Line Analysis of IMC Layer in Steel/6000 Series Aluminum Interface

Fig. 10にTEM観察と制限視野回折による化合物の同定結果を示す。アルミニウム側近傍はAlリッチのAl₃Fe、鋼板側近傍はFeリッチのAl₅Fe₂で構成され、IMCの基本構成はGAとEGで同じである。

TEMによるアルミニウム側近傍 (Fig. 10アルミ側指示部) の詳細分析結果をFig. 11, 12に示す。今回、EDXによる定量分析ではGAのみZnのピークを確認したが、制限視野回折による同定ではGA、EGともにAl₃Feであった。

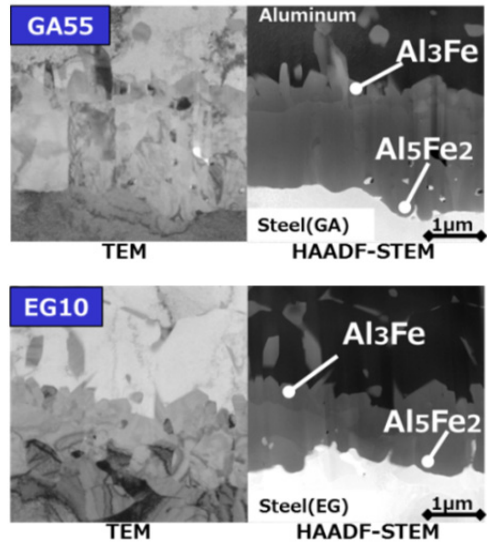


Fig. 10 Result of TEM Analysis of IMC Layer in Steel/6000 Series Aluminum Interface

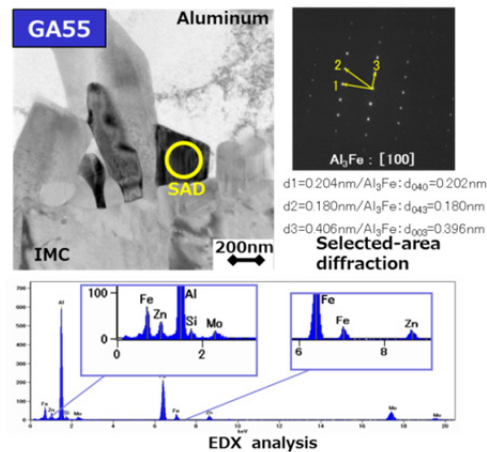


Fig. 11 Detailed Result of TEM Analysis of IMC Layer in GA/6000 Series Aluminum Interface

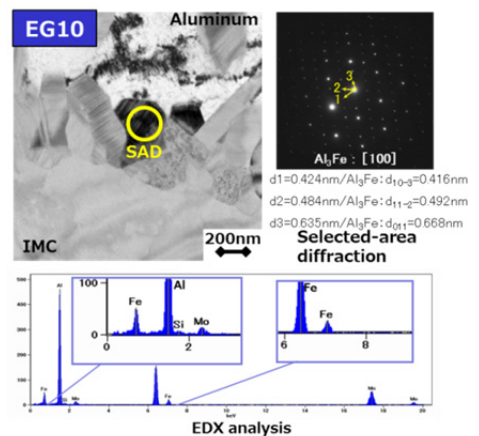


Fig. 12 Detailed Result of TEM Analysis of IMC Layer in EG/6000 Series Aluminum Interface

以上の結果から、めっき種の違いによりIMC層内のZn成分の有無という差はあるが、GAとEGで構成する化合物に大きな違いがないことが分かった。従って、めっき種による接合強度の違いは前述したIMC層の厚さと形成範囲に起因するものと考えられる。

3.4 めっきによる強度向上メカニズム

鋼板とアルミのスポット溶接における鋼板表面のめっきの効果についてまとめた模式図をFig. 13に示す。

強度低下の要因となるIMC層の粗大な成長や溶接チリの発生を抑制するため、入熱を抑えた場合、溶融が困難な鋼板表面の酸化被膜がアルミとの直接接触を妨げる。この問題に対して鋼板にめっき材を使用し、めっき成分を接合中に接合部外へ排出、もしくはアルミ内部へ拡散させて接合界面から除去することで、鋼板の新生面が露出する。これにより鋼板とアルミが直接接触し、IMC層を粗大に成長させることなく健全な接合が達成される。

逆に界面にめっき成分が残存する場合は接合強度低下の要因になる。その点、薄目付けのEGはめっき成分の除去がGAよりも容易であり、接合強度向上に有効に作用したと考える。

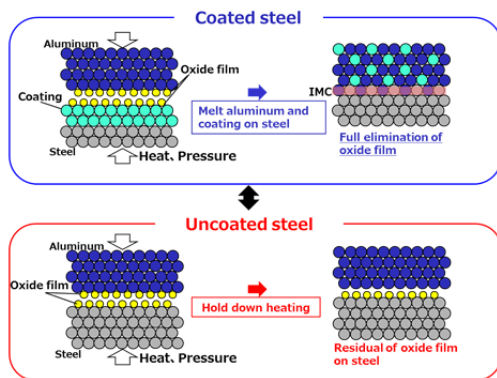


Fig. 13 Pattern Diagrams of Effect of Coating on Steel to Steel/Aluminum Resistance Spot Welding

4. 接合プロセスの改善

車体用鋼板として一般的なGA材にも本技術を適用するため、めっきの作用や接合強度向上メカニズムに基づき、プロセスの改善を進めている。その一例として、接合界面からのめっき成分の排出促進を目的とした多段通電プロセスを紹介する。

Fig. 14にその通電パターンを示す。これは十分な冷却時間を挟みながら段階的に高い溶接電流を通電させることで、溶接チリを発生させることなく、健全な接合領域径の拡大を図るものである。通電条件を制御することで、Fig. 15に示すように特に強度低下しやすいGA材の場合の剥離強度についても改善が可能となる。今後、電極形状も含めた検討を行い、接合技術としての汎用性を高める。

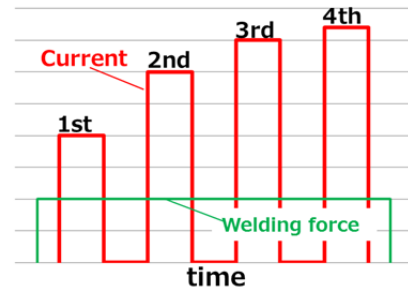


Fig. 14 Pattern of Current-Carrying in Multistep Steel/Aluminum Resistance Spot Welding

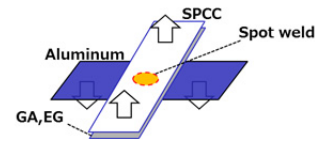
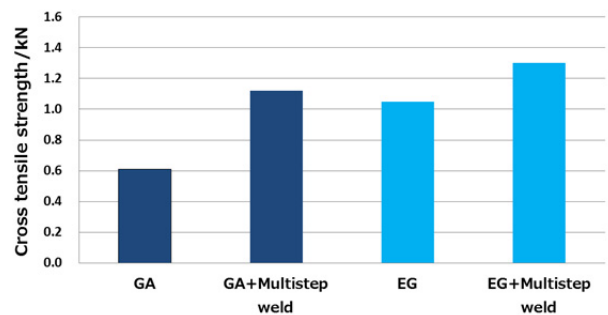


Fig. 15 Effect of Multistep Welding Process to Steel/Aluminum Spot Welding Joint Cross Tensile Strength

5. おわりに

鋼板とアルミのスポット溶接において、鋼板に低融点で必要最小限の目付量のめっきを施すことで効果的に高い強度が得られることが分かった。

鋼板表面にめっきを施すことで、強度低下の要因となる鋼板の酸化被膜の影響をなくし、接合中のめっき成分の除去により健全に接合することができる。

接合界面を詳細分析した結果、強度向上に適しているとされる厚さ1~2μmの金属間化合物層が、非めっき材や高融点めっき材に比べてより広範囲に形成していることを確認した。

加えて、通電条件の制御により高融点めっき材においても強度を改善することができ、より汎用性を高めることが可能となる。

本研究の一部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) 事業「革新的新構造材料等研究開発」の支援を受けて実施した。

参考文献

- (1) 玄道ほか：摩擦点接合技術の開発，日本金属学会誌，第70巻11号（2006）
- (2) 武田ほか：抵抗スポット溶接法によるFe-Al異材接合技術の開発，神戸製鋼技報，Vol.57 No.2（2007）

■ 著 者 ■



田中 耕二郎



杉本 幸弘



西口 勝也

論文・解説

23

微細気泡構造制御による高機能発泡体の開発 Development of Highly Functional Foams by Microcellular Structure Control

宮本 嗣久*¹ 小林 めぐみ*² 金子 満晴*³
Tsuguhisa Miyamoto Megumi Kobayashi Mitsuharu Kaneko
大嶋 正裕*⁴
Masahiro Ohshima

要 約

マツダでは、超臨界流体を活用しコアバック法と組み合わせた発泡射出成形技術を開発し、市販車に採用してきた。今回、要求機能の高い部品の軽量化や、新たに吸音等の機能を付加していくため、気泡構造をより高度に制御するための材料と発泡技術の開発を行った。自動車用ブロックポリプロピレンにゲル化特性を持つ結晶核剤を添加し、結晶を微細化させて、その結晶を発泡核剤として機能させた。その結果、核剤を添加しないものに対し、気泡核生成を促進して気泡成長を抑制したことで、同じ発泡倍率でも表層付近の剛性を向上させる断面構造を実現できた。これにより曲げ特性を向上させつつ、衝撃特性も従来品同等以上にできた。更に、コアバック時の延伸操作により、ナノレベルの繊維を微細気泡構造体の中に造り込むことができ、吸音率が向上した。

Summary

A foam injection molding technology was developed using super critical fluid as a physical foaming agent, combined with a core-back process. This technology has been applied to production of vehicle parts. In this time, in order to reduce the weight of highly specific and functional parts and produce higher sound absorbance, materials were compounded with advancement of Mazda's foaming technology: A crystal nucleating agent of gelling property was added to a block polypropylene (PP) to form PP nanocrystals in a cooling process of foam injection molding and utilize them as bubble nucleating agents. As a result, the cell size became highly smaller and the skin layer became thicker while the expansion ratio was the same. This new method can maintain the drop impact property at conventional product's level while improving flexural property. In addition, the sound absorbance can be increased by creating nano-level fibrils in a micro bubble structure by stretching cell walls in course of core-back operations.

1. はじめに

自動車用プラスチック部品において、発泡射出成形品の応用範囲が拡大されている。これまでマツダでは、超臨界流体を活用し、コアバック法と組み合わせた発泡射出成形技術を開発した。この技術によって、微細な気泡構造をもち機械物性を保持した表層と、高発泡化で軽量化な中心層をもちサンドイッチ気泡構造が得られ、機械物性の保持と大幅な材料削減の両立を可能とし、市販車に採用している^{(1),(2),(3)}。更にマツダは、要求機能の高い部品の軽量化や、新たに吸音等の機能を付加していくため、より気泡構造を

高度に制御するための技術開発を行っている。

その方法として、樹脂部品を構成しているポリマーの結晶を発泡核剤として働かせることを着想した。結晶性樹脂が熔融状態から冷却していくと、樹脂に溶解しているN₂などの発泡剤は結晶相から非晶相へ排出されていき、結晶の周りでN₂が過飽和状態となることで発泡核剤として働くと推論した。そのため、結晶サイズを微細化できれば、気泡サイズをも微細にできると考えた。そこで、ゲル化特性をもつ結晶核剤に着目した。結晶核剤は、熔融樹脂中に自己組織化に起因する三次元網目構造を形成する^{(4),(5)}。この網目によりラメラ結晶を球晶に成長させないよう抑制

*1~3 技術研究所
Technical Research Center

*4 京都大学
Kyoto University

し、微細結晶化させ発泡核剤として利用することを試みた⁶⁾。

本研究では、結晶核剤による気泡微細化の検証を行うとともに、自動車用ブロックPPにおいて、コアバック動作条件を調整することで、微細独立気泡や高連通率気泡構造の作り分けを試みた。更に、低発泡倍率の成形品では構造体の機能として要求される曲げおよび衝撃特性の評価を、高発泡倍率の成形品では付加機能として吸音特性の評価を実施した。

2. 実験方法

2.1 気泡微細化の可視化実験

実際の射出成形時に結晶化と気泡成長の挙動を観察することは困難なため、バッチ発泡装置を用いて顕微鏡での可視化を試みた (Fig. 1)。ベース樹脂には、純粋なホモPP (メルトフローレート (MFR)=3) と、ホモPPに比べ結晶化度が低く帯電防止剤や紫外線吸収剤なども添加されている自動車用ブロックPP (MFR=36) を用い検証を行った。結晶核剤は、1,3:2,4bis-O-(4-methylbenzylidene)-D-sorbitol gelling agent (ゲルオールMD; 新日本理化(株)製) を使用し、ベース樹脂に0.5wt%添加した。

結晶化挙動の観察は、ヒーターで熔融状態からPPの結晶化温度付近まで温度を低下させながら観察した。気泡の生成・成長挙動の観察は、コアバック発泡による内部圧力の低下を模擬するため、減圧弁を開放し圧力を制御して観察した。

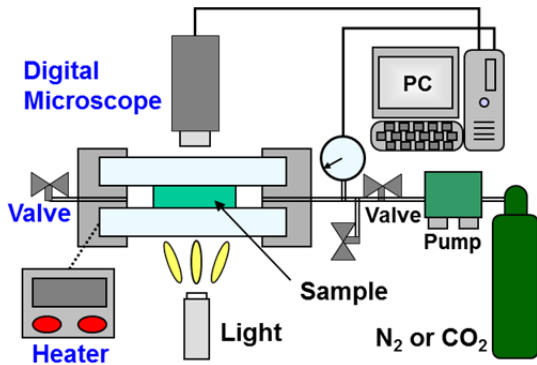


Fig. 1 Batch Foaming Apparatus

2.2 気泡微細化の成形実験

実験にはTrexel社のMuCell®システムを搭載した35ton電動射出成形機を使用した。金型は1点ダイレクトゲートの平板型 (70mm×50mm, 厚みは可変) を使用した。射出時の板厚は2.0mmとし、射出完了後にコアバック動作を行った。コアバック後の板厚は、2.5mm (発泡倍率: 1.25倍) と12.0mm (発泡倍率: 6倍) の2水準とした (Fig. 2)。

ベース樹脂は自動車用ブロックPPを用い、発泡剤はN₂

ガスを使用した。結晶核剤は可視化実験と同じものを使用し、ベース樹脂と同じブロックPPをマトリクスとした核剤5.0wt%のマスターバッチをドライブレンドして、核剤が0.5wt%になるように希釈して発泡射出成形した。

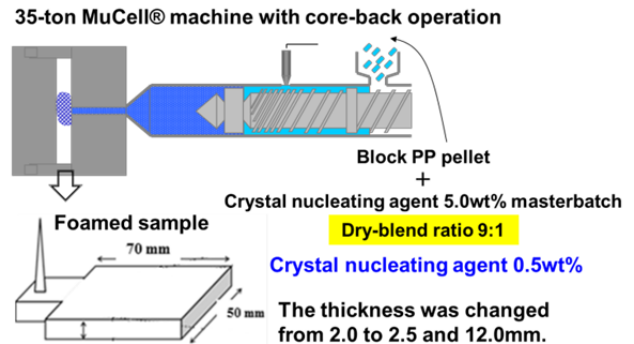


Fig. 2 Schematic View of Injection Process

2.3 特性評価

発泡サンプルの結晶化特性の測定には示差走査熱量計 (DSC) を用いた。条件は昇温10°C/min (室温~230°C) →保持1min→降温10°C/min (230°C~室温) とし、昇温時の吸熱プロファイルから融解熱量を、また降温時の発熱プロファイルから結晶化温度を求めた。

発泡倍率が1.25倍の低発泡倍率サンプルの気泡構造の観察には、X線CTを用いた。観察視野は0.5mm×0.5mmとし、サンプル表面から内部にかけて1.5mmまで観察した。データ解析は3D形態計測ソフトを用いて気泡径、気泡数及び空隙率を求めた。

発泡倍率が6倍の高発泡倍率サンプルの気泡構造の観察には、X線CTでは分解能が不十分であったため、走査型電子顕微鏡 (SEM) を用いた。

曲げ特性は、平板から幅10mm, 長さ80mmの短冊を切り出し、試験速度2mm/minで測定した。

吸音測定用のテストピースは、発泡サンプルをφ40mmに切り出し、音波を入射させるため片側のスキン層をカッターナイフで除去した。吸音特性は、φ40mmの音響インピーダンス管装置を用いて垂直入射吸音率を測定した。測定周波数範囲は200~5000Hzとした。

3. 結果と考察

3.1 結晶化と発泡挙動

バッチ発泡装置を用いて熔融温度から120°Cに低下させたときの結晶化挙動は、Fig. 3に示すように純粋なホモPPでは球晶に成長したのに対し、結晶核剤を添加すると、球晶は現れず非常に微細な結晶となった。続いて、発泡挙動をFig. 4に示す。結晶が現れ始めた温度で減圧させると、純粋なホモPPでは球晶の界面で気泡が生成し、大きく成長した。一方、結晶核剤を添加したものでは微細な気泡が緻密に成長した。この結果から、ねらいどおり結晶が発泡

核剤として働くことが確認できた。

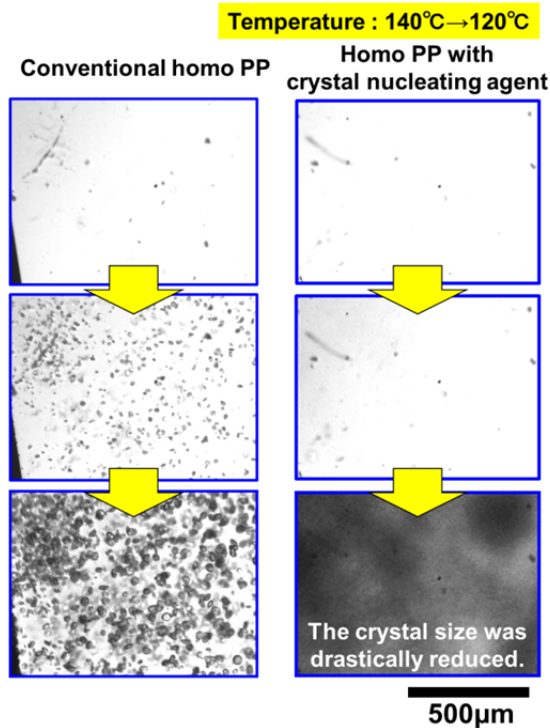


Fig. 3 Crystallization Behavior of Homo PP with/without Crystal Nucleating Agent

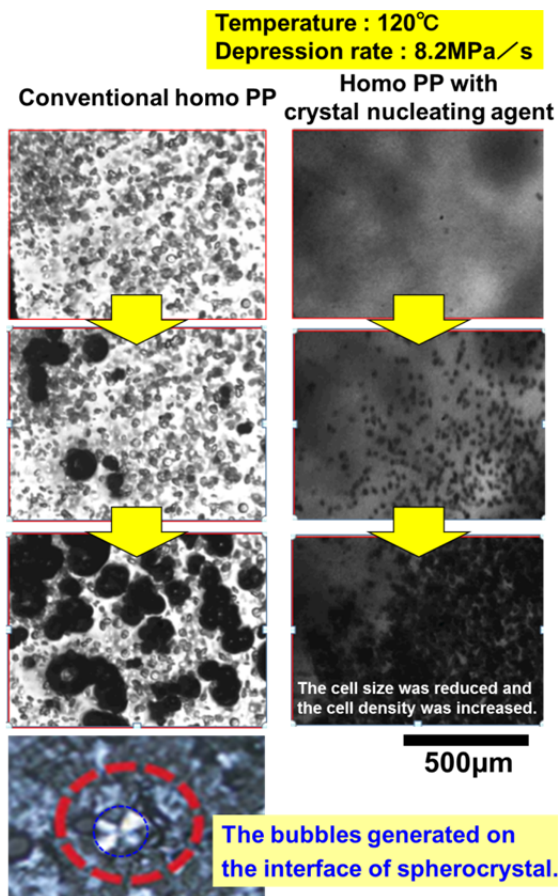


Fig. 4 Foaming Behavior of Homo PP with/without Crystal Nucleating Agent

更に自動車用ブロックPPについても観察を行った結果、ホモPP同様に気泡を微細化できることが確認できた。

3.2 機械的特性

機械的特性への効果確認として、自動車用のブロックPPを用い、初期板厚2.0mmから2.5mmにコアバック発泡した成形品の曲げ及び衝撃試験の結果をTable 1に示す。結晶核剤を添加することにより、通常PPの発泡体に対し曲げ強度を15%、曲げ弾性率を30%向上できることに加え、衝撃特性も最大衝撃力・パンクチャーエネルギーともに同等以上となることを確認した。

Table 1 Mechanical Properties of Foamed Samples

Properties	Unit	Conventional block PP	Block PP with crystal nucleating agent
Bending strength	MPa	15.2	17.2
Flexural modulus	MPa	694	915
Maximum force	N	1825	1947
Puncture energy	J	10.9	11.8

機械的特性向上に結晶化度が寄与しているか確認するため、示差走査熱量計で融解熱量を求めた (Table 2)。その結果、融解熱量は核剤有無でほぼ同等なので結晶化度に差がないと考えられ、機械的特性の向上に関してこの影響は小さいと考える。

Table 2 Crystallization Properties of Foamed Samples

Properties	Unit	Conventional block PP	Block PP with crystal nucleating agent
Crystallinity (Melting calorice)	J/g	74.1	75.0

次に、気泡構造の影響を確認するため、X線CTで結晶核剤有無で同じ発泡倍率の発泡体内部を観察し、3D形態計測ソフトで気泡径や空隙率を求めて比較した結果をFig. 5, 6に示す。スキン層からコア層にかけては、空隙率が急激に立ち上がって10%以上となる領域が通常PPに対し核剤ありはコア層側に約0.3mmシフトしている。また、板厚中央部(表面から1.0~1.5mm)に着目すると、核剤ありは気泡数が700倍以上も形成され、最大気泡径が10分の1以下となっている。これは、微細結晶化により気泡核生成が促進したことで、気泡成長を遅らせることができたためと考えられる。その結果、スキン層とコア層の境界にナノオーダーの超微細な気泡が形成されている。これが疑似的なスキン層として振る舞うことで、同じ発泡倍率でも発泡体の表層付近の剛性が向上し、曲げ及び衝撃特性の両特性が向上できたと推察する。

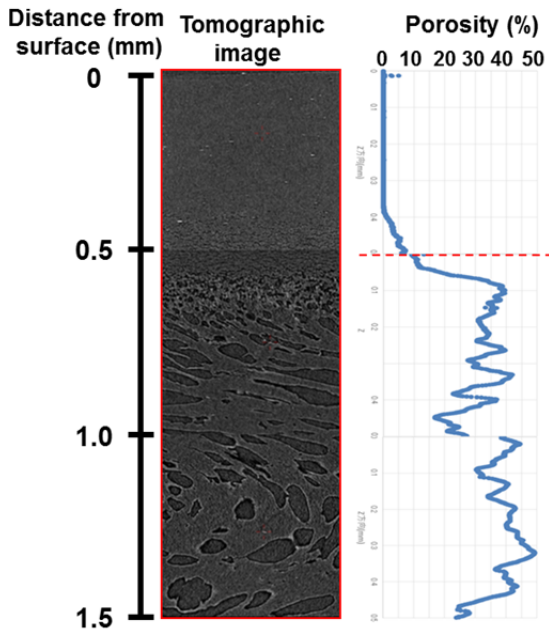


Fig. 5 X-ray Computed Tomography Data of Foamed Samples without Crystal Nucleating Agent

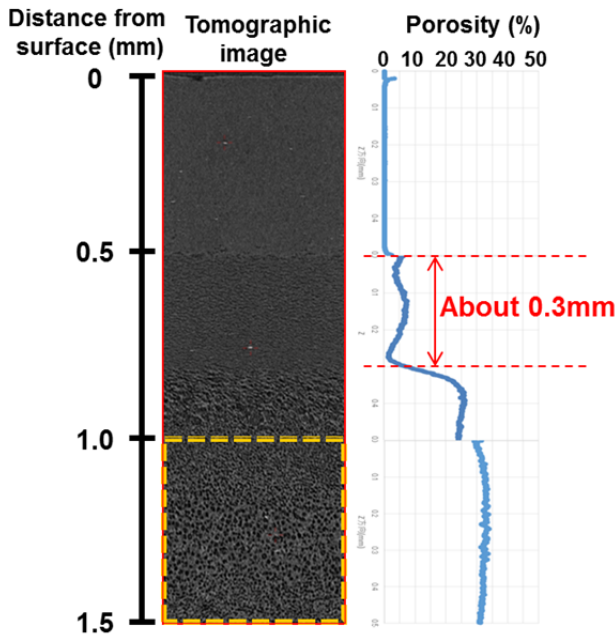


Fig. 6 X-ray Computed Tomography Data of Foamed Samples with Crystal Nucleating Agent

3.3 吸音特性

初期板厚2.0mmから12.0mmまで高倍率発泡させた成形品のコアバック方向と平行断面のSEM写真をFig. 7に示す。結晶核剤添加品は、気泡が微細化し、気泡壁が非常に薄くなり、気泡壁がマイクロ～ナノサイズに繊維化した構造になっていることが確認できた⁽⁷⁾。

通常PP発泡体では、発泡により気泡壁が延伸される際に、気泡壁に球晶を含むため弾性率が高く延伸されにくい状態となり、気泡壁が分厚くなってしまふ。一方、結晶核剤ありの発泡体では、微細結晶界面で多数の気泡核が生成し、更に気泡壁はラメラとアモルファス状態のため薄く引き延ばされやすく、フィブリル構造が形成されたと推察する。

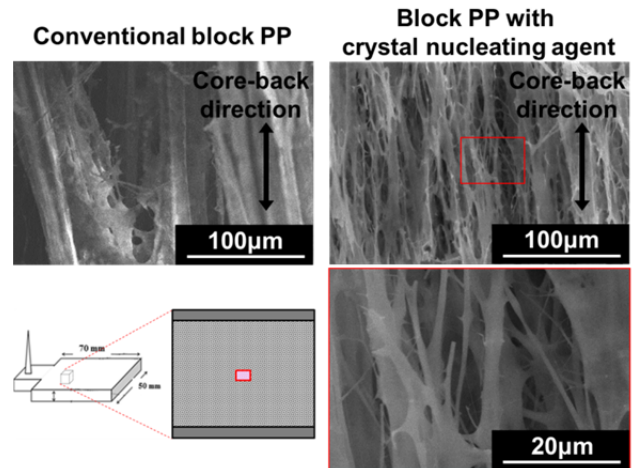


Fig. 7 SEM Micrograph of Foamed Samples

初期板厚2.0mmから12.0mmにコアバック発泡した成形品の垂直入射吸音率の周波数特性をFig. 8に示す。結晶核剤ありの発泡体では、通常PPの発泡体に比べ吸音率が全周波数域（200～5000Hz）で向上する効果が確認できた。これは、ナノサイズの緻密なフィブリル構造により、音波の粘性損失・熱交換損失が増大したものと推察する。

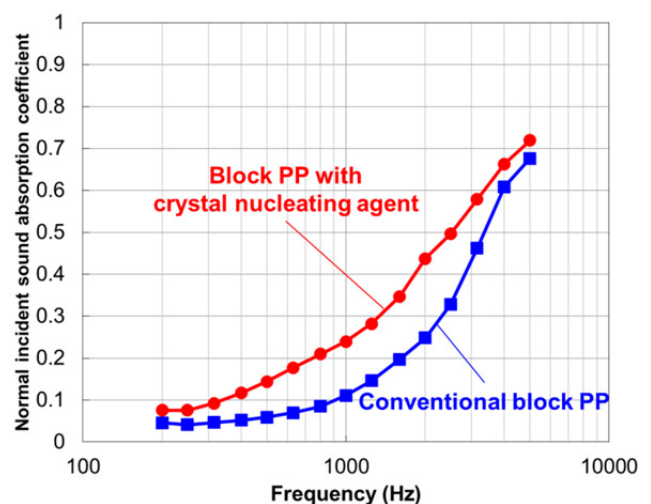


Fig. 8 Sound Absorption Properties of Foamed Samples

4. おわりに

超臨界流体発泡とコアバック法を組み合わせた射出発泡成形技術において、PPにゲル化特性を持つ結晶核剤を

添加し、結晶を微細化させ、発泡核剤として機能させることで気泡の微細化を実現した。

その結果、低発泡倍率の成形品では、気泡核生成を促進し、気泡成長を遅らせることで、表層付近の剛性を向上させる気泡構造を実現できた。これにより曲げ特性を向上させつつ、衝撃特性も同等以上に保持できることを確認した。

高発泡倍率の成形品では、コアバック時の延伸操作により、ナノレベルの繊維を微細気泡構造体の中に造り込み、吸音率を向上できることが分かった。

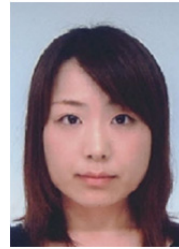
参考文献

- (1) 小川ほか：発泡成形技術を用いたドアモジュール基材の開発，マツダ技報，No.27，pp.21-25 (2009)
- (2) 梶山ほか：CX-5への発泡成形ドアモジュールの適用，マツダ技報，No.30，pp.109-113 (2012)
- (3) 宮本ほか：発泡成形技術を用いたドアモジュール用基材の開発，成形加工シンポジウム'12前刷集，pp.29-30 (2012)
- (4) 小林ほか：高分子融液および有機溶媒物理ゲルにおける1,3:2,4-cis-O-インサイド-ビス-O-(p-メチルベンジリデン)-D-ソルビトールの高次構造形成，高分子論文集，Vol.55，No.10，pp.613-627 (1998)
- (5) T. A. Shepard, et al. : Self-organization and polyolefin nucleation efficacy of 1,3:2,4-di-p-methylbenzylidene sorbitol, J. Polym. Sci., Part B, Polym. Phys., 35, pp. 2617-2628 (1997)
- (6) R. Miyamoto, et al. : Preparation of micro / nanocellular polypropylene foam with crystal nucleating agents, Polym. Eng. Sci., 54 (9) , pp.2075-2083 (2014)
- (7) 特許出願番号：特願2014-111478

■ 著 者 ■



宮本 嗣久



小林 めぐみ



金子 満晴



大嶋 正裕

論文・解説

24

品質機能展開を活用した技術開発プロセス Technology Development Process Using QFD

山田 洋史*¹
Yoji Yamada

要 約

品質機能展開（以下QFD：Quality Function Deployment）は顧客が望む品質と技術特性を関連付ける有効なツールで、一般的に製品ユーザーの要求品質を実現するための技術課題や技術特性間の矛盾の発見に活用した事例が多かった。しかしながら科学の発展で複雑化する社会においては製品ユーザーだけでなく周りの人達の要求をも満たした社会品質を実現することが必要となっている。そのためには一般ユーザーの要求と周りの人達の要求の背反を見つけ、これらを解決することが必要で、今回こうした社会品質も考慮するようにQFDを改良した。従来、品質表のマトリクスにおいて要求品質・品質特性の関連の強さだけを記載していたが、品質特性の特徴（望大、望小、望目）を併せて記載することで、品質特性そのものの背反や品質特性間の背反特性が容易に判断できるようにした。QFDで抽出した背反特性はTRIZ（発明的問題解決理論）を活用するプロセスにおいて技術的矛盾や物理的矛盾を定義する際に利用できる。また設計プロセスにおいては品質表の品質特性の特徴を参考にして効率的に実験計画を組むことが可能である。今回、このQFDをコアにしてTRIZを活用したアイデア発想プロセスや品質工学を活用した設計プロセスなどを組み合わせた技術開発プロセスを考案した。更に考案した技術開発プロセスを汎用的に使われている表計算ソフトを用いてワークシートとして作成し、プロセスに沿って効率的に開発が行えるようにした。

Summary

QFD (Quality Function Deployment) is very effective framework to find relation between demanded quality and quality characteristics. This tool is generally used to find the technical issue and the contradictions among technical characteristics in order to achieve the end-user demand. However, since the scientific development complicates whole society, it is very important to achieve social quality which meets not only the demand of product user but also the demand of other people in the society. To that end, QFD process is modified to find and resolve the contradictions between the demand of product user and the other people in the society. In the relation table between the demanded quality and the quality characteristics, the characteristic direction of relation is added to the strength of effect. The direction of relation is classified into three kinds of response: larger-is-better response, smaller-is-better response, and nominal-is-best response. The information of the direction can be used to define the physical contradictions and the technical contradictions. The contradictions found by QFD can be used for TRIZ (Theory of Inventive Problem Solving). Moreover, the direction of quality characteristics can be effectively used for the design of experiment. The technical development process is developed using QFD as framework combining TRIZ and Quality Engineering. The processes have been implemented into worksheet of the spreadsheet generally used. The technology development can be conducted efficiently and systematically along the work-sheet.

*1 技術研究所
Technical Research Center

1. はじめに

昨今の顧客ニーズの多様化に伴い、商品に搭載されるシステムが複雑化している。そうした複雑なシステムにおいては、どうしてもある一つの性能を高めると他の性能が低下するという背反特性が多くなっていく。更には社会におけるシステムを考えると、単に該当システム内の背反特性だけでなく、環境や安全など、社会のさまざまな要求と該当システムとの間に背反特性が存在している。こうした背反特性の問題を解決して両立させるための技術開発が必要となる。しかも設計自由度が比較的高い技術開発初期段階において、市場品質を確保するための機能性開発も同時に行う必要がある。市場における品質問題はお客様の心を傷つけるだけでなく、企業にとって経営面で大きなマイナスのインパクトとなる。こうした課題をかかえたシステムの技術開発は総合的な一連の開発プロセスに沿って行うことが質の面でも効率の面でも重要である。QFDをコアツールとして目標設定から機能性確保までをカバーした総合的な技術開発プロセスを構築し、その活用に向けて取り組んできたので、その内容を以下に紹介する。

2. シックスシグマのプロセス

2.1 コンセプト

マツダでは全社的な業務革新活動として2001年にシックスシグマ⁽¹⁾を導入した。シックスシグマを一言で表現することは難しいが、主なコンセプトとして、顧客志向、データ・事実重視、プロセス志向、全社最適の4つがあげられる。業務革新の原点はお客様を中心にした考え方である。またシックスシグマ活動の主な特徴としては以下の点があげられる。

- ・ トップダウンによるプロジェクトのテーマ設定
- ・ プロジェクトの成果を金額で表現
- ・ チャンピオン、ブラックベルト、グリーンベルトなどの役割の明確化
- ・ DMAIC^{※注1}とDFSS^{※注2}による解決アプローチ

※注1 : Define-Measure-Analyze-Improve-Control

※注2 : Design For Six Sigma

シックスシグマではプロジェクトのテーマは基本的にはトップダウンで経営課題からブレークダウンされて設定される。そしてプロジェクトはチャンピオン、ブラックベルト、グリーンベルトといった特別な研修を受講した推進役の下に遂行されていく。チャンピオンとはプロジェクトの推進責任者でテーマの決定、遂行から完了までプロジェクトを監視し、助言・サポートを行う。またプロジェクト遂行に必要な資源の確保や障害の除去を行う。ブラックベルトは問題解決のエキスパートで部門の複数のプロジェクトを担当し活動をリードするとともにグリーンベルトの教

育・育成も行う。グリーンベルトは小グループのプロジェク トリーダーとしてメンバーを統率し、課題を解決する。

当初マツダに展開されたプロセスはDMAICモデルで、一般的には既存製品や既存プロセスの改善に使われる手法である。研究開発のように既存システムがなく新しいシステムの開発を行う場合にはDFSSがよく使われている。DFSSはDMAICに比べてその内容がやや曖昧であるが、一般には新規商品や新規プロセスを非常に高い目標で実現する手法と考えられている。

2.2 DoMAIC モデルと DoMAZDA モデル

技術研究所では研究効率を高めるため積極的にシックスシグマの活用に取り組んできた。特にシックスシグマは材料の属性や分量、工程などの制御因子を設計パラメータとする材料開発との相性がよく、材料研究部門では方針として全メンバーが基本的にグリーンベルト研修を受講することになっている。技術研究所では技術開発に相応しいようにカスタマイズしたDoMAICモデル (Define-outlook-Measure-Analyze-Improve-Control) 及びDoMAZDAモデル (Define-outlook-Measure-Analyze-ZoomZoom-Design-Assure) を構築した。

Table 1 Seven Phases of DoMAZDA Model

フェーズ Phase	主なプロセスとアウトプット Major process and output	
Define (定義)	プロセス Process	・技術問題/課題の定義 Define technical issues ・品質特性(メトリクス) & 目標設定 Set the target of characteristics as metrics
	アウトプット Output	技術開発計画書(スケジュールを除く) Technical development plan (excluding schedule)
outlook (スケジュール管理)	プロセス Process	・タイムマネジメント、リスクマネジメント Time management, Risk management ・人的資源計画、コスト(費用)見積もり Man power plan, estimate cost
	アウトプット Output	技術開発計画書(スケジュール部分) Technical development plan (schedule)
Measure (測定)	プロセス Process	・現行/類似システム見える化および能力確認 Define current and similar system, confirm performance ・測定システム定義&分析 Define and analyze measurement system
	アウトプット Output	現行システム能力、測定システム分析結果 Current system performance, MSA results
Analyze (分析)	プロセス Process	・問題定性分析、定量分析 Qualitative and quantitative analysis of issue ・問題の原理・原則分析 Analysis of issue mechanism
	アウトプット Output	定量的分析結果、技術課題分析結果 Issue quantitative analysis results
Zoom-Zoom (創造)	プロセス Process	・解決構想、実現手段、検証方法明確化 Idea, method and validation of solution for issue. ・目処付け実験、コンセプト定量評価 Preliminary experiment, quantitative evaluation of concept
	アウトプット Output	技術課題解決策および検証結果 Solution for technical issue and verification results
Design (設計)	プロセス Process	・ロバスト設計 Robust design ・チューニング設計 Tuning design
	アウトプット Output	最適化システム/プロセス Optimized system/process
Assure (保証)	プロセス Process	・不具合未然防止 Prevention of issue ・機能性評価 Functionality evaluation
	アウトプット Output	FMEAシート、機能性評価結果 FMEA sheet, functionality evaluation result

従来のDMAICにおいて、プロジェクトの計画策定は一般にはDefineフェーズで行うが、計画の重要性を明確にするため、計画プロセスを独立して追加した。具体的にはDefineフェーズとMeasureフェーズの間にスケジュール作成を行うoutlookフェーズを追加し、DoMAICモデルと呼んでいる。また技術開発として測定精度やロバスト性を重視し、Measureフェーズに測定精度の確認を行うMSA (Measurement System Analysis) を、Improveフェーズにロバスト設計を行うための品質工学を追加している。

一方、DoMAZDAモデルはTable 1に示すように、Define (定義)、outlook (計画)、Measure (測定)、Analyze (分析)、Zoom-Zoom (創造)、Design (設計)、Assure (保証) の7つのフェーズで構成されている。DoMAZDAの名称は各フェーズの頭文字を取ったものでDFSSに相当する。DoMAZDAモデルはDoMAICモデルでは対応できないような新規商品やプロセスを非常に高い品質で実現する開発プロセスと位置づけている。実際には必要に応じてDoMAICモデルとDoMAZDAモデルを組み合わせる場合もある。次章でDoMAZDAモデルの具体的な内容を紹介する。

3. QFD をコアにした総合技術開発プロセス

3.1 仕組みとしてのQFD活用

新規商品や新規プロセスの開発においてはどのような機能をもたせるかなど、企画や目標設定が非常に重要になってくる。それを実現するツールとしてQFDが非常に有効であると考えている。更にQFDを単なるツールとして活用するのではなく、創造開発やロバスト設計とリンクされた技術開発プロセスの仕組みとして活用することにより、技術開発の効率や質を大幅に改善することが期待できると考えている。DoMAZDAモデルはQFDをコアとしてリンクされた技術開発プロセスである。以下、DoMAZDAモデルの各フェーズについて述べる。

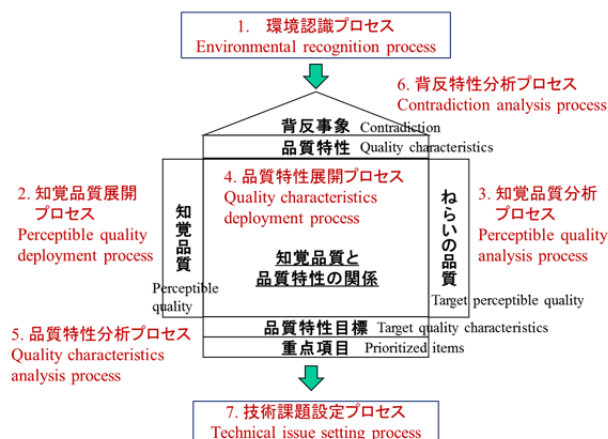


Fig. 1 Processes in Define Phase

3.2 Define (定義) フェーズ

このフェーズの目的は、技術開発テーマの目的・目標及び技術課題を明確にしてテーマを立ち上げることである。このフェーズのアウトプットはスケジュール部分を除いた技術開発計画書である。スケジュールの部分は次のフェーズのoutlookフェーズで作成する。Defineフェーズはプロジェクトの中で非常に重要なフェーズであり、QFDを有効に活用している。Fig. 1にDefineフェーズを構成する7つのプロセスを示す。なお、品質特性展開プロセス、品質特性分析プロセス、背反特性分析プロセスについては必要に応じてAnalyzeフェーズでも使用する。

(1) 環境認識プロセス

このプロセスの重要なステップとして顧客の定義がある。顧客の属性によって求められる要求が変わってくるからである。新商品・新プロセスを開発するに当たってまずどのようなお客様を対象にするかを決定することが重要で定義した顧客に対して提供する新商品・新プロセスの機能を検討する。新商品や新プロセスにどのような機能をもたせるかは開発の上流として極めて重要であり、これが間違っているとこれ以降のフェーズがいかにか完璧に行われてもプロジェクトの目標を達成できないことになる。

環境認識としては3C (Customer, Company, Competitor) 分析を行ったり、SWOT (Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats) 分析で社内外の環境、自社の強みや弱みを分析したりする。特にSWOT分析においては現在だけでなく将来において強みとなると思われる技術を明らかにしておき、現在は実現できなくても将来はその技術によって実現できる要求品質を洗い出せるようにしておく。これらの分析結果を参考にして以下に示すプロセスによってQFDの品質表を作成していく。

(2) 知覚品質展開プロセス

一般には要求品質展開と呼ばれることが多い。要求品質展開でよく使われるのがアンケートやクレーム情報などからくるVOC (Voice of Customer) であるが、現行商品に関するVOCだけでは必ずしもお客様が満足できるような新しい商品の要求品質を網羅できるとは限らない。特に品質の中でも魅力品質と呼ばれるものについては企業の側で将来の社会動向や顧客嗜好を予測し、技術の進歩により将来新たに提供できる価値はないかという視点で要求品質を追加・整理することが必要である。このような理由により要求品質と呼ばずに、お客様が認識できる品質という意味であえて知覚品質という言葉を使っている。知覚品質の展開においては前述した3C分析やSWOT分析の結果を使って仮想VOC (VVOC: Virtual VOC) を想定し、それに基づいて品質展開を行う。こうした取り組みにより現在のお客様が求めるVOCに加えて、現在は明示的な要求はないが将来はお客様が価値として認識できるような潜在的な知覚品質も抽出するようにしている。また通常は対象シス

テムのユーザーだけの知覚品質を考慮するが、ユーザー以外に対象システムの影響を受ける他の人の知覚品質や対象システムを取り巻く社会の知覚品質も考慮して社会全体の品質向上も検討する。自動車の場合、「歩行者の安全性が高い」や「駐車スペースが小さい」などが考えられる。

(3) 知覚品質分析プロセス

展開した知覚品質の中から自社で注力する重点品質（企画品質）を決定する。知覚品質は一般的に非常にたくさん抽出されるので今後の作業を効率的に行うためにこの段階で重点化を行う。重点化の尺度としては、実際の顧客からのVOCの多さ、法規制関連、魅力品質の度合い、会社としての戦略、他社ベンチマーク結果などを勘案して重要度をつけていく。

(4) 品質特性展開プロセス

このプロセスの目的は知覚品質を測るための品質特性を定義することである。前のプロセスで抽出した知覚品質を実現するための機能を洗い出す。この時、機能は一つだけとは限らない。また機能はいわゆるQFDでよく使われる機能表現にするが、更に付加情報として程度を表す言葉（形容動詞や形容詞）を付加する。この付加情報を参考にして機能の達成度を測るメトリクス（品質特性）を定義する。一般に品質表作成において品質特性と要求品質の関係は◎, ○, △などを使って関係の強さだけを示す場合が多いが、今回、品質特性自体の矛盾の発見や品質特性間の矛盾の発見を効率的に行えるようにするための工夫を行った。更には後のフェーズのZoom-ZoomフェーズやDesignフェーズにおいて、本フェーズで重点化した品質特性に対してTRIZや品質工学を効率的に活用できるようにするためである。具体的には品質特性ごとに知覚品質への影響度を望大特性（大きい方が良い）、望小特性（小さい方が良い）、望目特性（最適な値が存在する）の3つに分類し、更にその影響度を記入するようにした。事例としてTable 2に示すような記号を用いた。知覚品質（要求品質）と品質特性の関係例をTable 3に示す。左の表が従来の品質表で右の表が今回新しく採用した品質表である。従来の品質表では◎や○で関係の強さだけを示していたが、新しい品質表では関係の強さに加えて知覚品質を良くするためには品質特性をどうすれば良いかが分かるようになっている。Table 3の例では室内を広くするためには車幅や車高を大きくすればよいことを示している。

Table 2 Marks of Quality Characteristics

品質特性の分類 Characteristics	知覚特性への影響大 Large Effect	知覚特性への影響小 Small Effect
望大特性 Larger-is-better Response	▲	△
望小特性 Smaller-is-better Response	▼	▽
望目特性 Nominal-is-best Response	●	○

Table 3 Example of Quality Table

知覚品質 Perceptible quality	品質特性 Quality characteristics			
	車幅 Width	車高 Height	空気抵抗 Aerodynamic	エンジン音 Engine noise
室内が広い Large cabin	◎	◎		
室内が静かである Quiet cabin			◎	◎
燃費が良い Good fuel mileage			◎	
歩行者の安全性が高い Pedestrian safety				○
駐車スペースが小さい Easy parking	◎	○		

従来の品質表
Conventional Quality Table

知覚品質 Perceptible quality	品質特性 Quality characteristics			
	車幅 Width	車高 Height	空気抵抗 Aerodynamic	エンジン音 Engine noise
室内が広い Large cabin	▲	▲		
室内が静かである Quiet cabin			▼	▼
燃費が良い Good fuel mileage			▼	
歩行者の安全性が高い Pedestrian safety				▲
駐車スペースが小さい Easy parking	▼	▼		

新しい品質表
Proposed Quality Table

(5) 品質特性分析プロセス

このプロセスの目的は重要な知覚品質を実現する上で達成すべき品質特性の目標を設定することである。品質特性の目標設定においては他社の類似製品の品質特性調査結果と自社の現状能力などを比較して戦略的に目標を設定する。この時、目標と現状の間に大きなギャップがあり、通常の技術の改善で達成できない場合は技術のブレークスルーが必要となるのでそれを技術課題として設定する。

Table 3の例において品質特性の「空気抵抗」はこれに関係する知覚品質の「室内が静かである」や「燃費が良い」を改善するためにはともに望小特性なので問題がなく、基本的には「空気抵抗」は望小特性で設計すればよい。一方、品質特性の「車幅」は、知覚品質の「室内が広い」を改善するためには大きい方が良いが、知覚品質の「駐車スペースが小さい」を改善するためには「車幅」は小さい方がよいので品質特性自体に矛盾が生じている。つまり「車幅」は大きい方が良く、小さい方が良くということ、これはTRIZでいうところの物理的矛盾に相当する。物理的矛盾は真の矛盾なのでそのままでは解決できず、時間や空間、あるいは条件で分離して解決する。この例の場合、駐車するときは車幅を小さくし、人が乗っている時（運転する時）は車幅を大きくすれば良い。どうやって実現するかが技術課題となる。Table 3で赤くハッチングされた品質特性はそれ自体で矛盾をもっていることを示している。今までの品質表では異なる品質特性間の矛盾を見つけることを行っていたがそれらはTRIZでいうところの技術的矛盾であり、今回の工夫により品質特性自体の物理的矛盾を見つけることができるようになった。これが大きな利点である。製品システムだけでなく社会システムも考慮した社会品質を考えるとこうした物理的矛盾は更に増えてくる。こうした物理的矛盾を解決することが社会品質を実現する上で非常に重要であり、企業に求められていることである。

実際に前述の矛盾を見つける作業を開発者が一つ一つ行うことは効率が悪く、また見落とす恐れもある。市販されている表計算ソフトを使って品質表を作れば、そうした

見落としを防ぐことができる。たとえばセルの条件付き書式という機能を使えば、同じ列に下向きの記号と上向きの記号が混在しているかどうかを判別してTable 3のようにセルの背景の色を自動的に変えるように設定すれば物理的矛盾を容易に探すことが可能である。特に自動車ではたかさんの知覚品質があるので、非常に大きな品質表になりがちであるが、そのような場合でも簡単に物理的矛盾を見つけることができる。

(6) 背反特性分析プロセス

このプロセスの目的は、ある品質特性の変更による他の品質特性への影響を明らかにすることである。通常は品質表の屋根の部分で背反するかどうかをチェックするが、このチェックはかなり作業時間がかかる。特に自動車などの複雑なシステムにおいては品質特性が多くなるのでその傾向は著しい。たとえば品質特性が10個ある場合でも品質特性間のチェックは90通り（ $10P_2$ ）のチェックとなる。ここで45通り（ $10C_2$ ）ではないのは品質特性間の影響に必ずしも可逆性があるとは限らないからである。このチェックを効率的に行うために前のプロセスで記入した品質特性（望大、望小、望目）の情報を有効に使う。

Fig. 2に示すように品質特性展開プロセスで抽出した品質特性を背反特性マトリクスの行と列に転記する。この例において品質特性の「車幅」が望大特性なので「車幅」を大きくした時にマトリクスの列部に記載してある他の特性が影響を受ける方向を考える。「車幅」を大きくしても「車高」には影響しないが「空気抵抗」は大きくなる方向に影響するのでマトリクスのセルに上向きの記号▲を記載する。「空気抵抗」自体の品質特性は小さい方が良いので望小特性となり背反する。この背反はTRIZでいうところの技術的矛盾に相当する。これを解決することが技術課題となる。しばしば対象としているシステムだけの品質特性間の背反性を確認して、従来からある他のシステムの品質特性に対しての影響を見落としてしまう恐れがある。そのまま技術開発を進めてしまうと後で他のシステムの品質特性に悪影響を及ぼしていることに気がつき大きな手戻りの原因となる。そうしたことを防ぐために開発しているシステムと関係する他のシステムの品質特性を品質表に追加し、背反特性を網羅的に確認する必要がある。Fig. 2の例では品質特性の「車幅」を大きくすることにより空調システムの品質特性「冷房性能」が小さく方向に影響を受けるので背反している。こうした背反特性のチェックは、やはり表計算ソフトで作成すれば、Fig. 2のように条件付き書式機能を使ってセルの背景に色をつけることで、簡単に背反項目を確認することができる。

本プロセスで抽出した技術的矛盾や前述の品質特性展開プロセスで抽出した物理的矛盾を実際に解決するためのアイデアを出すのは後述するZoom-Zoomフェーズである。Zoom-ZoomフェーズではTRIZなどの手法を使ってこ

の矛盾を解決する。これらの複数の品質特性のロバスト性を確保するには品質工学でいうところの基本機能を定義して評価することが望ましい。品質工学の適用は後述するDesignフェーズで行う。

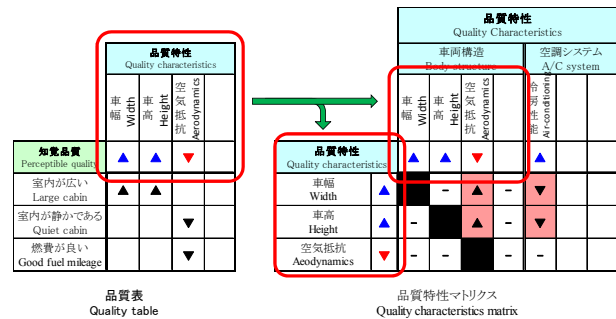


Fig. 2 Quality Characteristics Contradiction Analysis

(7) 技術課題設定プロセス

前のプロセスで発見された物理的矛盾や技術的矛盾、あるいは目標性能とのギャップなどを考慮して技術課題を定義する。これらをまとめて技術開発計画書に記載する。なお技術開発計画書のスケジュールの部分は次のoutlookフェーズで作成する。

3.3 outlook (計画) フェーズ

このフェーズの目的はプロジェクトの目標を達成できるようにスケジュールをたて、そのスケジュールに基づいて進捗管理を行うことである。またリスクを事前に想定してリスク発生時の影響を最小限にするよう対応を検討しておくことも重要な目的の一つである。プロジェクトマネジメントの基本的な考え方^④にしたがってWBS (Work Breakdown Structure) やRBS (Risk Breakdown Structure) を作成し、それに基づいて計画を作成する。なお、これらの作成にあたってはプロジェクトマネジメントソフトや品質管理ソフトを活用している。

3.4 Measure (測定) フェーズ

このフェーズの目的は開発するシステムの性能を測定する測定システムを定義し、その測定システムの精度を検証することである。

(1) 測定システム定義プロセス

対象とするシステムの性能を測定するための測定システムを定義する。具体的には測定システムの構成や測定手順などを明らかにする。もし対象とするシステムの性能を測定できるシステムが世の中に存在しない場合は新たに測定システム自体を開発する必要があるので必要に応じてDoMAZDAを使って開発する。

(2) 測定システム分析 (MSA) プロセス

前述の(1)のプロセスで定義した測定システムの精度を確認する。具体的にはゲージR&Rと呼ばれる方法で統

計的に精度を確認する。測定システムの精度が不十分である場合は、測定システム自体を一つのシステムとしてとらえ、DoMAICなどを活用して測定精度を改善する。

3.5 Analyze (分析) フェーズ

技術課題を解決する前段階として問題を定性的あるいは定量的に分析する。システムやプロセスを機能モデルやプロセスマップで見える化する。この時、後述するZoom-ZoomフェーズのTRIZやDesignフェーズの品質工学を効率的に適用しやすいように物質・場モデルや制御因子、誤差因子などを明確にした機能モデルやプロセスマップを作成する。これらの情報を使ってDefineフェーズで記載した品質特性展開、品質特性分析、背反特性分析を行い、技術課題の深堀を行う。品質特性の傾向が予測できない場合は必要に応じて実験計画法などによる予備実験を行って定量的な分析を行う。

3.6 Zoom-Zoom (創造) フェーズ

このフェーズでは技術課題を解決するためのブレークスルーとなるアイデアを創造する。まさにこのフェーズが技術開発のコアとなる。システムの創造は多分に固有技術に依存するところが大きく、手法を使えば万能的に必ず良い結果が得られるというものではない。しかしできるだけ人（開発者）の能力を最大限発揮できるような工夫が必要である。アイデアの創造にはTRIZ⁽⁴⁾を活用すると有効な場合がある。

TRIZの一般的な活用プロセスはシステム固有の問題を一旦、TRIZの一般的問題に置き換え、TRIZがもっているさまざまな知識ベースを活用してTRIZの一般的な解決策を抽出する。そしてその一般的な解決策を参考にしてシステム固有の解決策を創造する。TRIZを活用するためにシステムがもつ物理的矛盾や技術的矛盾を定義する場合があるが、DefineフェーズやAnalyzeフェーズでQFDの品質表を活用して物理的矛盾や技術的矛盾を明らかにしておけば効率的にTRIZを活用することが可能となる。

3.7 Design (設計) フェーズ

このフェーズの目的は前のフェーズで技術課題を解決したシステムにおいてロバスト性を確保するとともに、目標に合わせるためのチューニングを行うことである。

(1) ロバスト設計プロセス

ロバスト設計の基本的な考え方は技術開発時点で市場または後工程でのノイズに対してシステムの機能が安定して働くようにシステムを設計することである。ロバスト設計の手法として品質工学パラメータ設計⁽⁵⁾がある。

(2) チューニング設計プロセス

システムが要求される仕様・目標に合うようにチューニングを行う。チューニングの手法としてはシステムに

じて相応しい方法を選ぶ。

3.8 Assure (保証) フェーズ

このフェーズの目的は大きく二つある。一つは開発した新しい技術やプロセスによって影響を受けるものに問題が生じないように最終確認を行い必要に応じて対策を打つことである。もう一つは開発した新しい技術やプロセスが従来のものに比べて市場で十分安定していることを確認することである。前者は一般的に故障モード影響解析(FMEA)などが使われ、後者は機能性評価という手法が使われている。FMEAはシートの空白を埋めることに集中してしまいがちだが、最低限、変化した部分とその部分によって影響を受ける周辺部分の故障モードを徹底的に検討することが重要である。

4. おわりに

技術開発は対象となるシステムがさまざまになかなか決まった開発プロセスを構築しにくいですが、今回、QFDの品質表をコアツールとすることにより、TRIZや品質工学を効率的に活用することができる汎用性のある技術開発プロセスを構築することができた。DoMAZDAモデルはパールベルト研修と呼ばれるグリーンベルト研修の上位に当たる研修において教育し、新規製品や新規プロセスの技術開発プロジェクトに活用している。今後、更に目的を実現するために有効な新しい手法を導入したり、既存の手法を必要に応じてカスタマイズしたりしてより効率的なプロセスを構築していきたいと考えている。

参考文献

- (1) ピーター・S.パンディほか：シックスシグマ・ウェイ、日本経済新聞社（2002）
- (2) 大藤正ほか：品質展開法（1）、日科技連（1990）
- (3) Project Management Institute：A Guide To The Project Management Body of Knowledge, Project Management Institute, Inc.（2005）
- (4) ダレル・マンほか：体系的技術革新（TRIZ実践と効用）、創造開発イニシアチブ（2004）
- (5) 中野ほか：上級タグチメソッド、日科技連（2009）

■ 著 者 ■



山田 洋史

論文・解説

25

ナチュラル・サウンド・スムーザー量産工法の開発 Development of New Manufacturing Process for Natural Sound Smoother

田中 宏明*¹ 船津 昌幸*² 本室 武志*³
Hiroaki Tanaka Masayuki Funatsu Takeshi Motomuro

要 約

SKYACTIV-D1.5エンジンには、ディーゼルエンジンのノック音を低減する技術のひとつとして、ピストンとコネクティングロッドをつなぐピストンピンの内部に組み付けられ、ダイナミックダンパーとして機能するナチュラル・サウンド・スムーザー（以下、NSS）を世界で初めて採用した。NSSの機能を満足させる品質を量産で安定して確保するため、組み付け信頼性の向上、周波数特性の管理、周波数特性の造り込みなどの必要な工法の開発に取り組んだ経緯について紹介する。

Summary

Mazda has mounted the Natural Sound Smoother (NSS), which is installed inside the piston pin for connecting the piston to the connecting rod and acts as a dynamic damper, on the SKYACTIV-D 1.5 diesel engine for the first time in the world as a technology to reduce diesel knocking sound. To ensure stable and high quality of the NSS in mass production, we developed relevant techniques for, for instance, quality control of assembly, and measurement and adjustment of frequency characteristics. This article introduces the process of the technological developments presented above.

1. はじめに

環境志向の高まりとともに、乗用車でもディーゼルエンジンの採用が増えている。しかし、ディーゼルエンジンはガソリンエンジンに比べて燃焼効率が高い半面、静粛性ではガソリンエンジンに劣り、とくにディーゼルノック音の低減が課題である。SKYACTIV-Dではこのノック音低減のため、モデルベース開発の中で燃焼加振力を低減する効果的な技術がエンジンや車体に織り込まれてきた⁽¹⁾。そのノック音低減技術のひとつとして、新たに開発されたナチュラル・サウンド・スムーザー（NSS）がSKYACTIV-D1.5エンジンで世界で初めて採用されている⁽²⁾⁽³⁾。世界初がゆえに製造工程も前例がなく、その効果を最大限発揮できるように量産するためには、新たな工法が必要であった。

2. NSSの構造と特性

2.1 NSSの構造

Fig. 1に示すように、NSSはピストンとコネクティング

ロッドをつなぐピストンピンの中に組み付けられる。Fig. 2左のようにNSSはダンパーとウエイトの2部品で構成されており、ピストンピンの両側から圧入されることでエンジン内での脱落防止機能を備えた構造とし、更にFig. 2右のようにピストンピンへの組み付け後にウエイトの一部をかしめてダンパーに対して引っ掛かりを設け、万一の場合にもエンジン内で脱落しないようにしている。

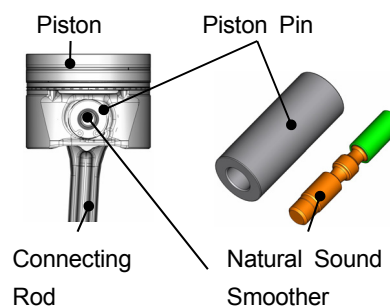


Fig. 1 Position to Install NSS

*1~3 パワートレイン技術部

Powertrain Production Engineering Dept.

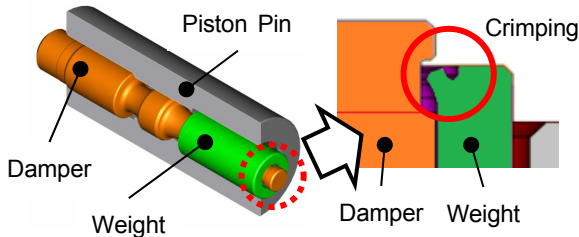


Fig. 2 Structure of NSS

2.2 NSSの効果

NSSはダイナミックダンパーとして機能し、Fig. 3に示すように緩加速時の3.5kHz付近のディーゼルノック音の低減に効果がある。また、音質(燃焼に起因する音の振幅変調)に影響し、聴感で硬い音が柔らかい印象の音に改善する。

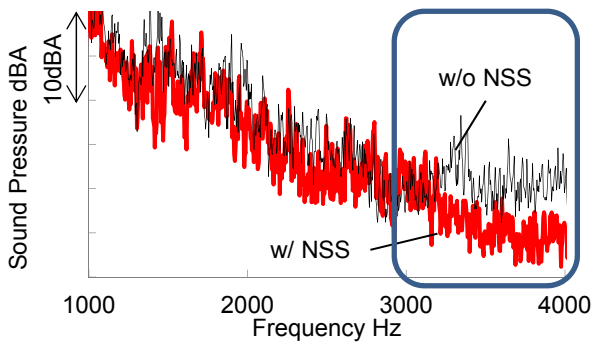


Fig. 3 Effect of NSS (Interior Noise at Moderate Acceleration)

2.3 NSSの周波数特性

NSSの量産においては単体での作動周波数を管理する必要がある。一般的にダイナミックダンパーの量産では、作動周波数は材料物性や形状寸法に置き換えて管理される。しかし、各部品の加工公差を加工機的能力限界にまで狭めても、Fig. 4の正規分布のように、机上計算では量産で予測される作動周波数ばらつきがねらいの周波数公差幅を超えることが明らかであった。そこで、NSSの量産では作動周波数を直接かつ全数管理することとした。管理ではFig. 5のように測定されるイナータンス*のピーク値と周波数を管理する。なお、今回の周波数公差幅は、ねらいの周波数3.5kHz付近の±約1%であり、それに応じた測定精度が要求される。また、作動周波数がねらいから一定範囲内で低い方に外れているものについては追加工により調整可能であるため、調整を前提としてねらいの周波数公差幅の中でも中央より低めをねらった形状設計としている。

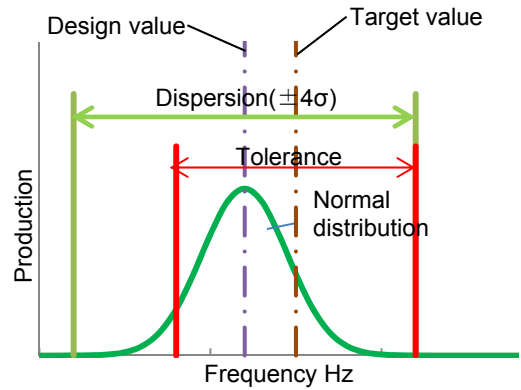


Fig. 4 Prediction Image about Dispersion of Response Frequency of NSS

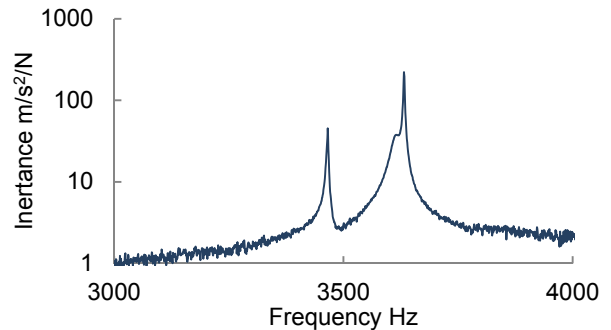


Fig. 5 Sample of NSS Inertance Measurement Result

3. NSS製造工程設計

NSSの組立・加工工程はFig. 6のとおりとなっている。

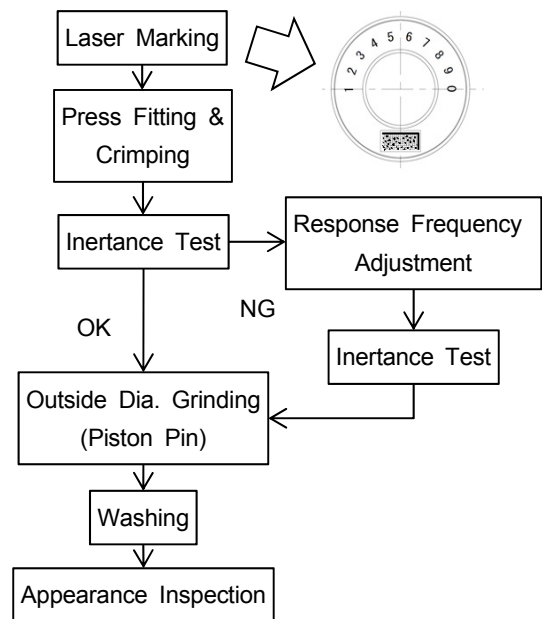


Fig. 6 NSS Manufacturing Process

* 物体に入力した加振力と、それによって生じる加速度の比による周波数応答関数。

- ① レーザー刻印工程
- ② 圧入・かしめ工程
- ③ イナータンス検査工程
- ④ 周波数調整工程
- ⑤ イナータンス検査工程(④を行った場合のみ)
- ⑥ ピストンピン外径研削工程
- ⑦ 洗浄
- ⑧ 外観検査

レーザー刻印はピストンピン端面に製造連番を刻印するもので、どの車両にどのピストンピンが使われているかを記録するトレーサビリティシステムだけでなく、周波数調整工程で一品一葉の調整を行うためにも使用している。ピストンピン外径研削は、ピストンピンとして必要な精度を満足させるため、NSS組み付け後に行い、その後に洗浄と外観検査を行っている。

これらの工程を実現させるため、品質確保に重要な新たな3つの工法開発が必要であった。

- ① かしめ量産条件の確立
- ② イナータンス計測開発
- ③ 周波数調整加工システム開発

以下に、これらの工程開発の概要を紹介する。

4. かしめ量産条件の確立

NSSは各部品をピストンピンに圧入組み付けした後に、Fig. 7のようにウエイトにかしめを行っている。かしめは、刃具をウエイト端面に押し当てることで2箇所を塑性変形させ、ダンパーの溝に引っかける形を作っている。

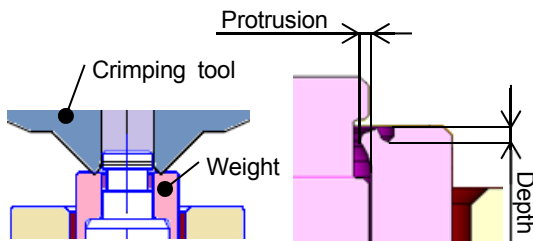


Fig. 7 Inspection Point of Crimping Result

ウエイトの抜き荷重は機能上必要な一定以上の力が求められ、圧入とかしめでこれを満足する。圧入によりその大半を保証するため、かしめは溝に引っかかる最低限の寸法として、その倒れ量が0.14mm以上を満足すればよい。一方、この倒れを得るために加える荷重によってNSSの部品が座屈しないようにする、あるいは塑性変形した部分がせん断して脱落しないようにする必要がある。そこでFig. 8のように、倒れ量とかしめ荷重について、机上計算より機能上必要な条件と、座屈やせん断しない条件を求めた。その上で、材料硬さがかしめに及ぼす影響を、実際の

ウエイトで検証を行い、硬度の上下限品のいずれも倒れ量を満足しつつ座屈あるいはせん断しない範囲内でかしめを行えることを確認し、製品設計に反映した。

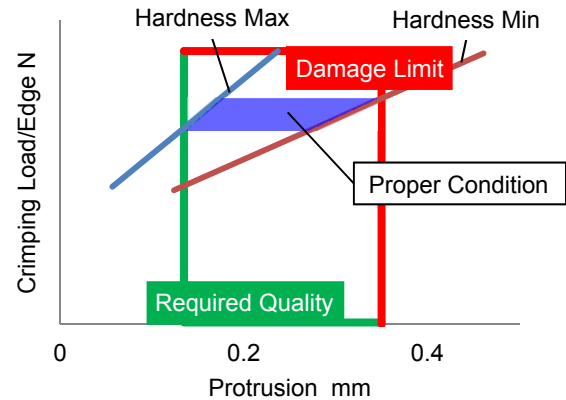


Fig. 8 Criteria for Crimping

しかし、かしめはFig. 7右図のような断面形状であり、この倒れ量を直接測定することはできないため、Fig. 9のように倒れ量とかしめ深さに相関があることを確認した上で、量産ではかしめ深さを全数管理している。

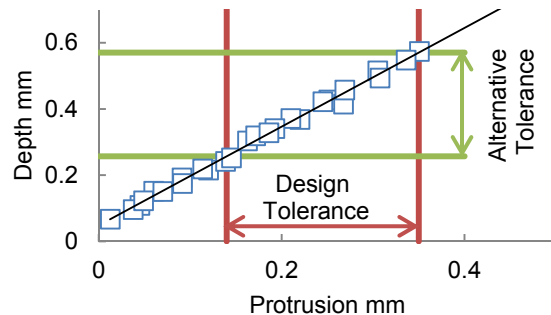


Fig. 9 Correlation between Protrusion and Depth

5. イナータンス計測開発

5.1 検査装置の要件と事前検証

NSSの開発初期段階では、NSSを組み込んだピストンピンをゴムで吊り下げ、インパルスハンマーで打撃し、その自由振動をピストンピン外径に貼り付けた加速度ピックアップ検出することでイナータンスを測定して、NSSの作動周波数を求めていた。この方法は、①ピストンピンのゴムへの取り付けの不確実性や、②加速度ピックアップを固定する方法の困難さ、③作業によるインパクト加振の不確実性、④それらに伴う計測時間の問題があり、量産ラインでの測定には不向きである。そこで、①～④の問題点を解決するための要件として、以下の3つを挙げて新たに測定方法を開発した。

- ① ピストンピン外周をクランプして測定する
- ② 振動計測は非接触で行う

③ 加振は自動で行う

これらの要件を満足する検査装置の成立性を事前検証するため、Table 1の項目についてFig. 10の簡易のテスト機などで検証を行った。その結果を量産検査装置の設計に反映した。

Table 1 Prior Study Items

Item		Method
Clamping Method	Clamper Shape	Test Unit
	Material	↑
	Clamping Force	↑
	Positioning	↑
Shaking Method	Impulse Hammer or Small Shaker	↑
	Directly or Indirectly	(Equipment Manufacturer)
Vibration Measuring Method	Measuring Instrument	Accelerometer or Laser Doppler Vibrometer
	Repeatability	↑
	Difference in measured values	↑
NSS Spec.	Dimensional Tolerance	Theoretical Calculation Test Unit
	Temperature of NSS	Thermometer/Test Unit CAE
	Surface Appearance	Test Piece / Test Unit
	Different Response Frequency in Both Sides	Test Piece / Test Unit CAE

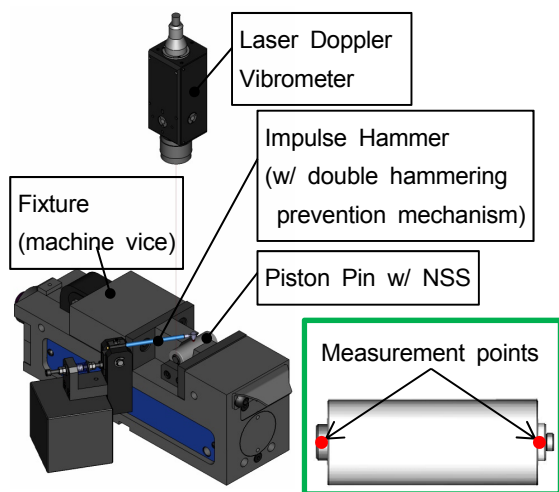


Fig. 10 Test Unit for Inertance Measurement

要件①では、クランプする治具を含む装置の振動特性が測定結果に影響することが予測された。治具の形状や材質、クランプ方法は、ピストンピンの位置決め繰り返し精度と作業性を考慮し、3面固定によるものとし、材質は鋼材に決めた。その場合のクランプ力は、テスト機を使用して、安定して測定できるポイントを探った。

要件②では、レーザードップラー振動計を用いた非接触での測定とした。ピストンピン外周をクランプすると、ピストンピンは振動せず、NSSに加速度ピックアップを貼り付けると、センサー質量が測定結果に影響することから、レーザードップラー振動計が最適であった。Fig. 10右下の図に示すように、NSSの機能保証のため、ピストンピン両端から出ているNSSの円筒面の2点を測定することとしたが、2点間の距離が狭く機器のサイズを制限するため、機種や配置を検証し、装置仕様を決定した。

要件③では、小型加振器を採用することとした。インパルスハンマーを使った自動加振も検討したが、一般的なハンマー・チップには量産の全数検査を前提とした耐久性はないと判断し、採用しなかった。

これらの事前検証の結果、装置として成立することを確認した。

5.2 NSS部品特性の計測への影響

量産ラインで全数測定するため、NSSに対する要件についてもテスト機を用いて確認を行った。その中でも、レーザードップラー振動計の測定では測定面のレーザ光の反射が重要であり、例えばNSSの振動を測定する円筒部のピストンピン外径に対する振れ(偏心)の反射レベルへの影響をFig. 11のように確認した。これらは要件として製品設計に織り込んだ。

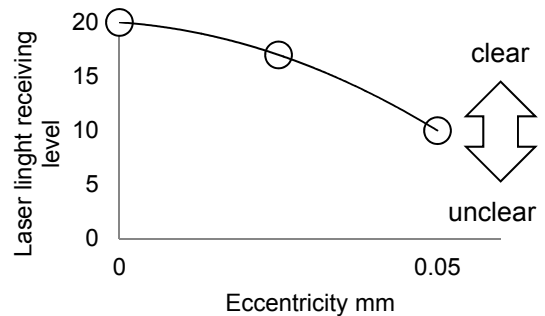


Fig. 11 Influence of NSS Eccentricity on Laser Light Receiving Level

更に、Fig. 12のようにNSSの部品の温度がイナータンス測定結果に影響することを、テスト機での測定で確認した。温度変化により弾性率が変化することに起因する現象であり、先に述べたとおり、NSSのねらいとする作動周波数の範囲は狭いため、わずか数Hzの差が判定や調整に影響する。恒温室に量産ラインを設置することは現実的ではないため、検査装置に温度補正機能を持たせることにした。

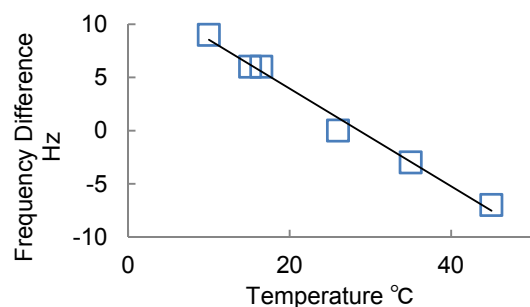


Fig. 12 Correlation between Temperature and Response Frequency of NSS

5.3 量産用検査装置の概要と測定ばらつき抑制

量産ラインに導入した検査装置の外観及び概略についてはFig. 13に示す。

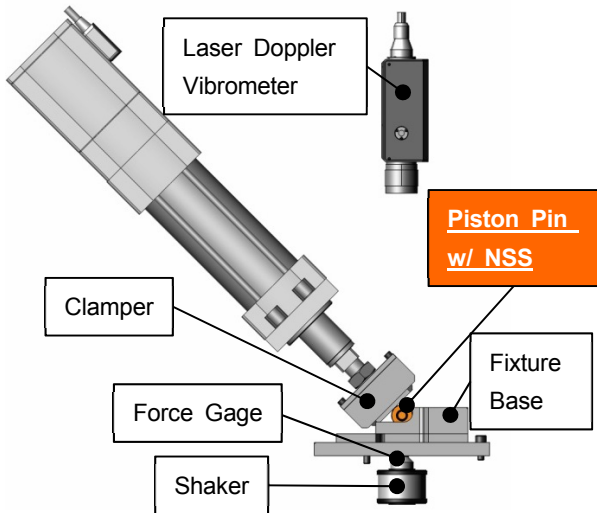


Fig. 13 Placement of Apparatus

イナータンス検査装置の測定ばらつきは、可能な限り抑える必要があるため、装置についてばらつきの要因となるものを整理した。その結果から、ばらつきに対して影響の大きいと考えられる治具の共振と、治具の組み付け時のボルト締め付けに絞って、調査と対策を行った。

共振については、CAEにより変更前の治具の固有値解析を行った結果、治具部品点数に起因する振動モードの多さと、NSSの作動周波数の近傍に共振周波数をもつことが明らかになった。Fig. 14左図に変更前の治具外観と固有値解析結果の一例を示す。Fig. 14左下では治具部品がばらばらに振動している様子が分かる。このような振動モードが各部品の固有振動数の数だけあり、実際には治具の製作誤差や組み付け誤差に応じて共振周波数が変動することになるため、測定ばらつきの要因となる。そこで、Fig. 14右図のように部品点数を減らして治具に起因する振動モードを減らし、NSSの作動周波数近傍に振動モードがないことを確認できた形状で治具を製作した。

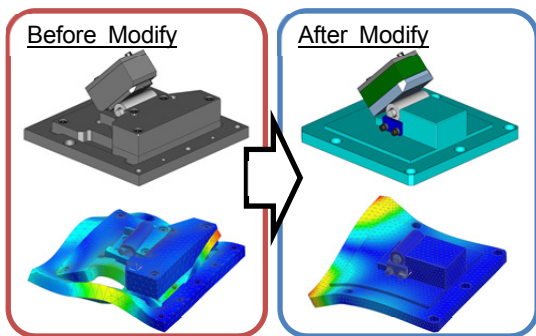


Fig. 14 Modified Fixture and CAE Result Sample

治具の組み付け時のボルト締め付けについて、その締め付け力の条件を変えると、一例としてFig. 15のように、同一のNSSを測定してもグラフの形が変化することを実際の装置で確認した。そこで装置への治具の組み付けに際しては、周辺部品含めてボルトで固定しているものについて、ボルトサイズに応じた締め付けトルクを規定し、トルクレンチによる締め付けを実施することとした。

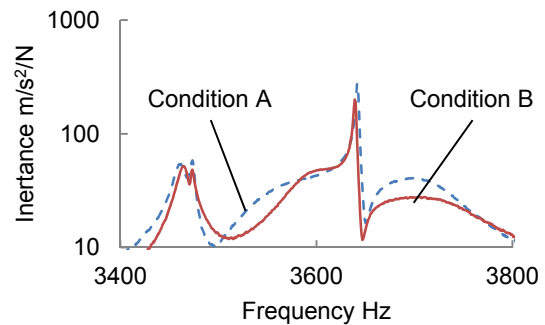


Fig. 15 Difference in Inertance Result by Difference in Fixture Bolts Tightening Condition

6. 周波数調整加工システム開発

NSSの作動周波数は、Fig. 16に示すようにダンパー端面を研削して振動等価質量を微修正することで調整する。この研削代と周波数変化量の関係はFig. 17のとおり、比例関係にあることを確認している。その関係を基に、イナータンス検査では測定される作動周波数に応じてNSSをランク分けすることとし、端面研削盤ではその各ランクに対する研削代を設定した加工プログラムを準備している。

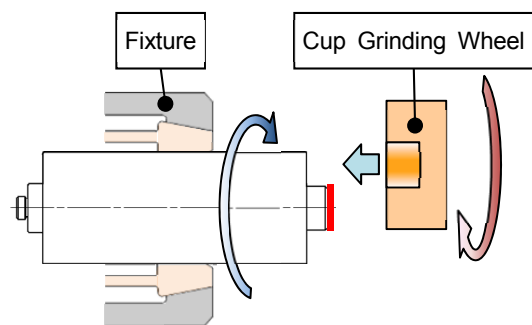


Fig. 16 End Face Grinding for Adjustment of Response Frequency of NSS

NSSの作動周波数調整は、周波数ランクに応じて一品一葉の対応をする。これには、ライン内で展開されるトレーサビリティシステムをFig. 18のように応用している。トレーサビリティシステムには今回の組立・加工工程での品質データが全て記録されており、周波数ランクも同様に記録される。周波数調整工程では、ピストンピン端面の刻

印を使ってイナータンス検査結果の周波数ランクを端面研削盤がシステムから呼び出し、そのランクに応じて加工プログラムを選択、加工する。

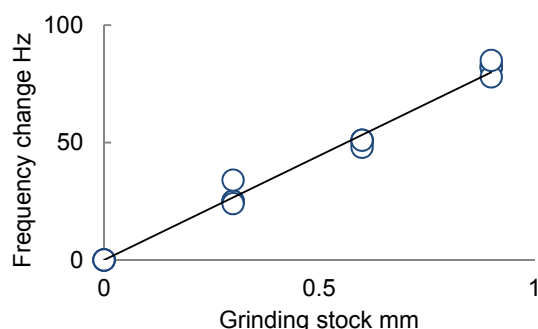


Fig. 17 Correlation between Grinding Stock and Response Frequency Change

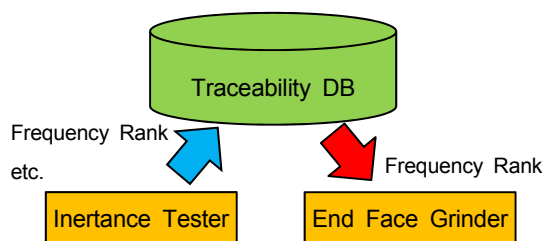


Fig. 18 NSS Response Frequency Adjustment System Outline

7. 成果

今回の活動での成果を以下のとおりである。

- ① 安定したかしめ品質による組立信頼性の確保
- ② 量産ライン内での作動周波数の計測技術の確立
- ③ 一品一葉の作動周波数造り込み工法の確立

2015年1月よりNSSの量産を開始した。かしめ深さと作動周波数については全数測定を行い、100%保証を行っている。

8. おわりに

ここに紹介した工法開発以外にも、社内に例のない工法に関する技術・技能不足や、NSSの形状やサイズなどに起因するさまざまな課題を、社内外の関係者を巻き込みながら克服していき、量産ラインを立ち上げた。

今回のNSS量産工法の開発を通して、関係者全員が「世界初の実現」に向けてベクトルが合っていたことを実感している。今回の活動を通してメンバーが得たこのような経験は、NSSの今後の展開、更にはブランド価値向上に生かされていくものと確信している。

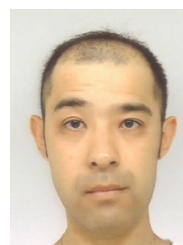
参考文献

- (1) 白橋尚俊ほか：SKYACTIV-D ノック音開発，マツダ技報，No.31，pp.85-90(2013)
- (2) Yasuhiro Kanda, Tsunehiro Mori：Diesel Combustion Noise Reduction by Controlling Piston Vibration, SAE paper, 2015-01-1667 (2015)
- (3) 白橋尚俊ほか：新型1.5L低圧縮比クリーンディーゼルエンジンの開発（第3報），自動車技術会春季大会 学術講演会講演予稿集，No.18-15，pp.485-490 (2015)

■ 著 者 ■



田中 宏明



船津 昌幸



本室 武志

論文・解説

26

ボンゴ生誕50周年を迎えて 50th Anniversary of MAZDA BONGO

田中 賢二*¹
Kenji Tanaka稲田 紀親*²
Norichika Inada榮谷 章*³
Akira Sakaedani

要 約

1966年5月に誕生したボンゴが、今年（2016年）でちょうど半世紀、50年の節目を迎える。

ボンゴはこれまでに3回のモデルチェンジを行っており、現行モデルは4代目にあたる。現プラットフォームを採用した3代目から数えても既に33年が経過しているが、ボンゴは現在でも国内市場で16万台以上が現役で活躍中である。

このたびマイナーチェンジしたボンゴは、この車のもつ「仕事向上ビークル＝しっかり積めて、きびきび走る」という基本コンセプトは継承しつつ、トラックを含む全機種にABS（Antilock Brake System）を装着し、燃費向上、排出ガス中の有害物質の低減といった安全・環境性能を中心に改良を行った。その他、シャシーを強化し積載量のアップを行っている。また、AT車においては、多段化したトランスミッションを採用し、スムーズで力強い走りを実現した。

Summary

MAZDA BONGO, which was first brought to the market in May 1966, marks its 50th anniversary this year. The BONGO has undergone three model changes in the past and the current BONGO is the fourth generation model. Thirty-three years have already passed since the third generation model, to which the current platform was first adopted, was taken to the market. Over 160,000 BONGOs are currently out on the roads in Japan.

The BONGO which performed a minor change has inherited its basic product concept “Vehicle for enhanced work efficiency; Large loading capacity and brisk driving”. At the same time, ABS (Antilock Brake System) has been mounted on its all models including trucks, and safety and environmental performances have been improved as manifested by enhanced fuel economy and reduced emissions of substances of environmental concern. In addition, the new BONGO carries a stronger chassis and offers larger loading capacity than the pre-minor change model. The number of gears of the AT car has also been increased from four to five to deliver a smoother and more powerful driving experience.

1. はじめに

戦後の広島復興を支えた三輪トラック「マツダ号」の流れをくむ「ボンゴ」は、1966年5月に初代誕生以来、多くのお客様にご愛用いただき、今年（2016年）で50周年を迎えることができた。日本の高度経済成長期より、現在にいたるまで、小型商用車カテゴリーを代表する車として、3回のモデルチェンジといくたびかのマイナーチェンジを行い、お客様のニーズの反映と価値の向上を図りながら、数多くのプロフェッショナル達の仕事を支えてきた。

2020年には、東京でオリンピックが開催される。これに向けて、色々な事業やサービスが新たに展開されつつあ

る。新型ボンゴは、「運ぶ」を通じて日本経済の成長、サービス・福祉の向上に貢献することを願って開発した。

今回のマイナーチェンジでは、「安全・環境性能」の向上、それに加えて、これからの多彩なユーザーニーズに応えられるよう商品性の向上も合わせて行った。

2. ボンゴの歴史

2.1 初代ボンゴ 1966.5～

初代ボンゴは、エンジンを車両後方に搭載し、後輪での駆動、そしてボディータイプはキャブオーバーというユニークな商用車として誕生した。

バリエーションは、トラック・バン・ワゴン（当時はコ

*1～3 商品本部
Product Div.

一と呼んでいた)と幅広く品揃えして同時に市場導入した。初代ボンゴ最大の特徴は「超低床」, 床面地上高はトラックで460mm, バンで450mmという大人の膝ほどの低さとして, 手積みによる荷物の積み降ろし作業が楽に行えるようにした。

また, トラックの2段折りたたみ式の荷台サイドドアやバン及びワゴンに採用したスライドドアは, 限られた駐車スペースでも荷卸しできるような工夫したもので, クラス初採用の独創的なものであった (Fig. 1)。

いずれのアイテムも, 商用車ユーザーには好評で, 初代ボンゴは, キャブオーバー型のパイオニアとして一世を風靡した。

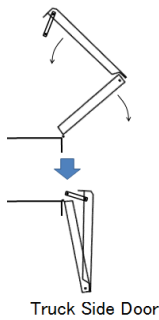


Fig. 1 First Generation BONGO

2.2 2代目ボンゴ 1977.8~

1977年には2代目ボンゴを発売。従来, 車両後方へ搭載していたエンジンを前方の運転席下に移し, 全モデルで後輪に小径ダブルタイヤを採用した。これにより, 段差の生じていた荷室をフラットかつ低床のものとし, 更なる荷役性の向上を図った。タイヤハウスが消えたフラットな低床は, トラックではクラス初, バンにいたっては業界初であり, 市場に大きなインパクトを与えた。また1979年には, ディーゼルエンジン搭載機種も追加設定した。このクラスの車でディーゼルエンジンを初めて搭載したのもボンゴであった (Fig. 2)。

ボンゴシリーズは瞬く間に大ヒット。月5千台をコンスタントに販売し, マツダの国内ディーラーの最量販車種ともなった。2代目ボンゴシリーズの成功は, その後同クラスの低床車市場への一斉参入を促した。

Table 1 Main Model Change and Minor Change

★:Model Change, *:Minor Change

1966	May	★First Generation BONGO release
.	.	800cc gasoline engine
.	.	Rear-engine Rear-drive
1968	September	* Changed to 1000cc gasoline engine
.	.	.
.	.	.
.	.	.
1977	August	★Second Generation
.	.	(Adopted small diameter double tire)
.	.	1300&1600cc gasoline engine
.	.	.
1979	October	* Added diesel engine
.	.	.
.	.	.
1983	September	★Third Generation
.	.	Renovated the platform
.	.	2000cc diesel engine
.	.	1400cc gasoline engine
.	.	.
.	.	.
1990	July	* Changed to 1500cc gasoline engine
.	.	.
.	.	.
1993	September	* Changed to 2200cc diesel engine(Type R2)
.	.	.
1995	August	* Changed to 1800cc gasoline engine(Type F8)
.	.	.
.	.	.
1999	Jun	★Fourth Generation
.	.	Change body structure
.	.	for crash safety improvement
.	.	(Specialized for commercial vehicle)
2003	December	* Changed to 2000cc diesel engine(Type RF)
.	.	adopted DPF
.	.	.
.	.	.
.	.	.
2010	August	* Changed to DOHC1800cc gasoline engine
.	.	(Type L8)
.	.	.
.	.	.
.	.	.
2016	February	* This time minor change



Fig. 2 Second Generation BONGO

2.3 3代目ボンゴ 1983.9～

1983年には3代目ボンゴを発売。多様化する市場のニーズに対応する車種体系とするためにモデルチェンジした。この時に、より低い床面地上高（VAN）、安価なメンテナンス費用、積雪時の走りやすさを求めるお客様の声に応じて、シングルタイヤシリーズを追加した。また、ボンゴの兄貴分にあたるボンゴブローニイも誕生させた。ブローニイは1～1.5トン積みをカバーする本格的な小型クラスで、多彩な車種バリエーションを誇り幅広い市場ニーズに応えた。3代目ボンゴは実に16年にもわたる長寿モデルとなるが、その間、待望の4WD車やAT車の追加で車種を充実、さらに電気自動車「ボンゴEV」の発売、OEM供給開始など、数多くの話題も提供した。

3代目ボンゴは、バン・トラックの国内外仕様はもとより、一クラス上のボンゴブローニイを含めてマツダ商用車群としてカテゴリーを広げ、企画・設計・生産した。



Fig. 3 Third Generation BONGO

2.4 4代目ボンゴ 1999.6～

1999年には、走行性能や環境性能への社会的要求の高まりに対応し、エンジン制御システムの変更とともにボデ

ィー構造を大幅に変更するフルモデルチェンジを行った。

2003年には、排気系にDPF*1を採用した新型ディーゼルエンジン（RF型ターボエンジン）を開発し搭載した。このDPF排気システムは、現在のSKYACTIV-Dにも採用しているが、その先駆的存在である。

2010年には、ガソリン車を従来エンジンに比べ、より高出力で環境性能にも優れた新型直列4気筒DOHC（L8型エンジン）に載せ替え、現在に至っている。

*1：Diesel Particulate Filter；ディーゼルエンジンの排出ガスに含まれる粒子状物質であるPMを除去するフィルター。



Fig. 4 Fourth Generation BONGO

3. 歴代ボンゴの“モノ造りの志”

マツダは今、コーポレートビジョンに沿って「構造改革プラン」に取り組んでいる。

<コーポレートビジョン>

1. カーライフを通じて人生の輝きを人々に提供します。
2. 地球や社会と永続的に共存するクルマをより多くの人々に提供します。
3. 挑戦することを真剣に楽しみ、独創的な“道（どう）”を極め続けます。

マツダは、現在その実現に向けて色々な施策を行っているところであるが、ボンゴの“モノ造り”の歴史を振り返ると、その原型を見ることができる。

まず、企画にあたっては、販売会社スタッフとともに開発担当者自らお客様のもとに出向き、時には運送会社様の配送業務時に同乗させてもらった。こうして集めたお客様の声を持ち寄り、お客様に喜ばれる車とは何かを販売最前線の営業スタッフとともに徹底的に議論した。また、歴代ボンゴの開発にあたっては、バンとトラック、0.75トン積

クラスから1.5トン積クラスまで、更には乗用車カテゴリーのワゴンに至るまで一括企画を行っている。これにより機種間でのモジュール化、共通化を実現している。

次に、具体的設計段階では、設計の事務所と製造現場とが近いこともあり、設計者は日常的に製造現場に足を運び、実車や部品の現物を前に、生産メンバーとともに改善すべき点をお互い腹に落ちるまで話し合った。

当時は、「現場現物主義」ということばであったが、開発、生産がお互いの立場を超えて目的達成のためお互いが提案し共に創り上げる“モノ造り”がされてきた。

ボンゴの歴史は、新たな発想とチャレンジで、キャブオーバー型商用車としての地位を確立していった創造期と、改善を加えながらも、物を運ぶ商用車として基本要件「しっかり積めて、きびきび走る」を頑なまでに守り続けた成熟期との2つに分けることができる。

初代～2代目のボンゴでは、1BOXカーパッケージとリアに小径ダブルタイヤを使ったワイドローで小型商用車のパイオニアとしての地位を築きあげてきた。

3代目～4代目においては成熟期に入る。4代目の企画段階で、乗用車系のワゴンは1.3BOXタイプのボンゴフレンドにバトンタッチし、ボンゴは商用車専用のモデルとした。当時は、商用車であるボンゴも衝突性能を確保しやすい1.3BOXタイプへの変更も検討された。しかし、物流を担う商用車としては、小回り性としっかり積めるところは譲ることができないということで1BOXタイプの基本レイアウトを踏襲した。ここでは、独自の衝撃吸収フレームを採用することで、小回り性・積載性を犠牲にすることなく、安全性を両立させた。

1983年発売の3代目以降のボンゴは、パワートレインやデザインを一部変更しながらも基本構造については、33年間変えることなく、現在に至っている。

歴代ボンゴ開発における“モノ造りの志”は、お客様に役立つクルマは何かを徹底的に追求し、チャレンジ精神を持って挑戦しパイオニアとなる。そして守るべきところは、守り継続させていく。現状に満足せず、常に改良を加え、商用車の“道”をきわめるというものであった。

それを支えているのは、開発部門のみならず営業・製造他、全ての部門において、現場現物主義で事実を調べ、それをお互い共有し進めていることであった。

4. 新型ボンゴ 商品性改善・法規適合

4.1 開発テーマ

新型ボンゴは、2016年2月にマイナーチェンジし販売を開始した。

今回のマイナーチェンジは、ビジネスユースのお客様に、未長く使っていただける車にすることがねらいである。そのためには、まず2016年以降に施行される環境・安全に関する法規にあらかじめ適合させること。そして、歴代の

ボンゴで培ってきた小型商用車の基本性能 (①しっかり積める積載性, ②きびきび走る小回り性, ③多彩な架装性) をきっちりと引き継ぐことを第一義の開発テーマとした。

それに加えて、走行性能や経済性の向上、見映え改善(内外装のリフレッシュ)をねらって商品化を進めてきた。

その結果、「運ぶ”プロ(匠)”のお客様にちょうどいい道具として喜んでいただける車に仕上がったと確信している。

4.2 機種構成

2017年よりこのクラスの商用車においても、ブレーキのABS装着義務が施行される。この法規に適合するシステムを全機種に展開するにあたって、全機種シングルタイヤ車に統一した。

従来ダブルタイヤ車をお使いいただいているお客様に不便をかけないように、トラックに標準ボディーや4WD AT, バンの4WD 5ドア車にハイルーフなどバリエーションを充実させた。

Past model					New BONGO									
TRUCK					Cargo Box Size	Trans-mission	Maximum Payload(kg)		Cargo Box	Trans-mission	Maximum Payload(kg)			
Rr.Tire	Drive-train	Single Tire	2WD	Long	MT/AT	900		STD./Long	MT/AT	1150				
						900				1000				
	4WD		AT	None		None								
Double Tire	2WD		4WD	Std./Long	MT/AT	850/1000								
VAN					Door	Roof	Trans-mission	Maximum Payload(kg)		Door	Roof	Trans-mission	Maximum Payload(kg)	
Single Tire	2WD	4/5	STD/High	MT/AT	750(500)		4/5	STD/High	MT/AT*	1150(900)				
					950(700)					1000(750)				
	4WD	5	Highroof only	MT/AT*										
Double Tire	2WD	4/5	STD/High	MT/AT	1000(750)		None							

*AT only for 4WD 5door Highroof

Fig. 5 Car Model Variation of New BONGO

4.3 積載量・積載性

ダブルタイヤ車廃止に伴い、シングルタイヤ車で、その積載量をカバーするため、従来のダブルタイヤ車以上の荷物を積めることを開発目標とした。

トラックのシングルタイヤ車では、荷台が幾分高くなるため、その影響について事前に市場調査を行った。法人ユーザーを中心に最重要視しているのは積載量であることが分かったので、積載量をアップしたシングルタイヤ車一本で進める決定をした。これにより、ダンプやキャンピングカーなどの重架装にも従来どおり対応できる。

またバンでは、元々シングルタイヤ車の販売割合が高かった。これは、荷室高(嵩)へのニーズが高いためである。

従って、ダブルタイヤ廃止の影響は少ないと思われるが、どうしてもタイヤハウスが出っ張らないフラットな床面の荷室が欲しいというお客様には、TESMA*2商品で対応することとした。

*2: TESMA (Technical Equipment System of Mazda)
マツダ(株)が企画・販売する特装車のこと

4.4 内外装リフレッシュ

ボンゴは、代替えのお客様も多いため、エクステリアとインテリアを小変更し、リフレッシュ感を演出している。外観は、キャンピングカーや移動販売車のベース車として使えるようにさわやかで清潔なイメージを出し、室内は、引き続きプロの仕事場として使いやすさを継続するとともに、乗用車的色調に変更した。

4.5 新法規適合

2015年～2017年にかけて、このクラスの商用車に環境・安全に関する規制強化が行われる。新型ボンゴではこれらに適合させた。

また、これから数年後までの間に国内法として適用されるECE基準の整合についても前倒しで対応した。

4.6 環境・燃費

経済性を求める商用車ユーザーからは、燃費向上や環境性能向上による減税メリットが求められる。また、企業方針としても環境対応に力を入れており、商用車も例外ではない。

燃費面では、全機種平成27年度燃費基準を上回り、また排出ガスは、平成17年基準の75%低減レベルを目標として開発を進めた。

5. 車両各部の改善

5.1 エンジン・駆動系

宅配を中心に女性ドライバーが増えていること、AT限定免許取得者の割合が増加していることから、商用車においてもATニーズが高まっている。従来バンでは80%弱、トラックでも40%強がAT車の比率であったが、この比率は、年々増加傾向にある。

今回の新型ボンゴでは、ATを従来の4速から5速に変更した。このトランスミッションは、従来から採用しているL8型ガソリンエンジンとの相性もよく、シフトスケジュールとファイナルギア比を最適化することにより、気持ち良い走りや燃費向上を両立した。

また、エンジンについては、キャタリストの貴金属仕様と燃料制御を最適化して、全機種排出ガス平成17年規制値に対して窒素酸化物 (NOx) と非メタン炭化水素 (NMHC) を75%低減し、いわゆる4☆SU-LEV対応した。これにより、大都市圏を中心に、環境対応を購入条件とし

ている大口法人様や官公庁様の仕様にも適合できた。また、積載量アップにより増加した負荷に対応するため、冷却系や排気系周辺部品に熱害対策を施した。

5.2 シャシー系

積載量のアップに伴い、フレーム・リーフスプリング・タイヤ・ホイール・フロントアクスル (2WDのみ)・リアアクスルケーシング・ドライブシャフト・ブレーキを従来のボンゴのものから強化した。元々、小型クラス商用車のボンゴブローニイやタイタンダッシュとシャシー共通部分が多いため、その開発経験を生かして、強度信頼性に関係する仕様を最適化した。

タイヤは、後輪のブレーキドラム内にABSのスピードセンサーを配置するため、12インチのリアダブルタイヤ仕様を止めて、14インチシングルタイヤのみとした。タイヤサイズは、185/80R14に変更し高負荷に耐えられる仕様とした。

ブレーキ関係では、全機種最新のABSを採用するとともに、リアブレーキドラムとマスターバックのサイズアップを行い、より確実な制動力が得られるようにした。

5.3 内外装

エクステリアでは、バン・トラックともにボディー色バンパーを採用した。従来車は、上級GLグレードだけの設定であったものを拡大展開した。また、フルホイールキャップも上品なデザインの従来品を復活させ、全車に設定した。



Fig. 6 New BONGO (DX Grade)

インテリアでは、シート表皮カラーを変更しコントラストを付けた。また、プリーツを縦から横に変更し、ラミネート厚も5mmから10mmにアップして品質感を高めている。

販売割合の高いDXグレードでは、質感の高い黒の革シボ調のサイド材を使用し、センターには、ストライプ柄を用いている。素材はビニール素材を継承し、汚れても簡単に拭き取れるよう、商用車としての実用性を確保した。

また、お客様のニーズを受けて、これまでオプション用品として設定していたキーレスエントリーシステムを全機種に標準装備とした。

6. 車両性能

6.1 走行性能

新型ボンゴでは積載量を50kg～400kg増しているにもかかわらず、AT多段化により、従来車に勝る登坂性能と加速性能を実現した。特に、積車時や登り坂などの中・高負荷領域においては、ワイド化した低速ギアにて駆動力を増し、従来に比べてより扱いやすい特性にしている。

6.2 環境性能・燃費

タイヤ仕様や動力伝達系のベアリングなどの変更により走行抵抗を減らし、ATの高段化、ファイナルギア比(AT車)や燃料制御定数変更により、全機種で平成27年燃費基準を超える燃費を実現した。(ほとんどの機種で+5%～+10%を達成)

合わせて、平成17年排出ガス基準に対して75%削減も達成したことから、従来モデルでは受けられなかった、取得税・重量税の減税措置を2016年度末まで受けられるようになった。

7. おわりに

これまで、ボンゴの歴史と新型ボンゴの構造変更概要を述べてきた。ボンゴは、小型商用車のカテゴリーにおいて、小回り性や多彩な架装性など唯一無二の商品として、日本の「運ぶ」を支えてきた。この基本構造は、30年以上も前に、0.75トン積クラスから1.5トン積クラスまでのバン・トラックを一括企画し共通化開発した商用車であり、その“モノ造りの志”は今も引き継がれている。

末筆となるが、商用車として30年以上も通用する優れた基本性能・商品性の商用車を生み出し、改良を重ねてきた諸先輩に敬意を表すとともに、今回の新型ボンゴの開発や量産準備に際し、多大な御協力をいただいた関係各位に深く感謝する。

参考文献

- (1) 福元ほか：新型ボンゴシリーズの紹介，マツダ技報，No.2，pp.121-130 (1984)
- (2) マツダの名車たち，マツダ(株)，マツダオフィシャルHP，<http://www.mazda.com/ja/innovation/stories/greatcar/>，調査日：2015/10
- (3) マツダ(株)：NEW BONGO VAN TRUCK，広報資料 (1999)

■ 著 者 ■



田中 賢二



稲田 紀親



榮谷 章

論文・解説

27

マツダの特装車（教習車・福祉車）の紹介 Introduction of Mazda Specially Equipped Vehicles (Driving School Vehicle・Welfare Vehicle)

田中 賢二*¹ 松本 真吾*² 縄田 光浩*³
Kenji Tanaka Shingo Matsumoto Mitsuhiro Nawata
下宮 康裕*⁴
Yasuhiro Shitamiya

要 約

マツダ教習車は、量産車をベースに教習に必要な装備を装着した車であり、毎年約110万人が、新規免許を取得するが、そのほとんどの方が利用する自動車教習所において、運転の基本である認知・判断・操作を習得できるよう教習指導要領に正確に対応する仕様としてある。一方で、教習車は走る広告塔でもあり、自動車教習所様の集客に貢献できるスタイリッシュで扱いやすい量産車をベース車としてある。また、自動車メーカー製ならではの高い信頼・安心感を提供している。

福祉車は、「介護する方の使い勝手の良さと、介護を受ける方の乗り心地を最優先に」を開発コンセプトに1995年に国内メーカーとして初めてスロープ式の車いす移動車を発売した。以後、介護用福祉車として、車いす移動車・リフトアップシート車・回転シート車・オートステップ車の展開を行って来た。自動車メーカーとして、ニーズに合った機能を持つ福祉車をリーズナブルな価格で供給できるよう取り組んでいる。

Summary

Mazda driving school vehicle is a vehicle equipped with necessary features developed based on a production model. About 1.1 million people newly acquire a driving license every year, and most of whom learn how to drive at a driving school or driver's training school. Mazda's driving school vehicle is tailored to exactly correspond to the instruction guidelines used at those schools so that trainees can learn driving basics: recognition, judgment, and operation there. Meanwhile, Mazda's driving school vehicle, which serves as a running billboard, is based on the stylish and easy-to-handle mass production vehicle so as to help attract customers to the driving school and training school. It also offers high reliability and a sense of security that only products by a car manufacturer can deliver.

For welfare vehicle, Mazda developed a ramp-type wheelchair access vehicle, under the development concept of "placing top priority on ease-of-use for caregivers and ride comfort for those receiving care", becoming the first Japanese manufacturer to bring it to the market in 1995. Since then, Mazda has expanded, its lineup of welfare vehicles: wheelchair access vehicle, lift-up seat vehicle, swivel seat vehicle, and auto-step vehicle as welfare vehicles for care. Mazda, as a car manufacturer, is striving to offer welfare vehicles equipped with functions necessary to meet customer needs at reasonable prices.

1. はじめに

マツダは、乗用車・商用車の量産車に加えて、特種な用途に対応した特装車も販売している。乗用車ベースの代表的な特装車として、教習車と福祉車がある。一方、商用車をベースにした特装車では、アルミバン架装した冷凍車・冷蔵車やダンプトラックやテールゲートリフター装着車等を販売している。本稿では、マツダ特装車開発について概

要を述べた上で、乗用車の代表的な特装車である、教習車・福祉車に関して、導入のねらい、特徴と構造、導入の成果等について紹介する。

2. マツダ特装車

2.1 特装車とは

特装車としては、トラックのシャシーフレーム上に、さまざまな装備を架装した商用車ベースのものが一般的であ

*1~3 商品本部
Product Div.

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

る。マツダでは、これら商用特種車に加えて、乗用車に特種用途ユーザーのために特別な架装を施した車も含めている。乗用車をベースに、自動車教習所向けに特別な架装を施したものが教習車であり、身体の不自由な方や足腰が弱った方向けに特別な架装を行ったものが、福祉車である。またマツダでは、子供や女性を含めて乗降を容易にするために架装した車も福祉車に加えている。

商用車系の特装車は、個々のニーズに合わせて完成車を業者が改造して登録するのが一般的である。一方、マツダ教習車・福祉車は、一部機種を除いて、量産車同様マツダが企画・開発・生産・販売を行っている。

2.2 マツダ特装車の企画

マツダでは、一般の乗用車・商用車の商品サイクルに合わせて、特装車企画を行っている。企画構築についてはユーザー・販売会社の情報を身近に吸収している営業部門と特装車架装を担当する関連会社の(株)マツダE&Tとの合同で行っている。

2.3 マツダ特装車の開発

マツダは、ベース車の開発を行い、架装部分については特装架装に関する専門的ノウハウを持つ(株)マツダE&Tと共同開発を行っている。

2.4 マツダ特装車の生産

特装車の生産には2通りあり、量販車のままラインオフした車両を架装するケースと特装車専用部品を組み込んだ車をライン生産した上で、量産ラインでは組み付けできない部品をラインオフ後に架装するケースがある。前者は多くの商用車のケースで、後者は教習車・福祉車のケースである。

特装車の架装は、(株)マツダE&T特装工場で行なっている。それ以外に販売会社が改造業社に依頼して架装している車は本論文で紹介するマツダ特装車には含めない。

3. 教習車

3.1 教習車とは

教習車とは、警察庁管轄の自動車免許試験場、各県公安委員会に技能検定の実施を認可された指定自動車教習所、技能教習のみの実施を認可された届出自動車教習所で使用される車両である。教習車の大きさなどは警察庁の通達を基に公安委員会や各県自動車教習所協会より発布されている基準に基づき取り決められている。

自動車メーカーが製造・販売している普通自動車免許用教習車は現在、トヨタコンフォート・マツダアクセラ・ホンダグレイスの3車である。

3.2 教習車導入のねらい

マツダが教習車を導入するねらいは、初めて免許を取得する人に、マツダ車に触れ、知る機会を作ることにある。また最新モデルをベースとすることで自動車教習所の集客率に貢献すること、自動車メーカー製ならではの安心感を提供すること、教習指導要領に正確に対応し適切な教習が実施できるようにすることである。

3.3 教習車要件

(1) 車両基準 (普通免許及び普通仮免許)

警察庁通達の教習所業務指導要領にて、乗車定員5人以上の普通乗用車で輪距(トレッド)が1.3m以上、軸距(ホイールベース)が2.5m以上2.8m以下、全長4.4m以上4.9m以下、全幅1.69m以上1.80m以下。指導員が助手席で操作する補助ブレーキを有するものと規定されている。

これに加えて公安委員会からの自動車教習所への業務指導には指導員用の後写鏡を備えることになっている。

また道路交通法にて仮免許練習中や運転技能検定中の標識の表示が義務付けられており、車両前後に標識のホルダー等が必要である。

(2) 教習指導要領

教習指導要領は、技能教習の各段階、技能検定において「認知・判断・操作」を正確に行う項目ごとの目標が細かく規定されており、教習生に馴染みのある教習原簿にも記載されている。

例えば坂道発進を教習生自身の操作で後退なくスムーズにできることや狭路(クランク路・S字路)を適切な進路と速度で通過できることなどであり、これらが適正にできることが車両側にも要求される。

(3) 教習車の商品性・信頼性要件

教習車は、前述の基準や要領に適合するだけでなく、街中を走る量産車とは異なる自動車教習所内のコースの要件や運転に慣れない初期段階の教習生が運転を行うこと、教官がほぼ1日中助手席に同乗し指導を行うこと等を前提とした商品としている。それに対し耐久性や信頼性、使いやすさ・快適性などの商品性、等の要件を満たすようにしている。

3.4 車両の選定・各部の特徴

(1) 架装ベース車(以下ベース車)の選定

ベース車は、使いやすく、マツダ独自の‘魂動’デザインを採用した現行アクセラを採用している(Fig. 1)。



Fig. 1 Appearance of Driving School Vehicle

教習車要件を満たし最新の量産車をベースとすることで、教習生は卒業後も違和感なく、自宅の車やレンタカーなどを運転することができる。また指導員は快適に一日が過ぎ、自動車教習所としては教習生募集などの教材に役立てることができる。

(2) PT・駆動系

教習車としての扱いやすさと信頼性から、トルクが大きく実績があるMZR1.6Lガソリンエンジンを選定し、低速の運転をしやすくするため専用チューニングを実施した。これに組み合わせるミッションは5MTと4EATとし、教習生が操作しやすい変速段数としている。更に5MTには、半クラッチ頻度が高い教習条件に対応し耐摩耗性を向上させた専用クラッチディスクを採用し、4EATはキックダウンが明確に解る変速段差としている。

エンスト判定を正確に行うため、アイドリングストップはあえて設定をしていない。

(3) シャシー系

構内教習でのハンドル据え切り持続時間や回数の多さに対応するため、電動パワーステアリングは電流制御を専用チューニングした。これにより教習時間の全てで普段と変わらない操舵力で運転できるようにしている。

助手席（指導員側）には補助ブレーキペダルを装備している。ケーブルを通じて運転席ブレーキペダルを動作させ、緊急時には指導員が安全に制動することを可能としている。長時間乗車している指導員の姿勢を保持し疲れを防止するため、人間工学に基づいて、補助ブレーキペダルの左右にフットレストを運転席レイアウトと同じ思想で配置した。これにより咄嗟の踏み替えがしやすいようにしている。

(4) ボディー

ボディーは前席足元のパネルを教習車専用とし、補助ブレーキ等を装着しやすい構造とした。ボディーカラーは量産車共通として人気のソウルレッドプレミアムメタリックも選択できるようにしている。

(5) エクステリア・インテリア

エクステリアでは仮免プレートホルダー、サブアウターミラーを装備している。どちらもオリジナルのデザインを崩さないようにレイアウトを考慮した。サブアウターミラーを取り付けるベースミラー内部にはサブミラーをしっかりと固定するリブを設けている。

Fタイヤの前に付くタイヤディフレクターは、上下寸法を量産車より小さくし、AT車の特性を体感するために行う段差乗り上げ教習やコース脱輪時の路面接触を防止している。この変更は、高速教習での直線安定性などが十分であることを確認済みである。

その他にもリアコンビランプはLEDブレーキランプタイプを採用し、構内教習での頻繁な制動回数に対しブレーキランプの信頼性向上に貢献している。

インテリアでは、教習車要件であるサブインナーミラー

を装備。ミラー取り付け部を2箇所とした専用フロントウインドウに縦に2段でレイアウトしている。

量産車では温度表示などがあるコンソール中央のインジケーターと同一レイアウトで教習モニターを装備した。これにより、速度・走行距離、方向指示器、ハイビーム、シートベルトワーニングの表示を指導員が前方から少ない視線の移動量で確認できるようにしている（Fig. 2）。



Fig. 2 Monitor

また、速度表示は指向性のある液晶を採用し、助手席からのみ視認できるようにしている。これにより運転席の教習生が誤って見ないようにしている。更にホーン・運転席フットランプのスイッチも設けてあり、緊急時に指導員が素早く操作をできるようにしている。

助手席シートにもシートリフターを設け、体格の違いや長時間乗車する教官の疲労低減のために乗車姿勢の自由度を持たせてある。リアシートはセンターアームレスト付として複数同乗教習時の教習生同士のプライベート空間が確保できるように配慮した。

3.5 教習車導入の成果

2004年に市場導入した初代アクセラ教習車から現行3代目の導入直後の2014年6月に1万台登録を達成した。最新型のアクセラ教習車は、デザインの評価も良く、高い販売シェアを得るようになってきた。その2014年度登録は、約1500台となり車種別の教習車トップシェア40%台後半（マツダ調べ）となった。

また、教習車の販売は、1970年代から継続しており、全国の自動車教習所での保有シェアでも25%を超え（マツダ調べ）、普通免許取得者の4人に1人は、マツダ教習車を運転することでマツダ車を広く体感いただけようになった。また、初心者運転技術習得や運転マナー向上に貢献してきた。

4. 福祉車

4.1 福祉車とは

(1) 福祉車の意義

日本の高齢化社会を反映して、高齢化率は年々上昇傾向にある。福祉車とは、高齢者や身体の不自由な方などが使いやすいように特別架装を施した車のことである。

移動に関してハンデキャップがある方に、移動の自由と喜びをひろげる車であり、介護する方にとっては、より負担が少なくスムーズな介護を可能にする車である。

ユーザーの利用スタイルに応じて、さまざまなタイプが用意されている。

(2) 福祉車の種類と用途

福祉車には、大きく分けて「介護式」と「自操式」の2種類がある。「介護式」は身体の不自由な方の介護や送迎に利用する車、「自操式」は身体の不自由な方が自分で運転するための補助装置が付いた車である。

更に詳細な用途に応じて、Fig. 3のように分類される。

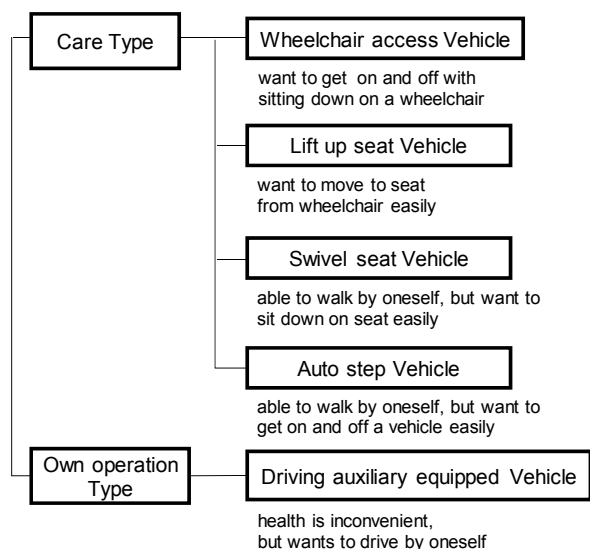


Fig. 3 Type and Use of Welfare Vehicle

4.2 マツダ福祉車と導入のねらい

マツダは1995年に国内自動車メーカーとして初めて、スロープ式車いす移動車を発売し、現在では福祉車「i (アイ) シリーズ」として、各ユーザーのニーズに応じた多様な車種をラインナップしている (Fig. 4)。

Care Type				
Auto step Vehicle	Swivel seat Vehicle	Lift up seat Vehicle		Wheelchair access Vehicle
		Passenger seat	Second seat	
BIANTE MPV	DEMIO	PREMACY BIANTE	BIANTE MPV	FLAIR WAGON

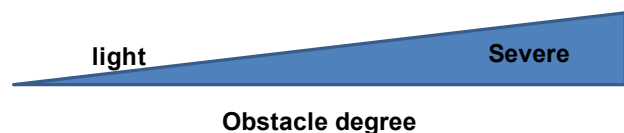


Fig. 4 Mazda Welfare Vehicle Lineup

「i シリーズ」は、高齢者の方や身体の不自由な方の、毎日の生活が楽しくなるよう、「介護する方の使い勝手の良さ、介護を受ける方の乗り心地を最優先に」をコンセプトとして、商品開発・導入を行ってきている。マツダ福祉車でカーライフを通じて、人生の輝きを人々に提供することがねらいである。

4.3 マツダ福祉車の概要

マツダ福祉車のベース車には、各タイプでのセグメントニーズが最も多く、福祉車としてのレイアウト条件 (乗降性・居住性・操作性等) 適合性を検討し選定している。

また福祉車開発は、福祉ユニット本体の開発とともに、排出ガス・燃費や衝突性能への適合対応等、福祉車全体の開発を行っている。

生産面では、ベース車のラインにてシート欠品生産や欠品に伴うユニークな搬入対応・検査対応を行う。その後、(株)マツダE&T特装工場にて福祉車シート等を架装・検査して、マツダ車として完成検査を行った後に出荷している。

また、変更部位がシート等の一部に限られるため、該当部位の変更について改造認可申請を行っている。

以下にマツダの福祉車「i シリーズ」の主要モデルを紹介する。

(1) スロープ式車いす移動車

常時、車いすを使用される方のクルマへの乗降をサポートする車。テールゲートに設けたスロープを使用して車いすのまま乗降ができるタイプをマツダは提供しており、フレアワゴンに設定している (Fig. 5)。



Fig. 5 FLAIR WAGON

介護する方の使い勝手の良さを追求し、ワンアクションで簡単に開閉できるテールゲート一体型スロープを開発。スムーズに準備ができるため、介護者の負担を軽減するとともに、段差のない1枚スロープ (通常は2枚か3枚) により、車いすでの乗り降りの際の振動も軽減している。

更に、低床設計・専用の床構造とし、角度12度の短くゆるやかなスロープを実現して、車いすでのスムーズな乗り降りを可能にした。後部車体を下げる高価なリアエアサスペンション等の採用をしなくても短くゆるやかなスロープを実現した。

また、介護を受ける方の乗り心地を最優先に考え、走行時は、ゆるやかな4度の乗車姿勢角 (車いすの傾き) を実現するフロア形状とし、安心感のある乗車姿勢を確保すると同時に、ゆとりある頭上や足元空間を実現した。

各ユーザーの用途に合わせて、リアシートを装備した仕様 (車いすの方の乗車有無に合わせてリアシートを折り畳む) と、装備しない仕様 (常に車いすの方が乗車されるユーザー向きで、スペースにゆとりが取れる) を準備してい

る。

(2) リフトアップシート車

外出時に車いすを使用される方のクルマへの乗降をサポートする車。助手席設定車はドライバーと並んで乗車したいユーザー向け、セカンド席設定車は常に隣に介護する方の乗車が必要なユーザー向けである。

シートが電動で回転・昇降するタイプ。プレマシー・ビアンテの助手席と、ビアンテ・MPVのセカンド席に設定している (Fig. 6)。

リモコンまたはシート両側スイッチで簡単にシート操作ができる。オートリクライニング機能により、シート昇降中の頭上スペースのゆとりを広げ、移乗しやすいように、車いすの座面とほぼ同じ地上高までシート座面が下降する。



Fig. 6 BIANTE

プレマシーは車内のスペース限度から、車いすを車載する場合には3rdシートを倒して5名乗車としていたが、現行モデルではシートアレンジで置き方を工夫することにより、6名乗車も可能にしている (Fig. 7)。



Five Rides



Six Rides

Fig. 7 PREMACY Compartment

また、リフトアップシートの重量は標準シートに比べて約60kg重いため、取り付け部のボディー側補強を入念に行って、標準車同等の耐久性を確保した。

ベース車に対してシート取り付け構造が大きく変わる場合 (ビアンテのセカンド席リフトアップシートは、スライドレールを介したフロアへの固定形態から、フロアへの直接固定に変更) には固定強度を確保するため、補強BRKTの追加や固定箇所を追加を行った。

(3) 回転シート車

シートへの着座に若干負担を感じる方をサポートする車。シートが手で回転し、座面が車外に出てくるタイプ。デミオの助手席に設定している (Fig. 8)。



Fig. 8 DEMIO

軽くなめらかな回転操作により介護者の負担を軽減している。また、介護される方が腰掛けやすいよう、シート座面高さとしり出し量を設定している。

特にスタイリッシュなデミオ搭載では、シート回転時のAピラーやルーフレール部と頭上隙を確保するため、フロアのクロスメンバー上面とシート回転ユニット下面の隙を最小化することにより、シート座面高さの増加を最小限に抑えた。

(4) オートステップ車

乗降時、足の上げ・下げの動作に若干負担を感じる方をサポートする車。乗降時に、ステップを出し入れするタイプ。ビアンテ・MPVのセカンド席に設定している (Fig. 9)。

助手席側スライドドアの開閉に連動して、ステップが自動展開・格納。乗降に安心のアシストグリップを装備する。



Fig. 9 BIANTE

(5) 自操式 (運転補助装置付車)

自操式には、足での操作が困難な方が手でアクセルやブレーキを操作する手動装置付車と、両腕が不自由な方が足のみで運転操作できる足動装置付車がある。マツダは、手動装置付車の導入を検討中である。自操式で自ら運転する「Be a driver.」体験を通じて、お客様が自分の人生を切り開いて、生活を楽しむことを積極的にサポートすることをねらいとしている。

マツダの手動装置付車は、左手でアクセル・ブレーキを操作できる一体のレバーと、ハンドルを右手で操作する専用のグリップの装着を基本構成としている。

2015年の第42回 国際福祉機器展にロードスターとデミオを参考出品した (Fig. 10)。



Fig. 10 ROADSTER

■ 著 者 ■



田中 賢二



松本 真吾



縄田 光浩



下宮 康裕

4.4 成果と社会貢献

マツダは福祉車販売を開始した1995年から2014年までに約11千台を販売しており、身体の不自由な方や高齢者の方が自由な移動ができるよう、生活をサポートしている。

これらの車両は使い勝手・乗り心地が良い等、お客さまから好評を得ている。

ちなみに、マツダの社会貢献活動の一つとしてMAZDA Zoom-Zoom スタジアム広島の来場者数100万人が達成されるごとに、マツダの福祉車を社会福祉団体に贈呈しており、2015年までに11台寄贈した。

5. おわりに

以上、マツダの特装車である教習車と福祉車について述べてきた。

教習車は、1970年代から継続して市場に送り出し、量産車の進化とともに発展させることで、自動車教習所様の信頼を得てきた。教習車の販売を通して、免許取得者に何らかの形で運転技術・安全意识やマナーの習得に貢献していると自負している。

一方、福祉車は、自動車メーカーが製造販売する福祉車のパイオニアであった。その後、色々なタイプの福祉車を開発し導入してきた。福祉車を通して、移動の自由をお客様に楽しんでもらえることを切に願う。

教習車・福祉車は市場規模は小さいものの、自動車メーカーの取り組み・考え方を社会に示すものであり、今後も引き続き発展させていきたい。

参考文献

- (1) (社)日本自動車工業会：でかけよういっしょに
はじめての福祉車両ガイド, p.6 (2015)

特許紹介

低圧縮比クリーンディーゼルエンジンの発明

特許第5338268号（登録日2013年08月16日）

発明者 金 尚奎, 志茂 大輔, 片岡 一司

発明の実績 社内実施 (SKYACTIV-D) 平成26年度中国地方発明表彰特許庁長官奨励賞受賞

SKYACTIV-Dは、100件を超える特許群に支えられ低迷していたディーゼル市場に強烈なインパクトを与えた低圧縮比クリーンディーゼルエンジンを実現するための優れた技術である。その技術の代表として本件特許が、平成26年度中国地方発明表彰では上位特別賞の特許庁長官奨励賞を受賞した。この発明表彰は毎年さまざまな業種の企業から優れた技術が数多く応募されており、その中からディーゼルエンジン技術が本賞を受賞するのは、産業界でもトップクラスの技術であることが認められたことを意味する。

＜発明の背景＞

近年、ディーゼル車はガソリン車に比べて熱効率が高くCO₂排出量削減の有力な手段として注目されている。しかしながら、ディーゼルエンジンの排ガス（NO_x、煤）の汚さ等のネガティブ要因が、ディーゼル乗用車普及のネックとなっていた。その最大の要因は、ディーゼルエンジンは、圧縮比が高く燃料が自己着火しやすいためにNO_xや煤が多く発生することであった。その対策として、自動車用量産ディーゼルエンジンで世界一の低圧縮比14.0での燃焼が考えられる。この場合、ピストン上死点における圧縮温度と圧力が低くなり、特に低負荷では燃料噴射後から自己着火までに空気との十分な混合時間が確保でき、酸素が充足された状態で燃えるのでNO_xと煤が減少する。しかしながら高負荷では、高効率な過給機によって上死点における圧力が再び上昇して低圧縮比だけでは燃料と空気との混合が不足するため、その解決が課題であった。



図1 低圧縮比クリーンディーゼルエンジンの外観

＜発明の概要＞

本低圧縮比クリーンディーゼルエンジンは、燃料と空気が良好に混合しNO_xや煤の発生を抑制するため、燃焼室は燃料噴霧が壁面の流れに対して、燃料噴霧が側面上の衝突点から燃焼室の底面に沿って流れる初期段階と、その後燃焼室の底面を経由してシリンダ中央部へ向かう中期段階、最後にシリンダ中央部からスキッシュエリアへ向かう後期段階の3つになるよう燃焼室形状に卵型楕円関数を採用し燃焼室内の縦渦、つまり縦方向の旋回流を強化することで、燃焼室内における燃料過濃混合気の停滞抑制および混合促進を図った。本発明により、燃焼室内で燃料噴霧と空気が良好に混合し煤の生成が抑制され、また高温既燃ガスの停滞がなくなりNO_xの排出も抑制された。また、活発な燃焼が燃焼期間を短くして燃費を改善した。本発明を含めた群特許技術によって、最新の厳しい排ガス規制（国内ポスト新長期/欧州EURO6）にNO_x触媒なしで適合するクリーン燃焼を実現しながら、燃費を従来比20%程度改善した。

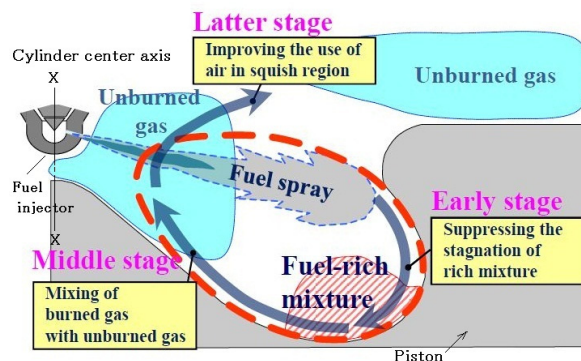


図2 低圧縮比クリーンディーゼルエンジンの燃焼状態を示す図

社外への発表論文一覧表（2015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
2015.4.20	SAE SAE2015 Hige efficiency IC Engine Symposium	Future Prospect of Internal Combustion Engine	山下 洋幸	技術研究所
2015.6.22-26	33st AIAA Applied Aerodynamics Conference	Unsteady Aerodynamics Simulation of a Sedan-type Road Vehicle during a Sinusoidal Steering Input	中島 卓司 森川 陽介 坪倉 誠 岡田 義浩 農沢 隆秀	広島大学 同上 北海道大学 車両実研部 技術研究所
2015.7.12	The 11th Asia-Pacific Conference on Vision APCV2015	The shape of the empirical horopter in the wide visual field and its relation to unconscious actions.	金子 寛彦 吉海 亮介 村瀬 健二 武田 雄策	東京工業大学 同上 技術研究所 同上
2015.7.26-31	ASME-JASME-KSME Joint Fluids Engineering Conference 2015	Aerodynamic characteristics of a road vehicle in steady-state cornering	中島 卓司 坪倉 誠 岡田 義浩 農沢 隆秀 河野 良祐 土井 康明	広島大学 北海道大学 車両実研部 技術研究所 広島大学 同上
2015.8.23-27	国際液体微粒化学会 (ILASS International) ICLASS 2015, 13th Triennial International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems	Characteristics of Flat-Wall-Impinging Fuel Spray: Vapor Phase Distribution and Liquid Film Adhesion	小立 俊己 朴 啓太 西田 恵哉 尾形 陽一 張 武 藤川 竜也	広島大学 同上 同上 同上 パワートレイン技術開発部 同上
		X-Ray Visualization of Cavitation in Nozzles with Various Sizes	宋 明良 南 慎一郎 R. Prasetya R. H. Pratama 文 石洙 和田 好隆 横畑 英明	神戸大学 同上 同上 同上 産業技術総合研究所 エンジン性能開発部 同上
		Wave Formation and Ligament of Liquid Film in Horizontal Rectangular Duct	田中 大地 丸井 堅太郎 尾形 陽一 西田 恵哉 山本 亮 中村 和博 横畑 英明	広島大学 同上 同上 同上 エンジン性能開発部 同上 同上
		Cavitation in Mini-Sac Nozzle and Injected Liquid Jet	R. H. Pratama 宋 明良 和田 好隆 横畑 英明	神戸大学 同上 エンジン性能開発部 同上
		Experimental Study of Impact Behavior of High-Speed Fine Droplets onto Dry Surface	小田 哲也 山本 啓介 大澤 克幸 曾田 将太 松尾 亮佑 横畑 英明	鳥取大学 同上 同上 同上 同上 エンジン性能開発部
		Modeling of the Rotary Engine Apex Seal Lubrication	Mathieu Picard Tian Tian 西野 隆之	Massachusetts Institute of Technology 同上 パワートレイン技術開発部
		Simultaneous Observation of Combustion in Optical Rotary Engine by Bottom View and Side View	尹 正虎 香川 良二 唐津 雄一 簗田 俊貴 橋本 英樹 森上 修 村瀬 英一	パワートレイン技術開発部 同上 九州大学 同上 同上 同上 同上

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
		Developments of the Reduced Chemical Reaction Scheme for Multi-Component Fuel	養祖 隆 山川 正尚 田村 亮 草鹿 仁	パワートレイン技術開発部 同上 早稲田大学 同上
		Analysis of Heat Transfer Phenomena on High Response Heat Insulation Coatings by Instantaneous Heat Flux Measurement and Boundary Layer Visualization	青木 理 田中 達也 中尾 裕典 清末 涼 原田 雄司 山本 博之	技術研究所 同上 同上 同上 同上 同上
2015.9.10-11	Society of Plastics Engineers FOAMS2015	Effect of Cell Morphology on Physical Properties of Polypropylene Foam for Automotive Applications	宮本 嗣久 小林めぐみ 金子 満晴 大嶋 正裕	技術研究所 同上 同上 京都大学
2015.9.14-16	PIV2015 11th International Symposium on Particle Image Velocimetry	Analysis of Cavitation Flow in Mini-Sac Fuel Injector and Discharged Liquid Jet	R. H. Pratama 宋 明良 西尾 茂 和田 好隆 横畑 英明	神戸大学 同上 同上 エンジン性能開発部 同上
2015.9.16-20	日本機械学会 International Tribology Conference, Tokyo 2015	Engine Tribology on SKYACTIV-G	相澤 一成 栗栖 徹 木村 昇平	エンジン性能開発部 同上 同上
2015.9.17	日本AEM学会 ISEM2015: The 17th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanism	Study of power generation using FPED assuming engine vibration	田中 義和 尾古 卓也 陸田 秀実 市川 和男 山本 寿英 沖濱 圭佑	広島大学 同上 同上 技術研究所 同上 同上
2015.9.21-23	11th International Modelica Conference 2015	Initiatives for Acausal Model Connection using FMI in JSAE (Society of Automotive Engineers of Japan)	平野 豊 嶋田 敏 寺岡 陽一 瀬谷 修 大隅 雄司 村上晋太郎 広野 友英 関末 崇行	トヨタ自動車(株) (株)本田技術研究所 統合制御開発本部 (株)デンソー AZAPA(株) ダッソー・システムズ(株) ニュートンワークス(株) アンシス・ジャパン(株)
2015.10.4-9	Erasmus Mundus EASED program committee International Conference on Silicon Carbide and Related Materials 2015	3D Integration of Si-based Peltier device onto 4H-SiC power device	古林 寛 黒木伸一郎 瀬尾 宣英 米盛 敬 種平 貴文	広島大学 同上 技術研究所 同上 同上
2015.10.5-7	RWTH Aachen University The Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology 2015	SKYACTIV Engine Efficiency Improvement and Monotsukuri Innovation to Be Applied to Next Generation SKYACTIV The New Small Diesel Engine MAZDA SKYACTIV-D 1.5	廣瀬 一郎 人見 光夫 志茂 大輔 大西 毅 森永 真一 平林 千典 林 幸輝 高松 宏志	パワートレイン開発本部 執行役員 エンジン性能開発部 同上 同上 同上 同上 同上
2015.10.5-9	ERTICO-ITS Europe ITS World Congress 2015	Reexamination of prototype cooperative ASV service between tramcars and cars	平沢 隆之 渡辺 翔 須田 義大 中野 公彦 長谷川智紀 竹内 俊裕 水間 毅 栃岡 孝宏 山本 康典 岩下 洋平 藤元 秀樹 東 耕一	東京大学 同上 同上 同上 交通安全環境研究所 同上 同上 統合制御システム開発本部 技術研究所 同上 広島電鉄(株) 同上

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2015.10.20-22	Automotive Circle International EuroCarBody 2015・17th Global Car Body Benchmarking Conference	Body of New Mazda MX5	大段 清二 内堀 佳 後藤 暢映	ボデー開発部 同上 車体技術部
2015.11.5	Institute for Automotive Engineering/Institute for Combustion Engines Aachen Colloquium CHINA	SKYACTIV Engine Innovation Both for Thermal Efficiency and its Monotsukuri	廣瀬 一郎	パワートレイン開発本部
2015.11.17-19	JSAE, SAE International 21st Small Engine Technology Conference 2015 OSAKA	Detailed Diesel Combustion and Soot Formation Analysis with improved Wall Model Using Large Eddy Simulation	周 蓓霓 堀越 政寛 喜久里 陽 草鹿 仁 大聖 泰弘 佐藤 圭峰 藤本 英史	早稲田大学 同上 同上 同上 同上 技術研究所 同上
2015.11.27-29	名古屋大学エコトピア科学研究所 ISETS'15	Oxidation behavior of Ce thin layer deposited on HOPG	國府田由紀	技術研究所
2015.12.15-20	環太平洋地域各国化学会 PACIFICHEM 2015	Ionic conductivity of nanocomposites formed with metal mesoporous oxides and LiClO ₄	松下 悟士 甲斐 裕之 對尾 良則 犬丸 啓	広島大学 技術研究所 同上 広島大学

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
2014.10.15 -2015.1.21	近畿大学 工学部機械工学科 寄付講義 「自動車工学」	自動車工学	坂手 宣夫 山本 寿英 天野 浩平 山本 康典 水戸部典朗	技術研究所 同上 同上 同上 同上
2015.1.6	慶應義塾大学 総合政策学部・環 境情報学部共通寄附講座 「交通安全文化論」	マツダの安全への取り組み	伊東 哲夫	技術企画部
2015.1.10	トライボロジー学会 エンジン潤 滑研究会 第2回エンジン潤滑研究会	エンジン用軸受の摩擦・摩耗の予測と薄 層放射化による精度検証	宮内 勇馬	技術研究所
2015.1.15	リード エグジビション ジャパン (株)	独自の進化を続けるマツダのエンジン開 発	鈴木 敬	エンジン性能開発部
2015.1.20	2015 オートモーティブワールド 大分県自動車関連企業会 平成26年度 大分県自動車関連企 業会 第2回現場改善セミナー	マツダのクルマ造り～アクセラの開発事 例～	柏木 章宏	商品本部
2015.1.21	dSPACE Tech day in MAZDA 2015	将来の車造りを変えていくモデルベース 開発	足立 智彦	統合制御システム開発本部
2015.1.21	広島県レンタカー協会 新年互礼会	これからの車と新技術	野村 誠治	技術研究所
2015.1.23	日本伝熱学会 第51回日本伝熱シンポジウム	自動車用三元触媒の白金族元素上での NO _x 、CO触媒反応の解析(第2報)	石本 尚基 下栗 大右 王 艶雷 村上 浩 松本 有平 竹林 広行	広島大学 同上 同上 パワートレイン技術開発部 同上 同上
2015.1.27	(株)技術情報協会 セミナー「車載用回生システムに よる燃費向上技術とキャパシタの 制御技術」	減速エネルギー回生システム“i-ELOOP” 用キャパシタの開発と制御技術	藤田 弘輝	技術研究所
2015.1.30	自動車技術会 電気動力技術部門 委員会 No.13-14 講習会「電動車両技術 の基礎から最新動向～JSAEが考 える電動車両技術の近未来～」	電動車両用電池技術の基礎から最新動向	藤田 弘輝	技術研究所
2015.2.6	粉体工業技術会 第3回電池製造技術分科会	～キャパシタを用いた減速回生システム から水素自動車まで～	藤田 弘輝	技術研究所
2015.2.10	接着学会 関西支部 第2回関西支部 広島講演会	分子動力学法を用いたガラス繊維強化複 合材の界面特性解析	平本 健治	技術研究所
2015.2.12	新エネルギー・産業技術総合開発 機構 (NEDO) NEDOフォーラム	社会を変えたNEDOの技術・新世代ク リーンディーゼルエンジンSKYACTIV- Dの実用化	志茂 大輔	エンジン性能開発部
2015.2.20	日本塗装技術協会 第3回講演会「自動車塗装の最新 動向～環境を考えたもの創り～」	揮発性有機化合物 (VOC) とCO ₂ を同時 に削減する新塗装技術『アクアテック塗 装』	篠田 雅史	車両技術部
2015.2.25	総務省中国総合通信局, 中国超高 速ネットワーク連絡協議会, 中国情報通 信懇談会 最先端ICT利活用シンポジウム	マツダのモノ造り革新とビッグデータ活 用による更なる進化	佐崎 幸司	パワートレイン技術部
2015.2.27	自動車技術会 新開発エンジンシンポジウム	新型クリーンディーゼルSKYACTIV-D 1.5Lエンジンの開発 (走る歓びと優れた 環境性能の実現)	高松 宏志	エンジン性能開発部

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2015.2.27	型技術協会 第22回型技術シンポジウム	“魂動デザイン”の実現に向けたデザイン部門との共創による金型作り	安楽 健次	ソーリング製作部
2015.3.2-3	情報処理学会 ハイパフォーマンスコンピューティング研究会 第148回ハイパフォーマンスコンピューティング研究会	自動車のモデルベース開発におけるシミュレーションのGPGPUによる高速化	窪田 昌史 北村 俊明 國光 修司 寺岡 陽一 矢野 康英	広島市立大学 同上 パワーレインシステム開発部 同上 同上
2015.3.3	広島産業振興機構 第7回広島県金属防食技術研究会	アーク溶接部の耐食性	深堀 貢 溝上 達志 北原陽一郎	技術研究所 同上 同上
2015.3.3	広島大学 ナノデバイス・バイオ融合科学研究所 国際ナノデバイステクノロジーワークショップ2015	Thermal management on Motor and Inverter	種平 貴文 瀬尾 宣英 米盛 敬 黒木伸一郎 中島 安理	技術研究所 同上 同上 広島大学 同上
2015.3.4	腐食防食学会 中国・四国支部 2015年材料と環境研究発表会	アーク溶接部の耐食性	溝上 達志 深堀 貢 北原陽一郎	技術研究所 同上 同上
		塗膜防錆機能の簡易評価技術	浅田 照朗 重永 勉 磯本 良則	技術研究所 同上 広島大学
		市場での車両の腐食メカニズム	江崎 達哉 重永 勉	技術研究所 同上
2015.3.4	文部科学省ナノテクノロジープラットフォーム H26年度文科省ナノテクノロジープラットフォームコンソーシアムシンポジウム	「今後の自動車における複合材料採用拡大の可能性について～ナノレベルのフィブリン繊維を有する自動車用高機能発泡樹脂の開発事例～」	藤 和久	技術研究所
2015.3.5	政策研究大学院大学ほか 「自動運転システムにおける標準化」セミナー	ITSに関する規格の現状と今後の展望	三角 正法	技術研究所
2015.3.11	電子情報通信学会大会 2015電子情報通信学会総合大会	マツダにおける通信連携支援システムの取り組み	山本 康典	技術研究所
2015.3.13	産業技術総合研究所 デジタルヒューマン工学研究センター デジタルヒューマンシンポジウム2015	自動車開発におけるデジタルヒューマンモデルの活用	西川 一男	技術研究所
2015.3.14	東京大学 先進モビリティ研究センター NU-Rail2015 研究発表会	路面電車-自動車間通信型ASVプロトタイプサービス実証実験の評価	渡辺 翔 平沢 隆之 須田 義大 中野 公彦 長谷川智紀 竹内 俊裕 藤元 秀樹 東 耕一 栃岡 孝宏 山本 康典 岩下 洋平	東京大学 同上 同上 同上 交通安全環境研究所 同上 広島電鉄(株) 同上 技術研究所 同上 同上
2015.3.20	日本セラミック協会 2015年日本セラミック協会年会	メソポーラス酸化物-LiClO ₄ 複合体のイオン伝導特性	松下 悟士 甲斐 裕之 對尾 良則 犬丸 啓	広島大学 技術研究所 同上 広島大学
2015.3.21	海上交通システム研究会 第124回海上交通システム研究会	先端的自動運転技術-自動車の場合	栃岡 孝宏	技術研究所
2015.3.23	触媒学会 第115回触媒討論会	触媒と非接触条件にあるパティキュレートの酸化反応促進の検討	原田浩一郎 馬場 誉士 滝沢 知也 重津 雅彦 高見 明秀	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
2015.3.30	精密工学会 中四国支部 技術賞記念講演	エンジン加工変種変量フレキシブルライ ンの開発	佐崎 幸司	パワートレイン技術部
2015.4.22-24	溶接学会 春季全国大会	亜鉛めっき鋼板用低スラグ溶接プロセス の開発に向けた基礎検討	宮田 実 山崎 圭 鈴木 励一 田中 正顕 小川 貴史 深堀 貢	(株)神戸製鋼所 同上 同上 シャシー開発部 技術本部 技術研究所
2015.4.23	オートモーティブコンポジット研 究会 第3回オートモーティブコンポ ジットシンポジウム	ガラス繊維強化ポリプロピレン樹脂複合 材の界面特性解析	平本 健治 藤 和久 松田 祐之 小川 淳一 小林めぐみ 森脇 健二 宮本 嗣久 住田 弘祐 濱田 泰以 王 存涛	技術研究所 同上 同上 同上 同上 同上 同上 同上 京都工芸繊維大学 同上
2015.4.24	解体性接着技術研究会 第3回解体性接着技術研究会	車体接着の技術動向と課題、および市場 劣化予測技術の開発	氷室 雄也 山本 研一	技術研究所 同上
2015.5.8	電子情報通信学会 環境電磁工学 研究専門委員会 第11回EMC基礎ワークショップ	電磁界シミュレータを用いた車載機器の 電波性能解析	浜田 康	電子開発部
2015.5.15	広島大学 第三類化学工学プログ ラム 平成27年度 化学工学概論	化学工学的思考のすすめ	田中 力	技術研究所
2015.5.17	軽金属学会 第128回春期大会	鉄/アルミ異材スポット溶接の継手強度 に及ぼす鋼板めっき種の影響	田中耕二郎 杉本 幸弘 西口 勝也	技術研究所 同上 同上
2015.5.18	Erasmus Mundus EASED program committee Erasmus Mundus EASED Evaluation Meeting	Panel discussion – Challenges and future of energy	野村 誠治	技術研究所
2015.5.19-20	電子情報通信学会 2015年 ヒューマン情報処理研究 会	自動車内装材における触感と物理特性の 関係	野中 優美 米澤 麻実 久保 賢太 宮崎 透 福井 信行 古島 剛 田中 松広	車両実研部 同上 同上 同上 同上 同上 同上
2015.5.20-22	自動車技術会 2015年 春季大会 フォーラム	新型マツダ2/デミオの車体技術	松岡 秀典	ボデー開発部
2015.5.20-22	自動車技術会 2015年 春季大会 学術講演会	乗用車用内燃機関の進化構想について	山本 寿英	技術研究所
		新型1.5L低圧縮比クリーンディーゼルエ ンジンの開発 (第1報)	大西 毅 高橋康太郎 高嶋 亮輔 森永 真一 志茂 大輔 高松 宏志	エンジン性能開発部 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
		低圧縮比コンセプトの踏襲を実現した新 技術		
		新型1.5L低圧縮比クリーンディーゼルエ ンジンの開発 (第2報)	金 尚奎 平林 千典 難波 真 宮崎 正浩 大西 毅 志茂 大輔	パワートレイン技術開発部 エンジン設計部 パワートレイン技術開発部 エンジン性能開発部 同上 同上
		燃焼室形状および混合気形成最適化によ る熱効率の改善		
		新型1.5L低圧縮比クリーンディーゼルエ ンジンの開発 (第3報)	白橋 尚俊 神田 靖典 長門 清則 松原 武史	エンジン性能開発部 同上 同上 同上
		燃焼加振力及び構造伝達特性の最適化に よるエンジン騒音・振動の低減		

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
		CAE活用による移動体通信機器性能の開発	浜田 康 鶴長真里絵 土屋 徹	電子開発部 同上 日本イーエスアイ(株)
		FMIでの非因果的モデル接続の取り組み	嶋田 敏 平野 豊 寺岡 陽一 瀬谷 修 大隅 雄司 村上晋太郎 広野 友英 関末 崇行	(株)本田技術研究所 トヨタ自動車(株) 統合制御システム開発本部 (株)デンソー AZAPA(株) ダッソー・システムズ(株) ニュートンワークス(株) アンシス・ジャパン(株)
		FMI仕様を活用した非因果的モデル接続手順紹介	嶋田 敏 寺岡 陽一 関末 崇行 上田 雅生 広野 友英	(株)本田技術研究所 統合制御システム開発本部 アンシス・ジャパン(株) Mnter・グラフィックス・ジャパン(株) ニュートンワークス(株)
		新世代Bカー商品群の空気抵抗低減技術とそれを実現するための空力開発のコンセプトおよびプロセス	中田 章博 岡田 義浩 岡本 哲 伊川 雄希 李 暉 田中 松広	車両実研部 同上 同上 同上 同上 同上
		産学連携を促進するベンチマーク問題の意義	小森 賢 川邊 武俊 大畠 明 安井 裕司 平野 豊	統合制御システム開発本部 九州大学 トヨタ自動車(株) (株)本田技術研究所 トヨタ自動車(株)
		車両の腐食環境計測システムの開発	福田 克弘 落岩 克哉 園田 賢司 山根 貴和	車両実研部 同上 同上 同上
		ペイントシールのき裂現象のメカニズム解明と自動評価システムの開発によるき裂予測技術の確立	鶴山 敦子 川口 克也 岩田 成樹	車両実研部 車両開発本部 同上
		高強度発泡充填材フレームの開発	奥山 智仁 田中 力 本田 正徳 松岡 秀典 藁 裕貴 梶村 勇一 石亀 勝義	技術研究所 同上 同上 ボデー開発部 同上 衝突性能開発部 同上
2015.5.21	西部造船会技術研究会 機能システム部会	自動車用水素ロータリーエンジン	水戸部典朗 今井 一雄	技術研究所 同上
2015.5.23-24	日本材料学会 第64回学術講演会	摩擦攪拌点接合によるアルミニウム合金/CFRP異材接合継手の疲労強度評価	小川 裕樹 曙 紘之 加藤 昌彦 菅田 淳 田中耕二郎	広島大学大学院 広島大学 同上 同上 技術研究所
2015.5.29	次世代自動車宮城県エリア他 レアメタル戦略と触媒開発の進め 方に関するシンポジウム	進化するエンジンと排ガス浄化触媒の課題	高見 明秀	技術研究所
2015.5.30-31	日本設計工学会 春季研究発表講演会	高圧縮比HCCIエンジンにおけるピストン表面温度測定手法の確立	今駒龍太郎 草鹿 仁 養祖 隆	早稲田大学 同上 パワートレイン技術開発部
2015.6.2-3	ダッソーシステムズ(株) 3DEXPERIENCE FORUM	スカイアクティブの開発とそれを支えたモデルベース開発	原田 靖裕	統合制御システム開発本部
2015.6.2-3	(株)CD-adapco STAR Japanese Conference 2015	CFDを活用した非定常空力技術開発の事例紹介	清水 圭吾	技術研究所

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2015.6.4	プラスチック成形加工学会 第26回年次大会	GF/CFハイブリッド繊維複合材の機械的特性	播摩 一成 山田 浩明 梶岡 信由 高垣 有紀 森脇 健二 小川 淳一 松田 祐之 藤 和久 濱田 泰以	ダイキョーニシカワ(株) 同上 同上 同上 技術研究所 同上 同上 同上 京都工芸繊維大学
2015.6.5	dSPACE Japan(株) dSPACE Japan User Conference 2015	今後10年における車載ソフトウェア開発の進化～MBD導入の歴史と今後の10年について～ 電動車両開発におけるHILSの活用事例	今田 道宏 大佐古昌和	統合制御システム開発本部 技術研究所
2015.6.8-10	日本計算工学会 第20回計算工学講演会	複数GPUを用いた気液分離装置のシミュレーション	泉田 康太 青木 尊之 小野寺直幸 杉原 健太 中島 聖 本郷 均 横畑 英明	東京工業大学 同上 同上 同上 エンジン性能開発部 同上 同上
2015.6.10	日本接着学会 次世代接着材料研究会 次世代接着材料研究会Part V 第5回例会	長期信頼性の面から見た車体接着の技術動向と課題	麻川 元康	技術研究所
2015.6.13-14	人間工学会 日本人間工学会 第56回大会講演集	インパネ加飾が車載情報機器操作中の視認行動に与える影響	吉田 誠	技術研究所
2015.6.15-16	品質工学会 第23回品質工学研究発表大会	加工後のワーク変形の抑制 めねじ加工条件の最適化 組付調整基準の明確化	中原 寛海 久保 祐貴 岡山 一洋	ソーリング製作部 ソーリング製作部 ソーリング製作部
2015.6.16-17	型技術協会 第29回 型技術者会議2015	SKYACTIVエンジンの軽量化及び低コスト化を実現する中子造型プロセスの追究 “魂動デザイン”の再現に向けたプレス加工における外観品質保証プロセスの構築 プラスチックバンパー金型における 離型シミュレーション技術 「魂動デザイン」を再現するプレス金型機械加工精度向上	三浦 直洋 山崎 太輔 鈴木 広之 西本 光毅	パワートレイン技術部 車体技術部 車両技術部 ソーリング製作部
2015.6.24	マスワークス合同会社 JMAAB Open Conference 2015 JMAAB	JMAABからの活動報告	今田 道宏	統合制御システム開発本部
2015.6.26	広島大学 女性研究活動委員会事務局 女性研究者研究活動支援事業（拠点型） 第1回女性研究者研究交流	自動車開発における計算科学シミュレーションの活用	大竹 恵子	技術研究所
2015.6.30	科学技術振興機構 SIP「革新的燃焼技術」	SKYACTIV技術について	廣瀬 一郎	パワートレイン開発本部
2015.7.1	計測自動制御学会 ロボティクス部会 講演会	感性に響く車づくり	西川 一男	技術研究所
2015.7.2	炭素材料学会 第53回炭素材料夏季セミナー	リチウムイオン電池の負極表面における電解液の分解の評価	佐山 瞭 後藤 和馬 仁科 勇太 石田 祐之 定井 麻子 三根生 晋	岡山大学 同上 同上 同上 技術研究所 同上

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2015.7.2	日本学術会議 総合工学委員会 安全工学シンポジウム2015	路面電車-自動車の安全走行支援システム プロトタイプの開発	平沢 隆之 須田 義大 中野 公彦 水間 毅 長谷川智紀 竹内 俊裕 栃岡 孝宏 山本 康典 岩下 洋平 藤元 秀樹 東 耕一 山崎 俊和 森井 紀裕	東京大学 同上 同上 交通安全環境研究所 同上 同上 統合制御システム開発本部 技術研究所 同上 広島電鉄(株) 同上 中電技術コンサルタント(株) 同上
2015.7.3	広島県環境県民局学事課 平成27年度 教育プログラム『グ ローバルプロジェクトマネジメン ト』	車載ソフトウェア開発の紹介	白 雪峰	統合制御システム開発本部
2015.7.4	日本認知心理学会 日本認知心理学会第13回大会	自動車のピラー形状が脳活動に与える影 響：fMRI研究	笹岡 貴史 岡本 宜久 岩瀬 耕二 吉田 敏宏 道田 奈々江 岸 篤秀 千葉 正基 町澤 まろ 金山 範明 牧田 快 山脇 成人 農沢 隆秀	広島大学大学院医歯薬保健学研究 院 技術研究所 同上 同上 同上 同上 同上 広島大学大学院医歯薬保健学研究 院 同上 同上 同上 技術研究所
2015.7.6	日本アルミニウム協会 第13回講演会 アルミ車両 技術と 情報	路面電車の衝突防止に向けたITS車車間 通信技術	須田 義大 平沢 隆之 中野 公彦 水間 毅 長谷川智紀 竹内 俊裕 栃岡 孝宏 山本 康典 岩下 洋平 藤元 秀樹 東 耕一 山崎 俊和 森井 紀裕	東京大学 同上 同上 交通安全環境研究所 同上 同上 統合制御システム開発本部 技術研究所 同上 広島電鉄(株) 同上 中電技術コンサルタント(株) 同上
2015.7.7	ひろしま産業振興機構 材料品質向上セミナー	材料品質向上セミナー	三根生 晋 山田 洋史	技術研究所 同上
2015.7.7	広島大学 工学部 応用化学概論	“応用化学”と“ものづくり”	甲斐 裕之	技術研究所
2015.7.10	EC研究会 生命経済研究所 第193回 EC研フォーラム	マツダが目指す自動車の未来像-全ての 人に「走る歓び」を永遠に提供し続ける クルマ作りと目指す社会	栃岡 孝宏	統合制御システム開発本部
2015.7.10	広島県環境県民局学事課 平成27年度 教育プログラム「グ ローバルプロジェクトマネジメン ト」	車載ソフトウェア開発の紹介	今田 道宏	統合制御システム開発本部
2015.7.15	日本計算工学会 不確かさのモデリング・シミュ レーション法に関する研究会第一 回	確率論モデルによるエンジンしゅう動面 の摩擦予測	宮内 勇馬	技術研究所
2015.7.17	日本バリュー・エンジニアリング 協会 VE阪神セミナー	SKYACTIVエンジン開発	廣瀬 一郎	パワートレイン開発本部
2015.7.17	広島工業大学 工学部機械システ ム工学科 キャリアデザイン I 社会人セミ ナー	働くことの意義、社会で求められる能力 について ～世界一のエンジニアを目指 そう～	沼 聖司	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
2015.7.22	呉工業高等専門学校 特別講演	SKYACTIVの誕生を支えたモデルベース開発	原田 靖裕	統合制御システム開発本部
2015.7.22	北海道大学 工学部機械知能工学科 機械工学特別講義	自動車のモデルベース開発	平松 繁喜	統合制御システム開発本部
2015.7.24	広島県情報産業協会 技術委員会セミナー	Mazdaが目指す「つながるクルマ」～ 「Mazda Connect」におけるクルマとICTの融合～	岡野 英紀	統合制御システム開発本部
2015.7.28-31	日本神経学会 第38回日本神経学大会	自動車の視界視認性が視覚的注意に与える影響：行動・fMRI研究	笹岡 貴史 岡本 宜久 岩瀬 耕二 吉田 敏宏 道田 奈々江 岸 篤秀 千葉 正基 町澤 まろ 金山 範明 牧田 快 山脇 成人 農沢 隆秀	広島大学大学院医歯薬保健学研究院 技術研究所 同上 同上 同上 同上 同上 広島大学大学院医歯薬保健学研究院 同上 同上 同上 技術研究所
2015.8.1	パワーエレクトロニクス学会 第209回定例研究会（招待講演）	環境自動車のパワーエレクトロニクス	瀬尾 宣英	技術研究所
2015.8.5	広島市立大学 H27年度 情報科学特別講義	モデルベース開発による制御開発プロセス効率化	矢野 康英	統合制御システム開発本部
		マツダにおける通信連携支援システムの取り組み	山本 康典	技術研究所
2015.8.19	ひろしま産業振興機構、もみじ銀行 第3回 経営者・管理者のための 「自動車部品製造業セミナー」	「自動車部品の材料品質向上のための分析技術」について	山田 洋史	技術研究所
2015.8.21	日本教育大学協会 全国技術教育部門・総会	マツダが目指すモノ造り革新と更なる進化	佐崎 幸司	パワートレイン技術部
2015.8.27	ひろしま産業振興機構 カーテック ロジー革新センター カーテクノロジー革新研究会講演会第1回	構造の最適化CAE技術について	天野 浩平	技術研究所
2015.8.27	電計貿易(上海)有限公司 Automotive Technology Days China 2015	マツダのクルマ作りと価値成長モビリティ実現への挑戦	古郡 了	技術研究所
2015.8.28	日本塗装技術協会 平成27年度 アンコール講演会	揮発性有機化合物（VOC）とCO ₂ を同時に削減する新塗装技術『アクアテック塗装』	篠田 雅史	車両技術部
2015.9.2-4	溶接学会 平成27年度秋季 全国大会	亜鉛めっき鋼板用低スラグ溶接プロセスの開発に向けた基礎検討 ー第2報：ガスシールドノズル形状と大気巻き込みに関する研究ー	田中 正顕 深堀 貢 小川 貴史	シャシー開発部 技術研究所 技術本部
2015.9.3-4	高輝度光科学研究センター、産業用専用ビームライン建設利用共同体、豊田中央研究所、兵庫県 第12回Spring-8産業利用報告会	自動車用材料開発における分子シミュレーション技術の活用	岡田 健太 大竹 恵子 平本 健治 宮本 嗣久 甲斐 裕之	技術研究所 同上 同上 同上 同上
		Liイオン電池正極材断面のX線マイクロビームによる充放電挙動解析	三根生 晋 住田 弘祐 山田 洋史 首藤 大器 竹田 晋吾 横山 和司	技術研究所 同上 同上 兵庫県立大学 放射光ナノテクセンター 同上 同上

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2015.9.3-4	電気化学会 九州支部 平成27年度「トークシャワー・イン・九州2015」	乗用車向け減速回生システム用キャパシタの開発	三好 誠治	技術研究所
2015.9.4	キャッツ(株) 第20回 ZIPCユーザーカンファレンス	SKYACTIV-G制御におけるモデルベース開発とトレーサビリティ	今田 道宏	統合制御システム開発本部
2015.9.9-11	日本分析化学会 日本分析化学会第64年会	熱分解GC/MSによるリチウムイオン電池電極被膜の成分分析	定井 麻子 永野 裕己 石津 嘉子 高山 修 三根 生晋 住田 弘祐 山田 洋史	技術研究所 同上 同上 同上 同上 同上 同上
2015.9.10-11	薄鋼板成形技術研究会 2015年度第2回研究討論会	“魂動デザイン”の再現に向けた プレス加工における外観品質保証プロセスの構築	西本 幸弘	車体技術部
		“人馬一体”の実現に向けた超ハイテン材適用の取り組み	空久保 宏	車体技術部
2015.9.12	プラスチック成形加工学会 発泡・超臨界流体利用成形加工専門委員会 平成27年度第2回発泡・超臨界流体利用成形加工技術専門委員会	自動車用高機能発泡樹脂の開発 ～吸音機能を有するナノフィブリル発泡構造体の実現～	宮本 嗣久	技術研究所
2015.9.13-16	日本機械学会 2015年度年次大会	多気筒HCCIエンジンの簡易吸排気モデルの構築	川澄 祐介 津村雄一郎 疋田 孝幸 水野 沙織	東京大学 パワートレイン技術開発部 同上 同上
		小排気量クリーンディーゼルエンジン SKYACTIV-D 1.5 の開発	志茂 大輔	エンジン性能開発部
		制振効果の向上を目的とした減衰材料と構造材料のマルチマテリアルトポロジー最適化	中野 陽平 竹澤 晃弘 中川 興也 北村 充	広島大学大学院 同上 技術研究所 広島大学大学院
2015.9.17	自動車技術会 技術交流会	魂動デザインを 最高のビジネス効率で実現する 樹脂金型造り	得平 吉輝	車両技術部
2015.9.18	広島大学 学術・社会産学連携室 メディカルエルゴノミシヤン基礎コース	人間工学と感性工学に基づく次世代自動車の開発	西川 一男	技術研究所
2015.9.25	高分子学会 2015年度 接着と塗装研究会講座 「自動車における接着と塗装の新展開」	車体接着の技術動向と課題、および市場劣化予測技術の開発	山本 研一 氷室 雄也 麻川 元康	技術研究所 同上 同上
2015.9.25	自動車技術会 関西支部 2015年 講演会	射出発泡成形技術のドアモジュールへの適用	高橋 知希	ボデー開発部
		新世代B カー商品群の空気抵抗低減技術とそれを実現するための空力開発のコンセプトおよびプロセス	中田 章博	車両実研部
2015.9.29	ひろしま産業振興機構 材料品質向上セミナー	材料品質向上セミナー	三根生 晋 山田 洋史	技術研究所 同上
2015.10.1-2	エムエスシーソフトウェア(株) MSC Nastran Technology & Solution Day 2015	デミオの軽量車体開発におけるNVH-CAE活用事例	三好 雄二	NVH性能開発部
2015.10.2-3	プラスチック成型加工学会 第23回秋季大会 (成形加工シンポジウム'15(福岡))	車体用CFRPエネルギー吸収構造体の温度異存性の考察	河村 力	技術研究所

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
		高強度発泡充填材フレームにおける接着剥離の予測技術開発	奥山 智仁 田中 力 本田 正徳 松岡 秀典 囊 裕貴 梶村 勇一 石亀 勝義	技術研究所 同上 同上 ボデー開発部 同上 衝突性能開発部 同上
2015.10.7	マスワークス合同会社 MathWorks Day in DENSO	SKYACTIV-G制御におけるモデルベース開発	今田 道宏	統合制御システム開発本部
2015.10.8	リードエグジビジョンジャパン 第3回関西高機能素材ワールド	マツダにおける先端材料開発の取組と今後の材料への期待	高見 明秀	技術研究所
2015.10.9	自動車技術会 中部支部 2015年度第4回技術講習会	新型ロードスター／守るために変えていく	山本 修弘	商品本部
2015.10.9	イータス(株) 車載制御開発シンポジウム	高度なシステム開発とそれを支えるモデルベース開発	原田 靖裕	統合制御システム開発本部
2015.10.10	自動車技術会 九州支部 2015年度九州支部学生自動車研究会総会・講演会	高圧縮比ガソリン燃焼技術	志々目宏二	パワートレイン技術開発部
2015.10.10-11	可視化情報学会 可視化情報全国講演会（京都2015）	ミニサック型燃料インジェクタにおける噴流微粒化メカニズムの解析	西尾 茂 西村奈央子 R. H. Pratama 宋 明良 和田 好隆 横畑 英明	神戸大学 同上 同上 同上 エンジン性能開発部 同上
2015.10.10-12	日本機械学会 第28回計算力学講演会	スーパーコンピュータKを用いた複数車種の車両構造同時設計最適化	大山 聖 小平 剛央 鋸持 寛正 立川 智章 渡辺 毅	宇宙航空研究開発機構 技術研究所 同上 宇宙航空研究開発機構 同上
2015.10.14-16	自動車技術会 2015年 秋季大会 学術講演会	新型1.5L低圧縮比クリーンディーゼルエンジンの開発（第4報） モデルに基づくブレ燃焼制御による過渡性能のロバスト性改善	角田 良枝 大西 毅 白橋 尚俊 高橋康太郎 金 尚奎 森永 真一 志茂 大輔	エンジン性能開発部 同上 同上 同上 同上 同上 同上
		新型1.5L低圧縮比クリーンディーゼルエンジンの開発（第5報） 少量多段噴射を可能にしたモデルベース噴射量制御の開発	白井 裕久 平林 千典 胡木 隆 三石 直哉 大磯 一生 森永 真一	エンジン性能開発部 同上 同上 同上 同上 同上
		超ハイテン材の破断に対する予測技術の研究(第5報)	麻 寧緒 高田 賢治 長坂 圭 徳永 孝行 西村 律 武田 力紀 岩井 隆浩 西 龍 小島 宏介 新居 直樹 坂本 匡史 池田光太郎 西浦 友子 社納真一郎 斉藤 啓 大宮 正毅	(株)JSOL (株)本田技術研究所 スズキ(株) 富士重工業(株) トヨタテクニカルイノベーション(株) 日産自動車(株) トヨタ車体(株) トヨタ自動車東日本(株) 車両開発本部 いすゞ自動車(株) 同上 ダイハツ工業(株) 伊藤忠テクノソリューションズ(株) 同上 (株)JSOL 慶應義塾大学

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
		ロードノイズ性能開発のためのタイヤモデル化技術の構築	村田 紘一朗 中野 伸一 木下 浩志 高橋 宗成 梶川 直子 海老澤弘道 須磨 達也	車両開発本部 同上 同上 NVH性能開発部 同上 (株)エステック 同上
		新型オープンカーの空力性能開発	大平 洋樹 岡本 哲 田中 松広	車両実研部 同上 同上
		Simulation Based Detection of Loudspeaker Induced Door Rattle	太田 亮平 中島 正典 浜田 康 Anneleen Van Gils Ivan Bosmans Christophe Coster Dominiek Sacré	シーメンス(株) 電子開発部 同上 シーメンス(株) 同上 同上 同上
2015.10.16	Mathworks Japan Matlab EXPO 2015	i-ELOOPのモデルベース開発	小谷 和也	電駆・PT制御部品開発部
2015.10.20	TU Automotive Japan 2015	コネクティッドカーの車載OSの役割とサイバーセキュリティへの対応を考える	山崎 雅史	統合制御システム開発本部
2015.10.23	アンシス・ジャパン(株) ANSYS Electronics Simulation Expo2015	モデルベース開発がめざすべきもの	原田 靖裕	統合制御システム開発本部
2015.10.27	ダッソー・システムズ(株) 2015 SIMULIA Community Conference Japan	TOSCAとInsightを用いた車体構造の軽量化検討、および最適化技術に対する期待	小平 剛央	技術研究所
2015.10.28	電気学会 センサ・マイクロマシン部門 第32回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム	質量分析器データと非負値行列因子分解法を用いた車室内臭の再現の基礎検討	市川 慧 中本 高道 山田 洋史	東京工業大学 同上 技術研究所
2015.10.30	GKNドライブラインジャパン(株) GKNパワートレインフォーラム	新世代4WDシステムの紹介	丸谷 哲史	ドライブトレイン開発部
2015.11.2-3	プラスチック成型加工学会 成形加工シンポジウム'15	自動車用ポリプロピレン発泡体の気泡構造が物性に及ぼす影響 第2報	宮本 嗣久 金子 満晴 小林めぐみ 大嶋 正裕	技術研究所 同上 同上 京都大学
2015.11.4	ひろしま医工連携イノベーション推進協議会 CAD/CAM/CAE 実践研修	自動車開発におけるCAE活用事例の紹介	花田 裕	車両開発本部
2015.11.5	中部産業連盟 自動車産業の針路2016	クリーンディーゼルエンジンの技術	志茂 大輔	エンジン性能開発部
2015.11.5	石油学会 第45回石油・石油化学討論会	人工光合成型光レドックス系を用いたエタノール生成反応	天尾 豊 首藤 菜穂 岩国 秀治	大阪市立大学 大分大学 技術研究所
2015.11.6	メッセナゴヤ実行委員会 メッセナゴヤ2015「次世代自動車フォーラム」	マツダ環境・安全戦略とSKYACTIVテクノロジー	仁井内 進	パワートレイン企画部
2015.11.7	日本機械学会 第93期 流体工学部門 講演会	水平長方形管における液膜の波の形成と液滴	田中 大地 横畑 英明 中村 和博 山本 亮	広島大学 エンジン性能開発部 同上 同上

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2015.11.9-10	応用物理学会 先進パワー半導体分科会 第2回講演会	4H-SiCショットキーバリアダイオードへのSiペルチェ素子の組み込み	古林 寛 黒木伸一郎 瀬尾 宣英 米盛 敬 種平 貴文	広島大学 同上 技術研究所 同上 同上
2015.11.11	日本高圧力学会 第56回高圧討論会	マツダの内燃機関進化構想について	山本 寿英	技術研究所
2015.11.11-13	電気化学会 電池技術委員会 第56回電池討論会	電気二重層キャパシタの高電圧作動化に向けた活性炭の細孔径の最適化に対する研究	森島千菜美 金 斗元 宇都 宮隆 吉 鉦植 中林 康治 宮脇 仁 尹 聖昊	九州大学 同上 技術研究所 九州大学 同上 同上 同上
2015.11.12	自動車技術会 シンポジウム (No.06-15) 「動力伝達系の最新技術 2015」	新型マツダロードスター専用GMTの紹介	延河 克明 川口 真一 濱野 正利 奥田 健司 山田 貴則	ドライブトレイン開発部 同上 同上 同上 同上
2015.11.14-15	システム制御情報学会, 計測自動制御学会, 日本機械学会 ほか 第58回 自動制御連合講演会	エンジンの制御システムと開発技術における現状と課題	小森 賢 今田 道宏	統合制御システム開発本部 同上
2015.11.14-15	日本化学会 中国四国支部 2015年日本化学会中国四国支部大会	リチウムイオンの電池の負極表面における電解液の分解の評価	佐山 瞭 後藤 和馬 仁科 勇太 石田 祐之 定井 麻子 三根生 晋	岡山大学 同上 同上 同上 技術研究所 同上
2015.11.15	日本機械学会 第23回機械材料・材料加工技術講演会	残存繊維長及びエラストマー添加がガラス繊維強化ポリプロピレンの衝撃特性に与える影響	森脇 健二 藤 和久 松田 裕之 小川 淳一 平本 健治 濱田 泰以	技術研究所 同上 同上 同上 同上 京都工芸繊維大学
2015.11.16	日本燃焼学会 第52回燃焼シンポジウム	自動車用三元触媒の白金族元素上でのNO, CO触媒反応の解析 (第2報)	石本 尚基 下栗 大右 王 艶雷 村上 浩 松本 有平 竹林 広行	広島大学 同上 同上 パワートレイン技術開発部 同上 同上
2015.11.18	名古屋国際見本市委員会 第5回次世代ものづくり基盤技術産業展 TECH Biz EXPO 2015	マツダのクリーンディーゼルエンジン SKYACTIV-D	寺沢 保幸	パワートレイン技術開発部
2015.11.18-20	計測自動制御学会 計測自動制御学会 システム・情報部門 学術講演会2015	モノ造りへ応用するための車体構造最適化システム的设计	小平 剛央 釦持 寛正 厚井 省吾 鐵本 雄一 木崎 勇 金本 俊介 大山 聖 渡辺 毅 立川 智章	技術研究所 同上 エンジニアリングシステム部 同上 衝突性能開発部 車両開発本部 宇宙航空研究開発機構 同上 東京理科大学
		インタラクティブ散布図行列可視化ツールiSPMの開発	立川 智章 大山 聖 渡辺 毅 小平 剛央 釦持 寛正 宮地 英夫	東京理科大学 宇宙航空研究開発機構 同上 技術研究所 同上 サイバーネット(株)
2015.11.19-20	日本イーエスアイ(株) PUCA2015 -ESI Users' Forum Japan-	“魂動デザイン”の再現に向けた プレス加工における外観品質保証プロセスの構築	松村 春樹	車体技術部

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2015.11.19-20	型技術協会 第21回 型技術ワークショップ 2015 in 群馬	バイオプラスチックの内装部品への応用 による提供価値の向上	一原 洋平 古川 智司 岩本 道尚	装備開発部 車両技術部 同上
		「魂動デザイン」再現に向けた、こだわりのモノづくり	佐々木忠義	ソーリング製作部
2015.11.24	(株)日経BP 日経Automotive 日経テクノロジーオンライン 車載電子システムの進化を支える 先進開発	モデルベース開発がめざすべきもの	原田 靖裕	統合制御システム開発本部
2015.11.24	北海道ITS推進フォーラム 地域ITS研究会	マツダにおけるITS/技術開発の取り組み	山本 康典	技術研究所
2015.11.26	Siemens PLM - Simulation & Test Performance Engineering Conference 2015	Simulation Based Detection of Loudspeaker Induced Door Rattle (ドアスピーカによるラトル音のシミュ レーション・ベースの検知手法)	中島 正典 浜田 康 Anneleen Van Gils Ivan Bosmans Christophe Coster Dominiek Sacré	電子開発部 同上 シーメンス(株) 同上 同上 同上
2015.11.26	(株)島津製作所 分析計測事業 部、(株)島津テクノリサーチ 第33回マイクロアナリシス研究 懇談会	EPMAの状態分析スペクトルのS/N比 の改善 およびSi系化合物の判別の検 討	片岡 良太 川上 愛子 谷岡 真一 山田 洋史	技術研究所 同上 同上 同上
2015.11.27	自動車技術会 シンポジウム (No.08-15) 「車両信頼性を担う疲労評価技術 の新展開」	車体構造における接合疲労試験法のリ ベット接合への応用	河井 範之 名倉 哲志 石田 公一 江口 達也 横手 芳樹 坂井 英明 古迫 誠司 今泉 博司 湯浅 卓也 中丸 敏明	車両実研部 (株)本田技術研究所 富士重工業(株) 日産自動車(株) 日野自動車(株) 日産車体(株) 新日鐵住金(株) ポップリベット・ファスター(株) 日産自動車(株) 同上
		車体構造における接着接合部の疲労強度 およびその影響調査	進 祐一郎 日下部雅幸 曹 敏 赤松慶志朗 清水 寛文 小林 敏雄 山本 研一	トヨタ自動車(株) 同上 トヨタ車体(株) 同上 トヨタ自動車東日本(株) サンスター技研(株) 技術研究所
2015.11.28	日本機械学会 日本機械学会講演会 ものづくり 最前線	クリーンディーゼル開発最前線	牛谷 真樹	エンジン性能開発部
2015.11.28	日本機械学会 日本機械学会中国四国支部シニア 会	混合潤滑モデルによるエンジンしゅう動 部の摩擦摩耗予測	宮内 勇馬	技術研究所
2015.12.1	電気学会 マグネティックス技術 委員会 電気学会 マグネティックス研究 会	磁区観察によるNd-Fe-B系焼結磁石の熱 減磁解析	池田壮一郎 竹澤 昌晃 森本 祐治 梶嶋 寿行	九州工業大学 同上 同上 技術研究所
2015.12.2	自動車技術会 ガソリン機関部門委員会企画シン ポジウム (No.10-15)	マツダの内燃機関進化	山本 寿英	技術研究所
2015.12.2	東京大学 医療社会システム工学 寄付講座・(株)ベリサーブ共同シ ンポジウム～品質イノベーション の追求～	SKYACTIV-G制御におけるモデルベー ス開発	今田 道宏	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
2015.12.2	炭素材料学会 第42回炭素材料学会年会	電気二重層キャパシタの高電圧作動時における活性炭の細孔径と静電容量の相関性	森島千菜美 金斗元 宇都宮隆 吉鉉植 中林康治 宮脇仁 尹聖昊	九州大学 同上 技術研究所 九州大学 同上 同上 同上
2015.12.2,4	広島県発明協会 平成27年度特許等取得活用支援事業	著作権について	池上 正文	知的財産部
2015.12.3-4	ITS Japan 第13回ITSシンポジウム2015	車間通信のLCR/AFD特性モデルの構築	強矢 昌宏 山田 秀行 タンザカン 荒木 純道	技術研究所 同上 東京工業大学 同上
2015.12.4	デジタルプロセス(株) オートモーティブデジタルプロセスセミナー2015	高度なシステム開発とそれを支えるモデルベース開発	原田 靖裕	統合制御システム開発本部
2015.12.4	日本航空宇宙学会 西部支部 西部支部講演会	炭化水素の分子構造が化学的着火遅れに与える影響	山田 眞平 崎間 俊明 下栗 大右 乃生 芳尚 斉藤 史彦	広島大学 同上 同上 技術研究所 同上
2015.12.4	日本材料学会 第52回X線材料強度に関する討論会	マツダにおける非破壊試験・分析手法の活用	常友 敦	技術研究所
2015.12.4	計測自動制御学会 中国支部 平成27年度 チューリアル講演会	最新の脳科学に基づく感性工学の新展開	農沢 隆秀 西川 一男	技術研究所 同上
2015.12.7	先端材料技術協会 14th Japan International SAMPE Symposium & Exhibition	MAZDA'S SKYACTIV TECHNOLOGY AND THE EXPANDING POSSIBILITIES OF ADOPTING COMPOSITE MATERIALS FOR FUTURE CARS	藤 和久	技術研究所
2015.12.7	日本鑄造工学会 中国四国支部 支部研究発表会	Al-Mn-X合金の組織・引張特性と合金設計	坂本 晋 崔 龍範 許 哲峰 杉尾健次郎 松木 一弘 小田 信行	広島大学 同上 同上 同上 同上 技術研究所
2015.12.8-10	自動車技術会 第26回内燃機関シンポジウム	LESモデルと壁モデルによるディーゼル燃焼と微粒子生成過程の予測	周 蓓霓 堀越 政寛 喜久里 陽 草鹿 仁 大聖 泰弘 佐藤 圭峰 藤本 英史	早稲田大学 同上 同上 同上 同上 技術研究所 同上
		多成分燃料に対応できる簡略化反応スキームを用いたHCCI燃焼制御の検討	養祖 隆 山川 正尚 西口 嵩人 草鹿 仁	パワートレイン技術開発部 同上 早稲田大学 同上
		筒内の混合気の不均質性を考慮した自己着火燃焼モデル	上杉 康登 山崎 由大 金子 成彦 疋田 孝幸 津村雄一郎 水野 沙織	東京大学 同上 同上 パワートレイン技術開発部 同上 同上
		ピストンリング合口部から燃焼室内へのオイル上がり現象の可視化	松本 貢典 中村 純平 大澤 克幸 栗栖 徹	鳥取大学 同上 同上 エンジン性能開発部
		エンジン内の非定常流動場が壁面境界層の形成に及ぼす影響	原田 雄司	技術研究所

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
		2領域簡易燃焼モデルを用いたディーゼル燃焼の熱動定解析	加藤 雄大 金 尚奎 志茂 大輔	エンジン性能開発部 同上 同上
		バイオディーゼル機関の着火特性に及ぼす噴射時期の影響	森本 隆資 田端 道彦 乃生 芳尚 斉藤 史彦	近畿大学 同上 技術研究所 同上
2015.12.9	自動車工業会 小型車燃費分科会 COMPAS勉強会	CO2換算ツールの確認結果	廣瀬 倫之	走行・環境性能開発部
2015.12.11	科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業CREST 自動車業界におけるIT・数理工学技術の活用	走る欲びを実現するモデルベース開発と数理的な課題	松崎 覚	統合制御システム開発本部
2015.12.11	エムエスシーソフトウェア(株) Adams Technology & Solution Day 2015	新型ロードスターのモデルベース開発におけるAdams活用事例の紹介	児玉 真吾	エンジン性能開発部
2015.12.13	日本人間工学会 中国・四国支部 第48回日本人間工学会中国・四国支部大会	インパネ加飾が車載情報機器操作中の視認行動に与える影響	貝野 彰	技術研究所
		自動車の内装色が運転時の外界認知性に与える影響	米澤 泰延	技術研究所
2015.12.14-16	計測自動制御学会 システムインテグレーション部門 第16回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会	筋力推定に基づくステアリング操舵における力知覚量設計手法の提案	岸下 優介 小池 祐輝 竹村 和紘 山田 直樹 新部 忠幸 原 利宏 岸 篤秀 西川 一男 農沢 隆秀 辻 敏夫 栗田 雄一	広島大学 同上 技術研究所 同上 同上 同上 同上 同上 同上 同上 広島大学 同上
2015.12.15	自動車技術会 振動騒音部門委員会シンポジウム 自動車の振動騒音にもとめられるもの	新型1.5Lクリーンディーゼルエンジンの燃焼加振力及び構造伝達特性の最適化によるエンジン騒音・振動の低減	白橋 尚俊 神田 靖典 長門 清則 松原 武史	エンジン性能開発部 同上 同上 同上
2015.12.15	日本流体力学会	エンジン排気を模した曲り管路内脈動流の計測と数値解析	大木 純一 横畑 英明 中村 和博 山本 亮 柳田 春菜	広島大学 エンジン性能開発部 同上 同上 同上
2015.12.18	日本液体微粒化学会 (ILASS-Japan), 日本エネルギー学会 第24回微粒化シンポジウム	平板に衝突するガソリン噴霧の特性	小立 俊己 西田 恵哉 尾形 陽一 張 武 藤川 竜也	広島大学 同上 同上 パワートレイン技術開発部 同上
2015.12.18	オートモーティブ・コンポジット研究会 第16回講演会	マツダの「SKYACTIV TECHNOLOGY」と今後の自動車における複合材料採用拡大の可能性について	小川 淳一 藤 和久	技術研究所 同上

3. 社外寄稿

*所属は原則発表時点を示す

寄稿誌名	巻・号・ページ	題目	発表者	所属
自動車技術				
	Vol.69, No.2(2015), pp.75-80	ISO /TC204 /WG 14 (ITS 走行制御システム) の国際標準化活動における日本の貢献	三角 正法	技術研究所
	Vol.69, No.6(2015), pp.4-5	走る歓びと環境性能を両立する新型オートマチックトランスミッション	土井 淳一 丸末 敏久 鎌田 真也 坂 時存 三谷 明弘	ドライブトレイン開発部 同上 同上 同上 統合制御システム開発本部
	Vol.69, No.6(2015), pp.108-117	生産加工部門委員会ワーキンググループ活動報告 2015年のクルマづくり ー日本が世界をリードするためにー	河野 英樹 山根 慎也 新井 孝拓 湯口 友人 岩崎 進一 柳井 寛 岡田 裕介 久連山 剛 佐野 健 高本 亮 小林 崇 内海 図 岩崎 康弘 鈴木 貴 大島 佑太郎	車体技術部 いすゞ自動車(株) スズキ(株) ダイハツ工業(株) トヨタ自動車(株) 日産自動車(株) 日野自動車(株) 同上 富士重工業(株) 同上 ホンダエンジニアリング(株) 本田技研工業(株) 三菱自動車(株) ヤマハ発動機(株) UDトラックス(株)
	Vol.69, No.7(2015), pp.38-43	ドライバの骨格筋活動に基づく車線維持操舵支援制御	高橋 英輝 菅野 崇 岡崎 俊実 山本 康典	技術研究所 同上 同上 同上
	Vol.69, No.9(2015), pp.62-69	小排気量クリーンディーゼルエンジン SKYACTIV-D 1.5 の開発	志茂 大輔 金 尚奎 大西 毅 森永 真一	エンジン性能開発部 同上 同上 同上
	Vol.69, No.10(2015), pp.22-27	SKYACTIVエンジンの開発を支えるトライボロジー解析技術	木村 昇平 白井 裕久 菅近 直範	エンジン性能開発部 同上 同上
	Vol.69, No.12(2015), pp.54-57	ICTを活用した次世代ITSの開発	山本 康典	技術研究所
	Vol.69, No.12(2015), pp.108	学生フォーミュラをたたかい続けるにあたっての動機づけ	藤井 拓磨	パワートレイン技術開発部
自動車技術会関西支部ニュース				
	第46号 (2015), pp.1-2	パネル等価放射パワー発生要因の分析技術の開発	新保晋太郎	車両開発本部
	第47号 (2015), pp.6-7	射出発泡成形技術のドアモジュールへの適用	高橋 知希	ボデー開発部
日本機械学会論文集				
	Vol.81(2015), No.822 p.14-00463	主観的力知覚空間におけるステアリングホイール操作特性の感性評価と設計への応用	竹村 和紘 山田 直樹 新部 忠幸 岸 篤秀 西川 一男 農沢 隆秀 栗田 雄一 辻 敏夫	技術研究所 同上 同上 同上 同上 同上 広島大学 同上
	Vol.81(2015), No.825 p.14-00658	完全陰解法に基づく損傷分割背応力弾塑性モデルの縮約積分法	山王丸 将吾 岡澤 重信 田中 智行	エンジン性能開発部 広島大学 同上
日本機械学会誌				
	2015.10 Vol.118 No.1163, pp.632-635	マツダの「モノ造り革新」とビッグデータ活用による更なる進化	佐崎 幸司 林 一哉	パワートレイン技術部 同上
	2015.12 Vol.118 No.1165, pp.714-717	楽しいクルマ／守るために変えていく	山本 修弘	商品本部

寄稿誌名	巻・号・ページ	題目	発表者	所属
電気学会論文誌A Vol.135, No.12		電気二重層キャパシタの劣化メカニズム	吉玉 拓 田島 大輔 迫田 達也 林 則行 湯原 将光 宇都宮 隆	宮崎大学 同上 同上 同上 電駆・PT制御部品開発部 技術研究所
型技術 2015 Vol.30, No.7, pp.054-055		“魂動デザイン”の再現に向けたプレス加工における外観品質保証プロセスの構築	山崎 太輔 西村 良治 河野 雄志 岡田 又治	車体技術部 同上 同上 同上
型技術者会議2015 講演論文集 pp.60-61		「魂動デザイン」を再現するプレス金型機械加工精度向上	西本 光毅 田中 貞夫 井筒 幸雄 中原 寛海	ツーリング製作部 同上 同上 同上
科学・技術研究 Vol.4, No.1, P21-26		複合材料の熔融粘度と混練スクリュウが炭素長繊維強化ポリプロピレン射出成形品の繊維長及び機械的強度に及ぼす影響	藤 和久 小川 淳一 松田 祐之 小林めぐみ 森脇 健二 平本 健治 金 成彦 山田 浩明 王 存涛 濱田 泰以	技術研究所 同上 同上 同上 同上 同上 ダイキョーニシカワ(株) 同上 京都工芸繊維大学 同上
ISO/TC204 国際標準化活動に関する専門家会議		自動走行システムに関する標準化	三角 正法	技術研究所
生産研究 Vol.67, No.2, pp.177-182		自動車と路面電車との間での車車間通信型ASVの導入効果評価 ～世界初の路面電車-自動車間通信型ASVデモ～	平沢 隆之 渡辺 翔 須田 義大 吉田 秀範 中野 公彦 水間 毅 長谷川智紀 竹内 俊裕 栃岡 孝宏 山本 康典 岩下 洋平 藤元 秀樹 東 耕一	東京大学 同上 同上 同上 同上 交通安全環境研究所 同上 同上 技術研究所 同上 同上 広島電鉄(株) 同上
石油学会 ペトロテック vol.38, No.2, pp.125-130 vol.38, No.3, pp.67-72		ディーゼル排ガス処理触媒の最新動向 ガソリン排ガス処理触媒	原田浩一郎 高見 明秀	技術研究所 技術研究所
月刊誌 Material Stage Vol.15, No.6		貴金属シングルナノ触媒の微細構造設計による自動車触媒のレアメタル使用料低減	岩国 秀治	技術研究所
プラスチック成形加工学会 成形加工 Vol.27, No.10, pp.434-439		ガラス繊維強化ポリプロピレンの界面特性評価方法に関する研究	藤 和久 平本 健治 松田 祐之 小川 淳一 森脇 健二 濱田 泰以	技術研究所 同上 同上 同上 同上 京都工芸繊維大学

寄稿誌名	巻・号・ページ	題目	発表者	所属
人間生活工学 Vol.16, No.1, pp.27-30		自動車ペダル操作フィーリングの向上を目指して	西川 一男 農沢 隆秀 辻 敏夫	技術研究所 同上 広島大学
みんなに役立っているコンピュータシミュレーション 第5号, pp.28-29		複数の車体構造の同時設計探査 ー大規模並列計算と多数目的進化計算アルゴリズムを用いた複数車種同時最適化手法の開発ー	小平 剛央	技術研究所
計算工学ナビ 解析事例データベース (WEBコンテンツ)		複数の車体構造の同時設計探査	大山 聖 小平 剛央	宇宙航空研究開発機構 技術研究所
革新的燃焼技術による高効率内燃機関開発最前線 NTS出版社		SKYACTIV-G テクノロジー	山川 正尚	パワートレイン技術開発部
知財研フォーラム Vol.103, 2015Autumn, pp4-9		ブランド構築における知的財産部門の役割について	安藤 誠一	知的財産部
マーケットホライズン 2015年3号, pp.17-18		モノ造り革新によるSKYACTIVエンジンの実現と、ビッグデータ活用による更なるお客様価値追求	佐崎 幸司	PT技術部エンジン技術Gr
IEEE Transactions on Haptics Vol.8, No.1, pp.8-19		Analysis of Operational Comfort in Manual Tasks Using Human Force Manipulability Measure	田中 良幸 西川 一男 山田 直樹 辻 敏夫	長崎大学 技術研究所 同上 広島大学
Mechanical Engineering Letters Vol.1-15-00389		Stochastic homogenization analysis of FIB-SEM image-based hierarchical model of sprayed porous ZrO2	宮内 勇馬 高野 直樹 Pin Weng	技術研究所 慶應義塾大学 同上
Applied Catalysis B: Environmental Vol.180, pp.403-407		Ethanol synthesis based on the photoredox system consisting of photosensitizer and dehydrogenases	天尾 豊 首藤 菜穂 岩国 秀治	大阪市立大学 大分大学 技術研究所
Materials Transaction Vol.56, No.10, pp.1675-1682		Compositional optimization of Al-Mn-X alloys and, their tensile and corrosion properties	松木 一弘 山村 信治 許 哲峰 崔 龍範 杉尾健次郎 佐々木 元 小田 信行	広島大学 同上 同上 同上 同上 同上 技術研究所
Experimental Thermal and Fluid Science Vol.68, November (2015) , pp.68-81		Ultrafast X-ray Study of Multi-hole GDI Injector Sprays: Effects of Nozzle Hole Length on Number on Initial Spray Formation	文 石洙 佐藤 圭峰 横畑 英明 和田 好隆	産業技術総合研究所 エンジン性能開発部 同上 同上
Romax Technology Case Studies (HP) https://www.romaxtech.com/downloads/case-studies/mazda/		Mazda Case Study (RomaxDESIGNER software)	宮本 崇史	Romax Technology Ltd. エンジン性能開発部
Electrochimica Acta j.electacta.2015.11.056 2015.12.12オンライン公開		Influences of Residual Water in High Specific Surface Area Carbon on the Capacitor Performances in an Organic Electrolyte Solution	森田 昌行 野口 優也 鴫田 真広 吉本 信子 藤井 健太 宇都宮 隆	山口大学 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
The 7th International Conference on Neural Computation Theory and Applications 2015		Pedestrian Acton Prediction using Static Image Feature	西田 健次 小林 匠 山崎 慎也 岩本 太郎	産業総合研究所 同上 技術研究所 同上
Progettare	Jun.15	Low weight with the right software	小平 剛央	技術研究所

編 集 委 員 会

委員長	本橋 真之	商品戦略本部 技術企画部
編集委員	温品 一雄	商品戦略本部 技術企画部
	田坂 寿康	商品戦略本部 技術企画部
	住田 和哉	商品本部
	山口 享	デザイン本部 デザイン開発推進部
	河口 健二	車両開発本部 衝突性能開発部
	沼元 正樹	車両開発本部 電子開発部
	谷田 芳夫	パワートレイン開発本部 パワートレイン技術開発部
	松田 祐之	技術研究所
	杉山 裕基	技術本部 生産企画部
	植月真一郎	広報本部 グローバル広報企画部
	柿沢 修成	広報本部 グローバル広報企画部
編集幹事	大森 正志	商品戦略本部 技術企画部

マツダ技報 第33号

発行 2016年5月
発行人 藤原 清志
編集人 本橋 真之
事務局 大森 正志
発行所 マツダ株式会社
商品戦略本部 技術企画部
〒730-8670
広島県安芸郡府中町新地3番1号
電話 082 (287) 4106

Mazda Technical Review No.33

May 2016
Publisher Kiyoshi Fujiwara
Editor Masayuki Motohashi
Bureau Masashi Ohmori
Publishing office Technology Planning Dept.
Product Strategy Div.
Mazda Motor Corporation
3-1 Shinchu, Fuchu-cho Akigun,
Hiroshima 730-8670, Japan

©2016 マツダ株式会社 (禁無断転載)

ISSN 2186-3490