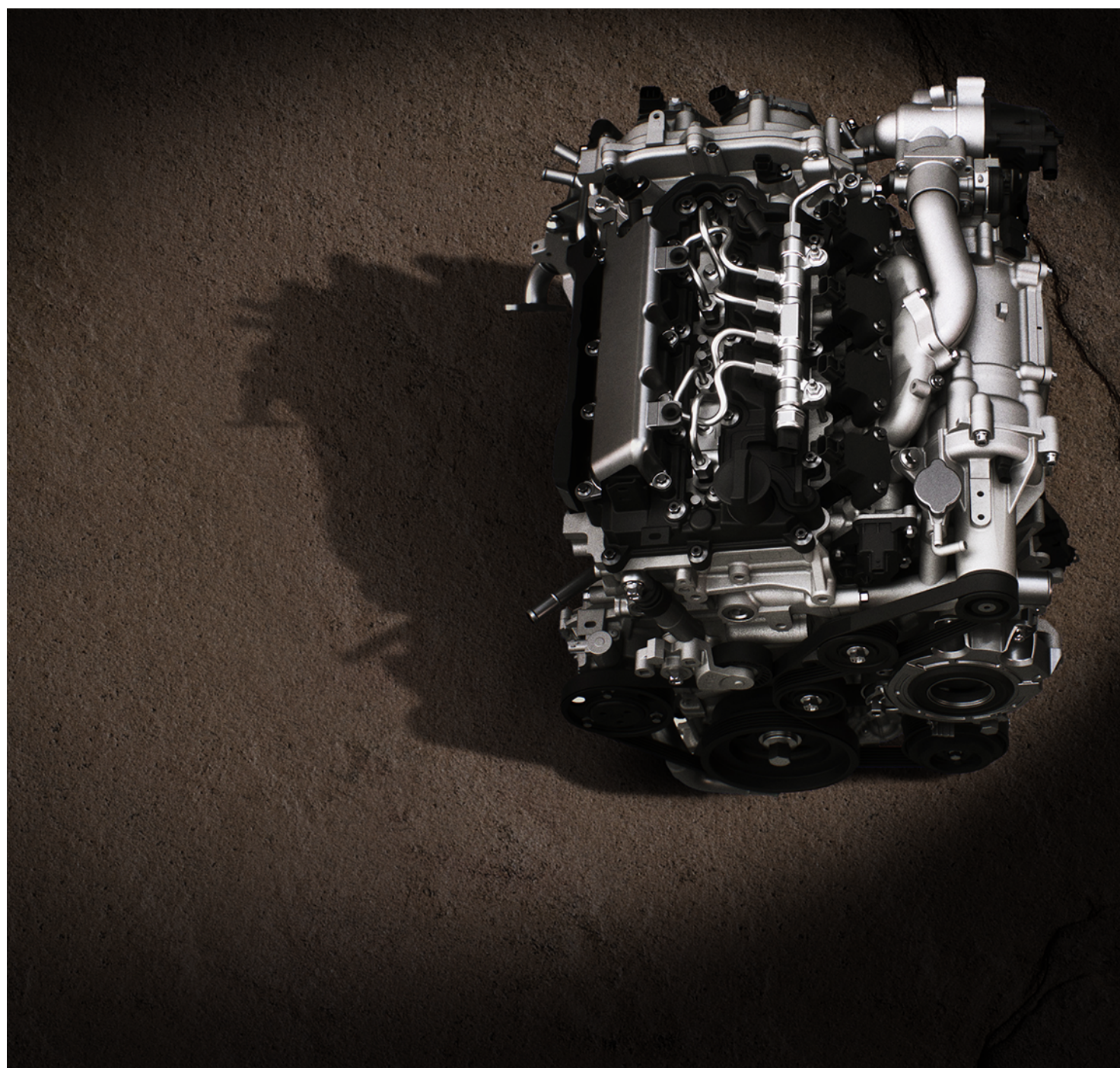


MAZDA TECHNICAL REVIEW

マツダ技報 2018 No.35



マツダ技報

Mazda Technical Review

2018 No. **35**

マツダ技報 第35号 (2018)

目次

巻頭言	工藤秀俊	1
1. サステイナブル “Zoom-Zoom” 宣言2030	本橋真之, 神八俊夫	3
2. 高熱効率燃焼の開発に適用する筒内壁温予測技術	山本 亮, 横畑英明, 角田浩行 丸井堅太郎, 和田栄治, 寿美眞治	9
3. SKYACTIV-G 2.5 気筒休止システムのNVH対応技術	濱野健太, 田中和宏, 陳 宇 土路生修	15
4. 次世代商品群の空力・空力騒音性能開発	岡本 哲, 村上健太, 大平洋樹 伊川雄希, 西田周平, 李 曄	21
5. 次世代足廻り部品向け防錆技術開発	田中正顕, 家永篤志, 浅田照朗 落岩克哉, 赤木宏行, 重永 勉 深堀 貢	26
6. 新型CX-8の紹介	松岡英樹, 佐々木克明, 諫山慎一 栗原洋治, 松原敏雄	32
7. 新型CX-8の軽量・高剛性ボディーシェル	高橋礼倫, 檜原隆志	40
8. 理想のシート構造設計に向けた人体研究	泉山朋大, 西田周泰, 朝日龍介 山縣大樹, 岩永秀幸, 大木順司 澤井 亮, 虫谷泰典, 杉本 繁 上野正樹	45
9. 衝突時の燃料揺動評価技術の構築と開発への適用	山内一矢, 嘉村浩二, 花田 裕 小島宏介	51
10. マツダコネクトの新機能開発	松本成司, 久保崎淳一, 佐藤陽平 水津浩司	56
11. HILSを活用した電装品評価システムの技術構築	岡田英之, 橋高德昭, 谷口雅也	61
12. 新型SKYACTIV-D 2.2におけるノック音を中心としたNVの更なる進化技術	森 恒寛, 白橋尚俊, 松原武史 長門清則, 平田耕一, 奥田良直	66
13. SKYACTIV-D用NO _x 後処理システムの開発	中野洋平, 上杉康範, 荒木崇至 勝田真斗, 藤井皓平, 佐藤義志	72
14. ロードスター専用新開発SKYACTIV-G 2.0技術紹介	村中宏彰, 迫川茂博, 志村直紀 朝倉浩之, 鈴木陽平, 小池和哉	78
15. エンジン筒内流動場を考慮した新たな伝熱モデルの開発	内田健司, 原田雄司, 佐藤圭峰 田中達也, 朱 前進, 藤本英史 山下洋幸	84

16. 車両防錆品質の造り込みと管理プロセスを革新する 塗膜耐食性短期評価技術の実用化	浅田照朗, 重永 勉	90
17. アルミニウム/CFRPの異材点接合技術	西口勝也, 田中耕二郎, 森田泰博 杉本幸弘	95
18. EMシステム制御モデル化のための触媒浄化メカニズムの解明	國府田由紀, 住田弘祐, 兒玉 潤 村上 浩, 竹林広行	101
19. 「魂動デザイン」実現に向けたプレス成形安定化の技術開発	長澄徹侍, 安楽健次, 中山光一	106
20. 薄肉ダイカストの事前検証技術開発	岡田又治, 浜口照巳, 坪根健児 竹村幸司, 亀井克則, 米澤英樹 菅谷 智, 河野一郎, 達谷正勝	112
社外への発表論文一覧表		120

Mazda Technical Review No.35

CONTENTS

Foreword

<i>(H. Kudou)</i>	1
1. "Sustainable Zoom-Zoom 2030" <i>(M. Motohashi, T. Kamihachi)</i>	3
2. Simulation Technique of Cylinder Wall Temperature to Apply for High Thermal Efficiency Combustion Development <i>(R. Yamamoto, H. Yokohata, H. Tsunoda, K. Marui, E. Wada, S. Sumi)</i>	9
3. Vehicle NVH Performance Technology for Cylinder Deactivation of SKYACTIV-G 2.5 <i>(K. Hamano, K. Tanaka, Yu Chen, O. Torobu)</i>	15
4. Aerodynamic and Aerodynamic Noise Performance Developments for Next Generation Vehicles <i>(S. Okamoto, K. Murakami, H. Ohira, Y. Ikawa, S. Nishida, Ye Li)</i>	21
5. Development of New Anti-corrosion Process for Suspension Parts <i>(M. Tanaka, A. Ienaga, T. Asada, K. Ochiwa, H. Akaki, T. Shigenaga, M. Fukahori)</i>	26
6. Introduction of All-New CX-8 <i>(H. Matsuoka, K. Sasaki, S. Isayama, Y. Kurihara, T. Matsubara)</i>	32
7. Light-Weight · High-Rigidity Body Structure of New CX-8 <i>(Y. Takahashi, T. Narahara)</i>	40
8. Study of Human Skeleton to Design Ideal Structure of Automotive Seat <i>(T. Izumiyama, N. Nishida, R. Asahi, H. Yamagata, H. Iwanaga, J. Ohgi, R. Sawai, Y. Mushitani, S. Sugimoto, M. Ueno)</i>	45
9. Establishment of Fuel Sloshing Evaluation Technique Upon Crash and its Application to the Development <i>(K. Yamauchi, K. Yoshimura, Y. Hanada, K. Kojima)</i>	51
10. New Feature Development for Mazda Connect <i>(S. Matsumoto, J. Kubosaki, Y. Sato, K. Suizu)</i>	56
11. Development of Electrical Component Evaluation System Using HILS <i>(H. Okada, N. Kittaka, M. Taniguchi)</i>	61
12. Advanced Technologies for Noise-Vibration on New SKYACTIV-D 2.2 <i>(T. Mori, N. Shirahashi, T. Matsubara, K. Nagato, K. Hirata, Y. Okuda)</i>	66
13. Development of NO _x Aftertreatment System for SKYACTIV-D <i>(Y. Nakano, Y. Uesugi, T. Araki, M. Katsuta, K. Fujii, Y. Sato)</i>	72
14. Newly Developed Gasoline Engine "SKYACTIV-G 2.0" for Roadster <i>(H. Muranaka, S. Sakogawa, N. Shimura, H. Asakura, Y. Suzuki, K. Koike)</i>	78
15. Formulation of New Wall Heat Transfer Model in Consideration of In-cylinder Flow of Internal Combustion Engines <i>(K. Uchida, Y. Harada, K. Sato, T. Tanaka, Zhu Qianjin, H. Fujimoto, H. Yamashita)</i>	84

16. Accelerated Evaluation Technique for Corrosion Resistance of Painted Parts to Facilitate Innovation of Technological Development and Quality Management Process <i>(T. Asada, T. Shigenaga)</i>	90
17. Dissimilar Material Spot Joining Technique of Aluminum and CFRP <i>(K. Nishiguchi, K. Tanaka, Y. Morita, Y. Sugimoto)</i>	95
18. Clarification of Catalyst Reaction Mechanism for Modeling of Emission System Control <i>(Y. Koda, H. Sumida, H. Kodama, H. Murakami, H. Takebayashi)</i>	101
19. Technical Development of Press-Forming Stabilization for “KODO” Design Realization <i>(T. Nagazumi, K. Anraku, K. Nakayama, M. Okada, T. Hamaguchi, K. Tsubone)</i>	106
20. Development of Computer Aided Engineering Technology for Thin Wall Die-Casting <i>(K. Takemura, K. Kamei, H. Yonezawa, S. Sugaya, I. Kouno, M. Tatsutani)</i>	112

List of Reports Published in 2018	120
--	-----

巻頭言

次の100年に向けて...

Towards next 100 years...



執行役員

工藤 秀俊
Hidetoshi Kudou

マツダは、2020年に創業100周年を迎える。お客さまとの信頼関係を強め、従業員や地域に継続的に貢献するためには、永続することこそが企業の使命とも言えるが、100年続く企業は全体の3%にも満たない。一方、日本における100年企業は3万社を超え、200年以上続く世界の長寿企業の約半分は日本に存在するという。その理由は、内乱が少なく平和な地域が多かったことやM&Aなどの欧米とのビジネス慣習の違いなどがあげられるが、日本の長寿企業にはいくつかの共通点がある。

それは、①企業理念を愚直に遵守していること、②伝統を守りつつも時代に合わせて変化していることである。以降、この2つの観点からマツダの現状と今後の抱負を述べたい。

① 企業理念の遵守

長寿企業の多くは、社会や地域貢献を柱とする企業理念を持ち、一貫性ある事業を通じて顧客からの信用を得て、不景気の時にこそ選ばれているという。これは、“工業で世界に貢献する”ことを目指した、我々の創業者の想いと同じであり、現在のマツダのコーポレートビジョンが目指すところとも一致している。そして昨年、マツダはコーポレートビジョンに沿った技術開発の長期ビジョン『サステイナブル“Zoom-Zoom”宣言 2030』を公表し、我々がクルマを造る目的・意義を改めて社内外に示した。“私たちマツダは、美しい地球と心豊かな人・社会の実現を使命と捉え、クルマの持つ価値により、人の心を元気にすることを追究し続けます”というメッセージには、生き様や真理の追究を精神の修練と捉える“道”の精神や、他者のために思いやりを持ち情熱を傾けることに生き甲斐を感じる“和”の精神が息づいており、それを走る歓びを中核に据えたクルマの価値で実現しようとする様はマツダらしくもありかつ日本的である。このような理念・哲学を持っていることをとても誇りに思う。

そのコーポレートビジョンはリーマンショック直後の2009年、その後に訪れるであろう未曾有の危機に耐えて生きのびるために、全社員の想いを揃えるべく改定に着手したものであった。そして、皆の想いを紡いだビジョンを額に入れて飾っておくのではなく、社員一人ひとりの行動の質を上げるための活動がブランド価値経営に他ならない。だからこそ開発の我々は、『人生の輝き』を提供するために『人間中心』でクルマを研究し、『地球や社会と永続的な共存』に向けた本質な課題解決のために理想の燃焼に向けた挑戦を続けているさまは、我々の強みになりつつあることを共通認識しておきたい。

今後も、創業時代から続く大義ある企業理念・開発哲学に基づき迷うことなく技術開発を行うしくみ作りを通して企業風土にまで高めることで、独自性と信用で選ばれる企業を目指していきたい。

② 伝統と変化

長寿企業の他方の特徴は、伝統を守りつつ時代に応じた変化をすることで、時代や世代を超えて選ばれ続けている点である。我々が守るべき伝統は、前述の理念に基づく、しなやかな人馬一体感のあるエフォートレスなドライビングフィール、理想燃焼を追求する超高効率な内燃機関、そして見る人を惹き

つけてやまない日本の美意識を体現するデザインなどの顧客提供価値に他ならない。

一方、自動化や電動化の台頭により 100 年に一度の変革期と言われている今、従来提供価値の正常進化に留まっているだけでは生き残れないが、他社を模倣するような変化に留まってはマツダの存在意義はなくなる。つまり、永続するためには、トレードオフ関係にある伝統と変化のブレークスルーが必要となる。したがって、上記のような最新技術を導入する目的・意義を真剣に考え抜き、企業理念・哲学に照らし合わせた上で取捨選択してブランドバリューを定義すること、言い替えれば、技術や世の中の変化を捉まえてマツダらしさを体現することこそが時代に合わせた変化の必要条件だと考える。

例えば、人間の能力の最大化を基本とし、ドライバーに異常が生じた場合にのみ人命保護を目的とする自動走行・停車を実行する自動運転コンセプト“Mazda Co-Pilot Concept”は、常に人とクルマがひとつでありながら状況に応じて主従の関係を变える究極の人馬一体性能であり、高齢化社会においても安心・安全な運転を提供できるクルマだと考える。また理想燃焼の実現による軽量・小型・安価でシステム効率に優れる電動化技術の導入や、EV の課題解決のためのレンジエクステンダーとしてのロータリーエンジンの復活などは、社会変化と最新技術を通してマツダらしい価値を提供する技術戦略ではないだろうか。

そしてこれらの戦略は、いずれも手戻りのないビルディング・ブロックの構造を持ち、結果的に濃淡を持ちながらもマルチソリューションにつながっていることがわかる。しかし、純粋な科学分野とは異なり、各社／各人の行動が次の行動や結果に影響を及ぼす、自動車業界を取り巻く社会科学的事象の将来を予測することは不可能であることを考えると、さらなる潜在的な変化に対する適応力が求められる。例えば EV の領域では、飛躍的なバッテリーコスト低減をもたらす技術革新や社会通念の急激な変化などにより、地域ごとに異なる複数車種の EV が必要となる時期が来るかもしれない。それに備えるためには、全ての車種に適用可能な専用プラットフォームを準備する必要があるが、そのリスクマネジメントを最高効率で実行するための鍵となるのは、やはり一括企画・コモンアーキテクチャー・フレキシブル生産というマツダ独自のプロセスなのである。これは新世代商品開発にあたり、飛躍的なビジネス効率向上を果たすために編み出した戦術であったが、経営のフレームワークが劇変する中でマツダ単独で存続するための原動力となり、そして今マツダの規模でマルチソリューションを持ち、時代変化に備える力になりつつある。すなわち、我々の仕事の進め方そのものの進化も生き残りのための条件である。

今後はあらゆる技術領域において、モノ造り革新プロセスと我々の他方の強みである MBD との連携を深め、異業種を含めて仲間を世界中に増やしながらか戦術を磨きあげることで、いかなる時代にも通用するマツダらしさと、いかなる時代変化にも適合できる力を身につけていきたい。

さて今回のマツダ技報は、SKYACTIV-VEHICLE ARCHITECTURE などの次世代技術を含む興味深い技術論文が多数寄稿されている。地球・社会・人に想いを馳せ、自ら定めた高い目標に向けた挑戦を続けるエンジニア諸氏に感謝の念とエールを送りたい。私が SKYACTIV 技術の開発を担当していた当時から多くの難題に直面したものだが、一心不乱に技術開発に没頭していたあの時期は第 2 の青春のように楽しかった。今現在苦しみ悩んでいるエンジニアもいるかもしれないが、原理原則に基づいてやり続ければ、課題解決に導く技術や人との出逢いが待っており、仲間はきっと支えてくれる。

よって、『答えは必ずある』というフェローの言葉を信じ、諦めることなく自己成長に向けたハードワークを楽しんで欲しい。これは、先輩エンジニアの私の経験を通して、真理だと断言できる。

2 年後に迫った創業 100 周年は通過点に過ぎないが、今日まで存続できたことを素直に喜ぶとともに、先人達の弛まぬ努力に心からの敬意と感謝を表したい。その上で、人の心と身体を元気にするマツダのクルマが健康医療器具として認定され、ドイツ人が発明した内燃機関はマツダが完成させた、マツダのデザインはアートの域に達したと認めて頂ける日を夢見て、マツダに係る全ての人々を幸せにするという大義を脈々と引き継ぎながら誠実なクルマ造りを続けていきたい。その結果として、次の 100 年も存続する企業になればこれ以上幸せなことはない。決して容易なことではないが我々マツダにはそれができると信じており、そのために私自身も最善を尽くし完全燃焼するまでやりぬく覚悟である。

1

サステイナブル “Zoom-Zoom” 宣言2030
“Sustainable Zoom-Zoom 2030”本橋 真之*1 神八 俊夫*2
Masayuki Motohashi Toshio Kamihachi

要 約

マツダは2007年に技術開発の長期ビジョン「サステイナブル “Zoom-Zoom” 宣言」を発表し、「走る喜び」と「優れた環境・安全性能」を高次元で両立することを目標に技術開発に取り組んできた。2012年から導入したSKYACTIV技術を搭載した車両は、その走行性能、及び環境・安全性能に対して、グローバルで高い評価を獲得することができた。この「サステイナブル “Zoom-Zoom” 宣言」からちょうど10年目となる2017年8月、世界の自動車産業を取り巻く環境の急激な変化を踏まえ、より長期的な視野に立ち、クルマの持つ魅力である「走る喜び」によって、「地球」「社会」「人」それぞれの課題解決を目指す新しいチャレンジ「サステイナブル “Zoom-Zoom” 宣言2030」を公表した。この具体的な取り組み内容について説明する。

Summary

Mazda announced its long-term vision for technology development “Sustainable Zoom-Zoom” in 2007. Since then, we have been taking on challenges for technology developments to achieve both “driving pleasure” and “outstanding environmental and safety performance” at high levels. As a result of our efforts, the models equipped with the newly-developed SKYACTIV TECHNOLOGY have received high evaluations globally for their environmental and safety performance as well as driving performance. In August 2017, a decade after the “Sustainable Zoom-Zoom” announcement, Mazda announced “Sustainable Zoom-Zoom 2030” amid radical transformations taking place in the automotive industry worldwide. The new vision represents Mazda’s new initiative in helping solve a variety of issues facing the earth, society and people in the long run, through driving pleasure – the fundamental appeal of the automobiles.

1. はじめに

マツダは、2007年に発表した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、CO₂排出量削減や大気汚染問題、交通死傷事故削減など自動車産業が抱えるさまざまな課題に対応し、地球環境と交通環境のサステイナブルな未来の実現に向けた技術開発に取り組んできた。お客様視点を頂点においた「走る喜び」と「優れた環境・安全性能」の全てをブレークスルーした商品の提供をお約束し、2012年のCX-5を皮切りにグローバルに導入した。その宣言からちょうど10年目となる2017年8月、自動運転やコネクティッドカー、モビリティサービス、そしてEV (Electric Vehicle) 化と、100年に一度の変革期といわれている自動車産業を取り

巻く急激な環境変化を踏まえ、より長期的な視野に立ち、クルマの持つ魅力である「走る喜び」によって、「地球」「社会」「人」それぞれの課題解決を目指す新しいチャレンジ「サステイナブル “Zoom-Zoom” 宣言2030」を公表した。また、この宣言は、マツダがクルマを造る意義・目的を、改めて社内外に示すものであり、マツダが目指しているのは、お客様にマツダ車をずっと乗り続けたいと言っていただけ、お客様と強い絆で結ばれた存在である。本稿では、これまでのマツダの環境・安全技術に対する取り組み、及び「サステイナブル “Zoom-Zoom” 宣言2030」の内容について紹介する。

*1, 2 技術企画部
Technology Planning Dept.

2. これまでの環境・安全への取り組み

マツダは、2007年に発表した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、「マツダ車をご購入いただいた全てのお客様に『走る喜び』と『優れた環境・安全性能』を提供する」という基本ポリシーの基、いつまでも「ワクワク」するクルマ、「見て乗りたくなる、乗って楽しくなる、そしてまた乗りたくなる」クルマを提供し、クルマも、人も、地球も、みんながワクワクし続けられるサステイナブルな未来の実現に向けた技術開発に取り組んできた (Fig. 1)。

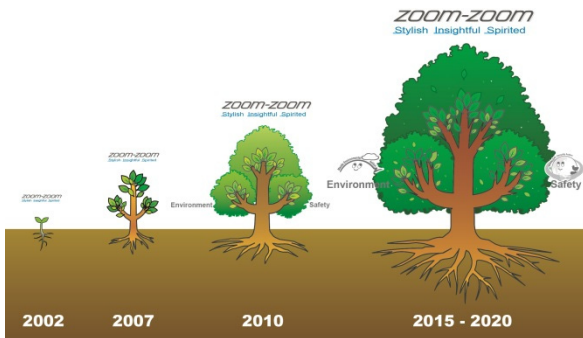


Fig. 1 “Sustainable Zoom-Zoom”

環境技術については、2015年時点で需要の中心である内燃機関 (含むHEV) の改善がグローバルCO₂削減に最大の効果を発揮すると考えた。消費者に分かりやすい指標である燃費を、グローバルで2008年比30%改善することを目標に掲げ、グローバル新車市場で主要なガソリンエンジン、ディーゼルエンジンなど、ベース技術の理想を徹底的に追求したSKYACTIV技術 (Fig. 2) に加え、段階的に電動化技術を導入する「ビルディングブロック戦略」 (Fig. 3) に基づくマルチソリューション対応を、2012年から開始した。SKYACTIV技術を搭載した新しい商品をグローバルに導入することにより、2015年には約26%の燃費改善を実現することができ、米国環境保護庁 (US EPA) の燃費トレンドレポートにおいて、マツダの企業平均燃費が5年連続で総合1位を獲得した。



Fig. 2 SKYACTIV TECHNOLOGY

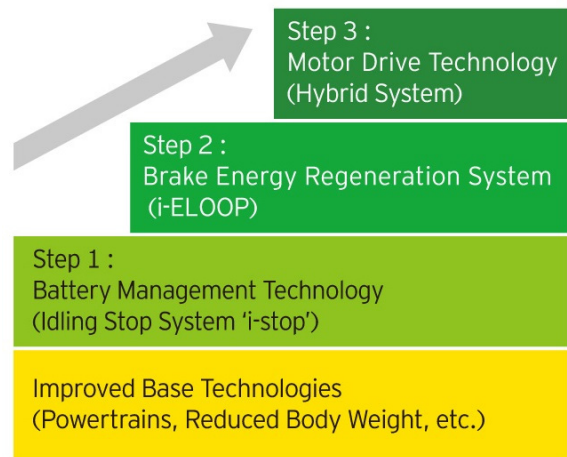


Fig. 3 Building-Block Strategy

また、安全技術については、時々刻々と変化する運転環境の中で、ドライバーがそれらの変化を正しく認知・判断することをサポートすることによって、安全かつ安心して運転を楽しんでいただく、そして、万が一のドライバーのミスに対しても、事故被害の防止・軽減を図るという「Mazda Proactive Safety」 (Fig. 4) の考え方に基づき、技術開発に取り組んだ。その結果、日本、欧州、米国の第三者機関による安全性能評価 (NCAP) において、全車種トップクラスの評価を獲得することができた (Table 1)。

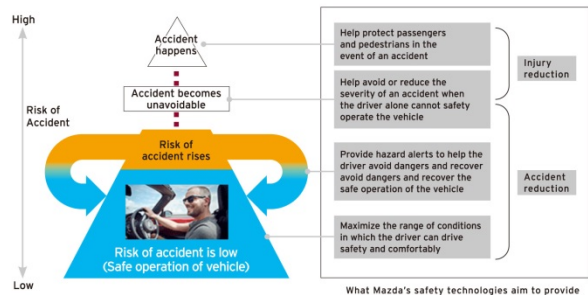


Fig. 4 Mazda Proactive Safety

Table 1 Third Party Safety Evaluations

		Demio /Mazda2	Atenza /Mazda6	Axela /Mazda3	CX-3	CX-5	CX-8	CX-9
Japan	J-NCAP (Collision)	5-Star ('14-'15)	5-Star ('13-'14)	5-Star ('14-'15)	5-Star ('15-'16)	5-Star ('17-'18)	5-Star ('17-'18)	-
	J-NCAP (Advanced)	ASV+ ('14)	ASV+ ('14)	ASV++ ('16)	ASV+ ('15)	ASV+++ ('17)	ASV+++ ('17)	-
US	US-NCAP	-	5-Star ('17MY)	5-Star ('17MY)	5-Star ('17MY)	4-Star ('17MY)	-	-
	IIHS	-	18TSP+	18TSP	18TSP	18TSP+	-	18TSP+
Europe	Euro-NCAP	4-Star ('15)	5-Star ('13)	5-Star ('13)	4-Star ('15)	5-Star ('17)	-	-

As of August, 2018

環境、安全、いずれの技術においても、市場に広く普及して初めて環境負荷低減、及び社会課題解決に貢献すると考え、高価な技術に頼るのではなく、ベース技術の徹底的な改善に注力してきた。

3. サステイナブル “Zoom-Zoom” 宣言2030

3.1 ビジョン／基本ポリシー

マツダは2002年に導入したブランドメッセージ「Zoom-Zoom」に基づき、お客様に「走る歓び」を提供するというブランドの方向性を明確にし、2007年に発表した「サステイナブル “Zoom-Zoom” 宣言」においても一貫して「走る歓び」を中心に据え、「優れた環境・安全性能」との高次元での両立に取り組んできた。そして、2017年8月に2030年を見据えた新たな技術開発の長期ビジョン「サステイナブル “Zoom-Zoom” 宣言2030」を発表した (Fig. 5)。『私たちマツダは、美しい地球と心豊かな人・社会の実現を使命と捉え、クルマの持つ価値により、人の心を元気にすることを追究し続けます』という基本ポリシーは、2015年4月に改訂したマツダのコーポレートビジョン (Fig. 6) に基づいており、これまでの「走る歓び」、「環境」、「安全」という3つの要素に対し、より長期的な視野と高い視点に立ち、クルマの持つ魅力であり、マツダが追求し続けている「走る歓び」を通じて、「地球」、「社会」、「人」、それぞれの課題解決を図り、世の中を元気にしたいという強い想いと高い志を込めた。

At Mazda, we see it as our mission to bring about a beautiful earth and to enrich people's lives as well as society. We will continue to seek ways to inspire people through the value found in cars.



Fig. 5 Sustainable “Zoom-Zoom” 2030

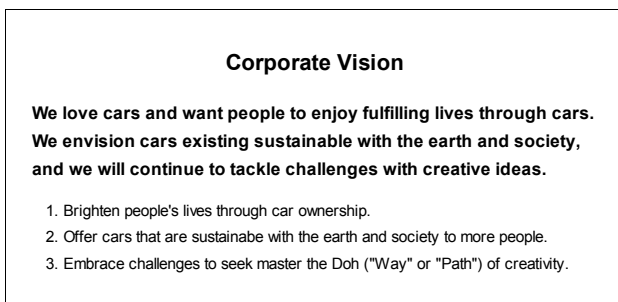


Fig. 6 Mazda Corporate Vision

3.2 「地球」課題に対する取り組み

地球温暖化防止を目指して、温室効果ガスの排出についての2020年以降の各国の取り組みを決めた国際的なルールであるパリ協定は、2015年12月に国連の会議「COP21」で190か国以上が合意し採択された。2018年4月時点で175か国・地域が署名しており、地球温暖化防止のためには、地球全体での排出削減が不可欠である。この協定では、IPCC第5次報告書などの最新の科学的知見を踏まえて、国際社会が実現を目指す共通の価値・ビジョンを示すとともに、主に以下の2つの目標を掲げて努力することが定められている。

- ①世界共通の長期目標として、産業革命前からの地球の気温上昇を「2℃未満」に抑制、更に、「1.5℃未満」を目指す。
- ②そのために、21世紀の後半に世界の温室効果ガス排出を実質ゼロにすること。

この目標を達成するため、再生可能エネルギーの導入量を増やすなどクリーンなエネルギーミックス（電気の発電に使用するエネルギー源の構成）の推進と、更なるエネルギー効率化の追求の具体的な取り組みが重要となる。自動車のCO₂排出量は、燃費規制や商品の燃費値に代表されるクルマに燃料を投入してから試験モードを走行する間のCO₂排出量を計測、いわゆるTank-to-Wheelとして求められる。それゆえ、EVのCO₂排出量はゼロである。パリ協定に基づいた地球全体でのCO₂排出量削減のためには、原油の採掘／輸送／精製に加え、燃料の輸送、電気の発電などのCO₂排出量を総合的に評価する必要があり、このプロセスの評価は「Well-to-Wheel（燃料採掘時から車両走行時まで）」 (Fig. 7) である。

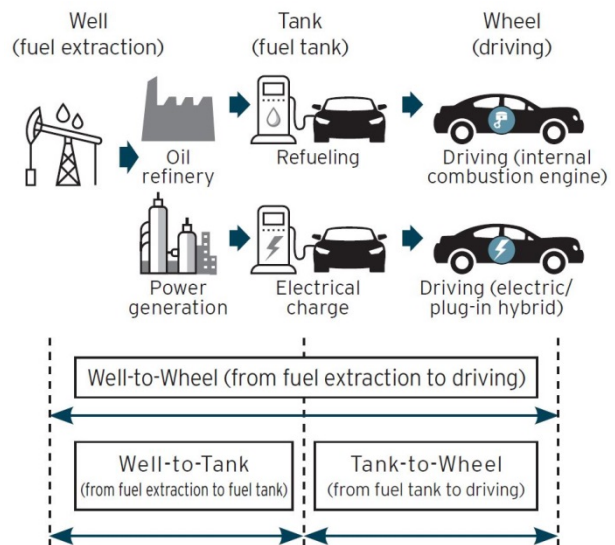


Fig. 7 Conceptual Diagram of Well-to-Wheel

Well-to-WheelによるCO₂排出量を評価した場合、火力発電による電力を使用したEVは、ゼロエミッションではない。エネルギーミックスは、国・地域によって異なり、そのため発電時のCO₂排出量も異なる。また、EV増による電力需要の増加やEV充電時間帯の重複に備えたピーク発電能力の追加などの電力インフラ整備、電力コストの増大などの課題に取り組んでいく必要がある。

つまり、自動車の技術においては、エネルギーミックスの再生可能エネルギーの効率的な活用技術及び、システムの進歩を考慮したEVの導入と、化石燃料を効率的に活用できるような内燃機関の更なる改善と電動技術の組み合わせ、というマルチソリューション（適材適所の対応）が真の意味でのゼロエミッションへ向かうロードマップであると考えている。「サステナブル“Zoom-Zoom”宣言2030」では、将来のカーボンフリーの社会を想定し、グローバル規模で徐々に進展する見通しの再生可能エネルギーに適確に対応することが、地球を守る本質的な取り組みであり、Well-to-Wheelでの地域ごとのきめ細かなCO₂削減技術が、地球を守る意味、大都市での大気環境を改善する意味で重要と考えた。具体的には、究極の内燃機関に向けた進化ロードマップ（Fig. 8）に則って開発した2nd Stepエンジン「SKYACTIV-X（次世代ガソリンエンジン）」（Fig. 9）、そして更なる進化を狙う3rd StepエンジンによるCO₂削減と、分散型を含む再生可能エネルギーが導入された地域にEVを導入することでCO₂を削減するマルチソリューション（適材適所）により、クルマのライフサイクル全体でのCO₂削減を視野に入れ、燃料の採掘段階から車両走行に至るまでの全体視点Well-to-Wheelで企業平均CO₂排出量を、2010年比で2050年に90%削減を視野に、2030年に50%削減を目指すこととした（Fig. 10）。

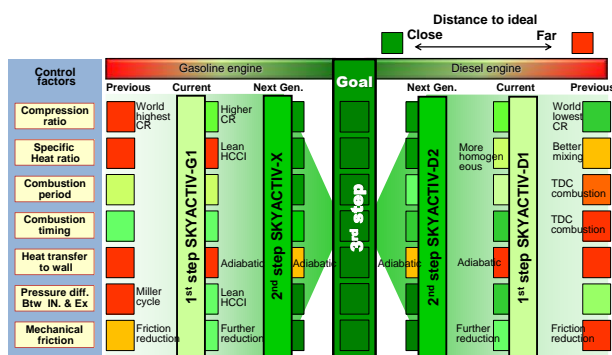


Fig. 8 Roadmap of ICE Innovation



Fig. 9 SKYACTIV-X Next-Generation Gasoline Engine

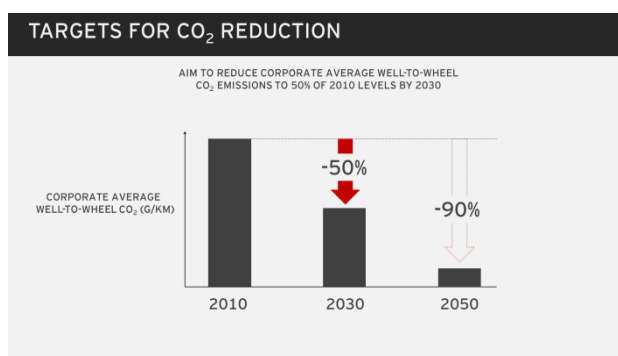
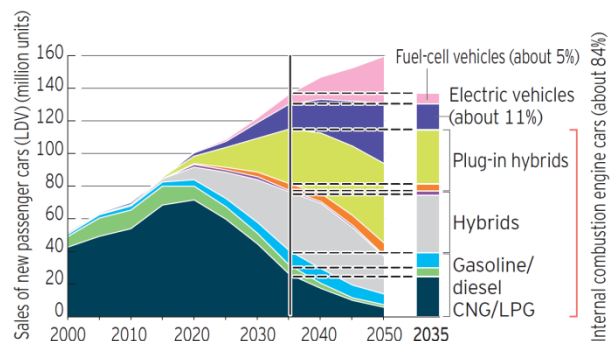


Fig. 10 Well-to-Wheel CO₂ Reduction Target

2030年目標実現については、2035年においてもグローバル市場の約84%は依然として内燃機関が占めることが予測されており（Fig. 11）、引き続き、ビルディングブロック戦略に基づき、内燃機関の徹底的な理想追求を行った上で、クリーン発電地域や大気汚染が深刻な都市部などについては、EVの導入という適材適所でパワーユニットを展開するマルチソリューションでのCO₂削減に取り組んでいく（Fig. 12）。



Source: IEA/ETP Energy Technology Perspective 2015

Fig. 11 Outlook for Global Market

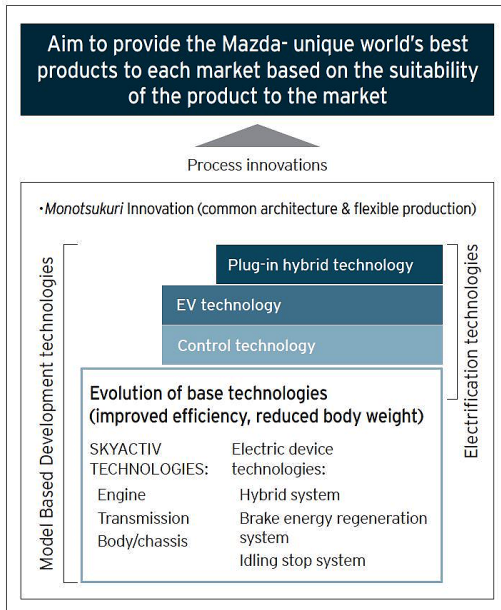


Fig. 12 Building-Block Strategy

2050年については、パリ協定で掲げられた温室効果ガス削減目標実現に貢献することを念頭に置いている。2060年時点の自動車保有台数は、グローバルで今の約2倍となる21億台となり、自動車による輸送距離は更に増加を続けることが予測されている。IEAの試算によれば、パリ協定で掲げられた、産業革命前と比べて将来の平均気温上昇を2℃未満に保つという目標を達成するためには、2060年の温室効果ガス排出量を、2010年と比べて、運輸部門全体で約30%、乗用車部門ではWell-to-Wheelで約65%削減する必要があるとされている。保有台数の増加を考慮すると、乗用車1台あたりのWell-to-Wheelでの温室効果ガス排出量では、2060年には2010年比約84%削減する必要があると考え、新車販売に置き換えると、この目標を2050年に達成することが必要であると考えている。また、2℃未満実現を確実なものとするために、挑戦目標として90%削減を掲げた。クルマをこよなく愛し、走る歓びを大切にされるお客様とともに、豊かで美しい地球と永続的に共存する未来を築くことに取り組んでいく。

3.3 「社会」課題に対する取り組み

安心・安全なクルマと社会の実現により、全ての人が、全ての地域で、自由に移動し心豊かに生活できる仕組みを創造し築いていくことをビジョンに掲げ、新たな交通事故の要因や、社会構造の変化に伴い顕在化している課題解決に取り組んでいく。具体的には、「過労による危険運転」、「増加する高齢ドライバーによる運転操作ミス」、「スマートフォンなどのIT技術の普及によるドライバーディストラクション」などの新たな交通事故要因への対応、日本、欧州を中心とした少子高齢化及び、都市集中化による「過疎地域における公共交通の弱体化」

など、将来想定されている社会環境変化に資する課題解決に取り組んでいく。その実現のために、引き続き“事故のない安全なクルマ社会”を目指したドライビングポジション、ペダルレイアウトなどの基本安全技術の継続的進化と全車標準化を進めていく。加えて、先進安全技術の継続的な性能向上と標準装備化、そして、自動運転技術を活用した、ドライバーがいつまでも安心して運転を楽しめる「Mazda Co-Pilot Concept (マツダ・コ・パイロット・コンセプト)」(Fig. 13)の2025年での“標準化”を目指す。

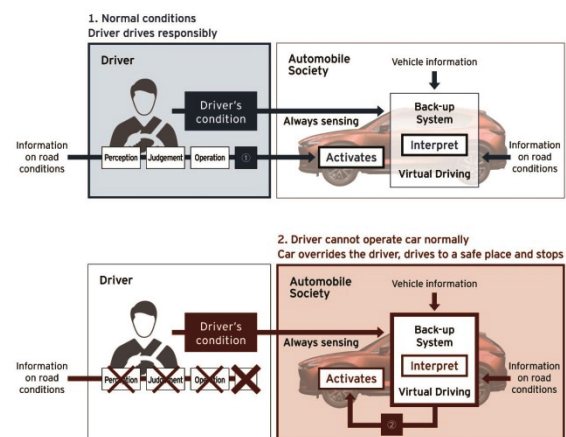


Fig. 13 Mazda Co-Pilot Concept

3.4 「人」課題に対する取り組み

「走る歓び」を感じるクルマを通じて、地球を守り、社会を豊かにすることで、人々に心の充足を提供し、心を健康にすることをビジョンに掲げ取り組んでいく。社会で生活する人々は、機械化や自動化により経済的な豊かさの恩恵を受けているが、一方で、日々体を動かさないことや、人や社会との直接的な関わりが希薄になることで、ストレスが増加していると考えている。これらの課題に対して、より多くのお客様にクルマを運転する「走る歓び」を感じていただき、更にクルマの運転を通じて、高揚感・達成感を得ることで、心豊かな人生を味わっていただくことを目指していく。このために、人の能力を引き出し心と体を活性化させる「人馬一体」感と、見る人全ての心を豊かにするデザインを、更に研ぎ澄ませていくことに取り組んでいく。

4. おわりに

私たちが長い間、目指してきたマツダブランドのありたい姿とは、お客様と強い絆で結ばれた存在である。マツダは、以前からコスモ・サバンナなどのロータリーエンジン車やロードスターといったスポーティー性能に優れた車のブランドとしてグローバルに認知されており、熱烈なファンの皆様に支えていただいている。

私たちは、いつまでもこのお客様に、お客様の期待を

超える商品やサービスを通じ、笑顔で人生を輝かせることができるようにサポートしていきたい。マツダは、企業がお客様に信頼され、その企業がお客様にとってなくてはならない存在であるべきと考えており、それは、その企業が持つ大義や哲学を通じて生み出された商品、技術、サービスにお客様は共感して初めて信頼し、絆を深めていただけるものと信じている。これが、私たちマツダのコーポレートビジョンの根幹であり、私たちの全ての行動の原点である。

参考文献

- (1) マツダサステイナブルレポート2016, 2017
- (2) IEA : Energy Technology Perspective 2015
- (3) IEA : World Energy Outlook 2017
- (4) IPPC : Fifth Assessment Report (2009)
- (5) United Nations Framework Convention on Climate Change : http://unfccc.int/paris_agreement/items/9485.php

■ 著 者 ■



本橋 真之



神八 俊夫

2

高熱効率燃焼の開発に適用する筒内壁温予測技術 Simulation Technique of Cylinder Wall Temperature to Apply for High Thermal Efficiency Combustion Development

山本 亮*¹ 横畑 英明*² 角田 浩行*³
Ryo Yamamoto Hideaki Yokohata Hiroyuki Tsunoda
丸井 堅太郎*⁴ 和田 栄治*⁵ 寿美 眞治*⁶
Kentaro Marui Eiji Wada Shinji Sumi

要 約

燃焼の革新による今後の更なるCO₂排出削減を実現しつつ、世界中のお客様に走る喜びをお届けする上で、エンジンの筒内壁温管理は非常に重要な開発課題である。走りと環境性を高い次元で両立するためには、高効率燃焼が要求する筒内壁温を、従来よりも詳細な制御により維持することが求められる。これを実現するために、エンジン本体の熱伝導と、冷却水やエンジンルーム内雰囲気への対流熱伝達による放熱を連成したCAE (Computer Aided Engineering) 予測技術を開発し、冷却水流量の制御や、キョーフ後のエンジン保温といった新たな放熱コントロール技術による熱流れのメカニズム解明と、その効果の予測に適用した。

Summary

Management of cylinder wall temperature is one of the most important topics for further CO₂ emission reduction and driving performance improvement. In order to achieve such improvement, more precise control of engine temperature is necessary to maintain suitable condition for higher thermal efficiency combustion. To achieve this goal, we developed new CAE(Computer Aided Engineering) simulation technique which couples the engine heat conduction and the fluid convection calculation, and applied to predict the heat transfer mechanism and its effect of the measures for controlling the temperature by new technologies such as the coolant flow rate control, and the engine heat retention.

1. はじめに

今後の更なるCO₂排出削減を実現しつつ、世界中のお客様に走る喜びをお届けするためには、内燃機関の燃焼革新による熱効率改善が重要である。ここで、さまざまな環境、乗り方において高効率燃焼を安定して実現し、一方では燃焼の熱負荷に対する部品の信頼性を満足するには、従来以上に詳細な筒内壁温の管理が必要である。そのような状態を実現するには、エンジンの温度状態と走行時の熱負荷に応じて、冷却水や外気への放熱量を調整する必要があり、部品構造と制御の最適化が求められる。本稿では、この課題の解決のために開発したCAEの解析技術について概要を説明する。

2. エンジン暖機の重要性と課題

2.1 開発における課題

運転中のエンジン温度管理は、冷間時の機械損失低減やHC,CO排出量の抑制、あるいは、高負荷運転時のシリンダーヘッド、ブロック（以下、エンジン本体と呼ぶ）の熱疲労による信頼性問題の回避など、さまざまな課題に直結する。また、燃焼改善によるCO₂排出削減のためには、エンジン始動から停止まで燃焼の要求する適切な筒内壁温を常時達成することが求められる。運転中のエンジンの壁温を管理するには、燃焼によって生じる熱に対して、エンジン本体内に設けられたウォータージャケットを流れる冷却水に、熱伝達によって伝わる熱量を適切に調整することが求められる。

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

マツダの次世代車種開発においては、このような放熱のコントロールによる温度管理についてFig. 1に示す考え方で開発をしている。具体的には、①始動時は冷却水への放熱を抑制することによりエンジン本体の昇温速度を高め、②燃焼に合わせて適温の状態を維持しながら運転し、③ソーク過程についてはエンジン停止後の放熱を抑制し、温度低下を小さくすることで、④再始動時の温度を高くすることにより昇温時間を短くする、というものである。

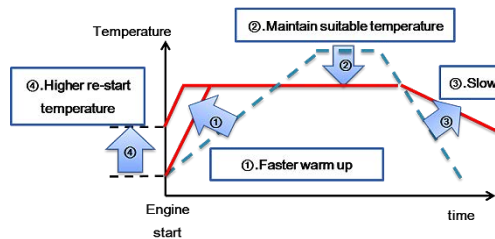


Fig. 1 Concept of Engine Temperature Control in New Vehicle Development

①の過程においては、冷却水への放熱を抑制するため、冷却水流量を小さくする制御を行っている⁽¹⁾。今後は、更に昇温時間を短縮するために、冷却水流量を停止し、熱伝達による放熱を限界まで小さくすることを目指している。②以降は目標とする燃焼室壁温に到達後も、燃焼安定性の維持とエンジン本体の信頼性それぞれの要求を満足するよう、冷却水流量の制御を行う。

③のエンジン停止後では、エンジンの放熱先はエンジンルーム内の雰囲気になる。雰囲気への放熱を抑制するために、断熱材をエンジン表面に設置することで、エンジンと雰囲気との熱抵抗を大きくする。しかし、エンジン本体の全ての表面に設置することは難しく、設置できない部位から熱が逃げてしまうため、これだけでは十分な効果を発揮できない。そこで、特に断熱材が設置しにくいシリンダーヘッド周辺をカバーで覆い、エンジンの熱で暖まった雰囲気をエンジン周辺にとどめ、シリンダーヘッド表面と雰囲気の温度差を低減することで熱伝達による放熱を抑制する。Fig. 2に断熱材とカバーの配置イメージを示す。

Fig. 1の①から③で用いられるいずれの手段も、従来のエンジンにない放熱管理のための新技術であり、それらの改善効果を発揮しつつ、部品の温度が上がりすぎることによる耐熱性、あるいは熱疲労による信頼性の課題を解決する必要がある。それには、始動からエンジン停止以降の熱流れと温度変化のメカニズムを理解した上で、最適な温度コントロールの方法を開発の早期に決める必要があり、その実現のため熱流れのモデル化と机上検討手段の確立を目指した。

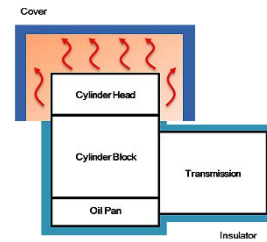


Fig. 2 Image of Engine Heat Insulation in Soak Process

2.2 サーマルマネジメント開発に向けた予測技術

エンジン内熱流れ・温度予測には、定常運転条件を対象に、燃焼ガスと冷却水の流れ・温度をCFD (Computational Fluid Dynamics) で計算し、その結果をエンジン本体の熱伝導解析の境界条件として用いる手法が広く用いられている。マツダにおいても、高負荷定常運転時の熱応力に対する信頼性評価のために、同様の手法を用いて温度を予測し⁽²⁾、冷却のための対策構造を検討してきた。

しかし、今後の開発では、早期昇温、燃焼と信頼性に対する適温維持、キーオフ後の保温という非定常状態の温度管理のために流体の熱伝達による放熱を適宜コントロールする。また、冷却水制御やエンジン保温などの技術によって、従来支配的だった経路の放熱が抑制され、エンジン本体内の熱伝導経路が大きく変わる。これらを考慮した上で筒内壁温管理の最適な方法を早期に決定するためには、部品の詳細な構造を考慮した過渡の伝熱現象の予測が必須であった。しかし、前述の定常状態の温度予測技術は、流体の流れとエンジン本体の熱伝導の計算を分離しているため、流れの時間変化とそれに伴う熱移動の変化を考慮することができない。

そこで、流体の流れとエンジン本体内の熱伝導を同時に計算する連成解析技術を開発した。具体的には、①ウオータージャケット内の冷却水流れの時間変化を考慮したエンジン本体内の伝熱解析技術、②ソーク中のエンジンルーム内の自然対流を考慮したエンジン本体内の伝熱解析技術を開発した。その詳細を以降で説明する。

3. エンジン温度変化の予測技術

始動からソークまでを含めた過渡のエンジン熱流れと温度変化を予測するには、まず、放熱先である流体の流れ、熱伝達を精度よく計算しなければならない。特に、ウオータージャケット内の冷却水の流れは、エンジン本体からの放熱量や温度分布に大きな影響を与えるため、その予測精度が重要である。

そこでまず、冷却水流れの可視化計測と、その結果を元にCFDモデルの改良を行うことで、流速、及び熱伝達率分布の予測精度を改善した。その上で、エンジン本体から冷却水への熱移動を時々刻々と計算するために、熱

伝導計算と冷却水流れ・熱伝達計算を連成する解析技術を構築した。

3.1 冷却水流れの予測精度改善

従来の温度予測は高負荷運転時の信頼性検討を主としており、熱負荷の高い運転条件と高温部位は、ある程度限定することができていた。このため、冷却水流れの予測を行う際には、その運転条件における高温部位の壁温と周辺の流速、及び熱伝達率との相関関係を把握できることが重要であった。

しかし、高効率燃焼の安定性確保や、エンジン油温コントロールなど、燃費に関連する機能を強化するための壁温管理部位は、エンジン本体の信頼性におけるそれとは異なることが考えられる。また、温度管理が必要なエンジン運転条件や冷却水流量の範囲が従来よりも大幅に広がっている。このため、ウォータージャケット内の局所的な流れだけでなく、流路内の全体的な流れを幅広い流量範囲で精度よく計算する必要があり、CFDの計算精度を検証する実験においても、複雑な形状のウォータージャケット内の全体的な流速分布の計測が必要であった。

そこで、ウォータージャケット内の流れをPIV (Particle Image Velocimetry) により可視化し、全体的な流速分布をCFDと比較することで、解析の問題点を明確にして精度を改善する活動に取り組んだ。

PIV計測を行う上で、ウォータージャケットのような複雑な形状は、湾曲する表面形状による屈折で、撮影する粒子の像が歪んでしまい、解析精度が低下するという課題がある。これを解決するため、Fig. 3に示すように流路の材料であるアクリルと同等の屈折率をもつ溶液中にウォータージャケット流路を浸し、屈折を相殺することで内部の画像の歪みを抑制するIndex Matching法を用いたPIV計測を行った⁽³⁾。

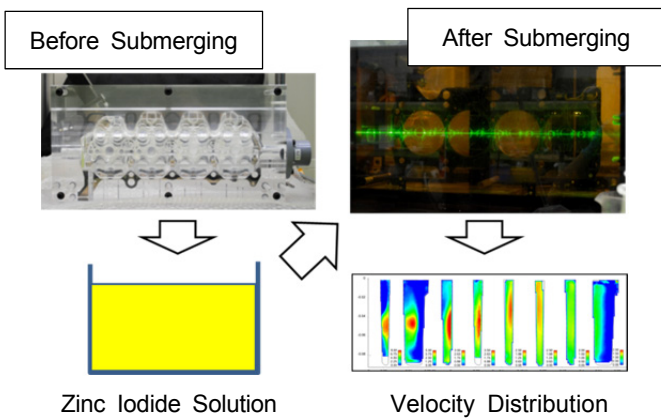
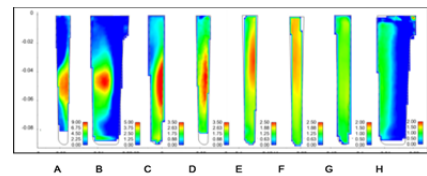
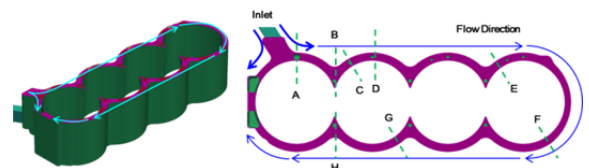


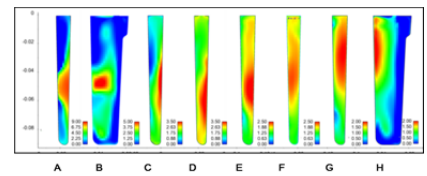
Fig. 3 Experiment of Index Matching PIV

上記の手法で計測したシリンダーブロック部の流速分布とCFD解析結果を、Fig. 4(a), Fig. 4(b)に示す。CFD

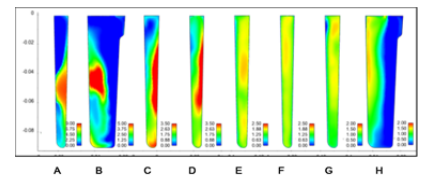
解析には、汎用流体解析プログラムICONCFD®を用いた。CFDで求めたシリンダーブロック内の流速分布は、流速の高い領域が広がらずに下流に流れており、この点で計算と実測の差が大きいが分かる。流速分布の広がりや差は断面C以降で発生しているため、その上流のシリンダーブロック入口付近の流れの様子に着目した (Fig. 5)。断面Cの直前で流れが壁面に衝突し、その後流れが広がらない状態で下流に向かって流れていることが分かる。このことから、シリンダーブロック入口付近の流れの衝突挙動が、予測精度に大きく影響すると推測した。



(a) PIV Measurement



(b) Initial CFD Calculation



(c) Improved CFD Calculation

Fig. 4 Comparison of Cylinder Block Velocity Distribution between CFD and PIV

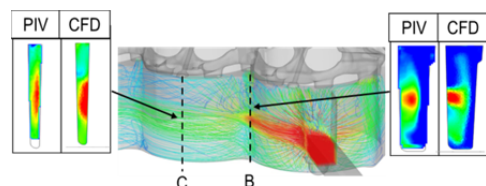


Fig. 5 Flow Behavior and Velocity Distribution

PIVによる検証により、ウォータージャケット内の流れ計算において、最上流であるシリンダーブロック入口付近の流れに課題があることが分かった。シリンダーブロック内の流れは、Fig. 6に示すようにまず入口でウォーターポンプのインペラ形状とその回転の影響を受けて流入する。その後、シリンダーの壁面に衝突、分岐し、それ以降も壁面への衝突を繰り返すことで流れの広がり方が決まってくる。

以上より、ウォーターポンプからの流れと、壁面衝突時の流れの挙動が流れの予測精度に対して重要と考え、これらに着目したモデル改善を行った。

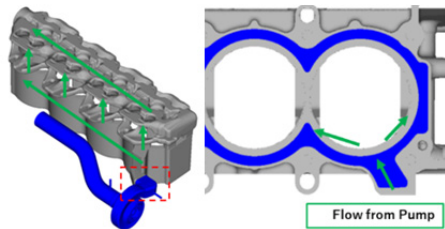


Fig. 6 Flow Complexity at the Inlet of Water Jacket

ウォーターポンプから吐出される流れを再現するために、インペラの詳細形状を考慮し、その回転による運動量の増加をMRF (Multiple Reference Frame) (4) によりモデル化した。モデル化の有無による流れの差を流線で比較した結果を示す (Fig. 7)。ポンプを考慮することによりシリンダーブロック内の流線は上下方向に広がっており、ポンプが流れに大きく影響していることが分かる。

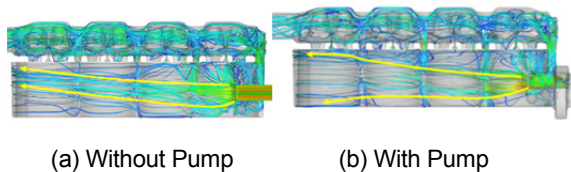


Fig. 7 Comparison of Flow with/without Water Pump

次に、壁面衝突・分岐流れの精度について検討した。ここでは、Fig. 8に示すT字型流路で分岐出口に同一な条件を与えたモデルを用い、対称な形状、条件における流れの対称性の計算精度を検証する。

Fig. 4(b)で示した計算のシリンダーブロック内のメッシュ分割は10程度のため、まず同等の分割数で計算を行った。このとき、メッシュを分岐流路に対して傾けた状態のヘキサ (立方体) セルを用いている。Fig. 8(a)に計算結果を流線で示す。流線の色は流速に対応している。これより、分岐部の再循環領域や、衝突後の分岐流れが対称にならず、流れ場がメッシュパターンに依存することが確認され、単純な形状においても衝突・分岐の流れ

の計算精度に課題があることが分かった。

この改善のためメッシュ分割数を倍程度にすると、全体的に衝突後の対称性は改善するが、循環領域の流れの非対称性が残ることが分かった (Fig. 8(b))。そこで、複雑な流れ場に対するセル面の直交性を確保しやすいポリヘドラル (多面体) セルを用いて計算を行った。その結果をFig. 8(c)に示す。流れがほぼ対称になり、衝突・分岐流れに対してメッシュタイプや分割数の選択による数値誤差の低減が有効であることが分かった。

以上の知見を適用したウォータージャケット改善モデルの計算結果Fig. 4(c)と実験Fig. 4(a)を比較すると、断面C以降で流速の速い領域が徐々に広がりながらブロック上部に向かって流れる様子が解析でも計算されており、実測とよく一致していることが分かる。

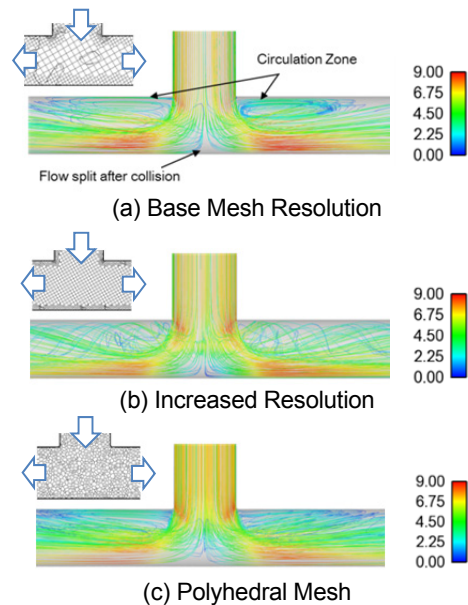


Fig. 8 Improvement in T-Split Flow Calculation

シリンダーヘッドの比較結果をFig. 9に示す。シリンダーヘッド内の流速分布も、PIVとCFDでよく一致していることが分かる。断面内で分岐している流路ごとの流量配分も比較しているが、これについても実験と解析は良好な一致を示した。

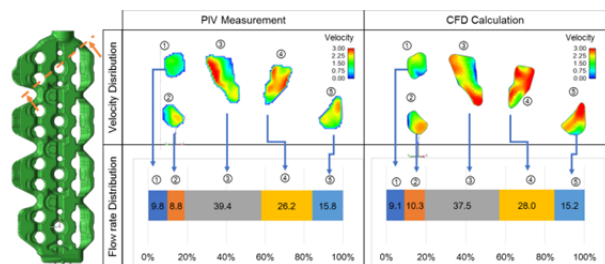


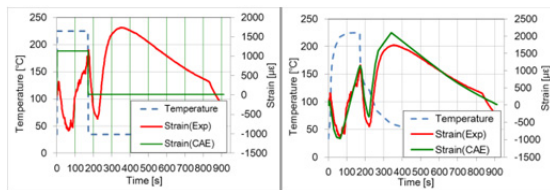
Fig. 9 Comparison of Cylinder Head Flow Between CFD and PIV

このような詳細精度検証とCFDのモデル化・計算方法改善により、ウオータージャケット内の流速分布の計算精度を確保した。冷却水制御では流量が大きく変わるため、上記の検証は25, 130[L/min]の条件で行い、いずれの流量においても良好な精度を確認している。

3.2 エンジンの非定常温度予測技術

従来の定常運転における温度解析は、熱の流れが一定となった状態を計算するため、定常状態の冷却水流れをCFDで計算し、その結果をエンジン本体の温度解析の境界条件とすることで予測ができた。しかし、非定常過程では流体とエンジン本体が相互に影響することで熱移動量が変化するため、この手法を用いた温度予測は難しい。

開発における温度の時間変化の重要性を、シリンダーヘッドの歪みを例に説明する。エンジンを定常状態まで運転し、その後停止して冷却する過程における温度と歪みを、CAE（熱応力・歪解析）と実験と比較した結果をFig. 10に示す。Fig. 10(a)に示すように、従来の定常温度解析手法ではステップ状の温度変化しか考慮できないため、歪みが成長する温度変化過程の予測が難しい。一方で、Fig. 10(b)のように実機の温度変化を考慮することができれば、歪みは実測とよい一致を示しており、温度変化が信頼性に対して非常に重要であることが分かる。



(a) Step-wise Temperature (b) Transient Temperature

Fig. 10 Difference in Strain Calculation by Transient Temperature Profile

エンジン本体温度の管理による燃費改善を実現するためには、目標温度の早期達成だけでなく、温度が変わる際の熱応力・歪に対するエンジン本体の強度を確保することも重要であり、温度変化の予測が開発に与える影響は大きい。そこで、エンジン本体の熱伝導（構造）と、冷却水やエンジンルーム内雰囲気の流れ（流体）を同時に計算する、非定常の構造流体連成解析技術を開発した。

まず、冷却水制御によるエンジン本体温度予測の手法について説明する。ここでは、流体領域であるウオータージャケットと、固体領域であるエンジン本体を1つのメッシュモデルで構築し、エンジン全体の熱バランスを計算することで温度分布を求める方法を採用した。これが、構造流体連成と呼ばれる解析手法である。流体の変化による熱バランスの変化を精度よく計算できるため、非定常の温度解析手法として適している。

冷却水流れと同じくICONCFD®を用いて、この手法によるエンジン本体の非定常温度予測技術を開発した。

Fig. 11にエンジン本体、冷却水領域のモデルをそれぞれ示す。固体はFig. 11(a)に示すように、エンジン本体（内部の吸排気バルブ含む）とエキゾーストマニフォールドをモデル化した。エキゾーストマニフォールドは非常に高温になり、シリンダーヘッドとの接触部位に対する熱源となるため考慮している。部品間のクリアランスに起因する熱抵抗は、接触熱抵抗によりモデル化した。

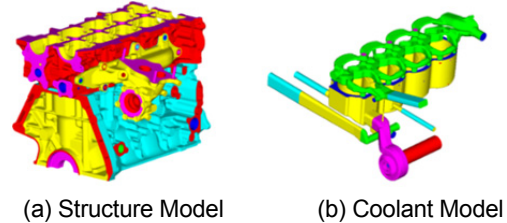


Fig. 11 Mesh Model of Engine Conjugate Heat Transfer Model

エンジンへの入熱要因となる燃焼ガスの流れや温度は、1次元のエンジン解析ツールの計算結果を適用した。燃焼ガスの温度は冷却水やエンジン本体の温度に比べて高いことから、燃焼ガスからの入熱は水温・壁温では変わらないと仮定し、入熱量は一定とした。

シリンダーブロックへの入熱は、ガスからだけでなくピストンを経由してライナーに入るものもあるため、1次元モデルにピストンライナー間の熱伝導を考慮し、ライナーへの伝熱量計算結果を当該部位への熱境界条件として適用した。

エンジン停止後の放熱を予測する上でも同様の手法は有効であり、この場合はエンジン本体からの輻射、及び内部の伝導とエンジンルームの雰囲気流れの連成計算となるが、大きく異なるのは評価時間の長さである。

キーオフから再始動までの時間は、毎日車に乗るお客様を想定すると一晩程度と考えられ、つまり数時間レベルでの保温が必要である。このような長時間の解析評価を、3次元の非定常CFDで行うのは計算負荷が高く、非現実的である。一方で、複雑な形状の部品が配置されるエンジンルーム内の自然対流や、エンジン構造体内の伝熱を、1次元モデルで精度よく再現することも難しく、計算負荷の低減と精度の確保が課題であった。

この課題の解決のために、エンジンルーム流れのCFDと伝熱解析の計算を交互に一定の時間だけ実行し、計算切り替え時にCFDと伝熱計算の結果を交換する仕組みを開発した。流れと伝熱の解析ツールには、それぞれICONCFD®と輻射・伝導解析プログラムPowerTHERM®を用いている。ここで、エンジン本体の温度変化が小さい間は雰囲気の流れは一定と仮定し、

CFDの実行頻度を間引くことで、計算時間の削減を行った (Fig. 12)。これにより、流れと伝熱計算のそれぞれに対して適切なメッシュや非定常計算の時間刻みを選択でき、精度と計算時間の課題を解決した。

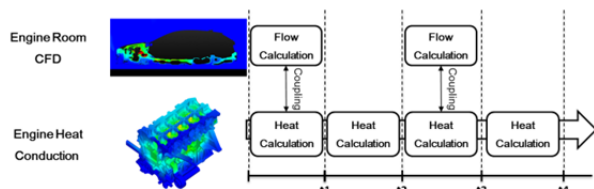


Fig. 12 Calculation Method of Engine Soak Simulation

4. 非定常温度解析の適用

前述手法を用いて、始動時の昇温速度を計算し、実機 (SKYACTIV-D 2.2) の温度計測との比較検証を行った。昇温促進の技術メニューとして検討している流量完全停止の効果を検証するため、SKYACTIV-D 2.2の流量を試験的に停止した場合と、1.75[L/min]の流量を流した場合の比較を行っている。25[°C]でソークした状態から始動し、回転・負荷を1500[rpm] Pe 100[kPa]の一定に保った状態の温度計測を行った。解析で得られた本体の温度分布と、シリンダーヘッド計測点における実験値との比較結果をFig. 13に示す。

いずれの条件においても、計測点での温度は良好な精度で予測できていることが分かる。また、水の流れを停止することによる早期昇温効果を確認することができた。

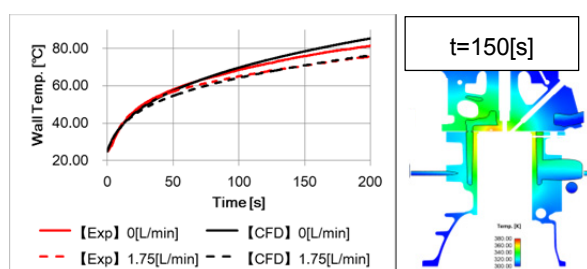


Fig. 13 Effect of Coolant Flow Rate in Cylinder Head Temperature Change

Fig. 14には、エンジン停止後の保温性能の予測結果を示す。量産車をベース車両として、カバーや断熱材で保温を強化した車両の水温を比較している。長時間の温度変化に対して、絶対値に不一致はあるものの、ベース車両からの保温効果は実測をほぼ再現しており、前述の連成計算手法で十分な精度の計算が行えていることが分かる。

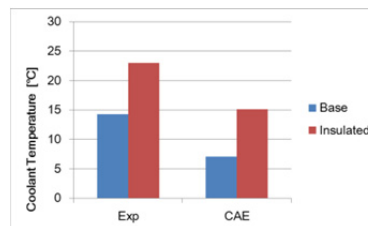


Fig. 14 Result of Coolant Temperature after 4hr Soak

5. まとめ

エンジンのサーマルマネジメント開発は、非常に多岐にわたる流体と伝熱現象が関わっているが、それぞれの現象に対してモデルを個別に検証・改善し、連成技術によってそれらをつなげることで、今後のエンジンの燃費改善において重要な、筒内壁温制御の開発に適用可能な予測技術を構築した。

参考文献

- (1) 山谷ほか：クリーンディーゼルエンジン新型 SKYACTIV-D 2.2の開発, マツダ技報, No.34, pp. 133-138 (2017)
- (2) 宮崎ほか：シリンダヘッドの熱疲労寿命予測, マツダ技報, No.24, pp.173-177 (2006)
- (3) K. Nishino and J.-W. Choi, "Index-Matching Technique for Effective Liquid Flow Diagnostics for Internal Combustion Engine", 20076592 (JSAE), (2007)
- (4) J. Y. Luo, et al., "Prediction of Impeller-Induced Flows in Mixing Vessels Using Multiple Frames of Reference". In I ChemE Symposium Series. 136. 549-556. 1994

(5) 著者 ■



山本 亮



横畑 英明



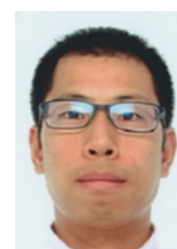
角田 浩行



丸井 堅太郎



和田 栄治



寿美 眞治

3

SKYACTIV-G 2.5 気筒休止システムのNVH対応技術 Vehicle NVH Performance Technology for Cylinder Deactivation of SKYACTIV-G 2.5

濱野 健太*1

Kenta Hamano

土路生 修*4

Osamu Torobu

田中 和宏*2

Kazuhiro Tanaka

陳 宇*3

Yu Chen

要 約

新型CX-5, アテンザのエンジン「SKYACTIV-G2.5」では、優れた環境性能実現を目指し、気筒休止システムを導入している。この気筒休止システムは、エンジン次数振動の起振力増大と周波数半減による車体振動の悪化が大きな課題であった。この克服のため、複雑な車体振動発生メカニズムを主要経路別に分析し、各影響因子を基礎理論レベルまで落とし込み、モデルベース開発にて改善した。駆動系振動改善のための遠心振り子動吸振器をはじめ、振動を伝えにくいエンジンマウント構造の工夫や、吸気圧力変動を振動に変換させない車体構造などのブレークスルー技術を構築し、高い燃費効果と快適性を両立させた。

Summary

SKYACTIV-G2.5L, new CX-5 and Atenza engine is equipped with cylinder deactivation system for good environment performance. During cylinder deactivation, the vehicle vibration deteriorates since excitation force of the engine increases and frequency decreases by half, which is the biggest issue. To overcome the issue, the complex mechanisms of the generation of vibration were organized by primary route, each influence factor was translated into the basic-theory, and improvement measures were studied mainly by model based development. We have achieved both fuel efficiency and comfort by building the technologies such as application of a centrifugal pendulum vibration absorber to improve transmission characteristics of drive transmission, a devised shape of engine mount or an improved structure to address vibration caused by pressure fluctuation of sucked air, to break-through restrictions of associated items.

1. はじめに

新型CX-5, アテンザのエンジンであるSKYACTIV-G 2.5には、優れた環境性能実現のため、気筒休止システムを導入している。しかし、気筒休止運転時は、エンジン起振力の増大、及び低周波化により、車体振動の悪化が課題となる。本稿では、気筒休止システム採用による燃費効果と快適性両立のために、車両の振動ポテンシャルを大幅に向上させた技術内容を紹介する。

2. エンジン特性と気筒休止燃費効果

マツダは“走る歓び”と“優れた環境性能”を両立させるSKYACTIV-Gを開発してきた。しかし、Fig. 1に示すように低負荷域の燃費効率は未だ改善の余地があった。そこで気筒休止を行うことにより排気損失、冷却損失の大幅な低減を実現し、低負荷領域の燃費を改善した。燃費は気筒休止システムがないものに対し、最大10%程度の改善効果がある。また、全トルク領域で燃費効率が改善することによりギヤ比選択の自由度が広がり、燃費を悪化させることなく走りを改善することを可能にした。

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

*2~4 エンジン性能開発部
Engine Performance Development Dept.

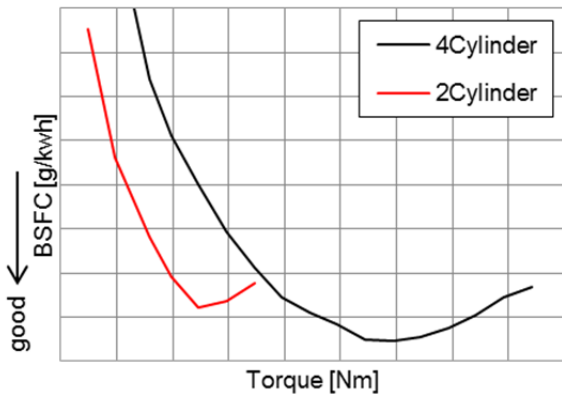


Fig. 1 Fuel Consumption Characteristics

3. 車体振動の課題

気筒休止運転をすることで、エンジンから発生するトルク変動や吸気圧力変動を起振力とし、駆動系・エンジンマウント・サスペンション・ボンネットなどの多くの車両構造が反応する非常に広域の車両システム振動が発生する。

3.1 起振力の変化

まず、気筒休止時は、燃焼次数が回転2次成分から1次成分に半減し、非常に低周波の起振力となる。また、4気筒運転時と同一のエンジントルクを発生するために、1気筒あたりの燃焼負荷が増え、これに伴いトルク変動、吸気圧力変動はほぼ2倍に増加する (Fig. 2)。

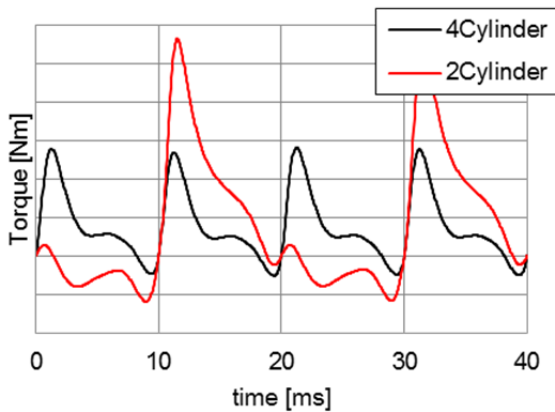


Fig. 2 Engine Torque at 70Nm 1,500rpm

3.2 車体振動特性との関係

エンジン次数起振力に対しては、車両の各システムの共振配置が非常に重要となる。通常4気筒運転のみの車両では、主要システムの共振周波数をエンジンのアイドルリング回転速度 (~800rpm=27Hz) と走行回転速度 (1000rpm=33Hz) の間に配置し、エンジン次数起振力でこれらの共振が励起されないようにしている。

しかし、気筒休止運転では、起振力周波数の半減により、これまで離間配置していた共振が励起される。起振力周波数と各主要システムの共振配置をFig. 3に示す。気筒休止運転では、従来の周波数離間配置が容易ではないことが分かる。

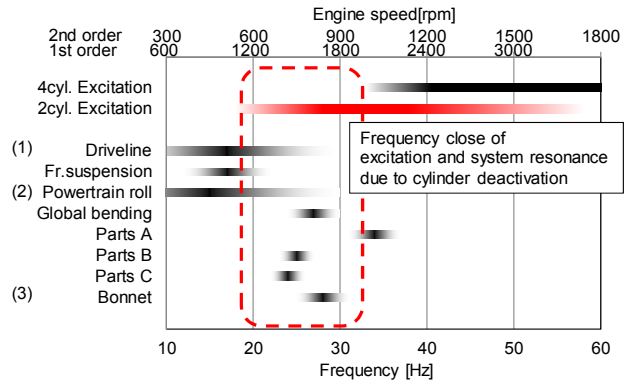


Fig. 3 Alignment of Excitation and Main System Resonance

気筒休止運転時の車体振動の課題を以下の3経路で述べる。

(1) 駆動系経路の振動

通常の4気筒でも低回転運転時は、エンジントルク変動により駆動系ねじり共振が励起され、サスペンションを介して車体に伝達される。このため駆動系ねじり共振をエンジンの走行回転速度以下に配置している。気筒休止の場合は起振力周波数が半減し、駆動系、及びサスペンション共振域に入り込んでくる。

(2) エンジンマウント経路の振動

同様に起振力周波数の半減は、パワートレインのロール共振にも近接する。起振力はロール共振峰までは低下しないが共振のすそ野を励起し、その振動が車体に入力される。特に、上下方向の入力に対しては、車体骨格系の上下曲げ共振の感度が高く、これを励起しやすいこと、車両付加部品が上下方向にシステム共振をもつものが多いため、車体振動となりやすい。

(3) 吸気圧力変動による車体振動

エンジンの吸気においても、吸気口付近に発生する圧力変動起振力周波数が半減する。これがボンネット共振に近接し、ボンネット振動が励起され、車体振動の要因となる。

これら起振力・共振周波数の近接による車体振動の悪化を前モデル仕様のフルビークルモデルで、予測・分析した (Fig. 4)。

この結果、エンジンの常用回転速度である1200~1800rpm領域において、車体振動は5~20dBの大幅な改善が必要であることを確認した。

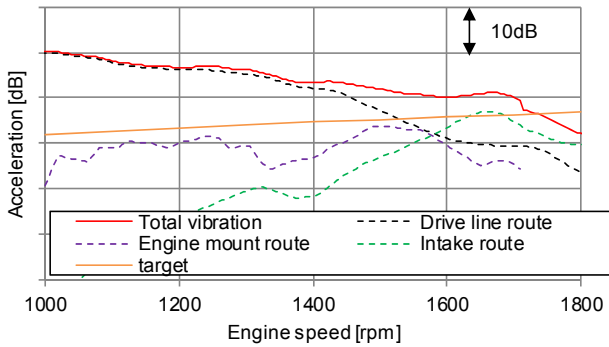


Fig. 4 Vehicle Vibration of Cylinder Deactivation (CAE)

4. 各システムの振動改善技術

4.1 駆動系振動低減

Fig. 5に示すとおり、気筒休止運転の周波数低下により、駆動系のねじり2次共振周波数が励起される。駆動系ねじり2次共振とはFig. 6に示すようにATのタービン以降の主にギヤ構造によるイナーシャ (I2) が主要なマスとなり、ねじりダンパーの剛性 (k1) とドライブシャフトのねじり剛性 (k2) が並列バネとなるモードである。この駆動系ねじり2次共振周波数を気筒休止の対象周波数域以下にするためには、I2を増加、k1、k2の低減が考えられる。しかし、これらのイナーシャ増加や剛性低減は、ねじり1次共振周波数も低下させ、加速時などの駆動力伝達における駆動系の応答性を悪化させるため、可能な限り避けなくてはならない。

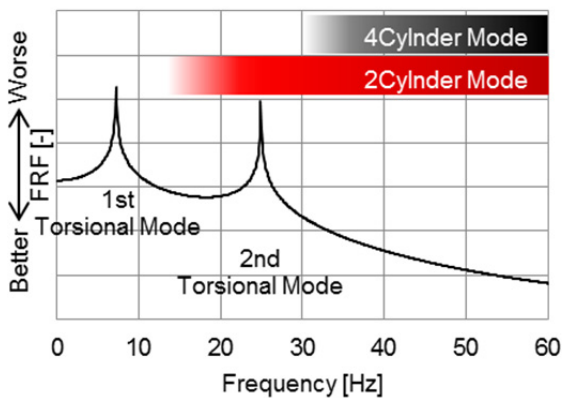


Fig. 5 Drivetrain Vibration Characteristics

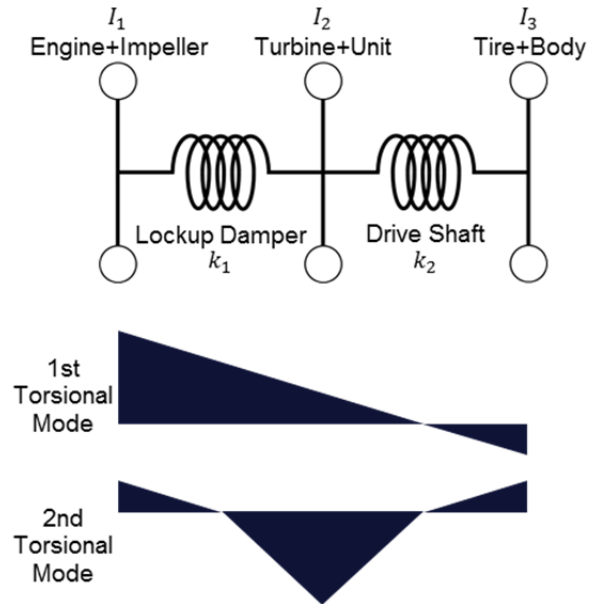


Fig. 6 Drivetrain Torsional Mode

そこでブレークスルーとして世界初となる気筒休止システム専用の遠心振り子動吸振器 (CPA : Centrifugal Pendulum Absorber) を開発した。Fig. 7に示すように従来の動吸振器 (DVA : Dynamic Vibration Absorber) は特定の周波数のみを低減 (パッシブ動吸振器) するのに対し、CPAはFig. 8に示すように周波数に追従し、全域で低減 (アクティブ動吸振器) することが可能である。CPAは式(1)に示すとおり、振り子の腕の長さl,rを調整し、対象の次数に設定することで ω (角速度) に依存した周波数追従型動吸振器にすることが可能である。このCPAを従来のロックアップダンパー部に採用することで、最大10dBの駆動系ねじり振動の低減を実現した。

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \sqrt{\frac{r}{l}} \cdots (1)$$

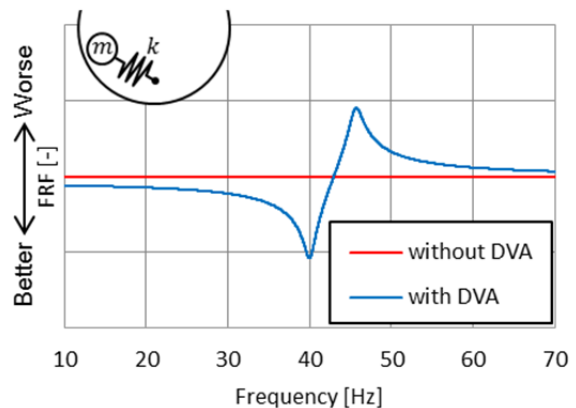


Fig. 7 Inertance with DVA

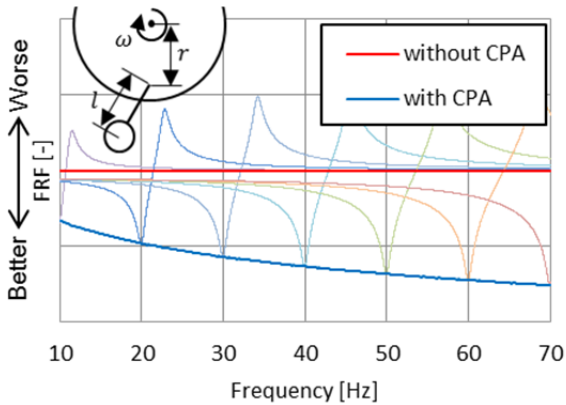
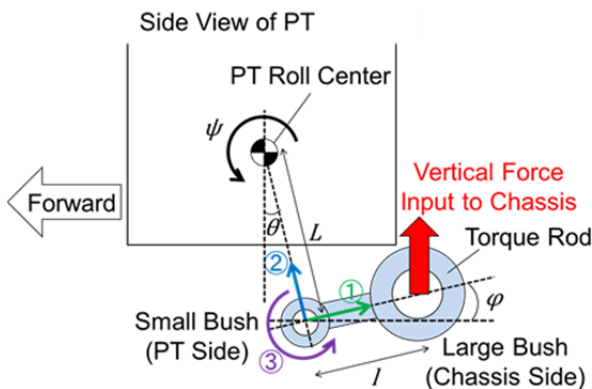


Fig. 8 Inertance with CPA

4.2 エンジンマウント振動低減

ペンデュラム式エンジンマウントでは、エンジン下方に設置するトルクロッドのジオメトリーとブッシュ剛性により、車体上下方向の入力の大きさが決まる (Fig.9)。



- ① Axial $F_A = K_A \psi L \cos(\theta - \varphi) \sin \varphi$
- ② Lateral $F_L = K_L \psi L \sin(\theta - \varphi) \cos \varphi$
- ③ Tilt $F_T = \frac{K_T}{l} \psi \cos \varphi$

K_A : Axial Stiffness, K_L : Lateral Stiffness,
 K_T : Twisting Stiffness

Fig. 9 Mechanism of Vertical Force Input to Chassis

車体上下方向の入力は、トルクロッドの軸方向入力①、軸直方向入力②、こじり方向入力③の合力となるため、それぞれの入力を最小化する必要がある。軸方向入力①は、エンジンロッド傾斜角(φ)をゼロにして発生させない。軸直方向入力②は、上述の $\varphi=0$ に加えて、PT側ブッシュの前後位置をPT慣性ロール軸に近づけて θ を最小化し、低減する。こじり方向入力③は、こじり方向剛性(K_T)の低減、並びにエンジンロッド長(l)の延長で低減する。

上記の考えでトルクロッドの配置とブッシュの剛性を設計し、車体上下方向の入力を大幅に低減した (Fig. 10)。

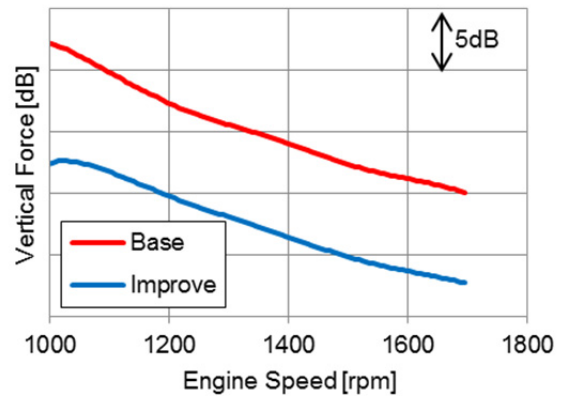


Fig. 10 Reduction of Vertical Force Input to Chassis

4.3 吸気圧力変動低減

吸気圧力変動による車体振動の発生メカニズムの概要を述べる。エンジンが燃焼に必要な空気を間欠的に吸入するため、吸気口部には体積変動が発生する。これによる圧力変動はバンパー・ボンネットで囲まれた狭い空間内で増幅し、ボンネット共振を励起する。振動はヒンジ・ラッチストライカー・ストップラバー各締結部を介して車体に伝達される (Fig. 11)。

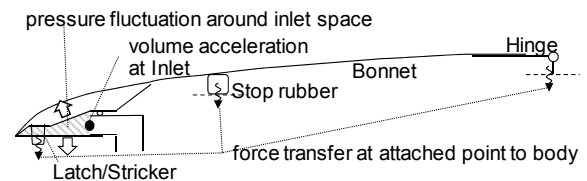


Fig. 11 Mechanism of Vibration Caused by Intake Pressure

音によって振動が励起されるという、従来の4気筒エンジンでは経験のない極低周波特有の現象である。その詳細を以下に記述する。

(1) 閉空間での圧力変動増幅理論

閉空間内の圧力変動増幅は、断熱工程における圧力と体積の関係は、ポアソンの法則式(2)より、式(3)の形で表すことができる。

$$PV^\gamma = c \quad (2)$$

$$V^\gamma dP + \gamma PV^{\gamma-1} dV = 0$$

$$\frac{dP}{dV} = -\gamma \frac{P}{V} \quad (3)$$

dV は吸気口より入力される体積変動、 dP は空間内の圧力変動、 P は静止状態の空間内圧力、 V は空間容積として、体積変動入力 dV に対する空間内の発生圧力変動 dP は、空間容積 V が小さくなるほど反比例して増幅されることになる。

圧力変動増幅について、ボンネット、バンパーにより形成される空間（3.8L）をおおまかに再現した音響モデルで検証した結果、空間容積が十分広い場合に比べ、約10dBの増幅があることを確認した（Fig. 12）。

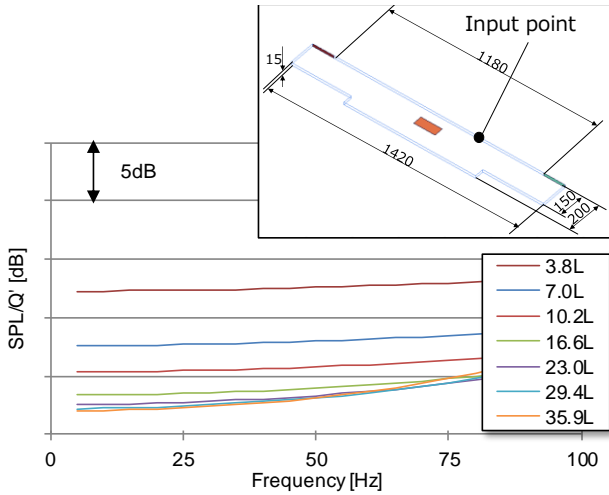


Fig. 12 Closed Space Acoustic Model Verification

(2) 圧力加振による構造加振現象の分析

圧力加振によるボンネット振動のシミュレーション、及び実験検証を実施した。ボンネットの構造と、エンジンルーム内音場が連成するモデル（Fig. 13）において、吸気口部に体積加速度入力を与え、ボンネット振動を出力した。また、実験検証においては、ピストン式圧力変動発生装置を吸気口部へセットし、ボンネット振動を計測した（Fig. 14）。

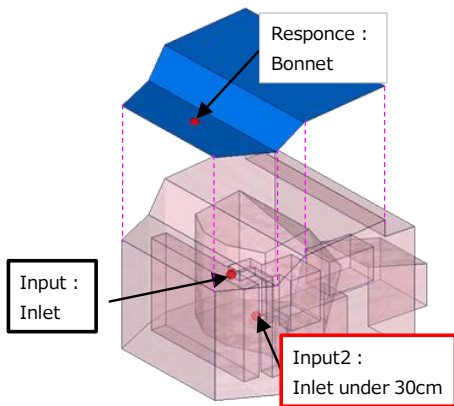


Fig. 13 Structure and Acoustic Field Coupled Model

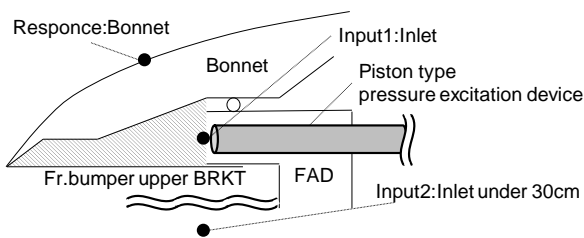


Fig. 14 Pressure Excitation Device Inside Engine Room

簡易モデルと実験検証の結果、圧力加振によりボンネット振動が励起される現象が確認された。更に、圧力加振位置を変更させた際の解析と実験の整合も取れていることを確認した（Fig. 15）。

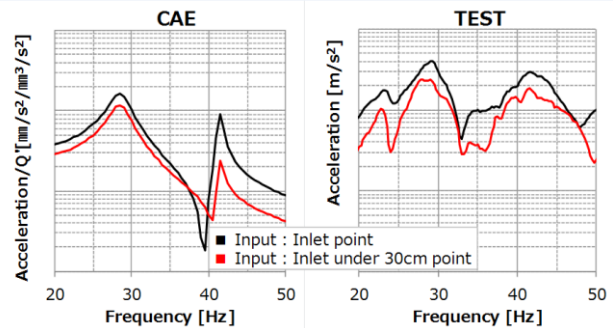


Fig. 15 Bonnet Vibration by Inlet Pressure (CAE/ TEST)

(3) 改善構造

これらのメカニズムより、吸気圧力変動による車体振動対策の方針として、①吸気体積加速度入力低減、②吸気口閉空間の拡大、③ボンネット共振の離間、④ボンネット振動伝達経路遮断が考えられる。①はエンジン出力特性で決定、③④は空間拡大によるパッケージや重量へのインパクトが大きく、②の吸気口圧力吐出空間の拡大が効率的と考えた。

この具体策として、フロントバンパーのアップブラケットの形状変更により、吸気圧力変動をバンパー内部の体積が広い部分へ発生させる構造を考案した（Fig. 16）。これにより、圧力変動の増幅を抑え、かつボンネットへ直接圧力変動を作用させないことで、振動低減が期待できる。試作検証では、約10dBのボンネット振動低減を確認した（Fig. 17）。なお、この構造技術については、今後のモデルより順次展開予定としている。

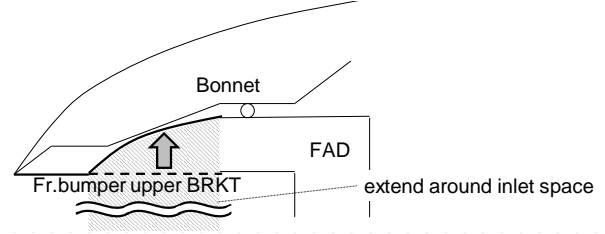


Fig. 16 Improve Layout of around Inlet

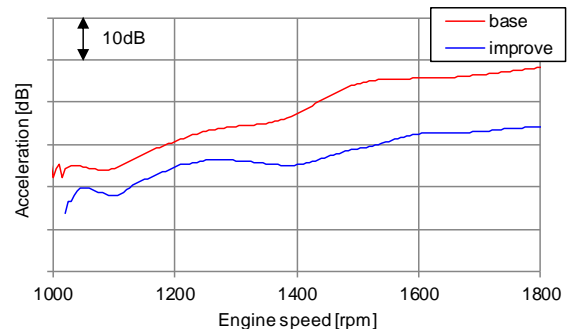


Fig. 17 Bonnet Vibration of Cylinder Deactivation

これら、4.1~4.3のCPA追加、エンジンマウントの変更、吸気体積流量制御の効果をフルビークルモデルで予測した結果、車体振動はFig. 18に示す5~20dBレベルの大幅低減できると予測した。最終的には、試作車による検証テストにより、モデル同様の効果を確認した (Fig. 19)。

これらの振動改善により、主要な走行モードでは気筒休止運転をほぼ制約することなく、計画した燃費低減を実現した (Fig. 20)。なお、グラフ上のバブルはWLTCモードの走行頻度を示している。

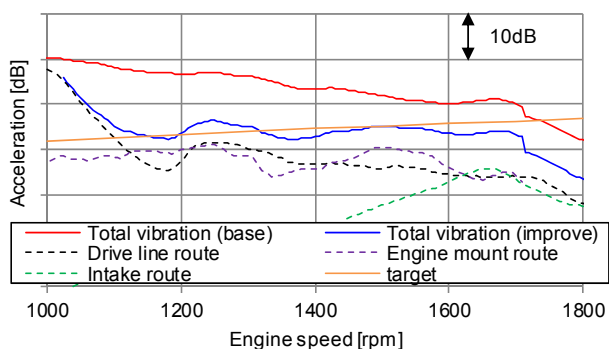


Fig. 18 Vehicle Vibration of Cylinder Deactivation (CAE)

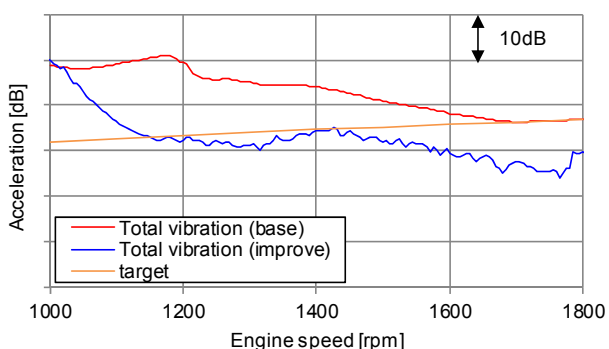


Fig. 19 Vehicle Vibration of Cylinder Deactivation (TEST)

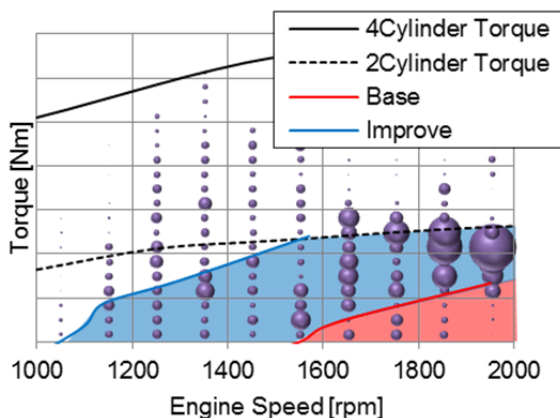


Fig. 20 Cylinder Deactivation Map Required for Vibration

5. おわりに

SKYACTIV-G 2.5エンジンの新技術である気筒休止システム採用における最大の課題である車体振動の低減技術に焦点を当てて紹介した。基礎理論に基づいて現象を解明し、コンセプトモデルから詳細構造モデルを最大限に活用することで、短期間で大幅な振動ポテンシャル向上を達成した。

コモンアーキテクチャ構想に基づき、本技術を今後のモデルにも更なる進化も含めて展開し、全てのお客様に優れた環境性能と高次元で両立した快適性能をお届けしていく。

参考文献

(1) 野田ほか：新型ガソリンエンジン「SKYACTIV-G 2.5気筒休止」の開発, マツダ技報, No.34, pp.35-40 (2017)

(2) 著者■



濱野 健太



田中 和宏



陳 宇



土路生 修

4

次世代商品群の空力・空力騒音性能開発 Aerodynamic and Aerodynamic Noise Performance Developments for Next Generation Vehicles

岡本 哲* ¹ Satoshi Okamoto	村上 健太* ² Kenta Murakami	大平 洋樹* ³ Hiroki Ohira
伊川 雄希* ⁴ Yuki Ikawa	西田 周平* ⁵ Shuhei Nishida	李 曄* ⁶ Ye Li

要 約

次世代商品群は、「ビークルアーキテクチャー構想」の基、全ての車を一括して考えて開発した。空力開発としては低燃費実現のため、空気抵抗の低減に注力して取り組んだ。空気抵抗は車体形状に大きく依存するため、デザインと空力の両立が課題である。特にマツダの「魂動デザイン」で表現したい形状を最大限に実現しつつ、空気抵抗を低減することを目指すなど、次世代商品群の空力開発は非常に難しいタスクであった。

この難易度の高いタスクを実践するため、風流れの運動エネルギー損失量を用いた車両周りを定量的に解析する手法を用いることで空気抵抗低減技術を更に進化させた。この進化させた技術とプロセスを適用することで、次世代商品群はクラストップレベルの空力性能と空力騒音性能を実現できた。

Summary

The next-generation vehicles were developed under “the Vehicle Architecture Concept”. To enhance the fuel economy performance, the focus was placed on reducing the aerodynamic drag through aerodynamic developments. Meanwhile, as the aerodynamic drag largely depends on the vehicle shape, it was a great challenge to establish compatibility between the design and the aerodynamic drag. In particular, we strived to reduce the aerodynamic drag while realizing the Mazda “Kodo” design concept to the maximum possible level. From the above, aerodynamic developments for the next-generation vehicles were quite demanding tasks.

To carry through the abovementioned challenge, we worked on a further innovation of the aerodynamic drag reduction technology by adopting a technique for quantitatively analyzing the vehicle peripheral area by use of the kinetic energy loss. By applying this evolved technology and process, we have been able to achieve the best-in-class aerodynamic performance and aerodynamic noise performance in our next-generation vehicles.

1. はじめに

近年のCO₂排出量の削減と排ガス規制の強化は自動車開発の重要課題となっている。よって、これに大きく寄与する空気抵抗低減が空力開発における重要な目的となっている。一方、自動車の空気抵抗低減はデザインとの両立が課題である。特に、マツダは美しさを追求したデザインの車づくりを実施しており、その「魂動デザイン」で表現したい形状を最大限に実現しつつ、空力性能を大

幅に向上させることが使命となる。

この使命をやり遂げるため、車全体で最適化や理想機能を考える「ビークルアーキテクチャー構想」の考え方にに基づき、車両周りの風流れに対し空気抵抗としての「風流れの運動エネルギー損失量」を定義し、ユニットごとに目標配分することで、それぞれのユニットで運動エネルギー損失量を抑制するという手法を見出した。その手法を次世代商品群の空力開発に適用することで、デザイン形状の変更によらない風流れ制御技術を検討し、

*1~6 車両実研部
Vehicle Testing & Research Dept.

クラストップレベルの空力性能と空力騒音を実現する風流れ制御技術を手に入れた。

本稿では、風流れの運動エネルギー損失量に基づく解析手法を適用した次世代商品群の空力開発プロセスとその具体的な制御技術について述べる。

2. 次世代商品群の空力開発

2.1 空気抵抗の各ユニットへの目標配分

空気抵抗の流れ場を定量的に解析する手法として、流れの運動量の指標を用いた解析方法が多く用いられている⁽¹⁾⁽²⁾。しかし、運動量の指標では、速度の増減のみで運動量が変化した場合、見かけ上変化するだけで、速度が元に戻ると運動量も元に戻るため、現象の本質を捉えられていない。そのため、空気抵抗の各ユニットへの目標配分ができないという問題が生じる。また、車両の前端から後端までの流れで運動量が決まるため、後流の現象と流れの運動量のつながりが分からない。

そこで、内部流れの圧力損失を用いた運動エネルギー損失の考え方⁽³⁾にヒントを得て、外部流である空気抵抗に圧力損失（運動エネルギー損失）の考え方をを用いることを考えた。風流れの運動エネルギーであれば、各ユニットに対しての運動エネルギー損失量が定量化でき、後流の現象とのつながりも分かるため、空気抵抗の各ユニットへの目標設定に使用することができると考えた。

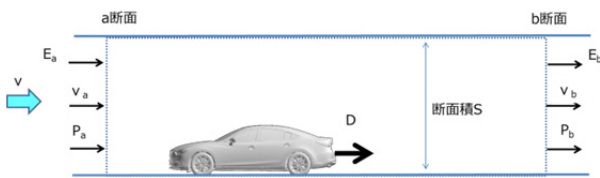


Fig. 1 Flow around Vehicle

自動車が高速で走行する際、自動車が空気になす仕事量は速度 v と抵抗 D との積 Dv であり、そのエネルギーはいったん空気の運動となるが、最終的には熱となって消散する。その結果、空気には圧力の低下が生じる。Fig. 1に示すように断面積 S の風洞に自動車を固定して風を速度 v で流せば、実走状態と相対的な流れは同一で Dv のエネルギーが消耗される。上流断面 a と下流断面 b が自動車から十分離れていて、速度が一樣になっている場合、風流れの運動エネルギー E の損失量は Dv と等価であり式(1)で表すことができる。

$$Dv = E_a - E_b \tag{1}$$

ここで運動エネルギー量 E は総圧と流量の積で表されるので、それぞれ速度 v 、静圧 P 、密度 ρ で表現すると式(2)となる。

$$E = \int (\frac{1}{2}\rho v^2 + P)v_x dS \tag{2}$$

ただし、 v_x ：主流方向速度である。この式(2)から風

流れの運動エネルギー損失量を求めると式(3)となる。

$$E_a - E_b = \int (\frac{1}{2}\rho v_a^2 + P_a)v_{ax} dS - \int (\frac{1}{2}\rho v_b^2 + P_b)v_{bx} dS \tag{3}$$

この式(3)を用いて、車両の前端の断面から、車両後方の運動エネルギーの減少がほぼなくなった断面までの風流れの運動エネルギーの損失を見たグラフがFig. 2である。このグラフに示すように、各断面までの風流れの運動エネルギーの損失量を見て取れる。このグラフを基に、車両のエネルギー損失を前方から輪切り分割し、各断面間での運動エネルギー損失量を算出することができる。

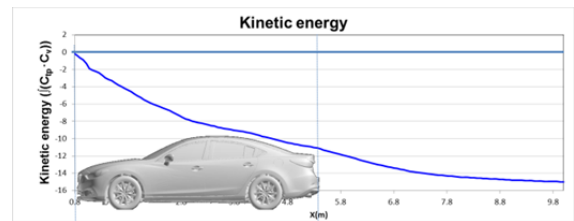


Fig. 2 Kinetic Energy of Flow around Vehicle

この車両全体の運動エネルギー損失量とCdの相関を確認した結果をFig. 3に示す。N=4ではあるが、相関が高く、空気抵抗の代用特性として使用可能であることを確認した。

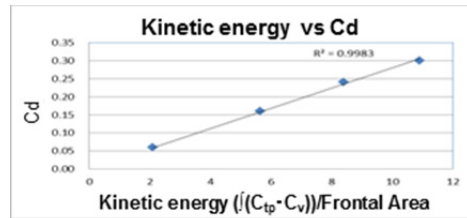


Fig. 3 Comparison between Kinetic Energy Results and Cd Results

2.2 風流れ制御の考え方

流体の運動エネルギーは粘性と速度差(速度と方向)によって熱に変換されるため、運動エネルギー損失量を低減するには、車両周りの流れの風速・風向を沿った流れにする(式(3): 速度 v 、静圧 P 、主流方向速度 v_x の変化を小さくすること、すなわち渦を抑制することがポイントである。風流れの運動エネルギー損失を発生させる渦は、以下3つに大別できる。

- ① 剥離渦：物体からの剥離により発生する渦…Aピラー・アンダーフロア
 - ② 混合渦：異なる流れが合流して発生する渦…タイヤ周り・エンジン冷却風出口
 - ③ 後流渦：物体後方で上面下面側面それぞれの流れが合流して発生する渦…車体後部・ドアミラー
- 従来車において、「剥離渦」「混合渦」「後流渦」が

主に発生している部位とその車両全体の運動エネルギー損失に対する割合を Fig. 4 に示す。これらの渦を抑制する制御技術を用いて運動エネルギー損失量を低減する。

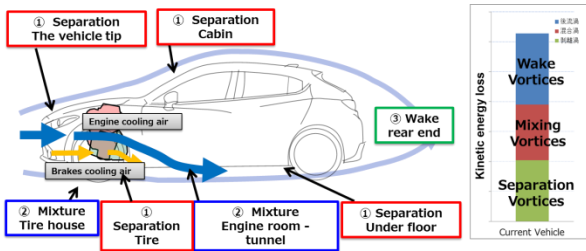


Fig. 4 Kinetic Energy Loss at Each Part of Vehicle

これまでの研究^{(4) (5)}から明らかになった「空気抵抗の発生要因となる渦構造の抑制の考え方 (Fig. 5)」に風流れの運動エネルギー損失の考え方を融合させ進化させた。

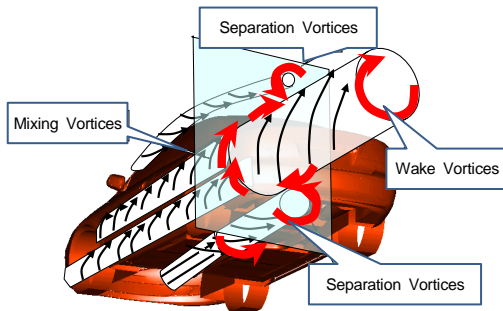


Fig. 5 Flow Structure around Vehicle

車両周りの各部位の「剥離渦」と「混合渦」を抑制することで、各部位の「風流れの運動エネルギー損失量」を低減しつつ、その結果、車両後端での速度差を小さくし、車両後方の「後流渦」を弱める。加えて、車両後端での上下左右の速度差を制御することで更に後流渦を弱め、後流渦の「風流れの運動エネルギー損失量」も低減し、車両トータルで「風流れの運動エネルギー損失量」を低減する。

これをどのような車両でも、つまり、車形が変わっても、車高が変わっても、それぞれの渦を同じ考え方の技術で制御することで、個別車両で相似形のような風流れを実現した。

この「風流れの運動エネルギー損失量」を低減する風流れ制御の肝は「剥離渦」は圧力勾配を制御して、物体表面に沿わせる(速度差を小さくすること)、「混合渦」と「後流渦」は圧力勾配を制御して合流する流れの速度差を小さくすることである。

3. 風流れ制御技術

本章以降では、これまで述べてきた風流れの運動エネ

ルギー損失量を低減する風流れ制御の考え方に基づいて、以下 3.1~3.4の制御技術の具体例について述べる。

- 3.1 アンダーフロアで発生する剥離渦
- 3.2 キャビンで発生する剥離渦とミラーの後流渦
- 3.3 タイヤ周りで発生する混合渦
- 3.4 車両後端で発生する後流渦

3.1 剥離渦：アンダーフロア

アンダーフロア周りで発生する剥離渦を抑制し、エネルギー損失量を低減するために検討した実例を述べる。

まず、フロアアンダーカバーでフロア表面の平滑度で圧力勾配を制御し速度差を小さくした。

特に制御の難しい箇所に、①トンネル部分には排気管周りの冷却風を確保するための排出口を設定したカバー ②リアサスペンション部には整流する機能を持たせたカバー ③サイレンサー周りには整流のためにフィンを設定 (Fig. 6)することによって速度差を小さくし (Fig. 7), アンダーフロア周りの剥離渦のエネルギー損失量を低減することができた。

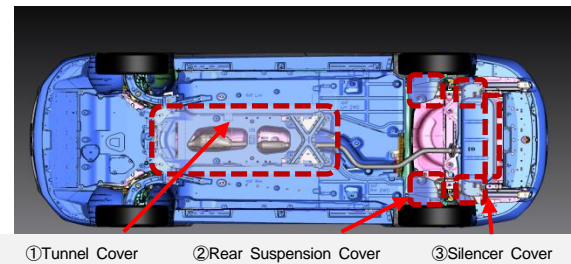


Fig. 6 Aerodynamics Optimization around Floor

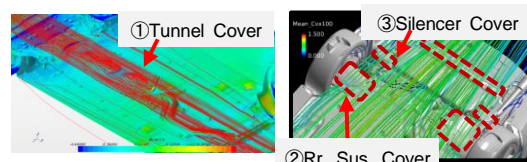


Fig. 7 Flow Stream Line around Floor

3.2 剥離渦：Aピラー・後流渦：ドアミラー

キャビン周りで発生するエネルギー損失量は空気抵抗になるだけでなく、一部が空力騒音となって車体を伝搬し、乗員に騒音として伝わる。車室内の快適性向上のためには、乗員への寄与が高いAピラーとドアミラーで発生する渦を抑制し、空力騒音を低減する必要がある。Aピラーの渦は、下流に向かって圧力が増加する過程で発生するため、圧力勾配を制御することで剥離渦を抑制できる (Fig. 8)。ドアミラーの渦は、後端での速度差を減らすことで、流れのせん断や巻き込みが低減され、後流渦を低減できる (Fig. 9)。また、渦をコントロールする各形状因子の寄与度を調べるため、それぞれの部位で単

純化したモデルを使って品質工学的な実験計画法を行った。その結果、Aピラー形状のRや段差、ドアミラー形状のRや面角度を最適化することによって、剥離渦・後流渦を低減できるようになり(Fig. 10)、Aピラー周りの剥離渦・ドアミラー周りの後流渦のエネルギー損失量を低減することができた。

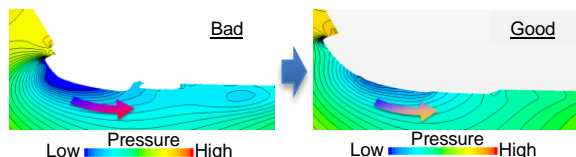


Fig. 8 Pressure Distribution of A-Pillar Cross-section

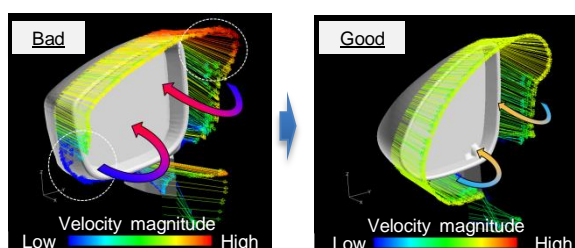


Fig. 9 Velocity Vector of Door Mirror Rear End

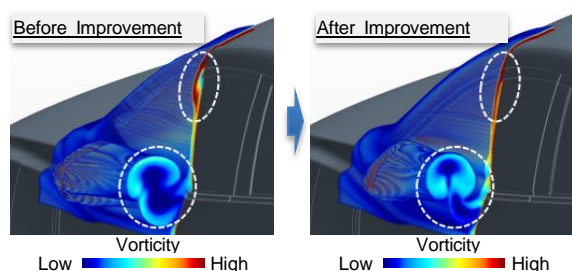


Fig. 10 Vorticity Distribution around A-pillar and Door Mirror

3.3 混合渦：タイヤ周り

従来の商品群では、タイヤハウスから流出する流れにより混合渦が生じ、エネルギー損失量が大きくなっている。そのため、タイヤハウスから吹き出す流れの抑制を試みたが、ブレーキの冷却性能確保の目的でブレーキローターに必要な風量を当てる必要があり、これ以上のタイヤハウスから吹き出す流れの抑制は難しかった。そこで、タイヤハウスを出入りする流量を分析し検討した結果、ブレーキ冷却風を確保しつつ、混合渦を抑制するためには、ブレーキ冷却風の出口であるホイール部分は圧力差を確保し吹き出す流れを許容しつつ、タイヤハウスの後方では、タイヤハウス内の圧力を下げ、その冷却風をタイヤハウス内に引き込むことを見出した。これにより、ブレーキ冷却風を確保しつつ、タイヤハウス部の混

合渦を抑制し、エネルギー損失量を低減することが可能となった(Fig. 11)。

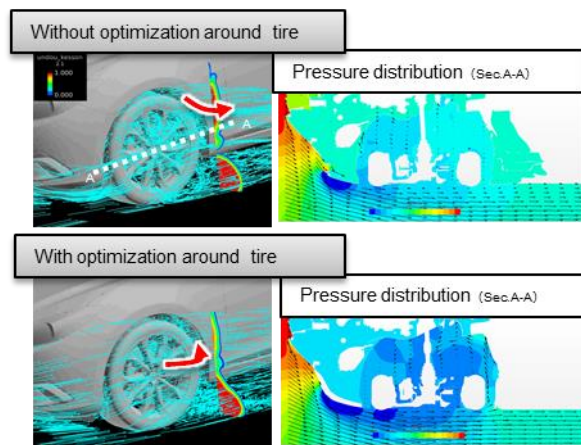


Fig. 11 Flow Stream Line & Pressure Distribution around Tire

タイヤディフレクター及びスブラッシュシールドカバーとタイヤハウス前方外側に導風ダクトを設定することで、タイヤハウス内外の圧力差を最適化した。その結果、圧力差でタイヤハウスからの流出を抑制するとともに、タイヤハウス後方では流れを引き込み、風向をそろえることで、混合渦を抑制することができ(Fig. 12)、タイヤ周りの混合渦のエネルギー損失量を低減することができた。

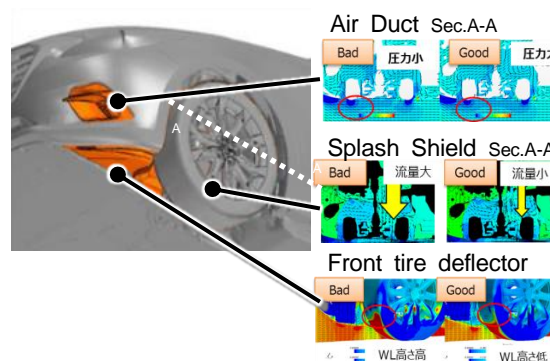


Fig. 12 Aerodynamics Optimization around Tires

3.4 後流渦：車両後端

車両後端で発生する後流渦を抑制し、運動エネルギー損失量を最小化するには、車両後端までの剥離渦・混合渦を抑制して風速差を小さくすることに加え、後流渦の規模を小さくするために、途中で剥離を発生させない程度に風向をそろえる必要がある。

そのために、前述の剥離渦・混合渦の抑制に加え、Fig. 13に示すように、車両後端の面積を小さくしつつ上面下面側面の風向差を小さくする目的で、アンダーフロアの角度を緩やかに跳ね上げる床下ラインを適用し、後流渦のエネルギー損失量を低減することができた。

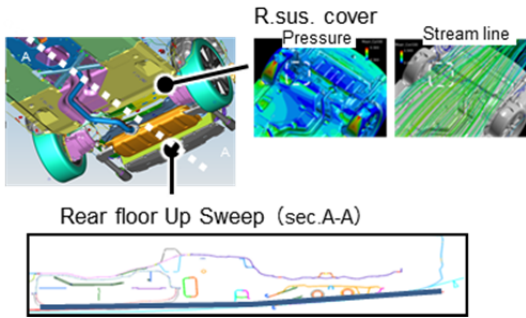


Fig.13 Aerodynamics Optimization around Rear Floor

4. 次世代商品群の空力性能

3章で述べた制御技術を各構成要素に適用することで、「剥離渦」「混合渦」「後流渦」を抑制し、車両周りの風流れの運動エネルギー損失量を現行車より14%低減する技術を手にすることができた (Fig. 14)。

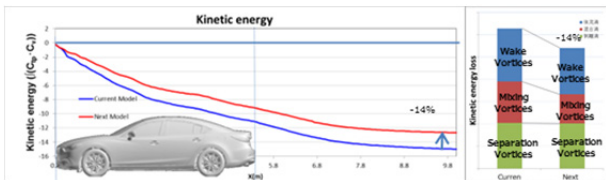


Fig. 14 Kinetic Energy of Flow around Vehicle

加えて、車両スケールが異なるスコープ間でも、同じ考え方の技術で制御することで、全スコープで車両周りの風流れの運動エネルギー損失量を低減し、クラストップレベルの性能を実現する技術を手にすることができた (Fig. 15)。

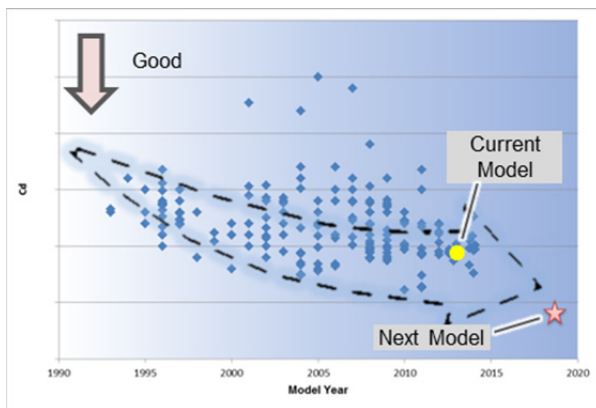


Fig. 15 Cd Performance

5. おわりに

従来商品群までに培ってきた風流れ制御コンセプトと空気抵抗低減技術を、車両周りの風流れの基本特性として運動エネルギー損失量を定義し、その特性値を制御する考え方で進化させ、次世代商品群の開発に適用した。その結果、クラストップレベルのCd目標を達成する技術を手に入れ、「魂動デザイン」を実現しつつ風流れを制

御する開発コンセプト、そして空気抵抗低減技術の実効性を確認した。

参考文献

- (1) 寺門晋ほか：空気抵抗低減に向けた車両後流構造に関する一考察，自動車技術会春季大会前刷集，No.78-15S, pp.1860-1865 (2015)
- (2) 外館直樹ほか：自動車周りに発生する縦渦による誘導抵抗の予測，自動車技術会春季大会前刷集，No.22-16, pp.509-514 (2016)
- (3) 妹尾泰利：流れの運動量・エネルギーと圧力損失②，ターボ機械，第16巻第12号，pp.46-52 (1988)
- (4) 農沢隆秀ほか：自動車の空気抵抗を増大させる車体周りの流れ構造：第2報，日本機械学会論文集B編，75, pp.1807-1813 (2009)
- (5) 中田章博ほか：新世代Bカー商品群の空気抵抗低減技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，自動車技術会春季大会前刷集，No.23-15S, pp.583-588 (2015)

■ 著 者 ■



岡本 哲



村上 健太



大平 洋樹



伊川 雄希



西田 周平



李 暉

5

次世代足廻り部品向け防錆技術開発 Development of New Anti-corrosion Process for Suspension Parts

田中 正顕*1 家永 篤志*2 浅田 照朗*3 落岩 克哉*4
Masaaki Tanaka Atsushi Ienaga Teruaki Asada Katsuya Ochiwa
赤木 宏行*5 重永 勉*6 深堀 貢*7
Hiroyuki Akaki Tsutomu Shigenaga Mitsugi Fukahori

要 約

マツダでは、全てのお客様に「走る喜び」と「優れた環境・安全性能」を提供するため、ダイナミクス性能向上と環境性能の両立から、軽量化技術開発に取り組んでいる。しかし、厳しい環境下で使用される足廻りの板金部品は、溶接部近傍やエッジ部の錆による板厚減少の問題があり、薄板化による軽量化が難しい。

一方、錆びにくい部品の実現は、お客様が車を所有する喜びにつながり、魅力性能の一つになると考える。

本技術は、被塗物と電着塗装の改善により、従来工法と比較して、防錆性能を大幅に向上させることを可能とした。この取り組みについて紹介する。

Summary

In order to provide “Driving pleasure” and “Excellent environmental and safety performance” to all customers, Mazda has been working on weight saving technologies by balancing both better dynamics performance and environmental performance. However, it is difficult to accomplish weight saving by thinning material of the suspension parts which are used under severe environment due to material thickness reduction issue caused by the rust of adjacent welding bead and edge.

On the other hand, creating rust resistant parts is connected to the joy of owning vehicles to customers and can be one of the attractive performances.

This technology made significant progress of antirust performance possible by improving coated object and electro deposition coating compare to the conventional process. Here is our approach.

1. はじめに

二酸化炭素排出量の低減、更なる燃費の向上が必要な中、自動車にはより一層の車両重量の軽減が求められている。また、マツダの理想は、安心感と運転する喜びを実現し、お客様に愛されるクルマを提供し続けることを目指している。しかし、足廻り部品は特に環境が厳しく、市場走行後早期に錆が発生することでお客様に部品破損のイメージを想起させる。更に、早いタイミングでの発錆は、効率的な軽量化手段である鋼板の薄板化を阻害する。マツダではこの市場走行後早期に生じる、信頼性に影響しない軽微な錆を「見栄え錆」と定義し、改善に取り組んでいる。この見栄え錆を抑制することで、車を所有し、ともに暮らす喜びに貢献するとともに、腐食起因

の経年劣化による疲労強度の低下を抑制し、今後の更なる軽量化を可能とする。

欧州の一部地域を中心に、防錆上厳しい使用環境が存在し、この地域では、お客様の錆に対する感度が非常に高い。それら厳しい環境を模擬した、開発車両の防錆評価結果をFig. 1に示す。黒色塗装が部分的に赤錆びに覆われていることが分かる。

本報では、これらを改善する「次世代足廻り部品向け防錆技術開発」について報告する。

*1,5 シャシー開発部
Chassis Development Dept.

*3,6,7 技術研究所
Technical Research Center

*2 技術本部
Production Engineering Div.

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



Fig. 1 Chassis Condition after Vehicle Corrosion Test

2. 現状分析

2.1 現状の分析

Fig. 1の発錆している弱点部位は、(1)溶接ビード上のスラグ、(2)エッジ部、(3)酸化被膜付着部、である。Fig. 2にこれらの模式図を示す。

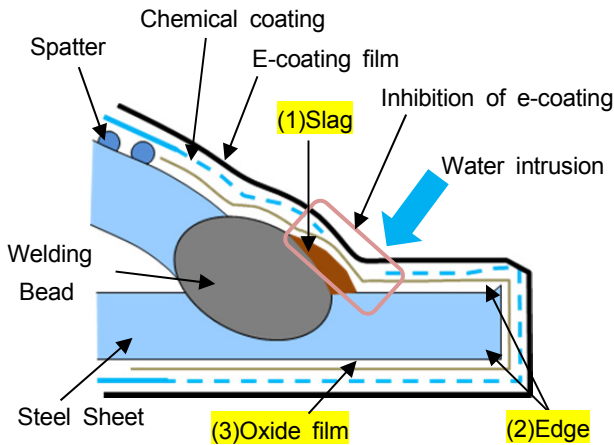


Fig. 2 Schematic of Weak Point in Stamping Parts

自動車の足廻り部品に多く用いられる、加工した鋼板を電着塗装により被覆する構造の場合、防錆性能の弱い部位から発錆する。

鉄は酸化した状態、すなわち錆びた状態で最も安定する性質を持ち、部品の弱点部から酸化鉄に戻ろうとする。これを抑制するには、酸化に必要な水分と酸素を遮断することが最も効果的である。しかし、実際には、使用環境や部品構造などで決まる被水環境が、想定した部品の防錆性能を上回る場合があり、錆が発生する。弱点部位の発錆メカニズムを把握し対策することで、無駄なく防錆性能を向上させることが可能となる。

現行工程を最大限活用しながら、全体の防錆性能を早期に底上げするねらいで、発錆タイミングを遅らせることに寄与度の高い、(1)(2)の改善を重点的に取り組んだ。

2.2 発錆メカニズム

防錆性能は電着塗装により発揮される。塗装層を乗り越えて、水分・酸素が母材に到達し、鉄の酸化反応が始まる (Fig. 3)。

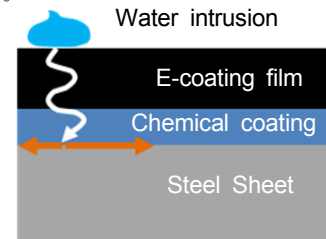


Fig. 3 Corrosion Mechanism

腐食を抑制するためには強固な塗膜で全面を覆うことで、水や酸素の侵入を防ぐことが理想であるが、足廻り部品は路面からのチッピングなどによる塗膜への傷の発生や、さまざまな腐食環境に曝され被塗物側からの耐食性改善も併せて考えることが必要である。Table 1に示すようにそれぞれの弱点部位において、腐食メカニズムに基づいた耐食性改善を検討する。

Table 1 Measures to Improve Issues

	Improvement of coated object	Conversion treatment	e-coating
(1) Slag on welding bead	◎	—	○
(2) Edge	○	△	◎
(3) Oxide film	—	○	△

Priority High:◎ Middle:○ Low:△

(1) 溶接ビード上の発錆要因は、主にビード上の「スラグ」^①である。スラグは、Si, Mnを主成分としたガラス質の物質で、電気を通さないため電着塗膜が生成しない。また一見、平滑に見えるが、実際はFig. 4のように凹凸、亀裂があり、容易に水が浸入し、母材に到達する。

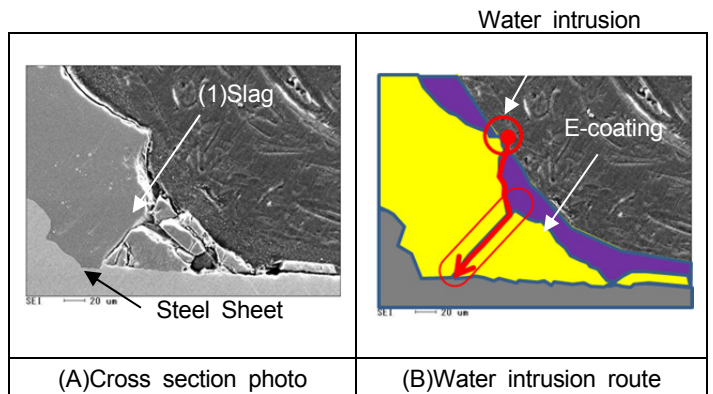


Fig. 4 Appearance of Slag on Welding Bead

(2) エッジ部は、電着直後のウェット膜状態では被覆されているが、焼き付け工程で被覆性が悪化する。これは、電着塗膜は外観品質やボルト締結性から一定の平滑性が求められるため、焼き付け時に一旦粘性が下がり、流動して平滑になる性質「フロー性」を有すためである。更に、プレス加工後のエッジ部には通常、バリが生じるため、更に被覆性が悪化する。Fig. 5にエッジ部の詳細形状を示す。(A)に通常のバリを、(B)に大きなバリを示す。両方ともにエッジ部頂点の膜厚が他の部位に比べ薄くなっている。

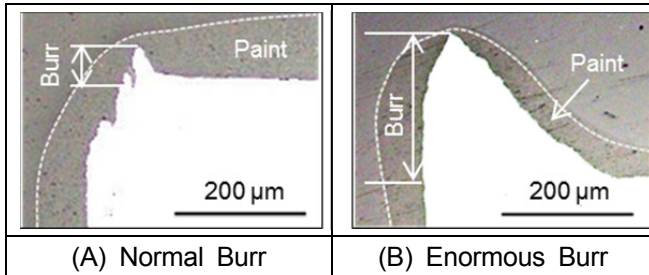


Fig. 5 Appearance of Edge⁽²⁾

2.3 改善方針

見栄え錆とは、信頼性に影響しない、市場走行後早期に生じる軽微な錆を指す。

従来、信頼性を重視した防錆技術開発を行っており、見栄え錆は許容してきたが、今後は、お客様に愛される車を実現するために、見栄え錆を性能ととらえ、発錆ゼロの期間を重視した開発とする。これにより、経年錆による信頼性劣化も改善できる。

以下にそれぞれの弱点部位の改善方針を述べる。

(1) 溶接ビード上のスラグ

溶接ビード上の耐食性改善には、スラグを縮小することが効果的であり、究極はスラグをなくすことである。しかし現実には、コストと生産性を両立しながら、スラグをゼロにすることは極めて難しい。

スラグを極小化した上で、電着塗膜のフロー性を高める、もしくは、電着塗膜を厚くし、塗料がフローする時の流動する量を増やすことでスラグをカバーする考え方で改善する。

(2) エッジ部

エッジ部の耐食性を改善するためには、エッジ部のバリ部を塗膜で覆うことが重要である。被塗物側のバリ高さを、全ての部位である一定値以下に管理することは、量産時の金型管理を考慮すると現実的でないため、電着塗料の改良で対応することを考えた。ここで、Fig. 6に溶接ビード上のスラグ部とエッジ部の被覆性の模式図を示す。スラグの被覆にはスラグサイズの縮小、電着塗装の塗膜厚さとフロー性を高める必要があるのに対して、エッジの被覆にはフロー性を抑制する必要がある。

この背反を両立する塗料開発が必要である。

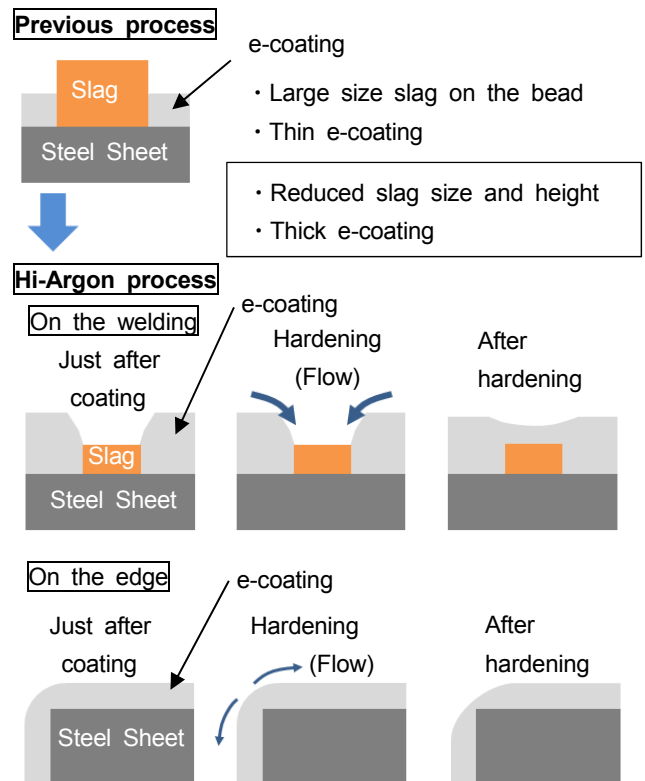


Fig. 6 Mechanism of Painting Flow

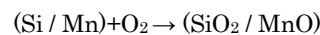
3. 要素技術開発と車両適用開発

3.1 溶接ビードの改善（低スラグ化）

溶接には、母材の強度を上げる目的と、溶融金属内部の酸素を外部に排出する目的で添加元素、Si, Mnが必要である。これらがアーク熱により周辺の酸素成分と反応し、溶接ビード部にスラグが生成される。大量生産に適すMAG溶接では、シールドガス中に多量の酸素成分を含むため、スラグを完全になくすことは極めて困難である。

一方で前述のとおり、スラグによる電着塗膜の不全部を起点とし発錆する。後工程でスラグを完全に除去することは、狭隘部分の多い足廻り部品では困難であり、防錆性能向上には、スラグ生成量の抑制が効果的である。

スラグ生成は以下の化学式で示される。



金属添加元素のSi, Mn等の易酸化性元素量を個別にコントロールすることは、量産の多種多様な材料に対しては困難なため、シールドガス中の二酸化炭素に代表される酸素成分を抑制することでスラグ生成量を抑制する。

マツダと(株)神戸製鋼所で開発した「ハイアルゴン溶接」⁽¹⁾により、通常に比べて極めて低い二酸化炭素量での溶接施工性を確保し、電着塗装で被覆可能なスラグ量・サイズとすることが可能となった (Fig. 7)。

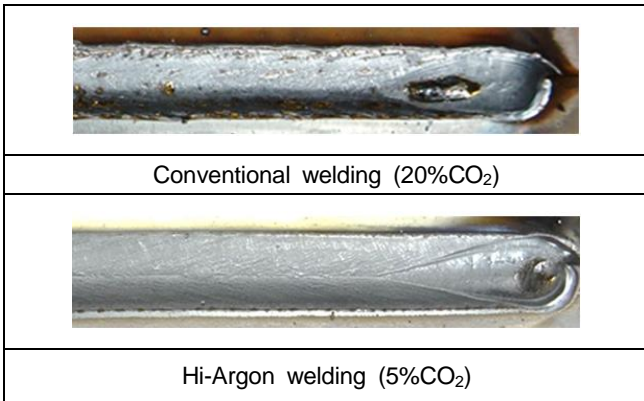


Fig. 7 Welding Bead by Hi-Argon Welding Process

従来溶接工法とハイアルゴン溶接で施工後、量産条件で電着塗装を施した試験片に対する、腐食試験結果をFig. 8に示す。スラグが少ないハイアルゴン溶接は、良好な結果を得た。

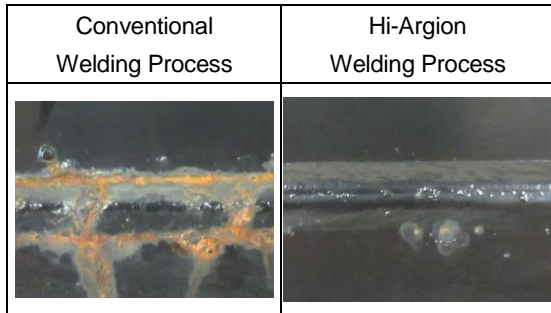


Fig. 8 Result of Combined Cycle Corrosion Test (30cycle)⁽²⁾

3.2 新電着塗料の開発

次にエッジ被覆性評価のため、現在の量産電着塗料をベースに、Table 2のように電着膜厚（一般部のねらい膜厚）を固定し、焼き付け時粘性を変動させた試験片を製作し、複合サイクル試験及び実車促進腐食試験を実施した。各試験片はハイアルゴン溶接で施工した。

エッジ部の複合サイクル試験10サイクル及び30サイクルにおける赤錆発生率（＝赤錆が発生したエッジ長÷試験片のエッジ長）の測定結果をFig. 9に示す。粘性の増加とともに、耐食性が大きく向上することを確認した。

Table 2 Test Piece Specification

	E-coating Thickness	Viscosity at baking
A	30μm	Standard
B	30μm	High
C	30μm	More High

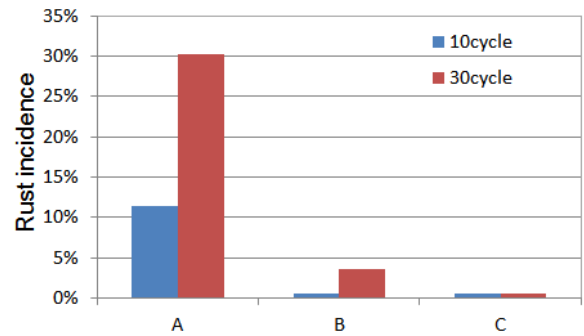


Fig. 9 Result of Corrosion Test (Edge)

しかし、前述のとおり、高い粘性は溶接ビード上のスラグ被覆性を悪化させる懸念がある。

Fig. 10に溶接部の実車促進腐食試験による評価を行い、試験後の発錆量の測定結果を示す。

基本的に粘性が高くなるほど赤錆が増える。エッジ錆を大幅に改善する仕様Cでは、溶接ビードと母材の境界付近の耐食性が低下した。粘性が高すぎて、スラグの被覆性が悪化したためと考える。

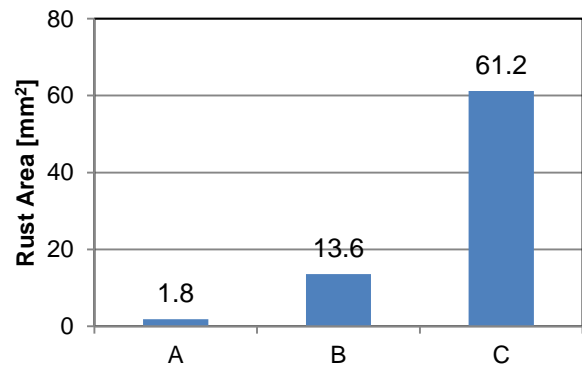


Fig. 10 Result of Corrosion Test (Welding)

溶接ビード上のスラグ部とエッジ部の被覆性に対する背反を解くため、エッジ部被覆性を電着塗料の焼き付け時粘性アップで確保し、逆に不利になる溶接ビード上のスラグ部は、スラグ量とサイズの縮小と、電着膜厚アップで被覆性を確保することとした。しかし、必要以上に厚過ぎる膜厚は、コストアップを伴い、締結部の性能を悪化させるため、膜厚：30μm、塗料仕様Bを対策仕様とした。Fig. 11に示すように標準仕様と膜厚アップ仕様で評価を行い、耐食性向上を確認した。

	E-coating Thickness	
	20μm	30μm
Hi-Argon Welding Process		

Fig. 11 Result of Combined Cycle Corrosion Test (30cycle)

3.3 電着塗装の厚膜化

厚膜化対応を行うにあたり、4つの制御因子（電圧、電極面積、浴温、溶剂量）を選定し、これらの寄与を評価した。この中で、電圧は上げ過ぎると亜鉛メッキ鋼板に対して、ガスピンと呼ばれる針孔状のピンホールが発生しやすくなることが知られているため制御幅が少なく、浴温も省エネルギーの観点から上昇は最小限に留めたいため、電極面積と溶剂量をメインのパラメーターとして、ラボテストとライントライを実施し、電極の追加本数と溶剤の増加量を決定した。溶剤については成分の見直しも行い、最適な配合にすることで電着塗料のロバスト性を上げ、結果として設備は電極追加のみで対応が可能となった。

溶剂量を上げる懸念点として、付きまわり性の低下、及び、エッジ部被覆性の低下が考えられたが、付きまわり性については、足廻り部品は比較的単純な断面で、電着に必要な穴も十分確保できていること、そして、電流値を上げる対策実施により、断面内に現状同等の膜厚が確保できた。エッジ部については、粘性増大による被覆性向上効果を妨げない条件を確認し、溶剤配合を決定した。

3.4 塗膜耐食性短期評価技術⁽²⁾の適用

塗装部の防錆品質の造り込みには、被塗物と塗膜双方の極めて多岐にわたる耐食性影響因子を精度良く制御することが不可欠である。従来、複雑なこれらの因子を制御して品質確立するために実腐食試験が用いられてきた。実腐食試験は対象物を発錆させ、その状態を定性評価する試験であり、長いものでは半年以上の試験期間が必要である。従って、防錆品質の造り込みにはおのずと長期の開発期間が必要で、車両開発期間短縮のネック項目のひとつであった。

この課題を塗膜耐食性短期評価技術により克服した。本評価技術は極めて短時間（従来3か月⇒約5分）に精度良く実部品のさまざまな部位の耐食性を直接定量化することができる。

この技術了新電着塗料の開発に活用し、従来より開発期間を大幅に短縮できた。

4. 実部品への適用と防錆評価結果

ここまでに検証してきた、見栄え錆改善技術を量産部品に織り込み（Fig. 12）、実車促進腐食試験を実施した。部品仕様は以下とした。

- 電着膜厚（一般部のねらい膜厚）：35μm
- 粘性：仕様B（Table 2）
- 被塗物側：ハイアルゴン溶接（Ar+5%CO₂）
- 被塗物側の鋼板材料は量産品



Fig. 12 Appearance of Sus-crossmember by New Anti-corrosion Process

Fig. 13に実車促進腐食試験後の部品外観写真を示す。実線部：溶接ビード、破線部：エッジを示す。従来塗装と比較し、大幅に発錆を抑制することができた。

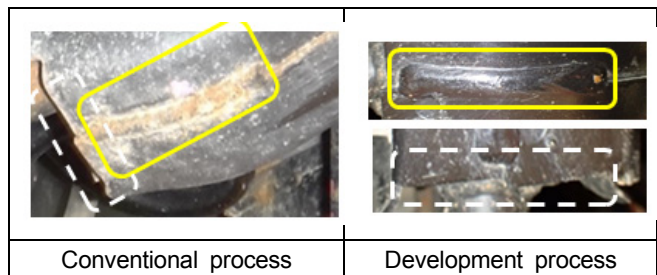


Fig. 13 Appearance of Sus-crossmember after Vehicle Corrosion Test

5. おわりに

見栄え錆の原因である溶接ビード部、エッジ部に対して、電着塗装の改善、厚膜化、被塗物のスラグ極小化の組み合わせで耐食性を大幅に改善し、その開発の過程で以下の知見を得た。

従来背反を解けなかった、溶接ビード上とエッジ部の防錆性能の両立を、以下の考えで解決した。

- ・ハイアルゴン溶接適用により、スラグ量・サイズを極小化し電着塗料の被覆性を向上した。
- ・電着塗料の焼き付け時粘性のコントロールで、スラグ被覆性とエッジ被覆性を両立した。
- ・塗膜耐食性短期評価技術の適用により、緻密なパラメーター・スタディが可能となり、実部品による実車評価に頼らない防錆技術開発の足掛かりを得た。

一方、今後の課題として以下の検討が必要である。

- ・現状の構造体において、更なる防錆性能向上のため、酸化被膜の完全な除去。
- ・究極の板金部品・薄板化実現に向け、更なる超ハイテン材の適用拡大が必要。その際、超ハイテン材は耐食性が不利になるので、更なる耐食性の改善、及び疲労強度の改善。

最後に、本研究開発を進めるにあたり多大なご協力をいただいた(株)ワイテック様、(株)神戸製鋼所様、日本ペイント・オートモーティブコーティングス(株)様の皆様に深くお礼申し上げます。

参考文献

- (1) 田中・斉藤・深堀ほか：ハイアルゴン溶接の技術開発，マツダ技報，No.34，pp.122-127 (2017)
- (2) 浅田・重永：車両防錆品質の造り込みと管理プロセスを革新する塗膜耐食性短期評価技術の実用化，マツダ技報，No.35，pp.90-94 (2018)

■ 著 者 ■



田中 正顕



家永 篤志



浅田 照朗



落岩 克哉



赤木 宏行



重永 勉



深堀 貢

6

新型CX-8の紹介
Introduction of All-New CX-8

松岡 英樹*1 佐々木 克明*2 諫山 慎一*3
Hideki Matsuoka Katsuaki Sasaki Shinichi Isayama
栗原 洋治*4 松原 敏雄*5
Yoji Kurihara Toshio Matsubara

要 約

新型CX-8は、マツダ新世代商品国内仕向けCXシリーズの最上位となる新規導入モデルであり、多人数乗用車の新たな選択肢としてマツダが新しく提案する3列シートクロスオーバーSUVである。「走りやデザインを諦めたくない。でも家族や友人ともドライブを楽しみたい」、「よりスペースや、より多くのシートキャパシティが欲しい」、「より上質な空間の中で、快適な移動をしたい」というお客様に向けて、「こんなクルマが欲しかった」と喜んで使っていただけるクルマを実現した。

Summary

The newly introduced All-New CX-8 is a high-end model in Mazda's new-generation "CX series" lineup for the Japanese market. Mazda proposes the three-row seat Crossover SUV as a new option of passenger vehicles with a large seating-capacity. We realized a vehicle that satisfies the customers having such desires as: "Don't want to give up either driving performance or design, but want to enjoy driving with family and friends", "Want more space and more seat capacity", and "Want a comfortable traveling in a superior space."

1. はじめに

マツダは、新世代商品の第1弾となるCX-5を2012年に導入した。それ以降、多くの新世代商品を導入し、世界中のお客様やジャーナリストから高い評価をいただいている。2017年には、技術開発の長期ビジョンとして、クルマ本来の魅力である走る喜びによって、美しい地球と豊かな人・社会を実現し、人の心を元気にすることを目指す「サステイナブル“Zoom-Zoom”宣言2030」を策定した。

新型CX-8は、長期ビジョンに沿った最新・最高の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CXシリーズの国内最上位となる車種であり、マツダが新しく提案する3列シートクロスオーバーSUVである。これまでの「多人数乗用車＝ミニバン」という概念を打ち破る商品であり、新しい市場をお客様とともに創造していきたいという想いで開発した。マツダの新世代商品に乗っていただいている方々が、これからはずっとマツダのクルマに乗り続けていただくために、より広い空間をもち、より乗車人数が多く、より上質な

仕立てを兼ね備えた商品である。走る喜びを追求すると同時に、進化したクリーンディーゼルエンジンや最新の先進安全装備を搭載して地球や社会に配慮した商品を実現した。

2. 商品コンセプト

新型CX-8は、マツダの国内市場における最上位SUVである。多人数乗用車の新たな選択肢として、このクルマを選んでいただきたい主要なお客様は、ご家族の方々と考えている。

家族それぞれの個性を尊重しながらも、かけがえのない時間を家族で一緒に楽しみたい。良き親としてだけでなく、一人の大人として人生の多様な側面を輝かせたいと心掛ける人たち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たちである。これらターゲットユーザーに提案する、3つのキーとなる商品価値を定義した。

① 日々の生活に心地良い刺激を提供する、普遍的な美しさと上質なデザイン

*1～2 商品本部
Product Div.

*4 車両開発本部
Vehicle Development Div.

*3 デザイン本部
Design Div.

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

- ② 行動範囲を広げる、ロングツーリング・オールラウンダー
- ③ 全ての乗員が安心・快適にカーライフの楽しさを共有できる室内空間

3. 商品特長

国内仕向け新世代商品として第8弾となる新型CX-8は、国内最上位SUVとして最新かつ最高のSKYACTIV技術と魂動デザインを採用した。3列シートをもつ多人数乗用車として、乗員全ての優れた快適性と十分な実用性を備えつつ、一人の大人として心を動かされる上質なデザインや走る喜びを、マツダの国内最上位SUVに相応しいレベルで両立した。家族や仲間と過ごすアクティブな時間から、ドライバーが一人で過ごす上質な時間まで、あらゆるシーンにおいて際立つ価値を感じていただける商品を実現した。

また、国内における最上位SUVとして、本物を求めるお客様にもご満足いただけるように、風格や質感についても細部にわたって吟味を重ね、インテリアには本杢を使った装飾やナッパレザーを使ったシートを採用した。

3.1 デザイン

新型CX-8は、マツダデザインが取り組む「魂動」の哲学を更に深化させ、より一段プレミアムな魅力を感じていただけるデザインを実現した。普遍的な美しさと上質なデザインによって、お客様の日々の生活に心地良い刺激を感じ続けていただきたいという想いをこめ、「TIMELESS EDGY」をキーワードに設定した。

- (1) 美しいスタイリングと多人数乗車を両立したエクステリアデザイン

ボディーの4隅に大径のタイヤをレイアウト、キャビンをしっかり支えて見せるようにバランスを取ることでSUVらしい力強さを表現。フロントとリアは水平基調のキャラクターで要素を整理し、大人の落ち着きや、上品で凛とした佇まいを表現した。また、一般的に居住性確保のため箱形になりがちなキャビンのボリュームを吟味し、3列目にも大人がきちんと座れるスペースを確保しつつ、多人数乗車を感じさせない伸びやかさやエレガントさ、そして走りの良さを感じさせるエクステリアを実現した (Fig. 1)。



Fig. 1 Exterior Design

- (2) 適度なタイトさに包まれて居心地の良さを堪能できるインテリアデザイン

ただ広い、大きい、ゴージャスといった既存の価値観とは一線を画し、適度なタイト感の中に「走る喜び」と「上質な豊かさやこだわり」を感じられるマツダらしい独自の世界観を表現した。造形の美しさはもちろん、素材の選択や色味についても徹底的に吟味を重ね、今回は特に使い込むほどに味わいが深まっていく「本物の素材」としてアユースの木を積層しスライスした本杢加飾と、しっとりとした滑らかな触感が特徴のナッパレザーを採用。洗練されたモノに囲まれた「こだわりの書斎」を思わせる、上質さと落ち着きに満ちた空間に仕立てた (Fig. 2, 3)。



Fig. 2 Interior Design

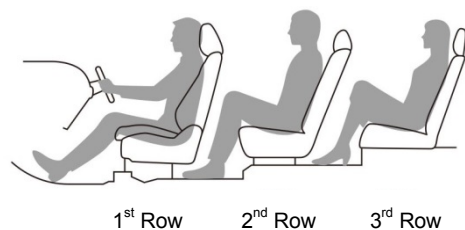


Fig. 3 Real Wood Panel

3.2 パッケージング

3列シートクロスオーバーSUVとしての機能や実用性を満たす室内空間をしっかりと確保しつつ、国内の道路環境や駐車場事情を考慮したボディーサイズとした。

室内空間は、「人間中心の設計思想」の基、3列全ての乗員が、自然な姿勢で心地良くしっかりと座れ、ロングドライブでも快適に過ごせる上質な空間を実現した (Fig. 4)。



- 1st Row Seat: Everyone can take "The ideal driving position" which is the common value for all Mazda models
- 2nd Row Seat: Realize a space where large adult can relax with room by the seat with wide width and long slide
- 3rd Row Seat: Realize a space where an occupant with 170cm height feels comfortable without difficulty

Fig. 4 Interior Package

運転席では、ドライバーを主役に考えるマツダ独自の安全思想「プロアクティブ・セーフティ」の考え方に従い、ドライバーが安全に運転できる状態を確保した上で、危険を未然に防げるように良好な運転環境を実現した。まず理想のドライビングポジションとして、ドライバーの真正面にステアリングを、また足を自然に伸ばした位置にペダルを配置した。自然な姿勢の保持と無駄のない操作は、意のままの走りをサポートする。次に、安全運転と情報操作を両立させる「ヘッズアップコックピット」の考え方に従い、さまざまな情報を扱いつつ運転に集中できる環境を実現した。運転中に、道路前方から「目」を離すことなく運転に必要な走行情報を確認できるように、フロントウィンドウ投射型のアクティブドライビングディスプレイを採用した。

3列シートクロスオーバーSUVとして、2列目シートは日常での使いやすさから非日常における移動の楽しさまで、さまざまなシーンやニーズに対応できる3つのシート仕様を設定した。いずれも人間工学に基づいた設計によって快適な座り心地を実現するとともに、10mmピッチで調整できる前後120mmのスライド機構とリクライニング、3列目シートへのウォークイン機能を備えている。3列目シートは人間工学に基づいて、フロアと座面の高さを最適に設計するとともに、2列目シートの下にはつま先が差し込めるスペースを設けた。また身長170cmの乗員が自然な姿勢で座れる快適なシートを実現している。

① キャプテンシート、コンソールボックス付き

2列目乗員が、1列目と同様な快適性や利便性を感じながら移動を楽しんでいただけるように、キャプテンシートを採用し、シート間には1列目シートと同様なアームレスト付きコンソールボックスを備えた。このキャプテンシートは、骨盤周りを面で支えるシート設計と幅広い座面により、1列目シートのような心地良いホールド性と座り心地を実現した (Fig. 5)。



Fig. 5 Captain Seat with Console Box for 2nd Row

② キャプテンシート、センターウォークスルー

3列目へアクセスする頻度が高いお客様に向けて、2列目中央から3列目へ乗り降りができるように、センターウォークスルーが可能なキャプテンシートを採用した。また、キャプテンシートの車両内側に、アームレストを装備した。このアームレストは、シートを後傾させた際にも適切な位置にセットできる角度調整機構付きである。ドアトリム側のアームレストと相まって、安定した姿勢の保持を可能としている (Fig. 6)。



Fig. 6 Captain Seat with center trough

③ 6:4分割シート

キャプテンシートと同様の基本構造によって優れた座り心地を実現する左右席と、シートバックにアームレストを内蔵した中央席により最大7人乗車を可能とした (Fig. 7)。



Fig. 7 Bench Seat

お客様のさまざまなシーンやニーズにフレキシブルに応えられる収納性とラゲッジスペースを実現した。

室内収納スペースには、1列目から3列目までそれぞれの使い方に配慮し、全ての乗員にとって使いやすさを徹底的に追求した。1列目には、蓋付きの大型コンソールボックスを採用し、大切なものを収納できる大きなスペースを実現した。2列目の中央にもシートタイプによっては、セカンドシートコンソールボックスを設定。1列目同様の蓋付きの大きな収納スペースやカップホルダーに加えて、ティッシュボックス等が収納できるスライド式の収納スペースを実現した (Fig. 8)。3列目には、500mLのペットボトルとスマートフォンなどを収納できる小物入れを採用した。



Fig. 8 Console Box for 2nd Seat

ラゲッジスペースは、最上位SUVとして大きな荷物が積みこめる空間を確保した。また、積み下ろしができるように、2列目・3列目シートを倒すだけでフラットな荷室空間となるように工夫を加えた。この状態では、荷室長が2.1m以上となり、旅行先で疲れた時などに仮眠できる空間を提供する。3列目シートを倒したときには、ゴルフバッグが4個積載できる空間である (Fig.9)。



Fig. 9 Luggage Space with Bed Pad (option)

トランクボード下には、307mmの深さをもつサブトランクを設定した。球技用ボールの中で最も大きなバスケットボールでも楽々収納できる大きな空間であり、普段は使わないものや、隠しておきたいものなどを収納できる (Fig. 10)。



Fig. 10 Sub-Trunk

多人数乗用車として、2列目や3列目への乗り降り性能や使い勝手の良さは特に注力した。2列目への大きな荷物の積み下ろしやチャイルドシートの操作のしやすさを確保するため、新型CX-8の後席ドアの最大開度を80°に拡大した。また、3列目への乗り降りのしやすさを向上するため、後席ドアの開口幅を大きくした。一方で、自車の隣に他の車両が駐車している時を想定すると、ドアを少し開けた時の乗り降りのしやすさも重要である。後席ドアトリムの造形やドアパネル形状を最適化した (Fig. 11)。

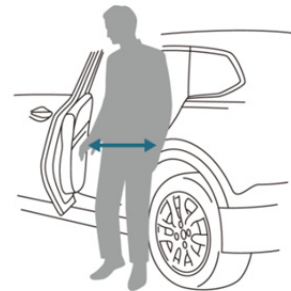


Fig. 11 Ingress/Egress of 2nd Row

3.3 ダイナミクス性能

新型CX-8は、新世代商品で採用してきたSKYACTIV技術を更に深化させた。提供価値の根幹である「人馬一体」を更に高め、3列シート車でありながらも、自分の意図したとおりにクルマが反応し、まるでクルマが自分の体の一部になったかのような一体感を生み出す高いダイナミクス性能を目指した。新世代商品の最上位として最も大きな車両諸元をもつ商品であるが、まるで小さなクルマを運転しているかのような一体感を感じていただくと考える。

最上位SUVとして新型CX-8が特に注力したのは、ロン

グツーリング・オールラウンダーとして全ての乗員がどこまでも走りたくなり、どこへいくにも疲れにくく快適であること、及び運転するご自身と大切な方々を守る安全である。3列シート多人数乗用車の想像を超え、力強く滑らかな性能と高い安全性能を実現した。

(1) 進化したクリーンディーゼル

2012年の初代CX-5から導入したクリーンディーゼルSKYACTIV-D 2.2は、世界中で高い評価を得ている。今回、SKYACTIV-D 2.2の導入以来で最も大きな改良を加え、圧倒的なトルクと高回転まで軽快に伸びる爽快なパフォーマンス、優れた静粛性と高い環境性能を更に向上させた。

出力は従来の129kWから140kWへ引き上げ、トルクは420Nmから450Nmへ高めた。多人数がたくさんの手荷物を持って乗り込んでも、最上位SUVとして力強い加速を感じていただける。また、レスポンスを向上させ、アクセルペダルに対する反応の素早さと正確さを感じられる走りの質を向上した (Fig. 12)。

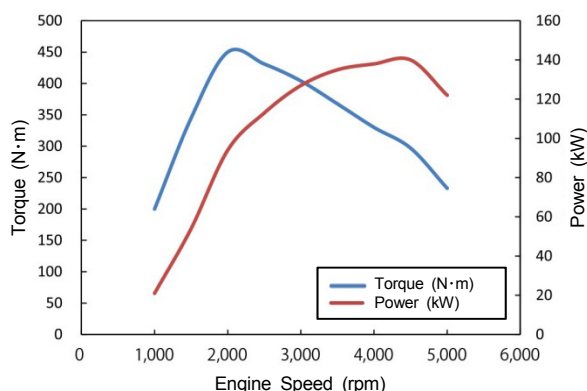


Fig. 12 Engine Output

これらを実現する主要な技術として、過給と燃焼領域の新技术を2つ述べる。1つ目は、過給技術として可変ジオメトリターボチャージャーを採用した。従来のSKYACTIV-D 2.2には2個のタービンを搭載し、運転領域によって大小2個を使い分ける2ステージターボチャージャーを採用していた。新型CX-8では、大きい方のタービンに可変ジオメトリターボチャージャーを新採用し、より低速から素早く過給圧を高め、高速でも過給効率を高めることで、最高出力最大トルクともに向上。より伸びやかで力強い走りを実現した (Fig. 13)。

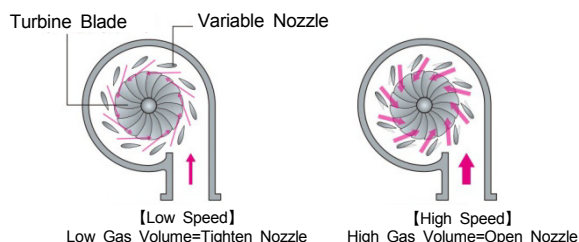


Fig. 13 Variable Geometry Turbocharger

2つ目は、新たな燃焼コンセプトとそれを実現する燃焼技術である。優れた燃焼効率と静粛性、そして高い環境性能を両立する理想の燃焼を目指し、急速多段燃焼という新たな燃焼コンセプトを構築。従来のSKYACTIV-D 2.2では、「パイロット・プレ噴射で形成される予混合的なプレ噴射により、クリーンなメイン燃焼を実現し、アフター噴射で燃え残りを燃焼させる」という3つのフェーズから構成される燃焼で、旧来のディーゼル燃焼をブレークスルーした。新型CX-8では、「急速多段燃焼」という新しい燃焼コンセプトで、従来SKYACTIV-D 2.2の燃焼に比べて、より短時間により多くの回数の燃焼を行う。短時間の連続した燃焼をピストンの上死点付近で発生させることで、より少量の燃料で大きなトルクを引き出し、同時にノック音の低減や環境性能改善を両立させた。市街地など低速・軽負荷の走行シーンでは静粛性を向上させ、力強い走りを求めるシーンではゆとりある加速とそれに調和するリニアなエンジンサウンドを実現した (Fig. 14)。

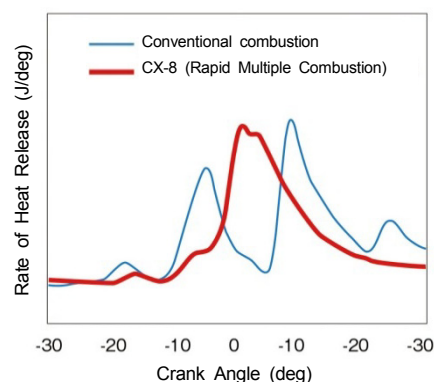


Fig. 14 Heat Generated Waveform of Rapid Multi-Stage Combustion (急速多段燃焼の熱発生波形)

この急速多段燃焼を実現する技術として、新たに「段付エッグシェイプピストン」や「超高応答マルチホールピエゾインジェクター」などを採用した。

(2) 操縦安定性と乗り心地

国内最上位SUVかつ大切な方々と同じ時間を過ごす多人数乗用車として、3列目を含む全ての乗員に感じていただける走る喜びと快適性を実現した。

ドライバーが運転する際に、ハンドル操作に対して気持ちの良い、意のままの車両応答を目指し、人間の滑らかなハンドル操作に対して車両もそれに応えるように滑らかに反応する、まるで自分の手足のような人馬一体の感覚を実現した。

また、大切な同乗者の快適さや心地良さを深化を目指し、全ての乗員がクルマとの一体感を感じられる上質で安心感がある乗り心地を実現した。

SKYACTIV-CHASSISとして海外専用車のマツダCX-9の基本構造を使用し、CX-8専用にチューニングするとともに、最新技術を採用した。特に、フロントダンパーにはリバウンドスプリングを採用し、コーナーリング時に車両内側の前輪が浮き上がるロール挙動を抑えて穏やかな挙動とした。これにより、唐突な揺れのない滑らかな乗り心地と、確かな接地感・安心感が高い直進安定性能を実現した (Fig. 15)。

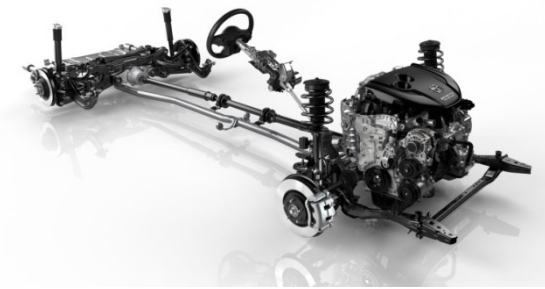


Fig. 15 SKYACTIV-CHASSIS (AWD)

(3) 静粛性

新型CX-8は、3列シート車として大切な方とともに過ごすクルマの中の時間を大切にしたい。1列目から3列目まで全ての乗員が普段どおりの声量でストレスなく会話ができる上質な空間を実現することを目指した。特に高速走行時で優れた静粛性を感じていただきたい。

まずは、車室外から車室内に入ってくるノイズを抑制した。路面から車体に伝わる振動を小さくするため、サスペンションの共振現象を緻密に制御した。またリア廻りでは、リアフェンダーパネルに制振材を採用し、3列目の乗員に聞こえるノイズの音源となる車体振動を抑制した (Fig. 16)。

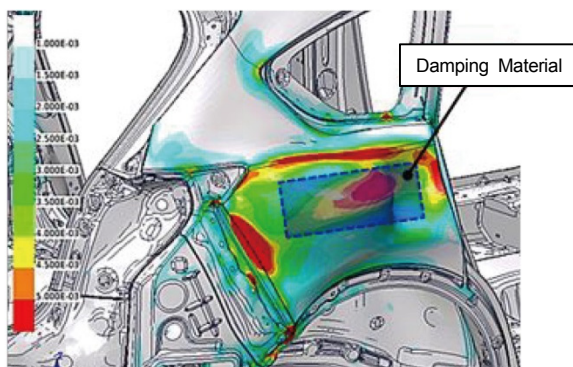


Fig. 16 Insulator on Rear Fender Panel

また、D.ピラー付近に吸音材を採用し、3列目乗員の耳に入るノイズを抑制した (Fig. 17)。

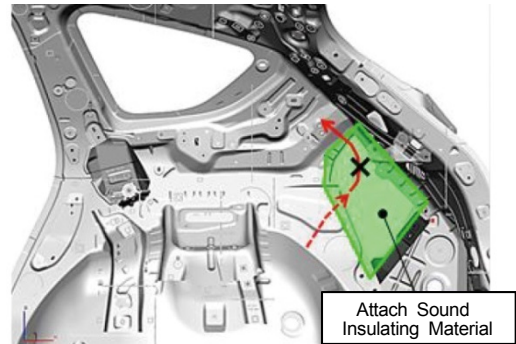


Fig. 17 Insulator on Rear Fender Panel

次に、車室内に入ってきたノイズについては、新しく吸音コンセプト (音を響かせない) による静粛性の向上を図った。車室内に侵入した音は、直接乗員の耳に入った後、室内を反射して時間差をもって耳に届く。この時間差をもつ音が人間を不快に感じさせると考え、車室内の吸音性を高めすっきりと静かさを感じられる上質な空間を実現した (Fig. 18)。

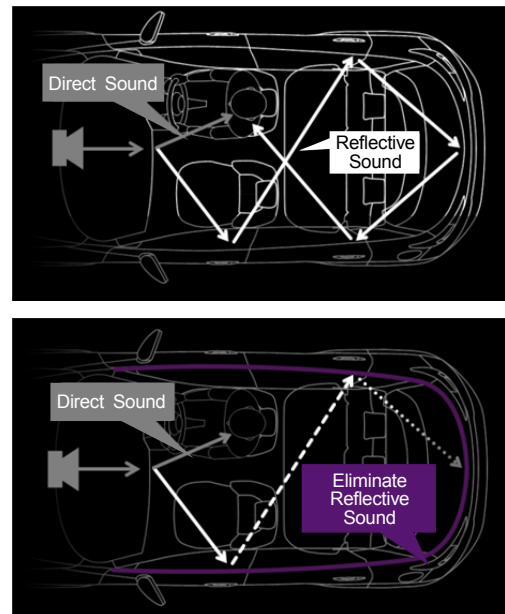


Fig. 18 Sound Absorb Concept

(4) シート性能

また、シートは、「脊椎がS字カーブを描いた姿勢で乗員を座らせる」というマツダの設計思想に基づいたシート構造を採用した

(5) 安全性

新型CX-8は、新世代商品の最新かつ最上位として、安全かつ安心して運転できる状態を作り出し、全ての乗員の「走る喜び」を支援している。

マツダの安全思想「MAZDA PROACTIVE SAFETY」は、危険な状態に陥ってから対処するのではなく、危険

事態を回避できるようにドライバーの認知・判断・操作をサポートし、事故のリスクを最小化することである。ドライバーの運転中の認知をサポートするため、新型CX-8には、運転中の視線移動を最小化するフロントウィンドウ投射型のアクティブドライビングディスプレイ（Fig. 19）、及び駐車時や見通しの悪い場面でも障害物をドライバーの目で確認できる360°ビューモニターを採用した。

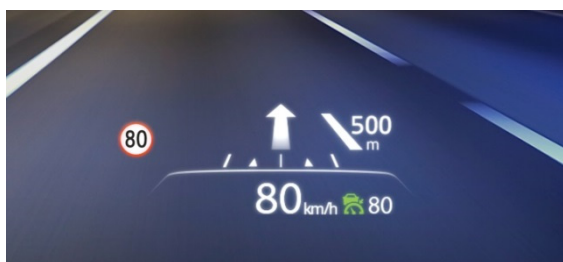


Fig. 19 Active Driving Display

また、万が一のドライバーのミスにも対応できるように、事故被害を防止・軽減することをサポートする。アクティブセーフティとして、マツダの最新・最高の先進安全技術「i-ACTIVSENSE」を採用した。危険認知、運転支援、衝突回避支援・被害軽減の全ての領域をより高いレベルで実現した。

パッシブセーフティとして、最新の高強度・安全ボディーSKYACTIV-BODY技術と、アクティブボンネットの採用により、最高レベルの衝突安全性能と歩行者保護性能を実現した。移動体験の楽しさを安心感でサポートする（Fig. 20, 21）。



Fig. 20 SKYACTIV-BODY



Fig. 21 Active Bonnet

更に、国内の新世代商品として初めての3列シート車として、3列目乗員にも高い衝突安全性能を実現した。

現在の日本の追突事故を調査した結果、その99%が時速70km以下の速度域で発生している。この事実を踏まえ、事故実態に即した速度域での衝突において、しっかりと生存空間を確保できる車体強度を造り込んだ。具体的には、車体後部のクラッシュゾーンで効率的にエネルギーを吸収できる二股ボディー構造によるマルチロードパスを採用した（Fig. 22）。

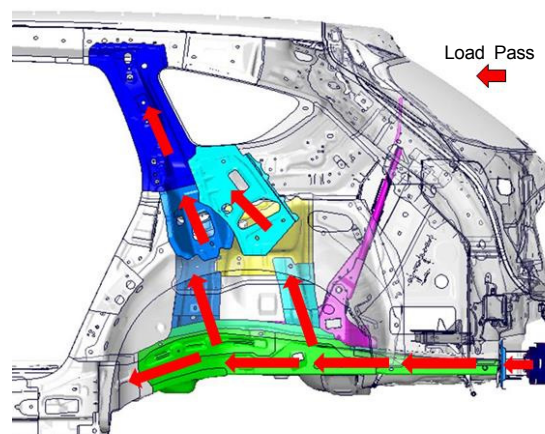


Fig. 22 Multi Load-Pass Structure

(6) 牽引性能

新型CX-8は、マツダが新しく提案する3列シートSUVという商品である。このクルマを所有いただくことで、お客様のライフスタイルが広がることを目指した。新型CX-8は、国内向けのマツダ車としては初の牽引性能を設定した。普通免許で牽引可能な750kg以下のキャンピングトレーラーなどを牽引することができる。牽引時の走行安定性を高めるため、トレーラー・スタビリティ・アシストというブレーキ制御を装備した（Fig. 23）。

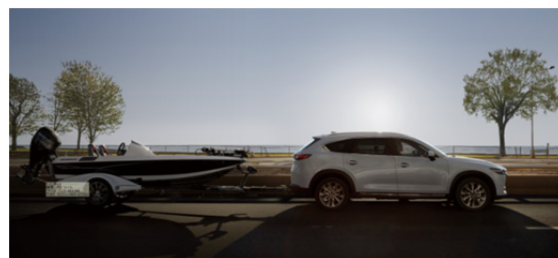


Fig. 23 Towing

4. おわりに

マツダは、「ドライバーにも同乗者にも、人生のあらゆる場面で、クルマとともに過ごすライフスタイルを心から楽しんでいただきたい」といつも考えている。新型CX-8は、マツダが新しく国内のお客様に提案する商品で

ある。ご家族が増え新しい生活が始まるお客様や、多くの大切な方が同乗され楽しい機会が増えるお客様、また愛着があるたくさんの道具を載せて毎日の生活やレジャーを楽しまれるお客様が感じていらっしゃる、「走りの楽しさやデザインを諦めたくない、でも家族や友人とドライブを楽しみたい」という潜在的なご要望にお応えできる新しい価値をもつ商品を実現した。マツダのクルマに既に乗っていただいているお客様や、これからマツダをご検討いただくお客様にとって、この新型CX-8が新しい選択肢となり、このクルマを所有することでお客様の毎日が、更に彩り豊かで充実した日々を過ごしていただければ、開発チームにとってこの上ない喜びである。

■ 著 者 ■



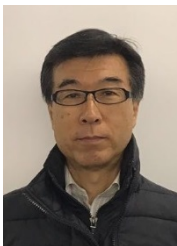
松岡 英樹



佐々木 克明



諫山 慎一



栗原 洋治



松原 敏雄

7

新型CX-8の軽量・高剛性ボディーシェル Light-Weight・High-Rigidity Body Structure of New CX-8

高橋 礼倫*¹ 檜原 隆志*²
Yoshitomo Takahashi Takashi Narahara

要 約

新型CX-8は国内市場におけるマツダの最上位SUVであり、SKYACTIV-BODY⁽¹⁾を採用した商品群の集大成ともいえる商品である。多人数乗車と、スタイリッシュなデザイン、市場に適したボディーサイズを並立させるパッケージングの実現とともに、高い衝突安全性と操縦安定性、NVH性能を確保することを目指した。SKYACTIV-BODYのコンセプトを踏襲しつつ、各性能の寄与度の高い部位を再度見つめ直し、構造の最適化を図ることで、基本性能の進化を果たした。

その結果、1列目から3列目まで全ての乗員が、安全を感じながら、安心して快適なロングドライブを楽しめる車を実現した。本稿では快適な車内空間を作る上でベースとなる軽量・高剛性ボディーシェル開発について、その実現手段を紹介する。

Summary

The All-New CX-8 is Mazda's top level SUV in the domestic market and is a compilation of the products which employ SKYACTIV-BODY. The CX-8 was designed to offer high collision safety, handling stability, and ensuring NVH performance as well as the packaging with the boarding of a large number of occupants, stylish design, and the body size suited to the market. We achieved further improvements in the basic performance by looking more deeply into highly contributed parts for each performance for optimization of the structure as following the concept of SKYACTIV-BODY.

Consequently, we realized the cabin that offers comfortable and enjoyable long drive with safety and security to all passengers in all rows. This report introduces how we developed the light/high-rigidity body shell on which production of comfortable cabin space is based.

1. はじめに

新型CX-8は多人数乗用車として、国内市場へ向けて新たな価値を提案するため、開発した商品である。従来の「多人数乗車＝ミニバン」の常識から脱却し、走りもデザインも妥協しない、「マツダらしさ」をお客様に十分に感じていただける車を目指した。そのためには、初代CX-5で採用してからこれまで進化を続けてきたSKYACTIV-BODYを更にブラッシュアップさせる必要があった。

構造の「ストレート化」「連続化」と荷重を分散させる「マルチロードパス」というSKYACTIV-BODYの肝のコンセプトを堅持しながら、原理原則に基づいた検証を行うことにより、構造を最適化した。これにより、高性能かつ

軽量ボディーシェルを実現した。

2. 新型CX-8のボディーサイズ

マツダにとってSKYACTIV-BODYを採用した3列シート車は初めてではない。2016年に発売した2代目CX-9に続き2車種目となる。北米・オーストラリアを中心に販売しているCX-9の全幅1969mm、全長5065mmに対し、CX-8は全幅1840mm、全長4900mmとよりコンパクトなサイズにしている(Fig. 1)。これは日本をはじめとした市場環境に適したボディーサイズを考え抜いた結果である。スタイリッシュなデザイン、CX-9同等の室内空間の確保、衝突安全性能等、商品としての魅力を一切妥協することな

*1, 2 ボデー開発部
Body Development Dept.

く、盛り込むことに挑戦した。具体的に各性能を実現する上での考え方及び手段については次項より紹介する。

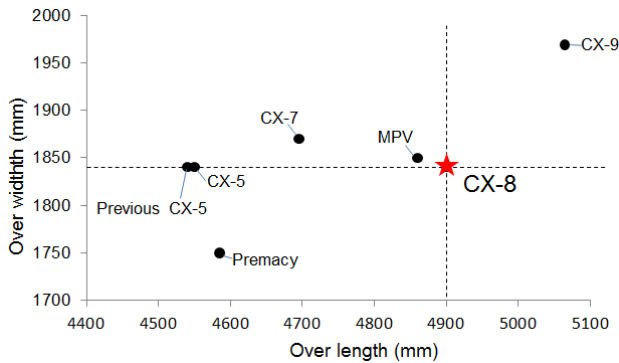


Fig. 1 Body Size of New CX-8

3. 衝突安全性

新型CX-8は、全てのお客様に安心・安全をお届けすべく開発を行った。3列シート車は車両重量が重いため、衝突時のエネルギーは増大する。このエネルギーを効率良く吸収できる構造を考え、SKYACTIV-BODYを進化させた。その開発事例として、フロント及びリア周りの開発事例について紹介する。

3.1 前面衝突性能

CX-8のフロントボディーは、SKYACTIV-BODY コモンアーキテクチャ構想に則り、基本骨格をCX-9と共有しつつ、最低限のユニーク部品で実現している。CX-8のフロントオーバーハングは、CX-9に比べ短くCX-5同等である。しかし、CX-5に比べて車両は重くその差は約260kg/台ある。車両重量が増えるほど衝突時のエネルギーは増大する。この増大したエネルギーをCX-5並みのクラッシュスペースで吸収するため、骨格内に最適な補強を施した。補強例として、フロントフレームにレイnfォースメントを追加した事例を示す(Fig. 2)。この補強にあたっては、衝突時に乗員にかかる加速度を増やさないため、最大発生荷重を維持しながら、エネルギー吸収量を上昇させることをねらい検証を重ねた。変形過渡の座屈を制御することにより、最大発生荷重が上がらないようコントロールし、エネルギー吸収量向上を実現した(Fig. 3)。

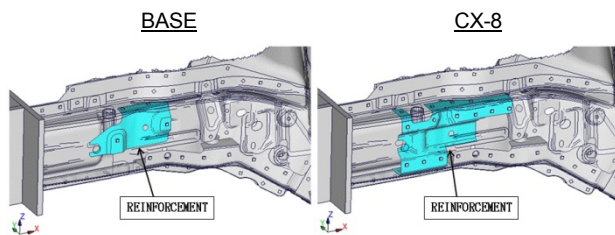


Fig. 2 Add Reinforcement of Front-Frame

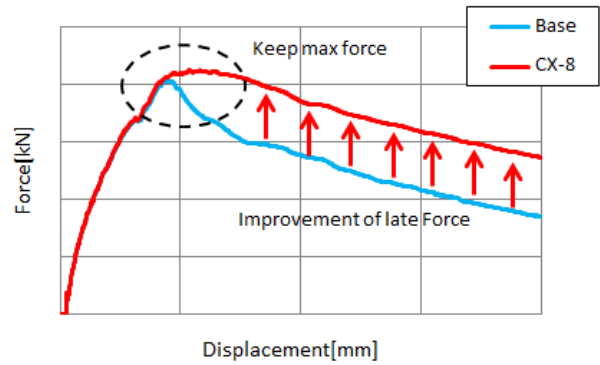


Fig. 3 Improvement Energy Absorption of Front-Frame

3.2 後面衝突時の3rdシート安全性

CX-5をベースとしたフロントボディーに対し、リアボディーは同じ3列シートをもつCX-9と基本骨格を共有している。新型CX-8はCX-9比で、全幅は130mm、リアオーバーハングは84mm短い。3rdシートの安全性においては同等レベルを目指した。リアオーバーハングの短縮によってクラッシュスペースが減少し、リアフレームに伝達するエネルギーは増大する。これを効率よく吸収するための構造として、Cピラー下のアウターレイnfォースメントに二股構造を採用した。二股に分かれたレイnfォースメントに荷重を分散させることによって、衝突時にリアフレームを上方から支え、持ち上がり挙動を抑制し、衝突エネルギーをリアフレームで安定して吸収することでバリアの侵入量を抑制している(Fig. 4)。これにより、国内保安基準の50km/hフルラップ衝突試験はもちろん、より高速なマツダ社内基準においても十分な生存空間を確保した。

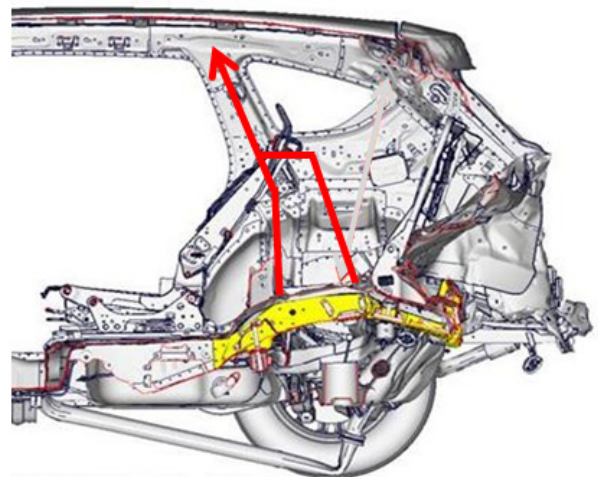


Fig. 4 Dual Structure for Rear-End Collision

4. 操縦安定性

新型CX-8は、多人数乗車が可能な3列シートをもつ車

であっても、マツダのフィロソフィーである「ドライバーの意のままに操れる」人間中心の車を目指し、開発を行った。一般的にボディが長くなればなるほど、車体のねじれは発生しやすい。ねじれが大きいほど、操舵時にドライバーへ車体挙動のフィードバックが遅れ、ドライバーの「意」を車へ十分に伝えられる応答性がなくなる。CX-5比で230mmホイールベースを長くした新型CX-8は、ドライバーのヒップポイントはCX-5そのままに、Bピラー後ろでストレッチした構造にしたため、入力点のリアタイヤがドライバーからは遠くなり、リアボディの挙動が伝わりにくくなる。それゆえに、リアボディ構造の剛性向上に注力し、全体として車体の大きさを感じさせないボディ剛性の実現をねらった。

4.1 Cピラー環状構造

リアボディのボックス変形を抑制する基本骨格構造の多くはCX-9の思想を踏襲し開発したが、新型CX-8では全幅の縮小や車内部品レイアウト制限等から全く同じ構造という訳にはいかず、SKYACTIV-BODYの特長であるCピラー環状構造の機能配分を見直し、更に進化をさせる必要があった。後面衝突性能にも寄与しているCピラー下アウターレインフォースメントの二股構造がそれである。ダンパートップからの入力とリアフレームからデュアル・ブレース沿いに入る力を、二股に分かれたアウターレインフォースメントで効果的に受け止め、リアダンパートップの支持剛性を高めた (Fig. 5)。また、アウターレインフォースメント内にガセットを設定。No.4クロスから続く断面のインナー側からCピラーに向けた荷重伝達をスムーズにした (Fig. 6 ①)。更に、Cピラー上部及びデュアル・ブレース前側の断面内に高剛性発泡充填材を配置し、断面崩れによる荷重の伝達ロスも抑制した (Fig. 6 ②)。以上の3点により、Cピラー環状構造の剛性向上を図った。

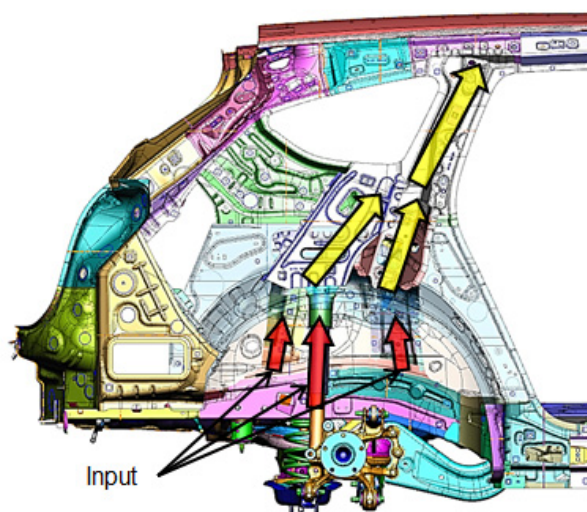


Fig. 5 Dual Structure of C Pillar Reinforcement

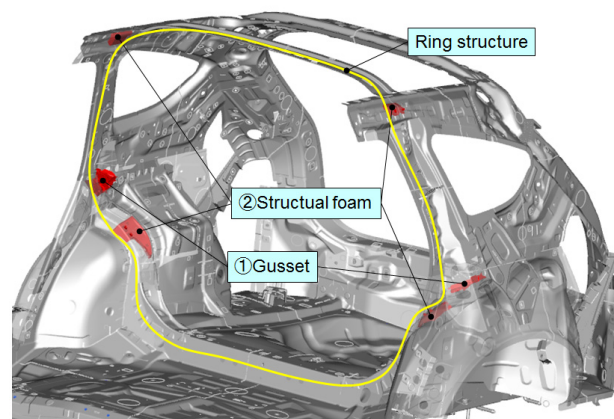


Fig. 6 Ring Structure of C Pillar

4.2 リフトゲート開口の構造

Cピラーだけでなく、リフトゲート開口部の断面の連続化や開口下部結合部に高剛性発泡充填材の配置等のCX-5/CX-9で得られた知見も盛り込むことで、リフトゲート開口部のボックス変形も抑制し、リアボディ回りの剛性を高めた (Fig. 7)。

結果として、ボディのねじり剛性をCX-5比7.0%向上させ、車を意のままに操る楽しさを感じられる車両性能を実現した。

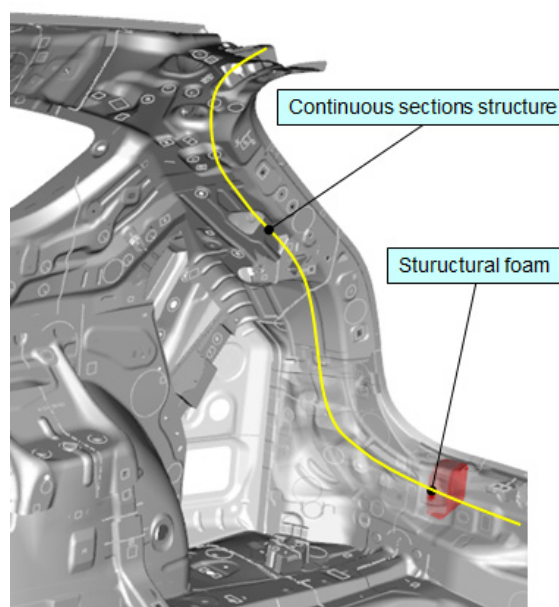


Fig. 7 Continuous Structure of Lift Gate Opening

5. NVH性能 (静粛性)

新型CX-8は、1列目から3列目まで全ての乗員が普段どおりの声量でストレスなく会話できる静粛性を目指した。特に、各座席間の静粛性の差を小さくすることに注力した (Fig. 8)。静粛性指標は、CX-9の開発から採用している

「高速走行時の静粛性」と「荒れた路面での静粛性」を用いた。ここではボディー領域での貢献事例を2つ紹介する。

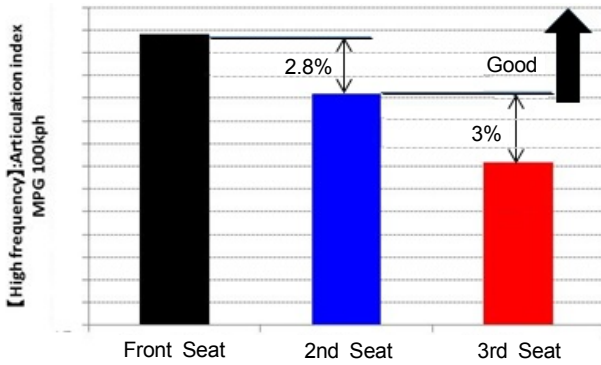


Fig. 8 Articulation Index of Each Seat

5.1 高速走行時の静粛性の向上

高速走行域の「会話のしやすさ」のためには、音源から車室内へ至るまでの遮音性能向上が必要である。一方で、主要部品をCX-5やCX-9と共有することで、開発ユニーク要素を限定し、開発効率向上にも取り組んだ。これらの両立のために、音源であるエンジンやタイヤに応じて適切な板厚を明確にするとともに、他モデルとの共通部品とCX-8のユニーク部品を適切に配置することで開発要素の最小化を実現した。更に、共通部品を増やすことで投資最小としながらも遮音性を高め、静粛性の目標を達成した (Fig. 9)。

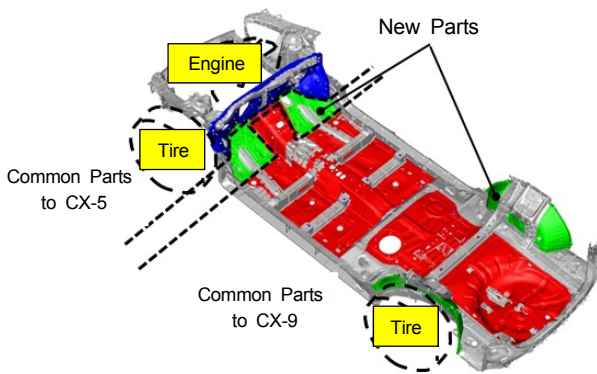


Fig. 9 Optimization of Panel Thickness

5.2 3列目乗員の静粛性の向上

荒れた路面でのロードノイズは、タイヤを起振源にサスペンションや車体骨格を介してキャビンに面したパネルが振動し、音となって放射される。3列目乗員の静粛性を向上させるため、CX-9以降の開発で用いているパネル等価放射パワー (Equivalent Radiated Power) の評価指標⁽²⁾を適用し、寄与の高い部位と、その振動現象を分析することで最適構造を実現した。例えば、性能への寄与が高いリアフェンダーパネルに対しては、振動を抑制すべきエリアを詳細に分析し、的確に制振材を付与することで、効果的

に音の低減を実現した (Fig. 10)。

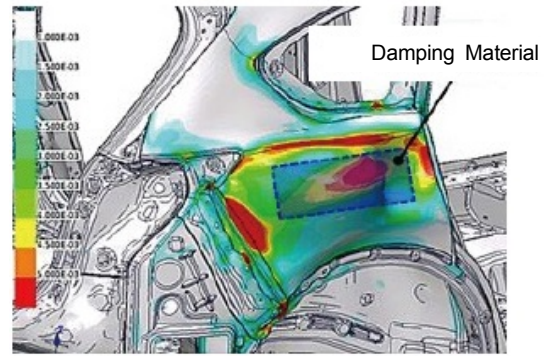


Fig. 10 Optimization of Body Panel

6. 複数性能最適化技術の適用

新型CX-8の開発では、複数性能(衝突、強度、剛性)間の同時最適化技術 (Multi-Disciplinary Design Optimization, 以降MDO)⁽³⁾を適用し質量改善に取り組んだ。具体的には、各性能目標を満足する指標を制約条件とし、質量最小化を目的関数とするMDOをアッパーボディー開発段階で実施した。性能・生産性から板厚を変更できる可能性がある部品を設計変数として設定し、板厚変化による性能寄与度を部品ごとに明らかにした。まず、剛性に対する寄与度を分析し、形状による剛性改善が可能な範囲で板厚を下げる部品を選定した。その上で衝突性能から強度が要求される部品には、ロードパス上の部品ごとの寄与度を参考に機能量を再配分した。この結果、対象部品は56部品、質量にすると40.5kg/台で実施し、1.14kgの軽量化を実現した (Fig. 11)。

56 Parts Primarily at MDO

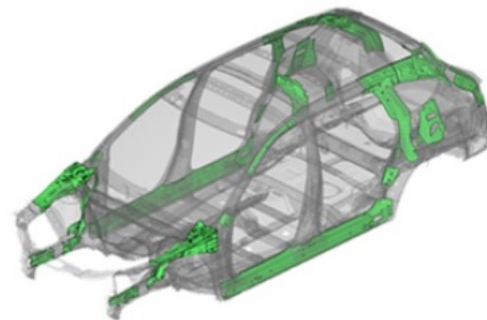


Fig. 11 MDO Application

上記のうちの0.314kg軽量化した取り組みの事例を紹介する。MDO結果から剛性への寄与度が高い部品を選び、形状による工夫を加えることで剛性を改善し、板厚低減を行った。また、後面衝突性能への寄与が高い部品であったことから板厚低減による強度低下対応として、MDO結果

からロードパス上で寄与度が高い部品を抽出し、材質グレードを上げることで機能量を増やした(Fig. 12)。

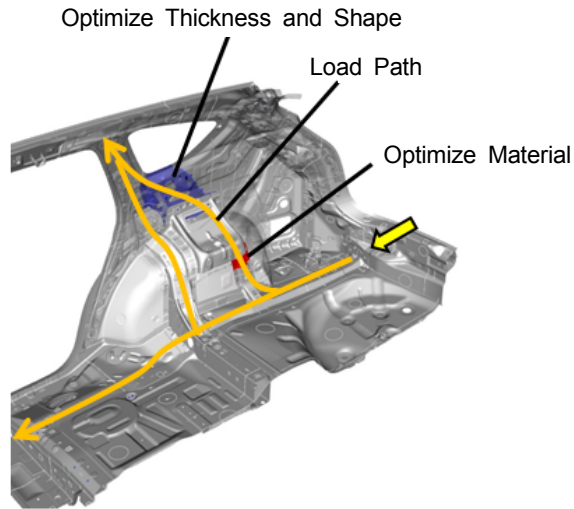


Fig. 12 Optimize Example

7. おわりに

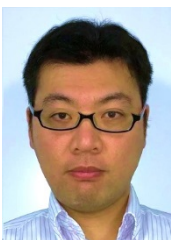
新型CX-8は、直近モデルまでに蓄積してきたマツダの技術・知見を総動員し作りあげた商品である。お客様が心から運転と会話を楽しみ、安全と安心を感じながら、疲れずどこまでも行ける、そんな車を実現することができたと確信している。これらの成果は企画・デザイン・設計・実研・生産技術及び製造部門、そしてサプライヤー様がONE MAZDAで活動した結果、成し遂げることができたものとする。

今後も更に技術を進化させ、お客様に選び続けていただける商品の開発に邁進する所存である。

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) 吉武晃司ほか：新型CX-9の軽量・高剛性ボディーシェル，マツダ技報，No.33, pp.44-49 (2016)
- (3) 小平剛央ほか：複数性能を扱う車体構造最適化手法の開発，マツダ技報，No.29, pp.104-109 (2011)

■ 著 者 ■



高橋 礼倫



樽原 隆志

8

理想のシート構造設計に向けた人体研究 Study of Human Skeleton to Design Ideal Structure of Automotive Seat

泉山 朋大*1 Tomohiro Izumiyama	西田 周泰*2 Norihiko Nishida	朝日 龍介*3 Ryusuke Asahi	山縣 大樹*4 Hiroki Yamagata	岩永 秀幸*5 Hideyuki Iwanaga
大木 順司*6 Junji Ohgi	澤井 亮*7 Ryo Sawai	虫谷 泰典*8 Yasuyoshi Mushitani	杉本 繁*9 Shigeru Sugimoto	上野 正樹*10 Masaki Ueno

要 約

交通事故による死亡重傷者低減のためには、適切な運転姿勢と乗員拘束性が鍵となる。乗員の運転姿勢は、シート形状に加え年齢・性別・体格による個々人の骨格アライメント（脊椎部各椎体の配列及び骨盤の傾き具合）の個体差からも影響を受けると考えられる。そのため、シート着座時の骨格アライメント個体差把握が重要であり、本研究では自動車シート着座時の骨格アライメントを調べ、年齢・性別・体格による個体差を分析した。さらに、人体の骨格や内臓を模擬したシミュレーションモデル（以下、人体FEモデル）THUMS ver.4 (Copyright 2015 © TOYOTA MOTOR CORPORATION) をベースに複数の個体を表現したモデルを作成し、これらを用いた衝突時の挙動解析を行い、乗員の安全性を確保できるシート構造について検討した。座位骨格アライメントは、S字と後弯の2タイプに大別された。また挙動解析では、骨盤回りの挙動差が観察され、事故時の乗員拘束性を確保するには正しい運転姿勢を保つことが重要であると示された。開発した次世代シートでは、骨盤を正立させ自然な脊椎S字を促し、自分の体の一部になったかのように意のままにクルマを操る「人馬一体」感を向上させながら快適性・安全性を両立した。

Summary

In order to reduce fatalities or serious injuries in traffic accidents, both an appropriate driving posture and occupant constraint are key points. It is important for us to understand the effect of individual difference in human skeletal alignment in seated posture. Consequently, in this study, we examined individual differences on the skeletal alignment in an automotive seat and analyzed the influence by the factors of age, gender and body type. Additionally, we created several human body models (HBMs) which represent individual differences by morphing the skeletal alignment of the human FE model, THUMS ver.4 (Copyright 2015 © TOYOTA MOTOR CORPORATION) and analyzed the kinematics of those HBMs to study the seat structure to ensure occupant's safety. The alignment in seated posture could be classified into two types: S-shaped and kyphosis. The analysis showed the difference of occupant kinematics in pelvic region, which indicates that it is important to maintain the correct driving position in consideration of occupant protection in case of accidents. It was confirmed that the next-generation seat, which was newly developed, facilitated upright pelvis and lumbar lordosis, leading to the advanced "Jinba-Ittai" philosophy and higher level of comfort and safety simultaneously.

*1,3,9 衝突性能開発部

Crash Safety Development Dept.

*8 操安性能開発部

Chassis Dynamics Development Dept.

*2,4,5 山口大学医学部附属病院 整形外科/放射線部

Department of Orthopedic Surgery and Radiological Technology, Yamaguchi University Hospital

*6 山口大学工学部 機械工学科

Department of Mechanical Engineering, Yamaguchi University

*7 装備開発部

Interior & Exterior Components Development Dept.

*10 車両実研部

Vehicle Testing & Research Dept.

1. はじめに

マツダ車が関係した交通事故での死亡重傷者を低減するための安全技術を確認すべく開発を行っている。これには、実際の市場事故の現状を把握し、内在する課題を明らかにすることや、人体そのものについて理解し、事故時の受傷発生メカニズムを正しく認識することが重要である。

部位別の比較において死亡者の割合は頭部・胸部が多いが、重傷者を含めると特に日本では腹部が大きな割合を占めている。その要因の一つとして、シートベルトが考えられる。自動車メーカーはシートベルトが腸骨にしっかりフィットするように設計しており、実際衝突用ダミーを用いた実験やシミュレーションでは衝突時も腰にしっかり掛かることは確認されている (Fig. 1) が、ヒトの骨格には個体差がありそれがどう影響するかを分析する必要がある。加えて、着座時の姿勢と骨格状態の関係も乗員の拘束性を考える上で把握する必要がある。正しい姿勢でシートに着座して、より快適な運転環境が実現すれば、自動車のダイナミック性能だけでなく安全性も確保されると考えている。

骨格アライメントについては、これまでさまざまな視点から立位及び座位骨格を対象にした研究がなされているが^(4,6)、実際に自動車シートを用いた研究、また幅広い年齢・体格を対象とした研究は少ない。今回、座位での人体骨格アライメントに注目し、その個体差を分析して人体FEモデルに反映させ、それらを用いて挙動解析を行った。また、次世代用に開発したシートについてマツダが考える理想の着座姿勢が実現できているかレントゲン撮影により確認を行ったので、報告する。

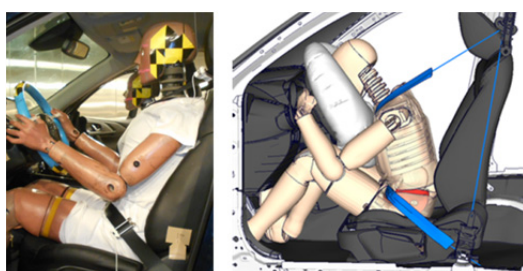


Fig. 1 Situation Which Lap Belt is Put on the Pelvis in Dummy

2. 実験方法

2.1 レントゲン撮影

レントゲン撮影用にアクセラシートを取り付けた治具をFig. 2に示す。シートバック24°、座面21.5°に固定し、シートスライド機能及び持ち手位置は調節可能とした。撮影に際し、被験者にはフットレストに足を置き、

手置き棒に手をのせて、普段の運転姿勢を取って着座してもらった。年齢・身長・BMIごとに被験者層の範囲を3層に分け、データに偏りが生じないように配慮の上、75名分の撮像データを取得した。撮影は山口大学医学部附属病院放射線部が所有する装置 (SONIALVISION Safire17 SHIMADZU) を使用し、座位・立位・臥位について撮影した (Fig. 2)。

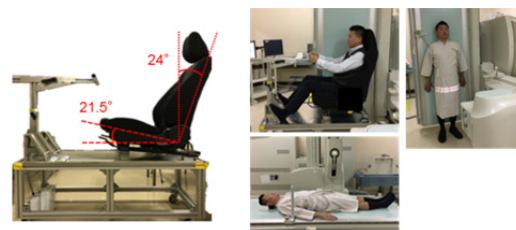


Fig. 2 X-ray Facility and Situations of X-raying

2.2 研究倫理

本研究は、山口大学及びマツダ(株)の研究倫理委員会にて承認を得た上で、被験協力者に説明を行い本人の参加同意を書面で確認し、撮影に臨んだ。

2.3 角度データ分析

脊椎及び骨盤について、7項目の角度計測を実施した。脊椎部 (Spine) は、①頸椎、②胸椎、③胸腰椎、④腰椎について最上位椎体の上端に平行な線と最下位椎体の下端に平行な線から成る角度を計測した。また骨盤部 (Pelvis) は、⑤仙骨と骨盤に対してその上端に平行な線と水平線から成る角度、及び⑥上前腸骨棘 (Anterior-Superior Iliac Spine; ASIS) と恥骨結合を結ぶ線と垂線から成る角度について計測を行った。各角度の略称を以下に示す。また、角度の簡略図をFig. 3に示す。

- ① Cervical Curvature (CC) :
第2頸椎 (C2) - 第7頸椎 (C7) 角度⁽⁷⁾
- ② Thoracic Kyphosis (TK) :
第5胸椎 (T5) - 第12胸椎 (T12) 角度⁽⁷⁾
- ③ Thoracolumbar Kyphosis (TLK) :
第10胸椎 (T10) - 第2腰椎 (L2) 角度⁽⁸⁾
- ④ Lumbar Lordosis (LL) :
第1腰椎 (L1) - 第5腰椎 (L5) 角度^(7,9)
- ⑤ Sacral Slope (SS) :
仙骨 (Sacrum) と水平線の角度^(7,9)
- ⑥ Pelvic angle (PA) :
ASIS - 恥骨結合と垂線の角度⁽¹⁰⁾

※①～④の各角度について+を前弯 (前方に湾曲)、-を後弯 (後方に湾曲) とする。また、⑤は仙骨の上面が水平線より上の場合を前傾、⑥はASIS - 恥骨結合の線が垂線より前の場合を前傾と定義する。

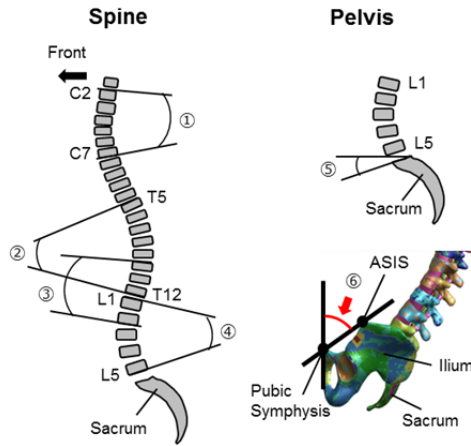


Fig. 3 Measurement Items for Spine and Pelvis

2.4 人体FEモデル作成及びシミュレーション

腸骨へのシートベルトの掛かり方と骨盤周りの挙動について分析を行うため、得られた角度のうち⑥PAについて正規分布図を描き、50%ile（座位時のアライメントがS字タイプ）、及び1%ile（座位時のPAが最も後傾するタイプ）の角度値を参考にTHUMS AM50 ver.4 の上肢、下肢、頸椎、寛骨臼付近の変位・回転を拘束し、腰椎及び骨盤に強制変位・回転を与えてそれぞれの角度を再現したモデルを作成した。加えて、挙動の傾向比較を行うため、中間値として10%ileの角度値を再現したモデルも同様に作成した。これらのモデルを用いてJNCAP Full Lap前面衝突（衝突速度56km/h）のシミュレーションを行った。プリテンショナー及びロードリミッター付シートベルトを使用し、脊椎を改変した人体モデルを運転席に着座させ、車体及び他の内装はマツダの代表的なものを用いた。

3. 結果及び考察

3.1 座位骨格アライメントの個体差

75名分の角度データを基に、座位骨格アライメントを分析すると、腰椎が前弯（Lordosis）し全体的に緩やかなS字を示すタイプと腰椎も後弯（Kyphosis）し脊椎全体が後弯したタイプに大別され、S字タイプはn=39、後弯タイプはn=36でいずれも約半数の割合となることが明らかとなった（Fig. 4）。更に、相対的に腰椎が前弯すると骨盤も前傾し、一方腰椎後弯では骨盤も後傾する傾向であった。

また、男女別に骨格の各角度の個体差範囲を調べると、脊椎下部、特にLL及びPAでバラつきが大きく、前弯角及び前傾角度の最大値と最小値の差は約50°あることが分かった（Fig. 5）。

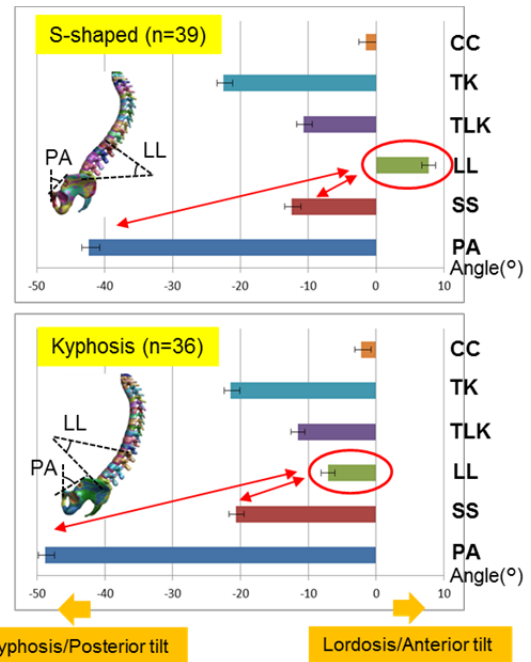
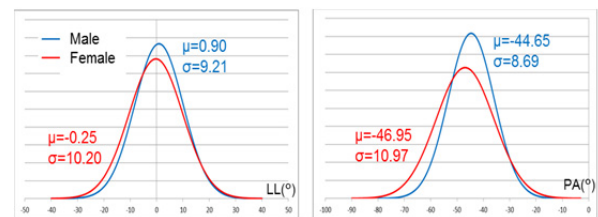


Fig. 4 Two Types of Skeletal Alignment in Seated Posture

	CC		TK		TLK	
	Male	Female	Male	Female	Male	Female
Min.	-26°	-25°	5°	5°	-7°	3°
Max.	13°	12°	44°	35°	30°	20°
Ave.	-1°	-3°	20°	24°	10°	12°

	LL		SS		PA	
	Male	Female	Male	Female	Male	Female
Min.	-22°	-26°	-33°	-33°	-62°	-67°
Max.	26°	21°	5°	-1°	-29°	-20°
Ave.	1°	0°	-15°	-19°	-45°	-47°



(a) Lumbar Lordosis (LL) (b) Pelvis Angle (PA)
Fig. 5 Variability Range of Skeletal Alignment in Seated Posture

この2つの角度が特に個体差の範囲が大きいことから、これら角度について年齢・性別・BMIとの相関を調べた。結果は、現状75名分のデータではいずれの因子とも強い相関性は見られなかった（Fig. 6）。

骨盤は、ASISの形状やASIS-PSIS（上後腸骨棘；Posterior-Superior Iliac Spine）間の長さ、ASISから恥骨結合までの距離に個体差がある。これらの因子はPAに影響を与える可能性があり、今後骨盤形状の個体差と年齢・性別・BMIとの関係性を調べる必要があると考えられる。

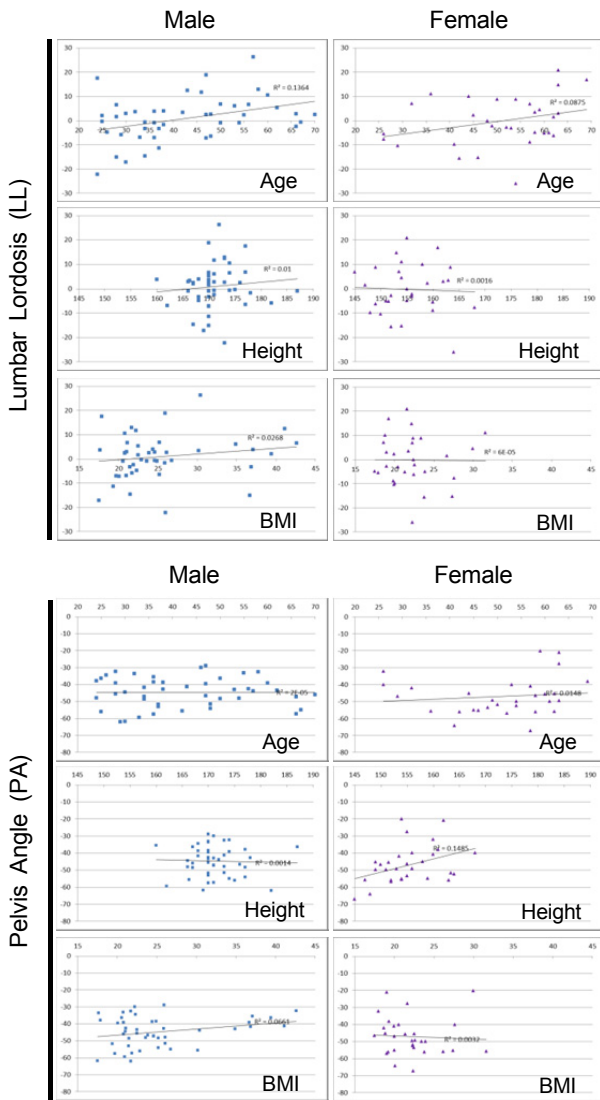


Fig. 6 Analysis on Angle of Lumbar Spine and Pelvis for 75 Subjects by Gender

3.2 人体FEモデルによる挙動解析

骨格アライメントの違いによる前突時の、特に腹部・腰部挙動への影響を解析するため、取得したPAについて正規分布を描いた (Fig. 7)。代表的なPA値として、座位S字タイプ50%ileに相当する-45°、及び座位後弯タイプ1%ile相当の-67° (PA最後傾)、中間値10%ile相当の-57°を選定し、それらを参考値としてTHUMS脊椎を修正、3タイプのモデルを作成した。各モデルを用いて挙動を解析すると、いずれのモデルでもシートベルトは腸骨に掛かっており腰がしっかり拘束されていることも確認できたが、PAが後傾である程腸骨上でのベルトずれ上がり量が多いことも分かった (Fig. 8)。更に、骨盤の後方への回転量及びシート座面上での前方への移動量もPAが後傾である程大きくなることが明らかとなった。これらの挙動に加え、腸骨へのシートベルトの掛かり方がベルトのずれ上がりに関与していると考えられる。つまり、

ベルトが腸骨に対してほぼ垂直に掛かる場合、拘束時の荷重は垂直に骨盤に掛かるが、腸骨に対して掛かりが浅い場合荷重は骨盤に対して垂直方向 (F²) と水平方向 (F²) に分散され、水平成分の力がベルトのずれ上りを促進させていると推察される (Fig. 9)。

事故時の乗員拘束性を確保するためには、背筋を伸ばし胸を張って脊椎のS字及び骨盤を立てた姿勢を保持することが重要であると考えられる。

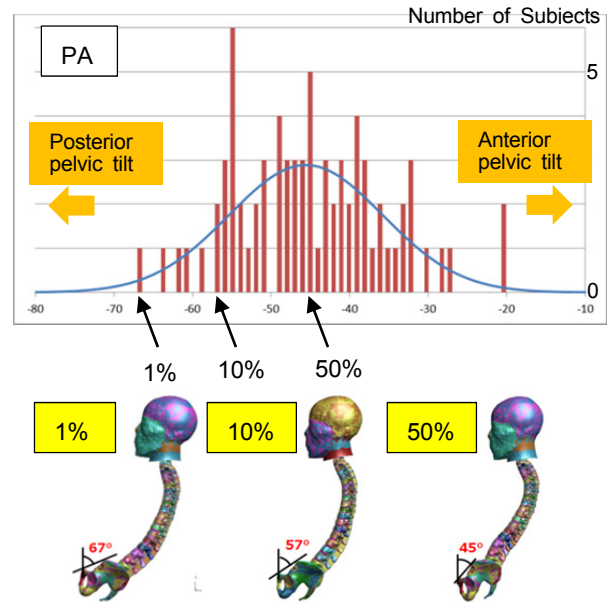
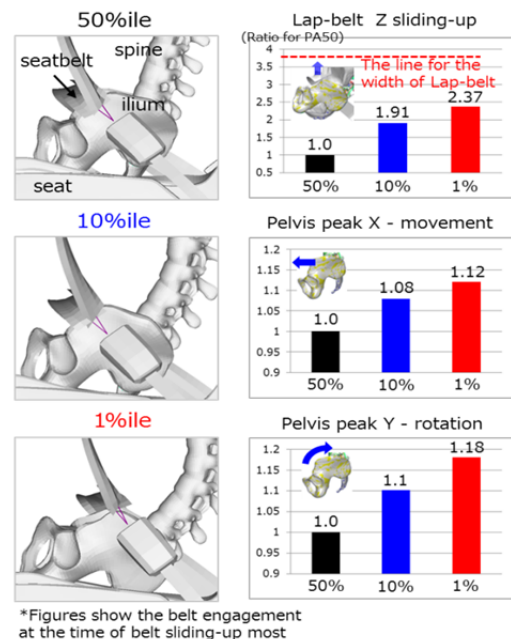
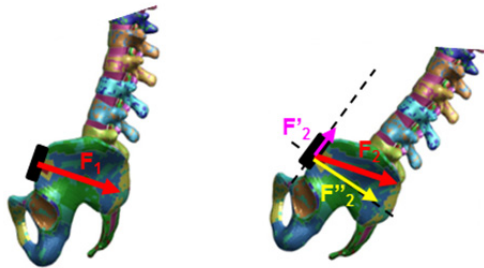


Fig. 7 Normal Distribution of Pelvic Angles and Human Models Equivalent to Each Percentile



*Figures show the belt engagement at the time of belt sliding-up most

Fig. 8 Behavior Analysis Using Three Models Which Modified Pelvic Angle



(a) Anterior Pelvic Tilt (b) Posterior Pelvic Tilt
 Fig. 9 Relationship between Engagement of Seatbelt and Loading to Ilium

3.3 ダイナミック性能・安全性能を両立したシート開発

次世代用に開発したシートは、「骨盤を正立させること」を目指し、それにより「自然な脊椎のS字を促し、腰椎も前弯を維持できる」ことをコンセプトとしている。これを実現することで、クルマのダイナミック性能が向上し、より「人馬一体」を感じられると考えている。加えて、快適性・安全性につながる正しい姿勢を自然に作り出すことも可能となる。このシートに着座した際の骨格アライメントを調べるため、レントゲン撮影を行った。その結果、アクセラシートにおいてそれぞれ座位S字タイプ、後弯タイプであった2名の被験者いずれでも骨盤(SS)が前傾傾向となり、それに伴う腰椎(LL)前弯が確認できた (Fig. 10)。

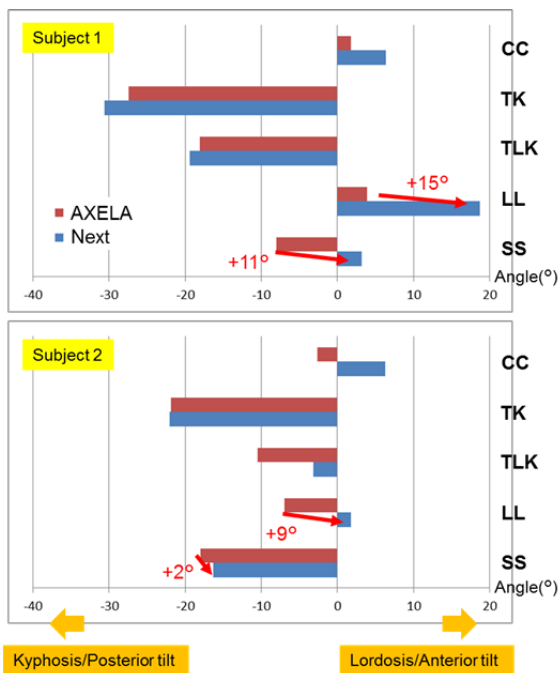


Fig. 10 Change of Skeletal Alignment between two Seats

4. まとめ

本研究において、自動車シートに着座した際の骨格アライメントのデータが収集され、データ分析から座位骨格アライメントは大きく分けて腰椎前弯を伴ったS字タイプと頸椎から腰椎まで全体的に後弯するタイプの2種類あることが分かった。現状データからは、角度と年齢・性別・BMIとの間に相関は見られなかった。

また、脊椎を修正した人体モデルによる挙動解析から、いずれもシートベルトは腸骨に掛かっていたが、PAが後傾になる程ずれ上がりが大きくなることが明らかとなり、乗員拘束性を考える上で骨盤を立て脊椎をS字に保つことが重要であると示された。

次世代用に開発されたシートは、この「骨盤を正立させ、それにより自然な脊椎のS字を作り出す」ことが確認できた。しかしながら、ダイナミック性能及び安全性能それぞれの観点で、長時間運転時の姿勢保持等取り組むべき研究も残っており、今後も「人間中心」の視点からシート形状や構造を追究していきたい。

本研究は、多くのボランティアの方に被験のご協力を頂いた。また、撮影・データ分析・モデル作成は、山口大学医学部附属病院整形外科の先生方や放射線部の診療放射線技師の皆様、工学部機械工学科の先生方のご協力により行った。

参考文献

- (1) E.G. Daniel et al.: An analysis of sagittal spine alignment in 100 asymptomatic middle and older aged volunteers., SPINE, Vol.20, No.12, pp.1351-1358 (1995)
- (2) T. Brazier et al.: Sitting and standing postural analysis through car seat comfort considerations, SAE paper No. 2002-01-2060 (2002)
- (3) J.A. Pramudita et al.: Variation of spinal alignment in standing and automotive seated postures, IRCOBI Asia Conference, pp.28-29 (2016)
- (4) H.W.D. Hey et al.: How the spine differs in standing and in sitting—important considerations for correction of spinal deformity. The Spine Journal, Vol.17, pp.799-806 (2017)
- (5) M. Kathleen et al.: The influence of different sitting positions on cervical and lumbar posture, SPINE, Vol.21, No.1, pp.65-70 (1996)
- (6) H.W.D. Hey et al.: Differences in erect sitting and natural sitting spinal alignment - insights into a new paradigm and implications in deformity correction, The Spine Journal, Vol.17, pp.183-189 (2017)

- (7) F. Sato et al.: Analysis of the alignment of whole spine in automotive seated and supine posture using an upright open MRI system, JSAE Annual Congress (Spring), pp.1754-1760 (2015)
- (8) Y.H. Yin et al.: Comparison between the antero-posterior and posterior only approaches for treating thoracolumbar tuberculosis (T10-L2) with kyphosis in children: a minimum 3-year follow-up, Childs Nerv Syst., Vol.32, No.1, pp.127-133 (2016)
- (9) J. Legaye: The femoro-sacral posterior angle: an anatomical sagittal pelvic parameter usable with dome-shaped sacrum, Eur Spine J., Vol.16, pp.219-225 (2007)
- (10) T. Kyo et al.: Factors predicting change in pelvic posterior tilt after THA, Orthopedics., Vol.36, No.6, pp.e753-e759 (2013)

■ 著 者 ■



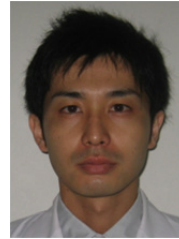
泉山 朋大



西田 周泰



朝日 龍介



山縣 大樹



岩永 秀幸



大木 順司



澤井 亮



虫谷 泰典



杉本 繁



上野 正樹

9

衝突時の燃料揺動評価技術の構築と開発への適用 Establishment of Fuel Sloshing Evaluation Technique Upon Crash and its Application to the Development

山内 一矢*1 嘉村 浩二*2 花田 裕*3
Kazuya Yamauchi Koji Yoshimura Yu Hanada
小島 宏介*4
Kosuke Kojima

要 約

マツダは「走る喜び」と「優れた環境・安全性能」を両立したクルマをお客様に提供することを目指して商品開発に取り組んでいる。衝突安全性能は、CAE (Computer Aided Engineering, 計算機支援工学) を駆使して、安全性能と軽量化などを高次元で両立する車両構造を効率的に開発している。近年においては、マルチフィジックス (複数分野にまたがる物理現象) 領域への適用が拡大しており、燃料タンクの燃料揺動現象の解析技術を開発し、次世代商品群の開発に適用している。この解析技術は試作車両を用いての実機検証型の開発から事前検証型の開発へ革新し開発効率を向上させるのみでなく、開発の早い段階でのCAEプロセス実行による衝突時の燃料漏れ防止の構造と品質を造り込むことが実現できた。

Summary

It is our challenge to develop and provide vehicles that satisfy both “driving pleasure” and “outstanding environmental and safety performance” for all customers. By actively employing CAE (Computer Aided Engineering) techniques in our crash safety development, we efficiently develop body structures that simultaneously achieve safety performance and weight reduction. In recent years, CAE techniques are expanding their scope of applications to multiphysics fields, and we have newly developed an evaluation technique of fuel sloshing in fuel tanks, and applied it for our next-generation vehicle development. With this technique, we not only improved development efficiency by replacing the conventional prototype verification process with early-stage verification process, but also developed fuel-leakage prevention structure by implementing CAE process in the early-development stage.

1. はじめに

マツダは、リアルワールドにおける衝突事故 (日々発生している実際の衝突事故) を研究し衝突安全性能の進化に取り組んでいる。SKYACTIV-BODYに代表される車体開発は、あらゆる衝突形態をバーチャル検証することで、衝突過程の車両や乗員挙動を高精度に予測している。

燃料タンクの開発では、安全に給油できる性能、悪路走行を想定した振動耐久性能、そして万が一の衝突事故発生時の燃料漏れを未然に防ぐ火災防止性能など、燃料システムの健全性の確保が重要である。特に衝突時の燃料タンクは、車両の速度変化による燃料の揺動、タンク壁面

の膨張、燃料揺動抑制のバッフル板の変形、これによる燃料の動きの変化など、さまざまな現象を発生させる。これらの燃料とタンク構造の相互作用が、衝突時の燃料漏れ評価に影響する主要因となるため、理想の燃料タンク性能開発においては、燃料と構造体の複雑な挙動を予測した上で構造や仕様を評価し決定するマルチフィジックス解析技術が重要となる。本稿は、流体解析と構造解析を同時に行う流体構造連成解析技術の構築と次世代商品群の燃料タンク構造への適用について報告する。

*1, 3, 4 車両開発本部
Vehicle Development Div.

*2 衝突性能開発部
Crash Safety Development Dept.

2. 衝突時の燃料システムの気密性保持に向けた開発

衝突安全性能には、乗員保護性能や緊急脱出性能に加え、燃料システムの気密保持による火災防止性能がある。Fig. 1, 2に示した燃料システムを、Fig. 3に示すようなさまざまな衝突モードで保護し、衝突後も気密性を保持して火災を防止することが必要である。

衝突時の燃料漏れ防止のためには、燃料タンクと周辺にレイアウトされた部品の干渉によるタンクの穴あきや、パイプの挟まれ、タンク内部のロールオーバーバルブの破損、タンク内部のホースやパイプの抜けなどを発生させないように、仕様を決定する必要がある。そのためには、Fig. 4に示すように、車体を構成するフレームやクロスメンバーなどのユニットの強度やFig. 3に示したさまざまな衝突形態におけるユニットの圧潰するタイミング、順序、車体全体のエネルギー吸収量を精度良く見積もり、車両全体の挙動や、車体に固定される各ユニットの挙動、それらの変形の様相を設計段階で精度良く予測することが重要である。これらは構造体の変形や破壊のみを扱うため、メッシュサイズの詳細化、各ユニットの詳細な作り込み、過大入力による溶接点や部材の破断リスクの高精度な予測モデル化技術の構築などのCAE進化により高い精度で予測可能となった。しかし、衝突時の燃料タンクの挙動やタンク内部のバルブの破損は、衝突により揺動する燃料（流体）から受ける構造体の作用も考慮しなければならない。従来は過去の開発経験からの知見を織り込んで、タンク試作品での実機試験で検証してきたが、実機試験での問題検知と図面仕様の修正の進め方は、開発の最終段階での仕様変更を発生させ、短期開発や低コストの開発の実現のネックとなっていた。

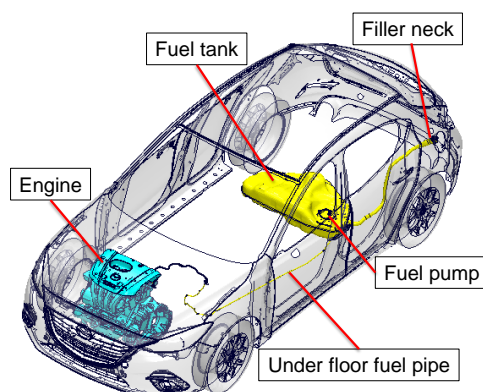


Fig. 1 Vehicle Fuel System

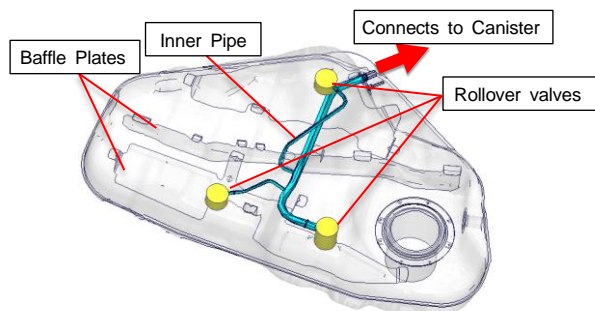


Fig. 2 Fuel Tank Components

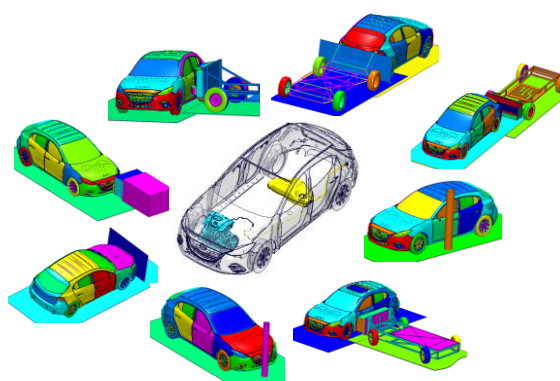


Fig. 3 Crash Simulations

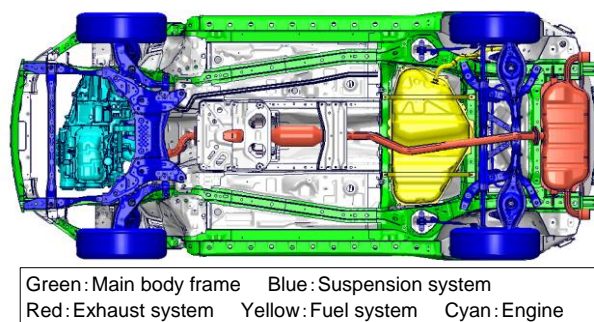


Fig. 4 Under-body Structure

3. 衝突時に燃料タンクの内部で起きている現象

燃料タンクの挙動やタンク内部の機能部品の破損を精度良く予測するには、タンク内部の発現象の見える化が重要である。停車している車両に別の車両が追突する現象を一例に説明すると、追突された車両のタンクは前側に加速されるが (Fig. 5(a))、内部の燃料は慣性力で、留まろうとするため、燃料は衝突側のタンク壁面を駆け上がり (Fig. 5(b))、その後に戻って渦を形成しながら (Fig. 5(c))、逆側の壁面まで移動して (Fig. 5(d)) 激しく揺動する。それにより、タンク壁面へ入力が生じ、タンク本体が部分的に膨張したり、内部の機能部品が変形する。これらは閉ざされた空間内で、わずか0.1秒の間に起きる現象であるため (Fig. 6)、定量的な現象把握が重要な課題である。

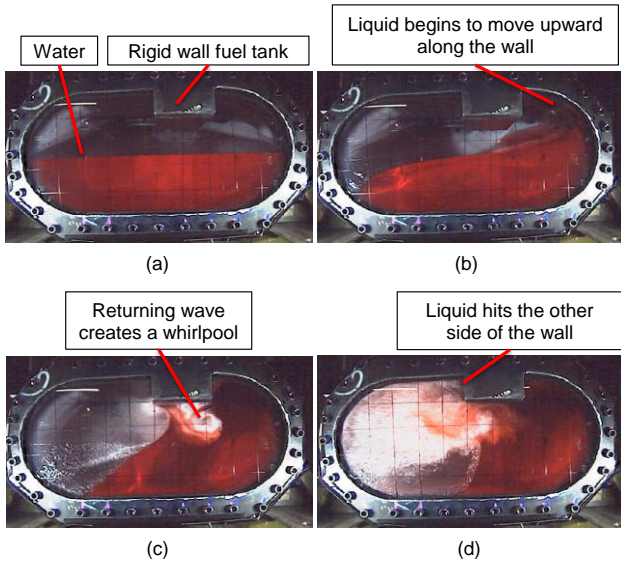


Fig. 5 Liquid Sloshing Motions in Rigid Tank

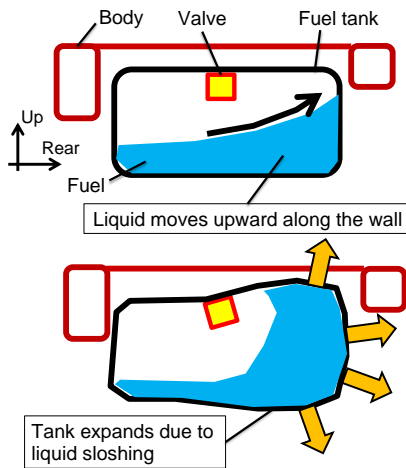


Fig. 6 Fuel Tank Deformation Upon Crash

4. 流体構造連成解析技術の構築

4.1 流体構造連成解析技術の重要性

前述したとおり、衝突時の燃料の揺動とタンク構造の相互作用が燃料漏れ評価に影響する主要因である。そこで、Fig. 7に示すように、タンク内部にバッフル板を設置して、Fig. 5と同様の条件で解析を行った。解析は、汎用非線形解析ソフトウェアのLS-DYNAを用い、流体解析部分をALE (Arbitrary-Lagrangian Eulerian) でモデル化した。構造体の変形を考慮しない流体解析は白線、流体と構造体の相互影響を考慮する流体構造連成解析は赤線で揺動する燃料内のトレーサー粒子挙動を比較した。その結果、流体解析では、燃料の流れがバッフル板によって大きく阻害される挙動となり、一方の流体構造連成解析では、燃料揺動がバッフル板を変形させ、この変形が燃料の流れを変え、トレーサー粒子の最後端部の位置及び流れの方向が異なることを確認した。燃料揺動がタンク構造に作用する荷重の大きさと方向を高精度に予測

し、設計段階で燃料漏れ防止構造を決定するためには、流体構造連成解析技術を用いた高度な予測技術を構築することが必要である。

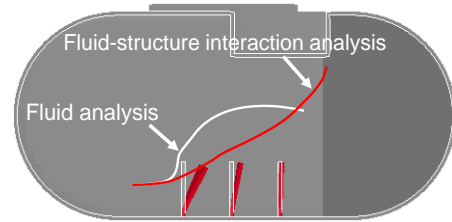


Fig. 7 Comparison of Tracer Particle Paths

4.2 流体構造連成解析技術の開発ステップ

この解析技術の開発は、液体揺動、燃料タンクの変形、車体との干渉を段階的に検証するために、(1)剛体壁タンク、(2)実体タンク、(3)車両状態、の3つのステップで検証した。

(1) 剛体壁タンク

1) 液体挙動の検証

壁面が変形しない剛体壁タンクを試作し (Fig. 8) , 着色水を充填して後面衝突相当の速度変化を与えるスレッド実験を行った。Fig. 9にアクリル製窓からの液体挙動、Fig. 10に壁面圧力の計測結果を示す。液体の挙動は実験、解析ともに40msでタンク上部の圧力センサー1付近に達し、同計測点における壁面圧力も高い精度で一致していることが確認できた。



(a) Top view

(b) Side view

Fig. 8 Configuration of Rigid Tank Sled Test

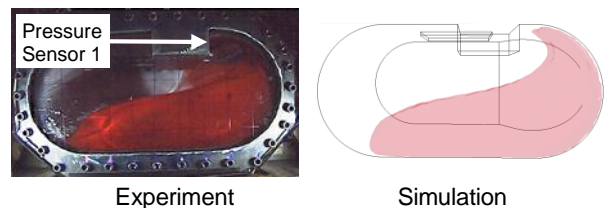
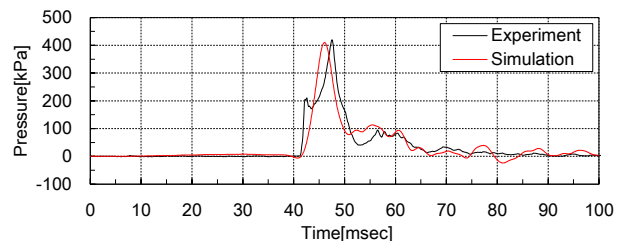


Fig. 9 Liquid Sloshing Motion at 40ms



Pressure at Sensor 1

Fig. 10 Result of Rigid Tank Sled Test

2) 流体構造連成の精度検証

流体構造連成の精度を確認するために、剛体壁タンクの内部底面にFig. 11に示す板厚の異なる3枚のバッフル板を設置し、前述のスレッド実験条件で液体挙動とバッフル板の変位量及び壁面圧力を計測した。解析は、バッフル板を弾塑性体としてモデル化して、ALEと連成させた。

Fig. 12に前述同様の40msでの実験と解析の液体挙動を示す。解析は、バッフル板の変形を実験同様に再現するとともに、構造体の変形による液体挙動の変化も再現している。また、Fig. 13に示すように、バッフル板の変位量は実験、解析ともに高い精度で一致し、壁面圧力も精度良く再現できている。本検証により、流体構造連成解析による構造体への荷重入力の定量評価技術を構築し、燃料タンク内に設置したバルブ等の変形の定量評価を可能にした。

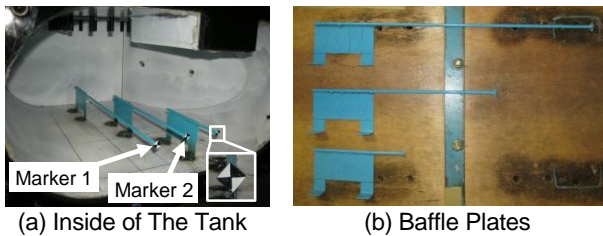


Fig. 11 Configuration of Rigid Tank Sled Test with Baffle Plates

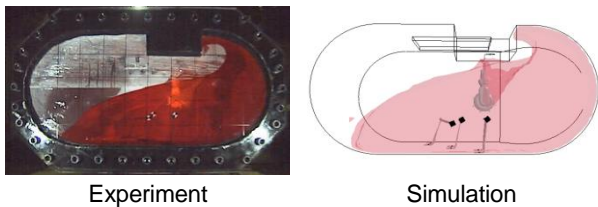


Fig. 12 Liquid Sloshing Motion at 40ms

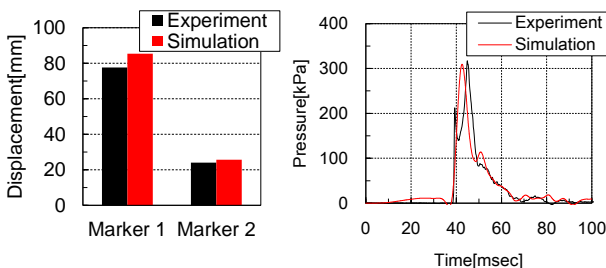


Fig. 13 Results of Rigid Tank Sled Test with Baffle Plates

(2) 実体タンク

前述で検証したモデル化方法と解析手法を実体タンクに適用し、タンク壁面が大きく変形する場合の予測精度を確認した。実験は、BIW (Body in White, ホワイト

ボディー)に燃料タンクを組み付け、前述と同じ条件でスレッド実験を行い、燃料タンク下面の加速度と実験後の燃料タンクの上下面の変形を三次元計測機で測定した (Fig. 14)。また、解析のタンク壁面残留変形量は、燃料揺動後のタンク形状に対してスプリングバック解析を適用して求めた。Fig. 15に示す実験と解析のタンク壁面残留変形量の分布のように、液体揺動によるタンクの膨らみ変形とタンク体積増加の負圧によるへこみ変形がよく再現できている。また、Fig. 16に示すタンク下面の加速度もピークの発生タイミングとレベルをよく再現できている。0.1秒程度の短時間で壁面が大きく変形する実体タンクの検証においても高い精度で現象を再現することを確認した。



Fig. 14 Grid Lines for 3-D Measurement

	Experiment	Simulation
Upper Pan	3 7 2 4 0 1 1 3 4	-2 4 0 0 -2 0 0 2 3
	10 6 5 -2 -4 -1 0 3	10 7 1 -4 -3 -1 1 2
	15 12 10 2 -2 -8 -4 -2 0	17 15 5 -1 -6 -5 -3 -1 1
	1 5 6 4 -7 -11 -8 -5 -1	-2 5 7 2 -8 -10 -7 -4 0
	2 3 2 -4 -12 -9 -5 -2	1 4 2 -7 -13 -9 -4 0
	-3 -3 -8 -8 -5	-4 -3 -8 -9 -4
Lower Pan	2 7 23 14 6 2 -1 0 2	2 9 20 11 1 -1 -1 0 0
	9 25 48 28 6 2 -1 0 1	8 23 40 25 1 -1 -1 0 0
	8 30 57 27 6 2 0 0 2	7 30 54 25 0 -1 0 0 0
	22 48 20 3 1 0 0 3	22 49 19 0 0 0 0 0
	3 29 11 1 1 1	1 31 11 0 0 0
	6 3 0 1	4 3 0 0

Fig. 15 Comparison of Deformed Fuel Tank Shapes

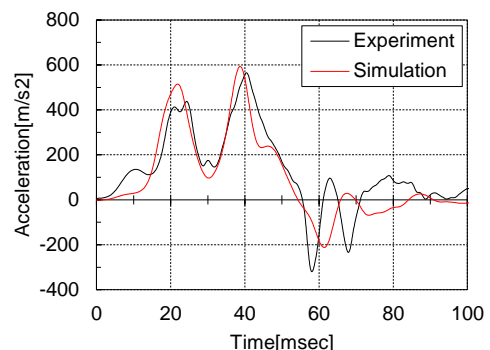


Fig. 16 Acceleration at Bottom of Fuel Tank

(3) 車両状態

タンク周辺部品の構造物と干渉する車両状態での精度を検証するために、車両にMoving Deformable Barrierを後面衝突させる実験を行った (Fig. 17)。前述のスレッド実験と同様に燃料タンク下面の三次元形状の変形量を計測した。

Fig. 18に示す実験と解析のタンク壁面残留変形量のように、車両状態のタンク壁面の膨らみ変形とへこみ変形がよく再現できることを確認した。

以上の流体構造連成解析技術開発の結果、液体挙動、バルブ等の部品への荷重入力、燃料タンク挙動が高精度に予測可能であることから、本技術が次世代商品群をはじめとする車両開発へ適用可能であることを確認した。



Fig. 17 Configuration of Crash Test

		Experiment						Simulation							
Lower Pan		-2	1	5	7	7	-8	0	-5	-1	6	6	4	-4	-4
		-2	2	8	11	10	-3	0	-5	1	10	11	10	1	-2
		-2	3	11	16	15	8	3	-5	2	14	16	17	9	0
		-3	4	12	17	14	11	2	-6	4	16	21	22	12	0
			2	15	21	22	7			2	20	25	27	8	
					19	12						19	15		

Fig. 18 Comparison of Deformed Fuel Tank Shapes

5. 開発への適用

次世代商品群では、流体構造連成解析を用いて、衝突時の燃料揺動によるタンク内のバルブへの入力荷重の大きさ、その方向、タンクの局所的な膨張、全体の挙動を予測し、燃料漏れ防止構造を設計段階で決定した。この結果、開発の最終段階における性能確認車による燃料漏れ防止に関わる設計変更要求がゼロにでき、計画どおりに市場導入することに貢献した。

6. おわりに

次世代商品群の開発に、マツダが長年取り組んできたCAE技術と流体構造連成解析を組み合わせた新たな性能開発技術を適用した。この結果、優れた衝突安全性能を効率的に実現する燃料タンク構造を構築した。

マツダは理想の性能と品質を追求する有効な手段としてCAE技術を活用した車両開発を進めている。マルチフィジックス解析による現象解明と設計支援は、複雑な物理現象の領域において部門を超えた活発な共創を可能に

している。今後も積極的にCAE技術を開発し、マツダらしいクルマをつくる構想・詳細設計の要として、更なる進化とより良い商品の開発に取り組んでいく。

■ 著 者 ■



山内 一矢



嘉村 浩二



花田 裕



小島 宏介

10

マツダコネクトの新機能開発 New Feature Development for Mazda Connect

松本 成司*1 久保崎 淳一*2 佐藤 陽平*3
Seiji Matsumoto Junichi Kubosaki Yohei Sato
水津 浩司*4
Koji Suizu

要 約

進化を続けるマツダコネクトは、2018年モデルCX-9から、マツダ初となるApple CarPlay™・Android Auto™及びSiriusXM®データサービス機能を搭載する。Apple®やGoogle®が提供する多彩なコンテンツを運転中でも安全に楽しむことができるように、ユーザーインターフェースを工夫し、運転中に不要な機能はあえて制限した。また、新機能の搭載に際しては、新車購入のお客様のみならず、既にマツダ車にお乗りいただいているお客様にも提供できるように、マツダコネクトのソフトウェアと一部のハードウェアの組み換えのみで実現できるようにシステムを設計した。これらの新機能により、マツダコネクトの「つながる楽しみ」を広げ、マツダ車で「走る喜び」を高めていく。

Summary

The Mazda Connect that has continued to evolve is equipped with Mazda's first Apple CarPlay™, Android Auto™ and SiriusXM® data service function from 2018 model CX-9. We have improved user interface and dared to restrict the unnecessary functions while driving so that the users can enjoy a wide variety of contents provided by Apple® and Google® safely. In addition, we designed the system to enable to provide new functions with the user not only buying a new car but also already owning the Mazda car by simply exchanging the Mazda connect software and the partial hardware. These new functions broaden "pleasure to be connected" of the Mazda connect and rouse "Celebrate Driving" with Mazda car.

1. はじめに

2013年の新型アクセラから導入したマツダの新世代コネクティビティシステムであるマツダコネクトは、「古くならないシステム」コンセプトを具現化し、機能の改善と新しい機能の追加により、発売から5年目を迎えてもなお進化を続けている。このたび、2018年モデルCX-9に、Apple CarPlay及びAndroid AutoとSiriusXMデータサービスを追加し、今後他モデルにも順次展開していく。これらマツダ初搭載となった新機能の概要と開発の注力ポイントを紹介する。

2. Apple CarPlay及びAndroid Auto

2.1 Apple CarPlayとは

Apple CarPlayは、米国Apple社によって開発された、iPhone®を車載インフォテインメント機器と連携さ

せるシステムである。iPhoneをLightning®ケーブルで車両のUSBポートに接続して使用する。iPhoneがCarPlayモードで接続されると、マツダコネクトのディスプレイにApple製品のようなインターフェース画面が表示され (Fig. 1)、音楽プレーヤー・マップ・SMS・電話など、さまざまなアプリケーションをマツダコネクトの操作デバイスやSiri®を使って、走行中でも安全に利用できる。

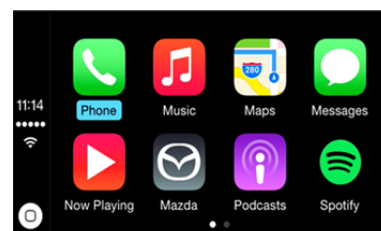


Fig. 1 CarPlay Screen

*1~4 情報制御モデル開発部
Infotainment and Control Model Development Dept.

2.2 Android Autoとは

Android Auto は、米国 Google 社によって開発された、Android™を OS として搭載するスマートフォンを車載インフォテインメント機器と連携させるシステムである。Android スマートフォンを USB ケーブルで車両の USB ポートに接続して使用する。Android スマートフォンが Android Auto モードで接続されると、マツダコネクットのディスプレイに Google Now のようなカード型インターフェース画面が表示され (Fig. 2)、音楽プレーヤー・Google Maps™・SMS・電話などさまざまなアプリケーションを CarPlay と同様に、マツダコネクットの操作デバイスを使って、走行中でも安全に利用できる。

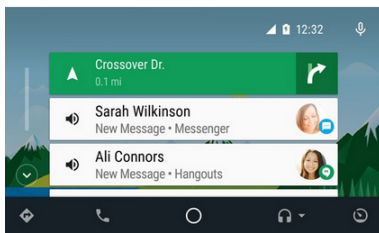


Fig. 2 Android Auto Screen

2.3 システム変更点

今回、CarPlay機能を搭載するために、マツダコネクットのシステム構成を一部変更した。従来のシステム構成については、マツダ技報No.31 (2013) に掲載した「マツダコネクットの開発⁽¹⁾」を参照いただきたい。

USB-HUB ユニットの 신설し、マツダコネクットのヘッドユニットであるコネクティビティマスターユニット (CMU) との間の接続方法を見直した。

Apple 社のシステム要件により、CarPlay 接続時の CMU と iPhone の間の通信は USB ホストモード (iPhone がホスト) に切り替わることが要求されている。従来の USB-HUB ユニットの CMU をホストとする接続モードにしか対応していなかったため、2 つある USB ポートのうちのポート 1 をホストモード対応に変更して、ポート 2 とナビ地図 SD カードスロットの系統から分離した別系統として USB-HUB ユニットの内部回路を新設計した (Fig. 3)。これにより CarPlay モードはポート 1 でのみ接続可能となるが、CarPlay 接続中であっても、同時にポート 2 に接続した他の USB デバイスを利用することを可能にしている。

CMU は、ソフトウェアの変更のみで CarPlay・Android Auto 機能の追加に対応した。新しい機能を追加するため、CPU やメモリーに対する負荷が増大する。この課題は、同時に使用しない機能を排他で起動することでメモリー使用量を削減したり、CPU の

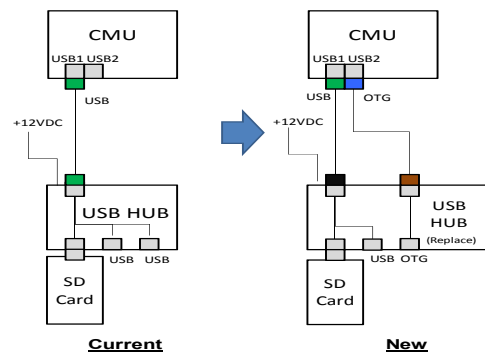


Fig. 3 USB-HUB Unit for CarPlay

動作周波数を上げて CPU の処理可能量を増やすことで解決した。これにより、CX-9 以外のマツダコネク搭載車においてもミニマムリードタイムで CarPlay・Android Auto 機能を搭載できるだけでなく、既にマツダコネク搭載車を利用いただいている市場の顧客にもミニマムコストで CarPlay・Android Auto 機能を提供できるようにした。

2.4 開発注力ポイント

(1) 安全性対応

マツダコネクは、運転中でも安全に利用できることを最優先にしながらも、コネクティビティによる利便性を享受できるように HMI を構成している。そのため、ディスプレイに表示されたインターフェースの操作は、走行中はタッチパネルでの操作ができないようになっており、コマンダーのみで操作できる。CarPlay モードにおいても、コマンダーのみで操作できるように Apple 社と協業を行った。CarPlay モードの画面描画や操作入力処理は iPhone によって制御されるため、インターフェース画面上のカーソルの動き方など、コマンダーで操作するために最適な仕様をマツダから Apple 社に提案して協議を重ね、Apple 社の仕様マツダの要望を追加いただくことで実現した。

Android Auto でもコマンダーのみで操作できるように Google 社と協業を行った。Android Auto はタッチパネルを優先的に使用するインターフェース画面を採用しているため、一部にタッチパネルでしか操作できないボタンがある。走行中にタッチパネルが使えないマツダコネクでは、走行中にこれらの操作ができない。そのため、接続モードをコマンダーのみに変更とすることで、走行中でも安全に全ての操作ができるようにした。

(2) ユーザーインターフェース (UI)

ユーザーによっては CarPlay モード・Android Auto モードのコンテンツとマツダコネクのナビ

ゲーションシステム（ナビ）などの既存コンテンツを切り替えながら使用するユースケースも想定できるため、そのようなユーザーの利便性を考慮し、容易に画面遷移できる UI を開発した。例えば、マツダコネクトの画面から CarPlay モードの画面に切り替える場合には、「ホーム画面上の CarPlay アイコンを選択する」、「アプリケーションメニューから CarPlay を選択する」、「コマンダーのホームボタンを長押しする」といった多くの切り替え方法があり、ユーザーは場合によって使いやすい方法を選んで利用することができる。このように、ユーザーが期待する多くの手段に対応しておくことで、多くの方にとって違和感なく新しいモードを利用いただくことができる (Fig. 4)。

また、CarPlay のミュージックアプリを再生中にコマンダーのエンターテインメントボタンを押すと CarPlay の “Now Playing” 画面を一発表示したり、CarPlay の “マップ” アプリで経路誘導中にコマンダーのナビボタンを押すと CarPlay の “マップ” 画面を一発表示したりするように設計した。これもユーザーの期待動作と実際の動作を合わせ、違和感なく利用できるようにした例である。

更に、マツダコネクトのナビと CarPlay の “マップ” アプリで別々のルートガイダンスが流れてドライバーが混乱することを避けるため、一方がルートガイダンス中にもう一方のルートを新たに設定すると、先のルートガイダンスを自動でキャンセルすることで、ガイダンスが重複しないように設計した。また、CarPlay・Android Auto 接続中に使用できる音声認識機能は、CarPlay・Android Auto それぞれの音声認識のみとし、マツダコネクトの音声認識は起動しないように制限した。これは既存機能と追加した機能のバッティングによってユーザーに違和感を持たれないようにするためである。

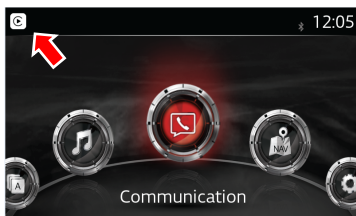


Fig. 4 Home Screen with CarPlay Connected (CarPlay Icon Is Being Displayed on Top of Screen)

3. SiriusXMデータサービス

3.1 SiriusXMデータサービスとは

米国の衛星放送配信会社であるSiriusXMが2004年

より音楽放送に加え、さまざまな最新情報を契約ユーザーに提供するサービスである。車載ナビとの連携により渋滞情報や道路の規制情報 (Traffic) ・リアルタイムのガソリン価格情報や駐車場の満空情報など (Travel Link®) が表示できる。これらのサービスは、アメリカ及びカナダの全都市で提供されている。

マツダコネクトはこのサービスを受信し、道路状況に合わせたナビルート設定や、地点情報を表示するだけでなく、ナビの目的地に設定したり、ハンズフリーシステムを用いて電話をかけたりなどの連携機能も提供した。なお、北米にはFM放送のHDラジオにも同様のサービスが存在するが、SiriusXMは衛星放送であり、北米全土のより広い地域で受信可能である。加えて、既に音楽サービスを契約しているお客様は、わずかな追加費用でこのサービスを受けられるメリットがあるため、SiriusXMのサービスを採用した。

3.2 機能概要

マツダコネクトで採用した機能を紹介する (Table 1)。

Table 1 SiriusXM Data Service Function List

Traffic	Traffic Plus
Travel Link	Weather Radar
	Weather Forecast
	Weather Alerts
	Fuel Prices
	Sports
	Parking
Audio	Album Art
	Channel Graphics
	Sports-Flash™
	Traffic & Weather Now™

(1) Traffic Plus

ナビの地図上に渋滞情報を表示することに加えて、道路工事等で通行できない場所や期間を文字情報でユーザーに通知する (Fig. 5)。

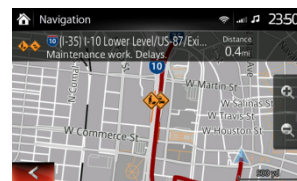


Fig. 5 Traffic Plus Screen

(2) Weather Radar

天気図・雨雲の動きやハリケーン等の位置をリアル

タイムでナビの地図画面上に表示する (Fig. 6)。



Fig. 6 Weather Radar Screen

(3) Weather Forecast

自車が位置する都市の現在・3時間後・6時間後の天気や、5日後までの天気予報を表示する。自車位置以外の主要都市の天気も表示可能である (Fig. 7)。

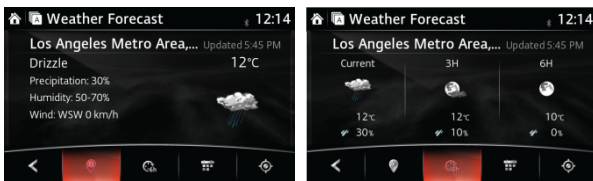


Fig. 7 Weather Forecast Screen

(4) Weather Alerts

自車位置の周辺に雷雨・ブリザード・ハリケーンや竜巻等の警報が発生した場合、ポップアップ画面による警告と詳細情報を表示する (Fig. 8)。

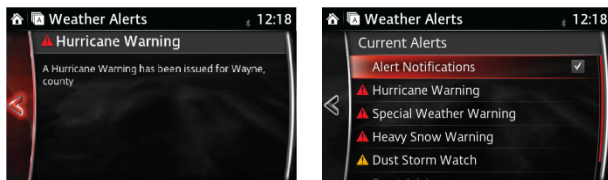


Fig. 8 Weather Alerts Screen

(5) Fuel Prices

自車位置の周辺にあるガソリンスタンドのリストを各スタンドの住所・取り扱い油種や価格とともに表示する。マツダコネクと連携し、電話をかけたり、ナビの目的地として設定したりすることも可能である (Fig. 9)。

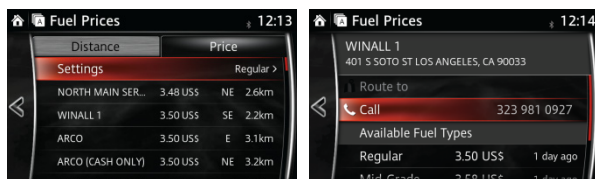


Fig. 9 Fuel Prices Screen

(6) Sports

野球・バスケットボールやゴルフなどの北米で人気のあるスポーツの試合結果やスケジュールを表示する

(Fig. 10)。

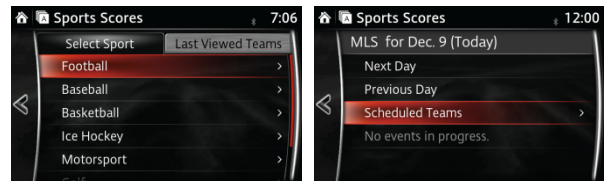


Fig. 10 Sports Screen

(7) Parking

自車位置の周辺にある駐車場のリストを各駐車場の住所・価格や満空情報などとともに表示する。マツダコネクと連携し、駐車場に電話をかけたり、ナビの目的地として設定したりすることも可能である (Fig. 11)。

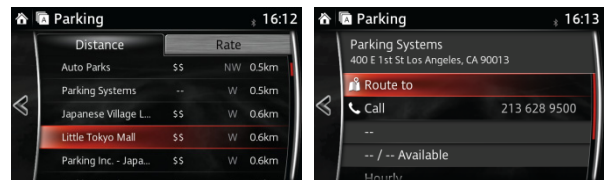


Fig. 11 Parking Screen

(8) Sports Flash

ユーザーのお気に入りチームの試合中に聞き逃さないシーンが発生すると、ポップアップ画面で通知し、その試合を中継しているSiriusXMのラジオチャンネルにワンタッチでチューンすることが可能である (Fig. 12)。

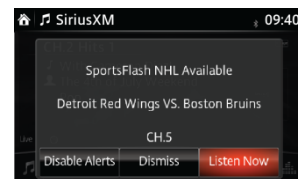


Fig. 12 Sports Flash Screen

3.3 開発の注カポイント

(1) 将来に向けての拡張性

データサービスに対応した新型のSiriusXMチューナー (X65H) をチューナーアンプユニット (TAU) に載せ替え、将来の動画配信や追加サービスに対応できるように、CMUからTAUのインターフェースを、これまでのCANから高速でデータ送受信可能なUSBに変更した。SiriusXMチューナーとの通信異常時にはリセット可能なように一部従来のCAN通信も残している。CMUのソフトウェアをバージョンアップすることで、市場導入後でも新規サービスに対応できるように機能配置を見直し、SiriusXMチューナーの制

御機能をCMUに集約した。

(2) 機能選択とUI設計

SiriusXMが提供するサービスの全てを採用した場合、扱う情報量が膨大となり、UIが複雑になることで、より多くの操作や画面への注視が必要となり非常に危険である。これは、走行中使用の安全性を最優先するマツダコネクトの方針に反することになる。そこで、弊社北米開発拠点と共同で「ユーザーに本当に必要な情報は何か？」を検討した結果、最寄りの映画館と上映時間情報を提供するMovieと株価情報を提供するStockは運転中のユーザーには不要と判断して採用を見送った。また、採用したサービスについても、できる限り機能を簡素化することで安全性に配慮した。

ユーザーの使い勝手を向上するためのUIの最適化を行った。例として、Fuel Pricesではガソリンスタンドのリストを油種でソートできるようにしたり、Fuel PricesやParkingから提供される地点情報をナビの目的地として設定する場面では、サービスによらず同一操作となるようにUIを統一化したりした。また、Weather Forecastでの天気表示方法やWeather Radarでの雨雲の表示方法を、TV放送での表示方法を参考にユーザーに馴染みのあるものとした。また、Weather Forecastが提供する天気情報は全部で40種類あるが、画面表示の上では細分化され過ぎているため、弊社北米開発拠点や実研部門と必要性を検討し、23種類に統合した上で、画面表示するアイコンの意匠を社内のグラフィックデザイナーが新たにデザインして分かりやすく最適化した。

(3) ナビ情報の進化

これまでは、過去統計交通渋滞情報を利用した経路設定しか行っていなかったが、今回リアルタイム交通情報を利用することにより、最適な経路案内とより正確な到着予測時刻を提供できるようになった。

また、過去北米向けのナビシステムで採用していた渋滞情報と比較して、より高精細なTrafficのデータを活用することで、実態に合った渋滞情報表示と、より最適なルート案内を実現した。例えば、これまではある道路区間の一部が渋滞であれば、その区間は全て渋滞と表示していたが、その区間を細分化し精度の高い情報を提供可能になった。また、工事情報や事故情報もTrafficから受信することにより、新たに活用するようになった。

4. おわりに

前章までに説明した新機能をマツダコネクトの安全なUI上で利用できるようになった。ユーザーが運転中でも安全性を損なうことなく、CarPlay・Android AutoやSiriusXMが提供する多彩なコンテンツを安心

して楽しむことができ、それによりドライブする喜びが広がり、クルマにもっと乗りたくなっていただくことができるように心を込めて開発した。マツダコネクトは、これからも進化を続け、世界中のマツダユーザーに「つながる楽しみ」と「走る喜び」を提供していく。これからも期待していただきたい。

参考文献

- (1) 山本栄一ほか：マツダコネクトの開発、マツダ技報, No.31, pp.24-28 (2013)

■ 著 者 ■



松本 成司



久保崎 淳一



佐藤 陽平



水津 浩司

11

HILSを活用した電装品評価システムの技術構築 Development of Electrical Component Evaluation System Using HILS

岡田 英之*1 橘高 徳昭*2 谷口 雅也*3
Hideyuki Okada Noriaki Kittaka Masaya Taniguchi

要 約

急速に複雑化・高度化を続ける車載電装品の開発に対応すべく、Hardware In the Loop Simulation(HILS)の技術をベースにロボットや音声合成や画像処理を活用した電装品評価システムを構築した。これにより電装品の評価工数90%減を初めとするさまざまな成果につながったため、本評価システムの概要及び特徴を紹介する。

Summary

In order to support the development of automotive electrical equipment, which continues to become increasingly complex and sophisticated, we developed an electrical equipment evaluation system that utilizes robots, voice synthesis and image processing technologies based on the Hardware In the Loop Simulation (HILS) technique. This system has reduced man-hours required for evaluations of electrical components by 90%. In this article, we introduce the outline and characteristics of the newly-developed evaluation system.

1. はじめに

従来の車載電装品はお客様の快適性を実現する手段としてさまざまな進化を遂げてきたが、近年マツダコネクタを初めとするエンターテインメント装備や自動ブレーキや各種警告機能などの安全装備が搭載されてきており、またそれらの制御ユニットは通信によってお互いに協調制御する仕組みとなった。その結果プログラムは急激に複雑化するとともに、それらの良し悪しを判断する評価項目や評価条件は指数関数的に肥大化した。一方、競争力維持のために開発期間の短期化や評価工数の削減要求も高まっている。

試作車や試作品をベースに人的工数に依存するこれまでの評価方法の延長では、遠くない将来に電装品開発が破綻することを予測したマツダでは、十数年前よりそれらの解決策としてMBD(Model Based Development)**1を推進してきた。更に約6年前からMBDの検証ツールとして、HILS技術を基にロバスト性評価と自動評価に主眼を置いた電装品評価システムの構築をスタートした。以降、年ごとにシステムの拡張や機能の向上に取り組んだ結果、電装品開発の主軸として活用できるシステムが構

築され、大幅な評価工数削減効果と対象電装品の品質向上に寄与できたため、その機能と特徴について紹介する。

2. システム構成

2.1 プラットフォーム

車載電装品の制御ユニットはスターター・パワーシートなどの大電力モーターによる電源変動環境や、小型モーターやソレノイドによる比較的高周波で高電圧な電気的なノイズ環境においても誤作動なく確実に動作しなければならない。またそれらの電気的な環境下での評価は、単なるOK・NGの判定ではなく、OKの余裕度、すなわちロバスト性を考慮した評価でなくてはならない。マツダではこれらの電気的な環境を再現し、ロバスト性評価を実現するツールESPER**2を2007年にソフトウェアを含め独自開発した。

電装品評価システム構想段階において、前述のESPER機能によるロバスト性評価を限りなく自動化することと、更に前例のない新機能の構築を目指した結果、ESPER開発時と同様にソフトウェアを自社開発することを決定した。

それらを効率良く構築するため、プラットフォームの

*1~3 電子性能開発部
Electrical & Electronics Performance Development Dept.

**1 MBD
CAEツールを利用し、制御システムをモデル化する開発手法

**2 ESPER (Electronics System with Perfect Robustness)
電気的ノイズ印可によるロバスト性評価ツール
マツダ技報, No.25, pp.106-111 (2007)

共通化を考慮した結果、National Instruments社製の各種入出力ボード群と、高速演算処理用FPGAを組み合わせたハードウェアプラットフォームを選択するとともに、グラフィカルインターフェイスプログラム言語であるLabVIEWをソフトウェアプラットフォームに選定した。

2.2 システム構成

National Instruments社製のHILSエンジンを中心に、以下の機能システム群によって構成した (Fig. 1)。

- ①産業用ロボットによる電装品自動操作システム
- ②画像処理による自動判定システム
- ③音声合成システム
- ④GPSシミュレートシステム
- ⑤ノイズシミュレートシステム
- ⑥小型ロボットによるカーナビ評価システム
- ⑦Bluetooth®評価システム
- ⑧仮想電装品エミュレートシステム
- ⑨電源変動エミュレートシステムESPER
- ⑩ファジングツールシステム

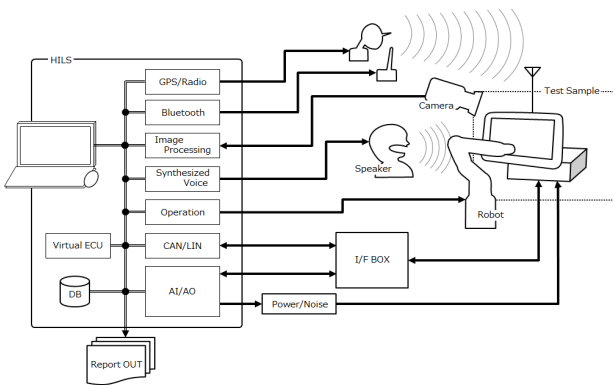


Fig. 1 System Configuration

3. 機能と特徴

3.1 産業用ロボットによる電装品自動操作システム

電装品評価には各種スイッチ類の操作が必要となるため、自動化の観点からその操作には産業用ロボットと、三本指のロボットハンドを採用した。押す・引く・回す

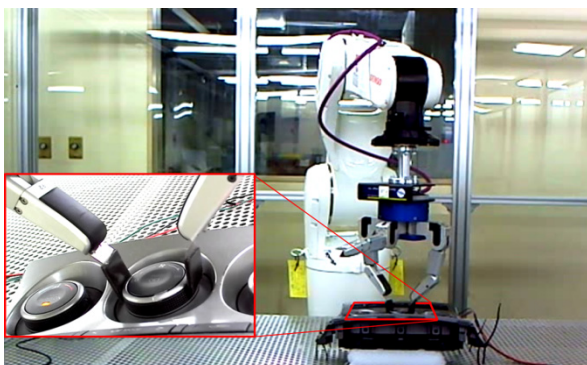


Fig. 2 Electrical Component Operation Robot

の操作が可能となり、人間の操作に比較しばらつきが少なく再現性の高いシステムとなった (Fig. 2)。

3.2 画像処理による自動判定システム

電装品評価の自動化を実現する上で重要なポイントの一つがOK・NGの自動判定といえる。効率的な評価システムとするため、評価中に動画撮影しながらリアルタイムで画像解析し、直ちに合否判定が行えるシステムを構築した (Fig. 3)。

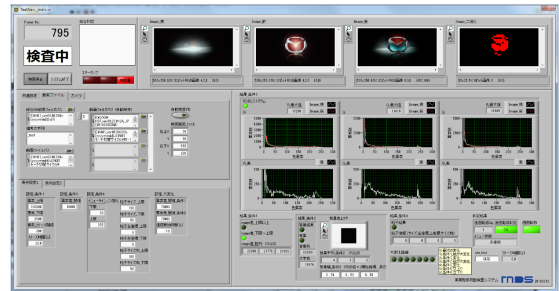


Fig. 3 Automatic Judgment System

3.3 音声合成システム

カーナビを始め近年の電装品は、スイッチ操作のみならず音声で動作するシステムが採用されている。これらの評価の自動化に先立って、発音のメカニズムのからくりを解明した。それにより性別・年齢・方言・イントネーション・滑舌を段階的に変化させることで車載電装品の音声認識機能において評価の数値化が実現した (Fig. 4)。

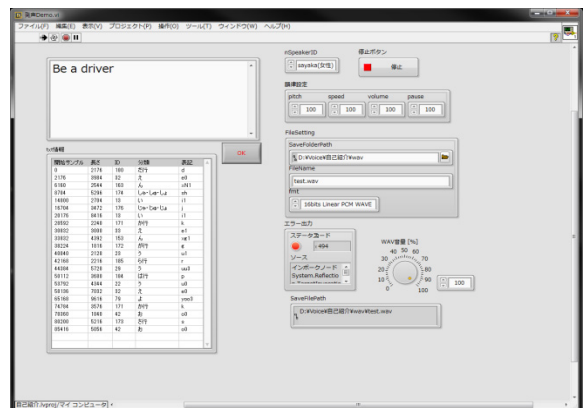


Fig. 4 Speech Synthesis System

3.4 GPSシミュレートシステム

カーナビの重要な機能の一つであるGPS性能を評価するため以下のシステムを構築した (Fig. 5, Fig. 6)。

- ①8衛星電波を同時発信するGPSシミュレート機能
- ②ビル影や樹木等による電波の減衰再現機能
- ③海面やビル反射を再現するマルチパス送信機能

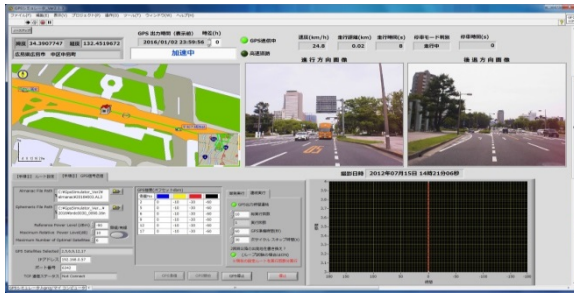


Fig. 5 GPS Simulation System (Japan)

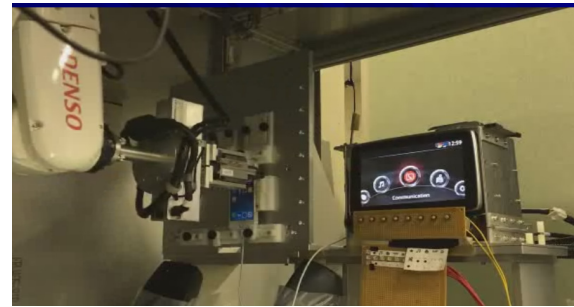


Fig. 8 Small Robot System

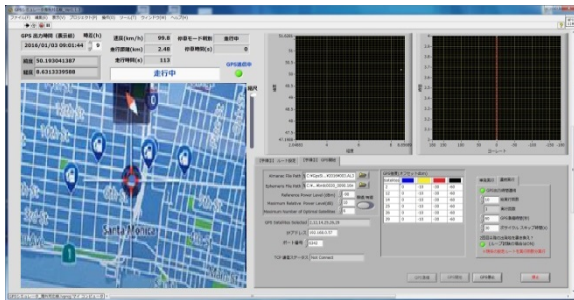


Fig. 6 GPS Simulation System (All countries)

3.5 ノイズシミュレートシステム

8チャンネルのノイズシミュレータをシステムに組み込むことにより、±150Vサンプリングタイム5μ秒までのさまざまな電氣的ノイズ評価が行えるシステムとした (Fig. 7)。

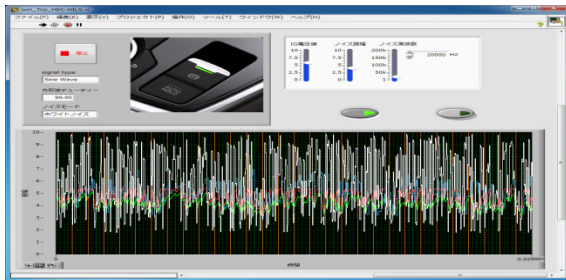


Fig. 7 Noise Simulation System

3.6 小型ロボットによるカーナビ評価システム

タッチパネルの操作には二本指のロボットハンドを装備した小型ロボットを採用した。これによりカーエンターテインメントディスプレイやそれに接続するスマホのパン・フリック・スワイプ操作が可能となった (Fig. 8)。

3.7 Bluetooth®評価システム

エンターテインメントシステムに接続した携帯やスマホを連携させて自動評価する際に問題が発生した場合、その真の原因を探るべく導入したのが本システムである。

例えばスマホの音楽ファイルをマツダコネクで再生する機能の自動評価中に音切れが発生した際、音切れの原因を特定するには、本システムでBluetooth®の電波そのものをアナライズすることで解決する (Fig. 9)。

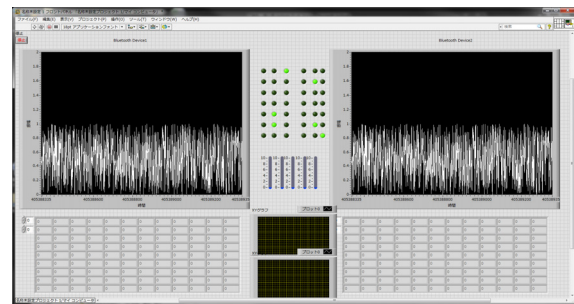


Fig. 9 Bluetooth® Evaluation System

3.8 仮想電装品エミュレートシステム

前述のとおり昨今の電装品は別の電装品と通信し連携しながら動作する機能となっている。以前は評価対象の電装品以外にも用意し接続する必要があった。本機能はこれら関連する別電装品をエミュレートする機能であるが、従来のHILSシステム標準のものではなく、より実態に近いリアルな電装品をエミュレートする (Fig. 10, 11)。

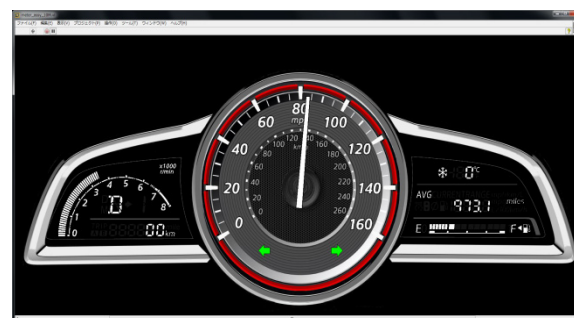


Fig. 10 Virtual Electrical Equipment (Cluster)



Fig. 11 Virtual Electrical Equipment (Commander)

3.9 電源変動エミュレートシステムESPER

車両の複数電源（バッテリー電源・アクセサリ電源・イグニッション電源）を同時に独立コントロールし以下の電源波形を電装品に印加する（Fig. 12）。

- ①エンジン始動波形
- ②瞬断波形
- ③リップル波形
- ④任意波形（波形エディタ装備）

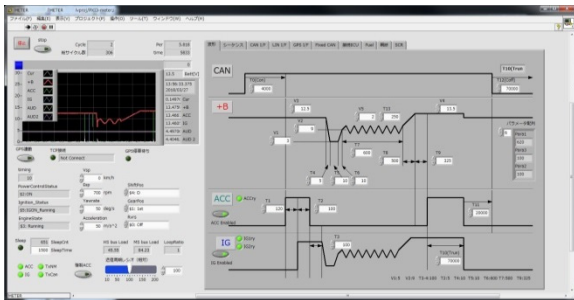


Fig. 12 ESPER

3.10 ファジングツールシステム

車載エンターテインメントシステムはBluetooth®・USB・Wi-Fi・CAN等の通信機能を有するが、これらのセキュリティー性を評価する必要がある。市販のシステムが市場では入手できるものの、システム価格・メンテナンス価格ともに非常に高価である。マツダでは、世の中に氾濫するセキュリティー攻撃方法をプログラミングし、独自のシステムを安価に構築した（Fig. 13）。

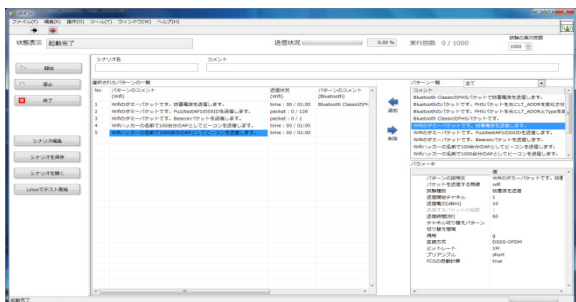


Fig. 13 Security Test System

4. システム全体像と小型化

4.1 システムの肥大化と小型化ニーズ

約6年前に構築を始めた本システムは、年ごとの機能拡張によって大型化してきた。複数の車種や電装品の評価には台数増しが必要となるが、大型のシステムを複数台導入するには必要な設置面積の問題が発生する（Fig. 14 設置面積30㎡）。そこで基本機能はそのままコンパクトかつ移動可能な小型・中型のシステムを構築するとともに、複数台導入し開発車種・評価対象電装品の拡大を図った。



Fig. 14 Large Size System Image

4.2 小型システムの構築

小型化ニーズに応えるべく以下機能を有した小型システムを構築し複数台導入した（Fig. 15 設置面積4㎡）。

- ①画像処理による自動判定システム
- ②音声合成システム
- ③GPSシミュレートシステム
- ④仮想電装品エミュレートシステム
- ⑤電源変動エミュレートシステムESPER

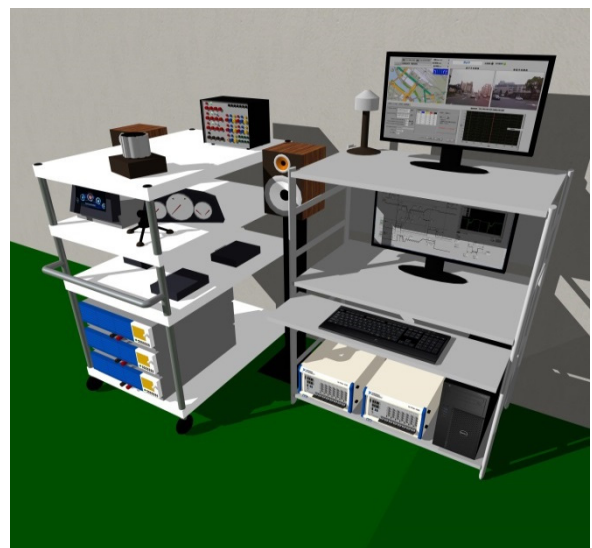


Fig. 15 Small Size System Image

4.3 中型システムの構築

小型化ニーズをベースに小型ロボットを追加し以下機能を有した中型システムを構築し複数台導入した (Fig. 16 設置面積6㎡)。

- ①画像処理による自動判定システム
- ②音声合成システム
- ③GPSシミュレートシステム
- ④仮想電装品エミュレートシステム
- ⑤電源変動エミュレートシステムESPER
- ⑥小型ロボットによるカーナビ評価システム

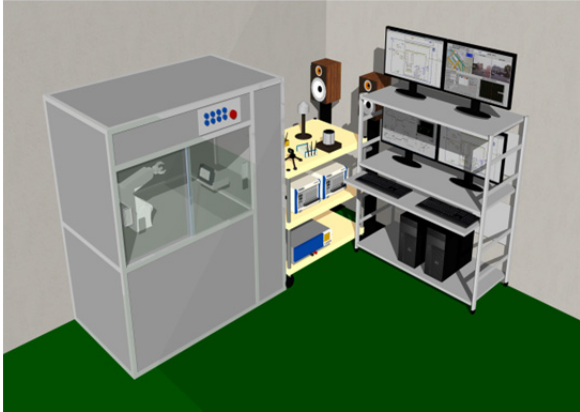


Fig. 16 Medium Size System Image

5. システム導入効果

5.1 評価工数の削減効果

従来は実車走行とベンチテスト主体の評価手法であったが、本評価システムの特徴であるテストシナリオの自動作成・ロボットによる昼夜の自動運転・画像処理によるOK・NGの自動判断等によって実車評価は最終確認のみとなり、結果的に90%の工数削減を図ることができた。

5.2 評価網羅性の効果

実車走行ベースの評価ではOK・NGの評価になりがちであり、電源電圧やノイズに対する動作の余裕度を検証することも困難となるため、発生頻度の低い不具合現象は表に現れない恐れがある。本システムを活用し条件を厳しめに設定することで、これまでは発生頻度が低く見逃してしまう問題を洗い出すことができるようになるとともに、余裕度の数値化も可能となった。

5.3 サプライヤー様との共通化効果

本システム運用によって評価工数削減や評価網羅性の向上効果があることを部品メーカー様にお伝えした結果、本システムを導入されることとなった。

評価設備をサプライヤー様と共通化することで以下の効果が生まれた。

- ①問題発生時の詳細条件が容易に共有化でき、早期問題解決につながった。

- ②発生頻度の少ない問題の再現試験時間の大幅な短縮
- ③サプライヤー様での試験網羅性が向上することで、試作品の完成度が向上した。

6. おわりに

車載電装品の進化・複雑化とそれに伴う開発工数増大の予測からの解決策として構築した本システムは、導入と活用により大きな効果を生み出した。しかしながらこれまで以上に急速な電装品の進化が予想されるため、現状のシステムに慢心することなく、更なる機能アップを図ることにより、単なる評価ツールの域を超え設計段階でも使用可能な包括的なツールへと進化させていき、ロバスト性の高い商品づくりに貢献したいと考える。

最後に、(株)マックシステムズ様

日本ナショナルインスツルメンツ(株)様

日本ノーベル(株)様

(株)ロジカルプロダクト様

(株)松浦電弘社様

を初め、本システムの開発にご協力賜りました方々に心より感謝申し上げます。

参考文献

- (1) 電装品ロバスト性開発システム「ESPER」の紹介、マツダ技報、No.25, pp.106-111 (2007)
- (2) マツダがNIのHILSを利用して電装品用の自動評価環境を構築—試験に伴う操作や結果判定にかかる工数を大幅に削減、日本ナショナルインスツルメンツ、ホームページケーススタディ、<http://sine.ni.com/cs/app/doc/p/id/cs-17634>
- (3) あらゆる電装品を協調動作させて機能とロバスト性を自動評価、マツダがNIのHILシステムで実現、日本ナショナルインスツルメンツ、ホームページ、ユーザー事例、<http://japan.ni.com/usersolutions/mazda>

■ 著 者 ■



岡田 英之



橋高 徳昭



谷口 雅也

12

新型SKYACTIV-D 2.2におけるノック音を中心とした NVの更なる進化技術

Advanced Technologies for Noise-Vibration on New SKYACTIV-D 2.2

森 恒寛*1 Tsunehiro Mori	白橋 尚俊*2 Naotoshi Shirahashi	松原 武史*3 Takeshi Matsubara
長門 清則*4 Kiyonori Nagato	平田 耕一*5 Koichi Hirata	奥田 良直*6 Yoshinao Okuda

要 約

2012年にSKYACTIV-D導入以降、NVに関してノック音改善を中心とした数々の技術を織り込んできた。新型SKYACTIV-D 2.2を搭載した2018年アテンザ、及びCX-5の商品改良モデルでは、新コンセプトの燃焼技術、進化した主運動系減衰技術、及び車外アイドリング時のインジェクターノイズ低減技術を織り込んだ。これらによりディーゼルエンジン（DE）音のイメージを払拭する静粛で優れたエンジン音を実現したので、これらの技術を紹介する。

Summary

We've been improving SKYACTIV-D drastically with a lot of new technologies in terms of drivability, fuel efficiency, emission, and NVH since the first-generation CX-5 launched in 2012. The novel concept of combustion for NVH has been applied for new SKYACTIV-D 2.2 since CX-8 launched in 2017. Furthermore, the brand-new technologies are applied for the one equipped ATENZA and CX-5 launched in 2018 with, consisting of advanced Natural Sound Smoother and the new method reducing idling noise. In this paper, we introduce these innovative technologies which realize the engine sound expressing "driving pleasure".

1. はじめに

2012年モデルのCX-5にSKYACTIV-Dを初めて導入し、その後もディーゼル特有のノック音に着目した技術革新を進めてきた。2017年の新型CX-5では、燃焼の爆発力を周波数に対してコントロールする“ナチュラルサウンド周波数コントロール制御”や、ピストン・コンロッドの伸縮モードを抑える“ナチュラルサウンドスモウザー（NSS）”を織り込んだ。これによりノック音と走り、燃費との両立を実現させ、多くの方から高い評価をいただいた。

2018年モデルのアテンザ、CX-5の商品改良車（新型SKYACTIV-D 2.2を搭載）では更にこれを進化させ、ノック音をほぼ聞こえないレベルに低減するとともに、アクセルに応じたエンジン音になるよう開発を進めてきた。加えて、アイドル時の車外DEノイズの低減も検討

してきた。これらを実現するための技術である「急速多段燃焼」「スプリットNSS」、及びアイドル時の「インジェクターノイズ制御」について説明する。

2. ディーゼルノック音

ノック音は燃焼が起因となって発生する間欠的な変動音で、この低減には①起振力となる燃焼加振力を噴射制御で低減する手法と、②伝達系であるエンジン構造の伝達放射特性を低減する手法がある。一般的に①燃焼による低減は燃費やエミッションを悪化させ、②伝達放射特性の向上は剛性アップや遮音材追加となり、重量やコストアップにつながる。ねらいのノック音の達成には、これらの相反する機能特性と高次元で両立する技術、いわゆる“ブレイクスルー技術”が必要である。

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

*6 品質技術部
Quality Engineering Dept.

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

3. 急速多段燃焼による加振力低減

3.1 燃焼加振力に関するこれまでの取り組み

ノック音は燃焼圧力が起振力で、これを周波数ごとのエネルギーで表したCylinder Pressure Level (CPL) が燃焼の機能特性となる。CPLは熱発生率波形の“最大傾き”や“高さレベル”と相関が強く、これらが大きいとCPLが高くなりノック音は大きくなる。

最近のディーゼルエンジンは、1サイクル中にプリ燃焼、メイン燃焼、アフター燃焼の3つの燃焼で構成されることが多い。これらの噴射タイミングや噴射圧を調整して熱発生率波形をコントロールし、CPLレベルを低減させる⁽¹⁾。2017年の新型CX-5では、これらに加え“ナチュラルサウンド周波数コントロール制御”によりCPLの特定周波数域に谷を作り、そこに構造系共振を合わせることで効果的にノック音を低減する技術を導入した⁽²⁾。

3.2 ノック音と関連性能を両立する理想燃焼

これまでの取り組みで改善は進んだが、「走る喜び」の更なる進化には、もう一步踏み込んでアクセル開度に応じたリニアなエンジン音の実現が必要である。

新型SKYACTIV-D 2.2では新たな燃焼制御技術の実現に取り組んだ。まずは、ねらいとする熱発生率波形を求めるために、熱発生率の傾きが最小となる波形をシミュレーションで作成し、その特性を維持しながら効率よくトルクを発生させるため、上死点付近から燃焼させるコンセプト的な燃焼波形を描いた。これを目標波形として、従来燃焼、全負荷燃焼波形の比較をFig. 1に示す。図中、全負荷時の波形は部分負荷と同一トルクになるようにシミュレーションで発生熱量をあわせたものである。

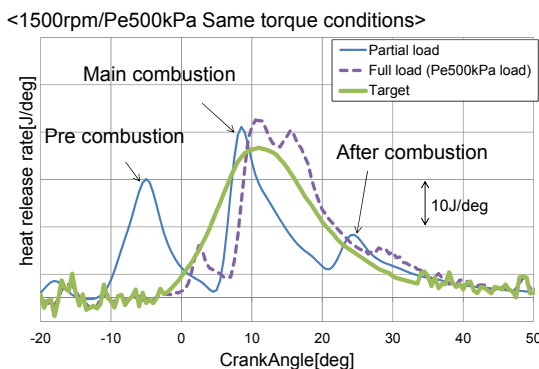


Fig. 1 Heat Release Rate Target

従来燃焼は三山の形状でねらいの波形と大きく異なっているが、全負荷の熱発生率波形はねらいの一山波形に近いことが分かる。これまで全負荷燃焼は発生する熱量が大きいためノック音の加振力が大きくなると考えられていたが、実運転ではノック音が問題になることはなかった。これは、熱発生率波形の傾きが部分負荷の燃

焼より緩やかで、有利な燃え方になっているためである。そこで詳細に燃焼特性の違いを調べると、プリ燃焼やメイン燃焼の着火遅れ期間が大幅に短いことが分かった (Fig. 2)。

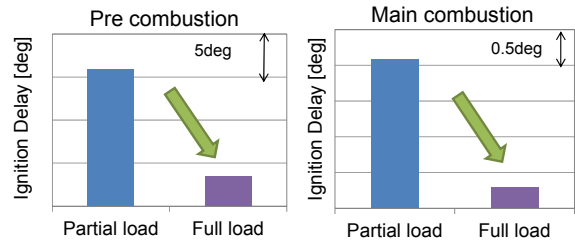


Fig. 2 Comparison of Ignition Delay

着火遅れ期間とは、燃料を噴射し燃焼が始まるまでの期間で、これが長いほど燃焼室内に未燃の燃料が混合気として蓄積される。その結果、燃焼開始時に急激な圧力上昇が起こり、熱発生率波形の傾きが大きくなることで音が大きくなる。ねらいの熱発生率波形の実現には、この着火遅れ期間のコントロールが重要であり、燃料の噴射制御を活用して着火遅れ期間短縮に取り組んだ。

3.3 急速多段燃焼技術による理想燃焼の実現

着火遅れ期間の短縮には、局所的にリッチ混合気をつくって着火性を改善できる多段噴射が有効であると考えた。この多段噴射を使って着火遅れをコントロールし、複数の燃焼を連続させる“急速多段燃焼”を考案した。これにより熱発生率波形を緩やかな傾きにし、かつ複数の燃焼を連続させ一山の形にする。ただしこの燃焼の実現には噴射間隔を短縮し、段階的に噴射量を増量する噴射制御が必要であり、従来の噴射システムでは限界があった。

そこで内部の燃料回路の最適化によって大幅な高応答化を実現した次世代型インジェクターを採用し、ねらいの噴射パターンを実現した (Fig. 3)。

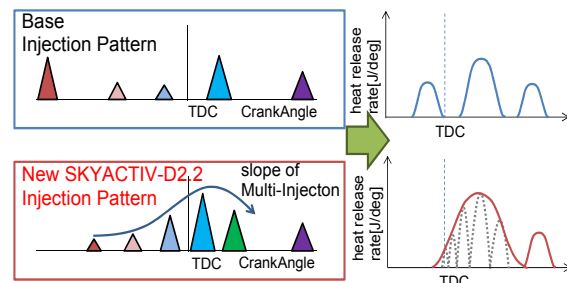


Fig. 3 Comparison of Injection Pattern

一方で、着火遅れ期間の短縮は音低減には有効であるが、燃料と空気が混ざる時間が少なくなることでスモークが不利になる。これに対し、燃料の噴射圧力を従来モデルに比べ20%~30%高め、噴霧の微粒化とペネ

トレーションを向上させ、燃焼室内の混合気形成を促進させることでスモークとの両立を図った。

試作エンジンで計測した着火遅れ期間をFig. 4に、熱発生率波形をFig. 5に示す。着火遅れ期間はプリ、メイン燃焼それぞれで大幅に短縮し、目標とする緩やかな傾きで、かつ連続した熱発生率波形を実現させた。

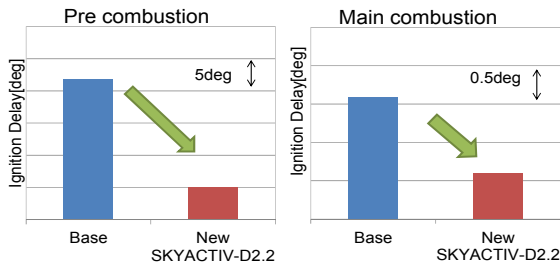


Fig. 4 Effect of Ignition Delay Reduction

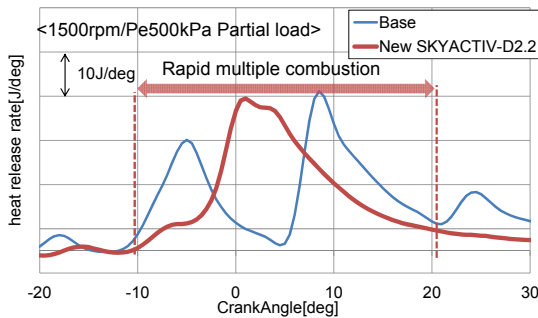


Fig. 5 Rapid Multiple Combustion

3.4 急速多段燃焼のノック音低減効果

急速多段燃焼の効果をFig. 6に示す。幅広い帯域でCPLが10dB程度低減し、ノック音を示すSound Pressure Level (以下SPL)においても大幅な低減を確認した。

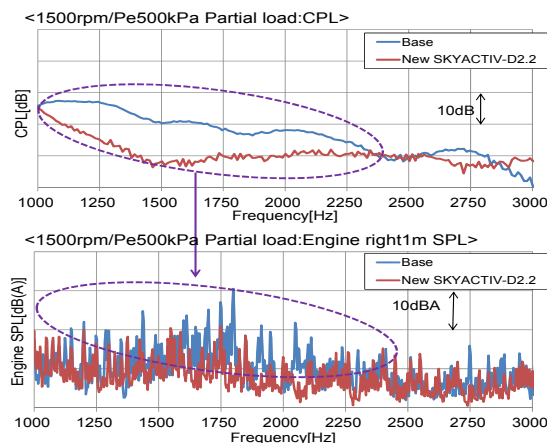


Fig. 6 Effect of Rapid Multiple Combustion

ノック音が顕在化しやすい低速でゆっくり加速する街中や住宅地で多用する低回転軽負荷領域にこの急速多段燃焼技術を採用している。アクセルを踏み込んで車速が

上昇していくシーンでもCPLの盛り上がりを抑制し、従来に比べてリニアな特性を実現している (Fig. 7)。

一方で、走りを訴求する中負荷以上のシーンでは、発生熱量の増大に伴ってCPLレベルも増大する。そのような領域ではナチュラルサウンド周波数コントロールを用い、周波数特性を整えながら高負荷から全開領域の力強いエンジン音につながるようきめ細かな制御を行っている (Fig. 8)。

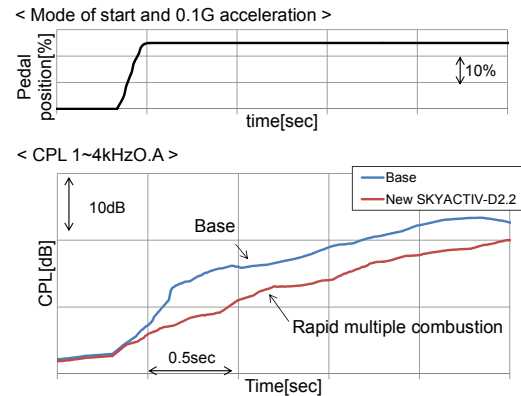


Fig. 7 Improved Knocking Noise in Acceleration Mode

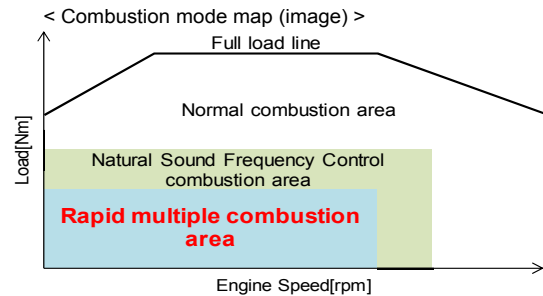


Fig. 8 Area of Rapid Multiple Combustion

4. スプリットNSSによる構造伝達特性の低減

4.1 従来のNSSの機能

ノック音改善の構造系対応として、ピストン・コンロッドの伸縮共振モード⁽³⁾を抑えるNSSをSKYACTIV-D 1.5, 2.2に織り込んでいる (Fig. 9)。

NSSは中央部がピストンピンに圧入固定され、両端は質量、その内側部がばねの機能をもつ形状である。

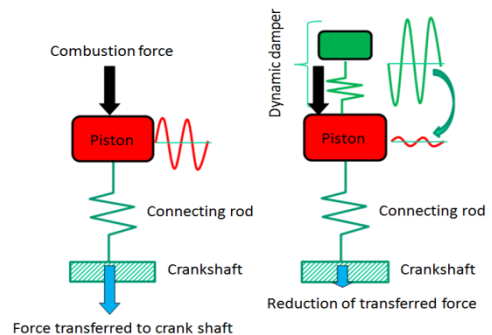


Fig.9 Piston Vibration Damping Mechanism

4.2 NSSの機能進化

新型SKYACTIV-D 2.2では先に述べた燃焼制御の対応に加え、進化させたNSSを新たに設計し織り込んだ。

従来のピストン・コンロッドの伸縮共振モードに加え、ピストン・コンロッド・メインベアリングキャップ(以下MBC)の連成モードが発生しており、この両方の振動モード抑制をねらい“スプリットNSS”の検討を行った(Fig. 10)。

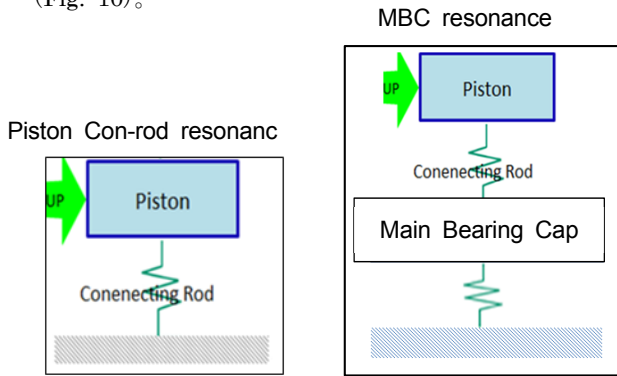


Fig. 10 Main Bearing Cap Vibration Damping Mechanism

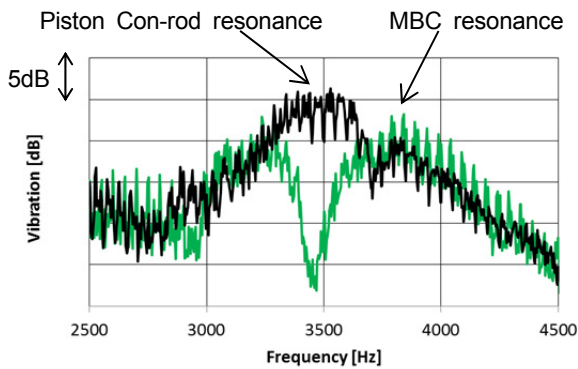


Fig. 11 Study of NSS Function Evolution

4.3 スプリットNSSの成立性検証

これまでのNSS(以下シングルNSS)は左右のダンパーマスの質量が等しく1つの振動モードをねらっていたが、質量を変えれば2つの振動モードをねらえるはずである。その場合減衰効果は半減するが、振動のピークを抑えるには十分であると考えた。左右のダンパーマスを変化させ、スプリットNSSの成立性をCAEで検証した(Fig. 12)。その結果、ねらいどおり2つのモードが発生し、この考え方が理論的に正しいことを確認できた(Fig. 13)。

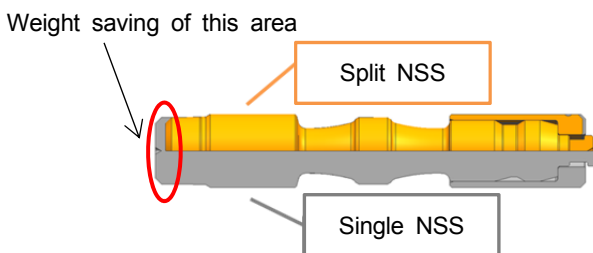
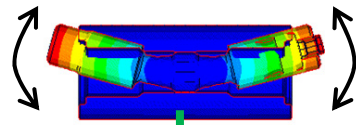


Fig. 12 Comparison of Single NSS and Split NSS

In case of same damper mass of both ends



In case of light damper mass of left side

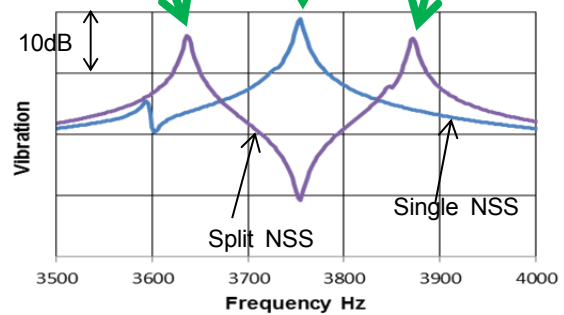
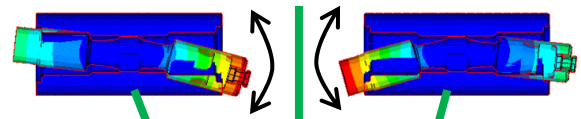


Fig. 13 CAE Study of Split NSS

4.4 スプリットNSSの効果検証

左右のダンパー周波数が近すぎるとシングルNSSと効果が変わらない(Fig. 14)。

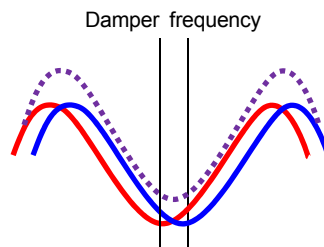


Fig. 14 Case of Close Frequency

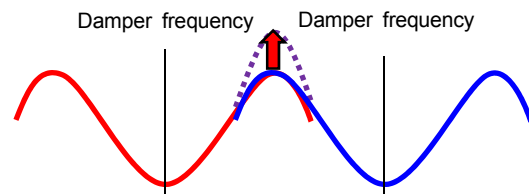


Fig. 15 Case of Far Frequency

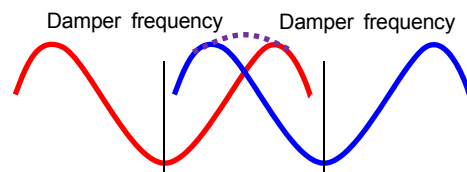


Fig. 16 Case of Optimized Frequency

離すと低周波側ダンパーと高周波側ダンパーの反共振が重なり、場合によってはベースより悪化する (Fig. 15)。最大効果を得るため、3つの反共振を同レベルにするようダンパー周波数を設定した (Fig. 16)。

これにより、スプリットNSSはシングルNSSに比べて更に2dB改善し、ノック音低減につなげることができた (Fig. 17)。

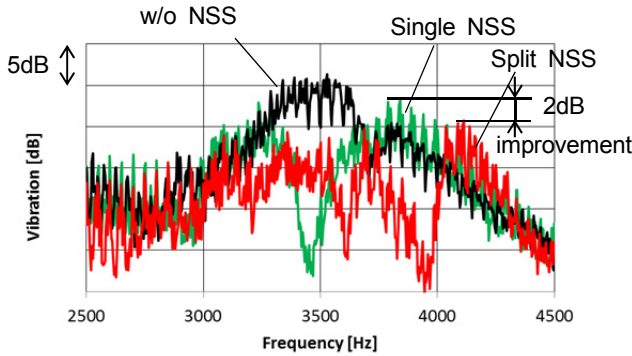


Fig. 17 Effect of Split NSS on MBC Vibration

5. インジェクターノイズ低減

5.1 インジェクターノイズの概要

一方、DE車のアイドル車外音はインジェクター (以下、INJ) の作動音が大きくINJノイズとして認知されることが分かってきた。このINJノイズは燃料を噴射する際に、制御弁がピエゾ素子で駆動され、高速で衝突することが加振力となり、INJ自体を振動させることで発生する。特にノック音や機械騒音の小さいアイドル時において、レベルは小さいが耳に障る「異音」として認知される。このINJノイズは従来、6,000Hz以上の周波数とされてきたが、アイドル車外音のうち800Hzや1,500Hzの音がINJノイズであることが分かってきた (Fig. 18)。

従来、INJノイズの対応はコスト、重量をかけてINJ周辺の構造共振や放射部位を吸遮音して対応してきた。今回はINJノイズのメカニズムを紐解き、燃料噴射間隔 (以下、噴射間隔) に着目してINJノイズ低減の検討を行った。

5.2 多段噴射によるINJノイズの発生メカニズム

INJが作動した際の衝突力はインパルス波であり、低周波から高周波までの振動が一度に励振される。そのためINJ振動のレベルと周波数は、衝突力の大きさと構造共振で決まると考えていた。燃料を多段噴射する場合は、わずか数ミリ秒の間に複数回振動が励振される。これらの振動が“波の重ね合わせ”によって増幅した場合、INJ振動悪化の要因になり得ると考えた。

アイドル時には一度の燃焼に燃料を3分割して噴射している。このときの噴射間隔は、1回目と2目が1.4ミリ秒、2回目と3目が1.3ミリ秒であった。“波の重ね合わせ”

を考えると、INJが作動することで励振される800Hzと1,500Hzの振動は同位相で重ね合っており、INJが作動するたびに振幅が増幅していることが分かった。800Hzの模式図をFig. 19 (a)に示すが、問題の周波数は構造系共振と一致していることも分かった。

多段噴射でのINJノイズのメカニズムは、3回の燃料噴射が構造系共振を同位相で増幅させ大きなINJ振動を励振させる。これが高圧管やヘッドなどの共振特性と重なって増幅され、大きなINJノイズになっていると考えられる。

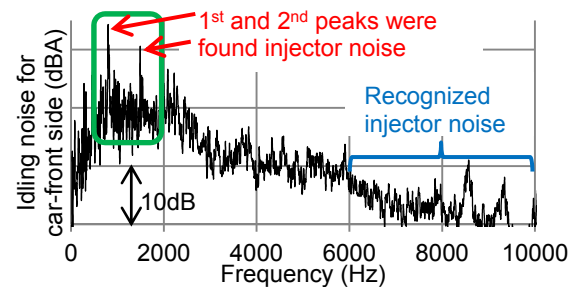


Fig. 18 Idling Noise on Developing

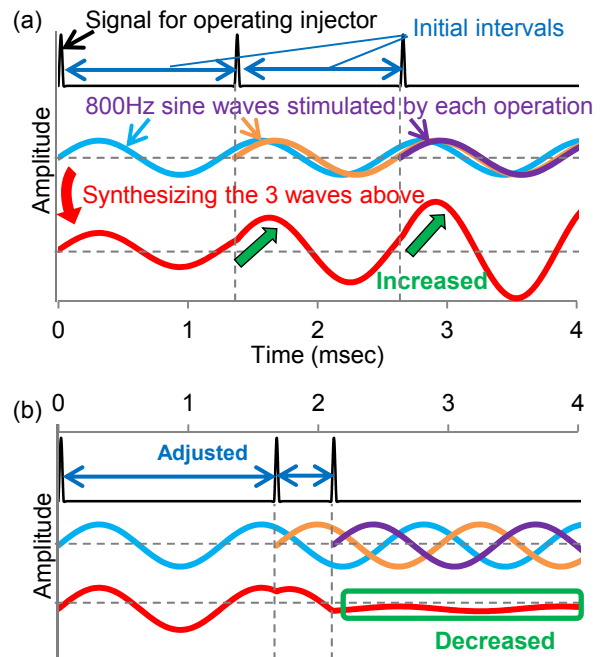


Fig. 19 Diagram of Interference between 3 Sine Waves Stimulated by Each Operation of Injector

5.3 噴射間隔最適化によるINJノイズの改善

このメカニズムに基づき、800Hzの構造共振を打ち消すのに噴射間隔を調整した一例をFig. 19 (b)に示す。これによりINJ振動を低減し、INJノイズを低減できると考えた。

これらの関係を関係式で表すと次のようになる。時間をt、1回目と2回目の噴射間隔をT₁、2回目と3回目の噴射間隔をT₂としたとき、3回目を噴き終わった後の角振動

数 ω ($=2\pi \times$ 周波数) の振動は式(1)のように書くことができ、振動の大きさは噴射間隔 T_1 、 T_2 のみに依存することが分かる。(αは T_1 、 T_2 で決まる位相)

$$\begin{aligned} & \sin \omega t + \sin \omega(t - T_1) + \sin \omega\{t - (T_1 + T_2)\} \\ = & \sqrt{\frac{\{1 + \cos \omega T_1 + \cos \omega(T_1 + T_2)\}^2}{+ \{\sin \omega T_1 + \sin \omega(T_1 + T_2)\}^2}} \sin(\omega t - \alpha) \end{aligned} \quad (1)$$

INJ共振周波数である800Hzと1500Hzに相当する ω の値をそれぞれ式(1)に代入し、それぞれの振動がともに打ち消されるような噴射間隔 T_1 、 T_2 を机上で検討した。噴射間隔を変えると燃焼が変化し、ノック音やエミッションが悪化する懸念があったため、他性能に弊害がなくINJノイズのみ低減できるような噴射間隔を0.1ミリ秒ごとに選定していった。その結果、Fig. 20(a), (b)に示すように、想定どおりINJ振動を低減でき、弊害なくアイドル車外音のレベルを低減することができた。

新型SKYACTIV-D 2.2では、この技術を織り込むことで、より静かなアイドル車外音を実現した。

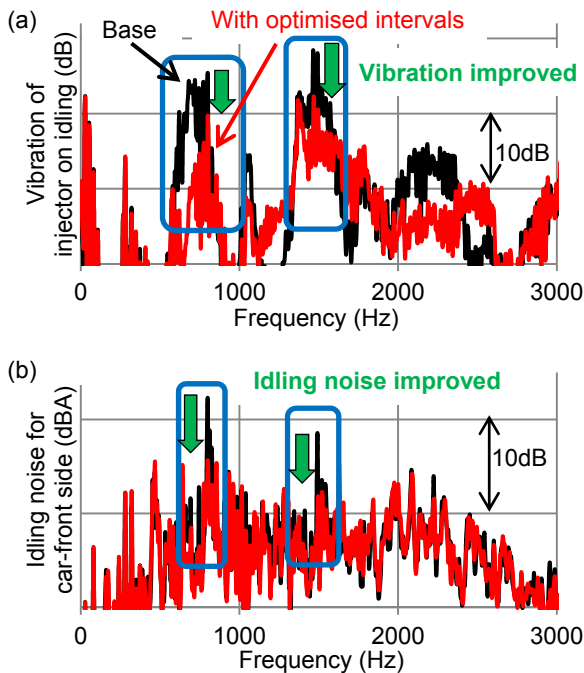


Fig. 20 Effect of Optimizing Intervals of Injections

6. おわりに

今回、新型SKYACTIV-D 2.2に織り込んだKeyとなる技術を紹介した。これらの技術によりディーゼルエンジンのノック音を大幅に改善し、車外のインジェクターノイズも気にならないレベルに低減した。これまでではゆっくりの加速時など、走りに対して音レベルの上昇がやや目立つ傾向にあった。今回の技術によりアクセル操作や走りに対して、よりリニアな音レベルを実現した。これ

により運転者のアクセル操作に対するパフォーマンスフィールをエンジン音という観点で向上させ、「走る歓び」に貢献できたと考えている。

今後はサウンドとしての音造りとSKYACTIV-Dの走りを更にマッチさせることで、最高の「走る歓び」を実現したいと強く願っている。

参考文献

- (1) 白橋尚俊ほか：SKYACTIV-D ディーゼルノック音の低減技術，マツダ技報 第34号（2017），新型CX-5特集 No6. pp.29-34
- (2) 冬頭孝之ほか：二段着火予混合燃焼を活用した高効率クリーンディーゼル燃焼（第3報）2nd噴射による・ミッション・騒音低減機構の解明，自動車技術会秋季大会前刷集，No.113-13（2013）
- (3) Y. Kanda, T. Mori : Diesel Combustion Noise Reduction by Controlling Piston Vibration, SAE, 2015-01-1667
- (4) 依田稔之：燃料噴射制御によるディーゼルエンジンの燃焼音低減，デンソーテクニカルレビュー, Vol.15, pp.110-114（2010）

■ 著 者 ■



森 恒寛



白橋 尚俊



松原 武史



長門 清則



平田 耕一



奥田 良直

13

SKYACTIV-D用NO_x後処理システムの開発 Development of NO_x Aftertreatment System for SKYACTIV-D

中野 洋平*1 Yohei Nakano	上杉 康範*2 Yasunori Uesugi	荒木 崇至*3 Takashi Araki
勝田 真斗*4 Masato Katsuta	藤井 皓平*5 Kohei Fujii	佐藤 義志*6 Yoshiyuki Sato

要 約

ディーゼルエンジンは、CO₂排出量が少ない内燃機関として、欧州を中心に技術進化しながらシェアを拡大してきた。同時に窒素酸化物（NO_x）による大気汚染抑制のために、NO_x低減技術開発が盛んに行われている。欧州では長年運用されてきたNew European Driving Cycle (NEDC) による規制が、実用と乖離があることが勘案され、排出ガス規制の国際調和を目指す世界統一試験サイクル Worldwide harmonized Light duty Test Cycle (WLTC) に加えて、Real Driving Emissions (RDE) 規制が2017年9月から施行された。2012年に発売したSKYACTIV-D 2.2は、低圧縮比と高効率過給をキーイネーブラとした燃焼コンセプトにより、トルクフルで伸びやかな加速性能、クラストップレベルの低燃費、NO_x後処理を必要としない環境性能を実現した。本稿では、SKYACTIV-Dのコンセプトを継承しつつ、更なる低エミッション化を目指して導入したNO_x低減技術とモデルを活用した開発プロセスについて、またモデルベース開発（以下MBD）を実現するために構築したSelective Catalytic Reduction（以下SCR）モデルについて報告する。

Summary

As internal combustion engines emitting low CO₂, diesel engines have expanded the market share mainly in Europe. At the same time, aiming to control air pollution caused by NO_x, NO_x reduction technologies have been actively developed. As the gap between the contents and reality of the long-time used NEDC was indicated in Europe, RDE regulation came into force in September 2017 in addition to the WLTC. The 2012 SKYACTIV-D 2.2 adopts a low compression ratio and efficient supercharging technology as key-enablers to realize strong and expansive acceleration, class-top fuel economy and clean emissions without the after-treatment system of NO_x. This paper reports on the NO_x reduction technology and a model-based development process to achieve further low emission, and SCR model constructed to realize the model-based development.

1. はじめに

SKYACTIV-D 2.2は、低圧縮比と高効率過給をキーイネーブラとした燃焼コンセプトにより、トルクフルで伸びやかな加速性能、クラストップレベルの低燃費、NO_x後処理を必要としない環境性能を実現した⁽¹⁾。本稿では、そのコンセプトを継承しつつ、更に進化した新型エンジン⁽²⁾での、NO_x低減技術について報告する。またMBD実現のために構築したSCRの物理化学1Dモデルについて報告する。

2. RDEについて

2.1 RDE規制の特徴

従来の排出ガス規制であるNEDCに対する主な変更点は、テストサイクルと環境条件の適用範囲である（Table 1）。特にRDEのテストサイクルは、要件適合し認可されたさまざまなコースが設定でき、車載式排出ガス測定システム（PEMS）を用いた路上走行でのNO_x排出量の精査が特徴である。そのため、さまざまな運転状況や環境面での外乱を前提としたNO_x低減能力が必要とされる。

*1, 4 走行・環境性能開発部

Driveability & Environmental Performance Development Dept.

*5 エンジン設計部

Engine Design Engineering Dept.

*2, 3 エンジン性能開発部

Engine Performance Development Dept.

*6 技術研究所

Technical Research Center

Table 1 Emissions Regulation in Europe

	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Standard	Euro 6c	Euro 6d-TEMP			Euro 6d		
Test Cycle	NEDC	WLTC/RDE					
NOx Standard (mg/km)	80	80/168(CF2.1)			80/114(CF1.43)		
Air Temp. (degC)	25±5	3~30 (Moderate) -2~below 3, 30~35 (Extended)			0~30 (Moderate) -7~below 0, 30~35 (Extended)		
Altitude (m)	-	0~700m (Moderate) 700~1300m (Extended)					

2.2 欧州市場における加速の強さ

Fig. 1 に各エミッションテストサイクルでの、車速と加速度の関係を示す。Artemisは、欧州のさまざまな機関によるプロジェクトにより作成されたテストサイクルで、RDEの開発に広く活用されている。また過去、欧州市場走行データを解析した結果を併せてプロットしている。この加速度は常用での上限に相当するが、RDE (Artemis) の加速度は、これと同等レベルであることが分かる。

RDE規制には、運転のアグレッシブ度合い（加速度の大小）を制限するために、車速に加速度を乗じた指標がガイドラインとして設定される。Artemisはこのガイドライン内にあり、更に激しい加速度も頻度によっては許容される。そのため欧州市場においては、市街地から高速道路まで全面的にNOx低減可能な技術が必要である。

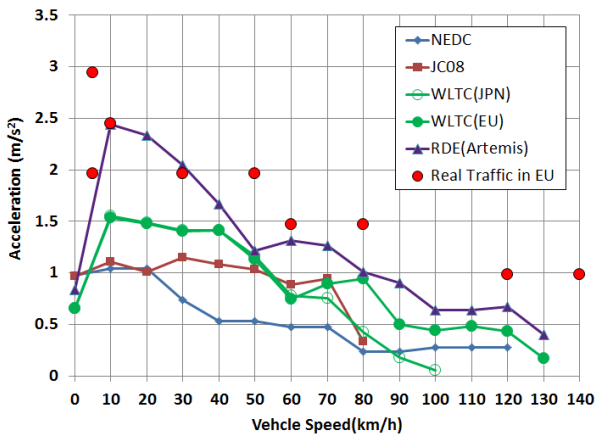


Fig. 1 Vehicle Speed vs Acceleration

3. 開発コンセプト

前記の全面的なNOx低減と、SKYACTIV-Dの更なる進化を目指して、下記コンセプトにて開発に取り組んだ。

- ① SKYACTIV-Dのコンセプトの進化 - 人間中心の走り と更なるNOx低減
- ② SKYACTIV-Dに最適な欧州市場向けUrea-SCRシステムの開発
- ③ モデルベース開発 (MBD) の活用

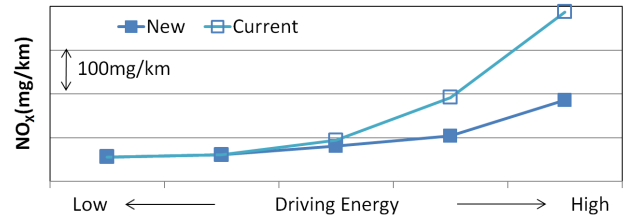


Fig. 2 Raw NOx Potential of New Engine

新型エンジンでは、CO2を低減し、走り性能と静粛性を改善しながら、更なるエンジン排出NOx（以下Raw NOx）低減を実現した（Fig. 2）。横軸は各エミッションテストサイクルを走行エネルギーが低い順に左から並べている。

しかし2章で述べたように、欧州市場での運転や環境因子のダイナミックレンジを考慮すると、更にNOxは増加する。更なるEGR増量や燃焼時期の遅角によるNOx低減は、今回実現した走り性能、静粛性及び燃費性能の低下につながる。これら商品性を妥協しないために、欧州向けにはNOx後処理システムを採用した。

SKYACTIV-Dの強みである低NOx排出領域と、欧州特有の高回転高負荷領域でのNOx低減機能の強化を勘案して、高い排ガス温度域で優れたNOx浄化性能を発揮するUrea-SCRシステムを選択した。

4. MBDによるNOx機能配分

4.1 機能展開とモデル構築

NOx低減機能をエンジン側とSCR側で配分するため、Raw NOx, SCRへの流入ガス条件, SCR浄化効率について機能展開を行った。Fig. 3に示すとおり、多くの影響因子に支配される。

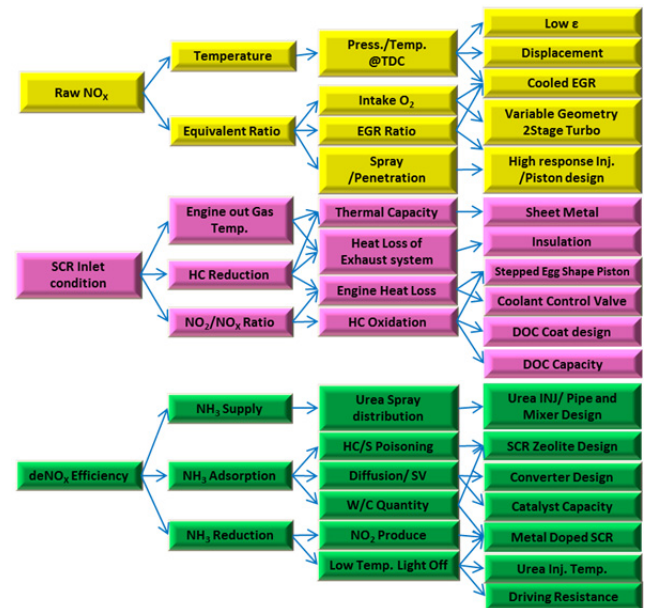


Fig. 3 Exploded Views of Function for NOx

欧州の実路走行条件、加速度の大きさ、環境条件において、各因子を考慮し、高性能なSCRシステムの仕様を決定しなければならない。新型エンジンの開発では、この際の重要な影響因子への要求を、機能目標として管理しながらシステムの仕様決定を行うため、Fig. 4に示すモデル環境を構築した。

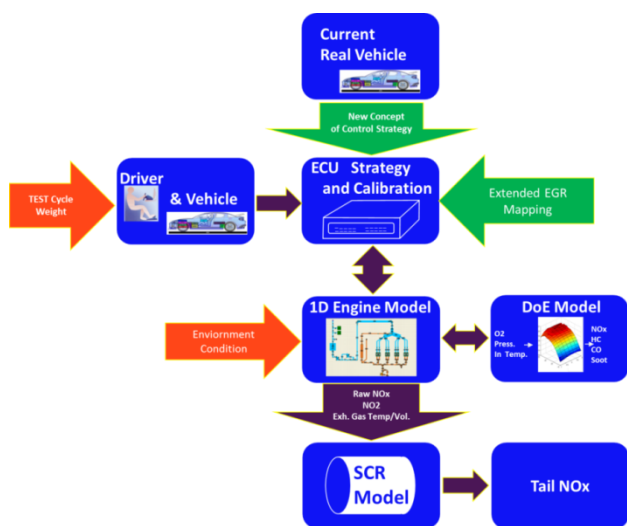


Fig. 4 Model Based Development Image

モデルは車両、エンジン、SCR、制御の各ユニットで構成される。エンジンユニットは、部品設計の要件検討が可能のように、1Dモデル (GT-POWER) にてモデル化し、排ガス温度、流量及びNO₂/NO_x比率を算出する。Raw NO_x量については実験計画法 (DoE) により構築した統計モデルで計算される。これら計算結果をSCRモデルに受け渡すことで、テールパイプ NO_x (以下Tail NO_x) が見積もられる。制御ユニットは、実車と同等のロジックにEGRや過給制御の最新技術を反映したものを構築し、エンジンユニットと連成した。これにより、部品・制御一体での機能目標の検討が可能となっている。

4.2 機能目標検討

RDEにおいては、テストサイクル全体とUrban (市街地) セクション単独のそれぞれにNO_x排出規制値が適用される。SCRの低温NO_x浄化性能に対しては、エンジンからSCR入口までの熱損失と、SCR流入ガスのNO₂/NO_x比率の影響が大きいいため、その影響をモデルにて検証し、性能目標であるUrbanセクションでのNO_x浄化率62%に対して、各ハードウェアでの実現性を勘案しながら、排気ガスの熱損失低減、SCR流入ガスのNO₂/NO_x比率のそれぞれに、機能目標値をモデル上で設定した。Raw NO_xとTail NO_xのモデル算出結果をFig. 5に示す。

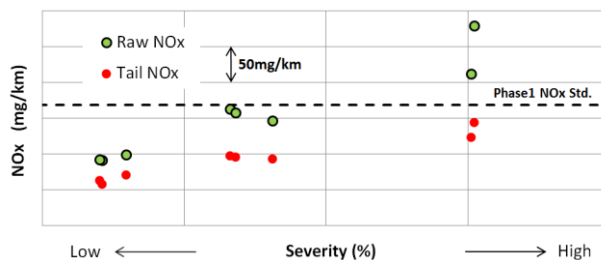


Fig. 5 Simulation of Urban NO_x with Function Target

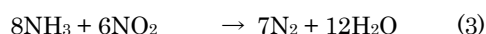
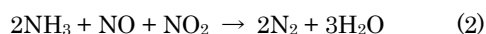
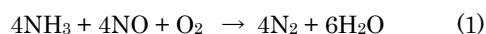
横軸のSeverityはWLTCのCO₂値を基準に算出される無次元数で、走行エネルギーに相当する。このSeverity値が±25%以内に収まるのがRDEのテスト要件となっている。排ガスの熱損失低減によりSCRシステムが早期活性し、低Severityから高Severityに至るまで低NO_xを実現できる機能目標を立案した。

4.3 SCRモデル

(1) モデルの概要

前節で述べたMBDを実現するために構築したSCRモデルについて紹介する。MBDによる開発構想段階でのNO_x機能配分と機能目標値の検討を主目的とし、Fig. 3で示した機能を表現できることを前提に考えて、市販ツール (GT-POWER) をベースとした1Dモデルを開発した。

モデルでは、ガスの移流、化学反応、成分の拡散を考慮している。化学反応は下記に示すNO_x還元反応の総括式(1)、(2)、(3)の他に、NH₃の吸着・脱離、NH₃及びNOの酸化を考慮し、当初は約10式を定義していたが、以降記載する検討を進める中で約30式まで拡張した。



(2) モデル同定と精度検証

まず、SCR触媒の詳細な特性を把握するために、Table 2に示す単体性能評価を、Synthetic Gas Test Benchにて実施した。

Table 2 Experiments on Synthetic Gas Test Bench

Experiment	Feed gas composition	Temperature	SV
NH ₃ adsorption	200ppm NH ₃ , 0%/7% H ₂ O	100/200/300°C heat up to 600°C	15k/48k/ 120k h ⁻¹
NO oxidation	100ppm NO, 10% O ₂ , 7% H ₂ O	180 to 500°C	48k h ⁻¹
NH ₃ oxidation	200ppm NH ₃ , 10% O ₂ , 7% H ₂ O	100 to 400°C	48k h ⁻¹
NO _x reduction steady-state	200ppm NH ₃ , 100ppm NO _x , 10% O ₂ , 7% H ₂ O with NO ₂ /NO _x =0/0.25/0.5	140/180/220/ 300°C	48k h ⁻¹
NO _x reduction temp. step	200ppm NH ₃ , 200ppm NO _x , 10% O ₂ , 7% H ₂ O with NO ₂ /NO _x =0/0.25/0.5	100 to 400°C	48k/120k h ⁻¹

評価条件は、市場で使用頻度の高い運転条件より決定した。反応ごとに個別の単体性能評価を実施し、各反応モデルの活性化エネルギーなどの反応パラメータを同定した。同定した結果について下記に述べる。

① NH₃の吸着・脱離

Table 2に従い、まずNH₃とN₂のみを単体に流通させ、NH₃吸着脱離の温度、空間速度 (SV) 違いに対する特性を得た。これに加え、NH₃とH₂Oはゼオライト上に競合吸着することからH₂Oの吸着・脱離反応を新たにモデル化した。NH₃吸着に対するH₂Oの影響を考慮する前後でのモデル検証結果をFig. 6に示す。H₂O吸着を考慮しない場合 (左図) は実測に比べて脱離が不足し、NH₃濃度が低く算出されるが、H₂O吸着を考慮することで相対的に空き吸着サイト数に対するNH₃吸着サイト数の割合が高くなり、脱離が促進されることで精度改善につながった。

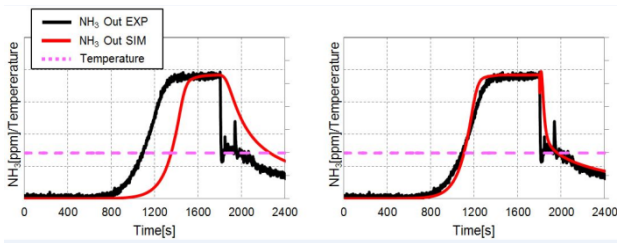


Fig. 6 NH₃ Adsorption and Desorption Model Accuracy, without H₂O (left) and with H₂O (right)

また、吸着サイト数は当初1サイトでモデル構築を進めていたが、昇温中の出口NH₃濃度の減衰が緩慢になる挙動から、温度に対する脱離特性が異なる複数の吸着サイトの存在が示唆され、最終的に3サイトでモデル化した。サイト数違いでのモデル精度検証結果の一例をFig. 7に示す。従来の1サイトモデルでは、3,500秒付近の濃度の減衰は直線的である一方、3サイトモデルでは温度に対する脱離特性が異なる山が重なることで精度が向上した。

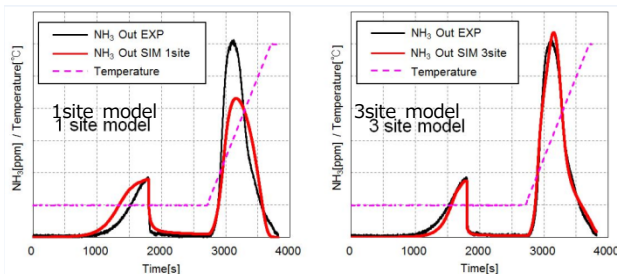


Fig. 7 NH₃ Adsorption and Desorption Model Accuracy

② NH₃酸化反応とNO_x還元反応

NO_x還元反応は前述した(1), (2), (3)式にてモデル構築を進めていたが、当該モデルだけでは高温域におけるNO_xとNH₃消費の挙動を正しく表現できなかったため、

SCR内部でのNH₃酸化反応をモデルに追加した。最終的に3つのNH₃酸化反応式を考慮することで、高温領域でのNH₃酸化に起因するNO_x還元率の低下を再現できるようになった。NH₃酸化を考慮する前後でのモデル検証結果をFig. 8に示す。

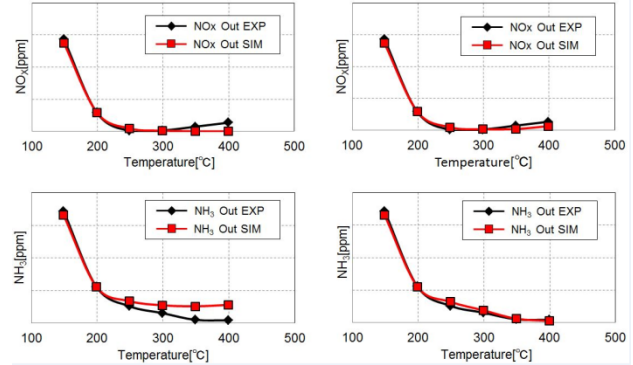


Fig. 8 NO_x Reduction with NH₃ Oxidation Model, without NH₃ Oxidation(left) and with NH₃ Oxidation(right)

④ 実機でのモデル精度検証結果

触媒単体評価にて構築したモデルの実機適用性を検証するために、SCRシステムを搭載した実機でのNO_x実測値とモデル計算値の比較を行った。モデルには供給NH₃量をコントロールするロジックを織り込んだ。このコントロールロジックには、NO_x還元率・NH₃酸化・NH₃脱離及び目標NH₃吸着量を考慮している。

この結果より、実機においても十分なモデル精度を確保しており、MBDへの適用性が確認できた (Fig. 9)。

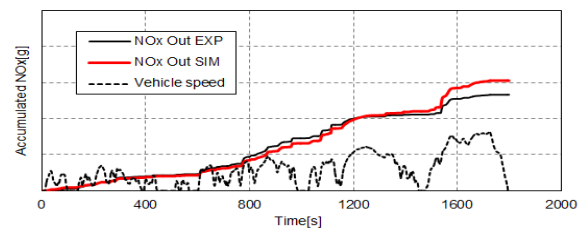


Fig. 9 WLTC SCR out NO_x Model Accuracy

5. 導入技術

5.1 排気システムでの熱損失低減

現行エンジンでは、シリンダーヘッド一体型の水冷エンジンストマニホールドを採用していた。新型ではターボハウジングの耐熱性基準をUPさせることで、空冷式に変更し、熱損失を低減した。次に大ターボのハウジングを板金化した。可変容量機構部の精度や剛性確保が必要な部位は鋳物とし、熱損失の大きいガス通路については薄肉板材を採用した。鋳物と板金部は、TIG溶接にて一体化されている。板金ハウジング部は2重管化されており、昇温と保温性能機能を実現した (Fig. 10)。

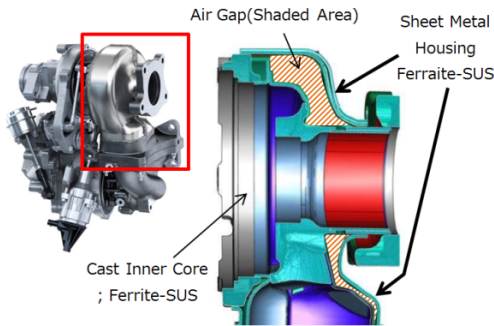


Fig. 10 Double Layer Sheet Metal Housing Technology

ターボ下流のDOCコンバーターでは、入口部を2重管による空気断熱層構造とし、また板厚0.8mmのSUS材でターボとの締結部シール機能を併せもつ構造を採用した。コンバーター出口部では、ディーゼルパーティキュレートフィルター出口～SCR入口間の放熱低減のために保温カバーを採用した。

以上の施策により、SCR入口までの熱損失低減について、機能目標値を実現できた。

5.2 NO₂生成能改善によるSCR反応促進

SCRにおけるNO_x還元反応の総括反応は、4章に示した(1)、(2)、(3)式で表され、このうち(2)式はFast SCR反応と呼ばれ低温から反応速度が速く、またこの反応を促進するためには、SCR前ガスのNO₂/NO_x比率を50%程度にするのが有効であることが知られている。市街地走行のような排ガス温度が低い運転シーンでは、Fast SCR反応を促進することが有効である。そのために、SCR前ガスのNO₂/NO_x比率を改善させる設計を採用した。

まずDOC容量を約20%UPし、空間速度を低下させた。またDOC触媒では、触媒劣化抑制とHC・COによるNO₂消費の抑制及びNO₂生成能改善をねらい、貴金属種の割合とウォッシュコート内部の貴金属配置を最適化した。実機での性能改善効果をFig. 11に示す。新設計のDOCにおいて、200℃以上の低温度域で約20～30%のNO₂/NO_x比率改善を実現した。ディーゼルパーティキュレートフィルター触媒では、DOCで生成されたNO₂の消費抑制のため、貴金属の高分散化及び活性O₂量の最適化を行った。

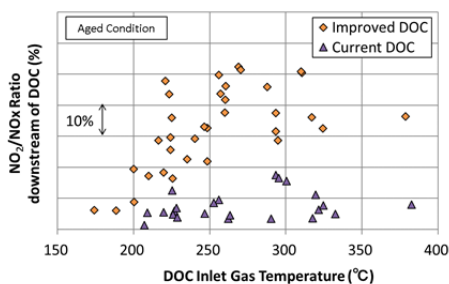


Fig. 11 Improvement of NO Oxidation on DOC

5.3 SCR触媒種の選定

SCR触媒には、金属添加されたゼオライトタイプを採用した。添加金属とゼオライトについて、Table 3に示す二つの仕様にて、機能検証を実施した。触媒A及び触媒BのNH₃吸着量とNO_x浄化率の特性をFig. 12に示す。

Table 3 SCR Catalyst Specifications

	Catalyst A	Catalyst B
Doped Metal	Metal A	Metal B
Zeolite	Structure I	Structure II

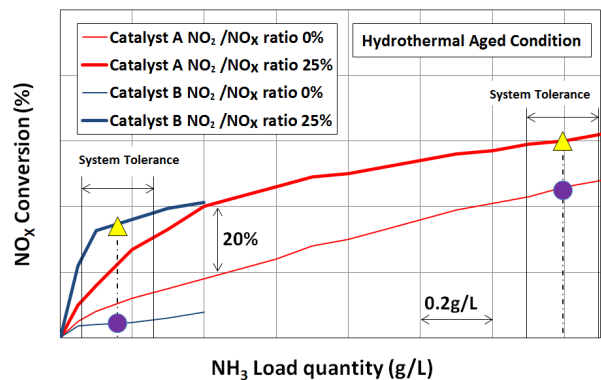


Fig. 12 Comparison of NO_x Conversion Characteristics

SCR温度は180℃、市街地走行相当の空間速度での特性であり、図中の三角及び丸印は安定したNH₃吸着量での浄化率を示す。NO₂/NO_x比率=25%の場合（三角印）、触媒Aは内部にNH₃をしっかりと吸着してNO_x還元反応を行うのに対し、触媒Bでは少ないNH₃吸着量で高いNO_x浄化率を示す。NO₂/NO_x比率=0%の場合（丸印）、触媒Bは触媒Aに対して浄化率の低下が著しく、SCRに流入するNO₂/NO_x比率に高く依存していることが分かる。

また関連する部品公差などを勘案したNH₃吸着量のシステムバラツキ (System Tolerance) を、Fig. 12に示している。SCRシステムは、触媒内部のNH₃吸着量を直接計測することができないため、NH₃吸着量のバラツキに対してNO_x浄化率が緩慢な特性をもつ触媒が望ましいが、触媒Bは浄化率変化が大きく、ロバスト性が劣る。

またゼオライトタイプのSCR触媒では、その多孔構造にHCが吸着し、SCRの機能を阻害することが報告されている⁽³⁾。吸着HCは、NH₃の酸点への吸着を阻害し、またディーゼルパーティキュレートフィルターの再生制御作動時のような高温ガスにより、吸着HCが一気に酸化した場合、酸化反応熱でゼオライトが破損するなど、耐久性の課題につながる。SCR用ゼオライトの改良が研究⁽⁴⁾され、孔径と気体分子の大きさから、SCRに適した材料選択が可能となっている (Fig. 13)。

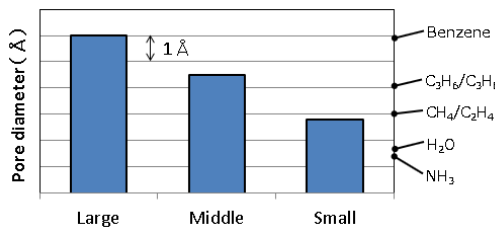


Fig. 13 Pore Size of Zeolite for SCR Catalyst

触媒Aと触媒Bにて、HC吸着時のNO_x浄化率への影響を確認した結果をFig. 14に示す。

触媒Aは、SCRにHCを8g供給しても、NO_x浄化率に影響がないのに対して、触媒BではHCを8g供給した場合、約半分までNO_x浄化率が低下する。またNH₃吸着量が少ない段階でNO_x浄化率への影響が現れ、NH₃の吸着点をHCがふさいでいることが示唆される。

以上の性能特性から、触媒Aを選定した。

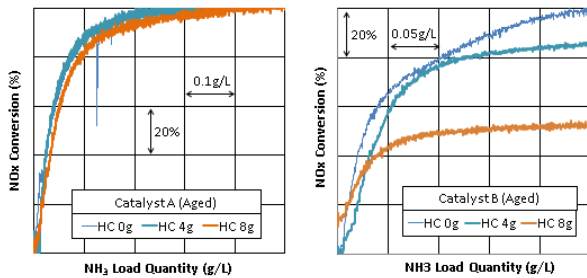


Fig. 14 HC Influence to NO_x Conversion

6. RDE NO_x結果

開発車両でのNO_x検証結果をFig. 15に示す。走行エネルギーに相当するSeverityに応じて、Raw NO_xが増加するが、NO_x規制値を超えるよりも低いSeverityから、SCRシステムの有効性が発揮されはじめ、高Severityに至るまでTail NO_xを抑制することができている。

適用したRDE規制値に対して、Severityを考慮してもNO_x後処理と燃焼との組み合わせにより、ロバストなシステムを構築した。

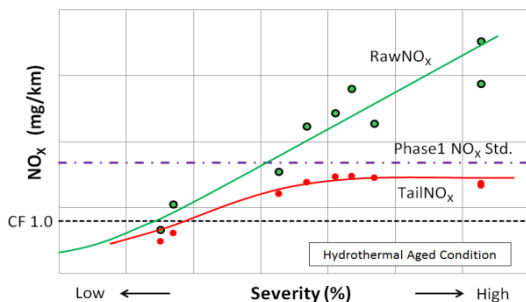


Fig. 15 Result of Actual Vehicle in RDE Several Cycles

7. おわりに

SKYACTIV-Dコンセプトを更に進化させ、エンジンポテンシャルを最大限生かしたエミッションシステムを実現できた。また本開発プロセスでは、エンジンのRaw NO_xと後処理の機能配分、更にSCRシステム内でのNO_x還元反応の機能配分の構想を描き、それを実現するというモデルベース開発プロセスを本格的に導入した。

効率的な開発はもちろんのこと、複雑なシステムの仕様決定に、MBDはますます有効であることを立証できた。

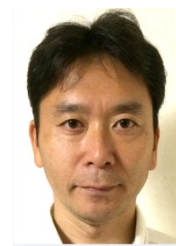
参考文献

- (1) 森永ほか：SKYACTIV-D エンジンの紹介, マツダ技報, No.30, pp.9-13 (2012)
- (2) 山谷ほか：クリーンディーゼルエンジン新型SKYACTIV-D 2.2の開発, マツダ技報, No.34, pp.133-138(2017)
- (3) James Girard et al. : Influence of Hydrocarbon Storage on the Durability of SCR Catalysts,SAE Technical Paper (2008), 2008-01-0767
- (4) Isabella Nova : Urea-SCR Technology for deNO_x After Treatment of Diesel Exhaust,Fundamental and Applied Catalysis, Springer, New York,2014, doi:10.1007/978-1-4899-8071-7

■ 著 者 ■



中野 洋平



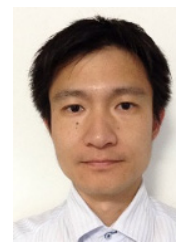
上杉 康範



荒木 崇至



勝田 真斗



藤井 皓平



佐藤 義志

14

ロードスター専用新開発SKYACTIV-G 2.0技術紹介 Newly Developed Gasoline Engine “SKYACTIV-G 2.0” for Roadster

村中 宏彰* ¹	迫川 茂博* ²	志村 直紀* ³
Hiroaki Muranaka	Shigehiro Sakogawa	Naoki Shimura
朝倉 浩之* ⁴	鈴木 陽平* ⁵	小池 和哉* ⁶
Hiroyuki Asakura	Yohei Suzuki	Kazuya Koike

要 約

マツダが一貫して追求している「走る喜び」、その象徴ともいえるロードスターのパワーユニットを進化させ、より多くの方々に人生の輝きを感じていただきたい、という気持ちを込めてエンジンの開発を行った。走る喜びと環境性能を高次元で両立することを目指して開発した高効率直噴ガソリンエンジン「SKYACTIV-G」に燃焼改善、機械抵抗低減、サウンド進化の新技术を投入し、パフォーマンスフィールドの理想を追求したエンジンを新開発した。本稿では、この開発コンセプトとその実現のため採用したブレークスルー技術について紹介する。

Summary

The Roadster can be regarded as a symbol of “driving pleasure” that Mazda has been consistently pursuing. The company has recently evolved the power unit of the Roadster in the hope of bringing brightness to the lives of many more people with it.

To develop a new engine that pursues the ideal performance feel, new technologies to improve combustion, reduce mechanical friction and enhance engine sound have been incorporated into “SKYACTIV-G”, a highly efficient direct-injection gasoline engine that the company previously developed with the aim of offering driving pleasure as well as outstanding environmental performance. This paper introduces the development concept of the new engine and the breakthrough technologies adopted to realize the concept.

1. はじめに

ロードスターは初代から一貫して心の通った馬を操るように駆ける「人馬一体」の楽しさを純粋に追求し開発されてきた。スポーツカーにふさわしいリニアで高回転域までストレスなく吹き上がる気持ちの良さ、ドライバーの意図に素直に自動車が反応する心地良さを高める、運転の楽しさをより進化させるパワーユニットを開発した。

本稿では、理想のパフォーマンスフィールドを実現するために高回転・高出力化し、その性能にふさわしいサウンドに進化を遂げた「ロードスター専用新型SKYACTIV-G 2.0」（以下新型）の開発コンセプトとその実現のため採用した新技术について紹介する。



Fig. 1 New SKYACTIV-G 2.0 for Roadster

*1, 3, 5, 6 エンジン設計部
Engine Design Engineering Dept.

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

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

2. コンセプトと性能

2.1 コンセプト

2016年12月から日本国内に導入したロードスターRFには、優れた環境性能と走行性能を高次元でバランスさせたSKYACTIV-G 2.0をFR搭載しトルクフルで余裕のある走りを実現した（以下旧型）⁽¹⁾。新たに搭載するエンジンとして、「走る歓び」の更なる進化のために、以下のコンセプトの実現に重点を置き開発に取り組んだ。

- ・スポーツカーにふさわしい高回転まで気持ちの良い理想の伸び感
- ・日常でより気持ち良く加速できる軽快感
- ・新開発エンジンにふさわしい環境性能
- ・ドライバーの意図にリニアに応答するレスポンスとサウンド

2.2 出力性能

SKYACTIV-G 1.5のロードスターで好評の高回転まで加速が続いていくような伸び感の実現をねらい、最高回転数を7500rpmとした⁽²⁾。トップエンドまでスムーズに加速の伸びを感じるために、最大トルクからヤクドが一定以上となり高回転で落ち込みの少ないなだらかなトルク特性を目標とした⁽³⁾。そのために6000rpmでは旧型比5%トルクを改善し最高出力は7000rpmで135kWとした。

高回転化による伸び感だけではなく、日常の気持ち良さも高めるために低中速トルクの改善も図った。市街地走行などにおいて使用頻度の高い1500rpmで7%のトルクを改善し、最大トルクは205Nmに改善した。2000rpmから7000rpmまで最大トルクの90%以上を発揮する、どの運転シーンでアクセルを踏んでも楽しめるワイドでトルクフルな特性を作りこんだ（Fig. 2）。

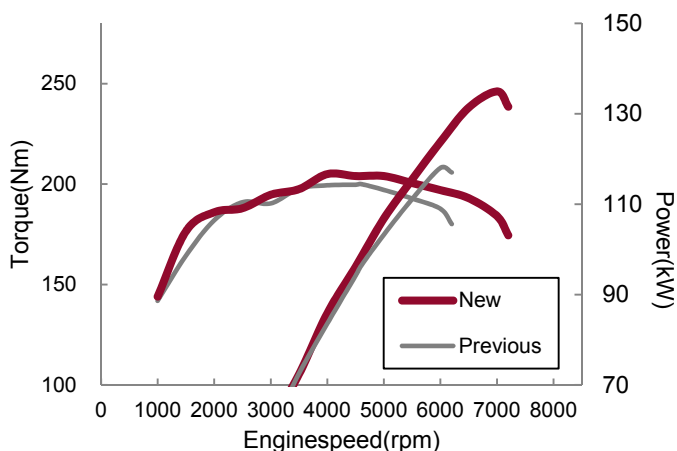


Fig. 2 Engine Performance

高回転域のトルクは吸入空気量の増加とポンピングロ

スの低減に加え、燃焼改善と機械抵抗の低減により実現した。具体的には、吸気量を増加するために、スロットル、インテークマニフォールド、吸気ポートの通気抵抗を低減し吸気バルブの径を拡大した。ポンピングロス低減には、排気の開弁角と排気バルブを拡大し、排気ポートとエキゾーストマニフォールド、メインサイレンサーの排気抵抗を低減した。機械抵抗は、主運動系を改良し低減した。燃焼改善は、吸排気ポートと燃焼室の改良と燃料噴射系の変更によって実現した。低中速域は燃焼改善の効果によって耐ノッキング性を大幅に高めることでトルクを向上した。

2.3 燃費性能

パフォーマンスフィールドの向上だけではなく環境性能も改善した。エンジンを高回転型にするとバルブスプリングの張力増加など機械抵抗が増加し燃費悪化を招く。主運動系の機械抵抗の低減と燃焼改善技術によって、軽負荷から高負荷まで全域で燃費率を改善し、2000rpmでは最大5%の改善を実現した（Fig. 3）。

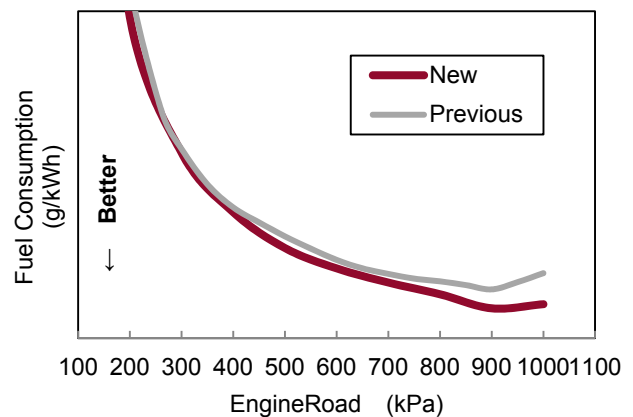


Fig. 3 Fuel Consumption

2.4 サウンド、レスポンス

トルク特性の改良に加えて、サウンドでよりドライビングを楽しめるようにした。トップエンドまで加速するようなシーンではエンジン回転にリンクしたリニアにサウンドとした。日常においてはアクセル操作に応じたフィードバックが感じられるように作り込み、車との一体感を高めた。

サウンド作りのために、ノイズ低減も行った。シリンダーヘッドの剛性改善と主運動系を軽量化で高回転域のエンジン振動を低減した。また、クランクシャフトの回転振動が駆動系に伝わりマニュアルトランスミッションから発生するノイズを低減するために、デュアルマスフライホイールを新開発した。メカニカルノイズに加え、排気音に含まれるノイズ成分も抑え、聞かせたい音をリニアに表現できるサイレンサーを新開発した。

Table 1 Specifications

Engine	Previous	New
Max Power(JIS net)	116kW(158PS) /6,000rpm	135kW(184PS) /7,000rpm
Max Torque(JIS net)	200Nm/4,600rpm	205Nm/4,000rpm
Max Engine speed(rpm)	6800	7500
Bore×Stroke(mm)	φ83.5 x 91.2	←
Displacement(cc)	1,997	←
Compression ratio	13.0	←
Int-valve event angle	258°	←
Exh-valve event angle	241°	254°
Fuel Pressure	20MPa max	30MPa max
Fuel Injector	DI (6holes)	DI (6holes) w./short penetration
Throttle Dia(mm)	55	60
Fly Wheel	Solid Type	Dual Mass Type
Water Jacket Specer	w/o.	w./
Oil Cooler	w/o.	w./ (MT)

3. ブレークスルー技術

3.1 燃焼改善技術

高回転域と低中速域のトルク改善の両立，更に燃費改善も実現した一番のブレークスルー技術が燃焼改善である。シリンダーヘッドの吸排気ポートと燃焼室の見直し，燃料システムを高圧化することで実現した。特に吸気ポートは，高出力化のための吸気抵抗の低減と，燃焼改善に必要な吸気流動の強化という二律背反の機能の両立を必要とした (Fig. 4)。

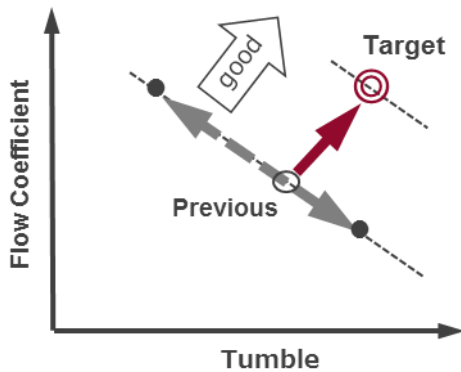


Fig. 4 Target Flow Performance

旧型では，強い筒内流動の生成に有利な独立ポートを採用していたが，新型では抵抗が低いコモンポートを採用し断面積を17%拡大した。面積を拡大しコモンポートにするとポート内の流速が落ち筒内流動の低下を招く。そのため，流れの指向性を強めるようにポート下部のエッジ角度をより寝かせ，ポートの分岐位置と断面積を最適化，更に吸気バルブ周りの燃焼室内の段差を排除する改良をすることで旧型比27%高いタンブル比を実現した (Fig. 5)。

加えて，圧縮工程中にタンブルを加速するようにピス

トン頭頂部を最適化した。その結果，燃焼期間の短縮に必要な圧縮上死点での乱流エネルギーを旧型比50%高めた。

燃料系は，2018年2月導入の新型CX-5から採用している高圧噴射システムを活用し強化したタンブル流と合わせミキシングを促進した。

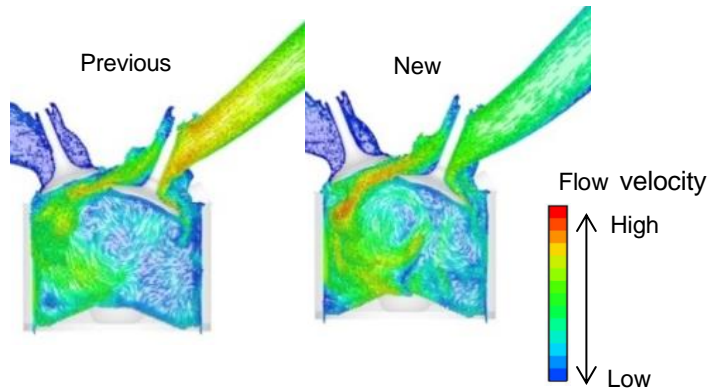


Fig. 5 Charge Motion

筒内残留ガスの排出性を改善するために，排気ポートの形状を見直した。ガス流れの剥離を抑制することで有効断面積を拡大し，ガス流量を18%向上させポンピングロス低減と掃気性改善を実現した (Fig. 6)。

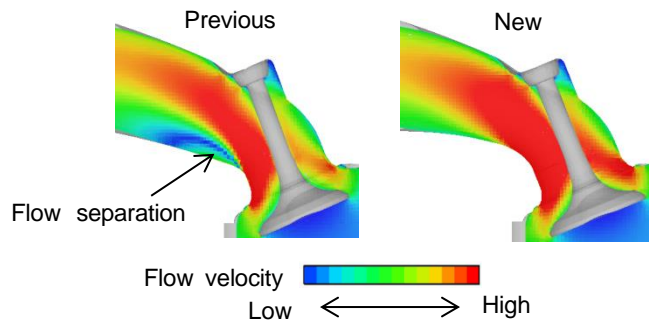


Fig. 6 Gas Flow in Exhaust Port

これらの効果により，燃焼期間を短縮し耐ノック性を大幅に改善した (Fig. 7)。

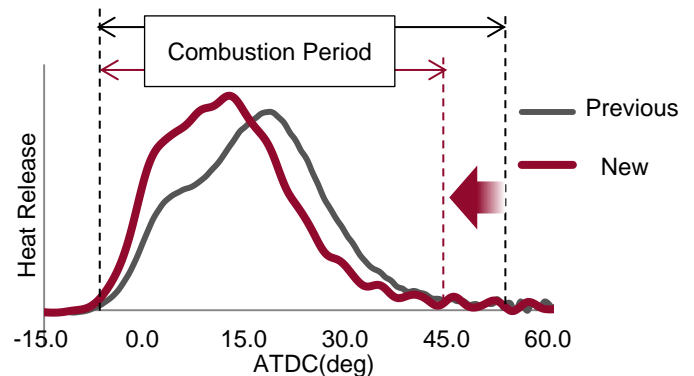


Fig. 7 Heat Release

3.2 機械抵抗低減技術

高回転化に伴い増加する往復系の慣性力を最小化し、重量低減とエンジン振動低減、更に機械抵抗低減を実現するブレイクスルー技術として主運動系部品を新開発した。特にピストンの慣性力はコンロッドとクランクシャフトに掛かるためピストン単体は10%以上の軽量化を実現し主運動系全体の軽量化を図った。

ピストンは、スカートの面積を旧型比30%小さくしながらシリンダー内のピストンの傾き運動を抑えるスカートプロファイルを新開発した。加えて、薄肉で高い剛性となるように燃焼室面裏とピストンピンボスを一体構造として最適化をすることで、燃焼室側の肉厚は最大38%薄くし1個当たり27gの軽量化を実現した (Fig. 8)。



Fig. 8 Piston

コンロッドは、新開発の高強度コンロッドボルトを採用した。また、軽量ピストンに合わせて各部形状を最適化し高回転で必要な剛性を確保しつつ軽量化を実現した。

クランクシャフトは、高強度材へ変更し、製造時の抜き勾配の縮小と最適なウェイトの配置により効率よくバランスさせる改良を加えた。主運動系全体の改良でシステム合計の重量を旧型同等に抑えた。(Fig. 9)

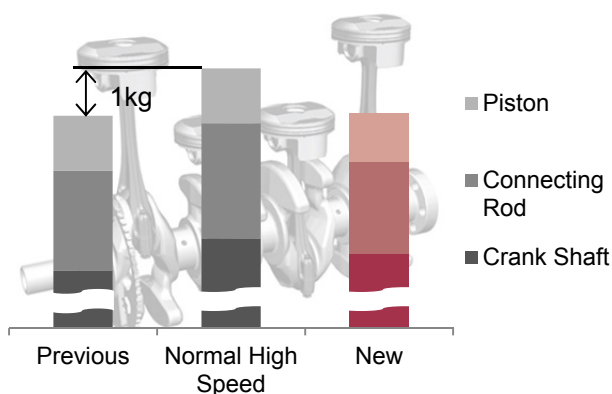


Fig. 9 Weight of Main Motion System

高回転化するとピストンリングの摺動速度が上がりシリンダーライナーとの間に発生する油膜圧力が上昇する。その結果、リングが搔き落としせなくなるオイル量が増えオイル消費が増加する。通常は高回転時に適正な油膜厚さとなるようにピストンリングの張力を高め対応するが

機械抵抗の増加を招く。新型では、上下非対称形状を採用しオイル搔き落とし機能を高めたことで旧型比38%低い張力とし、抵抗低減とオイル消費低減の両立を実現した。

3.3 駆動系振動低減技術

エンジンの高回転化により往復慣性力が高まり、クランク軸上の回転変動は増大する。また、低中速トルクの充実化により燃焼加振力は大きくなる。いずれの場合もトランスミッションへ入力されるトルク変動は増加し、駆動系異音の低減が課題となる。高回転・高出力化に伴って増大する駆動系異音の抑制と、スポーツカーにふさわしいパフォーマンスフィール性能 (軽快レスポンス) 維持という相反のブレイクスルーのため、マニュアルトランスミッション車用に低イナーシャデュアルマスフライホイール (以下、低イナーシャDMF) を新規開発した。(Fig. 10)

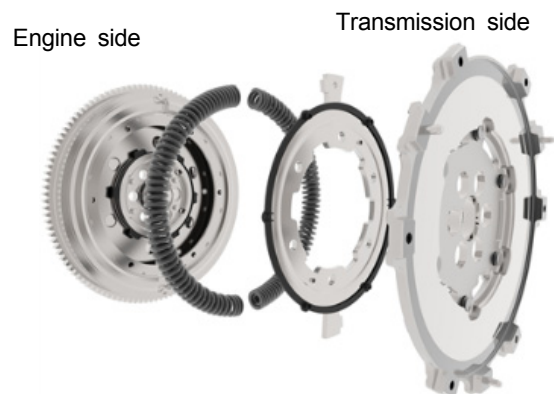


Fig. 10 Small Inertia DMF

一般に、トランスミッション歯打音に代表されるねじり系異音の応答レベルを低減する手段として、起振力低減 (エンジン回転系マス増加)、あるいは駆動系パネの剛性低減が挙げられる。しかし、いずれの手段もアクセル操作に対する車両加速応答の鈍化と駆動系振動の収束性の悪化を伴いレスポンス性能との背反を生じる。背反関係にある両性能を駆動系のねじり共振周波数をコントロールし両立を図った。具体的には、駆動系の振動収束性を支配するねじりの1次共振は旧型同等の周波数とし、駆動系異音を支配する2次共振は低周波化することで振動減衰性を向上させた。(Fig. 11)

1次共振は、エンジン側マスのイナーシャを最小化しフライホイール全体イナーシャを旧型同等に抑え周波数低下を抑制した。エンジン側イナーシャ低減に際しては、フライホイールの回転慣性エネルギーを蓄積するという基本の機能が減少する。MBDを活用してあらゆる運転シーンの検証を行い、部品仕様の選定とエンジン制御の

最適化を行った。

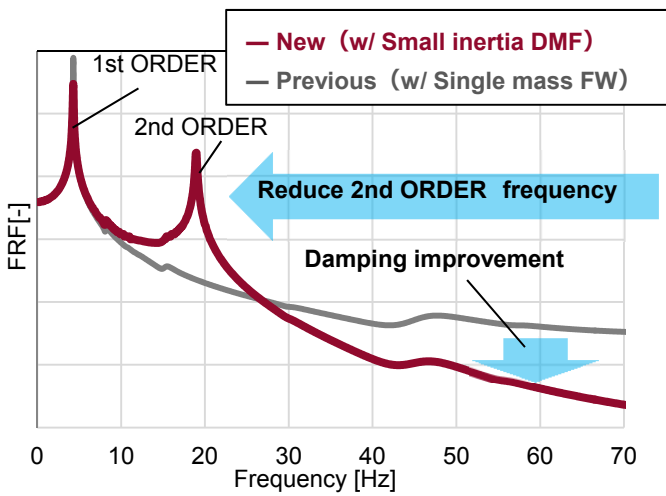


Fig. 11 Drivetrain Frequency Comparison

結果として、乗用車用の従来DMFと比較した場合は全体イナーシャが40%低減となる、ソリッドフライホイール同等の低イナーシャを実現した。

2次共振の周波数においては、トランスミッション側マスのイナーシャを最適化し低周波化を図った。トランスミッション側マスの設計にあたっては、ハウジング内部の風流れを考慮の上、クラッチ熱容量から必要最低限の追加マスとなるよう徹底した軽量化を施した。その結果、歯打ち音の応答レベルを旧型比で約75%の低減を実現した。本技術の採用により、旧型同等のパフォーマンスフィールド性能を維持しつつ、静粛性の大幅向上を可能とした (Fig. 12)。

Rattle noise (3rd WOT)

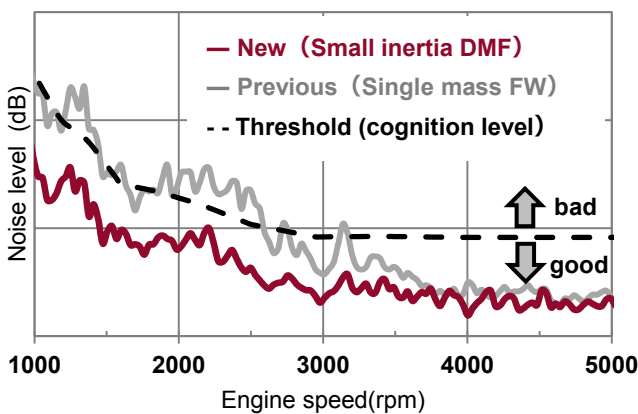


Fig. 12 Noise Improvement Comparison

3.4 排気サウンドの作りこみ

旧型の排気サウンドは、ロードスター用1.5Lエンジンと同様に、軽快な排気サウンドとしていた。新型では、ロードスター用1.5Lのキャラクターに対峙して、パワフルな特性を余すことなく表現するように開発をした。

パワフルなサウンドの主体となるエンジンの次数音をクリアに奏でるため、ガスが排気管を流れる際に生じる高周波音を消音する吸音室を設定し音の質感を高めた。

回転数に応じてリニアに音圧が大きくなる排気サウンドを基本とし、ドライビング視点で音圧が大きくなる領域を設定した。日常の運転シーンではエンジン回転3000rpm以下の使用頻度が高いため、排気サウンドはエンジンの基本次数である2次を中心に3000rpm以下でもエンジン回転の変化が分かりやすいように、リニアリティを失わない範囲で音圧を上げた (Fig. 13)。

回転数に応じてリニアに音圧が大きくなる排気サウンドを基本とし、ドライビング視点で音圧が大きくなる領域を設定した。日常の運転シーンではエンジン回転3000rpm以下の使用頻度が高いため、排気サウンドはエンジンの基本次数である2次を中心に3000rpm以下でもエンジン回転の変化が分かりやすいように、リニアリティを失わない範囲で音圧を上げた (Fig. 13)。

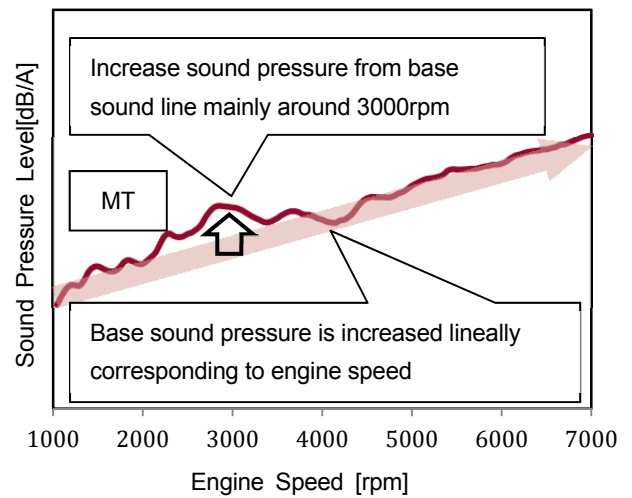


Fig. 13 Exhaust Sound at Tail-Pipe

その結果、アクセルワークに対するサウンドのフィードバックが高まり、ドライバーはエンジンの状態をサウンド(聴覚)で的確に把握できるようになり、スムーズで正確なギアシフト操作が容易になる。また繊細なアクセルの踏み込みに対してもフィードバックが得やすく、前車への追従加速や交差点右左折の徐行などのシーンでも思い通りのドライビングをサポートできるように開発した。

排気サウンドのフィードバック向上のために音圧を意図して高めたが、心地良いサウンド実現に向け、“ドライビングに必要な音圧”と“うるさく感じない音圧”の見極めと両立に注力した。ドライバーが意図して変速をするMT車と、車が変速するAT車では、能動的か受動的かの違いで「うるさい」と感じるレベルとシーンが異なる。MT車とAT車でそれぞれ使用領域を検証し、マフラーの拡張室/レゾネータのチューニングを変え、バストな排気サウンドが体感できるように造り込んだ (Fig. 14)。

排気サウンドの繊細な調律のためには複雑な構造が必要となるが、ガスが流れる経路に直接掛からないように細心の注意を払い設計し排気損失の低減を図った。ガス

の流れをコントロールすることで、ねらいの排気サウンドを得ながらも、低圧損となる理想の構造を得た (Fig. 15)。

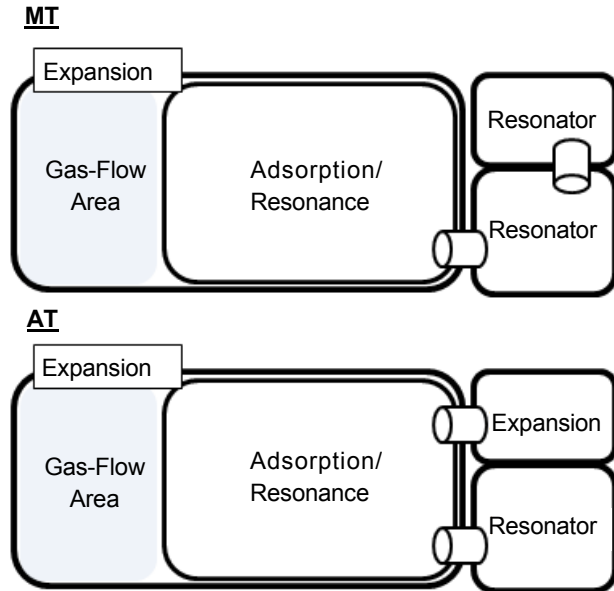


Fig. 14 Concept of Main Muffler for AT and MT

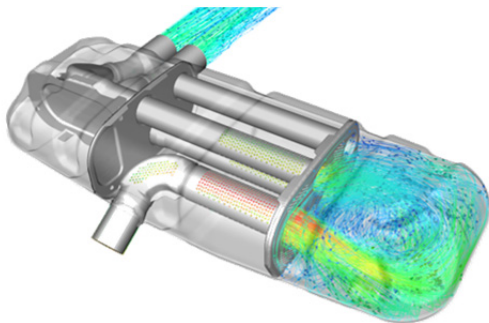


Fig. 15 Gas Flow in Main Muffler

4. おわりに

ロードスター専用の新開発SKYACTIV-G 2.0の主な採用技術について紹介した。紹介した以外にも吸排気系、動弁系、冷却系など専用部品を新設計し、あらゆるシーンでいつでも走りが楽しめるエンジンに仕上げる事ができた。新型エンジンを搭載したロードスターに込めた「走る歓び」の思いをより多くの方々感じていただき、一人でも多くの方に人生の輝きが届けられたら幸いである。

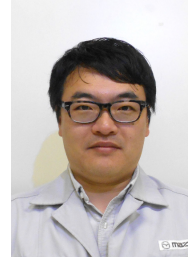
参考文献

- (1) 中山ほか：ロードスターRFの紹介, マツダ技報, No. 34, pp.47-51 (2017)
- (2) 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)
- (3) 兼為ほか：新型ロードスターのパフォーマンスフィール, マツダ技報, No.32, pp.114-118 (2015)

■ 著 者 ■



村中 宏彰



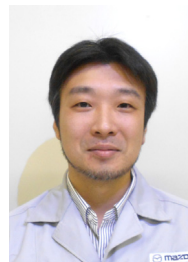
迫川 茂博



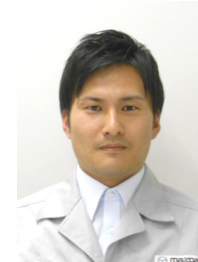
志村 直紀



朝倉 浩之



鈴木 陽平



小池 和哉

15

エンジン筒内流動場を考慮した新たな伝熱モデルの開発 Formulation of New Wall Heat Transfer Model in Consideration of In-cylinder Flow of Internal Combustion Engines

内田 健司*1 原田 雄司*2 佐藤 圭峰*3 田中 達也*4
Kenji Uchida Yuji Harada Kiyotaka Sato Tatsuya Tanaka
朱 前進*5 藤本 英史*6 山下 洋幸*7
Zhu Qianjin Hidefumi Fujimoto Hiroyuki Yamashita

要 約

内燃機関の熱効率を改善する課題の 1 つとして、冷却損失の低減が挙げられる。このため、広範な運転領域において熱効率を最大化するためには、燃焼室壁面における伝熱現象に対する理解とモデル化が必要となる。これまでにエンジン燃焼 CFD で使用されている伝熱モデル（壁関数）は、完全に発達した乱流場を仮定して構築されている。しかしながら、実際の燃焼室では、未発達な乱流状態が支配的となっている。本研究では、急速圧縮膨張装置（RCEM）を用いて、エンジン燃焼室に近い流れ場における壁面境界層内の速度分布と壁面熱流束の同時計測を実施した。計測結果より、境界層内の乱流運動エネルギーの生成と散逸の関係を表す乱流レイノルズ数を用いて壁面熱流束を推定するモデルを構築した。このモデルをエンジン燃焼 CFD に適用することにより、計算コストを増加させることなく、高精度で定量的に壁面熱流束を予測できることを確認した。

Summary

Recently, reduction of cooling loss in internal combustion engine has been recognized as one of the key issues to improve thermal efficiency. For maximizing thermal efficiency by suppressing wall heat transfer under the wide range of engine operation, comprehensive understanding and modeling of wall heat transfer in engine combustion chamber are definitely necessary. In general, fully-developed turbulent flow is assumed in existing wall heat transfer models (wall function) used in CFD. However, undeveloped flow was dominated in engine combustion chamber. In this study, velocity distribution in wall boundary layer and wall heat flux were measured at the same time under engine-like condition with RCEM (Rapid Compression and Expansion Machine). From the experiment, we revealed that wall heat flux could be predicted with turbulent Reynolds number. Considering this finding, we formulated the new model. Using this model in CFD, it was found that our new model was able to predict wall heat flux in internal combustion engine quantitatively with high accuracy.

1. はじめに

近年、地球温暖化の観点より、自動車の CO₂ 排出量や燃費の規制が厳しくなっている。今後も、自動車の主要な動力源は内燃機関が主流であり続けるので、自動車業界において内燃機関の熱効率改善は重要な課題である。理論熱効率の向上策として、高圧縮比・高膨張比化が有効であるが、実際には高圧縮比化に伴う冷却損失増大が熱効率向上を阻んでいる。このため、内

燃機関の効率追求には、冷却損失を低減させることが必要である。さまざまな物理量が複雑に影響し合う燃焼室内において、冷却損失低減効果を最大化させるための技術を確認するためには、モデルを活用した技術開発が必要不可欠であり、これまでに多数のモデルが提案されている⁽¹⁾⁻⁽⁹⁾。これらは定性的な傾向を表現しているものの、定量値として十分な精度を有しているとはいえず、低い計算負荷と高い計算精度を両立したモデルの構築には至っていない。この理由として、燃

*1~7 技術研究所
Technical Reserch Center

燃室内流動は非定常性が強く未発達な乱流状態が存在する⁽⁴⁾のに対し、従来のモデルでは発達乱流場を仮定して構築されていることが挙げられる。このため、本研究では、光学アクセスの自由度が高く、エンジンの複雑な流動場の特徴を再現できる急速圧縮膨張装置（以下、RCEM）を用い、境界層内流動と熱流束の同時計測を実施した。実験的なアプローチに加えて、高解像度な計算メッシュを適用した数値計算を実施し、実験と数値計算の両面でエンジン内流動場を想定した壁面熱伝達現象の解明とモデル化を試みた。

2. 実験方法

2.1 計測システム及び解析方法

壁面熱流束を把握するためには、高時間分解能での壁面温度計測が必要である。また、壁面境界層内の流体特性を把握するため、流速分布及び乱流統計量を計測する必要がある。これらの計測システムを Fig. 1 に示す。壁面温度計測には、同軸型高応答熱電対を使用し、信号はサンプリング周波数 10kHz で記録した。壁面熱流束は、壁面温度の時系列計測結果を境界条件として、壁面内部の非定常熱伝導方程式を完全陰解法にて解き、壁面内部の温度勾配を算出することにより求めた。壁面境界層内速度分布及び乱流統計量は、時系列 μ PIV 法にて計測し、平均乱流運動エネルギー k 及びその平均散逸率 ε を式(1)、(2)より算出した⁽⁵⁾。

$$k = \frac{1}{2}(\overline{u'^2} + \overline{v'^2}) \quad (1)$$

$$\varepsilon = 2\nu(\overline{s_{ij}s_{ij}}) \quad (2)$$

$$u' = u_i - U_i, \quad v' = u_j - U_j, \quad S_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)$$

u は瞬時流速、 U は平均流速であり、添字 i, j は壁に並行、垂直な方向の成分を表す。また、 S_{ij} は速度勾配テンソルであり、 $(\overline{\quad})$ はアンサンブル平均を表す。

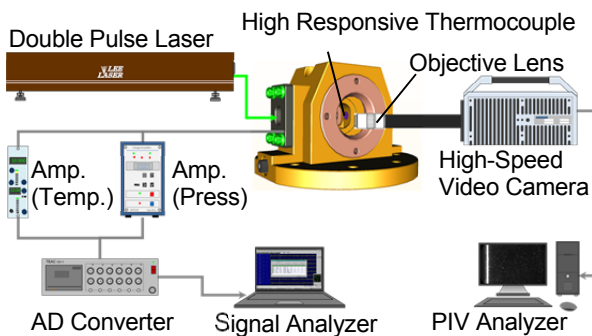


Fig. 1 Measurement System for RCEM

2.2 供試機関

可視化のための光学アクセスを容易とするため、供試機関として 1 回のみの圧縮膨張が可能な RCEM を用いて実験を行った。Fig. 2 に RCEM の全体図を、Table 1 に RCEM の諸元及び実験条件を示す。Fig. 3 に RCEM 燃焼室の概略図を示す。燃焼室部は、直径が約 35mm、厚さが 17mm の縦型の円筒形状をしており、エンジンのボア径・ストローク長に依存しない。壁面に沿う比較的単純な流動場と非定常性が強い流動場をそれぞれ表現するために、シリンダーライナ部と燃焼室部をつなぐ連通路の配置が異なる 2 種類の燃焼室形状 (Type 1, 2) を用いた。ピストンの上昇により圧縮された空気は、連通路を通して燃焼室内に流入する。時系列 μ PIV 計測は、同軸型高応答熱電対表面の中央位置において実施した。燃焼室のレーザー窓に対して垂直方向の両面には、厚さ 20mm のサファイアガラス製観察窓が取り付けられている。

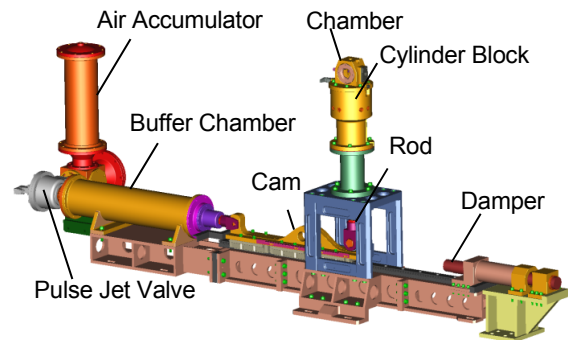
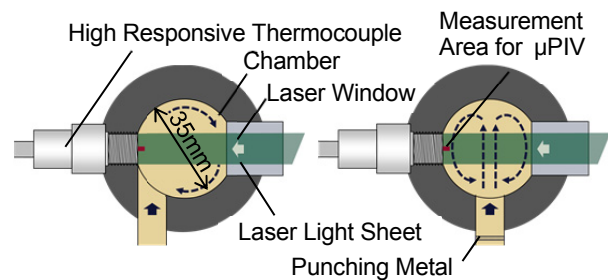


Fig. 2 Schematic of RCEM

Table 1 RCEM Specifications and Experimental Conditions

Bore x Stroke	φ89 mm x 95 mm
Compression Ratio	14.2 : 1
Compression Time	95 msec. (300 rpm Equivalency)
Infill Gas	Dry Air
Initial Gas Pressure	Atmosphere Pressure
Initial Gas Temperature	298 K
Initial Wall Temperature	298 K



(a) Type 1 (b) Type 2
Fig. 3 Schematic of Combustion Chamber

3. 実験結果による伝熱モデル検証

3.1 壁乱流が発達している流動場

発達した乱流場に近い流動場となるシリンダーヘッド (Type 1) を用いて、急速圧縮膨張環境へのモデル適用性について検証した。Fig. 4 に壁面に平行な方向の平均流速 U_y の分布を示す。本実験で構築した μ PIVにより壁面境界層内の急激な平均流速の変化をとらえることができている。

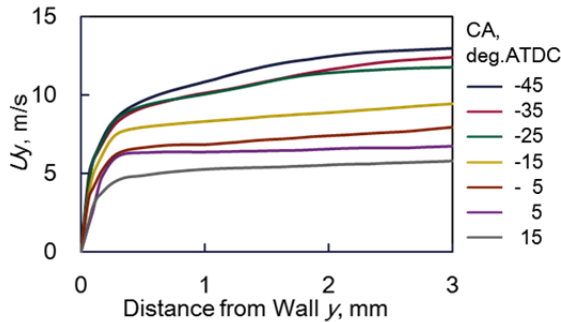


Fig. 4 Average Velocity Distribution (Type 1)

壁面境界層内流動の特徴を考察するためには、摩擦速度 u_τ で無次元化した、壁面に平行な方向の平均流速 u^+ と壁からの距離 y^+ との関係性を調査する必要がある。摩擦速度は壁面せん断応力 τ_w を速度の次元で表現したものであり、式(3)で算出できるが、今回の計測で粘性底層内の速度勾配はとらえられていない。このため、壁面から十分に離れた乱流が支配的な領域で、 u^+ が y^+ の対数関数で表現できる (以下、対数領域) という特徴を活用し、壁面から 1mm 以上離れた領域の平均流速分布を用いて、式(4)で摩擦速度を推定した⁽⁶⁾。

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} = \sqrt{\nu \frac{\partial u}{\partial y}} \quad (3)$$

$$\frac{1}{u_\tau} = \frac{1}{\kappa u_y} \left\{ \phi_m - \left(1 - \frac{0.993}{\phi_m} \right) \ln \phi_m \right\} \quad (4)$$

$$\phi_m = \phi \left(\frac{U_y y}{\nu} \right) = \ln \left(\frac{U_y y}{\nu} \right) + \kappa B + \ln \kappa \quad (5)$$

ρ は密度、 ν は動粘性係数である。また、定数は発達した壁面乱流境界層を仮定し、 $\kappa=0.41$ 、 $B=5.2$ とした。Fig. 5 に、計測による壁面境界層内の u^+ と y^+ の関係と、発達した乱流境界層における u^+ を破線で併せて示す。発達した壁面乱流境界層の分布をおおむね表現できており、対数領域の存在も確認することができる。これより、本流動場は発達した乱流境界層に近い状態と考えられ、式(4)による摩擦速度の推定は妥当であるといえる。ここで、発達した乱流境界層を想定して構築された伝熱モデルの適用性を検討する。伝熱モデルは、境界層内の密度変化を考慮しない場合に式(6)、考慮した場合に式(7)のように表される。

$$q_w = \frac{\rho C_p u_\tau T_g}{2.1 \ln y^+ + 2.5} (T_g - T_w) \quad (6)$$

$$q_w = \frac{\rho C_p u_\tau T_g}{2.1 \ln y^+ + 2.5} \ln \left(\frac{T_g}{T_w} \right) \quad (7)$$

q_w は壁面熱流束、 C_p は定圧比熱、 T_g はガス温度、 T_w は壁面温度である。

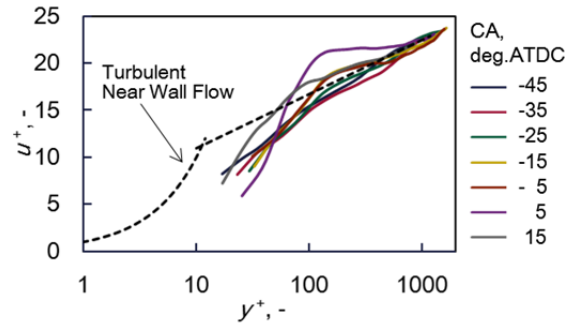


Fig. 5 Dimensionless Velocity Distribution (Type 1)

これらに実験で得られた物理量を代入し、高応答熱電対から算出した壁面熱流束と比較した。比較を進める際には、壁面境界層内のガス温度分布を決める必要がある。一般的に、壁関数を用いた伝熱モデルでは、壁面第 1 層目の計算メッシュは対数領域に位置することを前提としている。このため、式(6)、(7)から計算する壁面熱流束は、 $y^+=150, 300$ における値を求めた。これらの領域において、ガス温度は筒内平均温度に近いと仮定し、燃焼室内圧力より算出した燃焼室内の平均温度を用いた。Fig. 6 に、式(6)、(7)で算出した壁面熱流束と高応答熱電対で計測した壁面熱流束を示す。式(7)では、予測結果と高応答熱電対での計測結果はどの時刻においても定量的によい一致を示すことが確認できる。一方、式(6)では壁面熱流束を過小評価する結果となる。燃焼室内では、ガス圧力はほぼ均一となるが、壁面境界層内の急激な温度勾配により生じる密度分布が存在するためと考えられる。以上より、急速圧縮膨張を伴い、壁面境界層内の平均流速分布が発達した乱流境界層の分布と異なる流動場に対して、式(7)で壁面熱流束を正確に予測できることを実証した。

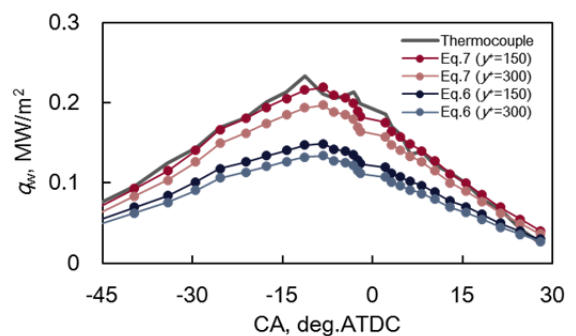


Fig. 6 Comparison of Wall Heat Flux (Type 1)

3.2 エンジン燃焼室内に近い流動場

エンジン燃焼室内に近い流動場となるシリンダーヘッド (Type 2) を用いて、対数領域が存在しない壁面境界層を含めた摩擦速度の推定方法を検討し、壁面熱流束予測精度を検証した。連通路入り口に設置したパンチングメタルでエンジン燃焼室のバルブで絞られた狭い空間を模擬している。これを通過して燃焼室内に流入した空気が燃焼室内上方の壁面に衝突し、壁面に沿って流れる。更に、ピストンの動きが逆転する上死点直後に、壁面に沿う流れが崩壊する。Fig. 7 に壁面に平行な方向の u^+ を示す。想定どおりに対数領域が表れていないことが確認できる。

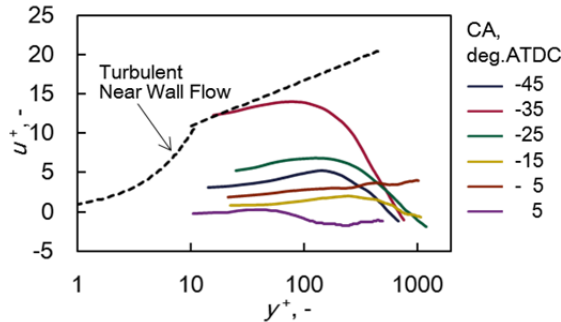


Fig. 7 Dimensionless Velocity Distribution (Type 2)

対数領域が存在しないことから、摩擦速度の推定に式(4)を適用することができないため、別の推定方法を検討する。発達した乱流境界層においては、壁面せん断応力とレイノルズ応力の釣り合いと、境界層内での乱流運動エネルギーの生成と散逸の釣り合いを仮定した式(8)、(9)から式(10)の関係が得られる。従来の壁関数では、一般的に式(10)で摩擦速度が算出されている。

$$\frac{\partial k}{\partial t} = P_k - \varepsilon = \nu_t \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 - \varepsilon \quad (8)$$

$$u_\tau^2 = -\overline{u'v'} = \nu_t \frac{\partial u}{\partial y} \quad (9)$$

$$u_\tau = C_\mu \sqrt{k} \quad (10)$$

P_k は乱流運動エネルギーの生成項、 ν_t は渦動粘性係数、 C_μ はモデル定数である。一方で、乱流が未発達な状態の境界層においては、これらの釣り合いが取れていないと推測する。これを検証するため、壁面境界層内の乱流エネルギーとその散逸率の関係を表す乱流レイノルズ数 (式(11)) に着目し、DNS (Direct Numerical Simulation) による発達した乱流境界層⁽⁷⁾の平均値 ($y^+ < 200$) と比較した。結果を Fig. 8 に示す。

$$Re_t = \frac{k^2}{C_\mu \varepsilon} \quad (11)$$

計測された平均乱流レイノルズ数は、発達乱流場とは大きくかい離していることが確認できる。また、両者の差は一定ではなく、時々刻々変化している。

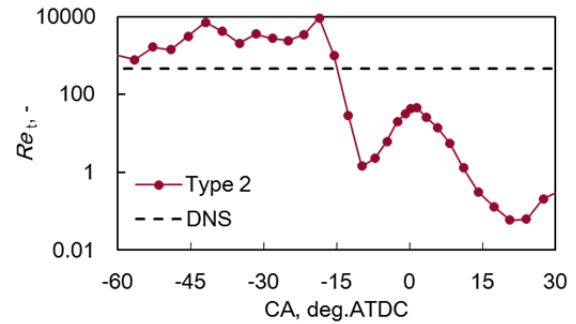


Fig. 8 Dimensionless Velocity Distribution (Type 2)

ここで、レイノルズ応力は乱流レイノルズ数を用いて式(12)のように表すことができる。

$$-\overline{u'v'} = \nu_t \frac{\partial u}{\partial y} = \sqrt{\nu_t \varepsilon} = \sqrt{C_\mu Re_t \nu \varepsilon} \quad (12)$$

これは、対象とする流れ場の乱流レイノルズ数が発達した乱流境界層と同じであれば、式(9)が成立することを示している。これより、Fig. 8 で見られた発達乱流場とのかい離を補正するため、式(13)のように乱流が未発達な壁面境界層内と発達した乱流境界層内における乱流レイノルズ数で構成された係数を導入し、レイノルズ応力と摩擦速度を関連付けられると考えた。ここで、添字 dev は発達乱流場の値を表す。そして式(13)を基に、式(14)を新たに導出した。

$$u_\tau^2 = \sqrt{\frac{Re_t \text{ dev}}{Re_t}} \times -\overline{u'v'} \quad (13)$$

$$u_\tau = \left(\frac{Re_t \text{ dev}}{Re_t} \right)^{0.25} C_\mu^{0.25} \sqrt{k} \quad (14)$$

以上の考え方の妥当性を検証するために、式(14)で推定した摩擦速度を式(7)に代入して壁面熱流束を算出し、高応答熱電対での計測結果と比較した。Fig. 9 にこの結果を示す。前項と同様、ガス温度は指圧計測結果から算出した燃焼室内の平均温度とし、無次元距離は、 $y^+ = 150, 300$ をそれぞれ適用した。図より、両者の壁面熱流束は、定量的に強い相関があり、式(14)で推定した摩擦速度は妥当性が高いことを実証できた。

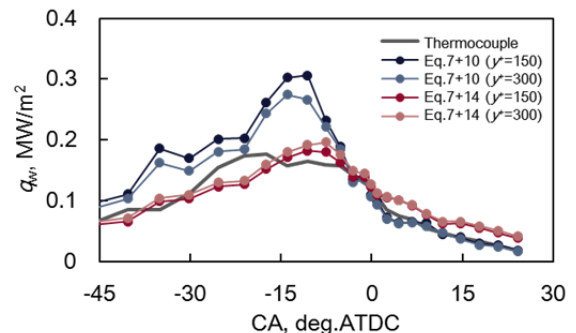


Fig. 9 Comparison of Wall Heat Flux (Type 2)

4. モデルの検証

さまざまな流動場に対する式(14)の適用性を調査するため、数値解析を実施した。Table 2 に計算条件、Fig. 10 に対象とする流れ場を示す。壁面第 1 層を $y^+ < 1$ となるようにメッシュを設定し、低レイノルズ数型の乱流モデルを使用した。これにより、壁面近傍の速度勾配から式(3)で摩擦速度 $u_{\tau,d}$ を直接算出できる。また、壁面境界層内 ($0 \leq y^+ \leq 100$) で平均化した平均乱流運動エネルギーとその散逸率から式(14)で摩擦速度 $u_{\tau,wm}$ を算出した。両者を比較した結果を Fig. 11 に示す。図より、両者が良く一致することが確認できる。このため、本研究で構築した式(14)は、さまざまな流動場で摩擦速度を定量的に予測可能であるといえる。以上の結果より、式(7)に式(14)を適用した新たな伝熱モデルを活用して、エンジンの壁面熱流束を高精度に予測できると考えられる。

Table 2 Computational Condition of Various Flow Fields

Solver	STAR-CCM+
Turbulence Model	Low-Re-number Standard k-ε
Wall Treatment	Without Wall Function
Fluid	Air
Time Integration	Implicit / Unsteady

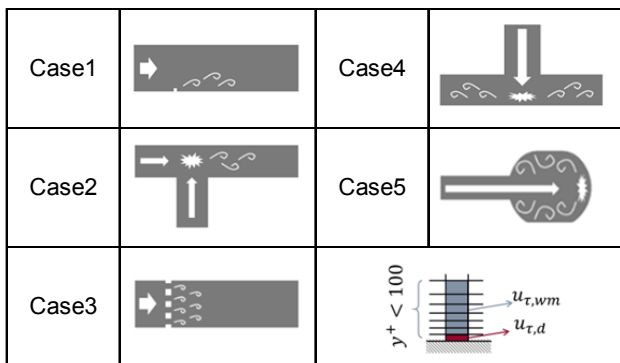


Fig. 10 Computational Domain of Various Flow Fields

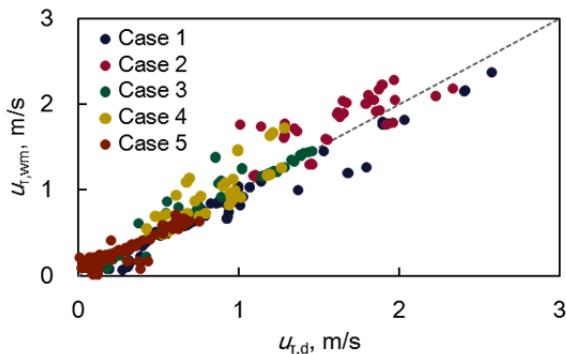


Fig. 11 Comparison of Predicted Friction Velocity

5. エンジン計算

前項で新たに構築した伝熱モデルを試験用単気筒エンジンにおける 3D-CFD に適用し、エンジン燃焼場における検証を行った。Table 3 に計算条件を示す。熱流束計測位置は、Fig. 12 の燃焼室概略図に示すスキッシュ部である。

Table 3 Computational Condition of In-Cylinder Flow

Solver	KIVA-4
Turbulence Model	RNG k-ε
Wall Treatment	Wall Function
Engine Speed	2500 rpm
Fuel	PRF90
Injection Timing	Intake Stroke
Combustion Model	Detailed Chemical Reaction
Reaction Mechanism	Reduced KUCRS Mech.

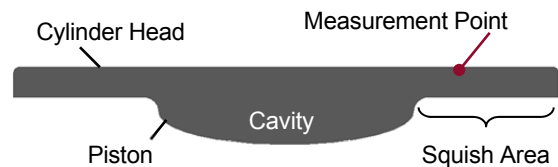


Fig. 12 Measurement Position of Heat Flux

Fig. 13 に壁面熱流束の結果を示す。比較のために、式(7)と式(10)で構成される従来モデルの結果を併せて示す。新たに構築したモデルを用いることで、エンジン燃焼場の壁面熱流束を精度良く予測可能なことを実証できた。

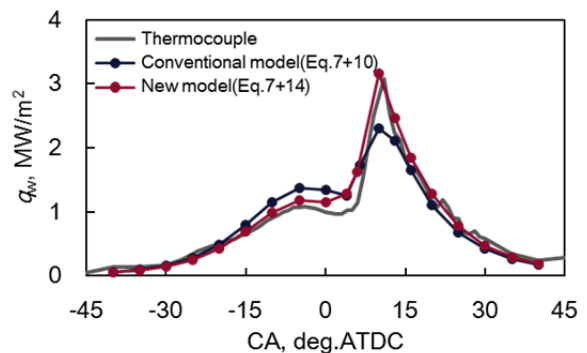


Fig. 13 Comparison of Local Heat Flux for Test Engine

更に、壁面熱流束の予測差が燃焼に及ぼす影響を考慮するため、Fig. 14 に熱発生率の比較を示す。本モデル(式(7)+(14))の結果に対し、従来モデル(式(7)+(10))は燃焼が緩慢化している様子が確認できる。これは、Fig. 15 に示す熱発生率の等値線(吸排気バルブ間のヘッド面から約 3mm オフセットした位置の断面)から分かるように、従来モデルを使用した場合には、スキッ

シュ部の壁面熱流束が大きくなったことから、ガス温度の低下に伴う燃焼速度の低下が要因と考えられる。このように、壁面熱流束の予測精度は火炎の発達に大きく影響を及ぼす。本研究で新たに構築した伝熱モデルを用いることで、壁面熱流束を正確に予測できるだけでなく、妥当性の高い燃焼解析を机上で実施することができる。

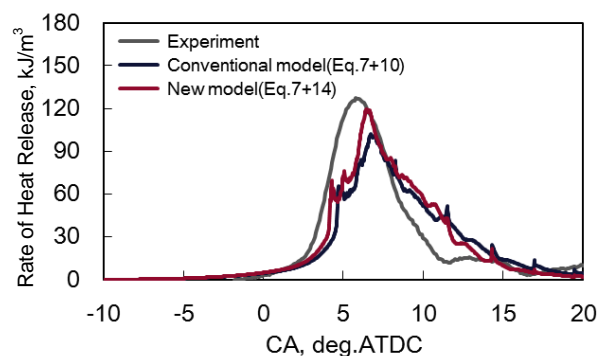


Fig. 14 Comparison of Rate of Heat Release

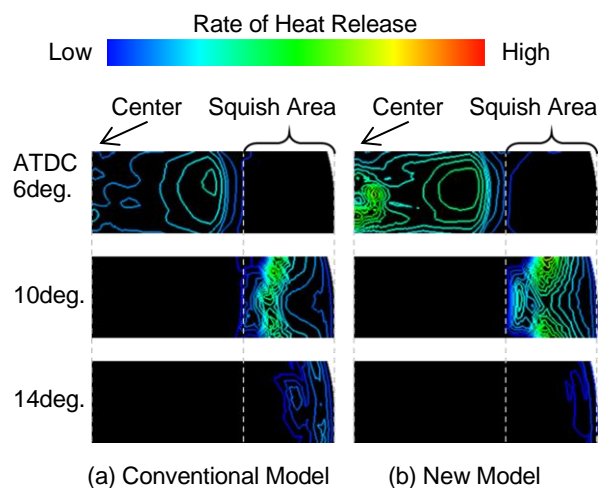


Fig. 15 Time Series and Spatial Distribution of Rate of Heat Release

6. おわりに

本研究では、実験と数値解析の両面で壁面境界層内の流動と壁面熱流束の関係を調査し、エンジン燃焼室内の未発達な乱流状態に着目することで、計算コストと精度を両立する新しい伝熱モデルを構築できた。このモデルを用いることにより、壁面熱流束の予測だけでなく燃焼解析においても精度向上が期待できる。

参考文献

(1) B.E. Launder et al. : The numerical computation of turbulent flows, *Comput. Methods in Appl. Mech. Eng.*, Vol.3, pp.269-289 (1974)

(2) Z. Han et al. : A temperature wall function formulation for variable-density turbulent flows with application to engine convective heat transfer modeling, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol.40, No.3, pp.613-625 (1997)

(3) C. Angelberger et al. : Improving Near-Wall Combustion and Wall Heat Transfer Modeling in SI Engine Computations, SAE paper, No.972881 (1997)

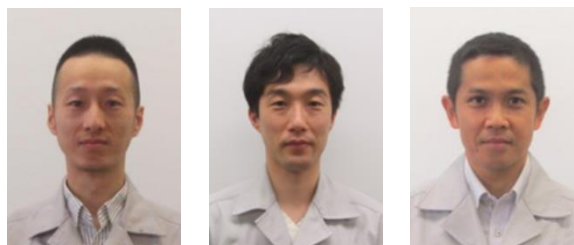
(4) M. Shimura et al. : Micro PIV Investigation of Near Wall Behaviors of Tumble Enhanced Flow in an IC Engine, *Proceedings COMODIA 2017*, No. A205 (2017)

(5) 原田ほか：エンジン筒内流動場における壁面熱伝達の研究（第1報），自動車技術会春季大会学術講演会講演予稿集，No.68-17，pp.1806-1810 (2017)

(6) 西岡ほか：乱流境界層の摩擦速度を推定する新しい方法，日本流体力学会 2015 年次大会 (2015)

(7) M. Tanahashi et al. : Scaling Law of Fine Scale Eddies in Turbulent Channel Flows up to $Re_\tau=800$, *Int. J. Heat and Fluid Flow*, Vol.25, pp.331-340 (2004)

著者



内田 健司 原田 雄司 佐藤 圭峰



田中 達也 朱 前進 藤本 英史



山下 洋幸

16

車両防錆品質の造り込みと管理プロセスを革新する 塗膜耐食性短期評価技術の実用化

Accelerated Evaluation Technique for Corrosion Resistance of Painted Parts to Facilitate Innovation of Technological Development and Quality Management Process

浅田 照朗*¹
Teruaki Asada

重永 勉*²
Tsutomu Shigenaga

要 約

自動車の防錆品質は、お客様の安全・安心に直結し非常に重要である。防錆品質は、材料、工法、工程条件など影響因子が多岐にわたる上、対象部品が多く多数の企業が関与して担保する品質である。従来、複雑なこれらの因子を制御し、防錆品質を確立するために実腐食試験が用いられてきた。実腐食試験は実際に発錆させ、その状態を定性評価する試験であり、長いものでは半年以上の試験期間が必要である。従って、防錆品質造り込みには長期の開発期間が必要で、車両開発期間短縮のネック項目のひとつであった。この課題を克服すべく、防錆塗膜の耐食性を防錆機能の発現原理に基づき、電気化学的に短時間（従来約3カ月⇒約5分）で高精度に定量評価可能な技術を開発した。本報では、新規開発した塗膜耐食性短期評価技術の評価原理、防錆技術開発（被塗物の制御技術開発、塗料開発）や品質管理に対する有効性について述べ、最後に本評価技術を適用したさまざまな評価事例を紹介する。

Summary

The rust prevention quality in vehicles is extremely important for the safety and security of customers. It involves a wide variety of influential factors, including materials, construction methods, and process conditions, and many companies have a lot of target parts related to the rust prevention quality. Conventionally, actual corrosion tests have been used to control these complicated factors and to establish the rust prevention quality. For an actual corrosion test, in which the parts are actually rusted and the rust condition is qualitatively evaluated, a test period of more than half a year is necessary in some cases. Because of this, an extended period of time is required for the development of a rust prevention technology, which has been a bottleneck in shortening the lead time for vehicle development. To overcome the abovementioned challenge, we developed a new electrochemical evaluation technology for quantitatively evaluating the corrosion resistance of painted parts, with high precision, in a shorter time (shortened from the conventional approx. 3 months to only about 5 minutes) based on the principle of the functional expression of rust prevention. In this technical report, we introduce the evaluation principle of the newly developed technology for evaluating the corrosion resistance, its effectiveness on the development of rust prevention technology and the quality management, and various examples of its utilization.

1. はじめに

鋼材の腐食を抑制する最も一般的な手法として塗装があり、幅広い分野で使用されている。日本国内における

腐食対策費は、数々の防錆手段の中でも塗装の割合が6割以上と最も高く、総額で年間約2.3兆円を占める⁽¹⁾。自動車業界においても世界中のお客様が、さまざまな腐食環境で安全・安心して使用できる高い防錆塗装品質を持つ

*1, 2 技術研究所
Technical Research Center

製品を効率的に開発、生産していくことが極めて重要である。塗装部の防錆品質は、市場での暴露環境以外に、材料、工法、工程条件など耐食性に影響する因子が多岐にわたり非常に複雑である。従来、これら複雑な因子の制御を実腐食試験で腐食環境に長期間暴露後の発錆状況を定性的に確認していたため、防錆品質の造り込みには莫大な開発期間が必要であり、評価も最悪条件の代表的な組み合わせに限定され、高い防錆品質を確立する上で大きな課題であった。また、生産現場で対象物の耐食性を簡便に評価することはできなかったため、効率的かつ高精度な品質管理も難しかった。そこで、品質の効率的な造り込みとその管理技術の構築を目的に、塗装部の腐食原理に基づき耐食性を定量的、かつ極めて短期に評価できる技術を開発、実用化した。本報では、この新規開発した塗膜耐食性短期評価技術の評価原理、材料開発や被塗物の制御技術開発に対する有効性と活用事例を報告する。

2. 実験方法

2.1 耐食性短期評価法の評価原理

塗装部の腐食は、防錆塗膜を腐食因子の水、酸素、塩素イオンなどが透過して、基材に到達することで発生すると考えられる。この腐食原理に着目し、防錆塗膜の腐食因子遮断性を評価した。Fig. 1に評価原理と試験装置外観を示す。塗装面上に腐食因子として塩水を保持して電圧を印加した。防錆塗膜に腐食因子が浸透して基材に到達すると電流が流れる。あらかじめ設定した電流に到達した時点の電圧値を測定し、防錆塗膜の腐食因子遮断性の指標とした。測定された電圧値が高いほど、塗膜中を腐食因子が透過し難い、つまり防錆塗膜の腐食因子遮断性が高い。以降、腐食因子遮断性は電圧値で記載する。

2.2 試験片の調製

非めっき鋼板にリン酸亜鉛化成処理とエポキシ系電着塗装（防錆塗膜）を施した。化成処理条件は全ての試験片で同一とした。耐食性への影響が考えられる材料の影響因子として、電着塗装の膜厚と膜質を変化させた。膜厚は5 μm ~15 μm と変化させ、焼付条件を140 $^{\circ}\text{C}$ ×15 min.~160 $^{\circ}\text{C}$ ×20min.と変化させ、電着樹脂の架橋密度を制御して膜質を変化させた。また、被塗物の影響因子として、鋼板切断面のバリ高さ（20 μm ~160 μm ）や溶接条件を変化させ、併せて電着塗料の種類や膜厚（平面部：20 μm ~40 μm ）を変化させた（Table 1参照）。これら試験片を用いて評価法の有効性について検証した。

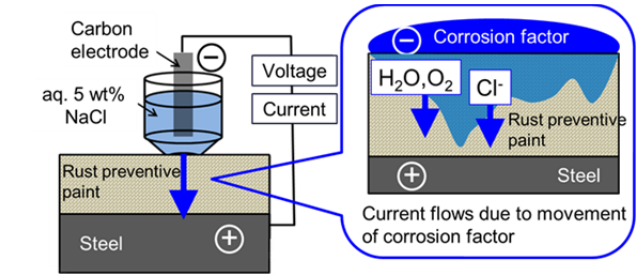
2.3 電着樹脂の架橋密度の測定

動的粘弾性スペクトロメーター（UBM社製、レオゲルE-4000）を用い測定を行った。塗膜樹脂の温度と粘弾性

の関係から架橋密度を求めた。

2.4 実腐食試験（複合腐食促進試験）

塩水噴霧6時間、乾燥3時間、湿潤14時間、送風1時間を1サイクルとした繰り返しモードで試験を実施した。



<(a) Principle of measurement>



<(b) Measurement equipment>

Fig. 1 Principle of Measurement and Measurement Equipment

Table 1 Details of Specimens Used in This Study

Paint type	Thickness / μm	Baking (Crosslink density / mol cm^{-3})	Burr height / μm	Welding condition
A	5	150 $^{\circ}\text{C}$ × 20 min. (31×10 ⁻⁴)	No burr	No welding
	7			
	10			
	15			
	10	140 $^{\circ}\text{C}$ × 20 min. (9.5×10 ⁻⁴)		
B	20	160 $^{\circ}\text{C}$ × 20 min. (No data)	20-40	No welding
			60-80	
			140-160	
	30		20-40	
			60-80	
			140-60	
	40		20-40	
			60-80	
			140-60	
			140-60	
B	20		No burr	F
B	30		10-40	G
C				
D				
E				

3. 実験結果

3.1 防錆塗膜の腐食因子遮断性と複合腐食促進試験における発錆までの期間との関係

複合腐食促進試験における発錆までの期間と腐食因子遮断性（電圧値）の関係を図2に示す。膜厚が厚く、同膜厚では防錆塗膜樹脂の架橋密度が高い、すなわち膜質が良いほど、腐食因子遮断性は高くなった。また、腐食因子遮断性と複合腐食促進試験における発錆期間には高い相関が認められた。本評価技術では、従来3カ月後に発錆する防錆塗膜の腐食因子遮断性250V程度であれば、5分未満で評価可能である。このことから、塗装部の耐食性短期評価法として極めて有効である。

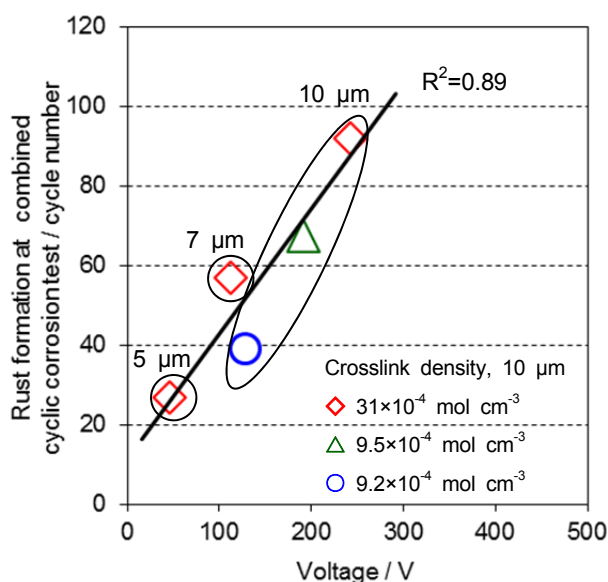


Fig. 2 Relationship between Cycle Number of Rust Formation at Combined Cyclic Corrosion Test and Measured Voltage (Paint Type: A) ⁽²⁾

3.2 塗膜耐食性短期評価技術の有効性

塗装部の防錆品質を造り込むには、被塗物、防錆塗膜双方の極めて多岐にわたる耐食性影響因子を精度良く制御し、管理するプロセスが不可欠である。しかし、従来の実腐食試験に基づく防錆技術開発では、評価に多大な時間を要する、試験後の錆状態を確認することから定性的となる、大型部品は試験槽に入らずモデル試験片での評価となるために実性能を正確に評価できない等の理由で防錆技術開発の効率化と精度向上を両立することが困難であった。これまでに実腐食試験に代わる耐食性の代用指標評価法として、極微弱な電圧を印加するインピーダンス法やターフェル法は存在したが、操作が煩雑で評価に時間が掛かる、外乱の影響を受けやすく電磁遮蔽された空間が必要、複雑な形状物の測定が困難等のさまざま

な制約があり実用性に乏しかった。本評価技術は極めて短時間に、工場等の電磁波ノイズの多い場所でも、複雑な形状物の耐食性をその場で評価できる実践的、かつ革新的な技術である。以降、新規開発した本評価技術が、これらの課題解決にいかにも有効であるかについて被塗物の制御技術開発や塗料開発の事例を交えて紹介する。

(1) 被塗物の制御技術開発に対する有効性

被塗物の状態は塗装後の耐食性に大きな影響を与える。一例として、鋼板エッジ部のバリ高さや防錆塗膜による被覆性の関係をFig. 3に示す。バリが高くなると、被覆性は低下し、耐食性は悪化する。このバリ高さは、鋼種や鋼板の加工条件等によって変化する。一般に、防錆塗膜による被覆性評価は断面観察法による。断面観察法は、対象部位の電着被覆状態を顕微鏡により目視確認できることから有効な手段のひとつである。しかし、評価に時間が掛かる、切断等を行わずに対象部位を直接評価することができない、局所的な一断面の情報である等のさまざまな課題がある。

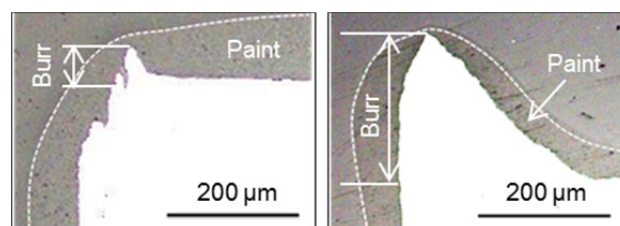


Fig. 3 Case Examples of Relationship between Height of Burr at Edge and Coatability of Electrodeposited Paint (Paint Type: B) ⁽²⁾

鋼板エッジ部の腐食因子遮断性に対するバリ高さ、防錆塗膜の平面部膜厚の関係をFig. 4に示す。バリが低く、防錆塗膜の平面部膜厚が厚いほど、被覆性が向上して腐食因子遮断性（電圧値）は向上した。この傾向は同試験片を用いた複合腐食促進試験における発錆期間の傾向と一致することを確認している。このように、本評価技術は被塗物の状態変化が塗装部の耐食性に与える影響を定量的に評価することができる。また、自動車のボディや大型部品の塗装後の耐食性を直接評価できる。エッジ部相当の防錆性能を持つ部位であれば、1分程度で評価可能であり、耐食性に影響を与える被塗物側の生産条件の詳細な制御に極めて有効である。

次に、被塗物側の具体的な制御事例として、溶接条件を変化させた場合の塗装後の耐食性を示す。ここでは、主に溶接時の不活性ガス流量とガス組成を変化させた。Table 2に複合腐食促進試験後の溶接部近傍の外観、本評価技術で評価した溶接ビード近傍の腐食因子遮断性（電圧値）を示す。溶接条件を変化させることで、溶接ビード近傍のスパッタ（金属粒）やスラグ（ガラス質粒）量

が変化した。スパッタやスラグ量の多い溶接条件G（制御不良）は、複合腐食促進試験で早期に発錆し耐食性が劣った。同傾向が腐食因子遮断性（電圧値）でも確認された。以上のことから、被塗物の状態が塗装部の耐食性に与える影響を精度良くとらえることができたといえる。

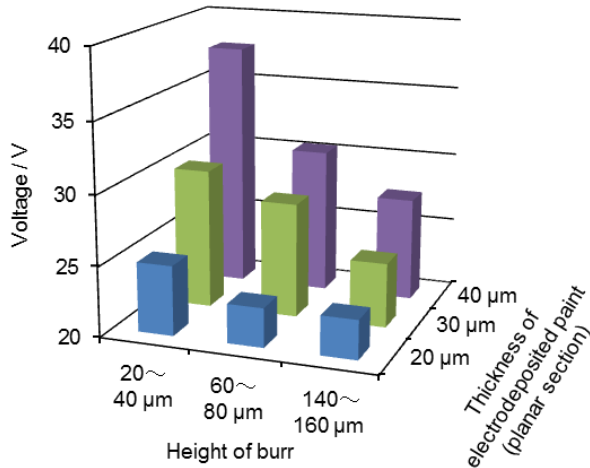


Fig. 4 Relationship among Measured Voltage, Height of Burr at Edge and Thickness of Electrodeposited Paint (Paint Type: B) ⁽³⁾

Table 2 Relationship between Result of Combined Cyclic Corrosion Test and Measured Voltage against Change in Welding Condition (Paint Type: B) ⁽²⁾

Welding condition	After combined cyclic corrosion test	Voltage / V
F		127
G		43

(2) 塗料開発に対する有効性

塗装部の防錆上の弱点部位として、一般に鋼板エッジのバリ部や溶接部が挙げられる。これは、防錆塗膜による被覆性が一般面に対して劣るためである。ここでは、これら部位の耐食性改善、つまり防錆塗膜による被覆性改善に有効な塗料開発に本評価技術を活用した。塗料の焼付時の粘度特性を変化させ、バリ部と溶接部の耐食性を評価した。Fig. 5に塗料の焼付時粘度に対して、バリ部と溶接部の腐食因子遮断性（電圧値）を評価した結果

を示す。塗料の焼付時粘性の増加（B<C<D<E）に伴い、バリ部の腐食因子遮断性は向上した。一方、溶接部には最適値が存在した。このことは、溶接部に共存するスパッタとスラグの被覆性が焼付時粘性に対してトレードオフの関係にあることで説明できる。スパッタの被覆性は粘性が高い方が有利であり、一方でスラグの被覆性は粘性が低い方が有利である。実際に塗料タイプBを用いた部品と塗料タイプDを用いた部品の実車錆耐久試験後の外観（Table 3）を比較すると、塗料タイプBではエッジ、溶接部に赤錆が多く発生しているのが分かる。一方、塗料タイプDでは発錆は認められなかった。従来、このような塗料開発には3~5年を要していたが、本評価技術の適用により1年未満での技術開発を実現した。

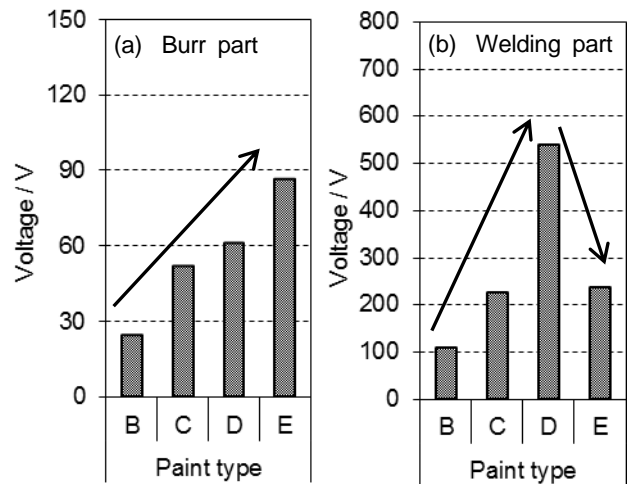


Fig. 5 Measured Voltage of (a) Burr and (b) Welding Part against Change in Paint Type (Welding Condition: F) ⁽²⁾





Table 3 Appearance after Corrosion Test of Underbody Parts Painted by Paint Type B or D

Paint type	After corrosion test	
	Burr part	Welding part
B		
D		

(3) 品質管理に対する有効性

新規開発した塗装部の耐食性短期評価法とその装置の特徴について、従来の複合腐食促進試験と比較した結果をTable 4に示す。本評価技術は、触子の工夫により溶接部、エッジ部、平面部など、あらゆる部位の塗装後の耐食性を極めて短期に精度良く評価することができる。従来であれば、生産現場で変化点が生じた際、それが耐食性に影響するかどうかを確認するためには、部品の切断、搬送、実腐食試験と手順が煩雑で、結果が判明するのに数か月を要することもあった。一方、新規開発した本評価技術と装置は、従来の据え置き型の評価設備とは異なり、容易に可搬できることから(約3kg)、工場等の生産現場や屋外で、対象物の塗装後の耐食性を迅速に直接測定することが可能である。以上のことから、品質の管理精度と効率を劇的に向上させ、安定した高い品質を実現できる。

Table 4 Effectiveness of Newly Developed Evaluation Method for Technological Development and Quality Management

		Conventional method	Newly developed method
Test equipment		 Non-portable	 Portable (ca. 3 kg)
	Evaluation period	Long (e.g. 3 month)  No rust 30 days  rust 90 days	Short (e.g. 5 min.)
Technical development	Accuracy	Qualitative evaluation	Quantitative evaluation
	Variation Point	Difficult to confirm immediately	Possible to confirm immediately
Quality control	Test frequency	e.g. Monthly	e.g. Daily

3.3 その他、評価適用事例

本評価技術は、上記で紹介した活用事例以外にも多くの塗装後の耐食性評価へ応用を既に実施している。一例を以下に示す。

- ・塗料の光劣化による腐食因子遮断性の経時変化評価

- ・チッピング（飛び石）ダメージ塗装部の腐食因子遮断性（≒残存膜厚）評価
- ・粉体塗装部品の腐食因子遮断性評価
- ・塗装ハジキ発生部位の腐食因子遮断性評価

4. おわりに

塗膜耐食性短期評価法を技術開発や品質管理に適用することで、防錆品質造り込みプロセスの革新を実現できる。現在、本評価技術と装置は既に実用化、製品化しており、防錆技術開発や品質確認に弊社内、及び協力メーカー殿で運用を開始している。また、本評価技術は幅広い塗装系でさまざまな用途に適用可能である。従来は定量評価できなかった市場での劣化後の塗膜防錆性能も評価できる。以上のことから、本評価技術は自動車業界のみならず、塗装鋼板を主として製造する産業機械部品、建機部品、製缶部品、その他家電製品や装飾部品を取り扱う他業界での応用が期待でき、将来的には耐食性評価のスタンダードとなり得る技術である。

最後に、本評価技術の構築に多大なご協力をいただいた広島大学大学院工学研究科の磯本良則先生に深くお礼申し上げます。

参考文献

- (1) 腐食コスト調査委員会：わが国の腐食コスト，材料と環境，50，pp.490-512(2001)
- (2) 浅田照朗ほか：塗装部の新規耐食性短期評価法の開発，及び防錆技術開発・品質管理への活用，2017年自動車技術会 春季大会 学術講演会 講演予稿集，2017，pp.1148-1151(2017)
- (3) 浅田照朗ほか：塗装部の耐食性評価法とその活用事例，第63回材料と環境討論会 講演集，pp.175-176(2016)

■ 著 者 ■



浅田 照朗

重永 勉

17

アルミニウム／CFRPの異材点接合技術 Dissimilar Material Spot Joining Technique of Aluminum and CFRP

西口 勝也*¹ 田中 耕二郎*² 森田 泰博*³
Katsuya Nishiguchi Kojiro Tanaka Yasuhiro Morita
杉本 幸弘*⁴
Yukihiro Sugimoto

要 約

地球環境問題を背景に自動車においては抜本的な車体重量の低減が求められており、従来の鋼板のみの単一素材ではなくアルミニウムや樹脂材料などを適材適所に配置したマルチマテリアル車体の研究が進められている。マルチマテリアル車体の主要材料、鋼板、アルミニウム等の金属、これに炭素繊維強化プラスチック（Carbon Fiber Reinforced Plastics : CFRP）を組み付けるための接合技術が必要となる。従来、異種材料の接合にはリベットやボルト／ナットなどの機械締結が用いられ、生産性やコスト面の課題が大きかった。アルミニウムとCFRPとを副資材なしに直接接合可能とするため、アルミニウム同士やアルミニウム／鋼板の異材接合法として実用化された「摩擦攪拌点接合」をベースとした異材接合技術の開発を行っている。本工法では、CFRPのマトリクス樹脂中に存在する官能基とアルミニウム表面の酸素リッチ層とが化学的に結合し接合されると推測された。また、接合条件を適正に設定することにより接合強度はアルミニウム抵抗スポット溶接のJIS A 級引張せん断荷重を上回る値を示した。接合部の要求強度や樹脂の熱的性質に応じて接合パラメーターを適正に設定することで多様な樹脂への適用可能性が示唆された。

Summary

Radical reduction in body weight is asked in vehicle development against the background of the global environmental problem, and a study of the multi-material body, arranging aluminum and CFRP properly instead of the conventional steel sheet body, is advanced. The joining technique to assemble a steel and aluminum materials, which are the main materials of the multi-material vehicle-body, and CFRP is needed. Application to joining of aluminum and CFRP was considered based on the "friction stir spot welding" which came to practical use as the dissimilar material joining way of aluminum materials or aluminum and a steel sheet. It was guessed that a joining mechanism is the chemical bonding between the functional group which exists in matrix resin of CFRP and an oxygen rich layer in the aluminum surface. Also, the joining strength indicated the value higher than the JIS A-grade tensile shear strength of the aluminum resistance spot welding by adopting joining condition properly. Proper adoption of joining parameter based on the required strength of the joint and thermal property of resin indicated applicability to diverse resins.

1. はじめに

地球環境問題を背景に自動車などの輸送機器には二酸化炭素排出量の削減が求められており、軽量化は電動化、内燃機関や伝達系の効率向上、摩擦や転がり抵抗低減などととも燃費改善の有効な手段である。自動車におい

ては抜本的な車体重量低減をねらい、従来の鋼板のみの単一素材だけではなく、アルミニウムや樹脂材料など各種材料の特徴を活かして適材適所に配置したマルチマテリアル車体の研究が進められている。

Fig. 1に、マルチマテリアル車体構想の一例を示す⁽¹⁾。マルチマテリアル車体実現のためには材料開発と、異種

*1～4 技術研究所

Technical Research Center

材料の接合技術が必要であり、それらをコストと生産性を高次元で両立し実現する必要がある。これらを背景として、平成26年度からNEDO委託事業「革新的新構造材料等研究開発」が開始され、革新的鋼板、アルミニウム、CFRPなどの軽量材料開発とそれらの接合技術開発が行われている。本稿では、マルチマテリアル車体の概要、NEDO委託事業の研究テーマの一つであるアルミニウム／CFRPの摩擦攪拌点接合技術開発の概要を報告する。

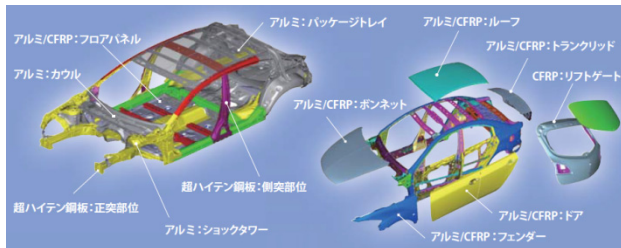


Fig. 1 Example of Study of Multi-material Body

2. 車体の軽量化と接合技術

2.1 車体のマルチマテリアル化

車体はボディシェルとハングオン部品からなり、車両重量の40%を占める大物部材である。その軽量化はシャシーやパワートレイン部品等にも波及するため、二次的な軽量化の効果も大きい。また、衝突安全性能、走行性能や振動騒音など車両の商品性に直結するため、車体の基本構造、材料の変更には大きな投資を伴う。車体構造の最適化、材料工法の選定が重要である。

現在の車体材料は鋼板が主体であり、今後も中心的な役割を果たすと考えられ、高張力鋼板、ホットスタンプ等の適用拡大が進み、中長期的には鋼板以外の材料も適材適所に適用したマルチマテリアル化が進展すると考えられている。既に欧州の一部高級車では、鋼板、アルミニウム及びCFRPを組み合わせたマルチマテリアル車体の実現されている。国内でも、軽量化と走行性能の向上をねらいにハングオン部品へのアルミニウム材料置換が進んでおり、一部の少量生産の高級車ではCFRP部材の適用も始まっている。

2.2 異種材料接合技術

従来の鋼板製車体は鋼板パネルをアセンブリーするモノコック構造が主流であり、その接合には抵抗スポット溶接が1台当たり3000~4000点程度使用されている。抵抗スポット溶接は、副資材が不要で1点当たりの接合コストが小さい、ロボットによる自動化が容易でかつ接合時間が短い、板組に対する自由度が大きいなどの優れた特徴をもつ。マルチマテリアル車体の組み立てに用いられる異材接合技術も抵抗スポット並みの品質、コスト、

生産性が求められる。

鋼板／アルミニウムの接合では、接合装置が両サイドからアクセスできる構造にはセルフピアッシングリベット（SPR）の適用が主流であり、中空材と板材の接合など片側からのみアクセス可能な部位にはブラインドリベットやフロードリルスクリュー（FDS）などの工法が用いられる。高強度鋼板とアルミニウムの接合では、SPRの適用が難しいため、摩擦圧接の原理を利用したフリクションエレメント溶接（FEW）の適用も始まっている。CFRPと金属の接合では、低い塑性変形能や層間はく離等の問題があるため依然としてブラインドリベットと接着による結合が主流である。

CFRPは現状材料コストが高く、調達性、リサイクル性など考慮するとその特徴を最大限に発揮できる部位への限定的な使用が現実的と考えられる。量販車種を想定したマルチマテリアル車体の主要材料である鋼板、アルミニウム等の金属、これにCFRPを組み付けるための接合技術が必要となる。従来のリベット接合には生産性やコスト面の課題が大きく、自動化や低コスト化に対応した新たな接合技術が必要である。以下に、アルミニウム同士やアルミニウム／鋼板の異材接合法として実用化された「摩擦攪拌点接合」^(2,3)をベースに開発中の、アルミニウム／CFRP摩擦攪拌点接合技術のメカニズム、性能について報告する。

3. アルミニウム／CFRPの摩擦攪拌点接合

3.1 接合プロセス及びメカニズム

アルミニウム同士の摩擦攪拌点接合では、高速回転するツールが下板まで挿入され、摩擦熱でアルミニウムを軟化させ、塑性流動により上下の板が固相接合される。アルミニウム／鋼板の接合では、同様にアルミニウム側から挿入されたツールは下板までは貫通せず、摩擦熱と加圧力により上下板の界面に金属間化合物を形成し固相接合される⁽³⁾。

アルミニウム／CFRPの摩擦攪拌点接合は、アルミニウム／鋼板の接合により近いと考えられる。高速回転するツールは上板のアルミニウム側から挿入され、挿入量は上板板厚内にとどめられる。アルミニウムとツール間で摩擦発熱し熱伝導により界面のCFRPの樹脂を溶融し

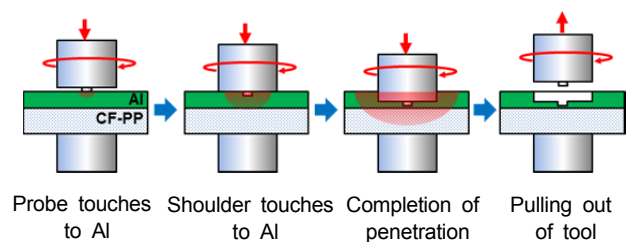


Fig. 2 Schematic of Joining Process

アルミニウムと溶着する。そのため、ポリプロピレンやポリアミドなどの熱可塑性樹脂をマトリクスとするCFRPの接合が可能である。Fig. 2に、接合プロセスの概略を示す。

Fig. 3に、アルミニウムとCFRPの接合部断面写真を示す。アルミニウム中央の窪んだ部分はツールが挿入された領域であり、ツール直下ではアルミニウムがCFRP側に塑性変形している。また、Fig. 4には、Fig. 3の中で四角で囲んだ位置のSEM写真を示す。アルミニウムとCFRPが隙間なく密着していることが確認できる。Fig. 5に、同様の位置のTEM写真及び炭素、酸素及びアルミニウムの元素マッピング結果を示す。アルミニウム表面には酸素リッチな層が存在しており、この中間層を介してアルミニウムとCFRPが接合していることが分かる。熱可塑性樹脂において官能基を持たない場合は接合ができないことから、本接合手法では樹脂中に存在する官能基と酸素リッチな中間層との結びつきにより化学的に結合されているものと推測される。第一原理計算など計算化学の結果から、化学結合種として電気陰性度の違いによ

るクーロン力に起因した結合、脱水縮合による共有結合、水素結合など幾つかのメカニズムの可能性が示唆されている。

3.2 接合強度に及ぼす接合条件の影響

板厚3mm のカーボン繊維40wt%PP 射出成型品（以下、CF-PP）、アルミニウム材に板厚1.2mm のA5052-H34 酸洗材を供試材として、接合強度に及ぼす摩擦攪拌点接合条件の影響を調査した。なお、CF-PPにはあらかじめ官能基を添加し、接合性を改善した樹脂マトリクスを用いている。

接合には、Fig. 6に示す位置制御式摩擦攪拌点接合装置を用いた。本装置では、ツールの回転速度と挿入速度が一定の条件で設定した挿入量までツールが押し込まれる。接合は、30×100mm 試験片同士をアルミニウムを上板側とし30mm ラップで治具に固定し、重ね合せの中心部を接合した（Fig. 7）。Table 1 に、接合条件を示す。

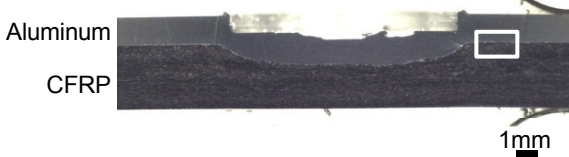
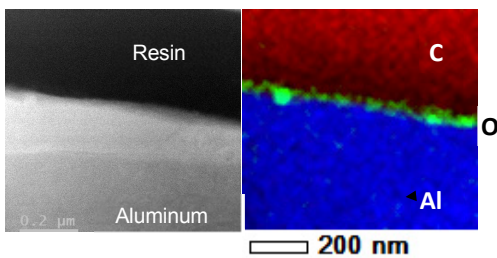


Fig. 3 Picture of Joint Section



Fig. 4 SEM Image of Cross Section



HAADF image Mapping of an element

Fig. 5 TEM Image of Cross Section⁽⁴⁾



Fig. 6 Photo of Joining Devices

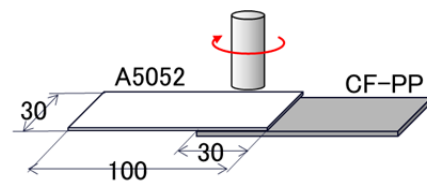


Fig. 7 Schematic Image of Joining

Table 1 Joining Conditions

Parameter	Conditions
Tool diameter	6~10mm
Rotation speed	1000~15000rpm
Penetration speed	6~60mm/min
Penetration depth	1.0mm

接合ツールには、径φ6、8及び10mmの3種類を用いた。ツール回転数は1000～15000rpm、ツール挿入速度は6～60mm/minの範囲とした。また、ツール挿入量はツール先端のプロープがアルミニウムに接触した位置から挿入終了までの移動量であり、全ての条件で1.0mmの一定とした。

接合中に、熱電対及びレーザー表面温度計により界面及びアルミニウム表面 (Fig. 8) の温度を、アンビルに組み込んだロードセルによりツール加圧力をモニタリングした。同時に、接合装置の駆動軸モータートルクを出力した。接合強度は、ISO19095 Plastics—Evaluation of the adhesion interface performance in plastics-metal assemblies—に準じた引張せん断試験により測定した。

Fig. 9に、接合後の試験片外観写真を示す。前述のとおり、アルミニウム側にはツールに対応したへこみが形成されるが、樹脂側はほぼ元の平坦なままである。接合条件によっては、本写真のように溶融した樹脂が上下板間の外部に排出されたバリ部が形成される。

Fig. 10に、接合時間と上下板界面及びアルミニウム表面温度の関係の一例を示す。接合条件は図中に示している。ツール先端のプロープがアルミニウム表面に接触し昇温が開始する。次にショルダーがアルミニウムに接触した時点から急激に温度上昇し、その後は各測定位置とも接合終了まで緩やかに温度上昇する。最高到達温度は接合界面中央部でポリプロピレンの分解温度 (約280℃) を超える500℃近くまで上昇しており、周辺部分でも溶融温度 (166℃) を超える温度に上昇する。

Fig. 11に、接合中の駆動軸トルクのモニタリング結果の一例を示す。軸トルクは初期に急激に立ち上がり、そ

の後は接合が終了するまで緩やかに低下する。また、同じ挿入速度であれば最大軸トルクは回転数が小さい程大きくなった。荷重についても軸トルクとほぼ同様の傾向を示した。

接合温度や軸トルク、荷重に及ぼす接合条件の影響を見ると、ツール挿入速度の増加に伴い軸トルク、荷重のピーク値は増加するが、界面の最高到達温度は小さくなる。これは、荷重、軸トルクが上がることで界面の昇温速度は増加するものの、逆に接合時間が短く、温度上昇する前に接合が終わってしまうからである。ツール回転数の増加に伴い、荷重及び軸トルクのピーク値は低下する傾向を示した。界面の最高到達温度は、ツール回転数を3000 から15000rpm に増加させてもあまり変化しなかった。ツール径を大きくすると荷重及び軸トルクのピーク値は増加した。界面中心の温度はツール径を変えてもあまり変化しないが、外周温度はツール径とともに増加した。

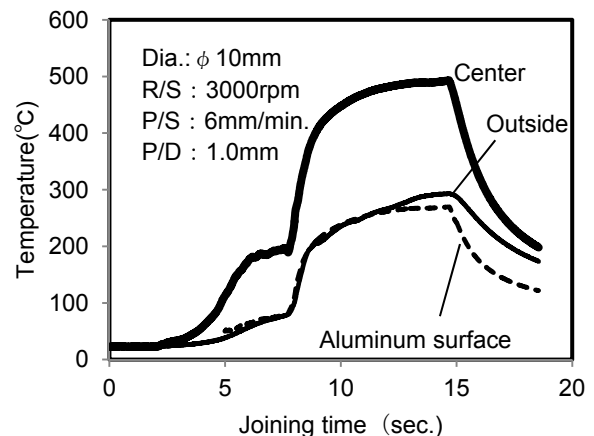


Fig. 10 Temperature Change of Each Portion

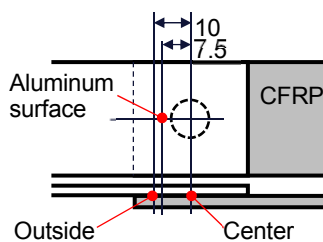


Fig. 8 Measuring Position of Temperature

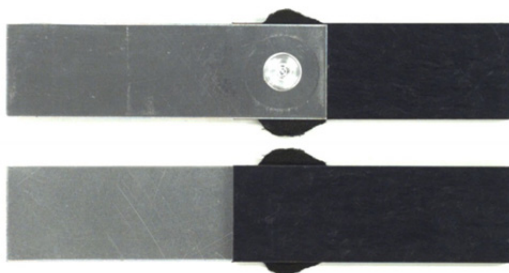


Fig. 9 Photo of Test Piece after Joining

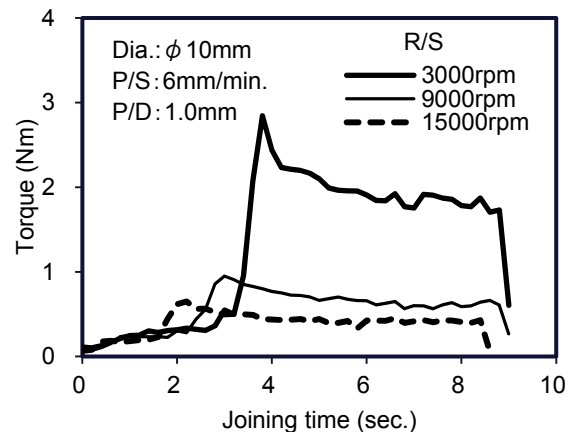


Fig. 11 Relationship between Joining Time and Torque

Fig. 12 に、挿入速度6及び60mm/minで接合した試験片の引張せん断試験後のはく離面写真を示す。図中に点線で示す範囲が、樹脂が溶融しアルミニウム表面と接合されていた範囲である。アルミニウムの表面には、樹脂及びカーボン繊維の付着が確認できる。いずれの接合条件においても、界面温度が高く樹脂の溶融面積が大きくなるほど、引張せん断強度は高くなる傾向を示した (Fig. 13)。本接合技術では、回転ツールとアルミニウムとの摩擦熱で溶融した樹脂がアルミニウム側に溶着するため、発生する摩擦熱量が樹脂溶融面積、接合強度を支配する重要な指標と考えられる。接合中の回転ツール駆動用サーボモーターの軸トルクから下記の式(1)を用いて単位時間当たりの摩擦熱を算出し、それを基に接合中の最大摩擦熱量、総摩擦熱量を求めた。

$$\text{摩擦熱(J/s)} = \text{トルク(Nm)} \times \text{回転数(rpm)} \times 0.1047 \quad (1)$$

Fig. 14 に、総摩擦熱量と樹脂の接合面積の関係を示す。摩擦熱の一部はツールや材料、試験片固定用の治具

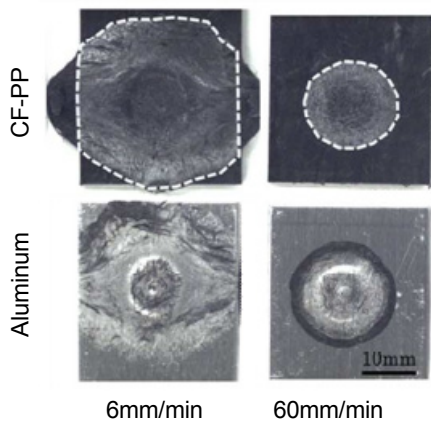


Fig. 12 Photo of Fracture Surface

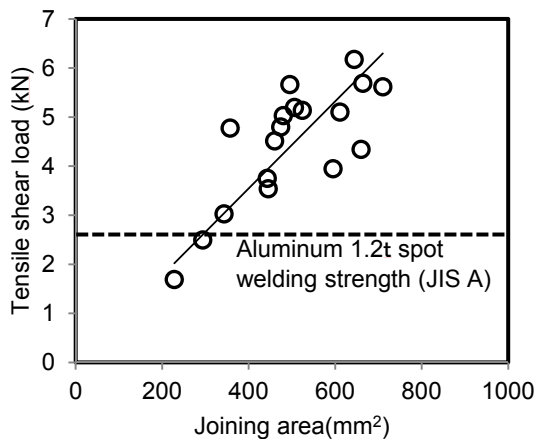


Fig. 13 Relationship between Joining Area and Joining Strength

等にも伝達されるため必ずしも接合に投入された正味の摩擦熱量ではないが、計算から求めた総摩擦熱量と接合面積には相関関係が認められた。

3.3 接合部の耐久信頼性

引張せん断試験に用いた同じ材料を用いて、疲労試験及び耐候性試験を行った。Fig. 15に、疲労試験の結果を示す。試験は、応力比0.05の引張-引張せん断荷重による疲労試験を実施した。図中に示す破線は、アルミニウム板どうしの抵抗スポット溶接試験片の疲労試験結果であり、CFRP/アルミニウム摩擦攪拌点接合試験片は抵抗スポット溶接に比べ高い疲労特性を示した。

同様の試験片を用いて、恒温恒湿環境 (85°C×85% RH) 及び高温環境 (85°C) に672時間保持、冷熱くり返し (-40°C⇔100°C) を500cycまで実施し、試験前後の引張せん断強度の比較を行った。初期値に比べ暴露後の引張せん断強度はバラツキが大きくなる傾向を示すものの、平均強度は初期とほぼ同等の値を示した。

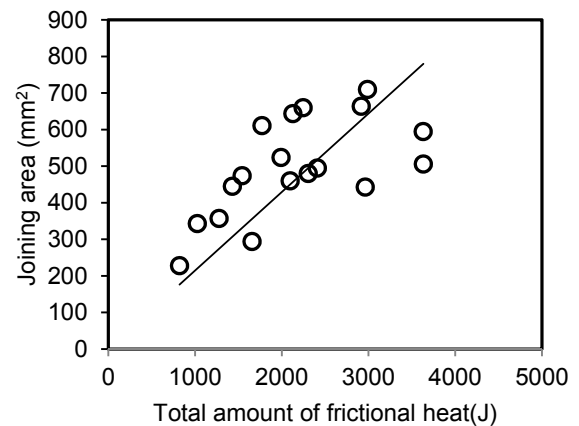


Fig. 14 Relationship between Total Amount of Frictional Heat and Joining Area

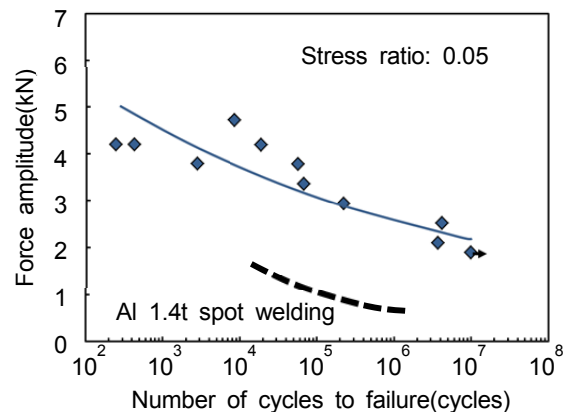


Fig. 15 Fatigue Characteristics of CFRP/Aluminum Joining

4. おわりに

マルチマテリアル車体を想定した異材点接合技術として、アルミニウム/CFRPの摩擦攪拌点接合の可能性を見出すとともに、接合メカニズムや接合性向上のための要件を明らかにした。

CFRPとアルミニウムは酸素原子リッチな中間層を介しナノメートルレベルで緻密に接合されていた。熱可塑性樹脂において官能基を持たない場合は接合ができないことから、本接合手法では樹脂中に存在する官能基と酸素リッチな中間層との相互作用により化学的に結合されているものと推測される。

接合条件を適正に設定することにより、接合強度はアルミニウム抵抗スポット溶接のJIS A級引張せん断荷重を上回る値を示す。また、接合中の総摩擦熱量と接合面積には相関があり、要求強度レベルや樹脂の熱的性質に応じて接合パラメーターを設定することで多様な樹脂の接合が可能と考えられる。

今後は車体部材適用時の外乱に耐え得るロバスト性や耐久信頼性の検証に加え、接合時間の短縮と品質保証方法の検討に取り組む。

5. 謝辞

本研究の成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託業務の結果得られたものです。ここに謝意を表します。

参考文献

- (1) ISMA REPORT No.1 December (2015)
- (2) 村上ほか：アルミ新接合技術の開発，マツダ技報，No.21, pp86-91(2003)
- (3) 玄道ほか：摩擦点接合技術の開発，日本金属学会誌，70(11)，870(2006)
- (4) 西口ほか：アルミニウム/CF-PP の摩擦攪拌点接合強度に及ぼす接合条件の影響，軽金属学会第133 回秋季大会講演概要(2017)

■ 著 者 ■



西口 勝也



田中 耕二郎



森田 泰博



杉本 幸弘

18

EMシステム制御モデル化のための
触媒浄化メカニズムの解明Clarification of Catalyst Reaction Mechanism
for Modeling of Emission System Control

國府田 由紀^{*1} 住田 弘祐^{*2} 兒玉 潤^{*3}
 Yuki Koda Hirosuke Sumida Hiroshi Kodama
 村上 浩^{*4} 竹林 広行^{*5}
 Hiroshi Murakami Hiroyuki Takebayashi

要 約

触媒の特性を最大限発揮させるためには、排ガスの吸着点である貴金属表面の状態を最適化する必要がある。それを制御する、より高精度なエミッション制御の構築のため、排ガス環境、NAP XPSのその場分析による貴金属（ロジウム）表面状態及び浄化特性の関係を明らかにすることで、理想とする制御指針を得ることを試みた。その結果、Rh表面が酸化することにより浄化性能が低下することが確認された。更に、酸化した表面を還元することで触媒浄化性能を回復させる制御を実排ガスに近い条件で検討した結果、排ガス中のNOが吸着して表面酸素と相互作用してできたNO₂が吸着点を占有し、COなどの排ガス成分の吸着・浄化反応を阻害していることが分かった。得られた結果を元に、従来よりもNOを低濃度にしたガス組成で処理した結果、浄化性能が従来に比べ20%向上することがエンジンテストで確認でき、本手法による制御の高精度化が可能であることが示された。

Summary

To maximize the performance of catalysts, it is necessary to optimize the precious metal surfaces which are emission's adsorption sites. In order to control the precious metal's surfaces, the precision of the emission control system need to be improved. Accordingly, we developed an ideal control guide line by clarifying the relations between emission conditions, precious metals' surface conditions found by in-situ analyses (NAP XPS), and the catalytic performance, and found that the oxidation of the Rh surface deteriorated the catalytic performance. Also, as a result of the research where an oxidized surface was deoxidized to recover the catalytic performance in an almost-actual emission condition, the NO₂ that was generated by the interaction between the surface oxygen and NO in the emission covered the adsorption sites, preventing the adsorption of emission components such as CO as well as catalytic reactions. Based on the outcome, an engine test was performed with the gas composition of lower concentration NO, showing that the NO emission was reduced by 20%. It was proved that this method improves the precision of the control of the emission system.

1. はじめに

地球温暖化やエネルギーセキュリティーの観点から、自動車の燃費改善が強く求められており、内燃機関の熱効率向上が急務となっている。ガソリンエンジンの熱効率向上のために、オートサイクルでは膨張比を高める

ことやリーンバーンが有効であることが示されており、その研究が進められていることから^{(1), (2)}、今後のエンジン燃焼形態は従来のSI燃焼からリーンバーンへ移行する可能性が高まってきている。一方、環境保護及び健康影響の観点から、自動車の排出ガス規制は世界的に年々厳しくなっており、その規制に適合させるためには、酸素

*1, 2 技術研究所
 Technical Research Center

*3~5 パワートレイン開発本部
 Powertrain Development Div.

過剰雰囲気下の排ガスに対して高い浄化性能をもつ排ガス浄化用触媒^{(3),(4)}とその性能を使いきるためのエミッション制御技術の開発が必要となる。触媒性能を最大限発揮させるためには、浄化反応の律速となる「吸着」過程において、排ガスの吸着点である貴金属の表面状態を最適化することが重要となる。すなわちこれまでのエミッション制御は排ガス成分の排出量を元に制御している例が多いが、更に高い浄化性能を得るためには、触媒の貴金属表面状態と性能の変化との関連性から、より高精度なエミッション制御を構築する必要がある。

本研究では、NO_x浄化特性に優れるロジウム (Rh) に着目し、排ガス環境、貴金属表面状態及び浄化特性の関係を明らかにすることで、理想とする制御指針を得ることを試みた。貴金属表面状態分析には、その場分析可能な準大気圧X線光電子分光法 (Near Ambient Pressure X-ray Photoelectron Spectroscopy : NAP XPS) を用いた。

2. 実験方法

2.1 評価サンプル

触媒特性評価には、外径25.4mm、長さ22mm、セル密度600cell/inch²のモノリス担体に、Rhを2wt%担持したAl₂O₃粉末をコーティングしたものをを用いた。NAP XPSには、Si自然酸化膜が生成したSi基板上にRhナノ粒子を蒸着したものをを用いた。Rhナノ粒子はガス中蒸着法で作製した。

2.2 触媒特性評価

サンプルを流通式の試験装置内に配置し、Table 1に示す種々混合ガスを流通させながら、室温～500℃まで30℃/分で前処理を行った。λ=1のガス組成は、酸化成分と還元成分のモル比を1に設定した。その後λ=1条件で、30℃/分で昇温させながら、MEXA-7500 (HORIBA製) で触媒前後のガス分析を行い、浄化性能を算出した。

Table 1 Model Gas Composition (Pretreatment)

Condition	Temp.(°C)	Concentration (%)							
		O ₂	CO	H ₂	CO ₂	C ₃ H ₆	NO	H ₂ O	N ₂
λ=1	500	0.90							
Lean①	200	9.20	0.73	0.66	13.9	0.06	0.100	10.00	Balance
Lean②	400								
Lean③	200	15.9							
Lean④	400								

SV = 60000 (1/h)

2.3 エンジンによる評価

エンジンを用いた触媒特性の評価には、2.5Lの直噴エンジンを用い、触媒は量産触媒をエンジンから150cm後方へ取り付け付けた。計測は、集合部でA/F、触媒Bed温度、触媒前後のガス組成分析を行い、MEXA-7000

(HORIBA製) を用いた (Fig. 1)。

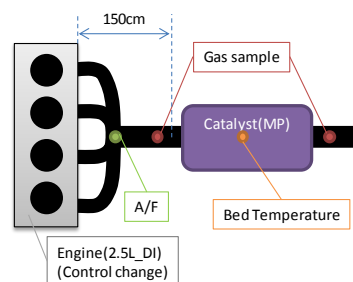


Fig. 1 Schematic of Engine Evaluation Test

2.4 Rh物性評価

(1) Rh構造の分析

Rhの構造は透過電子顕微鏡 (JEM-3000F, JEOL, ひろしま産学連携拠点) で評価した。NAP XPS評価用のRhナノ粒子は、作製時にあらかじめTEM観察用グリッドへも同時に蒸着し、そのグリッドを観察することでRhの構造を評価した。

(2) Rh表面状態の分析 (NAP XPS分析)

NAP XPSの実験は、高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・放射光科学研究施設 (Photon Factory) BL-13Bにおいて、慶應義塾大学との共同研究として行った。ガス組成をTable 2に示す。試料を各初期状態に前処理した後、ガスを流通させ、その後2.5℃/分で昇温しながらNAP XPSによりRh 3dピークを分析した。反応後のガス組成の分析は質量分析計によって計測した。

Table 2 Model Gas Composition (NAP XPS)

Condition	Initial	Concentration (%)		
		CO	NO	O ₂
O ₂	Rh metal	0	0	100
CO	Rh oxide	100	0	0
λ=1		62.5	12.5	25

3. 実験結果

3.1 触媒性能評価結果

Fig. 2にRh触媒の浄化特性評価結果を示す。エミッション性能指標の1つであるライトオフ性能 (NOを50%浄化した時の温度) では、λ=1は164℃であるのに対して、Lean①～④の前処理を行うことでλ=1に比べて19～42℃悪化しており、処理温度が高く、酸素濃度が高いほど性能が低下していることが分かった。

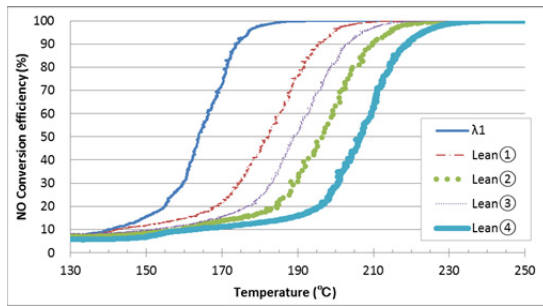


Fig. 2 Result of the Catalytic Performance Evaluation

3.2 Rh構造分析結果

触媒の浄化性能を向上させる手法として活性種である貴金属のナノ粒子化がある。これは、高い表面積と構造的・電子的に高活性なことを利用したものである。Fig. 3(a)にRh担持 Al_2O_3 のTEM観察像を示す。今回評価に用いた触媒もRhナノ粒子であり、球状で平均粒子径は2.0nmであった。このRhナノ粒子におけるガス成分の吸着・脱離・反応現象を正確にとらえるため、Rhナノ粒子をSi基板に蒸着したものを作製した。Fig. 3(b)にTEM観察用にグリッド上に蒸着したRhナノ粒子のTEM観察像を示す。触媒中Rhと同様に球形で平均粒子径は2.7nmであり、Rhナノ粒子としては同様な構造的・電子的性質が得られると考え、NAP XPSのサンプルとした。

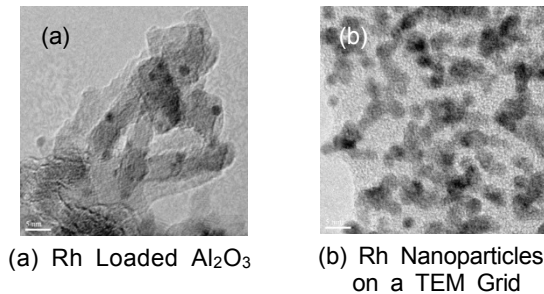


Fig. 3 TEM Images

3.3 Rh表面状態分析結果

(1) 酸化挙動の解析

3.1の結果から、Rh表面酸化状態と浄化特性の相関を明確にするため、Table 2の O_2 の条件下でNAP XPSで行った。

Fig. 4は各温度において得られたRh 3dスペクトルを示す。Fig. 5はそれを等高線で示したもので、ピーク強度を規格化し、図右のカラーバーに示すように存在割合を0~100%で色分けした。室温ではおよそ307.3eVに金属Rhに帰属されるピークのみが見られた。酸素中で昇温していくと、等高線の変化から、150°C付近から270°C付近まで徐々に金属Rhが減少、308.3eVの酸化Rhに帰属されるピークが増加し、酸化Rhの割合が高くなった。その後

400°Cまで変化が見られなかった。この結果から、性能評価の前処理Lean①~④において、Rhの表面が酸化していると考えられる。

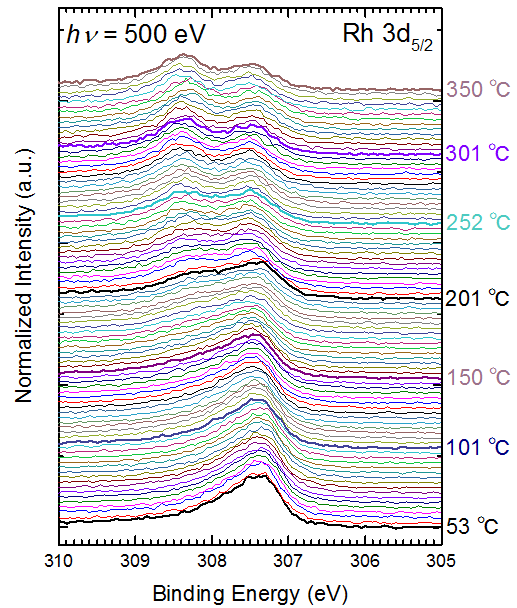


Fig. 4 XPS of Rh 3d Under Oxidation

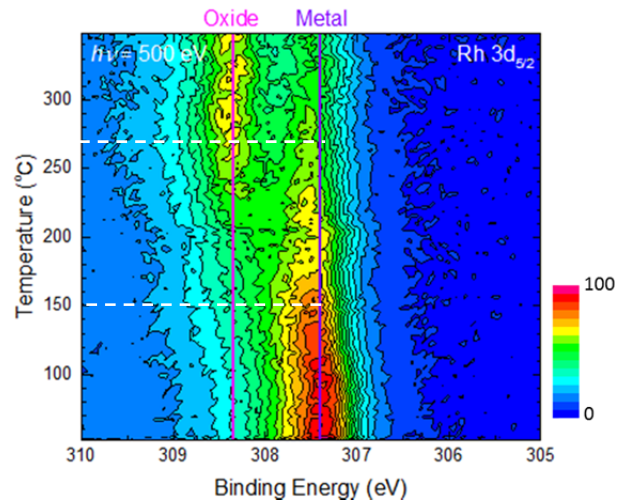


Fig. 5 XPS of Rh 3d with Contour Line Under Oxidation

(2) Rh表面酸化の還元挙動の解析

表面酸化し触媒浄化特性が低下したRhを還元することで性能を回復させる制御を検討するため、Table 2のCOの条件下でRh表面状態分析をNAP XPSで行った。結果をFig. 6に示す。室温では表面酸化状態を示しており、CO中で昇温していくと150°C付近から徐々に金属Rhが増加し、200~230°Cにかけて還元が急速に進行し、250°C付近で完全に金属Rhへ変化した。

次に、酸化成分と還元成分のモル比を1にした $\lambda=1$ の条件下でRh表面状態分析をNAP XPSで行った。結果をFig. 7に示す。室温では表面酸化状態を示しており、 $\lambda=1$ の

ガス中で昇温していくと、等高線の変化から、200℃付近から金属Rhへの変化が始まり、250℃付近で大部分が金属Rhへ変化した。COガス単独での還元と比較すると、還元開始温度は異なるものの金属Rhへ変化する温度は大差なかった。以上のことから、ガス組成の違いによって表面反応過程に違いがあると考えられる。

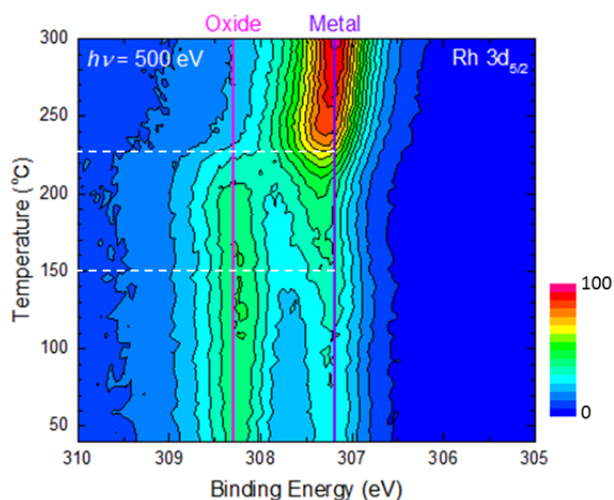
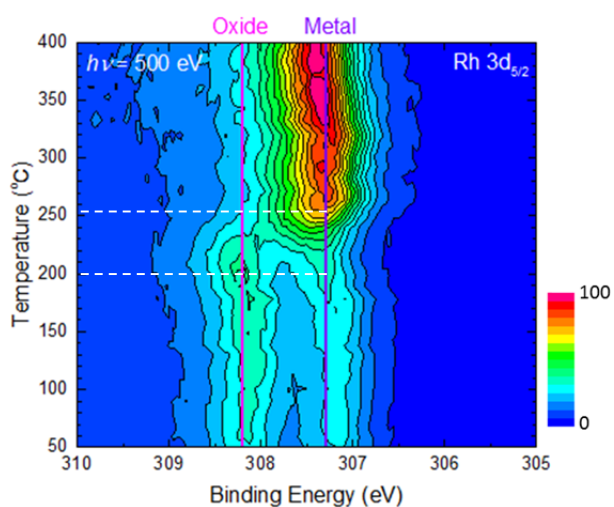


Fig. 6 XPS of Rh 3d Under CO Reduction

Fig. 7 XPS of Rh 3d Under $\lambda=1$ Condition

更に詳しく反応過程を解析するため、Fig. 8にN 1sスペクトルを、Fig. 9に同時計測した反応後のガス組成分析結果を示す。Fig. 8において、室温で403.5eVにNO₂に帰属されるピークが観測された。これはNOが吸着して表面酸素と相互作用してできたものである。等高線の変化より、NO₂は200℃付近で脱離し、その後230℃付近から397.5eVに原子状Nに帰属されるピーク及び400eVにNOに帰属されるピークが現れた。原子状Nは金属Rh上でNOが解離することによって生じると考えられる⁽⁵⁾。またFig. 9において、CO₂の生成が200℃付近から始まっており、反応中NAP XPSでCOの吸着はほとんど見られなか

った。また、250℃付近からN₂強度がわずかに上昇し始め、350℃付近からN₂が明確に生成し始めた。以上のことから、COと酸化剤であるNOとO₂が共存する $\lambda=1$ 条件では、COの吸着サイトをNO₂が占有してしまうため還元が進みにくい。NO₂脱離後CO吸着が可能となりRhの還元が進むとNOの解離吸着や分子吸着が起これ、N₂が生成すると思われる。

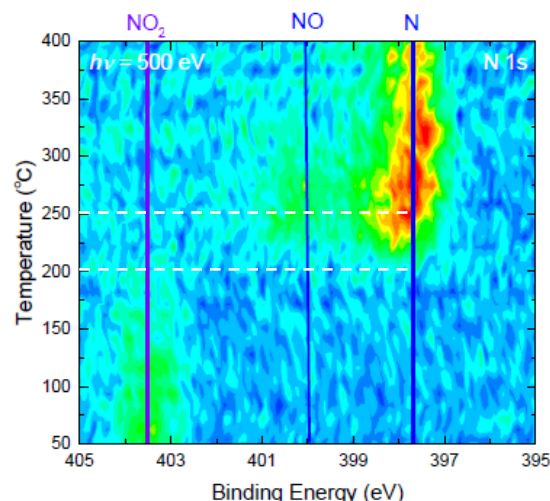
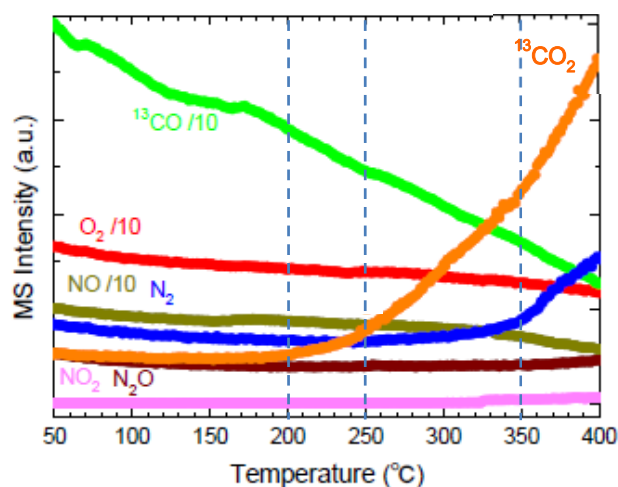
Fig. 8 XPS of N 1s Under $\lambda=1$ Condition

Fig. 9 Profiles of Gas Components

以上の結果から、表面酸化Rhを低温より効果的に還元するには、温度を上げてNO₂を脱離させる、または、含有NOをできるだけ少なくすることが有効であると考えられる。現行主流の三元触媒は400℃以上で使用されていることから、後者が有効であると思われる。

3.4 エンジンを用いた効果の確認

3.3で得られた結果をエンジンを用いて検証した。運転はTable 3に示す条件で行った。安定化前処理、酸化処理の後、還元は従来制御条件：空燃比13.3及び新制御条

件：空燃比14.7+低濃度NO_xで評価を行った。

Fig. 10にNO_x及びO₂の触媒前後の分析連続波形を示す。12.5秒付近の縦線は、通常制御への切り替わりを示している。従来制御では触媒内の酸素は消費するものの、NO_xが浄化できていないのに対し、新制御では触媒内の酸素を消費させつつ、NO_x排出量を低減することができた。通常制御への切り替わりまでのNO_x排出量積分値をFig. 11に示す。新制御では従来制御に比べ約20%のNO_x排出量を低減させることができた。

Table 3 Engine Evaluation Condition

	Pretreatment	Oxidation	Regeneration	
			conventional	trial
Bed temp (degC)	400			
λ	1	1.8	0.9	1
O ₂ conc.(%)	0.56	11.21	0.27	0.44
NO _x conc. (ppm)	2351	1072	926	193
SV (1/h)	65000	94000	65000	65000

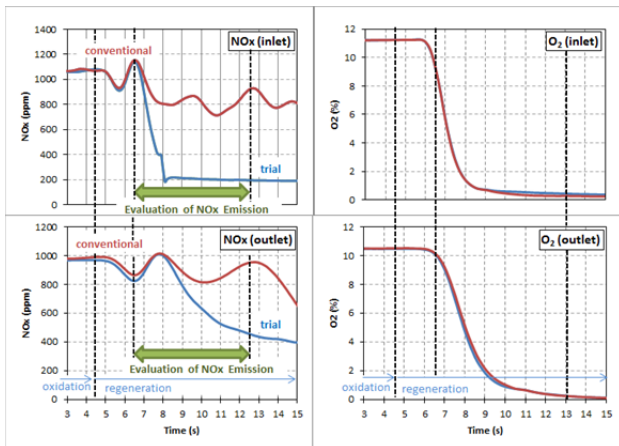


Fig. 10 Profiles of NO_x and O₂ Concentration at Inlet and Outlet

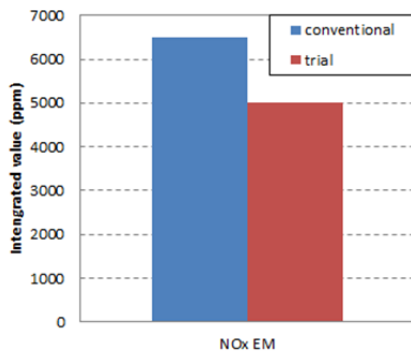


Fig. 11 NO_x Emission at Engine Evaluation

4. まとめ

反応中のRh表面状態をNAP XPSでその場分析することで、性能との関連性が明らかとなり、触媒特性を最大限発揮させる制御条件の提案が可能となることが示唆された。具体的には、従来制御では、酸化したRhの性能回復に $\lambda < 1$ のガスを用いてきたが、ガス中のNO_xを低濃度にする事で $\lambda = 1$ のガスでもRhの性能回復が可能であることを見出した。

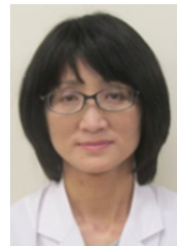
今後は更に、得られた結果の定量的解析手法を確立し、エミッション制御モデルの確立に取り組む。

本論文は、慶應義塾大学理工学部 近藤寛教授との共同研究成果を含む。

参考文献

- (1) R. H, Thring : SAE Paper 892068 (1989)
- (2) 畑村耕一：HCCI (予混合圧縮着火) ガソリンエンジンの可能性と課題, Transactions of Society of Automotive Engineers of Japan, 36 (2), 13, 2008-03-15
- (3) 松村益寛ほか：三元触媒における初期還元がRhに及ぼす活性化メカニズム, 第117回触媒討論会, 20160321
- (4) 羽田正明：ロジウム-担体相互作用を利用した省ロジウム三元触媒の開発, Catalyst 54 (3), 167, 2012-04-10
- (5) H. Kondohほか：Surface Science, 615, 33 (2013)

■ 著 者 ■



國府田 由紀



住田 弘祐



兒玉 潤



村上 浩



竹林 広行

19

「魂動デザイン」実現に向けたプレス成形安定化の技術開発 Technical Development of Press-Forming Stabilization for “KODO” Design Realization

長澄 徹侍*1 安楽 健次*2 中山 光一*3
Tetsuji Nagazumi Kenji Anraku Koichi Nakayama
岡田 又治*4 浜口 照巳*5 坪根 健児*6
Mataharu Okada Terumi Hamaguchi Kenji Tsubone

要 約

まるで命が宿っているような、美しい表情を放つ、それが「魂動デザイン」。当社はお客様に、このデザインが発する生命感から、愛馬と騎手と同じような特別な絆を感じていただきたいと考えている。新世代デザインは、この生命感をキャラクターラインの抑揚や連続した陰影形状で表現していた。次世代デザインは、日本の美意識を際立たせた、限りなく虚飾を削ぎ落としたシンプルなフォルムである。その滑らかにつながる面の流れは、クルマに光が当たった際のリフレクションの移り変わりが、より自然な生命感を表現しているように感じる。本稿では、このアートともいえる滑らかな面の流れを、プレス成形部品で実現するために、金型の製作とプレス成形工程の最適化を行った取り組みについて紹介する。

Summary

Express beauty like a living creature. This is the concept behind “KODO design”. Vitality created by the design brings a special bond same as the relationship between horse and rider. The design of new generation expressed this vitality by dynamics of character line or continuous shadow shape. Design in next generation represents distinct Japanese aesthetics in extremely lean and simple form. The surface flow to connect its smoothness with changes in reflection by the car to be lightened expresses vitality more naturally. This report introduces the activity to realize the most optimal method of die manufacturing and press forming process to realize this smooth flow of surface like art.

1. はじめに

当社は「魂動デザイン」により、見る人の心を揺さぶるような、命あるモノとしたクルマ造りを目指している。「魂動デザイン」を実現するために、開発から生産領域まで強いこだわりを持ち、日々技術開発に取り組んでいる。当社のプレス金型製作部門も、「魂動デザイン」の実現に注力した取り組みを継続的に行っている。「魂動デザイン」は生き物が見せる一瞬の動きや美しさを究極の姿と考え、連続した陰影形状やキャラクターラインにより、その生命感を表現したものである(Fig. 1)。随所にデザイナーの想いが込められており、その想いまでも量産化していくことが、使命ととらえている。

このデザインのこだわりは常に進化を続けており、それに伴いプレス成形の難易度も上がっている。



Fig. 1 “KODO Design”

現状技術でどこまで形状を実現できるか次世代デザインを模したドア金型を製作し、プレス成形したところ、

*1~3 ツーリング製作部
Tool & Die Production Dept.

*4~6 車体技術部
Body Production Engineering Dept.

一部デザイン面の精度でCADモデルに対しコンマ数ミリの乖離が発生した。この状態では次世代デザインで重要となる光が当たった際のリフレクションに、ばらつきや折れが発生し、生命感が表現できないという大きな問題が判明した。次世代デザインのリフレクションを実現するためには、現状より30%の寸法精度向上が必要であった。この問題を解決するため、外板ボディーの製作プロセスに対し、前後工程の設計から量産までを見据えた技術改善を進めることにした (Fig. 2)。

本稿では、デザイン面成形時の初工程であり、外板ボディーの約7割の形状を決定しているドロー工程に着目した事例を紹介する。

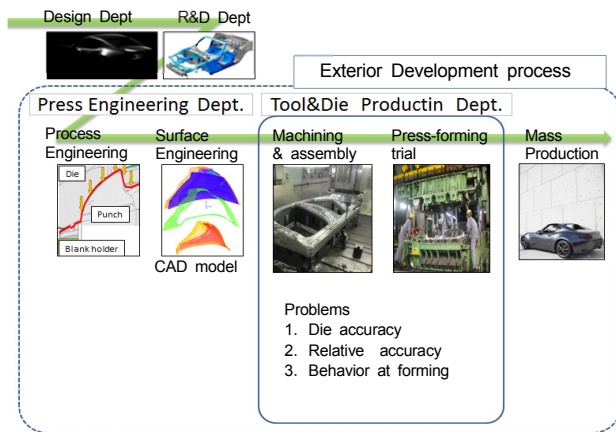


Fig. 2 Production Process of Press Die

2. 次世代「魂動デザイン」実現の課題

プレス加工のドロー工程の成形過程をFig. 3に示す。まず、①板材を金型にセットしスライドを降下、②上型とブランクホルダーにて板材をホールドして張力を加える。③その状態で上型、ブランクホルダーとも降下し、④下死点で成形完了となる。成形中の板材は、ホールド状態による張力と成形Rによる曲げ応力が加わることでより塑性変形し製品寸法が定まる。

デザイナーの意図どおりの製品パネルを成形するためには、金型自体を高精度に造り、その金型形状どおりに成形することが必要である。そのため、プレス金型製作部門の課題は大きく分けると次の3点である。

- 1) 単体精度向上 (機械加工, 手仕上げ精度)
- 2) 相対精度向上 (組み付け, 上下合わせ)
- 3) 成形時の挙動制御 (金型, 板材)

これらの課題を解決する上でプレス金型製作部門では、2010年より品質工学手法を活用している⁽¹⁾。発生する問題に対して、影響を与えている因子が何かを明確化し、よりロバスト性の高い条件を導くことで、デザインに追従できる製作技術の構築をねらっている。

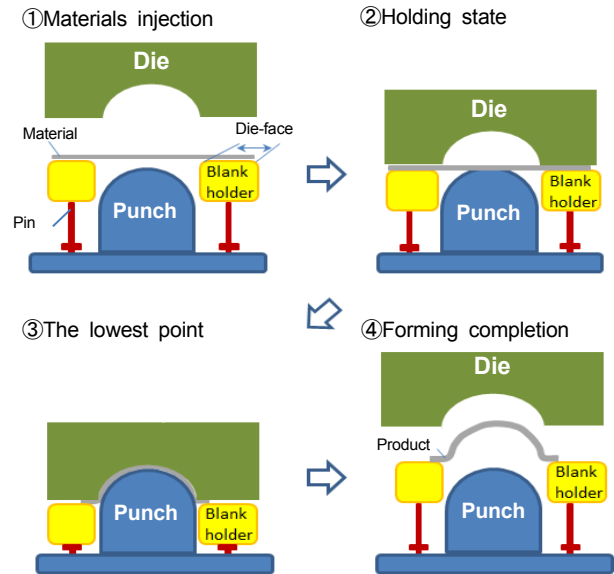


Fig. 3 Forming Process of Drawing Mold

初めに、1) 単体精度と2) 相対精度に対し、機械加工、手仕上げの金型造り込みによる精度向上や組み付け精度を向上させる取り組みを行い、静的状態における要求精度に対して効果を出してきた⁽²⁾。次に、3) 成形時の挙動制御に取り掛かった。製品パネル成形中の金型は数百トンという力が加わり変形が生じている。そのため、静的状態で保証した精度とは異なり、上下型のクリアランス量に変化が起こる。この差が起因して、板材の張り出し量にばらつきが発生し、製品パネル精度の悪化につながっていた。この挙動はプレス設備の機差や傾きの影響が強く、容易に解決できない。

一般的に板材の張り出し量をコントロールするには、絞りビードにて張力を加えるが、クルマの外板ボディーなど深さが必要なものは、絞り成形と張り出し成形を複合して成形している。絞り成形は2点の力 (静止摩擦力, 動摩擦力) を考慮する必要があり、外乱の影響を受けやすい⁽³⁾。そこで、品質工学手法を用いて上記の外乱影響があったとしても、実機での流入量のコントロールが正確に行えるロバストな成形ができないか追求することにした。

3. 品質工学を用いた課題解決

3.1 ビッグデータの活用

流入量のコントロールを行うためには、設計した絞りビードの張力が安定的に発生できる状態を決める必要があると考え、これを評価できる品質工学での目的機能を検討した。張力はブランクホルダーのはたらきにより増減している。そこで、この抵抗値を高める方法をまとめた (Fig. 4)。抵抗値の決定には、「しわ押さえ面抵抗」「ビード引き抜き抵抗」「ダイR通過抵抗」の3つがある。

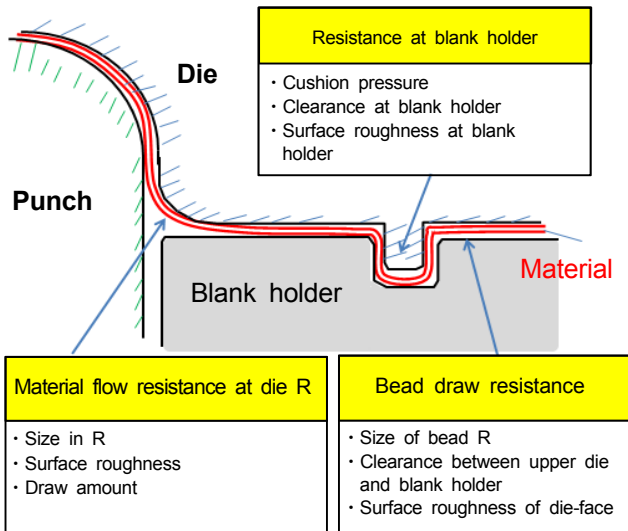


Fig. 4 Factor about Resistance Value of Die-Face

これを考慮し入力信号は、この抵抗値3つを同時に変化させることが可能な因子として、「しわ押さえ面の圧力」とした。このしわ押さえ面の作用の大小に応じて、ブランクホルダー上の「板材の残量」が変化するため、これを出力特性とした。実際に、この因子間で比例関係があるか、予備実験で確認した結果、成立することが分かった (Fig. 5)。

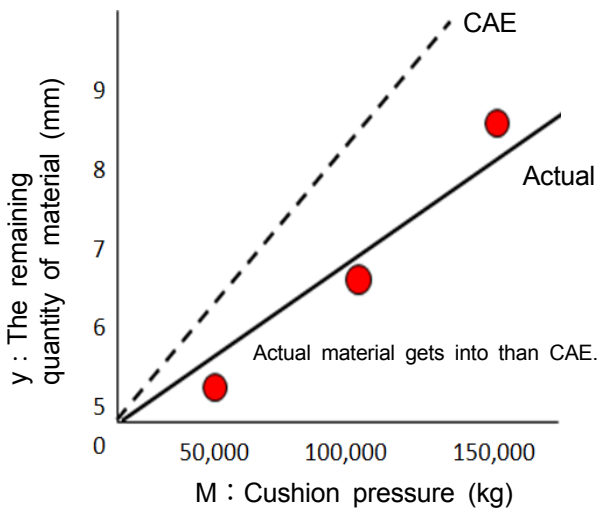


Fig. 5 Pilot Study Result

この予備実験の際に、成形中に測定可能な特性を15項目全315データ取得した。これを統計解析ソフト「R」(オープンソース)をベースとする内製ソフトの「グラフ構造化分析」(以下GSA)を用いて、各因子の相互依存関係を構造化した (Fig. 6)。

GSAとは確率論(ベイズ推定)とグラフ理論を融合したビッグデータ解析手法の1つである(4)。これは因子間の確率分布構造を推定して、交わりの少ない階層表現に自動的に最適化し、可視化するソフトである。メリットとして膨大なデータから各因子間の関係性が把握でき、相関のある新たな影響因子も見出すことができる。

Input : The remaining quantity of material

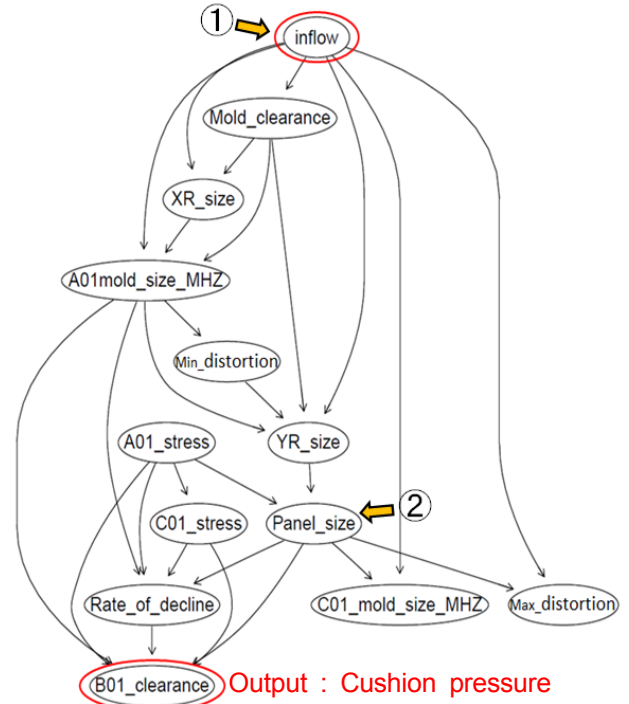


Fig. 6 GSA Result in Press Formation

GSAの結果より次の3点が判明した。

- ① 考察により求めた目的機能と同様にGSAのイン・アウトに「しわ押さえ面の圧力」と「板材の残量」が導き出された。この目的機能を用いた評価の妥当性が立証された。
- ② 板材の残量は、しわ押さえ面の圧力の制御によって変化する。その関係性の途上に製品パネル精度が存在するため、残量のコントロール精度と製品パネル精度に相関があることが分かった。
- ③ 関連性の大きい項目について実データを調査した結果、ブランクホルダーの剛性不足が判明した。これは、関係性の近いクッションピン精度にて操作することが可能であり、重要な制御因子を発見することができた。

3.2 バーチャルパラメータ設計による成形条件最適化

バーチャルパラメータ設計とは、品質工学の一つの手法である。従来の実機検証やCAE検証と異なり、検証結果を人間(エキスパート)が予想し、この知見を元に仮

想的に検証結果を算出するものである。この手法を用いた理由として、制御因子に設計要素を取り入れた際に、実験ごとに金型の形状加工が必要となり、膨大な実験費用が必要となるためである。

品質工学での制御因子を選定する上で、社内エキスパートによる因子選定に加え、GSA結果から判明したことを織り込んだ。まず、社内エキスパートを、成形技術、形状設計、製作技術の領域から計5名選び、流入をコントロールできる影響因子を15個列挙した。その中から影響の高い因子を7つ選別した。加えて、GSA結果 (Fig. 5) から1因子を追加して8因子を選定した (Table 1)。

Table 1 Control Factor, Error Factor

	Control factor	Present condition		
		good	bad	
		revel1	revel2	revel3
A	Bead R size	small	large	
B	Face roughness of the blank holder	small	middle	large
C	Clearance of the blank holder	small	middle	large
D	Relative accuracy of the blank holder	methodA	methodB	methodC
E	Inflow balance	methodA	methodB	methodC
F	Material touch area	methodA	methodB	methodC
G	Cushion pin arrangement	methodA	methodB	methodC
H	Formation oil	methodA	methodB	methodC

誤差因子は、量産条件でもロバスト性の高い成形条件を算出することをねらい、「プレス設備の機差」と「板材の降伏点ばらつき」を選定した。

次に、成形技術、形状設計、製作技術の領域から各3名の合計9名の社内エキスパートでバーチャルパラメータ設計を行った。その際に、8因子と3つの水準を変更したプレス成形のイメージが困難だったため、制御因子の項目での影響度を数値にした。その後、水準のふり幅に応じて効果の度合いを数値にした。0~9点で数値が小さいほど張力が大きいとして評価し、それらの積を求め、L18直交表に割り付けた。結果を望小特性SN比で計算した (Fig. 7)。

要因効果図から次の4点判明した。

- ① 当初は設計系 A, C, E, F の因子が特に効果が大きいと予想していた。しかし、製作系 D や、設備系 G の因子も効果的であった。金型挙動を制御できる因子として影響度が高いと考えた。
- ② F については各エキスパートとも傾向が一致しなかった。これは D の「しわ押さえ上下精度」の影響を考慮するかどうかで結果が変わっている。関係性が不明確なので実機調査が必要と判断した。
- ③ H については変化が発生することは予測しているが、安定化にどの程度効果があるか判断しきれなかった。

水準のふり幅をもっと大きくすることで効果を明白にできたと考える。

- ④ 9名全員の利得平均は 2.31db (1.81~2.54db) であり、形状設計者は高めの利得となった。これは設計系因子の効果を数値的に把握し、バーチャル設計時の採点を正確に行えたと推測した。

以上4点を踏まえ4因子 (C, D, E, G) を変更し、最適条件を A2, B3, C1, D1, E1, F2, G1, H2 とした。

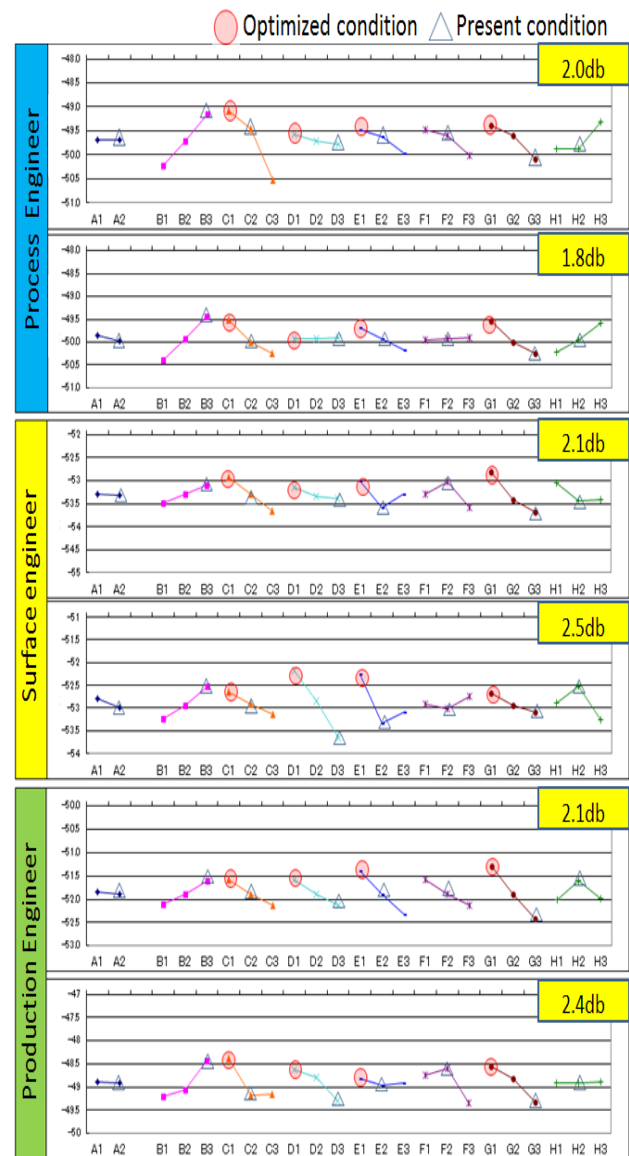


Fig. 7 VPD Result

4. 効果の確認

バーチャルパラメータ設計で求めた最適条件を実験金型にて効果の確認を行った。確認方法はFig. 8の油圧プレス機で実施した。まず金型に板材を投入し、プランクホルダーでホールドする状態まで、上型スライドを降下

させる。その時にしわ押さえ面上の板材端部にケガキ線を引く。次に下死点までスライド降下させ板材の端部とケガキ線の距離をデジタルノギスで測定し、板材の残りを求めた。実機の結果を次に示す (Table 2, Fig. 9)。

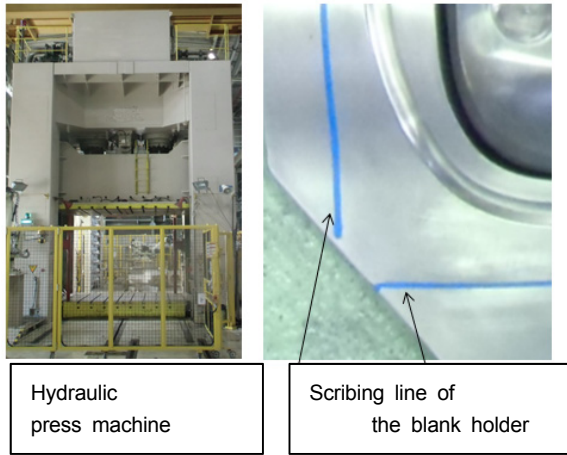


Fig. 8 Experimental Landscape

Table 2 Experimental Profit

SN ratio	Vertical Parameter			Actual
Present condition	-50.68	-54.75	-50.78	-32.86
Optimized condition	-48.63	-52.14	-48.52	-30.80
Gain	2.05	2.61	2.25	2.06
	Process Engineer	Surface Engineer	Production Engineer	

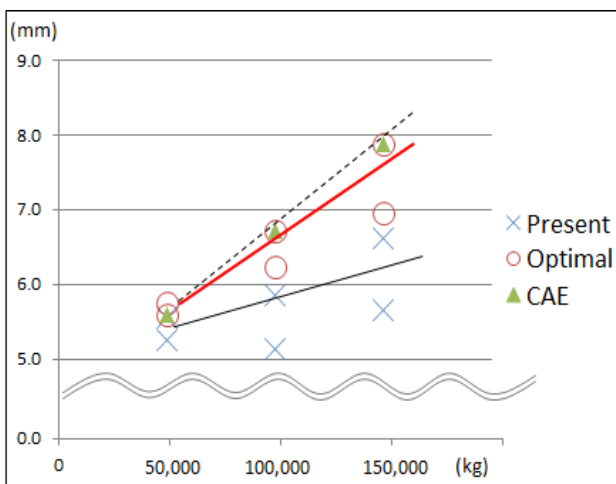


Fig. 9 Real Trial Result

バーチャルパラメータ設計で算出した平均値2.31dbに対し、実機の利得は2.06dbと同等となり、再現性があると判断した。現行条件に比べ製品パネルの成形安定性が38%向上する結果となった。実際の板材端部の比較を Fig. 10に示す。

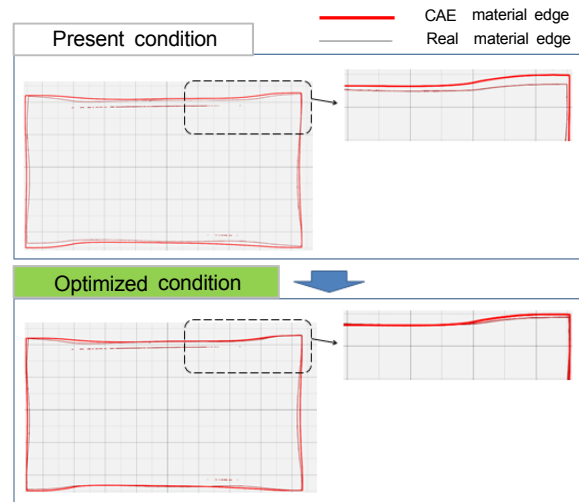


Fig. 10 Change in Material Remaining Amount

現行条件はホールド状態から下死点までで板材が多く入る傾向だった。最適条件でしわ押さえ面の精度対策を行うことで、流入量が少なくなった結果、張りが強まった。CAEで算出した形状精度に近い製品パネルを取得することができ、現行条件に対し寸法精度が32%向上した (Fig. 11)。

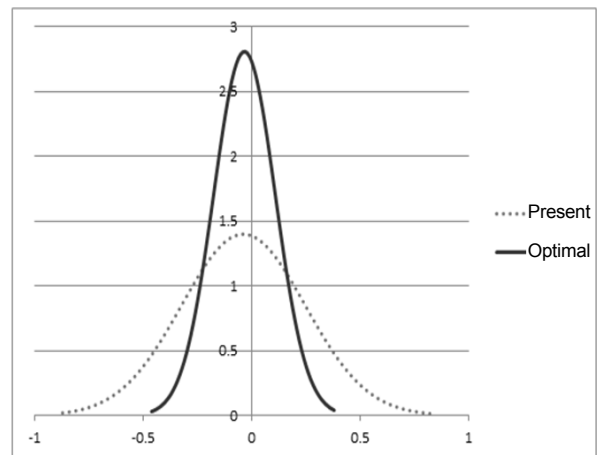


Fig. 11 Regular Distribution Map of Product Precision

同時に張り出しが強化された影響で、ブランクホルダーでホールド時に発生していた折れしわの外観不具合も解消できた (Fig. 12)。

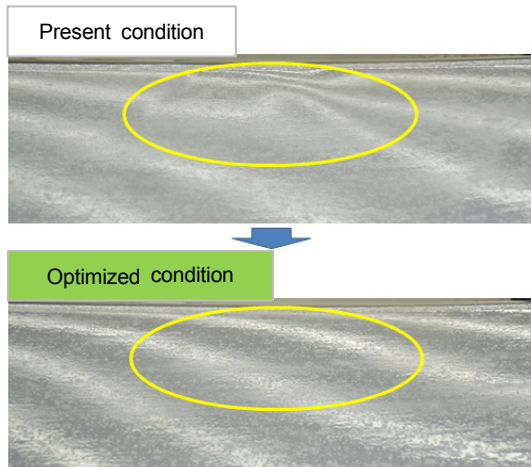


Fig. 12 Hold Cancellation of Wrinkles

この製品パネルに対しリフレクション品質を確認したものを下記に示す (Fig. 13)。形状精度が向上し、ゼブララインもCADモデルに近づいていることが分かる。結果として、次世代デザインの重点ポイントである形状面の連続性が格段に高まり、リフレクションによる生命感の演出が実現可能となった。

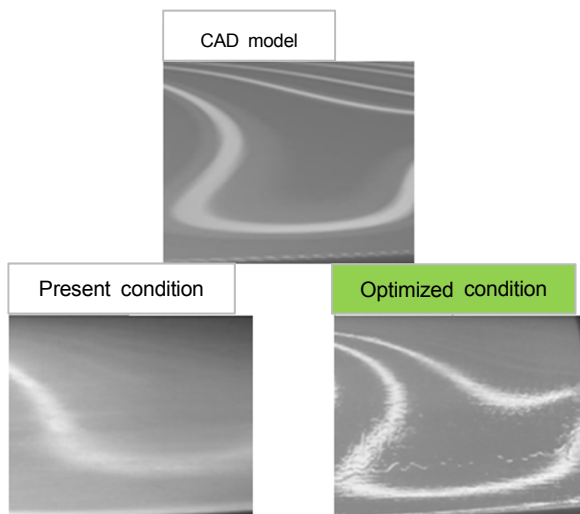


Fig. 13 Comparison of Reflection Quality

5. まとめ

本取り組みにより次の3点を達成した。

- ① 金型の挙動を制御しうる、影響因子を設定しロバスト性の高い成形条件を算出することができた。結果として、実機で流入量のコントロールが正確に行える条件を見出し製品パネルの寸法精度 32%向上が実現できた。
- ② ビッグデータ解析手法を因子選定の際に活用する新しいアプローチ方法を提案できた。結果、エキスパートの知見外の新しい制御因子を見出し、本取り組みの重

要な因子の1つを選定できた。

- ③ バーチャルパラメータ設計を取り入れることで、実機検証を必要としない「試作レス」で成果を出すことができ、量産準備期間の短縮と検証費用 85%の削減につながる事が分かった。

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

参考文献

- (1) 長澄徹侍ほか：バーチャル設計を用いた金型の形状合わせ技術の向上，第 25 回品質工学研究発表大会予稿集，pp. 194-197(2017)
- (2) 中原寛海ほか：平面高精度加工技術の確立，第 24 回品質工学発表大会予稿集，pp. 290-293(2016)
- (3) 吉田弘美：技術大会シリーズプレス加工大全，井水治博，pp. 75-76(2015)
- (4) 日本規格協会：標準化と品質管理 Vol. 69 No. 6，pp. 16(2016)

■ 著 者 ■



長澄 徹侍



安楽 健次



中山 光一



岡田 又治



浜口 照巳



坪根 健児

20

薄肉ダイカストの事前検証技術開発 Development of Computer Aided Engineering Technology for Thin Wall Die-Casting

竹村 幸司*1 亀井 克則*2 米澤 英樹*3
Kouji Takemura Katsunori Kamei Hideki Yonezawa
菅谷 智*4 河野 一郎*5 達谷 正勝*6
Satoshi Sugaya Ichiro Kouno Masakatsu Tatsutani

要 約

マツダは「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させてきた。ハイプレッシャーダイカスト（以下、ダイカスト）の領域では、その最重要課題を「軽量化」と考え、鑄造工法とCAE技術の革新を進めてきた⁽¹⁾⁽²⁾。ダイカスト金型設計では、製品肉厚の薄肉化を軽量化の手段として、積極的にコンカレントエンジニアリング（以下、コンカレント）で形状提案してきた経緯がある。

次世代の商品では、従来を超える大幅な軽量化を実現するために、形状が成形できる限界肉厚への挑戦という野心的な目標を設定した。そのため、薄肉化により懸念される鑄造品質である、湯まわり性（溶湯が健全に製品に行き渡るか）をモデルベースで検証することが不可欠であると考えた。

Summary

Based on the "Sustainable Zoom-Zoom", Mazda achieved both driving pleasure and environmental performance at a high level. For high pressure die-casting, weight saving is considered to be essential, and the innovation of the die-casting method and CAE technology have been focused on. In die-casting die design, as a method of weight saving for making thinner plate of product thickness, we have proposed the shape of concurrent engineering.

In order to realize drastic weight saving more than normal in next product, we determined an ambitious target which is a challenge to limit thickness that the shape can be formed. Therefore, it is inevitable to verify molten metal flow (molten metal flows into the product completely) which is a concern of casting quality by making thinner with model base.

1. はじめに

車両の軽量化は、運転操作のダイレクト感向上とともに燃費の改善に貢献するため、鑄造部品の開発において重要課題として取り組んでいる。そのために、製品設計段階から鑄造解析により製品機能と品質の両立可能な駄肉削減をコンカレントで提案している。

更なる製品軽量化のために、製品の薄肉化を進めている。その理由は、薄肉前提で製品を設計することによって、局所的ではなく全体で軽量化効果を刈り取れるからである。しかし、その反作用として健全な溶湯が製品に行き渡らず、“湯じわ”や“湯境（ゆざかい）”と呼ばれる外観不良の総称である「湯まわり不良」に直結する

リスクをあわせもつ。したがって、製品の薄肉化と湯まわり不良をブレイクスルーするには、湯流れ解析を従来以上に活用することが求められる。

本稿では、製品機能と生産性を両立する世界一軽量なダイカスト製品を、実現可能な限界薄肉の鑄造性を事前検証できる技術の確立を目指した。ダイカスト鑄造は、数十ミリ秒間で溶湯を製品形状に流し込むため、薄肉形状の成形に有利な工法である反面、検証技術の確立で不可欠な湯流れ（溶湯が金型内を流動する現象を指す）の実態を把握する技術的難易度が高い。そのため、ゼロベースで技術的難易度を高めている要件を洗い出し、金型設計技術で解決すべき課題を明確にする。

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

*6 大同特殊鋼株式会社 技術開発研究所
Corporate Research & Development Center,
Daido Steel Co., Ltd.

2. ダイカスト湯流れの可視化

2.1 湯流れ可視化の取り組み

溶湯流れの実態把握は、旧来よりさまざまなアプローチで取り組まれている。それは、流動現象を視覚的にとらえる手段（可視化）と、流動経路に仕込んだセンサー類で間接的に検出する手段（点灯法）に大別できる。

可視化は流れを直接観察できる反面、実際の casting と異なる何かを犠牲にするデメリットが発生する。点灯法は、溶湯流路に配置したセンサー類（例えば、熱電対）から得られる信号がアウトプットであり、溶湯流れの速度や方向を測定結果から類推する間接的な検出手段である。次節では、ダイカストの湯流れを可視化するにあたり、過去の可視化事例を交えながら取り組み課題を明確にする。

2.2 ダイカスト湯流れ可視化に向けた課題

砂型を用いた重力 casting では、型の天井面を成形する砂型を取り外すことで、湯流れを可視化することができる。Fig. 1は、シリンダーヘッド砂型の一部を取り去り、溶湯の充填状態を可視化した事例である。しかし、ダイカストでは高速射出で溶湯を流し込むため、キャビティー（型内の閉空間を表す）の露出は溶湯が飛散する危険が伴う。このため観察面には、ガラスやアクリルといった可視化する像を阻害せずキャビティーを密閉する機能をもつ、透明な遮蔽板が必要となる。

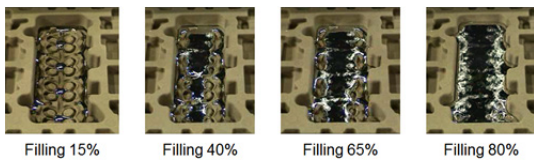


Fig. 1 Cylinder Head Experiment

Fig. 2左は、「水モデル」と呼ばれる、アクリル型に着色した水を流し、その挙動を可視化した事例である。この手法は、比較的多くの casting プロセスで採用されている。しかし、水モデルは溶湯の代わりに水を使用する都合上、温度低下による溶湯の粘度変化を再現できず、更には比重も水とアルミで異なる。ゆえに、可視化実験で取り扱う流体はダイカストで casting するアルミ材を用いる必要がある。

Fig. 2右は、黒鉛型内を流動する溶湯を、X線で可視化した事例である。これは、X線を透過できる材料（一般的に、黒鉛）を型材に使用することで、流体として溶湯が使用でき、アルミ湯流れの可視化実験に広く取り入れられている⁽³⁾。しかし、黒鉛は熱伝導率が一般的な金型材（工具鋼）の約3倍となるため、流動中に溶湯から型への抜熱量が大きくなり、溶湯の流動性を正しく評価でき

ない。このため、湯流れ中の金型-溶湯間の熱マネジメントの観点から、型材には工具鋼を使用する。

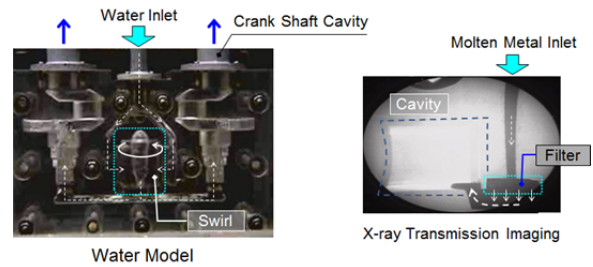


Fig. 2 X-ray Transmission Imaging

既報の事例⁽⁴⁾では、上記条件を満たしたテスト casting 機に、アクリル窓を設置して金型背面より流動を観察している。射出駆動にサーボモーターを採用することは実験の再現性が高く、比較的簡略な機構でテスト casting 機が設計できる。しかし、射出速度を十分に上げられないためゲート速度やキャビティー形状の自由度に制約が伴う。また、サイクリックに casting して金型温度上昇を実体に模した形で再現を試みたくても、型締め・型開きの機構面の煩雑さからテスト casting 機は不向きである。

この課題を解決するためには、量産 casting で用いるダイカストマシンや補助材（チップ潤滑や離型剤など）を使用した可視化実験が必須であると考えた。

3. ダイカストマシンでの湯流れ可視化

3.1 可視化構想の概要

一般的なダイカストマシンは型開き方向に溶湯射出や型の開閉機構、そして射出後に注湯口を押し込む casting 圧力によって、金型が開かないように保持するための丈夫な構造物（プラテン）が備わっている。このため、この方向で湯流れを撮像・記録する装置を設置するのは、制約が多い（Fig. 3）。

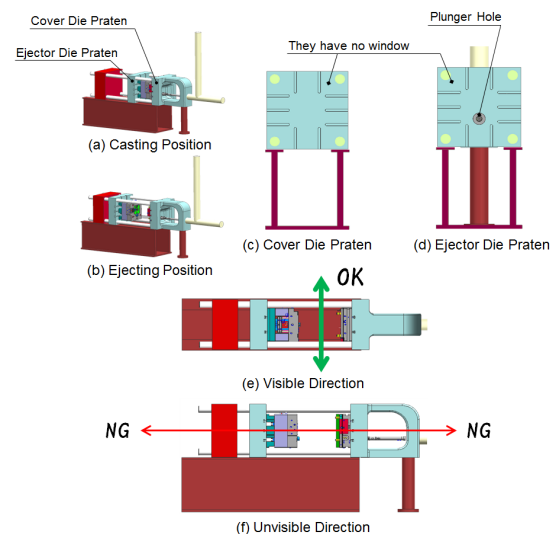


Fig. 3 Structure of Die-Cast Machine

撮像する方向に制約があるため、本稿は型開き方向に対して鉛直方向から撮像可能な金型構造を新たに考案した。可動型は、鋳造後の製品を取り出すエジェクター機構が可視化を阻害するため、可視化するための機構は、固定側に設置することとした。

Fig. 4は、固定型内に観察窓とそれに続くトンネルを設け、像を転写するための鏡面を設置する構造を示す。観察窓の寸法は102mm×86mmとした。

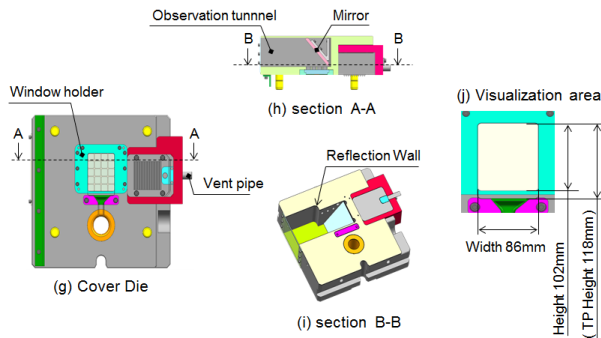


Fig. 4 Die Design for Die-cast Visualization

ダイカストを可視化する上で、照度の不足が問題となる。その理由は、数十ミリ秒間で充填が完了するダイカストの場合、ハイスピードカメラのような1000分の1秒オーダーで記録できる機器が必要となる。一般的に、そのフレームレートで撮像するには1000ルクス程度の照度が必要である。ダイカストマシン周囲の照明だけでは、金型内に掘り込んだトンネルにこの照度を確保することが困難である。

本稿は0.03秒で充填完了する試験片形状であり、湯流れ解析で分析する充填2%刻みのコマ割りという考え方の下2000分の1のフレームレートで撮像した。そのため、照度を確保するための構造を新たに考案し、可視化金型の設計に織り込んだ。光源は金型内部に設置する方法が考えられるが、光源そのものが鏡面体構造に映り込んで像を阻害する。そこで、金型外部に光源を設けて反射板によって散乱光をトンネル内で拡散させた。

観察窓材には、アクリルを採用した。可視化実験で広く用いられる石英ガラスは製作費が高く、金型の熱間膨張による破損リスクを鑑みて、消耗品であると割り切った。ただし、アクリルは溶湯からの熱によって表面が溶けだし実験の再現性が損なわれやすい。そのため、観察窓の交換によって鋳造サイクルを阻害しないように、型開き時状態で観察窓を交換できる構造とした。

また、溶湯射出時の衝撃力と鋳造圧によって、観察窓を破損させないための構造を金型設計に織り込んだ。それは、“バックアップ機構”と呼び、観察窓を格子状の柱で背面より支持する構造である。この柱は、縦・横寸法を等しくした正方形を構成し、柱の設計値と像との

関係をFig. 5に示す。

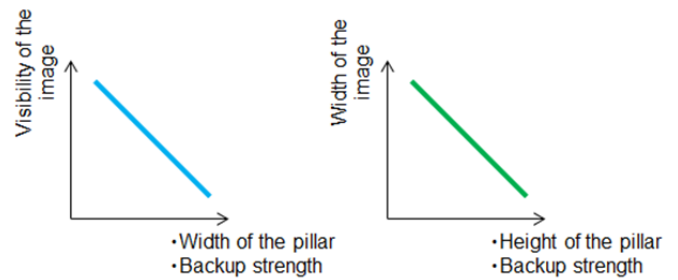


Fig. 5 Relationship of Design Parameter of Pillar and Image

柱の幅を細く設計すると、像の視認性が向上する反面、バックアップとしての強度が低下する。柱の高さは、ダイカストマシンに搭載できる固定型の厚みを最大にとり、可視窓構造部の厚みを除いた寸法で決める。柱の高さを増すとバックアップの強度が向上する反面、トンネル内に設置する鏡面の全長を短くする必要が生じる。鏡面の全長×cos45°が像の幅となるため、柱の高さを増すと像の幅が狭くなる。この関係性をFig. 6にまとめた。

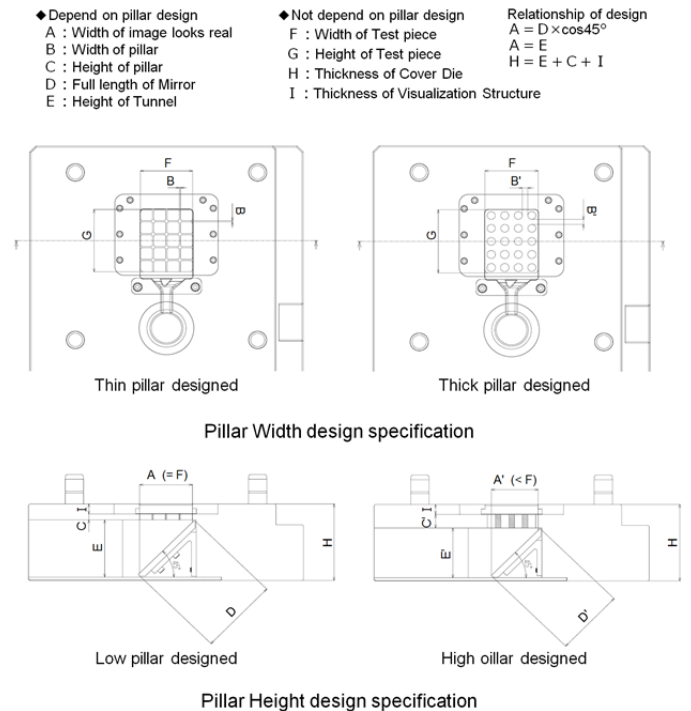


Fig. 6 Relationship Design Value of Pillar and Image (Cover Die)

以上、Fig. 5及びFig. 6に記した金型構造上の制約を満たした上で、最大限に広い像を撮るために構造解析を繰り返して、柱の設計仕様の最適解を導いた (Fig. 7)。

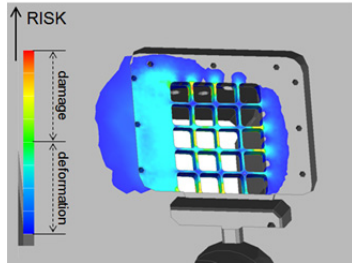


Fig. 7 Structural Analysis Results of Cover Die Receiving Casting Pressure

3.2 キャビティーの減圧

本稿ではダイカストで広く取り入れられている、真空ダイカストでの湯流れ挙動の可視化を実施する。キャビティー内の減圧は、湯流れ時の背圧影響を抑制するとともに、残存するエアや金型表面に塗布した離型剤から揮発するガスの除去を目的としている。可視化型においても、金型に減圧装置を接続し、型合わせ面にシール構造を施して、量産金型と同等の気密性を確保した (Fig. 8)。

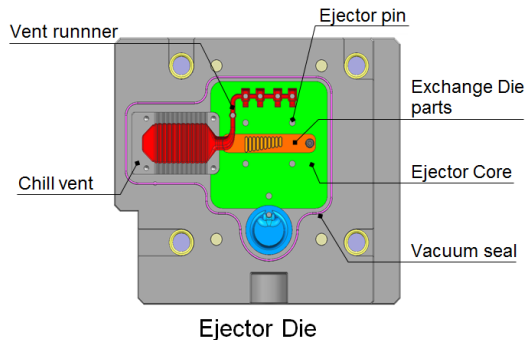


Fig. 8 Structure of Ejector Die

減圧装置は、真空ポンプ・タンク・バルブで構成され、キャビティーと真空タンク容量の比は、マツダで量産するシリンダーブロックと同じくした。また、減圧量を制御するため、圧力レギュレーターを真空ポンプとタンクの間設置した。

4. 湯流れ可視化実験

4.1 実験条件と水準

実験は、Table 1の制御因子と、水準とした。

Table 1 Experimental Conditions

Control factor	Level1	Level2	Level3
Decompression	80kPa	40kPa	atmosphere
Holding furnace temperature	720°C	670°C	
Gate speed	30m/s	50m/s	
Gate shape	Slanting	Straight	Branch
Production shape	Flat	Comb	

可視化する像の形状は、量産部品で実際に生じている流動現象を想定し、Table 1の組み合わせによってFig. 9のように再現する。

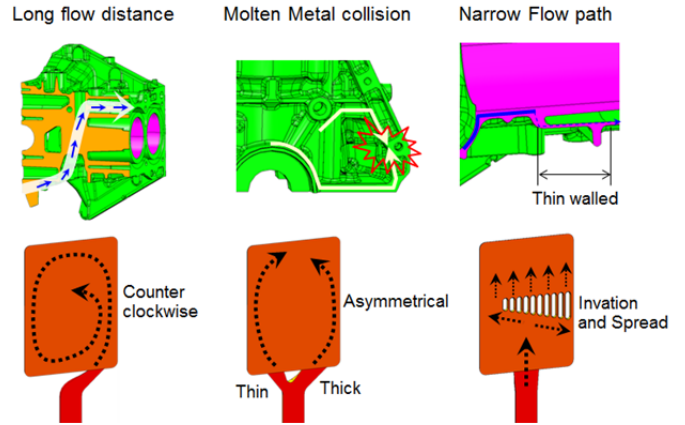


Fig. 9 Visualization Concept

4.2 湯流れ可視化実験の結果

可視化鋳造は、延べ140ショット鋳造した。代表的な撮像画像をFig. 10に示す。

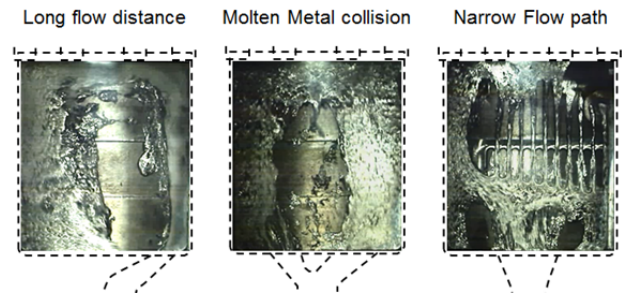


Fig. 10 Example of Visualization

なお、実験の再現性を検証するため、以下の物理量を計測したがバラツキは量産と同水準であった。

- 1) 溶湯温度 (水準1) : 720°Cねらいに対し, 722°C
- 2) 溶湯温度 (水準2) : 670°Cねらいに対し, 668°C
- 3) 給湯量 : 354±8g
- 4) ビスケット厚さ : 50.0±1.0mm
- 5) 金型温度 (サイクル内ピーク値) : 120±10°C

湯流れにおける減圧影響を表したのがFig. 11(a)である。溶湯温度は720°C, ゲートスピード50m/sで同一とし、減圧80kPaと大気圧を比較し、湯先形状に違いが出ることが分かった。減圧下では湯先が尖り直進性が高いのに対し、大気圧では溶湯の広がり大きい。これは、キャビティー内の背圧抵抗によって溶湯進行が阻害され、本来の尖り部分が左右に広げられたためと考えた。

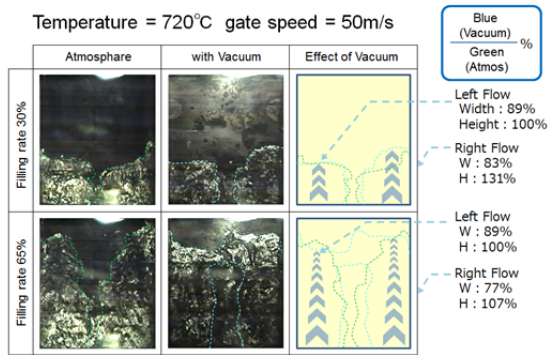


Fig. 11(a) Compare with Vacuum Effect

また、溶湯温度の影響を表したのがFig. 11(b)である。ゲートスピード50m/s, 減圧80kPaで同一とし、溶湯温度720°Cと670°Cを比較した。その結果、溶湯充填にかかる時間が溶湯温度720°Cでは0.028秒であるのに対し、670°Cでは0.044秒かかっていた。これは、温度低下によって溶湯の粘度が上がり流動しにくくなったためと考えた。

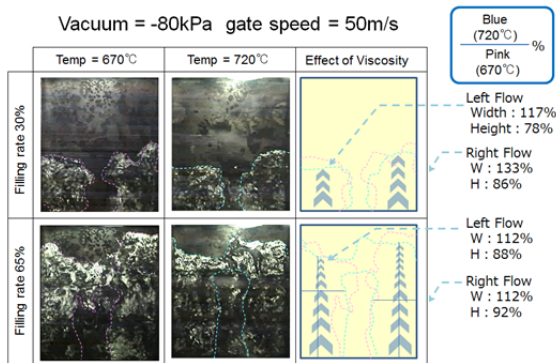


Fig. 11(b) Compare with Viscosity Effect

以上により、湯流れの“像”をとらえたことで、像を形成するための条件面が非常に重要であることが分かった。ゲートスピードは当然のことながら、溶湯温度が湯流れに対して非常に大きな影響をもつと判断し、湯流れ中の溶湯温度を実測する実験を追加で実施した。

4.3 湯流れ中の溶湯温度実測

Fig. 12に流動中の溶湯温度測定に用いた金型概略図を示す。キャビティーは、溶湯を一律で不可逆的な流れとするジグザグ形状とした。本実験の目的は、その形状内部に温度計測ポイントを設けて溶湯が流動しながら温度低下する様をとらえることである。

温度計は、プローブタイプの放射温度計を金型裏面より設置し、キャビティー面にはアクリルで栓を設けて溶湯と放射温度計が接触することを防ぐ。栓の材質にアクリルを選定した理由は、コスト面の他に、放射温度計の

検知する波長1000nm帯の赤外光の透過に優れるためである。

放射温度計を採用する理由は二点、接触式の温度計は接触子が溶湯の流れを阻害するためと、接触式では温度を検知して信号に変換するまでにタイムラグが生じ、ねらいのサンプリングレートを満足しないためと考えたからである。本稿では、1000分の1秒のサンプリングレートをもつ放射温度計を選定し、溶湯流動中に30点を計測できる計算となる。

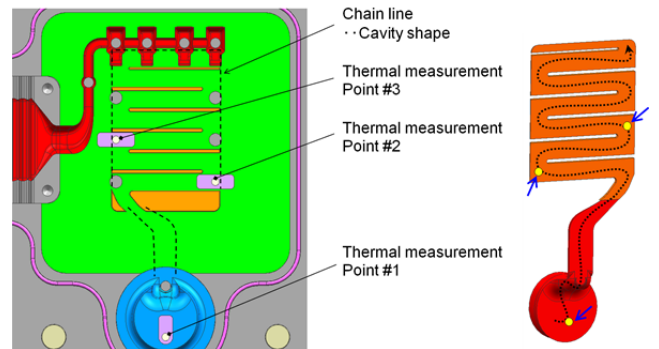


Fig. 12 Temperature Measurement Concept

Fig. 13は縦軸に流動中の溶湯温度、横軸に流動距離を表し、720°Cで铸造した際に得られたデータを示す。溶湯が流動するに従い、溶湯温度が低下する現象を確認した。充填完了後には、周囲の復熱によって温度がやや上がる現象を確認した。この実験により、溶湯の初期温度の違いによって到達時の温度や低下の勾配が異なること、そして到達までに要する時間が異なることが分かった。

次章にて、以上の実測結果を基に湯流れ解析の確からしさを確認する。

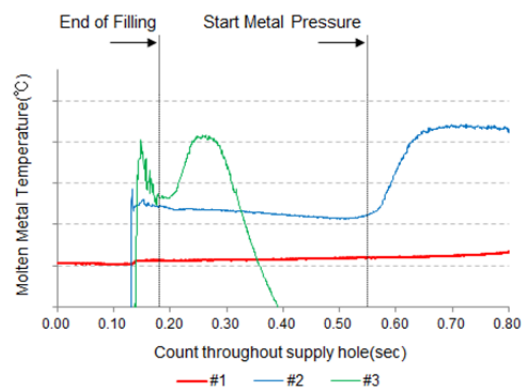


Fig. 13 Temperature Drop at 720°C

5. 可視化結果の分析と湯流れ解析への反映

5.1 可視化結果の分析手法

ダイカスト湯流れを、定量的な実測値とする手法を考

案する。最初に、可視領域に溶湯が占める割合を「溶湯充填率」とし、可視領域へ充填が始まる瞬間までを溶湯充填率0%、満充填する時を溶湯充填率100%と定義する。

ハイスピードカメラで撮像した像（静止画）をマトリクス状に分割し、そのマトリクスに溶湯が充填する割合を「セル充填率」としてサンプリングする。マトリクスは、必要な分析精度と作業工数のバランスを考慮して分割数を決定する必要がある。ここまでの作業で「溶湯充填率」に対し、マトリクスに分割した数だけの「セル充填率」が定量的なデータとして求めることができる。

湯流れ解析の確からしさを確認するには、可視化実験と同条件で湯流れ解析を実施し、計算結果となるポスト表示（コンタ図）を使用する。手法はFig. 14に示すとおり、同じ溶湯充填率の静止画とコンタ図を抽出し、静止画のセル充填率に対するコンタ図のセル充填率の再現率をセルごとに算出する。例えば、静止画でセル充填率17%に対し、コンタ図でセル充填率100%であればそのセルの解析精度は17%となる。Fig. 14の例では、溶湯充填率30%においてセル充填率の総平均、つまり解析精度が62%であることを示す。この分析を進めた結果、従来の湯流れ解析は52%の整合率であることが判明した。

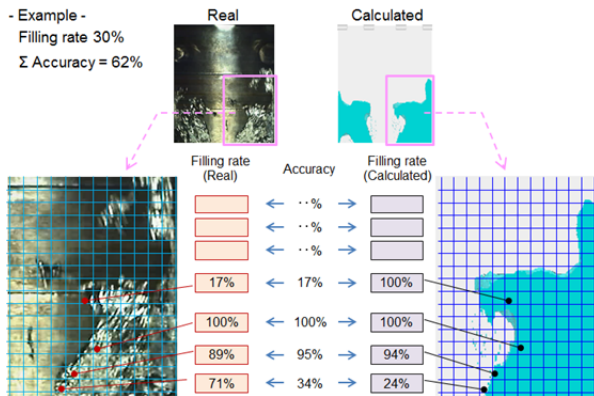


Fig. 14 Calculation Accuracy for Filling Sim. (Individual)

5.2 湯流れ解析の精度向上

鋳造CAEの精度改善で一般的に用いられるのは「合わせこみ」と呼ばれる手法である。湯流れ解析では、ナビエ・ストークス方程式を解いて理論的に解を求めるが、計算時間の制約もあり、例えば壁面への熱移動などを完全な理論式で再現することは実用的でない。そのため壁関数など、仮定をもったモデルとして定義する。その仮定をふまえた上で、物理学で説明がつかない結果も可能性として生じるが、実態の情報を衝として解析が最も実体を再現するパラメータを求めることが、合わせこみである。

上記のパラメータに先立ち、鋳造解析を実行する工程表 (Fig. 15) を説明する。

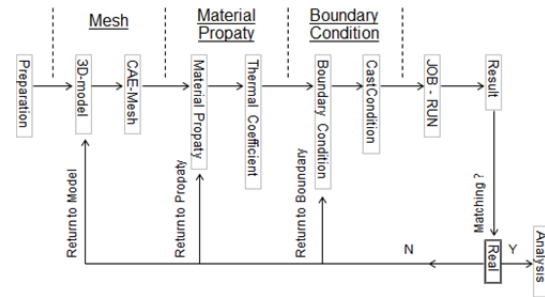


Fig. 15 CAE Turning Block Chart

工程は大きく分けて、計算メッシュの作成工程、材料の設定工程、境界条件の設定工程での作業による設定を経て、スーパーコンピュータ等で計算を実行し結果分析に至る。例えば計算メッシュのつくり方を変更し、解析の再現性が向上するかを試す場合は、Fig. 15計算メッシュの作成工程に戻ることを表している。

鋳造解析は、燃焼系や塑性領域を含む構造解析に比べると、現象が単純でありその歴史も古い。言葉を換えると、それは最も基本的な物理方程式に基づいた計算がなされており、計算に用いる溶湯や金型の物性値の確からしさが解析精度の根幹を担うともいえる。

溶湯材料の物性値は、特に高温領域において文献情報が乏しく、鋳造解析ソフトの初期（メーカーデフォルト）値を使用している。本稿では可視化実験によって実態を定量的に把握したため、それをものさしとして溶湯材料の合わせこみをすることに着想した。

式(1)は湯流れ解析で用いられるナビエ・ストークス方程式である。本稿では、溶湯材料の④動粘性係数νの合わせこみを実施した。それは、動粘性係数が流体計算の要となる物性値であるとともに、流体の粘度を測定する手段に理由がある。粘度は、オストワルド粘度計に代表される、ガラス管に注いだ流体の動作を目視で目盛を計測するが、溶融した金属はこの手段では測定できない。つまり、動粘性係数は鋳造解析の物性値合わせこみにおいて、直接粘度を計測した事例が過去に存在しないと考え、最も信頼性が低いパラメータであると判断したからである。

$$\frac{\partial v}{\partial t} + (v \cdot \nabla) v = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 v + g \quad (1)$$

①Time ②Velocity ③Pressure ④Viscosity ⑤Gravity

Fig. 14で紹介した実態と解析結果の比較に加えて、Fig. 13で実測した温度結果を組み合わせることによってアルミ材の温度依存の動粘性係数を得ることができる。その結果、溶湯の凝固が始まる温度付近の動粘性係数を、

初期値より大きく（粘りが出る）した方が整合率が改善することが分かった。

式(1)の③では、射出動作中のキャビティー減圧量を Table 1の実験条件ごとで調整した。③を算出する上で、背圧を考慮する気体の状態方程式は式(2)のようになり、質量項mは式(3)で算出される。

$$p \times V = m \cdot R \cdot T \quad (2)$$

p:Back pressure V:Volume m:Gas mass
R:Avogadro's number T:Temperature

$$-\frac{\partial m}{\partial t} = \sum_i \dot{m}_{v,i} + \sum_j \dot{m}_{v,j} \quad (3)$$

$\dot{m}_{v,i}$: Gas mass from vent per second ··a
 $\dot{m}_{v,j}$: Gas mass into Cavity per second ··b

マツダが使用する湯流れ解析では、キャビティー内の減圧設定項目を調整すると式(3)・aが変更され、ナビエ・ストークス方程式計算へ反映される。以上、溶湯の動粘性係数と金型内の減圧量の合わせこみを進めた結果、活動前の湯流れ解析整合率が52%であったのに対し、82%まで改善することができた (Fig. 16)。

湯先の挙動を再現できたことにより、実際の鋳造品での表面性状品質がどのような湯流れを経て発現したかの考察が可能となった。そこで、製品への溶湯充填状態の解析情報を基に、湯まわり性を検証するための新技術開発を進めた。

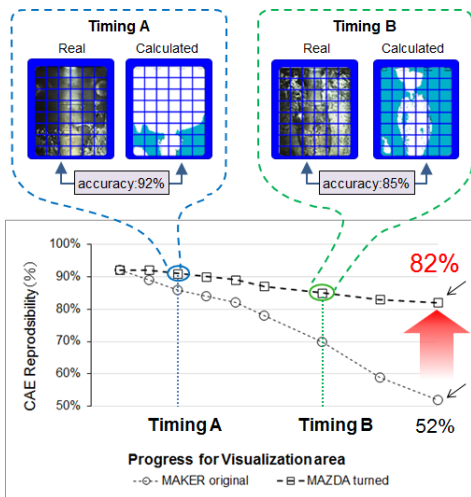


Fig. 16 Calculation Accuracy for Filling Simulation(overall)

6. 湯まわり性検証技術の開発

6.1 極薄肉シリンダーブロックの鋳造

鋳造プロセスにおける湯まわり性に関連する各工程の

入力と出力を明確にするため、金型を用いた鋳造実験を実施した。金型は、SKYACTIV-Gシリンダーブロックの量産金型を改造した実験型を用いた。

実験対象とした部位は、現状で製品の基本肉厚で設計するシリンダーボア外周に冷却水を通す機能をもつ“ウォータージャケット”外壁とした。それは、同部位は製品形状に広くまたがり、薄肉形状であるために湯まわり性の感度が高いと考えたからである (Fig. 17)。肉厚の水準は、従来設計での2.5mmに対し0.3mmと0.7mmの2水準とした。それは、金型製作精度を考慮して最小の隙間である0.3mmと、検証技術を構築する上で湯まわり品質を段階的につくる目的で経験的に0.7mmとした。

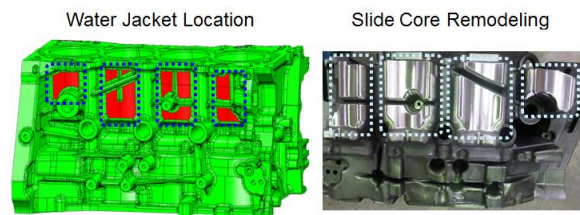


Fig. 17 Target of Thin Walled Experiment

Fig. 18に、本実験の鋳造品を示す。当初のねらいどおりの品質ができており、成形品の肉厚は0.3mmねらいに対して0.30~0.35mm、0.7mmに対して0.71~0.73mmであった。

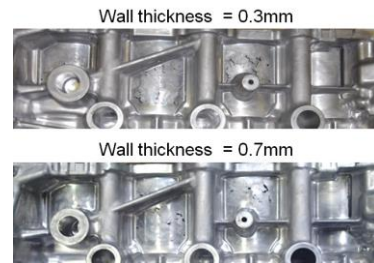


Fig. 18 Test Sample

6.2 湯まわり性検証技術の開発

湯まわり性の検証技術をつくる上で、既製品ソフトウェアの計算ロジックを、ユーザー側で編集できるものはおそらく存在しない。そのため、本稿では湯流れ解析で出力する結果を説明変数とする回帰式を作成した。

初めに目的変数を定義する。それは、湯まわり性を定量的に表現する必要があり、本稿では“湯まわり値”と呼ぶ指標を新たに作成した。それは湯まわり性を百分率で表し、材料の充填密度、光沢のRGB値、導電率を掛けあわせて算出する、マツダで独自に考案した数値であり、100%に近づくほど良好な湯まわり状態と定義する。まずは、前節で鋳造したシリンダーブロックのウォータージャケット外壁肉厚の湯まわり値を網羅的に調べた。

次に、前節の実験を忠実に再現（金型3Dモデル、鋳造条件）した湯流れ解析を実施し、解析結果を説明変数として求めた。重回帰分析の結果、 t 値が2以上となる説明変数が「有意である」と考え、かつ p 値が5%よりも小さくなる解析結果を説明変数とした。その結果「溶湯温度」、「溶湯流速」、「溶湯の継時劣化」、「溶湯流動長」、「溶湯空気接触量」を説明変数とした回帰計算によって湯まわり値を再現する回帰式を作成することができた。

Fig. 19は、湯まわり値の再現性を表す。横軸に事前検証した湯まわり値を、縦軸に実体から算出した湯まわり値を示す。点群の分布から分かるように、おおむね実体を反映する結果である。量産準備において、湯流れ解析をした結果、製品形状にこの値を下回る部位が生じる場合に鋳造方案や製品形状を見直す評価基準としている。

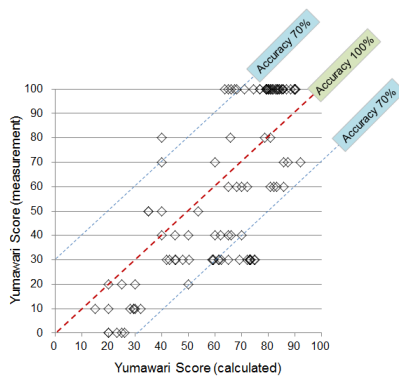


Fig. 19 Accuracy of Yumawari Score

直近では、SKYACTIV-Dの改良型エンジンシリンダーブロックにおいて、本技術を活用して開発コンカレントを進めた結果、従来比286gの製品軽量化を達成した。

7. まとめ

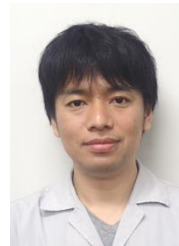
本稿では、将来にわたってダイカスト部品軽量化の可能性を大きく広げる湯流れシミュレーションの予測精度を改善した。それには、実際のダイカストマシン、金型を用いた湯流れ可視化と、さまざまな因子を計測する技術が大きな役割を果たした。コンピューティングパワーが大きく発達した現代にあっても、実態を徹底的かつ客観的に見ることの重要性を再認識できた。「現場現物」という考え方はしばしば生産性改善において語られるが、どんな場面にも共通して重要な「ものづくり」の肝であった。

今回、マツダのものづくりの考え方に共感していただき、ともにダイカスト湯流れの真理に迫る“同胞”として同じ釜の飯を食べた、大同特殊鋼(株)に対して厚く御礼を申し上げます。

参考文献

- (1) 竹村ほか：「走る歓び」を実現する薄肉ダイカストの金型設計技術革新，型技術者会議 2017，pp148-149
- (2) 大塚ほか：SKYACTIV 技術を実現した高精度薄肉ダイカストと金型技術，マツダ技報，No.31，pp.197-201 (2013)
- (3) 長坂ほか：ダイカスト湯流れ直接観察システムの開発に関するフィジビリティスタディ，(財)機械システム振興協会，平成16年度システム開発報告書
- (4) 飯見ほか：ダイカスト湯流れの可視化検証による解析精度向上，デンソーテクニカルレビュー，Vol.6，No.2，pp.100-106 (2001)

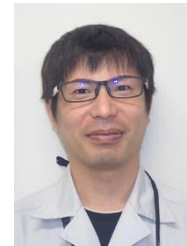
■ 著 者 ■



竹村 幸司



亀井 克則



米澤 英樹



菅谷 智



河野 一郎



達谷 正勝

社外への発表論文一覧表 (2017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
2017.3.25	Computer Science & Information Technology Computer Science & Information Technology	Ankle Muscle Synergies for Smooth Pedal operation Under Various lower-Limb Posture	木口 暁夫 藤田 拓斗 藪中 翔 武田 雄策 原 利宏	九州大学 同上 技術研究所 同上 同上
2017.5.15-18	Institute for Liquid Atomization and Spray Systems - Americas (ILASS-Americas) ILASS-Americas 2017 (29th Annual Conference)	Fuel Adhesion Characteristics of Flat Wall-Impinging Spray under DISI Engine Conditions	駱 洪亮 内富真太郎 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
2017.5.31-6.2	The Linux Foundation Automotive Linux Summit 2017	“Reference Hardware Architecture“ Deals with Various Requirements from OEMs	後藤 誠二	統合制御システム開発本部
2017.6.18-23	International Conference on Fracture 14th International Conference on Fracture(ICF14)	Fatigue of Aluminum alloy/CFRP Joints Produced by Friction Stir Spot Welding	小川 裕樹 熊 一達 曙 紘之 加藤 昌彦 菅田 淳 田中耕二郎	広島大学 同上 同上 同上 同上 技術研究所
2017.6.20-21	Chassis Tech Plus 2017	SKYACTIV TECHNOLOGY to enhance “Jinba Ittai”	吉岡 透 砂原 修 高原 康典 梅津 大輔 松岡 秀典 山本 忠信 兼品 直和 清水 良 高橋 絢也 山門 誠	統合制御システム開発本部 同上 同上 操安性能開発部 ボデー開発部 シャシー開発部 操安性能開発部 PT制御システム開発部 (株)日立製作所 神奈川工科大学
2018.7.18-19	International Symposium on Automotive Passive Safety Technologies and Standards & Regulations	Mazda Safety Concept and SKYACTIV Technology	杉本 繁	衝突性能開発部
2017.7.25-28	The Japan Society of Mechanical Engineers, The 9th International Conference on Modeling and Diagnostics for Advanced Engine Systems (COMODIA 2017)	Study on a Control-Oriented Model of Boosted HCCI Engine and Control Simulation	林 卓哉 山崎 由大 三好 正城 金子 成彦 疋田 孝幸 水野 沙織 藤井 拓磨	東京大学大学院 同上 同上 同上 パワートレイン技術開発部 同上 同上
		Development of Detailed Surface Reaction Database for TWC Based on Gas Phase and Surface Species Analyses (CO/NO/O2 reaction mechanism on PGM supported on Al2O3)	下栗 大右 日隈 聡士 村上 浩 松本 有平 横畑 英明 竹林 広行	広島大学 熊本大学 走行・環境性能開発部 エンジン性能開発部 同上 走行・環境性能開発部
2017.7.25-28	The Japan Society of Mechanical Engineers, The 9th International Conference on Modeling and Diagnostics for Advanced Engine Systems (COMODIA 2017)	Wall Heat Transfer of Undeveloped Turbulent Flow in Internal Combustion Engines	原田 雄司 内田 健司 田中 達也 佐藤 圭峰 朱 前進 藤本 英史 山下 洋幸 店橋 護	技術研究所 同上 同上 同上 同上 同上 同上 東京工業大学

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2017.7.25-28	The Japan Society of Mechanical Engineers, The 9th International Conference on Modeling and Diagnostics for Advanced Engine Systems (COMODIA 2017)	Effect of Impingement Distance on Fuel Adhesion of Hole-Nozzle Spray under Various Injection Pressures	駱 洪亮 内富真太郎 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
2018.8.24	CIDAS_Technical_Conference	Mazda Safety Concept and SKYACTIV Technology	金子 直樹	衝突性能開発部
2017.9.5-6	Dassault Systèmes World-wide SFE Users Group Meeting 2017	Mazda SFE application development	木崎 勇	衝突性能開発部
2017.9.12	ローレンスバークレイ国立研究所, スタンフォード大学 7th International Conference on Hard X-Ray Photoelectron Spectroscopy	High-precise measurements of temperature-driven core-level shift by using HiPP-2 analyzer with hard x-ray	豊田 智史 梶野 雄太 首藤 大器 野瀬 惣市 横山 和司 三根生 晋 住田 弘祐	京都大学 兵庫県立大学 同上 同上 同上 技術研究所 同上
2017.9.13-15	International Research Council on Biomechanics of Injury (IRCOBI), IRCOBI 2017 Conference	The Analysis of an Individual Difference using Human Skeletal Morphology in Automotive Seated Posture.	泉山 朋大 西田 周泰 岩永 秀幸 陳 猷 大木 順司 櫻本 逸男 朝日 龍介 杉本 繁 上野 正樹	衝突性能開発部 山口大学 同上 同上 同上 徳山工業高等専門学校 衝突性能開発部 同上 同上
2017.9.17-19	日本設計工学会 ICDES2017	A conceptual design for a value growth mobility system on time-axis design	古郡 了 戸田 敬介 籀野宗一郎 加藤 健郎 西村 秀和 松岡 由幸	技術研究所 慶應義塾大学 同上 同上 同上 同上
2017.9.17-22	ICTP2017委員会 12th International Conference on the Technology of Plasticity 2017	Effect of stress relaxation on springback in warm forming high strength stress sheet	吉田 総仁 濱崎 洋 久野 大輔 斉藤 直子 深堀 貢	広島大学 同上 同上 技術研究所 同上
2017.9.18-22	自動車技術会 FAST-zero '17	Development of the path generation technology which minimizes a vehicle dynamic characterixtic fluctuation.	楠本 信平	技術研究所
2017.10.3	ECS 232nd ECS Meeting	Calculation of Seebeck Coefficients for Advanced Heat Transfer Modules	種平 貴文 古林 寛 黒木伸一郎 三好 誠治 米盛 敬	広島大学 同上 同上 技術研究所 同上
2017.10.3	ECS 232nd ECS Meeting	Peltier Effect of Silicon for Cooling 4H-SiC-based Power Devices	古林 寛 黒木伸一郎 三好 誠治 米盛 敬 種平 貴文 山本 淳	広島大学 同上 技術研究所 同上 同上 産業技術総合研究所
2017.10.17-20	The Linux Foundation Automotive Grade Linux All Members Meeting	AGL Reference Hardware Spec_v0.1.0	後藤 誠二	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
2017.10.18-21	Institute for Liquid Atomization and Spray Systems - Asia (ILASS-Asia) ILASS-Asia 2017 (19th Annual Conference)	Unveiling the Factors Governing the Initial Flow Breakup and Atomization of Flash Boiling Sprays	全 知娟 文 石洙 佐藤 圭峰 永澤 健	産業技術総合研究所 同上 技術研究所 同上
		X-Ray Imaging and Measurement of Cavitation Flow in Fuel Injector Nozzles with Various Geometries	Rubby Prasetya 笠原 巧 小谷 和也 三輪 誠 宋 明良 文 石洙 和田 好隆 植木 義治 横畑 英明	神戸大学 同上 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 同上
		String Cavitation and 3D PIV in Multi-Hole Injector	中野 裕晃 Rubby Prasetya 出口慎一郎 三輪 誠 宋 明良 西田 恵哉 中島 聖 和田 好隆 植木 義治 横畑 英明	神戸大学 同上 同上 同上 同上 広島大学 同上 エンジン性能開発部 同上 同上
		Adhesion Characteristics of Fuel Spray Impinging on Flat Wall under High-Temperature and High-Pressure Ambient Condition	内富真太郎 駱 洪亮 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
2017.11.15-17	The Institute for Liquid Atomization and Spray Systems, Small Engine Technology Conference	Characteristics of Flat-Wall Impinging Spray Flame and Its Heat Transfer under Small Diesel Engine-Like Condition	Rizal Mahmud Seong Bum KIM Toru Kurisu Keiya Nishida Yoichi Ogata Jun Kanzaki Tadashi Tadokoro	広島大学 同上 同上 同上 同上 エンジン性能開発部 同上
2017.11.27-12.1	IEEE IEEE SSCI 2017	Simultaneous Design Optimization of Multiple Car structures Using K Supercomputer	大山 聖 小平 剛央 釧持 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
2017.12.13-15	IEEE iTEC INDIA 2017	Driving Scenario Recognition for Advanced HEV Control	Amirthalakshmi Veeraraghavan Ajinkya Bhave Viswa Adithya 横島 靖典 原田 真悟 小森 賢 矢野 康英	Siemens Industry Software 同上 同上 シーメンス(株) 統合制御システム開発本部 同上 同上

2. 社外講演(国内)

*所属は原則発表時点を示す

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2017.1.10	名古屋大学工学部 工学研究科 名古屋大学留学生講座 “車両計画と車体設計”	Engine Performance and Vehicle Performance	三角 正法	技術研究所
2017.1.19-20	日本機械学会 第29回バイオエンジニアリング講演会	実事故データと事故再現シミュレーションの相互活用による歩行者頭部傷害要因分析	原澤 雄貴 宮崎 祐介 上野 正樹 杉本 繁 松村 広隆	東京工業大学 同上 衝突性能開発部 同上 同上
2017.1.31	広島大学感性イノベーション研究推進機構 精神的価値が成長する感性イノベーション拠点 公開シンポジウム広島	ステアリング操舵における筋活動推定に基づく力知覚量設計手法の提案	岸下 優介 竹村 和紘 山田 直樹 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 技術研究所 同上 同上 同上 同上 同上 広島大学 同上
2017.1.31	自動車技術会 関東支部 自動運転技術と国際標準化、及び必要な外界認識センシング技術	自動運転技術と国際標準化	三角 正法	技術研究所
2017.2.15-17	2017ものづくり総合大会	マツダブランドを生かす造形とカラーの実現	寺本 浩司	車両技術部
2017.2.24	自動車技術会 新開発エンジンシンポジウム	新型CX-5 SKYACTIV-D 2.2の開発	皆本 洋 勝田 真斗 氏原 健幸 白橋 尚俊 三村 勇樹	エンジン性能開発部 同上 PT制御システム開発部 エンジン性能開発部 同上
		新型マツダSKYACTIV-G 2.5Tの過給技術	室谷 満幸	エンジン設計部
2017.3.3	腐食防食学会 中国・四国支部 2017年材料と環境研究発表会	接着欠陥が継手耐食性へ及ぼす影響	麻川 元康 山本 研一	技術研究所
		塗装鋼板のふくれ進展過程における耐食性評価	坂本 健 磯本 良則 浅田 照朗 重永 勉	広島大学 同上 技術研究所 同上
		自動車車体の穴あき腐食進行メカニズム	江崎 達哉 重永 勉	技術研究所 同上
		人工マグネタイトさび粒子の生成に及ぼすMn(II)の影響	山根万葉香 西谷 彩香 田中 秀和 江崎 達哉 重永 勉	島根大学 同上 同上 技術研究所 同上
		樹脂と金属の直接接合技術に対する耐食性の確保	奥山 智仁	技術研究所
2017.3.6	No Magic, Inc System Engineering/Model-Based Systems Engineering Symposium Japan 2017	大規模システム開発におけるModel-Based Systems Engineeringによるアプローチ	佃 厚典	統合制御システム開発本部
2017.3.7	化学工学会 化学工学会 第82年会	炭素系ナノ材料を高濃度を含む高分子複合材料の開発	木原 伸一 佃 祐介 浅田 真生 滝島 繁樹 米盛 敬 三好 誠治	広島大学 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
2017.3.8	自動車技術に関するCAEフォーラム2017	SKYACTIVエンジンの性能開発に用いたCFD	横畑 英明	エンジン性能開発部
2017.3.8	計測自動制御学会 マルチシンポジウム2017	Model Based Developmentで切り開く 自動車開発の新世紀	足立 智彦	統合制御システム開発本部
2017.3.11	日本機械学会関西支部 関西学生会学生員卒業研究発表講演会	熱効率の向上に向けた取り組み	養祖 隆	パワートレイン技術開発部
2017.3.13	兵庫県立大学 高度産業科学技術 研究所 ポスター展	SPring-8兵庫県ビームラインへの雰囲気 制御型硬X線光電子分析装置の導入と調整	住田 弘祐	技術研究所
2017.3.13	進化計算学会 第12回進化計算学会研究会	応答曲面法を用いた複数車種同時最適化 ベンチマーク問題の提案	小平 剛央 釦持 寛正 大山 聖 立川 智章	技術研究所 同上 宇宙航空研究開発機構 東京理科大学
2017.3.13	情報処理推進機構 システム開発の“今”と“これから” ～システムズエンジニアリング視点での 活用するために～	多様な要求を満足させる自動車の開発 ～システムズエンジニアリング視点での SKYACTIV-Gエンジン～	末富 隆雅	統合制御システム開発本部
2017.3.15-17	日本音響学会 2017年春季研究発表会	エンジン音の主観的判断に関わる脳活動	植島 大地 松村 琢磨 板垣 沙知 中谷 裕紀 萬 菜穂子 小林 耕太	同志社大学 同上 同上 技術研究所 同上 同志社大学
		自動車走行音の快/不快に対して特異的 に賦活する脳部位の特定	藤村 弘輝 板垣 沙知 松村 琢磨 中谷 裕紀 萬 菜穂子 小林 耕太	同志社大学 同上 同上 技術研究所 同上 同志社大学
2017.3.17	JST-OPERA「ゲノム編集」産学 共創コンソーシアム事務局 キックオフ・シンポジウム	高性能油脂生産藻類の開発	太田 啓之 坂本 敦 山本 卓 高見 明秀 野村 誠治 斉藤 史彦	東京工業大学 広島大学 同上 技術研究所 同上 同上
2017.3.17	洋光会 経営者懇談会	マツダのモデルベース戦略について	原田 靖裕	統合制御システム開発本部
2017.3.18	日本機械学会流体工学部門プラズ マアクチュエータ研究会 第4回シンポジウム	自動車の空気抵抗低減のためのPA適用 に向けた取り組み	清水 圭吾	技術研究所
2017.3.20	医療法人微風会 三次神経内科ク リニック花の里、日本早期認知症 学会 認知症研修会 兼 日本早期認知症 学会第1回春季ワークショップ (第1回広島大会)	マツダが目指す自動車の未来像 ～マツダが考える安全な運転とは 高齢 化社会にむけたマツダの夢と提案～	栃岡 孝宏	統合制御システム開発本部
2017.3.21	自動車技術会 第66回技術交流会 『CAD/CAM/CAE』	プレス金型設計におけるCAE技術の活 用	山口 大輔	車体技術部
2017.3.22-25	電子情報通信学会 2017年電子情報通信学会総合大 会	自動車内装デザイン設計支援のためのプ ロジェクション方式複合現実技術を用い た表面質感操作システムの構築	竹澤 拓朗 岩井 大輔 佐藤 宏介 原 利宏 村瀬 健二	大阪大学 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
2017.3.29	サイエンス&テクノロジー(株) ディーゼルエンジン排気浄化における触媒材およびシステムの開発・要素技術	高酸素イオン伝導性ZrNd系酸化物触媒によるパティキュレート燃焼技術	原田浩一郎	技術研究所
2017.4.19-21	溶接学会 溶接学会平成29年度春季全国大会	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 第4報：スラグ生成メカニズムに基づいたノズル構造の導出とスラグ生成抑制効果の検証	斉藤 直子 深堀 貢 田中 正顕 北原陽一郎 目良 貢	技術研究所 同上 シャシー開発部 技術研究所 同上
		自動車のマルチマテリアル化と異材接合技術	杉本 幸弘 田中耕二郎 西口 勝也	技術研究所 同上 同上
2017.4.21	自動車技術会 中部支部 第1回技術講習会	高応答エンジンを用いた量産型G-Vectoring Controlの開発	梅津 大輔	操安性能開発部
2017.5.8	The Society of Chemical Engineers, Japan	EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF LIQUID JET BEHAVIOR FOR PISTON COOLING BY A 90 DEGREE CURVED CIRCULAR NOZZLE	中島 聖 温 健 尾形 陽一 西田 恵哉 横畑 英明 本郷 均	広島大学 同上 同上 同上 エンジン性能開発部 同上
2017.5.16-17	電子情報通信学会 ヒューマン情報処理研究会 技術研究報告(信学技報)	自動車運転時のオブティカルフロー視覚刺激による認知行動への影響	村瀬 健二 原 利宏 武田 雄策 金子 寛彦	技術研究所 同上 同上 東京工業大学
2017.5.19	キャパシタフォーラム 2017年度年次大会	自動車用電気二重層キャパシタについて	藤田 弘輝	技術研究所
2017.5.21-5.23	第54回日本伝熱シンポジウム	気相・表面化学種の分析に基づく三元触媒用の表面詳細反応データベースの開発 Al ₂ O ₃ 担持された複合触媒における CO/O ₂ /H ₂ 反応機構	香西 祐輔 下栗 大右 日隈 聡士 村上 浩 松本 有平 横畑 英明 竹林 広行	広島大学 同上 熊本大学 走行・環境性能開発部 エンジン性能開発部 同上 走行・環境性能開発部
2017.5.22	全国マツダ労働組合連合会 全国マツダ労連第34期 トップフォーラム	マツダが目指す自動車の未来像	栃岡 孝宏	統合制御システム開発本部
2017.5.24-26	自動車技術会 2017年春季大会GIAフォーラム Cars that think and communicate I -セルフ・ドライビング・カーに向かって-	マツダが目指す自動車の未来像 -全ての人に走る歓びを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
2017.5.24-26	自動車技術会 2017年春季大会 学術講演会	排ガス環境が三元触媒の物性と浄化特性に及ぼす影響に関する研究	兒玉 潤 上田 昂平 白幡 尚生 近藤 寛 生天目博文 住田 弘祐 國府田由紀 村上 浩 竹林 広行	走行・環境性能開発部 慶應義塾大学 同上 同上 広島大学 技術研究所 同上 走行・環境性能開発部 同上
		ウィンドシールド投影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	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
2017.5.24-26	自動車技術会 2017年春季大会 学術講演会	ガソリン直噴エンジンにおける触媒暖機時の排出微粒子数低減技術の開発	伊藤 直也 俊成 貴志 竹内 暢男 本田 雄哉 内田 健児 藤川 竜也 山川 正尚	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 パワートレイン技術開発部 同上 同上
		エンジン筒内流動場における壁面熱伝達の研究 第1報・壁面熱伝達現象の解明	原田 雄司 内田 健司 田中 達也 朱 前進 山下 洋幸 店橋 護	技術研究所 同上 同上 同上 同上 東京工業大学
		エンジン筒内流動場における壁面熱伝達の研究 第2報・高精度熱流束予測モデルの構築	内田 健司 原田 雄司 佐藤 圭峰 藤本 英史 山下 洋幸 店橋 護	技術研究所 同上 同上 同上 同上 東京工業大学
		塗装部の新規耐食性短期評価法の開発, 及び防錆技術開発・品質管理への活用	浅田 照朗 重永 勉 磯本 良則	技術研究所 同上 広島大学
		車両挙動分析による先行者追従における運転者の運転特性推定	禹ハンウル 池 勇勳 河野 仁 田村 雄介 黒田 康秀 菅野 崇 山本 康典 山下 淳一 浅間 一	東京大学 同上 同上 同上 技術研究所 同上 同上 東京大学 同上
2017.5.24-26	腐食防食学会 材料と環境2017	自動車の防錆技術を革新する耐食性迅速評価法の開発とその実用化	磯本 良則 浅田 照朗 重永 勉	広島大学 技術研究所 同上
2017.5.25	日本伝熱学会 第54回日本伝熱シンポジウム	定容容器におけるエンドガス局所自着火現象の可視化	藤田 晴彦 伊藤祐太郎 山田 眞平 下栗 大右 佐藤 伴音 寺島 洋史 河野 通治 本田 雄哉 植木 義治 横畑 英明	広島大学 同上 同上 同上 北海道大学 同上 エンジン性能開発部 同上 同上 同上
2017.5.31-6.2	第22回計算工学講演会	複数材料トポロジー最適化の各種数値最適化手法による比較	和田 有司 山本 健裕 弓削 康平 中本 晶子 木崎 勇 上野 正樹	成蹊大学 同上 同上 衝突性能開発部 同上 同上
2017.6.1-2	日本交通科学学会 第53回日本交通科学会総会・学術講演会	視野欠損がステアリング操作に及ぼす影響とその要因	桑原潤一郎	技術研究所
2017.6.2	アマゾン ウェブ サービス ジャパン(株) AWS SUMMIT Tokyo	CAEクラウドによる大規模サンプリングを活用した次世代の車両開発のための最適設計手法の検討	小平 剛央 鐵本 雄一	技術研究所 エンジニアリングシステム部
2017.6.9	dSPACE Japan (株) dSPACE Japan User Conference 2017	マツダにおけるMBDとそれを支えるHILS	足立 智彦	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
2017.6.14-15	プラスチック成形加工学会 第28回年次大会	樹脂と金属の直接接合技術における接合力を確保するための成形要件	奥山 智仁	技術研究所
2017.6.16	広島大学 第三類化学工学プログラム 平成29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
2017.6.16	日本機械学会 振動・音響研究会	ロードスターのパフォーマンスフィールドとNVHのモデルベース開発	藤川 智士	パワートレイン開発本部
2017.6.19-20	型技術協会 第31回型技術者会議2017	魂動デザイン再現に向けた金型変形の抑制	岡山 一洋	ソーリング製作部
		魂動デザインの実現に向けた樹脂部品における面精度向上の取組み	上西 宏幸 田中 慶和 下野 廣太 新田 修平	車両技術部 同上 同上 同上
		「魂動デザイン」の再現に向けたこだわりのモノづくり ～プレス成形における外観品質保証プロセスの再構築～	大谷 肇 岩田 成弘 西村 良治 岡田 又治	車体技術部 同上 同上 同上
		「走る喜び」を実現する薄肉ダイカストの型設計技術革新	竹村 幸司 米澤 英樹 亀井 克則 宇野 聡	パワートレイン技術部 同上 同上 大同特殊鋼(株)
2017.6.22	第25回3D&バーチャルリアリティ展	マツダにおけるMR技術の活用事例～塗装領域の新車量産準備プロセス革新～	松永 伸子	車両技術部
2017.6.22-23	品質工学会 第25回品質工学研究発表大会	壁部高精度加工技術の確立	中原 寛海	ソーリング製作部
		バーチャル設計を用いた、金型形状合わせ技術の向上	長澄 徹侍	ソーリング製作部
		高精度輪郭加工技術の確立	秋月 匠	ソーリング製作部
		高硬度加工技術開発	上村 勝利	ソーリング製作部
2017.6.27	広島大学工学部 応用化学概論 卒業生によるセミナー	“応用化学”と“ものづくり”	松村 益寛	技術研究所
2017.6.29	NIMS ナノ材料科学環境拠点 NIMS・GREEN 第15回ナノ材料科学環境拠点シンポジウム	マツダのモノづくり革新と材料MBDへの期待	藤 和久	技術研究所
2017.7.1-2	日本分析化学会 中国四国支部 第23回中国四国支部分析化学若手セミナー	XFAS法によるリチウム二次電池負極剤の充放電時のリチウムサイトの評価	金田 敦徳 森 啄也 三根生 晋 住田 弘祐 Alvaro Munoz- Noval 早川慎二郎	広島大学 同上 技術研究所 同上 広島大学 同上
2017.7.14	自動車技術会 車両運動性能部門委員会 2017年度車両運動性能部門委員会シンポジウム	人馬一体を実現する基盤技術 “SKYACTIV TECHNOLOGY”	吉岡 透	統合制御システム開発本部
2017.7.14	ニュートンワークス(株) 第11回System Simulation Symposium	MAZDAにおけるMBDへの取り組み	足立 智彦	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
2017.7.18	SIP「革新的燃焼技術」 HINOCA合同会議 ガソリンチーム第2回勉強会および第3回HINOCA合同会議	エンジンの熱損失特性と新たな伝熱モデルの構築について	原田 雄司	技術研究所
2017.7.20-23	日本神経科学学会 第40回日本神経科学大会	操作性に依存したワクワク感に関わる顕著性および感情ネットワーク	笹岡 貴史 町澤 まろ 金山 範明 牧田 快 岡本 宜久 吉田 敏宏 竹村 和紘 農沢 隆秀 山脇 成人	広島大学 同上 同上 同上 技術研究所 同上 同上 同上 同上 広島大学
2017.7.27	自動車技術会 動力伝達系部門委員会 第6回動力伝達系部門委員会	SKYACTIV-DRIVE 気筒停止対応技術	本瓦 成人	ドライブトレイン開発部
2017.7.28	ダッソー・システムズ(株) 第3回SFE User交流会 2017	マツダに於けるSFE適用の歴史と事例紹介	木崎 勇	衝突性能開発部
2017.8.2-3	全国整備短期大学協会 第49回全国自動車短期大学協会研究発表会	進化するSKYACTIVエンジン最新技術	田中 伸彦	パワートレイン開発本部
2017.8.9	自動車技術会 第9回ガソリン機関部門委員会	新型マツダSKYACTIV-G 2.5Tの過給技術	室谷 満幸	エンジン設計部
2017.8.22	広島県音・振動技術研究会 平成29年度第2回研究会	高遮音複層構造の研究	村澤 英治	技術研究所
2017.8.24	公益社団法人 におい・かおり環境協会 第30回におい・かおり環境学会	新車臭成分の特定とニオイ閾値検討	市川 智士	車両実研部
2017.8.25	自動車技術会関西支部 創立70周年記念特別講演会	亜鉛めっき鋼板用低スラグ溶接プロセス	斉藤 直子	技術研究所
2017.8.25	ひろしま産業振興機構 ひろしまデジタルイノベーションセンターオープンセミナー	材料モデルベース開発によるモノづくり革新	甲斐 裕之	技術研究所
2017.8.29-9.1	日本行動計量学会 第45回大会	感性に基づく確率的ユーザーモデルの構築	櫻井 瑛一 本村 陽一 安松 健 坂本 和夫 道田 奈々江	産業技術総合研究所 同上 (株)オージス総研 広島大学 技術研究所
2017.8.29-9.1	日本機械学会 第15回「運動と振動の制御」シンポジウム(MoViC2017)	非線形性を有する自動車駆動系の加速度制御	佐藤 晶太 梶原 逸朗 坂田 将人 波多野 崇 平松 繁喜	北海道大学工学研究院 同上 統合制御システム開発本部 同上 同上
2017.9.1	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、兵庫県、豊田中央研究所 第11回SPring-8産業利用報告会	BL24XUにおけるNAP-HAXPESによる自動車用材料の界面状態解析	住田 弘祐 國府田由紀 三根生 晋 梶野 雄太 首藤 大器 野瀬 惣市 横山 和司 竈島 靖 渡邊 健夫	技術研究所 同上 同上 兵庫県立大学 同上 同上 同上 同上 同上

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2017.9.1	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、兵庫県、豊田中央研究所 第11回SPring-8産業利用報告会	ペダル操作用足首パワーアシストシステムの開発	藤田 拓斗 木口 量夫 原 利宏 武田 雄策 藪中 翔	九州大学 同上 技術研究所 同上 同上
2017.9.5	計測自動制御学会 ライフエンジニアリング部門シンポジウム2017	マツダの目指す自動車の未来像 ～全ての人に走る歓びを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
2017.9.7-9	電気学会 電子情報システム部門大会	データ駆動型制御を用いた車両ドライバモデルの一設計	山内 優 山本 透 脇谷 伸 木下 拓矢 矢野 康英 原田 真悟 宮腰 穂	広島大学 同上 同上 同上 統合制御システム開発本部 同上 同上
2017.9.8	日本トライボロジー学会 第92回自動車のトライボロジー研究会	オイル消費の安定的低減を実現するシリンドリック構造決定手法の研究	宮内 勇馬	技術研究所
2017.9.8	キャッツ(株) 第22回ZIPCユーザーカンファレンス	車載電子制御システムのモデルベース開発と今後の課題	今田 道宏	統合制御システム開発本部
2017.9.9-12	日本分析化学会 第66年会	層構造遮熱フィルムにおける構成材成分分析手法の検討	定井 麻子 三根生 晋 住田 弘祐	技術研究所 同上 同上
2017.9.11-13	第19回日本感性工学会大会	特別講演「感性に響くデザインとダイナミクス マツダロードスターの開発」	中山 雅 梅津 大輔	商品本部 操安性能開発部
2017.9.11-14	溶接学会 平成29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 第5報：PIV計測法によるMAG溶接中の気体流れの計測	斉藤 直子 原田 雄司 深堀 貢	技術研究所 同上 同上
2017.9.13	自動車技術協会 技術交流会	「魂動デザイン」の再現に向けたこだわりのモノづくり ～プレス成形における外観品質保証プロセスの再構築～	森澤 誠	車体技術部
2017.9.13-15	日本機械工学会 第27回設計工学・システム部門講演会	タイムアクシスデザインに基づく価値成長モビリティシステムの基本アーキテクチャの提案	古郡 了 加藤 健郎 西村 秀和 松岡 由幸	技術研究所 同上 同上 同上
		マルチマテリアルはり要素のレイアウト最適化	本田 正徳	技術研究所
2017.9.20-21	リードエグジビション ジャパン(株) 関西機能材Week 第1回接着・接合展	マツダにおける異種材料接合技術の取り組み	高見 明秀	技術研究所
2017.9.21	公益社団法人 精密工学会 2017年精密工学会秋季大会	SKYACTIVエンジンの進化を支えるパワートレインにおけるモノ造り革新	谷村 一穂	パワートレイン技術部
2017.9.22	ひろしま経済同友会 ものづくり委員会	プラスチック領域におけるモノ造り革新の取り組み	谷澤 浩樹	車両技術部
2017.9.25	熊本県社会・システムITコンソーシアム 熊本大学特別講義	アクティブセーフティを支えるセンシング技術と制御技術	小嶋 浩一	電子基盤開発部

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2017.9.25-27	日本音響学会 2017年秋季研究発表会	警告レベルに応じた和音を用いた警告音の提案	森 誠史 大池 太郎 大杉 郁代	中央大学 統合制御システム開発本部 同上
2017.9.27	情報処理推進機構 IoT時代のシステム開発の課題に立ち向かう ～システムズエンジニアリング導入の薦め～	多様な要求を満足させる自動車の開発～システムズエンジニアリング視点より～	末富 隆雅	統合制御システム開発本部
2017.9.29	腐食防食学会 中国・四国支部 第23回材料と環境講習会	鋼材用防錆塗膜の耐食性評価法の種類と特徴	浅田 照朗 江崎 達哉	技術研究所 同上
2017.9.29	イータス(株) 2017車載制御開発シンポジウム	SKYACTIV-G制御開発の振り返りと、今後の車載電子制御システム開発の課題と展望	今田 道宏	統合制御システム開発本部
2017.9.29	電気学会 第6回自動車(PHEV/EV)のEMC調査専門委員会	ラジオノイズの観点から見た自動車のEMC開発について	手島 由裕	電子開発部
2017.10.11-13	自動車技術会 2017年秋季大会	異なる混合条件における複数材料トポロジー最適化	和田 有司 山本 健裕 弓削 康平 中本 晶子 木崎 勇 上野 正樹	成蹊大学 同上 同上 衝突性能開発部 同上 同上
		「漆黑」質感の定量化技術の確立	赤峰 真明 中野さくら 桂 大詞 久保田 寛	技術研究所 同上 同上 同上
		Mechanical Behavior of Joints with Tap Bolt Subjected to Thermal Load	H.Yamamoto Y.Omiya T.Watanabe M.Fujii	Okayama Univ. Okayama Univ. Technical Reserch Center Okayama Univ.
		エンジン筒内流動解析を応用した溶接スラグ生成メカニズムの推定	斉藤 直子 深堀 貢 田中 正顕 北原陽一郎 目良 貢 宮田 実 鈴木 励一	技術研究所 同上 シャシー開発部 技術研究所 同上 (株)神戸製鋼所 同上
		立体物の直接的な質感測定技術	桂 大詞	技術研究所
		自動車内装意匠設計における投影型複合現実感技術を用いた視覚変形と表面質感変調に関する研究	竹澤 拓朗 岩井 大輔 佐藤 宏介 村瀬 健二 原 利宏	大阪大学大学院 同上 同上 技術研究所 同上
		流体構造連成解析による衝突時の燃料揺動を考慮した燃料タンク構造の検討	山内 一矢 花田 裕 嘉村 浩二	車両開発本部 同上 衝突性能開発部
		カラー開発におけるデザイナー完成の定量化技術の開発	濱田 有子 中本 尊元 山根 貴和	車両実研部 同上 同上
		車両応答の過渡特性が操舵行動へ与える影響 (第二報)	佐藤 一貴 塚野 孝俊 安部 正人 山門 誠 狩野 芳郎	神奈川工科大学 統合制御システム開発本部 神奈川工科大学 同上 同上

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2017.10.11-13	自動車技術会 2017年秋季大会	車両横加加速度に基づくヨーモーメント 制御手法の検討(第5報) ブレーキ液圧 の前後配分比の違いによる影響	平賀 直樹 佐藤 誠一 長谷川 義二 高橋 絢也 藤下 裕文 梅津 大輔	日立オートモティブシステムズ(株) 同上 同上 (株)日立製作所 操安性能開発部 同上
2017.10.12	(株)ヴァイナス VINAS Users Conference2017	多目的進化計算アルゴリズムCheetahと スパコン「京」を用いた複数車種同時最 適化	小平 剛央	技術研究所
2017.10.17-18	色材協会 色材協会創立90周年記念会議	in-situ塗装仕上がり肌評価技術の確立	湊 允哉 赤峰 真明 久保田 寛	技術研究所 同上 同上
2017.10.20	日本放射線技術学会 第45回日本放射線技術学会秋季 学術大会 特別講演	生体システムに基づくクルマの開発 ～人間中心のクルマづくり～	西川 一男	技術研究所
2017.10.20-23	公益社団法人 日本技術士会 中国 本部 第44回技術士全国大会ポスター セッション	新型ガソリンターボエンジン 「SKYACTIV-G 2.5T」の過給技術	三角 春樹	パワートレイン技術開発部
2017.10.25	溶接接合工学振興会 マルチマテリアル化に向けた異種 材料接合の最前線	異種材料接合の自動車産業への応用	杉本 幸弘	技術研究所
2017.10.26	SCSK(株) IPS Cable Simulation ユーザー カンファレンス2017 in JAPAN	車両ハーネス開発の革新	下河内次生	統合制御システム開発本部
2017.10.26-27	日本分析化学会 X線分析研究懇談 会 第53回X線分析討論会	放射光XPSによるNO吸着前後のRhナノ 粒子電子構造変化の解析	國府田由紀	技術研究所
2017.10.27	モデロン(株) Modelica Users Conference 2017 Japan	マツダにおけるModelica 活用の歴史と 今後の展望	小森 賢	統合制御システム開発本部
2017.10.27	EnSightユーザー会2017	SKYACTIVエンジンの性能開発に用い たCFD	横畑 英明	エンジン性能開発部
2017.10.27	富山県工業技術センター とやま高機能素材研究会 第3回マルチマテリアルWG 特別 講演会	自動車のマルチマテリアル化と異材接合 技術	杉本 幸弘	技術研究所
2017.10.30	近畿大学工学部次世代基盤技術研 究所/タイ学院システム工学研究 科/工学部産学官連携推進協力会 近畿大学工学部研究公開フォーラ ム2017	車両防錆技術開発を革新する耐食性短期 評価技術の開発	浅田 照朗 重永 勉	技術研究所 同上
2017.10.31-11.1	(株)JSOL LS-DYNA&JSTAMPフォーラム 2017	プレス成形シミュレーションを活用した ボディー精度予測の取り組み CFRP部材の予測技術の検討 CAEクラウドによる大規模サンプリ ングを活用した次世代の車両開発のための 最適設計手法の検討	高橋 大樹 西原 剛史 釧持 寛正	車体技術部 衝突性能開発部 技術研究所

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2017.10.31-11.1	プラスチック成形加工学会 成形加工シンポジウム'17	自動車用ポリプロピレン微細発泡体の成形ウインドウ拡大検討	小林めぐみ 金子 満晴 大嶋 正裕	技術研究所 同上 京都大学
2017.11.1	モノづくり日本会議 NEDO「革新的新構造材料等研究開発」プロジェクトシンポジウム	アルミニウム/異種材料の点接合技術 自動車産業の将来予測からみた構造材料の軽量化技術の役割と課題	杉本 幸弘	技術研究所
2017.11.2	広島県 広島県立総合技術研究所 研究成果発表会	材料モデルベース開発によるモノづくり革新	甲斐 裕之	技術研究所
2017.11.3	軽金属学会 第113回秋季大会	CF-RP/アルミニウムの摩擦攪拌点接合強度に及ぼす接合条件の影響	西口 勝也 田中耕二郎 森田 泰博 杉本 幸弘	技術研究所 同上 同上 同上
2017.11.7	SCSK(株) MAGMASOFTユーザーカンファレンス2017	HPD湯流れ可視化によるMAGMA Filling解析精度向上への取り組み	竹村 幸司	パワートレイン技術部
2017.11.9	IDAJ IDAJ CAE Solution Conference 2017	工学・数学の双方向アプローチによる、軽量・高機能な車体骨格の断面形状の研究	本田 正徳	技術研究所
2017.11.11-12	日本化学会 中国四国支部 2017年中国四国支部大会	ゴム中硫黄の熱変性に関する硫黄K殻XAFS解析	森 啄也 三根生 晋 大下 敬之 住田 弘祐 早川慎二郎	広島大学 技術研究所 同上 同上 広島大学
2017.11.13-15	日本燃焼学会 第55回燃焼シンポジウム	ノナン (C9H20) 異性体の着火遅れ	山田 眞平 下栗 大右 崎間 俊明 松原 圭輝 八房 智顯 遠藤 琢磨 乃生 芳尚 斉藤 史彦 三好 明	広島大学 同上 同上 同上 広島工業大学 広島大学 技術研究所 同上 広島大学
		ノナン/ドデカン異性体混合燃料の着火遅れ	崎間 俊明 下栗 大右 山田 眞平 松原 圭輝 八房 智顯 遠藤 琢磨 乃生 芳尚 斉藤 史彦 三好 明	広島大学 同上 同上 同上 広島工業大学 広島大学 技術研究所 同上 広島大学
		気相・表面化学種の分析に基づく三元触媒用の詳細表面反応データベースの構築 -Al2O3担持された複合触媒におけるCO/O2反応機構-	森山 大輔 下栗 大右 日隈 聡士 村上 浩 松本 有平 横畑 英明 竹林 広行	広島大学 同上 熊本大学 走行・環境性能開発部 エンジン性能開発部 同上 走行・環境性能開発部
		LII法および消光法を用いた定容容器内伝播火炎のすす粒子計測	谷井 透汰 下栗 大右 本田 雄哉 河野 通治 植木 義治 横畑 英明	広島大学 同上 エンジン性能開発部 同上 同上 同上

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2017.11.13-15	日本燃焼学会 第55回燃焼シンポジウム	ノッキング圧力振動を伴わない末端ガス 自着火燃焼モード	佐藤 伴音 寺島 洋史 河野 通治 植木 義治 横畑 英明	北海道大学 同上 エンジン性能開発部 同上 同上
		定容容器を用いた高温高压条件における エンドガス局所自着火現象の解析	伊藤 祐太朗 下栗 大右 藤田 晴彦 藤川 菜子 山田 眞平 寺島 洋史 河野 通治 本田 雄哉 植木 義治 横畑 英明	広島大学 同上 同上 同上 同上 北海道大学 エンジン性能開発部 同上 同上 同上
2017.11.14	ネオリウム・テクノロジー(株) 第5回Dymola/Modelica/FMIセミ ナー	マツダにおけるDymola、Modelicaおよ びFMIの活用事例と今後の期待	寺岡 陽一	統合制御システム開発本部
2017.11.15	日本トライボロジー学会 トライボロジー会議2017秋 高松	異種材料の摩擦攪拌点接合におけるプロ セスパラメータの影響	富岡 俊介 大宮 拓也 西口 勝也 島田 聡子 藤井 正浩	岡山大学 同上 技術研究所 同上 岡山大学
2017.11.16	日本イーエスアイ(株) PUCA2017・ESI Users' Forum Japan	「魂動デザイン」の再現に向けたこだわ りのモノづくり ～プレス成形における外観品質保証プロ セスの再構築～	浅田 雅彦	車体技術部
2017.11.17	自動車技術会 自動車技術会シンポジウム No.07-17 「車体構造の信頼性を 支える疲労接合評価の最新技術」	接着接合部疲労強度に対する経年劣化の 影響調査	樋江 井守 川合 淳一 清水 誠吾 富永 秀和 田中 良樹 小林 敏雄 山本 研一 清水 寛文 小松 圭吾 尾曲 秀明 進 祐一郎 倉野 隆文 日下部雅幸 植松 美彦 西川 出 菅田 淳	アイシン化工(株) 同上 (株)SUBARU 三菱自動車エンジニアリング(株) 三菱自動車工業(株) サンスター技研(株) 技術研究所 トヨタ自動車東日本(株) トヨタ車体(株) 同上 トヨタ自動車(株) 同上 同上 岐阜大学 大阪工業大学 広島大学大学院
2017.11.17	日本材料学会・複合材料部門委員 会, SAMPE Japan・コンポジット 委員会, 同志社大学先端複合材 料研究センター 第9回自動車用途コンポジットシ ンポジウム	PA12エラストマーを接着剤に用いた CFRP/A1の摩擦攪拌点接合強度に及ぼ す 加圧時間の影響	寺村 拓也 片山 傳生 田中 和人 西口 勝也	同志社大学 同上 同上 技術研究所
		PA12エラストマーを接着剤に用いた CFRP/A1の摩擦攪拌点接合強度に及ぼ す 加圧時間の影響	寺村 拓也 片山 傳生 田中 和人 西口 勝也	同志社大学 同上 同上 技術研究所
2017.11.22	(株)電通国際情報サービス ものづくりを革新するITフォー ラムin広島2017	プラスチック領域におけるモノ造り革新 の取り組み	埜 慎一	車両技術部

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2017.11.25	早稲田大学理工学研究所 早大モビリティ研究会 第37回早大モビリティシンポジウム	乗用車用クリーンディーゼルエンジン SKYACTIV-Dの進化	片岡 一司	エンジン性能開発部
2017.11.25	精密工学会 2017年度精密工学会中国四国支部・鳥取地方学術講演会 -	切削CAEを用いた切削条件選定手法の考察	秋月 匠	ソーリング製作部
2017.11.28	腐食防食学会 第186回シンポジウム	自動車腐食防食の現状と課題「自動車腐食分科会の活動経緯」	山根 貴和	車両実研部
		自動車腐食防食の現状と課題「自動車メーカー各社の腐食促進試験法と公的腐食促進試験法の比較」	丸山 慧 山根 貴和 三村 治	車両実研部
2017.11.28-29	型技術協会 第3回型技術ワークショップ 2017in岡山	コピープロセス適用によるパネル等価値の実現	影山 貴大	ソーリング製作部
		プレス金型設計におけるCAE技術の活用	安本 一也	車体技術部
		魂動デザインの実現に向けた樹脂部品の面精度保証プロセスの構築	藤末 晃 影本 真也 埜 慎一	車両技術部 同上 同上
2017.11.29	溶接学会 第119回軽構造接合加工研究委員会	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	技術研究所
2017.12.1	CAESEKI.com, ひろしま産業振興機構 第33回経営に貢献するCAEセミナー	材料モデルベース開発に基づくマツダのモノづくり革新	甲斐 裕之	技術研究所
2017.12.1	Pacific Center of Thermal Fluids Engineering	気相流れによる液膜からの液滴飛散特性に関する研究	土田 崇史 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
		エンジン排気を模したS字曲り管路内脈動流の2次流れ特性について	大木 純一 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
2017.12.6	早稲田大学創造理工学部総合機械工学科 熱エネルギー・反応工学	第6章：企業におけるエンジン開発	養祖 隆	パワートレイン技術開発部
2017.12.6-8	自動車技術会, 日本機械学会 第28回内燃機関シンポジウム	ガソリン高圧噴射を用いた高圧縮比エンジンの燃焼技術 (第1報) —高圧噴射による可能性検討—	藤川 竜也 原田 雄司 養祖 隆 山川 正尚	パワートレイン技術開発部 技術研究所 パワートレイン技術開発部 同上
		ガソリン高圧噴射を用いた高圧縮比エンジンの燃焼技術 (第2報) —単気筒エンジンによるコンセプト検証—	神長 隆史 長津 和弘 養祖 隆 藤川 竜也 長野 高皓 山川 正尚	パワートレイン技術開発部 同上 同上 同上 同上 同上
		高温高圧雰囲気における水添加が着火・燃焼反応に及ぼす影響	葛 晰遥 原田 雄司 清末 涼 山下 洋幸	技術研究所 同上 同上 同上
2017.12.7-8	薄鋼板成形技術研究会 2017年度第3回研究討論会	バーチャル設計を用いた、金型形状合わせ技術の向上	長澄 徹侍	ソーリング製作部

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2017.12.8	自動車技術会 シンポジウム：新しい時代が求める振動騒音の技術	ロードスターのパフォーマンスフィールドとNVHのモデルベース開発	藤川 智士	パワートレイン開発本部
2017.12.8	広島市立大学 地域で活躍する人材による講演会	車載ソフトウェア開発の動向と今後の取り組み	白 雪峰	統合制御システム開発本部
2017.12.9	進化計算学会 進化計算シンポジウム2017	産業界からみた最適化(進化計算)の世界	小平 剛央	技術研究所
2017.12.9	日本人間工学会中国・四国支部 第50回中国・四国支部大会	関節受動抵抗を用いた自動車の乗降動作負担推定技術の開発	成末 充宏 高山 雅年 武田 雄策	技術研究所 同上 同上
2017.12.12-14	日本流体学会 第31回数値流体力学シンポジウム	実走行条件における簡易車体形状周り流れのLarge Eddy Simulation	山本 英貴 木原 尚 安倍 賢一 李 曠 岡本 哲	九州大学 同上 同上 車両実研部 同上
		簡易自動車模型の流れ場に対する圧力断面極小旋回法の応用	中村 優佑 平岡 武宜 農沢 隆秀 中島 卓司 清水 圭吾	技術研究所 同上 同上 広島大学 同上
2017.12.13-15	九州大学 マス・フォア・インダストリ研究所 研究集会：データサイエンスの発展と実社会への応用	Application of statistical modeling for developing painted color with high quality design	中本 尊元	車両実研部
2017.12.19-20	日本液体微粒化学会・日本エネルギー学会 第26回微粒化シンポジウム	液膜におけるBag-Breakup	土田 崇史 大槻 洗介 尾形 陽一 西田 恵哉 山本 亮 中村 和博 丸井 聖太郎 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 同上
		非常噴射過程におけるノズル内キャビテーション流れのX線高速度可視化計測	小谷 和也 Rubby Prasetya 三輪 誠 宋 明良 文 石洙 和田 好隆 植木 義治 横畑 英明	神戸大学 同上 同上 産業技術総合研究所 エンジン性能開発部 同上 同上
		ノズル内キャビテーション乱流と液体噴流のハイブリッド数値解析	山本 将貴 鷺見 謙彰 宋 明良 和田 好隆 植木 義治 横畑 英明	神戸大学 同上 同上 エンジン性能開発部 同上 同上
		高速微小液滴の衝突挙動に関する実験的研究	小田 哲也 山根 尚也 大澤 克幸 山本 啓介 横畑 英明	鳥取大学 同上 同上 エンジン性能開発部 同上

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2017.12.19-20	日本液体微粒化学会・日本エネルギー学会 第26回微粒化シンポジウム	高温高压雰囲気におけるガソリン噴霧の壁面衝突挙動と液膜形成	内富真太郎 駱 洪亮 西田 恵哉 尾形 陽一 張 武 藤川 竜也 原 亮介	広島大学 同上 同上 同上 パワートレイン技術開発部 同上 同上
2017.12.20	自動車技術会 ガソリン機関部門委員会シンポジウム	「SKYACTIV-G 2.5T」の過給技術	室谷 満幸	エンジン設計部
2017.12.20	東レエンジニアリング(株) 2017年度3D TIMONお客様交流会	射出成形部品のソリ収縮変形解析精度向上の取り組み	下野 廣太	車両技術部
2017.12.21	廿日市市平良市民センター 大学セミナー(高齢者学級)	日本の交通事故の実態と自動車の安全技術の進化について	岩下 洋平	技術研究所

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.71, No.4(2017), pp.90-94	歩行者保護における高効率衝撃吸収ボンネットレインフォースメント構造とアクティブボンネットの開発	藤田 賢治 曾我部 洋 西原 剛史 藤井 照雅	ボデー開発部 衝突性能開発部 同上 ボデー開発部
	Vol.71, No.5(2017), pp.75-80	お客様の充実したカーライフのために「マツダコネクタの開発」	長谷川 勉 横田 正志 青木 敬 島谷 信行 久保崎淳一 工藤 恒夫 西嶋 孝祥	統合制御システム開発本部 同上 同上 同上 同上 同上 同上
	Vol.71, No.6(2017), pp.6-7	新しい価値を提供する新小型クリーンディーゼルエンジンの開発	森永 真一 大西 毅 平林 千典 志茂 大輔 高松 宏志	エンジン性能開発部 同上 エンジン設計部 エンジン性能開発部 同上
	Vol.71, No.6(2017), pp.28-32	モノ造り革新とビッグデータ活用による継続的進化	佐崎 幸司 林 一哉	パワートレイン技術部 同上
	Vol.71, No.8(2017), pp.7-16	自動車と法規	鈴木 敬 佐藤 幸紀 竹内 強	環境安全技術部 日野自動車(株) 川崎重工業(株)
	Vol.71, No.8(2017), pp.31-43	乗用車	津戸 明広 大森 正志 小山 文三 小倉 正直	商品ビジネス戦略企画部 技術企画部 デザイン開発推進部 ボデー開発部
	Vol.71, No.9(2017), pp.18-20	新型マツダロードスター専用6MTの開発	延河 克明	ドライブトレイン開発部
日本機械学会誌				
	Vol.120, No.1179(2017), pp.40-41	機会遺産のDNA 10A型ロータリーエンジンのDNA REスピリット	大久保昌紀	エンジン性能開発部
日本機械学会論文集				
	83 巻 (2017) , 850 号, p.16-00537	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	東京大学大学院 同上 同上 パワートレイン技術開発部 PT制御システム開発部 パワートレイン技術開発部
ENERGY				
	Vol.127, (2017), pp.89-100	Governing parameters and dynamics of turbulent spray atomization from modern GDI injectors	文 石洙 Tianyun LI 佐藤 圭峰 横畑 英明	産業技術総合研究所 同上 技術研究所 エンジン性能開発部
シミュレーション				
	Vol.36, No2(2017), pp.66-68	SKYACTIVエンジンの性能開発に活用するCFD	横畑 英明	エンジン性能開発部
International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics				
	vol.52, no.3-4, pp.1377-1383	Study of power generation using FPED assuming engine vibration	田中 義和 陸田 秀実 尾古 卓也 山本 寿英 市川 和男 沖濱 圭佑	広島大学 同上 同上 技術研究所 同上 同上

寄稿誌名	巻・号・ページ	題目	発表者	所属
マツダ技術通信	2017年2月号	電気二重層キャパシタの劣化解析技術	宇都宮 隆	技術研究所
溶接技術	平成29年2月号 pp.46-50	エンジン専用熱流体プログラムの適用による溶接スラグ生成メカニズム解明	斉藤 直子 深堀 貢 田中 正顕 鈴木 励一 宮田 実	技術研究所 技術研究所 シャシー開発部 (株)神戸製鋼所 (株)神戸製鋼所
月刊「溶接技術」	第65巻/第5号	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	技術研究所 同上 同上
軽金属溶接	Vol.55, No.11, pp.15-19	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	技術研究所
日本接着学会誌	Vol.53, No.8, 2017, pp.283-289	自動車における構造接着技術～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 麻川 元康 山本 研一	技術研究所 同上 同上
SPring-8/SACLA 利用者情報	2017, vol22, No.1	BL24XU実験ハッチの改造と雰囲気制御型硬X線光電子分光装置の整備	横山 和司 松井 純爾 竈島 靖 住田 弘祐	兵庫県立大学 同上 同上 技術研究所
Computer Science & Information Technology	Vol.7, No.4, pp.71-78	Ankle Muscle Synergies for Smooth Pedal Operation Under Various Lower-Limb Posture	木口 量夫 藤田 拓斗 藪中 翔 武田 雄策 原 利宏	九州大学 同上 技術研究所 同上 同上
工業材料	2017年6月号, Vol.65, no6, pp.30-35	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
TSUBAME/共同利用/採択状況および採択利用課題	平成28年度採択利用課題一覧(産業利用) 番号5	GPUマルチノードを活用した大規模電波伝搬のFDTD法による再現	奥木 友和 山田 秀行 山本 康典	技術研究所 同上 同上
ICRA2017 (IEEE International Conference on Robotics and Automation)	Vol.2, No.2, pp.1109-1116, April 2017	Lane-Change Detection Based on Vehicle-Trajectory Prediction	禹ハンウル 池 勇勳 河野 仁 田村 雄介 黒田 康秀 菅野 崇 山本 康典 山下 淳一 浅間 一	東京大学 同上 同上 同上 技術研究所 同上 同上 東京大学 同上

寄稿誌名	巻・号・ページ	題目	発表者	所属
e-Journal of Surface Science and Nanotechnology	vol.15(2017)	Fabrication and in/ex-situ XPS characterization of Rh nanoparticles	國府田由紀 住田 弘祐 小川 智史 塚田 千恵 生天目博文	技術研究所 同上 名古屋大学 同上 広島大学
車載テクノロジー	6月号, pp.31-35	異種材料接合技術について	高見 明秀	技術研究所
Science and Technology of Welding and Joining	Volume 23(2018), pp.79-86	Fatigue properties of friction stir welds of treated Al to carbon fibre-reinforced plastic	小川 裕樹 熊 一達 曙 紘之 加藤 昌彦 菅田 淳 田中耕二郎	広島大学 広島大学 広島大学 広島大学 広島大学 技術研究所
日経ものづくり	2017年6月号	温故知新の設計革新	小平 剛央	技術研究所
新構造材料技術研究組合 研究成果報告会ポスター集	p.60	アルミニウム/異種材料の点接合技術開発	西口 勝也	技術研究所
自動車のマルチマテリアル戦略最前線	pp.101-108	摩擦熱による異種材料接合技術	西口 勝也	技術研究所
成形加工	Vol29, No.10, pp.384-388	繊維複合材料における射出成形品の繊維長分布が機械的特性に及ぼす影響	播磨 一成 山田 浩明 梶岡 信由 高垣 有紀 藤 和久 松田 祐之 森脇 健二 小川 淳一 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
化学と教育	Vol.65, No.10, pp.502-503	化学とつながる職業	甲斐 裕之	技術研究所
IEICE Transactions on Electronics	Vol.E100-C, No.11, pp.972-977	Smart Steering Wheel with Swept Frequency Capacitive Sensing	小野裕太郎 森本 祐平 服部 励治 渡邊 雅之 道田奈々江 西川 一男	九州大学 同上 同上 技術研究所 同上 同上
進化計算学会論文誌	8巻1号, 2017	応答曲面法を用いた複数車種の同時最適化ベンチマーク問題の提案	小平 剛央 釧持 寛正 大山 聖 立川 智章	技術研究所 同上 宇宙航空研究開発機構 東京理科大学

寄稿誌名	巻・号・ページ	題目	発表者	所属
兵庫県ビームライン年報・成果集（オンライン出版）	Vol.6	小角X線散乱法によるナノフィラーの分散状態解析	三根生 晋 石津 嘉子 古賀 広之 角島 信司 住田 弘祐 桑本 滋生 漆原 良昌 李 雷 野瀬 惣市 横山 和司	技術研究所 同上 同上 同上 同上 兵庫県立大学放射光ナノテクノロジーセンター 同上 同上 同上
型技術	2017, Vol.32, No.8, pp.78-79	「魂動デザイン」の再現に向けたこだわりのモノづくり ～プレス成形における外観品質保証プロセスの再構築～	大谷 肇 岩田 成弘 西村 良治 岡田 又治	車体技術部 同上 同上 同上
	第33巻, 第1号, 2018年1月号, pp.50-53	自動車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	古川 智司 一原 洋平	車両技術部 装備開発部
型技術者会議2017 講演論文集, pp.94-95		魂動デザイン再現に向けた金型変形の抑制	岡山 一洋 久保 祐貴 小田上 進 山口 大輔	ソーリング製作部 同上 同上 車体技術部
型技術ワークショップ2017in岡山 講演論文集, pp.106-107		コピープロセス適用によるパネル等価値品質の実現	影山 貴大 佐々木忠義	ソーリング製作部 同上
日本金型工業会機関誌「金型KANAGATA」 No.170, 秋号, pp.32-36		バーチャル設計を用いた、金型の形状合わせ技術の向上	長澄 徹侍	ソーリング製作部
エレクトロヒート 2017, No.212, pp.11-15		生産工程革新「アクアテック塗装」	篠田 雅史	車両技術部
第25回品質工学研究発表大会予稿集 pp.134-137		壁部高精度加工技術の確立	中原 寛海 西本 光毅 大塚 宏明	ソーリング製作部 同上 生産企画部
	pp.194-197	バーチャル設計を用いた、金型の形状合わせ技術の向上	長澄 徹侍 新矢 齊 中山 光一 大塚 宏明 岡田 又治 坪根 健児 浜口 照巳	ソーリング製作部 同上 同上 生産企画部 車体技術部 同上 同上
	pp.210-213	高精度輪郭加工技術の確立	秋月 匠 中原 寛海 宇都宮 誠 大塚 宏明	ソーリング製作部 同上 同上 生産企画部
	pp.250-253	高硬度加工技術開発	上村 勝利 岡山 洋一 畑平 拓也 芝橋 恒成 安楽 健次 藤川 宏明 橋本 昭 大塚 宏明	ソーリング製作部 同上 同上 同上 同上 同上 同上 生産企画部

寄稿誌名	巻・号・ページ	題目	発表者	所属
2017年度精密工学会中国四国支部 鳥取地方学術講演会 講演論文集	講演論文集, pp.27-28	切削CAEを用いた切削条件選定手法の考察	秋月 匠 中原 寛海	ソーリング製作部 同上
電気学会電子情報システム部門誌	Vol.138, No.7, pp.910-911	データ駆動型制御を用いた車両ドライバーモデルの一設計	山内 優 山本 透 脇谷 伸 木下 拓矢 矢野 康英 原田 真悟 宮腰 穂	広島大学 同上 同上 同上 統合制御システム開発本部 同上 同上
Atomization and Sprays	Vol. 27, No.7(2017), pp.611-628	Experimental Investigation on Fuel Film Formation of Spray Impingement on Flat Walls with Different Surface Roughness	駱 洪亮 内富真太郎 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
自動車技術会関西支部ニュース	第30号(2017),pp.6-7	一括開発プロセスとCFDの導入による空力開発の革新	田中 章博	車両実験部
	第31号(2017),pp.1-3	1180MPa高強度鋼板のボデーへの適用	山口紘次朗	車体技術部

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
	望月 英生	商品戦略本部 技術企画部
	磯部 太郎	商品本部
	森野 敏峰	デザイン本部 デザイン開発推進部
	山根 貴和	車両開発本部 車両実研部
	安原 完治	車両開発本部 装備開発部
	吉川 尚好	統合制御システム開発本部
	拜崎 幸雄	パワートレイン開発本部 P T制御システム開発部
	横田 和也	技術研究所
	杉山 裕基	技術本部 生産企画部
	安田 孝志	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35号

発行 2018年10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 (565) 2833

Mazda Technical Review No.35

October 2018
Publisher Kiyoshi Fujiwara
Editor Masayuki Motohashi
Bureau Masashi Ohmori
Publishing office Technology Planning Dept.
Product Strategy Div.
Mazda Motor Corporation
3-1 Shinchi, Fuchu-cho Akigun,
Hiroshima 730-8670, Japan

©2018 マツダ株式会社 (禁無断転載)

ISSN 2186-3490