



MAZDA TECHNICAL REVIEW

マツダ技報 2020 No.37



MAZDA MOTOR CORPORATION
ESTD. 1920 HIROSHIMA, JAPAN

マツダ技報

Mazda Technical Review

2020 No. 37

マツダ技報 第37号 (2020)

目次

巻頭言	木谷昭博	1
特集：MAZDA CX-30		
1. MAZDA CX-30 の紹介	佐賀尚人, 山田真泰, 小曳脩介 森重領介, 西角博和	3
2. MAZDA CX-30 のデザイン	柳澤 亮	7
3. 新世代 C セグメント向け「SKYACTIV-G 2.5T」の紹介	西田良太郎, 加藤二郎, 藤山智彰 西尾貴史, 平田宏喜, 篠原宏文	12
4. タイヤ周りの風流れ制御技術を適用した MAZDA CX-30 の空力開発	中田章博, 森川陽介, 岡本 哲	19
5. MAZDA CX-30 のピークルダイナミクス性能開発	柏村祐二, 老川 隆, 吉村匡史 後藤英貴, 松村 篤	27
6. 新世代 i-ACTIV AWD の紹介	嶋田克利, 梅津大輔, 今村泰理 日高誠二	33
論文・解説		
7. 悪路耐久試験への自動運転装置の適用	田邊政治, 宮本幹大, 山上 登 山広昭文, 森本誠司, 上村晴美	39
8. 音からの情報で意のままの運転に貢献する エンジンサウンド開発	服部之総, 原田聖士, 光永誠介 森田洋明, 白石秀宗	45
9. 人体研究に基づく傷害低減技術の開発	泉山朋大, 西田周泰, 朝日龍介 山縣大樹, 鈴木 崇, 澤井 亮 杉本 繁, 福島正信	50
10. SKYACTIV-X を実現するシリンダーヘッド寸法の 高精度化	梅原美友, 米澤英樹, 丸尾幸治 末永啓太	57
11. 車体フレキシブル生産の進化	有泉雄一, 小池慎二郎, 倉橋聖矢	63
12. 魂動デザインを実現する高精度高効率金型製作 プロセスへの革新	影山貴大, 廻本章吾, 久保祐貴 江草秀幸, 叶井 貫, 大田敦史	69
13. 材料モデルベースリサーチによる多孔質吸音材微視構造 設計技術の開発と吸音部品設計への適用	山川啓介, 桂 大詞, 山本崇史	75
14. アルミニウム／樹脂異種材料点接合の強度特性に及ぼす 表面処理の影響	田中耕二郎, 小川裕樹	81

15. モデルベース開発によるエンジン吸気温低減の取組み	鈴野浩大, 外菌 徹, 檜原和晃	86
	丸本真玄, 前川耕太	
16. 分子論に基づくエンジン摺動面の境界潤滑解析技術	河口健太郎, 宮内勇馬	92
17. 火炎核を利用した圧縮自着火制御方法の検討	大野諒平, 大澤 駿, 葛 晰遥	98
	沖濱圭佑, 原田雄司, 藤本英史	
社外への発表論文一覧表		104

Mazda Technical Review No.37

CONTENTS

Foreword

(A. Kidani)	1
-------------------	---

Special Edition for Mazda CX-30

1. Introduction of Mazda CX-30 (N. Saga, M. Yamada, S. Kobiki, R. Morishige, H. Nishikado)	3
2. Design of Mazda CX-30 (R. Yanagisawa)	7
3. “Skyactiv-G 2.5T” for the New Generation C-segment Cars (R. Nishida, J. Kato, T. Fujiyama, T. Nishio, H. Hirata, H. Shinohara)	12
4. Aerodynamic Development for Mazda CX-30 by Using Flow Control Technology Around Tire (A. Nakata, Y. Morikawa, S. Okamoto)	19
5. Development of Vehicle Dynamics Performance for Mazda CX-30 (Y. Kashimura, T. Oikawa, T. Yoshimura, H. Goto, A. Matsumura)	27
6. Introduction of New Generation i-ACTIV AWD (K. Shimada, D. Umetsu, Y. Imamura, S. Hidaka)	33

Technical Reports

7. Application of Autonomous Driving Device to Rough Road Durability Test (S. Tanabe, M. Miyamoto, N. Yamagami, A. Yamahiro, S. Morimoto, H. Kamimura)	39
8. Development of Engine Sound with Information that a Person Gets from Sound, to Contribute to Driving with the Will on (Y. Hattori, S. Harada, S. Mitsunaga, H. Morita, H. Shiraishi)	45
9. Technological Development to Reduce Injuries Based on Study of Human Skeleton (T. Izumiyama, N. Nishida, R. Asahi, H. Yamagata, T. Suzuki, R. Sawai, S. Sugimoto, M. Fukushima)	50
10. Improving Accuracy of Cylinder Head Dimension to Realize Skyactiv-X (Y. Umehara, H. Yonezawa, K. Maruo, K. Suenaga)	57
11. Evolution of Flexible Body Production System (Y. Ariizumi, S. Koike, S. Kurahashi)	63
12. Process Innovation Aimed at High-Precision, High-Efficiency Production of Mold that Embodies “KODO” Design Theme (T. Kageyama, S. Sakomoto, Y. Kubo, H. Egusa, T. Kanai, A. Ohta)	69
13. Development of Microstructural Design Technology of Porous Sound Absorbing Material and its Application to Sound Absorbing Component Design Based on Material Model Based Research (K. Yamakawa, D. Katsura, T. Yamamoto)	75
14. Effect of Surface Treatment on Strength Properties of Aluminum/CFRTP Spot Joining (K. Tanaka, Y. Ogawa)	81
15. Intake Air Cooling with Model-Based Development (K. Suzuno, T. Hokazono, K. Narahara, M. Marumoto, K. Maekawa)	86

16. Atomistic Simulation for Boundary Lubrication in Engine Tribology (K. Kawaguchi, Y. Miyauchi)	92
17. Study of Compression Auto-Ignition Control Method Using Flame Kernel (R. Ono, S. Osawa, S. Katsu, K. Okihama, Y. Harada, H. Fujimoto)	98

List of Reports Published in 2019	104
--	-----

巻頭言

モノ造りを支えるデジタル技術の進化

Evolution of Digital Technology to Support Monotsukuri



執行役員

木谷 昭博

Akihiro Kidani

私は大学4年生の時、ほぼ毎日と言っていいほど学内の機械工場に通いつめ、卒業研究のための引っ張り試験用テストピースの製作に青春の大事な時間を費やしていました。「テストピースに要求される精度のものを『自分の手で』作ることができる。これこそが機械技術者としての第一歩である」と研究室の教授に指導されたので、フライス盤、ボール盤などの手動の工作機械を使ってテストピースを製作することに打ち込みました。要求された精度が出せるようになるまでにかかった期間は6カ月。その機械工場にはNCフライス盤もありましたが、壊す可能性があるからといって使わせてもらえず、となりでNCフライス盤をあやつる職人さんの作業を横目で見ながら、うらやましいのと同時に高機能・高精度のすばらしさに感心したのを今でも覚えています。(私が6カ月要したテストピースも数日で仕上げていました。)振り返ると、モノづくりを支えるデジタル技術に初めて興味を持ったのはこの時だったと思います。

1982年にマツダに入社し、幸運にもCAD/CAMシステム開発プロジェクトに参画することになりました。そのプロジェクトでは、自動車のデザイン、部品設計、金型設計ができる3次元CADシステムと、NC工作機械を使用して高精度・高効率で金型を製作するCAMシステムにより、商品の開発期間を短縮することを目標にしていました。私はCAMシステム開発の担当として、3次元CADデータからNC工作機械を制御するカッターパスの自動生成システム開発に取り組みました。やっとあこがれのNC工作機械とNC制御技術に触れる立場になり、ワクワクしながら仕事に没頭しました。当時は現在のような市販品はほとんどなく、多くの自動車会社は、CAD/CAMそしてCAEの開発を内製し、競い合っていました。商品開発や生産準備のモノづくりを高効率で実現するために、裏方的な存在としてCAD/CAM/CAEシステムの開発技術者が奮闘していた時代です。当時のコンピューター技術では、手書きの図面や職人が作る石膏モデルをトレース制御して金型を製作するモデル倣い方式に時間がかかり、CAD/CAMを動かす端末も大変高価で実用化に大きな課題がありました。

1990年代に入り、IT技術の進化と同期してCAD/CAMのアルゴリズムの継続的改善、そして工作機械の性能進化により、CAD/CAMシステムを使用した仕事の実用段階に入りました。1996年、経営者からの大きな期待の中で、マツダ・デジタルイノベーション・プロジェクトが立ち上がり、商品開発プロセス革新への挑戦が始まりました。すべての部品を3次元CADで設計し、それらの部品の金型設計も3次元CADで行い、金型を切削するNCプログラムを自動生成し、高速・高精度制御のNC工作機械で製作する技術。クルマ1台分の3次元CADデータを活用したバーチャル・テストング。そのバーチャル・テストングの精度を向上させるために現象解明が可能な実験計測解析装置。2000年以降、これらのデジタル技術を駆使

した技術開発プロセスや商品開発プロセスの革新を進め、スーパーコンピューターをフル活用した衝突解析・燃焼解析等のシミュレーション技術も大きく進化し、試作品による試行錯誤の限界を突破し、エンジニアが新技術・新構造に挑戦しやすい環境づくりに貢献しました。同プロジェクトで取り組んだモノづくりを支えるデジタル技術の成果は、開発の効率化にとどまらず、相反する課題をブレークスルーした SKYACTIV 技術を搭載した商品を市場導入できたことです。世界初の SPCCI (Spark Controlled Compression Ignition : 火花点火制御圧縮着火) を搭載した SKYACTIV-X もデジタル技術の支えがあった成果であり、まさにオペレーション・ブレークスルーがテクノロジー・ブレークスルーを生み出したといっても過言ではないと思います。

CASE 時代に突入し、超高速・高精度な画像処理やセンシング、5G 通信、AI、クラウド、量子コンピューターなどの先進要素技術を駆使した安全・安心な商品の提供とお客さまとクルマがつながることによる新たな付加価値提供が求められています。これらを実現するのはソフトウェア開発力です。目に見えるハード部品中心の BOM (Bill Of Materials : 部品表) では限界があり、クルマ一台分の制御ソフトウェアや MBD (Model Based Development) のモデルまであつかえる BOM、さらにその MBD モデルの根拠となるテスト解析データやコネクテッド通信から得られる市場データとの因果関係まで容易にわかる BOM、すなわちソフトウェア BOM が必要になっており、現在、当社はそれらの新たなデジタル技術の開発を進めています。今後、我々の業務の中に占めるソフトウェア開発の仕事量が飛躍的に増えることは明らかです。新しい商品のためのソフトウェア開発とそのソフトウェア開発を効率化し自動化するようなソフトウェア開発です。これらのソフトウェア開発は、物理現象からロジックを導き出すことやお客さまの安全・安心を提供する観点からソフトウェアに要求される品質の厳しさと緻密さが要求され、ソフトウェアの開発プロセス革新が、今後の当社のデジタル技術の進化の方向と考えます。また、世界各国での環境規制強化、CASE 対応により、技術開発・商品開発に関わる技術者の仕事量は著しく増加傾向にあります。一方、少子化による日本の労働人口の減少や新しい働き方の浸透により、技術者の生産性を飛躍的に向上することが必要不可欠な時代に突入していくでしょう。自動化できる業務は、ローコード (Low-Code Development Platform : 最小限のソースコードでソフトウェア開発を高速化するための IT ツール)、RPA (Robotic Process Automation)、AI 等を活用して徹底的に自動化を進め、技術者が、考え抜くことに集中できる環境の構築、さらにワークライフバランスを満たせる環境の構築もますます重要になります。

NC フライス盤に出会ってからもうすぐ 40 年になりますが、こうして振り返ってみると、モノづくりのデジタル技術は当時想像していたよりはるかに大きく進化したと思いますし、今後も進んでいくのだと感じます。このソフトウェア開発プロセスの革新の鍵は、人です。IT 人財の確保が難しくなることを考慮すると、デジタル技術を実際に使用して試行錯誤しながらも既存業務を効率化・自動化できる人 (IT 人財) を社内で育てることが重要と考えています。彼らが、さらにクルマのソフトウェアの開発プロセスの効率化まで支援できる人財に成長すれば、人財のデジタル・トランスフォーメーションが達成できます。そのためには、私が NC フライス盤を初めて使った時のようなワクワク感を彼らにも経験してもらうことも大事なことだと思います。今後も仕事を楽しみつつも、飽くなき挑戦の姿勢を貫き、次の 100 年に向けてモノづくりを支えるデジタル技術の持続的な進化を進めてまいります。みなさまのご支援・ご指導をよろしくお願い申し上げます。

特集：MAZDA CX-30

01

MAZDA CX-30 の紹介

Introduction of Mazda CX-30

佐賀 尚人 ^{*1} Naohito Saga	山田 真泰 ^{*2} Masahiro Yamada	小曳 脩介 ^{*3} Shusuke Kobiki
森重 領介 ^{*4} Ryosuke Morishige	西角 博和 ^{*5} Hirokazu Nishikado	

要 約

CX-30 は人間中心の設計思想の下、コンパクトクロスオーバーとしての使い勝手のよさを徹底的に磨き上げ、全く新しい車種として導入した。乗る人全てがくつろぎながら、ロングドライブでも快適に過ごせる、心地よいゆとりを実現した室内空間、さまざまなシーンやニーズにストレスなく応えられる容量と使いやすさを兼ね備えたラゲッジスペース、ドライビングポジションやヒューマン・マシン・インターフェイスなど、最新の知見と技術を織り込んで進化させた運転環境を提供した。CX-30 は幅広いライフスタイルをサポートするとともに、このクルマと暮らす時間をより豊かに感じられるよう、細部まで丁寧に造り込んだ。

Summary

Under the human centric design approach, CX-30 is introduced as a completely new product which thoroughly realizes the value of the convenience as a compact crossover. The interior realizes the all passengers can spend a long drive comfortably while relaxing. The luggage space realizes the capacity and the usability which can respond to the various scene and needs without a stress. Technologies were interwoven with the latest knowledge such as driving position and Human-machine interface (HMI) and the evolved driving circumstance. CX-30 made politely to the detail and was crowded in order to support a wide lifestyle above up to now as well as feel this car and create a radiant life.

Key words : Vehicle development, Design, Vehicle dynamics, Body shell

1. はじめに

世界で SUV シフトが加速している。マツダは、これを一過性のブームではなく、現代生活にフィットしたモビリティの正常進化としてとらえた。そして一人でも多くのお客様に喜んでいただけるようマツダの一括開発の根源である SKYACTIV-VEHICLE ARCHITECTURE と SKYACTIV-ENGINE を軸に、全く新しいクロスオーバー SUV を開発した。新世代商品群の第 1 弾である MAZDA3 とのコモナリティを活かしマツダらしいダイナミック性能を与えながらも、独自のコンセプトを貫き、都市生活から郊外まで使って頂けるキャラクターを持った商品とした。新しいスタンダードモデルとなるべく、それに相応しいデザイン、外観寸法、室内パッケージ、ダイナミック性

能、セーフティーを、高次元で融合することにチャレンジしたのが CX-30 である。

2. ターゲット顧客と商品コンセプト

2.1 ターゲット顧客

CX-30 は、「ライフステージ変化に伴う人生の転換期を迎える人々」に着目し開発をスタートした。この転換期の中で独身～結婚～出産の家族形成期は、短期間に家族構成や生活形態が目まぐるしく変わる時期である。そして、生活の変化や人間関係の広がりを通して、自身の価値観にも変化がもたらされる時期でもあると考える。このため転換期を迎える方々のニーズは多様化し、クルマに求める要求のレベルが一層高まる傾向にある。マツダは、彼らの要求に真摯に向き合うことで、多くのお客

*1～3 商品本部
Product Div.

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

*4 企画設計部
Architecture Design Dept.

様に笑顔を届けられると考えた。また、CX-30をお客様の生活に寄り添い愛されるモデルにするため、ターゲットカスタマーやコンセプトを定める上で、市場情報等の定量データからニーズを読み解く活動に加え、この転換期を向かえる世界中のお客様に直接会い話を聞かせてもらう活動を行った。データによる包括的な情報と個人のもつ生々しい情報を組み合わせながら議論を重ねた結果、CX-30のターゲットカスタマーを、「新たな発見や挑戦を楽しみ、大切な人との創造性あふれる生活を送るヤングファミリー」と定義した。

2.2 商品コンセプト

CX-30では、このような人々の「人生の転換期」を輝かせるクルマを目指し商品コンセプトを、「人生の幅が広がる・世界が広がる」と定め4つのKey Value (以降KV)を下記と定義した。

KV1：美しさに感性が共鳴し、創造性豊かな自分になれる。

KV2：大切な人と過ごす時間を通して、絆が深まる。

KV3：自分の意志のまま、自由に走り出せる。

KV4：心の余裕が、日常の中に新たな発見を生む。

これらの価値を高次元で実現するために、都市～郊外までシーンに依らず取り回しのよいコンパクトな外観諸元の中に、(KV1)感性が共鳴する美しさ、(KV2)同乗者全員が充実した時間を共有できる上質な空間、(KV3)ヤングファミリーの生活に必要な荷室、(KV4)ドライバーの意思にシンクロするダイナミック性能、(KV4)安心かつスマートな運転を支える人間中心の cockpit と先進安全装備を凝縮させた。

3. 商品特徴

3.1 デザイン

CX-30のデザインコンセプトは「Sleek and Bold」と定めた。ヤングファミリーの日常をサポートしながら創造性豊かな生活を届けるため、一般的にデザイン性と相反するはずの居住性や荷室容量などにも一切の妥協をすることなく、伸びやかな美しさの中にSUVらしい力強さが融合したプロポーションを創り上げた。更に、見るたび触れるたびに感性が共鳴することをねらった、時間や場所によりその表情を変える美しいボディーサーフェスや、包まれ感と抜け感を鮮やかに対比させた、乗る人全てが一体感と心地よさを感じられる上質なインテリアなど細部に至るまで造り込みを行った。

3.2 パッケージング

何処へでも自由に行ける気軽さをもつコンパクトなサイズでありながら、子供や友人と気兼ねなくレジャーに行ける室内空間を持ち合わせたパッケージの実現は、CX-30にとって大切な要素の一つである。

(1) 諸元寸法

外観諸元は、生活の中でコンパクトさを必要とするさまざまなシーンを想定し、お客様が最も価値を感じられるシーンを抽出して寸法を決めた。

全長は、欧州で日常的に行う縦列駐車の際、他車が出た後のスペースに停め易くすることを考え、車両販売数の多いCo-XO & C-HBの群れに入れるべく4400mmに抑える事を決めた。更に、日本における立体駐車場へのアクセスを考え、全高は1540mm以下、全幅は1795mmとした。またクロスオーバーらしく大径タイヤを履きながらも、最小回転半径はMAZDA3と同じとなる様、ホイールベースをMAZDA3より70mm短い、2655mmとした (Fig. 1)。

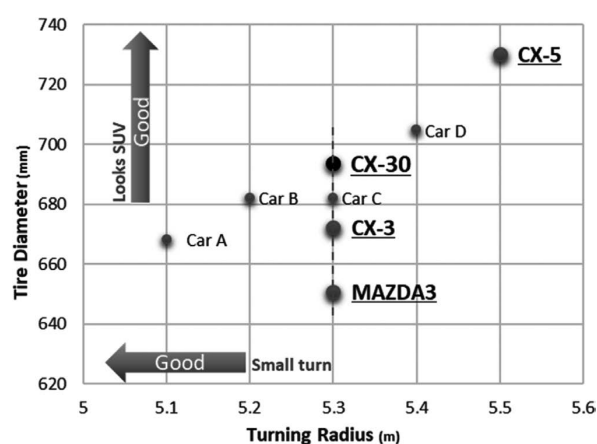


Fig. 1 Tire Diameter vs. Turning Radius

(2) 荷室スペース

荷室は、お客様の使い勝手を優先し、荷室スペースの確保を行った。

ターゲットカスタマーであるヤングファミリーが、組み立て家具など、大きく重い物を購入して持ち帰るシーンに注力し、クルマへ載せ降ろししやすい様、荷室開口の高さ／幅にこだわった。特に、開口高さ（地上高）に関しては、社内基準がある中、開発チームのこのクルマに対する強い想い入れを具現化すべく、高さが変化するモックアップを造り、図面ではわからない感覚的な所までこだわり、関係者で最適な高さをターゲットとした。載せ降ろしの指標となる開口高さを目標まで下げるため、質量が増えるものの開口のボディー断面を拡大し実現した (Fig. 2)。

更に、子供の誕生を迎えるヤングファミリーには不可欠な荷物であるベビーカーについても注力した。国内で代表的なA型だけでなく、近年のトレンドを反映し、大きなタイヤが特徴の海外ベビーカーも積める様、検討に入れた。子どもを連れた旅行や帰省では、ベビーカーと一緒にスーツケースやお土産といった荷物を積むことになる。それら荷物で満載時、影響が大きいのがリフトゲートトリムである。満載で閉めた時に干渉して閉まらない経験をしたことがある人も多いことを想定し、それ

をさせないため、デザインも巻き込んで取り組んだ。外板を膨らませたデザインとともにトリム面の形状を工夫し、積載性にもこだわったゆとりあるユーティリティの高いスペースを実現した (Fig. 2)。

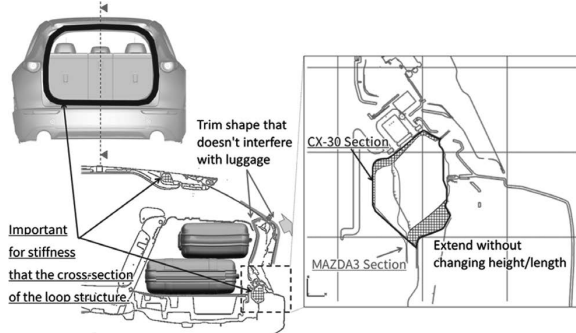


Fig. 2 Body & Trim Structure at Luggage Space

(3) 室内スペース

長距離移動も心地よく過ごせる、ゆとりある室内空間でありながら、乗員同士が近過ぎず遠過ぎず、コミュニケーションが弾むレイアウトの実現を目指して乗員配置、着座姿勢を決めた。

まず、前席乗員は、1クラス上の左右席距離を確保し、くつろいだ姿勢で移動を楽しめるゆとりあるスペースを作り上げた。前後席乗員の距離も、CX-3比 26mm 拡大しつつ、後席空間は Co-XO & C-HB 群の中で Top レベルを確保した (Fig. 3)。後席の着座姿勢も、前席同様に人間の自然な背骨の形である S 字の姿勢が取れ、かつ安楽な関節角が取れる様に設計した。

また、アップライトに座った人は前後 G に対して、体が前に滑りやすい傾向にあり、足を踏ん張って体を支えようとするが、この行動が疲労につながってくる。そこで、足元を少し斜めに持ち上げて踏ん張りやすくすることで、咄嗟に対応しやすくなり、普段はリラックスした状態で過ごすことができる。更に、アップライトにすることでアイポイントを高くし、見晴らし確保に貢献している。この着座姿勢を取ることで、荷室長を確保しながら、全長 4400mm 以下に収めることができた。

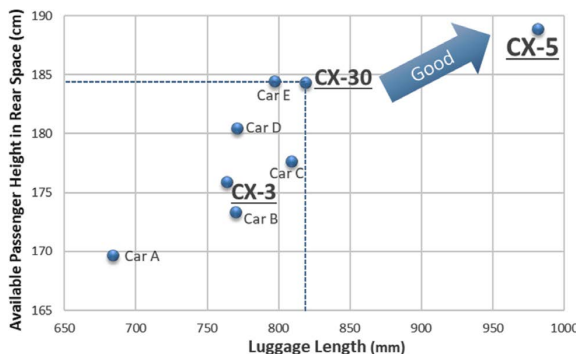


Fig. 3 Available Passenger Height in Rear Space vs. Luggage Length

3.3 ダイナミックパフォーマンス

人間のバランス保持能力をクルマに乗っているときに最大限に発揮できることを目指した新世代車両構造技術「SKYACTIV-VEHICLE ARCHITECTURE」を MAZDA3 に続いて CX-30 で採用している。SUV の機能性を担保する大径タイヤの装着、どこへでも自由に行ける気軽さを産み出す短い全長 (MAZDA3 比) を採用しているながら、MAZDA3 と等価なドライブフィールを実現している。個々のシステムよりも「クルマ全体のコーディネート」を重視する「SKYACTIV-VEHICLE ARCHITECTURE」がねらった、人が座るシートからボディー・サスペンション・タイヤまでの全ての部品が、時間軸で有機的に連携して動くことで実現している。

(1) ステアリング・ハンドリング・ライド

ロール特性・ピッチ運動・ヨー運動特性を制御し、MAZDA3 と等価なドライブフィール (同体質) を実現している。(別稿「5. MAZDA CX-30 のビークルダイナミクス性能開発」に詳細あり)

(2) 新 i-ACTIV AWD

低μ路だけでなく、ドライ路・悪路でも積極的に駆動力をコントロールし、日々の運転における『安全・安心』と人間特性にマッチした車両挙動を両立し、前輪駆動に迫る実用燃費で実現している。(別稿「6. 新世代 i-ACTIV AWD の紹介」に詳細あり)

(3) 空力

MAZDA3 で取り組んできた車体下部の風流れの最適化に加えて、新たにタイヤ周りの風流れ制御技術を取り込み、クラストップレベルの Cd を実現している。(別稿「4. タイヤ周りの風流れ制御技術を適用した MAZDA CX-30 の空力開発」に詳細あり)

(4) PT

MAZDA3 と同じユニットを用い、タイヤ径/車重/応答性の違いなどの変化点を、各種キャリブレーションやギヤ比等で補正し、最適な動力性能としている。

4. おわりに

CX-30 はマツダ車の新規ネームプレートである。さまざまな SUV が登場する中、その個性とお客様の使い勝手を最大限引き出すため、開発企画段階においては、コンセプトだけではなく、それに紐づく各種諸元の決定に大きな力点を置いた。

日常で使っていただける中で、デザインやダイナミック性能だけではなく、一つ一つのこだわりを感じていただければ幸いです。そして、このクルマとともに一人でも多くのお客様の日常や人生に広がりや輝きを感じていただけることを願っている。

■著者■



佐賀 尚人



山田 真泰



小曳 脩介



森重 領介



西角 博和

特集：MAZDA CX-30

02

MAZDA CX-30 のデザイン Design of Mazda CX-30

柳澤 亮^{*1}
Ryo Yanagisawa

要 約

全く新しいコンパクト・クロスオーバー SUVとして誕生したCX-30は、日本の美意識を礎とし深化したマツダのデザイン・テーマ『魂動（こどう）—SOUL of MOTION』を採用した新世代商品の第2弾である。「引き算の美学」のもと、研ぎ澄まされた強い生命感を表現した。

多くのお客様に支持されるよう高い実用性を持ちながらも、「世界で最も美しいクロスオーバー SUV」というあい反する高い目標を掲げ、課題のブレークスルーによりそれらを高い次元で両立した。デザイン・コンセプトは『Sleek & Bold』（スリーク・アンド・ボールド）とし、伸びやかな美しさと、SUVらしい力強さが融合したプロポーションを創造した。

室内は『人馬一体』・人間中心の思想と、日本の伝統的な建築にも見られる「間」の考え方にに基づき、ドライバー・コックピットの「包まれ感」と、助手席の「抜け感」を対比させた。また細部に至る徹底的な創り込みによる高い質感に加え、内装色は4つのコーディネートにより、お客さまの歓びとライフ・スタイルをサポートする。

Summary

Mazda CX-30, which is an entirely new entrant in the compact crossover SUV category, is the second model in Mazda's new-generation product lineup to feature the further-matured Kodo – Soul of Motion design concept, a concept rooted in traditional Japanese aesthetics. Inspired by the 'aesthetics of subtraction', an approach that lets beauty emerge by reducing elements rather than adding new ones, CX-30 has achieved styling with a finely-honed, powerful sense of dynamism.

CX-30's styling has raised the car design to a higher level to satisfy two contradictory demands: the enhanced utility to win over a broad range of customers and the 'world's most beautiful crossover SUV' as a work of art. Based on the 'Sleek & Bold' design concept, its proportions combine the toughness of an SUV with a supple, flowing beauty that transcends the category.

Design of CX-30's cabin is based on Mazda's 'Jinba-Ittai', human-centered design philosophy and traditional Japanese architecture with its use of Ma or empty space. The basic layout revolves around two areas with contrasting characteristics: a snug and condensed cockpit area for the driver, and a clean, airy open space around the front passenger. In addition to a genuinely refined, top-quality interior space achieved by great attention paid to every detail for improved fit and finish, four interior color schemes are offered to bring joy to customers and suit their different lifestyles.

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

1. はじめに

CX-30は、近年成長著しいコンパクト・クロスオーバー SUV市場における、マツダの全く新しい商品として開発した。私達が目指したのは、世界で最も美しいクロ

スオーバー SUVである。日本の美意識を礎とし深化した『魂動デザイン』を採用した新世代商品の第2弾であり、『Car as Art』（クルマはアート）と呼べる高い次元の芸術性を追求した。通常ならこれとあい反するはずの居住性や荷室容積などにも一切の妥協をすることなく美しいブ

*1 デザイン本部
Design Div.

ロケーションを実現すべく、デザイナーとエンジニアの垣根を超えブレークスルーを目指し、チーム一丸となって創り上げた。その流れるようなフォルムや心地よく質感高いインテリアは、見る者が息をのむアート作品のような、類い稀な美しさを表現した。

お客様の感性がこのクルマの美しさに共鳴し、より創造的な自分になることで、アートと毎日とともに過ごす豊かな人生を送って欲しいと考えた。

2. デザイン・コンセプト

2.1 深化した魂動デザイン

2010年から始まったマツダのデザイン・テーマ『魂動』は、ブランド価値を向上させる大きな原動力となった。そして2017年のコンセプトカーVISION COUPEでは、魂動デザインをアートのレベルに引き上げるべく更に深化させ、新たなステージへと踏み出した。深化した魂動デザインが目指すのは、日本の美意識を礎とした新たなエレガンスである。「引き算の美学」のもとに、一筋の強い動きである「反り」、余計な要素を削ぎ落とした「余白」、光りと影のゆらめきを映し込む「移ろい」の3つの要素で、より自然な生命感を表現した (Fig. 1)。



Fig. 1 Three Factors of Japanese Beauty

2.2 デザイン・コンセプト『Sleek & Bold』

この考え方のもと、コンパクト・クロスオーバー SUV としての新たなデザインを創造したのが CX-30 である。『Sleek & Bold』をデザイン・コンセプトとし、伸びやかな美しさと SUVらしい力強さが融合したプロポーション、一瞬ごとに変化する豊かな表情を見せるボディサーフェース、包まれ感と抜け感が鮮やかに対比し全ての乗員が一体感と居心地のよさを感じられる上質なインテリアを創造した。これらにより、見るたび触れるたびに感性が刺激される、このクルマならではの価値と個性を磨き上げた。

3. エクステリア・デザイン

3.1 パッケージとプロポーションのブレークスルー

CX-30 は居住性などのパッケージを一切妥協すること無く、伸びやかな美しさを追求するという高い目標を掲

げた。しかしこのクラスのクロスオーバー SUV は、全長が短く背が高いクルマゆえにずんぐりとしたプロポーションになってしまうため、伸びやかに見せることは極めて困難であった。しかし何としてでも克服しようとチャレンジし、3つのブレークスルーによりそれを果たした。

- ① ボディー下部を幅広の黒いクラディング（樹脂ガーニッシュ）でブラック・アウトすることで、残ったボディー・カラー部がスリムで伸びやかに見える視覚的効果をねらった。同時にクラディングによって SUVらしい力強さと安心感も表現 (Fig. 2)。
- ② 後席の頭上空間を確保したまま Dピラーを寝かせることによる、居住性とクーペのような流麗さを両立したキャビン (Fig. 3)。
- ③ キャビンから一気に張り出すリア・フェンダーと、妖艶で幅広いくびれの造形によるワイド・スタンスでスポーティーな後ろ姿 (Fig. 4)。



Fig. 2 Slim Body Proportion



Fig. 3 Roomy and Fast Cabin



Fig. 4 Wide Stance from Back View

これらをまとめたデザイン・コンセプトを『Sleek & Bold』とし、伸びやかなクーペの美しさと、大胆な SUV の力強さを併せ持ったデザインとした。

3.2 デザイン・テーマ「溜めと払い」

深化した魂動デザインの要素である「余白」「反り」「移ろい」のもとに、ボディー全体で前進感を表現するた

め、書道の筆づかひの動きである「溜めと払い」をCX-30の造形テーマに規定した。これはノーズからフロント・フェンダーにかけて溜めたエネルギーを、後方に向けて拡散して前進する動きである (Fig. 5)。



Fig. 5 Design Theme “Charge and Release”

ボディー面は明確な折れ線を使わず柔らかな面の表情のみでこの動きを構成し、クルマの動きとともに周囲の景色がS字型に揺らめきながら映り込む「移ろい」を表現した。このようにCX-30は、アートとしての美しさと生命感を感じさせるデザインを創生した。

一方でS字型の映り込みの実現は困難を極めた。このためにはフロントドア前端の面を上向きに傾けることが必要になるが、ここに収められているドアヒンジを傾けることはドアの開閉性能の悪化につながる。そこでエンジニアにこのねらいを説明し腹落ちしてもらうことで共創活動につなげた。開閉性能を犠牲にせず、構造の見直しや隙を限界まで詰めることで、この魅力的な映り込みを実現している。

また、この「移ろい」の表情には極めて微細な面の変化が必要であり、量産に当たってはそれを表現し切るだけの極めて精細な鉄板面・樹脂面の加工精度が求められる。MAZDA3の開発でエンジニアと工場メンバー、サプライヤー様らが自ら取り組んだ「面のアーティスト活動」を進化改善し共創することで、鉄板や樹脂の成型歪みの問題を克服し、更なる高い精度の美しいボディー、ドア、バンパーなどを産み出した (Fig. 6)。

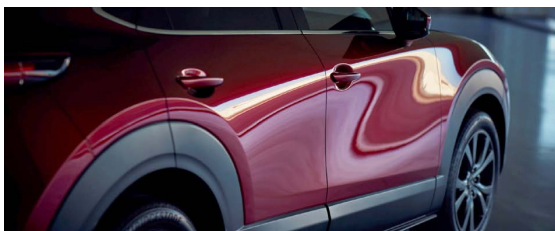


Fig. 6 Body Surface

3.3 エレメント・デザイン

フロント・エンドはマツダのファミリーフェイスを踏襲しつつ、端正で精悍な表情を創った。それ自体が彫刻作品であるかのように、より鋭く深い造形に進化したシグネチャー・ウイング (ラジエーター・グリル外周の縁取り) により、強い前進感を表現した。三角形のブロックを交互に上下反転させて配置したラジエーター・グリルは、見る角度や光の当たり方によってさまざまな表情の移ろいを見せるよう工夫した。

前後のランプは、ともに極限まで薄くデザインし、精緻に造り込んだシリンダー形状が際立つ発光表現と相まって、アート・ピースとしての美しさと、マシンとしてのメカニカル感を表現した (Fig. 7)。



Fig. 7 Front and Rear Details

また瞬時に点灯したのち、余韻を残すかのように徐々に消えていくディミング・ターン・シグナル (光源: LED) を新たに開発した。拍動を感じさせる温かみのある点滅によって、マツダらしい生命感を表現している。この発光表現はサプライヤー様や社内エンジニアとの共創により、LEDの調光制御を開発し実現に漕ぎつけた。ターンシグナル作動時のメーター内のインジケーターと作動音も同様のリズムで点滅・鳴動するようチューニングを施し、心地よい統一感を造り込んだ。

アルミホイールではセンター部の強い凝縮感と、外側へと広がるスポークのコントラストによって、しっかりとボディーを支える力強さを表現した。

3.4 空力性能

新世代商品群では卓越した空力性能に取り組んだ。空力の改善は燃費性能、すなわち世界的に重要なCO2削減につながるのみならず、操縦安定性の改善によりマツダの目指す『走る歓び』にも直結するからである。ただし空力を優先する余りデザインを悪化させる訳には行かないため、エンジニアと共創し高い空力性能と美しいデザインの両立のためのブレークスルーにチャレンジした。一例として二重のエアカーテンをもつフロントタイヤ・ディフレクターは、まさに二人三脚とも言える共創の成

果であり、特許取得につながった。

これらの結果、CX-30はクラス・トップレベルの高い空力性能と、『人馬一体』の走りを実現した。

4. インテリア・デザイン

4.1 包まれ感と抜け感を対比させた「間(ま)」の空間

CX-30のインテリアは、『人馬一体』・人間中心の思想と、日本の伝統的な建築にも見られる「間」の考えに基づいて創り上げている。凝縮されたドライバー・コックピットの「包まれ感」と、すっきりとした助手席の「抜け感」を対比させた空間を基本とした。このように『Sleek & Bold』のデザイン・コンセプトのもと、伸びやかな美しさとSUVの大胆さが同居したインテリアを実現した。また上質で豊かな空間を創り上げるため、素材や仕立てなどのクラフトマンシップも追求している。

4.2 コックピット・デザイン

コックピットはドライバーを中心に完全に左右対称のレイアウトや造形とするとともに、3つの各メーターやセンター・ディスプレイをドライバーに向けて角度を持たせることで、クルマとの一体感と対話のしやすさを強め、運転に集中できる室内環境を整えた (Fig. 8)。



Fig. 8 Driver Cockpit

前席空間は、メーター・フードを起点に助手席側のドアトリムまで美しくカーブを描くウイング状のフード造形をテーマとした。凝縮感のあるコックピットに対する抜け感を表現するとともに、視覚的な広がりによるすっきりとした居心地のよさを演出している。更には前席乗員を翼で大きく包み込むようなフード・デザインとすることによって、安心感をも提供する。またウイングの縁部分にあしらったステッチや末端部の金属加飾により、インテリア全体の上質さを引き立てた (Fig. 9)。



Fig. 9 Front Passenger Space

4.3 フロント・コンソール

ワイドなフロント・コンソールは、操作部を集約した前方のメカニカルなシフト・パネルと、伸びやかでしなやかにキックアップするパッド部の柔らかな表情が、美しく対比したデザインとした。

シフト・パネルには、MAZDA3で導入したバイオエンジニアリングプラスチックの2層成形技術を更に進化させて採用した。上層の深みのあるスモーク・グレーのパネルに光が当たると、下層のパネルに刻まれたメカニカルな金属調のパターンが出現するように、スモークの明度やパターンを吟味した。このように光の移ろいで表情を変化させることによって、上質感と先鋭感を表現した (Fig. 10)。



Fig. 10 Front Console

4.4 インテリア・カラー

内装色は、シックな大人の世界を醸し出すリッチ・ブラウンと、モダンで知的な世界を演出するネイビー・ブルーの2色をラインナップした。それぞれに明るいシートとブラックのシートを組み合わせる4つのカラー・コーディネートで、お客様のライフ・スタイルをサポートする。

a. リッチ・ブラウン内装

ブラックまたはピュア・ホワイトの本革シートを設定。

ブラックのシートには、パーフォレーションの穴の断面にアクセント・カラーとしてブラウンをあしらい、上質感を表現した。

b. ネイビー・ブルー内装

布シートと合皮シートの2種類を設定。どちらのシートにも、グレージュまたはブラックを用意した。

このネイビー・ブルー内装、グレージュのシートと、ポリメタルグレーメタリックのボディー・カラーの組み合わせにより、JAFCA主催による「オートカラーアワード 2019」グランプリを MAZDA3 とともに受賞した (Fig. 11)。

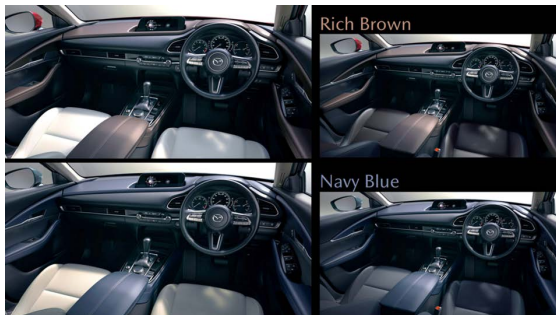


Fig. 11 Interior Color

5. 『人と共に創る』

CX-30 のデザインを支えたのは『人と共に創る』マツダの企業風土である。居住性とプロポーションの両立、ドアの映り込みの実現とそのクオリティ、デザインと空力性能の両立、ディミング・ターン・シグナルの実現、シフト・パネルの表現など、ここには書ききれないありとあらゆる領域で、エンジニア、サプライヤー様、デザイナーの垣根を越えて共創を重ねてきた。それを可能にしたのは、腹に落ちるまでお互いを理解し合い、お客様とマツダにとって正しいと信じることをやるという各々の姿勢であり、広島の地に育てていただいた企業風土であったと言える。

6. おわりに

新世代商品の第1弾として先行した MAZDA3 が、デザインに特化した個性の強い商品にシフトしたのを受け、CX-30 はより多くのお客様に支持される商品とする必要があった。そのために居住性などの機能を最良の物としつつも、それと同時に最高に美しいスタイリングを両立したいとの強い想いがあった。チーム一丸となって取り組みブレークスルーを果たした結果、「2020 ワールド・カー・オブ・ザ・イヤー」トップ3、独「ゴールデン・ステアリングホイール賞」コンパクト SUV 部門、独「2020 年レッド・ドット賞」プロダクト・デザイン部門、独 AUTO ZEITUNG 誌「デザイン・トロフィー 2020」チャンピオン・オブ・オールクラス、そして先述

の JAFCA 「オートカラーアワード 2019」グランプリなど、数々の賞* を頂くことができた。それもまた各国の販売も好調であるが、お客様からお褒めの言葉や歓びの声を頂くことが何にも増してありがたく、嬉しいと感じる。

CX-30 は登場して日も浅く、まだまだ無名に近いクルマではあるが、今後もより多くのお客様の日々の暮らしに豊かな彩りを与えられる存在として大きく育てて行ってくれたなら、私達創り手にとって何よりの喜びである。

(*受賞歴：2020年6月時点。マツダ調べ。)

■著者■



柳澤 亮

特集：MAZDA CX-30

03

新世代Cセグメント向け「SKYACTIV-G 2.5T」の紹介

“Skyactiv-G 2.5T” for the New Generation C-segment Cars

西田 良太郎^{*1} 加藤 二郎^{*2} 藤山 智彰^{*3}
Ryotaro Nishida Jiro Kato Tomoaki Fujiyama
西尾 貴史^{*4} 平田 宏喜^{*5} 篠原 宏文^{*6}
Takafumi Nishio Hiroki Hirata Hirofumi Shinohara

要約

マツダは「走る喜び」を通じて、地球・社会・人それぞれの課題解決を目指すことを「サステイナブル“Zoom-Zoom”宣言 2030」の中で示した。SKYACTIV-G 2.5Tは、CX-9やCX-8、CX-5、MAZDA6といった比較的大型の車種に搭載され、高いトルク性能や加速レスポンス性能を特徴に、走る喜びを提供して市場で好評を得てきた。今回、新たに北米向けCX-30やMAZDA3などCセグメント車に本エンジンを搭載して、意のままの力強い走りを提供する。水冷インタークーラーを高い冷却効率で活用することで、エンジンの大幅なコンパクト化を実現した。本稿では「走る喜び」をより多くのお客様に提供する新世代Cセグメント向けガソリンターボエンジンSKYACTIV-G 2.5Tの技術紹介を行う。

Summary

Mazda announced its long-term vision for technology development “Sustainable Zoom-Zoom 2030” and launched a new initiative in helping solve a variety of issues facing the earth, society and people through driving pleasure. Skyactiv-G 2.5T has been installed on relatively large vehicle models, such as the CX-9, the CX-8, the CX-5 and the Mazda6, to provide customers with driving pleasure, and has earned a good reputation for its high torque and acceleration response performance. This engine is now going to be installed on C-segment cars such as the CX-30 and the Mazda3 for North American market to offer customers responsive and torqueful driving. A water-cooled intercooler is used at maximum efficiency, and the engine has been significantly reduced in size. This paper introduces technologies employed for the new generation C-segment gasoline turbocharged Skyactiv-G 2.5T, which offers driving pleasure to many customers.

Key words : Heat engine, Spark ignition engine, Design/Control, Intake and exhaust, Turbocharging

1. はじめに

2030年を見据えた技術開発の長期ビジョンとして、マツダは「サステイナブル“Zoom-Zoom”宣言 2030」⁽¹⁾を発表し、この中で「走る喜び」を通じて、地球・社会・人それぞれの課題解決を目指すことを示した。これまでSKYACTIV-G 2.5Tは4.0L V8自然吸気ガソリンエンジン並みの力強いトルクやターボラグを感じさせない加速レスポンスなどを特徴に、市場で高い評価を得てきた⁽²⁾⁽³⁾。ただし従来エンジンではユニットサイズが大きく、CX-9やCX-8、CX-5、MAZDA6といった比較的大型の車種への搭

載に限定されていた。今回、新たにCX-30やMAZDA3などCセグメント車に本エンジンを搭載して、より多くのお客様に意のままの力強い走りを提供する。エンジンの大幅なコンパクト化を行うべく、吸気系を一新し、インテークマニホールド内蔵型の水冷インタークーラーを採用した。動力性能面では最大253PS、434N・mの高い動力性能を有しつつも、過給レスポンス性能（ターボラグ）の大幅改善を達成した。環境性能面でもEGR導入域の拡張、排気S-VTの作動角拡大、ダイナミック・プレッシャー・ターボのエゼクタバルブ開度セットの最適化等により、更なるCO₂低減に貢献した。本稿ではCX-30やMAZDA3

*1,2,5,6 エンジン設計部
Engine Design Engineering Dept.

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

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

など新世代Cセグメント車に搭載するガソリンターボエンジン「SKYACTIV-G 2.5T」の技術紹介を行う (Fig. 1)。



Fig. 1 SKYACTIV-G 2.5T

2. エンジン開発コンセプト

新世代Cセグメント車に高性能の過給エンジンを搭載して、意のままの走りを提供し、「お客様の心にゆとりを与え、生活の質を高める」ことを目指した。

これにはエンジン性能として、①レスポンスとコントロール性の両立、②力強いトルクの実現が重要となる。前者は、現行エンジンに対してコンプレッサ後の吸気系容積を低減しつつ、制御ロジックの最適化を行い、ターボラグを克服して実現を図る。後者は、新世代Cセグメントプラットフォームがもつ優れた衝突安全性能との両立を踏まえ、現行エンジンがもつハイパフォーマンスの維持をねらいとした。エンジンの大幅なコンパクト化が課題となるが、省スペース性に優れたマニホールド内蔵型の水冷インタークーラーを高い冷却効率で利用することで高性能とコンパクト化の両立を実現した。

一本エンジンにより提供する特性一

- ・洗練された「走りのリズムと余裕」
- ・余裕が生み出す「心のゆとり」
- ・意のままの踏み込みに応える「躍動感」

3. エンジン諸元とシステム

Table 1 に新 SKYACTIV-G 2.5T (New, 2020, US) と従来エンジン (Previous, 2016, US) の主要諸元を示す。また Fig. 2 に新エンジンのシステム図を示す。新エンジンでは、これまで利用してきた空冷式インタークーラーを用いず、省スペース性に優れたマニホールド内蔵型の水冷式インタークーラーを採用した。インタークーラーはコアバイパス流量の最小化やコア部へのガス当たり性最適化を織り込みつつ、冷却系としても水冷式インタークーラー専用のサブ回路を組むなど、冷却効率の最大化を狙った。これら対応によりCセグメント車に搭載可能なコンパクト化とねらいとする動力性能の両立を実現した。加えてコンプレッサ後の吸気系容積の大幅低減を達成し、過給レスポンスの大幅な改善を実現した。

Table 1 Dimension and Specification

Engine	SKYACTIV-G 2.5T (Previous: US, 2016)	SKYACTIV-G 2.5T (New: US, 2020)
Engine Type	In-line4	In-line4
Displacement	2488cm ³	←
Bore × Stroke	89.0mm × 100.0mm	←
Compression ratio	10.5	←
Turbocharger System	Dynamic pressure turbo system	←
Intercooler	Air-cooled	Water-cooled
ETB L/O	after Inter-cooler	before Inter-cooler
Intake Volume After Compressor	10.8L	6.6L
Max Power	169kW (230PS)* ¹ / 5000rpm 186kW (253PS)* ² / 5000rpm	←
Max Torque	420Nm / 2000rpm	420Nm* ¹ / 2000rpm 434Nm* ² / 2500rpm

*1: Regular gasoline *2: Premium gasoline

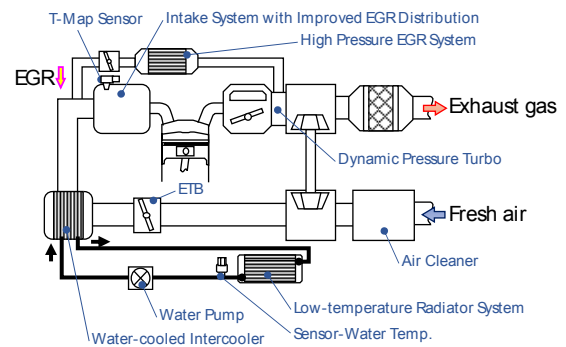


Fig. 2 System Diagram at Skyactiv-G 2.5T

またマツダが取り組む内燃機関の熱効率改善に向けた取り組みに沿って、Cooled EGR の利用領域拡張と排気 S-VT 作動角の拡大、ダイナミック・プレッシャー・ターボのエゼクタバルブ開度セットの最適化を行い、ポンピング損失と比熱比の更なる改善を達成した (Fig. 3)。

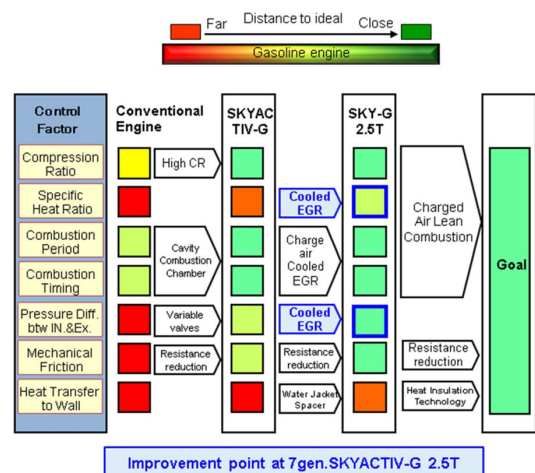


Fig. 3 Vision for Evolution of Internal Combustion Engine

4. パフォーマンス

4.1 出力性能

新 SKYACTIV-G 2.5T では従来の空冷インタークーラー同等の冷却性能を小型の水冷インタークーラーで実現し、吸気抵抗低減やメインサイレンサの排圧低減を行うことで、従来型と同じ 420Nm/2000rpm, 169kW (230PS)/5000rpm (プレミアムガソリン使用時は 434Nm/2500rpm, 186kW (253PS)/5000rpm) を達成した (Fig. 4)。またコンパクト化に伴うコンプレッサ後の吸気系容積を大幅に低減したことにより、従来仕様に対して 1500rpm 全開加速の過渡レスポンス性能において初期の応答性は継承しつつ、Boost 上昇時間を 30%短縮した。その結果、発進時の力強さと実用域でのリニアで軽快な反応、そして高速域までの伸びやかな加速により一層磨きをかけている (Fig. 5)。

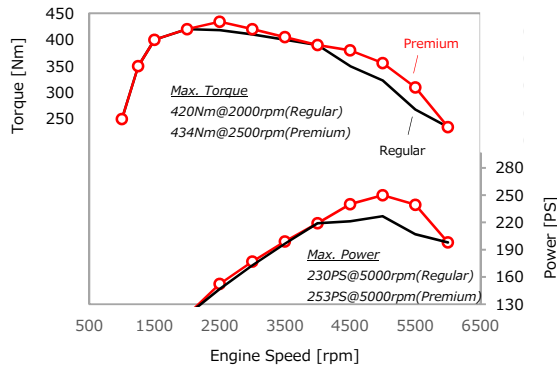


Fig. 4 Engine Performance

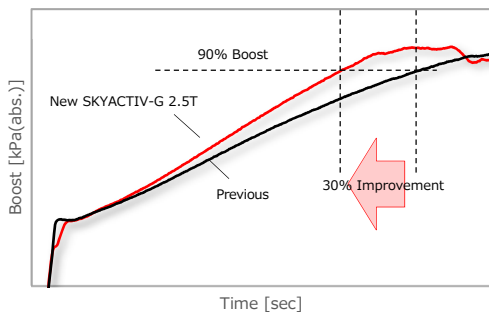


Fig. 5 Transient Response Performance

4.2 熱効率改善

新 SKYACTIV-G 2.5T では、従来仕様から熱効率を改善するため、①比熱比の上昇を目的に EGR 導入領域の拡大、②ポンピング損失を改善するため排気 S-VT の作動角拡大、エゼクタバルブ開度セット最適化を行った。結果、熱効率を改善することができ、ユニットとして実用領域の燃費を改善した (Fig. 6)。

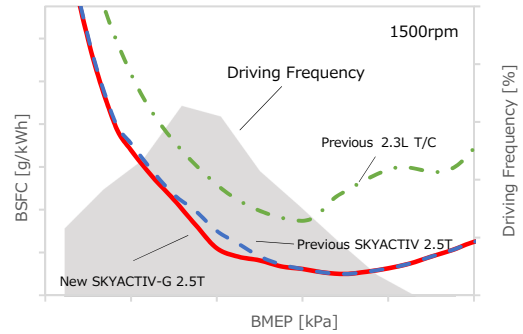


Fig. 6 Fuel Consumption Characteristic

5. エンジン性能とコンパクト化の両立

5.1 高効率マニホールド内蔵型水冷インタークーラー

過渡レスポンス性能と冷却性能の両立を図るために、水冷インタークーラーを採用した。また搭載性を考慮して、スタンドアロン型ではなく、マニホールド内蔵型を選定した (Fig. 7)。マニホールド内蔵型は搭載性に優れている一方で背反もある。コアの周囲に隙間ができるため、一部の高温ガスがコアを通らず下流への吹抜け (バイパス) が生じ、インタークーラーの冷却性能を十分に発揮できない。今回、マニホールド内蔵型の小型水冷インタークーラーに工夫を取り入れ、高効率で最大限活用しきることを検討した。具体的に、(1) バイパス量最小化、(2) コアへのガス当たり性最適化を行った。

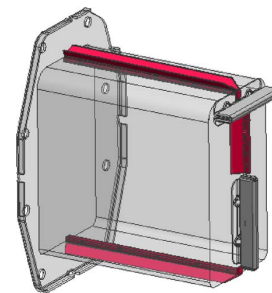


Fig. 7 Intercooler with Intake Manifold Integrated

(1) バイパス量最小化

マニホールド内蔵型はコア周囲にバイパス流路が形成され、一部高温ガスがコアを通らずに冷却されないままコア下流側へ通過し、冷却効率低下を引き起こす。今回、コアの周囲 3 か所にバイパスシールを設置して、冷却効率改善を行った。インタークーラー外周部の凹凸面ではなく、ケース側の平滑面でシールできるようインタークーラー側へのシール取り付けとした。また組付性を阻害しないようにシール形状は、先端部を調整したリップタイプとし、逆流にも対応できるよう Y 字型の断面を採用した。結果、本バイパスシール設置によりシールなし仕様に対して 9pt の冷却効率改善が確認できた (Fig. 8, 9)。

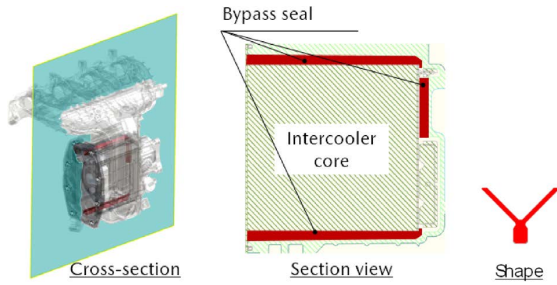


Fig. 8 Bypass Seal Layout and Shape

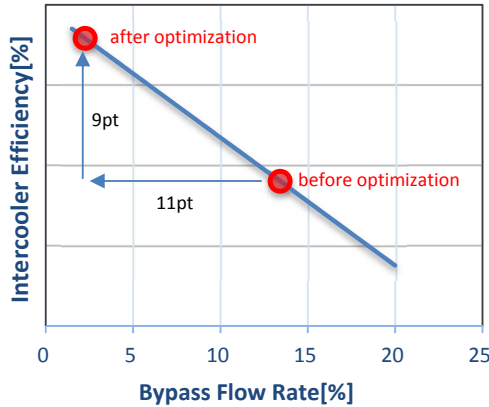


Fig. 9 Bypass Flow Rate vs Intercooler Efficiency

(2) インタークーラーコアへのガス当たり性最適化
 インタークーラーコアへのガス当たり性にムラ（偏流）が生ずると、冷却効率が低下する。今回、限られた空間の中で衝突要件を考慮すると、インタークーラー入口側タンク部が扁平形状となる。当初、偏流が強く出ているが、導風板を設置するなど構造面での工夫を行い、コアへのガス当たり性最適化を実現した。検討に際して、ガス当たり性による冷却効率改善と圧力損失の両面からの最適化を行なった結果、最適化前に対して 1.6pt の冷却効率改善を達成した (Fig. 10,11)。なおガス当たり指標として今回用いたコア入口部におけるガス流量の標準偏差を式(1)に示す。

$$\text{Flow Deviation} = \sqrt{\frac{\sum(G_i - \bar{G})^2}{n}} \quad (1)$$

$$G = \rho \times V \times S$$

- G_i : セル “ i ” におけるガス流量
- \bar{G} : 対象断面における平均ガス流量
- n : 対象断面におけるセル数
- V : ガス流速
- ρ : 密度
- S : 面積
- i : 対象断面のセル番号

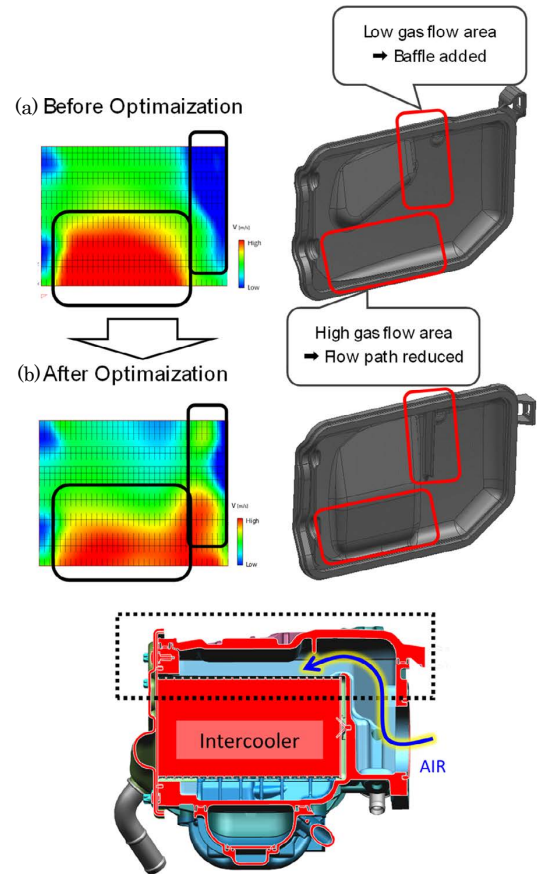


Fig. 10 Optimized Structure for Gas Exposure

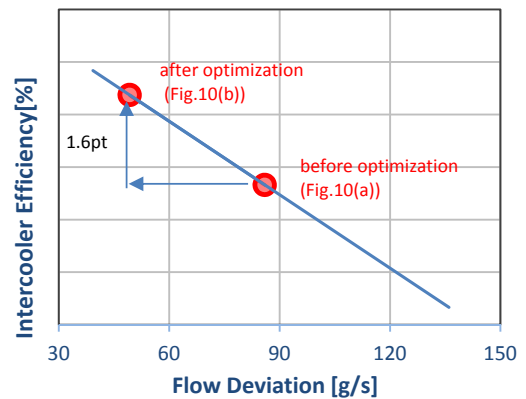


Fig. 11 Flow Deviation vs Intercooler Efficiency

5.2 水冷インタークーラー冷却システム

マニホールド内蔵型でねらいとする冷却性能を得られるように、新エンジン向けの水冷インタークーラー冷却システムを構築した (Fig. 12)。具体的には先行導入されている SKYACTIV-X などの C セグメント車をベースに、インタークーラーでの冷却効率を最大限高めるべく、本機能専用の冷却回路を設定した。

SKYACTIV-X に対し高車速で高出力をサポートするため、ラジエータ制御因子である冷却水流量／風量のうち電力消費量に対する放熱効果が大きい水流量を強化（電動ウォーターポンプ容量 15W → 70W）し、熱交換性能を最大限活用した (Fig. 13)。

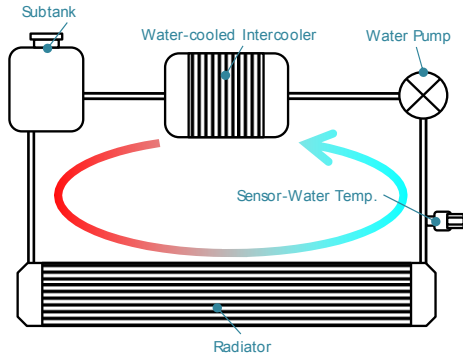


Fig. 12 Low-Temperature Water Cooling System

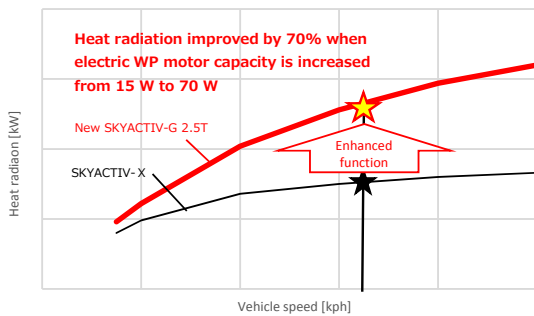


Fig. 13 Vehicle Speed vs Heat Radiation

一方、通水量を増やす手段として電動ウォーターポンプを大型化したため、MAX 通水時のポンプ仕事量がSKYACTIV-Xの5倍となったが走行シーンに応じた受放熱コントロールを実現することで日常使いなど軽負荷走行シーンではMAX 通水時の1/4レベルの仕事量に抑えることが出来ている (Fig. 14)。

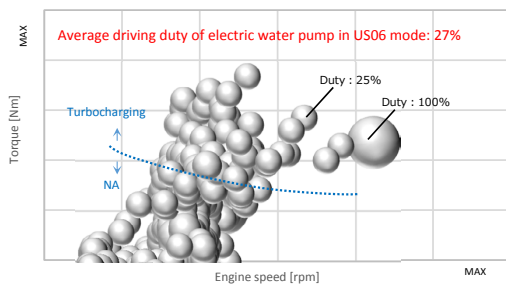


Fig. 14 Driving Duty of Electric Water Pump (US06)

水冷インタークーラー下流温度を最適にコントロールするため、インタークーラーを作動理論に基づいた物理モデルとして構築した。インタークーラーの仕事 (放熱) は、過給により温度上昇した空気を冷却することである。その放熱量は式 (2) で表せる。

$$Q = C_p \times W(T_{in} - T_{out}) \quad (2)$$

Q：インタークーラーの放熱量

C_p：ガスの比熱比

W：インタークーラー通過ガス量

T_{in}：インタークーラー上流 ガス温度

T_{out}：インタークーラー下流 ガス温度 (目標吸気温度)

インタークーラーの放熱量とインタークーラー通過ガス量から、Fig. 15 のインタークーラーの熱交換特性を用いて必要な冷却水流量を求め、その流量を電動ウォーターポンプで実現する。予実差についてはインタークーラー下流の温度センサーを用いて目標吸気温度に調整するよう冷却水流量をフィードバックする。

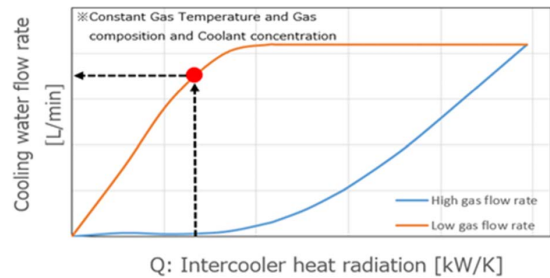


Fig. 15 Intercooler Characteristics

本制御構造によって、目標吸気温度を実現するために必要なインタークーラーに流れる冷却水流量を自動的に算出し、電動ウォーターポンプを用いて実現可能にした。その結果 Fig.16 のとおり、基礎的な物理モデルにて、計測誤差や車速、外気温度に左右されない吸気温度のコントロールを可能にした。

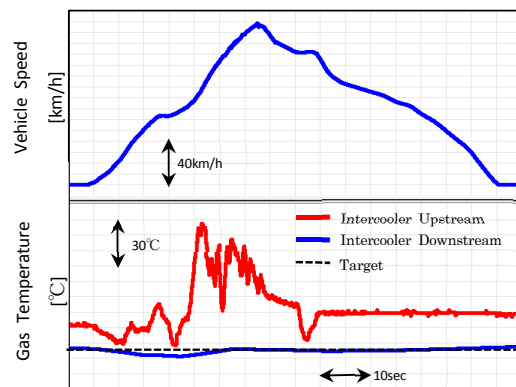


Fig. 16 Intake Air Temperature Independent of Vehicle Speed

5.3 外部 EGR 分配性最適化

新エンジンではコンパクト化を目的にマニホールド内蔵型の水冷インタークーラーを採用したが、吸気系構造を従来仕様⁽²⁾から大きく見直す必要が生じ、スロットル位置をインタークーラー前へ移設した。吸気系の重要機能の1つにEGR分配機能があるが、従来エンジンではスロットリングによる乱れを活用することで機能確保を行ってきた。一方、新エンジンではEGR導入部はスロットルからは大きく離れ、同様の手法はとれないため、EGRの混合性が高まる様に吸気系構造を工夫することで従来同等以上のEGR分配性能達成を図った。

SKYACTIV-G 2.5Tでは新旧ともに、燃費改善を目的に中高負荷域において外部EGRを導入する。各気筒の吸入

EGR 率に差が生ずると、発生負荷や燃焼安定性の気筒間差につながり、トルク低下や燃費悪化を招く。このため全気筒の EGR 率が同等となる様に、吸気系を設計した。

今回、EGR 分配性の最適化にあたり、サージタンク直前の EGR 混合状態に着目した。本箇所では EGR と空気が十分に混ざっていれば、各気筒へ吸入される外部 EGR 率は一定となり、EGR 分配性能は高まる。3 次元 CFD にてサージタンク直前部での濃度分布を確認し、式(3)で示す γ 値を高めるように形状検討を進めた。この γ 値は EGR と空気の混合状態を表す指標であり、 γ 値が高いほど混合が進んだ状態を表す。(完全混合状態： $\gamma = 1.0$)

$$\gamma = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{(C_i - \bar{C})^2} \cdot A_i}{2 \cdot \bar{C} \cdot A_{tot}} \quad (3)$$

- C_i : セル “i” における既燃ガス濃度
- \bar{C} : 対象断面における平均既燃ガス濃度
- A_i : セル “i” の流れエリア
- A_{tot} : 対象断面の総流れエリア
- i : 対象断面のセル番号

ねらいとする混合状態を達成すべく、①吸気管内に EGR を均等に導入し、②空気と EGR がミキシングしやすい環境を整えた (Fig. 17)。前者に関して、マニホールドネック部に左右均等に外部 EGR を入れることで、EGR 導入時の拡散機能を強化した。後者に関して、EGR 導入部直前の吸気経路にバンド構造を設け、2 次流れによる混合促進を行った (Fig. 18)。これら対応により、サージタンク直前部での大幅な γ 値改善が机上で見られ (Fig. 19)、実機でも現行エンジン同等以上の EGR 分配性能が確認できた (Fig. 20)。

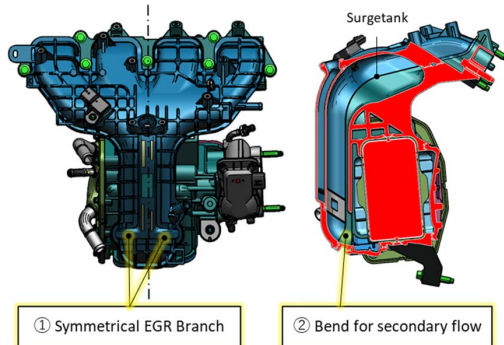


Fig. 17 Intake Manifold

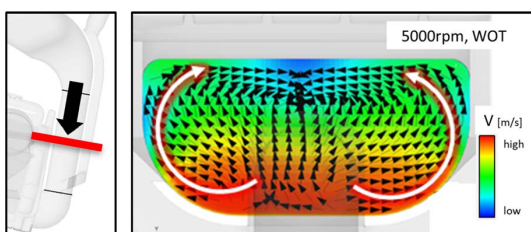


Fig. 18 Flow Field Involving Second Flow

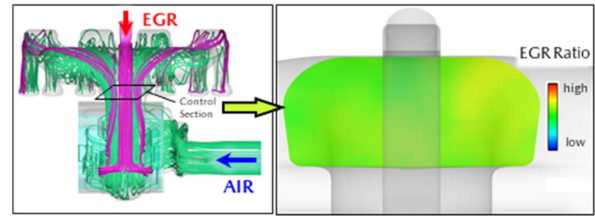


Fig. 19 EGR Flow and EGR Ratio at Intake Manifold Neck

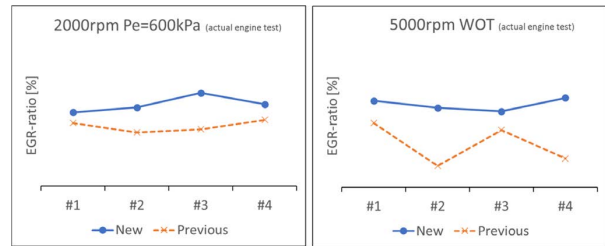


Fig. 20 EGR Ratio at Each Cylinder (Engine Test)

6. おわりに

CX-30 や MAZDA3 など新世代 C セグメント車に搭載可能とし、新たに改良を加えた 2.5L ガソリンターボエンジン「SKYACTIV-G 2.5T」の技術紹介を行った。このエンジンにより、実用領域での熱効率を改善し、高い動力性能により意のままの力強い走りを幅広いお客様に提供できるようになった。引き続き、人馬一体を支えるパワートレインを提供し続けることで、「走る喜び」を通じて、地球・社会・人の課題解決を目指し、お客様との絆を深めていきたい。

参考文献

- (1) 本橋ほか：サステイナブル “Zoom-Zoom” 宣言 2030, [マツダ技報, No.35, pp.3-8 \(2018\)](#)
- (2) 室谷ほか：新型ガソリンターボエンジン SKYACTIV-G 2.5T の開発, [マツダ技報, No.33, pp.16-22 \(2016\)](#)
- (3) 西尾ほか：新型 2.5L ターボチャージャーエンジン制御技術の紹介, [マツダ技報, No.33, pp.23-27 \(2016\)](#)

■著者■



西田 良太郎



加藤 二郎



藤山 智彰



西尾 貴史



平田 宏喜



篠原 宏文

特集：MAZDA CX-30

04

タイヤ周りの風流れ制御技術を適用した MAZDA CX-30 の空力開発

Aerodynamic Development for Mazda CX-30 by Using Flow Control Technology Around Tire

中田 章博^{*1} 森川 陽介^{*2} 岡本 哲^{*3}
Akihiro Nakata Yosuke Morikawa Satoshi Okamoto

要 約

自動車からの CO₂ 排出量削減のために空気抵抗の低減は欠かせない。ただし空気抵抗は車体形状に依存するため、商品開発においてはデザインと空力の両立が命題となる。私たちは、空力性能とデザインを高次元に両立するために、SUV デザインの重要ポイントの一つであり、Cd 値への寄与度が大きいタイヤ周りの風流れに注目し、Computational fluid dynamics (CFD) 技術と風流れ制御技術開発に取り組んだ。まず、タイヤ形状の再現度とホイール回転手法に着目し、タイヤ周りの風流れの現象を再現できる CFD 技術を構築した。そして CFD を用いて、Cd 値に寄与する風流れの運動エネルギー損失の発生要因を分析し、従来技術比で Cd 値を約 3% 低減できる新しい風流れ制御技術を確立した。そして新技術を CX-30 の商品開発に適用することで、デザインコンセプトとクラストップレベルの Cd 値の両立を実現できた。

Summary

Reducing the aerodynamic drag is essential for cutting CO₂ emissions. However, the aerodynamic drag depends on the geometry of the vehicle, so both the aerodynamic performance and the design are necessary for the product development. We studied the Computational Fluid Dynamics (CFD) technique and aerodynamic drag reduction technology, focusing on the tire with rotation. First, we studied CFD validity of the flow around the tire with rotation, focusing on the tire shape and wheel rotation method. Secondly, we studied factors causing energy loss of flow by using the CFD, and achieved 3% Cd value reduction from the technology of previous generation. And, we adopted these new technologies on the aerodynamic development of CX-30. As a result, the vehicle achieved top level aerodynamic drag among the same class vehicles and realized the design concept.

Key words : Aerodynamics, Design, CFD

1. はじめに

マツダは走る喜びをお客様にお届けしつつクルマから排出される CO₂ を削減することで地球環境との永続的な共存を目指している。自動車の CO₂ 排出量は、エンジンの性能だけでなく走行抵抗にも依存する。私たちが取り組むのは、走行抵抗の一つである空気抵抗の低減である。走行抵抗は主に空気抵抗と転動抵抗に分けられる。空気抵抗の寄与度は車速が高まるほど大きくなり、時速 100km/h で走行する場合はおよそ 8 割を占める⁽¹⁾。空気抵抗の大小は空気抵抗係数 (Cd 値) に依存し、Cd 値に

比例して空気抵抗値は大きくなる。そして、Cd 値は車両周りを流れる風流れの状態によって決まる。私たちは車両周りの風流れにおいて渦が発生すると、風がもつ運動エネルギーが損失し、これに比例して空気抵抗が大きくなると考えている⁽²⁾。

従って、空気抵抗を低減するためには車両周りの風を制御し、渦を抑制すればよい。ただし、車両周りの風流れは目に見えない複雑な現象であり、渦の発生と発達に関する現象解明は途上にある。既存技術を用いて渦を低減するなら車両形状を平滑にするなどいくつかの手法があるが、既存技術だけに頼った制御は車両パッケージン

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

グやデザインに対して制約を与えることになってしまう。従って、商品開発の重要課題はデザインを始めとした他機能と両立できる形状を導出することにある。本稿では魂動デザインと空気抵抗低減を高次元で両立させるために取り組んだCFD技術開発とタイヤ周りの風流れ制御技術開発、及びこれら技術を用いてデザイナーと共創したCX-30の空力開発の実例について述べる。

2. 新世代SUVの空力開発課題

2.1 風流れ制御の考え方

私たちはこれまでの研究により、Cd値を低減するためには風流れの運動エネルギー損失低減が重要であり、これを発生させる渦は、大きく三つに大別できると考えた⁽²⁾。一つ目は、物体からの剥離により発生する“剥離渦”，二つ目は異なる流れが合流して発生する“混合渦”，三つ目は物体後方で上下左右のそれぞれの流れが合流して発生する“後流渦”である。車両周りの各部で生じる(Fig. 1)これらの渦を小さくすることで風流れの運動エネルギー損失を小さくすることができる。

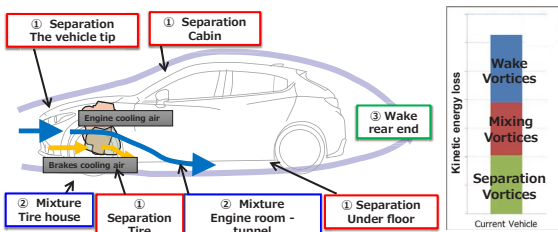


Fig. 1 Kinetic Energy Loss at Each Part of Vehicle⁽²⁾

2.2 CX-30における空力とデザインの両立課題

本研究ではタイヤ周りで発生する剥離渦と混合渦に着目し、技術開発を行った。その理由は車両全体の中でも、タイヤ周りの渦に起因する運動エネルギー損失の寄与度が大きいためである。一般的にも車両周りで発生する空気抵抗のうち、20%~30%はタイヤに起因するものと言われており⁽³⁾、SUVなどの車高が高い車型では、タイヤの露出量が増えるため、その影響が大きくなる。更に、CX-30では大胆なSUVの力強さを表現したいデザインコンセプトを実現するために、ボディ外側へタイヤの露出面積を拡大する造形が求められた。この露出面積の拡大はタイヤに当たる風量を増大させ、タイヤ周りの渦を更に強めてしまう。以上より、CX-30の空力とデザインを両立するための最大の課題は、タイヤ周りの渦を低減できる新たな制御技術を確認し、デザイン自由度の高い開発初期段階で空力とデザインを両立できる造形を共創することであった。

本稿では、この課題解決に向けて取り組んだタイヤ周りの現象解明に必要なCFD技術の構築(2章)、それを用いた制御技術の確認(3章)、CX-30での共創活動(4章)について報告する。

3. タイヤ周りの現象解明をサポートするCFD技術

3.1 CFD技術開発の検討アプローチ

回転を伴うタイヤ周りの現象を再現するためのCFD技術については、近年盛んに研究が行われ、タイヤ周りの風流れの総圧やCd値の予測精度について議論している^(4~7)。CFD技術は年々高度化しているが、回転を伴うタイヤ周りの流れ場には依然として誤差が残っており、研究は途上にある。CFDの精度を更に高め、現象解明や商品開発に応用していくためにはCFDと実測値の間に誤差が生じる要因を詳しく理解することが重要となる。これは、誤差の要因が判っていれば、CFDの精度を高めるための課題を明確にできることに加え、誤差要因とその程度を考慮に入れた実車の性能予測やスペック決定ができるためである。そこで、本検討ではCd値や風の運動エネルギー損失量の精度検証に加え、運動エネルギー損失量に寄与する風流れの中間特性値を定義し精度検証を行うことで、CFDと実現象の違いを詳しく理解する。

これまでの研究により⁽²⁾、タイヤ周りには上部と下部にそれぞれ特徴的な渦が存在することがわかっている(Fig. 2)。私たちは、その発生・発達過程を分析することで、これらの渦は“タイヤ正面部の圧力上昇により、風がホイールハウス内とタイヤ側部に曲がる現象”と“ホイール開口部やホイールアーチ隙に風が流入・流出する現象”の二つにより形成されていると考えた(Fig. 3)。そして、「タイヤ正面部の圧力」と「タイヤ側面開口部の流入量」を運動エネルギー損失量に寄与する中間特性値と定義した。

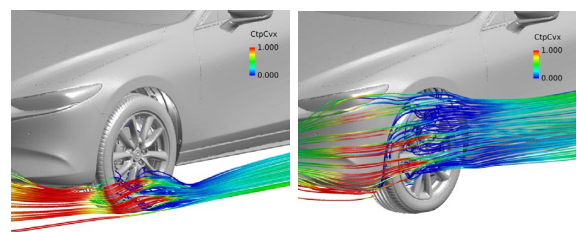


Fig. 2 Flow Streamline around Tire

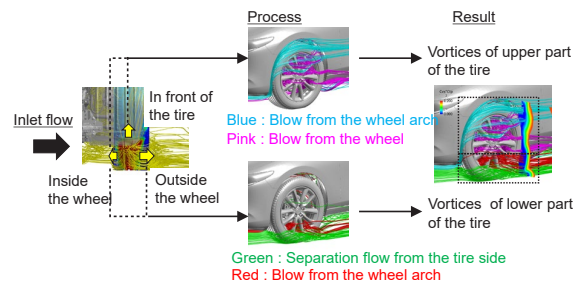


Fig. 3 Process of Causing Vortices around Tire

3.2 CFDの解析条件

本研究のCFDは汎用流体解析ソフトであるSTAR-CCM+®を用い乱流モデルにはDetached Eddy Simulation (DES)を適用し、非定常解析を行った。今回は特に、タイヤ正面部の圧力に影響が大きいと考えられるタイヤ形状の再現度(断面形状とパターン形状)と、タイヤ側面開口部の流入量への影響が大きいと思われるホイール回転手法の違いについて検討する。それぞれの影響を確認するために以下4条件の解析を実施した(Table 1)。

Table 1 CFD Setup

		Case1	Case2	Case3	Case4
Tire shape	Deformed	×	○	○	○
	Pattern	×	×	○	○
Wheel rotation method	Rotation wall boundary	○	○	○	—
	Sliding mesh method	—	—	—	○

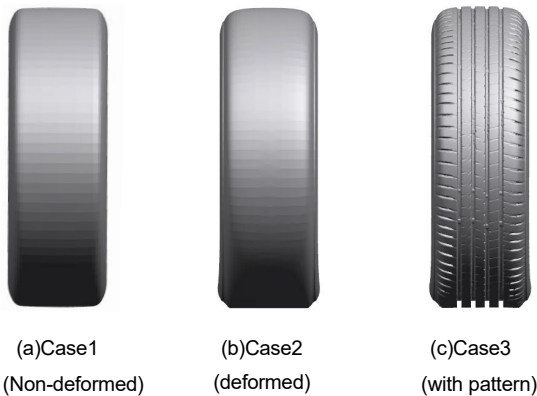


Fig. 4 Tire Shape

タイヤサイズは215/55 R18とし、3通りの形状データを用意した(Fig. 4)。Case1はタイヤの総幅と外径の情報を基に作成した簡易形状である。形状作成に際してタイヤのショルダRなど細部の形状については実際の形状の再現性は考慮していない。一方で、Case2, 3は風洞試験に用いたタイヤを3Dスキャンして取得した形状である。Case2, 3ともに風洞テスト時の接地による潰れは再現している。Case2, 3の違いはタイヤの溝の再現有無である。また、ホイールの回転再現手法については2通りの手法について検討した。一つは、実際にホイールのスポークは回転運動させずに、ホイールの壁面に回転速度を付与する手法(rotation wall boundary)、もう一方の手法はホイールスポーク部のメッシュを回転させることで、ホイールの剛体回転運動を再現する手法(sliding mesh technique)である。

3.3 風洞試験による流れ場計測

風洞試験はシュツットガルト工科大学のFKFS風洞にて、タイヤ回転と路面移動を再現した状態で実施した。タイヤ周りの流れ場計測には4孔ピトー管を使用し、フロントタイヤ前、側部にて全4断面にて速度と圧力を計測した(Fig. 5)。そして、計測した速度・圧力から以下の式(1)~(5)を用い、各特性値を算出した。

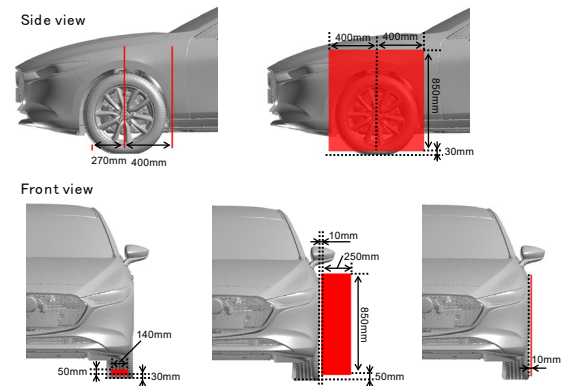


Fig. 5 Measurement Sections

$$C_p = \frac{P_{static} - P_{\infty}}{1/2\rho U_{\infty}^2} \tag{1}$$

$$C_{vx} = \frac{V_x}{U_{\infty}} \tag{2}$$

$$C_{vy} = \frac{V_y}{U_{\infty}} \tag{3}$$

$$C_{tp} = \frac{P_{total} - P_{\infty}}{1/2\rho U_{\infty}^2} \tag{4}$$

$$KE = C_{tp} \times C_{vx} \tag{5}$$

P_{static} : static pressure at measurement sections

P_{total} : total pressure at measurement sections

ρ : air density

$V_{x-direction}$: velocity component towards the X-axis at measurement sections

$V_{y-direction}$: velocity component towards the Y-axis at measurement sections

U_{∞} : testing wind speed

P_{∞} : absolute pressure in the wind tunnel

3.4 結果と考察

(1) タイヤ形状の影響

タイヤ形状の再現度の違いが、式(1)より求めたタイヤ前の圧力係数について及ぼす影響について検証した(Fig. 6)。赤い部分は圧力が高いことを意味し、図中の数値は圧力係数の計測断面の平均値を表している。タイヤ接地部の潰れと溝の形状を再現するとタイヤ前の圧力が低下し、実測値に近づいていることが分かる。Case2はCase1に比べ、タイヤ前圧力が低い。これはタイヤ潰れ

を再現することで、接地部の面積が減り、ショルダ部の曲率が大きくなったことで流れが側面に受け流されやすくなったためである (Fig. 6, 7)。また、Case3 は Case2 より更に、タイヤ前圧力が低くなっている。これはタイヤの縦溝と地面の間の空隙を風が通気するためである (Fig. 6, 7)。いずれもタイヤ形状の再現度を高めることで実測値に近づいており、中間特性の一つであるタイヤ前圧力の再現精度を高めるにはタイヤ接地部の断面形状と、タイヤの縦溝と地面の空隙部の通気の再現が重要であるといえる。

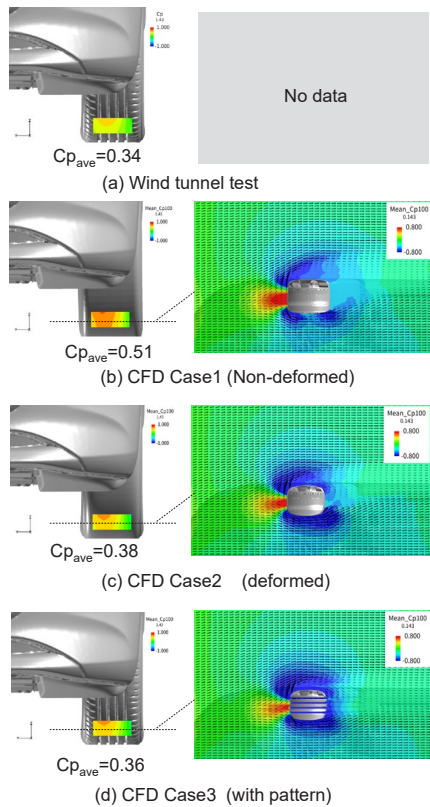


Fig. 6 Pressure in Front of Tire Measured by WT Test and CFD

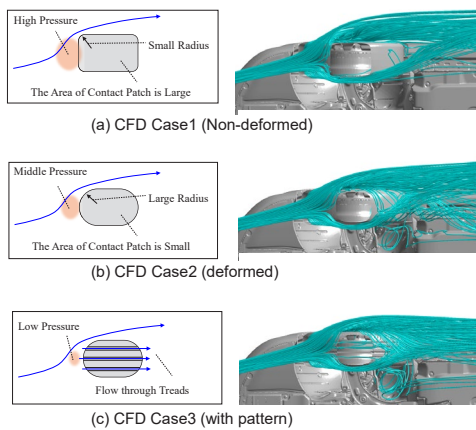


Fig. 7 Image of Flow Structure and Flow Stream Line Bottom of Tire

次にもう一つの間中特性である、式(3)より求めたホイール開口部で流入出する流れについて及ぼす影響を検証した (Fig. 8)。赤い部分はホイール開口部からの流出量が大きいことを示し、青い部分は反対に流入量が大きいことを示している。ホイール開口の上部に着目すると風洞での実測の場合はホイールへの流入方向の流れが支配的であるが、CFDで求めた結果 Case1~3 のいずれも流出方向の流れが支配的であり実測と逆である。このことから、タイヤ形状の再現精度を高めるだけでは回転を伴うホイール開口の再現精度を向上することは難しいと考えられる。

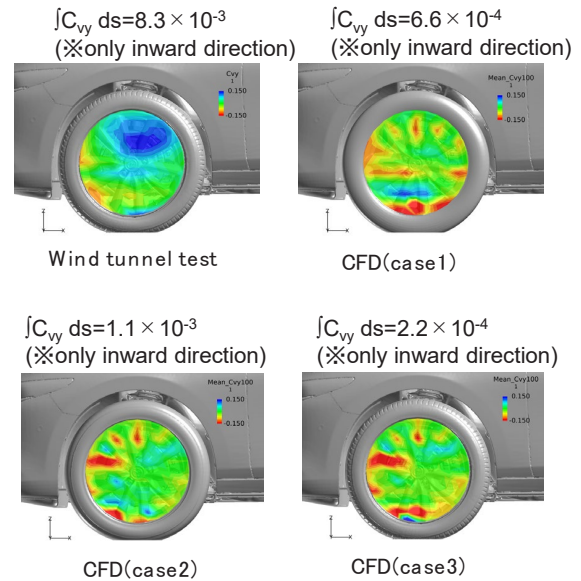


Fig. 8 Velocity Magnitude of Y Direction on Wheel Opening (Blue: Inward Direction, Red: Outward Direction)

(2) ホイールの回転手法の影響

ホイール回転手法の違いがタイヤ前圧力とホイール開口部で流入出する流れに及ぼす影響を確認した。ホイールの剛体回転運動を考慮した Case4 は、Case3 に比べタイヤ前圧力が上昇し (Fig. 9)、実測値からの乖離が大きくなる。一方で、ホイール開口上部やホイールアーチ隙への流入量については、実測値に近づいている (Fig. 10, 11)。これら変化の要因を理解するために、CFDの流れ場を分析した (Fig. 12)。ホイールの剛体回転有無により、ホイールスポーク部の風向が大きく変化していることが分かる。これはホイールの回転運動により主流がせん断されるためであり、せん断された流れの一部が開口内に流入すると考えられる。またその流入に誘起されてホイールアーチ後端からの流入も増加する。この流入はタイヤハウス内の圧力を高め、先に述べたタイヤ前圧力の上昇につながっていると推測する。以上より、もう一つの間中特性であるタイヤ側面開口部の流入量の再現精度を向上するにはホイール回転運動の再現が重要であるといえる。ただし、ホイール開口下部については実測値とCFD結果の差が大きく、精度向上は今後の課題となる。

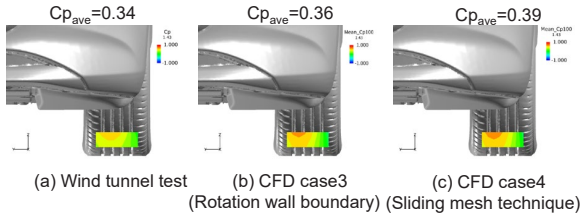


Fig. 9 Pressure in Front of Tire Measured by WT Test and CFD

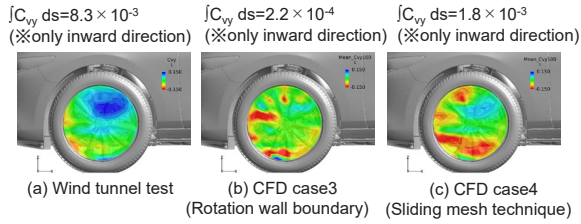


Fig. 10 Velocity Magnitude of Y Direction on Wheel Openings (Blue: Inward Direction, Red: Outward Direction)

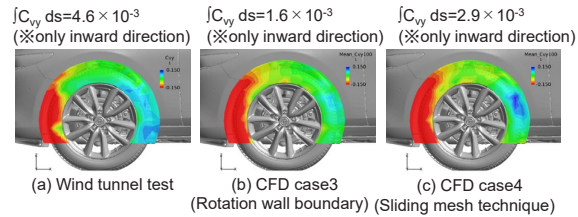


Fig. 11 Velocity Magnitude of Y Direction on Wheel arch Openings (Blue: Inward Direction, Red: Outward Direction)

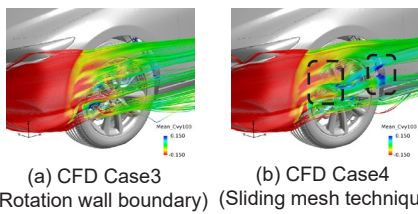


Fig. 12 Flow Path Line around Front Wheel (Blue: Inward Direction, Red: Outward Direction)

(3) 運動エネルギー損失と Cd 値の予測精度

タイヤ周りの運動エネルギー損失量を確認すると、前節までに述べた中間特性の再現精度が高い Case4 が最も実測値に近い値を示していることが分かる (Fig. 13)。

この結果を踏まえ、Case1 と Case4 の解析条件にて、タイヤ周りの形状が異なる複数仕様の解析を実施し、Cd 値の予測精度を検証した。Case4 は Case1 に比べて相関が高く、絶対値の予測精度も高い。以上より、中間特性の再現精度を高めることで最終性能の再現精度も向上できることを確認できた。更なる CFD の精度向上の技術開発は今後も継続するが、本技術開発で精度を検証できた解析条件は誤差影響を補正することでタイヤ周りの現象解明や車種開発のスペック決定に活用する。

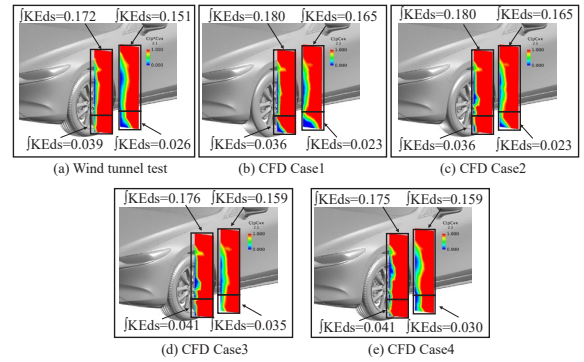


Fig. 13 Kinetic Energy Beside Tire

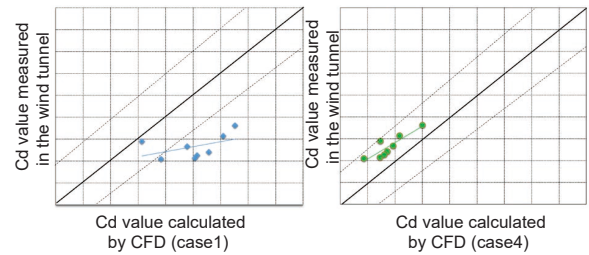


Fig. 14 Correlation Diagram of Cd Value between CFD and Wind Tunnel Test

4. タイヤ周りの風流れ制御技術開発

4.1 制御技術進化に向けたアプローチ

タイヤ周りの流れ場はタイヤ、ホイールの形状だけでなく、フロントバンパーなどのボディ形状、そして実走時はタイヤとホイールの回転運動などの複数の因子が影響する。そのためフルビークルの流れ場から各因子の影響を個別に把握し、異なる車種にも適用できる共通の考え方や制御因子を見出すことが難しい。そこで私たちは、まず簡易モデルを用いて、各因子がタイヤ周りの渦とそれに起因するエネルギー損失へ及ぼす影響を個別に理解することで、制御の発想を得るアプローチをとった。具体的には、自動車の与件であるタイヤ回転とボディの存在の影響のみを個別に評価できる簡易モデルを作成し検討を行った。

4.2 タイヤ回転が風のエネルギー損失に及ぼす影響

まず、タイヤ単体のモデルを用いてタイヤとホイールの回転運動が風の運動エネルギーに及ぼす影響を調査した (Fig. 15)。青い部分はエネルギーが低いことを示しておりタイヤの回転を再現するとタイヤ上部ではエネルギーが低下し、反対にタイヤ下部ではエネルギーが上昇することが分かる。図中に示す各断面で保有するエネルギー量からもその傾向が確認できる。これはタイヤ下部ではタイヤ回転と入力風の向きが一致するため、壁面近傍の速度が上昇し、剥離渦発生を抑制できるためである。一方、タイヤ上部はその逆である (Fig. 16)。従って、タイヤ前の上下方向の入力風向を制御し、剥離渦が発生し

にくいタイヤ下部へ風を導風すれば風のエネルギー損失を低減できると考えられる。

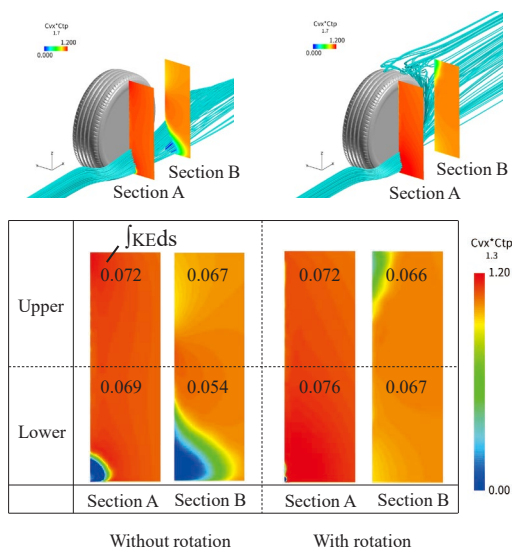


Fig. 15 Flow Streamline and Kinetic Energy Beside Tire

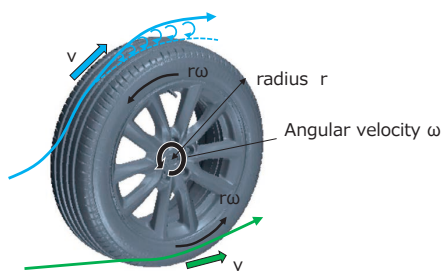


Fig. 16 Image of Flow Structure around Tire with Rotation

4.3 ボディーの存在が風のエネルギー損失に及ぼす影響

次に、簡易車両モデルを用いてボディーの存在が風の運動エネルギーに及ぼす影響を調査した。タイヤ単体の状態に比べ、ボディーが存在することで、タイヤ側部のエネルギーが低下することが分かる (Fig. 17)。この要因はボディーを取り付けた場合、タイヤ前の入力風向が主流に対してタイヤ外側に向かって曲がることにある (Fig. 18)。入力風の曲がりが大きくなることでタイヤ外側では、風がタイヤショルダから遠ざかる方向に流れることで剥離が誘発され、タイヤ内側ではタイヤ後部に風が巻き込むように流れる。その結果、タイヤ後部ではタイヤ内と外の風向差が大きくなりタイヤ背面の混合渦を強める (Fig. 19)。従って、タイヤ前の左右方向の風向を制御し、主流に対する風の曲がり小さくできればタイヤ側部と背面における風のエネルギー損失を低減できると考えられる。

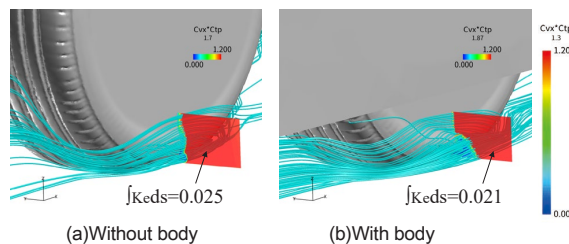


Fig. 17 Kinetic Energy Beside Tire

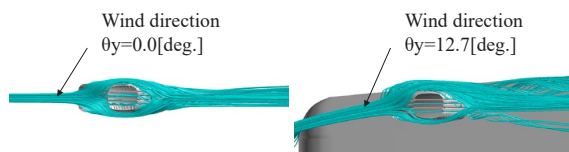


Fig. 18 Flow Structure around Tire with Body

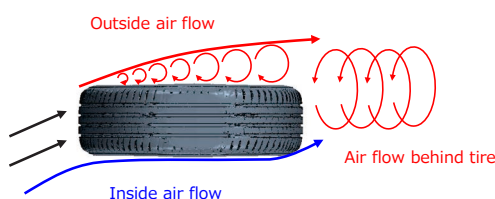


Fig. 19 Image of Flow Structure around Tire with Body

4.4 タイヤ下部の渦を低減する制御コンセプトと具体構造

前節までに、タイヤ前の入力風向を制御することでタイヤ周りのエネルギー損失量を低減する考え方を示した。具体的には左右方向の風の曲がり最小化しつつ、タイヤの回転方向と入力風向が一致するタイヤ下部に風を導風すればよい。本節ではこれを実現するための具体構造について言及する。デザインや車両レイアウトに制約がなければ、バンパーの外端位置や曲率などを制御因子として、ねらいの方向に風を導くことは可能である。しかし、この手法ではタイヤをバンパーから露出させたいデザインコンセプトを実現することは難しい。そこで、私たちはバンパー下部に小さく目立たないアタッチメント部品 (デフレクタ) を取り付けることで風向を制御し、デザイン自由度を高める取り組みを行った。

前世代 SUV 群では平板型のデフレクタ構造を採用し、タイヤへ当たる風を減らして、ホイールハウス内への風の流入を抑制することで、タイヤ上部の渦を低減していた。しかし、この構造ではデフレクタ表面で急激な圧力上昇を伴い、タイヤ直前で風が左右に大きく曲がってしまうため、タイヤ前での風向制御が難しい。そこで、私たちは3次元的なスロープ構造を着想し、バンパー下端から徐々に風を曲げることで、ねらいの風向制御を実現する形状を導出した (Fig. 20)。更なる部品小型化のためにデフレクタの基本形状だけでなく、風を利用した風向制御を検討した。具体的には、デフレクタ内に一度風を取り込み、背面からねらいの方向に風を排出することで、基本形状を小型化しても風向制御機能を維持できるとい

うものである (Fig. 21)。これらの構造により、運動エネルギー損失量に寄与するタイヤへの入力風向を約 6° 小さくすることができた (Fig. 22)。上記の進化によりデザインと両立しながら空力性能を高めることができ、前世代比で約 3% Cd 値を低減することができた (Fig. 23)。

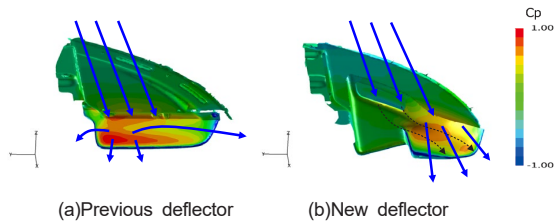


Fig. 20 Image of Flow around Deflector

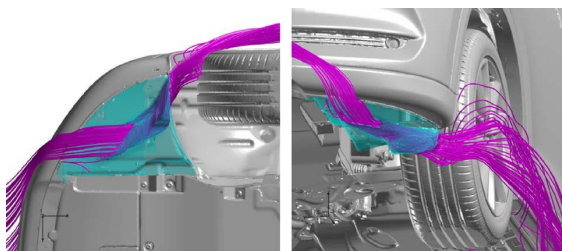


Fig. 21 Deflector with Air Blow Structure

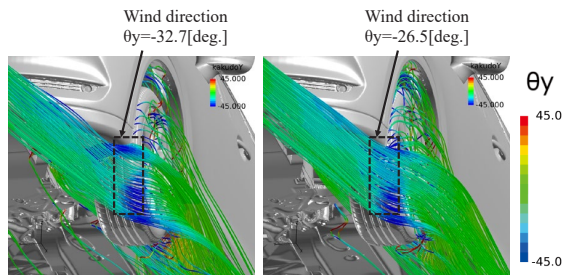


Fig. 22 Flow Streamline in Front of Tire

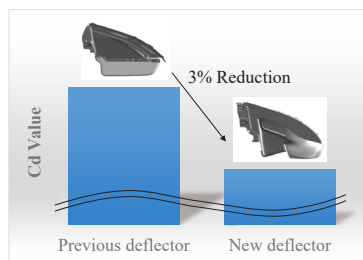


Fig. 23 Drag Reduction Performance of New Deflector

5. CX-30 の空力とデザインの共創活動

5.1 「人とともに創る」共創プロセスによる開発短期化
デザインと空力のブレークスルーの発想を得るためには、双方が両立に向けた議論を早い段階から行う必要がある。そこで私たちは先行段階からデザインコンセプトの理解に努めることに加え、現象理解が容易な CFD を活用し、空力の原理・原則と 4 章で述べた新しい制御の考

え方と必要機能を設計者やデザイナーにも理解してもらうための場を設け共創活動を行った。その甲斐があって、お互いにブレークスルーの提案をしあうことができ、結果として商品開発を早期収束させつつ、新しい風流れ制御技術を商品に反映させることができた。

5.2 風流れの制御機能とデザインの両立構造

空力とデザインの共創対象となった部品は複数ある (Fig. 24) が、特に注力した部位は新しい制御技術を採用したタイヤ周りの造形である。タイヤをボディから露出させたいデザインコンセプトを実現するために、4 章で述べた一度風を取り込んだ風をねらいの方向に排出する構造をフロントバンパーとデフレクタに採用することで、デザインコンセプトとタイヤ周りの風の運動エネルギー損失量低減機能を両立できる構造を導出した (Fig. 25)。

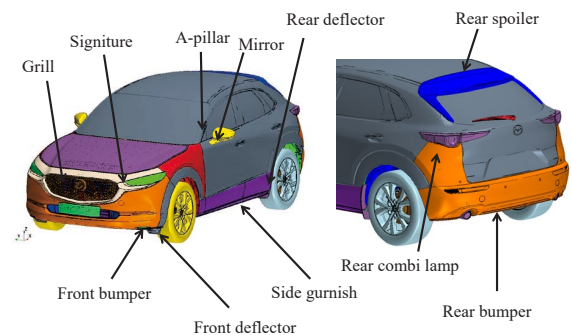


Fig. 24 Aerodynamic Parts on Upper Body of CX-30



Fig. 25 Aerodynamic Optimization around Tire of CX-30

5.3 最終性能の答え合わせ

ムービングベルト付き風洞にて、最終性能確認車両を用いた実機検証を実施し、車両周りの風流れの運動エネルギーについて CFD と風洞実験の相違点を比較検証した。ホイール開口下部の分布に差があるが、これは 2 章の検討で想定したものであり絶対値の誤差についても想定していた範囲に収まっていた (Fig. 26)。Cd 値についても、想定していた誤差の範囲内であり、CFD の結果が

ら予測していたクラストップレベルの Cd 値目標値を達成することができた (Fig. 27)。

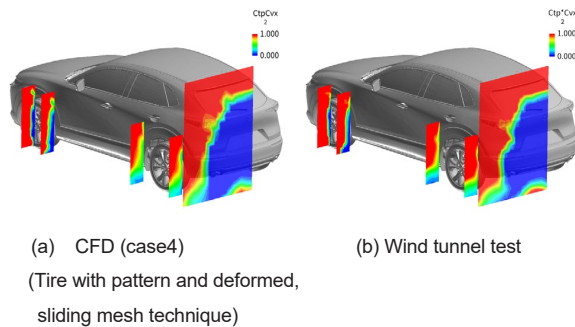


Fig. 26 Kinetic Energy around Vehicle

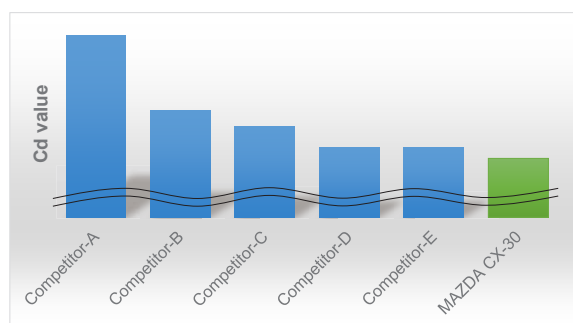


Fig. 27 Aerodynamic Drag of CX-30 and Competitors Measured in Wind Tunnel

6. おわりに

回転を伴うタイヤ周りの流れ現象に着目し、先行開発段階から取り組んできた CFD 技術とタイヤ周りの風流れ制御技術を更に進化させ、デザイナーとの共創活動を行うことで CX-30 のデザインコンセプトとクラストップレベルの Cd 値の両立を実現できた。私たちは引き続き、熱・風流れに責任をもつエンジニアとしての道を極めつつ、今後もデザイナーと互いの進化ビジョンと原理・原則を腹落ちするまで相互理解し、お客様に人生の輝きを提供するという共通意識の下、独自技術をともに創り上げていく姿勢で挑戦を続けていく所存である。

参考文献

- (1) 久我秀功ほか：新型 MAZDA3 の熱流体エネルギーマネジメント技術，[マツダ技報](#)，No.36, pp.102-106 (2019)
- (2) 岡本哲ほか：次世代商品群の空力・空力騒音性能開発，[マツダ技報](#)，No.35, pp.21-25 (2018)
- (3) Wickern, G., Zwicker, K., and Pfadenhauer, M., “Rotating Wheels : Their Impact on Wind Tunnel Test Techniques and on Vehicle Drag Results,” SAE Technical Paper 970133 (1997)
- (4) 川村哲祐ほか：移動地面条件下におけるタイヤ、ホイール開口及びフロントストレーキが空力性能に及ぼす影響，自動車技術会春季大会学術講演会，講演番号 135, pp.742-747 (2017)
- (5) Charlie Lew et.al, Aerodynamic Simulation of a Standalone Rotating Treaded Tire, SAE 01-1551 (2017)
- (6) Alexander Waschle et.al, The Influence of Rotating Wheels on Vehicle Aerodynamics – Numerical and Experimental Investigations, SAE Technical Paper 01-0107 (2007)
- (7) K. shimizu. et.al, VISUALIZATION OF FLOW STRUCTURES AROUND THE FRONT WHEEL OF A SEDAN-TYPE AUTOMOBILE, The 11th Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing1-3, Kumamoto, JAPAN (2017)

■ 著 者 ■



中田 章博



森川 陽介



岡本 哲

特集：MAZDA CX-30

05

MAZDA CX-30 のビークルダイナミクス性能開発

Development of Vehicle Dynamics Performance for Mazda CX-30

柏村 祐二^{*1} 老川 隆^{*2} 吉村 匡史^{*3}
 Yuji Kashimura Takashi Oikawa Tadashi Yoshimura
 後藤 英貴^{*4} 松村 篤^{*5}
 Hidetaka Goto Atsushi Matsumura

要 約

CX-30 と MAZDA3 は新世代スモール商品群として、コモンアーキテクチャを用いて開発をスタートした。乗り心地性能と操縦安定性のプラットフォーム開発においては、人間中心の開発哲学に基づき、人の頭部の動きを安定させて、快適な乗り心地性能と車が人の手足のように感じられる“人馬一体”が更に進化することを目指した。それは新たな車両構造技術 SKYACTIV-VEHICLE ARCHITECTURE を適用したことで実現した。これを具現化した MAZDA3 に続き、SUV である CX-30 でも同じ乗り心地性能と操縦安定性能が感じられるように、MAZDA3 から踏襲すべき要素技術を“固定”，CX-30 ユニークなシステム要件に対して変更を加えることで同じ性能が得られる要素技術を“変動”と定め、この“固定”と“変動”を組み合わせることで、MAZDA3 と同体質（同じ特性）が感じられるダイナミクス性能を実現した。

Summary

CX-30 and Mazda3 were developed based on a common architecture as new generation vehicles. In the development for better ride comfort and vehicle dynamics, we set a target with aim to achieve a driver's stable head motion and “Jinba-ittai” performance based on the human-centered development philosophy. This target was achieved by newly-developed vehicle structural technology called Skyactiv-Vehicle Architecture. Following Mazda3, which was developed as a leading model equipped with this new technology, CX-30 was also developed with the adoption of the technology to realize the same characteristics in ride comfort and vehicle dynamics as those of Mazda3. We defined part of newly-developed technology that sustained Mazda3 characteristics as “fixed factor” technology, and rest of the technology that was changed from Mazda3 characteristics as “variable factor” technology. With a combination of these “fixed factor” and “variable factor” technology, we finally developed CX-30 in which a driver can feel same characteristics in ride comfort and vehicle dynamics as in Mazda3.

Key words : Ride Comfort, Vehicle Dynamics, “Fixed factor”, “Variable factor”

1. はじめに

近年、マツダは人間中心の開発哲学に基づき、開発プロセスを進化させている。従来は車両性能を機械特性として扱い進化を目指してきたが、人の特性に関する研究を進めることで、人間が本来持っている優れた能力を運転中に発揮できるように、車両特性を開発している。

本稿では CX-30 の開発コンセプトと開発プロセス、そ

れらを実現する技術について述べる。

2. 新世代商品群の一括開発プロセス

2.1 ダイナミクス性能の一括開発

一括開発におけるプラットフォームの役割は、いくつかのセグメントで車種適用できるコンセプト、同じ体質（特性）を実現する要素技術を開発して、それらを構造化する。ダイナミクス性能は人の頭部の動きを安定させる

*1～2 操安性能開発部
Chassis Dynamics Development Dept.

*4 ボデー開発部
Body Development Dept.

*3 シャシー開発部
Chassis Development Dept.

*5 マツダ E&T CAE 技術推進部
Mazda E&T CAE Technology Promotion Dept.

コンセプトとそれを具現化する技術を開発した。

2.2 人の特性に関する開発コンセプト

一般的に、人は頭部の動きが安定すれば、快適な乗り心地性能を感じることができることは知られている。運転操作中でも人の頭部の動きを安定させることを開発のコンセプトとした。路面からの入力で発生する力が、人体へ伝わるまでの経路の中で頭部の動きを不連続にする要素を洗い出し、それらを連続的な動きに変換して、頭部の動きを安定させる (Fig. 1)。

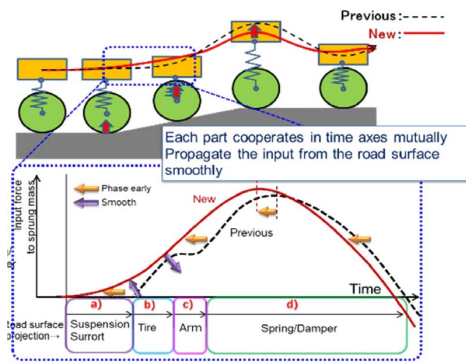


Fig. 1 Concept of Road Input Force Control

2.3 ダイナミクス性能の同体質

人間特性を基にダイナミクス性能が同じと感じられる車両特性を平面運動とバネ上運動で定義した。

(1) 平面運動における同体質化

① 操舵特性に関する定義で、日常の走行条件における操舵力の差が±1N以下であることを同体質とした。

② 車両応答に関する定義で、操舵に対するヨー応答と横向き加速度の発生タイミングを適切にすることが重要で、その位相遅れの関係がある一定以内であることを同体質とした (Fig. 2)。

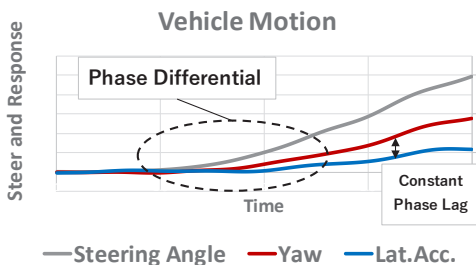


Fig. 2 Yaw and Lateral G Phase Lag against Steer

(2) バネ上運動における同体質化

バネ上の運動は路面入力により発生する上下運動、操舵により発生するピッチ運動やロール運動を起こす。これらの運動が連成する一定の関係について同体質を定義した。例として操舵初期におけるピッチ運動とロール運動の連成を示す (Fig. 3)。

Relation of Roll and Pitch Motion

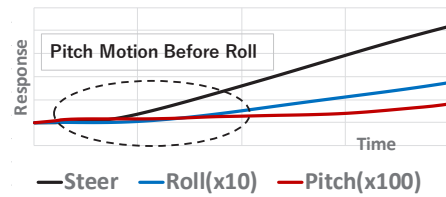


Fig. 3 Pitch and Roll Relation

2.4 同体質性能を実現する制御因子

ダイナミクス性能の同体質化に向け、各システム、ユニットの特性を検証し、制御因子を明らかにした。

① 頭部の動きを安定させるシート特性⁽¹⁾

着座時でも立位 (歩行時) に近くなるよう骨盤を立てさせること、バランス保持能力が発揮できるよう脊柱に自然なS字カーブを描かせることで、乗員がバネ上運動を正確に把握できる優れたシート特性が実現できる。これから座面、シートバックの体圧分布など、人体の支持特性を制御因子とした。

② 入力伝達に遅れがなく振動を減衰させるボディー特性

フロントサスペンションからの入力をリアサスペンションへ遅れなく伝達する高剛性な車体骨格特性と振動エネルギーを減衰させて乗員へ伝える伝達特性を制御因子とした。

③ タイヤの動きを安定させるサスペンション支持特性⁽¹⁾

路面からのさまざまな方向への入力に対して、ロアアーム前側ブッシュをピボット化して、タイヤの位置決め機能を強化した。タイヤへ横力や前後力が入力した時、前側ブッシュを中心にロアアームが回転運動することで、連続したコンプライアンス特性となり、車両運動を安定させる。この特性を制御因子とした (Fig. 4)。

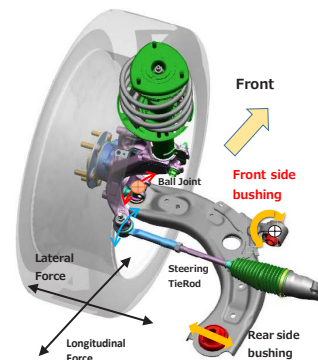


Fig. 4 Stable Tire Position against Input Force

④ ロール運動とピッチ運動を決定するロール軸

バネ上のロール運動やピッチ運動はロール軸の設定に依存する。ロール軸はフロントとリアのサスペンションのリンク配置により決定する特性で、路面からの入力的大小と位相を制御する。このリンク配置とロール剛性を制御因子とした。

これらの制御因子に加え、ショックアブソーバーの減衰特性、電動パワーステアリングの制御パラメーター特性、タイヤ空気圧などを検討した。

2.5 同体質性能を支える解析技術

CAE 解析はヨー運動などの平面運動の分析に加えて、ロール運動とピッチ運動の連成など、バネ上運動の分析を強化した。

このCAE 解析は、機構解析ソフトによるシミュレーション技術の強化により実現した。プラットフォーム開発時からCAE モデルの精度向上に取り組み、CX-30 開発はモデル精度と検証精度を向上させた。その一例として、新たな形状を採用したトーションビーム式リアサスペンションのロール剛性に関する検討を示す。質量の増加を抑え、ねじり剛性の確保とステア方向の金物の剛性を向上させる目的で新規開発した Smart Expand Beam (Fig. 5) は、従来の解析手法では精度良く解析できないことから、新たなモデル化技術が必要であった。プラットフォーム開発時からこの課題に取り組み、MAZDA3 開発時のコリレーション活動を経て、CX-30 開発時は実測との誤差を5%以内に抑えることができ、解析精度を向上させた (Fig. 6)。この技術は後述のバネ上運動の分析精度を向上させた。

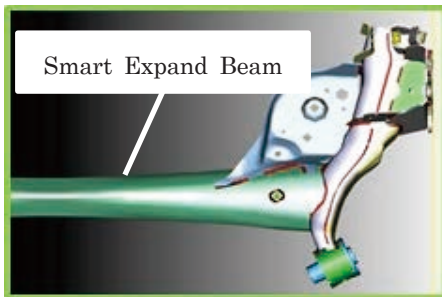


Fig. 5 Torsion Beam Axle (Smart Expand Beam)

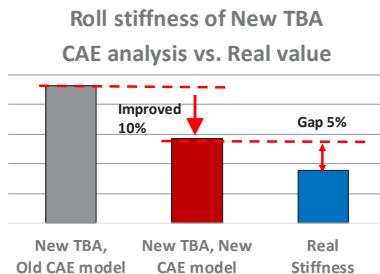


Fig. 6 Rear Roll Stiffness CAE Analysis vs. Vehicle's

3. CX-30 のダイナミクス性能開発

CX-30 は MAZDA3 と車両諸元が異なり、ダイナミクス性能に変化が生じるが、制御因子を用いて同体質性能を実現した。本章では、CX-30 のダイナミクス性能開発における制御因子の適用について述べる。

3.1 主要諸元とダイナミクス性能

CX-30 と MAZDA3 はその商品の特性から下記のような違いがある (※ C.G.: Center of Gravity)。

Table 1 Difference of Vehicle Specification

	MAZDA3	New CX-30	GAP
Vehicle height (mm)	1440	1540	+100
Ground height (mm)	140	175	+35
Weight (kg)	1360	1400	+40
C.G. height (mm)※	—	—	+40
Tire Diameter (mm)	651	694	+43

(1) SUV 化した CX-30 は、幅広いシーンで使いやすい荷室容量と開口部の広さを設定した (Fig. 7)。

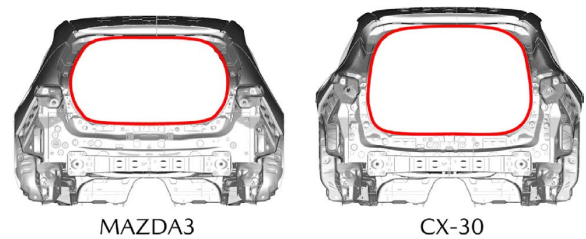


Fig. 7 Back Door Open Area

荷室開口部が広がると車体骨格の剛性、特にねじり剛性が低下して、サスペンション入力の伝達ロスや振動エネルギーの減衰機能が低下する (Fig. 8)。

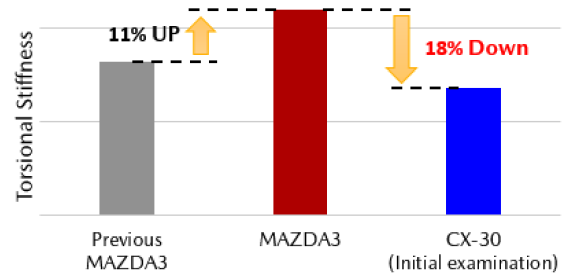


Fig. 8 Body Torsional Stiffness

(2) 大径タイヤ採用と地上高拡大により、フロントロアアームの傾きが増大する。その結果路面からボディーへ伝達される前後、上下入力の位相が変化し (Fig. 9)、バネ上運動が変化する。

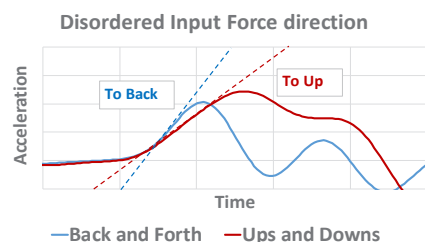


Fig. 9 Disordered Input Force Direction

ロアアームの傾き増加はジャッキアップが増大し、操舵時のロール姿勢はフロント旋回内輪が浮く特性へ変化する (Fig. 10)。

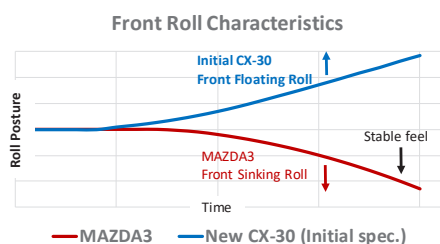


Fig. 10 Lose Front Roll Balance (Jack Up)

(3) 全高、重心高、質量のアップに伴いモーメントが増加して、ロール運動やピッチ運動のバネ上運動が増大する (Fig. 11)。

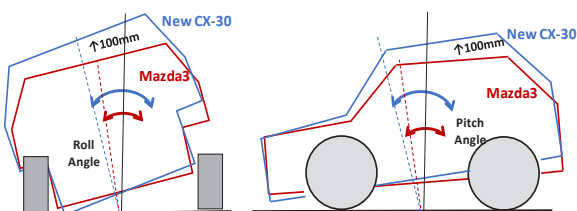


Fig. 11 Increasing Roll and Pitch Motion

3.2 伝達、減衰機能を実現するボディー構造

車体骨格のねじり剛性を MAZDA3 と同じにすることで、等価なボディー特性の実現を図った。車体骨格は MAZDA3 の環状構造を踏襲し、ねじり剛性の低下はリアボディー構成部品の感度を分析して、高感度で質量影響が小さい部品の構造・板厚を最適化した (Fig. 12)。

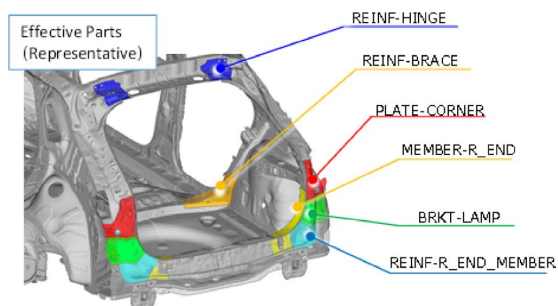


Fig. 12 Sensitive Analysis of Rear Body Parts

その結果、車体骨格の質量増加を最小減に抑え、MAZDA3 と同等な車体ねじり剛性を実現した (Fig. 13)。

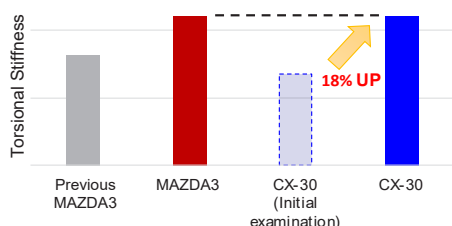


Fig. 13 Improved Body Torsional Stiffness

車体骨格の剛性を等価にしたことで、路面からの入力によって発生する車体の歪部位、その歪エネルギーを減衰させる減衰接着剤のエネルギー減衰効果を等価にでき、MAZDA3 と同等な減衰特性を実現した。効果の一例として路面入力に対する乗員付近の振動レベルを MAZDA3 と比較した (Fig. 14)。

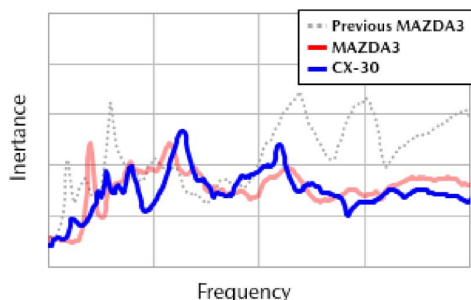


Fig. 14 Body Damping Characteristics

ピークが低く、総面積が小さいほど、振動エネルギーを減衰させる高機能なボディー特性である。

CX-30 は車体のねじり剛性と振動エネルギーの減衰特性を“固定”要素ととらえ、リアボディー構成部品の構造・板厚の新設計により、MAZDA3 と同体質なボディー特性を実現した。

3.3 入力の位相を揃えるフロントサスペンション構造

バネ上の上下運動は、路面からの前後入力と上下入力の位相関係が重要である。前後入力はロアアームの回転運動により、上下入力はロアアームの傾き (以下、下反角) により決まる。

この上下運動を MAZDA3 と同体質にするために、ロアアームの回転運動を等価にした。また車両諸元の違いからロアアームの下反角が同傾となるように、ロアアームとナックルを新形状にした。

同体質化のために守るべき特性・構造を明確にして、“固定”要素ととらえ、前後、上下入力の位相を揃えることで、MAZDA3 と同体質な入力特性とバネ上の上下運動を実現した (Fig. 15)。

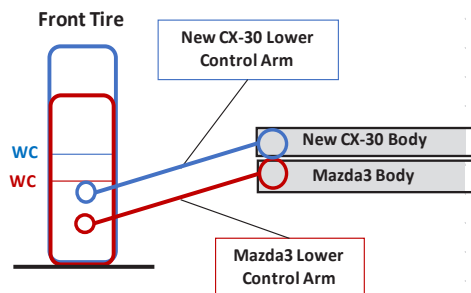


Fig. 15 Front Lower Control Arm Inclination (Front View)

その結果、路面から入力を受けた時の前後方向と上下方向の加速度の増加率が等価となり、乗員は滑らかで連

続した入力と上下運動を感じることができる (Fig. 16, Fig. 17)。

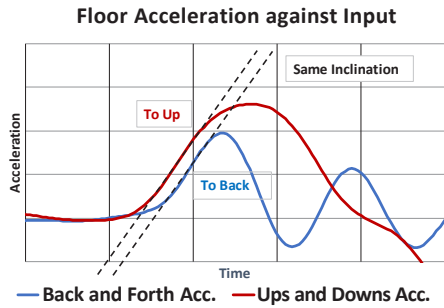


Fig. 16 Floor Acceleration against Road Input

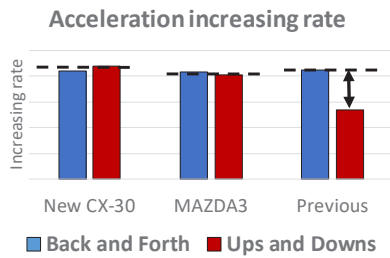


Fig. 17 Acceleration Increasing Rate

更に MAZDA3 と同傾にしたロアアーム下反角は、ロール運動時のジャッキアップの増加が抑制でき、フロントの旋回内輪が浮くロール姿勢を改善した。

3.4 ロール、ピッチを連成させるロール軸とロール剛性

ロール運動とピッチ運動が連成して滑らかに発生するように、MAZDA3 からロール軸と前後ロール剛性配分を再考した。

(1) ロール運動とロール軸の考え方

ロアアームの下反角は、ロール運動時の回転中心となるロール軸の高さ、すなわちロールセンター高を決定する。同体質なロール運動の実現は、重心高アップと同等にロールセンター高を上げ、ロールモーメントを等価にする必要がある。しかし、同体質な上下運動の実現のために MAZDA3 と下反角を同傾にした結果、フロントのロールモーメントは増加した (Fig. 18)。

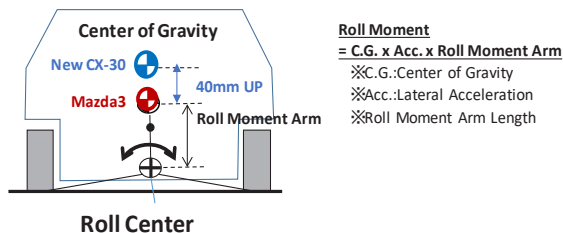


Fig. 18 Center of Gravity and Front Roll Center Height

一方、リアのトーション・ビーム・アクスル式サスペンション (TBA 式：車軸懸架) は、フロントのマク

ファーソン・ストラット式サスペンションと異なり、ロールセンター高は TBA サスペンションのボディー取り付け点の高さに依存する。そのため取り付け点を重心高アップと同等の 40mm 引き上げ、リアのロールモーメントを等価にした (Fig. 19)。

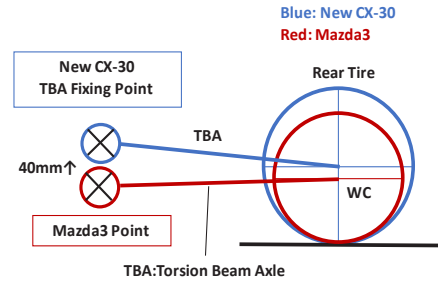


Fig. 19 Rear Torsion Beam Fixing Point (Side View)

リアのロールセンター高を上げた結果、CX-30 のロール軸は MAZDA3 のロール軸に対して前傾となった (Fig. 20)。

この変化によるフロントのロールモーメントの増加は、制御因子であるフロントのロール剛性を 10% アップさせて、同体質なロール運動を実現した。

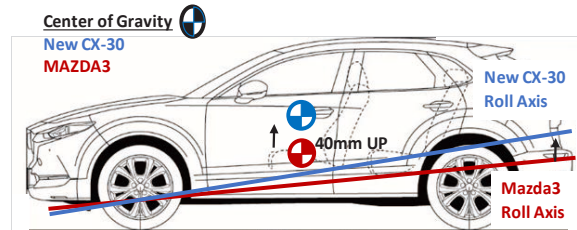


Fig. 20 Roll Center Axis Inclination (Side View)

(2) ピッチ運動とロール運動の連成の考え方

操舵時にロール運動とともに発生するピッチ運動は、フロントのロール剛性アップでフロント旋回外輪の沈み込みが抑えられ、ピッチ運動は減少する。

この変化に対し、リアのロールセンター高を上げ、ロール剛性を MAZDA3 と同等にしたことで、リアの旋回内輪によるジャッキアップを利用してピッチ運動を誘起し、同体質なピッチ運動を実現した。

これらロール運動とピッチ運動の連成を指標に、ロール軸と前後のロール剛性配分を決定する検証を CAE 解析で行い、MAZDA3 と同体質なバネ上運動を導いた。

4. ダイナミクス性能の達成状況

試験車両の実走試験においても、操舵初期にピッチ運動が発生し、その後にロール運動が連成して発生するバネ上運動が実現できた (Fig. 21)。

ロール運動とピッチ運動の連成は、同体質の定義で定めたターゲットを達成している (Fig. 22)。

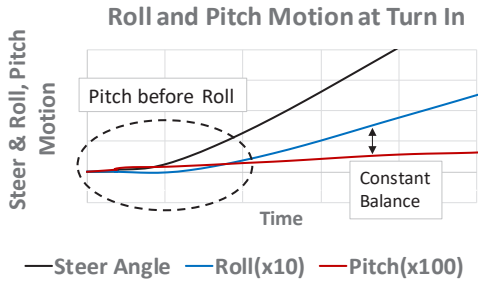


Fig. 21 Pitch and Roll Motion Relation at Turn In

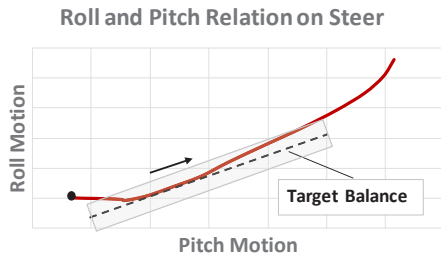


Fig. 22 Pitch and Roll Motion Relation on Steer

CX-30 は、路面からの前後入力と上下入力の位相を揃えて上下運動を制御すること、操舵により発生するロール運動とピッチ運動の連成を制御すること、これらによって MAZDA3 と同体質なバネ上運動性能を実現した。更に開発のコンセプトである乗員の頭部の動きを安定させた。それは社内テストコースの路面において、頭部の動きの計測で確認した (Fig. 23)。これは前世代プラットフォームの車両に比べて、頭部の動きが減少し、快適な乗り心地性能を感じることができる。

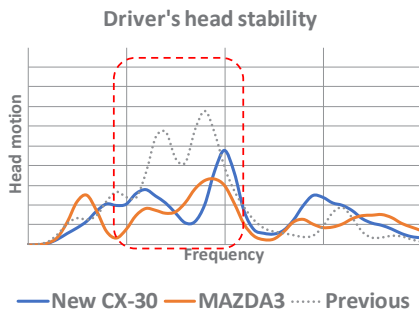


Fig. 23 Driver's Head Motion on Testing Vehicles

5. おわりに

CX-30 は、MAZDA3 と同体質で優れたダイナミクス性能を実現した。市場からの評価では、ドイツで最も権威のある自動車賞のひとつである「ゴールデンステアリングホイール賞」(コンパクト SUV 部門) を受賞した。国内の評価においても、イメージするだけで車がそのとおりに動くような「以心伝心」感を感じるなどのコメントをいただき、人間中心の開発哲学に基づいたダイナミクス性能が市場で評価されたと考える。

参考文献

- (1) 塚根ほか：新型 MAZDA3 のビークルダイナミクス技術, [マツダ技報, No.36, pp.90-95 \(2019\)](#)

■ 著 者 ■



柏村 祐二



老川 隆



吉村 匡史



後藤 英貴



松村 篤

特集：MAZDA CX-30

06

新世代 i-ACTIV AWD の紹介

Introduction of New Generation i-ACTIV AWD

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

要 約

マツダは、長期ビジョン「サステイナブル “Zoom-Zoom” 宣言 2030」に基づき、クルマのもつ魅力である「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している。AWD システムでは、人の能力を引き出し、心と体を活性化させる「人馬一体」感のさらなる追究と、実用環境下における燃費性能の両立を掲げて技術開発を行ってきた。本稿では、2012 年 CX-5 以降の車両に順次搭載してきた「i-ACTIV AWD」をベースとして、ハードウェア/ソフトウェアとも大幅に進化した、CX-30 搭載の「新世代 i-ACTIV AWD」について紹介する。

Summary

Based on a long term vision, “Sustainable “Zoom-Zoom” 2030”, Mazda aims to solve a variety of issues facing the “earth” “society” and “people” through “driving pleasure”. Mazda AWD system has been developed by further pursuing “Jinba-ittai” to bring out human potential and boost the excitement of mind and body while aiming for ideal handling and real-world fuel economy performance.

This article introduces “New generation i-ACTIV AWD” for CX-30 supported by significantly improved hardware and control system while sustaining the characteristics of the original “i-ACTIV AWD” mounted from 2012 CX-5.

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

1. はじめに

マツダは、1970 年代からフルタイム 4WD システムの技術開発をスタートし、国産車初の乗用フルタイム 4WD 車である 1985 年の「ファミリア 4WD」を発売。センターデフ式 4WD と低速用デフロック機構を有し、高い走破性を実現していた。1990 年代には「ボンゴフレディ」や「トリビュート」でロータリーブレードカップリング式 4WD を開発し、4WD モデルの課題であった燃費との両立に取り組んだ。2000 年代からは電子制御多板クラッチ式 4WD の技術開発をスタートし、初代「アテンザ」で初導入。2005 年の「マツダスピードアテンザ」ではハイパフォーマンス AWD セダンの開発を通し

てノウハウを蓄積してきた。

現行世代につながる 2012 年の初代「CX-5」に搭載した「i-ACTIV AWD」では、電子制御式多板クラッチユニットに独自の高度な制御アルゴリズムを組み合わせた AWD システムへと進化。それまでの四輪駆動のクルマというと、一般的に直進安定性が高い一方でアンダーステア傾向が強く、曲がりにくさを感じるものであったが、i-ACTIV AWD ではドライバーのステアリング操作に応じて後輪トルクをリニアに変化させることで類まれな曲がりやすさを実現し、誰もが扱いやすい AWD を提供してきた。

MAZDA3 から採用した「新世代 i-ACTIV AWD」では、ドライバーの操舵に合わせてエンジントルクを制御し、4

*1,4 ドライブトレイン開発部
 Drivetrain Development Dept.

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

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

輪の荷重状態を最適化して操舵応答性を改善する「G-ベクタリングコントロール (GVC)」とAWDの協調システムを構築し、曲がりやすさと安定性をさらに高次元で両立。SUVであるCX-30には、悪路走破性を飛躍的に向上する「オフロード・トラクション・アシスト」を搭載し、より幅広いシーンでの「人馬一体」感を提供する。

2. 進化のコンセプト

MAZDA3とCX-30に採用した新世代i-ACTIV AWDシステムでは、次のふたつの提供価値の更なる向上を目指して、ハードウェアとソフトウェアの両方においてさまざまな機能を進化させた (Fig. 1)。

- (1) さまざまな路面で安全に走行できるダイナミクス性能
- (2) 実用域で2WD車に迫る低燃費

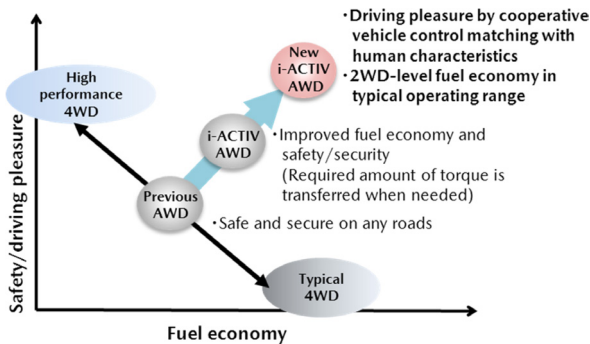


Fig. 1 Evolution of AWD

2.1 理想の車両挙動へ

タイヤは、垂直荷重が掛かることでより高いグリップを発揮することができる。「新世代 i-ACTIV AWD」はこの原理を活用し、さまざまな走行シーンにおいて4つのタイヤに効率的に仕事をさせるため、クルマの前後方向の荷重移動をドライバーの操作やGセンサーの情報などから推定。前後荷重状態に応じて、前輪・後輪の荷重が掛かった方へ積極的にトルクを配分する。

これを実現するため、減速～旋回～加速と時々刻々変化する車両運動状態と、ブレーキやステアリング、アクセルによるドライバーの操作意図をモニターしながら、瞬時に前後のトルク配分を変化させることで前後タイヤの負荷バランスを最適化する。すなわち、前後輪のタイヤ摩擦円状態を推定し、タイヤ力のキャパシティを最大化する前後トルク配分コントロールによって、人馬一体のダイナミクス性能と高効率な低燃費性能を両立するのが新世代 i-ACTIV AWD の技術コンセプトである。

2.2 加減速時のAWDトルク配分

加速時は、アクセル操作や前後Gから推定した車両後方への荷重移動に応じて後輪のトルク配分を増加し、前輪のタイヤ負荷を低減。タイヤスリップが発生するずっと手前から前後輪のタイヤ力の路面伝達効率の最大化を

狙って制御する。減速時には前輪への配分を増加させ、垂直荷重が減少した後輪のタイヤ負荷を低減し、タックイン挙動も含めた減速姿勢の安定化に貢献する。

高速走行時には、路面にうねりのある高速道路などでも安心して走行できるよう、車速の増加に応じて後輪へのトルク配分を増加させ、前後輪の拘束力を強化することで直進安定性を高める (Fig. 2)。

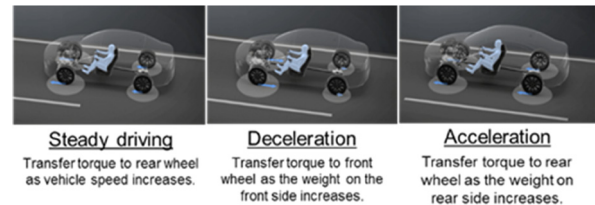


Fig. 2 AWD Torque Ratio at Acceleration

2.3 旋回時のAWDトルク配分

旋回時は、ターンインのタイミング、すなわちドライバーがハンドルを切り足している間は、曲がりやすさを優先するため、GVCのエンジントルク制御による荷重移動効果を優先し、AWDはその瞬間の前後トルク配分を保持。定常旋回に至るまでには、車両のヨー運動の強度に応じて後輪へのトルク配分を増やしていくことで、前輪のタイヤ横力マージンを確保してアンダーステアの発生を防ぎつつ、後述のサスペンションジオメトリーとの相乗効果を活用して旋回姿勢の安定化を実現した (Fig. 3, 4)。



Fig. 3 AWD Torque Ratio at Turn

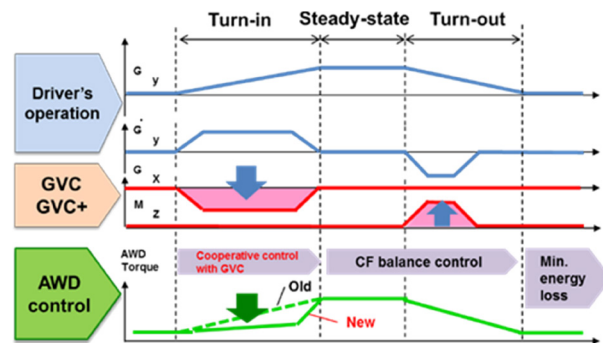


Fig. 4 Cooperative Control with GVC

2.4 サスペンションジオメトリーとの相乗効果

MAZDA3 と CX-30 からは、新世代車体構造技術である SKYACTIV VEHICLE ARCHITECTURE を採用。前輪駆動 2WD と AWD 用のプラットフォームで、リヤサスペンションにはトーションビームアクスル (TBA) を採用する。AWD ではこの TBA の取付角を活用し、後輪トルク付加によるアンチスコット効果によって加速時の車体後部の沈み込みを抑制。安定した加速姿勢を実現する。

旋回時には後輪トルク増加によってピッチ姿勢変化を抑制し、ドライバーが感じるロール感を穏やかに改善する。具体的には、アクセル一定で走行した場合、前輪が減速してアンチダイブ効果、後輪が増速となってアンチスコット効果が発生し、前後の車体の支えが強化されることでピッチ姿勢を安定する (Fig. 5)。また TBA の特徴として駆動力の増減に対するタイヤのトー角変化が少ないため、旋回加速シーンにおいても限界挙動が予測しやすいというメリットがある。

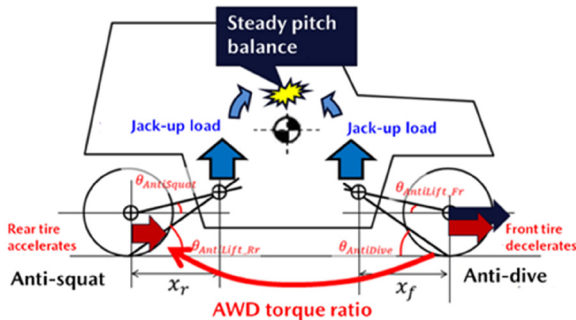


Fig. 5 Image of Stabilizing Effect in Vehicle Pitching

新旧の i-ACTIV AWD で旋回時の操舵応答性を比較した結果を Fig. 6 に示す。GVC と AWD の協調制御により、ゼロ舵角から切り込み時のアンダーステアが低減し、よりスムーズな旋回挙動を実現。ハンドルを戻す際のヨー挙動の収束性も改善し、よりリニアリティの高いハンドリング性能を実現した。

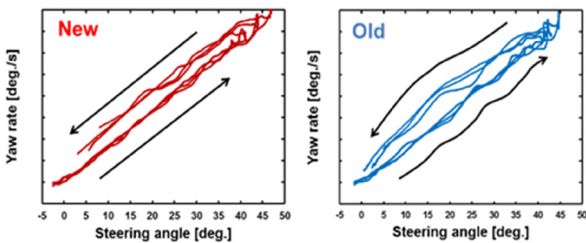


Fig. 6 Comparison Result of Steering Response between Previous and New System

以上の相乗効果によって、ドライ、ウェットにかかわらずさまざまな路面環境で高効率かつ意のままのダイナミクス性能を実現した。不安定になりやすい雪上においても、安定した車両挙動と自在なコントロール性を提供する (Fig. 7)。



Fig. 7 New Generation i-ACTIV AWD on Snowy Road

2.5 悪路走破性の向上

SUV モデルの CX-30 では、悪路でのスタック脱出性を高める「オフロード・トラクション・アシスト」を新規に開発、採用した (Fig. 8)。AWD システムとトラクション・コントロール・システム (TCS) が協調し、オフロードやぬかるみ、深雪、わだち等の悪路における走破性とコントロール性を高め、「悪路でも人馬一体」を実現する。

オフロード・トラクション・アシスト作動時には、AWD はスリップする前から後輪トルクを最大化し、4 輪のタイヤのグリップポテンシャルを向上。対角輪のスリップをはじめとするスタック状態をモニターし、悪路で地面から浮いて空転する輪に対しては通常よりも強い TCS のブレーキ介入によって駆動力の抜けを抑えることで、接地輪側へ駆動力を確実に伝達する (Fig. 9)。



Fig. 8 Operation SW and Meter Display

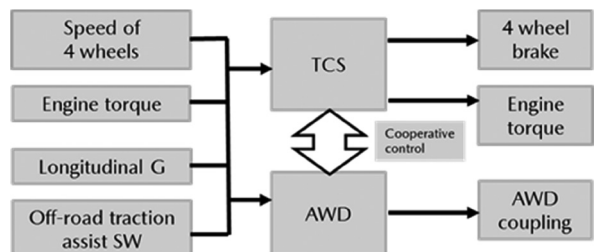


Fig. 9 System Diagram of Off-Road Traction Assist

この機能によって、悪路においてもタイヤのグリップを余すことなく使い切ることが可能となり、ドライバーがスリップを緻密にコントロールしながら積極的にアクセルを踏んで走破することが可能となった (Fig. 10)。



Fig. 10 Off-Road Traction Assist

3. 進化をささえる制御技術

上述の車両挙動を実現するためには、時々刻々と変化する車両状態を正確に把握し、ドライバーのアクセルやステアリング操作と連動して遅延なく最適な AWD トルクを演算し制御することが必要である。以下に進化した制御技術を紹介する。

3.1 AWD 制御システムの進化

従来の i-ACTIV AWD では AWD 専用 ECU を有しており、エンジンを制御するパワーコントロールモジュール (PCM) と独立で構成され、PCM から CAN 送信される情報を基に AWD トルクを演算していた。新世代 i-ACTIV AWD では、この AWD 専用 ECU を PCM へ統合 (Fig. 11)。AWD トルク演算に必要な情報の CAN 送信による遅れを排除することで応答速度を向上させるとともに、GVC と共通の車両運動モデルを用いた新たな統合制御システムを構築した。

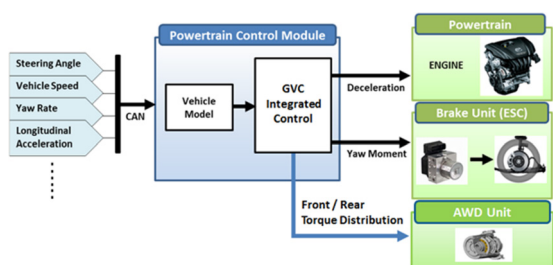


Fig. 11 Summary of Vehicle Integrated Control System

3.2 AWD 制御ロジックの進化

i-ACTIV AWD では、ドライバー操作情報及び車両情報を基に推定した車両状態に応じて、最適な AWD トルクを演算している。新世代 i-ACTIV AWD では、より緻密な車両状態の把握とリアなトルク配分を目指して、以下の新規ロジックを構築した (Fig. 12)。

① 4 輪接地荷重推定ロジック

加減速・旋回時の 4 輪の接地荷重を演算する。

② エネルギー損失最小制御ロジック

4 輪の接地荷重に応じて、タイヤのグリップ性能を最

大化するように AWD トルクを最適化する。

③ GVC 協調旋回制御ロジック

GVC と協調して GVC 作動中の AWD トルクを維持するとともに、旋回状態に応じて AWD トルクを増加する。

これにより、旋回時の操舵応答性と安定性との両立を図ると同時に、加減速時におけるタイヤ伝達効率最大化とドライバー意図に応じた挙動コントロール性を実現した。

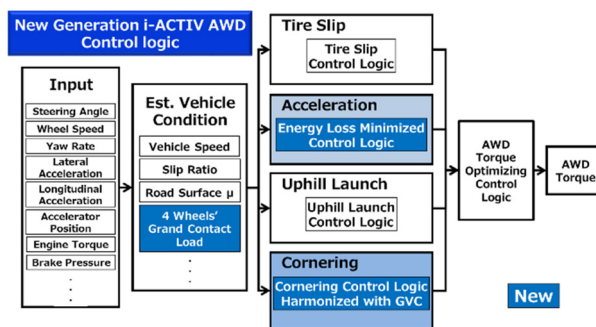


Fig. 12 Summary of AWD Control Logic

4. 進化をささえるハードウェア技術

上述の車両制御を実現するためには、AWD トルク配分の応答性と精度の向上が不可欠である。また、実用燃費向上のためには、個々の関連部品はもちろんのこと、AWD 全体のシステム効率を上げることが重要である。以下に進化したハードウェア技術を紹介する。

4.1 トルク配分範囲の拡大と応答性・精度の向上

新世代 i-ACTIV AWD では、システムとしてトルク配分制御範囲の拡大、応答性・精度の向上のため、前後駆動系に約 1% の差回転を発生するギヤ比を新たに設定した (Fig. 13)。

多板クラッチ式 AWD ユニットでは、その締結力により回転数の高い側から低い側へトルクが配分される。つまり前後輪の回転差が大きい場合は正確なトルク配分がしやすい一方、平坦路での定常走行など前後輪の回転差が少ない場合は正確なトルク配分が難しい状況となる。そこで、パワーテイクオフ (PTO) とリヤデファレンシャルユニット (RDU) にギヤ比差を設定することで、常に AWD ユニットの前後に差回転が生じる状態をつくり、より正確で確実な後輪トルク配分を可能とした。また、差回転によってユニット内部のパイロットクラッチをスタンバイ状態に維持することで、トルク配分の応答速度を従来比で約 1/2 に改善した (Fig. 14)。

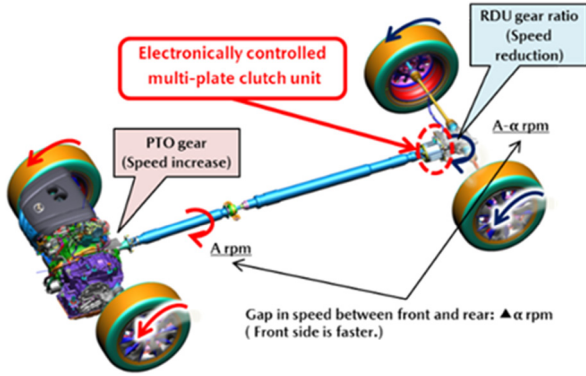


Fig. 13 Gap in Rotation between Front and Rear Wheels

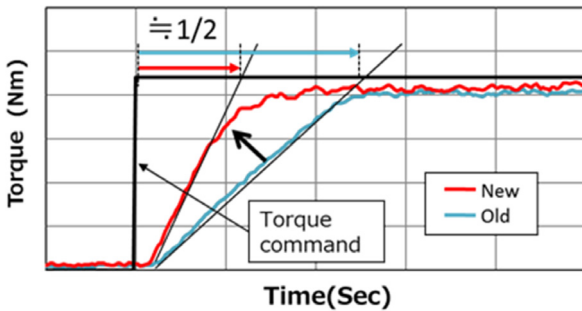


Fig. 14 Rear Wheel Torque Response

4.2 電子制御式多板クラッチユニット

AWDユニット内に常に生じる差回転の課題として、引き摺りトルクが発生し、トルクコントロール性と効率低下が懸念される。この解決策として、多板クラッチの最適化や低粘度フルード等を採用。冬季を想定した電子制御式多板クラッチフルード温度 0°C付近において、引き摺りトルクを約 43%低減し、トルクコントロール性の向上とエネルギー損失の低減に貢献した (Fig. 15)。

更に、ユニット内部に温度センサーを追加、内部温度を直接モニターし、温度変化に対するクラッチの特性変化を制御で補正することで、トルク配分精度の向上を図った (Fig. 16)。

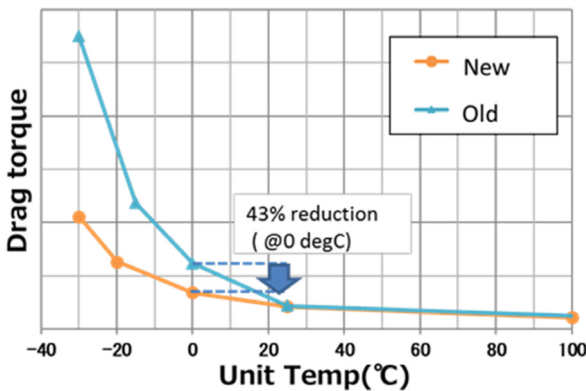


Fig. 15 Drag Torque of Electronically Controlled Multi-Plate Clutch Unit

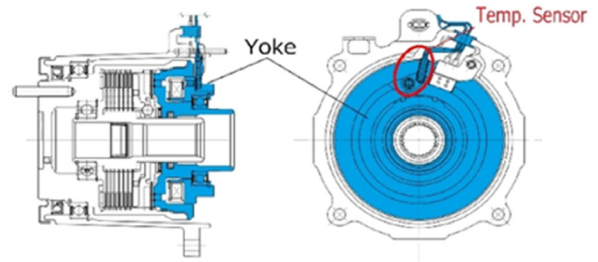


Fig. 16 Electronically Controlled Multi-Plate Clutch Unit Temp. Sensor

4.3 パワー・テイク・オフユニット (PTO) / リヤデフ・ユニット (RDU)

初代 CX-5 以降、マツダでは AWD モデルの実用燃費の向上を目的に、PTO と RDU の抵抗低減に継続的に取り組んでいる。新世代 i-ACTIV AWD システムでは、次の①～③の技術を採用することで、AWD システムのエネルギー損失を旧型に対して 60%低減した (Fig. 19)。

① PTO ダンパーの採用

新世代 i-ACTIV AWD では、PTO の動力伝達経路上に、ストッパー付きねじりダンパー (PTO ダンパー Fig. 17) を設定し、PTO のねじり剛性を従来比大幅に低減することで、リヤ駆動系のねじり共振周波数を常用域外に離間した。これにより、リヤ駆動系起因の NVH 性能の向上及び、リヤ駆動系へのトルク変動入力を大幅に低減でき、幅広い運転状況下において AWD トルクをより正確に配分することを可能とした。また、正確なトルク配分により AWD システムのエネルギー損失も大幅に低減した。

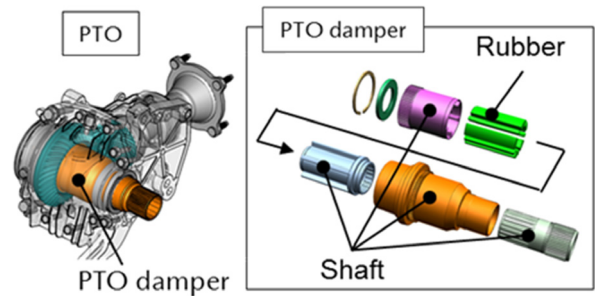


Fig. 17 Structure of PTO Damper

② PTO/RDU ボールタイプのベアリングの採用

ベアリングの構造をテーパローラータイプからボールタイプに変更することで、回転抵抗を低減した。

③ RDU オイルの一時預け構造の採用

過剰なオイル供給によるベアリングの攪拌損失の増大を抑制することで、回転抵抗を低減した (Fig. 18)。

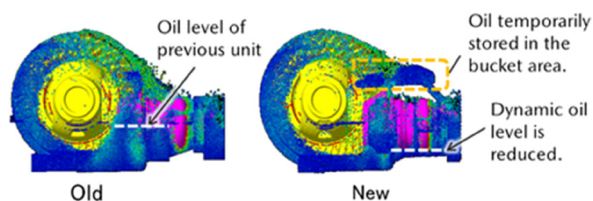


Fig. 18 Results of Oil Flow Analysis by Particle Method

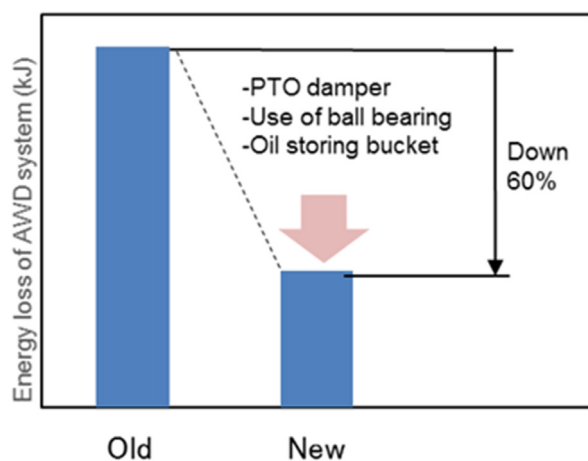


Fig. 19 Energy Loss of AWD System

4.4 NVH 性能の強化

より快適なドライビング環境を実現するため、AWDシステムでも車両静粛性を大幅に向上させている。AWD車両では2WDに対して後輪を駆動させるためのギヤや動力伝達軸が追加され、振動・騒音の発生/伝達源が増加する。そこで新世代 i-ACTIV AWD では、初期開発段階からAWDシステムの車両振動モデル (Fig. 20) を構築し、構成部品の主要共振モード周波数をコントロールし離間配置することにより、AWDシステムによる振動増幅を抑制するNVHポテンシャルの高い基本骨格を実現。優れたNVH性能に貢献した。

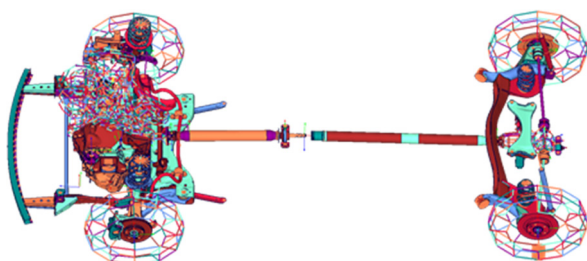


Fig. 20 Vibration Analysis AWD Vehicle Model

おわりに

新世代 i-ACTIV AWD は、統合的な車両運動制御システムの進化によって、従来からもつ舗装路や雪道での直進安定性や操縦安定性の向上のみならず、オフロード等の悪路においても安心・安全な人馬一体性能を提供し、

ドライバーの行動範囲をより拡大する。

また、AWDシステムのエネルギー損失を継続的に低減することで環境性能も飛躍的に向上し、マツダの目指すAWDの理想にまた一步近づいた。

参考文献

- (1) 沢崎ほか：新型デミオ・CX-3の小型・軽量4WDシステムの紹介, [マツダ技報, No.32, pp.38-41 \(2015\)](#)
- (2) 梅津ほか：G-Vectoring Controlの開発, [マツダ技報, No.34, pp.99-104 \(2017\)](#)
- (3) 梅津ほか：G-Vectoring Control Plusの開発, [マツダ技報, No.36, pp.235-240 \(2019\)](#)

■ 著 者 ■



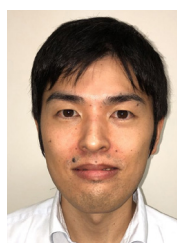
嶋田 克利



梅津 大輔



今村 泰理



日高 誠二

論文・解説

07

悪路耐久試験への自動運転装置の適用

Application of Autonomous Driving Device to Rough Road Durability Test

田邊 政治^{*1} 宮本 幹大^{*2} 山上 登^{*3}
Seiji Tanabe Mikihiro Miyamoto Noboru Yamagami
山広 昭文^{*4} 森本 誠司^{*5} 上村 晴美^{*6}
Akifumi Yamahiro Seiji Morimoto Harumi Kamimura

要 約

マツダの車両開発における信頼性評価では、車体やシャシーに代表されるコンポーネントを使ったリグ試験（熱・振動など過酷な条件を模擬した耐久試験）に加え、実車（フルビークル）耐久信頼性試験が重要な役割を担っている。

この耐久信頼性試験は、従来テストドライバーが、耐久車に乗車する形で行われてきた。この業務は、昼夜交代制の勤務でありドライバーの判断ミス防止や労務環境の改善、試験期間の短縮という課題があった。これらの課題に対し有効な打開策となる自動運転装置による悪路耐久試験方法を考案し実用化することができた。本稿では、自動運転装置を適用した事例と今後の展望を紹介する。

Summary

For the vehicle reliability evaluation, Mazda has two test methods. The first one is the rig test using vehicle body or chassis part. The second one is the driving test using the actual vehicle. Both tests take important roles to evaluate vehicle durability and reliability.

The driving test has been conducted by test-drivers who drive the test vehicle by day and night shifts, and there are some problems to be solved, which include prevention of judgement errors by the driver, improvement of labor environment, and shortening of evaluation period. We developed a rough-road durability test method using the autonomous driving device which can be the effective solution for these problems and verified it. This paper shows some application cases and the future prospects of the autonomous driving device.

Key words : Common Infrastructure, Durability Test, Test/Evaluation

1. はじめに

自動車はシャシー、車体、内外装など多くのコンポーネントから構成されている。商品としての自動車の信頼性確保を確認するには、個々の部品の信頼性試験のみでは十分でなくそれらが組みあがった実車（フルビークル）での信頼性確認が必要となる。この試験の実施には、多大なる期間・工数を要している。試験期間を短縮するためこれまでは、路面入力の大きい区間を増やして走行距離を減らす加速化を図ってきた。しかし、路面から受ける入力が増大は、車両を運転しているドライバーに対し大きな身体的な負荷となる。そこで自動運転装置の悪路耐久試験への適用に取り組み、運用面も工夫して既存の

コースで適用が可能な実験技術・手法を確立した。この技術で路面からの入力負荷に対する不具合の再現性を維持するとともに労務環境改善と開発効率の向上を実現している。

2. 自動車の信頼性試験

自動車は多数のシステムや部品点数で構成されるため信頼性を確保するために、部品単品やシステム単位のリグ試験実車を使った走行試験を実施している。

Fig. 1 のように部品単体のリグ試験では、部品固有の信頼性を評価する。次にシステム単位のリグ試験では、部品単体で評価できない部品間の締結や摺動に関わる部分を評価する。更に実車を使った走行試験では、実際に

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

走行することで発生する水・泥・埃などを含めた複合的な入力に対する信頼性を評価している。

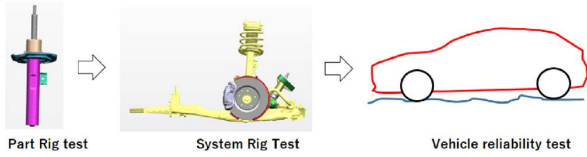


Fig. 1 Reliability Test of Vehicle



Fig. 2 Autonomous Driving Device

3. 自動運転装置の概要

3.1 自動運転装置の選定

ドライバーの労務環境の改善やテスト精度と効率の向上を目的とした悪路耐久試験への自動運転技術の活用事例は 1990 年代より報告されている。それは、コース両脇に埋設された誘導ケーブルからの磁界を走行車の誘導コイルアンテナで検出して走行コース中心からのずれ距離を小さく制御するもので路車協調型^{(1) (2)}と呼ばれて専用コースを使用している。一方、マツダが選定した方式は、Global Navigation Satellite System (GNSS) から得られる車両位置と速度情報を活用する自律型⁽¹⁾の高精度 GPS 方式である。この方式のメリットを路車協調型と比較すると、既存のコースを活用して自動運転範囲を段階的に変更することが可能であることである。自律型の 3 社について機能を比較した結果を Table 1 に示す。試験結果に影響する周回精度と安全システムの作動状態は、デモ機で確認した。悪路耐久試験に耐え得る取り付け方法や装置トラブル発生時に対応するサポート体制などが決め手となってマツダは、イタリア HI-TEC 社（技術サポート：東陽テクニカ）の自動運転装置を導入した (Fig. 2)。本稿では、STEP1 である 1 周 1km のコース内にある二種類の固定悪路を使用した耐久試験方法の活用事例を紹介する。新たな取り組みであり段階を踏んで着実にステップアップする計画としている。

3.2 自動運転装置の構成

自動運転装置の移動局のシステム構成は、Fig. 3 となり橙色部分が、イタリア HI-TEC 社製の実車走行試験用のロボット「Navicontrol」⁽³⁾ である。Real Time Kinematic GPS (RTK-GPS) 測位と慣性計測装置：Inertial Measurement Unit (IMU) の情報を車載するコントロールユニットが演算してアクセル、ステアリング、ブレーキ、それぞれのロボットを制御して自動運転する。RTK-GPS 測位は、移動局の座標と速度を高精度に保つために、基地局の GPS 測位情報を受信して移動局の GPS 測位情報をリアルタイムに解析する情報補正によって成立する。自動運転の範囲となるテストコースの全域で基地局と移動局の通信をカバーできる LTE 回線を選定している。なお自動運転リスクの中で予測が困難な車両前方の小動物の飛び出しなど障害物に対しては、レーザーセンサーを追加しておりシステムが異常を検知し緊急停止によって衝突を回避する。またリモートコントローラーを使用することで自動運転コース内の軌道までの移動とロボットシステムの簡易的な作動確認をドライバーが乗車して実施することもできる。

3.3 フェイルセーフ

耐久車の安全走行は、これまでは車両を運転するテストドライバーの技能に委ねられていた。自動運転装置は、システムが車両の走行状態を監視しており、規定した車

Table 1 Autonomous Driving Device Comparison

Category	Item	Required Performance	Company A	Company B	HI-TEC (TOYO)
Driving	Durability	Using to the Rough Road	△	Unknown	○
	Network Communication	Stability of Network Communication	△	Unknown	○
	Extensibility	Running Simultaneously of Other Vehicles	×	Unknown	△
	Applicable Road	4m Road Width, Sloping Road, 1km/Lap	×	Unknown	△
	Applicable Weather	Bad Weather (Rain, Fog, Snow)	△	×	○
Safety	Fail Safe	Double or More Systems	△	Unknown	○
Support	Technical Support	Ease of Maintenance and Care	△	Unknown	○
Comprehensive Evaluation			2	3	1

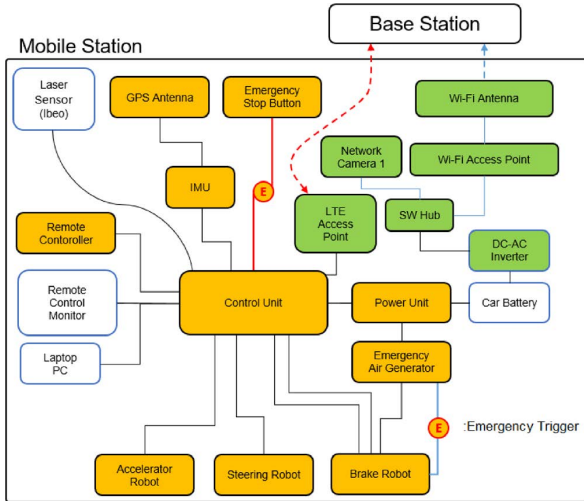


Fig. 3 System of Mobile Station

速と位置を逸脱すると車両を緊急停止させるパスエラー制御が基本となる。システムの状態も監視しており、通信状態の悪化によるフィードバック不良、あるいは、耐久劣化による断線で電源の喪失があっても自動運転が継続できなくなる前に複数のトリガー機能が作動して車両は緊急停止する。ブレーキロボットの作動システムは、モーターとエアシリンダーで二系統の構成になっているためシステムの電源喪失時には、電磁バルブを介したエアシリンダーが作動し車両のブレーキペダルをストロークして緊急停止する (Fig. 4)。この時、同時にアクセルロボットのアクチュエータの電源が遮断されるためアクセルペダルは機械的バネで戻されてアクセルオフの状態になる。

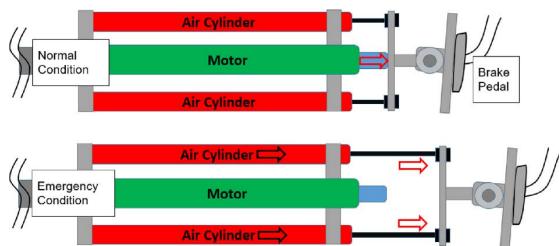


Fig. 4 Brake System of Autonomous Driving Device

3.4 遠隔操作・監視システム

基地局は、Fig. 5 のシステム構成で移動局と同様に橙色部分が自動運転装置の RTK-GPS 測位と遠隔操作に必要な部分になる。リモートコントローラーと専用 PC により走行パターンの変更、自動運転の開始と停止を LTE の通信回線によってコントロールルームから遠隔操作することが可能である。自動運転中の GPS による走行車速や逸脱量は数値やバーグラフで画面上に表示され、移動局システムとの通信状態は、各ステータスランプによって同じ PC の画面上で確認できる。自動運転中の車両の制御とシステムに関する状態監視の他には、パナソニック

システムソリューションズジャパンの現地調査によって専用 Wi-Fi ネットワークシステムを追加して構成し専用の別 PC で運用している。これは、ドライバーが行っている情報収集を装置に置き換えるねらいがあり、自動運転走行中の車両の映像と音、更には、二か所の定点監視カメラからの映像をコントロールルームに集約させている (Fig. 6)。

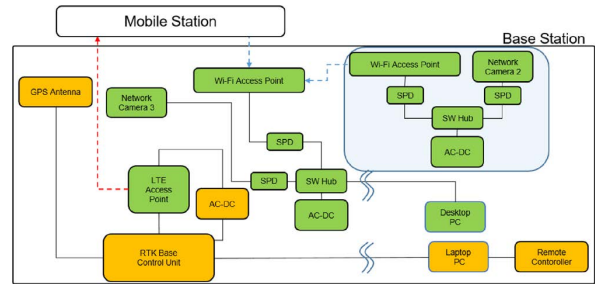


Fig. 5 System of Base Station

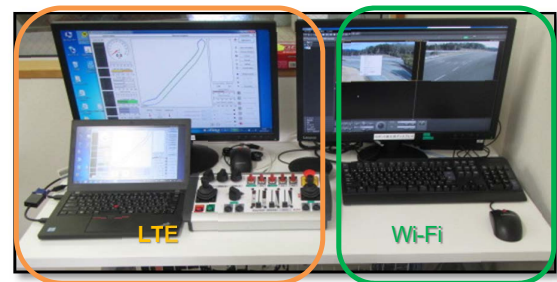


Fig. 6 Monitoring System of Autonomous Driving

追加した監視システムは、現在の技術レベルと重要度から判断して視覚と聴覚に相当する情報を取得する構成とした。車室内にセットするネットワークカメラで車両メーターとワーニングランプの点灯、ステアリングホイールの動きから車両の状態や走行路面を同時に視認 (Fig. 7) & 記録できるようにした。そして、ネットワークカメラに付属するマイクで走行中の車内音 (装置と車両異音) を監視する。更にコースの両端に設置した定点のネットワークカメラで、走行コースの路面変化と自動運転車の走行状態を鳥瞰的に常時監視 & 記録している。これらの情報は、画像・音とも常時通信させているため、その通信量は多いが、自動運転装置の LTE 通信回線と分けているため個々の通信電波が干渉することなく安定して運用できている。

4. 悪路耐久試験への適用

車両が悪路から受ける入力負荷は、①路面の凹凸の大きさ②走行車速③試験車両への積載条件で決まる。①の路面の凹凸の大きさは、市場の代表的な数種類の悪路を模擬し走行コースとして設定してあるため各コースで既に決まっています路面形状から受ける入力となる (Fig. 8)。よって、入力負荷は②と③によってコントロールする。

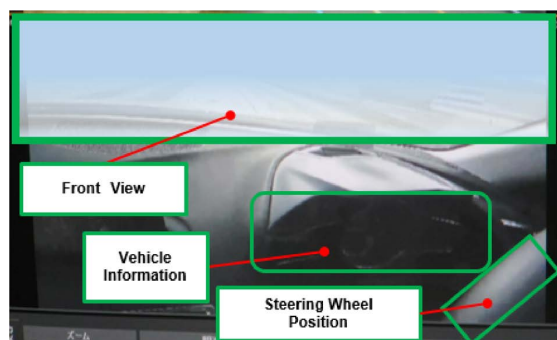


Fig. 7 Monitoring of Autonomous Driving Condition

試験期間を短縮するために市場での一般的な使われ方よりシビアな車速や条件を組み合わせ自動運転装置による耐久試験方法ならではの工夫を入れて構成した。

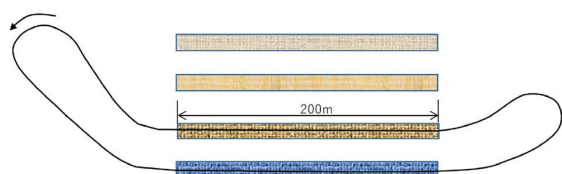


Fig. 8 Rough Road Test Course

4.1 走行車速制御

耐久試験中の走行車速は、一発大荷重的な入力 Avoiding market's general driving speed, but larger and smaller than market's general driving speed. On rough roads, small inputs at low speeds are absorbed, while larger inputs at high speeds are not. This phenomenon is shown in Fig. 9, where the driving pattern of a general customer is simulated. The driving pattern is combined with the chassis and body input load balance for use.

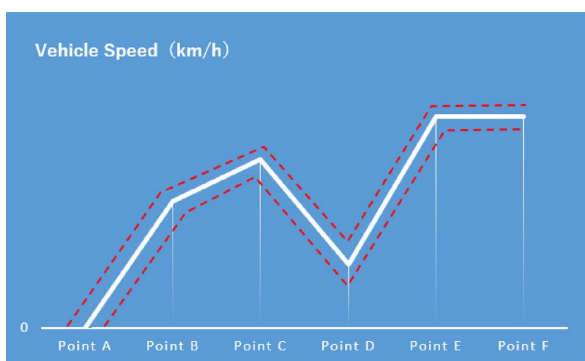


Fig. 9 Example of Vehicle Speed Pattern

設定した走行車速は、耐久試験の負荷をコントロールする上で重要な要因になる。しかし、ドライバーの運転では、長時間の走行になるほど基準の車速 $\pm 2\text{km/h}$ を

維持することが困難になるため走行車速のばらつきを少なくするように車速の変化が少ない単調な走行方法を設定していた。そのためにドライバーが運転する限りは、居眠り運転や判断ミスの危険性がゼロにはならずに残っていた。自動運転装置による走行は GPS 測位による位置と速度の情報をベースにコントロールユニットが 1 秒間に 50 回のトラッキング制御を行う。ユニットメーカーの公表値によると車速誤差は $\pm 0.5\text{km/h}$ である。制御パラメータをコースでチューニングすることで悪路の連続走行でも目標車速に対する誤差は 1km/h 以内で周回することが可能になった (Fig. 10)。

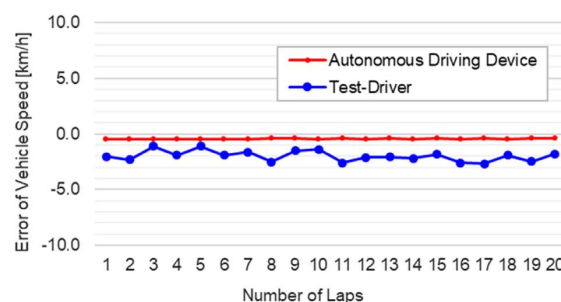


Fig. 10 Speed Accuracy of Autonomous Driving Device

車両を加速させたい区間は、現在車速と目標車速の差に対するアクセルストロークの上下限を設定、更に車両の速度維持に必要なストロークと調整幅を 5 段階まで規定する。このチューニングによって緩加速と急加速をコントロールする。また悪路走行中のブレーキ操作の加減でアクスルと周辺部品には前後方向の入力負荷が変化する。そして、エンジンマウントラバーの取り付け部分にも前後方向の入力負荷に変動がある。これらの入力負荷条件の設定もドライバーの運転では、経験やスキルの差によって操作のタイミングとポイントが一定にならない。自動運転装置は、反復の運転操作に対する精度が高いため加減速による入力負荷を凹凸路面 200m 区間の中で制御する走行方法が可能になった。

4.2 走行ライン制御

耐久試験は、使用するコースを周回数で管理して定期的に車両点検やデータ計測、積載条件の変更を行い運用する。走行車速と積載条件の変更による入力負荷の変動は、走行ラインの違いによっても悪路からの入力と車体ロールによるねじりの入力に変化することになる。更に走行車速に応じてコーナー進入から出口までの走行ラインのトレース性は、耐久試験結果の安定性に影響を及ぼすことになる。この調整は、自動運転させたいコース上の位置情報と速度を設定して制御する。ドライバーが運転時に行う「認知・判断・操作」をシステムに制御させるようにトライ&エラーの走行をデータロガーで収集して変化代の確認と調整を繰り返しノウハウとして習得し

た。この点が自動運転装置を適用する上で最も苦労した所である。

Fig. 11 のように直線から旋回へ移行する自動運転の軌跡をスムーズに走行させるためには、ステアリングロボットとアクセルロボット、及びブレーキロボットの設定をチューニングする必要がある。設定変更の数値による変化代から旋回に必要なステアリング操作の開始する位置を車速に応じてシステムが先読みして制御するように旋回判定区間までの距離と時間のパラメータを変える。減速開始が遅れるとオーバースピードでコーナーに進入して走行ラインが規定した逸脱量を超えて緊急停止してしまう。

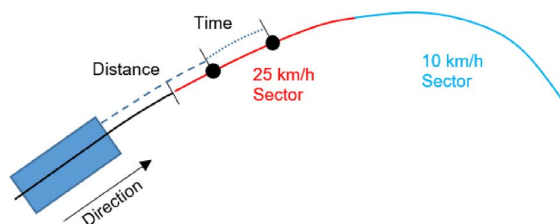


Fig. 11 Turning Control for Autonomous Driving

逸脱量を最小化するため制御パラメータを変更するが、車種によるステアリングギヤ比の違いで実際のステアリング操作量は変化する。更に試験中に遭遇する雨天など環境変化による路面状態の変化や車両側の性能の変化も加味する必要がある。例えば、車のブレーキ性能をコントロールする摩擦材は、冷間と温間で制動距離に差がある。また、燃料が減ってきて車両が軽くなるため減速完了が早くなる。試験開始前には、燃料を満タンにする試験条件とし影響を最小化した。合わせて、減速度制御＋自己学習モードによる対策ソフトウェアの追加製作をユニットメーカーへ依頼し安定する方向に改善した。事前準備に必要な作業は、ステアリング切れ角と回転半径の対応テーブルを作成することでシステムは、走行ラインに追従するための回転半径をリアルタイムで計算して回転半径に対応したステアリング切れ角で制御する。最終的には、ドライバーの運転よりも早めに減速開始する安全第一の設定で対応するが、各車ごとの細かいトライ＆エラーによる設定が不要となった。基本パラメータの設定は、ファイルでシステムに保存できるため車種に応じてファイルを読み込む手順により悪路耐久試験として十分な走行精度と応答性を得ている。

最終的な位置の逸脱量は、適用させた悪路耐久試験コースを 10 周して規定した位置に対する逸脱量の精度を検証した。結果は、悪路の 200m 直線部で逸脱量は 5cm 以下である。逸脱量が大きくなるのは、ステアリングの操舵角で 180°以上を必要とする旋回走行の後半部分で 50cm 以下の実力を有している (Fig. 12)。なお、逸脱量が増える範囲においても繰り返し精度は、直線部と同

等の 5cm 以内になる。このレベルは、適用した耐久試験の精度として極めて良好であり、熟練ドライバーの運転でも長時間の再現は困難と言える高いレベルにある。

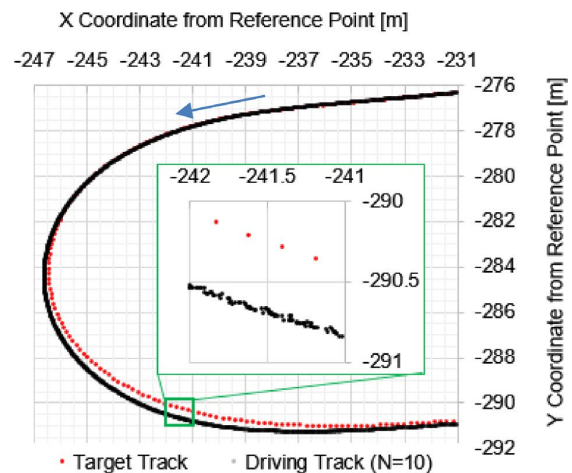


Fig. 12 Track Accuracy of Autonomous Driving Device

悪路耐久試験は、一般的なお客様の使用過程から想定した目標となるダメージを規定している。車両の信頼性を早期に確認する試験方法であり不具合の発見が遅れると商品開発に混乱をきたしてしまう。自動運転制御による繰り返し精度を向上させたことで主要なコンポーネントを歪ゲージと加速度センサーで計測した結果から算出した 1km あたりのダメージは、従来の試験方法に対し 2 倍近くに設定できており耐久走行期間が半減できた。ピーク荷重も既存のテスト方法と大差がないことを確認している。過去の耐久試験実績とも比較して想定外の問題は発生せず同等といえる劣化現象が、ねらいの距離で再現することから適用可能な最終判断ができている (Fig. 13a-b-c)。

4.3 運用方法と改善

この自動運転装置を導入し耐久試験に適用させるには、運用方法・手順など、さまざまな事項の整備が必要であった。耐久試験は、一定期間の走行が必要でその運用には、日々装置を脱着する作業が発生する。精度と安全に関わる部分であり影響度を理解して作業手順、作業者の認定基準、設備の改良が必要になった。例えば、アクチュエータを車両に固定することも作業者の力加減の違いを考慮して改善する必要がある。ペダルロボットの固定は、脱着を容易にするために運転席シートのクッション上にプレートを置いてシートクッションにラチェットバンドで締め付けている。この場合は、シートクッションが変形するため締め付けの力加減が難しい問題が発生した。ベースプレートにガイドを追加して解消した。他にも自転車の位置情報を補正する IMU のセット位置は、悪路走行の振動で角度がある閾値を超えると、ねらいの走行ラインにならない。車の評価への影響を最小

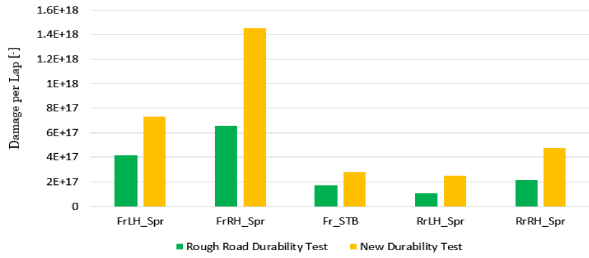


Fig. 13a Parts Damage Comparison

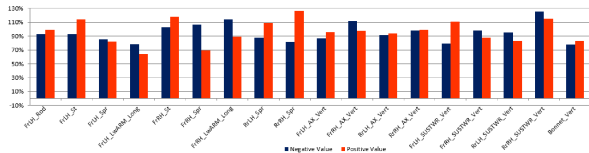


Fig. 13b Max Strain Inputted by New Test

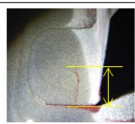

Phenomenon	Results of Durability Test Using the Rough Road	
	By Autonomous Driving Device	Test Driver
Body Panel Crack	 <p>Size : 10 mm</p>	 <p>Size : 10 mm</p>

Fig. 13c Body Damage Comparison

化した固定方法を考案して検証テストで効果を確認した。このように、耐久試験で使ってみるとさまざまな問題が認められた。中には、自動運転中に異常な状態に見えないのに緊急ブレーキが作動する症状が出たこともあった。再現性が乏しく時間はかかったが、原因究明から設計変更につなげ改善した。

5. 更なる進化と適用拡大

導入した自動運転装置は、GPS 位置情報を基に走行精度を確保していることはこれまでに述べているとおりだが、自動運転の肝といえる通信の安定性に関しては、新しい通信規格「5G」などが台頭してきており市場の動向を引き続き注視し適用を検討していきたい。今後の展望として1周5kmの耐久周回コース、耐久試験以外にも自動運転装置の反復精度が活用できるテストへ展開を考えている。コース脇の樹木や立体交差などの人工遮蔽物によりGPS衛星捕捉数が規定数に達しない場合には、極端に自動運転の精度が低下することが分かっている。衛星捕捉環境の整備とシステムの弱点を理解して機能追加を狙った技術開発によって解決する必要がある。既に社内外の関係部門と、これまでの経験と失敗事例も含めて絶対に事故を起こさないリスクアセスメントと必要なトラリアルテスト方法について検討を開始している。

6. おわりに

本稿で紹介したシステムは、イタリアのHI-TEC s.r.l. 社、

(株)東陽テクニカ、及びパナソニックシステムソリューションズジャパン(株)の尽力により実用化できたもので、また説明用の資料も提供いただいた。ここに感謝の意を表す。そして長年の労務環境に関する課題を解決して変革することができた。今後も技術の進化に応じて最も効率が良い、新しい働き方に挑戦していきたい。

参考文献

- (1) 津川定行：自動運転技術の発展，国際交通安全学会誌，特集，自動運転／論説，Vol.40，No.2，(2015)
- (2) 山北俊英：無人走行技術の耐久信頼性開発への適用と展望，日本信頼性学会，解説，Vol.22，No.2，(2000)
- (3) (株)東陽テクニカ：実車走行試験用ロボットシステム GPS 制御実車走行試験ロボット「Navicontrol」，https://www.toyo.co.jp/files/user/img/download/mecha/pdf/navicontrol_catalog.pdf

■ 著 者 ■



田邊 政治



宮本 幹大



山上 登



山広 昭文



森本 誠司



上村 晴美

論文・解説

08

音からの情報で意のままの運転に貢献する エンジンサウンド開発

Development of Engine Sound with Information that a Person Gets from Sound, to Contribute to Driving with the Will on

服部 之総^{*1} 原田 聖士^{*2} 光永 誠介^{*3}
Yukifusa Hattori Satoshi Harada Seisuke Mitsunaga
森田 洋明^{*4} 白石 秀宗^{*5}
Hiroaki Morita Hidekazu Shiraiishi

要 約

新型 MAZDA3 では、エンジン音や路面からのロードノイズを低減し、車内での会話や音楽を聴きやすくするだけでなく、走行中に変化するそれらの音から周囲の状況を認識できるような「質の良い静粛性」で、安心・快適な車室内空間を実現した。新世代車種においてはこれに加えて、音は人にとって次の行動を決めるための情報であることに着目し、加速・減速時のエンジンサウンドを活用することで、更に意のままに車を操れる状態へ近づけると考えた。音で伝える情報、タイミングを定義し、これらの要素を反映したエンジンサウンドの構築を行った。このエンジンサウンドが走行速度のばらつき抑制効果があると仮説し、シミュレーターを実装した車両による検証で明らかにできた。サウンドの機能として、車を意のままに操ることへ貢献できるという新しい価値を定めることができた。

Summary

Aims of Mazda's NVH performance development to enhance the value by realizing "quietness of good quality". That does not only reduce the sound pressure of the road noise from the road surface, and engine sound to make it easy to listen to conversation and music in the car, but also to be able to recognize a surrounding from those sounds to change while driving. In addition to "quietness realized from new Mazda3 of good quality", the sound paid its attention to being information to decide the next action for a person and thought that I brought it close to a state to be able to handle a car in a beck and call more by utilizing engine sound at the time of acceleration, the slowdown. We defined information, the timing to tell by a sound and built the engine sound that reflected these elements. When this engine sound could control unevenness of the vehicle speed, I hypothesized and proved it by the evaluation with the vehicle which implemented a simulator. We was able to fix the new design that I contributed to for handling a car on will as value of the sound.

Key words : Sound quality evaluation, Evaluation technology, Cognitive reaction time, Driving act, Driver behavior, Sense of hearing, Operational, Driving support

1. はじめに

マツダの NVH 性能開発は、お客様の静粛性への高まる期待に応えるために、新型 MAZDA3 以降の車種で、単に静かにするだけでなく、運転に必要な情報を適切に伝え、安心・快適な車室内空間を価値として提供し

ている。

次なる提供価値として、エンジンサウンドと走る喜びの関係性について着目した。人と音の関りを辿り、音を創造し、操作と音、更には走る喜び、所有する喜びを高めることへの貢献に向けて検討を重ねてきた。本稿では、この研究成果について報告する。

*1~5 NVH性能開発部
NVH Performance Development Dept.

なお、本研究における被験者実験は社内の倫理規定に準じ、事前審査を経て行った。また、実験内容について被験者に対し事前に十分な説明を行い、インフォームドコンセントを実施した。

2. 運転と音

2.1 人と音の関わり

人にとって音は、記憶や経験と結びついて感情に作用する機能と、危険・力の大きさ・距離など情報を得る機能に分けることができる。人は、音から情報を得る機能と、視覚や触覚からの情報、及び自身の記憶と合わせて、次の行動に活かすことを無意識に行っている⁽¹⁾。

例えば、雪道を歩行している際に、視線は前を見て周囲の情報をつかむのに活用し、足からの触覚や聴覚は、雪を踏む感触と、発生する音から、路面の状態が凍結していて滑りやすいのか、積雪状態で滑りにくいのかを判断し、次に踏み出す一歩の歩幅や、足の運び方を自然と調整している。

このように音は人にとって、次の行動に必要な情報の1つである。

2.2 運転と音との関係

車の運転は、走る、曲がる、止まるをアクセルペダル、ステアリング、ブレーキ操作によって行っている。

「走る」の中には、加速・減速・定常がある。

「加速」「減速」時は、アクセルペダル操作と、車両加速度の関係や、アクセルペダル操作時の重さとストローク（踏力と作動量）、運転姿勢を支えるシートなどが関係しており、これらを連携して造り込むことで、ドライバーにとって意のままに走る車を目指し、開発を続けている。

上記に加えて、先に述べた人の行動に不可欠な音を制御することで、更に「意のままに」の価値が深化し得ると考えた。

3. 音で伝える情報と、その要件

3.1 力の大きさを伝える音

音で届けるべき情報は、ドライバーが直接コントロールしている原動機のトルクの変化と考えた。この情報を、ドライバーが遅れなく受け取ることで、次の操作に活かせると考えた。

トルクは、加える力と置き換えることができる。身の回りで起こっている加える力の差と、音の変化に着目し考察した。

私たちは、音だけで力の差をイメージすることができる。例えば遠くから聞こえる水の流れる音から、水の量や勢いのような「力の差」をイメージすることができる。この音の差を、音の発生メカニズムから説明すると、自然界の音は基準となる音（基音）と倍音で構成されてお

り、入力する力が増えるほど、全体の音圧レベルが増え、聞こえる倍音も増えるようになる。つまり、力と音の関係は、入力する力が大きいほど①低周波領域の、②聞こえる周波数の数が多くなり、③音圧が大きくなるといえる（Fig. 1）。

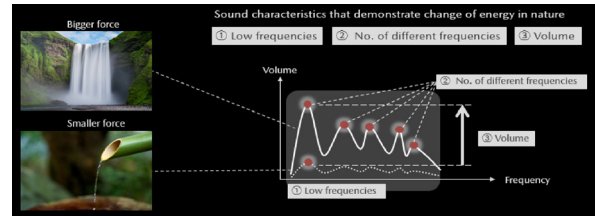


Fig. 1 Sound Characteristic Change of Energy Nature

3.2 音の因子に関する検証結果

加える力の大きさと、音の因子の関係を確かめるために、サンプル音を視聴して、評価点をつけてもらう方法にて、検証を行った。

シンセサイザーにて発生させたトロンボーン音をベースとして使用し、サンプル音の作成を行った。（Fig. 2）この音を基に周波数帯を3水準、聞こえる周波数の数を6水準、音の大きさを3水準とし、サンプル音源を作成した（Table 1）。

周波数帯の3水準、及び聞こえる周波数の数6水準については音の大きさを一定とし、各因子の変化だけで評価できるようにした。また音の大きさ3水準については、各周波数同士の音の大きさのバランスは変えずに、全周波数一律で音の大きさを上げ、音の大きさのみを評価できるようにした。

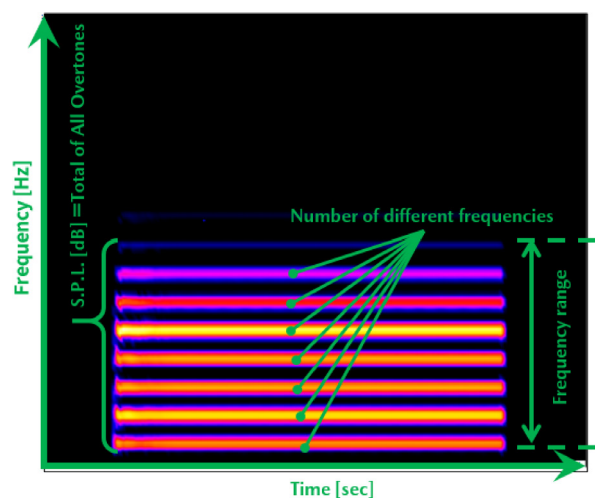


Fig. 2 Contour Diagram of Sample Sound

ヘッドホンによる試聴で評価を実施し、印象の偏りを避けるため20歳代～50歳代までの10名の被験者に、順不同でサンプル音を提示し、各サンプル音の印象を回答してもらった。力が大きいと感じるを5点、力を感じな

Table 1 Sample Sound for Auditory Evaluation

①Frequency Range

Sample 1	Sample 2	Sample 3
1k to 2kHz for the reference sound	500 to 1kHz for the reference sound	0 to 500kHz for the reference sound

②Number of different Frequencies

Sample 1	Sample 2	Sample 3
the 1st, 2nd, and 3rd harmonics of reference sound	the 1st, 2nd, 3rd, and 4th harmonics of reference sound	the 1st, 2nd, 3rd, 4th, and 5th harmonics of reference sound

Sample 4	Sample 5	Sample 6
the 1st, 2nd, 3rd, 4th, 5th, and 6th harmonics of reference sound	the 1st, 2nd, 3rd, 4th, 5th, 6th, and 7th harmonics of reference sound	the 1st, 2nd, 3rd, 4th, 5th, 6th, 7th, and 8th harmonics of reference sound

③S.P.L.

Sample 1	Sample 2	Sample 3
Reference sound	Each frequency +6dB	Each frequency +12dB

いを1点とする5段階評価で点数を付けた。

①周波数帯, ②聞こえる周波数の数, ③音の大きさ, それぞれの音の因子と, 力の大きさの感じ方について相関関係を分析した。その結果, ①音の周波数帯は低いほどに力を大きく感じる。②聞こえる周波数の数は, 多いほど力を大きく感じる。③音の大きさについても, 音が大きいほど力を大きく感じるという結果が得られた (Fig. 3)。

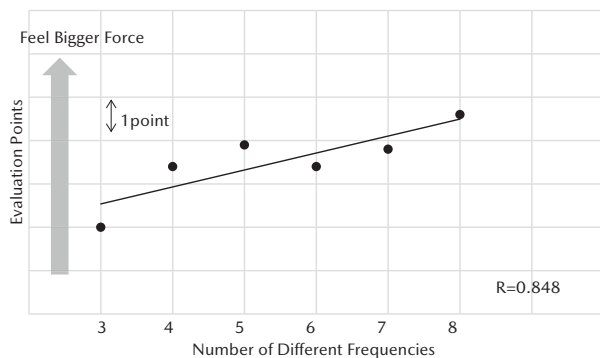


Fig. 3 Relationship between Number of Frequency and How to feel Force

次に, ①②③の因子を組み合わせたサンプルを用意し,

①②③を説明変数 (x,y,z) とし, 力の大きさの感じ方を目的変数 (f) として, 重回帰分析を行った。(Table 2) その結果, 重決定係数 R2=0.835 となり, 人が音から感じる力の大きさを 3 つの音の因子の組み合わせにより説明できることが分かった。

ここで得られた回帰式から, 力の差を 1 点分大きく感じさせるためには, ①音の周波数帯であれば 50Hz 低く, ②聞こえる周波数の数であれば 1 つ増やし, ③音圧であれば 4dB 大きくすることで実現できると示すことができた。

3.3 時間遅れに関する検証結果

トルク変化を音で, 遅れなくドライバーへ届けるため, 音の変化量とタイミングを変化させ, その感じ方について検討を行った。評価は社内のエキスパートドライバー 5 名にて実施した。

過去の検討結果から, トルクが変化し始める時間を起点とし, そこから 1 秒以上あとに, 音の変化を感じると遅れて感じてしまい, 次の操作へ活かすことができないことが分かっている。

そのため今回は, 音圧をエキスパートドライバーが変化を感じ取れるレベルの 2dB と固定し, この音圧差が発生するタイミングを 1 秒から早期化していくことで, 評価を行った。

まず 0.8 秒で 2dB の変化から評価を行ったが, 全てのドライバーがトルク発生に対し, 音が遅れてついてくるように感じ, タイミングとして遅すぎる結果となった。そのためタイミングを徐々に早期化して評価を行い, 0.4 秒で 2dB 以上の音圧変化を与えることで, 音が遅れなく変化しているように感じ取れることがわかった。微細な変化を感じ取れることのできるエキスパートドライバーが許容できることから, お客様含めてほとんどのドライバーが遅れなく感じることを基準をトルク変化が発生するタイミングから 0.4 秒と決めた (Fig. 4)。

また, 今回の評価車両において, アクセルペダル開度と, トルク発生がほとんど同時である。(Fig. 4) このことから, アクセルペダル操作によって変化するトルク全体に対する応答性を見るために, 横軸にねらいのアクセル開度を 1 とした時の変化率, 縦軸にねらいのアクセルペダル開度に到達した際の音の大きさを 1 とした時の変化率をとり, その分布を描く指標化を行った。この指標にてアクセルペダル操作に対して, 音が遅れている状態だと下にふくらむ分布となり, 早すぎる場合には上に膨らむ分布となる。ねらいである遅れなく感じる状態とするには, 線形に分布した状態を目指せばよいことが分かった (Fig. 5)。

Table 2 Sample Sound for Multiple Correlation Analysis

	x: ①Frequency Range	y: ②Number of different Frequencies	z: ③S.P.L.
Sample 1	Only 60 to 150Hz for the reference sound	2 numbers (the 1st, and 2nd harmonics of reference sound)	Base
Sample 2	Only 60 to 210Hz for the reference sound	3 numbers (the 1st to 3rd)	Base +4dB
Sample 3	Only 60 to 270Hz for the reference sound	4 numbers (the 1st to 4th)	Base +9dB
Sample 4	Only 60 to 330Hz for the reference sound	5 numbers (the 1st to 5th)	Base +13dB
Sample 5	Only 60 to 390Hz for the reference sound	6 numbers (the 1st to 6th)	Base +15dB
Sample 6	Only 60 to 450Hz for the reference sound	7 numbers (the 1st to 7th)	Base +17dB
Sample 7	Only 60 to 510Hz for the reference sound	8 numbers (the 1st to 8th)	Base +18dB
Sample 8	Only 60 to 570Hz for the reference sound	9 numbers (the 1st to 9th)	Base +19dB
Sample 9	Only 60 to 210Hz for the reference sound	2 numbers (the 1st to 3rd)	Base +1dB
Sample 10	Only 60 to 330Hz for the reference sound	3 numbers (the 1st, 3rd, and 5th)	Base +11dB
Sample 11	Only 60 to 450Hz for the reference sound	4 numbers (the 1st, 3rd, 5th, and 7th)	Base +14dB
Sample 12	Only 60 to 570Hz for the reference sound	5 numbers (the 1st, 3rd, 5th, 7th, and 9th)	Base +16dB

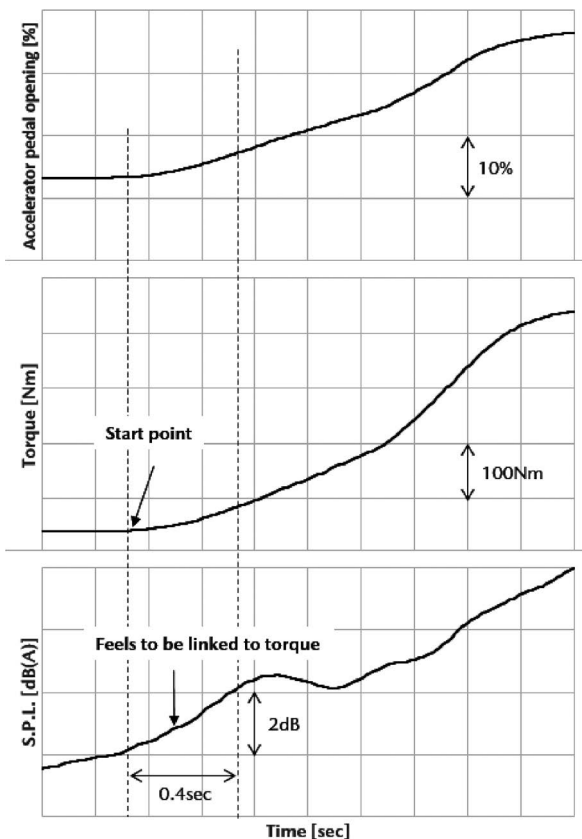


Fig. 4 Time Chart of Accelerator Pedal Operation and Engine Sound Pressure Level

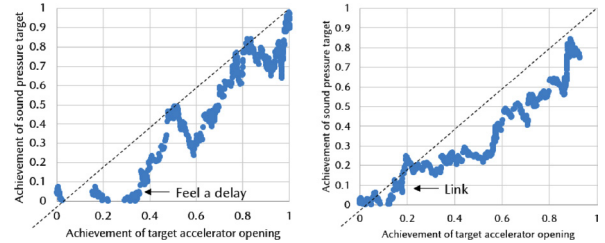


Fig. 5 Index between Change of Accelerator Pedal Operation and Sound Pressure Level

3.4 トルクの変化を伝えるエンジンサウンド

ここまで検討してきた、トルク変化が分かる音の3つの要素と、遅れなく伝える要件を織り込んだエンジンサウンドをシミュレーターで模擬し、実際に運転操作への影響の定量的な検証を行った。

構築したエンジンサウンドは、主に聞かせる周波数を500Hz以下とし、一般に20kHzまで聞こえるという人にとって低い周波数帯域で構成した。また音圧については、トルクに応じて線形に大きくなるようにした。そして聞こえる周波数の数については、次数音の数をトルクに応じて増やしていくこととした。次数音というのは、エンジン音のようにエンジン回転数に比例する周波数の音で構成される音のことをいう。

次数音の構成は通常エンジンの気筒数で決まる。しかしながら今回は全てに共通する構想の構築のため、気筒数を前提とせず基本の1つの次数だけを決め、そこから協和音の比率を基に次数音を構成した。

また、遅れなく伝えるために、アクセル開度の変化率と、音の大きさの変化率が線形になるような音にした。

これらの要素を加味して構築したエンジンサウンドはトルクに応じて音圧の変化、次数音1つ1つの増減を感じ取り、かつ不快な音にならず、内燃から電気自動車までも適用できるエンジンサウンドの基本構成を造り出すことができた (Fig. 6)⁽²⁾。

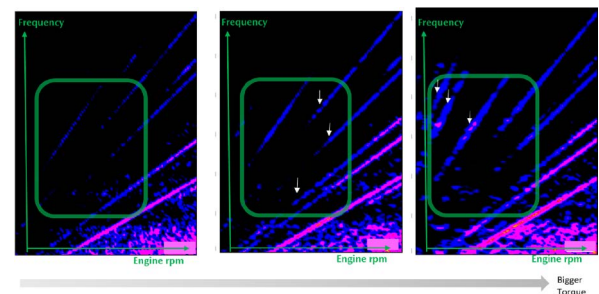


Fig. 6 Change of Engine Sound for Torque

4. 効果の検証

4.1 試験条件

シミュレーター装置でねらいのエンジンサウンドを再

生できるようにした車両を用いて、社内テストコースで評価を実施した。ドライバーは1名とし、検証内容は、上記の考えを基にしたエンジンサウンドが発生する状態と、エンジンサウンドが発生しない状態の2仕様とした。各仕様、複数回走行し、一定区間の走行速度ばらつきを計測することで、運転精度の差を検証することとした。なお車速については、各ポイントに表示されている車速をねらうこととし、評価の間、車速計は隠し見えないようにして行った。

評価区間は、加速・減速・定常を包含しているテストコース内のひとつのコーナー区間を評価対象区間とした (Fig. 7)。

4.2 検証結果

エンジンサウンドのあり、なしの2仕様にて、時間軸に対して、繰り返し計測の中での最大速度差を縦軸に取り比較を行った (Fig. 8)。

エンジンサウンドが発生している仕様は、発生していない仕様と比べて速度ばらつきが低減していることが分かる。大きいところでは5km/h程度速度差が縮まっている。これは目標速度の約10%程度に相当しており、ばらつき低減後は、速度ばらつきは5% (2~3km/h)程度になり、メーター誤差程度の差となってくるため、同じ道を、同じように安定して運転できていることといえる。

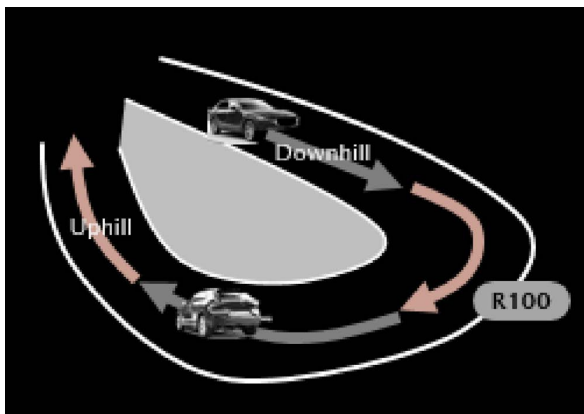


Fig. 7 Evaluation Course

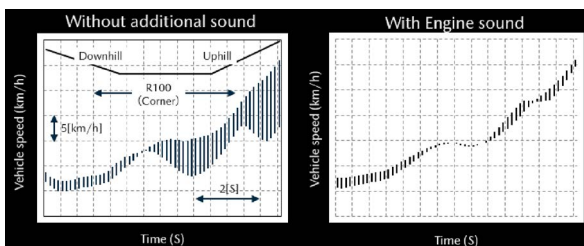


Fig. 8 Evaluation Result of Variation in Vehicle Speed

今回の考えのようにドライバーが直接コントロールしている原動機の状態を音で伝えることで、今の原動機の状態、次の車両挙動の予見精度が上がり、運転操作の精度向上につながり、今回のように速度ばらつきを低減できる結果につながったと考える。

5. おわりに

これまでエンジンサウンド開発は、音だけの観点からどのような音色にするかを中心に開発を続けてきた。しかし、そもそも人は音とどのように関わっているのから検討を進め、意のままに運転するために必要な情報を考察し、結びつけることで安心・快適からもう一歩進化した意のままに操れることに貢献し、走る喜びの提供につながるエンジンサウンド構想を構築することができた。

この考えを基にしたトルクの変化を伝えるサウンドは、今後の新型車から順次適用を予定している。

今回の成果を起点に今後、更に研究を拡張させ、ドライバーにとって意のままに操れる車となり、同乗者に安心・快適を感じてもらえる商品の実現に貢献していく。

参考文献

- (1) 中島祥好 (九州大学 2020年3月退官) : 耳と心 (聴覚心理学入門)
- (2) 岩宮眞一郎 (九州大学) : よくわかる最新音響の基本と仕組み

■ 著 者 ■



服部 之総



原田 聖士



光永 誠介



森田 洋明



白石 秀宗

論文・解説

09

人体研究に基づく傷害低減技術の開発

Technological Development to Reduce Injuries Based on Study of Human Skeleton

泉山 朋大 ^{*1}	西田 周泰 ^{*2}	朝日 龍介 ^{*3}	山縣 大樹 ^{*4}
Tomohiro Izumiyama	Norihiro Nishida	Ryusuke Asahi	Hiroki Yamagata
鈴木 崇 ^{*5}	澤井 亮 ^{*6}	杉本 繁 ^{*7}	福島 正信 ^{*8}
Tadashi Suzuki	Ryo Sawai	Shigeru Sugimoto	Masanobu Fukushima

要約

交通事故による死亡重傷者を低減するには、適切な着座姿勢保持と乗員拘束が重要である。重傷化リスクが高い腹部傷害には、この2要素が関係する。乗員の着座姿勢は個体差を有し、シートベルトによる乗員拘束に影響を与える。本研究は、実際の乗員姿勢の個体差を骨格視点から把握し、人体の骨格や内臓を模擬したFEシミュレーションモデル（以下、人体FEモデル）を用いて衝突時の乗員挙動を分析した結果を基に、傷害防止に必要な技術を構築・商品化することを目的とした。自動車シート着座時のX線撮像による脊椎形状と骨盤状態の個体差解析から、着座姿勢は脊椎S字と後弯の2タイプに大別されることが分かった。骨盤については、ラップベルトが掛かる上前腸骨棘（anterior superior iliac spine: ASIS）形状やそこから恥骨結節までの距離のばらつきを分析し、個体差を反映させた人体FEモデルを作成して、そのモデルによる乗員挙動解析から骨盤角度のコントロールが最も重要であることを導き出した。これらの結果から、MAZDA3ではシート着座時に骨盤を立て、その状態を保持できるシートを開発した。また、ベルトがたるみなく骨盤に掛かりシート位置に依らずその状態を維持できるシート内蔵式シートベルトラップアンカー構造とした。更にニーエアバッグの採用により、衝突時の乗員前進を抑制するシートベルトの乗員への入力を分散させ、人体耐性の高い部位での乗員にやさしい拘束を可能とした。これらの構造を設計し、安全安心な「人間中心」のクルマづくりを実現した。

Summary

In order to reduce fatalities or serious injuries in traffic accidents, retaining a safer seated posture and proper occupant restraint is important, and the lack of them tend to cause serious abdominal injuries. The individual differences of the seated posture affects the occupant restraint by a seatbelt. This study aims to construct and commercialize technologies required for abdominal injury prevention based on the individual differences of the skeletal alignment in a seated posture and occupants' kinematics in a collision which was analyzed using human body models (HBMs). According to the analysis of individually different skeletal alignments in a seated posture, the seated postures are classified into two types: S-shape and kyphosis. For pelvis, the individual differences of ASIS shapes and the distances between ASIS and pubic symphysis were analyzed and incorporated into the HBMs to study occupants' kinematics. The analysis results of the kinematics indicated that the controlling the pelvic angle is essential to prevent the abdominal injuries.

Based on the results, three new technologies were applied to Mazda3: a new seat design to achieve the S-shaped posture, a seat-integrated lap belt anchor to reduce pelvic rotation, and the knee airbag to sustain the occupant in position while limiting the force into the abdomen. The safer seated posture structure together with the newly designed restraint systems further improve the occupant protection performance, bringing Mazda's "human-centered design" philosophy into shape.

Key words : Passive Safety, Seated Posture, S-shaped, Seat Design, Seat-Integrated Lap Belt Anchor, Knee Airbag, Human-Centered Design

*1,3,7,8 衝突性能開発部
Crash Safety Development Dept.

*5,6 装備開発部
Interior & Exterior Components Development Dept.

*2,4 山口大学医学部附属病院 整形外科
Department of Orthopedic Surgery and Radiological Technology, Yamaguchi Univ. Hospital

1. はじめに

市場での死亡重傷低減を目指し、医工連携による人間研究を推進しながら、得られた知見を基に万一の事故の際に人命を保護するための安全技術開発に取り組んでいる。市場事故において、腹部傷害は受傷割合こそ少ないものの一度受傷すると内臓や内膜の創傷により重傷化しやすく、死亡重傷低減の上で重要な傷害と位置付け、研究を進めている。傷害発生の一因として、シートベルトの骨盤からのずれ上がり現象が考えられ、着座姿勢や骨盤状態、ベルトの骨盤への掛かり方が重要となる。これまで、臨床医学の観点から座位での骨格アライメントを調べた研究⁽¹⁻³⁾や自動車乗員の特徴（年齢、身長、体型等）と骨盤状態、ベルトパス、衝突時の乗員挙動の関係を分析した研究⁽⁴⁻⁸⁾などが報告されている。更に、将来の高度自動運転環境における着座姿勢の多様化を想定した乗員拘束の研究報告⁽⁹⁻¹²⁾もあり、世界的に注目されている領域と言える。今回、マツダは日本の健康者ボランティアを対象に、自動車シート着座時の骨格アライメントと骨盤状態にどの程度の個体差が存在するか分析した⁽⁷⁾。また、それらの個体差が衝突時のシートベルトずれ上がりにもどのような影響を及ぼすかについて解析した。被験者データを基に個体差を反映した複数の人体FEモデルを用いて衝突時の挙動をシミュレーションし、シートベルトおよび乗員挙動を経時的に分析、シートベルトのずれ上がり現象に最も寄与する因子を特定した。このような研究から、乗員の安全性を確保する技術として、①常時、脊椎の自然なS字・骨盤前傾を維持するシート、②常に適切な角度で骨盤を拘束できるシート内蔵式シートベルトラップアンカー構造を確立した。更に、③衝突時の乗員前進を抑制し、シートベルトによる乗員への入力荷重を分散させ、より耐性の高い人体部位（下肢骨格部）を拘束するニーエアバッグを乗員の安全性確保に必要な技術として加え、MAZDA3に導入した。

本稿では、上記の人間研究により得られた知見を報告するとともに、①～③の技術について紹介する。なお記載の人間研究については、インパクトバイオメカニクス会議体 IRCOBI (International Research Council on Biomechanics of Injury) にて報告済みである⁽¹³⁻¹⁵⁾。

2. 人間研究

2.1 研究概要

研究概要のフローチャートを Fig. 1 に示す。シートベルトの掛かり方に影響を与える骨盤状態を決める因子として、(a) 骨格アライメント（脊椎形状と骨盤角度）、(b) 骨盤形状（ASIS 角度）、(c) 骨盤大きさ（ASIS-恥骨結節間距離）の3因子を設定した。各因子について、年齢・性別・体格による個体差の傾向を調べ、各被験者データ分布から代表値を選定し、その数値を再現する人

体FEモデルを作成した。それらの人体FEモデルを用いて衝突シミュレーションを行い、各モデルでのシートベルト及び乗員挙動を比較分析した。本研究の最終目的は、設定した上記3因子について腸骨上でのベルトずれ上がりへの寄与度を調べ、骨盤状態のコントロールに最も重要な因子を特定し、対応技術を構築することである。

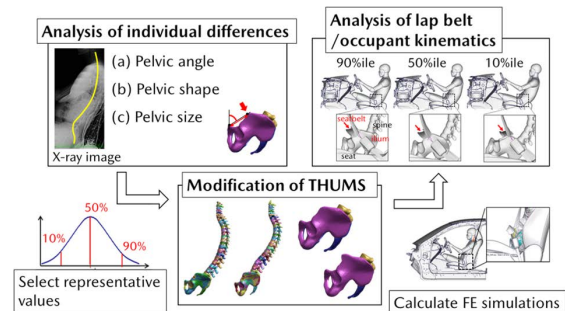


Fig. 1 Research Outline of Pelvic Orientation

2.2 研究方法

(1) X線撮影及び研究倫理

シート着座時の骨格状態をX線で撮影するため、アクセラシートを取り付けた撮影治具を作製した (Fig. 2)。着座姿勢は、シートバック 24° (設計標準)、シートクッション座面 21.5° に固定し、シートスライドは自由に調整できる構造とした。撮影時、被験者はフットレストに足を置き、普段の運転姿勢で着座した。また、画像上の脊椎部に上肢骨格が重ならないよう、長さ・高さ調節可能な手置き棒に手を乗せて撮影した。



Fig. 2 X-Ray Facility and Situations of X-Raying

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・立位について頸椎から骨盤までの範囲を撮影した。本研究の手順は全て、山口大学及びマツダ (株) により決定され、双方の研究倫理委員会にて承認を得た上で実施した。被験者には十分な説明を行い、本人の参加同意を書面にて取得した。

(2) 被験者

2.1 節で述べた骨格アライメント及び骨盤形状、大きさの計測では計 113 名の被験者データを取得した。内訳は、男性 56 名、女性 57 名、であった。それぞれの年齢・身長・BMI 平均は、男性が 43 歳、171.3cm、25.5kg/m²、女性は 47 歳、154.8cm、22.2kg/m² であった。

(3) X線データ計測及び分析

2.1節で述べた各項目の計測部位を Fig. 3 に示す。得られた全被験者の X 線撮像データについて、骨格アライメント、骨盤形状、骨盤大きさの計測を行い、個体間ばらつきや年齢・身長・BMI との相関性について調べた。計測方法の詳細を、以下に記載する。

a. 骨格アライメント (脊椎形状と骨盤角度)

脊椎及び骨盤に関して、6 項目：頸椎角度 (CC)、胸椎後弯角 (TK)、胸腰椎後弯角 (TLK)、腰椎前弯角 (LL)、仙骨角度 (SS)、骨盤角度 (PA) の角度計測を行った (Fig. 3a)。

b. 骨盤形状

ラップベルトが掛かる位置に当たる ASIS の形状は、角度で表現した。ASIS 頂点よりその形状に沿ってラップベルト幅 40mm の半分に相当する 20mm 幅ずつ斜線を引き、その 2 斜線の成す角を計測した (Fig. 3b)。ASIS の正確な位置は、山口大学の整形外科医に X 線撮像から判断していただいた。

c. 骨盤大きさ

計測部位としてはさまざま考えられるが、本研究ではラップベルトの骨盤への掛かり方を調べるといった目的から、ASIS-恥骨結節間の距離を骨盤大きさと定義し、その距離を計測した (Fig. 3c)。

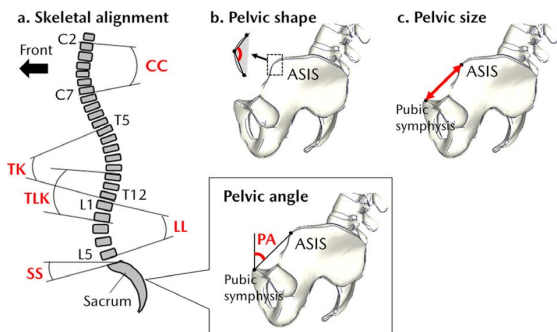


Fig. 3 Measurement of Pelvic and Lap Belt Factors

(4) 人体 FE モデル作成

a-c の各因子について、個体差分布から 90 パーセント、50 パーセント、10 パーセントを代表値として選定し、それぞれに相当する数値データを人体 FE モデルに反映させた (Fig. 4)。モデルは、THUMS ver.4 (Copyright 2015 © TOYOTA MOTOR CORPORATION) の AM50 体型モデルをベースとして用い、被験者の着座状態を再現するよう修正を加えた。修正は、Oasys PRIMER ソフトウェア (ARUP, UK) 上で強制変位や部分的なモーフィング手法を組み合わせることで実施した。

(5) 衝突シミュレーション解析

作成した人体 FE モデルを用いて、JNCAP フルラップ前面衝突 (衝突速度 56km/h) のシミュレーションを行った。車両内装モデル及び人体 FE モデルは、挙動の妥

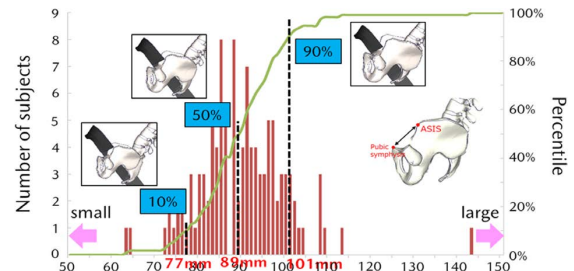


Fig. 4 Image of Modification for THUMS Pelvic Size

当性検証を行った上で用いた。シミュレーションは、運転席に着座させた人体 FE モデルをプリテンショナー & ロードリミッター機構付シートベルトで拘束し、手はステアリング、足はアクセルペダル及びフットレストに配置し行った。また、インパネ下部にニーエアバッグを取り付けた内装モデルとした。

シミュレーション結果から、衝突時のラップベルト及び乗員挙動を解析した。ラップベルト挙動は、ASIS に対するベルト初期位置からの腸骨上での最大ずれ上がり量を調べた。また、初期位置からの最大腰前進量及び最大腰回転角度も計測し、3 モデル間での挙動を比較した。

2.3 結果及び考察

(1) 個体差分析

① 骨格アライメント

取得した 113 名分の X 線撮像から、自動車シートに着座した際の骨格アライメントは腰椎前弯を伴った骨格全体が緩やかな S 字を描くタイプ (以下、S 字タイプ) と腰椎後弯・骨盤後傾による骨格全体が後弯したタイプ (以下、後弯タイプ) の 2 つに大別されることが明らかとなった (Fig. 5a)。各タイプの割合は、S 字タイプ n=55、後弯タイプ n=58 でほぼ 1 : 1 を占めることが分かった。また骨格各部の角度ばらつきを調べると、胸椎後弯角は個体差が小さく、一方で骨格の上下部、特に腰椎前弯角及び骨盤角度の個体差が多少大きいことも分かった (Fig. 5b)。

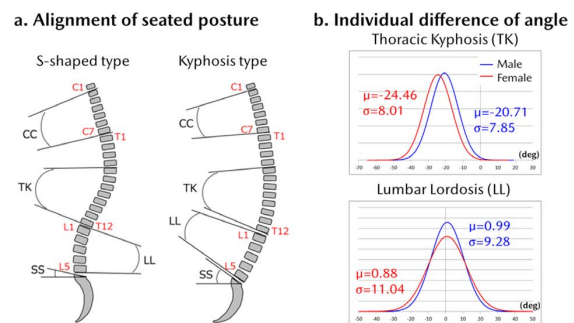


Fig. 5 Analysis of Individual Differences in Pelvic Angle

年齢・身長・BMI と各角度との相関は見られなかったが、BMI30 以上では骨盤角度は小さくなる (骨盤前傾) ことが確認された (Fig. 6 赤枠部分)。これらの分析結果

から、人体における姿勢変化は胸椎を中心に頸椎・腰椎・仙骨・骨盤の各アライメントを変形させることで実現していることが示唆される。その変形量に差が生じることで、骨格アライメントの個体差が引き起こされると考えられる。

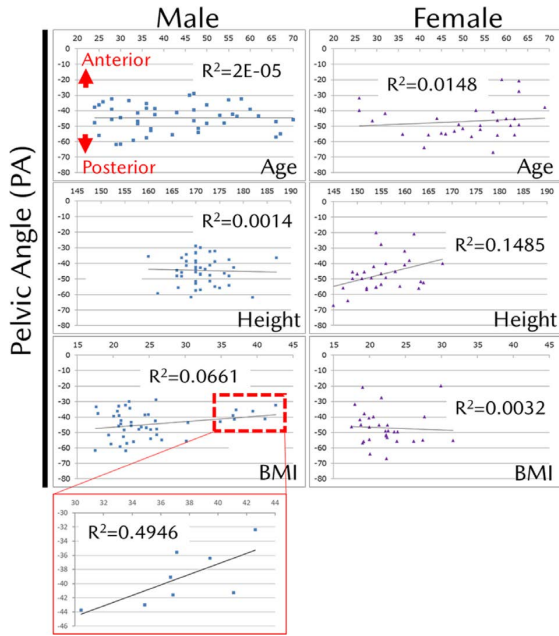


Fig. 6 Regression Analysis on Correlation of PA

② 骨盤形状及び大きさ

被験者データを基に計測した ASIS 角度及び ASIS-恥骨結節間距離について、男女別に分析を行った。それぞれの平均値は、ASIS 角度：男性 107.36°，女性 105.43°，ASIS-恥骨結節間距離：男性 89.98mm，女性 90.47mm であった。また、各因子のバラツキを調べると、ASIS 角度は男性と女性の間には差はほぼ無かったが (Fig. 7a)，ASIS-恥骨結節間距離では男性より女性の個体差が大きい結果となった (Fig. 7b)。いずれの因子も、年齢・身長・BMI との相関は見られなかった。

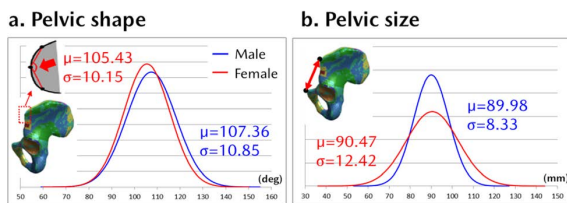


Fig. 7 Analysis of Individual Differences in Pelvic Shape and Size

(2) 人体 FE モデルを用いた衝突時の挙動解析

2.2 節で定義した a-c 各因子について、前面衝突時のラップベルト及び乗員挙動への影響を、2.2 節第 4 項の手法で作成した人体 FE モデルを用いて解析し、次の結果を得た。

骨盤角度違いによる比較では、角度が大きくなる (骨

盤後傾) 程ラップベルトの骨盤上でのずれ上がり量も増加した (Fig. 8)。更に、最大腰前進量及び最大腰回転角度の増加 (より後傾) も確認された。

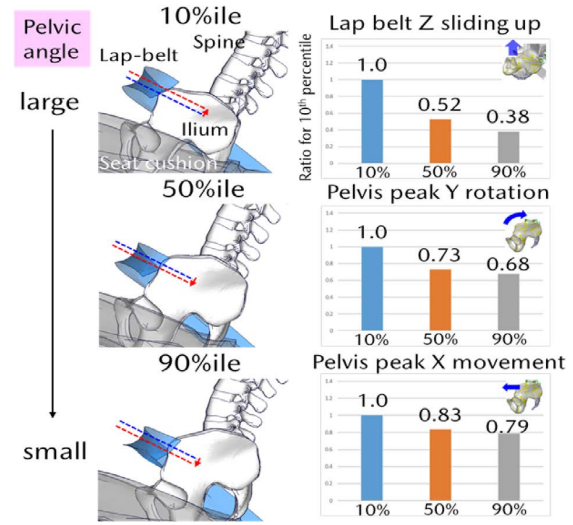


Fig. 8 Analysis of Lap Belt and Pelvic Kinematics Using Three HBMs with Different Pelvic Angle

骨盤形状を比較した解析では、ASIS 角度が大きい (形状が平坦になる) 程ベルトずれ上がり量も増えた (Fig. 9)。一方で、腰前進量及び回転角度に差は見られなかった。

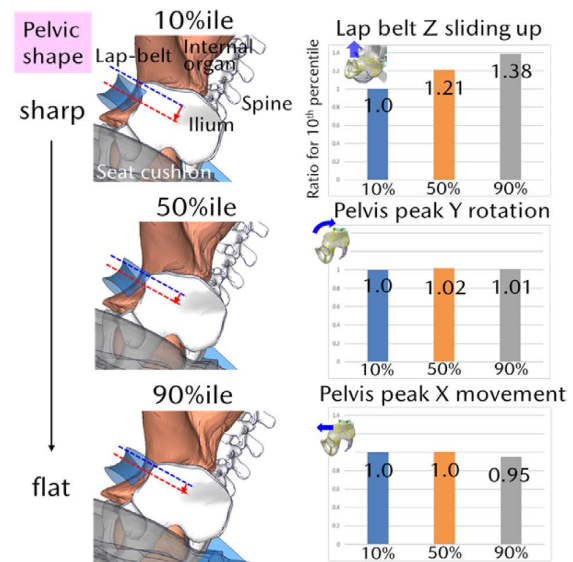


Fig. 9 Analysis of Lap Belt and Pelvic Kinematics Using Three HBMs with Different Pelvic Shape

骨盤大きさの比較では、定義した部位の距離が小さい程ベルトずれ上がり量も増加した (Fig. 10)。また、腰前進量には差は見られなかったが、腰回転角度は距離が小さい程後傾しやすいことが分かった。

いずれの因子も、ベルトずれ上がりへに寄与することが確認された。これら 3 因子のベルトずれ上がりへの寄与度は、骨盤角度が最も大きかった (Fig. 11)。つまり、骨

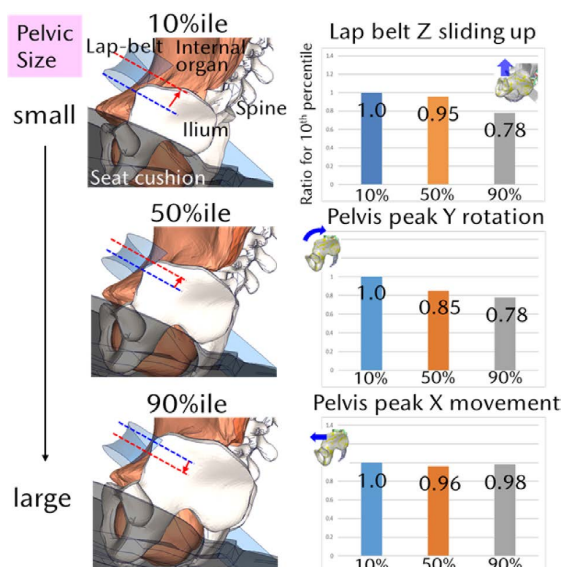


Fig. 10 Analysis of Lap Belt and Pelvic Kinematics Using Three HBMs with Different Pelvic Size

盤状態をコントロールし、シートベルトの骨盤からのずれ上がり現象への対応技術を構築する上で、骨盤角度が最も重要であると言える。

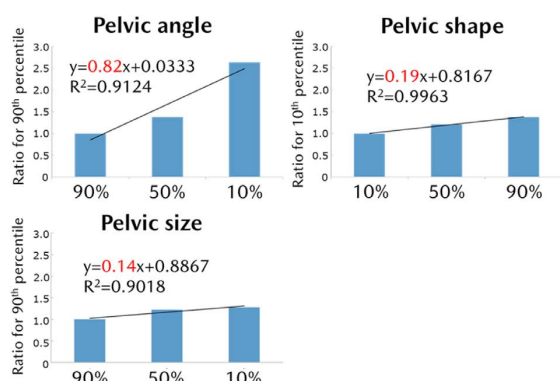


Fig. 11 Comparison with Contribution Level for Each Factor Involved in Pelvic Orientation

3. 安全技術開発

3.1 腹部傷害低減を目的とした乗員保護シナリオ

マツダが考える乗員保護の姿は、以下2点である。

- ① 拘束装置の効果を最大限引き出すため、乗員の適切な姿勢（骨盤前傾、脊椎の自然なS字）を維持する (Fig. 12a)。
- ② 衝突時の乗員の前方移動を抑制し、入力に対して脆弱な部位での損傷を最小にするため、人体耐性の高い部位へ荷重を分散させ入力バランスを最適化する (Fig. 12b)。

この基本的なシナリオに、第2章の人間研究による知見を組み入れ、腹部傷害低減の対応技術として下記3つの安全技術をMAZDA3へ導入した。

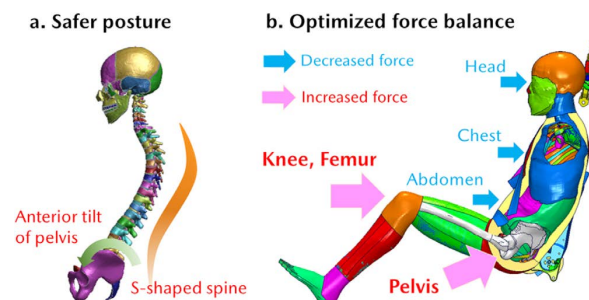


Fig. 12 Constraint Scenario of Vehicle Occupants

(1) 骨盤前傾・脊椎S字を作り出すサブマリン防止シート

被験者データに基づく衝突シミュレーションでも、骨盤が後傾する程ラップベルトのずれ上がり量は大きくなることが確認された。加えて腰前進量や腰回転角度の増加（より後傾）も見られ、傷害低減には骨盤前傾及び脊椎の自然なS字を作りその状態を維持するシート構造が必要となる。マツダは、シートクッションとシートバックの工夫により、それを実現するシートを設計した。16名の被験者に対するX線での骨格アライメント分析では、旧来と比較してPA平均5°前傾の効果が確認され (Fig. 13), より適切な運転姿勢を作り出せるだけでなく、直立歩行時に近い骨盤状態を創出し、ダイナミック性能の向上も実現させ「人馬一体」を感じられるクルマとなっている。

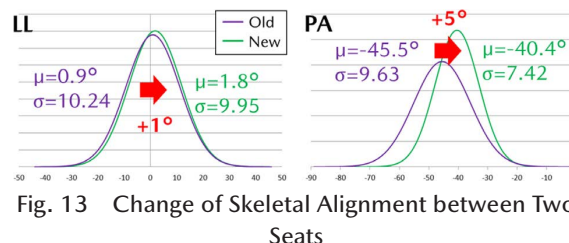
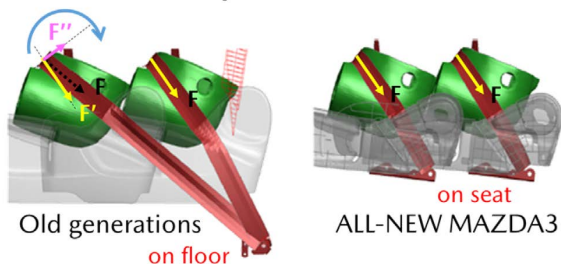


Fig. 13 Change of Skeletal Alignment between Two Seats

(2) シート内蔵式シートベルトラップアンカー構造

研究結果から、人体骨盤は角度だけでなく形状や大きさにも個体差があり、多様な骨盤状態が考えられる。骨盤向きにばらつきが生じると、ラップベルトの掛かり方にも個体差が生まれる。掛かりが浅くなると、拘束時のベルト荷重は骨盤に対して垂直方向と水平方向に分散され、ベルトのずれ上がり成分を生じさせ、また骨盤後傾をより促進する結果となり、衝突時の傷害発生リスクを高めることになる (Fig. 14a)。このずれ上がり成分を減らし、どのシートスライド位置でもベルトがずれにくくするため、前席シートベルトのラップアンカー部をシート上に取り付ける構造とした。衝突ダミーを用いた実機での効果検証により、腰の後方への回転が抑制されていることを確認した (Fig. 14b)。

a. Structure of lap belt anchor



b. Assessment of pelvic rotation

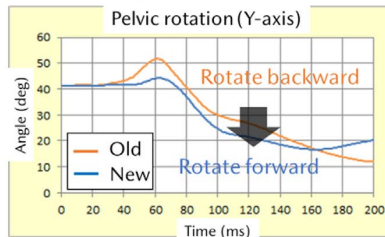


Fig. 14 Effect of Lap Belt Anchor in Seat

(3) 腰前進量を抑止するニーエアバッグ

骨盤後傾により、ラップベルトのずれ上がりとともに腰前進量も増えることを前述した。衝突時のこの乗員移動を抑制する安全装置の一つとして、ニーエアバッグを導入した。この装置により、人体耐性の高い下肢骨格部（主に、膝部）を拘束し、腰移動を抑えることができる。衝突ダミーを用いた検証でも、腰前進の大幅な改善が見られた（Fig. 15）。更に、大腿部荷重も傷害閾値以下であることも確認済みである。下肢骨格部の拘束を加えることでラップベルト拘束時に生じる骨盤への荷重を分散させ、入力バランスの最適化を可能にする効果も得られる。

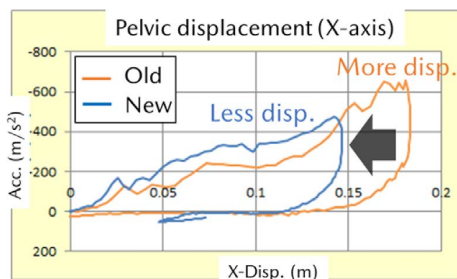


Fig. 15 Effect of Knee Airbag

以上の安全技術を組み合わせ、乗員が接する車両パーツとなるシートと安全装置による統合的な乗員保護を実現した。

4. まとめ

本稿では、人間研究から明らかになった自動車乗員の骨盤状態について報告するとともに、その知見に基づき MAZDA3 に装備された腹部傷害低減を実現する安全技術の概要を紹介した。人間研究の章では、シートベルトによる拘束で重要となる骨盤状態について、骨盤角度（と脊椎アライメント）、骨盤形状、骨盤大きさ、各因子の個

体差を分析し、人体 FE モデルを用いた衝突シミュレーションによるラップベルト及び乗員挙動の解析結果を述べた。シート着座時の乗員の骨格状態と腹部傷害発生の一因であるシートベルトずれ上がりの寄与因子を明らかにした。また安全技術開発の章では、傷害低減の対応技術として（1）サブマリン防止シート、（2）シート内蔵式シートベルトラップアンカー構造、（3）ニーエアバッグの3つについて目的や実際の効果を含めて解説した。死亡重傷低減の実現に向け、市場事故の分析と人間研究から万一の際にもお客様を保護するために必要な安全技術を開発するプロセスに沿って、今後も傷害低減技術を織り込んだクルマづくりを進めていく。

最後に、本研究は多くのボランティアの方に X 線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診療放射線技師の皆様、工学部機械工学科の先生方にご協力頂いた。

参考文献

- (1) 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)
- (2) 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)
- (3) N. Nishida et al.: Changes in the global spine alignment in the sitting position in an automobile, *The Spine Journal*, Vol.20, pp.614-620 (2020)
- (4) M.P. Reed et al.: Effects of Obesity on Seat Belt Fit, *Traffic Injury Prevention*, Vol.13, pp.364-372 (2012)
- (5) M.P. Reed et al.: Effects of Driver Characteristics on Seat Belt Fit, *Stapp Car Crash Journal*, Vol.57, pp.43-57 (2013)
- (6) J. Park et al.: Statistical Models for Predicting Automobile Driving Postures for Men and Women Including Effects of Age, *Human Factors*, Vol.58, No. 2, pp.261-278 (2016)
- (7) M.L.H. Jones et al.: Effects of High Levels of Obesity on Lap and Shoulder Belt Paths, *IRCOBI conference*, pp.317-326 (2017)
- (8) J. Hu et al.: Stature and Body Shape Effects on Driver Injury Risks in Frontal Crashes: A Parametric Human Modelling Study, *IRCOBI conference*, pp.656-667 (2017)
- (9) K. Boyle et al.: A Human Modelling Study on Occupant Kinematics in Highly Reclined Seats

- during Frontal Crashes, IRCOBI conference, pp.282-292 (2019)
- (10) B.D. Gepner et al.: Comparison of Human Body Models in Frontal Crashes with Reclined Seatback, IRCOBI conference, pp.293-307 (2019)
- (11) K. Rawska et al.: Submarining Sensitivity across Varied Anthropometry in an Autonomous Driving System Environment, Traffic Injury Prevention, Vol.20, sup2, pp.S123-S127 (2019)
- (12) R. Richardson et al.: Test Methodology for Evaluating the Reclined Seating Environment with Human Surrogates, ESV paper no. 19-0243 (2019)
- (13) T. Izumiyama et al.: The Analysis of an Individual Difference in Human Skeletal Alignment in Seated Posture and Occupant Behavior Using HBMs, IRCOBI conference, pp.549-560 (2018)
- (14) T. Izumiyama et al.: Analysis of Individual Differences in Pelvic Shape and its Impact on the Seatbelt Kinematics in a Collision, IRCOBI conference, pp.44-46 (2019)
- (15) T. Izumiyama et al.: Identification of Influential Factors for Seatbelt Kinematics in a Collision and Analysis of their Influence Degree to the Kinematics, IRCOBI conference, pp.456-469 (2020)

■著者■



泉山 朋大



西田 周泰



朝日 龍介



山縣 大樹



鈴木 崇



澤井 亮



杉本 繁



福島 正信

論文・解説

10 SKYACTIV-X を実現するシリンダーヘッド寸法の高精度化

Improving Accuracy of Cylinder Head Dimension to Realize Skyactiv-X

梅原 美友^{*1} 米澤 英樹^{*2} 丸尾 幸治^{*3}
 Yoshitomo Umehara Hideki Yonezawa Koji Maruo
 末永 啓太^{*4}
 Keita Suenaga

要 約

マツダのブランドエッセンスである「走る歓び」を実現するために、エンジン性能に寄与する複雑な製品形状を高精度に成形することは極めて重要である。しかし、シリンダーヘッド素形材（アルミ鋳造で成形した鋳物）の鋳造に用いる薄肉砂型は熱影響による変形が大きく、製品形状成形の難易度が高い。素形材の寸法精度を高めるためには、この変形を抑制し、最低限の変形を見込んだ寸法であらかじめ金型を補正しておく必要があるが、そのためには変形を精度よく予測する技術が必要である。そこで、砂型熱変形の発生メカニズムを明らかにし、実態計測に基づく変形モデルの深化により、高精度な変形予測技術を確立した。

今回、この技術を用いて、製品開発初期段階において、砂型の熱変形を抑制する鋳型構造及び寸法補正を設計するモデルベース開発プロセスを構築した。SKYACTIV-X シリンダーヘッドの量産準備（生産技術領域での量産に向けた、製品機能と生産性を向上させるために、製品形状や生産条件の検討・最適化、及び設備や金型を準備）にこれを適用することで、製品機能と生産性の両立を果たしたので、本稿ではこの取り組みについて報告する。

Summary

For the realization of “Celebrate Driving”, Mazda’s brand essence, it is extremely important to perform high-precision molding of the complicated product shape which contributes to engine performance. Molding the product shape precisely, however, is not easy because a thin sand mold which is used for casting the cylinder head material is easily deformed by heat. To improve dimensional accuracy of the material, we need to suppress deformation and prepare a modified die with the expected dimension including minimum deformation. To achieve that, a technique to measure deformation precisely is required. Then we revealed an outbreak mechanism of heat deformation in the sand mold, improved the deformed model based on measured values and established a high-precision deformation prediction technology.

We established a mold structure to suppress deformation by the heat and a model base development process which designs dimension correction in the initial stage of product development by using this technology. We achieved both functionality and productivity by adopting them to production preparation of Skyactiv-X cylinder head. This paper reports our activities.

Key words : production • manufacture, formed and fabricated materials, casting/forging/assembly/painting/rig/trim, die/mold, design/prototyping, APMC, MBD, In-Process-Out, CAE

1. はじめに

技術本部では、モノ造り革新を圧倒的に進化させ、お客様の期待を超える価値をミニマムコストで提供し、ビ

ジネス効率を最大化することを、部門方針に掲げている。新開発した SKYACTIV-X のシリンダーヘッド（以下 C/H）における、成形難易度の高いウォータージャケット（以下 W/J）について、製品機能（=お客様価値）を高効率

*1~4 パワートレイン技術部

Powertrain Production Engineering Dept.

(=ミニマムコスト) で実現するために、新規のモデルベース開発 (以下 MBD (Model Based Development)) 技術を開発し、適用した。

2. SKYACTIV-X 実現の重要課題

走る喜びと環境性能を両立する上でエンジンの役割は大きく、出力特性と燃費を高い次元で両立することが求められる。

Fig. 1 に示すように、C/H は燃焼時の火炎伝ばを制御する燃焼室や吸排気の空気の流れを制御するポート、燃焼熱を冷却する水流れを制御する W/J を組み込んでおり、動力性能や燃費に大きく寄与するエンジンの主要部品である。

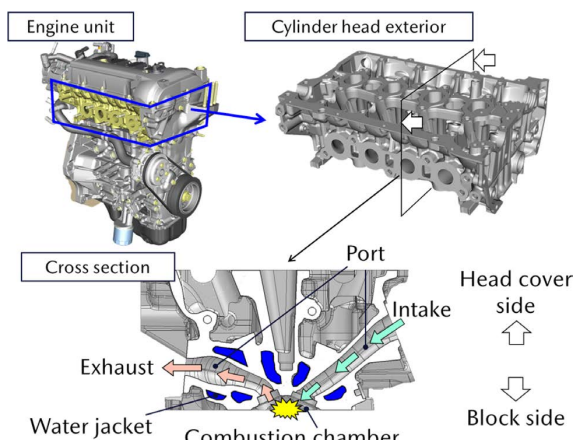


Fig. 1 Outline of Cylinder Head

SKYACTIV-X は、火花点火制御圧縮着火: Spark Controlled Compression Ignition (SPCCI) により、ガソリンエンジンとして世界で初めて圧縮着火を採用することで、走る喜びと環境性能を両立した。圧縮着火を安定的に行う上で重要な要素の 1 つが燃焼室内の緻密な温度制御であり、Fig. 2 に示すように、SKYACTIV-X の W/J はこれまでにない狭小かつ複雑な形状となっている。SKYACTIV-X を実現するためには、この複雑な W/J を高い寸法精度で成形することが極めて重要な課題であった。

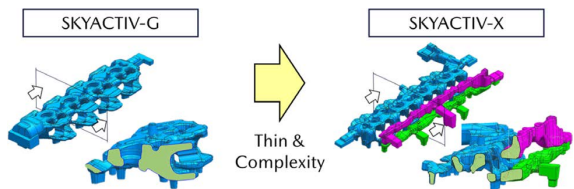


Fig. 2 Water Jacket Sand Mold

3. SKYACTIV-X を実現するプロセス革新

従来、モノ造り (製品開発) の進め方は Fig. 3 に示すように、実機を中心とした摺合せ型の開発であり、自部門のアウトプットが後工程部門のインプットになるような、バトンリレー式の直列フローが一般的である。この

方式は確実に進めれば無駄が発生しにくいですが、最終的な不具合は大きな手戻りを生じる。

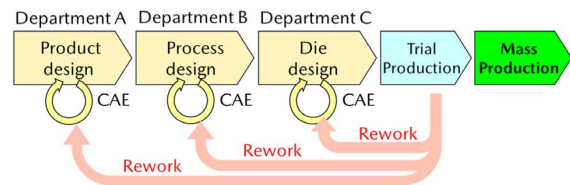


Fig. 3 Conventional Manufacturing Flow

そこで、製品設計の初期段階から関係する全ての部門が「モデル」による摺合せ開発を行う方法を目指している (Fig. 4)。例えば、残留応力モデルによる生産性の CAE 検証により、工程や金型を同時に最適化しながら、その CAE 結果を開発部門と共有して製品機能の CAE 検証にも活用し、予想されるさまざまな問題を未然に防止するやり方である。ここでいう「モデル」とは机上で再現したい現象を IPO (Input-Process-Output) や相関式で明確化して机上検証可能なツール化したものをいい、いわゆる CAD で使う 3D モデルとは一線を画すものである。また、複雑なモデルの計算は、システム化した CAE ツールで解く。

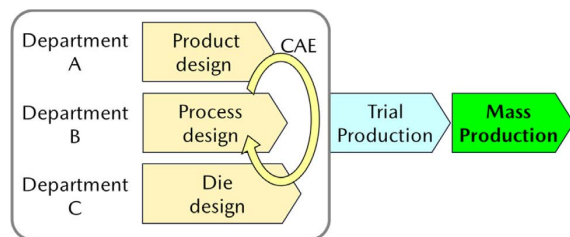


Fig. 4 Manufacturing Flow with a Focus on MBD

この机上検証を基軸として従来の限界を突破しようとする「モノ造り」を MBD と定義して、全社的に展開しようとしている。

4. シリンダーヘッド寸法のモデルベース開発

弊社では C/H を Advanced Precision Mazda Casting (以下 APMC) 工法で鋳造している (Fig. 5)。この工法は、全ての鋳型を砂型 (以下中子) で構成した製品形状自由度の高い、コスワース鋳造法を発展させたものである。その特徴はコスワース鋳造法に加え、中子の一部を金型化することで急冷凝固による緻密な鋳造組織を得るとともに、シャワー冷却による焼き入れ効果を取り入れて熱処理レスを実現している点にある。これにより、機械的性質を向上しながら薄肉形状を成形可能としている。

APMC 工法における MBD 技術マップを Fig. 6 に示す。これはモデル化すべき道筋を、長期的な商品動向をも見据えてまとめたものである。実用化したものを青色、開発中のものを黄色、開発予定のものを赤色で示している。

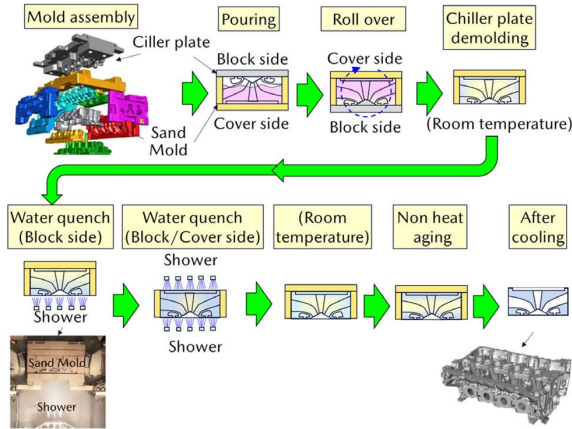


Fig. 5 APMC Process Flow

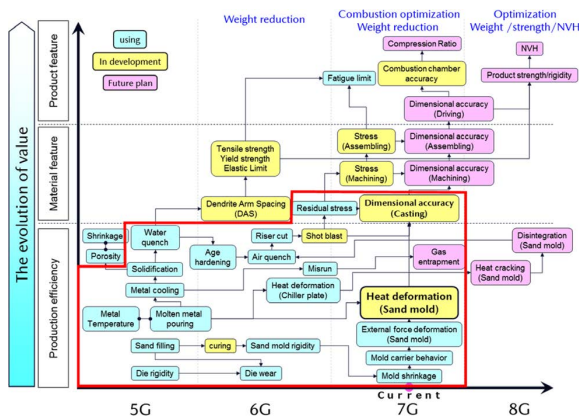


Fig. 6 Technology Roadmap for MBD (APMC)

これまで、生産効率を高める項目から着実にモデル化・実用化し、手戻りのない量産準備を行っている。将来的には、製品機能モデルなどに生産モデルを組み合わせて、更なる製品機能向上までを視野に入れて活動を進めていく。その中でC/H 素材寸法モデルは Fig. 6 の赤枠内の右上に位置し、中子熱変形モデルやアルミ残留応力モデルなどつながっている。

Fig. 7 は、C/H 素材寸法モデルを簡略した IPO で整理したものである。最終的な C/H 寸法を CAE で正確に予測するためには、各工程の寸法を正しく計算し、つないでいく必要がある。本稿では、赤枠で示す中子熱変形モデルの事例を報告する。

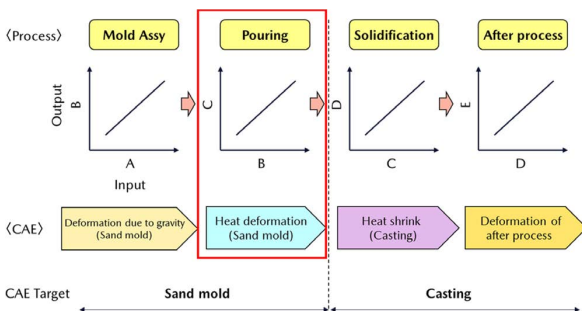


Fig. 7 Cylinder Head Casting Dimension In-Process-Out

5. シリンダーヘッド素材寸法の課題

中子熱変形とは高温の溶湯の熱影響により中子が局部的に大きく変形する現象である。素材の寸法精度を高めるには、この熱変形の方向や量を予測し、その結果を基にまず変形を抑制し、抑制しきれない変形量のみ金型を補正する必要がある。従来は、類似機種の実績を参考に変形を見込んだ補正を金型に織込んでいた。そして、試作铸造した結果を基に寸法規格外れ、あるいは工程能力を満足しない懸念があると判断した箇所に補正を追加していた。これらの結果、金型修正にかかる費用や期間のロスが発生していた。そのため、SKYACTIV-X のような全く新しい形状の場合、類似の変形が見込めず寸法規格外れ箇所が増加し、金型修正ロスが膨大になる。また、そもそも変形を抑制する方法を見出せないため、過大な変形を金型補正だけでは対応できず製品形状を成形できないといった、2つの大きな問題が発生する。これらの問題を回避するためには、製品設計の初期段階において、生産モデルを用いた机上検証で変形予測と抑制効果確認を行い、それらの結果を金型へ織込む、つまり MBD へと量産準備のやり方を進化させる必要がある。

APMC 工法における中子熱変形のメカニズムを Fig. 8 に示す。中子は、製品形状を成形する部位（以下形状部）と各中子の位置決め構造（以下巾木）で構成されている。アルミ溶湯を充填すると、形状部が溶湯からの熱を受けて W/J 中子全体の温度が上昇する。そして、W/J 中子は温度上昇に伴い熱膨張するとともに強度低下を生じる。W/J 中子は巾木で拘束されるため、自由膨張することが出来ず、熱膨張により生じた反力や浮力の影響を受けて変形する。特に薄肉 W/J 中子は断面積に対して表面積が大きいいため、内部まで高温となる。このため、熱膨張量が大きく、大きな変形を生じる。

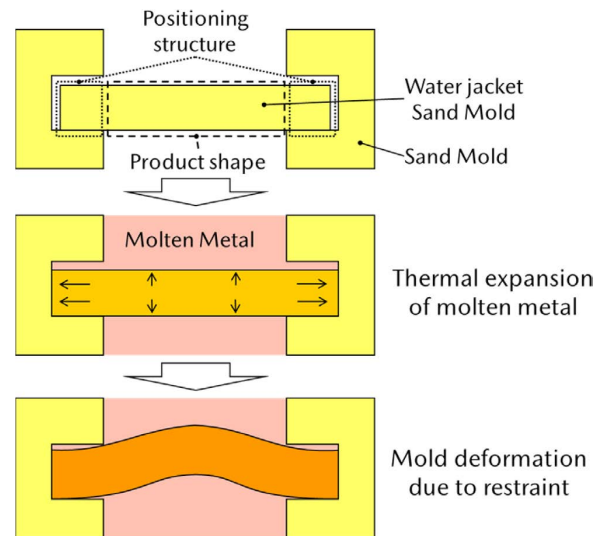


Fig. 8 Mechanism of Sand Mold Heat Deformation

6. 実態計測に基づいたモデルの深化

中子熱変形モデルの構築に向け、実態計測に基づいたメカニズム解明から、熱変形の制御因子（物性値、中子拘束などの境界条件等）と誤差因子（雰囲気温度、中子初期温度等）を鑄造の工程ごとに網羅的に洗い出し、IPOとともに整理した。

CAEは、この制御因子や誤差因子のパラメータを計算しながら、実際の生産と同様に、各工程の計算結果を次工程の初期値につないで最終結果を得る。中子熱変形モデルのCAEは、上述のメカニズムから、中子各部位の熱膨張と反力を正確に計算するためのパラメータ設定が重要である。

中子熱変形モデルの深化に向け、以下の2点に注力した。

6.1 実態に則した物性値の取得

1つ目は実態に則した各種物性値の取得である。中子熱変形において特に重要な物性値は、熱伝導率と各温度域の強度である。従来のCAEにおいて、中子の熱伝導率は重量比で98%以上を占める砂単体の熱伝導率を採用していた。しかしながら、中子は結合剤に包まれた砂の集合体であり、砂単体の熱伝導率とは相違している。すなわち、砂単体では内部熱伝導現象のみを扱えばよいのに対し、中子は砂粒間の結合剤を介した熱伝達を伴う伝熱特性として把握する必要がある。そこで、中子の熱伝導率を測定した結果、従来採用していた砂単体の値に対して、大幅に小さいことが分かった。これは、上述したように砂単体での熱伝導現象に対し、中子では砂粒間の結合剤を介した点接触による熱伝達現象であるため、見かけの熱伝導率としては非常に小さな値となったと考えられる。

中子の各温度域の強度測定において、外注した中子単体の計測方法では200℃以上になると結合剤が軟化して中子が崩壊するため、測定できない問題が発生した。しかし、量産で鑄造した後の中子を調査すると強度が残っていることがわかった。そこで、結合剤である樹脂の温度による状態変化を調査したところ、酸素と反応して発生した水による軟化やその蒸発による硬化、及び分子結合の分断による崩壊と、温度域によって変化することを突き止めた。また、W/J中子は鑄造時にアルミ溶湯で鑄包まれるため、酸素供給が少ないことから、鑄造状態を再現したFig. 9に示す実験計測方法を考案した。その結果、常温から500℃まで50℃ごとの強度を取得するとともに、結合剤樹脂の各温度域の状態により強度が増減する特性も確認できた。

取得した各物性値の確からしさは、簡単な形状のテストピースを用いた実験とCAEの比較結果で確認している。

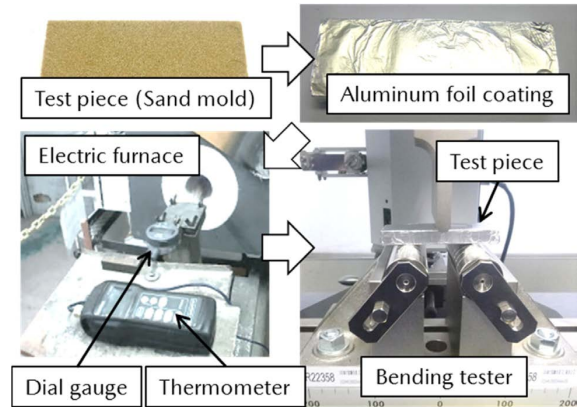


Fig. 9 Bending Test

6.2 実態に則した拘束条件の織り込み

2つ目は実態に則した拘束条件の織り込みである。APMC工法では複数の中子と金型を組み合わせることで鑄型を構成している（以下、中子が組み合わせられた鑄型をサンドパッケージと呼称する）。サンドパッケージは複数の搬送工程を経た後、溶湯充填を行う鑄造機中で把持される。各中子間には金型製作時の製作公差や中子造形時のバラツキを考慮して、位置決めや干渉回避など、目的別のクリアランスが設けられている。そのため、鑄型に外力が加わる工程では、クリアランスに変化が生じる可能性がある。そこで、量産各工程における中子の変位を連続測定し、クリアランスの値の変化を明確にした。Fig. 10に中子変位の測定装置を示す。サンドパッケージ内部に設置したダイヤルゲージを、小型カメラで撮影することで連続的に測定している。この中子挙動の測定結果から、サンドパッケージクランプによるクリアランス変化のメカニズムを解明し、巾木部の拘束条件の変化として中子熱変形モデルに織込んだ。

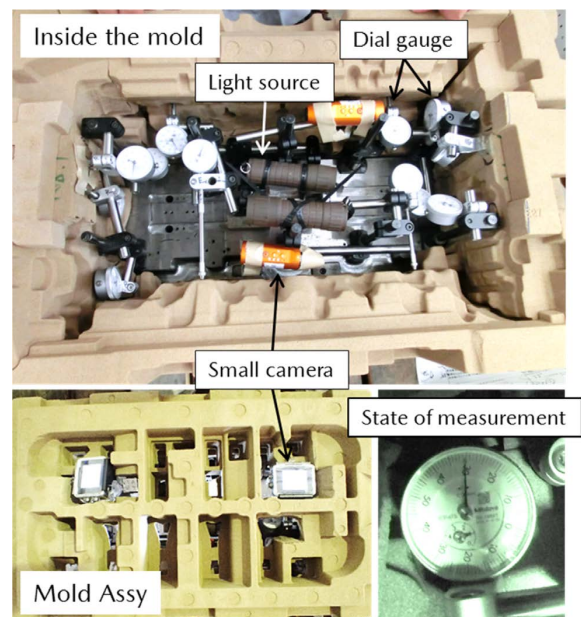


Fig. 10 Sand Mold Behavior Measurement

6.3 モデル改善効果

W/Jの中子熱変形解析結果と実铸造したC/HのW/J部の寸法測定結果との比較をFig. 11に示す。中子熱変形モデルの最適化には、これまで量産導入した中で一番変形が大きい機種種のW/J中子を用いた。物性値とクリアランスを織込んだ改善モデルは、実測の曲線傾向と近似しており、整合している。活動開始時の整合率21%に対し、改善の結果、整合率を80%以上に高めることができ、実用的なモデル精度を確保できた。

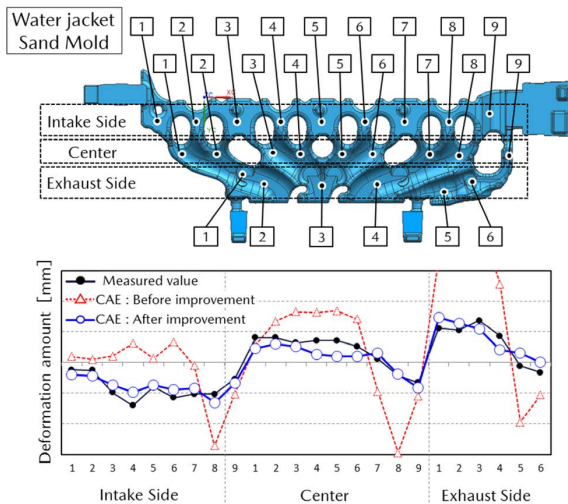


Fig. 11 Analysis Precision

なお、寸法規格の $\pm 0.8\text{mm}$ 以内に一発で収め、かつ量産での寸法変動を考慮し、予実差 $\pm 0.2\text{mm}$ 以内を整合の条件と定義し、整合率80%以上を目標として設定している。

7. モデルを活用した変形対策の立案・織り込み

構築した中子熱変形モデルのCAE検証で、SKYACTIV-XのW/J変形を予測するとともに、変形を抑制する鋳型構造を開発した。その結果をFig. 12に示す。従来の鋳型構造では、XYZそれぞれの方向に大きく変形しており、最大で 1.6mm 変形している。変形を抑制する考え方として、熱膨張は物理現象として不可避であることから、拘束を制御する因子である中子クリアランスと中子支持位置の最適化を検討した。結果、Fig. 12のMBDに示すように製品中央部の巾木はXYZ方向を固定し、両端はYZ方向を支持してX方向にクリアランスを設け自由膨張させる仕様が、最も変形量が少ないことを導き出した。これにより、熱膨張量分を中子全体の拡縮補正で簡便に制御が可能になる。この構造によりYZ方向の変形を 0.1mm に抑制できた。

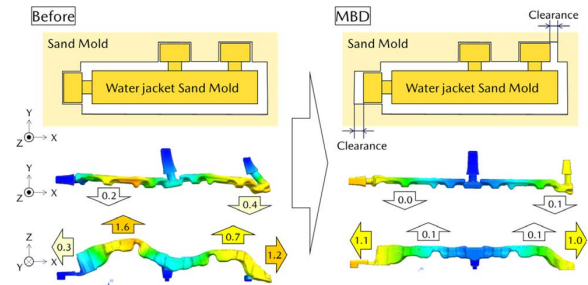


Fig. 12 Optimization of Mold Structure by MBD

8. 成果

これまで実機のトライ&エラーで達成していたW/J寸法を、中子熱変形MBDを適用した結果、前例のないSKYACTIV-XのW/J形状を寸法規格 $\pm 0.8\text{mm}$ 以内に対し、予実差 $\pm 0.2\text{mm}$ 以内の整合率90%を達成し、実機寸法を $\pm 0.5\text{mm}$ 以内で成形できた。SKYACTIV-Xの製品機能を実現しつつ、W/J寸法の金型修正レスを達成できたことで、Fig. 13に示す金型準備期間を22%、金型投資を19%削減した。

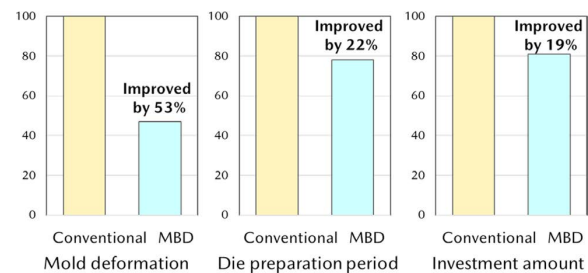


Fig. 13 Conclusion of MBD

9. おわりに

今回、中子熱変形を対象としたモデルベース開発プロセス構築に挑戦し、SKYACTIV-Xシリンダーヘッドでは製品機能と生産性を両立させるブレークスルーを実現できた。MBDにおいて中核をなすのは「モデル」と「CAE」であるが、モデル構築にあたっては「実現象を正確かつ詳細に把握し、整理すること」がスタートであり、最も重要であることを再認識できた。

また、素材寸法全体を予測する上で、中子熱変形後の現象である素材熱収縮変形や後処理工程のモデル化も必要であり、現在取り組んでいる。将来的には、加工・組立プロセスも含めて、製品性能をMBDで評価・最適化し、さらなる製品機能の向上を目指していく所存である。

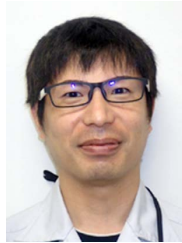
今後も、全てのステークホルダーへ笑顔を届けられるクルマ造りに向けて、技術への挑戦を続けていきます。

この論文は(株)日刊工業新聞社 型技術 2020年6月号に投稿した内容に追記・転載したものです。

■著者■



梅原 美友



米澤 英樹



丸尾 幸治



末永 啓太

論文・解説

11

車体フレキシブル生産の進化

Evolution of Flexible Body Production System

有泉 雄一^{*1} 小池 慎二郎^{*2} 倉橋 聖矢^{*3}
 Yuichi Ariizumi Shinjiro Koike Seiya Kurahashi

要約

マツダ生産技術では、お客様の期待を超える『商品価値の実現』と市場環境の変化に即応可能な『高効率でフレキシブルな生産』を両立させたグローバルな生産・供給体制の構築に取り組んでいる。2019年には宇品車体工場にその第1号となる次世代ライン Flexible Module Line（以下、FML）を立ち上げた。本稿では、この次世代ラインに組み込んだコンセプト、機能、成果について紹介する。

Summary

Body Production Engineering Dept. has been tackling to establish the global production/supply system. This can realize both “Embodying the product value” that Mazda is pursuing and “High efficient and flexible production system” that can respond the change of market quickly.

In 2019, the first Next-generation production line called “FML” (Flexible Module Line) was launched at the vacant lot of Ujina Body shop B2 line. This article introduces the concept, function, results, and challenges of this new line.

Key words : Production・manufacture, Continuous production, Module, Total cost, Flexible Module Line

1. はじめに

近年自動車業界を取り巻く環境は100年に1度の劇的な変化を迎えている。この変化は過去に経験のない大きさとスピードである。

マツダの車体組立領域においては、ニーズの多様化や市場環境の急激な変化に柔軟に対応するため、汎用システムの導入による多種変量生産ラインを開発し、各拠点に展開してきた。

しかし、「CASE (Connected, Autonomous, Share, Electric)」と呼ばれる新しい領域での技術革新に表れているように、自動車の概念が大きく変わろうとしている。

この動きに対応するためにボディー構造は大きく変わりつつあり、その変化に対応するためマツダの生産ラインを更に進化させることが必要となっている。

本稿では、お客様価値向上のための商品進化を実現し、かつ効率的な生産を実現する次世代ライン Flexible Module Line（以下 FML）について紹介する。

2. 車体生産

2.1 車体ラインの概要

マツダの車両工場は、1台単位で生産する順序を決め、計画とおりに生産する多車種の計画順序生産である。車体工場は、鉄板部品を成型するプレス工場とボディーの塗装をする塗装工場の間にある。プレス工場及び社外部品メーカーで生産された約300点の鉄板部品を、主にスポット溶接で3,500~4,000点接合しボディーを組み立て、後工程である塗装工場へ送る (Fig. 1)。

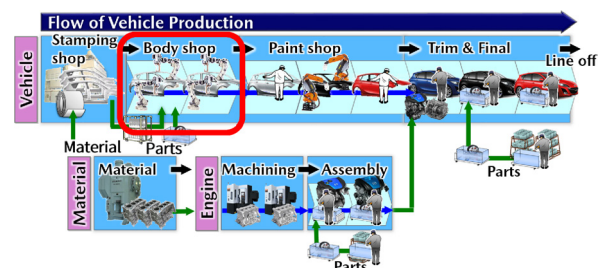


Fig. 1 Body Shop

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

2.2 車体ラインの構成

車体生産ラインは大きく分けて3つで構成されている。各部品を小サブ Assembly（以下 Assy）するスモールサブライン、その小サブ Assy 部品やその他の部品を組み立ててアンダーボディーやサイドフレームなどのサブ Assy にするサブライン、そしてボディーにルーフやドアなどのフタ物を組み立てボディーシェルにするメインラインである。

ラインは複数の工程から構成されており、各工程が決められた作業を行い、その作業が完了したら次の工程に部品を送るということを繰り返す（Fig. 2）。

それぞれの加工工程は、部品を位置決め・拘束する治具、部品を接合する溶接ロボットなど、多くの治具・加工設備で構成されている。

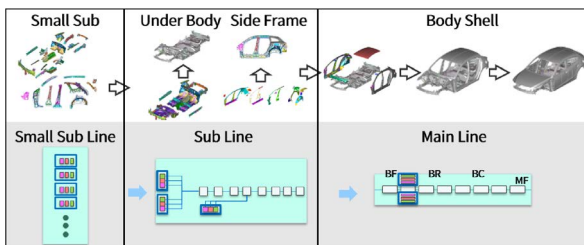


Fig. 2 Configuration of Body Shop Assembly Line

2.3 車体ラインでの加工

車体ラインでは次の加工プロセスを繰り返すことでボディーを組み上げている。

搬送（部品組付）⇒位置決め⇒接合⇒搬送（部品組付）

多数の治具での組付加工を繰り返し1台のボディーを組み上げるため、それぞれの治具において決められた精度で位置決め・接合を行い、高い精度のボディーを生産している。

(1) 部品の位置決め

部品の基準穴に基準ピンを挿し、部品の基準面を受けて、拘束することで部品を正しい位置に固定する。この基準穴、基準面のことを総じて加工基準と呼んでいる。これらの基準ピン、基準面を受ける、押さえるユニットの集合体が“治具”である。この治具には部品を正しい位置に位置決めをする機能（精度）と溶接加工中の部品位置を保持する機能（剛性）が求められる。

(2) 接合

約300点の部品を1台のボディーに組み立てるための主要な接合方法はスポット溶接であり、溶接機を保持したロボットにより行われる。スポット溶接は2枚または3枚の鉄板部品を両側から電極で挟み込み、加圧し、電流を流すことで発熱溶融させる接合方法である。

3. 車体フレキシブル化の取り組み

車体組立ラインのフレキシブル生産技術は、1990年前後に電動ロボットの性能向上と適用技術の強化に伴い飛躍的に進歩した。C-BAL（Circulation of Body Assembly Line）と称する多種変量生産ラインを防府工場に構築し1992年に生産を開始した。C-BALのコンセプトは“車格や車型に関係なく繰り返し生産できる車体組立ライン”である。そしてそれを達成するための重要な考え方が標準ボディー構造である。生産技術のみで高効率生産を実現するのではなく、開発部門と十分な相互理解と協力の下商品性を阻害せず、生産しやすいボディー構造を開発し、それを標準構造として長期的に改善・進歩させることによりフレキシブル生産を実現した。このC-BALのコンセプトが現在のフレキシブル生産のベースとなっている⁽¹⁾。

2000年初めには、C-BALの発展形としてサブラインであるアンダーボディー・サイドフレームラインのフレキシブル化にも取り組んだ。その過程でさまざまな多種変量生産技術を開発し、各拠点に展開した。その後、これらの技術に改善や見直しを加え、現在に至っている⁽²⁾。

このように新技術を取り入れながら車体組み立てラインのフレキシブル生産技術を進化させてきたが、標準ボディー構造を元に繰り返し生産できるラインすなわち汎用性が高いラインというコンセプトは一貫してきた。

4. 現状の課題

ボディー構造の標準化を前提とした従来の汎用システムでは対応しきれない変化に対応するために、コンセプトを更に進化させた次世代のフレキシブル生産を具現化していく必要がある。

4.1 商品進化への対応

従来のフレキシブル生産ラインは“ボディー構造の標準化”の上に成り立っている。しかし、近年では自動車の電動化によるバッテリー搭載、車両重量の増加による衝突安全対応の変化、エンジンと電動でプラットフォームが異なる等、ボディー構造は標準化の枠組みから外れつつある。

商品の進化が多車種混流生産ラインに与える影響は下記のとおりである。

- ・新構造と現行工程のアンマッチ
- ・部品点数の増加による組付け時間の不足
- ・加工量増加による加工時間の不足または工程数不足
- ・材料の高強度化による治具機能や溶接機の能力不足

従来の“標準”から外れたボディーを生産するために現行ラインの工程設計をやり直し現行車を含めた工程の追加／改造に投資と時間をかけて対応してきた。しかし、この手法では現行車の生産、品質に影響を出すケースも

ある。

現在起こっている進化は従来の生産ラインの枠組みの中では対応できなくなりつつあり、また現行ラインでの生産成立を優先させると商品に制約をかけてしまう可能性が出てきた。

課題は高品質で安価な多種類の商品をタイムリーに供給するという考え方はそのままに、現行車生産に影響を及ぼさずに短期間で商品の進化に対応し生産できるようにすること。ボディ構造の進化に柔軟に対応でき、進化し続けることが可能な生産ラインを構築することである。

4.2 台数変動への対応

昨今のSUV需要に表れているように消費者のニーズの変化は量・スピードが従来とは比較にならない。

多車種の計画順序生産に取り組んでいるマツダでは同一ライン内の車種の組み合わせの台数比率変更（縦スイング）、ラインをまたいだ生産車種の追加や組合せの変更（横スイング）により対応してきた。しかし、ライン改造のボリュームが増え、また長年繰り返す中で生産ラインごと（拠点）で構成に違いが生じてきた。同一車種を複数ラインに導入するケースでラインごとに対策内容が異なるケースが出てきた。

縦・横スイングの対応に費やす追加投資とリードタイムをミニマムにしなければならない。

課題は現状ラインごとに決まっている生産車種と車種ごとの生産台数の容易な変更を可能とすること、縦スイングと横スイングにより制約無く短期間で要求と通りの車種と台数が生産できる生産体制とすること。

4.3 高精度化

マツダ車の魅力である魂動デザインを実現するためにはボディ精度の向上が不可欠である。例えば、魂動デザインの特徴にデザインハイライトの流れの美しさがあるが、これには外板部品の面の流れのつながりが重要となる（Fig. 3）。

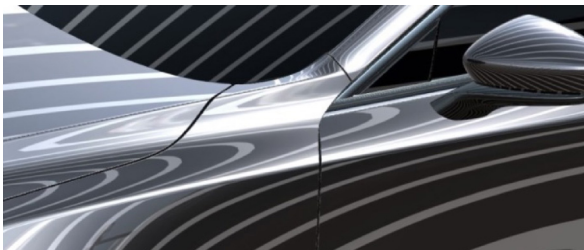


Fig. 3 Design Highlight

外板部品は1部品ではなく、サイドフレームアウター、フロントフェンダー、ドア、ボンネット等、複数の別々の部品があり、これらを一枚のパネルであるかのように部品と部品を段差なく、隙間を均一に組み立てて、面の

流れを表現する。前述のようにボディはおおよそ300点の非常に多くの部品で構成されており、これらの全てを従来よりも高精度で組み立てる必要がある。

5. FMLでの取り組み

マツダのモノづくりのベースである“最高の効率で最高の価値をお客様にお届けする”というビジネス効率（Fig. 4）の考え方を念頭に置いて最新の多車種変量車体ラインのフレキシブル生産のレベルアップに取り組んだ。

以下に、4.1節、4.2節のFMLの取り組みを紹介する。

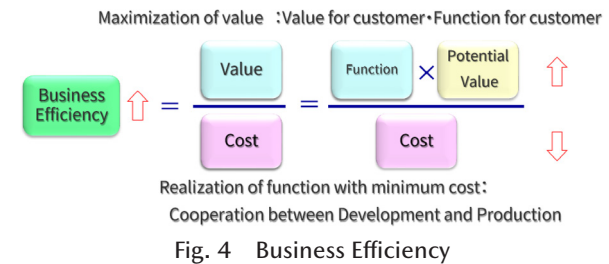


Fig. 4 Business Efficiency

5.1 固定と変動の再定義

開発の目指す理想構造（コモンアーキテクチャー構造）と生産の目指す理想工程（フレキシブルライン構想）を徹底的にすり合わせ、製品・生産工程の固定要素と変動要素を再定義した（Fig. 5）。

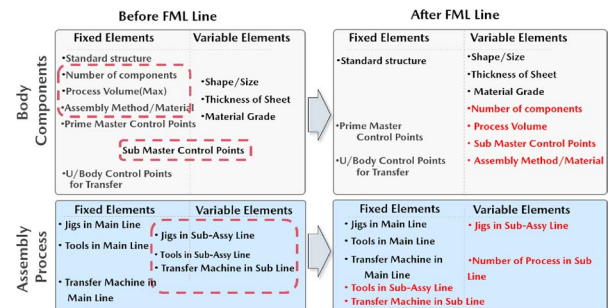


Fig. 5 Fixed Elements and Variable Elements

ボディ構造の“固定と変動”は、商品進化によるボディ構造の変化に制約を与えない様、固定要素を減らし変動要素を拡大した。

例えば部品点数と加工量の上限については、これまで固定要素と位置づけ工程を汎用化してきた。FMLでは変動要素と定義した上で工程の汎用化に取り組み、新構造・新機能への対応能力を大幅に広げることが可能とした。

生産工程の“固定と変動”は、拡大させたボディ構造の“変動”を工程で吸収ができるよう、以下に取り組んだ。

部品点数、加工量のような量の変化に対してはメインライン、サブラインの加工量の上限を考慮して前工程のsmallサブラインで吸収する。つまりsmallサブラ

インの数を変動とし増減させることで対応する。

また、工法や材料の変化に対してもスモールサブラインをモジュール単位で変更することで対応する。これによりメインライン、サブラインを都度大きく改造することなく治具などの専用部分のみの変更で対応することを可能とする。

5.2 サブラインの並列化

車種追加時に工程改造の多いサブラインの在り方について見直した。

これまではメインラインとサブラインを直列としたライン構成として変化に対して工程や加工機の追加などで対応してきた。“変動”を増やしていくためにサブラインの加工工程をゼロベースで見直し加工効率の最適を導き出した。

サブラインは部品の増加に伴いサイクルタイムの中で部品組付けや搬送の時間の割合が増加し加工時間が短くなる傾向にある。サブラインの加工時間を増やす対応として加工時間によって工程数を決めるのではなく必要な加工を同じ工程で完結させ、加工時間に対してはサブラインを複数（並列）もつことで対応するライン構成とした。そうすることでメインライン同等の加工時間を確保し、より少ない工程数かつ省スペースでの展開を可能とした (Fig. 6)。

“変化”に対して工程を増減することなく対応が可能となり、対応アイテム削減にもつながる。

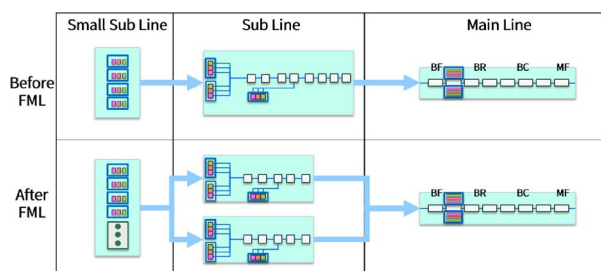


Fig. 6 Parallelization of Subline

6. FML の具体像—3つのモジュール

6.1 治具モジュール

FML では 5 章で述べた“固定と変動”の考えに基づき治具を車種専用として車種の切替を装置によって行う設備構成とした。これを治具モジュールと定義した。

切替装置 (図はターンテーブル) 上に A 車, B 車それぞれの専用治具を配置し, 装置が回転することにより車種の切替を行った (Fig. 7)。

これにより, 従来の多車種共用治具から車種ごとの専用治具とし部品形状とそれに付随する加工基準の変化に柔軟に対応し加工の最適化を図るとともに改造時に混流する他の車種への影響を排除する。

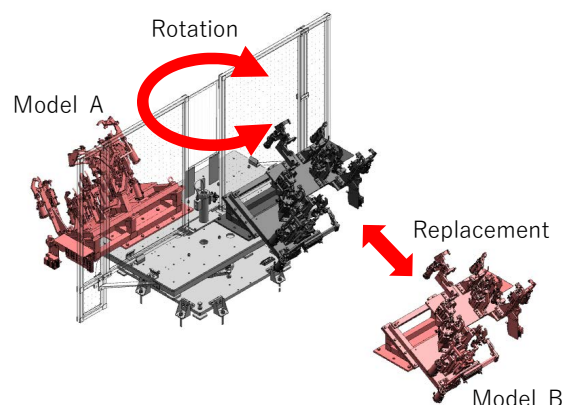


Fig. 7 Jig Module

治具モジュールとしての設計, 入替の効率化を図るために以下の標準化に注力した。

- 治具構造の最適化
- 治具と切替装置間の接続部の標準化
- 治具制御のソフトの標準化
- 配線配管の標準化
- 治具搬送時の搬送の標準化

これらを水平展開することで FML 展開後には複数ラインへのコピー展開時の図面完全流用も可能とした。

また, 本方式は治具の入替が前提の方案であるため, 治具の軽量化を必須として取り組んだ。過去のさまざまな車種・今後の構造予測により Assy 単位と加工基準の比較をおこない, それぞれの工程ごとに治具サイズと治具を位置決めする装置の対応範囲を決定した。専用の治具は角パイプをつなぎ合わせたフレーム構造を基本として不要な機能を削ぎ落とし, 構成要素ごとの機能の最適化を行った。

併せて近年各段に進歩した解析ツールを活用して治具の移動時の変形, 自重変形, 及び加工時の治具の変形の変形解析を繰り返し行い, 精度と剛性を満足した軽量構造を決定した。また実機の変化測定も実施し, 解析の確からしさの検証と解析条件の整備も合わせて行い解析精度も向上させた。

6.2 汎用セルモジュール

変動である加工量を吸収するためのスモールサブ工程においては最大限汎用化することに取り組んだ。治具モジュールと汎用溶接ロボットという最小限の設備での構成である。この工程を実現するために下記に取り組んだ。

- 加工ロボットの最適配置の標準化
- 加工機器のモジュール化

最大限の加工効率となる治具とロボットの配置について複数部品の加工動作シミュレーションを繰り返し行い汎用性の高い配置を割り出し, 加工量に合わせて 1 台又は 2 台設置可能とした。限られたスペースで最

大限の加工効率を目指し、省スペースかつ高い汎用性を実現した。これを汎用セルモジュールと定義した (Fig. 8)。

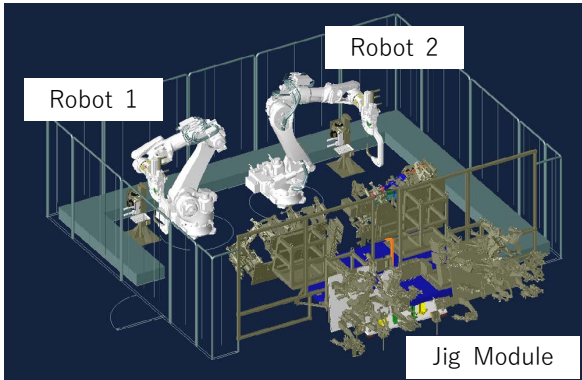


Fig. 8 Commonized Cell Module

6.3 工程モジュール

車体のメインラインは車体のラインの中では汎用化が進んでおり、製品の進化に対して大きく工程改造をすることのない高い汎用レベルを維持してきた。しかし今後、構造、新工法、加工量の大きな変化 (進化) により、現状の生産ラインでは対応できないことが必ずでてくる。メインラインについてもラインへの加工機能の追加は改造による対応ではなく工程単位のモジュールの追加で対応する。これを工程モジュールと定義した。現行ラインの生産をしながらモジュールの追加対応を可能とし、面積を変えずに実現するためにラインの加工効率を上げて工程を集約し新工程を間に挟み込むことが可能な形を準備した。

工程モジュール実現のために以下に取り組んだ。

- ・ 搬送システム高速化による加工可能時間拡大
- ・ ロボットと溶接機とラインコントローラーの接続制御の見直しによる溶接高速化
- ・ 加工部位ごとにグルーピングし、加工機をモジュール化 (Fig. 9)
- ・ モジュール化した加工機の組み合わせにより高密度配置 (Fig. 10)

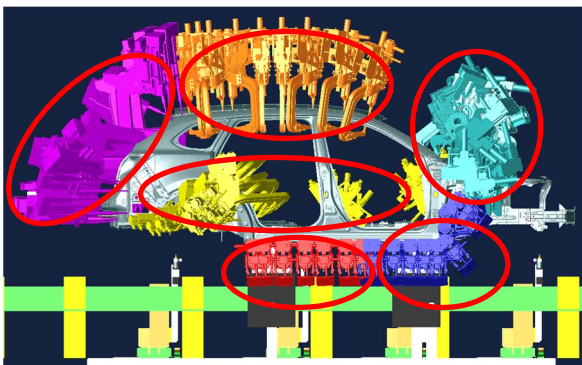


Fig. 9 Modularization for Each Processing Portion

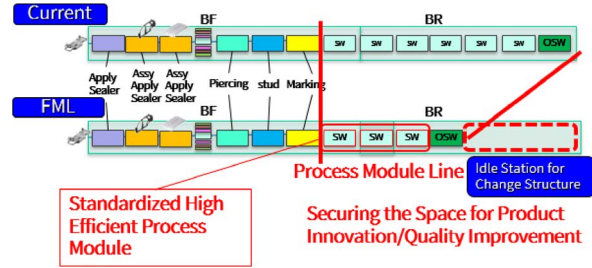


Fig. 10 Process Module

以上に述べた3つのモジュール構想により、製品の進化を妨げることなく、高効率の生産を実現する仕組みを作り上げた。

本取り組みにより変化に強い体制になったことと合わせて量産準備における期間、投資及び工数の面で大幅な低減を達成することができた。Fig. 11 に各対応における低減率を示す。

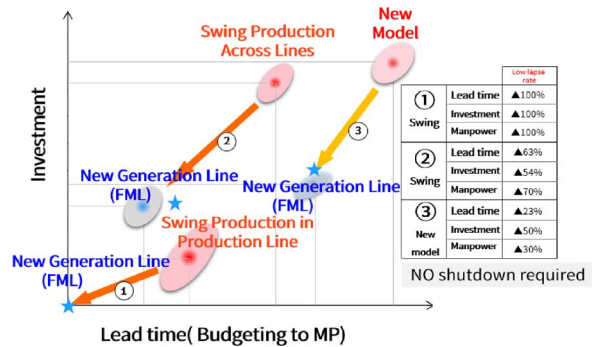


Fig. 11 Effects of FML

同一ライン内での生産台数の変更 (縦スイング) については期間、投資、工数全ての低減率が従来比で100%、すなわち対策不要となった (Fig. 11-①)。

生産ラインの移管や追加 (横スイング) については従来比で期間が63%、投資が54%、工数が70%の低減を達成した。(Fig. 11-②) これにより想定以上に大きな市場のニーズの変化が起こった際でも従来よりも短時間で車を届けることができるようになった。

新車導入においては期間23%、投資50%、工数30%の低減を達成 (Fig. 11-③) し、新商品をより早くお客様に届けることができる。

2020年時点で次世代車体ラインであるFMLの1本目を宇品車体工場に展開し1車種目としてCX-30を量産中である。更に、2車種目としてMX-30の導入を完了し量産を開始した。

7. 今後の課題

今後FMLの効果を最大限に発揮するために全生産拠点のFML化を進めていく。その課題は同体質性 (Global One Engineering) の維持である。FMLの展開が進む中で新技術の開発や車体新構造の採用など量産準備の要件は

常に変化し続ける。また、全拠点への展開はこれまでもそうであったように、立ち上げタイミングや拠点による部品の搬入単位の違い（社内 Assy の範囲の違い）など、拠点特有の条件により他ラインとは異なる対応を取らざるを得ない事態も考えられる。FML の効果を維持するためには、そのような大きな変化に対しても同体質性を維持・管理していく仕組みを作ることである。

8. まとめ

今回の取り組みにより高効率でフレキシブルな車体組み立てラインを具現化することができた。しかし、この生産体制が真価を発揮するのは各生産拠点に FML が展開された時である。グローバル展開の中で更なる改良と技術開発に取り組み、より容易かつスピーディーに変化に対応できるラインに進化させていく。

参考文献

- (1) 前島ほか：多種変量車体組立ライン，マツダ技報，No.11 (1993)
- (2) 五島ほか：フレキシブル車体組立ラインの進化，[マツダ技報](#)，No.23, pp.177-181 (2005)

■著者■



有泉 雄一



小池 慎二郎



倉橋 聖矢

論文・解説

12 魂動デザインを実現する高精度高効率金型製作プロセスへの革新 Process Innovation Aimed at High-Precision, High-Efficiency Production of Mold that Embodies “KODO” Design Theme

影山 貴大^{*1} 廻本 章吾^{*2} 久保 祐貴^{*3}
Takahiro Kageyama Shogo Sakomoto Yuhki Kubo
江草 秀幸^{*4} 叶井 貫^{*5} 大田 敦史^{*6}
Hideyuki Egusa Toru Kanai Atsushi Ohta

要 約

マツダは、お客様との間に特別な絆をもったブランドを目指している。そのお客様の期待を超えるクルマを提供していくために、金型製作部門では、特にデザイナーが想いを込めた「魂動デザイン」を量産車で実現させることを使命としてとらえている。本稿では、お客様への提供価値を高めるために、金型製作の高精度高効率化をねらった金型製作プロセス革新について紹介する。

Summary

Mazda aims to be a brand with a special bond with its customers. In order to provide cars that exceed the expectations of our customers, we, at the mold production department, believe that it is our mission to embody the “KODO - Soul of Motion” design theme, which represents the designers’ aspiration, in the form of mass production cars. This article introduces the process innovation aimed at high-precision, high-efficiency production of molds to enhance the value offered to customers.

Key words : Production • Manufacture, Die/Mold, Press/Resin (Plastics), Machining, Measurement technology, Forming process

1. はじめに

マツダでは、お客様に愛され続ける Only One のメーカーになるため、現在「ブランド価値経営」を強力に推進している。

「ブランド価値経営」の実現のために、モノ造りの中核である生産技術部門では、ビジネス効率を最大化すること、すなわち「お客様への提供価値を高めつつ、量産準備段階でのムダを排除した高効率な生産プロセスを確立すること」と定義し、その実現を目指している。

お客様への提供価値の1つである魂動デザインは「生命感」を共通の思想として、ボディに反射する繊細な光の陰影で動きや美しさを表現している (Fig. 1)。このデザインに込められたデザイナーの想いを理解し、高精度かつ高効率で魂動デザインを量産車で忠実に実現させることが生産技術の使命である。

魂動の生命感を量産車で実現させるためには、マザーツールである金型の品質が非常に重要となる。キャラク



Fig. 1 “KODO Design”

ターライン重視の先々代に対して、面重視の先代では、機械加工の技術開発及び磨き技能を向上することで形状クリアランスのばらつきを50%削減した。新世代商品群では、ボディ全体での連続的な面の再現が重要であり、形状クリアランスのばらつきを更に先代比50%削減する必要があった (Fig. 2)。そのために、より高精度な金型造りに進化させた製作プロセスに変革を行った。

本稿では、CX-30のフロントバンパー射出成形金型 (以下バンパー金型) 製作を事例に、高精度高効率な金型製作プロセスへの変革に向けた取り組みを紹介する。

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

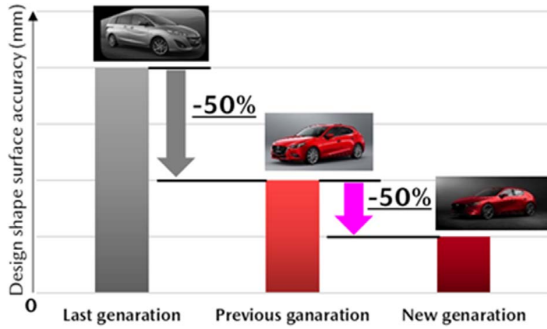


Fig. 2 Evolution of Design and the Accuracy of Requirements

2. 新世代商品群のデザイン実現課題

2.1 バンパー金型とは

バンパー金型は、凹側のキャビティ（固定側）と凸側のコア（可動側）から構成されており、キャビティとコアの隙間（形状クリアランス）に樹脂を充填して製品を成形する（Fig. 3）。そのため、バンパーのような意匠面をもつ金型では、金型形状がそのまま転写される特徴がある。バンパー部品で魂動デザインを実現するためには、キャビティとコアの単体形状の正確さだけでなく、両者の相対位置を正確に造り、ねらいの形状クリアランスを実現させることが金型製作にとって重要となる。

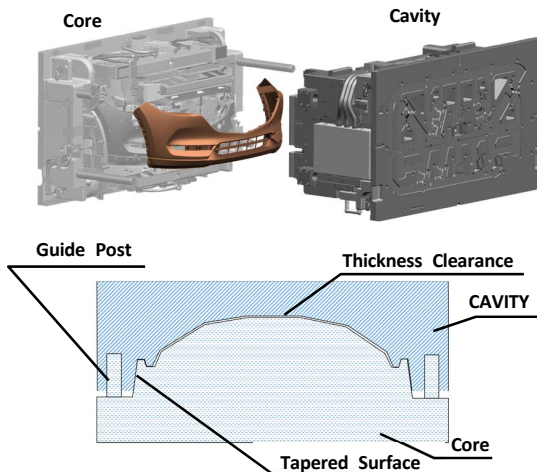


Fig. 3 Bumper Face Mold

2.2 バンパー金型の製作プロセス

バンパー金型の製作プロセスは、Fig. 4 上のように、機械加工、精度確認測定、形状磨き、組付け、型合わせによって金型を完成させる。その後、射出成形機に金型を取り付けてバンパーを成形し、デザイン再現性など製品品質を確認している。

これまで、形状磨きや型合わせでは、微小な段差などの機械加工精度のばらつきに対して技能者が砥石を使って多大な工数をかけながら精度修正を行っていた。しかし、砥石を使用した精度修正はねらいの精度を崩す結果となり、型合わせで繰り返し形状クリアランスを調整す

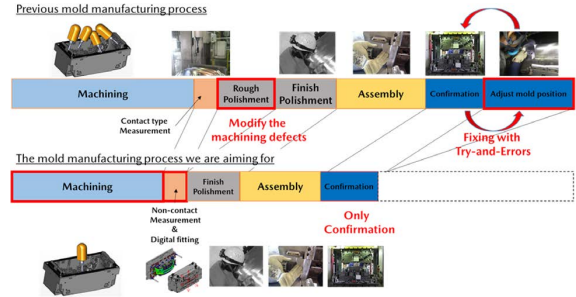


Fig. 4 Mold Manufacturing Process

る要因になっていた。結果、この形状クリアランスのばらつきにより、不均一な熱収縮による意匠面の曲率変化が起これ、デザイン再現に重要な左右の見栄えに影響を与えていた（Fig. 5）。

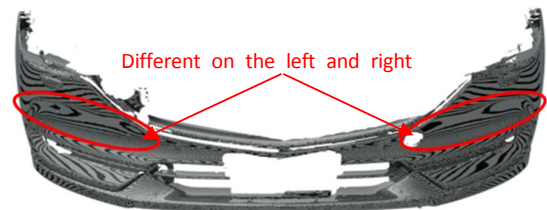


Fig. 5 Zebra Pattern on Front Bumper

従って、砥石修正が不要な単体加工精度への向上と、単体加工精度を活かし、相対位置精度を保証する技術によって、技能者による不要な調整作業を極小化できる、高精度かつ高効率な金型製作プロセスへの変革を目指した（Fig. 4 下）。

3. 単体加工精度向上の取り組み

3.1 単体加工精度向上の技術課題

比較的大きいバンパー金型では、大型門型 5 軸マシンングセンターで機械加工を行う。機械加工は、マシンングセンターの主軸先端にセットした切削工具を回転させて素材を削るが、切削工具の剛性は、工具長の 3 乗に比例して低下する。そのため、切削工具の剛性低下に伴う加工精度の低下を排除するため、従来は、Fig. 6 に示すとおり切削工具を B 軸（Y 軸を回転中心）と C 軸（Z 軸を回転中心）で回転させた状態の固定 5 軸加工を採用し、工具長を極力短くしてきた。

しかしながら、干渉回避のために数種類の加工軸方向で加工エリアを変えながらバンパー形状全体を切削するため、機械の変位や加工軸の旋回誤差によって加工精度にばらつきが生じ、加工エリアの境界に十数 μm の微小な段差（境界段差）が発生する（Fig. 7）。樹脂部品は境界段差が製品に転写されるため、通常は研削量が多い粗目の砥石で、境界段差がなくなるまで形状面を磨き補正しており、結果、金型単体精度のばらつきを更に大きくしている。しかも、CX-30 のバンパー金型は、成形中の樹脂圧による金型の挙動を抑制するために、Fig. 6 の構

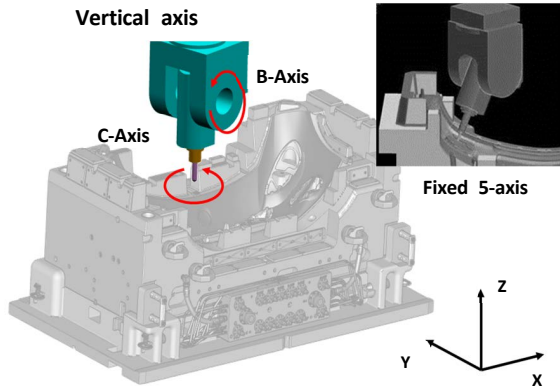


Fig. 6 Tilted Tool Axis

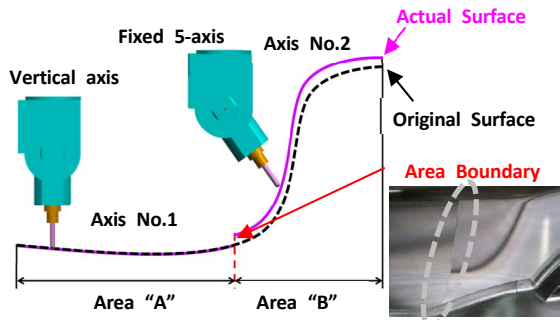


Fig. 7 Example for Cutting Area Boundary

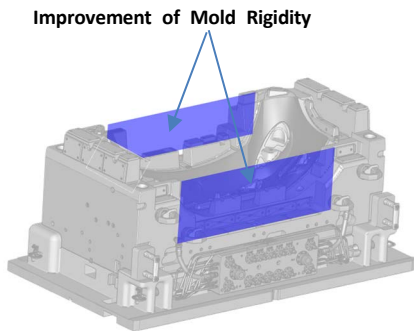


Fig. 8 Mold Structure in CX-30

造から、キャビティ全体を縦壁でつないだ金型構造を採用している (Fig. 8)。そのため、干渉回避のために加工エリアをこれまで以上に細分化する必要があり、境界段差による磨き調整作業が多発する恐れがあった。

そこで、加工精度のばらつき起因となる加工エリアの分割がなく、形状面を縦軸のみで連続加工する 1 エリア 1 方向加工の技術開発に取り組んだ。

3.2 1 エリア 1 方向加工実現の取り組み⁽¹⁾

1 エリア 1 方向加工を実現するためには、バンパーの深い形状に対応する従来比 2.8 倍の長い工具でも、工具撓みを少なくできる安定低負荷切削と、剛性低下がなく全ての形状を干渉回避できる切削工具把持ホルダー (以下、ホルダー) の開発が課題であった。

まず、安定低負荷切削の実現については、切削工具の

刃先形状及び切削条件の最適化を行った。最適条件は、品質工学手法と切削シミュレーションを組み合わせ導出した。

刃先形状は、切削工程や被削材硬度など使用環境に応じて形状が異なる。今回は、形状クリアランス実現に最も影響の大きいバンパー金型の形状仕上げ加工を想定して実験した。

切削シミュレーション結果より、切削工具の刃数は従来の 2 枚刃と比べて、多刃の方が良好な結果を得られた (Fig. 9 上)。多刃にすることで、1 刃あたりにかかる切削負荷が低減でき、安定した切削を実現できたと考える。また、刃先形状は、刃先のねじれ角を従来よりも大きくする方がより良好な結果を得られた (Fig. 9 下)。これは、切削工具と被削材の接触距離が長くなることで、切削負荷が分散されたと推測する。刃先形状及び切削条件の最適解を用いた結果、切削負荷を 40%抑制できることを確認した (Fig. 10)。

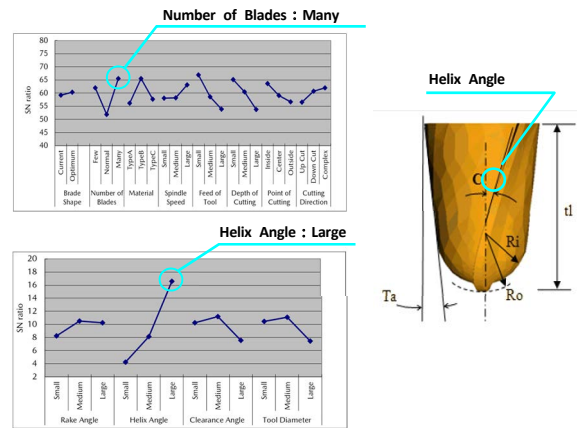


Fig. 9 Experimental Results

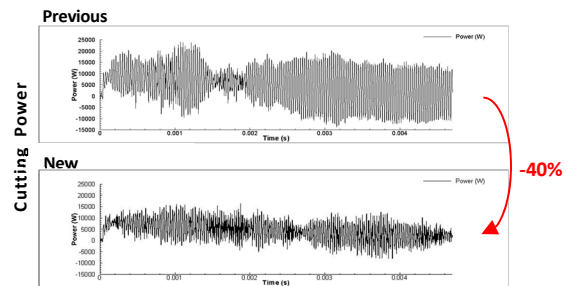


Fig. 10 Cutting Load Variation

次に、剛性低下がなく、かつ、深い形状でも干渉のないホルダーについては、テーパ形状の焼き嵌めホルダーを採用し、工具長を短くしつつ干渉のない加工ができるようになった。切削工具及びホルダー全体での撓み量を従来比 73%改善し、剛性不足が原因で発生する切削負荷のばらつきを低減した (Fig. 11)。更に、切削工具とホルダー形状を金型製造要件として金型設計に織り込むことで、1 エリア 1 方向加工を実現した。

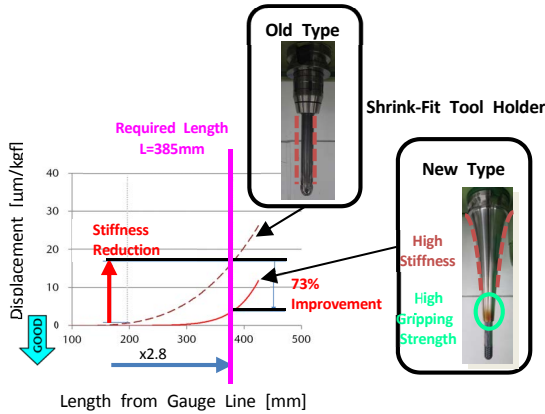


Fig. 11 Relationship between Stiffness and Tool Length

以上の対策をCX-30のフロントバンパー金型製作に織り込んだ結果、単体加工精度のばらつきを50%改善できた (Fig. 12)。

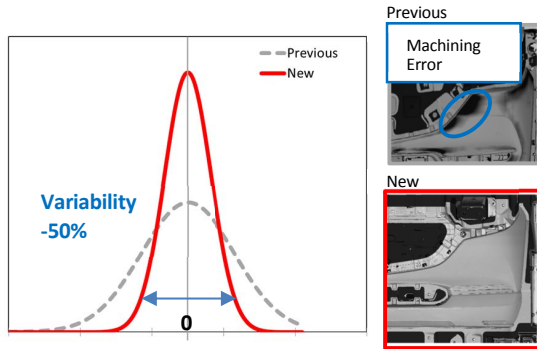


Fig. 12 Cavity Machining Result

4. 相対位置精度向上の取り組み

4.1 相対位置精度向上の技術課題

ねらいの形状クリアランスを実現するために、単体加工精度を活かした相対位置精度保証技術の開発に取り組んだ。前述3章のとおり、単体加工精度のばらつきを削減できたが、機械設備などの誤差によって、数µmの加工誤差は存在し、また単品部品の積み上げ誤差は存在する。ねらいの形状クリアランスを正確に実現する相対位置精度保証のためには、キャビティ及びコアの機械加工面を正確に把握し、両者を組み合わせた状態から誤差をキャンセルする相対位置補正技術が必要となる。

従来、バンパー金型のキャビティとコアの相対位置は、機械加工後にダイスポッティングプレス機で現物確認と調整を繰り返しながら形状クリアランスを補正していた。

そこで、この問題を解決するために、Fig. 13のように点測定から面測定に変えて金型全体を連続的に把握し、測定結果からねらいの形状クリアランスになるキャビティとコアの相対位置を予測することにし、以下2点の技術を開発した。

- ①高精度面測定技術の開発
- ②測定結果から相対位置精度を予測するデジタル型合わせ技術の開発

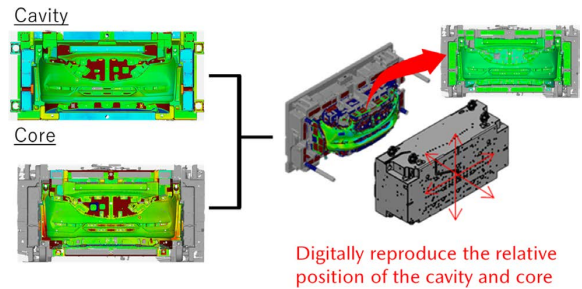


Fig. 13 Digital Relative Position Prediction

4.2 高精度面測定技術の開発⁽²⁾

機械加工面を連続して測定するために、非接触式3次元測定機を活用した。非接触式3次元測定機の測定手順は、一般的に、①金型にマーカーを貼り付け、②マーカーの空間座標及び位置関係を定義する。次に、③非接触式3次元測定機のデジタルカメラで金型を撮影し、取得した画像データを空間座標に沿って貼り合わせていく、④測定対象物の全体形状を撮影し測定結果を取得する (Fig. 14)。

非接触式3次元測定は、カメラ撮影画像等の情報を介して測定結果を取得するため、撮影時の環境などの外乱により測定精度のばらつきが発生してしまう。機械加工面を高精度にデジタル上で再現させるには、現状に対して測定精度のばらつきを40%改善する必要があった。そこで、キャビティとコアの相対位置を高精度に予測するために、外乱に左右されない測定条件の適正化を行った。

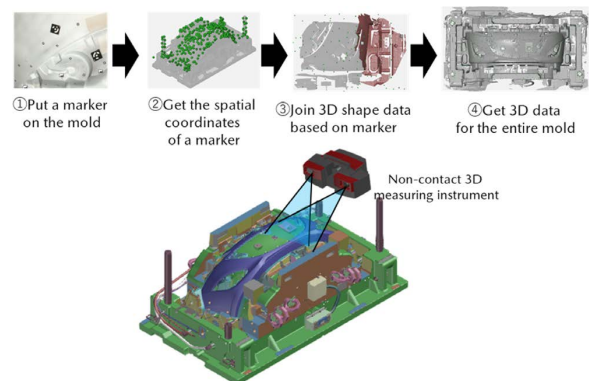


Fig. 14 Non-Contact 3D Measurement Procedure

測定条件を適正化するために、非接触式3次元測定機の測定原理から特に影響のあるパラメータを抽出して品質工学を活用し取り組んだ。検証の結果、シャッタースピードと測定対象物との距離が特に測定精度のばらつきに影響があることがわかった。シャッタースピードについては、金型測定時の光の反射（ハレーション）を防止する対策を織り込み、カメラへ入光する光を抑制する条件を設定した。また測定対象物との距離については、カメラの焦点距離の範囲内なるべく近い距離を適正な測定距離とした。上記の測定条件を適正化したことで細部の形状再現性が向上した（Fig. 15）。

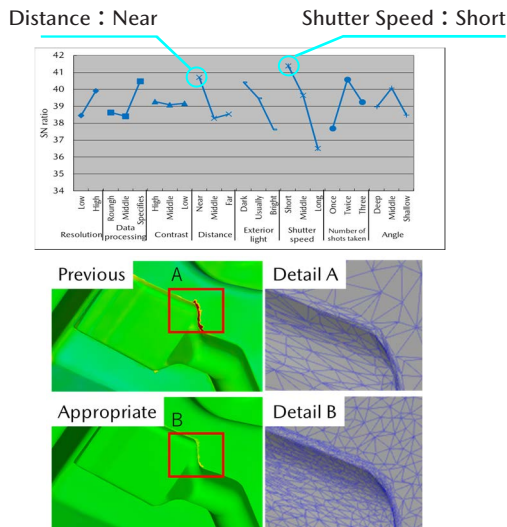


Fig. 15 Experimental Results

測定条件の適正化により、細部の形状再現性が向上したが、金型の寸法に対して測定結果がXYZ軸方向ともに数十μm大きくなっていることが分かった。基準となるガイドポストの測定では十数μmの誤差でも相対位置精度に影響がある。そのため、ガイドポストの測定誤差発生の要因を追求し、測定時の温度変化の影響をつきとめた。わずか1°Cの温度変化でも3mクラスの金型では十数μmの寸法変化がある。そこで、測定時の温度変位を極力排除するために、温度補正を行った。具体的には、XYZ各軸方向の温度変化に対する寸法誤差から、補正係数を算出し測定結果に加味した。

これらの取り組みにより非接触式3次元測定機の測定精度は現状に対してばらつきを42%改善し（Fig. 16）、機械加工面をより高精度にデジタル上で再現できるようになった。

4.3 デジタル型合わせ技術の開発

機械加工面の測定結果から、デジタル上でキャビティとコアの相対位置を定量化し、形状クリアランスのばらつきの補正をデジタル上で行うデジタル型合わせ技術を開発した。具体的には、キャビティとコアの機械加工面

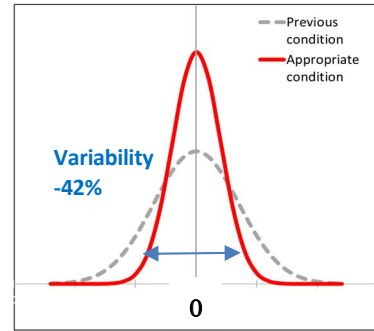


Fig. 16 Non-Contact Measurement Accuracy

の測定結果と、組付け基準のガイドポストの測定結果を比較し、均一な形状クリアランスになるガイドポストの補正値を計算できるようにした。その結果、デジタル上で設計どおりの形状クリアランスを再現させた（Fig. 17）。この補正値に基づいて金型のガイドポスト位置を調整することで、ダイスポッティングプレス機での確認、調整を極小化したデジタル型合わせができるようになった。

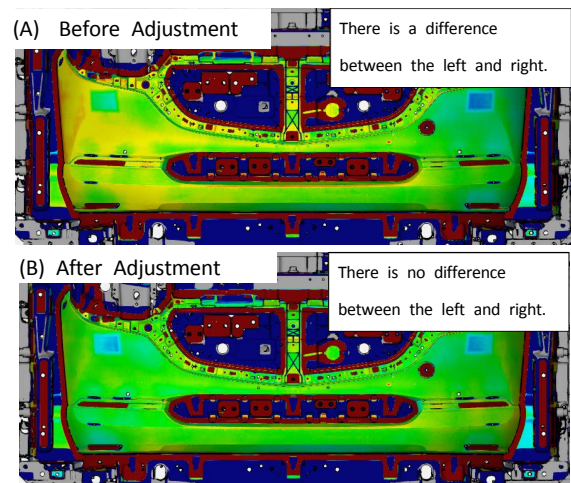


Fig. 17 Digital Relative Position Prediction

5. 金型製作プロセス革新の効果

従来は各工程内で、技能者が精度修正するプロセスであったが、1エリア1方向加工で高精度に加工し、デジタル型合わせで相対位置を調整するというシンプルかつ形状クリアランスの精度ばらつきを抑制したプロセスを実現した。

Fig. 18に先代とCX-30の形状クリアランスのばらつきを示す。先代に対して形状クリアランスのばらつきを50%削減した。Fig. 19に金型完成後の初期段階で取得したCX-30のフロントバンパーの見栄えを示す。魂動デザインの再現性を確認するためにゼブラ表示を行ったものであるが、左右の見栄えの違和感がなくなり、面の連続性もある製品品質にできた。また、単体加工及び相対位置精度を向上したことで、バンパー金型製作工数を24%削減できた。

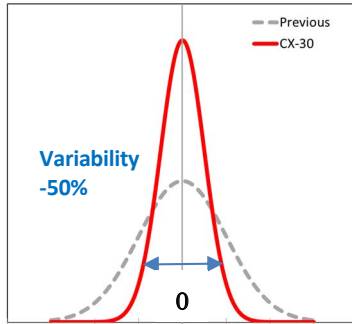


Fig. 18 Shape Clearance Variations

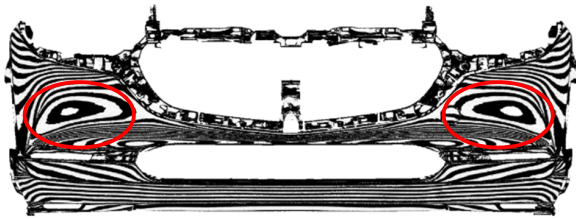


Fig. 19 Initial Panel Quality

■ 著 者 ■



影山 貴大



廻本 章吾



久保 祐貴



江草 秀幸



叶井 貫



大田 敦史

6. おわりに

高精度機械加工とデジタル型合わせを実現できたが、成形加圧時の金型及び射出成形機の変形による微細な調整の排除が今後の課題となる。加圧を加味した変形挙動の検証をできるようにし、更に形状クリアランスのばらつきを削減していく。そして、これからも深化し続ける「魂動デザイン」を量産車で実現し、お客様の期待を超えるクルマを造り続けていく。現状に満足せず更に高いレベルのモノ造りを追求し、高精度高効率な金型製作に愚直に取り組んでいく。

参考文献

- (1) 廻本章吾ほか：樹脂金型の意匠面仕上げ加工における切削工具及び条件の最適化，第25回品質工学研究発表大会（2018），pp.66-69
- (2) 影山貴大ほか：非接触測定精度向上の取り組み，第27回品質工学研究発表大会（2019），pp.176-179

論文・解説

13

材料モデルベースリサーチによる 多孔質吸音材微視構造設計技術の開発と吸音部品設計への適用

Development of Microstructural Design Technology of Porous Sound Absorbing Material and its Application to Sound Absorbing Component Design Based on Material Model Based Research

山川 啓介^{*1} 桂 大詞^{*2} 山本 崇史^{*3}
Keisuke Yamakawa Daiji Katsura Takashi Yamamoto

要約

マツダでは、クルマの価値向上につながる革新的な材料を効率的に開発する材料モデルベースリサーチ (MBR) の考え方に基づいた研究開発を進めている。本研究では、車室内の静粛性向上に寄与する多孔質吸音材料に対して、限られた質量と容積の中でねらいの音響特性を実現するために、その微視構造を効率的に設計する技術を開発した。本技術は、材料の微視構造特性から平均的な巨視構造特性を導出する手法である均質化法と、比較的簡便な吸遮音性能予測モデルである Biot のモデルを組み合わせたもので、微視構造の形状や寸法に対する高精度かつ効率的なパラメトリック計算を可能とするものである。本技術の概要とエンジンカプセル化技術への適用事例について紹介する。

Summary

Aiming to improve the value of cars, Mazda has been developing technologies with the concept of Material Model-Based Research (MBR) for the efficient development of innovative materials. In this study, aiming to achieve desired acoustic characteristics with a limited mass and volume of a porous sound-absorbing material that improves quietness in a car, we have developed technology that efficiently designs the microstructure of the material. This technology is a combination of the homogenization method that derives an average macro-structural property from the micro-structural property of the material and Biot model which is relatively simple prediction model for sound absorption/insulation performance. This technology enables highly accurate and efficient parametric calculations for microstructure's shape and size. Here we introduce the outline of this technology and the application of the technology to engine encapsulation.

Key words : Noise, Acoustic material, CAE, Homogenization method, Biot's model

1. はじめに

車室内の静粛性能は、運転者、同乗者の安全・安心で快適なドライビング環境をサポートする重要な性能の一つであり、マツダ車の性能も年々進化している⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾。一方で、他性能や軽量化と相反することも多く、これらと整合のとれた開発を効率良く行う必要がある。そのためにはできるだけ開発の早期に他性能とのバランスを取りながら、必要最小限の質量、容積での防音防振部品の設計要件を導出することが重要である。

マツダでは、材料の微視構造内部で生じている物理現象をそのメカニズムに基づいた数式でモデル化し、材料

全体としての性能や機能と結び付けることで、微視構造レベルでの制御因子を明らかにし、必要機能からのバックキャストによって材料開発を効率的に行う、材料モデルベースリサーチ (MBR)⁽⁴⁾ の考え方に基づいた研究開発をしている。本研究では、室内の静粛性を高めるために一般的に用いられる多孔質吸音材について、限られた質量と容積の中でねらいの特性を実現する材料の設計技術構築に取り組んでいる。

これまでに、材料の微視構造から巨視構造における特性を導出する手法である均質化法⁽⁵⁾⁽⁶⁾ と、比較的簡便な多孔質材の吸遮音性能予測モデルである Biot のモデル⁽⁷⁾ を組み合わせて、ねらいの吸音特性を実現するために必

*1~2 技術研究所
Technical Research Center

*3 工学院大学 工学部機械工学科
Kogakuin University, Graduate School of Mechanical Engineering

要な微視構造を効率よく設計する技術を構築した⁽⁸⁾⁽⁹⁾。この技術を活用して、低減したい音の特性と限りのある配置スペースに対応した吸音材を効率的に設計し、CX-30、MAZDA 3 のエンジンカプセル化技術に適用した。本稿では、本技術の概要とエンジンカプセル用吸音材の開発事例を報告する。

2. 多孔質吸音材微視構造設計技術の開発

本研究で取り扱う多孔質材料とは、細い繊維を重ね合わせたり、樹脂を発泡させたりすることにより、数 μm ～十数 μm の骨格部（固体相）と数十 μm ～数百 μm の空隙部（流体相）の二相からなる連通孔の材料のことであり、一般的に吸音材や断熱材として広く用いられているものを指す（Fig. 1）。マツダでは、モノを作って試行錯誤しながら仕様を決定するモノベースの開発ではなく、欲しい性能を得るために必要な微視構造パラメータ（骨格形状、骨格と空隙の寸法など）を机上で設計するモデルベースでの開発を目指している。

多孔質材料の音響性能を予測するために一般的によく用いられる手法として、Biot のモデルによる手法がある⁽⁷⁾。この手法は比較的低い計算コストで解析できるが、材料微視構造と解析に必要なパラメータとの関係が不明確であり、材料設計に用いることは難しい。一方、山本らは、材料の微視構造と巨視構造の特性を関連付けることのできる均質化法を用いて、多孔質材料の音響特性を解析する手法を開発した⁽⁶⁾。微視構造設計を可能とする手法であるものの、比較的計算コストがかかるため、所望特性を得るためのパラメータスタディを実施するには改善の余地がある。

そこで本研究では、均質化法と Biot モデルを組み合わせたハイブリッド手法を考案し、多孔質材料の微視構造をパラメトリックに計算する手法を開発した⁽⁸⁾⁽⁹⁾。本章では、Biot モデルと均質化法の概要を説明した後に、両者のハイブリッド手法による材料微視構造設計技術及びそこで必要な関係式の導出事例について述べる。

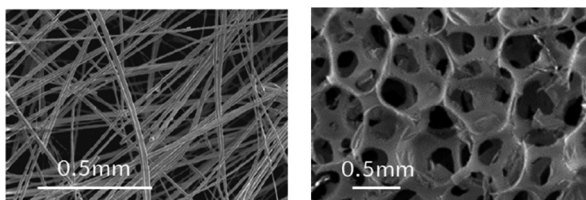


Fig. 1 Enlarged Image of Porous Material
Left: Fiber Type, Right: Foam Resin Type

2.1 Biot モデルによる多孔質材料の音響特性解析

Biot モデルは、音響エネルギーが多孔質材内部に入射した時の固体相と流体相の振る舞いについて、両者の相互作用を考慮して解析するモデルである（Fig. 2）。このモデルでは材料内部の骨格構造形状について直接的には

考慮せず、固体相と流体相の相互作用影響を複数のパラメータ、いわゆる Biot パラメータ⁽¹⁰⁾ によって表し、多孔質材内部で生じるエネルギー損失を求める。このモデルを例えば伝達マトリクス法⁽¹⁰⁾ に適用して垂直入射吸音率⁽¹¹⁾ を計算する場合、1 ケース当たり十数秒程度で結果が得られる。計算コストが比較的低く、予測精度が高いため、多孔質材の吸音特性予測に広く用いられているモデルである。しかしながら、Biot パラメータは実験的に同定する必要があり、微視構造との関係が不明確なものが複数あるため、材料設計への適用は容易でない。

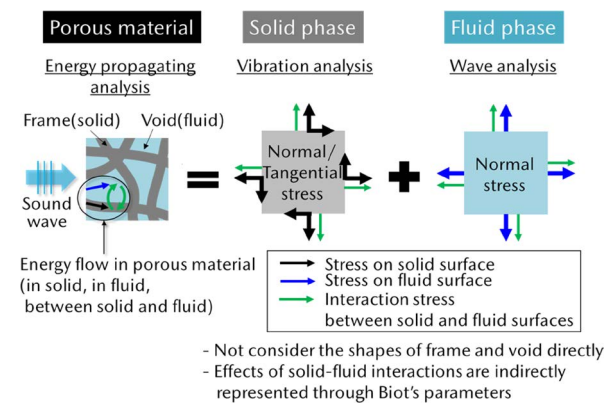


Fig. 2 Biot's Model Overview

2.2 均質化法による多孔質材料の音響特性解析

均質化法とは、材料内部の微視構造を平均的に等価な特性をもつ周期的で均質な構造（ユニットセル）が並んだものに置き換え、ユニットセルの挙動を解いて平均化して、巨視構造の特性を得る手法である（Fig. 3）。

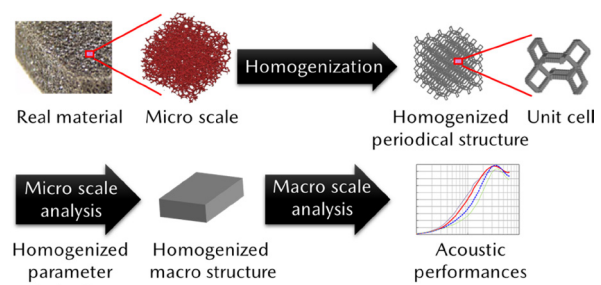


Fig. 3 Schematic View of Homogenization of Poroelastic Material

山本らはこの手法を多孔質材内部での音振動エネルギー伝搬現象に適用した。その概略について Fig. 4 の流れに沿って説明する（詳細は文献（6）を参照）。

微視構造について、固体相を線形弾性場として、流体相を圧縮性の線形流れ場として取り扱い、それぞれ Navier 方程式と Navier-Stokes 方程式を適用する。境界面において変位と垂直応力の連続条件を考慮する。温度場については、固体相の比熱が流体相の比熱に対して十分大きいことから、固体相では温度は平衡状態であると

仮定し、流体部のみに熱伝導方程式を適用する。境界面では温度の連続条件を考慮する。これら3つの方程式を解くことによって、吸音材内部での主な音響エネルギー損失（熱エネルギーへの変換）、すなわち、構造減衰損失、粘性損失及び熱散逸損失を定量的に解析することができ、巨視的な吸音特性の解析が可能となる。更に質量保存則及び状態方程式も考慮して、全ての支配方程式を解き、得られた微視構造特性関数について微視構造内で体積平均することで巨視的なパラメータ（均質化パラメータ）を得ることができる。そしてこの特性を用いて材料の巨視的な挙動を解析することで音響性能が求められる。以上により、構造パラメータと音響性能とが紐づいた解析が可能となる。解析は全て有限要素法（FEM）で実施され、1ケースの計算時間は計算専用のPCにて数十分～数時間を要する。

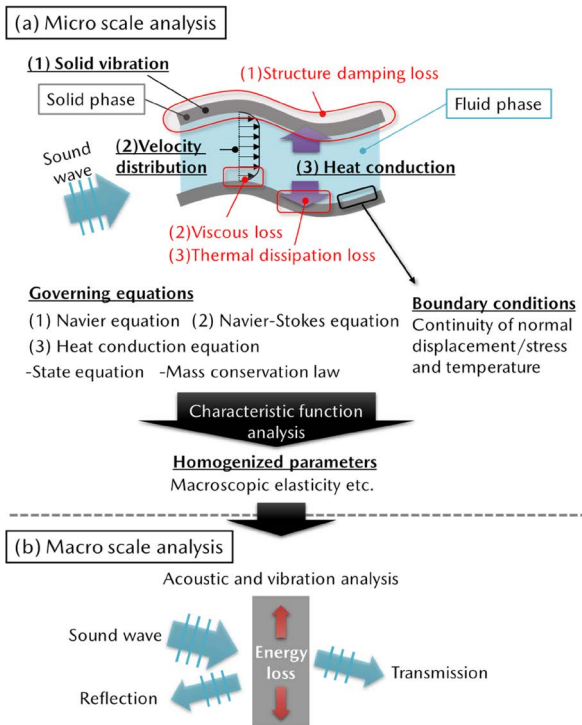


Fig. 4 Acoustic/Vibration Energy Propagation Analysis Model Inside Porous Material by Homogenization Method

この手法を発泡樹脂多孔質材に適用して、吸音率を予測した結果を Fig. 5 に示す。実測値と良い整合が得られている。なおユニットセルとしては後述する Kelvin セル構造を適用した。

2.3 均質化法と Biot モデルのハイブリッド手法による多孔質吸音材微視構造設計プロセスの開発

多孔質材の微視構造パラメータと Biot パラメータの関係が定量的に分かれれば、計算コストの低い Biot モデルが利用でき、微視構造と音響特性が紐づいた解析を短時間で行うことが可能となる。両パラメータの関係に

ついて研究した事例としては、ヤング率や流れ抵抗など一部の Biot パラメータについて、構造を単純化することで解析的に求めた事例⁽¹²⁾ や、微視構造寸法との関係式を実験的に同定した事例がある⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾。一方、山本らは、均質化法により全ての Biot パラメータを導出する手法を開発した⁽¹⁵⁾。

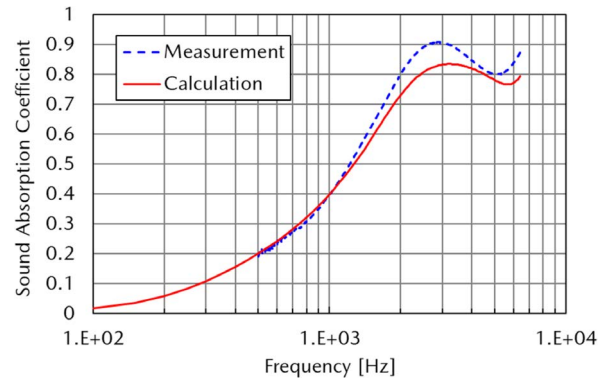


Fig. 5 Comparison of Normal Incidence Sound Absorption Coefficient Calculated by Homogenization Method and Measured: Foamed Resin Porous Material (Porosity 90%, Averaged Void Diameter 251 μm)

本研究ではこの山本らの手法を利用して、微視構造に関するパラメータスタディを多数回行うことで、両パラメータの関係式を導出することとした。一旦この関係式が得られれば、微視構造パラメータを変更した場合の音響特性を Biot モデルによって短時間で算出することができるようになる。ここに最適化アルゴリズムなどによる多数のパラメータスタディを適用することで、比較的短い時間でねらいの吸音特性を実現する微視構造パラメータを求めることができる。このようにして所望の音響特性を実現するために必要な多孔質材料微視構造を高精度かつ効率的に設計する手法を構築した。一連の微視構造パラメータ設計プロセスを Fig. 6 に示す。

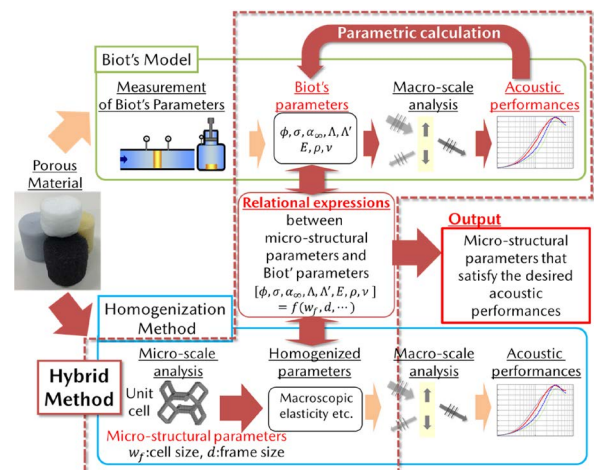


Fig. 6 Micro-structure Design Process of Porous Sound-Absorbing Material by Hybrid Method of Homogenization Method and Biot's Model

2.4 微視構造パラメーターと Biot パラメーターの関係式導出

繊維系及び発泡樹脂系の多孔質材について、微視構造パラメーターと Biot パラメーターの関係式の導出を行った事例を示す。Biot パラメーターのうち、固体相に関連する見掛けのヤング率 E 、質量密度 ρ 、ポアソン比 ν 、流体相に関連する空孔率 ϕ 、単位厚流れ抵抗 σ は均質化法で直接求めることができる。また、迷路度 α_∞ と粘性特性長 Λ は等価密度、熱的特性長 Λ' は等価体積弾性率から最小二乗法を用いて同定する⁽¹⁵⁾。

(1) 繊維系多孔質材

繊維系材料に対するユニットセルの形状としては Fig. 7 に示す井桁構造を用いた。単純化するため、ここでは厚さ方向の繊維のつながりは考えていない。したがってここでは流体相に関するパラメーターのみを求める。

繊維径 d を $0.5\mu\text{m} \sim 100\mu\text{m}$ 、空孔率 ϕ を $0.75 \sim 0.99$ の範囲に設定して計 50 のサンプリングを行って、各々 Biot パラメーターを導出した。更に微視構造パラメーターを繊維間平均距離 d_f と空孔率 ϕ として、最小二乗法により各 Biot パラメーターとの関係式を導出し、式 (1)～式 (4) に示す結果を得た。流れ抵抗 σ は d_f^2 に反比例、特性長 Λ 、 Λ' は d_f に比例しており、経験的に知られている関係と一致している。

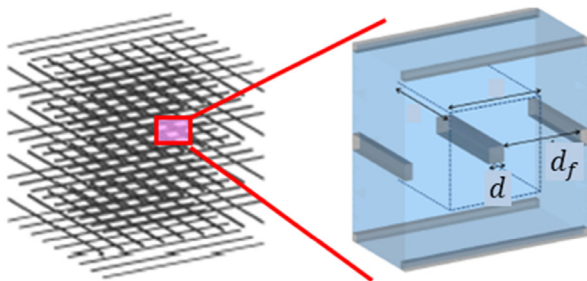


Fig. 7 Unit Cell and Microscopic Structural Parameters of Fibrous Porous Materials: Girder Structure

$$\alpha_\infty = 1.0 + 1.03(1.0 - \phi) \quad (1)$$

$$\sigma = 3.33 \times 10^{-4} d_f^{-2} (1.0 - \phi)^{0.16} \quad (2)$$

[Pa·s/m²]

$$\Lambda = 0.70 d_f (1.0 - \phi)^{-0.15} \text{ [m]} \quad (3)$$

$$\Lambda' = 0.76 d_f (1 - \phi)^{-0.13} \text{ [m]} \quad (4)$$

(2) 発泡樹脂系多孔質材

発泡樹脂系材料に対するユニットセルの形状としては、Fig. 8 に示すような泡の三次元構造の一種として知られる Kelvin セル構造を用いた。微視構造は棒状の骨格による四角形と六角形で構成されている。今回検討したのはユニットセルの 3 辺の長さが同じ場合で ($w_x = w_y = w_z = w_f$)、四角形及び六角形の空孔の大きさはそれぞれおよそ $1/3w_f$ 及び $2/3w_f$ である。ここでは、 $1\mu\text{m} \leq w_f \leq 1\text{mm}$ 、 $0.905 \leq \phi \leq 0.992$ の範囲において計 50 のサンプリング

を行い、Biot パラメーターの導出を行った。求めた w_f 、 ϕ と Biot パラメーターの関係式を式 (5)～式 (10) に示す。ここで、 E_0 は発泡樹脂の素材のヤング率である。流れ抵抗は w_f^2 に反比例、特性長は w_f に比例しており、経験的に知られている関係と一致している。

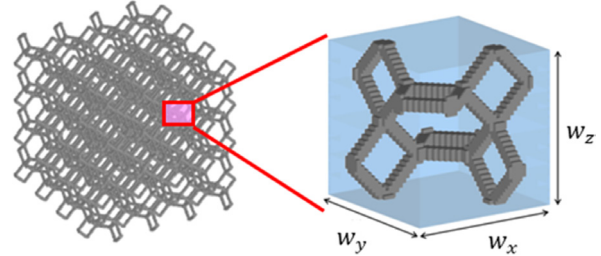


Fig. 8 Unit Cell and Microscopic Structural Parameters of Foamed Resin Porous Material: Kelvin Cell

$$\alpha_\infty = 1.43 - 0.43\phi \quad (5)$$

$$\sigma = 3.88 \times 10^{-3} w_f^{-2} (1 - \phi)^{0.355} \quad (6)$$

[Pa·s/m²]

$$\Lambda = 0.094 w_f (1 - \phi)^{-0.359} \text{ [m]} \quad (7)$$

$$\Lambda' = 0.383 w_f (1 - \phi)^{-0.149} \text{ [m]} \quad (8)$$

$$E = \frac{2(1 - \phi)^2}{3(1.9 - 0.9\phi)} E_0 \text{ [pa]} \quad (9)$$

$$\nu = \frac{\phi}{2(2 - \phi)} \quad (10)$$

3. エンジンカプセルの吸音部品開発への適用

CX-30, MAZDA3 に搭載されている SKYACTIV-X エンジンでは、燃費性能と静粛性能を両立させるため、エンジンルーム内のカプセル化技術が施されており、断熱性能と吸音性能の高い部品でエンジンが覆われている⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾。ここでは構築した吸音材微視構造設計プロセスをエンジンカプセルの吸音部品開発へ適用した事例を示す。

エンジンカプセルの吸音部品に用いられる発泡樹脂材を Kelvin セルでモデル化した。2.3 に示した設計プロセスにおいて、微視構造のパラメータスタディを遺伝的アルゴリズムによって行い、吸音率を最大化する微視構造パラメーターを求めた。吸音材の厚さは 20mm で、目的関数は低減したい 1kHz～5kHz における垂直入射吸音率の平均値とした。材料選定の段階で、耐熱性、成形性、コストなどの要件から、材料をウレタンに絞り込み、セルサイズ w_f のみを設計変数としてその最適なサイズを求めることとした。材料の特性値を Table 1 に示す。

スタディ数を $N=600$ として、遺伝的アルゴリズムを用いて垂直入射吸音率の予測計算を実施した結果、目的関数を最大化する解として $w_f=200\mu\text{m}$ が得られた。このときの吸音率算出結果を $w_f=280\mu\text{m}$ 、 $360\mu\text{m}$ のときの結果と合わせて Fig. 9 に示す。

Table 1 Properties of Urethane Foam used in the Development of Sound Absorbing Materials

Porosity ϕ	Young's Modulus E_0 [MPa]	Density ρ [kg/m ³]	Loss Factor η
0.88	24	1,280	0.1

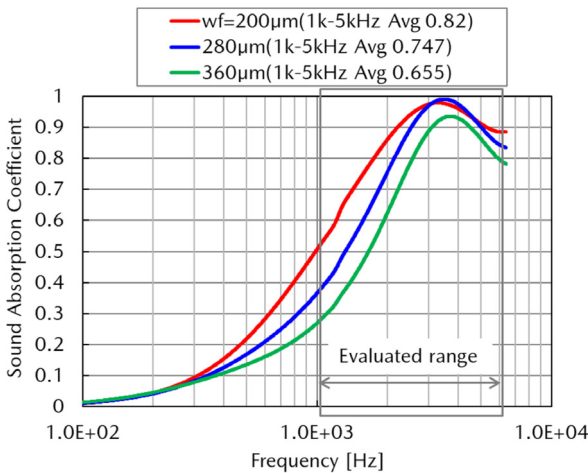


Fig. 9 Calculated Sound Absorption Coefficient of Material in Table 1 for Normal Incidence (Unit Cell Size $w_f=200\mu\text{m}$ Maximizes Performance)

この結果を踏まえ、現状の製品製造プロセスを使って、空隙サイズを変えた 2 種類 ($w_f=286\mu\text{m}$, $647\mu\text{m}$) の吸音材を製作した。それらの垂直入射吸音率の実測値を Fig. 10 に示す。ウレタンのセルサイズを目的関数が最大となる解析結果に近づけることで、ねらいの周波数帯域で高い吸音性能を得た。

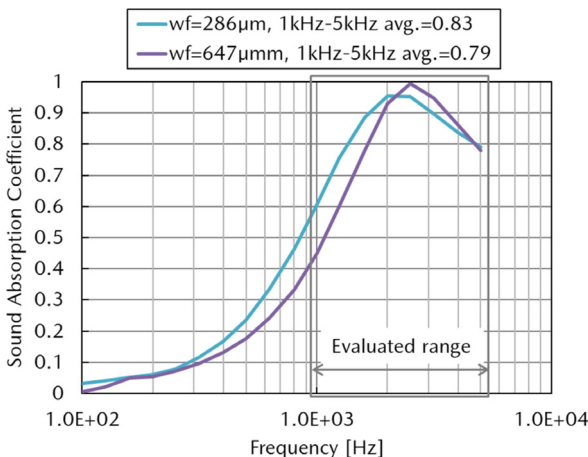


Fig. 10 Measured Sound Absorption Coefficient for Normal Incidence of Engine Cover made of Foamed Resin Material

最後に、最大の吸音性能を得る材料特性を導出するために、固体相に関する全ての特性値 w_f , ϕ , E_0 , ρ , η を設計変数とした場合の計算事例を示す。目的関数は先ほ

どと同様 1kHz ~ 5kHz における垂直入射吸音率の平均値とした。スタディ数 $N=600$ として、遺伝的アルゴリズムにより得られた目的関数を最大化する設計変数を Table 2 に示す。また、このときの垂直入射吸音率算出結果を Fig. 11 に示す。1kHz 以上の吸音率がほぼ 0.9 と、ねらいの周波数帯域において平坦で高い性能を示している。非常に小さなセルサイズ $84.7\mu\text{m}$ を実現することによって、高い吸音性能を達成できる可能性があることを示唆している。

Table 2 Material Properties that Maximize Sound Absorption Performance

Cell size w_f [μm]	Porosity ϕ	Young's Modulus E_0 [MPa]	Density ρ [kg/m ³]	Loss Factor η
84.7	0.989	152	1,069	0.395

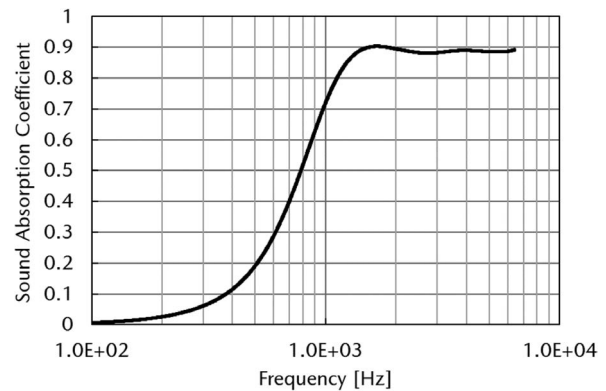


Fig. 11 Calculated Sound Absorption Coefficients for Normal Incidence using Properties in Table 2 (1kHz – 5kHz avg. 0.87)

4. まとめ

本稿では、材料 MBR の考え方に基づき開発した、所望の音響性能を得るために必要な多孔質吸音材微視構造を高精度かつ効率的に設計する技術の概要と、本技術を自動車の吸音部品開発に適用した事例について報告した。より高い性能の吸音材を開発するためには、多孔質材のセルサイズのばらつきを小さくし、ねらいのサイズにするための製造方法の開発が必要である。

一方、今後ますます厳しくなる燃費規制をクリアして環境負荷を大きく低減しつつ、お客様価値を向上させていくためには、コスト・重量効率を飛躍的に向上させていかななくてはならない。このためには部品の高機能化に加え多機能化が必須である。材料 MBR のアプローチを断熱性能など他性能に対する材料設計にも適用して、多機能統合材料実現のための複数機能同時制御設計技術の構築を進めていく。

参考文献

- (1) 伊藤 ほか：新型 MAZDA3 の静粛性開発について，[マツダ技報](#)，No.36, pp.96-101 (2019)
- (2) 永本 ほか：新型 CX-5 の静粛性開発について，[マツダ技報](#)，No.34, pp.20-24 (2017)
- (3) 清水 ほか：新型 CX-9 の静粛性開発について，[マツダ技報](#)，No.33, pp.33-38 (2016)
- (4) 坂手：自動車の革新を支える材料技術への期待と課題～材料モデルベースリサーチによる挑戦～，自動車技術会春季大会フォーラムテキスト，pp.31-38 (2019)
- (5) 寺田 ほか：均質化法入門，丸善 (2003)
- (6) T. Yamamoto, et al.: A generalized macroscopic model for sound-absorbing poroelastic media using a homogenization method, *Comput. Methods in Appl. Mech. Eng.*, Vol.200, pp.251-264 (2011)
- (7) M.A. Biot: Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid., *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol.28, pp.168-191 (1956)
- (8) 山本 ほか：均質化法による吸音材微視構造の最適設計法，No.72-18，自動車技術会春季大会講演予稿集 (2018)
- (9) 山川 ほか：均質化法による発泡樹脂吸音材の材料内部構造モデル化技術の開発，No.152-19，自動車技術会秋季大会講演予稿集 (2019)
- (10) J.F. Allard, et al.: *Propagation of Sound in Porous Media*, Wiley (2009)
- (11) JIS A 1405-2：音響管による吸音率及びインピーダンスの測定一第 2 部：伝達関数法，日本産業規格 (2007)
- (12) M.M. Tomadakis, et al.: Viscous Permeability of Random Fiber Structures: Comparison of Electrical and Diffusional Estimates with Experimental and Analytical Results, *J. Compos. Mater.*, Vol.39(2), pp.163-188 (2005)
- (13) C. Boutin, et al.: Estimates and bounds of dynamic permeability of granular media, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol.124, pp.3576-3593 (2009)
- (14) 見坐地 ほか：繊維体吸音材の Biot パラメーターの推定，自動車技術会論文集，49 巻，pp.787-792 (2018)
- (15) 山本 ほか：均質化法による多孔質吸音材の等価特性の導出，日本機械学会論文集 C 編，77 巻，pp.75-78 (2011)
- (16) 幸徳 ほか：SKYACTIV-X 用熱マネージメント技術，[マツダ技報](#)，No.36, pp.32-37 (2019)
- (17) 神田 ほか：SKYACTIV-X NVH 技術，[マツダ技報](#)，No.36, pp.38-43 (2019)

■著者■



山川 啓介



桂 大詞



山本 崇史

論文・解説

14

アルミニウム／樹脂異種材料点接合の強度特性に及ぼす 表面処理の影響

Effect of Surface Treatment on Strength Properties of Aluminum/CFRTP Spot Joining

田中 耕二郎^{*1} 小川 裕樹^{*2}
Kojiro Tanaka Yuki Ogawa

要約

自動車車体のマルチマテリアル化を実現するため、摩擦攪拌点接合を応用してアルミニウムと樹脂を接合する研究を進めている。本報では強度特性に及ぼすアルミニウム表面処理の影響をせん断引張試験、疲労試験、恒温恒湿試験、冷熱衝撃試験を行い調査した。化学結合力向上及びアンカー効果付与を主目的としたアルミニウム表面処理2種について比較評価を実施した結果、2種ともに無処理材と比較して強度特性や信頼性は向上し、バラツキも低減する傾向を示した。樹脂母材由来の接着性は材料によりさまざまであるが、本接合技術を使用する場合はアルミニウム表面処理と組み合わせて使用することでロバスト性の向上が可能である。

Summary

In order to realize multi-material body, we are conducting researches on joining of aluminum and carbon fiber reinforced thermoplastic resin by using friction stir spot welding. In this report, the effects of aluminum surface treatment on strength properties were investigated by conducting shear tensile strength tests, fatigue tests, constant temperature and humidity tests, and thermal shock tests. As a result of comparative evaluation of two types of aluminum surface treatment for the purpose of improving chemical bond strength and giving anchor effect, both types showed a tendency to improve strength properties and reliability, and reduce variation, compared to the non-treatment material. Although the adhesiveness derived from the resin matrix components varies depending on the material, it is possible to improve robustness by using it in combination with aluminum surface treatment when using this joining process.

Key words : Materials, Aluminum alloy, Polymer material, Joining, Weight reduction

1. はじめに

1.1 背景

世界各国の厳しいCO₂排出量規制や電動化への対応を目的に、自動車車体の軽量化の要求は年々高まっている。軽量化を実現するための手段の一つに車体のマルチマテリアル化がある。鋼板車体をベースにアルミニウム、樹脂材料など異なる材料をそれぞれの特性を活かしながら適材適所に使用することで、車体に求められる性能の確保やコストとの両立を図りながら軽量化することが可能となる。車体をマルチマテリアル化する際の課題として、熱ひずみの抑制やガルバニック腐食防止などに加えて重要となるのが異種材料接合技術の確立である。自動車への量産適用を考慮した接合技術の開発において、可能な

限りリベットなどの副資材を使用しないことやロボットによる自動化が可能であることなど、製造コストや生産性を含めて検討する必要がある。

1.2 摩擦攪拌点接合の金属／樹脂接合への応用

異種材料の組合せの中で、今後自動車への採用増加が見込まれるアルミニウムと熱可塑性繊維強化樹脂の接合では、手法の一つとして摩擦熱を利用した研究が進められている⁽¹⁾⁻⁽³⁾。マツダではこれまでアルミニウム同士やアルミニウム／鋼板の組合せにおいて、プローブ付きの回転ツールを使用した摩擦攪拌点接合技術（Friction Stir Spot Welding, FSSW）を実用化してきた（Fig. 1）。この技術を応用し、回転ツールをアルミニウム側に押し当て重ね合わせた相手側の樹脂を溶融させる溶着法がアルミニウム／樹

*1 技術研究所
Technical Research Center

*2 広島大学
Hiroshima University

脂の摩擦熱による点接合技術である。樹脂中に含まれる官能基とアルミニウム表面の酸素リッチ層との化学結合など、いくつかのメカニズムにより接合されると推測されており、直接接合することにより副資材が不要になることや製造ラインに適用しやすいメリットがある (Fig. 2)。

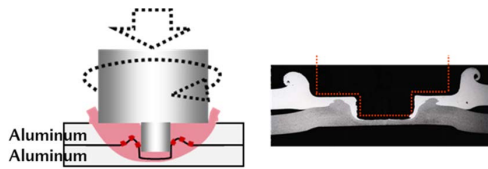


Fig. 1 Aluminum/Aluminum Joining by FSSW

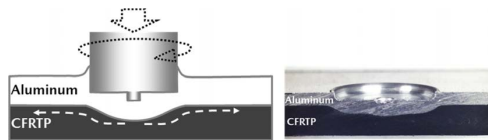


Fig. 2 Aluminum/CFRTP Joining by FSSW

アルミニウムと樹脂の間の接合強度は、各素材の成分や表面状態、また、周囲の環境を含めた接合の条件によって決まり、それらを適正に制御することで実用強度を得ることができる。また、素材へのさまざまな表面処理と組み合わせることで強度特性を向上させることが可能である。

本報では、接合部の強度特性や耐久信頼性の向上を目的とし、アルミニウム側に施す表面処理の効果を調査するとともに適用の可能性を検討した。

2. 実験方法

2.1 評価材料

アルミニウム (以下アルミ) には板厚 1.2mm の A5052-H34 材を使用した。酸洗材を基準材とし、表面処理はアルミの接着性改善を目的に開発されたポリオレフィン系有機被膜処理と樹枝状陽極酸化処理の 2 種類について比較評価を実施した。樹脂材料にはポリプロピレン (PP) に 40wt% の不連続炭素繊維を混合し、板厚 3.0mm に射出成形した材料を使用した。本材料を以下、CF-PP と表記する。PP 自体は官能基を持たずアルミと直接的な接着性を有さない。それに対し、今回使用した CF-PP は繊維の混合工程を含む材料製造時にアルミ表面と反応する官能基を含む成分が添加され、マトリックスとして溶着時の接着性が改善されたものとなっている。アルミと CF-PP の仕様詳細を Table 1 に示す。

Table 1 Material Properties

Material	TS(MPa)	EL(%)	E(GPa)	Remarks
A5052-H34(1.2t)	250	9	70	<ul style="list-style-type: none"> •Non treatment •Organic coating •Anodization treatment
CF-PP(3.0t) CF:40wt% φ7μm L2~3mm	100	0.6	17	Melting point:166℃ Decomposition temperature:280℃

今回評価したアルミ表面処理 2 種について、強度向上メカニズムの概要を次に示す。

(1) 有機被膜処理 (Organic Coating)

今回使用した CF-PP には官能基が含まれており、化学結合を主としたアルミ表面との接着力をもつ。この化学結合による接着力の向上を目的とするのが有機被膜処理である。本報では膜厚 2μm 相当のポリオレフィン系有機被膜処理材を評価した。接合界面に配置された有機被膜はツール/アルミ間の摩擦熱により熔融し、同様に熔融した CF-PP 表面と相溶する形で異種材料間は接合される (Fig. 3)。構造上はアルミ/CF-PP 間に接合強度を高める接着剤を介する形で接合されており、使用する場合は有機被膜種を樹脂母材種に合わせて選択することが重要となる。有機被膜と樹脂材料が適正に相溶しなければ有機被膜/樹脂間の十分な接合強度が得られず、結果、この表面処理により反対に接合強度を低下させる場合もある。

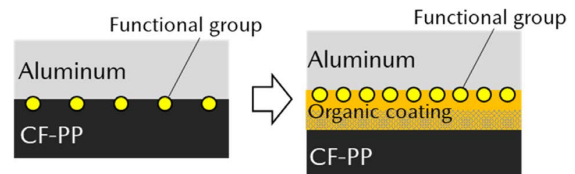


Fig. 3 Organic Coating

(2) 樹枝状陽極酸化 (Anodization Treatment)

陽極酸化は孔径約 30nm の微細な空孔をもつ処理層をアルミ表面に形成し、その層内に熔融樹脂が侵入することで主としてアンカー効果により強度を向上させる手法である。また、表面積が増えることで元々の接着性を高める効果も得られる。陽極酸化アルミの表面及び接合断面の写真と断面模式図を Fig. 4 に示す。

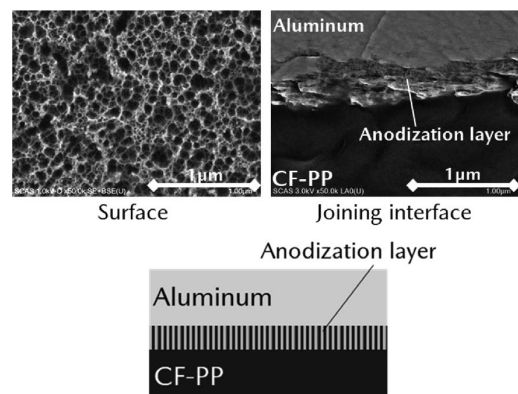


Fig. 4 Anodization Treatment

2.2 接合条件・試験片形状

接合にはツールの挿入方向の位置を制御可能な位置制御式摩擦攪拌点接合装置を使用し、径 2.0mm 高さ 0.35mm の先端プローブをもつホルダー径 10mm の回転ツールにより継手を作製した。今回設定した接合条件

のツール回転数、挿入速度及び挿入量について Table 2 にまとめる。

試験片形状はせん断強度及び耐久信頼性評価用は 30mm×100mm で重ね代長手 30mm、疲労試験用は 50mm×105mm で重ね代長手 40mm とし、それぞれ重ね部中央を Table2 の条件で接合した。

Parameter	Condition
Tool diameter	10mm
Rotation speed	3000rpm
Insertion speed	6.0mm/min
Insertion depth	1.0mm

2.3 評価方法

表面処理の効果を調査するために今回実施した試験方法の詳細を以下に示す。

(1) せん断強度試験

せん断引張時の試験速度は 10mm/min とし、専用の引張治具を使用し試験を実施した。この治具は負荷を純せん断で加えると同時に、接合界面近傍以外での樹脂母材破断を防止するためのものである。

(2) 疲労試験

荷重比 0.05 の部分片振り条件にてせん断引張疲労試験を実施した。試験回数は 10⁷ 回を上限とし、破断に至るまでの荷重別試験繰り返し数を調査した。また、併せて疲労試験前後の接合界面の状態についても断面及び破面観察を実施し、表面処理の影響を調査した。

(3) 耐久信頼性試験

自動車の使用環境を想定し、一定の高温高湿条件で保持する恒温恒湿試験、及び低温⇄高温の環境を繰り返し与える冷熱衝撃試験の 2 種類の耐久信頼性試験を実施した。試験片は室温放置で安定化させた後、せん断強度試験による比較を行った。2 種類の耐久信頼性試験の試験条件を Table 3 に示す。

Table 3 Endurance and Reliability Test Condition

Test	Condition
High temperature /High humidity	85°C/85%RH(672h)
Thermal shock	-40°C-0.5h 100°C-0.5h (500cyc)

3. 実験結果及び考察

3.1 せん断強度試験結果

アルミ表面処理材 2 種を含む計 3 種のアルミを使用した場合のせん断強度の比較を Fig. 5 に示す (n=3)。表面

処理がない場合と比較して、どちらの表面処理においても 1.5kN 以上強度が向上した。

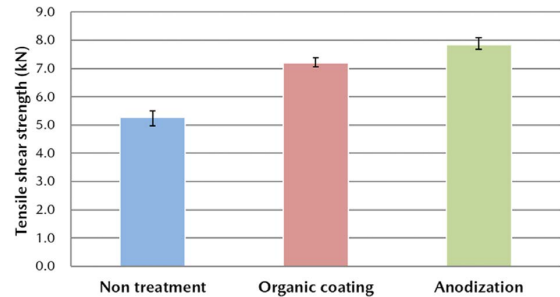


Fig. 5 Tensile Shear Strength

3.2 疲労試験結果

せん断引張疲労試験結果を Fig. 6 に示す。疲労限が約 2kN の基準材に対し、表面処理したアルミを使用すると静的強度と同様に疲労特性は向上し、破断回数のバラツキも低減する傾向を示した。また、その効果は陽極酸化処理の方が若干高い。

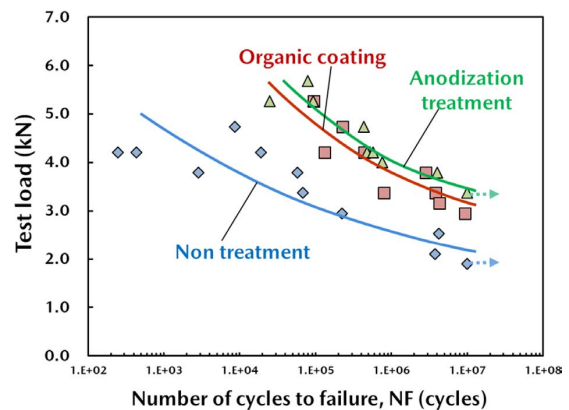


Fig. 6 Fatigue Property Curve (Test Load)

各仕様の疲労試験後の破断面写真と樹脂溶融範囲におけるアルミ側への樹脂附着面積率を Fig. 7 にまとめる。アルミ／樹脂接合の場合、接合中に溶融した樹脂が広がった範囲が接合領域となる。金属同士の接合で通常使用される抵抗スポット溶接など、他の一般的な点接合方法よりも接合径が大きくなるため、せん断強度に有利となる。

各仕様で接合条件及びそれによって決まる入熱量は一定のため溶融した樹脂の広がった範囲は同等であるが、その範囲内の接合状態は仕様ごとに異なっている。CF-PP の板厚内で破断し樹脂がアルミ側へ付着している領域の面積率を画像解析により算出すると、陽極酸化材が 60～65% と最も高く、その強度特性の向上効果を裏付ける結果となった。

続いて、疲労試験中における破壊起点からの亀裂進展の状態を調査するため、破断後のアルミ側破面における

起点付近の樹脂付着状態を観察した (Fig. 8)。破壊の起点は破断に至るまでの途中の試験回数で試験を停止したサンプルの断面を調査し推定したものである。この結果から、表面処理を施すことで亀裂は樹脂内部方向へ進展し、樹脂付着高さが増加していることが分かる。界面強度の向上により亀裂起点の近傍で樹脂の凝集破壊に変化していると考えられ、樹脂の付着高さは陽極酸化処理が最も高くなっていた。

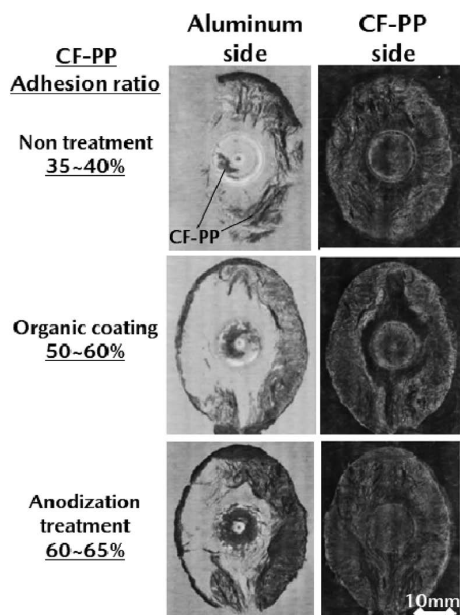


Fig. 7 CF-PP Adhesion Ratio on Aluminum

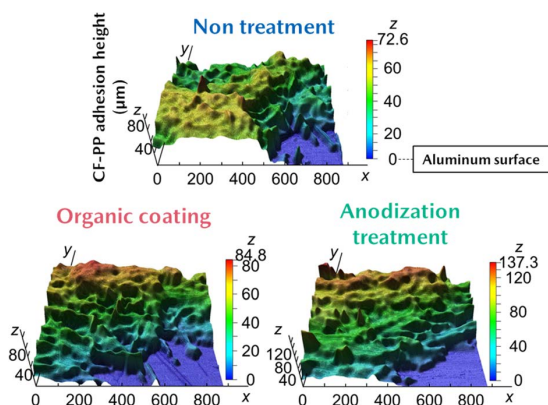


Fig. 8 State of Crack Growth near the Origin

陽極酸化処理したアルミと CF-PP の接合界面近傍について、EDX (エネルギー分散型 X 線分析) による成分ライン分析を行った結果を Fig. 9 に示す。CF-PP の主成分 C がアルミ表面の酸化層内に存在しており、樹脂が浸透していることが分かる。今回使用した CF-PP のような材料の場合、強度向上効果には主となるアンカー効果に加えて、接触面積拡大による樹脂母材成分に起因する接着力の向上も寄与していると考えられる。

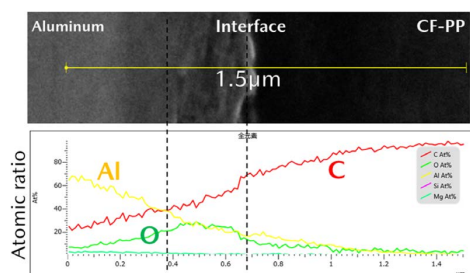


Fig. 9 EDX Line Analysis

3.3 耐久信頼性試験結果

恒温恒湿試験及び冷熱衝撃試験後に調査したせん断強度の比較結果を Fig. 10 にまとめる。本評価では樹脂母材破断を防止する治具を使用していない。そのため、接合界面でなく樹脂母材で破断した継手は破断強度のデータに上矢印のマーキングを付けている。

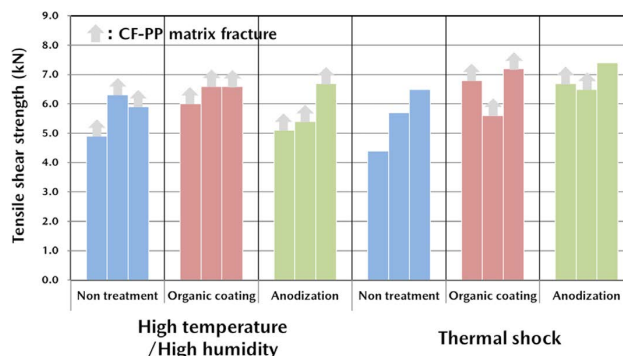


Fig. 10 Endurance and Reliability Test

2 種の耐久信頼性試験の結果、基準材においても接合界面の極端な強度低下は生じなかった。多くが樹脂母材破断となっており、アルミ表面処理材を使用することで更に界面破断する継手は減少する傾向にある。樹脂種と表面処理の適切な選択により高い耐久性能を得られることが確認できたとともに、樹脂の母材破断強度のバラツキが大きいことから、今回評価したような環境下では樹脂材料の劣化による物性低下に注意する必要があると言える。

4. まとめ

摩擦熱を利用したアルミ/樹脂異種材料点接合について、その強度特性におよぼすアルミ表面処理の影響をせん断引張試験、せん断引張疲労試験、恒温恒湿試験、冷熱衝撃試験を行い調査した。

ポリオレフィン系有機被膜処理及び樹枝状陽極酸化処理の 2 種類について比較評価を実施した結果、ともに基準となる酸洗材に対して強度特性や耐久信頼性は向上し、バラツキも低減する傾向を示した。また、その効果は陽極酸化処理の方が若干高い結果となった。樹脂母材自体

に官能基を含み、特別な表面処理なしで要求されるせん断強度特性が得られる板組みの場合でも、ロバスト性向上や今回評価していない剥離強度等も考慮し、アルミ表面処理と組み合わせて使用することがより好ましいと考えられる。

本報で評価したものを含めた種々の表面処理材を自動車へ適用することを想定した場合、材料との相性に加えて、接合の工程まで効果を保持する安定性やコスト、処理施工性も考慮すべき要件となる。生産性やコストの要件を満たすことを前提としながら、使用する材料と適用する部位の要求特性に合わせて適切な表面処理種を選択することが、本接合手法のような金属と樹脂の直接接合では重要となる。

本研究に使用した2種の表面処理材を含むアルミニウム評価材の提供にご協力いただいた(株)UACJ様に謝意を表す。

本成果は国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託業務「革新的新構造材料等研究開発」の取り組みで得られた。

参考文献

- (1) 西口勝也, 田中耕二郎, 森田泰博, 杉本幸弘: アルミニウム/CF-PPの摩擦攪拌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, pp.213-214 (2017)
- (2) 永塚公彬, 斧田俊樹, 岡田俊哉, 中田一博: 摩擦重ね接合によるMg添加量の異なる種々のアルミニウム合金/樹脂の直接異材接合, 溶接学会論文集, 32巻, pp.235-241 (2014)
- (3) 岡田俊哉, 内田壮兵, 中田一博: 摩擦重ね接合によるアルミニウム合金と樹脂材料の直接接合特性に及ぼすアルマイト被膜処理の影響, 軽金属溶接, 53巻, pp.298-306 (2015)

論文・解説

15

モデルベース開発によるエンジン吸気温低減の取組み Intake Air Cooling with Model-Based Development

鈴野 浩大^{*1} 外菌 徹^{*2} 檜原 和晃^{*3}
Kohta Suzuno Tohru Hokazono Kazuaki Narahara
丸本 真玄^{*4} 前川 耕太^{*5}
Masaharu Marumoto Kota Maekawa

要約

エンジンの高圧縮比化では、高負荷運転時における異常燃焼の抑制が課題であり、吸気温の低減は課題解決に有効な要素の一つである。この実現に向け、従来から取り組んできたモデルベース開発に加え、最少の計算回数で効率的に解を得る解析技術を組み合わせ開発に取り組んでいる。まず、エンジン吸気系のモデルに対して逆解析の一手法であるアジョイント法による感度解析を行い、吸気温の低減に対して効果的な冷却部位をバックカスティングで見出した。次に、得られた知見を基に吸気温の低減効果を CAE・実験により検証し、エンジンルームへの効率的な導風要件及び吸気ポート断熱構造要件を導いた。一連の検討から、本研究で開発中の技術にはねらいどおり、吸気温の低減を実現できるポテンシャルがあることを確認した。

Summary

This paper presents the development of intake air cooling with model-based development. Since the temperature of the intake air affects the efficiency of internal combustion engine, the technology of intake air cooling could be a key factor for the realization of fuel-efficient cars and the greenhouse gas reduction. In this study, we develop novel technologies to lower the temperature of the intake air based on numerical simulations and the sensitivity analysis via the adjoint method. The effectiveness of these methods is validated through the measurement of the temperature of the intake air system in a test vehicle.

Key words : heat・fluid, intake and exhaust system, CFD, Adjoint method

1. はじめに

マツダは 2030 年を見据えた技術開発の長期ビジョン「サステナブル “Zoom-Zoom” 宣言 2030」を 2017 年に公表し、地球・社会・人の調和の実現を目指した技術開発を進めている。その中で特に地球環境問題の解決に関しては、温室効果ガスの大幅削減を目指し、小型軽量化な電動化技術と高効率内燃機関を実現するための技術開発に取り組んでいる⁽¹⁾。

内燃機関の熱効率向上に向けては、水添加⁽²⁾ や筒内壁温予測技術⁽³⁾ などさまざまな研究が進められており、それらと相補的な技術の 1 つに吸気温の低減技術がある。本論文ではその取り組みの概要について説明する。

2. 吸気温低減技術の重要性

本研究の目的は、内燃機関の熱効率向上に向けた吸気

温の低減技術を確立することである。ここで吸気温とは、エンジン筒内に流入する空気の温度を指す。吸気温の低減によって、内燃機関が従来から抱えてきた問題の一つである高負荷運転時における異常燃焼を改善することができ、その結果、高圧縮比化による熱効率向上、エンジントルク向上、NVH 性能向上といった性能向上が可能となる。このように、吸気温の低減は優れた燃費や加速性能、静粛性をクルマにもたらす重要な要素技術である。これを実現するために、従来から取り組んできたモデルベース開発（以下 MBD）⁽⁴⁾ に加えて逆解析を用い、効率的に解を導き出すプロセス革新を行いながら、吸気温低減技術の開発に取り組んでいる⁽⁵⁾。

3. 吸気温低減のための感度解析

3.1 吸気系の全体像と検討プロセス

ここでは、吸気系の昇温過程を踏まえた上で、MBD に

*1~5 技術研究所
Technical Research Center

よって吸気温の低減を効率的に検討するプロセスを説明する。

吸気温の低減を実現するには、吸気系に冷却または断熱機能を付加する必要がある。しかし、吸気系は経路が長くエンジンルーム内にはさまざまな熱源があることから、吸気の昇温過程は複雑である。Fig. 1 は本研究が対象としている自然吸気ガソリンエンジン用吸気系の全体像、Fig. 2 は吸気の流れと主要な伝熱経路を表したものである。車両前面からダクトによって吸入された空気は、吸気系を構成する各デバイスを通じたのち、吸気ポートを経てエンジン筒内へと至る。その過程で空気は吸気系周囲に存在するエンジンを始めとした各熱源からさまざまな伝熱経路を経て受熱し、数十度以上昇温する。

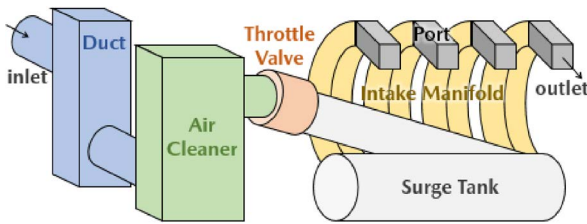


Fig. 1 Overview of Intake System

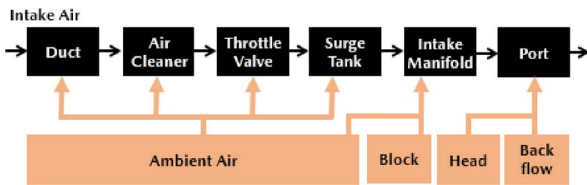


Fig. 2 Major Heat Path in Intake System

吸気温低減技術の開発においては、このような複雑な昇温過程をもつシステムに対して、効果的な冷却・断熱の方式や部位を見出す必要がある。しかし、上記の検討を実験的な試行錯誤によって行うことは開発効率の面で問題がある。そこで、この検討を効率化し開発スピードを向上させるために逆解析の一手法であるアジョイント法を活用し、吸気温の低減に対して効果的な冷却部位を見出し、その冷却効果を机上で定量的に見積もった。

この問題に対する MBD の活用には 2 つのアプローチが存在する。一つはパラメータスタディによる感度解析、もう一つはアジョイント法による感度解析⁽⁶⁻¹²⁾ である。前者は、吸気系の物理学的挙動を模擬する数値流体力学 (CFD) モデルを用い、冷却部位が異なるさまざまなケースについて吸気温を予測するシミュレーションを行う。それらの比較検討から、冷却部位の変更が吸気温にどのような変化をもたらすかを検討し、効果の高い冷却部位を見出すことが可能である。この方法は汎用性が高くさまざまなタイプのモデルに対して適用可能だが、その反面、規模の大きいモデルを用いた多数のシミュレーションを実行する必要があるため、検討に時間を要

するという側面がある。これに対して後者のアジョイント法による感度解析は、吸気系の CFD モデルそのものではなく、それを基にして数学的に生成されるアジョイントモデルの解析を通じて冷却部位と吸気温の関係を見出すものである。この方法は適用範囲に制限があるものの、アジョイントモデルを 1 回解析するだけで冷却部位と吸気温の関係すなわち冷却の感度が求まるため、計算回数を圧倒的に抑えることが可能である。解析に先立ち吸気系のモデル化手法を検討した結果、吸気系はアジョイント法の適用条件を満たす形でモデル化可能であることが分かったため、本研究では後者のアジョイント法による感度解析を用いた。

3.2 解析手法

アジョイント法による感度解析の概略を Fig. 3 に示す。入力 x に対して出力 y を与えるモデル f が与えられており、出力 y の良し悪しは評価指標 J によって定量的に評価されるとする。またアジョイント法を用い、モデル f を基にアジョイントモデル g をあらかじめ生成しておく。以上の基で、まず入力 x を用いてモデル f を解き、その結果出力 y を得る。次に、出力 y の良し悪しを評価指標 J によって定量化する。その上で、今度は評価指標 J をアジョイントモデル g に入力し、 g を解く。その結果から、感度 $\Delta J / \Delta x$ が得られる。ここでいう感度 $\Delta J / \Delta x$ とは、入力 x を Δx だけ微小変化させた時に評価指標 J がどの程度変化 ΔJ を示すかを表すものである。より正確かつ一般的な説明及び吸気系への適用については文献⁽⁵⁾ に詳細が与えられている。

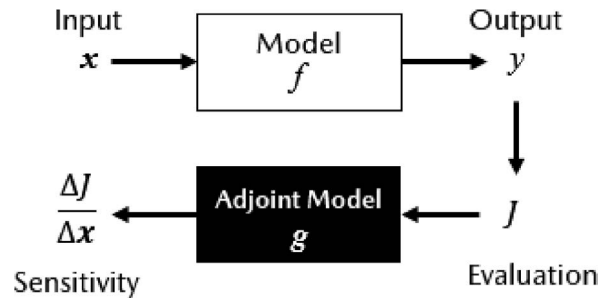


Fig. 3 Process of Sensitivity Analysis via Adjoint Method

以上を吸気系に適用した場合、入力 x は吸気の流入温度や吸気系の壁温分布、モデル f は吸気系の CFD モデル、出力 y は吸気温、評価指標 J は吸気温とその設計目標との差であり、感度 $\Delta J / \Delta x$ は吸気系の任意の場所の管壁面温度に変化 Δx を加えた際に吸気温がどの程度の変化 ΔJ を示すかを表す量である。感度が大きい部位ほど冷却効果の高い部位を示す。より一般化した表現をすると、評価指標 J は吸気系のあるべき姿と現状の設計案のギャップ、感度 $\Delta J / \Delta x$ はあるべき姿に近づくための施策を示唆

する量である。この解析手法は空力設計における車体形状最適化などの用途で広く研究されてきたが⁽¹³⁾、近年は上記の立場からこの手法を逆解析と称する場合もあり^(8,11)、出力から入力を求める逆問題^(7,14-16)の観点からも研究が進んでいる。

以下、本手法による吸気系の感度解析結果を示す⁽⁵⁾。なお、本検討で用いている解析条件は以下のとおりである。モデル形状は Fig. 4 に示す、自然吸気 2.0L ガソリンエンジン搭載車における吸気系形状とし、モデル f は吸気系内部の空気と熱の流れを記述するナビエ・ストークス方程式及びエネルギー保存則とする。走行シーンは外気温 25°C 下での車速 40km/h 中負荷定常走行とする。モデルの入力 x として、試験車両を用いて当該環境下にて計測した吸気系の管壁面の温度を与える。また評価指標 J は、第 4 気筒の吸気ポートにおける吸気温 T_{port} と設計目標値 T_{tgt} の二乗偏差 $|T_{port} - T_{tgt}|^2$ を用い、なおここで設計目標値 T_{tgt} は外気温と同一とする。アジョイントモデル g の生成及び解析は FlowDesigner2019 にて実行する。

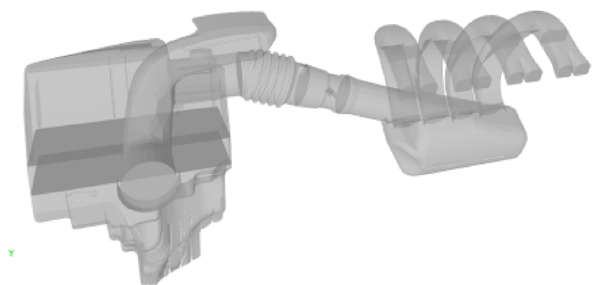


Fig. 4 Geometry of Intake System

3.3 解析結果

Fig. 5 は得られた感度を 3 次元モデル上にマッピングしたものである。ここでの感度は、吸気系の壁面温度を微小減少させた際に、第 4 気筒の吸気温がどの程度低減するかを表すものである。図は青いほど感度が大きいことを意味する。最も冷却感度が高い部位はサージタンクの車両中央寄り壁面、次いでインテークマニフォールド末端から吸気ポートにかけての管壁面となっている。

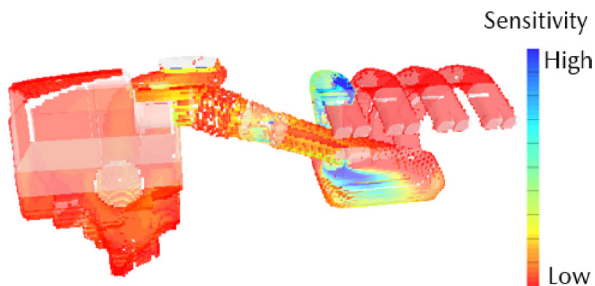


Fig. 5 Result of Sensitivity Analysis

次に、広範囲にわたって感度が高いサージタンクにつ

いて更に詳しく検討するため、サージタンク壁面上のいくつかの代表的な点における感度を定量的に評価する。その結果が Fig. 6 である。この図から、サージタンク壁面温度の感度は各部位ごとで大きな差があり、特定部位の冷却によって吸気温を効果的に低減できる可能性があることを示唆している。

ここで、得られた感度分布の妥当性を別の観点から考察する。Fig. 7 は吸気が壁面から授受する熱量を CFD モデルにより推定したものである。吸気が最も受熱するのはサージタンクであり、これは Fig. 5 の感度解析結果においてサージタンクが広範囲にわたって大きな感度を示していることと符合している。これらの結果はともにサージタンク内での昇温が吸気温に大きく影響していることを示唆するものであり、感度解析結果と熱収支に基づく分析結果は矛盾するものではないことがわかる。なおサージタンク壁面が高感度となる理由については、速度及び温度分布の観点からの考察が文献⁽⁵⁾に与えられている。

以上から、今回の解析条件の基で吸気温の低減に効果的な冷却部位はサージタンク、次いで吸気ポートだとわかった。

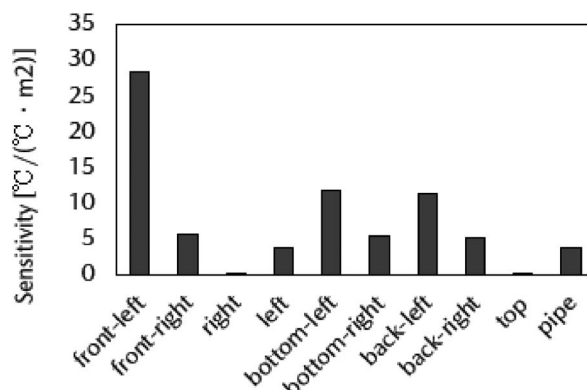


Fig. 6 Sensitivity Distribution on Wall of Surge Tank

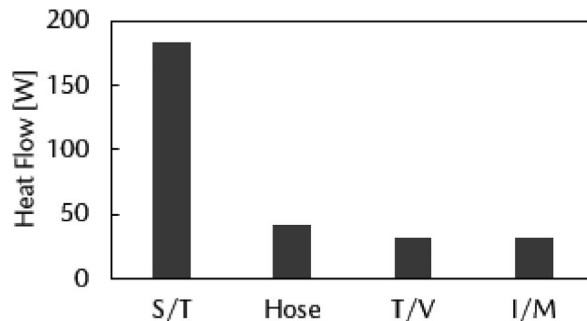


Fig. 7 Heatflow into Surge Tank, Hose, Throttle Valve and Intake Manifold

4. 冷却・断熱技術の開発

吸気温の低減を車両搭載状態において実現するための

具体的な手段について説明する。吸気温の低減を実現するには、感度解析から見出した高感度部位であるサージタンクや吸気ポート付近を冷却・断熱すればよい。ただし、冷却機器の付加はコスト、重量増加につながるため、最小限のシステム構成で効果が得られるものが望ましい。ここではその具体的手段として、外気を利用したサージタンク冷却、及び吸気ポート断熱の二つを検討した。

4.1 外気を効率的に用いるサージタンク冷却技術

前述の解析からサージタンクの壁温低減の重要性が示唆されたため、その実現手段を考える。サージタンク壁面の冷却には、エンジンルーム内に外気を導入することが効果的であるが、空力性能の悪化などの問題が生じる。そのため、最小限の導入風量で最大限の冷却効果を発揮する構造の具体化と検証を先行的に進めている。Fig. 8は、少量の外気導入によるサージタンク冷却の概念図である。エンジンルーム内にはシンプルな形状の導風構造を新たに設けており、これを用いて外気をサージタンク近傍に直接輸送し、サージタンクを局所的に冷却することをねらいとしている。前述の感度解析結果を踏まえ、本構造により導入された外気はサージタンク半面の冷却感度の高い部位を集中的に冷却するよう設置している。また、本技術では導入された外気の流量が車載ラジエータ通過風量比で5%程度となるように設定し、レイアウト面及び空力面での問題が極力生じないように配慮している。

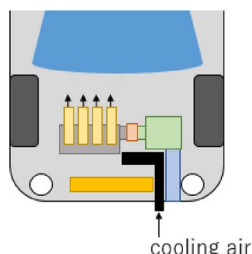


Fig. 8 Overview of Cooling

次に、吸気温の低減に対する効果を実験的に示す。上記の技術を実装した試験車両を用い、吸気温の計測を行った。ここで計測条件は前節の解析条件と同じく外気温 25°C下での車速 40km/h 定常走行としている。またエンジン負荷については、平地走行相当の低負荷、登坂相当の中負荷の2ケースで行い、この時ラジエータファンは未稼働状態である。その結果を Fig. 9 に示す。計測部位はサージタンク出口、第4気筒のインテークマニフォールド長手方向中央部、及び吸気ポート内部とし、各部を通過する吸気温度を熱電対により計測した。結果から、微小風量による冷却によりサージタンクにおいて 10°C強の吸気温の低減が確認でき、サージタンクより下流においても吸気温の低減が見られた。以上より、吸

気温の低減に対してはサージタンクの感度が高いことが確認された。今後、更に各性能要件を具現化していく。

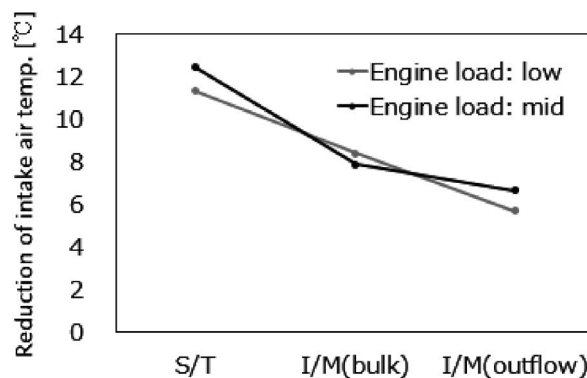


Fig. 9 Effect of Cooling

4.2 吸気ポート断熱技術

次に、吸気ポートの断熱による吸気温の低減効果について説明する。前述の感度解析の結果から、サージタンクに次いで、インテークマニフォールド出口から吸気ポートの壁温低減が吸気温の低減に大きく貢献していることが示唆されている。そこで、Fig. 10のように吸気ポートを断熱し、吸気を高温のポート壁から熱的に隔離することを考える。

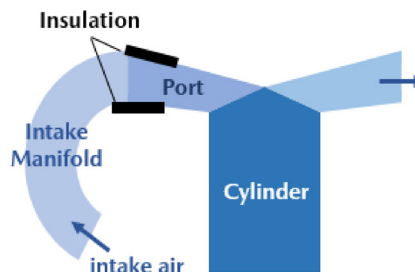


Fig. 10 Overview of Port Insulation

断熱材の主たる制御因子である厚さと熱伝導率について、それらの影響を1次元シミュレーションで試算した結果を Fig. 11 及び 12 に示す。なお解析の対象及び条件は、前節と同じく自然吸気 2.0L ガソリンエンジン搭載車における外気温 25°C下での車速 40km/h 定常走行、エンジン負荷は軽負荷及び中負荷相当の2種である。ここで用いた1次元モデルでは、吸気ポート形状は実機形状を模擬したものとし、吸気ポート内の流動、吸気ポート壁面と吸気との熱伝達、断熱材を含む吸気ポート壁内の熱伝導、吸気ポート壁面とエンジンクランクとの熱伝達をモデル化対象としている。断熱材厚みは吸気ポートに設置可能な3mm以下、熱伝導率は樹脂レベルから下限は空気相当の値までとした。ただし本検討では、断熱材のレイアウトによる充填効率等への影響は未考慮としている。なお Fig. 11 では断熱材の熱伝導率を 0.2W/(m・K)、Fig. 12 では厚みを 3mm としている。

結果をみると、断熱材の厚さを増すほど昇温は抑制されるが、低負荷・中負荷ともに、断熱材の厚さをその構造上の上限である 3mm とした場合でも見込まれる吸気温の低減効果は 2°C未滿にとどまる。さらなる昇温抑制のためには、断熱材の熱伝導率低減が効果的であり、空気相当に近づけることで、同条件で約 4°C吸気温を低減できる可能性がある。

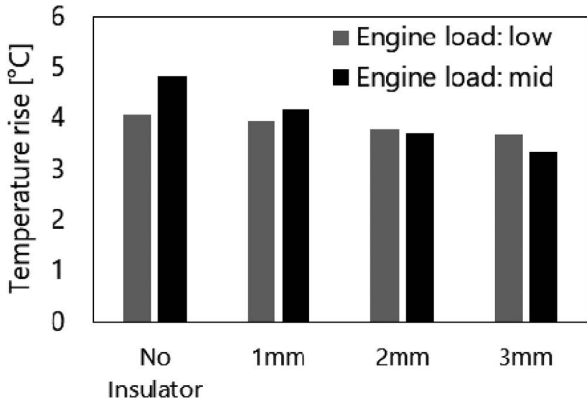


Fig. 11 Dependence of Temperature on Thickness of Insulator

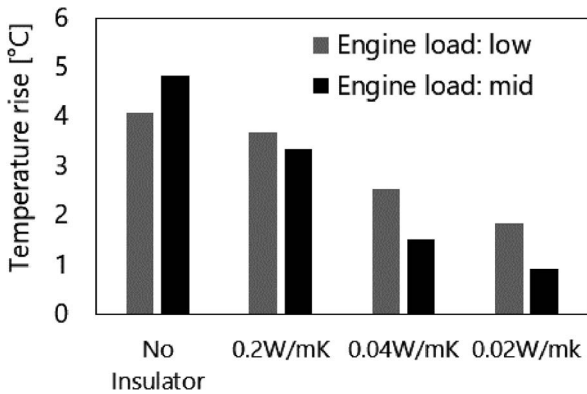


Fig. 12 Dependence of Temperature on Conductivity of Insulator

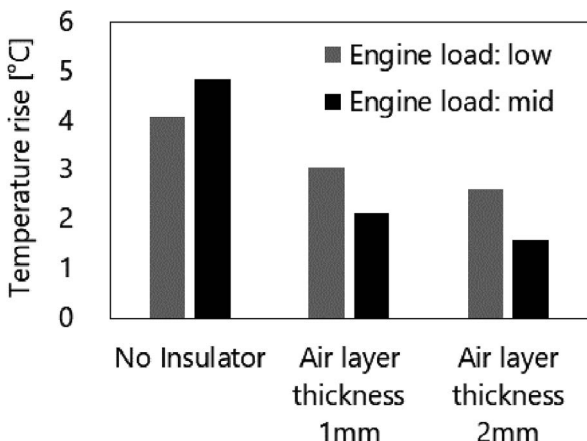


Fig. 13 Dependence of Temperature on Thickness of Air Layer Inside the Insulator

その実現手段の 1 つとして、断熱材を中空構造として内部に空気層を設けた場合のシミュレーション結果を Fig. 13 に示す。断熱材の厚さは 3mm、熱伝導率は 0.2W/(mK) とし、空気層部分の厚さの影響を試算したものである。Fig. 12, Fig. 13 の結果から、空気層厚さを 2mm とすることで、熱伝導率 0.04W/(mK) の断熱材相当の効果があることが分かった。

以上から、サージタンク冷却、吸気ポート断熱が吸気温の低減に有効であることが確認された。

5. おわりに

本論文では、内燃機関の熱効率向上に向けた吸気温の低減技術の開発について、概要を紹介した。まず、吸気系を対象として、吸気温に対する吸気管の壁面温度の影響、すなわち感度を計算し、低減に効果が高いと思われる冷却部位を可視化した。次いで、解析結果に基づき、冷却・断熱効果が高いと思われる部位に対して冷却・断熱技術を適用した場合の効果の評価した。その結果、今回の検討条件下では、エンジンルーム内への外気導入構造により 10°C強、吸気ポート断熱構造により 4°C以上の吸気温低減が可能であることが示唆された。今後、導風構造の洗練やエンジン冷却系など、関連技術との組み合わせにより吸気温の低減効果を高め、高効率内燃機関をサポートすべく、技術開発を加速させる。

参考文献

- (1) MAZDA: ANNUAL REPORT (2019)
- (2) 葛晰遥ほか：高温高圧雰囲気場における水添加が自着火・燃焼反応におよぼす影響, [マツダ技報, No.36, pp.265-271 \(2019\)](#)
- (3) 山本亮ほか：高熱効率燃焼の開発に適用する筒内壁温予測技術, [マツダ技報, No.35, pp.9-14 \(2018\)](#)
- (4) 藤川智士：マツダの目指すモデルベース開発, [マツダ技報, No.31, pp.44-47 \(2013\)](#)
- (5) 鈴野浩大ほか：逆解析によるエンジン吸入空気の冷却検討, 自動車技術会論文集 51 巻 4 号, pp. 707-712 (2020)
- (6) 桃瀬一成ほか：自然対流熱伝達問題に対する熱的境界条件の影響 (摂動随伴作用素表現に基づく数値解析), 日本機械学会論文集 B 編 63(614), pp.3347-3352 (1997)
- (7) 桃瀬一成ほか：対流熱伝達特性に対する熱および流れの境界摂動の影響 (随伴作用素表現に基づく数値解析), 日本機械学会論文集 B 編 66(646), pp.1473-1479 (2000)
- (8) 安部恒平ほか：随伴数値解析を利用した自然対流場の最適化, 日本機械学会論文集 B 編 70(691), pp.729-736 (2004)

- (9) 池島薫ほか：感度解析に基づく熱対流場設計支援システムの開発（システムの概要と応用例），平成18年空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集 pp.407-410（2006）
- (10) 桃瀬一成ほか：感度解析に基づく熱対流場設計支援システムの開発（変分法に基づく感度解析），平成18年空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集 pp.403-406（2006）
- (11) 中川修一ほか：ノンパラメトリック感度解析を用いた産業車両におけるエンジンルームの熱管理手法，日本機械学会論文集 B 編 79(805)，pp.1774-1783（2013）
- (12) 露木義ほか：気象研究ノート第 217 号「気象学におけるデータ同化」，日本気象学会（2008）
- (13) 下川真之介ほか：Adjoint 法を用いた空力形状最適化の検討，Toyota technical review 63，pp.60-66（2017）
- (14) 久保司郎：逆問題，計算力学と CAE シリーズ 10，培風館（1992）
- (15) 登坂宣好ほか：逆問題の数理と解法，東京大学出版会（1999）
- (16) 土木学会：土木工学における逆問題入門，丸善（2000）

論文・解説

16

分子論に基づくエンジン摺動面の境界潤滑解析技術

Atomistic Simulation for Boundary Lubrication
in Engine Tribology河口 健太郎*¹ 宮内 勇馬*²
Kentaro Kawaguchi Yuma Miyauchi

要約

エンジン摺動面の潤滑状態の中で、ピストンの上下死点やエンジンの始動停止時ではエンジンオイルによる油膜形成が困難であるため、部品表面の粗さ同士が固体接触する境界潤滑状態となる。境界潤滑は摩擦抵抗が大きく、摩耗の懸念があるため摺動面への材料コーティングによる対策が図られている。中でもダイヤモンドライクカーボン (DLC) は低摩擦かつ耐摩耗性をもつ材料としてエンジン摺動部への適用検討が進められている。一方、境界潤滑現象のモデルとして、エンジンシミュレーションに用いられる弾性流体潤滑 (EHL) 計算では、粗さを確率密度で表現した Greenwood-Tripp モデル等が用いられてきた。しかし、これらのモデルではコーティング材料の影響や表面粗さの形状変化に起因するなじみや凝着現象を十分に表現することができない。このため、材料や形状の影響を伴う境界潤滑モデルとして、分子動力学法 (MD) を適用する研究を実施し、DLC の原子構造が摩擦特性に及ぼす影響をモデルから明らかにした。また、メカニズムの妥当性検討のため摩擦実験と表面分析を実施し、解析結果との相関をもつことを確認した。

Summary

Boundary lubrication occurs at the start/stop of an engine and on the top/bottom dead centers of a piston. With the boundary lubrication, solid-solid contacts partially occur, which cause high friction resistance and wear. As a countermeasure, diamond-like-carbon (DLC) is an effective coating material with low friction and high wear resistance. For the Elasto-hydrodynamic lubrication calculations, Greenwood-Tripp (G-T) has been used as the model of the boundary lubrication phenomena, but the G-T model is not sufficient to reproduce the effect of coating materials and the microstructures of the contact interfaces. Therefore, the molecular dynamics method was used for modeling the effect of a molecular structure on the frictional properties in the boundary lubrication condition. The effect of the DLC molecular structure on the friction properties was clarified using a simulation model. To verify the friction mechanism, ring-on-disc friction tests and Raman spectroscopy analysis were performed.

Key words : Heat Engine, Lubrication/Tribology, Theory/Modeling, Molecular Dynamics Method

1. はじめに

温室効果ガスの抑制のために、自動車用内燃機関の熱効率向上すなわち CO₂ 排出量の低減が有効であり、燃焼制御による図示熱効率向上に加えて、摩擦損失低減による正味熱効率向上が必要である⁽¹⁾。摩擦損失低減においては、エンジンの全運転領域において摩擦低減が必要でありエンジンオイルの油膜が存在する流体潤滑の摩擦損失低減にはエンジンオイルの低粘度化が有効である。一方、自動車用内燃機関の摺動面は数十 MPa を超える面圧

が発生するため、潤滑流体の低粘度化により油膜形成能力が低下し、境界潤滑での運転割合が増加する可能性がある。境界潤滑では、摩擦損失増加とともに摩耗や焼付きなどの信頼性問題発生懸念がある。この境界潤滑の摩擦、摩耗特性を向上させるために、表面コーティングが有効であり、中でもダイヤモンドライクカーボン (DLC) は低摩擦、耐摩耗性をもつ材料として期待されている。DLC はダイヤモンドとグラファイトの中間構造である非晶質炭素膜であり、水素を含む水素化アモルファスカーボン (a-C:H) と水素を含まないアモルファス

*1,2 技術研究所
Technical Research Center

カーボン (a-C)、水素を含まず結晶構造の割合が大きいテトラヘドラルアモルファスカーボン (ta-C) が存在する⁽²⁾⁽³⁾。DLCの低摩擦や摩擦抑制のメカニズムとして、DLC表面のグラファイト化や相手材への移着⁽⁴⁾、DLC表面への水素基または水酸基終端⁽⁵⁾などが提言されている。しかし、境界潤滑の摺動面をその場観察することは難易度が高く、原子レベルの構造変化や化学反応を伴う現象解明が困難であるため、詳細な摩擦メカニズムは不明な点も存在する。また、先述したように内燃機関の摺動面は数十MPaを超える面圧が発生すると同時に、10m/sを超える摺動速度をもつため、この過酷な条件に耐える信頼性をもっていなければならない。本研究は、分子動力学法 (MD) を用いた DLC の摩擦解析とリング摩擦試験及び表面分析を実施し、原子レベルの構造変化や化学反応が摩擦特性に及ぼす影響を解明し、解明した特性から内燃機関の摺動面の摩擦低減及び信頼性確保に有効な構造を導くことを目的とする。

2. 計算解析及び実験条件

2.1 計算コード・計算条件

MD 計算には、サンディア国立研究所の LAMMPS⁽⁶⁾ を使用した。原子間ポテンシャルは化学反応を考慮するために電荷移動型のボンドオーダーポテンシャルである ReaxFF 力場⁽⁷⁾ を適用した。DLC のモデル化にはメルトクエンチ法を用いた。密度一定の状態では 8000K から 300K に冷却することで非晶質状態をモデル化する。Fig. 1 に摩擦解析に用いたモデルを示す。突起状の DLC モデル化し上下に配置する。接触をモデル化するため上下の突起は垂直方向に 5Å オフセットさせる。下突起の下部は固定し、上突起の上部を z-y 方向に固定して、x 方向に 50m/s で移動させ接触摩擦をモデル化した。温度は 300K、時間刻みは 0.1fs で計算を実施した。摩擦力は下突起の固定部にかかる -x 方向の力の合計から算出する。

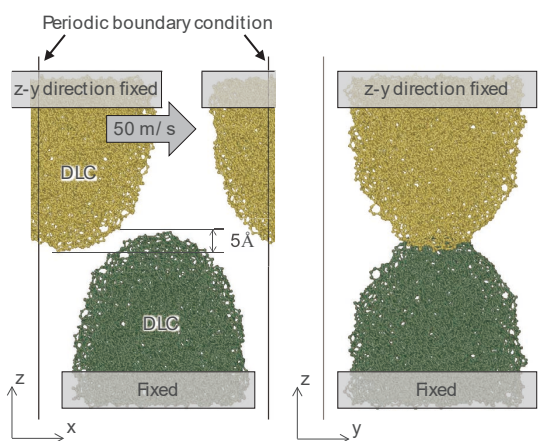


Fig. 1 Simulation Model for Friction Interface between DLC Asperities

2.2 実験条件・分析条件

計算解析の妥当性検証のため、摩擦摩耗試験を実施した。実験装置の概要を Fig. 2 に示す。リングオンディスク形式で定常回転するディスクに対して、リングに荷重を加えて押し当てる。このとき、リングに働く回転反力から摩擦力を計測する。潤滑状態はドライの無潤滑であり、リング及びディスクは SUS440C 基材の摺動面に DLC を成膜したものをを用いた。DLC 同士の摩擦試験を実施し、摩擦係数及び焼付き耐荷重を評価した。なお焼付き耐荷重は試験片温度が急激に増加する点で判定した。

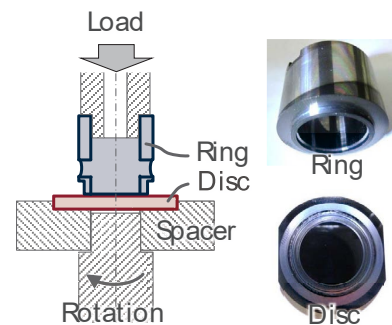


Fig. 2 Schematic of Ring-on-Disc Friction Tester and Images of SUS440C Test Piece with DLC Coating

また、摺動前後の DLC 表面の構造変化を同定するために、ラマン分光分析を実施した。摺動試験後にディスク表面に形成される摺動痕と非摺動部を測定し、ラマンスペクトルの変化から摩擦による構造変化を評価した。一般的に DLC のラマンスペクトルは G ピークと D ピークの特徴的なピークが現れる。各ピーク強度の比 I_D/I_G 比やピーク位置の変化で構造変化を同定する⁽³⁾。

3. 結果・考察

3.1 水素非含有 DLC における表面分子構造が摩擦特性に及ぼす影響

水素非含有 DLC について、DLC 表面の原子構造が摩擦特性に及ぼす影響を明らかにするために、ダイヤモンド構造に近い表面構造をもつ DLC (d-DLC) とグラファイト構造に近い表面構造をもつ DLC (g-DLC) をモデル化し、摩擦特性の比較を行った。Fig. 3 に d-DLC の摩擦プロセスのスナップショットを示す。d-DLC 同士が接近すると摩擦界面で炭素-炭素結合 (C-C 結合) を形成する凝着が発生した (Fig. 3(b))。その後、せん断によって界面の C-C 結合を解離しながら摩擦が進行する様子が観察された (Fig. 3(c))。Fig. 4 に g-DLC のスナップショットを示す。g-DLC は摩擦界面での C-C 結合は形成されず、表面が形状変形しながら滑らかに摩擦が進行する様子が観察された (Fig. 4(b), (c))。この時の摩擦力を比較した結果を Fig. 5 に示す。d-DLC は凝着発生後に摩擦力が増加し、100nN 程度となった後に減少する。これは、摩擦によるせん断仕事、界面の C-C 結合 (347.7kJ/mol)

を解離するために使われたと考えられる。一方、界面にC-C結合を形成しないg-DLCは摩擦力がd-DLCの1/10程度と低く、これはせん断仕事は表面の変形に使われたためと考えられる。以上より、界面の結合形成がDLC摩擦特性に大きく影響を及ぼすことが示された。Fig. 6に水素非含有DLCの摩擦メカニズムを示す。d-DLCの表面には、ダイヤモンドの4面体構造の頂点に未結合手をもってあり、界面で未結合手同士が接近するとC-C結合が形成される。このC-C結合の解離にせん断仕事が使われるため摩擦損失が大きくなる。一方、g-DLCの表面が5員環や6員環の環構造でおおわれており、未結合手が最小化された状態となっているため、界面でのC-C結合の形成が抑制され低摩擦を示したと考えられる。以上より、DLCの低摩擦化には摩擦界面にグラファイト構造が存在することが重要であることが示唆された。一方、Pastewkaらよりグラファイト化した表面構造は機械的に脆く接触による摩耗と酸化による摩耗が進行すると示唆されている⁽⁸⁾。このことから、接触部のみグラファイト構造をもち、非接触部は機械的強度の高いd-DLC構造をもっていることが重要であると考えられる。

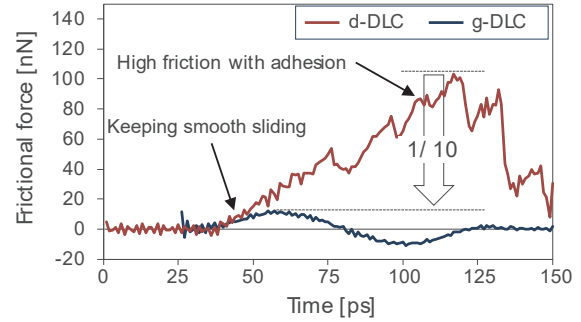


Fig. 5 Frictional Forces during the Friction Simulations of d-DLC Films and g-DLC Films

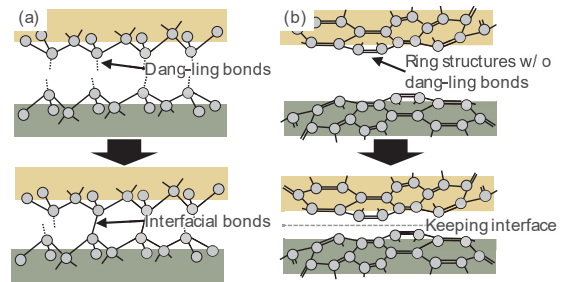


Fig. 6 Different Mechanisms during Friction of (a) d-DLC Films and (b) g-DLC Films

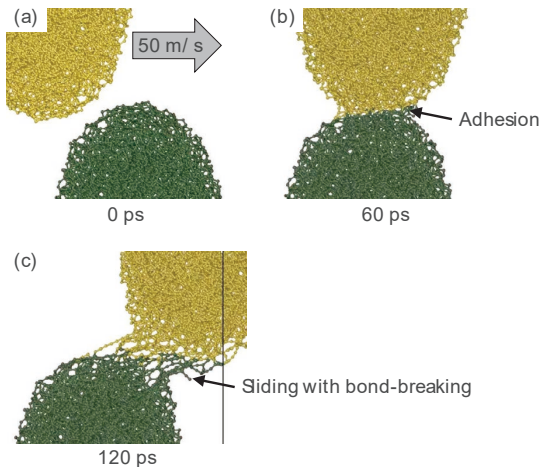


Fig. 3 Snapshots of Friction Simulation of d-DLC Films at (a) 0ps, (b) 60ps, and (c) 120ps

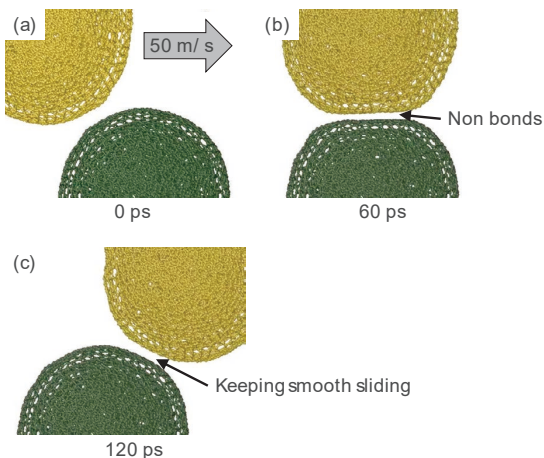


Fig. 4 Snapshots of Friction Simulation of g-DLC Films at (a) 0ps, (b) 60ps, and (c) 120ps

3.2 DLC膜中の水素が摩擦特性に及ぼす影響

膜中に水素を含むDLC (a-C:H) について、膜中の水素が摩擦特性に及ぼす影響を明らかにするために、20%程度の水素を含むDLC膜をモデル化し、3.1節に示すd-DLCとの摩擦プロセスの比較を行った。Fig. 7にa-C:Hの摩擦シミュレーションのスナップショットを示す。a-C:H同士が接近すると界面にC-C結合が形成され凝着が発生する様子が観察された (Fig. 7(b))。その後、界面のC-C結合を解離しながら摩擦が進行し、摺動後の表面にはグラファイトの環構造が表面に形成された (Fig. 7(d))。この環構造が摩擦特性に及ぼす影響を明らかにするために、a-C:H及びd-DLCを3サイクル繰り返し接触摩擦させる計算を実施した。Fig. 8に3サイクルの摩擦シミュレーションから得られる摩擦力の変化を示す。1サイクル目は、a-C:H、d-DLCともに凝着が発生し、C-C結合を解離しながらせん断するため摩擦力が増加する。a-C:Hはd-DLCに比べて低い摩擦力を示す。これは、a-C:H表面に存在する水素が表面の未結合手をキャップすることで、界面に形成されるC-C結合の数が減少することによるものと考えられる。2サイクル及び3サイクルの摩擦力について、d-DLCは60nN程度と高いが、a-C:Hは1サイクル目の摩擦力と比べて、摩擦力が大きく低減していることがわかる。この摩擦特性を明らかにするため、各DLC内の炭素原子について、未結合手をもつ炭素 (高摩擦に寄与)、グラファイト構造の炭素 (低摩擦に寄与)、ポリマー構造の炭素に分けて、摩擦界面からの深さ方向に対する割合分布を解析した。Fig. 9に各炭素の割合分布を示す。未結合手をもつ炭素原子に関して、

初期状態 (0cycle) では a-C:H の割合が d-DLC より小さいことがわかる。これは、a-C:H 表面の水素が炭素の未結合手をキャップするためと示唆される。a-C:H は 1cycle 後に未結合手が増加するものの、2cycle 後の未結合手の増加は抑制されていることがわかる。一方、d-DLC はサイクルに対して未結合手が増加する傾向を示した。低摩擦に寄与するグラファイト構造の炭素の割合について、初期状態 (0cycle) では割合が a-C:H の割合が d-DLC より大きいことがわかる。また、a-C:H はサイクル増加とともに摩擦面上部の領域でグラファイト構造が増加することがわかる。一方、d-DLC は 2cycle 後に大きくグラファイト構造が減少し、ポリマー構造の炭素は大きく増加する結果となった。以上の解析より考察される a-C:H と d-DLC の連続的な摺動に対するメカニズムを Fig. 10 に示す。a-C:H は初期状態で表面水素により未結合手が少ない状態である。繰り返し摩擦することで界面に低摩擦を示すグラファイト構造が形成されることで、摩擦抵抗が減少する。この過程が、原子レベルのなじみ過程に相当すると示唆される。一方、d-DLC は表面に未結合手が多く存在しており、摩擦界面で C-C 結合を形成後、せん断によって表面の破壊が起こる。繰り返し摩擦することで、界面ではポリマー上の炭素が形成され、表面の破壊により未結合手が繰り返し形成されることで高摩擦が維持されると考えられる。

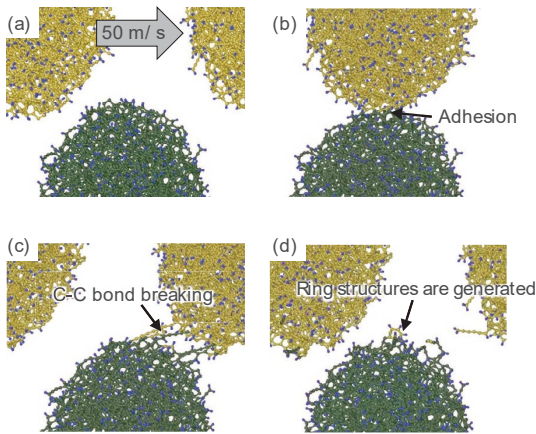


Fig. 7 Snapshots of Friction Simulation of a-C:H Films at (a) 0ps, (b) 10ps, (c) 75ps, and (d) 100ps

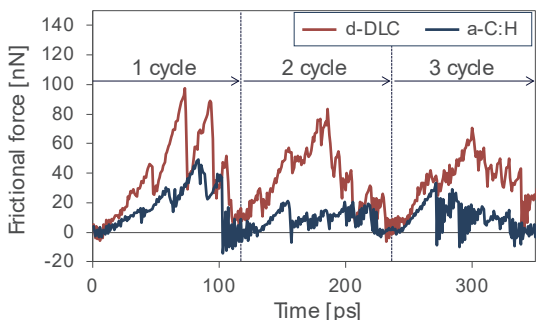


Fig. 8 Frictional Forces during the 3-cycle Friction Simulations of d-DLC Films and a-C:H Films

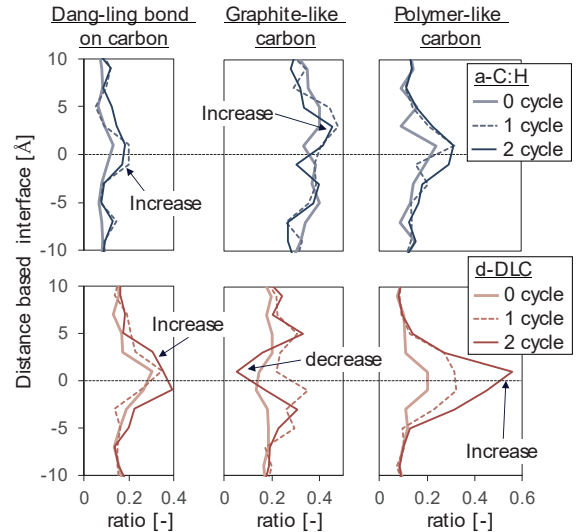


Fig. 9 Depth Profile of Ratios of Carbons in a-C:H and d-DLC Films, Which Are Classified about Carbon Having Dang-Ling Bond, Graphite-Like-Carbon, Polymer-Like-Carbon.

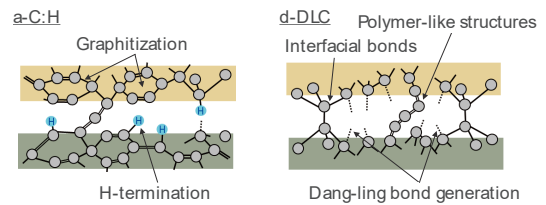


Fig. 10 Mechanisms of Continuous Friction Interface in a-C:H Films and d-DLC Films

3.3 a-C:H と d-DLC 膜の摩擦実験による摩擦特性の計測及び表面分析による原子構造変化の同定

3.2 節で明らかにした a-C:H と d-DLC の低摩擦メカニズムを検証するために、リングオンディスク試験方式による摩擦特性の計測を行った。Fig. 11 に各 DLC 膜の定常状態の摩擦係数の計測結果を示す。摺動速度を面圧で割った値を横軸、摩擦係数を縦軸とする。横軸の値が小さいほど固体接触の割合が多いシビアな摩擦状態となる。d-DLC はシビアな摩擦状態ほど摩擦係数が増加する結果となった。横軸 0.8m/s-MPa 以下は焼付きが発生し摩擦係数の計測ができない結果となった。一方、a-C:H はシビアな摩擦状態でも低摩擦を発現する結果となり、3.2 節で示した計算結果と定性的に一致するものである。

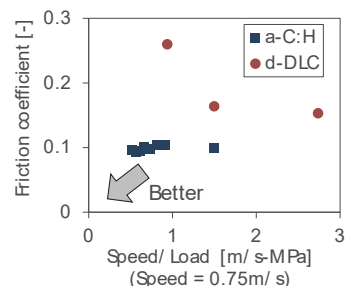


Fig. 11 Friction Coefficients of a-C:H and d-DLC Carried out from Ring-on-Disc Friction Test

耐焼付き特性について、計測した結果を Fig. 12 に示す。横軸に摺動速度、縦軸にテストピース温度が急激に上昇するときの荷重を示す。d-DLC は耐荷重が 0.5MPa 以下であるのに対して、a-C:H は低速域で 3MPa 程度の荷重に耐えることができると示された。

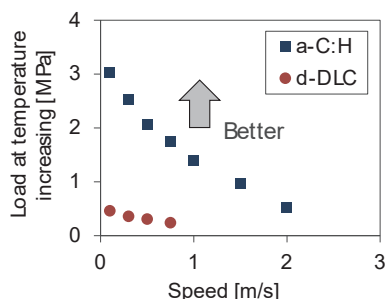
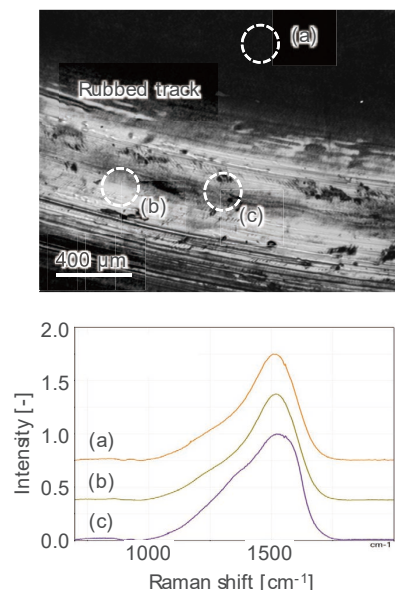


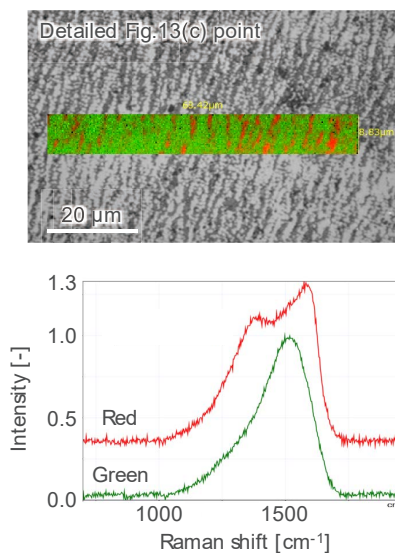
Fig. 12 Load Toughness Properties of a-C:H and d-DLC Films

3.2 節において、a-C:H 膜の繰り返し摩擦により表面が低摩擦なグラファイト構造へ変化することが示唆された。このような、摩擦による原子構造変化を同定するために、ラマン分光法を用いた表面分析の結果を Fig. 13 に示す。ディスク表面に形成される摺動痕 2 箇所と非摺動部 1 箇所について、ラマン分光分析を実施した。非摺動部 (a) と摺動部 (b) の点に関してはスペクトル形状に有意な差はないが、摺動部 (c) の点においては、 I_D/I_G 比の値が 0.5 から 0.9 へ大きくなり、グラファイト構造の形成が示唆される⁽⁹⁾。また、G ピーク位置が 1356cm^{-1} から 1393cm^{-1} へ高周波側にシフトする結果となった。崔らは G ピーク位置と G ピークの半値幅から DLC の分類を行っており、G ピークが高周波側にシフトするとグラファイト構造の特徴を示すとされる⁽³⁾。以上より、摺動部 (c) ではグラファイト構造の形成が示唆される。摺動部 (c) を更に拡大したラマン分光分析の結果を Fig. 14 に示す。摺動部 (c) の白色光像から明るい領域と暗い領域が縞状に存在する様子が確認された。そこで、四角で示す領域でマッピング分析したところ、赤と緑で示す領域で 2 つの特徴的なラマンスペクトルを得た。緑で示す領域は非摺動部 (a) と同様のラマンスペクトルを示すのに対して、赤で示す領域ではシャープな G ピークと D ピークが現れる結果となった。シャープなピークは結晶化した構造を示しており、高い I_D/I_G 比 (1.2) 及び G ピーク位置の高周波側へのシフト (1412cm^{-1}) から、赤で示す領域に結晶化したグラファイト構造が存在することが示唆される。以上より、a-C:H の摺動部の一部が摩擦によってグラファイト構造に変化することが実験的にも示され、シミュレーションから明らかにした a-C:H の低摩擦メカニズムの妥当性を示した。また、摺動部の一部のみがグラファイト構造をとっていることから、粗さ突起接触の真実接触部のみグラファイト化している可能性がある。接触部のみ低摩擦なグラファイト化すること



Point	Peak	Raman shift (cm ⁻¹)	Intensity	I _D /I _G ratio
(a)	G	1526	9735	0.5
	D	1356	4590	
(b)	G	1530	26830	0.5
	D	1362	13317	
(c)	G	1552	9301	0.9
	D	1393	8405	

Fig. 13 Upper Image Shows Rubbed Track and Points of Raman Spectroscopy Analysis. Middle Figure Shows Raman Spectrums. Lower Table Shows Data of Spectrums



Point	Peak	Raman shift (cm ⁻¹)	Intensity	I _D /I _G ratio
Red	G	1582	59	1.2
	D	1412	69	
Green	G	1528	50	0.5
	D	1379	25	

Fig. 14 Upper Image Shows Detailed (c) Point in Rubbed Track and Mapped Analysis Range Separating Green and Red Parts. Middle Figure Shows Raman Spectrums of Green and Red Regions. Lower Table Shows Data of Spectrums

で、膜全体の機械的強度は維持しながら低摩擦化が可能と考えられ、内部までグラファイト構造の膜 (g-DLC) より耐摩耗性を発現することが示唆される。以上より、内部に高強度なダイヤモンド構造を一部もち、摺動面にはグラファイト構造をもつ DLC が、内燃機関の摺動面の摩擦低減及び信頼性確保に有効な構造と考えられる。

4. おわりに

内燃機関の摺動面の摩擦低減及び信頼性確保に有効な DLC 構造について、原子レベルの摩擦解析と摩擦実験及びラマン分光分析の結果、以下の知見を得た。

(1) 水素非含有 DLC において、表面に未結合手が存在すると摩擦界面に C-C 結合が形成する凝着が起こる。この C-C 結合をせん断により解離しながら摩擦が進行すると高摩擦を示す。ダイヤモンド構造に近い d-DLC は高摩擦化の原因となる未結合手が表面に存在するのに対して、グラファイト構造に近い g-DLC は環構造により未結合手が最小化された表面構造をとる。その結果、g-DLC は低摩擦な特性を示す。

(2) 水素含有 DLC (a-C:H) において、水素原子は DLC 表面に存在する未結合手をキャップすることで、強い凝着を抑制する。また、a-C:H を繰り返し接触、摩擦することで a-C:H の表面構造がグラファイト構造へと変化する原子レベルのなじみが起こり低摩擦化する。グラファイト構造化は接触部の一部で起こるため、a-C:H の機械的強度を維持しながら最表面のみ低摩擦構造をとる。

参考文献

- (1) K. Holmberg et al.: Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions, *Friction*, 5, pp.263-284 (2017)
- (2) T. Muguruma et al.: Effects of sp²/sp³ Ratio and Hydrogen Content on In Vitro Bending and Frictional Performance of DLC-Coated Orthodontic Stainless Steels, *Coatings*, 8, pp.199-210 (2018)
- (3) 崔ほか：ラマン分光法による DLC 膜の機械特性評価および予測 (第 2 報) — 種々の原料ガスを用いてバイポーラ PBII&D 法により作成した DLC 膜 —, *トライボロジスト*, 62 巻 3 号, pp.228-235 (2017)
- (4) 鈴木ほか：原料の異なる DLC 膜のトライボロジー特性, *表面科学*, 25, pp.232-237 (2004)
- (5) J. Jiang et al.: The effect of relative humidity on wear of a diamond-like carbon coating, *Surface and Coatings Technology*, 167, pp.221-225 (2003)
- (6) S. Plimpton: Fast Parallel Algorithms for Short-Range Molecular Dynamics, *Journal of Computational Physics*, Vol.117, pp.1-19 (1995)
- (7) H. M. Aktulga et al.: Parallel reactive molecular dynamics: Numerical methods and algorithmic

techniques, *Parallel Computing*, Vol.38, pp.245-259 (2012)

- (8) L. Pastewka et al.: Anisotropic mechanical amorphization drives wear in diamond, *Nature Materials*, 10, pp.34-38 (2011)
- (9) H. Okubo et al.: In Situ Raman Observation of the Graphitization Process of Tetrahedral Amorphous Carbon Diamond-Like Carbon under Boundary Lubrication in Poly-Alpha-Olefin with an Organic Friction Modifier, *Tribology Online*, Vol.12 pp.229-237 (2017)

■ 著者 ■



河口 健太郎



宮内 勇馬

論文・解説

17

火炎核を利用した圧縮自着火制御方法の検討

Study of Compression Auto-Ignition Control Method Using Flame Kernel

大野 諒平 *¹ 大澤 駿 *² 葛 晰遥 *³
 Ryohei Ono Shun Osawa Sekiyou Katsu
 沖濱 圭佑 *⁴ 原田 雄司 *⁵ 藤本 英史 *⁶
 Keisuke Okihama Yuji Harada Hidefumi Fujimoto

要 約

内燃機関の効率改善には希薄燃焼を可能にする圧縮自着火燃焼が有効であるが、着火時期、燃焼期間制御が課題である。今回、従来の火花放電システムで生成される火炎核を利用した燃焼制御について検討した。低圧場において希薄混合気中に放電すると、形成された火炎核はその周囲の未燃混合気を昇温し、その後消炎する様子が可視化実験にて観察された。また、単気筒エンジンにて、吸気行程中に希薄混合気中に放電すると、放電から圧縮自着火までの時間が長いにもかかわらず、着火時期が進角した。この現象について、実験を模擬した詳細化学反応計算を用いて分析した。その結果、火炎核によって昇温された未燃混合気中の燃料が一部開裂することにより生成された化学種が圧縮着火前まで生存し、圧縮着火を誘発することが示唆された。また、開裂によって生じる化学種の中でもとりわけ HO_2 が、進角効果の大小に大きく影響を与えることが示唆された。

Summary

While compression auto-ignition enabling lean burn combustion is effective for improving the efficiency of the internal combustion engine, controlling ignition timing and combustion duration are major challenges. In this study, we considered enhancing the combustion control by using an electric discharge which forms a flame kernel. When an electric discharge occurred in lean air-fuel mixture under a low pressure condition, we observed a flame kernel formed, unburned gas near the kernel heated, and then the flame going out. And when an electric discharge occurred during an intake stroke in a single-cylinder engine, we observed the auto-ignition timing advanced despite a longer time passes from electric discharge to compression auto-ignition. Then we performed a detailed chemical reaction analysis simulating an experiment to analyze the factors of this phenomenon. The result of analysis suggested that part of the fuel in unburned gas, which had been heated up by the kernel, was cleaved and generated chemical species, which survived until the latter half of engine cycle and induced compression auto-ignition. It also indicated that among the chemical species generated by the cleavage, HO_2 , in particular, greatly affected the effect of advancing of ignition timing.

Key words : Heat engine, Compression ignition engine, Numerical calculation, Combustion analysis

1. はじめに

地球温暖化やエネルギーセキュリティ等の地球規模の課題に対応するため、内燃機関の熱効率向上が求められている。パワートレイン別長期見通し⁽¹⁾では、内燃機関搭載車のシェアは2030年に約90%、2040年においても約75%となっており、短・長期的に見ても高い。内燃機関の熱効率向上には、オットーサイクルの理論熱効率式から、希薄燃焼化と高圧縮比化が有効である。前者の

燃焼形態として均質予混合圧縮自着火 (Homogeneous Charge Compression Ignition, 以下HCCI) 燃焼が挙げられるが、着火時期と燃焼期間の制御が難しく、実用化に向けて制御性を高める必要がある。

近年、炭化水素燃料混合気に対して、誘電体バリア放電プラズマを照射することにより着火を促進させた研究事例⁽²⁻⁴⁾や、炭化水素の原子間結合 (C-C及びC-H結合) を均等に開裂させた分解生成物を圧縮前混合気を与えること、自着火時期が変化することを計算解析により確認し

*1,2,5,6 技術研究所
Technical Research Center

*3,4 パワートレイン技術開発部
Powertrain Technology Development Dept.

た研究事例⁽⁵⁾が報告されている。本研究では、通常の火花点火システムにより生成される火炎核を利用し、炭化水素燃料を開裂させることを模擬した計算実験により、希薄予混合気の自着火燃焼促進に関する検討を行った。

2. 実験装置及び実験条件

本研究では、火炎核形成挙動を観察するための可視化実験と、エンジン環境下での着火時期変化を確認するための性能実験を実施した。前者の可視化実験には、1回のみでの圧縮が可能な急速圧縮装置 (Rapid Compression Machine, 以下 RCM) を用い、後者の性能実験には、単気筒エンジンを用いた。以下に用いた実験装置及び計測手法について述べる。

2.1 RCM

Fig. 1 に RCM 燃焼室形状を示す。本 RCM では、混合気はピストン上昇により圧縮されるとともに、連通路を通して燃焼室内に流入する。燃焼室形状は、直径約 35mm、厚さ 17mm の円筒状である。燃焼室両側面に設置した厚さ 20mm のサファイアガラス製観測窓により、燃焼室内部の観察を可能としている。ボア及びストロークは、それぞれ 89mm、95mm である。圧縮比は、2.3 における単気筒エンジンの有効圧縮比と同じ 12.4:1 とした。

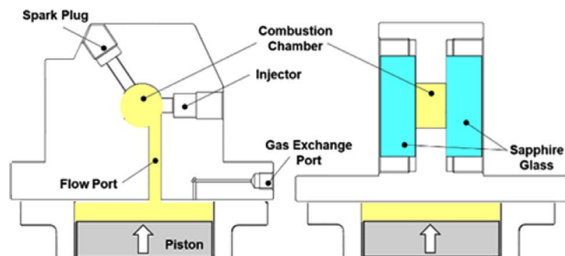


Fig. 1 Schematics of Combustion Chamber of RCM

Table 1 に実験条件を示す。燃料はイソオクタンとし、燃焼室に取り付けたインジェクタにより燃焼室内に供給される。燃料混合時間を十分に確保するため、RCM 作動 10 分前に燃料を噴射した。空燃比は 30:1 である。圧縮速度は、単気筒エンジン換算で約 750rpm 相当の圧縮速度とした。初期ガス温度及び壁面温度は 298K、初期ガス圧力は 101.3kPa である。火花点火の一次エネルギーは、100mj に設定し、圧縮開始から 25msec. 後に放電を行った。

Table 1 Experimental Conditions of RCM

Fuel	iso-Octane
Compression time (msec.)	40
Air-fuel ratio	30:1
Initial gas temperature (K)	298
Initial wall temperature (K)	298
Initial gas pressure (kPa)	101.3
Ignition energy (mj)	100

2.2 可視化計測手法

高速度カメラを用いて化学発光を撮影することにより、初期火炎核形成過程を観察した。また、シュリーレン撮影法を使用し、初期火炎核により形成される高温部の空間分布を定性的に可視化した。

2.3 単気筒エンジン

単気筒エンジンは 4 ストローク機関であり、行程容積は 622cm³、幾何学的圧縮比は 20:1、吸気弁閉弁時期における有効圧縮比は 12.4:1 である。点火プラグはシリンダーボア中心に設置した。Table 2 に単気筒エンジン諸元と実験条件をまとめる。

Table 2 Engine Specifications and Experimental Conditions

Engine type	4-stroke, Single cylinder
Bore (mm)	89
Stroke (mm)	100
Displacement volume (cm ³)	622
Geometric Compression ratio	20:1
Engine speed (rpm)	1000
Coolant temperature (deg. C)	90
Lubricant temperature (deg. C)	90
Inlet valve opening timing (deg. BTDC)	-47
Inlet valve closing timing (deg. ABDC)	87
Fuel supply	Direct Injection
Start of injection (deg. BTDC)	320 (single)
Fuel	Gasoline (91RON)
Air-fuel ratio	30:1
Ignition energy (mj/cycle)	100

3. 実験結果

3.1 RCM 可視化実験結果

Fig. 2 に RCM 燃焼室の圧力時間履歴を示す。比較のため、非放電時の結果も併せて示す。Fig. 2 より、放電の有無による圧力履歴の差異が小さいことがわかる。

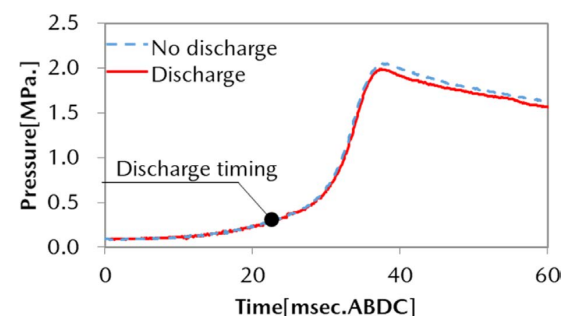


Fig. 2 Pressure of RCM

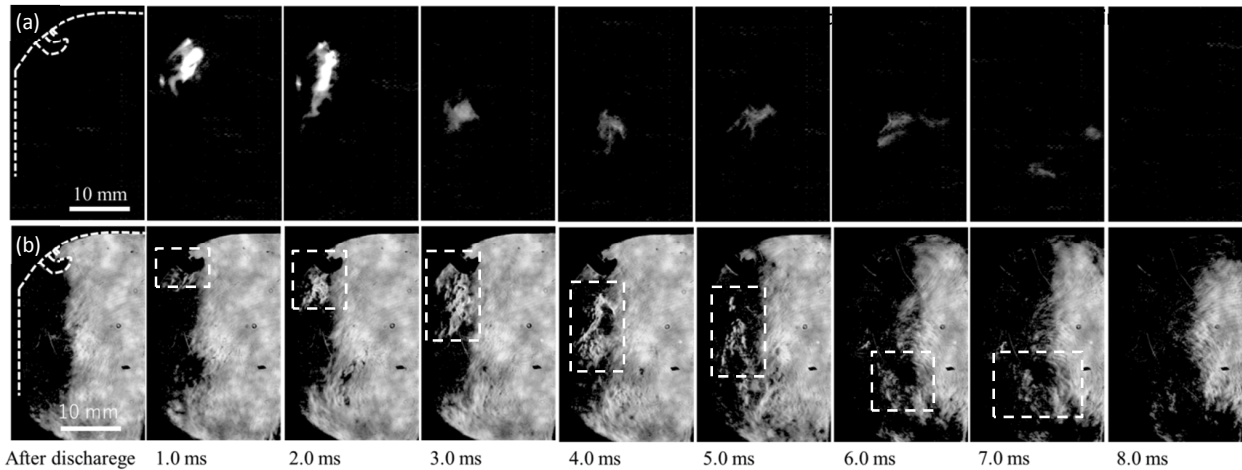


Fig. 3 (a) Chemiluminescence Images, (b) Schlieren Images

次に、本条件での可視化実験結果を Fig. 3 に示す。Fig. 3(a)は化学発光撮影結果、(b)はシュリーレン撮影結果である。Fig. 3(a)から放電開始後 2msec. までは、点火プラグ付近で強い発光が見られ、放電後 8msec. で化学発光が見られなくなった。このことから、希薄混合気中の放電によって火炎核が形成され、火炎伝播に至ることなく放電後 8msec. で消滅したと考えられる。更に、気体の密度差をとらえられるシュリーレン撮影結果 Fig. 3(b)において、点線で囲んだ部分のように、ゆらいでいる領域は周囲の混合気より高温になっていると考えられる。また Fig. 3(a) (b)を比較すると、ゆらいでいる領域は、化学発光領域の外周部であることがわかる。つまり、火炎核はその周囲の混合気に対し、何らかの熱的影響を与えていることがわかった。

3.2 単気筒エンジン実験結果

前節の RCM を用いた希薄混合気中の火炎核形成過程の可視化実験結果を受け、単気筒エンジンにて、吸気行程中において放電した際の熱着火挙動の変化について調査した。Fig. 4 に熱発生率を示す。放電タイミングは 300deg. BTDC である。放電を施した条件では、吸気行程中放電にもかかわらず、質量燃焼割合 50%位置が 0.5deg. 程度進角した。本結果から、放電によって生成した火炎核が、圧縮上死点近傍における自着火へ影響を与えることがわかった。

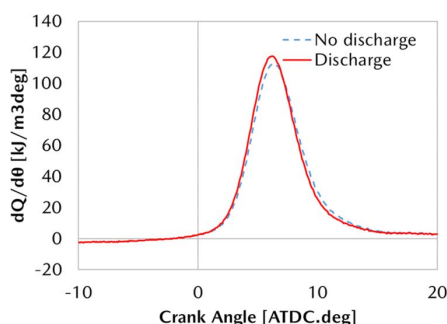


Fig. 4 Heat Release Rate of Single Cylinder

4. 計算手法

4.1 火炎核が未燃混合気に及ぼす影響の計算手法

詳細化学反応計算には、Chemkin Pro⁽⁶⁾を用いた。反応機構として、ガソリンサロゲート反応機構 SIP-Gd1.0⁽⁷⁾に NO_x の反応機構を付加したものをを用いた。NO_x の反応機構には GRI-3.0⁽⁸⁾ に含まれる高温 NO_x 反応、及び典型的な低温の NO_x 反応を用いた。燃料成分として、S5R (レギュラーガソリン相当)⁽⁷⁾を用いて検討を行った。

4.2 計算フロー及び条件

RCM 可視化実験結果、単気筒エンジン実験結果から、放電を行った条件でのエンジン筒内では Fig 5 に示す現象が起こっているものと考えられる。

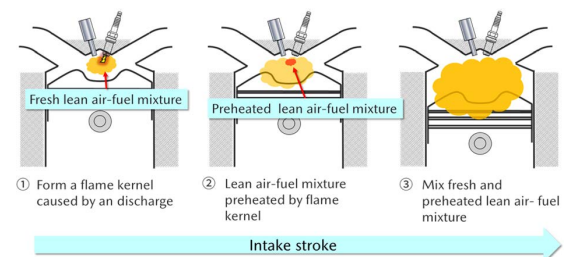


Fig. 5 Estimation Results of Phenomenon in Engine

- ① 点火により希薄混合気中において火炎核が形成される。
- ② 火炎核の周囲混合気が予熱される (以下、予熱混合気)。
- ③ 火炎伝播に至ることなく、火炎核が消滅し予熱混合気は燃焼室内に拡散する。

これらの現象を計算解析により模擬するため、計算フローを以下のとおりとした。

- (1) 混合気を定容容器内に比較的高温条件で 2msec. 間保持し、燃料開裂状態を計算 (Fig. 6 の①)。
- (2) 上記予熱混合気を 6msec. 間中に 400K まで線形に降温し、予熱混合気の拡散に伴う冷却過程を計算 (Fig. 6 の②)。

- (3) 予熱混合気と、火炎核の影響を受けていない混合気（以下、新規混合気）を攪拌し、次計算行程の HCCI Engine Simulator 用初期混合気を計算。
- (4) (3)の混合気を初期条件とした HCCI Engine Simulator（以降エンジンモデル）を用いた圧縮着火計算。

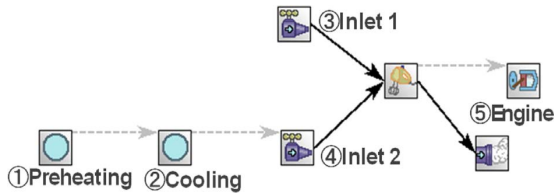


Fig. 6 Network Diagram View

Table 3 に計算条件を示す。なお、最大予熱温度は予熱期間中に着火しない 1140K とした。

Table 3 Calculation Conditions

① Preheating	
Problem type	Constrain volume and solve energy equation
Temperature (K)	700-1140
Pressure (bar)	2
Holding time (msec.)	2
Air-fuel ratio	30:1
② Cooling	
Problem type	Constrain volume and temperature
Temperature (K)	From 700-1140 to 400
Cooling time (msec.)	6
③ Inlet1	
Air-fuel ratio	30:1
Mass flow rate (kg/sec.)	Parameter (95.0, 97.5, or 99.5)
④ Inlet2	
Mass flow rate (kg/sec.)	Parameter (5.0, 2.5, or 0.5)
⑤ Engine	
Bore (mm)	89
Stroke (mm)	100
Compression ratio	20
Engine speed (rpm)	1000

4.3 計算結果・考察

本計算条件での燃料開裂状態を確認するため、エンジンモデルの初期混合気の成分を分析した。Fig. 7 に radical（不対電子をもつ化学種）、低温酸化反応中に蓄積される代表的な生成物 KetOOH、H₂O₂ chemistry⁽⁹⁾ において主要な役割を担う生成物である H₂O₂ のモル分率と予熱温度の関係を示す。いずれの条件においても、エンジンモ

デルに投入する混合気（Inlet ①と Inlet ②を混合したガス）中に radical, KetOOH, H₂O₂ が存在していることから、Fig. 7 の予熱①と降温②において、燃料が開裂することを確認した。

次に、新気混合気に対する予熱混合気の混合率ごとの予熱混合気を添加しない条件（base）との着火時期の差（以下、進角量）を Fig. 8 に示す。着火時期は燃焼室内温度が 1600K に達した時期と定義し、混合率は下式により求めた。

$$\text{混合率 (wt\%)} = \frac{\text{予熱混合気質量}}{\text{新規混合気質量} + \text{予熱混合気質量}} \times 100$$

Fig. 8 から、予熱温度を 900K 以上とすることにより、混合率によらず着火時期が進角することが確認できる。また、予熱温度 900K 以上では、予熱温度が高くなるほど、進角量は大きくなる。更に、予熱温度と進角量の関係には、予熱温度 1000K 近傍で変曲点が存在する。

混合率により進角量の絶対値には差があるが、予熱温度と進角量の関係の傾向は同一であるため、これ以降 2.5wt% の条件を対象として、これらの要因分析を行う。

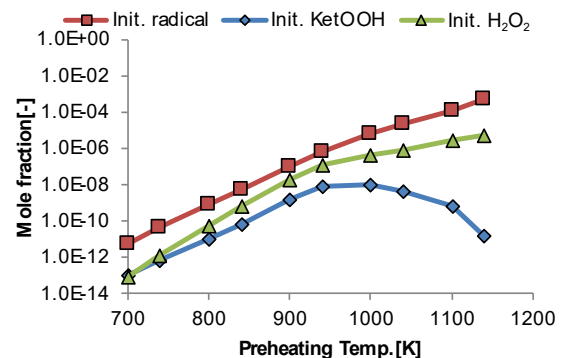


Fig. 7 Mole Fraction of Radical, KetOOH, H₂O₂ of HCCI Engine Simulator Initial Condition

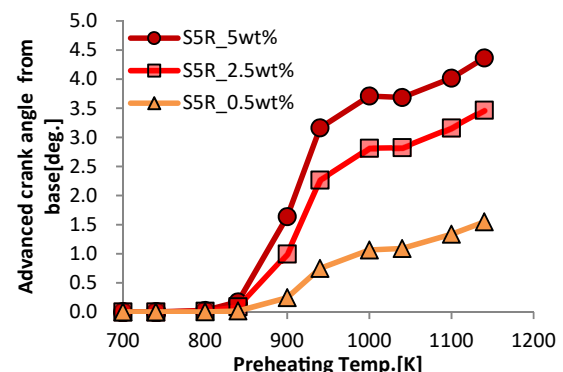


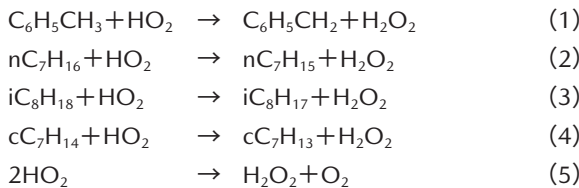
Fig. 8 Preheating Temp. vs Advanced Crank Angle

Fig. 7 にて、radical や H₂O₂ 濃度は、予熱温度上昇に伴い増加しているが、KetOOH は 1000K 近傍にピークをもつ凸の曲線となっている。これは、混合気を 1000K 以上に保持することで、予熱期間中に低温酸化反応よりも燃料の熱分解が支配的に起こることに起因する。この

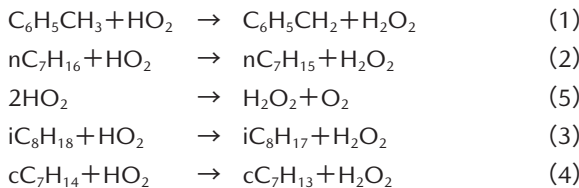
ように予熱された温度環境における主要反応経路の違いが、Fig. 8 の 1000K 近傍における変曲点が存在する要因となっている可能性がある。そこで、予熱温度 700K, 900K, 1100K に関して更に詳細な分析を行うことにより、着火進角メカニズムについて検討する。

Fig. 9 に、エンジンモデルにおける圧縮行程中の燃焼室内温度変化に対する KetOOH 濃度変化を示す。予熱温度 700K の条件では、燃焼室内温度が 800K 以上で、KetOOH 濃度が上昇するが、予熱温度 900K, 1100K の条件では、通常低温酸化反応が活発ではないと考えられる燃焼室内温度 800K 以下においても KetOOH 濃度の上昇が見られる。これから、予熱温度 900K, 1100K の条件では、少量混合した予熱混合気により燃焼室内における低温酸化反応が促進されている可能性がある。

次にこれについて分析を行う。Fig. 10 に燃焼室内温度変化に対する H₂O₂ 濃度の変化を示す。H₂O₂ 濃度が上昇し始める温度は、予熱温度 1100K の条件が最も低く、700K, 900K の条件はほぼ同等になっている。これから、予熱温度 1100K の条件は、他の条件に対し H₂O₂ chemistry に関わる化学種の初期濃度が高いことが示唆される。そこで、燃焼室内温度 900K のタイミングにおいて、H₂O₂ の生成速度が大きい素反応を抽出した。その結果、予熱温度 700K, 900K では



の順で H₂O₂ の生成速度が大きく、1100K では



の順であり、いずれの素反応にも HO₂ が含まれていることがわかった。また、予熱温度 1100K の条件では、その他の条件と素反応の序列が異なり、式(5)の H₂O₂ 生成速度が上位になっている。すなわち、HO₂ は燃料成分と反応するより、それ自身が反応して H₂O₂ を生成する方が優位になるほど、HO₂ 濃度が高いことを示唆しており、更に、この素反応の序列の違いが、Fig. 10 に示すように、予熱温度 1100K がその他の条件に比べ低温で H₂O₂ 濃度が上昇する、つまり H₂O₂ chemistry が早期化する要因と考えられる。

HO₂ は低温酸化反応域では温度に対し指数関数的に生成速度が増加し、H₂O₂ chemistry 領域以降は生成速度が緩やかになることが知られている。エンジンモデルの初期混合気中の HO₂ 濃度を確認しても、予熱温度 1100K > 900K >> 700K の序列どおりになっており (Fig. 11 参照)、HO₂ の温度に対する振る舞いがエンジンモデルの初期混

合気中の HO₂ 濃度の序列に表れている。また、上記素反応式(1)~(4)は初期燃料成分から H を引き抜く反応、すなわち低温酸化反応の起点となる反応である。Fig. 9 において予熱温度 1100K の条件では、最も低温酸化反応が促進されていることを述べたが、これはエンジンモデルの初期 HO₂ 濃度が高いことによるものと考えられる。

予熱温度 900K の条件は、燃焼室内温度の変化に対す

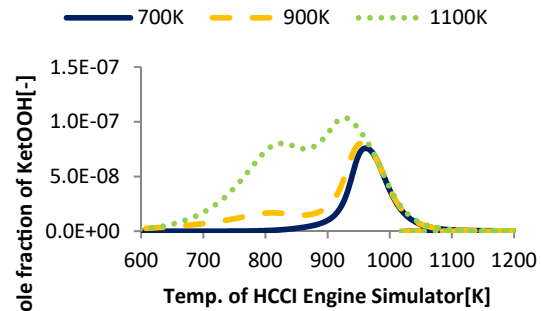


Fig. 9 Mole Fraction of KetOOH vs Temp. of HCCI Engine Simulator

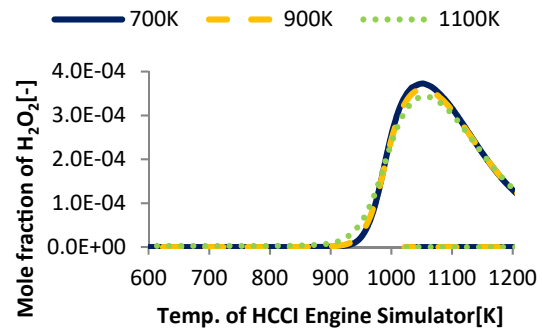


Fig. 10 Mole Fraction of H₂O₂ vs Temp. of HCCI Engine Simulator

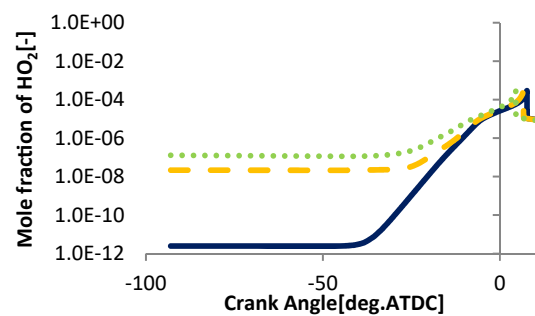


Fig. 11 Mole Fraction of HO₂ vs Crank Angle

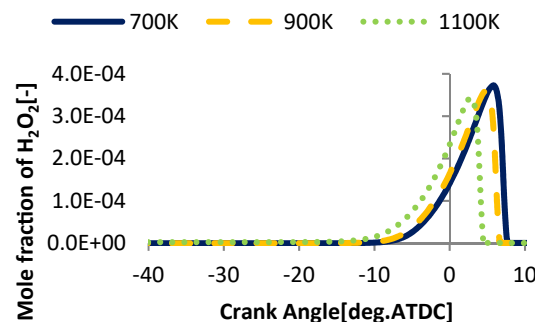


Fig. 12 Mole Fraction of H₂O₂ vs Crank Angle

る H_2O_2 濃度の変化が予熱温度 700K の条件と同等である。一方, Fig. 12 のクランク角に対する H_2O_2 濃度変化をみると, 予熱温度 900K の条件は 700K の条件より早く H_2O_2 濃度が上昇している。つまり, 予熱温度 900K の条件は, 低温酸化反応が促進されたことにより燃焼室内温度が上昇し, H_2O_2 chemistry が早期化したと考えられる。

以上から, Fig. 7 で示した予熱混合気添加による自着火時期の進角効果は, HO_2 濃度を用いて次のように説明できる。

まず, 低温酸化反応領域の温度帯にて予熱された混合気は予熱温度に応じた濃度の HO_2 を生成する。生成された HO_2 が, 予熱されていない混合気の低温酸化反応を活性化し, 自着火時期を早期化する。一方, およそ 1000K 以上に予熱された混合気は予熱温度に応じて HO_2 濃度は高まるものの, HO_2 濃度の温度感度は小さく, 予熱温度に対する進角効果も鈍化する。したがって, 進角効果は予熱温度 1000K 近傍で変曲点をもつ。

また, 進角効果への HO_2 の作用はその濃度に依存して異なり, 比較的高濃度 (およそ予熱温度 1000K 以上) では低温酸化反応と H_2O_2 chemistry の両方を促進させるのに対し, 低濃度 (予熱温度 1000K 未満) では低温酸化反応のみ促進させていると考えられる。

5. おわりに

火炎核を利用し, 炭化水素燃料を開裂させることを模擬した計算実験により, 希薄予混合気の自着火燃焼促進に関する検討を行った。その結果, 以下の知見を得た。

- (1) 低温低圧場にて, 通常の火花点火システムを用いて空燃比 30:1 の混合気に放電を行うと, 火炎核が形成されたのち消滅する様子について RCM を用いて確認した。
- (2) 単気筒エンジンにて, 通常の点火システムを用いて吸気行程中に放電を行うと, 火炎伝播せず後の圧縮自着火が促進されることを確認した。
- (3) 詳細化学反応計算より, 予熱混合気の燃料成分は一部開裂しており, 冷却後にも radical 等が存在することが示唆された。
- (4) 予熱混合気の温度が高いほど, 着火時期進角量は大きい。ただし, 進角効果は予熱温度 1000K 近傍で変曲点を持ち, およそ 1000K 以上では鈍化する。
- (5) 進角の要因は, 混合気が予熱されることにより生成される HO_2 である。進角効果が 1000K 近傍で鈍化するの, 炭化水素燃料の温度環境における主反応経路の違いにより, HO_2 生成速度も 1000K 近傍で鈍化するためである。
- (6) HO_2 の進角効果への作用は濃度によって異なり, 比較的高濃度の場合, 低温酸化反応並びに H_2O_2 chemistry を促進し, 低濃度の場合には低温酸化反応のみを促進する。

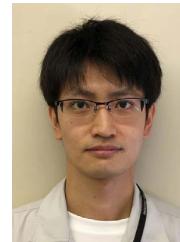
参考文献

- (1) マツダ: アニュアルレポート 2019, https://www.mazda.com/globalassets/ja/assets/investors/library/annual/files/mazdaar19all_j.pdf (2019)
- (2) 高橋 栄一, 小島 宏一, 山口 誠也: 予混合気非平衡プラズマ放電による着火制御, 第 51 回燃焼シンポジウム講演論文集, p.148, 講演番号 E133 (2013)
- (3) 小野 拓磨, 高橋 栄一, 西岡 牧人: メタン予混合気への誘電体バリア放電プラズマ照射による着火及び燃焼促進機構の検討, 第 52 回燃焼シンポジウム講演論文集, p.534, 講演番号 D341 (2014)
- (4) 小野 拓磨, 高橋 栄一, 西岡 牧人: 液体燃料予混合気への DBD プラズマ照射による圧縮着火特性への影響, 第 52 回燃焼シンポジウム講演論文集, 講演番号 E114 (2015)
- (5) 三好 明: 燃焼の自由度を高めるための基礎検討, 第 28 回内燃シンポジウム講演論文集, 講演番号 99 (2017)
- (6) CHEMKIN-PRO 2019R2, ANSYS, San Diego, 2019
- (7) 三好 明, 酒井 康行: ガソリンサロゲート詳細反応機構の構築, 自動車技術会論文集 48 巻 5 号, p.1021-1026 (2017)
- (8) M. Frenklac, h N. W. Moriarty, B. Eiteneer, M. Goldenberg, C.T. Bowman, R. K. Hanson, S. Song, W. C. Gardiner Jr., V. V. Lissianski, G. P. Smith, D. M. Golden, and Z. Qin, Gri mech 3.0 <http://www.me.berkeley.edu/gri-mech/> (参照 2016-03-23)
- (9) 安東 弘光, 酒井 康行, 桑原 一成: プラズマ支援燃焼の化学反応メカニズム: プラズマサポートによる着火遅れ短縮の可能性, プラズマ・核融合学会誌, 89(4), p.220-224 (2013)

■ 著 者 ■



大野 諒平



大澤 駿



葛 晰遥



沖濱 圭佑



原田 雄司



藤本 英史

社外への発表論文一覧表（2019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
2019.2.13-14	Automotive Ethernet Congress 2019 (WEKA FACHMEDIEN GmbH)	Comparative Analysis on the EMC Characteristics of 1Gbps Electrical and Optical Ethernet	河瀬 量平 湯本大次郎	商品戦略本部 日産自動車（株）
2019.3.23-27	The Virtual Reality Society, IEEE Computer Society IEEE VR 2019	Material Surface Reproduction and Perceptual Deformation with Projection Mapping for Car Interior Design	竹澤 拓朗 岩井 大輔 佐藤 宏介 原 利宏 武田 雄策 村瀬 健二	大阪大学 同上 同上 技術研究所 同上 同上
2019.4.2	VECS 2019 in Gothenburg, Sweden	Future Mobility comes true through the Model Based Development	足立 智彦	統合制御システム開発本部
2019.4.9-11	SAE World Congress Experience 2019 (WCX19)	Development of Fuel Sloshing Evaluation Technique upon Crash Using Fluid-Structure Interaction Simulation	山内 一矢 嘉村 浩二 花田 裕 小島 宏介	MBD 革新部 衝突性能開発部 MBD 革新部 同上
2019.5.22	International Society of Structural and Multidisciplinary Optimization World Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization	Structural topology optimization with strength of gasoline piston	市川 和男	技術研究所
2019.5.27-30	FLUCOME 2019 (The 15th International Conference on Fluid Control, Measurements and Visualization)	Spatio-Temporal Analysis of Correlation between the Cavitation Forming inside Injector and the Progress of Liquid Jet Atomization	宗村 宏晃 西尾 茂 宋 明良 西田 恵哉 和田 好隆 植木 義治 横畑 英明	神戸大学 同上 同上 広島大学 MBD 革新部 同上 同上
2019.6.9	The Organization for Human Brain Mapping 2019 OHBM Annual Meeting	Cortico-subcortical interactions underlying anxiety elicitation and regulation during driving	笹岡 貴史 原田 宗子 佐藤 大地 道田 奈々江 米澤 泰延 高山 雅年 農沢 隆秀 山脇 成人	広島大学 同上 技術研究所 広島大学 技術研究所 同上 同上 広島大学
2019.6.10-13	Peer-Reviewed Journal for the 26th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV)	Relationship between frontal car-to-car test result and vehicle crash compatibility evaluation in mobile progressive deformable barrier test	渡辺 泰介 黒田 一平 中嶋 太一 増田 光利	日産自動車（株） 衝突性能開発部 日本自動車研究所 トヨタ自動車（株）
2019.7.1-5	12TH The Asia-Pacific Conference on Combustion (ASPACC)	Development of C3H6 surface reaction mechanism on Pt/Al2O3 monolith catalyst based on gaseous and surface species measurements	Set NAING 下栗 大右 日隈 聡士 村上 浩 I Putu Angga KRISTYAWAN 松本 有平 竹林 広行 三好 明	広島大学 同上 熊本大学 走行・環境性能開発部 広島大学 同上 走行・環境性能開発部 広島大学
		Shock tube study of ignition delay time of n-nonane 2,2,4,4-tetramethyl-pantane	山田 眞平 崎間 俊明 松原 圭輝 下栗 大右 三好 明 遠藤 琢磨 八房 智顯 乃生 芳尚 斉藤 史彦	広島大学 同上 同上 同上 同上 同上 広島工業大学 技術研究所 同上

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2019.7.2-5	International symposium on Impact Engineering 2019	An Approach to Vehicle Crash Simulation of Laminated CFRP Components using LS-DYNA	西 正人 齋藤 啓 西原 剛史 金本 俊介 河村 力 Bo Ren	(株) JSOL 同上 衝突性能開発部 MBD 革新部 技術研究所 Livermore Software Technology
2019.7.8-10	広島大学エネルギー超高度利用研究拠点 The 3rd. International Symposium on Fuels and Energy	海洋微細藻類ナンノクロロプシスからのバイオ燃料生産 1-Dimensional Detailed Reaction Numerical Simulation in Delay Times of Hydrocarbon Species Determined with Shock Tube Facility	岡崎久美子 山本 卓 太田 啓之 高見 明秀 坂本 敦 進士 勇太 下栗 大右 三好 明 山田 真平 寺島 洋史 八房 智顯 斉藤 史彦	広島大学 同上 東京工業大学 技術研究所 広島大学 広島大学 同上 同上 同上 北海道大学 広島工業大学 技術研究所
2019.7.28-8.1	アメリカ機械学会・日本機械学会・韓国機械学会 AJK2019 Joint Fluids Engineering Conference	Experimental investigation for the better control of flows over a simplified vehicle configuration with DBD plasma actuator	関本 諭志 清水 圭吾 中島 卓司 藤井 孝蔵 平岡 武宜 農沢 隆秀	東京理科大学 広島大学 同上 東京理科大学 技術研究所 同上
2019.7.29-8.1	日本視覚学会・日本科学フォーラム APCV2019 15th Asia-Pacific Conference on Vision	Influence of optical flow on unconscious horizontal- and cyclo-vergence	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
2019.8.26-29	JSAE/SAE International 2019 JSAE/SAE Powertrains, Fuels and Lubricants International Meeting	Energy equation based wall heat transfer modeling for zero dimensional engine simulation Heat Balance Analysis Using Cylinder Pressure Obtained by Engine Experiments Considering the Spatial Heterogeneity of Diesel Combustion Vaporization and Turbulence Characteristics of High Pressure Gasoline Sprays Impinging on a Wall Effects of Nozzle Hole Diameter and Injection Pressure on Fuel Adhesion of Flat-Wall Impinging Spray	原田 雄司 内田 健司 山下 洋幸 加藤 雄大 金 尚奎 福田 大介 志茂 大輔 張 武 原 亮介 藤川 竜也 山川 正尚 渡部 智弘 市川由記彦 西田 恵哉 尾形 陽一 駱 洪亮 内富真太郎 渡部 智弘 西田 恵哉 尾形 陽一 張 武 原 亮介 藤川 竜也	技術研究所 同上 同上 エンジン性能開発部 同上 同上 同上 パワートレイン技術開発部 同上 同上 同上 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
2019.8.29	CIDAS Technical Conference	Contribution of ICE on CO ₂ Emission Reduction C-NCAP 2021 Protocol Strengthening Point based on CHINA Accident Analysis	漆原 友則 金子 直樹	エンジン性能開発部 衝突性能開発部

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2019.9.1-4	9th International Conference on Life Cycle Management	Estimation of CO ₂ emissions of internal combustion engine vehicle and battery electric vehicle using LCA	河本 竜路 望月 英生 森口 義久 中野 隆裕 本橋 真之 酒井 裕司 稲葉 敦	技術企画部 同上 同上 同上 商品戦略本部 工学院大学 同上
2019.9.10-13	International Conference on Lightning and Static Electricity 2019 Kansas, USA	Lightning Current Flows on Different Types of Automobiles	山本 和男 塚原 仁 野島 昭彦 内田 宏正 手島 由裕	中部大学 日産自動車(株) トヨタ自動車(株) スズキ(株) 電子性能開発部
2019.9.11-13	International Research Council on Biomechanics of Injury (IRCOBI), IRCOBI 2019 Conference	Analysis of Individual Differences in Pelvic Shape and its Impact on the Seatbelt Kinematics in a Collision	泉山 朋大 西田 周泰 岩永 秀幸 陳 献 大木 順司 朝日 龍介 杉本 繁 福島 正信	衝突性能開発部 山口大学 同上 同上 同上 衝突性能開発部 同上 同上
2019.9.12-13	Dassault Systèmes World-wide SFE Users Group Meeting 2019	Mazda Development Process Innovation utilizing SFE Concept	永木 秀典 松岡 智恵	ボデー開発部
2019.9.15-19	14th International Conference on Engines & Vehicles (ICE2019)	A Study on Combustion Characteristics of a High Compression Ratio SI Engine with High Pressure Gasoline Injection	神長 隆史 山口 恭平 Ratnak Sok 草鹿 仁 養祖 隆 藤川 竜也 山川 正尚	早稲田大学 同上 同上 同上 パワートレイン技術開発部 同上 同上
2019.9.24-25	IEEE Ethernet & IP @ Automotive Technology Day 2019 (IEEE Standards Association)	The study of TSN profiling for Safety and Reliability on automotive network	野村 拓望 秋月 克之 上田 健 河淵 量平 堀田 義文	(株) 本田技術研究所 日本電気(株) 同上 商品戦略本部 三菱電機(株)
2019.10.15-17	Automotive Circle Euro Car Body 2019-21th Global Car Body Benchmarking Conference	All-New Mazda3	亀井 丈広 阿部 健 田丸 真司	ボデー開発部 同上 車体技術部
2019.10.17	prostep ivip Systems Engineering Day 2019/Tokyo	METI MBD Project	竹内 一雄 足立 智彦	トヨタ自動車(株) 統合制御システム開発本部
2019.11.1-3	Pacific Center of Thermal Fluids Engineering (PCTFE), 30th INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON TRANSPORT PHENOMENA	Study on Behavior and Breakup Process of Oil Jet Ejected From Curved Pipe	新田 吾一 中島 聖 三村 溪太 西田 恵哉 本郷 均 横畑 英明 尾形 陽一	広島大学 MBD 革新部 広島大学 同上 MBD 革新部 同上 広島大学
		Study of Wave and Breakup Formation on Water Film by Steady and Pulsating Gas Flow in A Rectangular Duct	秋山 京介 中田昇太郎 馬 季 西田 恵哉 山本 亮 中村 和博 丸井堅太郎 横畑 英明 尾形 陽一	広島大学 同上 同上 同上 MBD 革新部 同上 同上 同上 広島大学
2019.11.7-8	Editorial Department of International Journal of Hydromechanics 20th International Conference of Fluid Power and Mechatronic Control Engineering	Unsteady aerodynamics of automobile under real-world conditions	中島 卓司 中村 優佑 平岡 武宜 清水 圭吾 農沢 隆秀	広島大学大学院 同上 技術研究所 同上 同上

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2019.11.8	Automotive E/E Architecture Technology China Conference in Shanghai, China	Future Mobility comes true through the Model Based Development	足立 智彦	統合制御システム開発本部
2019.11.11-14	NACE International NACE International East Asia & Pacific Area Conference	Analysis of hydrogen states present in vicinity of the fracture surface under elastic region for ferrite-martensitic dual-phase steel	浅里 大地 溝上 達志 深堀 貢 高井 健一	上智大学 技術研究所 同上 上智大学
2019.11.17-22	Association for Computing Machinery & IEEE Computer Society Supercomputing Conference 19	Detailed analysis of target scattering and propagation structure for onboard radar by FDTD method	奥木 友和	技術研究所
2019.11.18-20	Asia-Pacific Vibration Conference The 18th Asia-Pacific Vibration Conference	Vibration characteristics of seated human bode under exposure to vertical whole-body vibration in wide frequency range	G. Tamaoki K. Sugimoto T.Yoshimura Y. Kitahara K. Yamashita	首都大学東京 同上 同上 技術研究所 同上
		Motion and vibration control of automotive drivetrain with control cycle limitation	米沢 平成 梶原 逸朗 西留 千晶 波多野 崇 坂田 将人 平松 繁喜	北海道大学 同上 キャテック (株) 統合制御システム開発本部 同上 同上
2019.12.13-17	日本機械学会・韓国機械学会・米国熱流体工学会 2019Extended Abstracts of The Second Pacific Rim Thermal Engineering Conference	Feasibility Study of Membrane Filter for Gasoline Particulate Filter through Electron Microscopic Time-lapse Visualization of Soot Trapping Process	伊原 哲志 栗田 寛之 荒木 崇至 村上 浩 花村 克悟	東京工業大学 走行・環境性能開発部 MBD 革新部 走行・環境性能開発部 東京工業大学
		Calculation of the Human-body Thermo-Physiological Exergy Balance Model for the Evaluation of Thermal Sensation	岡部 力也 永野 秀明 宿谷 昌則 白鳥 英 島野健仁郎 横田 和也 加嶋 利浩	東京都市大学 同上 同上 同上 同上 技術研究所 装備開発部

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
2019.1.16	軽金属溶接協会 軽金属溶接	アルミニウム／CFRPの異種材料接合技術	西口 勝也 田中耕二郎 杉本 幸弘	技術研究所 同上 同上
2019.1.18	リードエグジビジョンジャパン (株) クルマの軽量化技術展「軽量化革新 フォーラム 2019」	アルミニウムと異種材料の点接合技術	杉本 幸弘	技術研究所
2019.1.21	新構造材料技術研究組合 革新的新構造材料等研究開発 平成 30 年度成果報告会	アルミニウム／異種材料の点接合技術	西口 勝也	技術研究所
		異材接合技術への取り組み	杉本 幸弘	技術研究所
2019.1.25	コニカミノルタ (株) 開発プロセスにデジタルイノベー ションをおこすために～データや AI 活用によるプロセス革新の最前線	材料モデルベース研究 (Model Based Research) に基づくマツダのモノづくり 革新	甲斐 裕之	技術研究所
2019.1.25	応用物理学会 電子デバイス界面テクノロジー研究 会	雰囲気制御 X 線光電子分光によるゲート 積層薄膜界面深さ方向分布の時系列解析 法の開発	豊田 智史 山本 知樹 横山 和司 住田 弘祐 三根生 晋	兵庫県立大学 同上 同上 技術研究所 同上
2019.1.27	日本安全運転・医療研究会 第 3 回日本安全運転・医療研究会	マツダが考える自動運転「MAZDA Co-Pilot Concept」の目指す姿	山本 雅史	技術研究所
2019.1.31-2.1	省エネルギーセンター ENEX2019 第 43 回地球環境とエネ ルギーの調和	ENEX2019 での TherMAT の取組みパンフ レットへの記事提供	種平 貴文	技術研究所
2019.2.8	日本塗装技術会 平成 30 年度 第 3 回講演会	自動車塗装の質感定量化技術について	久保田 寛	技術研究所
2019.2.14-15	日本大学生産工学部・(株) インブ レス 第 7 回自動車技術に関する CAE フォーラム 2019 in 東京	塗装乾燥炉工程における、車体品質予測 技術構築への取り組み	問註所久史 神高 弘樹	ボデー開発部 同上
		マツダの目指す MBD と車両電装システム 開発での適用事例	浜田 康	電子性能開発部
2019.2.18	一般社団法人組込みシステム技術協 会 第 2 回 JASA 中四国協業セミナー in 広島	デジタルで進化する 次世代自動車とモビ リティ産業の変革 マツダの目指す共創社会	後藤 誠二	統合制御システム開発本部
2019.2.22	自動車技術会 構造強度部門委員会 公開委員会	亀裂進展予測ワーキンググループ活動報 告「ハイテン材における延性亀裂進展の 予測技術に関する研究」	金本 俊介	MBD 革新部
2019.2.22	自動車技術会 新開発エンジンシンポジウム	新開発 SKYACTIV-D1.8 の紹介	牛谷 真樹	エンジン性能開発部
2019.2.22	精密工学会 第 400 回講習会「次世代の内燃機関 を支える精密加工技術」	SKYACTIV エンジンに関する研削加工技術	是永 義憲	パワートレイン技術部
2019.2.27	精密工学会 第 104 回難削材加工専門委員会	モデルベース開発によるエンジン加工の 高能率追究	木瀬 浩一	パワートレイン技術部
2019.3.1	生産加工研究会 第 68 回研究会	SKYACTIV エンジンに関する研削加工技術	是永 義憲	パワートレイン技術部
2019.3.4	新エネルギー・産業技術総合開発機 構 NEDO 未利用エネルギーの革新的活 用技術シンポジウム	モータ／インバータ用吸熱モジュールの 開発	種平 貴文	技術研究所

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2019.3.5	腐食防食学会 中国・四国支部 2019 年材料と環境研究発表会	γ -FeOOH- 鉄板界面での Fe ₃ O ₄ さびの生成に対する温度および湿度の影響 電着塗装鋼板のふくれによる劣化現象の迅速評価法	田中 秀和 福原 俊介 江崎 達哉 重永 勉 MIN KYUNG SOO 磯本 良則 浅田 照朗 重永 勉	島根大学 同上 技術研究所 同上 広島大学 同上 技術研究所 同上
2019.3.5	日本機械学会 傷害バイオメカニクス研究会 第 19 回日本機械学会 傷害バイオメカニクス研究会	乗員の筋緊張を考慮した内因性事故の逆解析による衝突直前の乗員挙動の実態把握	岩下 洋平 山本 康典 中畑洋一朗 一杉 正仁	技術研究所 同上 情報制御モデル開発部 滋賀医科大学
2019.3.5-7	日本 LCA 学会 第 14 回日本 LCA 学会研究発表会	LCA による内燃機関自動車と BEV の CO ₂ 排出量の算定	河本 竜路 望月 英生 森口 義久 中野 隆裕 本橋 真之 酒井 裕司 稲葉 敦	技術企画部 同上 同上 同上 商品戦略本部 工学院大学 同上
2019.3.5-7	日本音響学会 2019 年春季研究発表会	自動車内の音像定位に関する検討	田中 康治 江崎 雄也 木村 勝 釜谷 悠介 若松 功二 山中 尋詞	三菱電機 (株) 同上 同上 同上 電子性能開発部 同上
2019.3.6-8	日本複合材料学会・日本材料学会 第 10 回日本複合材料会議	LS-DYNA による CFRP 部材の自動車衝突解析に向けた取り組み 断面形状による、熱硬化性炭素繊維複合材を用いた中空フレームの曲げ強度向上の検討	西 正人 齋藤 啓 西原 剛史 金本 俊介 河村 力 西川 雅章 Bo Ren	(株) JSOL 同上 衝突性能開発部 MBD 革新部 技術研究所 京都大学 Livermore Software Technology
2019.3.7	日本機械学会 中国四国支部第 57 期総会・講演会	ロータリーエンジンにおける混合気形成に関する研究	趙 成光 田端 道彦 原 亮介 尹 正虎 張 武	近畿大学 同上 パワートレイン技術開発部 同上 同上
2019.3.13	京都合成樹脂研究会・京都市産業技術研究所 自動車に資するプラスチック材料・技術セミナー	自動車用樹脂材料の研究開発事例と今後の課題	朝野 千明	技術研究所
2019.3.13-15	日本植物生理学会 第 60 回植物生理学会年会	ナンクロロプシスの SPX 遺伝子のリン欠乏時の機能	岡崎久美子 堀 孝一 清水 信介 澤 祥平 野村 誠治 斎藤 史彦 山本 卓 太田 啓之 坂本 敦	広島大学 東京工業大学 同上 広島大学 技術研究所 同上 広島大学 東京工業大学 広島大学
2019.3.14-15	インダストリアル・バリューチェーン・イニシアティブ IMI 公開シンポジウム 2019	グループワーキング報告 「素材製造ラインによる品質向上～見える化のその先へ～」 エコロジーなエコシステムでエコノミー～環境配慮と高生産性の共存～	今野 康之 市本 秀則	パワートレイン技術部 生産企画部

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属	
2019.3.14-15	インダストリアル・バリューチェーン・イニシアティブ IVI 公開シンポジウム 2019	グループワーキング報告 「人・モノの実績可視化/動作分析と最適化」	杉山 裕基	生産企画部	
		グループワーキング報告 「AIにおける生産ラインの生産性向上/自動化進展と品質改善」	市本 秀則	生産企画部	
		グループワーキング報告 「部品輸送トラックの位置把握と輸送時間の実績収集による最適化」	奥屋 太志	車両技術部	
2019.3.20	イノベティブ・デザイン LLC システムズエンジニアリング/ Model-Based システムズエンジニアリング シンポジウム 2019	実践から得られたシステムズエンジニアとしての成長と気づき	休坂 慎也	統合制御システム開発本部	
2019.3.25	自動車技術会生産加工部門委員会 第 70 回技術交流会	深化した魂動デザインを実現するインバース技術の開発	上西 宏幸	車両技術部	
2019.5.14-15	光産業技術振興協会 2019 年度第 1 回自動車・モビリティフォトニクス研究会	Comparative Analysis on the EMC Characteristics of 1Gbps Electrical and Optical Ethernet	河淵 量平	商品戦略本部	
2019.5.15	山口県高等学校教育研究会工業部会 平成 31 年度山口県高等学校教育研究会工業部会	人間工学と感性工学に基づく次世代自動車の開発	西川 一男	技術研究所	
2019.5.21	東陽テクニカ・ドアサミット	新型 C カーサイドドア開発	高谷 洋隆	ボデー開発部	
2019.5.22	リード エグジビジョン ジャパン (株) 関西 接着・接合 EXPO	自動車における構造接着技術の動向と課題	山本 研一	技術研究所	
2019.5.22-24	自動車技術会 2019 年 春季大会 学術講演会	構造用接着剤における CAE 破断予測手法に関する研究 (第 1 報)	堀内 伸	産業技術総合研究所	
			関口 悠	東京工業大学	
			石橋 慶輝	日産自動車 (株)	
			岡村 昌浩	(株) JSOL	
			黒田 一平	衝突性能開発部	
			若松 顕都	トヨタ車体 (株)	
			手塚 翔太	ヤマハ発動機 (株)	
			玉置 健二	アイシン精機 (株)	
			岩本 光宏	(株) SUBARU	
			玉置 秀行	スズキ (株)	
			渡辺晋太朗	トヨタ自動車東日本 (株)	
			太田垣 良	伊藤忠テクノソリューションズ (株)	
			古沢 透流	(株) 本田技術研究所	
			近澤 亮介	トヨタ自動車 (株)	
			伊原 涼平	(株) 神戸製鋼所	
			車体の減衰制御構造の開発	中川 興也	技術研究所
			山本 研一	同上	
			氷室 雄也	同上	
			渡邊 重昭	ボデー開発部	
			棗 裕貴	同上	
川野 晃寛	同上				
小橋 正信	同上				
吉田 智也	同上				
三好 雄二	NVH 性能開発部				
伊藤 司	操安性能開発部				
減衰性に優れた構造用接着剤の開発	氷室 雄也	技術研究所			
山本 研一	同上				
吉田 智也	ボデー開発部				
鍵元 皇樹	車体技術部				
八巻 悟	同上				
片岡 伸介	車両技術部				
小林 敏雄	サンスター技研 (株)				
柳澤 祥平	同上				
西田 貴富	同上				

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2019.5.22-24	自動車技術会 2019年 春季大会 学術講演会	人体局所部位のエクセルギー収支と温冷感の分析(第二報)―接触熱伝導のモデル化がエクセルギー消費に及ぼす影響―	岡部 力也 永野 秀明 宿谷 昌則 白鳥 英 島野健仁郎 横田 和也 加嶋 利浩	東京都市大学 同上 同上 同上 同上 技術研究所 車両開発本部 装備開発部
		顕著な空気抵抗増加の要因となる車両後流構造のヨー角応答特性	中島 卓司 濱村 航明 中村 優佑 土井 康明 清水 圭吾 平岡 武宜 農沢 隆秀	広島大学 同上 同上 同上 技術研究所 同上 同上
		車線変更が必須である交通環境下における 他車の割り込み場所の推定	杉本 瑞生 禹ハンウル 田村 雄介 山崎 慎也 黒田 康秀 菅野 崇 山本 康典 山下 淳 浅間 一	東京大学 秋田県立大学 東京大学 技術研究所 同上 同上 同上 東京大学 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	岡田 又治	車体技術部
2019.5.24	日本材料学会 第4回マルチスケール材料力学シンポジウム	C-H-O-Fe系原子間ポテンシャルの開発とDLC 摺動解析への応用	神田 英慈 小林 森 高本 聡 波田野明日可 泉 聡志 河口健太郎 宮内 勇馬	東京大学 同上 同上 同上 同上 技術研究所 同上
2019.5.25-26	日本材料学会 第68期学術講演会	アルミニウム/CFRPの異材点接合技術	西口 勝也	技術研究所
		摩擦攪拌点接合によるAl合金/CFRP異種接合継手の変動荷重下に対する疲労強度評価	中原 文弥 小川 裕樹 曙 紘之 田中耕二郎 菅田 淳	広島大学大学院 広島大学 同上 技術研究所 広島大学
2019.5.26	日本設計工学会 2019年度春季大会研究発表講演会	恒等写像ニューラルネットワークと状態遷移モデルを用いた自動車制御システムのタイムアクシスデザイン	古郡 了 末富 隆雅 加藤 健郎 松岡 由幸	技術研究所 統合制御システム開発本部 慶應義塾大学 同上
2019.6.3-5	日本ゲノム編集学会 日本ゲノム編集学会第4回大会	油糧微細藻類 Nannochloropsis における除去可能プラチナ TALEN ベクターを利用した外来遺伝子フリー高効率ゲノム編集	栗田 朋和 諸井 桂之 岡崎久美子 坂本 敦 佐久間哲史 山本 卓 岩井 雅子 太田 啓之 高見 明秀 野村 誠治 斉藤 史彦	広島大学 同上 同上 同上 同上 同上 東京工業大学 同上 技術研究所 同上 同上
2019.6.6	ソフトウェアシンポジウム 2019 ワーキンググループ (WG) 7 本当は難しいソフトウェアプロダクトライン	マツダにおけるソフトウェアプロダクトライン (SPL) 取り組み事例	平田 篤識 多賀 俊樹	統合制御システム開発本部 デジタルソリューション (株)
2019.6.7	日本鑄造工学会 第1回鑄造 CAE 研究部会	「走る喜び」の実現に向けたシリンダーヘッド寸法のモデルベース開発	梅原 美友	パワートレイン技術部

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2019.6.12	日本溶接協会 2018年度 日本溶接協会賞	自動車足回り向けスラグ低減溶接プロセスの実用化	井海 和也 山崎 亮太 鈴木 励一 田中 正顕 深堀 貢	(株) 神戸製鋼所 同上 同上 シャシー開発部 技術研究所
2019.6.13	富士通 (株) 富士通 LS-DYNA セミナー2019	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
2019.6.13	自動車技術会 マルチメディア部門委員会 マルチメディア部門委員会 話題提供	V2X・レーダ開発のための電波シミュレーション技術	奥木 友和	技術研究所
2019.6.14	広島市立大学・広島修道大学 二大学連携講義 プロジェクトマネジメント論	企業活動とプロジェクトマネジメント	白 雪峰	統合制御システム開発本部
2019.6.15-16	日本人間工学会 日本人間工学会第 60 回大会	ペダル操作時にかかとをつけて操作することの効果	堀上 正義 上村 裕樹 大坪 智範	車両実研部 同上 同上
2019.6.20-21	型技術協会 第 33 回型技術者会議 2019	「走る歓び」の実現に向けたシリンダーヘッド寸法のモデルベース開発 魂動デザインの深化を実現するこだわりのモノづくり ～プレス成形技術の開発～ 世界初 1.3GPa 冷間プレス部品の量産実現に向けた、ハイテンプレス金型製造プロセス革新	梅原 美友 中村 武 畑平 拓也 松永 明子 上村 勝利 秋月 匠 岡山 一洋	パワートレイン技術部 車体技術部 ツーリング製作部 同上 同上 同上 同上
2019.6.21	ダッソー・システムズ (株) Dassault Systèmes User Conference 2019	「SFE-Concept」を使ったボデーの設計パラメータ検討事例	松岡 智恵	ボデー開発部
2019.6.24	広島経済同友会ものづくり委員会 2019年度デジタルものづくり塾 (プレス成形金型)	マツダ(株)プレス成形金型領域の取り組み紹介	岡田 又治	車体技術部
2019.6.26	自動車技術会 第 8 回 燃料潤滑油委員会	混合潤滑域の摩擦予測モデルについての開発	和田 茂	パワートレイン技術開発部
2019.6.26	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”	湊 允哉	技術研究所
2019.6.27-28	一般社団法人 品質工学会 第 27 回 品質工学研究発表大会	バンパー金型の多層盛り溶接条件最適化 非接触測定精度向上の取り組み 樹脂金型の小径加工における切削工具及び条件の最適化	鈴木 健太 安楽 健次 中山 光一 長澄 徹侍 木下 光雅 田中健太郎 宮川英里也 大宅 雅巳 影山 貴大 江草 秀幸 河野 優 向川 知加 牧本 亮平 中原 孝善 大田 敦史 橋本 昭 廻本 章吾 江草 秀幸 叶井 貫 大田 敦史 橋本 昭	ツーリング製作部 同上 同上 同上 同上 同上 同上 同上 ツーリング製作部 同上 同上 同上 同上 同上 同上 ツーリング製作部 同上 同上 同上 同上

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2019.7.2	産業技術総合研究所 材料診断フェア～樹脂系材料の変革期に応える企業支援ネットワーク～	マツダにおける材料分析の取り組み	住田 弘祐	技術研究所
2019.7.11	Realize LIVE Japan 2019 -Realize Innovation- Today, Tomorrow, Together	欧米で進行する戦略的標準化活動を鑑み、日本における JT 活用の今後を考える	鐵本 雄一	エンジニアリングシステム部
2019.7.12	東京大学 生産技術研究所 半場研究室 第 56 回 LES 研究会	複雑形状における渦構造の同定手法について	中村 優佑 中島 卓司 平岡 武宜 清水 圭吾 農沢 隆秀	広島大学 同上 技術研究所 同上 同上
2019.7.12	自動車技術会中部支部 2019 年度 第 1 回 技術交流会	エンジン制御を中心とした MBD の現状と将来	小森 賢	統合制御システム開発本部
2019.7.12	SCSK 株式会社 ADVENTURECluster ユーザー会 2019	ENG 大規模モデルにおける疲労オプション導入検討	中野 徹	MBD 革新部
2019.7.18	山口大学 研究開発戦略特論	自動車分野の研究開発戦略	坂本 和夫	技術研究所
2019.7.23	ひろしまデジタルイノベーションセンター 第 4 回 MBD エンジニアフォーラム	構造最適化 CAE 勉強会	釘持 寛正	技術研究所
2019.7.26	日本塗装技術協会 2019 年度アンコール大阪講演会	自動車塗装の質感定量化技術について	久保田 寛	技術研究所
2019.8.1	広島大学大学院工学研究科生体システム論研究会 生体電気工学講義	生体電気工学に基づく自動車開発	西川 一男	技術研究所
2019.8.2	日本機械学会 ブレーキの摩擦振動研究会 第 21 回『摩擦振動を中心とした談話会』	モーンノイズ 開発事例紹介	村上 大輔 姫野 信幸	シャシー開発部 (株) エステック
2019.8.7	日本大学生産工学部・名城大学・(株) インプレス 自動車技術に関する CAE フォーラム 2019in 名古屋	マツダの目指す MBD と車両電装システム開発での適用事例	浜田 康	電子性能開発部
2019.8.9	技術情報協会 自動車室内 VOC・においの遮減法と濃度分析	車室内内装材から発生する VOC の特定と対策	市川 智士	車両実研部
2019.8.12	計測自動制御学会 SICE Annual Conference 2019	Plant Model Interface Guideline Proposal for Automotive	足立 智彦 小森 賢 平松 繁喜	統合制御システム開発本部 同上 同上
2019.8.23	ひろしま感性イノベーション推進協議会 感性イノベーション講座 2019 テーマ別講座	将来に向けての人間中心の車開発	西川 一男	技術研究所
2019.8.27-30	日本機械学会 機械力学・計測制御部門 Dynamics and Design Conference 2019	断片線形型動吸振器による複数モード制振	吉村 孝史 近藤 孝広 森 博輝 宗和 伸行 栗原 海 吉武 達弘 住川 大樹	ボデー開発部 九州大学 同上 同上 同上 同上 同上
2019.8.29-30	自動車技術会 自動車サイバーセキュリティ講座	「自動車アーキテクチャ概論と脅威事例への対応」	山崎 雅史	MDI&IT 本部

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2019.9.1-3	日本実験力学会 日本実験力学会 2019 年度年次講演会	EBSD によるボルト締結めねじ谷底部の歪評価技術の検討	定井 麻子 渡邊 忠俊 住田 弘祐 清水 一郎	技術研究所 同上 同上 岡山理科大学
2019.9.2	自動車技術会 生産加工部門委員会 第 71 回 技術交流会	車両状態での ECU ソフトウェア書込み技術の開発	山田 活弘	車両技術部
2019.9.3	新構造材料技術研究組合 ISMA テーマリーダー会議 2019	ISMA のマルチマテリアル化に関するパネルディスカッション	杉本 幸弘	技術研究所
2019.9.3-7	日本ロボット学会 第 37 回 日本ロボット学会学術講演会	ステアリング操舵時における手先コンプライアンス特性	大澤 崇広 積際 徹 横川 隆一 成末 充宏 武田 雄策 原 利宏	同志社大学 同上 同上 技術研究所 同上 同上
		つまみ回転操作時における示指・拇指のコンプライアンス特性	織田 悠平 積際 徹 横川 隆一 成末 充宏 武田 雄策 原 利宏	同志社大学 同上 同上 技術研究所 同上 同上
		示指・拇指によるつまみ回転操作時の筋・脳賦活解析	岡谷 梨央 積際 徹 横川 隆一 成末 充宏 西村 啓人 武田 雄策 原 利宏	同志社大学 同上 同上 技術研究所 同上 同上 同上
2019.9.4	2019 年度 SSDS/JMAC 技術講演会	人間特性に基づく自動車車室内 情報伝達音の開発	浜田 康	電子性能開発部
2019.9.4-6	日本音響学会 2019 年秋季研究発表会	結合音を用いた車内サウンドデザインの検討	山際 納月 石光 俊介 谷本 典之 藤川 智士 松本 貢典 村上 泰樹	広島市立大学 同上 同上 PT 開本 エンジン性能開発部 大島商船高専
2019.9.5-6	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／Spring-8 利用推進協議会 第 16 回 Spring-8 産業利用報告会	ゴム材料の XAFS-SAXS 同時分析による反応状態解析	三根生 晋 百崎賢二郎 大下 敬之 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 ひょうご科学技術協会 同上 同上 同上 同上
2019.9.8-11	日本機械学会 2019 年度年次大会	HCCI エンジンのサイクル間ばらつきメカニズムの把握 —ニューラルネットワークモデルの分析—	酒向優太郎 武藤 優哉 山崎 由大 金子 成彦 疋田 孝幸 水野 沙織 藤井 拓磨	東京大学 同上 同上 同上 パワートレイン技術開発部 同上 同上
		せん断引張負荷を受けるボルト締結体の剛性について	渡邊 忠俊 橋村 真治 大久保信吾 上別府和照	技術研究所 芝浦工業大学 同上 同上
2019.9.8-12	応用統計学会 2019 年度統計関連学会連合大会	正定値行列の一般化平均 一色認知空間上の楕円予測	江口 真透 中本 尊元 西井 龍映	統計数理研究所 車両開発本部 長崎大学

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2019.9.10-11	アルテアエンジニアリング (株) 2019 Japan ATC (Altair Technology Conference)	Squeak and Rattle Director (SnRD) によるインパネ異音解析の車両開発への適用 MVD による業務効率化	榎井 茜 小林 知春	技術研究所 MBD 革新部
2019.9.11-13	日本鉄鋼協会 日本鉄鋼協会 第 178 回秋季講演大会	複合組織型高強度鋼の異なる水素脆化評価法による破壊形態の比較	浅里 大地 高井 健一 溝上 達志 深堀 貢	上智大学 同上 技術研究所 同上
2019.9.12	日本金属学会・日本鉄鋼協会 2019 年秋季講演大会合同シンポジウム	自動車の革新を支える材料技術への期待と課題 ～材料 MBR による挑戦～	坂手 宣夫	技術研究所
2019.9.12	自動車技術会 自動車開発における人間工学の理論と実践ードライバーの特性を考えた車づくりー	女性の不安解消に着目した 視界・ドライビングポジション	松葉 慶暁 藤村 絵梨	車両実研部 同上
2019.9.14	日本感性工学会 第 21 回日本感性工学会大会	柄テクスチャと色による浴室壁柄の質感表現と画像統計量の関係 漆黒の嗜好・質感評価におけるグローバルな地域差と光学特性との関係	東 麻美子 加藤 智久 渡邊 雅之 高山 雅年 梶川 浩子 赤峰 真明 渡辺 雅之 道田奈々江 西川 一男 下出祐太郎	TOTO (株) 同上 技術研究所 技術研究所 同上 同上 同上 同上 同上 京都産業大学
2019.9.18-20	中国自動車工学学会・自動車軽量化技術革新戦略連盟 2019 (第 13 回) 自動車軽量化大会および展覧会	Mazda Environment Initiatives and Challenges for Weight Reduction by Material Model Based Research	遊川 秀幸	技術研究所
2019.9.18-20	リード エグジビション ジャパン (株) 名古屋 クルマの軽量化 技術展 革新フォーラム	自動車における構造接着技術の動向と課題	山本 研一 麻川 元康 氷室 雄也 中川 興也	技術研究所 同上 同上 同上
2019.9.19	リード エグジビション ジャパン (株) 第 2 回名古屋スマート工場 EXPO	製造現場における検査工程のスマート化～IVI 実証実験 (DeepLearningLearning, AI 適用) より～	市本 秀則	生産企画部
2019.9.19-20	第 4 回 BYK-Gardner ユーザーミーティング	統計モデルによる等色楕円の予測とカラーマッチングへの適用	中本 尊元	車両開発本部
2019.9.25	素形材センター 2019 年度素形材技術セミナー	クランクシャフト鍛造ラインにおける IOT の取組	今野 康之	パワートレイン技術部
2019.9.25-27	日本機械学会 第 29 回設計工学・システム部門講演会	ロバスト設計を利用した区間変数設計の提案 散布図行列と並行座標プロットを併用した大規模設計データのインタラクティブ可視化	荒川 雅生 佛圓 哲朗 宇根崎 弘 平松 繁喜 近藤 俊樹 立川 智章 大山 聖 小平 剛央 鈿持 寛正	香川大学工学研究院 同上 統合制御システム開発本部 同上 技術研究所 東京理科大学 宇宙航空研究開発機構 技術研究所 同上
2019.9.25-27	日本機械学会 第 29 回設計工学・システム部門講演会	多様な走行場と複数ユーザに対応した価値成長モビリティのタイムアクシスデザイン	古郡 了 末富 隆雅 加藤 健郎 松岡 由幸	技術研究所 統合制御システム開発本部 慶應義塾大学 同上
2019.9.27	自動車技術会 関西支部 2019 年度講演会	エンジン筒内の非正常温度予測	山本 亮	MBD 革新部

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2019.10.9-11	自動車技術会 2019年 秋季大会 学術講演会	火花点火制御圧縮着火エンジンの開発に 適用する燃焼予測技術	河野 通治 三好 明 下栗 大右 寺島 洋史 横畑 英明 幸徳 正信 植木 義治 本田 雄哉 谷井 透汰	MBD 革新部 広島大学 同上 北海道大学 MBD 革新部 同上 同上 同上 同上
		火花点火制御圧縮着火を実現する燃焼技 術	井上 淳	エンジン性能開発部
		火花点火制御圧縮着火を導入した新型 2.0L ガソリンエンジンの開発	末岡 賢也	エンジン性能開発部
		自動車エアクリーナ内の乱れ抑制に関す る研究 (第1報)	井上 祐哉 大木 純一 久家由紀香 中田昇太郎 西田 恵哉 尾形 陽一 山本 亮 柳田 春奈 横畑 英明	広島大学 同上 同上 同上 同上 同上 MBD 革新部 同上 同上
		自動車エアクリーナ内の乱れ抑制に関す る研究 (第2報)	山本 亮 寿美 眞治 柳田 春奈 鷹村 優太 中川 博勝 西田 恵哉 尾形 陽一 井上 祐哉 大木 純一 久家由紀香	MBD 革新部 同上 同上 エンジン設計部 同上 広島大学 同上 同上 同上 同上
		構造用接着剤における CAE 破断予測手法 に関する研究 (第2報)	堀内 伸 関口 悠 石橋 慶輝 岡村 昌浩 黒田 一平 若松 頭都 手塚 翔太 玉置 健二 岩本 光宏 玉置 秀行 渡辺晋太郎 太田垣 良 古沢 透流 近澤 亮介 伊原 涼平	産業技術総合研究所 東京工業大学 日産自動車 (株) (株) JSOL 衝突性能開発部 トヨタ車体 (株) ヤマハ発動機 (株) アイシン精機 (株) (株) SUBARU スズキ (株) トヨタ自動車東日本 (株) 伊藤忠テクノソリューションズ (株) (株) 本田技術研究所 トヨタ自動車 (株) (株) 神戸製鋼所
		固有値および動剛性の最大化を目的とす る複数材料トポロジー最適化	和田 有司 弓削 康平 海氣 絵里 木崎 勇 橋田 光二	神戸大学 成蹊大学 衝突性能開発部 同上 MBD 革新部
		新たな前面衝突試験方法に関する研究	中嶋 太一 新井 勇司 渡辺 泰介 黒田 一平 國司 大地	日本自動車研究所 同上 日産自動車 (株) 衝突性能開発部 トヨタ自動車 (株)

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2019.10.9-11	自動車技術会 2019年 秋季大会 学術講演会	大規模データを用いた凍結防止塩散布地域の腐食環境分析	喜久山良弼 本延 愛梨 濱田 有子 福田 克弘 中本 尊元 山根 貴和	車両実研部 同上 同上 同上 同上 同上
		レーンチェンジを行うドライバのモデル パラメータによる運動性能評価の妥当性 分析	塚野 孝俊 中山 祥平 鈴木 隆将 狩野 芳郎 山門 誠 安部 正人	操安性能開発部 神奈川工科大学 同上 同上 同上 同上
		過渡応答解析によるインパネ異音解析と 異音の熱劣化評価への適用	伊藤 和樹 井上 実 榎井 茜 山川 輝翔 土居 達裕 石橋 幸佑	装備開発部 同上 技術研究所 車両実研部 同上 同上
		衝突時の車体構造における Ustar (U*) に よるエネルギー吸収特性の表現	岡村 優希 櫻井 俊彰 槇 徹雄 高橋 邦弘 本田 正徳 河村 力	東京都市大学 同上 同上 慶応義塾大学 技術研究所 同上
		側方走行車両により簡易車両モデルに生 じる空気力の履歴効果	清水 圭吾 中島 卓司 平岡 武宜 中村 優佑 農沢 隆秀 土井 康明	技術研究所/広島大学 広島大学 技術研究所 広島大学 技術研究所 広島大学
		自動車空力特性に関する多目的形状最適 化フレームワークの構築	池田 隼 中野 樹 犬井 太一 福本 浩章 大山 聖 平岡 武宜 清水 圭吾 中島 卓司 坪倉 誠	神戸大学 同上 同上 宇宙航空研究開発機構 同上 技術研究所 同上 広島大学 神戸大学/理化学研究所
		アルミニウム/樹脂異種材料点接合の強 度特性に及ぼす表面処理の影響	田中耕二郎 杉本 幸弘 西口 勝也 小川 裕樹	技術研究所 同上 同上 広島大学
		加減速領域における貴金属シングルナノ 粒子触媒の Nox 浄化メカニズム解明	松村 益寛 中西 美恵 重津 雅彦 松本 祐樹 國府田由紀 岡田 健太 住田 弘祐 山田 啓司	技術研究所 同上 同上 同上 同上 同上 同上 同上
		均質化法による発泡樹脂吸音材の材料内 部構造のモデル化技術の開発	山川 啓介 桂 大詞 山本 崇史	マツダ (株) 同上 工学院大学

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2019.10.17-18	第 34 回日本整形外科学会 基礎学術集会	座位アライメントの違いが人体傷害解析 モデルに与える影響	西田 周泰 山縣 大樹 今城 靖明 鈴木 秀典 中島 大介 三原 惇史 加藤恵圭彦 坂井 孝司 蔣 飛 大木 順司 陳 献 岩永 秀幸 泉山 朋大 朝日 龍介 杉本 繁 福島 正信	山口大学 同上 同上 同上 同上 同上 同上 同上 同上 同上 同上 同上 衝突性能開発部 同上 同上 同上
2019.10.18	自動車技術会 第 8 回インパクトバイオメカニクス 部門委員会	Analysis of Individual Differences in Pelvic Shape and its Impact on the Seatbelt Kinematics in a Collision	泉山 朋大 西田 周泰 岩永 秀幸 陳 献 大木 順司 朝日 龍介 杉本 繁 福島 正信	衝突性能開発部 山口大学 同上 同上 同上 衝突性能開発部 同上 同上
2019.10.18	広島県 EMC 研究会特別事業講習会	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	電子性能開発部
2019.10.21	東北大学産学官広域連携センター・ 東北経済産業局 自動車関連技術セミナー	車体のマルチマテリアル化とその要素技 術	杉本 幸弘	技術研究所
2019.10.24-29	スガウェザリング技術振興財団 スガウェザリング学術講演	自動車塗膜中の HALS メカニズムの定量的 検討	久保田 寛	技術研究所
2019.10.28	日本機械学会 連続講習会「機械－電気の統合モデ ルによるモデルベース開発」	マツダ（株）における適用事例	平松 繁喜	統合制御システム開発本部
2019.10.29-30	ダッソー・システムズ（株） 2019 SIMULIA Community Conference Japan	塗装乾燥炉工程における車体品質予測技 術	神高 弘樹	ボデー開発部
2019.11.1	モデルオン（株） Modelica Users' Conference 2019 Japan	マツダにおける Modelica 活用状況と今後 の展望	小森 賢	統合制御システム開発本部
2019.11.6	自動車技術会 蓄電システム技術委員 会 第 11 回蓄電システム技術部門委員 会	新型 MAZDA3 M Hybrid デバイス開発	藤田 弘輝	技術研究所
2019.11.6-8	日本航空宇宙学会 第 63 回宇宙科学技術連合講演会	マツダのモデルベース開発とシステムズ エンジニアリングへの取り組み	佃 厚典 休坂 慎也 末富 隆雅 今田 道宏	統合制御システム開発本部 同上 同上 同上
2019.11.6-8	(株) JSOL JSOL CAE フォーラム	ハイテン材における延性亀裂進展の予測 技術に関する研究	金本 俊介	MBD 革新部
		シリカ基材を修飾するシランカップリン グ剤層構造の分子モデリング	岡田 健太	技術研究所（広島大学出向）
		Digmat-FE による繊維－樹脂界面特性を 考慮した繊維強化樹脂の力学特性モデル	平本 健治	技術研究所
2019.11.7	山口大学 研究開発戦略特論	自動車分野の研究開発戦略	坂本 和夫	技術研究所

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2019.11.7-8	日本機械学会 第 97 回 流体工学部門 講演会	Numerical Simulation of Combustion in a Rapid Compression Machine (RCM)	Rahul Bale Wei-Hsiang Wang Chung-Gang Li Keiji Onishi Kenji Uchida Hidefumi Fujimoto Makoto Tsubokura	理化学研究所 同上 神戸大学 理化学研究所 技術研究所 同上 理化学研究所, 神戸大学
		自動車周りの渦構造の同定手法	中村 優佑 中島 卓司 平岡 武宜 清水 圭吾 農沢 隆秀	広島大学大学院 同上 技術研究所 同上 同上
		空気抵抗および揚力の低減を目的としたセダン型簡易車両の多目的形状最適化	池田 隼 中野 樹 福本 浩章 大山 聖 平岡 武宜 清水 圭吾 中島 卓司 坪倉 誠	神戸大学 同上 宇宙航空研究開発機構 同上 技術研究所 同上 広島大学 神戸大学/理化学研究所
2019.11.7-9	電子スピサイエンス学会 第 58 回電子スピサイエンス学会 年会	塗膜中の光安定剤 (HALS) の機能発現と反応機構	駒口 健治 早川慎二郎 河邊 光祥 湊 允哉	広島大学 同上 技術研究所 同上
2019.11.8	自動車技術会 CFD 技術部門委員会 第 10 回 CFD 技術部門委員会	複雑な流れ場における渦構造の同定手法	中村 優佑 中島 卓司 平岡 武宜 清水 圭吾 農沢 隆秀	広島大学大学院 同上 技術研究所 同上 同上
2019.11.8-10	日本機械学会 第 62 回自動制御連合講演会	ガウス過程回帰を用いたエンジンシリンダー内の空気充填効率を推定するソフトウェアモデリング検討	小川 史恵 桑原 一徳 松江 浩太 清水 良 和田 正義	東京農工大学・PT 制御システム開発部 MBD 革新部 PT 制御システム開発部 パワートレイン開発本部 東京農工大学
		物理機能モデルを活用した非線形システムの状態量推定	米沢 平成 梶原 逸朗 西留 千晶 波多野 崇 坂田 将人 平松 繁喜	北海道大学 同上 キャテック (株) 統合制御システム開発本部 同上 同上
		非線形性を有する自動車操舵系のモデル化とモータによる角度追従制御	近藤 俊朗 米沢 平成 西留 千晶 梶原 逸朗 加藤 真 近藤 秀一 波多野 崇 坂田 将人 平松 繁喜	北海道大学 同上 キャテック (株) 北海道大学 統合制御システム開発本部 同上 同上 同上 同上
2019.11.12	慶應義塾大学 総合政策学部・環境情報学部 共通寄附講座「交通安全文化論」	マツダの安全への取り組み	伊東 哲夫 宮之原 央	技術企画部 同上
2019.11.12-13	プラスチック成形加工学会 成形加工シンポジウム '19	自動車用ポリプロピレン発泡体の構造制御と、気泡の微細・均質化制御が機械特性と断熱特性に与える影響	東中川圭介	技術研究所

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2019.11.12-14	内閣府総合科学技術・イノベーション会議／戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）自動運転推進委員会 「SIP-adus Workshop2019」	1,Keynote Speech 「Cybersecurity Plenary Session」 ・ Global Trends Automotive Guidelines/standards/others ・ Japan Trends Automotive regulations/Guidelines ・ Regulations and standardization schedule (forecast) 2,Workshop ・ セキュリティ法規・認証の最新動向と注力すべき研究領域	山崎 雅史	MDI&IT 本部
2019.11.14	ダッソー・システムズ（株） Dassault Systemes JAPAN SFE User Event 2019	議長挨拶 ―これまでの振り返り、SFE workshop in BERLIN―	木崎 勇	衝突性能開発部
2019.11.14-15	（株）IDAJ IDAJ CAE Solution Conference 2019	火花点火制御圧縮着火エンジンの開発に適用する燃焼予測技術	河野 通治	MBD 革新部
2019.11.15	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11回自動車用途コンポジットシンポジウム	ポリアミド樹脂を接着剤に用いて摩擦攪拌点接合した CFRP/Al の引張せん断強度評価	丹羽 一将 田中 和人 片山 傳生 西口 勝也	同志社大学 同上 同上 技術研究所
2019.11.15	京都大学 電気系教室懇話会	マツダの目指す MBD と車両電装システム開発での適用事例	手島 由裕	電子性能開発部
2019.11.16	早稲田大学 モビリティシンポジウム	火花点火制御圧縮着火を導入した SKYACTIV-X の紹介	末岡 賢也	エンジン性能開発部
2019.11.19	ガイオ・テクノロジー（株） ガイオ・テクノロジー プライベートセミナー「G-TEC 2019」	マツダの目指すモデルベース開発と共創～車載電子制御システムを中心に～	今田 道宏	統合制御システム開発本部
2019.11.20-22	日本燃焼学会 第57回燃焼シンポジウム	一次元詳細反応計算による衝撃波管内での炭化水素の自着火現象の解析	進士 勇太 下栗 大右 三好 明 山田 眞平 寺島 洋史 八房 智顯 乃生 芳尚 斉藤 史彦	広島大学 同上 同上 同上 北海道大学 広島工業大学 技術研究所 同上
		フラン類の混合が飽和炭化水素の着火遅れに及ぼす影響	山田 眞平 下栗 大右 三好 明 進士 勇太 遠藤 琢磨 八房 智顯 乃生 芳尚 斉藤 史彦	広島大学 同上 同上 同上 同上 広島工業大学 技術研究所 同上
		超音波による燃料噴射特性の変化	豊田 健吾 廣田 光智 齊藤 寛泰 佐藤 圭峰	室蘭工業大学 同上 芝浦工業大学 技術研究所
		定容容器内伝播火炎における未燃ガス局所自着火現象の解析	原 孝弥 山田 眞平 下栗 大右 三好 明 寺島 洋史 河野 通治 植木 義治 横畑 英明	広島大学 同上 同上 同上 北海道大学 MBD 革新部 同上 同上

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属		
2019.11.20-22	日本燃焼学会 第 57 回燃焼シンポジウム	Visualization of the end-gas auto-ignition phenomena of n-heptane in rapid compression machine	劉 雷 岩瀬 巧 山田 眞平 下栗 大右 三好 明 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 MBD 革新部 同上 同上 同上		
		燃焼室部分可視化 RCM を用いたガソリン サロゲート燃料におけるエンドガス局所 自着火の観測	岩瀬 巧 劉 雷 山田 眞平 下栗 大右 三好 明 寺島 洋史 河野 通治 本田 雄哉 谷井 透汰 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 MBD 革新部 同上 同上 同上 同上		
		Development of CO/O ₂ surface reaction mechanism on Pt/CeO _x catalyst including reactions of metal-support interface	Set NAING 下栗 大右 内藤 弘貴 日隈 聡士 I Putu Angga KRISTYAWAN 村上 浩 大森 智仁 竹林 広行 三好 明	広島大学 同上 同上 産業技術総合研究所 広島大学 走行・環境性能開発部 広島大学 走行・環境性能開発部 広島大学		
		三元触媒の担持材の吸蔵能に及ぼす 貴金属の影響	内藤 弘貴 Set NAING I Putu Angga KRISTYAWAN 大森 智仁 下栗 大右 日隈 聡士 村上 浩 竹林 広行 三好 明	広島大学 同上 同上 同上 同上 産業技術総合研究所 走行・環境性能開発部 同上 広島大学		
		2019.11.21-22	出光興産（株） 第 41 回切削油研究会	モデルベース開発によるエンジン加工の 高能率追究	木瀬 浩一	パワートレイン技術部
		2019.11.22	東レエンジニアリング（株） 3D TIMON お客様交流会	射出成形による繊維強化樹脂部品の寸法 予測精度向上の取り組み	古川 智司	車両技術部
		2019.11.23-25	計測自動制御学会 計測自動制御学会システム・情報部 門学術講演会 2019（SSI2019）	死角を含む走行環境文脈における歩行者・ 自転車の行動に関するデータ解析	高地 鳳真 齊藤 裕一 伊藤 誠 伏間 文悟 菅野 崇 山本 康典	筑波大学 同上 同上 技術研究所 同上 同上
		2019.11.25	自動車技術会・蓄電システム技術部 門委員会 電動化を支える最新の蓄電技術	新型 MAZDA3 M Hybrid デバイス開発に ついて	吉田 勝正	電駆・PT 制御部品開発部
		2019.11.26	SID 日本支部 IDW' 19 チュートリアル	人間中心のコックピットと運転支援技術	藤田 健二 森田 和元	開発調査部 中央大学
		2019.11.27-28	日本イーエスアイ（株） 30th PUCA—ESI Users' Forum Japan 2019—	魂動デザインの深化を実現するこだわりの モノづくり ～プレス成形技術の開発～	山本真一郎	車体技術部
		2019.11.28	塑性加工学会 講座 ～応用編～	自動車開発におけるプレス成形 CAE の活 用	森澤 誠	車体技術部

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2019.11.28-29	型技術協会 第 25 回型技術ワークショップ 2019 in いばらき	輪郭加工自動化の取組み事例	小宮 悠紀 秋月 匠	ツーリング製作部 同上
		高張力鋼板冷間プレス成形におけるせん断成形の課題解決に向けた取組み	高井良幸弘 吉崎 真吾 新井 直樹	車体技術部 同上 同上
2019.11.29	自動車技術会 自技会 No.11-19 シンポジウム「車体軽量化と信頼性を支える疲労入力・接合評価技術の新展開」	射出成形による繊維強化樹脂部品の寸法予測精度向上の取組み	田中 慶和	車両技術部
		接着接合強度に及ぼす被着体および接着層の影響調査 ①接着層応力分布の解析による考察	清水 寛史 飯塚 隆 松永 達則 河村 拓昌 日下部雅幸 小松 圭吾 山本 研一 小椋 英司 富永 秀和 河合 淳一 樋江井 守 小林 敏雄 巽 明彦 平出 隆志 小熊 博幸 植松 美彦 菅田 淳 西川 出	トヨタ自動車東日本 (株) (株) SUBARU 同上 トヨタ自動車 (株) 同上 トヨタ車体 (株) 技術研究所 三菱自動車工業 (株) 三菱自動車エンジニアリング (株) アイシン化工 (株) 同上 サンスター技研 (株) (株) 神戸製鋼所 JFE スチール (株) 物質・材料研究機構 岐阜大学 広島大学大学院 大阪工業大学
		接着接合強度に及ぼす被着体および接着層の影響調査 ②静的強度と疲労強度の実験による考察	平出 隆志 飯塚 隆 松永 達則 河村 拓昌 日下部雅幸 清水 寛史 小松 圭吾 山本 研一 小椋 英司 富永 秀和 河合 淳一 樋江井 守 小林 敏雄 巽 明彦 小熊 博幸 植松 美彦 菅田 淳 西川 出	JFE スチール (株) (株) SUBARU 同上 トヨタ自動車 (株) 同上 トヨタ自動車東日本 (株) トヨタ車体 (株) 技術研究所 三菱自動車工業 (株) 三菱自動車エンジニアリング (株) アイシン化工 (株) 同上 サンスター技研 (株) (株) 神戸製鋼所 物質・材料研究機構 岐阜大学 広島大学大学院 大阪工業大学
2019.11.29	軽金属学会 第 113 回シンポジウム	車体のマルチマテリアル化とその要素技術	杉本 幸弘	技術研究所
2019.11.30	情報通信研究機構 (NICT) SecHack365 in 愛媛	「クルマを取り巻くセキュリティ」	山崎 雅史	MDI&IT 本部
2019.12.2	明治大学 理工学部 明治大学理工学部機械工学科・機械情報工学科 機械工学講座	エモーショナルな車作り～自動車と感性工学～	西川 一男	技術研究所
2019.12.4	早稲田大学 創造理工学部総合機械工学会 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
2019.12.4-5	日本機械学会 1DCAE・MBD シンポジウム 2019	乗用車用ディーゼルエンジンのモデルベース開発 ーつながら 1D モデルを用いた機能開発ー	志茂 大輔 宮崎 正浩 小林 謙太 村井 亜樹	エンジン性能開発部 同上 MBD 革新部 同上

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2019.12.4-6	日本機械学会 Conference on Motion and Vibration Control (MoViC) 2019	制御周期制約下における自動車駆動系の バックラッシュ補償	米沢 平成 梶原 逸朗 西留 千晶 波多野 崇 坂田 将人 平松 繁喜	北海道大学 同上 キャテック (株) 統合制御システム開発本部 同上 同上
2019.12.6	制振工学研究会 制振工学研究会 2019 年技術交流会	均質化法とトポロジー最適化を併用した 多孔質材微視構造の設計法	山本 崇史 山川 啓介 桂 大詞 大下 浄治	工学院大学/広島大学 技術研究所 同上 広島大学
2019.12.7	東京理科大学 脳学際研究部門 東京理科大学 研究推進機構総合研 究院 脳学際研究部門 第 3 回公開 シンポジウム	fMRI による自動車操舵時の脳活動研究	岡本 宜久	技術研究所
2019.12.8	人間工学会中国四国支部 第 52 回日本人間工学会中国・四国 支部大会	人が予測・実行しやすい連続操作の法則 性を用いた「気持ち良さ」の可視化研究	石井 秀和	技術研究所
2019.12.10	日本ゴム協会 第 30 回エラストマー討論会	マツダにおける人間中心ものづくり 振動変形シミュレーションで求めたゴムの マスターカーブ解析	西川 一男 森田 裕史 戸田 昌利 富永 哲雄 山村 浩樹 本田 隆 高柳 篤史 小野 裕己 藤中 正俊 麻川 元康 小島 隆嗣 宮下 直士	技術研究所 産業技術総合研究所 同上 JSR (株) 同上 日本ゼオン (株) 同上 同上 バンドー化学 (株) 技術研究所 横浜ゴム (株) 同上
2019.12.10-12	自動車技術会・日本機械学会 第 30 回内燃機関シンポジウム	火炎核を利用した圧縮着火燃焼制御方 法の検討 分子動力学法を用いたエンジン摺動面の 境界潤滑計算手法 多段ガソリン高圧噴射を用いた圧縮着火 燃焼の制御 HCCI エンジンにおける吸排気行程 NVO 制御のモデル構築 高圧縮比ガソリンエンジンにおけるノッ キングメカニズムの分析と全負荷 SPCCI 燃焼の実現	大野 諒平 河口健太郎 宮内 勇馬 小林 森 泉 聡志 伊藤 直也 神長 隆史 内田 健児 藤川 竜也 養祖 隆 山川 正尚 武藤 優哉 山崎 由大 水野 沙織 藤井 拓磨 疋田 孝幸 武藤 充宏 漆原 友則	技術研究所 同上 東京大学 同上 パワートレイン技術開発部 同上 同上 同上 同上 同上 東京大学 同上 パワートレイン技術開発部 同上 同上 同上 エンジン性能開発部
2019.12.11	精密工学会 第 107 回難削材加工専門委員会	コネクティングロッド加工の切削課題解 決事例 ～軽量化に伴う変形及び自励振動対策に ついて～	山崎 友揮	パワートレイン技術部
2019.12.13	東広島市産業部産業振興課 未来の〇〇を創ろう！ワクワクする チャレンジを一緒に！東広島イノ ベーションラボ ミライノ+	挑戦者の DNA 人馬一体感の実現！1 番ピンは骨盤にあ り！「えっ、全然違う！」乗る人を驚き と感動で包む考え方の革新	虫谷 泰典	操安性能開発部 兼 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
2019.12.13-14	日本安全運転・医療研究会 第4回日本安全運転・医療研究会	ドライビングシミュレータでの長期訓練 実施による介入前後における運転能力比 較と検討	桐畑 将司 岩下 洋平 桑原潤一郎 青木 壮椰 一杉 正仁	近江温泉病院 技術研究所 同上 同上 滋賀医科大学
		視線計測器を使用した健常者・患者の視 線変化の違い～Trail making test 実施中の 視線変化に着目して～	仲野 剛由 岩下 洋平 岩瀬 耕二 福井亜希子 一杉 正仁	近江温泉病院 技術研究所 同上 同上 滋賀医科大学
2019.12.22-23	日本液体微粒化学会・日本エネル ギー学会 第28回微粒化シンポジウム	Characteristics of Oil Jet Ejected from a Nozzle with Different Types of a 90 Degree Bend Pipe	川口 幹祐 新田 吾一 三村 溪太 西田 恵哉 中島 聖 山本 亮 幸徳 正信 尾形 陽一	広島大学 同上 同上 同上 MBD 革新部 同上 同上 広島大学
		ニードル弁運動に伴う燃料インジェクタ 内非常流動と液体噴流	松上 晃平 三輪 誠 宋 明良 和田 好隆 植木 義治 横畑 英明	神戸大学 同上 同上 MBD 革新部 同上 同上
		多噴孔燃料インジェクタ内4次元キャピ テーション流動と噴霧挙動	中道 勝久 脇坂 優志 奥中 勇太 三輪 誠 宋 明良 西田 恵哉 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 MBD 革新部 同上 同上
		壁面に衝突するガソリン高圧噴霧の蒸発 特性に及ぼす噴孔形状の影響	竹田幸太郎 原 亮介 張 武 藤川 竜也 山川 正尚 市川由記彦 西田 恵哉 尾形 陽一	パワートレイン技術開発部 同上 同上 同上 同上 広島大学 同上 同上

3. 社外寄稿

*所属は原則発表時点を示す

寄稿誌名	巻・号・ページ	題目	発表者	所属
計測と制御	Vol.58. No.1 (2019), pp.33-37	自動車の制御とモデリングの課題解決を目指す SICE の産学連携, 異分野交流	川邊 武俊 向井 正和 小森 賢 平野 豊	九州大学 工学院大学 統合制御システム開発本部 トヨタ自動車 (株)
Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing (JAMDSM)	Vol. 13, No. 1, (2019), Paper No. 18-00430	Vibration control of automotive drive system with backlash considering control period constraint	米沢 平成 梶原 逸朗 西留 千晶 平松 繁喜 坂田 将人 波多野 崇	北海道大学 同上 キャテック (株) 統合制御システム開発本部 同上 同上
American Society of Mechanical Engineers (ASME) Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control	Vol. 141, Issue 12, (2019), p.121002	Vibration Control of Automotive Drive System with Nonlinear Gear Backlash	米沢 平成 梶原 逸朗 佐藤 晶太 西留 千晶 坂田 将人 波多野 崇 平松 繁喜	北海道大学 同上 同上 キャテック (株) 統合制御システム開発本部 同上 同上
Sustainability	Vol.11 (2019), Issue 9, 2690	Estimation of CO2 emissions of internal combustion engine vehicle and battery electric vehicle using LCA	河本 竜路 望月 英生 森口 義久 中野 隆裕 本橋 真之 酒井 裕司 稲葉 敦	技術企画部 同上 同上 同上 商品戦略本部 工学院大学 同上
自動車技術	Vol.73, No.8 (2019), pp.32-34	自動車と安全	野田 幸宏 平田 大介 森田 太史 福田 貴生	技術企画部 環境安全技術部 統合制御システム開発本部 衝突性能開発部
	Vol.73, No.9 (2019), pp.55-60	SKYACTIV-G 2.5 気筒休止エンジンの開発	野田 明裕 荒川 博之 居軒 年希 山本 賢宏 本瓦 成人 西本 敏朗	エンジン設計部 エンジン性能開発部 同上 PT 制御システム開発部 ドライブトレイン開発部 エンジン設計部
	Vol.73, No.9 (2019), pp.78-83	新開発 SKYACTIV-D1.8 の紹介	牛谷 真樹 福馬 真生 平林 千典 三村 勇樹 大西 毅	エンジン性能開発部 エンジン設計部 同上 エンジン性能開発部 同上
	Vol.73, No.11 (2019), pp.75-80	自動車における構造接着技術の動向と課題	山本 研一 麻川 元康 氷室 雄也 中川 興也	技術研究所 同上 同上 同上
自動車技術会論文集	Vol.50, No.2 (2019), pp.396-402	操舵に対する横運動応答の過渡特性が性能評価へ及ぼす影響	塚野 孝俊 佐藤 一貴 狩野 芳郎 山門 誠 安部 正人	マツダ (株) 神奈川工科大学 同上 同上 同上

寄稿誌名	巻・号・ページ	題目	発表者	所属
自動車技術会論文集				
	No1.50, No.2 (2019), pp.403-410	基本諸元が操舵に対する運動応答へ及ぼす影響度の評価手法	塚野 孝俊 狩野 芳郎 山門 誠 安部 正人	マツダ (株) 神奈川工科大学 同上 同上
	Vol.50, No.6 (2019), pp.1593-1599	レーンチェンジを行うドライバのモデルパラメータによる運動性能評価の妥当性分析	塚野 孝俊 中山 祥平 鈴木 隆将 狩野 芳郎 山門 誠 安部 正人	マツダ (株) 神奈川工科大学 同上 同上 同上 同上
自動車技術会シンポジウムテキスト				
	No.01-19 (2019), pp.37-42	量産型 GVC Moment Plus 制御車両の開発	梅津 大輔 加藤 史律 高原 康典 砂原 修 高橋 絢也 狩野 芳郎 安部 正人 山門 誠	操安性能開発部 同上 シャシー開発部 統合制御システム開発本部 (株) 日立製作所 神奈川工科大学 同上 同上
Journal of Fluid Science and Technology				
	Vol.14, No.1 (2019), pp.90-94	Effect of Ambient Pressure on Cavitation in the Nozzle and Discharged Liquid Jet	Rubby Prasetya 宋 明良 和田 好隆 横畑 英明	神戸大学 同上 MBD 革新部 同上
Atomization and Sprays				
	Vol.29, No.2 (2019), pp.123-141	In-Nozzle Cavitation and Discharged Liquid Jet during Transient Injection Process	Rubby Prasetya 宋 明良 文 石洙 Raditya Hendra Pratama 和田 好隆 横畑 英明	神戸大学 同上 INHA 大学 産業技術総合研究所 MBD 革新部 同上
International Journal of Mathematics for Industry				
	Vol.11, No.01, 1950002 (2019)	Predicting precision matrices for color matching problem	Takayoshi Nakamoto Ryuei Nishii Shinto Eguchi	Department of Vehicle Development, Mazda Motor Corp Institute of Mathematics for Industry, Kyushu University The Institute of Statistical Mathematics
バイオメカニズム学会誌				
	Vol.43, No.4 (2019), pp.217-222	素早く正確にペダル操作ができるドライビングポジションの開発	平田 義人 上村 裕樹 堀上 正義 大坪 智範	車両実研部 同上 同上 同上
バイオブラジャーナル				
	No.72, pp.5-8, 2019 年 3 月発行	無塗装・高質感の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	一原 洋平	装備開発部
プラスチックスエージ				
	Vol.65, pp.56-60, 2019 年 5 月発行	無塗装・高質感の自動車内外装意匠部品用バイオエンブラの開発	一原 洋平	装備開発部
自動車内装材とインテリアの快適性向上				
	pp.137-142, 2019 年 9 月 30 日発行	無塗装・高質感の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	一原 洋平	装備開発部

寄稿誌名	巻・号・ページ	題目	発表者	所属
Radiation Physics and Chemistry In Press DOI: 10.1016/j. radphyschem.2018.12.030		Ti K-edge XFAAS investigation of lithium migration in lithium titanium oxide anode material under charge and discharge cycle	早川慎二郎 金田 敦徳 森 啄也 Alvaro Munoz- Noval 三根 生晋 住田 弘祐	広島大学 同上 同上 同上 技術研究所 同上
軽金属学会誌「軽金属」		アルミニウムと異種材料の点接合技術	杉本 幸弘	技術研究所
Science and Technology of Welding and Joining Volume 24, 2019 - Issue 3, pp.235- 242		Effect of welding time on fatigue properties of friction stir spot welds of Al to carbon fibre-reinforced plastic	小川 裕樹 曙 紘之 田中耕二郎 菅田 淳	広島大学 同上 技術研究所 広島大学
ICBBE 2018 pp.52-57, doi>10.1145/3301879.3301896		Brain Activity While Waiting to Steer a Car: An fMRI Study	岡本 宜久 笹岡 貴史 吉田 敏宏 竹村 和紘 曾 智 農沢 隆秀 山脇 成人 辻 敏夫	技術研究所 広島大学 技術研究所 同上 広島大学 技術研究所 広島大学 同上
材料と環境 Vol.68, No.4		高電圧印化法を用いた電着塗装鋼板の耐食性評価	浅田 照朗 重永 勉 磯本 良則	技術研究所 同上 広島大学
自動車技術会 2019 春季大会フォーラムテキスト 「自動車の大変革に貢献する材料技術の最新動向」, pp.31-38		自動車の革新を支える材料技術への期待と課題	坂手 宣夫	技術研究所
月刊 車載テクノロジー 2019 年 5 月号		アルミニウム / CFRP の異材点接合技術	西口 勝也	技術研究所
東京工業大学学術国際情報センターホームページ		車載レーダにおけるターゲット散乱及び伝搬構造の FDTD 法による詳細解析	奥木 友和	技術研究所
Biochimica et Biophysica Acta - Molecular and Cell Biology of Lipids Volume 1864, Issue 9, September 2019, pp.1185-1193		A homolog of Arabidopsis SDP1 lipase in Nannochloropsis is involved in degradation of de novo-synthesized triacylglycerols in the endoplasmic reticulum	信澤 岳 太田 啓之 山川 薫 高見 明秀 野村 誠治 斉藤 史彦	広島大学 東京工業大学 同上 技術研究所 同上 同上
2019 年年次大会 / 日本医学写真学会雑誌 Vol.57, No.1, p.16		高次脳機能障害患者の運転時視線変化の解析	井上 拓也 奥野 隆司 岩下 洋平 岩瀬 耕二 福井亜希子 一杉 正仁	彦根市立病院 近江温泉病院 技術研究所 同上 同上 滋賀医科大学

寄稿誌名	巻・号・ページ	題目	発表者	所属
International journal of Engine Research Vol.20, Issue7, pp.817-833		Wall Heat Transfer of Unsteady Near Wall Flow in Internal Combustion Engines	原田 雄司 内田 健司 田中 達也 朱 前進 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 同上 同上 東京工業大学
2019JSAE/SAE Powertrains, Fuels and Lubricants International Meeting Proceedings of SAE 2019-01-2349		Development of Non-equilibrium Plasma and Combustion Integrated Model for Reaction Analysis	堀越 政寛 田中 達也 沖濱 圭佑 今 陽平 高奈 秀匡	技術研究所 同上 同上 東北大学大学院 東北大学流体科学研究所
Journal Advanced Robotics Volume 33, 2019 - Issue20		Lane-Change Detection Based on Individual Driving Style	禹ハンウル 池 勇勲 田村 雄介 黒田 康秀 菅野 崇 山本 康典 山下 淳 浅間 一	秋田県立大学 中央大学 東京大学 技術研究所 同上 同上 東京大学 同上
Mechanical Engineering Letters Vol.5, 2019, Paper No.19-00354, pp.1-9		Aerodynamic drag reduction of a simplified vehicle model by promoting flow separation using plasma actuator	清水 圭吾 中島 卓司 関本 諭志 藤井 孝蔵 平岡 武宜 中村 優佑 農沢 隆秀 池田 隼 坪倉 誠	技術研究所/広島大学 広島大学 東京理科大学 同上 技術研究所 同上 同上 神戸大学 神戸大学/理化学研究所
日本バーチャルリアリティ学会誌 第21回論文賞受賞報告 Vol.24, No.4, 2019, p.69		自動車運転時の周辺対象認知における頭部と眼球運動	村瀬 健二 金子 寛彦	技術研究所 東京工業大学
型技術者会議 2019 講演論文集 第33回(2019) No.402, pp.122-123		魂動デザインの深化を実現するこだわりのモノづくり ～プレス成形技術の開発～	中村 武	車体技術部
塑性加工学会講座 第164回(2019), pp.75-86		自動車開発におけるプレス成形 CAE の活用	森澤 誠	車体技術部
第25回型技術ワークショップ 2019in いばらき講演論文集 pp.128-129		輪郭加工自動化の取組み事例	小宮 悠紀 秋月 匠	ソーリング製作部 同上
第27回品質工学研究発表大会予稿集 pp.76-80		バンパー金型の多層盛り溶接条件最適化	鈴木 健太 安楽 健次 中山 光一 長澄 徹侍 木下 光雅 田中健太郎 宮川英里也 大宅 雅巳	ソーリング製作部 同上 同上 同上 同上 同上 同上 同上

寄稿誌名	巻・号・ページ	題目	発表者	所属
第 27 回品質工学研究発表大会予稿集				
	pp.176-179	非接触測定精度向上の取り組み	影山 貴大 江草 秀幸 河野 優 向川 知加 牧本 亮平 中原 孝善 大田 敦史 橋本 昭	ツーリング製作部 同上 同上 同上 同上 同上 同上 同上
	pp.236-239	樹脂金型の小径加工における切削工具及び条件の最適化	廻本 章吾 江草 秀幸 叶井 貫 大田 敦史 橋本 昭	ツーリング製作部 同上 同上 同上 同上
	pp.246-249	磨き機能の適正化	徳留 宏俊 山下 信幸 高井 繁 長澄 徹侍 得平 吉輝 安楽 健二	ツーリング製作部 同上 同上 同上 同上 同上
第 33 回型技術者会議 2019 講演論文集				
	pp.138-139	世界初 1.3GPa 冷間プレス部品の量産実現に向けた、ハイテンプレス金型製造プロセス革新	畑平 拓也 松永 明子 上村 勝利 秋月 匠 岡山 一洋	ツーリング製作部 同上 同上 同上 同上
型技術ワークショップ 2019 講演論文集				
	pp.148-149	射出成形による繊維強化樹脂部品の寸法予測精度向上の取り組み	田中 慶和 田中 宣隆 古川 智司	車両技術部
色材協会誌				
	Vol.92, DEC.2019 No.12, pp.11-16	微細な層構造の制御によるソウルレッドクリスタルメタリックの開発	平野 文美 山根 貴和	車両技術部 車両実研部
IVI 業務シナリオ集 2019				
	2019 年版 4 月	AI による生産ラインの生産性向上／自動化進展と品質改善	市本 秀則	生産企画部
	2019 年版 4 月	人・モノの実績可視化／動作分析と最適化	杉山 裕基	生産企画部
	2019 年版 4 月	素材製造ラインによる品質向上～見える化のその先へ～	今野 康之	パワートレイン技術部
	2019 年版 4 月	部品輸送トラックの位置把握と輸送時間の実績収集による最適化	奥屋 太志	車両技術部

編 集 委 員 会

委員長	神八 俊夫	商品戦略本部 技術企画部
編集委員	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
	木村 嘉孝	商品本部 商品企画部
	岡崎 安昭	デザイン本部 デザイン開発推進部
	平田 直	車両開発本部 操安性能開発部
	亀井 丈広	車両開発本部 ボデー開発部
	吉河 和彦	統合制御システム開発本部 情報制御モデル開発部
	原澤 涉	パワートレイン開発本部 ドライブトレイン開発部
	米澤 泰延	技術研究所
	杉山 裕基	技術本部 生産企画部
	増田 雅彦	技術本部 パワートレイン技術部
	折居 利昭	技術本部 車体技術部
	柿沢 修成	広報本部 グローバル広報企画部
編集幹事	下野 博典	商品戦略本部 技術企画部

マツダ技報 第37号

Mazda Technical Review No.37

発行 2020年12月

December 2020

発行人 廣瀬 一郎

Publisher Ichiro Hirose

編集人 神八 俊夫

Editor Toshio Kamihachi

事務局 下野 博典

Bureau Hironori Shimono

発行所 マツダ株式会社

Publishing office Technology Planning Dept.

商品戦略本部 技術企画部

Product Strategy Div.

〒730-8670

Mazda Motor Corporation

広島県安芸郡府中町新地3番1号

3-1 Shinchi, Fuchu-cho Akigun,

電話 082 (565) 2198

Hiroshima 730-8670, Japan

©2020 マツダ株式会社 (禁無断転載)