マツダ技報 2013 No.31

MAZDA TECHNICAL REVIEW

マツダ技報
Mazda Technical Review

2013 No.31

マツダ技報　第31号　（2013）

目　次

特集：ITS世界会議

論文・解説

Mazda Technical Review No.31

CONTENTS

Special Edition for ITS World Congress

Technical Reports

巻 頭 言

エンジニアとして大切にしたいこと

What are Essential for Engineers

常務執行役員　　素利　孝久
Takahisa Sori

2007 年「サステイナブル“Zoom-Zoom”宣言」にて，マツダ車を御購入していただいた全てのお客様に「走る歓び」と「優れた環境・安全性能」を提供すると発表して 6 年を経て，この間に，それを具現化した SKYACTIV 技術を全て織り込んだ CX-5，新型アテンザを世に出してきた。

今回の特集では，その第 3 弾の新型アクセラの技術を紹介し，SKYACTIV 技術の進化とともに，それを支えている「モデルベース開発（MBD）」を取り上げている。

マツダモノ造り革新／SKYACTIV 技術を進めてゆく中で，多くの技術が進化し，エンジニアが飛躍的に成長してきたと自負しているが，私自身がエンジニアの心構えとして最も大切であると考えている 3 点について以下に述べる。

第 1 は，「高い志」を持ち続けることである。「If you can dream it, you can do it.（夢見ることができれば，それは実現できる。）」ウォルト・ディズニーのあまりにも有名な言葉であるが，正直，モノ造り革新／SKYACTIV 技術の実現性に対して，当時懸念をいだいた人達は少なからずいたのではなかろうか。しかし，エンジニア達は，ひたすらその理想の実現に向け，さまざまな困難に対して果敢にチャレンジしてブレークスルーを実現させた。まだまだやり残したことはあるとは言え，理想のシステムや構造／工法を追求して，ベースの技術を飛躍的に向上させ，「走る歓び」とともに環境性能に対しても，減速エネルギー回生技術 i-ELOOP 等の「環境ビルディングブロック戦略」を実現した。

一方，安全性能に対しても，SKYACTIV-BODY に代表される，マツダの安全思想である「プロアクティブセーフティ」のもと，良好な運転環境（正しい運転姿勢，視界／視認性）に優れた操縦安全性で安全運転をサポートするベース技術を強化し，またミリ波レーダなどの検知デバイスで，ドライバの認知支援や衝突回避や被害軽減をはかる先進安全技術「i-ACTIVSENSE」も導入してきた。

「高い志」を常に持ち続け，愚直に課題を 1 つ 1 つ克服して技術を進化させてきた，全てのエンジニアの取り組み姿勢を，私自身は誇りに思いたい。

第 2 は，「科学的な洞察力」である。最近の人気 TV ドラマに「現象には必ず原因がある」との物理学者の決めセリフがあるが，私が会社に入った時にまず先輩からたたきこまれたのがこの言葉である。当時は現在のように計測，解析技術や CAE は進んでおらず，まず現象をしっかりくり返し観察する。次に十分な計測・解析機器のない中，得られた数少ない計測データをじっくりと考察し，仮説を立て最小限の実験で検証してゆく。そのなかで「カラクリ」を究明し原因をつきとめる。

それをくり返すと共通の原因＝真因が分かり，それが普遍的なものであれば，新たな法則の発見につながるかも知れないと教えられた。

その中で重要なのが，科学的な「観察力，洞察力」である。一見複雑とも思えるさまざまな現象も注意深く観察し考察してゆくと，1つ1つは基本的な原理・原則に基づいて起きており，それが組み合わさっていることが解き明かされるものである。それが，カラクリ＝メカニズムの解明でありその行動をくり返してゆくことで科学的な「観察力，洞察力」が磨かれ，より複雑な・より深い現象の解明や相反する現象をブレークスルーして高度なレベルで両立できる技術の開発が可能となる。また一見原理・原則で説明できない特異点にも注目し，単なる計測誤差で片付けることなく，そこにも何か新しい発見や見落としがないか留意することも大切なことで，そこに大きな技術の宝が隠れているかもしれない。ただいたずらに膨大なデータを収集し，早急な結果を求めるのではなく，一歩一歩立ち止まりながら「洞察力」を磨きエンジニアとして成長する姿を望みたい。

第3に，「共創」である。言うまでもなく，自動車やそれ以外の分野での技術進化は目ざましく高度化，複雑化している。電子技術の進化，材料の革新，加工技術の革新等それぞれの分野での研究開発を進めてゆくことは，もちろん重要であるが，それらとともに分野／企業／部門の壁を越えて，それぞれの技術を融合させてより高い価値を生む技術に昇化させてゆく「共創」活動が今後ますます重要になってくると考える。

マツダモノ造り革新の中で，開発エンジニアと製造エンジニアが，理想構造／理想工程を一体となって追求したのが，SKYACTIV 技術である。製造エンジニアが商品力強化のために何ができるか，開発エンジニアが生産性を上げるために何ができるか，立場が変わったように語る場面が非常に増え，風土が全く変化してきたといっても過言ではないと思う。デザイナと開発／製造エンジニアが，その美しいデザインテーマを損うことなくレイアウト，衝突安全性，空力，加工性，溶接性 etc 相反する性能を数限りなく議論を重ねながら，「魂動」デザインを具現化したと考える。このためには，それぞれの部門が前工程から後工程につなぐバトンタッチではなく，開発の初期から各エンジニアがその領域を超えて共同で1つの高い目標に向かって創造活動を行う必要がある。

そのためには，一人一人のエンジニアが自分の専門領域を超えて，ボデーもシャシーもエレキ，パワートレインも，または開発も製造も品質保証もデザイン意匠も分かる，または車全体からその性能（衝突・NVH）を達成する機能配分やその機能を構造化，システム化できる，いわゆる「骨太エンジニア」の育成が必要であり，この「骨太エンジニア」達が，高い目標を「共創」してゆく活動が飛躍的に技術を向上させてゆくと考える。

また今回，この「共創」活動をより活発して進めるためにイネーブラとして「モデルベース開発（MBD）」を特集した。「MBD」はメカニズムを把握し，モデル化し，パラメータスダディ等において性能の飛躍的な向上と品質のロバスト性の劇的な向上をはかるものである。今回 SKYACTIV 技術のパワートレイン領域に主に活用し，理想構造，理想特性を全ユニットに転写して同時多発種開発を可能として開発効率を大幅に向上させている。今後この「MBD」をエンジン／ボデー／シャシー／制御など車両全体をモデル化するとともに人間系／環境系のモデルと結びつけた「MBD」を実現することで，「共創」の活動が革新的に進化すると考える。

最後に，「微差は大差」という言葉で締めくくりたい。自動車が誕生して以来，偉大な先人達は一歩ずつ着実に進化を続け，現代の優れた自動車技術の発展を実現している。先人達の歩みに深く感謝するとともに，その技術の進化にほんの微かな小さな一歩でも貢献できれば，幸せであると考える。

特集：新型マツダアクセラ

1

新型アクセラ／Mazda3 の紹介

Introduction of All-New AXELA／Mazda3

猿渡　健一郎*1　柏木　章宏*2　下舘　真*3
Kenichirou Saruwatari　Akihiro Kashiwagi　Makoto Shimodate

要約

アクセラは 2003 年の初代発売以来，スポーティなデザインと優れたレスポンスを備えたダイナミック性能，高いクラフトマンシップ，優れた環境・安全性能など，お客様の期待を超える新しい価値を提供し続け，これまでに世界約 120 か国以上で販売しマツダの年間販売台数の 3 割以上を占めるマツダブランドを代表する基幹モデルに成長した。

マツダを代表するこのクルマを進化させるにあたり私たちは，クルマの基本性能を更に進化させ，走る歓びを追求し続けるマツダブランドの魅力を惜しみなく注ぎ込み，セグメントを超えた新しい価値をお届けすることが必要であると考えた。

そのために，「一目見た時，乗り込んだ時，そして走り出せばすぐに感じられる」魅力と，「長い所有体験の中でじっくり実感していただける」魅力の両面から提供価値を探求し，一瞬で見る人を魅了するデザインと，乗れば乗るほど馴染んでくる人馬一体の運動性能，考え造り込まれた HMI（Human Machine Interface）／パッケージングや高い品質，優れた環境・安全性能を実現した。これらの進化により，お客様のライフスタイルの中で欠かすことのできない存在，つまり相棒となること，これが新型アクセラの狙いである。

Summary

Since the launch of its first model in 2003, Mazda Axela has consistently exceeded both customers' expectations and the standards of the era with its sporty styling, responsive handling, high-level craftsmanship, and excellent environmental and safety performance. As a result, it is sold in over 120 countries around the world and accounts for more than thirty percent of Mazda's annual sales volume.

To evolve this car as a representative of the Mazda brand, it was essential to further enhance its basic performance and generously deliver Mazda-unique driving pleasure so as to create new values that had never been seen in the segment.

To that end, during the new Axela's development, a two-stage approach was taken to appeal to customers: a stunning first impression that captures customer's eye the moment he/she climbs into the car and a deeper-level appeal which a customer comes to understand and appreciate over many years of ownership. To achieve this, the team explored value drivers and successfully realized a dynamic design that captivates viewers at first glance, dynamic performance that provides Mazda-unique experience of oneness between a driver and a car (Jinba-Ittai), carefully-crafted Human Machine Interface and packaging, high-quality interior, and outstanding environmental and safety performance. With these evolutions, the New Axela' aim is certain to serve as an irreplaceable partner in customers' lives.

1. はじめに

「お客様にとって最高の相棒になること」。新型アクセラの商品の狙いはこの一言につきるといえる。そのために，アクセラ独自の提供価値を，世界中のお客様の期待を超えるレベルで提供することがアクセラ開発の取り組むべき課題であった。

商品の価値は，『見た瞬間，乗った瞬間に感じられ

*1～3　商品本部
Product Div.

る魅力』と『所有期間の中で時間をかけて感じていただける魅力』の両方を提供することである。そのために，マツダが持っている最新の考え方，技術を惜しみなく投入し価値の実現を行った。まさに『“The Mazda”スポーツコンパクトの革新』が開発の取り組み方針であった。

お客様の「人生のパートナ」となり，お客様が見て触れて乗って，毎日が，そして人生が，もっとワクワクする歓びに満ちたものになるような，そんな想いをこのクルマに込めている。

2. 商品コンセプト

2.1　ターゲットカスタマ

新型アクセラのターゲットカスタマを一言で言い表すと，「車を運転することを愛し，大きな夢を抱き，その夢に向かってチャレンジを惜しまない全ての人々」である。彼ら・彼女らは上昇志向が強く，自らさまざまなことにチャレンジし成長していくことに歓びを感じており，クルマに対しても自らの手でハンドルを握り，意のままに操る楽しさを享受することに価値を感じている。

2.2　（カスタマに深く関わる）開発キーワードと商品コンセプト

ターゲットカスタマと強い絆を結ぶため，従来とは違った手法で開発キーワードを設定する必要があった。従来は機能・性能面から商品の提供価値を設定していたが，今回は「見た瞬間，乗った瞬間に感じられる魅力」と，「所有期間の中で時間をかけて感じていただける魅力」をカスタマの日々の生活の中で実感していただくため，アクセラが果たすべきキーワードを 3 つ設定した。①「SWITCH」＝気持ちを前向きに切り替え，挑戦心を湧きあがらせる。②「ACTION」＝挑戦心を行動力に変え，感動に出会わせる。③「INSPIRE」＝出会った感動を成功体験とし，さらなる挑戦の原動力とする。これらのキーワードから商品コンセプトを，「夢を追いかけ挑戦し続ける人達のパートナとして，互いに刺激し合い気持ちの良い成長のリズムを奏でる存在」とした。

3. 商品特徴

3.1　SWITCH　～　気持ちを前向きに切り替える

SWITCH の狙いは，クルマを見て触れる一つ一つの瞬間を，気持ちを切り替えるスイッチとすること。その実現手段は，「見る人の心を瞬時にとらえ，魅了するエクステリアデザイン」，「乗り込んだ瞬間に歓びあふれる走りのイメージで包み込むインテリアデザイン」，更に「デザインの狙いを実現したパッケージ」である。

(1) エクステリアデザイン

「一目見てアクセラに惚れ込む」，こんなデザインを目指した。まず歴代のアクセラが培ってきたスポーティで躍動感あふれる造形を，「魂動（こどう）」のデザインテーマのもとでマツダの C カーにふさわしいダイナミックでエモーショナルな造形表現として進化させた。特に注力したことは，薄くコンパクトに感じるキャビンとタイヤを四隅に配置したことによる安定したスタンスを追求し，車全体のバランスの良さを実現した。これはワイドトレッド，ロングホイールベース，大径タイヤの採用により実現した（Fig. 1）。

Fig. 1　Exterior Design

(2) インテリアデザイン

「ドアを開けた瞬間に，すぐに乗ってドライブに行きたくなる」，こんなインテリアを実現するため，ドライバには運転に集中できる適度なタイト感を，助手席乗員には安心感と共に開放感を，そして後席乗員には前席空間との隔たりを感じずにドライブを一緒に楽しめる気持ちよさの提供を目指した（Fig. 2）。キャビンがコンパクトに見える魅力的なエクステリアとの両立を図るため，従来の対競合比勝ち負けの寸法を追うのではなく，人が必要とする絶対的な寸法を一から見直した結果，実用上必要十分なスペースを確保実現できた。具体的には助手席の安心感と開放感を両立させたインパネ高さ，前席と後席との隔たりを感じさせないフロントシート形状，後席乗員がリラックスできる足元・膝空間が挙げられる。

Fig. 2　Interior Design

3.2　ACTION　～　挑戦心を行動力に変える

ACTION の狙いは，クルマを走らせた瞬間の気持ち

良さ・しなやかさによる意のままに操ることの歓びと，乗るたびに深まっていく楽しさを実現し，カスタマの日々の行動力を広げることである。その実現手段は，「マツダらしい意のままにクルマを操れるダイナミック性能」，「長距離ドライブでも経済的な燃費性能」，そして「アクティブセーフティ」である。

(1) 人馬一体感

マツダはカスタマに「走る歓び」を提供するため，「人馬一体感」を追求している。人馬一体とは，人の「操る」という行為にクルマとの「コミュニケーション」が加わり最高の走行状況を造り出すことで「人とクルマが心まで通じ合う」ことである。この実現のシナリオは「走り出す前から意のままに操れる予感が高まり，走り出したら更に予感を超える実感が得られる」ことである（Fig. 3）。

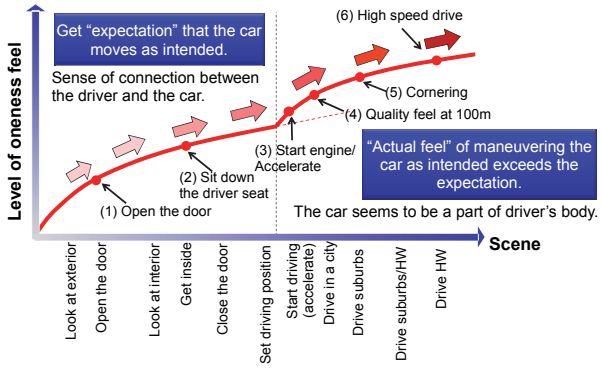


Fig. 3　Expectation to "Jinba-Ittai"

(2) ダイナミック性能

この人馬一体感の実現に応えるため，マツダは CX-5，アテンザから一貫した考え方を取り入れた開発を行い，今回の新型アクセラにも採用している。それは，マツダらしい軽快で自然なドア開閉フィール，運転に集中できるドライビングポジションと前方視界，爽快でリニアな加速感とエンジンサウンド，軽快感と直進安定性を両立させたダイナミック性能である。

今回新型アクセラの開発の中で特出するべき進化点は，人馬一体感を更に高めるための研究として，クルマと人との関係を更に追求したことである。今回「人」を理解することで明らかになったのは，人の「構え」という動作がクルマとの一体感に大きく関わっていることである。「構え」とは，ドライバがクルマを操作する際にクルマの動きを予測して反射的に筋肉を緊張させ身構えることをいう。このクルマの動きと「構え」の動きが一致したとき，一体感を感じる（Fig. 4）。

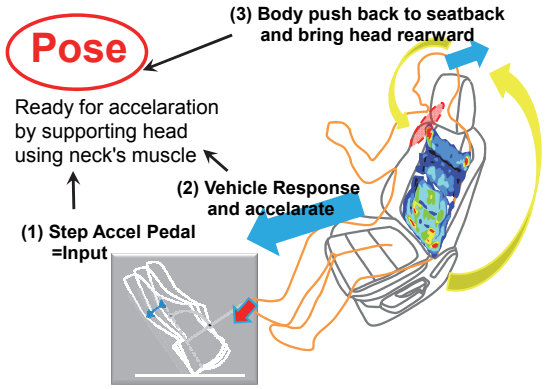


Fig. 4　Pose

新型アクセラではこの「構え」の理解を元に一体感ある「走り＝アクセルコントロール性」を更に進化させた。主な進化ポイントは加速度の発生タイミング。CX-5，アテンザではドライバがペダルをゆっくり踏み込む時は加速度の発生タイミングもゆっくりと，速く踏み込む時には早く発生させていたが，新型アクセラではこの「構え」の研究より加速度の発生するタイミングは一定であることが，より人間の感覚に近いことが分かり，最適化チューニングを施した。

この考え方はシート開発においても取り込んでいる。マツダが目指す人馬一体感の実現，とりわけ人の「構え」をサポートする上でシートが果たす役割は大きい。

車両 G に対しドライバの重心移動がリニアになるよう，サポート特性を改善させることを主眼におき次のことにこだわった。①座った瞬間にクルマとの一体感を得られる，包み込まれるようなフィット性の追求。②体幹・骨盤をしっかりと支える身体支持性。③シートバックの構造を最適化し，自然な着座位置でコーナリング中でも横 G に対して安定した姿勢を実現するホールド性。④不快な振動を抑制するため，シートバックにサスペンションマットを採用すると共に，座面には振動吸収性の高いウレタンフォームを採用し，快適な座り心地を実現した（Fig. 5）。

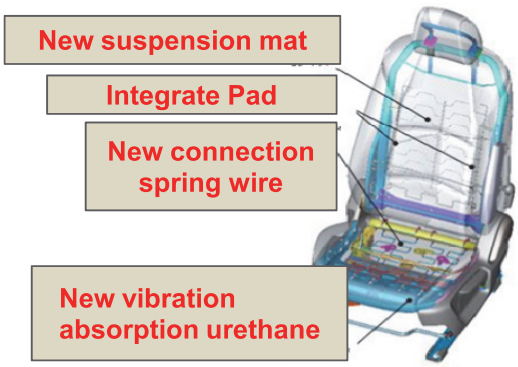


Fig. 5　Seat Structure

(3) 燃費性能

「休日は遠くへ出かけたくなる」，こんなカスタマの行動力をサポートするため，走る歓びを妥協することなくベストインクラスの燃費性能を達成した。その達成手段は PT（Powertrain）ユニット・電気デバイス・軽量化・空力性能である。

a. パワートレインユニット

新型アクセラでは世界中のカスタマのライフスタイルをサポートするため，幅広い PT ラインアップを設定した。ガソリンエンジンは新規開発の SKYACTIV-G 1.5L をはじめ，2.0L，2.5L，Non-SKYACTIV 1.6L，ディーゼルエンジンは SKYACTIV-D 2.2L，そして SKYACTIV-G 2.0L とモータを組み合わせた「SKYACTIV-HEV（ハイブリッド）」を用意した。なお，ガソリンエンジンについては，マツダ独自の「ライトサイジングコンセプト」を取り入れている。

＜ライトサイジングコンセプト＞

近年の欧州市場で増加している「ダウンサイジングターボ（以下 D/S ターボ）」は，エンジン排気量を小さくして低負荷領域での燃費向上を図ると共に，高負荷領域においては過給器により駆動力を確保するコンセプトのエンジンである。このタイプのエンジンは，走行条件によって実用燃費が大きく変わるという特徴がある。

これに対しマツダの SKYACTIV-G は，マツダが目指す人馬一体感の実現のために，あくまでもターボラグのない自然吸気エンジンにこだわり，1 サイズ大きな排気量を選定し十分なトルクを確保した上で，ギアを高速化して走りと燃費の最適化を図るという，“ライトサイジングコンセプト”を採用している。特に燃費性能では，高圧縮比と高効率燃焼による中高負荷域の燃費優位性を維持しつつ，低負荷領域に対しても徹底した機械抵抗低減とポンピングロス低減を行うことにより，ほぼ全域で D/S ターボを凌駕する燃費性能を実現した（Fig. 6）。

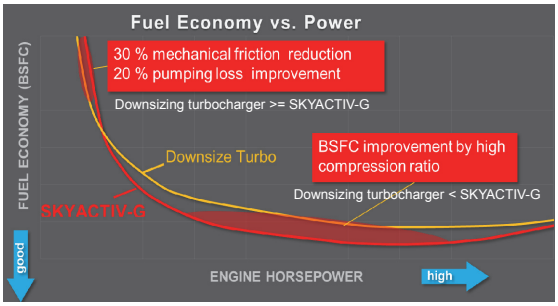


Fig. 6　Right Size Concept

＜新開発 SKYACTIV-G 1.5L＞

4-2-1 排気システム，マルチホールインジェクタ，キャビティ付ピストンなどの革新技術により，高圧縮比 13.0 を達成し，前モデルの MZR 1.5L に比べて，動力性能・燃費性能共に大幅に向上した。特に燃費性能では，デュアル S-VT（可変バルブタイミング機構）の採用や，MZR 1.5L 比約 30%の抵抗低減などにより，20%以上の燃費向上を達成した。

b. 電気デバイス（i-ELOOP）

新型アクセラではアテンザと同じシステムである減速時のエネルギー回生システムを採用した。これにより電装品を作動させるために消費していた燃料の使用を抑制することができ，頻繁に加減速を繰り返す実用走行時には，特に燃費向上が見込める。

c. 軽量化

走る歓びと環境性能の両立のため，軽量化は最も重要な要素である。今回新型アクセラでは拡大したボデーサイズ，衝突性能の向上，大型化したタイヤ&ホイール，吸排気系や冷却系の進化などに伴うパワートレインでの重量増など，性能向上のための対策を採り入れながらも，最大で約 100kg に及ぶ軽量化メニューを採用した。

d. 空力性能

クラストップの燃費性能実現のため，エモーショナルなデザインを実現しながらも Cd 値 0.255（セダン），0.275（ハッチバック）とクラストップレベルの空力性能を達成した。この実現のためにアテンザでも採用したアンダカバーや走行状況に応じてラジエータ前のシャッタを自動的に開閉するアクティブエアシャッタ（一部モデル）を採用した。

(4) 安全技術

新型アクセラではアテンザ同様の先進安全技術を採用した。これはカメラ，レーザ，レーダなど複数の最新センシングを用いて，それぞれの長所を効果的に活用することで，どのような天候，どのような路面でも常にカスタマが安全に運転できる状態を確保している。

3.3　INSPIRE　～　更なる挑戦心を誘発する

INSPIRE の狙いは，カスタマが，クルマの中でも「仲間との即時性のつながり」から感性への刺激を得ることができ，更にその経験や情報を仲間と共有することで，カスタマが次の行動への挑戦心を誘発されることである。これを実現するため，走行安全を最優先した上で，最新の人間工学を元にしたマツダ独自のコックピットのコンセプト「Heads up Cockpit（ヘッズアップコクピット）」を採用し，直感的に操作をできるようデバイス類を設計。更に最新のコネクティビティーシステム「MAZDA CONNECT（マツダ コネクト）*」を導入し，運転中も常にリアルタイムで友人やコミュニティに向けて情報を発信し，分かち合うことを可能とした。

*「MAZDA CONNECT」は、日本、アメリカ合衆国、カナダ、メキシコ市場での名称。その他市場に於ける名称は、「MZD CONNECT」。

(1) Heads up Cockpit

「安全最優先」の思想の元，ユーザ中心設計の原則に基づいて 3 つのポイントを重視し，デバイス設計・レイアウトを行った。①わき見の最小化，②迷いの最小化，③姿勢移動の最小化，である。

このガイドラインを元に新型アクセラでは 3 つのデバイスを設定・進化させた。①わき見の最小化：走行中の視線移動を最小化する Active Driving Display（Fig. 7），②わき見と迷いの最小化：視認しやすい表示高さ，行間，文字サイズ，一度に把握しやすい画面表示数を考慮した 7 インチディスプレイ＆GUI（Graphic User Interface）（Fig. 8），③姿勢移動の最小化：画面操作の際に大きく体を動かす必要のないコマンダ（Fig. 9）。

Fig. 7　Active Driving Display

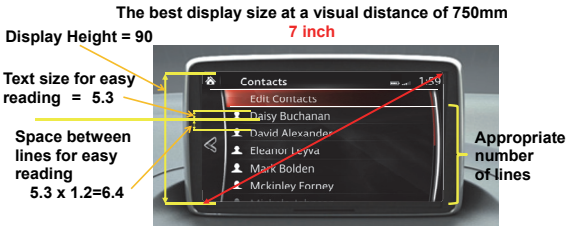


Fig. 8　7 inch Center Display

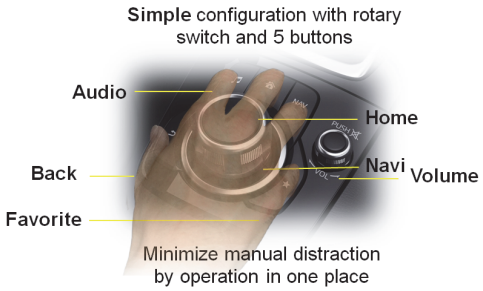


Fig. 9　Commander

(2) MAZDA CONNECT

日進月歩のように発展する情報化社会へスピーディに対応するため，新型アクセラのシステムでは，次の 3 つの機能を持つ画期的なシステムを実現した。①従来ベース機能（ラジオ，CD/DVD，TV チューナ，ナビ，外部接続機器）のモジュール化によるハードウェアのカスタマイズ対応，②カスタマが所有する iPhone や，Android OS 搭載のスマートフォンを車載機と接続 することで可能になる，インターネットを経由するさまざまなインフォテイメント機能，③更に通信機器のハード＆ソフトの進化に対応して自らも進化する，アップデート機能。

②ではマツダ車初，インターネットラジオ「Aha-Radio」に対応，音楽やニュースなどの放送はもちろん，Facebook と Twitter という世界中で数多くのユーザが利用しているソーシャルネットワーキングサービス（SNS）へのアクセスなどのサービスの利用が可能となった。

3.4　ハイブリッドモデル

新型アクセラでは幅広い PT ラインアップの一つとして，国内向けにハイブリッドモデルを設定した。マツダは環境技術の導入にあたり，エンジンの熱効率改善や車両の軽量化などの「ベース技術」を優先的に改良した上で，段階的に電気デバイスを導入する「ビルディングブロック戦略」の下，これまでにアイドリングストップシステム「i-stop」や，減速エネルギー回生システム「i-ELOOP」などの電気デバイスを段階的に市場導入してきた。

新型アクセラでは，更なるステップアップとして，ハイブリッドシステムを搭載したモデルをセダンに設定し，走る歓びとクラストップレベルの燃費性能の両立を目指した。

以下ハイブリッドモデルのユニーク点を中心に車両の特徴を述べる。

(1) ハイブリッドシステム

ハイブリッド車の燃費に対するお客様の期待は非常に高く，モード燃費だけでなく実用燃費においても確実にその期待に応える必要がある。

高い燃費性能を実現するためには，走行中にエンジンとモータをそれぞれが最も得意とする領域で運転できることが重要である。また，エンジンの不得意な領域をモータでカバーし，同時にハイブリッドらしい走行感覚を実現するために，低速域での EV 走行が可能であることも必要条件と考えた。

これらを可能にするために，モータとジェネレータを別々に持つ，2 モータタイプのハイブリッド駆動ユニットに，ニッケル水素電池を組み合わせたハイブリッドシステムを採用した（Fig. 10）。

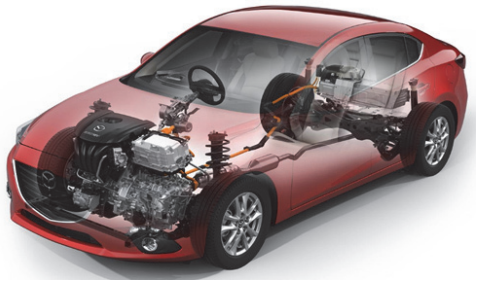


Fig. 10　Hybrid System

(2) 燃費性能の作り込み

エンジンは，SKYACTIV-G 2.0L エンジンをベースに，ハイブリッド用に新規開発を行った。高い燃費性能の実現のため，クールド EGR を採用して圧縮比を 14.0 とし，レイアウトや要求性能に合わせて，制御や吸排気系も新規開発とした。また，冬季の実用燃費改善に効果が高い，排気熱回収装置も採用した。

走行抵抗に関しては，空気抵抗とタイヤを主とする転がり抵抗の低減に注力した。また，LED タイプのストップランプを採用するなど消費電力の低減にも配慮した。

(3) マツダらしさの作り込み

ハイブリッドであっても，マツダブランドが目指す，「走る歓び」の実現は必須と考えた。「走る・曲がる・止まる」のダイナミック性能と HMI について，その実現のために行ったことを，以下に述べる。

a.走る

アクセルペダルの操作感とそれに応じた発生加速度，その際耳に届く加速サウンドなど，ドライバが走りを感じる複数の因子について，こだわりを持って作り込みを行った。

アクセルペダル操作感については，ベースモデル同様にドライビングポジションにおけるアクセルペダルの位置を最適化した上で，右足拇指球とペダルとの関係を考慮して，アクセルペダルの踏面形状を決定した。アクセルペダルの踏み込み量に対する発生加速度は，リニア感を最優先とし，アクセル軽開度域の速度コントロール性を維持しつつ，大開度での伸び感を両立させたセッティングとした。加速サウンドも吸排気系による心地よい音作りと，エンジンマウントや遮音材の最適化による不快なノイズの低減により，ベースモデルと同じ方向性で作り込みを行った。

b.曲がる

SKYACTIV ボデー＆シャシーが持つポテンシャルの高さを生かすため，ボデー＆シャシーの基本構造を維持したまま，ハイブリッドユニットを搭載することを実現した。また，高電圧電池の搭載による重量変化に合わせて，ベストバランスとなるようサスペンションスペックを決めた。

c.止まる

ブレーキについては，減速時のエネルギー回収量を最大化するため，電子制御回生協調ブレーキを採用した。回生ブレーキと油圧ブレーキの併用となるため，自然なブレーキフィールを作り込むには長期間にわたる評価が必要となったが，ブレーキの効き始めや戻し側のコントロール性を含めた，マツダの目指すリニアな減速感が得られるブレーキを実現した。

d. HMI

運転に必要なハイブリッド特有の表示項目には，パワーメータや，EV 走行，電池残量，シフトポジションのインジケータ，などがあるが，これらについてもアクセラシリーズ共通の走行安全最優先の考え方のもと，ドライバから見やすいメータ内に表示を設けた。また，シフトレバーは電気式とし，指先で操作しやすいノブ形状を作り込んだ。

以上により，JC08 モードで 30.8km/L というクラストップレベルの燃費性能と，マツダらしい走る歓びを両立したハイブリッドを実現した。

4. おわりに

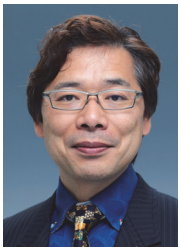
マツダでは一貫した開発哲学「人を信じ，人に操作させることを第一に考える。人が持つ素晴らしい能力を最大限発揮させることを最優先する」の下，あらゆる技術，車を開発している。

新型アクセラでは，CX-5，アテンザと新世代商品で一貫して取り組んできた，新生マツダの持つ価値の全てを結集させた。「魂動（こどう）」デザインの進化，走る歓びと優れた環境・安全性能を高いレベルで両立し 3 世代にわたって進化・熟成した SKYACTIV テクノロジーの全面採用，ドライバの安心を支える先進安全技術「i-ACTIVSENSE」を搭載し，マツダが追求する走る歓びを高い次元で体現した。

更に，人間中心設計を徹底し，走行安全性を第一に考えた新 HMI により走る歓びを広げる MAZDA CONNECT を新規導入した。このほかパッケージ，快適性，品質など，クルマに求められる基本性能についても，高い次元で実現している。

あらゆる面で走る歓びを追求した新型アクセラが，セグメントの枠を超えて世界中のお客様から愛され，人生の良きパートナとして長く付き合っていただけることを，我々は切に願っている。

■著　者■


猿渡 健一郎


柏木 章宏


下舘 真

特集：新型マツダアクセラ

2

新型アクセラにおける魂動デザイン

“KODO” Design in new AXELA

田畑 孝司*1
Koji Tabata

要約

新型アクセラのデザインは，マツダのデザインテーマ「魂動（KODO）」の第3弾となり，このデザインテーマのポイントは，生命感あふれる動きを表現することである。

今回の新型アクセラでは，魂動のデザインを高級車らしい伸びやかで力強い動きで表現した新型アテンザに対し，新しい動きの表現としてエネルギッシュでテンションを効かせたリズミカルな動きを心掛けた。そのため，デザイン開発のキーワードとして「瞬発・誘発」という言葉を掲げて開発を進めた。これは，出逢った瞬間に心に火が着き，さまざまな新しい夢や楽しい出来事を予感させるデザインを象徴する言葉として，またそれと同時に「単なる道具ではなく，人生のパートナに対して感じるようなときめきや，いつまでも色褪せることのない存在と共に過ごす歓び」これらの情感を呼び覚ますことのできるデザインを目指した言葉であり，新型アクセラはそれを実現したクルマである。

Summary

Mazda new AXELA is the third model to adopt Mazda’s KODO design theme. At its heart, the KODO design expresses dynamic motion in every detail and maximizes distinct features of each Mazda model.

In applying this KODO design to the new AXELA, we held up a Japanese phrase "SHUNPATSU & YUHATSU" as our slogan in the design development. This symbolizes a design that ignites your spirit at first sight and evokes a sense of anticipation for new dreams and exciting experiences. In contrast to the new ATENZA design, which expressed powerful dynamism better suited for a CD-car, we pursued a rhythmical look featuring energetic tension in the new AXELA design. We also looked to a pleasing design with unfading appeal so that the new AXELA would earn a unique place in the hearts of customers as a trusty partner rather than a mere means of transport.

1. はじめに

新型アクセラでは，小型車にも展開できる新たな魂動の動きの表現を探りデザインを行った。その結果シンプルな立体の強さから生まれる瞬発力を感じさせる動きに着目し，新しい動きの表現を実現した。

インテリアでは，ドライバオリエンテーションの進化を考え，ドライバが自然と前方に意識を集中するための力強いベクトルを持ったコックピット空間と，開放感を乗員に提供するパッセンジャ空間の両立を目指した。更にハイコントラストで艶感のある加飾表現を考え，ドアを開けた瞬間に走りへの期待感を高めるエモーショナルで洗練されたインテリアを実現させた。本稿ではそのデザイン表現についての手法を紹介する。

2. デザインコンセプト

2.1 エクステリアデザインの狙い

小型車に展開できる新たな動きの表現をイメージし，デザイン開発するため「瞬発・誘発」をキーワードとした。

「瞬発」とは一瞬で見る者の心を刺激し，魂を目覚めさせるデザインキーワードである。それに対して，「誘発」とは見る者の力を湧き上がらせ，長いスパンで活力を与えるキーワードとして使用した。

私たちは，この二つのイメージを表現することを目標としてエネルギッシュでリズミカルな新しい動きの表現を考え，気持ちの良い走りを想起させるスタイリングを実現した。

*1　デザイン本部
Design Div.

3. エクステリアデザイン

3.1 ACCELERATING MOTION / 加速感のある動き

魂動デザインは，生命感あふれるフォルムを作ることがコアテーマである。そのため，大地を掴む安定したスタンスと獲物に飛びかかるような一瞬の躍動感ある動きを実現することが不可欠である。

新型アクセラもこの二つを備えたデザインを目指した。この魂動デザイン共通の考え方に対し，新型アクセラでは更に進化させたのは動きの表現である。

マツダの車種群の中でスポーツカーを除いて最もスポーティな表現を必要とする車種のため，魂動の動きの表現をよりエネルギッシュで，鍛え抜かれたアスリートがスタートダッシュした時の動きにこだわった。それを表現したのが「ACCELERATING MOTION / 加速感のある動き」である。その加速感の感じるラインと面の動きを表現するため，シンプルで立体感の強い造形にテンションを設けて軽快でリズミカルな動きをもつ表情豊かなボデー造形とした（Fig. 1, 2）。

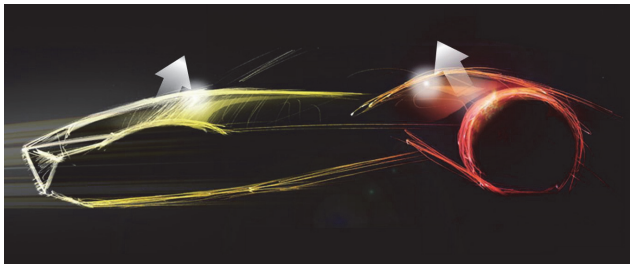


Fig. 1　AXELA Image

Fig. 2　AXELA (5HB)

3.2 面へのこだわり

新型アクセラの軽快でリズミカルな動きを感じさせる造形には，マツダが長く追求してきた「面質」へのこだわりがある。そのため，鍛造で作られたような凝縮した塊が持つ硬さをボデー全体で感じるシンプルな立体の構成とし，ボデー面の動きの表現が分かりやすい形とした。また，光や見る角度によってなめらかに移り変わるリフレクションの表情をボデーに与えることで，見る者の感情を揺さぶる仕掛けを試みた。ボデーに写りこむリフレクションを意図したように映すことが必要であり，微細な面の調整が求められる。そのため初期クレー造形の過程でリフレクションのライン一本一本を調整すると共に，ボデー面にラインを投影することなどでリフレクションのチェックを繰り返し行い，より効果的な面の表情を追求した（Fig. 3）。

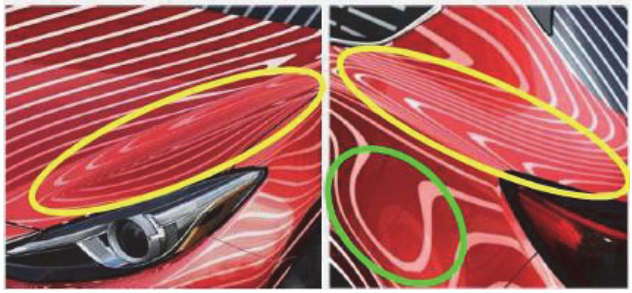


Fig. 3　Reflecting 3D Data

3.3 フロントデザイン

(1) ファミリーフェースの表現

今回の新型アクセラは，スポーツカーライクな表情を作り出すためにライセンスプレートをグリル内に取り入れ，低い位置にグリルを構えた。これによりノーズを下げた精悍な顔立ちとなり，勢いよく地を蹴って前へと突き進むイメージをいっそう強調させた。

グリルメッキパーツでは立体的な造形を施し，従来のような薄い飾りのメッキモールといった処理ではなく，それ自体がフレームのようにボデーの内側から表面へと突き出たようなグリルを創り上げた。更に金属の冷たさや重さを感じるようなこだわった立体造形を行い，そこから感じる高い質感を演出した（Fig. 4）。

Fig. 4　Family Face

(2) ヘッドランプ

生き物のように「鋭い目」を実現するため，ターンランプをヘッドランプユニットの外へ出し，ヘッドランプの外形を薄くシャープな形状とした。またハイグレードでは昼夜を問わず個性的なアイコンとするため，直線のラインと導光リングを組み合わせた形状として LED 光源とすることで上下幅を 15mm に縮小した鋭くシャープに光るシグネチャーラ

ンプとした。ランプベゼルの細部にまで緻密な仕上げを行い，堀の深い造形で立体感を出し目力のある精悍な表情を実現した（Fig. 5）。

Fig. 5　Head Lamp

3.4 ボデーデザイン

サイドでは，スポーティで薄くコンパクトなキャビンの実現と前進感を感じる動きに注力した。

キャビンの後方では，現行車にあるリヤクォータウインドウを後方の視認性を犠牲にすることなく廃止し，ドア周りをシンプルな処理とした。これによりベルトラインが前後ドアの中だけで完結したコンパクトでクリーンな外観となり，室内空間を犠牲にすることなくキャビンをコンパクトに感じる印象を実現した。そしてキャビンを後方に配置し，リヤを持ち上げた前傾姿勢のプロポーションにより，勢いよく前へ進もうとする印象を出した。

低く位置するグリルラインはヘッドランプへとつながり，強く張り出したフェンダからリヤへとリズミカルな動きを作ることでエネルギッシュな躍動感を強調した。そして俊敏な走りを想起させるために立体的な面構成として力強さを表現した（Fig. 6）。

Fig. 6　Movement of Body Face (5HB)

3.5 リヤデザイン

(1) リヤ

リヤまわりは，力をため込んだイメージとなるように塊の強い造形とした。その強い塊をだすためリフトゲートパネルのプランビューの曲率を強くした。その結果スチールパネルでは成形ができず，ナンバプレート周りを樹脂製パーツとすることで実現した。合わせてその樹脂製パーツを台形のグラフィックとすることで力強いスタンスを表現した。

ルーフスポイラはシャープに張り出した形状とし，空力の性能アップだけでなく上下に薄いキャビンを強調し，更に前進感・スピード感を高める造形とした（Fig. 7）。

Fig. 7　Rear Shape (5HB)

(2) リヤコンビネーションランプ

ヘッドランプユニットと同じく薄い形を実現しつつ，昼夜を問わずひと目で分かるブランド表現とし，走り去る後ろ姿が印象的に感じる造形とした。そのためハイグレードではヘッドランプの発光シグネチャーとのデザインの統一性を用いて，テールライトにも鋭くシャープに光るシグネチャーランプを採用した。リングからウイング状に伸びる直線パターンで点灯する形状を採用し，リングの中はターンランプを配置した個性的なレイアウトとした（Fig. 8）。

Fig. 8　Rear Combination Lamp (5HB)

4. インテリアデザイン

4.1 空間の考え方

(1) バニシングポイント

これまでデザインテーマとしていたドライバオリエンテーションを進化させ，バニシングポイントを使用したインテリアの空間造形を試みた。バニシングポイントとは，デザイン

や建築図用語でパースペクティブの消失点という意味である。ドライバの視点の先を消失点として全体空間を造形しており，ドライバがインテリアの軸となっている。

そのため，インテリア全体がドライバを軸とした一つの空間造形となっている。これによりインパネやドアトリムといった個別のデザインを行う手法や今までのラウンドデザインでもない，新しいインテリアのデザインを実現した（Fig. 9）。

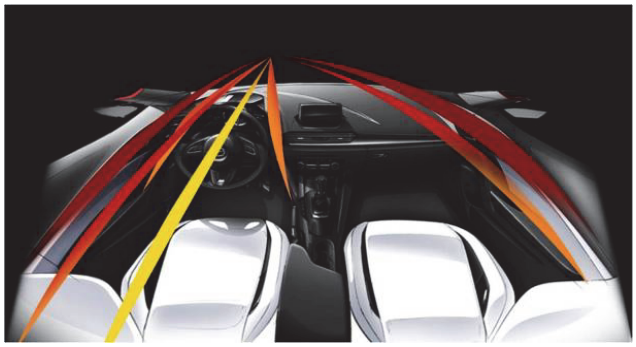


Fig. 9　Flow of Interior Shape

加えて，ドライバエリアとパッセンジャエリアではそれぞれの空間でデザインの違いを色濃く反映させた。ドライバエリアでは，運転に意識を集中しやすく前後に動きを感じるメカニカルで凝縮を感じる運転席空間を設定。パッセンジャエリアでは心地よい開放感と安心感を提供する空間を造形した。この二つの空間を対比的な造形とすることでそれぞれベストな空間を実現しつつ，更にドライバオリエンテーション空間を際立たせた（Fig. 10）。

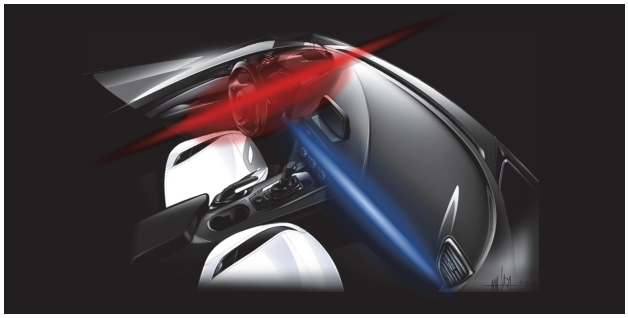


Fig. 10　Front Seat Area

(2) ドライバエリア

ドライバエリアでは，身体が空間の同軸になるよう運転情報を投射するために新たに開発されたアクティブドライビングディスプレイと単眼メータを配置した。そのため，ドライバはシートに身を沈めた瞬間にクルマと一体になる感覚を味わうことができる。そしてバニシングポイントへと収斂していく造形は視覚的にもスピード感を強調し，前へ向かって行くドライバの気持ちを駆り立てるように演出した（Fig. 11）。

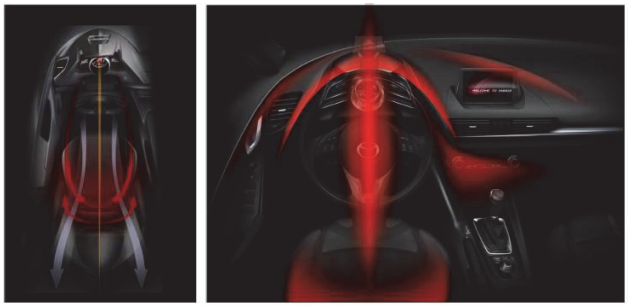


Fig. 11　Driver Space

(3) パッセンジャエリア

ドライバエリアとパッセンジャエリアを隔てるセンタコンソールは，非対称の形状とした。パッセンジャ側は適度な「抜け」を設けてドライバ側との連続性を感じさせることで，パッセンジャが孤立感を感じない造形とした。またオーディオ本体を別構造とすることでインパネダッシュボード上端の高さを抑えることができ，開放感のある広々としたインパネ基本面を実現した。ただし，この上端位置が低すぎると高速走行中に乗員が不安を感じることになるため，関係部門と協力し「安心してドライブを楽しめる」最適なインパネの高さを実現するため，実際の走行テストを繰り返し行い決定した（Fig. 12）。

Fig. 12　Airy Human Space

4.2 インパネデザイン

(1) 加飾表現

操作機器が集中するセンタエリアでは，空調ダイヤルやコマンダなどを無垢の金属を思わせる硬質の輝きをサテンクロームで表現した。これは走行中の視線誘導の役割を果たすと共に，艶やかなブラック内装に凛としたコントラストを与える処理としインテリアの質感を上げている。更に質感を上げるため，サテンクロームのパーツをピアノブラックのパネルと対で使用することを行い，高い質感を実現した（Fig. 13）。

Fig. 13　Airy Human Space

(2) メータ・AT シフト

ドライバの軸を意識し，ハイグレードモデルのメータ上部にはアクティブドライビングディスプレイを配置。ドライバ正面に配置されたメータクラスタは中央を円形とし，左右にウイング状のデジタルディスプレイを配した。メータ中央部には造り込んだ金属立体文字盤を採用して視認性と精緻感を両立し，大型タコメータとデジタルスピードメータとのコンビネーションで，走りへの期待を誘発するデザインとした。

AT シフトでは，シフトステーにブーツの設定を行い，スポーティな処理として質感をアップした。シフトノブ形状については何通りものスタディを繰り返し，上から握る場合と横から握る場合のどちらの場合にもドライバの手のひらにレザーがあたるフォルムとし操作しやすくクルマと対話できるデバイスとしての形をデザインした（Fig. 14）。

Fig. 14　High-Grade Meter・AT Shift

4.3 シートデザイン

ドライバの身体の中心が空間の軸となるため，シートもセンタの軸を感じる造形とした。体の軸をブレさせないシートフォルムのデザインを追求し，高いホールド性でドライバのサポート性能を高めた。また前席のシートバックの幅をスリムにしたことで後席乗員の圧迫感を少なくすると共に，シート性能を確保しつつ厚みを調整することで後席の膝前スペースの拡大も実現した。

ハイグレードのオフホワイトレザーでは，スポーティな外観とするためブラックレザーをアクセントとして使用した。更にアクセントのステッチでは部位別にホワイトとグレイの糸を使い分け，ブラックレザーの部分には赤色のステッチでスポーティな印象を演出した（Fig. 15）。

Fig. 15　Off-white Leather

5. おわりに

新型アクセラのデザインでは，One & Only の姿を描きチーム目標とすることで開発が進められた。そのため，デザインメンバのみならず，新型アクセラのデザインを実現するためにデザイン部以外の多くの関係者にもデザイン視点で考えていただき，いままで難しかったことも実現することができた。そして，今回私たちの熱い想いを形にしたこのクルマが，ひと目で皆様を魅了し，人生をこれまで以上にエネルギッシュに楽しむパートナとして永く愛され続けていただけると，私は確信している。

■著　者■

田畑 孝司

特集：新型マツダアクセラ

3

新型アクセラの軽量ボデーシェル開発 ～SKYACTIV-BODY の更なる進化～

Development of New AXELA Light Weight Body Structure ～Further Evolution of SKYACTIV-BODY～

中村 岳司*1 Takeshi Nakamura
森本 誠*2 Makoto Morimoto
田中 潤一*3 Junichi Tanaka
玄道 俊行*4 Toshiyuki Gendo

要約

新型アクセラは，CX-5・アテンザに続き，デザインテーマ「魂動」を，よりエネルギッシュで躍動的に進化させたエモーショナルなデザインに，優れた実用性を兼備した商品である。CX-5・アテンザの市場導入によってブラッシュアップした SKYACTIV-BODY に更に磨きをかけることで，スポーツコンパクトとして秀でた運動性能を実現することを目指した。本稿ではこの高い運動性能とデザイン意図を忠実に表現するためのベースとなる軽量・高剛性ボデー開発について，その実現手段を紹介する。

Summary

Following the Mazda CX-5 and the Mazda ATENZA, All-New AXELA is Mazda's another SKYACTIV-BODY product that is superior in usability and embodies the design theme "KODO" in a more energetic and dynamic manner. New AXELA was aimed at realizing a superior dynamic performance as a Sport Compact Car by further honing the SKYACTIV-BODY that had already been brushed up since the launch of CX-5 and ATENZA. This paper outlines development activities for a light-weight high-rigidity body structure, which is the basis for the high dynamic performance and emotional design of the New AXELA.

1. はじめに

新型アクセラはセダン，ハッチバックの2つのモデルを持つマツダの主力車種である。双方とも現行モデルに対し各性能を飛躍的に向上させながらホワイトボデー質量はベストインクラスとすべく，CX-5, アテンザで熟成してきたSKYACTIV-BODY(1)の更なる進化を求め開発した。

同時に魂動デザインコンセプトを，よりエネルギッシュで躍動的に進化させ，見る者の心を瞬間的にとらえて魅了するような圧倒的な造形美と優れたパッケージングの両立を目指した。

構造体として最適なフレームワークを採用し，構造部材一つ一つの性能に対する寄与度を分析し，最適化を図り，高張力鋼板の使用拡大を行うことで，高剛性で，かつ軽量ボデーシェルを実現した。本稿ではこの軽量化の考え方・手法を紹介する。

2. 新型アクセラの SKYACTIV-BODY

新型アクセラでは，SKYACTIV-BODY の考え方を踏襲しつつ，CX-5，アテンザから以下の項目について進化させた。

2.1 マルチロードパスの進化

新型アクセラでは，マルチロードパスの考え方を更に進化させることで，これまで寄与の薄かった部材にも機能配分を行い，薄板化を実現した。例えば，Cピラーレインフォースメントとルーフレールレインフォースメントを結合することでリヤヘッダへのロードパスを追加した。この構造の採用により側面衝突時にBピラーレインフォースメントからの荷重をルーフ部へ効率よく伝えることができる（Fig. 1）。 また，#3クロスガセットの稜線を直線的に通すことで部品の耐力を高め，サイドシルの侵入を抑制する構造とした（Fig. 2）。

*1～4　ボデー開発部
Body Development Dept.

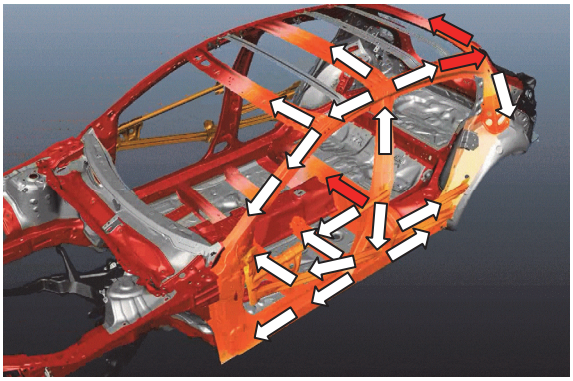


Fig. 1　Multi-Load Path Concept

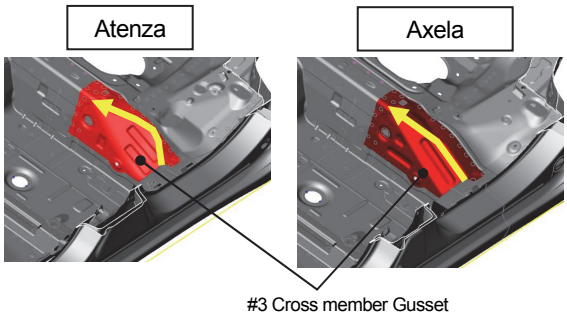


Fig. 2　#3 Cross Member Gusset Structure

2.2　連続構造の進化

ハッチバックモデルのリヤアッパボデーについては現行モデルに対し，リヤヘッダ前方移動によりリヤピラーを前傾させたデザインとしている（Fig. 3）。同時に斜め後方視界確保のため，リヤドア開口を拡大した。その結果，車体剛性に対する寄与が高いリヤピラーコーナ部断面は減少しデザイン・パッケージの両立という観点で大きな課題を抱えることとなった。車体性能・デザイン・パッケージを高次元でバランスさせるため，リヤピラーインナとCピラーレインフォースメントで構成する閉断面をリヤヘッダ断面に連続させた。かつ，リフトゲート開口側部の閉断面もリヤヘッダへ結合させ適正な構造とした（Fig. 4）。

結果，デザインコンセプトを崩すことなく斜め後方視界を向上させながら，現行モデルに対しねじり剛性を50%アップさせ（Fig. 5），アッパボデーで2.6kgの質量低減を実現した。

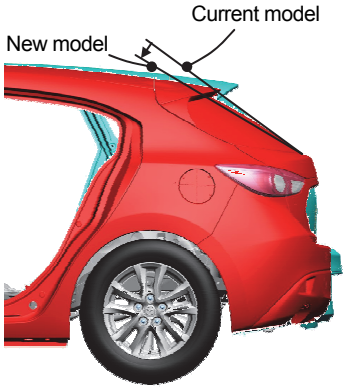


Fig. 3　Rear Body Appearance

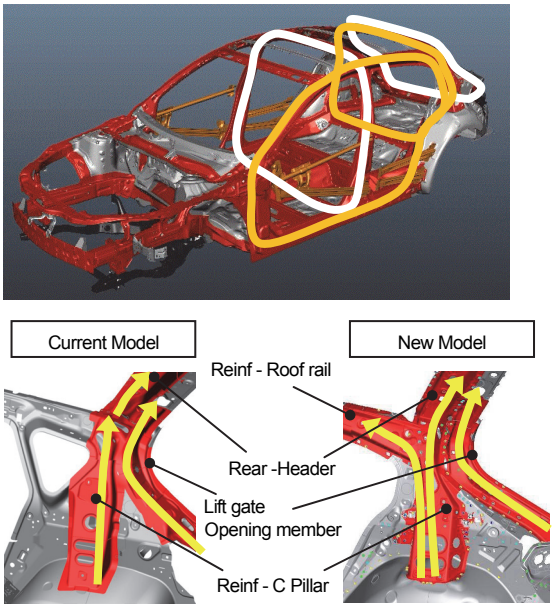


Fig. 4　Ring Structure

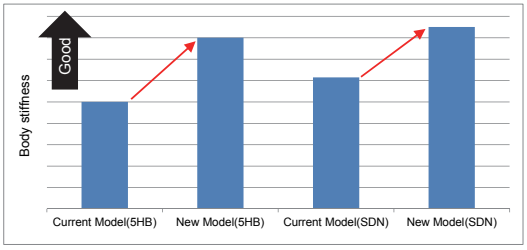


Fig. 5　Body Stiffness (Current Model vs. New Model)

2.3　節（断面変形抑制部材）構造の進化

フレームの機能（剛性確保・衝突時の耐力確保等）を最大限に発揮させることを目的とし，多節構造を採用した。サイドシル断面内には各ピラーとの接合部位とピラー間の適切な部位に多様な節を配置し，各モードでの断面崩れを抑制させ部材本来のポテンシャルを引き出した。リフトゲート開口部は C ピラーレインフォースメントを上部へ連続させ，リヤエンドメンバは両サイドを延長し節の機能を持たせ，リフトゲート開口の対角変位を低減させた（Fig. 6）。

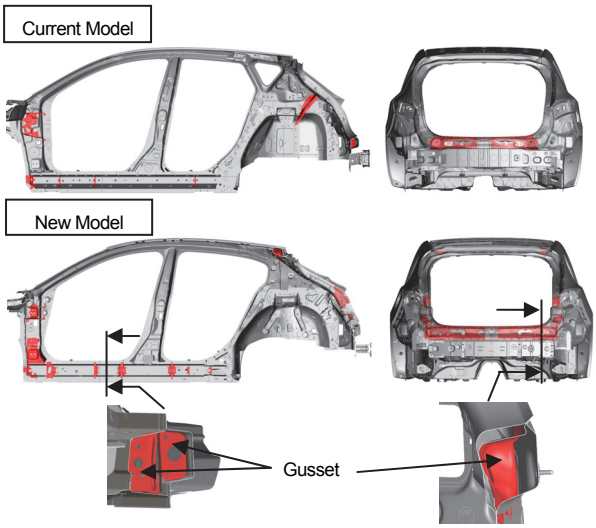


Fig. 6　Superior Gusset Structure

3. 軽量化

3.1　ウェルドボンドの適用拡大

ウェルドボンドの適用については，CX-5・アテンザで適用していた部位に加え，ダッシュロアとアッパ接合部，リヤヘッダ部へ適用を拡大し，部材の結合部の強化を図った。これにより，新たな部材を追加することなくロードノイズ低減と剛性を向上させた（Fig. 7）。

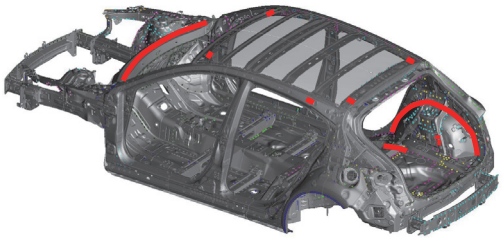


Fig. 7　Weld Bonded Area

3.2　ハイテン材，ホットスタンプ使用による軽量化

(1) ハイテン鋼板材（高張力鋼板材）

車体剛性から必要な板厚を定め，その上で衝突性能から，エネルギー吸収させたい部位と，変形させたくない部位を見極めて高張力鋼板（引張強度が440MPa以上の鋼板）を適用した。高張力鋼板適用率（質量比）は現行モデル50%に対し60%に拡大させた。中でも衝突への寄与が高いサイドシルレインフォースメントを590MPaから980MPa，フロントピラーレインフォースメント，ルーフレールレインフォースメント，＃3クロスメンバを590MPaから780MPaにグレードを上げ衝突性能を向上させた（Fig. 8）。

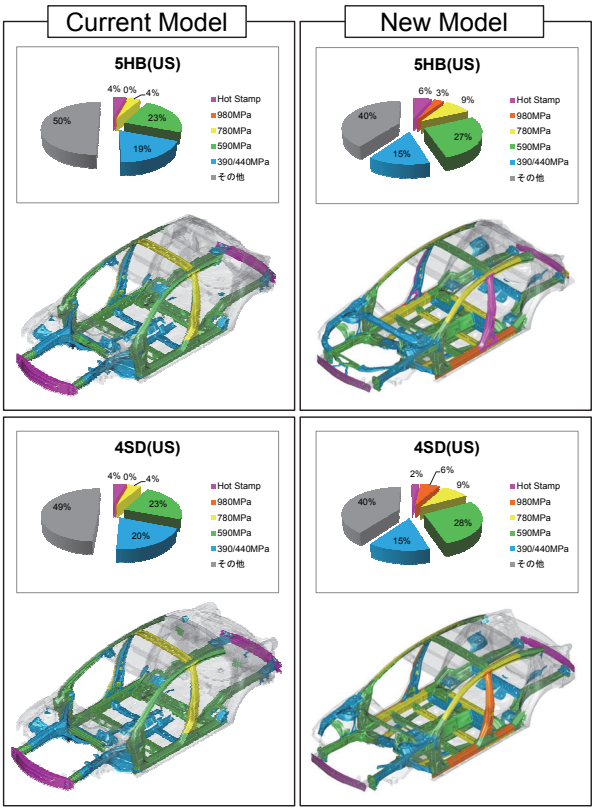


Fig. 8　High-Tensile Steel Usage Rate

(2) ホットスタンプの採用

新型アクセラでは，優れた側面衝突性能と軽量化を両立するため，一部のモデルに対し B ピラーレインフォースメントにホットスタンプを適用した。

ホットスタンプのスポット溶接部は，熱影響部（HAZ：Heat Affected Zone）が軟化することが一般的に知られており，フランジ部がスポット溶接されたハット部材の曲げ試験では，HAZ 軟化部に応力集中しクラックが発生する事例[2]も報告されている。B ピラーレインフォースメントの設計では，側面衝突時におけるフランジ部のスポット溶接部の応力緩和を目的として，B ピラー下部の断面形状の適正化を行った（Fig. 9）。

その結果，980MPa ハイテン材を用いた構造に対し，一部のレインフォースメントが廃止でき，2kg の軽量化を実現した（Fig. 10）。

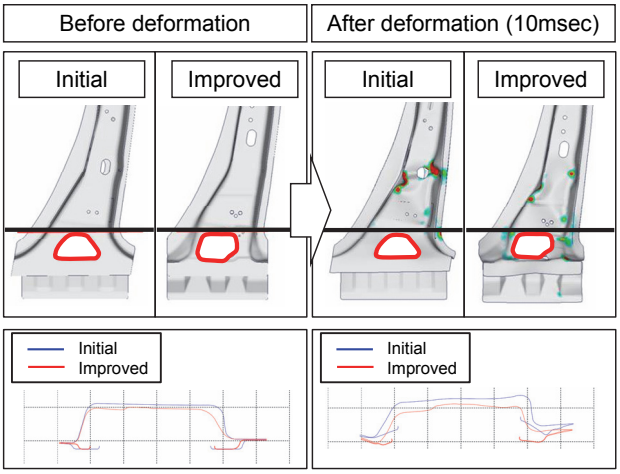


Fig. 9　Hot stamp B-Pillar Analysis Results

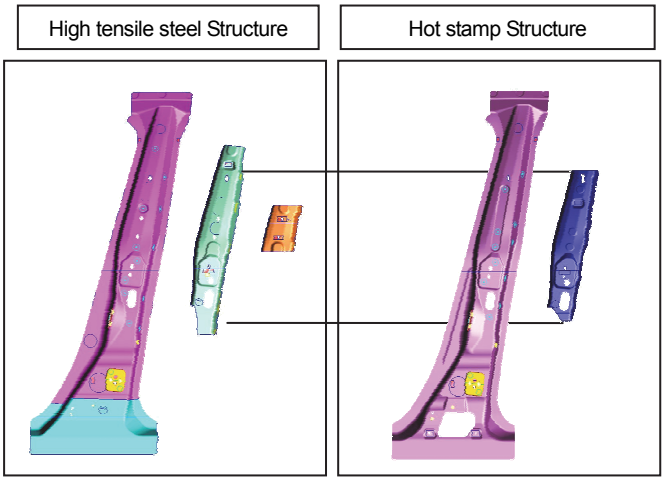


Fig. 10　B-Pillar Appearance

3.3　樹脂部品の軽量化

新型アクセラにおいては，車体のみでなく樹脂部品においても必要機能を明確にし，機能の量から部品に必要な形状，板厚を決めた。その例を以下に示す。

(1) マッドガード適正化

マッドガードの機能として，泥よけ・風圧・走行時の負圧による入力に耐えること，車体へのチッピング防止等がある。このようなさまざまな入力に対し，解析，実車での評価を駆使し剛性に対して効率的なビード形状・位置・締結位置を導き出した（Fig. 11）。これを採用することで，マッドガードの薄板化が可能となり，機能を満足させながら，現行モデル比約 20%の軽量化を行った。また，その他の樹脂部品においても同様の考え方を踏襲し設計を行った。

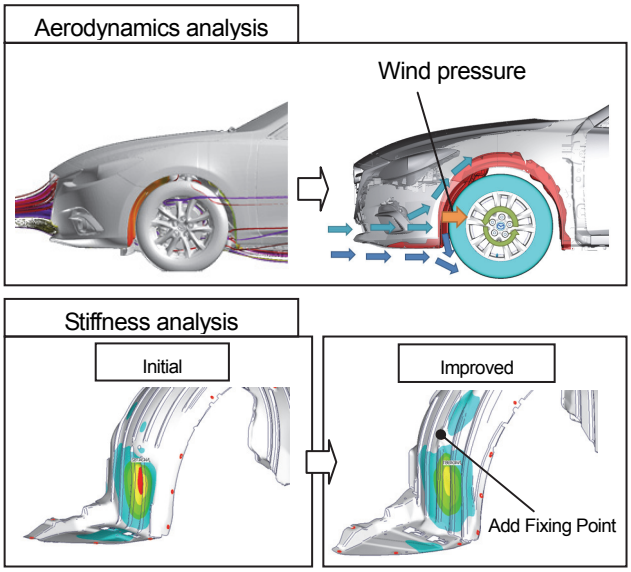


Fig. 11　Mud-Guard Analysis Results

3.4　ボデーシェル質量

新型アクセラは，SKYACTIV-BODYの考え方を取り込み，更なる構造適正化を進めた結果，ベストインクラスのボデーシェル質量を達成した（Fig. 12）。

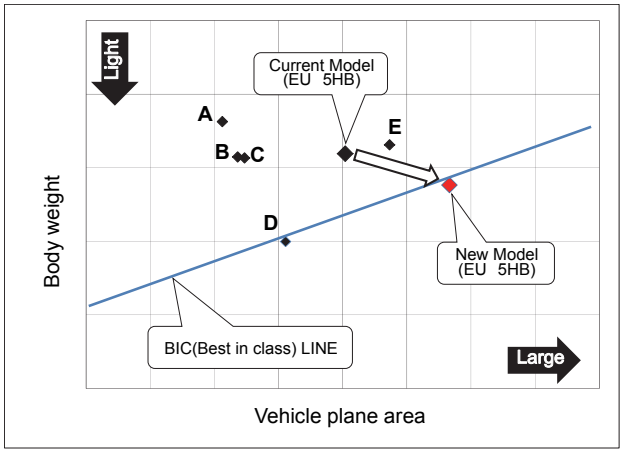


Fig. 12　Vehicle Weight Per Projected Area

4. 魂動デザインの実現

デザインコンセプトを実現させるために，現行モデルに対しフロント・オーバハングを 45mm 短縮（Fig. 13），リヤ・オーバハングはハッチバックモデルを 35mm，セダンは 30mm の短縮を行った（Fig. 15）。

4.1　フロントボデー構造

通常，フロント・オーバハングを短縮した場合，前面衝突時のエネルギー吸収長が減少するため，補強追加により質量が増える。新型アクセラではストレートフレームを最大限に機能させるためにフロントフレームとエプロンレインフォースメント・アッパとをつなぐサイドステーの強化とフロントサスペンションタワー後部にエプロンガセットを設定し正面衝突時の折れモードの適正化を行った。

また，フロントサスペンションタワー前部のエプロンレインフォースメント・ロアを裾広がり形状にすることにより悪路走行時の変形抑制を行った。結果，フロントボデー質量は，現行モデル比で 15.3kg の軽量化を実現した（Fig. 14）。

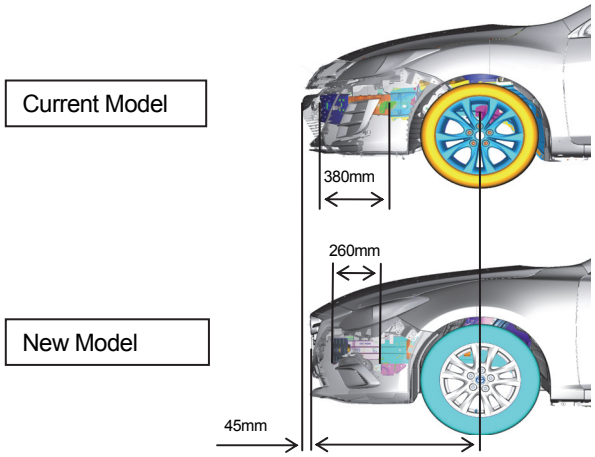


Fig. 13　Front Over Hung

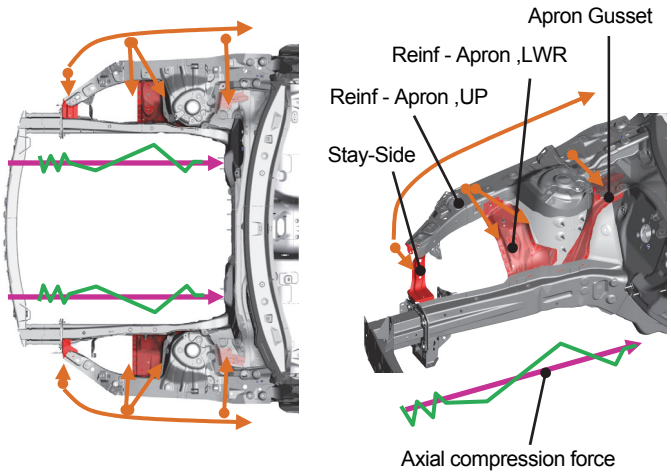


Fig. 14　Front Body Structure

4.2　リヤボデー構造

リヤ・オーバハングを短縮した場合も後面衝突時のエネルギー吸収長が減少するため，補強追加等の質量増が必要となる。リヤ・オーバハング短縮と軽量化を両立させるため，エネルギー吸収効率を向上させることに着目し，リヤサイドフレーム断面内にレインフォースメントを設定し，両側のフレーム間に#4.5 クロスメンバを渡すことでモードコントロールを行った。結果，リヤボデー構造の質量増を最少化した（Fig. 16）。

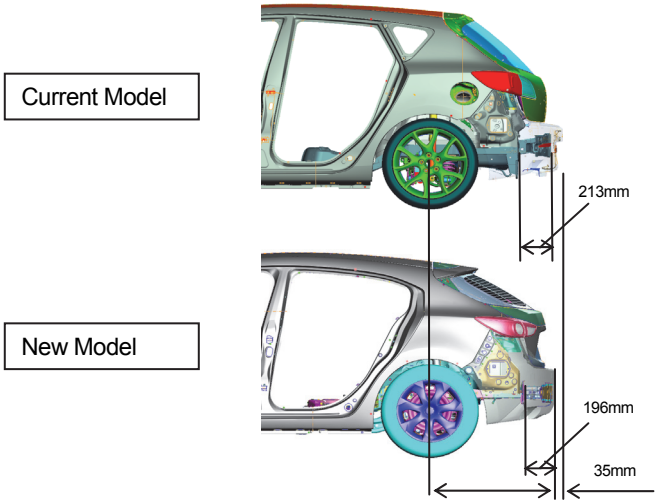


Fig. 15　Rear Over Hung　(5HB)

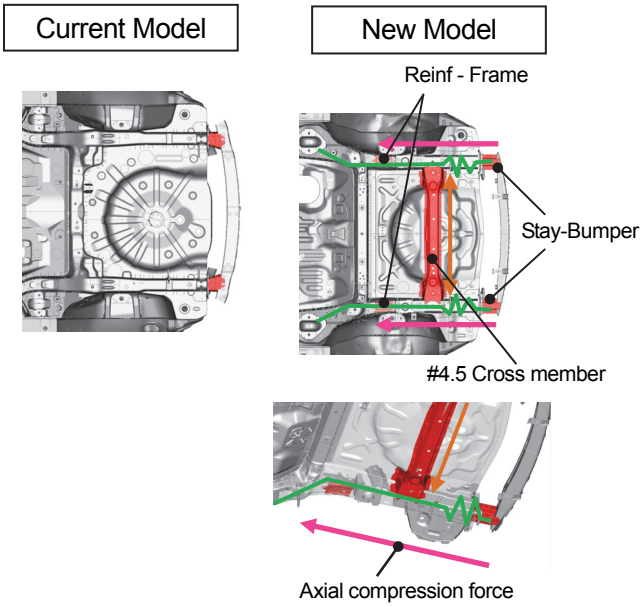


Fig. 16　Rear Body Structure

5. おわりに

以上がSKYACTIV-BODYの更なる進化を目指し開発した新型アクセラの主なボデー構造である。新型アクセラは現行モデルからサイズアップしながら，衝突性能や車体剛性といったパフォーマンスを飛躍的に向上させベストインクラスのホワイトボデー質量を達成した。

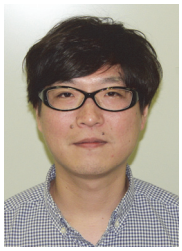
開発過程においてさまざまな問題に直面したが，企画・デザイン・実研・開発・生産技術及び製造部門が一丸となって活動することで高い目標を達成することができたと考える。今後もお客様により良い商品を提供できるよう，全社一体となって努力する所存である。

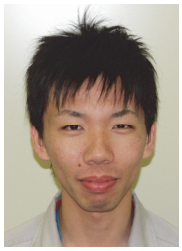
参考文献

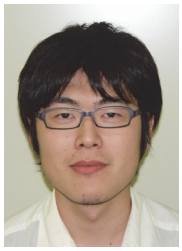
(1)　木村隆之ほか：SKYACTIV-Body，マツダ技報，No.29，pp.61-67（2011）

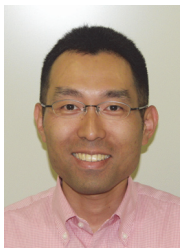
(2)　富士本博紀ほか:熱間プレス鋼板，高張力鋼板の抵抗溶接性，溶接技術，3月号，pp.48-53（2011）

■著　者■


中村 岳司


森本 誠


田中 潤一


玄道 俊行

特集：新型マツダアクセラ

4　新型アクセラのシャシーダイナミクス性能

Chassis Dynamics Performance of All-New Axela

吉村 匡史*1　Tadashi Yoshimura
寺田 武史*2　Takeshi Terada
青木 智朗*3　Toshiaki Aoki
坂口 欣也*4　Kinya Sakaguchi

要約

SKYACTIV-シャシーは，走る歓びの更なる進化と環境性能に貢献する大幅な軽量化を実現した上で，「人馬一体のドライビングプレジャー」と，快適性や安心感改善による「走りの質」の向上を実現した。新型アクセラは，CX-5/アテンザに採用した SKYACTIV-シャシーと基本構造を同じとすることで，CX-5/アテンザで実現したダイナミクス性能を継承しながら，各部品の最適化や細かな改良を行うことにより，セグメントをリードする「軽快感」と「人馬一体感」を実現した。

Summary

With further evolved fun-to-drive and significant weight reduction that supports environmental friendliness, Mazda SKYACTIV-chassis has achieved "enhanced Jinba-Ittai (oneness between a driver and a car) driving pleasure" and realized higher "driving quality" that provides enhanced comfort and a sense of security. While New AXELA inherited dynamics performance from CX-5/ATENZA by applying the same base-structure of SKYACTIV-Chassis, it has achieved the segment-leading "agility" and "a sense of Jinba-Ittai" by optimizing each component and making improvements in details.

1. はじめに

SKYACTIV-シャシーは走る歓びの更なる進化と環境性能に貢献する大幅な軽量化を実現し「人馬一体のドライビングプレジャー」の向上，安心感や快適性の改善による「走りの質」の向上を狙い，サスペンション・ステアリングの機能を根本から見直し，一体感・安心感・快適性の間にある背反性能を高次元で両立するための技術開発に取り組みブレークスルーを実現した。

本稿では，SKYACTIV-シャシー採用商品の第三弾である新型アクセラについて，SKYACTIV-シャシーと基本構造を同じとしながら，このセグメントに訴求する性能をどのように具現化したか，その手段と達成性能を紹介する。

2. 開発の狙い

SKYACTIV-シャシーは，以下の背反性能の両立に取り組み実現した。

・中低速域の軽快感と高速安定性の両立
・中低速域の軽快感と乗り心地の両立
・軽量化とダイナミクス性能，NVH 性能の両立

これに加え，「走る・曲がる・止まる」という基本的な運転行動で感じられるダイナミクスフィール（G のつながり）の「統一感」を実現した。

新型アクセラは，この SKYACTIV-シャシーの採用により向上したダイナミクス性能をベースにセグメントをリードする「軽快感」と「人馬一体感」の実現を目指した。具体的にはドライバが操作し，その期待どおりに車が動くこと，それはドライバが予期しやすい車両挙動をつくり，車から期待どおりのフィードバックがドライバに返ってくること，ドライバが車と対話している感覚を持てることである。快適性においては単に入力を小さくすることではなく，ドライバが予期

*1，2　シャシー開発部
Chassis Development Dept.
*3　操安性能開発部
Chassis Dynamics Development Dept.
*4　NVH 性能・CAE 技術開発部
NVH & CAE Technology Development Dept.

するフィードバックは残しながら，予期しにくい不快な振動と騒音を低減することで上質な乗り心地と静粛性を目指した。

3. 達成手段

3.1　構造と特徴

新型アクセラでは，フロントにマクファーソンストラット式サスペンションを，リヤにE型マルチリンク式サスペンションを採用した（Fig. 1，2）。CX-5／アテンザと基本構造を同じとしながら全幅，車高，タイヤサイズなどの車両諸元の違いに適合させた。具体的には，全幅要件に適合させるためにアームやリンクの長さを変更し，最適なジオメトリ変化とするためハードポイントの変更を行った。また，各構成部品は使用する材料の材質・板厚を最適化することで軽量化を行った。

ステアリングは，ECU とステアリングモータを一体とした機電一体型のコラムアシスト式電動パワーステアリングを採用し，軽量化を実現した。また，モータの多極化により滑らかさを向上させた。

Fig. 1　Front Suspension and Steering

Fig. 2　Rear Suspension

3.2　軽快感

新型アクセラは，SKYACTIV-シャシーが実現したダイナミクス性能を継承しながら，ヨーレイトゲインを増加させることで，セグメントをリードする「軽快感」を実現した。ヨーレイトゲインは次式で示され，その増加手段はスタビリティファクタの最適化とステアリングのトータルギアレシオの高速化である。

$$G_0 = \frac{V}{L(1+KV^2)\times\varepsilon}$$

$$K = \frac{-m(l_f K_f - l_r K_r)}{2K_f K_r L^2}$$

V：車速

L：ホイールベース

K：スタビリティファクタ

ε：ステアリングギアレシオ

m：車両の質量

K_f：フロント等価コーナリングパワー

K_r：リヤ等価コーナリングパワー

新型アクセラは，車両全体で軽量化に取り組んだ結果，ロール／ヨー慣性モーメントを小さくすることができた。その上でフロントとリヤの最適なバランスとする等価コーナリングパワーを引き出すことでスタビリティファクタを最適化した。

等価コーナリングパワーは，フロントとリヤサスペンションのコンプライアンスステア量とロールステア量で調整した。現行モデルに対し新型アクセラは，フロント及びリヤサスペンション共に，必要なステア変化量に対しロールステア分を減少させ，横力コンプライアンスステア分を増加させた（Fig. 3）。

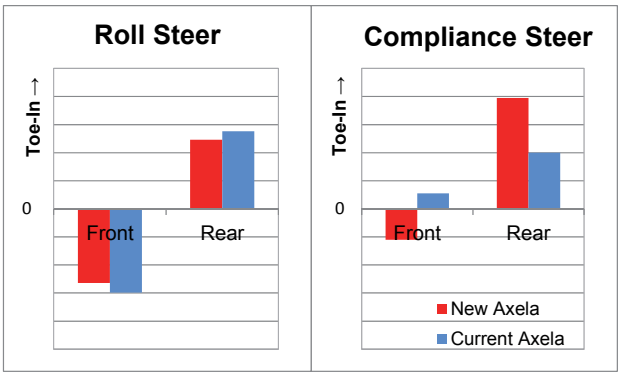


Fig. 3　Roll Steer and Compliance Steer Comparison

この変更により後輪のコーナリングパワーを大幅に増加させ安定性を高め，前輪のコーナリングパワーは必要十分な量とすることでスタビリティファクタを最適化した（Fig. 4）。

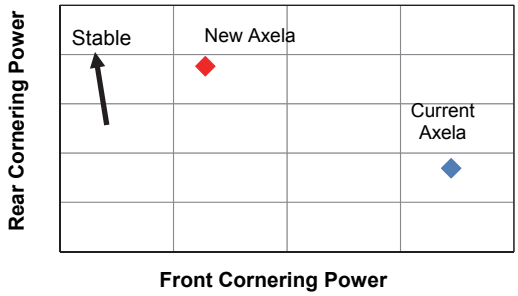


Fig. 4　Cornering Power Comparison

ステアリングのトータルギアレシオは，現行モデルの 16.2，CX-5 の 15.5，アテンザの 14.2 に対して新型アクセラは 14.1 とし最も高速化した。

これらから得られるヨーレイトゲインとヨー慣性モーメントの関係を Fig. 5 に示す。このグラフから新型アクセラは，現行モデル，CX-5，アテンザと比較してヨーレイトゲインが大きく，より軽快であることが分かる。

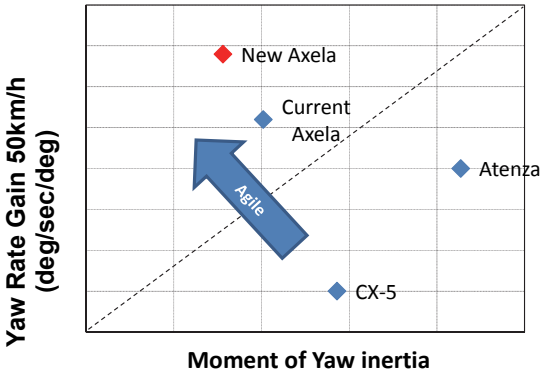


Fig. 5　Yaw Rate Gain - Moment of Inertia

3.3　人馬一体感

SKYACTIV-シャシーで実現した「人馬一体のドライビングプレジャー」は，ドライバの操舵と車両のヨーレイト，横 G 及びロール応答が旋回初期から高 G 領域までリニアにつながることを重視し開発した。

車両が旋回するときには，ロール方向に荷重が移動することによって，サスペンションがストロークする。この荷重移動が大きい，すなわち重い車ほどサスペンションをスムーズにストロークさせやすい。新型アクセラは，軽量化に取り組んだ結果として，車両のヨーレイト，横 G 及びロール応答のリニアなつながりに対しては，ハンディキャップを負うこととなる。特に旋回 G の低い領域では，旋回初期にストロークせずに，その後急にストロークを始める現象が生じ，初期の動きのリニアリティが悪くなる。この車両質量が軽いことと応答のリニアリティの背反事象のブレークスルーに取り組んだ。以下に具体例を紹介する。

a. コイルスプリング

ストラット式のサスペンションにおいて，サスペンションジオメトリからダンパに発生する横力に対して，コイルスプリングでその反対方向に打ち消す力を発生させ，この合力を低減することでダンパのフリクション低減を行い，サスペンションをスムーズにストロークさせる技術は一般的に知られている。この技術を使って，コイルスプリングのジオメトリやダンパのスプリングシート，スプリングシートラバー各部品の形状を大幅に見直し，車両が軽いことによるハンディキャップを克服するコイルスプリングの横力を発生させた（Fig. 6）。

サスペンションがストロークする過程でダンパに発生する上述の合力は刻々と変化する。この力の変化を小さくしてスムーズなサスペンションストロークを実現することにも注力した。

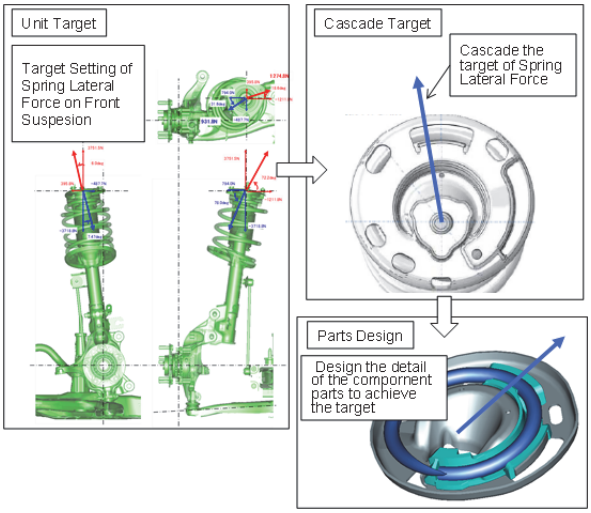


Fig. 6　Study of Coil Spring Lateral Force

b. フロントロアアームブッシュ

フロントサスペンションには，操舵初期にタイヤに微小なスリップアングルが付くことで発生するドラッグや横力が大きく変化しながら作用しており，フロントロアアームの後ろ側ブッシュは常にこの入力によって，ブッシュに入る荷重の方向や大きさが刻々と変化している。この荷重によるブッシュの変位の方向と量が操舵初期のリニアリティに影響していることを見出した。直進状態から旋回に移行する時の荷重変化によるブッシュの荷重たわみ特性がよりリニアになるように改良し，同時にヒステリシスの低減も行った。

3.4　快適性

(1) 乗り心地

SKYACTIV-シャシーでは乗り心地向上の手段として，サスペンションのジオメトリとコンプライアンスをタイヤ特性も含めて最適化している。小さな路面入力に

対してはタイヤやブッシュのたわみを使い，大きな路面入力に対してはダンパをより積極的にストロークさせるように減衰力特性を設定した。新型アクセラではこれに加えて，リヤダンパのボトム側バルブに応答性の向上した改良タイプを採用し，大きな路面入力の領域だけでなく小さな路面入力による微振幅領域においてもダンパの追従性を向上させた。

(2) ロードノイズ性能

ロードノイズ性能では，CAE 解析を用いてタイヤからボデーまでの伝達経路のからくり解明を行い、サスペンションブッシュ特性の最適化とリンク＆アーム剛性の最適化を行った。ブッシュ特性については，まず詳細な経路分析を行うことで車内音に対して寄与の高い部位を明らかにした。その上で，パラメータスタディを繰り返し行い，操縦安定性とロードノイズ性能を高次元で両立する特性を決定した。加えてブッシュのラバー材料の工夫を行い動的ばね定数の低減を行った。リンク＆アーム剛性については，サスペンション部品ごとの共振点配置を明確化し，共振点が重なり合わないように，各部品の剛性を最適化した。具体的には，CAE を用いてサスペンションの振動モードを可視化することで，ロードノイズに寄与の高い部品を特定した。この結果，リヤロアアームのアーム軸方向の剛性低減がロードノイズの低減に効果が高いことを見出した。更なるブッシュの剛性低減で対応すると，ヒステリシス増加など操縦安定性への影響が大きいため，アーム本体の剛性低減の検討を行い，強度・信頼性と剛性が両立できる構造・形状・板厚を決定した（Fig. 7，8）。

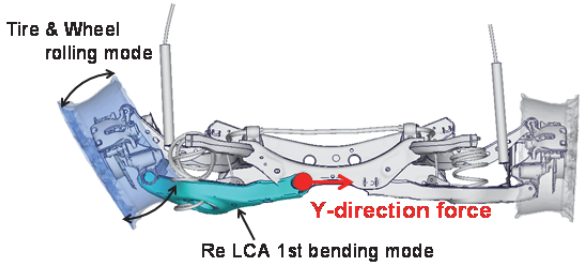


Fig. 7　Rear Suspension Deformation Mode

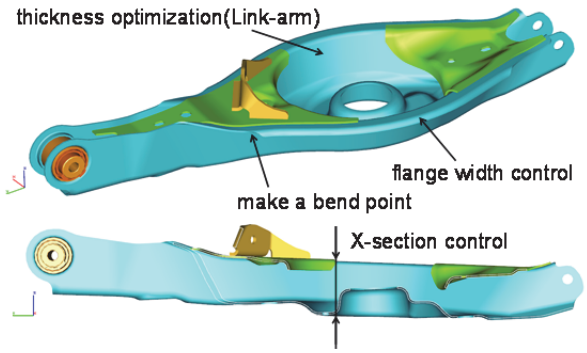


Fig. 8　Shape of Rear Lower Control Arm

4. 達成性能

新型アクセラで実現した達成性能の代表例を紹介する。

4.1　軽快感

Fig. 9 は車速によるヨーレイトゲインの変化を示す。サスペンション特性とステアリングギアレシオの見直しにより，中低速でのヨーレイトゲインを増加させ，現行モデル，欧州競合車，アテンザと比較しより軽快に，高速では SKYACTIV-シャシーで実現した後輪のコーナリングパワーを高めてヨーレイトゲインを低くする手法を継承し，アテンザとほぼ同等の安定感を実現した。

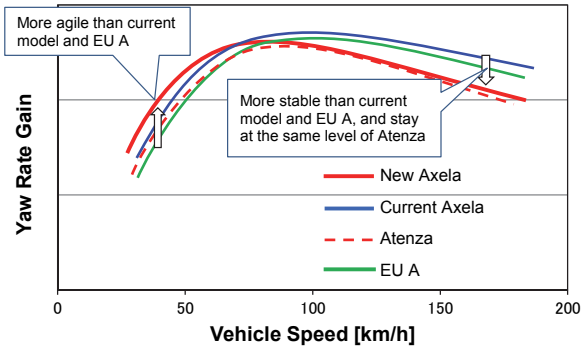


Fig. 9　Improvement of Yaw Rate Gain

4.2　人馬一体感

Fig. 10 は，操舵力とヨーレイトの関係を示す。操舵力の小さい操舵初期の領域においてヨーレイトの立ち上がりがリニアになっており，旋回初期の応答のリニアリティを実現した。

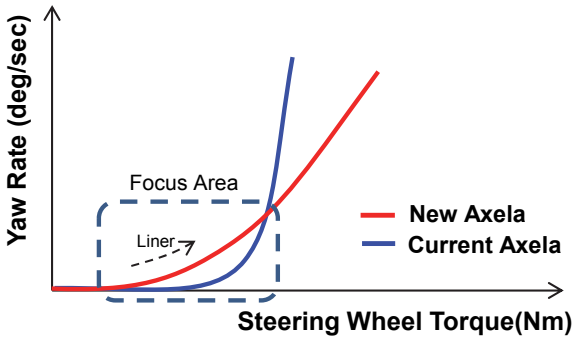


Fig. 10　Steering Torque – Yaw rate

サスペンションの初期からの動きのつながりの良さから感じられる応答性の良さに加えて，しっかりとしたフィードバックが得られている（Fig. 11）。これらによって新型アクセラで目指した「人馬一体感」を実現した。

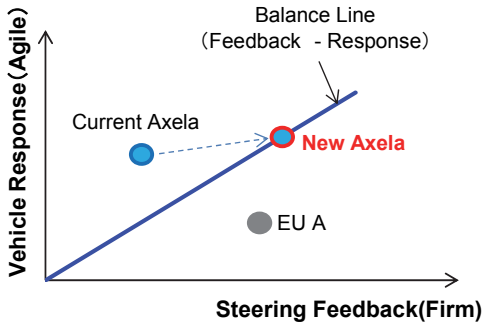


Fig. 11　New Axela Dynamics Result

4.3　快適性

(1) 乗り心地

Fig. 12 は横軸に路面の起伏の大小を縦軸に車両の上下方向の加速度レベルを示したものである。路面入力の小さな領域での加速度レベルが低減できており，路面起伏の大きさに対してリニアな変化を実現した。

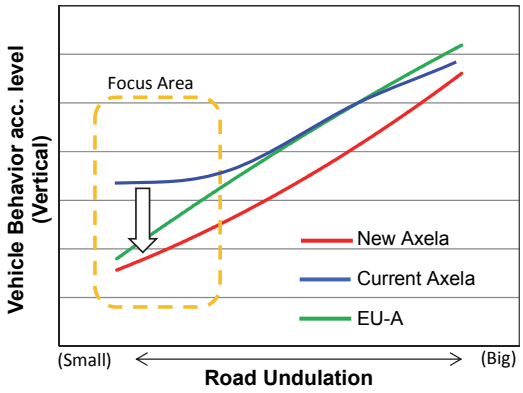


Fig. 12　Vehicle Behavior Due to Road Undulation

また，路面入力に対して人体共振に近く人が不快と感じやすい周波数帯の入力を減らすことで，しっかりとしたボデーコントロール性と荒れた路面でのブルブル，ゴツゴツとした振動低減との両立を実現した（Fig. 13）。

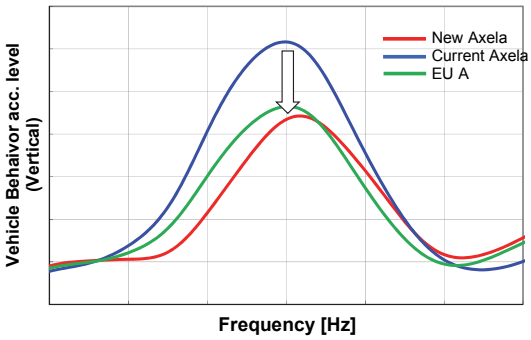


Fig. 13　Result of Choppy Ride Measurement

(2) ロードノイズ性能

Fig. 14 は粗粒路ロードノイズの音圧レベルを示す。前述のロードノイズ低減の開発技術，部品構造の採用により現行モデルからの低減と，欧州競合車と同等レベルのロードノイズ性能を実現した。

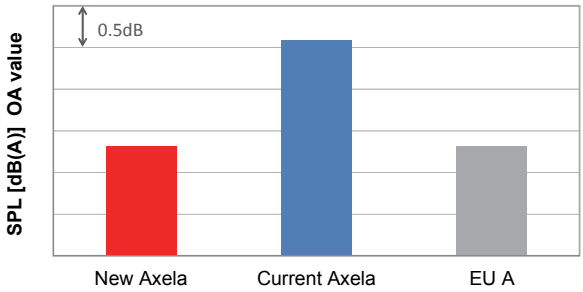


Fig. 14　Result of Road Noise Level

5. おわりに

新型アクセラのシャシーダイナミクス性能について簡単に紹介した。SKYACTIV-シャシーの採用と各部品の最適化と改良に取り組み，現行モデルに対してダイナミクス性能を大きく向上することができたと自負している。今後もマツダのシャシーダイナミクス性能の向上に取り組んでいく。

参考文献

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

(2)　村田親ほか:SKYACTIV-シャシーのダイナミクス性能，マツダ技報，No.30，pp.32-36（2012）

■著　者■

吉村 匡史

寺田 武史

青木 智朗

坂口 欣也

特集：新型マツダアクセラ

5

マツダコネクトの開発
Development of MAZDA CONNECT

山本 栄一*1 Eiichi Yamamoto
香川 八州男*2 Yasuo Kagawa
松本 成司*3 Seiji Matsumoto
青木 敬*4 Takashi Aoki
田中 修*5 Osamu Tanaka
福野 匡彦*6 Masahiko Fukuno
周藤 正樹*7 Masaki Suto

要約

近年のスマートフォンの急速な普及に伴い，日常生活においてさまざまな情報を手軽に入手，また発信もできるようになっている。このようなクルマの外の言わば「あたりまえ」を，クルマの中でもコネクティビティ機能として実現することは当然のニーズとしてあり，各社とも取り組みが加速している。マツダは，単純に機能を載せるだけでなく，「ヘッズアップコクピットの開発」で紹介する安全に使える HMI（Human Machine Interface）を構築し，その上で「古くならないシステム」を目指しモジュールハードウェア構造，及びアップデート可能なソフトウェアを持たせ拡張性のあるシステムを開発した。

Summary

As the rapid spread of smartphones has enabled people to easily obtain and transmit various sorts of information, it is no surprise that they are starting to expect such a natural part of life also available in a car in the form of connectivity function. In light of such circumstances, each automaker is accelerating the development of such connectivity systems. Not simply equipping a vehicle with the connectivity function, Mazda has established safe HMI, the detail of which is described in another article of this Mazda Technical Review, as the Heads-Up Cockpit. Aiming at "a system that never becomes obsolete", Mazda has also developed a scalable system that contains a module hardware structure and updatable software.

1. はじめに

この数年でスマートフォンの急激な普及により，ライフスタイルや価値観が劇的に変化している。人々はネットワーク上に存在する膨大な情報へ常につながることができ，自らが情報を発信することが容易となっている。また，アプリケーションソフトをインストールすることによる機能追加／ソフトアップデートが可能となり，スマートフォン購入後もフレキシブルに進化させることも可能となっている。日常生活の中でそれが言わば「あたりまえ」になりつつある状況の中で，それをクルマの中でも実現することは当然のニーズとしてあり，各社とも開発が加速している。「走る歓び」を提供価値として大事にしているマツダとしては，クルマとしてあるべきシステムを考え，その上で「つながる歓び」を提供する MAZDA CONNECT（マツダコネクト）*を開発した。本稿では，そのシステム構成／機能／新規採用技術の概要を紹介する。

*「MAZDA CONNECT」は日本，アメリカ合衆国，カナダ，メキシコ市場での名称。その他市場における名称は「MZD CONNECT」

2. 開発のねらい

マツダの新世代コネクティビティシステムであるマツダコネクトの開発において，コネクティビティを単なる便利装備としてとらえるのではなく，ネットワークとつながる楽しみを，クルマに乗りながらも安全に楽しむことができ，ドライブする歓びが広がることで，クルマにもっと乗りたくなるようなシステムの実現を目指した。

そのようなシステムを開発するにあたって我々が注力した進化のポイントは以下の 3 点である。

*1，3～7　電子開発部
Electrical & Electronics Development Dept.
*2　商品企画部
Product Planning Dept.

(1) 走行安全性を最優先した HMI

クルマの外とつながることにより，走行中に車内で得られる情報量は飛躍的に増える。それに伴い，運転への集中や安全性が損なわれるリスクも高まる。そのため，何よりも安全性を最優先するという考え方で HMI を徹底的に再点検し，安心して利用できるユーザインタフェースを構築した上で本システムの機能を実現する。

(2) 古くならないシステムの構築

従来のオーディオやナビゲーションユニットは，販売したあとはユニットを入れ替えない限り，クルマの所有期間ずっと同じ機能となる。クルマの外では，スマートフォンやクラウドなどの IT 技術の開発サイクルが非常に速く，また多様なインターネットコンテンツが日々，拡大・登場している。比較的長いクルマの所有期間においても，お客様に可能な限り最新のコンテンツや機能を楽しんでいただけるシステム，つまり「古くならないシステム」を構築する。

(3) インテリアデザイン革新をサポートする

従来のディスプレイオーディオは，いわゆる 2DIN と呼ばれるユニットサイズで，コクピット中央に大きく場所をとるため，デザインの自由度が奪われていた。圧迫感をなくし開放感のあるインテリアデザインを実現できるユニット構成／サイズで開発を進めた。

上記の開発注力ポイントに対して，マツダコネクトでは以下の機能を持たせている。

3. 新機能

3.1　見やすくわかりやすいユーザインタフェース

人間工学に基づいて，不注意運転のリスクを低減するために，高い位置に配置した 7 インチセンタディスプレイと安定した姿勢で扱えるコマンダスイッチで操作できるようにしている。また魂動デザインの要素を取り入れたグラフィックを採用しながら直感的に操作できる GUI（Graphical User Interface）を実現した（Fig. 1）。

Fig. 1　User Interface

3.2　エンターテイメント機能

従来の AM／FM といったラジオ，USB や Bluetooth®で携帯音楽プレイヤを接続できるといった機能に加えて，スマートフォンを通してインターネット上の WEB アプリケーションを楽しめる機能を持たせた。これを車載器で安全に楽しんでもらうためには，マツダの考える HMI で使えることが必須となる。今回採用した「Aha™」は世界 4 万局以上のウェブコンテンツを利用できるクラウドプラットフォームで，スマートフォンと Bluetooth®を通してオーディオ信号だけでなく，操作信号のやり取りができる仕組みをもったアプリケーションをもつ。ラジオのように手軽に局を選んで楽しめるという意味で「インターネットラジオ」とも呼ぶ。この仕組みにより，スマートフォン上で見える操作画面とは異なる画面構成で，車載のディスプレイに表示することができ，またタッチ操作に限らずコマンダによる操作信号でコントロールすることが可能になる。

また，このクラウドプラットフォームには今後もさまざまなコンテンツが増え，それらは全てクラウドサーバ側での更新になるため，車載器側は何も変更する必要はない。それゆえにこれは，ねらいの「古くならないシステム」を実現しているひとつの新しい機能といえる（Fig. 2, 3）。

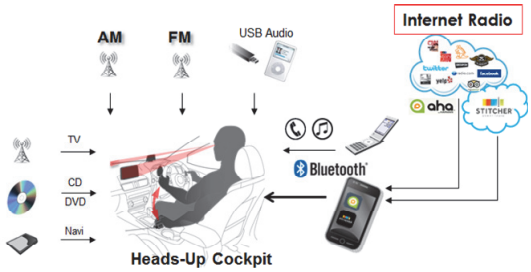


Fig. 2　MAZDA CONNECT Function

Fig. 3　Aha Menu Screen

3.3　アプリケーション機能

スマートフォンと連携した車の外のアプリケーションを楽しむ機能以外に，車載器に搭載するアプリケーションとしての機能もホームメニューに準備している。この中にはマツダ独自の運転サポート機能である i-DM（Intelligent Drive Master），i-ELOOP，i-stop システ

ム作動状況と共に視覚的に見せる燃費モニタ，メンテナンスのタイミングを設定し通知するもの，ウォーニングが点灯した際に，その意味を表示してユーザマニュアルを見る手間を省いてくれるものなどを用意している（Fig. 4）。今後それぞれの機能で，スマートフォンを通してサーバとデータのやり取りをすることにより，さまざまなサービスを提供できるようなものに進化させていく。

Fig. 4　Application Screen Sample

3.4　コミュニケーション機能

Bluetooth®による接続で，ハンズフリー電話およびショートメッセージサービス（SMS）の受信表示，その読み上げ機能（Text to Speech），定型文による返信機能も搭載した（Fig. 5）。

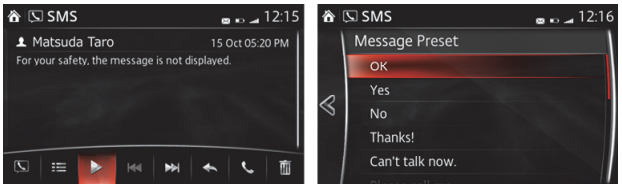


Fig. 5　SMS Screen Sample

3.5　ナビゲーション機能

今回新規開発したナビゲーションシステムは，基本機能であるルートガイダンス機能をもつだけでなく，車外と通信することでリアルタイム情報を入手できるコネクティッドサービスを採用した。具体的にはユーザ所有のインターネット接続機能をもったスマートフォンなどの機器と車載器を，Wi-Fi 通信で接続して利用する。車外サーバから「周辺施設（POI）検索」「交通情報」「ガソリンスタンド価格表示」「天気情報」といったリアルタイム情報を得ることができる。また価格検索を行ったガソリンスタンドを目的地としてナビゲーションルートガイダンスを続けることもできる（コネクティッドサービスは欧米とその他一部の海外のみ）。

4. システム概要

システムを設計する上で，

・進化のレベルに応じたモジュールハードウェア構成

・アップデート可能なソフトウェア

を実現させている。以下に具体的なシステム内容を説明する。

4.1　システム構成

本システムの部品構成を Fig. 6 に示す。

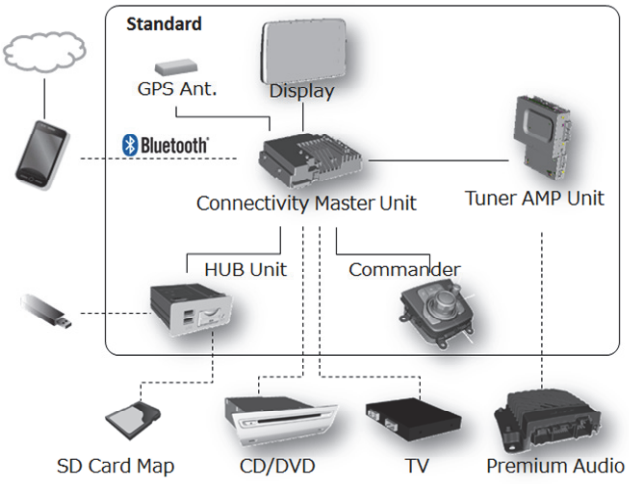


Fig. 6　System Architecture

本ユニット構成を決定するにあたってのポイントは，各種機能の進化スピードと将来性，装着ニーズの規模，そして意匠をもつデザイン部品か否かという点から以下のように配分した。

(1) 進化のスピードが速い機能：Bluetooth®／Wi-Fi などの通信機能，アプリソフト対応機能，NAVI

(2) 大きな進化がないが，必須機能：ラジオ／アンプ

(3) デザイン部品：ディスプレイ，コマンダ，ハブ

(4) 装着ニーズがマーケットで限定的，または今後減少すると予測される機能：TV，CD

これらの機能配分に応じて，モジュール構成を採用した。

(1)の機能をもつユニットを本システムの中心に据え，主要機能を持たせたコネクティビティマスタユニット（以下 CMU）として開発した。CMU は従属する各種部品のコントロールやディスプレイに表示するグラフィック描画機能をもつだけなく，進化が早い Bluetooth®通信モジュール，Wi-Fi 通信モジュール，ナビゲーションモジュールを搭載した。

(2)は，ラジオチューナ機能と，各種部品から出力されるアナログ信号を増幅する機能をもつ，チューナアンプユニット（以下 TAU）として開発した。ラジオ機能は，各仕向地によって異なる周波数域，デジタル放送方式の違いがあるため，上述の CMU は共通に持ちながら，このユニットで種類を持たせる。またプレミアムサウンドシステム設定時には，TAU に BOSE 社アンプを接続しシステムグレードアップも可能とした。

(3)は，ユーザが直接触ったり見たりするデバイスで，個別モジュールとすることで，個別車種デザインのニーズに合わせることや，変化するデザイントレンドにフレキシブルに合わせることを容易とした。

(4)は，各マーケットのニーズに合わせて設定をフレキシブルに行うことを目的に個別ユニットとした。

4.2　主要ユニット仕様

(1) コネクティビティマスタユニット（CMU）

スマートフォンは年 1～2 回の割合でミドルウェアが更新され，ユーザはアプリケーションをダウンロードすることで機能を追加することができる。本システムにおいても，車両購入後に機能追加を行うことを可能とするために，システムに拡張性を持たせている。本システムの中核をなす CMU は，ソフトコンテンツの進化に追従することを目的として車両所有期間となる数年をカバーできるハードウェアスペックを採用した。Table 1 に CMU 内のマイコン，メモリと主なスペックを記載する。

Table 1　CMU Tip Specifications

Tip	Specification
SoC	ARM Coretex-A9
VIP	Interface between CMU and Vehicle system
Boot RAM	CMU Startup:16MB
DRAM	CMU Acting:1GB
NVRAM	CMU Sleep:1GB
FLASH	Language data:4GB

CMU は全仕向で共通のハードウェアだが，ブート RAM／FLASH に出荷仕向ごとで異なるソフトをプリインストールし種類を持たせている。また，内部ソフトは HUB ユニットの USB を経由して容易にアップデートすることを可能とした（Fig. 7）。

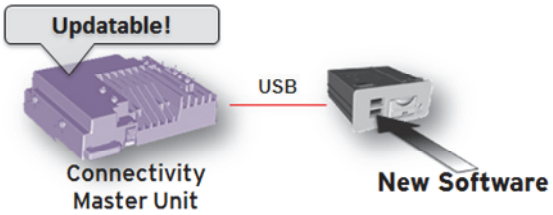


Fig. 7　Updatable Software

(2) チューナアンプユニット（TAU）

ラジオチューナ及びアンプ機能をもつ TAU においても今後採用する機能に対応すべく，将来を見据えたハードウェア構成を持たせている。マーケットにより求められるラジオチューナも異なる。北米であればアナログの AM／FM ラジオチューナだけでなく，HD ラジオ放送やサテライトラジオ用チューナも必要となる。マーケットの違いにより，メイン基板上のラジオチューナを入れ替える構造を持たせることで，例えば今後欧州のデジタル放送 DAB 対応やサテライトラジオチューナ世代交代に対しても，このチューナ部を載せ替えることで，将来の拡張性に対応した構造とした。

4.3　ユニット間の通信方式

機能ごとに分割したユニット間の通信は業界標準方式を採用し，それぞれについて以下のように仕様を決めて，低コストと高フレキシビリティを両立した。

(1) CAN 通信

ユニット間でコマンド通信をする場合には CAN を採用している。本システムの中心となる CMU と TAU，CD，TV ユニット間がそれにあたる。CAN 上に流れる信号は主に CMU からの制御信号や各ユニットの状態，更にはディスプレイ上に表示するテキストデータやメタデータの情報である。トラフィックの増加による車両側 ECU の通信への影響を回避するために，車両通信とは切り離した専用のプライベート CAN を採用した（HS-CAN）。ただし，CMU 本体は車両のパブリック CAN と接続している（HS-CAN）。そして CMU 本体は車両の仕向地や装備情報をセントラルコンフィグレーションによって信号を受け，ハードウェアはグローバルで 1 種類を実現している。

(2) LIN 通信

CMU とコマンダ間の通信には，LIN を用いている。信号としてはコマンダの操作情報であるメインダイヤルの回転情報，5 つのボタン押下情報，そしてボリュームダイヤルの回転情報となる。通信速度の面では LIN で問題なく，7 本のハードワイヤで接続する場合に比べて，1 本の接続で済むため通信チップ増加分を考慮してもコスト面で最適な手段といえる。

(3) RS-485 通信

CMU と TAU 間の通信には CAN 通信以外に RS-485 を採用している。本通信ではデジタルラジオ放送のアルバムアート，トラフィックデータや VICS 情報などの画像情報転送に使用する。RS-485 の特徴として，USB などの通信方式と比べて通信プロトコルが容易であること，またノイズにも耐性があり自動車では実績もある。通信速度仕様を 500kbps とすることで性能を満足する設計としている。

(4) LVDS 通信

CMU からディスプレイへ画像転送する通信方式として，車両搭載デジタル画像通信として業界標準である LVDS（Low Voltage Differential Signaling）を採用している。映像をデジタル伝送することで画像品質の向上を図った。また LVDS の特徴として，映像信号のほかにコマンド通信も可能であるため，伝送路 2 本のみで映像通信とディスプレイのタッチ情報や輝度調整などが可能となる。その他として，著作権保護の観点から High-bandwidth Digital Content Protection（HDCP）を搭載した。同様のデジタル伝送で著作権保護付きの通信方式として HDMI が考えられるが，コスト，業界実績を検討した結果，LVDS を採用した。

(5) USB 通信

携帯音楽プレイヤとして i-Pod やスマートフォン，USB メモリなど同乗者含めて複数持ち込む機会が増えていること，また充電用途としてのニーズが高いため USB ポートを 2 つ搭載した。また，前述のナビゲーションシステムは，USB ポートとともに HUB ユニット内に設定したスロットに地図情報が入った SD カードを装着することで利用可能としているが，データ通信を業界標準である IC USB82642AM_1 を使用することで 1 本のデータラインで接続できている。

4.4　ユニットのパッケージ

「古くならないシステム」をねらい，機能ごとでの特徴を考えた個別ユニット構成をもたせた結果，デザインの自由度を上げることができた。走行安全最優先の HMI を考えた際にディスプレイの位置は見やすく高くしたいが，その裏にボックス上のユニットがあると，どうしても圧迫感のあるインパネ造形を作らざるを得ない。前述のように今回のモジュール構成では，ディスプレイを別体にしたことと，GPS や Bluetooth® アンテナとの関係でその付近にあるべき CMU の大きさがコンパクトになることから，今回の新型アクセラでは Fig. 8 のように解放感のあるインパネを実現した。

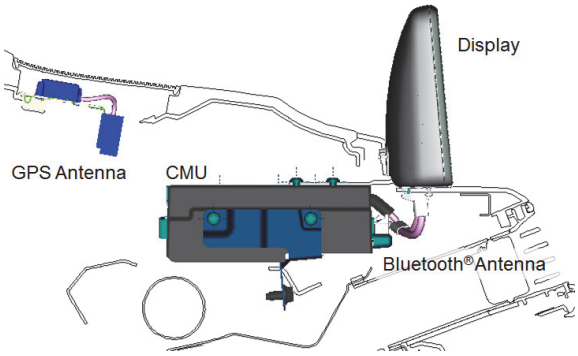


Fig. 8　CMU Package

TAU は車両後方にあるアンテナからのフィーダ線，スピーカ配線，そしてオプションアンプへの接続線を短くする配置として，Fig. 9 のようにカウルサイドを選定している。

分割したユニットを他の場所に車載設計することは容易ではないが，これを実現することによりマツダのインテリア革新へのブレークスルーをサポートする結果に至っている。

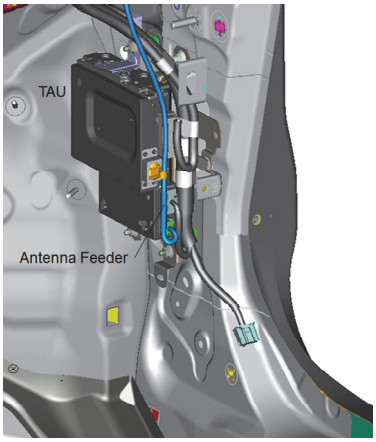


Fig. 9　TAU Package

5. おわりに

マツダコネクトは安全に使ってもらえる環境の中で，お客様にさまざまな「つながり」を提供し，また「古くならないシステム」で常にお客様とマツダをつなげるイネーブラとしての可能性をもったコネクティビティプラットフォームともいえる。つながる機能を持たせたこのプラットフォームをベースに，今後は，車両情報を活用した新たな価値創造を続け，お客様とマツダとのつながり，お客様同士のつながりを更に広げてマツダファンを増やしブランド力を高めていきたい。

■著　者■


山本 栄一


香川 八州男


松本 成司


青木 敬


田中 修


福野 匡彦


周藤 正樹

特集：新型マツダアクセラ

6

ヘッズアップコクピットの開発
Development of Heads-Up Cockpit

藤原 明広*1　Akihiro Fujiwara
古江 彩*2　Aya Furue
島田 高志*3　Takashi Shimada
松尾 純太郎*4　Juntaro Matsuo
石橋 基範*5　Motonori Ishibashi
大池 太郎*6　Taro Oike

要約

マツダは新型アクセラから新世代コネクティビティシステム「MAZDA CONNECT（マツダコネクト）*」を導入する。その際，情報が増えて快適・利便性が向上しながらも不注意運転のリスクが増加することに注目し，その対応が不可欠と考えた。そこでマツダは，ヒューマンマシンインタフェース（HMI）の再点検を実施し，走行安全最優先で開発した HMI を持つコクピットをヘッズアップコクピットと名付け，マツダコネクトはそれとセットでお客様に提供する。その取り組みは人間中心設計の考え方に基づき，三つの不注意運転の要因ごとにそのリスクを最小限にするアプローチで，具体的には高い位置に配置した 7 インチディスプレイ，手元で操作するコマンダスイッチ，そしてマツダ新規開発のアクティブドライビングディスプレイを導入した。

*「MAZDA CONNECT」は日本，アメリカ合衆国，カナダ，メキシコ市場での名称。その他市場に於ける名称は「MZD CONNECT」

Summary

Mazda is introducing a new generation connectivity system, "MAZDA CONNECT". While the system increases communications and improves comfort and convenience of the driver, it also increases the risk of driver's distractions. Accordingly, Mazda reviewed the Human Machine Interface (HMI) which was developed to facilitate driver's concentration on driving operations, and upgraded the function focusing on driving safety. Based on the "human centered design" concept, three major causes of negligent driving were analyzed and countermeasures were considered for each to minimize the distractions. Specifically, a higher-positioned 7 inch display, a commander switch operable without looking at, and Mazda's newly developed Active Driving Display were introduced to the cockpit, which was named "Heads-Up Cockpit". The MAZDA CONNECT and the Heads-Up Cockpit are bundled for sale for safety and enjoyable driving.

1. はじめに

スマートフォンの急速な普及と共に，家や会社の中だけでなく電車の中や外出先でも手軽にインターネットに接続し，さまざまな情報やアプリケーションを入手し生活の楽しみ方も多様化している。その中でも，ソーシャルネットワーキングサービス（SNS）と呼ばれるアプリケーションは，人と人とのつながりの形をこの 5 年で大きく変えてきている。自動車はある意味，閉ざされた空間であり，それは「プライベート空間」としての価値を作ってきたという側面もある。しかし，普段の生活で歩きながらでも常に，人とのコミュニケーションを取ることができる環境がある現代では，「クルマの中」でも同じ環境にすることは当然のニーズである。しかし，従来から携帯電話による会話，テレビの視聴などの行為は，道路交通法での規制や，自動車会社としてのガイドラインで規制してきたように，運転中の「運転以外の行為」は不注意運転を促す結果となり，事故の原因となり得る。自動車の装置として組み込まれるもので，その行為に制

*1，2，6　電子開発部
Electrical & Electronics Development Dept.
*3～5　車両実研部
Vehicle Testing & Research Dept.

限を加えることは容易にできるが，そうするとドライバは，例えば自分のスマートフォンを片手で持ち，画面を見ながら操作する欲求を押さえながら走ることになり，その操作に及んでしまった際には事故という最悪の結果を招きかねない。本当にお客様のことを考えるならば，安全に操作できる環境を提供すべきと考え，マツダコネクトの導入に合わせてあらためて HMI の再点検を行った。

2. HMI の再点検

これまでもマツダでは「運転に集中できる HMI」を開発してきた。ディスプレイの配置やメータの視認性など，経験を踏まえながら，ある基準を設けてデバイスの配置，設計をするスタイルであったが，今回の新型アクセラでこの HMI を再点検する上では，もう一度人間にとって理想のインタフェースはどうあるべきかを考えた。つまり人間が不注意状態に陥るとはどのようなシーンの時で，そのシーンにおける不安全リスクを最小限にするためには，どのような設計制御因子があるのかを整理することから始めた。

ドライバの注意が散漫になり，本来向けなければならない“運転への注意”が疎かになることを，英語ではドライバディストラクションと呼ぶ。米国の運輸省道路交通安全局（NHTSA）は，このドライバディストラクションを深刻な問題ととらえ，2013 年 4 月にガイドラインを発行した[1]。そこにも記載があるが，運転中には次の三つのディストラクションがある。

(1) コグニティブディストラクション
　前方道路から“心”が離れる際の不注意状態
(2) ビジュアルディストラクション
　前方道路から“目”が離れる際の不注意状態
(3) マニュアルディストラクション
　ステアリングから“手”が離れる際の不注意状態

以下に，それぞれのディストラクションを最小限にする考え方と設計制御因子について述べる。

2.1　コグニティブディストラクションの最小化

「意識のわき見」とも表現できるこのディストラクションは，運転中に運転以外の操作をしようとする際に，どこを見ればよいか，またどのような操作をするか，といった“迷い”が生じることである。これを最小限にするための制御因子は，「情報の配置」と「使い方」であり，それぞれ次のように考え方を決めた。

(1) 情報を明確にゾーン配置する

走行中に運転以外のことに意識が向く時間を最小限にするためには，必要な情報を得れば素早くまた運転に意識が戻る，また不必要なものに意識を奪われないようにするために，Fig. 1 に示すように明確にしかもシンプルにゾーンを分けて配置する。

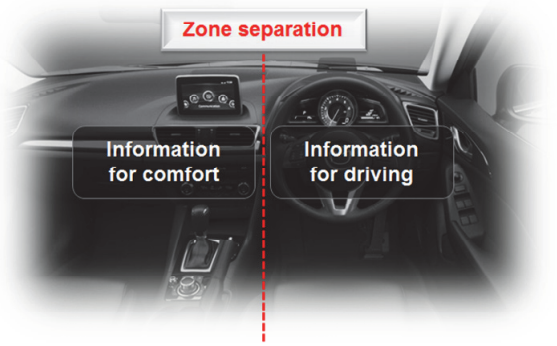


Fig. 1　Zone Location of Information

(2) 分かりやすい使い方

自動車に限らず，日常使う家電製品においても分かりやすい使い方（ユーザビリティ）になっていることは重要である。新型アクセラにおいて，センタディスプレイで表示し，後に説明するコマンダスイッチで操作する方法については，このユーザビリティの基本に立ち返って構築した。それは，次に示す ISO9241 で定義される指標や原則に基づいて開発を行った。

・有効さ：特定の目標を達成する上での正確さ，完全さ
・効　率：目標を達成する際に費やした資源
・満足度：不快さがない，及び製品への肯定的な態度

これらの指標で優れたユーザビリティを構築する上でのガイドラインとしては ISO9241-110 を参考にした。

・タスクへの適合性：効果的，効率的な操作を助けること
・自己記述性：適切なフィードバックで状態がわかる
・可制御性：ユーザが操作の主導権を持つ
・利用者期待への合致：メンタルモデルに合致する
・誤りに対しての許容度：ミスを容易に修正できる
・個別化への適合性：ユーザがカスタマイズできる
・学習への適合性：使い方を学習することを支援する

2.2　ビジュアルディストラクションの最小化

前方道路からコクピット内の表示に目を移す際のいわゆる「わき見」で前述の「意識のわき見」と区別するならば「見るわき見」と表現することになる。これを最小限に留めるためには“わき見時間”を最小化することである。わき見時間は，次の三つの段階に分かれる。

(1) 前方道路から視線を移動する
(2) 遠方から近方へ焦点を調節する
(3) 表示内容を判読する

それぞれの時間を最小限にする考え方を以下に示す。

(1) 視線移動時間

運転中に前方道路を見ている状態から，車内のディスプレイなどの表示に目を移す際に，視線移動距離が長ければ長いほど時間はかかる。マツダではその程度を実際に測定して以下の関係を導き出した。

視線移動時間 $t = a\theta_h^2 + b\theta_v^2 + c$

θ_h：水平視野角，θ_v：垂直視野角

$a=3.49\times10^{-5}$，$b=4.06\times10^{-5}$，c=Const.

つまり，視線移動時間は視野角の二乗に比例して大きくなるという関係があるということがわかった。また，a<b ということから垂直視野角の影響が大きく，今回の新型アクセラではセンタディスプレイの配置を可能な限り上方に配置し，垂直視野角 $\theta_v=15°$ とした（Fig. 2）。

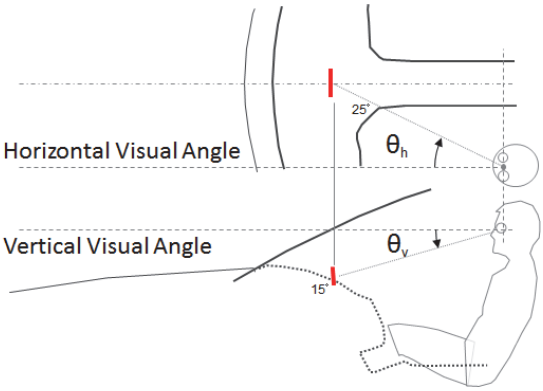


Fig. 2　Sight Line Movement Time

(2) 焦点調節時間

通常，クルマを運転している際には約 20m 先を見ているが，そこから車室内に目を移す際には 1m 以内の箇所に目の焦点を合わせることになる。人によってその程度は変わるが，この焦点を調節する時間は 0.7m 付近以下にまで焦点を合わせる時間は極端に長くなる傾向にある。つまりそれ以上遠方に表示を配置する必要があり，一般的な乗用車での室内という条件下では，目から約 1m の位置に配置することが理想となる。条件をつけなければ，さらに遠い位置が良いのだがその距離は 2m 前後から時間の差に変化がなくなるといわれている。したがって遠方に虚像表示を作るヘッドアップディスプレイは 2m 付近に設定することが一般的となっている。

今回の新型アクセラでは，前述の視線移動時間とこの焦点調節時間の効果が大きい虚像表示を走行系の表示に適用するため，新規にアクティブドライビングディスプレイを開発した（Fig. 3）。詳細は，「アクティブドライビングディスプレイの開発」を参照。

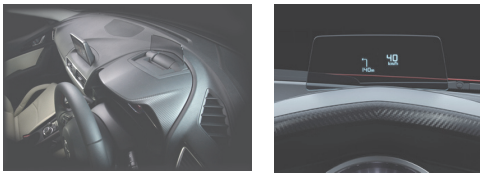


Fig. 3　Active Driving Display

(3) 表示判読時間

表示物を見てから，その内容を読み取る時間を最小にするには，まず「読みやすい文字」にすることである。表示の内容を読み取り，ドライバが操作のアクションを取る際に時間がかかるリスクがあるものは，複数ある項目が並んでいて，その中からねらいの項目を選択し，決定するという作業となる。いわゆるリスト操作と呼んでいるものになるが，そのリストに記載する文字の「大きさ」から考察する。

一般的にディスプレイに表示する文字の大きさは，視角 20～22 分とされている[2]。しかし，走行中にわき見をして素早く読み取る必要がある文字の大きさはそれより大きくすべきと考え，マツダでは 24 分と定義した。今回の新型アクセラでのセンタディスプレイは視距離 750mm の位置に配置しているため，視角 24 分の文字の大きさは 5.3mm となる。次に，上下に項目を並べたリストについて，判別しやすい行間スペースについて考える。一般的に文章を読む際には，文字高さの 0.7 倍が適切とされている。これも，走行中に素早く判別することを考慮して，1.2 倍と定義した。そしてリストに並べる選択候補の数は，人間が一度に把握できる数として，心理学的にマジカルナンバ 7±2 というものがあり，それを適用する。

Fig. 4　Size of Display

以上の各数字を用いて，センタディスプレイのサイズを計算すると，Fig. 4 に示すように高さが約 90mm となり，それは 7 インチサイズとなる。つまり，視距離 750mm の位置でビジュアルディストラクションを最小限にするサイズが 7 インチであり，仮に 850mm の位置に置く場合は 8 インチが必要ということになる。今回の新型アクセラでは 7 インチワイド VGA のディスプレイを採用した。

実際の画面表示設計においては，都度変化し読み取る必要があるものを 24 分とし，その他はシンボル的に認識できればいいものは少し小さめとするなど，情報種類によってランク付けをして文字の大きさを定義した。

2.3　マニュアルディストラクションの最小化

走行中にステアリングから手を離して，運転以外の操作をするシーンにおけるディストラクションを最小にする要件として，三つ挙げる。

(1) 安定した姿勢で楽に操作

(2) 操作部を見ずに操作

(3) 間違えずに確実に操作

センタディスプレイの表示内容を操作するシーンにおいて，これらの要件を満足するデバイスは，コマンダスイッチであると判断した。以下にタッチパネル操作との比較をしながら，その優位性を示す。

(1) 安定した姿勢で楽に操作できること

ステアリングから手を離す際に，姿勢が崩れるとそれはステアリングの振れに表れる。肩が浮いて上体がぶれるとその影響が大きくなるし，不安定状態での操作は筋肉への負荷が増える。したがって，ステアリングから手を離してから操作デバイスまでの手の動きが，肩を中心に自然に移動できる位置であること，つまり腕の動線上にあることが必要となる。また，ON/OFF 操作ではなく，階層操作で操作完了まで時間を要するものについては，操作中の筋肉の負荷を最小限にするためには，腕を保持する構造が不可欠である。今回の新型アクセラでは，自然に手が置けるようにシフタの後ろのセンタコンソール部にコマンダを配置し，かつアームレストで腕を保持して操作できるようにしている（Fig. 5）。

タッチパネル操作の場合は，手をディスプレイまで持ち上げながらの操作，そして腕に保持がない状態で続ける操作のため，筋肉への負荷が大きくなる。

Fig. 5　Commander Location

(2) 操作部を見ずに操作できること

通常の生活の中で，操作部を見ずにコントロールするものの例として，パソコンのマウス，ラジコンやゲームのコントローラがある。いずれも，使い方がシンプルで形状は手指で操作しやすい工夫が施されている。コマンダについても同様なことを考慮して設計しなければ，前述の「意識のわき見」「見るわき見」を誘発しかねないので，新型アクセラではシンプルにすることに注力した。具体的には，メインダイヤル周辺にマジカルナンバを考慮し五つのボタンを配置，その中では中央に少し高さを上げたホームボタン，親指にバック（戻る）ボタンという工夫を入れている（Fig. 6）。

タッチパネル操作の場合，表示部に存在する操作ボタンを見て，しかも自分の指先を確認しながらねらいを定める行為となるため，コマンダ操作と比べると「見るわき見」の時間は増えがちになる。

Fig. 6　Commander Switch

(3) 間違えずに確実に操作できること

これは，コグニティブディストラクションの説明にて述べた，わかりやすい使い方の一部でもある。つまり，確実な操作フィードバックで自分の操作している箇所を正確に把握し，ミスを防げるようになっていることが必要である。コマンダスイッチは，メカニカルな節度感を持たせ，触感でのフィードバックを返すと同時に，センタディスプレイでのグラフィックは，回転操作に応じて動いて直感的に理解できるものとすることで，迷わず確実に操作ができる。もし間違えても，親指ですぐバックボタンを押せる。

タッチパネルの場合，位置が都度変わるグラフィックで表示されるボタンをねらって，指で押すという操作になるので，車両振動などによる押し間違いの頻度は高くなる。最近ではタッチパネルに振動フィードバック機能を持たせるものもあるが，押すまでの過程においては指先を見て確認するしかない。間違えた際には，また別のバックボタンにねらいを定めて押す必要がある。

3. 効果の検証

不注意状態を三つの要素に分解し，それぞれのリスクを最小限にするアプローチで設計した結果を，実際の運転状態で検証する方法は以下の方法を用いた。迷いが少ないことは，ある決まった操作を一定時間内に完了することができるかという操作タスクの完了度，実際の見るわき見は，わき見時間，コマンダを操作している時のステアリング振れ量を実車で検証した。

それぞれの結果を次に示す。

(1) 操作タスクの完了度

一般ユーザの利用頻度が高い機能や操作を整理して，14 の操作タスクを設定した。そして，アクセラを含む各車両で一般ユーザにそれらのタスクを行ってもらい，完了できたタスク数の割合を算出した。アクセラは全て完了したが，他車は完了できないものがあった（Fig. 7）。

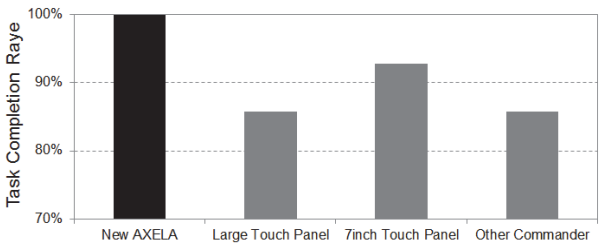


Fig. 7　Task Completion Rate

(2) わき見時間

一般的に一回のわき見時間は約 1～2 秒間といわれるが，もちろん操作内容，走行環境や速度によって変化する。ここでは，走行環境や速度を合わせて操作内容の違いによるわき見時間の差を検証した。新型アクセラでは，操作内容が変わってもほぼ 1 秒で安定したわき見時間となっているが，特にタッチパネルの他車は操作によってわき見時間が増える場合がある。アクセラは一貫性のある操作ができているといえる（Fig. 8）。

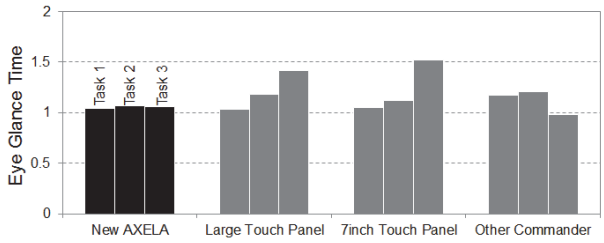


Fig. 8　Eye Glance Time

(3) ステアリングの振れ

ステアリングから片手を離して操作する場合，もう一方の手でしっかりコントロールしているつもりでも，実際には両手で握っているよりも振れは大きくなっている。車両の特性により振れ量は異なるので，両手でステアリングを握って運転する場合の振れ（操舵角の躍度）[3]に対する比率で比較検証した。タッチパネルの他車は 1.5 倍以上振れが出てしまっているが，新型アクセラでは影響は少ない（Fig. 9）。

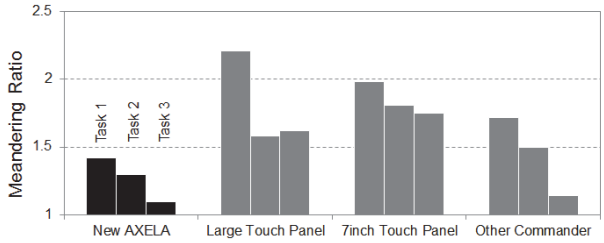


Fig. 9　Steering Meandering

4. おわりに

人間中心に考えた安全な HMI を持つヘッズアップコクピットは，これまでも運転に集中できる HMI として開発してきたものの進化版である。今後は新型アクセラだけではなく，全ての車種にこのコンセプトは適用していく。また次世代に向けて，表示系については遠方上方配置の進化，そして操作系については高機能でありながらシンプルなものへと進化させることで，より安心感が持てるコクピットを実現させる。また，マツダとしては人馬一体というキーワードで人とクルマの関係を築く開発を行っているが，その中で HMI は重要な役割を持っている。これまで人間工学的な観点で開発を進めてきたが，これに感性工学的な観点も加えて，魅力的なコクピット創りを続けていく所存である。

自動車の HMI を設計するにあたり，安全かそうでないかの線引きはできない。常にもっと見やすく，分かりやすくするにはどうすれば良いかを考えて設計に反映していくべきであり，決して妥協してはいけないと考えている。この安全な HMI を作ることはドライバのためだけではなく，その車の周辺にいる歩行者の安全を守ることにもなる。ディストラクションのリスクを最小限にするコクピット創りで，よりよいクルマ社会を実現できれば幸いである。

参考文献

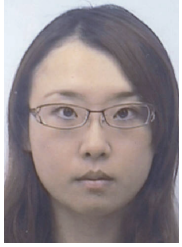
(1) NHTSA : Visual-Manual NHTSA Driver Distraction Guidelines For In-Vehicle Electronic Devices（2013）

(2) ISO 9241 : Ergonomics of human-system interaction　Part 303 : Requirements for electronic visual displays（2011）

(3) 太田浩司ほか：脇見時間と操舵角情報による車載情報機器操作性の評価，自動車技術会学術講演会前刷集 No.100-11，pp.19-22（2011）

■著　者■


藤原 明広


古江 彩


島田 高志


松尾 純太郎


石橋 基範


大池 太郎

特集：新型マツダアクセラ

7

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

中島 英信*1　山本 圭一郎*2　中森 泰樹*3
Hidenobu Nakashima　Keiichirou Yamamoto　Yasuki Nakamori
大池 太郎*4
Taro Oike

要約

アクティブドライビングディスプレイは，車両の情報表示機器として新たに開発した製品である。ドライバ正面に虚像で表示するタイプで，より遠方上方に車両情報を表示するため，走行安全の確保に有効な情報伝達手段となる。マツダでは，できるだけ多くのお客様にこの価値を提供したいと考え，新型アクセラから比較的安価でコンパクトなコンバイナタイプを採用した。表示の大きさや色などについては，人間工学的な観点から見やすい設計を行い，安心して運転できるコクピットを実現した。

Summary

Active Driving Display is a product newly developed as a vehicle information display device. With the vehicle information displayed as virtual image further upward in front of the driver, Active Driving Display serves as an effective means of providing a sense of security in driving. With the hope of providing this value to as many customers as possible, this will be mounted on New Mazda3 in the form of a compact, low-cost combiner-type device. Specifications of the device, including the display size and color, are designed from the viewpoint of human ergonomics engineering to realize a reliable cockpit.

1. はじめに

ドライバは通常約 20m 先前方を注視しながら運転している。その際にメータやナビゲーション情報に目を向けることはいずれも「わき見」という行為となる。このわき見による交通事故発生件数は警視庁統計によると，全体の約 17%を占めていて，約 30%の安全不確認に次いで 2 番目に多い（平成 24 年度調べ）(1)。クルマの中でさまざまな情報を享受できる機能が増えてくる中で，マツダとしてはこのわき見のリスクを最小限にする HMI（Human Machine Interface）を再点検し，強化するべきとの考えに基づき，ヘッズアップコクピットというコンセプトを構築している。その中ではドライバ正面には走行系の情報に限って表示し，特に走行環境に応じて「刻一刻と変化する，走るための情報」は前方注視時の有効視野内にあるのが理想であるとした。視線移動時間を最小限にするだけでなく，前方道路から表示へ目を移す際の焦点調節負荷も軽減できるものとして，遠方に虚像を表示するヘッドアップディスプレイという技術がある。他社ではプレミアムと呼ばれる車種で，しかもオプション装備としてそれが設定されているが，普及していない。マツダではできるだけ多くのお客様に提供できる形で，この有効視野虚像表示デバイスを開発すべきと考え，今回のアクティブドライビングディスプレイの開発に着手した（Fig. 1）。

Fig. 1　Active Driving Display

2. 開発注力ポイント

虚像を表示する光学的な基本メカニズムを簡単に示すと Fig. 2 のようになる。

*1～4　電子開発部
Electrical & Electronics Development Dept.

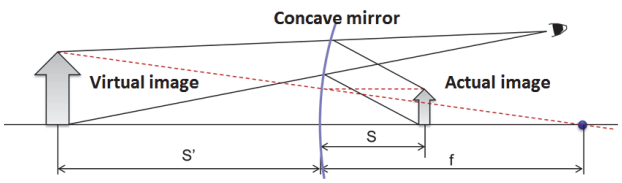


Fig. 2　Optical Basics

実像が焦点距離 f を持った凹面鏡から距離 S の位置にある場合，その像は以下の式で表される関係で，虚像は S'の位置に見える。このとき虚像は S'／S の割合で実像が拡大される。

$$1/f=1/S-1/S'$$

実際に車載ユニットでこの虚像表示デバイスを構成する場合は，実像が光源ディスプレイユニットとなる。そして，虚像は凹面鏡によってサイズが拡大されるとともに，遠方に表示される。ドライバの目の焦点調節負荷を最小限にするするために，できるだけ遠方にこの虚像を表示することが望ましい。凹面鏡の曲率設計で拡大率を決めて，ねらいの位置に表示することになるが，この拡大率が大きいと像の「ひずみ」が大きくなる。したがって，ひずみを抑えて同じ位置に表示するには，実像から凹面鏡までの光学距離 S を長くすると同時に，できるだけ光源の実像を大きくする必要がある。

前述したプレミアム車種が多く採用するヘッドアップディスプレイは，フロントウインドシールド（以下 W/S）越しに虚像が映し出されるタイプである。その概念図を Fig. 3 に示す。このタイプは目に対する W/S の位置／傾きが決まっているため，インパネ上面から光を出す位置がほぼ決定される。つまり凹面鏡は，ほぼ自由度がなく配置せざるを得ず，上述のように光源までの距離を長く取るため，平面鏡で一度光路を折り返す形が一般的であり，それゆえにユニット全体はメータ裏の大部分を占めるぐらいの大きさになる。そのため，空調ダクトやインパネメンバ形状，ボデー形状にまで影響が及ぶ可能性もある。また，W/S には像の２重映りを防止するために中間膜を楔（くさび）形状に変更，そして W/S 形状寸法の精度アップなどの作業も必要になる。

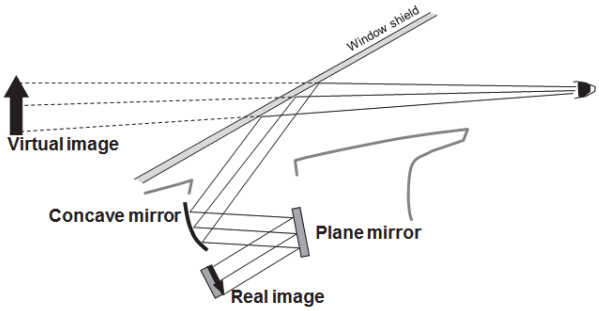


Fig. 3　Light Path of W/S Type

できるだけ多くのお客様に提供するためには，ユニット開発にかける「投資，部品コストを最小限」にし，一度開発したユニットは「複数の車種に展開」できるような設計をしなければならない。そのコンセプトを実現するために，ウインドウデザインに左右されずにユニット開発できるコンバイナタイプを選択した。コンバイナタイプの構造イメージを Fig. 4 に示す。

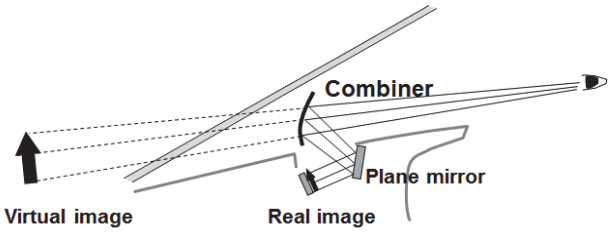


Fig. 4　Light Path of Combiner Type

このタイプはメータフードの上部にパネルが立ち上がるため，「煩わしさ」を生む可能性がある。また，表示スペースが限られるため，多くの情報は一度には出せない。さらにドライバの体格違いによる目の位置ばらつきの許容範囲も狭くなる。こういったところを克服するための開発注力ポイントは，あくまでも人間中心に考えて見やすく，分かりやすい表示を作る制御因子を見極めてその仕様を決定するということである。次に，その各構成部品の具体的な仕様について説明する。

3. 設計仕様

3.1　光路設計，および光源タイプの選択

従来からメータ裏は空調のダクトやワイヤハーネスの幹線がパッケージされている。今回の新型アクセラではこのユニットが置かれる部分だけ，ダクトの断面積を小さくし，ワイヤハーネスも経路を迂回するなどの工夫をして，Fig. 5 のようなスペースを確保した。そして，光源から出た光を平面鏡で折り返してコンバイナにあてる光路設計としている。この距離で像のひずみ度合いを検証し，コンバイナによる拡大率は 4.8 倍とし，虚像表示までの視距離は 1.5m とした。

Visual distance L1+S' = 1500mm

Magnifying power m = S'/S = 4.8

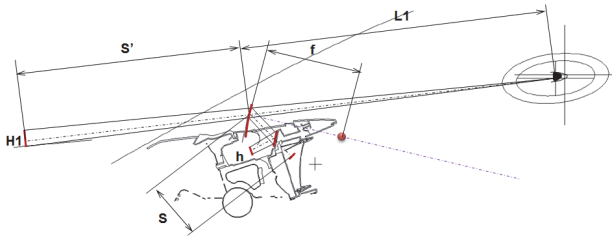


Fig. 5　Actual Light Path of Active Driving Display

3.2　表示設計

ドライバの有効視野内での表示は，視線移動は楽になる反面で「煩わしさ」の懸念がある。そのため表示は必要なコンテンツを必要なタイミングで，わかりやすくすることに注力した。

(1) 表示コンテンツとサイズ

表示するコンテンツは，コクピットでの表示機能を明確に配分した結果，走行環境に応じて刻一刻と変化する安全に走るための情報に限定した。具体的には，車速，経路誘導（ターンバイターン），アクティブセーフティ警告である。常に車速は表示し，それ以外は必要な時に適切なサイズで表示をするようにした。文字サイズは基本３パターンを用意し，情報種類とシーンに応じて Fig. 6 のように使い分ける。人間が見やすいとされる文字サイズは ISO[2]にも記載されていて，推奨値が 20～22 分となっている。アクティブドライビングディスプレイの表示では，常に数字が動いている車速はそれよりも大きいサイズで最小 24 分とし，車速のみで表示する場合は 42 分まで大きくしわかりやすくした。オートクルーズの設定車速値や経路誘導時の距離については 20 分，また単位は記号として認識していて読み取るものではないので 12 分までとしている。

この考え方で表示領域は必要最小限で画角は 1.34°×2.68° あれば良いということになり，前述の光路設計における拡大率から実像であるディスプレイは 7.7mm×15.3mm のサイズが必要ということになる。

光源ディスプレイは，上記のようなマルチ表示をさせるためドットマトリクスタイプで解像度 128×64 の VFD タイプを採用した。このタイプは TFT のようにバックライトが必要のない自発光式のため，搭載スペースを大きく取らないためユニット全体のコンパクト化に貢献する。

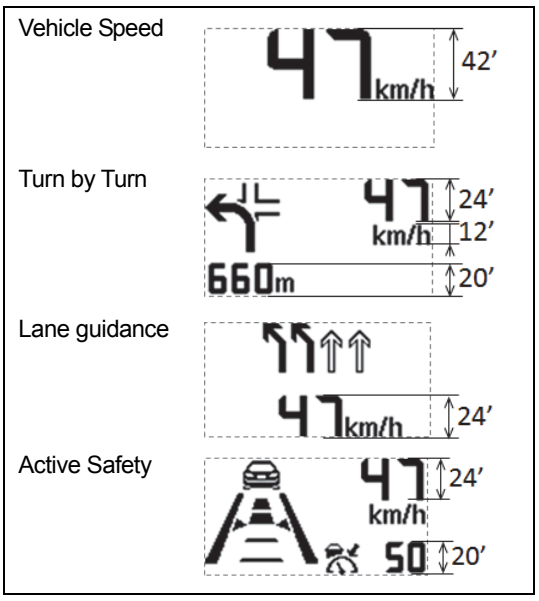


Fig. 6　Character

(2) 表示色と輝度

昼夜の外界色を背景とした表示となるので，あらゆるシーンにおいて影響を受けにくい表示色の選定が必要となる。想定される背景色に対して，埋没しにくい表示色としてブルーホワイトを選定した。

輝度については夜間に明るすぎず，昼間には晴天時や雪道で視認しやすいレベルを実走行で確認しながら 5～3300cd/m² と決定した（Fig. 7）。

Fig. 7　Color Study

3.3　コンバイナ設計

凹面鏡としての役割を持つコンバイナは，ドライバの正面に立ち虚像表示を映し出すのと同時に，煩わしさの低減のため表示の向こう側も見せるハーフミラーとなっている。前述の表示コンテンツと色の選定で見やすくしているものの，前方視界要件からこのコンバイナ上端位置の高さが制限されるため，特に背の高い人にとってはコンバイナの裏側に道路だけでなく車体の一部が重なる場合がある。したがって，今回はコンバイナの透過率を 50%としその煩わしさを最小限とした。ただし透明度合いが少なくなると，コンバイナ本体が煩わしくなるので視界要件よりも高さを極力低くして，さらに端面を３次元加工してドライバへの光の反射を抑える工夫をしている（Fig. 8）。

Fig. 8　Combiner Image

ドライバの背の高さによって表示高さを調節すること，及び表示輝度の調節はセンタディスプレイのメニューにある設定画面で行うことができる。表示高さは実際には，コンバイナ回転軸にギヤを介して接続したモータを駆動してコンバイナの傾きを変えることで調節する。輝度は後述する自動調光の ON/OFF，ON 時のレベル調整，OFF 時の固定輝度レベルの調節ができる（Fig. 9）。

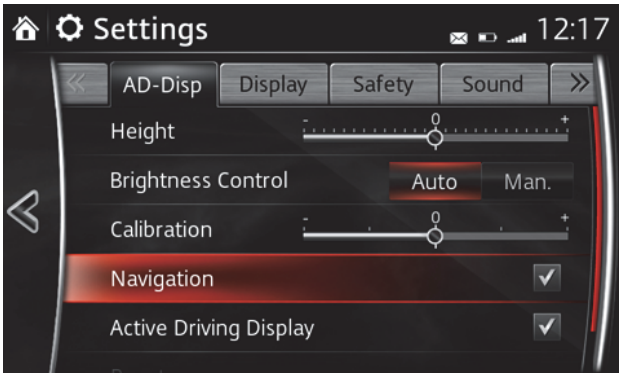


Fig. 9　Setting Screen for Active Driving Display

3.4　自動調光設計

自動調光仕様は，アクティブドライビングディスプレイのユニット内部に取り付けたフォトセンサで近辺の明るさを背景輝度として測定し，それに相当する表示輝度を自動で計算し反映するものである。この自動調光において最も重要となるのが，背景輝度に対してどのような表示輝度を設定するか，背景輝度変化に対してどのようなスピードで表示輝度を変化させるかを定義した「調光マップ」である。我々は確実に視認性を確保できる調光マップを作成するために国内外のあらゆる環境で走り込み，単に視認性を確保するだけでなく，運転中にお客様が不快に感じないようなロジックを作成し，違和感のない調光を実現した。

4. おわりに

今回のアクティブドライビングディスプレイは，より安全に，そして安心して走ってもらうコクピットを実現するために開発を行ったが，マツダとしてはさらに理想の表示を実現するために W/S タイプも視野に入れながら，引き続き開発を続けていく。今後の ITS インフラやカメラ認識技術の進化に伴い，さらに安全に走るための情報入手が可能になってくる。W/S タイプが優れている点は，Fig. 10 に示すように表示位置を高い位置に設定できること，表示エリアを大きく取れることなどがある。

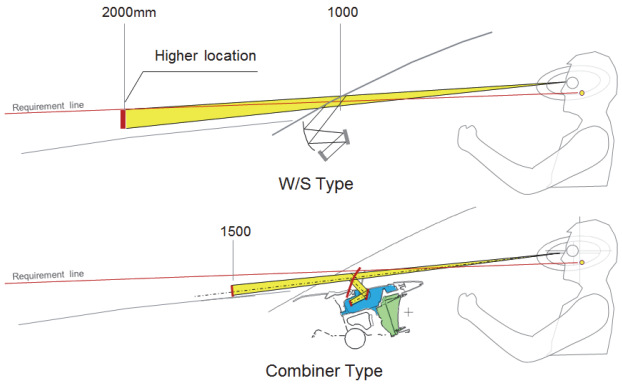


Fig. 10　W/S Type Advantage

パッケージ上や技術面で解決していかなければならない課題があるが，今回のアクティブドライビングディスプレイの開発での経験，新型アクセラでのお客様の評価フィードバックを得て，次のステップに進んでいく所存である。

参考文献

(1) 警察庁交通局：平成 24 年中の交通事故の発生状況（2013）

(2) ISO 9241：Ergonomics of human-system interaction
Part 303：Requirements for electronic visual displays（2011）

■著　者■


中島 英信


山本 圭一郎


中森 泰樹


大池 太郎

特集：新型マツダアクセラ

8

新型アクセラにおけるボデー造り革新
～デザインを際立たせるクルマ造り～
Innovation in Body Production for New AXELA
～Car Structure that Makes Design Conspicuous～

中野 伸哉*1　Shinya Nakano
酒井 明*2　Akira Sakai
山田 泰生*3　Yasuo Yamada

要約

車の個性化，区別化の手段としてデザインの革新が重要である。新型アクセラにおいてもデザインのこだわりを実現するために，ネガポジが入り混じり，かつシャープなキャラクタ R を実現するプレス成形技術と，それらを組み上げる車体アセンブリにおいての品質保証プロセスの両立が必須となっている。また，軽量化施策により，材料が軟鋼板から精度・成形性難度の高い高張力鋼板へ変わってきており，ボデーを造り上げるプレス成形技術，車体アセンブリ技術の進化が不可欠である。新型アクセラでは，プレスでのキャラクタ R を実現する技術，高張力鋼板部品の精度保証技術，及びデザイン面の流れを遮断せずクルマ全体の一体感を生む品質保証プロセスを革新することでデザインテーマを具現化できた。

Summary

Innovation of the design is important as a means of individualizing and differentiating a vehicle. The same holds true for the new AXELA: To materialize its design consider, it is necessary to achieve both a stamping technology that involves a negative-positive process while realizing a sharp character R and a quality assurance process in the body assembly. As a weight saving measure, mild steel sheet is increasingly being replaced by high tensile strength steel sheet that is high in accuracy and high in degree of difficulty in terms of formability. For this, evolution in the stamping technology and the body assembly technology is indispensable. In the new AXELA, its design theme has been embodied through innovation of stamping technology realizing the character R, accuracy assurance technology for high tensile strength steel sheet parts, and innovation of quality assurance process that does not interrupt the flow of design and induces a sense of oneness of the whole car.

1. はじめに

グローバル競争が激しい中で存在感を示すために，One & Only のデザインが欠かせない。新型アクセラのボデー造りにおける課題のひとつが，マツダデザインの特徴である生命感あふれる面の造形を量産工程で安定的に実現することである。そのコア技術がプレス部品でのデザイン具現化技術と，プレス部品ならびに車体アセンブリの寸法精度をコントロールする技術である。特に，新型アクセラは全世界 3 つの工場で短期間に立ち上げる車種であり，現地で計画通り生産するための工程設計段階の検証が極めて重要となる。本稿では，新型アクセラで取り組んだボデー造り革新について，プレス領域から車体アセンブリ領域でのシミュレーションを使った検証技術の進化と，その結果を実際のクルマ造りへどう反映させたかを中心に紹介する。

2. デザイン意匠を忠実に再現

新型アクセラのデザインコンセプトは「瞬発／誘発」，よりエネルギッシュでテンションを効かせたリズミカル

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

な動きをボデーに表現している。ボデーのフロントからサイドを目一杯使って走るキャラクタライン，ライン間の面が生み出す陰影に至るまで，新型アクセラにはデザインのこだわりが詰まっている。デザインのこだわりを表現するためには，キャラクタ R と面を忠実に表現することと，その流れを遮断しないことが重要となる。Fig. 1 にデザイン意匠を再現するプロセスを示した。

このプロセスに沿って，3 章でキャラクタ R の再現で重要となる線ズレ対策，4 章でデザイン意匠を表現するボデー造り，5 章でボデー精度のカギとなるプレス部品の精度向上，6 章で車体アセンブリでの精度向上，7 章で車両まで含めた寸法精度向上について事例を交えながら述べる。

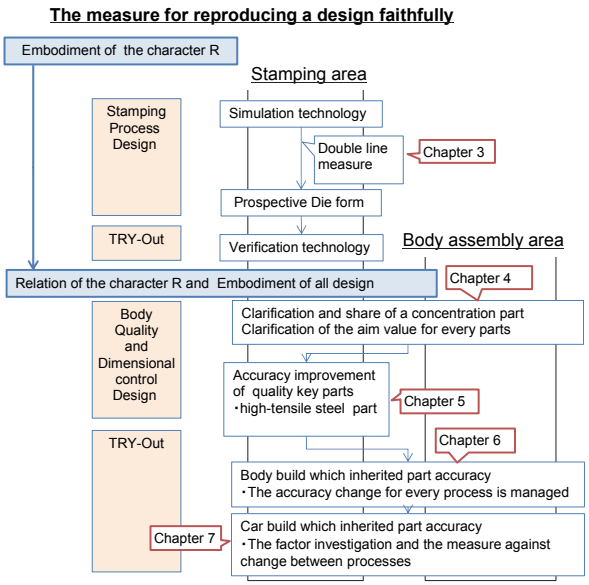


Fig. 1　The Process of Reproducing Styling

3. 線ズレ対策

3.1　キャラクタ R の実現と線ズレ対策

シャープなキャラクタ R を具現化する上で最も重要なことは，第 1 にキャラクタ R の印象をプレス部品で忠実に再現すること，第 2 にプレス成形時のキャラクタ R と鋼板の初期当たりが曲げ癖として見えないようにすることである。しかしながらこの両者は相反する関係にあり，キャラクタ R がシャープになればなるほど曲げ癖が強くなり，線ズレという外観品質不具合を発生させやすくなる。これまで，線ズレは定量評価できるまでには至っておらず，成形シミュレーションでの予測が困難だった。金型製作後に線ズレが起きてしまった場合，対策によっては割れ／しわなどの他の不具合へ発展してしまうこともあり，微妙な金型の調整を繰り返してきた。そのため，金型製作前に線ズレを定量評価し，外観品質を保証する技術が必要不可欠である。そこで，過去の事前検証結果と不具合現象とを総ざらいし，線ズレの発生メカニズムを再度解明しなおし，検証技術の向上を果たした。その事例を次に紹介する。

3.2　見える線ズレと見えない線ズレを定量化

鋼板が金型（ポンチ側）に接触し，ある値を超えて塑性変形した場合に曲げ癖として残り，線ズレと呼ばれる不具合現象になる。この現象を机上で検証できるようにするには，その曲げ癖が見えるか否かを定量的に予測する技術が必要となる。鋼板が金型に接触した時の圧力を計算し，軌跡を追い，その過程と成形完の位置がどのような形状部になるかを総合的に検証できるようにしてきた。具体的には，メッシュのかけ方や大きさ等を工夫した計算精度向上と，塑性変形が起きる面圧の閾値や線ズレが見えない形状など，それまでの知見を基に実機との一致を確認しながら線ズレの評価技術を構築し,検証方法として確立させた。

見える線ズレか見えない線ズレかを検証できるようになったことで，対策の幅が生産工程だけでなく，デザインへも広がった。デザイン部門へ線ズレが起きないキャラクタ R を伝え，デザインの意匠を崩さない範囲でのキャラクタの形をデザイナと一緒に決めていけるようになった。これにより，デザインと生産性を高い次元で両立し，シャープなキャラクタ R の具現化に大きく貢献している。

3.3　デザイン意匠を崩さない線ズレ対策

キャラクタ R から受ける印象は，R の大きさそのものより R の幅の影響が大きい。すなわち，R 止まり間の距離を一定にし，その中で R の大きさを変えても，キャラクタ R は同じに見える。そこで，デザイン R の幅の中で，材料と接触して痕になる部分だけ R を大きくして痕に残らない R を作る，あるいは接触部をずらすことで線ズレ対策を実施しデザイン意匠を崩さないようにした（Fig. 2）。

対策が完了するまでには，デザイン部門やボデー設計部門と数多くのやり取りと試行錯誤を積み重ね，デザイナなど関係部門の協力を含めたキャラクタ R 実現プロセスを構築した（Fig. 3）。

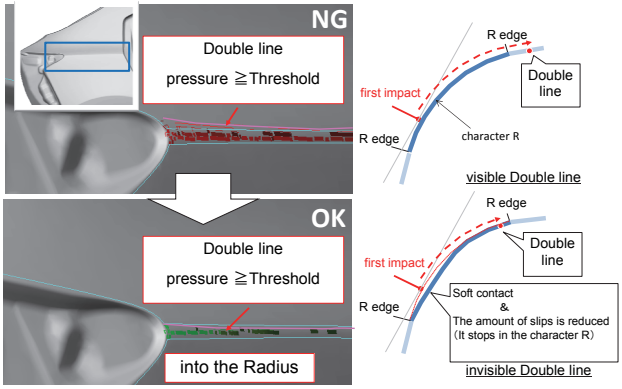


Fig. 2　The View of the Measure Against Line Gap

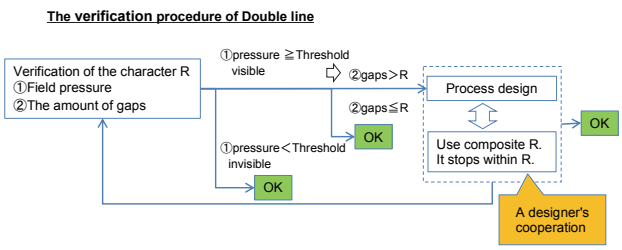


Fig. 3　The Verification Procedure of Line Gap

4. デザイン意匠を表現するボデー造り

キャラクタ R を忠実に表現した次のステップは，複数の部品にまたがるキャラクタラインと面の流れを再現することである。車の外板面は，機能と安全性からフェンダとフロントドアのような部品に分割され，部品間にパーティング隙が発生する。デザイン意匠の再現には，パーティング隙によってキャラクタラインと面の流れを分断させることなく，調和させる技術が必要となる。

4.1　パネル段差の意匠面への見え方の影響

パネルの組み付け位置がずれたり，パネル間に段差が発生したりした場合，デザイナがこだわり抜いた光と影のバランスが，パーティングを境に変化する（Fig. 4）。

デザイン意匠の再現には，フェンダやフロントドアアウタといった個々の外板パネル精度，パネルの組み付け位置精度，パネルを組み付ける土台となるボデーシェル精度の三位一体の精度向上が求められる。

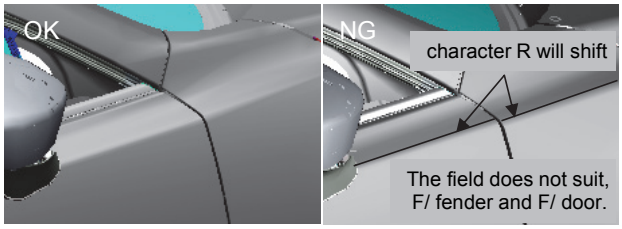


Fig. 4　Change of Shade by Panel Level Difference

4.2　パネル段差の発生メカニズム

外板パネルはボルトで締結されるため，組み付け位置をある程度調整できる。一方，パネル段差の一因であるボデーシェルは溶接で組み上げられるため手直しが効かず，高い精度で造ることがより難しい。そのパネル段差の発生メカニズムを，フェンダとフロントドアの事例で説明する。

Fig. 5 に示すように，フロントドアはドアヒンジでボデーに締結され，フェンダはアッパヒンジの上側とサイドシル下端部でボデーに締結される構造となっている。そのため，各締結面の位置関係が崩れるとフェンダとドアの段差が発生する。

4 つの締結面はすべてボデーサイドアウタに接地するが，その内側にはレインフォースメントがある。アウタより板厚が厚いレインフォースメントの方が締結面の位置精度に支配的である。このレインフォースメントは，衝突性能・プレス成型性・材料歩留まりを最適化するため分割しており，ドアヒンジとフェンダがそれぞれ別の部品に乗っている。このようにフェンダとフロントドアの段差の発生源をたどると，主に 3 つのレインフォースメントの部品精度に行き着く。

なお，レインフォースメントの精度はアンダボデーと接合することにより変化することがあるが，これについては 6 章で述べる。

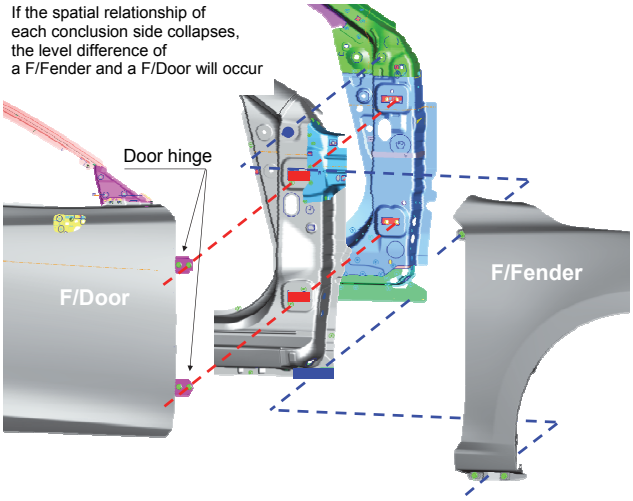


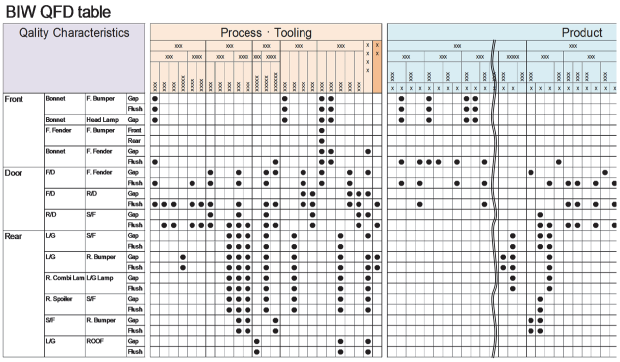
Fig. 5　Conclusion Structure F/Fender and F/Door

4.3　外観折り合いと工程・部品の関連付け

でき上がったモノを見てから先に述べたような精度不良の発生源の特定を始めても，期間やコストの制約からできる対策は限られてくる。現物で起きうる不具合を想定し事前に根本対策を打つため，外観折り合いとそれに関連する工程・部品を一覧表にまとめ（Table 1），重点的に管理すべき工程・部品を洗い出した。CX-5 や新型アテンザの量産準備の中で，当初予想していなかった工程の関連も明らかになってきており，得られた知見は随時新型車に反映させている。

Table 1　Body in White QFD Table

BIW QFD table



ボデー造りでは，ボデーのカギとなる部位の精度を狙い値に導き，かつそれらの部品を変形させずに溶接し組み付けなければならない。そのためにも，まずはボデーを構成しているプレス部品の精度向上が必須である。次章ではプレス部品の精度向上について述べる。

5. プレス部品の精度向上

5.1　ハイテン部品の成形方案の革新

外観折り合いに影響が大きく重点的に管理すべき部品の一例として，ヒンジレインフォースメントの精度向上の取り組みを紹介する。ヒンジレインフォースメントはフロントドアヒンジの締結面及びフェンダ締結面を持つ部品との接合面を有している。また，軽量化と安全性を両立させるため高強度のハイテンが用いられ，狙いの精度を出すことが難しい。プレス部品の成形方法は，絞り成形とフォーミング成形（≒曲げ成形）に大別される。ハイテン部品の場合，その硬さから通常はフォーミング成形すべきだが，形状の起伏が激しい場合はシワをコントロールするために絞り成形となる。絞り成形では，材料の流入量により与歪量が変化するため，精度がバラツキやすい。これを解決するために，1 工程目で浅く成形を行い，シワがない状態で形状を出し，2 工程目で正規位置まで成形する，精度のばらつきを最小にする成形方法（Fig. 6）を考案し，新型アクセラに取り入れた。

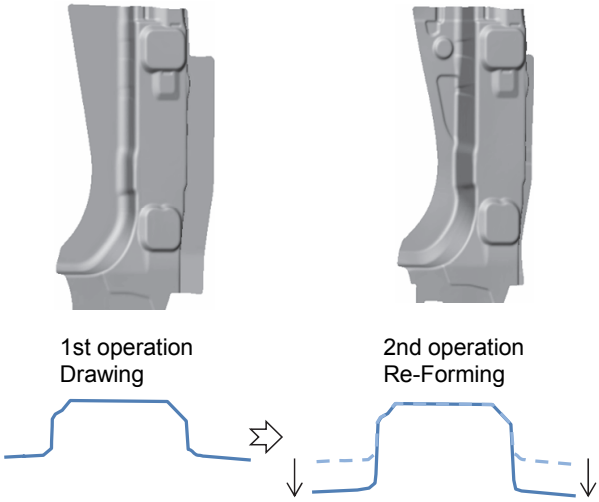


Fig. 6　Forming of the High Tensile Strength Steel Parts

5.2　フォーミング成形による精度向上

この方案により，初部品の精度 OK 率（面精度±1.0mm の中に入る率）が飛躍的に向上した。それまで初加工品で精度 OK 率 80%程度だったものが，この工法の採用により，初加工品の精度 OK 率をほぼ 100%まで向上させることができた。Fig. 7 は，緑色が 0 近傍を，赤色が車外方向を水色が車内方向を示す。機能面は一部を除き狙いの約半分にあたる±0.5mm 内にすることができた。結果，ボデーシェルでのフロントドアヒンジ精度の向上を果たし，ドアとフロントフェンダのキャラクタ R を途切れなく流すことに貢献できている。

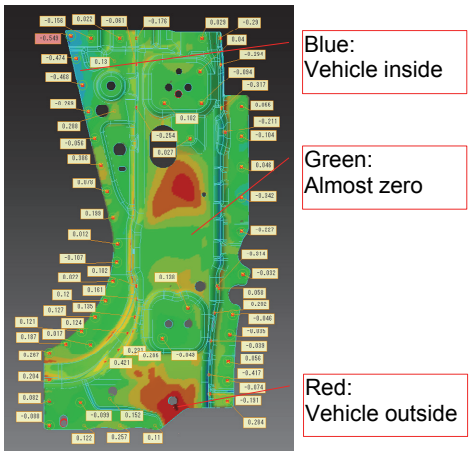


Fig. 7　First Build Part Accuracy for F/Pillar Rein-F

6. 車体アセンブリにおける精度向上

6.1　精度変化の予測技術の確立

車体アセンブリ工程には，プレス部品の精度を変化させることなく溶接し組み上げる機能が求められる。その機能を実現する工程の基本要素が，治具による部品の位置決め方法を規定する加工基準と，溶接し治具を解放した後も拘束時の精度を保持するための仮付打点である。

加工基準と仮付打点の設定にあたり，これまでも自重によるたわみを剛性解析ソフトでシミュレーションしてきた。CX-5 以降，部品接合面の隙や干渉，スポット溶接の増打ちによる精度変化の予測にも適用範囲を拡大している。Fig. 8 は，アンダボデーとボデーサイドの接合面干渉によるボデーシェルの精度変化をシミュレーションした一例である。この例では，フロントドアヒンジの上下の締結面とリヤドアヒンジの上下の締結面にねじれが生じており，完成車としてはフロントドアとリヤドアの段差が発生すると予測される。部品の精度，車体アセンブリでのスポット溶接で精度が変わることが検証できるようになった。

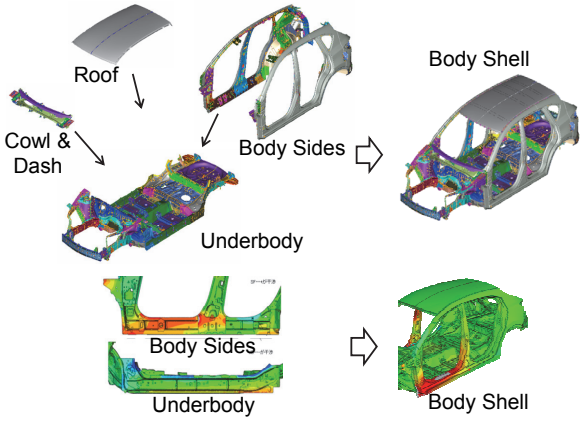


Fig. 8　The Simulation of Mating Surface Influence

6.2　重点管理接合面の特定

このシミュレーション技術を用い，まず接合面精度や増打打点といったノイズに対して影響を受けにくくするように加工基準と仮付打点の適正化を行った。その上で重点的に管理すべき接合面の部位の絞り込みを行った。Fig. 9 は，アンダボデーとボデーサイドの接合面のそれぞれの部位が，外板パネルのどこの段差にどれだけ影響を及ぼすかを算出したものである。

寄与度の高い接合面精度及び打点を重点管理することで，品質保証の確実性の向上と効率化を果たせるように進化させている。

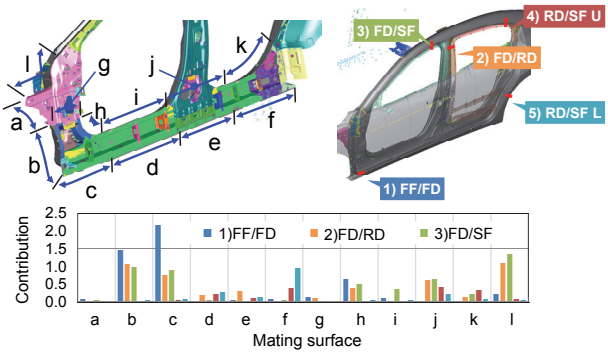


Fig. 9　Contribution of Mating Surface to Step between Panels

6.3　実車の品質育成

机上検証と並んで重要なのが，実車での検証である。ここでは，実車検証について紹介する。まず，加工基準・仮付打点の妥当性，接合面影響のシミュレーション予測精度を開発確認車で確認した。非接触三次元測定機を用いてアンダボデーとボデーサイドの接合面をそれぞれ測定しデータを突き合わせ，隙・干渉量を算出した。シミュレーションで予測されるボデーシェル精度変化と，実際の開発確認車のボデーシェル精度との相関が取れたことから，外観折り合いへの寄与度を踏まえ部品修正の部位と狙い値を決めた。設備トライアル・パイロット生産では，先ほどの外観折り合い-工程・部品展開表（Table 1）に従いサブ工程まで遡り，1 工程ずつ治具精度・部品精度・アセンブリ精度変化を確認した。このような地道な検証と修正を積み重ねた結果，アンダボデーとボデーサイドの接合面は狙いの状態となり，フェンダとフロントドアの狙いの段差を再現できた。

6.4　自動組み付けによる精度変化の抑制

これまで，プレス部品とボデーシェルの関連に着目して進めてきたが，車体アセンブリ単体でもデザインの具現化に貢献してきている。ここでは，車体アセンブリ工程で特にバラツキ幅の大きい人が調整している工程の寄与度を下げることに着目し，ボデー完成後の補正量と補正時間のミニマム化を達成した事例を紹介する。これまで担当者の経験や技術力に依存していたボンネットやドアなど蓋物の組み付けにおいて，ロボットや治具などの工程機能ごとのバラツキを検証し，最適な条件を導き出した。結果，無調整化を達成できた。

導き出した条件の一例として，Fig. 10 にボンネット搬送時の保持位置を挙げる。本工程ではロボットに取り付けられたバキュームパッドを有する搬送ツールでボンネットを保持したままボンネットヒンジをボデーに対して締め付けるため，ヒンジ部の精度と剛性が重要となる。青色表示が 0.1mm 以下，緑色で 0.4mm 以下の変位を示しており，搬送用バキュームパッド位置の違いによりボンネットの搬送時の精度変化と締付時の精度変化を抑制した。同様な机上検証を繰り返し，良品条件を並べ，車体アセンブリ工程に織り込んだことで補正レスを実現した。

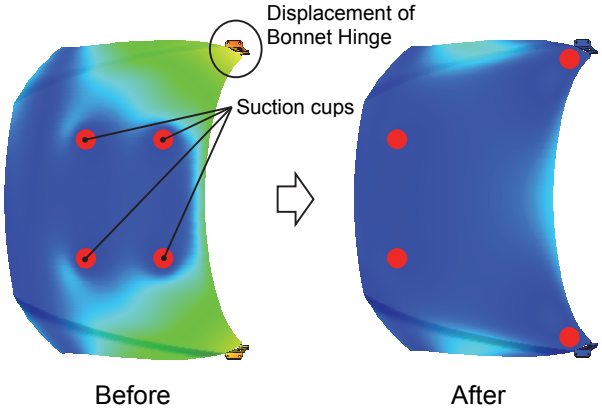


Fig. 10　Accuracy Displacement by the Difference in a Conveyance Maintenance Position

7. 完成車に至るまでの精度変化抑制

7.1　車体工程以降の精度変化

車体工程から完成車までの間でボデーの精度が変化することがある。例えばドアでは，塗装乾燥炉内での車室内と車室外の温度差により熱伸び（熱歪）が発生する。この時点で，車体で使用している硬化シーラが熱伸び発生中に硬化すると，外郭精度が変化する。このような変化は影響因子が多く，解析／対策ともに時間がかかる。この塗装での熱影響の変化を，開発部門や塗装部門等と一体となり抑制したフロントドアの事例を紹介する。

7.2　ドアの熱歪による精度変化を抑制

塗装の乾燥炉で起こっている変化の仮説を立てるため，まず部品ごとに乾燥炉での温度変化を測定した。Fig. 11 は，縦軸に温度，横軸に時間の経過を取ったグラフである。ドアアウタとインナのシーラが硬化する温度に達した時点で，インパクトバーの温度が上昇しきっていないことがわかった。ここから，熱膨張差による精度変化が原因という仮説を立て，その要因追求と対策案を作り，最も効果的な策へと絞り込んで行った。結果，インパク

トバー近くに溶接を追加する案が最も効果的だとわかり，対策した。最終的に車体から塗装後の状態でドア外郭段差の変化量は 0.3mm 以下と良好な結果が得られた（Fig. 12）。

このように，車体に部品精度を狂わせることなく組み付ける，または車両までの精度変化を確認対策するために，これまで培ってきた解析ツールと手法を総ざらいし，車体アセンブリの各工程へ展開した。これにより，バラツキを抑えた車体アセンブリ工程の実現と，量産準備の初期から不明値の解析に時間を取られることのない高効率の実機検証を実現した。

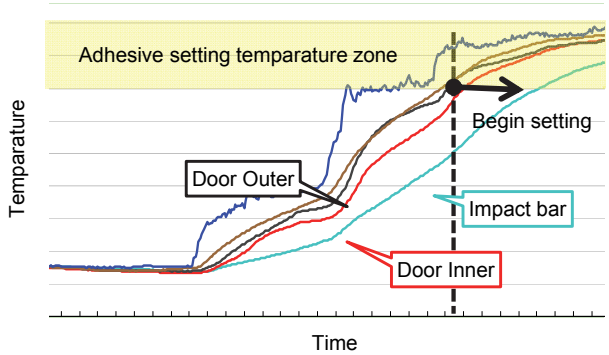


Fig. 11　The Temperature Change in [Classified by Parts] a Drying Furnace

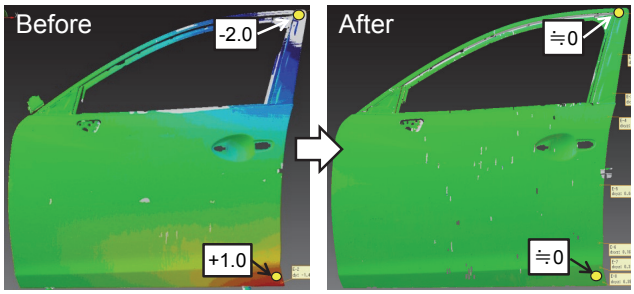


Fig. 12　The Accuracy Improvement of a Door

8. おわりに

One & Only のデザインを意識し，マーケティングはもちろん，デザインから製造，販売に至るビジネスの流れに，これまで積み上げてきたプレスと車体アセンブリの技術を，一貫したプロセスとして組み込んだ。生産工程では，プレス加工から始め車体アセンブリ以降の塗装や車両組立など全生産工程での変化も考慮し，一連の流れのひとつとしてのボデー造りに取り組んだ。新型アクセラのデザイン実現の裏側には，このようなプロセス革新と技術の詰め込みがあることをお分かりいただけたと思う。

デザイン・開発・生産技術各部門の担当者が，膝を突き合わせ，共に知恵を出し合い，情熱をぶつけ合う距離感はマツダならではの強みである。今後もこの強みに磨きを掛け，グローバルな競争の中で存在感を示し続ける。

この新しいプロセスにより新型アクセラでは造りの良さを実感できる折り合いはもとより，デザインテーマである「瞬発／誘発」を存分に表現できた。ボデーに表した，よりエネルギッシュでテンションを効かせたリズミカルなデザインを楽しんでください。

■著　者■


中野 伸哉


酒井 明


山田 泰生

特集：モデルベース開発

9

マツダの目指すモデルベース開発

Model Based Development in Mazda

藤川　智士*1
Satoshi Fujikawa

要約

マツダでは，「走る歓び」と「優れた環境・安全性能」を SKYACTIV テクノロジーとして 2011 年より提供を始め，2016 年には SKYACTIV 技術搭載車比率を全販売台数の 80%の展開を目標に拡大中である。この SKYACTIV テクノロジーの高度かつ迅速な開発を支えたモデルベース開発に関して，その新たな開発プロセスと開発技術を紹介する。

Summary

In 2011 Mazda started offering “Driving pleasure” and “Excellent environmental and safety performance” in the form of the SKYACTIV technology, and is now expanding its deployment so that vehicles equipped with SKYACTIV technology will make up 80% of Mazda’s total sales volume in 2016. This study introduces a new development process and technology in relation to the Model Based Development which supported Mazda with advanced and prompt development of the SKYACTIV technology.

1. はじめに

近年，車に求められる機能は高度化，多様化する一方で，これに対応する車両の構造や制御システムは複雑化の一途をたどり，今後ますます加速していく方向にある。このような複雑なシステムを限られたリソースで迅速に開発し続けるには，開発そのものを机上で効率良く行う「モデルベース開発」（MBD：Model Based Development）が極めて重要になりつつある。

マツダでは，2012 年 2 月，SKYACTIV テクノロジーとして，エンジン，トランスミッション，シャシー，ボデーに至る全ての車の構造，制御システムを一新した CX-5 を発表し，その後，アテンザ，アクセラと，進化させ続けている。これらの高度，かつスピーディな技術の進化，展開は MBD なくしては成し得ない成果であった。本稿では，今後の展望を含め，マツダの目指す MBD の姿を述べる。

2. モデルベース開発に求められるもの

最初に，未だ世間一般に定着していない MBD の言葉の定義，特にマツダでの定義を述べる。MBD はもともと，制御モデルと制御対象モデルを用い，机上で制御開発を行うことを意味した。しかし，前述のように，車のシステムが複雑化したことにより，個々のシステムの相互影響を考えると，制御の対象が車全体へと広がりつつある。この広がりにより，従来，CAE モデルと呼んでいた強度，振動，燃焼，運動などを扱うモデルのほとんどが，制御対象モデルとしての役割を求められるようになった。また，マツダでは将来，開発の全てを机上化するという理想を掲げているため，CAE モデルと制御対象モデルを区別することは意味がなくなってきている。このため，机上開発全てを MBD と定義している。

その上で，マツダではモデルの役割を開発フェーズごとに定義して来た。Fig. 1 は一般的な開発の V 字プロセスを示す。車両からユニット，ユニットから部品へと機能をカスケードし，それを検証していくプロセスである。一般にはこのように標準化された開発プロセスをベースに，それぞれの開発フェーズにモデルの役割を定義して

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

いくが，マツダでは，モデルという新たなイネーブラを駆使する視点を加え，MBD プロセスそのものに広がりを持たせることから考えた。それは，従来開発の V 字プロセスの外にあったものをモデルでつなぐことである。車両のシステム構想の前にある「市場要求の把握」と部品設計の次にある「生産品質の開発」のプロセスをモデルでつないで Fig. 2 に示す MBD としての新たな V 字プロセスを設定した。

その上で，この新たなプロセスを鳥瞰し，モデルの役割を定義した。以下，MBD V 字プロセスの各開発フェーズにおけるモデルの役割を述べる。

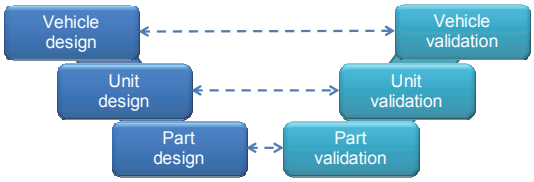


Fig. 1　General V-Type Development Process

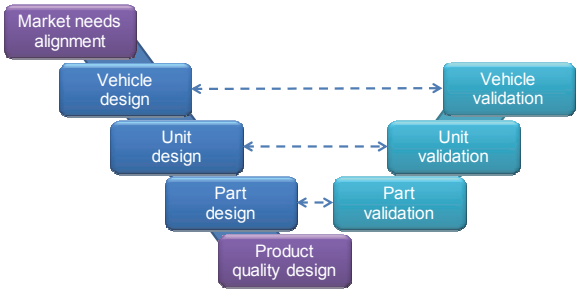


Fig. 2　Model Based V-Type Development Process

3. 各開発フェーズにおけるモデルの役割

3.1　市場要求の把握モデル

車を開発するためには，その車の顧客要求，環境条件を正しく把握し，それを達成，保障すべき目標として開発要件に反映させる必要がある。従来の内燃機関のみを搭載した車であれば，その長い経験の中で，これらの要求はほぼ把握できており，開発コード化できている。しかし，今後，各種電気駆動システムの採用拡大，あるいは従来とは異なる燃焼方式の採用，そしてそれらの組み合わせを考えた場合，市場要求の把握から再構築する必要がある。この課題に効率良く対応するために，モデルを活用している。

燃費や，操縦安定性などの走行性能を予測するモデルをベースに，道路の勾配，路面状況，交通，温度，積載量などの環境，使用条件を付加することで，すなわち仮想空間で車両モデルをフリート走行させることで，運転，環境が与える影響を早期に抽出している。例えば新たなエンジン特性や，モータ特性によるドライバビリティや制動，操舵性能への影響，あるいは路面状況や温度による電気系への信頼性要件などを早期に抽出することができる（Fig. 3）。

もちろん，実走行で分析しないと抽出できない条件も未だ沢山あるが，試験情報の反映先となるモデルを整備することで，実走行の知見を効率良く蓄積する役割もモデルに持たせている。このように，仮想試験の試行錯誤で，問題抽出の網羅性を向上させるだけではなく，市場要求の情報を蓄積し，開発コード化する重要な役割をモデルに持たせている。

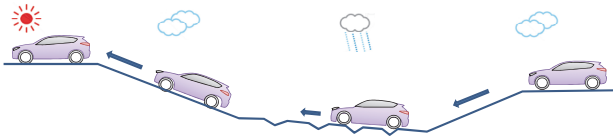


Fig. 3　Driver and Market Ground Model Image
（Altitude, Climate and Road Model）

3.2　車両のシステム構想モデル

開発初期におけるモデルの重要な役割は，目標とする車両性能をサブシステムへ最も効率良く機能配分することである。このシステム構想モデルには，燃費や走り，操縦安定性，NVHなどの車両性能を表現でき，かつ，その性能とエンジン，トランスミッション，シャシー，ボデー，制御などのサブシステムとの機能の関わりを分析可能であることが求められる。

一般に，緻密なモデルを組み合わせて車両モデルを作り上げると，性能現象は表現できても，その複雑さのために，性能と各サブシステムの関わりが見えにくくなる。このため，車両のシステム構想では，機能配分に必要な最低限のモデル要件を性能ごとに定義し，不要な情報を排除した専用のコンセプトモデルを活用している。

ここで用いるサブシステムのモデルは，先行して開発した要素技術の実験結果や，それを再現する詳細モデルなどをベースに，モデル構成の低次元化を行う。具体例としては，アクセル操作に対する加速度応答性を求めるために，エンジンの複雑な燃焼モデルを用いるのではなく，1次元の燃焼モデルを用いたり，あるいは車両の連成振動を解くために，必要最小限の周波数までを表現できるドライブラインの振動モデルを用いたりしている。なお，これらのモデルは，計算速度を向上させるための単純化ではなく，機能の関わりを理解できるコンセプト化（ホワイトボックス化）が重要となる。

これらのコンセプトモデルを組み上げたシステムモデルで，車両全体をエネルギー視点，運動視点で見渡し，新規のエンジンやトランスミッション，電気駆動系の特質に応じた最適な機能配分を開発の初期に行っている（Fig. 4）。

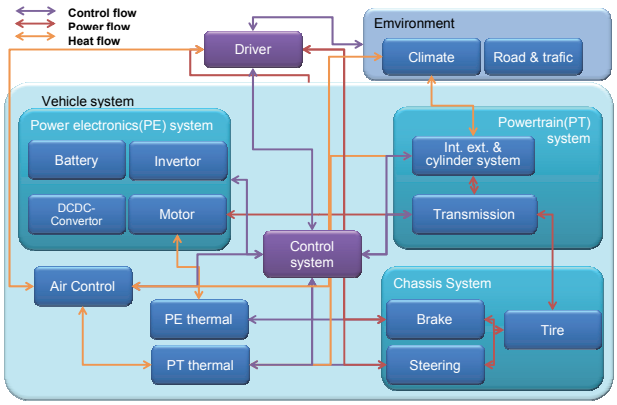


Fig. 4　Vehicle System Design Model

3.3　ユニット，部品の詳細設計モデル

システム構想で配分した機能目標を設計スペックにカスケードすることを目的に詳細な設計モデルを用いる。従来の CAE モデルの役割である。緻密な有限要素モデルによる構造体の強度，振動設計をはじめ，3 次元の流れモデルによる燃焼性能の作り込み，機構モデルによる部品挙動の詳細設計などがある。近年では，コンピュータ性能の進化に伴い，モデルの範囲拡大や緻密化を更に進めることで，予測精度を向上させ，手戻りのない開発に大きく貢献している。

また，ソフトウェアの進化によって，流れ，構造，音響といった解法の異なるモデルを組み合わせることが可能となり，従来は実機，実車開発に依存していた複雑な現象を初回設計段階で作り込むことが可能となった。Fig. 5 はエンジンルーム内の吸気系の放射音をモデルで予測した結果である。前述の 1 次元のエンジン燃焼モデルで求めた吸気系の脈動を入力に，エンジン本体と吸気系の構造を加振し，それによるエンジンルーム内の放射音を定量予測することで，燃焼性能と騒音を両立させる構造を机上で作り込んでいる。

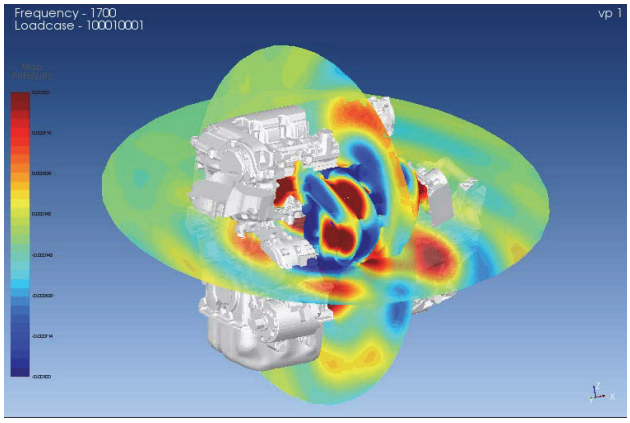


Fig. 5　Intake Manifold Radiation Noise Model

3.4　制御開発モデル

制御開発においては，前述のシステム構想のモデルを用いて，制御仕様の定義を行った上で，「制御の詳細設計」，「コントロールユニット系の動作確認」，「キャリブレーション開発」に連続性のあるモデルを用いている。

制御の詳細設計では，システム構想モデルをベースに，必要な制御対象モデルを全て加えて MILS（Model In the Loop Simulation）を構築する。

制御設計のためには，システム構想モデルよりもモデルの精度が必要となるものがあるため，詳細設計モデルを活用する。しかし，構造，燃焼の複雑な詳細モデルは，大きな計算時間を要するので，そのまま制御対象モデルとして用いることは難しい。そこで，詳細モデルの計算速度向上を目的に，入力に対して出力のみを正しく計算できる統計モデル化などの「単純化」（ブラックボックス化）を持って制御設計に使用している。

その後で，MILS をベースに，コントロールユニットを実機に変えた HILS（Hardware In the Loop Simulation）で，その動作検証を行う。この時，必要に応じて，センサ，アクチュエータ類も実機を用い，電気的な過渡応答やノイズの影響を含めた検証を行う。

そして制御の最終工程であるキャリブレーションにおいては，実機，実車を用いながらも，モデルを活用することで効率的な開発を行っている。緻密さが要求されるキャリブレーションにおいては，この工程以前の制御対象モデルでは精度不足となる。このため，実機，実車の実験分析結果に基づき，モデルの補完と精度向上を行うことで，机上キャリブレーションの範囲を拡大している。これにより，複雑で膨大なシステムでも，制御定数の最適解を短期間で見出すことを可能にしている。

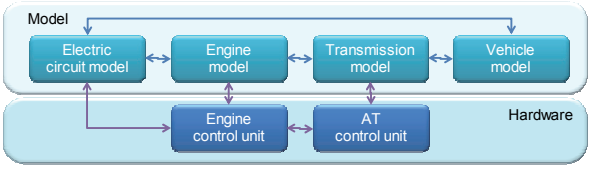


Fig. 6　Schematic of HILS for Powertrain Control

3.5　生産品質の開発モデル

開発部門と生産部門の間では，図面による情報伝達をベースに，1990 年代から 3D CAD モデルを用いることで，形状情報の効率的な共有を行ってきた。最近では，これを発展させ，解析モデルを共有することで，早期の生産品質の作り込みに取り組んでいる。

図面，形状情報だけでは管理しきれない生産工程に起因する機能の外乱をモデルで予測し，それを最小化する取り組みである。

射出成形による材料物性値の異方性，あるいは鋳造の冷却や鍛造の塑性加工などに起因する部品の残留応力などを，専用のモデルで予測している。これにより，異方性を前提とした適切な形状の設計や，残留応力を低減するための構造や工法の開発を，開発部門と生産部門が共同で取り組むなど，モデルの活用によって，開発初期に生産を含めた品質の作り込みが可能となりつつある（Fig. 7）。

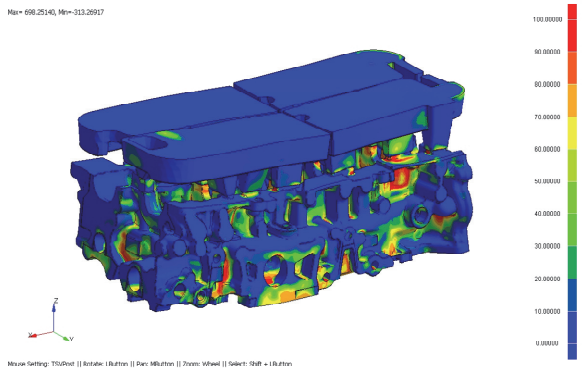


Fig. 7　Residual Stress Model of Cylinder Head

4. おわりに

以上が，市場要求の把握から生産品質の開発までモデル主導で進めていくプロセスであるが，このプロセスに必要なモデルは，ソフトウェアのように購入すれば良いものではなく，自分達で構築していかなければならない。そのためには，複雑かつ膨大な現象を実験主体で解明し，それを開発技術として使えるモデルに整備する必要があり，それに要する工数や費用は開発全体において非常に大きな割合となっている。

しかし，高い商品力を持った製品を効率的に開発し続けるには，モデルの整備とその駆使，すなわち MBD が必要であり，MBD こそが車の開発そのものであると確信し，この取り組みを一層加速させている。

今後も，MBD によって，SKYACTIV テクノロジーを更に進化させ，市場のサプライズを伴う高いお客様価値の商品を続々と提供していく計画である。

■著　者■

藤川 智士

特集：モデルベース開発

10

SKYACTIV の MBD 検証環境について

MBD Verification Environment for SKYACTIV

臼田 浩平*1 Kohei Usuda
小森 賢*2 Satoshi Komori
三吉 拓郎*3 Takuro Miyoshi
寺岡 陽一*4 Yoichi Teraoka
本城 創*5 So Honjo
久禮 晋一*6 Shinichi Kure

要約

環境に対する意識が高まる中，マツダでは技術開発の長期ビジョンである「サステイナブル“Zoom-Zoom”宣言」を策定し「走る歓び」と「優れた環境・安全性能」の両立を目指しパワートレインを進化させてきたが，これに伴ってエンジン制御は，大規模かつ複雑化してきた。

このような環境の中でも，走行，環境性能向上の要求をタイムリーに実現していくためには，制御の品質を確保しながら短期間で開発を完了しなければならない。そこで，SKYACTIV-G の制御開発では，「モデルベース開発」（MBD：Model Based Development）を全面的に適用し，各開発段階で必要な机上検証システムを構築し効率化を進めてきた。

更に，SKYACTIV-G の商品化以降も搭載車種をすばやく拡大するために，机上検証領域の拡大や，机上検証システムの自動化と検証速度の改善を継続的に進めて，制御の品質確保と短期開発の両立化を図った。

Summary

In response to the growing environmental awareness, MAZDA declared "Sustainable Zoom-Zoom", a long-term corporate vision for technology development, and has evolved a powertrain aiming to achieve both "driving pleasure" and "excellent environment and safety performance." Along with it, engine control has become larger and more complicated.

To improve drivability and environmental performance in time for the requirement under such conditions, it is necessary to develop the engine control of the highest-possible quality in a short time. To heighten the development efficiency of the SKYACTIV-G control, Model-based Development (MBD) was applied overall and a theoretical verification system was established for each development stage.

In order to quickly deploy the system to other models after the SKYACTIV-G launch, expansion of the theoretical verification scope, automated theoretical verification system, and shorter verification speed have been addressed to achieve both high quality and faster development speed.

1. はじめに

環境や燃費に対する意識が高まる中，マツダでは技術開発の長期ビジョンとして「サステイナブル“Zoom-Zoom”宣言」を策定し，「走る歓び」と「優れた環境・安全性能」の両立を目指して SKYACTIV-G を開発してきた。そして，2011 年にデミオへ初めて搭載し(1)，その後も各車種へ搭載を拡大してきた。

SKYACTIV-G の開発では，パワートレインの進化に伴って大規模，複雑化する制御に対して，MBD を全面的に適用することで，制御の品質確保と短期開発の

*1～6　パワートレインシステム開発部
Powertrain System Development Dept.

両立を目指してきた。

本稿では，制御の品質確保と短期開発を実現するために開発し，活用してきた制御の品質確認手段（机上検証システム）について紹介する。

2. MBD と机上検証の実現

2.1　開発／検証プロセスと MBD の役割

自動車の制御開発で一般的に用いられている，V 字で表現した開発プロセスを Fig. 1 に示す。V 字の右側は，実機や実際の車両を使った開発段階（検証段階）であり，ここで不具合が発覚した場合には大きな手戻りにつながってしまう。手戻りを最少化するには，各開発段階で細かく検証サイクルを回して，不具合の後工程流出を防止する必要がある。SKYACTIV-G の制御開発では，MBD を適用することにより各段階での検証を可能とした。

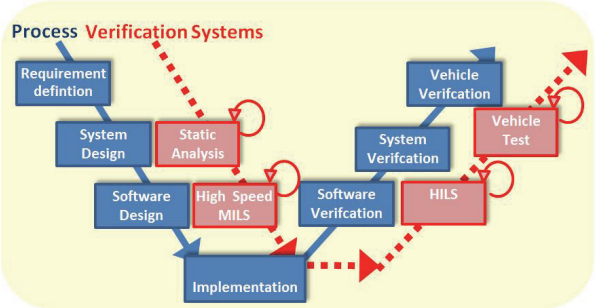


Fig. 1　MBD and Verification System in V-Process

2.2　MBD と机上検証システム

MBD 適用に際しては，各制御モデルと制御対象モデル，そして，机上検証システムを 2 段階に分けて開発した。

各々の定義は以下の通り。

① 制御モデル：エンジン制御の仕様を MATLAB/Simulink などのモデリングツールで表現したもの。

② 制御対象モデル：エンジンや車両などの動きをモデリングツールやプログラミング言語で表現したもの。

③ 机上検証システム：制御の品質を確認するシステムであり，制御単体で検証するシステムや制御モデルと制御対象モデルを結合して動作検証するシステム。

第 1 段階では，制御モデルの構成を定め，制御対象モデルを開発した（3 章）。机上検証システムは，左バンク（Fig. 1）の制御モデル開発（ソフトウェア設計）段階で，静的解析システム及び，制御モデルと制御対象モデルをモデリングツール上で接続した MILS（Model In the Loop Simulation）環境を整備した。

また，右バンク（Fig. 1）では制御ソフトウェアの検証段階で HILS（Hardware In the Loop Simulation）環境を構築した。更に，検証結果の管理については構成管理システムを活用して，モデル開発履歴と検証結果の可視化を実現した。

第 2 段階では，机上検証システムの自動化と検証速度の改善を進めてきた。具体的には，左バンクの静的解析システムの検証時間を改善し（4.1 節），MILS 環境においては，新たに開発した「高速 MILS 環境」へ置き換えることで，短時間で網羅的な検証ができる仕組みを構築した（4.2 節）。また，高速 MILS 環境については，大きく分けて下記の 3 つの機能を備えた検証環境として整備した。

① C 言語化及び並列演算による検証速度の向上機能。

② 自動車の操作系統を再現した GUI（Graphical User Interface）及び自動走行機能。

③ 車両系制御，TCM（Transmission Control Module），DSC（Dynamic Stability Control），MRCC（Mazda Radar Cruise Control）などと制御モデル間の多重通信や協調制御を確認できる機能。

以降では，制御と制御対象モデルの概要及び，机上検証システムの自動化と検証速度の改善について示す。

3. 制御モデルと制御対象モデル

まず MBD の中核を成すモデルについて簡単に説明する。

3.1　制御モデル[1]

SKYACTIV-G の制御は，複数のセンサ，アクチュエータ信号を入出力に持ち，また TCM や DSC などの複数の車両系制御と多重通信処理を行っている。この多くの外部信号と整合性を取りながら，複数の制御機能を効率的に開発するために SKYACTIV-G の制御モデルは，エンジンや車両の挙動を制御するアプリケーション層と外部信号を物理変換するプラットフォーム層に分ける構造を選択した（Fig. 2）。

また，複数の機能を効率的に開発するため，機能ごと，更に時間や角度同期単位にモジュールを分ける構造を採用して，複数の技術者による並行開発を実現した。

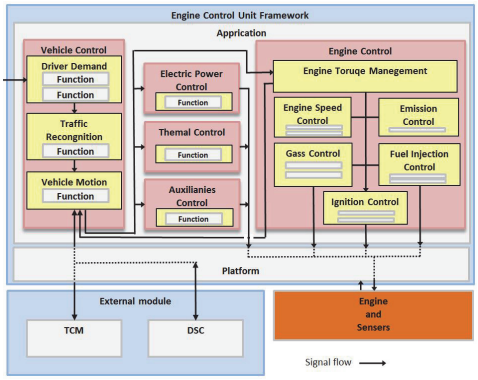


Fig. 2　Framework of Engine Control

3.2　制御対象モデル

制御モデルの動作を確認するために，制御対象となるモデルを机上検証システム（高速 MILS）上で制御モデルと結合している。具体的には，エンジンや各種センサやアクチュエータ，補機とトランスミッション，空気と路面など車両抵抗をモデル化したものである（Fig. 3）。このプラントモデル群は HILS と共通化することで，V 字の左右両バンクにおける検証の等価性を確保している。その中で，エンジンモデルは精度と速度が両立できる統計モデルを採用し[2]，オートマチックトランスミッションについては，プラネタリ構造から油圧システムまでを詳細に解いた物理モデルと演算速度の速い簡易モデルを採用することで，検証要求に応じてモデルを切り替え，検証時間を改善した。

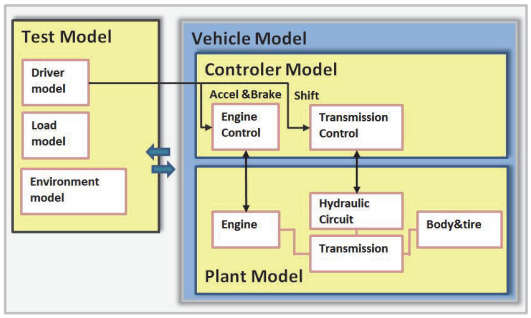


Fig. 3　Framework of Vehicle Model

4. 机上検証システムの改善

4.1　制御モデルの静的解析システム

静的解析とは，制御モデル（ソースコード）を実行せずに，モデリングルールの違反か所や欠陥を検出する検証である。具体的には，モデルの記述ミスによって生じる，ゼロを取り得る変数による除算やオーバフローといった，欠陥を検出する。欠陥を含んだまま,制御が車両に搭載されれば不意に制御プログラムは動作を止めてしまう恐れがある。これが車両走行中に起これば重大な結果を招きかねない。そのため,この検証は確実に実施する必要がある。

また，この検証システムでは，欠陥以外にも検証対象の入力値（組み合わせ）に対して検証対象から出力される信号が，仕様の範囲内に収まることを確認している。

更に，この検証には以下に示すメリットがある。

① 手戻りが小さい。V 字左バンクのモデル開発段階（設計初期）で検証可能なため，欠陥を発見した場合でも，即座にモデルや仕様に修正を反映できる。

② 網羅性が高い。動的検証では動作した部分しか検証できないが，実行可能なパス（分岐）は全て検証可能。

③ テストケースの準備が不要。

④ 実行可能なパスの可視化。

しかし，SKYACTIV-G の制御モデルは，その要求と仕様の情報量から，モデルの大規模化と複雑化が生じるため，制御モデルを全て検証することに，数千という時間が必要となる。このままでは，現実的に部分的な検証しかできない。また，一般的にモデルの大規模化と複雑化は，検証の網羅性も低下させてしまう。

そこで，品質確保と短期開発を両立させるために，制御モデルの構造を活用しながら，モデルの検証単位を最適化し，関数（時間や角度同期）単位まで細分化して，1 回の検証における複雑さを低減させた。更に，変更点を中心に影響範囲を自動抽出するシステムを開発することで，検証範囲を限定し検証時間を改善した（Fig. 4）。

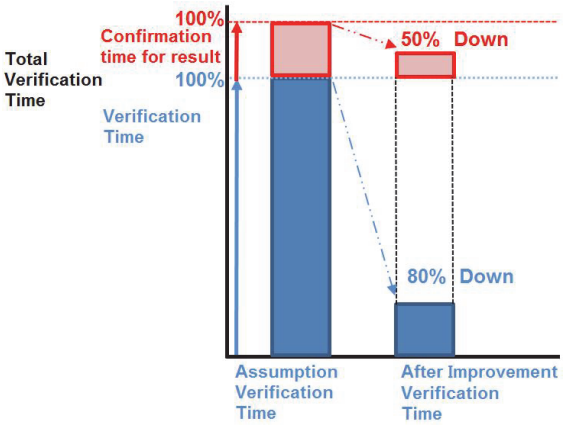


Fig. 4　Verification Time Reduction Effect by Automated System

また，膨大な検証結果の解析については，自動レポート機能（Table 1）を開発することで，PASS/FAIL を選別し，詳細を確認すべき項目を絞り込み，確認工数を削減している（Fig. 4）。

Table 1　Static Verification Report

No.	Spec Name	Function Name	Engineer Name	Date and time	Comprehensive Judgment	Coverage(%)	Coverage Judgment	Description Defect	Output Defect
1	Application1	sample1	–	–	PASS	100	S	PASS	PASS
2		sample2	–	–	PASS	100	S	PASS	PASS
3		sample3	–	–	FAIL	76.56	B	PASS	FAIL
4	Application2	sample4	–	–	PASS	100	S	PASS	PASS
5		sample5	–	–	FAIL	100	S	FAIL	PASS
6	Application3	sample6	–	–	FAIL	—	D	FAIL	PASS
7		sample7	–	–	PASS	100	S	PASS	PASS
8	Platform(Input)1	sample8	–	–	PASS	100	S	PASS	PASS
9		sample9	–	–	PASS	100	S	PASS	PASS
10	Platform(Output)1	sample10	–	–	PASS	100	S	PASS	PASS
11		sample11	–	–	PASS	100	S	PASS	PASS
12		sample12	–	–	FAIL	–	–	FAIL	FAIL

上述，2 点の改良を加えた静的解析システムの全体像を Fig. 5 に示す。設計者が，制御モデルの変更を構成管理システムへ登録すると自動的に変更部分を検証し，レポートを出力する仕組みを構築した。これにより，静的解析は，検証作業を完全に自動化し，レポートから限定された範囲を確認する仕組みとすることで短時間でも品質の確保が可能となった。

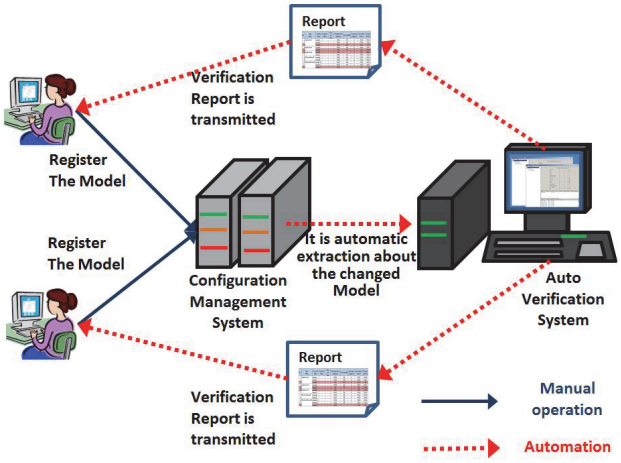


Fig. 5　Automatic Static Verification System

4.2　高速 MILS 環境

(1) 高速 MILS 環境の概要

高速 MILS 環境とは，制御モデルと MATLAB/Simulink を含む他のモデリングツールで作成した制御対象モデル全てを C 言語化し，これを実行体となる DLL（Dynamic Link Library）へ変換した，「制御モデルの動作を確認する」ための，机上検証システムである。

MATLAB/Simulink や他のモデリングツールは，モデルを開発しやすい反面，C 言語などのプログラミング言語に対して実行速度が遅くなる。これはモデリングツール上で作成，完結された「MILS 環境」も同様であり，大規模で複雑なモデルになれば，より顕著に現れてくる。そこで，この問題を解決するために，計算速度の改善が期待できる C 言語化を選択した（Fig. 6）。

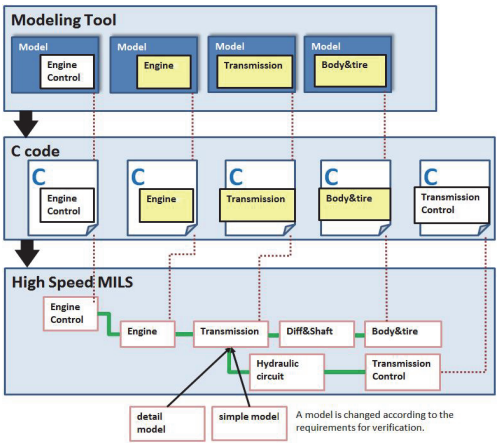


Fig. 6　Framework of High Speed MILS

高速 MILS 環境の構成は，Fig. 6 に示すように，エンジンやトランスミッションなどの制御対象モデルをユニット単位ごとに C 言語化後，それぞれ別個体の DLL ファイルとしている。そして，この DLL ファイルを切り替えることで，検証の要求や詳細度に応じて簡単に制御対象モデルを入れ替え可能とし，効率的な検証を実現した。

なお，C 言語から高速 MILS に組み込む作業も全て自動化を図っている。

(2) 高速 MILS 環境の GUI

高速 MILS-GUI にはリアルタイムのグラフ表示と数値表示機能を備え（Fig. 7），手動操作用のステアリングスイッチ各種とシフレバー,ブレーキ,アクセルなどを備えている（Fig. 8）。

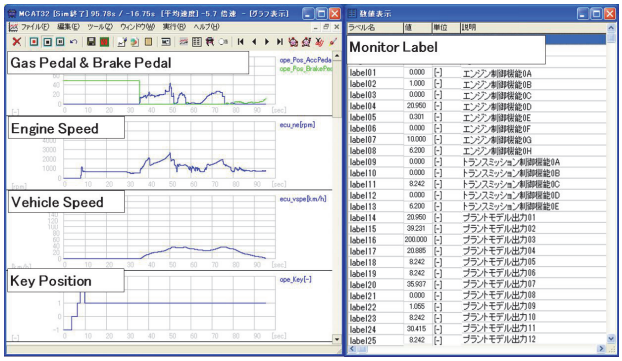


Fig. 7　Graph and Numeric Display of High Speed MILS

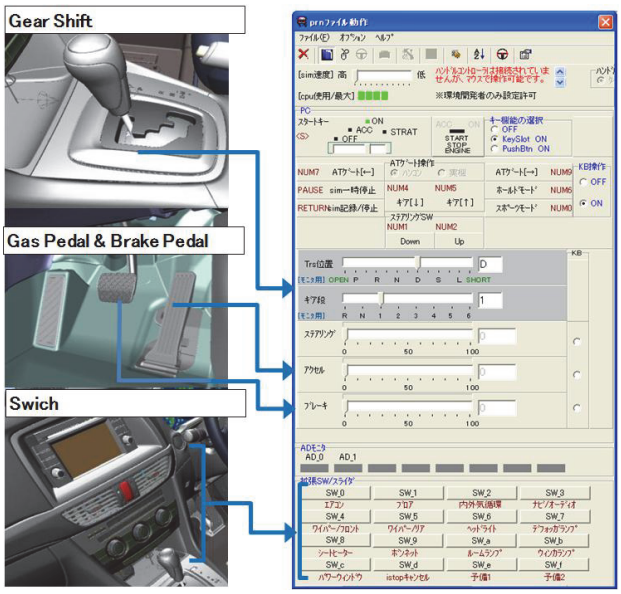


Fig. 8　Driver Operation Panel of High Speed MILS

(3) 制御モデルの組み込み

制御モデルの C 言語化は，MATLAB/ Simulink のオートコード機能を活用している。ただし，制御モデルは全ての機能を含めると規模が非常に大きく，C 言語化するだけで膨大な時間が必要となる。そのため，複数の技術者によって効率良く並行開発を進めるには，モデル編集から高速 MILS に組み込むまでの作業時間を改善する必要がある。

そこで制御モデルに限っては，制御モデルの構造（Fig. 2）を活用することで，一定単位のユニット（機

能）を切り出し，一部のみ C 言語化する技術を開発して C 言語生成時間を改善した。また，先に記した自動組み込み機能を組み合わせることで，簡単かつ高速にモデリングツールから高速 MILS 環境へのモデル反映が可能となった（Fig 9）。

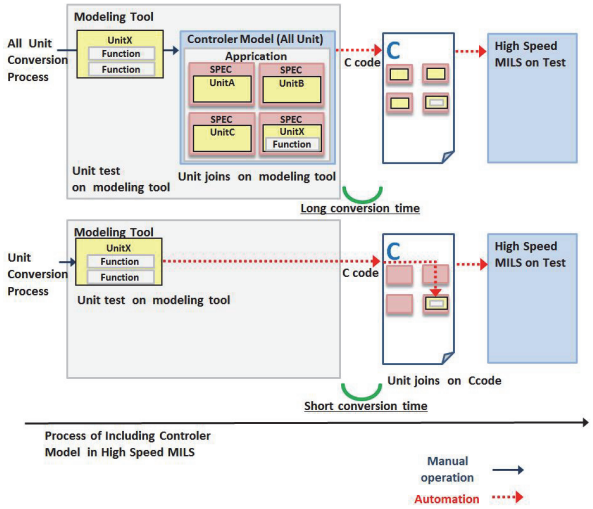


Fig. 9　Controller Model C-Conversion Time

(4) 並列計算による高速化

高速 MILS 環境には，SKYACTIV-G 制御モデルとこれに接続される他の制御や制御対象モデルが複数搭載されている。そのため，C 言語化による高速化を実現しても，接続するモデル数の増加やそれぞれの詳細度が増せば，必然と検証速度は低下していく。そこで，これら問題の影響を低減し，更に検証速度を改善した効率的なシステムとするため，新たに並列計算技術を開発した。並列化による検証速度の改善効果を Fig. 10 に示す。

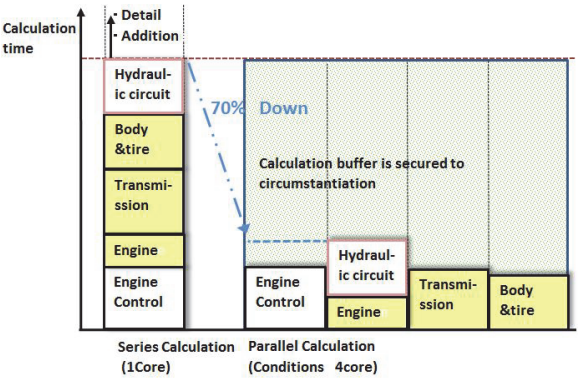


Fig. 10　Improvement Effect by Parallel Calculation System

並列演算の構成は，高速 MILS 環境の構成（Fig. 6）を活用し，各モデル（DLL）単位で計算コアを分散する構成としている。そして，実行スケジュールは，入力→実行→出力の 3 タスクに分けることで，全てのモデルが前回の計算結果を使って計算する仕組みとした。入力タスクで信号バスから各モデルの計算値を取得し，次に実行タスクでこの入力値の結果を使って演算を行う。そして，出力部分で計算結果を信号バスに返す仕様としている（Fig. 11）。入力→実行→出力の実行スケジュールは，単一の計算コアしか持たない計算機器においても有効となるため，直列実行と並列実行の間で，計算結果の等価性を保つことができる。言いかえれば，ユーザの利用環境によって検証結果が異なることを防止している。

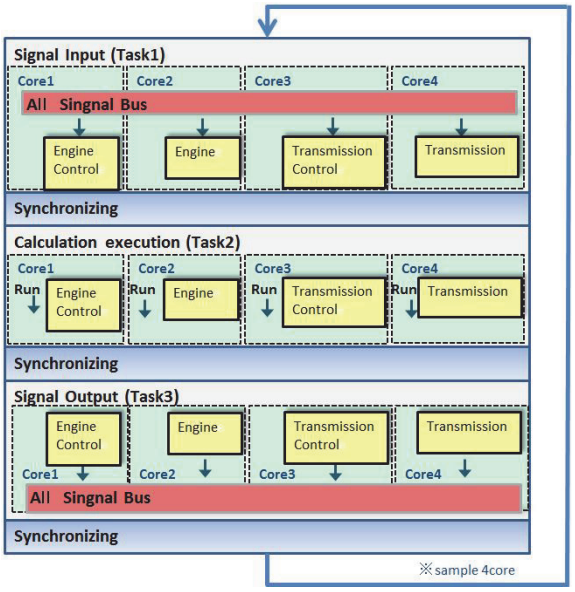


Fig. 11　Framework of Parallel Computing

(5) 自動レポートシステム

制御モデルは複数の技術者によって並行開発されているため，各技術者が全体の影響を全て把握することは困難である。そこで，基本的な走行条件については，高速 MILS 環境での実行結果に対する，自動レポート機能を構築することで PASS/FAIL を自動判定して品質確認をサポートしている。

(6) 高速 MILS 環境の機能項目

高速 MILS 環境では，机上での検証項目拡大を図るために以下に示す検証機能を開発した。

a.全パラメータのキャリブレーション機能

b.自動走行機能

c.各種センサやスイッチをフェールさせる機能　など

5. 机上検証システムの適用事例

5.1　高速 MILS による検証

高速 MILS は，SKYACTIV-G の制御モデルを中心に，幅広い制御開発領域に適用を図ってきた。具体的には，「駆動力制御」，「DSC とのブレーキ協調制御」，「i-ELOOP（減速エネルギー回生システム）制御」，「クルーズコントロール制御」等である。実際の適用事例を 2 つ紹介する。

（事例 1）　駆動力制御

走行性能と燃費のために常に最適な駆動力を発生させるには，パワートレイン全体を制御する必要がある。そのため，エンジン制御と TCM 間で通信を行い，発生トルクとギヤ比を常に最適な状態に制御しなければならない。そこで，高速 MILS に搭載されたエンジン制御と TCM の通信機能を活用し，お互いの基本動作を検証した。更に実車よりも高速に検証できる機能を活用することで，机上でさまざまな走行パターンを再現し，駆動力制御の初期品質向上を図った。

（事例 2）　クルーズコントロール制御

高速 MILS 環境の GUI（Fig. 12）を操作することで，実車相当のクルーズコントロールスイッチ操作が再現可能となった。

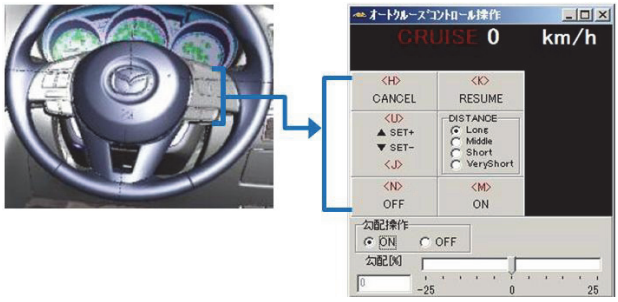


Fig. 12　High Speed MILS GUI in Auto Cruse Switch

実際にドライバ指示（GUI 入力）によって設定車速が操作できる。オートクルーズ ON 状態で，「SET＋」スイッチを押しこむとオートクルーズの設定速度が次第に上がっていく。そして，道路の勾配変化が発生しても，制御が働き，目標車速を維持していることが確認できる（Fig. 13）。また，さまざまなテストケースを検証することによって，机上でオートクルーズ制御の基本品質向上を図ることができた。

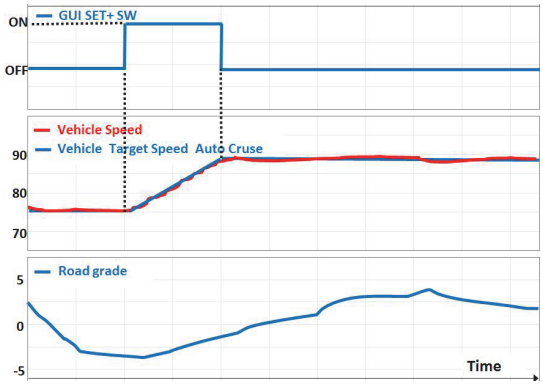


Fig. 13　Test Results of Auto Cruse Control

6. 机上検証システムの改善効果

V 字左バンクにおいて，静的解析システムの自動化を実現し，更に，高速 MILS 環境の実現によって短時間で制御モデルの動作検証が可能となった。また，検証事例のように机上検証領域を拡大させることで，制御開発において，品質確保と短期開発を両立することができた（Fig. 14）。

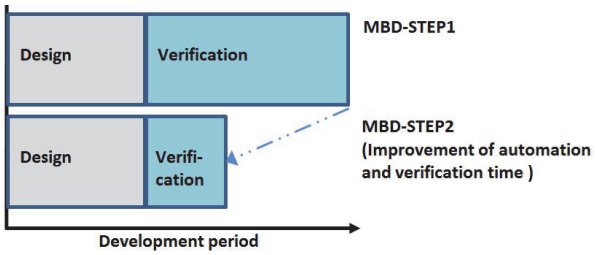


Fig. 14　Improvement of Verification Time

7. おわりに

以上のように，制御開発の V 字プロセスを手戻りなく進めるために，検証システムを充実させ，机上開発の領域を拡大してきた。

また，この机上検証システムを活用することで，制御開発 V 字プロセスの右バンクに移る前段階で，高品質の制御開発を実現できた。今後も「サステイナブル“Zoom-Zoom”」を実現していくパワートレインの進化と技術開発において，MBD を更に発展させ，制御の品質確保と短期開発を両立しながら更なる効率化を図っていく。

参考文献

(1)　江角ほか:SKYACTIV-G 制御技術の紹介，マツダ技報，No.29　pp.36-40（2011）

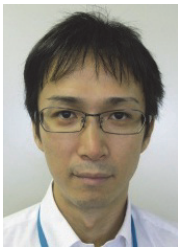
(2)　寺岡ほか:エンジンの制御系仮想開発環境と新型エンジン開発への適用，自技会論文集 No.20124464 Vol.43（2012）

■著　者■


臼田 浩平


小森 賢


三吉 拓郎


寺岡 陽一


本城 創


久禮 晋一

特集：モデルベース開発

11 SKYACTIV エンジンの性能開発に活用した MBD

MBD Applied for the Development of SKYACTIV Engines

横畑　英明*1　Hideaki Yokohata
佐藤　圭峰*2　Kiyotaka Sato
和田　好隆*3　Yoshitaka Wada
田所　正*4　Tadashi Tadokoro
小林　謙太*5　Kenta Kobayashi
植木　義治*6　Yoshiharu Ueki

要約

SKYACTIV エンジン（SKYACTIV-G 及び SKYACTIV-D）は，従来に比べてはるかに高度に燃焼をコントロールして出力，燃費ともに高い性能を実現した(1)(2)。この開発は従来型の実験中心の手法では困難であり，実験と計算モデルをうまく組み合わせた「モデルベース開発」（MBD：Model Based Development）への変革が不可欠であった。マツダでは構想設計，詳細設計の各段階で実用的に使えるモデルの開発を進め，MBD を活用して SKYACTIV エンジンを世の中に送り出すことができた。

Summary

SKYACTIV engines (SKYACTIV-G and SKYACTIV-D) achieve high power and low fuel consumption by controlling a far more complex combustion than in conventional engines. The conventional development approach, which depends on experimental results, couldn't realize such a sophisticated technology. For this reason such approach needed to be replaced with Model Based Development (MBD) applying both experiment results and CAE results. Mazda improved the accuracy and efficiency of CAE process to create an environment for MBD before being able to implement MBD in conceptual and detailed designs. Consequently, Mazda was successfully able to bring SKYACTIV engines into the world.

1. はじめに

SKYACTIV エンジンの目指した出力・燃費性能は，従来の延長線上の開発手法では実現が困難であった。今までになく複雑な開発をやりきるために，マツダでは多くのCAE（Computer Aided Engineering）の解析技術を開発し，CAEツールつまりモデルと実験をうまく活用したMBDでエンジン諸元や細かな形状を決定した。本稿ではこうしたMBD技術について概要を説明する。

2. エンジン性能予測における MBD の必要性

エンジンの設計は，車両としての性能や搭載性も考慮して吸排気管長など大きな諸元を決定する企画・構想設計段階から，ピストン形状など細かい部品の形状を決定する詳細設計段階に至るまで，多くの検討が必要である。Fig. 1にエンジン開発のV字プロセスを示すが，左バンクでの設計により図面が完成した後，右バンクで実機評価を行う。実機評価で目標が未達成であると左バンクに戻らざるを得ず，開発期間，開発工数ともに大きな損失になる。特にSKYACTIV エンジンは，低速域から高速域まで高い出力性能と燃費性能を達成する必要があり，従来よりも困難な開発が予測された。そのため，左バンクの開発を充実させることが重要なポイントであり，従来のような実験中心の試行錯誤的な開発から，モデルを使ってメカニズムをきちんと把握した上で多くの諸元の最適化を机上で行う開発へと変革を進めた。

具体的には吸排気系長さといった大きな諸元を決める構想設計段階では，吸排気管を長さと径で表現する1次元サイクルシミュレーション（1Dモデル）もしくは燃焼室を容積

*1，3～6　エンジン性能開発部
Engine Performance Development Dept.
*2　技術研究所
Technical Research Center

変化で表現する0次元燃焼シミュレーション（0Dモデル）を用いた。また，ピストンなど細かい形状を決定する詳細設計段階では3次元シミュレーション（3Dモデル）を用いた（Fig. 1）。更にそれらの効率的活用のため解析実行の自動化システム[3]を開発し，机上での検討数を大幅に増やした。

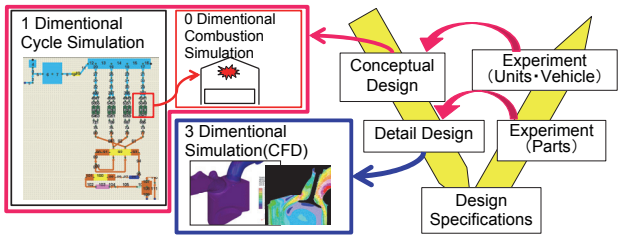


Fig. 1　V-process of Engine Development

例えばSKYACTIV-Dでは，高価なNOx後処理装置なしにEuro6の自動車排ガス（EM）規制をクリアし，同時に高トルク，低燃費を実現している。こうした性能はエンジン回転数，負荷に応じてターボチャージャやEGR（Exhaust Gas Recirculation）バルブなどの切り替えを細かく行い，燃料の噴射パターンを大幅に変えて，空気量，不活性ガス量，燃料量を常に最適にすることで実現した。SKYACTIV-Dのように複雑なエンジンで性能を出し切るためには，開発初期から各種性能を満足させる燃焼を考えながら，ターボチャージャの選定や吸排気管，燃焼室の諸元設定を行うことが極めて重要である。この膨大な数の検討を実機エンジンの試作だけに頼ることは困難であるため，構想設計段階でのMBDは重要である。

構想設計段階のあとは詳細設計段階になる。この場合もMBDが高性能化の鍵を握る。例えばSKYACTIV-Gは，従来にない高圧縮比を採用したガソリン直噴エンジン（DI：Direct Injection）であり，高出力・低燃費を生み出すポテンシャルを持つ。しかし，それだけに開発が難しい。例えば燃料を筒内に噴射する際，少しでも筒内流動と燃料噴射パターン，燃焼室形状の組み合わせが適切でないと，燃焼が悪化して性能が大幅に低下する。つまり，高性能を生み出すためには，詳細形状の最適化検討が必須であり，机上で多くの仮想実験を行う必要がある。

このように，SKYACTIVエンジンの開発においては，構想設計段階でも詳細設計段階でも，MBDが重要なポイントであった。机上での検討を充実させるには実用的な予測精度が必要不可欠であるが，当初は十分なレベルになかった。そのため，最初に予測技術の精度を大幅に高めるための開発を行った。並行して，多くの検討を行うために解析効率を向上させる開発も行った。こうして確立した解析技術と実験を組み合わせることでエンジンの内部で起きている現象を解明し，その知見を活用して諸元，形状を決めてきた。これ以降，各段階について詳細に述べる。

3. 構想設計段階でのモデルの活用

エンジンの出力・燃費・EMは，筒内の温度，圧力，不活性ガス量などに起因する着火性や燃焼速度と，吸入する空気量で多くの部分が決まる。これらは，エンジンの吸排気管諸元，圧縮比，バルブタイミングなどに大きく影響を受ける。こうした諸元を構想設計段階に机上で検討するために，0Dもしくは1Dモデルが一般的によく活用される。3Dモデルに比べて計算時間が短く多くの計算が可能なことから，大きな諸元決定には欠かせないモデルである。従来からこうした手法は活用されていたが，SKYACTIV　エンジンの開発においては，高精度な検討が必要なため，従来モデルをそのまま使うことはできなかった。

例えばディーゼル燃焼の場合，燃料の着火や燃焼速度は，燃焼室内の温度，圧力，燃料の噴霧形態や筒内流動により大きく左右される。こうした燃焼の検討を行う場合，廣安らが開発したHIDECS[4]という燃焼を計算する0Dモデルを活用することができる。0D計算でありながら，噴霧を疑似的に3Dで解くことができるため，燃焼計算には有効である。SKYACTIV-Dでは，出力・燃費・EMや音の両立を図るため，燃料を1サイクル中に一度に噴く一括噴射に加え，パイロット噴射，遠隔パイロット噴射，アフタ噴射を組み合わせて使う（Fig. 2）。

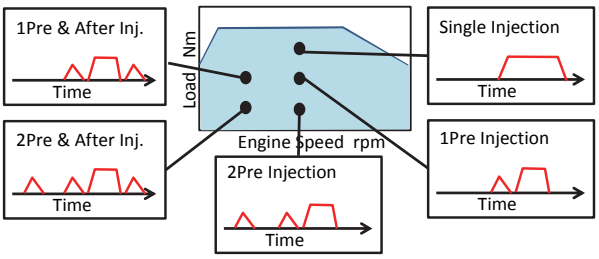


Fig. 2　Injection Concept of SKYACTIV-D

しかし HIDECS は一括噴射を対象に作られているため，こうした複雑な燃料噴射パターンに適用するには精度が十分ではなかった。例えばパイロット噴射では，噴射した燃料が圧縮されて化学反応が急速に進み，実際よりも急激な圧力上昇になるという予測精度の問題が起きていた（Fig. 5(a)）。こうした予測精度悪化は，燃焼という現象が複雑な化学反応の組み合わせであることに起因する。例えば Fig. 3 に，ある温度，圧力における燃料の着火遅れ時間を示す τ-map と呼ばれる燃焼特性を示す。筒内温度圧力履歴の一括噴射のラインとパイロット噴射が通るラインを比べると，後者では温度が上昇すると着火が遅れる，という負の温度依存領域を通る。こうした現象は従来の HIDECS に組み込まれた簡易な化学式を使った予測では再現できなかった。そこで，燃焼過程を細かく再現する化学反応速度論に基づく化学反応解析（以下，詳細化学反応モデル）を使った着火遅れ時間予測技術を新

たに開発することで複雑な燃焼パターンによる燃焼予測に対応した[5]。

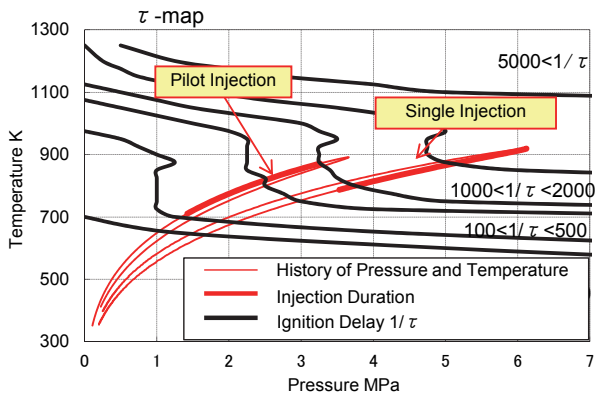


Fig. 3　Ignition Delay Map (τ-map)

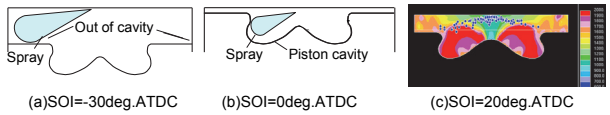


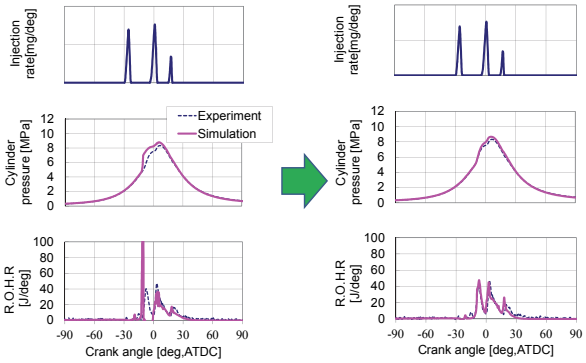
Fig. 4　Schematic (a) (b) and CAE (c) of the Spray Injected to Inside and Outside of Piston Cavity Area

こうした詳細化学反応を用いた改良に加え，0Dで表現の難しい形状の影響も検討を可能にした。SKYACTIV-Dは，遠隔パイロット噴射やアフタ噴射を採用し，燃料を噴射する時期が幅広い。例えばFig. 4(b)の噴射開始時期（SOI：Start of Ignition）＝0deg.ATDCの場合はピストンキャビティ内に燃料を噴射するが，Fig. 4(a)（SOI＝-30deg.ATDC）ではキャビティ外に燃料を噴くことになり，Fig. 4(c)（SOI＝20deg.ATDC）では燃焼中の熱いガスの中に燃料を噴くことになる。これらを0Dモデルで考慮するため，まず3Dモデル，具体的には空気の流動や噴霧を計算する流れ解析（CFD：Computational Fluid Dynamics）を活用し，現象のメカニズムを解明した。その上で，代表的な回転数・負荷・燃料噴射パターンで3Dモデルの計算を行ってその結果を関数化し，更に0Dモデルに組み込むことで精度改善を行った 。

こうした結果のうち，パイロット噴射で精度改善を行った例をFig. 5(b)に示す。改良前の予測（Fig. 5(a)）ではパイロット噴射を行った場合に圧縮上死点前に急激に燃焼が立ち上がっているが，改良後はそうした反応は起きず，大幅な精度改善が実現できた。こうした燃焼予測の精度向上により，燃料噴射パターンの違いを燃焼の違いとして正確に表現することが可能になった。

上述のように燃焼の予測精度は大幅に改善できたが，実際にエンジンを車両に載せて走る場合には，ターボチャージャやEGRバルブ切り替えによる導入空気量の遅れや，燃料噴射パターンの組み合わせにより，希薄状態や過濃状態になりやすく，失火やEMの悪化を招きやすい。つまり，吸排気系の制御と燃焼を切り離して考えることはできない。そこで，上述の詳細化学反応燃焼モデルをマツダ内製の1Dモデル GSP[6]に組み込んで燃焼と同時に吸排気計算を可能にした。更に，マツダ内製の車両モデルPT-VTES[7]及び制御モデルと組み合わせ，車重やギヤ比，制御などを考慮した上で燃焼挙動を検討する解析技術を開発し，吸排気・燃焼系諸元の検討を行うことが可能になった[8]（Fig. 6）。Fig. 7にEMモードを走行した時の予測・実測結果を示すが，よく一致していることがわかる。

従来は実車での評価に頼らざるを得なかった過渡運転時の車の挙動も机上で検討が可能になり，実機と机上の組み合わせで諸元の最適化を図り，高品質な性能を実現できた。



(a) Previous model　　(b) Improved model

Fig. 5　Comparison of Heat Release Rate and Cylinder Pressure between Experimental and Simulated Result

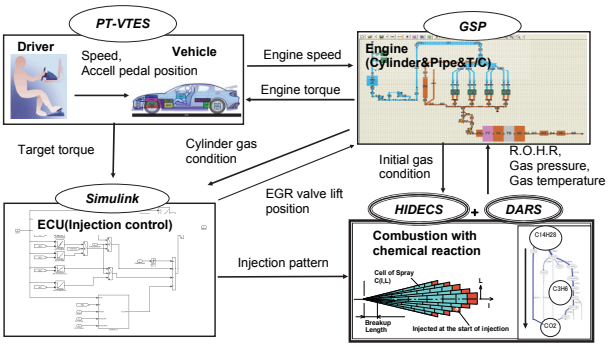


Fig. 6　Schematic of Total Transient Analysis System

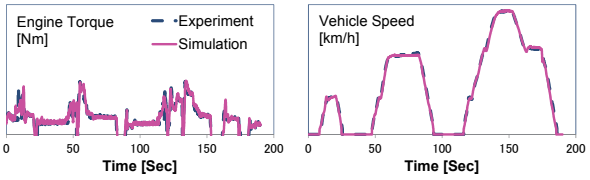


Fig. 7　Comparison of Transient Analysis Result and Experimental Result

4. 詳細設計段階でのモデルの活用

一般的に燃焼室の詳細な形状はエンジンの性能に大きく影響するが，特に高性能を狙うSKYACTIVエンジンの場合，

影響は大きい。例えばSKYACTIV-Gは燃焼室内に直接燃料を噴射するDIエンジンであり，従来にない高圧縮比を実現するため，Fig. 8(b)に示す独自のピストン形状を採用している。従来型のポート噴射エンジンでは燃焼室内の混合気分布はほぼ均質になるのに比べ，DIは不均質性が高い。この不均質性はEM悪化につながるほか，火花点火時期における点火プラグ付近の混合気が薄ければ着火性が悪化し，燃焼安定性が極端に悪化するため，設計が極めて難しい。例えばFig. 11(a)は燃料噴射時期と燃焼安定性の関係を示したものであるが，少し燃料噴射時期が変わると極端に燃焼安定性が悪化することがわかる。商品性を確保するために，さまざまな条件においても問題なく運転できるようロバストな燃焼特性にする必要があり，そのためには形状の最適化が必要である。

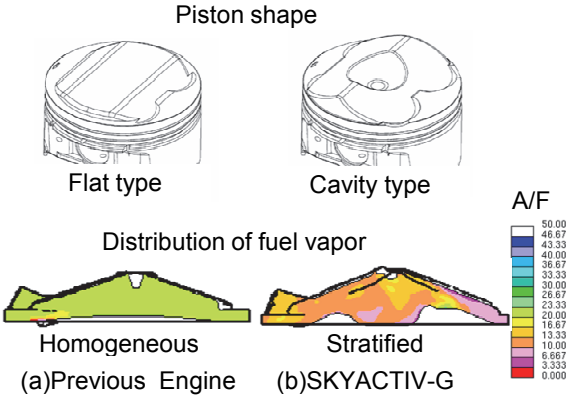


Fig. 8　Combustion Chamber of SKYACTIV-G

従来の形状検討は3Dモデルの精度不足のために，実験による試行錯誤を行うしかなかった。SKYACTIVエンジンでは，こうした状況をブレークスルーするために，モデルの精度を大幅に向上させ，メカニズムを把握して形状を決めてきた。燃料噴霧解析を事例に説明する。

筒内の現象は大変複雑であるため，物理現象を全て理論式で再現することは難しく，乱流モデルに代表される物理モデルを使った簡易化をせざるを得ない。こうした現状の3Dモデルでは，実機計測結果を手本としてパラメータチューニングを行って精度を向上させることが基本である。その際，時々刻々変化する燃焼室内に燃料を噴射する，という複雑さを緩和するため，まず定積の容器でインジェクタの基礎計測を行う。その後噴霧モデルパラメータの同定を行い，インジェクタの特性を精度良く再現する。この場合，一般的には，常温・常圧の定容器にインジェクタをセットして燃料を噴射し，それを高速度カメラで光学撮影を行い，噴霧先端到達距離や噴霧の粒径を計測する。しかし，SKYACTIV-Gでは燃料を吸気行程から圧縮行程までさまざまなタイミングで噴射して燃焼をコントロールするため，例えば圧縮行程での噴射では高温・高圧下での燃料噴射となる。こうした条件の場合，噴射された燃料は早期に蒸発するが，従来の光学撮影では蒸発していない液滴と燃料蒸気を同時に計測することが不可能なため蒸気の挙動が不明で，3Dモデルの精度は大幅に低下する。そのため，広島大学との共同研究で，高温・高圧下において蒸気相と液相を分離して計測する手法の開発から始めた。その結果，高圧容器とLAS法（Laser Absorption Scattering technique：2波長レーザ吸収散乱法）[9]（Fig. 9）という手法により計測が可能になり，常温・常圧から高温・高圧まで各種条件下で噴霧挙動を正確に計測できるようになった。

こうした計測が可能になったことから，モデルの精度も大幅に向上できた。例えば，Fig. 10(b)に予測精度改善前と改善後の結果の比較を示す。改善前では液相の挙動は実測と合っているが，蒸気相の挙動が大きく異なる。改善後は液相・蒸気相ともによく一致していることがわかる。

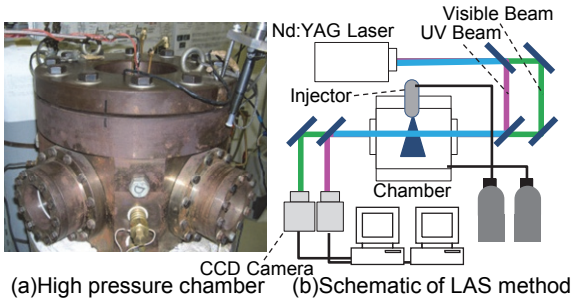


Fig. 9　High Pressure Chamber and LAS Method

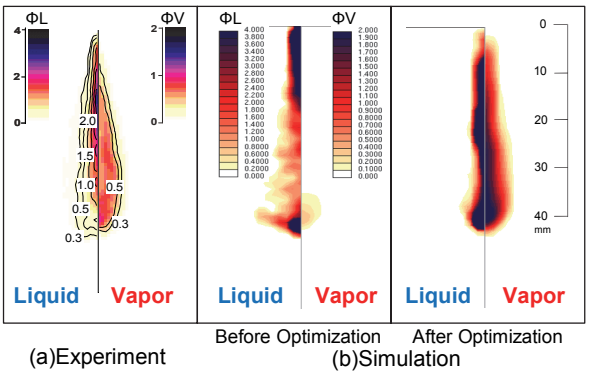


Fig. 10　Liquid and Vapor Phase Equivalence Ratio Distribution (Comparison of Experiment and Simulate Result)

これらの基礎実験で精度改善を行ったモデルをエンジン性能予測に活かした事例をFig. 11に示す。噴霧レイアウトの異なったTypeAとTypeBというインジェクタでの燃焼安定性の実測値と予測値の比較結果であるが，改善後は実機の結果と解析結果の傾向が良い一致を示し，相対比較が十分に可能なことがわかる。SKYACTIVエンジンの開発においては，こうして精度を大幅に向上させた解析技術を用い，筒内流動・噴霧挙動に大きな影響を及ぼすポート形状，ピストン形状，インジェクタの噴孔レイアウトなどを決めていった。

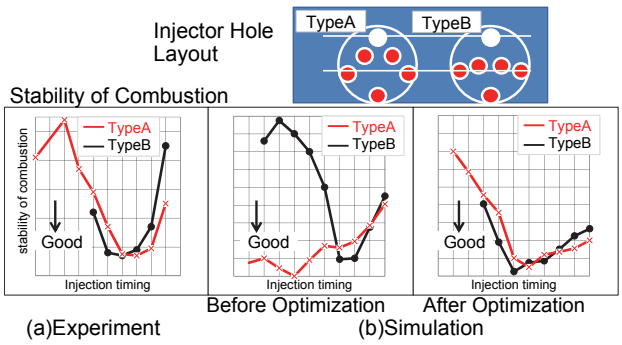


Fig. 11　Difference of Stability of Combustion between Injector Type A and Type B (Effect of Nozzle Holes Layout)

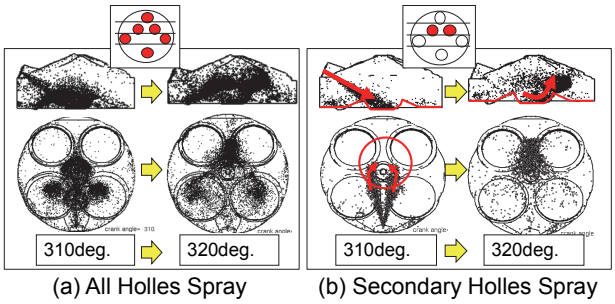


Fig. 12　Spray Droplet Distribution

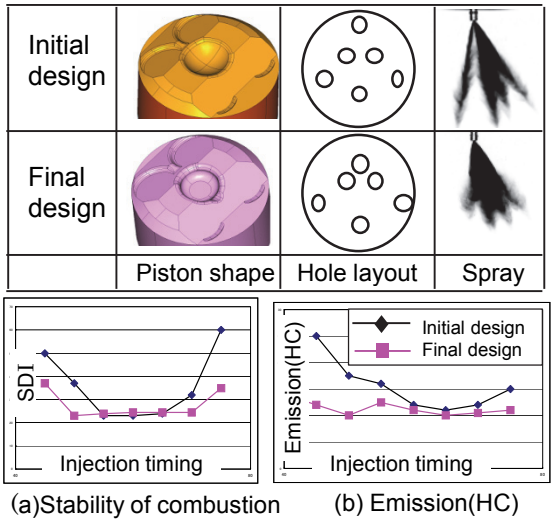


Fig. 13　Improvement in Robustness by the Shape Optimization

ただし，インジェクタの噴霧レイアウトとピストン形状だけでも，組み合わせは無限にあるため，最適値を見つけることは難しい。そのためインジェクタの噴孔の1つ1つの役割を解明しながら開発を進めた。実機の計測では各噴孔からの噴霧の挙動を切り分けて考えることは困難であるが，モデルなら比較的容易である。例えばFig. 12(a)に全ての噴孔からの噴霧結果を表示したが，これでは各噴孔の役割がわからない。Fig. 12(b)に2段目から噴射された燃料液滴だけを表示させたが，ピストンキャビティ部から点火プラグ付近に向かって燃料粒子が回り込み，プラグに可燃混合気を形成させる役割を持つことがわかる。このように，1つ1つの噴霧の持つ役割を明確にしながら，噴霧レイアウト・ピストン形状を決めていった。

また，市場におけるさまざまな運転条件や，経年劣化，製造上のわずかなバラツキにより，性能が低下することは防がなければならない。そこで，モデルを用いてロバスト性を確保可能な形状を探っていった。例えばインジェクタのわずかな製造バラツキが噴霧挙動に与える影響を網羅的に解析し，バラツキに強い噴霧レイアウトを決めていった。こうした検討により，開発当初に比べ性能が向上し，ロバスト性確保可能な形状を見つけることができた（Fig. 13）。

5. MBD を支える効率化技術

極めて複雑な燃焼で高性能を達成したSKYACTIVエンジンの性能開発では，従来にない膨大な量の解析実行が必須であった。複雑な現象を扱う3Dモデルの実行は，スーパーコンピュータを活用することもあり，CFDの知識の他にシステムの知識が必要である。それに加えて，モデルの作成，解析実行，結果処理の操作自体が難しい。更に，解析モデルの作成や条件設定にはさまざまなノウハウが必要である。こうした難しさから，精度の良い結果を出すためには長年の経験を積む必要があり，解析実行が可能なメンバは限られる。これでは十分な検討ができないため，解析の大幅な効率化を図る必要があった。そこで市販のCFDソルバを使って精度を確保した上で，マツダの解析業務を対象にして操作を簡易化し，更に多くの解析ノウハウを織り込んだ設計者向けCFDシステム（PT-ECS：Powertrain Easy CFD System）を独自に開発した[3]（Fig. 14）。このシステムはWindows PC上からスーパーコンピュータの存在自体を意識せず，解析ソフトの複雑な操作なしにCFD計算用データを作成，実行して結果を見ることができ，操作方法の習得時間はほとんど必要ない。解析ノウハウを組み込んでいるため，経験が浅くてもベテランと同様な結果を出すことができる。このシステムは2002年から量産開発に適用して，3Dモデルを使った開発を効率化している。

従来のPT-ECSでは一般的な定常流及び非定常流の解析を対象にしていたが，SKYACTIVエンジンの開発にあたり，ピストンの動きなどを表現する移動メッシュを伴う筒内流動や，噴霧，燃焼解析にも活用できるよう機能を拡張した。また，自動実行の機能も大幅に強化して，従来に比べて約10%程度という少工数で解析が実行できるようになった[10]。例えば前述の噴霧挙動を液相・蒸気相ともに精度良く予測するためには，分裂計算など9つのパラメータの同定が必要であり（Fig. 15），従来は結果算出に200日以上かかっていた。こうした検討が，現在はPT-ECSを使い約5日で完了する。この効率化システムがあって初めて膨大な量の計算実

行が可能になり，モデルがエンジン開発の中に完全に定着して多くの諸元，形状を机上で決めることができたといえる。

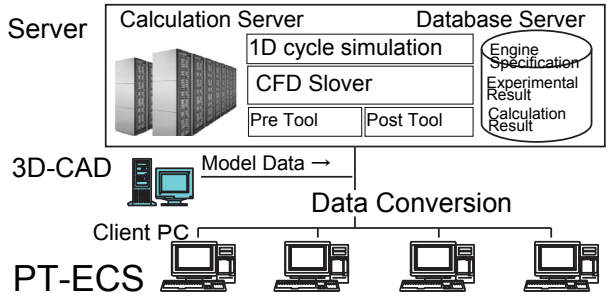


Fig.14　PT-ECS System Constitution

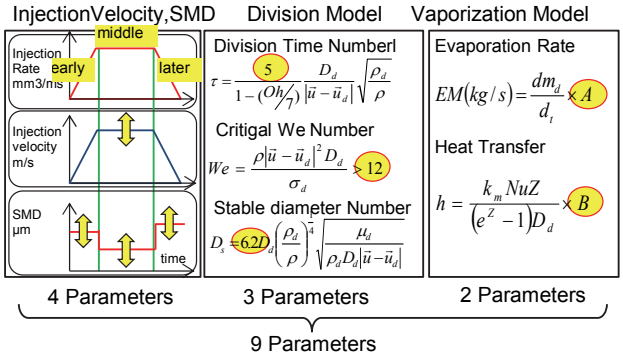


Fig. 15　Spray Optimizational Parameter

6. おわりに

SKYACTIVエンジンの出力・燃費性能は，従来型の開発方法では実現が困難であったため，モデルの予測精度を大幅に向上させ，自動化技術により効率を大幅に改善した。こうして実用性を増したモデルと実験を組み合わせたMBDを構築することで，燃焼のメカニズムを把握して諸元，形状を最適化し，高性能なエンジンを生み出すことができた。

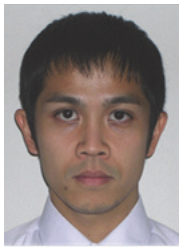
マツダでは20年以上前からモデルの開発を行ってきたが，実際のエンジン開発に十分貢献できない時代が長く続いた。しかし，地道な基礎実験の積み重ねと高度なモデルの開発で予測精度を大幅に向上させることで，SKYACTIVエンジンの開発にとって，モデルがなくてはならないものになった。これらは，紙面の都合上共著に載せられなかった多くの解析メンバ，設計・実験研究メンバ，システム開発メンバ，また，広島大学をはじめとする多くの大学及びソフトウェアメーカが力を合わせて技術開発を進めてきた結果である。今後は更なる高性能エンジンの開発に向け，力を合わせて開発を続けていく予定である。

参考文献

(1)　富澤ほか：新型デミオのエンジン技術，マツダ技報，No.29，pp.8-13（2011）
(2)　森永ほか：SKYACTIV-D　エンジンの紹介，マツダ技報，No.30，pp.9-13（2012）
(3)　横畑ほか：設計者向けCFDシステム（PT-ECS）の開発，マツダ技報，No.21，pp.180-185（2003）
(4)　廣安ほか：“直接噴射式ディーゼル機関の燃焼モデルと性能予測：第1報，燃焼モデル”，日本機械学會論文集．B 編，No.48-432，pp.1606-1613（1982）
(5)　田所ほか：“0次元現象論モデルを用いたディーゼル燃焼予測技術の構築”，第 21 回内燃機関シンポジウム，No.B3-5，pp.321-326（2010）
(6)　大西ほか：“コンピュータシミュレーションによる吸排気性能予測技術の開発”，マツダ技報 1988，No.6，pp.84-93（1988）
(7)　平松ほか：パワートレイン構想設計の Virtual Testing 技術の紹介，マツダ技報，No.22，pp.50-55（2004）
(8)　小林ほか：“詳細燃焼反応を考慮した DEsim による車両過渡性能の予測”，第 23 回内燃機関シンポジウム，No.A1-12（2012）
(9)　Yamakawa, M. et al., Quantitative Measurement of Liquid and Vapor Phase Concentration Distributions in a D.I. Gasoline Spray by the Laser Absorption Scattering (LAS) Technique, SAE Paper, 2002-01-1644, pp.1-13（2002）
(10)　佐藤ほか：DISI エンジン噴霧モデルの最適化手法の開発，マツダ技報，No.25，pp.134-139（2007）

■著　者■


横畑 英明


佐藤 圭峰


和田 好隆


田所 正


小林 謙太


植木 義治

特集：モデルベース開発

12 モデルベースによる SKYACTIV-DRIVE の NVH 開発

Model Based NVH Development of SKYACTIV-DRIVE

工藤 健志*1　田中 和宏*2　佐野 徹*3
Kenji Kudo　Kazuhiro Tanaka　Toru Sano

要約

マツダは技術開発の長期ビジョン「サステイナブル“Zoom-Zoom”宣言」の中で，「走る歓び」と「優れた環境・安全性能」を高次元で両立することを宣言している。その実現のために SKYACTIV-DRIVE は，理想の変速機が果たすべき使命として定義した「低燃費」「ダイレクト感」「滑らかな変速」「スムーズで力強い発進」を追求した新型自動変速機である。

上記使命を達成するためには全域ロックアップや軽量化が有効な手段であるが，従来の技術では，こもり音／振動やギヤノイズなどの NVH 性能が障害となっていた。SKYACTIV-DRIVE の開発では，一括企画に基づく一括開発を行うと共に，モデルベースにより効率的に開発を行うことで，全域ロックアップ，軽量化を実現し，燃費・走り性能と NVH 性能とを高次元で両立させた。

Summary

Mazda’s long-term vision of technology development, "Sustainable Zoom-Zoom", declares achievement of both driving pleasure and environmental performance. The newly developed automatic transmission, SKYACTIV-DRIVE, achieves "low fuel consumption", "direct feel", "smooth shift of transmission" and "smooth and powerful start" of an ideal transmission.

The most effective ways to achieve the above are full range lockup and weight reduction, but they cause NVH issues such as booming noise/vibrations and gear noise. For the SKYACTIV-DRIVE, bundled development based on the bundled planning as well as effective model based development method were performed to realize both the full range lockup and weight reduction, resulted in the improvement in fuel economy, driving performance and NVH performance.

1. はじめに

マツダは「走る歓び」と「優れた環境・安全性能」の高次元での両立を実現した革新的な新世代技術“SKYACTIV TECHNOLOGY”を採用した新世代商品群を一括開発した。その中の新型自動変速機（AT）“SKYACTIV-DRIVE”(1)(2)は，従来型ATから最大7%の燃費改善を可能とした上で，総重量・サイズ共に大幅に低減した。更に，発進の容易さを維持しながら，手動変速機（MT）並みのダイレクトドライブフィールを実現した。これらの背景には背反するNVH性能の改善がある。本稿ではモデルベースによってどのようにして燃費・走り性能とNVH性能をハイバランスで成立させたか紹介する。

2. SKYACTIV-DRIVE コンセプト

SKYACTIV-DRIVEの開発にあたり，ATの理想を再定義した。理想のATが果たすべき使命は以下の４つと考え，その実現を目指した。

(1) 低燃費への貢献
(2) MTのようなダイレクト感とクイックシフト
(3) 滑らかな変速
(4) スムーズで力強い発進性能

低燃費の実現においては，動力伝達ロスの低減とユニットの軽量化に注力した。動力伝達ロスに関してはトルクコンバータのロスが大きいことに着目し，走行中の滑りをなくす全域ロックアップを，軽量化に関しては背反するNV性

*1，2　エンジン性能開発部
Engine Performance Development Dept.
*3　NVH 性能・CAE 技術開発部
NVH & CAE Technology Development Dept.

能の根本改善による構造体の大幅な質量低減をそれぞれ目指した。ダイレクト感，滑らかな変速についてはロックアップクラッチ及び変速クラッチを高精度で応答の良い，緻密な制御ができるようにしたいと考えた。スムーズで力強い発進性能についてはトルクコンバータの使用を発進時のみにできないかと考えた。

これら理想実現のためにはロックアップの拡大がキーイネーブラとなるが，ロックアップの拡大は，こもり音／振動やショックなどのNVH性能の悪化を伴うためにこの克服が必要となる。なお，ATのロックアップ状態はトルクコンバータを作動させない直結状態であるため，振動構造上はMTと同等となるが，ATは一般にMTよりも厳しいNVH性能が求められる。これは，MTの場合はお客様が走行段位を自分の意志で選択するため，エンジンの運転領域変化（負荷・回転数の変化）に伴うNVH性能の変化にはある程度納得感が得られる一方，ATは段位などの運転状態がお客様の意図によらず変化するためである。つまりATでのロックアップの拡大はMTと同じ振動構造で，より厳しいNVH目標を達成しなければならないという非常にハードルの高い開発となる。

軽量化に関してもトランスミッション開発の永遠の課題であるギヤノイズに代表されるNV性能と背反関係にある。構造の適正化などによる設計は従来からすでに追求されており，多段化の進む中，これまで通りの開発プロセス及び設計技術では大幅な軽量化は困難であるため，開発手法の抜本的な改革から取り組んだ。

3. 開発の考え方

マツダのSKYACTIV技術を搭載した商品群は，パワートレイン（PT）から車両に及ぶすべての領域で同時刷新開発を行った。限られたリソースで効率的に開発するために，マツダでは一括企画に基づく一括開発を行った。これはエンジン，車種，仕向地などの全ラインアップを企画段階から見据え，全体最適となる仕様を一括して決めることで開発効率を向上させるものである。そのために，単に部品を共通化するだけではなく，共通化できない部品であっても，共通の設計コンセプト，共通の特性，共通の生産手法などを目指して開発した。

一括企画の考えは，NVH開発にも適用した。FMEA（Failure Mode & Effect Analysis）をベースに開発初期段階で設計すべきNVH性能と関連する部品・起振力・振動現象を洗い出し，背反性能の見える化などを実施した。その上で全ラインアップを見据え，NVH性能の骨格となるシステム・部品の設計を企画段階から行った。

その開発方法の事例を，前述のロックアップ拡大の弊害である“こもり音／振動”と，軽量化の弊害である“ギヤノイズ”について紹介する。

4. モデルベースによる機能配分

性能目標を達成するための機能を，各システム，更に下位層の各コンポーネントへ定量目標として配分することを機能配分と呼んでおり，NVH性能においても，低周波の振動から，高周波のギヤノイズまで，一括開発構想に基づいた機能配分を実施している。

このNVH性能の機能配分をモデルベースで効率的に実践するために，実験部門ではNVHの起振力となるエンジン燃焼圧をはじめ，ATやドライブシャフトの振動伝達特性，そして車体の音響感度特性などを分析し，現象解明する一方で，解析部門ではそれをCAEモデルとして再現させると共に，モデルのアセンブリ，計算などの自動化を行い，開発技術として迅速に駆使できるツールを構築した。

また，機能配分する上では，性能寄与度が高いコンポーネントで重点的に対策することが効果的かつ効率的であることから，入力伝達経路の寄与度の調査を，既存車両の実験解析で徹底的に実施した。これをベースに，新世代商品群で新規設計となるエンジンの起振力や制御，PT構造，車両構造等の変化を，モデルで予測することで，重点対策すべきコンポーネントへ確度の高い目標を設定した。

4.1　こもり音／振動の機能配分

車両性能のこもり音／振動目標を，PTの目標に機能配分するために，実験による伝達経路解析（TPA:Transfer Path Analysis）を実施した。車両とPTが結合される箇所であるエンジンマウント，排気系ハンガマウント，サスペンションブッシュの振動入力の寄与度を求め，その寄与度に応じた改善目標を設定した（Fig. 1）。特に寄与度の高いサスペンションブッシュの入力に対しては，それと結合するドライブシャフトのトルク変動入力へ目標値を機能配分したが，この部分に関しては必要となる改善代が大きいため，車体側の音響感度も改善する配分を行った。

PT，車両の双方でこの機能目標を達成するよう課題解決に向け取り組んだ。

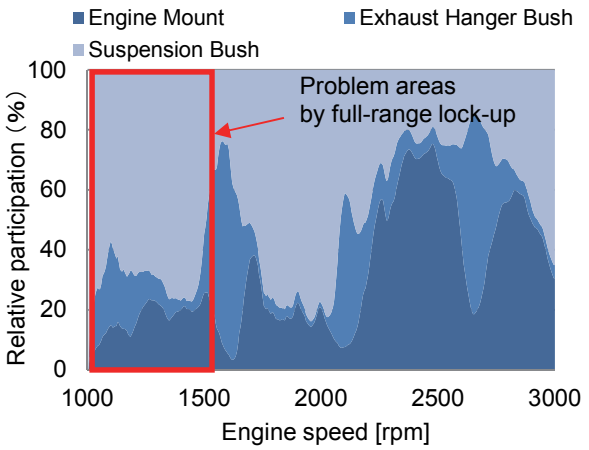


Fig. 1　Contribution of the Body Input by TPA (Transfer Path Analysis)

4.2　ギヤノイズの機能配分

ギヤノイズに関しては，前述のように厳しい軽量化ニーズに加え，静粛性改善，すなわちギヤノイズ自体の改善ニーズがあった。このため，こもり音／振動性能と同様に伝達経路解析を用いて，ユニットの改善すべき個所を特定し，その改善に注力した。ギヤノイズの場合は，主な振動入力点として，マウントブラケット，そして放射音入力としてケース表面を改善個所と特定した。

また，そのユニット目標に対して，ユニット内でも機能配分を行った。起振力となるギヤの噛み合い伝達誤差（TE: Transmission Error）とその噛み合い点からエンジンマウントブラケットやケース表面までの振動伝達特性の目標を定量設定し，その改善に取り組んだ。

5. こもり音／振動改善

5.1　駆動系ねじり振動メカニズム

こもり音／振動の寄与度が高いドライブシャフトのトルク変動は，エンジンのトルク変動と駆動系ねじり振動特性によって決まる。ここで，エンジンのトルク変動はエンジン諸元に依存し，その低減は困難なため，目標の配分はせず，これを条件として扱い，駆動系ねじり振動特性の改善に取り組んだ。駆動系ねじり振動特性は，Fig. 2に示すクランクシャフトから車体までのねじりバネマス系でモデル化できる。ATの主要なねじり振動の共振点は，エンジンが4気筒の場合，エンジンの常用域以下に発生する（Fig. 3）。このため，常用域での振動レベルを下げるには駆動系ねじり二次共振周波数を低周波化して，そのすそ野のレベルを下げることが有効となる。

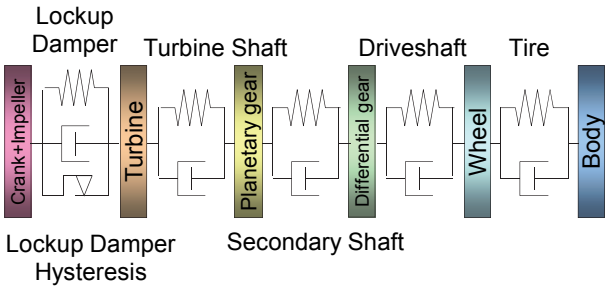


Fig. 2　Schematic Model Structure of Drivetrain Torsional Vibration

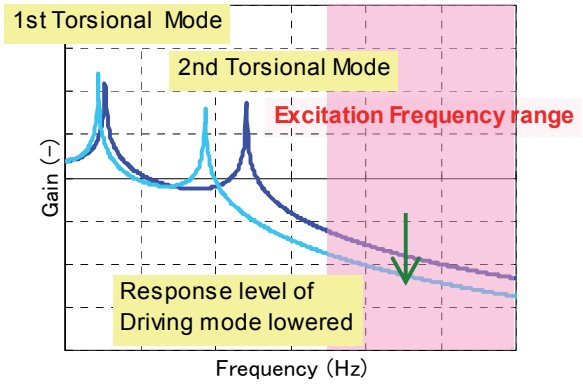


Fig. 3　Drivetrain Vibration Characteristics

5.2　駆動系ねじり振動最適化

駆動系ねじり二次共振周波数を下げるためにはどのようなバネマス配置が良いかをモデルベースで検討した。具体的には，ATのどの位置にダンパを配置するのが良いかをFig. 4に示すようなねじりバネマス配置にてケーススタディした。駆動系ねじり振動特性からだけではなく，コスト・重量・レイアウトを含めハイバランスする，最適なねじりバネマス配置を検討した。

前述したように，駆動系ねじり二次共振周波数の低周波化を基本としながら，駆動系ねじり三次共振周波数をなるべく高周波へ配置することで，二次共振と三次共振の谷間の低減を狙った。このため，ロックアップダンパの特性に加え，トランスミッションユニット内の剛性も最適化した。

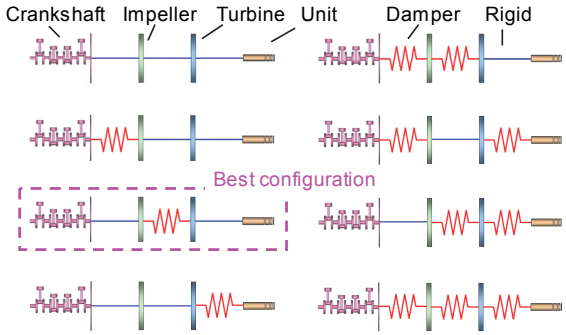


Fig. 4　Case Study of Damper Arrangement

5.3　ロックアップダンパ構造の最適化

前述のバネマスモデルで求めた理想の特性を，より詳細なモデルで具体化した。

ロックアップダンパは従来よりも大幅な低剛性化が必要となった。当初，限られたスペースの中で低剛性化するために，Fig. 5に示すような高トルク域での剛性変化を伴う構造を検討した。しかし，このように大幅な剛性変化があると，それをまたぐ起振力が入力された場合，ダンパ剛性の非線形性により，起振力とは異なる周期の振動（分数調波振動）が発生し，許容レベルを超えることがモデルで判明した[3]。そこでロックアップの拡大により，トルクコンバータの使用領域が縮小されていることを利用し，トルクコンバータをコンパクト化することで，ロックアップダンパの広角低剛性化を実現した。

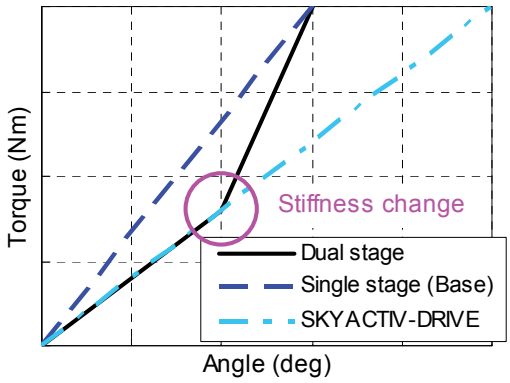


Fig. 5　Lockup Damper Torsional Characteristics

また，ロックアップクラッチについては，摩擦による振動増幅現象であるジャダーを発生させないための要件をモデルで求めた。前述のねじりバネマスモデルに減衰モデルを加え，摩擦面のμ-V特性に起因する負減衰が，ねじり振動全体の減衰より大きくならないように，μ-V特性の目標を決めた。これを実現するために，セグメントタイプの湿式多板クラッチを採用し，冷却性能を高めることで対応した。

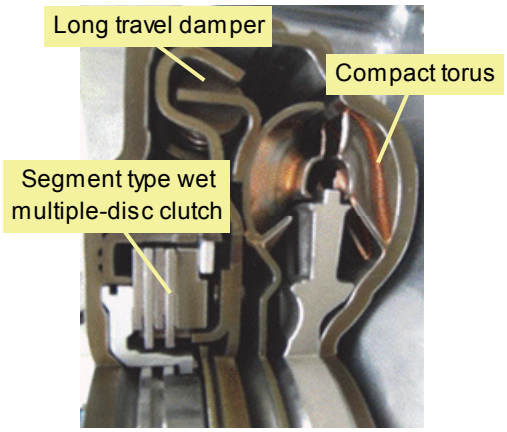


Fig. 6　Torque Converter Structure

これらのモデルによる構造の最適化を行い，Fig. 6のようなトルクコンバータ，ロックアップダンパ，ロックアップクラッチの配置を持つ構造とした。

5.4　ドライブシャフト構造の最適化

ロックアップダンパの最適化を行うと共に，駆動系ねじり二次共振周波数を更に低周波化するためにドライブシャフトの低剛性化にも取り組んだ。しかし，ドライブシャフトは一次の駆動系ねじり振動に大きく寄与しており，低剛性化するとその振幅が増大し，加速ショックなどによる振動が悪化する。そこでこの加減速ショックによる振動に対してはエンジントルクを制御することで対策し，ドライブシャフトの低剛性化を実現した。

5.5　車体音響感度の改善

こもり音が問題となる40～50Hz付近は，車室内空気の密度変化による空洞共鳴があるため，これの改善にも取り組んだ。この周波数は車室寸法によって決定され,コントロールが困難であることから，空洞共鳴を励起させない構造の設計に取り組んだ。具体的にはフロントヘッダ，リヤヘッダ，リフトゲートなどの共振周波数を空洞共鳴から離すよう設計し，車内音圧レベルを従来比改善させている。

5.6　こもり音／振動性能改善まとめ

モデルによるこれらの開発を行い，駆動系ねじり振動と車体音響感度のレベルを改善することでFig. 7に示すように車内音圧レベルを低下させ，走行中のロックアップ可能範囲を大幅に拡大した。Fig. 8に示すようにJC08モード走行中のロックアップ範囲を従来の49%に対し，SKYACTIV-DRIVEでは82%に拡大することができた。

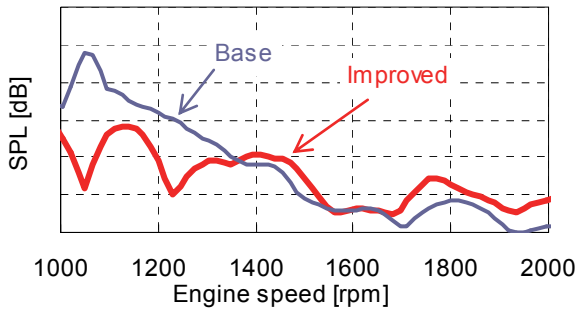


Fig. 7　Cabin Sound Pressure Level

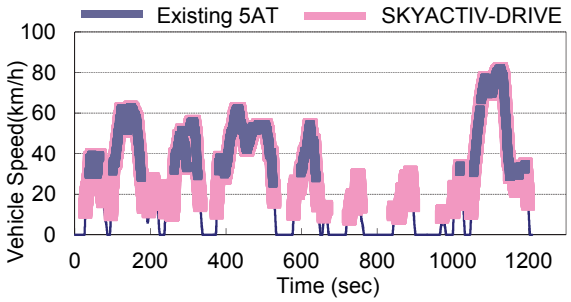


Fig. 8　Lockup Area in JC08 Mode

6. ギヤノイズ性能改善

6.1　ギヤノイズ性能開発コンセプト

理想の変速機の実現のために，ギヤノイズ性能の改善と低燃費へ貢献のための軽量化に取り組んだ。一般にNV対策はケース類のリブ追加など，質量増加につながるため，従来通りの開発プロセス及び設計指針では抜本的な軽量化にはつながらないと考えた。そこでSKYACTIV-DRIVEでは変速機の基幹部品であるトランスミッションケースの開発プロセスを見直し，またNV対策の設計指針についても見直しを図ることでギヤノイズのポテンシャルを飛躍的に向上させながら，抜本的な軽量化の実現を目指した。更にあらかじめ予測精度の向上を行ったCAE技術を全面適用することで，開発の短期化・効率化を実現した。

6.2　CAE 技術開発

ギヤノイズ開発に適用するCAE技術については，商品開発に先行して，過去の総括と次期の開発でニーズがある項目をあらかじめ抽出し，手戻りが生じないよう技術整備を行った。形状情報からはモデル化できない各種結合部やジョイント，ベアリングといった境界条件や，各種材料の振動特性に対し実験によるメカニズム究明と，CAE予測技術への反映を徹底的に実施した。そして，ここで得られた共通の要素技術をベースとして構築した，「マスタCAE」と呼ぶ予測技術・モデルを，一括に各ユニット開発のフェー

ズで適用した。部品単品から大規模なアセンブリまでの予測技術を段階的に積み上げ，最終的に構築したモデルでのギヤノイズの応答結果がFig. 9である。ピーク周波数や変位応答のレベルは捉えられており，ギヤノイズをモデルで開発できる予測精度を有すると判断した。

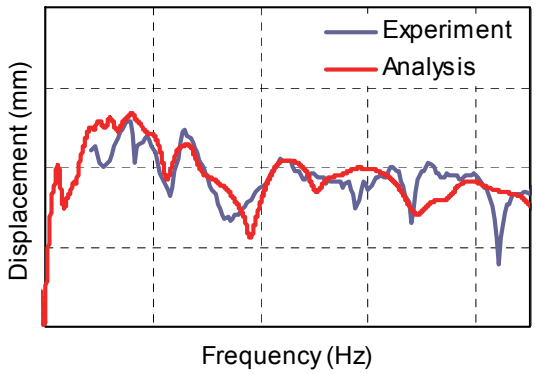


Fig. 9　Gear Noise Vibration of Engine Mount

6.3　アライメントエラー最適化

まずはギヤノイズの起振力であるTEを最小にすることを目的に，ギヤ噛み合い部のアライメントエラーを最小にする基本剛性を造り込んだ。基本剛性はケースの基本形状に依存するところが大きく，必要最低限の質量で最適な形状を求めるため位相最適化の技術を適用した。Fig. 10に位相最適化のイメージを示す。レイアウト要件を満たす設計領域を設定し，この領域内で指定した剛性の指標が最大限となるような，最も質量効率の良い形状を導き出した。こうして得られた結果を元に，初期の基本形状やリブ配置を決定した。基本形状決定後，更にアライメントエラーを低減させるため，アライメントエラーに対するギヤシャフト，ベアリング，ケースなど各要素の寄与を求めた。そして，この寄与を用いることで，アライメントエラーのレベル及びトルクに対するロバスト性の観点から最適な詳細形状を決定した（Fig. 11）。

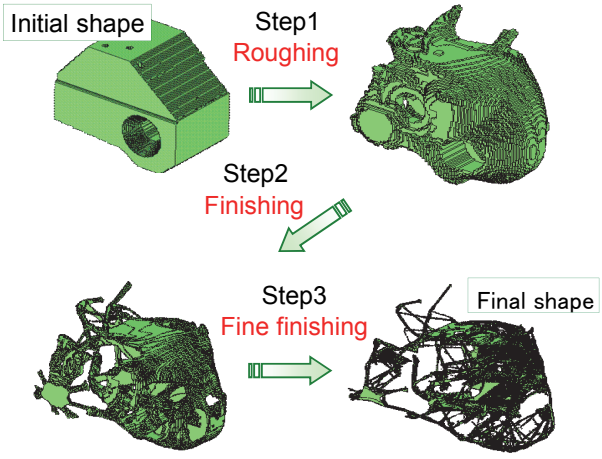


Fig. 10　Topological Optimization of Transmission Case

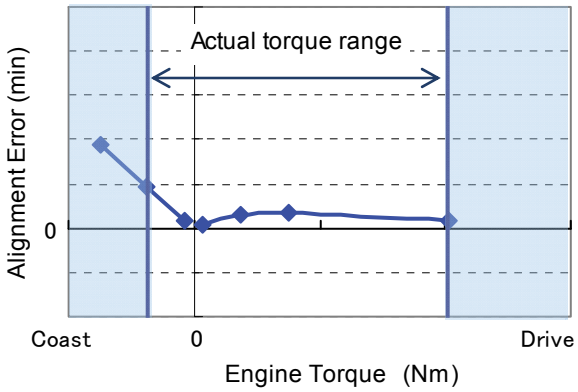


Fig. 11　Change in Gear Alignment Error According to Engine Torque

6.4　噛み合い周波数と TE の最適化

変速機におけるギヤの歯数は，噛み合い周波数としてギヤノイズの周波数範囲を決めると共に，起振力であるTEに影響する重要な要素となっている。一般に，車の暗騒音は車速が高く周波数が低いほど大きくなるため，ギヤ歯数が少ないほうが車速に対し低い周波数となり，暗騒音によるマスキング効果が大きくなる。一方，TEについてはギヤ歯数の減少は噛み合い率が低下するため悪化する方向にある。

SKYACTIV-DRIVEユニットでは，既存ユニットに対してギヤ歯数を減らし，噛み合い周波数を低周波数化させて，開発対象となる周波数を最小範囲に限定し，更にマスキング効果を増加させた。TEの悪化については，歯幅・歯丈・ねじれ角などの主要諸元を最適化することで噛み合い率の低下を最小限に抑えた。Fig. 12に，マスキング効果とTEとの関係を示す。歯数を減少させることでTEの悪化が見られるが，マスキング効果を十分に得られることでギヤノイズ性能は改善方向にあることがわかる。

SKYACTIV-DRIVEではマスキング効果がTEより最も大きくなるポイントを採用した。

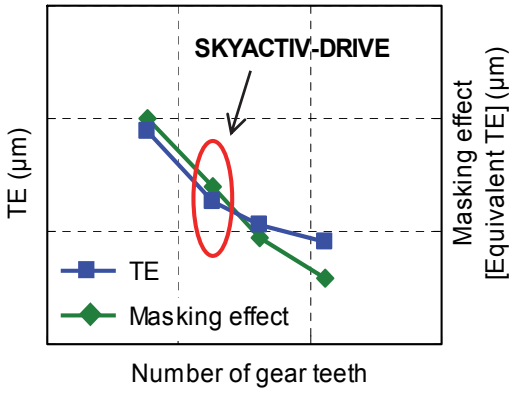


Fig. 12　Relation between Masking Effect and Transmission Error (TE)

6.5　メッシュフォースの最適化

歯面の動荷重であるメッシュフォースについては，振動伝達特性とハイバランスさせたギヤーシャフト構造を構築することに注力した。

メッシュフォースは，歯面の自己コンプライアンスの逆数で表され，振動伝達特性とは背反する性能である上に，強度や全長など極めて多くの設計要素が加わるため，最適解を得ることは非常に難しい。そこでギヤの形状に対して形状最適化の技術を適用した。以下にギヤボディ形状を最適化し，強度の限界を超えない範囲で振動伝達特性とメッシュフォースをバランスさせ，最適形状を検討した例を示す。Fig. 13にトランスファギヤでの形状最適化の様子，Fig. 14に最適化前後の振動応答結果を示す。ギヤ形状の最適化によりメッシュフォースを低減し，振動応答が下がっている。またFig. 15はそれぞれ最適化前後の振動伝達特性とメッシュフォースを示す。振動伝達特性は，加振点への力入力に対する応答点の変位で表現している。応答レベルの高い高周波側にメッシュフォースの谷を形成することでギヤノイズが低減している。更に，低周波側についても振動伝達特性は悪化するが，メッシュフォースとのバランスでギヤノイズが低減していることがわかる。

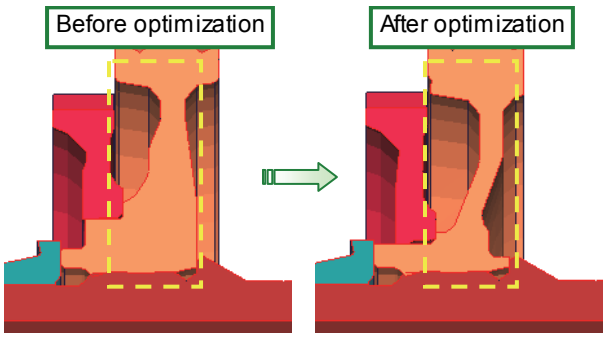


Fig. 13　Shape Optimization of Transfer Gear Body

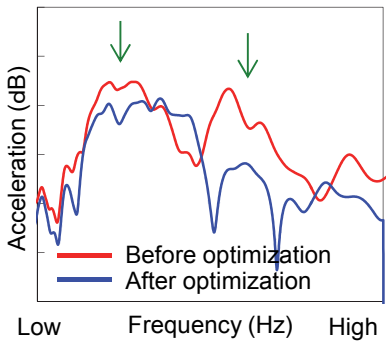


Fig. 14　Gear Noise After Optimization

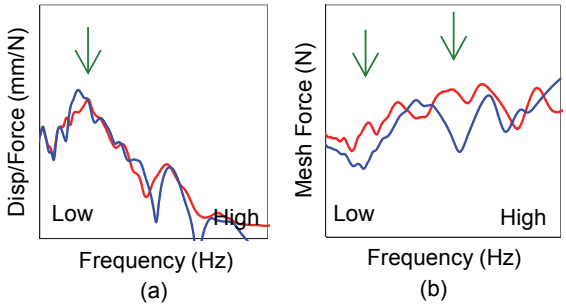


Fig. 15　(a) Frequency Response Function
(b) Mesh Force After Optimization

6.6　振動伝達特性最適化

振動伝達特性についてはシステム最適化設計を行った。通常，ギヤノイズは走行段位や噛み合い位置によってメッシュフォースの周波数特性やTEのレベルが異なる上に，対策が段位によって背反する場合もある。したがって，各段位に対して個別に対策をし，共通解を模索するのは効率が悪い上に質量やコストの増加の原因となる。そこで，振動低減コンセプトとして，PTが車両に結合される出口の部品での対策に着目した。

前述のようにFF車の主変速ギヤノイズの伝達パスの中で寄与が高い経路として，エンジンマウントからの入力が挙げられる。SKYACTIV-DRIVEでは，このエンジンマウントの振動モードに注力して振動低減対策を実施し，出口部品の改善に注力することで質量の使い方をシステムとして最適にし，車両トータルとして軽量化を実現した。

Fig. 16にエンジンマウント形状を示す。マウントブラケットの先端部分に質量を付与し，ブラケットの共振をコントロールすると共に，その振動のマスラインを利用し振動伝達特性を低減させている。ブラケットの共振コントロール及び質量の付与についても形状最適化を適用し，強度やレイアウトなど多くの制約の中，付与する質量の重量配分や位置，ブラケット形状など目的とする特性を満たす最適形状を導き出した。本来，振動伝達特性改善目的でトランスミッション各部に使用する質量をマウントブラケットに集約させることで，マウントブラケット自体の質量は増加するがシステムとしての軽量化を達成した。

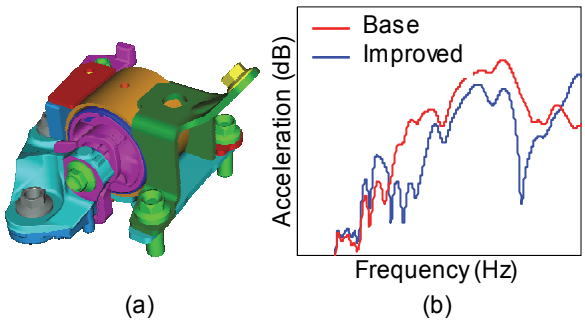


Fig. 16　(a) Engine Mount and
(b) Gear Noise Response of Engine Mount

6.7　音響放射特性最適化

トランスミッションユニットからの放射エネルギーの対策は，まずトランスミッションケース断面形状を球面化させることで，ポテンシャルの高いケース形状とした。更に車内へ伝搬する放射エネルギーのうち，ケース表面のどの部位からのエネルギーが寄与しているのかCAE及び実験的に求め，寄与の高い部位にリブなどの対策を集中的に実施することで，無駄のない最適な対策を実施した（Fig. 17）。

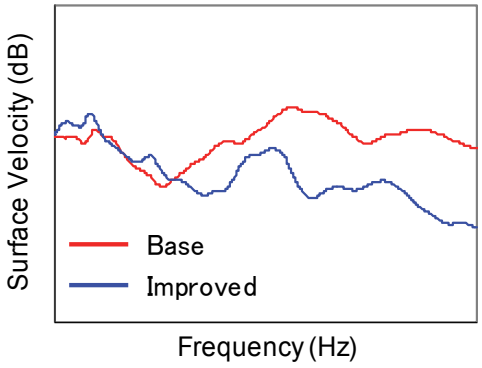


Fig. 17　Surface Integral Velocity of Transmission Case

6.8　ギヤノイズ性能改善まとめ

モデルを用い上記開発を行うことで，ギヤノイズ性能目標を最小限の質量で達成した。その結果，SKYACTIV-DRIVEは6速ATにもかかわらず，当社既存5速ATに対し，トランスミッションケースでは8%の軽量化を達成し燃費改善に貢献した。

7. おわりに

新型自動変速機“SKYACTIV-DRIVE”は，モデルベース開発を適用することにより，燃費・走り性能とNVH性能を高次元で両立させた。

(1) 一括企画により，企画段階からNVH性能の骨格となるシステム・部品を機能配分により造り込んだ

(2) こもり音／振動については，駆動系ねじり振動特性をモデルベースで見直し,広角低剛性ダンパを採用することで走行中の全域ロックアップを実現した

(3) ギヤノイズについては，CAE技術を駆使し開発プロセスを見直し，システム最適設計を行うことでギヤノイズ性能と軽量化との両立を実現した

今後も，更にモデルベースによる機能配分を進化させ，品質の向上を継続し一層の商品力の向上を実現していく。

参考文献

(1) J.Doi,et al.: Neues Automatikgetriebe SKYACTIV-Drive von Mazda, ATZ Automobiltechnische Zeitschrift 113, September 2011, pp.682-687

(2) J.Doi,et al: New MAZDA SYKACTIV-Drive Automatic Transmission, 10th International CTI Symposium in Berlin, A3（2011）

(3) 田辺裕樹ほか:広角捻りダンパーの非線形振動分析，動力伝達系の最新技術2008，pp. 1-5（2008）

(4) 宮本崇史ほか：SKYACTIV T/Mユニット同時開発に対するギヤノイズ解析の適用，動力伝達系の最新技術，pp. 1-6（2012）

■著　者■


工藤 健志


田中 和宏


佐野 徹

特集：モデルベース開発

13

WLTC に対する i-ELOOP の適用

Application of i-ELOOP for WLTC

小谷 和也*1　Kazuya Kotani
久米 章友*2　Akitomo Kume
水落 洋行*3　Hiroyuki Mizuochi
平野 晴洋*4　Seiyo Hirano

要約

マツダは，技術開発の長期ビジョンである「サステイナブル“Zoom-Zoom”宣言」に基づき，「ビルディングブロック戦略」を推進している。i-stop に続く Step2 として，減速時の運動エネルギーを回生し，車の使用電力として再利用する i-ELOOP を 2012 年発売のアテンザから導入した。また，各社からも減速エネルギー回生技術が提案されており，減速エネルギー回生技術が重要な技術となっている。本稿では，WLTC（Worldwide harmonized Light duty driving Test Cycle）における i-ELOOP の妥当性を確認するため，ブレーキ協調機構，パワートレイン（以下，PT）停止機構の有無による減速エネルギーの回収率を試算し，「つくる」「ためる」「つかう」の観点で分析を行った。

Summary

Based on the long-term vision of technology development, "Sustainable Zoom-Zoom", Mazda has been promoting "Building Block Strategy". As the second step of this approach, a new regenerative braking system "i-ELOOP" was introduced to the market in 2012, which regenerates the energy from decelerating vehicle and reuses it as electric power consumed by the vehicle. Recently not a few companies presented various types of the regenerative braking systems, which will continue to be an essential technology from now on. To confirm the validity of "i-ELOOP" in WLTC, the system was analyzed in difference of recoverable energy due to the presence or absence of cooperative regenerative brake or engine stop mechanism, and the results are shown as follows.

1. はじめに

マツダは，「ビルディングブロック戦略」に基づき，減速時に失われる運動エネルギー（以下，減速エネルギー）を回収し，車の使用電力として再利用する i-ELOOP を導入した(1)。各社からも減速エネルギーを回収し再利用するシステム（以下，減速回生システム）が提案されており(2)(3)，減速エネルギー回生技術が重要視されている。また，現在国連では安全で環境性能の高い自動車を容易に普及させる観点から，自動車の安全・環境基準を統合し，国際的な相互承認を推進することが検討されている。その中で，CO_2 の排出量を計測する走行条件について，世界の走行条件を代表する全世界共通のテストサイクルとして WLTC が検討されている。

本稿では，多くの減速回生システムが提案される中で i-ELOOP の妥当性を確認するため，ブレーキ協調機構， PT 停止機構の有無による減速エネルギーの回収率を WLTC で試算し，「つくる」「ためる」「つかう」の観点で分析を行った。

2. 減速回生システムの概要

減速エネルギーはフライホイールで直接運動エネルギーとする方法や，電気エネルギー，圧力エネルギーに変換して回収する方法がある。特に電気エネルギーとして回収する方法は，オーディオ，ライトやモータなどさまざまな再利用手段がありハイブリッド車でも用いられている。今回の検討で取り扱う減速回生システムも，一般的な方法である電気エネルギーとして回収し，再利用するシステムを対象としている。

減速エネルギーは大きく分けて摩擦ブレーキ損失，PT 抵抗損失，走行抵抗損失として失われる。例えば，

*1～4　パワートレインシステム開発部
Powertrain System Development Dept.

JC08 モードで各損失が占める割合は，おおよそ摩擦ブレーキ損失 40%，PT 抵抗損失 30%，走行抵抗損失 30%である。このうち走行中に必ず発生する走行抵抗損失以外の摩擦ブレーキ損失，PT 抵抗損失分のエネルギーが減速回生システムで回収可能な損失である（Fig. 1）。

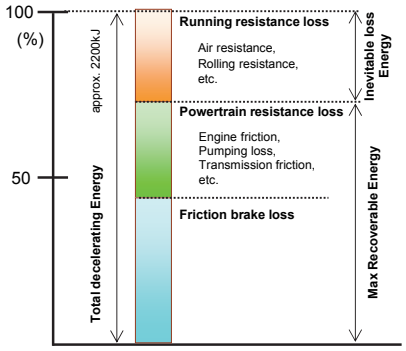


Fig. 1　Analysis of Total Decelerating Energy with Car of 1500kg in JC08

摩擦ブレーキ損失，PT 抵抗損失から回収できるエネルギーは，摩擦ブレーキ，PT 抵抗を低減することで削減した損失分のエネルギー（以下，回収可能エネルギー）である。

摩擦ブレーキ損失から回収可能エネルギーを得る方法を大きく分けると，ブレーキ協調機構の有無で分けられる。ブレーキ協調機構は摩擦ブレーキによる制動力を任意に調整できるため[4]，要求制動力に占める摩擦ブレーキの比率を任意に変化させることができる。そのため，ドライバの要求制動力を発電機だけで実現できる場合には，摩擦ブレーキ損失を全て回収することが可能となる。

ブレーキ協調機構がない場合にはドライバのブレーキ操作量に連動して発電量を増やすことで，発電しない場合に比べ強めの制動力を発生させている。その結果，ドライバのブレーキ操作量は発電しない場合に比べ少なくなり，要求制動力に占める摩擦ブレーキの比率を低減する効果が得られる（Fig. 2）。

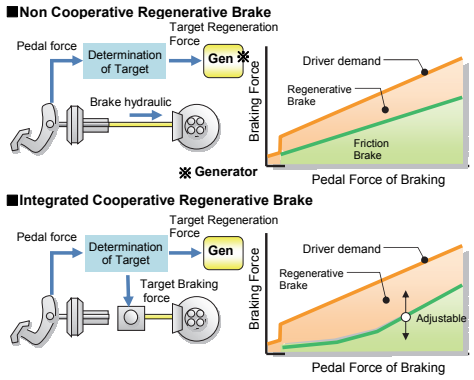


Fig. 2　Schematic View of Cooperative Regenerative Brake

PT 抵抗損失から回収可能エネルギーを得る方法は，大きく分け PT の回転を停止させる機構（以下，PT 停止機構）の有無で分けられる。PT 抵抗はクランクシャフトが回転することで発生する摺動抵抗やポンピングロスなどであり，回転を停止させることでなくすことができる。PT 停止機構はクラッチや遊星歯車を利用してエンジンなどの回転を停止させる機能と，エンジン停止中の負圧，油圧を補償する機能で構成される[5]。PT 停止機構の利用によって PT 抵抗損失を回収することが可能となるが，発電機は PT 停止機構で回転を停止されない場所に設置する必要がある（Fig. 3）。

PT 停止機構がない場合は，気筒停止やバルブタイミングの変更によりポンピング損失を低減することで回収可能エネルギーを得ることができる。

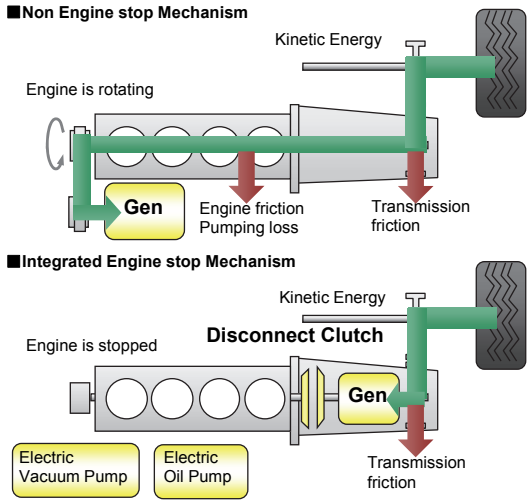


Fig. 3　Schematic View of Engine Stop Mechanism

以上から減速エネルギーの回収方法はブレーキ協調機構，PT 停止機構の有無で 4 つに分類することができる。ブレーキ協調機構や PT 停止機構を利用しない減速回生システムとしては i-ELOOP が上げられる（Table 1）。

Table 1　Classification of Regenerative Braking System

Engine stop Mechanism	Cooperative Regenerative Brake	Representative Example
Non	Non	i-ELOOP
	Integrated	Hybrid Systems are corresponding to each type
Integrated	Non	
	Integrated	

得られた回収可能エネルギーは発電機で電気エネルギーに変換し，蓄電装置に蓄え，電装品やモータで利用する。減速回生システムは，この「つくる」「ためる」「つかう」一連の流れで構成されている。次章以降ではブレーキ協調機構，PT 停止機構の有無による回収可能エネルギーの違いと，「つくる」「ためる」

「つかう」の観点で分析を行った結果を紹介する。

3. 減速エネルギー回生量の試算

3.1　試算方法と条件

試算は，i-ELOOP のモデルベース開発で構築した車両全体のエネルギーフローを解析できる仮想開発環境[6]に，ブレーキ協調機構，PT 停止機構を加え試算を行った。

試算条件は，車両重量 1500kg とし，走行モードは WLTC V5.0 を前提とした（Table 2, Fig. 4）。WLTC は EU，インド，日本，韓国，米国の実走行データをもとに策定されており，WLTC での減速エネルギーを有効に回収し，再利用できる減速回生システムであれば実走行での効果も期待できる。

Table 2　Simulation Condition

Vehicle Weight	1500kg
Engine Displacement	1.997L
Transmission Type	6AT
Driving Cycle	WLTC V5.0
Generation Efficiency	85%

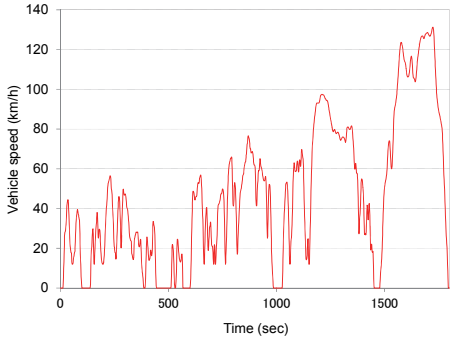


Fig. 4　Driving Cycle (WLTC V5.0)

ブレーキ協調機構は，摩擦ブレーキの制動力を任意に 0～100%まで調整できる機構を想定し，調整に必要な電気エネルギーは回収可能エネルギーから差し引いた（Fig. 5）。

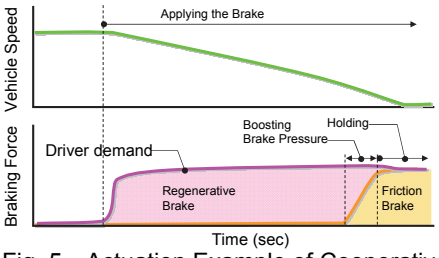


Fig. 5　Actuation Example of Cooperative Regenerative Brake

PT 停止機構は，トランスミッションとエンジンを分離するクラッチを想定し，エンジンを再始動させてクラッチを再締結するために必要な電気エネルギーは回収可能エネルギーから差し引いた（Fig. 6）。

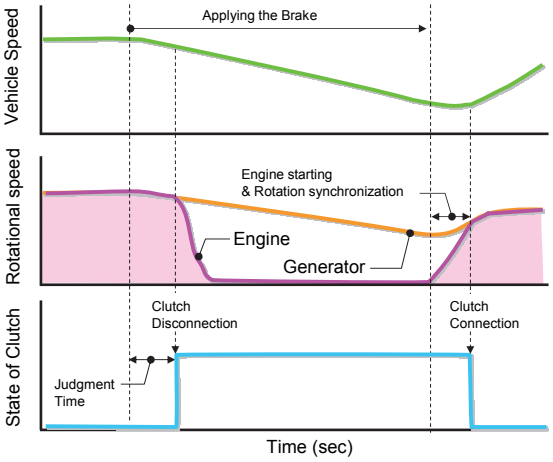


Fig. 6　Actuation Example of Engine Stop Mechanism

また，ブレーキ協調機構，PT 停止機構の有無により Fig. 7 に示す RG1～RG4 の 4 つのシステム構成を設定した。以降の説明では各システム構成を RG1～RG4 として取り扱う。

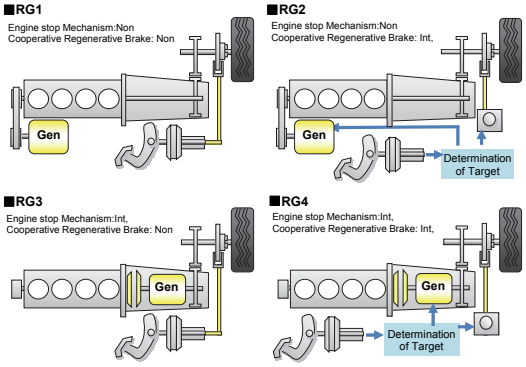


Fig. 7　System Configuration of Simulation Assumption

3.2　回収可能エネルギーの試算結果

WLTC で各損失が占める割合は，摩擦ブレーキ損失 35%，PT 抵抗損失 20%，走行抵抗損失 45%である。JC08 モードと比べ車速が高いため，JC08 より走行抵抗損失の割合が高くなったと考える（Fig. 8）。

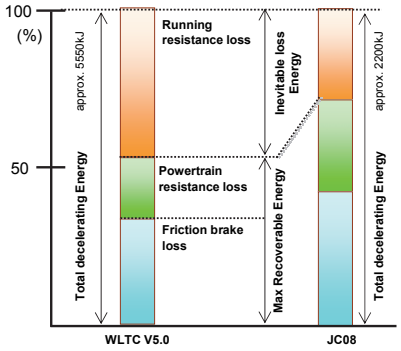


Fig. 8　Analysis of Total Decelerating Energy in WLTC

回収可能エネルギーは，ブレーキ協調機構，PT 停止機構を利用することで大きくなり，RG4 では減速エ

ネルギーの 74%が回収可能となる（Fig. 9）。

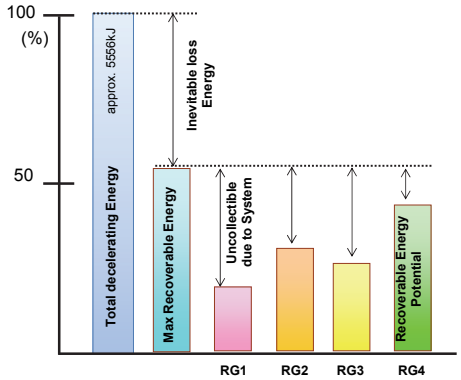


Fig. 9　Recoverable Energy Potential of Each System Configuration

ブレーキ協調機構を利用した場合，摩擦ブレーキ損失を回収できるため PT 停止機構の有無に関係なく，1 秒当たりの回収可能エネルギーが大幅に大きくなる（Fig. 10）。

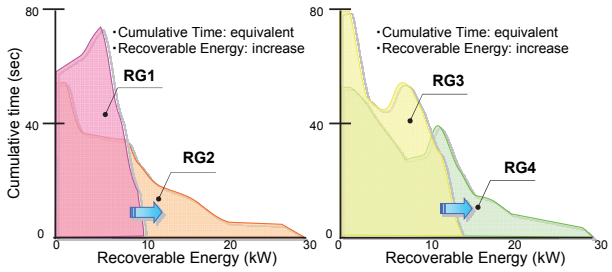


Fig. 10　Effect of Cooperative Regenerative Brake

PT 停止機構を利用した場合，PT 抵抗損失を回収できるためブレーキ協調機構の有無に関係なく，1 秒当たりの回収可能エネルギーが大きくなる。更に，ロックアップ状態に関係なく発電できるため，減速エネルギーを回収できる時間が長くなる（Fig. 11）。

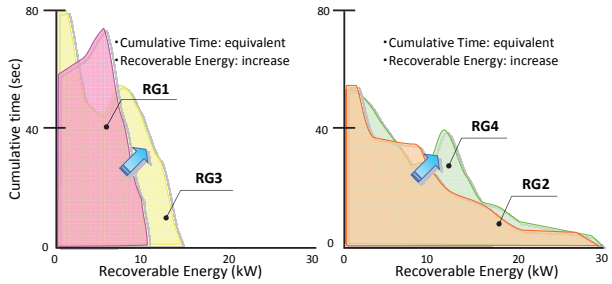


Fig. 11　Effect of Engine Stop Mechanism

4. 各機能と回生量の関係

4.1　「つくる（発電）」

回収可能エネルギーを電気エネルギーとして回収するには，回収可能エネルギーに応じた発電機の出力が必要となる。そこで，発電機の出力を考慮し回収可能エネルギーの回収量について分析を行った。発電機の出力が 5kW まではブレーキ協調機構，PT 停止機構の有無による差は少なく，明確な差を出すには 10kW 以上が必要だと考える（Fig. 12）。

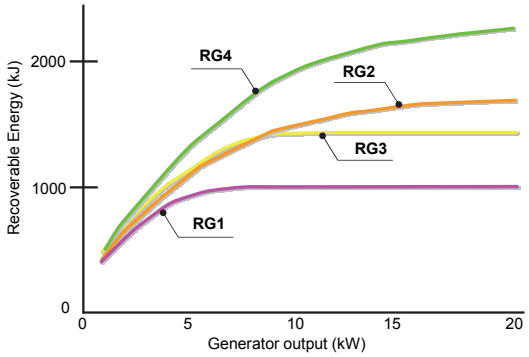


Fig. 12　Effect of Generator Output Given to Recoverable Energy in Driving Cycle

次に，発電機の出力と回収可能エネルギーの回収率について分析を行った。RG1 は 4.5kW で 80%，6kW で 95%，RG4 では 10kW で 80%，16kW で 95%の回収率となった（Fig. 13）。RG1 に分類される i-ELOOP は 5kW の発電機を採用し，回収可能エネルギーの 80%以上を回収できる。

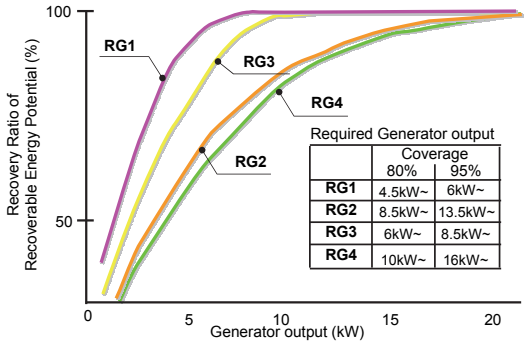


Fig. 13　Relationship between Generator Output and Recovery Ratio of Recoverable Energy Potential

4.2　「ためる（蓄電）」

発電機の出力を最大まで利用するには，発電機の出力を受け入れることができる蓄電装置が必要となる。一般的な電線ではジュール熱による損傷を防ぐため，電流を約 200A 以内に抑える必要がある。したがって，発電機の出力が 10kW の場合，その出力を利用するためには蓄電装置の電圧を 50V 以上とする必要がある（Fig. 14）。

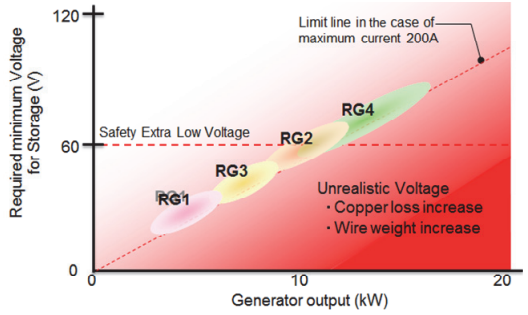


Fig. 14　Relationship between Source Voltage and Generator Output

12V 以上の蓄電装置を利用する場合，従来の 12V で動作する電装品の損傷を回避するため，蓄電装置と 12V 電源とは分離する必要がある。更に，60V 以上の蓄電装置は感電すると人に有害な影響を与えるため，人が感電しないための対策が必要となる。5kW の発電機を採用する i-ELOOP は最大 25V の高電圧電源と電装品に電力を供給する 12V の低電圧電源の 2 電源システムとなっている。

次に，蓄電装置の容量を考慮し，発電機で変換された電気エネルギーの回収量について分析を行った。蓄電装置が 30kJ まではブレーキ協調機構，PT 停止機構の有無による差は少なく，明確な差を出すには 60kJ 以上が必要だと考える（Fig. 15）。

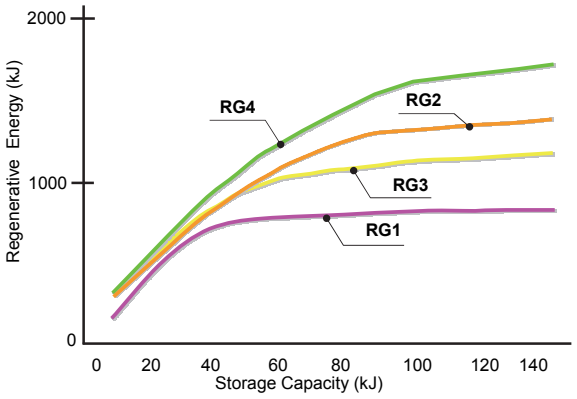
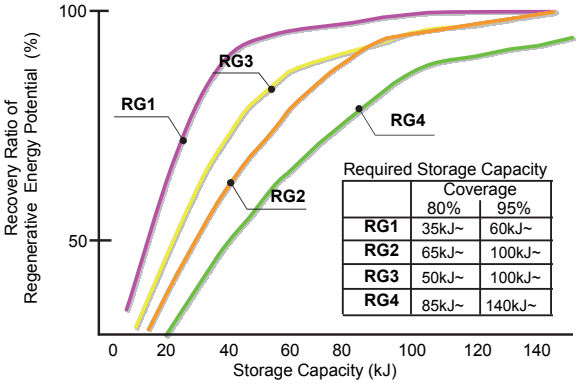


Fig. 15　Effect of Storage Capacity Given to Regenerative Energy in Driving Cycle

次に，蓄電装置の容量と発電機で変換された電気エネルギーの回収率について分析を行った。RG1 は 35kJ で 80%，60kJ で 95%，RG4 では 85kJ で 80%，140kJ で 95%の回収率となる（Fig. 16）。



Required Storage Capacity

	Coverage 80%	Coverage 95%
RG1	35kJ~	60kJ~
RG2	65kJ~	100kJ~
RG3	50kJ~	100kJ~
RG4	85kJ~	140kJ~

Fig. 16　Relationship between Storage Capacity and Recovery Ratio of Recoverable Energy Potential

i-ELOOP では発電機の出力は入出力特性に優れたキャパシタに蓄え，蓄えた電気エネルギーは並行して大容量の鉛バッテリに移動させている。その結果，25kJ のキャパシタで蓄電装置の容量 35kJ に相当する 80% 以上の回収率を実現できる（Fig. 17）。

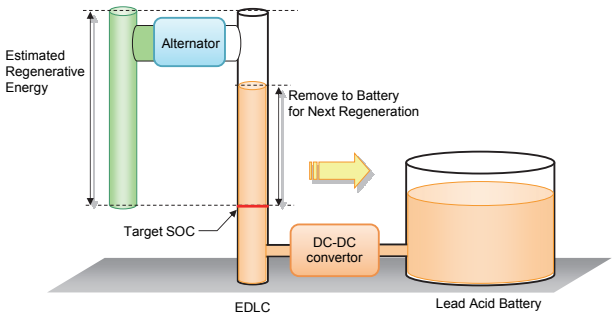


Fig. 17　Schematic Diagram of Dual Charge in i-ELOOP

4.3　「つかう（電力利用）」

減速回生システムでは，発電機で変換された電気エネルギーと車両で使用する電力（以下，消費電力）のバランスが取れていることが必要となる。例えば WLTC の場合，おおよそ 30 秒～2 分ごとに減速するため，毎分得られる電気エネルギーと消費電力が等しければ減速回生システムを効果的に利用しているといえる。

RG1 が得られる電気エネルギーを平均化すると最大 27kJ/min，RG2 は最大 46kJ/min，RG3 は最大 39kJ/min，RG4 は最大 62kJ/min となる。消費電力は空調，ヘッドライトなどの電装品の作動状態の影響を受け，空調を使用しない昼間で約 10～18kJ/min，夜間は約 15～23kJ/min である。空調を使用する場合は昼間で約 22～33kJ/min，夜間は 27～38 k J/min である（Fig. 18）。

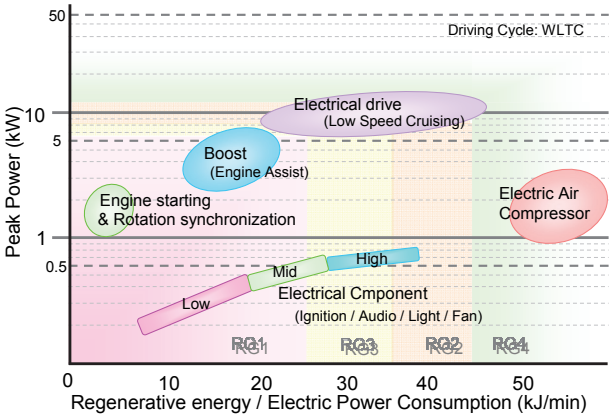


Fig. 18　Relationship between Regenerative Energy and Electrical Power Consumption

仮に電装品の消費電力 38kJ/min を減速エネルギーで供給する場合，39kJ/min の電気エネルギーが得られる RG3 が適している。その場合，消費電力が 10～18kJ/min のシーンでは，29～21kJ/min が余剰となるため有効に利用する機能を追加することが適している。例えば 3～5kW のモータを利用すればエンジンを補助

することができ，更に 8～10kW のモータを利用すれば低速での定常走行をモータのみで実現できる。RG3 の回収可能エネルギーを 80%以上回収できる発電機は 6kW 以上であり，消費電力が少ない場合はモータとしてエンジンを補助することで減速回生システムを効果的に利用できる。

i-ELOOP では RG1 の構成で，約 80%の回収率を実現する能力を有しているため，得られる電気エネルギーは約 21kJ/min である。消費電力が約 10～38kJ/min であることを考えると，減速エネルギーで電装品の電力を供給する減速回生システムとしてバランスが取れている。

5. 結論

今回，ブレーキ協調機構，PT 停止機構の有無による減速エネルギーの回収率について WLTC を用いて試算した。その結果，RG1 に分類される i-ELOOP は WLTC でも，減速エネルギーで電装品の電力を供給する減速回生システムとして適切な構成であることが確認できた。

また，検討結果から WLTC において減速エネルギーの回収率を高めていくと，減速回生システムは以下のように進化していくと考えられる（Table 3）。

(1) RG1～RG4 全て 12V 以上の蓄電装置が適しており，蓄電装置と 12V 電源を分離した 2 電源システムの採用が広がる。
(2) RG2～RG4 では，得られた電気エネルギーを有効に利用するため，モータ機能の採用が広がる。

Table 3　Summary of Study Results

		RG1	RG2	RG3	RG4
Cooperative Regenerative Brake		non	Int,	non	Int,
Engine stop Mechanism		non	non	Int,	Int,
Generator	Output(kW)	4.5~6	8.5~13.5	6~8.5	10~16
Storage	Voltage(V)	23~30	43~68	30~43	50~80
Separation of 12V Power Supply		Need			
High-voltage protection		non	non~Need	non	non~Need
Recovery Ratio of Max Recoverable Energy		26~31%	44~52%	37~44%	59~70%
Use of Regenerative Energy	Electrical Cmponent	○	○	○	○
	Boost	△	○	○	○
	Electrical drive (Low Speed Cruising)	-	△	△	○
	Electric Air Compressor	-	-	-	△

○ Standard　△ Possible

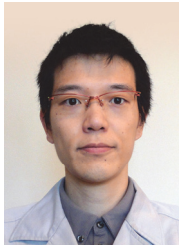
6. おわりに

今後も，全てのお客様に「走る歓び」と「優れた環境性能」をお届けするために，仮想開発環境と減速エネルギー回生技術を進化させる取り組みを続けていく。

参考文献

(1) A. Kume, et al.: Mazda "i-ELOOP" Brake Energy Regeneration System and Strategy, AABC Europe 2013, AABTAM Symposium Session 2-4 (2013)
(2) L. Alger,　et al.: Li-Ion Battery Pack for Micro Hybrid Vehicles: Development and Series Application, AABC Europe 2013, AABTAM Symposium Session 2-5 (2013)
(3) M. Uhl, et al.: Boost Recuperation Machine-Electric Motor for 48V Systems, EEHE, Session 2-1 (2013)
(4) N. Ohkubo, et al.: Application of Electric Servo Brake System to Plug-In Hybrid Vehicle, SAE Paper, No.2013-01-0697 (2013)
(5) N Mueller, et al.: Next Generation Engine Start /Stop Systems: "Free-Wheeling", SAE Paper, No. 2011-01-0712 (2011)
(6) 柴田ほか：“i-ELOOP”制御系開発における机上環境の進化，マツダ技報 No.30，pp.56-59（2012）

■著　者■


小谷 和也


久米 章友


水落 洋行


平野 晴洋

特集：モデルベース開発

14

SKYACTIV-D i-stop 開発における MBD 適用事例の紹介

Introduction of MBD for SKYACTIV-D i-stop Development

中本 仁寿*1　Yoshihisa Nakamoto
中島 宏幸*2　Hiroyuki Nakashima
朝倉 浩之*3　Hiroyuki Asakura
寺岡 陽一*4　Yoichi Teraoka
田賀 淳一*5　Junichi Taga

要約

SKYACTIV-D に搭載した i-stop は，確実な着火を可能にする多段プリ燃焼制御技術及び圧縮ストロークを十分確保するためのエンジン停止時ピストン位置制御技術により，SKYACTIV-G 搭載の i-stop と同等の再始動時間を実現している。

本稿では，SKYACTIV-D i-stop をマニュアルトランスミッション車に搭載する上で課題となった DMF（Dual Mass Flywheel）の共振現象による再始動時間の問題について，MBD（モデルベース開発）を適用した内容について紹介する。

Summary

For SKYACTIV-D i-stop, shortening the restart time of the engine is focused on. A multistage pre-fuel injection combustion control technology that secures ignition and a piston position control technology at engine stops that secures adequate compression strokes were developed, which enable equivalent engine-re-start time to that of the SKYACTIV-G i-stop.

Engine re-start time of the SKYACTIV-D i-stop installed on MT model was deteriorated due to DMF resonance phenomena, and the solution by the model-based development was shown in this paper.

1. はじめに

停車時にエンジンを停止し，発進時に自動でエンジンを再始動するアイドリングストップ技術は，比較的シンプルな構成で高い燃費改善効果を得ることができ，費用対効果の高い燃費改善技術であり，現在ではほとんどの自動車メーカから採用車両が販売されている。しかしながら，以前のアイドリングストップ技術では，再始動時間が長いために発進遅れが生じ，実交通流下で使い難く市場での展開は限定的であった。これに対し，マツダでは燃焼始動により再始動時間を大幅に短縮し使い勝手を改善した i-stop を開発(1)，2009 年発売のアクセラに搭載し高評価を得たことを受け，順次採用車種を拡大してきた。

このような状況から SKYACTIV-D i-stop 開発では，再始動時間の短縮を第一目標とし，圧縮着火機関で再始動時に最初の燃焼気筒である停止時圧縮行程気筒から燃焼を開始できる技術の確立を目指した。その結果，低圧縮比（ε＝14.0）でも確実な着火を可能にする多段プリ燃焼制御技術及びエンジン停止位置制御技術を開発し，SKYACTIV-G i-stop と同等の再始動時間を実現した。一方で，SKYACTIV-MT との組み合わせにおいて，ディーゼルエンジン特有のトルク変動に伴うトランスミッション歯打ち音低減のため採用した DMF の始動時共振現象を回避するため，スタータ駆動時間を長くせざるを得ない問題が発生した。この問題解決のために DMF 付きエンジンの再始動挙動を再現できる CAE モデルを構築し，相反する再始動時間短縮と DMF 共振現象の回避を同時に満足するための再始動時燃焼制御の開発及び共振現象を最小化する DMF 仕様の決定にモデルベース開発を適用した。

*1　技術研究所
Technical Research Center
*4，5 パワートレインシステム開発部
Powertrain System Development Dept.
*2，3　ドライブトレイン開発部
Drivetrain Development Dept.

2. SKYACTIV-D i-stop 迅速再始動技術

2.1　システム構成

Fig. 1 に SKYACTIV-D i-stop のシステム構成を示す。i-stop システム特有のデバイスとしては，エンジン停止中でも燃料圧力を保持しエンジン再始動開始直後から燃料噴射できるコモンレールシステム，及びエンジン停止中でもエンジンの位置を正確に検出するための逆転検出可能な回転センサを採用した。

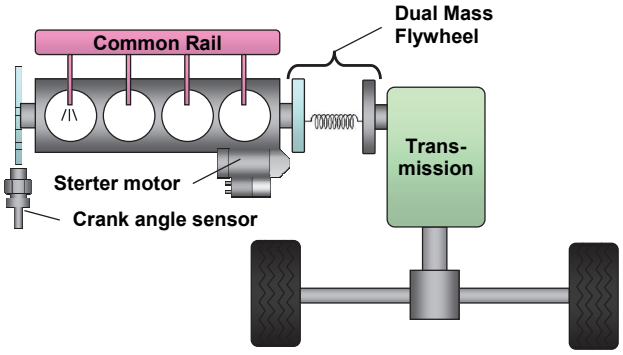


Fig. 1　SKYACTIV-D i-stop System Configuration

2.2　再始動方法

一般に，ディーゼルエンジンの始動は，スタータを駆動しエンジンを回転させながら各気筒のピストン位置を特定し，同時にコモンレール圧を上昇させて圧縮行程気筒に燃料を噴射，燃焼させることでエンジン回転数を上昇させていく。そのため，Fig. 2 に示すようにスタータ駆動から 2~3 回程度燃焼させることができないサイクルが存在する。一方で SKYACTIV-D で採用した一圧縮燃焼始動では，エンジン停止中に圧縮行程途中で停止している気筒（以下，第一圧縮行程気筒）を特定し，その気筒から燃焼を開始するため，SKYACTIV-G の i-stop と同等の迅速再始動を実現できる。

2.3　第一圧縮行程気筒の着火技術

前述のとおり，ディーゼルエンジンで迅速に始動させるためには第一圧縮行程気筒での燃焼が不可欠である。スパークプラグを持たないディーゼルエンジンで筒内に噴射した燃料を確実に着火させるためには，①筒内に着火性に優れた混合気を形成する，②着火に必要な筒内温度，圧力を確保するため第一圧縮行程気筒のピストン停止位置を下死点（BDC）寄りにする，の 2 点が有効である。

SKYACTIV-D i-stop では，これらを達成するため，再始動時に燃料を複数回分割して噴射することで着火性を確保する「多段プリ噴射制御技術」と，エンジンの停止過程でオルタネータ負荷を使い回転挙動を制御するとともに，停止直前の筒内の空気量を制御することでピストン停止位置を BDC 寄りに制御する「エンジン停止位置制御技術」を採用した。

これらの技術により，第一圧縮行程気筒から確実に燃焼させることができるようになり，アイドリングストップ状態からの再始動時間を SKYACTIV-G i-stop と同レベルまで短縮することができた。以下，一圧縮燃焼始動を実現するために開発した「多段プリ噴射制御技術」，「エンジン停止位置制御技術」について詳細を説明する。

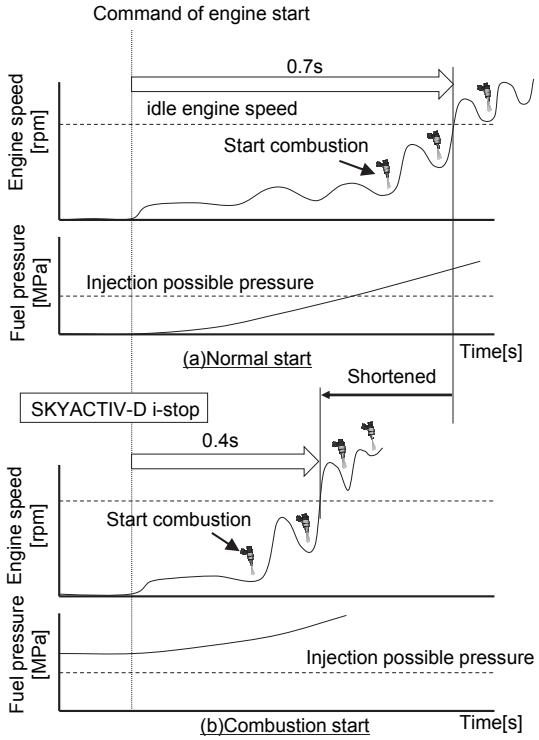


Fig. 2　Comparison of Engine Re-Start Behavior between Normal Start and SKYACTIV-D i-stop

(1) 多段プリ噴射制御技術[2]

第一圧縮行程気筒では，通常の燃焼サイクルと比較して圧縮行程途中からの圧縮による低温低圧雰囲気により着火しにくくなる。このような筒内雰囲気で確実に着火させるためには，燃料リッチな混合気を長期間維持する必要がある。そのためには，噴霧貫徹力を抑制し，蒸発特性に優れた微粒化の良い噴霧を供給する必要がある。このことを踏まえ，次の多段プリ燃焼制御技術を検討した。

① 微粒化の良い噴霧を得るため，エンジン停止期間中コモンレール圧を保持し，多孔タイプ噴射ノズルを用いる。

② ピストン燃焼室内に噴霧をトラップできるタイミングで，噴霧貫徹力を抑制した少量の噴射（プリ噴射）を複数回に分けて行うことで，燃焼室内の同じ個所に噴霧を重ね，長く漂う燃料リッチな混合気を形成する。

③ プリ噴射による燃料リッチな混合気を上死点（TDC）付近まで維持し着火・燃焼させ，筒内の圧力・温度を上昇させる。その結果，TDC 付近で噴射するメイン

噴射を確実に着火・燃焼させ十分な燃焼トルクを得る。

上記の多段プリ燃焼制御技術を用いた際の第一圧縮行程気筒の燃焼可能範囲を評価した結果を Fig. 3 に示す。再始動開始位置が 77deg.BTDC よりも下死点側であれば一定値以上の Pmax が得られており，確実に一圧縮燃焼が可能であることが分かる。

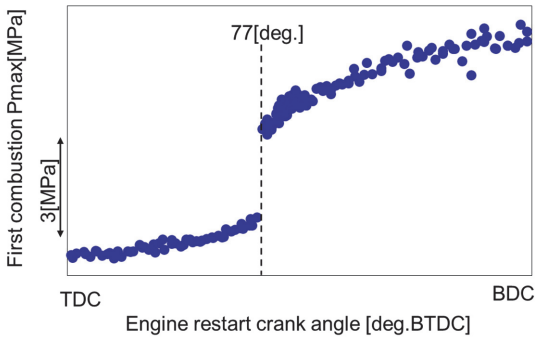


Fig. 3　Restart Possibility Boundary of 1st Compression Cylinder's Combustion with Pre-Combustion

(2) エンジン停止位置制御技術[2]

第一圧縮行程気筒での燃焼を確実に行うための二つ目の要件である，「着火に必要な筒内温度，圧力を十分確保する」には，第一圧縮行程気筒のピストン停止位置を下死点寄りにすることが効果的である。エンジン停止時に第一圧縮行程気筒のクランク角位置を下死点寄りに停止させるには，①エンジンが完全停止する直前の TDC を通過する時のエンジン回転数を低くする，②エンジン停止時の膨張行程気筒の空気量を少なくかつ圧縮行程気筒の空気量を多くし圧縮反力の作用を活用する，の 2 点を実施する必要がある。

エンジン回転数制御にはオルタネータ負荷を利用した。燃料停止直後からエンジン回転数の下降状態を検出し，エンジン停止直前の TDC 通過回転数を予測しながら，目標回転数になるようオルタネータ負荷を調整した。空気量制御では，エンジン停止制御開始直後からスロットルを閉じ停止時膨張行程気筒の空気量を少なくした上で，停止時圧縮行程気筒の吸気行程でスロットルを開け，停止時圧縮行程気筒の空気量だけを増加させるようにした。以上の制御で，再始動時に第一圧縮燃焼可能な位置に確実にエンジンを停止させることができた（Fig. 4）。

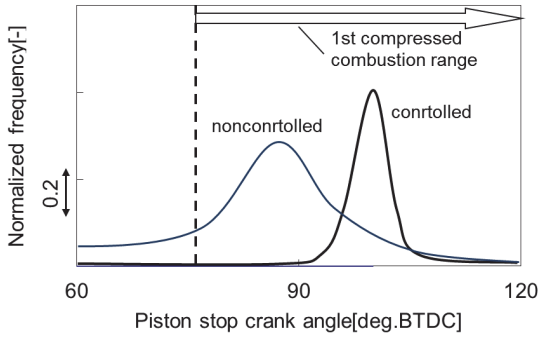


Fig. 4　Effect of Engine Stop Position Control

3. エンジン始動時の DMF 共振現象

3.1　DMF 付きシステム構成の狙い

Fig. 5 に Single Mass Flywheel （以下，SMF）を採用した SKYACTIV-G，及び DMF を採用した SKYACTIV-D の駆動系模式図を示す。前者では一体構造となっているフライホイール質量を，後者ではクランクシャフト側に締結されるプライマリフライホイールとセカンダリフライホイールに分割し，その間に弾性部材と摩擦部材を配置している。SKYACTIV-D では，DMF を採用することで駆動系のねじり共振周波数を 10～15Hz，4 気筒エンジンでの回転数で 300～450rpm とし，通常走行中に使用する回転数範囲から外すことで，車両振動性能を改善した。

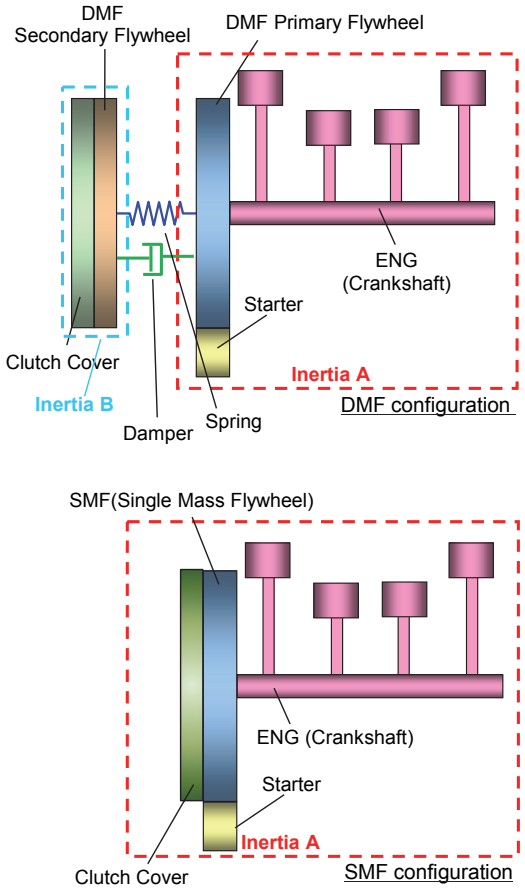


Fig. 5　Comparison of DMF and SMF Configuration

3.2　始動時 DMF 共振現象

前述の駆動系ねじり共振周波数変更の結果，エンジン始動時に駆動系ねじり共振回転数を通過するようになる。この影響で，Fig. 6 で示すように共振回転数以下でスタータ駆動を停止すると，エンジンの燃焼起振力周波数と駆動系ねじり共振周波数とが一致し，共振状態となる。DMF 共振時は，DMF 内部の弾性部材に大きな力が加わることで過大なインパクトトルクが発生し，車体振動の悪化とともに，DMF 本体の信頼性にも著しい悪影響を及ぼす。

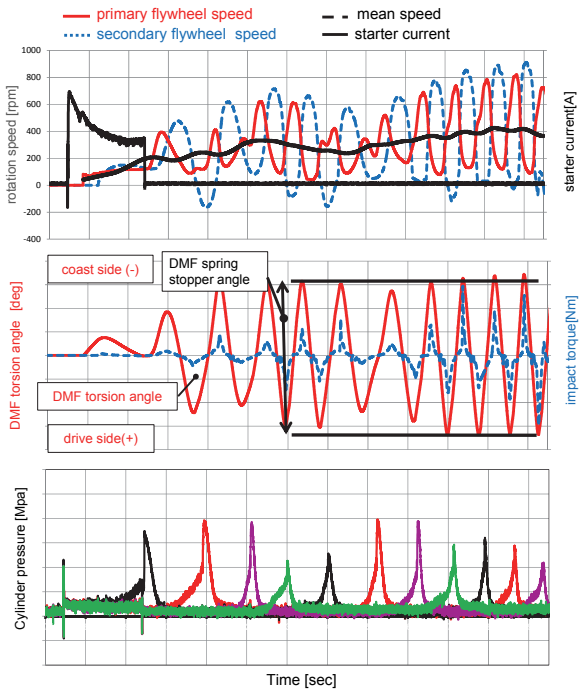


Fig. 6　DMF Resonance Behavior at Engine Start

3.3　始動時 DMF 共振抑制

SKYACTIV-D 迅速再始動には始動時の DMF 共振を回避しながら始動を完了することが不可欠である。Fig. 7 に SKYACTIV-D 迅速再始動の機能系統図を示す。DMF 共振を回避しながら迅速再始動を完了するには，燃焼トルク増大とエンジントルク変動抑制という，相反する性能を同時に満足する必要がある。そのために，①始動時の燃焼時期を制御し，DMF ねじれ角が小さくなるよう制御する，②DMF 仕様を共振現象が最小化するよう設定する，ことが必要である。今回，これらの技術を開発するために，再始動時のエンジン挙動を再現するエンジン始動モデルを開発し，始動完了までの各燃焼の着火時期をきめ細かく制御する「着火時期による DMF ねじれ角制御技術」と，DMF 共振を最小化する仕様選定にモデルベース開発を適用した。

4. エンジン始動モデル

4.1　エンジン始動モデルについて

DMF 共振は，起振源であるエンジン燃焼トルクと，応答系である DMF の作用による現象のため，エンジンのトルク挙動と DMF のねじり振動発生機構に主眼を置きモデル化を行った。以下，それぞれのモデルについて説明する。

(1) エンジンモデル

エンジンモデルは，燃焼室内の熱発生と筒内圧の上昇，筒内圧をトルクに変換するクランク－ピストン機構を主な構成要素とした。熱発生モデルには Wiebe 関数を用い，燃焼ガスのクランクケースへの漏れや冷却損失を考慮した。構築したエンジンモデルの概要を Fig. 8 に示す。

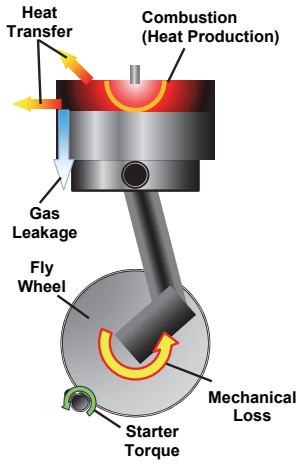


Fig. 8　Engine Model Schematic

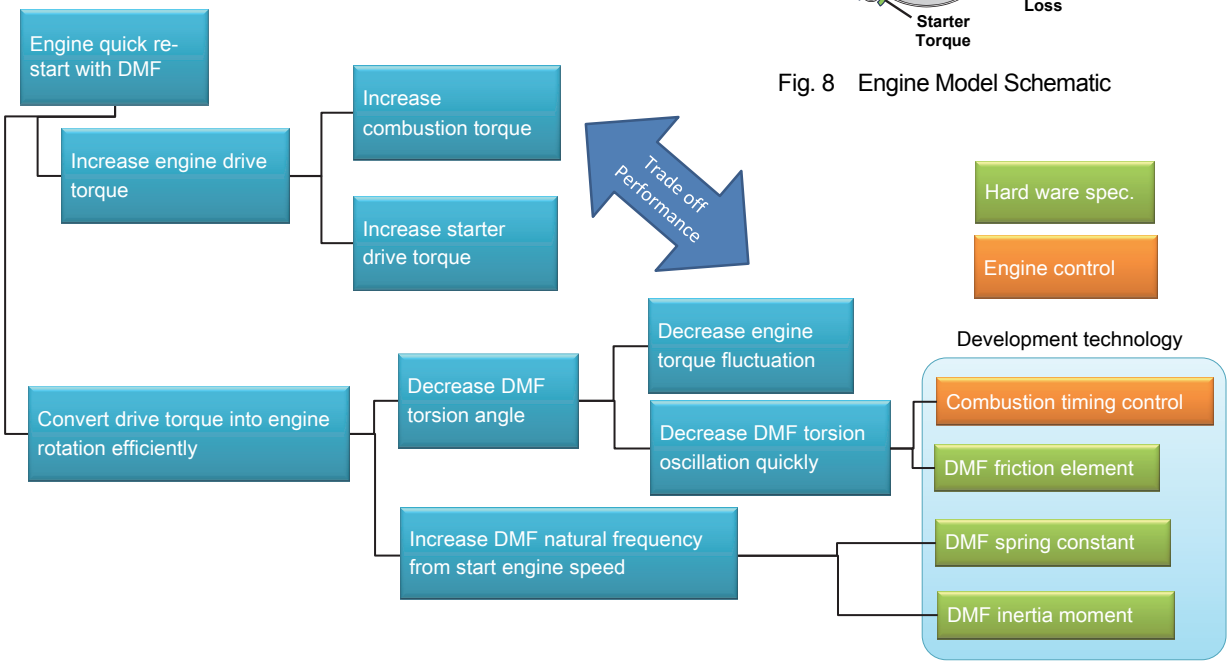


Fig. 7　Quality Function Deployment Diagram of Quick Re-Start System with Diesel Engine

(2) DMF モデル

先述のとおり，DMF は 2 つのマス（プライマリ／セカンダリフライホイール）が弾性部材と摩擦部材で接続されていることから，Fig. 9 のようにイナーシャ，バネ，摩擦要素を組み合わせることで DMF モデルを構築した。

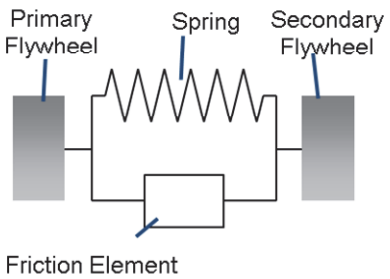


Fig. 9　DMF Model Schematic

4.2　モデル精度検証

始動時の実機の回転数，筒内圧，クランク角挙動などが先述のエンジンモデルの挙動と一致するよう燃焼モデルや冷却損失モデルのパラメータを調整した。更にエンジンイナーシャと機械抵抗を適切に設定することで，実機の筒内圧及び回転数挙動を再現することが可能となった。エンジン挙動を再現した結果を Fig. 10 に示す。再始動時の筒内圧挙動及び回転数挙動を精度良く再現できていることが分かる。

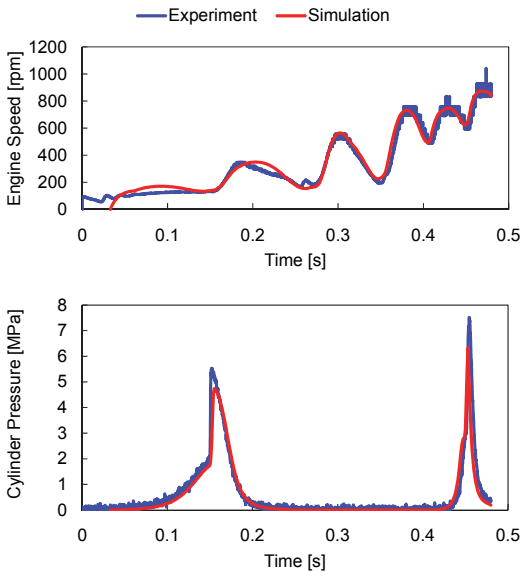


Fig. 10　Simulation Result of Engine Model

5. 共振コントロール技術確立

5.1　MBD による共振コントロール技術の検討

(1) DMF ねじれ角制御技術の開発

先述のエンジン始動モデルを用い，共振が発生する場合の筒内圧と DMF の挙動の違いを明らかにした。評価は，始動完了までの各燃焼の着火時期をモデル上で任意に変更することで行った。結果を Fig. 11 及び Fig. 12 に示す。DMF が共振する場合（Fig. 11），DMF のねじれ角の速度（プライマリフライホイールとセカンダリフライホイールの角速度差）が減少しているタイミングで着火が発生する（図中×印）と角速度差が増大し，その後ある瞬間にねじれ角速度と燃焼タイミングとが逆位相となり，これにより共振現象が発生することが分かった。

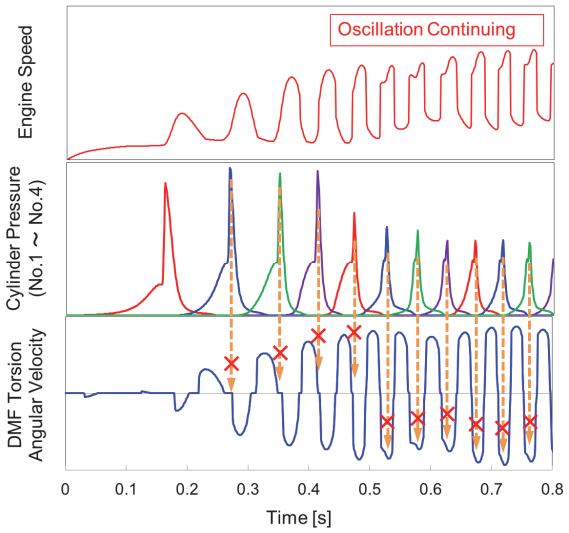


Fig. 11　Combustion Timing at Resonance

一方，共振が発生しない場合（Fig. 12），DMF のねじれ角速度が減少中の着火ではねじれ角速度が増大する方向であるが，ねじれ角速度が増大中に着火が発生すると（図中○印），ねじれ角速度差が急激に減少し，その後 DMF 共振が収束することが分かった。以上より，燃焼タイミング（着火時期）をねじれ角速度差のピークに対して進角側にすることで，共振を収束できることが明らかになった。

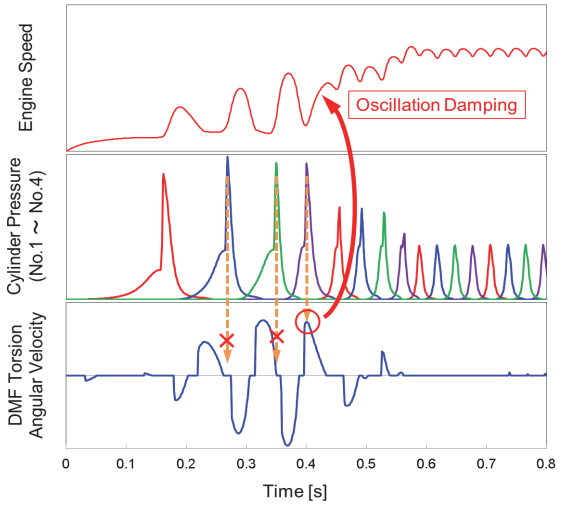


Fig. 12　Combustion Timing at No-Resonance

確認のため，始動から 3 回目の燃焼までを共振発生時と同条件とし，それ以降の燃焼で着火時期を進角さ

せる評価を行った（Fig. 13）。4 回目の燃焼以降（図中△印），ねじれ角速度差の変動幅が徐々に減衰し，最終的に共振が回避できることが確認できた。

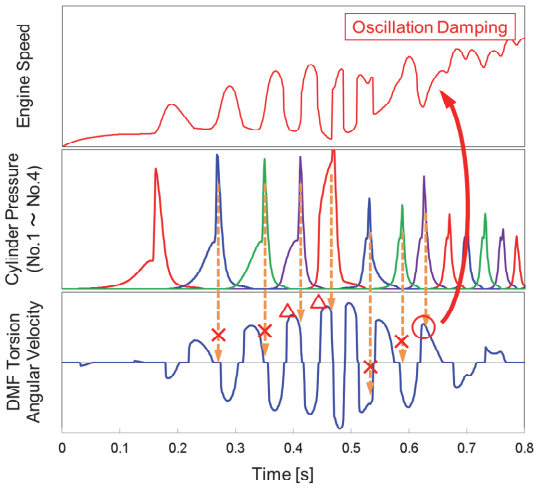


Fig. 13　Effect of Shift of Combustion Timing

(2) ハードウェア仕様の選定

DMF の仕様選定により共振を最小化するために，先述の DMF ねじれ角制御を適用し，エンジン停止位置や始動時の噴射量を同一とし DMF 共振周波数を変えて始動時間を評価した（Fig. 14）。この結果，DMF の共振周波数が低いほど始動時間が短縮（共振しにくい）できることが明らかになった。これにより，DMF 採用の本来の目的である走行時の車両振動性能を改善しながら，始動性能に対して最大限有利となる仕様選定を CAE により行った。

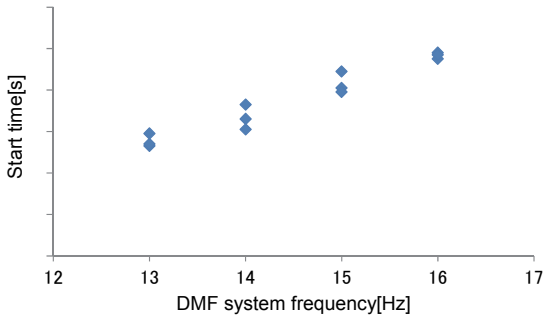


Fig. 14　Engine Start Time – Frequency Relation

5.2　実機検証

前述の共振を最小化する DMF 仕様を適用し，DMF ねじれ角制御技術の有無による第一圧縮行程気筒のピストン停止位置-138deg.ATDC から再始動した時のエンジン回転数挙動の違いを Fig. 15 に示す。制御なしの結果と比較し，DMF ねじれ角が抑制されることにより始動後半のエンジン回転数 500rpm 付近を中心にエンジン回転数が大きく振れる現象が抑制されているのが分かる。

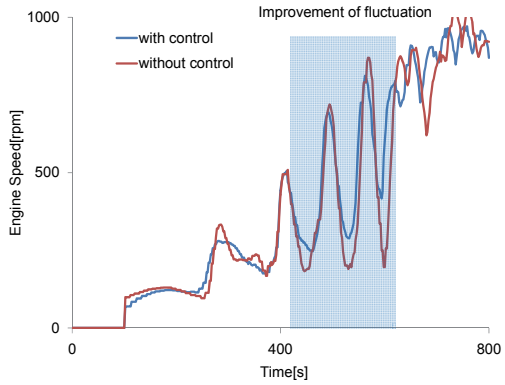


Fig. 15　Experimental Results of Restart from -138deg ATDC between with and Without DMF Torsion Angle Control

6. おわりに

CX-5 に採用された SKYACTIV-D　i-stop の開発では，開発のさまざまな段階で，モデルベース開発を適用することにより，従来の実車を相手に実験を繰り返す開発手法から脱却し，開発期間を劇的に短縮できた。今後も本手法の適用範囲を更に拡大し，お客様にマツダ車らしい「感動的なドライビング体験」を提供できる車を効率的に開発していきたい。

参考文献

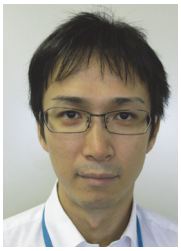
(1) 猿渡ほか：マツダ i-stop（アイ・ストップ），マツダ技報，No.27，pp.9-14（2009）
(2) 中本ほか：新型ディーゼルエンジンのアイドルストップ技術，第 22 回内燃機関シンポジウム，pp.415-420（2011）
(3) H.J.Curran ほか：A Comprehensive Modeling Study of n-Heptane Oxidation, Combustion and Flame, Vol.114, pp.149-177 (1998)

■著　者■


中本 仁寿


中島 宏幸


朝倉 浩之


寺岡 陽一


田賀 淳一

特集：モデルベース開発

15

SKYACTIV-DRIVE を支えたモデルベース開発
Model based Development for SKYACTIV-DRIVE

三谷 明弘*1　Akihiro Mitani
柴田 哲孝*2　Tetsutaka Shibata
清岡 毅*3　Tsuyoshi Kiyooka
南 竜洋*4　Tatsuhiro Minami

要約

マツダでは，技術開発の長期ビジョンである「サステイナブル“Zoom-Zoom”宣言」に基づき，環境に優しく，走って楽しい車造りを目指している。SKYACTIV-DRIVE では，低燃費，ダイレクト感，スムーズで力強い発進，滑らかな変速，を追求しており，トランスミッション制御開発ではこれらの開発目標達成に加え，飛躍的に増加する各ユニットとの協調制御も併行開発しなければならない。

SKYACTIV-DRIVE の制御開発では，モデルベース技術を基に開発プロセスを改善することで，多様化する技術開発を支え，機種開発の短期間化を実現した。本稿では，SKYACTIV-DRIVE の制御開発で導入した，モデルベース技術を基にした 3 つの技術について紹介する。

Summary

Mazda aims to build environmentally friendly and fun-to-DRIVE vehicles based on the long-term vision, the Sustainable "Zoom-Zoom" concept. "Low fuel consumption", "direct feel", "smooth and powerful startup" and "smooth gearshift" were focused on in the SKYACTIV-DRIVE development.

In order to shorten development period, and develop new function, we improved the development process by applying model based technology during the development of SKYACTIV-DRIVE. This paper introduces the model based technology which supported development of SKYACTIV-DRIVE.

1. はじめに

近年，車における制御システムでは，各システムの機能の多様化，高性能化と共に，ユニット間の協調制御が増加しており，ソフトウェア開発の規模が飛躍的に増加している。更に車両適合させるパラメータの数も膨大となっており，その開発と検証に多くの人員と，長い期間を要している。またトランスミッション開発においても，早期開発を実現するためには制御対象となるトランスミッションユニットのハードウェア開発と，その制御手段となるソフトウェア開発を併行して行う必要がある。

従来から開発効率化のために取り入れられてきたモデルベース技術を，開発プロセス及び制御技術に対して適用範囲を拡大させることで，SKYACTIV-DRIVE の開発[(1)(2)(3)]を成功に導いた事例について紹介する。

2. SKYACTIV-DRIVE 開発プロセス

一般的にトランスミッションを動作させる各機能の開発は，下記 3 つのプロセスで構成される V 字サイクルで定義できる（Fig. 1(a)）。

① 仕様設計の実施
② 協力メーカによって TCM（Transmission Control Module）を試作して制御ソフトウェアを実装
③ 納入された TCM を用いた検証及びキャリブレ

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

ーション（パラメータの車両適合）の実施

制御ソフトウェア全体の開発プロセスでは，最終的な製品に対する要求から，必要な要件，性能を定義し，必要な個別機能に落とし込む。機能開発を行うたびに①～③の V 字サイクルを繰り返すことで，最終的なソフトウェアへ育成していく（Fig. 1(b)）。

またオートマチックトランスミッションでは遊星ギヤや油圧クラッチの数など内部の構成要素を自在に組み合わせることでギヤ多段化を実現している。構成要素に応じてアクチュエータを駆動する制御方法が異なり，その構成に最適な制御プログラムを構築する必要がある。

SKYACTIV-DRIVE では，さまざまな機能において理想を追求するため，従来機種とは全く異なる構成要素を採用した。それら構成要素に対応する制御プログラムは，多くが完全に新規開発となり，限られた開発期間の中で高品質と高機能化を両立させるために，開発効率の改善が必要であった。

2.1　V 字サイクルの改善

開発効率の改善を行うために，従来の個々の機能を順番に V 字サイクルを繰り返す開発から，各機能ごとの V 字サイクルを同時併行で開発し，更に V 字サイクル自体の短縮を検討した。その結果，②TCM 試作プロセスを省略し，更に③検証プロセスでの作業効率化を実現する「ラピッドプロト TCM 環境」（3 章）を導入した。

従来機種ではソフトウェアシミュレーションを仕様検証に活用していたが，より実トランスミッションに近い精度を実現する「リアルタイムシミュレーション」（4 章）を，導入することで品質検証及びキャリブレーション工程を前倒しさせた。ラピッドプロト TCM 環境と組み合わせることで，機能開発における V 字サイクルを効率化した（Fig. 2 (a)）。

これらの技術導入により，機能単位で併行開発を行い，機種開発にかかる期間を大幅に短縮した。これら技術の適応事例を「機能開発への活用事例」（5 章）で紹介する。

2.2　機種開発サイクルの効率化

従来トランスミッションは，諸元や制御機能を最適化すると同時にさまざまな車種に搭載される。そのため，トランスミッションの機能開発を伴わない車種開発においても，搭載するパワートレインに合わせ，再度キャリブレーションを実施して車両適合させる必要がある。

SKYACTIV-DRIVE ではハードウェア面での精度向上技術と合わせて，高精度の仮想トランスミッションモデルを制御ソフトウェアに取り込むことで，従来機種に比べ高精度かつ高速な変速制御を実現した。これが「次世代モデルベースアルゴリズム」（6 章）である。

この技術導入により高機能を実現すると共に，ユニットの物理特性を示す諸元データの設定と最小限のキャリブレーションのみで車両適合を可能としており，多様化する機種開発を短期間かつ省資源で開発することに成功した。

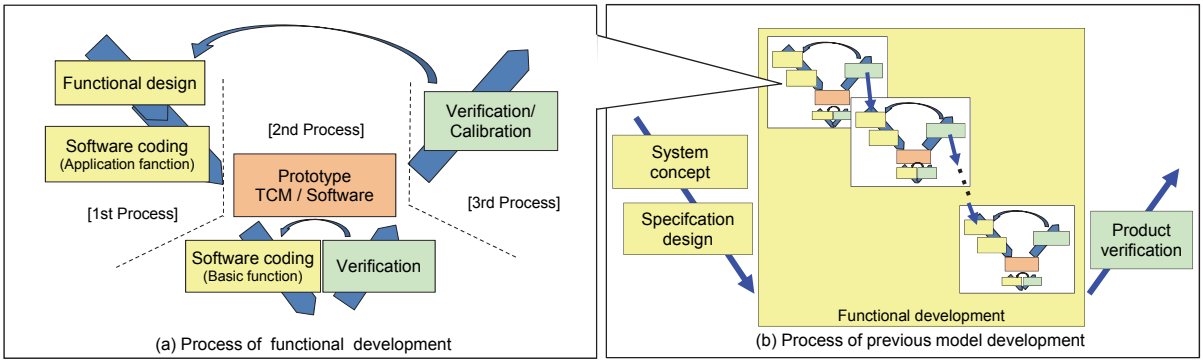


Fig. 1　Process of Previous Development

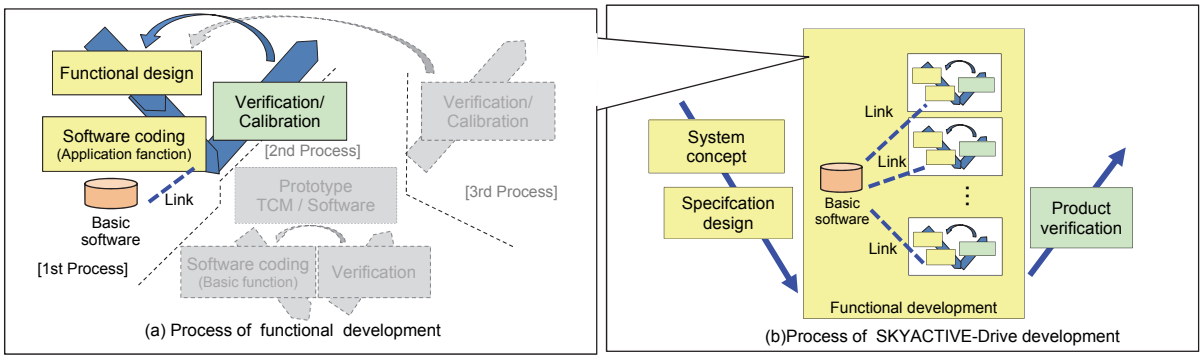


Fig. 2　Process of SKYACTIV-DRIVE Development

3. ラピッドプロト TCM 環境

ラピッドプロト TCM 環境とは，ソフトウェア開発の V 字サイクル短縮手段として導入したソフトウェア開発環境の総称である。下記の機能を備えた PC と対応する TCM で構成される。

① ソフトウェア生成機能
② リプログラミング（TCM への再書き込み）
③ TCM のデータエミュレーション
④ TCM 内データ，車両間通信のリアルタイムモニタ
⑤ データロガー

本ラピッドプロト TCM 環境を用いて，SKYACTIV-DRIVE の開発では，実際の TCM を使った機能検証や，実車や実トランスミッションを用いたキャリブレーション効率化をサポートする各種機能も合わせて実装した。

3.1　ソフトウェア生成機能

ラピッドプロト TCM 環境では，電気的な入出力と制御ソフトウェアの時間的管理（タスク管理）を扱う「ベーシックソフトウェア領域」と，変速制御などのトランスミッションの機能全般を扱う「アプリケーション領域」に，ソフトウェア構成上で分離した（Fig. 3）。

アプリケーション領域ではギヤ段制御や変速制御あるいは故障診断機能など，車両メーカごとの独自制御が織り込まれる。これらアプリケーション領域と OS（Operation System）の役割を果たすベーシックソフトウェア領域を分離，再リンクすることで，アプリケーション領域を自由に仕様変更し，TCM で動作可能なソフトウェアを即時生成する機能を実現した。

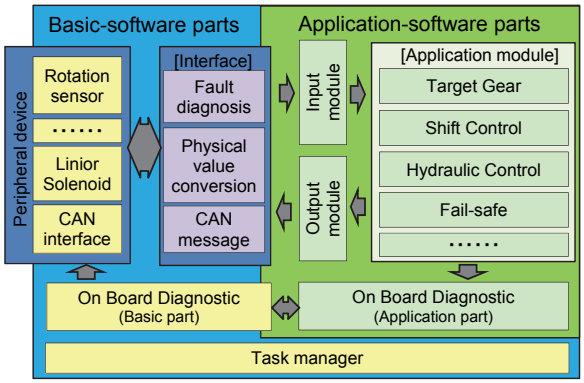


Fig. 3　Functional Definition of Control Software

3.2　開発環境構成

機能開発やパラメータの車両適合に必要な開発環境として，一般的に使われている CCP（CAN Calibration Protocol）をベースに通信プロトコルを効率化して採用した。開発中の TCM には，CCP をベーシックソフトウェア領域へ導入することにより，実作業で使用する機材は，ノート PC に CAN（Controller Area Network）インターフェースを組み込んだ構成を用いて実現した。

従来機種における開発では，マツダのパワートレイン開発における当時の標準機材を使用しており，各種イネーブラ資産が活用できるメリットがあった。その一方で，専用コネクタを後付けした特殊 TCM を試作する必要があり，専用機材と TCM との間にインターフェース BOX を中継し，配線の取り回しや機材の配置など，開発における制約が存在していた。

ラピッドプロト TCM 環境では，トランスミッション制御開発に必要な基本機能を前述の 5 項目に整理して，必要機能を実現するための機材構成とし，汎用機器を活用したコンパクトで拡張性，汎用性の高い開発環境を構築した。

4. リアルタイムシミュレーション[(4)]

マツダでは従来から，実際の車両やエンジンあるいはトランスミッションなどの実機を用いずにコンピュータ上で机上検証できるソフトウェアシミュレーション環境を導入しており，ソフトウェアの品質検証に活用している。

SKYACTIV-DRIVE の開発においては，車種，エンジン仕様あるいはトランスミッション諸元の組み合わせに対応できるようにシミュレーション環境を再整備すると共に，トランスミッション内部油圧のシミュレーション精度を実機同等まで向上させ，実時間と同じ時間軸でシミュレーション演算を行う環境を新たに構築し，開発プロセスにおける左バンクとなる機能開発へリアルタイムシミュレーションを採用した。

4.1　リアルタイムシミュレーション環境構成

SKYACTIV-DRIVE の開発で導入したリアルタイムシミュレーション環境では，TCM 及びエンジンを制御する PCM（Powertrain Control Module）は実機を採用し，各ユニットに接続されるアクチュエータやセンサなどを電子回路で構成した擬似負荷で模擬している（Fig. 4）。

TCM，PCM 以外のシミュレーション環境は，リアルタイムシミュレーション内に搭載する CPU モジュールで演算，制御される。CPU モジュールでは，エンジン及びトランスミッションの内部状態を，物理方程式を用いて高精度な仮想モデルで再現すると共に，補機類を含めた仮想車両モデルを演算している。作業者はアクセル，ブレーキなどを操作パネルで操作し，CPU モジュールによって現実時間と同じ時間軸で各モデルが演算され，リアルタイムシミュレーションが実行される。

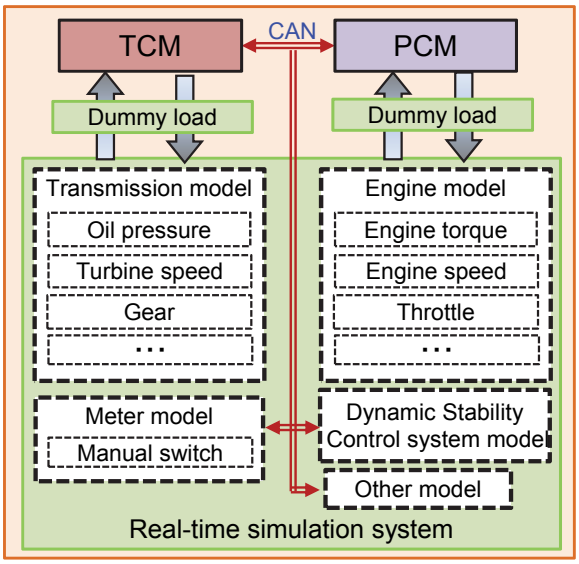


Fig. 4　Diagram of Real-Time Simulation System

4.2　拡張モデル

CPU モジュールに構成する仮想モデルを実車同様の単位に細分化することで，検証内容に応じてモデルから外部接続した制御ユニットに置き換えることを可能とした。トランスミッション油圧回路を仮想モデルで演算するのではなく，実トランスミッションに用いる油圧回路を接続したシミュレーション環境を新たに構築した。

SKYACTIV-DRIVE で採用しているギヤ段変速制御では，従来機種にはない高精度な油圧制御が必要となる。これらの技術では，油圧回路上に発生する微小な影響の積み重ねが無視できない。仮想モデルによるシミュレーションでは精度上回避できない誤差が生じるため，結果としてトランスミッション実機を用いた検証工程の負担を増加させてしまう。その対策として，仮想モデルではなく実際の油圧回路を疑似負荷として接続することで，高精度油圧モデルの仮想トランスミッションを実現した。

5. 機能開発への活用事例

トランスミッション制御開発では，ギヤ段変速時のクラッチ制御などトランスミッション単体で完結する機能開発のほか，エンジンやブレーキなどと協調する制御など，さまざまな機能を先述（Fig. 2）の V 字サイクルに従って開発を行う。

SKYACTIV-DRIVE の開発ではラピッドプロトTCM の導入により，マツダが開発するべきコアの制御であるアプリケーション領域を自由に仕様変更し，評価用の特殊環境を必要に応じて作成可能とした。合わせてリアルタイムシミュレーション環境を活用することで，特定の機能開発に特化させた評価環境の作成や，シミュレーション評価の実施を容易とした。

5.1　機能開発事例：故障診断の機能検証

故障診断の機能検証には故障状態を作り出すために実車やトランスミッション実機を用いた評価が必要となる。しかしながら，実車やトランスミッション実機を用いて故障模擬あるいは機能検証するには，検証目的によっては故障発生状態の再現が難しいケースがあり，網羅的な検証を行うためには多くの工夫と工数が必要であった。

マツダでは従来機種より，故障診断の機能検証にリアルタイムシミュレーション環境を活用していたが，SKYACTIV-DRIVE の開発では，サービス品質の向上を目的に故障部位を正確に特定できるよう故障診断機能を大きく進化させることにより，仕様設計の段階からリアルタイムシミュレーション環境を活用した。

より網羅的な機能検証を行うため，自動実行可能なシミュレーション環境を新たに構築し，パターンごとの合否判断も自動判別可能とした。これを用いて数十万パターンの評価を実施し，開発工数の大幅削減と網羅的な検証による品質向上を実現した。

更に，実車評価では危険が伴う，高車速での機能損失時のフェイルセーフ検証や，稀な発生頻度の故障形態での制御検証などにも活用しており，故障診断やフェイルセーフ制御開発の高品質化に貢献している。

5.2　機能開発事例：シフトインジケータ

新型アクセラでは，新たにシフトレバー横にレバー位置を表示するためのシフトインジケータが設置されており，シフトインジケータ表示は TCM とメータシステムとの協調制御によって実現している。

シフトインジケータ表示の機能開発においては，リアルタイムシミュレーション環境を用いて，メータ及びシフトインジケータの実機を駆動するシステムを構築し（Fig. 5），表示の応答性やユーザ操作に対する網羅的な品質確認を行った。その結果，インジケータ表示検証を早期に開発完了することに成功した。

5.3　機能開発事例：最適メータ表示制御

パワートレインの魅力をより引き立てるために，車内のスピーカからエンジンサウンドを流す，あるいはギヤ変速時にタコメータを素早く動かす，という演出が一般化している。マツダにおいても， SKYACTIV-DRIVE の持つ本来の変速レスポンスを運転者が適切に感じられるようにするため，最適なメータ挙動を実現する技術開発を行った。

レスポンス評価では，常にタコメータを見ながら評価することになり，実車では脇見運転となりがちで危険が伴う。また同じ変速を繰り返し行うことも，実車評価では多大な工数を要するが，リアルタイムシミュレーション環境をメータ評価用に再構築（Fig. 5）して繰り返し評価を実施し，短期間での技術開発を実現した。

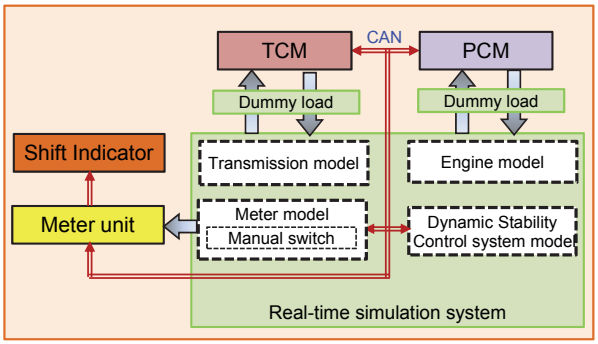


Fig. 5　Diagram of Real-Time Simulation with Meter System

5.4　機能開発事例：駆動力制御開発

「意のままに」のコセンプトを実現するため，SKYACTIV-DRIVE ではアクセル操作やカーブの曲率，路面勾配や外気温度などの周囲環境も考慮して，エンジン制御と協調して最適なエンジン出力と最適なギヤ段を選択する制御を採用している（例: コーナリング時のギヤ段保持制御（Fig. 6））。これらの機能開発では，制御の動作結果から運転者が感じ取るフィーリングが重要な開発視点となる。最初に定量的な視点から制御仕様を作成し，シミュレーション環境下で育成した後に，最終的な作りこみを実環境における車両評価にて行う。実車評価結果は定量的視点へフィードバックし，必要があれば仕様設計から再検討するプロセスを繰り返すことで，制御仕様を育成する。

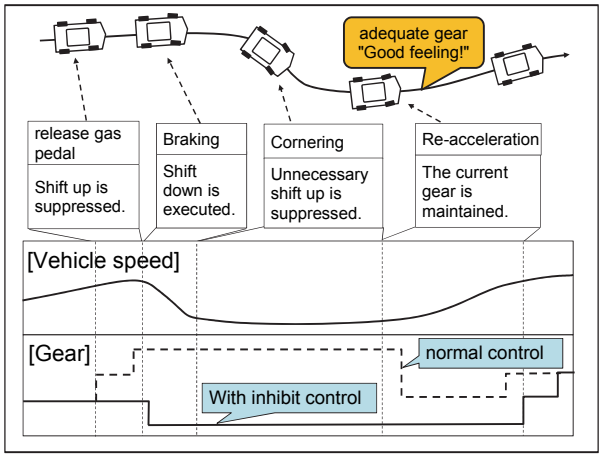


Fig. 6　Overview of Gearshift Control

SKYACTIV-DRIVE では，ラピッドプロト TCM 環境とリアルタイムシミュレーション環境を活用することで，机上における仕様設計の作りこみを実現した。また実車でのキャリブレーションや制御仕様評価を効率的に実施でき，ソフトウェアの即時生成機能を活用した迅速な仕様変更と再検証によって，従来機種より大きく進化した「意のままに」を実現する機能開発を短期間で実現した。

6. 次世代モデルベースアルゴリズム

従来機種の開発では，TCM の性能による制約（プログラム容量や演算速度など）から一部の制御に，制御特性をマップパラメータで表現する制御手法を採用していた。

さまざまな環境下でスムーズな変速ができるように，このパラメータをキャリブレーションする必要があり，ある程度穏やかな変速制御とする必要があった。

また，ベース機種からトランスミッション諸元やエンジンの変更がある場合，ベース機種のソフトウェアを流用すると諸元やトルク特性の違いから変速性能（変速の滑らかさ）にバラつきが発生してしまう。この性能バラつきを吸収するため，実車による車種適合が必要であった。

SKYACTIV-DRIVE では，製品ごとに生じる性能バラつきを補償する技術を導入し，ハードウェア面の精度向上を実現した。定量的な物理特性に基づく次世代モデルベース技術を制御ソフトウェアに導入することで，トランスミッション内部状態を推定し，高精度かつ高速な変速制御を実現した。

ベース機種からトランスミッション諸元やエンジン特性が変更される機種開発においても，物理特性に基づいた次世代モデルベース技術により，トランスミッション諸元などを設定し直すことで，最小限のキャリブレーションによる車両適合を可能とした。

6.1　変速制御の高精度，高速化

一般的な有段位トランスミッションでは，入出力軸の回転数を制御パラメータとして，内部クラッチを油圧制御して変速制御を行う。各ギヤ段は複数あるクラッチを締結する組み合わせで決定されるため，変速制御中は，各クラッチを適切なタイミングで締結及び解放を切り替える必要がある。

従来機種では，入出力軸の回転数変動と油圧スイッチの状態を基にクラッチの締結や解放状態を制御していた。締結や解放を行っている過渡状態では，回転数変動が少なくなる期間があり，上記の情報だけではクラッチの締結あるいは解放状態を正確に推定できない。そのため，あらゆる状況下でスムーズな変速を実現させるには，各クラッチの動作タイミングに若干の余裕を持たせ，緩やかに締結する必要があり，変速制御の応答性が抑制されていた。

SKYACTIV-DRIVE では，トリミングと呼ぶトランスミッションの固体ごとに性能補償する技術を導入すると共に，モデルベース技術に基づく仮想油圧回路モデルを TCM ソフトウェア内に織り込んでいる。この油圧回路モデルにより，リアルタイムにクラッチや油圧回路中のバルブの動作状態を推定することが可能と

なった。

ハードウェア面の精度向上と共にソフトウェア面からクラッチの動作タイミング補正を行うことで，高速変速を行っても外乱に対して安定した変速制御を実現した。更に有段位トランスミッションでありながら，従来機種以上の変速レスポンスとスムーズさを両立した変速性能を実現した（Fig. 7，8）。

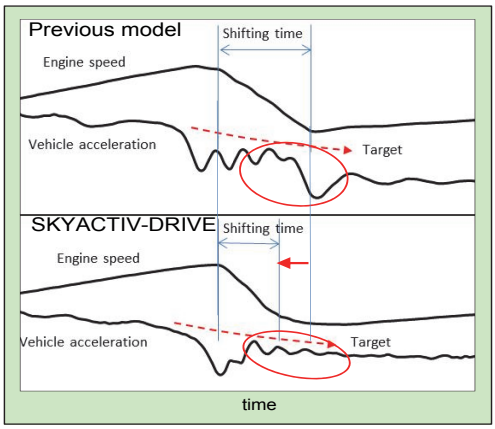


Fig. 7　Comparison of Upshift Control

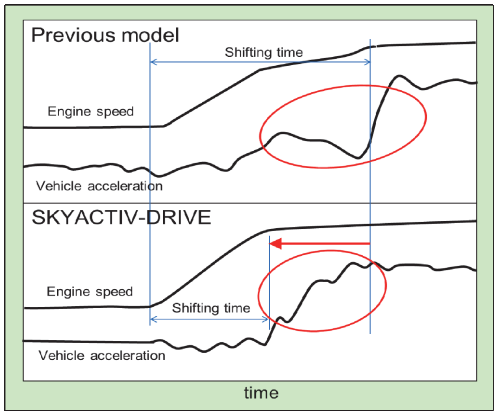


Fig. 8　Comparison of Downshift Control

6.2　機種開発サイクルの改善

従来機種では，一部制御に制御特性を簡易的な数式モデルに置き換えて特定のパラメータを軸にしたマップパラメータで表現する制御を採用していた。これらの制御には，さまざまな環境条件や運転操作に対応するための補正項が存在し，機種開発によってトランスミッションのギヤ比やエンジン特性などが変更されると，多くのパラメータを再キャリブレーションして車両適合する必要があった。

SKYACTIV-DRIVE では，物理特性に基づいた次世代モデルベースアルゴリズムを採用することで，制御の基礎となる諸元パラメータの設定と，制御を補正するための最小限のパラメータをキャリブレーションすることで，基本的な車両適合を完了させることができ，機種開発サイクルが完了する。

機種開発では，仕向けごとに地形や運転習慣の違いが存在するため，これらに最適なギヤ比や制御仕様を採用すると，その数だけ必要工数は増加する。SKYACTIV-DRIVE では，次世代モデルベースアルゴリズムの採用により機種開発サイクルを改善し，各仕向けに応じた最適なトランスミッション仕様の採用を実現した。

7. おわりに

SKYACTIV-DRIVE では，開発環境のみならず制御技術にもモデルベース技術を導入することで，トランスミッション開発における理想系を追求した。その結果，低燃費，ダイレクト感，スムーズで力強い発進，滑らかな変速，など従来機種から大幅な性能改善を実現した。またモデルベース開発の導入によって実現した開発プロセスの変更により，大きく開発効率を改善し，多様化する SKYACTIV-DRIVE の開発を支えている。

参考文献

(1) J. Doi, et al.: New MAZDA SYKACTIV-DRIVE Automatic Transmission, 10th International CTI Symposium in Berlin, A3 (2011)

(2) J. Doi, et al. : Neues Automatikgetriebe SKYACTIV-DRIVE von Mazda, ATZ Automobiltechnische Zeitschrift 113, September 2011, pp.682-687

(3) 土井ほか：SKYACTIV-DRIVE の開発，マツダ技報 30 号，pp.19-23（2012）

(4) 仲岸ほか：AT 制御系開発における HILS の活用，自動車技術会シンポジウムテキスト 2005 年 No.10-05, pp.7-11（2005）

■著　者■


三谷 明弘


柴田 哲孝


清岡 毅


南 竜洋

特集：モデルベース開発

16

SKYACTIV-D ノック音開発
Knocking Noise Reduction Technology of SKYACTIV-D

白橋 尚俊*1 Naotoshi Shirahashi
阿部 宏司*2 Hiroshi Abe
住谷 章*3 Akira Sumitani
住田 英司*4 Eiji Sumida
岩田 陽明*5 Kiyoaki Iwata
松原 武史*6 Takeshi Matsubara

要約

マツダは新世代クリーンディーゼルエンジンとして，優れた出力，燃費，エミッション性能に加え，従来モデルから更にノック音性能を改良した SKYACTIV-D 2.2L エンジンを開発し，新型アクセラへ搭載した。本稿では，ノック音低減として取り組んだ，エンジンから車両への伝達経路に基づく新たな開発プロセス及び採用技術の概要について報告する。

Summary

A new generation clean diesel engine, SKYACTIV-D 2.2L, was developed and applied to the New Mazda Axela. In addition to an excellent output, fuel economy and emission performance, the engine has less knocking noise than that of the previous diesel engine. This report describes the outline of the new development process focusing on the engine-to-vehicle pathway of the noise and adopted technology for the noise reduction.

1. はじめに

近年の世界的な環境志向の高まりにより，ガソリンエンジン（GE）に比べて熱効率の高いディーゼルエンジン（DE）に大きな期待が寄せられている。

欧州市場においては，早くから DE が注目され販売台数においても高い比率を占めてきた。一方で，ますます厳しさを増すエミッション規制への対応や，HEV や EV の台頭に伴い，DE においても更なる環境性能改善への取り組みが必要となっている。

これらの取り巻く環境から，DE ではより高効率な燃焼が求められ，その加振力は増大する方向にあり DE 特有のノック音が問題となるケースも増えている。とりわけ GE に遜色のない静粛性が求められる乗用車においては，高い環境性能とノック音性能の両立が大きな課題であり，エンジンと車両トータルでのノック音対応が重要となっている。

本稿では当最新 DE 開発で取り組んだ，ノック音開発プロセス及び採用技術の概要について解説する。

2. 新世代クリーン DE の仕様

新開発した SKYACTIV-D 2.2L[(1)(2)]の主要諸元を従来型 MZR-CD 2.2L と対比して Table 1 に示す。

従来型 DE に対し，低圧縮比化，2 ステージターボやピエゾアクチュエータを搭載した高応答インジェクタを採用することで燃費を向上させると共に，国内ポスト新長期規制及び EURO6 規制にも対応している。

これらの高い環境性能とノック音性能の両立を実現するため，新型アクセラに搭載している SKYACTIV-D では，①ノック音伝達経路の解明を基に，②燃焼加振力とエンジン構造特性コントロール，③エンジンから車体への伝達特性コントロールを行っている。これらの各特性はノック音を低減する上で重要な機能であり，この機能を高めることで効果的なノック音開発を行い，相反する性能との両立をより高次元で実現する開発プロセスに取り組んだ。以下それぞれの対応技術について述べる。

*1～3，5，6　エンジン性能開発部
Engine Performance Development Dept.
*4　NVH 性能・CAE 技術開発部
NVH&CAE Technology Development Dept.

Table 1　Specifications of MZR-CD and SKYACTIV-D

Engine	MZR-CD (Previous model)	SKYACTIV-D (New model)
Max. power	136kW / 3500rpm	129kW / 4500rpm
Max. torque	400Nm / 2000rpm	420Nm / 2000rpm
Emission standard	EURO5	EURO6 JPN PNLT
Displacement (cm3)	2184	2184
Bore X Stroke (mm)	φ86 X 94	φ86 X 94
Compression ratio	16.3	14
Peak firing pressure (Mpa)	17.5	13.5
Fuel injection system	common rail system solenoid type(200MPa)	common rail system piezo type(200MPa)
Nozzle	10hole 900cc/min.	10hole 1112cc/min.
Turbocharger	variable geometry turbocharger	serial sequential 2 stage turbocharger
Crankshaft main / Pin journal dia. (mm)	φ60 / φ51	φ52 / φ52
Aftertreatment system	DOC+DPF under foot type	DOC+DPF with engine type

3. ノック音の低減

ノック音は，燃焼と同期して発生する間欠的な変動音であり，Fig. 1 のように 2.8kHz～3.8kHz の周波数帯域で特徴的に現れる。

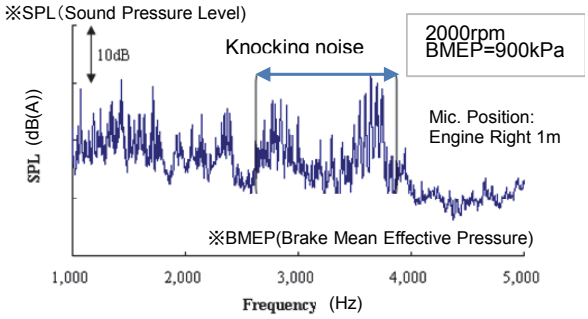


Fig. 1　Knocking Noise Frequency of SKYACTIV-D

このノック音を低減する手段として，従来から燃料噴射のタイミングや噴射量を最適化することで燃焼加振力を低減させる手法で対応してきた。

ノック音は Fig. 2 に示すように燃費性能や出力，エミッションなど関連する性能と相反する関係にあることが知られており，これらの各種性能要求との両立を燃焼特性の最適化のみで達成させるのは困難になってきている。そのため燃焼系の対応に加え，構造系の伝達特性においても支配的な特性因子を抽出しそれをコントロールすることが肝要となる。

SKYACTIV-D では，あらかじめ伝達特性の支配的な機能を抽出し，それをコントロールするプロセスを適用することで，高い環境性能を達成しながら従来モデルから大幅な低減を行った（Fig. 3）。

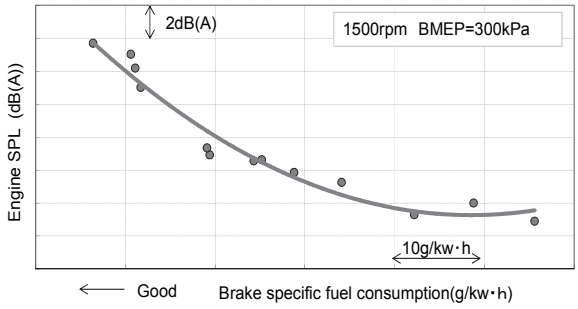


Fig. 2　Tradeoff between SPL and Fuel Consumption

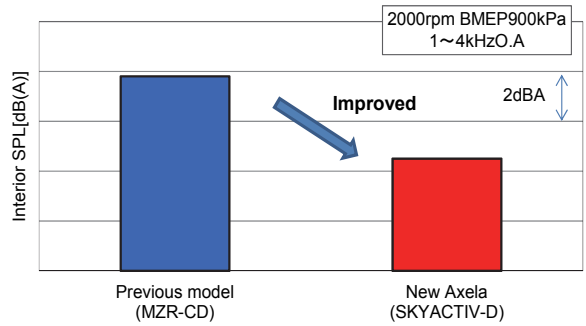


Fig. 3　Knocking Noise Level of New Axela

4. ノック音機能開発と低減技術

4.1　燃料噴射制御による燃焼加振力の低減

ノック音の加振力である CPL（Cylinder Pressure Level）の高周波成分は，筒内での燃え方に依存する。この燃え方と CPL の関係をシミュレーション及び実機運転により解析した結果，影響度の高い因子は熱発生率の最大高さと最大傾斜であることがわかってきた（Fig. 4）。

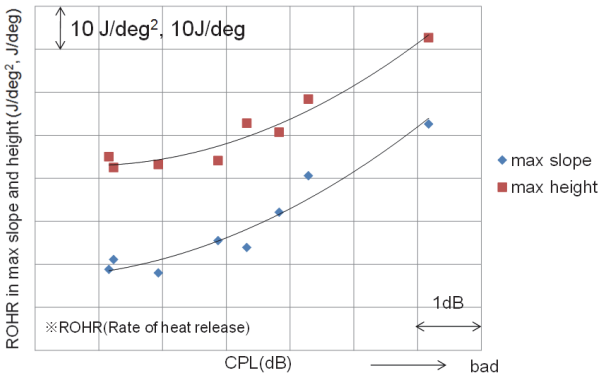


Fig. 4　Relation between CPL and ROHR

SKYACTIV-D では高応答のピエゾインジェクタと高圧コモンレールシステムを採用することで熱発生率の

高さと傾斜をより緻密にコントロールし，燃焼加振力の悪化を抑制しながら相反する燃費やエミッション性能との両立を図っている。

熱発生率をコントロールするには，メイン燃焼の着火をアシストするプリ燃焼の熱量を一定量確保することが重要であり，Fig. 5 に示すようにエンジン回転数，負荷，環境条件に合わせ最適な熱量となるように 2～4 回の近接マルチ噴射を行っている[3]。

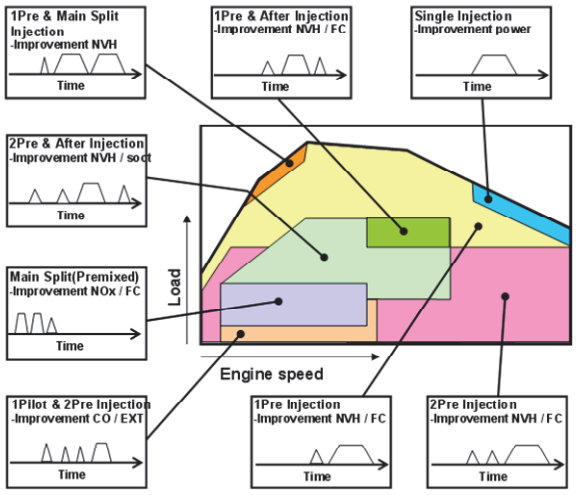


Fig. 5　Multi-Injection Pattern of SKYACTIV-D

一方で，追い越し加速などの急峻な過渡状態においては，定常走行状態と異なり過給や EGR などの空気系の遅れ，更に筒内の温度上昇の遅れから，着火環境が悪化し CPL が悪化する現象が発生する。

SKYACTIV-D では，時々刻々の過給圧や EGR 量の変化，及び筒内のシリンダ壁温を予測するモデルベース制御を用い，定常走行時の安定状態に対する着火環境の変化を推定し，Fig. 6 のようにパイロット噴射及びプリ噴射の噴射量及び時期を緻密に補正する噴射制御を採用している。

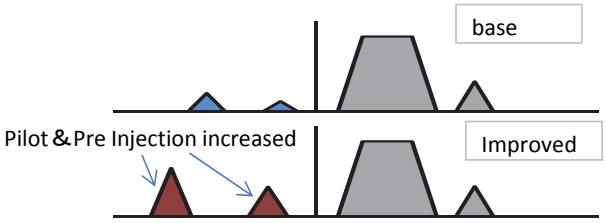


Fig. 6　Acceleration Control by Multi-Injection

これにより過渡中に弱まるプリ燃焼を強化し熱発生率の最大高さや傾斜の悪化を抑制した（Fig. 7）。

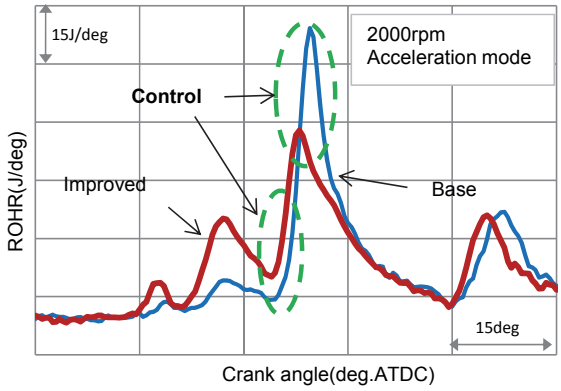


Fig. 7　ROHR Improved by Pre-Combustion Control

過渡制御の採用により，熱発生率をコントロールすることで，Fig. 8 に示すように過渡運転においても CPL の悪化を抑制することができた。

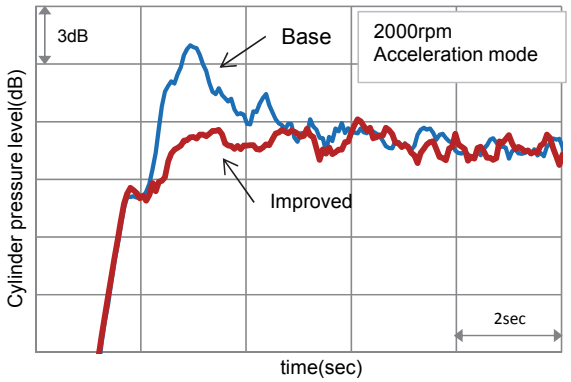


Fig. 8　CPL Performance of Acceleration

4.2　ノック音の伝達経路

ノック音はその原因となる燃焼からドライバの耳位置に至るまでには，エンジン本体内，エンジン本体から車体，そして車内のドライバ位置まで，非常に多くの伝達経路が考えられる。効率よくノック音を抑制するためには，主要な伝達経路を解明することが重要である。

そのために，加振力となる燃焼圧力からエンジン音源に至る，エンジン本体内の主要な伝達経路の把握及び，エンジン音源部から車室内へ伝播する主要な伝達経路の把握を行った。

Fig. 9 に，エンジン本体から放射されるノック音成分の伝達経路の寄与率を示す。CAE 及び試作エンジンでの計測結果から，約 80%がピストンからコンロッドを介し，クランクシャフトへノック音成分の振動が伝わり，更にクランクシャフト軸受部，シリンダブロック側壁面へと振動伝達していることがわかった。

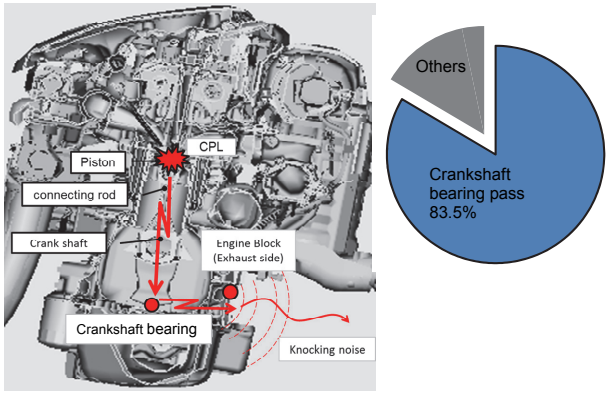


Fig. 9　Major Transfer Pass and Contribution Ratio in Power Train

また，Fig. 10 に，エンジンからドライバ耳位置に至る伝達経路の寄与率を示す。主に車室内に近いエンジン排気系側を音源として，約 75%はダッシュパネル下部及び，フロントコンソール（シフト部）を含むフロアからの伝達寄与が大きいことがわかった。

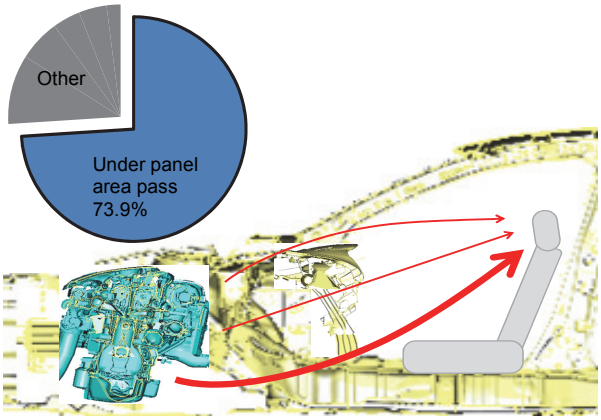


Fig. 10　Major Transfer Pass and Contribution Ratio in Vehicle

これら燃焼室からエンジンの各部品，そして車両に至る DE ノック音の主要伝達経路に基づき，各重点機能及びその制御因子の抽出を行った（Fig. 11）。

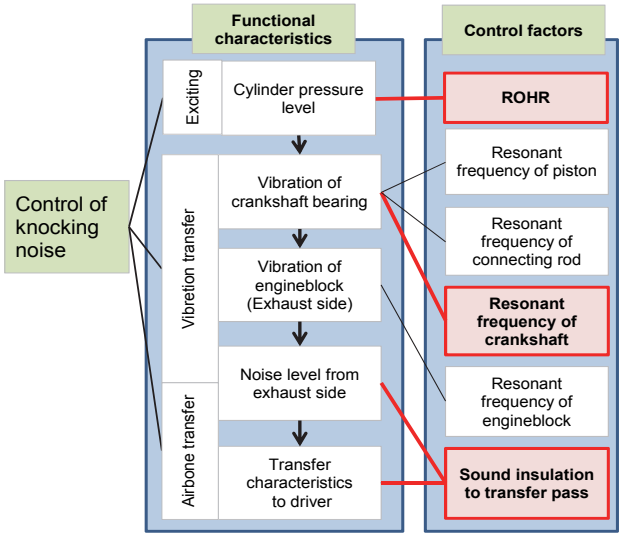


Fig. 11　Functional Characteristics and Control Factors

SKYACTIV-D は開発の初期段階で，これらの重要機能のうち，前項で述べた燃焼特性のコントロールに加えて，伝達経路に対し影響度の高いクランクシャフト軸受部振動特性，車室内への伝達特性に着目し対応を行うことで効率的にノック音を低減することができた。

4.3　クランクシャフトの振動伝達低減

ノック音コントロールの重要機能であるエンジン本体の伝達特性を改善するため，試作エンジンを用いてピストン，コンロッド，クランクシャフトなどの主運動系部品ならびにシリンダブロック周りの動特性を加振計測により把握することで，これらの特性とノック音とに高い相関があることがわかった（Fig. 12）。

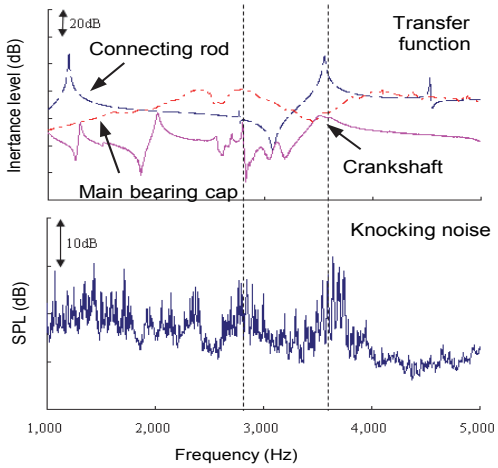


Fig. 12　Relation between Transfer Function and Knocking

SKYACTIV-D では，クランクシャフトの振動モードと伝達特性に注力して改善検討を行った。対象として着目したのはクランクシャフト後端近傍に曲げが発生する振動モードである（Fig. 13）。

CAE でウェブ部やカウンターウェイト形状の最適化を行い，また DMF（Dual Mass Flywheel）のプライマリ質量変更を行うことで対象モードの再配置を行っている。

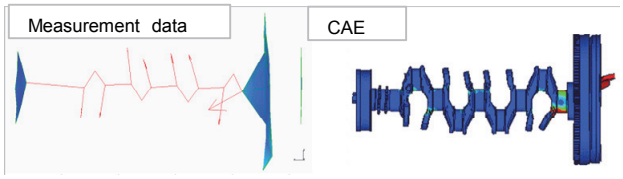


Fig. 13　Resonance Mode of Crankshaft

これによりクランクシャフトの振動伝達特性を Fig. 14 のように変化させ，Fig. 15 に示すようにエンジン本体から放射されるノック音を低減した[4]。

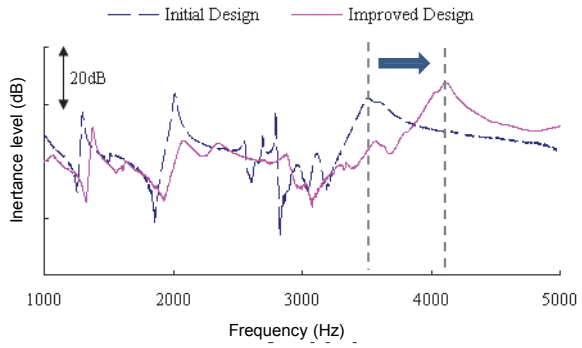


Fig. 14　Transfer Function of Crankshaft

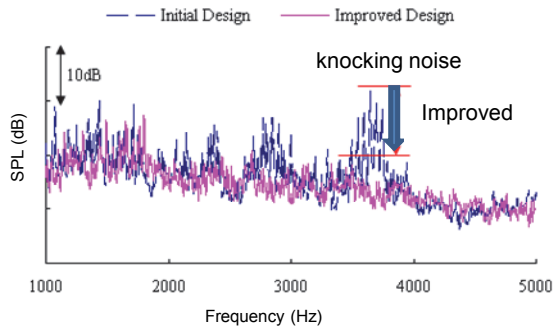


Fig. 15　Improved Design Effect on Knocking Noise

4.4　伝達経路への遮音対応

DE ノック音の車室内への伝達を効率よく制御するため，主要伝達経路に着目し，エンジン・車体による最適な遮音設定を行っている。

音源であるエンジンについては，アコースティックカメラによる音場解析により，排気系側の発生部位を更に詳細に切り分けを行い，部品別の寄与率を求めることで，Fig. 16 に示すようにシリンダブロックやオイルパン，排気系部品などに効果的な遮音材を設定した。

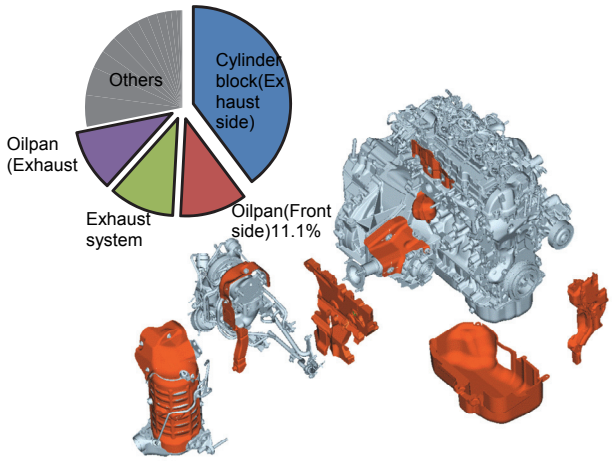


Fig. 16　Insulation Cover of Engine

車体側においても，実走行状態のエンジンルームや車内の多点計測，更にスピーカ加振による遮音量計測もあわせて行うことで，主要伝達経路であるダッシュパネル下部からアンダ構造にかけて更に詳細に経路分析を行った。それぞれの寄与率を求めることで，Fig. 17 に示すような，ダッシュパネル下部からアンダ構造部に設定しているインシュレータ及び，車内フロア領域のコンソール内部に効果的な遮音材の設定を行っている。

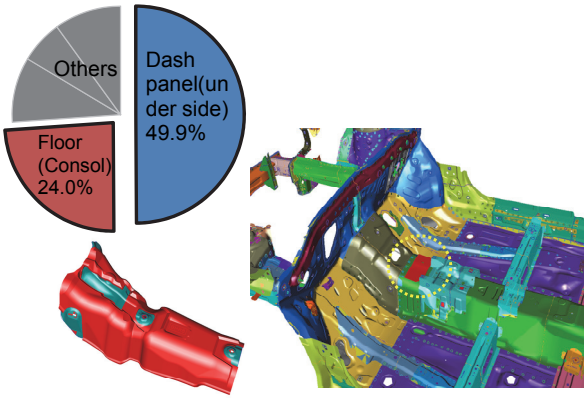


Fig. 17　Insulation Cover of Vehicle Components

5. まとめ

マツダは出力，燃費，エミッション性能を高次元でバランスさせつつ，従来型を上回る静粛性を達成した新世代クリーンディーゼルエンジン，SKYACTIV-D 2.2L を搭載した新型アクセラを開発した。

(1)　開発初期より，ノック音の伝達経路に基づいた重要機能の絞り込みと，その機能を CAE と実機検証により強化する開発プロセスに取り組んだ。これにより効果的な対策を行い，高い環境性能と両立しつつ大幅なノック音の低減を実現した。

(2)　ピエゾインジェクタによる精密な噴射制御に加え，着火環境予測モデルにより，定常だけではなく過渡時の熱発生率コントロールも行うことで，加速シーンでの適切な燃焼加振力に制御することを行った。

(3)　主要な伝達経路内でエンジン・車体トータルで伝達特性や遮音機能を最適化することで，重量やコストとの高次元な両立を行った。

今後，重要機能のモデルベース開発を加速させ，お客様に走る歓びと高い環境性能・快適性を提供できるよう，SKYACTIV-D の更なる進化を目指していく。

参考文献

(1) 大塚雅也：ディーゼル燃焼騒音のエンジン構造での低減方法，自動車技術会学術講演会前刷集 20055143（2005）

(2) Sakono, et al. : Mazda SKYACTIV-D 2.2L Diesel Engine, AACHEN COLLOQUIUM 2011, p.943（2011）

(3) 森永真一ほか：SKYACTIV-D エンジンの紹介，マツダ技報，No.30，pp.9-13（2012）

(4) 住谷章ほか：最新ディーゼル機関の静粛性向上技術，自動車技術会論文集 Vol.67，No.7（2013）

■著　者■


白橋 尚俊


阿部 宏司


住谷 章


住田 英司


岩田 陽明


松原 武史

特集：モデルベース開発

17

SKYACTIV-G ノッキング検出性の MBD
MBD for Knock Detection in SKYACTIV-G

阿部 広幸*1 Hiroyuki Abe
森本 博貴*2 Hiroki Morimoto
住谷 章*3 Akira Sumitani
荒川 博之*4 Hiroyuki Arakawa
井上 淳*5 Atsushi Inoue

要約

SKYACTIV-G では熱効率を徹底的に追求し，14.0 という高圧縮比を採用した(1)。この高圧縮比の採用にはノッキングに代表される異常燃焼の回避が重要であり，Knock Control System を用いた点火時期制御において，従来と比べ高いノッキング検出性に基づく緻密な制御が不可欠であった。今回，ノッキング発生時のセンサ振動状態を燃焼室空洞共鳴とエンジン構造体の連成応答解析で模擬し，エンジン構造変更によるノッキング検出性への影響を定量的に予測する手法を開発したので紹介する。

本技術の適用により机上検討の段階でノッキング検出性のポテンシャル見極めが可能となり，エンジンの点火時期制御開発を早期化した。

Summary

In the pursuit of thermal efficiency improvement, SKYACTIV-G has taken up a high compression ratio of 14.0. The avoidance of irregular combustion such as knocking was essential to the adoption of a high compression ratio, and even for ignition timing control which utilizes the Knock Control System more precision was necessary, requiring high knock detection accuracy. Sensor vibration during knocking was simulated by coupled response analysis of the combustion chamber resonance and the engine structure. The quantitative prediction of the effects of changes in engine structure on knock detection.

This technology enables knock detection ability to be assessed during the preliminary verification stages, accelerating the selection of engine specifications which enhance the ability to control ignition timing.

1. はじめに

SKYACTIV-G では，熱効率を徹底的に追求し，高圧縮比 14.0 を採用している。しかし，高圧縮比化を行うとノッキング（以下，ノック）やプリイグニッション等の異常燃焼が起こりやすくなる。これを回避するための制御による無駄なトルク低下なしに，高圧縮比化のメリットを最大限生かすため，ノックセンサで検出する振動でノック発生を判定する KCS（Knock Control System）を開発してきた。ノックによるトルク低下(2)およびプリイグニッション回避技術(3)については，既に技報にて紹介しているため詳細は割愛する。

この KCS により点火時期セットを大幅に効率化してきた。一方でエンジン開発時にノック強度の代用特性とするため設置した燃焼室圧力センサ値と，ノックセンサ振動値の相関が弱いため，エンジン構造変更がノック検出性に与える影響が定量的でなく，エンジン制御キャリブレーションに多くの工数を要していた。

そこで今回，燃焼室-エンジンの連成応答解析により机上でノック発生時におけるノックセンサ部振動を模擬する手法を開発した。これによりノックセンサ振動に対するノック加振力や，燃焼室からセンサ部への振動伝達特性に対する多くの制御因子を明らかにし，課題であった燃焼室圧力センサ値とノックセンサ振動値の関係を解明した。以上で得られた知見を基にノック検出性の MBD を行ったのでここで紹介する。

*1～4　エンジン性能開発部
Engine Performance Development Dept.
*5　パワートレイン技術開発部
Powertrain Technology Development Dept.

2. ノック発生～点火時期制御の流れ

ノックが発生すると Fig. 1 のように，燃焼室内の空洞共鳴を励起し，増幅した圧力波が燃焼室壁面を加振することでエンジン全体が振動する。この振動（加速度）をシリンダブロック吸気側壁面にあるノックセンサで検出している。

KCS は上記振動を周波数分析することで，気筒／サイクルごとに特定周波数帯での強度を算出し，振動強度の頻度分布を推定している。その分布の標準偏差などから算出した閾値（Kσ）を振動強度が超えた場合，ノック発生と判定する。

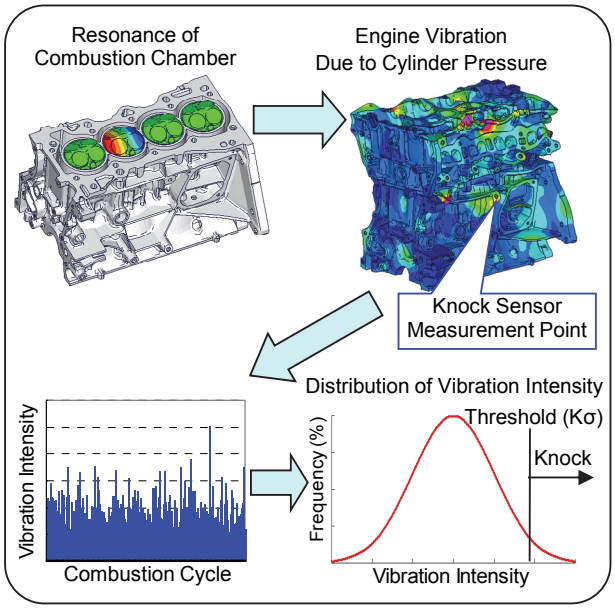


Fig. 1　Knock Detection Flow

3. 解析手法

3.1　解析モデル

解析は燃焼室（燃焼ガス），PT（Powertrain）ユニットを有限要素でモデル化して行う（Fig. 2）。

ここでいう燃焼室はノックが発生するクランクアングルにおける容積をモデル化する。解析で使用する燃焼ガス物性値は，燃料噴射量と燃焼室容積から求めた質量密度と式(1)から求めた音速を使用する。

$$\alpha = \sqrt{\frac{\kappa P}{\rho}} \qquad (1)$$

α：音速
κ：比熱(1.25)
ρ：質量密度
P：燃焼指圧

有限要素長は，ノック発生周波数帯の燃焼室空洞共鳴，エンジン振動状態を十分表現できる長さとする。今回は平均メッシュサイズ 8mm，約 300 万自由度でモデル化を行った。

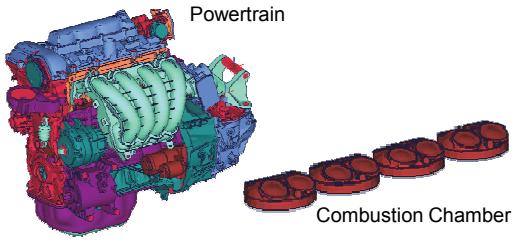


Fig. 2　Finite Element Model

3.2　解析手法

計算はモーダル周波数応答解析（NASTRAN Solution 111）で燃焼室－PT ユニットを連成させて行った。ここでは振動の伝達特性を評価するため，体積加速度（球面放射の加速度）で単位加振を行い，燃焼室－PT ユニット構造体でノックに対する振動応答感度を評価する。

加振点は燃焼室内のノック発生点とした。ノックは主にエンドガスゾーン（シリンダ外周部の未燃混合気部）で発生すると考えられており，本解析ではエンドガスゾーン全周でノックが発生すると想定した（Fig. 3）。

応答評価は以下で行う。

(1) 燃焼室指圧計測用センサ部の圧力
(2) ノックセンサ位置の振動（加速度）（Fig. 4）

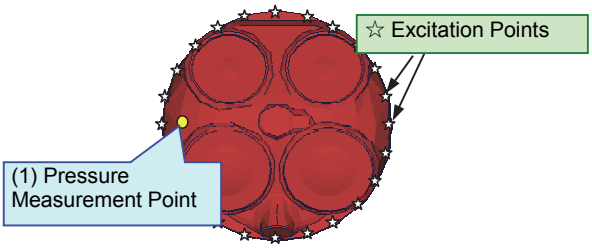


Fig. 3　Load and Response Points of Combustion Chamber

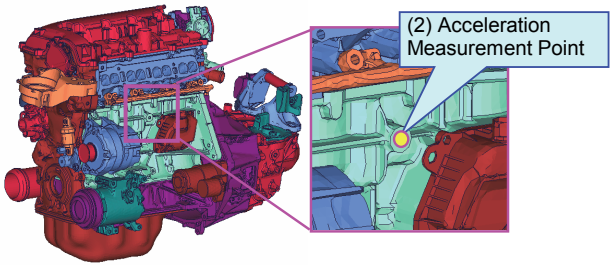


Fig. 4　Response Point of Knock Sensor

3.3　結果処理方法

結果処理は制御性評価周波数帯のノックセンサ加速度，燃焼室圧力値それぞれで RMS（Root Mean Square）値をとり，燃焼室圧力を横軸，ノックセンサ加速度を縦軸として加振点ごとに（ここでは 28 点）プロットする（Fig. 5）。

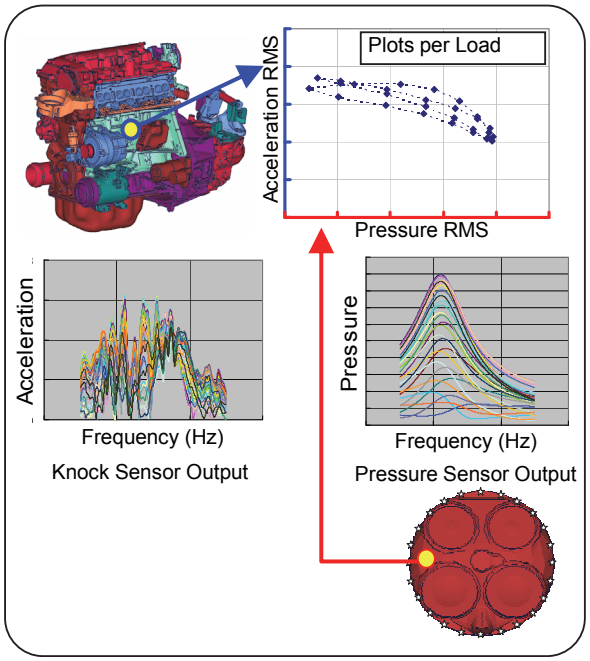


Fig. 5　Treatment of Calculated Data

ここで P_{max}（時間軸での指圧最大値）付近で定義された燃焼室形状において 1 次の空洞共鳴は Front-Rear モードと Intake-Exhaust モードがあり，これらはほぼ同じ周波数帯に存在する。

例えば Front もしくは Rear 側でノックが発生した場合，Front-Rear モードを主に励振することから指圧計測点は応答の腹となり，圧力値は大きくなる（Fig. 6(b)）。

一方，Intake もしくは Exhaust 側でノックが発生した場合，Intake-Exhaust モードが主に励振され，指圧計測点は応答の節となり，圧力値は小さくなる（Fig. 6(a))。

この結果より，ノック強度が一定でもノック発生位置により指圧センサ圧力はおよそ 8 倍も変わることを示している。よって冒頭で述べた燃焼室圧力センサ値とノックセンサ振動値との相関が弱いメカニズムの解明ができた。

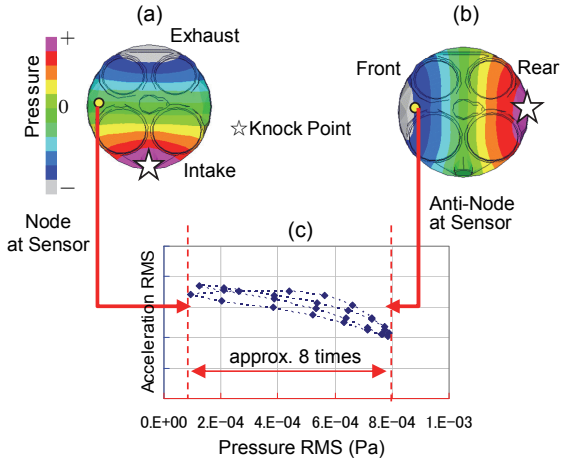


Fig. 6　Sensor Pressure by Loaded Point

前述のようにノック発生点（加振点）ごとに励起される空洞共鳴が変わり，それによりセンサ振動が変化するため，加振点をエンドガスゾーン全周として評価すると Fig. 6(c)のような点群となる。更にノックは P_{max} から以後 10° あたりの特定 CA（Crank Angle）間で発生するため，それぞれの燃焼室状態において Fig. 6 のような点群を求める必要がある。

Fig. 7 に例として，2 つの点火時期状態を評価するために行った下記 4 条件 CA の解析結果を示す。

① 弱ノック発生点火時期から 1°点火進角した場合の P_{max} 時の CA
② 上記進角時の P_{max} 後 10°の CA
③ 弱ノック発生点火時期から 5°点火遅角した場合の P_{max} 時の CA
④ 上記遅角時の P_{max} 後 10°の CA

ここで②，④はノック発生タイミングばらつきの最遅角側を表している。

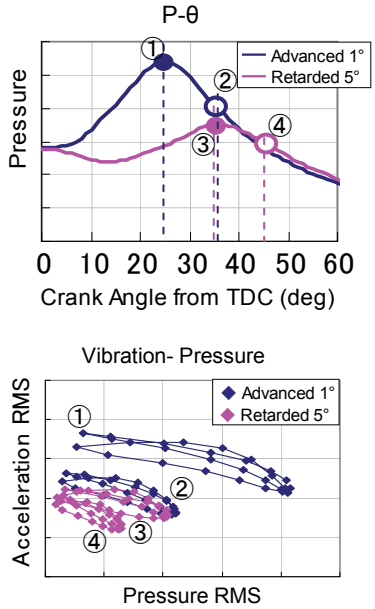


Fig. 7　Calculated Data for Each Crank Angle

Fig. 7 点群分布において，1°進角状態（紺色点）では CA25°（①）と 35°（②）間に分布が存在し，5°遅角状態（マゼンタ点）では CA35°（③）と 45°（④）間に分布が存在すると仮定し，No.1～4 気筒ごとに実機結果と CAE 点群分布比較を行うと，単位加振の解析結果にもかかわらず実機同様の特徴を再現しており，実機との相関があると判断した（Fig. 8）。

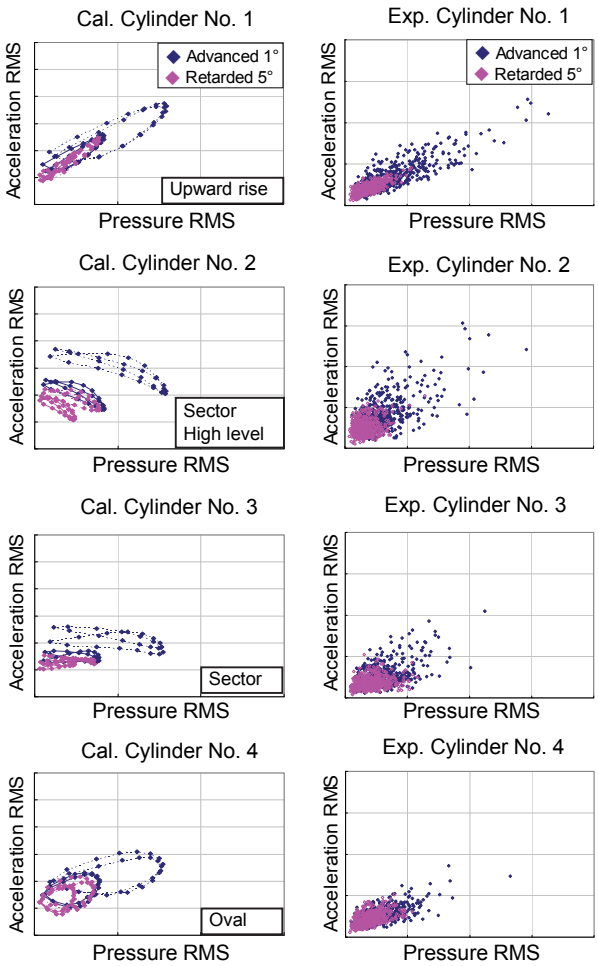


Fig. 8　Calculation/Experiment Vibration- Pressure

従ってこの振動－圧力分布結果を基にノック検出性の評価指標を定めた。

4. ノック検出性評価手法

KCS の点火時期制御では以下 2 つの現象が課題となる。

(1) ノックを判定できないため，必要な遅角を行わずノック音が聞こえる。

(2) ノックを誤判定し，不要な遅角を行ってしまいトルクが低下する。

これら現象はノック判定閾値に対するノックセンサ値の関係で決まるが，これに対して Fig. 8 の振動 - 圧力分布から理想特性を考えると以下のようになる。

Fig. 9(a)のように振動－圧力分布の縦軸（ノックセンサ振動）に着目すると同一加振力にも関わらずノック発生点，ノック発生タイミング CA25°，CA35°で縦軸値が S の幅でばらつく。つまりノック発生点－ノックセンサ振動への応答感度が S だけばらつくことを示している。

2 章「ノック発生～点火時期制御の流れ」で述べたが，KCS は振動強度の頻度分布を推定し，Kσ（閾値）を超えた時をノック発生と判定するため，応答感度ばらつきはない方がノック判定閾値は安定し，更に純粋なノック強度を評価できるため，ノック検出性としては理想である（Fig. 9(b)）。

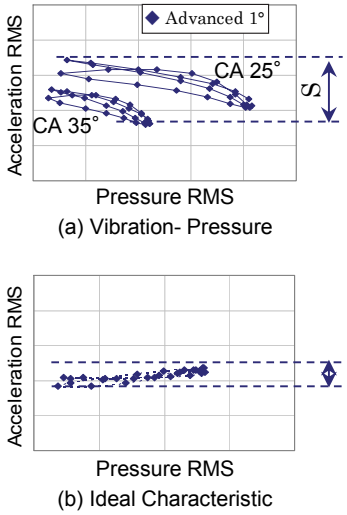


Fig. 9　Interpretation of Response Sensitivity

4.1　定常時のノック検出性評価

上記理想特性を踏まえ 1°進角状態のノック検出性を評価する場合，Fig. 10 のように分布の縦軸のばらつき幅を各気筒で評価し，ばらつき小をノック検出性良，ばらつき大をノック検出性悪と定義する。

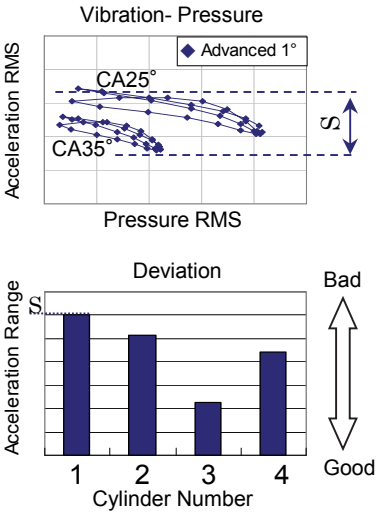


Fig. 10　Evaluation of Knock Detection During Steady State

4.2　過渡時のノック検出性評価

ある気筒でノック判定した場合，点火時期が一気に遅角するので，遅角前と評価する CA，燃焼ガス物性が変わる。それによる燃焼室圧力分布の変化からノックセンサ部への応答感度も大きく変化する。しかしながら遅角時において通常ノックは発生しない（粗悪燃料使用時，吸気高温時など除く）ため，応答感度が下

がる場合は問題ではない。一方，応答感度が大きく上昇する場合，遅角切り替わりでセンサ振動が上昇し，ノック判定閾値も上昇することでノック検出性が悪化する可能性がある。よって遅角切り替わり前後のノック検出性評価も必要であり， Fig. 11 における遅角前（進角時）分布の最小値と遅角時の最大値の幅 S'をばらつきとして各気筒を評価する。

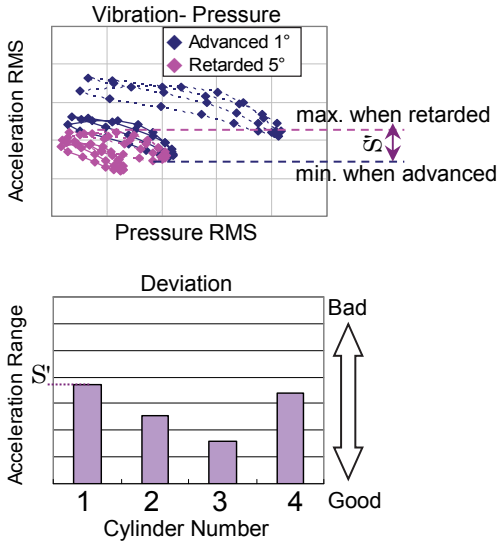


Fig. 11　Evaluation of Knock Detection During Transient

上記のように定常時（4.1 節）と過渡時（4.2 節），2 つの場合のノック検出性を評価することで，対象ユニット構造のノック検出性優劣を机上で評価できる。

5. おわりに

今回開発した技術により，ノックによるセンサ部の振動発生メカニズムを明らかにし，机上でノック検出性を評価する指標を確立した。この指標からノック検出性に優れた PT ユニット仕様検討が可能となり，高精度な点火時期制御を実現し，ノック音とエンジントルクを高次元でバランスしたエンジンを短期間で開発するプロセスを構築できた。

今後は次世代のエンジンに対しても本技術適用を進め，更にお客様に喜ばれる高品質な商品開発に貢献していく所存である。

参考文献

(1) 富澤和廣ほか: SKYACTIV-G 新型ガソリンエンジンの紹介， 2012 年自動車技術会シンポジウム（2012）

(2) 長谷川裕一ほか： CX-5 SKYACTIV-G のエンジン技術，マツダ技報，No.30，pp.3 - 8（2012）

(3) 江角圭太郎ほか： SKYACTIV-G 制御技術の紹介，マツダ技報，No.29，pp.36 - 40（2011）

■著　者■


阿部 広幸


森本 博貴


住谷 章


荒川 博之


井上 淳

特集：モデルベース開発

18 SKYACTIV エンジン開発を支える燃焼圧解析システム

Combustion Pressure Measurement and Analysis System for the Development of SKYACTIV Engines

吉田 昌弘*1　神邑 剛司*2
Masahiro Yoshida　Takashi Kamimura

要約

当社のパワートレイン開発領域では長年にわたり計測適合支援システムを内製化している。燃焼圧解析領域は1999年に雛形となるシステムを開発し，業務ニーズに合わせた育成を重ねてきた。2011年には車載用燃焼圧解析システムを開発し，SKYACTIVエンジン開発をサポートした。本稿では，当社の燃焼圧解析システムの概要とSKYACTIVエンジン開発での活用事例を紹介する。

Summary

Mazda, in its powertrain development area, has developed and manufactured its own measurement and analysis systems over the years. Mazda first developed a model for combustion analysis system in 1999 and improved it to match the needs of actual engine development. Then in 2011, Mazda developed a combustion analysis system for use in automobiles, which eventually supported the development of SKYACTIV engines. This study outlines the combustion analysis system developed by Mazda.

1. はじめに

SKYACTIV以前のエンジン制御開発では，エンジンユニットの燃焼状態の検証は定常運転時が大半で，実車・過渡運転時のPCM（Powertrain Control Module）制御開発は排ガス・燃費・ドライバビリティ等の諸性能の検証に直接頼る部分が多かった。

しかし，世界一の圧縮比14.0により出力と環境性能を高い次元で両立するSKYACTIVエンジンの実現には，定常・過渡全ての運転状態において最適な燃焼状態を制御で作り込む開発が必要である。

例えば，SKYACTIV-D(1)では，低圧縮化により筒内温度を下げ上死点付近での燃料噴射を可能にすることで最適な燃焼を実現することを狙っているが，低温時の始動性確保や暖機中の失火回避が課題であった。これらは，始動時・暖機時それぞれの場面で最適な燃焼モードに切り替えることで解決している。

このように，回転・負荷・エンジン及び環境状態ごとに最適な燃焼モードを作り込むために，緻密な噴射制御が可能なインジェクタを採用し，過給圧・燃料圧力・EGR等と併せた燃焼サイクルごとの制御を行っている。実車走行中は最適な燃焼モードをスムーズに切り替えることで，出力・燃費・エミッション・静粛性といった互いに背反する性能を高い次元で両立している。

つまりSKYACTIVエンジン開発では，実車走行評価を含めた全ての領域においてPCM制御による燃焼状態の育成・検証が不可欠であり，それらを支援するためのエンジンユニット評価用・実車評価用（車載型）の各燃焼圧解析システムと共に，膨大な燃焼制御データを即座に効率良く解析できる処理ソフトの開発を行った。

2. 燃焼圧解析システムの構成

以前よりエンジンユニットの燃焼圧解析は内製の計測システムにより行われ広く定着していた。しかし前述の通り，SKYACTIV開発においては過渡状態でのPCM制御と燃焼の連携解析を効率良く，より高い精度で行う必要がある。

求められる機能としては，テストコース・市場走行を含めた実車でのテスト機能，燃焼騒音指標のCPL（Cylinder Pressure Level）やトレースノックといった微細かつ高速な燃焼圧力変動の解析精度向上，燃焼と制御動作の解析効率向上である。

*1，2　走行・環境性能開発部
Driveability & Environmental Performance Development Dept.

これらを迅速かつ低コストで展開すべく，既存の内製システムをベースにハード・ソフトの資産を最大限活かして，計測及び処理ソフトの大幅な機能強化を実施した。更に新たな机上解析ソフト（PIAnalyzer）を新規に開発し，制御と燃焼の連携解析を非常に簡便に行えるようにした。

2.1　計測ハードウェア

計測ハードウェアとして，従来資産の完全活用・燃焼計測の精度と速度の向上・ユニット用と実車用の異なる要求ハード仕様への対応，これらを全て満足できる市販製品を慎重に選定した（Fig. 1，3のmeasurement device参照）。

選定ハードウェアは，最大計測電圧レンジ利用時でも約0.3mV/bit計測分解能がある。これはCPL解析や一般的な指圧センサ・チャージアンプの性能に対し十分な性能である。計測速度に関しても，6気筒分の燃焼圧力を計測しても燃焼騒音やトレースノックといった高速な燃焼変動を十分にとらえられる性能を有している。

更に，計測・処理の基本ソフトウェアをバイナリレベルで一本化しシステムの開発・保守を効率化すると共に，きわめて低コストでの展開を可能にしている。

(1) ユニット評価用ハードウェア

ユニット評価用は，新旧の計測ハードウェアを同期させることにより最大32チャンネルの高速計測を実現した（Fig. 1のsynchronous measurement参照）。

燃焼圧解析では，筒内圧力の他にクランクアングル（以下，CA）情報が必要となる。ユニット用計測システムでは，このCA情報を，クランクシャフト軸上に取り付けたロータリエンコーダから取得する。

PCM制御モニタデータに関しては，内製のPCM制御開発ツールであるMEPS（Mazda Ecu Parameter Setting tool）との通信により取得する。利用するプロトコルはASAMの通信規格ASAM MCD3-MCを独自拡張し，通信データのスループットを大幅に向上させたもので，最大1kHzでのPCM制御モニタが可能となっている。なおこの独自プロトコルはMHCP（Mazda Highspeed Communication Protocol）と呼び，HILS（Hardware In the Loop Simulation）・ユニット・実車などの試験環境で活用されている。

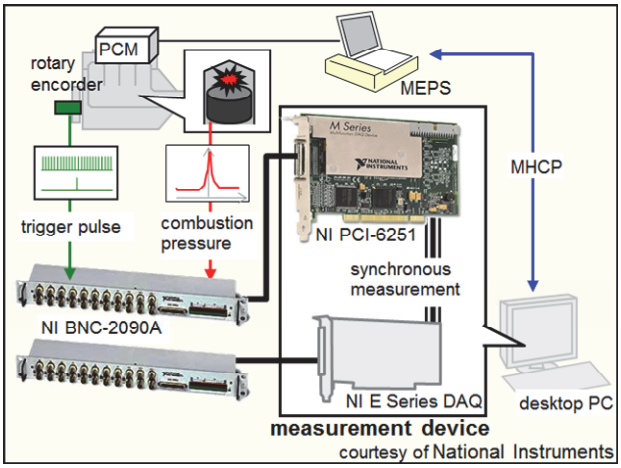


Fig. 1　Hardware Configuration for Engine Unit Testing

また当システムは，燃焼圧力の解析だけでなく，角度単位での解析機能を活かしたさまざまなメカニズム解析に利用されている。

SKYATIV-G[2]の燃焼開発には，気筒間の排気ガス干渉を抑えたスムーズな掃気が重要な役割を果たすため，排気系開発に利用するCFD（Computational Fluid Dynamics）解析精度向上が必要不可欠であった。

そのためFig. 2のように，ユニット評価用システムを利用した排気系の主要箇所の脈動を多チャンネル計測を行い，CFD解析モデル精度を検証した。これにより，モデルの育成と解析結果の確からしさが実証され，SKYACTIVエンジン排気系のモデルベース開発の拡大にも貢献した。

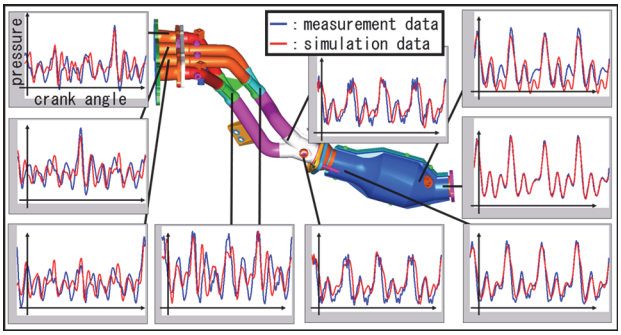


Fig. 2　Measurement Multi-Channel Exhaust Pressure for Verification of the Accuracy of CFD Simulations

(2) 実車評価用ハードウェア

計測デバイスは可搬性を考慮し，USB接続タイプを採用した（Fig. 3）。実車評価用の最大の特徴は，CA情報をエンジンのクランクアングルセンサ（以下，CAセンサ）信号から取得する点である。実車に搭載にされたエンジンは，スペースの制約上ロータリエンコーダを取り付けることができない。そのため，CAセンサ信号を分岐計測し，ソフトウェアで0.5deg単位に逓倍処理することで，燃焼圧解析に必要となる角度基準信号を内部生成している。

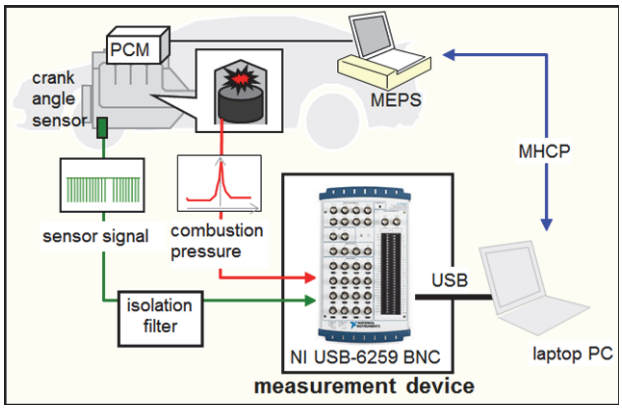


Fig. 3　Hardware Configuration for Automotive Testing

CAセンサを分岐する場合，車両の誤作動回避のため信号への絶縁処理が必須となる。市販絶縁フィルタでは車載時に余分な設置場所や電源が必要となるため，Fig. 4のように，システムの内部電源で駆動できるコンパクトな絶縁フィルタを作成した。

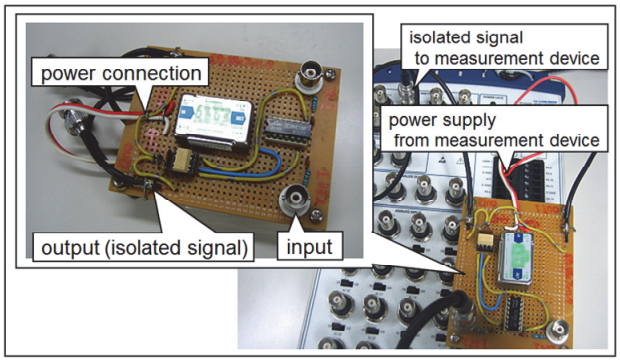


Fig. 4　Handmade Isolation Filter

2.2　計測ソフトウェア

燃焼圧解析機能として，クランク角度軸ベースの解析（以下，CA解析）と周波数軸ベースの解析（以下，Hz解析）とを持たせている。計測ソフトウェアの開発にあたり，CA解析とHz解析両方の精度の同時確保を目指した。

(1) 計測手法

市販の燃焼圧解析装置の大半は，ロータリエンコーダからの入力パルスエッジに同期してデータを計測する（以下，パルス同期計測）。パルス同期計測の場合，指定角度間隔で確実にデータを計測できる反面，計測周期がエンジン回転数に比例することにより，低回転側では必要な計測周期を確保できず正確な周波数解析ができない。

そのため本システムでは，Fig. 5の計測手法を採用している。燃焼圧力は，最大100kHzの高速一定周期計測を行うことで，全回転域で周波数解析に対し十分な計測周期を確保する。この周期計測とは別に，ロータリエンコーダやCAセンサからのパルスをカウンタで計測している。50nsの分解能でパルス間隔を計測することで，指定角度でのデータを正確な補間処理により高精度で得ている。この高速一定周期計測とカウンタの同時計測により，CA解析精度とHz解析精度を両立させている。（詳細は，2.2(3)～2.2(4)に後述）

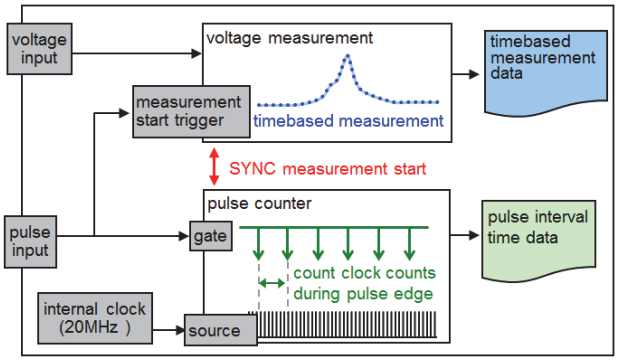


Fig. 5　Measurement Method for Improving the Analysis Accuracy

(2) 計測・解析可能範囲

当システムが採用した計測手法では，高速一定周期電圧計測とパルスエッジ間隔計測の開始同期が重要となるため，先頭パルスをトリガに電圧計測とカウンタの開始同期をとっている。これにより，クランキング開始直後からのデータ計測を実現した。

燃焼圧解析は，吸入～圧縮～膨張～排気の4工程を1サイクルとした，サイクル単位で処理する。最初に排気TDCを計測できた気筒を基準気筒としてサイクルを切り出す方式を採用することで，計測中のリアルタイム解析ができない領域は，Fig. 6の網掛け領域のように，計測開始～先頭排気TDC間と最小限の範囲にとどめた。

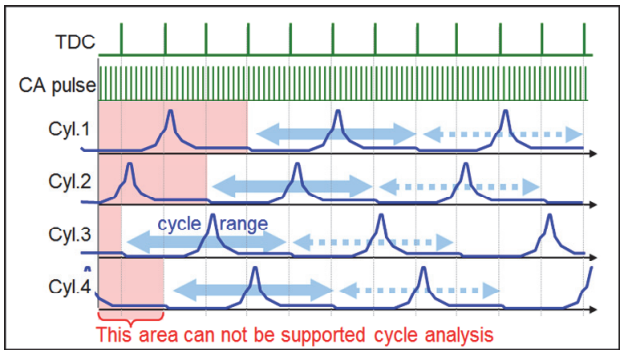


Fig. 6　The Analysis Data Range in the Measurement Data

なお，2.3で後述する机上解析ソフトウェアであれば全計測データの解析が可能となる。クランキングからの燃焼圧解析が可能になったことで，ユニットの始動時燃焼トルクと車両機構解析モデルを組み合わせ，エンジンマウント設計や車両振動の机上検証が行われている（Fig. 7）。

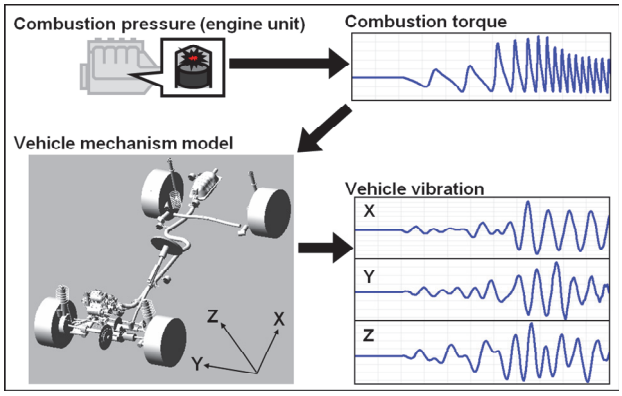


Fig. 7　Vibration Simulation Using the Vehicle Mechanism Model

(3) クランク角度解析

当システムでは，解析用途に応じて処理対象データを切り換えている（Fig. 8）。

CA解析には，パルス間隔データを元に高速一定周期計測データから生成したCA軸データを処理させている。

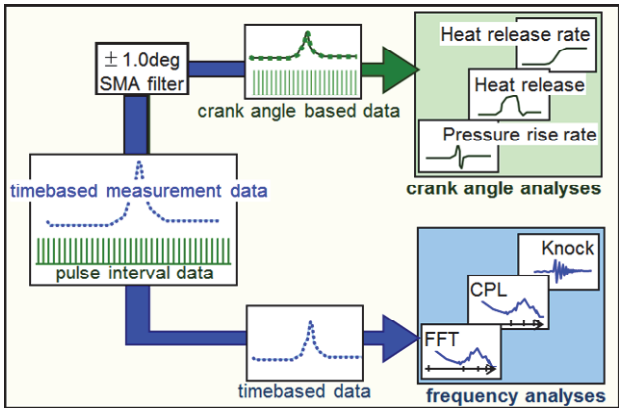


Fig. 8　Data Analysis Flow for Improving the Analysis Accuracy

この手法を採用したことで，パルス同期計測と遜色のないCA解析精度を保つと共に，入力パルス間隔幅に依存しない角度位置補正処理を実現した。

また，この計測手法はノイズ対策においても優れている。一般的に，高周波ノイズ対策には，低い周波数のみを通過させるローパスフィルタで計測信号を前処理する。しかし，燃焼圧力信号をローパスフィルタ処理した場合，燃焼騒音やノッキング解析に必要となる高速な圧力変動成分まで除去されてしまう。

しかし，高速一定周期データからCA軸データを内部生成するこの方式であれば，高周期成分が不要となるCA軸データに対してのみ演算によってフィルタ処理できる。Fig. 8に示すように，フィルタ処理には，±1.0deg相当の単純移動平均（SMA: Simple Moving Average）処理を採用した。Fig. 9は，SMAフィルタ有無による熱発生波形の変化を表したものである。SMAフィルタによりノイズによる変動が抑えられることが確認できる。

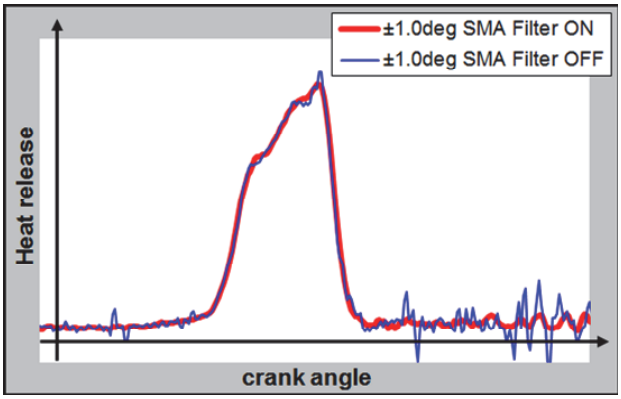


Fig. 9　Comparison of Heat Release with SMA Filter

SKYACTIVエンジン開発では，この熱発生波形やこの波形から算出する燃焼期間を解析することで，狙いの燃焼状態が実現できているか検証してきた。算出式に微分項が含まれる熱発生波形はノイズの影響を受けやすいが，SMAフィルタ処理によりその影響を最小限に抑えた。

(4) 周波数解析

SKYACTIV-Dの燃焼騒音の指標であるCPLは，FFT解析(3)の結果を処理することで得られる解析値である。その解析精度を確保するため，既出のFig. 8に示したように，Hz解析には一定周期計測データをそのまま利用する。

以下のFig. 10は，燃焼圧力信号を分岐し，一方はパルス同期計測（赤），他方は75kHz一定周期計測（青）し，それぞれのFFT解析結果をグラフ化したものである。計測周期がエンジン回転数に比例するパルス同期計測データでは，本来8kHz付近に存在する周波数特性に対して十分な計測周期を得られておらず，折り返し雑音としてその特性が4kHz付近に現れていることが分かる。

このようにHz解析に一定周期計測データを利用することで，周波数軸上の誤差を生じさせることなく解析できる。

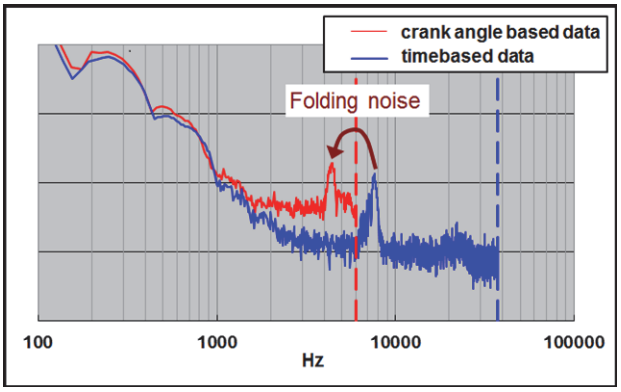


Fig. 10　Comparison of FFT Analysis (2000rpm 360ppr)

以上のように，当システムはSKYACTIVエンジン開発に必要となる全ての解析を高い精度で実現している。

2.3　机上解析ソフトウェア

当システムは，高速一定周期計測を採用したことで解析精度を確保した反面，計測データサイズが膨大となった。膨大な計測データに対しても，柔軟・迅速な解析を実現するため，机上解析ツール「PIAnalyzer」を開発した。

PIAnalyzerを利用することで，PCMモニタデータと燃焼計測データを連動させ，PCM制御の時間変化や燃焼状態のサイクル変化といったマクロな解析から，サイクル内の燃焼状態の角度変化といったミクロな解析までを即座に行うことができる。

SKYACTIV-Dは，常に最適な燃焼状態を実現するため，急激な操作による燃焼モード遷移中においても振動やショックが起きないように調整を行った。Fig. 11はその調整におけるPIAnalyzer活用イメージを示したものである。

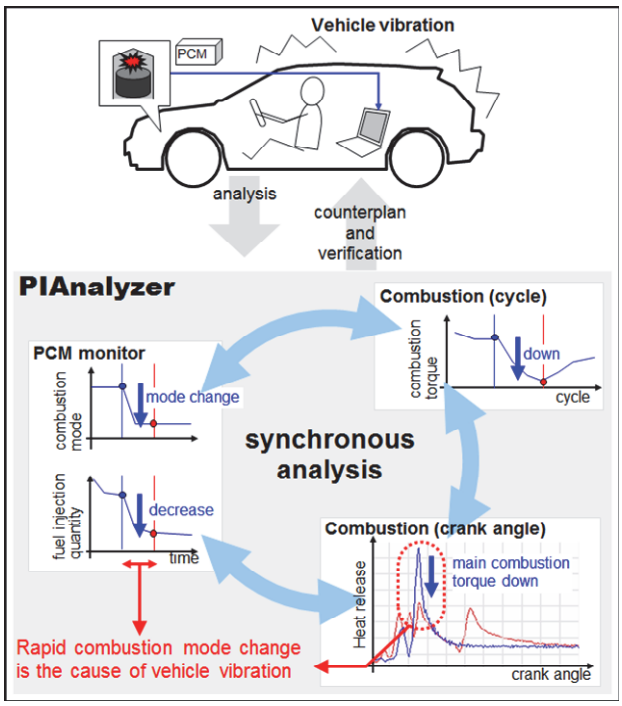


Fig. 11　Optimization of Combustion by Using Analysis Software (PIAnalyzer)

直感的な操作でPCM制御～燃焼状態～物理現象の同期解析を容易に行えるようになったことで，実車状態におけるPCM制御と燃焼状態の育成・検証を迅速かつ詳細に行うことができた。また，振動などの原因追求をテスト現場で迅速に行えるようになったことで，SKYACTIV-Dは前機種比の倍以上となる燃焼モードを有するにもかかわらず，前機種同等の期間で開発することができた。

3. おわりに

計測・解析システムに求められることは，開発エンジニアの経験やノウハウを即座にシステムに反映でき，またそれを柔軟に育成できることであると考える。マツダは長年にわたり計測・解析システムを内製化してきたことで，エンジニアのニーズをダイレクトに反映できる環境を構築した。今後は，全サイクルにおける走り・燃費・エミッションの最適バランスを実現するメカニズム解明に向け，軸トルクメータ・高速排気ガス分析手法・高速燃料流量計といった新たな計測技術と組み合わせた解析手法を実現していく。

参考文献

(1)　森永真一ほか：SKYACTIV-D エンジンの紹介，マツダ技報，No.30，pp.9-13（2012）
(2)　長谷川裕一：CX-5 SKYACTIV-G のエンジン技術，マツダ技報，No.30，pp.3-8（2012）
(3)　R.B.Randall：周波数分析ハンドブック，Brüel & Kjær，pp.146-184

■著　者■


吉田 昌弘　　神邑 剛司

特集：モデルベース開発

19

新耐候試験設備の紹介

Introduction of New Climate Testing Laboratory

森嶋 徹*1　Toru Morishima
丸本 祐一*2　Yuichi Marumoto
弘中 実*3　Minoru Hironaka
髙田 直哉*4　Naoya Takada

要約

近年急速に高まっている燃費や性能改善への要求，更に市場拡大に伴い，開発段階で決定すべき諸元が急増し，開発効率を向上するためのプロセスの抜本的な改革が進められている。仕様検討の段階において CAE を多用するモデルベース開発が改革の柱として成果を上げる中，実機テストへの要求に変化が出てきた。温度環境試験の領域においてこの要求に応えるため，耐候試験設備を新設した。そこで得られた実機テストの情報が CAE の実用性向上の取り組みに活用され，モデルベース開発推進に貢献している。

Summary

As a rapid increase of developing characteristics due to higher targets of fuel economy and driving performance, and also widely spreading markets in recent years, the R&D divisions has been challenging a drastic change of development method to make our work more efficient. Since Model Based Development with CAE became one of the main approaches to achieve it, requirements for measuring tests have changed. To provide sufficient data for them, Mazda has constructed the new climate testing laboratory to utilize its data for CAE and Model Based Development.

1. はじめに

近年急速に高まっている燃費や性能改善への要求，更に新興国への市場拡大に伴い，検討すべき開発項目が急増し，各開発部門において開発効率の向上が急務となっている。CAEを用いて机上で諸元を検討するモデルベース開発はその柱であり，時間のかかる実機検証の大幅な削減につながった。しかし一方で難解な技術課題に取り組む際，実機データを境界条件に用いるなどの工夫により開発効率を更に向上できるケースがある。ただしここでは実機データの精度が鍵になる。今回，熱収支にかかわる開発領域において，モデルベース開発をサポートする実車用耐候試験設備を新設したので活用事例をまじえてモデルベース開発への貢献を紹介する（Fig. 1）。

Fig. 1　View of New Climate Testing Laboratory

2. 新設耐候試験設備の活用

2.1　温度環境適合性開発プロセスの変革

温度環境試験では，テスト車両に極低温から高温までさまざまな温度環境を与え，ドライバビリティの環境適合や各部品の耐候性を評価する。いずれも車両全体が関連する複雑な熱の収支を伴うもので，以前は異なる設計仕様を多数試作し，それらを用いて試行錯誤的に実機テストを繰り返して開発目標を達成する仕様を決定するやり方が主流だった。しかし，検討項目や開発車種が増加に伴い，工数や実験設備のキャパシティの不足が生じ，開発活動が立ち行かなくなることが予想された。そこで実機評価結果を基に仕様決定するやり方から，メカニズムを明確にした上で机上で仕様を決定し，実機では確認のみを実施するやり方への変革が求められるようになった。パワートレイン（以下PT）開発部門においても，特にSKYACTIV技術導入以降，CAEを多用して仕様を検討するモデルベース開発への移行を加速させてきた。本稿で紹介する温度環境性能開発では，以下のステップが基本となる。

Step 1　車両運転中の熱の発生と伝達，放射にかかわる現象を数式化してコンピュータ上で再現し机上で

*1，4　走行・環境性能開発部
Driveability & Environmental Performance Development Dept.
*2　プラント技術部
Plant Engineering Dept.
*3　開発管理部
R&D Administration Dept.

温度を予測するCAEモデルを作成する。

Step 2　CAEモデルを用いて目標温度を達成できる部品仕様やエンジン制御定数を机上検討する。

Step 3　机上検討結果を基に製作した実機で最終確認して開発作業を終了する。

このやり方により開発効率が飛躍的に向上し，より多くの技術・機種を短期間で開発できるようになった。

2.2　CAE の課題と実機テスト目的の変化

関連する要素が多い現象を理論式だけで数式化すると，使用目的（計算時間，精度）を満たすことが困難なケースが発生する。今回紹介する耐候試験設備で取り扱う，実車の熱収支事象をCAE化する際は，PTと車両の広範囲に及ぶ多数の部品を検討対象とし，それぞれの部品形状の影響を受けた複雑な空気の流れや熱の伝搬現象を細部まで数式化する必要があるため，モデル自体が膨大で複雑になり計算時間が非常に長くなる，あるいは十分な精度を得にくくなる傾向がある。

モデルベース開発をスムーズに進めるためには，この問題を解決しCAEを実用的なものにすることが重要な課題となる。

この課題を解決する取り組みでは，CAEモデルを作成する際に，実機テストで得たデータを適切に利用することが鍵となる。具体的には，実機テストで得たデータを部品間で熱が伝搬する際の境界条件として数式に組み込む手法が有効である。すなわち理論式と実機テストの情報を併用することで，短時間に予測精度の高い結果を得ることが期待できる。

以上のように実機テストの役割は，モデルベース開発の展開に伴い，従来の試行錯誤的な仕様決定手段から，CAEをより実用的なものにするための情報を収集する手段へと変化し，従来と異なる領域で重要な役割を担うこととなった（Fig. 2）。

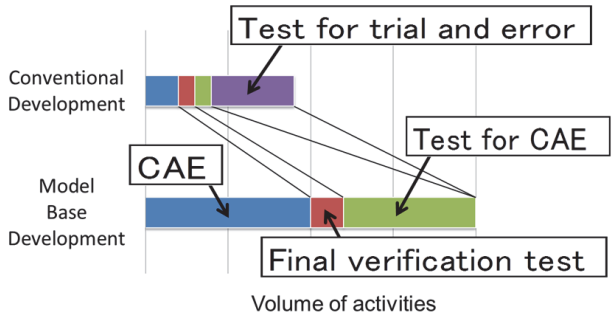


Fig. 2　Change of Laboratory Use

2.3　CAE をサポートする実機テストの要件

CAEモデルを実用的なものにするためには実機テストで得るデータが重要な鍵であることを述べた。ただしそこで用いるデータはCAEの予測結果に重大な影響を及ぼすため，データ収集テストの際には十分な精度の確保に努める必要がある。

温度環境性能開発においては，テスト時の環境条件を狙いの状態で安定させることが要件となる。実車を用いたデータ収集方法には，実路走行テストと実験室内でのテストがあるが，前者は自然環境が不定期に変動するため精度の高いデータを安定して収集することが難しい。また，テスト可能な場所，季節，天候，時間帯が限定されテスト効率が非常に悪く，開発全体の効率向上を阻害する要因ともなる。そこで後者が望まれるが，実験室で有効なテストを実施するには実路と相関のある環境条件を繰り返し提供できる耐候試験環境が必要である。

3. モデルベース開発に貢献する新耐候試験設備

3.1　新設備の狙い

このように実機テストの目的と試験設備への要求が大きく変化する中，耐候試験設備を新設した。新設備で調整する環境項目は，温度，湿度，走行風，日射，路面輻射とし，それぞれを実路環境に近づけるための設備仕様を選定した。

3.2　環境調整性能

(1) 温度，湿度，風速

低温室と高温室を合わせて，-40℃～+55℃の室温範囲でのテストを可能とした。高温室の相対湿度は30%～80%に調整可能とした（Table 1）。

Table 1　Specifications of Air Conditioning

	Temperature Range	Humidity	Max. Wind Speed
Hot Chassis Dyno Chamber	+20℃～＋55℃	30%～80% (Less than 10% at higher temp.)	150km/h
Cold Chassis Dyno Chamber	-40℃～＋20℃	-	-
Cold Idle Test Chamber	-20℃～＋20℃	-	200km/h

(2) 走行風

風洞設備を導入し（高温シャシーダイナモ室の送風性能＝最大12500m3/min），車両に均一な走行風を供給できるようにした（Fig. 3）。

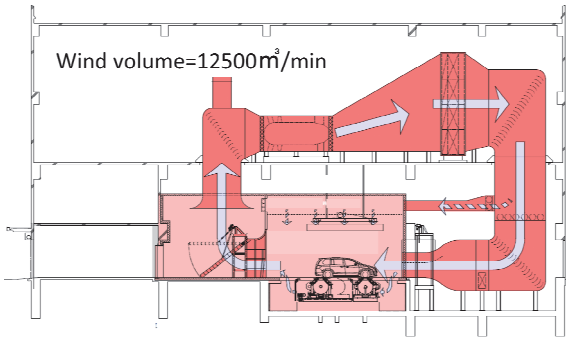


Fig. 3　Cross Section of Wind Tunnel

(3) 日射（高温シャシーダイナモ室）

日射が車両上面に与える熱負荷を自然環境と同等にするため，波長成分が太陽光に近いメタルハライドランプを使用した日射装置を採用した。日射量は400W～1300W/m3可変式とした。

(4) 路面輻射（高温シャシーダイナモ室）

表面温度を85℃まで調整できる床面ヒートマットを採用し，路面からの照り返しを再現した（Fig. 4）。

Fig. 4　Heat Mat for Appropriate Floor Temperature

(5) 4WD シャシーダイナモ

非駆動輪を含む４輪の回転が気流に与える影響を再現した。

3.3　レイアウト

高温，低温それぞれのシャシーダイナモ室と低温アイドルテスト室の3つの試験室を１階に配置した（Fig. 5）。

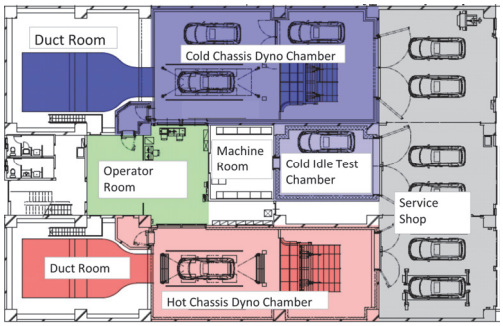


Fig. 5　Ground Plan

3.4　テストの効率化

設備の稼働率を高めるため，低温実験室におけるソーク（テスト前の車両冷やしこみ）時間の短縮，シャシーダイナモの運転稼働率向上，省力化による車両準備時間の短縮などを実現する機能を検討した。

3.5　環境負荷低減への配慮

冷凍機をブラインチラー2台，及び冷水チラー3台に分割し，発熱負荷に応じて稼働台数を決めるシステムを採用して消費電力を低減した。

4. 新耐候試験設備活用事例

4.1　FTTP の開発要素

新設した耐候試験設備の実路再現性能をモデルベース開発へ活用した代表事例としてFTTP（Fuel Tank Temperature Profile＝タンク内燃料温度）開発を紹介する。本件は，高温シャシーダイナモ室の活用例である。

米国EPA（United States Environmental Protection Agency）が定める蒸発燃料規制に関する法規のひとつがFTTPである(1)。この規制では，まず定められた環境条件（外気温度35℃以上，路面温度51.7℃以上，晴天）において72分間のFTTP走行モードを路上走行した後の燃料温度を計測する。次に実験室にて，その燃料温度を再現させながら，燃料タンクと燃料供給部品から蒸発して外部に放出される燃料蒸発ガス量を計測するもので，この量が規制対象である。燃料温度自体は規制対象ではない。

この規制においては，燃料温度が高いほど蒸発量が多くなり，漏れ対策をより強化しなければならなくなる。したがって，伝熱量を抑制する排気管のレイアウトや遮熱板仕様，発熱量が小さい燃料ポンプ構造やその制御，燃料系部品へエンジンルームの熱を伝搬しにくい空気流の制御構造などを車両トータルで検討することがFTTPの開発要素となる。

4.2　FTTP 開発 CAE 化の背景

FTTP開発においては，燃料温度と各関連部品，雰囲気温度を計測し考察する。これらのデータ収集作業は，従来米国のテストコースを走行して取得してきた。しかし，現地へ出向いた時の天候によっては気温や日射などの条件が整わずテストが思うように進まないケースや，走行中に変化する風速，風向，日射などによりデータが変動するケースなど，実路テストでは不可避な問題があった。またテスト実施時期が夏季に限定されるため，開発計画によっては必ずしも現地テストの際に狙った仕様の部品試作が間に合わないという問題も生じた。これらはテストを非効率にするばかりでなく，仕様の検討不足を招き，開発後期の予想外の追加対策や過剰品質により不要なコストアップのリスクを高める原因ともなっていた。また，FTTP以外の開発にも併用する試作車を海外テストで長期間占有することで開発全体の効率に悪影響を及ぼす問題もあった。

このようなFTTP開発における一連の問題を解消し，適正な仕様を早期に決定できるようにするため，CAEで燃料及び各部温度を予測して仕様検討するモデルベース開発への移行に取り組んだ。

4.3　FTTP 開発 CAE 化の課題

燃料温度を決める熱の流れは広範囲にわたる（Fig. 6）。これら全てを計算しようとするとエンジンルーム内や車両周りの流れ，ラジエータでの熱交換，排気ガス流れ等の3次元の非定常計算が必要となるが，その計算には非常に時間がかかる。特にFTTPは走行時間が長く，計算時間が膨大になるため開発への適用は難しい。そこで，3次元の非定常計算が必要な排気管の温度，タンク回りの空気の温度や流速，燃料ポンプの発熱量等は実験値を境界条件として与え，タンク回りの熱の移動のみを計算して計算時間を短くする手法に取り組んだ。

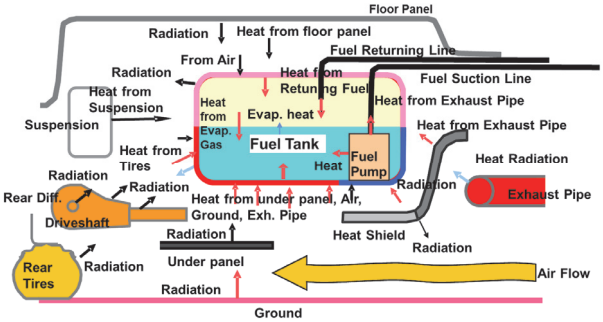


Fig. 6　Complicated Heat Flow between Related Parts

4.4　新設耐候試験設備を用いた FTTP データ収集

CAEの温度境界条件に用いる実機データ情報を得るため，新設した耐候試験設備のシャシーダイナモ上で，FTTPモード走行中の各部温度を計測し，その精度を検証しながらCAEモデルの改善に活用することにした。

実験室で温度を計測する際は，走行中の車両近傍の空気の流れ，日射条件，路面輻射条件を実路に近づけることが特に重要となる。新設の耐候試験設備は大型風洞と，車両の前面投影面積を100%カバーする大型の吹き出しノズルにより，実路走行時と同様に車両全体に一定方向の走行風を均一に吹き付けることを可能としている。またテスト室床面の風速を高める境界層制御装置と，非駆動輪の回転による気流への影響を再現する４WDシャシーダイナモで，タンク内燃料温度に影響が大きい車両床下の空気の流れを実路に近づけた（Fig. 7）。

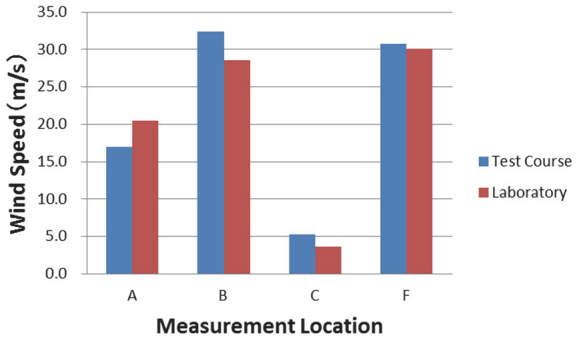


Fig. 7　Comparison of Measured Wind Speeds

更に，日射装置と床面ヒートマットにより環境を調整した実験室内で FTTP モードを走行し，タンク内燃料温度及び関連個所の温度を計測するテストを実施した（Fig. 8）。

Fig. 8　View of FTTP Mode Test

4.5　新設耐候試験設備での計測精度検証結果

新耐候試験設備で計測した各部の温度と実路で計測した温度を比較し，差異が±5℃以下であることを確認した（Fig. 9）。これにて試験室で計測した温度と実路走行時の温度に一定の相関があると判断し，このデータを基に得た情報を温度境界条件としてCAEモデルへ織り込んだ。

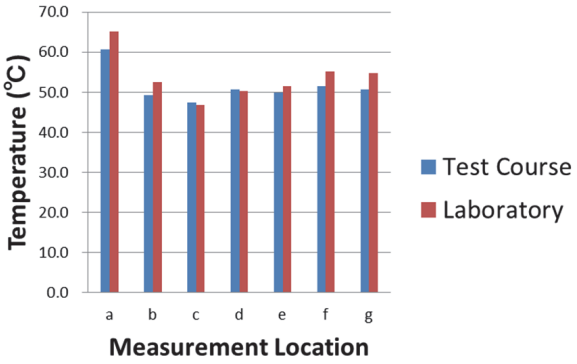


Fig. 9　Measured Temperature

4.6　CAE モデルの改善効果

実機テスト情報をCAEモデルに織り込んだ結果，計算に要する時間は大幅に短縮され，開発に十分活用できるものになった。また，CAEによる予測温度が実測した温度とほぼ一致し，FTTPの温度予測ツールとして活用できる精度を確保することができた（Fig. 10）。

この予測式を活用することにより，タンク内燃料温度に影響の大きい要素を明らかにし，温度上昇を抑えるために有利な構造を短時間に机上で検討し，提案できる仕組みを作った。

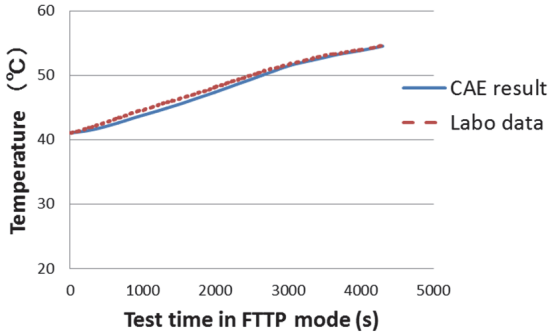


Fig. 10　Comparison of Laboratory Data and CAE Result

5. 新設耐候試験設備の効果

(1) FTTP開発の事例でみられるように，CAEをサポートし開発の効率を向上することができた。ドライバビリティ，燃費開発にも更に利用を広め，モデルベース開発に適宜活用していく。

(2) 試験自体の効率を上げ，実質的なテストのキャパシティを拡大したことにより，より多くの技術課題に取り組むことができるようになった。

(3) 省エネ化・テスト効率化により消費エネルギーを低減した。

6. おわりに

モデルベース開発の拡大に伴い，実機テストの位置づけは，試行錯誤のための物から，CAEをはじめとする机上検討をサポートするものへと変化してきた。

実車走行試験設備においては実路走行の再現精度や効率がより一層重視されるようになり，新設耐候試験設備は走行風，日射，路面温度の精度にも踏み込んで設備仕様を決定した。今後も，その高い機能を十二分に活用しモデルベース開発を強力にサポートできるよう運用面も含めて工夫を重ねる。

参考文献

(1) EPA86 Subpart B
NEW LIGHT-DUTY VEHICLES AND NEW LIGHT-DUTY TRUCKS AND NEW OTTOCYCLE COMPLETE HEAVY-DUTY VEHICLES; TEST PROCEDURES (S86.101 -S86.167-17)

■著　者■


森嶋 徹


丸本 祐一


弘中 実


髙田 直哉

特集：モデルベース開発

20

電動系仕様の最適化計算システムの構築

Design System Construction for the Optimization of Electric System Specifications

米盛 敬*1　Kei Yonemori
板坂 直樹*2　Naoki Itasaka
栃岡 孝宏*3　Takahiro Tochioka

要約

マツダでは，全てのお客様に，「走る歓び」と「優れた環境・安全性能」をお届けするために，電気デバイスの段階的な適用を戦略として掲げている。自動車の機能向上を叶える構想設計は，一般に複数案が考案されるが，交互作用の複雑なシステムでは従属検討が膨大化するため，全ての影響を高精度に事前検討することは極めて困難である。

そこで，さまざまなハードウェアや制御ストラテジの組み合わせにおける期待性能をあらかじめ大量に試算しておき，要求に対して最適な仕様の組み合わせを瞬時に提示するデータベースの構築に取り組んでいる。今回，一定電圧と温度の条件下で IPM（Interior Permanent Magnet）モータを効率最大となる通電条件で運転した場合の動力特性計算の高速実行に成功した。これを循環型の自動計算システムに組み込むことで，人的には不可能なレベルの量的検討や，複数性能指標の同時検証が可能となったので，概要を紹介する。

Summary

To deliver "driving pleasure" and "excellent environment and safety performance" to all customers, Mazda set a strategy of the step-by-step application of electric devises. For functional improvement of vehicles, multiple numbers of conceptual designs are proposed in general, but as systems with complicated interactions require a huge number of subsidiary studies, preliminary studies of all the effects with high precision are very difficult.

Accordingly, we are establishing the data base which preliminary calculates a huge amount of expected performances generated by various combinations of hardware with control strategies and instantly presents the optimal spec-combination for a requirement. This time, high-speed implementation of dynamic-characteristic computation in vehicle driving was succeeded under the electricity conditions maximizing the efficiency of Interior Permanent Magnet (IPM) motor at a constant voltage and temperature. By incorporating the computation in the cycloid type automatic computation, quantitative studies beyond human capability became possible as well as simultaneous verifications of multiple performance indexes. The outline of the study is reported as follows.

1. 背景

自動車は，20世紀初頭に大量生産の技術革新を遂げて以来，既に100年間を経ているが，今もなお，更なる性能進化と技術革新が追求されている。近年の代表的事例としては，動力系に新たにモータ／インバータを組み込むことで加速フィーリングや燃費性能を向上させるハイブリッド車がある。旧来，エンジンやブレーキは各々専用のペダルで操作されていたが，モータは双方のペダル指令に対して適切な制駆動力を発揮せねばならない。またエンジンをエネルギー消費抑制のために走行中に休止させ，駆動力の急峻な垂下が生じた際，瞬時に起動して動力を補いつつ，車両運動エネルギーの回収機能も実現せねばならない。これら制駆

*1～3　技術研究所
Technical Research Center

動力の統合的な運用技術を一端として，より高度な技術への革新が要求されている。

そこでマツダでは，パラメータ最適化技術を車載部品特性のモデリング技術に組み合わせ，製品開発へ適用する試みを行っている。例えば，遺伝的アルゴリズムとエンジン性能モデルとの組み合わせにより，非線形特性領域でのエンジンの諸元設計が行われている。[1] あるいは多目的最適化手法と構造強度モデルの組み合わせにより，車両の複数方向の壁面衝突における運動エネルギー吸収性能の設計が行われている。[2]

これらのモデルをベースとした開発手法は， CX-5 など SKYACTIV TECHNOLOGY を適用した商品のコンセプト設計[3]に用いられ，実機測定結果とモデルの整合取りも施されたことで，有効性が向上しつつある。本稿では，電動車両の構想設計におけるモータ／インバータ仕様設計のモデルベース開発に取り組むために，新たに構築した動力特性計算手法と，その有効性の検証結果について紹介する。

2. 電動系領域の MBD 需要

車両駆動用原動機としてモータ／インバータを用いる場合，下記の電気系固有の特長を活かす検討がなされる。

(1)　全速度域で正負の大トルクを高応答で発揮する。
(2)　車両の運動エネルギーを回収する。
(3)　運用において排出ガスや騒音を生じない。

これらの効果を最大化するには，電気駆動システムの仕様設計が重要になる。例えば，自動車は独立移動体で，走行中のエネルギー供給が現在は不可能であるため，運用中に蓄電デバイスの過充電や過放電が生じないように，電気エネルギー収支を計画的に管理する必要がある。また，その動力特性は，電源電圧や，モータ／インバータそのものの動作温度とも強い相関があるため，過熱時は機器保護のために出力制限を講じる必要がある。

上記の事例を含め，電動系への要求機能は多岐にわたり，最大性能の向上のみならず，発熱時の性能安定性などを一元的に実現することが求められる。しかしながらIPMモータの電磁界断面設計パラメータ群の間には，複雑な交互作用があり，所望の動力特性を発揮する究極のモータ設計を獲得することは容易ではない。また一つのモータに対して，効率最大となる交流運転条件は一対一で決まるはずであるが，制御パラメータ間にも交互作用があるために，その解を試行錯誤なく得ることは難しい。

一方，系統電源のように電圧が安定し，また設置環境温度や運用温度が一定であれば，電気系は略線形の挙動を示すことがよく知られている。自動車以外の用途のモータ／インバータ製品においては，モータ制御の自動チューニングは既にスタンダードな技術になっている。

そこで今回，マツダでは必要な試行錯誤をスキップするのではなく，極めて高速に実行すること，更には目的志向で設計を洗練することをねらいとし，モータの電磁界解析モデルと最適化アルゴリズムを高速計算サーバ上で組み合わせることに取り組んだ。モータの制御ストラテジはさまざまあるが，基礎検討として最も低発熱となる効率最大運転条件を自動探索する手法の構築を行った。またモータ トルクや電流や電圧などのリアルタイム挙動特性を構想設計段階で掌握することに取り組んだ。

これによりハイブリッド自動車や電気自動車のように電源電圧や動作温度が不安定に変動する製品でも，挙動をあらかじめ網羅的に検討し，常に最適な駆動条件で運転を行うことができれば，モータ／インバータの動作効率が向上し，燃費や電費性能の向上になる。更にモータによる制駆動力の高応答操作により「優れた環境安全性能」をお届けすることにつながると考える。

3. 設計の最適化計算システムの概要

今回構築した計算システム機能の全体像をFig. 1 に示す。数十個の入力変数（設計パラメータ）や出力変数（動力性能値）間の寄与度や交互作用を解析するため，変数間の関係の分析機能を持つIDAJ社の modeFRONTIERをプラットフォームに用いた。

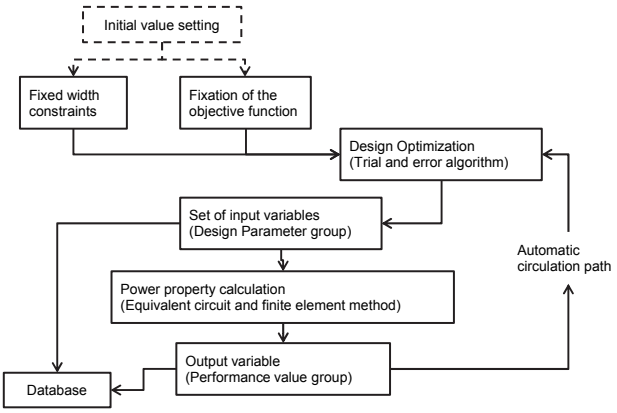


Fig. 1　modeFRONTIER Work Flow Example

本計算システムの機能検証のために，準備したハードウェアの主要スペックを以下に記す（Table 1）。

Table 1　Calculation System Specifications

PRI/POST PC	Windows, 64Bit, Intel Xeon 1 CPU Dual Core, 8GB RAM/Core, 3GHz
Calculations server	Linux, Intel Xeon 32 CPU Quad core, 4GB RAM/Core, 2.93GHz
Storage	Temporary area: 500GB, Database area: 4TB

3.1　各計算機能の概要

(1) 計算全体の進捗管理，およびデザインの最適化

modeFRONTIERは，数値間の関係の分析に加え，全計算の進捗状況管理とデザインの最適化を行う。modeFRONTIERは，一連の計算を実行した後，入力変数と対になる出力変数をデータベースへ記録し，1サイクルの完了を判断する。その後，次のサイクルの計算を行うために出力変数と目的関数とを照合し，より性能向上が期待できる方向へと入力変数の組み合わせを自動刷新して，再計算のサイクルに入る。よってFig. 1の通りフローは，永久循環型となっている。

デザインの試行錯誤パターンは，アルゴリズムとしてあらかじめ備わっているが，それぞれの手法には固有の進化パターンの偏向があり，性能向上を実現させる上で障害になりうる。そこで遺伝的アルゴリズム・実験計画法・ゲーム理論などのアルゴリズムの複合的な組み込みを行った。

(2) モータの電磁界解析と形状変形

JSOL社のJMAG-Studioが，modeFRONTIERより設計パラメータ(入力変数)を受け取り，電磁界解析を行う。この段階では，数学的な正弦波電流源に対するトルク特性と損失特性を回転数や電流振幅や電流位相ごとに算出する。

デザイン刷新のたびに，設計者による断面形状の作図を要すると，設計者が従事できない場合に計算が停止する。そこでJMAG-Studioのモータテンプレート機能をベースに用い，modeFRONTIER が数値操作し，自動で作図するようにプログラムを改造した。例を Fig. 2 (a) に示す。

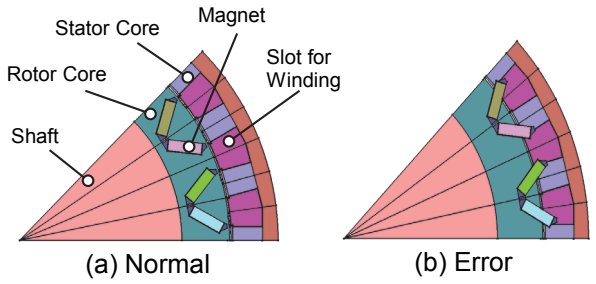


Fig. 2　Motor's 2D Electromagnetic Field Cross Section FEM Model Sample

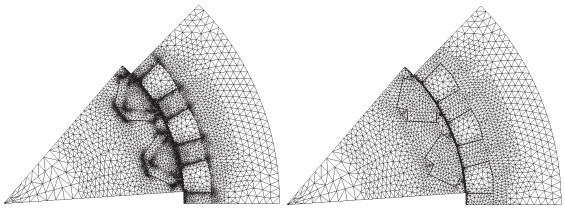
ここで，モータテンプレートはステータとロータの幾何学的な形状の整合性を考慮せず，単純に数値を操作するため，設計変数群の組み合わせが不適であると，例えばロータに埋設されているべき磁石がはみ出してステータに食い込み，回転不能な状態に陥る場合がある。例を Fig. 2 (b) に示す。またJMAG-Studioは，エラーデザインであることを認識できずに解析を実行するため，不要な解析業務が発生する上，無用の出力データの混在により設計改良の試行錯誤が乱れてしまう。

そこで自由な変形と形状エラーの潰し込みを両立するための拘束式を追加した。これにより当初，単純にコンピュータが自動生成したデザインの中で，設計者が見て実際に回転可能なデザインは7%程度しかなかったが，成功率を99%以上に向上した。

モータ電磁界解析において一般的には，解析精度とメッシュには相関があるため，解析後に隣接要素間の数値連続性を評価し，不連続性が著しい場合はメッシュ追加により再計算する自動メッシュ解析手法が主流である。さまざまな断面形状を試行錯誤する場合，本来は自動メッシュを用いることで高精度の解を期待できるが，解析成功に到るまで計算コストが数倍に増加する要因になる。

そこで予備検証段階でモータの自動メッシュ解析を多数行い，高調波成分の解析精度を確保するためにメッシュを細かく切るべき領域と，その粒度を見出した。この手法を適用したメッシュ生成を行うことで，メッシュの追加，修正を行うことなく，1回での計算実行を実現した。

Fig. 3 (a) にメッシュを追加手法での最終的なメッシュイメージを示す。Fig. 3 (b) には同じ断面設計に固定メッシュを用いた場合を示す。ノウハウを適用した(b)によりメッシュ数は少ないながらも，ほぼ同等の計算結果を得た。



(a) Adaptive meshing method　(b) Fixed meshing method

Fig. 3　Comparison of Motor's FEM Mesh of Adaptive Method and Fixed Method

(3) 挙動モデルの作成

JMAG-Studioによる電磁界解析の解析結果が数百以上集積されると，JSOL社のJMAG-RTが，それらの点群情報を数枚のマップへ統合し，MathWorks社のMatlab/Simulink形式で挙動モデルを生成する。

JMAG-RTの挙動モデルの生成方法には，プリミティブな検討用の高速版から，比較的重い収束計算を要する拡張版までさまざまな手法があるが，IPMモータにおいて空間高調波による印可電圧やトルクの入出力の不整合を無視すると，トルクと損失の予測精度が低下するため，空間高調波型へ統一した。

モータの実機では，モータのスロット高調波やインバータのスイッチングにより歪の加わった交流の影響で，トルク変動やサージ電圧などが生じるが，挙動モデルを用いることで，これら動的特性の検証を可能にした。

(4) 交流電気回路と動力性能のモデル

モータとインバータを組み合わせた上で生じる交互作用を再現するために，Matlab/Simulink型のモータ挙動モデルを同ソフトウェア上に作成された直流電源，および三相交流インバータモデルに連結し，電気系のプラントモデルとして完結動作させた。Fig. 1の動力特性計算部の詳細フローを Fig. 4 に示す。三相交流のベクトル制御用のコントロールモデルや時系列データの検出機能も同ソフトウェア上に配置され，モータ／インバータの動的性能を記録可能とした。

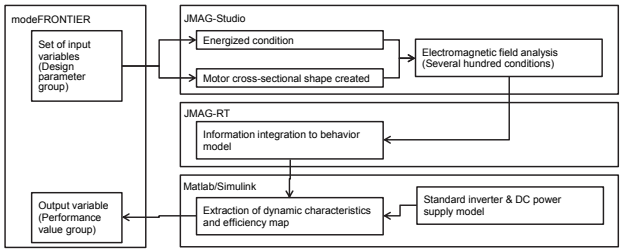


Fig. 4　Calculation Workflow of Motor Characteristics

マツダでは，Matlab/Simulinkによる車両の構想設計を推進しており，同じソフトウェアプラットフォームでモータ／インバータのモデルを作成することで，エンジンやブレーキなど直接的に協調動作を求められるシステムとの連結性を確保した。

(5) 大量の計算結果の可読性の向上

数百MBのファイルとして大量に生成される出力変数群を設計者が統合的に理解することは困難である。そこで計算結果の要点を既定の指標と同じグラフ目盛で掌握できるように独自の定型グラフの自動生成プログラムを追加した。Fig. 5に，その一例として回転数とトルクに対する交流の電流位相角の計算結果を示す。

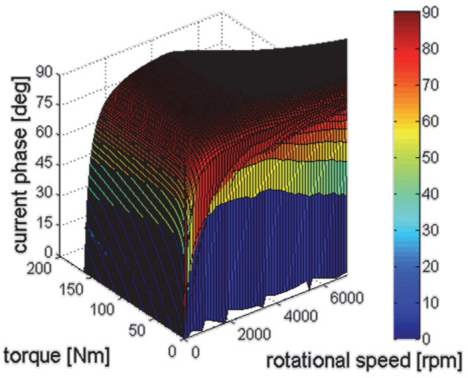


Fig. 5　Motors Drive System's Current Phase Angle Three-Dimensional Map Sample

効率を最大化する運転条件を探索した場合，電流位相角が連続的曲面に収束すること，また原点から高トルク域と高回転域の双方に向け，非線形的に増大を視覚的に表現することで直感的な理解を補助した。

曲面形状がIPMモータのリラクタンストルク理論や弱め界磁制御理論に沿った傾向にあることから，本計算機能が一定の妥当性を持つことを確認した。

4. 本計算手法の有効性検証

4.1　モータ断面設計固定での位相制御最適化

車両駆動用のIPMモータが，300V一定の直流電源において効率最大となるような位相制御状態を仮定して，性能計算を行い，計算結果の分析から動作検証を行った。

(1) 静的特性の検証

効率マップの生成例をFig. 6 に示す。トルクと回転数ゼロの原点から基底回転数にかけての領域，あるいは極低トルク域以外の領域では90%以上の動作効率となっており，IPMモータの特徴的プロフィールを良く再現している。当該実機（n=1）との絶対値比較における誤差は，約2 % になった。

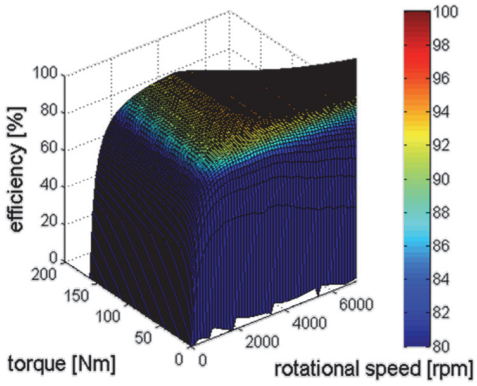


Fig. 6　Efficiency Map of IPM Motor Sample

(2) 動的特性の検証

効率マップの生成過程で，各動作点に対し都度，トルクの動的特性の収束演算を行っている一例をFig. 7 に示す。

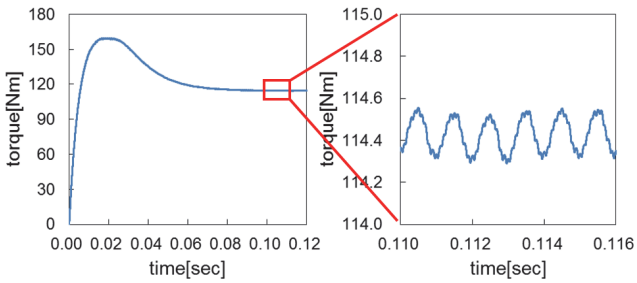


Fig. 7　Motor's Torque Ripple Behavior of Time Series Image

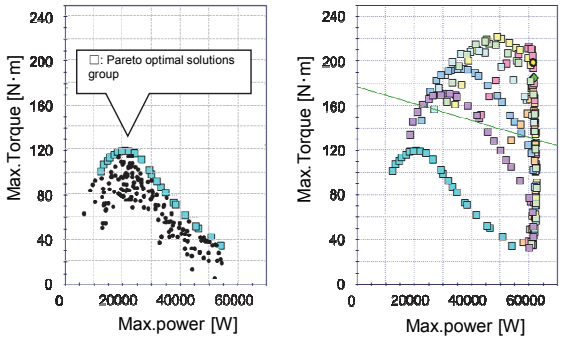
モータには，最大トルクだけでなくトルクリップルが大きなデザインもあり得るが，机上設計段階でのイジェクトを可能にした。また本稿には図示しないが，急峻なトルク

操作指令におけるサージ電圧など，電気的な動特性も検討可能とした。

4.2　モータの電磁界断面設計の最適化

(1) 性能向上限界の俯瞰と性能向上の高寄与因子の抽出

モータ体格の制約条件を一定とした時の動力性能向上限界を掌握するために，パラメータスタディの上下限を常識的な設計者が検討しないような領域まであえて広げた事例をFig. 8に示す。左図の初回検討はロータデザインを固定してステータのみ新設計，右図ではロータ・ステータ共に新設計している。また右図のロータの断面形状は，数種類の断面設計コンセプト（色別）を用い，各々別個に設計改良を行っている。なお，右図では，それぞれのコンセプトの最良のデザイン群（パレート解）のみを選出してプロットした。



(a) Fixed Rotor Designs study　(b) Variable Rotor Designs study

Fig. 8　Pareto Optimal Solutions Plot Sample

縦軸にモータ／インバータの最大トルク性能，横軸に最大出力性能を用いてプロットすると，分布にある程度の輪郭が生じた。これはモータの磁気飽和やインバータとの組み合わせによる力率操作などの技術律則によって生じる成長限界であると考えている。

最大トルクと最大出力など，複数性能の向上機能を確認した後，本データベースの約30種の入力変数と数十種の出力変数間の相関係数を分析し，動力性能向上への寄与度の高い入力変数（設計パラメータ）の選別を行った。その一部をFig. 9 に示す。

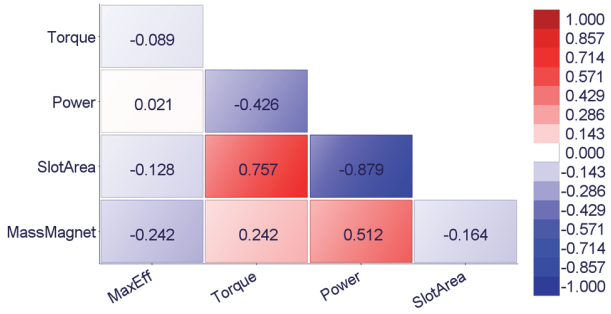


Fig. 9　The Parameter Sets a High Correlation to System Performance

変数は入力と出力を区別せず総当たりで相関係数を算出するが，重複表記を割愛するため，階段状に関係を表示する。本事例においては入力変数（設計変数）の加工値であるSlotArea がTorque に対して正の強い相関，Power に対して負の強い相関を示している。あるいは変数 MaxEff に対して，他の変数は相関が低いことを示している。

(2) 設計探索作業の効率向上

前述の4.2 (1)の結果から得られた高寄与因子群のみを操作した場合を，Fig. 10に示す。二つの性能指標を引き上げるべく右上方向に向けてのみ，集中的に新デザインが改良されている。つまり設定した複数の目的を充足するように，目的指向で効率的に探索できるようになった。

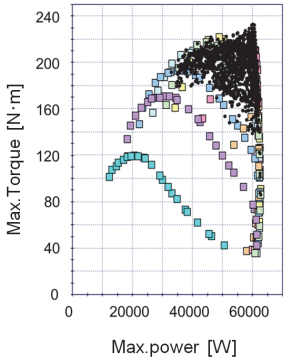


Fig. 10　Pareto Answer Solutions Plot Sample

(3) 優秀な設計群のパラメータ分布の検証

Fig. 10で選出された優秀なデザイン群の設計パラメータの組み合わせを分析した事例をFig. 11に示す。左から縦軸ごとに設計パラメータを，上下枠は制約条件を示す。高性能デザイン（太線）のパラメータの組み合わせは，必ずしも唯一解に収束するのではなく，ある程度の帯域で分散した。

IPMモータと三相交流インバータの基本特性の机上設計技術としては，今回構築した一連の計算システムが有効に機能することを確認した。しかしながら，本システムを用いて，自動車の電動系部品として仕様を最適化し，究極の設計に洗練していくには，更にマツダ固有の目的関数や制約条件の追加が必要不可欠と考える。

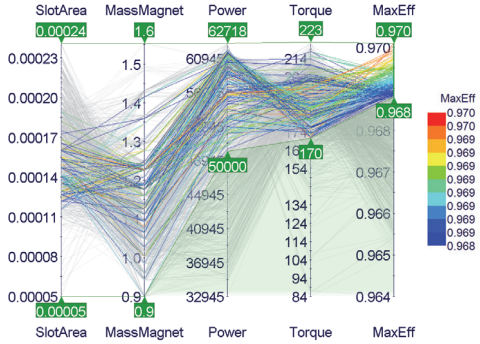


Fig. 11　Combination of Design Parameters Sample

4.3　動力特性の計算速度の向上

本計算システムの開発当初，1モータデザインあたり効率マップの生成に130時間を要していた。しかし前述のエラーデザインの事前排除，解析メッシュの自動切り直しの排除，最適運転条件の抽出法の改良などの運用ノウハウ構築により，計算サイクルタイムが200倍速となり，40分での生成を実現した。

更にコンピュータによる24時間連続操業との組み合わせにより，1000モータデザイン／月の検討作業を一人のオペレータが1回で仕掛けられ，検討能力が量的に大幅向上している。

また高寄与因子の選択操作，および計算データベースが増大して試行錯誤の経験値が蓄積されるに従い，無駄なデザインの試行錯誤が減少していくため，技術検討の質的向上を図れた。コンピュータが自動生成した電磁界設計図は，市場流通製品と類似する域に到達し，数千デザインの実践的なモータ設計データベースを得ることができた。

5. まとめ

モータ／インバータの性能モデルに最適化技術を複合し，計算サーバで高速に演算することで，電動車の構想設計におけるモータ／インバータの仕様設計を支援する計算システムを構築できた。本計算システムは，設計刷新のハードルが低いバーチャル空間内で，モータデザイン検討を1000回／月のペースで行うことで，複数目的を充足する設計へとパラメータの組み合わせを絞り込んでいくことができる。

今後は，予実差校正によりモータ／インバータモデルの高精度化を図りつつ，マツダ固有の要求を目的関数として追加し，構想設計への本格適用を行う。またモータ／インバータ挙動モデルを活用した制御ストラテジの自動育成や，動く要求仕様書としての流通を促進し，モデルベース開発の立場から“Zoom-Zoom”なクルマづくりへの進化を後押ししていく。

参考文献

(1)　藤田ほか：遺伝的アルゴリズムによる機械システムの最適化法とそのエンジン諸元の最適設計への適用，日本機械学会論文集（C 編），65 巻，630 号，pp.821-827（1999-2）

(2)　小平ほか：複数性能を扱う車体構造最適化手法の開発，マツダ技報，No.29，pp.104-109（2011）

(3)　木村ほか：CX-5 SKYACTIV-BODYストラクチャの開発，マツダ技報，No.30，pp.103-108（2012）

■著　者■

米盛　敬

板坂 直樹

栃岡 孝宏

特集：ITS 世界会議

21 マツダの ITS（高度道路交通システム）への取り組み
Introduction of Mazda's Intelligent Transport Systems

田坂 寿康*1　中野 隆裕*2
Toshiyasu Tasaka　Takahiro Nakano

要約

ここ数年の安全技術の進歩は目覚ましく，さまざまな先進安全装備が商品化され，市場に投入されている。一方，ITS（高度道路交通システム）においても，既に ITS スポットサービスが商品化され，市場で活用されている。また，車車間通信や歩車間通信も各社研究開発が進められ，近い将来の商品化も期待されている。更に，2013 年 10 月に開催された第 20 回 ITS 世界会議東京 2013 が商品化を加速させるものと思われる。本稿では，これらの背景も踏まえながら，マツダにおける ITS 開発の概要を紹介する。

Summary

In recent years safety technology has been drastically progressed and various advanced safety equipment are put on the market. As part of it, Intelligent Transport System (ITS) is further improved and ITS spot service is already used in the market. In addition, each maker is promoting research and development of vehicle-to-vehicle and vehicle-to-pedestrian communications, and launches of such products onto the market are expected in a few years. Success of the 2013 ITS World Meeting held in Tokyo in October will accelerates the commercialization of such products. With this background, the outline of Mazda's ITS development is introduced in this report.

1. はじめに

2013 年 10 月，ITS 世界会議 2013 が東京で開催され，マツダは他自動車メーカと ASV（Advanced Safety Vehicle：先進安全自動車），DSSS（Driving Safety Support Systems：安全運転支援システム），協調型 ACC（CACC：Cooperative Adaptive Cruise Control：路車間・車車間連携による交通円滑化走行スマートカー）のデモを実施した。また，ポストコングレスツアーとして，広島市で，「広島における世界初の路面電車～自動車間通信 ASV デモ」を行った。ここ数年の自動車関連の ITS の研究開発は目覚ましいが，今回の世界会議によって更に大きく進展するものと期待される。マツダにおいても，これまで，国土交通省の ASV 活動などを通じて ITS の研究開発を行ってきたが，本稿では，安全領域に内容を絞り，安全における ITS の位置づけ，これまでの ITS への取り組み，広島市での ASV デモを中心とした ITS 世界会議参加の概要，商品化事例などを紹介する。

2. マツダの安全技術への取り組み[1]

2.1 安全思想（MAZDA PROACTIVE SAFTY）

マツダの技術開発の長期ビジョンである「サステイナブル "Zoom-Zoom" 宣言」において，「すべてのお客様に走る歓びと優れた環境・安全性能を提供する」という考えのもとに，「クルマ」「人」「道路・インフラ」という 3 つの視点で，「事故のない安全なクルマ社会の実現」に取り組んでいる（Fig. 1）。その中で「クルマ」については，ドライバ（人間）を理解・信頼・尊重することを重視し，安全技術の研究開発を行っている。具体的には，「安全に運転するためには，認知・判断・操作の各ステップで適切に行動することが重要で，運転する環境が変化しても，正しく認知・判断することをサポートし，安全に安心して運転していただきたい。しかし，人間は時として避けられないミスを起こす。このため，万が一のドライバのミスにも対応できるように，事故被害を防止・軽減することをサポートする技術を開発し提供する。」という考え

*1，2　技術企画部
Technology Planning Dept.

方である（Fig. 2）。

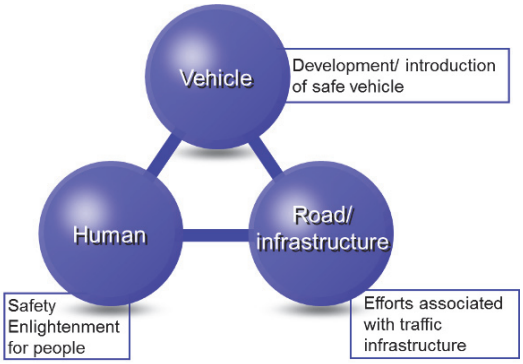


Fig. 1　Viewpoint to Safety

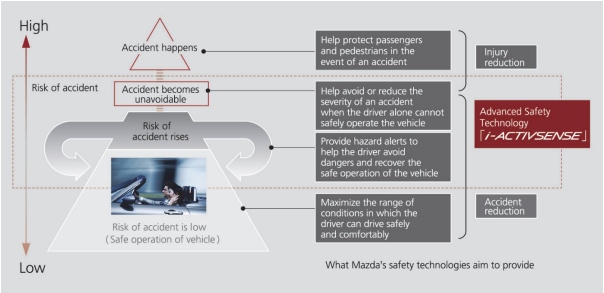


Fig. 2　Safety Mazda Aims to Realize

2.2　先進安全技術「i-ACTIVSENSE」

i-ACTIVSENSE（アイアクティブセンス）は，マツダの安全思想である Mazda Proactive Safety（マツダプロアクティブセーフティ）に基づき開発したミリ波レーダなど（Fig. 3）を用いたマツダの先進安全技術の総称である。「運転支援技術」,「認知支援技術」,「衝突回避支援・被害低減技術」で構成されている。

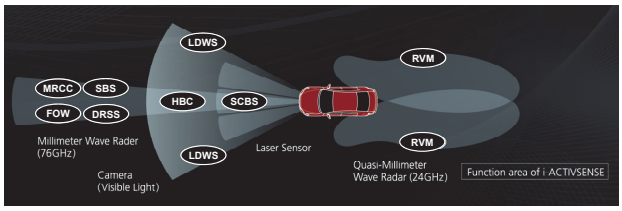


Fig. 3　i-ACTIVSENSE

3. ITS とは

3.1　安全における ITS の位置づけ

i-ACTIVSENSE は，ミリ波レーダやカメラ検知デバイスを用いているが，デバイスの検知外の遠方や見通しの効かない交差点などの死角が存在する。その死角をカバーし，360 度認知（解かる／伺える／聴こえる）を実現するための手段の一つとして，ITS を位置づけている（Fig. 4）。

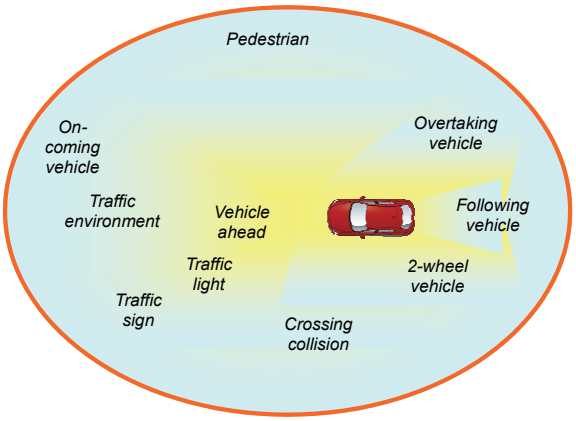


Fig. 4　360° Recognition

3.2　ITS の概要

ITS とは，インフラ協調により安全運転を支援するシステムである。路車間通信による道路インフラ情報，車車間通信や歩車間通信による他車両や歩行者からの情報を利用することにより，安全運転を支援するものである。官民合同で検討中の主な ASV に織り込まれたサービスを下記に示す（Table 1）。

Table 1　ASV Demo Application

Solution to accident	
Collision with the oncoming vehicle	Right turn collision prevention support system
Collision with the intersection vehicle	Crossing collision prevention support system
	Oversight prevention support system of the stop indication
	Oversight prevention support system of the signal
	Tramcar approach information system at the time of the vehicle right turn
Collision with the approach vehicle from the rear	Left turn collision prevention support system (two-wheeled vehicle)
	Tramcar rear approach information system
	Tramcar rear approach information system at the time of vehicle passing
Collision with the crossing walker	Oversight prevention support system of the crossing pedestrian
	Pedestrian information system
Providing information of neighboring traffic	
Providing information of neighboring vehicles	Emergency vehicle information system
	Construction vehicle information system
The use of the signal information	
The crossing passage that is smooth and safety	Signal information utilization driving support system

3.3　マツダ ITS のこれまでの取り組み（Fig. 5）

1991 年に先進安全自動車（ASV）研究開発プロジェクトに参画し，1995 年にマツダ最初の試験車両として「マツダ ASV」を，以後， ASV2，ASV3 と開発してきた。

2006 年 9 月，最先端の ITS を活用した車両安全技術の実証実験を推進することを目的に，マツダ，広島大学，中国地方整備局，広島県警本部など産官学が連携して「広島地区 ITS 公道実証実験連絡協議会」を設立した。

山陽道や国道 2 号の事故多発地点において，路車が協調することによって追突や出会い頭事故防止のための情報提供や警報を行う技術の開発に取り組み，この中でマツダは

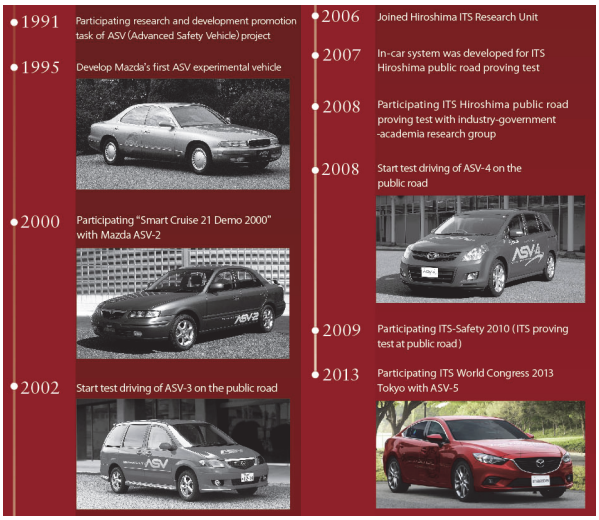
ITS 車載器の開発を担当すると共に，実験車両を提供し，実験を通じて安全システムとしての効果や情報提供の内容，タイミングの適切さなどを評価検証した。

2007 年秋から広島で予備実験を開始し，2009 年 2 月に実証実験を終了している。

その間，2008 年 3 月から同年 10 月まで，広島市内の公道において，出会い頭事故など見通しの悪い道路での衝突事故を防止する車車間通信システムの走行実験を実施した。

2011 年 12 月には，インフラ協調システムに関する官民連携の実証実験，及びその実用化に向けて，内閣官房主導で，産官学の ITS への取り組みを連携させようという活動（ITS 推進協議会）がスタートした。マツダもこの活動メンバとして参画している。

Fig. 5　Mazda Chronological Table



4. マツダの今後の取り組み
～ITS 世界会議での紹介事例～

4.1　ASV-5

国土交通省の ASV-5 プロジェクト（第 5 期先進安全自動車<ASV>推進検討会；2011 年から 2015 年までの 5 年間）に参画し，ASV 技術の飛躍的高度化や通信利用型安全運転支援システムの開発促進，などの検討を行っている。こうした官民連携のプロジェクト活動への参画と貢献は，自動車会社の社会的責務と考え，積極的に対応していく考えである。

4.2　ITS 世界会議東京 2013

2013 年 10 月に ITS 世界会議が，“Open ITS to the Next”をテーマに東京で開催され，65 か国，約 2 万人の参加者があり，成功裏に終了した。

東京でのショーケースにおいては，マツダは他の自動車メーカ等と協力し，アテンザ ASV-5 を用いて，ASV（車車間／歩車間），次世代 DSSS（路車間），高速道路サグ部の交通円滑化サービスのデモを実施した。

4.3　広島における世界初の路面電車－自動車間通信型 ASV デモ[(2)(3)(4)]

ITS 世界会議東京 2013 のポストコングレスツアーの一つとして，東京大学／交通安全環境研究所／広島電鉄（株）と協力し，「広島における世界初の路面電車－自動車間通信型 ASV デモ」を実施した（Fig. 6）。広島市では，路面電車が市民の足として定着しており，一日平均約 15 万人の利用がある。デモでは，路面電車と自動車が道路空間を共有する場所において，路面電車と自動車の車車間通信に自律型車載センサを組み合わせ，自動車と路面電車双方の安全性が高まるようなシステムを実証した。また，スマートフォンを活用した自動車と歩行者の通信についても，併せてデモを行った。

Fig. 6　Tramcar to Vehicle Communication

(1) デモ概要

デモは，広島市中区の広島電鉄（株）の江波線（江波～舟入本町）で実施した（Fig. 7）。

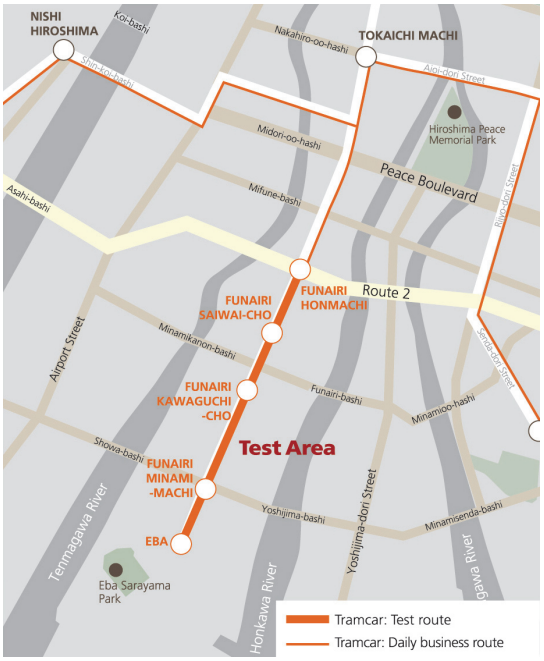


Fig. 7　Demo Map in Hiroshima

Fig. 8 は，デモ 5 か所におけるデモの内容である。自動車ドライバへの支援として，①は右折時路面電車

後方接近情報提供（V2T），②は路面電車後方接近情報提供（車載センサ／V2T），③は対向直進車接近情報提供（車載センサ／V2V）　④は右折時歩行者情報提供（車載センサ／V2P），⑤は追い越し時路面電車後方接近情報提供（車載センサ／V2T）を示している。

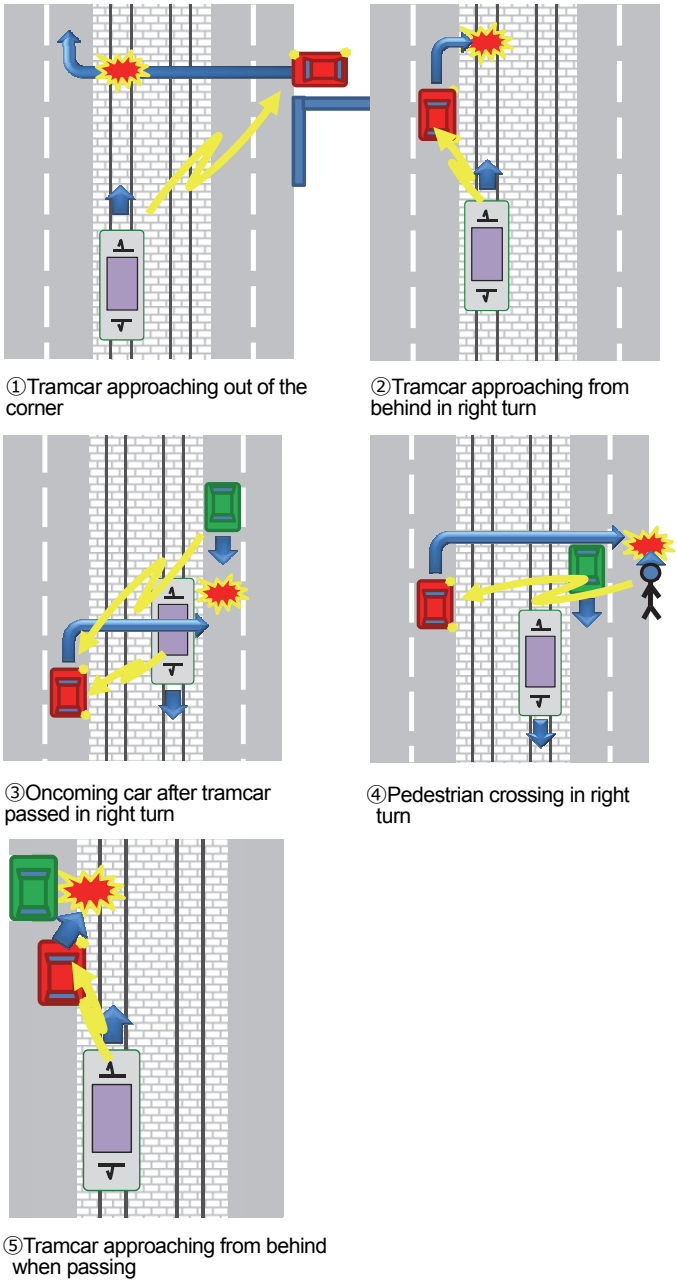


Fig. 8　Purpose of the Demonstration

(2) デモシステム

デモ車両は，先進安全技術「i-ACTIVSENSE」である，スマートシティブレーキサポート（SCBS），リヤビークルモニタリングシステム（RVM）などに，車車間通信機器やヘッドアップディスプレイ（HUD）などを追加したものである（Fig. 9）。

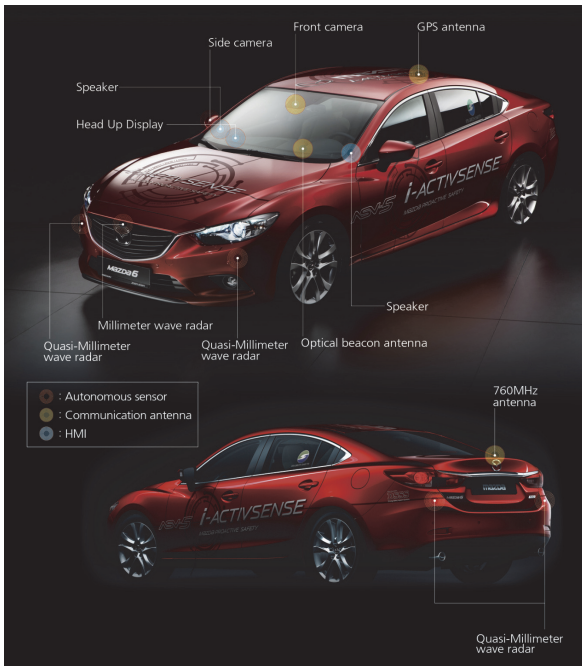


Fig. 9　ASV-5 System

ウインド直影のヘッドアップディスプレイにデモ電車やデモ歩行者の接近情報をイメージ画面で表示し（Fig. 10）,デモ電車の運転席にはデモ車両の接近情報を表示するモニタを設置した（Fig. 11）。

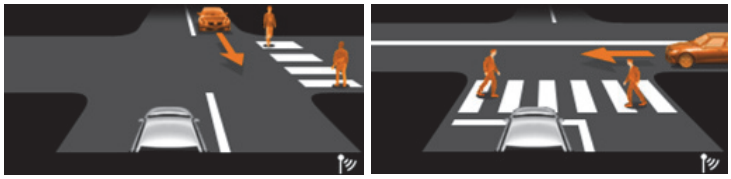


Fig. 10　Sample of Head-up Display

Fig. 11　Support Monitor for Tramcar

歩車間通信については，歩行者のスマートフォンを活用した。スマートフォンに交通安全環境研究所開発の専用アプリケーションをダウンロードすることにより，交通安全環境研究所のサーバを介して，スマートフォンの IP アドレスを取得し，IP アドレスを指定してスマートフォンから歩行者の位置情報を含むパケットを直接受信している。併せて，デモ車両の位置，速度などのデータを総合的に判断し，デモ車両のドライバに歩行者の接近情報を提供する（Fig. 12）。

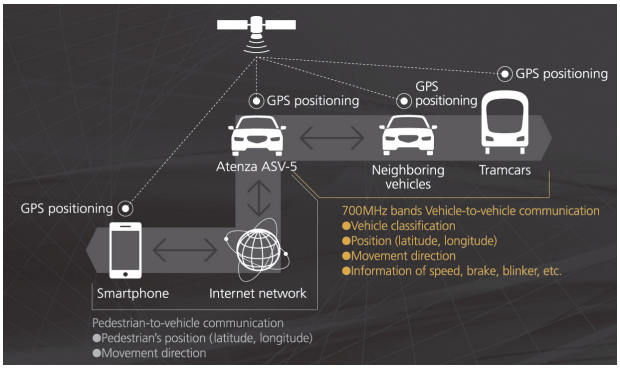


Fig. 12　System Configuration

(3) HMI（Human Machine Interface）

コンセプトは，運転操作を阻害せずに，ドライバを取り巻く見えない危険も含めた危険対象の空間認知ができる直観 HMI とした。

このため，前方注視状態で，死角を含めた危険対象の空間認知を実現するため，デモ用にウインド投影型のヘッドアップディスプレイを採用した。実際の表示は，ドライバが瞬時に情報を判断できるように，簡易的な図形を用いたシンボル表示とした（Fig. 13）。

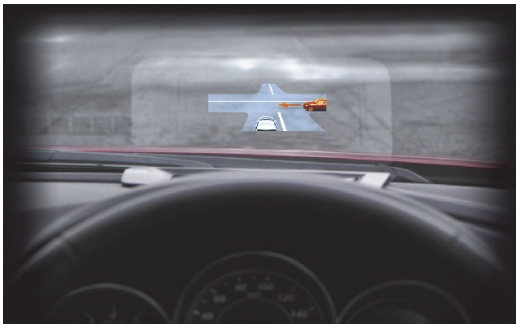


Fig. 13　Head-Up Display

4.4　東京における ASV，C-ACC デモ

お台場では，アテンザ ASV-5 を用いて，路車間通信／車車間通信などのデモを実施した（Table 1）。また，首都高において，スマート交通流（渋滞・CO_2 などの低減）を目的とした協調型 ACC（C-ACC：Cooperative Cruise Control）のデモを行った（Fig. 14）。

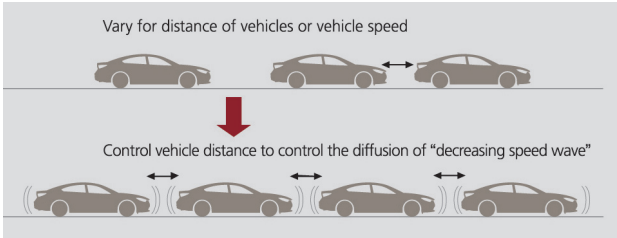


Fig. 14　C-ACC

5. 商品への取り組み

5.1　DSRC 車載器

マツダでは，スマートイン DSRC システムとして，ITS スポット対応 DSRC 車載器を用品で設定している（Fig. 15）。サンバイザの後ろに隠れるように車載器を収納できる。また，DSRC に対応した HDD ナビゲーションシステムも用品で設定しており，車載器とナビゲーションを組み合わせることにより，ITS スポットサービスを受けることが可能である。

Fig. 15　Smart in DSRC System

5.2　新型アクセラ

マツダは，コネクティビティの強化に伴い，独自の「Heads-up cockpit」コンセプトに基づく新世代 HMI を新型アクセラから導入した。人間中心設計を徹底し，ドライビングポジションや運転視界などの基本性能を向上すると共に，独自のコマンダコントロールなどから構成されるシンプルで使いやすい表示／操作デバイス群や新しい GUI を開発。運転への集中を妨げる Visual Distraction（見る脇見），Cognitive Distraction（意識の脇見），Manual Distraction（不安定な操作）を最小化している。マツダで初めて採用されたアクティブドライビングディスプレイは，ディスプレイパネルに表示した情報をミラーに反射させ，メータフード前方に立ち上がったコンバイナに「虚像」として投影するデバイスである（Fig. 16）。車速，ナビゲーションシステムによる経路誘導（ターンバイターン），スマートブレーキサポート警告（SBS）など，リアルタイムに変化するさまざまな情報が表示される。

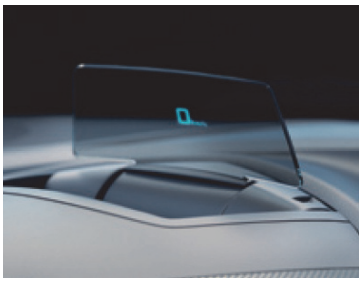


Fig. 16　Active Driving Display

6. おわりに

ITS 世界会議東京 2013 が，今後の ITS の商品化に大きな影響を及ぼすと思われる。近年のアクティブセーフティ技術の発展は目覚ましいが，360 度認知と危険に遭遇させない早めの情報提供を目指すには，ITS 技術を欠かすことはできない。また，各々な情報の整合性やユーザが本当に必要とする的確な情報を，的確なタイミングで，ユーザが分かりやすい形で提供することが非常に重要となる。今後も先進安全自動車（ASV）推進検討会の活動に積極的に参加し，ITS の研究開発・商品化を推進していきたい。なお，広島市での ASV デモに際しては，広島地区 ITS 公道実証実験連絡協議会，および広島地区 ITS 共同研究体を構成する東京大学，交通安全環境研究所，広島電鉄（株）の各位に，深く感謝いたします。

参考文献

(1) 竹本ほか：マツダの安全性向上の取り組み，マツダ技報，No.30，pp.145-150（2012）
(2) Suda et al : FOT of Innovative ASV in Hiroshima, ITS World Congress Tokyo 2013
(3) 林田ほか：車車間通信を用いた路面電車周辺の自動車に関する運転支援システム，交通研フォーラム 2013
(4) 坂本ほか：スマートフォンを活用した歩車間通信のための基礎的検討，交通研フォーラム 2013

■著　者■


田坂 寿康


中野 隆裕

特集：ITS 世界会議

22

先進安全自動車「マツダ アテンザ ASV-5」の開発
Development of Advanced Safety Vehicle “Mazda Atenza ASV-5”

山本 雅史*1 Masashi Yamamoto
奥木 友和*2 Tomokazu Okugi
岩下 洋平*3 Yohei Iwashita
吉田 誠*4 Makoto Yoshida
岡崎 晴樹*5 Haruki Okazaki
是 治久*6 Haruhisa Kore

要約

路面電車と自動車との間の無線通信に車載センサを組み合わせることで，路面電車と自動車が道路空間を共用する場所において，自動車と路面電車双方の安全性が高まる先進安全運転支援システムを構築した。「広島における世界初の路面電車－自動車間通信型 ASV（Advanced Safety Vehicle：先進安全自動車）」として，ITS（Intelligent Transport Systems：高度道路交通システム）公道実験を行うと共に，第 20 回 ITS 世界会議東京 2013 のポストコングレスツアーとして試乗会を行った。

通信利用型安全運転支援システムと車載センサ検知型安全運転支援システムの連携機能，および直感的に理解できる HMI（Human Machine Interface）機能の検証を目的として，路面電車後方接近情報提供や右折時歩行者情報提供など 5 つの支援機能を搭載する「マツダ アテンザ ASV-5」を開発した。

本稿では，「マツダ アテンザ ASV-5」のシステム概要，通信利用型安全運転支援システムと車載センサ検知型安全運転支援システムの連携の考え方，直感的に理解できる HMI 設計の考え方，搭載した安全運転支援機能について報告する。

Summary

To improve the safety of vehicles and trams on their shared roads, an innovative safe driving support systems were developed, which combine onboard sensors with the vehicle-to-tram radio-communication. Mazda Atenza ASV-5 (Advanced Safety Vehicle - Phase 5) was developed to verify the system as the “world’s first vehicle-to-tram cooperative ASV”, which was tested on public roads in Hiroshima and demonstrated in the post congress tour of the 20th ITS World Congress Tokyo 2013.

Five driving support functions are installed to the Mazda Atenza ASV-5, including an approaching tram information provision system and an oncoming vehicle information provision system to verify the intuitive Human Machine Interface (HMI) and the linkage function between the Vehicle-to-Vehicle (V2V) communication system and the onboard sensing systems.

This paper describes the overview of the ASV-5 systems, the concept of the linkage between the communication system and the onboard sensing systems, realizing methods of the intuitive HMI, and the safe driving support functions.

1. はじめに

日本をはじめ，北米，欧州では，無線通信を使って車同士が情報を交換する「車車間通信」や，路側設備と車が無線通信する「路車間通信」を利用して，交通安全，環境問題，交通円滑化，利便性向上などの道路交通に係る諸問題の解決を目指した研究開発が行われ

*1～4　技術研究所
Technical Research Center
*5，6　車両システム開発部
Vehicle System Development Dept.

ている[1]。日本における例として，国土交通省が主導し，自動車メーカ全社が参加する ASV-5 プロジェクト（第 5 期先進安全自動車推進計画）があり，車車間通信を利用した安全運転支援システムの検討が行われている。これは，車車間通信により周辺車両の存在を検知することで，物陰に隠れて見えにくい接近車両の情報を事前にドライバに伝えたり，衝突する危険性がある場合に注意を喚起したりすることで，交通事故を防止することをねらいとしている[2]。

このような車車間通信，路車間通信を活用して交通事故を減らそうとする取り組みは，自動車のみならず，道路空間を共用する他の交通参加者（鉄道や歩行者など）へ展開・適用することで，より安全・安心な道路交通社会の実現に資すると期待される。

広島市では，路面電車が市民の足として定着しており，一日平均約 15 万人の利用がある。近年，路面電車はエコな交通手段として世界的に見直される一方，自動車はさらなるエコ化が進んでいる。この二つの交通形態が，それぞれのメリットを活かしつつ共存できる交通体系を作るために，東京大学，広島電鉄（株），（独）交通安全環境研究所，マツダ（株）が協働して，鉄道とクルマとの安全な連携を目指して共同研究に取り組んできた。

4 者は，路面電車と自動車との間の無線通信に車載センサを組み合わせることで，路面電車と自動車が道路空間を共用する場所において自動車と路面電車双方の安全性が高まるシステムを構築した。2013 年 9 月から「広島における世界初の路面電車－自動車間通信型 ASV」として ITS 公道実験を行うと共に，ITS 世界会議東京 2013 のポストコングレスツアーとして試乗会を行った。

この取り組みの中でマツダは，自動車と路面電車の連携による安全運転支援システムや，通信利用型安全運転支援システム（以下，通信利用型システム）と車載センサ検知型安全運転支援システム（以下，車載検知型システム）の連携システムのコンセプト検証・機能開発，また，ドライバへ分かりやすく情報を伝達する技術の開発・検証を行うことを目的に「マツダ アテンザ ASV-5」を開発した（Fig. 1）。

Fig. 1　Mazda Atenza ASV-5

本稿では，「マツダ アテンザ ASV-5」のシステム概要，通信利用型システムと車載検知型システムの連携の考え方，直感的に理解できる HMI 設計の考え方，搭載した安全運転支援機能について報告する。

2. 「マツダ アテンザ ASV-5」の開発

「マツダ アテンザ ASV-5」を開発するにあたり，以下の機能を実現することをねらいとした。

2.1　通信利用型システムと車載検知型システムの連携

マツダは，ドライバが正しく認知・判断することをサポートするために，見えない危険も含めた危険対象の 360° 認知支援を目指している。そこで，今回は通信利用型システムと車載検知型システムを連携させることで 360° 認知支援の機能を構築した。

Table 1 は，車車間通信と車載センサの特徴を比較したものである。この表に示すように，車車間通信は，広範囲の対象物を検知できる，物陰にいる対象物を検知できるという特長がある一方で，現状では検知精度（位置精度）は GPS の測位精度に依存し，GPS 電波の受信状態によっては 10m 以上の誤差が生じる場合がある。これに対して車載センサは，車車間通信で得られる対象物体の位置精度よりも高い精度で物体までの距離を検知することが可能である一方で，他車両や建物等の物陰にある危険対象の検知は不可能である。このような車車間通信と車載センサの特徴を鑑みて，以下のような考え方で通信利用型システムと車載検知型

Table 1　Feature Comparison between V2V Communication and Onboard Sensors

	V2V communication		Onboard sensors	
Maximum detection length	◎	Max. 1000m at line-of-sight (varying due to driving environment)	○	About from 20m to 200m (varying due to sensing methods)
Detection angle	◎	360deg	○	About from 20deg to 200deg (varying due to sensing methods)
Detection in a blind area (behind other car)	◎	Detectable (having no influence on shading vehicles)	×	Undetectable at not-line-of-sight
Detection in a blind area (behind building)	○	Detectable within about 80m even in worst-case condition of communication	×	Undetectable at not-line-of-sight
Detection accuracy	○	From about 1m (by quasi-zenith satellite GPS) to about 10m (by ordinary GPS)	◎	About 5% of detection length (varying due to sensing methods)

システムの連携機能を構築した。

すなわち，通信利用型システムでは他車両や建物等の物陰にある対象を検知し，危険の存在をドライバに認知させる。そして，危険対象までの距離を精度よく検知できるという車載検知型システムの特性を活かし，ドライバが認知ミスをして衝突する危険があるときに警報によりブレーキ操作を促すことで認知ミスをカバーすることとした。

2.2　直感的に理解できる HMI

HMI の基本性能として，ドライバが煩わしく感じないように情報提供することで不安全状態を回避することが必要である。これに加えて，脇見時間を最小化することを重要視し，表示情報を遠方・上方に配置すると共に，直感的に理解できる情報コンテンツを設計した。

表示情報の遠方・上方配置化は，ウインドシールド投影型 HUD（Head-Up Display：ヘッドアップ・ディスプレイ）で実現した。ウインドシールド投影型 HUD は，メータフード内やナビゲーションディスプレイに情報表示する場合に比べて，ドライバ正面のより上方に情報を表示できる。このため，運転中の視線移動を最小限にすることが可能となる。また，HUD はディスプレイ画面の虚像を見かけ上遠方に投影することができるため，前方道路から情報表示へ視線を移動する際の焦点調節の負担が少なく，表示画面への注視時間を短縮する効果が期待できる。

直感的に理解できる表示コンテンツとするためポイントは以下の 3 点であると考え，これら要件を織り込んだ表示コンテンツを設計した（Fig. 2）。

① 自車を中心に鳥瞰的に危険対象を表示する
② ドライバが経験し，理解しやすいシンボルアイコン，色情報を統一的に用いる
③ 接近方向からシンボルアイコンをスライドインさせることで，どちらの方向からどんな危険対象が接近するのかを視覚的に表現する

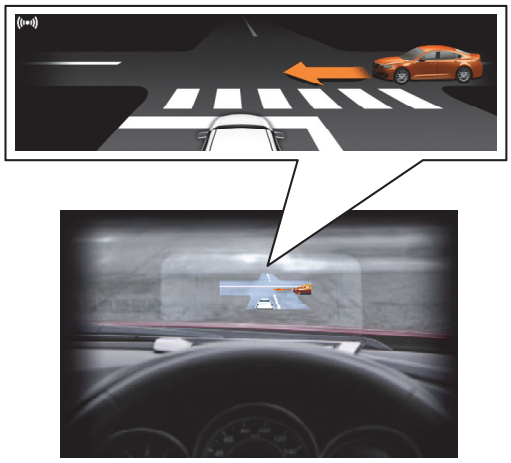


Fig. 2　HUD Screen Image

3. システム構成

Fig. 3 に，「マツダ アテンザ ASV-5」に搭載されているデバイスを示す。カメラやレーダなどの車載センサに加えて，車車間・路車間通信を行う通信デバイスを搭載している。また，ドライバへの情報提供デバイスとして，ウインドシールド投影型の HUD とスピーカを搭載している。

3.1　車載センサ

市販されている「マツダ アテンザ」に搭載されている i-ACTIVSENSE では，ミリ波レーダ（76GHz 帯）や近赤外線レーザを用いて先行車両や前方の障害物を検知したり，マイクロ波レーダ（24GHz 帯）を用いて後側方の接近車両を検知したりしている。これらに加えて「マツダ アテンザ ASV-5」では，対向車や右折先の横断歩行者を検知するために，右前端部にマイクロ波レーダを，ドアミラーの付け根にサイドカメラを設置した。

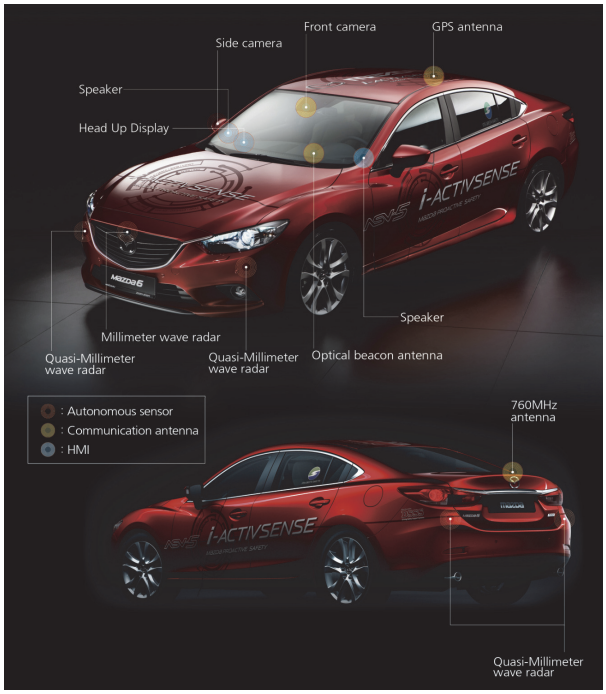


Fig. 3　System Configuration

3.2　通信デバイス

700MHz 帯通信機を用いて，他車両や路面電車と相互に車車間通信を行い，GPS から得られる位置情報（緯度，経度）や進行方向，速度，ブレーキやウインカなどのドライバ操作情報などを送受信する。また，「マツダ アテンザ ASV-5」には，スマートフォンを活用した歩車間通信機能を搭載した。歩行者が所持するスマートフォンに通信アプリケーションをインストールすることにより，インターネット網を経由して車と歩行者の間で通信を行う。これにより車両は，スマー

トフォンに内蔵された GPS で測位した歩行者の位置情報（緯度，経度）と進行方向の情報を受信することができる（Fig. 4）。

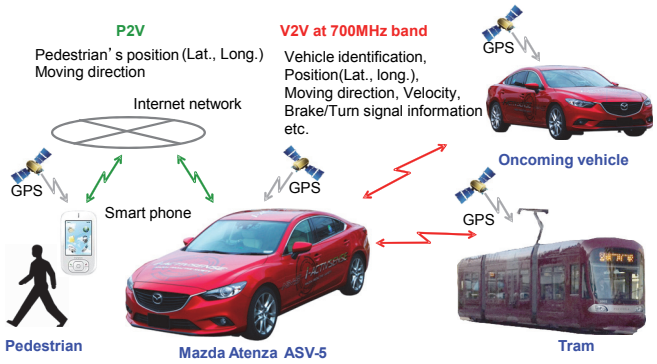


Fig. 4　Communication System

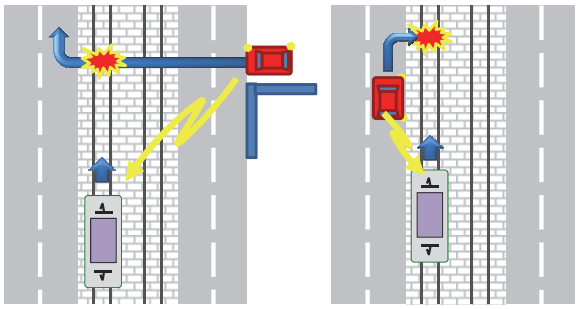
4. 搭載した安全運転支援機能

本章では，「マツダ アテンザ ASV-5」に搭載した安全運転支援機能について述べる。

4.1　自動車と路面電車の連携による支援

路面電車と自動車が道路空間を共有する場所で，自動車と路面電車双方の安全性が高まるシステムとするために，自動車のドライバ，路面電車の運転士に対する以下の支援機能を構築した。

路面電車の運転士に対する支援機能を検討するにあたり，広島電鉄（株）の運転士にヒヤリングを行った。その結果，自動車が急に軌道敷内に進入してくるときにヒヤリとした経験があるという意見を得た。これを受けて，見通しの悪い路地から自動車が出て軌道敷を横断する場面，路面電車の前方で自動車が右折しようとしている場面や，駐車車両や障害物を避けるために自動車が軌道敷内に進入してくる場面において，路面電車の運転士に対して情報を提供することとした（Fig. 5）。なお，路面電車側の支援機能の開発は，交通安全環境研究所が取り組んだ。



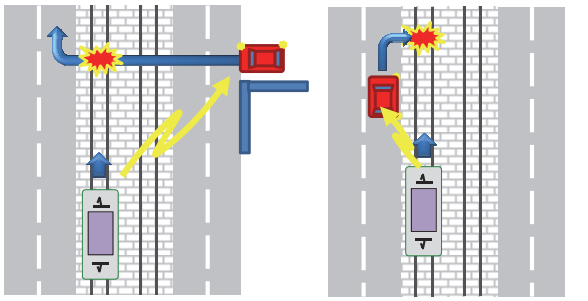
(a) Provision of information on right turn vehicle at blind corner ahead(V2T)

(b) Provision of information on right turn vehicle ahead (V2T)

V2T:Vehicle-to-Tram communication

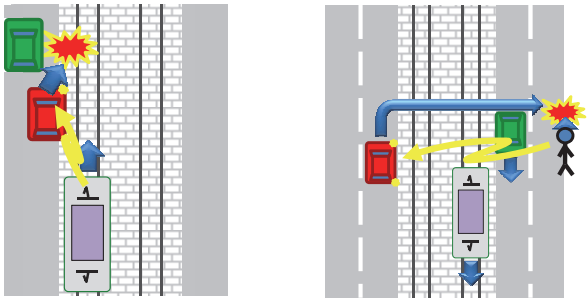
Fig. 5　Supports for Tram Driver

一方，自動車のドライバにとっては，後方から接近する路面電車に気付くのが遅れることがあったり，見通しの悪い交差点では交差する車両・電車の接近状況の目視確認が困難である。このことから，路面電車で支援を行う場面と同じ場面において，自動車のドライバに対して路面電車の接近情報を提供することとした（Fig. 6 (a)～(c)）。



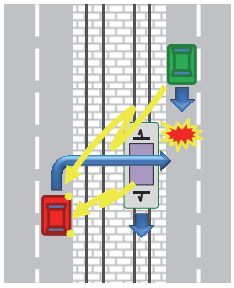
(a) Provision of information on Tram approaching out of the corner(by T2V)

(b) Provision of information on approaching Tram in right turn (by T2V and Onboard sensors)



(c) Provision of information on approaching Tram in overtaking (by T2V and Onboard sensors)

(d) Provision of information on pedestrian in right turn (by P2V and Onboard sensors)



V2V:Vehicle-to-Vehicle communication
T2V:Tram-to-Vehicle communication
P2V:Pedestrian-to-Vehicle communication

(e) Provision of information on oncoming vehicle in right turn (by V2V and Onboard sensors)

Fig. 6　Supports for Car Driver

このように，自動車と路面電車が支援し合うことで，万が一，ドライバ，運転士のどちらかが認知ミスをした場合でも，他方がカバーすることで衝突を防ぐことができ，双方の安全性を高めることができると考えた。

4.2　他車両，歩行者との衝突に対する支援

広島の道路交通環境の特徴として，自動車と路面電車，歩行者が共存することにより，交通が錯綜しているという特徴がある。これを踏まえて，他車両，歩行者との衝突事故に対応した支援機能を搭載することとした。自動車が右折する場面において，右折先の横断

歩行者の情報を提供することでドライバの認知を支援する機能（Fig. 6 (d)），および接近する直進対向車の情報を提供することでドライバの認知を支援する機能を構築した（Fig. 6 (e)）。

4.3　システムの機能動作

本節では，Fig. 6 (b)に示した後方からの路面電車接近情報提供と Fig. 6 (d)に示した右折時の歩行者情報提供を例に取り上げ，システムの機能動作について述べる。一連の機能の動作の流れを Fig. 7 に示す。

右折しようと交差点に進入したときに路面電車が後方から接近すると，喚起音と共に Fig. 7 の右下に示す画像を HUD に表示することでドライバに後方から路面電車が接近していることを気づかせる。ドライバの右折意思は，ドライバのウインカ操作とブレーキ操作の有無，車速，交差点に対する自車の位置から判定している。また，路面電車の接近を知らせるタイミングは，TTC（Time To Collision：衝突までの時間）に基づいて算出している。GPS で測位した自車位置と車車間通信で獲得した路面電車の位置から算出した相対距離と路面電車の走行速度を用いて逐次 TTC を計算し，あらかじめ設定しておいた閾値を下回った時点で情報を提示している。また，HUD の表示画像は，路面電車が自車を追い越した時点で消している。GPS で測位した自車位置と車車間通信で獲得した路面電車の位置から相対的距離を算出し，路面電車が自車を追い越したことを判定している。

次に，路面電車が通過した後，自車が右折待ちから発進しようとしたときに，右折先の横断歩道とその付近に歩行者が存在すると，喚起音とともに Fig. 7 の右中央に示す画像を HUD に表示することで，ドライバに歩行者が存在することを知らせて注意を喚起する。まず，歩車間通信で獲得した歩行者の位置情報を用いて，右折先の横断歩道とその周辺に歩行者がいるかを判断する。このとき，歩車間通信で獲得した歩行者の進行方向の情報から横断歩道から遠ざかる歩行者は除外している。注意喚起は，右折待ちから発進したことをドライバのブレーキ操作と車速から判断し，このタイミングで行っている。

この注意喚起にもかかわらず，ドライバが右折を継続し，横断歩行者と衝突の危険がある場合には，車載センサで検知した結果に基づいて警報を発報する。警報音とともに Fig. 7 の右上に示す画像を HUD に表示することでドライバに歩行者と衝突する危険があることを警報し，ドライバにブレーキ操作を促す。

5. 広島での ITS 公道実験

Fig. 5，6 に示す 7 つの支援機能を確認するために，広島市内の公道で走行実験を行った。実験は，Fig. 8 に示す広島電鉄江波線（江波駅～舟入本町駅）沿いで行った。また，実験に用いた「マツダ アテンザ ASV-5」，路面電車を Fig. 9 に示す。

実験の結果，自動車と路面電車間の車車間通信により互いに情報をやり取りすることで，Fig. 5，6 (a)～(c)に示す自動車と路面電車の連携による安全運転支援が，自動車と路面電車の双方で動作することを確認できた。また，Fig. 6 (d)の歩行者との衝突防止支援，Fig. 6 (e)の対向車との衝突防止支援が，通信利用型システムと車載検知型システムの連携の考え方に基づき動作することを確認できた。

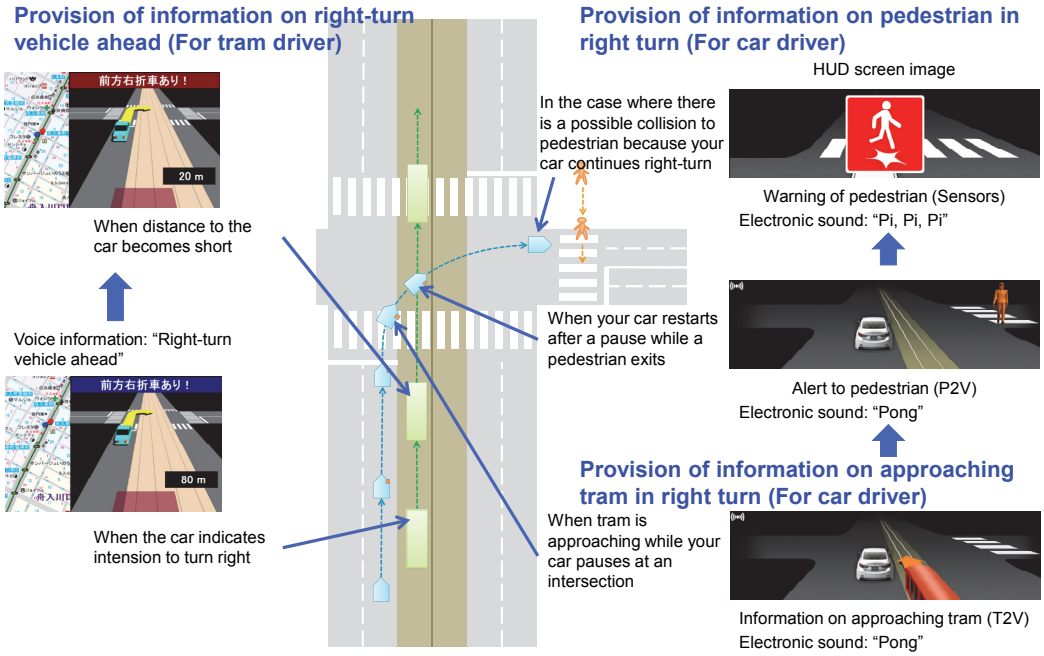


Fig. 7　Example of Support Scenario

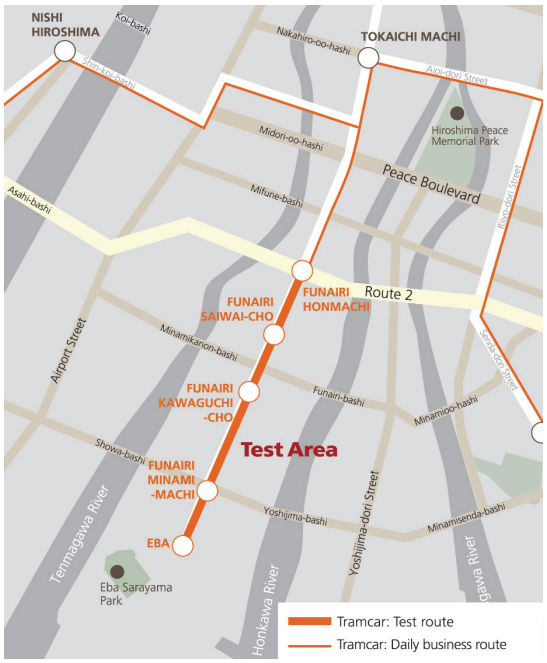


Fig. 8　Test Area

Fig. 9　Mazda Atenza ASV-5 and Test Tram

6. まとめ

本稿では，「マツダ アテンザ ASV-5」のシステム概要，通信利用型システムと車載検知型システムの連携の考え方，直感的に理解できることをねらいとしたHMI 設計の考え方，搭載した安全運転支援機能について述べた。今回，これらを「マツダ アテンザ ASV-5」に搭載し，自動車と路面電車の連携による支援や，通信利用型システムと車載検知型システムを連携させた歩行者との衝突防止支援などが設計どおりに動作することを確認した。今後，自動車と路面電車の連携支援の有効性評価，通信利用型システムと車載検知型システムの連携機能の検証と改善，直感的に理解できるHMI の定量的効果評価に取り組んでいく。

参考文献

(1) 花井：ITS（高度道路交通システム），自動車技術，Vol.67，No.8，pp.170-177（2013）
(2) 山本ほか：車車間通信を利用した安全運転支援システムの開発，マツダ技報，No.26，pp.131-136（2008）

■著　者■


山本 雅史


奥木 友和


岩下 洋平


吉田 誠


岡崎 晴樹


是 治久

特集：ITS 世界会議

23　車車間通信性能予測モデリング手法の確立

Establishment of Vehicle-to-Vehicle Communication Performance Prediction Modeling Techniques

山田 秀行*1　Hideyuki Yamada
強矢 昌宏*2　Masahiro Suneya
奥木 友和*3　Tomokazu Okugi
山本 雅史*4　Masashi Yamamoto
荒木 純道*5　Kiyomichi Araki
タン ザカン*6　Gia Khanh Tran

要約

任意の走行環境に対して，ロバスト性の高い車車間通信システムを実現するためには，走行環境特有の信号強度変動特性（フェージング特性）を把握し，十分なシステムマージンを確保できる受信機感度やゲインを設計する必要がある。今回，市街地見通し外交差点環境を対象に，通信性能予測モデリング手法を開発した。走行環境のフェージング特性を仲上-m 分布によりモデル化することで，達成すべき通信性能に必要な SN 比を精度よく予測し，システムマージンを精度よく設計可能とした。

Summary

In order to realize the vehicle-to-vehicle communication system with high robustness for any running environment, it is necessary to grasp signal strength variation characteristics of the driving environment-specific (fading characteristics), and to design the gain and receiver sensitivity that ensures a sufficient system margin. This time, we have developed a communication performance predictive modeling techniques for urban NLOS intersection environment. Through the modeled by Nakagami-m distributed fading characteristics of the driving environment, we made it possible to predict accurately the SN ratio required communication performance, and to design a high accuracy system margin.

1. はじめに

交通事故削減を目的に，車車間通信による安全運転支援システムの実用化と普及促進へ向け，官民連携で取り組まれている。車車間通信システムに必要な通信性能及び通信エリアは，個々のサービス要件から定められている(1)。見通し外交差点での出会い頭発進待機支援サービス要件例をTable 1に示す。

Table 1　One Cases of V2V (Vehicle to Vehicle) Service Requirement

Service Situation	Anti-Collision at Intersection Service
Target Vehicle Maximum Speed	70km/h
Communication area length	94.7m (10m + 84.7m)
Requirement PER (max)	5%

ロバスト性の高い車載システムとするには，通信性能及び通信エリア要件を満足するために必要となる平均SNR（Signal Noise Ratio）を精度よく予測して，システムマージンを十分確保する必要がある。官民連携活動で検討された回線設計例(2)（Table 2）によると，システム許容伝搬損失を求める際に必要なフェージングマージンには，実測結果から得られた固定値を使用し，都市部，市街地，郊外など代表的な走行環境の平均伝搬損失は，送受信車両間の距離や交差点形状から平均伝搬損失を推定する方法として提案された「伊藤・多賀モデル」(3)により見積もられている。通信システムマージンはシステムの許容伝搬損失と環境ごとの平均伝搬損失の差で表される。回線設計例(2)によれば，都市部，郊外のシステムマージンが10dB弱確保できているのに対し，市街地では1.7dB と少なく，仮に，建物配置や交通状況などでフェージング特性が想定より悪化することがあれば，必要

*1～4　技術研究所
Technical Research Center
*5，6　東京工業大学
Tokyo Institute of Technology

な通信性能を満足できなくなることも考えられる。Fig. 1に示すように，システムマージン確保のための通信システム設計を行うには，走行環境の平均伝搬損失と所要の通信性能達成に必要な平均SNRを精度よく予測する必要があり，そのためには，走行環境のフェージング特性を正確に把握する必要がある。今回，実際の市街地交差点での出会い頭事故防止支援サービスを対象に通信性能予測モデル及びフェージング特性モデルを検討し，シミュレーションとフィールド実験により，フェージング特性モデルの再現精度と平均SNR予測精度を検証した。

Table 2　Line Design Example
(Non Line of Sight Intersection)

Environment		City	Urban	Suburbs
Fading Margin	dB	6.3	6.8	5.8
Require C/(I+N) @QPSK/100Byte	dB	4.0		
Receiving Sensitivity	dB	-90.1		
Acceptable propagation loss	dB	99.0	98.5	99.5
Distance	m	105(10+95)		
Propagation Loss (Estimate)	dB	89.2	96.8	91.6
System Margin	dB	9.8	1.7	7.9

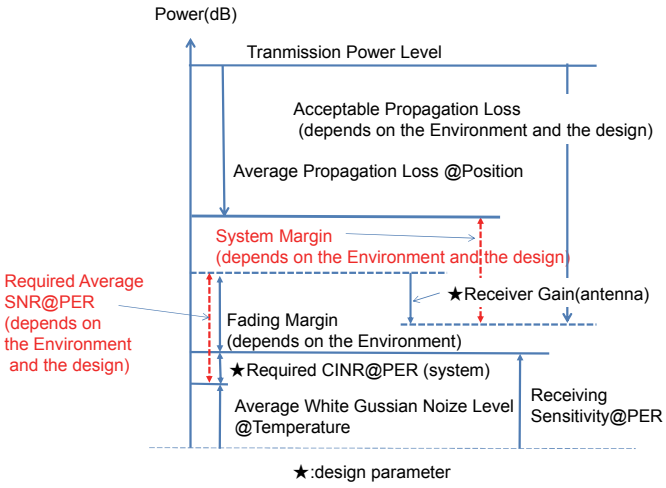


Fig. 1　Outline of Power Level

2. 車車間通信性能予測モデル

車車間通信システムでは，運転支援サービスコンセプトを基に，ドライバの反応時間や検知対象車両の上限速度などを考慮した通信エリアサイズと通信性能要件が規定されている[1]。通信性能の指標は，通信エリア内の対象車両から送信された情報を受信した際のエラー度合いを示すパケットエラー率PER（Packet Error Rate）で定義され，5%以下とすることが必要とされている。

また，平均SNRと平均PERの関係は式(1)で示される。

$$\overline{PER}(\bar{\gamma}) = \int_0^{\infty} PER(\gamma) \times pdf(\gamma|\bar{\gamma})d\gamma \qquad (1)$$

左辺の$\overline{PER}$ は平均PERを表し，$\bar{\gamma}$ は平均SNRを表している。右辺のPER(γ) はホワイトガウスノイズ環境下でのSNRとPERの関係を表す関数で，変調方式，パケット構成，誤り訂正方式など通信機の伝送方式により決まる。ここで所要PERを達成するために必要となるSNRは通信機の伝送効率を表す指標である「搬送波レベル対干渉・雑音比」CINR（Carrier to Interference and Noise Ratio）に相当し，回線設計例[2]（Table 2）では「Require C / (I+N)」として示され，無線機の受信感度に影響する。また，pdf(γ|γ̄)は受信信号SNRの空間分布を確率密度関数で表したもので電波伝搬特性におけるフェージング特性に相当する。式(1)から求まる所要平均PERを達成するために必要な平均SNRとCINRの差がフェージングマージンに相当する。受信感度，フェージングマージン，及びゲインなどから求まるシステムの許容電力損失と実環境下で予測される平均電力損失との差がシステムマージンであり，システムマージンが0dB以上ないと通信システムとして成立しない。

以上より，システムマージンを確保するためには，環境の平均伝搬損失と共に，伝送特性と伝搬特性から平均SNRを把握しシステムの許容損失を精度高く設計する必要がある。車車間通信システムの変調方式は，無線LANなどで一般的に使われているOFDM（Orthogonal Frequency Division Multiplexing）であり，伝送特性に関しては参照可能な知見が豊富であるのに対し，車車間通信サービス環境特有の伝搬特性については，平均伝搬損失予測モデルに関する報告事例[3]はあるが，700MHz帯車車間通信のフェージング特性モデルに関する検討事例は見当たらない。今回，日本における実用化優先度の高い代表的なサービスとして，見通し外交差点出会い頭発進待機支援サービスを対象に，フェージング特性モデルを検討し，シミュレーションとフィールド実験により再現精度を検証した，以下，その結果につき述べる。

3. フェージング特性モデル

3.1　フェージング特性モデルの検討

送受信車両間の距離による平均電力損失変動が時間空間的にマクロな変動であるのに対し，フェージング特性とは，送受信車両間の建物，路側構造物，周辺走行車両などによる多重反射波が複雑に干渉した結果発生する，時間空間的にミクロな信号強度変動特性のことである。このミクロな変動特性は信号強度の統計的分布特性として確率密度関数pdfで表現される。基地局と移動局関係での陸上移動体通信における見通し外通信では，平均値

が一定とみなせる狭い範囲での受信レベルの分布特性は，位相関係が全方位にわたって無相関かつ定常状態の分布に相当するレイリー分布に従うとされている[4]。しかし，車車間通信では，送受信アンテナが共に低く，相互に移動していることから，場合によっては分布特性がレイリー分布から外れる可能性も指摘されている[5]。日本における700MHz帯車車間通信のフェージング特性も，交差点の形状，建物配置や送受信車両の位置関係によっては，フェージング特性が変動する可能性があると仮定し，レイリー分布を含み，より広く分布特性を表現できる仲上-m分布[6]（式(2)）まで拡張し，フェージング特性のモデル化を行った。

$$pdf(\gamma) = \frac{m^m}{\bar{\gamma}^m \Gamma(m)} \gamma^{m-1} \exp\left(-\frac{m}{\bar{\gamma}}\gamma\right) \qquad (2)$$

Γ(m): ガンマ関数

仲上-m分布は式(2)中のパラメータ“m”の値（以下mファクタと呼ぶ）により，電波伝搬の結果生じるフェージングの度合いを広く表現でき，m＝1の場合がレイリー分布となる。m＞1の場合は，見通し関係のような強い直接波成分のある分布に相当し，フェージングの度合いは，レイリー分布よりも緩いと定性的には理解できる。逆に，m＜1の場合は，レイリー分布よりも激しいフェージング状態と理解することができる。車車間通信のフェージング特性を仲上-m分布でモデル化し，代表的なサービス提供環境のmファクタを求めることで，精度高く平均SNRを予測できる可能性がある。東京都内の実在の市街地交差点を対象とした，シミュレーションとフィールド実験により，フェージング特性を仲上-m分布でモデル化することの有効性に関して検証を行った。

3.2　シミュレーションによる再現性の検証

シミュレーションには，電波を光線として近似し，その軌跡上の反射・回折・透過・減衰・干渉などの影響を幾何光学原理により計算するレイトレース法電波伝搬シミュレータ“Wireless Insight”（REMCOM／構造計画研究所）を使用し，車車間通信による電波伝搬特性を解析した。

(1) シミュレーション条件

対象交差点の道路・建物寸法，間隔，高さなどからFig. 2に示す実スケールの3次元形状モデルをシミュレータ上に作成した。道路，建物の材質は全てコンクリートとした。送信車両（TX），受信車両（RX）それぞれをTable 3に示す3通りの位置（TX1～TX3，RX1～RX3）に設定し，9通りの送受信車両位置関係ごとに電波伝搬特性を計算した。

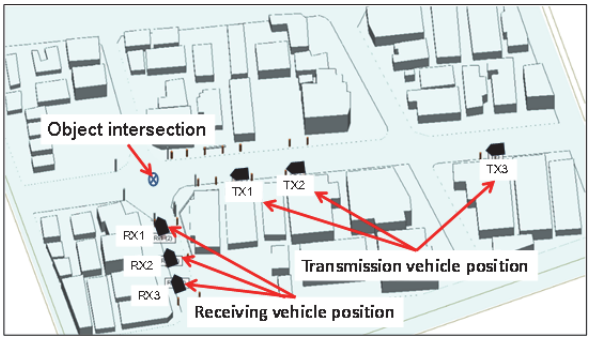


Fig. 2　Raytrace Simulation Model

Table 3　Vehicle Distance from Center of the Intersection

RX Position	Distance (m)	TX Position	Distance (m)
RX1	20.3	TX1	29.2
RX2	28.3	TX2	49.0
RX3	36.3	TX3	115.0

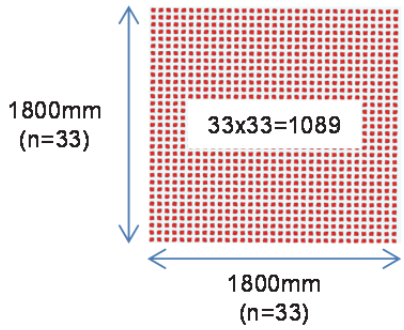


Fig. 3　Receiving Antenna Array Setting

アンテナモデルには，フィールド実験で使用する700MHz帯水平面無指向性モノポールアンテナパラメータを設定した。送信アンテナは，車両を模擬した金属箱モデルの上に設置し，フィールド実験で使用する通信機の中心周波数と同じ720MHzの連続サイン波を放射した。受信車両位置におけるフェージング特性を評価するためには，平均電力が一定とみなせる狭いエリアを設定する必要があるため，交差点角建物による回折波の自由空間減衰量が1dB以内とほぼ一定とみなせる範囲を計算し1800mm×1800mmのエリアを設定した。このエリア内にFig. 3に示すように，33×33＝1089個の受信アンテナを等間隔に配置した。ただし，簡単のため受信側には車体モデルは設置していない。受信エリア内の各アンテナで得られた信号強度からアンテナ位置ごとのSNRとエリア内の平均SNRを算出し，受信エリアの受信電力分布特性（pdf）を求めた。

レイトレース計算手法はイメージング法とし，計算条件は，反射，透過，回折回数を，それぞれ3回，1回，1回とした。

(2) シミュレーション結果

シミュレーション結果の一例として，出会い頭発進待機支援サービスでの通信エリア要件の送受信車両位置関係に相当するTX3-RX1内の一つのアンテナ間で抽出された有効伝搬パスの例をFig. 4に示す。交差点周辺の建物壁での反射や，建物角での回折により伝搬パスが抽出されている。アンテナごとに有効伝搬パスの信号強度を合計することで，個々のアンテナ位置での受信電力を求め，1089個全てのアンテナに対して同様の計算をすることで，1800mm^{2}の受信エリアの電力分布のヒストグラムを得る。一例としてFig. 5にRX1エリアにおける受信電力分布を示すヒストグラムと，得られた分布の統計量から求めたpdfを重ねて示す。pdfとしては，レイリー分布（m＝1）と仮定したケースと，仲上-m分布と仮定したケースの2通りを求めた。シミュレーション結果のmファクタは，送受信位置関係ごとに，得られたヒストグラムが仲上-m分布に従うとして最も尤もらしいパラメータを推定する手法である最尤推定法により求めた。

Fig. 4　Simulated Propagation Paths (TX3-RX1)

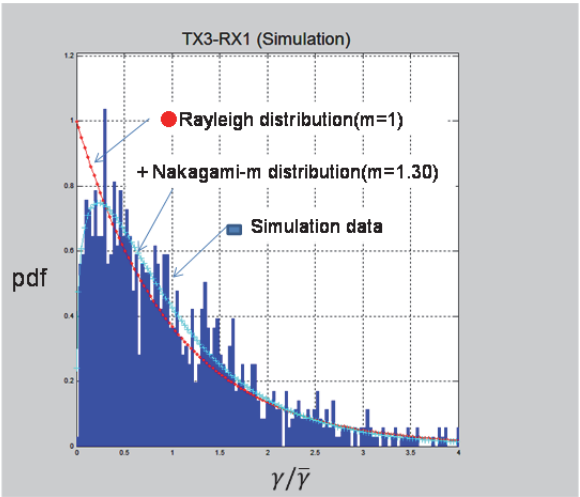


Fig. 5　Fading Characteristics TX3-RX1 (Simulation)

次に，pdfとして仲上-m分布が実際の分布をどの程度再現できているかを定量的に評価するために，カルバックライブラ情報量DKL（Kullback Leibler divergence）(7)を求めた。DKL　は，二つの確率分布の相対的な類似度の指標として式(3)で求められ，この値が0であれば等しい分布であり，0に近いほど二つの確率分布の類似度は高いと解釈できる量とされている。

$$D_{KL}(P||Q) = \sum_{k=0}^{\infty} p(x_k) log \frac{p(x_k)}{q(x_k)} \qquad (3)$$

送受信車両位置関係ごとに求めた受信エリアの分布特性を，レイリー分布（m＝1）と仮定した場合と，それぞれの結果から最尤推定で求めたmファクタによる仲上-m分布と仮定した場合で，シミュレーション結果のヒストグラムに対するDKL　を求めた結果をTable 4に示す。

Table 4　D_{KL} (Simulation)

Position	Rayleigh	Nakagami-m
TX3-RX1	0.10	0.08 (m=1.30)
TX2-RX1	0.11	0.09 (m=1.37)
TX1-RX1	0.13	0.08 (m=1.57)
TX3-RX2	0.09	0.09 (m=1.04)
TX2-RX2	0.11	0.11 (m=1.04)
TX1-RX2	0.11	0.10 (m=1.31)
TX3-RX3	0.10	0.10 (m=1.20)
TX2-RX3	0.11	0.10 (m=0.85)
TX1-RX3	0.15	0.10 (m=1.54)

シミュレーション結果からは，送受信位置関係によりmファクタがばらつき，おおむねm＞1の卓越成分があるような分布となっているが，送受信位置関係によっては，レイリー分布（m＝1）に近づいたり，TX3-RX2のようにレイリーよりも乱れた分布（m＜1）になることもあることが分かった。DKL　でみると，仲上-m分布とした場合に，mファクタが1から外れるケースほど類似度は高い傾向があることから，今回のような交差点環境においては仲上-m分布で表現するほうが実際の分布に近いと考えられる。

3.3　フィールド実験による再現性の検証

シミュレーション検証を行った交差点にて，実車に700MHz帯車車間通信機とアンテナを搭載し，シミュレーション時と同じ送受信車両位置関係で各受信車両位置における受信信号強度（RSSI）を計測・解析し，フェージング特性を評価した。実フィールドでは，送受信車両の位置関係以外の条件，特に周辺の交通状況などはコントロールできないため，周辺の駐停車車両，走行車両，歩行者などの外乱が分布特性に与える影響も解析できるように，計測中の送受信車両間の交通状況もビデオ映像として記録した。

(1) フィールド実験条件

送受信車両に搭載した通信機の主な仕様をTable 5に示す。送信車両のルーフ上中央部（設置高1685mm）に水平面無指向性モノポールアンテナを設置した。送信機からは100バイト長のデータを10ms間隔で連続送信した。

受信車両も同一車種とし，ルーフ上にFig. 6に示す1～8の位置にアンテナを2本ずつ設置し，進行方向に時速3km/h程度の微低速で2m程一定速で移動しながら計測を繰り返すことで，各受信位置エリアの受信信号強度分布データを取得した。

Table 5　V2V Communication Unit Spec

Frequency	720MHz
Transmit Power	20dBm
Bandwidth	8.3MHz
Modulation Scheme	16QAM (1/2) OFDM
Error-Collection Scheme	Convolutional Code R=1/2
Access Method	CSMA/CA

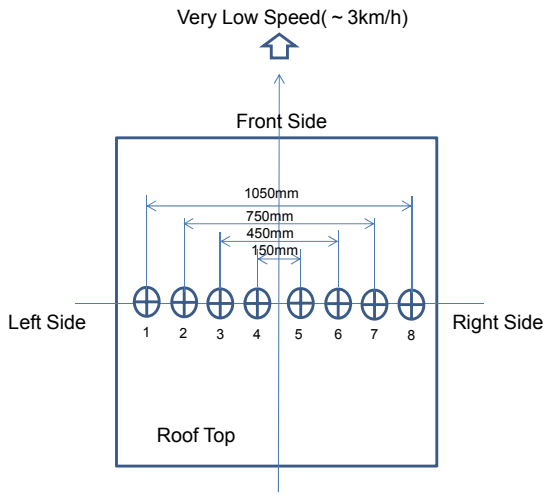


Fig. 6　Receiving Antenna Position (Field Test)

(2) フィールド実験結果

フィールド実験結果に対してもシミュレーション結果と同様の手法で解析・検証を行った。Fig. 7に実測結果から得られた受信電力のヒストグラムと得られた分布の統計量から求めたレイリー分布，仲上-m分布の2種類のpdfを重ねて示す。

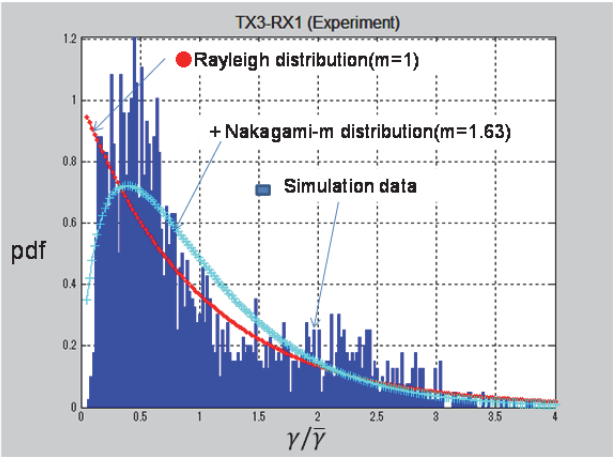


Fig. 7　Fading Characteristic TX3-RX1 (Experiment)

シミュレーション検証と同様レイリー分布，仲上-m分布とフィールド実験結果の分布との類似度の指標となるDKLを全送受信位置関係ごとに求めた結果をTable 6に示す。

Table 6　D_{KL} (Experiment)

Position	Rayleigh	Nakagami-m
TX3-RX1	0.12	0.11 (m=1.63)
TX2-RX1	0.13	0.13 (m=1.25)
TX1-RX1	0.12	0.06 (m=1.86)
TX3-RX2	0.15	0.09 (m=2.05)
TX2-RX2	0.11	0.07 (m=1.78)
TX1-Rx2	0.13	0.09 (m=1.86)
TX3-RX3	0.28	0.06 (m=4.05)
TX2-RX3	0.17	0.07 (m=2.10)
TX1-RX3	0.15	0.09 (m=1.75)

フィールド計測結果の分布特性は，仲上-m分布で表現した場合では，送受信車両位置関係全体にわたりm＞1となった。また，位置関係によりmファクタに大きなばらつきが見られた。更に，シミュレーションで見られたようなm＜1になるようなケースはなかった。全体として，mファクタが大きく1を超える分布であることから，DKLで見ても仲上-m分布のほうが実測結果の分布をよく表現できているという結果となった。ただし，実測データにはシミュレーションと異なり，周辺走行車両による外乱や受信エリア内のアンテナ位置のばらつき，また，微低速ではあるが移動しながら計測したことによるエリア内のサンプリング位置のばらつきなどが，mファクタに影響する可能性があり，本フィールド実験結果のmファクタについては，計測生データの事前処理方法も含め，引き続き検証していく必要がある。

3.4　フェージング特性モデルの有効性検証

上記のシミュレーション及びフィールド実験結果による再現性検証結果から，伝搬環境のフェージング特性を仲上-m分布でモデル化することで，送受信位置関係の影響も含め実際のフェージング特性を精度よく再現できる見通しが得られた。次に，フェージング特性モデルの性能予測への有効性を検証するために，シミュレーション結果フィールド実験結果それぞれに対してフェージング特性モデルを適用して求めたpdfと伝送方式から求まるPER(γ)特性を，式(1)に適用することで得られる平均SNR-平均PERの関係と，シミュレーション，フィールド実験結果の各受信点のSNRから直接求めたpdfと伝送方式から求まるPER(γ)特性を式(1)に適用して得た平均SNR-平均PERの関係を比較することで，フェージング特性モデルによるSNR予測精度を評価した。

(1) 伝送方式によるPER(γ)特性

伝送方式から決まるPER(γ)特性については，ランダムなビット列からなるパケットを生成し，通信機の伝送方式による誤り訂正符号化処理，変調処理の後，加法性白色ガウス雑音（AWGN）を付加し，復調，復号するまでの一連の伝送処理を，検証すべきSNRの範囲で繰り返しシミュレーション計算を行うことで，各SNRに対するPER(γ)特性を求めた。

(2) SNR 予測精度

以上の方法により，位置関係ごとの平均SNR-平均PERの関係を求めた。TX3-RX1の位置関係におけるシミュレーション結果に対する平均SNR-平均PERの関係をFig. 8に，フィールド実験結果に対する平均SNR-平均PERの関係をFig. 9に示す。

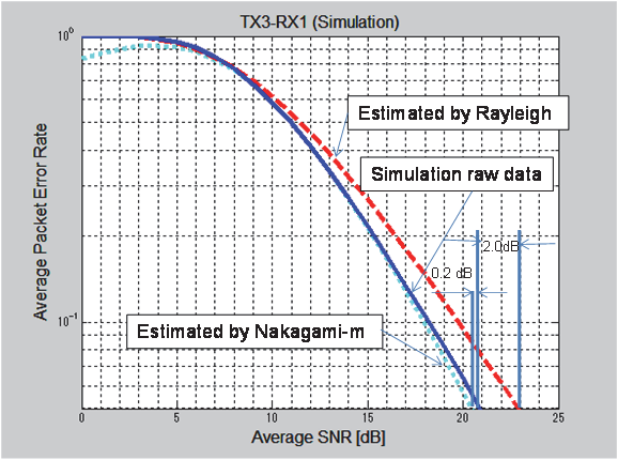


Fig. 8　PER and Average SNR (TX3-RX1 Simulation)

出会い頭発進待機支援サービスの位置関係に相当するTX3-RX1にて，平均PER＝5%を達成するために必要な平均SNRを評価した。シミュレーション，フィールド実験生データから直接求めた平均SNRとフェージング特性モデルから予測して求めた平均SNRとの差を比較した。直接求めた平均SNRをSNRd，レイリー分布で予測した平均SNRをSNRr，仲上-m分布で予測した平均SNRをSNRnとした時，各分布での予測値と直接求めた値との差

Δr＝SNRr－SNRd，Δn＝SNRn－SNRdは，シミュレーション結果に対しては，Δr＝2.0dB，Δn＝-0.2dB，フィールド実験結果に対しては，Δr＝5.0dB，Δn＝0.8dBとなり，フェージング特性を仲上-m分布としてモデル化することで，所要平均PERの達成に必要な平均SNRを精度よく予測できる目途を得た。

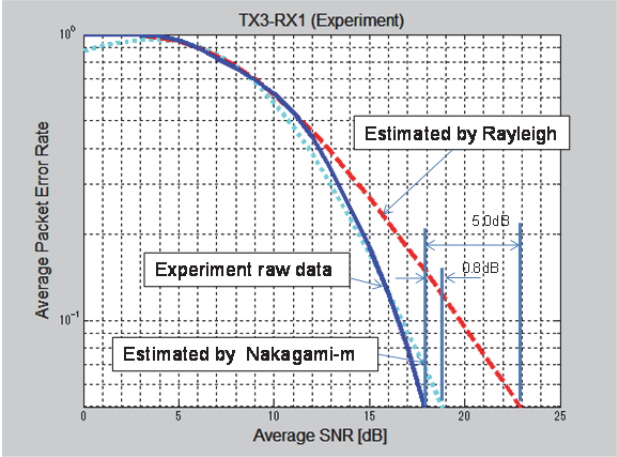


Fig. 9　PER and Average SNR (TX3-RX1 Experiment)

ただし，今回検証した交差点環境のサービス提供条件（TX3-RX1）でのmファクタは，m＞1であり，レイリー分布で予測して設計するほうがシステムマージンをより多く確保できる。しかし，3.2章で示したように，シミュレーション結果からは，送受信車両位置関係，車両周辺の建物配置によっては，m＜1になる可能性があることが予想されている。m＜1となる環境では，レイリー分布として予測して設計すると，システムマージンがマイナスとなり通信システムとして成立しない。従って，車車間通信のように，伝搬特性の変化が激しい環境に対しても精度よく必要な平均SNRを予測できる仲上-m分布が有効であると考える。

4. まとめ

実環境にて達成すべきPERに必要な平均SNRを予測し，システムマージンを確保するためのシステムパラメータ設計のためには，フェージング特性を仲上-m分布としてモデル化することが有効であることを示した。また，走行環境条件によっては，フェージング特性は大きく変化すること，場合によっては，レイリー分布よりも厳しいフェージング状態（m＜1）になる可能性があることもシミュレーションにより示した。引き続きmファクタの変動要因の解明と定式化に向けて取り組んでいきたい。

参考文献

(1) 国土交通省自動車局先進安全自動車推進検討会：先進安全自動車（ASV）推進計画報告書，pp.89-184（2011）

(2) 総務省情報通信審議会情報通信技術分科会ITS無線システム委員会作業班:移動通信システム委員会報告参考資料，p.4（2011），
http://www.soumu.go.jp/main_content/000117297.pdf

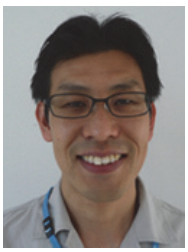
(3) 伊藤ほか：車々間通信環境における見通し外伝搬損失推定，2008年電子情報通信学会総合大会　通信講

演論文集1，p.61（2008）
(4) 細谷：電波伝搬ハンドブック，リアライズ社，p.201(1999)
(5) L. Cheng : “Mobile Vehicle-to-Vehicle Narrowband Channel Measurement and Characterization of the 5.9 GHz Dedicated Short Range Communication (DSRC) Frequency Band, IEEE JSAC, vol. 25, No. 8, pp.1501–1516（2007）
(6) M.Nakagami : The m-distribution.A general formula of intensity distribution of rapid fading, in Statistical Methods in Radio propagation, W.C.Hoffman, Pergamon Press（1960）
(7) S.Kullback : On Information and sufficiency, Ann.Math.Statist., vol. 22, pp.79-86（1953）

■著　者■


山田 秀行


強矢 昌宏


奥木 友和


山本 雅史


荒木 純道


タン ザカン

特集：ITS 世界会議

24

ドライバの筋活動に基づく車線維持操舵支援制御の研究

A Study of Lane Keeping Assistance by Steering Control Based on Muscular Activity

高橋 英輝*1　Hideki Takahashi
菅野 崇*2　Takashi Sugano
岡﨑 俊実*3　Toshimi Okazaki

要約

前方認識カメラによって得られる車線情報を利用して，ドライバのステアリング操作を支援する車線維持支援システム（LKAS：Lane Keeping Assistance System）を対象として，走行シーンに最適な操舵支援の実現を目指している。操舵支援の良し悪しを評価するにあたり，LKAS が働いている際の操舵フィーリングを，上肢の筋活動に着目して分析した。その結果，専門家の主観評価が高い LKAS は，左右対称関係にある筋の同期的活動や操舵を止める方向に作用する筋（拮抗筋）の活動が増加することなく，操舵方向に作用する筋（主動筋）の活動が減少していることが分かった。この現象を解釈することによって得られた仮説を基に，道路曲率に応じて操舵軸周りの粘性特性を制御する操舵支援制御手法を考案した。この支援制御により，直進走行時や定常旋回時のような一定の操舵角を保持するシーンでは，保舵の楽さと安定性を，コーナ切り込み／切り戻し時のような操舵を行うシーンでは，操舵の滑らかさを向上させることができた。

Summary

Lane Keeping Assistance System (LKAS) controls an electric power steering that assists driver's steering operations to the lanes observed by an on-board camera. LKAS performance was evaluated in terms of steering stability including the ease of steering, and electromyogram (EMG) of the drivers' arms was analyzed. The result showed that stable steering control prevents synchronous contractions of symmetrical muscles of arms, and reduced the action of the agonists without increasing the use of the antagonists. Based on the result, a new steering control logic was setup, which modifies yaw motions and steering viscosity, improving steering smoothness and stability by less force.

1. はじめに

近年では，自動車の周辺環境を認識する技術が発達し，それを利用した運転支援システムが数多く開発されている[(1)~(4)]。その中の一つとして，車線維持支援システム（LKAS）が商品化されている。LKAS は，車載カメラで前方の車線を認識し，電動パワーステアリングのアシストトルクを制御することによって，ドライバのステアリング操作を支援する機能をもつ。従来の LKAS の評価は，主に長時間運転におけるドライバの肉体的負担や精神的負担の軽減という観点で行われてきた[(5)~(7)]。しかし LKAS は，通常の走行中にも常に操舵反力に影響を与えるシステムであるため，ドライバのハンドル操作との干渉が発生し[(5)]，操舵フィーリングの悪化のために機能を活用しないケースも生じる。そのため，LKAS の機能を活用する／しないを含め，本当に有効な支援とするためには負担軽減の観点のみでなく，操舵フィーリングの観点でも良好な支援としなければならない。これまでも操舵フィーリングのような感覚量を物理量で定量化する取り組み[(8), (9)]は行われてきたが，評価指標として利用できるレベルにまで至っていない。また，操舵支援制御設計に活用するためには，評価指標の論理的解釈も必要となる。

本稿では，LKAS の操舵支援が働いている際の操舵

*1～3　技術研究所
Technical Research Center

フィーリングの良し悪しを評価するために，ハンドルと腕の動き，そのときの筋活動とを照らし合わせて分析を行った。更に，ドライバの筋活動による特性変化に基づく操舵支援制御手法を考案し，その効果検証を行った。

なお，本研究で行った全ての被験者実験は，試験開始前にインフォームドコンセントを得て行った。

2. 操舵フィーリングに関する主観評価

LKAS の操舵支援による操舵フィーリングの変化を把握するために，走行評価によるフリーコメントを収集した。被験者は，運転支援システムの開発に従事している 20 代から 50 代の男性社員 13 名とした。評価は，LKAS が装着されている市販車 A 車と B 車の 2 台を用い，それぞれ LKAS OFF と ON の順で乗り比べた。A 車の LKAS の支援の特徴は，常時車線中央へ誘導するものであり，B 車の LKAS の支援の特徴は，車線と車両進行方向のなす角度をゼロにするように誘導するものである。試験路は，直線及び左旋回コーナ，その間を緩和曲線で結んだテストコースである。走行後に収集したフリーコメントを，ビジュアルテキストマイニング [10] を利用して，3 シーン（直進走行時，定常旋回時およびコーナ切り込み／切り戻し時）に分けて分析した。その結果，LKAS の支援によって操舵フィーリングに変化が生じたのは，下記の点であった。

(a) 直進走行時および (b) 定常旋回時
- 保舵の楽さ（Effortlessness）
- 保舵の安定性（Stability）

(c) コーナ切り込み／切り戻し時
- 操舵の滑らかさ（Smoothness）

上記の観点で，主観評価結果を“Good / Fair / Poor”の 3 段階でまとめた結果を Table 1 に示す。LKAS の支援によって，主観評価が向上した場合は Good，低下した場合は Poor，変化を感じなかった場合は Fair とした。主観評価結果の t 検定を行い，5%水準の優位差があることを確認した。

次に客観データとして，操舵角と操舵トルクを確認した。計測には脱着式の操舵角力計を用い，被験者は主観評価を行った 13 名のうちの 2 名とした。計測結果の一例を Fig. 1 に示す。直進走行時（図中 (a) 部），LKAS の支援によって，A 車は操舵角と操舵トルクの変動が大きくなり，B 車はその変動がわずかに小さくなる。この結果は，保舵の楽さと安定性の主観評価結果と相関がとれる。定常旋回時（図中 (b) 部）では，LKAS の支援によって，A 車は保舵に必要な操舵トルクが大きく減少するのに対し，B 車の減少量はわずかであり，保舵の楽さの主観評価結果と一致する。しかし，保舵の安定性を操舵トルクの変動で比較すると，A 車，B 車ともに，LKAS OFF と ON で大きく変化しないにもかかわらず，A 車と B 車で主観評価結果が異なる。コーナ切り込み／切り戻し時（図中 (c) 部）では，A 車は LKAS の支援によって，操舵角に対する操舵トルクの立ち上がり方の変動が大きくなり，これが操舵の滑らかさの主観評価を悪化させている要因の 1 つと考える。一方で B 車は，LKAS OFF と ON で大きな変化はないが，操舵の滑らかさの主観評価は良好な結果となっている。以上のように，操舵角と操舵トルクにより主観評価を説明できる部分もあるが，これらだけでは主観評価を説明できない項目もある。そこで次章では，ハンドル操作時のドライバの腕の動作に着目した分析を行う。

Table 1　Subjective Evaluation Results on Vehicle A and B

Scenes	Evaluation axes	Vehicle A	Vehicle B
(a) Straight driving	Effortlessness	Poor	Good
	Stability	Poor	Good
(b) Steady turning	Effortlessness	Good	Fair
	Stability	Poor	Good
(c) Turning or reversing a wheel	Smoothness	Poor	Good

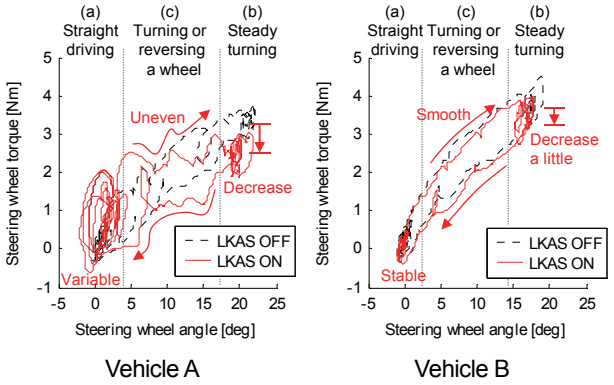


Fig. 1　Change in Steering Characteristics by LKAS

3. 筋活動による評価 [11]

3.1　実験方法

LKAS の操舵支援によるドライバの腕の動作の変化を把握するために，上肢の筋電位を計測した。計測したポイントは Fig. 2 に示す 11 か所の皮膚表面筋電位である。計測器は NEC 製サイナアクト MT11 を使用した。計測した筋電位は，整流後，事前に計測した最大随意収縮（MVC：Maximum Voluntary Contraction）で正規化した後，ローパスフィルタによって平滑化した。試験車両と試験路は，2 章と同様である。被験者は，2 章で操舵角と操舵トルクを計測した 2 名とした。慣熟走行後，自動速度制御装置の設定速度を

100km/h に設定し，LKAS OFF，ON の順で計測を行った。計測に際しての条件は，両手でハンドルを持ち，計測の間は手をハンドルから離すことを禁止する制約を設けたが，それ以外は通常通りの車線維持走行を行うように指示した。

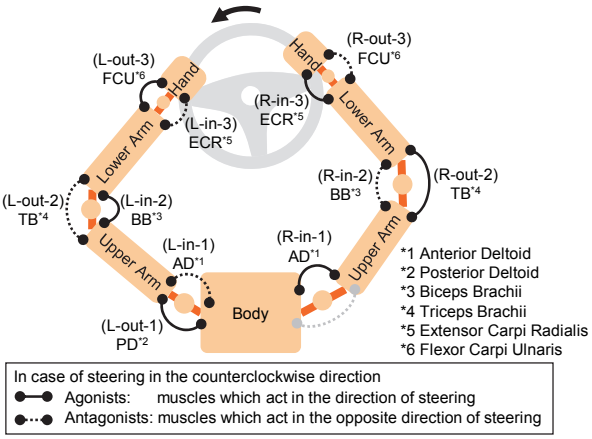


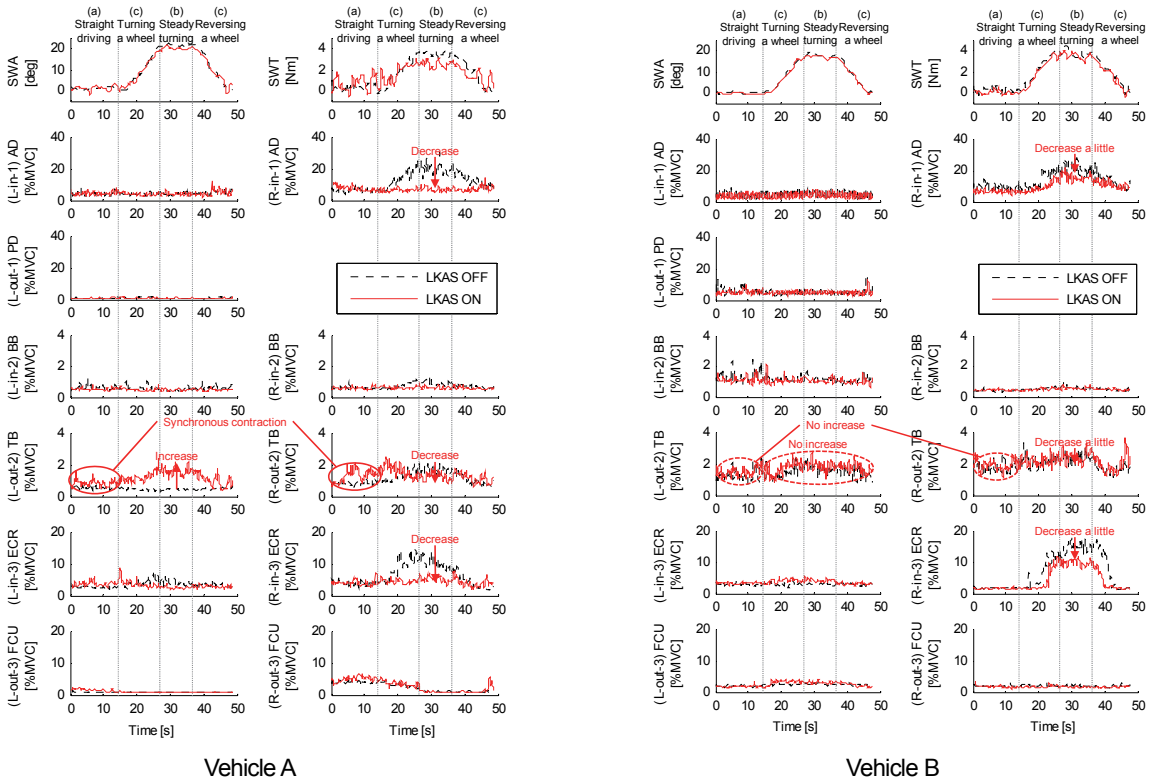
Fig. 2　Measurement Parts of Muscles

3.2　実験結果と考察

計測結果の一例を Fig. 3 に示す。グラフはそれぞれ，操舵角（SWA），操舵トルク（SWT）と，Fig. 2 に示した計測箇所の筋電位（L-in-1）AD ～（R-out-3）FCU の時系列データである。ドライバがハンドルを左回りに操舵する場合，ドライバは右肩を押出し，右肘を伸ばし，右手首を曲げるといった腕の動作が必要である。図示した筋の中で，これらの動作をもたらす筋は，右三角筋前部（R-in-1），右上腕三頭筋（R-out-2）および右橈側手根伸筋（R-in-3）が該当する。逆に，左上腕三頭筋（L-out-2）などは左回りの操舵を止める働きをする。本稿では，操舵方向に作用する筋を主動筋，操舵方向とは逆方向に作用する筋を拮抗筋と定義した。なお，操舵軸回りの 1 自由度に対して筋は冗長であるため，同じ左回りの操舵に対しても，筋活動は一意に決まらないが，走行シーンごとのハンドルと腕の動き，そのときの筋活動を事実としてとらえ，最も無理がないと考える解釈をした。また，操舵角の変化によって腕の姿勢も変化するため，同じ操舵トルクをハンドルに伝えても活動する筋は変化するが，本実験では最大でも操舵角は 20deg であるため，腕の姿勢変化は無視して評価した。

(a) 直進走行時の筋活動

A 車は LKAS の支援によって，主動筋と拮抗筋の関係にある左右の上腕三頭筋（L-out-2）（R-out-2）が同じタイミングで活動する現象が発生する。これを同期的活動と呼ぶ。左右対称筋の同期的活動によって，発生する力は相殺されるものの，腕を含めた操舵系の剛性は高まることになる [12]。A 車の場合，車線中央から少しでも外れると，それを修正しようと LKAS の支援が働くため，それをドライバはハンドルのふらつきと感じ，左右上腕三頭筋の同期的活動によって，そのふらつきを抑制する行動をとったと考える。一方で B 車は，LKAS OFF と ON で大きな変化はない。



Vehicle A　　Vehicle B

Fig. 3　Muscular Activities When Driving Vehicle A and B

(b) 定常旋回時の筋活動

A 車，B 車ともに，LKAS の支援によって，主動筋である右三角筋前部（R-in-1），右上腕三頭筋（R-out-2）および右橈側手根伸筋（R-in-3）の活動が減少する。特に A 車の減少量が大きく，保舵の楽さという観点で良好に見えるが，拮抗筋である左上腕三頭筋（L-out-2）の活動が増加している。筋の特性から活動が大きいほど，腕の剛性は大きくなる[13]。この事実から考察すると，A 車のように LKAS の支援によって主動筋の活動が大幅に減少すると腕の剛性が小さくなるが，それに合わせて車両の特性に変化がないと，腕を含めた車両の安定性が低下する。この車両の安定性低下を補うために，ドライバが主動筋と拮抗筋を同時に活動させることによって，腕の剛性を高める行動をとったと考える。

(c) コーナ切り込み／切り戻し時の筋活動

上述の (b) 定常旋回時と同様に，A 車，B 車とも LKAS の支援によって，主動筋の活動は減少するが，A 車の場合のみ，拮抗筋の活動が増加する。一般的に，主動筋はある動作をする時に作動させる筋であり，拮抗筋はその動作の調節に作動させる筋である。このことから，A 車は LKAS の支援によって滑らかな操舵ができなくなり，拮抗筋の活動による調節作業を LKAS OFF の時以上に行わなければならないため，拮抗筋の活動が増加したと考える。

以上の評価から，(a) 直進走行時の保舵の楽さと安定性は，左右対称筋の同期的活動量と相関が高く，また，(b) 定常旋回時の保舵の安定性や (c) コーナ切り込み／切り戻し時の操舵の滑らかさは，主動筋や拮抗筋の活動量と相関が高いことが分かった。

4. 制御ロジック開発[11]

4.1 操舵フィーリング向上のための操舵支援制御

3 章の考察から，LKAS の操舵支援によって保舵の楽さや安定性，操舵の滑らかさの性能を向上させるためには，下記の仕組みが必要であると考える。

- 左右対称筋の同期的活動の原因となる操舵系のふらつきを発生させない，または抑える。
- 車線形状に応じた支援によって主動筋の筋活動を低下させる場合，その筋活動の低下によって生じる腕の剛性低下を補償する。

上記の実現案として，操舵軸まわりの粘性特性 を，シーンに応じて制御することが有効であると考えた。具体的には，車線が直線と判断された場合は，ハンドルのふらつきを抑制するために操舵軸まわりの粘性特性を高め，コーナリング中は，旋回するために必要な操舵トルクを減少させるよう操舵方向へのトルク支援を行うのと同時に，その減少させた操舵トルクに応じた粘性補償を行うことによって，保舵の楽さと安定性および操舵の滑らかさを向上させることとした。

4.2 制御ロジック概要

制御ロジックは，前方認識カメラと車載センサから得られた情報に基づき操舵の支援量（アシストトルク）を決定する構成であり，概要を Fig. 4 に示す。4.1 節に示した制御手法を実現するために，図中 Calculation of target damping torque と示した部分の処理を設けた。この処理は，式 (1) にて粘性補償トルクを算出する。

$$T_{target\_damping} = -C(\gamma_{target}) \cdot \delta' \quad \cdots\cdots (1)$$

ここで γ_{target} は，車両が車線を走行する際に目標とするヨーレイトであり，曲率 R，クロソイドパラメータ A を用いて算出されるものである。この目標ヨーレイトに応じた粘性ゲイン C を変化させることによって，車線形状に応じた操舵軸回りの粘性特性が変化することになる。この粘性補償トルクをアシストトルクに加えることにより，LKAS 全体の出力とする。

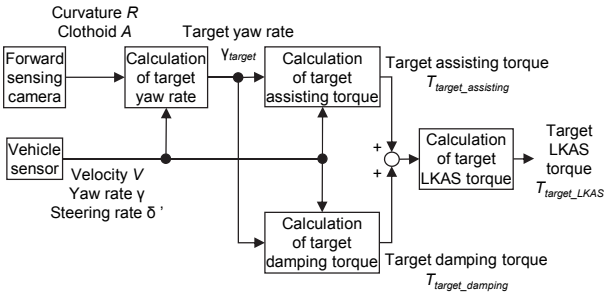


Fig. 4　Configuration of Control Logic

4.3 制御性能比較

4.2 節の制御ロジックを実装した試作車両を用いて，2 章，3 章と同様に主観評価と筋活動評価を行った。主観評価結果を Table 2 に示す。主観評価では，LKAS の支援によって全ての評価軸で向上したことが確認できた。

Table 2　Subjective Evaluation Results on Test Vehicle

Scenes	Evaluation axes	Test vehicle
(a) Straight driving	Effortlessness	Good
	Stability	Good
(b) Steady turning	Effortlessness	Good
	Stability	Good
(c) Turning or reversing a wheel	Smoothness	Good

また，操舵角（SWA），操舵トルク（SWT），筋電位（L-in-1）～（R-out-3）の時系列データの一例を

Fig. 5 に示す。 (a) 直進走行時では，左右上腕三頭筋（L-out-2）（R-out-2）の同期的活動が減少することが確認できた。また， (b) 定常旋回時や (c) コーナ切り込み／切り戻し時では，拮抗筋である左上腕三頭筋（L-out-2）の活動を増加させることなく，主動筋である右三角筋前部（R-in-1），右上腕三頭筋（R-out-2）および右橈側手根伸筋（R-in-3）の活動を減少させている。これらは全て意図した通りの結果であり，粘性補償が狙い通りに働いていることを確認できた。また，この結果は 3 章で示した考察が適切であったことを裏付ける。

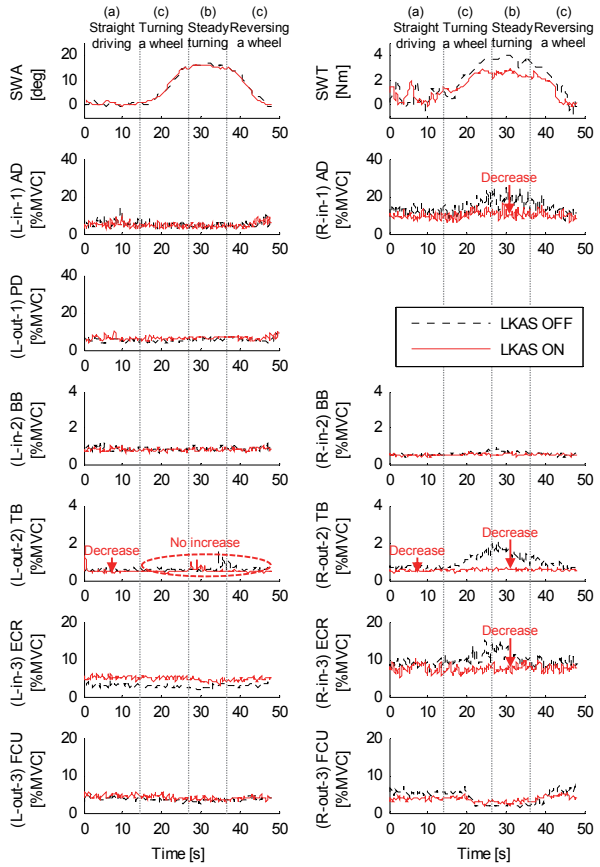


Fig. 5　Muscular Activities When Driving Test Vehicle

上述の筋活動と操舵角，操舵トルクの特徴量を Fig. 6 に示し，Table 1，2 の主観評価との対応関係を評価する。Fig. 6 の各項目は，各車両の LKAS OFF に対する LKAS ON の減少率であり，試験回数 3 回，被験者 2 名分の平均値である。 (a) 直進走行時，左右上腕三頭筋（L-out-2）（R-out-2）の同期的活動は，A 車が増加，B 車と試作車両は減少し，保舵の楽さと安定性の主観評価結果と一致する。 (b) 定常旋回時では，主動筋に相当する右三角筋前部（R-in-1），右上腕三頭筋（R-out-2）および右橈側手根伸筋（R-in-3）の活動の減少率が，B 車，A 車，試作車両の順で大きく，保舵の楽さの主観評価と一致する。また，拮抗筋に相当する左上腕三頭筋（L-out-2）の活動は，A 車が増加，B 車と試作車両は減少し，保舵の安定性の主観評価と一致する。 (c) コーナ切り込み／切り戻し時では，拮抗筋に相当する左上腕三頭筋（L-out-2）の活動は，A 車が増加，B 車と試作車両は減少し，操舵の滑らかさの主観評価結果と一致する。

以上より，操舵支援には粘性特性をシーンに応じて調整することが重要であり，提案した制御ロジックは (a) 直進走行時の保舵の安定性と楽さ， (b) 定常旋回時の保舵の安定性と楽さ， (c) コーナ切り込み／切り戻し時の操舵の滑らかさにおいて，効果的に作用することを確認できた。

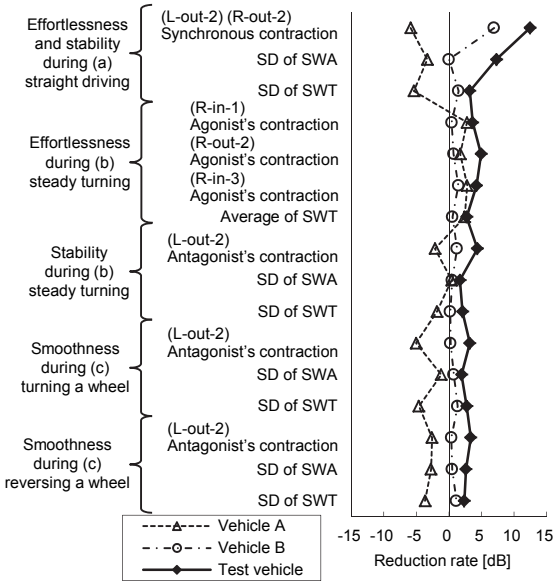


Fig. 6　Comparison of Control Performance

5. おわりに

『車は人間が運転するものである』という考えの下，より良い支援を行うためには，安全性・利便性のみならず，操舵フィーリングを損ねないことが重要であると考え，車線維持走行時における操舵支援制御方法の検討をドライバの上肢の筋活動に着目して行った。その結果，左右対称筋の同期的活動や拮抗筋活動を増加させることなく，主動筋の活動を減少させることが，操舵フィーリングの良い LKAS を実現するためのポイントであることを見出した。この知見を基に，道路曲率に応じたアシストによって主動筋活動を低下させるとともに，粘性制御を合わせて行うことによって拮抗筋活動を抑える操舵支援制御手法を考案した。これにより，直進走行時や定常旋回時のような一定の操舵角を保持するシーンでは，保舵の楽さと安定性を，コーナ切り込み／切り戻し時のような操舵を行うシーンでは，操舵の滑らかさを向上させることができた。

参考文献

(1) 細田浩司ほか：低速域衝突被害軽減システムの概要，マツダ技報，No. 30，pp.156-160（2012）

(2) 尾崎昴ほか：SBS／MRCC の機能／性能向上について，マツダ技報，No. 30，pp.161-165（2012）

(3) 内海将司ほか：フォワード・センシング・カメラの開発，マツダ技報，No. 30，pp.166-169（2012）

(4) 信時宣和ほか：後側方障害物警報システムの開発，マツダ技報，No. 26，pp.124-130（2008）

(5) 石田真之助：インテリジェントドライバサポートシステムの開発，自動車技術，Vol.60，No.12，pp.39-44（2006）

(6) 増田奨ほか：レーントレースアシストによる運転負荷軽減効果の検討，自動車技術，Vol.57，No.12，pp. 91-95（2003）

(7) 定野温ほか：レーンキープサポートシステム，自動車技術，Vol.55，No.11，pp.36-41（2001）

(8) 水野尊広ほか：運転者の操舵動作と筋活動との関係の研究，JTEKT ENGINEERING JOURNAL，No. 1010，pp.13-18（2012）

(9) 竹村和紘ほか：人間の主観的な力知覚モデルの提案とステアリング操作系への応用，日本機械学会論文集（C 編），Vol.78，No.795，pp.64-73（2012）

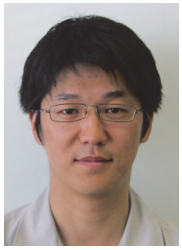
(10) 渡部勇：ビジュアルテキストマイニング技術－特許検索・分析支援への適用－，FUJITSU，Vol.56，No. 4，pp.371-377（2005）

(11) Hideki Takahashi et al.：A Study of Lane Keeping Assistance by Steering Control Based on Muscular Activity，Proceedings of 20th ITS World Congress，in press（2013）

(12) 倉森章ほか：ドライバの筋活動に着目した運転しやすさ評価の検討，自動車技術，Vol.61，No.6，pp. 116-121（2007）

(13) 田中良幸ほか：ステアリング操作における人間の手先インピーダンスの解析，計測自動制御学会論文集，Vol.42，No.12，pp.1353-1359（2006）

■著　者■



高橋 英輝

菅野 崇

岡﨑 俊実

論文・解説

25 プレマシー ハイドロジェンRE レンジエクステンダーEVの開発

Development of Premacy Hydrogen RE Range Extender EV

森本 賢治*1　今井 一雄*2　内田 浩康*3　堂園 一保*4
Kenji Morimoto　Kazuo Imai　Hiroyasu Uchida　Kazuho Douzono
為貝 仁志*5　胡本 博史*6　野村 裕之*7　水戸部 典朗*8
Hitoshi Tamegai　Hirofumi Ebisumoto　Hiroyuki Nomura　Noriaki Mitobe

要約

プレマシー ハイドロジェン RE レンジエクステンダーEV は，2009 年リース販売の水素ハイブリッド車「プレマシー ハイドロジェン RE ハイブリッド」をベースとして高電圧バッテリの大容量化，プラグイン化及びエンジン正味熱効率の改善を行った。熱効率の改善は，希薄燃焼や混合気形成の最適化などにより達成することができた。これらにより，日常の利便性向上と水素や電気などのクリーンなエネルギーで走行可能な航続距離を従来車にくらべ大幅に向上させた。更に，希薄燃焼時の NOx 排出量低減のためにシリーズハイブリッドの特性を生かした排気ガス処理システムを開発した。本稿では開発の狙いと織り込み技術について紹介する。

Summary

Based on the Mazda Premacy Hydrogen RE Hybrid launched in 2009, a new Premacy Hydrogen RE Range Extender EV adapts a larger high-voltage battery, plug-in-system and a thermal-efficiency-improved engine. The thermal efficiency was improved by lean burn and optimization of mixture formation and others. Also an exhaust emission treatment system which utilizes series hybrid characteristics was developed to reduce NOx emission at the lean burn. As a result, daily usability and driving range with clean energy are significantly improved. The development purpose, technologies and results are introduced in this paper.

1. はじめに

中国，インドなど新興国での自動車の普及加速など世界の自動車の需要は増え続けている。それに伴い，自動車による環境問題，エネルギー問題がますます深刻化すると考えられる。これら諸問題への対応策として，従来の石油中心から，石油に加えて CNG や LPG，あるいはバイオ燃料，電気，水素等へのエネルギーの多様化が進むものと考えられる。そうした中で，自然エネルギーを含むさまざまな 1 次エネルギーから製造可能な水素は，電気エネルギーと並んで究極のクリーンなエネルギーとして位置づけられている。水素を燃料とする自動車では，エネルギー変換効率の高い燃料電池自動車の開発が日本を中心として積極的に進められており，2015 年には量産型の燃料電池自動車の販売開始が発表されている(1)。一方，水素エンジンは，燃料電池と比較してエネルギー変換効率では劣るものの，信頼性が高く比較的安価に製造可能であるため，マツダはロータリエンジン（以下 RE）をベースとした RX-8 ハイドロジェン RE を開発し 2006 年にリース販売を開始した(2)。更にシリーズハイブリッド化による車両効率を向上させたプレマシー ハイドロジェン RE ハイブリッドを開発し，2009 年にリース販売を開始した(3)。

Fig. 1 Exterior Styling

*1～8　技術研究所
Technical Research Center

そして，このたび更に諸性能を向上させたプレマシー ハイドロジェン RE レンジエクステンダーEV（Electric Vehicle）を開発した（Fig. 1）。本稿では，この車両の開発の狙い，開発技術について紹介する。

2. 開発の狙い

2.1 クリーンエネルギー航続距離の向上

プレマシー ハイドロジェン RE ハイブリッド（以下従来車）では，水素エンジンにより走行中の燃料消費に基づく CO_2 発生ゼロでの航続距離 200 ㎞を達成した。本車両では，水素エンジンの熱効率の向上及びエンジン制御最適化により水素運転時の航続距離の向上を図り，更に高電圧バッテリの大容量化とプラグイン化により，水素や電気などのクリーンなエネルギーで走行可能な航続距離（以下クリーンエネルギー航続距離）の大幅延伸を狙いとした。具体的には，クリーンエネルギー航続距離 350 ㎞以上を目標とした。また，日常の走行は EV のみで走行できるように，100 ㎞以上の EV 走行可能距離を目標とした。なお，プラグイン化に伴い，水素と電気の両エネルギーが利用できることから水素自動車の利便性向上が果たされたため，従来車で採用していたガソリン併用システムは廃止した。

2.2 熱効率の向上と排気エミッション性能の両立

水素エンジン車は，燃料中に炭化水素（以下 HC）が存在しないため排気エミッション（以下 EM）上の課題は燃焼により生じるサーマル窒素酸化物（以下 NO_X）の発生のみである。NO_X 排出量の低減技術として，空気過剰率（以下 λ）＝1 で運転し三元触媒による浄化技術が使用されてきた[4]。この方法は，NO_X の浄化には極めて有効であるが λ＝1 で運転する必要があるため，熱効率では希薄燃焼に劣る。そこで熱効率の向上と EM 性能を両立させるため，希薄燃焼下での NO_X を浄化するシステムを開発することを狙いとした。

3. 開発結果

3.1 クリーンエネルギー航続距離の向上

(1) 熱効率の向上

水素は内燃機関の燃料として用いる場合，Table 1 に示すように，混合気中の水素の割合が λ＝1 で約 30％を占めるため，予混合で燃料を供給すると体積効率の低下を招く。

対策としては吸気行程終了後，燃料を噴射する筒内直噴方式が有効である。RE は，構造上燃焼圧力のかからない位置に直接噴射弁を設置することが可能であり，低圧での噴射が可能となる。Fig. 2 に示すように，噴射圧 0.6MPa の低圧噴射弁を長軸の位置に配置した。なお，低圧で噴射できるメリットは，特に高圧タンクを燃料タンクとして用いる場合，低圧まで燃料を消費できることである。本開発においても，低圧直接噴射の水素 RE をベースとした[5]。

1) 希薄燃焼

Table 1 に示すように，水素は可燃混合気範囲が極めて広いためこの特性を活用して超希薄燃焼が可能である。希薄燃焼は λ＝1 燃焼と比較して，比熱比の上昇や燃焼温度の低下による冷却損失の減少から正味熱効率が向上する要素がある。反面希薄燃焼は，燃焼速度が低下し，等容度が低くなることや，出力が低くなることから相対的に摩擦損失の割合が増すことから正味熱効率が低下する要素もある。したがって正味熱効率（以下 η_e）は，これらの要素がバランスした点で最大値を示す。Fig. 3 に示すように，本エンジンでは，λ＝2.3～2.5 において η_e はベストとなった。

Table 1 Characteristics of Hydrogen

	H_2	Gasoline
chemical formula	H_2	C7.5H17
Minimum Ignition Energy (mWs)	0.02	0.24
Combustible Limit (Vol %)	4-75	1.0-7.6
Adiabatic Flame Temperature at theoretical mixture (deg.C)	2045	2200
Laminar Flame velocity at theoretical mixture(cm/sec)	265	40
Volume percentage of Fuel in Mixture at theoretical mixture (Vol %)	29.53	1.7
Heat value at theoretical mixture (MJ/m³)	2.98	3.55

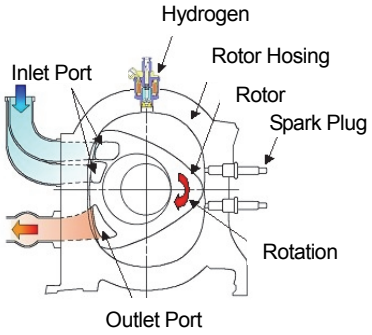


Fig. 2 Hydrogen RE

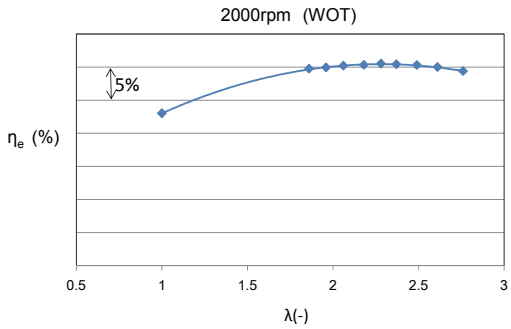


Fig. 3 Lean Characteristics of B.T.E

2）混合気形成最適化

低圧直接噴射式エンジンでは，噴射弁の位置，噴射方向，噴射タイミング，噴射期間等多くのパラメータが影響するため，実験的に最適諸元を求めるには莫大な試作及び評価を要す。そこで，数値解析(CFD)により混合気分布の解析を行い，熱効率が最大となるインジェクタの位置，噴射方向や噴射率等の仕様を求めた[6]。

解析の結果，燃焼に最適な混合気分布は，Fig. 4に示すように，燃焼室中央からロータ回転方向進み側にかけて水素を重点的に配置する分布であり，それは噴射方向を長軸方向からに燃焼室方向に5度傾けて噴射率を従来比2倍にした仕様で実現できることが分かった。これにより従来水素REと比較して正味熱効率を4%改善した。

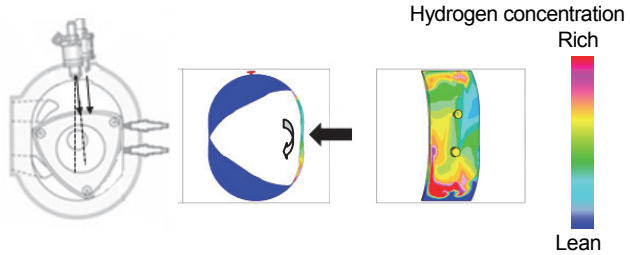


Fig. 4　Best Configuration and Distribution of Hydrogen by CFD

3）シール類最適化

ガソリンを燃料とするサイド排気ポート方式ロータリエンジンでは，内部 EGR 低減のためカットオフシールを採用している[7]。一方水素を燃料とした場合，着火性に優れることからカットオフシールの廃止が可能となる。カットオフシールはサイドハウジングを摺動するため，廃止により機械抵抗を低減できる。その他水素専用であるため燃焼室シールクリアランスへのカーボン付着が極微量であるため，各シールクリアランスをガソリン併用仕様と比較して小さくすることが可能である。これにより漏れ損失の低減が図れた。

以上の希薄燃焼，混合気形成最適化，シール類最適化等により，従来水素 RE と比較して 2000rpm 全負荷において，正味熱効率を 30%改善した。

(2) プラグイン化とハイブリッドシステム

1）水素自動車プラグイン化のメリット

プラグイン化による EV 化は，クリーンな電気エネルギーによる航続距離の延伸だけでなく，水素自動車の利便性向上にも寄与する。

経産省は現在約 1400 基の急速充電器の EV スタンドを 2014 年度までに約 3 万 6000 基に拡充する計画を立てている。したがって今後大幅な EV スタンドの増加が見込まれる。また，車庫等車両保管場所でエネルギーの補給が可能であるという利便性を持つ。

一方水素ステーションは，2015 年に 4 大都市圏とその間の高速道路を中心として 100 か所，2025 年に 1000 か所程度の建設が計画されているが，当面限定された地域での運用に止まる。なお，EV は充電時間が急速充電でも約 30 分必要であるのに対して水素は 5 分以下で充填が可能であるというメリットを持つ。

以上の状況を踏まえて，通常利用時は保管場所での充電により EV で運行し，一充電で走行できる距離を超えた場合には，水素ステーションのある地域では水素で運行し，水素ステーションのない地域に出かけた場合には，EV で運行するという使い方が可能となる。

2）車両諸元とレイアウト

本車両は，シリーズ式ハイブリッドであるプレマシー ハイドロジェン RE ハイブリッドをベース車両として，高電圧バッテリを大容量化しプラグイン化した。

Fig. 5 に車両レイアウト，Table 2 に車両諸元を示す。高電圧バッテリはモジュール化し，バッテリコントロールユニット，電装品と共にリヤシート下部に配置した。電池容量は，日常の走行を充電した電気による EV 走行で賄えるように，100km 以上走行可能な容量とし，また電池出力は，国内の代表的な走行モードとして JC08 を仮定し，それを EV モードで走行可能な出力とした。以上の条件を満足するバッテリとして電池容量 20kWh，最大出力 70kW のリチウムイオンバッテリを搭載した。

充電システムは，CHAdeMO（チャデモ）規格に準拠した充電器による急速充電と AC200V 電源から充電を行う普通充電の 2 つの充電方式に対応した。Fig. 6 に示すように車両右側面の後方に普通充電用と急速充電用の充電口を並べて配置した。

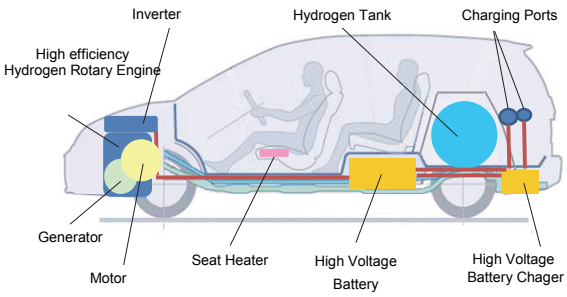


Fig. 5　Vehicle Layout

Table 2　Vehicle Specification

Size（Length×Width×Height）		4.565×1.745×1.620 m
Weight		1920 kg
Seat Capacity		5 passengers
Max Speed		150 km/hr
Driving range（JC08mode）		over　350 km
Motor	Type	AC IPM Synchronous
	Max Power	110kW
Generator	Type	AC IPM Synchronous
Engine	Type	13B Hydrogen Rotary Engine
	Displacement	0.654L × 2rotor
	Compression Ratio	10:01
High Votage Battery	Type	Lithium-ion
	Normional Volt	346V
	Capacity	20kWh
Hydrogen Fuel Tank		150L/35MPa

Fig. 7 にメータを示す。従来車のメータからガソリン燃料計を廃止し，EV 走行で必要となる表示を追加した。EV 選択時には①が点灯し，水素選択時には②が点灯する。③，④は各々の残量計である。⑤は普通充電並びに急速充電中に点滅し充電状態であることを知らせる。パドルスイッチにより減速エネルギー回生量を，通常回生（ガソリン車のエンジンブレーキ相当の減速 G となる回生量），強回生または回生なし（以下コースティング）の 3 段階に変更可能としている。通常回生時には⑥が点灯し，強回生時には⑦が点灯する。コースティング時には，⑥,⑦いずれも消灯する。また，回生が行われている間は⑧が点灯し回生の有無を知らせる。なお，コースティングは，高速走行中にアクセルを OFF した時の減速 G を小さくすることでアクセルの頻繁な ON-OFF を少なくする効果が期待できる。

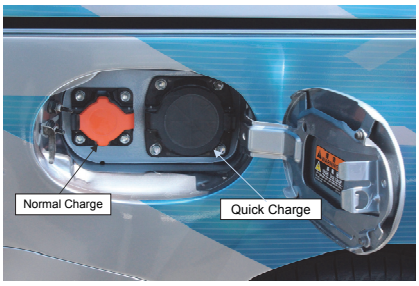


Fig. 6 Ports for Battery Charge

Fig. 7 Meter

3) EV とハイブリッドモード

プラグインハイブリッド車は，走行に伴いバッテリの電力を消費する CD モード（Charge Depleting mode）とバッテリ収支をバランスさせながら走行する CS モード（Charge Sustaining mode）を持つ。一般的には前者は EV モード，後者はハイブリッドモードとも呼ばれる。

Fig. 8 にフル充電から走行時間の経過に伴う高電圧バッテリの充電率（以下 SOC : State Of Charge）の変化示す。IG-ON 時に，SOC が一定量（Fig. 8 中の Center of SOC at CS mode）以上ある場合には，EV モードが選択され，走行により電気が消費されて SOC が一定量に達すると自動的にハイブリッドモードに切り替わる。この一定量は，目標とする一定時間全開加速を行い SOC の維持が困難な場合にも，バッテリ出力，信頼性を考慮した下限閾値（Fig. 8 中の Under limit）を下回らないように設定した。

また，運転席のマニュアルスイッチにより EV モードとハイブリッドモードを，任意で選択できる仕様とした。すなわち，SOC が高い状態においても，ハイブリッドモードの選択が可能であり，優先的に，水素を使用することもできる。この結果，移動経路中の EV スタンドと水素ステーション場所を考慮して，任意にエネルギーを選択できる。

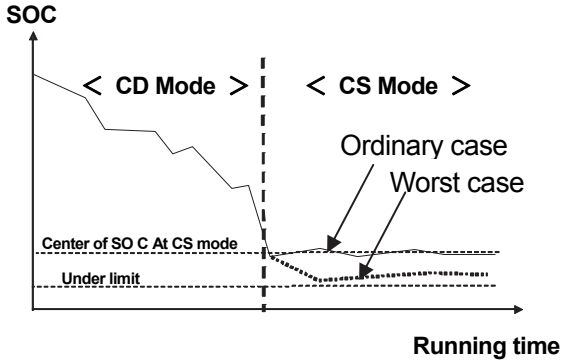


Fig. 8 Change of SOC by Driving Time

4) 発電制御法

ハイブリッドモードにおいて，電力収支バランス，熱効率，走行フィーリングの三つの要求を高い次元でバランスさせる発電制御法を開発した(8)。この制御法では，熱効率を考慮した発電量モデルにおいて電力収支と走行フィーリングとを考慮した評価関数を逐次最小化しながら目標発電量を決定するモデル予測制御法を用いた。モデル予測制御法と車速に対するエンジン始動停止条件とを組み合わせることにより，三つの要求を高い次元でバランスする発電制御法を構築できた。Fig. 9 に JC08 モード走行中の熱効率分布を示す。NVH 上有利な比較的低いエンジン回転数を使用しながら，熱効率の高い領域での運転が可能となった。

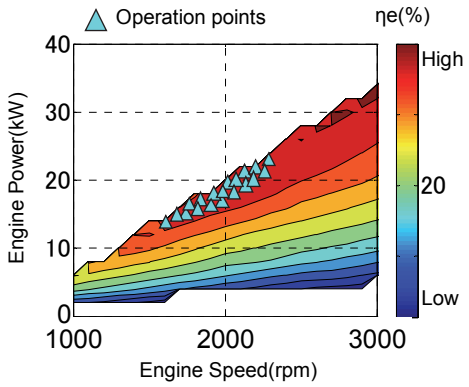


Fig. 9 Operation Points at JC08 Mode

次に，この制御の車内騒音への影響を確認した。加速初期のエンジンの吹き上がりや，所定速度以下では

エンジン回転数の上昇を抑えることで，静かで違和感のないフィーリングを実現した。車内騒音は，ベースのガソリン車比 3dB 低減を目標とした。Fig. 10 に車内騒音の測定結果を示す。EV モード及びハイブリッドモードで全域にわたり目標を達成できた。

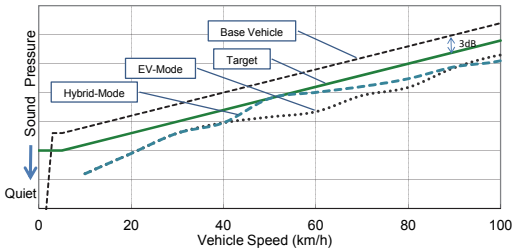


Fig. 10　Sound Pressure at Front Seats

5）走行性

本車両はシリーズハイブリッド車なので，EV モード，ハイブリッドモード共に車両はモータにより駆動される。その結果，駆動トルクの緻密なコントロールが可能となり，Fig. 11 に示すように，ガソリン車では得られないリニアで滑らかな加速性を実現できた。

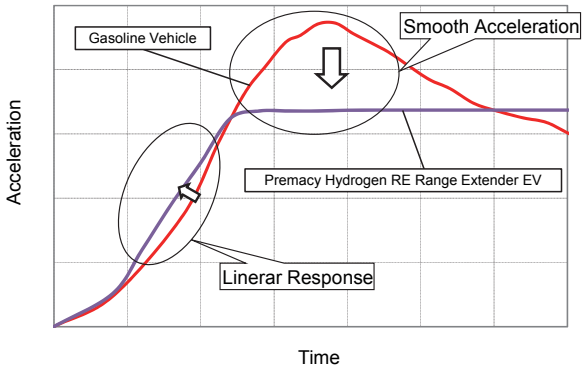


Fig. 11　Comparison of Acceleration

6）クリーンエネルギー航続距離

以上開発した水素エンジン及びハイブリッド制御による水素航続距離向上とプラグイン化による EV 航続距離のプラスにより，従来車と比較してクリーンエネルギー航続距離を大きく延伸した。Fig. 12 に 1 回のエネルギー補給で可能な航続距離を示す。JC08 モードで EV 航続距離は 116km，総航続距離は 350km であり，いずれも目標を達成した。

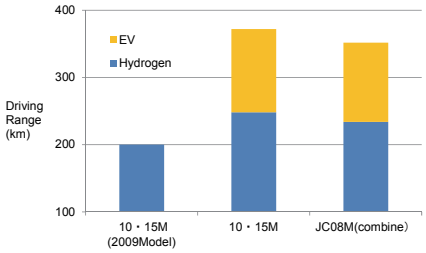


Fig. 12　Clean Driving Range

3.2　排気 EM 浄化システム開発

(1) 浄化システム

前述のように本車両では，NOx 浄化と熱効率との両立を目指し，希薄燃焼を前提として NOX の低減を図った。

まず，希薄燃焼による NOX 低減ポテンシャルを調べた。後処理は用いずに，JC08 モードを走行した。Fig. 13 左欄に現行の国内規制値，SU-LEV 適合値と共に触媒なしの測定値を示す。図に示すように希薄燃焼だけで，現行の JC08 モードの規制値 0.05g/km をクリアできるが，SU-LEV 0.013g/km には未達であった。

SU-LEV に適合するため，後処理による NOX の浄化システムを検討した。後処理としては，NOX の発生量，システムの簡便性等を考慮して，NOX 吸蔵還元触媒を採用した。これは，希薄燃焼で発生した NOX を触媒により吸蔵し，所定量蓄積後リッチ燃焼により NOX を還元（以下リッチパージ）する手法である。しかしながらこの手法を水素エンジンに適用する場合，リッチ時に燃焼速度が速いため，特に高負荷で燃焼音が増大する。

そこで，本システムではエンジン出力と車両駆動力を独立して制御できるシリーズハイブリッドの特性を活かし，リッチパージを無負荷で行うことで，リッチ燃焼時の水素エンジン燃焼音の課題を解決した。EM システムを Fig. 14 に示す。構成は Pre-Cat（Pd/Rh+Pt）と Main-Cat（Pt/Rh）とした。

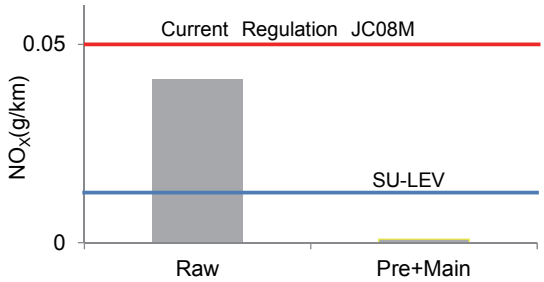


Fig. 13　NOx Emission

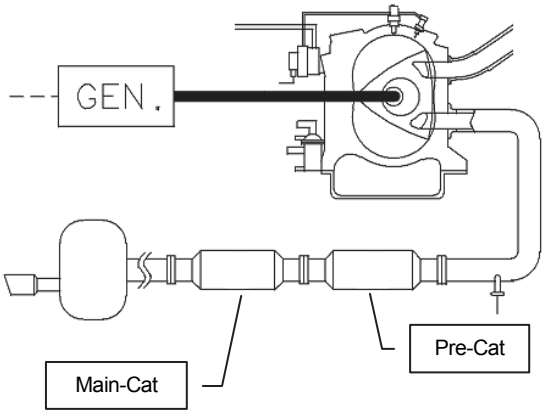


Fig. 14　Emission System

(2) 測定結果

定常走行時のリッチパージの挙動を Fig. 15 に示す。横軸は経過時間を示し，縦軸は上から，リッチパージ指示信号，エンジン回転数，充填効率，目標 λ，実 λ，ジェネレータトルク，モータ駆動トルクを示す。リッチパージ信号が OFF から ON になると，エンジンは，有負荷から無負荷に変更される。この間エンジン回転数は，ほぼ一定に保持されるが，充填効率は低下し，ジェネレータトルクは有負荷からゼロとなる。合わせて目標 λ はリーンからリッチに変化し，実 λ も追随して変化している。これら一連のリッチパージ制御中，モータ駆動力は一定に保持されており，ショックレスでリッチパージが実現できていることが分かる。

本システムの JC08 モードコンバインでの計測結果を Fig. 13 右欄に示す。SU-LEV 適合値より極めて低い排出レベルが得られた。

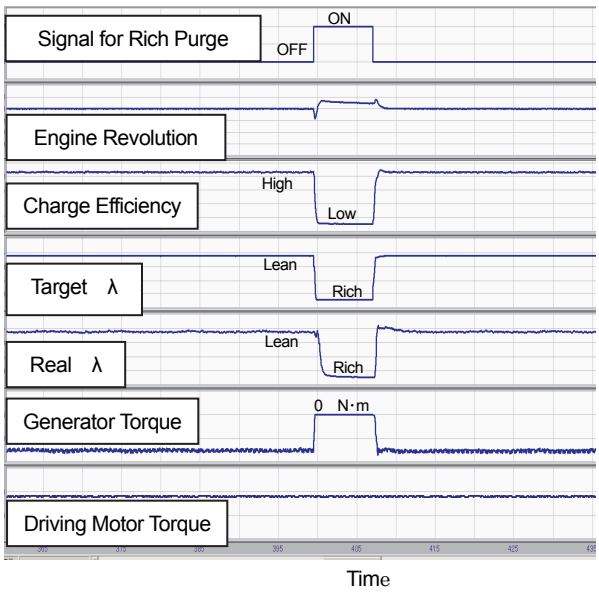


Fig. 15 Engine Behavior during Rich Purge

4. おわりに

水素，電気は究極のクリーンエネルギーであるが，インフラ整備の課題や航続距離の課題がある。これらの課題解決には今しばらく時間を要すると考えられる。今回水素を燃料とするシリーズ式ハイブリッド車をベースとして，電池を高容量化しプラグイン化することで，水素と電気の双方の弱点を補填できる環境対応車が開発できた。将来の CO2 問題や，エネルギー問題及び利便性を考慮した一つの解決策と考える。

本車両は，2013 年 1 月に認可を取得し，2013 年 6 月からリース販売を開始した。

参考文献

(1) http://www.meti.go.jp/press/20110113003/20110113003-1.pdf
(2) 柏木ほか：RX-8 ハイドロジェン RE の紹介，マツダ技報，No24，pp.135-138（2006）
(3) 柏木ほか：プレマシー ハイドロジェン RE ハイブリッドの紹介，マツダ技報，No27，pp.26-30（2009）
(4) 森本ほか：水素自動車の開発，マツダ技報，No14，pp.154-161（1996）
(5) 森本ほか：RX-8 ハイドロジェン RE の紹介，マツダ技報，No22，pp.132-138（2004）
(6) 大竹ほか：直接ガスエンジンの筒内混合状態に及ぼす噴射パラメーターの影響，自技会春季学術講演会，264-20135436（2013）
(7) 田島ほか：サイド排気ポート方式ロータリエンジンの概要，マツダ技報，No21，pp.18-23（2003）
(8) 大室ほか：電動車両の走行フィーリングを考慮した発電制御法，自技会春季学術講演会，35-20135070（2013）

■著　者■


森本 賢治


今井 一雄


内田 浩康


堂園 一保


為貝 仁志


胡本 博史


野村 裕之


水戸部 典朗

論文・解説

26 水素 RE を用いたレンジエクステンダ EV の発電制御法
A Generation Control for Range Extender EV with Hydrogen RE

大室 朗*1　Akira Ohmuro
堂園 一保*2　Kazuho Douzono
藤川 裕志*3　Yasushi Fujikawa
胡本 博史*4　Hirofumi Ebisumoto

要約

2009 年に開発した「プレマシー ハイドロジェン RE ハイブリッド」のバッテリ容量を拡大しプラグインによる充電機能を付加したレンジエクステンダ EV（Electric Vehicle）「プレマシー ハイドロジェン RE レンジエクステンダーEV」を開発した。このハイブリッドシステムでは，バッテリの大容量化によりエンジン発電量制御の自由度が上がることを活かし，電力収支バランス，熱効率，走行フィーリングなどのさまざまな要求を同時に満足する発電制御法を構築した。また追加された充電機能は，電気エネルギーにより走行できる航続距離を大幅に延伸した。本稿では，複雑に関わり合う要求仕様を同時に満足する発電制御および関連する技術について報告する。

Summary

Mazda Premacy Hydrogen RE Range Extender EV is developed from the Mazda Premacy Hydrogen RE Hybrid (2009). The Range Extender EV is equipped with a plug-in function and larger capacity battery. The new hybrid system with larger capacity and high voltage battery met concurrently various specifications required such as thermal efficiency, energy balance and engine sound when the vehicle is in motion. Also the plug-in function achieved an improvement of driving range with electric energy. In this paper, the detail of the electric generation control that satisfies the required specifications is described.

1. はじめに

2009 年に開発した「プレマシー ハイドロジェン RE ハイブリッド」(1)(2)をベースに，エンジンを水素専用として熱効率を改善するとともに，バッテリ容量を拡大し充電機能を付加したレンジエクステンダ EV「プレマシー ハイドロジェン RE レンジエクステンダーEV」を開発した。レンジエクステンダ EV とは，バッテリ充電率（以下 SOC : State Of Charge）が所定の値より高い時は EV 走行し，所定の値より低い時は SOC を下げないようにエンジンで発電しながら走行する車両のことをいう。この車両の利点は，エンジンを発電のみ用いるシリーズ型 HEV（Hybrid Electric Vehicle）と同じシステムであることからエンジンを高効率で作動できるだけでなく，プラグインによる充電を行うことで総合的な効率向上を図ることのできる点にある。本車両では，この利点を活かし耐環境性や信頼性を確保しながら，電力収支バランス，熱効率，走行フィーリングを同時に満足する発電制御法を構築した。

本稿では，この発電制御法について次の順で詳細を述べる。まず 2 章においてレンジエクステンダ EV の要求仕様を解説し，3 章にて車両の構造を述べる。次に 4 章で，最適制御理論を用いたモデル予測制御法を導入した発電制御法を提案し(3)，この制御法が，電力収支バランス，熱効率，エンジン音による走行フィーリングの 3 つの要求を同時に満足することを示す。そして 5 章にて，この発電制御法に排気エミッション浄化制御やバッテリ保護制御を追加する。最後に 6 章で，常温や冷間の環境下でモード走行を行い，この発電制御法が自動車排出ガス規制やバッテリ保護を確保しな

*1～4　技術研究所
Technical Research Center

がら，電力収支バランス，熱効率，走行フィーリングを同時に満足する手法であること示す。

2. レンジエクステンダ EV への要求仕様

本車両は，電力収支をバランスさせる CS モード（Charge Sustaining mode）において，耐環境性，信頼性，熱効率，走行フィーリングの観点から以下のような要求がある。

(1) 電力収支バランス

① バッテリ充電率（SOC）を走行に影響しない水準に維持する。

(2) 耐環境性と信頼性

② 排出ガス中の汚染物質（NOx・HC 他）を基準値以下に抑える。

③ 車外騒音を基準値以下に抑える。

④ バッテリの実充放電電力を充放電可能領域（以下 SOF）内に収める。

(3) 熱効率

⑤ 熱効率の高い動作点（トルク・回転数）でエンジン発電を行う。

⑥ エンジン始動停止回数をできるだけ少なくする。

(4) 走行フィーリング

⑦ エンジン音による走行フィーリングがドライバに違和感を与えないようにエンジン回転数及び回転数変化を制御する。

⑧ 外部環境が高温時や冷間時において，常温時と変わらない走行を可能にする。

3. 車両の構造

3.1 車両の構造

開発した車両の外観を Fig. 1 に示す。本車両は内燃機関自動車をベースにレンジエクステンダ EV に改造したものである。搭載しているエンジンは排気量 654cc×2 の水素ロータリエンジン（RE）で，その他には駆動用モータ，ジェネレータ，高電圧バッテリなどを車載している。また，車両の主要諸元値は Table 1 となる。

Table 1　Vehicle Specification

model	Parameter	Value
Vehicle	Weight	1920kg
	Dimensions	4.6×1.7×1.6mm
Motor	MaxPower / MaxTorque	110kW / 350Nm
Generator	MaxPower	80kW
Fuel Tank	Capacity	150L / 35MPa
Battery	Type	Li-ion
	Nominal Energy	20kWh

Fig. 1　Appearance of Vehicle

3.2 シリーズ型 HEV 方式

本車両ではシリーズ型 HEV と同様の発電方式を採用している。その特徴は SOC が高い時は EV 走行し SOC が下がってきた時に発電しながら走行できるところにある。その方式の概要を Fig. 2 に示す。インバータはモータ，ジェネレータ，高電圧バッテリと接続されており，モータ出力とジェネレータ出力との差分電力が昇圧されバッテリに充電される。

また，補器類は直流・直流変換器（DC-DC コンバータ）により降圧された電力を使用する。エンジンは PCM（Powertrain Control Module），モータはインバータ内の TMCM（Traction Motor Control Module），ジェネレータはインバータ内の GCM（Generator Control Module），高電圧バッテリは TBCM（Traction Battery Control Module）でそれぞれ制御し，VCM（Vehicle Control Module）により車両全体を制御する。

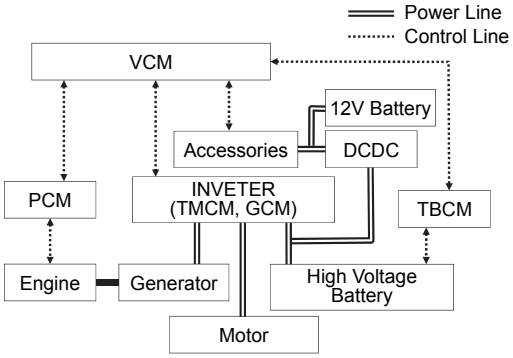


Fig. 2　Structure of Series HEV System

4. 基盤となる発電制御法

4.1 発電制御法の概要

本車両では，CS モードにおいて，1 サンプル時間ごとに評価関数を最小化しながらエンジン発電量を制御するモデル予測制御（以下 MPC）を採用する。MPC は未来の状態変化を予測して操作量を決める機能を有するため，エンジン回転数を滑らかに変化させながら電力収支をバランスさせることが可能になる。

まず，車速 v_0［km/h］，車両加速度 a_v［km/h/s］，モータトルク T_r［Nm］，SOC［%］，補器類の消費

電力［kW］が観測できるとする。次に，現在時刻を 0 として予測時間区間 T_e を設定し，時間 $t \in [0, T_e]$ において現在の運転状態を維持する（a_v で加速し続ける）と仮定した場合に T_e 秒間に発電すべき総発電量 P_J［kJ］を算出する。この P_J は，現在 SOC を目標 SOC との差分電力および，T_e 秒間にモータと補器類が消費する電力とから求める。そして，車両の運転状態に応じてエンジン音による走行フィーリングを良好に保つエンジン回転数［rpm］を算出する関数としてフィーリング関数 $w(t)$ を定義し，P_J と $w(t)$ とを含んだ評価関数 I を導入する。T_e 秒間において評価関数 I を最小化するエンジン動作軌道を求め，その動作軌道の 1 サンプル時間後の値を目標動作点として PCM および GCM に出力し制御する。この制御法を 1 サンプル時間ごとに繰り返す[3]（Fig. 3）。

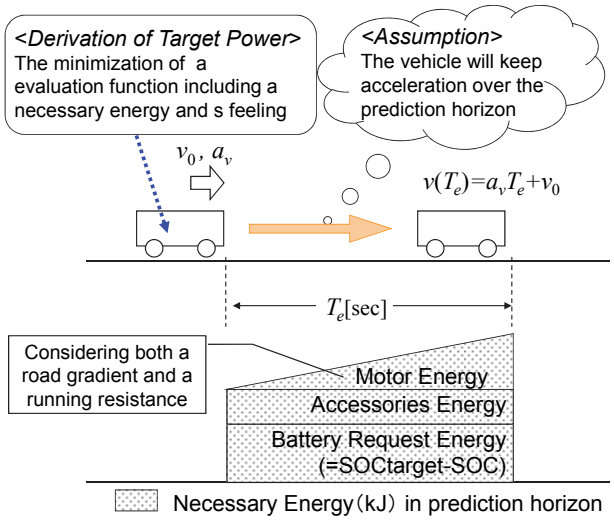


Fig. 3　Concept of Electric Generation Control

4.2　最適化問題の定式化

現在時刻 0 に対する時間を $t \in [0, T_e]$，エンジンの目標発電量［kJ］を $x_1(t)$，エンジン目標回転数［rpm］を $x_2(t)$，エンジン目標回転数変動［rpm/sec］を意味する入力を $u(t)$ とする。この 3 変数に関して，目標発電量挙動を示す状態方程式と初期条件を次式(1)(2)のように表現する。この時，状態方程式内のパラメータ a_1, a_2 はエンジンの動作領域（Fig.4 の点線）に基づいて設定するものとする。なお，・（ドット）は時間微分を表し，N_0 は $t=0$ のエンジン回転数を表す。

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = a_1 x_2 + a_2 \\ \dot{x}_2 = u \end{cases} \tag{1}$$

$$\begin{pmatrix} x_1(0) \\ x_2(0) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ N_0 \end{pmatrix} \tag{2}$$

そして，重み係数を S_0, Q_0, R_0 とおき評価関数を式(3)のように設定する。第 1 項目が電力収支バランス，第 2 項目が走行フィーリングに関する評価項になっており，重み係数の設定に応じて優先度を決められる[3]。

$$I = \frac{S_0}{2}\left(x_1(T_e) - P_J(T_e)\right)^2 + \int_0^{T_e}\left\{\frac{Q_0}{2}\left(x_2(t) - w(t)\right)^2 + \frac{R_0 u(t)^2}{2}\right\}dt \tag{3}$$

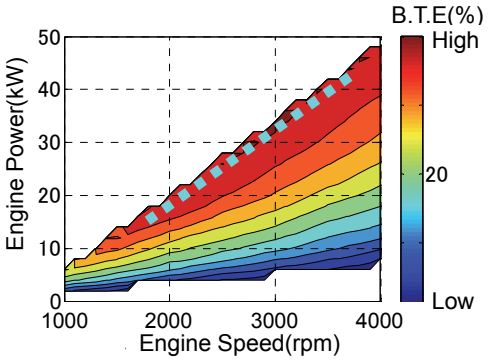


Fig. 4　Brake Thermal Efficiency (B.T.E) Map

ここでの $w(t)$ は 4.1 節で述べたフィーリング関数を意味し，次の条件（式(4)）を満たすものと定義する。なお，C^{n+1} は n+1 回微分可能な関数の集合を示し，具体的には 4.5 節で設定する。

$$w(t) \in C^{n+1}, \quad \frac{d^{n+1}w(t)}{dt^{n+1}} = 0 \tag{4}$$

4.3　最適解の導出

最適レギュレータと呼ばれる最適制御問題に類似しているため，同様の手順で最適解を導出できる。まず，ラグランジュ乗数 $\psi(t)$ を導入して，ハミルトニアンやオイラー方程式を用いることにより最適解を導出する。$\alpha = \sqrt{Q_0/R_0}$ とすると，エンジン目標回転数である x_2 に関して示すと式(5)となる（導出の詳細は文献(3)参照）。

$$x_2(t) = -\frac{\alpha\psi_2(0)}{\psi_0 Q_0}\sinh(\alpha t) + x_2(0)\cosh(\alpha t) - \alpha\int_0^t \sinh\left(\alpha(t-\tau)\right)w(\tau)d\tau + \frac{\psi_1 a_1}{\psi_0 Q_0}\left(\cosh(\alpha t) - 1\right) \tag{5}$$

4.4　モデル予測制御の実装

Fig. 5 に示すように本車両の発電制御システムは，VCM から PCM と GCM に制御指令を出力する構造になっている。まず VCM では，式(5)より 1 サンプル時間 Δt 秒後の $x_2(\Delta t)$ を算出し，その目標回転数において最も熱効率が高くなるトルクを目標トルクとしても求めておく。

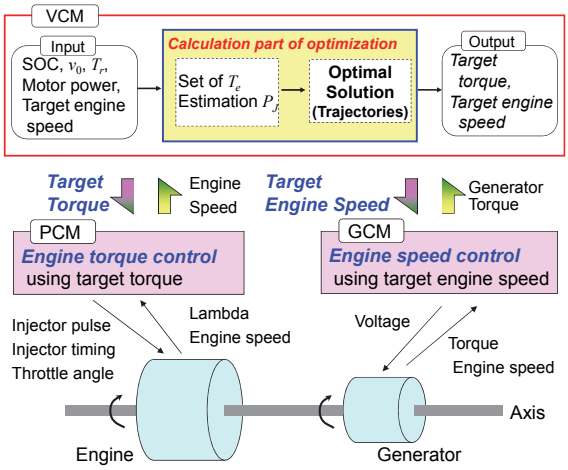


Fig. 5　Generation Control System

そして VCM から PCM に向けては目標トルクやエンジン始動停止などの指令信号が送られ，PCM から VCM へはエンジン実回転数やエンジン水温などが送られる。この指令に基づいて，PCM は VCM からのトルク指令やエンジン実回転数に基づいてスロットル開度やインジェクタのパルス幅などを制御する。次に，VCM から GCM に向けては目標回転数やエンジン始動停止などの指令信号が送られ，GCM から VCM へはジェネレータ回転数やジェネレータトルクなどが送られる。GCM は目標回転数に従ってジェネレータの回転数を制御する。エンジンとジェネレータが直結されているので，このシステムにより発電電力制御が可能になる[3]。

4.5　フィーリング関数の設定

発電中のエンジン動作点を走行フィーリングの良い点に近づけるために式(4)を満たすフィーリング関数を導入している。予測時間区間［$0, T_e$］中の車速を $v(t)$として，本発電制御法には式(6)のように与える。

$$w(v(t)) = k_v(a_v)v(t) + w_0, \because v(t) = a_v t + v_0 \quad (6)$$

ここでは，走行中のエンジン音が車速変化に対してドライバに自然な印象を与えるために，エンジン回転数と車速とが直線的な関係になるよう $w(v)$を設定する（Fig. 6）。

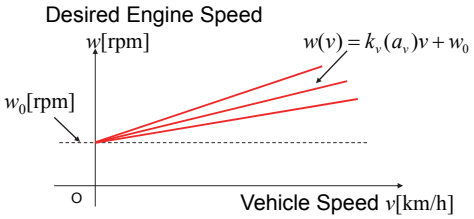


Fig. 6　Feeling Function

また，車速に対する $w(v)$の変化率を表す k_vを加速度 a_v に依存させることで運転中の走行フィーリングをより向上させることができる。なお，k_v を一定とした場合の走行実験結果は，文献 (3) にて報告している。

5. 発電制御法に追加する機能

本章では，2 章の要求仕様において，特に重要となる耐環境性と信頼性の①③並びに熱効率の②に関して追加する機能を述べる。

5.1　排気エミッション浄化機能

排気エミッションを浄化するために，本車両では，NOx 吸蔵還元触媒を車載しリッチ燃焼により NOx を還元（リッチパージ）する方法を採用した。シリーズ型 HEV の構造から無負荷によるリッチ燃焼が可能になることで，高効率発電とリッチ燃焼時の騒音抑制とを両立しながら SU-LEV（Super Ultra Low Emission Vehicle）の基準を満足できる（背景は，「プレマシー ハイドロジェン RE レンジエクステンダーEV の開発」を参照）。そこで，触媒内の NOx 吸蔵量［kg］を推定し，その推定値が所定値に達した際にリッチパージを実行する機能を追加した。その実行判定の考え方を以下に示す。

まず，1 サンプル時間中に触媒とエンジン間の排気ガス中に含まれる NOx 量 A［kg/sec］をエンジン出力に応じて実験的に求めておく。そして 1 サンプル時間中に触媒に吸着する NOx 量 y［kg/sec］を式(7)のような近似関数を用いて算出する。

$$y = A\left(1 - \frac{x}{B}\right)^p \quad (7)$$

ここでの x は現在時刻の NOx 吸蔵量推定値［kg］，B は触媒の NOx 最大吸蔵量［kg］，p はエンジン出力に応じて変化する近似次数を表している。そして，その y を積算することで x が推定でき，その推定値が所定の値に到達したらリッチパージを実行する（Fig. 7）。

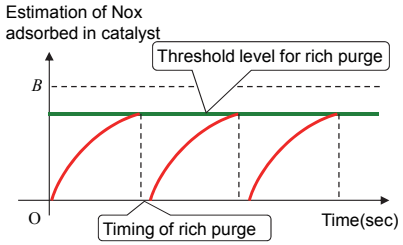


Fig. 7　Rich Purge

リッチパージの実行時間と実行判定のための所定値を実験的に求めた結果，JC08 モード中ではリッチパージが 2 回実行される制御仕様となった。

5.2　常温時におけるエンジン始動頻度の抑制機能

CS モードで走行している際のエンジン始動頻度に関する要求は次のようにまとめることができる。

① 走行中のエンジン動作の総時間をできるだけ小さくしたい。
② エンジンの始動停止回数をできるだけ減らしたい。
③ エンジン音による走行フィーリングを犠牲にしないようエンジンを動作させたい。
④ ロードノイズに対してエンジン音が目立ちやすい速域ではエンジンを停止したい。

このような要求に対して，走行実験を行い，Table 2 のようなエンジン始動停止条件を求めた。この時，目標発電量（トルク・回転数）の導出には，アクセルオン時はモデル予測制御法を，アクセルオフ時は車速に比例して発電電力を決定する制御法を用いることとした（Fig. 8）。アクセルオフ時はエンジンを停止しても良いが，②③の要求からエンジンを止めない条件を設定した[3]。この始動停止機能により，エンジン音による走行フィーリングを確保しながら，不必要にエンジンを停止させる頻度を小さくすることができる。

Table 2　Engine Start-Stop Condition

	Condition
Engine start	Vehicle speed ≧45[km/h]
Engine stop	Brake on period ≧ a few seconds or Vehicle speed ≦ 35[km/h]]

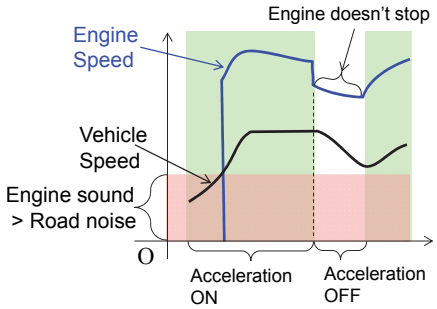


Fig. 8　Trajectory of Engine Output

5.3　高電圧バッテリの保護機能

高電圧バッテリは SOC やバッテリ温度に応じて充放電可能電力［kW］が変動する。例えば，高 SOC 時は充電可能電力（以下 Pin）が小さくなり，温度が高い場合や低い場合では Pin と放電可能電力（以下 Pout）の両方が低下する。特に，Pin と Pout の両方が小さい場合では，加速中において Pout では不足する電力をエンジン発電電力で補いながらモータを駆動させる必要があるだけでなく，アクセルオフ時にはモータを空転させながらエンジンを停止させる必要もある。このような機能を追加しないまま通常走行をしてしまうと，Pin と Pout の範囲を超えた電力がバッテリに充放電されてしまう現象が発生する。このような現象が繰り返されるとバッテリは大きく劣化してしまう。特に Pin を超えた電力が充電される現象については制御が複雑となるため，その原因と対策について以下に述べる。

(1)　原因
① オーバシュート：エンジン出力上昇時に発電電力が目標発電電力を一時的に超えてしまう（Fig. 9 の左図）。
② オフセット：低外気温中の定常発電状態において，発電電力が定常的に目標発電電力よりも大きくなる（Fig. 9 の左図）。
③ 発電電力残り：モータ出力減少時にエンジン出力降下が遅れてしまう。

(2)　対策と効果
① オーバシュート：発電上限電力（Pin+モータ出力）と発電電力との偏差を PD 制御法を用いてフィードバックすることにより，応答遅れを持つ発電電力挙動が発電上限電力を超えないように制御できる。（Fig. 9 の右図）
② オフセット：バッテリ Pin が小さい状態において，発電上限電力と目標発電電力との間に余裕を設けることにより，オフセットが発生したとしても，発電電力が発電上限電力を超えないように制御できる。（Fig. 9 の右図）
③ 発電残り：モータ出力が減少し始めたら速やかに発電電力を 0（エンジン停止またはアイドリング）にすることにより，モータ出力が 0 になる前に発電電力を 0 にできるため，発電電力が発電上限電力を超えないように制御できる。

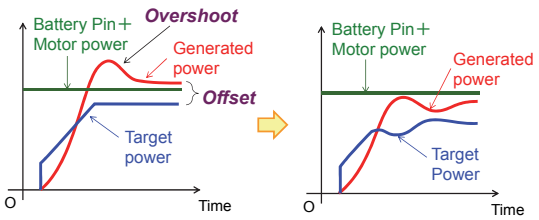


Fig. 9　Battery Protection Feature

6. 走行テストの結果

本章では，4 章で提案した発電制御法に 5 章で示した機能を追加した制御法を組み込み，走行実験を行ったので，その結果を述べる。

6.1　常温でのモード走行

5 章にて述べた機能を含んだ発電制御法を組み込んだ本車両において JC08 モード走行を CS モードで行ったところ Fig. 10 のような結果となった。SOC 挙動から，電力収支が目標 SOC 付近でバランスしていることが分かる。この時，リッチパージを所定回数実行しながらバランスできていることが確認できる。またエンジン回転数の挙動から，フィーリング関数値付近でエンジンが回転していることが分かる。エンジン始動停止の挙動と併せてみると，ロードノイズよりもエンジン音が大きくなりやすい車速域（40km/h 以下）においてエンジンが停止してい

ることが確認できる。さらに発電中のエンジン動作点をプロットしてみたところ Fig. 11 のようになった。この結果から，式(1)の a_1，a_2 を Fig. 4 の点線になるように設定したことが効果的に作用しているといえる。

これらの結果をまとめると，SU-LEV を満足しながら，電力収支バランス，熱効率，走行フィーリングを同時に満たしていることが示された。

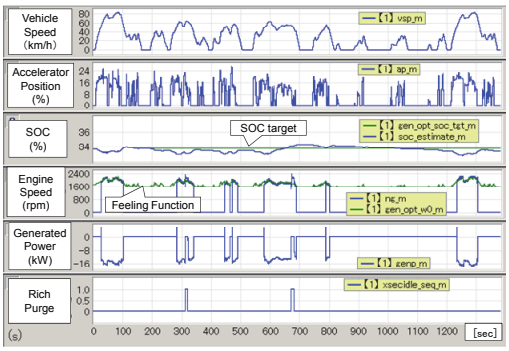


Fig. 10　Result of Driving Test of JC08 Mode

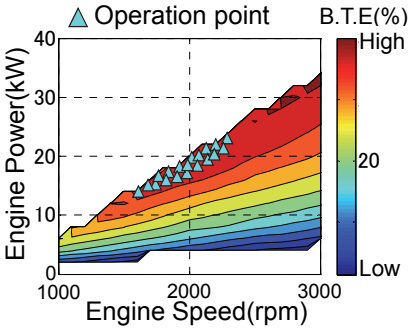


Fig. 11　Distribution of B.T.E During JC08 Mode

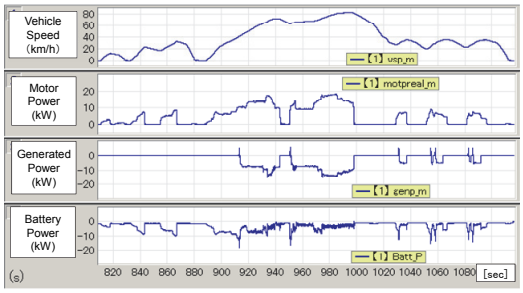


Fig. 12　Result of Cold Driving Test

6.2　高電圧バッテリの保護を要する場面の走行

バッテリの Pin と Pout が低下する場面の代表として，冷間環境において JC08 モード相当の走行実験を行った。この実験に際し，バッテリの充放電可能電力が十分小さくなるまで（-10℃環境下で 24 時間程度）事前に車両を冷却した。その状態から，JC08 モード走行を行った結果（一部）を Fig. 12 に示す。まずバッテリへの充放電電力（充電側がプラス）の挙動から，放電のみで走行していることが分かる。これは，バッテリの Pin を守りながら走行できていることを示している。また，このエンジン発電量の挙動を詳しく見たところ，発電電力上昇時にオーバシュートが抑えられていることと，モータ出力低下時に速やかに発電電力が 0 になっていることが確認できた。このように，追加した機能が有効に働きながら JC08 モードを走行できていることが示された。

また冷間でのモード走行では，バッテリの温度上昇が Pin の回復をもたらすため，一時的に低下してしまった SOC が再び回復することが確認された。

7. おわりに

本稿では，レンジエクステンダ EV の発電制御において，耐環境性や信頼性を確保しつつ，電力収支バランス，熱効率，走行フィーリングの 3 つの要求を同時に満足する発電制御法を提案した。この制御法では，熱効率を考慮した発電量モデル（4.2 節）に対して電力収支と走行フィーリングとを考慮した評価関数を逐次最小化しながら目標発電電力を決定するモデル予測制御法をベースとして採用した。そして，その制御法に，排気エミッション浄化システム，エンジン始動停止条件，バッテリ保護機能などを組み合わせることにより，高度な要求（2 章）を同時に満足する発電制御技術を実現した。

参考文献

(1) 柏木ほか:プレマシー ハイドロジェン RE ハイブリッドの紹介，マツダ技報，No.27，pp.26-30（2009）

(2) 若山ほか:ハイドロジェン RE ハイブリッドシステムの開発，マツダ技報，No.27，pp.31-35（2009）

(3) 大室ほか：電動車両の走行フィーリングを考慮した発電制御法，自動車技術会春季大会前刷集，No.7-13，pp.13-18（2013）

■著　者■


大室 朗


堂園 一保


藤川 裕志


胡本 博史

論文・解説

27

ロータリエンジンの燃焼予測技術開発

Analysis Technology of Combustion Model in a Rotary Engine

中島 聖*1 Akira Nakashima
尹 正 虎*2 Jyong-Ho Yun
本郷 均*3 Hitoshi Hongou
植木 信也*4 Shinya Ueki
香川 良二*5 Ryoji Kagawa
横畑 英明*6 Hideaki Yokohata

要約

ロータリエンジンは，シンプルな構造であるため，軽量，コンパクト，高出力といった特性をもったエンジンであるが，扁平な燃焼室かつ膨張行程中に強い流れが生じるなど，一般的なレシプロエンジンにはない極めて独特な流動パターンをとる複雑さもあわせもっている。ロータリエンジンの更なる図示熱効率改善のためには，これら独特な現象を明らかにする必要がある。そこで，現象を把握可能なシミュレーション技術を構築することを目的として，燃焼室内 PIV（Particle Image Velocimetry）可視化計測結果との検証，スキッシュ流の改善による燃焼パターンの再現を行った。その結果，特徴的な燃焼パターンの高精度な予測を可能とする解析技術を構築することができた。そして，本解析技術及び実機を用いて，現在開発中の次期ロータリエンジンにおける熱効率改善の方向性を確認した。

Summary

A Wankel rotary engine, due to its simple structure, is characteristically compact and light-weight and has high power density. Meanwhile, it has complexity that ordinary reciprocating engines do not have, such as a squish flow at an expansion stroke in its flat narrow combustion chamber. To further improve indicated thermal efficiency of the rotary engine, it is necessary to better investigate its combustion mechanism and the detail of the flow. Therefore, Mazda has developed a simulation technique for making an accurate prediction of combustion, an effective tool for analyzing such combustion pattern. Applying this technique, Mazda has confirmed the potential for improved thermal efficiency in the next generation rotary engine which is currently under development.

1. はじめに

近年の化石燃料の枯渇や地球温暖化防止から，内燃機関への燃費改善のニーズは日増しに強くなってきている。CO_2 削減要求は，ロータリエンジン（以下，RE）に対しても例外ではなく，熱効率改善を短期間で必達しなければならない。しかしながら，RE は燃焼室が扁平で，かつ膨張行程中に強い流れが生じるなど極めて独特であるため，レシプロエンジンと比べ流動パターンが大きく異なり，RE 独特な現象を理解した上で燃焼阻害要因を明らかにしなければ熱効率改善は実現できない。そのためには，シミュレーションによる検討が必須であるが，RE における燃焼解析事例はほとんどない。

そこで，本稿では，ガソリン RE の熱効率改善を目的とした燃焼解析による予測技術(1)を構築し，本予測技術を用いて燃焼改善による熱効率改善の方向性(2)を確認した。

2. ロータリエンジンの構造及び特徴

2.1 構造及び名称

RE は，Fig. 1 に示すように，ハウジングとロータとの間で燃焼室が形成される。回転方向に対してトレ

*1，3，6 エンジン性能開発部
Engine Performance Development Dept.
*2，4，5 パワートレイン技術開発部
Powertrain Technology Development Dept.

ーリング（以下，T）側にある点火プラグを T プラグ，リーディング（以下，L）側にある点火プラグを L プラグとよぶ。また，ロータの T 側の端を T 端，L 側の端を L 端とよび，リセスの T 側の位置をリセス T 端，リセスの L 側の位置をリセス L 端と定義する。

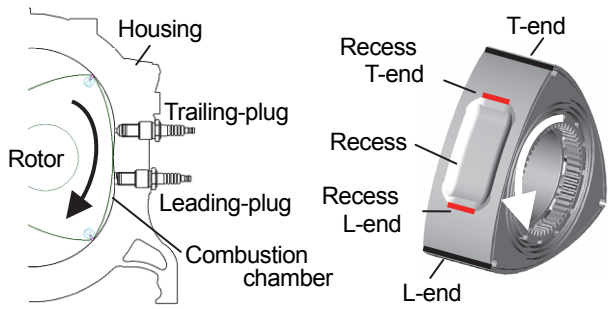


Fig. 1　Terminology of RE

2.2　流動パターンにおける特徴

Fig. 2 に圧縮・膨張行程における一般的なレシプロエンジン及び RE の流動解析による燃焼室内体積平均ガス流速の一例を示す。なお RE は，行程時間がレシプロエンジンと比べ 1.5 倍長いため，それぞれの出力軸における上死点後の角度（deg.ATDC）を横軸としている。レシプロエンジンは上死点（TDC）において燃焼室内ガスの圧縮による減衰でガス流速が最小となるのに対して，RE は，TDC でガス流速が最大となる。これは，ロータが回転していくと，燃焼室内は L 側が膨張，T 側が圧縮していくため，T 側から L 側への流れが強くなるためであると考えられる。

以上のことから，本論文の目的である燃焼を予測するためには，まず燃焼室内の流れ場を予測する必要がある。

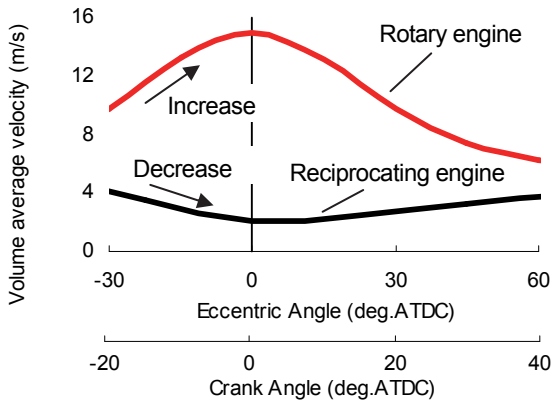


Fig. 2　Volume Average Velocity in Combustion Chamber of Rotary Engine and Reciprocating Engine

2.3　燃焼パターンにおける特徴

Fig. 3 にレシプロエンジンと RE における同一点火時期での熱発生率の例を示す。RE は，レシプロエンジンに対して，主燃焼ピーク後に二つ目の燃焼ピーク（二段燃焼）が発生する点が特徴的である。この二段燃焼は，膨張行程中に燃焼室 T 側の未燃混合気が押し出されることによる燃焼であること[3]が分かっており，冷却損失及び排気損失を増大させる一因となっていると考えられる。

以上のことから，RE の熱効率予測を行うためには，特徴的な熱発生パターンである二段燃焼を高精度に予測する必要がある。

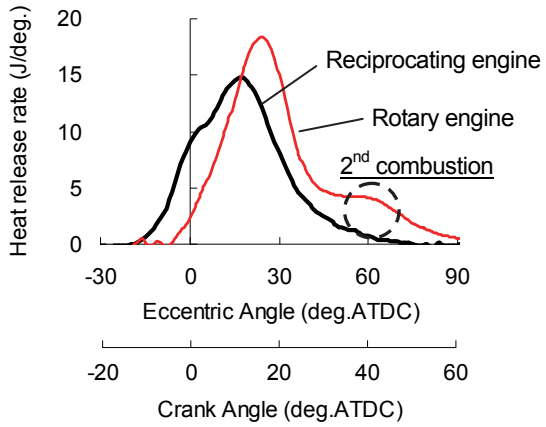


Fig. 3　Heat Release Rate of Rotary Engine and Reciprocating Engine at Same Ignition Timing

3. 解析手法

3.1　解析モデル

RE の燃焼計算には，汎用熱流体解析プログラム STAR-CD を用い，燃焼モデルには，乱流の影響による火炎面の状態を火炎面密度で定義し，その輸送方程式を解くことで火炎進行を表現する総括反応モデル ECFM-3Z を使用した。

3.2　ロータリ移動境界プログラム

RE の燃焼室容積変化はトロコイド関数で表現される。CFD（Computational Fluid Dynamics）による解析を行うには，解析対象となる空間をメッシュで分割する必要があるが，RE 特有の燃焼室形状変化に対応した自動メッシュ作成ツールはほとんどない。そこで，独自に自由度の高いロータリ移動境界プログラムを開発し，RE 特有の形状変化を再現した。

開発したロータリ移動境界プログラムは，Fig. 4 に示すように燃焼室内を周方向に数個のセグメントに分け，その領域ごとにそれぞれ独立にメッシュの追加・削除を行うことで RE 特有の燃焼室形状変化を再現した。また，壁面 1 層目のレイヤ厚さを任意に指定できるようにすることで，詳細な流動パターンを再現可能な解像度を確保できるようにしている。

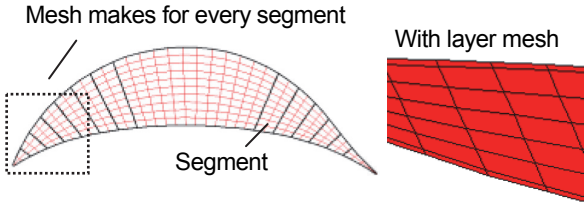


Fig. 4　Calculation Model of RE Movement

4. シミュレーションによる予測技術

4.1　燃焼室内流動解析技術[1]

(1) 計測及び解析条件

比較対象とした PIV 可視化計測結果は，千葉大学大学院とマツダとの共同研究で計測した結果[4]を用いた。可視化エンジンは，マツダ RX-8 に搭載している 13B 型 RE（654cc×2）をベースとし，計測は全負荷条件（1500rpm WOT）で行っている。これに対して，解析では，同条件におけるメッシュサイズ，乱流モデルといった解析パラメータを変更した解析を行い，流れ場を計測結果と対比する。そして，その中から最適な解析パラメータを選定し，RE 用流動解析技術を構築する。

(2) メッシュサイズの影響

-240deg.ATDC における PIV 可視化計測結果を Fig. 5(a)に，平均メッシュサイズを 1mm，2mm，4mm と 3 仕様変更した際の流動解析結果を Fig. 5(b)に示す。乱流モデルは，Standard k-ε 乱流モデルを使用した。

-240deg.ATDC は，ポート開口部が閉まる前 6deg であり，面積は約 25%しか開いていない状態である。PIV 可視化計測結果では，ポートからのガス流入による流れより容積変化による影響が大きくなっており，ロータにガスが押されることでポート入口付近に流れが生じていることが分かる。これに対して，解析結果は，メッシュサイズ 2mm 以上では，メッシュサイズに関係なく大きな時計回りの渦を形成しており，細かな流れを再現できていない。メッシュサイズを 1mm まで小さくすると，L 側の反時計回りの流れについては再現できていないが，ポート閉後の燃焼室内流動に影響を及ぼすポート入口付近に関しては，PIV 可視化計測結果と同様に流れ場を再現できている。

(3) 乱流モデルの影響

Fig. 5(c) に高レイノルズ数型 k-ε 乱流モデルの中で，Standard，RNG と 2 つの乱流モデルを変更した際の流動解析比較結果を示す。メッシュサイズは 1mm とした。剥離流れや旋回流に対して精度が良いとされる RNG k-ε 乱流モデルを使用した場合，L 側の反時計周りの渦を再現できておらず，また，Standard k-ε 乱流モデルに比べてポート入口付近の流れに関しても可視化計測結果から離れる結果となった。これは，レシプロエンジンのバルブ上面での剥離流れのように，複雑な流れ場を形成しづらい構造である RE では，Standard k-ε モデルを使用した方が流れ場の再現性を確保できるということがいえる。

以上のことから，本論文で行った解析パラメータの中では，メッシュサイズ 1mm，乱流モデルは Standard k-ε 乱流モデルを用いた条件で最も可視化計測結果を再現できることが分かった。

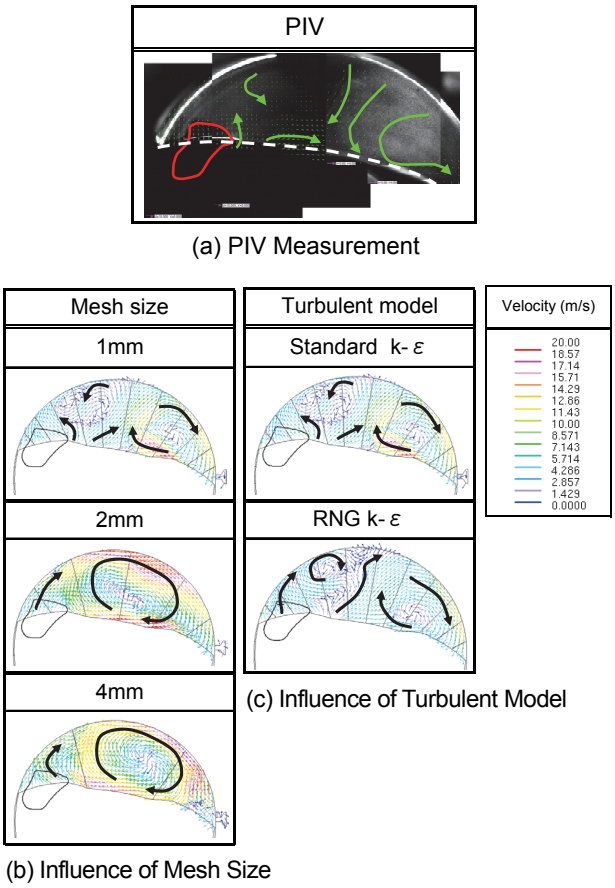
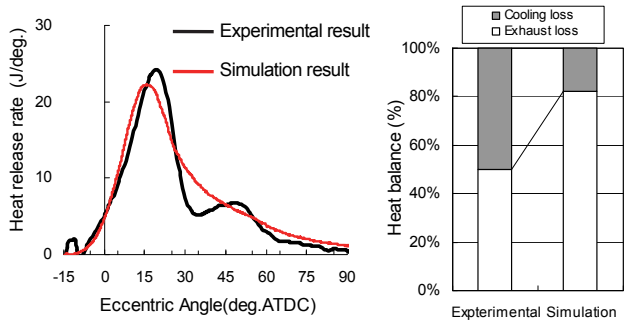


Fig. 5　Comparison of Flow Pattern in Rotor Center Section at -240deg. ATDC

4.2　燃焼パターン予測解析技術

(1) 流動解析手法による流れ場での燃焼解析予測精度

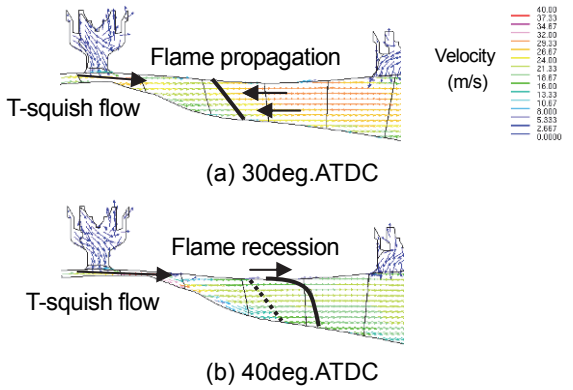
前節において構築した流動解析手法を用いて均一予混合燃焼解析を行った。Fig. 6 に，熱発生率及び熱分配における冷却損失と排気損失の割合の実験結果と解析結果を比較した結果を示す。特徴的な熱発生率のカーブである二段燃焼を解析では再現できておらず，また，損失に占める冷却損失と排気損失の割合が予測できていないことから，予測精度が悪いことが分かる。



(a) Heat Release Rate　(b) Heat Balance

Fig. 6　Comparison of Heat Release Rate and Heat Balance between Measured Results and Calculated Results

解析において，30deg.ATDC 以降，緩慢燃焼になっている要因の推測を行った。Fig. 7 に実機で二段燃焼が発生している区間で熱発生率が最も低い 30deg.ATDC と，その後熱発生率が上昇し始める 40deg.ATDC におけるセンター断面の流速ベクトル図を示す。二段燃焼の開始タイミングでは，リセス T 端の極小なエリアから発生するスキッシュ流（T スキッシュ流）により火炎伝ぱ面が L 側へ後退していくことで，燃焼速度が低下し緩慢燃焼を引き起こしている。このことから，現状の解析結果では，T スキッシュ流が弱いため，火炎伝ぱ面の後退すなわち燃焼速度の低下が弱くなり燃焼が持続してしまったと考えられる。



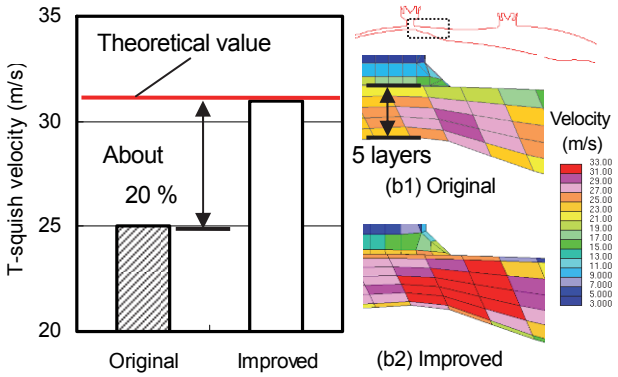
(a) 30deg.ATDC

(b) 40deg.ATDC

Fig. 7　Flow Pattern in Rotor Center Section

そのため，T スキッシュ流速の妥当性について確認を行った。Fig. 8(a) に，スキッシュ流速ピーク時の断面平均流速の理論値と現状の解析値との比較結果を示す。理論値は，赤線で示し，リセス T 端を境に燃焼室を 2 つの領域に分け，それぞれの容積変化から流速を算出した。現状の解析結果では，理論流速に対して，約 20%低い値となっており，T スキッシュ流が弱いことが分かる。これは，Fig. 8(b1)に示すように，構築した流動解析手法では，周方向に 5 層のメッシュを等間隔に配置していたため，極小なエリアであるリセス T 端において，主流を再現できるメッシュ数の不足による数値粘性の影響及び壁面 1 層目厚さが大きいことによる壁関数の影響が強くなったためであると考えられる。

以上のことから，二段燃焼を再現できていない要因は，T スキッシュ流速が弱いことによる主燃焼ピーク後の火炎面後退を再現できていない，すなわち極小なエリアであるリセス T 端のメッシュに要因があることが分かった。そのため，Fig. 8(a)及び(b2)に示すように，主流メッシュサイズ及び壁面 1 層目厚さの調整を行うことで，T スキッシュ流速を理論流速まで改善した。

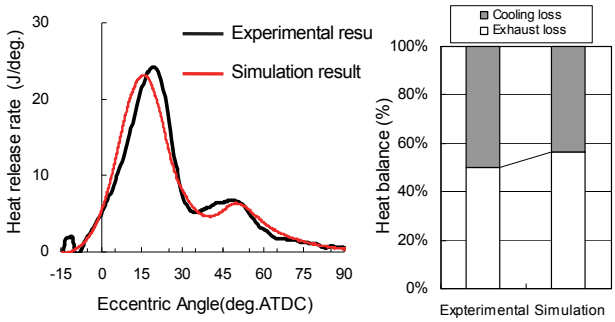


(a) Squish Velocity　(b) Flow Pattern

Fig. 8　Comparison of Peak Squish Velocity between Original Results and Improved Results

(2) T スキッシュ流速選定による燃焼改善結果

Fig. 9 に T スキッシュ流速を改善したメッシュを使用した場合の熱発生率及び熱分配を示す。

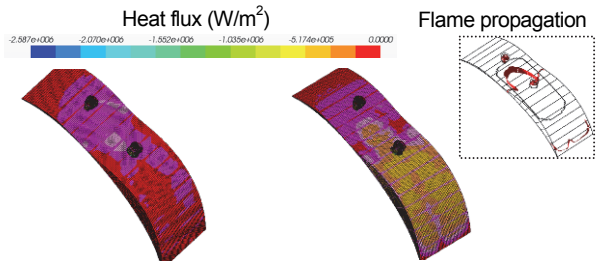


(a) Heat Release Rate　(b) Heat Balance

Fig. 9　Comparison of Heat release Rate and Heat Balance between Measured Results and Improvement Calculated Results

T スキッシュ流速の改善を行うことで，緩慢燃焼となっていた主燃焼ピーク後の燃焼速度が低下し，二段燃焼を明確に再現できていることが分かる。また，損失に占める冷却損失と排気損失の割合においても実機

と同等まで改善していることが分かる。これは，熱発生パターンの高精度化により排気損失予測精度が改善したためと考えられる。更に，これまでは火炎面に対して適正な壁面 1 層目厚さではなかったため，Fig. 10 に示すように，熱流束を小さく見積もっていたが，壁面 1 層目厚さの調整により，壁関数による境界層近似の精度が上がり，冷却損失予測精度が改善したためである。



(a) Original　　(b) Improved

Fig. 10　Heat Flux on Combustion Chamber Wall at 30deg.ATDC

以上の改善技術により，RE 独特な燃焼パターンの高精度な燃焼予測を行うことが可能となった。

5. シミュレーションによる燃焼改善検討[2]

構築した予測技術を用いて，L 側空間における乱流生成による燃焼改善の検討を行った。

5.1　ロータリエンジンの S/V 推移

Fig. 11 に，各出力軸アングルに対する回転方向におけるロータ中心から T 側と L 側に容積を分けた場合のそれぞれの表面積（Surface）と容積（Volume）の比（以下，S/V）を示す。

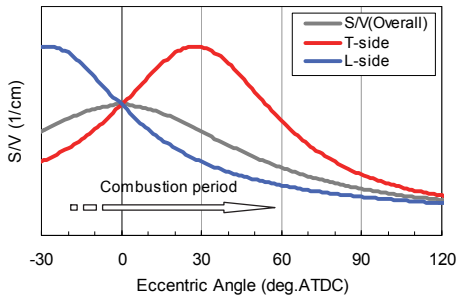


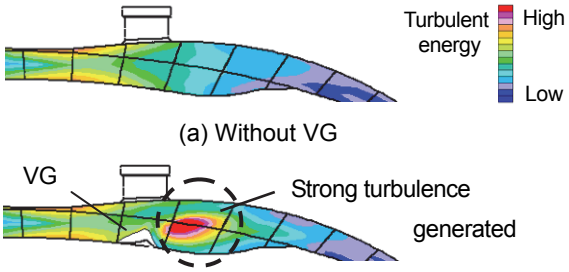
Fig. 11　Surface Volume Ratio in Combustion Chamber

T 側は，燃焼期間中 S/V が大きく，30deg.ATDC まで増加するのに対し，L 側は逆に燃焼期間中 S/V が小さく，減少傾向にある。これは，構造上，L 側は膨張し続け，反対に T 側は圧縮されるためであり，その結果，L 側は，冷却損失低減検討のためには有利な空間と考えられる。

5.2　シミュレーションによる燃焼促進効果の検証

S/V による関係から，冷却損失低減には L 側空間での燃焼は有利である。しかしながら，L 側空間での燃焼は，乱流エネルギが弱く[2]緩慢燃焼となるため，燃焼を促進させる必要がある。そのため，構築した予測技術を用いて，燃焼形態の変更を検討した。

Fig. 12 に L 側燃焼の促進化を図り，なおかつ冷却損失低減のため壁面から離れた空間に乱流を形成する目的で，部分負荷条件における乱流生成翼（Vortex Generator，以下 VG）を用いた机上検討結果を示す。VG 先端の L 側の空間に強い乱流が形成されており，目的とする乱流生成が可能であることが分かる。

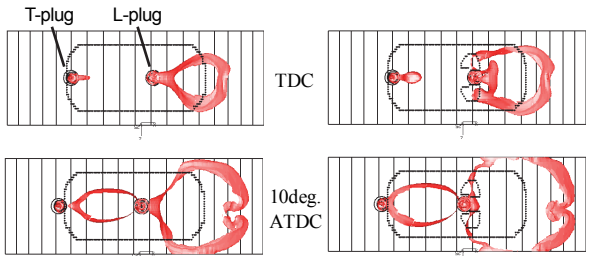


(a) Without VG

(b) With VG

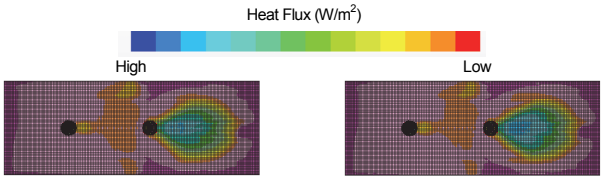
Fig. 12　Turbulent Energy with and without VG at 10deg. ATDC

次に，同一運転条件における燃焼解析を行った。Fig. 13, 14 に，火炎面位置，熱流束の結果の例を示す。VG による L 側乱流生成が L 側燃焼を大きく促進させ，更に，空間上で乱流を形成することで,冷却損失がほとんど悪化していないことが分かる。



(a) Without VG　　(b) With VG

Fig. 13　Flame Propagation View from Normal Direction of Rotor



(a) Without VG　　(b) With VG

Fig. 14　Heat Flux View from Normal Direction of Rotor at TDC

5.3　実機による燃焼促進効果の検証

以上の効果を検証するため，実機を用いた計測を行った。机上検討と同一運転条件での VG 有無による実機での熱発生率を Fig. 15 に示す。VG を装着することにより，机上検討結果と同様に，-5deg.ATDC 付近から燃焼が促進されていることが分かる。

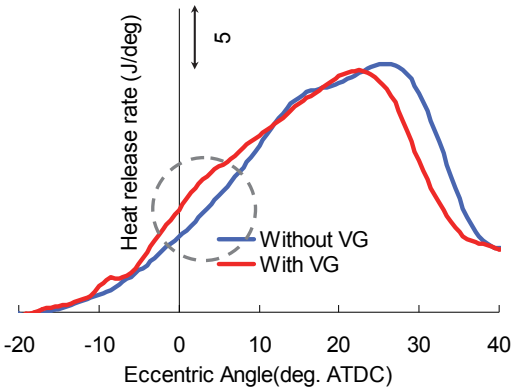


Fig. 15　Bench Engine Test Result on Heat Release Rate with and without VG

更に,VG 有無による燃焼の違いを明らかにする目的で，可視化エンジンを用いた燃焼観察[5]を行った。可視化結果を Fig. 16 に示す。VG ありの場合，なしに比べ輝度が高くなっており，L 側空間で燃焼が活発に行われていることが分かる。

また,実機テストによる熱分配解析結果から，VG を装着することにより冷却損失割合を約 3%低減できることが明らかになった。

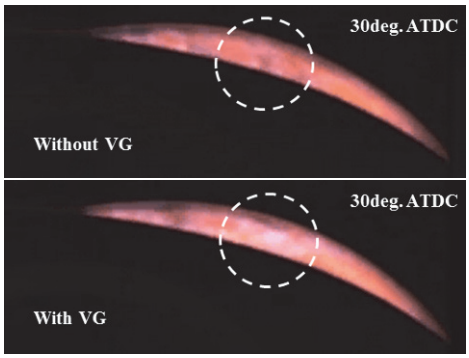


Fig. 16　Visualized Combustion with and without VG in L-side

6. おわりに

机上でガソリン RE を対象とした燃焼予測技術の構築を行い，構築した予測技術を用いて燃焼改善による熱効率改善の方向性を確認した。その結果，以下の知見を得た。

(1) 平均メッシュサイズ 1mm，乱流モデルは，Standard k-ε 乱流モデルを用いれば，RE 独特な流れ場を再現可能である。

(2) 燃焼パターンの予測には，主燃焼ピーク後の火炎面後退を再現することが重要であり，T スキッシュ流速の予測精度の改善を行うことで，二段燃焼を再現できた。

(3) L 側空間に VG で乱流を生成させることで，燃焼を促進させつつ，冷却損失低減が可能であることが机上及び実機において確認できた。

次期ガソリン RE 開発では，各種損失の中で特に冷却損失の改善を目的に開発を行っている。現在，本文で述べた L 側空間の燃焼促進による熱効率改善の考え方を適用することで，熱効率を大幅に改善できることを確認している。この事実に基づき，ガソリン RE の開発を加速している。

参考文献

(1) 中島ほか：ロータリエンジンにおける詳細素反応を用いた流動・燃焼解析技術の構築，第 23 回内燃機関シンポジウム講演論文集，B1-05（2012）

(2) Yun, J. et al.: Understanding of The Combustion Characteristics of Rotary Engine through Combustion Analysis, Proceedings JSME of The 8th CO-MODIA, No.12-201, pp.585-590（2012）

(3) 奥井ほか：ロータリエンジンの火炎伝ぱに及ぼす点火プラグ配置の影響，マツダ技報，No.27，pp.142-147（2009）

(4) 森吉ほか：ロータリエンジンのサイクル変動に注目したガス流動場の解析，第 20 回内燃機関シンポジウム講演論文集，20090078（2009）

(5) Jaber N. et al.: Amelioration of Combustion of Hydrogen Rotary Engine, International Journal of Automotive Engineering, Vol.3, No.3, pp.81-88（2012）

■著　者■


中島 聖


尹 正 虎


本郷 均


植木 信也


香川 良二


横畑 英明

論文・解説
28

オゾン添加によるガソリン HCCI 低温燃焼特性の改善

Improvement of Low Temperature Combustion Characteristics in Gasoline HCCI Engines Associated with Ozone

髙橋 巧朋*1　清末 涼*2　山下 洋幸*3
Yoshitomo Takahashi　Ryo Kiyosue　Hiroyuki Yamashita

要約

ガソリン圧縮予混合自己着火（Homogeneous Charge Compression Ignition，以下，HCCI）エンジンは低温燃焼により，冷却損失が低減することが知られている。本稿では，更なる低温燃焼を目指し，自己着火温度の低下を試みた。通常の HCCI 燃焼において，自己着火に至る筒内ガス温度を低下させていくと，着火性や未燃排出ガスの悪化を伴う。これらの問題に対して，吸入ガスへのオゾン添加が有効であることが他の研究で報告されている。しかし，これらの中には，自己着火温度の低下量や排気改善の要因分析を明示したものが見受けられない。そこで，排気性能及び，自己着火温度に対するオゾンの効果を単気筒エンジンで確認し，更に排気改善要因を化学反応速度理論に基づく化学反応計算（以下，詳細化学反応計算）を用いて明らかにした。

Summary

Gasoline HCCI engine is a well-known approach to realize low-temperature combustion so as to reduce cooling loss. This study aims at lowering auto-ignition temperature to further decrease the combustion temperature. The low-temperature combustion generally causes deterioration in ignitability and unburned exhaust emissions. To break through these issues, other studies reported that ozone added to intake air is effective on ignitability and exhaust emissions. However, there are no studies which clarify the auto-ignition temperature and the reason of exhaust emissions reduction. In this study, auto-ignition temperature and emissions reduction were confirmed under low-temperature condition with use of a single cylinder engine. And the mechanism of exhaust emissions reduction was also clarified with a chemical kinetics model.

1. はじめに

地球温暖化，エネルギー資源問題に対応するため，内燃機関の高効率化が強く求められている。この要求に応えつつ，低公害を実現する手法として，ガソリン HCCI に代表される低温燃焼技術が知られている。筆者らは更なる低温燃焼が実現できれば，冷却損失低減により図示効率が大幅改善する可能性を示している(1)。ガソリン HCCI は希薄燃焼限界が高いため，数 ppm 以下まで NOx 排出を抑制したうえで，比熱比向上による熱効率向上が可能であるが，自己着火開始前の筒内ガス温度が低い条件では，着火性や未燃排出ガスの悪化を伴う。この対策として，吸入ガスにオゾン（以下，O_3）添加することで，低吸気温でも着火性，排気性能が改善するという研究が行われている(2)(3)(4)。しかし，これらの研究には，吸気管内温度の低下量や排気改善結果が示されているものの，自己着火温度そのものの低下量や排気改善要因分析を明示したものが見受けられない。そこで，本稿では，O_3 添加時の自己着火温度及び排気性能を単気筒エンジンで評価するとともに，排気改善要因の検討を詳細化学反応計算にて行った。

2. 実験装置及び温度解析

2.1 実験装置

評価に用いた単気筒エンジンの装置概略を Fig. 1 に，基本諸元を Table 1 に示す。Fig. 1 中 A に示す燃料気

*1～3　技術研究所
Technical Research Center

化装置を空気流量計の下流に配置し，燃料気化装置内の多孔質焼結金属フィルタに燃料を噴射することで，気化を促進させている。また，Fig. 1 中 B に示す O_3 発生器で生成した O_3 を燃料気化装置内で空気，燃料と混合させてエンジン筒内へ導入した。更に，燃料気化装置とエンジン本体の間に配置したサージタンク内から，混合気をサンプリングし，O_3 濃度を測定している。O_3 生成には，沿面放電法，紫外線法，パルスパワー技術の応用等さまざまな手法[5][6]があるが，今回は，石英ガラス 2 重管の間隙に無声放電を発生させ，その間隙へ原料ガスを流すことで O_3 を生成させる無声放電法を使用した。また，レギュレータで 100kPa（相対圧）に減圧した圧縮空気ボンベからの空気を原料ガスとした。また，O_3 濃度は，原料ガスの流量及び，O_3 発生器の出力で 20～80ppm に調整した。このときの原料ガス流量は 0.02～0.08g/s の範囲である。O_3 発生器，O_3 濃度計は，それぞれエコデザイン社製 ED-OG-S3，オキトロテック社製 OZM-5000G2 を使用した。

Table 1　Engine Specifications

Engine type	4-Stroke single cylinder
Displacement volume	392 cm^3
Bore × Stroke	76×86.4 mm
Compression ratio	18.0 : 1
Intake valve open-close timing	3deg.BTDC - 30deg.ABDC
Exhaust valve opne-close timing	40deg.BBDC - 8deg.ATDC
Fuel system	Mixer
Fuel	Gasolione (91RON)

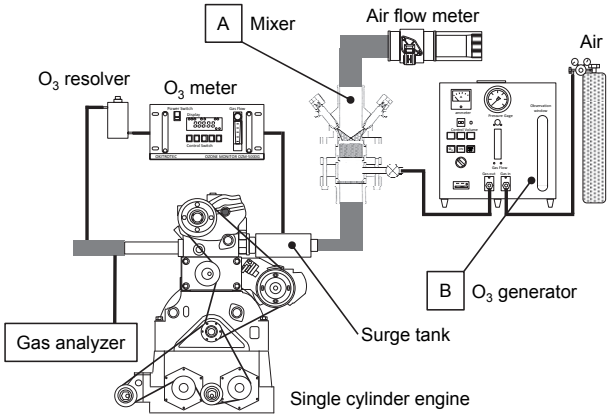


Fig. 1　Experimental Setup

2.2　筒内ガス温度解析

自己着火温度を求めるためには，筒内ガス温度を高精度に求めることが重要である。また，排気改善要因分析にも，未燃ガスが高温による酸化を伴うことから，筒内ガス温度を高精度に求めることが重要である。筒内ガス温度を直接計測する手法は存在するものの，容易かつ高精度に計測できる手法は少ない。そこで，本研究では，比較的容易に計測可能な筒内圧力計測，吸気流量計測，燃料流量測定の結果から高精度に筒内温度を算出できる手法を検討した。その算出手法を以下に示す。

理想気体状態方程式は，筒内圧力 P（絶対圧），筒内容積 V，筒内混合気質量 m，気体定数 R，筒内ガス温度 T とすると式(1)となる。

$$PV = mRT \tag{1}$$

式(1)における筒内圧力 P は，筒内圧力計測にて測定でき，また，筒内容積 V は，エンジン諸元より幾何学的に求めることができる。なお，本稿において計測した筒内圧力 P は，300 サイクルの平均圧力を用いた。次に、筒内混合気質量 m は，吸入ガス質量 m_{air}（O_3 を含む），投入燃料質量 m_{fuel}，残留ガス質量 m_{res} とすると式(2)で表すことができる。

$$m = m_{air} + m_{fuel} + m_{res} \tag{2}$$

このため，筒内混合気質量 m の定量化には，残留ガス質量 m_{res} まで計測する必要があるが，吸気系への残留ガス流出入，排気系への吸入新気の吹き抜け等があり，その測定は極めて困難である。そのため，従来の筒内圧力を使った温度計算では，残留ガス質量 m_{res} を上死点体積等から仮定するか，吸気弁閉時の温度 T_0 を仮定するなどして決定していた。今回，この残留ガス質量 m_{res} を圧力計測結果から算出した値と吸気流量測定結果から算出した値の整合性から真値を算出することで精度向上を図っている。以下に，その算出方法を示す。

吸気流量と燃料流量の和，すなわち，筒内への流入質量を M_{Intake} とすると，M_{Intake} と，微小クランク角 dθ 間に吸気管から流入する吸入気体の時間微分値 dm_{in} は，吸気開弁時期 IO から吸気開弁時期 IC の期間において式(3)の関係にある。

$$M_{Intake} = \int_{IO}^{IC} dm_{in} d\theta \tag{3}$$

ここで，時間微分値 dm_{in} は測定した筒内圧力 P と吸気管圧力 P_{in} の差圧，バルブとヘッド間の開口面積 A，バルブ及び吸気ポート形状に依存する流入係数 C_{cfin} などで計算することができる。すなわち，式(3)の右辺は C_{cfin} を除くと，圧力測定結果から算出可能であり，左辺は，吸気流量測定，燃料流量測定の結果から求めることができる。一方，吸気側から流入するエンタルピー H_{in} は，筒内への流入質量 M_{Intake}，吸入気体の定圧比熱 C_p，筒内流入前の吸気弁近傍混合気温度 T_{in} を用いて，式(4)，式(5)で表すことができる。

$$H_{in} = \int_{IO}^{IC} dH_{in} d\theta \tag{4}$$

$$H_{in} = M_{Intake} \cdot C_P \cdot T_{in} \tag{5}$$

ここで，式(4)中の dH_{in} は，比熱比 κ を用いて，式(6)で表すことができる。

$$dH_{in} = \frac{1}{\kappa - 1} \cdot VdP + \frac{\kappa}{\kappa - 1} \cdot PdV \qquad (6)$$

式(5)，(6)の定圧比熱 C_p，比熱比 κ は，吸入ガスの成分より算出できるため，式(6)は圧力計測結果から求まり，式(4)も求まる。更に，式(5)の右辺は T_{in} を除くと吸気流量測定結果から求めることができる。同様に，筒内から排気ポートを通じて排気される質量を $M_{Exhaust}$ とすると，以下のようになる。

$$M_{Exhaust} = \int_{EO}^{EC} dm_{ex} d\theta \qquad (7)$$

$$H_{ex} = \int_{EO}^{EC} dH_{ex} d\theta \qquad (8)$$

$$H_{ex} = M_{Exhaust} \cdot C_P \cdot T_{ex} \qquad (9)$$

ここで，排気される質量 $M_{exhaust}$ は，燃焼過程でピストンリングからの漏れがないと仮定すると，m_{air} と m_{fuel} の和であり，式(7)の左辺及び，式(9)の右辺は，吸気流量計測から求めることができる。また，式(7)の右辺及び，式(8)の右辺は，圧力測定結果から求めることができる。従い，式(1)～(9)で特定できない変数は，残留ガス質量 m_{res}，吸気流入係数 C_{cfin}，排気流入係数 C_{cfex}，吸気温度 T_{in}，排気温度 T_{ex} である。一方，今回計測した筒内圧力は，相対圧として計測しており，絶対圧補正が必要である。通常は，吸気管圧力の絶対圧計測値で補正するが，吸気行程時の筒内圧力 P の値は，吸気脈動等で変動することが多く，精度の確保が困難である。そこで，前述の未特定変数と同様に絶対圧補正値 $P_{correct}$ を未特定変数として扱い，その特定のために，新たに誤差変数 er を式(3)，(4)，(5)，(7)，(8)，(9)を用いて，以下に示す式(10)で定義した。

$$er_0 = \frac{\int_{IO}^{IC} dm_{in} d\theta - M_{Intake}}{M_{Intake}},$$

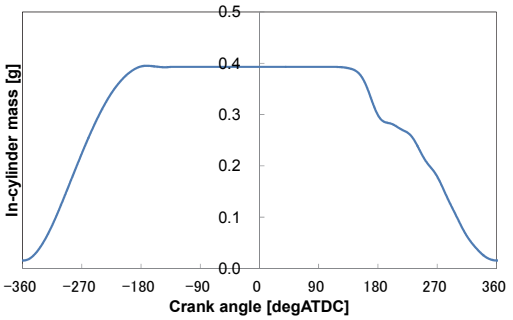
$$er_1 = \frac{\int_{EO}^{EC} dm_{ex} d\theta - M_{Exhaust}}{M_{Exhaust}},$$

$$er_2 = \frac{\int_{IO}^{IC} dH_{in} d\theta - M_{Intake} \cdot C_p \cdot T_{in}}{M_{Intake} \cdot C_p \cdot T_{in}},$$

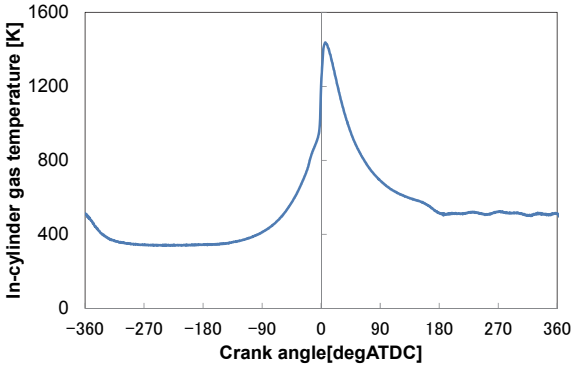
$$er_3 = \frac{\int_{EO}^{EC} dH_{ex} d\theta - M_{Exhaust} \cdot C_p \cdot T_{ex}}{M_{Exhaust} \cdot C_p \cdot T_{ex}},$$

$$E = \sum_{i=0}^{3} er_i^2 \qquad (10)$$

この誤差変数 er の二乗和 E が 0 となるように非線形最小二乗法を用いた繰り返し計算を行えば，前述の未特定変数を求めることができる。これにより，残留ガス質量 m_{res} の真値を特定し，筒内質量 m と筒内ガス温度 T の算出を行った。その結果を一例として Fig. 2 に示す。



(a) In-cylinder mass results



(b) In-cylinder temperature results

Fig. 2　Calculation Results of In-Cylinder Mass and Temperature

3. 実験結果と考察

3.1　O_3 添加時の低温燃焼特性と排気性能

本稿では，筒内ガス温度を低下させる方法として，冷却水温度（以下，Tw），潤滑油温度（以下，Toil）を低下させる手段をとった。筒内ガス温度を低下させた場合，通常，着火性や排気性能の悪化を伴うため，着火開始前筒内ガス温度と O_3 添加濃度をパラメータとし，THC（Total hydrocarbon），一酸化炭素（以下，CO）の排出特性を調査した。O_3 濃度は 80ppm とし，Tw，Toil は，それぞれ，Tw/Toil =353/353K，333/333K，313/313K，303/303K とした。また，エンジン回転速度 1000rpm，吸気管圧力（絶対圧）101kPa，吸気管温度（Fig. 1 サージタンク内温度）308K は，固定とした。なお，失火限界は，300 サイクル無失火，最大圧力上昇率 $dP/d\theta_{max}$ 限界は，2.0MPa/deg 以下とした。排気特性結果を Fig. 3，4 に示す。O_3 濃度 80ppm 添加時は Tw/Toil = 303/303K まで低温化しても，Tw/Toil = 353/353K の O_3 添加なしに対

し，THC が約 10%～25%，CO が 2%～12%改善している。特に，希薄側でその効果が大きいことが分かる。

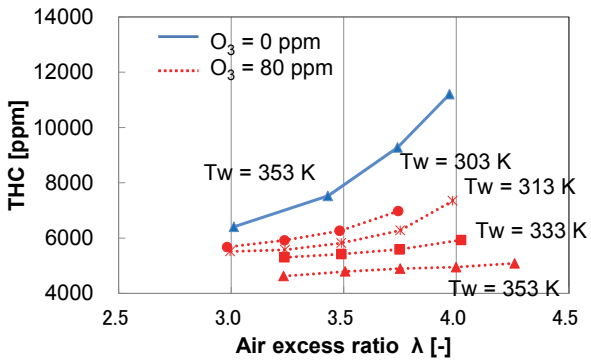


Fig. 3　THC at the Low Temperature Atmosphere

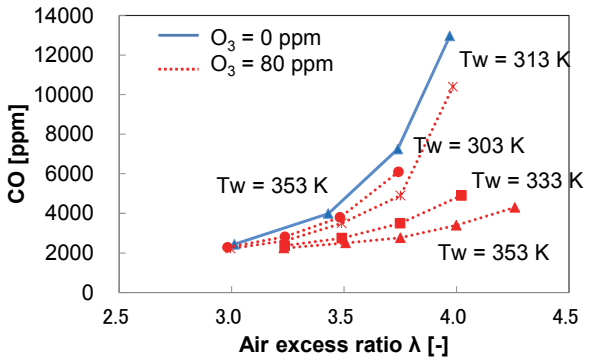


Fig. 4　CO at the Low Temperature Atmosphere

次に，自己着火温度の低下量を確認するため，この実験結果を自己着火時の筒内ガス温度で整理した。なお，着火時期は，質量燃焼割合 3%で定義している。結果を Fig. 5 に示す。これにより，O_3 濃度 80ppm 添加することで 100K 低温でも着火可能であることが分かった。

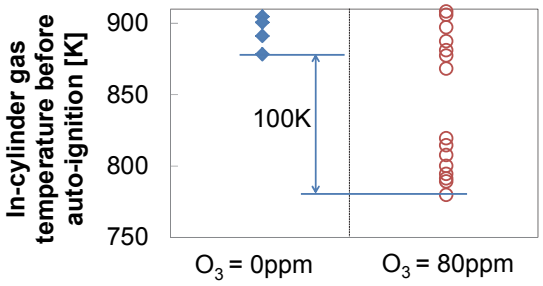


Fig. 5　Effect of O_3 on In-Cylinder Gas Temperature before Auto-Ignition

一般に CO は 1400-1500K，THC は 800-900K 以上で酸化が促進されるため，これらの温度以上に燃焼温度が上昇すれば，未燃損失が低減する。前述の O_3 による排気改善のうち燃焼温度の影響を把握するため，Fig. 3，4 の結果を燃焼最大温度（以下，T_{max}）で整理した。結果を Fig. 6，7 に示す。CO は，O_3 添加の有無にかかわらず，T_{max} のみに依存した排出濃度である。一方，THC は，T_{max} と O_3 添加の有無，両方に依存した排出濃度となっており，特に低温側（1200K 付近）では，THC 排出濃度に O_3 添加の有無の差が認められ，約 20%の THC 改善効果が認められる。これらの結果から，CO 排出濃度が改善した理由は，O_3 による CO 酸化ではなく，O_3 添加による燃焼の活性化，すなわち，燃焼温度上昇によるものであると考えられ，THC は，燃焼温度以外の O_3 がもたらす別の効果も寄与していると考えられる。

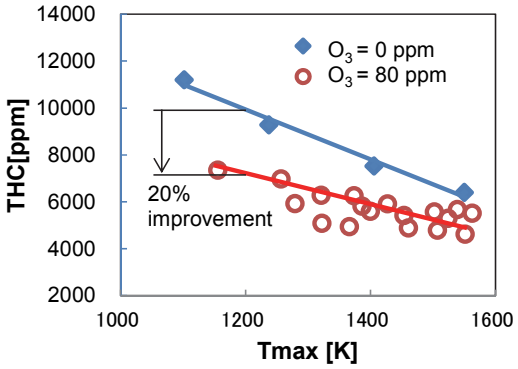


Fig. 6　Effect of O_3 on THC

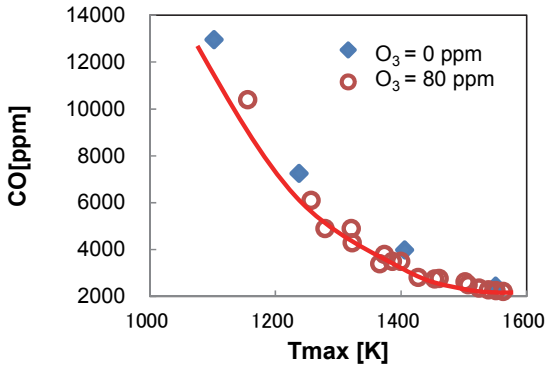


Fig. 7　Effect of O_3 on CO

次節に述べる詳細化学反応計算で THC の改善理由の検討を行った。

3.2　詳細化学反応計算による検討

今回用いた詳細化学反応解析ソフトは，CHEMKIN-MFC（Model Fuel Consortium[7]）を使用し，反応スキームは，化学種数 2207，反応数 10289 に Mohammadi ら[3]の O_3 反応スキームを加えたものを用いた。まず，排気性能の温度に対する影響を O_3 濃度ごとに調査した。計算条件は，等温，等圧，標準燃料（以下，PRF90）とし，燃焼後の THC，CO 排出濃度を算出した。燃焼温度は，1100K～1500K を 100K ごとに変化させた。なお，燃焼圧力は，実機の最大燃焼圧力を全運転条件で平均した 6.4MPa とした。結果を Fig. 8，9 に示す。Fig. 8，9 の縦軸は，O_3 添加なしからの CO，THC 濃度の削減割合を示している。なお，THC 濃度は，酸素原子を含まない炭素原子（以下，C）と水素原子（以下，H）のみで構成さ

れる分子の総数から算出している。この結果から 3.1 で述べたように，CO に対する O_3 の感度がほとんどなく，THC に対しては低温側において感度があることが分かる。

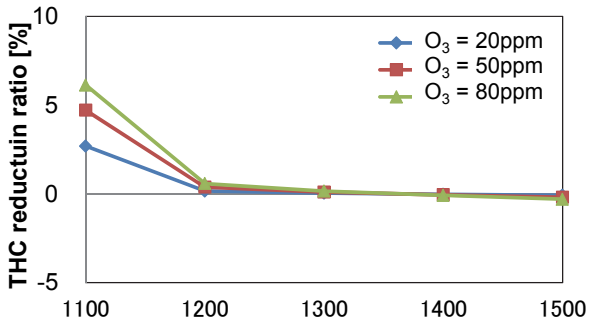


Fig. 8　THC Reduction Ratio with O_3 Addition

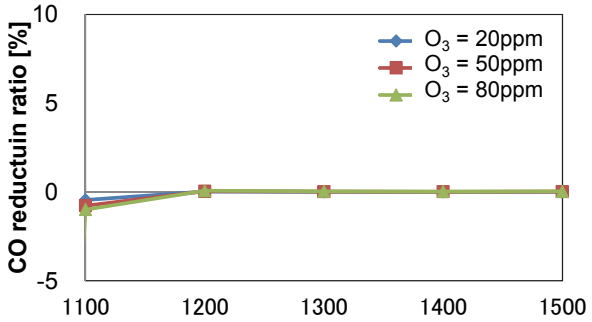


Fig. 9　CO Reduction Ratio with O_3 Addition

THC は，計算結果では 1200K 以下でしか改善していないが，Fig. 6 で示したように実機では高温側でも改善が認められている。この違いは，等温，等圧計算で考慮できていない筒内ガス温度，圧力の時間履歴が影響していると推測される。そこで，CHEMKIN の 0 次元エンジンモデルを使用した計算を行った。燃料は，PRF90 であり，それ以外のエンジン諸元は，Table 1 と同じである。計算条件は，O_3 濃度 0ppm，20ppm，50ppm，80ppm，初期圧力 101kPa とした。また，着火時期が O_3 添加の有無で同一になるように圧縮開始温度を調整している。THC 濃度の計算結果を Fig. 10 に示す。この結果から，O_3 濃度が増加すると THC 濃度が減少することが認められ，O_3 濃度に対する感度があることが分かる。また，0ppm と 20ppm を比較すると，添加した O_3 濃度以上の THC 濃度減少が認められる。

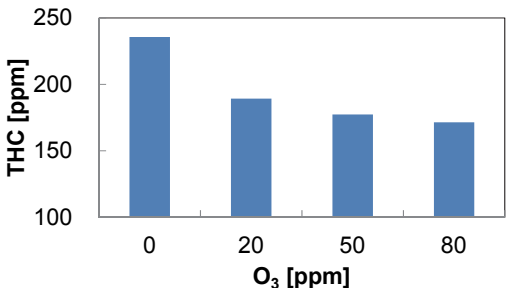


Fig. 10　O_3 Effect Calculated by CHEMKIN

このことから，添加した O_3 濃度分だけ THC 濃度が減少するのではなく，何らかの連鎖分岐反応が起こっていることが推測される。この THC 濃度低減メカニズムを詳細に調べるため，このエンジンモデル計算結果のクランク角に対する THC 濃度履歴を調査した。THC は，等圧計算を行った際と同様に，酸素原子を含まない C と H で構成された分子の総数から算出している。結果を Fig. 11 に示す。O_3 濃度 80ppm は，O_3 添加なしに対し，Fig. 11 の区間 A と区間 B の 2 回の THC 減少が認められる。

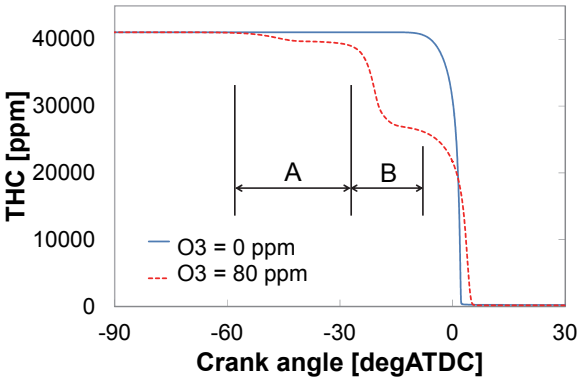


Fig. 11　O_3 Effect on THC History

これらの減少は，500K 以上で式(11)に示す O_3 が O_2 と O に熱分解されたことに起因している。以下，それについて説明する。

熱分解により発生した O は，式(12)のようにアルカン（以下，RH）と結びつき，OH を生成する。生成された OH は，式(13)のように別の RH と結びつき，H を引き抜き，R を生成する。更に R は，式(14)に示すように O_2 と反応することで，RO_2 を生成する。

$$O_3 \rightarrow O_2 + O \quad (\geqq 500\mathrm{K}) \tag{11}$$

$$RH + O \rightarrow R + OH \tag{12}$$

$$RH + OH \rightarrow R + H_2O \tag{13}$$

$$R + O_2 \Leftrightarrow RO_2 \tag{14}$$

式(14)は，平衡状態を表し，生成された R の半数が RO_2 になることを示す。このため，RO_2 濃度は，式(14)左辺の R と O_2 の濃度で決まる。例えば，R が他の反応で多く生成されると，RO_2 も多く生成されることになる。O_3 添加ありの場合，式(11)～(13)の反応により，R の濃度増加が低温（500K 程度）で発生する。それに伴い RO_2 濃度増加が起こる。これに対し，O_3 添加なしの場合，雰囲気温度が 850K 程度に達しないと R が生成されないため，850K 以下では，式(14)の反応が起こらない。RO_2 生成後は，分子内水素引き抜き反応の式(15)，OH 生成を伴う反応の式(16)(18)，酸素付加反応の式(17)など，式(15)～(18)に示す低温酸化反応が活性化する。

$$RO_2 \rightarrow QOOH \quad (15)$$

$$QOOH \rightarrow QO + OH \quad (16)$$

$$QOOH + O_2 \rightarrow O_2QOOH \quad (17)$$

$$O_2QOOH \rightarrow R'O + 2OH \quad (18)$$

O_3 起因の OH は，O_3 添加量が微少であるため，式(13)による反応で，生成後，即時全量消費される。しかし，式(14)の左辺から右辺への反応と式(15)～(18)の反応が進行することで，OH 濃度が高まり，区間 B へと移行する。区間 B の反応は，一般的な自己着火と同様に，H_2O_2 自己ループが起こり，大量の OH 生成と OH 消費が繰り返される。その後，区間 B 以降の高温酸化反応に至る。

前述のように，O_3 添加時の固有反応は，式(11)～(13)であり，それによる効果は，低温酸化反応前の 500K という比較的低温で，微少量ながら RO_2 発生のトリガとなったことである。これにより，低温酸化開始時期を早期化し，反応自体を活性化させ，区間 A，B の 2 回の THC 減少を引き起こしたと考えられる。

O_3 添加の研究以外に，OH 添加の研究が他研究機関[8]で行われている。これによると，低温酸化反応前に OH が添加されると反応が促進され，着火遅れが短縮されるとされている。O_3 の熱分解は 500K であるため，低温酸化反応前に式(12)で示したように OH を生成させている。このため，前述の研究が示した低温酸化反応前の OH 添加と同じ効果が O_3 添加にはあると考えられる。

一方，O_3 添加なしの場合，O_3 添加のような低温酸化反応の活性化がほとんど認められず，クランク角-10°以降の筒内ガス温度上昇による反応でしか THC が減少しない。

以上のことから，O_3 添加による高温酸化反応前（区間 A，B）の THC 減少により，燃焼後の THC 低減が起こったと考えられる。

4. 結論

O_3 添加がガソリン HCCI 燃焼に与える影響について，以下の 1～5 を明らかにした。

1. O_3 添加することで，ガソリン自己着火に至る筒内ガス温度が低下できる。
2. O_3 添加することで，CO，THC 排出濃度の改善効果が認められ，THC においては，最大燃焼温度 T_{max} が低温となる領域でその効果が顕著に現れる。
3. CO 排出濃度は，O_3 濃度に依存せず，T_{max} にのみ依存し，THC 排出濃度は，O_3 濃度と T_{max} 両方に依存する。
4. CO 改善要因は，O_3 添加による燃焼活性化がもたらした筒内ガス温度上昇によるもので，O_3 が酸化剤となった酸化効果が直接的要因ではない。
5. THC 改善要因は，500K 以上での O_3 熱分解がもたらした低温酸化反応の活性化によるものである。

参考文献

(1) Hiroyuki Yamashita, Hidefumi Fujimoto, Masahiko Fujimoto, Tatsuya Tanaka and Hiroyuki Yamamoto : "Thermal Efficiency Improvement by Increasing Compression Ratio and Reducing Cooling Loss", COMODIA 2012，July 23-26, 2012

(2) 白石，漆原：“2 バリア放電を応用した低温プラズマ添加の点火特性に関する基礎研究”，自動車技術会学術講演会前刷集　No.90-09 20095786

(3) Ali Mohammadi, Hiroshi Kawanabe, Takuji, Ishiyama, Masahiro Shioji : "Study on Combustion Control in Natural-Gas PCCI Engines with Ozone Addition into Intakes Gas", *SAE TECHNICAL PAPER SERIES*,2006-01-0419

(4) Taisuke Shiraishi : "A Study on the Effect and Mechanism of Plasma Assisted Gasoline HCCI Combustion by Low Temperature Plasma", COMODIA 2012，July 23-26, 2012

(5) 山部：オゾン生成，“プラズマ・核融合学会誌”，第 74 巻 2 号 1998 年 2 月 pp.134-139

(6) 勝木，高木，浪平：“パルスパワー技術の応用”，J.Plasma Fusion Res. Vol87，No.4，pp.268-275（2011）

(7) http://www.reactiondesign.com/

(8) 安東，酒井，深野，周，桑原：“プラズマサポートによる着火遅れ短縮の可能性”，自動車技術会学術講演会前刷集　No.134-10 20105604

■著　者■


髙橋 巧朋


清末 涼


山下 洋幸

論文・解説

29

歩行者頭部保護性能の市場事故時傷害低減効果の研究

A Study on Effect of Pedestrian Head Protection Performances on Pedestrian Injuries

河口　健二*1　石橋　篤*2　尾川　茂*3
Kenji Kawaguchi　Atsushi Ishibashi　Shigeru Ogawa

要約

歩行者事故時の傷害低減のために，ボンネット等に衝突した時により大きなエネルギー吸収ができる車体構造を，自動車メーカ各社は開発，商品化してきている。衝撃エネルギーを吸収して傷害を低減するためのこの安全性能は，日本ではJNCAP（Japan New Car Assessment Program）にて，その他各国NCAP（New Car Assessment Program）にて評価されている。本稿では，その歩行者頭部保護性能が歩行者事故時の傷害発生率低減に貢献していることを，日本市場事故全体を見たマクロ的な視点で定量的に分析し明らかにした。また，マツダの事故分析手法，活用方法についても紹介する。

Summary

Body structures that could absorb more impact energy from a pedestrian have been developed to mitigate the degree of injuries in the real-world pedestrian accidents. The energy absorption capability is evaluated by various NCAP systems around the world, such as JNCAP in Japan. In this paper, it was statistically clarified by statistical accident data analyses that a better pedestrian head protection performance could contribute to reducing the rate of pedestrian injuries, fatal injuries in particular. In addition, the techniques Mazda has utilized to analyze accident data and make effective use of analyzed results were outlined.

1. はじめに

近年，日本における交通事故死者は低下傾向にあり，平成24年には4,411名となっている。しかし，その中での歩行者比率は2002年の28.8%から，2012年には37.0%へと増加し，その絶対数は1,634人である(1)。米国では2010年の交通事故死者32,885人のうち，歩行者比率は13%だが，絶対数では4,280人である(2)。中国では2011年の交通事故死者62,387人のうち，16%の9,891人が歩行者となっている(3)。

これらの歩行者の事故を低減するためには，人，環境，クルマの継続的改善が必要である。人の面からは，歩行者の反射材利用促進，運転者の脇見防止啓発など，環境面からは，道路照明の設置，歩車分離信号の設置など，さまざまな歩行者事故削減の施策が実施されつつある。クルマとしても，前方視界の改善，夜間に遠くの歩行者まで見えるようにライティングの改善などに取り組んでいる。

そのようなさまざまな努力により，歩行者事故は減少してきているが，それでもなお，歩行者事故は多く発生している。そのため，万一歩行者事故が発生し，歩行者の身体が車体に衝突しても，できるだけ，その衝撃エネルギーを吸収し，傷害を低減するようなクルマの開発も行ってきている。その開発を行うに当たり，各国の歩行者事故の特徴について国際比較の研究(4)(5)を行うとともに，歩行者保護性能の効果を検証する研究も試みられている(6)(7)(8)。ここでは，日本の市場事故分析を行い，歩行者頭部保護性能が，市場の歩行者事故時の傷害低減に効果を発揮していることを明らかにしたので報告する。また，事故分析手法，活用方法についても合わせて論じる。

2. 歩行者頭部保護性能

自動車事故対策機構（NASVA）において，自動車アセスメント（JNCAP），すなわち，新型車の安全性能評価が実施されており，その評価項目の一つとして

*1 衝突性能開発部
Crash Safety Development Dept.
*2（株）マツダE&T
Mazda Engineering & Technology Co.,LTD.
*3 国立高等専門学校機構 呉工業高等専門学校
Kure National College of Technology

2003 年度から歩行者頭部保護性能試験[9]が導入されている。2011 年度からは歩行者脚部保護性能試験も開始されているが，評価された車種が少なく十分な事故分析ができないので，ここでは頭部保護性能の分析に焦点を絞った。

歩行者頭部保護性能試験は，自動車が時速 44km/h で歩行者に当たって，歩行者頭部がボンネット，カウルグリル，A ピラー，フロントウインドウなどに衝突することを想定している。大人および子供の頭部を模擬したインパクタを該当車体部位に時速 35km/h の速度で発射し，その頭部インパクタが受ける衝撃の測定結果から頭部傷害値を評価するものである。頭部に重大な傷害を受ける確率（AIS*が 4 以上）が約 50%（HIC**1436）の得点 1.67 を基礎点とし，その確率が約 10%（HIC876）の得点 3.33 以上満点 4 点までをレベル 5 として，その間を 4 等分した 5 段階で評価されている[9]。今回の分析では，この得点を性能値として用いた。

歩行者頭部保護性能の JNCAP スコアのトレンドを Fig. 1 に示す。横軸はテスト実施年度である。全体的に，スコアが上昇していることがわかる。

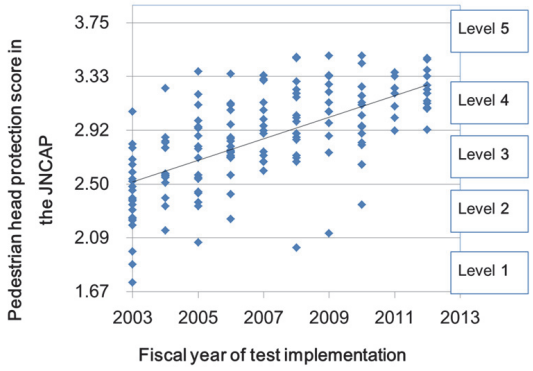


Fig. 1　Trend of Pedestrian Head Protection Score in the JNCAP

3. 歩行者事故データ

3.1　事故データ

(1) 日本

日本においては，警察に届けられた人身事故全ての情報が各都道府県の道府県警，警視庁から警察庁に集められる。その後，交通事故総合分析センター（ITARDA : Institute for Traffic Accident Research and Data Analysis）で，国土交通省管轄の車両型式等の車両情報と付き合わせてデータベース化される。日本のマクロ事故データは，人身事故が全て網羅されていること，車両型式とのリンクが取れていること，分析可能な項目数が多いことなどのアドバンテージがあり，統計的に分析できるマクロ事故データとしては世界トップレベルの充実度といえる。これまでもさまざまな視点でのマクロ事故分析を行ってきている[11][12][13]。本稿では，このデータを用いて分析を行った。

日本のミクロデータとしては ITARDA がつくば市周辺で調査した事故データがあるがサンプリングされたもので，1 件ごとの事故の詳細を分析できるが，今回のような統計的な分析にはデータ数が不十分である。

(2) 海外

米国の NASS-CDS，ドイツの GIDAS，中国の CIDAS などいくつかの国に存在，データ収集，分析が行われている。ただ，人身事故全数でなく，サンプリングされた一部の事故を詳細に調査したミクロ事故データとなっている[14]。もちろん，これらの事故データを基に事故の要因，傷害の状況，対策案の検討が行われているが，今回のような統計的分析はあまり活発に行われていない。

3.2　歩行者事故概観

事故は，さまざまな角度から分析可能であるが，ここでは，まず，自動車側の運転行動類型である直進，右折，左折という視点と歩行者の傷害程度である死亡，重傷，軽傷という視点での分析をした。対象は，2012 年の普通乗用車，軽乗用車と歩行者の事故である。

傷害程度別件数でみると直進，右折，左折のいずれも，軽傷の事故が最大，行動類型で見ると直進時が最大であるが，右折時も多くの事故が発生していることがわかる（Fig. 2）。右折している時間よりも直進中の時間の方がはるかに長いことをイメージすると，右折は歩行者事故のリスクが高いシーンであると推測される。右折時歩行者事故については A ピラー周りの視界の影響もあることがわかってきている[15]。

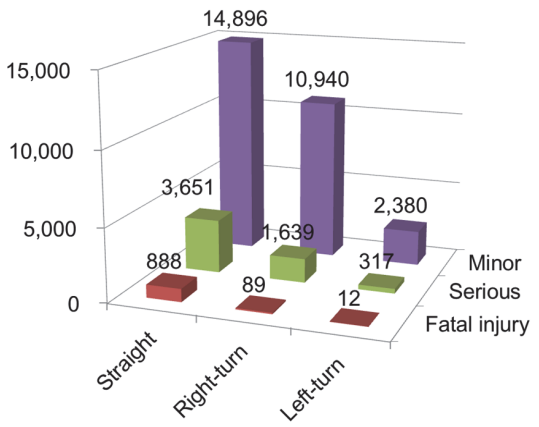


Fig. 2　Pedestrian Accident for Vehicle Maneuver and Degree of Injury

傷害程度別に直進，右折，左折の比率を見たグラフ

*　AIS : Abbreviated Injury Scale，簡易傷害スケール[10]
**　HIC : Head Injury Criteria，頭部傷害基準

が Fig. 3 であり，直進は，死亡事故の約 90%，重傷事故の約 65%となっている。右折は，重傷事故の 30%程度を占めている。

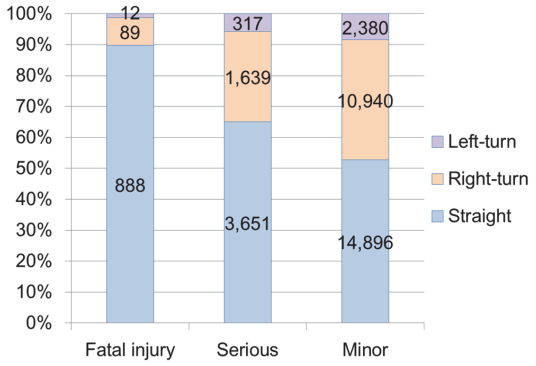


Fig. 3　Rates of Vehicle Maneuver for Each Degree of Injury of Pedestrian Accidents

4. 事故分析

4.1　保有台数と分析対象車種選定

歩行者事故を概観したので，次に歩行者頭部保護性能と事故時傷害の関係をみるために，車種ごとの事故データを分析する。単年でみると事故データ数が少なくなり，有意な分析が難しいので，2008 から 2011 年までの 4 年間の事故データを対象とした。

次に，事故傷害頻度の大小を指標化するために，分子は対象の歩行者事故死亡重傷者または死者数，分母には，その車種の 4 年間の延べ保有台数をとった。保有台数は，発売開始から 2011 年までの月別販売台数に減少率を加味して求めたものである。車の減少率は，Fig. 4 に示したカーブを用いている。これは，主要車種の実績を基にマツダで作成したもので，前半は 2 次曲線，後半はワイブル分布のハイブリッド曲線としている。

また，販売された年の保有台数に対しては，販売月が 1 月と早い場合と，12 月と遅い場合はその販売台数の保有台数に対する寄与が異なるので，例えば，1 月については係数として 11.5／12 を，12 月に対しては 0.5／12 となる月別係数をかけて，保有台数を計算している。

歩行者頭部保護性能の JNCAP スコアを持ち，かつ，4 年間の延べ保有台数が 30 万台以上の車種に絞ると 29 車種が選定された。保有台数の最小値は 334,000 台，最大値 2,318,000 台，平均 1 車種当たり，962,000 台である。

4.2　事故時傷害指標

事故時傷害発生頻度を表す指標として，いくつかが候補にあがる。衝突安全性能を評価する際には，死亡重傷率＝（死亡＋重傷）／（死亡＋重傷＋軽傷）　や致死率＝死亡／（死亡＋重傷＋軽傷）　を用いている例が多い。マツダにおいては，4.1 で説明した保有台数 1 万台当たりかつ 1 年当たりに何人が死亡，重傷，死傷事故に遭っているかという指標を主に用いている。例えば，4 年間の延べ保有台数が 100 万台の車種で，死亡重傷者が 150 人であると，150／100 万×1 万＝1.5 となる。

これらの指標について，まず，「死亡重傷率」と「保有台数 1 万台当たりの死亡重傷者数」について比較評価する。行動類型は，直進，右折，左折を合算している。

Fig. 5 は歩行者頭部保護性能スコア（PHPS）と「死亡重傷率」，Fig. 6 は「保有台数 1 万台当たりの死亡重傷者数」である。この二つのグラフを比較してみると，「死亡重傷率」で見るよりも「保有台数 1 万台当たりの死亡重傷者数」で見た方が JNCAP スコアとの相関関係が現れてくることがわかる。

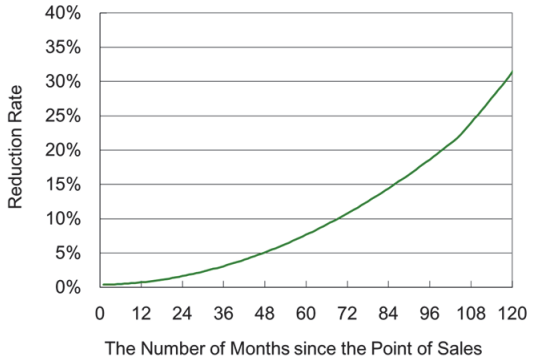


Fig. 4　Reduction Rate of Vehicle

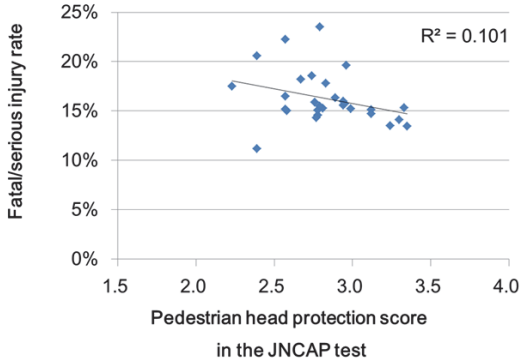


Fig. 5　Relationship between PHPS and Fatal/Serious Injury Rate for Pedestrian Accidents

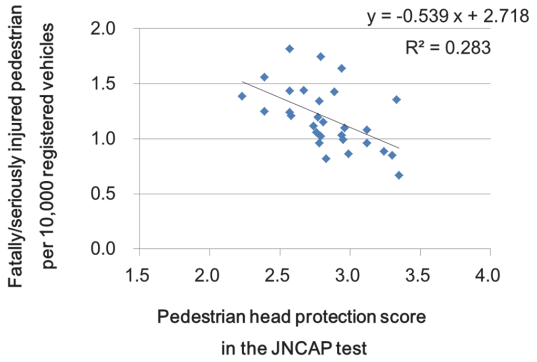


Fig. 6　Relationship between PHPS and the Number of Fatally/Seriously Injured Pedestrians per 10,000 Registered Vehicles

グラフ中の R^2 値は相関係数 R を二乗した決定係数である。R^2 が 0.283 の場合，相関係数 R は 0.53 である。普通，相関係数が 0.2 以下の場合はほとんど相関がないといわれる。また，これらの判定は標本数によっても異なるため，今回の標本数 n＝29 の場合の相関係数の t 検定を行うと，95%の確率で相関が有意となるのは，相関係数が 0.36，決定係数が 0.13 以上であり，Fig. 6 で示した相関は有意であることがわかる。ただ，決定係数等の数値のみでなく，グラフ内にデータがどのように分布しているかのイメージをとらえることも重要である。決定係数が約 0.28 ということから，歩行者の死亡事故に対して歩行者頭部保護性能が約 28%の影響を与えていると推測できる。1 件ごとの事故は，速度も，車体の衝突部位も，歩行者の年齢，性別，身長なども，千差万別であるにもかかわらず，それらの変動要因を全て含んだ分析で，「保有台数 1 万台当たりの死亡重傷者数」の指標を用いて総合的に見ると歩行者保護性能の影響を確認できたということである。

同様に，直進時死亡事故について Fig. 7 は「致死率」，Fig. 8 は「保有台数 1 万台当たりの死者数」を縦軸に採っている。ここでも，Fig. 7 の「致死率」では見られない JNCAP 歩行者頭部保護性能スコアとの関係が，Fig. 8 の「保有台数 1 万台当たりの死者数」では，有意に現れてきている。

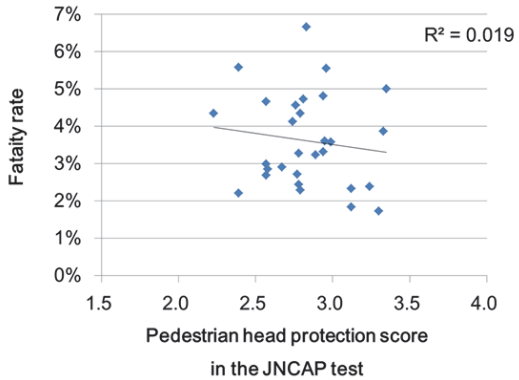


Fig. 7　Relationship between PHPS and Fatality Rate (Going-Straight)

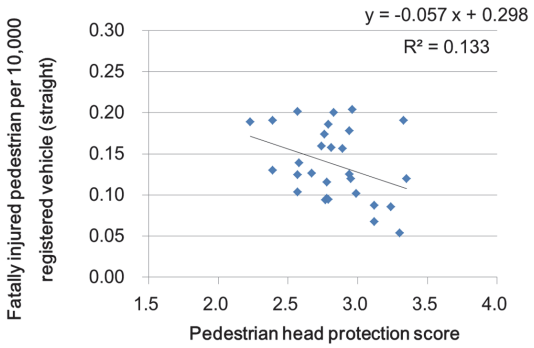


Fig. 8　Relationship between PHPS and the Number of Fatally Injured Pedestrians per 10,000 Registered Vehicles (Going-Straight)

事故時傷害発生頻度を表す指標として何を採用するかは，それほど議論されることはないが，上記に示したように，事故分析から知見を得られるかどうかに関わる重要な経験的ノウハウである。保有台数 1 万台当たりの指標を用いた研究論文には文献(11)(12)(13)がある。

ところで，車種によって，走行頻度が異なるという議論もあり，この暴露率を加味するために，事故責任の少ない側である第 2 当事者としての被追突事故数を暴露率として分母にとることもある。しかし，マツダにおけるこれまでの事故分析では，ブレーキランプの仕様によって追突されにくさが異なることや，車両重量によって追突事故時の傷害発生頻度が異なるという知見も得られており，この第 2 当事者としての被追突事故数は暴露率とはなりにくいと考えている。

ある車種の事故あるいは傷害の絶対数が多いか少ないかは，まず保有台数に依存することは間違いなく，マツダではこの保有台数 1 万台当たりを基本的な指標としている。走行頻度，運転者年齢，その他条件で絞り込むことは，次のステップであり，その分析により，よりはっきりした関係が得られる可能性があると考えている。

4.3　事故条件の絞り込み

上記の「死亡」「直進」の事故条件に加え，傷害を発生させた加害部位を絞り込んでいく。

歩行者事故における加害部位は，マクロ事故データでは，「車外部位（タイヤ）」，「車外部位（その他）」，「路面」，「その他」の 4 種類に分類されている。タイヤ以外の車外部位，つまり全車体についてより詳細な分類項目があると更なる詳細分析が可能となるので改善を期待したい。Fig. 9 は，行動類型別に加害部位の分布を見たものである。直進では，加害部位の約 75%が車体で，歩行者頭部保護性能を評価している領域が多いと推定される。右折，左折時の死亡は絶対数が少ないが，タイヤや路面が加害部位となって

いる比率が高いことがわかる。

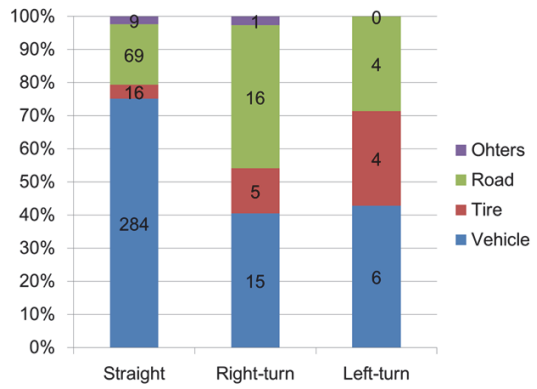


Fig. 9　The Number of Fatally Injured Pedestrian for each of Vehicle Maneuvers and Injuring Object

そこで次に，直進において，加害部位を JNCAP で評価対象である車体に絞った歩行者頭部保護性能と保有台数 1 万台当たりの死亡の関係性を見たグラフが Fig. 10 である。決定係数が Fig. 8 の 0.133 から 0.193 と上昇している。この決定係数の差は統計的に有意であるとまではいえないが，相関加害部位を車体に絞ることにより，歩行者頭部保護性能の影響がより強まった可能性はあると考えられる。

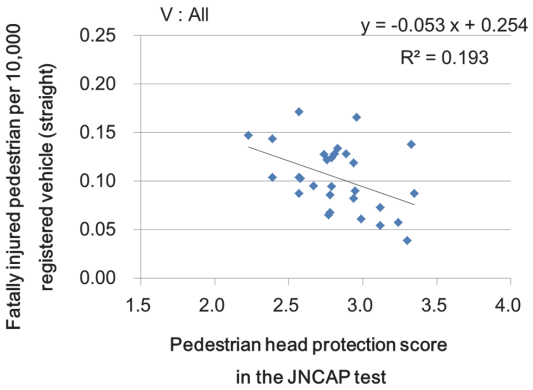


Fig. 10　Relationship between PHPS and the Number of Fatally Injured Pedestrian per 10,000 Registered Vehicles　(Going-Straight, in Case Where Human Body Collided with Vehicle Body)

次に速度についての検討を行う。Fig. 11 は危険認知速度と行動類型で分類した死者数を表している。直進が非常に多く，かつ，速度が高くなるほど死者数が多くなっていることがわかる。ここで，危険認知速度とは，運転者が衝突相手を認め，危険を認知した時点の速度である。

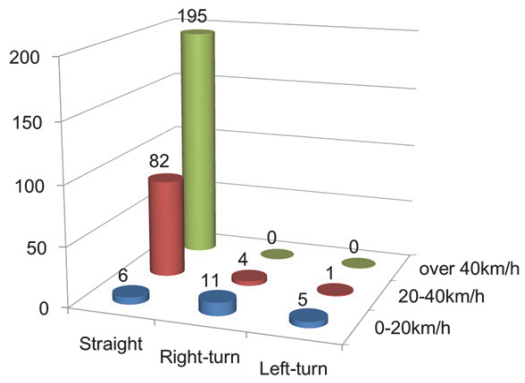


Fig. 11　The Number of Fatally Injured Pedestrian for Each of Vehicle Maneuvers and Danger-Cognitive Velocity

危険認知速度を 40km/h 以下と 40km/h 超に分けて「歩行者頭部保護性能スコア」と「保有台数 1 万台当たりの死者数」の関係を見たグラフが Fig. 12 と Fig. 13 である。

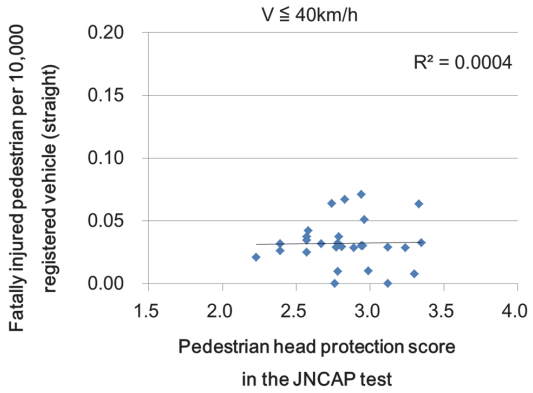


Fig. 12　Relationship between PHPS and the Number of Fatally Injured Pedestrian per 10,000 Registered Vehicles (Going-Straight, in Case Where Human Body Collided with Vehicle Body, under the Condition of Danger-Cognitive Velocity that is 40km/h or Less)

Fig. 13 の決定係数は 0.269 となり，Fig. 10 の 0.193 から相関が上昇している可能性がある。Fig. 10 と比較し，40km/h 以下の Fig. 12 では相関が見られないが，この理由としては，低速は衝撃エネルギーが小さく，性能の差が表れない領域となっていることが考えられる。

JNCAP の性能は，衝突速度が 0 から 44km/h までをカバーしており，それ以上の速度領域はカバーできていないと考えることがある。しかし，今回のように，危険認知速度 40km/h 以上の速度の事故を全て加味しても，その性能が良い方が歩行者の傷害が低いことが示され，現在評価されている歩行者頭部保護性能は，

高速域を含んで有用であることも確認できた。

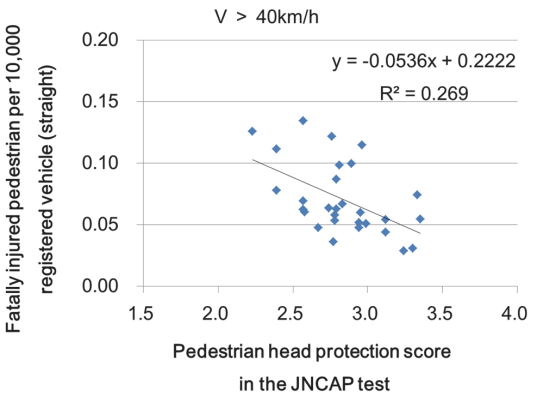


Fig. 13　Relationship between PHPS and the Number of Fatally Injured Pedestrian per 10,000 Registered Vehicles　(Going-Straight, in Case Where Human Body Collided with Vehicle Body, under the Condition of Danger-Cognitive Velocity that is over 40km/h)

5. 歩行者頭部保護性能の市場価値

歩行者頭部保護性能は，頭部を模擬したヘッドフォームを用い，衝突エネルギーの吸収の良否をみるものであるが，今回の分析では傷害部位を特に頭部に限定していない。それでも上記のような関係が見られたということは，実際の市場事故時には，衝突エネルギーの吸収良否は頭部に対してのみでなく，人体のその他の部位に対しても効果を発揮し傷害を発生しにくくしていると推定される。

実際の商品開発の際には，重量やコストの制約条件等難しい課題も解決させ，かつ，デザインとの両立も図り，高い安全性能を目指している。CX-5（Fig. 14）の JNCAP 歩行者頭部保護性能は 3.46 点と高得点を達成しており，万一の事故時に歩行者への加害性が低く抑えられていると推定できる。今後，市場での検証を行っていきたい。

Fig. 14　CX-5

6. 事故分析の活用方法

実際の市場では，衝突速度，衝突相手，乗員，歩行者の性別，年齢，体格のような条件は非常に広い幅を持つ。そのような幅広い条件を全て加味しても，事故や傷害を低減できる提案をすることが事故分析業務の目的の一つとなる。事故分析を含む安全開発プロセスは次のようになる。

(1) さまざまな視点で市場事故全体をマクロ的に分析し，注力すべき事故領域や事故シーンを絞り込んで特定する。

(2) その事故や傷害へ影響がある性能，指標を統計的に明らかにする。データマイニングの一種ともいえる。

(3) 事故や傷害発生のメカニズムをミクロ事故データや実験，CAE などを用いて解明し，対策を検討する。

(4) 再びマクロの視点から，その対策が市場全体に対してどのような効果をもたらすかを推定する。

(5) 技術開発，商品開発を行い，対策を商品に織り込む。

(6) 対策の効果を市場の事故データを分析して検証する。

このような地道な研究開発を行いながら，究極的に目指す姿は交通事故がゼロである。もちろん，そういった状況に近づけば，交通事故を統計的に分析することはできないが，我々の使命は事故分析をすることではなく，事故や事故時傷害を限りなくゼロに近づけることである。

7. まとめ

今回の事故分析では，直進時の死亡事故に着目し，歩行者頭部保護性能が歩行者事故時に傷害低減効果を発揮していることを統計的に明らかにすることができた。

また，マツダがこれまで培ってきた事故分析技術，その活用方法についてまとめた。

もちろん，最初に述べたように，歩行者事故低減のためには人，環境，クルマ等その他のさまざまな取り組みも必要である。マツダとしても自らクルマを改善し続けるとともに，警察や国土交通省，日本自動車工業会，あるいは世界中のさまざまな機関，自動車・部品メーカなどと協力しながら，世界の道路交通安全の向上に取り組んでいきたい。

参考文献

(1) 警察庁交通局：平成 24 年中の交通死亡事故の特徴及び道路交通法違反取締り状況について，p.9 (2013)

(2) NHTSA U.S. Department of Transportation: TRAFFIC SAFETY FACTS 2010, DOT HS 811659, (2013)
(3) The Ministry of Public Security of the People' Republic of China: Annual Statistical Report of Road Traffic Accidents in the P.R. of China
(4) Kawabe, Y., et al: Different Factors Influencing Post-crash Pedestrian Kinematics, SAE 2012-01-0271, (2012)
(5) Chen, H., et al: A comparative Study between China and IHRA for the Vehicle-Pedestrian Impact, SAE 2009-01-1205, (2009)
(6) Takeuchi, K., et al: Correlation between JNCAP Pedestrian Head Protection Performance Tests and Real-world Accidents, ESV 07-0203, (2007)
(7) Strandroth, J., et al: The Correlation between Pedestrian Injury Severity in Real-life Crashes and Euro NCAP Pedestrian Test Results, ESV 11-0188, (2011)
(8) Pastor, C.: Correlation between Pedestrian Injury Severity in Real-life Crashes and Euro NCAP Pedestrian Test results, ESV 13-0308, (2013)
(9) 自動車事故対策機構 NASVA：自動車アセスメント歩行者頭部保護性能試験の概要,
(10) http://www.nasva.go.jp/mamoru/assessment_car/head_protection_test.html
(11) 水野幸治：自動車の衝突安全, 名古屋大学出版会, p.5 (2012)
(12) Kawaguchi, K., et al: Accident Data Analysis for the Real-world Safety Enhancement, SAE 2003-01-0504, (2003)
(13) Kawaguchi, K., et al: Field Data Analysis in Japan for the Real-world Safety Enhancement, FISITA F2004V270, (2004)
(14) Kawaguchi, K., et al: Frontal Crash Data Analysis in Japan for the Real World Safety Enhancement, FISITA F2006M136, (2006)
(15) Kuehn, M., et al: Benefit Estimation of Advanced Driver Assistance Systems for Cars Derived from Real-life Accidents, ESV 09-0317, (2009)
(16) Ogawa, S., et al: Effect of Visibility and Pedestrian Protection Performance on Pedestrian Accidents, ESV13-0365, (2013)

■著　者■


河口 健二


石橋 篤


尾川 茂

論文・解説
30

新型荷重センサの衝突実験への適用
Application of New Load Sensor to Crash Test

伊東 紀明*1 Noriaki Ito
徳山 辰弥*2 Tatsuya Tokuyama
友重 丈二*3 Jouji Tomoshige
尾川 茂*4 Shigeru Ogawa
藤本 由紀夫*5 Yukio Fujimoto

要約

自動車の衝突性能開発を取り巻く環境は，年々厳しくなっている。我々はより高い安全性能を持った車をお客様に提供するために，CAE を活用して車両の各部分の目標特性を設定し，実際の実験でロードパスや特性の検証を行っている。本研究では，側面衝突試験時の荷重を計測できる圧電フィルムを応用した軽量なセンサを開発し,ロードパスや目標特性の検証，荷重分布による現象解析が可能となった。

Summary

The environment surrounding the crash safety development for automobiles is becoming tougher year after year. To provide higher safety performance for customers, Mazda sets target properties through CAE analyses for each part of a vehicle and verifies the properties through on-vehicle tests. In this study, Mazda developed a lightweight sensor by applying a piezoelectric film capable of measuring a load of collision during side impact testing and verification of target characteristics, load path, phenomenon due to the load distribution analysis has enabled.

1. はじめに

我々は，より高い安全性能を持った車をお客様に提供するために，CAE を活用した精度の高い車両各部位の目標特性を設定し，衝突試験で特性の検証を行っている。しかしながら，側面衝突試験においては，荷重センサの質量が重いため，可動バリアの質量要件を満足した状態で特性の検証を行うことができなかった。

本研究では，軽量なシート型変動荷重センサを開発し，側面衝突試験時の荷重を計測することで，ロードパスや目標特性の検証，荷重分布による現象解析が可能となったので報告する。

2. 側面衝突試験における荷重計測の課題

側面衝突の性能開発においては，可動バリアに取り付けられたアルミハニカムバリアから，車体の各部が受ける荷重のロードパスや目標特性の検証が重要である。このためには，Fig. 1 に示す側面衝突試験のテスト方法において，可動バリアに取り付けられたアルミハニカムバリアが受ける荷重を計測することが必要である。可動バリアは法規により質量や重心位置，慣性モーメントなどが規定されている。しかし，既製品のロードセルではその自重の影響で可動バリアの質量や重心位置が変わってしまい法規通りの試験を行うことができない。そこで本研究では側面衝突試験に，シート型変動荷重センサの適用を検討した。

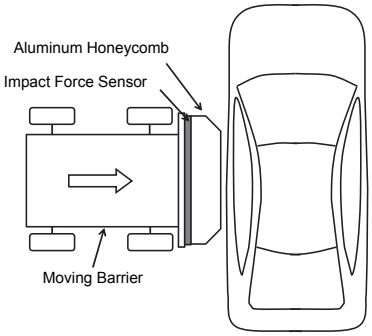


Fig. 1　Side Impact Test Method

*1～3　衝突性能開発部
Crash Safety Development Dept.
*4　国立高等専門学校機構　呉工業高等専門学校
Kure National College of Technology
*5　広島大学工学研究院　機械システム・応用力学部門
Hiroshima University.

3. シート型変動荷重センサ

3.1　荷重検出原理

シート型変動荷重センサの検出原理を Fig. 2 に示す[1]。荷重が入力されることにより両面に電極をつけた圧電フィルムの両面に張り付けられたゴムが，圧縮力により水平方向へ伸び，圧電フィルムの電極に電荷が発生する。

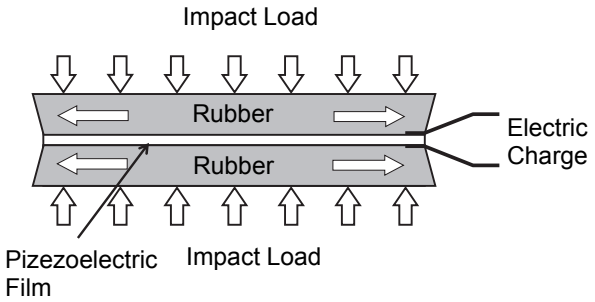


Fig. 2　Load Measurement Principle of Detection

3.2　荷重検出回路と周波数特性

圧電フィルムの出力信号を計測するために，Fig. 3 に示す回路で計測を行った。圧電フィルムは電流源 I と静電容量 C_1 で表すことができる。またセンサ出力が荷重と比例するようにするために静電容量 C_2 を並列接続した回路を通して入力インピーダンス R_0 の記録器に接続している。回路の出力応答と位相遅れ φ を式(1)，(2)に示す。式中の k は比例定数，W は荷重，ω は角周波数である。本研究では，回路の静電容量 C_2＝4.4μF，計測器の入力インピーダンス R_0＝100kΩ となっており，この回路における出力特性と位相遅れを Fig. 4 に示す。周波数が 10Hz 以上では出力が安定し，位相遅れもなく，10Hz 以上の現象を計測する衝突試験で適用可能であると考えられる。

$$|V_{out}|/kW = \frac{\omega R_0}{\sqrt{1+\{\omega R_0(C_1+C_2)\}^2}} \quad (1)$$

$$\phi = \tan^{-1}\{1/\omega R_0(C_1+C_2)\} \quad (2)$$

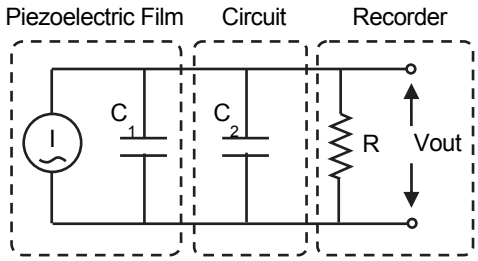


Fig. 3　Electric Circuit

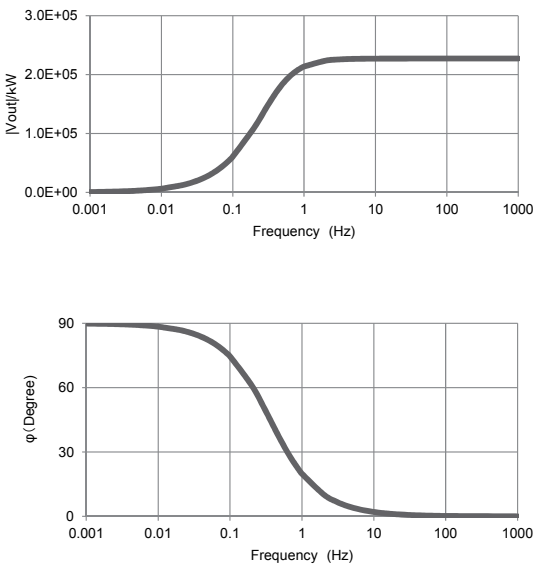
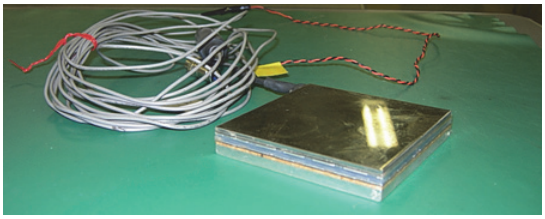


Fig. 4　Frequency Response of Electric Circuit

3.3　センサの仕様

開発したセンサを Fig. 5 に示す。側面衝突試験時のハニカムバリアが車体から受ける荷重計測に適用できるように，圧電フィルムをシリコンゴムとパンチングメタルで挟み，更に衝撃荷重に耐えられるようにジュラルミンで表面を被覆した。許容荷重は 50kN，質量は 500g と軽量である。



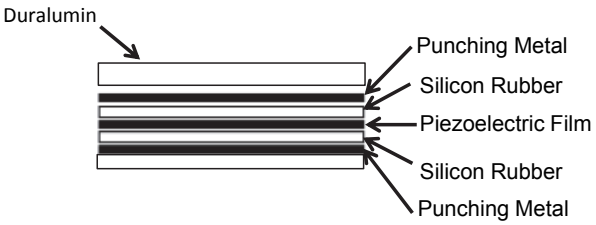


Fig. 5　Impact Force Sensor

4. 荷重センサの特性検証

4.1　単体テストによる特性検証

本荷重センサの単体特性を Fig. 6 に示す方法で検証した。このテストでは検証用のロードセルの上に荷重センサを重ねて置き，衝突テストで用いるハニカムバリアを介しインパクタを垂直落下させて荷重の計測を実施した。Fig. 7 に示すように，荷重センサはロードセルと同等に荷重が計測可能であることが確認できた。

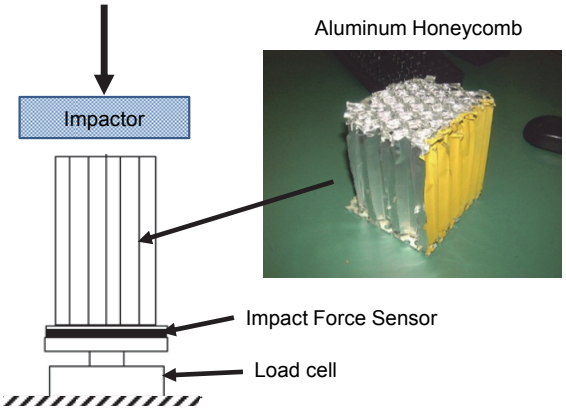


Fig. 6　Characteristic Test Method

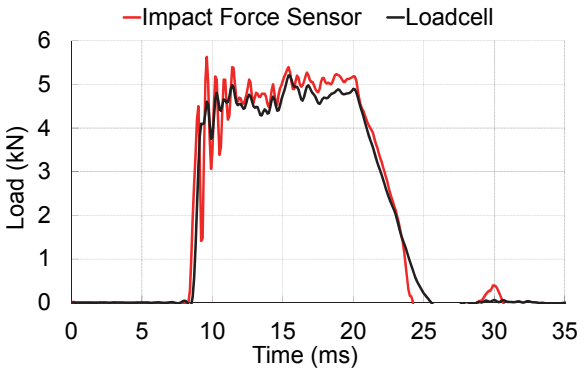


Fig. 7　Characteristic Test Results

4.2　ユニットテストによる特性検証

更に実車での衝突試験により近い状態で評価を行うために，Fig. 8 に示すような 8 個のセンサとロードセルを配置したアルミハニカムに，時速 4km/h で質量 1000kg の台車を衝突させるユニットテストを実施した。Fig. 9 にセンサの配置を示す。Fig. 10 に示すように，各センサの出力は各々のロードセルで計測した荷重とよく一致しており，8 つのセンサの合計荷重では，ロードセルの全合計に対して 6%程度の誤差で計測が可能であることが分かった。

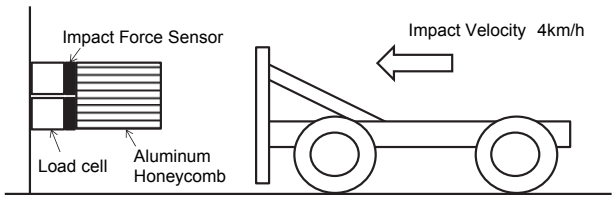


Fig. 8　Unit Test Method

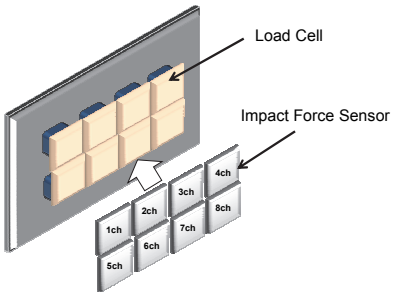
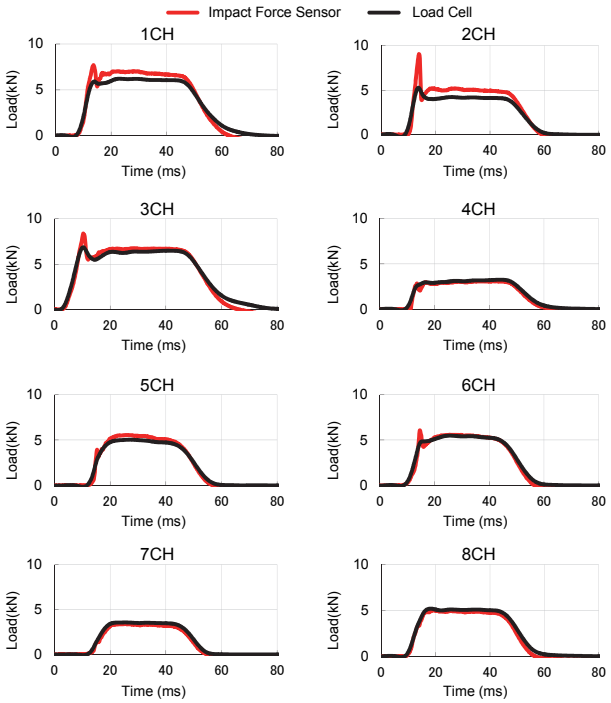
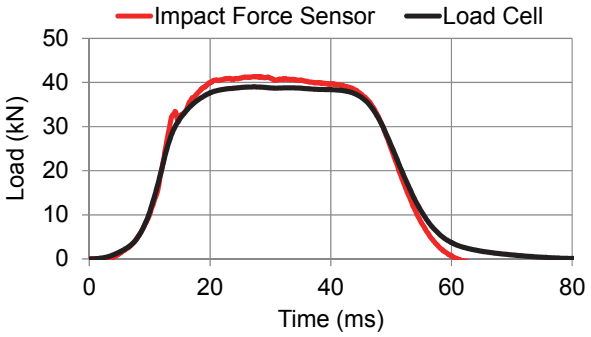


Fig. 9　Layout of Impact Load Sensors



(a) Measurement Load of Each Sensor



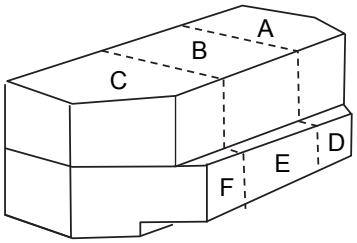
(b) All Measurement Load

Fig. 10　Measurement Load of Unit Test

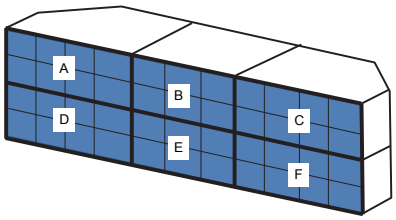
4.3　側面衝突試験への適用と考察

(1) 側面衝突試験用センサの配置

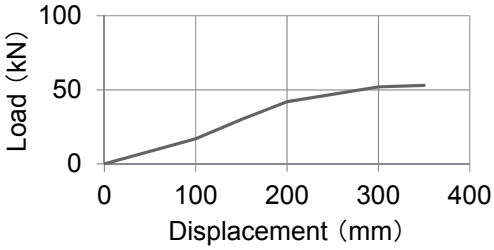
ハニカムバリアと台車の間に荷重センサを挟み込み，側面衝突試験を実施した。今回使用したハニカムバリアは欧州側面衝突で使用される AE-MDB バリアで，Fig. 11(a)に示すように内部で A から F の 6 ブロックに分割されており，Fig. 11(b)のように各ブロックに 6 または 8 個の荷重センサを配置した。また，本ハニカムバリアの荷重特性として Fig. 11(c)にブロック E の荷重－変位の特性線図を示す。各ブロックの荷重と変位の圧縮特性データから最大荷重は A＝C＝19kN，B＝16kN，D＝F＝72kN，E＝53kN で下部と両端が高い荷重特性を有する。なお，衝突試験の条件は，衝突速度　50km/h，台車質量 1500kg である。



(a) Shape of Honeycomb Barrier



(b) Layout of Load Sensors



(c) Characteristic of Block E

Fig. 11　Shape and Characteristic of AE-MDB Honeycomb Barrier[2]

(2) ロードパスと目標荷重

本衝突試験での衝突時の運動エネルギーを台車質量と速度から算出すると 145kJ となる。このエネルギーは車体とハニカムバリアの潰れによって吸収されるため，台車に取り付けた荷重センサでは，車体とハニカムバリアの潰れ荷重を計測することとなる。この試験で使用した車体では，この潰れ荷重の目標を 200kN とし，Fig. 12 にロードパスの荷重目標を示す。車体が受ける荷重をフロントドアとリアドアに均等に分散させるロードパスコンセプトで開発し，この目標荷重を共に 100kN としている。

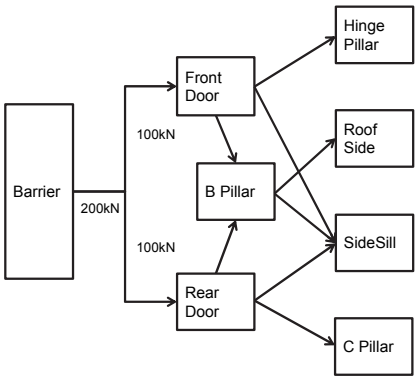


Fig. 12　Load Path Target

(3) テスト結果と考察

① 全計測荷重の考察

Fig. 13 に荷重の計測結果を示す。荷重センサの総合計と台車につけられた加速度計と質量の積で表される荷重を比較した結果，2 つはよく一致しており，荷重センサの値が正しいものと判断できる。

このテスト結果から荷重の目標である 200kN に対して計測された最大荷重は 40ms 近傍で 177kN となっており，ほぼ狙い通りの荷重が発生していると考えられる。

衝突時の運動エネルギーは，車体とハニカムバリアで吸収されるエネルギーと，衝突後の車両の反発で消散される運動エネルギーの和となる。グラフの面積は車体とハニカムバリアで吸収されたエネルギーに等しく 123kJ である。また，衝突後の反発で 1590kg の車体が速度 5.7m/s で移動するため，反発による運動エネルギーを算出すると 25kJ となる。この総和は 148kJ であり，初期に持っていた運動エネルギーの 145kJ とほぼ一致している。

このことから計測結果が妥当であると考えられる。

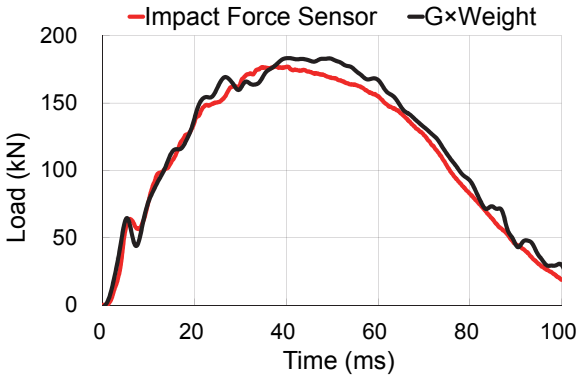


Fig. 13　Overall Load

② 各ブロックの計測荷重の考察

Fig. 14 に各ブロックの計測荷重を示す。また Fig. 15 にハニカムバリア中央断面のテスト前後の変形状況を示す。同図上部はブロック B，下部はブロック E を示している。2 つの図より，ブロック E の最大荷重は 48kN であり，変形量は約 200 ㎜であることが分かる。この荷重と変形量の関係は前述した Fig. 11(c)に示される圧縮特性と良く一致しており，荷重センサの計測値が潰れ特性を計測できていることが分かる。

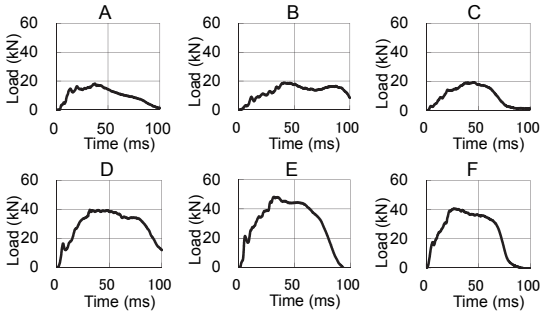


Fig. 14　Load of Each Block

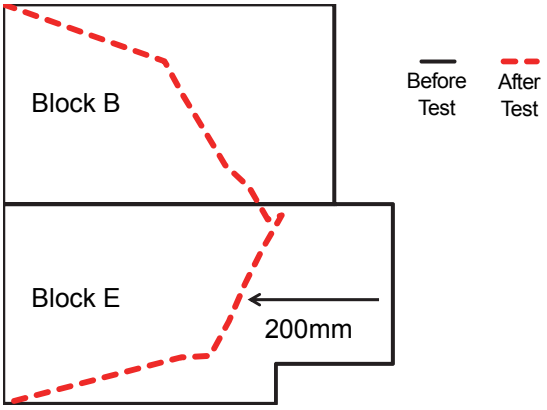


Fig. 15　Deformation at Center of Honeycomb Barrier

Fig. 16 にフロントドアとリアドア部分の入力荷重が最大となる 40ms 近傍での各荷重センサの合計値を示す。この値から狙い通り前後に均等に荷重が入力されていることが分かる。その時の荷重分布を等高線で示したのが Fig. 17 である。図よりハニカムバリアの下側のブロック D，E，F に集中的に荷重が入っていることが分かる。これはドア内部のインパクトバーが機能していることを示している。

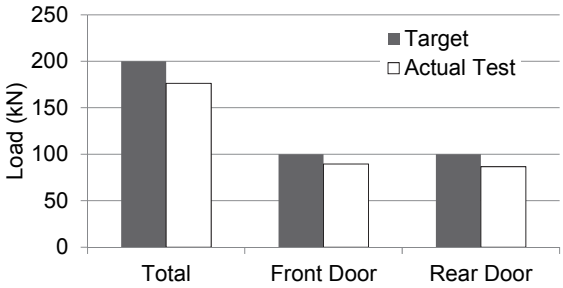


Fig. 16　Load Path

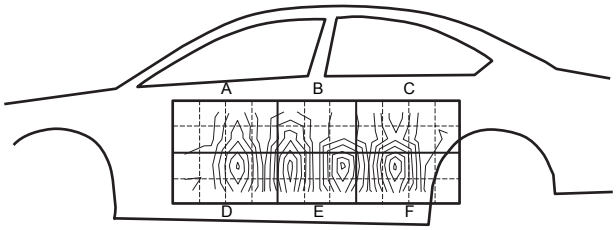


Fig. 17　Load Path

5. 結論

本研究で開発したシート型変動荷重センサを用いることで，側面衝突試験時の荷重計測を行うことができ，ロードパスや荷重の目標特性の検証，荷重分布による現象解析が可能となった。

6. おわりに

これらの開発したセンサを用いることで，より高い安全性能を持った車両開発に貢献するための現象解明や CAE 技術の精度向上に活用していきたい。

参考文献

(1)　藤本ほか：圧電フィルムを用いたシート型衝撃力測定センサ,日本機械学会論文集 C 編 73 巻，725 号 184-191（2007）

(2)　M. Roussarie ほか：Enhancement of side impact protection using an improved test procedure, No. 07-0245, ESV20

■著　者■


伊東 紀明


徳山 辰弥


友重 丈二


尾川 茂


藤本 由紀夫

論文・解説
31

日独米ドライバ着座位置調査による シート調節範囲設計方法の検証

Verification of Seating Accommodation Design Method with a Driver's Seating Position Survey in Japan, Germany and USA

竹之内 久美子*1 Kumiko Takenouchi
堀上 正義*2 Masayoshi Horiue
大坪 智範*3 Tomonori Ohtsubo
沖山 浩*4 Hiroshi Okiyama
田中 松広*5 Matsuhiro Tanaka

要約

ドライバが快適に楽しく運転できる状態をつくるため，人体の寸法や姿勢を考慮し，シートや運転操作機器を適切に設計する必要がある。マツダでは従来より，ドライバ着座位置について国際基準を参考に社内基準を構築し，商品開発に適用してきた。一方，自動車に求められる法規，装備，デザインなどの要求は年々多様化しており，従来からの設計方法が実際のドライバの使用実態に合っているか，定期的な検証が必要である。

従って今回，セダンタイプ車両運転時の着座位置や姿勢について，世界の代表的 3 市場で計 46 名の調査を行った。その結果，着座の前後位置とトルソ角度の設計方法が実際のドライバの使用実態に合っていることを確認できた。一方，着座上下位置については従来基準とは異なる結果を得るとともに，着座前後位置とトルソ角度の地域差，また，より快適な運転席の設計のための改善視点を把握した。

Summary

To create comfortable and fun-to-drive conditions for drivers, comfortable seating positions and postures should be estimated to properly design the layout of seat, driving controls and others. So we have established our internal standard for driver seating position by referring to an international standard to apply to our product development. Since the requirements on automobiles for regulations, equipment and styling have been diversified, however, periodic verifications on the effectiveness of the conventional design method are necessary.

Accordingly, an investigation on seating positions and postures on sedan-type vehicles was conducted (Object: 46 drivers of three globally-major markets). The result showed that the fore/aft seating positions and torso angle were just as estimated. On the other hand, the up/down positions were different from the ones estimated by the conventional method. Further, regional difference about fore/aft position and torso angle were grasped as well as improvement points for more comfortable design of the driver's space.

1. はじめに

お客様に快適で Zoom-Zoom なドライビングを提供するためには，運転席の着座位置や着座姿勢が運転しやすいものとなるよう，シートや運転操作機器を設計する必要がある。そのため，従来よりドライバ着座位置について，人体の寸法や姿勢を考慮した設計のための国際標準を参考に社内基準を構築し，商品開発に適用してきた。ドライバに最適な着座位置を提供する手

*1～5　車両実研部
Vehicle Testing & Research Dept.

段としては，シートやステアリングホイールの調整範囲，ペダルやメータ，シフトレバーの配置，前方視界（上方／下方）の確保などがある。

一方，快適なダイナミック走行への欲求の高まりや，空力，衝突などから自動車に求められる性能要求の多様化，また，デザイン的訴求力の高度化などに応えるべく，車両の構造や形状も年々変化している。

このため，従来からの設計方法が，実際のドライバの使用実態に合っているか，運転姿勢や各操作機器についてドライバが十分満足しているかを検証するため，主要市場において数十名規模の調査を行った。なお，本稿の調査対象は，シートとステアリングホイールの位置，及び主観評価である。

2. 運転操作機器の設計方法

マツダにおける従来からのドライバ着座位置の設計方法は以下のとおりである。なお，ドライバ着座位置は，国際標準である米国自動車技術会（以下 SAE）が定めるヒップポイント（以下 H.P）で定義する[1]。H.P は，人体の胴部と脚部の回転中心である。

最初に，ドライバの上下位置について，アクセルペダルを操作する足のかかとを置くフロアの高さ位置を基準に，まず代表体格の H.P 高さを決める。代表体格は SAE が定める大柄米人男性（身長 95%ile）とする。この際に H.P 高さは，商品企画の観点から，車両の性格などを考慮して決める。

次に，ドライバの上下位置について，小柄乗員の前方下方視界目標から，小柄乗員の H.P 高さを定める。小柄乗員は，大柄乗員に比べ座高が低いため，大柄乗員ほどに前方下方の路面が見えない。このため，大柄乗員の下方視界量にできるだけ近くなるよう，小柄乗員の H.P を，大柄乗員よりも高い位置に決める。この考えは自社独自のものであり，国際標準である SAE が定める H.P には上下位置の定義はない。なお，この上下位置の実現方法は，シートスライド角度を前上がりに設計し，シートを前方にするほど着座位置が高くなるようにすること，及びシートリフタを設定し，シートを上方へ調節可能とすることである。

ドライバの前後位置については，SAE が定めるアクセルペダルの足の拇指球位置（以下 BOF）を基準に，快適な足首角と膝角の範囲，及び上述した H.P 上下位置，の全てを満足する位置を割り出して定める。その結果，人体寸法の大きい乗員は車両後方寄りに，小柄な乗員は車両前方寄りに着座させることになる。

一方，ドライバのトルソ角度については，市場母集団の分布が広いことが報告されているが[2]，市場母集団の平均値を想定した設計基準角度はフロアからの H.P 高さから定めている。つまり，着座姿勢における各関節の快適な角度範囲は，H.P の高低によらず一定であるため，H.P が低い車両では，高い車両よりもドライバを後傾姿勢とし，その結果トルソ角度を大きくする。

以上により，ドライバ H.P の上下と前後位置，標準的なトルソ角度を定めることで，シートスライドの角度，シートスライド量とリフタ量，及び設計基準シートバック角度を定める（Fig. 1）。更に，その時点でドライバの肩の位置を推定することができるため，その肩位置から，快適な腋角と肘角の範囲を満足するように，ステアリングホイールの上下，前後の調整範囲，及びシフトレバー位置を定める。

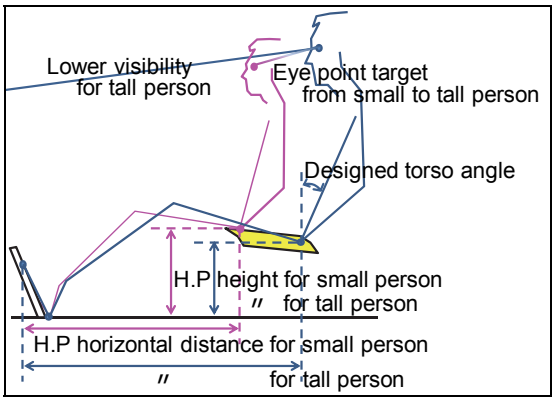


Fig. 1　Seating Accommodation Decision Method

3. 実験方法

3.1 実験参加者

実験参加者として，日常的に自動車を運転する男女 46 名（20～50 歳）を集めた。国別の内訳は，日本 16 名，ドイツ 15 名，米国 15 名である。実験実施に先立ち，データ収集の目的，内容などについて説明を行い，参加者全員のインフォームドコンセントを得た。参加者の体格情報を Table 1 に示す。表中，BMI とは体重 kg÷身長 m^2 で算出される肥満度の指標である。世界保健機構は，BMI が 18.5 以上 25 未満を標準体型，30 以上を肥満体型と定義している。

Table 1　Participant

Country	n	Height (cm)			BMI (kg/m^2)		
		Mean		S.D.	Mean		S.D.
JPN	16	172.3	±	10.8	21.9	±	3.4
DEU	15	175.7	±	10.7	26.2	±	4.2
USA	15	178.7	±	9.9	25.0	±	6.1

3.2 実験車両

実験車両は，3 か国ともにセダンタイプの同一車種である。日本は右ハンドル MT 車，ドイツは左ハンドル MT 車，米国は左ハンドル AT 車であり，また，日本とドイツのシート位置調節は手動式，米国は電動式であるが，調査対象操作機器の配置などは基本的に同一のものである。実験車両の詳細を Table 2 に示す。

Table 2　Test Vehicle

Country	Driver's seat	Transmission	Steering	
			Tilt	Telescopic
JPN	Right	MT	✓	✓
DEU	Left	MT	✓	✓
USA	Left	AT	✓	✓

Country	Seat				
	Type	Slide	Lift	Cushion tilt	Recliner
JPN	Manual	✓	✓	-	✓
DEU	Manual	✓	✓	-	✓
USA	Power	✓	✓	✓	✓

3.3　実験方法

各参加者に，実験車両で一般道を想定した試験路を交通法規に従って走行するよう指示を与えた。走行距離は日本 5km，ドイツ 5km，米国 2km である。走行後にシートとステアリングホイールの調節位置を計測し，また，主観評価を取得した。計測箇所は，Table 2 の✓印をつけた 6 項目である（Fig. 2）。主観評価は，着座位置と運転操作機器についての満足度 5 段階評価と，不満があればその内容の記録である。

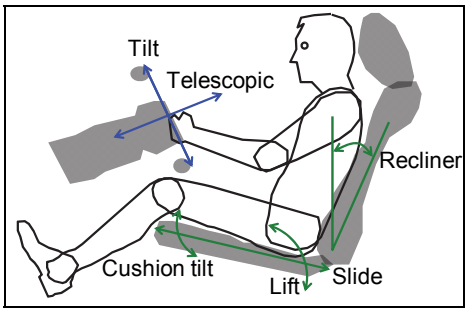


Fig. 2　Measurement Item

3.4　解析方法

実験参加者の H.P 位置は，シート調節位置から推定した。H.P 前後位置は，シートスライドにリフタ操作による前方移動量を，H.P 上下位置は，シートリフタにスライド操作による上方移動量を，それぞれ加味して算出した。トルソ角度はシートバックリクライニング角度から推定した。

4.　結果

シートや運転操作機器の設計方法を検証するため，2 つの検討を行った。1 つは，着座位置について，設計方法に基づいた推定値と実験結果の比較である。もう 1 つは，不満評価の抽出・分析である。

各分析結果のグラフでは，実験参加者は日本を■，ドイツを▲，米国を●でそれぞれ示す。

4.1　着座位置

(1) H.P 前後位置

ドライバは体格が大きいほど後方寄りに着座する。このため今回取得したデータを，身長を横軸に，H.P 前後位置（BOF から H.P までの距離）を縦軸に取り，プロットしたところ，両者の間には有意に正の相関が確認できた（r＝0.83, p<0.01）（Fig. 3）。なお，r は相関係数，p は有意確率をそれぞれ示す。

また比較のため，SAE 基準に沿って身長から求めた H.P 前後位置と，実験参加者の H.P 前後位置の差異を，国別に調べたところ（Fig. 4），ドイツと米国が SAE 基準に一致した一方，日本は前寄り（p<0.01）であることが分かった。

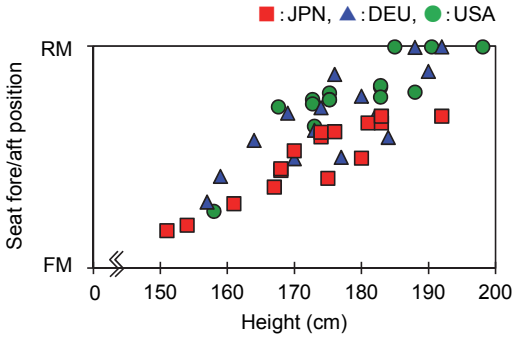


Fig. 3　Correlation between Participants' Height and Seat Fore/Aft Position

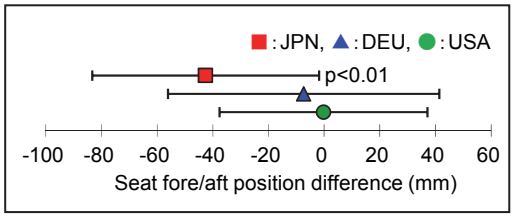


Fig. 4　Measured Seat Fore-Aft Position in Comparison with the Design Standard Among Countries

(2) H.P 上下位置

ドライバは体格が小さいほど上方寄りに着座するよう設計している。このため今回取得したデータを，身長を横軸に，H.P 上下位置（フロアから H.P までの距離）を縦軸に取り，プロットしたところ，両者の間には有意に正の相関が確認できた（r＝0.80, p<0.01）（Fig. 5）。グラフにはシートスライドによる上方移動量を直線で示す。この直線から上方にある量は，シートリフタ調整による移動分である。

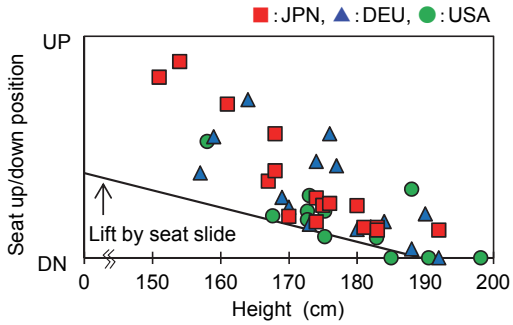


Fig. 5　Correlation between Participants' Height and Seat Up/Down Position

(3) トルソ角度

トルソ角度は，先述の方法で設計基準値を定めた。その角度と，実験参加者のトルソ角度平均値の差分を，国別に比較した（Fig. 6）。その結果，米国が設計値に一致した一方，日本は身倒し（$p<0.05$），ドイツは身起こし（$p<0.01$）であることが分かった。

またトルソ角度は，市場母集団の分布は比較的広いことが知られている。念のため，個々人の H.P 高さとトルソ角度の関係を調べたが，今回のデータにおいてもやはり相関は得られなかった（$r=0.01$，$p>0.1$）（Fig. 7）。

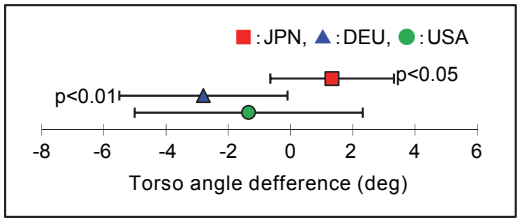


Fig. 6　Measured Torso Angle in Comparison with the Design standard Among Countries

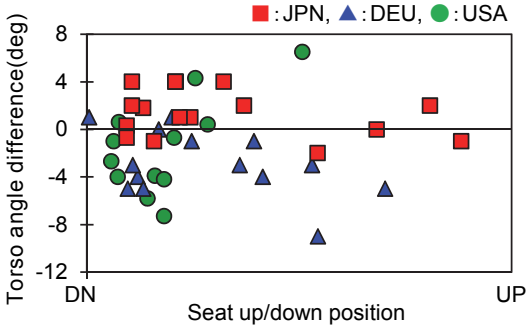


Fig. 7　Correlation between Participants' H.P Height and Torso Angle

(4) シート可動範囲に対する着座位置

実験参加者の着座位置の全容を把握するため，シート可動範囲に対する実験参加者の着座位置（H.P 位置）を示す（Fig. 8）。グラフには，シート可動範囲と個々人の分布の回帰式を示す。回帰式は，相関係数が 1 次式では 0.74，2 次式で 0.77 であったため，より相関の高い 2 次式を採択した。その結果，直線的な分布でなく，スライド中間において下寄り傾向であることが見てとれる。

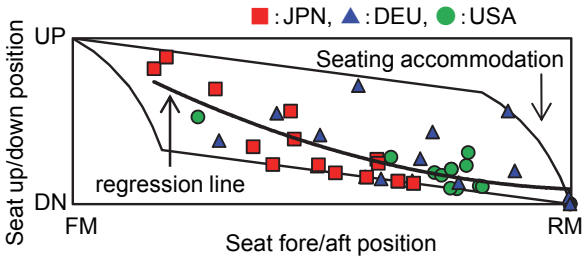


Fig. 8　Participants' H.P Distribution in the Seating Accommodation

4.2　主観評価

着座位置と運転操作機器について，全 46 名の回答を調べたところ，全項目に満足した人が 34 名，一部にでも不満があった人が 12 名であった。

不満の内容は，シートスライドの後方調整量不足が 3 名，シートリフタの下方調整量不足が 3 名，ステアリングホイールテレスコの前方調整量不足が 1 名，後方調整量不足が 4 名，シートのサイサポート不足が 3 名，過剰が 1 名，視界量不足が 3 名である。なお，不満は複数回答可としたため，不満回答の総数は不満指摘者より多い。

不満があった 12 名について，不満内容と着座位置や身体的特徴などを突き合わせて示し（Table 3），5 章の考察にて不満と感じた要因を明らかにする。

Table 3　Participants' Complaint and Attribute

Attribute								
Country			JPN		DEU			
Name			A	B	C	D	E	F
Body size	Height (cm)		151	181	176	177	190	192
	BMI (kg/m^2)		21	20	26	26	32	45
Seat position	fore/aft gap (mm)		22	-58	66	-71	-44	-29
	torso gap (deg)		2	4	-9	-1	0	-1
	cushion tilt (mm)							
Complaint								
Seat	slide	aft			✓			✓
	lift	down						✓
Steering	telescopic	fore	✓					
		aft		✓				
Thigh support		less					✓	
		much						
Visibility		less				✓		

Attribute								
Country			USA					
Name			G	H	I	J	K	L
Body size	Height (cm)		168	173	173	183	191	198
	BMI (kg/m^2)		22	22	21	22	33	22
Seat position	fore/aft gap (mm)		64	39	0	-35	-18	-73
	torso gap (deg)		-4	-4	4	-3	-3	1
	cushion tilt (mm)		0	5	12	25	0	2
Complaint								
Seat	slide	aft						✓
	lift	down	✓				✓	
Steering	telescopic	fore						
		aft			✓	✓		✓
Thigh support		less	✓			✓		
		much		✓				
Visibility		less			✓		✓	

5. 考察

5.1　実験参加者着座位置

(1) H.P 前後位置

H.P 前後位置については，ドイツと米国が SAE 基準に一致した一方，日本は前寄りとなった。

その要因は，身長に対する下肢の割合の違いであると考える。実験参加者の平均身長である 175.5cm にお

ける下肢長（H.P から足首までの長さ）は，日本が814mm，ドイツ 836mm，米国 847mm であり，ドイツ，米国と比べ日本は短い。SAE 基準は米国の人体寸法を基に H.P 前後位置を定めているため，米国とそれに近いドイツは SAE 基準に一致した一方，日本は前寄りとなったものと考えられる。この考えを検証するため，身長から推定した下肢長と H.P 前後位置の関係を調べたところ，両者の間には有意に正の相関が確認でき（r＝0.87，p<0.01）（Fig. 9），相関係数は身長と H.P 前後位置の間より強かった。よって，ドライバの着座前後位置は，直接的には身長よりも下肢長に依存するものと考えられる。

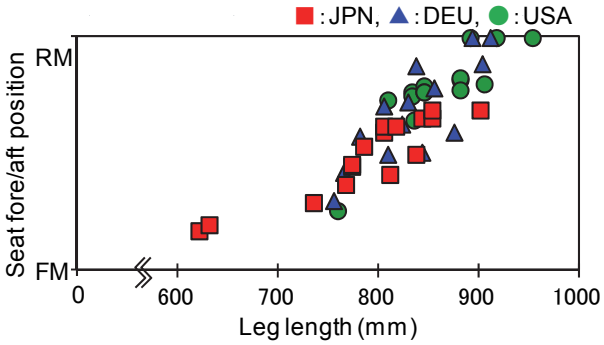


Fig. 9　Correlation between Participants' Leg Length and Seat Fore/Aft Position

(2) H.P 上下位置

Fig. 5 より，身長が低いほど H.P 位置を高く調整する傾向が確認できた。これは座高の低い小柄乗員が前方下方視界を確保しようとする要求を反映したものと理解でき，設計の考え方とも一致する。ただし，その量が予想どおりであったかについては，前方下方視界との関係を調べる必要があり，5.1（4）で詳しく調べる。

(3) トルソ角度

トルソ角度は，米国が設計値に一致した一方，日本が身倒し，ドイツが身起こしとなった。過去の社内調査（日本 93 名，独米 42 名）においても同傾向の結果が得られたことから，再現性は高いものと考えられる。国際標準である SAE には，市場ごとのトルソ角度の差は定められていないが，車両の仕向地ごとによりドライバ実態に合った設計を行う上で重要な情報と考える。

(4) シート可動範囲に対する着座位置

シート可動範囲におけるドライバ着座位置の分布は，スライド中間において下寄り傾向である。その要因を考察するため，身長を横軸に，設計時に設定した目の位置（Fig. 1）に対する実験参加者の目の上下位置を縦軸に取りプロットする。なお，参加者の目の位置は体格，H.P 前後／上下位置とトルソ角度の調査結果を組み合わせて算出した。

その結果，中柄体格（170～180cm 付近）において，リフタを上方に調節することで目の位置が上方となり，より前方下方の路面が見えるようになるにもかかわらず，リフタを下方に調整しているドライバが多いことが分かった（Fig. 10）。大柄体格の主観評価において，前方上方視界，及びヘッドクリアランスをより確保したいコメントがあることを把握している。

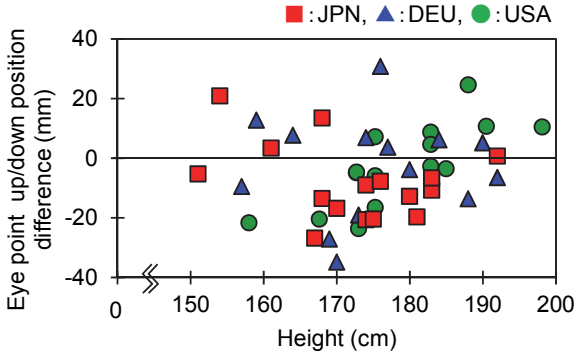


Fig. 10　Correlation between Participants' Height and Eye Point Up Down Position

5.2　不満評価

不満内容の現象ごとに，不満の要因を考察する。

以下考察では，不満があった 12 名を識別するため，Table 3 の Name 欄の記号を（　）内に示す。

(1) シートスライドの後方調節量不足

不満指摘者 3 名のうち，2 名（F，L）は身長が高すぎ，実験車両の運転操作機器の設計に用いた乗員体格の範囲外であった。

残る 1 名（C）の特徴は，トルソ角度が設計基準比マイナス 9°と極端に身起こしであった。この値は，比較的身起こし傾向が強いドイツ人にあっても 2σを超えており，95%保証の外であることが確認できた。不満指摘者 C の身長から考えると，シートスライド調節位置は後方すぎて，腰はシートバックにしっかり届いていないものと推察されるが，シートバックを起こしているために肩付近は支持され，運転が可能なものと思われる。

(2) シートリフタの下方調節量不足

不満指摘者 3 名のうち，2 名（F，K）は身長が高すぎ，実験車両の運転操作機器の設計に用いた乗員体格の範囲外であった。実際に，1 名（K）は前方上方の視界が悪いためシートをもっと下げたいとコメントしており，身長の高さが直接的要因となったことを裏付けている。

残る 1 名（G）は，下方調整不足のコメントとともに，サイサポート不足をコメントしていることから，

シートを下げることでより十分なサイサポートを得たいものとみられた。ただし，実験車両（米国）は，クッションチルト付きであるにもかかわらず，チルトを最下端のままとしているため，調整機器を使い切れていない結果であるともいえる。

(3) ステアリングテレスコの前方調節量不足

不満指摘者 1 名（A）は，身長が低すぎ，実験車両の運転操作機器の設計に用いた乗員体格の範囲外であった。

(4) ステアリングテレスコの後方調節量不足

不満指摘者 4 名のうち，1 名（L）は身長が高すぎ，実験車両の運転操作機器の設計に用いた乗員体格の範囲外であった。

また 2 名（B，I）はヘッドレストが近すぎる窮屈さを解消するためにシートバックを倒した結果，ステアリングホイールが遠くなったとコメントしている。この不満から，シートの部分的な不満が着座姿勢に影響を与えることが分かった。

残る 1 名（J）は，サイサポート不足を解消するためシートスライドを後方にしようとしたが，ステアリングホイールが届かなくなるため諦めたとコメントしている。記録した着座姿勢からは，スライドは身長の割に前寄り傾向で，トルソも起こし気味であることから，ステアリングホイールが届かないとは考えにくく，論理的な解釈が困難であり，追跡調査を行っている。

(5) サイサポート不適

不足指摘者 3 名，過剰指摘者名であった。

まず不足について，2 名（G，J）は先に述べたとおりである。残る 1 名（E）は，身長が保証意図をわずかに超え，また，BMI も肥満に分類されるレベルであることから，シートスライドは最後端にすべきであるが，実際の選択位置は身長の割にかなり前寄りであった。このことが，サイサポート不足を招いていると考えられる。

次に過剰と指摘した 1 名（H）は，身長の割にシートスライドをかなり後寄りにしている。シートスライドを前寄りにするとサイサポートは弱くなるため，調整機器を使い切れていない結果であると考えられる。

(6) 視界

不満指摘者 3 名のうち，I，K は先に述べた。残る 1 名（D）は，ボンネット前方をみるためにシートリフタを上方にしようとしたが，ヘッドスペースが足りなくなるため諦めたとコメントしている。記録した着座姿勢からは，身長の割にシートスライドを相当に前寄りとしている。身長に相応しいスライド位置まで後方寄りにすれば，頭上のスペースもより大きくなり，全てが改善方向になると推測されるが，コメントを確認すべく追跡調査を行っている。

以上より，不満内容ごとの考察から導いた不満要因を，以下のとおり分類する。

・体格保証意図の範囲外：4 名（A，F，K，L）
・特殊な座り方（トルソ角の起こしすぎ）：1 名（C）
・ヘッドレスト配置不良：2 名（B，I）
・シート調整を使い切らず：3 名（E，G，H）
・原因未解明（追跡調査中）：2 名（D，J）

このうち，体格保証については設計意図により制御可能である。また，2σを外れる特殊な座り方についても，体格保証と同様に，保証範囲を大きく取ることが考えられるが，そのために相反するデメリットを明らかにして判断をする必要がある。ヘッドレスト配置については，衝突（後突）時のむち打ち防止性能との両立を考慮して，満足ゆく配置レベルを把握することで，改善につなげることが可能である。また，シート調整を使い切れていないドライバに対しては，何らかの方法で適切な位置を選んでもらうことにより，改善を図れる可能性があるものと考える。最後に，論理的な解釈が困難であった 2 名については，更に詳細な姿勢調査と聞き取りを行っている。

6. まとめ

今回，従来からの運転操作機器の設計方法が実際のドライバの使用実態に合っているかを検証した。

その結果，着座の前後位置とトルソ角度の設計方法は実際のドライバの使用実態に合っていることを確認できた。その一方で，着座上下位置については，シート可動範囲に対して中柄体格に下寄り着座傾向が見られた。また，着座前後位置とトルソ角度について，地域差を把握した。国際標準である SAE が定める H.P には，上下位置推定方法の定義はなく，また着座前後位置とトルソ角度について地域差の視点はない。今後，更なる要因調査を行い，SAE へ H.P の定義の提案を検討し，また，よりドライバの実態に合った運転席の設計を行っていきたい。

参考文献

(1) SAE：Driver selected seat position, SAEJ1517 (2011)
(2) Miriam A et. Al.,：ATD Positioning Based on Driver Posture and Position, 42nd Stapp Car Crash Conference Proceedings, 337 (1998)

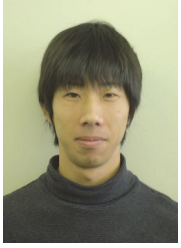
略号

SAE：Society of Automotive Engineers
BMI：Body Mass Index（体重÷身長 ^{2}）
FM, RM：Front most, Rear most

UP, DN：Up, Down
H.P：Hip point　BOF：Ball of foot
JPN：Japan　DEU：Deutschland

■著　者■


竹之内 久美子


堀上 正義


大坪 智範


沖山 浩

論文・解説

32

樹脂部品の熱収縮現象解明と CAE 予測技術開発

Investigation on Heat Shrink Phenomena of Plastic Parts and Development of CAE Methodology

井上 実*1　Minoru Inoue
平本 健治*2　Kenji Hiramoto
高田 幸次*3　Kouji Takata
藤 和久*4　Kazuhisa To
西村 賢治*5　Kenji Nishimura

要約

樹脂は金属と比べて温度変化に伴う変形現象が顕著に見られるため，樹脂部品設計において熱変形への配慮が不可欠である。この際，樹脂では金属では見られない「熱収縮」という現象を考慮しなければならないが，従来からの線膨張係数による熱応力解析では「熱収縮」現象は再現できなかった。

そこでまず樹脂の材料試験を実施し「熱収縮」現象や発生しやすい条件等を明らかにした。そして線膨張係数について異方性を有し昇温時と室温戻し時では別経路の関数表現を採用するとともに，加えて部品製造時の残留応力を考慮することによって，簡易かつ開発の早期段階でも適用可能な「熱収縮」現象を予測できる CAE 技術を開発した。

Summary

As plastics, compared with metals, show remarkable sensitivity to deformation with temperature changes, much consideration needs to be given to thermal deformation in designing plastic parts. In so doing, "heat shrinkage" phenomena, which are not observed in metals, need to be taken into consideration. However, the conventional FEM methodology using the coefficient of linear expansion, which is applicable to metal parts, cannot reproduce "heat shrinkage" phenomena.

In response, material tests by specimen were conducted to investigate and clarify the phenomena regarding the "heat shrinkage". Then a CAE methodology was developed so that the "heat shrinkage" phenomena could be predicted by dealing with the anisotropic different coefficients of linear expansion by function as well as the residual stress, which can be used in early design stage.

1. はじめに

自動車において樹脂は金属と並ぶ中心的構成材料である。射出成形により自由な形状を短時間・安価に製造でき，比重が 1 程度と低い点などから，内外装領域においてポリプロピレンを中心とする樹脂が広く活用されている。Fig. 1 には代表的な乗用車における内外装部品の構成重量比率を示す。樹脂類は約半分の 46% を占めている。近年の環境・省資源の観点から，金属から樹脂への置換や樹脂部品の最適化による軽量化は，今後も一層重要性を増している。

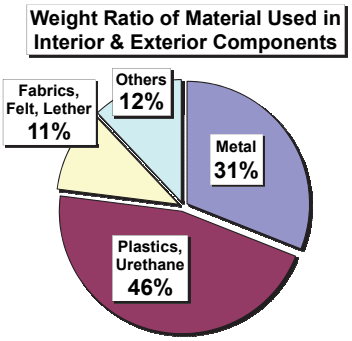


Fig. 1　Weight Ratio of Materials Used in Interior & Exterior Components

*1，3，5　装備開発部
Interior & Exterior Components Development Dept.
*2，4　技術研究所
Technical Research Center

内外装領域の部品開発において，金属と比べて樹脂は熱に対する変形・強度問題に検討・配慮を必要とする。鋼板では常用温度域で材料物性値はほとんど変化せず熱伸びも小さいが（線膨張係数は多くの場合樹脂の 1/3 から 1/10 程度），樹脂では温度に対する材料物性変化が顕著で熱伸びが大きい。例えば代表的物性値のヤング率は，100℃では室温の 1/5 程度にまで低下するものも見られる。

また線膨張係数に 10 倍程度の差があるということは，温度によって金属部品と樹脂部品との間で相対的な位置変化が生じ，変形・異音・干渉・見栄え等の原因となる。このため，開発の早い段階から変形状態を正確に把握して固定方法や隙・干渉に配慮した設計を行う必要がある。

加えて樹脂では加熱・冷却サイクルを繰り返すと初期状態から長さが小さくなる「熱収縮」現象が観察されるため，熱収縮量も考慮する必要がある。しかし一般的な線膨張係数を定数として扱う熱応力解析では，「熱収縮」現象をとらえられないという問題があった[(1)(2)(3)(4)]。

そこでリフトゲートトリムに使われているポリプロピレン樹脂について試験片による特性試験を行い，まず「熱収縮」現象を明らかにした。そして分析および計測結果に基づき線膨張係数を単なる定数から関数表現とし「熱収縮」現象をとらえられるようにした。更に従来から指摘されていた樹脂部品製造時の残留応力[(5)]を考慮し，リフトゲートトリムの平均残留応力を推定することで熱収縮量を精度良く机上予測できるようにした。以下にその概要を述べる。

2. 材料試験による現象解明

2.1　熱変形に影響を及ぼす材料特性

樹脂部品の熱変形は，①熱膨張差により生じる熱応力による塑性変形，②高温保持に起因するクリープ変形，③樹脂の結晶再配列および分子配向緩和による「熱収縮」の 3 因子により生じると考えられる。そこで，弾塑性特性に加えクリープ特性および熱収縮特性を考慮することが必要である。

2.2　材料特性の測定

(1) クリープ特性

JIS K7115 に準拠し 25℃，80℃，100℃で試験を行った。各温度につき 3 水準の荷重を負荷し，測定を行った。80℃の結果を Fig.2 に示す。

(2) 熱収縮特性

異方性を考慮するため，樹脂の流れ（MD）方向／流れと直角（TD）方向それぞれの試験片（φ5×10）を作成し，熱機械分析装置（Thermomechanical Analyzer）を用いて，試験片を加熱・冷却した際の変形量を測定した。測定は室温→120℃→-60℃→室温の加熱・冷却を 3 サイクル繰り返した。その 1 例として MD 方向の測定結果を Fig. 3 に示す。1 サイクル目の昇温時のみ異なる変形を示し，それ以降は同じ変形を繰り返している。更に，1 サイクル目の最高温度を変えて収縮量を測定した結果を Fig. 4 に示す。これらのことから，収縮現象は初回昇温時の温度に大きく依存すると考えられる。

Fig. 5 に MD 方向および TD 方向の収縮量を示す（N＝4 の平均）。本供試材では MD 方向の収縮量が TD 方向の収縮量よりも大きいことが分かった。

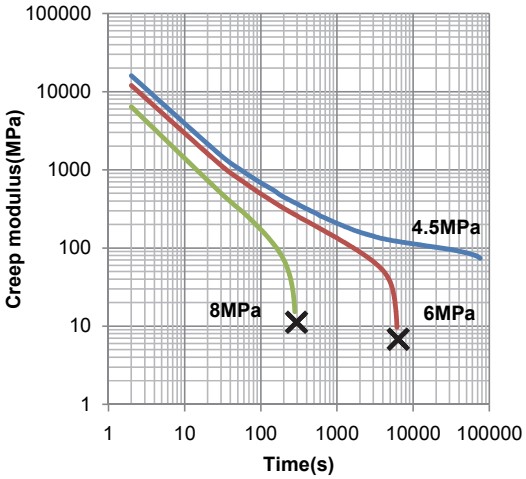


Fig. 2　Result of Creep Tests at 80℃

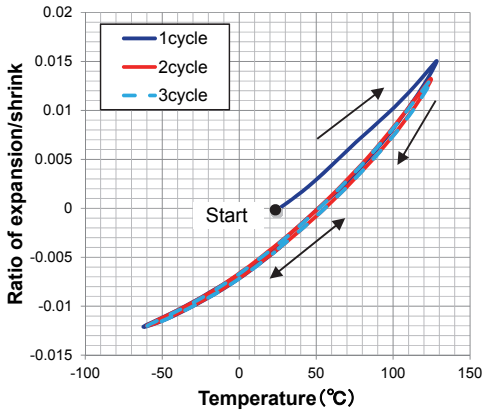


Fig. 3　Thermal Expansion & Shrink in Heat Cycle

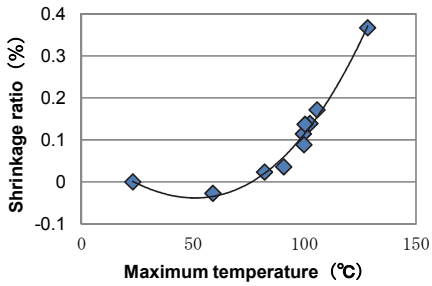


Fig. 4　Relationship between Maximum Temperature and Shrinkage

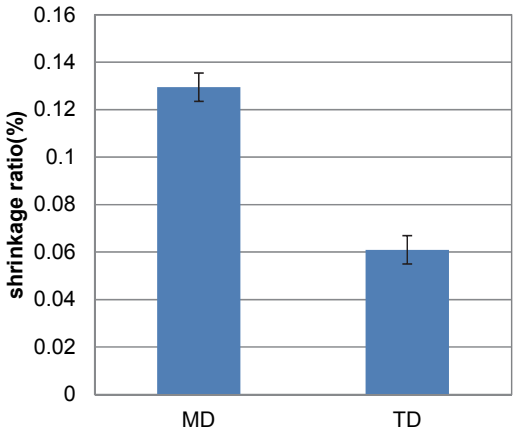


Fig. 5　Comparison of Heat Shrinkage in Direction

2.3　熱収縮現象

一般的に樹脂の熱収縮は以下の 2 つの要因で生じると考えられている。

① 結晶化の進展（Fig. 6）

② MD 方向に引き伸ばされた分子鎖の緩和（Fig. 7）

そこで，①について結晶化度と収縮量の関係を調査するため，示差走査熱量測定（Differential scanning calorimetry）を用いて結晶化度の測定を行った。結晶化度と収縮量の関係を Fig. 8 に示す。結晶化度が低いほど収縮量は大きくなり，結晶化が収縮に影響を及ぼしていることが分かる。

また，②については，今後検証を行う予定である。

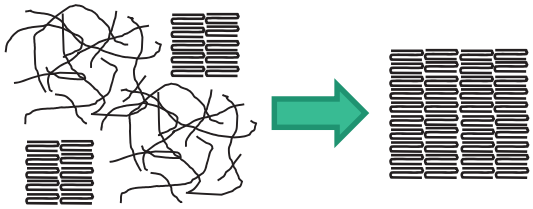


Fig. 6　Mechanism of Heat Shrinkage I: Growth of Crystallization

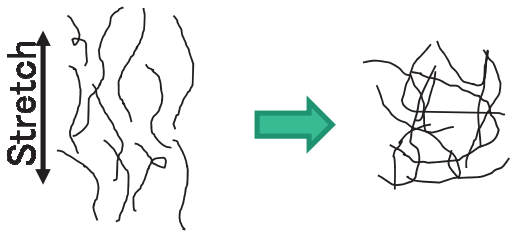


Fig. 7　Mechanism of Heat Shrinkage II: Relaxation of Molecular Chain Orientation

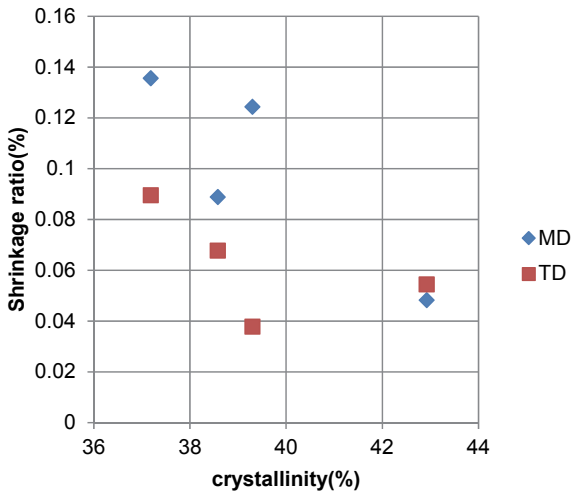


Fig. 8　Relationship between Crystallinity and Shrinkage

3. 熱収縮 CAE の開発

2.2 の測定結果を非線形構造解析ソフト ABAQUS に組み込み，簡単な形状で検証を行った。

クリープ特性は式(1)のひずみ硬化則を用い，温度ごとに材料定数 A,n,m を決定した。

$$\dot{\varepsilon}^{cr} = (A\sigma^{n}[(m+1)\varepsilon^{cr}]^{m})^{\frac{1}{m+1}} \qquad \cdots(1)$$

$\dot{\varepsilon}^{cr}$:クリープひずみ速度

ε^{cr} :クリープひずみ

σ :相当応力

A, n, m :材料定数

熱収縮特性は既存ソルバでは計算できないため，線膨張係数を温度とサイクルの関数としてユーザサブルーチンで定義した。

検証は Fig. 9 に示す簡単な形状の試験片で加熱前後の変形量を測定し，解析結果と比較した。測定部位は矢印方向の変位である。

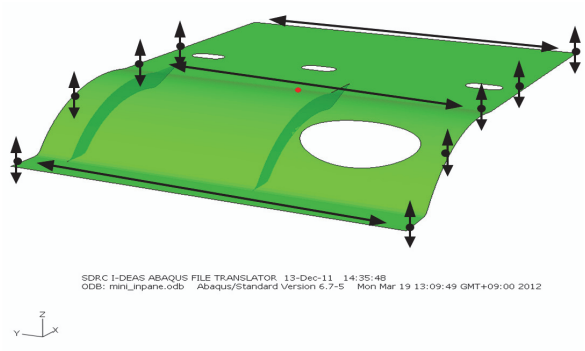


Fig.9　Validation Model

その結果を Fig. 10 に示す。図中の破線は実測値：計算値＝1：1 となる線であり，これに近づくほど精度が良いことを表している。熱収縮を考慮することで，精度を大幅に改善できることを確認できた。また，クリープ変形は熱収縮にはあまり影響しないことが分かった。

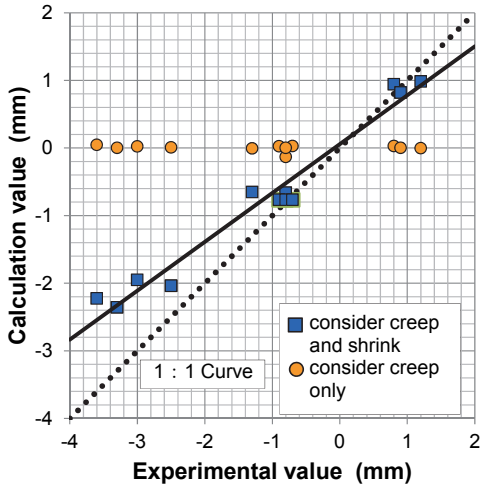


Fig.10　Comparison of Heat Shrinkage between Calculation and Experiment

4. 実部品での精度検証

4.1　実部品での精度評価

続いて前章で開発した手法を実部品に適用し精度検証を行った。対象部品としては熱収縮が時に観察される大型内装部品であるリフトゲートトリムロアとした。A 車から D 車までの 4 車種 11 か所について，Fig. 11 に示すような，トリム上の計測点間左右方向長さを，初期の室温時（L0）と室温から高温にした後室温に戻した時点（L1）で比較し，その差（L0-L1）を熱収縮量として比較した。Table 1 には A 車から D 車の各テスト条件および計測された熱収縮量（L0-L1）を示す。

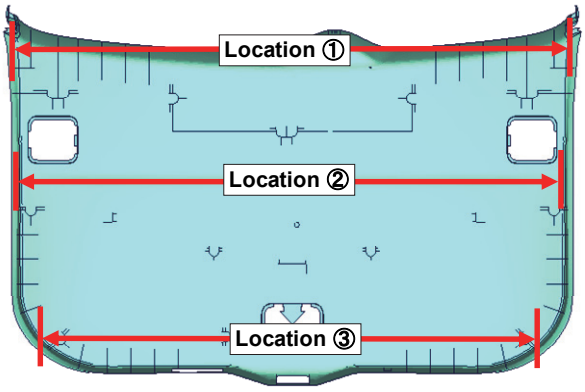


Fig. 11　Heat Shrink Evaluation of Vehicle-A

解析評価において温度はトリム全体で一様分布と仮定し，3 章結果に基づき，線膨張係数は異方性まで考慮しクリープは考慮していない。線膨張係数の異方性方向定義に関しては，厳密には金型設計に基づく樹脂流動解析結果をそのまま構造解析モデルに導入することが望ましいが，今回は射出成形の際，溶けた樹脂は注入ゲート位置から放射状に拡散する方向に流れるものと考えて，ゲート位置に円筒座標系を定義し，その半径方向を MD 方向に，円周方向を TD 方向に割り当てた。Fig. 12 から Fig. 14 には C 車における本解析で得られた温度ごとの変形状態を示す。

Table 1　Test Condition and Heat Shrinkage

Vehicle	Location of Evaluation	Evaluation by Actual Tests	
		(mm)	Test Condistions
A	①	4.7	RT---> 90℃--->RT Unit Test
	②	3.8	
	③	5.5	
B	①	1.5	RT---> 70℃--->RT,Unit Test
C	①	3.7	RT--->100℃--->RT Unit Test
	②	3.9	
	③	3.8	
	④	2.9	
D	①	2.5	RT---> 70℃--->RT Vehicle Test
	②	1.5	
	③	2.5	

RT:Room Temperature

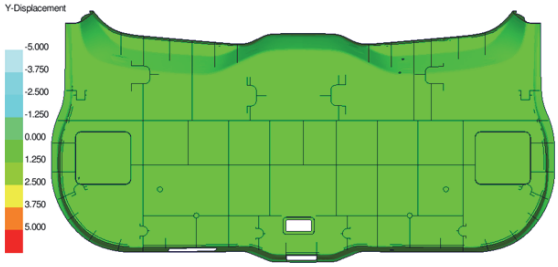


Fig. 12　Initial State at Room Temperature

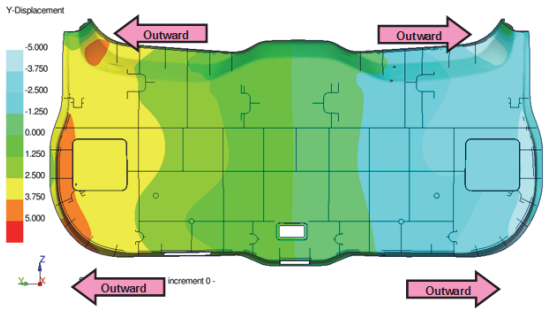


Fig. 13　State at the Maximum Temperature

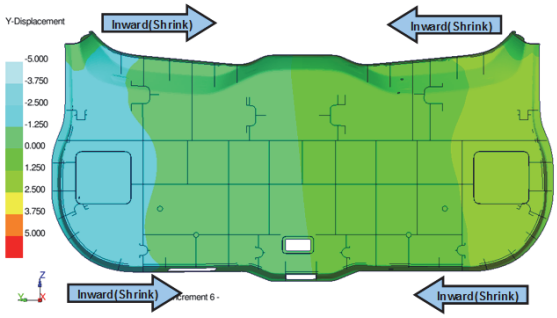


Fig. 14　Final State at Room Temperature

Fig. 12 は計算開始時の室温状態であり，全域緑色（変形なし）を示している。Fig. 13 は，Fig. 12 の室温状態から温度を上げ，Table 1 に示す車種ごとの最高温度に達した時点の状態を示す。最後の Fig. 14 は Fig. 13 の車種ごと最高温度から室温に戻した時の状態を示す。Fig. 14 を見ると，高温から室温に戻した状態では，初期状態に比べて左右部分が内側に移動する状態を示しており，熱収縮が実部品でも解析上とらえられていることを示している。C 車の場合で左右それぞれ 1.25mm 以上の移動が観察されている。

Table 2 には，各測定位置における熱収縮量の解析値および実車で計測された収縮量を 100%とした場合の比率を示している。解析で確かに熱収縮がとらえられているものの，その熱収縮量は 9%～95%とばらついており 11 点平均でも 55%となっている。3 章の簡易形状での結果も，計算結果は実測値に対して 75%と少なめの予測値となっており絶対値予測には不十分である。

Table 2　Heat Shrinkage Predicted by CAE

Vehicle	Location of Evaluation	Actual Tests	CAE	
			(mm)	Prediction(%)
A	①	4.7	1.2	25%
	②	3.8	2.0	52%
	③	5.5	3.2	59%
B	①	1.5	1.0	68%
C	①	3.7	0.3	9%
	②	3.9	2.3	58%
	③	3.8	3.2	83%
	④	2.9	2.7	95%
D	①	2.5	1.1	46%
	②	1.5	1.1	76%
	③	2.5	0.8	33%
			Mean Value	55%

4.2　製品製造時の残留応力の考慮

前節の結果を受けて，線膨張係数を異方性とし温度とサイクルの関数として考慮することに加え，従来その影響が十分検討されていなかった射出成形による製造時に部品内部に残る残留応力[5]の考慮と，その値の適値同定を次に行った。

製造時の部品内部に残る残留応力値も型法案・製造条件等，また部位によって異なると考えるのが妥当であり，従ってこの残留応力を厳密に把握するには，流動方向と同様に樹脂流動解析が必要となるが，残留応力についても今回簡易な検討が可能となるように，射出成形されたリフトゲートトリム内には一様に面内引張応力が生じる（せん断応力は 0）と仮定した。そして残留応力値については，塑性変形が発生するような大きな値ではなく，線形変形範囲の値であると考えられることから，1 から 5MPa まで変化させ A 車から D 車の 4 車種に関して最も再現性の高い残留応力値を求める手順を取った。Table 3 には，一様残留応力値を初期状態としてモデル全体に付加して熱収縮解析を行って得られた熱収縮量の実測値に対する比率を示す。

Table 3　Effect of Added Residual Stress

Vehicle	Location of Evaluation	CAE ORTHO TROPIC					
		Resitual Stress 0MPa	Residual Stress 1MPa	Residual Stress 2MPa	Residual Stress 3MPa	Residual Stress 4MPa	Residual Stress 5MPa
A	①	25%	34%	44%	54%	66%	77%
	②	52%	67%	81%	96%	110%	125%
	③	59%	68%	78%	87%	97%	107%
B	①	68%	94%	119%	144%	169%	194%
C	①	9%	18%	27%	35%	43%	52%
	②	58%	72%	86%	100%	114%	128%
	③	83%	96%	109%	122%	135%	148%
	④	95%	109%	122%	136%	150%	164%
D	①	46%	70%	95%	120%	145%	170%
	②	76%	99%	123%	146%	168%	187%
	③	33%	52%	71%	90%	107%	123%
	Mean Value	55%	71%	87%	103%	119%	134%

Table 3 より，リフトゲートトリムについては 3MPa の残留応力を付加すると A 車から D 車の 4 車種 11 か所平均として最も実測に近い予測値（実測値の 103%）が得られた。詳細に見ると車種や評価位置により最適な残留応力値が 1MPa から 4MPa の範囲でばらつきを持っていることが Table 3 から確認できる。これらは解析条件として付加した温度条件（一様分布）や局所的な線膨張係数の方向定義の誤差，また車種による形状・大きさの差から型設計／製造条件（保圧・保圧時間等）が異なる結果として平均残留応力にばらつきがあることによるものと考える。また 3MPa という値は，リフトゲートトリム用の一般ポリプロピレンで考えると室温での降伏応力（13MPa）より低く線形範囲内で，ひずみ値は 0.22%に対応している。

なおこの平均残留応力値は，部品によって異なると考えるのが妥当であり，ピラートリムなどへの適用では同様手法により同定・決定することが必要となる。

4.3　残留応力の影響

一方 Table 3 からは，残留応力値が 1MPa 変わるだけで熱収縮量が 15%程度変化しており，熱収縮に対する残留応力値の影響・感度が大きいことも分かる。

Fig. 15 と Fig. 16 に，11 点の評価位置における最高温度時伸び量および熱収縮量と，残留応力との関係を示す。

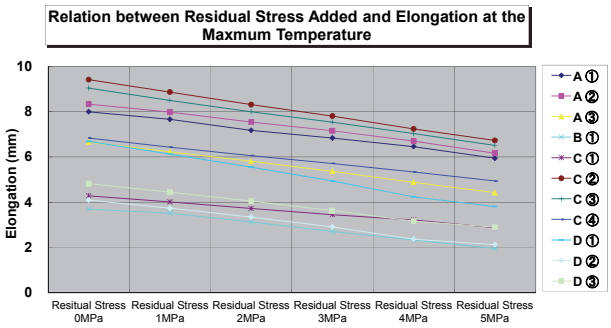


Fig. 15　Elongation at the Maximum Temperature

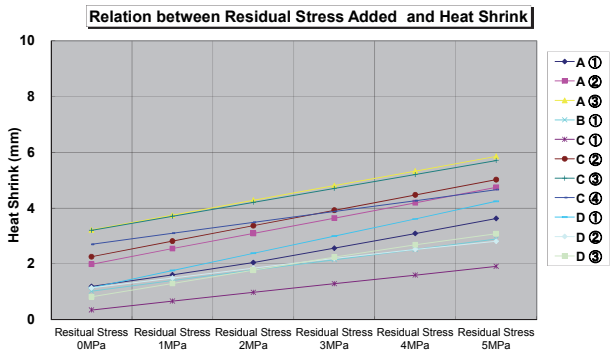


Fig. 16　Heat Shrinkage at Room Temperature

残留応力値が大きくなるほど，Fig. 15 から最高温度時の伸び量は減少し，Fig. 16 から室温戻し後の熱収縮量は増加することが分かる。これは残留応力が温度上昇の際に開放され，熱伸び量を抑制させる効果を持つことを示している。そして逆に熱収縮量に対しては増加させる影響を与えることを示している。

樹脂部品の熱変形に対しては，過去の開発経験を参考にして，対象部品がどの程度の残留応力を持ちうるかを想定して設計することが必要である。

5. 結論

リフトゲートトリムに使われているポリプロピレン樹脂の熱収縮現象に関して，材料試験による計測・現象分析と解析技術の検討・開発を行った。その結果，以下の成果・知見を得た。

(1) 熱収縮現象は室温から高温，そして室温に戻す加熱・冷却サイクルの初回に発生し，2 回目以降は同じ変形経路を取る。

(2) 熱収縮量は，最高温度や結晶化度によって変化し，異方性がある。流れ方向（MD）の方が直交方向（TD）よりも熱収縮量は大きい。また熱収縮に対してはクリープの影響は小さい。

(3) 非線形構造解析ソフト ABAQUS を用いて熱収縮量を予測できる解析手法を確立した。本手法は，線膨張係数について異方性を有し昇温時と室温戻し時では別経路の関数表現を採用するとともに，残留応力を考慮する特徴を有する。今回検討したリフトゲートトリムの場合，平均残留応力値として 3MPa を用いることで最も実測値に近づいた。なお本手法では，異方性定義および残留応力値に経験値・同定値を用いることから，型設計が未完了の開発の早期段階でも適用可能である。

(4) 残留応力が大きいほど，高温時の熱伸び量は小さくなり，室温戻し後の熱収縮量は大きくなる。

本手法は，現在ではリフトゲートトリム用以外のポリプロピレン樹脂や他の内装部品にも展開しており，適用車種・部品数の拡大により解析精度の改善を図りつつ，図面品質の向上に寄与している。

参考文献

(1) 石鍋ほか：PET フィルムのガラス転移温度近傍での力学挙動と熱収縮の有限要素解析，日本機会学会論文集（A 編），78 巻，785 号，pp.81-94（2012）

(2) 高原ほか：樹脂物性を考慮した大型樹脂部品の熱変形 FEM，トヨタテクニカルレビュー，Vol.52 No.2，pp.90-95（2002）

(3) 藤本ほか：新型「日野デュトロ」開発における樹脂 CAE の取り組み，日野技報，No.63，pp.52-57（2012）

(4) X. Chen et al. : Numerical Analysis of Thermal Growth of Cast Aluminum Engine Components, SAE Technical paper，2008-01-1419 (2008)

(5) 本間精一：プラスチックの実用強さと耐久性 11，プラスチックス，VOL.55 No.8，pp.87-97 (2004)

■著　者■


井上 実


平本 健治


高田 幸次


藤 和久


西村 賢治

論文・解説
33

3R に基づいたバンパのライフサイクル設計
3R-Based Life Cycle Design for Bumpers

新田 茂樹*1 Shigeki Nitta
山田 武*2 Takeshi Yamada
相澤 誠*3 Makoto Aizawa
築山 友美*4 Tomomi Tsukiyama
坂尻 光一*5 Kouichi Sakajiri

要約

持続可能な自動車製造業の実現に向け，自動車のライフサイクルにおける資源消費量，エネルギー使用量，環境負荷，コストを最小化する高度な循環型ライフサイクルシステムの構築が求められている。この実現のためには，Reduce，Reuse，Recycling（3R）に基づいたライフサイクル設計が必要である。

現在，廃車後の自動車の樹脂部品は Automobile Shredder Residue （自動車シュレッダダスト，以下 ASR）として大部分は燃焼して熱回収されている。マツダは，樹脂部品の中で質量が最も大きく，比較的解体しやすいバンパに注目し，1990 年代よりライフサイクル設計を進めている。2011 年８月に開始した世界初の廃車バンパから新車バンパへのリサイクルは，その成果の一端である。

本稿は，ライフサイクルで環境と資源節減に貢献する 3R に基づいたバンパのライフサイクル設計についてマツダの取り組みを紹介する。

Summary

To foster a sustainable automobile manufacturing industry, it is necessary to build an advanced recycling-oriented life cycle system that minimizes resource and energy consumptions, environmental burdens and costs. To that end, it is required to develop a product life cycle design based on 3R (Reduce, Reuse, Recycling).

Under the current system, most of the plastic automobile parts from End of Life Vehicle (ELV) are burned in the form of ASR (Automobile Shredder Residues) for energy recovery. Since the 1990s, Mazda has focused on life cycle design of bumpers because they are larger in mass and easier to dismantle than any other plastic parts. The world's first material recycling of ELV bumpers into new car bumpers, which Mazda started in August 2011, is an indication of such life cycle design.

This paper introduces Mazda's activity concerning the 3R design of bumpers that contributes to environmental protection and resource conservation.

1. はじめに

マツダは，サステイナブル“Zoom-Zoom”宣言の下，さまざまな領域において地球温暖化防止など環境保全活動を行っている。その中で，限りある資源を有効に活用するため徹底した再資源化と廃棄物削減に取り組んでいる。

その取り組みの一つとして，新車のリサイクル性を向上させるため，1990 年代より解体・分解容易な車両の設計，解体技術の研究や，リサイクルしやすい樹脂材料の採用を行ってきた。

例えば，バンパでは解体時に短時間に一体で取り外せる構造を追求してきている 。2008 年発売の 2 代目アクセラからは，バンパ下部の締結部分に，強く引くと外れやすくなる構造を採用し，バンパ開口部には取り外す際にバンパが破断せずに一体で外せるよう補強している。インストルメントパネルでは，取り付け部を離脱させやすい構造とすることで，解体時に容易に外れるよう工夫している。ハーネスのアース端子は，

*1 技術企画部 Technology Planning Dept.
*2，3 装備開発部 Interior & Exterior Components Development Dept.
*4 技術研究所 Technical Research Center
*5 カスタマーサービスビジネス企画部 Customer Service Business Development Dept.

取り外す際に端子部がちぎれ，ハーネスが残りにくい構造にしている。

また，ASR 重量の多くを占める樹脂においても，リサイクルしやすい材料を採用している。例えば，AT シフトノブにはオレフィン系熱可塑性エラストマ（TPO）を採用し，ダッシュインシュレータは，遮音材を同素材の熱可塑性フェルトに統一している。

本稿では，これらの中から特に注力しているバンパのライフサイクル設計について紹介する。

2. ライフサイクル設計に関する要件

資源効率利用設計には，ライフサイクルをベースとしたシナリオ（以下ライフサイクルシナリオ）が重要であり，このシナリオと整合させた製品の構造や形状を設計することが不可欠である[1]。廃車の場合，製品の回収後に，事前解体によって部品を回収リユース，リサイクルするシナリオと，シュレッダによる粉砕後の ASR から，素材を分別することによってリサイクルを行うシナリオなどが考えられ，そのシナリオによって製品設計の要件は異なる。例えば，前者の場合は解体容易性の設計が重要になり，後者の場合は粉砕・分別に適した材料を使用することが重要になる。このシナリオは国や製品とその部品によって異なり，また乗用車の平均ライフサイクルは約 13 年であることから，設計時点で決定することは難しい。そのため，さまざまなシナリオを想定して，設計に織り込む必要がある[2]。

Fig. 1 に，資源効率のヒエラルキーを示す。このヒエラルキーは一般的な環境影響の程度によって階層化されており，上層ほど優先すべきとしている。最も優先すべき事項は，使用量を減らすリデュースである。続いて優先事項は，部品をそのまま再使用するリユース，少し修理して再使用するリファービッシュ，一部の部品を新品と交換して再利用するリマニファクチャー，材料としてのリサイクルの順となる。また，熱回収が，廃棄よりも優先すべきであるとされている[3], [4]。

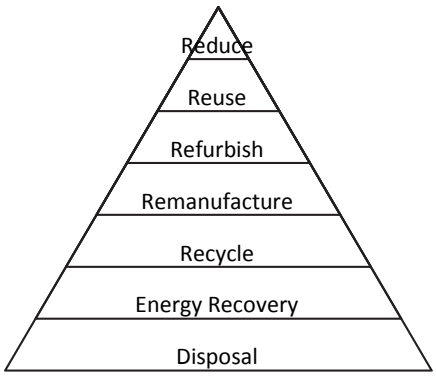


Fig. 1　Hierarchy of 3R
(Drawn Based on Erik Sundin, et al.[3])

このヒエラルキーを製品のライフサイクルの中で示したのが Fig. 2 である。リデュースは，設計，資源供給，製造などさまざまなライフサイクルステージで可能であるが，本稿では設計時に軽量化等によって行うものを示している。

マツダは，1990 年代からバンパを事前解体によって部品を回収し，リユース，材料リサイクルするシナリオに基づく要件により，ライフサイクル設計を行ってきた。この要件は，バンパを含む ASR から素材を分別するシナリオにも整合するものと考えている。
バンパのライフサイクル設計のリデュース，リユース，リサイクルそれぞれの視点で説明する。

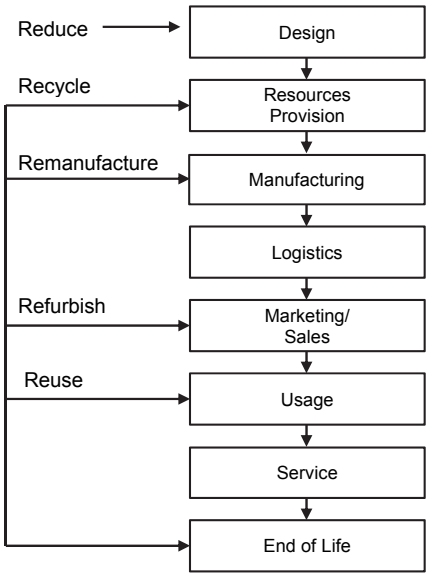


Fig. 2　Product Life Cycle
(Drawn Based on Lee Hui Mien, et al.[5])

3. リデュース設計：省資源・省エネルギー

リデュースとは，環境負荷や廃棄物の発生を抑制するために無駄・非効率的・必要以上な消費・生産を抑制あるいは行わないことである。

(1) バンパの機能

バンパの機能は，外観デザイン，燃費向上，安全性の大きく分けて 3 つがある。外観デザインとして，バンパはまさしく車の“顔”の一部であり，優れた形状や色が求められる。燃費向上には，バンパの形状による空力性能改善や開口部からの冷却性能向上が求められる。また，安全性には，軽衝突時に歩行者を保護し，機能部品（ランプ類やウォッシャタンクなど）を保護する機能が求められる。これらの機能と両立できるようライフサイクルを考慮した設計をすることが重要である。

(2) 新しいバンパ材料開発[6], [7]

マツダは，車両の軽量化を実現する自動車部品用の樹脂材料を，日本ポリプロ(株)と共同で開発した。バ

ンパとしての開発目標は，従来の部品コストと同等以下で，20%の軽量化を達成することとした。20%軽量化のためには，現状の平均板厚 2.5mm を 20%削減して 2.0mm にする必要がある。

薄肉化によって低下した剛性を補うため，材料としての開発目標は，曲げ弾性率を従来材に対して 50%向上の 2300MPa とした。剛性は板厚の 3 乗に比例することから 50%の曲げ弾性率向上では剛性は 24%不足するが，不足分については，構造と板厚配分の最適化によって達成することとした。また，薄肉化によって成形性が悪化することを防ぐため，成形時の樹脂の流れやすさの指標であるメルトフローレート（以下 MFR）は 25%上げ，40g/10min とすることを目標とした。

従来のバンパ材は，ベースとなるポリプロピレン（以下 PP）にゴム，そして充填材としてタルクを配合した，いわゆる 3 元系の材料である。剛性を向上させるにはタルクの配合量を増やし，PP の分子量を上げればよい。しかし，それでは成形性や耐衝撃性が低下してしまう。これに対して開発材は，高分子量の PP と，低分子量の 2 種類の PP にそれぞれ役割を分担させた。高分子量 PP で剛性を向上し，低下した成形性を低分子量 PP の添加で補って，剛性と成形性を両立した。

また，開発材は剛性向上のために増加したタルクの影響による耐衝撃性の低下を補うために従来中程度であったゴムの分子量を上げることにより耐衝撃性を向上させた。しかし，塗装の密着性を確保するには，成形品表面に出るゴムの面積が外表面に存在する比率（以下表層ゴム分率）を一定以上に確保する必要があるが，高分子量のゴムは球状になろうとする性質が強く，表層ゴム分率を確保できない。そこで表層にゴムが出るように，球状になりにくい分子量が低いゴムを別に添加した。

従来，中程度の分子量を持つゴムを使用していたものを，高分子量のゴムで耐衝撃性を向上させ，低下する塗装密着性を，低分子量のゴムで補うことで，耐衝撃性と塗装性を両立した。

射出成形用材料は特性が異なるものを混ぜた場合に，層分離を起こし，層間剥離することがあり，安易な多成分化は危険である。開発材料にあっても各組成の分子量と配合量を調整しながらテストピースでの確認はもちろん，実際のバンパを成形して性能確認を繰り返し，最適化を行い目標を達成した。

(3) バンパの形状

薄肉にすると冷却しやすい反面，早く充填してやらないと樹脂の粘度が上がり，流れが途中で止まってしまう。射出成形では，樹脂の注入口であるゲートの位置や，樹脂の流れの乱れなどをコンピュータによるシミュレーションで予測し，事前に形状等の最適化を行う。薄肉にすると流れる距離が短くなりゲートのレイアウトが困難となる。材料物性だけで解決できないものはゲートの位置や形状などに変更を繰り返し，最適な形状を探り出した。また，キャラクタライン（折れ）のある形状とすることで剛性が保たれる。

(4) 薄肉化，軽量化，省エネルギー化

実際に開発材を用いて板厚 2.0mm で成形したバンパの性能を評価した結果，剛性，耐衝撃性といった必要機能を全て満足することを確認し，目標とした 20%の軽量化を達成することができた。また，部品をより薄肉で製造できるため，材料使用量の大幅な削減が可能となった。

製造工程においては，薄肉化により成形時の冷却時間を短縮したことに加え，CAE 解析技術の活用により樹脂材料の流動性を最適化することで，従来は約 60 秒かかっていたバンパの成形時間を，半分の 30 秒に縮めた。これにより，製造時の消費エネルギーを大幅に削減することができた。

(5) 低コスト化

日本国内で製造される PP は，インラインコンパウンドといわれ，樹脂の重合プラントでペレットといわれる状態に造粒される。この方法は，別に造粒工程を持たないためコスト的に有利である。一方重合プラントは巨大で，基材となる PP 以外の成分を多種，大量に添加するとプラント自体の生産性が低下し，経済的に成立しない。本開発では材料メーカとの密接な共同開発を通じて，材料の 5 成分系を経済的に生産可能な組成バランスを探し出した。射出成形は，樹脂を溶かし（可塑化），型内に充填し（射出），固める（冷却）という本質的な工程と，型を開いて成形品を取り出す，といった付随的な工程に分類される。このうち可塑化時間と射出時間は材料の量が 20%減らせたことにより短縮した。薄肉化による時間短縮の効果が更に大きいのは冷却工程で，冷却時間は板厚の 2 乗に比例し，20%の板厚削減の効果で 46%削減できる計算となる。今回，実成形においても冷却時間はほぼ半減できた。更に付随的な工程も見直すことで，バンパ 1 本あたりの成形サイクルを 60sec から 30sec に削減した。また，材料のコストアップなく材料使用量も 20%削減したことで，バンパの製造コストも削減でき，低コスト化につながった。

(6) 新型車への適用

本開発材を CX-5 のバンパに採用した（Fig. 3）。前後バンパで目標の 2.0mm 板厚を実現し，重量も従来から 20%低減してフロントとリヤを合わせて 7.5kg から 6.0kg へ重量を低減した。CX-5 以降の新型車に順次展開している。

Fig. 3　Bumpers of Mazda CX-5[8]
(Upper: Front, Lower: Rear)

4. リユース，リマニファクチャリング適合設計

本稿においてリユースとは，廃車部品をそのまま再利用することである。また，リマニファクチャリングとは，部品を補修・修理をして再利用することであり，リビルディングといわれることもある。エンジン，トランスミッション，スタータ，ボンネット，ドアなどさまざまな廃車部品が自動車解体事業者などによってリユース，リマニファクチャリングが行われている[9]。

リユース，リマニファクチャリングに適合する設計とは，当該部品の解体作業を考慮することである。ロルフ シュタインヒルパー（2000）は，解体作業を容易にするための設計チェックリストを示した。このチェックリストには部品の接合の位置，取り外し方法，アクセスなど 7 項目を，3 レベル（理想的，許容できる，対策が必要）で評価するようになっている。また，リユース，リマニファクチャリングを考慮した設計が，製品の組み立て作業の効率化に役に立つことが頻繁にあり，組み立て作業時間が 5 分短縮されると解体作業時間では 10 分の短縮が見込まれるとしている[9]。

金城産業（株）の協力のもとアクセラの前モデルであるファミリアのリヤバンパの解体実験を行ったのが Fig. 4～6 である。ファミリアのリヤバンパ解体には，トランクルーム内に締結してあるリヤバンパ固定ボルトを脱着する必要がある。そのためには，まずトランクルーム内のマットを除き，次にエンドプレートのトリムを外し，その上でボルトを脱着する作業が必要である。これは，ロルフ　シュタインヒルパー（2000）のチェックリスト“接合の位置”において見えない，カバーがかかっている，隠れているので対策が必要と評価されるものである。

そこで，2 代目アクセラのリヤバンパは，トランクルーム内からのバンパ締結を止め，全て車両の外側からの締結としている。これにより，リヤバンパ解体のための作業時間が改善され，リユース，リマニファクチャリングが容易化される。

Fig. 4　Dismantlement Test 1 of Rear Bumper of Mazda Familia (Remove Trunk Mat)

Fig. 5　Dismantlement Test 2 of Rear Bumper of Mazda Familia (Remove Endplate Trim)

Fig. 6　Dismantlement Test 3 of Rear Bumper of Mazda Familia (Removed Fastening Bolts)

5. リサイクル容易設計

リサイクルとは，製品化したものを再資源化し，新たな製品の原料として利用することである。1992 年にマツダでは「リサイクル設計ガイドライン」を制定し，リサイクルしやすい材料／構造を推進している。これは，解体しやすい構造，リサイクルしやすい材料，分別の容易化，再生材の利用からなっている。対象部品はバンパ，インストルメントパネルを含む樹脂部品，その他である。このうちバンパについて述べる。

(1) 解体しやすい構造

マテリアルリサイクルのために車体からバンパを取

り外す作業では，リユース，リマニファクチャリングの解体とは異なり，バンパが破壊されても効率良く解体できることが必要である。また，解体シナリオとしては，解体事業者の既存の設備／道具で汎用性の高い方法が求められる。解体事業者の通常設備であるホイストによる上方への引き上げでの取り外しが最も主流になると予測し，フック位置や外れやすさを検証した。

効率的にバンパが解体できるように，2 代目アクセラの開発段階で，ヤマコー（株）の協力を得て，バンパをホイストで引き上げる解体実験を行った。フックをかける位置によって，バンパが破断して車体に残ってしまうケース（Fig. 7）や，締結が強いために車体が浮き上がってバンパを取り外せないケースもあった。

Fig. 7　Broken Bumper

そこで，車体が浮き上がらず容易に取り外せるように，車体との締結穴に薄肉構造を採用して締結部が破断しやすくし，部分的な破断を避けるために力がかかる部分には補強構造を取り入れ一体で解体できるようにした（Fig. 8）。この構造を取り入れたバンパにて解体業者で実験したところ，バンパはちぎれずに一体で取り外せ，効率的に解体できるとがわかった（Fig. 9）。この構造を 2 代目アクセラに採用し，以降の新型車に順次採用を拡大している。

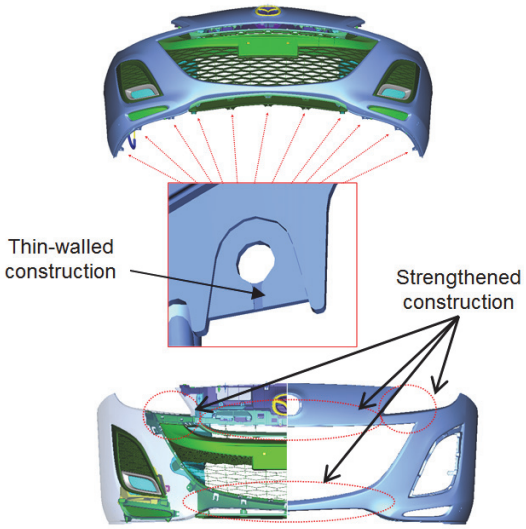


Fig. 8　Thin-Walled and Strengthened Construction in Fastenings

Fig. 9　Dismantlement Test of Bumper Designed for Recycling

(2) リサイクルしやすい材料

「リサイクル設計ガイドライン」制定前にはウレタンなどリサイクルしにくい材料がバンパに使われることもあった。「リサイクル設計ガイドライン」により，バンパには，リサイクルしやすい材料としてポリプロピレンを採用し，更にバンパフェースと同じ材料で，ラジエータグリルやロアメッシュ等の構成部品を成形している。そのため，リサイクルの際にそれぞれの構成部品を外さなくとも，分別することなくまとめて粉砕できる。

(3) 分別の容易化

樹脂部品には一目で材料がわかるように，材料記号が記載されており，バンパはポリプロピレン製で，>PP<のマークが入っている。

(4) 再生材料の利用

使用済み部品の回収・リサイクルでは，系列販社から回収した損傷バンパから新車バンパへのリサイクルを業界に先駆けて推進してきた。更に，この損傷バンパのリサイクルで培った技術を廃車バンパに応用し新車バンパの材料としてリサイクルすることを可能にした。Table 1 に，マツダのバンパリサイクル活動を示す。

Table 1　Mazda Technology Development and Implementation on Bumper Recycling

Year	Contents
1992	Recycling damaged bumper to undercover was commenced.
2001	Recycling damaged bumper to bumper reinforcement was commenced.
2002	Recycling damaged bumper to grained bumper surface was commenced.
2003	A technology to recycle damaged bumper to smooth bumper surface was developed.
2005	Continued recycling damaged bumper to smooth bumper surface was commenced.

1992 年販売会社を通じて市場損傷バンパを回収し，アンダカバーなどへの再生利用を開始した。2001 年，機械式の塗膜除去技術を活用し，市場損傷バンパリサイクル材を新材と同等レベルの強度に高め，バンパ補強用部品への再利用を開始した。2002 年，塗膜除去条件を最適化し，塗膜除去率を 98.5%まで向上させ，同年 7 月からボンゴフレンディのシボ面バンパへの再生利用を開始した。2003 年，（株）サタケと共同で光学選別技術を組み合わせた新しい塗膜除去技術を開発し，リサイクル材の塗膜除去率を 99.85%へと高め，強度・品質とも高い要件が求められる通常の塗装バンパへの再生利用が可能な技術を確立した（Fig. 10）[10], [11]。2005 年，それまでの技術確立を基に，市場損傷バンパを新車のバンパ材料として継続的に再利用することを開始した。

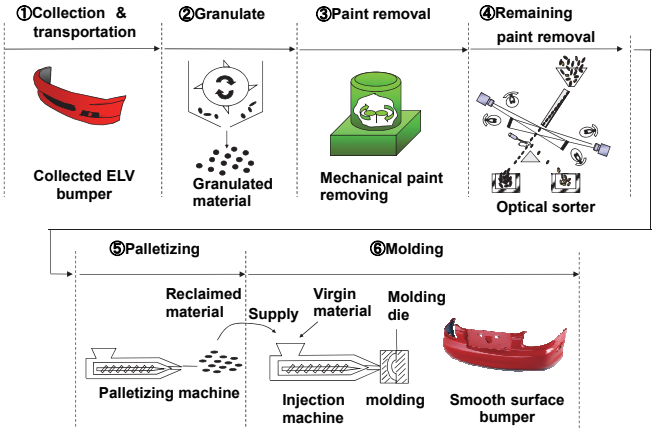


Fig. 10　Bumper Recycling Process [12]

(5) 世界初の廃車バンパの新車バンパへのマテリアルリサイクル

再生材料利用のための技術開発がベースとし，1990 年代から進めたリサイクルしやすい設計を織り込んだバンパを採用した廃車が増加してきたタイミングをとらえて，廃車バンパの新車バンパへのマテリアルリサイクルを 2011 年 8 月より世界で初めて広島地区で実施した[12], [13]。廃車バンパから新車バンパへのサプライおよびリサイクルチェーンを示したのが，Fig. 11 である。

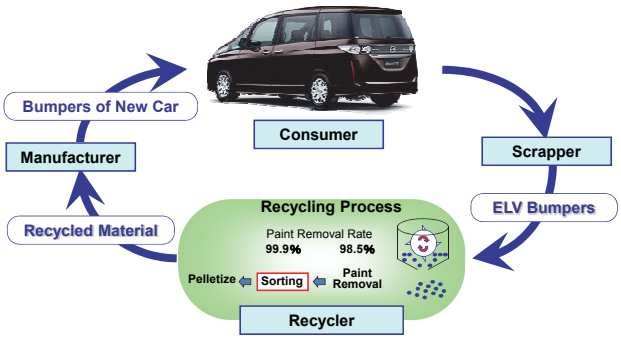


Fig. 11　Bumper Supply and Recycle Chains [13]

6. まとめ

マツダは 1990 年代から取り組んできたバンパのライフサイクルシナリオ，ライフサイクル設計を紹介した。今後もライフサイクルの全てのフェーズで，お客様の満足と地球環境や資源効率を両立させる活動を行っていく。

参考文献

(1) 福重真一，松浦剛，國井英輔，梅田靖：ライフサイクルシナリオに基づく製品設計のための統合支援環境の提案，精密工学会誌，78巻，2号，pp.143-148（2012）

(2) 中野隆裕，新田茂樹，伊東加奈子：自動車のリサイクル設計，自動車技術，Vol.66，No.11（2012）

(3) Erik Sundin and Hui Mien Lee : In what way is remanufacturing good for the environment?, Proceedings of EcoDesign 2011 International Symposium. Dec. 2011

(4) 環境省（2013），循環型社会形成推進基本計画，p.41，平成25年5月

(5) Lee Hui Mien，Lu Wen Feng ; Gay，R. ; Kheng Leng（2005），：An Integrated Manufacturing and Product Services System（IMPSS）Concept for Sustainable Product Development，Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing，2005. Eco Design 2005. Fourth International Symposium on Dec. 2005

(6) 朝野千明，藤和久，原正雄，大西正明：バンパ用高剛性ポリプロピレン材料の開発，マツダ技報，No.30，pp.191-194（2012）

(7) 朝野千明，藤和久，原正雄，大西正明，古田和広：第63回自動車技術会賞　技術開発賞受賞　超薄肉軽量バンパの開発，自動車技術，Vol.67，No.6，pp.4-5（2013）

(8) マツダ(株)：マツダ，車両の軽量化を実現する自動車部品用樹脂材料を開発，ニュースリリース，2012年02月，http://www.mazda.co.jp/corporate/publicity/release/2012/201202/120209a.html

(9) ロルフ　シュタインヒルパー：リマニファクチャリング，FRANK Sprachen，2000年7月

(10) 森脇健二，藤和久：プラスチックバンパの塗膜除去技術の開発，自動車技術会学術講演会前刷集No.99-03，pp.17-20（2003）

(11) 森脇健二，藤和久，田中宣隆，中村浩一郎，相澤誠：バンパの塗膜除去技術の開発，マツダ技報，No.23，pp.125-129（2005）

(12) 新田茂樹，伊東加奈子，森脇健二，古田和広，松田裕之，田中宣隆，山崎和重，小出朋之：世界初の廃車バンパから新車バンパへのマテリアルリサイクル，マツ

ダ技報，No30，pp.229-233（2012）
(13) Nitta.S.，Ito.K. : A Study on Innovation of Material Recycles: World's First Implementation to Use ELV Bumper Materials for New Car Bumpers, SAE Technical Paper No.2013-01-0831 , doi:10.4271/2013-01-0831，April 2013

■著　者■

新田 茂樹

山田 武

相澤 誠

築山 友美

論文・解説

34

樹脂リサイクルのライフサイクルアセスメント
－ 使用済み自動車のバンパ －
Life Cycle Assessment of Plastic Recycles
- ELV Bumper Materials -

森口 義久[*1]　新田 茂樹[*2]　中野 隆裕[*3]
Yoshihisa Moriguchi　Shigeki Nitta　Takahiro Nakano

要約

マツダは，技術開発の長期ビジョン「サステイナブル“Zoom-Zoom”宣言」にて，マツダ車をご購入いただいたすべてのお客さまに「走る歓び」と「優れた環境・安全性能」を提供することを宣言している。このビジョンの下，燃費向上などの地球温暖化抑制とともに，資源循環にも積極的に取り組んでいる。

マツダは廃棄処分された使用済み自動車のバンパ（廃車バンパ）を新車バンパの材料としてリサイクルする技術を世界で初めて実用化した（2011 年 8 月現在マツダ調べ）(1)。

本稿では，廃車バンパについてシュレッダ処理後の，樹脂が含まれた自動車シュレッダダスト（以下 ASR）を熱回収する場合と，バンパ取り外し後，新車バンパへマテリアル・リサイクルする場合について，複数のシナリオでライフサイクルアセスメント（LCA）を実施し，環境負荷を定量的に比較評価した。従来 ASR 化後の埋立てを想定した LCA を実施した例はあるが，今回，ASR 化後の熱回収の実測データを収集することにより熱回収を考慮した評価を行った。また，マテリアル・リサイクルの大きな影響要因となる輸送距離や輸送手段による，環境負荷の違いを定量的に明確化した。

Summary

Mazda announced the Sustainable Zoom-Zoom long-term vision for technology development to provide all customers who purchase Mazda vehicles with driving pleasure and outstanding environmental safety performance. Based on this vision, Mazda has been making active efforts to reduce global warming, such as improving the fuel economy, and also working on cyclical use of resources.

Mazda developed and put into practical use the world's first technology to recycle scrapped bumpers from end-of-life vehicles (ELVs) into a raw material for new vehicle bumpers (As of August 2011; Mazda data).

Regarding ELV bumpers, the environmental burden of thermal recovery from automobile shredder residue (ASR) that contains plastics after shredded and of material recycling after dismantled was shown by the Life Cycle Assessment (LCA) in several scenarios. So far, there was an LCA example of ASR landfilling, and at this time, the data of thermal recovery was collected and the result of LCA was shown. Regarding distance and means of transport that can influence on a result, the difference of environmental burden was clarified.

1. はじめに

マツダは，サステイナブル“Zoom-Zoom”宣言の下，さまざまな環境保全活動を行っている。その中で，限りある資源を有効に活用するため徹底した再資源化に取り組んでいる。取り組みのひとつとして，系列ディーラから回収した損傷バンパを新車バンパへリサイクルすることを業界に

*1～3　技術企画部
Technology Planning Dept.

先駆けて推進してきた。更に，この損傷バンパのリサイクルで培った技術を廃車バンパに応用し新車バンパの材料としてリサイクルすることを行っている。

本稿では，廃車バンパを熱回収する場合と新車バンパの材料としてマテリアル・リサイクルすることについて，LCA で環境負荷を定量的に比較評価した。

2. 手法

2.1　概要

循環型の製品設計には，ライフサイクルシナリオが重要であり，このシナリオと整合させた製品の構造や形状を設計することが不可欠であると，福重[2]らは述べている。使用済み自動車の場合，製品の回収後に，事前解体によって部品を回収・リサイクルを行うシナリオと，シュレッダによる粉砕後の ASR から，素材を分別することによってリサイクルを行うシナリオや熱回収するシナリオなどが考えられる。[3]

当社では，熱回収より望ましい樹脂マテリアル・リサイクルに取り組んでおり，具体的には，廃車バンパから新車バンパへのマテリアル・リサイクルシナリオを描きライフサイクル設計を実施し，2011 年，本社工場での廃車バンパから新車バンパへのマテリアル・リサイクルを開始した。（Fig. 1，2）

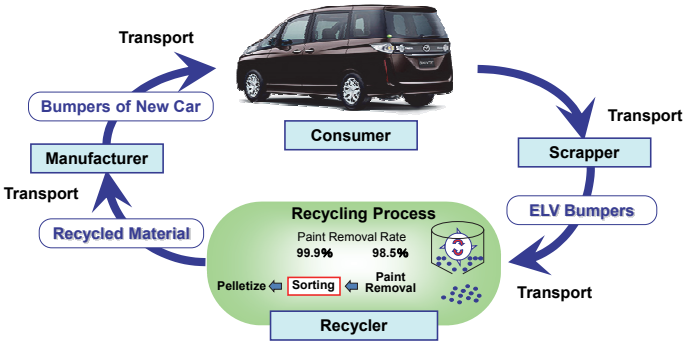


Fig. 1　Bumper Recycling System [4]

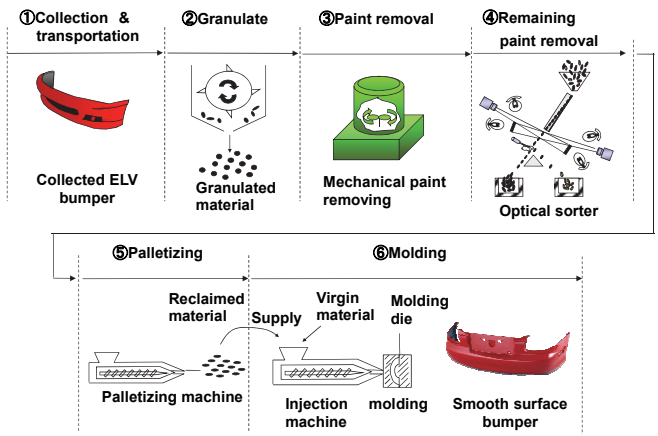


Fig. 2　Bumper Recycling Process [5]

現在，シュレッダによる粉砕後の ASR からは素材分別後，大部分熱回収されている。本稿では，当社で実施中の廃車バンパのマテリアル・リサイクルと，熱回収のうち，最も効果的なリサイクルである廃棄物発電について，LCA 評価を行った。

なお，マテリアル・リサイクルでは，今後の全国への拡大を想定し，回収した廃車バンパの粉砕，再生拠点を北海道～九州で 5 ヵ所設定し，輸送距離，輸送手段を変化させた。また，比較対象の熱回収では，再資源化処理方法について，ガス化改質炉[6][7]，熱分解ガス化灰溶融プラント[8]，RDF 化・還流ガス化プロセス[9]の 3 方式で算出を行った。

2.2　LCA 実施手法

(1) 目的

使用済み自動車（廃車）のバンパは，現状，再資源化施設で廃車の一部として熱回収される。また，廃車のバンパは，マテリアル・リサイクルする技術が確立されており，今後実用が拡大していくオポチュニティがある。今回，熱回収する場合とマテリアル・リサイクルでの環境負荷を確認することを目的とした。

(2) 製品特徴

バンパは車体の前後にフロント・バンパ，リヤ・バンパが 1 本ずつ取り付けられている。当社で平均的なバンパの仕様は，PP（ポリプロピレン）材，質量 3kg/本であり，そのうちの 1 本を評価対象とした。

(3) 機能単位

廃車バンパ 1 本（＝3kg）を機能単位とした。

(4) システム境界

システム境界を Fig. 3 に示す。システム境界は，バンパ製造から最終処分あるいはリサイクルされるまでとした。廃車として排出され，熱回収の場合は，解体処理工程にて破砕され，バンパは分離回収されずに ASR に含まれ，熱回収される。生成されたスラグは，路盤材等に活用されるが，本来の評価目的ではないためシステム境界外とした。マテリアル・リサイクルを行う場合は，解体処理工程にて廃車からバンパを取り外し，粉砕，再生処理ののちペレットとして再びバンパとして水平リサイクルされる。なお，いずれの場合もバンパの使用段階はシステム境界に含まれない。

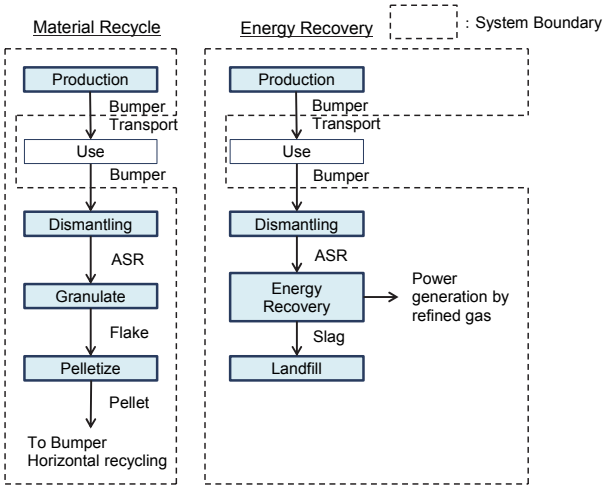


Fig. 3　System Boundaries

(5) 分析シナリオ

マテリアル・リサイクルについて 5 ケース，熱回収について 3 ケースのシナリオで算出した。マテリアル・リサイクルでは，回収・粉砕拠点の違いにより輸送区間や輸送方法が異なる。熱回収では，再資源化処理方法が異なる。

1) マテリアル・リサイクル

全国 5 ヵ所で回収・粉砕したものをいずれも広島地区へ輸送し再生する。回収・粉砕拠点について，case1：広島地区，case2：九州地区，case3：中京地区，case4：東北地区，case5：北海道地区とした。輸送区間は，case1：広島地区内，case2：九州地区～広島地区，case3：中京地区～広島地区，case4：東北地区～広島地区，case5：北海道地区～広島地区。また，輸送手段については，case1～case4：トラック，case5：トラック及び船とした。

2) 熱回収

再資源化処理方法について，case1：ガス化改質炉，case2：熱分解ガス化灰溶融プラント，case3：RDF 化・還流ガス化プロセスとした。

(6) 算出方法

バンパの成形，粉砕，再生工程，ガス化改質炉の情報は，工場の実績値を使用した。材料製造，電力等の供給エネルギー，輸送は，LCA ソフトウエア GaBi6（PE International 社）のデータベースを採用した。これらのデータから GaBi6 を用いて，積み上げ法により温室効果ガス（GHG：Greenhouse Gas）排出量を算出した。

3. 結果と考察

各プロセスにおけるインベントリ分析結果を Fig. 4 に示す。グラフの縦軸は廃車バンパ 1 本当たりの温室効果ガス：GHG 排出量（kg-CO_2 eq./unit）をあらわし，正の値が環境負荷，負の値が回避効果である。Production にはバンパ材料の PP 新材の製造および成形，Processing には廃車バンパの粉砕や再生など，Transport には廃車バンパや粉砕材の輸送，Recovery には PP 再生材利用による PP 新材製造の回避分をあらわす。Over All は，環境負荷から回避効果を差し引いた GHG 排出量である。Over All でみていくと，マテリアル・リサイクルでは，case1（広島地区内），case2（広島～九州），case3（広島～中京），case4（広島～東北），case5（広島～北海道）の順に GHG 排出量の少ない結果となった。最も少ない case1（8.9 kg-CO_2 eq./unit）に対し，最も多い case5（11.7 kg-CO_2 eq./unit）では，約 1.3 倍の GHG 排出量となった。これは，粉砕拠点，再生拠点より輸送距離や輸送手段の違いよるものである。

熱回収では GHG 排出量の少ない順に case1（ガス化改質炉），case2(熱分解ガス化灰溶融プラント），case3（RDF 化，還流ガス化プロセス）となった。最も少ない case1（10.9 kg-CO_2 eq./unit）に対し，最も多い case3（14.7 kg-CO_2 eq./unit）では，約 1.3 倍の GHG 排出量であった。これは，再資源化プロセスの違いによるものである。

また，当社の廃車での ASR 処理量が最も多く（2011 年実績），実測データを収集して算出した熱回収の case1 とマテリアル・リサイクルの各シナリオとを比較すると，マテリアル・リサイクルの case5 を除き，マテリアル・リサイクルの方が GHG 排出量は少ない。すなわち，case5 のように北海道地区で回収・粉砕を行い広島地区まで輸送し再生を行うシナリオでは輸送距離が長いため，輸送にかかる GHG 排出量の増加により環境負荷が高い結果となったが，北海道地区を除くと，各地区で回収・粉砕を行い広島地区まで輸送し再生を行うシナリオにおいて，マテリアル・リサイクルの方が，環境負荷から回避効果を差し引いた GHG 排出量が少ない結果となることが分かった。

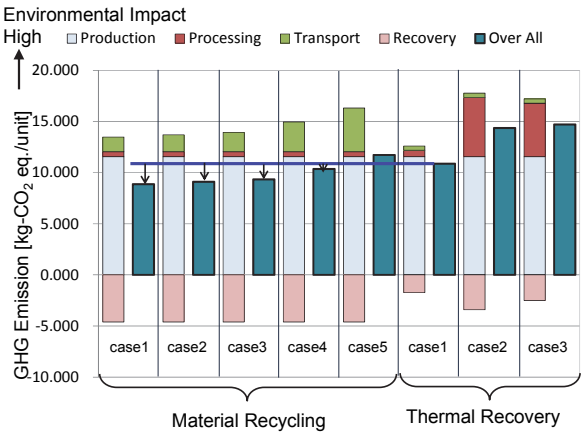


Fig. 4　Results of GHG Emissions between Energy Recovery and Material Recycling

4. 結論

本稿では，当社が世界で初めて実用化した廃車バンパを新車バンパとしてマテリアル・リサイクルする場合と，廃車バンパを熱回収する場合について，複数のシナリオでLCAによる環境性を比較評価した。その結果，北海道地区を除き，各拠点で回収・粉砕し広島地区まで輸送し再生するシナリオにおいて，マテリアル・リサイクルする方が熱回収する場合より環境負荷低減効果があることが分かった。

5. おわりに

今後，さまざまな新技術や新製造工程においても，ライフサイクル全体での環境負荷を低減するための車づくりが重要になると考える。引き続き，ライフサイクルを通した環境負荷低減効果を定量的に評価し，リサイクルをはじめ当社のさまざまな戦略立案における意思決定をサポートしていく。

参考文献

(1) マツダ（株）ニュースリリース，マツダ，廃車バンパーから新車バンパーへのリサイクルを世界で初めて実現（2011.8.24）

(2) 福重真一ほか：ライフサイクルシナリオに基づく製品設計のための統合支援環境の提案，精密工学会誌，Vol. 78，No. 2，pp.143-148

(3) 中野隆裕ほか：自動車のライフサイクル設計，自動車技術，Vol.66，11，p.13（2012）

(4) Nitta S. et al.: “A Study on Innovation of Material Recycles: World's First Implementation to Use ELV Bumper Materials for New Car Bumpers”, SAE Technical Paper 2013-01-0831，2013，doi: 10.4271/2013-01-0831

(5) 新田茂樹ほか：世界初の廃車バンパから新車バンパへのマテリアル・リサイクル，マツダ技報，30号，pp.229-233（2012）

(6) 藤原善治ほか：サーモセレクト方式ガス化改質炉制御システム，JFE 技報，No.15，2007 年 2 月，pp.43-46

(7) 経済産業省資源エネルギー庁，第 13 回基本問題委員会配布資料，資料７，p17

(8) 船崎ほか：使用済み自動車の LCA，自動車技術，vol.56，No.7，pp.57-63（2002）

(9) （独）新エネルギー・産業技術総合開発機構 平成 16 年度報告書 「二酸化炭素固定化・有効利用技術等対策事業／製品等ライフサイクル二酸化炭素排出評価実証等技術開発／製品等に係る LCA 及び静脈系に係る LCA の研究開発」，（社）産業環境管理協会，p.322

■著　者■


森口 義久


新田 茂樹


中野 隆裕

論文・解説

35

SKYACTIV 技術を実現した 高精度薄肉ダイカストとその金型技術

Die Design Technology Realizing the High-Precision and Thin-Walled Die-Casting for SKYACTIV Technology

大塚 真*1 Makoto Ohtsuka
河野 一郎*2 Ichiro Kouno
小国 英明*3 Hideaki Oguni
菅谷 智*4 Satoshi Sugaya
竹村 幸司*5 Kouji Takemura
佐々木 大地*6 Daichi Sasaki

要約

エンジン性能に影響の大きな部品であるシリンダブロックはダイカストによって生産されている。SKYACTIV エンジンの量産化にあたっては，その卓越した製品性能を実現するために，シリンダブロックの寸法精度を向上し薄肉軽量化を達成しながら，生産性も向上させる工法への進化が課題であった。「最適充填」と「安定化」という考え方に基づいて超高速高真空ダイカストを実用化した。

一方，ダイカストの鋳造工程は金型内で進行するため，この革新的工法を実現するためにはそれに適した金型技術が求められた。これに対し，中心となる金型設計はもとより，製品開発の初期段階に始まり金型メンテに至るまで全ての領域において，必要とされる技術の確立を行った結果，寸法精度に優れた薄肉軽量シリンダブロックを量産に導くことができた。

Summary

In general, the cylinder block is manufactured through aluminum die-casting process. For the SKYACTIV engine to be mass-produced, Mazda had to face two conflicting challenges to deliver its remarkable performance: development of a lighter and thinner-walled cylinder block with improved dimensional accuracy and productivity. As a result of much hard work, an ultra-high-speed ultra-high-vacuum die-casting process was successfully put into practice based on the concepts of “optimized filling” and “stabilized process”.

Meanwhile, since the die-casting process mostly develops in the die cavity, a suitable die-casting technology was necessary to make this innovative technique a reality. To this end, Mazda developed die-design and other required technologies, covering the whole engineering process from early stages of product development to die maintenance. Consequently Mazda was able to bring a dimensionally-accurate thin-walled cylinder block into mass production.

1. はじめに

近年，自動車の環境性能に対する社会的要請の高まりもあり，軽量化を目的として，乗用車用エンジンには多くのアルミ部品が使われているが，それらの生産プロセスにはダイカスト工法（以下，ダイカスト）が広く用いられている。ダイカストは溶融した金属（溶湯）を金型で形成した空間（キャビティ）に 100 分の１秒オーダで瞬時に注入（射出）して凝固させる鋳造法で，寸法精度の優れた鋳物をハイサイクルで生産可能である。

エンジン性能に影響の大きな部品であるシリンダブロックもダイカストによって生産されている。しかし，SKYACTIV エンジンの量産化にあたっては，環境性能と動力性能を両立するために，これまで以上に踏み込んだ寸法精度の改善により，製品機能を満たしながら

*1～6　パワートレイン技術部
Powertrain Production Engineering Dept.

薄肉軽量化を実現しコストアップさせない工法への進化が課題であった。

本稿では，そのダイカストを紹介するとともに課題解決のキーとなった金型技術について詳述する。

2. 超高速高真空ダイカスト

高精度薄肉のシリンダブロックを安定品質で製造するために新しいダイカストの開発を行った。その技術のポイントは「最適充填」と「安定化」である。

「最適充填」とは，アルミ溶湯を高速射出によりキャビティの隅々まで溶湯の金属凝固が始まらない状態で充填完了させる技術である。これにより，溶湯温度が低下することで発生する湯境や湯廻り不良などの充填不良を防止するとともに，充填完了直後に付加される鋳造圧力の伝達効率を高めることで内部品質の優れた製品を得る。

Fig. 1 に射出プロファイルを示す。

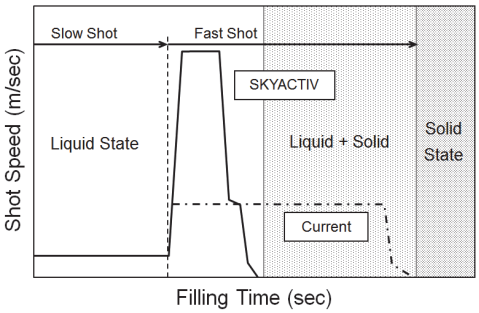


Fig. 1　Concept of Ideal Shot Profile

縦軸が射出速度で横軸が充填時間である。

従来工法は，射出速度が低いため充填時間が長くなる。そうなると，射出口から離れた部位では，溶湯が到達した時の温度（以下，「充填温度」）が，凝固の始まる初晶温度以下に低下するため充填不良が発生しやすい。また，ダイカストでは主に鋳巣を潰す目的で充填完了直後に射出口から圧力（以下，「鋳造圧」）を付加するが，凝固が始まった部分では鋳造圧の伝達が不十分になるため，巣欠陥が発生しやすくなる。

そこで，射出速度を高速化すると同時に，高速射出時に充填抵抗となる背圧の発生を抑制するために，キャビティ内をゲージ圧で-90kPa 以下に減圧する技術を開発した。

これにより充填時間が短くなり，キャビティの隅々にまで凝固開始前の温度で溶湯が到達するため充填不良が発生しない。また，凝固が始まってないため鋳造圧の伝達効率が改善され，巣欠陥の発生が抑制される。加えて，減圧実施により，キャビティ内のエアが排出されていることからエア巻き込み不良をも改善することができる。これらの相乗効果により，ほとんど巣の発生しないダイカスト製品を生産することができる（Fig. 2）。

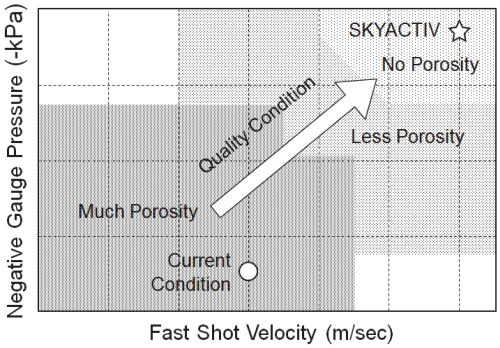


Fig. 2　Target Casting Condition

一方，「安定化」は鋳造条件を理想状態に維持する技術で鋳造条件センシングと金型保全システムからなる。

前者はキャビティ内の減圧度と鋳造圧，金型温度などをリアルタイムでモニタリングするもので，ショットごとに理想の鋳造条件にあることを確認することで品質のばらつきを抑制する。後者は適切なメンテナンスによって理想の金型状態を維持するシステムである。

これらにより安定した品質での生産を実現している。

駆け足ではあるが，以上が本稿で紹介する金型技術の前提となる工法の概要である。

3. 高精度薄肉ダイカストを実現する金型技術

これまで述べたように，ダイカストの鋳造工程はその全てが金型内で進行する。従って，この革新的工法を実現するためにはそれに適した金型技術が必要である。この考え方を図式化したのが Fig. 3 である。

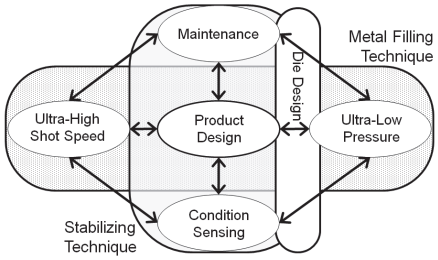


Fig. 3　Scheme of Precision Die Cast

高精度な製品を実現するための金型設計は，製品開発の初期段階から始まって，最適充填と安定化の具現化，金型メンテに至るまで全ての領域をカバーする重要な役割を担っている。これは金型技術の目的を「金型を作る」ことだけでなく「お客様価値の提供」と位置付けているからである。この考え方に基づいて，高精度ダイカストシリンダブロックを実現するために確立した施策を Table 1 に示し，主だった施策について後段に詳述する。

Table 1　Action on Die Design

Step	Objective	Action
Product Design	Proposal of Wall Thickness	・Thin wall management
	Proposal of Product Shape	・Improve the shape based on casting CAE ・Improve the accuracy on cavity dimension ・Optimize the die chilling, etc.
Die Design	Ensuring the die function	・Satisfy both of rapid decompression and prevent the molten-metal intrusion ・Direct observation of air and metal pressure ・Die damage of molten-metal impact simulation ・Die soldering simulation ・Core pin life simulation ・High air-tightness sealing, etc.
Process Design	Verifying the die function	・Coolant flow rate checking device ・Cavity air-tightness checker ・Assurance of the cavity dimension, etc.

3.1　製品設計領域の施策

高精度で薄肉軽量なシリンダブロックをコストアップすることなく生産する上で，最も重要なポイントは「いかに生産性に優れた製品設計を行うか」にある。いかに革新的な製造プロセスを適用しようとも原点である製品形状に問題があると機能／品質／コストのどこかに問題が発生する。そこで製品開発に参画し機能と生産性を両立させる活動を展開した。

(1)　肉厚マネジメント

シリンダブロックは，リブやフランジのような構造部分，部品締結のためのボス，直接機能を担うシリンダや冷却経路などから構成され，それらを結んでいる壁状構造が肉厚形状部である（Fig. 4）。

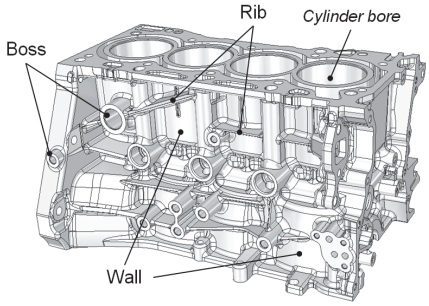


Fig. 4　Outline of Cylinder Block

軽量化を目的とし肉厚形状部の薄肉化目標を設定し，最適充填を前提に，射出口（ゲート）から各肉厚形状部分までの肉厚バランスをどうすべきかを提案するのが「肉厚マネジメント」である。品質のキーを充填温度と考え，それを，上述の通り，初晶開始温度以上とするための各領域の最小肉厚と最適射出速度を同時に提案した。

まず，鋳造シミュレーションを用いてゲートから各肉厚形状までの流動距離を算出，この距離ごとに基準の充填温度を確保するために必要な肉厚と射出速度（＝充填時間）を計算する。ダイカストで用いられる最適充填時間の式として F. C. Bennett 式や G. Ulmer 式が知られるが[1]，我々は溶湯から金型への熱伝達が支配的と考えた独自の簡易式を用いて初期検討を効率的に進めた。一般的に，流動距離の短い部位ほど薄肉化しやすいが，同時に流動距離の長い部位への充填性も考慮する必要があるため，最終的には全体の充填バランスを検証しながら肉厚を決定する必要があり，これには汎用流体解析ソフトを用いた。

このようにして製品性能と生産性を両立する製品肉厚を提案した。この時の最適射出速度は 6.6m/sec である。

(2)　生産性改善提案の実施

次は，製品形状全体を評価して鋳造品質を阻害する部位の改善を行う。引け巣，湯廻り不良，焼き付きなど，ダイカストで発生する鋳造不具合をコンピュータ・シミュレーションを用いて事前検証し，問題発生部位が明確になれば対策形状を考案し提案する。Fig. 5 は，シミュレーションによって引け巣発生が懸念された部位の製品形状を変更した事例である。

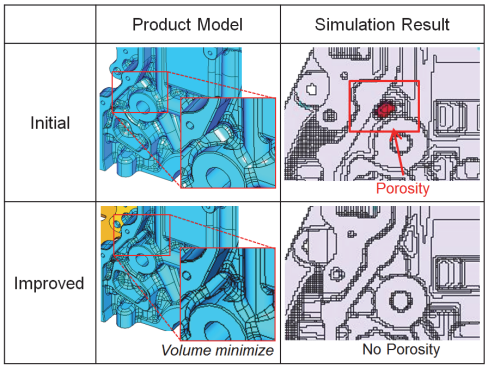


Fig. 5　Improve Shape Based on Simulation

3.2　金型設計領域の施策

製品機能と生産性を両立させる一方で，そこで明確になった要件を反映させながら金型設計を行う。また，金型への要求機能実現のみならず，生産中もそれを維持するための金型構造，材質，製作方法を決定する。

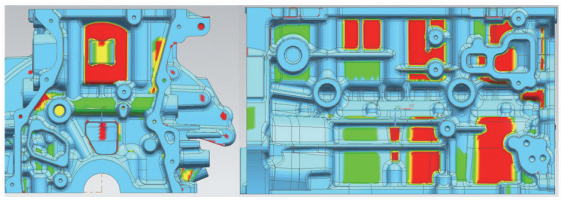
(1)　キャビティ肉厚寸法の高精度化

ダイカスト金型は鋳造性を確保するために鋳造時には 100～250℃に維持されるのが一般的である。この温度は鋳造サイクルに伴い一定の範囲に収束するが，この温度分布に応じた熱変形が発生し金型を変形させる。この変形は製品成形部位でも最大で 0.3mm に達し，製品肉厚の 10%を越えるバラツキ原因となっている。加えて，これが機械加工面で発生すると黒皮残りとなるので，これを避けるために多くの取り代が必要となり，コスト上昇要因となる。

従って，高精度な製品を実現するためにはこの金型変形を考慮して，稼働状態で狙いのキャビティ肉厚寸法になるように金型設計する必要がある。そのために，金型に発生する温度分布を鋳造シミュレーションで求め，これと FEM 熱構造解析との連成により鋳造時の金型変形量とキャビティ肉厚変化量を算出した上で，この変化をキャンセルするように金型に形状補正を実

施した。

Fig. 6 は解析によって求めた肉厚変化量を製品形状にマッピングしたもので，例えば，赤色領域は狙いの製品肉厚に対してキャビティが 0.3mm 薄くなる部分である。このような領域に対しては金型製作時に補正を加えた。



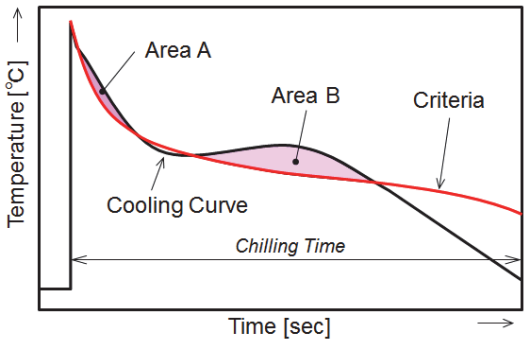
Color shows the gap, that due to the thermal deformation, from target wall-thickness. Example, red-area is thinner 0.3mm than it.

Fig. 6　Improve Shape Based on Simulation

(2)　金型焼き付きシミュレーション

焼き付きとは溶湯が金型と融着する現象をいう。これが発生すると，製品離型時に融着部が金型に残り製品欠肉を起こすとともに型表面も激しく損傷する。そのため，焼き付きが発生しにくい（＝局所的に温度上昇しない）製品形状を提案するか，金型冷却を最適化して融着を防止する必要がある。そのイネーブラとして焼き付きシミュレーション技術を確立した。

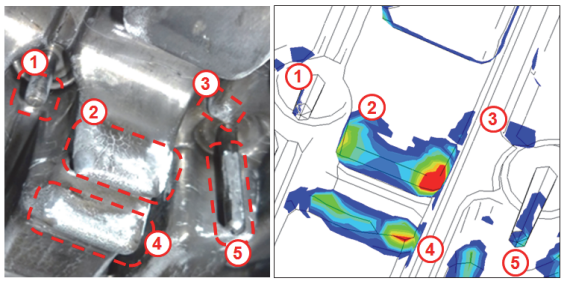
焼き付きの予測方法として，鋳造サイクルの特定のタイミングにおける，製品，または，金型の温度を評価指標とする方法が一般的に知られているが，この方法では，ボス部や鋳抜きピンなど，充填完了直後に温度上昇した後，急速に冷却されるような部位に発生する焼き付きが判定できなかった。このような現象をシミュレーションするためには融着メカニズムにのっとった計算を行う必要がある。そこで，融着をアルミ原子の鋼材中への拡散と考え，アルミ合金温度のチルタイム中の経時変化を評価基準とする解析方法によりシミュレーションを可能にした（Fig. 7）。



Area A and B are above the criteria line. Total area S (=A+B) is correlated to the time when soldering occurs. The case S is equal to zero, no soldering.

Fig. 7　Concept of Soldering Simulation

Fig. 8 にシミュレーション実施例を示す。従来は評価が難しかった鋳抜きピンに発生する焼き付きも，鋳造ショットを重ねるごとに拡大していく様子が，実態と比較してよく一致して評価できている。これを金型設計に反映するだけでなく，焼き付き部位に製品離型時に加わる引っ張り荷重を付加することで鋳抜きピン寿命を推測するシステムを構築し，交換周期の設定などに活用している。



Actual　Simulation result

Compare the soldering positions with the actual to simulation result. Contour color shows the growth of soldering.

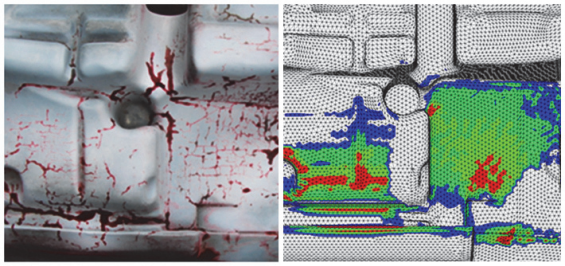
Fig. 8　Result of Die Soldering Simulation

(3)　溶湯激突による金型損傷評価

最適充填のためには高速射出を行う必要がある。それにより凝固開始前の溶湯が充填するので，従来工法に比べると鋳造圧を下げられる。従って，金型が受ける負荷は鋳造圧より，射出溶湯に起因するものが支配的になる。

従来，ゲート通過溶湯の流速は 40m/sec 以下に抑制していたが新工法では 60m/sec に達し，比重の軽いアルミ溶湯とはいえ運動エネルギーは大きい。そのため，溶湯流による金型へのダメージを事前に評価し，製品形状や金型構造に対策を織り込んでおく必要がある。このような損傷評価は実際に生産しながら長い期間かけて評価する必要があったため，多くの無駄を発生させていた。

そこで新たに射出溶湯による金型損傷をシミュレーションする技術を開発した（Fig. 9）。



Actual　Simulation result

The left shows the hairline crack distribution at the front of pour-in-gate. The Color in the right shows the time when crack occurs.

Fig. 9　Die Damage of Molten-Metal Filling Impact

鋳造シミュレーションから金型に衝突する溶湯の運動エネルギーを算出し，これと被衝突部位の金型温度（型材の高温強度を考慮するため）を変数にして，当該部位へのクラック発生タイミングを評価する仕組みである。

この技術を活用して損傷度の高い位置を作らない方案設計や，同部位での鋳抜きピン必要形状の廃止，埋め金化による高機能型材の部分適用などの対策を金型設計に織り込むことが可能となった。

(4) キャビティ真空度＆鋳造圧の計測

製造工程の安定化を目的として鋳造条件センシングを実施するため，型構造もこれに対応する必要がある。その代表例がキャビティ内減圧度と鋳造圧の計測機構である。

従来，減圧度は減圧タンク手前の配管で計測していたが，この位置では減圧タンクの影響が大きくキャビティ内減圧状態の変化を詳細に評価できなかった。そこで，キャビティ内雰囲気を直接計測可能なセンサを設置した。設置にあたっては，充填初期の溶湯飛び込みによるセンサ破損などの問題を抑制するために，溶湯挙動を考慮したセンサ構造を採用し，減圧度の微妙な変化をモニタ可能とした。

鋳造圧計測も同様で，従来のダイカストマシン加圧力の評価から，キャビティ内鋳造圧の直接計測に変更すべく，エジェクタピン座にロードセルを設置する方式に変更した。これも，実際にモノを作っている場所の状態を計測するという意味で非常に効果的である。

3.3　工程設計領域の施策

厳しい条件にさらされるダイカスト金型の状態変化を正確にとらえて適切にメンテナンスすることは重要である。

今回，メンテナンス時に，金型機能を評価するシステムを導入した。以下にその事例を紹介する。

(1) 冷却水流量チェックシステム

ダイカストにおける金型冷却は品質の生命線であるが，従来メンテでは冷却経路のサビ／垢とりと通水確認が主であった。一方，金型設計では，適切な金型冷却のために冷却点ごとの必要水量を想定している。従って，型機能評価のためには水量評価が不可欠だが，100 か所を超える冷却点を計測するのは現実的でない。そこで冷却系統ごとに生産条件での通水量をチェック可能なシステムを導入した。

(2) 金型摩耗量検知システム

0.1mm 単位で肉厚マネジメントしても，金型摩耗が発生すれば寸法は大きくばらつく。これを検出するためには摩耗による金型形状面の寸法変化をチェックする必要がある。従来は，これを可搬式の三次元測定器を用いて行っていたが計測点の網羅性や計測スピードで問題があった。目的からすれば，摩耗の発生を検知できれば良いので，1/100mm 台での計測精度は必要ない。そこで，非接触計測機を導入し形状面の変化をマスタデータとの比較で検知するシステムを確立した。型摩耗検知にとどまらず，金型損耗に関する基礎データとして新たな技術開発にも活用している。

4. まとめ

以上，SKYACTIV エンジン実現のために構築してきた金型技術を見てきたが，最後に成果を紹介する。

(1) 製品の高機能化とコスト改善の両立

シリンダブロックの一般肉厚 2.5mm を達成，その他，各部位の除肉などと合わせて 3kg の軽量化を実現した。また，サイクルタイムの短縮，加工取り代の最小化，金型補修費用の改善などにより，従来製品比での大幅なコスト改善も実現した。

一般的には相反すると考えられている「機能」と「コスト」を高いレベルでの両立という課題をブレークスルーできたのではないかと評価している。

(2) 人財育成

一方で，挑戦することで見えてきた問題も多く，今後も取り組むべき課題は多い。しかし，その解決は次の進歩への近道でもある。高い目標に挑戦し，自ら変革し続けることが「日本のものづくり」の生きる道であると認識し，金型技術で「お客様価値を実現」することの重要性を実感できた活動であり，このプロジェクトに携わったメンバがそれを共有し成長したことが最大の成果である。

参考文献

(1) 菅野，植原：アルミニウム合金ダイカストその技術と不良対策，東京，カロス出版，p.261（1997）

■著　者■


大塚 真


河野 一郎


小国 英明


菅谷 智


竹村 幸司


佐々木 大地

社外への発表論文一覧表（2012 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
2012.4.5	Thai Automotive Industry Association Automotive　Symposium 2012	Telecommunication & Radio wave Technology for Current and Future in Japan	瀬川　邦生	開発調査部
2012.4.24-26	SAE International SAE World Congress 2012	A Study on Design Factors of Gas Pedal Operation	堀上　正義 大坪　智範 沖山　　浩 田中　良幸 辻　　敏夫	車両実研部 同上 同上 広島大学 同上
		Unsteady Vehicle Aerodynamics during a Dynamic Steering Action: 1st Report, On-Road Analysis	岡田　義浩 農沢　隆秀 岡本　　哲 富士田拓也 上岡　孝志 坪倉　　誠	車両実研部 技術研究所 車両実研部 同上 同上 北海道大学
		Unsteady Vehicle Aerodynamics during a Dynamic Steering Action: 2nd report, Numerical Analysis	坪倉　　誠 伊川　雄希 中島　卓司 岡田　義浩 上岡　孝志 農沢　隆秀	北海道大学 車両実研部 広島大学 車両実研部 同上 技術研究所
		A general method of Life Cycle Assessment	新田　茂樹 森口　義久	技術企画部 同上
2012.5.14-18	IEEE Robotics and Automation Society 2012 IEEE International Coference on Robotics and Automation	A Haptic Instruction based Assisted Driving System for Training the Reverse Parking	廣川　暢一 上杉　直久 北川　朋子 古郡　　了 鈴木　健嗣	筑波大学 技術研究所 同上 同上 筑波大学
2012.5.23-25	R&D Management The R&D Management Conference 2012, Grenoble	A methodology of product life cycle assessment consistent with new business trend	新田　茂樹	技術企画部
2012.6.6-8	European Research Community On Flow, Turbulence And Combustion 9th International ERCOFTAC Symposium on Engineering Turbulence Modelling and Measurements	A Numerical Study of Transient Aerodynamics of Vehicles Subjected to Pitching Oscillation	坪倉　　誠 Cheng, S. Y. 中島　卓司 岡田　義浩 農沢　隆秀	北海道大学 同上 広島大学 車両実研部 技術研究所
2012.6.24-27	American Institute for Aeronautics and Astronautics 30th AIAA Applied Aerodynamics Conference	Effects of Transient Aerodynamics on Vehicle Stability: A Large Eddy Simulation Analysis	Cheng, S. Y. 坪倉　　誠 中島　卓司 岡田　義浩 農沢　隆秀	北海道大学 同上 広島大学 車両実研部 技術研究所
		Unsteady Aerodynamics of Road Vehicle in Dynamic Maneuvering	坪倉　　誠 小林　敏雄 伊川　雄希 中島　卓司 岡田　義浩 上岡　孝志 農沢　隆秀	北海道大学 日本自動車研究所 車両実研部 広島大学 車両実研部 同上 技術研究所

日 程	主催・大会名	題　目	発表者	所　属
2012.6.28-29	Automotive Circle International Strategies in Car Body Painting 2012	The development of the new waterborne paint system	久保田　寛	技術研究所
2012.7.23-26	The Japan Society of Mechanical Engineers The 8th International Conference on Modeling Diagnostics for Advance Engine System (COMODIA 2012)	Model-Based Control for Ignition Timing of Premixed Compression Ignition Combustion in a Diesel Engine	角田　良枝 金　尚奎 志茂　大輔 丸山　慶士 橋本　孝芳 林原　寛 鐵野　雅之	エンジン性能開発部 同上 同上 同上 同上 走行・環境性能開発部 パワートレインシステム開発部
		Understanding of The Combustion Characteristics of Rotary Engine through Combustion Analysis	尹　正虎 安永雄一郎 糸中　亮 伊藤　達夫 植木　信也	パワートレイン技術開発部 同上 同上 同上 同上
		Evaporation and Mixture Formation Processes of Ethanol/Gasoline Blended Fuel Spray Injected by Hole-Type Injector for D.I. Gasoline Engine	佐藤　圭峰 和田　好隆 藤川　竜也 北光　健太 茶藤　雅晴 西田　恵哉 Zezheng Li	技術研究所 エンジン性能開発部 パワートレイン技術開発部 (株)マツダ E&T 広島大学 同上 同上
		Development of Combustion Chamber Shape to Reduce NOx and CO_2 Emissions by Enhancing In-cylinder Gas Mixing in a Diesel Engine (Validation of Egg-shape combustion chamber concept)	金　尚奎 志茂　大輔 片岡　一司 西田　恵哉	パワートレイン技術開発部 エンジン性能開発部 走行・環境性能開発部 広島大学
		Study on Auto-ignition Characteristics of Ethanol and ETBE Blended Fuels in a Gasoline HCCI Engine	神長　隆史 養祖　隆 山川　正尚 伊藤　聡史 保泉　明 草鹿　仁	パワートレイン技術開発部 同上 同上 コスモ石油(株) 同上 早稲田大学
		Thermal Efficiency Improvement by Increasing Compression Ratio and Reducing Cooling Loss	山下　洋幸 藤本　英史 藤本　昌彦 田中　達也 山本　博之	技術研究所 同上 同上 同上 同上
2012.9.19-21	Union of Japanese Scientists and Engineers The 18th International Symposium on Quality Function Deployment	Technology Development Process Using QFD, TRIZ and Taguchi Method	山田　洋史 松井　恵子	技術研究所 同上
2012.10.16-18	SAE International 2012 Small Engine Technology Conference	Fuel Spray Evaporation and Mixture Formation Processes of Ethanol/ Gasoline Blend Injected by Hole-Type Nozzle for DISI Engine	茶藤　雅晴 Run CHEN Zezheng LI 西田　恵哉 福田　英 佐藤　圭峰 藤川　竜也	広島大学 同上 同上 同上 本田技研工業(株) 技術研究所 パワートレイン技術開発部

日 程	主催・大会名	題　目	発表者	所　属
2012.10.18-19	ESI-Group ESI Global Forum 2012	Development Process Innovation for the Vehicle Communication Systems by Electromagnetic CAE	浜田　康 鶴長真里絵	電子開発部 同上
2012.11.8-10	The Japan Society for Precision Engineering The 14th International Conference on Precision Enginerring	Challenge the Limits of Internal Combustion Engines (Innovation in Diesel Engine Technologies)	赤木　裕治	パワートレイン開発本部
2012.11.19-20	JCREN The 1st Joint Conference on "Renewable Energy and Nanotechnology"	Fundamental characteristics of co-gasification of ASR and biomass	福田　有輝 柳田　高志 松村　幸彦 中山　祐正 中島　田豊 美濃輪智朗 一原　洋平	広島大学 同上 同上 同上 同上 産業技術総合研究所 技術研究所
2012.12.5-7	INMEET CMS PTE LTD AEPA2012	Elasto-palastic property of high strength steel sheet at warm temperature and its springback	斉藤　直子 深堀　貢 久野　大輔 市川　祐也 濱﨑　洋 吉田　総仁	技術研究所 同上 広島大学 同上 同上 同上
2012.12.16-18	IEEE/SICE 2012 IEEE/SICE International Symposium on System Integration	Challenge the Limits of Internal Combustion Engine: Innovation in Diesel Engine Technologies	赤木　裕治	パワートレイン開発本部

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
2012.1.6-9	日本放射光学会 第25回日本放射光学会年会	蛍光X線・転換電子の同時測定による担持されたRh触媒のサイト分別XAFS測定	辻　笑子 生天目博文 早川慎二郎 住田　弘祐	広島大学 同上 同上 技術研究所
2012.1.18-19	日本エネルギー学会 第7回バイオマス科学会議	バイオマスとシュレッダーダストの共ガス化	福田　有輝 柳田　高志 松村　幸彦 中山　祐正 中島　田豊 美濃輪智朗 一原　洋平	広島大学 同上 同上 同上 同上 産業技術総合研究所 技術研究所
2012.1.20	日本人間工学会 安全人間工学研究部会第9回研究会	自動車運転におけるヒューマンファクタ研究の一事例 ～行動・生理・認知の各側面から～	石橋　基範	技術研究所
2012.1.21	日本都市計画学会　中国四国支部 2012年度第3回都市計画研究会	マツダ環境戦略とSKYACTIV技術	仁井内　進	パワートレイン開発本部
2012.1.30	九州先端科学技術研究所 ISIT第10回カーエレクトロニクス研究会	マツダSKYACTIV-G制御系開発における新たな取り組み	彌生　啓介	パワートレインシステム開発部
2012.2.2	自動車技術会 シンポジウム（No.12-11） 「CAE の更なる進化がもたらす車両開発」	複合領域最適化技術の適用による軽量車体構造の開発	小池　真人 小平　剛央 天野　浩平	技術研究所 同上 同上
2012.2.17	日本機械学会エンジンシステム部門 第3回自着火制御技術の高度化研究会	SKYACTIV-Dの燃焼技術開発	志茂　大輔	エンジン性能開発部
2012.2.17	東レエンジニアリング(株)， (株)NTTデータエンジニアリングシステムズ 樹脂流動CAEお客様情報交流会	CAEの活用方法と課題解決に向けた取り組み ～限界コストの追求に向けて～	岩本　道尚	車両技術部
2012.2.24	慶應義塾大学グローバルCOEプログラム 第4回環境共生・安全システムデザインに関する国際シンポジウム	次世代モビリティにおける価値成長デザイン	古郡　了 山﨑　卓 黒田　康秀 末冨　隆雅 農沢　隆秀 氏家　良樹 中澤　和夫 松岡　由幸	技術研究所 同上 同上 同上 同上 慶應義塾大学 同上 同上
2012.2.24	自動車技術会 シンポジウム（No.15-11）「新開発エンジン」	新型ディーゼルエンジンSKYACTIV-D 2.2Lの開発	中井　英二	エンジン性能開発部
		SKYACTIV-G 新型ガソリンエンジンの紹介	富澤　和廣	エンジン設計部

日 程	主催・大会名	題　目	発　表　者	所　属
2012.2.28	(株)日経 BP Automotive Technology フォーラム 2012 winter	マツダ SKYACTIV-G 制御系開発におけるモデルベース開発	小森　賢	パワートレインシステム開発部
2012.3.7	日本機械学会　中国四国学生会 第 42 回学生員卒業研究発表講演会	アルミニウム合金板の温間張出し成形限界	藤田　嗣人 久野　大輔 濱崎　洋 日野隆太郎 吉田　総仁 西口　勝也 鳥飼　岳	広島大学 同上 同上 同上 同上 技術研究所 住友軽金属工業(株)
		バイオマスとシュレッダーダストの共ガス化	福田　有輝 柳田　高志 松村　幸彦 中山　祐正 中島　田豊 美濃輪智朗 一原　洋平	広島大学 同上 同上 同上 同上 産業技術総合研究所 技術研究所
		板の繰り返し曲げによる材料パラメータの同定	市川　祐也 久野　大輔 濱崎　洋 日野隆太郎 吉田　総仁 斉藤　直子 深堀　貢	広島大学 同上 同上 同上 同上 技術研究所 同上
2012.3.8	日本機械学会　中国四国支部 第 50 期総会・講演会	高張力鋼板の温間における弾塑性挙動とスプリングバック	久野　大輔 藤田　嗣人 市川　祐也 濱崎　洋 日野隆太郎 吉田　総仁 斉藤　直子 深堀　貢	広島大学 同上 同上 同上 同上 同上 技術研究所 同上
		上肢運動インピーダンス特性を考慮したステアリングアシストシステムの構築	中原　裕貴 田中　良幸 栗田　雄一 辻　敏夫 山田　直樹 西川　一男 農沢　隆秀	広島大学 同上 同上 同上 技術研究所 車両実研部 技術研究所
		エタノール／ガソリン混合燃料噴霧の蒸発と混合気形成過程	茶藤　雅晴 李澤　征 福田　英 佐藤　圭峰 西田　恵哉	広島大学 同上 本田技研工業(株) 技術研究所 広島大学
		ピストンスカート部における潤滑油膜厚さの定量測定精度向上とクロスハッチ加工の有無が油膜に及ぼす影響	中川　俊 吉澤　隆浩 木山　悟 大澤　克幸 菅近　直範	鳥取大学 同上 同上 同上 エンジン性能開発部

日 程	主催・大会名	題　目	発　表　者	所　属
2012.3.8	自動車技術会 2011 年度関東支部　学術研究講演会	駐車運転の技量向上を促進する運転支援システムの研究	上杉　直久 廣川　暢一 北川　朋子 古郡　　了 鈴木　健嗣	技術研究所 筑波大学 技術研究所 同上 筑波大学
2012.3.9	腐食防食学会　中国・四国支部「材料と環境研究発表会」	アルミニウム合金 2011 の腐食とクラックのメカニズム解明	上田　正志	車両実研部
		アルミ−亜鉛めっき鋼板の腐食評価法の検討	今里　雅司 礒本　良則 西口　勝也	広島大学 同上 技術研究所
		ホットスタンプ材の耐食性に関する研究	江崎　達哉 重永　　勉	技術研究所 同上
2012.3.13	日本船舶海洋工学会　西部支部「異業種に学ぶ最先端数値シミュレーション技術」	自動車設計のための衝突安全シミュレーション技術	花田　　裕	NVH 性能・CAE 技術開発部
2012.3.15	東広島商工会議所 次世代自動車技術研究会	内燃機関の進化構想 −SKYACTIV エンジンとその技術進化−	山本　博之	技術研究所
2012.3.25-28	日本化学会 日本化学会第 92 春季年会（2012）	Mo_6S_8 の有機化学修飾とイオン伝導	花岡　輝彦 犬丸　　啓 甲斐　裕之 對尾　良則	広島大学 同上 技術研究所 同上
2012.3.28	日本数学会 数学・数理科学のためのキャリアパスセミナー −研究開発型企業との出会い	マツダにおけるインターンシップ体験−時系列解析を活用したエンジン性能予測精度向上	目良　　貢	技術研究所
2012.3.28	大阪市立工業研究所 プラスチック・テクノプラザ 平成 24 年 3 月例会	マツダ(株)における“もの造り革新”の取組み 〜徹底したムダ排除による軽量バンパーの開発〜	市川　真治	車両技術部
2012.3.28-29	触媒学会 第 109 回触媒討論会	アルミナと複合化した Zr-Nd 系酸化物による PM 燃焼反応の促進	原田浩一郎 馬場　誉士 山田　啓司 重津　雅彦 髙見　明秀	技術研究所 同上 同上 同上 同上
2012.3.29-31	電気化学会 電気化学会第 79 回大会	小粒径カーボン表面のリチウムイオン吸蔵メカニズムについて	甲斐　裕之 住田　弘祐 對尾　良則 玉井　久司	技術研究所 同上 同上 広島大学
2012.4.13	全国ディーゼルポンプ振興会連合会 定例総会講演会	新型ディーゼルエンジン SKYACTIV-D 2.2L の開発	寺沢　保幸	エンジン性能開発部
2012.4.19	日本トライボロジー学会 第 10 回変速機のトライボロジー研究会	新型オートマチックトランスミッション「SKYACTIV-Drive」の開発	寺岡　隆道	ドライブトレイン開発部
2012.4.19	自動車技術会 第 1 回自動車技術会ヒューマンファクター部門委員会	駐車運転の技量向上を促進する運転行動支援システムの研究	上杉　直久 廣川　暢一 北川　朋子 古郡　　了 鈴木　健嗣	技術研究所 筑波大学 技術研究所 同上 筑波大学

日 程	主催・大会名	題　目	発表者	所　属
2012.4.20	SPE 日本支部 SPE 講演会：クルマの軽量化を支える最新プラスチック材料・加工技術	バンパーTO バンパーリサイクル	藤　　和久	技術研究所
2012.5.18	慶応義塾大学 デザイン科学講座	次世代モビリティにおける価値成長デザイン	古郡　　了	技術研究所
2012.5.19-20	日本分析化学会 第 72 回分析化学討論会	蛍光 X 線・転換電子の同時測定による元素選択的な比表面積測定	辻　　笑子 生天目博文 早川慎二郎 住田　弘祐	広島大学 同上 同上 技術研究所
2012.5.23-25	自動車技術会 2012 年春季大会　フォーラム	マツダの現状と将来のディーゼルエンジン開発	寺沢　保幸	エンジン性能開発部
2012.5.23-25	自動車技術会 2012 年春季大会　学術講演会	高剛性バンパ用ポリプロピレンの開発	朝野　千明 大西　正明 藤　　和久 原　　正雄 長田　全弘 岡田　泰史	技術研究所 同上 同上 同上 日本ポリプロ(株) 同上
		衝突シミュレーションにおけるスポット溶接破断評価モデルの開発	東山　実樹 花田　　裕 竹内　俊夫 北原陽一郎	NVH 性能・CAE 技術開発部 同上 同上 技術研究所
		高圧縮比ガソリンエンジンにおける燃焼のコモンアーキテクチャー技術	長津　和弘 西本　敏朗 早川　元雄 和田　好隆 養祖　　隆 山川　正尚 人見　光夫	パワートレイン技術開発部 エンジン設計部 エンジン性能開発部 同上 パワートレイン技術開発部 同上 パワートレイン開発本部
		駆動系の非線形特性を利用した 4WD 車の燃費と NV の最適化	小泉　　陽 藤川　智士 森田　賢二 丸谷　哲史 西川　　啓 中島　宏幸	エンジン性能開発部 同上 同上 ドライブトレイン開発部 同上 同上
		乗用車用次世代クリーンディーゼルエンジン	旗生　篤宏 丹羽　　靖 丸尾　幸治 出口　博明 寺沢　保幸	エンジン設計部 同上 パワートレイン技術部 エンジン設計部 パワートレイン技術開発部
		マツダ「CX-5」の車体技術	松岡　秀典	ボデー開発部
		外板材の塗装焼き付きひずみ解析技術の開発	浜田　幸一 角田　将晃	住友金属工業(株) 車体技術部

日 程	主催・大会名	題　目	発表者	所　属
2012.5.24	石油学会 第 61 回研究発表会	新型ディーゼルエンジン SKYACTIV-D2.2L の開発	寺沢　保幸	エンジン性能開発部
2012.5.27-29	日本機械学会 ロボティクス･メカトロニクス講演会 2012	緊急回避支援機能を組み入れた上肢運動インピーダンス特性に基づくステアリング制御系	田中　良幸 中原　裕貴 栗田　雄一 辻　　敏夫 山田　直樹 西川　一男 農沢　隆秀	広島大学 同上 同上 同上 技術研究所 同上 同上
2012.6.2	日本設計工学会　中国支部 平成 25 年度研究発表講演会	新開発した圧電フィルムセンサーの自動車衝突実験への適用	徳山　辰弥	衝突性能開発部
2012.6.7-8	日本ばね学会 2012 年度春季定例行事	SKYACTIV エンジン開発における Breakthrough	富澤　和廣	エンジン設計部
2012.6.7-9	日本塑性加工学会，日本機械学会 平成 24 年度塑性加工春季講演会	高張力鋼板の温間弾塑性特性とスプリングバック	斉藤　直子 深堀　　貢 久野　大輔 市川　祐也 濱崎　　洋 吉田　総仁	技術研究所 同上 広島大学 同上 同上 同上
2012.6.14-15	組込みシステム技術協会 組込み総合技術展　関西	超低燃費 SKYACTIV テクノロジー誕生を支えたモデルベース開発	原田　靖裕	パワートレイン開発本部
2012.6.15	中国 IBM ユーザー研究会 平成 23 年度 IT 研究会成果発表会	大規模データ処理を支える Hadoop とは!?	村上志穂美 坂本　太一	インフラシステム部 (株) 中電工
2012.6.20-22	リードエグジビションジャパン(株) 第 23 回設計･製造ソリューション展専門セミナー	マツダ技術研究所における，人材育成の取組み ～「技術のプロ」から「仕事のプロ」へ～	細谷　英生	技術研究所
2012.6.21-22	型技術協会 型技術者会議 2012	CAE を活用したプレス金型構造の最適化事例	三笹　　護	車体技術部
2012.6.29	(株) 日経 BP 最先端技術セミナー 「EV/PHEV の次世代要素技術を知る」	電気二重層キャパシタを用いた減速エネルギー回生システム「i-ELOOP」の狙い	高橋　正好	車両システム開発部
2012.7.2-3	電子情報通信学会 VLD/CAS/MSS/SIP 共催研究会	スカイアクティブの開発とそれを支えたモデルベース開発	原田　靖裕	パワートレイン開発本部
2012.7.4	プロメテック･ソフトウェア(株) Prometech Techno Forum in NAGOYA	自動車開発への Particleworks の適用事例と課題	佐藤　晴美	エンジニアリングシステム部
2012.7.7	軽金属学会　中国四国支部 第 4 回軽金属学会中国四国支部講演大会	A5182-O アルミニウム合金板の温間成形限界試験法の確立	藤田　嗣人 濱崎　　洋 吉田　総仁 西口　勝也 鳥飼　　岳	広島大学 同上 同上 技術研究所 住友軽金属(株)

日 程	主催・大会名	題　目	発表者	所　属
		Al-Mn-X 合金の開発	山村　信治 松木　一弘 崔　　龍範 佐々木　元 木村　貴広 小田　信行 西口　勝也	広島大学 同上 同上 同上 技術研究所 同上 同上
2012.7.11-13	日本能率協会 第 26 回 EMC・ノイズ対策技術シンポジウム	車両開発の立場から見た電気・電子機器の EMC 仕様など	網本　徳茂	電子開発部
2012.7.17	日本材料学会 腐食防食部門委員会 第 287 回例会 「輸送機器の腐食防食」	自動車の腐食現象と防食技術	山根　貴和	車両実研部
2012.7.18-19	(株)JSOL LS-DYNA&JSTAMP フォーラム 2012	衝突解析における破断リスク評価用スポット溶接モデルの開発	東山　実樹	NVH 性能・CAE 技術開発部
2012.7.19	シーメンス PLM ソフトウェア Siemens PLM Connection Japan 2012	Mazda の生産領域での 3 次元工程検証（DPA）の革新	川合　優崇 松永　伸子	車両技術部 同上
2012.7.24	(株) 日経 BP ものづくりフォーラム 2012 summer「CAE 活用最前線～解析主導型設計の課題と対策～」	マツダにおける CAE の取組み	花田　　裕	NVH 性能・CAE 技術開発部
2012.7.24	東京大学 東京大学 JAXA 社会連携講座	マツダ技術研究所におけるエンジン CFD の開発経過と目指す方向	藤本　英史	技術研究所
2012.7.27	群馬県産業経済部工業振興課 次世代自動車特別講演会	技術開発の方向性と自動車に求められる技術	山本　幸男 栃岡　孝宏	技術研究所
2012.7.31	ひろしま医工連携イノベーション推進協議会 イノベものづくり士育成研修「CAD/CAM/CAE/VE 実践研修」	自動車開発における CAE 活用事例の紹介	中野　伸一	NVH 性能・CAE 技術開発部
2012.8.4	日本鋳造協会 平成 24 年度鋳造カレッジ中国四国地区 鋳鉄コース	量産小物鋳鉄鋳物を中心とした鋳鉄の材質	黒谷　真司	パワートレイン技術部
		量産小物鋳鉄鋳物を中心とした鋳鉄の製造プロセス，材質，鋳造方案	田中　裕一	パワートレイン技術部
2012.8.21	広島大学先進機能物質研究センター 次世代電池研究会	リチウムイオン電池の劣化メカニズム解析について	古賀　広之	技術研究所
2012.9.6-7	薄鋼板成形技術研究会 2012 年度第 2 回研究討論会	マツダ「モノ造り革新」プレス領域	森澤　　誠	車体技術部
		CAE を活用したプレス金型構造の最適化事例	三笹　　護	車体技術部

日 程	主催・大会名	題　目	発表者	所　属
2012.9.10-12	日本機械学会 2012 年度年次大会	マツダ減速エネルギー回生システムの開発	平野　晴洋	パワートレインシステム開発部
		品質工学的手法による「癒し度」の定量化	北岡　哲子 内田　博志	東京工業大学 技術研究所
2012.9.12-14	電気学会 平成 24 年電力･エネルギー部門大会	交通行動パターン推定を考慮した電気自動車による周波数制御に関する研究	造賀　芳文 塚井　誠人 出口　翔太 谷脇　誉崇 餘利野直人 佐々木　豊 坂本　和夫 福庭　一志	広島大学 同上 同上 同上 同上 同上 技術研究所 電気駆動システム開発室
2012.9.16-18	日本流体力学会 日本流体力学会年会 2012	自動車実走行時に作用する空力減衰効果とその発生メカニズム	ﾁｪﾝ　ｼｭｱﾝ 坪倉　　誠 中島　卓司 岡田　義浩 農沢　隆秀	北海道大学 同上 広島大学 車両実研部 技術研究所
2012.9.19-21	化学工学会 第 44 回秋季大会	アルミ・鋼板の耐食性評価法の検討	礒本　良則 澤田　和英 今里　雅司 西口　勝也	広島大学大学院 同上 同上 技術研究所
2012.9.21-24	日本機械学会 M&M2012 材料力学カンファレンス	車体軽量化のための複数性能を両立させる構造最適化技術	天野　浩平 小平　剛央 小池　真人	技術研究所 同上 同上
2012.9.24-26	触媒学会 第 110 回触媒討論会	Rh 担持 ZrO_2 触媒の三元触媒活性に与える La の複合化効果	川端　久也 国府田由紀 住田　弘祐 重津　雅彦 高見　明秀 犬丸　　啓	技術研究所 同上 同上 同上 同上 広島大学
		PM 燃焼における ZrNd 系酸化物の CO 酸化反応メカニズムの検討	馬場　誉士 原田浩一郎 山田　啓司 重津　雅彦 石原　達己 髙見　明秀	技術研究所 同上 同上 同上 九州大学大学院 技術研究所
2012.9.26-28	日本機械学会 第 22 回設計工学･システム部門講演会	視空間知覚の感性特性を考慮した自動車インテリア構造の検討	武田　雄策 大黒谷陽子 村瀬　健二 大坪　智範 橋本　　悟 伏見　　亮 民谷　　謙	技術研究所 同上 同上 車両実研部 商品企画部 同上 開発企画部

日 程	主催・大会名	題　目	発表者	所　属
		走行場の時間軸変動に対応した創発型のハイブリッド自動車制御システムの提案	山﨑　卓 古郡　了 黒田　康秀 末冨　隆雅 農沢　隆秀 氏家　良樹 中澤　和夫 松岡　由幸	技術研究所 同上 同上 電気駆動システム開発室 技術研究所 慶應義塾大学 同上 同上
		SKYACTIV テクノロジーとその開発を支えたモデルベース開発	原田　靖裕	パワートレイン開発本部
2012.9.28	プロメテック・ソフトウェア(株) Prometech Simulation Conference 2012 第2弾	自動車開発への Particleworks の適用事例と課題	佐藤　晴美	エンジニアリングシステム部
2012.10.3-5	自動車技術会 2012 年秋季大会　学術講演会	透過光減衰による直噴ガソリンエンジンのプラグくすぶり性評価方法の開発	内田　健児 藤川　竜也 樫山　謙二 小野　裕史 山川　正尚	パワートレイン技術開発部 同上 エンジン性能開発部 同上 パワートレイン技術開発部
		逐次実験計画法の拡張による車体構造の複合領域最適化手法	小平　剛央 中本　尊元 小池　真人 天野　浩平 西井　龍映 秦　攀	技術研究所 同上 同上 同上 九州大学ﾏｽ･ﾌｫｱ･ｲﾝﾀﾞｽﾄﾘ研究所 同上
		均質化法を用いた冷却損失と耐久性を両立する高応答断熱構造の研究	増山　将 宮内　勇馬 角島　信司 甲斐　伸吾 高野　直樹	技術研究所 同上 同上 同上 慶應義塾大学
		高彩度カラーの発色技術	中野さくら 久保田　寛 篠田　雅史	技術研究所 同上 車両技術部
2012.10.4	サイエンス&テクノロジー(株) セミナー	電気二重層キャパシタを用いた減速エネルギー回生システム「i-ELOOP」について	高橋　正好	車両システム開発部
2012.10.11-12	(株) ヴァイナス VINAS Users Conference 2012	CX-5 車体開発とフロントフロアのトポロジ最適化	田中　祐充 小平　剛央	ボデー開発部 技術研究所
2012.10.12	慶應義塾大学 理工学部 機械工学科 慶應義塾大学 計算力学講義	自動車業界における計算力学の活用事例	宮内　勇馬	技術研究所
2012.10.13	日本機械学会 先進内燃機関セミナー研究会	冷却損失低減による内燃機関の図示効率向上	山本　博之	技術研究所
2012.10.16	ダッソー・システムズ(株) 2012 SIMULIA Community Conference Japan	マツダにおける最適化技術活用の取り組み	鐵本　雄一	エンジニアリングシステム部

日 程	主催・大会名	題　目	発表者	所　属
2012.10.20	日本機械学会 北海道支部 第51回講演会	燃焼方式及び多種炭化水素成分が高圧縮比ガソリンエンジンの性能に及ぼす影響	川田　貴大 草鹿　　仁 岡屋　晋伍 養祖　　隆 山川　正尚 伊藤　聡史	早稲田大学 同上 同上 パワートレイン技術開発部 同上 コスモ石油(株)
2012.10.25-26	日本TOC推進協議会 TOCシンポジウム2012	「SKYACTIV開発」へのCCPMの活用	木谷　昭博 三村　光生	パワートレイン企画部 同上
2012.10.26	日本知的財産協会 2012年度関西三業種合同部会	マツダの知的財産戦略	安藤　誠一 水嶋　浩治	知的財産部 同上
2012.10.30	日本立地センター 日本工作機械販売技術者研修	車体軽量化技術の現状と将来展望	山本　幸男	技術研究所
2012.10.30-31	日本バリュー・エンジニアリング協会 第45回VE全国大会	マツダ「SKYACTIV」モノ造り革新による理想コスト追求活動	井口　　勇	エンジン設計部
2012.10.30-11.2	エムエスシーソフトウェア(株) MSC Nastran Users Meeting 2012	構造最適化技術を用いた自動車車体の軽量化検討の事例紹介	小平　剛央	技術研究所
2012.10.31-11.2	日本機械学会，自動車技術会 第23回内燃機関シンポジウム	オゾン添加によるガソリンHCCIの低温燃焼特性	髙橋　巧朋 清末　　涼 村上　　康 山下　洋幸	技術研究所 同上 エンジン性能開発部 技術研究所
		マツダディーゼルエンジンSKYACTIV-Dの燃費向上技術と将来	中井　英二	エンジン性能開発部
		詳細燃焼反応を考慮したディーゼルエンジンシミュレーションによる車両過渡性能の予測	小林　謙太 田所　　正 高橋　宏和 佐藤　圭峰 宮崎　正浩 金　　尚奎 志茂　大輔	エンジン性能開発部 同上 パワートレイン技術部 技術研究所 エンジン性能開発部 同上 同上
		ロータリエンジンにおける詳細素反応を用いた流動・燃焼解析技術の構築	中島　　聖 山本　　亮 横畑　英明 香川　良二 村瀬　英一 森吉　泰生	エンジン性能開発部 同上 同上 パワートレイン技術開発部 九州大学 千葉大学
		各種燃料種が高圧縮比ガソリンエンジンの自己着火特性に及ぼす影響	岡屋　晋伍 川田　貴大 草鹿　　仁 養祖　　隆 山川　正尚 伊藤　聡史 保泉　　明	早稲田大学 同上 同上 パワートレイン技術開発部 同上 コスモ石油(株) 同上

日 程	主催・大会名	題　目	発表者	所　属
		SKYACTIV-D の電子制御システム	杉山　貴則 丸本　真玄 名越　匡宏 前川　耕太 波多野　崇	パワートレインシステム開発部 技術研究所 パワートレインシステム開発部 同上 同上
2012.11.2	岡山県産業振興財団，ひろしま産業振興機構 平成 24 年度次世代自動車開発技術高度化促進講座	モデルベース開発の活用事例	原田　靖裕	パワートレインシステム開発部
2012.11.7	自動車技術会 蓄電システム部門技術委員会 第 5 回委員会	可変電圧オルタネーターとキャパシタによる世界初高エネルギー回生型減速回生システム（i-ELOOP）の開発	藤田　弘輝	技術研究所
2012.11.7-9	全国 IBM ユーザー研究会連合会 第 23 回 iSUC 仙台大会	大規模データ処理を支える Hadoop とは!?	村上志穂美 坂本　太一	インフラシステム部 (株)中電工
		Global Common IT へのチャレンジ ～EA 取り組み事例紹介～	久保田康之	インフラシステム部
2012.11.9	日本金属プレス工業協会 第 88 回金属プレス加工技術研究会	マツダモノ造り革新 ～超ハイテン材の精度予測技術の構築～	橋本　　昭	車体技術部
2012.11.9	CAE 懇話会 第 35 回関西 CAE 懇話会	自動車エンジン･変速機開発における大規模 CAE	栗栖　　徹	エンジン性能開発部
2012.11.10	日本機械学会 講演会「ものづくり最前線」	クリーンディーゼル開発最前線	神崎　　淳	パワートレイン技術開発部
2012.11.13	自動車技術会 シンポジウム（No.02-12）「動力伝達系の最新技術 2012」	SKYACTIV T/M のユニット同時開発に対するギヤノイズ解析の適用	宮本　崇史 奥田　健司 日髙　隆紀 水谷　聡志 佐野　　徹 田辺　裕樹 工藤　健志 橋本亜由子	エンジン性能開発部 同上 同上 同上 NVH 性能･CAE 技術開発部 エンジン性能開発部 同上 第 2 パワートレイン製造部
2012.11.14-16	電気化学会電池技術委員会 第 53 回電池討論会	小粒径カーボン負極における電解液の反応メカニズム解析	石津　嘉子 甲斐　裕之 住田　弘祐 對尾　良則 玉井　久司	技術研究所 同上 同上 同上 広島大学
2012.11.16	(株)IDAJ IDAJ CAE Solution Conference 2012	マツダの電気駆動システム：モデルベース開発における活用	米盛　　敬 板坂　直樹	技術研究所 同上

日 程	主催・大会名	題　目	発表者	所　属
2012.11.16	東レエンジニアリング(株) 2012 年度 3D TIMON お客様交流会（東京会場）	ムダの徹底排除に向けた CAE の取り組み	岩本　道尚	車両技術部
2012.11.20	自動車技術会 第 4 回計測･診断部門委員会	直噴ガソリンエンジンにおける高温高圧下でのエタノール／ガソリン燃料噴霧の蒸発と混合気特性	佐藤　圭峰	技術研究所
2012.11.21-22	日本イーエスアイ(株) PUCA2012 -ESI Users' Forum Japan-	電磁界 CAE による自動車通信システム開発プロセス革新	浜田　　康 鶴長真里絵	電子開発部 同上
		PAM-STAMP 2G の温間成形シミュレーションへの適用	斉藤　直子	技術研究所
2012.11.27-28	(株) CD-adapco STAR Japanese Conference 2012	マツダ(株)装備開発部における CFD 活用	井上　　実	装備開発部
2012.11.29-30	型技術協会 型技術ワークショップ 2012 in 神戸	「モノ造り革新」歩留まり向上に向けた取り組み	森澤　　誠	車体技術部
2012.11.30	日本機械学会 エンジンシステム部門 基礎教育講習会	新世代高効率ガソリンエンジン・クリーンディーゼルエンジンの開発	赤木　裕治	パワートレイン開発本部
2012.11.30-12.1	プラスチック成形加工学会 第 20 回プラスチック成形加工学会秋季大会	高剛性バンパー用ポリプロピレンの開発	大西　正明 藤　　和久 朝野　千明 原　　正雄 古田　和広	技術研究所 同上 同上 同上 同上
		発砲成形技術を用いたドアモジュール用基材の開発	宮本　嗣久 小川　淳一 金子　満晴 藤　　和久 梶山　智宏 高橋　知希 髙橋　信之 中野　誠司 大畦　大輔 岩崎　有彦 宮地　敏記	技術研究所 装備開発部 技術研究所 同上 ボデー開発部 同上 同上 衝突性能開発部 ダイキョーニシカワ(株) 同上 同上
2012.12.7	自動車技術会 シンポジウム（No.04-12）「自動車の振動騒音とうまくつきあう方法」	ロードノイズ性能のためのサスペンション振動特性分析技術	木下　浩志	NVH 性能･CAE 技術開発部
2012.12.7	中国情報通信懇談会，総務省中国総合通信局 電波利活用セミナー2012 in 広島	クルマと無線通信の融合	山本　雅史	技術研究所
2012.12.8	日本鋳造協会 平成 24 年度鋳造カレッジ中国四国地区 鋳鉄コース	鋳鉄鋳造概論（キュポラ溶解理論と実際）	田中　裕一	パワートレイン技術部

日 程	主催・大会名	題　目	発表者	所　属
2012.12.12	自動車技術会 シンポジウム（No.05-12）「究極の燃費向上を目指して」	マツダ減速エネルギー回生システム i-ELOOP（intelligent energy loop）の開発	久米　章友	パワートレインシステム開発部
2012.12.12-13	(株)JSOL JMAG ユーザー会 2012	磁界 CAE を用いたアドバンストキーレス開発	吉田　俊秀	電子開発部
2012.12.15	日本人間工学会　中国･四国支部 第 45 回日本人間工学会中国･四国支部大会	視覚特性に基づいた車載表示器の輝度ムラ判定基準の開発	兼重　一菜 上村　裕樹 石橋　基範 沖山　　浩 田中　松広	車両実研部 同上 同上 同上 同上
		車室内表示情報設計のための文字情報の認知負荷の定量化	中里　仁美 星野　陽子 原　　利宏 石橋　基範 岩下　洋平	技術研究所 同上 同上 車両実研部 技術研究所
		日本，欧州，米国における運転席着座状態の実態調査分析	加藤久美子 堀上　正義 大坪　智範 沖山　　浩 田中　松広	車両実研部 同上 同上 同上 同上
		車両挙動に対する操縦負担の生体力学的評価	成末　充宏 田中　良幸 大坪　智範 沖山　　浩 田中　松広 西川　一男 農沢　隆秀 辻　　敏夫	広島大学 同上 車両実研部 同上 同上 技術研究所 同上 広島大学
		人間の反力知覚特性に関する実験的考察 ～ステアリング操作への適用～	山田　直樹 竹村　和紘 岸　　篤秀 西川　一男 農沢　隆秀 栗田　雄一 辻　　敏夫	技術研究所 同上 同上 同上 同上 広島大学 同上
		自動車の内装質感定量評価方法 －加飾部品の素材感定量化－	中本　尊元 桂　　大詞 山根　貴和	技術研究所 同上 同上
2012.12.16-17	宇宙航空研究開発機構 実問題のための多目的設計探査ワークショップ 2012	自動車の車体構造開発における複合領域近似最適化の適用事例と今後の課題	小平　剛央	技術研究所
2012.12.17-18	日本液体微粒化学会 第 21 回微粒化シンポジウム	直噴ガソリンエンジンにおける高温高圧下でのエタノールとガソリン燃料噴霧の蒸発と混合気形成特性	佐藤　圭峰 志々目宏二 和田　好隆 北光　健太 茶藤　雅晴 西田　恵哉	技術研究所 エンジン性能開発部 同上 (株)マツダ E&T 広島大学 同上

日 程	主催・大会名	題　目	発表者	所　属
		レーザーシート／シリコン油滴散乱法によるガソリン噴霧の蒸気相流動のPIV 測定	茶藤　雅晴 朴　　啓太 原田　雄司 藤川　竜也 尾形　陽一 西田　恵哉	広島大学 同上 パワートレイン技術開発部 同上 広島大学 同上
2012.12.25	ITS 情報通信システム推進会議国際会議結果報告会	ITS 世界会議ウィーン 2012&VCSS ワークショップ報告	瀬川　邦生	開発調査部

3. 社外寄稿　　＊所属は原則発表時点を示す

寄稿誌名　巻･号･ページ	題　目	発表者	所　属
自動車技術会学術講演会前刷集（春季） 20125269,No.31-12,pp.15-18	衝突シミュレーションにおけるスポット溶接破断評価モデルの開発	東山　実樹 花田　　裕 竹内　俊夫 北原陽一郎	NVH 性能･CAE 技術開発部 同上 同上 技術研究所
自動車技術会シンポジウムテキスト No.16-11,20124188,pp.9-11	衝突特性のロバスト性検討内容について	花田　　裕 荒木　敏弘 鈴木　友和 宮田　悟志 小田　穂高 小出　　貢 先田　　款 篠原　　啓 立神　清浩 田中　友樹 玉置　健二 寺本　真人 林　　賢司	NVH 性能･CAE 技術開発部 日産自動車(株) 富士重工業(株) ダッソー･システムズ(株) (株)JSOL スズキ(株) ダイハツ工業(株) (株)本田技術研究所 関東自動車工業(株) トヨタ車体(株) アイシン精機(株) 日産自動車(株) 三菱自動車工業(株)
No.16-11,20124189,pp.12-16	CAP を活用した衝突特性のロバスト性検討	同上	同上
No.16-11,20124190,pp.17-22	多変量解析を活用した衝突特性のロバスト性検討	同上	同上
No.16-11,20124191,pp.23-27	Diff-Crash を活用した衝突特性のロバスト性検討	同上	同上
自動車技術会論文集 Vol.43,No.2	統計的機械学習を用いたプローブカーデータからのヒヤリハット発生形態の推定	森村　哲郎 谷澤　悠輔 山崎　慎也 井手　　剛	IBM 東京基礎研究所 技術研究所 同上 IBM 東京基礎研究所
Vol.43,No.2	構造用接着剤の吸水劣化メカニズムの解明	氷室　雄也 定井　麻子 松井　恵子 住田　弘祐 山本　研一	技術研究所 同上 同上 同上 同上
自動車技術会　関西支部ニュース No.41,pp.10-11	ECU 用データロガーの開発	吉川　　尚好	技術研究所
自動車技術 Vol.66,No.7(2012),pp.10-11	希少資源を低減できる耐熱性と低温活性を両立した貴金属シングルナノ粒子触媒の開発	岩国　秀治 赤峰　真明 住田　弘祐 重津　雅彦 高見　明秀	技術研究所 同上 同上 同上 同上
Vol.66,No.8(2012),pp.138-142	材料	角島　信司 藤　　和久	技術研究所 同上
日本機械学会誌 2012 年 10 月号,pp.716-719	自動車の高速直進安定性と車体周りの流れの制御	農沢　隆秀	技術研究所
日本機械学会誌 メカライフ Vol.115,No.1120(2012),pp.134-135	エンジンの技術革新	石野　時雄	パワートレイン企画部
Vol.115,No.1123(2012),pp.404-405	エンジンをとめる：アイドリングストップ技術"i-stop"	岡田　久伸	走行･環境性能開発部

寄稿誌名　巻･号･ページ	題　目	発表者	所　属
日本機械学会論文集C編 Vol.78,No.795(2012),pp.3705-3714	人間の主観的な力知覚モデルの提案とステアリング操作系への応用	竹村　和紘 山田　直樹 岸　　篤秀 農沢　隆秀 田中　良幸 栗田　雄一 辻　　敏夫	技術研究所 同上 同上 同上 広島大学 同上 同上
バリュー･エンジアリング No.269(2012.4),pp.19-27	マツダ SKYACTIV　モノ造り革新による理想コスト追求活動	井口　　勇	エンジン設計部
月刊トライボロジー No.297(2012.5),pp.22-24	SKYACTIV の紹介とエンジンの未来	赤木　裕治	パワートレイン開発本部
月刊「発明」 Vol.109,No.2(2012),pp.19-21	How to 発明 全国発明表彰受賞者に聞く 平成23年度 日本経済団体連合会会長発明賞 「3ウエットオン塗装用新塗料技術」の発明（特許第3831266号）	山根　貴和	技術研究所
月刊「工業材料」 Vol.60,No.5,pp.27-31	「3ウエットオン塗装用新塗料技術」の発明 －平成23年度全国発明表彰「日本経済団体連合会会長賞」を受賞	山根　貴和 重永　　勉 渡邉　正一 垣井　拓広	技術研究所 同上 日本ペイント(株) 同上
新版「鋳鉄の生産技術」 pp.553-577	中子造型法と中子砂	堀　　雄二	パワートレイン技術部
型技術ワークショップ 2012年,pp.86-87	「モノ造り革新」歩留まり向上に向けた取り組み	森澤　　誠	車体技術部
型技術 Vol.27,No.7,pp.020-021	CAE を活用したプレス金型構造の最適化事例	三笹　　護 安本　一也 吉崎　真吾 大中　雅博	車体技術部 同上 同上 同上
「型技術者会議2012」講演論文集 pp.178-179	レーザー測定による品質向上／無人連続加工の取組み	久保　祐貴 西田　俊明	ツーリング製作部 同上
溶接学会誌 Vol.81,No.3,April 2012,pp.159-163	自動車車体　－安全･環境性能における接合技術－	坂野　律男	車体技術部
SEC journal Vol.8,No.2(2012),pp.79-84	SKYACTIV テクノロジーの誕生を支えたモデルベース開発	原田　靖裕	パワートレイン開発本部
電気協会報 11月号	減速エネルギ回生システム『i-ELOOP』について	高橋　正好	車両システム開発部

寄稿誌名　巻･号･ページ	題　目	発表者	所　属
横幹連合 会誌「横幹」 Vol.6,No.1,Apr.2012	次世代モビリティにおける価値成長デザイン	古郡　了 山﨑　卓 黒田　康秀 末冨　隆雅 農沢　隆秀 氏家　良樹 中澤　和夫 松岡　由幸	技術研究所 同上 同上 同上 同上 慶應義塾大学 同上 同上
光技術コンタクト Vol.50,No.6(2012),pp.20-24	画像処理による道路状態･歩行者の認識	森江　隆 石川　聖二 松岡　悟	九州工業大学 同上 技術研究所
日経 Automotive Technology 11 月号,p54	コストを上げずに軽くする　Part3 樹脂を賢く使う	藤　和久 朝野　千明	技術研究所 同上
品質工学 Vol.20,No.5,pp.49-60	オンライン･オフライン QE 融合による製造ライン構想設計技術の開発	井田　吉人 中田　行俊 高橋　克典	パワートレイン技術部 同上 同上
Vo.20,No.5,p115	ヘリ継手におけるレーザ溶接技術の確立	深堀　貢	技術研究所
Vol.20,No.5,pp.134-135	受賞者の感想	内田　博志	技術研究所
米沢工業会 会誌会報合併号 2013.3	高剛性バンパー用ポリプロピレンの開発	朝野　千明	技術研究所
建築と社会 12 月号	自動車の車体設計～SKYACTIV ボデー開発～	上野　正樹	衝突性能開発部
Kansei Engineering International Journal Vol.11,No.3(2012),pp.147-154	Evaluation of Driver-vehicle Matching using Neck Muscle Activity and Vehicle Dynamics	岩本　義輝 梅津　大輔 尾崎　繁	筑波大学 操安性能開発部 筑波大学
International Journal of Automotive Engineering Vol.3,No.3,pp.89-95	Changes of Driver Behavior by Rear-end Collision Prevention Support System in Poor Visibility	岩下　洋平 石橋　基範 三浦　泰彦 山本　雅史	技術研究所 車両実研部 技術研究所 同上
SIMULIA Community News September/Octorber 2012	Mazda Balances Performance and Weight In a Steel Car Body	小平　剛央	技術研究所
SAE Technical Papers 2012-01-0649	A general method of Life Cycle Assessment	新田　茂樹 森口　義久	技術企画部 同上
R&D Management Conference 2012	A methodology of product life cycle assessment consistent with new business trend	新田　茂樹	技術企画部

マツダ技報　第31号

発　行　2013年11月
発行人　素利　孝久
編集人　小島　岳二
事務局　大森　正志
発行所　マツダ株式会社
商品戦略本部　技術企画部
〒730-8670
広島県安芸郡府中町新地3番1号
電話　082（287）4106

Mazda Technical Review No.31

November 2013
Publisher　Takahisa Sori
Editor　Takeji Kojima
Bureau　Masashi Ohmori
Publishing office　Technology Planning Dept.
Product Strategy Div.
Mazda Motor Corporation
3-1 Shinchi, Fuchu-cho Akigun,
Hiroshima 730-8670, Japan

ISSN 2186-3490