

マツダ技報 2011 No.29
MAZDA TECHNICAL REVIEW



zoom-zoom
zoom-zoom
zoom-zoom

zoom-zoom
zoom-zoom
zoom-zoom

マツダ技報

Mazda Technical Review

2011 No. **29**

マツダ技報 第29号 (2011)

目 次

巻頭言	菖蒲田清孝	1
特集：新型マツダデミオ		
1. 新型デミオ～SKYACTIV-G 搭載の開発	水野成夫, 本藤雅彦, 妹尾 卓	3
2. 新型デミオのエンジン技術	富澤和廣, 松尾佳朋, 大槻 健 室谷満幸, 後藤 剛, 上月正志	8
3. 新型デミオ向けバッテリーマネジメントシステムの紹介	吉田勝正, 久米章友, 小谷和也 湯原将光, 柴田敏治, 北村成基	14
4. インテリジェント ドライブ マスタ (i-DM) の概要	楊 殿宇, 中野雄介 沖田齡次, 柴川 学, 佃 厚典 石井洋輔, 伊藤剛豊, 川原直人	20
5. マツダのライフサイクルアセスメント (第2報) -新型デミオ-	新田茂樹, 森口義久	25
特集：SKYACTIV TECHNOLOGY		
6. 新世代技術「SKYACTIV パワートレイン」	石野勅雄, 伊藤あずさ	29
7. SKYACTIV-G制御技術の紹介	江角圭太郎, 佃 厚典, 今村友之 遠藤孝次, 上野隆司, 小森 賢	36
8. SKYACTIV-Gにおける開発プロセス変革	増田幸男, 渡辺友巳, 荒川博之 松尾直也, 杉浦博昭, 富澤和廣	41
9. SKYACTIV-GにおけるCAEの活用	佐藤圭峰, 植木義治, 和田好隆 本郷 均, 宮内勇馬, 横畑英明	47
10. SKYACTIV-シャーシ	山本忠信, 井芹晴明, 東 裕章 江島勝美, 望月浩孝, 渡邊雅哉,	53
11. SKYACTIV-ボディ	安野谷知城, 開原真一 木村隆之, 清武真二, 阪井克倫 小橋正信, 上野正樹, 近藤量夫	61
	伊藤 司, 岡本 哲	

論文・解説

12. 次世代デザインテーマを具現化したコンセプトモデル「靱」の開発	中牟田泰, 石原智浩	68
13. 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	76
14. 設備特性を考慮した絞り金型構造設計プロセスの構築	大中雅博, 三笹 護	83
15. 歩行者保護の頭部傷害低減構造の開発	西田靖彦, 横山暢彦, 上野正樹 尾川 茂	88
16. 後側方レーダの電波伝搬可視化技術の開発	稲田貴裕, 浜田 康, 鶴長真里絵 花田充基, 西田史彦, 遠藤靖之 中畑洋一郎	93
17. 平滑感が高いプラスチック用塗装の開発	古賀一陽, 河邊光祥	99
18. 複数性能を扱う車体構造最適化手法の開発	小平剛央, 小池真人, 天野浩平	104
19. 溶射技術によるアルミニウム合金鋳物の耐摩耗性向上	小田信行, 南場 智, 大下敬之	110
社外への発表論文一覧表		115

Mazda Technical Review No.29

CONTENTS

Foreword

<i>(K.Shobuda)</i>	1
--------------------------	---

Special Edition for New Mazda DEMIO

1. New Mazda DEMIO~SKYACTIV-G Installation <i>(S.Mizuno, M.Hondou, T.Senoo)</i>	3
2. Engine Technology for New Demio <i>(K.Tomizawa, Y.Matsuo, K.Ohtsuki, M.Murotani, T.Goto, M.Kouzuki)</i>	8
3. Introduction of Battery Management System for New DEMIO <i>(K.Yoshida, A.Kume, K.Kodani, M.Yuhara, T.Shibata, S.Kitamura, T.Yan, Y.Nakano)</i>	14
4. Outline of Intelligent Drive Master (i-DM) <i>(R.Okita, M.Shibakawa, A.Tsukuda, Y.Ishii, T.Ito, N.Kawahara)</i>	20
5. Mazda Life Cycle Assessment (2 nd Report) - New Demio - <i>(S.Nitta, Y.Moriguchi)</i>	25

Special Edition for SKYACTIV TECHNOLOGY

6. New-Generation Technology "SKYACTIV Powertrain" <i>(T. Ishino, A.Ito)</i>	29
7. Introduction of SKYACTIV-G Control Technology <i>(K.Ezumi, A.Tsukuda, T.Imamura, K.Endou, T.Ueno, S.Komori)</i>	36
8. Development Process Innovation on SKYACTIV-G <i>(Y.Masuda, T.Watanabe, H.Arakawa, N.Matsuo, H.Sugiura, K.Tomizawa)</i>	41
9. Application of CAE to SKYACTIV-G <i>(K.Sato, Y.Ueki, Y.Wada, H.Hongo, Y.Miyauchi, H.Yokohata)</i>	47
10. SKYACTIV-CHASSIS <i>(T.Yamamoto, H.Iseri, H.Higashi, K.Ejima, H.Mochizuki, M.Watanabe, T.Anotani, S.Kaihara)</i>	53
11. SKYACTIV-Body <i>(T.Kimura, S.Kiyotake, K.Sakai, M.Kobashi, M.Ueno, K.Kondo, T.Ito, S.Okamoto)</i>	61

Technical Reports

12. Development of Concept Model “SHINARI”, an Embodiment of Next Generation Design Theme (<i>Y.Nakamuta, T.Ishihara</i>)	68
13. Robust Production line Development Method Utilizing Combination of Online-QE and Offline-QE (<i>Y.Ida, Y.Nakata, K.Takahashi</i>)	76
14. Establishing of the Die Design Process to Optimize the Characteristic of the Production Facilities (Drawing Die) (<i>M.Ohnaka, M.Misasa</i>)	83
15. Development of Structure to Reduce Pedestrian Head Injury (<i>Y.Nishida, N.Yokoyama, M.Ueno, S.Ogawa</i>)	88
16. Development of Method for Visualizing Radio Propagation of Side to Rearward Sensing Radar (<i>T.Inada, Y.Hamada, M.Tsurunaga, Y.Hanada, F.Nishida, Y.Endo, Y.Nakahata</i>)	93
17. Development of Highly Smoothed Coating for Plastic (<i>K.Koga, M.Kawabe</i>)	99
18. Development of Multidisciplinary Design Optimization for Body Structure (<i>T.Kohira, M.Koike, K.Amano</i>)	104
19. Wear Resistance Modification of Aluminum Alloy Casting by Thermal Spray Technology (<i>N.Oda, S.Nanba, T.Ohshita</i>)	110
List of Reports Published in 2010	115

巻頭言

SKYACTIV元年

マツダらしい『夢』の実現に向けて



執行役員 菖蒲田 清 孝
Kiyotaka Shobuda

昨年、当社は会社創立90周年を迎えました。10年後の『輝く100周年』に向けた第一歩となる今年
は、マツダらしさへブレクスルーする年、“SKYACTIV”元年となります。

チャレンジングスピリット溢れる商品の市場導入を通じて、マツダというブランドを世界にアピール
するまたとないチャンスです。このチャンスを必ず成功へと導き、さらに次なるマツダらしさへの実現
に向け、変革の努力を続けたいと考えています。

『変革には“夢”が必要』、『エンジニアは“夢”を持って』とよく言われます。

しかし『夢』という言葉は、時には個人的な情熱を意味し、また特定の組織が意識的に共有する目標
や将来像であったりします。それでは、われわれマツダのエンジニアが持とうとしている『夢』とはど
のようなもののでしょうか？

マツダは、自動車という商品をお客様に提供する企業です。長期的な視点に立って新技術を生み出す
研究、次にその技術を組み合わせる新商品を創造したり、商品の付加価値を上げて、よりコストパフォー
マンスを高める開発、生産、そして商品をタイムリーに市場に導入して具体的な成果をあげる販売、こ
れら全ての活動が連携して初めて、企業は収益を上げることができるのです。つまり、『夢』を実現する
ためには、その『夢』を共有化し、それぞれの分野で『夢』実現のための課題を設定し、解決するとい
う、暗黙裏に構成されたベクトルの揃った大きな分業体制の結果として『夢』は実現し続けているので
す。実現のハードルが高ければ高いほど大規模な分業活動が必要になり、部門横断的な『夢』の共有が
必要となります。乱暴に言えば、『夢』の共有には安直には解決できない高いハードルが必要なのです。

さて、今後の自動車製造業を取り巻く環境に目を向けると、2つの大きな変化があります。

一つ目の大きな変化は、『製品の変化』です。環境、安全という言葉キーワードとして、自動車は大
きく変わりつつあります。ハイブリッド、燃料電池のように自動車の基本となる動力そのものも変化し
ています。ABSやナビゲーションも一般化し、さらに衝突防止機構などの安全技術も大きく進化して
きています。

もう一つの大きな変化は、顧客のグローバル化から生じる『生産構造の変化』です。国内、海外の生
産比率がすでに逆転している業種も数多く存在しています。海外の生産では、材料、部品などの調達先
の環境、国内とは異なる労務費、また生産量の点でも国内工場並みの量から極少量まで、バラエティー
に富んできます。また、グローバルにビジネスすることは、競争も一段と厳しいところで戦うことであ

り、差別化も重要な課題となってきます。

このような変化に対応していくために、『環境』『安全』『経済性』の領域で、マツダらしい商品をグローバルに開発、生産、販売するのが我々の共有する課題であり、一朝一夕にはクリア出来ない高いハードルです。

そしてこういう状況こそが技術者にとって最も幸福な瞬間なのだと思います。クリアすべき課題がなければ、誰も新技術開発には投資はせず、従来技術の踏襲を続けます。技術者にとっては、自らの内部に育んできた新技術や着想の可能性、正当性を堂々と主張し『個人の夢』を『組織の夢』に昇華させるチャンスでもある訳です。

今回の“SKYACTIV”は正に『組織の夢』であり、関係部門の協働によって大きな『夢』を実現させようとしています。今後も、マツダの技術者には、ハードルをクリアするために必要なブレークスルー技術とその活用シナリオを、机上に出してもらうことを期待します。そしてそれらを関係部門で協力して『共有する夢』『次世代、次々世代商品』『新しいモノづくりシステム』にまとめ上げましょう。目標ブレークダウンと分業化による『夢の具現化』の前段階に位置する『夢を創るプロセス』が重要であり、技術者の活躍の場です。そういった意味で、これからは正に『技術者の時代』であると言えます。勇気と創造力を武器に、素晴らしい夢を描き、共有し、そして持ち前のOne MAZDAの精神によってそれを実現していきましょう。

巻頭言を執筆する機会を得て、こんな思いを巡らせていた時に目に入ってきたのが、正月の箱根駅伝のシーンでした。ゴール直前で、ある大学のアンカーが中継車につられてコースを間違えましたが、そこからコースを修正して懸命に前の走者を追い越して、僅か3秒差で初のシード権を獲得しました。コースを間違えたと気付いた時、彼はいったいどんな気持ちだったのでしょうか。想像するだけでも冷や汗が出てきます。気力も体力も本当に限界に近い中で、道を間違えても最後まで諦めずにゴールを目指して一心で走り続ける。その姿が、“SKYACTIV”やモノづくり革新という夢の実現を間近に控えた当社技術者たちの姿と重なってきました。

夢の実現へ向けたチャレンジも駅伝と同じ。『もう駄目だ』と諦めて立ち止まったら、明日は走り始めることが出来なくなるかもしれません。だから、これまで走り続けてきた過去の努力を無駄にしないために、また、その襷を明日の自分につなぐために、力の限り、走り続けよう。最後の直線路で繰り広げられたドラマを改めて見返しながら、『大丈夫だ。諦めるな。』と自分自身にもエールを送り続けています。

本誌では、夢の実現に向けて、マツダが取り組んできた次世代技術『SKYACTIV』を特集として掲載しています。大きな転換期にあって、自分の回りにある技術の一つ一つ突き詰め、最後までマツダらしいチャレンジをし続けている技術者の姿を感じとっていただければ幸いです。

最後に、本誌に寄稿された皆様に心から感謝いたします。今後も、マツダブランドのためにマツダらしい独創的な技術を開発し、実用化、量産まで達成することで、技術の完成度を上げ、広く社会の発展に貢献していきたいと考えています。

特集：新型マツダデミオ

1

新型デミオ～SKYACTIV-G 搭載の開発 New Mazda DEMIO～SKYACTIV-G Installation

水野 成夫*¹ 本 藤 雅 彦*² 妹 尾 卓*³
Shigeo Mizuno Masahiko Hondou Takashi Senoo

要 約

2007年7月に発表した現行3代目デミオは、コンパクトカーの原点に回帰し、新たなベンチマークを打ち立てた。国内向け初の本格的マイナーチェンジとなる今回の変更では、マツダらしいデザイン、機能的なインテリアに加え、ガソリンエンジンの常識を打ち破ったSKYACTIV-G 1.3 DISI初搭載、プレマシーに続き、統一感を重視したチューニングにより、“我慢のいらぬエコ”と“リニアで気持ちのよい走り”を実現した。また、これをサポートする運転スキル習得／向上サポートシステム「Intelligent Drive Master Gauge (以下i-DM)」ⁱ⁾をマツダ車初採用、DSCⁱⁱ⁾設定など安全性も強化し、よりデミオらしく、「走る歓び」と「環境・安全性能」を更に進化させた。

Summary

The Current third generation Demio introduced in July 2007 has been recognized as a new Bench Mark Model, returning to the starting point of compact car. This in-cycle product enhancement first for the domestic market has delivered SKYACTIV-G 1.3 DISI that breaks the image of common sense of the gasoline engine with Mazdaly design and functional interior. This New Model has achieved “Ecology but without Endurance” and “Liner and comfortable driving feel” by the tuning emphasized on harmonization as in Premacy. Also, with the driving skill acquisition/improvement support system “Intelligent Drive Master Gauge (hence i-DM)”ⁱ⁾, and the safety reinforcement such as DSCⁱⁱ⁾, new Demio has further evolved “Fun-to-drive” and “Environment and safe performance”.

1. はじめに

2007年7月に発表した3代目デミオは、コンパクトカーの原点に回帰し、「美しさ・軽快感」にこだわって創りあげたモデルである。特に100kgもの軽量化を実現して運動性能向上、燃費性能向上を果たし、コンパクトカーカテゴリに新たなベンチマークを打ち立てた。

2007年のRJCカー・オブ・ザ・イヤー受賞、日本カーオブザイヤー10ベストカー選出をはじめ、2008年にはワールドカーオブザイヤーという世界一の称号も得て、これまでの受賞総数は57にのぼる。

現在までの国内販売状況は、2010年末までの3年半で22万台、マツダの国内販売の約30%を占めるマツダを代表

するモデルとなっている。

また、2007年に中国、2009年にはタイでも順次現地生産を開始ⁱⁱⁱ⁾、2010年からは北米にも導入し、正にグローバルモデルとして重要な役割を担っている。

日本におけるコンパクトカー市場では、ハイブリッド車やアイドルストップ搭載車も登場、軽自動車も含めて各社とも一段と燃費向上を進めてきており、更なる燃費向上は必須の状況となっている。

このような中で、初の本格的マイナーチェンジを実施するにあたり、従来のガソリンエンジンの常識を打ち破ったSKYACTIV-Gと、コンパクトカーの原点回帰から生まれたデミオを融合し、走る歓びとクラスを超えた安全性をお客様に提供すべく企画した。

*1～3 プログラム開発推進本部
Program Management Div.

本稿ではSKYACTIV-G 1.3 DISI搭載モデルを中心にデミオのマイナーチェンジの内容について紹介する。

2. 商品コンセプト

2.1 マイナーチェンジで目指したもの

マイナーチェンジにあたり、

- (1) お客様の要望に応えること
 - (2) お客様の期待に応えること
- の2点を発想の原点にデミオらしさを追求した。

2.2 Key Value

提供するKey Valueは、

- 1.マツダらしいエクステリアデザイン
- 2.機能的でアクセントの効いたインテリア
- 3.楽しく走っても得られるエコ
- 4.統一感のあるダイナミック性能
- 5.クラスを越えた安全性能

の5つで、サステイナブルZoom-Zoomを更に深化させている。

各Valueについての特徴を以下に述べる。

3. 商品特徴

3.1 マツダらしいエクステリアデザイン

マイナーチェンジにあたって、外観はアクセラ、プレマシーと共通の顔つき (New Family Face) に変更、デミオのスポーティなイメージを強化すると同時に、マツダブランドとしてのデミオを大きく主張するものとした。SKYACTIV-G搭載モデルでは、SKYACTIVの世界観をイメージしたブルーのアクセントを効果的に使ってさりげなく差別化した。

(1) エクステリアデザイン

フロントアンダー開口部を大型化して5ポイントグリルを強調したスポーティな形状に変更、サイド開口部は立体感を増したNew Family Faceを採用した (Fig.1)。合わせて上部グリルは、バンパから連続する滑らかなフォルムとして品質感を向上、シンボルマークを大型化し力強さを増した。



Fig.1 New Family Face Front Design



Fig.2 New Design 16inch Aluminum Wheel

この他、リヤスポイラは後部端末をルーフから連続する形状に見直し、Cd値を向上させている。

また、SPORTに標準の16インチアルミホイール (Fig.2) は、二股に大きく開いて大きく見える新デザインとして軽快感やスポーティさを表現した。

(2) SKYACTIV-G専用デザイン

SKYACTIV-G搭載モデルについては、専用デザインを採用して技術の独自性を視覚面でもアピールしている。

無限の可能性や透明感、生き活きとしたSKYACTIV TECHNOLOGYの世界観を表す部位をエンジンカバー (Fig.3)、ヘッドランプ (Fig.4)、メータ&リヤバッジ (Fig.5) に集約した。その他、燃費向上を支援する、14インチアルミホイール (Fig.6)、LEDリヤコンビランプ (Fig.7) を専用デザインとし、SKYACTIV-G非搭載モデルと差別化している。



Fig.3 Engine Cover



Fig.4 Head Lamp

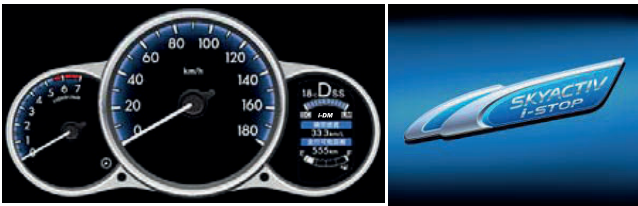


Fig.5 Meter & Rear Badge



Fig.6 14inch Light Weight Aluminum Wheel



Fig.7 LED Rear Combi Lamp

3.2 機能的でアクセントの効いたインテリア

(1) センターパネル

センターパネルのセンター部にメッキバーを入れることで、インパネの横方向の動きを強調した。これによりインパネ中心部の品質を大幅に向上させながら、赤色化したハ

ザードスイッチ等の機能部品に視線誘導させる意図を持たせた (Fig.8)。



Fig.8 Interior Design

(2) シート

SPORT以外の標準グレード (SKYACTIV-G搭載モデル含む) は、アクティブさ (スピード感, キビキビ感) を表現するため、斜線柄を基調に、ブラックタイプはダークレッド, ティンテッドタイプはダークグレーの線をアクセントとして入れた。織りの緻密さとタッチ感の改善で大幅に品質を向上させている (Fig.9)。

SPORTグレードは織り組織で表現したジオメトリック柄により、スタイリッシュで上質な立体感のある布を設定。更にダークレッドのパイピングをアクセントとして用い、よりスポーティさをプラスした。

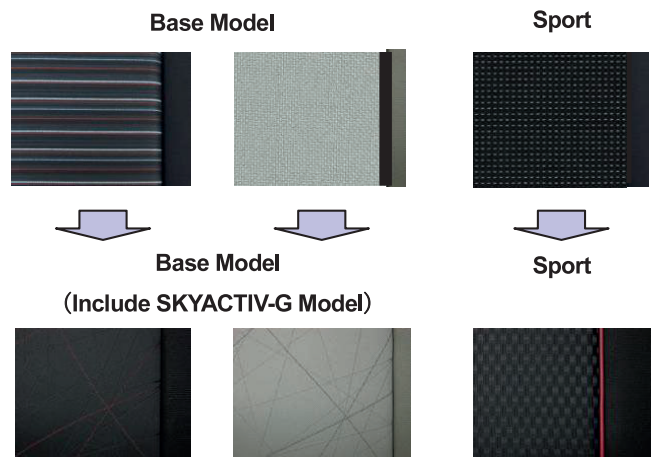


Fig.9 Seat Fabric

(3) メータ

SKYACTIV-G搭載モデルには、専用メータ内右側の視認しやすい位置に、ドライバーに必要な運転支援情報を表示するTFTカラー液晶ディスプレイを設定した。

表示するコンテンツは以下の4つである。

① DIS情報^{※)}

運転支援情報として、通常のオドメータ/トリップメータの他に、瞬間燃費, 平均燃費, 平均車速, 残走行可能距離, 外気温, i-stop^{※)} 情報としてエンジン停止時間 (今回

Key-on後の累積時間、車両完成時からの累積時間)をMID^{vi)}に表示する。

② i-DM情報

アクセル/ブレーキ/ハンドルの操作を、やさしい～しなやかな～急激、の運転状態に分け、ゲージでMIDに表示、また、スコア情報(アベレージスコア/今回のスコア)も表示する。

③ 警報

ドア開状態、i-stop不作動理由をMIDに表示する。

④ ENDING画面

i-stopの情報として今回のi-stop率および累計効果、i-DM情報としてステージ、スコア、運転アドバイスをMIDに表示する。

3.3 楽しく走っても得られるエコ

(1) クラストップレベルの燃費性能

SKYACTIV-G搭載モデルの燃費は、従来モデルの13C-V比、10-15モードで30%、JC08モードで24%向上、同クラスのハイブリッド車同等レベルの30km/lの低燃費を電気モータアシストなしで実現した (Fig.10)。

燃費達成技術としては、量産用ガソリンエンジンとして世界初の高圧縮比14.0の実現に始まり、エンジン本体系では燃焼改善や機械抵抗/慣性重量低減、i-stop採用、加えて減速時に従来の2倍以上エネルギーを回生する高出力オルタネータと専用バッテリーを搭載しこれを最適制御、車両系では走行抵抗の低減を図るなど多岐にわたる。

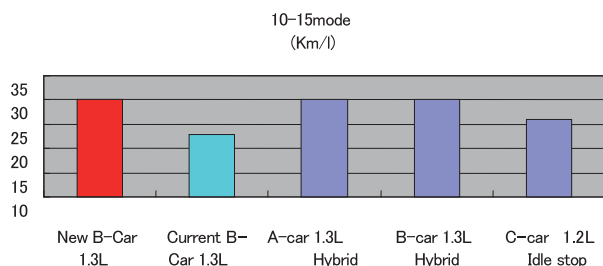


Fig.10 Fuel Economy

(2) i-stop

アクセラ、ビアンテ、プレマシーに続いてi-stopを採用した。従来はDレンジのみだったアイドルストップをN/SS/Lレンジまで拡大し、加えて吸気超遅閉じ化によって再始動時の燃料消費量を削減することで、更に進化している。

(3) i-DM

「快適なドライブ」という価値を、車両と乗員が一体となった走りを実現する運転スキル習得のサポートという形で提供することを狙いとして、i-DMを採用した。i-DMのゲージ/文字表示による車内コミュニケーションを通して、アクセル、ブレーキ、ハンドルを交通の流れに応じて適正に操作する運転スキルが身につく情報をリアルタイムで提供する (Fig.11)。



Fig.11 i-DM Teaching Information Sample

また、運転終了時には、運転の結果がフィードバックされることで、技量の向上へのモチベーションを感じることができる (Fig.12)。

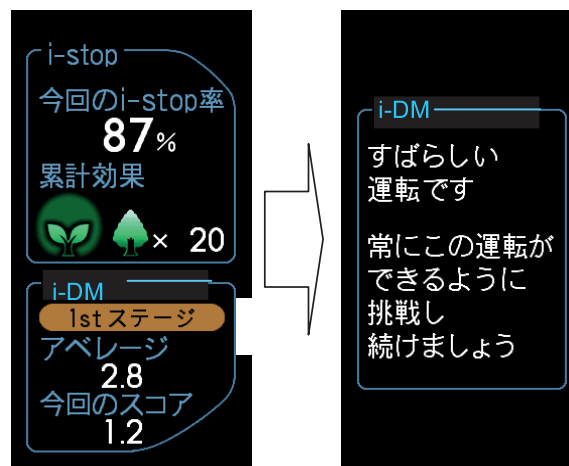


Fig.12 i-DM Coaching Information Sample

(4) 軽量化

① 軽量化シート

SKYACTIV-G搭載モデルの前席シートバック座面は、従来のSバネ構造からネット構造に変更、フレーム構造も見直して低周波域での振動レベル改善と軽量化を行った。

② 14インチ軽量アルミホイール

軽量化製法により、従来のスチールホイール比、台あたり4kg以上軽量化したアルミホイールをSKYACTIV-G搭載車に標準設定し、低燃費に貢献している。

(5) 走行抵抗低減

空力シミュレーションによる改善を重ね、アンダーフロアの流れを最適化した。具体的には、エンジン下、センターフロア、フロアトンネル、燃料タンク下、スペアタイヤパン下にカバーを装着、フロント/リヤのタイヤディフ

レクター、新形状のリヤスポイラと合わせて、現行モデルから約8%の空気抵抗低減を実現した。

3.4 統一感のあるダイナミック性能

(1) 統一感チューニング

車両の基本性能である「走る・曲がる・止まる」を全て「リニア」な応答特性で統一し、車両のキャラクタに一貫性を持たせることで、ドライバが車両への信頼感を持って思い通りに運転できるようにチューニングを行った。

具体的には、SKYACTIV-Gのエンジンコントロール制御方式に、ドライバの要求に応じて駆動トルクを出力する駆動力制御方式を採用し、アクセルペダル操作に対するリニアで滑らかな加速応答を実現。また、サスペンションチューニングにより操舵入力に対する旋回運動応答をリニアに改善し、軽快感と安心感を両立させた。

この結果、コーナリングにおける減速から旋回、あるいは旋回から加速に移行する際のG（加速度）のつながりが滑らかとなり、車両との一体感や同乗者の快適性が向上した（Fig.13）。

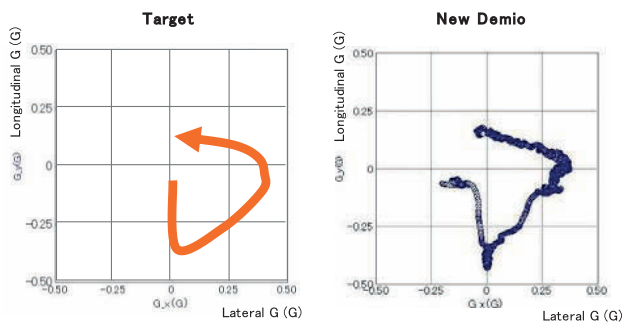


Fig.13 G-G Diagram

(2) 乗り心地向上

ボデーのリヤサスペンション取り付け部周辺の局部剛性を高めた。この剛性Upしたボデーに最適なトーションビームのブッシュとリヤダンパの特性を見直し、これに合わせてフロント側もダンパ特性をチューニングし直した。

(3) ブレーキ

SKYACTIV-G搭載モデルには、アイドルストップ状態からのスムーズな発進をサポートするヒルローンチアシストを新たに採用した。

3.5 安全性

(1) DSC

SKYACTIV-G搭載モデルには、滑りやすい路面での走行時や、緊急回避などの急激なハンドル操作時に車両の横滑りを抑え車両の安定性を確保するDSCを標準設定した。

(2) 後席中央3点式シートベルトとヘッドレスト

後部座席の中央席の乗員保護を狙いとして、3点式シートベルトおよびヘッドレストを設定した。^{vii)}

(3) ブレーキアシスト

2011年秋から適用される、欧州基準調和ブレーキアシスト要件に適合させた^{viii)}。

4. おわりに

マイナーチェンジしたデミオは、従来から好評いただいている経済性、運転のしやすさ、軽快な走りに更に磨きをかけ、「リニアで気持ちのよい走り」を実現した。従来の常識を超えたSKYACTIV-Gと、プレマシーに続いてステアリング/ハンドリング性能と質感のある乗り心地を両立する統一感を重視したチューニングを実施、マツダ初採用となる、快適なドライブをサポートするi-DMを得て、すべてのお客様に「走る喜び」と「環境・安全性能」を提供できるクルマに仕上がった。

是非一度体感していただきたい。

■ 著 者 ■



水野成夫



本藤雅彦



妹尾 卓

- i) Intelligent Drive Master Gaugeの略称
- ii) Dynamic Stability Controlの略称
- iii) 現地名：Mazda 2
- iv) Driving Information Systemの略称
- v) マツダ独自のアイドリングストップシステム
- vi) Multi Information Displayの略称
- vii) 6：4分割後席仕様車に設定
- viii) 13inch Brake：Electric Brake Assist/14inch Brake：Mechanical Brake Assist

特集：新型マツダデミオ

2

新型デミオのエンジン技術
Engine Technology for New Demio

富澤和廣*1 松尾佳朋*2 大槻 健*3
Kazuhiro Tomizawa Yoshitomo Matsuo Ken Ohtsuki
室谷満幸*4 後藤 剛*5 上月正志*6
Mitsuyuki Murotani Tsuyoshi Goto Masashi Kouzuki

要 約

SKYACTIV-Gは、内燃機関の効率を徹底的に追及し、相反する関係にあった燃費と出力の両方をブレークスルー技術で飛躍的に向上させている。その中で新型デミオに搭載のSKYACTIV-G 1.3Lエンジンは、特に燃費性能を重視し、走りを犠牲にすることなく、世界一の高圧縮比14.0とハイブリッド車並の30km/lという低燃費を実現した。本稿では、このエンジンの諸性能と採用技術について紹介する。

Summary

For the SKYACTIV-G engines, the efficiency of internal combustion has been pursued thoroughly, and both fuel consumption and torque, which conflict with each other, are being improved drastically by the use of breakthrough technologies. Among the SKYACTIV-G engines, fuel efficiency performance was especially valued for the SKYACTIV-G 1.3-liter engine mounted on New Demio. As a result, the world's highest compression ratio of 14.0 and the fuel consumption of 30 km per liter, which is as low as that of hybrid vehicles, were achieved without sacrificing driving performance. This article introduces the engine's performances and adopted technologies.

1. はじめに

近年ハイブリッド車や電気自動車の市場導入が活発化し、電気デバイスによる燃費改善技術の採用が進んでいるが、2020年時点でも自動車の多くは内燃機関を搭載していると考えられている¹⁾。ハイブリッド等の電気デバイスの効果を十分発揮させるには、そのベースとなる内燃機関の効率が高いことが重要である。それを具現化するSKYACTIVエンジンの第1弾として新型デミオに搭載され、世界一の圧縮比14.0とハイブリッド並みの30km/lという低燃費を実現した新開発1.3Lエンジンの諸性能と織り込み技術を紹介する。

2. 開発のねらい

SKYACTIV-Gは、マツダのブランドメッセージである、サステイナブルZoom-Zoomを具現化するエンジンとして、優れた環境性能と走る喜びを高次元で両立することを目指した。ガソリンエンジンを内燃機関の理想へと近づけるための

大きなステップとして、圧縮比やポンプ損失改善にメスを入れ、更にディーゼル比優れている機械抵抗の一層の低減をねらいとした。

本エンジンはその第1弾として、既存プラットフォームのデミオに搭載され、ハイブリッド並みの低燃費を実現したもの



Fig.1 SKYACTIV-G Engine

*1, 4, 5 エンジン設計部
Engine Design Engineering Dept.
*6 パワートレイン企画部
Powertrain Planning Dept.

*2, 3 エンジン性能開発部
Engine Performance Development Dept.

である。SKYACTIV-Gは、排気量や搭載車種によらず同体質の特性を持ったコモンアーキテクチャとするが、本エンジンは、その中でも特に燃費性能を重視したものである (Fig.2)。上記ねらいの実現のため、世界一の高圧縮比14.0としながら、燃焼期間を維持できる燃焼技術の確立と、ポンプ損失20%低減および、機械抵抗30%低減により、エンジンの燃費率を現行エンジン比12%低減することを目標とした。

3. エンジン諸元

SKYACTIV-Gは、高圧縮比での燃焼を実現する燃焼技術、ポンプ損失低減技術、機械抵抗低減技術を排気量や搭載車種によらず同体質で展開するコモンアーキテクチャとしているが、本エンジンでは更なる燃費改善技術として、Cooled EGRによる燃焼改善や、カムジャーナル鏡面加工などの機械抵抗低減技術を採用した (Table 1)。

4. 燃費改善技術

4.1 高圧縮比化

高圧縮比化による弊害は、高負荷時の耐ノック性悪化による点火タイミングの遅角化に伴うトルク低下や、高外気環境下および燃料オクタン価バラツキなどによるブレイグニッションの発生などである。これらの課題をブレイクスルーし、高圧縮比燃焼を実現した技術を以下に示す。

(1) ノックによる出力低下対応

ノックによる出力低下は、圧縮比上昇により、圧縮上死点での①筒内ガスの温度や圧力が上昇することでノックしやすくなり、ノック回避のため点火タイミングを遅角化して着火することで実質膨張比が低下するのに加え、②燃焼期間が長くなって熱効率が低下することが主な原因である。

① 筒内ガス温度低減技術

燃料粒子の微粒化と筒内への均等噴射により、燃料の気化潜熱による効果的な筒内ガス温度低減を狙い、6噴口マルチホールインジェクタ (MHI) を採用した (Fig.3)。更に、燃料のミキシング、気化を促進させるために、燃料噴射時期を吸気行程中2段階に分割した噴射制御とした。筒内温度分布の解析を実施し、分割噴射とすることで温度分布が改善し、混合気高温部のガス温度が6°C低減することを確認した。この温度低減は圧縮比0.5低減と同等の効果と考えられ、この効果により耐ノック性が改善し、1,500rpmの全開トルクは5.5%向上した。また、Cooled EGRシステム (Fig.4) を採用し、EGRクーラで冷却された排気ガスを吸気に還流させ、自己着火発生までの時間を長くすることでノックを抑制し、高負荷領域のトルクを向上させた。

② 燃焼期間短縮技術

高圧縮比化のためにピストン頭部形状を盛り上げる際、Fig.5 (a) に示すフラットピストンを用いると、燃焼速度が低下し熱効率は悪化する。これは、初期火炎面がピストンに干渉し、そこで火炎が冷却されて伝播が阻害されたためと考

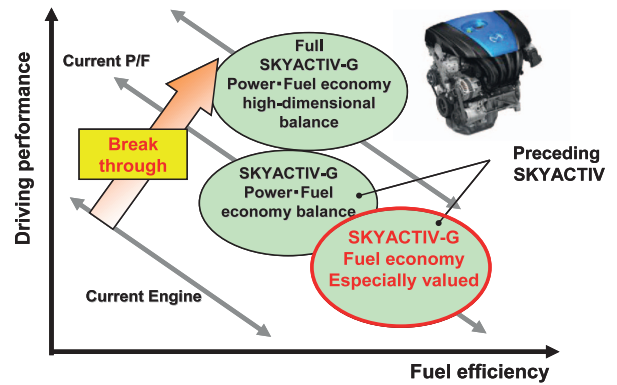


Fig.2 SKYACTIV-G Engine Development

Table 1 Principal Specification

Engine	Current 1.3L	SKYACTIV-G 1.3L
Max Power (JIS net)	66kW/6000rpm	62kW/5400rpm
Max Torque (JIS net)	120Nm/4000rpm	112Nm/4000rpm
Bore×Stroke (mm)	φ74 x 78.4	φ71 x 82
Displacement (cc)	1348	1298
Compression ratio	11.0	14.0
Intake-valve time	Open(BTDC)	-12~28
	Close(ABDC)	80~40
Exhaust - valve time	Open(BBDC)	31
	Close(ATDC)	-1
Fuel Injection	PFI	DI (6Hole Injector)
Combustion Chamber	Flat piston	Cavity piston
Cooled EGR	w/o.	w/.
Int.S-VT	Hydraulic	Electric
Ex.S-VT	w/o.	Hydraulic
Valve train	Direct	Roller follower
Tapet clearance adjustment	MLA	HLA
Camshaft journal finish	STD	mirror finish
Crank main/pin journal dia.	φ50/φ40	φ43/φ43
Chain type	Roller	Roller
	(STD)	(Low friction)
Oil Pump drive	Direct	Chain drive
Oil Pump Control	w/o.	Electric control (2-stage)
Accessory drive belt	Serpentine	Alternator belt + Water pump belt
Accessory drive belt tensioner	Mechanical	Hydraulic

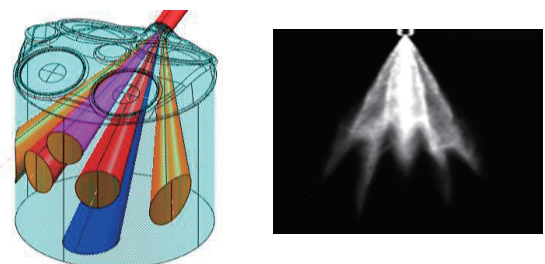


Fig.3 Multi Hole Injector

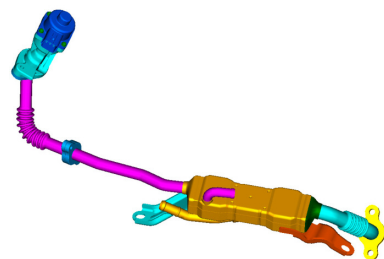
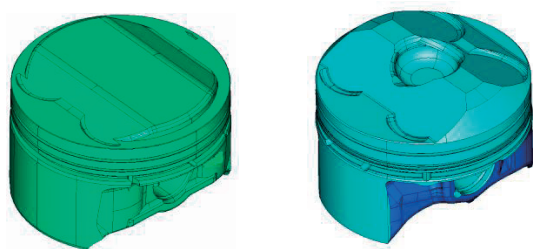
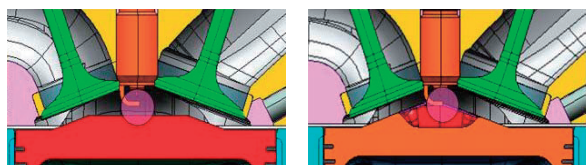


Fig.4 Cooled EGR

えられる。そこで初期火炎の伝播を妨げないピストン形状を狙って、Fig.5 (b) のようにピストン頂部に球形キャビティを設けることで燃焼速度の低下を抑制した⁽²⁾。これにより1,500rpm全開トルクは約4%向上した。更に、筒内流動を強めるために吸気ポート入射角、バルブ傘角などを最適化することでタンプル比 (Tr) : 2.25という高い値を実現した (Fig.6)。また、現行1.3Lエンジンに比べ、スモールポア化することで火炎伝播距離を短くし燃焼期間短縮を図った。これにより1,500rpm全開トルクを更に9%向上できた。



(a) Flat piston (b) Cavity piston
Fig.5 Configuration of Combustion Chamber

これらの技術の織込みにより、従来エンジン並みの燃焼速度を実現し、出力性能は回転上昇に対してフラットな特性とした (Fig.7)。この出力特性とエンジン制御およびCVT制御のチューニングにより、走り性能は現行デミオのレベルを維持しつつ、アクセル操作に対してリニアに加速してゆく上質な走り感を実現した。

(2) 異常燃焼発生に対するロバスト性

高圧縮比エンジンでは正常な火炎伝播前に圧縮着火による異常燃焼が生じるプリイグニッションなどの発生回避が重要になる。圧縮着火はオクタン価、圧力、温度、時間に依存し、低オクタン、高有効圧縮比、高温、低回転側で発生リスクが高くなる。SKYACTIV-Gは耐プリイグニッション限界を高めるため、吸気圧縮分割噴射を採用した。その結果、従来エンジンに比べ有効圧縮比を高く設定することが可能となり、低速トルクの向上が図れた。また、環境、劣化、燃料性状等の条件に対してロバストにするため、プリイグニッション予測制御を採用し、プリイグニッション限界に近づいた際は吸気バルブ閉時期 (IVC) を遅らせて有効圧縮比を下げることでプリイグニッション発生からの余裕度を確保している (Fig.8)。更に、万が一プリイグニッションが発生する条件に入った場合でも軽度の燃焼変化をイオン電流の変化として検出し、空燃比やIVCのコントロールによりプリイグニッション回避制御を行うロバストなシステムとした。

(3) 圧縮比向上による熱効率改善

開発初期段階において、圧縮比を13以上に上げて燃費改

善が頭打ちになる現象が発生した (Fig.9)。この原因は、プラグ付近の高温の既燃ガスがピストン頭部壁面に接触するこ

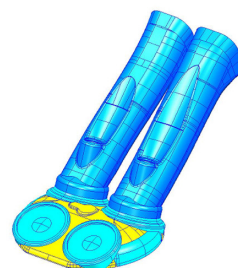


Fig.6 High Tumble Ratio Head Port

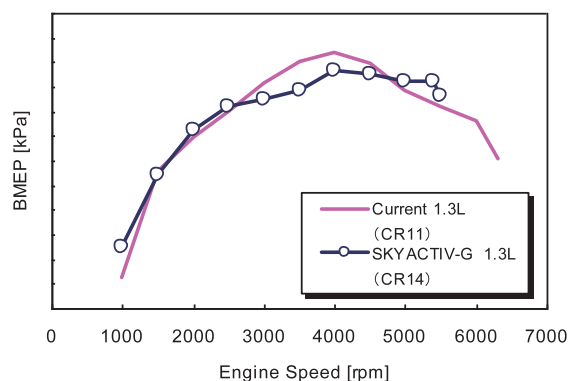


Fig.7 WOT Performance

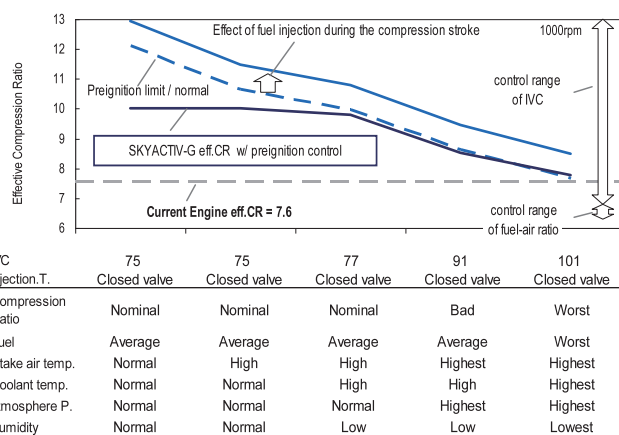


Fig.8 Relation between Pre Ignition Limit and Effective Compression Ratio

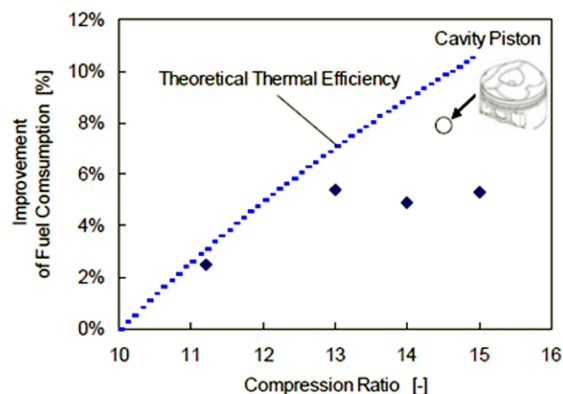


Fig.9 Relation between Compression Ratio and Fuel Consumption

とによる冷却損失の悪化が支配的であることが分かった⁽³⁾。前述の球形キャピティピストン (Fig.5 (b)) により既燃ガスがピストン壁面に接する面積を低減することで冷却損失を改善し、燃費向上度を理論値近くまで改善した。また新型デミオではStep ATと比較して低回転高負荷域の使用頻度が高いCVT (Fig.10) を採用している。Cooled EGRの採用により高負荷域のノッキング発生を回避することで高圧縮比本来の熱効率を実現したエンジンとCVTを組み合わせ、徹底的な熱効率の改善を追求した (Fig.11)。

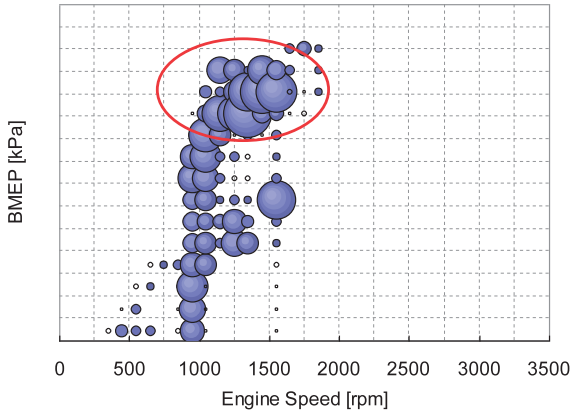


Fig.10 Engine Operating Frequency Map for CVT

4.2 ポンピングロス低減

ポンピングロスを低減するため、吸気バルブの閉時期をABDC105度まで遅くし、更にDual S-VT (Sequential Valve Timing) (Fig.12) の採用により内部EGRを制御することでポンピングロスを約20%低減した。従来、ここまで吸気遅閉じにすると有効圧縮比の低下による燃焼安定性悪化で燃費改善できなかったが、高圧縮比化により、遅閉じ量を増加しても有効圧縮比が維持できることから、燃焼安定性を確保しつつ大幅なポンピングロス低減が実現できた (Fig.13)。部分負荷運転では、吸気バルブ閉時期をABDC105度まで遅くしているが、スロットル全開時には即座に吸気バルブ閉時期を出力に有利なABDC36度まで動かす必要があり、素早い応答性を低回転から常に安定して確保できる電動式の吸気S-VTを採用した。この電動S-VTは前述のブリイグニッション回避のため吸気閉時期を素早く正確にコントロールする要求からも重要な部品となっている。

4.3 機械抵抗低減

以下技術の織込みにより、エンジン全体の機械抵抗を現行機種比30%低減した (Fig.15)。

- (1) 往復回転系：クランクジャーナル細軸化による回転抵抗低減や、ピストンスカート剛性適正化とリング張力低減によるシリンダライナの摩擦抵抗低減、ピストンやコンロッドの軽量化 (Fig.14) による往復慣性力の低減により、往復回転系の機械抵抗を20%低減した。
- (2) 動弁系：ローラフォロアの採用、カムリフトカーブの最適化によるバルブスプリング荷重低減、カムジャーナル鏡

面加工により動弁系の機械抵抗を54%低減した。

- (3) チェーン系：高剛性ストレートガイドの採用によるチェーンとガイド間の摩擦抵抗低減や、レバーに作用する荷重分担均等化によるチェーン挙動の安定化でチェーン張力を低減するとともに、チェーンリンク形状を見直しチェーンとガイド間の油膜形成を促進させた低フリクションチェーンの採用により、チェーン系の機械抵抗を30%低減した。

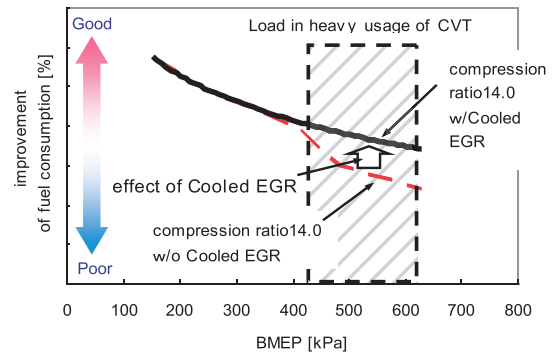


Fig.11 Improvement of Fuel Efficiency in Cooled EGR

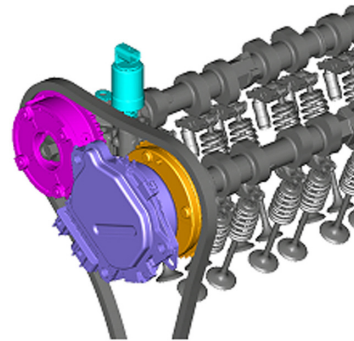


Fig.12 Dual S-VT

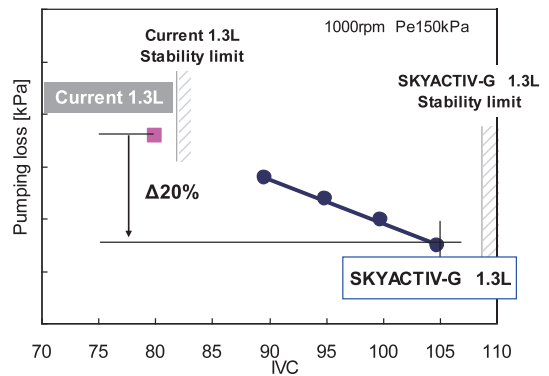


Fig.13 Pumping Loss Reduction

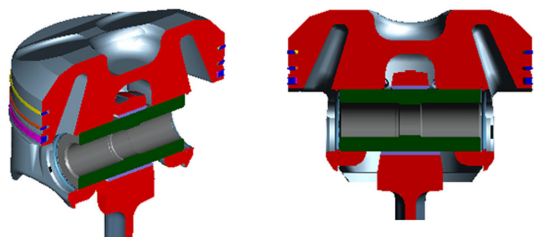


Fig.14 Light Weight Piston and Conrod

- (4) 冷却系：冷却水通路の抵抗低減によりウォーターポンプの仕事量を低減した上で、高効率樹脂インペラの採用によりウォーターポンプの効率を改善し、冷却系の機械抵抗を27%低減した。
- (5) 補機駆動系：ベルト張力を低減してもベルト振動の悪化を抑制できる最適補機配置を採用した上で、油圧式オートテンションナの採用によりベルト振動時のダンピング性を高めることでベルト張力を下げ、機械抵抗を13%低減した。
- (6) 潤滑系：オイルポンプ～各油圧デバイス間の経路シンプル化による圧力損失低減や、各油圧デバイスの要求油圧のMin化を行った。その上で、国内メーカー初となる油圧フィードバックと電子制御油圧切替え機構を搭載したオイルポンプ (Fig.16) の採用によりエンジンの運転状態に応じて必要な油圧にコントロールすることで、潤滑系の機械抵抗を57%低減した。

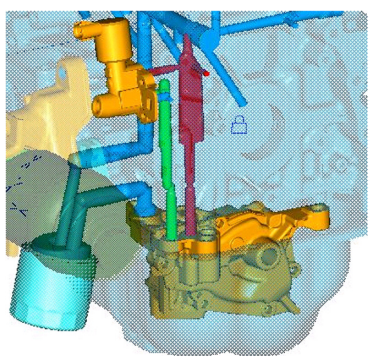


Fig.16 Oil Pump with Oil Pressure Control System

上記の技術により、エンジンの燃費改善目標を達成した (Fig.17)。

5. エミッション低減技術

HCは、エンジンおよびキャタリストが低温時にその多くが排出されるため、低減のためにはキャタリスト早期昇温とその活性開始前のエンジンからのHC排出量抑制が重要である。始動時のHCを低減するため、MHIを用いて始動燃圧を6MPaまで上昇させて燃料を微粒化すること (Fig.18) により、始動時のHC排出を約半分に低減した (Fig.19)。始動直後の早期キャタ昇温については、点火時期リタードにより排気ガス温度を上昇させる方法が知られているが、点火時期のリタードは、それに伴う燃焼安定性低下により制約を受ける。本エンジンでは、直噴の利点を活用し、プラグ周りに可燃混合気を形成し弱成層燃焼を行っている。この効果と、高圧縮比化による燃焼安定性向上効果により、燃焼安定性を確保しながら点火時期リタードによるガス温上昇を実現した。

6. エンジン音質

6.1 エンジンマウント振動低減

静粛かつ加速時のスポーティなエンジン音質を実現するため、

300Hz近傍のサウンドを際立たせるチューニングを実施し、軽量化・機械抵抗低減と静粛性の両立を実現した (Fig.20)。

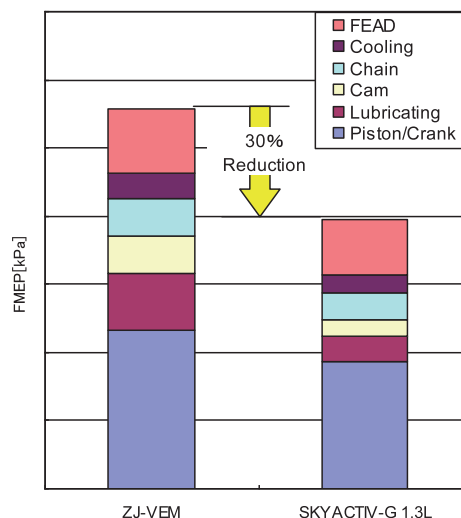


Fig.15 Reduction in Mechanical Resistance (1,500rpm)

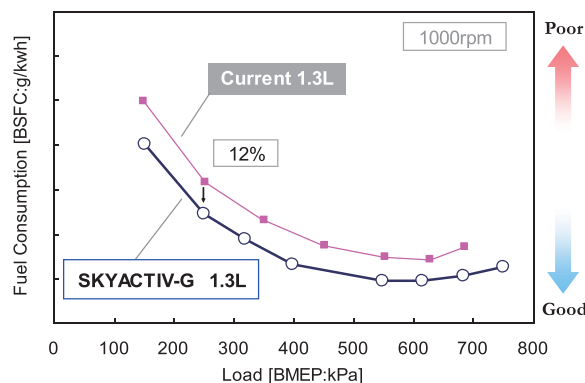


Fig.17 BSFC Curve

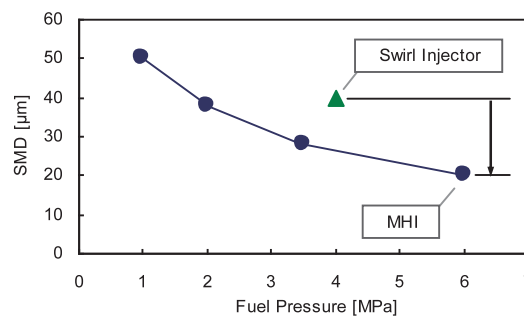


Fig.18 Relation between Fuel Pressure and Fuel Spray Dia

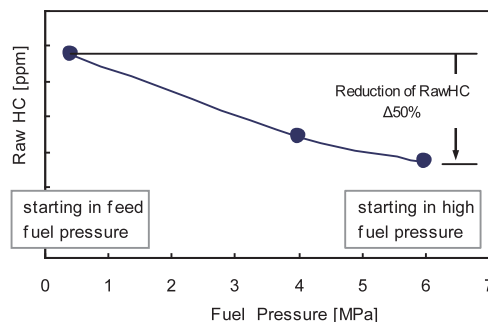


Fig.19 Relation between Fuel Pressure and RawHC

- ① 軽量・高剛性構造系：ロアブロック構造採用により主軸受け支持剛性とエンジンブロックねじり／横曲げ剛性を確保するとともに、パワープラント変形の節位置の最適化チューニングを実施し、軽量化と振動レベル低減を両立させた (Fig.21)。
- ② クランクシャフトねじり振動とパワープラント構造系の共振による振動レベルの増加を抑制するため、クランク系のねじり振動周波数とパワープラント周波数のチューニングを行い、クランク軸細軸化による機械抵抗低減と低振動を両立させた (Fig.22)。

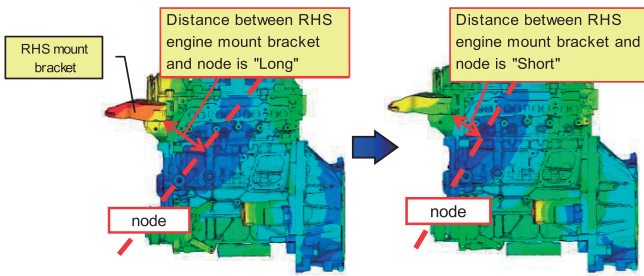


Fig.21 Tuning for Nodes of Power Plant Bending (PPB)

6.2 エンジン放射音低減

更に、CAEによる最適化解析により、静粛性に寄与の高い1~1.5kHzのエンジン放射音低減と軽量化の両立を図った。特にローラフォロア特有の振動入力低減のため、カム表面の加工うねり精度をローラフォロア径に合わせて最適化することで、シリンダヘッドへの振動入力を5~10dB低減した。またシリンダヘッドの点火コイル穴部にブリッジ構造 (Fig.23) を設けることで、主要な振動伝達系であるシリンダヘッドのねじり振動を1~2dB低減した。

7. まとめ

サステナブルZoom-Zoomを具現化するSKYACTIVエンジンの第1弾である新開発1.3Lガソリンエンジンの織り込み技術を紹介してきた。SKYACTIVエンジンは今後、他排気量およびDEなどに同体質の技術を織り込んだエンジンが展開されてゆく予定であり、引き続きこれらのエンジンで走る喜びと優れた環境性を具現化する技術に磨きをかけるべく、努力を続けてゆきたい。

参考文献

- (1) 環境対応車普及方策検討会：環境対応車普及によるCO₂削減予測，環境対応車普及戦略，2010，p.129
- (2) 西田正美ほか：高圧縮比エンジンの燃費改善技術について，第21回内燃機関シンポジウム，p.539-544 (2010)
- (3) 山川正尚ほか：高圧縮比ガソリンエンジンの燃焼技術の開発 2011年5月18日自動車技術会春季学術講演会において発表

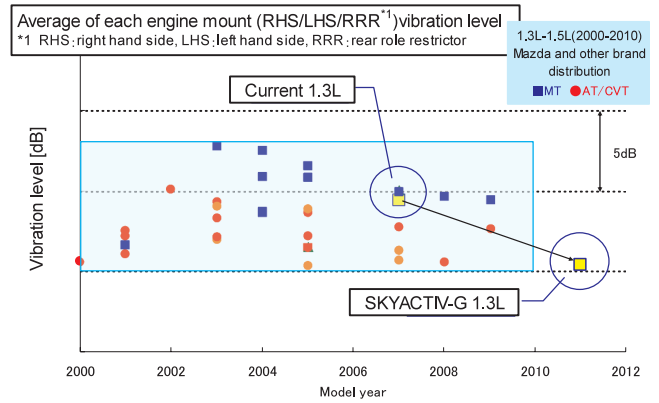


Fig.20 Engine Vibration Level (Middle Frequency) at WOT (Measuring Point: bases of Engine Mounting Brackets)

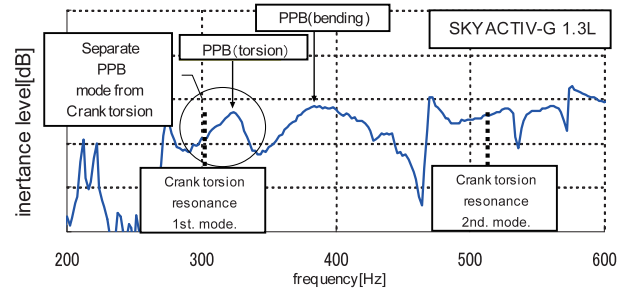


Fig.22 Relation between PPB Frequency and Crank Shaft Torsional Vibration Frequency

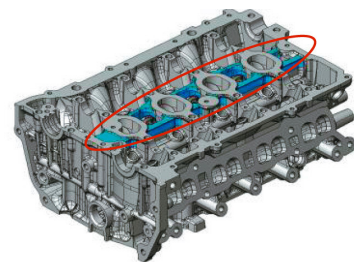


Fig.23 Stiffness Improvement Structure for Cylinder-Head

■ 著 者 ■



富澤和廣



松尾佳朋



大槻 健



室谷満幸



後藤 剛



上月正志

特集：新型マツダデミオ

3 新型デミオ向けバッテリーマネジメントシステムの紹介 Introduction of Battery Management System for New DEMIO

吉田 勝正*¹ 久米 章友*² 小谷 和也*³ 湯原 将光*⁴
 Katsumasa Yoshida Akitomo Kume Kazuya Kodani Masamitsu Yuhara
 柴田 敏治*⁵ 北村 成基*⁶ 楊 殿宇*⁷ 中野 雄介*⁸
 Toshiharu Shibata Shigeki Kitamura Tenyu Yan Yuusuke Nakano

要 約

マツダは環境技術として「i-stop」を2009年発売のアクセラ/Mazda3から導入した。その後もビアンテ、プレマシーと搭載車を順次拡大してきた。

新型デミオでは、バッテリーマネジメントシステムの進化により、減速回生による燃費向上、アイドリングストップ頻度の向上、1個のバッテリーを搭載したi-stopシステム（以下シングルバッテリーシステム）による小型/軽量化を実現した。

これにより、更に多くのお客様に「優れた環境性能」をお届けすることが可能になった。

Summary

“i-stop” was for the first time introduced to 2009MY AXELA / Mazda3 as an environmental technology. Since then, Mazda has deployed it to new vehicles one by one, including BIANTE and PREMACY.

The newly released DEMIO features the evolving battery management system, which enables fuel economy improvement through the regeneration of deceleration energy, frequent idling stops and downsizing / weight saving by reducing the number of batteries in the i-stop system to one (henceforth Single Battery System).

As a result, we are now able to deliver the “excellent environmental performance” to more customers.

1. はじめに

マツダは、段階的にi-stop, 減速エネルギー回生システム, モータ駆動技術などの電気デバイスを導入する「ビルディングブロック戦略」を推進している (Fig.1)。

これらのシステムでは、減速時に回生する電気エネルギーを段階的に増加してゆくことを目指している。そのため、蓄電デバイスであるバッテリーへの要求は飛躍的に増大してゆく。これらの要求に応えるため、高い充放電性能、寿命性能を備えたバッテリー、およびバッテリーマネジメントシステムが必要となる。

新型デミオでは、バッテリーマネジメントシステムを進化させることにより、燃費を大幅に向上させ、小型/軽量化を実現しながらも、高い信頼性を確保した。

本稿では上記バッテリーマネジメントシステムについて紹介する。

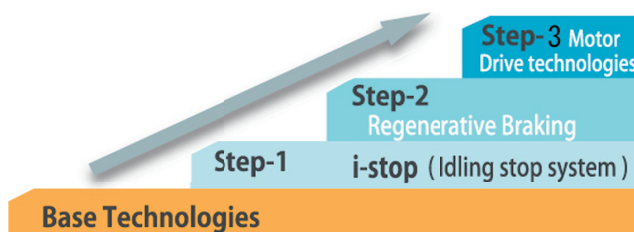


Fig.1 Building Block Strategy

*1~7 パワートレインシステム開発部
Powertrain System Dept.

*8 電子開発部
Electrical & Electronics Development Dept.

2. 開発コンセプト

マツダ車をご購入していただいた全てのお客様に「優れた環境性能」をお届けするため、全ての車種に展開できるバッテリーマネジメントシステムを目指した。



Fig.2 New DEMIO

新型デミオにおけるバッテリーマネジメントシステムの進化ポイントを以下に示す。

<優れた環境性能>

- ◇減速エネルギーの回生による燃費向上
- ◇アイドリングストップ頻度の向上

<全ての車種に展開可能な小型/軽量システム>

- ◇シングルバッテリーシステム
- ◇DC/DCコンバータ

<高い信頼性>

- ◇確実なエンジン再始動
- ◇バッテリー寿命の向上

次章より上記を実現する技術の詳細について紹介する。

3. 優れた環境性能

3.1 減速エネルギーの回生による燃費向上

(1) メカニズム

減速時の運動エネルギーをバッテリーに充電し、走行中にオルタネータを駆動する負荷を低減することで燃費を向上させる (Fig.3)。したがって、回生エネルギーを増加させることが重要となる。

今回、オルタネータの発電効率とバッテリーの充電受入性を向上させることで、大幅に燃費を向上させた。

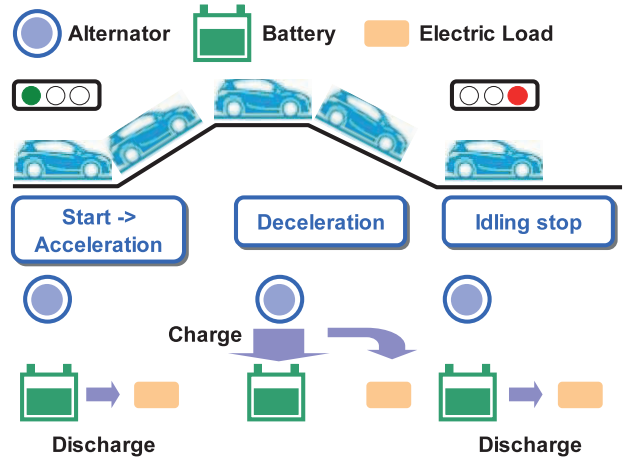


Fig.3 Regeneration of Deceleration Energy

(2) 発電効率の向上

減速時の回生エネルギーを増加させるため、オルタネータの発電量を40%増加させた (Fig.4)。高効率のオルタネータ⁽⁴⁾を採用することで (Fig.5)、発電量を増加しながら重量およびサイズの増加を最小限に抑えている。

更に、オルタネータをエンジン前に配置し、減速以外は発電を停止することでオルタネータの作動温度を下げている。これにより、オルタネータの発電効率を高い状態に維持しながら使用できるようになった。

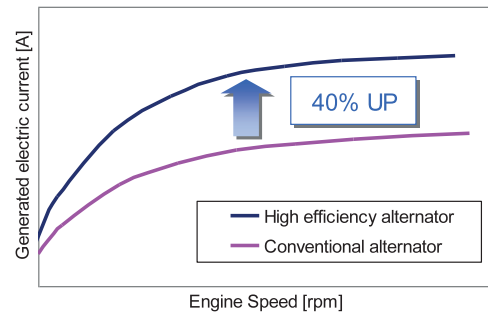


Fig.4 Generated Electric Current Characteristic

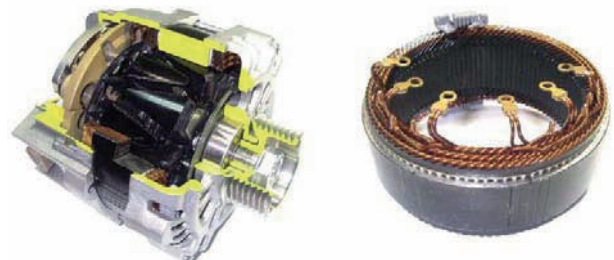


Fig.5 High Efficiency Alternator

(3) 充電受入性の向上

減速時の回生エネルギーをより多くバッテリーに充電するためには、バッテリーの充電状態（以下、SOC：State Of Charge）を下げた状態（以下、PSOC：Partial SOC）で充電することが望ましい。一方、バッテリー寿命低下やエンジン再始動不能を回避するためには、必要以上にSOCを下げないように充電しておくことが求められる。今回、バッテリーのSOCを高精度に推定する技術を開発し⁽¹⁾、PSOCで使用することを可能にした。

更に、通常のバッテリーに対して充電受入性を大幅に向上したアイドリングストップ専用バッテリーを採用した。

これらの相乗効果により、充電受入性を50%向上させることができた (Fig.6)。

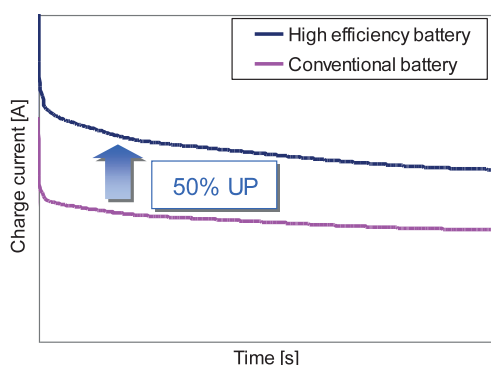


Fig.6 Charge Current Characteristic

(4) 違和感のない減速フィーリング

減速時の回生エネルギーを増加させると、オルタネータの発電によって発生する負荷トルクが増大する。その結果、運転者の期待に比べて減速度が大きくなり違和感になる。

そこで、駆動力を考慮した減速回生制御を導入することで、回生エネルギーの増加と減速フィーリングを両立させた。

具体的には、オルタネータの発電量とバッテリーの充電受入性から最大発生する減速度を予測し、運転者の要求減速度に調整することで最適な減速回生を行うようにした (Fig.7)。

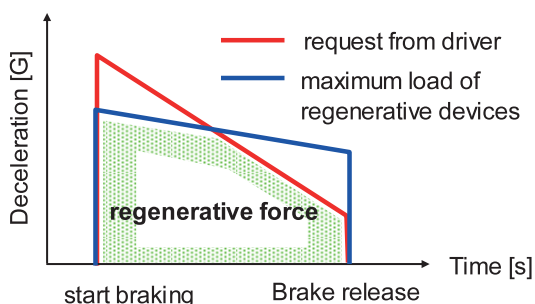


Fig.7 Regenerative Braking Force Control

3.2 アイドリングストップ頻度の向上

(1) アイドリングストップ時間の向上

前述のアイドリングストップ専用バッテリーは耐久性が大幅に向上している。これにより、アイドリングストップ時間は、平均消費電流45[A]にて最大120[s]を可能にした (Fig.8)。

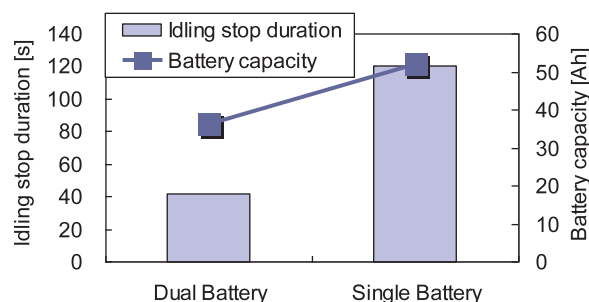


Fig.8 Extension of Idling Stop Duration with Increasing Battery Capacity

(2) アイドリングストップ許可までの時間を短縮

従来は、エンジンを始動した後に一度バッテリーを満充電にし、SOCを推定する必要があるため (5.2章)、バッテリーが満充電になるまではアイドリングストップを行うことができなかった。

新型デミオでは、車両の駐車中もSOCをモニタすることで、エンジン始動直後からアイドリングストップを可能にした (Fig.9)。

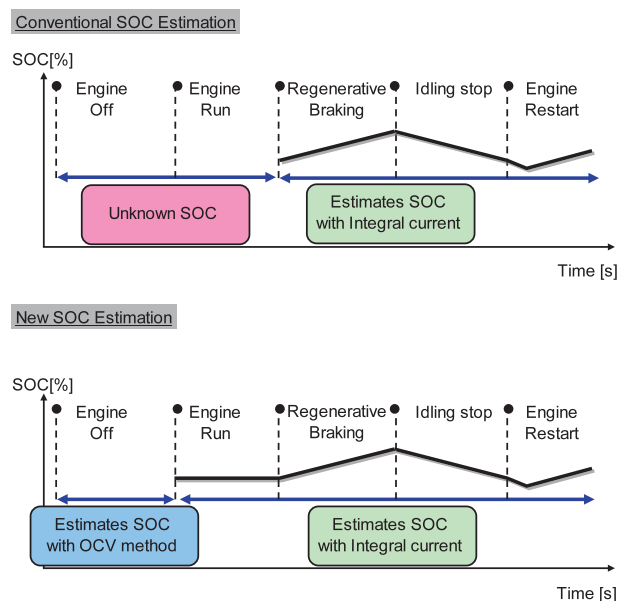


Fig.9 SOC Estimation Flow Chart

4. 全ての車種に展開可能な小型／軽量システム

4.1 シングルバッテリーシステム

新型デミオでは、減速時の回生エネルギーを増加させるため、オルタネータとバッテリーのサイズを大きくしている。これを現在の2個のバッテリーを搭載したi-stopシステム（以下デュアルバッテリーシステム）(Fig.10) に適用する場合、重量およびサイズが増加してしまい、車両への搭載が困難という課題があった。これを解決するため、サブバッテリーを廃止し、パワーリレーおよびチャージリレーを廃止し小型のDC/DCコンバータを採用した (Fig.11)。これにより、デュアルバッテリーシステムに比べて小型／軽量なシステムを実現した (Fig.12, 13)。

Table 1 Dual Battery System and Single Battery System

	Dual battery system	Single battery system
Battery	Main: N-55 (B24 for Idling stop) Sub: 26B17L (Standard)	Q-85 (D23 for Idling stop)
Alternator	φ 128 90[A]	φ 128 150[A]
Battery Sensor	Main: Hole type Sub: Hole type (with Temperature Sensor)	Shunt type (with ASIC)
Other	Power Relay Charge Relay	DC/DC Converter (200W)

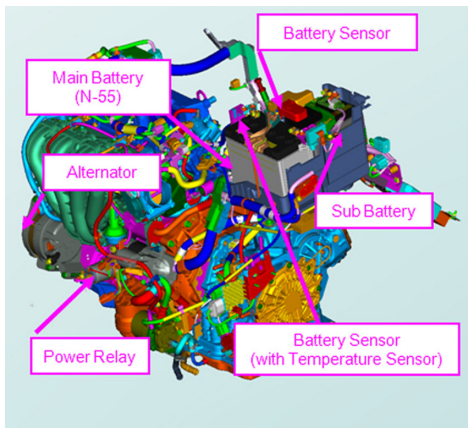


Fig.10 Dual Battery System

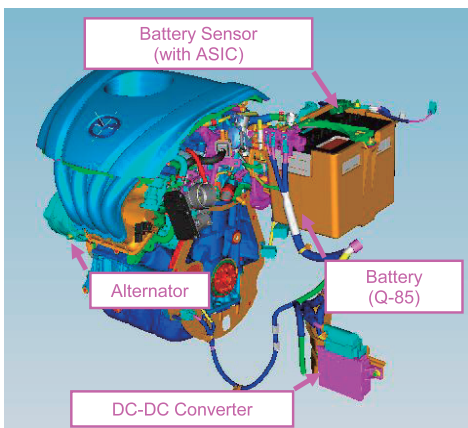


Fig.11 Single Battery System

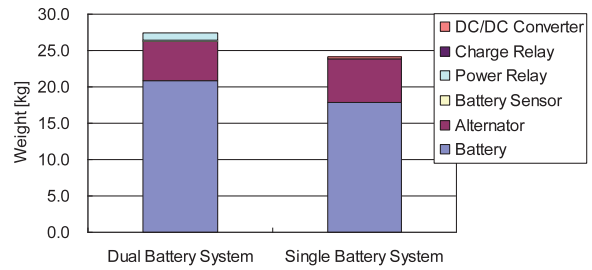


Fig.12 Weight Reduction

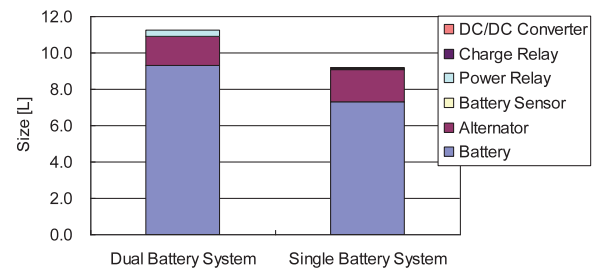


Fig.13 Downsizing

4.2 DC/DCコンバータ

エンジン再始動中にオーディオ、カーナビゲーションシステム、ETCを作動させるため、DC/DCコンバータを採用した (Fig.14)。

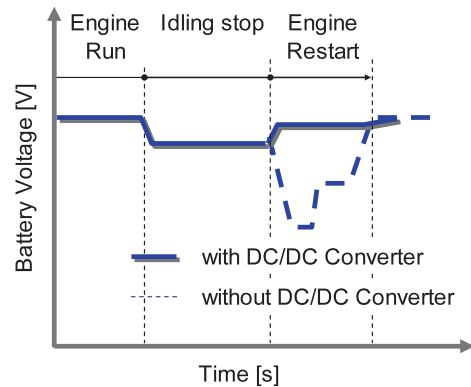


Fig.14 DC/DC Converter

しかし、DC/DCコンバータの容量は限られており、接続する車両の電気負荷が大きくなると、大型化や最悪複数必要になる。新型デミオでは、GNDラインの最適化を図り、DC/DCコンバータを必要とする電気デバイスを最小限にした。これにより、DC/DCコンバータを小型化することができた。

5. 高い信頼性

5.1 バッテリー信頼性の考え方

アイドリングストップシステムにおける供給電源の信頼性を確保するためには、『アイドリングストップからの確実なエンジン再始動』、『バッテリー寿命の向上』という要求を満足する必要がある。

デュアルバッテリーシステムでは、電源系の2重系という考え方を採用した。これにより、どちらかのバッテリーが使用不能となっても、残るバッテリーで確実にエンジンを始動できる。シングルバッテリーシステムでは、1個のバッテリーで高い信頼性を確保することが重要課題となる。

新型デミオでは、バッテリー状態 (Fig.15) を高精度に推定することで、上記課題を解決した。

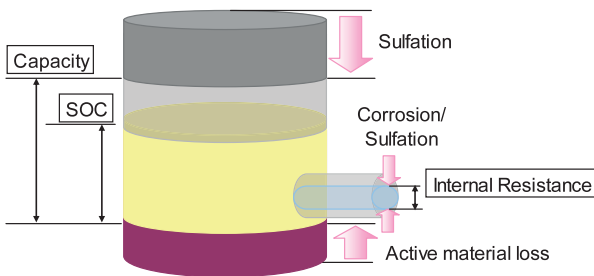


Fig.15 Image of Battery State

5.2 確実なエンジン再始動

デュアルバッテリーシステムでは、エンジンを始動した後に、バッテリーを満充電にすることでSOC推定を行っていた。バッテリーをPSOCで使用する場合、満充電でのSOC測定精度が悪化する懸念がある。これはバッテリー内部の極板における分極および成層化の影響によるものである (Fig.16)。このためバッテリーの寿命が短くなり、劣化検出ができず、最悪ケースとして、エンジンの再始動ができない可能性がある。

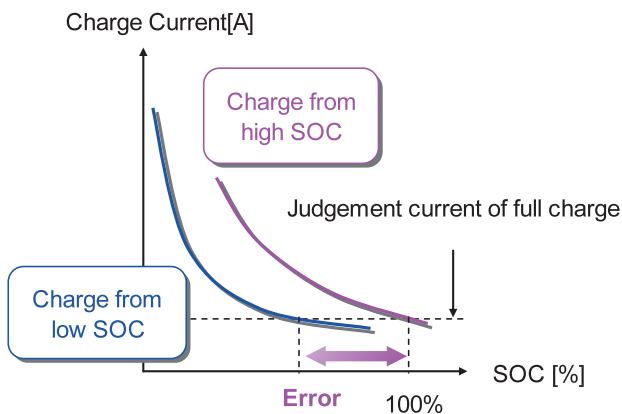


Fig.16 Error of Estimated SOC

新型デミオでは、バッテリーのSOCを高精度に推定することで、PSOCによる燃費向上、バッテリーの信頼性確保という背反する課題をブレイクスルーした。

まず、車両の駐車中にバッテリーの開放電圧 (以下、OCV: Open Circuit Voltage) を測定する (Fig.17)。これまでは、車両の駐車中にOCVを測定することができなかった。そこで、高性能電流センサによってOCVを高精度に測定し、更に測定したOCVをメモリに記憶することで実現した。

次に、エンジン始動後、分極および成層化の影響をモデルによって推定し、測定したOCVからバッテリーの起電力を推定する。SOCと相関がある起電力を推定することにより、SOCを高精度に推定可能にした。

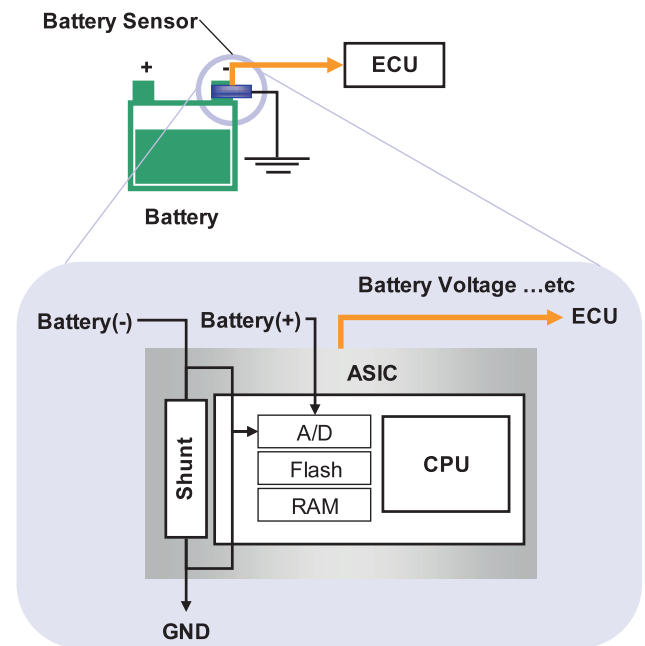


Fig.17 Intelligent Battery Sensor

5.3 バッテリー寿命の向上

(1) バッテリー寿命マネジメント

バッテリーはSOCが低い状態で維持され続けると、サルフェーション等により劣化が進行する。そこでSOCを適切に管理することで、劣化を抑制している (Fig.18)。更に、1回のアイドリングストップ中に連続して放電するエネルギー (以下、DOD: Depth of Discharge) が大きくなるほど、バッテリー寿命への影響は大きくなる。そのため、DODの幅を所定範囲内に抑えることで劣化を抑制している。

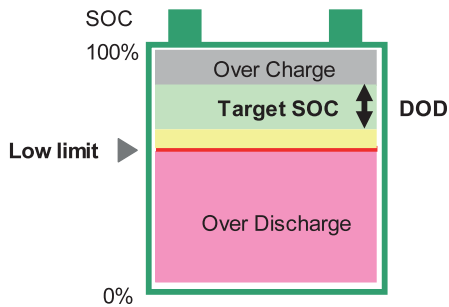


Fig.18 Battery Life Management

(2) アイドリングストップ車用バッテリー

減速回生およびアイドリングストップによりバッテリーへの充放電エネルギーが増加する。これらの充放電に対応するため、耐久性が大幅に向上したアイドリングストップ車用バッテリーを採用した (Fig.19)。

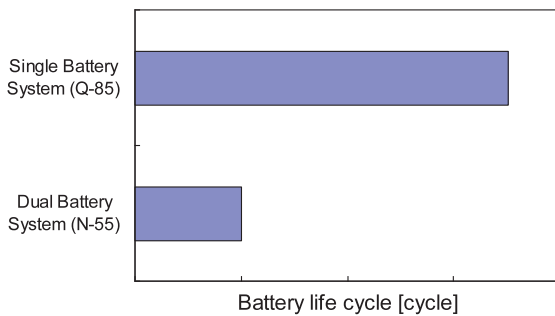


Fig.19 Battery Life Cycle for Idling Stop

バッテリー寿命マネジメントとアイドリングストップ車用バッテリーにより、燃費向上とバッテリー寿命の両立を実現した。

(3) バッテリーライフサイクルシミュレーション

バッテリーの寿命は、お客様の使い方や環境条件によっても大きく変わってくる。寿命や信頼性への影響を検証するためには、膨大な実験検証が必要となる。また、従来のバッテリー劣化テストでは、複雑なバッテリーマネジメントを再現することが困難になってきた。

そこで新たにバッテリーライフサイクルシミュレーションを開発し、机上にて信頼性を検証する環境を構築した。これはバッテリーの劣化をモデル化し、バッテリーマネジメントの制御モデルも含めた長期間のシミュレーションを行うものである。これにより、いろいろなおお客様の使い方や環境条件を、短期間に検証できるようになった。

今後、この技術を様々な地域および車種への展開、商品性向上等に活用してゆく。

6. おわりに

新型デミオでは、燃費を大幅に向上しつつ、小型/軽量化を実現しながら高い信頼性を確保した、シングルバッテリーシステムを開発することができた。今後、減速エネルギー回生システムやモータ駆動技術などの電気デバイスに対応するため、バッテリーマネジメントシステムを進化させてゆく必要がある。

更に多くのお客様に「優れた環境性能」を提供できるように、継続して技術開発を進めてゆく。

参考文献

- (1) 久米ほか：次世代バッテリーマネジメント技術の開発, [マツダ技報No.28 \(2010\)](#), p.54-58
- (2) 西里ほか：バッテリーマネジメントによる燃費改善, [マツダ技報No.25 \(2007\)](#), p.152-156
- (3) 猿渡ほか：マツダ i-STOP (アイ・ストップ), [マツダ技報No.27 \(2009\)](#), p.9-14
- (4) 宮地ほか：新世代 (9G) オルタネータ, 三菱電機技報2007年9月号

■ 著 者 ■



吉田勝正



久米章友



小谷和也



湯原将光



柴田敏治



北村成基



楊 殿宇



中野雄介

特集：新型マツダデミオ

4

インテリジェントドライブ マスタ (i-DM) の概要 Outline of Intelligent Drive Master (i-DM)

沖田 齡次^{*1} 柴川 学^{*2} 佃 厚典^{*3}
 Reiji Okita Manabu Shibakawa Atsunori Tsukuda
 石井 洋輔^{*4} 伊藤 剛豊^{*5} 川原 直人^{*6}
 Yosuke Ishii Takeatsu Ito Naoto Kawahara

要約

運転者も楽しく、同乗者にもやさしい運転ができ、更にはその結果が燃費向上につながるような運転技術の向上を支援するシステムを目指した。このシステムは、アクセル/ブレーキ/ハンドルの運転操作により結果として生じる車の挙動を、車両が持っている車両速度及びハンドル舵角信号をもとに、乗車している人の体へ与える力を求める。その力を受ける乗車員の体の動きを、車両に搭載しているコンピュータ内で乗車員の体を仮想したバネマスモデルを使い、走行中の連続した体の動きを計算する。求められた体の動きから運転の特徴を独自に開発した評価指標により判定し、運転席前方のメータ内に装着した表示器で判定結果をリアルタイムで伝える。更に、運転開始から運転途中までの、また運転終了後にはドライビングサイクル全体の総合判定結果を評価点として表示し、自分の運転結果を振り返ることができるようにしている。このシステムを活用することにより、マツダ車を運転する多くのドライバが楽しく運転技術の向上ができることを期待し開発したものである。

Summary

We aimed to develop the system which would help drivers improve their driving techniques so that the drivers could enjoy driving, offer a comfortable ride to passengers and consequently reduce the fuel consumption. The system calculated the effects of the G force generated by vehicle behaviors due to operation of the accelerator/brake pedal/steering wheel on drivers/passengers by using the vehicle speed and steering angle signals of the vehicles. A series of body movements of the driver/passengers during driving is simulated with the mass point of the spring mass model set in the computer of the vehicle. The computer calculates the body movements of the driver/passengers based on this spring mass model simulation. The calculated body movements are rated as per the evaluation criteria which was uniquely developed with consideration of the driving characteristics. The rating is displayed on the dashboard in front of the driver's seat on a real time basis. In addition, the ratings in the course of driving (startup to the course of driving) and after the entire driving (startup to driving end) are shown. Therefore, drivers can review their driving results and get to know their own driving habits/skills. We developed this system, hoping that our customers would enjoy driving more than ever and upgrade their driving skills by maximizing the system.

1. はじめに

我々マツダ開発部隊は、新型プレマシーで代表されるような、車のダイナミック性能を「統一感」という思想のもと、基本性能である走る/曲がる/止まるをリニアで軽快なフィールに統一させた開発を行い、楽しく気持ちよく走る車づくりを行っている⁽¹⁾。今回紹介する「Intelligent Drive Master (以下i-DM)」は、「統一感」という思想を継承しながら視点を変えた試みであり、「統一感」の思想で開

発した車の良さを、運転操作の習熟により更に効果的に引き出し、マツダ車の性能を最大限楽しんでもらいたい、との思いで開発したものである。

車の性能を高め、更にその性能を最大限に発揮するように車がドライバの運転技術向上を支援していく、まさに“人馬一体”を目指したシステムである。

2. 運転技量の差と着目点

一般的に「運転が上手い」というのはフィーリングで感

*1, 4, 6 走行・環境性能開発部
D&E Performance Development Dept.

*2 技術企画部
Technology Planning Dept.

*3, 5 パワートレインシステム開発部
Powertrain System Development Dept.

じることあるものの、定量的な指標は確立されておらず、何がどう違うのか、を明確にしていく必要があった。そこでまず、社内の一般社員及び熟練ドライバ計15名に、マツダ走行試験場の同じコースを同じ車両で走行してもらい、その走行データより、運転技量の差による運転操作及び車の挙動の相違を見極めることから始めた。

2.1 運転操作の相違

まずはアクセル、ブレーキ、ハンドル操作を一般社員と熟練ドライバで比較し、以下4つの差を確認した (Fig.1, 2)。

- ① アクセル操作ON-OFF頻度→熟練ドライバは少ない
- ② アクセル踏み込み特性→熟練ドライバは滑らかに操作

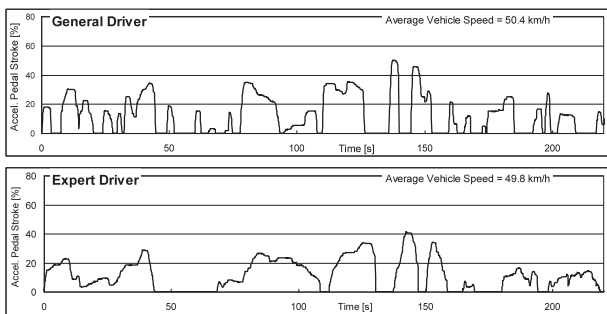


Fig.1 Difference of Acceleration Pedal Operation

- ③ ハンドル操作の早さ→熟練ドライバは早めにゆっくり
- ④ 旋回中の舵角安定性→熟練ドライバは一定舵角を維持

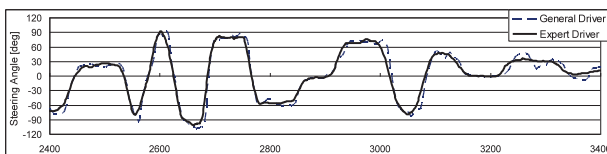


Fig.2 Difference of Steering Operation

2.2 車の挙動の相違

次に運転操作により結果的に生じた車の挙動を、一般社員と熟練ドライバで比較した。その結果、前後及び左右方向で、

- ⑤ 発生躍度 (加速度の微分値) のピーク高さ
- ⑥ 一定値を超える躍度発生頻度

に差があることを確認した。Fig.3及びFig.4にその結果を示す。縦軸の“躍度指標”とは、車速センサの信号を二階微分したうえで、ノイズ除去及び躍度発生が相対的に見えやすくする独自の処理を施したものである。またグラフ下側に示すバーは一定値を超えた躍度発生のタイミングを示す。

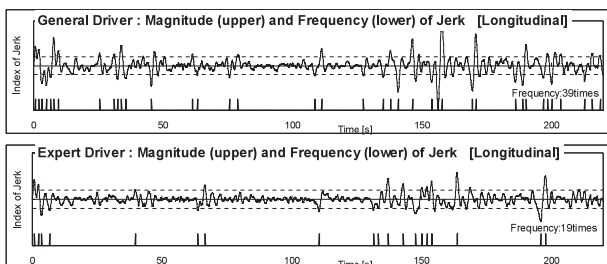


Fig.3 Difference of Jerk [Longitudinal]

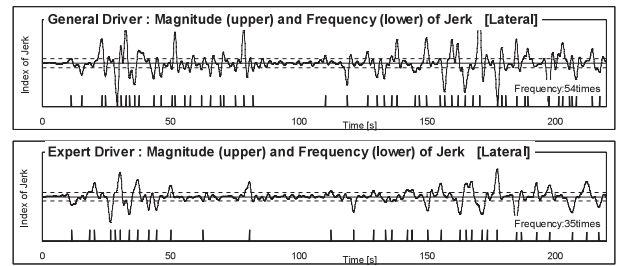


Fig.4 Difference of Jerk [Lateral]

2.3 実燃費の相違

上記に実例を挙げた一般社員と熟練ドライバの走行は、同じ走行路/距離、ほぼ同じ平均車速、同じ車両という条件下で、平均燃費は7%熟練ドライバが良い結果となった (Table 1)。

2.4 走行データ分析のまとめ

今回の走行データ分析から、運転操作と車の挙動は強い相関がありかつ一般社員と熟練ドライバでは運転操作及び車の挙動に明確な差があることが分かった。

この事実から我々は、車の挙動をリアルタイムで把握し、その情報をもとに定量的指標を設定することで運転操作の評価結果をドライバへリアルタイムに伝達、運転操作の修正、繰り返しによる習熟を促し、求めるところである“ドライバ及び同乗者が気持ち良くかつ環境にもやさしい運転”の支援をすることができる可能性を見出した。

3. 車の挙動と乗車員の体の動きのモデル化

3.1 車の挙動の把握

まず前後方向の加速度変化及び左右方向の加速度変化を求める必要があるが、我々は車両に通常搭載されている車速センサ及びハンドル舵角センサの信号から、逐次計算することとした。機種により搭載されているGセンサの信号を使用することも考えられるが、Gセンサ信号はノイズが大きいこと及び運転操作に関係のない路面状況が起因する加速度変化も検知することから、運転操作に直結する車速センサ及び舵角センサを使用することが適切であると判断した。

3.2 加速度の変化による仮想した体の動き

乗車している人の体をFig.5に示すバネマスモデルの質点と仮想し、この質点に車の挙動により変化する加速度を与える。この入力による質点の挙動を前後方向/左右方向それぞれの「バネマスモデル」の運動方程式 (式1) を解くことにより、リアルタイムで前後/左右方向の体の動きを求めることができる。この質点の動きを以後の運転操作による車の挙動の判定に使用する。

$$m \cdot \frac{d^2x}{dt^2} + c \cdot \frac{dx}{dt} + k \cdot x = f(t) \quad \sim \quad (1)$$

x : 質点位置, m : 質量, c : 減衰係数, k : ばね定数
f(t) : 車両加減速による入力

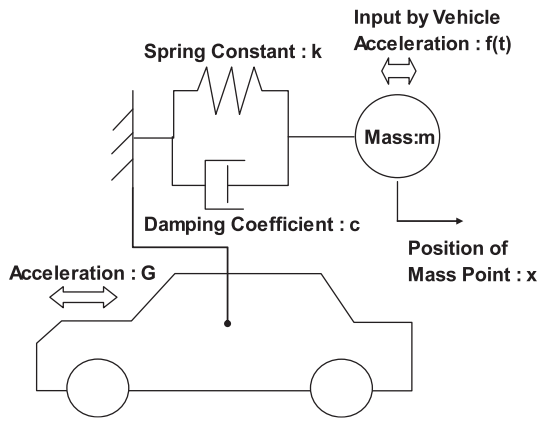


Fig.5 Imaginary Model with Spring - Mass - Damper

4. 車の挙動の判定

4.1 「丁寧な運転」と「荒い運転」の判定

(1) 指標の考え方

「運転者及び同乗者も気持ちが良い運転」の判定を行う指標を設定するため、加速度の変化による体の動きのオーバシュート現象に着目した。つまり「加速度変化によって体が前後または左右に動かされ、動きが急激な場合は振られた体の動きが“オーバシュート”し、更に体が跳ね返ってくる」という現象の定量化である (Fig.6)。

質点に力が加わり質点が動き始めると、受けている力に相当する静的安定位置に対し、質点移動の速さが持つ運動エネルギーにより、静的安定位置を通り越して移動する。

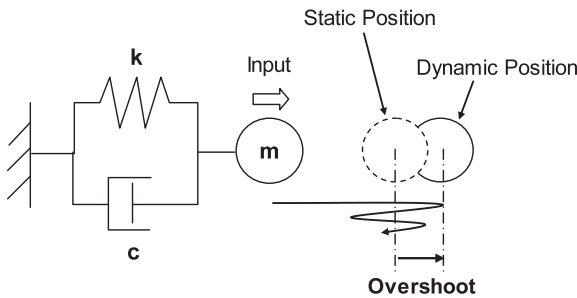


Fig.6 Definition of Overshoot

「オーバシュート」をFig.6のように定義すると、このオーバシュートが持つエネルギーは、質点が静的安定位置を通過する時の速度の二乗に比例する。このエネルギーを“Eov”，またこのオーバシュートを引き起こした加速度変化幅を“ ΔG ”とし、以下のように指標を定義し「荒い運転」と「丁寧な運転」の判別を行う。

$$\text{指標値 (定数)} K_{id} = F(E_{ov}, \Delta G) \sim \quad (2)$$

車両の特性、実走フィーリングから定数 K_{id} (式2) を固定し、これを超える場合を「荒い運転 (Rough)」下回る場合を「丁寧な運転 (Mild)」と定義した。

(2) 具体的計算方法

Fig.7にバネマスモデルの質点 (実線) の動きと質点に

入力される力が静的に加わった時の質点安定位置 (点線) を示す。判定は常にこの2つの線の交点、つまり加速度により質点に加わる力とバネの反力の値が一致し質点への入力がゼロとなる時点で行う。

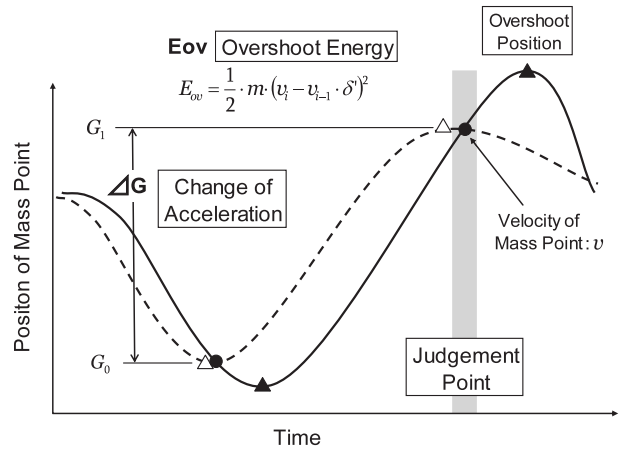


Fig.7 Calculation of Overshoot

なお、計算するバネマスモデルは連続した加速度変化を入力とし質点の動きを計算していることから、加速度変化が連続した場合は前回のオーバシュートエネルギーが減衰後の残エネルギーとして次の判定点に影響を与える。このままでは個々の加速度変化に対する正しい判定ができないことにつながるため、当システムではこの残振動の影響を除去するため、前回のオーバシュートが次の判定点において影響する残エネルギーを排除する計算上の工夫を入れ、判定点ごとに正確に評価できるようにした。

4.2 「しなやかな運転」の判定

(1) 「しなやかな運転」の定義

車を運転して楽しむためにはある大きさを持ったGの変化は欠かせない。G変化がある程度大きければダイナミック感があり、特に運転者にとっては気持ちの良い運転となる。当システムでは、運転者が望む車両速度、加速度に制約を与えるのではなく、加速度を大きく変化させるのであれば上手く変化させているかどうかというところに着眼している。大きなGの変化を上手くコントロールしている状態を、イメージと一致するよう「しなやかな運転 (Smart)」と呼称する。

(2) 「しなやかな運転」の指標

- その①: 「丁寧な運転」の領域内にありかつ加速度の変化が大きい、つまり大きなGの変化を滑らかにつないでいる (加速開始/終了, 旋回開始/終了)
- その②: 加速度絶対値がある一定以上でかつその加速度を一定値で維持している (一定Gでの加速中, 一定舵角&速度で旋回中)

4.3 運転評価の判定マップ

前記4.1, 4.2で定義した運転状態の判定マップはFig.8, 9となり、この判定マップに従い、「丁寧な運転」, 「しなやかな運転」, 「荒い運転」を判定していく。

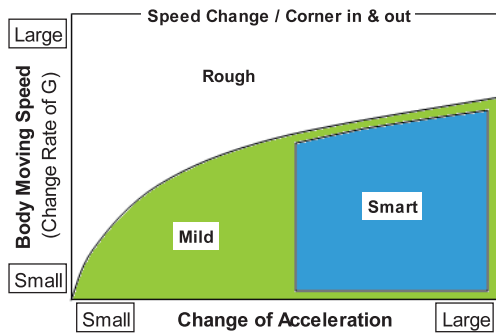


Fig.8 Judgement Map [Acceleration Change]

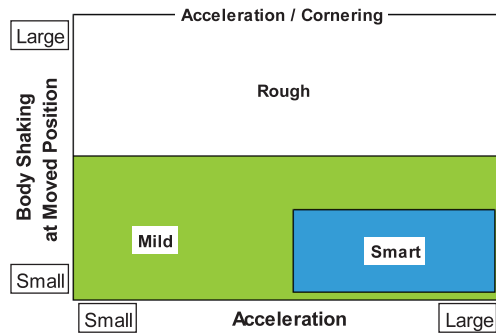


Fig.9 Judgement Map [Constant Acceleration]

4.4 加速度変化頻度の判定

(1) 加速度変化頻度と上手い運転の関係

前記2.1, 2.2の走行データ分析で、一定値を超える躍度の発生頻度が一般社員と熟練ドライバで差があることを確認した。躍度の発生は乗車員が車の挙動により強制的に体を動かされる頻度に相当し、「気持ちが良い運転」の判定には欠かせない指標と考えられる。更に2.3で述べた“実燃費への影響”も操作頻度に大きく関与していることが考えられ以下のような指標化を試みた。

(2) 加速度変化頻度の指標化

加速度変化を示す躍度（加速度の微分値）の発生頻度をカウントすることにより定量化する。加速度変化は運転技量とは関係のない運転環境、例えば街中、高速、郊外、渋滞状況等により大きく左右されることから、単純な回数積算では正しい判定にはならない。一方、1回の加減速または一つの旋回においてはそれぞれ少なくとも2回の躍度が発生（加速の場合は加速開始と加速終了時点）することから、直前一定時間履歴（例：5sec）内での躍度発生回数をカウントし、その値が3回以上、つまり短時間内に加減速または旋回操作を2操作以上行ったところを捕まえ、操作頻度の評価指標とした。

5. システムの検証結果

5.1 運転技量と判定結果（個々の加速度変化判定）

前記4.1~4.4で説明した判定方法を具体的にソフトウェアで構築し、前記2.の走行データを使用したシステムの検証を実施、主な評価領域は以下となる。

- 1) 前後方向, 加速度+, 加速度変化+(アクセル踏込)
- 2) 同上, 加速度変化-(アクセル戻し)
- 3) 前後方向, 加速度-, 加速度変化-(ブレーキ踏込)
- 4) 同上, 加速度変化+(ブレーキ戻し)
- 5) 左右方向, ハンドル操舵側(切り込み)
- 6) 同上, ハンドル戻し側
- 7) 前後方向, 加速度+, 適度な加速度維持(アクセル)
- 8) 前後方向, 加速度-, 適度な加速度維持(ブレーキ)
- 9) 左右方向, 適度な加速度維持(旋回中)

例としてFig.10に“5) 左右方向, ハンドル操舵側”の評価結果を示す。一般社員と比べ熟練ドライバは安定した「丁寧な運転」領域に集中しかつ「しなやかな運転」領域の頻度も多い。

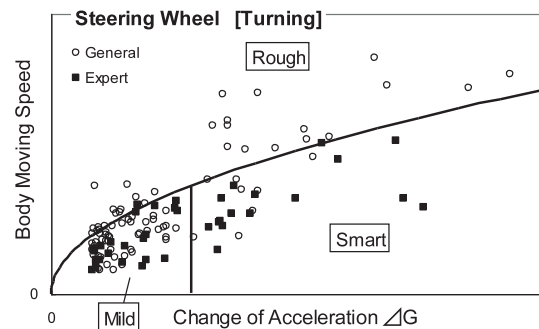


Fig.10 Evaluation Result [Turning in]

5.2 実燃費と判定結果の相関

(1) i-DM総合評価結果と実燃費

一般社員と熟練ドライバの比較結果をTable 1に示す(判定閾値は暫定)。

Table 1 Comparison of Fuel Economy [Driver]

Driver	Average Vehicle Speed (km/h)	Evaluation by i-DM						Average Fuel Economy (km/L)	*Perfect Score : 5 points
		Way of Operation			Frequency of Operation				
		Longitudinal	Lateral	Total	Longitudinal	Lateral	Total		
General	50.2	2.92	1.00	1.40	4.43	4.46	4.45	13.7	7% ↓
Expert	49.7	4.25	5.00	5.00	4.92	5.00	5.00	14.7	base

(2) 個々の加速度変化と実燃費との相関

0km/hからの発進において、下記2つの項目についてそれぞれ同一走行距離での実燃費を比較した。

a) 加速時の加速度変化による比較

車速変化を「丁寧な運転」, 「しなやかな運転」及び「荒い運転」とした場合の燃費の比較結果をTable 2に示す。燃費記載値は、それぞれ複数回走行して計測した燃費の平均値を示す。

Table 2 Comparison of Fuel Economy [#1]

Change of Vehicle Speed	Item	Evaluation by i-DM		
		Mild	Smart	Rough
0→40km/h Distance:140m	Ave. F/E (km/L)	11.31	10.19	9.28
	Comparison	base	10% ↓	18% ↓
	Number of times	8	12	6
0→80km/h Distance:320m	Ave. F/E (km/L)	7.83	7.06	6.27
	Comparison	base	10% ↓	20% ↓
	Number of times	4	6	5

b) 加速時の操作頻度による比較

0km/hから60km/hまでの加速を、「1段階」、「2段階」及び「3段階」とした場合の燃費の比較結果をTable 3に示す。燃費記載値は、それぞれ複数回走行して計測した燃費の平均値を示す。

Table 3 Comparison of Fuel Economy [#2]

Distance	Item	Evaluation by i-DM		
		Smart 0→60 Once Accel.	Frequent Operation 0/30/60 2times Accel.	0/20/40/60 3times Accel.
190m	Ave. F/E (km/L)	7.21	6.08	5.83
	Comparison	base	16% ↓	19% ↓
	Number of times	10	6	5

5.3 検証結果のまとめ

前記5.1, 5.2のように、一般社員と熟練ドライバの運転技量の差を車の挙動情報から定量化できることを確認でき、更にこのシステムの評価結果は実燃費との相関もあることを確認した。

6. 判定結果のメータ表示

6.1 リアルタイム表示

運転操作判定結果のドライバへの伝達は運転席前方のメータ内ディスプレイで行う。Fig.11はマツダが新たに開発したエンジンSKYACTIV-Gを搭載した新型デミオにおけるi-DMシステムの判定結果のメータ表示例を示す。

判定結果は「丁寧な運転」、「しなやかな運転」、「荒い運転」の3つであり、メータ表示においてもそれぞれの判定結果を「緑」、「青」、「白」(白はゲージとして3段階表示)としている。色分けは運転者が容易に判別しやすく、判定結果とイメージが一致するような色を選択した。



Fig.11 Indication of Evaluation Result

Fig.11の表示は、運転中の個々の加速度変化の判定結果を表示するが、もう一方の指標となる「操作頻度」の判定結果については、運転中に表示されてもドライバが理解するには難しいと予測されることから、リアルタイム表示には適さないと考え、ドライビングサイクル終了時の総合評価点を算出する中で加味することとした。

6.2 運転終了後の総合評価結果表示

運転終了後には、運転中のリアルタイム判定結果を1ドライビングサイクルの総合評価結果として5点満点法で表示する。総合評価点が低かった場合は、運転中に「荒い運転」または「操作頻度が高い」と判定された中で、最も多かった操作(アクセルorブレーキorハンドル)をドライバへメッセージとしてメータ内に表示し、運転後に確認できるシステムとした。

7. まとめ

仮想モデルを使った人の体の動きの定量化と独自に開発した評価指標を用い、運転操作による車の挙動を判定することが可能である。またこの判定結果は燃費とも強い相関があることも確認した。i-DMシステムの支援に従い運転技量を向上することで「楽しく気持ちの良い運転」のみならず、地球環境にもやさしい運転の支援が期待できるものとする。現在このシステムを活用することで運転技量及び実燃費が向上することを検証中であり、実証結果により更にシステムの改善・育成を行う計画である。

8. おわりに

日頃気がつかない自分の運転操作の特徴を、このシステムを活用することにより客観的に判定でき、自分自身が楽しく運転できるようになるだけでなく、同乗者にもやさしい運転技術の向上に役立てることができると期待している。更には、この運転技術の向上は、実燃費の向上にも役立ち、環境への貢献にもつながるものと期待している。

参考文献

- (1) 梅津ほか：新型プレマシー ダイナミックフィールの統一感, マツダ技報, No.28, p.13-18 (2010)

■ 著 者 ■



沖田 齡次



柴川 学



佃 厚典



石井 洋輔



伊藤 剛豊



川原 直人

特集：新型マツダデミオ

5

マツダのライフサイクルアセスメント (第2報)

—新型デミオ—

Mazda Life Cycle Assessment (2nd Report)

- New Demio -

新田 茂樹*¹ 森口 義久*²

Shigeki Nitta Yoshihira Moriguchi

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、マツダ車を購入していただいたすべてのお客さまに走る喜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。

この度、マイナーチェンジされた新型デミオは、新エンジンSKYACTIV-G、マツダ独自のアイドリングストップシステム (i-stop)、インテリジェント ドライブマスタ (i-DM) など「サステイナブル “Zoom-Zoom” 宣言」を具現化する技術が採用された。また車両製造時の生産効率の向上と省エネルギー対策を実施している。そこで、新型デミオについて自動車のライフサイクル全体で環境負荷を評価するLife Cycle Assessment (以下LCA) を実施し、CO₂を含む各種地球温暖化ガスの排出量を定量的に求めた。その結果、地球温暖化ガスの中で最も排出量の多いCO₂において、新型デミオは従来型車より排出量で11%低減することが示された。

Summary

Under a “Sustainable Zoom-Zoom” slogan of a long-term vision for technology development, Mazda announced it would provide all Mazda vehicle purchasers with driving joy and excellent environmental and safety performance.

We applied devices that realize the “Sustainable Zoom-Zoom” to New Demio, including a new engine “SKYACTIV-G”, Mazda unique idling stop “i-stop”, and an intelligent drivemaster “i-DM” as in-cycle product enhancement. Production efficiency and energy saving at the vehicle production process are also improved. To quantitatively measure the emission of various global warming gases including CO₂ due to Demio, we performed Life Cycle Assessment (LCA) that assesses environmental loads of a vehicle during its life cycle. The result showed that CO₂ was largest emission among various global warming gasses and the Demio emitted 11% less CO₂ than the predecessor.

1. はじめに

マツダは、サステイナブル“Zoom-Zoom”宣言のもと、さまざまな領域においてCO₂削減など環境保護活動を行っている。その中で、自動車を製造する過程、お客さまの使用段階、使用後の廃棄まで、あらゆる側面から環境負荷を定量化し、自動車のライフサイクル全体で環境負荷低減を目指している。

そのための手法としてLCAに着目し、新型プレマシー

において、「マツダ車を購入いただいたすべてのお客さまに「走る喜び」と「優れた環境安全性能」を提供する」との考え方にに基づき、特定の燃費向上デバイスを搭載したグレードだけでなく全グレードでLCAを実施し、大気圏排出物排出量の販売台数加重平均値を算出した⁽¹⁾⁽²⁾。また、水素を燃料としたRX-8ハイドロジェンREでは、クリーンエネルギー車の新しいLCA手法を提案し、実施した⁽²⁾。今回、新型デミオについてLCAを実施し、種々の地球温暖化ガスの排出量を算出し、その中で最も排出量の多いガス

*1, 2 技術企画部
Technology Planning Dept.

やその他の大気圏排出物の排出量について従来型車と比較したので紹介する。

2. LCAの手法

2.1 LCA手法の枠組み

国際標準規格 (ISO14040) におけるLCAの枠組みは、①調査の目的と調査範囲、②インベントリ分析、③影響評価および④解釈である (Fig.1)。

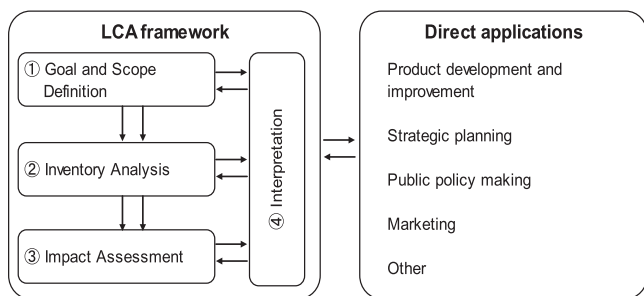


Fig.1 LCA Framework and Applications⁽³⁾

2.2 調査の目的と調査範囲

(1) 調査の目的

調査の目的は、新型デミオの従来型車に対する環境改善効果を確認すること、および環境改善をするための課題を把握することである。

(2) 調査範囲

1) 製品性能や特徴

Fig.2に示す新型デミオは、5人乗りのコンパクトカーとして、エクステリアデザインおよびインテリアデザインのリファイン、新型エンジンSKYACTIV-G初搭載、マツダ独自のアイドリングストップi-stop、「快適なドライブ」という価値を実現する運転スキルの習得をサポートするi-DM、軽量シートの採用、空気抵抗係数Cdの低減、滑りやすい路面での走行時などで車面の横滑りを抑え安定性を確保するDSCや後席中央3点式シートベルトなどの安全性向上を行っている。燃費は、SKYACTIVE-G搭載車において同クラスハイブリッド車同等の30km/L



Fig.2 New Demio

(10・15モード)の低燃費を実現している。また、新しい走行モードJC08においても、トップレベルの25km/Lの低燃費を達成している。

2) 機能単位

使用期間を10年間、生涯走行距離を10万km、走行モードは新しいJC08モードと設定した。

3) システム境界

システム境界をFig.3に示す。自動車のライフサイクルを資源採掘から廃棄までとし、材料製造、車両製造、走行、メンテナンス、廃棄の5段階で設定した。環境負荷項目は、大気圏排出物のうち自動車の重要環境側面を地球温暖化と大気汚染と捉えCO₂、NO_x (窒素酸化物)、NMHC (非メタン炭化水素)、PM (粒子状物質)、SO_x (硫黄酸化物)とした。また、影響評価として、地球温暖化への影響を評価した。

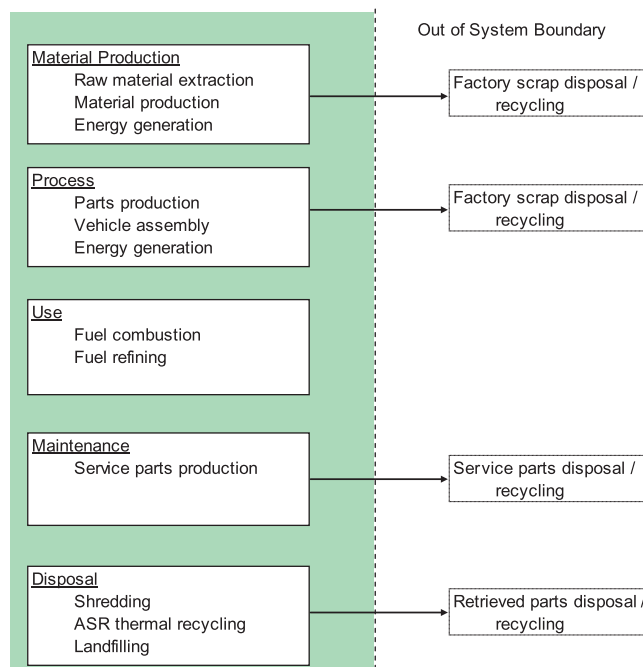


Fig.3 System Boundary

2.3 インベントリ分析手法

材料製造段階、車両製造段階、走行段階、メンテナンス段階、廃棄段階の5つの段階で、それぞれ環境負荷を算出する⁽¹⁾。まず最も販売台数の多いグレード (計画値) について大気圏排出物についてインベントリ分析を実施し、各大気圏排出物の地球温暖化への寄与率を求める。

それぞれの温室効果ガスの地球温暖化に寄与する割合を地球温暖化係数といい、CO₂の温室効果を基準値1として、各ガスの効果を相対値で表す。それぞれのガスは、大気中での滞留時間が異なり、どの時間範囲で温室効果を表すかによって係数が異なる。20年、100年、500年の地球温暖化係数が求められているが、ここではLCAで一般的に用いられている100年を基準とした。具体的には、ライデン

大学が提唱した地球温暖化係数 (CML2001⁽⁵⁾) によって算定した。地球温暖化効果のある主なガスの100年を基準とした地球温暖化係数は、メタン (CH₄) 23、一酸化二窒素 (N₂O) 296、非メタン炭化水素 (NMHC) 16などである。

各種排出ガスの地球温暖化へ影響をCO₂の換算質量として求め、式(1)に示すように総和を算出する。各種排出ガスのCO₂換算質量を、式(1)の総和で除した値を寄与率として算出する。

$$CO_{2equivalent} = \sum_{j=1}^n GWP_{a,j} \times m_j \quad (1)$$

ここで、

- CO_{2equivalent} : CO₂換算排出量
- GWP : 期間aでの排出ガスjの地球温暖化係数
- m_j : 排出ガスjのライフサイクルでの排出質量 (kg)
- a : 温暖化を考慮する期間のサフィックス
- j : 排出ガスの種類のサフィックス

次に、地球温暖化への寄与率が最も大きい大気圏排出物について、1台当たりの環境負荷に、各グレードの普及の実態を反映する。具体的には、特別な燃費デバイスを搭載した特定グレードだけでなく、全グレードで当該排出物の排出量を算出し、グレードごとの販売台数比率を乗じ、全グレードで合計した。これを式(2)で示す⁽²⁾。この販売台数加重平均値が、デミオの販売台数全体としての1台当たりの当該排出物の環境負荷である。

$$LE_{average} = \sum_{i=1}^m LE_i \times \left(\frac{V_i}{\sum_{i=1}^m V_i} \right) \quad (2)$$

ここで、

- LE_{average} : 車種1台当たりのライフサイクル環境負荷、
- LE_i : グレード i のライフサイクル環境負荷、
- V_j : グレード i の販売台数、
- i : 全グレード数mのうち、i番目であることを示す

3. 分析結果

① 地球温暖化影響

前述の分析方法に従い、新型デミオの最の販売台数の多いグレード (計画値) において、ライフサイクルにおいて排出される各種ガスの地球温室化への寄与率を定量的に把握した。

Fig.4は、新型デミオのライフサイクルでの地球温暖化影響において、各温室効果ガスの寄与率を示している。これを見ると、CO₂が96.897%、メタン (CH₄) が2.529%、一酸化二窒素 (N₂O) 0.331%、非メタン炭化水素 (NMHC) が0.242%などとなっており、CO₂が主要因であることが確認できる。

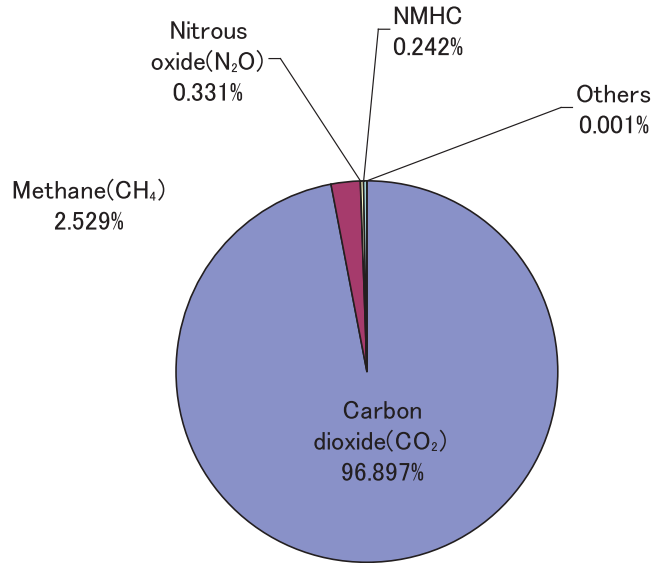


Fig.4 Comparison of Global Warming Potential Among Greenhouse Effect Gases Due to New Demio Life Cycle

② CO₂排出量

従来型車および新型デミオについて、地球温暖化の主要因であるCO₂排出量を式(2)で算出し、比較して示したのがFig.5である。従来型車のCO₂排出量 (質量) を1.0とした場合の相対値で示している。

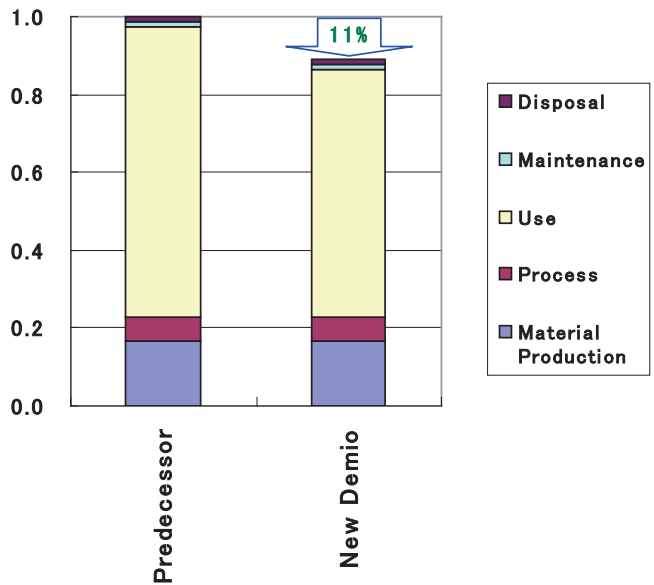


Fig.5 Comparison of CO₂ Emissions between Predecessor and New Demio

新型デミオのCO₂排出量は、従来型車から11%の低減が確認された。これは、主として燃費性能向上が寄与しており、新型エンジンSKYACTIV-Gやi-stopの採用、空力性能の向上によるものである。安全性向上対策などにより車両質量は増加しているが、生産効率の向上および省エネルギー

化により、車両製造時のCO₂排出量は、従来型車と同等に抑えられている。今後の課題として、車両製造時のCO₂排出量低減のため、一層の生産効率向上および省エネルギー化を行う必要がある。

③ NO_x, NMHC, PM, SO_x排出量

酸性雨や大気汚染の要因になるCO₂以外の項目の排出量(質量)を従来型車と新型デミオを比較して示したのがFig.6である。それぞれの項目で、従来型車のSO_x排出量を1.0とした場合の相対値を示している。これを見ると、全ての項目で排出量が低減している。新型デミオのNO_x排出量は、従来型車の6%低減していることが確認された。同様に、新型デミオのNMHC, PMおよびSO_x排出量は、それぞれ従来型車の5%, 1%および7%低減している。

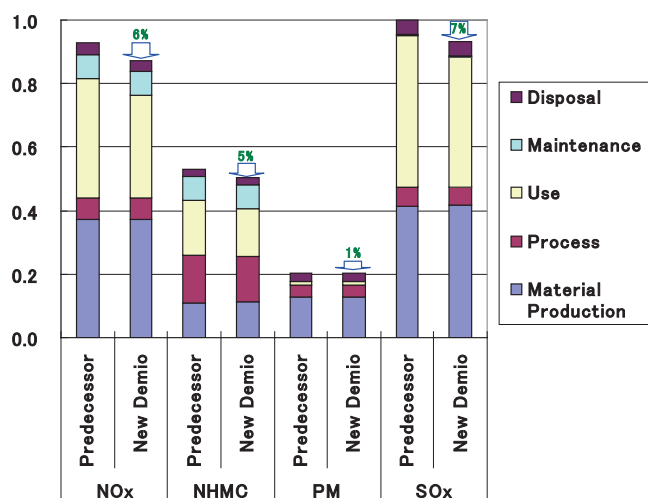


Fig.6 Comparison of NO_x, NMHC, PM, and SO_x Emissions between Predecessor and New Demio

これは、NO_x, NMHC, SO_xについては、主に燃費性能向上により燃料製造時の排出が低減したものである。また、安全性向上対策などにより車両質量は増加しているが、車両製造時の排出量は casting 工程、機械加工工程の省エネルギー化が寄与して、従来型車と同等に抑えられている。CO₂排出量と同様に、一層の生産効率向上および省エネルギー化による、NO_x等の排出量低減が今後の課題である。

4. 結 論

新型デミオを全グレードでLCAを実施し、販売台数の加重平均値で評価した。

まず、様々な地球温暖化効果ガスの排出量およびそれらの100年基準の地球温暖化係数(CML2001)より、全排出ガスの中のCO₂排出量の割合を求めた。その結果、CO₂が全体の約97%を占め、地球温暖化の主要因であることを定量的に確認した。その上で、ライフサイクル中において新型デミオが従来型車と比較して、CO₂排出量は11%低減、NO_x排出量は6%低減、NMHC排出量は5%低減、PM

排出量は1%低減、SO_x排出量は3%低減が確認できた。

これらは、新型エンジンSKYACTIV-Gやi-stopの採用、空力性能向上などによる燃費性能向上、生産効率の向上および省エネルギー化の効果である。今後の課題として、車両の軽量化、より一層の生産効率の向上および省エネルギー化による車両製造時のCO₂等の排出量低減を行う必要がある。

5. おわりに

以上述べたように、新型デミオは、従来型車と比較しライフサイクル中の環境負荷低減を確認できた。

今後、マツダのビルディングブロック戦略に基づき、電気デバイスの段階的実用化に向け、減速エネルギー回生、ハイブリッドシステムなどのモータ駆動技術を導入していく。これらの新技術や新製造工程で、ライフサイクル全体での環境負荷を低減するための車造りが重要になると考える。社内外の関係者と連携して取り組んでいく所存である。

参考文献

- (1) 新田茂樹, 森口義久: マツダのライフサイクルアセスメント, マツダ技報, 28号, pp75-79 (2010)
- (2) Nitta, S., Moriguchi, Y.: New Methodology of Life Cycle Assessment for Clean Energy Vehicle and New Car Model, Proceeding of SAE International2011 World Congress (April 2011)
- (3) International Organization for Standard (2006) ISO14040
- (4) The University of Stuttgart and PE International (2000), Gabi4: software and database for life cycle engineering
- (5) Guinée, J.B., Handbook on Life Cycle Assessment, Operational Guide to ISO Standards, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht

■ 著 者 ■



新田茂樹



森口義久

特集：SKYACTIV TECHNOLOGY

6

新世代技術「SKYACTIV パワートレイン」 New-Generation Technology “SKYACTIV Powertrain”

石野 勅雄*¹ 伊藤 あずさ*²
Tokio Ishino Azusa Ito

要 約

「SKYACTIV TECHNOLOGY (スカイアクティブ テクノロジー)」とは、エンジン・トランスミッションをはじめ、ボデー・シャシーを含めたマツダの新世代技術の総称である。マツダはこの新世代技術を全ての商品に今後導入していく。SKYACTIV TECHNOLOGYを実現させているのは、固定概念にとらわれず、相反する課題を同時に解決する「ブレイクスルー」という考えである。本稿では、SKYACTIV パワートレインのユニットの紹介を通して各ブレイクスルーを説明する。SKYACTIV-G (スカイアクティブ ジー) では、これまでになく高い圧縮比により燃費改善とトルクの向上を実現した。SKYACTIV-D (スカイアクティブ ディー) では、低圧縮比によってクリーン燃焼を実現しながら、これまでのディーゼルエンジンの燃費を更に改善した。SKYACTIV-DRIVE (スカイアクティブ ドライブ) では、走行状態のほぼ全域に渡りロックアップ領域を拡大させ、燃費改善とダイレクトなシフトフィールを実現した。

Summary

Mazda has announced “SKYACTIV TECHNOLOGY” as an all-inclusive name for our next-generation technologies. “Breakthrough”, which is the act of resolving two or more conflicting issues simultaneously, is the principle which penetrates the SKYACTIV TECHNOLOGY. Breakthroughs are realized by technical innovations. This paper explains each breakthrough through the introduction of representative SKYACTIV powertrain units. SKYACTIV-G achieves significant improvement in fuel economy and torque with an unexampled high compression ratio. SKYACTIV-D achieves clean combustion while fulfilling further fuel economy improvement and high responsiveness. SKYACTIV-DRIVE achieves improved fuel economy and a direct driving feel.

1. はじめに

2010年10月、マツダは新世代技術として「SKYACTIV」を発表した。SKYACTIVとは、技術開発の長期ビジョン「サステイナブル“Zoom-Zoom”宣言」に基づいて、「走る喜び」と「優れた環境・安全性能」を高次元で両立させる新世代技術の総称である。SKYACTIVは、「ビルディングブロック戦略」(Fig.1) によって展開される全ての技術を包含している。ビルディングブロック戦略とは、自動車の基本である「ベース技術」の上に、段階的にi-stop (アイ・ストップ：マツダ独自のアイドリングストップ&スタート技術) からハイブ

リッドシステム等の電気デバイスを導入していくという戦略である。マツダは、この戦略の基盤であるベース技術の開発を最優先で行っていく。ベース技術は、パワートレインの革新的技術と、ボデーおよびシャシーの基本性能を向上させながら軽量化する総合的軽量化技術からなる。この中から、今回はSKYACTIV パワートレインの革新的技術について紹介する。

*1, 2 パワートレイン企画部
Powertrain Planning Dept.

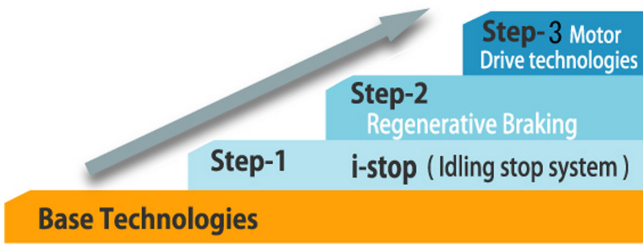


Fig.1 Building Block Strategy

2. ブレークスルー

SKYACTIVを貫いているのは「ブレークスルー」という考えである。例えば、燃費改善とトルクの向上など、相反する課題のベストバランスを狙うのではなく、技術革新によって二つの課題を同時に解決し、性能を飛躍的に向上させることである (Fig.2)。今回、パワートレインとプラットフォームを同時に刷新することで、固定概念にとらわれず車両全体最適の観点から理想の追求を行うことができた。そのことがブレークスルー実現の可能性を大きくした。以下では、SKYACTIVパワートレインにおける具体的なブレークスルーを述べる。

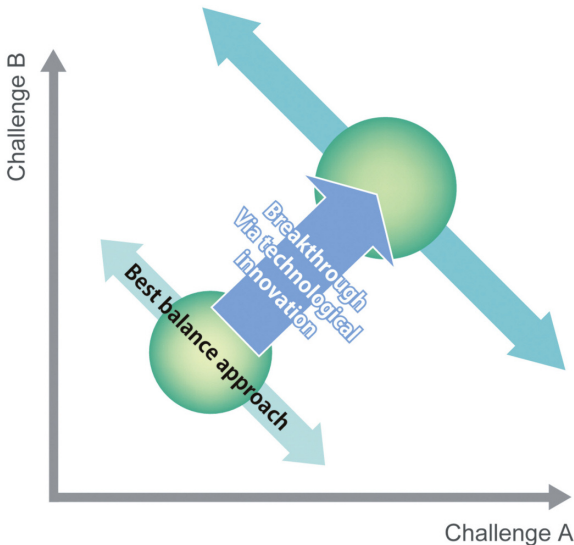


Fig.2 Breakthrough

3. SKYACTIV エンジンの取り組み

内燃機関はFig.3に示すように、燃焼によって発生する熱エネルギーの内、ほとんどの部分が排気損失、冷却損失、ポンピング損失、機械抵抗損失という4つの損失となって捨てられている。内燃機関の熱効率改善とは、この4つの損失を低減することであり、更に、この損失を低減するために具体的に制御できる要素 (因子) は、膨張比 (圧縮比)、燃焼期間、燃焼タイミング、比熱比、ポンピング損失 (吸気量)、機械抵抗 (摩擦抵抗) の6つである。この6つの制御因子を理想に

近づけていくことが、内燃機関を進化させることに他ならない (Fig.4)。上記の6つの制御因子の中で、ガソリンエンジン、ディーゼルエンジンともに鍵となった因子が圧縮比である。

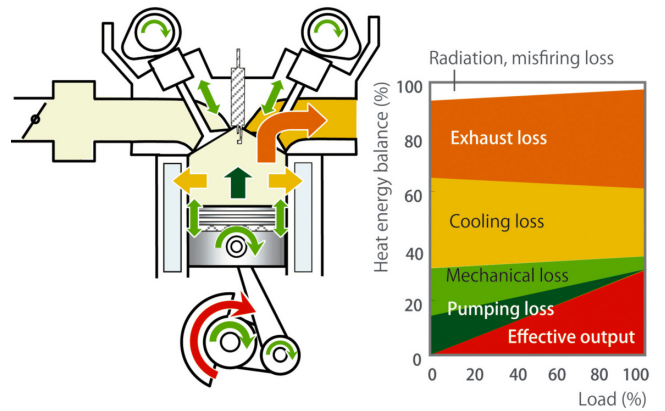


Fig.3 Energy Balance in an Engine

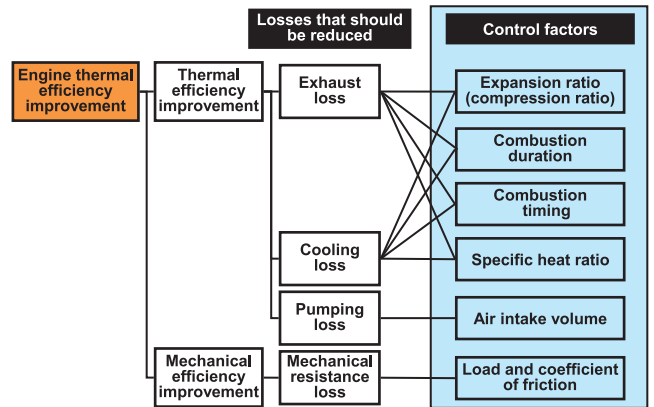


Fig.4 Internal Combustion Engine Improvement

4. 新世代ガソリンエンジン：SKYACTIV-G

ガソリンエンジンでは、圧縮比を大幅に高め、低中速トルクを改善させるとともに、燃費は現行ディーゼルエンジン並みまで改善させた (Fig.5, 6)。

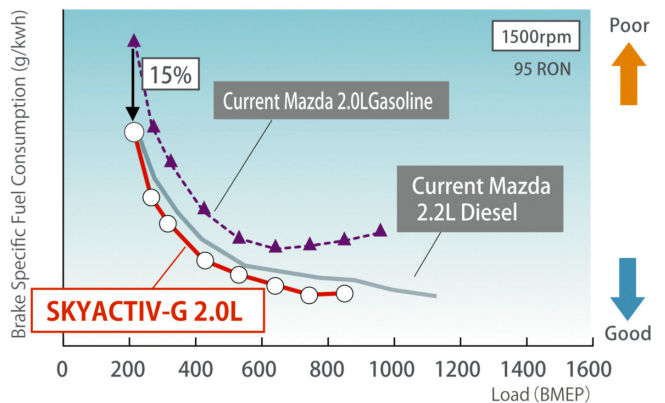


Fig.5 SKYACTIV-G Fuel Economy Improvement

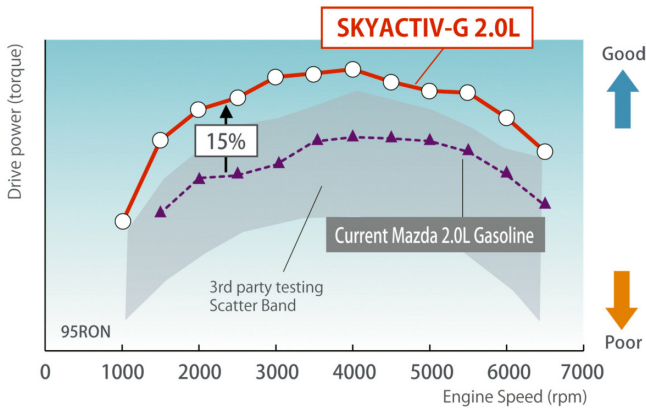


Fig.6 SKYACTIV-G Torque Improvement

4.1 ブレークスルーポイント (SKYACTIV-G)

理論的には、圧縮比を高くすると燃費と出力を改善できる。例えば、圧縮比を11.2から15まで高めると、約7%熱効率を改善できる。それにもかかわらず、これまでガソリンエンジンの高圧縮比化がさほど進んでいない理由の一つは、高圧縮比にするとノッキングが発生しやすくなり、その対応によって出力が下がるためである (Fig.7)。高圧縮比化による本来の性能向上を実現させるためには、ノッキング発生抑制という課題をブレークスルーする必要がある。

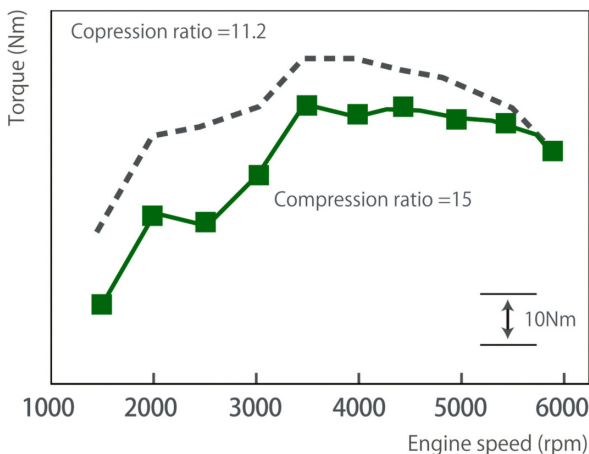


Fig.7 Torque Decrease and Increased Compression Ratio

4.2 課題と対応 (SKYACTIV-G)

圧縮比を高めると、圧縮上死点付近の温度と圧力が高くなる。燃料と空気の混合気がこの条件に一定時間さらされると、ノッキングが発生しやすくなる。ノッキングの主な発生要因である温度と圧力は、圧縮比によって決まってしまうが、温度については別の因子によっても制御可能であると考えた。それは、完全に排気されずに残ってしまう高温の残留ガスの量によって圧縮上死点温度が大きく変化するというこ

とである。例えば、圧縮比が10、排気ガス温度が750℃、新気温度が25℃のとき、排気ガスが10%シリンダ内に残留ガスとして残ってしまうと、圧縮前のシリンダ内の温度は約70℃上昇し、圧縮上死点温度は約160℃上昇する。このような温度上昇がノッキング発生に大きな影響を与える。この温度変化を、圧縮比による温度変化と併せて考えると次のようになる。例えば、残留ガスを8%から4%に半減させることができれば、圧縮比を3上げてても圧縮上死点温度は圧縮比を上げる前と同じに保つことができる (Fig.8)。SKYACTIV-Gでは、このような残留ガスの低減によって、圧縮上死点温度を下げ高圧縮比化を実現した。

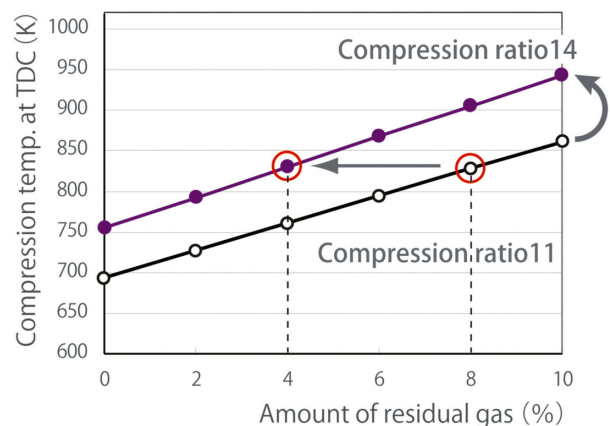


Fig.8 Effect of Residual Gas Reduction

4.3 適用技術 (SKYACTIV-G)

(1) 4-2-1排気システム

残留ガスを大幅に低減する技術として、排気経路の長い4-2-1排気システムを採用した。排気経路が短い従来の排気システムではFig.9に示すように、例えば3番気筒の排気バルブが開いた直後に発生する高圧の排気圧力波が、排気バルブが閉じる前の1番気筒に到達する。このため1番気筒では、一度排出された排気ガスが再び燃焼室内に押し戻されてしまい、多量の残留ガスとなる。そしてこの現象は、経路が短い低回転から高回転まで継続して発生する。経路の長い4-2-1排気システムでは、排気圧力波が1番気筒に到達した時にすでに排気バルブは閉じており排気ガスの押し戻しは起こらない。この効果は、経路が長い低回転以外のほぼ全回転速度域に及ぶ。また、経路の長い4-2-1排気システムでは、集合部での反転負圧による掃気効果が実用回転域で期待できる。実用回転域でその効果を出すには、600mm超という長い管長が必要になるが、新設計のループ型排気管を採用することで、長い管長を確保しながらも小型化することができた。

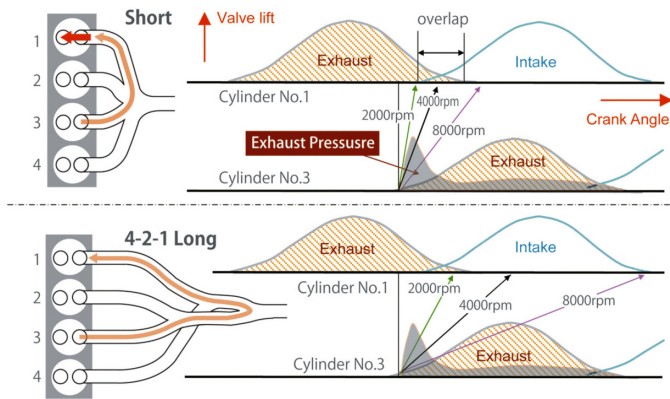


Fig.9 Advantages of 4-2-1 Exhaust System

4-2-1排気システムの問題は、集合部にある触媒までの距離が長いこと触媒に到達する排気ガスの温度が低下し、始動直後の触媒を早期活性化できないことである。対策として、点火時期を遅らせ排気ガス温度を上昇させることで、触媒の早期活性化を促す方法がある。しかし、点火時期を遅らせ過ぎると燃焼が不安定となるため、触媒の後方配置には限界があった。SKYACTIV-Gでは、マルチホールインジェクターにより燃料噴射を最適化し、プラグ周りに成層混合気が生じられるようにした。その結果、点火時期を大幅に遅らせても燃焼が不安定とならず、4-2-1排気システムでの触媒後方配置を実現できた。

(2) 燃焼速度の向上

燃焼速度を高めれば、エンドガス（点火プラグから遠い場所にある未燃焼の混合気）が高温状態にさらされる時間を短縮でき、ノッキングが発生する前に正常燃焼を完了させることができる。SKYACTIV-Gでは、空気流動の強化、燃料噴射圧力の強化、噴霧特性改善などにより、均質で流動の強い混合気を生じ燃焼速度を高めた。また、従来の高圧縮比ピストンでは盛り上がった頭頂部に点火後の初期火炎が当たり、火炎の成長が阻害され燃焼速度が落ちるといった問題があった。これに対して、SKYACTIV-Gでは、Fig.10に示すようなキャビティーをピストン頭頂部に設けることで、初期火炎の形成を保護して燃焼速度を高めた。

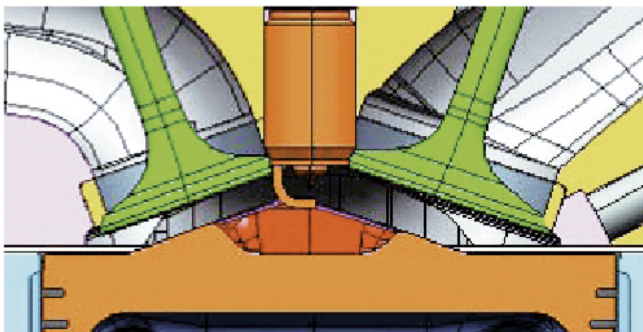


Fig.10 Piston Cavity

5. 新世代ディーゼルエンジン：SKYACTIV-D

ディーゼルエンジンでは、大幅に圧縮比を下げ、クリーンな燃焼をさせながら燃焼タイミングの最適化と機械抵抗低減を達成し、大幅に燃費を改善させた。

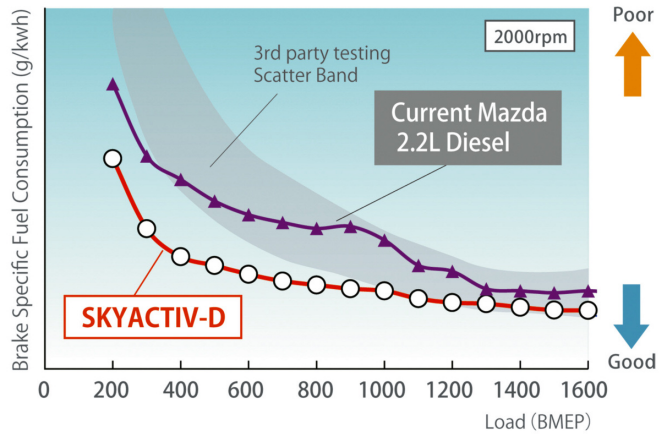


Fig.11 SKYACTIV-D Fuel Economy Improvement

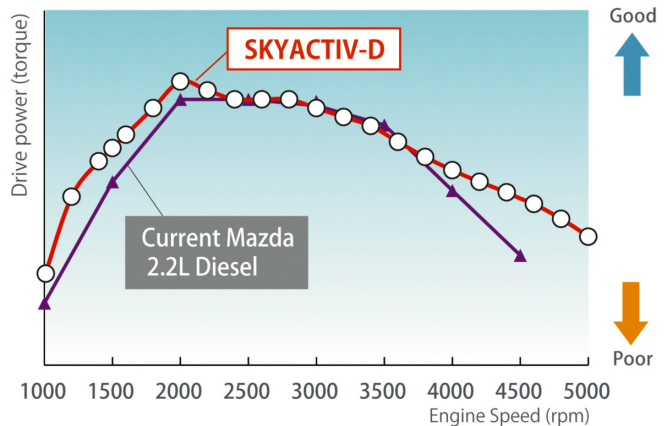


Fig.12 SKYACTIV-D Torque Improvement

5.1 ブレークスルーポイント (SKYACTIV-D)

ディーゼルエンジンは、燃料を噴射し自己着火させる機関であるため、高温高压に圧縮する必要がある。高温高压にするために圧縮比が高く、このため本来高効率であるべきである。しかし、高い圧縮比に耐えるために一般的にピストンなど往復・回転部品は高剛性で重く、ガソリンエンジンに比べ機械抵抗が大きい。更に、近年のNOx（窒素酸化物）やススの厳しい排出ガス規制に対応するために、最適燃焼タイミングでの燃焼が困難となってきており、効率面での優位性が減少している。そこで、最適燃焼タイミングでのクリーンな燃焼と機械抵抗の大幅な低減という課題をブレークスルーする必要がある。

5.2 課題と対応 (SKYACTIV-D)

圧縮比の高いディーゼルエンジンのピストン上死点付近で燃料が噴射された場合、高温高压であるため、空気と十分に混ざる前に燃料が偏在しているまま自己着火し、局所的な燃焼となる。この結果、局所高温領域ではNO_xが生成し、燃料の濃い酸素不足領域ではススが発生する。近年の厳しい排気ガス規制の下では、NO_xやススの発生を極力抑える必要がある。そのために、高温高压の上死点付近での噴射(燃焼)タイミングを遅らせ効率を犠牲にし、圧力と温度が下がった状態で燃料を噴射し空気と十分に混ぜてクリーンな燃焼をさせる必要があった (Fig.13)。

SKYACTIV-Dでは、最適燃焼に影響する温度と圧力を一度に下げることができる低圧縮比に着目した。圧縮比を低くすることで、燃焼タイミングの最適化とNO_xやススの発生の大幅低減を可能にした。

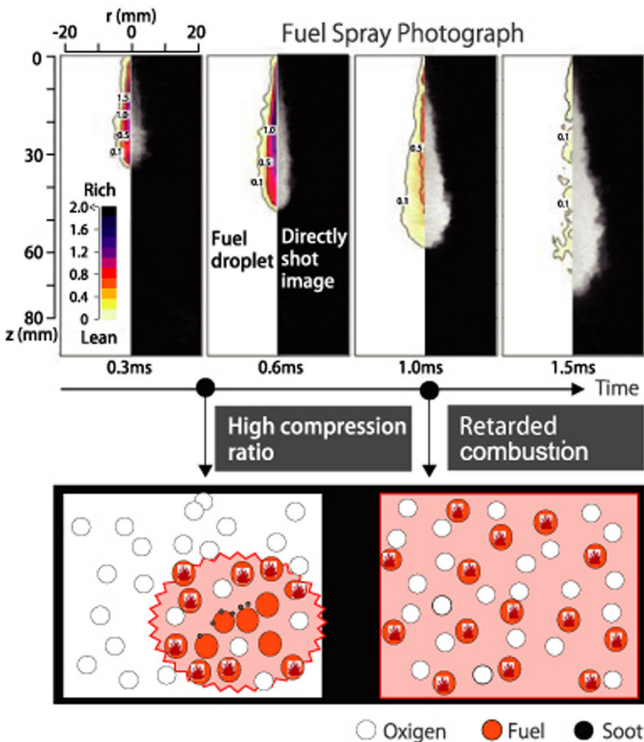


Fig.13 Compression Ratio and Diesel Combustion

5.3 適用技術 (SKYACTIV-D)

(1) 低圧縮化による燃焼タイミングの最適化

圧縮比を下げた場合は、ピストン上死点付近における圧縮温度・圧力は低くなる。この状態では、噴射後の燃料は空気と十分に混ざってから燃焼する。よって、より均質な燃焼となり局所的高温や酸素不足が回避され、NO_xやススの発生量は大幅に低減される。その結果、各国の厳しい排気ガス規制にNO_x触媒なしで対応可能なほど、クリーンな燃焼を実現できた。また上死点付近での燃焼が可能であるため、実質の仕事量(膨張比)は高圧縮比のクリーンディーゼルエンジンよりも大きくとれて高効率化を実現できた (Fig.14)。

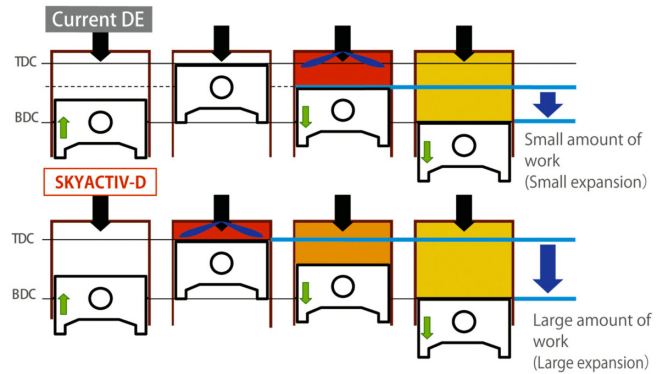


Fig.14 Higher Expansion Ratio Due to Lower Compression Ratio

(2) 低圧縮化による軽量化と機械抵抗低減

低圧縮化によって、従来のディーゼルエンジンより最大筒内燃焼圧力が下がり、ピストンやコンロッドなどの往復・回転部品の剛性の最適化によって大幅な軽量化と低抵抗化が実現できる。この結果、SKYACTIV-Dは平均的なガソリンエンジン並みの低い機械抵抗を実現した (Fig.15)。

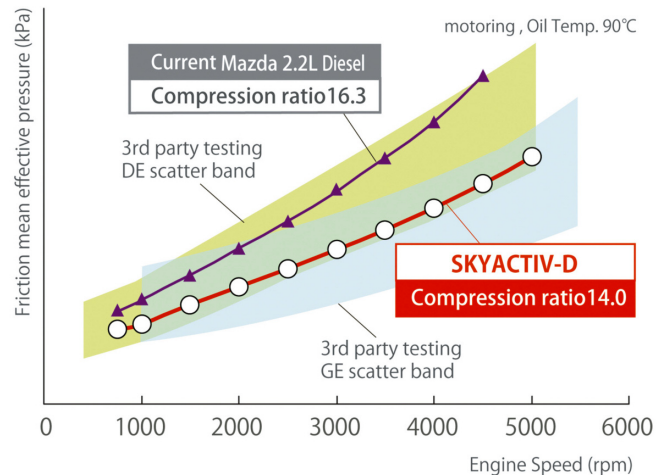


Fig.15 Lower Friction Due to Lower Compression Ratio

(3) 始動性確保

このようなメリットにも関わらず、従来、ディーゼルエンジンの低圧縮化が進まなかった要因は主に2つある。1つは、極低温時の圧縮温度が下がりすぎることによって着火性に問題が生じること。2つ目は、着火後の暖機運転中に、圧縮温度不足による半失火など不安定燃焼が発生してしまうことである。SKYACTIV-Dでは、マルチホールピエゾインジェクターにより燃料噴射パターンの自由度を拡大し、混合気濃度制御の精度を上げ低温着火性を確保した。着火後の暖機運転中の圧縮温度上昇のために排気VVL (Variable Valve Lift: 可変バルブリフト機構) を採用した。一度着火し燃焼が起これば、排気ガス温度は高くなる。そこで、吸気行程中に排気

VVLを作動させわずかに排気バルブを開き、排気ポート内の高温の排気ガスをシリンダ内に少し逆流させる。これにより、圧縮時の温度上昇を促進し、冷間時の圧縮温度不足による半失火を防ぎ、燃焼の安定性を向上させた。

6. 新世代オートマチックトランスミッション：SKYACTIV-DRIVE

現在普及しているオートマチックトランスミッション(AT)は構造の違いから、ステップAT(多段オートマチックトランスミッション)、CVT(無段変速トランスミッション)、デュアル・クラッチ・トランスミッションと、大きく3つに分類できる。市場の要求に対する各ATの特徴をまとめると、一般的にFig.16のようになりそれぞれに優劣がある。SKYACTIV-DRIVEでは、全てのタイプの利点を集約した理想のATを目指し、ステップATをベースに、「燃費の良さ」、「ダイレクト感」、「なめらかな変速」を徹底的に追求した。

Technology	CVT	Dual Clutch	Conventional AT	SKYACTIV-Drive
Good Fuel Economy	+	+	+	+
Easy start up (Launch feel)	+	+	+	+
Easy start up on hill (Creep)	+	+	+	+
Direct feel		+	+	+
Smooth shifting (Shifting Quality)	+			+

SKYACTIV-Drive +: Better
Ideal for global market

Fig.16 Advantages of Each Transmission Type

6.1 ブレークスルーポイント (SKYACTIV-DRIVE)

ステップATは、スムーズな発進と変速が利点であるトルクコンバータを持っている。一方で、トルクコンバータには、流体継手の滑りによる動力伝達ロスが生じることや、加速時のエンジン回転の変化に遅れて車速が変化するというダイレクト感不足の問題もある。この対策として、機械的にエンジンとトランスミッションを直結し滑りをなくすロックアップを使用して、燃費とダイレクト感を向上させてきた。しかし、燃費とダイレクト感を更に向上させるためには、ロックアップ領域を可能な限り広くする必要があり。ロックアップ領域拡大はダイレクト感を増加させる一方で、NVH(騒音や振動)の悪化、ロックアップクラッチの信頼性不足などの問題もある。このため、あらゆる場面で確実にロックアップさせながら、NVHの抑制などの課題をブレークスルーする必要がある。

6.2 課題と対応 (SKYACTIV-DRIVE)

これまでは、スムーズ性を重視しショックを吸収する流体継手を主体とした動力伝達機構を使用してきた。しかし、滑りを縮小させるためには、ロックアップクラッチを主体とした動力伝達機構に切り替える必要がある。そのために、ロックアップクラッチ、トーラス(流体継手)、ダンパの機能を

基本から見直した新トルクコンバータを開発した。その上で、NVHに関してはトランスミッション単体のみならず、車両全体の改善によって対応し克服した。その結果、Fig.17に示すように、これまでのステップATに比べ格段にロックアップ領域が拡大し、低車速領域を除くほぼ全域でのロックアップが可能になった。

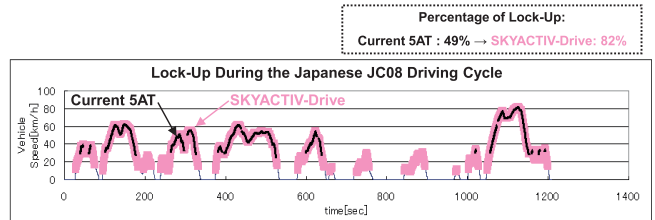


Fig.17 Comparison of Lock-Up Area Between SKYACTIV-DRIVE and Current 5AT

6.3 適用技術 (SKYACTIV-DRIVE)

(1) 新開発トルクコンバータ

ロックアップ領域拡大時のNVHの改善のためには、ロックアップクラッチとダンパの性能を大幅に上げる必要がある。そのために、これまでのトーラス(流体継手)主体の構造を転換し、可能な限りトーラスを小型化することでクラッチとダンパのスペースを確保し、そこに制御性の良い多板クラッチを採用した。その上で、多板クラッチの特性を活かし、応答性を向上させロックアップ制御の緻密化を実現し、優れたダイレクト感とNVH性能改善を達成した。更に、このロックアップ制御とオイルの流れ改善による冷却性能アップによってクラッチ表面のスリップ時の熱発生を抑え、信頼性も格段に改善することができた。

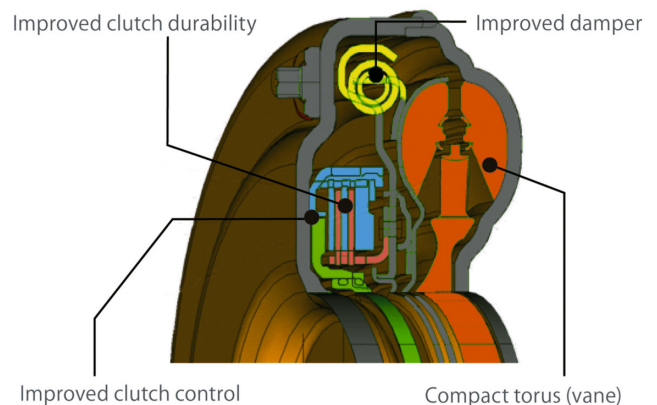


Fig.18 Newly-Developed Torque Converter

(2) 総合振動制御

車内のNVHの改善のためには、加振源の対策と同時に伝播経路における振動抑制が重要な要素となる。ロックアップ領域拡大時のNVH課題に対して、CAEを活用し全体最適を行った。加振源であるエンジン、SKYACTIV-DRIVEの制御システムと振動伝播のマウント、車体などの振動特性制御システムを網羅した大規模システム解析を駆使し、車両としての総合振動制御にて広範囲に課題を克服した。

7. おわりに

今回紹介したSKYACTIVパワートレインは、ビルディングブロック戦略の基盤を構成するものである。そして、今後も、電気デバイスの割合は増えていくが内燃機関と電気デバイスの組み合わせがパワートレインの主流であり続けると予測される (Fig.19)。電気デバイスとの組み合わせにおいては、内燃機関の不得手な領域をモータが受け持っている。この電気デバイスを小型化するためにも内燃機関の更なる改善には意義がある。内燃機関の熱効率を極限まで高め、シンプルで高効率なトランスミッションを組み合わせた究極のパワートレインを追求していく。理想のパワートレインと小型・軽量電気デバイスとの組み合わせによって、マツダらしい走る喜びと優れた環境性能を提供し続けることが可能となる。

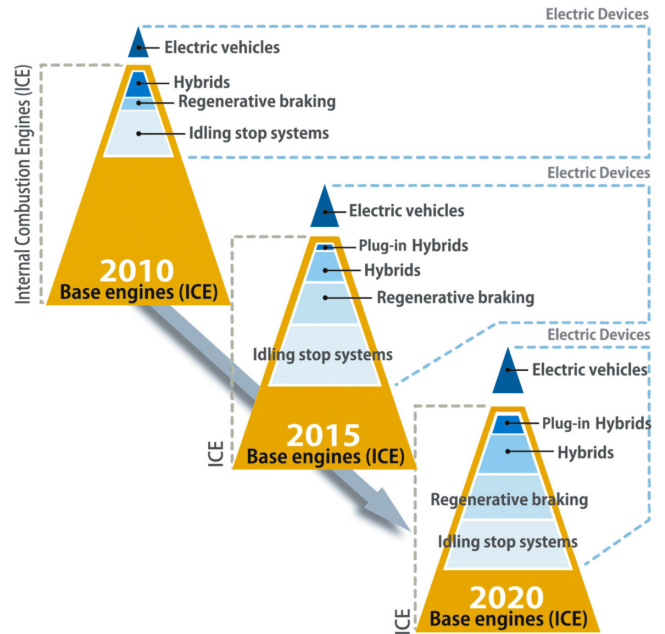


Fig.19 Anticipated Expansion of Environmental Technologies

■ 著 者 ■



石野勅雄



伊藤あずさ

特集：SKYACTIV TECHNOLOGY

7

SKYACTIV-G制御技術の紹介 Introduction of SKYACTIV-G Control Technology

江角 圭太郎*¹ 佃 厚典*² 今村 友之*³
Keitaro Ezumi Atsunori Tsukuda Tomoyuki Imamura
遠藤 孝次*⁴ 上野 隆司*⁵ 小森 賢*⁶
Kouji Endou Takashi Ueno Satoshi Komori

要 約

デミオを皮切りにそれ以降の車種で搭載するSKYACTIV-Gの開発に当たり、常識を打ち破る機能／性能を実現するため、エンジン制御を基本から見直して一新した。

具体的には、ガソリン・エンジン制御の基本である吸排気制御／吸気量予測、DISIエンジンの噴射自由度を活用して最適な混合気を形成する燃料噴射制御、SKYACTIV-Gの特徴である超高圧縮比を使い切るための異常燃焼検出・抑制制御、燃費向上のための次世代i-stopバッテリーマネジメントシステムや燃費最適制御、および「走る喜び」を実現するための駆動力制御などである。

またこれらの制御技術を適切に動作させるための新しいPowertrain Control Module（以下PCM）階層構造を採用するとともに、モデルベース開発の実践を掲げて設計検証の充実を図った。

Summary

To develop SKYACTIV-G, which will be installed in Demio as its leading vehicle, conventional engine control was thoroughly reexamined and completely renewed to achieve functionality and performance beyond common knowledge.

Newly adopted technologies include intake / exhaust gas control and airflow prediction as it is the base of gasoline engine control, fuel injection control to optimize air mixture utilizing DISI engine's high flexibility in fuel injection, and abnormal combustion detection / containment control, which takes full advantage of super-high compression ratio that SKYACTIV-G supplies; furthermore, next generation i-stop battery management system and optimized fuel consumption control improve vehicle fuel economy while driving force control delivers "fun-to-drive."

In addition, new PCM hierarchy structure was adopted to properly operate those control technologies along with model-based development technology to enhance design verification.

1. はじめに

マツダにおけるガソリン・エンジン制御の歴史は30年を越え、その間、走行性能や環境性能の向上を狙って年々進化してきたが、これに伴って制御も大規模化／複雑化し、マイコンのROM容量で表すとこの20年間で100倍と指数的に増大している（Fig.1）。

このような中、マツダ独自の「ビルディングブロック戦

略」および「内燃機関の3step進化構想」に則ったSKYACTIV-Gの開発に当たって、走行性能と環境性能を大幅に向上し、かつ将来の発展性を確保するため、エンジン制御もその構造から一新し、開発手法も変革することで、常識を打ち破る機能／性能を実現した。

本稿では、このSKYACTIV-G制御に織り込んだ制御技術や開発手法について紹介する。

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

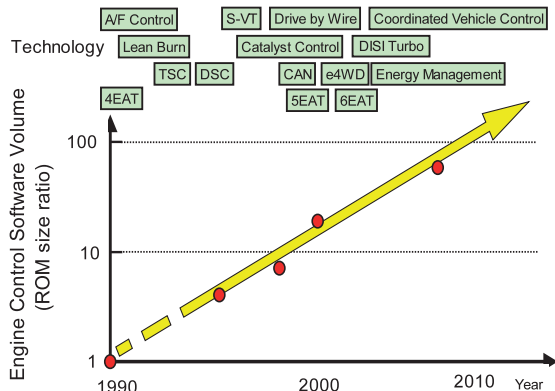


Fig.1 Enhancement of Engine Control

2. SKYACTIV-G制御技術

2.1 制御構造

SKYACTIV-Gでは、PCMにセンサやアクチュエータでそれぞれ約50系統（故障判定用信号含む）の信号入出力があり、更にTransmission Control Module (TCM) や Dynamic Stability Control System (DSC) などの車両系 Electronic Control Unit (ECU) 群との多数の通信情報が加わるため、車両やエンジンとして整合の取れた制御が行え、かつ効率的に開発するためには適切な構造を有することが必須である。

このため、まずアプリケーション層とプラットフォーム層に大別した上で、前者は更に車両としての挙動を制御する車両制御層と、エンジンの挙動を制御するエンジン制御層に分けた。

車両制御層とエンジン制御層の情報伝達はトルク信号に集約し、エンジン制御層内でその他の制約条件を満たしつつ所望のトルクを出力するように吸排気/燃料/点火制御を協調させた（トルクベース制御、Fig.2）。

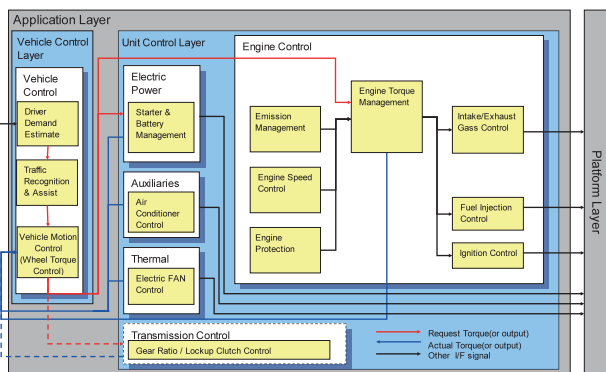


Fig.2 Engine Control Structure

また、後者のプラットフォーム層には、PCMハードウェアと接し、センサからの信号を物理量に変換する機能とアクチュエータを駆動する機能を置いた。

なお、それぞれの層に配置する制御機能群は、SKYACTIV-Gで新規に必要なものを含めて、従来

機種比約1/3に再編および統廃合して機能間の独立性を高め、複数の制御技術者による並行開発を可能にした。

2.2 制御技術

SKYACTIV-G制御として新規開発した以下の技術について述べる。

(1) 吸排気制御/吸気量推定

SKYACTIV-Gでは、吸気/排気S-VTとEGRを用いてエンジンを常に効率の良い状態に制御している（Fig.3）。

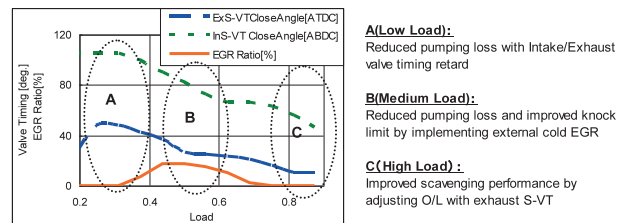


Fig.3 Optimized Intake/Exhaust Control Strategy

今回のシステムでは、EGRバルブ、吸気/排気S-VTの応答性がほぼ同等かつエレキスロットルがそれよりも速いことから、応答性の遅いデバイスにまず目標値を与え、それら目標値が入力されたときの各制御デバイスとエンジンの将来の状態をPCM内部のモデルで予測し、狙いの吸気量を実現できるようにスロットルで調整することで、目標値を精度よく実現しつつ、常にエンジンの効率が最適となる組み合わせを維持している。また、PCM内部の予測モデルをエンジンに装着している各センサを使ってフィードバック補正することで、モデルによる誤差や外乱に対するロバスト性を確保している（Fig.4）。

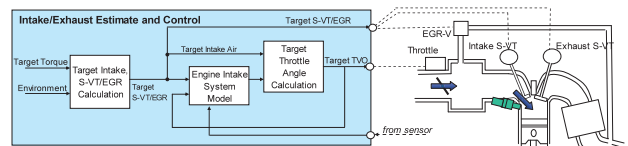


Fig.4 Intake/Exhaust Control Structure

(2) 燃料噴射制御

DISIは、筒内の吸気量が確定する吸気バルブを閉じた後でも燃料を筒内へ噴射することが可能である。急激な吸気量の変化等に対しても、圧縮行程で噴射量を調整することで、精度の高い空燃比制御や筒内の混合気温度の低減による耐ノッキング性能を改善した。

また、Fig.3でも述べた通り、吸気バルブ閉タイミングを遅くすることで燃費を改善しているが、吸気制御吸気バルブ閉タイミングが最も遅い状態（ABDC110deg）では、一旦シリンダへ吸入したガスの大半はインテークマニホールドへ吹き返される。吸気行程中に筒内へ噴射した燃料も、大半はインテークマニホールドへ吹き返されることになるため、この吹き返し量の変化によって空燃比が大きく変動してしまう。今回、吸気バルブタイミングや燃料噴射時期などから、燃料の吹き返し量を計算して噴射量を補正することで、空燃比制御性を向上した（Fig.5）。

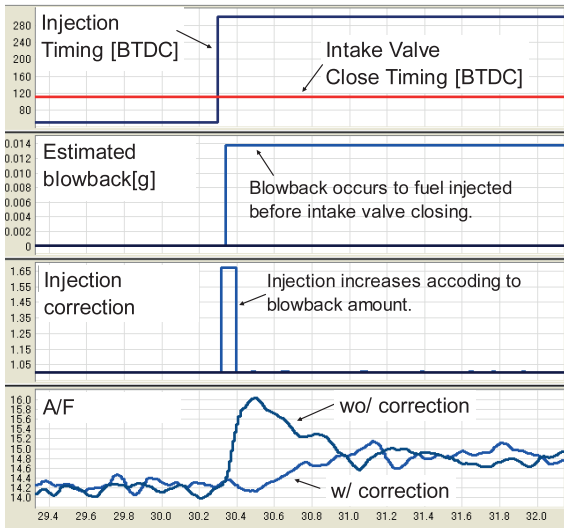


Fig.5 Behavior of Air-to-Fuel Ratio at Transient

(3) 異常燃焼検出・抑制制御

① 新デジタルノックコントロールシステム

高圧縮比エンジンでは、点火時期に対するノッキングの感度が高くなるため、微小なノッキングを検出して点火時期を制御する必要がある。SKYACTIV-Gでは、吸気/排気S-VTの採用や圧縮行程での高圧噴射のために、バルブ着座時やインジェクタの噴射開始/終了時の振動発生がノッキングの発生するタイミングと重なり、従来のノックウインドウを用いたノイズ分離ができない他、正常燃焼時の筒内圧刺激で発生するノッキングに近い振動も分離する必要があった (Fig.6)。

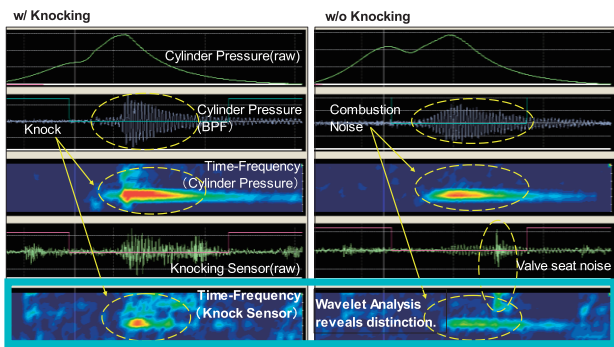


Fig.6 Wavelet Analysis of Knocking Signal and Noise

Fig.6の例のように、ノックセンサ信号を周波数軸、時間軸で解析すると各ノイズには特徴があることが分かる。

今回、高速でA/D変換可能なマイコンを採用することで、ノックセンサ信号をマイコン内で周波数と時間軸で解析してノイズを分離し、微小なノッキングを捉えることができた (制御ブロック図, Fig.7)。

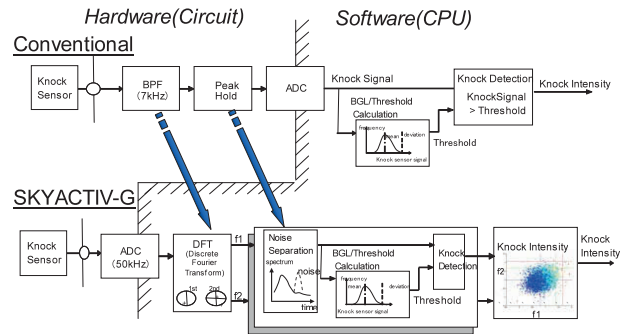


Fig.7 Knocking Control Strategy

② プリイグ抑制制御

低回転、高負荷で圧縮比を高くすると、プリイグ (圧縮自着火) が発生し、非常に大きなノッキング音が発生する。吸気S-VTを遅角させ有効圧縮比を下げることでプリイグは回避可能であるが、S-VTを遅角すると、一旦シリンダへ吸い込んだ吸気がインテークマニホールドへ押し戻されるため、充填量が低下しトルクが低下してしまう。このため、プリイグが発生しない限界までS-VTを進角させておく必要がある。

プリイグが発生する時期は、Livengood-Wu積分式で求める手法が知られており、SKYACTIV-Gでもこの予測式を用いてプリイグが発生しない有効圧縮比を求め、吸気S-VTを制御している。

しかし、プリイグ予測に必要な情報の内、湿度、オクタン価、燃焼室内へのデポジット堆積など、PCMでは直接知ることができない因子があり、実際のプリイグ限界より、S-VTを遅角側に設定する必要があった。今回、点火プラグに電圧を印加して燃焼で発生するイオンを検出し、燃焼開始時期を推定することで、プリイグが発生する予兆を捉えてS-VTを遅角し、プリイグを回避した (Fig.8)。

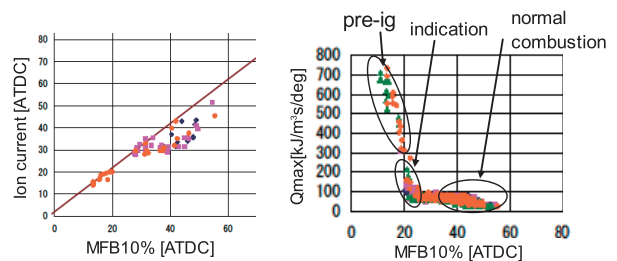


Fig.8 Correlation of Ion Current and MFB

(4) 次世代i-stopバッテリーマネジメント

バッテリーマネジメントについて詳細は本号別稿に譲るが、システムの進化に合わせて減速時のエネルギー回生量の増加、および後述の駆動力制御と協調させて違和感のない減速感を実現した。

i-stop機能については、従来Dレンジのみの動作であったものをNレンジやLレンジ、またSSモードでも動作させることでi-stop作動頻度を向上させるとともに、SKYACTIV-Gの特徴である吸気S-VTによる吸気弁超遅

閉じ機能を活用し、より滑らかな再始動とその際の燃料消費量の低減を図った (Fig.9)。

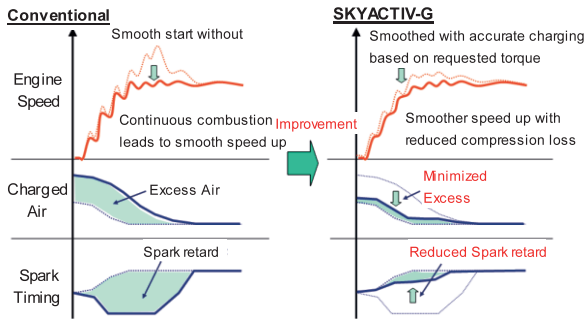


Fig.9 Comparison of Re-Start Behavior

(5) 駆動力制御

SKYACTIV-Gでは「意のままに」をスローガンに、アクセル操作に対してドライバーが期待する駆動力を実現することを上位目標として設定し、その駆動力を最も少ない燃料で実現することを目指した。

「意のまま」を実現するにあたり、Fig.10のようにドライバーのペダル操作～車両挙動までの一連のループの中に、目標加速度決定部とユニット目標決定部を配置し、理想の車両挙動を目標加速度として設定することで、エンジン、トランスミッションなどのユニット制御部と切り離して実現できる構成とした。

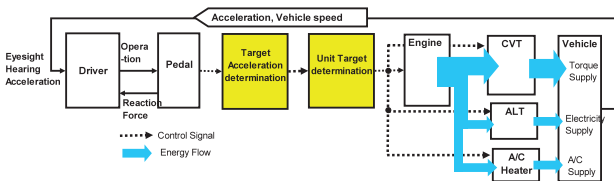


Fig.10 Driving Force Control

また、ユニット目標決定部では、必要な電力の供給と快適な冷暖房性能を実現しつつ、目標とする加速度を最小の燃料流量で実現するための、発電量、エアコンのコンプレッサ駆動/ヒータへの熱エネルギー供給量、ギヤ比、およびエンジントルクを決定している (「燃費最適制御」, Fig.11)。

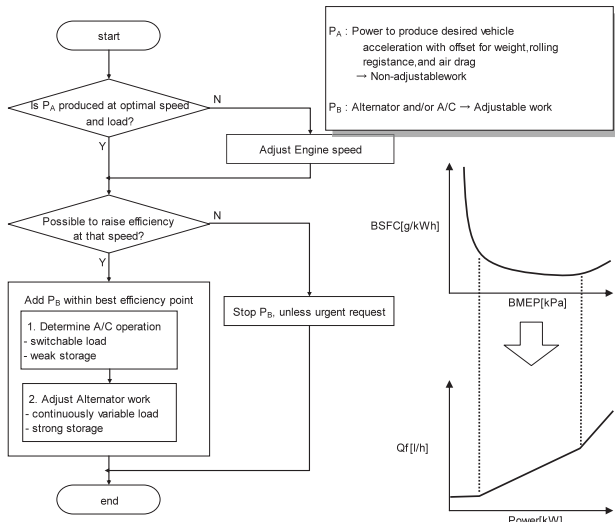


Fig.11 Flowchart of "Optimized Fuel Consumption Control"

Fig.12は、燃費最適制御有無の2仕様で同一ルートを行なったときの、エンジン領域使用頻度をバブルチャートで示したものである。本制御によって最も効率が良い領域 (太線部) を使った走行が実現できた。

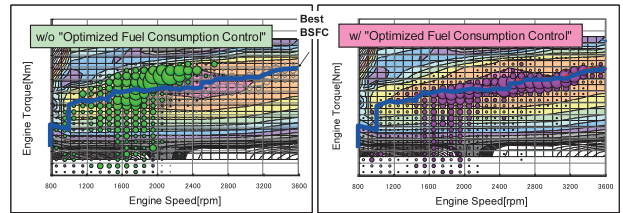


Fig.12 Result of "Optimized Fuel Consumption Control"

3. 開発手法

3.1 制御モデル

アプリケーション層の全制御機能およびプラットフォーム層の一部の制御機能については、ブロック線図表記と状態遷移図表記を併用し、前述の制御構造に沿って「制御モデル」として記述した。

これにより、機能単体およびPCM全体の両面で制御アルゴリズムの設計段階での検証が可能になった。

またほとんどの制御モデルについては自動コード生成技術が適用可能であり、迅速かつ高品質にPCMに実装でき、最終的に実車で検証/適合を行うまでの期間を劇的に短縮できた。

3.2 制御対象モデル

制御機能の検証のため、エンジンやセンサ/アクチュエータ、補機、トランスミッションおよび車両の走行抵抗等をモデル化した。

この内、エンジンのシリンダ内挙動についてはMBC (Model-Based Calibration) のために得た統計モデルを用い、その他は物理モデルとして組み合わせたハイブリッド構造にすることで、扱いやすさと精度の両立を図った (Fig.13)。

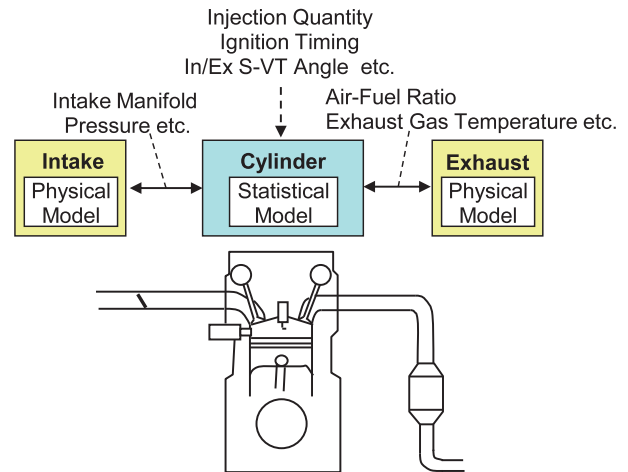


Fig.13 Plant Model Structure

また同一の制御対象モデルを、制御モデル設計段階ではMILS (Model-In-the-Loop Simulation) に組み込んで用い、その後、制御モデルをPCMに実装した段階ではHILS (Hardware-In-the-Loop Simulation) に組み込んで用いることで、設計開始から実車検証前まで、プロセスごとの検証が容易になった。

3.3 支援ツール

前述のモデル群を用いてより効率的に開発するため、下記の支援ツールを導入／開発した。

(1) 高速MILS

モデル編集機能を省いた、高速でシミュレーションできる環境。個別の制御モデル設計段階で、PCM全体での機能確認が短時間でできるようになった (Fig.14)。

(2) 構成管理システム

モデル群のバージョン／派生管理システム。大規模化／並行開発に伴う作業ミスの防止と、モデル開発履歴の可視化が可能になった。

■ 著 者 ■



江角圭太郎



佃 厚典



今村友之



遠藤孝次



上野隆司



小森 賢

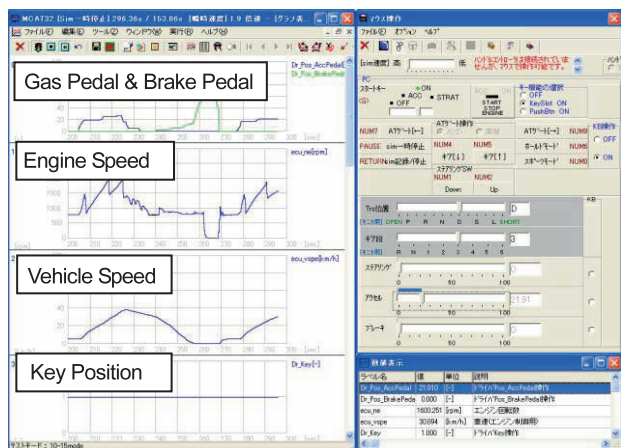


Fig.14 Screen-Shot of Hi-Speed MILS

4. おわりに

次世代パワートレインとしてのSKYACTIV-Gを完成させるため、エンジン制御を開発手法も含めて一新し、その搭載第1弾となるデミオでは、クラストップの10-15モード燃費30km/L達成に貢献するとともに、走りについてもアクセル操作に対してよりリニアで滑らかな車両挙動を実現した。

また、この開発を通じてエンジン制御のモデルベース開発ができるようになった。

引き続き、今後のマツダの内燃機関および商品の進化に貢献していきたい。

特集：SKYACTIV TECHNOLOGY

8

SKYACTIV-Gにおける開発プロセス変革 Development Process Innovation on SKYACTIV-G

増田 幸男^{*1} 渡辺 友巳^{*2} 荒川 博之^{*3}
Yukio Masuda Tomomi Watanabe Hiroyuki Arakawa
松尾 直也^{*4} 杉浦 博昭^{*5} 富澤 和廣^{*6}
Naoya Matsuo Hiroaki Sugiura Kazuhiro Tomizawa

要約

我々は、これまでにない高圧縮比化による飛躍的な燃費改善とトルク向上を実現した次世代ガソリンエンジンSKYACTIV-Gを開発した。SKYACTIV TECHNOLOGYの開発においては、開発プロセス面でも新しい取り組みを進めてきた。具体的には、機能開発や品質検証のやり方、コモンアーキテクチャ（CA）構想などの取り組みである。

性能・信頼性・NVの各領域に、この新しい開発プロセスを適用することで、排気量差、仕向け地展開による仕様差に関わらず、同体質のエンジン群を一括開発することが可能となった。これにより従来よりも開発効率を大幅に高めるとともに品質のロバスト性を保証できるようになった。

Summary

We developed new generation gasoline engine called as SKYACTIV-G which achieved remarkable improvement of fuel economy and torque due to high compression ratio. In this SKYACTIV TECHNOLOGY development, we introduced new development process as well. That is the approach such as function development, quality certification method in the market field, common architecture (CA) concept and so on.

By applying this new development process to all technical attributes such as performance, reliability and NV area, bundled development of the engine family could be realized, which has same functional characteristics regardless of difference of engine displacement or difference of specification due to the market deployment plan. Finally, this approach brought about robustness of the quality guarantee, as well as drastic improvement of engine development efficiency.

1. はじめに

近年ハイブリッド車や電気自動車の開発が活発化し、電気デバイスによる燃費改善技術の採用が進んでいるが、グローバルで見ると今後も内燃機関が主流である。そしてハイブリッド車においても、その効果を十分発揮させるには、ベースとなる内燃機関の性能が重要であることはいまでもなく、その答えとしてSKYACTIV-G開発を行ってきた。

一方で、SKYACTIV-Gを初めとする競合力の高い商品をタイムリーに市場導入するためには開発、生産の効率改

善が必須であった。我々はガソリンエンジンの機能を見つめなおし、全生産車に適用できる展開性のある技術を実現するために、開発プロセス自体も新しい取り組みを進めてきた (Fig.1)。本稿では、CA（コモンアーキテクチャ）構想と機能開発および、MBC（モデルベースキャリブレーション）の考え方と開発事例を紹介する。

*1~5 エンジン性能開発部
Engine Performance Development Dept.

*6 エンジン設計部
Engine Engineering Dept.

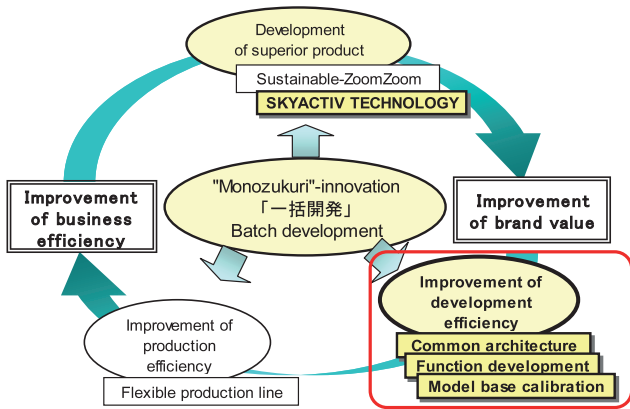


Fig.1 Mazda "Monozukuri"-Innovation

2. CA構想による機能展開の取り組み

(1) コモンアーキテクチャ (CA) 構想の概念と狙い

激変する市場環境下において、SKYACTIV-Gに代表される優れた商品がかつてないスピードと効率で開発してゆくことが必須である。これを実現するために、我々は「CA構想」に基づく「一括開発」という新しいプロセスを導入した。これは、将来の機種展開スコープを見据えたビジョンの下、各機能システムごとに、機種によらず共通のコンセプトを定め、高めるべき機能を明確化する。

その機能を安定して（ロバストに）実現する仕様（＝固定要素）を選定する。その後、機種ごとに商品性・生産性・レイアウト等の要求にミートするハード（＝変動要素）を選定するアプローチである（Fig.2）。すなわち、CAとは部品の共通化ではなく、排気量等が異なっても狙いの機能が揃う（機能の転写）よう、必要な部分は構造や部品の諸元を作り分けること。そのために、目標とする機能および機能目標群をあらためて定義しなおした。この定義により、機能限界（我々は機能限界のことを「崖」と呼ぶこととした）と製造トランスをリンクさせた新しい開発のアプローチが可能になり、機能と品質、コストを同時に造りこむ開発革新が実現した。

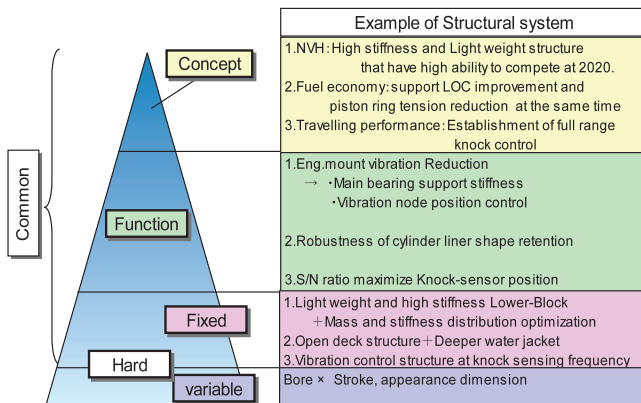


Fig.2 Concept of Common Architecture

(2) 燃焼特性のCA化

例えば、燃焼性能では、物理機能【流速・混合気濃度・

温度・圧力など】を転写することで排気量によらず、同体質な燃焼特性を実現。これにより、燃焼に起因する諸性能開発やキャリブレーションを一本化し、排気量によらない共通開発とすることで市場の性能要求の変化に対しても、柔軟かつ迅速に対応することを可能にした。

燃焼特性では、排気量違いの熱発生パターンを同一にすることを狙い、空気流動をボア径に応じて変化させた（ボア径の拡大に伴い流動を強く制御した）。また、混合気特性（混合気均質度）を同一にするために、インジェクタの噴霧方向、ペネトレーションをボア、ストロークで補正する考えにより、点火時期、噴射時期がほぼ同一になるよう諸元決定しCA化を図った（Fig.3）。

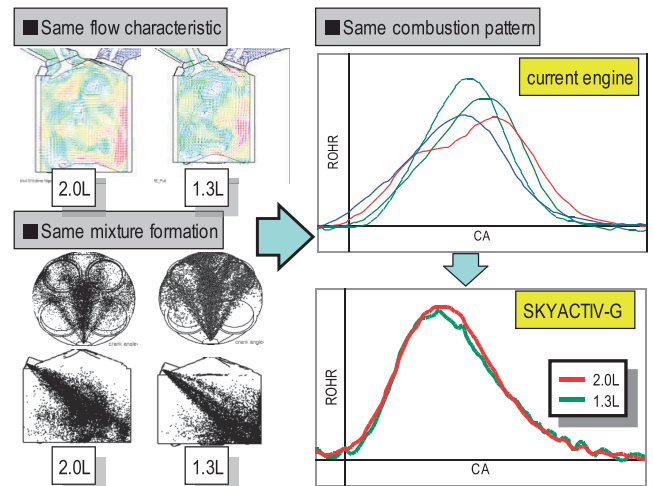


Fig.3 Combustion CA

また、出力特性を規定する主要素である体積効率のCA化に際しては、吸排気脈動、Cfの物理特性転写を目指した。例えば、吸気・排気の脈動特性を合わせることで、排気量が違っていても体積効率の特性を揃えた（Fig.4）。

同様のアプローチを信頼性、NV開発でも適用することで、個別開発を大幅に削減し、開発の効率化を実現した。

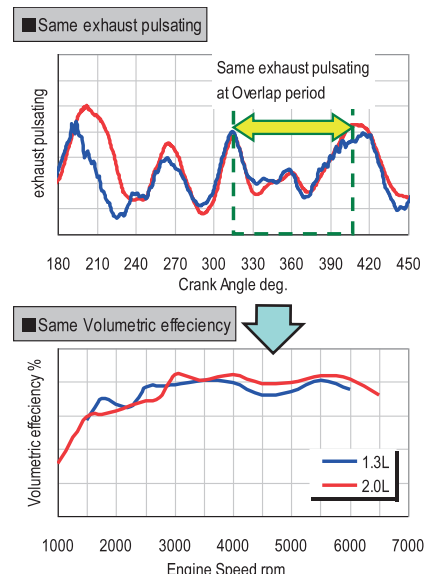


Fig.4 Volumetric Efficiency CA

3. 機能開発と品質検証の新しい取り組み

3.1 機能開発の考え方 (品質と機能の崖の見極め)

(1) 機能開発のプロセス

従来の開発は、商品性 (=品質) 目標を達成することを確認し、仕様を決定するというプロセスであったが、SKYACTIV-Gの開発では、システムに要求される機能そのものにフォーカスし、それをロバストに実現する仕様を選定する開発アプローチへの変革を図った。具体的なプロセスをFig.5, 6に示す。

- ① 機能展開・カラクリ (メカニズム) 解明: このプロセスでは、品質と機能の関連を明らかにするとともに、機種によらずに共通な(i)基本機能および(ii)機能限界を定義する。また、このプロセスでは、基本機能をコントロールする仕様である(iii)制御因子および、製造トレランス、使用環境、劣化等、コントロールができない(iv)ノイズ (誤差因子) の抽出も行う。
- ② 機能限界 (崖) に対するロバスト仕様選定: 制御因子の組み合わせにより、ノイズの影響を受けにくく、また全てのノイズの影響を考慮しても機能限界 (崖) を越えることがない仕様 (=ロバスト仕様) を選定する。
- ③ 商品性目標達成仕様決定: 機種ごとの商品性目標 (=品質限界) にミートするように制御因子の範囲を決定する。
①~③のプロセスではCAEを最大限に活用し、検証の短期化・効率化を図った。これらの結果、開発後期の実機確認段階での問題発生や仕様見直しによる開発手戻りを防止できた。
- ④ 市場検証: 上記プロセスで選定した仕様で製作した車両を実際に市場走行させ、開発の確からしさの検証を行った。

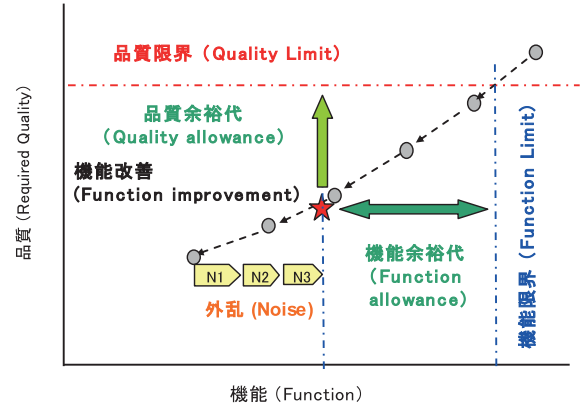


Fig.6 Philosophy of Function Development

3.2 機能開発事例

(1) LOC低減開発

機能開発プロセスに取り組んだ事例としてLOC (Lubrication oil consumption (オイル消費)) 低減開発を紹介する。従来開発では、LOC (=品質) 目標を達成することを確認し、仕様選定を行ってきたが、SKYACTIV-G開発では、基本機能として「シリンダライナー (以下ライナー) の形状保持性」と「ライナー表面油膜のコントロール性」を定義し、機能限界 (崖) に対して余裕のある仕様の選定を行った。Fig.7にライナーとリング間でのオイル掻き落としの状況を示す。ライナーはシリンダヘッドの締め付けや運転時の熱などで変形するが、この変形にピストンリング (以下リング) が追従できない場合、リングとライナーの間に隙間が発生し、リングでの十分な掻き落としができなくなってLOCは増加する。従って、運転中のライナーの真円性を保つことが、LOC低減とリング追従性改善に基づくリング張力低減による燃費改善には重要となる。

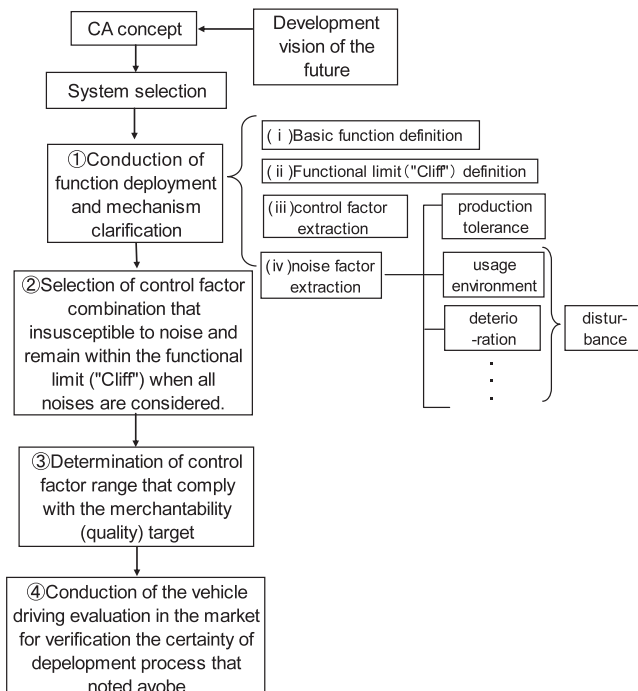


Fig.5 Function Development Process

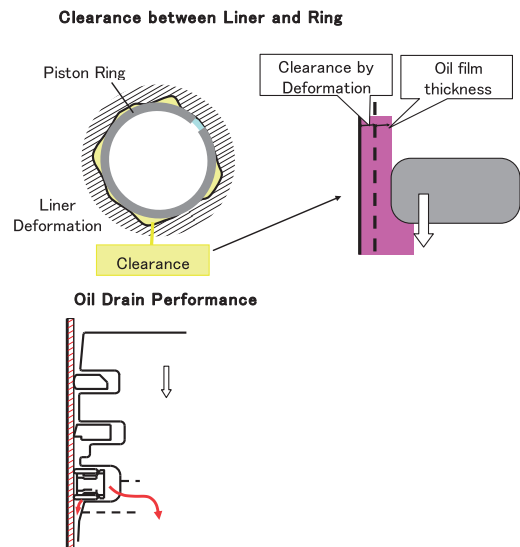


Fig.7 LOC Function Development

SKYACTIV-G開発では、上記基本機能であるライナーの形状保持性に影響する制御因子、誤差因子を抽出し、誤差因子の影響が小さく、全ての誤差因子を考慮しても機能限界 (崖) を越えない仕様を選定した。検証前後でのライ

ナー変形の結果をFig.8に示す。両者とも誤差因子の影響を考慮しているが、最適化仕様ではほとんど変形は見られない。

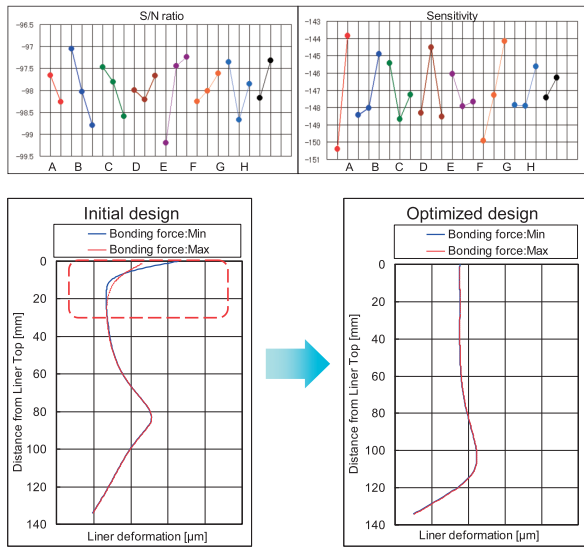


Fig.8 Function Development Result

基本機能のロバスト性を確保した結果、品質であるLOCは、低燃費化のためにリング張力を従来機種比約14%低減したにもかかわらず、ノイズの影響を考慮しても開発目標に対する余裕度を確保することができた (Fig.9)。

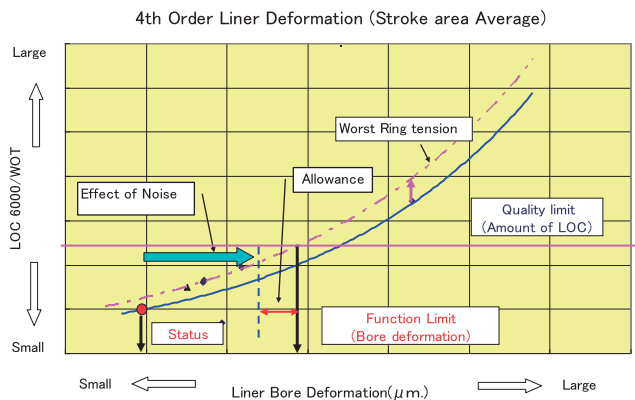


Fig.9 LOC Function Limit

(2) 燃焼開発

燃焼開発においても同様なアプローチを適用した。開発初期の段階で機能展開を行い機能、制御因子、誤差因子を明らかにし、機能目標を設定した。燃焼の機能としては、筒内へ入る空気流動と筒内の混合気均質度が最も重要である。これらを制御する主な因子は、吸気ポート形状、インジェクタ噴霧形状である。誤差因子は、部品、製造ばらつき以外に、劣化、使用環境によるばらつき、部品の応答遅れの観点から抽出した (Fig.10)。

次のステップで、設計した部品が設定した機能目標を達成できているかをCAEで検証した。このプロセスで誤差因子による影響度を明確にし、機能限界 (崖) からの余裕度を明らかにした。最終段階では、実際に試作したエンジンで検証を行い、品質目標、機能目標の達成を確認した。

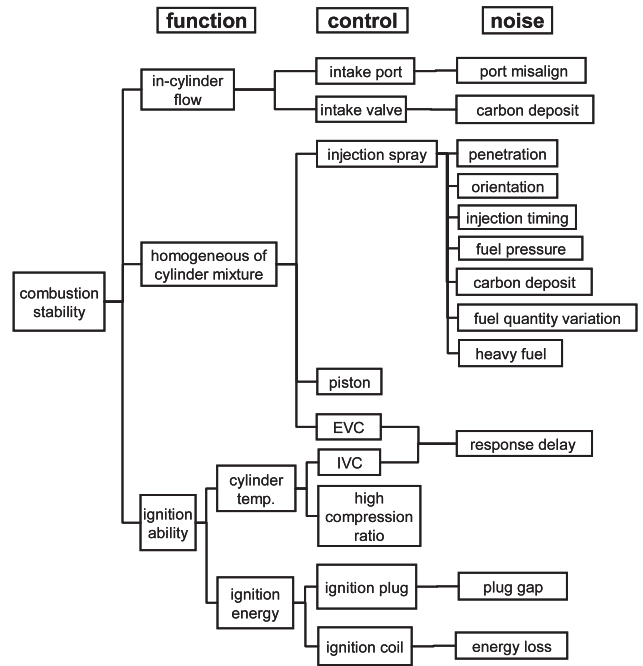


Fig.10 Combustion Function Development

Fig.11に燃焼機能の一つの混合気均質度の限界と余裕代を示す。混合気の均質度は、燃焼安定性と相関が高い筒内混合気のA/F偏差値を指標に絞り込み、混合気に関する誤差因子を抽出して検証した結果、余裕代は確保できることがわかった。この結果、重点開発項目を絞り込み、効率的な開発が可能になり、展開性のあるロバストな燃焼性能を実現した。同様に性能、信頼性、NVの各領域の重点開発項目についても、システムに要求される機能を高め、その機能を安定して実現する仕様選定を進めた (Fig.12)。

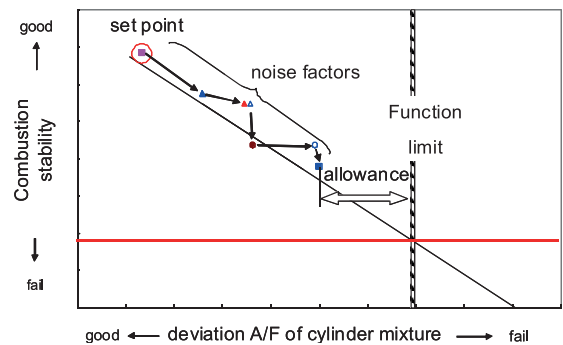


Fig.11 Function Limit of Combustion

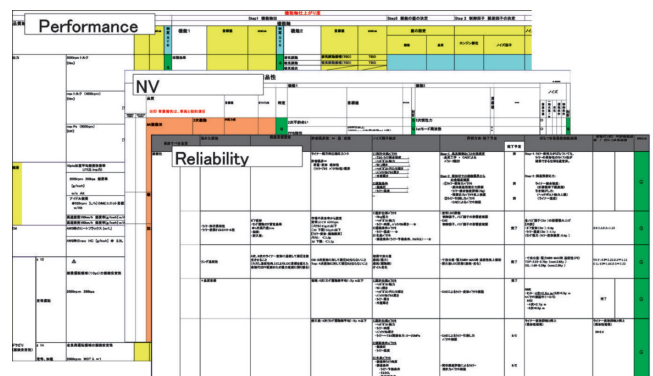


Fig.12 Application of Function Development

3.3 市場品質検証

(1) 市場品質検証活動の狙い

以上のような機能開発の仮説を検証し、我々が技術をコントロールできていることを立証するために市場検証活動を実施した（米国市場で実施）。

視点1：強化した重要機能が、市場環境下（多くの複合ノイズ、市場ユニークな使われ方）にさらされてもロバストに機能するかどうかを検証する。

視点2：ベンチ上での連続的な耐久評価ではなく、様々な環境変化の中における、実車状態での劣化に対するロバスト性を検証する。

視点3：台上評価で発見されない複合ノイズ下での潜在問題がないか徹底的に調べる。

(2) 市場品質検証結果

本活動の事例として、燃焼機能を変化させたときの市場検証結果を紹介する。Fig.13に示すように、故意に燃焼機能を高めた仕様と弱めた仕様を設定して車両に搭載し、市場走行データを収集した。その結果、我々が選定した機能が、市場環境下においても十分なロバスト性を確保していることを検証できた。

また、この状態を台上と車両で比較すると、機能の変化傾向が同等で開発での想定どおりの動きをしており、台上評価で確認した結果は、市場の検証結果を代表していると判断できた。

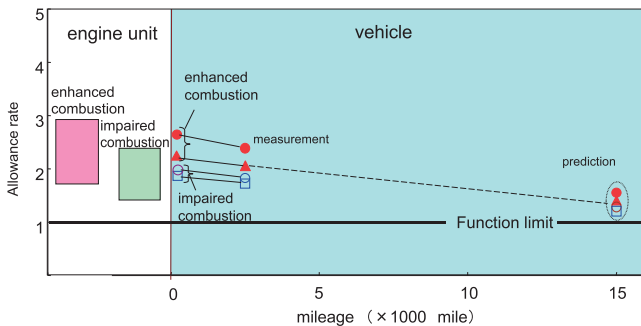


Fig.13 Dyno Evaluation Result

4. キャリブレーションプロセス変革

4.1 CA構想とキャリブレーションプロセスの変革

キャリブレーションとは、燃焼（筒内状態量）と体積効率が（ ηv ）を制御して要求性能を実現することで、Fig.14に示すように機能展開による同体質のエンジンでは、キャリブレーションも多くの部分で転写可能となる。これによりプログラム間／ユニット間の性能開発、キャリブレーション開発の共通化を図り、大幅な開発工数の削減を実現した。

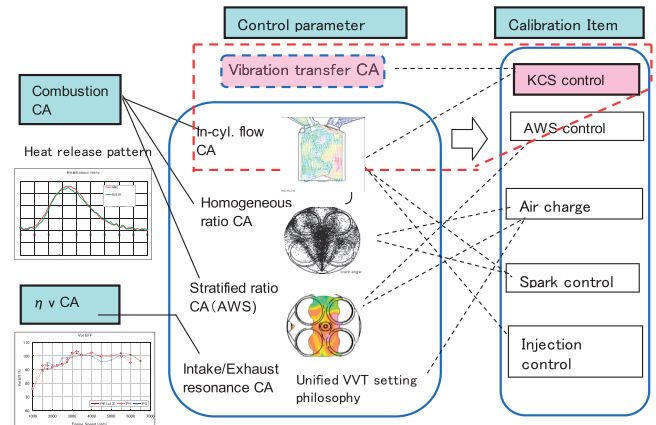


Fig.14 Calibration CA

4.2 MBCによるキャリブレーションアプローチの変革

SKYACTIV-Gのように多くの制御パラメータを扱うエンジンでは、キャリブレーションに際してあらゆる制御状態での特性を把握する必要があり、そのためのテスト量も膨大に必要であった。これまでMBC（モデルベースキャリブレーション）のアプローチにて、少ないデータ量で高品質の制御最適設定に取り組んできたが、今回のSKYACTIV-Gでは更にCA構想に則し、次の3点の効果を狙い変革キャリブレーションプロセスを設定した。

- 狙い①：既存の親エンジン特性を派生エンジンに活用することでテスト量を削減…燃焼CAに基づく
- 狙い②：既存エンジンの制御要求値をもとにあらかじめデータ収集すべき制御範囲を絞り込みテスト量を削減…制御CAに基づく
- 狙い③：既存エンジンの制御要求値をもとにあらかじめ最適キャリブレーション点を特定することで、探索時間を削減…制御CAに基づく

これらの狙いをいかに実現するかについて、採取したデータをもとにエンジン特性をモデリングする工程、そしてこのモデルをベースに最適制御値を求める最適化工程（エンジン特性が最適となるエンジン制御量を求める）の2工程に分けて紹介する。

(1) エンジン特性掌握のためのエンジンモデリング方法

前述のとおり、SKYACTIV-Gでは、燃焼CA構想にて筒内状態量をそろえることで燃焼特性を等価にできることを狙い開発を進めてきた。これはモデルを筒内状態量入力とすることで派生機種のエンジンモデルとしても活用できることを狙いとしてきたものでもある。これを実現すべく、エンジンモデルはFig.15に示したように(A)(B)(C)の3つのモデルでの構成としている。

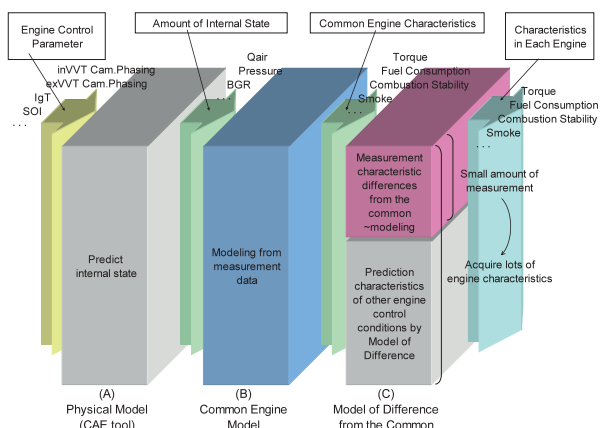


Fig.15 Approach of Engine Modeling

親とするコモンエンジン特性は、既にあらゆる運転条件毎の燃焼特性を取得できており、まずこのデータで(B)のコモンエンジンモデルを製作した。モデルの入力項は、筒内状態量(狙い①)とし、値はエンジンスペックをもとに運転条件毎に(A)のCAEツールで求めたものを採用している。

派生エンジンでは、あらかじめ絞り込んだ制御量範囲から、コモンエンジンとの特性差異のみを少量テスト(狙い②)で採取、これらのデータで(C)の差異モデルを製作する。

以上の3つのモデルを組み合わせることで、派生のエンジンモデルを製作し、運転条件毎の燃焼特性をモデル上で掌握できる状態を実現した。

(2) 制御最適値探索方法

MBCは、様々な制約条件の中でベストな性能を成立する制御因子の最適探索とその検証が可能な手法だが、更に機能転写、制御CAの取り組み効果を採用入れ、短期間で最適制御値を導く手順を設定した。

製作したエンジンモデルを用いて、あらかじめ大よそ把握できている(狙い③)制御要求値が、制約条件(崖)からどれだけ余裕を確保できているか、また燃費や出力最良か、といった性能面、品質面から最適化できていることを網羅的に確認する(Fig.16)。

先行ユニット開発と併行して開発してきた当キャリアブレーション手法を、今後のSKYACTIV派生エンジン開発に本格的に適用する。これにより、更にキャリアブレーションの大幅な効率化が期待される。

5. おわりに

SKYACTIV-G開発の中で構築してきた新しい開発プロセスを紹介したが、今後マツダが発表する車の商品力を高め、お客様の様々なニーズに柔軟にかつ迅速に応えられるよう、より機能を高め、更なる効率的な開発を目指して今後も開発プロセスの進化に取り組んでいく。

■ 著 者 ■



増田幸男



渡辺友巳



荒川博之



松尾直也



杉浦博昭



富澤和廣

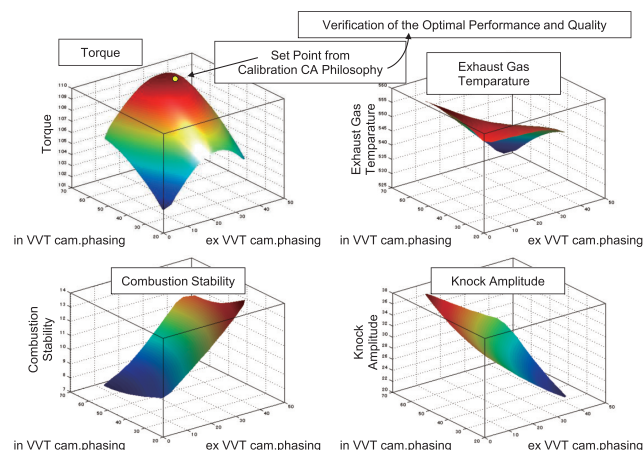


Fig.16 Approach of Optimization

特集：SKYACTIV TECHNOLOGY

9

SKYACTIV-GにおけるCAEの活用 Application of CAE to SKYACTIV-G

佐藤 圭 峰^{*1} 植木 義 治^{*2} 和田 好 隆^{*3}
Kiyotaka Sato Yoshiharu Ueki Yoshitaka Wada
本郷 均^{*4} 宮内 勇 馬^{*5} 横畑 英 明^{*6}
Hitoshi Hongo Yuma Miyauchi Hideaki Yokohata

要 約

高圧縮比で燃料消費率・出力を大幅に向上させるSKYACTIV-Gの開発においては、きわめて多くの制御因子が存在するため、従来の実機検証を元にした開発ではその諸元決定の最適化に限界があった。開発の高品質化・短期化を狙うために、CAE (Computer Aided Engineering) をフル活用した開発を進め、基本性能だけでなくロバスト性を高めたエンジンを実現できた。本稿では、多くのCAE適用項目の中から、主に筒内流動、燃料噴霧解析を中心に説明する。

Summary

In the development of SKYACTIV-G that greatly improved the specific fuel consumption and the engine power, traditional experimental verification development style had limitations in the optimization of specification due to a great number of restrictions. Aiming at a high quality and short-term development, we take full use of CAE (Computer Aided Engineering) to proceed with the development of the engine, which improves not only a basic performance but also robustness. We explain chiefly about the in-cylinder vortex and fuel spray analysis among a lot of CAE applications.

1. はじめに

従来に比べ、はるかに高い目標を掲げたSKYACTIV-Gの開発においては、エンジンの空気導入量改善、燃焼改善及び機械抵抗低減、重量低減など改善すべき項目が多岐にわたった。従来の実機計測を中心とした諸元決定では最適化に限界があるため、CAEを中心とする予測技術力を劇的に向上させ、実験とCAEを融合させることでメカニズム解明を進め、技術のブレークスルーを図ってきた。

多くのCAEの技術開発及び適用を行ってきた中で、燃費・出力に関係が深い筒内流動、燃料噴霧を中心にCAE技術の説明を行う。

2. エンジン筒内の流動解析技術

2.1 筒内流動の精度改善

SKYACTIV-Gでは、従来にない高圧縮比を実現するため、エンジン筒内の燃焼状態を、幅広い運転条件で最適に

する必要があった。良い燃焼のためには筒内の流動と混合気の分布が重要であり、その実現のためには正確な現象把握が必要である。そのため、筒内流動及び燃料噴霧の影響を精度良く予測できなければならない。まずは筒内流動の予測技術について説明する。

近年、急激なCFD (Computational Fluid Dynamics) ツールの発展により、インターカムニホールド、吸気ポートといった吸気系の流動及びエンジン筒内の流動予測が可能なレベルになってきた。しかし、筒内の流動予測の精度に関しては、実機の可視化が簡単ではないため、十分な確認が行われていなかった。筒内流動は、燃焼のベースとなるため、流動が精度良く予測できないと全ての予測精度が悪化する。そこで、まずは筒内の空気流動の可視化により、CFDの予測精度の確認を行った。

マツダでは、汎用CFDツールであるSTAR-CDを主に使って開発を進めているが、一般的に現在のCFDでは、乱流モデル、メッシュサイズ、流動パラメータなどの設定

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

が精度に大きく影響を与えるため、事前検証が欠かせない。従来こうしたパラメータ設定の正しさを、シリンダヘッド及びライナのみを組み合わせた定常流でのタンブル・通気抵抗試験（以下定常リグテスト）で評価することが多かった。

SKYACTIV-Gの開発にあたっては、予測精度向上のため、ガラスライナ製単気筒エンジンによる実運転条件（750rpm, スロットル全開）でのPIV（Particle Image Velocimetry）を用いた流動可視化計測とパラメータ設定を行って予測精度検証を進めた。可視化計測結果と計算結果の比較をFig.1の(a), (b)に示す。この図から、当初のパラメータ設定では渦中心や流動の方向などの計算結果が計測結果と全く合っていないことがわかる。この予測と実測差の原因を探るため、メッシュサイズ、乱流モデル、乱流モデル係数を変更して検討を行った。例えば、メッシュサイズは精度と計算の安定性、計算コストを考慮し、最終的に1.5mmとし、乱流モデルは標準k- ϵ モデルとした。最終的に決定したCFDモデルでの結果をFig.1(c)に示す。この設定パラメータを使えば運転条件を変えても、実用的な精度で予測できることも確認できた。

2.2 流動解析の効率化

筒内の流動を大きく決定付けるのはポートやピストンの形状である。SKYACTIV-Gでは従来の定常リグテストに加え、CFDで点火時期における乱流強度などを予測し、良否の判断を行う方法を多く活用した。更にポートの製造ばらつきやカーボンデポジットの影響も勘案したロバスト

な形状を実現するために、品質工学を活用して多くの形状検討を行ってきた。こうした検討を行うためには、従来に比べてはるかに多くの計算量と解析工数が必要となる。マツダではCFDの解析工数を大幅に削減するために、マツダ内製の設計者向けCFDシステムPT-ECS⁽¹⁾を独自に開発している。このシステムは、汎用CFDツールであるSTAR-CDを解析専任者以外でも使えるようにしたプリ/ポストアプリケーションであり、これまで蓄積してきた解析ノウハウを織り込むと同時に自動化計算を可能とし、社内で広く活用している。ただ、従来は定常解析にしか対応していなかったため、SKYACTIV-Gの開発にあたって、このシステムをピストンの動きを再現する移動境界メッシュに対応できるように改善して活用した。これにより、メッシュ作成や結果処理時間を大幅に低減し、検討人員の増加を最小限に抑えながら多くの解析を実現することができた。

以上の筒内流動の精度改善と効率化の取り組みにより、狙いの流動を実現可能なポートに設計できた。混合気が均質な場では流動の予測精度が高いと燃焼の予測精度が向上するため、Fig.2示すように実用上十分な精度で均質燃焼の予測が可能になった。

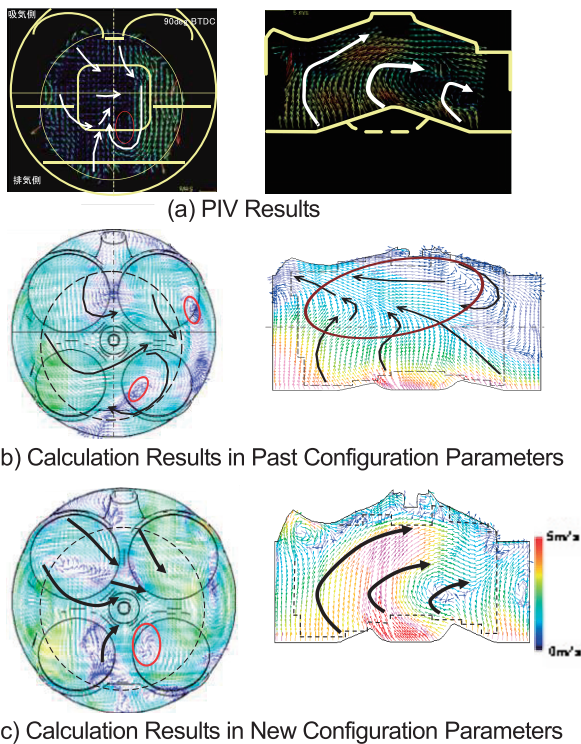


Fig.1 Comparison of PIV and Calculation Results of Internal Flow

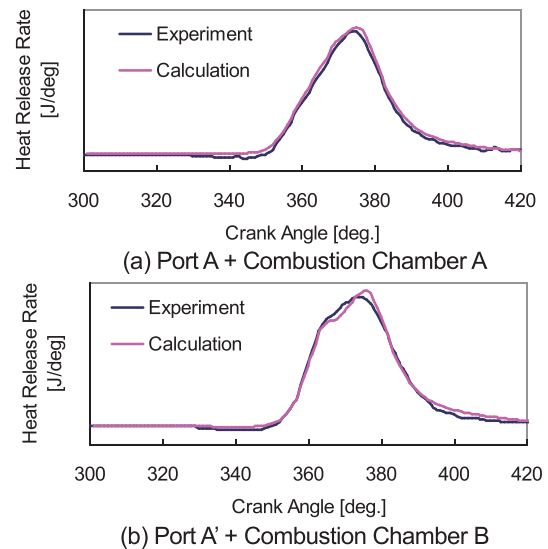


Fig.2 Comparison of Homogeneous Combustion Calculations of Different Combustion Chamber

3. エンジン筒内の燃料噴霧解析技術

3.1 燃料噴霧解析の重要性

筒内流動とともに燃焼に大きく影響を与えるのが燃料噴霧挙動である。SKYACTIV-Gは、吸気冷却効果を最大限利用可能な噴霧パターンの実現を狙い、マルチホールインジェクタ（MHI）を採用した。MHIは、従来のスワールインジェクタに比べ、噴孔数や噴孔配置の自由度が上がるため、各運転領域別の燃焼要件を高度にバランスさせることが可能である。しかし、筒内流動と噴霧の混合気形成過程

の膨大な組み合わせを最適に制御する必要があるため、筒内の複雑な混合気形成過程の噴霧解析を行い、設計諸元の決定を行った。

3.2 定容容器噴霧計測

筒内の現象は、大変複雑かつ高速な現象であるため、物理現象をモデル化した現状のCFDでは、実機計測がない状態での精度の高い予測は難しい。噴霧と混合気形成過程を高精度で予測するためには、まず定容容器でインジェクタ単体の特性を事前に計測し、その結果と整合を取れるよう噴霧モデルパラメータと噴射初期条件の適切な設定が必要である。SKYACTIV-Gでは、従来の液相のみの光学撮影計測に加え、液相及び蒸気相を同時に定量的に計測する2波長レーザー吸収散乱法⁽²⁾ (Laser Absorption Scattering technique : LAS法) で正確な計測を行った。また、通常の計測を行う常温常圧場に加え、よりエンジンの運転条件に近い高温高圧場での計測も行うことで、予測精度を高めた。

噴霧挙動のモデル化にあたっては、メッシュのサイズの最適化も重要である。Fig.3はメッシュサイズの違いによる噴霧先端到達距離を比較したものであるが、大きく違うことがわかる。こうしたメッシュの影響を最小限にするために、エンジンモデルと定容容器モデルでメッシュサイズをできるだけ揃えるよう条件設定を行った。また、壁面衝突後の噴霧挙動の精度良い予測も重要であるため、同志社大学千田らのモデル⁽³⁾をSTAR-CDに組み込み、計算精度の向上を図った。

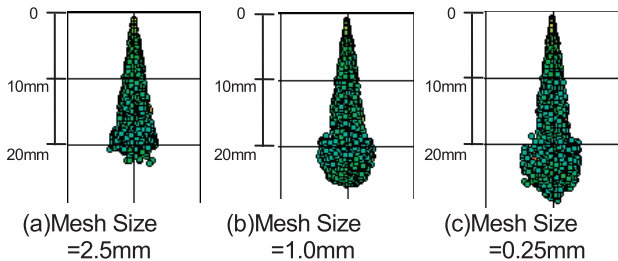


Fig.3 Comparison of Spray Tip Penetration by Different Mesh Sizes

3.3 噴霧モデルパラメータの最適化手法

上述の実機計測結果と計算結果との整合取りには、多くの噴霧モデルパラメータが対象となるため、モデル作成などに多くの工数がかかる。そこで最適化手法を活用することで大幅な効率化⁽⁴⁾を図った。STAR-CDと多目的ロバスト設計最適化ツール (modeFRONTIER) をカップリングさせた噴霧予測計算システムを開発し、噴霧到達距離、液相及び蒸気相質量を目的関数として、入力変数 (分裂・蒸発モデルパラメータ) の最適化を多目的遺伝的アルゴリズムを用いて行い、計測結果と計算結果の詳細な比較を実施⁽⁵⁾した。

圧縮行程中に、蒸発しながら壁面に当たることを想定した高温・高圧下 (500K, 1MPa) の定容容器における単噴孔インジェクタから噴射した自由噴霧の予測と実測の比較

をFig.4(a)に示し、衝突噴霧をFig.4(b)に示す。本システムを活用することで、液相及び蒸気相質量分布とも、良い一致を示す結果を短期間で得ることができた。

上記で決定された噴霧モデルパラメータと噴射初期条件を使い、実エンジンでの噴霧挙動と比較した。Fig.5は単気筒の可視化エンジンを使ってモータリング運転を行った時の噴射後の混合気分布を可視化した結果と、移動境界メッシュを用いて計算した混合気分布の比較である。計測と予測は良く一致していることがわかる。こうした技術を用いることで、筒内の燃料付着や混合気分布を把握することができ、その結果として燃焼のポテンシャルなどが精度良く把握できるようになったため、SKYACTIV-Gの現象解明を進めることができた。

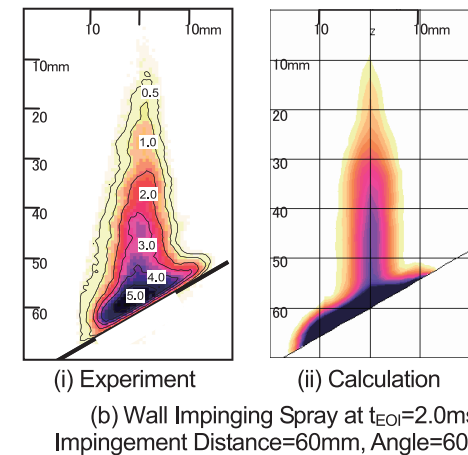
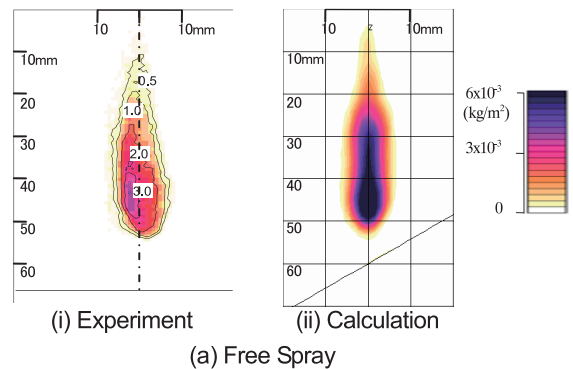


Fig.4 Comparison of Experimental and Calculation Results of Vapor Phase Mass Distributions

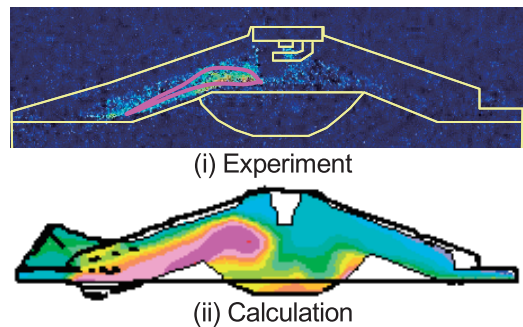


Fig.5 Comparison of Experimental and Calculation Results of Spray Behavior at 30deg. (BTDC)

3.4 SKYACTIV-Gへの噴霧解析の適用

SKYACTIV-Gでは、燃焼改善による燃費、出力、エミッションの大幅改善を行う必要があり、これらを高次元で実現するためにCFDによる噴霧解析を適用し、ピストン及びインジェクタ諸元への反映を行っている。触媒暖機領域 (1,200rpm)、全負荷領域 (1,500rpmWOT)、オイル希釈領域 (1,500rpm) といった運転領域の違いにおける適用事例を紹介する。エンジン諸元をTable 1に示す。

(1) 触媒暖機領域

各国の厳しいエミッション規制をクリアするための重要項目である触媒暖機領域について述べる。SKYACTIV-Gでは始動時に触媒を早期に活性化させ、浄化率を上げるために点火時期を遅角させ、排気温度を上げる制御を行っている。ただし、燃焼悪化を防ぐため、可燃混合気を点火プラグ周りに集めて燃焼させる弱成層燃焼が必要である。これを成立させるためのピストン形状決定事例を紹介する。

混合気の弱成層化のために、噴霧をキャビティにトラップさせ、更に噴霧を点火プラグ方向へ巻き上がらせるコンセプトで検討を進めている。Fig.6に検討を行ったキャビティピストン形状を示す。バスタブ型はレンズ型よりキャビティが深い。Fig.7に各キャビティピストンに上死点前 (55deg.BTDC) で燃料を噴射開始した際の噴霧粒子挙動を示す。35deg.BTDCで、レンズ型はキャビティに入った噴霧が排気側に流れてしまうのに対して、バスタブ型は点火プラグ方向に噴霧を巻き上がらせることができている。

Table 1 Engine Specifications

Bore [mm]	83.5
Stroke [mm]	91.2
Compression Ratio [-]	14

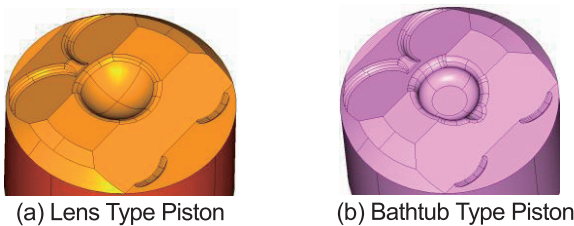


Fig.6 Cavity Piston Shape

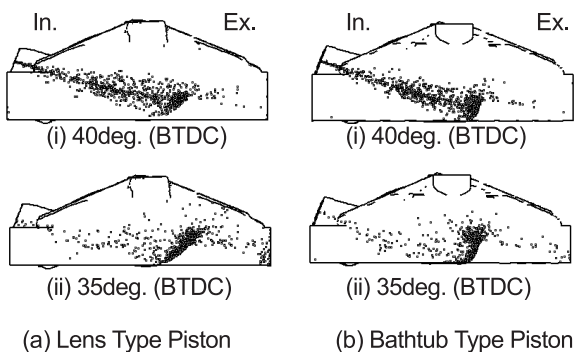


Fig.7 Spray Behavior in Cavity Pistons

この結果、Fig.8に示す点火時期における点火プラグ断面での混合気分布を比較すると、バスタブ型の可燃混合気が点火プラグ周りに集まっている様子が確認できる。また、Fig.9に点火プラグ近傍領域における混合気A/Fの頻度分布を示す。この図からも、点火プラグ近傍領域に燃料噴霧が集まっていることが確認できる。

(2) 全負荷領域

出力性能を評価する全負荷領域では、混合気の均質性が重要である。そのためには、より良く分散させる最適な噴霧レイアウトによる噴霧と空気流動との混合気形成が必要である。Fig.10に示すような噴霧レイアウト (A, B, C) のインジェクタにて、混合気の均質性評価した事例を紹介する。噴霧レイアウトAはB, Cに対し、Y噴霧間角度 α を 3.5deg. 拡げている。また、噴霧レイアウトA, CのX噴霧をBに対し、X-Z平面において-3deg. ずらしている。

Fig.11に噴射後の吸気行程中の噴霧粒子挙動を、Fig.12に点火時期における点火プラグ断面での混合気分布を示す。レイアウトAは他と比べ、Y噴霧間を広げることで、噴霧の筒内への分散が良くなり、均質性が向上している。これは、分散された噴霧が筒内の空気をより多く取り込む

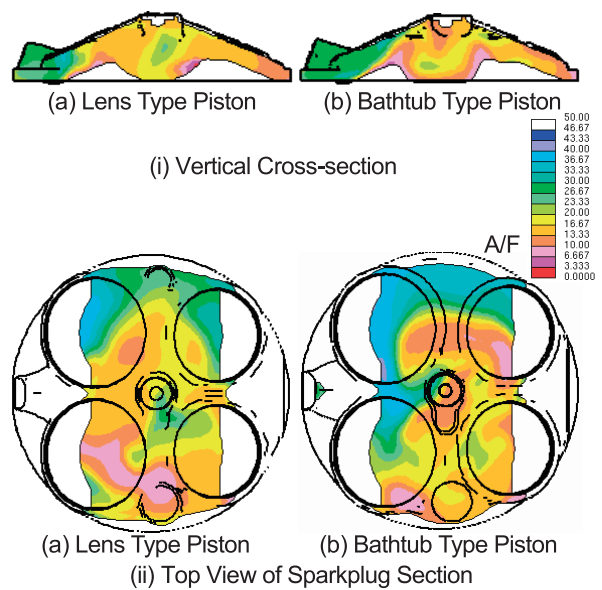


Fig.8 Mixture Distributions at Ignition Timing

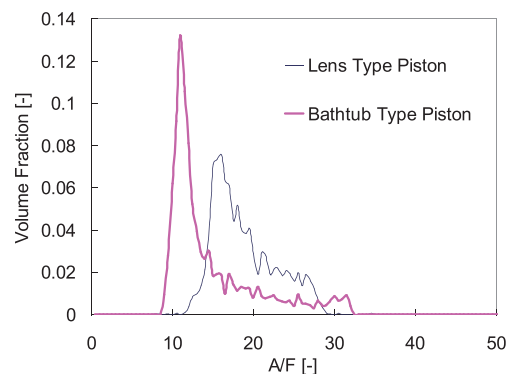


Fig.9 A/F Distribution of the Volume Frequency at Ignition Timing

ことで、噴霧の蒸発を誘起し、空気との混合が促進されて均質性が向上されていると考えられる。Fig.13に示すようにレイアウトAの点火時期におけるストイキ混合気の体積割合が最も高く、均質性が良いことが確認できた。

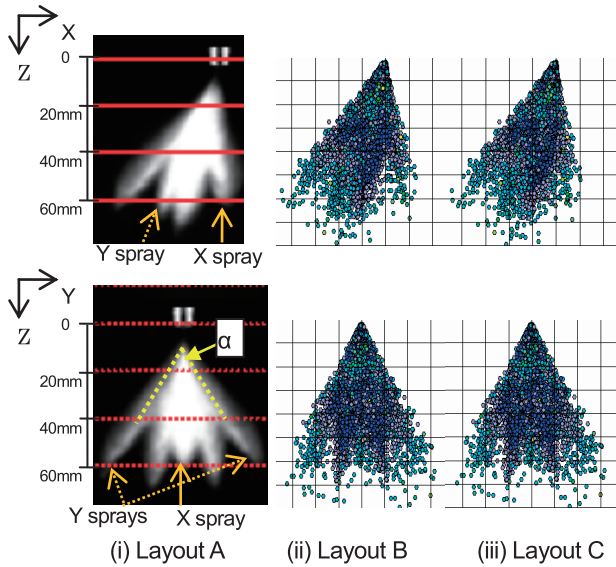


Fig.10 Spray Layout

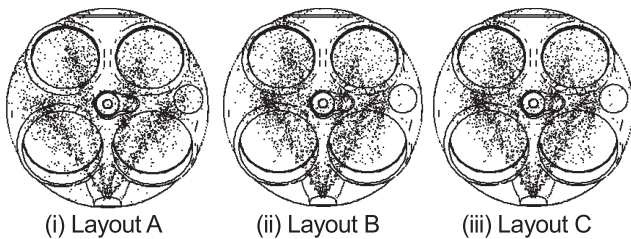


Fig.11 Spray Particle Behaviors at 265deg. (BTDC)

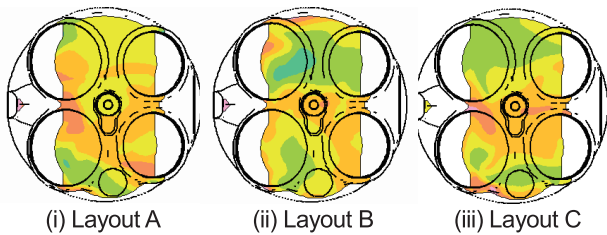


Fig.12 Mixture Distributions at Ignition Timing

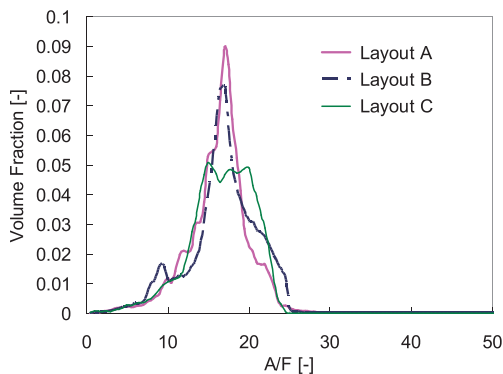


Fig.13 A/F Distribution of the Frequency at Ignition

(3) オイル希釈領域

燃料噴霧を設計する上で考慮しなければならない問題の一つに、シリンダライナ壁に付着した燃料が、ピストン挙動によってクランクケース内のエンジンオイルを希釈する問題がある。この問題を防ぐためには、前述した3.4(2)項の要件を満たした上で、できるだけ噴霧を壁面に付着させないように、シリンダライナまでの距離を長くとることで、燃料気化時間を稼ぐことのできる噴霧レイアウトを考案する必要がある。3.4(2)項で述べた噴霧レイアウトAとBでシリンダライナ壁面付着量の比較を行った。Fig.14に示すようにレイアウトAはBより壁面付着量を約15%低減させることができ、実機評価によるオイル希釈率を2.8%低減できた。

以上に述べたように、様々な運転条件に対応したMHIの各噴孔レイアウトと燃焼室形状をCAEで検討し、ロバストな燃焼を実現する諸元を選定できた。

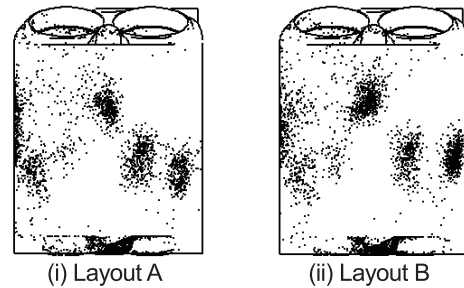


Fig.14 Comparison of Stuck Fuel at 30deg. (BTDC)

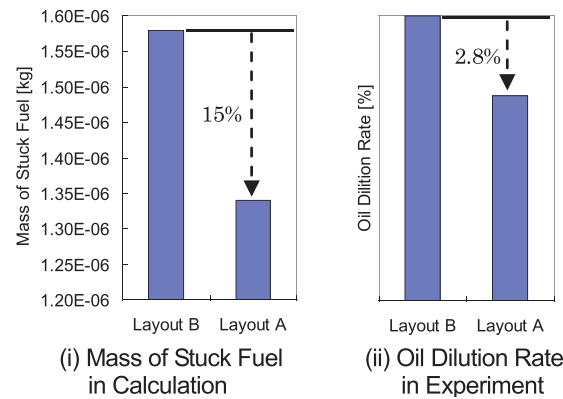


Fig.15 Relation between Mass of Stuck Fuel on the Cylinder Liner and Oil Dilution Rate

4. 構造解析による機械抵抗低減

4.1 構造系の概要

SKYACTIV-Gでは、燃焼改善による燃費、出力の大幅改善に加え、シリンダヘッドやシリンダブロックなど構造系の一新で大幅な摩擦損失低減、軽量化を図った。信頼性、NV性能との両立を図るために、従来に比べはるかに多くのCAE活用と品質工学の活用を進めた。

例えば形状最適化の技術を用いることで、大幅な薄肉化による軽量化を図ってきた。

また品質工学を用いたロバスト検討も多く行ってきたが、一例として、ピストンの検討について紹介する。

エンジン内の摩擦損失の大きな割合を占めるピストンは、アルミ材であることや燃焼ガスにさらされるため熱膨張の影響を強く受ける。熱膨張は摺動部のクリアランスを変化させるので、熱による変化があっても摩擦損失が変わらないようにしなければならない。また、オイル粘度も温度により変化するが制御できる因子ではないため、ばらつきを生む因子となる。製造による寸法の微小なばらつきも同様である。これらコントロール不可能な誤差因子を考慮して、抵抗に対してロバスト性を確保したピストンスペックを決定するため、ピストンスカートの摩擦損失、運動エネルギーを予測する弾性流体潤滑を伴う機構運動解析を実施した。計算モデルとピストンスカート部の油膜圧力及び固体接触圧力の出力例をFig.16に示す。

ピストンの摩擦損失は、弾性流体潤滑モデルとして計算で表現する。ピストンの機能は燃焼荷重をコネクティングロッドに伝えることであるため、燃焼荷重からピストンピンに伝わるエネルギーを評価特性とした。この結果得られた要因効果を分析し、ピストン機能の安定性を重視するため、S/N (信号雑音) 比の高い諸元を選定した。

こうした検討の積み重ねにより、安定性が高く従来に比べ大幅に摩擦損失を低減したピストンスペックを決定することができた。シリンダブロック、シリンダヘッド等でも品質工学とCAEを組み合わせることで、形状の最適化を図っている。

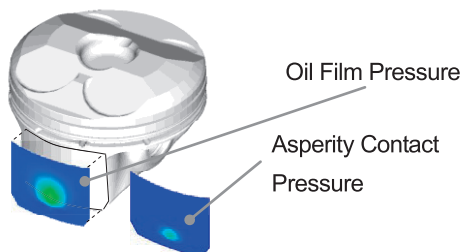


Fig.16 Calculation Model of Oil Film Pressure and Solid Contact Pressure of Piston Skirt

5. まとめ

マツダは、1996年から始めている量産車の企画から生産に至るまでの全プロセスにわたってデジタル革新を行う「マツダデジタルイノベーション」の中で、計算ワークステーション増強、解析手法の標準化、解析期間の短縮化、解析結果の高精度化を推進している。SKYACTIV-Gの開発では多くのCAEを開発、それを活用することで、ロバストで高品質な諸元決定を、高効率で行うことが可能となった。今後もCAEの精度改善及び予測領域を拡大させ、効率的な商品開発プロセスを推進していく。

参考文献

- (1) 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, p.180-185 (2003)
- (2) 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 (2002), pp.1-13
- (3) 千田ほか：噴霧液滴の壁面衝突噴霧過程のモデリング, 微粒化, Vol. 11, No.23 (2002)
- (4) 佐藤ほか：DISIエンジン噴霧モデルの最適化手法の開発, No.25, p.134-139 (2007)
- (5) Sato, K. et al., Spray and Mixture Properties of Hole-Type Injector for D. I. Gasoline Engine - Comparison of Experiment and CFD Simulation-, SAE Paper, No.2007-01-1850 (2007)

■ 著 者 ■



佐藤圭峰



植木義治



和田好隆



本郷 均



宮内勇馬



横畑英明

特集：SKYACTIV TECHNOLOGY

10

SKYACTIV-シャーシ
SKYACTIV-CHASSIS

山本 忠信*¹ 井 芹 晴 明*² 東 裕 章*³ 江 島 勝 美*⁴
 Tadanobu Yamamoto Haruaki Iseri Hiroaki Higashi Katsumi Ejima
 望 月 浩 孝*⁵ 渡 邊 雅 哉*⁶ 安野谷 知 城*⁷ 開 原 真 一*⁸
 Hirotaka Mochizuki Masaya Watanabe Tomoki Anotani Shinichi Kaihara

要 約

SKYACTIV-シャーシでは、走る喜びの更なる進化と環境性能に貢献する大幅な軽量化を実現した上で、「人馬一体のドライビングプレジャー」と「走りの質」を向上させるために、一体感・安心感・快適性の間に存在する背反性能を高次元で両立する（ブレイクスルー）技術開発に取り組んだ。結果、サスペンションとステアリング領域では「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心地の両立」「軽量化とダイナミクス性能の両立」のブレイクスルー技術を、ブレーキ領域では「軽量化と冷却性の両立」と「効きと静粛性の両立」のブレイクスルー技術を確立しながら、シャーシ全体で現行Mazda6クラス比14%の軽量化を実現した。

Summary

In the development of SKYACTIV-CHASSIS, in order to enhance “driving pleasure of oneness with the vehicle” and “driving quality” while reducing the weight significantly so as to support the environmental friendliness, technological breakthrough was pursued for achieving conflicting attributes at the same time: the oneness with the vehicle, stable & safe, and comfort. With new suspension and steering, compatibilities between “agility at low-mid range and stability at high speed”, “agility at low-mid range and ride comfort”, and “weight reduction and dynamic performance” were accomplished, and with new brake system, compatibilities between “weight reduction & thermal control” and “effectiveness and NV” were achieved while reducing the weight of chassis components by 14% compared with the current Mazda6.

1. はじめに

SKYACTIV-シャーシは走る喜びの更なる進化と環境性能に貢献する大幅な軽量化を実現した上で、

- (1) 「人馬一体のドライビングプレジャー」の向上
- (2) 快適性や安心感改善による「走りの質」の向上

を実現するために、サスペンション、ステアリング、ブレーキの機能を徹底的に見直すことによる一体感・安心感・快適性の間に存在する背反性能を高次元で両立 (Fig.1) することを目標とした。

本稿では新開発したサスペンション・ステアリング・ブレーキの構造と特徴、達成した車両性能・システム特性について紹介する。

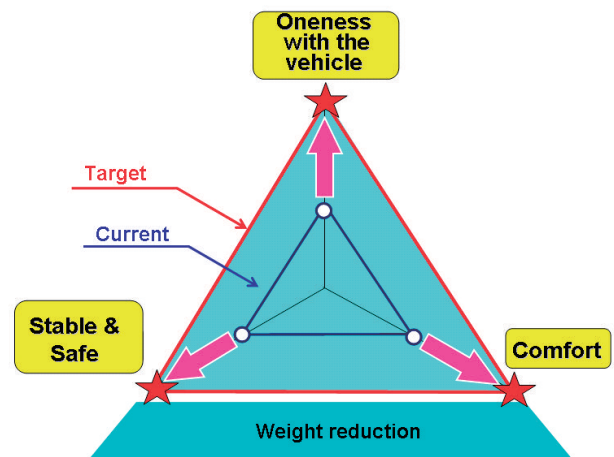


Fig.1 Development Target

*1~3 シャーシ開発部
Chassis Development Dept.

*4 ボデー開発部
Body Development Dept.

*5~8 操安性能開発部
Chassis Dynamics Development Dept.

2. サスペンション・ステアリング

2.1 技術の狙い

サスペンション・ステアリングでは、一体感・安心感・快適性を高次元で両立させるために、

- (A) 中低速域の軽快感と高速安定性の両立
- (B) 中低速域の軽快感と乗心地の両立
- (C) 軽量化とダイナミクス性能の両立

をブレークスルーすべき技術課題として設定した (Fig.2)。

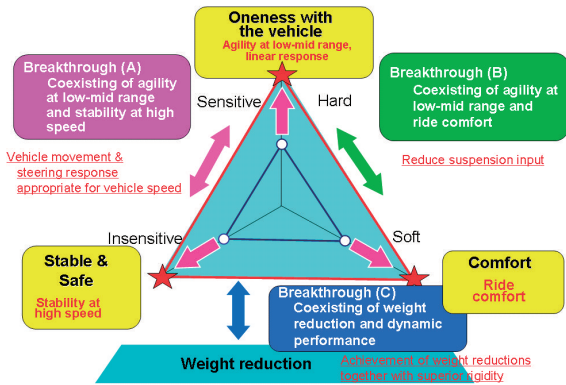


Fig.2 Trade off & Technical Subject

2.2 開発のアプローチ

走行フィーリングのカラクリ解明に基づいた運動性能目標を、性能GVE活動を通じて最適なシステム特性に機能配分した。同時に、転写性を確保し競合力のある多品種生産を可能とするコモンアーキテクチャ構想と、同体質ライン化によるボリューム効率を高めるフレキシブル生産をサポートできるように、最適な構造・工法・材料を選定した。

2.3 ブレークスルー技術

2.3.1 (A) 中低速域の軽快感と高速安定性の両立

2.3.1.1 車速に適応した車両運動の実現

中低速域でのステアリング操作に対する軽快感、および高速域の安定性をより高い次元で両立させるために、車両特性であるヨーゲイン (車両の旋回速度) を中低速域では高く、かつ高速域では低くすることを目指した。更にヨーレイト (自転運動) に対する横加速度 (公転運動) の遅れを減らし安定性を高めることを目標とした。

まずは高速域でのヨーゲインを下げ安定性を向上させるために、リヤサスペンション特性変更により後輪のコーナリングパワーを増加させる必要がある。そこでサス横剛性の低下を最小限に抑えながらサスペンションコンプライアンスステップを効果的に発揮できるようリンク配置を最適化した (Fig.3)。更にタイヤからの上下方向入力にサスクロスマウントブッシュに入る点に着目し、ブッシュのヒステリシス特性を低減し、後輪の荷重移動タイミングを早めた (Fig.4)。加えて、中低速域のヨーゲインを高めるためステアリングギヤレシオを高速化した。

これらの施策により、目標とした各速度域のヨーゲイン特

性、およびヨーレイトに対する横加速度の遅れの低減を達成し、中低速域の軽快感と高速度域の安定感を従来を上回るレベルで両立させた (Fig.5, 6)。

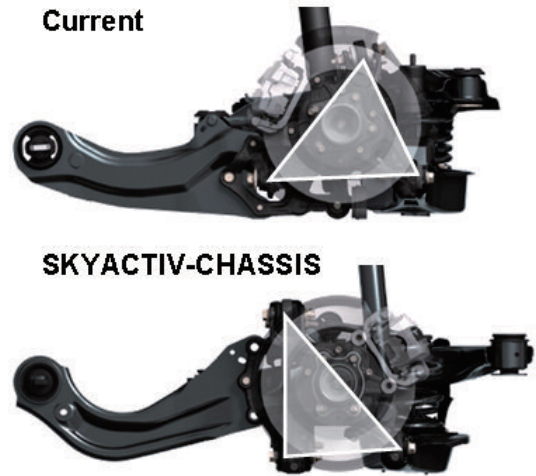


Fig.3 Optimization of Link Layout

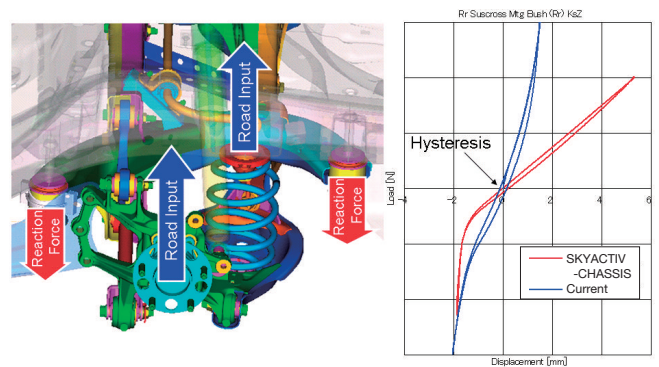


Fig.4 Input to Mounting Bush & Characteristic

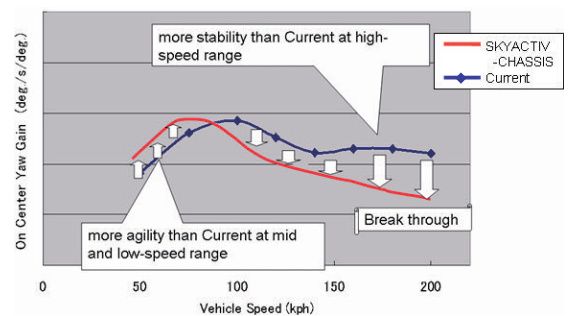


Fig.5 Improvement of Yawrate Gain

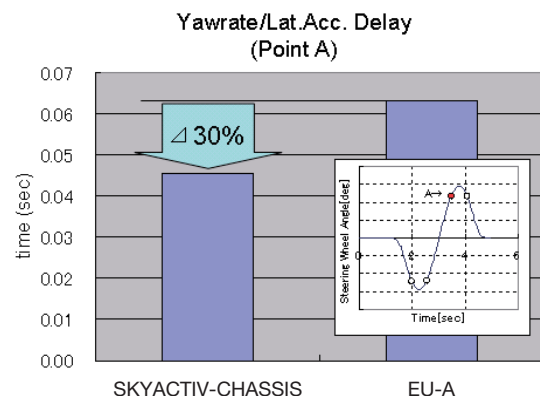
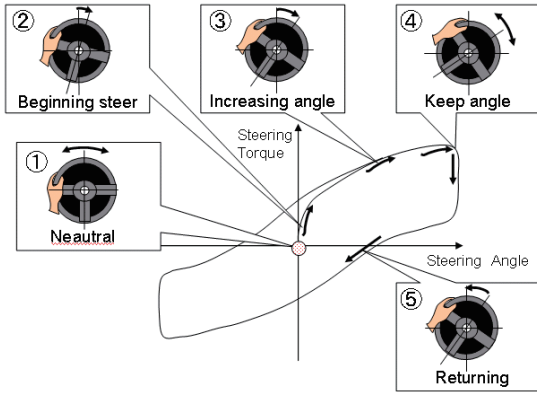


Fig.6 Improvement of Timelag (Yawrate/Lateral G)

2.3.1.2 車速に適応した操舵フィールの実現

中低速域での軽快感と高速域での安定感の両立は、各車速域での操舵フィールと関係が深い。そこで中低速域と高速域で求められる操舵フィールの整理を行い、車速域ごとに直立や切り込み始めといった操舵状態に対して求められる操舵フィールは異なることに着目した (Fig.7)。



		Urban-speed range		Highway-speed range			
		Agility		Stability		Vehicle speed	
*LA: Lateral Acceleration		0	100	250			
Steering wheel	Vehicle	Agility Feel	Stability Feel	Metrics			
① Neutral	straight	understand the steering center easily by steering torque slope	self-centering immediately if input the steering torque slightly	-Torque deadband -Torque build up			
② Beginning steer	beginning Yawing	less phase lag time between steering torque and vehicle yaw response	more phase lag time between steering torque and vehicle yaw response	-Torque dead band -Torque build up			
③ Increasing steer angle	turning w/ increasing LA	increasing steering torque as increasing LA	increasing steering torque as increasing LA	-Torque linearity			
④ Keeping steer angle	turning w/ constant LA	little disturbed amount when experiencing disturbance	keeping steer angle easily - little disturbed amount when experiencing disturbance	-Torque hysteresis			
⑤ Returning steer	turning w/ decreasing LA	self-centering steering wheel and vehicle immediately	self-centering steering wheel and vehicle modelately w/o overshoot	-Returnability			

Fig.7 Steering Condition & Ideal Steering Feeling

<シーン①：直立>

中低速域ではハンドルセンタの位置が明確に分かることを、高速域では多少の操舵力や外乱に動じない直進安定性を狙い、フロントサスペンションのキャストトレール (Fig.8) の拡大によるセルフライニングトルクの増大と車速別アシスト特性マップの適正化を行い、横Gに対するトルク勾配を一定化した (Fig.9)。

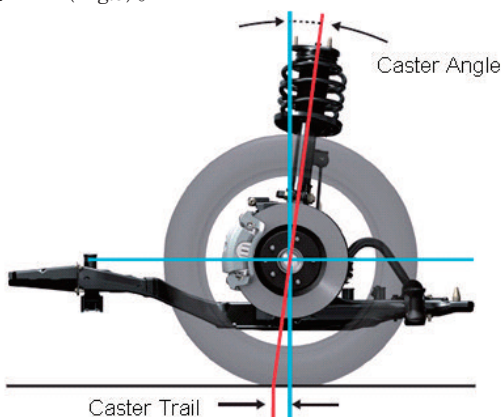


Fig.8 Front Caster Trail

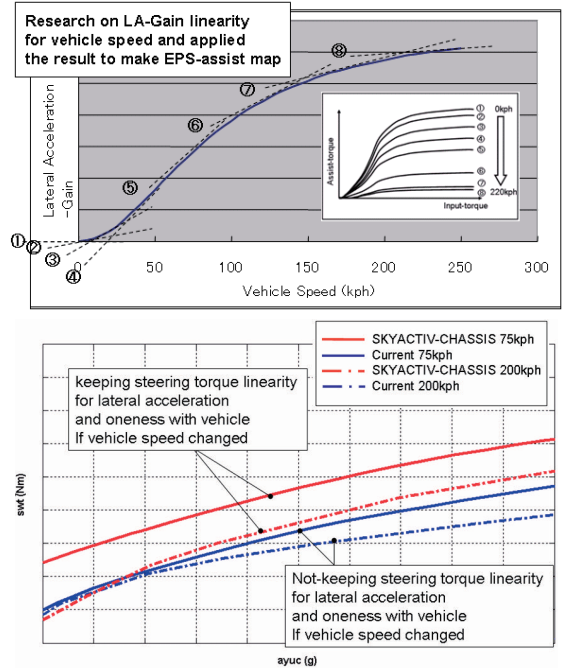


Fig.9 Characteristic of Steering Assist

<シーン②：切り込み始め>

中低速域ではドライバーの操舵に対して、手応えと車の動き出しに位相が少ない方が軽快に感じるため、操舵トルクに対するヨー運動の位相を短縮することを狙った。これに対し、0.5Nm以下の低インプットトルクに対してアシストを増やすことで実現した。高速域ではドライバーの操舵に対して、手応えを感じてから車が動く方が安心感を感じるため、操舵トルクに対してヨー運動の位相を遅らせること (レスポンスディレイ) を狙い、中低速とは異なり、0.5Nm以下の低インプットトルクに対してアシストを減らし、位相を遅らせることで実現した (Fig.10)。

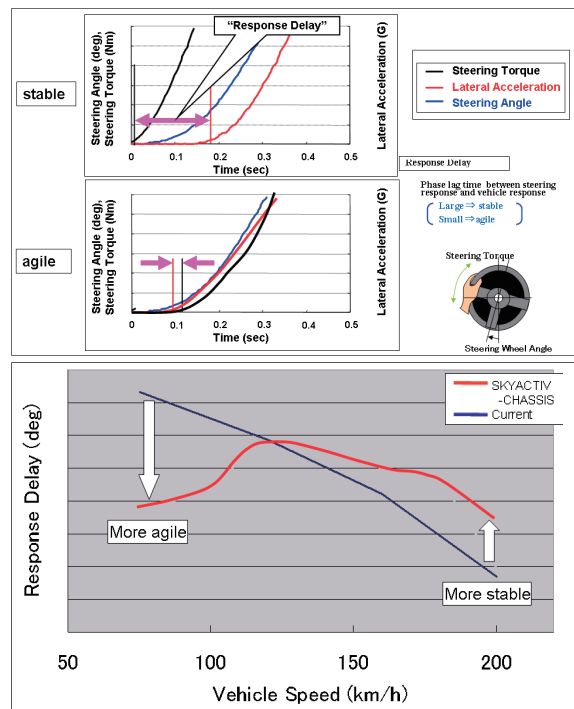


Fig.10 Response Delay

<シーン③：切り込み>

全車速で横Gに対してリニアに変化する操舵フィールを狙い、車速別アシスト特性マップを設定した。

<シーン④：保舵>

中低速では外乱を受けても操舵トルク変動なく安定して旋回ができることを、高速域では常に保舵ができることで疲労を軽減させること、かつ外乱を受けても操舵トルクが抜けないことを狙い、保舵力制御により適度な外乱抑制を実現した (Fig.11)。

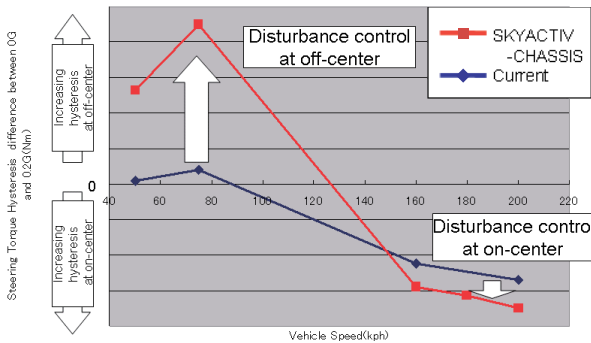


Fig.11 Effect of Disturbance Control

<シーン⑤：切り戻し>

中低速域では、ハンドルと車両がオーバシュートなく直進状態に戻れることを、高速域では戻り始めとセンタ付近での穏やかなコントロール性を狙った。これに対し、戻し速度制御により良好な車両収れん性を実現した (Fig.12, 13)。

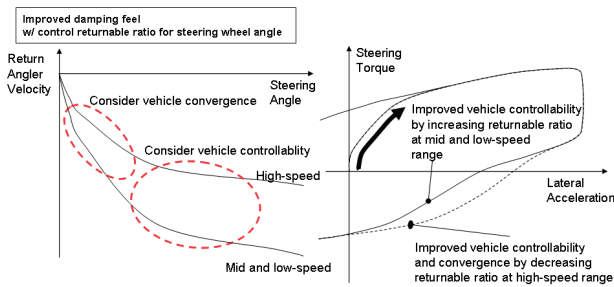


Fig.12 Concept of Steering Returnability Control

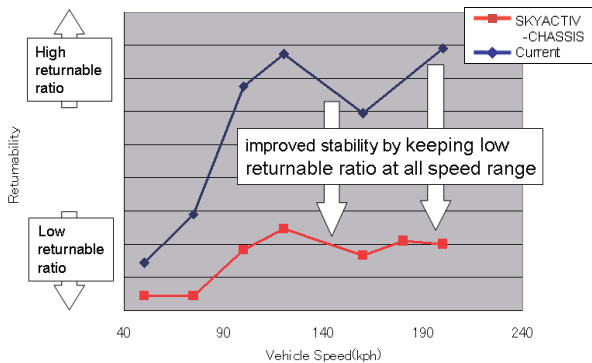


Fig.13 Effect of Steering Returnability Control

これらの考え方・制御方法により車速を問わず一体感と安心感の両立をはかる操舵フィールを実現した。

2.3.2 (B) 中低速域の軽快感と乗心地の両立

2.3.2.1 リヤ上下方向入力の低減

前述したリヤサスペンションのリンク配置最適化により、車両運動に必要なCPに占めるタイヤ接地荷重変動成分を低減することができる。これによりダンパの減衰力とトップマウントラバーの剛性が低減可能となり、上下方向の車体入力を低減。結果、Bumpy/Choppy (ヒョコヒョコした乗心地) を改善した (Fig.14)。

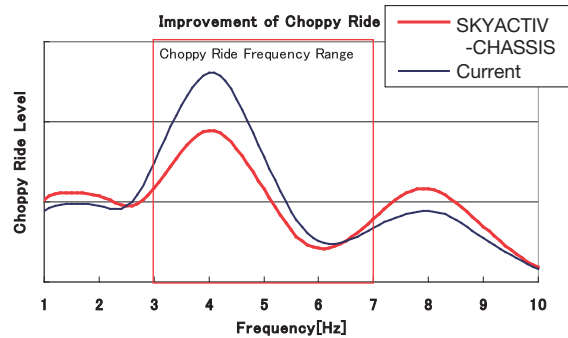


Fig.14 Result of Choppy Ride Measurement

2.3.2.2 リヤ前後方向入力の低減

トレーリング式マルチリンクサスペンションでは乗心地改善を目的にトレーリングアーム車体取付点を極力高い位置に取り付けたい。しかしながら従来の車体構造では、フレーム必要断面を確保するために、後席スペースや燃料タンク容量を悪化させることになる (Fig.15)。

そこで、リヤサイドフレームの断面内にトレーリングブッシュを収める構造を採用し、フレーム下面の大きな開口に対する剛性や後面衝突性能の確保は、断面内部に節を配置したボックス構造とすることで、前後左右の入力に対し断面崩れを抑制し、剛性・後面衝突性能とレイアウトスペースを両立させた (Fig.16)。

結果、トレーリングアーム取付位置を現行Mazda6比43mm上方へ移動でき、トレーリングアームが上下ストロークに対してFig.17に示す後退軌跡化を実現。これによりタイヤへの突起入力をアームの前後方向に伝達しにくくなり、ブッシュへの前後入力が低減し、Impact shock (突起乗越し時のショック) を改善した (Fig.18)。

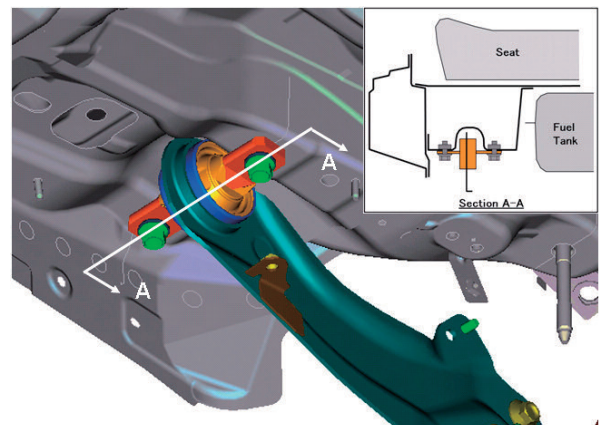


Fig.15 Current Model Structure

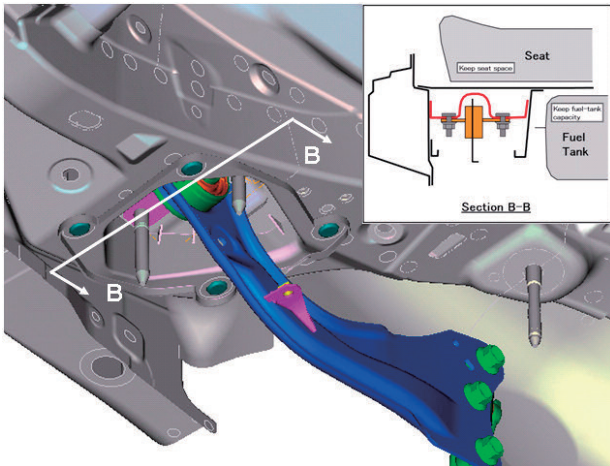


Fig.16 SKYACTIV-CHASSIS Structure

2.3.2.3 制動時の安心感の改善

トレーリングアーム取付位置の変更により、制動力に対する車体を引き下げる力（アンチリフト力、Fig.19）が増大する。これにより制動時の姿勢変化を低減（Fig.20）し安心感を高めると同時に、接地荷重変動を抑制することで効果的な制動力を発揮することが可能となり、制動距離も短縮した。

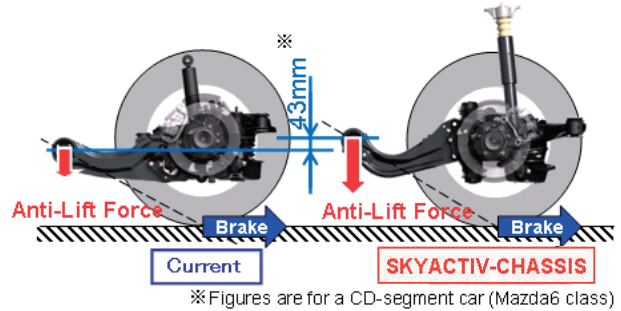


Fig.19 Anti-lift Force

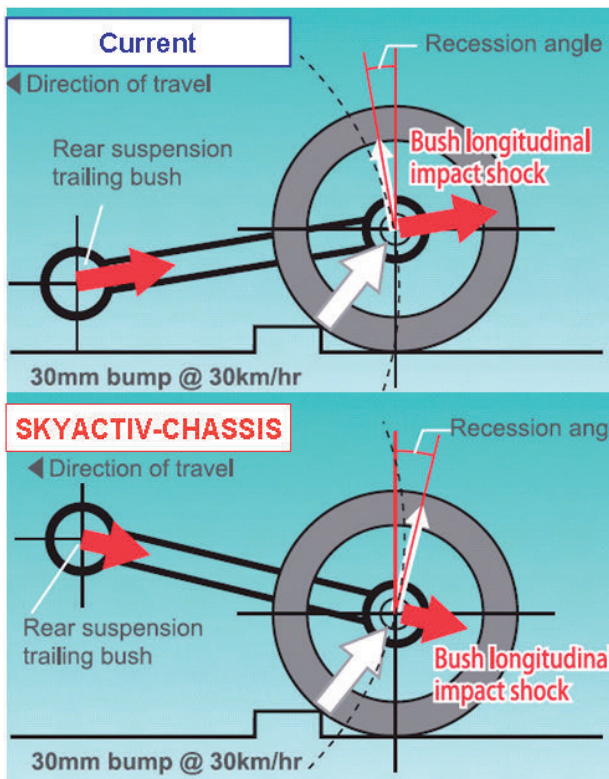


Fig.17 Increase Recession Angle

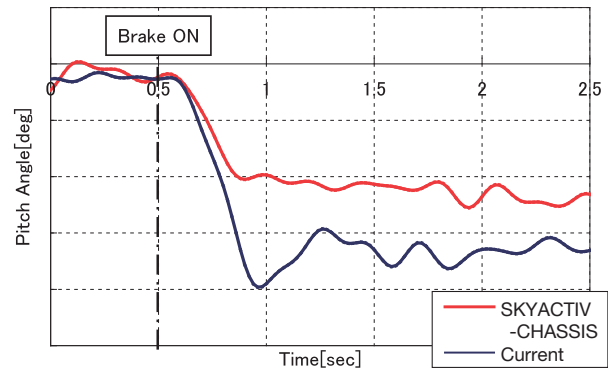


Fig.20 Control a Pitch Angle

2.3.3 (C) 軽量化とダイナミクス性能の両立

ここではサスクロス（サスペンションメンバ）を例にして、構造最適化（基本骨格の最適化、接合要素技術）による軽量化と剛性の両立技術について紹介する。

基本骨格の最適化については、要求される機能を実現した上で、質量を低減するため、最適な構造を求めてCAEでコンセプトモデルを作成。車体パッケージとの整合性を確認しながら最終形状を決定した。フロントではセンタメンバの断面を拡大しロアアーム取付位置の前後オフセット量を縮小。リヤではクロスバーの前後スパンを拡大しラテラルリンク取付位置の前後オフセット量を縮小した（Fig.21）。

次に接合要素技術については、フロント/リヤとも溶接フランジを削減（フランジレス化）し、溶接部の結合剛性を高め（Fig.22）、結果として部材の板厚を下げ軽量化を実現することができた（Fig.23）。

これらの構造を採用することにより軽量化と高剛性の両立を図り、シャシー全体で旧型比14%（現行Mazda6クラス比）の軽量化を実現した。

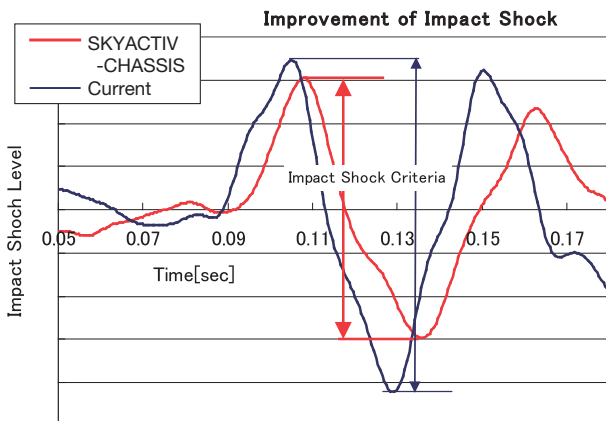


Fig.18 Result of Impact Shock Measurement

3. ブレーキ

3.1 技術の狙い

ブレーキ性能は一体感（コントロール性）、安心感（ブレーキの効き）、快適性（制動時の静粛性）がいかなる状況下においても高次元でバランスされていることを目指し、背反する性能の両立を目指した。具体的には、

(A) 軽量化と冷却性の両立

(B) 効きと静粛性（制動時ブレーキ異音低減）の両立をブレークスルーすべき技術課題として設定した（Fig.24）。

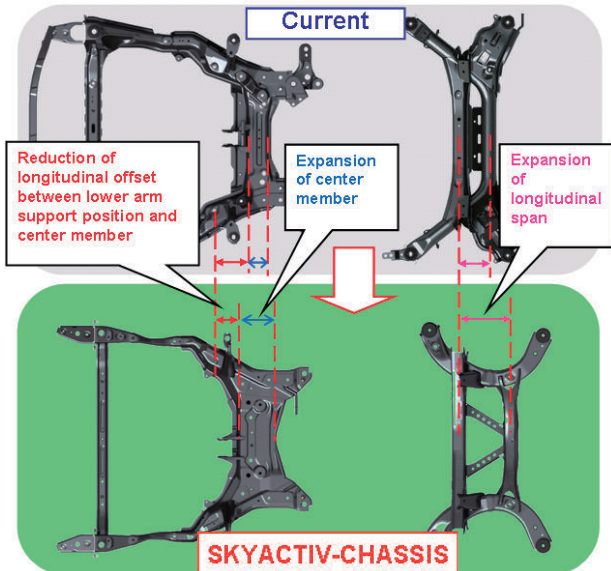


Fig.21 Optimization of Base Structure

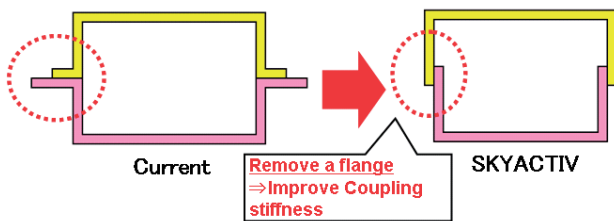


Fig.22 Coupling Elemental Technology

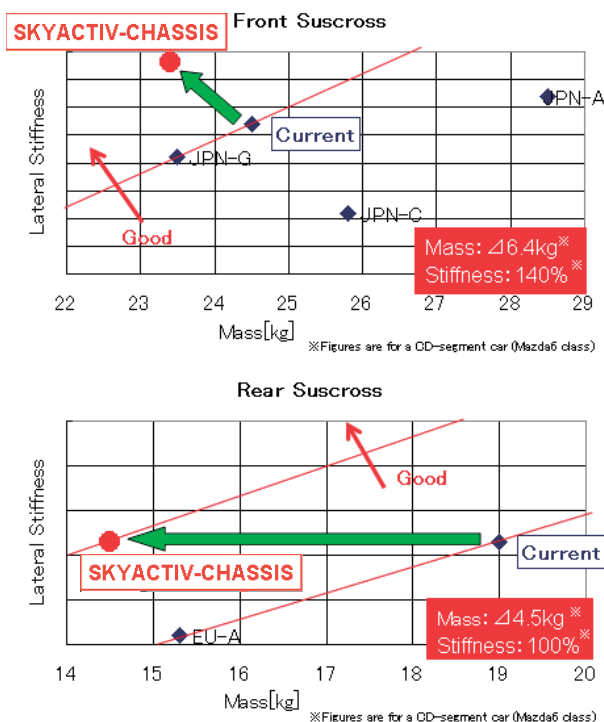


Fig.23 Mass of Suscross Member

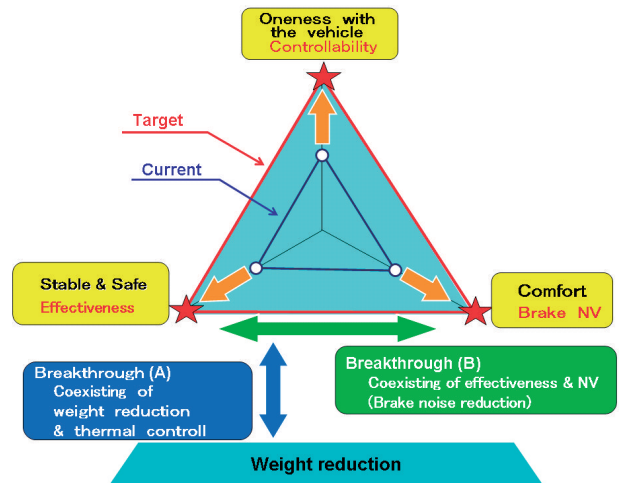


Fig.24 Development Target

3.2 開発のアプローチ

背反する性能両立のために、ブレーキの温度、効き、ノイズのバラつき解明に基づく要因分析を通じて寄与率の高い因子を抽出した。更にその因子を基にCAE解析、固有振動解析、実機検証によるパラメータスタディによりブレーキ部品の最適構造を検討した。

3.3 ブレークスルー技術

3.3.1 (A) 軽量化と冷却性の両立

ブレーキの基本的な機能は車両の運動エネルギーを熱エネルギーに変換することである。しかし制動時に発生する熱による各部品の温度上昇は摩擦係数の変動や摩擦材の磨耗促進などによりブレーキの商品性に悪影響を及ぼす。温度上昇を抑制するにはブレーキ部品の冷却性を向上させる方法と熱容量を増やす方法があるが、熱容量増加は質量の増加を伴う。そこで質量増加を抑制しつつブレーキ温度上昇抑制のためにブレーキの冷却性を向上させることに注力した。

3.3.1.1 ブレーキ冷却風の効率的取り込みの実現

Cd低減を目的にタイヤデフレクタが大型化されブレーキロータ、キャリパへ向かう冷却風が減少する傾向にあり、Cd低減とブレーキ冷却風の確保という背反に対して短期間に両立可能な構造を決定する必要がある。机上解析ツールとしてCFD (Computational Fluid Dynamics) 活用にてタイヤデフレクタ、ダストカバーなどのレイアウト、形状の最適化

を行い、ブレーキ冷却性を損なうことなくCd低減を実現した (Fig.25)。具体的にはバンパ周辺およびホイールハウス内の風の流れを表す流線および圧力・流速分布を比較しながら各部品のレイアウト、形状を変更する。ブレーキ冷却性の代用特性としてブレーキロータの熱伝達率を用い、Cd値と併せてブレーキ冷却性への影響を確認しレイアウト、形状を決定した (Fig.26)。

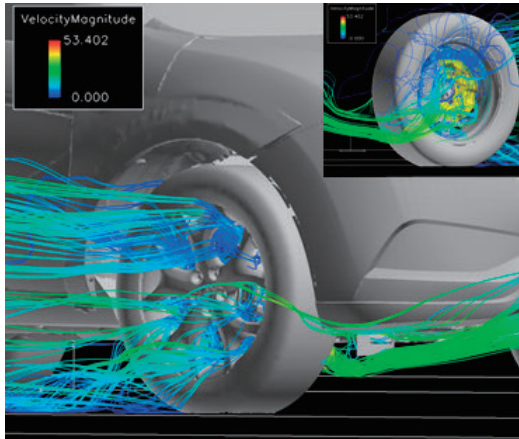


Fig.25 Stream Line from Forward of Vehicle to Brake

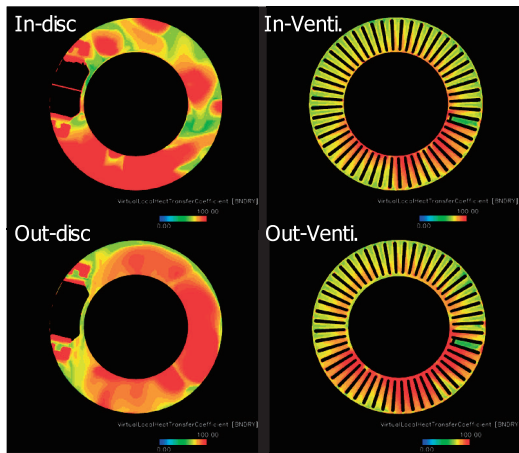


Fig.26 Distribution of Heat Transfer Coefficient on Surface of Rotor

3.3.1.2 ブレーキロータの冷却性向上の実現

ブレーキロータはブレーキノイズ等の振動&異音現象に深く係わる部品であり、その形状決定には冷却性、軽量化とのバランスが必須となる。

そこで、ブレーキロータに要求される性能 (冷却性、軽量化、音&振動性) を各々特性に置き換え、

- ・冷却性→ブレーキロータ摺動部の放熱性
- ・軽量化→ブレーキロータ質量
- ・音&振動性→他部品との固有値離間、熱倒れ量

各特性に寄与すると考えられるロータ部位の寸法を制御因子とし、寄与度を分析して温度上昇抑制、重量抑制、熱変形

抑制、固有振動数離間を両立するベストバランスとなる形状&寸法を決定した (Fig.27)。

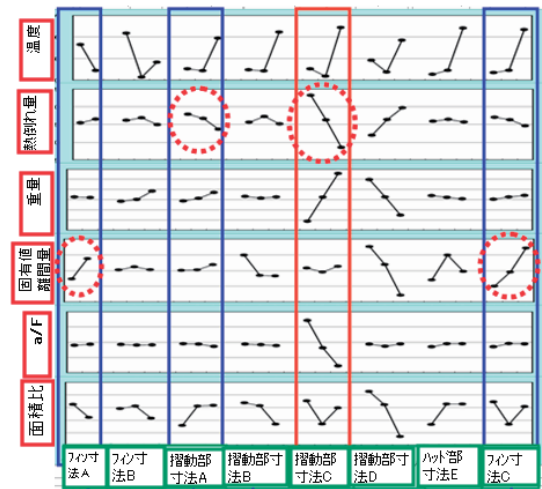


Fig.27 Factional Diagram for Brake Performance

3.3.2 (B) 効きと静粛性の両立

制動過程において回生制動を除き、車両運動エネルギーのほとんどは熱エネルギーへ変換され放出されるが、ごく一部は振動エネルギーとなり、これがブレーキのスキルノイズ等の異音発生の一因と考えられている。一般的に摩擦係数を上げる (ブレーキの効きを向上させる) と振動エネルギーも増えるため、ブレーキの効き向上とブレーキ音振の抑制は背反と考えられるが、今回振動エネルギーを抑制するブレーキキャリパ構造を構築することによりこの両立を図った (Fig.28)。

具体的には、まずブレーキに直結した電動モータを回転させながらブレーキを作動させる。制動時のモータ電力波形に現れる乱れをノイズ発生に繋がる振動エネルギーとして捉え、その変化の大小 (起振力の大小) に寄与するパラメータを制御因子として規定した。これら因子を基に品質工学を活用し振動エネルギーが最小かつ安定する構造を見出した。

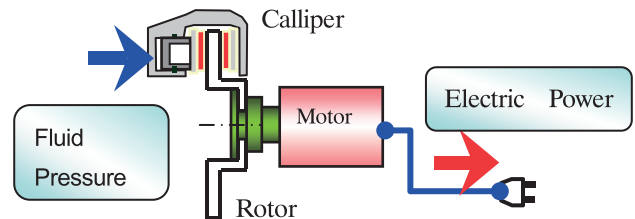


Fig.28 Brake Energy Measurement System

一方、共振性についても境界条件 (ブレーキ構成部品間の接触条件) を全面的に見直し、実機とのコリレーションに基づく複素固有値解析の精度を向上させ、耐ノイズ性能の優れたブレーキ構造を確立した (Fig.29)。

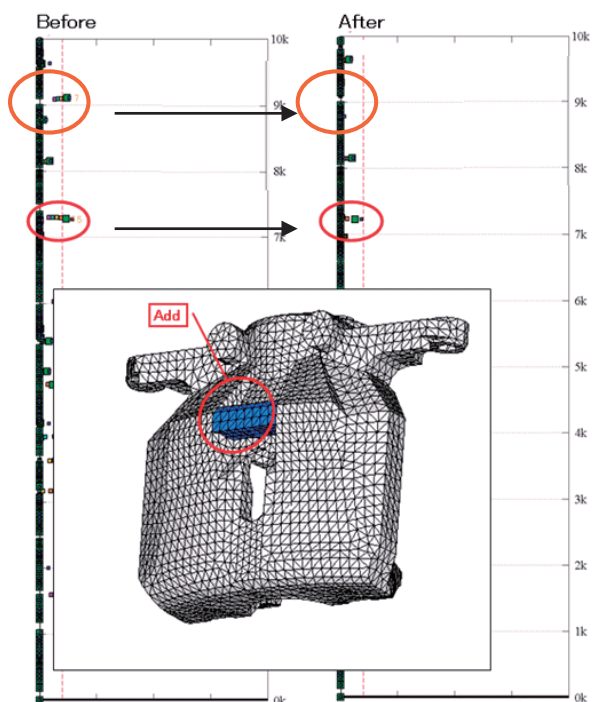


Fig.29 Shape Optimization by Complex Eigenfrequency Analysis

■ 著 者 ■



山本忠信



井芹晴明



東 裕章



江島勝美



望月浩孝



渡邊雅哉



安野谷知城



開原真一

4. おわりに

SKYACTIV-シャーシは、背反要素をブレークスルーする技術開発に取組み、サスペンション・ステアリング・ブレーキをはじめシャーシ全てを一新することで、「人馬一体のドライビングプレジャー」と「走りの質」を向上させながら、現行Mazda6クラス比14%の軽量化を実現した。これらの技術は今後のマツダ全車に投入し、お客様に提供する。

ご協力いただいた関係者の方々に感謝するとともに、マツダでは更なるブレークスルーを目指し今後も技術開発に取組んでいく。

特集：SKYACTIV TECHNOLOGY

11

SKYACTIV-ボディ
SKYACTIV-Body

木村隆之*¹ 清武真二*² 阪井克倫*³ 小橋正信*⁴
 Takayuki Kimura Shinji Kiyotake Katsunori Sakai Masanobu Kobashi
 上野正樹*⁵ 近藤量夫*⁶ 伊藤 司*⁷ 岡本 哲*⁸
 Masaki Ueno Kazuo Kondo Tsukasa Ito Satoshi Okamoto

要 約

軽量化は燃費を改善するだけでなく、エンジンの性能をフルに引き出し、走る・曲がる・止まるという自動車の基本性能を飛躍的に向上させるため、「走る喜び」を大切にするマツダにとって注力すべき領域である。

パワートレインとプラットフォームの同時刷新という機会を活用し、全体最適の視点からボデーの理想構造を追求した上で、新工法の採用・材料を最適化するプロセスを繰り返し行い、剛性・衝突安全性能の確保と軽量化という相反要素を両立させる技術のブレークスルーを図った。基本骨格は力学の原理原則に立ち返り、可能な限り直線で構成する「ストレート化」と各部の骨格を協調して機能させる「連続化」、入力を特定部品に集中させるのではなく、多くの部品に最適なバランスで分散させる「マルチロードパス」をコンセプトとした。また工法面ではウェルドボンドやスポット溶接を増やし、材料面では高張力鋼板材の使用拡大などを行い、前モデル比約30%の剛性向上、世界トップレベルの衝突安全性能（社内テストによる）と約8%の軽量化を実現した。

Summary

Reducing vehicle weight does not just boost fuel economy; it also complements engine's performance potential and significantly improves vehicle's basic attributes when driving, turning, and stopping: thus being one of the priorities for Mazda who values "driving pleasure".

Taking the renewal of power train and platform as an opportunity, we identified the ideal body structure from the total optimization viewpoint. By adopting new methods and iterating material optimization processes, we tried to achieve a technological breakthrough: a lightweight and highly-rigid body with excellent crash safety performance. As for the basic frame structure, going back to the basis of mechanics, we pursued three main concepts: "straight structure" where frames are straightened as much as possible, "continuous structure" where frames function in union, and "multi-load paths", which disperse loads to multiple parts rather than concentrating in a specific part. By increasing the number of spot-welding points and weld bonding points and expanding the use of high tensile strength steel, we have enhanced the stiffness by 30% compared with the previous model and achieved world-top-level crashworthiness (according to the internal test) while reducing the weight by approximately 8%.

1. はじめに

「走る喜び」と「世界トップレベルの環境・安全性能」を実現した上で、「軽量化」という相反課題を高次元で両立させ

るべく、技術のブレークスルーをすることが開発に対する至上命題であった (Fig.1)。

本稿では、この開発における考え方、開発プロセス、構造の特徴や性能を紹介する。

*1~4 ボデー開発部
Body Development Dept.

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

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

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

*6 NVH性能・CAE技術開発部
NVH & CAE Technology Development Dept.

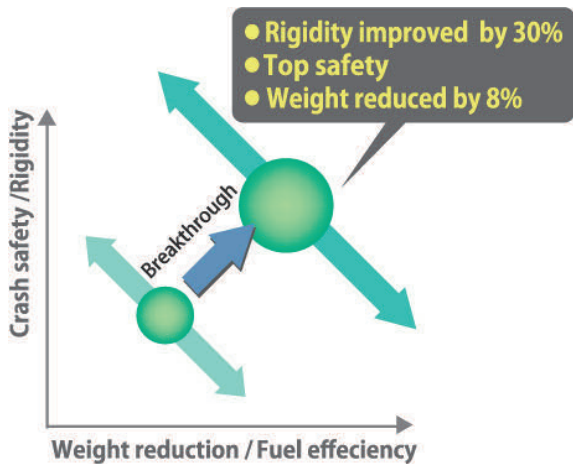


Fig.1 Aim of SKYACTIV-Body

2. 開発プロセス

2.1 ボデー開発プロセスとコンセプト

開発プロセスとして、まずボデー機能の定義を一から見直し、明確にした。そして、その一つ一つの機能のバラクリを徹底的に行った。ここでいう「バラクリ」とは、性能や現象を個別部品の機能に関連づけ、それを量的に明らかにし全体像として見える化したもので、その中に「メカニズム」も包含している。

それらの機能に基づき、ボデー構造は、力学の原理原則から以下を基本コンセプトとした。

- ① ストレート化
- ② 連続化
- ③ マルチロードパス

そして、性能目標から決定した機能配分量に対し、適正な工法と材料を選定した。

同時に、転写性を確保し競合力のある多品種生産を可能とするコモンアーキテクチャ構想と、同体質ライン化によるボリューム効率を高めるフレキシブル生産をサポートできるように、開発を行った。

前述の開発プロセスを何度も繰り返すことで、各プロセスの質を高め、より高精度な開発へと進化させた (Fig.2)。

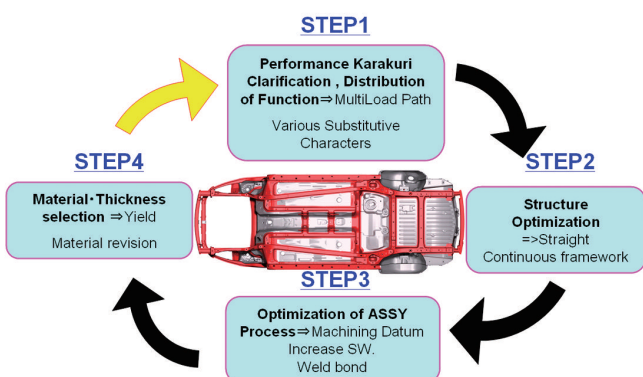


Fig.2 Body Development Approach Cycle

2.2 カラクリ解明と機能配分

前節にもあるように車両の全性能に対して、そのカラクリを解明し、ボデーの機能・機能配分にカスケードした。詳細は車両性能章で後述する。

更にボデーの部位・部品ごとに全性能に対する機能を定め、マッピング化する取り組みを行った。それにより、相反する性能・機能が一目で明らかになり、それらを両立させる構造検討を最初から着手し開発効率を高めた。

3. 構造の特徴

3.1 構造の特徴

(1) ストレート化

ボデー構造を考える上で、力学の原理原則に立ち返り、基本骨格を可能な限り直線で構成した。特にプラットフォームにおいては、極力湾曲や屈折をなくしたストレート形状とした。従来は、既存するパワートレインやドライブシャフトの可動軌跡を逃がすためにフレームに湾曲や凹み形状があったが、今回はパワートレインも含め一新し、車両全体が適正となる開発を一括して同時に進めたことにより、ストレート化を実現した (Fig.3)。

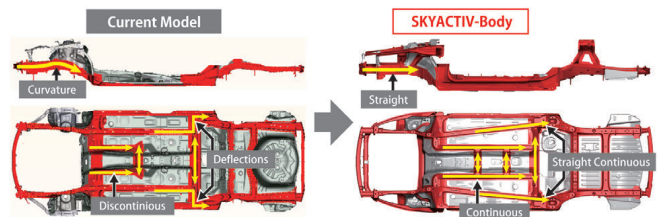


Fig.3 Straightening of Basic Framework and Continuous Framework Structure

(2) 連続化

従来は、一つの部品で衝突荷重や路面入力を支えていたものを、他の部品にも伝えることで、個々が協調して、分担荷重を低減し部品の軽量化ができる。具体的には、ストレート形状のフレームが、フロントからリヤまで連続する構成とした。ストレート化した上で、曲げが入らざるを得ない部分では、横方向のフレームとも連続接合し、また可能な限り閉断面構造とすることで、剛性を確保しながらの軽量化に大きく貢献させている。

トップハットも同様に連続化の構成部材として機能させている。具体的には、Fig.4に示したルーフレールやBピラーなどをはじめとするトップハットとプラットフォームのラインフォースメント全体で3つのリング構造を形成することで、ボデーの全体剛性を向上させた。更に、サスペンション・サブフレーム部も構造を一新し、単体の剛性向上とともに、ボデー側の取付位置の最適化を図ることで全体剛性向上に寄与させている。また、ホイールハウス内部の合わせ部といった細部に渡って連続構造を徹底した。

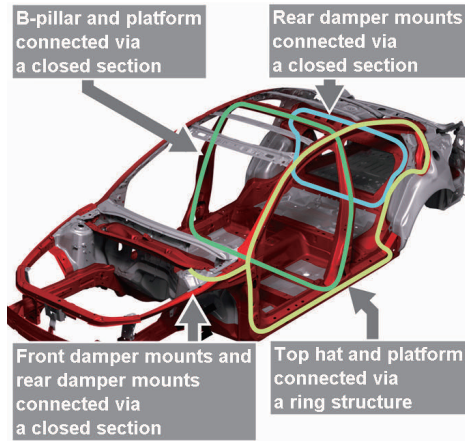


Fig.4 Ring Structure

(3) マルチロードパス

入力を特定の部位だけで受けるのではなく、多くの部品に最適なバランスで分散させる構造で、軽量で強い骨格を作る上で重要な考え方である。ここでは考え方の紹介に留め、詳細は衝突性能節で後述する。

3.2 工法

(1) 接合強化

「連続化」と「マルチロードパス」の実現手段として、ルーフレール後端部とリヤサスペンションリインフォースメントの結合部にウェルドボンドを採用した。

またプラットフォームでは、ウェルドボンドに併せてスポット溶接点数も増やし、部材の結合部を強化することで、ロードノイズ低減と剛性を向上させた (Fig.5)。

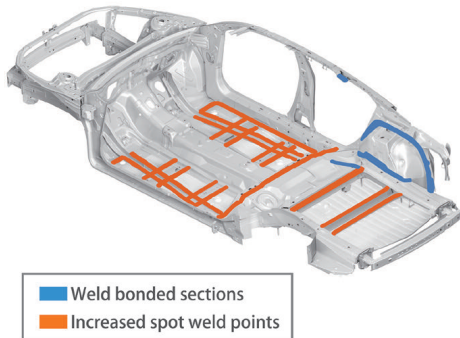


Fig.5 Weld Bonding, Increased Spot Weld

(2) ホットスタンプ

ホットスタンプとは、材料を約900℃に加熱してプレス型で成形と同時に急冷 (高強度化1,200~1,470MPa) するという手法で、成形後の部品精度も良好で成形性と強度を同時に確保するものである。これをBピラーリインフォースメントに適用したことで、従来の780MPaハイテン材では側面衝突性能から強度上、リインフォースメントの内側に更にリインフォースメントが必要であったものを廃止することができ、軽量化を実現した (Fig.6)。

同様に、フロント・リヤバンパレインにも採用し、軽量化を行った。

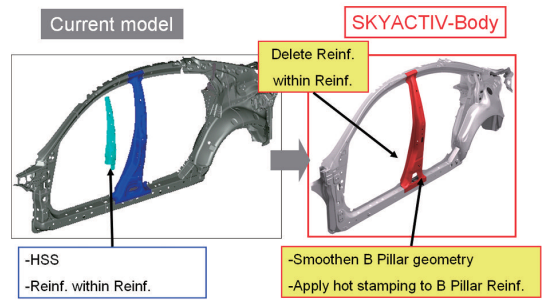


Fig.6 Manufacturing Method (Hot stamping)

3.3 材料

(1) ハイテン鋼板材 (高張力鋼板材)

車体剛性上必要な板厚をCAEにて算出して定め、その上で衝突性能上強度が必要な部品に、エネルギー吸収性と強度・信頼性に優れたハイテン鋼板を適用した。部品形状は、加工しやすいシンプルな形状に見直すことで適用を広げ、ハイテン鋼板適用率 (質量比) は現行CDセグメントで40%から60%に拡大させている。中でも生産性と性能の両立性が優れている590MPa級ハイテン鋼板の適用率を増やした (Fig.7)。

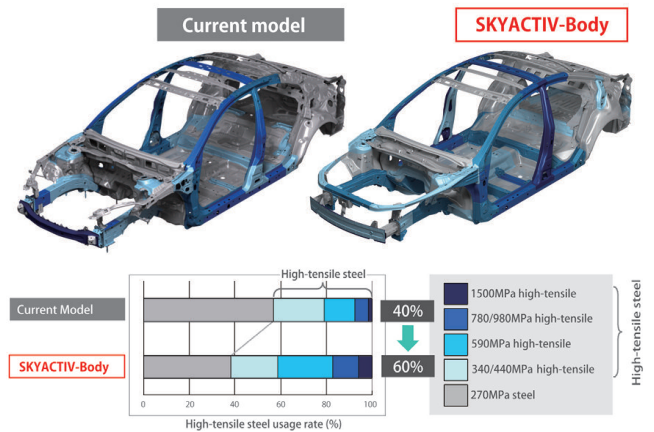


Fig.7 High-Tensile Steel Usage Rate

3.4 ボデー質量比較

前章の開発プロセス、構造・工法・材料を用いた結果、ホワイトボデーで従来モデル比約8%の軽量化を達成した。同時にCDセグメントの中で最軽量を実現した (Fig.8)。

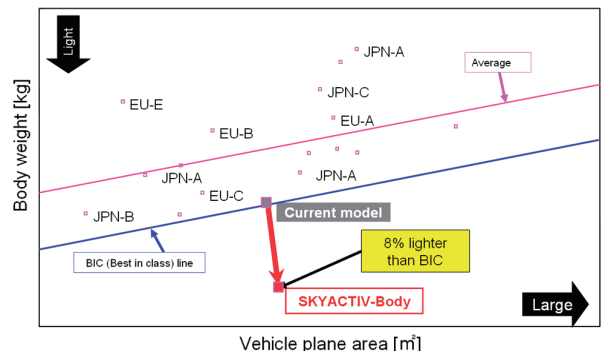


Fig.8 Vehicle Weight Per Projected Area

4. 車両性能

4.1 衝突性能

世界トップレベルの衝突安全性能と軽量化という、一見相反する目標を両立するため、「最適なエネルギー吸収シナリオ」構築と「耐力配分の適性化」を基本骨格レベルから行い、客室を強固に保護するボデー構造を実現した。

(1) 最適な車体各部のエネルギー吸収シナリオ

従来衝突時のエネルギーはフロントフレームのような主要エネルギー吸収部材を中心に吸収させていた。これに対し、今回のボデーでは、マルチロードパスコンセプトを採用し、フロントフレームの周辺に存在する部材にもより多くのエネルギー吸収をさせることで、無駄なくエネルギー吸収効率をあげている。例えば、前面衝突時の入力エネルギーは、「フロントフレームからアンダーフロアへ」「エプロンからフロントピラーへ」「サスペンション・サブフレームからアンダーフロアへ」の、3つの連続した経路（ロードパス）に分散されて吸収している（Fig.9）。

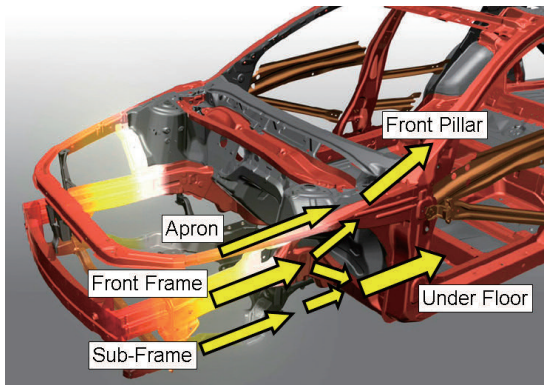


Fig.9 Multi-Load Path Concept

次に、このロードパスコンセプトに基づいて、車体各部の最適な耐力設計を行った。そのために、Fig.10に示すような車両を構成する主要骨格部材を簡単なバネと質点に置き換えた3次元バネマスモデルを開発した。その各バネには耐力に応じて質量も算出できる機能を追加し、最新の数値最適化計算技術と組み合わせて数千ケースにのぼるスタディの中から、質量効率に最も優れた耐力配分を見出した（Fig.11）。

(2) 最軽量を実現する構造化技術

車体各部の構造は、(1)の車体各部の耐力目標に基づいて、

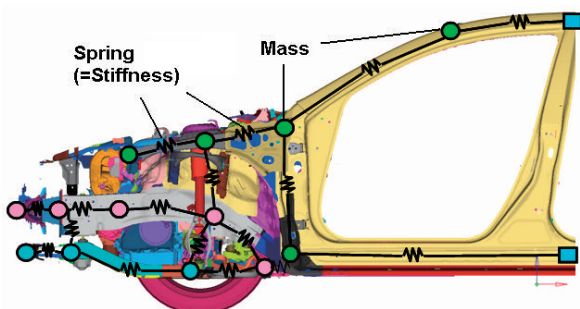


Fig.10 Concept of 3D Mass Spring Model

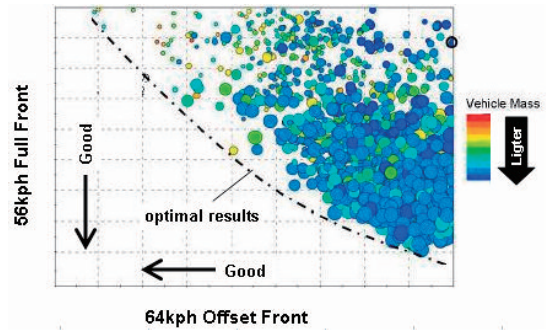


Fig.11 Optimization of Body Stiffness Balance

詳細なFEMモデルを用いて決定していった。

この中で、個々の部品設計においてもマルチロードパスの考え方を適用している。例えばクラッシュカンやフロントフレームでは、衝突エネルギーが主に構造体の稜線部分を通して伝わることに着目し、クラッシュカンからフロントフレーム前端部までの断面形状をFig.12に示すように十字型に成型している。従来の四角断面では稜線の本数は4本だが、十字型にすることにより稜線は12本になり、前方からの入力により広く分散される。これによってエネルギー吸収量を損なうことなく、部材の板厚を低減し軽量化を図った。またより短い長さでエネルギー吸収量を確保できるため、車両のフロントオーバーハングを短縮でき、エクステリアデザインの自由度も高めた。同様の考え方は、側突に重要なサイドドアや後突に重要なリアフレームなどにも採用し、車両全方位での安全性能向上と軽量化に貢献している。

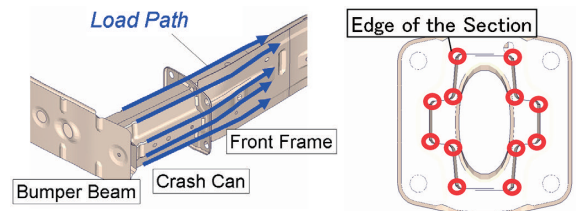


Fig.12 Multi-Load Path and Cross Section of The Frame

(3) 前面オフセット衝突性能検証結果

Fig.13に前面オフセット衝突時のダッシュ後退量と、車両前部の質量の関係を示す。上記のような新しいエネルギー吸収シナリオと耐力配分の最適化により、競合車比で大幅な軽量化を図りつつ、キャビン変形量の極めて少ない強固な車体構造を実現した。

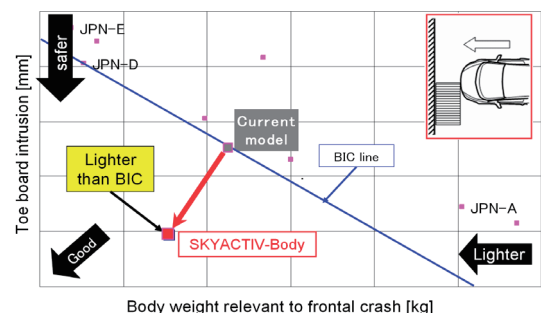


Fig.13 Crash Performance and Body Weight Comparison

4.2 振動・騒音性能

乗員がストレスなく会話できる静粛性と軽量化を両立するために、「ロードノイズのカラクリ解明」、「最適なボデー放射音低減シナリオ」構築と「機能配分」を行い、走行中の路面違いによる室内の音圧変化やピーク感を抑制するボデー構造を実現した。

(1) 最適なボデー放射音低減シナリオと機能配分

ロードノイズのカラクリは、「起振源系（タイヤ・ホイール特性）」、「サスペンション入力伝達系」、「ボデー伝達放射系」の3つに大きく分けられる。その中で、ボデーの関係する「ボデー伝達放射系」の開発では、従来、目標設定を行うために、サスペンション取付部に一定の力が加わったときの音の発生量「車体感度」を用いてきた。今回の開発では、この「車体感度」をFig.14に示すような3つの指標「①サスペンション取付部剛性 ②車体振動伝達特性 ③各ボデー骨格・パネル剛性」に機能配分した。更に、数百項目の目標を設定し、実車とCAE解析によるパラメータスタディを行い、寄与が高い経路と部品を特定し、最適な機能配分を実現した。

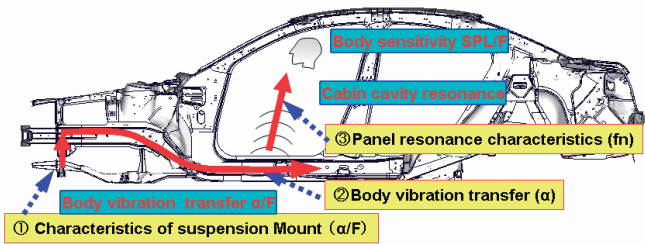


Fig.14 Road Noise Transmission

(2) 軽量化を図る具体構造化

(1)の機能配分したカスケード特性指標を元に、振動・騒音性能へ寄与が高い部品や経路を特定し、以下のような最適構造化を行った。

- ① サスペンション取付部剛性に関しては、フロントのサスペンションサブフレーム取付部に衝突性能との整合を取りつつ、剛性と軽量化を両立させた構造を採用し、ボデーの変形を抑制した (Fig.15)。
 - ② 車体伝達特性に関しては、リヤフレームのストレート化と、リヤダンパマウントとNo.4およびNo.4.5クロスメンバを連続化するデュアルブレース構造の採用により、骨格の剛性を確保し変形を抑えた (Fig.16)。
 - ③ パネルの特性に関しては、センターフロアやNo.4クロスメンバ上部に、曲面パネルを用いてパネル剛性を上げ、剛性向上部品の追加なしで、放射音を低減した (Fig.17)。
- (3) ロードノイズ検証結果

以上のように「車体感度」を各部品特性に機能配分し、構造を最適化することで、軽量化と他性能との整合を取りながら、高いロードノイズ性能を実現した (Fig.18)。

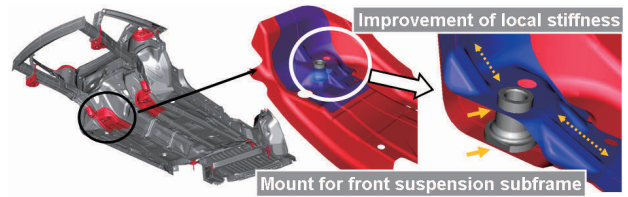


Fig.15 Front Structure

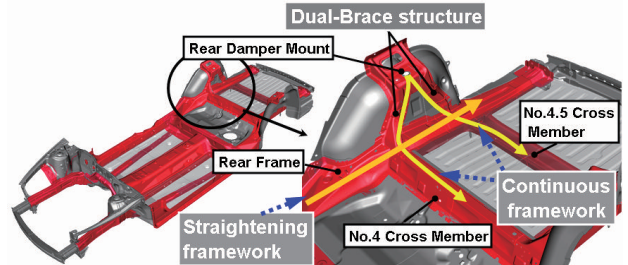


Fig.16 Rear Frame Work

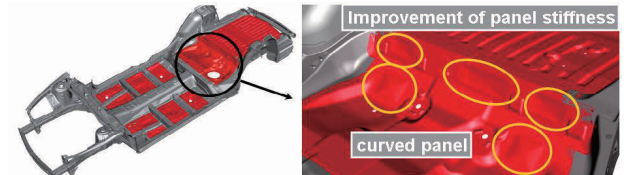


Fig.17 Center Floor Panel

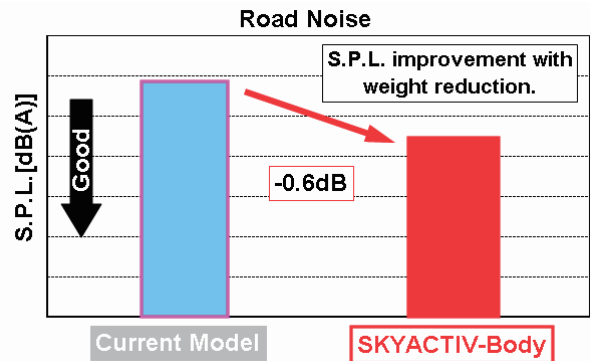


Fig.18 Road Noise Performance

4.3 操縦安定性・乗り心地性能

走る喜びを提供できる高い操縦安定性・乗り心地性能と軽量化を両立するために、ボデー各部の「剛性配分の適性化」を行い、高剛性のボデーを実現した。

(1) 機能配分による剛性目標設定

操縦安定性や乗り心地に対するボデー性能を向上するためには、ねじり剛性のほかに、サスペンション取付部剛性、乗員周辺部の剛性などを向上する必要がある。今回、各々の剛性に対し目標値を割り振る「機能配分」において、性能目標と質量低減を両立する配分を実施した。

まず、各種の車体入力に対し主要変形となるねじれを抑制するため、ねじり剛性を大幅に向上させ、その上で曲げ、キャビンの倒れなどの主要変形や局所変形に起因する他の剛性項目も従来モデルを上回る剛性を確保する配分とした。更に、各々の剛性と実車性能の相関に基づいて各剛性の配分を再調整することで、質量効率の良い剛性配分を決定した。

(2) 剛性向上の構造化

各剛性目標を達成する具体的な構造化においては、他性能と同様にCAEを駆使して、ストレート化と連続化に注力した。ねじり剛性を例にあげると、品質工学の活用から、リヤダンパまわりなど寄与の高い部位を特定してから、構造の適性化を図った。同時に、Fig.5に示したスポット溶接点数増しやウェルドボンド追加を行い、結合部を強化することで、更に剛性を高めた。

特にリヤダンパまわりの構造では、車型の違いより操縦時に感じられる剛性感の差の最小化を目指した。ワゴン車型は、セダン車型と異なり、リヤに剛性に不利な大きな開口部を持つ。そこで、Fig.16に示したデュアルブレース構造の採用により、ワゴン車型でのリヤダンパマウント周辺の高剛性化を実現した。

(3) 剛性とボデー質量低減の両立結果

剛性配分の適正化と構造の効率化により、Fig.19に示すように、ボデー質量を低減しつつ従来モデルに対し、ねじり剛性を30%アップした。また、その他の剛性指標においても同様にCDセグメントの中でトップレベルの質量効率を実現した。

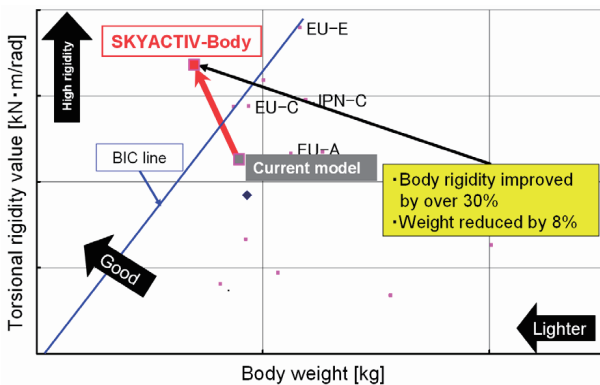


Fig.19 Body Stiffness

4.4 空力性能

ボデーの軽量化に加え、大幅な走行抵抗低減を実現するため、世界トップレベルの低Cdプラットフォームを開発した。この困難な目標を達成するために、車両周りの流れの解析を行い、「プラットフォームの理想流れを構築」し、「その流れを実現するための構造の具体化」を実施した。

(1) プラットフォームの理想流れの構築

従来プラットフォームでは、床下で発生する渦に着目し、その渦を小さくするためフロアのフラット化を実施し、空気抵抗低減を実現していた。しかし、フロアのフラット化だけでは空気抵抗力を決定する車両後方の後流の上下の流れのバランスをコントロールすることが難しく、その結果後流が吹き降ろす流れになり、十分な空気抵抗低減はできなかった。

そこで、後流の上下の流れを制御して一箇所に集約させることによって、車両後部の乱流・渦の発生を抑制し、空気抵抗を大幅に低減するコンセプトを実現した (Fig.20)。

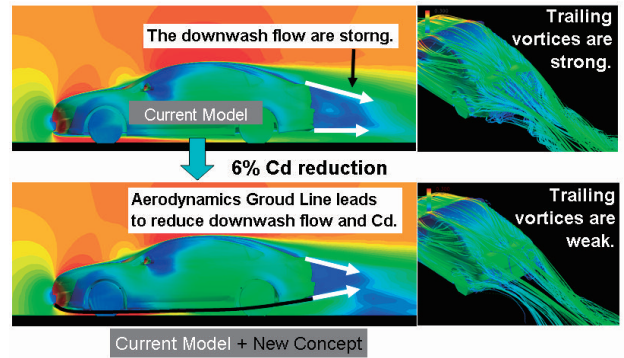


Fig.20 CFD-based Aerodynamics Optimization by Modifying Underbody Geometry

(2) 具体構造化

このコンセプトを実現するため、CFD (流体流れ解析) を用いてフロア形状の検討を行った。その結果、Fig.20に示す、車両後端部の空気の流れを持ち上げる形状と、Fig.21に示すトンネル部やタイヤ周りの空気の流れを制御するアンダーカバー形状を見出した。

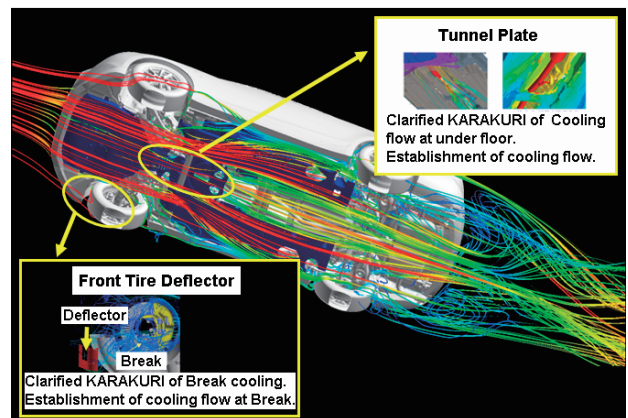


Fig.21 Flow Streamlines Around under Floor

(3) 空気抵抗検証結果

この形状を織りこんだ車両を評価した結果、従来プラットフォームと比較し、空気抵抗を8%低減でき、加えて、Yawモーメントとリフトバランスを最適化し高速直進安定性も改善した (Fig.22)。

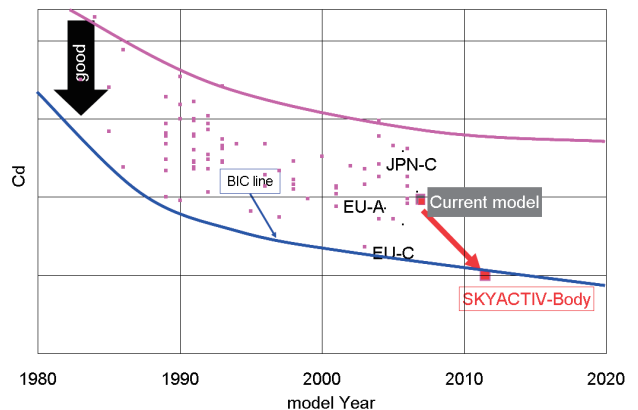


Fig.22 Cd Performance

5. おわりに

今回の開発は、開発部門、生産部門や社内外を問わず、全てのメンバが一丸となって、開発をゼロから見直して取り組んだ。それにより、設計から生産に至るまでの全てプロセスを一新し、大きな成果を上げることができた。

ご協力いただいた関係者の方々に感謝するとともに、今後もお客様により良い商品を提供できるように努力する所存である。

■ 著 者 ■



木村隆之



清武真二



阪井克倫



小橋正信



上野正樹



近藤量夫



伊藤 司



岡本 哲

論文・解説

12

次世代デザインテーマを具現化したコンセプトモデル「靱」の開発 Development of Concept Model “SHINARI”, an Embodiment of Next Generation Design Theme

中牟田 泰^{*1} 石原 智浩^{*2}
Yasushi Nakamuta Tomohiro Ishihara

要約

マツダは、マツダブランドの更なる強化及びお客様との深い心のつながりを目指し、デザインにおけるDNAである「動きの表現」を追及し続けている。

今後はお客様により深い感動を感じていただくことを目指し、生き物などが目標に向かって突き進む時の強く速い動きを表現する次世代デザインテーマ「魂動（こどう）-Soul of Motion」を構築した。

「マツダ靱（しなり）」は、強固な金属が強い力によりしなった状態の、強いエネルギーとスピードを感じさせる様をモチーフに「魂動（こどう）-Soul of Motion」を表現した、次世代デザインの第一弾である。マツダデザインは今後様々な手法により「魂動（こどう）-Soul of Motion」を具体化し、お客様に提供していく。

Summary

With a goal of reinforcement of Mazda brand and bonds with customers, Mazda is pursuing the expression of “motion” as a Mazda DNA.

To deeply impress the customers through the expression of powerful and speedy living motions that remind them of “Will Power” of animals heading for their targets, we have setup a next generation design theme “KODO - Soul of Motion”.

“Mazda SHINARI” is the first model of the next generation design depicting the “KODO - Soul of Motion”, with a motif suggesting accumulated high energy in a metal forced to be bent and the speed when it is released. Mazda Design will continuously take various approaches to embody the “KODO - Soul of Motion” and provide the embodiments to the customers.

1. はじめに

マツダが初の乗用車として高い実用性と無駄のないスタイリングを持ったMazda R360 Coupeを発表した1960年代以来、マツダのデザイナーは、デザイナーである前にクルマをこよなく愛する者として、単なる道具ではなく愛すべき生き物のような存在としてのクルマを表現しようとしてきた。それはマツダデザインが半世紀も前からチャレンジしてきたマツダのデザインフィロソフィである。

マツダブランド戦略「Zoom-Zoom」がスタートして以来マツダデザインは、動きをテーマにした表現によってオリジナリティを確立してきた。今後も強い感動と「心のつながり」を引き起こす、「動きの表現」の進化を目指し続ける。

本稿では、マツダの次世代デザインテーマ「魂動（こどう）-Soul of Motion」と、それを具体化した「マツダ靱（しなり）」について紹介する。

*1, 2 デザイン本部
Design Dept.

2. マツダデザインの歴史

2.1 オリジナリティ模索の歴史

R360 Coupe (Fig.1) に始まる1960年代～70年代のマツダデザインは、様々な表現のスタイルや手法を取り入れながらマツダらしさを模索するチャレンジの時代であった。走りのイメージを未来的なスタイリングで表現したCosmo Sportsや初代RX-7 (Fig.2) のデザインを通じて、マツダらしさの基本となる「スポーティ」という個性を育て上げた。

1980年代後半～90年代には、「ときめきのデザイン」と称して、クルマを愛すべき存在にしたいという想いを明確に表現しようとした。ボデーのデリケートな面構成によって生じる光と影をコントロールすることで、エモーショナルなフォルムを創る造形力を身に付けた。MX-5 (Fig.3) や3代目RX-7などはこの時代の代表的モデルであり、世界的に高い評価を得て、マツダデザインの造形力の高さを印象付けた。



Fig.1 R360 Coupe



Fig.2 RX-7 (1978)



Fig.3 MX-5 (1989)

2.2 「動き」によるオリジナリティ確立

2000年代には「Zoom-Zoom」という新しいブランドメッセージのもと、アスレティックでスポーティな表現にチャレンジした。スポーティな造形の基本である、かたまり感や踏ん張り感のあるフォルムと、5角形のフロントグリルや特徴的なフェンダ造形などマツダのデザイン特徴を確立させた。初代アテンザ (Fig.4) やRX-8 (Fig.5) を始めとする、すべてのマツダ車でこれを採用した。

更に近年、水、風、砂、溶岩など自然界に存在する「動き」の美しさを取り込んだ新しいクルマの造形にチャレンジする「ながれ (NAGARE)」デザインをテーマとしたコンセプトカーを発表するとともに、新型プレマシー (Fig.6) に採用した。



Fig.4 Atenza (2002)



Fig.5 RX-8 (2003)



Fig.6 Premacy (2010)

マツダデザインは「動き」の表現により、そのオリジナリティを確立するとともに、高い表現力を身に付け、多くの賞を獲得するなど世界中で高い評価を得た。

3. 次世代デザインテーマ「魂動 (こどう) -Soul of Motion」

3.1 次世代への取り組み

今の環境や社会性が重視される中においては、一般的に車本来の魅力が忘れられがちである。マツダデザインは、そのような状況であるからこそ、効率やクリーン性だけでなく「人の感情に訴えかける魅力」をもっと高めねばならないと考えている。人間の温かみや生き物のような躍動を感じさせる工業製品はクルマ以外にない、そうしたクルマのより根源的な魅力をもっと大切にしたクルマづくりやデザイン開発にこだわるからこそ、クルマの未来のために今必要なことと考える。

マツダデザインは、世界の車造りをリードするという強い決意とともに、人の心を強く動かす「動き」の表現のブレークスルーに挑む。「アスレティック」や「ながれ (NAGARE)」のデザインなど、これまでのテーマを踏まえながら、「動きの表現」を進化させる (Fig.7)。

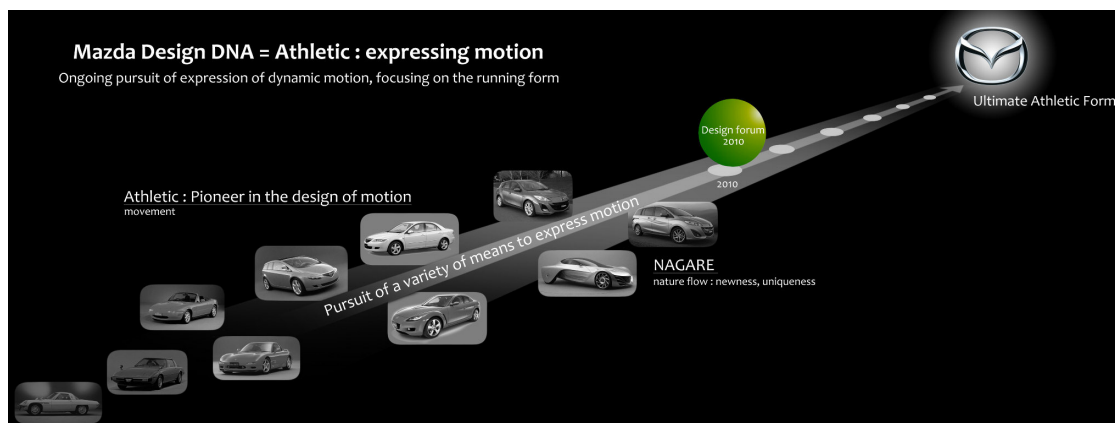


Fig.7 Mazda Design's Aim

3.2 「魂動 (こどう) -Soul of Motion」コンセプト

今マツダデザインは、生き物が見せる一瞬の動きの強さや美しさを「動きの表現」の究極の姿と考えている。

例えば、何かを狙って動き出す瞬間のフォームー日本古来の武道である剣道の突きの一瞬、あるいはチータが獲物を狙って力を溜め飛び掛るような最大の集中力を要する一瞬には、研ぎ澄まされた力のバランスや、瞬発的な力、スピード感、凜とした緊張感、無駄のない洗練された美しさや色気といった、人の心を動かすエモーションを感じさせられる (Fig.8)。

マツダデザインは、この一瞬の「生命感にあふれ心ときめかせる動き」をクルマのデザインテーマとして表現することを目標とし、そのテーマ名を「魂動 (こどう) -Soul of Motion」とした。



Fig.8 The Ultimate form of Motion

3.3 「魂動 (こどう) -Soul of Motion」を構成する要素

マツダデザインは様々な「人の心を動かす動き」を分析し、「魂動 (こどう) -Soul of Motion」を表現するデザインの基本要素を以下の3つと規定した (Fig.9)。

SPEED (前進感) : スピード感を生む骨格

見る者に思わず「運転したい」という感情を起こさせる、強い前進感を表現する。

TENSE (緊張感) : 研ぎ澄まされた緊張感を生むフォーム

日本のものづくりの精神を活かし、無駄を排し、磨き上げる。

ALLURING (艶やかさ) : 味わい、艶っぽい質感

生き物が持つ艶っぽさ、温かみを表現する。

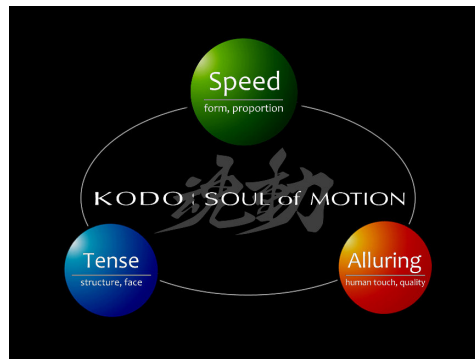


Fig.9 Kodo's Elements

4. 「魂動（こどう）-Soul of Motion」表現手法への取り組み

4.1 スタディ活動

マツダデザインは「魂動（こどう）-Soul of Motion」の具体的な造形開発にあたり、通常の手法やプロセスにとらわれない取り組みを行った。デザイナーやモデラたちは、獲物を狙って構えている獣のイメージや剣道の突きの一瞬など、各人が心に描いたイメージを手がかりに、各々が思い思いにスケッチやクレイ（粘土）を使って自由に造形スタディ活動を行った（Fig.10）。



Fig.10 Mazda Modeler's Study

4.2 しなり

その活動の中からマツダデザインは、強い力によってたわんだ鋼板の姿に着目した。堅い金属に強い力が加わった時、その金属は反りながらも常に元の状態へ戻ろうとする反発の力を示す。加える力が強くなればなるほど、反発力も大きくなる。その姿は今にも跳ね返り、強いエネルギーと速いスピードを生み出すことを人に想像させる。

この鋼や竹のように強い張りを持ったものをねじったり曲げたりしたときに、強い反発力を溜めながらしなやかにしなる様子＝「しなり」は、人や生き物が速い動きを生み出すために、体をしなやかに変形させる姿もイメージさせる。マツダデザインはこの「しなり」に「魂動（こどう）-Soul of Motion」を具現化する造形のひとつとしての可能性を見出し、造形手法としてのスタディを重ねた。



Fig.11 "SHINARI" Art

4.3 デザインコンセプトモデル「マツダ靱（しなり）」

マツダデザインは「しなり」を抽象的な表現から徐々にクルマのカタチへと変化させ、「マツダ靱（しなり）」のデザイ

ンとして具現化した (Fig.12)。

「マツダ靱 (しなり)」は、マツダデザインが目指す新たなデザインテーマ「魂動 (こどう) -Soul of Motion」を、伸びやかなフォルムで表現した4ドア4シータスポークーペの純粋なデザインコンセプトモデルであり、見る人を胸の奥底から湧き上がる熱くエモーショナルな気分させたいと願うマツダデザインの想いを純粋に表現した「魂動 (こどう) -Soul of Motion」のひとつの形である。



Fig.12 Mazda Shinari

5. 「マツダ靱 (しなり)」エクステリアデザイン

5.1 プロポーション

車体を前後に貫くボデーの軸と、ボデーの後方へ引き絞られたような形状を見せるAピラやキャビン形状、そしてフロントフェンダなど全体が織り成すリズム感により、いまにも飛び出そうとするかのような力の溜めと、一気に全速力で動き出す瞬発力をイメージさせるプロポーションを構成した (Fig.13)。

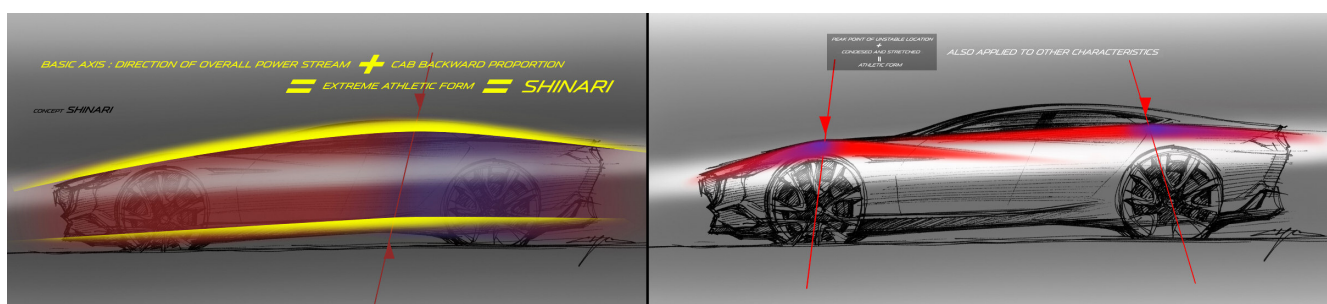


Fig.13 Proportion

5.2 サーフェス

RX-8から始まったタイヤの存在感を強調する造形を更に進化させた特徴的なフロントフェンダにより、ダイナミックなボデーサイドの動きをエレガントかつスポーティに際立たせた。このフロントフェンダから後ろへ向かう動きとリヤフェンダから前に向かう動きを複層的に融合させることにより、強い緊張感と美しくしなやかな動きのつながりを表現した。

また、すべてのボデー面は常に変化し、一定な断面はない。例えば、サイドシル部の上向き面は、フロントからリヤにかけて微妙に角度をコントロールし、変化させることでスピード感を表現している。



Fig.14 Surface

5.3 フロントフェイス

フロントフェイスは、五角形のフロントグリルを立体的な造形に進化させ、マツダブランドを誇り高く主張させた。そのグリルを起点にした力強い動きはボンネット、フェンダ、ヘッドランプ、そしてバンパへと繋がっている。特にグリルからヘッドランプに繋がる金属製のモールはより立体的なスピード感を表現し、新しいマツダのデザイン特徴として

フロントフェイスを特徴づけている。その先にあるヘッドランプは奥まった灯体をむき出しにしたアウトレンズのない構成を採用し、獲物を狙う動物のような生命感ある瞳の表情を表現している (Fig.15)。

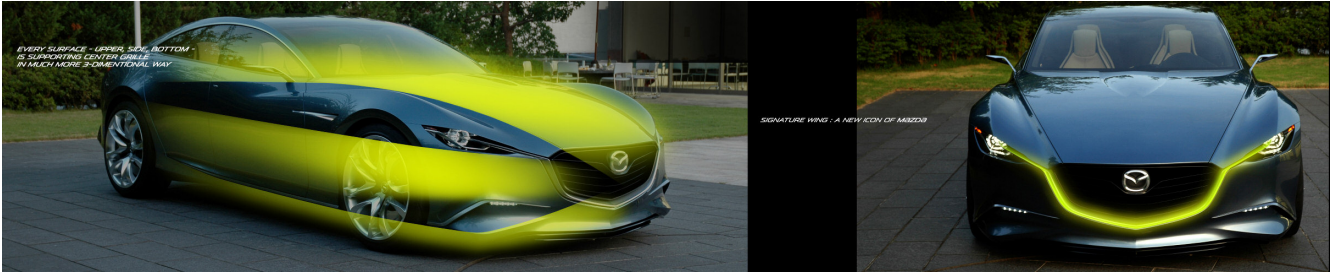


Fig.15 Front Face

5.4 ディテール

アウトミラやホイール、テールパイプなど細部に至るまで「しなり」のテーマを反復し、スピード感とともに人の手で作り上げたハンドメイドのような仕上げによる高品質でプレミアムなイメージを表現した (Fig.16)。

フロント及びリヤバンパは、下部をアンダーフロアへの気流の導入と排出を最適化した形状にして、サイドシルを含めたボデー周りアンダーフロアの整流効果により空力性能を高めた。

また、ボデーカラーは、硬質な金属をイメージさせる高輝度メタルブルーを採用し、ハイライトは強く緻密に、シャドウはしっかり黒く落ち込むことによる立体感と滑らかな面表現の両立を実現した。日本刀が持っている凄みのある輝きと他をはじくような硬さや、秘めた色気といった日本的な質感を表現している。



Fig.16 Detail

6. 「マツダ靱（しなり）」インテリアデザイン

6.1 空間構成

インストルメントパネルを二つのゾーンに分け、ドライバ席は、クルマに乗り込んだ時にドライバを包み込むような、運転に集中できる独立したコックピット空間、パッセンジャ席は反対にインストルメントパネルの形状を低くし、水平エレメントにより広々感と安心感を表現した快適な居住空間とすることで、コントラストの強い空間構成を構築した。

加えて、レイヤ状に動きを表現した造形を組み合わせることで、スピード感と、人とマシンが直感的にコミュニケーションできるドライバオリエンテッドな空間を視覚的に表現している (Fig.17)。



Fig.17 Interior Space

6.2 機能レイアウト

人間工学を適用してドライバー/パッセンジャそれぞれの操作に最適な操作機器のレイアウトと、前述のレイヤ状の造形と整合させ、すっきりと洗練されたイメージを表現するだけでなく、各乗員のエリアを視覚的にもわかりやすく表現して、直感的な操作をしやすくした (Fig.18)。



Fig.18 Function Layout

6.3 クラフトマンシップ

精緻でメカニカルな金属の質感と、潤いを感じさせる皮革のコントラストにより空間全体に強い密度感、作りこみを感じさせた。また、アルミニウムの切削加工により、計器やスイッチ類に艶やかな質感を与えた (Fig.19)。

また、落ち着いた色合いのインストルメントパネル表皮に対し、シートなど部分的に明るい素材色を採用することで、ボリューム感のある基本面对し、強い動きを感じさせるエッジの効いた造形を際立たせた (Fig.20)。



Fig.19 Material



Fig.20 Color Coordination

6.4 情報機器

ドライバーとマシンのコミュニケーションのためにユニークな情報提供機能を提案した。フローティング状態に設置されたディスプレイは可動することで、ドライバーまたはパッセンジャそれぞれに最適な位置と角度にあわせることができ、小型ながら効率よい情報提供を可能にする (Fig.21)。

このシステムではシーンに合わせ、「ビジネス・モード」「プレジャー・モード」「スポーツ・モード」の三つのモードを設けた。例えば「プレジャー・モード」では、快適な環境づくりやエンターテインメントを重視し、ドライバーが自由自在にインテリアの雰囲気を変更できるなど、それぞれのシーンに合わせた機能を提供する。



Fig.21 Information System

7. おわりに

以上、人の心を動かす動きの表現「魂動（こどう）-Soul of Motion」とそれを具体化したデザインコンセプトモデル「マツダ靱（しなり）」の紹介を行った。

グローバルなマツダデザインのメンバが一丸となって実現させた「マツダ靱（しなり）」は、ジャーナリスト等から非常に高い評価を得ることができた。今後は「魂動（こどう）-Soul of Motion」を世界中の人々に届けるべく、量産モデルへと展開する。

マツダデザインは、マツダが際立ったブランドであるといわれる存在になることを目指して、更なるスタディを繰り返しながら、生き物のような躍動感と温かみを感じさせるデザインを今後も追及していく。

■ 著 者 ■



中牟田 泰



石原 智浩

論文・解説

13 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 Robust Production line Development Method Utilizing Combination of Online-QE and Offline-QE

井田 吉人^{*1} 中田 行俊^{*2} 高橋 克典^{*3}
Yoshito Ida Yukiotoshi Nakata Katsunori Takahashi

要 約

製造ラインのライフサイクル全体における高品質と高生産性を両立させつつ、それらの安定性を継続・向上できるロバストな生産システムへの進化が求められている。

今回、品質工学（QE）として初めての「ライン構想設計，稼働検証領域への適用」を試みた。ライン構想段階において、製造ラインのライフサイクル全体における品質と生産性のバランスを“損失L，SN比，感度”で総合的に同時評価する評価法を考案し、モデルライン適用によりその有効性を実証した。更に設計者自身の多様なライン構想案に追従しながら、この評価法を正確かつ迅速に業務適用できる標準シミュレーションシステムとして開発・導入した。これらを活用した評価の結果、初期条件に対し出来高+8%，SN比の利得3.1db（再現性有），損失▲56%のライン仕様を決定し2007年から量産を開始した。また「SN比向上により損失は低減し，損失低減により生産性は向上する。つまり品質向上でコスト低減できる」ことを改めて実証した。

具体的には、まず製造4Mの状況変化と損失関数構成要素の変動（工程管理，設備点検保全，刃物交換等の工場運営方法）の関連を明確にした。次に品質・生産性レベルの変化に伴い必要となる追加投資や管理コストをオンラインQEで定量化・最適化した上で時間データへ変換し，設備・搬送機・作業者の動きとして稼働シミュレータ上に再現した。ライン構想案ごとに、ラインのライフサイクルを想定した外乱（混流比率，設備劣化，刃物摩耗，作業バラツキ等）を与え，オフラインQE（パラメータ設計）による最適案を導出した。

Summary

An evolved robust production system is required, which concurrently achieves high quality and productivity in the life cycle of the production line, and improves its stability.

We tried the first application as Quality Engineering for “Conceptual production line design and Operational verification”. At the conceptual production line design stage, we developed an evaluation method that concurrently and comprehensively assesses the balance between quality and productivity in the life cycle of the production line with “Total Loss (Loss function)”, “S/N ratio”, and “Sensitivity”. The effectivity of the method was proved by the application of it to a model line. In addition, following to the various production line planning ideas of designers, we developed this method into a standard simulation system which is accurately and quickly applicable to work.

According to the evaluation results, we decided the line specs that achieved “8% Up of the production count”, “3.1db gain of S/N-ratio (repeatable)”, and “56% cut of the total loss” from the initial conditions, reaffirming “Increase in S/N ratio reduces Total Loss, which improves productivity. That is, quality improvement leads to cost reduction.”

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

1. はじめに

先の見えない経済状況や顧客ニーズの激変の中でも、高品質と高生産性を両立させつつそれらの安定性を継続・向上できるロバストな生産システムへの進化が求められている。今回、品質工学（以下QE：Quality Engineering）として初めての「ライン構想設計、稼働検証領域への適用」を試み、オンライン品質工学（以下On-QE）の指標である「損失L」とオフライン品質工学（パラメータ設計）の指標である「SN比」「感度」で、製造ラインのライフサイクル全体における品質と生産性のバランスを総合的に同時評価する評価法を考案し、モデルライン適用によりその有効性を実証した。更に設計者自身の多様なライン構想案に追従しながら、この評価法を正確かつ迅速に適用できる標準シミュレーションシステムとして開発・導入した。本稿ではこの取り組み内容・成果および今後の課題を報告する。

2. 従来の問題点と課題

ライン構想設計は、狙いとするQCD（Quality, Cost, Delivery）を満足するよう製造ラインの仕様を決定する業務である。具体的にはラインレイアウト、工程編成、設備や搬送の形態・仕様、作業配置等の最適組合せの検討業務であり、決定後の変更には大きな追加投資・期間を要するだけでなく、その後の量産準備業務と製造ラインのQCDに直結し経営に多大なインパクトを与える。それゆえにここでの評価の充実度・信頼性が重要となるが、設備多機能化等に伴う選択肢の拡大により設計者の検討自由度が増大する中、超短期でそれを行う必要がある。こうした状況の中で従来のライン構想設計は、ライン量産準備部門としての責任を果すという意味合いから、投資の前提生産能力を確実に発揮するという機能に主眼を置き、立上がり時点での不良率、稼働率、機種比率等が最もリスクを含んだ状態でも目標最低基準台数を保証するという構想、すなわちこの状態でも最大のパフォーマンスを備えるよう設計するのが一般的であった。従って、その後の不良率、稼働率の進化や機種比率の変化等に対し、ラインのライフサイクルを通じた最適効率からは隔たりを生じる傾向にあった。そこで、筆者らは工程管理等にOn-QEの考え方を生産ライン・生産技術業務の評価に適用して品質とコストの両立を図り、工程管理方式（検査場所・周期・検査具種類等）、検査設計（検査の必要性、検査方法の妥当性、工場許容差の妥当性）を評価・最適化することで損失評価の有効性を実証し、「QEにおける品質（＝損失）」の意味を明らかにした。つまり、「目標値からのずれを小さくし損失低減することは、工程内不良も激減させる」ことを実証し、生産技術上の課題として「損失低減は、既存ラインへの適用だけでは設備制約等により実現に限界があり、新ライン構想段階からの適用こそが有効かつ重要」であることを明らか

かにした^{1) 2)}。以上を踏まえ、「ラインのライフサイクル全体を通じたQCDを総合的かつ論理的に評価・最適化できる指標・評価法を核とするライン構想設計技術の開発」を課題とした。

従来、設計者はライン構想初期にその構成要素（設備、刃物、金型、材料等）ごとの「工法・機構・メーカ・型番・使用条件等」を、予算枠・工場要求・部分的実験・経験則等を通じて仮決定し、それを前提とした台数・工程編成・工場運営方式の組合せについて稼働検証とOn-QE最適化を独立して実施するのが現実的であり、損失評価という定量的な視点は取り込めておらずラインの骨格はOn-QE思想からずれたものになっていた。そこで今回、長期的な品質・生産性の実力とそれに伴い必要となる追加投資や条件維持のための管理コストを、構想段階からOn-QE評価で定量化・最適化することが必要であると考えた。これを踏まえ、上記を含めたライン構想案ごとにラインのライフサイクルを想定した外乱を与え、製造4M（Man, Machine, Material, Method）の状態変化とそれに伴う損失関数要素の変動の関連を明確にした上でパラメータ設計に組み込むことで、生産性と品質の安定性をSN比・感度・損失で評価することを考えた。その実現のためには次の技術課題を解決する必要がある。

課題1： 目指すべき生産システムの理想状態の定義

課題2： 「ライン設計で評価・決定すべき仕様項目」「製造4Mの状態変化」「損失関数」の関連の明確化

課題3： 単位が異なる課題2の項目の変化を論理的に結びつける「データ変換ロジック」を組み込み、SN比・感度・損失を指標とする評価を可能にする「QCD総合評価法」の提案と有効性実証

3. 新評価法・指標の提案

まず課題1に対し、設備・搬送・作業者等の複雑な組合せである製造ラインを“1つのシステム”と捉え、理想とする生産システムの働きをFig.1に定義した。信号とした負荷時間に対して、特性値である出来高（仕事）が比例関係にあることを理想とした。

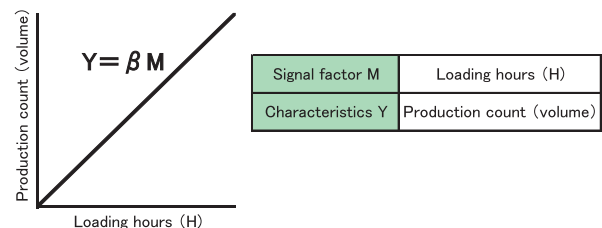


Fig.1 Ideal Function of Production System

次に課題2に対し、ライン構想設計段階で評価すべき「生産技術要素」を展開し、「損失関数構成要素」および「製造ライン4Mの状態変化（TPM-12大ロス）」との関連を整理した（Table 1）。ライン設計の悪さとして現れるこ

Table 1 Relation among Elements of Production Engineering, 12 Major Losses, and Elements of Loss Function

		Elements of Production Engineering																						
		Process design			Facility and Transfer design				Jig, Hand tool, Cutting tool design		Inspection design				Education									
		Cycle time setting (Line)	Capital investment and Production capacity decision	Product process and layout decision	Types of Equipment and Transfer decision	Cycle time setting (Facility)	Specification and Volume decision	Usage condition setting	Adjustment procedure and criteria (limit) setting	Adjustment interval setting	Maintenance procedure and criteria setting	Specification and Volume decision	Usage condition setting	Changing procedure and criteria setting	Changing interval setting	Inspection characteristics decision (Need for Inspection Estimation)	Inline-Tolerance setting (Validity Estimation)	Inspection area and Layout setting	Specification and Volume of Inspection tools decision	Inspection procedure setting	Inspection interval and time setting	Inspection tool's Calibration interval and time setting	Operator training (Inspection, Calibration, Adjustment, Maintenance)	
12 Major Losses that can impede Equipment and Worker efficiency	Equipment Breakdown Losses																							
	Set-up and Adjustment Losses																							
	Cutting tool Change Losses																							
	Start-up Losses																							
	Choko-tei minor stoppage & Idling Losses																							
	Speed Losses																							
	Defect and Rework Losses																							
	Management Losses																							
	Motion Losses																							
	Line Balancing losses																							
Material Handling Losses																								
Monitoring and Adjustment Losses																								
Elements of Loss function	Δ Current tolerance																							
	A Loss on producer side																							
	B Measurement cost																							
	C Adjustment cost																							
	n_0 Current Measurement interval																							
	u_0 Current adjustment interval																							
	D_0 Current adjustment limit																							
	l Time lag																							
	σ_m Error variance of measurement																							

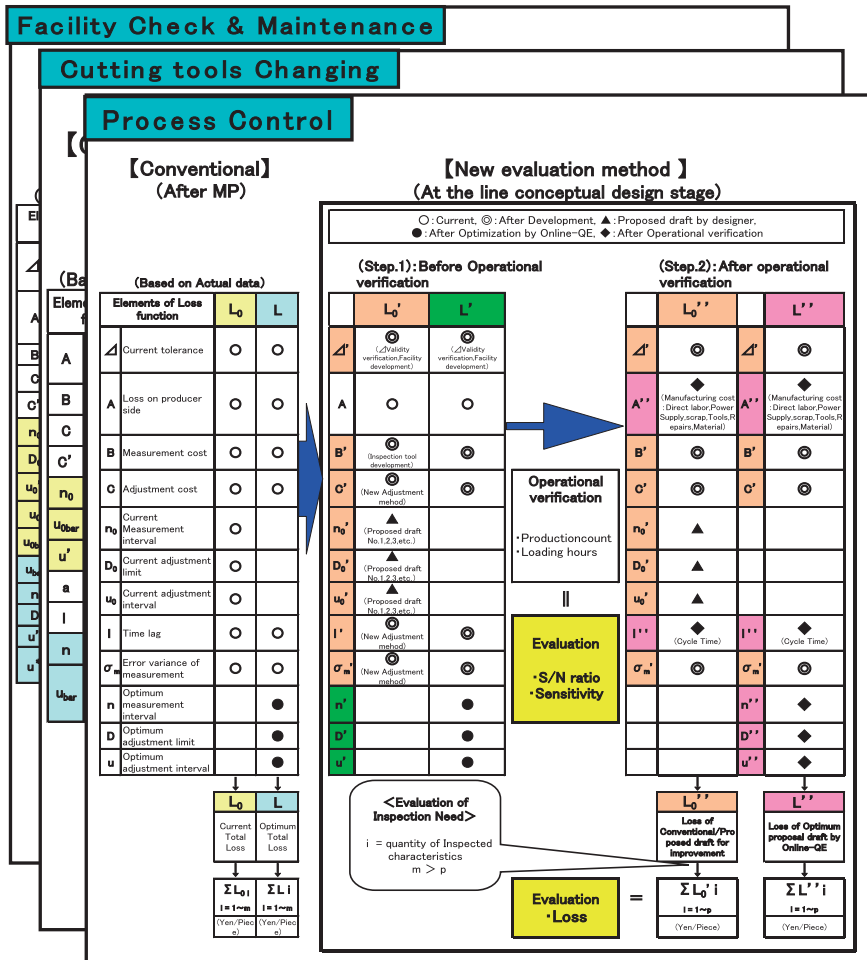


Fig.2 QCD-Total Evaluation Method (Process Control, Tool Change, Machine Maintenance)

これらのロスが発生させないライン仕様の決定が必要であり、ライン構想案(従来レベル/設計者の改善案/On-QE最適化案)を損失評価すると同時に、各案の基本機能に対するロバスト性をSN比・感度で評価することにした。

以上を踏まえ、課題3に対する「①QCD総合評価法」、「②時間データへの変換ロジック」を提案する。

① QCD総合評価法：従来は、品質実績に基づく最適条件 (Fig.2左表●) を算出し最適検査周期等を提案・導入してきた。

新評価法では、まずStep.1として、導入予定の設備の技術開発等の成果 (Fig.2中央表◎) を含む構想案を全てパラメータに織り込み、損失関数で検査・刃物交換・設備保全等の工場運営方式を最適化する³⁾。次にStep.2として、実績データからラインのライフサイクルにおける外乱と製造4Mの変化を誤差・制御因子とした「稼働検証」を全構想案で実施し、算出する出来高と時間データからSN比・感度評価することで、Fig.1の理想状態に対しロバストな

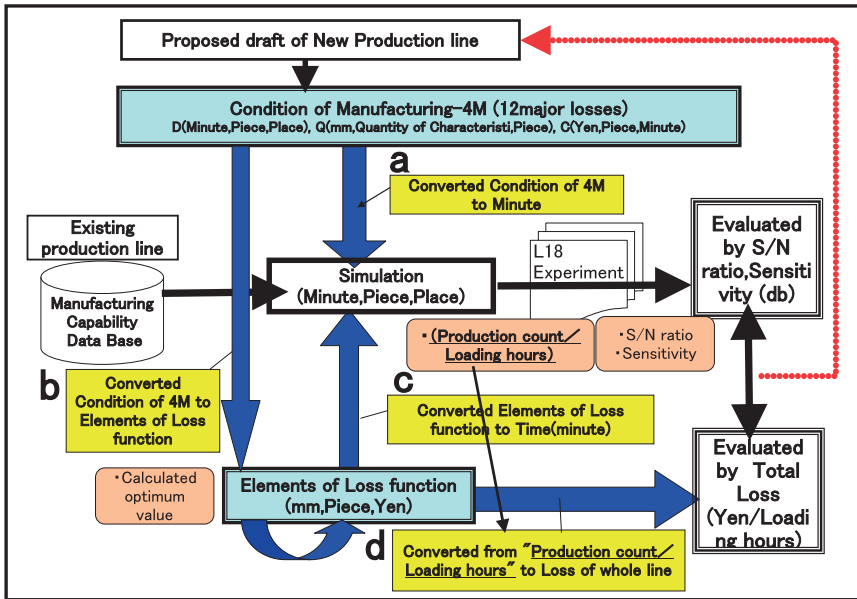


Fig.3 Flow of Data Conversion to Time (Minute)

に対する時間（動／止）と場所”のデータに変換した。

4. 新評価法の適用・実証

4.1 ライン設計に対するL18実験計画

ライン構想中の新設シリンダブロック機械加工ラインをモデルラインとし、新評価法の有効性を検証した。このラインはマシニングセンタの並列配置ラインであり、その特徴から設計者の検討自由度が大きいという理由から選定した。この時点でマシンメカ・型番等の検討は予備実験から完了しており、今回は既に決定したマシン・搬送機の機構・台数・能力を前提としたライン構想中盤への適用とした。まず誤差因子について、想定さ

Table 2 Logic of Conversion from Loss Function Elements to Time (Minute) < Logic - c >

[Per Quarity characteristic]		Conversion logic to Time(Minute).			
Elements of Loss function	Current total loss L_0 (Yen/Characteristic)	Δ	Current tolerance	mm	(Calculated through n_0, u_0, D_0)
		A	Loss on producer side	Yen per piece	(Calculated through n_0, u_0, D_0) *Reflected shortening of CT, Operation time.
		B	Measurement cost	Yen per time	$(B * (X/n_0)) / \text{Labor wage rate}$
		C	Adjustment cost	Yen per time	$(C * (X/u_0)) / \text{Labor wage rate}$
		n_0	Current Measurement interval	piece	$CT * n_0$
		u_0	Current adjustment interval	piece	$CT * u_0$
		D_0	Current adjustment limit	mm	(Calculated through u_0)
		l	Time lag	piece	Measurement time for all characteristics we measure at a time
		σ_m	Error variance of measurement	mm ²	(Calculated through u_0, D_0)
		Optimum total loss L (Yen/characteristic)	n	Optimum measurement interval	piece
D	Optimum adjustment limit		mm	(Calculated through u)	
u	Optimum adjustment interval		piece	$CT * u$	

※ CT=Cycle time (mitute per piece), X=Production count of targeted time zone.

ライン仕様案を決定する。更にこれらの出来高と時間データに関連して増減する損失関数要素 (Fig.2右表▲) について再度最適化を行う (Fig.2右表◆)。以上から導出される L_0 ” (従来/設計者の改善案の損失) と L ” (On-QE再最適時の損失) に対し、ライフサイクルにおける総生産台数を乗じて長期的損失を算出する。

以上の考え方で工程管理、刃物交換、設備点検・保全について個別に実施し、それらの損失を総和することでライン全体の損失を算出する^{3) 4)}。この評価法では誤差の与え方が鍵であり最も重要となる。

- ② 時間データへの変換ロジック：①の評価法を組込む「稼働検証」実現のための時間データへの変換ロジックを提案する (Fig.3)。「12大ロス」と「損失関数要素」には、製造4Mの状態の数値化や単位変換 (mm, 円, 個→時間) が必要なものが多く、Fig.3のa~dのロジック導出が必要であり、実績データの解析から各要素間の関連を定義した上で導出した。例としてFig.3のロジックcをTable 2に示す。これらにより、全要素を“設備と作業者

れる混流機種・比率、設備劣化、工程安定度、刃物摩耗等に関する変動を、実績データに基づき最大限に振り調べした (Table 3)。また制御因子は、投資や工数を左右するバッファ数・場所、工場運営方式を設定し、「従来/設計者の改善案/On-QE最適化案」を基本に水準を与えた (Table 4)。特にH因子は、生産性・品質の安定性により管理コストが変動する検査・刃物交換・保全等の作業方式とし、類似ラインの実力データ (寸法、刃物寿命・折損、設備故障等) と従来の管理方式での損失関数要素 (B, C, D_0, n_0, u_0, l) から解析し、H3 (On-QE最適化案) として与えた (Fig.2, D', n', u')。

4.2 ライン設計に対するL18実験結果

実験結果をFig.4, Table 5に示す。確認実験でのSN比の利得は3.1dbとなり再現性を確認した。これにより、Fig.1の関係は、生産システムを評価する基本機能として有効であるといえる。要因効果図から、C, D因子が出来高の安定性に大きく影響していることがわかった。C因子 (初工程パレット比率) については、総パレット数が最少

Table 3 Noise Factors

		Machine deterioration on (aging)	Process stability (Variation of Dimension)	Tool wear (Tool life)	Variation of Operation (Experienced/Young, Physical condition)	Ratio of Mixed models
N1	Those Levels reduce output	Break down:L	Variation:L Defective:L	Life:S	Variation of Operation time:L	A model=50% B model=50%
N2	Those Levels enlarge output	Break down:S	Variation:S Defective:S	Life:L	Variation of Operation time:S	A model=33% B model=67%

Table 4 Control Factor

		Level.1	Level.2	Level.3	
A	sequence control (With or without Dedicated model)	Without	With	-	
B	Allocation of Operators	Overlapped operation: Without (Type.1: Quantity of Machines)	Overlapped operation: Without (Type.2: Quantity of Work)	Overlapped operation: With (Free)	
C	Variable mixed model ratio of No.1 Jig-pallet	A:B=L:S	A:B=M:M	A:B=S:L	
D	Variable mixed model ratio of No.2 Jig-pallet	A:B=L:S	A:B=M:M	A:B=S:L	
E	Variable mixed model ratio of No.3 Jig-pallet	A:B=L:S	A:B=M:M	A:B=S:L	
F	Variable mixed model ratio of No.4 Jig-pallet	A:B=L:S	A:B=M:M	A:B=S:L	
G	Buffer storage quantity (Before each Zone) (Multi-layer strage) (After finished product)	S S S	M M M	L L L	
H	Method of production line management	Interval and time of Sampling inspection	Interval: S,Uniformity (Conventional)	Interval: L,Uniformity (Based on Actual quality data)	Interval: optimize,Each characteristic (Based on Online-QE)
		Interval and time of Tool Change	Interval: Set at MP start,Constant (Conventional)	Interval: Re-examining,Constant (Based on Actual changing data)	Interval: optimize,Each cutting-tool (Based on Online-QE)
		Interval and time of Machin mentence	Interval: Set at MP start,Constant (Conventional)	Interval: Re-examining,Constant (Based on Actual break down data)	Interval: optimize,Each machine (Based on Online-QE)

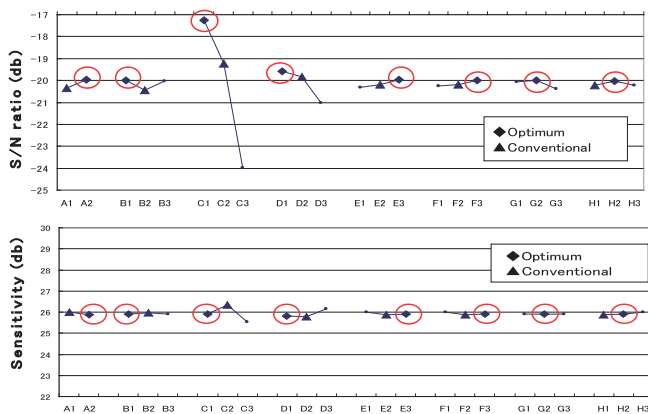


Fig.4 Response Graph

Table 5 Result of Confirmation Run

		Conventional condition	Optimum condition	Gain
S/N ratio (db)	Estimation	-19.39	-15.70	3.69
	Confirmation	-18.90	-15.82	3.09
Sensitivity S (db)	Estimation	26.13	25.63	-0.50
	Confirmation	26.11	26.05	-0.05

の工程であり水準間のパレット数の差が大きいため妥当と判断でき、C3の影響の大きさも予想通りであった。またD因子(2工程パレット比率)が初工程のパラツキを吸収していることが、後工程であるE, F因子のSN比が水準間で差がないことから判断できた。

更にH因子のSN比は、H2(設計者改善案) > H3(On-QE最適化案) > H1(従来)となり、H2を最適条件とした(損失▲56%, Fig.5)。H3のSN比はH2と差がなく損失低減も大きいため、量産前の品質確認により採否を決定することにした。現在はH3の「特性ごとの最適周期」を数パ

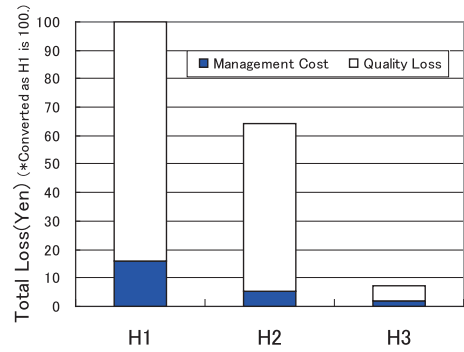


Fig.5 Reduction of Loss Function (H-Factor)

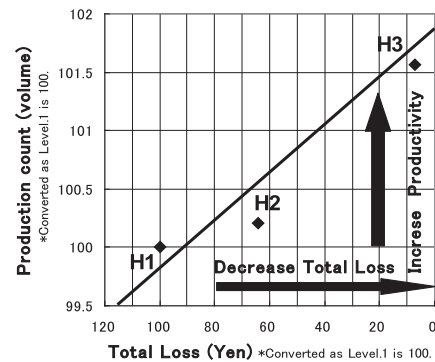


Fig.6 Total Loss vs. Production Count

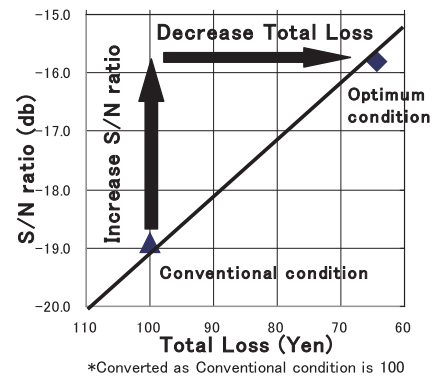


Fig.7 Total Loss vs. S/N Ratio

ターンにまとめて運営中である(損失▲74%)。

これらに基づき基本仕様を決定後、制御因子・水準を変更したL18実験を2回繰り返し最終仕様を決定して2007年から量産開始した。

ここでQCD総合評価結果について考察する。H因子の損失低減額の算出方法については、今回、ラインのライフサイクルを8年と想定し、実績以上の設備劣化や環境変化を誤差として与えた。稼働検証の結果から生産性向上(出来高/時間)分を不良損失Aやタイムラグ等に反映し、検査・刃物交換・設備点検・保全の周期等を再最適化してその損失に8年間の累計出来高を乗じた。この結果から、生産性向上によるわずかなAの減少が、長期間にわたる大きな損失低減に繋がることがわかった。更にこれらのデータから「出来高と損失の関係」を解析した結果、「SN比向上は損失低減に繋がり、損失低減は生産性向上に繋がる。品

質向上でコスト低減できる」ことを改めて実証した (Fig.6, 7)。また、長期的な視点での生産性と品質 (損失) について、誤差N1, N2による影響度の差をマネジメントに与えるこの評価法を拡充すれば、企業資源 (人・モノ・金) の投入先決定の有効な指標に成り得ると考える。以上により、本評価法の有効性を実証できた。

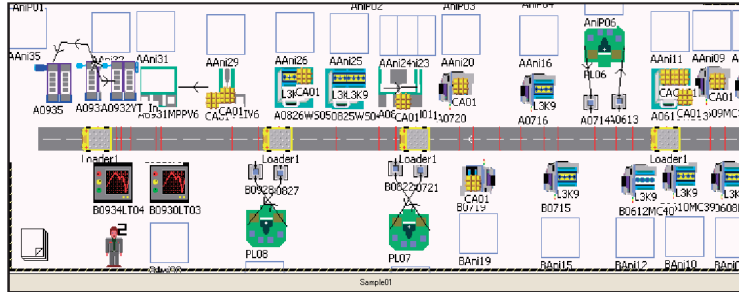


Fig.8 Standard Simulation System (Operational Verification)

Table 6 Functionality Evaluation (Noise Function)

【A: Before Modification】		A. Before modification			Season	Work-shifts	Ratio of Mixed models
		Machine deterioration (aging)	Process stability (Variation of Dimension)	Tool wear (Tool life)			
N1	Those Levels reduce output	Break down: L	Variation: L Defective: L	Life: S	Summer	Continuous operation	A: B=M: M
N2	Those Levels enlarge output	Break down: M	Variation: M Defective: M	Life: M	Spring	Day shift	A: B=M: M

【B: After Modification】		B. After modification (2 years later)			Season	Work-shifts	Ratio of Mixed models
		Machine deterioration (aging)	Process stability (Variation of Dimension)	Tool wear (Tool life)			
N1	Those Levels reduce output	Break down: M	Variation: M Defective: M	Life: M	Winter	Continuous operation	C: B=S: L
N2	Those Levels enlarge output	Break down: S	Variation: S Defective: S	Life: L	Spring	Continuous operation	C: B=L: S

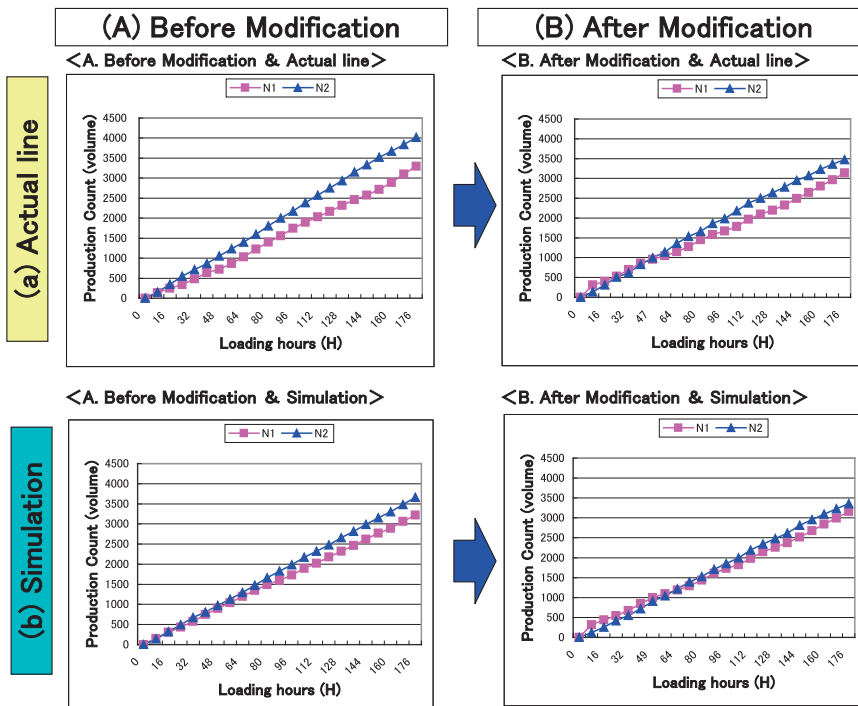


Fig.9 Result of Functionality Evaluation

5. 新シミュレーションシステムの開発

5.1 設計者自身での評価実現のための機能開発

以上のモデルラインでの活動結果に基づき、設計者が新評価法を正確かつ迅速に実践できるようにするため、モデリング・パラメータ設定・検証までの手順を全部品共通と

なるよう標準化した上で、以下の機能を開発した。これにより、検証工数▲75% (モデリング▲65%, 設定&検証▲85%) を達成し、標準シミュレーションシステムとして業務適用した (Fig.8)。

- ・標準モジュールモデル: モデリング (工数大, 手順のバラツキ大) を標準化。設備・作業者ごとに独立した標準モジュールとして開発。これらを組合せるだけでモデリングの大半を完了。
- ・標準パラメータ設定テーブル: 設定作業 (プログラム修正工数大) を標準化。プログラム修正を排除。設備・作業者ごとのテーブル入力だけで対応。
- ・自動水準変更&2実験同時検証機能: 全実験の因子・水準を「実験計画テーブル」へ事前設定しておけば、全実験を自動的に水準変更しながら実行。

5.2 機能性評価 (実験計画と評価結果)

前章のL18実験前に、本シミュレーションが実ラインの働きを再現できるかを確認するため、“市場”を実ライン値(a), “製品”をシミュレーション値(b)と捉え、機能性を評価した。量産後に設備改造したラインを選び、改造前(A), 改造後(B)の1ヶ月分のデータを稼働モニタリングから収集した。データの差から、混流機種・比率、設備劣化、作業バラツキ (勤務シフト, 季節変動, 習熟等) 等を抽出し、前述の変換ロジックで時間データに変換後、調合して誤差因子 (Table 6) として与えシミュレートした (A-b, B-b)。この結果データ (出来高/時間) から算出したSN比・感度と、稼働モニ

Table 7 Result of Functionality Evaluation

	S/N ratio		Sensitivity S (db)	
	a. Actual	b. Simulation	a. Actual	b. Simulation
A. Before modification	-22.3	-16.7	26.2	25.8
B. After modification	-18.7	-14.3	25.6	25.4
Gain	3.6	2.4	-0.6	-0.4

タリングデータから直接算出したSN比・感度 (A-a, B-a) を比較評価した。その結果, SN比の利得は再現し, 本シミュレーションは実ラインの働きを再現した (Fig.9, Table 7)。

6. まとめ

6.1 開発技術と従来技術との違い

今回開発したQCD総合評価技術と従来の稼働検証技術との根本的な違いは構想 (前提条件) である。

従来は, 不良, 稼働阻害等のリスクを考慮した上で最低出来高 (生産能力) を確実に保証するという構想や, あるべき不良率, 稼働率等のQCD目標達成時の出来高を予測するという構想でのある一場面での評価が一般的であった。一方, 今回は, 生産ラインのライフサイクルを通じた実際の設備劣化やそれに伴う製品のQCDの経時変化やバラツキに対し必要となる更なる対策案 (不良改善, 工場運営方法改善, 自動化等の合理化対策等) を製造4Mの状態変化に置き換え, 基本機能のロバスト性に対する寄与度を, SN比 (バラツキ), 感度 (傾き), 損失 (バラツキが及ぼす市場/後工程への影響コスト) の3指標で捉え, 総合的にバランス評価した最適ライン仕様を量産準備初期段階で導出するという時間軸の広がりに対し有効な構想である。本技術により, 従来, 断片的な判断をせざるを得なかったライン設計者の膨大なアイデアに対する評価を, 長期的かつ網羅的に設計者自身がPDCAサイクルを回しながら自由に実践できるようにした。

6.2 効果と成果

初期条件に対し, 出来高+8%, SN比の利得3.1db (再現性有), 損失▲56%のライン仕様を早期決定し量産化した。これは, 長期的な生産性・品質の安定性とそれに伴い必要となる追加投資や条件維持のための管理コストを, SN比・感度・損失で総合評価し導出した最適なライン仕様といえる。

これにより今回の提案が, ラインのライフサイクルを通じたQCDの総合評価技術として有効であることを実証した。また「SN比向上により損失は低減し, 損失低減により生産性は向上する (品質向上でコスト低減できる)」ことを実証した。

6.3 今後の課題

今回の取り組みは, Table 1に示した生産技術業務 (工程設計, 設備設計, 搬送設計, 治工具・検査設計, 工場運営決定等) での各決定要素 (設備・搬送機のサイクルタイム, 設備段替時間・方法, 検査・刃物交換・保全の周期・

方法, オペレータ配置等) の最適な組合せを, 長期的な生産性・品質の安定性を考慮して検討することの有効性と重要性を示した。

今後, マツダのモノ造り革新へ繋げていくため, 実効を刈取りながら本技術を駆使した事例を積み重ね, 「工法・機構・メーカー・型番・使用条件等」の評価・決定へ本格適用するとともに, 部品/ライン/工法ごとに基本機能に対して寄与度の高い生産技術要素と最適水準を見極め反映する評価を「標準業務プロセス」に織り込んでいくことが課題である。更に, 真に顧客が要求する製品機能の向上に直結する新技術, 設備仕様, 工場管理方法等を明確にした上で, 設備投資, 工数等のリソースを最適投入する提案をマネジメントに与えられる技術への進化を追究してゆく。

参考文献

- (1) 井田吉人, 安達範久: 機械加工ラインにおけるオンライン品質工学の展開とサイクルタイム短縮, 品質工学, Vol.10, No.6, p.97-104 (2002)
- (2) 井田吉人, 鳥居元: 損失関数による生産技術業務の評価と考察, 品質工学, Vol.12, No.6, p.59-65 (2004)
- (3) 田口玄一ほか: 品質工学講座2-製造段階の品質工学-1, 日本規格協会 (1989)
- (4) 田口玄一ほか: 品質工学便覧, 品質工学会 (2007)

* 品質工学会誌に投稿中

(Journal of Quality Engineering Society / in press)

■ 著 者 ■



井田吉人



中田行俊



高橋克典

論文・解説

14

設備特性を考慮した絞り金型構造設計プロセスの構築 Establishing of the Die Design Process to Optimize the Characteristic of the Production Facilities (Drawing Die)

大 中 雅 博^{*1} 三 笹 護^{*2}
Masahiro Ohnaka Mamoru Misasa

要 約

プレス量産の安定化の取り組みにおいて、絞り型のシワ押さえ機構に荷重を伝達する各クッションピンの当たり面が部分的に凹凸になっている現象に着目し、各クッションピンの荷重分布が不均一になる現象をCAE構造解析手法により解析した。この原因の一端が、各プレス機械構造とクッションピンの配置によるものであることが判明した。プレスの生産安定性の向上のため、これを検証するCAE構造解析ツールの開発と金型構造設計へのインライン化したプロセスについて報告する。

Summary

In a activity to pursue the efficient production, the uneven force on each cushion pins is analyzed by the structural CAE method with the view of pointing the dents on them which transfer the force to the blank holder for binding in the drawing die. The layout of the cushion pins and the characteristic of the facilities are discovered as one of the causes. This report introduces the development of the structural analysis tool to evaluate and the die design process which has analyzing the structure in the process to improve production efficiency.

1. はじめに

近年、世界景気、為替の激しい変動により、海外での現地生産化が進み、多拠点生産化している。このような環境の中で、短期間での海外現地量産化、安定生産による品質維持は経営の中で更に重要性を増している。

こうした中、プレス領域では成形シミュレーションというCAE解析手法を進化させ、金型製作から量産までの金型育成期間短縮に大きく寄与してきた。

また、金型構造設計領域では、設計形態の3次元化により、構造部品同士の干渉確認等の幾何学的検証を進化させ、効果を生み出してきた。例えば、プレス工程間パネル搬送の要具と金型との干渉、金型製作加工具と金型との干渉等、これらを設計段階で3次元検証することにより、金型製作、金型製作後のトライアルにて発生していた問題事象を劇的に減少させてきた。

また、金型製作工程においても、自動切削プログラムの

作成が可能となり、金型自動切削も果たし、製作費の削減、製作時間の短縮に寄与してきた。

このように、設計段階での幾何学的な検証や取り組みによって、量産開始までの問題事象に対しては劇的な効果を生み出してきたが、一方で、プレス量産における生産トラブルでのライン停止、量産でのパネル品質劣化、金型破損、設備劣化の頻度等の減少速度は緩やかなままであり、機能面での品質保証問題へ取り組みをシフトせねばならない。

そこで本報では、安定生産の実現に向けて、CAE構造解析を用いた絞り型の生産機能問題の事前検証をインライン化し、設備特性を考慮した絞り型の金型構造設計を可能にしたプロセスについて報告する。

*1, 2 車体技術部
Body Production Engineering Dept.

2. 絞り型の問題事象

2.1 絞り型の量産での現状

プレス領域では、安定した生産の維持のために、定期的な設備、金型の保全、及び部品の品質検査を行い、変化の予兆があれば、設備や金型の必要な補修を実施し、品質を維持している。品質維持活動の中で、最も重要度が高いものが、絞り成形工程の保全である。絞り成形は、車の品質に大きく影響するワレ、シワの不具合が発生する工程であり、かつ、保全の難易度の高い領域が存在する工程である。絞り成形の難成形領域は、鋼板材料の伸び縮みの微妙なバランスにより成立しており、品質の維持のため保全頻度が多く、また、調整にも工数をかけているのが現状である。

これまでは、量産工場で発生するこれらの問題事象を、現場の経験的な対処法により回避していた。また、その発生メカニズムが明確でなく、設計時の事前検証による金型構造の恒久的な対策方法が確立できていなかった。そこで、絞り型の各構造が要求される機能を果たしているのか、現物と構造解析により検証しメカニズムを明確にする。それにより構造解析をインライン化し、金型構造設計に織り込むことができるプロセスに変えることにより、問題事象の事前検証方法を確立し生産安定性の向上につなげる取り組みを実施している。

2.2 絞り型構造とプレス設備構造の構成

絞り型の取り組み内容を説明するにあたり、一般的な絞り型構造、プレス設備構造及び絞り成形の構成について説明する。シワ押さえ機構のブランクホルダ上に鋼板材料を配置し (Fig.1-a)、ブランクホルダと上型により、鋼板材料をプレス設備のクッションパッドの荷重により固定、拘束する (Fig.1-b)。次に、鋼板材料を上型とブランクホルダで固定したまま上型が下降し、鋼板材料を下型の形状に塑性成形する (Fig.1-c)。その際、シワ押さえの荷重とブランクホルダ上面のビード形状 (凹凸形状) により、鋼板材料の拘束力を調整し、鋼板材料の伸び縮みをコントロールすることで、ワレ、シワがないようにプレス板金部品の品質を調整する。

シワ押さえ機構を担うブランクホルダには、成形条件に応じた必要なシワ押さえ力をプレス設備から伝達するためのクッションピン当たり面を設置する。クッションピン当たり面は、製品形状や設備構造、金型構造などから数と位置を決定している。

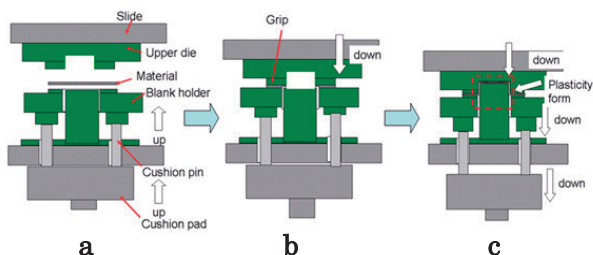


Fig.1 Description of Drawing Die Structure

2.3 絞り型の問題事象

絞り成形において、絞り成形部品の品質を調整している最も重要な構造がシワ押さえ機構である。シワ押さえ機構は鋼板材料の流入量、伸び縮みのバランスを制御し、所定の張力を鋼板材料に与える役割を持っている。そこで、シワ押さえ機構に着目し、機能検証することにした。

プレス生産の定期的な金型の検査において、プレス設備からシワ押さえ機構へ荷重を伝達しているクッションピンの当たり面へ凹凸が部分的に発生しているケースを目にする (Fig.2)。これは、各クッションピンの1本ずつが同等にブランクホルダに当たっておらず、それにより、各クッションピンの荷重分布が部分的に異なる状況になったということが考えられる。また、該当部の凸凹が生じたということは、設備を通してクッションピンによって伝達されるシワ押さえの荷重が変化していると推測される。

よって、プレス生産における絞り成形の品質に与える影響は大きいと考えられるので、この荷重の変化が生じる機構を解析して原因を特定し、対策することにした。

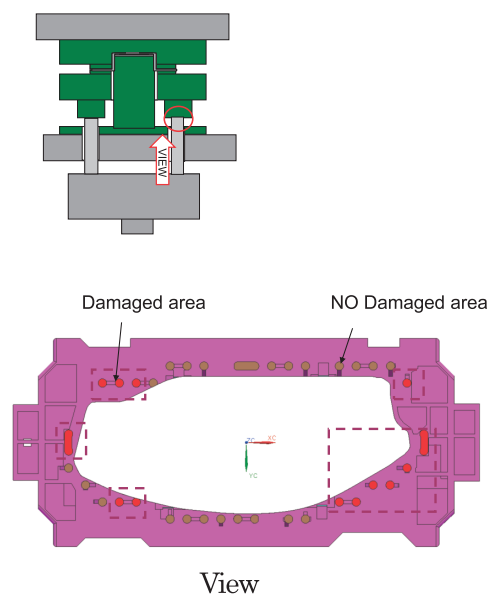


Fig.2 Damage Area of Cushion Pin Contact

3. クッションピン荷重分布の変化要因

各クッションピンの荷重分布が部分的に異なる事象を分析するにあたり、Fig.2の金型モデルにてCAE構造解析を実施した。

3.1 クッションピン荷重分布が変化する要因の仮説

各クッションピンが同等にブランクホルダに当たらない要因として、金型側とプレス設備側のクッションピンが直に接触する面の製作精度の悪さが考えられる。まず実機での製作精度を確認した。その結果、精度は基準内であり、測定値と金型凹凸の発生部位に因果関係がないことから、

成形時、金型とプレス設備にかかる荷重から発生する撓みによる精度変化に着目した。金型とプレス設備の3次元モデル (Fig.3) に生産条件と同条件の荷重をかけ、撓み量、寄与度をCAE構造解析によって、相対比較したものがFig.4である。検証の対象物は、クッションピンが直に接触する構造、プレス設備側がクッションパッド、金型側がブランクホルダである。これにより、金型側のブランクホルダよりプレス設備側のクッションパッドの撓み量が大幅に大きいことがわかった。

これらの結果により、各クッションピンの荷重分布が部分的に異なる要因は、プレス設備側の構造による寄与度が大きいと考えられる。そこで、設備側のクッションパッドのCAE構造解析により、各クッションピンにかかる荷重を計算することにした。

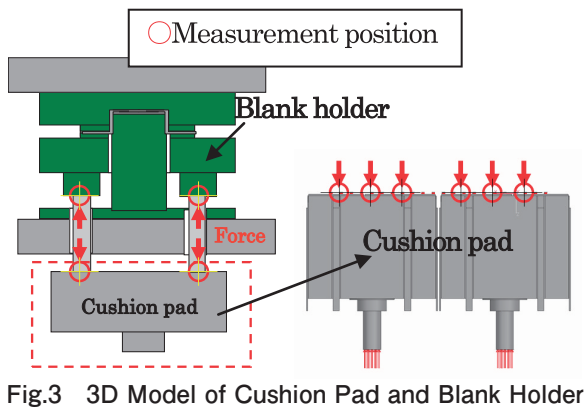


Fig.3 3D Model of Cushion Pad and Blank Holder

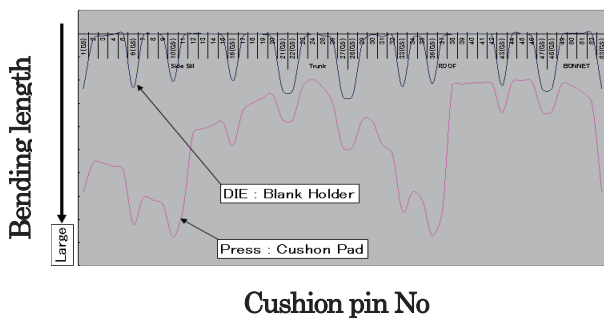


Fig.4 Comparison of Deflection between Cushion Pad and Blank Holder

3.2 プレス設備側クッションパッドの構造解析

Fig.3のプレス設備モデルに、Fig.2と同じクッションピンの配置にて、生産条件と同条件の荷重を付加した。これから、各クッションピンの荷重を、クッションパッドの撓み、クッションピンの配置バランス等から、CAE構造解析にて計算した。その計算荷重とブランクホルダのクッションピン当たり面凸凹を表記したのがFig.5である。クッションピンごとに荷重が異なり、荷重が高い部位の当たり面に凸凹が発生している傾向が見える。

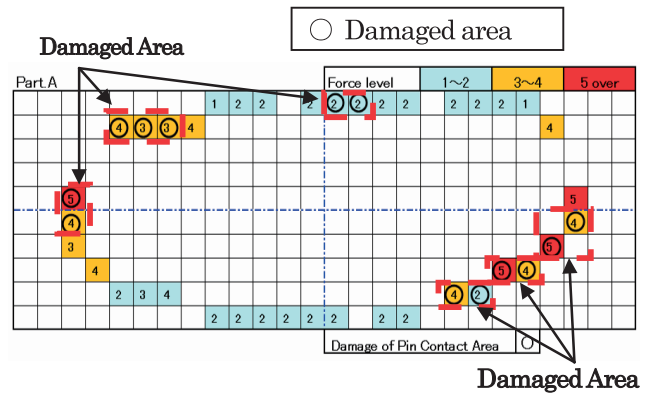


Fig.5 Analysis of Force Level

このCAE構造解析手法の確からしさを評価するため、Fig.2での金型凹凸の大きさとCAE構造解析で求めたクッションピン計算荷重との相関を検証した。この相関係数は、0.72、金型の凹凸現象と構造解析結果に相関関係があると評価でき、構造解析の荷重が増すごとに金型凹凸ダメージが大きくなる傾向がわかった。

以上により、クッションピンの荷重分布が部分的に異なる事象の要因の一つが、クッションピン配置とプレス設備のクッションパッド構造にあると考えられる。

3.3 クッションピン配置と荷重分布の相関

クッションピン配置と荷重分布の相関を検証するため、Fig.2のモデル型にて、クッションピンの配置を変更し、荷重の変化量を検証した。クッションピンの配置を変更した図がFig.6、変更前後の各荷重の変化量を比較したものがFig.7である。

このようにクッションピンの配置の変更により、各クッションピンの荷重のバラツキが縮小した。クッションピン配置の適正化は、荷重分布の均一化に有効であることがわかる。

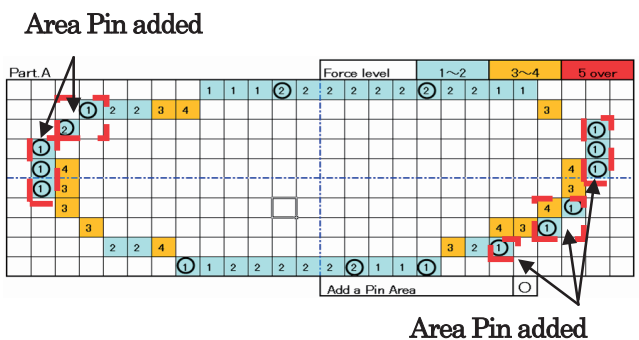


Fig.6 Pin Layout after Change

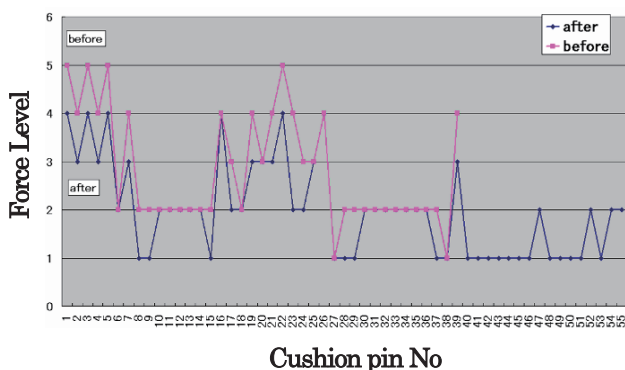
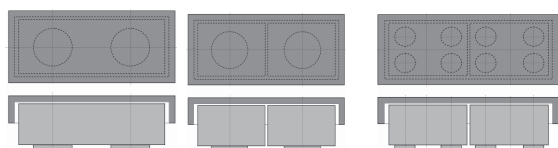


Fig.7 Comparison of Force before and after Pin Layout Change

3.4 各設備構造の種類と荷重分布の相関

各設備仕様により、クッションパッドの構造、圧力を与えている位置、数が異なる。これにより、クッションピンの荷重分布のバランスが変化する可能性があると考え、設備構造の違いによる各クッションピン荷重分布への影響度を、Fig.2をモデルに、CAE構造解析により検証した。

当社のプレス設備クッション機構には①1クッションパッド2シリンダ、②2クッションパッド2シリンダ、③2クッションパッド8シリンダなどがある (Fig.8)。同条件のクッション荷重とクッションピン配置でプレス設備仕様によって、各クッションピンの荷重分布への影響度の比較を検証した結果がFig.9である。この結果から、プレス設備仕様によりクッションピンの荷重分布が大きく変化することがわかる。



①1pad 2cylinder ②2pad 2cylinder ③2pad 8cylinder

Fig.8 Type of Cushion Pad Structure

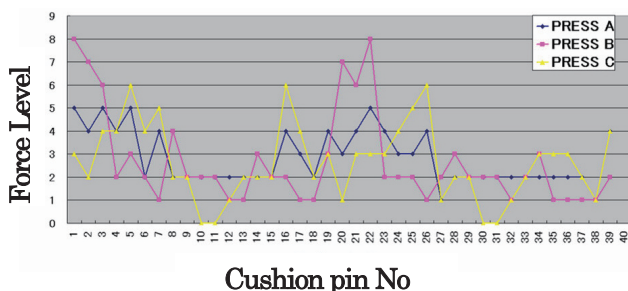


Fig.9 Comparison of Force Distribution by Type of Cushion Pad Structure

4. インライン解析型の金型設計プロセス構築

以上のことから、絞り工程の金型構造において安定した生産のために重要なことは、クッションパッド構造を考慮したクッションピン配置により、クッションピンへの荷重変化を抑制することである。そのため、金型設計におけるクッションピン荷重変化の検証においては、限られたスペース内で金型構造が成立するクッションピン位置、及び製作コストバランスを考慮した最適解を、繰り返し検証によって求める必要がある。一方、当社のプレス設備は、生産部品の特徴を考慮して仕様が多様化していることから、クッションパッド構造の相違により各生産ラインのクッションピン荷重分布が異なるため、複数ラインに適応した金型構造では、対象ラインのクッションパッドの相違も考慮する必要がある。よって、これらの検証対象の多さに対応できる構造解析の速度向上が重要と考えた。

しかし、構造解析のツールは存在しても、解析に多大な時間を要するだけでなく、解析には専門的な知識が必要なため、従来はオフラインでCAE検証するしかなかった。これにより、CAE構造解析に必要な複雑な操作、知識を必要としないクッションピン荷重分布検証ツールを開発し、誰もが活用できるものにして、構造解析を金型構造設計プロセスへインライン化した (Fig.10)。

以下に、開発した専用解析ツールについて述べる。

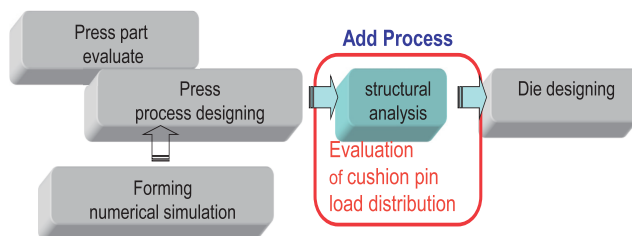


Fig.10 New Die Design Process

4.1 クッションピン荷重分布検証の短時間化

クッションピン荷重検証の短時間化のために、(1)解析オペレーションの簡素化、(2)計算時間の短縮を実施し、誰もが使用できる解析ツールを開発した。

4.1.1 解析オペレーションの簡素化

従来、Fig.11のような、構造解析に必要な、煩雑で複雑な専門的なオペレーションから、構造解析知識がなくても簡単に理解でき、少ないオペレーションによって結果が出力できるユーザインターフェイスにした。

4.1.2 計算時間の短縮

解析モデルを簡素にすることで、解析時間の短時間化は可能であるが、解析精度が変化する。そこで、解析精度の変化を実用的な10%以内を基準として、計算時間の短縮に取り組んだ。解析モデルのチューニングにより、計算時間95%短縮が可能となり、クッションピン荷重分布検証を金型構造設計プロセスへインライン化することができた。

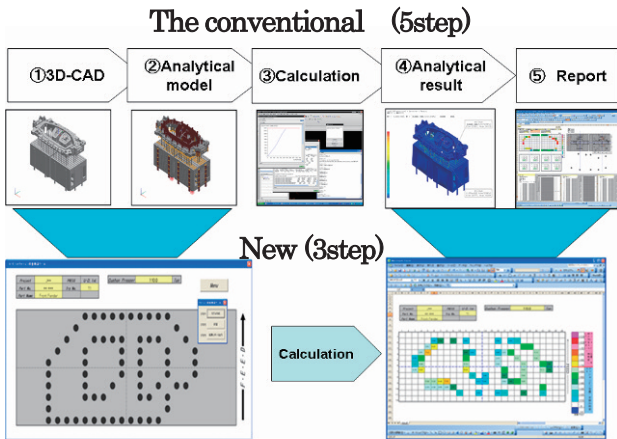


Fig.11 Analysis Process

5. 適用事例

以上の取り組みの適用事例を紹介する。適用した詳細な金型設計プロセスをFig.12に示す。クッションピン荷重検証を基に、クッションピンの配置を変更した金型構造にすることで、高荷重となる箇所が減少し均一化できた (Fig.13)。

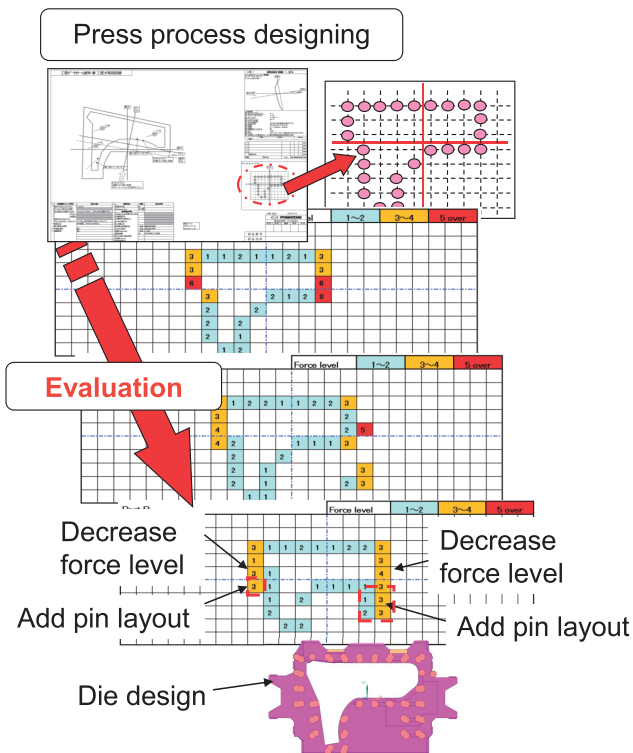


Fig.12 Example of the Case Applied in the New Design Process

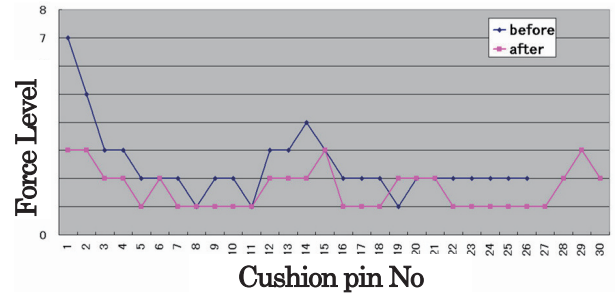


Fig.13 Force Comparison before and after Evaluation

6. おわりに

今回の取り組みにより、絞り型の安定生産を阻害する一因がわかり、クッションピン荷重検証をインライン化した金型設計プロセスが実現できた。今後は、その他の成形工程、金型機能と構造についても取り組みを展開し、安定生産へ寄与するとともに、量産準備段階での金型トライアル調整の期間短縮へもつなげていく。

■ 著 者 ■



大中雅博



三篁 護

論文・解説

15

歩行者保護の頭部傷害低減構造の開発 Development of Structure to Reduce Pedestrian Head Injury

西田 靖彦^{*1} 横山 暢彦^{*2} 上野 正樹^{*3}
Yasuhiko Nishida Nobuhiko Yokoyama Masaki Ueno
尾川 茂^{*4}
Shigeru Ogawa

要約

市場事故での死者数低減の観点から、歩行者死者数の低減は重要課題である。本稿では、歩行者頭部傷害HIC (Head Injury Criterion) の高いフロントガラス取付部に着目し、これを低減する手法を紹介する。まず、フロントガラス取付部の設計変数と設計自由空間を決定した。次にCAE解析を活用したパラメータ分析により、構造とHIC発生の関係を明確にした。その結果、HICを現状より50%低減できる構造を導き出した。

Summary

For reducing traffic accident fatalities, it is important to lower the pedestrian fatalities in collision accidents. This paper elaborates the method we developed in order to minimize pedestrian's HIC (Head Injury Criterion) intensified at the windshield mount. First, the design variables and design freedom space in the windshield mount were determined. Then, the relation between structure and HIC was clarified through parametric analysis utilizing CAE. As a result, a structure that reduces HIC by 50% was established.

1. はじめに

近年、法規の強化や、各社メーカーによる車両安全対策の取り組みにより、交通事故死者数は減少傾向にあり、2009年の交通事故死者数は5,000人を下回り、4,914人となった。しかし、Fig.1の状態別死者数の推移⁽¹⁾を見ると、2000年から2010年の減少率は、自動車乗車中は10年前の63%に対して、歩行中は37%に留まっており、歩行中は自動車乗車中に比べて減少率が低い傾向にある。またFig.2に示す2010年の状態別死者数の割合⁽¹⁾では、自動車乗車中が33.0%、歩行中が34.5%という結果となっており、歩行中の死者数の改善が重要な課題となっている。

また歩行者事故分析データから、Fig.3に示すように、歩行中の死者の損傷部位は頭部の割合⁽²⁾が高い。Fig.4からは、歩行中死者の傷害を発生させる主要な車両部位はフロントガラス取付部⁽³⁾であることが読み取れる。しかし、頭部傷害と車両構造を関連付けた研究は少ない。

本研究では、歩行者頭部の傷害値低減のため、傷害発生の高いフロントガラス取付部に対して、CAE解析を活用したパラメータ分析を実施し、歩行者保護性能を高めた車両構造を明らかにしたので報告する。

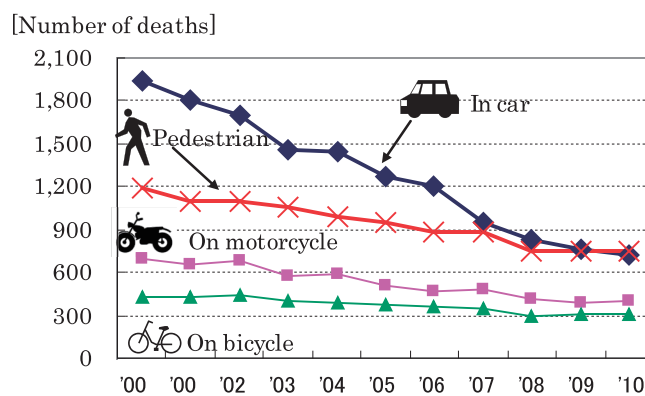


Fig.1 Change in Death Toll⁽¹⁾

*1~4 衝突性能開発部
Crash Safety Development Dept.

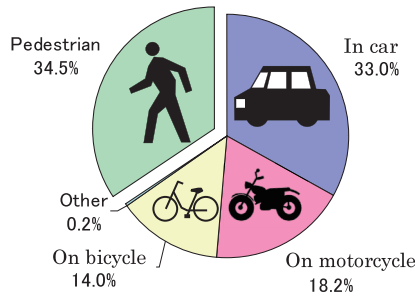


Fig.2 Death Toll in 2010⁽¹⁾

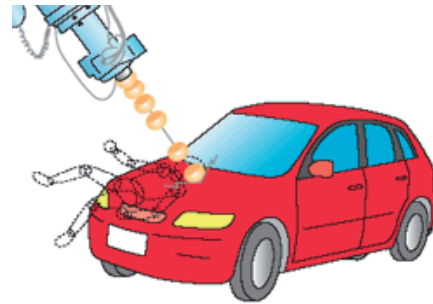


Fig.5 Test Image⁽⁴⁾

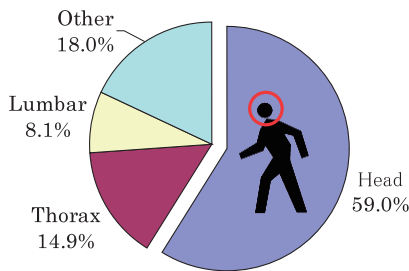


Fig.3 Body Regions Damaged in Pedestrian Fatal Accidents⁽²⁾

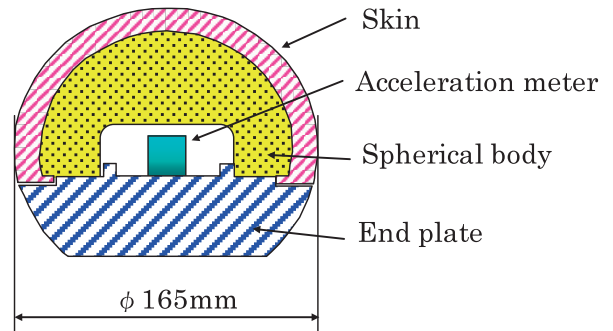


Fig.6 Head Impactor

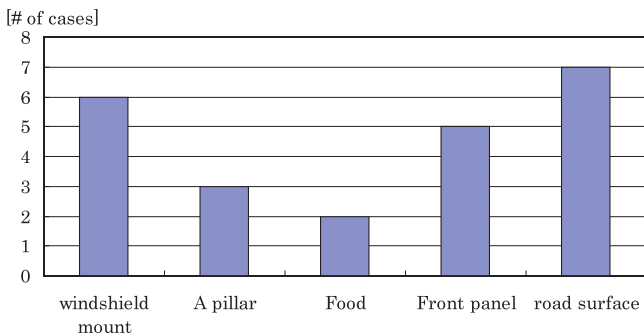


Fig.4 Vehicle Areas Causing Damage in Pedestrian Fatal Accidents⁽³⁾ (Over AIS 3)

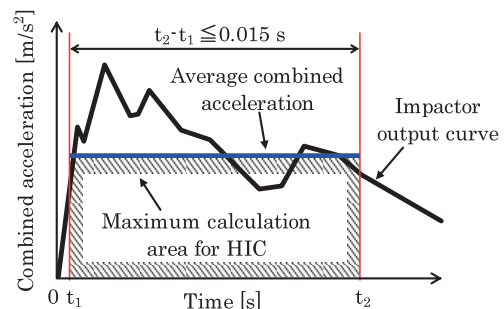


Fig.7 HIC Calculation

2. 歩行者保護性能評価

法規や市場評価で使用されている頭部傷害の評価方法は Fig.5のイメージ⁽⁴⁾のように、自動車が時速44km相当で歩行者をはね、歩行者の頭部が自動車に衝突したことを想定しており、頭部を模擬した頭部インパクトを発射して実施する。性能評価は、その際の頭部インパクトの衝撃を Fig.6の頭部インパクト内部に設置した加速度計（3軸）を用いて合成加速度を測定し、式(1)を用いて傷害値のHIC（Head Injury Criterion）を計算して判定する。

$$HIC = \left\{ (t_2 - t_1) \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} A_R dt \right]^{2.5} \right\}_{\max} \quad (1)$$

ここで、 t ：時間(s)， A_R ：合成加速度(g)， \max ：HICが最大となる時間幅 ($t_2 - t_1 \leq 0.015s$) である。Fig.7にはHIC計算波形の一例を示す。

HICの値が低ければ頭部に受ける傷害の程度は低くなる。HIC1000程度であれば、頭部外傷分類のAIS（Abbreviated Injury Scale；略式傷害尺度）はレベル4の重篤発生確率が20%以下となる。

3. 目標設定

本研究では、フロントガラス取付部を対象としており、大人頭部インパクトを用いて構造化を行った。このフロントガラス取付部は、Fig.8のような部品で構成されるが、主にカウルパネルとダッシュアッパーの2部品によりフロントガラスは支えられている。歩行者のHICが高くなるのは車両剛性の高い箇所であるため、衝撃位置はフロントガ

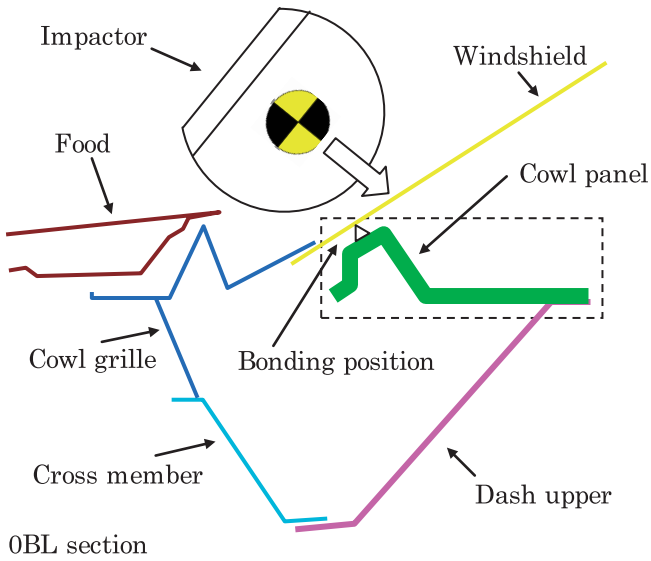


Fig.8 Windshield Mount & Impact Point

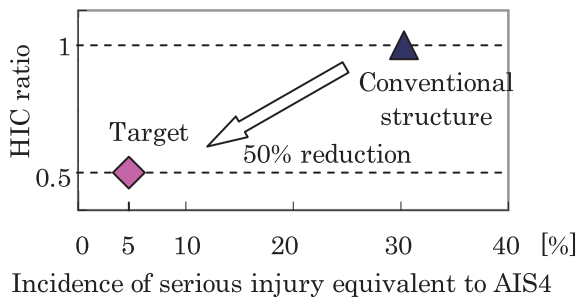


Fig.9 Development Target

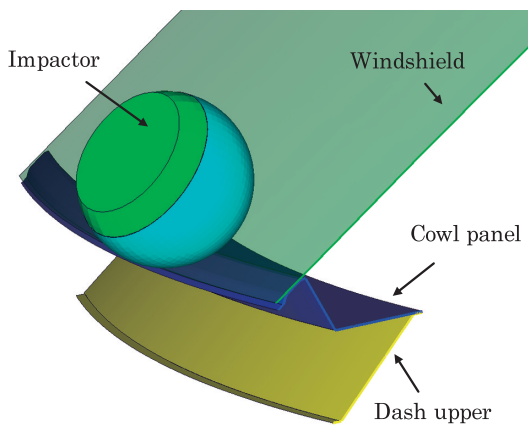


Fig.10 CAE Analysis Model

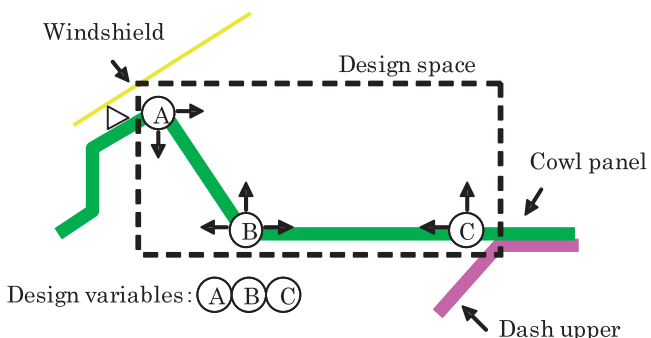


Fig.11 Design Space & Design Variables for Cowl Panel

ラスとカウルパネルの接着位置を選定した。

HIC目標は、Fig.9のように従来構造からHIC比で50%低減とし、頭部外傷分類のAIS4の重篤発生確率が約5%以下とした。

4. パラメータ設計

4.1 CAE解析モデル

Fig.10にHIC評価を再現したCAE解析モデルを示す。CAE解析モデルは、フロントガラス、カウルパネルとダッシュアップパーおよび頭部インパクトにて構成されている。解析ソルバーは非線形構造解析ソフトであるLS-DYNA (Ver.971) を用いた。モデルの要素数は3万程度で、計算時間は1モデル当たり約20分である。

4.2 設計変数の選定

目標のHICを目指すには、一般にエネルギー吸収量の高い構造が求められ、剛性の低い構造となってしまう。しかしフロントガラス取付部は、フロントガラスを支える機能が必要であり、振動・騒音等からも車両にとって重要な部分である。したがって、単純に剛性を低くするだけでは、車両として成り立たない。また本研究では、車両のデザイン性や補機類設置のためレイアウト上の制約があり、変更できる部品がカウルパネルだけに限られている。そこでFig.11のように、カウルパネルに制約条件から与えられる自由空間を定め、フロントガラス取付位置からダッシュアップパーまでのフランジ位置の経路に3つの設計変数を設定し、直交表を用いて、カウルパネルの構造を検討した。

5. 結果および考察

目標達成のカウルパネル構造を見出すまでに、パラメータ分析を数回繰り返した。

1回目は、Fig.11のカウルパネル構造をベースとし、直交表は設計変数の数からTable 1のL4を採用した。設計変数の点A, 点B, 点Cに移動方向と移動量を与えて、直交表に合わせて、Fig.12のようにNo2からNo4までのカウルパネルの断面を作成した。これらの断面を用いて、Fig.10の解析モデルをそれぞれ作成し、大人頭部インパクトの衝撃解析を実施した。そのHIC結果から、Fig.13の要因効果図を作成し、各設計変数の移動方向と量がHICに与える影響を分析した。

Table 1 Orthogonal Table

No.	1	2	3	1	2	3
	A	B	C	A	B	C
1	1	1	1	Base	Base	Base
2	1	2	2	Base	Above	Above
3	2	1	2	Right	Base	Above
4	2	2	1	Right	Above	Base

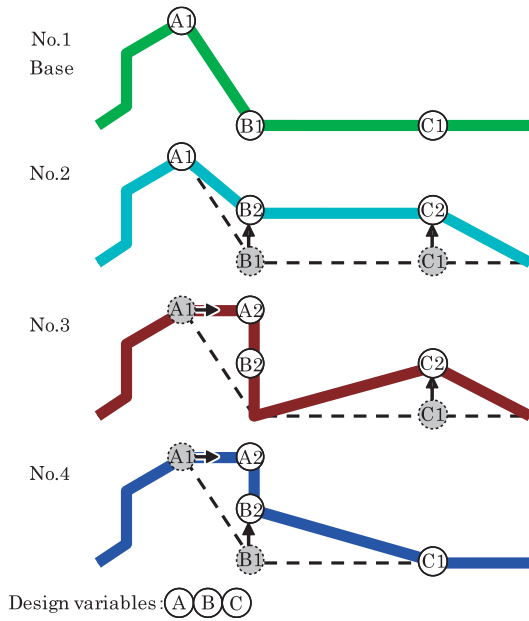


Fig.12 Cowl Panel Structures Studied (1st Iteration)

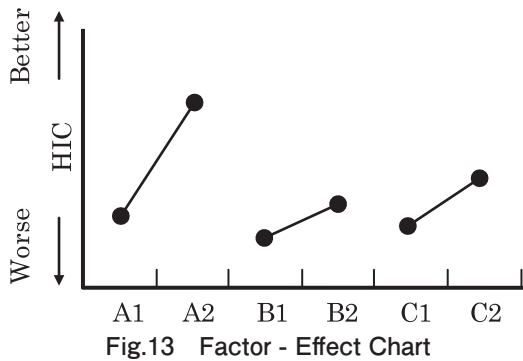


Fig.13 Factor - Effect Chart

要因効果図は値が大きい方が、HICを低減させる効果があることを示しており、点AはA1よりもA2の方がHIC低減の効果があることがわかる。また点BはB1よりもB2が、点CはC1よりもC2が低減の効果があることがわかる。

したがって、1回目では、点A、点B、点Cともにベースの位置から移動させた構造がもっともHICを低減させる効果が高い。特に点Aは他の2点比べて効果が大きい。これはカウルパネルの構造が、点Aは頭部インパクトの衝撃位置から離れた位置で、点Cがベースの位置よりも高い方が目標を達成する可能性があることを示している。また点Aと点Bは近接した方がより効果が高い。

しかし1回目だけでは目標HICを達成できなかったため、更に2回目の検証を実施した。2回目以降はFig.14のように、最も効果の高い設計変数位置をベース構造として新たに設計変数を稜線と経路に設定し、移動方向と移動量を与えて、直交表に合わせてカウルパネルの断面を作成した。この作業を繰り返して目標達成構造を導き出した。

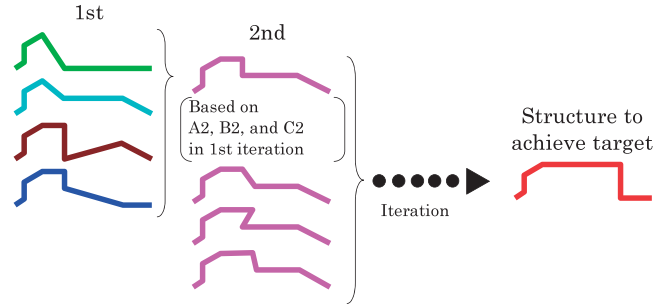


Fig.14 Study for Structure to Achieve Target

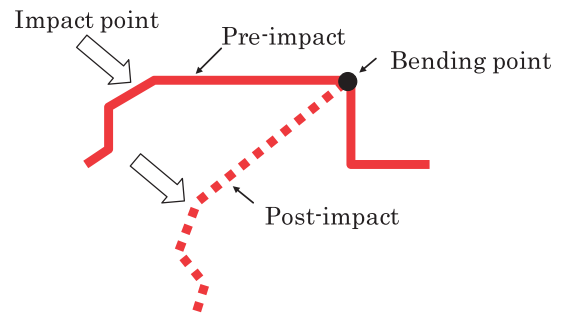


Fig.15 Deformation of Cowl Panel that Achieves Target

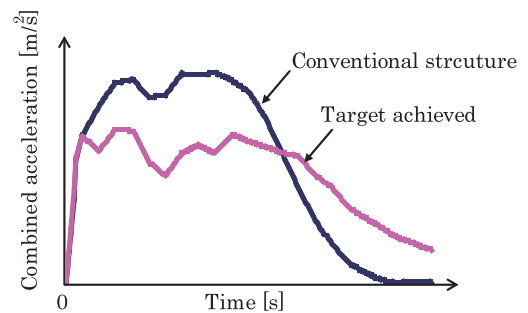


Fig.16 Curve that Achieves Target

目標達成構造のポイントは、Fig.15に示すように衝撃位置とカウルパネル折り曲げの基点位置を離すことにより、Fig.16の波形のように従来構造よりも低い荷重でカウルパネルを変形させることができたことである。その結果、インパクトの進入量をFig.17に示すように15%増加させることができ、HICを従来構造から50%低減することができた。

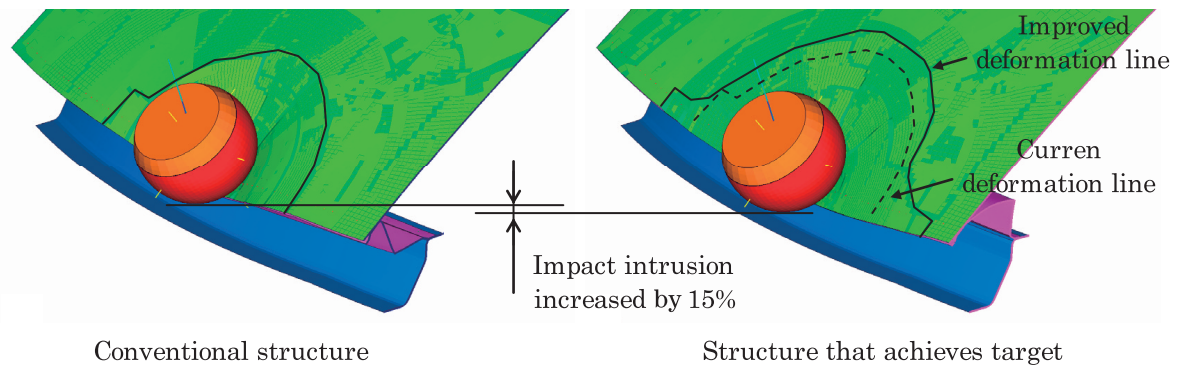


Fig.17 Comparison of Windshield Deformation

6. 結言

本論文ではフロントガラス取付部での歩行者頭部傷害低減構造を検討した。構造化アプローチにパラメータ設計を用いて、カウルパネルの衝撃位置と折り曲げの基点位置の関係を明確にした。更に、カウルパネル構造を改善し、従来構造のHICから50%の低減を達成した。

7. おわりに

本研究によりフロントガラス取付部のHICの大幅な低減が達成できた。今後も車両各部位においても研究を進め、歩行者の死者数低減に貢献できる車両開発を実現し、より安全な車をお客様の元へ届けたい。

参考文献

- (1) 警察庁交通局：平成22年上半期の交通死亡事故の特徴及び道路交通法違反取締状況について，2010年7月22日
- (2) 交通統計：状態別・損傷主部位別30日以内死者数，2008年度版，p.130-131
- (3) 交通安全環境研究所：歩行者の頭部傷害に関する研究，2001年度
- (4) 国土交通省：歩行者頭部保護性能試験方法

■ 著 者 ■



西田靖彦



横山暢彦



上野正樹



尾川 茂

論文・解説

16

後側方レーダの電波伝搬可視化技術の開発 Development of Method for Visualizing Radio Propagation of Side to Rearward Sensing Radar

稲田 貴裕*¹ 浜田 康*² 鶴長 真里絵*³ 花田 充基*⁴
Takahiro Inada Yasushi Hamada Marie Tsurunaga Yoshitsugu Hanada
西田 史彦*⁵ 遠藤 靖之*⁶ 中畑 洋一朗*⁷
Fumihiko Nishida Yasuyuki Endo Youichiro Nakahata

要 約

マツダは、利便性向上と交通事故低減に貢献するため運転支援・予防安全技術の開発を進めているが、その一つとして、障害物警報システムを各市場に導入してきた。

この障害物警報システムの開発では、市場適合性評価のために様々な道路環境での走行評価とチューニングが必要となる。障害物警報システムに使われるセンサとしては、車両前方を検出する前方レーダや、車両後方や側方を検出する後側方レーダなどがあるが、本論文では主に24GHz帯の電波を利用した後側方レーダについて述べる。

この、後側方レーダに関して、車両走行時に観測される環境ノイズに着目し、その発生メカニズムを電磁界シミュレーションによる電波伝搬可視化技術で明らかにした。解明したメカニズムを基に環境ノイズ低減技術を検討し、効率的な評価手法を開発した。

Summary

As part of the development of driver support/active safety technology to contribute to enhancing convenience and reducing traffic accidents, Mazda has been introducing obstacle warning systems into various markets.

In the development of obstacle warning systems, in order to assess the market compliancy, parameter tuning based on vehicle driving test in wide variety of environment is required. For obstacle warning systems, various types of radars are used; forward radar to detect frontal obstacles, adjacent rear radar to detect obstacles in adjacent rear areas, and so on. This paper describes the study results on 24GHz rear adjacent radar.

For the adjacent rear radar, focusing on clutter observed during driving, we developed an electromagnetic simulation method for visualizing radio propagation. Based on the mechanism defined, technology for reducing clutter was studied and efficient evaluation methods were developed.

1. はじめに

車両後方や側方の障害物警報システムに利用される後側方レーダ⁽¹⁾ (以下、レーダ) には準ミリ波の電波が多く用いられている。このレーダ電波は、周囲の車両構造物や市場環境の影響を大きく受ける傾向がある。そのため、レーダ単体性能から車両搭載時のレーダ送受信性能を完全に予

測することは難しい。

そこで、電磁界シミュレーション (以下、CAE) 解析等による各種の技術検証を重ね、車両搭載時の、車両構造物や市場環境を考慮した電波伝搬可視化技術を開発することで、車両搭載時の環境ノイズ発生時の電波伝搬メカニズムを解明した。

加えて、解明したメカニズムを基に、開発の机上検証段

*1~3 電子開発部
Electrical & Electronics Development Dept.

*4~7 車両システム開発部
Vehicle System Development Dept.

階で車両搭載時の性能および環境ノイズを予測し、この環境ノイズを低減することで、より信頼性の高い警報システムを効率的に実現する手法を開発したので報告する。

2. 後側方レーダ開発の現状

2.1 レーダの性能・信頼性

Fig.1に、後側方の障害物警報システム用レーダのレイアウト場所の例を示す。

レーダを左右のリヤ・バンパ部の内側にそれぞれ一つずつ装着し、後側方のターゲット車両を検出する。

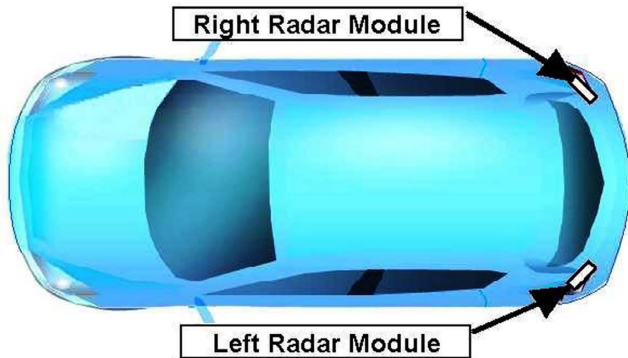


Fig.1 Side to Rearward Sensing Radar

このレーダの距離計測には、Fig.2に示すような、周波数を変調し送信波と受信波の位相差で距離を検出するFMCW (Frequency Modulated Continuous Wave) 技術、角度計測には、Fig.3に示すような、二つの受信アンテナで受ける受信波の位相差から角度を検出するモノパルス (Monopulse) 技術を採用することで、ターゲット車両検出に必要な性能を確保した。

また、過警報の発生頻度を最小限にチューニングすることで警報の信頼性を確保している。これらにより、高性能かつ信頼性の高い障害物警報システムを実現している。

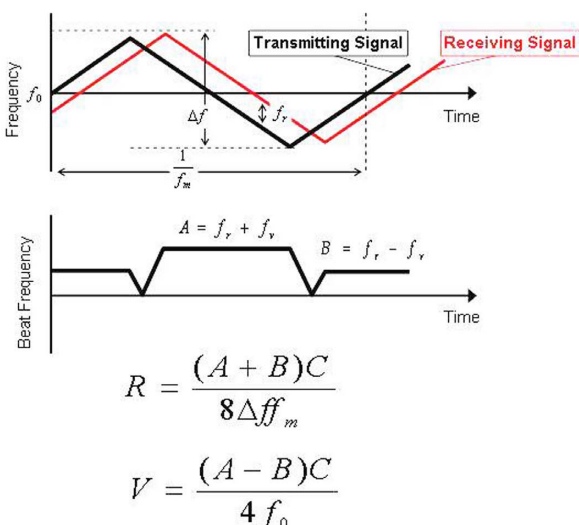
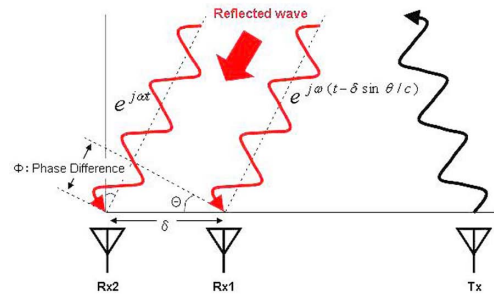


Fig.2 FMCW System



$$\begin{aligned} \Sigma &= e^{j\alpha x} + e^{j\omega(t - \delta \sin \theta / c)} \\ &= 2e^{j\alpha x} \cdot e^{-j\pi \delta \sin \theta / \lambda} \cdot \cos(\pi \delta \sin \theta / \lambda) \\ \Delta &= e^{j\alpha x} - e^{j\omega(t - \delta \sin \theta / c)} \\ &= 2je^{j\alpha x} \cdot e^{-j\pi \delta \sin \theta / \lambda} \cdot \sin(\pi \delta \sin \theta / \lambda) \\ \Delta / \Sigma &= \tan(\pi \delta \sin \theta / \lambda) \end{aligned}$$

Fig.3 Monopulse System

2.2 開発の現状

後側方の障害物警報システムとしての検出性能を確保しつつ、過警報の発生頻度を最小限にチューニングするために、様々な市場環境下でレーダの評価を繰り返している。

過警報には発生しやすい場所などの条件があるため、レーダを実際の車両に搭載し、複数の場所で実車評価することで、検出性能と過警報の最適なバランスを取るよう、制御パラメータのチューニングを繰り返している。

3. 過警報発生要因と技術課題

3.1 環境ノイズ調査

実車による繰り返し評価を最小限にするためには、車両を使った様々な市場環境下での走行評価を、CAE等を使った電波伝搬メカニズム解明により、バーチャルな机上評価へと変えて行く必要がある。

レーダは電波を外部に放射しターゲットからの反射波を観測することで隣接車両などを検出するが、車両による市場評価時にターゲット以外からの不要な反射波がノイズとして観測されることがある。

そこで、このターゲット以外からの不要なノイズを環境ノイズと定義し、この環境ノイズと過警報に相関があるとの仮説を立て、様々な市場環境や車両装備の変化によりこの環境ノイズがどのように変化するかを調査した。

(1) 特定道路環境

特定の道路で不要な環境ノイズがどのように変化するかを、レーダ受信波モニタ装置を実車に搭載して検証した。その結果ノイズレベルは道路ごとに差があり、更にトンネルや橋といった特定の道路構造物とノイズ増加の相関が強いことが確認できた。

Fig.4は車両走行状態で環境ノイズを測定した一例で、Fig.5に示すようなトンネル内で環境ノイズが増加する様子を示している。

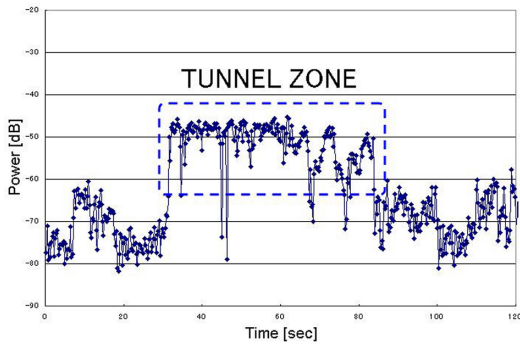


Fig.4 Environmental Noise



Fig.5 Tunnel Zone

(2) 特定装備

上記環境ノイズは、バンパなどの車両装備によって変化することを確認した。具体的にはボデー形状やバンパ形状などによって、上記環境ノイズは大きく変化することが明確になった。

これは、バンパ内にレイアウトしているレーダの性能が、ボデーやバンパの何らかの影響を受けているためと推定され、その原因の解明が必要であった。

3.2 環境ノイズ伝播経路

(1) 電波伝搬経路確認ツール

電波伝搬経路を確認するツールとして、Fig.6に示すような回転型の小型反射器 (Mini-Reflector) を採用した。

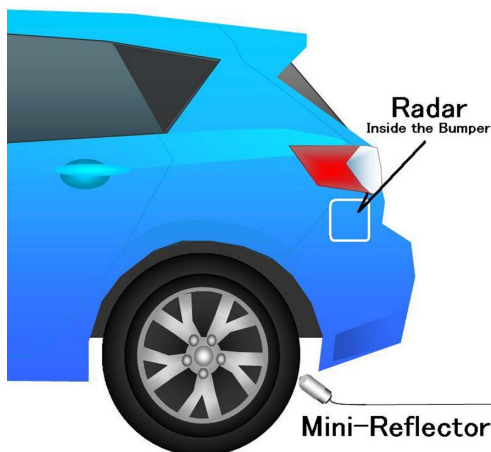


Fig.6 Mini-Reflector

回転によって発生するドップラー信号を検出することで、小型でも感度良く反射波を検出することが可能となる。

従来のコーナリフレクタなどの反射器では、サイズが大きく車室外エリアの測定しかできなかったが、小型反射器を使うことで狭い車両構造物間の測定も可能となり、レーダから放射された電波がバンパやボデー間などで反射・回折しながら車室外へ伝播する様子の概略を、実験的に確認することができるようになった。

(2) 不要反射波の伝播と技術課題

上記小型反射器により車両周辺の電波伝搬経路を測定した結果、車両構造物内の反射や回折により想定外の方に電波が伝播され、地面や車両構造物などに対して電波の伝播経路が形成される場合があることが確認できた。

また、この伝播経路に放射された電波がターゲットに当たり不要反射波としてレーダに戻ってくると、レーダ性能に大きな影響を及ぼす場合があることが実験的に分かってきた。この電波の伝播経路はボデー形状やバンパ形状ごとに違い様々な経路を取る。

これらから、試作車のない設計段階で電波伝播経路を予測できる、電波伝搬可視化技術の獲得が、評価最小化を実現する上での重要な課題となる。

4. CAEによる電波伝搬可視化と予測技術

上述のような、複雑な電波伝搬経路を持つレーダシステムの性能を効率良く解析・予測するために、Fig.7に示すようなCAEを活用した。



Fig.7 CAE Analysis

4.1 CAE方式の検討

CAEの解析手法として、Fig.8に示すようなFDTD法 (Finite Difference Time Domain Method) を用いた。

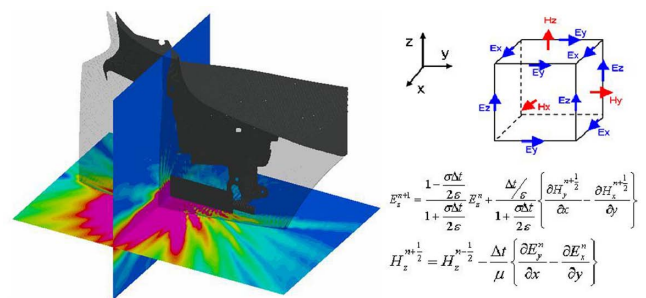


Fig.8 FDTD Analysis

FDTD法ではレーダ解析のような大規模モデルを扱う際、計算資源面から解析領域をあまり大きくはできない。そこで、Fig.9, 10に示すような遠方界の電界を理論的に演算可能なヘルツダイポール電磁界理論 (Hertz Dipole Electromagnetic Theory) および、Fig.11に示すようなターゲットからの反射波を考慮した解析が可能なPO法 (Physical Optics) を組合せた独自の方式を採用することで、ターゲットからの反射波を考慮した精度の高いCAE解析を、より広いエリアで実現することが可能となった。

$$\begin{aligned}
 \mathbf{H} &= k^2 \mathbf{p}(\hat{\mathbf{p}} \times \hat{\mathbf{r}}) \times \hat{\mathbf{r}} \frac{\cos(kr - \omega t)}{r} + \mathbf{p} \left[3(\hat{\mathbf{p}} \cdot \hat{\mathbf{r}})r - \hat{\mathbf{p}} \right] \left[\frac{\cos(kr - \omega t)}{r^3} + \frac{k \sin(kr - \omega t)}{r^2} \right] \\
 \mathbf{H} &= k^2 \mathbf{p}(\hat{\mathbf{p}} \times \hat{\mathbf{r}}) \left[\frac{\cos(kr - \omega t)}{r} + \frac{k \sin(kr - \omega t)}{kr^2} \right] \\
 \hat{\mathbf{r}} &= \mathbf{r}/r \quad \hat{\mathbf{p}} = \mathbf{p}/p \quad \omega = 2\pi f \quad k = \omega/c
 \end{aligned}$$

Fig.9 Hertz Dipole Equations of Electromagnetic Field

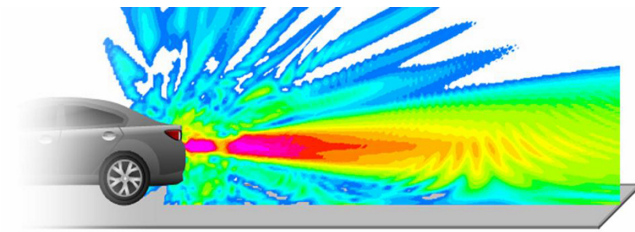


Fig.10 FDTD with Electromagnetic Theory

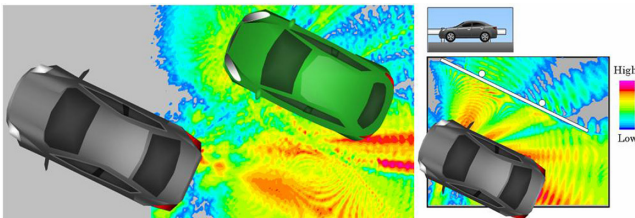


Fig.11 FDTD with Physical Optics

また、ターゲットの位置精度に影響を与える塗装膜については、薄膜のためモデル化が難しいことから、サブセル法とマロニー&スミス理論を用いモデル化を行った。

これらの手法を全てを組み合わせることで、レーダ電波の車両搭載状態における複雑な振る舞いを視覚的に確認することが可能となった。

4.2 CAE精度の検証

CAE精度の検証を行うために、CAE結果と実測結果の比較を行った。Fig.12は車両構造物の影響による地面への漏れ電波の電界分布をCAE解析と実測で比較した結果であり、Fig.13はFig.12の矢印部における電界値の偏差を比較した結果である。測定データ上の黒く一様な部分は、測定装置の制約から計測できなかった領域を示す。

Fig.13からCAE解析結果は実測結果とほぼ同様の結果となっていることが分かる。これにより、CAE解析による机上予測検証が可能であることが確認できた。

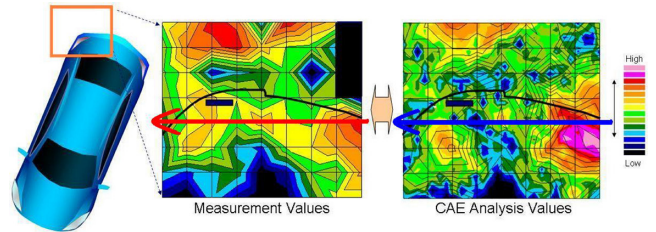


Fig.12 Comparison between Measurement Values and CAE

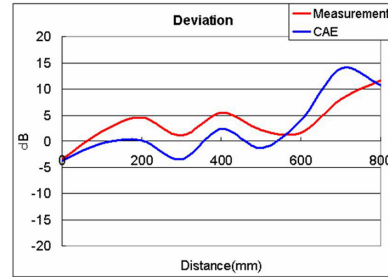


Fig.13 Comparison of Deviation between Measurement Values and CAE

4.3 CAEによる環境ノイズ電波伝搬可視化

車両搭載状態の環境ノイズがどのように伝播するかという電波の振る舞いや伝播経路を解析するために、CAE上でFig.14に示すような極短パルス状の電波を放射することで、バンパ内の反射波や回折波が路面や道路構造物などに当たり、不要な環境ノイズとしてレーダに戻ってくる様子を視覚的に確認できるようにした。

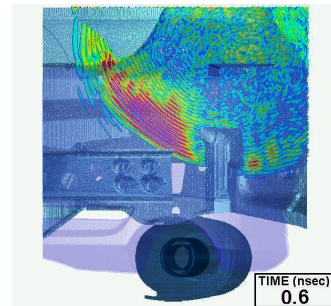


Fig.14 Analysis by Single Pulse

また、CAE上で連続的に電波を放射しながら、特定のポイントに、どんな強さの電波が何ns後に到達したかを計算し、その結果をFig.15のようにグラフで示すことで、電波の時間的な振る舞いがより定量的に確認できるようになった。これらによりCAEによるレーダの定量的な電波伝搬机上予測が可能となってきた。

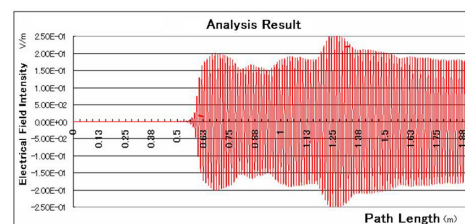


Fig.15 Time Domain Analysis

5. CAE可視化技術によるメカニズム解明と開発への適用

5.1 過警報状態の再現と発生メカニズム

(1) 車両構造物の影響

前述のCAEによる電波伝搬可視化技術を活用すると、道路構造物への電波伝搬経路とともに、車両構造物内での反射点を推定することができる。

そこでその反射点の一つをCAE上で選択し、実際の車両で強い反射波が道路構造物などへ伝播するよう、その反射点での反射率が意図的に大きくなる構造としたところ、3.1での仮説の通り、道路構造物からの環境ノイズが増加し、結果として過警報状態が再現することを実験的に確認した。

Fig.16は、実際の車両での実験結果である。

選択した反射点の反射率を意図的に大きくし環境ノイズを増加させることで、実際の車両の左後方に偽のターゲット車両が発生させ、過警報 (Excessive Alarm) 状態を再現している。

これより過警報状態を抑えるためには、バンパなどの車両構造物の構造およびレーダとの位置関係の設計が重要なポイントとなることが分かってきた。

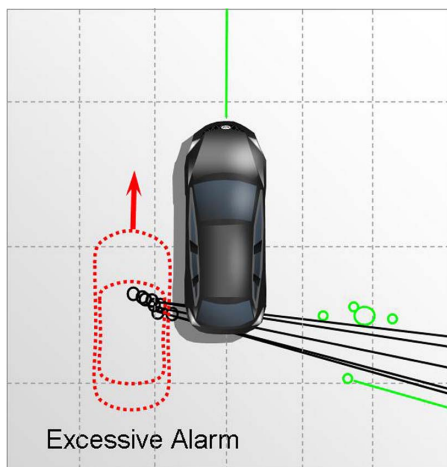


Fig.16 Reproduction of Excessive Alarm

(2) 道路構造物の影響

同様に、道路構造物への電波伝搬経路がある場合に、道路構造物側の反射率を意図的に大きくし強制的に強い反射波が戻ってくるように設定したところ、環境ノイズが増加し過警報状態が再現することを確認した。

Fig.17に示す「最悪条件再現あり」が、強制的に強い反射波が戻ってくるように設定した時のデータで、強い反射波により偽のターゲット車両が発生し、過警報 (Excessive Alarm) 状態となっていることが分かる。

これにより道路構造物の最悪条件を明らかにすることができるようになってきた。

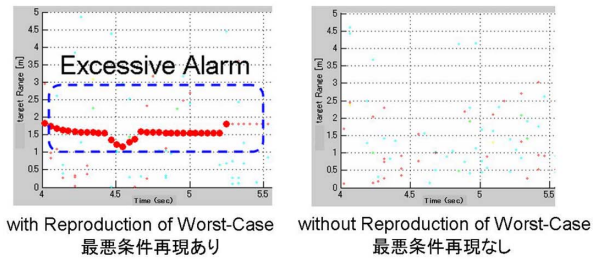


Fig.17 Reproduction of Worst-Case

(3) 環境ノイズと過警報発生メカニズム

従来、後方レーダを活用した警報システムでは、過警報の発生を最小限とするよう車両を使って開発を進めてきたが、上記の結果から「バンパ内の反射波などによる電波伝播経路が車両構造物内に形成されており、その伝播経路が道路構造物などへ到達し、強い反射波が戻ってくる市場環境下」で、環境ノイズが極端に増加し過警報につながる可能性があることが判明した。

CAEによる複雑な電波伝搬の可視化により、環境ノイズ要因の過警報発生メカニズムの一つを明らかにすることができた。

5.2 ノイズ低減手法の検討と設計要件化

上記メカニズムから、バンパ内の不要反射波を低減し、道路構造物への不要な電波伝搬量を軽減することが、環境ノイズを低減する手法として有効であることが分かってきた。CAE等を使った検証結果から、具体的な手法として、バンパ内部の反射波を低減させる手法や、適切なカバー構造を設けて反射波をコントロールする手法などが有効な手段として考えられる。

Fig.18は、前述の強い反射波が伝播するように反射点での反射率が意図的に大きくなる構造とした上で、Fig.19に示すような適切なガイド構造 (ADJUST PLATE) を設けて、この反射波をコントロールするガイド構造あり/なしで環境ノイズがどのように変化するかを実測した結果であるが、この構造により環境ノイズが低減していることが分かる。

今後この手法を活用し、更なるシステムの信頼性向上を図るべく設計要件化を進めてゆく。

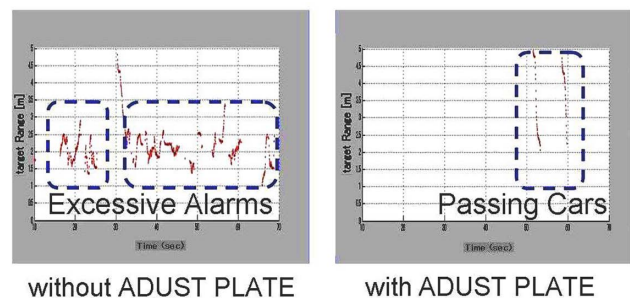


Fig.18 Control of Reflected Wave

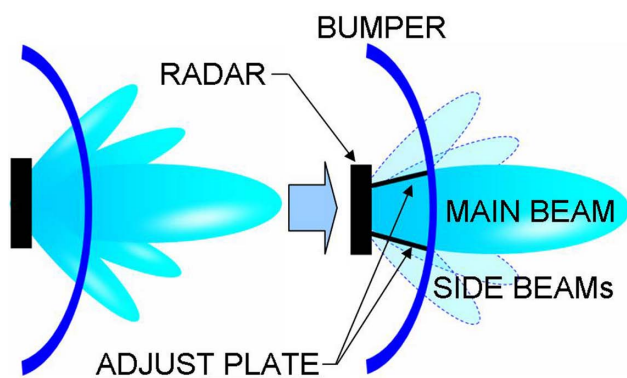


Fig.19 Adjust Plate

5.3 市場最悪条件の再現と評価効率化

従来の、実際の市場環境での走行評価を、解明したメカニズムを基にして、テストコース上に最悪条件を再現させることで、開発効率が大幅に改善する可能性が出てきた。

Fig.18に示した、テストコースで強制的に道路構造物側から強い反射波が戻ってくるように設定した時のノイズ発生状況では、様々な市場環境下での走行評価で観測される最大ノイズと同等以上のノイズが発生しており、走行評価がテストコースでの評価に置き換え可能であることが分かった。

5.4 開発への適用

上記結果から、CAEを活用することにより、机上検証段階で信頼性の高いシステムの構築が可能となることが分かった。また、様々な市場環境下での評価を、最悪条件を模擬したテストコースでの評価に置き換えることで、評価・チューニングを最小限にできることが分かった。

これらより、CAEによる電波伝搬可視化技術は、開発の効率化に適用できる技術であることが明らかになった。

6. おわりに

車両搭載状態でのレーダの電波伝搬メカニズムを明らかにすることで、効率的な開発に必要な設計要件や評価条件が明らかになってきた。

今後この検討結果を基に、実車主体の開発を設計要件化やバーチャル評価等に置き換えることで、より効率的な開発を実現するとともに、お客様に満足していただける商品を提供してゆけるよう、高性能で信頼性の高いシステムの開発を進めて行く。

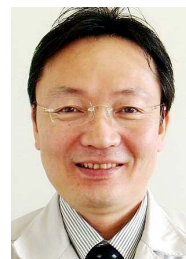
参考文献

- (1) 信時ほか：後側方障害物警報システムの開発，マツダ技報，No.26，p.124-130（2008）

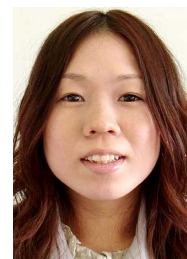
■ 著 者 ■



稲田貴裕



浜田 康



鶴長真里絵



花田充基



西田史彦



遠藤靖之



中畑洋一郎

論文・解説

17

平滑感が高いプラスチック用塗装の開発 Development of Highly Smoothed Coating for Plastic

古賀 一陽*¹ 河邊 光祥*²
Kazuhi Koga Mitsuyoshi Kawabe

要 約

自動車プラスチック部品用塗装の平滑感を向上させるため、ベースウェット塗膜の平滑性に着目した。ウェット塗膜の平滑性向上には塗装時の塗料粘度の低減が有効だが、塗料保管時に顔料沈降が生じるなど塗料安定性が低下することがわかった。

そこで、ベース塗料に含まれる粘性制御剤の分散性に着目してその制御に取り組んだ結果、塗料安定性を維持しながら塗装時の塗料粘度を低減できることがわかった。本技術に高沸点溶剤の添加率増加によるウェット塗膜粘度の低減を組み合わせることで、塗色に関わらず、狙いの平滑感を達成することができた。

Summary

To improve smoothness of coating for plastic parts, smoothness of wet basecoat surface was focused on. Reducing basecoat viscosity at atomization is effective on improving the smoothness of the wet basecoat surface but it causes unacceptable basecoat storage-stability such as pigment sedimentation.

To overcome the above mentioned technical difficulty, dispersibility of rheology-control agent was focused on and tried to be controlled. As the result the basecoat viscosity at atomization can be reduced with maintaining acceptable level of the basecoat storage-stability. Applying this technology and reducing viscosity of the wet basecoat with raising the ratio of its high boiling-point solvent resulted in achieving targeted smoothness in all basecoat colors.

1. はじめに

自動車塗装の平滑感は商品性に影響を与える重要な外観品質の一つである。平滑感とは塗装表面の凹凸によって得られる質感である。この凹凸は、塗料粒子が被塗装面上に塗着する際に形成されるウェット塗膜の凹凸が十分に流動しないため形成され、ウェット塗膜の凹凸は塗装時の塗料粘度と塗装後のウェット塗膜粘度の低減により小さくなること報告例⁽¹⁾⁽²⁾で明らかにされている。

塗装表面の凹凸を数値化する計測機器は幾つか存在するが、本開発では凹凸波長 (Fig.1) を複数域に分類できるBYK-Gardner社製Wave-scan DOIを用いた。凹凸波長域

とこれに対応する本機器による測定成分、および目視による質感との関係をTable 1に示す⁽³⁾。凹凸が少なく艶感や平滑感が高いほど、測定値が小さくなる。



Fig.1 Definition of Wave Length

Table 1 Wave Length of Wave-Scan DOI

Wave length(mm)	<0.1	0.1-0.3	0.3-1.0	1.0-3.0	3.0-10	10-30
Parameter	Dullness	Wa	Wb	Wc	Wd	We
Related quality	Gloss			Smoothness		

*1, 2 技術研究所
Technical Research Center

本機器を用いてプラスチック用塗装の凹凸を測定した結果、Wd (波長：3-10mm) がベース塗料の塗色により異なっていたためこの波長域に着目した。Wdが塗色により異なる原因は、ベース塗料塗装時の塗料粘度と塗装後のウェット塗膜粘度が高いためであり、両粘度の低減に取り組んだ。

塗装時の塗料粘度については溶剤の増量または粘性制御剤 (以下、粘性剤) の減量により低減できる。しかし、前者は溶剤排出量の増加につながるため環境保全の観点から適切な手法ではなく、後者は保管時の塗料粘度を低下させ、その結果顔料沈降を招く⁽⁴⁾⁽⁵⁾ため実用性に欠ける手法であった。

本開発では保管時の塗料粘度を確保しながら塗装時の塗料粘度を低減するため粘性剤の分散性に着目し、その制御に取り組んだ。また、塗装後のウェット塗膜粘度の低減を組み合わせることで、塗色の中で最高水準のWd実現を目指したベース塗料技術の開発に取り組んだ。

2. 開発目標の設定

2.1 実験

開発目標設定のため、下記2つを目的とする実験を行った。

- (1) 塗色とWdの関係を把握して目標Wdを設定する。
- (2) Wdと粘度の関係を把握して目標粘度を設定する。

2.2 試料

- ・基材：ポリプロピレン
- ・プライマ塗料：塩素化ポリオレフィン系溶剤型塗料
- ・ベース塗料：アクリル系溶剤型塗料 (Table 2)
- ・クリヤ塗料：2液ウレタン系溶剤型塗料

Table 2 Basecoat Colors for Experiment

Color	Black	Red	Blue	Black	Silver	White
Kind of Pigment	Organic			Inorganic		
Pigment Weight Content (%)	15	20	25	5	15	60

2.3 塗装条件

2.2の試料を用いて、乾燥後の膜厚がプライマ10 μ m、ベース20 μ m、クリヤ30 μ mになるように、Fig.2に示す工程にしたがって垂直面で適切な条件で塗装して乾燥した。

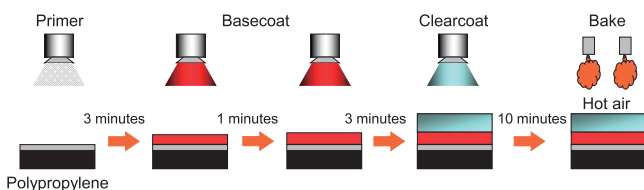


Fig.2 Process

2.4 測定方法

- ・Wd：Wave-scan DOI (BYK-Gardner社製)

- ・塗装時の塗料粘度：CAP-2000+L型 (Brookfield社製)
- ・塗装後のウェット塗膜粘度：Physica MCR レオメータ (Anton Paar社製)

2.5 結果と考察

(1) 塗色とWdの関係把握と目標Wdの設定

塗色によりWdが異なる原因を様々な観点から解析した結果、ベース塗料の顔料濃度が低いほどWdが低い傾向が見られた (Fig.3)。

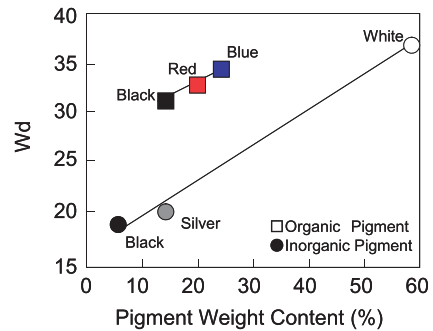


Fig.3 Relation between Pigment Weight Content and Wd

また、無機顔料と有機顔料という区分けをした結果、同じ顔料濃度では有機顔料を含む塗色のWdに比べて無機顔料を含む塗色のWdの方が低かった。

塗色によるWdの差を最小にするため、塗色の中でWdが低い無機系黒および無機系シルバーのWd20以下を他の塗色でも実現することを開発目標に設定した。

(2) Wdと粘度の関係把握と目標粘度の設定

Wdと塗装時の塗料粘度および塗装後のウェット塗膜粘度の関係を明らかにするため粘度を測定した。塗装時は回転霧化式静電塗装機による高いシェアが塗料に加わるため、塗装時の塗料粘度についてはシェアレート15,000/sで測定した。塗装後のウェット塗膜粘度については塗装時のシェアが解放されているため、シェアレート10⁻¹/sで測定した。

上記条件で得られたベース塗料各色の塗装時の塗料粘度、塗装後のウェット塗膜粘度と2.5(1)で得られたWdとの関係をまとめた結果、両粘度ともに低いほどWdが低かった (Fig.4)。

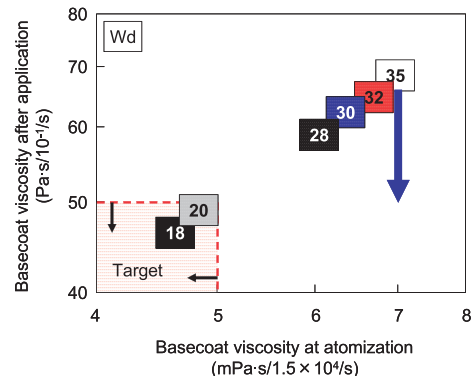


Fig.4 Relation between Basecoat Viscosity and Wd

無機系黒や無機系シルバーのWdを他の塗色で実現するため、目標とする塗装時の塗料粘度と塗装後のウェット塗膜粘度を次のとおり設定した (Fig.3)。

- ・ 塗装時の塗料粘度 $\leq 5 \text{ mPa} \cdot \text{s} / 15,000 / \text{s}$
- ・ 塗装後のウェット塗膜粘度 $\leq 50 \text{ Pa} \cdot \text{s} / 10^{-1} / \text{s}$

顔料濃度が高いほど塗装時の塗料粘度と塗装後のウェット塗膜粘度が高い原因は、顔料自身が凝集力を持っており、この凝集力は顔料濃度に比例するためと考察する。

また、無機顔料系ベース塗料の粘度に比べて有機顔料系ベース塗料の粘度が高い原因は、無機顔料に比べて有機顔料の粒子径の方が小さいため⁶⁾、粒子の被表面積が大きく凝集力が高いためと推察する。

3. 粘性剤の分散性計測技術とベース塗料技術の開発

3.1 技術課題

塗装後のウェット塗膜粘度については、ウェット塗膜に含まれる溶剤比率を増加させることで低減できる。ウェット塗膜の溶剤比率の増加は、塗料中の溶剤のうち揮発し難い高沸点溶剤の比率を高めることで可能である。

塗装時の塗料粘度については、溶剤の増量または粘性剤の減量により低減できる。しかし、前者は溶剤排出量の増加につながるため、環境保全の観点から適切な手法ではない。後者は保管時の塗料粘度を低下させ、その結果、顔料沈降を招くため実用性に欠ける手法である。

したがって、保管時に一定の塗料粘度を確保しながら塗装時の塗料粘度を低減できる粘性挙動の実現が技術課題であった。保管時の塗料粘度については、ライン適性を考慮して $2 \text{ Pa} \cdot \text{s} / 10^{-2} / \text{s}$ 以上に設定した (Fig.5)。

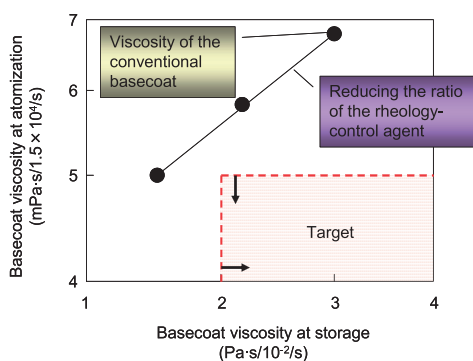


Fig.5 Target of Basecoat Viscosity

3.2 技術課題解決の考え方

塗料に加わるシェアが高いほど粘度が低下する挙動を「構造粘性」といい、構造粘性の向上により技術課題を解決できると考えた。構造粘性を付与するため塗料に粘性剤が分散されており、構造粘性は粘性剤間の水素結合力がシェアで破壊・回復することで発現する。水素結合力は粘性剤が小さな粒子で均一に分散 (Fig.6) しているほどシェアで破壊されやすく粘度が下がりやすいとの仮説を立

てた。本仮説の検証には粘性剤の分散状態の把握が必要であったが、十分な検討がなされていなかった。

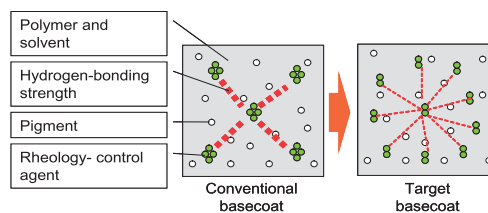


Fig.6 Target Condition of Rheology-Control Agent

粘性剤の粒子径を低減すると粒子数増加による遮蔽効果で透明度が低下したが、粒子径が可視光波長域の半分 (200nm~400nm) 以下では上記効果よりも粒子を回避する光が増えて透明度が増す傾向が見られた (Fig.7)。粘性剤粒子径の実用域は400nm以下のため、分散性を分光光度計⁷⁾で得られる透過率を用いて数値化し、透過率の向上により目標とする塗料粘度の実現が可能か検証した。

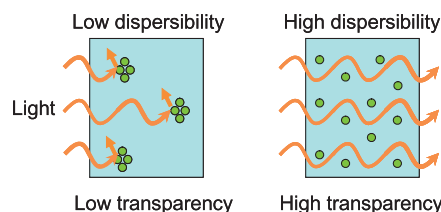


Fig.7 Comparison of Transparency between Low and High Dispersibility

3.3 実験

下記3つを目的とする実験を行った。

- (1) 分光光度計によるベース塗料の透過率測定条件を決定し、保管時の塗料粘度と塗装時の塗料粘度を両立できる透過率範囲を明らかにする。
- (2) 保管時の塗料粘度と塗装時の塗料粘度の両目標を達成するベース塗料を用いてWd向上効果を検証する。また、3.1で述べたベース塗料の高沸点溶剤の添加率増加で塗装後のウェット塗膜粘度を低減し、Wd向上効果を検証する。
- (3) 塗装時の塗料粘度と塗装後のウェット塗膜粘度の低減によるWd向上効果について、塗色の汎用性を検証する。

3.4 試料

2.2と同じ基材、プライマ塗料、クリア塗料を使用し、ベース塗料については、透過率と高沸点溶剤の添加率が異なる仕様とした (Table 3)。

Table 3 Specification of Test Panels

Panel No.	Primer	Basecoat		Clearcoat
		Transmission (%)	The ratio of high-boiling-point solvent(wt%)	
1	Solventborne Polyolefine acryl	45	5	Solventborne acryl/isocyanate
2		55		
3		65		
4		75		
5		85		
6		65		
Film thickness(μm)	10	20		30
Baking condition	90°C/20minutes			

(1)の透過率測定用ベース塗料には、透過率の差を確認できるように顔料を含まないベース塗料を使用した。

(1)と(2)の粘度とWd測定用ベース塗料には、粘度とWdが比較的高い無機系白ベース塗料を使用した。

(3)のWd向上効果の汎用性検証には、無機系白ベース塗料と同様にWdが目標を下回る有機系黒、赤および青系ベース塗料を使用した。

3.5 塗装条件

2.3と同様に塗装した。

3.6 測定方法

- ・透過率：UV-2450 (島津製作所製)
- ・Wd：Wave-scan DOI (BYK-Gardner社製)
- ・保管時の塗料粘度：Physica MCR レオメータ (Anton Paar社製)
- ・塗装時の塗料粘度：CAP-2000+L型 (Brookfield社製)

3.7 結果と考察

(1) 透過率の決定

粘性剤の分散性が異なる2種類のベース塗料 (Panel No.1とNo.2のベース塗料) について透過率を測定した結果、分散性の違いによりベース塗料の透過率に差が生じることが確認できた (Fig.8)。また、透過率の差は低波長に比べて高波長の方が大きく、800nm付近で最大であったため、本開発では800nmにおける透過率を比較した。

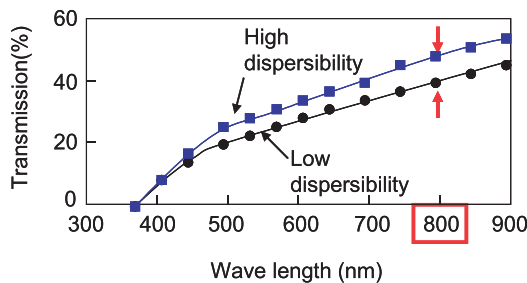


Fig.8 Comparison of Basecoat Transmission between Low and High Dispersibility of Rheology-Control Agent

次に、塗料の製造条件を制御して粘性剤の分散性を向上させてベース塗料の透過率を高めた。透過率は45%、55%、65%、75%、85%の5水準 (Panel No.1~No.5のベース塗料) とした。

透過率を高めた結果、塗装時の塗料粘度 (シアレート 15,000/s) と保管時の塗料粘度 (シアレート 10^{-2} /s) はいずれも低下した (Fig.8)。

透過率が50%以上の場合に塗装時の塗料粘度の目標 ($\leq 5 \text{ mPa} \cdot \text{s} / 15,000/\text{s}$) を達成でき、透過率が75%以下の場合に保管時の塗料粘度の目標 ($\geq 2 \text{ Pa} \cdot \text{s} / 10^{-2}/\text{s}$) を達成できることがわかった。

したがって、塗装時の塗料粘度と保管時の塗料粘度の両目標を達成するために必要なベース塗料の透過率範囲は50%~75%であることを見出した (Fig.9)。

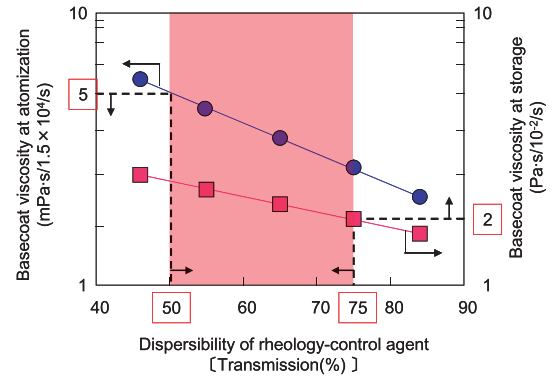


Fig.9 Relation between Basecoat Transmission and Basecoat Viscosity

(2) Wd向上効果の検証

透過率が従来並み45%のベース塗料 (Panel No.1のベース塗料) と透過率を65%に高めたベース塗料 (Panel No.3のベース塗料) を用いてWd向上効果を検証した結果、Wdが10ポイント向上した (Fig.10)。

また、塗装時の塗料粘度の低減に加えて、高沸点溶剤の添加率増加 (Panel No.6のベース塗料) により塗装後のウェット塗膜粘度を目標の $50 \text{ Pa} \cdot \text{s} / 10^{-1}/\text{s}$ に低減した結果、Wdが更に5ポイント向上し、無機系白ベースのWdは目標のWd20以下を達成した。

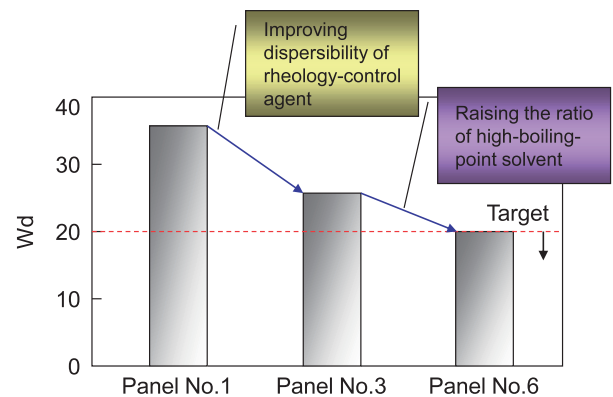


Fig.10 Effect of Improved Dispersibility of Rheology-Control Agent and Increase of High Boiling-Point Solvent on Wd

粘性剤の分散性向上によって塗装時の塗料粘度を低減した狙いは、塗装粒子径を低減することであった。そこで、狙い通りの塗装粒子径低減効果が発現できているかどうかの裏付けを得るため、従来のベース塗料 (Panel No.1のベース塗料) と分散性を向上したベース塗料 (Panel No.3のベース塗料) の塗装粒子径を各100個実測して平均値を算出した。

その結果、従来のベース塗料の塗装粒子径の平均値は $45 \mu\text{m}$ であったが、分散性を向上したベース塗料の塗装粒子径の平均値は $30 \mu\text{m}$ であり、塗装粒子径の低減効果が発現できていることを確認した (Fig.11)。

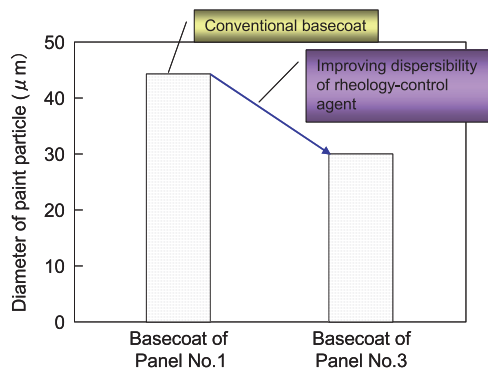


Fig.11 Comparison of Diameter of Paint Particle

(3) Wd向上効果の汎用性検証

無機系白ベース塗料と同じ分散性向上技術を有機系黒、赤および青ベース塗料に適用した結果、Wdは10ポイント向上した。

粘性剤の分散性を向上させた上記ベース塗料に高沸点溶剤の添加率増加を適用した結果、Wdは更に5ポイント向上し、いずれの塗色も目標のWd20以下を達成できた(Fig.12)。

粘性剤の分散性向上と高沸点溶剤の添加率増加によるWd向上効果が塗色を選ぶことなく発現したため、塗色の汎用性があるベース塗料技術であることが確認できた。

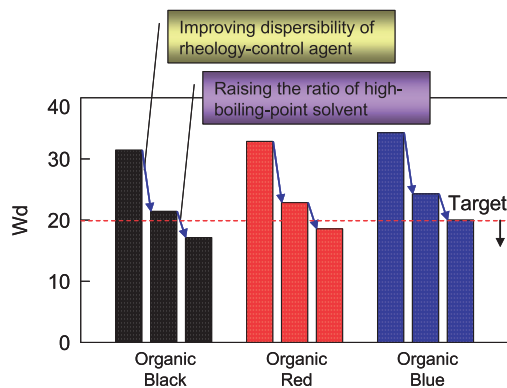


Fig.12 Effect of the Basecoat Technologies on Wd of other Colors

4. まとめ

平滑感が高いプラスチック用塗装を開発した。平滑感向上は次に示す(1)粘性剤の分散性計測技術と、(1)適用による分散性制御に溶剤沸点制御を組み合わせ(2)ベース塗料技術により実現した。その結果、対象全塗色において目標の平滑感(Wave-scan DOIによるWd20以下)を達成し、塗色における平滑感の違いを解消することができた。

(1) 粘性剤の分散性計測技術：粘性剤の分散性を分光光度計による透過率で数値化し、顔料沈降抑制に必要な保管時の塗料粘度確保と塗装時の塗料粘度低減を両立するための透過率の最適範囲を見出した。

(2) ベース塗料技術：粘性剤の分散性制御による塗装時の塗料粘度の低減に、高沸点溶剤の増量による塗装後のウェット塗膜粘度の低減を組み合わせることによって、対象全塗色について上記両粘度を均一化した。

5. おわりに

本技術はプラスチック用塗装に限定されるものではなく、ポデー用溶剤型塗装や水性塗装にも展開できる可能性があるため、本技術の展開可能性を検討し、自動車全体の更なる平滑感向上に努めていく。

参考文献

- (1) 館和幸：自動車上塗り塗料のレオロジーと外観品質，色材協会誌，Vol.76，No.8，p.307-312（2003）
- (2) 館和幸ほか：色材協会誌，Vol.58，p.390（1985）
- (3) 竹内徹：塗膜の仕上がり外観評価技術，塗装工学，Vol.42，No.12，p.382-394（2007）
- (4) 石原真興：レオロジーコントロール剤，色材協会誌，Vo.72，No.5，p.328-336（1999）
- (5) 長沼桂：水系塗料用チクソトロピック剤，塗装工学，Vo.41，No.11，p.388-394（2006）
- (6) 中道敏彦：よくわかる顔料分散，東京，日刊工業新聞社，p.5-9（2009）
- (7) 眞砂央：紫外可視分光法，色材協会誌，Vol.78，No.11，p.531-538（2005）

■ 著 者 ■



古賀一陽



河邊光祥

論文・解説

18

複数性能を扱う車体構造最適化手法の開発 Development of Multidisciplinary Design Optimization for Body Structure

小平 剛 央*¹ 小池 真人*² 天野 浩 平*³
Takehisa Kohira Masato Koike Kohei Amano

要 約

車体部品の板厚最適化解析手法は、衝突や剛性等の車両性能を保持した上で、最軽量な部品の板厚仕様を予測することができ、合理的な構造を求めるうえで有望な技術である。しかし、非線形性の強い衝突性能などを扱う場合、実用的な計算時間内で計算結果の精度を確保することは難しい。そこで、最適化計算の中心プロセスである近似モデルに着目して、その実験サンプリング手法および近似モデル作成手法を工夫し、非線形性の強い複数の衝突性能と剛性、NVH等を同時に扱える手法を構築した。

Summary

Gauge optimization technology which can predict the lightest gauge combination of parts while maintaining crashworthiness and stiffness etc., has a potential to pursue an optimal structure. However it is difficult to maintain calculation accuracy during practical duration of analysis in the case of crashworthiness etc. which has a strong non-linearity. In this paper, data sampling and approximation model have been improved focusing on main process of optimization analysis, and design optimization technology for body structure subjected to stiffness, NVH and crashworthiness with strong non-linearity has been established.

1. はじめに

地球温暖化に対する世界各国での自動車CO₂排出量の規制強化を受けて、自動車の質量低減、とりわけ車体に要求される軽量化目標は年々高まっている。一方で、衝突安全性能などの自動車の性能も、市場から高いレベルで求められており、軽量化と自動車の性能の両立は困難になりつつある。

これら自動車の軽量化や高性能化の問題の解決手段として、CAE (Computer Aided Engineering) 技術のひとつである構造最適化技術や、その高度な活用の研究が進んでいる⁽¹⁾。例えば、車体の剛性、あるいは衝突性能を低下させることなく、より軽量の構造を導出するなど⁽²⁾⁽³⁾、その実用化が進んでいる。更に、より多くの性能を同時に扱うことを狙った複数性能最適化技術 (Multidisciplinary Design Optimization : MDO)⁽⁴⁾⁽⁵⁾の研究も進んでいる。しかし、自

動車の車体の場合、対象とする性能が線形挙動を示す剛性から、非線形挙動を示す衝突性能まで様々であり、最適化計算過程の途中で作成する近似モデルの精度の確保が大きな課題となっている。

そこで本研究では、まず車体構造に要求される剛性 (静剛性・動剛性)、振動特性、および衝突性能 (前面衝突・側面衝突・後面衝突) を扱うことができる板厚・材質最適化の解析システムを開発⁽⁶⁾⁽⁷⁾し、次に、車体構造の板厚最適化への適用を通して、非線形性の強い衝突現象の近似モデルの精度確保を行った。更に、実車体構造モデルを用いて複数の性能目標を満足しつつ、質量を低減する板厚・材質最適化機能を確認した。

*1~3 技術研究所
Technical Research Center

2. 最適化解析システムの開発

2.1 複数性能最適化技術

複数性能最適化とは、複数の設計領域を効率よく最適化する解析技術のことで、式 (2.1) ~ (2.3) で定式化される⁽⁴⁾。

$$\text{最小化 } f(x, u(x)) \quad (2.1)$$

$$\text{制約条件 } g(x, u(x)) \geq 0 \quad (2.2)$$

$$h(x, u(x)) = 0 \quad (2.3)$$

ここで、 $u(x)$ は、式 (2.4) より求められる。

$$A(x, u(x)) = \begin{pmatrix} A_1(x, u_1(x), \dots, u_n(x)) \\ \vdots \\ A_n(x, u_n(x), \dots, u_n(x)) \end{pmatrix} = 0 \quad (2.4)$$

式 (2.1) は目的関数、式 (2.2) は不等式制約条件、式 (2.3) は等式制約条件である。また、 x は設計変数、 $u(x)$ は式 (2.4) の複数性能解析で求められる状態変数、 n は性能の数である。本解析技術の特徴は、対象とする複数の性能を状態変数化し、目的関数と制約条件内に定義できる点であり、車体の解析においては、剛性や衝突などの複数の性能と質量最小化を両立する構造の導出を効率的に行うことができる。

2.2 最適化解析システム

式 (2.1) ~ (2.3) に基づいて、目的関数を車体質量の最小化、設計変数を車体の各部材の板厚・材質とし、制約条件として、車体の線形・非線形な複数の性能を扱うことが可能な、実験計画法と近似モデルを組み合わせた複数性能の板厚・材質最適化解析システムを作成した。Fig.1にその計算プロセスを示す。

実験計画法 (Design of Experiments : DOE) は、設計変数の変動が性能や質量に及ぼす影響を効率よく解析するためのデータサンプリング手法であり、近似モデル (Approximation Model) は、性能解析予測を近似関数に置き換えることで解析時間を削減できる手法である。どちらも最適化解析では近年、一般的に用いられている。実験計画法、近似モデル、最適化手法の具体的な手法は以下である。

実験計画法：ラテン超方格法⁽⁸⁾

近似モデル：応答曲面法

最適化手法：遺伝的アルゴリズム

ラテン超方格法は、設計変数を連続値として扱いながら、実験点を最適設計空間内に均一に分布させ、高次の効果を捉えることができるので、非線形性の強い衝突現象の実験計画として適切であると考えられる。なお、材質を設計変

数にする場合は、材質の強度特性を変数として扱う。応答曲面法 (Response Surface Method : RSM) は、性能解析予測を多項式関数で表現する手法である。

図中のStatistics Analysisでは、部材の性能寄与を把握するためのパレート分析、回帰分析などを行う。また最適化解析の精度確認のため、図中のError (最適解誤差) で判断する。

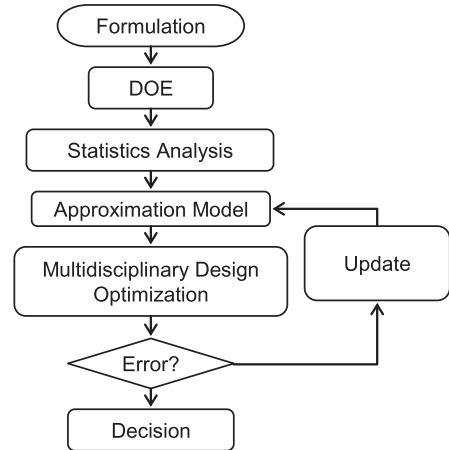


Fig.1 Multidisciplinary Design Optimization Process

3. 近似モデルの高精度化

一般に、非線形性の強い衝突現象を含む複数性能最適化では、近似モデルの精度が低下する。Fig.2はその概念を示す。この精度を高めるためには、通常、実験サンプルの数を増やせば良く、例えば、2次の応答曲面を高精度で計算するために必要な実験サンプル数 S は、式 (3.1) で見積もられる⁽⁴⁾。

$$S = \frac{(j+1)(j+2)}{2} \quad (3.1)$$

ここで j は設計変数の数であるが、自動車の車体構造のように設計変数が多い場合は、実験サンプルの数が膨大になり、衝突解析は多大な計算時間が必要なことから実用的でない。そこで、商品開発への適用を念頭に、実用レベルまで実験サンプル数を減らしながら、近似モデルの精度の確保を行った。

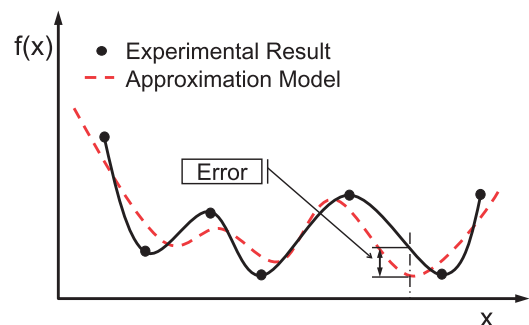


Fig.2 Schematic of Accuracy of Approximation Model

3.1 実験サンプル数の削減

実験サンプル数の削減は、前述のラテン超方格法の特徴を活かしながら行った。ラテン超方格法の実験サンプル数は、j+1以上であれば、任意の実験サンプル数を設定することができ、そのサンプル数が水準数となる。そこで、設計変数の探索範囲を考慮しながら、各実験の板厚が連続値として設計空間内に均一に分布する水準数を見積もり、実験サンプル数を決定し実験解析を行った。次に、その実験結果から、各設計変数の板厚変化に対する全制約条件（全性能）のパレート分析を応用した寄与解析を行い、寄与の低い設計変数を無視することで、少ない実験サンプル数で2次の応答曲面の作成を可能とした。

3.2 非線形性に基づく精度向上

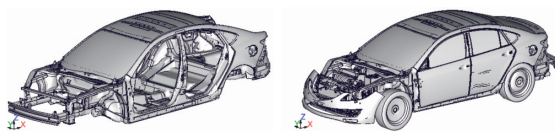
次に衝突現象の違いに着目して、近似モデルの高精度化に取り組んだ。衝突現象は、側面衝突のように曲げ座屈現象（本論文では、弱非線形性で定義）が主体的なものと、前面衝突や後面衝突のように主に曲げ座屈と軸圧縮現象（強非線形性で定義）が複合しているものがある。この非線形性の強弱に分けて、精度悪化の要因を分析し、改善策を講じた。Table 1に非線形性の違いに応じた改善ステップを示す。

Table 1 Process of Accuracy Improvement

	STEP1	STEP2	
Crashworthiness	Side Impact	Frontal Impact	Rear Impact
Mode	flexural buckling	flexural buckling and axial compression	
Nonlinearity	Weak	Strong	

(1) 弱非線形性能に対する高精度化 (STEP1)

弱非線形現象である側面衝突の曲げ座屈に対する精度悪化要因を、側面衝突だけを制約条件とする最適化解析結果を用いて分析した。最適化解析に用いた詳細モデルと解析条件をFig.3に示す。



- 目的関数： 質量最小化
- 制約条件： 側面衝突： 生存空間量 \geq 目標値
- 設計変数： 車体骨格部品 37 変数
- 板厚変更幅： $0.6 \leq t_j \leq 3.6$ ($j=1,2,\dots,37$)

Fig.3 FE Model and Analysis Conditions

最適化解析結果をTable 2に示す。表中の①～⑤は、車

体の各計測点における生存空間量，“True Value”は最適板厚仕様における解析値，“Predicted Value”は応答曲面を用いた最適計算での予測値，“Error”はTrue ValueとPredicted Valueの誤差である。

5つの計測点全てで誤差が100%を越えており、予測精度が低いことが分かった。この誤差を分析した結果の概念をFig.4に示す。この分析より、最適解が実験計画法で設定した設計空間内にある場合の誤差（図中のType A）と、最適解が実験計画法で設定した設計空間外（図中Type B）にある場合の誤差に分けられることが分かった。

Type Aの誤差の大きさを評価するため、応答曲面を用いて計算した性能とFEMで計算した性能の相関を調べた。その結果をFig.5に示す。これよりR2係数は0.9以上と高く、応答曲面の予測精度は高いことが分かった。

Table 2 Accuracy of Response Surface Method (RSM)

	True Value (FEM)	Predicted Value (RSM)	Error [%]
Weight	82	64	-23%
Side Impact	①	142	328%
	②	126	186%
	③	151	158%
	④	135	100%
	⑤	169	109%

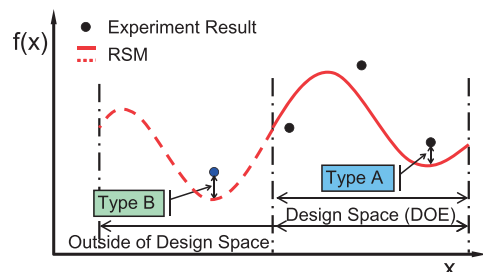


Fig.4 Factor of Low Accuracy of RSM

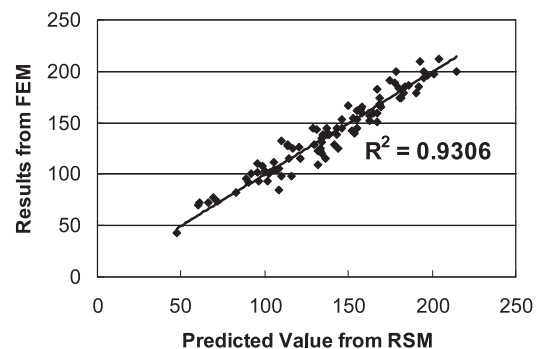


Fig.5 Correlation between RSM and FEM

次に、Type Bでの予測精度を調べた。設計空間外での調査のため、まず設計空間内の基準となる初期板厚仕様の

性能を応答曲面を用いて予測し、FEMで求めた性能と比較した。その結果をTable 3に示す。Table 2より改善傾向にあるが、初期仕様の性能予測においても応答曲面の精度が悪いことが分かった。そこで、各板厚仕様の実験サンプルの質量分布を調べた。その結果をFig.6に示す。初期板厚仕様での質量(図中点線部分)を超える実験点は多くあるが、それ以下の実験点が少ないことが分かり、実験計画法での最適解近傍空間の実験組み合わせが、ほとんどないことが精度悪化の主要因と考えられる。

Table 3 Accuracy Verification of Initial Thickness

		True Value (FEM)	Predicted Value (RSM)	Error [%]
Weight		104	94	-9%
Side Impact	①	96	74	-23%
	②	89	69	-23%
	③	90	93	4%
	④	125	121	-3%
	⑤	89	173	94%

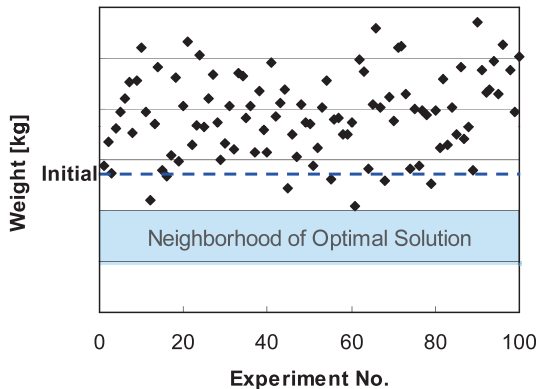


Fig.6 Mass Distribution of DOE

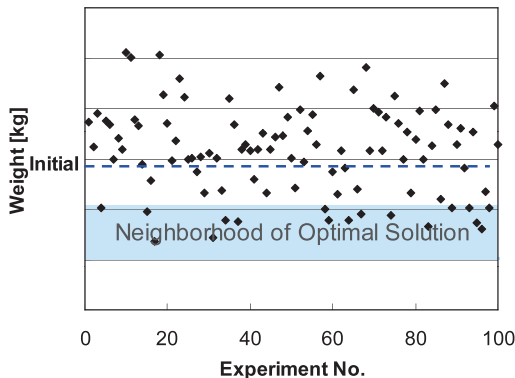


Fig.7 Improvement of Mass Distribution

この対策として、実験計画法の板厚水準の振り方を、絶対値 ($0.6 \leq t_j \leq 3.6$) から初期仕様に対する相対値 (例え

ば、 $\pm 30\%$) に変更し、実験組み合わせの質量が初期仕様の質量の近傍に均一に分布するように変更した。Fig.7に変更後の質量分布、Table 4にその精度検証結果を示す。これらより、変更後の質量は最適解近傍にも分布し、近似モデルの精度が改善したことを確認した。

Table 4 Verification of Accuracy Improvement

		True Value (FEM)	Predicted Value (RSM)	Error [%]
Weight		107	107	0%
Side Impact	①	101	105	4%
	②	97	110	13%
	③	114	116	2%
	④	147	157	7%
	⑤	190	190	0%

(2) 強非線形性能に対する高精度化 (STEP2)

強非線形現象である前面オフセット衝突と後面衝突に対しては、側面衝突に前面オフセット衝突と後面衝突を加えた制約条件で精度悪化要因の分析を行った。

目的関数：質量最小化

制約条件：

前面オフセット衝突：トーボード後退量 \leq 目標値

側面衝突：生存空間量 \geq 目標値

後面衝突：タンクエリア変形量 \leq 目標値

設計変数：車体骨格部品37変数

板厚変更幅： $-30\% \leq t_j \leq +20\%$ ($j=1, 2, \dots, 37$)

精度検証結果をTable 5に示す。表中の①～⑥は、車体の各計測点におけるトーボード後退量、生存空間量、タンクエリア変形量である。

この結果から、非線形の衝突現象の中でも特に前面オフセット衝突の精度が低いことが分かり、3.2(1)項と同様に、精度悪化要因の分析を行った。この場合、Fig.4のType Aに相当する応答曲面とFEMの相関R2係数は0.4と低いことが分かった。その結果をFig.8に示す。

Fig.9には前面オフセット衝突の、解析途中の状態を示す。この図より、前面オフセット衝突は軸圧縮や曲げ座屈が複合的に発生する衝突現象であるため、2次の応答曲面ではその現象を十分にモデル化できていないと考えた。非線形現象の近似モデルとしては、ニューラルネットワークの一種のRBF (Radial Basis Functions)⁽⁹⁾が提案されており、この手法の適用を試みた。その結果、弱非線形と同様に近似モデルの精度が改善したことを確認した (Table 6)。

Table 5 Accuracy of RSM

		True Value (FEM)	Predicted Value (RSM)	Error [%]
Weight		98	98	0%
Frontal Impact	①	42	29	-31%
	②	6	20	221%
	③	33	12	-64%
	④	14	16	9%
	⑤	23	22	-6%
	⑥	24	31	31%
Side Impact	①	110	110	0%
	②	105	106	2%
	③	108	111	3%
	④	123	125	2%
	⑤	159	161	1%
	⑥	208	207	0%
Rear Impact	①	62	52	-16%
	②	140	138	-2%
	③	165	160	-3%

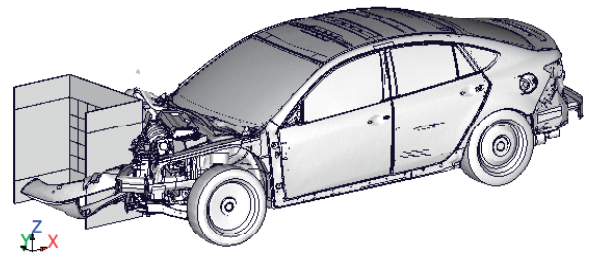


Fig.9 Frontal Offset Impact

Table 6 Verification of Accuracy Improvement by RBF

		True Value (FEM)	Predicted Value (RSM, RBF)	Error [%]
Weight		101	101	0%
Frontal Impact	①	30	30	-2%
	②	7	8	19%
	③	27	30	11%
	④	13	14	6%
	⑤	20	25	21%
	⑥	21	23	11%
Side Impact	①	108	111	3%
	②	103	105	3%
	③	106	110	4%
	④	122	124	2%
	⑤	159	163	3%
	⑥	209	208	0%
Rear Impact	①	60	54	-10%
	②	137	140	2%
	③	161	159	-2%

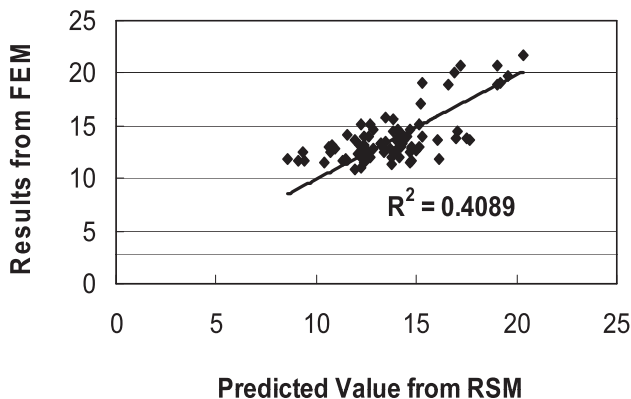


Fig.8 Correlation of Frontal Offset Impact

4. 最適化解析システムの機能検証

前述で開発した最適化解析システムを、量産開発の車体上部モデルの板厚・材質最適化検討に適用し、その機能と有効性を検証した。最適化条件を以下に示す。

目的関数：質量最小化

制約条件：車体ねじり剛性 \geq 目標値

低周波振動数 \geq 目標値

リヤダンパトップ動剛性 \geq 目標値

側面衝突：車体進入量 \leq 目標値

ルーフクラッシュ：耐荷重 \geq 目標値

設計変数：NVH系67部品の板厚

衝突系39部品の板厚と材質

板厚変更幅：-20% \leq t_j \leq +20% (j=1, 2, ..., 67)

材質変更幅：440, 590, 780, 980MPa級ハイテン材

近似モデル：2次の応答曲面法

最適化手法：遺伝的アルゴリズム

最適化結果をTable 7に示す。近似モデルの予測精度は $\pm 5\%$ 未満と高い水準で、実用上問題のないレベルである。また、最適解析前は得ることができなかった、全ての性能目標を満足しつつ、3.4%の軽量化効果を有する仕様を導き出し、有効性を確認することができた。

5. まとめ

最適化解析の近似モデルに着目して、実験サンプリング手法と非線形現象の分析手法に以下の工夫を加えて、車体で問題となる剛性、振動、衝突現象を扱える最適化解析システムを開発した。

- ・実験計画法の実験組み合わせは、目的関数に応じた最適探査範囲を考慮した空間を定義
- ・設計変数パラメータの水準は、初期値からの相対値で定義
- ・非線形の強い現象の近似関数モデルの算出法として、RBFを適用

本システムを商品開発の車体上部構造の軽量化検討に適用したところ、性能目標を満足しつつ、軽量化の可能性を示す結果が得られ、本システムが車体構造の軽量化検討に有用であることを確認した。今後、車両の更なる軽量構造の開発に、今回開発した複数性能を扱える最適化解析システムを応用展開していく。

Table 7 Application Result

		Target	Optimized Results	Error [%]
Weight		Minimum	-3.4%	0.0%
Body Stiffness		$\geq A$	$> A$	0.1%
Torsion Frequency		$\geq B$	$> B$	0.4%
Bending Frequency		$\geq C$	$> C$	0.0%
Dynamic Stiffness of Rear Damper Top	X(RH)	$\geq D$	$> D$	-0.4%
	X(LH)	$\geq E$	$> E$	-0.3%
	Y(RH)	$\geq F$	$> F$	0.5%
	Y(LH)	$\geq G$	$> G$	0.9%
	Z(RH)	$\geq H$	$> H$	0.1%
	Z(LH)	$\geq I$	$> I$	-0.8%
Side Impact	①	$\leq J$	$< J$	1.0%
	②	$\leq K$	$< K$	-1.7%
	③	$\leq L$	$< L$	-2.1%
	④	$\leq M$	$< M$	-3.1%
Roof Crash		$\geq N$	$> N$	-4.5%

参考文献

- (1) Donald M. Baskin et al. : A Case Study in Structural Optimization of an Automotive Body in White Design, SAE Technical Paper (2008)
- (2) 玉木善規 : 構造最適化解析技術を利用したボデー軽量化検討, 自動車技術会学術講演会前刷集, Vol.981, No.9831676, p.197-198 (1998)
- (3) 岡本和之ほか : 衝突対象を考慮した車体構造の最適設計, 自動車技術会学術講演会前刷集 (2002年秋季), No.80-02, p.9-12
- (4) 川面恵司ほか : 最適化理論の基礎と応用, 2000年初版, コロナ社, p.171-210
- (5) Nickolas Vlahopoulos (Univ. of Michigan) et al. : Utilization of Response Surface Methodologies in the Multi-discipline Design Optimization of an Aircraft Wing, SAE Technical Paper (2009)
- (6) 小平剛央 : 複数の衝突性能を扱う車体構造最適化システムの開発, 2010年自動車技術会秋季大会, No.128-10, p.17-20, 自動車技術会 (2010)
- (7) 小平剛央 : 自動車の複合領域最適化における応答曲面の高精度化, 第9回最適化シンポジウム, No.10-67, 210, 日本機械学会 (2010)
- (8) 宮田悟志ほか : 自動化・最適化プログラムiSIGHTによる区分モンテカルロ法の適用, 平成12年度材料力学部門講演会講演論文集, No.00-19, p.691-692, 日本機械学会 (2000)
- (9) 山川宏ほか : 最適設計ハンドブック, 2003年初版, 朝倉書店, p.160-174, p.197-199

■ 著 者 ■



小平剛央



小池真人



天野浩平

論文・解説

19

溶射技術によるアルミニウム合金鋳物の耐摩耗性向上 Wear Resistance Modification of Aluminum Alloy Casting by Thermal Spray Technology

小田 信行^{*1} 南場 智^{*2} 大下 敬之^{*3}
Nobuyuki Oda Satoshi Nanba Takayuki Ohshita

要約

アルミ鋳物は、鋳鉄代替による軽量化を目的に多くの自動車部品に採用されているが、耐摩耗性不足が代替の課題になることが多い。耐摩耗性確保のための表面処理の一種である溶射は、材料選定の自由度が高く、また高い耐摩耗性が確保できることから、近年、高耐摩耗性が要求される摺動部品への溶射の適用が始まっている。本稿では、鋳鉄に窒化処理を施しているエンジン摺動部品をアルミ鋳物化するにあたり、サーメット溶射を適用しその仕様を検討した結果を紹介する。

これらの特性は、いずれも皮膜のHV硬さと強い相関があり、HV硬さを高めることで、鋳鉄窒化と同等以上の耐摩耗性を確保できる一方、HV硬さを下げれば耐スカッフ性が改善される。溶射粉末や溶射施工条件を最適化し適切なHV硬さを設定することで、エンジン摺動部品に適した耐摩耗特性を確保することができる。

Summary

Aluminum casting is often adopted for automotive components as substitute for cast iron. And the wear resistance shortage often becomes the issue of replacement. In recent years thermal spray coating, which is one of the wear resistance modification method, is started to be applied to automotive components that demand high wear resistance, because it has flexibility of material selection and high potential of wear resistance. The application of the cermet spraying and the material specification were examined to replace aluminum casting with nitrided cast iron for engine components.

Cr₃C₂-NiCr high velocity thermal spray coating has high scuff limit and wear resistance. These sliding properties have a high correlation with HV hardness of coating. If coating hardness is HV 700 or more, wear resistance equivalent to nitrided cast iron can be obtained. And the lower coating hardness is, the higher scuff limit is. Cr₃C₂-NiCr thermal sprayed aluminum casting with proper coating hardness by optimizing powder and coating condition has suitable wear resistance as engine components.

1. はじめに

アルミニウム合金は、低比重・高熱伝導といった材料物性を活かし、多くの自動車部品に採用されているが、鋳鉄鋼に比べ軟質なため、耐摩耗性不足が課題の一つである。

表面処理の一種である溶射は、皮膜材料の自由度が高く特性確保が比較的容易、他の表面処理手法に比べ皮膜生成が速

い、複雑部材や大型部材への施工が容易、といった特長を有する。更に、近年のプロセス技術開発により弱点であった耐剥離性が大幅に改善されたことから、高耐摩耗性が要求される摺動部品への適用が始まっている⁽¹⁾。

今回対象としたエンジン部品は、鋳鉄にガス軟窒化処理を施工し、高い耐摩耗性を確保している。アルミ合金化の開発目標を、現行同等以上の耐摩耗性の実現とし、摺動部への耐

*1~3 技術研究所
Technical Research Center

摩耗付与技術として、高速フレイムによるサーメット (CrCr₃C₂-25NiCr) 溶射を選定した⁽²⁾。

一般に、耐摩耗性確保には、皮膜の緻密化・硬化化で対応するが、耐焼付き性、摺動抵抗等の摺動特性が悪化する場合も少なくない。本サーメット溶射皮膜においても、適用に応じた皮膜仕様を設定するには、皮膜仕様と要求特性との関係を明確にしておく必要がある。これまで、本溶射皮膜中の炭素量に注目し、皮膜の組織構造と物性の相関性を定量的に評価した研究例⁽³⁾はあるが、耐摩耗性や耐焼付き性といった摺動特性との相関性については充分把握されていない。そこで、溶射システム・条件を工夫することで、幅広い範囲で皮膜仕様を設定した溶射皮膜を作成し、摺動特性を中心に皮膜仕様との関係を詳細に調査した。

2. 開発の考え方

2.1 耐摩耗性付与技術

アルミへの耐摩耗性付与技術を比較検討するため、複合メッキ、溶射、陽極酸化等の表面処理を施工したテストピースを作成し、主に耐摩耗性の観点からスクリーニング評価を行った。Fig.1に往復摺動摩耗試験での評価結果を示す。本部品適用環境において鋳鉄窒化品と同等以上の耐摩耗性を示すのは、カーバイド系のサーメット溶射のみであった。

2.2 溶射プロセス

上記のスクリーニング結果よりカーバイド系材料の溶射皮膜を選択し、それらを高品質で実現する溶射プロセスを検討した。Fig.2に代表的な溶射プロセスの特徴を粒子速度とフレイム温度の関係で示す。粒子速度が高いほど粒子結合度や基材密着力が増し、溶射皮膜の緻密さ・硬さは高くなり、また、フレイム温度が高いほど高融点材料の適用が可能で、溶射材料の選択肢が広がることが知られている。

Table 1に、カーバイド系材料を溶射する場合の各種溶射プロセスの特徴を、投入エネルギーと皮膜特性で比較して示す。フレイム溶射やアーク溶射は投入エネルギーが小さく投資/コストの面は優位であるが、粒子間結合力や基材密着力が低い。一方、高速フレイム溶射やプラズマ溶射、爆発溶射は、投資/コスト面では不利であるが、特性の良い皮膜が得られる。

以上より、投入エネルギーと皮膜特性の両面から、バランス

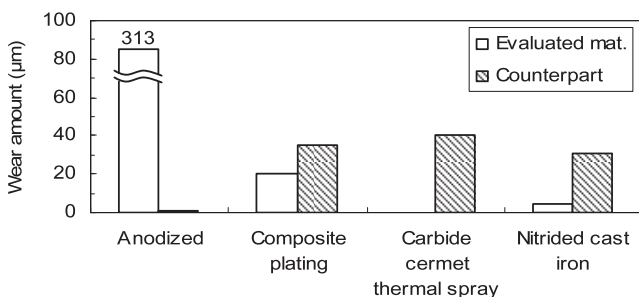


Fig.1 Wear Resistance of Various Surface Treatments

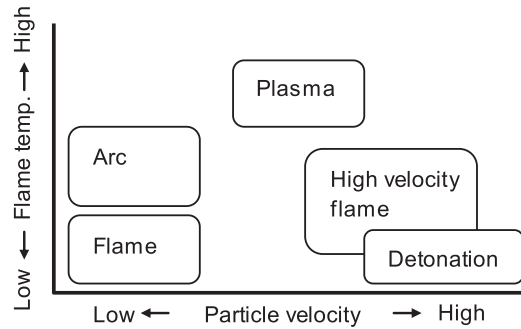


Fig.2 Schematic of Thermal Spray Process

Table 1 Process Comparison in Carbide Thermal Spray

Thermal source	Process	Energy	Interparticle cohesion	Adhesion
Combustion gas	Flame	4	2	2
	High velocity flame	2	4	4
	Detonation	1	4	4
Electricity	Arc	4	2	2
	Plasma	3	3	3

の良い高速フレイム溶射を選定した。

2.3 溶射材料

本部品で最も問題となる摩耗形態は、焼付きによるアドヘシブ摩耗である。そこで、溶射材料の選定には、ピンオンディスク試験による焼付き限界評価を用いた。試験条件をTable 2に示す。候補の溶射材料には、代表的な耐摩耗性材料であるCr₃C₂-25NiCrとWC-12Coを選択し、実際に摺動するシール部材2種を相手材として、焼付き限界評価に供試した。Fig.3に現行の鋳鉄窒化と比較して結果を示す。選定した溶射皮膜はいずれも鋳鉄窒化に比べ焼付き限界は同等以上で、Cr₃C₂-NiCrがより良好であった。

以上より、溶射材料としてCr₃C₂-25NiCrを選定した。

Table 2 Scuff Limit Test Condition (Pin-on-Disk)

Load	Raised in stages to scuffing occurrence
Sliding speed	8m/s fixed
Lubrication	Engine oil 0W20: 100°C, 0.7ml/min
Counterpart	Seal A: Sintered iron alloy (Fe-3%C) Seal B: Boron added ductile cast iron

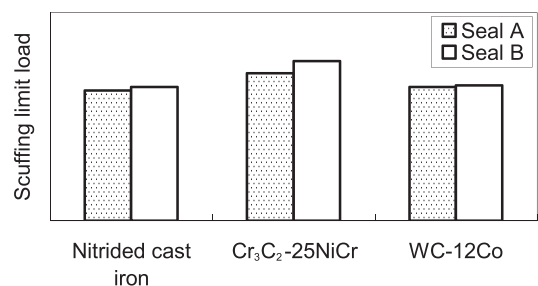


Fig.3 Scuff Limit Test Result

3. 実験方法

サーメット溶射の基本仕様として、溶射プロセスには『高速フレーム溶射』、溶射材料には『Cr₃C₂-25NiCr』を選定した。実部品では、高い耐摩耗性だけでなく、低摺動抵抗や高皮膜密着力も同時に要求される。また、溶射の施工条件が異なれば、皮膜仕様も変動する。従って、適用に応じた皮膜仕様とそれを達成する溶射条件を設定するためには、皮膜仕様が要求特性に及ぼす影響を明確にしておかなければならない。そこで、溶射条件・システムを工夫することで仕様の異なる溶射皮膜を広い範囲で作成し、要求特性を評価して、これらの関連性を詳細調査した。更に、一部仕様を実機に織込み、これら関連性を検証した。

3.1 溶射条件

溶射皮膜は、粒径の小さい粉末を使用し、溶射中の粉末(粒子)速度を速くすることで、緻密で硬さが高く、基材との密着力が高い皮膜が得られる。また、この逆の条件では、皮膜は疎になり硬さ・密着力の低い皮膜になる傾向を示す。この傾向を利用し、溶射材料の組成を固定し、溶射システム(燃料・溶射ガン)、溶射粉末の粒径、被溶射物との距離(W/D: work distance)を調整し、硬さをパラメータとして、仕様の異なる皮膜が得られるよう、条件設定を行った。

溶射システムとしては、①液体燃料(ケロシン)を用いるシステムと②気体燃料(プロピレン)と水冷ガンのシステムおよび③気体燃料(プロピレン)と空冷ガンのシステムを用いた。溶射速度は①、②、③の順で高い。粉末粒径は、細粒(10~38μm)と粗粒(15~45μm)の2グレードを用いた。W/Dは各システム、粒径に合わせて調整した。Table 3に溶射試作条件と狙いの硬さを示す。

3.2 評価方法

実部品と同じアルミ鋳物合金(AC4B-T6)を基材とする試験片に、各条件で溶射を実施し、皮膜仕様と摺動特性、耐剥離性の関係性を評価した。

皮膜仕様を表す指標として、皮膜のHV硬さ、気孔率、および金属組織を調査した。

摺動特性は、ピンオンディスク試験装置を用い、耐摩耗性、耐焼付き性、摺動抵抗を評価した。評価装置概略をFig.4に、評価条件をTable 4に示す。耐焼付き性は2.3項と同

Table 3 Trial Production Condition

No	Coating spec (Target HV)	Spray gun [fuel]	Particle dia.(μm)	W/D (mm)
1	>1000	WokaStar	10~38	300
2	1000	[Oxygen/kerosene]	15~45	
3	1000	DJ-2700	10~38	230
4	900	[Oxygen/propylene]	15~45	
5	800	DJ-Std#9 [Oxygen/propylene]	10~38	180
6	700		15~45	215
7	600		15~45	180

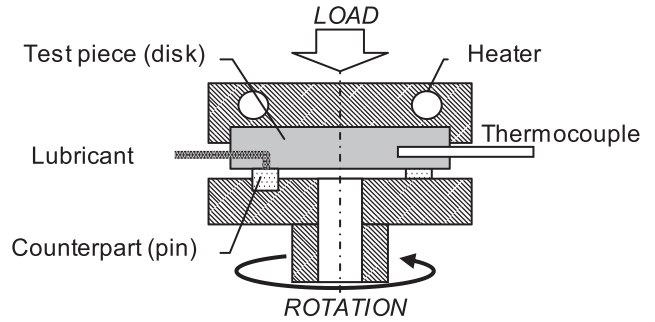


Fig.4 Schematic of Sliding Property Test Method

Table 4 Sliding Property Test Conditions

Mode	Wear resistance	Scuff limit	Frictional resistance
Metrics	Wear amount after 30 min.	Pressure at scuff occurrences	Coefficient of friction
Load	6MPa fixed	Raised in stages	2,4MPa
Speed	1m/s	15m/s	2.5 ~ 10m/s
Lubricant	No	Engine oil 10W-20 0.17ml/min (Room temp.)	
TP temp.	—	100°C	100°C

様に焼付き限界で評価しているが、試験片仕様間の差異を明確にするため、更に厳しい条件とした。相手材はいずれも実際に摺動するシール部材(鉄系焼結材)である。なお、摺動特性評価用の試験片は、ダイヤモンドでの研削により、表面粗さをRa: 0.10~0.16μmに揃えている。

耐剥離性評価は、溶射皮膜とアルミ鋳物基材との密着力へ溶射条件が及ぼす影響を把握するため、JIS H 8402「溶射皮膜の引張密着強さ試験法」に準じて実施した。

4. 実験結果と考察

4.1 皮膜仕様

Fig.5に、各皮膜仕様のHV硬さと気孔率、金属組織を示す。粒子速度の大きい仕様(番号の若い仕様)ほど、HV硬さが高く気孔(金属組織中黒く見える部分)が少なく、緻密な皮膜が形成されていることが分かる。狙い通り、特性の異なる皮膜を得ることができた。

4.2 摺動特性

Fig.6にHV硬さと耐摩耗性評価での摩耗量の関係を示す。HV硬さが高いほど摩耗量は小さく、皮膜硬さと耐摩耗性には高い相関関係がある。またHV700以上の仕様については、現行量産仕様に比べ摩耗量は少ない。Fig.7に皮膜のHV硬さと相手材(鉄系焼結材)の摩耗量との関係を示す。両者に明瞭な相関関係は見られず、かつ、現行鋳鉄窒化での摩耗量と同等以下である。本皮膜仕様の相手攻撃性は、HV硬さに寄らず現行鋳鉄窒化と同等以下である。

Fig.8に皮膜硬さと焼付き限界面圧の関係を示す。硬さが低いほど、焼付き限界面圧は高い。Fig.9に気孔率との関係を示すが、焼付き限界面圧と更に高い相関関係が認められ

る。硬さが低いほど皮膜中に存在する気孔は多く、この気孔がオイルピットの役割を果たし焼付き限界が向上したものと考える。なお、気孔率が低く（1%以下）、焼付き限界面圧が低いNo.1～3（HV1,000レベル）においても、現行鑄鉄窒化（図中点線）と同等の焼付き限界面圧であり、本サーメット溶射は高い耐焼付き性を有すると考える。

Fig.10および11に面圧2MPaおよび4MPaでの摩擦係数を示す。いずれの皮膜仕様においても、摺動抵抗は現行鑄鉄窒化よりも小さく、特に面圧の低い場合に小さい。面圧が高くなると、油膜形成が困難となり摩擦係数が増える傾向にあると考える。なお、鑄鉄窒化は面圧に対しほとんど変化しないが、これは摺動面に黒鉛脱落による比較的大きなオイルピットが存在し、面圧の大小に寄らず同様の油膜が形成されるためと考える。

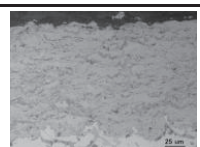
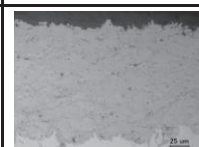
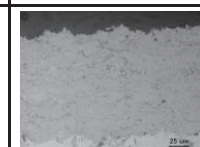
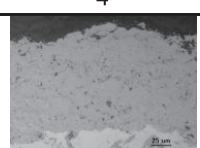
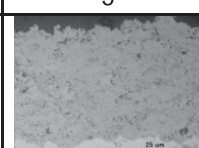
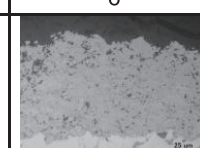
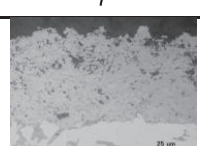
1	2	3
		
Hardness(HV)1010	1000	980
Porosity(%) 0.8	0.6	0.4
4	5	6
		
920	780	700
1.4	2.7	5.3
7		
		
550		
6.1		

Fig.5 Metal Structure and HV Hardness of Each Coating

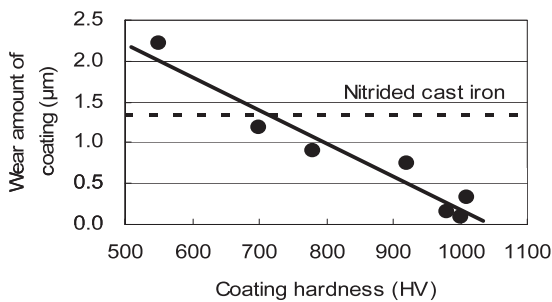


Fig.6 Wear of Coating Against Coating Hardness

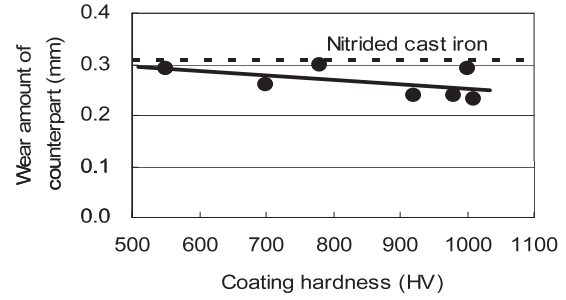


Fig.7 Wear of Counterpart Against Coating Hardness

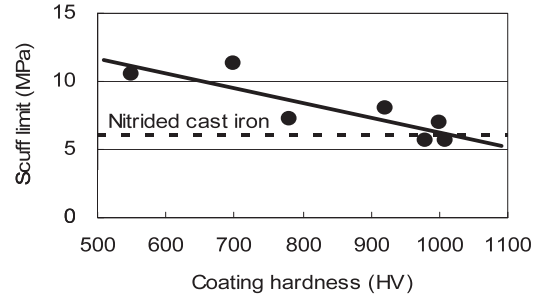


Fig.8 Scuff Limit Against Coating Hardness

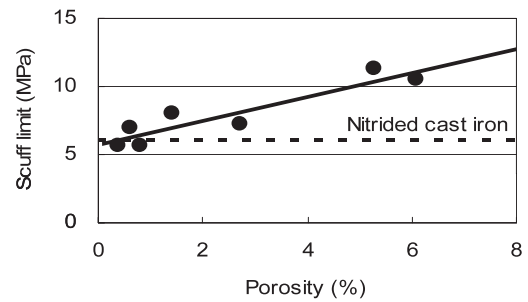


Fig.9 Scuff Limit Against Porosity

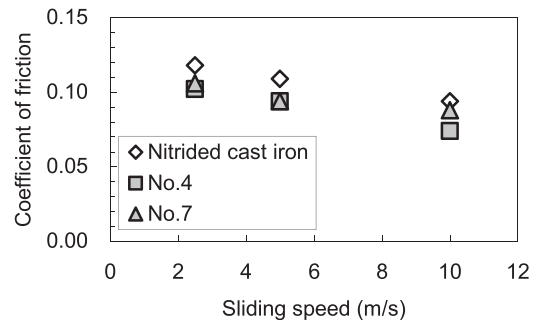


Fig.10 Coefficient of Friction at 2MPa

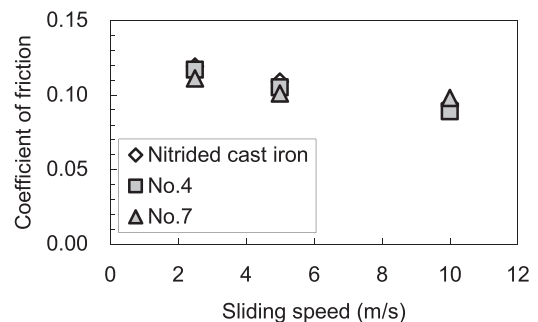


Fig.11 Coefficient of Friction at 4MPa

4.3 耐剥離性

Fig.12に引張密着強さ試験結果を示す。本試験方法は、溶射皮膜と基材間に剥離が生じる際の応力で、密着力を定量化するものである。しかしながら、今回の皮膜仕様では、溶射皮膜と基材の剥離はなく、溶射皮膜と接着剤の界面で剥離した。基材がアルミ鋳物で軟質であるため、溶射皮膜の機械的嵌合が強く、非常に高い皮膜密着力が得られるものと考えられる。今回の評価では、いずれの皮膜も接着剤強度（70MPa程度）と同等以上の密着力を有することが確認できた。

4.4 皮膜仕様の実機検証

試験片でのリグ評価により、耐焼付き性、耐摩耗性、耐剥離性といった要求特性は、HV硬さをパラメータとして整理できることがわかった。実部品に施工し耐久試験を行い、要求特性とHV硬さの関連性を検証した。Fig.13に、リグ試験と実機試験での摩耗量、および摺動面の拡大写真を示す。実機においても溶射皮膜は現行鋳鉄窒化と同等の滑らかな摺動面を呈しており、摩耗量はHV硬さと高い相関があることが判った。

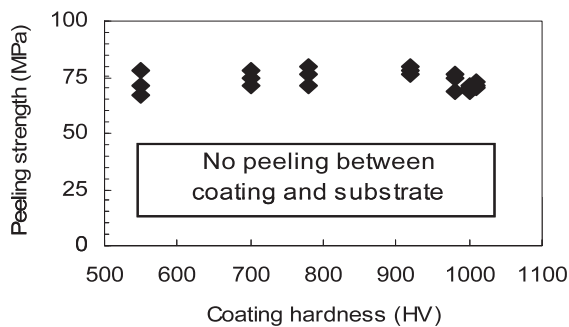


Fig.12 Peeling Strength

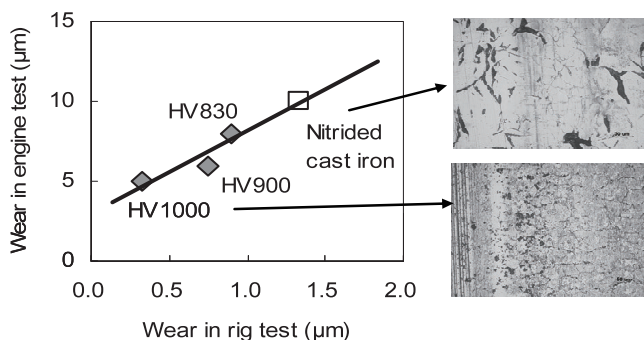


Fig.13 Wear Relationship between Rig and Engine Test

5. まとめ

高耐摩耗性が要求されるエンジン摺動部品のアルミ鋳物化を図るにあたり、耐摩耗性付与技術として $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-}25\text{NiCr}$ の高速フレーム溶射を選定した。適用に応じた皮膜仕様を設定するため、広い範囲でHV硬さを設定した溶射皮膜を作成し、皮膜仕様と摺動特性との関係を調査することで、以下の知見を得た。

- (1) 耐摩耗性は、HV硬さと高い相関があり、HV700以上の硬さであれば鋳鉄窒化並みの耐摩耗性を得ることができると考えられる。相手攻撃性は、HV硬さに寄らず鋳鉄窒化以下である。
- (2) 耐焼付き性は、HV硬さが低いほど良好であるが、これは皮膜中の気孔が増え、オイルピットの役割を果たすためと考えられる。
- (3) 摺動抵抗は、いずれの仕様においても鋳鉄窒化よりも小さい、特に面圧の低い場合に小さくなる。

最後に、本研究開発を進めるにあたり多大なご協力をいただいた社外の関係者の皆様に深謝します。

参考文献

- (1) 池田ら：新型高性能V6エンジン用シリンダブロックの開発，自動車技術会学術講演会前刷集，No.75-08 (2008)
- (2) 和田：高速フレーム（HVOF）溶射の現状と課題，表面技術，Vol.59, No.8 (2008)
- (3) 園家ら：HVOF溶射による $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ 皮膜の組織構造と物性の相関性，溶接学会論文集，第21巻 第1号 (2003)

著者



小田 信行



南場 智



大下 敬之

社外への発表論文一覧表 (2010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
2010.3.31	University of Guelph Bioplastics and Green Composites 2010	Development of Mazda Biotechmaterial for Automotive Use	松田 祐之	技術研究所
2010.4.29	Austrian Society of Automotive Engineers 31st International Vienna Motor Symposium	Development of Premacy Hydrogen RE Hybrid	若山 敬平	技術研究所
2010.5.19-20	ESI Group Global Forum 2010	24GHz Vehicle Radar Performance Analysis with PAM-CEM	浜田 康 鶴長真里絵	電子開発部 (株)マツダE&T
2010.6.28-7.1	AIAA 28th AIAA Applied Aerodynamics Conference	Transient Analysis of Pitching Stability of Sedan- type Vehicle Models Using Large-Eddy Simulation	Seeyuan Cheng 坪倉 誠 中島 卓司 農沢 隆秀 中村 貴樹	北海道大学 同上 広島大学 技術研究所 エンジニアリングシステム部
2010.6.30-7.2	The R&D Management Conference 2010	New Methodology of advanced Technology Valuation for compensatory multiattribute Product	新田 茂樹	技術企画部
2010.7.14-17	Fifth European Conference on Computational Fluid Dynamics	Large-Eddy Simulation on the Aerodynamic Pitching Stability of Road Vehicle	坪倉 誠 Seeyuan Cheng 中島 卓司 農沢 隆秀 中村 貴樹	北海道大学 同上 広島大学 技術研究所 エンジニアリングシステム部
2010.10.4-6	VDI International Conference on Gears	An Investigation of Influence of Misalignments on Root Stresses of Hypoid Gears	Ahmet Kahraman Mohammad Hotait 西野 隆之	The Ohio State University 同上 パワートレイン技術開発部
2010.10.10-13	IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics	Active-Steering Control System Based on Human Hand Impedance Properties	田中 良幸 加芝 祐介 山田 直樹 末富 隆雅 西川 一男 農沢 隆秀 辻 敏夫	広島大学大学院 同上 技術研究所 同上 車両実研部 技術研究所 広島大学大学院
2010.11.12	American Society of Mechanical Engineers ASME 2010 International Mechanical Engineering Congress & Exposition	Impact Strength Degradation of Adhesive Joints under Heat and Moisture Environmental Conditions	合田 泰弘 岩本 剛 沢 俊行 氷室 雄也 山本 研一	広島大学 同上 同上 技術研究所 同上
2010.11.17-19	The 2nd INTERNATIONAL CONFERENCE ON DESIGN ENGINEERING AND SCIENCE	The Method of Determining the Vehicle Framework in Safety Development Using a Spring-Mass Model	尾川 茂 竹下 弘明 神本 一朗	衝突性能開発部 同上 同上
2010.11.21-23	The 2010 American Physical Society, Division of Fluid Dynamics 63rd Annual Meeting	Aerodynamic Pitching Damping of Vehicle-Inspired Bluff Bodies	坪倉 誠 Seeyuan Cheng 中島 卓司 農沢 隆秀 岡田 義浩	北海道大学 同上 広島大学 技術研究所 車両実研部
2010.11.23-26	International Symposium on Antennas and Propagation	Electrically Small Antenna for a Handy Terminal	渡部 旦 道下 尚文 山田 吉英 鶴長真里絵 稲田 貴裕 浜田 康	防衛大学 同上 同上 (株)マツダE&T 電子開発部 同上

2. 社外講演 (国内)

*所属は原則発表時点を示す

日程	主催・大会名	題目	発表者	所属
2010.1.20	リードエグジビションジャパン株式会社 第2回カーエレクトロニクス技術展	プレマシーハイドロジェンREハイブリッドの開発	柏木 章宏	プログラム開発推進本部
2010.1.21	自動車技術会中部支部 2009年度第2回自動車技術講演会	マツダにおける軽量化技術 ～100kgの軽量化に成功した新型「デミオ」～	鍵本 浩一	装備開発部
2010.1.20	リードエグジビションジャパン株式会社 第2回・国際カーエレクトロニクス技術展・専門技術セミナー	機能安全に関する最新状況の紹介と考え方	村井 健	車両システム開発部
2010.1.22	鳥取県設備設計事務所協会 新春技術講演会	地球環境と自動車	正守 一郎	技術研究所
2010.2.5	財団法人岡山県産業振興財団 第14回岡山リサーチパーク研究・展示発表会	水素自動車開発の取り組み	柏木 章宏	プログラム開発推進本部
2010.3.1	大学連合・科学技術交流財団・愛知県 第3回 XAFSグループ シンクロトロン光利用者研究会	自動車材料への放射光分析の利用	住田 弘祐	技術研究所
2010.3.2	自動車技術会 自動車工学基礎講座 生産技術	組立工程と品質保証	古川 努	車両技術部
2010.3.6	日本機会学会中国支部 第48期 総会・講演会	マツダの水素エンジン車の技術	齊藤 智明	技術研究所
2010.3.8	広島市経済局 第7回 広島航空宇宙研究会	機能統合モジュールを実現した高強度プラスチック複合材料技術	藤 和久	技術研究所
2010.3.15	人間生活工学研究センター 第5回 運動行動データベース活用研究会	運動行動データベース活用研究会の紹介	石橋 基範	技術研究所
2010.3.18	自動車技術会 車両運動性能部門委員会	品質工学に基づくアクティブサスペンションのロバスト最適設計	末富 隆雅	技術研究所
2010.3.24	触媒学会 第105回 触媒討論会	貴金属微粒子含有高性能触媒～第4報	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
2010.4.9	(株)日本計画研究所 日本計画研究所特別セミナー	プレマシーハイドロジェンREハイブリッドの現状と今後の展開	柏木 章宏	プログラム開発推進本部
2010.4.20	溶接学会 平成22年度 春季全国大会	ホットワイヤーレーザ溶接法による薄板広間隙重ね溶接技術の開発	篠崎 賢二 山本 元道 門井 浩太 井上 豪 藤田 大吾 深堀 貢 北原陽一郎	広島大学 同上 同上 同上 同上 技術研究所 同上

日程	主催・大会名	題 目	発表者	所 属
2010.5.19-21	自動車技術会 2010年 春季大会 学術講演会	環境に優しい新水性塗装システムの開発～第2報	中野さくら	技術研究所
			山根 貴和	同上
			久保田 寛	同上
			石橋 毅子	同上
			神田 輝夫	同上
		松田 隆臣	同上	
		溶射によるアルミニウム合金の耐摩耗性改善	小田 信行	技術研究所
			南場 智	同上
			大下 敬之	同上
			山本 真司	パワートレイン技術部
自動車用ワイドレンジモータ駆動システムの開発	米盛 敬	技術研究所		
	瀬尾 宣英	同上		
	天野龍一郎	同上		
	古川 晶博	同上		
	野田 岳人	同上		
	鈴木 健生	(株)安川電機		
ウエルドボンド用接着剤の強度劣化に及ぼす吸水現象の解明	氷室 雄也	技術研究所		
	山本 研一	同上		
	佐々木真二	同上		
	谷岡 真一	同上		
	石田 恭聡	同上		
ホットワイヤーレーザー溶接を用いた重ね継手の高隙裕度溶接技術の開発	北原陽一郎	技術研究所		
	田中 力	同上		
	石田 恭聡	同上		
	深堀 貢	同上		
	篠崎 賢二	広島大学		
	山本 元道	同上		
マツダ新型MZR-CD2.2 ディーゼルエンジンの開発	森永 真一	エンジン性能開発部 第1エンジン性能開発グループ		
2010.5.25	レーザー加工学会 第73回 講演会	ホットワイヤーレーザー溶接溶接法による薄板広間隙重ね溶接技術の開発	篠崎 賢二	広島大学
			山本 元道	同上
			門井 浩太	同上
			藤田 大吾	同上
			井上 豪	同上
			深堀 貢	技術研究所
			北原陽一郎	同上
2010.6.1	溶接学会 高エネルギービーム加工研究委員会	ホットワイヤーレーザー溶接溶接法による薄板広間隙重ね溶接技術の開発	篠崎 賢二	広島大学
			山本 元道	同上
			門井 浩太	同上
			藤田 大吾	同上
			井上 豪	同上
			深堀 貢	技術研究所
			北原陽一郎	同上
2010.6.5	日本設計工学会中国支部	衝突性能開発におけるバネマスモデルを用いた車体基本骨格の決定方法	竹下 弘明	衝突性能開発部
			尾川 茂	同上
			神本 一朗	同上
			久保 一夫	車両開発本部

日程	主催・大会名	題 目	発表者	所 属
2010.6.7-8	品質工学会 第18回 品質工学研究発表大会	溶接部品の機能性評価における解析方法の検討	渡邊 忠俊 山田 洋史 藤 和久 草開 良治 志村 直紀 平山 幸人 木村 俊英 江里口 直	技術研究所 同上 同上 エンジン設計部 同上 エンジン性能開発部 (株)ヒロテック 同上
		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
2010.6.4	アルテアエンジニアリング株式会社 HyperWorks Technology Conference	車両系CAE支援システムCPAsの紹介	江頭 裕二	NVH性能・CAE技術開発部
2010.6.10	人間生活工学研究センター HQL研究交流会2010	運転行動データベース活用研究会の活動報告	石橋 基範	技術研究所
2010.6.19	日本人間工学会 第51回 大会	出会い頭衝突防止情報提供における音の定位による注意誘導手法の有効性	露木 章史 石橋 基範	技術研究所 同上
2010.6.24-25	日本接着学会 第48回 年次大会	自動車構造用接着接合部の吸水劣化	山田 卓司 氷室 雄也 山本 研一 佐藤 千明 京極 秀樹	東京工業大学 同上 技術研究所 東京工業大学 近畿大学
		接着継手の動的強度劣化に関する研究	合田 泰弘 沢 俊行 氷室 雄也 山本 研一	広島大学 同上 技術研究所 同上
2010.6.25	産業技術総合研究所 新中国センター開所記念 バイオマス講演会	マツダにおけるバイオマス利用の取り組みと期待	松岡 孟	車両開発本部
2010.7.20	第38回可視化情報シンポジウム	感性工学を用いた自動車の内装質感に関する設計手法について	福井 信行 西川 一男 農沢 隆秀	車両実研部 同上 技術研究所
2010.7.21	自動車技術会 No01-10シンポジウム 車体構造形成におけるCO ₂ 削減の新展開－資源循環と車体軽量化－	自動車を取り囲む環境の変化と資源循環	高田 泰明 石川 晴雄 石田 恭聡 板谷 俊臣 折井 拓 富田 耕二 中西栄三郎	トヨタ自動車(株) 電気通信大学 車両開発本部 東京製鐵(株) いすゞ自動車(株) 富士重工業(株) 日産自動車(株)
		資源リサイクル～鉄リサイクルの現状（自動車車体に関連して）～	折井 拓 中西栄三郎 富田 耕二 高田 泰明 石田 恭聡 石川 晴雄 板谷 俊臣	いすゞ自動車(株) 日産自動車(株) 富士重工業(株) トヨタ自動車(株) 車両開発本部 電気通信大学 東京製鐵(株)

日 程	主 催 ・ 大 会 名	題 目	発 表 者	所 属
		鉄リサイクル技術と自動車車体としてのCO ₂ 削減効果	板谷 俊臣 折井 拓 中西栄三郎 富田 耕二 高田 泰明 石田 恭聡 石川 晴雄	東京製鐵(株) いすゞ自動車(株) 日産自動車(株) 富士重工業(株) トヨタ自動車(株) 車両開発本部 電気通信大学
		課題と提言	中西栄三郎 折井 拓 板谷 俊臣 富田 耕二 高田 泰明 石田 恭聡 石川 晴雄	日産自動車(株) いすゞ自動車(株) 東京製鐵(株) 富士重工業(株) トヨタ自動車(株) 車両開発本部 電気通信大学
2010.7.23	日本鑄造工学会・鑄造CAE研究部会 鑄造CAEの活用と品質向上シンポジウム	中子造型金型CAEによる量産準備期間の短縮	永谷 卓也	パワートレイン技術部
2010.8.8	福岡産業・科学技術 文部科学省 地域イノベーション クラスタープログラム都市エリア型研究発表会	マツダにおける次世代自動車の取り組みとナノ材料技術への期待	高見 明秀	技術研究所
2010.8.27	自動車技術会関西支部 2010年度第1回講習会	振動・騒音のシミュレーション・解析技術	木下 浩志	NVH性能・CAE技術開発部
2010.9.1	(社)未踏科学技術協会 エコマテリアル・フォーラム 「ベッセマー+200の鉄と社会」 ワーキング シンポジウム	資源循環と鉄リサイクル技術	板谷 俊臣 折井 拓 中西栄三郎 富田 耕二 高田 泰明 石田 恭聡 石川 晴雄	東京製鐵(株) いすゞ自動車(株) 日産自動車(株) 富士重工業(株) トヨタ自動車(株) 車両開発本部 電気通信大学
		自動車メーカーの視点から見たCO ₂ 削減	折井 拓 中西栄三郎 富田 耕二 高田 泰明 石田 恭聡 石川 晴雄 板谷 俊臣	いすゞ自動車(株) 日産自動車(株) 富士重工業(株) トヨタ自動車(株) 車両開発本部 電気通信大学 東京製鐵(株)
2010.9.7	広島県技能士連合会 第30回近畿・中国・四国技能士会ブロック会議	マツダの環境への取り組み～水素自動車開発への挑戦～	柏木 章宏	プログラム開発推進本部
2010.9.7-10	ヒューマンインタフェース学会 ヒューマンインターフェースシンポジウム2010	信号待ち車両への追突防止支援システムの人間工学的評価	奥田 一之 石橋 基範 三浦 泰彦	技術研究所 同上 同上
2010.9.15	日本分析化学会 第59年会	蛍光X線収量，転換電子収量の同時測定によるサイト分別XAFS測定に関する検討	早川慎二郎 小川 周太 生天目博文 廣川 健 古賀 広之 住田 弘祐	広島大学 同上 同上 同上 技術研究所 同上

日程	主催・大会名	題 目	発表者	所 属
2010.9.15-18	触媒学会 第106回 触媒討論会	Lean/RichサイクルにおけるPt-Rh-アルカリ土類金属/酸化物でのNox吸蔵還元挙動の研究	牟禮 辰洋 永岡 勝俊 西口 宏泰 瀧田 祐作 山田 啓司 高見 明秀	大分大学 同上 同上 同上 技術研究所 同上
		酸素イオン伝導性を有するZr-Nd系PM燃焼触媒の高活性化	原田浩一郎 馬場 誉士 岡本 謙治 山田 啓司 重津 雅彦 高見 明秀	技術研究所 同上 同上 同上 同上 同上
		貴金属微粒子含有高性能触媒～第5報	岩国 秀治 住田 弘祐 高見 明秀	技術研究所 同上 同上
2010.9.20-22	日本心理学会 第74回 大会	運転支援のヒューマンファクタ研究におけるドライバ特性の活用	石橋 基範	技術研究所
2010.9.24	自動車技術会 第53回技術交流会 (プレス・溶接)	ハイテン部品の寸法精度予測技術向上の取り組み	酒井 明	車体技術部
2010.9.24	日本機械学会 東北支部第46期秋季講演会	熱力学的手法を用いたCFRエンジンにおけるノックの数値解析	波出石大作 草鹿 仁 田中 重行 日高 匡聡	早稲田大学大学院 早稲田大学理工学術院 コスモ石油(株) パワートレイン技術開発部
2010.9.28	滋賀県自動車教習所教官講習会	環境対応車の動向と将来展望, マツダの環境対応について	河口 邦史	パワートレイン企画部
2010.9.29-10.1	自動車技術会 2010年 秋季大会 学術講演会	ARXモデルによる車両横変位予測に関する基礎検討	楠本 信平 新部 忠幸	技術研究所 同上
		プローブカーのヒヤリハットデータを活用した危険経路の推定	山崎 慎也 舟久保 晃 谷澤 悠輔	技術研究所 同上 同上
		複数の衝突形態における車体構造最適化システムの開発	小平 剛央	技術研究所
		平滑感が高いプラスチック用塗装の開発	古賀 一陽	技術研究所
2010.9.30	新交通管理システム協会 UTMSセミナー2010	広島県における協調システムの取り組み	山本 雅史	技術研究所
2010.9.30	広島県音・振動技術研究会 平成22年度第2回研究会	自動車における振動・騒音のシミュレーション技術	木下 浩志	NVH性能・CAE技術開発部
2010.10.7-8	溶接学会 溶接冶金研究会 創設50周年記念シンポジウム	ホットワイヤ・レーザ溶接法による薄板の広間隙重ねね及び突合せ継手溶接技術の開発	井上 豪 篠崎 賢二 山本 元道 門井 浩太 藤田 大吾 深堀 貢 北原陽一郎	広島大学 同上 同上 同上 同上 技術研究所 同上
2010.10.11	日本機械学会 M&M2010 材料力学カンファレンス	硬化前吸湿が構造用接着剤の接着強度に及ぼす影響	山本 研一 氷室 雄也 Liao Lijuan 澤 俊行	技術研究所 同上 広島大学 同上

日程	主催・大会名	題 目	発表者	所 属
2010.10.12	自動車技術会 マルチメディア部門委員会	プローブカーのヒヤリハットデータを活用した 危険経路の推定	山崎 慎也 舟久 保晃 谷澤 悠輔	技術研究所 同上 同上
2010.10.14	日本複合材料学会 第35回 複合材料シンポジウム	高強度ガラス繊維強化複合材の物理発泡挙動に 関する研究	宮本 嗣久 小川 淳一 金子 満晴 住田 弘祐 藤 和久	技術研究所 同上 同上 同上 同上
2010.10.23	日本化学会 平成22年度 化学イノベーション シンポジウム	環境にやさしいくるまの材料化学	國府田由紀	技術研究所
2010.10.23	日本設計工学会 2010年度秋季研究発表講演会	歩行者保護の頭部傷害値低減手法	西田 靖彦 久保 一夫 尾川 茂 上野 正樹 横山 暢彦	衝突性能開発部 車両開発本部 衝突性能開発部 同上 同上
2010.10.25	自動車技術会 自動車工学基礎講座 生産技術	組立工程と品質保証	小笠 正道	車体技術部
2010.10.30	日本人間工学会 第43回 中国・四国支部大会	ステアリング操作時の覚醒レベルに伴う人間の 手先インピーダンスの変化	中原 裕貴 田中 良幸 辻 敏夫 山田 直樹 西川 一男 農沢 隆秀	広島大学 同上 同上 技術研究所 車両実験部 技術研究所
		ペダルレイアウト・シミュレータの開発とペダル 操作性解析への適用	武田 雄策 大黒谷陽子 岡本 宜久 山本 康典	技術研究所 同上 同上 同上
		操作しやすいクラッチミートエリアの検討	堀上 正義 楠 弘隆 大坪 智範 沖山 浩	車両実研部 同上 同上 同上
		ステアリング操作時の覚醒レベルに伴う人間の 手先インピーダンスの変化	中原 裕貴 田中 良幸 辻 敏夫 山田 直樹 西川 一男 農沢 隆秀	広島大学大学院 同上 同上 技術研究所 車両実研部 技術研究所
		ペダル操作時の踏み込み角度と反力知覚特性の 相互関係	松原 弘明 田中 良幸 辻 敏夫 大坪 智範 西川 一男 農沢 隆秀	広島大学大学院 同上 同上 車両実研部 同上 技術研究所
		感性工学を用いた自動車の内装質感に関する設 計手法について	平山 和幸 福井 信行 西川 一男 農沢 隆秀	車両実研部 同上 同上 技術研究所

日程	主催・大会名	題 目	発表者	所 属
2010.10.30-31	日本機械学会 第88期流体工学部門講演会	ピッチング振動時の車両安定性の数値解析	Seeyuan Cheng 坪倉 誠 中島 卓司 農沢 隆秀 中村 貴樹	北海道大学 同上 広島大学 技術研究所 エンジニアリングシステム部
2010.11.2	自動車技術会 シンポジウム 動力伝達系の最新技術 2010 －環境と走りを追求した次世代 駆動系－	駆動軸トルクと振動系の最適化によるi-stopシス テムの始動時振動の低減	児玉 真吾	エンジン性能開発部 PT解析グループ
2010.11.10-12	日本機械学会 第21回内燃機関シンポジウム	内燃機関の将来展望 高圧縮比エンジンの燃費改善技術について 高圧縮比エンジンの出力改善技術について i-STOPの摩擦損失と主軸受け摩耗の計算解析 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 ホールノズルから噴射したガソリン噴霧の点火 と火炎発達過程 ディーゼル機関における燃焼室形状の改良によ る排気低減－EGG 燃焼室コンセプトの検証－ 直噴ディーゼル噴霧の到達距離に及ぼす噴射量 と蒸発の影響	人見 光夫 西田 正美 山川 正尚 養祖 隆 藤川 竜也 西本 敏郎 佐々木潤三 志々目宏二 藤川 竜也 佐藤 圭峰 和田 好隆 大森 秀樹 小田 裕介 宮内 勇馬 木村 昇平 内田 敦 田所 正 高橋 宏和 佐藤 圭峰 植木 義治 横畑 英明 荒木 崇至 片岡 一 西田 恵哉 田 江平 佐藤 圭峰 金 尚奎 福田 大介 志茂 大輔 片岡 一司 志茂 大輔 張 武 小川 昌則 田 江平 西田 恵哉 入江 和郎 加藤 康夫 吉崎 真吾 川田 光紀 西村 良治 河野 雄志	パワートレイン開発本部 エンジン設計部 パワートレイン技術開発部 同上 同上 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 エンジン性能開発部 同上 同上 同上 エンジン性能開発部 PT解析グループ 同上 エンジン性能開発部 同上 同上 同上 エンジン性能開発部 広島大学大学院 同上 同上 エンジン性能開発部 エンジン性能開発部 第1エンジン性能開発グループ 同上 同上 エンジン性能開発部 パワートレイン技術開発部 広島大学大学院 同上 同上 車体技術部 同上 同上 車体技術部 同上 同上
2010.11.17-18	型技術協会 型技術ワークショップ2010 in 宇都宮	プレス金型設計品質と効率化を両立する金型ナ レッジ設計事例 プレスの外観品質保証プロセスの構築	入江 和郎 加藤 康夫 吉崎 真吾 川田 光紀 西村 良治 河野 雄志	車体技術部 同上 同上 車体技術部 同上 同上

日程	主催・大会名	題 目	発表者	所 属
		バンパー成形サイクルタイム短縮の取組み	熊井 克明	車両技術部プラスチック技術Gr
2010.11.25	オートモーティブデジタルプロセスセミナー2010	マツダのパワートレイン戦略とそれを支えるIT	人見 光夫	パワートレイン開発本部
2010.11.26	産総研バイオマス研究センターバイオマスオープンセミナー	マツダバイオテックマテリアルの開発	松田 祐之	技術研究所
2010.11.26	自動車技術会 No.07-10シンポジウム「自動車の強度信頼性の明日を担う接合技術と実験技術」	構造用接着の吸水劣化現象の調査	山本 研一 杉浦 裕 井口 博行 梅村 俊文 西川 出 佐藤 千明	技術研究所 サンスター技研(株) トヨタ自動車(株) トヨタ車体(株) 大阪工業大学 東京工業大学
2010.12.1-3	日本燃焼学会 第48回燃焼シンポジウム	可視化ロータリエンジンをを用いた水素燃焼に関する基礎研究	堤 雄樹 山村 啓 香川 良二 中倉 陽己 橋本 英樹 森上 修 村瀬 英一	九州大学 エンジン設計部 パワートレイン技術開発部 九州大学 同上 同上 同上
		急速圧縮装置を用いた水素ロータリエンジンの着火に関する基礎研究	松坂 直樹 神原 伸司 香川 良二 中島 史裕 橋本 英樹 森上 修 村瀬 英一	九州大学 パワートレイン技術開発部 同上 九州大学 同上 同上 同上
		高圧縮比ガソリンエンジンの点火前の低温酸化反応が出力に及ぼす影響	養祖 隆 藤川 竜也 山川 正尚 光法 高史 草鹿 仁	パワートレイン技術開発部 同上 同上 早稲田大学大学院 早稲田大学理工学術院
2010.12.1-3	日本機械学会 第21回内燃機関シンポジウム	各種炭化水素がHCCI燃焼に及ぼす影響	光法 高史 養祖 隆 藤川 竜也 田中 重行 草鹿 仁	早稲田大学大学院 パワートレイン技術開発部 同上 コスモ石油(株) 早稲田大学理工学術院
2010.12.2	CAESEKI.com 第18回経営に貢献するCAEセミナー	車両のNVH性能開発におけるCAEの活用	中野 伸一	NVH性能・CAE技術開発部
2010.12.3	自技会中部支部浜松地区講習会	マツダの次世代パワートレインにおける燃費改善技術	鈴木 敬	パワートレイン開発本部
2010.12.4-5	日本人間工学会 平成22年度 関西支部大会	人間工学研究のための倫理指針 ー背景・概要・運用の私見ー	石橋 基範	技術研究所
2010.12.7	レーザ加工学会 第74回 レーザ加工学会講演会	ホットワイヤーレーザ溶接を用いた重ね継手の高隙裕度、高速溶接技術の開発	北原陽一郎	技術研究所
2010.12.8-9	日本機械学会 第9回 最適化シンポジウム2010	自動車の複合領域最適化における応答曲面の高精度化	小平 剛央	技術研究所
2010.12.10	自動車技術会 シンポジウム 環境と振動騒音性能の両立	i-stop システムの始動時振動の予測と改善	坂田 将人	エンジン性能開発部 PT解析グループ

日 程	主 催 ・ 大 会 名	題 目	発 表 者	所 属
2010.12.15	自技会ガソリンエンジンシンポジウム	マツダ次世代ガソリンエンジンコンセプトの紹介	鈴木 敬	パワートレイン開発本部
2010.12.15	はままつ産業創造センター 浜松地域ウルトラハイテン事業 化研究会第2回セミナー	マツダにおける軽量化への取組み	石田 恭聡	車両開発本部
2010.12.16-17	SOFC研究会 第19回 SOFC研究発表会	マイクロチューブSOFCへのジルコニア電解質 の適用可能性評価	杉原 真一 鈴木 俊男 藤代 芳伸	技術研究所 産業技術総合研究所 同上
2010.12.20-22	日本流体力学会 第24回数値流体力学シンポジウム	On the Aerodynamic Damping Mechanism of Vehicle Pitching Stability Using Large Eddy Simulation	Seeyuan Cheng 坪倉 誠 中島 卓司 農沢 隆秀 岡田 義浩	北海道大学 同上 広島大学 技術研究所 車両実研部
2010.12.21-22	日本液体微粒化学会 微粒化シンポジウム	ホールノズルから噴射したガソリン噴霧の混合 気分布と点火確率	片岡 一 田 江平 佐藤 圭峰 北光 健太 西田 恵哉	広島大学大学院 同上 エンジン性能開発部 マツダE&T 広島大学大学院

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
Vehicle System Dynamics Vol.48, No.11, pp.1285-1303	A Study of Dynamics Performance Improvement by Rear Right and Left Independent Drive System	菅野 崇	技術研究所
九州大学大学院 数理学府 数理学研究院 Journal of Math for Industry Vol.2, 2010A-11, pp.109-114	ARX Models for Time Varying-systems Estimated by Recursive Penalized Weighted Least Squares Method	秦 攀 西井 龍映 中川 正 中本 尊元	九州大学 同上 技術研究所 同上
触媒学会 Catalysis Surveys from Asia Vol.14, No.3-4	Development of High Performance Catalyzed DPF with New Soot Burning Mechanism	原田浩一郎 山田 啓司 岡本 謙治 高見 明秀	技術研究所 同上 同上 同上
自動車技術会論文集 Vol.41, No.3, pp.775-780	ドライバの安全確認行動検知のための顔向き検出技術の開発	嶋田 敬士 野口 祥宏 笹原 英明 山本 雅史 為貝 仁志	産業技術総合研究所 同上 旭化成(株) 技術研究所 同上
Vol.41, No.4, pp.927-932	状態遷移モデルを用いた一時停止交差点におけるドライバの発進意図推定方法の検討	為貝 仁志 山本 雅史 藤田 健二	技術研究所 同上 同上
Vol.41, No.3, pp.623-628	ガソリンHCCI機関における燃料特性と自己着火に関する検討 (第2報) -燃料成分が異なる同一オクタン価のモデル燃料を用いた解析-	養祖 隆 山川 正尚 田中 重行 草鹿 仁	パワートレイン技術開発部 同上 コスモ石油(株) 早稲田大学理工学術院
自動車技術 Vol.64, No.6, pp.60-63	マツダのブランド戦略と新型アクセラのデザイン開発 (特集 カーデザインの技術)	井ヶ田 章 栗栖 邦彦	デザイン戦略スタジオ 同上
Vol. 64, No. 7, pp.40-45	車体軽量化の新たな必要性	石田 恭聡	車両開発本部
Vol.64, No.8, pp.33-48	乗用車 (年鑑号)	橋本 昌寛 新田 茂樹 森口 義久 小山 文三 黒木 治	商品ビジネス戦略企画部 技術企画部 同上 デザイン戦略スタジオ 車両開発推進部
Vol.64, No.8, 2010	振動・騒音・乗心地	小具 洋一	NVH性能・CAE技術開発部
Vol.64, No.10, pp.60-65	インフラ協調安全運転支援システムの人間工学的評価手法	石橋 基範 岩下 洋平 三浦 泰彦 山本 雅史	技術研究所 同上 同上 同上
Vol.64, No.11, 83-88	環境に優しい新水性塗装システムの開発	山根 貴和 久保田 寛 古賀 一陽 中野さくら 石橋 毅子 神田 輝夫 亀迫 裕介 松田 隆臣	技術研究所 同上 同上 同上 同上 車両技術部 同上 同上
Vol. 64, No. 12, pp.30-35	上肢運動インピーダンスを組み込んだステアリング制御系	田中 良幸 山田 直樹 末富 隆雅 辻 敏夫	広島大学大学院 技術研究所 同上 広島大学大学院

寄稿誌名 巻・号・ページ	題 目	発表者	所 属
自動車技術関西支部ニュース 第37号, pp.2-3	CO ₂ 削減に向けた車体軽量化	石田 恭聡	車両開発本部
エンジンテクノロジーレビュー 第2巻, 第3号	次世代パワートレイン開発コンセプト SKYコンセプト	鈴木 敬 石野 勅雄 伊藤あずさ	パワートレイン企画部 同上 同上
第21回内燃機関シンポジウム・講演 論文集 No.10-17, pp.111-114	次世代鉛バッテリーマネジメント技術の開発	久米 章友 庄司 明 吉田 勝正 小谷 和也 平野 晴洋 福馬 勉	PTシステム開発部 技術研究所 PTシステム開発部 同上 同上 同上
日本燃焼学会誌 第52巻, 161号	自動車排ガス浄化用触媒の動向	高見 明秀	技術研究所
「燃料電池」2010年冬号 Vol.9, No.3, pp.33-37	マツダにおける水素自動車の開発	齊藤 智明 稲目 力	技術研究所 同上
計測自動制御学会論文集 Vol.46, No.2, pp.123-129	人間の眼球－関節運動特性に基づく自動車インテリア・パッケージの解析評価	田中 良幸 柴松 武 堀上 正義 宮崎 透 西川 一男 農沢 隆秀 辻 敏夫	広島大学大学院 同上 車両実研部 同上 同上 技術研究所 広島大学大学院
型技術 2010.12月号 Vol.25, No.12, pp.54-55	プレス金型設計品質と効率化を両立する金型ナレッジ設計事例	入江 和郎 加藤 康夫 吉崎 真吾	車体技術部 同上 同上
機械振興協会 機械学会誌 メカライフ特集号 Vol.113, No.1105, pp.924-925	ロータリーエンジンの点火プラグ配置が火炎伝ばに及ぼす影響	高橋 巧朋	技術研究所
化学と工業 Vol.63, 6月号, pp.495	研究の現場から	山田 啓司	技術研究所
日本ロボット学会誌 Vol.28, No.5, pp.639-647	平面投影ステレオ視を用いた路肩検出	葛西 達哉 小野口和則 佐藤 正明 岩瀬 耕二	弘前大学 同上 同上 技術研究所

編集後記

2011年3月11日に発生した東日本大震災により、被災された皆さまに、心よりお見舞い申し上げます。

さて、マツダ技報第29号は、特集としてこのたび発売した新型「マツダ デミオ」と「SKYACTIV TECHNOLOGY」を取り上げました。マツダは、2007年3月に技術開発の長期ビジョン「サステイナブル “Zoom-Zoom” 宣言」において、マツダ車を購入いただいたすべてのお客さまに「走る喜び」と「優れた環境安全性能」を提供することを約束しました。2011年は「サステイナブル “Zoom-Zoom” 宣言」に基づいて行ってきた技術開発の成果を、新型デミオを皮切りに商品として市場に導入するSKYACTIV TECHNOLOGY元年と位置づけております。

特集では、マツダの技術者がこのビジョンを追求するため、いかに技術的なブレークスルーに取り組み、達成してきたのかについて紹介しました。その他の論文・解説と併せてマツダの技術者の情熱と誇りを感じていただけたと考えております。

最後になりますが、東日本大震災被災者支援として4月3日にマツダR&Dセンター横浜で開催された「第23回ロードスター・チャリティフリーマーケット」に、保有していたマツダ技報のバックナンバーを提供しました。その売上金は主催者を通じて日本赤十字社に寄付されました。ささやかではありますが、被災された皆さまの復興に寄与できれば幸いです。

(新田茂樹)

編集委員会

委員長	富山 道雄	商品戦略本部 技術企画部
編集委員	森口 義久	商品戦略本部 技術企画部
	石原 智浩	デザイン本部アドバンスデザインスタジオ
	小林 泰知	商品企画本部 企画設計部
	谷口 晴幸	車両開発本部シャシー開発部
	寺田 栄	車両開発本部 NVH性能・CAE技術開発部
	末次 元	パワートレイン開発本部 パワートレインシステム開発部
	斉藤 史彦	技術研究所
	中西 克司	技術本部 生産企画部
編集幹事	新田 茂樹	商品戦略本部 技術企画部

マツダ技報 第29号

発行 2011年6月
発行人 金澤 啓隆
編集人 富山 道雄
事務局 新田 茂樹
発行所 マツダ株式会社
商品戦略本部 技術企画部
〒730-8670
広島県安芸郡府中町新地3番1号
電話 082(565)2198

Mazda Technical Review No.29

June 2011
Publisher Hirotaka Kanazawa
Editor Michio Tomiyama
Bureau Shigeki Nitta
Publishing office Technology Planning Dept.
Product Strategy Div.
Mazda Motor Corporation
3-1 Shinchi, Fuchu-cho Akigun,
Hiroshima 730-8670, Japan

©2011マツダ株式会社 (禁無断転載)