

Mazda Technical Review



マツダ技報

Mazda Technical Review

2004 No. **22**

マツダ技報 第22号 (2004)

目 次

巻頭言

| | | |
|----------------------|------------|---|
| 「世界一のクルマ」を目指して | 金井誠太 | 1 |
|----------------------|------------|---|

特集：Virtual Testing

| | | |
|--|--|----|
| 1. Virtual Testingの紹介 | 河内正行, 大地正樹, 上岡孝志 | 3 |
| 2. NVHのVirtual Testingの紹介 | 安藤正登, 小具洋一, 砂田 実 中野伸一 | 7 |
| 3. 側面衝突のVirtual Testing | 伊藤 司, 安藤誠一, 伊東紀明 尾川 茂 | 13 |
| 4. 耐久性開発におけるCAEシミュレーション技術の紹介 | 田村秀二 | 17 |
| 5. 空力・風騒音シミュレーションの開発への適用 | 中村貴樹, 農沢隆秀, 岡本 哲 大平洋樹, 李 曄 | 22 |
| 6. CFDを活用した空調開発の効率化 | 矢野輝昭, 中村良則 金清政治 | 28 |
| 7. ブレーキジャダ及びシミの解析技術の開発 | 竹川隆茂, 日比野忠和, 大原 司 | 33 |
| 8. エンジン振動騒音のVirtual Testingの紹介 | 土路生修, 堀川浩司 阿部宏司 | 38 |
| 9. パワートレインにおける機構解析ソフトADAMSの適用 | 栗栖 徹, 藤川智士, 宮内勇馬 小泉昌弘, 廣部敏之, 福島小巻 | 44 |
| 10. パワートレイン構想設計のVirtual Testing技術の紹介 | 平松繁喜, 百田浩一, 小森 賢 徳光文広, 城谷佳孝, 村井亜樹 | 50 |
| 11. AT制御系のVirtual Testing技術の紹介 | 小森 賢, 鎌田真也, 澤 研司 | 56 |

特集：アクセラ

| | | |
|----------------------------------|---|----|
| 12. アクセラの紹介 | 谷岡 彰, 久保田聡 | 61 |
| 13. アクセラ/Mazda3のデザイン | 鈴木英樹 | 66 |
| 14. アクセラのパッケージング | 中尾浩二, 長尾治典, 佐賀尚人 日和禎二, 真鍋敏之, 高橋克征 | 72 |
| 15. アクセラのダイナミクス性能 | 和田仁法, 渡邊雅哉, 熊田拓佳 高橋宏行, 林 義博, 飯田英一朗 | 78 |
| 16. アクセラの衝突安全性能 | 柴崎宏武, 信本昇二, 福谷和也 角美智雄, 長井 博, 飯田英一朗 杉本 繁 | 84 |
| 17. アクセラ/Mazda3のパワートレイン | 内海 巖, 谷口正明, 野崎 修 星野彦一, 金本芳実 | 88 |
| 18. 非対称ダンピングオートテンションの開発 | 山下佳行, 戸郷晴雄, 石田公雄 藤井伸浩 | 92 |
| 19. アクセラのフレキシブルアクスル組立ライン構築 | 金本 巖, 戸川善太 | 97 |

論文・解説

| | | |
|--|--|-----|
| 20. ロードスタークーペの紹介 | 上村 博, 磯部重隆, 鈴木 健 山根文昭, 武田圭介, 姫路吉博 | 103 |
| 21. 側突クラッシュシミュレータによる衝突安全性能開発 | 元木正紀, 福谷和也 伊東紀明, 尾川 茂 | 108 |
| 22. マツダの機能統合型モジュールへの取り組み | 影山和宏, 唐澤正人 | 114 |
| 23. パラメトリック設計システムの開発～エンジン設計の自動化～ | 楠 康友, 三村光生 佐々木晋 | 120 |
| 24. ボンゴ用触媒担持型DPFシステムの開発 | 松江浩太, 柚木伸夫, 林原 寛 崎本正嗣, 松尾祐児 | 126 |
| 25. RX-8ハイドロジェンREの紹介 | 森本賢治, 水島善夫, 定平誠二 堂園一保, 内田浩康 | 132 |
| 26. マツダAHS安全運転支援システムの開発 | 山本雅史, 為貝仁志, 千葉正基 藤田健二 | 139 |
| 27. マウント振動の奇数次・ハーフ次の発生メカニズム解明 | 熊野昌平, 榎本正章, 森実健一 波多野耕二 | 145 |
| 28. 乗員体格検知システム評価シミュレーション技術の開発 | 伊与田輝, 石川敏弘, 世戸孝幸 高橋恭直 | 150 |
| 29. ドライバ個人特性の評価指標の開発 | 石橋基範, 大乗政幸, 赤松幹之 | 155 |
| 30. 座圧変化に基づくドライバの疲労推定 | 古郡 了, 三浦泰彦, 吉澤公理 稲目 力 | 161 |
| 31. X線CTスキャナの導入と活用事例の紹介 | 三宅智史, 村田 充, 吉田隆博 下山英昭, 藤井博司, 山下耕司 | 167 |
| 32. CAEによる鋳造用鋳型設計条件の最適化 | 垣田 健, 堀 雄二, 菅谷 智 永田亮平, 刀祢英雄 | 173 |
| 33. エンジン組立自己完結生産システムの開発 | 品川裕史, 上迫博文, 川上真一 神南裕巳, 森尾宏基 | 178 |
| 34. 金型加工における機械加工時間短縮 | 大田敦史, 西本光毅, 井筒幸雄 | 183 |
| 35. スポット溶接モニタシステムの開発 | 小田修二, 山北恭司, 村重滋男 | 188 |
| 36. 接着剤塗布時の形状計測技術開発 | 菅 康之, 木村美昭, 美本和彦 | 192 |
| 37. 外装樹脂部品のFit & Finish向上 | 湯野兼敏, 西山剛史, 室本 将 岩本道尚, 谷本治生, 近藤和真 | 198 |
| 38. 車両組立領域における構造標準化の取り組み | 後藤泰之, 今井洋一, 青島浩三 村木憲一, 藤澤秀行 | 204 |
| 社外への発表論文一覧表 | | 210 |

CONTENTS

Foreword

Aim at “ The World’s Best Car ”

(*S.Kanai*) 1

Special Edition for Virtual Testing

1 . Introduction of Virtual Testing

(*M.Kawachi, M.Ohzi, T.Kamioka*) 3

2 . Introduction of NVH Virtual Testing

(*M.Ando, Y.Ogu, M.Sumada, S.Nakano*) 7

3 . Virtual Testing of Side Impact

(*T.Ito, S.Ando, N.Ito, S.Ogawa*) 13

4 . Introduction of Durability CAE Simulation Technology

(*S.Tamura*) 17

5 . Application of Aerodynamics and Wind Noise Simulation into Product Development

(*T.Nakamura, T.Nouzawa, S.Okamoto, H.Oohira, Y.Li*) 22

6 . Efficiency Improvement of Air Conditioning Development Using CFD

(*T.Yano, Y.Nakamura, M.Kanekiyo*) 28

7 . Brake Judder and Shimmy Simulation Technology Development

(*T.Takegawa, T.Hibino, T.Ohara*) 33

8 . Virtual Testing of Engine Vibration and Noise

(*O.Torobu, K.Horikawa, H.Abe*) 38

9 . Application of ADAMS to Powertrain Development

(*T.Kurisu, S.Fujikawa, Y.Miyauchi, M.Koizumi, T.Hirobe, K.Fukushima*) 44

10 . Introduction of Virtual Testing Technology for Concept Design of Powertrain

(*S.Hiramatsu, K.Momota, S.Komori, F.Tokumitsu, Y.Shirogami, A.Murai*) 50

11 . Introduction of Virtual Testing Technology of Automatic Transmission Control System

(*S.Komori, S.Kamada, K.Sawa*) 56

Special Edition for Axela

12 . Introduction of Axela

(*A.Tanioka, S.Kubota*) 61

13 . Design of Axela /Mazda3

(*H.Suzuki*) 66

14 . Package of Axela

(*K.Nakao, H.Nagao, N.Saga, T.Hiyori, T.Manabe, K.Takahashi*) 72

15 . Dynamics of Axela

(*H.Wada, M.Watanabe, H.Kumada, H.Takahashi, Y.Hayashi, E.Iida*) 78

16 . Passive Safety of Axela

(*H.Shibasaki, S.Nobumoto, K.Fukutani, M.Kado, H.Nagai, E.Iida, S.Sugimoto*) 84

17 . Powertrain for Axela/Mazda3

(*I.Utsumi, M.Taniguchi, O.Nozaki, H.Hoshino, Y.Kanemoto*) 88

18 . Development of Asymmetric Damping Auto-tensioner

(*Y.Yamashita, H.Togou, K.Ishida, N.Fuji*) 92

19 . Achievement of Flexible Axle Assemble Line for Axela

(*I.Kanemoto, Z.Togawa*) 97

Technical Reports

| | |
|---|-----|
| 20 . Introduction of ROADSTER COUPE (<i>H.Uemura, S.Isobe, K.Suzuki, F.Yamane, K.Takeda, Y.Himeji</i>) | 103 |
| 21 . Development of Side Impact Performance Using Crash Simulator (<i>M.Motoki, K.Fukutani, N.Ito, S.Ogawa</i>) | 108 |
| 22 . State of Modularity and Mazda's Functional Integration Module (<i>K.Kageyama, M.Karasawa</i>) | 114 |
| 23 . Automation of Engine Design Process by Development of Parametric Design System (<i>Y.Kusunoki, M.Mimura, S.Sasaki</i>) | 120 |
| 24 . Development of Catalyzed DPF System for Bongo (<i>K.Matsue, N.Yunoki, H.Hayashibara, M.Sakimoto, Y.Matsuo</i>) | 126 |
| 25 . Introduction of RX-8 Hydrogen RE (<i>K.Morimoto, Y.Mizushima, S.Sadahira, K.Douzono, H.Uchida</i>) | 132 |
| 26 . Development of Mazda AHS Safety Driving Support System (<i>M.Yamamoto, H.Tamegai, M.Chiba, K.Fujita</i>) | 139 |
| 27 . Investigation of Excitation Mechanism of Odd and Half Vibrations at Engine Mount (<i>S.Kumano, M.Kashimoto, K.Morizane, K.Hatano</i>) | 145 |
| 28 . Development of Simulation Technology for Occupant Classification Sensor (<i>T.Iyota, T.Ishikawa, T.Seto, K.Takahashi</i>) | 150 |
| 29 . Development of Metrics for Driver's Individual Characteristics (<i>M.Ishibashi, M.Okuwa, M.Akamatsu</i>) | 155 |
| 30 . Estimation of Driver's Fatigue Based on Change in Body Pressure Distribution (<i>S.Furugori, Y.Miura, N.Yoshizawa, C.Iname</i>) | 161 |
| 31 . Introduction of X-Rays CT Scanner and Application Examples (<i>T.Miyake, M.Murata, T.Yoshida, H.Shimoyama, H.Fujii, K.Yamashita</i>) | 167 |
| 32 . Optimization of Mold Design Parameter with CAE (<i>T.Kakita, Y.Hori, S.Sugaya, R.Nagata, H.Tone</i>) | 173 |
| 33 . Development of Independent Production System for Engine Assembly (<i>H.Shinagawa, H.Uesako, S.Kawakami, H.Kannami, H.Morio</i>) | 178 |
| 34 . Machining Time Reduction in Die Manufacturing (<i>A.Ohta, M.Nishimoto, Y.Izutsu</i>) | 183 |
| 35 . Development of Monitoring System for Spot Welding (<i>S.Koda, Y.Yamakita, S.Murashige</i>) | 188 |
| 36 . Development of Adhesive Shape Measurement System (<i>Y.Kan, Y.Kimura, K.Mimoto</i>) | 192 |
| 37 . Fit & Finish Improvement for Bumper Fascia (<i>K.Yuno, T.Nishiyama, M.Muromoto, M.Iwamoto, H.Tanimoto, K.Kondou</i>) | 198 |
| 38 . Standardization of Vehicle Structure in Trim & Final Assembly (<i>Y.Goto, Y.Imai, K.Aoshima, K.Muraki, H.Fujisawa</i>) | 204 |
| List of reports published in 2003 | 210 |

巻頭言

「世界一のクルマ」を目指して Aim at “The World’s Best Car”



執行役員 金井 誠太
Seita Kanai

いきなり私事で恐縮だが、私は1974年に当時の東洋工業(株) (現マツダ(株))に入社し、シャシー設計に配属されて、以来ずっと技術者として過ごしてきた。幸いにもその最初から、尊敬する諸先輩に恵まれ、彼らのように「技術者として誇りの持てる仕事をしたい」と念じるようになっていた。

そして今マツダは2001年来の2年間で、アテンザ、デミオ、RX-8、アクセラ、と次々に、「マツダミレニアムプラン」に則った新型モデルを導入した。どのモデルもそれまでになく高い商品目標を掲げ、皆の多くの知恵と努力でそれを実現したと考える。かつては少し口幅ったかった「世界一のXX」という言葉も、開発中に本気で使ってきたし、結果「やればできる」という自信を得たことも、マツダの技術陣にとって大きい収穫だった。

その甲斐もあって、これらの商品と技術は幸い市場でZoom-Zoomのねらい通りの好評を博し、マツダが目指すクルマ作りをお客様にも少なからずご理解頂いたことには、喜びを禁じがたい。今後もこの成功を足がかりに、マツダらしくかつ誇りの持てるクルマを世に提供し続けて行きたいと考えている。

これらの車種の開発にあたって、私自身の思いを次のようにまとめた。既に2003年7月号の「マイ・マツダ」にも載せて頂いているが、改めて再掲させて頂く。

マツダの商品の「志」

1. マツダのブランド戦略を体現する
2. 競合セグメントにおける“世界ベンチマーク”となる
3. 全ての面で、“Better でなく Best”, “最高で超一流, 最低でも一流”
4. 開発/生産/販売/サービスする, 購入/所有/使用する, “誰もが「誇り」の持てる商品”

くどいと思うが、簡単に説明を加える。

1. は言うまでもなくマツダのブランド戦略で規定したZoom-Zoom, すなわち、センスの良い (Stylish), 創意に富む (Insightful), はつらつとした (Spirited) に合致させた商品を作る, ということを言っている。

2. と3. は共に、「世界一と自他共に認められるレベルを実現する」ということを言っている。当たり前だが、従来の自分たちのパフォーマンスに比べて良くしただけでは、世界一の保証にはならない。世界一を実現するには、よく世界を見回して世界一(一流)の技術を知り、自らの工夫でその上を行く「超一流」を考える。もしどうしてもそれを越える工夫が思いつかない時は、謙虚に世界一に学ぶ。蛇足ながら、「学ぶ」は「真似る」から派生した言葉とのことである。

4. は言うまでもない。

しかし、いくらマツダのミレニアム戦略の出だしが好調であったにしても、世の中の変化、競合車の進歩は、我々に安穩とした時間を許す暇を与えない。まさに技術は日進月歩であり、お客様の好み、社会的な要請についてもそれらを背景に刻々と変化し、また強化されていく。

いくら世界一と誇れる技術であっても、必ずより優れた技術に取って代わられる時が来る。そういう意味で技術革新に終わりはなく、完璧な技術もありえない。しかも昨今はこの切り替わりスピードがますます速まってき

ており、世界一の地位を長期間保つことは難しい。

我々技術者は、世界一であるという自信と誇りを持って自分の技術を世に送り出すのはもちろん大切だが、一方では世の中には必ずもっと優れたやり方があるはずだという謙虚さも、常に心の内に同居させなくてはならない。そして実際により優れた技術を目の当たりにして、ショックを受けることもある。それはそれで、競争社会なのだから、改めて世界一に挑戦するための動機とすればよい。

何人であれ自然の法理の支配から逃れることはできないが、一方で我々がクルマ作りで扱う技術とは、その自然の法理を理解しつつ、その中から人類や地球にとって価値のある部分をうまく抽出し組み合わせることによって世の中に役立つモノに仕上げる技(ワザ)の術(スベ)である。

燃料を注ぎキーをひねりアクセルペダルを踏むだけでクルマが走り始めるのは、今では誰にとっても当たり前である。しかし改めて、遠い過去からここに到るまでに積み重ねられた自然の法理の発見や技術開発の件数を想像しただけで、気の遠くなる思いがする。それらを一步一步成し遂げてきた先人達の知恵と努力に畏敬の念を抱かざるを得ない。

その先人達の成果の上にさらに自分達の知恵と努力を積み上げ、もっと進化した技術にしていくことが、彼らの後継者たる我々の責任であろう。

世界一の技術を生み出す秘訣を知っていると云えばウソになるが、私なりに感じていることを述べる。それは、事実を前に「なぜそうなるのか？」に対する固執とも言える探究心が大切ということである。

AならばBなり、と誰もが常識的に思っている因果関係について、「AであればなぜBになるのか」を改めて考えることによって、「AならばCである。CならばBである」というAとBの間を繋ぐ要素Cを発見(または再確認)できることが多い。さらに「AであればなぜCになるのか」、「CであればなぜBになるのか」を考えれば、またDやEが見つかる。なぜを5回繰り返せ、とはよく言われる言葉である。

また、「事実を前に」というのも極めて重要で、思い込みがあるとなつて事実の把握が大雑把になり勝ちだ。「どの程度Aならば、どの程度Bなのか」と定量的に掴むこと、またその微妙な差までも見つけ誤差と真の差を見分けることも大切だ。

これらはいずれも際限のない知的な探究といえる。技術者の姿勢として是非とも継続したい。どんな優秀なアイデアも、最初からいきなり成功することは稀である、というより少なくとも私の30年近い経験では「ない」やってみて、失敗と改良を積み重ね、これらの事実を前に悩んだ挙句にやっとモノになる。

ところで、最近のクルマの技術進歩を見る時、構造的な工夫も無いではないが、大きな技術革新のキードライバーは、①材料、②加工技術、③電子技術、④シミュレーション技術の4要素ではないかと感じている。

昨今のマツダの例で見ても、次のようなものがある。

- ① 材料の進化については、02年の日本機械学会賞他を獲得した「高強度射出成形ガラス長繊維強化複合樹脂材料」やディーゼルパティキュレートフィルタなど。
- ② 加工技術の進化については、アルミ材摩擦点接合技術、セミドライ加工技術やハイドロフォーム成型技術など。
 - ①②の複合として、第一回新機械振興賞を受賞したスリー・ウエットオン塗装など。
- ③ 電子技術については言うまでもなく、パワートレイン制御や、IT、安全など。
- ④ コンピューターを利用したシミュレーション技術では、強度解析のみならず、衝突、NVH、バーチャルリアリティ、製造工程シミュレーションなど。

どの技術も、前述の弛まざる探究心の成果であると確信する。

おわりに、45億年といわれる地球の歴史の中で、今ほど人類がエネルギーを消費している時代はない。これからのクルマの技術の進む方向に環境と安全への対応が欠かせない。

先人達の知恵を乗り越え、自然の法理を今まで以上に有効に活用しながら、人々の感性や行動にもっとフィットすると共に、地球規模で生物・資源とも共存できる、世界一のクルマ作りにこれからも挑戦し続けたい。

特集 : Virtual Testing

1

Virtual Testingの紹介 Introduction of Virtual Testing

河内 正行^{*1} 大地 正樹^{*2} 上岡 孝志^{*3}
Masayuki Kawachi Masaki Ohzi Takashi Kamioka

要 約

マツダでは、お客様の価値観の多様化と地球環境や安全に代表される社会的要請に対応し、柔軟で小回りが利き、小ロットでも利益の得る企業構造を構築することを狙いとして、1996年よりMDI (Mazda Digital Innovation) による全社活動を推進してきた。

お客様の価値観や社会的要請の変化へ俊敏に対応するためには、三次元設計に代表されるデジタルエンジニアリングを基盤として、試作車の存在しない商品開発の早い段階で、性能や信頼性を中心とした開発要素の良否を検証し、開発目標を着実かつ迅速に造り込む技術を確認することが必要不可欠である。

マツダではMDIにおける実験領域の革新活動の一環として、Virtual Testing (以下、VT) という概念を導入し、事前検証技術の開拓へ取り組んできた。

本稿では、MDIの理念を踏襲し、商品開発プロセスの革新を目指す取り組みであるVTの概要を紹介する。

Summary

Since 1996 Mazda has been promoting a corporate activity of MDI (Mazda Digital Innovation) to build a company structure that has high flexibility and agility and can boost high profitability even under small lot production in response to diversification of customer's values and social requirements represented by global environment and safety.

In order to promptly accommodate changes in the customer's values and social requirements, it is essential to establish the technology for maturing and meeting development targets steadily and speedily by the validation of development elements such as performances and reliabilities at an early development stage where no prototypes are available, based on digital engineering represented by 3D modeling.

Mazda had introduced the concept of Virtual Testing (hereafter called "VT") and have developed proactive simulation technology, as a part of innovation activities for the testing area in MDI.

This paper introduces an overview of VT activities aiming at product development process innovation based on MDI philosophy.

1. はじめに

マツダでは、MDIの基本理念である「最新鋭の情報技術を駆使」した、「小回りが利き、柔軟」で、かつ「小ロットでも利益の得る構造」への変革へ向け、先行して取り組んだ三次元設計に代表されるデジタルエンジニアリングを基盤として、実験領域の革新活動を推進してきた⁽¹⁾。

実験革新の目指す姿は、試作車が存在しない開発早期段階において、開発目標の事前検証と性能育成が可能な効率の高い商品開発プロセスである。

この実現に向け、VTの概念を導入し、部門横断型のプロジェクト活動を推進してきた。

本稿では、商品開発のプロセス革新を目指すVTの取り組みについて述べる。

*1 MDIプロジェクト推進室
MDI Project Promotion Office

*3 第2ITソリューション推進部
IT Solution Leadership Dept. No.2

*2 MDIプロジェクト推進室兼CAE部
MDI Project Promotion Office & CAE Dept.

2. 革新の構想

2.1 狙い

お客様のニーズへ対応した競争力の高い商品を市場へタイムリーに導入するためには、開発早期段階で商品目標を確実に造り込み、開発後期における後退や滞留のない車造りを実現することが基本要件となる。

この要件を満たすことがVTの役割であり、狙いは、商品開発の企画・図面育成段階で、開発目標と現実との乖離とその要因を検証し、タイムリーに対策を講ずる技術とプロセスの確立である (Fig.1)。

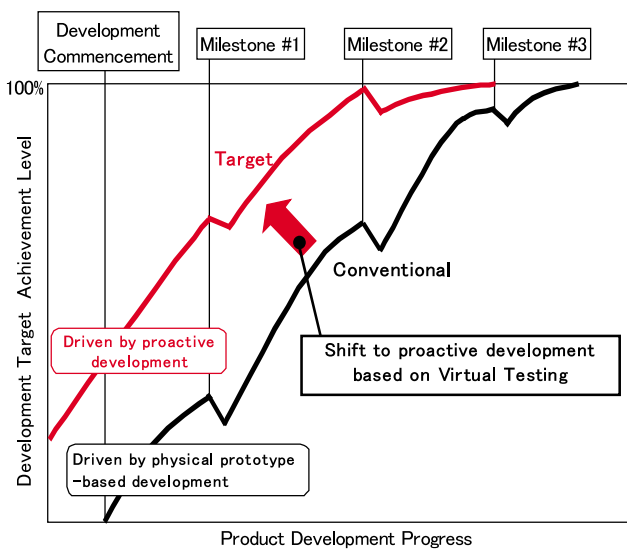


Fig.1 Target of Virtual Testing

2.2 実現手段の考え方

VTの要件を技術水準と時間軸の見地から、第一に、お客様が運転時に遭遇する性能や信頼性に関わる現象のカラクリを論理的に押さえながら開発目標を造り込むための体系・方式を整備すること、第二に、開発目標を造り込む主要なタイミングを、車両の企画～図面育成の早い段階に置くこと、へ設定した。

第一の点については、車両/システム/コンポーネントの間の論理関係を押さえ、目標設定し、開発育成できる試験体系と設備体系の見直しが必要である。

第二の点に対しては、試験体系に対応した、車両/システム/コンポーネントレベルに事前検証モデルを整備し、物理的なテストの前にバーチャルなテストを実施できるようにすることが必要である。

VTの構想概念図をFig.2へ示す。図の横方向が開発の流れ、白抜き部分が主要な段階及び工程、長方形部分が情報及び処理、矢印が情報の流れを示す。この内、図中へ着色して示しているV字型の車両目標設定から目標をシステム/コンポーネントへカスケードし、机上検証により開発育成する構造がVTの目指す姿である。加えて、開発の進捗に伴い得られた知識やデータが蓄積され、次期の商品開発へと還元し、初期の完成度を高める構造である。

VTの移行プロセスをFig.3に示す。VTの完成を効果的かつ効率的に進めるため、従来検証方法の主流であったフィールドテストから、再現性と解析精度で優位性があり論理的な試験体系の確立が可能となるラボラトリーテストへの設備体系の見直しを、事前検証モデルの開発に先行して開始するプロセスとした。

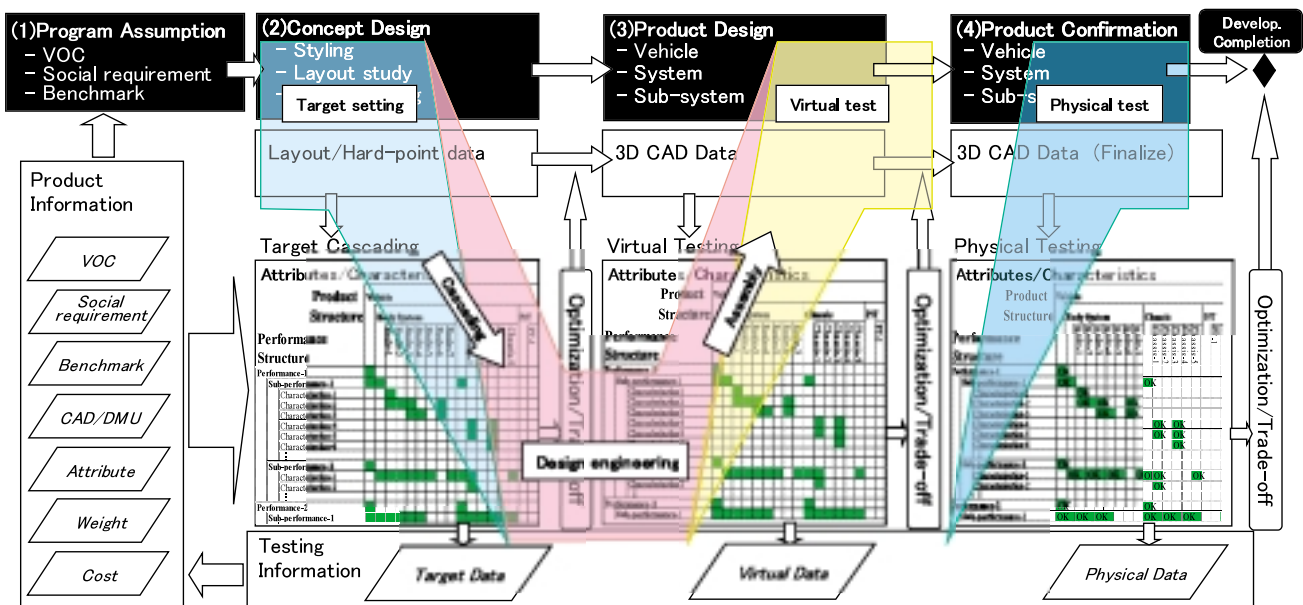


Fig.2 Concept of Virtual Testing

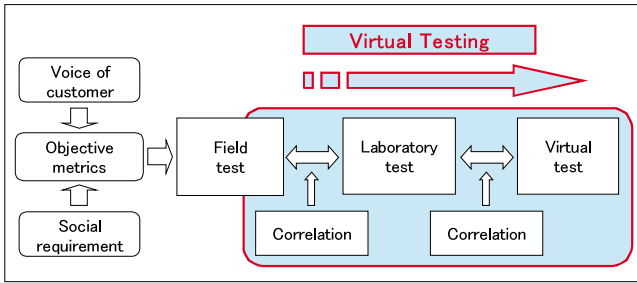


Fig.3 Transition Process

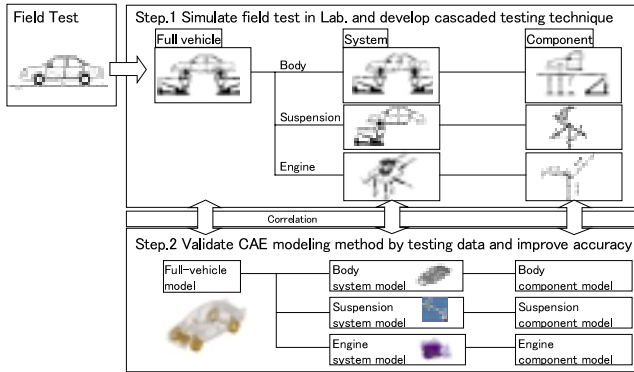


Fig.4 Cascading System for Durability

具体例として、強度領域における試験体系の構築例を Fig.4に示す。第一段階として、ラボラトリー試験機によるカスケード型試験体系を整備し、車両/システム/コンポーネント間の論理関係の把握を実車検証で可能とした。第二段階として、この試験体系を基盤に、相応した事前検証モデルを順次開発することで、図面段階での検証技術の確立を目指した⁽²⁾。

2.3 定義

革新の狙いを効果的に実現する観点から、VTを事前検証技術の開拓（CAEモデル、実験モデル、CAE・実験ハイブリッドモデル、統計的推論）とその手段（ラボ技術強化、情報インフラ整備）を包含する広い概念と定義づけた。

| | 1st year | 2nd year | 3rd year | |
|-----------------|---------------|------------------|---------------|-------------------|
| Virtual test | NVH | → | | Total 27 projects |
| | Veh. Dynamics | → | | |
| | Durability | → | | |
| | Powertrain | → | | |
| | Safety | → | | |
| Aerodynamics | → | | | |
| | → | | | |
| Laboratory test | 2 | 7 | 2 | Total 21 systems |
| | NVH | NVH Durability | NVH | |
| | Veh. Dynamics | Safety Safety | Veh. Dynamics | |
| | | Powertrain Elec. | Powertrain | |

Fig.5 Implementation Plan for Virtual Testing

従って、VTの推進には、実験評価技術の強化やCAEモデル化技術の強化といった様々な活動が含まれている。

3. 革新の取り組み

3.1 主要な開発テーマ

各開発領域でラボラトリーテスト設備導入と連動したVTの開発テーマを設定した。領域は、車両の主要な開発要素である衝突、NVH、強度、車両運動性、空力、パワートレインを対象とした（Fig.5）。

なお、各開発テーマの詳細については、当技報の特集として紹介しているので、ご参照いただきたい。

3.2 体制

VTの推進活動体制として、部門横断型のCFT（Cross Functional Team）を編成した。CFTは、全体マネジメントにあたる運営委員会と、活動全体の指揮を担当するプロジェクトリーダーを中心に、実験研究担当部門、CAE担当部門、IT担当部門で構成される（Fig.6）。

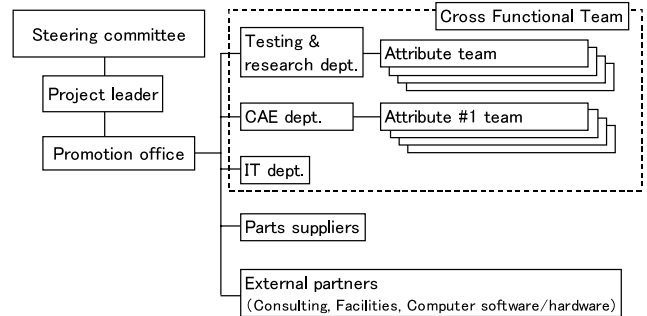


Fig.6 Cross Functional Project Organization

3.3 運営方法

VTの推進活動を円滑化するための運営方法の要点は、運営委員会によるレビュー、CFT機能の有効活用に大別される。

(1) 運営委員会によるレビュー

プロジェクト活動の計画、進捗、成果に関するレビューは、運営委員会を実施された。この関係者全員参加型による審議は、活動計画や実績の共有化、課題抽出、動機付けの点で、有効に機能した。

(2) CFT機能の有効活用

関連部門参画型であるプロジェクト活動の利点を最大限に高めるため、CFT機能の活用を重視した。特に、車両系・パワートレイン系間の連携強化に注力した。

4. 成果と課題

VTの推進活動で得られた成果と今後に残された課題を以下にまとめる。

4.1 成果

過去に蓄積した開発技術のノウハウ、三次元設計に代表されるデジタルエンジニアリングとVTの取り組みにより強化された事前検証技術を融合させた開発育成手法を活用することで、試作車に依存しない画期的な車造りが可能となってきた。

経営的指標としては、開発期間の短縮と開発費用の低減へ大きく貢献し、省資源型開発の推進を支えるためのキーネーブラへとMDIを進化させることができた。

4.2 課題

お客様の声や社会的要請を忠実に事前検証モデルへ反映させた結果、幾つかの領域において、モデルの精緻化が進展している。この結果、開発工程の限られた期間で事前検証のサイクルを十分に回すためのマネジメントが、より一層必要となってきた。

今後は、モデルを実務で有効活用するための適用スピードの向上が重要である。

5. おわりに

VTの推進活動による事前検証技術の強化により、お客様の声や社会的要請へ対応しつつ、開発期間の短期化と開発費用の低減を両立できる車造りへの道筋を拓くことができた。

今後は、現在までの成功事例を活かし、かつ残された課題へ対応することで、企業競争力の更なる強化へ取り組んでゆく所存である。

参考文献

- (1) 新見：製造業のデジタル革新，マツダ技報，No.18，p.3-7（2000）
- (2) 飯坂，青野：実験領域におけるMDIの紹介 - 強度信頼性開発 - ，マツダ技報，No.18，p.36-42（2000）

著者



河内正行



大地正樹



上岡孝志

特集 : Virtual Testing

2

NVHのVirtual Testingの紹介 Introduction of NVH Virtual Testing

安藤 正登*1 小具 洋一*2 砂田 実*3
Masato Ando Yoichi Ogu Minoru Sunada
中野 伸一*4
Shinichi Nakano

要約

NVHのVirtual Testing (以下VT) では、開発の進め方のゴールイメージを明確にし、それに必要な技術の育成を行ってきた。ゴールイメージとは、第一ステップでお客様の満足度を定量的な車両のNVH目標に置き換える。第二ステップで、車両の目標を車体やサスペンションなどシステム目標にブレイクダウンする。第三ステップで、この各システムの目標をCAEによって具体的に構造化する。第四ステップで、車両性能の予測からお客様の満足度を検証して出図するものである。MDI (Mazda Digital Innovation) では、このゴールイメージの達成に必要なTransfer Path Analysis (以下TPA) などの実験解析技術、車体音響感度の予測技術やシャーシ振動の予測技術を導入し、ロードノイズ開発などNVHの主要な性能開発に取り入れた。その結果、品質向上、開発期間の短縮、開発費用の削減に大きな成果をあげることができた。

Summary

The development of NVH Virtual Testing is based on the following approach : a goal image of NVH development process had been well defined and necessary technologies have been developed. The goal image of the NVH Virtual Testing is as follows : customer satisfaction is transferred to quantitative individual NVH targets (1st step) , vehicle level targets are cascaded into individual system targets such as vehicle body and suspension system characteristics (2nd step) , system level targets are realized as a concrete structure (3rd step) , and final drawings are fixed by verification using customer satisfaction estimation based on vehicle level performance prediction (4th step) . Through MDI (Mazda Digital Innovation) project activities, we had introduced necessary technologies such as experimental TPA and predictions on body acoustic sensitivity and chassis vibration into major NVH attributes' development of actual vehicle programs, thus having achieved significant success in upgrading product quality, shortening development period and reducing development cost.

1. はじめに

厳しい競争に置かれている自動車業界では、品質向上に取り組みながら、開発期間の短縮や開発費用の削減にも応えていくことが要求されている。これらの要求に応えるために各社ともCAEに力を入れてきており、最近では衝突性能を初めとして車のさまざまな性能が図面段階で予測できるようになってきている。この結果、従来の試作車による図面検証や改善活動からCAEによる検証や改善を中心とした開発へと移行しており、試作車の削減とそれに伴う実験工数の削減など大きな成果を出している。この傾向は今後も加速されていき、将来的には試作車を作らない開発に移行することが予想される。こうした開発のやり方への移行において、NVH開発のやり方を変えることは重要な課題である。本稿では、弊社におけるNVHのVTの概要を紹介する。

2. NVHのVT

VTの本来の意味は、試作車でのテストをコンピュータ上で仮想的に行うものである。しかし、中高周波数の車体音響特性など予測技術開発は容易ではない。またNVHには多くの性能評価項目があり、すべての性能をVTに置き換えるには多くの工数が必要である。こういった背景から、より具体的にNVH開発のVTとはどういうことなのか、どういう形で実現していくのかという検討を行った。

その結論として、Fig.1に示すようなNVH開発のイメージを作り上げた。これは、ロードノイズの開発を例に、NVH開発の目指すべき姿を描いたものである。第一ステップは、お客様の評価を車内騒音の大きさや振動の大きさといった車両の物理量に置き換える。第二ステップでは、その車両目標をシステム特性目標に置き換える。更にそのシステム特性目標をサブシステム、部品の特性目標へ

*1, 2, 4 NVH性能開発部
NVH Development Dept.

*3 CAE部
CAE Dept.

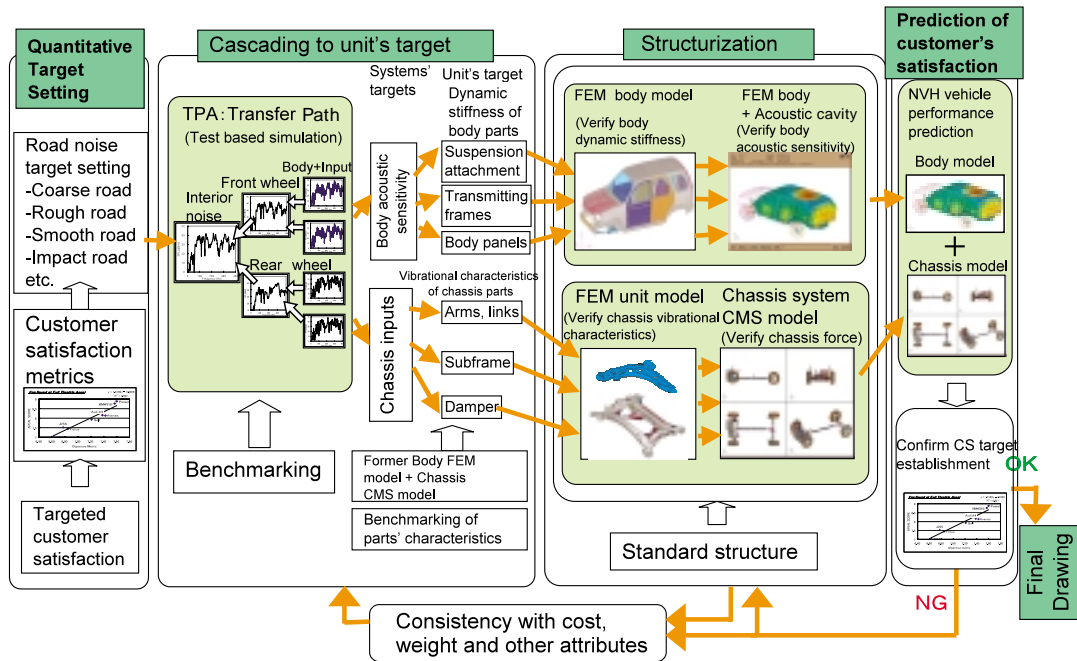


Fig.1 Goal Image of NVH Development

とブレークダウンする。これをカスケードと呼んでいる。第三ステップでは、カスケードされた目標を達成できるようCAEで検証しながら構造化する。Fig.1に示すロードノイズの例では、車体とシャシーのCAEでシステム特性を予測しながら構造を具体化し図面にする。第四ステップでは、これらのシステム特性をつなぎ合わせて車両のNVHを予測し、お客様の満足度を検証する。お客様の満足度が目標に達しない場合は、再度カスケードの見直し、CAEによる構造化、お客様の満足度予測を行う。こうして最終的にはお客様の満足度を検証し出図する。このような開発の進め方がNVH開発のあるべき姿(ゴールイメージ)であり、これをNVHのVTと定義した。

このゴールイメージを目指して、計画的に予測技術などの技術開発や設備の導入を進めている。更に、予測技術の育成は非常に時間と費用がかかるため、技術育成を進める一方では、CAEのデータのみでなく実験データを併用したハイブリッドでの予測を積極的に取り入れ、現時点の技術を最大限生かしている。また、現段階では、お客様の評価から品質の改善が特に急がれるロードノイズやエンジン音など数性能に優先的に取り組んでいる。

3. 商品目標設定ステップ

性能開発目標の設定や、性能目標達成度の検証を的確に行うためには、精度の高い性能評価指標が必要である。これに関して従来から、NVHの客観的評価手法を開発してきたが、市場での実際の走行シーンなど、さまざまな条件を考慮した上で、これらの指標を組み合わせることで総合的なお客様の満足度を推定できることが重要であり、このような指標を顧客満足度メトリクスと呼んでいる。

今回の活動の中では、市場調査から得られた顧客満足度指数を基に、各種定量評価手法を組み合わせ、計測可能な物理量から、お客様の満足度を推定できるような手法を開発した。具体例として車室内エンジン音を挙げると、車内音のエンジン回転基本次数成分と非基本次数成分とのバランスの平均値から「音質 (Tone)」指標を抽出、ラウドネ

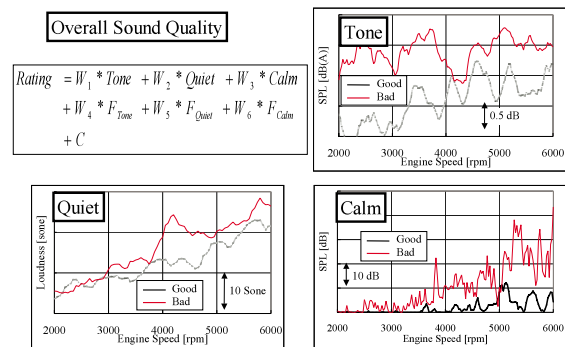


Fig.2 Overview of Quantitative SQ Evaluation Method

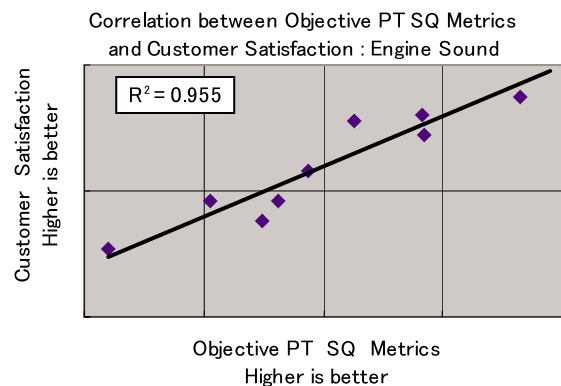


Fig.3 Correlation between PT Sound Quality Metrics and Customer Satisfaction

スの平均値から「静粛性 (Quiet)」指標を抽出、次に、高周波の平均音圧と、純音成分の背景音からの平均突出レベルにより「高周波静粛性 (Calm)」指標を抽出、一方、それぞれの指標の回転数変動 (Fi) も考慮し、これらに官能評価実験で得られた重み付けを行って総合評価点 (Rating) を求めた (Fig.2)。更に、この総合評価点と市場調査から得られたお客様の満足度との相関を取ることによって、エンジン音顧客満足度メトリクスとした (Fig.3)。

4. カスケーディングステップ

4.1 システム目標へのカスケーディングとTPA

車両のNVH性能は、車体、サスペンションなど複数のシステム特性から決定されるため、NVH性能目標を各システム目標にカスケーディングすることが重要である。システム目標は、必要に応じてサブシステムや部品の目標にカスケーディングされる。

車両性能をシステム目標へカスケーディングする際には、現行量産モデルなど次期モデルのベースとなる車のTPAを実施する。TPAの基本的な考え方をFig.4に示す。TPAによりエンジンやサスペンションなどシステムから車体への入力 F_j 、車体の音響特性 $(P/F)_j$ を明らかにすることができる。この結果と次期モデルの定量目標値から、各システムの入力目標と車体の音響特性目標を決定する。

4.2 TPAの精度向上と効率化

システム目標へのカスケーディング精度向上のためTPAの精度向上を図った。寄与度解析においては、実験による入力の同定の際にいくつかの誤差要因がある。一つは入力推定の際に使用する逆マトリクス法の誤差である。これは、FRFの逆行列を作る際に、FRFのレベルの低い部分の精度がないことから入力を大きく見積もってしまうものである。また、「廻り込み」による誤差がある。これは、あるサスペンションリンクの車体側取り付け部の振動が他のサスペンションリンクからの入力の影響を受けることにより生じる誤差である。TPAの精度を上げるために、これらの誤差を極力小さくする必要がある。

これらの誤差は、従来の正方行列ではなく長方形行列を使用して処理するOver Determination法を使うことで回避した。これは入力点以外の部位についても振動を計測し、

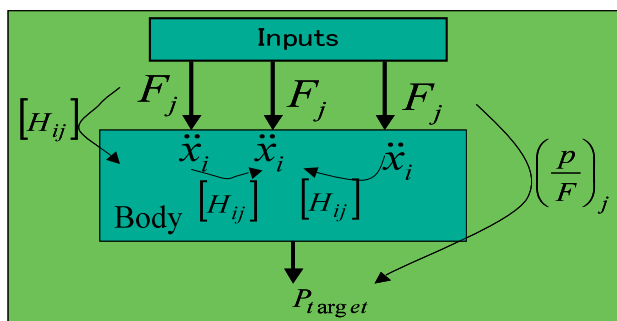


Fig.4 Basic Concept of TPA

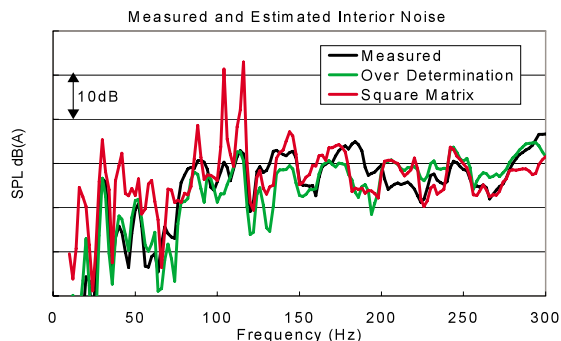


Fig.5 Accuracy Improvement by Over Determination



Fig.6 Course Road Noise Chassis Dynamometer

必要な解の数以上の行列から、最小自乗法により入力を同定するものである。Fig.5に示すように、Over Determinationを用いて入力を同定することで精度が大幅に向上した。その結果、振動や伝達関数を計測する計測点の数は、車体への入力点数の倍程度にする必要があり、実験工数の増加を招くことになった。

したがって、高い解析精度を保ちながら限られた開発期間の中でTPAを活用していくためにはテストの効率化を進めていくことが不可欠である。また、各計測点の位相の精度が計算結果の精度に大きく影響することから、多点同時計測が望ましい。以上二点から、ロードノイズをラボで再現するためのロードノイズ用シャシーダイナモと多チャンネルの計測システムを導入した。ロードノイズ用シャシーダイナモでは、テストコースのロードノイズ路面形状をローラ表面の硬質ウレタン上に再現している (Fig.6)。多チャンネル計測システムでは180チャンネルを同時計測することができ、フロントサスペンション、リヤサスペンションの振動を一度のテストで計測する。これらの設備や計測システムを導入することで、大幅なテスト時間の削減と短い開発期間の中でTPA活用を可能とした。

5. 構造化ステップ

前述したように、車両のNVH性能は、車体への入力特性と車体特性の2つのシステム特性にカスケーディングされる。これらシステム特性の目標を達成する構造を効率的に見出すには、それぞれの特性を有限要素法 (Finite Element Method, 以下FEM) などのCAEで予測する必要がある。以下に、車体とシャシーのCAEについて述べる。

5.1 車体特性予測技術

ここでは、車体特性のFEMによる予測技術について述べる。ここでいう車体特性とは、車体へのある入力点を単位荷重で加振した際の車室内音圧レベルであり、車体音響感度と呼んでいる。車体音響感度には、車体の骨格、パネル、トリム部品の振動、トップシーリング、カーペットなどの遮音、吸音特性など数多くの特性が関わっており、従来これを精度良く予測することは困難であった。今回、MDIの一環として、車体音響感度を200Hzまで予測する技術を開発、アテンザのNVH性能の育成に適用した。

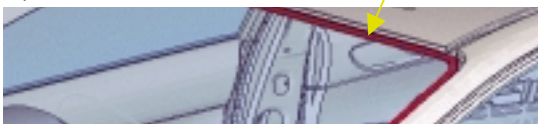
車体音響感度の計算には、車体モデルと車室内の空気を表す空洞モデルを用いるため、双方の精度向上を図った。

まず、ホワイトボデー、ブルーボデー（サイドドアなどのふた物を組付けたホワイトボデー）、トリムボデー（PT、サスペンション系を取り除いた車両；Fig.7）のそれぞれについて、各部の振動特性を実験値と比較、順次車体モデルの精度向上を図った。具体的には、重量物の正確な表現、ウインドの接着材やウェザーストリップなどの特性、



Fig.7 Trimmed Body Model

Modeling Using Adhesive between Body and Windshield by Solid Element



Considering Contact between Body and Hinge



Fig.8 Example of Structure Model Update



Fig.9 Trim Model

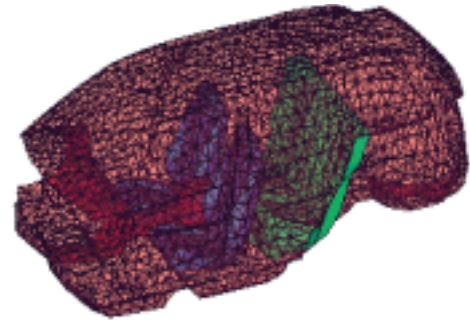


Fig.10 Cavity Model



Fig.11 Acoustic Impedance Setting Parts

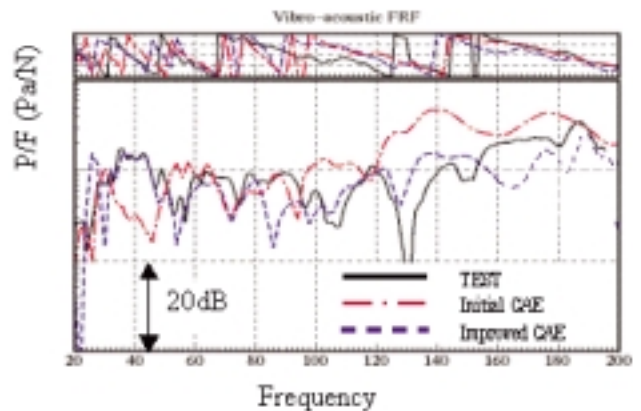


Fig.12 Calculation Result of Acoustic Sensitivity

表現の見直し、ドアヒンジとボデーの接触の考慮 (Fig.8) など、従来のモデルをより詳細化した。更に、従来はモデル化していなかったインパネ、ドアトリムなどの樹脂部材も直接車室内の空気に触れる部材としてモデル化した (Fig.9)。

空洞モデルは、従来車体のパネル形状に合わせて作成していたが、トリム、シートの表面に合わせて詳細にモデル化した (Fig.10)。また、車室内の空気を取り囲む車体パネルやトリムの振動と、その近傍の音圧には周波数依存性があるため、これを表わす音響インピーダンスと呼ばれる物理量を導入し、空洞モデルの表面に設定した (Fig.11)。これにより、フロアカーペットなど多孔質材料の部材の吸音効果も考慮している。これらの改善の結果、Fig.12に示すように、200Hzまで全域に渡って車体音響感度の精度が大幅に向上した。

5.2 シャシー入力予測技術

ここでは、シャシー系から車体への入力を予測する上で重要なシャシー系振動特性の解析モデルについて述べる。

50Hz以上のロードノイズ発生時のシャシー入力を予測するためには、シャシー系各 부품の弾性振動も精度良く再現させる必要がある。そこで、基本的に各部品をFEMによりモデル化した。これに、プッシュやベアリングなどをばね要素、各種付属物を質量要素として付加している。タイヤモデルは、加振テスト結果に基づくリングモデルとした。フロントサスペンションのモデルイメージをFig.13に示す。リヤサスペンションも同様のモデル化を行っている。しかし、このような大規模なモデルのままでは多くの計算時間を要する。精度を保ちつつ計算時間を短縮するために、

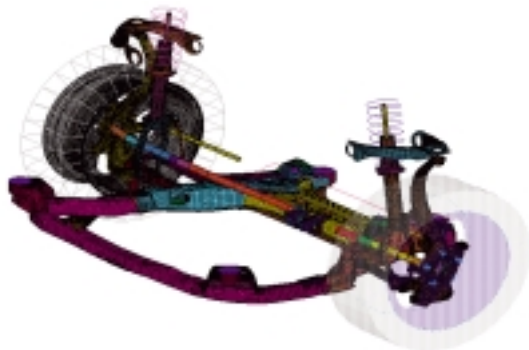


Fig.13 Chassis FEM Model

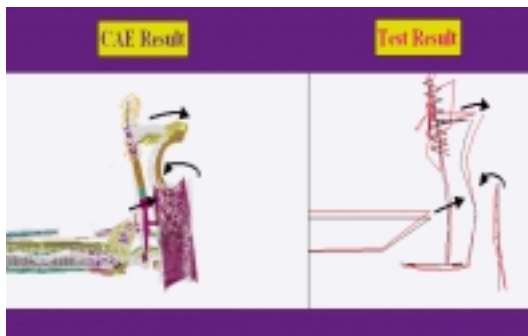


Fig.14 Suspension Mode Comparison (250Hz)

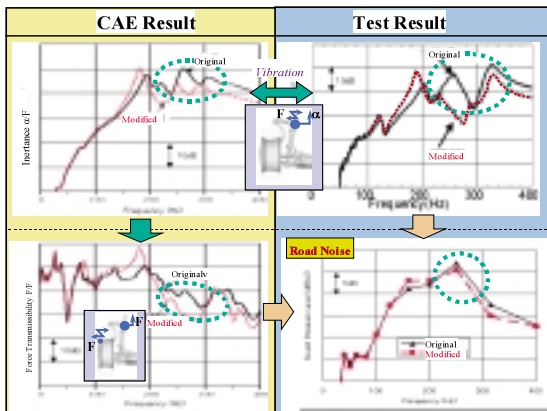


Fig.15 Measures Effect Verification

(1)各FEM部品のモーダルモデル化,(2)伝達関数合成法を応用したFEM振動特性の動剛性マトリクス化(周波数応答解析のみ),を行った。この手法により、300Hz程度までのシャシー系からの入力計算でもEWS(Engineering Work Station)を用いて数十分で計算可能となり、種々のパラメータスタディを高速に実施できるようになった。

次に、このシャシー入力予測技術の活用事例を紹介する。ロードノイズの音圧ピークとなっていた250Hz域に対し、車体への入力を高めているサスペンション振動の特定をこのシャシーCAEモデルを用いて行った。その結果、Fig.14のようなホイール~ナックル~アッパーアームが連成したモードの寄与が高いことがわかったので、シャシー入力低減構造をCAE検討し、ナックル、アッパーアーム回りに対策を施した。対策前後のアッパーアーム部振動伝達関数と力伝達率(シャシー入力)のCAE結果、及び実測でのアッパーアーム部伝達関数と実走音圧比較をFig.15に示す。CAE上で低減効果のあった250Hz域で、実車でも同様に振動及び音圧が低減されている。

6. お客様満足度の検証

5章で示したような車体特性と車体への入力特性を予測するモデルに実走時のエンジントルク変動や路面から受ける変位を与えれば、車両NVH性能を予測できる。この車両性能予測値から規定のデータ処理に基づいて顧客満足度メトリクスを算出し、最終的にお客様の満足度を定量的に推定していくことになる。以下にこの車両性能予測技術について述べる。

6.1 低周波車両NVH性能予測技術

80Hz以下の低周波車両NVHの代表的なものとして、アイドリング振動・こもり音がある。これは、数百rpmのアイドリング時のエンジントルク変動に伴うNVH現象である。4気筒エンジンではその回転2次が、6気筒の場合は3次がトルク変動の主成分となるため、通常20~40Hzでの振動・こもり音を評価する必要がある。

この性能予測のため、Fig.7, Fig.10の車体及び車室モデルに、Fig.14のシャシー系振動解析用モデルを組み合わせ

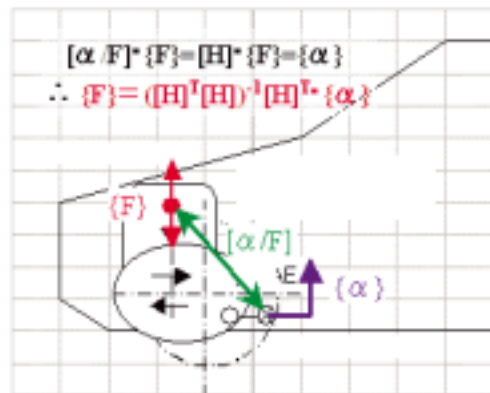


Fig.16 Relation between Engine Load and Engine Bracket Vibration

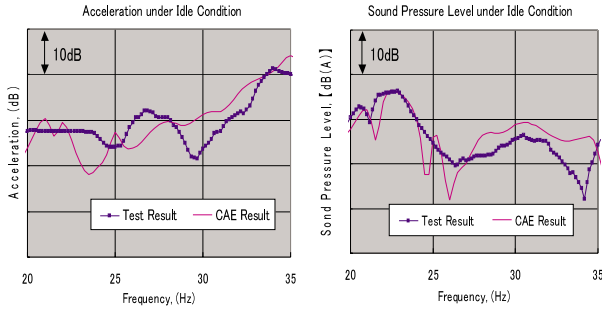


Fig.17 Idle Simulation Result

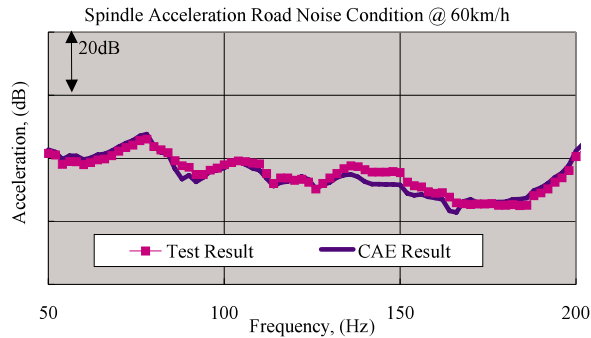


Fig.18 Spindle Acceleration under Road Noise

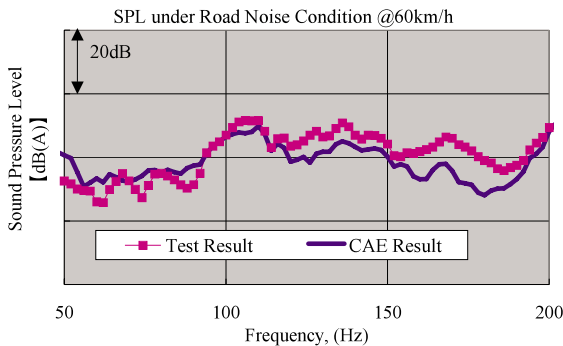


Fig.19 Road Noise Simulation Result

た車両モデルを構築した。更に、エンジンマウントや排気マウントからの入力も予測するために、排気系をFEM、エンジンを剛体マスとして追加した。低周波のみを扱えば良いため、モーダルモデルとして表現される各部品FEMモデルの採用モード数は低次のみにして、モデル自由度の増加を抑えている。アイドリング時性能予測に必要なエンジントルク変動は、Fig.16に示すように、CAEによる伝達関数とエンジンマウント部実測振動に基づく推定手法により算出した。具体的には、計測加速度を{ }_{measured}、車両CAEモデルによる荷重荷重位置～エンジンマウント部までの伝達関数を[H]([= /F])、とすれば、入力荷重 F は、

$$\{F\} = ([H]^T [H])^{-1} \cdot [H]^T \cdot \{ \}_{measured}$$

と推定できる。この荷重を荷重したアイドリング時性能予測結果をFig.17に示す。良好な予測精度が得られている。

6.2 中周波NVH性能予測技術の概要

80Hzを超える領域の中周波NVH現象の一つロードノイズにおけるシャーシ系からの入力をまず求めるために、Fig.13のシャーシCAEモデルのタイヤ接地面に入力される路面変位が必要である。そこで、上記のエンジン荷重推定手法の考え方を、タイヤ接地面変位を推定する手法に応用した。この推定用データとして、Fig.6に示したシャーシローラと多点同時計測技術により実走時加速度を計測し、推定手法の精度を向上させた。推定した接地面変位をシャーシCAEモデルに与えたときのサスペンション加速度の比較結果をFig.18に示す。良好な精度で実走行時の加速度が再現している。

この計算により求められるシャーシ入力と、5章で述べた車体モデルで算出した音響感度を掛け合わせロードノイズ性能を予測する。Fig.19に示すように、車体音響感度の整合が高い200Hz程度まで比較的良好な精度で予測できている。

7. おわりに

VTの構築活動により、お客様の満足度推定精度、要因分析の精度、車体音響感度やサスペンションからの入力の推定精度が向上し、図面段階でお客様の満足度がある程度推定できるようになった。一方、CAEや実験解析の精度向上、車体音響感度の予測周波数の拡大、入力同定方法の精度向上、適用性能の拡大などの課題も残されている。今後はこれらの課題に取り組み、予測精度の向上を図りたい。

著者



安藤正登



小貝洋一



砂田実



中野伸一

特集：Virtual Testing

3

側面衝突のVirtual Testing Virtual Testing of Side Impact

伊藤 司^{*1} 安藤 誠一^{*2} 伊東 紀明^{*3}
Tsukasa Ito Seichi Ando Noriaki Ito
尾川 茂^{*4}
Shigeru Ogawa

要約

マツダでは、全社横断型プロジェクトとしてVirtual Testing (以下VT) の概念を導入し、事前検証技術の強化に取り組んでいる。衝突安全性能開発の領域でも、自動車の安全性能に対する市場要求に対応し、高い衝突安全性能を有する車体構造や新しい安全装備などの開発を短時間でかつ高効率に進めるため、VTを開発プロセスの中で積極的に取り入れている。本稿では、側面衝突の開発におけるCAEモデル化技術の精度向上と実験評価技術の取り組みについて紹介する。

Summary

Mazda has introduced the concept of Virtual Tests and strengthened proactive simulation technology. In order to respond to the increasing market demands for higher safety performance of vehicles, we should develop body structure and new safety equipment with high efficiency in a short time, and have been positively performing Virtual Tests in development processes. This paper introduces Mazda's activity for the accuracy improvement in CAE modeling technology and experiment evaluation technology for the development of side impact protection.

1. はじめに

近年のコンピュータの演算速度向上に伴い、有限要素法 (Finite Element Method, 以下FEM) に基づく数値解析を用いて複雑な現象をシミュレートすることが自動車の性能開発の領域で一般的になっている。当社では1980年代前半よりスーパーコンピュータを導入しFEMシミュレーションの技術開発を進めてきており、衝突性能開発の領域では開発費用の削減と効率化の面から必要不可欠な技術となっている。このような中、特に側面衝突の領域においては、従来の車体構造のモデル化に加えて傷害値評価用のダミーのモデル化が必要となり、大規模なモデルのシミュレーションが必須となっている。

本稿では、FEMシミュレーションを中心としたCAEと部品やユニットでのテスト評価技術を組み合わせることによるVTの衝突性能開発への適用について述べる。

2. 側面衝突性能開発プロセスと課題

衝突性能は、複雑な車体システムや各種の内装システムにより決定され、それぞれが複雑に絡み合っている。このため、我々は衝突性能開発を効率的に進める方法として、車体全体性能から車体システム、内装システムに性能をカスケードし、部品レベルで開発/育成を行い、CAEやユニットテスト等で検証を行った後、最終的な実車テストで確認するという開発プロセスを推進している。VTはこの開発プロセスを進めていく上での中心技術となっている。

側面衝突性能の開発では、Fig.1に示すように、開発初期の車体特性の目標設定、車体各部および内装構造の具現化、車体全体の性能検証の領域にVTを活用する開発プロセスを行っている。この側面衝突性能の開発プロセスを実現するためには、実現象を定量的に把握する実験・解析技術を開発しながら、CAEの予測精度を向上させることが最重要課題である。以下、これらの取り組みについて述べる。

*1, 2 CAE部
CAE Dept.

*3, 4 衝突性能開発部
Crash Safety Development Dept.

3. CAE予測精度の向上

CAEの予測精度を改善するために、車両に搭載されるダミーモデル、車体各部の強度とそのバランス、内装の衝撃吸収性の予測精度向上について述べ、更に精度向上した各部分モデルの組み合わせによる車両全体モデルでの精度向上について以下に説明する。

3.1 ダミーモデルの精度向上

ダミーモデルの精度向上のため、Fig.2に示すようにダミーの内部構造の忠実な再現と、ダミーの部品・サブアセンブリ・全体アセンブリ各構造単位で、段階的にユニットテストで整合取りを実施した。最終的な全体アセンブリのユニットテスト結果に対するCAEの結果の一例をFig.3に示す。ダミー信号の最大値などピンポイントの値だけでなく、時間履歴での応答まで高い精度で再現が可能となった。

3.2 車体強度バランス検討モデルの構築

車体強度バランス検討モデルは、車体の各部強度と車体変形の間接関係を予測するツールである。これによって、開発初期に車の基本形状に見合った車体各部の必要強度を定量的に予測することができる。

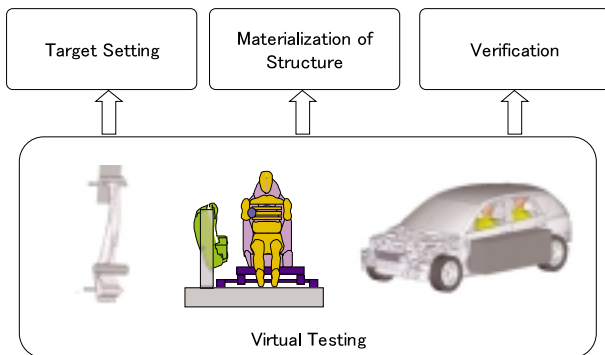


Fig.1 Development Process



Fig.2 Dummy Model

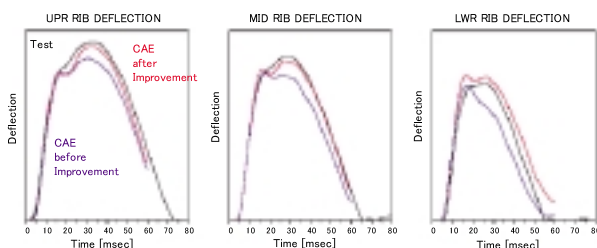


Fig.3 Dummy Simulation Result

的に予測することができる。

モデル構築のポイントは、衝突体からの負荷が車体各部にどのように伝わるかを正しく把握することである。このため、実車現象を模擬しながら車体各部の伝達荷重が計測できるユニットテスト方法を開発し、更に様々な構造の車について伝達荷重を定量的に求めた。ここから得られた知見をもとに、Fig.4に示すような車体の簡易バネマスモデルを構築した。このモデルを用いた実車テストにおける車体速度のCAE予測の一例をFig.5に示す。実車での衝突現象に対して妥当な予測精度が得られた。

3.3 車体各部強度の評価手法の構築と精度向上

車体各部強度を定量的に把握する方法として、Fig.6に示すように車体各部の強度特性を評価する手法を開発した。この手法と前述した車体強度バランス検討モデルを組み合わせることにより、車体各部が適切な強度になるようCAEモデルの詳細構造を作りこみ、実際の現象との検証を行うことが可能となる。更に、この評価手法を使って、CAEモデルの車体各部特性の予測精度を向上した。単純化した条件下でCAEとテストを対比できるため、予測誤差の要因が特定しやすく、かつ予測誤差低減手段の効果を定量的に把握しながら、精度向上することができた。このモデルのユニットテスト結果に対するCAE結果の一例をFig.7に示す。

3.4 内装の衝撃吸収特性評価手法の構築と精度向上

側面衝突においてBピラーやドアでは、衝突することで引き起こされる変形と、乗員への衝撃を吸収するための変形現象が同じ場所で発生する。このような複雑な現象の中

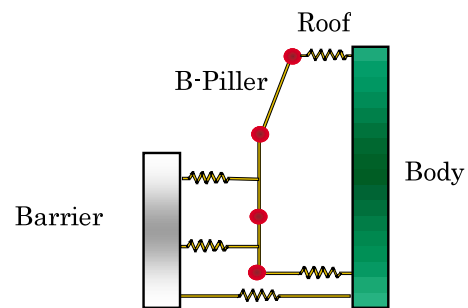


Fig.4 Side Impact Spring-mass Model

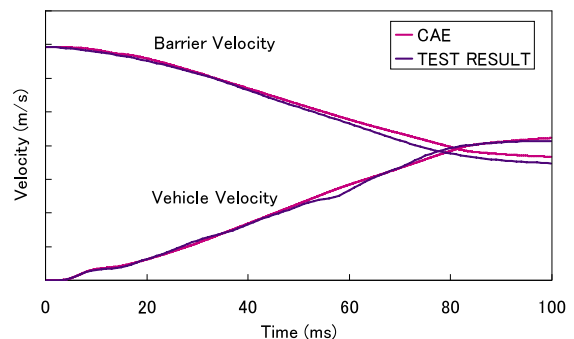


Fig.5 Simulation Result

から、内装の衝撃吸収特性を分離し内装特性を把握するユニットテスト手法を開発した。Fig.8にドアの衝撃吸収特性のユニットテスト方法を、Fig.9にドアのCAEモデルを示す。またこの手法を用い、前節の車体強度のCAE精度検証と同様に、内装モデルの精度向上を実施した。このモデルとユニットテスト結果の比較をFig.10に示す。CAEで内装のつぶれ荷重を精度よく再現することが可能となった。

3.5 車両全体モデルの精度向上と問題点

これまで述べてきた、ユニットでの精度を向上したモデルを組み合わせさせた結果、Fig.11に示すように、車両全体の

CAEでも車体変形速度等の精度は向上してきた。しかしながら現状では、ダミーの傷害値予測を含めた車両全体の解析予測においては、Fig.12に示すように、ダミーの傷害値を精度良く予測できていない。これは、前節までに述べてきたような各種特性の予測誤差が累積していることに加え、車種固有の衝突現象に対しCAE精度検証が完全には行えておらず、想定外の現象にCAEが追従しきれていないことが原因と考えられる。

4. ユニットテスト装置の活用

実車テストのCAE予測において、予測精度を低下させる要因の一つに、ダミーに対する内装の衝突位置や衝突荷重分布がある。内装とダミーが、精度検証時に打撃した位置や角度・速度と異なる条件で衝突する場合、その状況を定性的に表したCAE結果は得られるが、ダミーの傷害値の定量精度は保証されていないといえる。



Fig.6 Body Strength Test

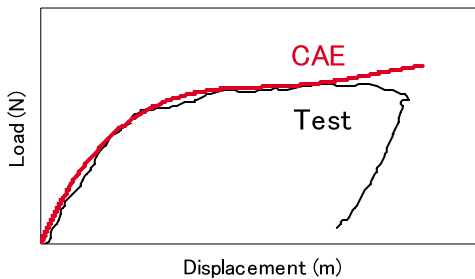


Fig.7 Body Strength Simulation Result



Fig.8 Door Impact Test



Fig.9 Door Impact Simulation Model

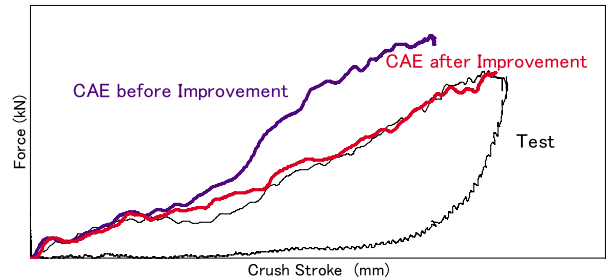


Fig.10 Door Impact Simulation Result

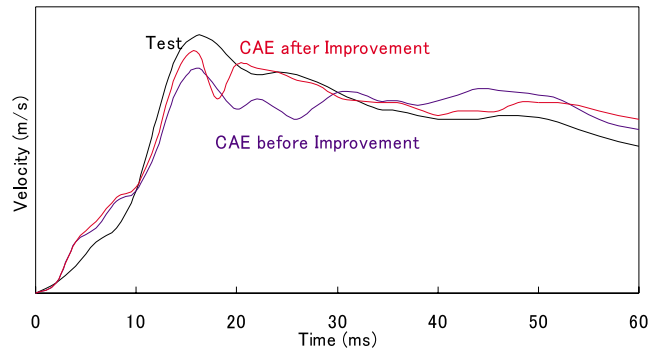


Fig.11 Body Characteristic Simulation Result

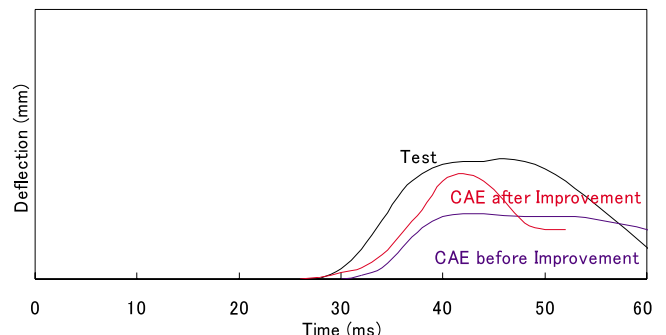


Fig.12 Dummy Injury Simulation Result

そこで、Fig.13に示すようなクラッシュシミュレータを活用し、予測を補正する方法を開発した。本装置は、実車と同等の車体速度を再現でき、かつ台上にキャビン内部の構造をセットして動きを制御し、様々な衝突状況を試行できる装置である。この装置を活用してCAEで計算された車体・内装挙動に近い挙動を発生させ、その状況下でのダミーの傷害値をCAEと比較し、CAEのダミーモデルの精度を検証する。この精度検証結果を踏まえてCAEモデルを改良し、ダミーの傷害値の予測精度を向上することが可能である。

Fig.14にクラッシュシミュレータで検証した結果を受けて改良したモデルによるCAEのダミー腰部の予測結果と、テストの傷害値を比較した例を示すが、高い精度でダミーの傷害値を予測することが可能となった。

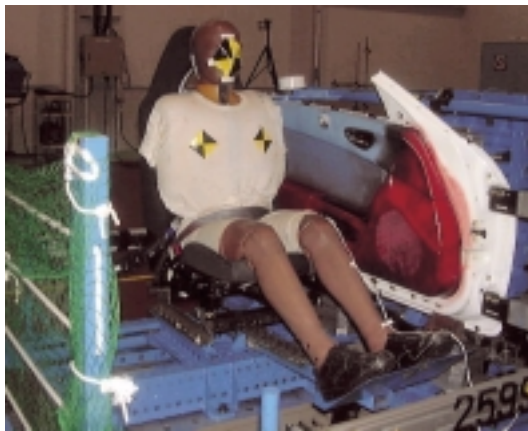


Fig.13 Side Impact Crash Simulator

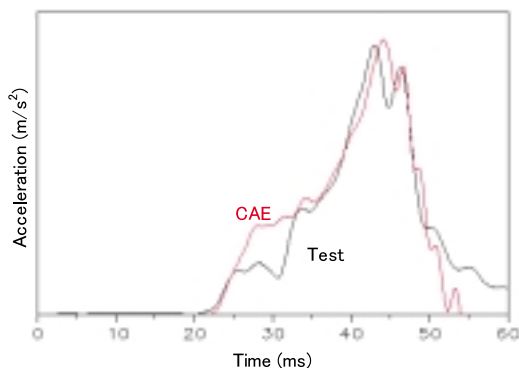


Fig.14 Modified Injury Value Prediction

5. まとめ

側面衝突における開発初期の目標設定、構造の具現化、車体全体の性能検証の領域に活用できるVTの技術について紹介した。今後、更なる精度の向上により予測精度の改善を行い、より強力な開発ツールとなりうるよう技術開発を進める。

著者



伊藤 司



安藤誠一



伊東紀明



尾川 茂

特集：Virtual Testing

4

耐久性開発におけるCAEシミュレーション技術の紹介 Introduction of Durability CAE Simulation Technology

田村 秀二^{*2}

Shuji Tamura

要約

ますます多様化するお客様のニーズに合った商品を、タイムリー、かつ、リーズナブルな価格で提供するためには、商品開発の短期化と開発コストの低減が極めて重要である。中でも、耐久性の開発は、試作車を用いての性能確認では時間を要するため、開発の効率化・短期化に対しては、コンピュータ上でのシミュレーション（以下、CAEシミュレーション）の活用が特に有効となる。マツダでも、ボデー・シャシーなど構造体の耐久寿命を、CAEシミュレーションで予測する手法の開発に取り組み、実用化の見通しを得るまでに至っている。

本稿では、市場を想定した試験路の走行によって実施している耐久試験を、コンピュータに置き換えてシミュレーションするための3つの手法、①試験路をコンピュータ上のデータとして表現する手法、②路面からの刺激により、各構造体に伝達する力を算出する手法、③力の伝達に伴い、構造体に発生する応力（歪）を求める手法についての解説と、耐久寿命を予測する方法について紹介する。

Summary

With customer needs becoming diversified more and more, further reductions in cost and period required for products development are of very importance in order to supply products satisfying such needs to customers timely at reasonable cost. Computer-aided engineering (CAE) simulation is an essential enabler for the development of durability as one of basic vehicle requirements, therefore we had studied the possibility of estimating the fatigue life of a vehicle structure such as body and chassis by means of CAE simulation, which has proceeded toward practical use.

This report describes three approaches-1) converting a road profile on the proving ground into computer input data for geometrical modeling, 2) calculating the forces transmitted to each structure by road stimulation; and 3) calculating the stress produced on the vehicle structure by force transmission-to doing the CAE simulations of durability tests, which were conventionally physical tests on the proving ground with actual market roads assumed, and introduces a method of estimating the fatigue life of the vehicle structure.

1. はじめに

商品開発において、開発期間の短縮、及び開発コスト低減は、極めて重要な課題である。それに対し、CAEシミュレーションは不可欠なイネーブラであり、耐久性開発についても、その実用化に向けて手法の開発を進めてきた。本稿では、耐久性に関するCAEシミュレーション手法と、そ

の実用性を検証した結果について紹介する。

2. 取組みの狙い

取組みの大きな狙いは、耐久性に関するCAEシミュレーションを実用化することにより、試作車を使って耐久性を確認する方法から脱却し、図面を基に机上で予測する方法に変革していくことである。

*2 CAE部
CAE Dept.

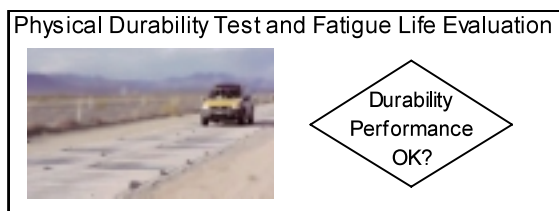
その取組みは、1998年頃からスタートしている⁽¹⁾ものの、CAEシミュレーションの簡便さや、精度など実用性の面で課題もあった。そのため、本取組みでは、既存のCAEシミュレーション手法をベースに、より「簡便で実用性の高い」手法に育成することを狙いとした。

3. 手法と検証結果

3.1 CAEシミュレーション手法の全体像

市場を想定した試験路の走行によって実施している耐久試験を、机上に置き換えてシミュレーションするためには、Fig.1に示す3つの手法が必要であると考えた。それは、

- ① 耐久性開発の拠り所である試験路を、コンピュータ上のデータとして表現する手法



How to Simulate on the Computer ?

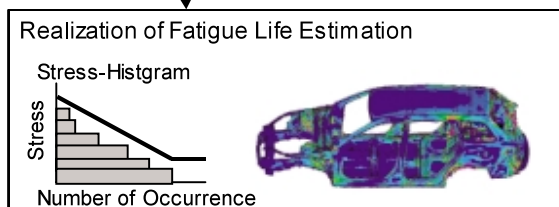
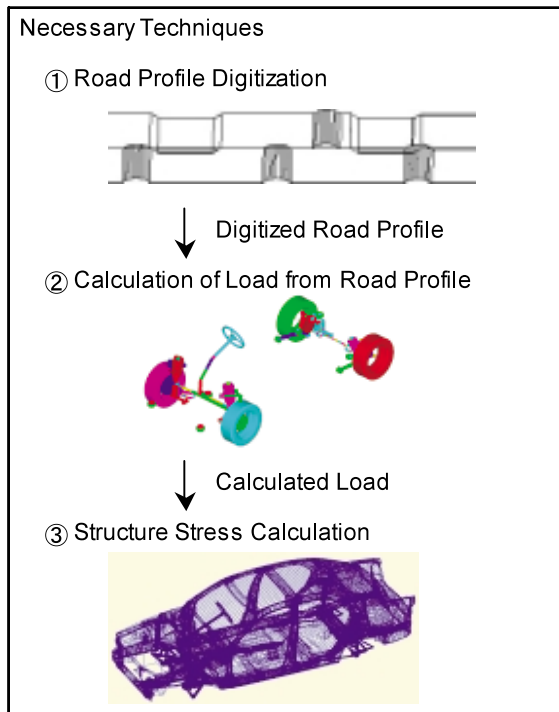


Fig.1 How to Simulate Physical Evaluation on the Computer

- ② 路面刺激により、構造体に伝達する力を算出する手法
- ③ 力の伝達に伴い、構造体に生じる応力を求める手法である。

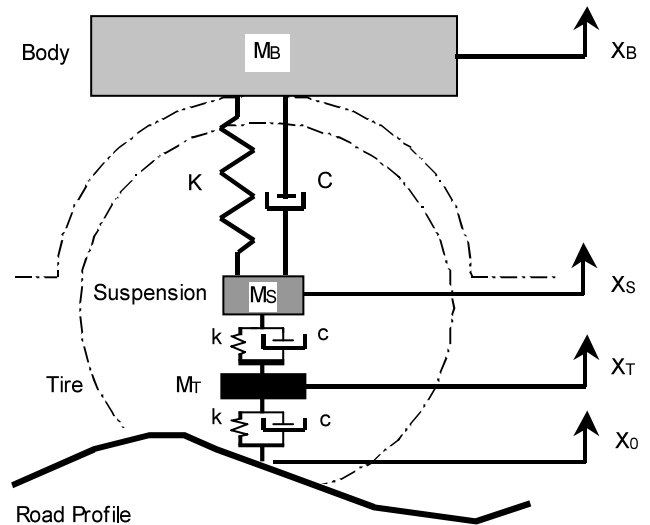
以上により、構造体に生じる応力(歪)を求めることができれば、マイナー則など一般的な寿命推定手法⁽²⁾を適用することにより、机上での耐久性予測が可能となる。

3.2 路面をコンピュータ上のデータとして表現する手法

(1) 手法

実際の路面をコンピュータ上のデータに置き換える方法としては、路面形状を実際に計測することが考えられる。しかし、市場を想定した試験路は、形状が複雑で、かつ種類が多いため、計測は容易ではない。そこで、サスペンション挙動やタイヤ特性値など、測定可能なデータを基に、路面形状を逆算で求める手法⁽³⁾を採用した。

これは、路面と車両をFig.2に示すようなモデルで表し、運動方程式を解くことによって、路面形状を逆算する手法である。この手法で求めた路面形状は、特にタイヤの部分



M_B : Body Mass, X_B : Body Displacement
 M_S : Suspension Mass, X_S : Suspension Displacement
 M_T : Tire Mass, X_T : Tire Displacement
 F_{SP} : Force on Suspension, X_O : Calculated Road Profile
 K : Suspension Spring Rate, C : Suspension Damping Rate
 k : Tire Stiffness, c : Tire Damping Rate

Motion Equation

$$\begin{aligned}
 M_T \ddot{x}_T &= k(x_S - x_T) + c(\dot{x}_S - \dot{x}_T) - k(x_T - x_O) - c(\dot{x}_T - \dot{x}_O) \\
 M_S \ddot{x}_S &= K(x_B - x_S) + C(\dot{x}_B - \dot{x}_S) - k(x_S - x_T) - c(\dot{x}_S - \dot{x}_T) \\
 M_B \ddot{x}_B &= -K(x_B - x_S) - C(\dot{x}_B - \dot{x}_S)
 \end{aligned}$$

Solution

$$X_O = \frac{M_T s^2 + 2cs + 2k}{(cs + k)^2} \cdot F_{SP} + \frac{M_S s^2 (M_T s^2 + 2cs + 2k)}{(cs + k)^2} + \frac{M_T s^2 + cs + k}{(cs + k)^2} \cdot X_S$$

Fig.2 Modeling for Road Profile Back-calculation

を、バネ - マス - 減衰特性だけのシンプルなモデルで表現していることから、タイヤモデルに対応した「擬似的な路面形状」であるということが出来る。そこで、本稿では、実際の路面と区別するため、「路面プロファイル」と呼ぶことにする。

なお、Fig.3に、形状が分かっている実際の路面と、路面プロファイルとの比較例を、参考として示す。図のように、両者は似ているものの、完全には一致していない。

(2) 検証結果

路面プロファイルを採用するに先立ち、「路面は車種によらず普遍である」という前提のもと、妥当性を検証した。その検証は、複数の車種で同じ路面を走行し、それぞれ求めた路面プロファイルの一致性を確認する方法で実施した。Fig.4は、その結果を示したものであるが、車種が異なる場合でも、路面プロファイルはほぼ一致していることから、この手法は実用レベルにあるものと判断した。

3.3 構造体に伝達する力を算出する手法

(1) 手法

伝達力算出手法の概要は、Fig.5に示すように、

- a. まず、構成部品の質量や慣性諸元、部品間の結合部の特性情報などを基に、車両の機構モデルを作成しておく。
- b. 続いて、そのモデルに、3.2で求めた路面プロファイルを与え、部品ごとの運動方程式を連成させて解くことにより、各構造体に伝わる力を算出していく。

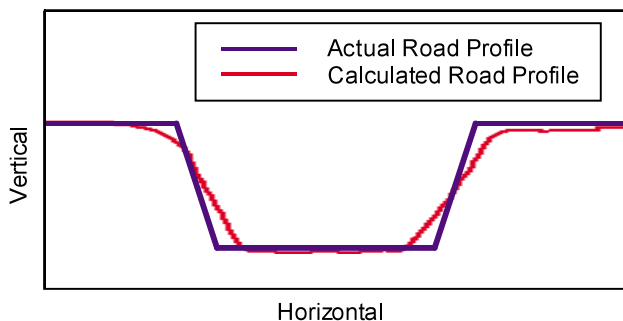


Fig.3 Comparison Result with Actual Road Profile

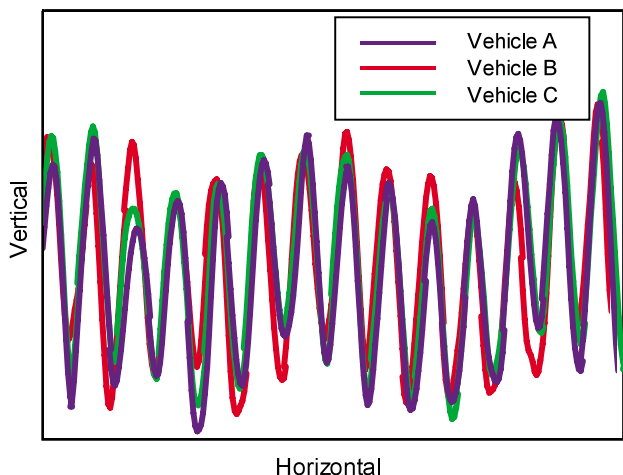


Fig.4 Validation of Calculated Road Profiles Conformity

という方法である。

なお、ここで活用したツールは、既にマツダで広く使われている機構解析ソフト「ADAMS」であるが、以下に、当手法の主なポイントをあげておく。

① タイヤをシンプルなモデルで表現したこと

タイヤをモデル化する方法としては、形状や特性を詳細まで忠実に表現することも考えられる。しかし、今回は、モデル作成の容易さや、コンピュータへの負荷軽減を重視し、Fig.2と同じシンプルな表現にした。このモデルを使えば、車両モデルとの合成が容易であるうえ、計算に要する時間が少なくて済む。

② 一部の構成部品を弾性モデルで表現したこと

一般的な機構解析では、サスペンション・リンク類など、構成部品を剛体(変形しない)モデルで表現する。しかし、当手法では、顕著な変形が予想される部品については、変形を考慮できる弾性モデルで表現したうえで、機構解析モデルと合成することにより、精度の向上を図った。

(2) 検証結果

この手法による精度を、以下の2つの面から検証した。

① タイヤに伝わる力のシミュレーション精度

まず、タイヤをシンプルなモデルとしたことにより、精度上の問題がないかを検証しておく必要があると考えた。しかし、走行中タイヤに伝わる力を、直接計測することは難しいため、タイヤ近傍のホイールの加速度について、予測結果と実測値を比較する方法で検証することにした。Fig.6は、その一例を示したものであるが、両

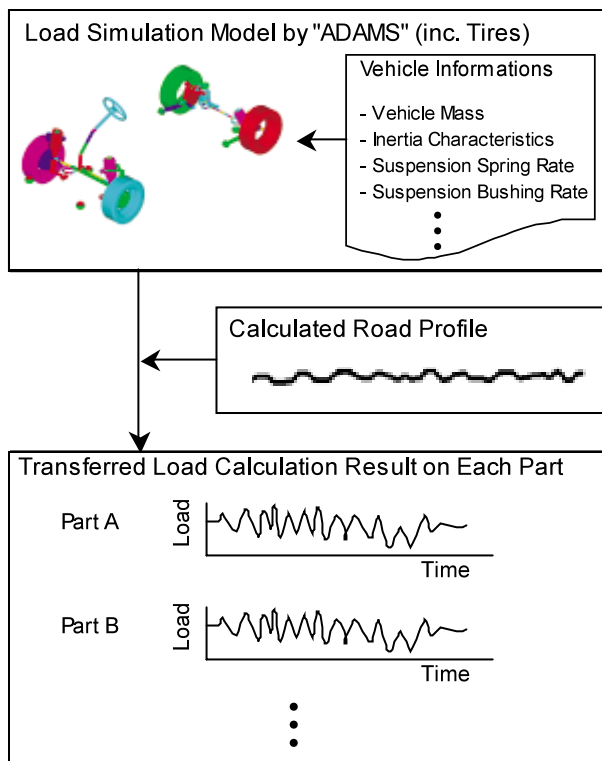


Fig.5 Transferred Load Calculation Method

者はほぼ一致していることから、実用上の問題はないと判断した。

② 各構造体に伝わる力のシミュレーション精度

次に、各構造体に伝わる力を予測した結果が、実際と一致しているかを検証した。Fig.7は、サスペンション部品についての例であるが、構造体に伝達される力を、精度良くシミュレートできていることが確認できた。

3.4 構造体に生じる応力を算出する手法

(1) 手法

構造体の耐久寿命は、発生する応力(歪)の大きさと頻度によって決まる。また、応力の大きさと頻度を求めるには、力に応じて刻々と変化する応力(以下、時系列応力)を把握する必要がある。

これについては、既にマツダで実績のある、汎用ソフト「FATIGUE」を使うことにより対応した。その概要は、Fig.8のように、単位入力を与えた場合の応力値を事前に求めておき、3.3で算出した時系列の伝達力を乗じる方法である。

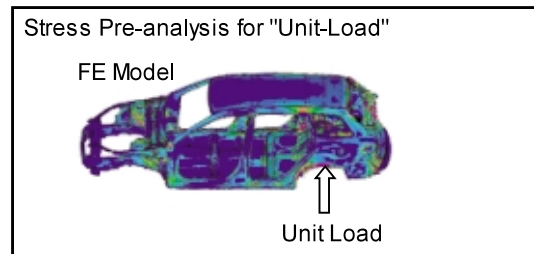
(2) 検証結果

この手法を使って求めた時系列応力と、応力の実測結果を比較することにより、シミュレーションの精度を検証した。Fig.9は、ボデーについての例であるが、両者は良く

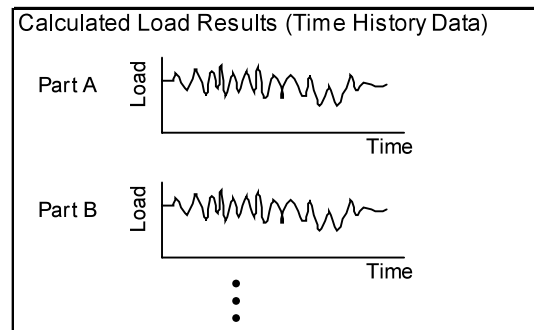
一致しており、構造体に生じる時系列応力を、精度良くシミュレートできていることが確認できた。

3.5 耐久寿命推定精度を検証した結果

以上の手法によって得た時系列応力データに、マイナー則を適用して耐久寿命を求め、実際の寿命と比較した。Fig.10は、その結果を示したものであるが、両者の間に相関はあるものの、一致度は高くなく、正確に耐久寿命を予



X



||

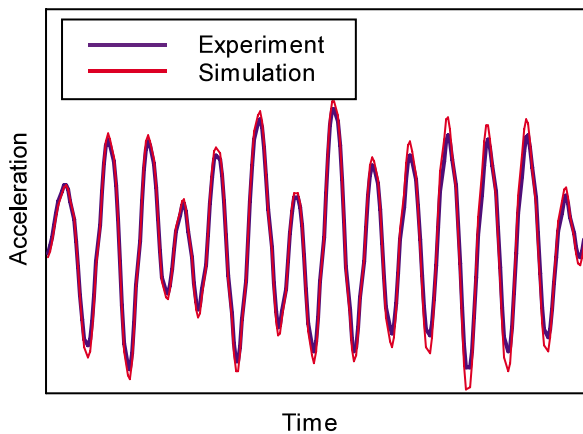
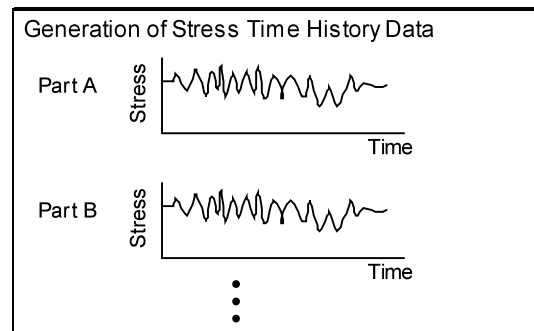


Fig.6 Validation Result of Acceleration

Fig.8 Time History Stress Generation Method

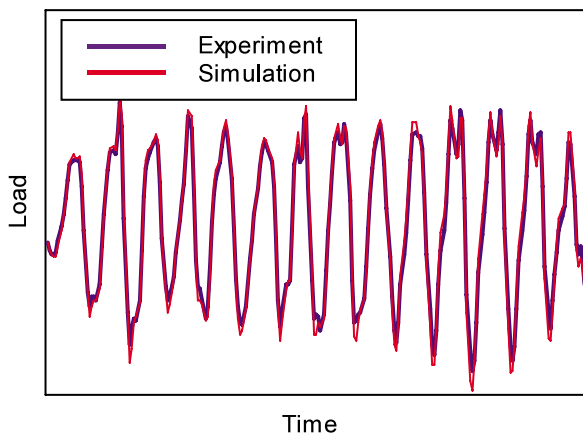


Fig.7 Validation Result of Simulated Load

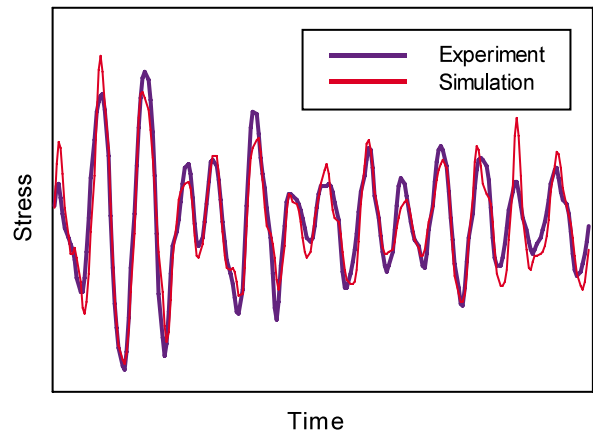


Fig.9 Validation Result of Simulated Stress

測するためには、まだ改善の余地があることが分かった。

対応としては、路面プロファイルや伝達力、時系列応力など、個々の精度を高めることが考えられるが、相当な労力が必要であり、現実的ではない。

そこで、次節で述べるように、開発済みの車種の試験結果を活用するという簡便な方法により、寿命推定の信頼度を高めることを確かめた。

3.6 寿命推定結果の信頼度を向上するための方法

(1) 方法

Fig.11のように、予測対象車のベースとなる既開発車の耐久寿命に、両車種のシミュレーション上の寿命比を乗じ、寿命予測結果を補正する方法を試みた。

(2) 補正結果

Fig.12は、Fig.10の結果に加え、上述の方法で補正した結果も併せてプロットしたものである。まだ完全ではない

が、補正前に比べ、信頼度を实用レベルにまで高めることができた。

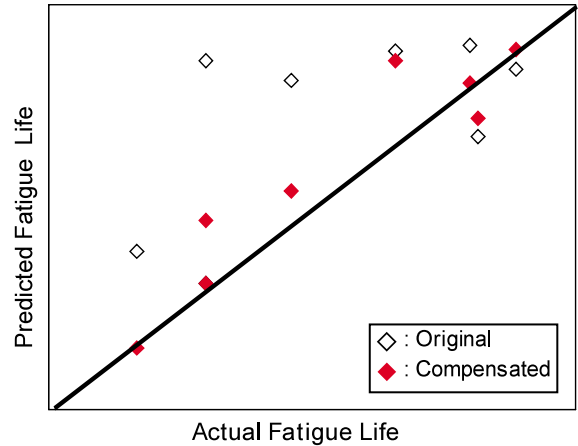


Fig.12 Compensated Result

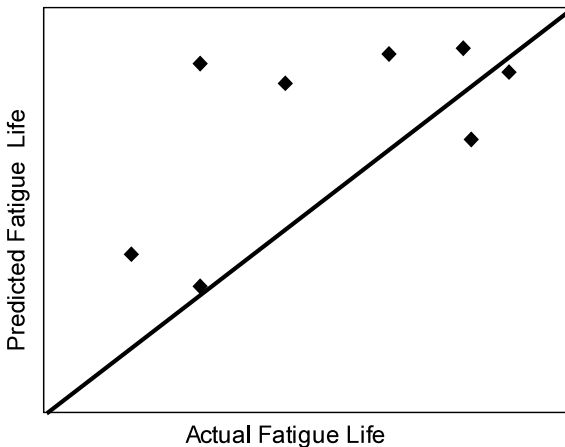


Fig.10 Validation Result of Predicted Fatigue Life

4. まとめ

以上の取組みにより、CAEシミュレーションを用いて耐久性を予測することに対し、精度面で実用化の見通しが得られた。また、簡易モデルの活用や、既に活用されている手法をベースとすることにより、簡便に性能を確認できる手法にすることができた。以上の結果、当手法は商品開発上、欠くことのできない存在になりつつある。

更に、今後も精度向上と簡便さの両立を図りながら、活動に取組んでいく所存である。

最後に、取組みに協力して頂いた関係部門に深く感謝の意を表します。

参考文献

- (1) 田村 他：車両の耐久強度解析手法の開発，マツダ技報，No.20，p.146-153（2002）
- (2) 鯉淵興二：実働荷重下の疲労被害法則の検討，材料，17-173，p.169（1968）
- (3) Yuting Rui, F.Saleem, J.H.Zhou：Road Load Simulation Using Effective Road Profile, SAE 971512，p.19-28（1997）

著者



田村秀二

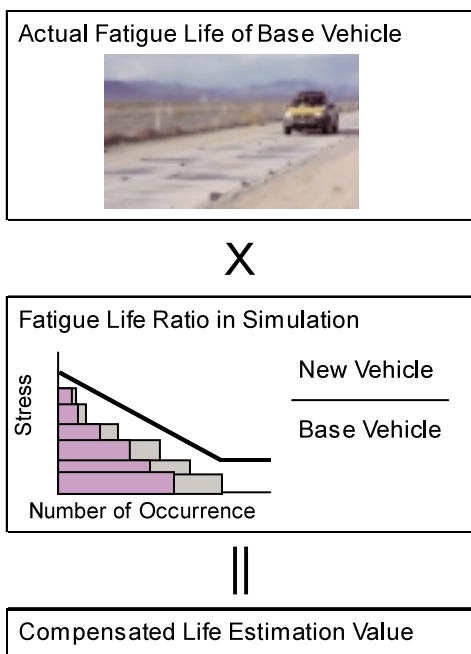


Fig.11 Compensation Concept of Fatigue Life Estimation

特集 : Virtual Testing

5

空力・風騒音シミュレーションの開発への適用 Application of Aerodynamics and Wind Noise Simulation into Product Development

中村 貴樹*¹ 農 沢 隆 秀*² 岡 本 哲*³
Takaki Nakamura Takahide Nouzawa Satoshi Okamoto
大 平 洋 樹*⁴ 李 曄*⁵
Hiroki Oohira Ye Li

要 約

短期間に空気抵抗と空力騒音の小さな商品を開発するには、開発後期における後退や滞留を最小にさせることが必須要件であり、開発前半に充実した検討を行い図面の完成度を高めることが重要である。しかし、開発前半では試作車が存在しない。そこで、この段階で充実した検討を行うため、空力・風騒音シミュレーション技術を確立し、シミュレーションと風洞実験が強力に連携した開発プロセスを構築した。本稿では、その開発プロセスの概要、および空力・風騒音シミュレーションの開発への適用事例を紹介する。

Summary

To achieve high aerodynamic performance and low wind noise level in production vehicles, drawing quality should be improved by making a substantial study in the first half of the development period because it is essential that the setback or residence which could occur in the second half of a development period should be minimized. No prototypes exist in the first half of the development period. For this purpose, we have developed aerodynamics and wind noise simulation technology and established a development process with great linkage between the simulation and a wind tunnel test. This paper shows the outline of the development process and applicable examples of the aerodynamics and wind noise simulation to the product development.

1. はじめに

地球温暖化に対する関心が高まり、燃費に対する法規制や優遇税制が強化されるといった状況の中で、低燃費化の要求から空気抵抗低減への取り組みが重要となってきた。一方で、高速走行時の車両静粛化の要求も高まり、高速時における風騒音の騒音源である空力騒音低減への取り組みも重要となってきた。これらの要求を満足させた製品を短期間に開発するには、開発前半の充実した検討が重要である。この実現のため、空力・風騒音シミュレーション技術を構築し、シミュレーションと風洞実験が強力に連携した開発プロセスを構築した。

2. 開発プロセスへの適用

2.1 適用の方針

開発プロセスの中で効果的にシミュレーションを適用するには、シミュレーション・風洞実験のそれぞれの長所を生かし、短所を補完したプロセスを構築しなければならない。空力・風騒音シミュレーションの長所は、試作車が不要なことと計算結果から流速・圧力といった車体まわりの詳細な流れの様子を知ることができることである。一方の風洞実験の長所は、短時間に数多くの仕様について評価が可能であることと、詳細な形状について評価検討が可能なことである。

*1~5 車両実研部
Vehicle Testing & Research Dept.



Fig.1 Aerodynamics Testing Laboratory of Mazda

マツダでは、実車風洞を保有しており (Fig.1), 風洞実験と空力・風騒音シミュレーションを、同一の組織で行っている。開発担当者は、風洞実験にてクレイモデルを使い空力改善を行うとともに、シミュレーションも自ら実施し、この二つを連携させ開発を進めている。

空力・風騒音シミュレーションを開発に適用するにあたり、風洞実験との連携重視という方針で、以下に示す開発プロセスを構築した。

2.2 プロセス概要

開発前半のプロセスは、車体の基本構造を決定する①レイアウト段階、デザインの方向性を決定する②デザインテーマ育成段階、詳細デザインを決定する③デザイン育成段階に大別される。

レイアウト段階では、おおまかな空力性能をケーススタディするため簡易空力性能予測ツールを用いて評価を行い、基本骨格と空力性能目標との整合を取る。

次のデザインテーマ育成段階では、デザイン形状データを用いて空力シミュレーションを実施し空力性能の予測を行うとともに、車体まわりの流れ解析結果を元に空力性能悪化要因を特定する。この目で見える形になった流れの様子をデザイナーと協議しながら、デザインテーマの空力的改善を行うとともに空力性能目標との整合を取る。

デザイン育成段階では、空力シミュレーションに加え、風騒音シミュレーションも実施し、空力・風騒音性能の予

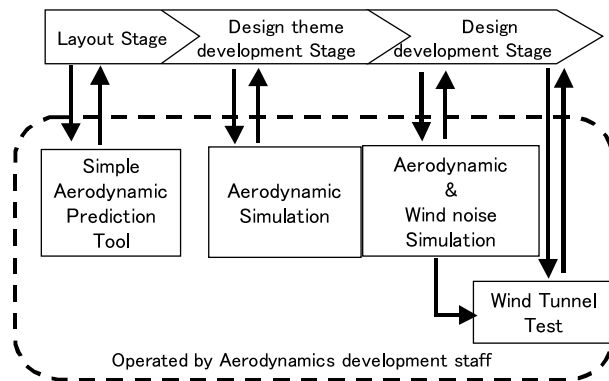


Fig.2 Aerodynamic Developing Process

測および解析を行い細部形状についてデザイン部門へフィードバックする。シミュレーションにより明確になった車体まわりの流れの情報を、風洞実験へもフィードバックし、これを基に風洞実験で空力改善を行っていく。

これにより、以下の三点が可能になり、デザイン要件を満足させながら、高い空力・風騒音性能を短期間に実現することができる (Fig.2)

- ① レイアウト・デザインテーマ育成段階でレイアウトやデザインと空力性能目標の整合取りが可能
- ② 実験モデルなしでデザインテーマについて空力性能の育成が可能
- ③ デザイン育成段階で、効率的に風洞実験を行い短い期間で空力・風騒音性能の育成が可能

このプロセスを実際に運用するには、シミュレーション・風洞実験の長所を把握していることに加え、車体まわりの流れを熟知し、シミュレーションで出た流れの結果の妥当性を判断するとともに、これに考察を加え車体形状の改善箇所を見出すことが必要である。我々は、こうした技術者の育成に注力し、シミュレーションを開発に適用することに成功した。

Table 1 Comparison of Applied FDM, FEM and FVM

| | Finite Difference Method (FDM) | Finite Element Method (FEM) | Finite Volume Method (FVM) |
|---------------------|---|--|---|
| Governing Equations | Unsteady Incompressible Navier-Stokes Equations | Filtered Unsteady Incompressible Navier-Stokes Equations | Time-averaged Navier-Stokes Equations |
| Turbulent Model | K-K scheme | Smagorinsky SGS Model | K-ε Model |
| Model Structure | Structured Hexahedron | Unstructured Tetrahedrons | Unstructured Hybrid (Mainly Hexahedron) |
| Model Size | 10 Million Grids | 6.3 Million Mesh Elements | 2 Million Mesh Elements |
| Minimum Spacing | 4.0 mm | 0.44 mm | 2.0 mm |
| Adaptive mesh | N/A | H-refinement | N/A |
| Inflow / Outflow | Fixed Value / Zero Gradient | | |
| Body Surface | No Slip | | Wall Law |
| Time Step | 1 msec | 3.2 μsec | --- |
| Computation Time | 30 CPU Hours | 70 CPU Hours | 50 CPU Hours |

3. シミュレーション手法

車体まわりの流れの計算には、計算流体力学の代表的な手法である有限差分法(FDM : Finite Difference Method), 有限要素法(FEM : Finite Element Method), 有限体積法(FVM : Finite Volume Method)の三つの手法を適用し、

Table 2 Characteristic of FDM, FEM, FVM

| | FDM | FEM | FVM |
|-------------------------|----------------------------|---------------|------------------|
| Computation Time | Short | Long | Relatively short |
| Shape Reproducibility | Difficult | Easy | Relatively easy |
| Unsteady Simulation | Available | Available | Not Available |
| Temperature Calculation | Not Available | Not Available | Available |
| Applied area | Aerodynamics Wind Noise | Wind Noise | Climate Control |

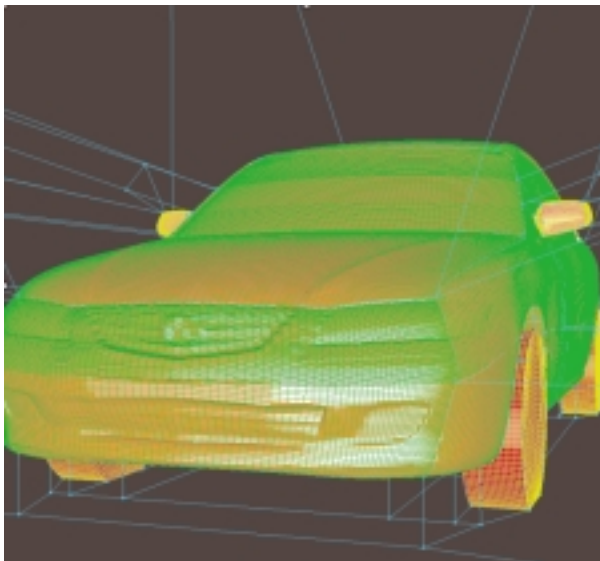


Fig.3 Computational Grid of Finite Difference Method

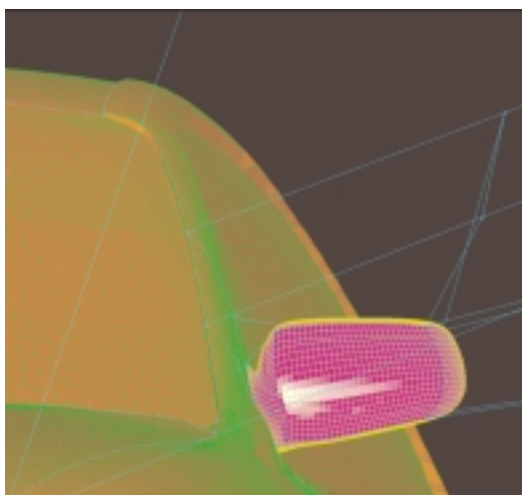
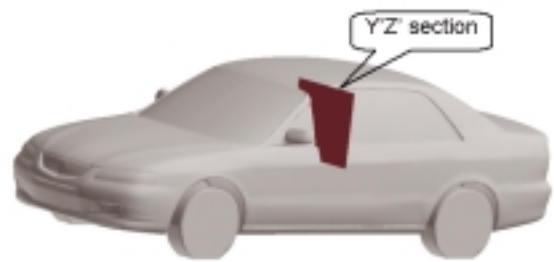
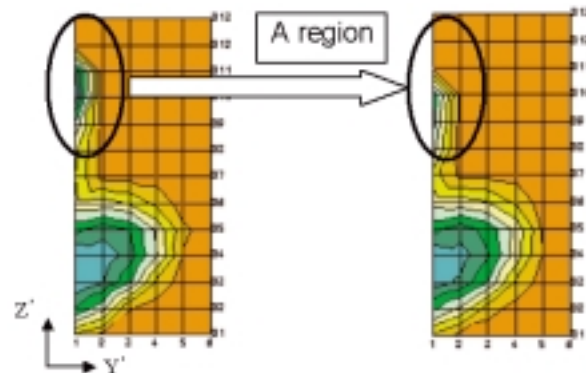


Fig.4 Computational Grid of Finite Difference Method (Front-pillar and Door Mirror)

それぞれTable 1に示した計算手法を採用している。これらの三つの手法には、Table 2に示したような特徴がある。空力シミュレーションには、流れの計算精度の高いFDMを用いている。風騒音シミュレーションには、詳細形状の再現が容易なFEMと計算精度が良いFDMに風騒音が計算できるように手を加えて、これら二つを併用している。また、壁面温度の計算に影響を与える温度場モデルに、壁面からの距離の影響を考慮した工夫を入れることで温度場計算精度を上げ、FVMの車室内空調への適用に成功した⁽¹⁾。なお、FVMについては、適用分野が車室内空調であるため、本稿では詳述しない。以下にFDMとFEMの概要と適用事例について紹介する。

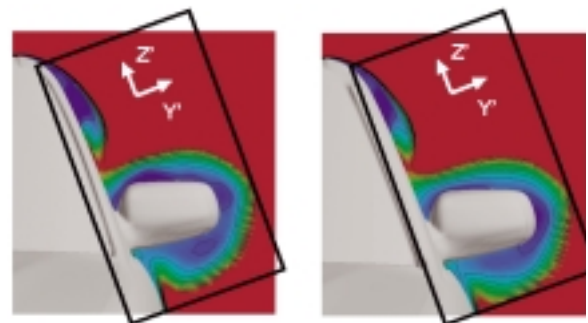


(a) Definition of YZ section



Original Model Modified Model

(b) Experiment



Original Model Modified Model

(c) FDM

Fig.5 Pressure Distribution at Y-Z Section (Section is at 300mm behind Door Mirror)

4. 空力シミュレーション

4.1 計算手法

前章で述べたように空力シミュレーションには、流れの計算精度が良いという点で、FDMを用いている。この計算格子は、六面体で作成されており、タイヤ・ミラー・床下がついた状態を表現し計算を行っている (Fig.3, 4)。

4.2 計算精度

FDMでは、車体後流だけでなくフロントピラー・ドアミラー等の車体各部に生じる複雑な流れの様子を精度よく捉えることができる。Fig.5cは、シミュレーションによるフロントピラー・ドアミラー後方におけるYZ断面圧力分布を示しており、風洞実験で見られるフロントピラー近傍とドアミラー後方に発生している渦の様子 (Fig.5b) を、シミュレーションでも再現している。また、フロントピラー形状を修正しフロントピラーの渦を小さくしたような微妙な変化でも、シミュレーションで捉えることができる。

このように流れを精度良く捉えることが可能であるため、シミュレーションの空気抵抗の実車予測精度は97%以上を実現しており、デザインデータからの空力性能予測は、十分実用レベルにある。

4.3 開発への適用例

(1) RX-8開発における空気抵抗低減

RX-8の開発において、デザインを悪化させずに効果的に空気抵抗を低減するため、デザインデータからシミュレーションを実施し最適形状を検討した事例を紹介する。シミュレーションで車体まわりの流れを解析した結果、リアコンビランプ付近で車体側面の境界層が厚くなっていることがわかり、この部分で空気抵抗が増大していることをつきとめた (Fig.6)。実際にこの部分の形状をコンピュータ上で改善しシミュレーションを実行した所、車体後流の渦が弱くなることが確認できた (Fig.7)。この結果をもとに風洞実験で、デザイナーを交えて詳細形状の検討を行い、デザインを悪化させないよう透明部品であるコンビランプハウジング形状を車体外側に張り出すことにより、空気抵抗の低減を行った (Fig.8)。

5. 風騒音シミュレーション

5.1 計算手法

風騒音シミュレーションには、詳細な形状の再現性が容易であるという点でFEMを用いている。FEMの計算格子は、四面体で作成されており、タイヤ・ミラー・床下等の詳細車体形状を再現し計算が可能である (Fig.9, 10)。また、ミラー後方のような複雑な流れについては、詳細形状の再現は容易ではないが、計算精度の高い前章で述べたFDMを用いている。

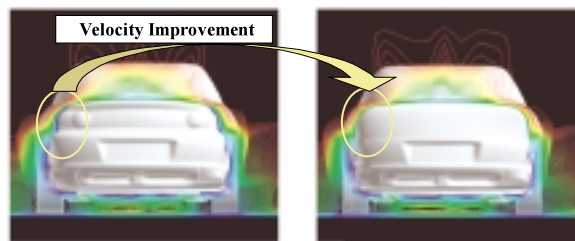


Fig.6 Velocity Distribution of RX-8

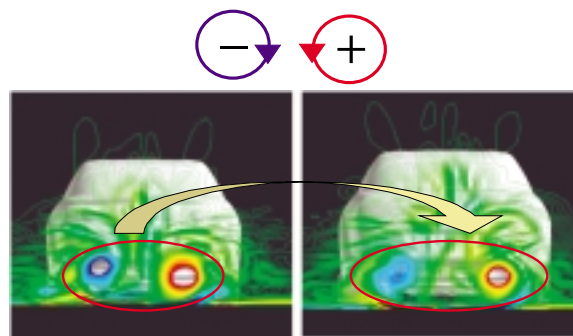


Fig.7 Vorticity Distribution of RX-8



Fig.8 RX-8 Rear Combination Lamp

5.2 計算精度

風騒音シミュレーションの精度を検証するため、風騒音の大小に影響の大きいフロントピラー形状の異なる二つの車体形状について、風洞実験と風騒音シミュレーションの比較を行った。Fig.11aは、風洞実験にてサイドウインド表面にマイクロホンを埋め込み、音圧変動を計測したものである。フロントピラー形状の違いにより、サイドウインドのフロントピラー付近の音圧が変化しているのがわかる。自動車における空力騒音は二重極音源が主であり、圧力変動を積分した値を音圧として用いることで、風騒音シミュレーションでも、風洞実験と同様にサイドウインドフロントピラー付近の音圧変化を捉えることができた⁽²⁾。

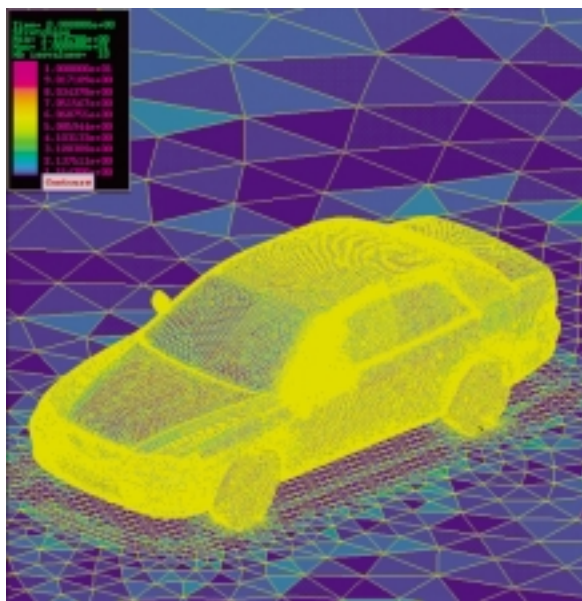


Fig.9 Computational Grid of FEM

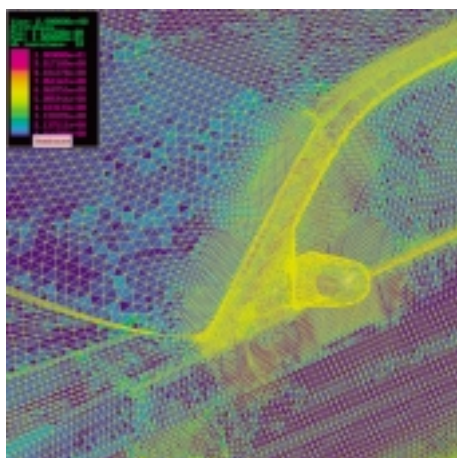


Fig.10 Computational Grid around Door Mirror

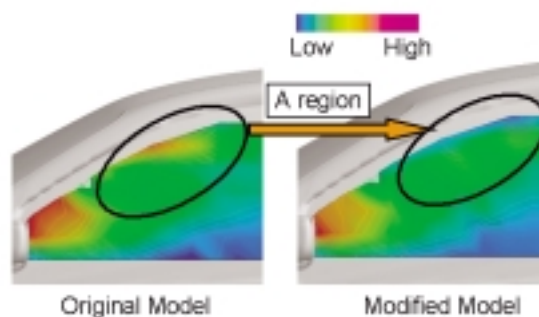
Fig.11bに、FEMを用いてフロントピラー付近の音圧を計算した例を示す。FEM・FDMの両者ともに、フロントピラーの形状変化のような微妙な形状の違いについても、音圧の大小が検討可能なレベルの予測精度を確保した。

5.3 開発への適用例

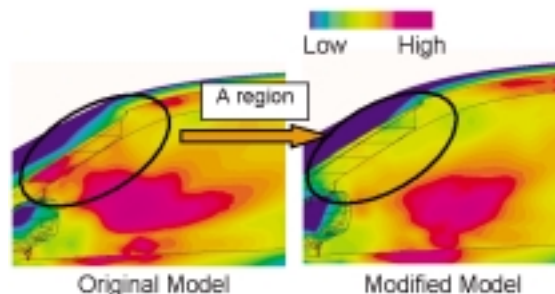
(1) フロントピラーまわり空力騒音低減

風騒音への影響の大きい車体まわりの空力騒音は、車体形状に大きく左右される。このため空力騒音の大小は、デザイン段階でほぼ決定する。空力騒音を定量的に把握するには前節の風洞実験のように、マイクロホンを実車に埋め込みサイドウィンド表面の音圧を計測する手法もあるが、デザイン段階では、実験モデルにマイクロホンを埋め込むことは実用効率の面から困難である。

そこで、デザインデータを用いて風騒音シミュレーションを行うことにより、デザイン段階での空力騒音低減の検討を可能にした。RX-8ではFEMによる風騒音シミュレー



(a) Experiment



(b) FEM

Fig.11 Intensity of Acoustic Source on Side Window

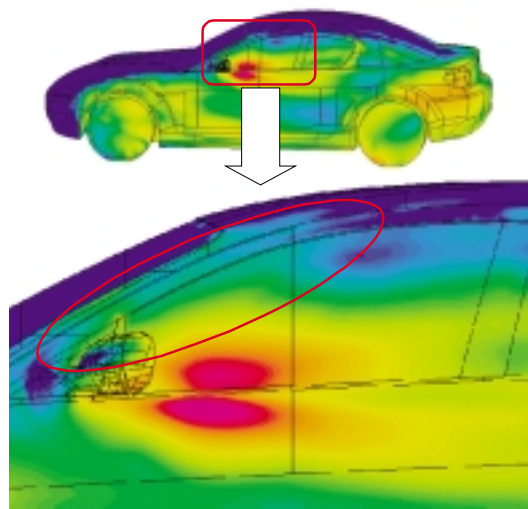


Fig.12 Intensity of Acoustic Source on RX-8

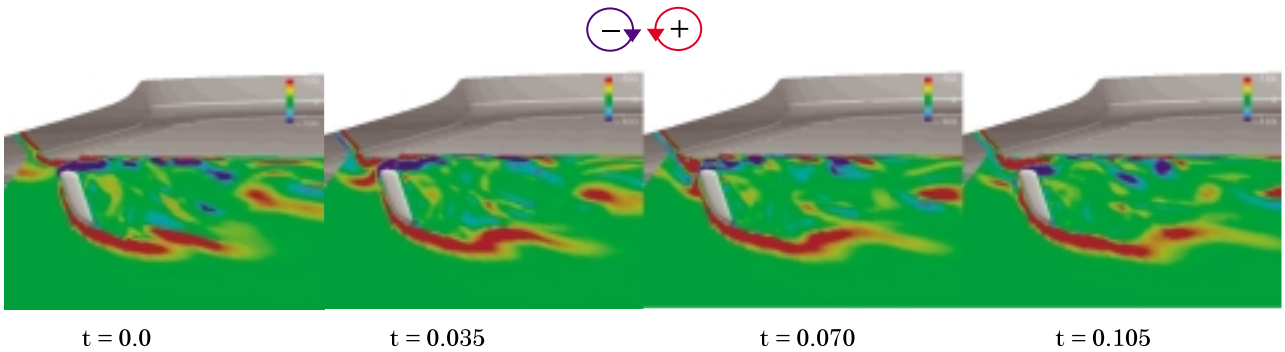
ションを実施し、空力騒音への影響の大きいフロントピラー形状について検討を行い、サイドウィンド表面の音圧を低減した (Fig.12)。

(2) ドアミラーまわり空力騒音低減

ドアミラーまわりの乱れの大小は、車室内の静粛性に寄与する空力騒音に影響を与える。流れの時間的な変化で発生する音であるドアミラーからの空力騒音を低減し、空気抵抗低減と両立させるためには、その圧力変動を解析する必要があり、非定常でのシミュレーション解析が有効な手段となる。セダン形状を供試体として車体まわりの流れを、複雑な流れでも計算精度の高いFDMによる非定常のシミ



(a) Location of XY section used in fig.



(b) Vorticity ω_z distribution around Door mirror on the XY section

Fig.13 Unsteady Flow Simulation

シミュレーションを実施し、ミラー後方の渦の時間的変化を解析した例を示す (Fig.13)。各時刻の渦度を見てみると、フロントピラーからの流れとドアミラー内側部分の流れが干渉しあい、渦の時間的な変化が起きている。この渦の時間的変化が、ドアミラーまわりの圧力変動を引き起こし、空力騒音を悪化させていることがわかった。この結果をもとにドアミラー形状を最適化し、ドアミラー空力騒音を低減することができた。

6. おわりに

空力・風騒音シミュレーションを開発に適用することにより、短期間に空力・風騒音性能を育成するプロセスを構築することができた。今後、シミュレーションを用いて車体各部形状パラメータを決定していくというような、シミュレーションを核としたプロセスを構築するためには、デザインデータを受け取ってから結果が出るまでの時間を短縮する必要があり、格子作成時間の更なる短縮に取り組んでいきたい。

参考文献

- (1) 岡田ほか：車室内空調風の数値シミュレーションによる予測，自動車技術会論文集，Vol.31，No.2，p.29-34 (2000)

- (2) Y.Li et al : Evaluation of Aerodynamic Noise Generated in Production Vehicle Using Experiment and Numerical Simulation, SAE Paper, No.2003-01-1314 , p.1-8 (2003)

著者



中村貴樹



農沢隆秀



岡本 哲



大平洋樹



李 暉

特集 : Virtual Testing

6

CFDを活用した空調開発の効率化 Efficiency Improvement of Air Conditioning Development Using CFD

矢野 輝 昭*1

Teruaki Yano

金 清 政 治*4

Masaharu Kanekiyo

中 村 良 則*3

Yoshinori Nakamura

要 約

近年、開発期間の短縮や品質向上が求められており、空調開発において、これらに対応するために Computational Fluid Dynamics (CFD) の活用が有効である。

マツダにおいても、ダクト、Heating Ventilating Air-Conditioning (HVAC) ユニットの解析やデフロスタ性能予測等にCFDを活用して、開発の早い段階で仕様を決定できるようになってきた。

本稿では、CFDによって効率的にベントダクトやデフロスタノズルの通気抵抗や騒音を低減した事例や、マツダ初のフルセンターレイアウトを採用したHVACユニットの開発に活用した事例を紹介する。

Summary

In recent years short-term development and quality improvement are in demand, the utilization of Computational Fluid Dynamics (CFD) is effective in satisfying such a demand at air-conditioning development.

Mazda, having been using the CFD in the analysis of ducts and a HVAC (Heating Ventilating Air-Conditioning) units or the estimation of defroster performance, has had the ability to decide on air conditioning specifications even in the early stage of development.

This paper introduces the cases where the CFD has suppressed the airflow restrictions and noises of the vent duct and defroster nozzle with high efficiency and has been utilized in developing the HVAC unit featuring Mazda's first full central layout.

1. はじめに

開発期間の短縮や開発費削減が求められる中、低コストで高品質な商品を短期間で開発する技術の確立が必要である。空調開発においても、地球環境問題に対して小型・軽量化や省動力化を実現するとともに、お客様の快適性の高い要求にも対応することが求められている。これらに対して、開発の初期段階において短期間で仕様を決定するための予測技術としてCFD解析を行っている。

本稿では、マツダにおける空調性能の予測技術とこれを用いた商品開発の実例を紹介する。

2. CFDの空調開発への適用

空調性能開発は、デザインやパッケージで大きく影響を受けるため、早期にこれらと両立する要件を提示すること

が必要である。近年は、CFD解析を積極的に活用して、試作に頼らずに仕様を決定できるようになってきた。

空調開発におけるCFD解析は、市販の汎用流体解析ソフト“STAR-CD”を使用している。CFD解析では、ベントダクトやデフノズルなどのダクト内の流れ解析、デフロスターの晴れ解析、車室内の気流解析などを行っている。

マツダは、インパネやHVACの開発を担当する各部品サプライヤと役割を分担し、情報を共有化して解析している。解析結果をもとに、Rapid Prototypingによってダクト等を試作して検証することで図面の精度を向上でき、その後の型修正を大きく減少させることができている。

今回、①ベントダクトの最適化による通気抵抗と騒音の低減、②高効率な動圧式デフノズルの開発、③フルセンターレイアウトのHVACユニットの開発にCFDを活用した事例を説明する。

*1, 2 装備開発部
Interior Components Development Dept.

*3 (株)日本クライメイトシステムズ
Japan Climate Systems Corporation

*4, 5 西川化成(株)
Nishikawa kasei co., Ltd.

3. 解析事例

3.1 ベントダクトの解析

(1) 通気抵抗の改善検討

ダクト解析条件を以下に示す。

流入条件：HVAC出口の風速分布

流出条件：圧力規定 (0Pa)

壁面条件：壁面測適用

乱流モデル：k-モデル

差分スキーム：風上差分 (一次精度)

初期レイアウト形状 (Model A) の解析結果はFig.1に示すように、サイドベントダクトのくねり形状やダクト曲折部の急なR形状およびダクト入り口直後の曲折形状が原因で、通気抵抗値と単体騒音性能が目標を大幅に未達の状況であった。CFDの結果を分析し、Fig.2に示すようにダクトのレイアウトや形状を大幅に見直した (Model B)。その結果、風量分配を適正にした上に、通気抵抗を135Pa、ダクト単体騒音を10dB低減することができ、トップクラスの高騒音性能が実現できた (Fig.3)。

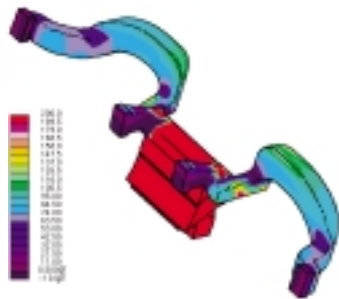


Fig.1 Pressure Distribution (Model A)

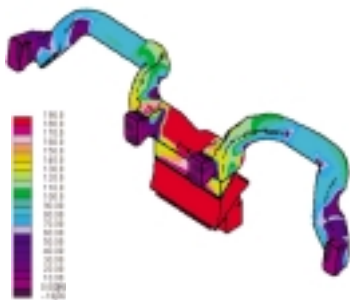


Fig.2 Pressure Distribution (Model B)

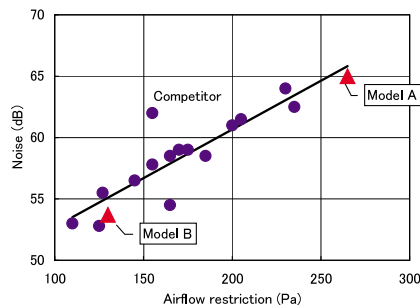


Fig.3 Comparison of Airflow Restriction and Noise

(2) 計算精度

通気抵抗の計算値の精度は約5%とよく一致している。また、各吹き出し口の風量分配も実測値との比較で最大2%の差であり、実用上問題ないレベルにある (Fig.4)。



Fig.4 Comparison Air Volume Distribution

3.2 デフロスタの解析

(1) デフノズルの解析

従来マツダでは静圧式ノズルを多く採用してきたが、レイアウトの制約から十分な容量のチャンバを確保できず、動圧式ノズルと比較して、通気抵抗や吹き出し風速分布の均一性において不利であった。そこで今回、新たに動圧式ノズルにおいて通気抵抗の低減、低騒音化、風速分布の改善を目指し、ノズル形状の最適化を行った。

今回開発したノズルの速度ベクトル分布と吹き出し風速分布をFig.5に示す。ノズルからの吹き出し風速分布は均一であり、吹き出し風速分布や各吹き出し口の風量分配の計算値は、実測値とよく一致している (Fig.6)。

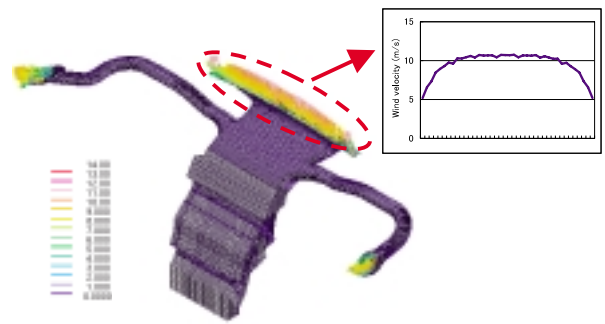


Fig.5 Velocity Vector and Outlet Velocity Distribution

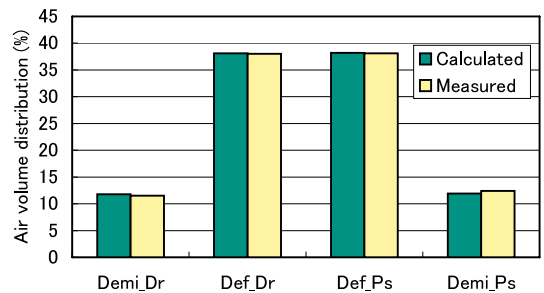


Fig.6 Comparison Air Volume Distribution

通気抵抗やノズル単品騒音においても、静圧式ノズルを採用していた従来モデルと比較して通気抵抗を60%、単品騒音を10dBと大幅に低減でき、競合車と比較してもトップクラスの性能を確保している (Fig.7)。

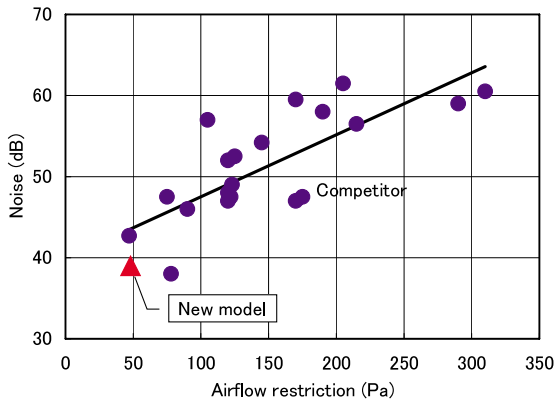


Fig.7 Comparison of Airflow Restriction and Noise

(2) 晴れ性能の解析

ノズル形状の最適化とともに、吹き出し口とウインドガラスとの距離やデフロスタ風のウインドへの当たり角についても解析を行い、様々な条件下で晴れに対して最適な条件を明確にした。

ウインドシールドとサイドウインドの風速分布の計算結果をFig.8に示す。差分スキームは単調移流再構成スキーム (2次精度) を使用している。実測値 (Fig.9) と比較してよく一致しており、また低温時の晴れ性能とも相関があり、晴れ性能を充分予測可能となった。

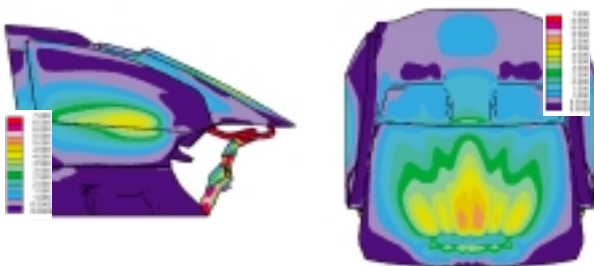


Fig.8 Calculated Flow Velocity Distribution

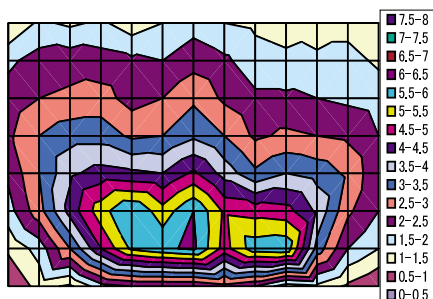


Fig.9 Measured Flow Velocity Distribution

3.3 HVACの解析

今回開発したHVACユニットは、ブロウ、熱交換器、エアミックスチャンバを車両中央に全て配置したフルセンターレイアウトを採用した。フルセンターレイアウトはスペースの制約条件が厳しく、効率的な設計が求められ、CFDを活用して開発を進めた。

HVACの圧力分布と速度ベクトル分布の解析結果をFig.10に示す。通気抵抗の解析結果と実測値の比較をFig.11に示すが、精度は約15%以内で予測可能である。

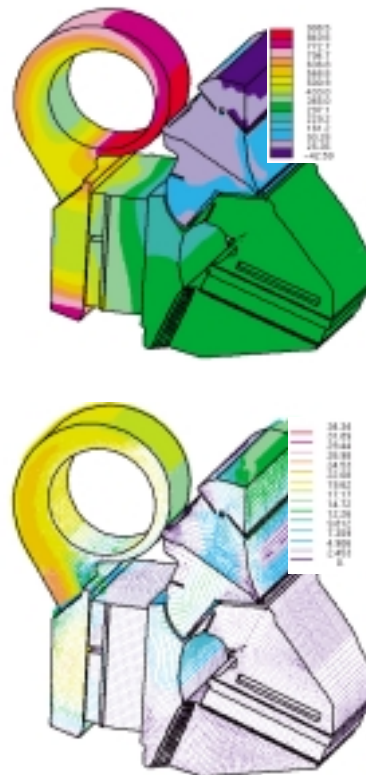


Fig.10 Pressure Distribution and Velocity Vector

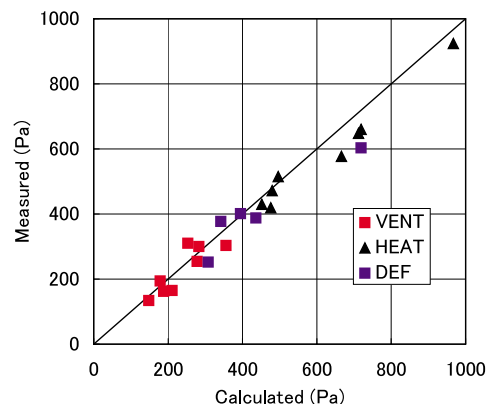


Fig.11 Correlation of Airflow Restriction

また温度分布の解析も実施し、温度コントロール特性の検討を行った。温度予測に関しては、精度的に更に改善の余地があるが (Fig.12), レイアウト初期段階の温度コントロール特性の検討には利用できることが確認できた。

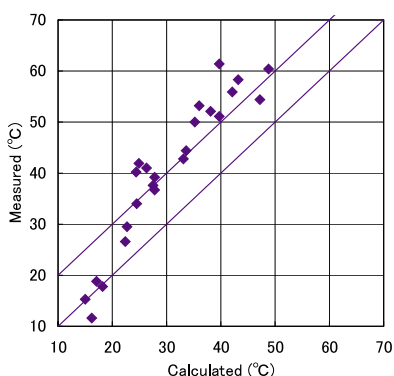


Fig.12 Correlation of Temperature

フルセンターユニットを実現したことで、HVACの横幅は飛び抜けて小さく (Fig.13), 大型グローブボックスの採用などインパネ内部のレイアウトにおいて自由度の向上に貢献できた。

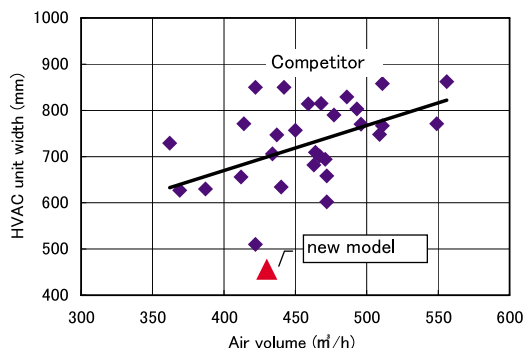


Fig.13 Size of HVAC Unit

3.4 システムでの性能向上

ベントダクトやデフノズルの性能改善とフルセンターHVACの開発によって、通気抵抗と騒音を大幅に改善できた。Fig.14に示すように、従来の車種と比較してVENTモード、DEFモードともに通気抵抗は約40~45%低減でき、これによって騒音も1.5dB改善できた。

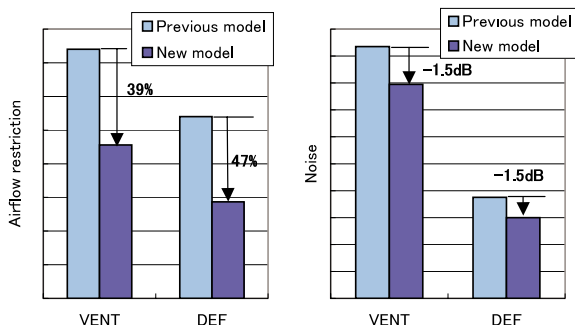


Fig.14 Improvement of Airflow Restriction and Noise

3.5 HVAC内の細部流れの解析

CFDはこれまで紹介した以外にもHVAC内の細部の流れなどに対して活用している。

Fig.15はエバポレータの風速分布を計算し、耐フロスト性の改善検討を実施した事例である。HVAC内の通路やエアガイド形状を見直し、フロストしやすい風速の弱い部分を改善することで対策を行った。また、エバポレータのフィン配列や形状の最適化の検討にもCFDを有効活用している。

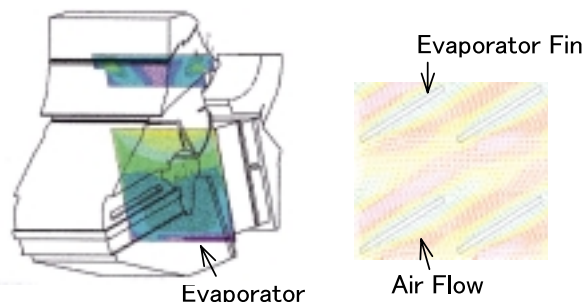


Fig.15 Flow Velocity Distribution of Evaporator

Fig.16ではHVAC内のドア部の流れを解析し、ドア両面の総圧からドアへのモーメントを求めた。ドアのレイアウトや形状を検討し、大風量時においてもヒーターコントロールの操作性を向上することができた。また、ドアの開度が小さいとき、ケースとの隙間において流速が速くなり異音が発生する。流速と異音発生との関係を検討し、ドア形状と開度の最適化を行った。

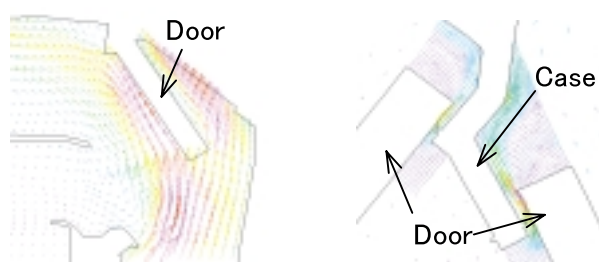


Fig.16 Flow Velocity Distribution of HVAC Door

Fig.17はブロワレジスタのヒートシンク形状やレイアウトを検討したものである。ブロワユニットのスクロール部に配置した場合とエバポレータ部に配置した場合での流れ計算を行い、冷却に必要な最低風速が得られ、抵抗が少なく、風の乱れによる異音の発生のない場所を選定した。

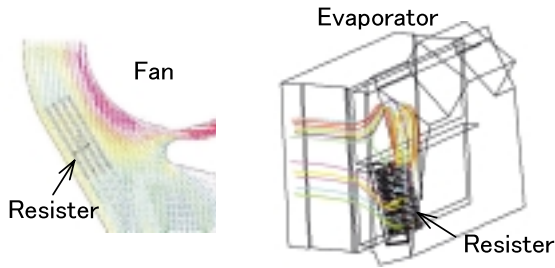


Fig.17 Examination of Layout of Resister

3.6 開発の効率化

CFDを開発に積極的に活用することで、開発効率も大幅に向上できた。現在、設計活動はCFDで実施しており、開発期間の前半における検討工数は増加しているが、試作車での評価段階以降での後戻りがなくなったことで大幅に育成工数を削減でき、開発期間全体では約40%の削減ができています。また、性能改善に起因する型の修正もほとんどなくなり、開発費の削減にも貢献できています。

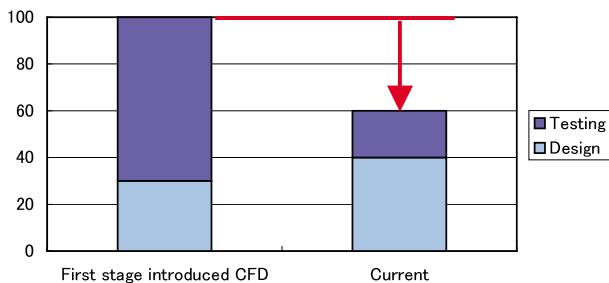


Fig.18 Reduction in Development Time

4. まとめ

CFDの活用によって、試作に頼らず短期間で高性能な商品開発が可能となってきたが、今後更なる精度の向上と解析時間の短縮が課題であり、引き続き検討を行っていく。

現在CFDにおいて最も工数が必要な業務はモデル作成であり、特に解析時間が多大に必要な車室内の気流解析の効率化が急務である。モデル作成業務を効率化することで、更なる開発期間の短縮に繋がり、メッシュサイズやメッシュ形状と計算精度との両立を図ることやエラーメッシュの修正時間の短縮などに取り組んでいく。

更に低風量時の計算精度を改善することや、検討が充分できていないベントルーバーの解析などを行っていき、乗員の快適性の予測精度を向上させていく。

今回の開発にあたり、ご協力をいただいた(株)日本クライメイトシステムズ殿並びに西川化成(株)殿に感謝いたします。

著者



矢野輝昭



中村良則



金清政治

特集 : Virtual Testing

7

ブレーキジャダ及びシミーの解析技術の開発 Brake Judder and Shimmy Simulation Technology Development

竹川 隆茂*¹ 日比野 忠和*² 大原 司*³
Takashige Takegawa Tadakazu Hibino Tsukasa Ohhara

要 約

商品開発期間の短縮や開発コスト削減のためには、試作車の存在しない開発初期において、対象となる性能を机上検討することが有効である。

今回、Virtual Testing技術の一つとして、これまで実験主体で性能開発されていたブレーキジャダ及びシミーについて、両現象に共通するステアリングホイールの回転方向の振動を予測する技術を開発した。

本稿では、ステアリングホイール回転方向の振動を表現する上で必要不可欠であるステアリング系のフリクション特性のモデル化概要、ジャダ及びシミーの現象再現性及びジャダの性能改善検討に使用した事例について報告する。

Summary

To achieve shorter lead time and cost saving for product development, analytical verification of performance to be studied would be effective in the early development phase where no hardware is available.

As one of virtual testing technologies, we have developed an approach to predicting steering wheel vibration in the rotational direction, common to both phenomena, namely brake judder and shimmy, whose performance development was conventionally driven by experiment.

This paper covers a modeling description of the steering friction characteristics essential to represent the steering wheel vibration in the rotational direction, reproducibility of the judder and shimmy phenomena, and a case where this approach was used to make a study of judder performance improvement.

1. はじめに

開発期間の短縮や開発コストの削減のためには、開発初期において、対象となる性能を机上で検討することが有効である。ブレーキジャダ及びシミーは乗員の快適性に大きな影響を持つ振動現象であるが、これまで試作車を用いた実験により開発されており、予測技術の開発が急務であった。

2. ブレーキジャダ及びシミー現象とは

ブレーキジャダは、車両の制動時に発生するフロア・ペダル振動のことで、ステアリングホイール回転方向に振動

を伴う場合もある。ブレーキディスクのDisk Thickness Variation (以下、DTV) により発生する制動トルク変動が起振源で、車輪の回転の一次及び高次成分を持つ。これがサスペンションの前後共振などで増幅され、車体やステアリング系を伝達して、フロア・ペダル振動やステアリングホイール回転方向の振動となる。

一方、シミーは車両定常走行時にステアリングホイール回転方向に発生する振動のことである。タイヤ及びホイールなどの回転部分のアンバランスやノンユニフォミティが起振源となり、サスペンション共振で増幅され、ステアリング系を介してステアリングホイール回転方向の振動となる。

*1, 3 CAE部
CAE Dept.

*2 NVH性能開発部
NVH Development Dept.

両振動現象ともに、ステアリングホイール回転方向の振動が発生することが共通している。

3. モデルの概要と精度

解析モデルは、ステアリング系とサスペンションに分けてモデル化している。ステアリングホイール回転方向の振動を表現するため、特にステアリング系のフリクション特性の再現に重点を置いてモデル化を行った。

各々で比較検証を行った上で、フルビークルモデルを構築した。

3.1 ステアリング系モデル

ステアリング系はFig.1に示すような非線形な振動伝達特性を持っている。これは、パワーステアリング作動の状態ではラック端を加振したときのステアリングホイール回転方向のイナータンスを示したもので、加振力の増加によってステアリングのねじり共振が下がるという現象を示している。Fig.2はラック端加振試験の概略図である。

線形モデリングでは、フリクションを等価粘性減衰としてモデル化することは可能であるが、Fig.1のような特性

を再現することは難しく、モデル化してもフリクションの値を設計スペックに置き換えることができないという問題がある。これを実現するためには非線形モデリングによってフリクション特性を忠実に再現する必要があると考えた。そのため、以下に述べるモデル化手法によってフリクション特性の再現を試みた。

- (1) ステアリング系の各部品に多数存在すると考えられる摺動部位を一つ一つ直接的にモデル化するのではなく、ステアリング系オーバーオールでの振動伝達特性（非線形性）を表現できることを狙った簡易物理モデルとした。
- (2) フリクションはコラム、インプットシャフト、ラック部の3ヶ所に定義しており、それぞれにFig.3のようなスティック状態を表すばねとスリップ状態を表すクーロン摩擦を直列に結合したものを複数個並列にモデル化した。

Fig.4にステアリングホイール回転方向イナータンスの実測と解析結果を重ね書きしたものを示す。解析結果が加振力依存によるステアリングねじり共振の非線形特性を再現しており、現象を十分再現できていることが確認できた。

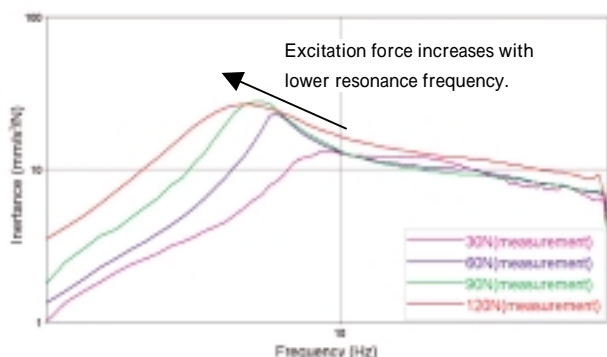


Fig.1 Excitation Dependency of Steering Torsional Resonance (Test Result)

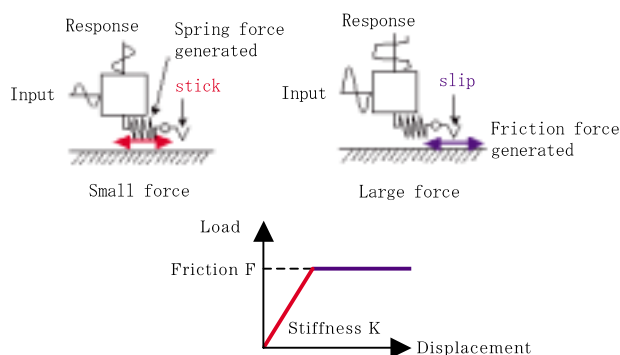


Fig.3 Friction Model

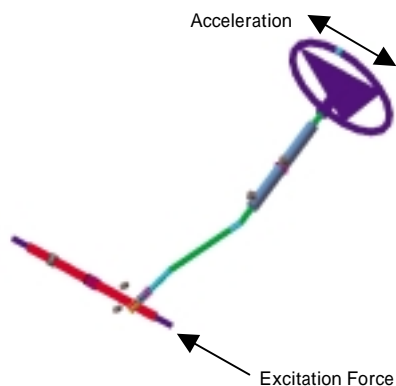


Fig.2 Rack End Excitation

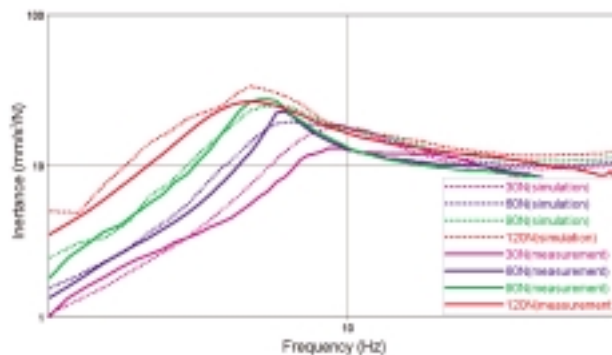


Fig.4 Test vs. Analytical Steering Torsional Resonance

3.2 サスペンションモデル

ストラット式のサスペンションについてモデル化を行った。ジャダとシミー現象は、減速度の違いから、Fig.5に示すように、振動時に使用するサスペンションブッシュのばね特性の領域が異なるため、線形解析ではこの2つの現象を同一モデルで解析することは不可能である。モデル作成工数の削減からも同一モデルで解析できることが望ましいため、サスペンションに含まれる個々のブッシュの変位と力の特性を忠実にモデル化することにより、外力による振動特性の変化を表現することで、同一モデルでジャダ及びシミーの解析を可能とした。Fig.6とTable 1にジャダやシミーに影響が大きいサスペンションの前後共振（固有モード）の解析結果を示す。解析結果が台上4輪加振試験とほぼ同等の周波数帯にあることが分かり、現象を再現できていることが確認できた。

3.3 フルビークルモデル

ステアリング系モデルとサスペンションモデルから、フルビークルモデルを構築した。

フルビークルモデルはシャシーダイナモ走行試験を模擬しており、ジャダやシミー現象に影響が小さいと考えられるリヤサスペンションは等価バネで表現している (Fig.7)。入力については、ジャダに関しては、ブレーキトルク変動がDTVと比例関係にあると仮定し、ブレーキトルクに換算して入力した。また、シミーに関しては、タイヤホイールに質量を付加しアンバランスとした。

フルビークルモデルの精度を検証するため、ステアリングのフリクションを変更した仕様でのステアリングホイール回転方向の加速度レベルを実測と比較した。その結果をFig.8, Fig.9に示す。なお、実機でのステアリングフリクションの仕様差は、ラック&ピニオンのサポートヨークを調整することで表現した。

この結果より、解析がフリクション増による加速度の減少を再現していることが分かる。このことから、解析モデルはステアリングフリクションの仕様差を定性的に評価可能であることを確認した。

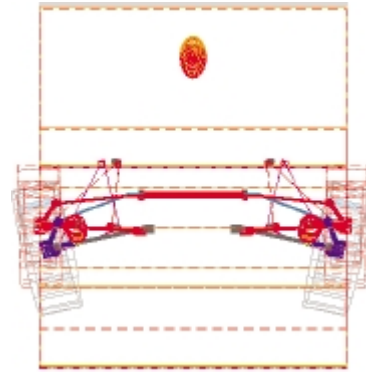


Fig.6 Fore and Aft Mode of Suspension (Top of view)

Table 1 Eigenmode Frequency Comparison in Judder Range

| Simulation | Measurement (biaxial 4 poster) |
|------------|-----------------------------------|
| 21.7Hz | 22.3Hz |

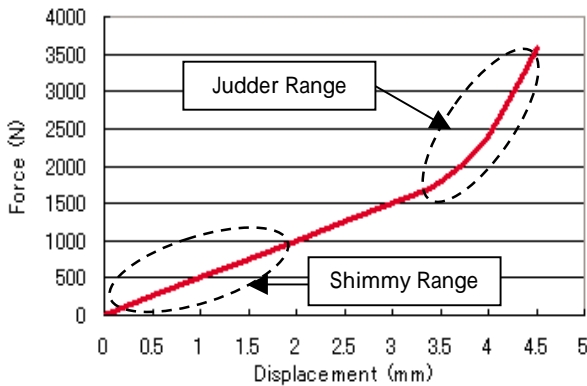


Fig.5 Range Where Suspension Bushing is used for Each Phenomenon

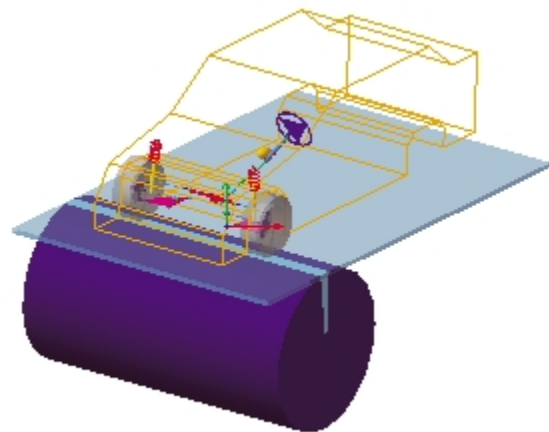


Fig.7 Full Vehicle Model

4. ジャダへの適用事例

ブレーキジャダに関して、ステアリングホイール回転方向の振動レベルが大きかった車両（以下、ベース仕様）に対し、対策案としてロアアーム後側プッシュ特性を変更した仕様（以下、対策仕様）について検討した。これら仕様違いでジャダ解析を行い、それぞれの仕様でのステアリングホイール回転方向の加速度レベルをFig.10に示す。この結果から、対策仕様はプッシュ特性を変更することで、サスペンションの動きが抑制され、ベース仕様に対して振動が低減されることを確認できた。

ベース仕様と、解析にて振動低減効果が確認された対策仕様について実車テストを実施し、ステアリングホイール回転方向の加速度レベルを比較した結果、解析と同様に減少することを確認した（Fig.11）。

この結果から、プッシュ特性変更による加速度レベルの変化が評価可能であることを確認した。

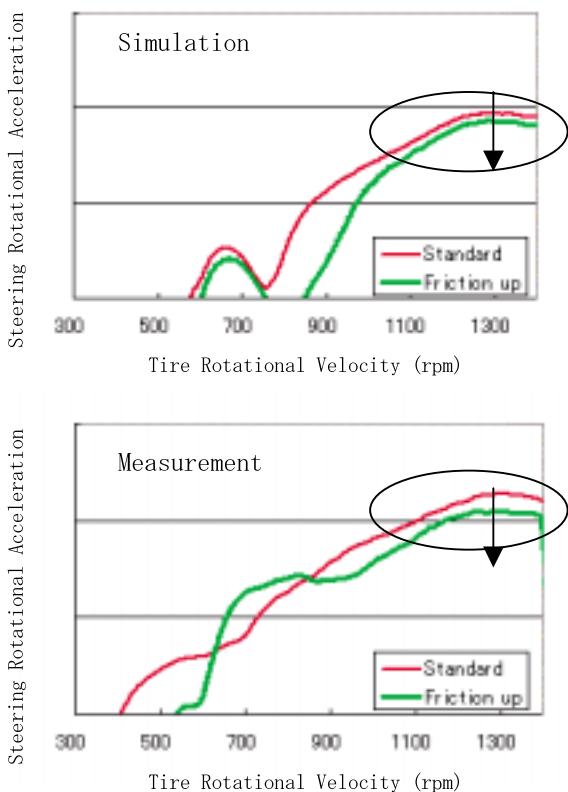


Fig.8 Acceleration Level at Different Steering Friction (Judder)

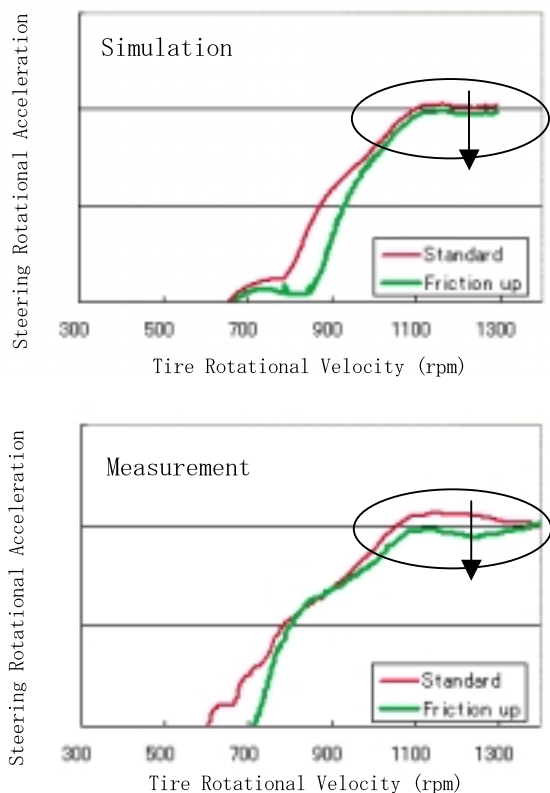


Fig.9 Acceleration Level at Different Steering Friction (Shimmy)

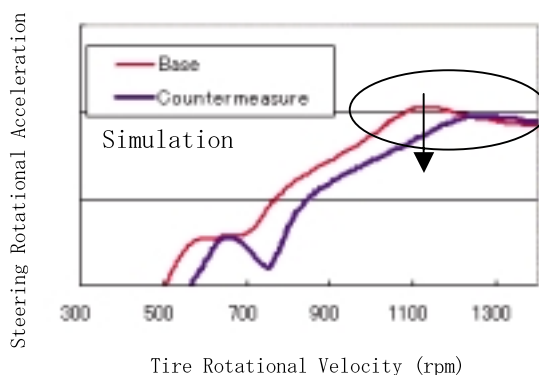


Fig.10 Acceleration Level at Different Lower Arm Rear Bushing Characteristics in Simulation (Judder)

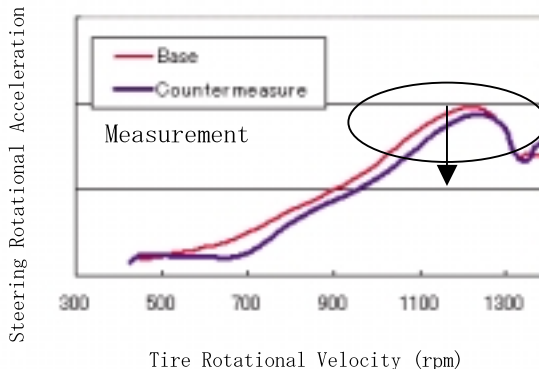


Fig.11 Acceleration Level at Different Lower Arm Rear Bushing Characteristics in Measurement (Judder)

5. まとめ

バーチャルテスト技術の一つとして、ブレーキジャダ及びシミーの解析技術を開発した。

- (1) 両現象に共通しているステアリングホイール回転方向の振動に重点を置いてモデル化を行った。
- (2) ステアリング系の非線形な振動伝達特性を再現することで、仕様違いによる振動レベルの変化を定性的に評価可能であることを確認し、開発適用への見通しを得た。

6. おわりに

開発期間の短縮や開発コストの削減が重要視される中、本技術開発では、ブレーキジャダ及びシミー領域に着目し、ステアリングホイール回転方向の振動を評価・予測できるレベルにまで向上させることができた。

最後に、この解析技術の開発に際し多大なるご協力を頂いた(株)エステック殿をはじめ関係各位に深く感謝の意を表します。

参考文献

- (1) Yasushi Suganuma, et al. : Dynamometer Simulation Study for Market Brake Judder, SAE2001013191. (2001)
- (2) Masahiro Kubota, et al. : A Study of the Mechanism Causing High-Speed Brake Judder, SAE980594. (1998)
- (3) Mohamed Khalid Abdelhamid : Brake Judder Analysis : Case Studies, SAE972027. (1997)
- (4) Stefan Gassmann, et al. : Excitation and Transfer Mechanism of Brake Judder, SAE931880. (1993)
- (5) Myung-Gyu Kim, et al. : Sensitivity Analysis of Chassis System to Improve Shimmy and Brake Judder Vibration on Steering Wheel, SAE960734. (1996)
- (6) 江口 真 : シミー、ジャダーのサスペンション系を中心とした解析, JSAE9541434. (1995)
- (7) 山口哲也ほか : ブレーキジャダ低減に関するサスペンション動特性の研究, Honda R&D Technical Review Vol.13 No.1 (April 2001)

著者



竹川隆茂



日比野忠和



大原 司

特集 : Virtual Testing

8

エンジン振動騒音のVirtual Testingの紹介 Virtual Testing of Engine Vibration and Noise

土路生 修*2 堀川浩司*3
Osamu Torobu Kohji Horikawa阿部宏司*4
Hiroshi Abe

要約

PT (Powertrain) の低燃費, 高出力性能を追求するとともに快適なNVH (Noise Vibration and Harshness) 性能を効率よく開発するため, MDI (Mazda Digital Innovation) において, PTユニットのNVH実験評価を机上検証に置き換えるエンジン振動騒音VT (Virtual Testing) を開発した。これは, 詳細3D-CADデータを活用したFE (Finite Element) モデルの高精度化, モーダルモデル併用による計算時間の短縮, 構造解析・流れ解析・機構解析および音響解析の連携により, マウント振動・エンジン放射音を予測する技術である。本稿では, その適用事例を交え, エンジン振動騒音VTを紹介する。

Summary

As part of the MDI (Mazda Digital Innovation) project, we have developed a new method called VT (Virtual Testing) to improve NVH (Noise, Vibration, and Harshness) of the powertrain by computer simulations instead of actual testing, without affecting the fuel economy and performance. The VT technology was achieved by creating accurate FE (Finite Element) models based on 3D-CAD, shortening calculation time by reducing the modal models, and developing new methods for structural analysis, CFD analysis, multi body dynamic analysis and acoustic analysis. This paper describes how the VT technology can predict the mount vibration and engine radiation noise.

1. はじめに

1.1 Virtual Testingとは

自動車性能として, 低燃費・高出力性能が求められる一方, 快適な運転ができるNVH性能の実現が重要であり, PT開発の中で, この自動車性能の進化を, 短期に低コスト構造で成立させることを目指している。しかし低燃費・高出力に向けた軽量化および燃焼効率向上は, NVH性能悪化を伴う場合が多く, その両立のためには, 多くの構造検討が必要である。この検討を短期で行うために, 従来からCAEを活用してきたが, 例えばパワープラントベンディングと呼ぶPTユニット全体の固有振動特性(以下, PPB)の机上評価など, NVH評価における中間特性の予測に留まっており, 実車実験で評価するエンジンマウント振動やエンジン放射音の机上評価には至っていなかった。MDI

において, CAEに代表される事前検証技術を飛躍的に進化させ, 机上における仮想実験を拡充するための取り組みをVTと呼んでおり, その中で, PTユニットの振動・騒音実験そのものを机上予測するCAEの革新に取り組んできた。この予測技術をPTNVH VTと呼ぶものとした。

1.2 PTNVH VTの重点領域

車両のNVH性能開発の中で, 顧客満足度メトリックスと呼ぶ車両NVH性能評価の指標を開発し, この指標をパワートレインのユニット特性にブレークダウンすることで, お客様の評価に繋がるPTNVH評価指標を設定してきた。第三者の調査機関の顧客満足度調査結果を基に, 車両NVHとしてロードノイズ・エンジン音の更なる改善を優先課題と位置付け, これを受けて, PTNVHもエンジン振動騒音実験のVT化から着手した。本論文では, このエンジン振動騒音のVTの概要を紹介する。

*1~3 パワートレイン先行開発部
Powertrain Advance Development Dept.

*4 第3エンジン開発部
Engine Development Dept. No.3

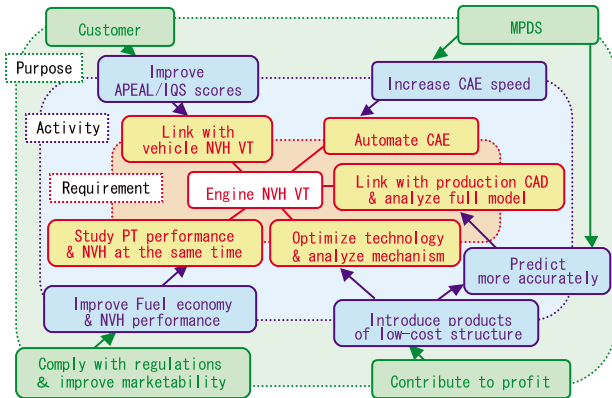


Fig.1 Role of Engine NVH VT

2. エンジン振動騒音VTのコンセプト

2.1 エンジン振動騒音VTの要件

エンジン振動騒音VTの機能要件をFig.1に示す。

(1) 車両NVH VTとの連携

お客様満足度向上に貢献するために、エンジン振動騒音の評価特性は、車両NVHの評価指標と繋がっている必要がある。Fig.2に車室内エンジン音の定量評価手法の概要を示す。音のレベルおよびエンジン回転基本次数成分と非基本次数成分とのバランスから、『伸びやか』『力強い』『落ち着いた』『静かな』等の指標を抽出し、総合評価を行っている。このため、エンジン振動騒音特性は、周波数軸とエンジン回転数軸で表すスペクトルマップとして捉える必要があり、これを振動騒音VTの提示要件とした。

(2) エンジン性能VTとの同時検討

燃費向上とNVH性能の両立に貢献するために、性能予測VTと繋がっている必要がある。Fig.3は、車内エンジン音のカスケード図である。起振力経路を赤で、それを増幅する共振系を青で示している。2.5kHzまでの主要なエンジン起振力として、燃烧圧・動弁系荷重・ピストンスラスト力及びクランク軸荷重を考慮しており、これらは個別の性能シミュレーションにより求める。振動騒音予測に繋げるためには、エンジン回転数1,000rpm~6,000rpm、回転次数0.5次刻みに対応する周波数分解能で出力する必要があり、これを性能シミュレーションの提示要件とした。

(3) 詳細CADデータとの連携

製品特性と予測が一致するためには、FEモデルは詳細CADデータと繋がっていることが重要である。詳細CADデータとは、部品生産で必要となる抜き勾配やコーナール形状を含む3D-CADデータと呼んでいる。詳細CADデータはIDEASを使って、設計部門または生産技術部門で作成されたものを自動メッシングにより短期にFEモデルとする。このとき、解析精度と計算規模より、要素品質と部品ごとの要素数ガイドラインを設定し、FEモデル要件とした。

(4) VTの高精度化と実行の短期化

2.5kHzまでの振動騒音現象を捉えるためには、FEモデルの飛躍的高精度化が必要である。このため各部品モデルと詳細CADデータの一致に加え、モデル化範囲を、PTを構成する主要部品全てを対象とした。一方、全部品をFEモデルで計算すると膨大な計算時間が掛かるため、モデルモデルを併用し、節点番号等ルールを定め、自在に組合せモデルが作れることを、解析モデルの構成要件とした。

(5) 最適化およびメカニズム分析法の確立

低振動騒音構造の作り込みにより、補強材や遮音材を廃し、低コスト化に貢献するためには、最適化手法やメカニズム分析法の活用が有用である。まず振動騒音のメカニズム分析法として、机上TPA (Transfer Path Analysis ; 伝達経路分析) を可能とするものとした。

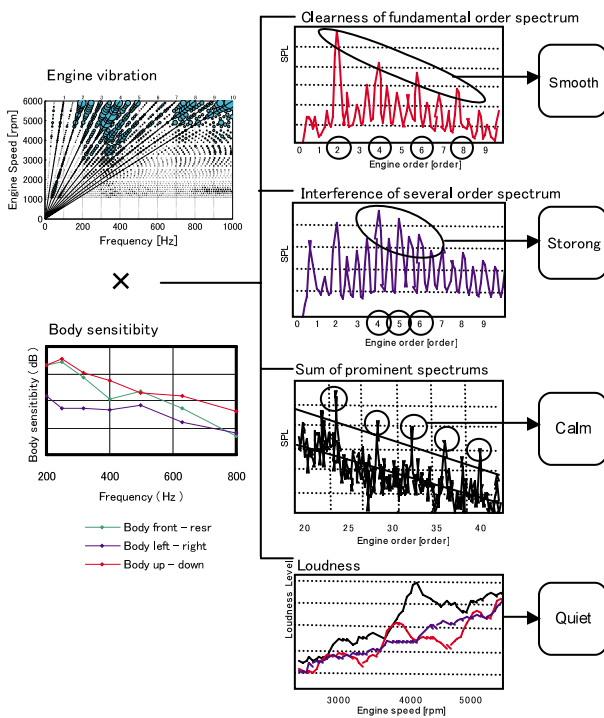


Fig.2 Interior Engine Noise Evaluation Method

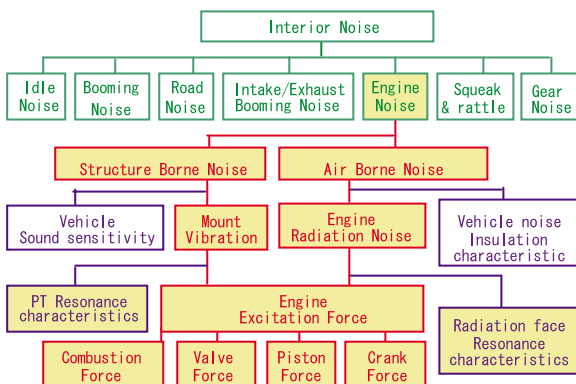


Fig.3 Factors of Interior Engine Noise

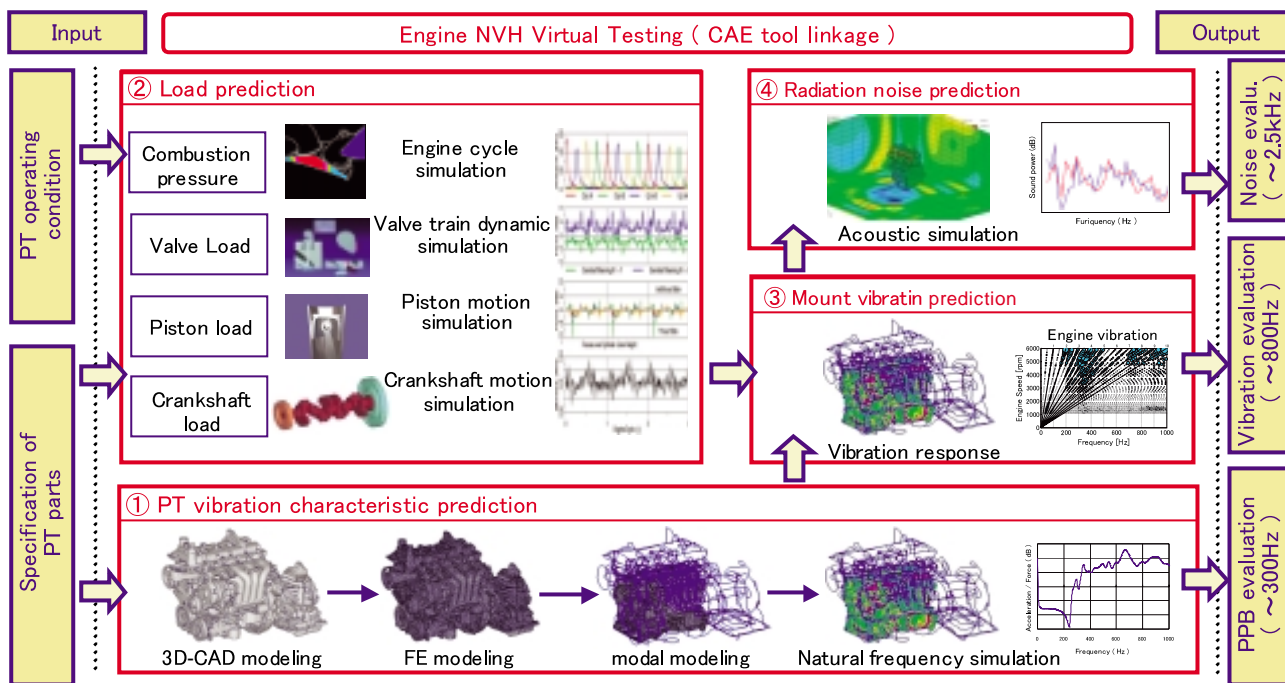


Fig.4 Projection of Engine Vibration & Noise

2.2 エンジン振動騒音VTの全体像

エンジン振動騒音VTの全体像をFig.4に示す。エンジン諸元・運転条件をインプットとし、PT振動特性・実機振動・放射音をアウトプットとする。この間の現象を複数のCAEツールで予測し、それらをリンクして全てをVT化している。この技術は、以下の4つの技術から成っている。

- FEMによる、振動伝達特性予測技術
- 流れ解析および機構解析による、起振力予測技術
- マウント振動を予測し、振動伝達経路を分析する技術
- 放射音を予測し、放射音伝達経路を分析する技術

3. シミュレーション技術

3.1 振動伝達特性予測技術

(1) FEモデル

まず、FEMによる振動伝達特性予測技術について説明する。形状CADとして、IDEASの3Dデータを用いている。従来は、PPB解析を中心に机上評価を行ってきたため、300Hzまで表現できるFEモデリング技術を活用して来たが、本VTにおいて、800Hzまでのマウント振動予測と、更に2.5kHzまでの放射音予測を可能とするために、高精度のFEモデルが必要となり、その技術開発を行った。振動伝達モデルの精度指標は、共振モードの周波数と伝達特性のピークレベルである。『伸び』に関する1kHz以下の0.5次~8次成分を再現するために、周波数精度は±3%が必要、また、『落ち着いた』に関する1kHz~2.5kHzは、周波数で±5%とした。Fig.5にFEモデルの例を示す。

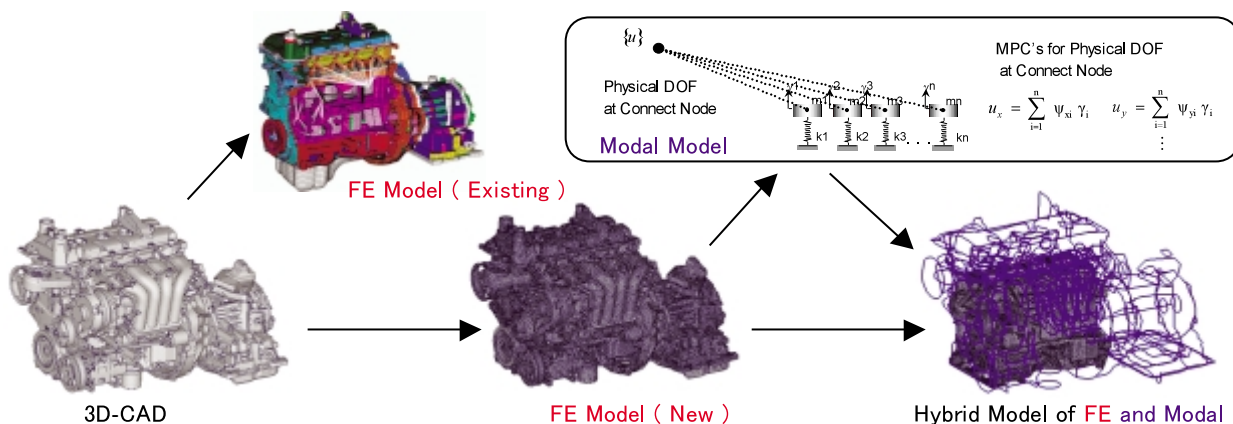


Fig.5 FE and Modal Model

高精度化ポイントは、部品形状を3D-CADと一致、ボルト結合モデルの精度向上、従来は計算能力の限界から、ブロック・ミッション等主要部品、約10部品以外は簡略化・省略化していたが、これをPT全体モデル約20部品をFEモデル化した点である。一方、FEモデルの節点数は、従来60万節点規模であったものが、250万規模に大幅に増大した。そこで、解析精度を維持しつつ、計算時間短縮するため、モーダルモデルを併用している。

(2) モーダルモデル

ここでいうモーダルモデルとは、部品ごとのFEモデルから求めた固有振動特性を、Craig-Chang法に基づく拘束モーダル法を使って、モーダル剛性・モーダル質量およびモードシェイプを求め、NASTRAN INPUT形式で書き表したモーダルモデルである。これにより、例えばシリンダヘッドモデルの計算自由度は、約120万自由度から1,000自由度に圧縮され、大幅な計算時間短縮となる。また、各部品のボルト結合部のモデル化方法と節点番号付けを標準化し、組合せ解析を容易にしている。このモーダルモデルへの変換は、内製プログラムにより自動化している。

3.2 起振力予測技術

(1) 燃焼圧予測シミュレーション

燃焼圧予測には、Fig.6に示す内製の1次元吸排気シミュレーションを使っている。吸排気シミュレーションでは、ボア径・ストローク・圧縮比・バルブタイミングなどのエンジン諸元と、空燃比・点火タイミング・エンジン回転数など運転条件から流入空気量を算出し、燃焼はWoschniの式を改良した方法で求めている。

(2) 動弁系荷重予測シミュレーション

動弁系荷重予測は、Fig.7に示す内製の動弁系シミュレーションを使っている。動弁系シミュレーションでは、バルブ質量・バネ特性およびカムプロフィールから、回転数ごとのカム軸荷重とバルブ着座荷重を求めている。

(3) クランク・ピストン荷重予測シミュレーション

クランク軸荷重とピストンスラスト荷重は、クランク挙動シミュレーションを使っている。クランク挙動シミュレーションとは、シリンダブロックの中でクランクが弾性振動をしながら回転し、両者が連成振動するさまを解く機構解析プログラムである。FEおよびモーダルモデルで表現したPT振動モデルから、剛性マトリックス・質量マトリックスを縮退して求め、加振力は、燃焼圧・動弁系荷重を読み込み、クランク・ピストンの機構解析を行い、クランク荷重・ピストンスラスト荷重を算出する。

3.3 マウント振動予測および伝達経路分析技術

(1) マウント振動予測シミュレーション

エンジン運転時のマウント振動予測は、上述のクランク挙動シミュレーションにおいて、縮退点として、エンジンマウントの計算自由度を残すことで、マウント振動結果を得ることができる。

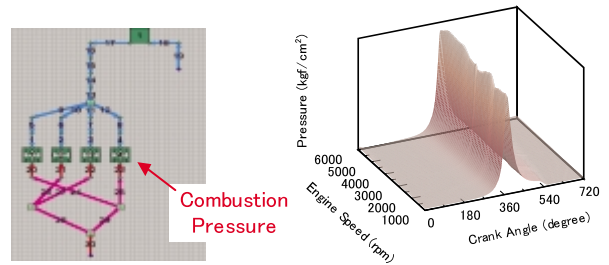


Fig.6 Engine Cycle Simulation

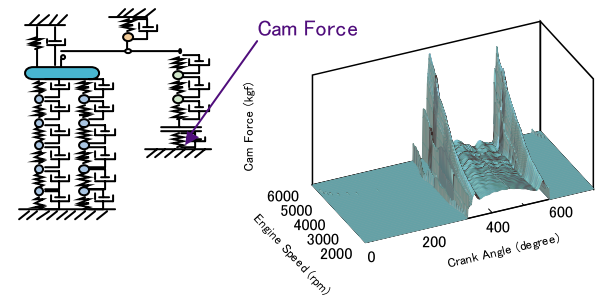


Fig.7 Valve Train Dynamic Simulation

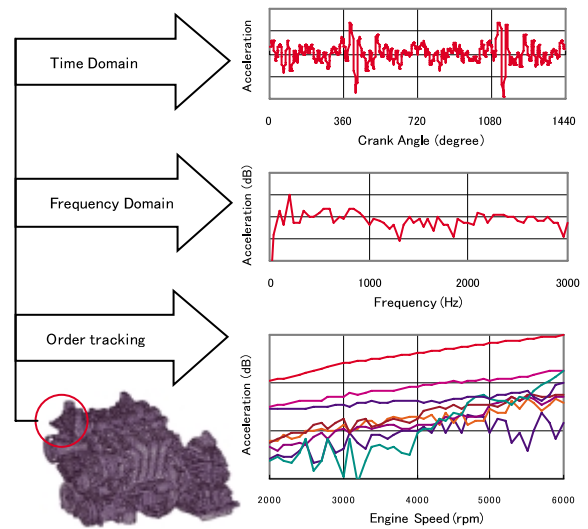


Fig.8 PT Mount Vibration

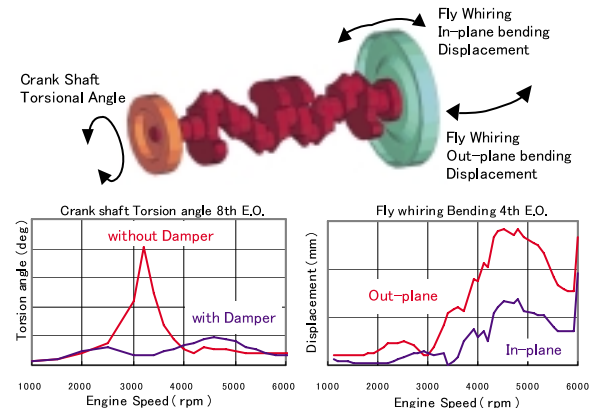


Fig.9 Crankshaft Motion

Fig.8は、マウント振動予測結果を、時間軸・周波数軸および回転次成分トラッキングで表したものである。これにより、エンジン2次振動に関する『静かな』『リニアな』を机上評価できる。

また、Fig.9は、クランクシャフトのねじり振動とフライホイール面振れ振動の予測結果である。クランクが振動しつつ回転することで、さまざまな次数成分の発生原因の一つとなるが、特にフライホイール面振れ振動が発生すると、ハーフ次成分増大の大きな要因となる。これら全ての部位の振動は、Fig.10に示すスペクトルマップとして得ることができ、『伸びやかな』を机上評価できる。

(2) 伝達経路分析 (TPA : Transfer Path Analysis)

マウント振動の大きさは、エンジンの複数の起振力が、複数の経路で伝わってきた振動の総和である。TPAとは、これをカスケードするために、マウント振動に影響する主要な起振力と伝達経路の寄与率を分解する技術である。これにより、マウント振動を下げるために、どの荷重の、どの伝達経路を改善すべきか、を特定することができる。

Fig.10の4次振動レベルに着目し、この4次振動のピークの発生原因について机上で分析を行った。Fig.11は、主軸受け加振力の4次成分の回転特性を軸受けごとに示したものである。これより、4次の軸受け加振力は、2&4番主軸受けの値が他の軸受けよりも大きいことが分かる。そこで4番主軸受けに着目し、軸受け～マウントへの伝達関数と加振力を重ねて描いたものがFig.12である。これより、伝達関数のピークと加振力のピークが交わることで、5,500rpm近辺で振動のピークが発生していることが分かる。

3.4 放射音予測技術

(1) 放射音予測シミュレーション

放射音予測は、汎用音響解析ソフトウェアで行っている。エンジンブロックやカムカバーなどの表面振動のスペクトルマップをクランク挙動シミュレーションで求め、これをインプットとして、音響解析ソフトウェアにより音圧分布や音響パワーを計算する。

(2) 放射面分析

音と表面振動の対比により、問題となる音の放射面を特定し、放射音低減に有効な構造変更が検討できる。しかし、狙いのモードを対策するための構造変更により他のモードも変化し、問題でなかった周波数帯が悪化するケースがある。そこで、モード感度分析を行い、狙いのモードにのみ効果のある部位を絞り込み対策を行っている。

モード感度分析の概要をFig.13に示す。まず、ユニット全体に対するそれぞれの部品単体モードの感度係数から、どの部品のどのモードを変化させると、狙いの周波数帯が改善できるかを絞り込む。次に、絞り込んだ部品の各モードに対する各部位剛性の感度係数から、狙いのモードのみ変化させる構造変更を絞り込む。これにより改善すべきユニット特性から対策構造へのカスケードが可能である。

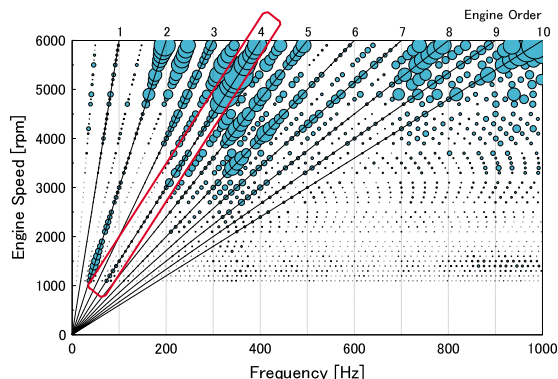


Fig.10 Mount Vibration Spectrum

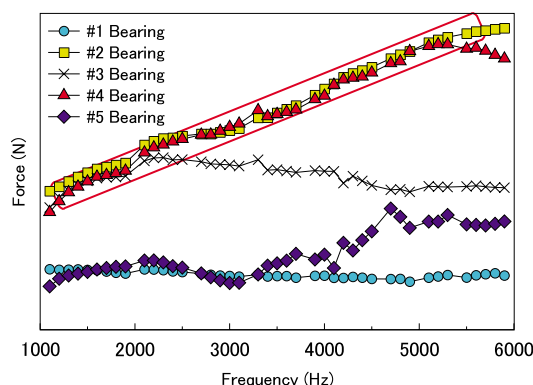


Fig.11 Bearing Force

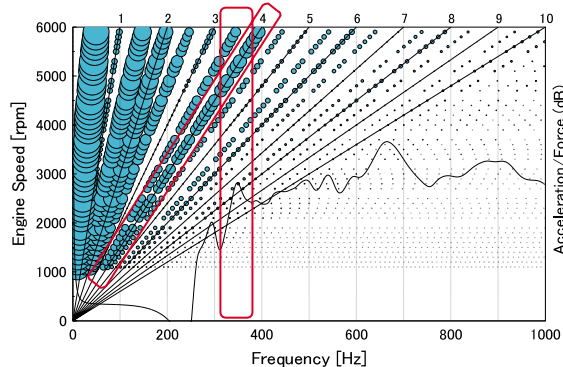


Fig.12 #4 Bearing Force & FRF

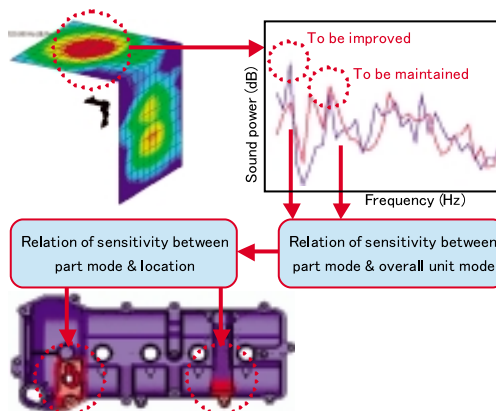


Fig.13 Mode Sensitivity Analysis

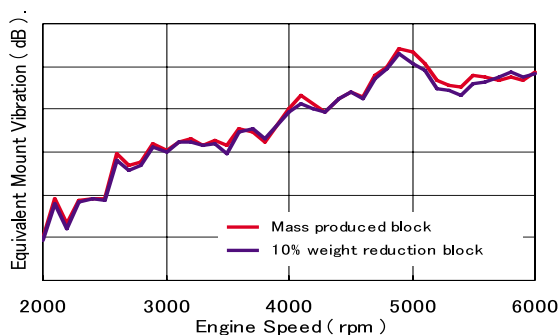


Fig.14 Block Weight Reduction and Equivalent Mount Vibration

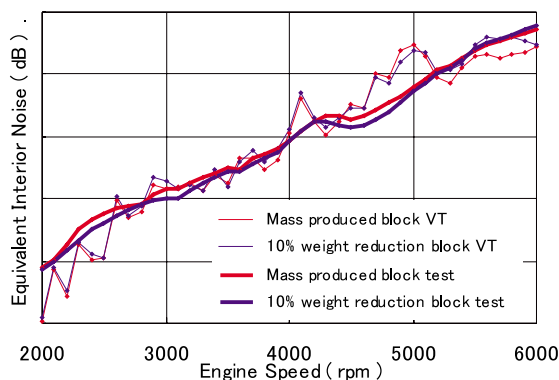


Fig.15 Block Weight Reduction and Equivalent Interior Noise

4. 適用事例

4.1 マウント振動低減と軽量化の両立

シリンダブロックの軽量化とマウント振動低減の両立検討の事例をFig.14に示す。スペクトルマップにて、200～800Hzのマウント振動に寄与するモードとして、ブロック振り・横曲げ・縦曲げ、の三つのモードを特定し、歪エネルギー分析より、エネルギー小の部位の軽量化と、エネルギー大の部位の構造改善を行い、等価エンジン振動の低減を検討した。等価エンジン振動とは、200～800Hzのマウント振動の3軸成分であり、振動レベル評価として採用している指標の一つである。検討の結果、等価エンジン振動を従来車以下に抑えるとともに、ブロックを10%軽量化する構造を得た。更に、基準とする車体感度特性を掛けた等価車内音と呼ぶ評価指標においても、従来車以下であることが分かった。そこで、本軽量化案を試作し、実験評価したところ、Fig.15に示すように、期待通りの効果を確認できた。

4.2 放射音低減と軽量化の両立

カムカバーの軽量化と放射音改善の両立検討の事例をFig.16に示す。一般肉厚を2.5mmから1.5mmに一律薄くすると、軽量化前の音響パワー性能に対し、1kHz帯のレベルが上昇することが分かった。

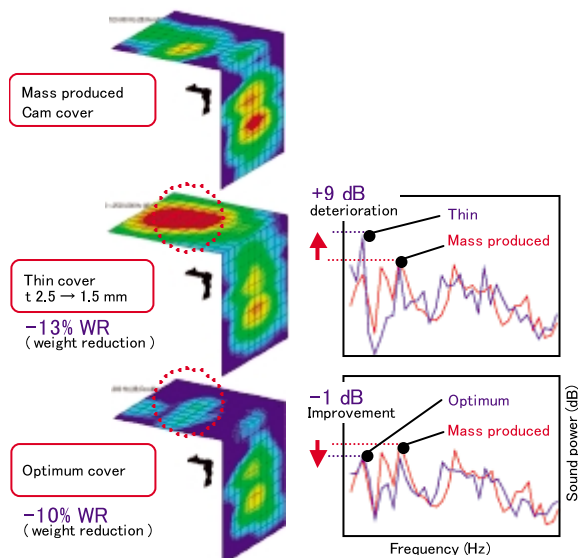


Fig.16 Cam Cover Weight Reduction and Sound Power

これに対し、モード感度分析の結果、剛性UPが有効な部位を特定し、モデルを修正して、その効果を机上検証したところ、全周波数帯に渡り現状の音響レベルを維持しつつ、約10%の軽量化が可能であることを確認した。

5. おわりに

エンジン振動騒音VTの第一歩をスタートさせた。適用事例で紹介した、振動騒音低減と軽量化の両立構造は、新PTの開発の中で採用されている。今後、本VT技術をPT開発プロセスの中でフル活用し、低燃費・高出力かつ快適な運転ができるNVH性能を有するPTの開発に貢献したい。

著者



土路生修



堀川浩司



阿部宏司

特集 : Virtual Testing

9

パワートレインにおける機構解析ソフトADAMSの適用 Application of ADAMS to Powertrain Development

栗 栖 徹*¹ 藤 川 智 士*² 宮 内 勇 馬*³
Toru Kurisu Satoshi Fujikawa Yuma Miyouchi
小 泉 昌 弘*⁴ 廣 部 敏 之*⁵ 福 島 小 巻*⁶
Masahiro Koizumi Toshiyuki Hirobe Komaki Fukushima

要 約

パワートレインは当社のブランド戦略を支える重要な技術要素として、その性能・品質は世界に通用すべく、要求が非常に高度化してきている。短納期で迅速にこれらの要求に応えるため、エンジン、ドライブトレインの機構の挙動によって発生する様々な現象を精度よく解析する必要性が高まっている。そこで、汎用機構解析ソフトADAMSを当社で開発・生産しているレシプロエンジン、ロータリエンジンならびに手動/自動変速機へ適用し、NVHや信頼性、燃費などの面で多くの成果をあげてきた。それらの事例について紹介する。

Summary

Powertrain is one of the most important technological elements for supporting Mazda's brand strategy, of which performance and quality require substantially high competitiveness of worldwide level. To speedily meet the requirement in a short period, requests for accurate analyses of powertrain behavior with multi body dynamics are on the increase. Our application of ADAMS to various types of engines and transmissions under development and production at our plants has had much effect on fuel economy, NVH, and reliability. This paper introduces some applicable examples.

1. はじめに

エンジン、ドライブトレインは、往復運動や回転運動など機構の運動によって燃焼エネルギーを回転運動に変換し駆動力として車輪に伝えている。そのため、動弁系のジャンプ・バウンスをはじめ、変速ショックなど機構に起因する様々な問題を発生しやすい。従来は、そのような問題に対し簡単な設計計算式で済ませたり、比較的自由度の少ない解析モデルを使用した内製ソフトを使用して解析してきた。それにより、問題の早期解決をはじめ、より性能・品質のよい商品を開発することに貢献してきた。そして、CAEの発展・普及とともに、試作・実験を最小限に抑え、CAEを使い設計初期段階で仕様を決め開発期間を短縮することが、競争力上必要になってきた。そのためには、飛躍的に高精度な解析解が必要であり、エンジン・ドライブトレインへ汎用機構解析ソフトADAMSを適用し、より実際

の機構に近い高精度のモデルを使用した解析に移行してきた。本稿では、その適用事例について紹介する。

2. レシプロエンジンへのADAMS適用

2.1 補機駆動ベルトへの適用

補機駆動ベルトは、レシプロエンジンの開発においてスリップやばたつきなどによる異音を発生しやすい。そのため、機構解析によりレイアウトの適切性や寿命、異音に対するポテンシャルを開発の早い段階で把握し、防止しなければならない。また、異音が見つかった場合にも迅速なメカニズム究明と適切な対策の実施が必要で、実験結果で決定した対策だけでは問題が迅速に解決しないため、機構解析を活用して発生メカニズムの明確化やいくつかある対策案の中から効果のある対策を試作前に絞込むことが有効である。

*1~6 パワートレイン先行開発部
Powertrain Advance Development Dept.

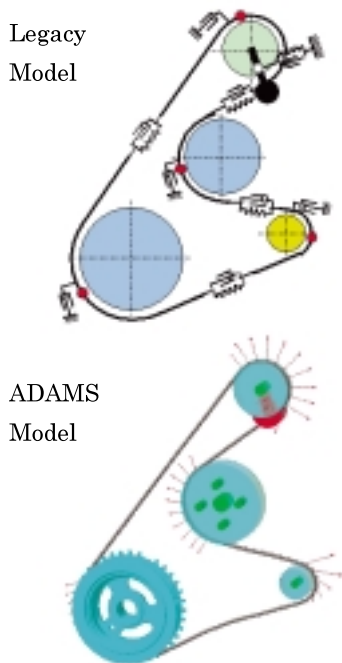


Fig.1 Accessory Drive Belt Motion Model

Fig.1は、補機駆動ベルトの挙動解析モデルの例である。従来使用してきた内製ソフトは、ベルトスパン部分を伸び方向のばね・減衰要素で扱ったモデルを使用していた⁽¹⁾。このモデルでもスリップは精度よく予測できるが、弦振動が考慮されておらず、ばたつきによる音や干渉は予測できなかった。ADAMSではベルトスパン部分もリンクとしてモデル化し、弦振動も予測可能である。それにより、弦振動ノイズや部品間の干渉についても検討が可能になった。

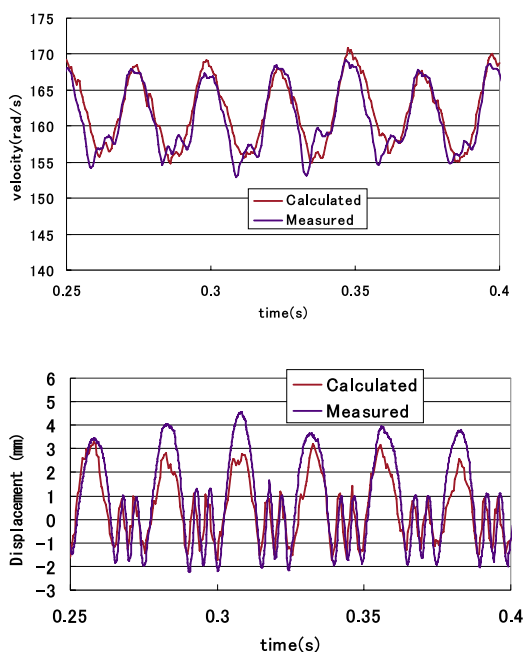


Fig.2 Validation of Pulley & Belt Motion

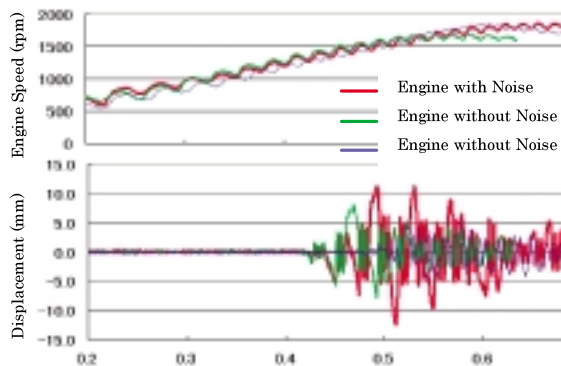


Fig.3 Calculated Belt Motion at Car Launch

Fig.2に検証結果の一例を示す。プーリー回転速度、ベルト弦振動速度とも波形の特徴・周期がよく一致し、ばたつき振幅には最大2mm程度の差異があるが、実験のばたつきを考慮すると十分な精度で予測できている。Fig.3は、発進操作時に発生した異音の原因について解析を行った例である。排気量の違いにより数mm補機レイアウトが異なる同一シリーズエンジン間で音に差があったが、解析結果ではばたつきに差が現れ、異音との相関もよく現象を再現できることが分かり、対策案の効果検討に活用できた。

2.2 動弁系への適用

動弁系は、カムによる強制運動系で、古くからばね・質点系モデルによる挙動解析が行われ、当社でも内製シミュレーションプログラムをジャンプ・バウンスの評価に使ってきた⁽²⁾。ただし、計算機能力やモデル化の限界などからバルブ1本だけの小規模モデルを使い、カム軸のねじりや他気筒の影響などを考慮していなかった。しかし、軽量化・長寿命化などの対応によって、気筒連成による共振など従来のモデルでは対応できない問題の予測が必要になってきた。

そのため、ADAMSを適用しカムシャフト・スプロケットやチェーンなどを含めた動弁駆動系全体のモデルを作成し、騒音や信頼性の評価を実施している。この例を以下に示す。

カムシャフトには、カムプロファイルに起因するフォロワ慣性力およびバルブスプリング反力によりねじり方向のモーメントが発生する。場合によっては過大なねじりモーメントによって騒音や、信頼性の問題が発生することがある。そのため設計初期段階でカムシャフトのねじりモーメントを精度良く予測することが重要である。そこで、ADAMSにより、カムシャフトの弾性を考慮可能な動弁系機構モデルを開発した (Fig.4) それにより、カムシャフトのねじり共振による過大なモーメントの発生等、動弁系諸元がカムシャフトねじりに与える影響を明らかにすることができた。

また、燃費と出力を両立する狙いで、負荷や回転数に応

じて開弁量を任意に制御するため、リフト量、弁開期間・閉閉タイミングを連続的に変更可能な連続可変動弁系 CVVA (Continuously Variable Valve Actuation) と呼ばれるタイプの動弁系がBMW社のValvetronic[®]の量産を機に注目を集め、近年各社から数多く提案されている。新機構の連続可変動弁系は多くのリンクや摺動面を持ち、それらによってバルブのリフト量が決まり、摺動部の摩擦挙動も支配される。その機構の成立性検討のためには、機構運動解析は必須ともいえ、他社提案のCVVAのベンチマーク活動や当社オリジナル機構の評価のために解析を行っている (Fig.5)



Fig.4 Valvetrain Dynamics Model



Fig.5 CVVA Model

3. ロータリエンジンへの適用

ロータリエンジンは、燃焼室の摺動シール部が多く、シール性向上が出力・燃費の向上の鍵を握っている。1961年、当社でロータリエンジン開発に着手した当初からシール技

術の開発には注力してきたが、従来の実験主体の開発では、シール挙動の把握が難しく、地道な開発活動により徐々に改善してきたが、改善に長い期間を必要とした。RX-8搭載のRENESISの開発においては、出力・燃費の革新的向上を効率的に実現するためADAMSを適用して、サイドシール、アベックスシールの挙動を解析し、シール性改善の検討を行った。

3.1 アベックスシールのシール性解析

レシプロエンジンのピストンリング同様、燃費・性能から、シールとハウジングの間にガス漏れのもとになる微小隙間が発生しないように設計することが重要である。本例ではこの隙間の発生を評価するために、アベックスシールとトロコイド面との間にかかる荷重が0になる状況が発生しないかを確認する。この評価のために、ロータ、アベックスシール、スプリング、ガス圧、スプリング力、慣性力をモデル化した (Fig.6)。このモデルにより計算した押し付け荷重と挙動を、Fig.7に示す。新開発したRENESISでは、常にアベックスシールとトロコイド間に荷重が作用しており、シールの浮き上がりによる隙間が発生していないことが分かる。このようなシール性改善により、出力を3PS改善することができた。

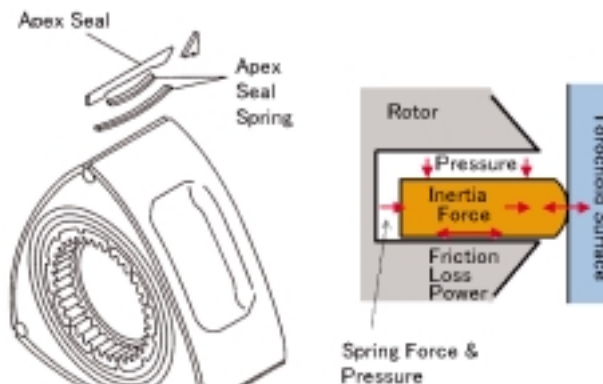


Fig.6 Modeling of Apex Seal Motion

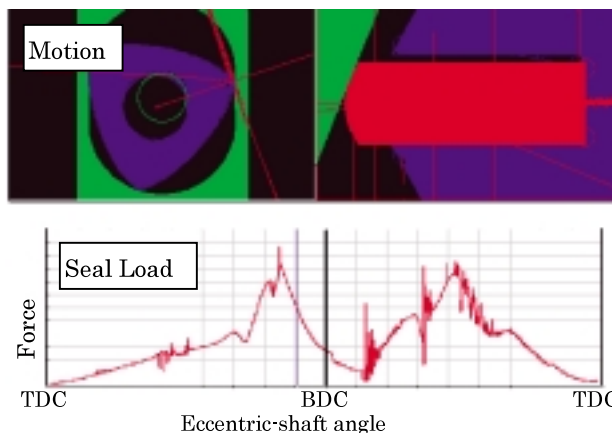


Fig.7 Load between Apex Seal and Trochoidal Surface

3.2 サイドシールのシール性解析

サイドシールは燃焼室/サイドハウジング間のガスシール機能を有し、サイドハウジング面への追従および、シール溝面への密着が必要となる。しかしながら、ロータの機構上、サイドシール/ハウジング間に働く摩擦力は同一方向でなく、サイドシールのリーディング側、トレーリング側で逆方向に働く場合がある。それにより、摩擦力と圧力、慣性力のつりあいによっては、サイドシールがシール溝面から離れ、シール機能が低下し、燃焼室からサイド面へのガス漏れが発生する可能性がある (Fig.8)。そこで、シール溝内において、ガス漏れを発生させる異常挙動がないかを検討した。解析モデルは、サイドシールを20分割した多質点モデルとして、各質点をばね要素で結合し、弾性を表現している。また、サイドシールにかかる圧力、慣性力、スプリング力をそれぞれモデル化している。解析の結果、摩擦力の影響は小さく、圧力の影響が支配的で、サイドシールは溝内で安定しており、シール性を悪化させる異常挙動はないことが分かった (Fig.9)。

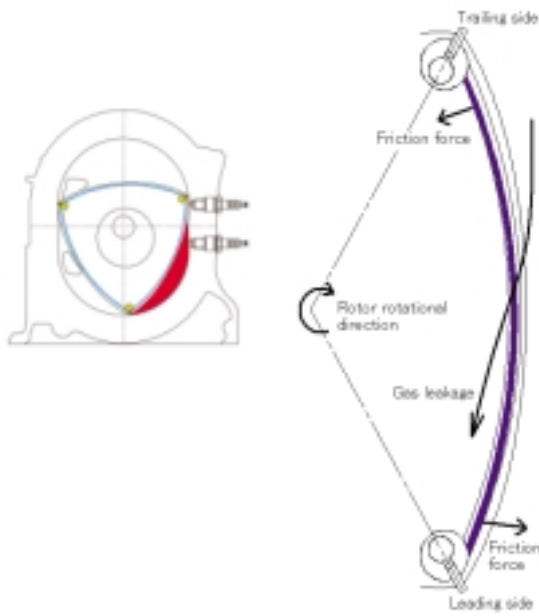


Fig.8 Modeling of Side Seal Friction Force

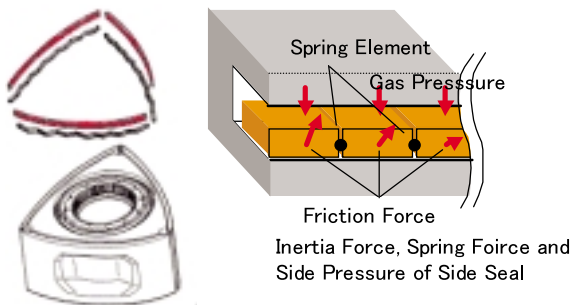


Fig.9 Modeling of Side Seal Dynamics

4. ドライブトレインへのADAMS適用

4.1 駆動系の振動に関して

次に、駆動系を主体とするシステムティックなNVH問題にADAMSを適用している事例を紹介する。

駆動系はATのトルクコンバータやロックアップダンパ、あるいはドライブシャフトの等速ジョイント等、非線形振動構造が多く、複雑な共振現象を示す。

更に200Hz以下の低周波領域では、マウント、サスペンションおよびタイヤ特性と連成し合い、振動現象は、より複雑なものとなっている。

これらの振動現象に対して、関連するユニット、部品を全てADAMSでモデル化したフルビークルモデルを開発し、必要に応じて実際の走行状態を作り出すことで、その性能を予測している。

4.2 AT車アイドリング振動への適用

近年、燃費改善のために、アイドリング回転の低回転化が必要となっているが、低回転化はエンジン角速度変動の増加によるアイドリング振動の悪化を伴う。アイドリング振動は、エンジンの燃焼圧が加振源となり、トルクコンバータによる引き摺りトルクや、ドライブシャフトの等速ジョイント構造による摩擦抵抗、更にタイヤ、マウントおよびサスペンションのバネ特性が複雑に絡み合う振動現象である。このため、アイドリング振動の机上予測モデルを開発し、その性能の予測と新たな振動低減技術の研究を行っている。

Fig.10にアイドリング振動の予測を目的に開発したAT車のフルビークルモデルを示す。

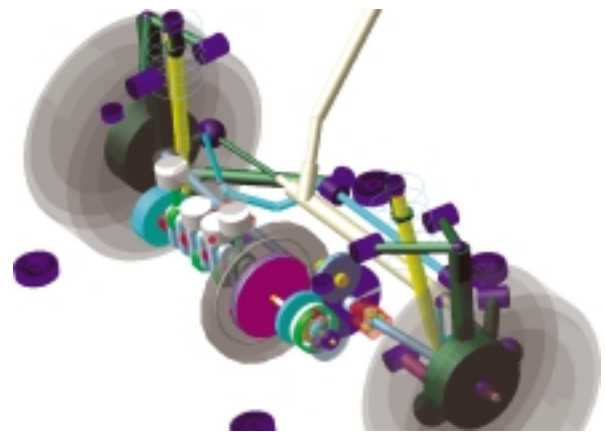


Fig.10 AT Full Vehicle Model

本モデルではこれらの機構、振動特性を全てADAMSでモデル化し、実測のエンジン燃焼圧を入力として、車両、駆動系各部の振動を予測している。

Fig.11にアイドリング振動時の主要な車体入力箇所であるホイールハブ部の左右振動の予測結果と実測結果を示す。

過去、簡易モデルやFEM系モデルでは予測できなかった低回転化に伴う振動悪化が予測できており、このモデルをベースに、等速ジョイント構造の違いによる振動への影響を研究している。

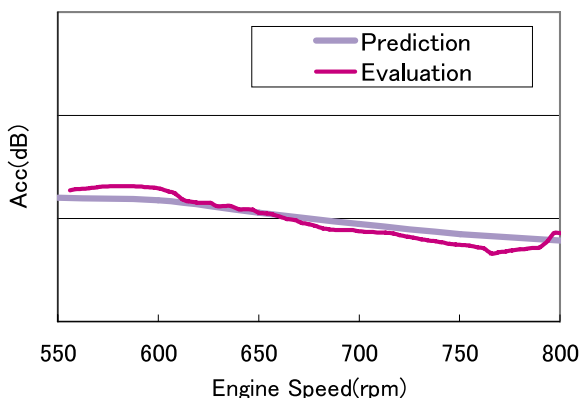


Fig.11 Validation of Wheel Hub Vibration

Fig.12は、そのジョイント構造を変更した場合の振動予測結果である。この事例では、車両との関係を考慮した最適なジョイント構造を早期に仕様確定することができた。

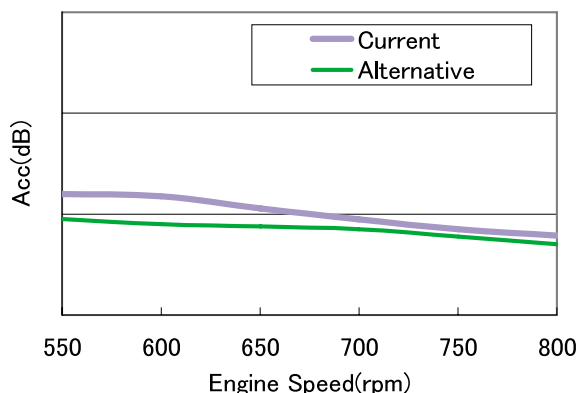


Fig.12 Wheel Hub Vibration of Alternative Joint

4.3 AT車ロックアップこもり音への適用

同様に燃費改善上重要であるAT車のロックアップ回転数の低回転化も、広範囲の振動特性の影響を受ける。

ロックアップ範囲を低回転化する場合、アイドル振動同様、エンジン角速度変動の増大とともに、駆動系のねじり共振レベルの上昇により、こもり音の悪化を伴う。

ADAMSのフルピークルモデルで、この性能予測と対策検討に取り組んだ。

こもり音においては、ロックアップダンパのねじり振動特性が大きく寄与する。このためダンパの持つ履歴減衰構造によるスティック・スリップの非線形性を含め、ダンパ構造を厳密にモデル化した。

Fig.13は、ロックアップ時におけるドライブシャフト上のエンジン回転2次トルク変動の予測結果と実測結果を比較したものである。

このグラフのようにトルク変動予測値は、実測とよく一致したので、本モデルを用いて、こもり音を悪化させずロックアップ範囲を低回転化できる構造を求めた。

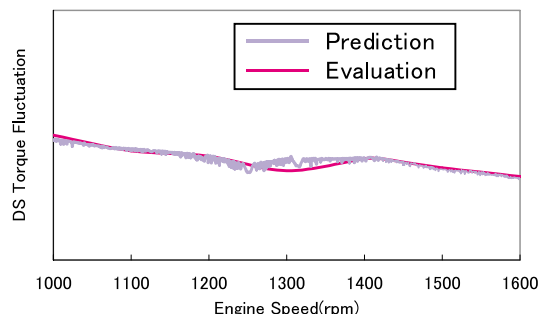


Fig.13 Validation of Drive Shaft Torque Fluctuation

一般には、ダンパバネのねじり剛性を低減すればねじり共振周波数が低下し、こもり音も低減するが、バネ剛性を低減する構造はユニットの全長アップを伴うため、バネ剛性に頼らない構造を解析によって検討した。

Fig.14は、その改善構造を採用した場合のドライブシャフトのトルク変動予測結果である。ダンパのバネ剛性を低減しなくても、履歴減衰構造と剛性のバランスを最適化することで、振動悪化なく、ロックアップ範囲を低回転化できることが分かった。本構造を試作し、実験した結果、車内音で2~5dBのこもり音低減を確認した。このようにADAMSを活用することによりロックアップ範囲の低回転化が実現できた。

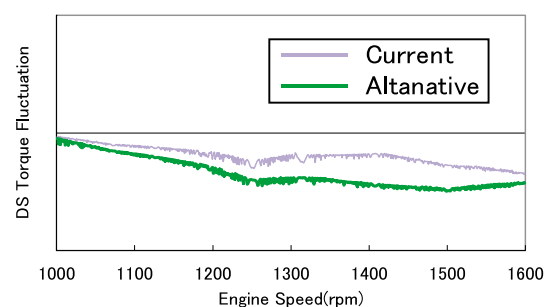


Fig.14 Drive Shaft Torque Fluctuation of Alternative Damper

4.4 MT車クラッチ締結ショックへの適用

最後にMT車への適用例について紹介する。

MT車では、クラッチの締結時に発生する車体のショック問題にフルピークルモデルの解析を適用した。

FF車の場合、変速時に急激なクラッチ締結を行うと、パワートレインのロール振動が発生し、それが車体の不快な前後振動となる。

本モデルではクラッチとフライホイールの締結構造を詳細に作りこんで、この現象を予測した。なお、本性能ではエンジン角速度変動の影響はないため、エンジンからの入力には運転条件に応じたトルクの負荷のみとした。また、前述のモデルが停車状態や、角速度変動成分のみの非走行モデルであったのに対し、本ショック性能は車速の変化とタイヤのスリップの影響を考慮する必要があるため、路面とタイヤ間の摩擦を定義した走行可能なモデルとした。Fig.15にそのモデルを示す。

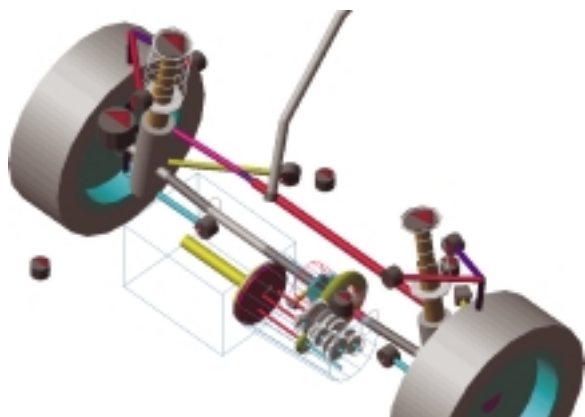


Fig.15 MT Full Vehicle Model

急激なクラッチ締結を行う場合、車体への主要なショック入力箇所となるマウントの前後変位にて予実差を検証した結果をFig.16に示す。ピーク特性はほぼ一致し、挙動を予測可能なことが分かったので、このモデルを使用して、クラッチねじりバネの低剛性化による車体の前後振動低減構造を検討し、体感振動を約15%低減できる構造を提案した。

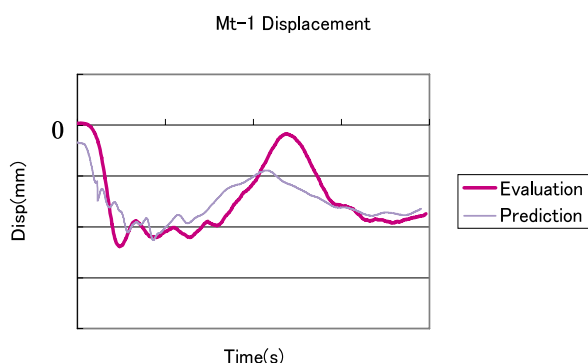


Fig.16 Mount Displacement

開発車で試作評価した結果、ショックをほとんど不快と感ぜないレベルの改善が確認できたため、採用した。

4.5 ドライブトレイン系まとめ

エンジンから駆動系、そして車両を含めたフルビークルのADAMSモデルを開発し、ユニット単体では予測不可能であったこれらの複合性能の机上予測を可能とした。

5. おわりに

パワートレインにおけるADAMS機構解析の適用事例について紹介した。ここに紹介した以外にも様々な解析を行っており、ADAMS機構解析は当社のパワートレイン開発にはなくてはならないものとなっている。今後も更に積極的に解析を適用し、マツダブランドを具現化したお客様に喜んでいただけるパワートレインを提供していく所存である。なお、ドライブシャフトの詳細モデルに関しては、(株)NTNにて開発いただいたモデルを使用しており、この場を借りて御礼申し上げる。

参考文献

- (1) 栗栖：エンジン補機Vベルトスリップ挙動のシミュレーション，自動車技術会秋季大会，No.195 (1997)
- (2) 栗栖他：動弁系における解析技術について，自動車技術，Vol.46，No.11，P86 (1992)
- (3) R.Flierl，M.Klüing：The Third Generation of Valvetrains-New Fully Variable Valvetrains for Throttle-Free Load Control，SAE Paper，2000-01-1227 (2000)

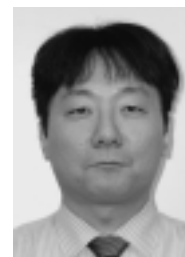
著者



栗栖 徹



藤川智士



宮内勇馬



小泉昌弘



廣部敏之



福島小巻

特集 : Virtual Testing

10

パワートレイン構想設計のVirtual Testing技術の紹介

Introduction of Virtual Testing Technology for Concept Design of Powertrain

平松 繁喜*1 百田 浩一*2 小森 賢*3
Shigeki Hiramatsu Kouichi Momota Satoshi Komori
徳光 文広*4 城谷 佳孝*5 村井 亜樹*6
Fumihiro Tokumitsu Yoshitaka Shirotani Aki Murai

要約

パワートレイン (PT) 開発初期段階の構想設計におけるVirtual Testingに適用することを目的として、シミュレーションシステムPT-VTES (Power Train Virtual Testing and Evaluation System) を開発した。構想設計は製品開発の中で重要な位置を占め、その効率化と検討充実のためにCAEの導入が求められている。しかし、構想設計には一般的なCAEの適用は必ずしも適切ではなく、異なるアプローチのモデル化が必要である。本稿では、まず構想設計で求められるシミュレーションモデルの要件について述べる。次に、それらの要件を実現するために導入した、システムとしてのモデル定式化および階層構造化の概念について説明する。また、シミュレーションを実行するためのシステムの概要と適用事例を紹介する。

Summary

A simulation system, PT-VTES (Power Train Virtual Testing and Evaluation System), has been developed for applying to virtual testing in a concept design of a powertrain. A concept design phase occupies an important place in a product development and needs introducing computer simulations for efficient and scrupulous studies. General simulation models, however, are not always suitable for studies in the concept design, and a new modeling approach is necessary. This paper describes prerequisites of simulation models in the concept design phase of the product development and the basic concepts of PT-VTES that enables to realize simulation models with these prerequisites, as well as the formulation of models by system approach and the organization of models by the concept of hierarchy structure, and introduces the outlines of the computer system of PT-VTES and applicable examples of simulations.

1. はじめに

顧客ニーズに適合したコストパフォーマンスに優れた製品を迅速に市場へ提供するために、当社ではMDI (Mazda Digital Innovation)⁽¹⁾をはじめとする開発の革新を進めている。昨今の自動車開発は、国際的な部品調達や開発拠点の世界的分散によって、時間的・空間的な同時並行・協調活動としての様相を呈している。更に、省エネルギー・低公害・安全性向上など、自動車に対する社会的要求も高度となり、開発活動は困難さを増している。このような中で高品質の自動車を短期間で開発するためには、開発プロセス

が整然かつ効率的に進むことが求められ、それには開発初期の基礎的な検討の充実が成否を握るといって過言ではない。PTにおいては、開発着手時点において、車両が実現すべき性能目標からエンジンや変速機等のユニットや部品が満たすべき性能・機能を明確化する、構想設計における検討の充実と精度の向上が必要である。

そこで、構想設計段階でPTの性能目標検討を充実させることを主目的として、シミュレーションシステムPT-VTESを開発した。本稿では、このシステムの基本概念と、システムの適用例について紹介する。

*1~5 第3エンジン開発部
Engine Development Dept. No.3

*6 パワートレイン先行開発部
Powertrain Advance Development Dept.

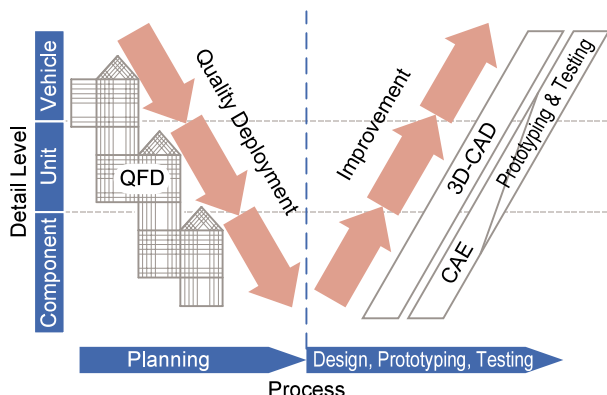


Fig.1 Flow of Product Development

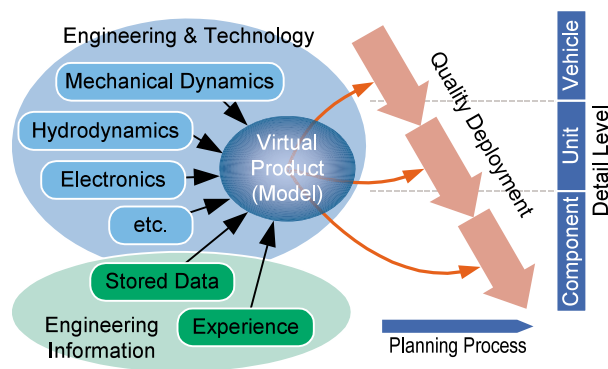


Fig.2 Concept of Product Development with Virtual Product

2. 構想設計とCAE⁽²⁾

2.1 商品開発プロセスの課題

Fig.1は開発プロセスを模式的に表した図で、車両・ユニット・コンポーネントを検討順に上から縦方向に並べ、横方向をプロセスの進捗としている。この図の右側は設計・試作・評価段階を表し、そこではCAEやCADなどコンピュータ援用技術の充実によって効率化が進んでいる。その反面、車両の目標を設定し、それをエンジンや変速機などユニットやそれらの部品の目標に展開していく左側の構想設計プロセスでは、品質機能展開(QFD)⁽³⁾を軸に据えた品質管理ツールが主要な手段として用いられ、その適用や運用には人の経験や英知に多くを依存せざるを得ないというのが実情である。しかし、開発プロセス全体に対して企画段階の検討は極めて重要な意味を持つ。この段階における失敗は開発全体のやり直しを招くことになり、それは人・物・金など開発資源の大きなロスを生むだけでなく、開発の遅れや性能・機能の熟成不足などの大きな原因となる。従って、優れた製品を短期間で開発するためには合理的かつ高精度な目標設定と展開が不可欠である。

そのために、QFDを中心とする品質管理手法に依存した構想設計段階にCAEを導入し、PTの構想設計検討を充実させることを考えた。これが、PT-VTES開発の目的である。

2.2 構想設計で求められるCAE

構想設計は、自動車の「燃費」や「走り」など数値や感覚として表現される性能を、自動車を構成するユニットや部品の具体的構造・機構へと変換するプロセスである。それに対して、一般的なCAEは現象の解析を目的として発展してきた。これらのCAEにとって現象の要因は構造や機構であり、入力すべきデータとして詳細な諸元が存在することが前提となっている。このようなCAEを構想設計に適用すると、幾つもの構造案、機構案をモデル化して組み合わ

せ、自動車全体のシミュレーションを行うことになる。しかし、各諸元はコストや信頼性、レイアウトなど、性能や機能以外の様々な制約の下で設定されるため、案を策定しモデル化するには多くの時間と労力を要する。更に、シミュレーション自体が大規模化して、実行が非常に困難なものとなる。このように、構想設計への一般的なCAEの導入には問題があり、この場面で用いるCAEにはそれらとは異なる以下のような特徴が要求される。

- (1) 全体から部分へと目標展開するとともに、それを逆にたどって目標の妥当性を検証できなければならない。そのため、シミュレーションモデル(モデル)の構成は実車の階層構造と一致しなければならない。
- (2) 自動車は様々な工学分野に基礎を置く装置の集合体であり、分野を越えたモデル化が可能でなければならない。
- (3) 形状や機構がない段階で検討するのであるから、それらに依存せずにモデル化できることが必要である。
- (4) 過去から培われた膨大なデータや経験が有効活用できることが必要である。これには、物理的なデータだけでなく、顧客満足度など市場情報やそれに基づく試験手順など品質管理上の知識も含む。

以上の要件を満たすことによって、構想設計のためのCAEが実現できる。それは、ユニットや部品の構造・機構を与えてその特性・挙動を求める一般的CAEと異なり、ユニットや部品の抽象的な特性を与え、それらを組み合わせで構成される製品全体の性能や機能を求めるCAEであり、仮想製品と呼ぶことができるものである(Fig.2)。

この仮想製品を実現するため、一般化されたシステムとしての定式化と階層構造化の概念をモデル化に導入した。次章でその概要を述べる。

3. 構想設計モデルの概念と構成

3.1 モデルの定式化^{(4),(5)}

異なる分野に跨るユニットや部品のモデルを実体と同様に統合・分解できるという要求を満たすために、対象を一

一般的なシステムと捉え、モデルを定式化する。

Fig.3は一般化したシステムを表している。全体システムの機能は、サブシステムが入出力で結ばれ相互に作用し構成される。また、システムの外部は環境と呼ばれる。例えば、エンジンや変速機はサブシステム、それらが結び付いたPTは全体システムと位置付けられる。また、環境はドライバの操作や道路勾配など試験条件を意味する。このようなシステムとして捉えることで、内燃機関やモータのようにユニットの種別や立脚する理論分野が異なっても、支配方程式を統一された形式で表すことができる。また、ユニット・部品単独や、それらを統合したPT全体のシミュレーションが自在となる。更に、走りや燃費など様々な評価目的の試験に適応したモデル化が可能となる。このように、一般化したシステムに基づくモデル化によってシミュレーションは高い普遍性を持ち、検討目的に合わせたモデル修正の必要がなくなり、シミュレーションの運用が容易となる。また、データや試験手段など技術的資産の蓄積と活用が促進でき、技術と開発効率の向上にもつながる。

サブシステムの動きは、一般的に次の支配方程式で表される。

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x(t), u(t)) \\ y = h(x(t), u(t)) \end{cases} \quad (1)$$

ここでxは内部状態量, uは入力状態量, yは出力状態量で、これらの状態量は情報・物質・エネルギーなどを意味する。式(1)で表されたサブシステムを統合すると、システムの外部(環境)に他のシステムを持たない、独立した全体システムとなる。特に線形の全体システムでは

$$0 = X\dot{x} + Ax + G \quad (2)$$

と表すことができる。上式に含まれるG, X, Aの各因子の役割や意味を考えると、まずGは系内部の状態量発生源で、エンジンが発生するトルクや摩擦抵抗などである。Aは定常状態を形成する因子で、粘性抵抗係数が代表例である。Xは状態量の過渡的变化に関係する因子で、バネやマスなどエネルギーを保存する因子である。このように、式の各因子には機能と意味があり、それらを利用することで、次節に述べるモデルの体系化が可能となる。

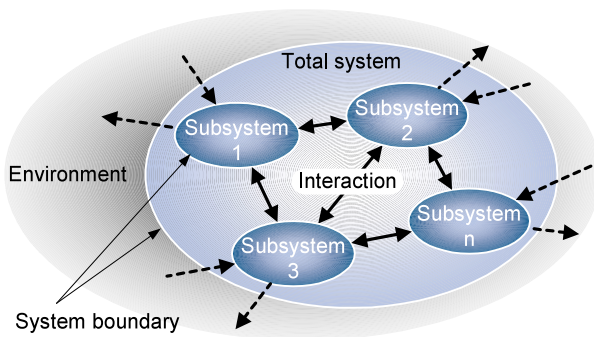


Fig.3 Concept of System

3.2 階層構造の概念⁽⁶⁾

一般的CAEでは、部品やユニットの設計図などを基にし、それらが組み立てられ全体が構成されるという関係に基づいて、部品・ユニットのモデルを繋いでPT全体のモデルを作成することができる。しかし、構想設計ではそれとは逆に、PT全体の性能や機能の目標を実現できる最適なユニットや部品を、多くの選択肢の中で模索する。従って、一般的CAEのように、部品やユニットの設計情報を積み上げて行くモデル化が困難である。そのため、拠り所となる新たな考え方として、階層構造化の概念を導入した。前節で述べたシステムとして一般化したモデルは、その因子と状態量を持つ意味や機能の包含関係による階層構造化によって、Fig.4のように体系化される。これによって、単なる省略ではなく、詳細な構造・機構との結び付きを維持しながら実体の機能を抽象化した汎用的モデル化が可能となる。また、抽象的モデルから、無理や無駄のない適切なモデルの詳細化も可能となる。更に、階層構造化の概念は品質機能展開における要因の展開と類同し、品質機能展開による目標の設定と展開をCAEに持ち込むことが容易となる。

階層構造の概念は、合成関係、集約関係、汎化・特化関係の3つの要素間関係が基本となる。まず、合成関係はFig.4で‘part-of’と表現されているもので、エンジンと変速機が締結されてPTとなるように、複数のモデルが統合され一つのモデルとなる関係を示す。これは同時に、統合されたモデルが部品となるモデルに分解できることも意味する。次に、集約関係は類似機能のモデルを関連付ける概念で、‘member-of’と呼ばれる。例えば、自動変速機(AT)と手動変速機(MT)は類似機能であるから集約関係となる。最後に、汎化・特化関係は抽象と具象の関係を表し、‘is-a’と称される。例えば、変速機はATとMTを包含する概念で、減速比としてモデル化できる。このように、共通機能でモデル化することによって、類似機能の集合に含まれるすべてのモデルを代表する抽象的なモデルが作られる。そして、元の集合との間で抽象的な上位概念とより具体的な下位概念の関係、すなわち、汎化・特化関係を構成する。

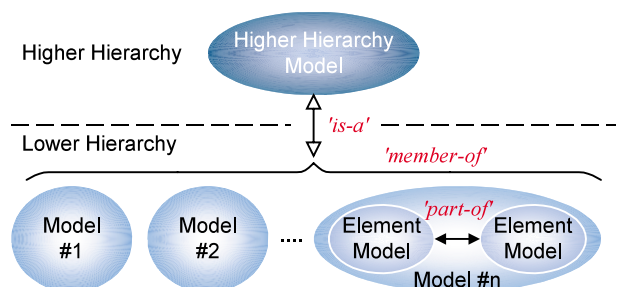


Fig.4 Organaization of Models

3.3 構想設計モデルの基本構成

以上に述べたシステムと階層構造化の概念をモデルとして実現するために、Fig.5に示すように構想設計モデルの基本形を構成した。この基本形では、線形の形式で表現されたサブシステムの支配方程式である式(1)と、その因子の数値を設定する因子演算部から構成される。因子演算部は理論式あるいは実験データから構成され、ユニットや部品のメカニズム・制御が状況に応じて働く状態を、支配方程式中の因子値の変化として表す。そして、基本型として作成されたユニットや部品のモデルをモデル要素(要素)とし、それらの支配方程式を統合することによって全体モデルを構築する。

要素は、階層構造による体系化を利用して、検討対象に応じた詳細度の階層を選択する。例えば、車両性能からエンジンや変速機などPTの各ユニットへの目標展開では、それぞれの抽象度が高い要素を選択し、それらを統合してPT全体モデルを構築する。そして、更に深く検討する際には、階層構造をたどり詳細化・具体化した要素を選択し、単独で、あるいは全体モデルの中に組み込んで検討を行う。

このモデル構造によって、まず、各ユニットに架空の特性を設定してシステム全体に与える効果を評価し、適切な特性を見出す。そして次に、それを実現するための構造や

機構を、システム全体の中で、あるいは全体から切り離して単独で検討することが可能となる。このように、従来QFDとして表現されていた実車や実機が持つ機能とその要因の包含関係をモデルに反映でき、実物と同様に統合・分解することが可能となる。そして、上位階層の目標を下位に展開し、全体との整合を保ちつつ領域を絞り込んだ深く綿密な検討を進めることが可能となる。また、シミュレーション実行中に因子の値は常に変動し、モデルは実質的に非線形となるが、支配方程式は線形の形式を維持している。このことは、シミュレーションの精度・実行速度・頑健性を両立するための重要な要因となっている。

4 . PT-VTESの構成

4.1 PTの機能展開とモデル構成

PTの機能はFig.6のように展開することができる。PT-VTESでは、図の水準3で支配方程式を構成し、下位は因子演算部として表した。この水準では変速機がMT, AT, 無段変速機(CVT)を包含する抽象的な支配方程式として表されるため、因子演算部を交換するだけで変速機の種別を変えることが可能である。更に、変速機については水準4でATとして詳細化した支配方程式を用意し、より詳細な検討に適用している。

シミュレーション実行状態のモデルは、Fig.7に示すように、PTのモデルを中心に据え、操作モデルと評価モデルを接続する。エンジンとATの因子演算部には、それぞれの制御がモデル化され接続される。操作モデルは、データ化された試験標準に従って、試験条件やドライバ操作をPTの各モデルに入力する。ドライバのスロットルおよびブレーキ操作は、時系列データとして与える他、あらかじめ与えた目標速度に自動追従する機能によって計算させる。後者を特にドライバモデルと呼んでいる。また、シミュレーション実行中にリアルタイムで任意な操作を直接入力する機能も用意している。評価モデルは、観測したモデルの状態量から評価基準に基づいて良否を判定する。このように、開発対象のモデルと試験標準とを分離することに

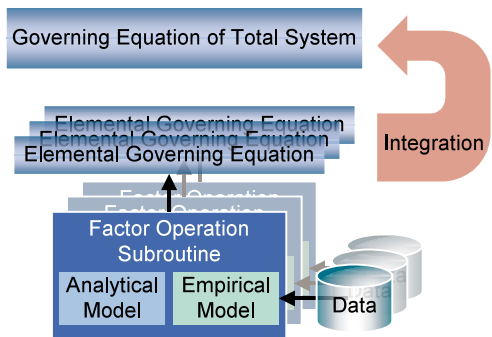


Fig.5 Construction of Simulation Models

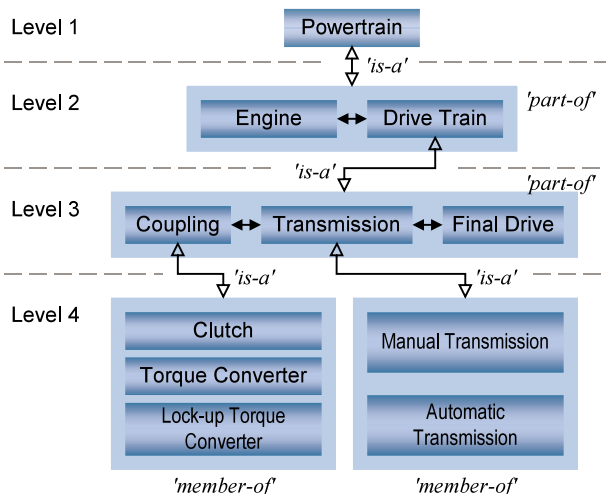


Fig.6 Functional Deployment of Powertrain

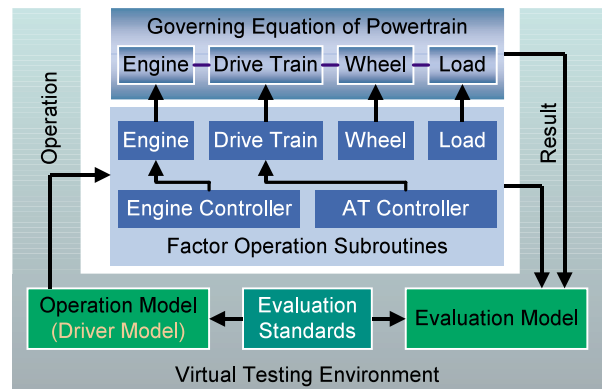


Fig.7 Powertrain Model

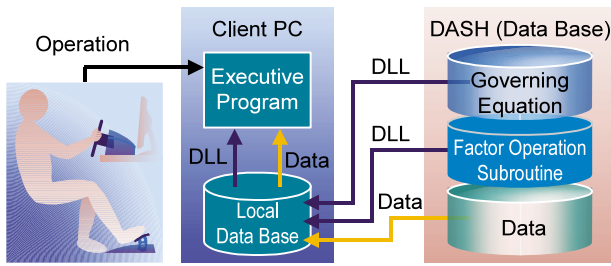


Fig.8 Structure of PT-VTES

よって、後述する動力性能評価と燃費性能評価の事例のように、一つのモデルを用いて複数の試験を机上で実行することが可能となる。このことによって、数多くある試験の机上化を効率的に進められるだけでなく、試験ごとにモデルやデータの整合性を維持することも容易となる。

4.2 PT-VTESのシステム構成

Fig.8に、PT-VTESのシステム構成を示す。システムは、シミュレーション実行部とデータやシミュレーション手順を管理する運用管理部が中心にあり、モデルの支配方程式の定義・演算部と因子演算部がDLL (Dynamic Link Library)としてプログラム化され、実行部に組み込まれる。機構・構造の種別変更に対しては、これらのモデルDLLの組み合わせを変更することで容易に対応することができる。例えば、変速機ではMTやATに対応した因子演算部のDLLを組み込むことで、MTやAT搭載車としてシミュレーションを行うことができる。更に、そのDLLが用いるデータを車種に応じて変更して、任意の仮想車両を構築することができる。操作モデルについても同様にDLLとしてプログラム化し、試験標準に基づいてデータ化した操作条件を与える。また、シミュレーションにアクセル・ブレーキ・シフトレンジ操作などを任意に直接入力するために、操作入力デバイスの接続が可能となっている。

モデルDLLやデータ化された試験標準、特性データは、DASH (Data Analysis and Standardization Headquarters)と呼んでいるPT開発部門の基幹データベースシステムに蓄積して一元管理している。ユーザは必要なモデルとデータをDASHから選択・抽出して手元のパーソナルコンピュータ(PC)にダウンロードし、シミュレーションを実行できる。これによって、一元管理されたモデルとデータ、試験標準に基づいて、関連する部門の多数のユーザが、同時並行的に目標展開や実現手段の検討を行うことができる。

5. 適用事例

本章では、最上位階層である車両の性能目標を、エンジン特性や変速機ギヤ比そして制御のあり方など各PTユニットの目標に展開することを目的として行った、動力性能と燃費性能評価のシミュレーション事例を紹介する。

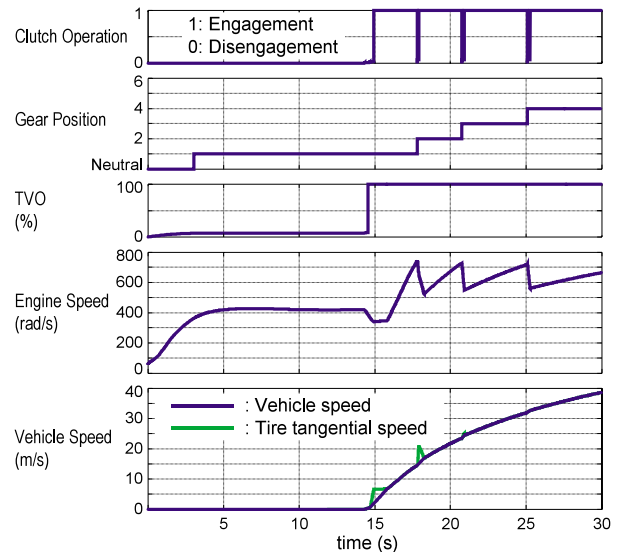


Fig.9 Simulation Result (Full Throttle Acceleration)

5.1 動力性能評価の机上試験

Fig.9は、車両の動力性能を評価する仮想試験の例で、車両は、排気量1.8L4気筒エンジンと6速手動変速機を搭載した乗用車を想定している。この試験は、停止状態で所定のエンジン回転数に維持し、クラッチを係合させると同時にスロットルを全開にして発進する。また、所定のエンジン回転で、スロットルを全開のままクラッチ操作と変速段目の切り替え操作を行い、変速する。計測項目は、一定の速度あるいは距離に到達するまでの所用時間である。

シミュレーションでは、上記スロットル操作 (TVO) およびブレーキ操作を時系列データとしてドライバモデルに与えた。また、変速を行うエンジン回転数を条件として与え、これに従いドライバモデルはFig.9の上から1および2段目に示すようにクラッチ操作と変速段目の切り替えを行っている。クラッチ操作は、1が係合を示している。Fig.9の下から1段目には車両速度と駆動輪接線方向速度を示している。これを見ると、車両走行速度よりも駆動輪の接線方向速度が高いところがあるが、これは駆動力が駆動輪の伝達できる力を越えたためにスリップしていることを表し、同様の現象は実車試験でも確認されている。

5.2 燃費性能評価の机上試験

Fig.10は10-15モードによって、2.3L4気筒エンジンと4速自動変速機を搭載した乗用車の燃費評価をシミュレーションで行った例である。モデルは全開加速試験と同一で、変速機の因子演算部をAT用に交換し、AT制御モデルを接続し、各因子演算部に上記車両の特性データを与えた。また、ドライバモデルを目標車速追従用に交換した。Fig.10の最上段は、ドライバモデルの出力であるスロットル開度である。また、上から2段目には目標車速となる走行モードデータと仮想車両の速度が示されているが、両者はほぼ完全に重なっており、ドライバモデルが目標車速に対して正確

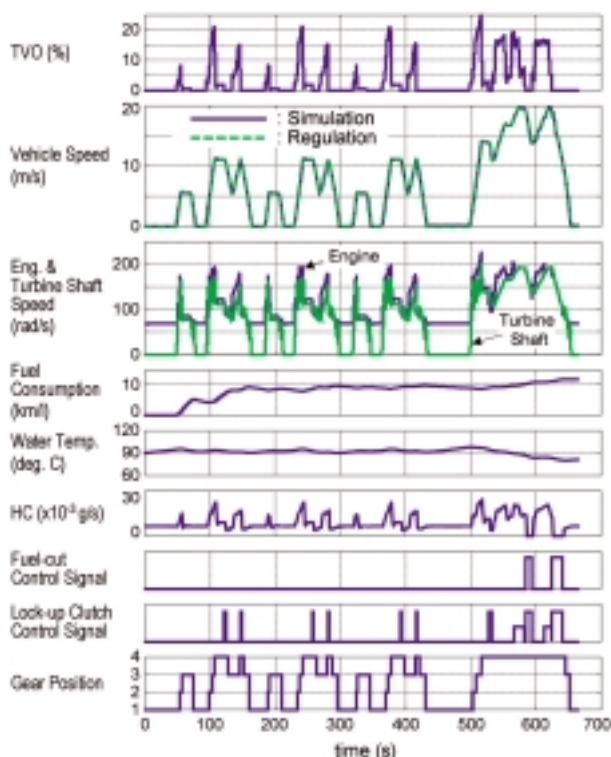


Fig.10 Simulation Result (10-15 Mode)

に追従していることがわかる。3段目は、エンジンとAT入力軸（タービンシャフト）の回転を示している。4段目は燃費率、5段目はエンジン内部の冷却水温度である。また、6段目はエミッションの計算例として、浄化前のHC排出量を1秒ごとの累積値として描いている。Fig.10の下から3段目はエンジン制御を観測した例で、燃費を向上させるために減速時に燃料噴射を停止する減速時燃料カット信号を示している。また、下から2段目と1段目はそれぞれロックアップクラッチを操作するAT制御信号と変速段である。この例からわかるように、各ユニットの制御が相互に与える影響を考慮したシミュレーションが可能となっている。また、燃費率・動力性能の誤差は、数パーセントに止まることが実車テストで検証されている。

以上の例から理解できるように、PT-VTESでは共通のモデルとデータそして実車試験に準じた標準を用いることで、評価項目間やモデルと実車間の一貫性を維持して、車両やユニットの性能・機能を効率的に検討することができる。

6. 適用領域の拡大

PT-VTESのモデル構造は、安定性や実行速度・モデル化の容易さなどの面で、集中定数系の非線形シミュレーションとして優れた特徴を有しており、様々な領域への展開が期待できる。特に、開発後期に試作ユニットや試作車によって行われる評価は構想設計と表裏の関係にあり、これらを机上化するための有効なモデル化手法と考える。例えば、市場における一般ユーザの様々な操作を網羅した包括的評

価は膨大な資源と時間を要し、机上化の必要性が高い。また、制御系開発の領域において適用が広がりつつあるHILS (Hardware in the Loop Simulation) や制御系開発の標準的ツールと位置付けられているSimulinkと連携させることで、車両・ユニットの特質や市場での使われ方をより深く考慮した制御の検討が可能となると考える。このように、適用場面の拡大や他のツールとの連携を進めることにより、開発プロセス全体で活用できるCAEとして発展させていきたいと考える。

7. おわりに

PTの構想設計を支援するCAEとして開発した、PT-VTESの基本概念とシステム構成、適用事例について述べた。

最後に、当システムの開発にご協力を頂いたキャテック(株)、技術・理論面でご指導頂いた角田鎮男工学博士、長松昭男法政大学教授に感謝の意を表す。

参考文献

- (1) 新見：製造業のデジタル革新，マツダ技報，No.18，pp.3-7（2000）
- (2) 長松ほか：自動車開発のための仮想製品の概念と運用，日本機械学会論文集（C編），Vol.69，No.678，pp.356-368（2003）
- (3) TQM委員会：TQM-21世紀の総合「質」経営，東京，日科技連出版社（1998）
- (4) 近藤：システム工学，東京，丸善（1981）
- (5) Arthur D.Hall：システム工学方法論，東京，共立出版（1969）
- (6) D. W. Embleyほか：オブジェクト指向システム分析，東京，東京電機大学出版局（1993）

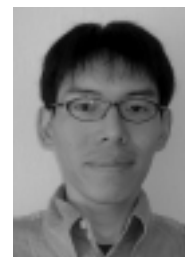
著者



平松繁喜



百田浩一



小森 賢



徳光文広



城谷佳孝



村井亜樹

特集 : Virtual Testing

11

AT制御系のVirtual Testing技術の紹介

Introduction of Virtual Testing Technology of Automatic Transmission Control System

小 森 賢*¹ 鎌 田 真 也*² 澤 研 司*³
Satoshi Komori Shinya Kamada Kenji Sawa

要 約

近年、オートマチックトランスミッション車の販売比率は高まる一方であり、それに伴いシフトクオリティ、燃費・環境性能の向上など、お客様からの様々な要望に高度に応えていく必要がある。そこで、より緻密な制御を実現し、更に開発期間や費用を抑制するために、PT-VTES (PowerTrain Virtual Testing and Evaluation System) と呼ぶ、いくつかのVirtual Testing技術を開発した。従来実機が必要だった試験を、制御ソフトウェア開発の段階で先取りすることで、大幅な効率化を図ることが出来た。

Summary

In recent years when the selling ratio of automatic transmission vehicles has been rising steadily, we should highly meet various needs from customers, such as improvements in shift quality, fuel consumption and environmental performance. Therefore, in order to realize more precise control and further to keep development period short and to keep cost low, we have developed some virtual testing technologies called PT-VTES (PowerTrain Virtual Testing and Evaluation System), which has enabled us to previously implementing PT testing without need for a unit system, which had been conventionally required, in the control software development phase, thus having achieved substantially high efficiency.

1. はじめに

乗用車においてオートマチックトランスミッション(以下AT)の採用比率は高まる一方である。これに伴い、シフトクオリティに対するお客様の要求は高度化しており、また環境・燃費性能の向上など車両全体に対する要求にATも貢献していく必要がある。

これら多岐に渡る要求に応えていくため、制御系にはより緻密なコントロールが求められてきており、いかなる状況下においても最適な性能を引き出す必要から、電子制御のソフトウェア容量は増大し続けている (Fig.1)。

ソフトウェア容量の増大に伴い、制御系開発にかかる期間・工数も増大していくため、いかに短時間で効率よく、

かつ品質良く開発を行うかがキーとなる。

一般に制御系開発では、制御ソフトウェア作成段階で、まず基本アルゴリズム作成、更に詳細なアルゴリズム作成、そして検証を行った後、出図する。そしてハードウェアコントローラの試作を経て、ハードウェア完成後は、ユニット評価 実車評価 実車総合評価の順をたどる (Fig.2)。

この過程において、制御ソフトウェアの動作品質確認を、ハードウェア完成後に抜け・漏れなく行っていくには、ありとあらゆる状況を考慮すると多大の期間が必要になる。そこで、実機を用いたテストと同様の評価を、制御ソフトウェアの作成段階で先取りし、開発期間の短縮と品質の向上を図ることを考えた。

まずこのような技術を実現するため、AT制御ソフトウ

*1 第3エンジン開発部
Engine Development Dept. No.3

*2, 3 ドライブトレイン開発部
Drivetrain Development Dept.

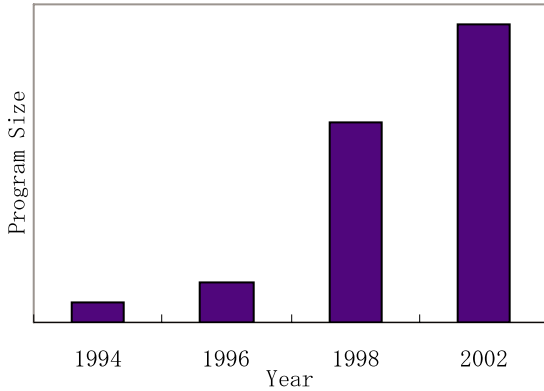


Fig.1 Increase of Program Size

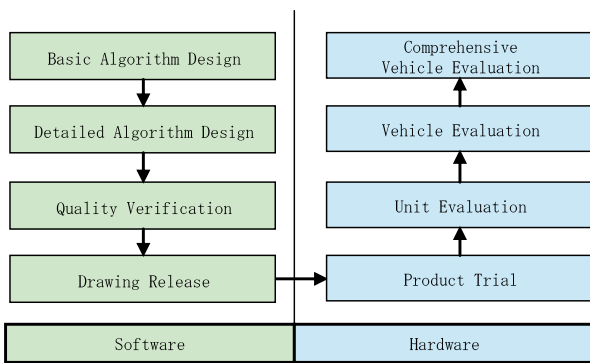


Fig.2 Control Algorithm Development Process

エアはプログラマブルな言語で記述し、記述したアルゴリズムをコンピュータ上で実行可能なプログラムに即変換出来るようにした。

そして実際にソフトウェア開発段階で利用可能なシミュレーションシステムPT-VTESを開発し、実機評価と同等の試験を机上で再現可能とした。また、これらの技術を実際の量産開発で適用し、大きな効果を上げることが出来た。以下の章で、制御ソフトウェア開発各段階におけるVirtual Testing技術の詳細を述べる。

2. 基本アルゴリズム作成段階

2.1 概要

この段階では、アルゴリズムを頭で考えながら具体化していく作業を行う。この際に試行錯誤を行うことになるが、作成したアルゴリズムが意図した通りに動いているかどうかは、従来一通りの作業を行った後にPCM (Powertrain Control Module) と呼ばれるハードウェアの試作を待たなければならず、万が一意図通りに作動しない部分があった場合には、期間的なロスが大きかった。

そこで、自分の作成したアルゴリズムが意図通りに動作しているかをすぐさま確認出来るシステムを作成した。その概要をFig.3に示す。

2.2 モデル技術内容

アルゴリズム作成者が実際に自らアクセルやブレーキ操作を行い、自分の作成したアルゴリズムの条件を満たす運転をリアルタイムで行いながら、動作の正常・異常を判定出来るシステムとしている。

ここでは、実車における操作フィーリングに合わせるため、リアルタイムで動作させることを優先させ、車両のハードウェアモデルは簡易的なものとした。また、リアルタイムゆえに、細かい動作を見落とす可能性があるが、アルゴリズムに使用している任意の変数を観測・記録出来るようなシステムとすることで見落としを防止している。

また、アクセルやブレーキ、シフトレバーなどの操作は、マウスによる入力に加えて、アクセル、ブレーキについてはゲーム用として使われている機器を、シフトレバーについては実機のレバーをそのまま使用した (Fig.4)。これにより実際の車を運転するような自然な操作で、アルゴリズム作成者が入力を行えるようになった。

以上の機能の実現により、基本アルゴリズム作成という開発初期段階から、実車やユニット評価同様の動作品質検証を同時に実施出来るため、品質の高いソフトウェアの作成が可能となった。

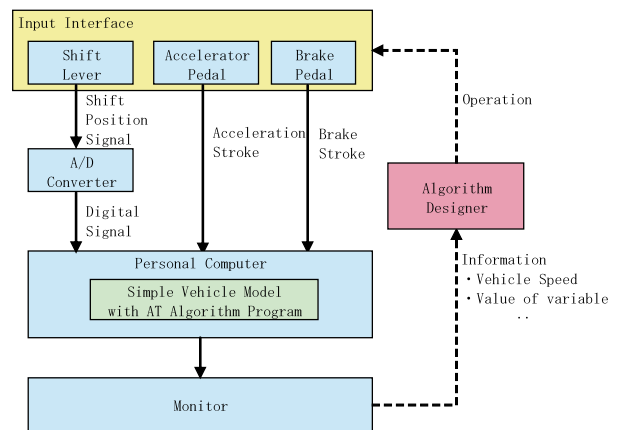


Fig.3 System Configuration in Basic Algorithm Design Phase



Fig.4 Input Device of Operation

3. 詳細アルゴリズム作成段階

3.1 概要

基本アルゴリズム作成段階で全体の概要が固まった後に、詳細にアルゴリズムを検討していく。現在のAT制御は、燃費や走りの要求に応えるために様々なアルゴリズムが追加されている。代表的なものとして、スロープ制御がある。これは、スロットル開度と車両の加速度などから道路勾配を推定し、降坂路ではエンジブレーキを利かせるため、登坂路では不要な変速を抑えるためにギヤを最適に選択するものである。

このアルゴリズム開発においては、アルゴリズムの変更前後で、より自然なギヤ段を選択したか、不要な変速が発生していないか、などを比較評価することになる。この場合、確実に意図する車速をトレースする操作を行う必要があるが、基本アルゴリズム作成段階で使用したようなシステムで人間が直接操作すると、操作にばらつきが生じるために、比較が出来なくなる懸念がある。

そこで、目標となる車速を自動的に追従するように、人間の動きを模擬するドライバモデルを作成し、純粹にアルゴリズムの変更による差を検証出来るようにした。

3.2 モデル技術内容

全体の構成をFig.5に示す。

まず入力となる路面勾配と目標車速は、実車で計測を行ったデータを使用した (Fig.6)。また車両のハードウェアモデルは、ギヤ段の変化そのものが判別出来れば良いため、簡易的なものとし、計算スピードを優先させた。そして、ドライバモデルと呼ぶ、人間の代わりとなってアクセルやブレーキを自動的に計算するモデルを作成した。これは、目標車速を追従させるため、目標車速と実際に計算された車速との差を最小にするようにアクセルやブレーキの操作を与えるアルゴリズムで実現している。

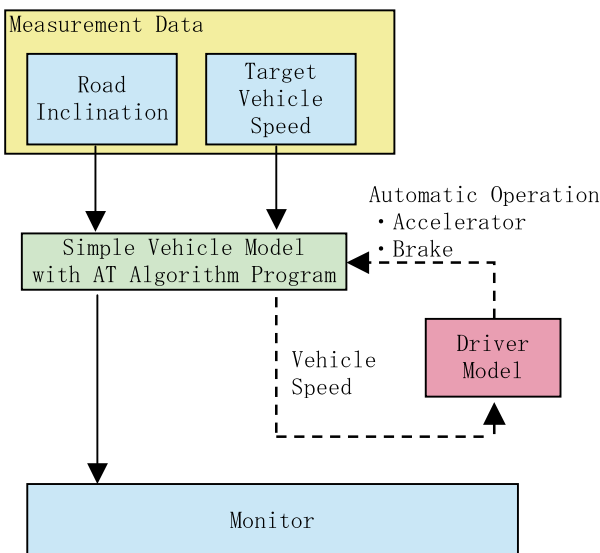


Fig.5 System Configuration in Detailed Algorithm Design Phase

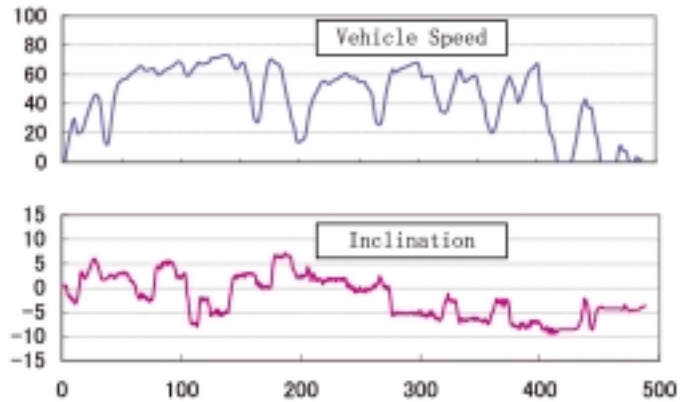


Fig.6 Field Statement

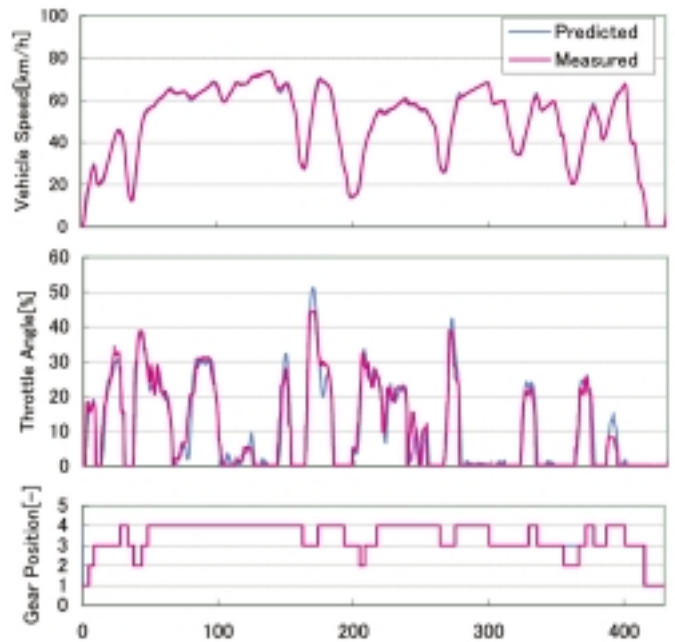


Fig.7 Verification Result

適用結果をFig.7に示す。実車のギヤ段位と予測結果のギヤ段位がほぼ同じになることが確認出来た。

これにより、世界中のあらゆる路面状況と走り方を一度データ化しておけば、机上にて最適なアルゴリズムを検討出来るようになった。また当技術を活かして、アルゴリズム開発だけでなく、エンジン機種の違いによるラフな制御定数セッティングやシフトパターンの検討などへの応用も可能になった。

4. 出図前検証段階

4.1 概要

ATをコントロールする制御系は、実際にお客様が運転される様々な運転シーンに対応しておく必要があり、最終的にはありとあらゆるシーンを想定した総合評価を実車で行うことになる。この中には、ドライバの意図が変速途中に変わり、変速動作中に目標とするギヤ段が変化する場合も含まれ、これをチェンジマインドモードと呼ぶ。例えば、ドライバが追い抜きをしようとアクセルを踏み込んだが、対向車が見えたためにアクセルを戻した場合などに発生する。

Fig.8は一般道走行中の変速パターンを調べたものである⁽¹⁾。チェンジマインドシフトの頻度はそれほど多くはないが、どのような使われ方をされた場合でも常に滑らか、かつレスポンスの良い変速を実現する必要がある。

前述の通り、最終的には実車を用いて総合評価を行うが、アルゴリズム作成時点でこれらのシーンで問題が発生しないかどうかを把握出来れば、アルゴリズムの修正が早期に行えるようになる。

そこで、シフトパターンを基にあらゆる走行パターンを作り出すドライバモデルを作成し、机上にて総合評価を実施可能にした。

4.2 モデル技術内容

Fig.9に全体の構成を示す。

チェンジマインドモードにおいては変速の過渡状態を厳密に再現する必要があるため、実際のハードウェアを詳細に再現した車両モデルを作成した。またドライバモデルは、シフトパターンを探索し、時系列のアクセル操作を入力データとして与える役割を果たす。探索の例をFig.10に示す。この例では、ギヤ段位を4速 3速 4速と変化させているものである。

実際には、狙いとするギヤ段の変化を実現するアクセル操作量を数水準、また、アクセル操作の時間も数水準変化させるようにした (Fig.11)。これにより、ありとあらゆる変速パターンを網羅するアクセル操作パターンを作り出している。

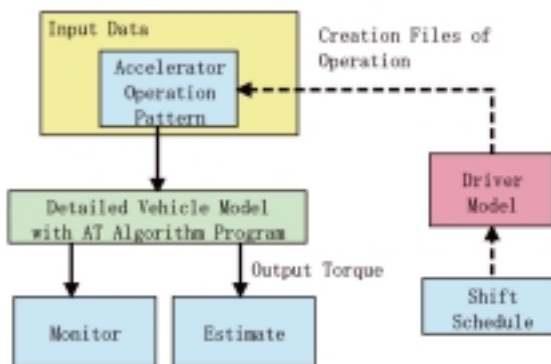


Fig.9 System Configuration in Quality Verification Phase

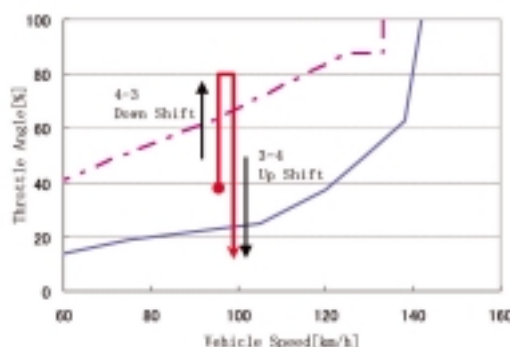


Fig.10 Example of Throttle Operation

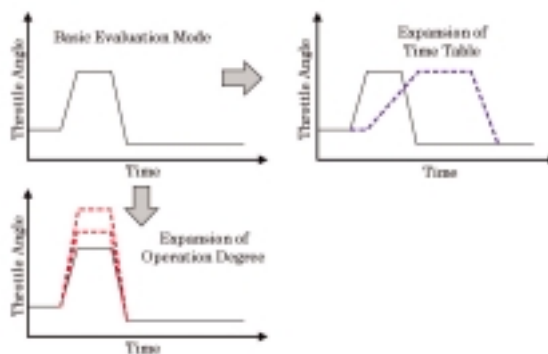


Fig.11 Expansions of Throttle Operation Pattern

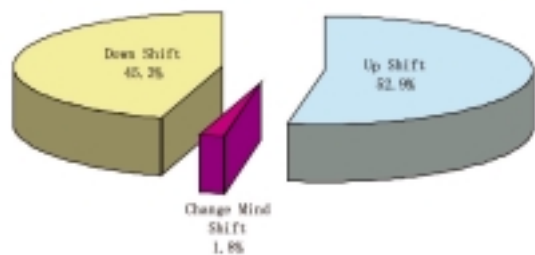


Fig.8 Frequency Analysis of the Shift Change in Customer Driving

また、この水準数を拡大すればするほど、評価する予測結果の数も増加するため、予測結果の良否を判断するために評価モデルも作成した。これは、トランスミッション出口の軸トルクの大きさを基に判断を行うようにした。評価結果の例をFig.12に示す。

これらの機能の実現により、実車での評価以上に広範囲のチェンジマインドモードを机上にて検証出来るようになり、制御ソフトウェアの品質を高めた上で出図を行うことが出来るようになった。

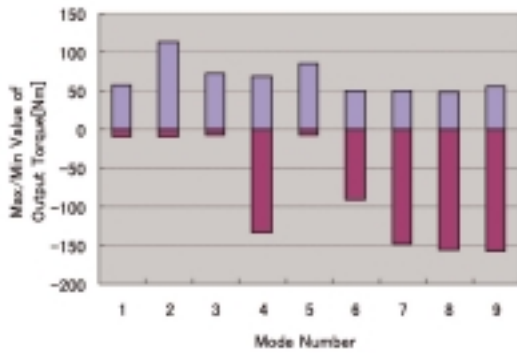


Fig.12 Example of Estimation Result

5. まとめ

以上の技術の関係を整理した (Table 1)。目的に応じて、ドライバモデルを変更しているのが特徴である。

これらの技術を開発したことで、お客様のあらゆる使われ方や環境をVirtual化し、これまで実機でしか行えなかった評価を、開発の初期段階から机上で行えるようになった。結果として、より緻密な制御アルゴリズムの構築を効率よく実施出来、品質を高めることが出来た。

6. おわりに

自動車に求められる機能はますます高度化してきており、エンジニアはこれらの要求に誠実に応えていくべく開発に取り組んでいる。その一方で、リーズナブルな価格で価値を提供していくことも社会からの要求であり、これらを高バランスで実現していく必要がある。今後もますますVirtual Testingのような技術をとどまることなく進化させ続けることで、お客様のニーズを満足する商品を提供していきたい。

最後に、当技術の開発に際してご協力並びにご支援いただいた社内外の関係者の皆様、特に基本アルゴリズム作成段階におけるリアルタイムシステムの開発にご協力いただいたCATEC(株)に感謝の意を表します。

Table 1 Comparison of Driver Model

| Application Phase | Type of Driver Model |
|---------------------------|---|
| Basic Algorithm Design | Real-time Input by Designer |
| Detailed Algorithm Design | Automatic Vehicle Speed Trace |
| Quality Verification | Automatic Creation before Calculation Execution |

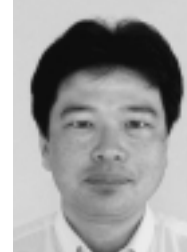
参考文献

- (1) 鎌田, 中山, 中野: 新型ファミリア用ATの電子制御開発について, 自動車技術会シンポジウムテキスト, No.9806, p.8-12 (1998)

著者



小森 賢



鎌田真也



澤 研司

特集：アクセラ

12

アクセラの紹介 Introduction of Axela

谷岡 彰^{*1} 久保田 聡^{*2}
Akira Tanioka Satoshi Kubota

要約

コンパクトカー（以下Cカー）は世界各市場で強力な競合車がひしめく最激戦区である。アクセラは、Ford・Volvo・Mazdaの三社共同開発によるプラットフォームを用い、世界のCカー市場で競合できる「お客様の期待を超える」商品とすることを狙った。そのため、際立つデザイン、運転する楽しみを実現するダイナミクス、高品質な仕上げとクラフトマンシップ、最適なパッケージ、安全・環境への配慮の五つのキーワードに基づいて開発を行い、アテンザからデミオ、RX-8に至るマツダ新世代商品群で築いたマツダDNAを明確に体現する商品として育成した。

Summary

The C-segment market is a fierce arena packed with strongest competitions throughout the world. To prevail against such rivals, the new Axela employed the platform jointly engineered among Ford, Volvo and Mazda, with an aim to deliver a product that “exceeds customer’s expectation”. The product development of Axela is based on five key values: distinctive styling, dynamics that offers driving pleasure, high quality finish and craftsmanship, smart and passenger-oriented packaging, and careful attention to safety and environmental compatibilities. The Axela clearly expresses Mazda Brand DNA that has been established by Mazda’s new-generation products-Atenza, New Demio and Mazda RX-8.

1. はじめに

アクセラは、アテンザ以降の次世代商品群第四弾であり、アテンザ、デミオ、RX-8の美点を全て結集させた。すなわちスタイリッシュなデザイン、マツダDNAである走りと安全性、および最適なパッケージと使い勝手、これらを高い質感とともに具現化した。そのためにFord・Volvoとの共同開発によるプラットフォームを用い、世界の競合車と互角に渡り合えるグローバルなCカーとして開発・育成を行ってきた。

本稿では、商品コンセプトおよびデザインを含む、車両全体の概要を紹介する。

2. 商品コンセプト

アクセラの商品コンセプトは「Dynamic Sport Compact」であり、既存の国産車をはるかにしのぐ抜群のハンドリングと走行安定性、スポーティで質感の高いスタイリングと内装デザインを実現した。

このアクセラのお客様への提供価値は、次の五点である。

- ・躍動感溢れ、際立ったデザイン：一目見て人の気持ちを捉え、かつ何回見ても飽きがこない。
- ・ハイバランスな運転する楽しみ：ハンドルを握り運転を始めて直ぐに、期待通りのドライビングパフォーマンスの持ち主であることがわかる。
- ・高品質な仕上げ：一目で並みのCカーとは全く違う品質レベルであることがわかる。
- ・四人の大人に最適な室内空間：外観からは想像できない

*1, 2 第1プログラム開発推進室
Program Management Office No.1

ほど、車内空間は使い勝手が良い。

- ・安全・環境への配慮：先進の安全性を備え、環境との調和が取れている。

すなわちアクセラは、毎日のカーライフをエキサイティングに楽しむことができる、本物志向の商品である。

3. 車種構成と主要諸元

3.1 車種構成

ボデータイプは、4ドアセダン（アクセラ）とステーションワゴン（アクセラ・スポーツ）の二種類で、これに直列四気筒1.5L、2.0Lおよび2.3LのMZRエンジンを搭載する（Table 1）。

Table 1 Powertrain Lineup in Japan

| Drive | Engine | Transmission |
|-------|--------|---|
| FWD | 1.5L | Electronic-Controlled 4-Speed Automatic |
| | | 5-Speed Manual |
| | 2.0L | Electronic-Controlled 4-Speed Automatic |
| | | 5-Speed Manual |
| | 2.3L | Electronic-Controlled 4-Speed Automatic |
| | | 5-Speed Manual |

3.2 主要諸元

アクセラは高い運動性能と広い車内空間を実現するために、2,640mmのロングホイールベースと、フロント1,530mm、リア1,515mmのワイドなトレッド、1,465mmの高めの全高を採用した（Table 2）。

Table 2 Key Dimensions

| | 4dr Sedan | Station Wagon |
|-----------------------|---------------|---------------|
| Overall Length (mm) | 4485 (4540 *) | 4405 (4485 *) |
| Overall Width (mm) | 1745 | 1745 |
| Overall Height (mm) | 1465 | 1465 |
| Wheelbase (mm) | 2640 | 2640 |
| Tread Front/Rear (mm) | 1530/1515 | 1530/1515 |

* 23S Grade

4. アクセラの特徴

4.1 デザイン

世界のCカー群の中でもマツダらしさをアピールし、真に競合できるデザインを目指し、「エキサイティング&コンフォータブル」というデザインテーマに基づき開発を行った。

エクステリアは、「見た瞬間に運転する楽しさを感じ取ることができるエモーショナルでエキサイティングなスタイリング」を実現するために、ダイナミックなプロポーシ



Fig.1 Front Exterior Styling (Axela Sport)



Fig.2 Rear Exterior Styling (Axela Sport)



Fig.3 Front Exterior Styling (Axela)



Fig.4 Rear Exterior Styling (Axela)



Fig.5 Interior Styling

ョン、ソリッドなフォルム、メカニカルフィールなディテールの造形表現に注力した。(Fig.1-4)

インテリアは、スポーティエキサイトメントな表現、シンプルクリーンな快適空間、心地よいオリティフィールに注力し、「五感に訴えかける気持ちのよさと質感の高さ」を実現した(Fig.5)

4.2 ダイナミック性能

アクセラでは、狙ったラインを正確にトレースできる操安性とフラットでしっかりした乗り心地を高次元でバランスさせることを狙った。

(1) サスペンション

フロントはマクファーソンストラット形式で、ロアクロスメンバの4点ラバーマウントおよびロアアーム後ろ側に液体封入ブッシュを採用した。また、ダンパのピストン径を大径のものとし、トップマウントはダンパとスプリングの入力がそれぞれ並列にボデーに伝わる入力分離構造とし、優れた応答性を実現した(Fig.6)



Fig.6 Front Suspension



Fig.7 Rear Suspension

リアは新開発のマルチリンク形式としている。最適なキャンバコントロール、ロールセンター高、トーコントロールにより操縦安定性を向上させるとともに、各リンクのブッシュサイズの大型化により、乗り心地の向上とロードノイズの低減を図った。またスプリングとダンパを分離するレイアウトを採用し、広い荷室も確保した(Fig.7)

(2) ボデーストラクチャ

アクセラのボデーを開発するに当たっては、局部剛性、全体剛性の向上とボデー振動特性の改善に注力した。大型ストレート断面フロントサイドフレームをキャビンに強固に結合し、フロント部の曲げ剛性および捩り剛性を向上させている。またダッシュクロスメンバで左右のフロントサイドフレームを連結することで横方向の変形を抑制するとともに、フロントフロアトンネル下部に3本のメンバを装着し車体の捩り変形を抑制するなど、アンダーボデーの剛性を強化した。

アッパーボデーにおいても、サイドパネル内のテールードブランク工法による補強部材の採用や、リヤサスペンション取り付け部のガセット配置を行っている(Fig.8)

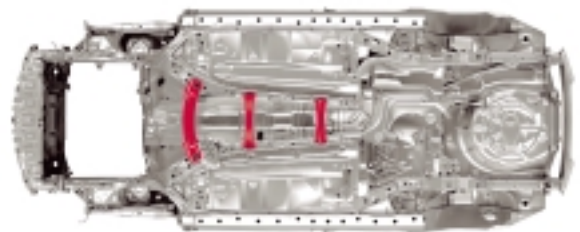
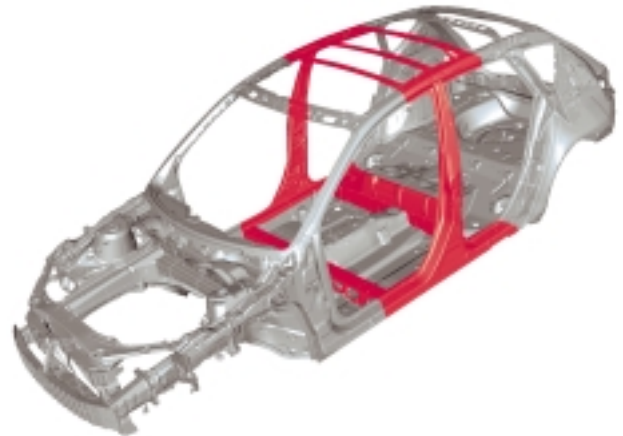


Fig.8 Body Structure



Fig.9 Power Steering System

(3) パワーステアリング

ステアリングには、油圧式と電動式の長所を兼ね合わせた電動ポンプ式油圧パワーステアリングシステムを採用した。様々な車速と操舵速度に対し正確できめ細かいアシスト力の制御が可能となり、リニアでしっかりしたステアリングフィールを実現した。また、パワーアシストが不要なアイドリング時にポンプ作動を低減させることができるため、低燃費にも貢献している (Fig.9)。

(4) パワートレイン

エンジンは、アテンザ、デミオで好評を博したトルクフルなMZRエンジンを更に熟成して搭載した。アルミシリンダブロックや軽量ピストン、コンロッド採用に伴うクラック支持剛性の向上を行い、また2.3Lではバランスシャフトの採用により、振動/騒音の低減を実現した。また吸気側S-VT (Sequential Valve Timing, 1.5Lおよび2.3Lに適用)、VIS (Variable Induction System)、等長ロング吸気マニフォールドおよびステンレス製等長ロングブランチ排気マニフォールドなどを採用し、高い充填効率達成による全回転域での高トルク化を図った。更にTSCV (Tumble Swirl Control Valve) により、冷間時および低負荷時の燃焼を安定化させ、クリーンな排気と高出力を両立させた (Fig.10)。

トランスミッションは、ATは全車アクティブマチックとすることにより運転する楽しさを実現するとともに、変速応答性やスロープ制御のチューニングを実施し、運転者の感性により近い味付けとした。MTでは、ケーブルシフト化により振動改善を図るとともに、二重構造のディテントボール採用とシンクロ機構の強化を行い、操作フィーリ



Fig.10 MZR Engine

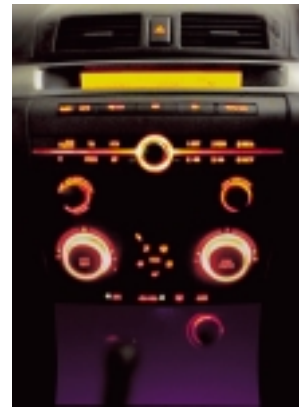


Fig.11 Customer Delight

ングを大幅に改善した。

(5) ブレーキ

全ての領域で競合車を上回り、応答が良くリニア、かつ抜群の安心感とコントロール性を発揮するブレーキを目指した。そのためにブレーキサイズとブースターを大型化し、制動力や応答性を向上させた。また、軽くペダルを踏んだときの遊びが少なく、コントロールしやすいリニアなペダルフィールも実現した。

4.3 クラフトマンシップ

マツダではアテンザ以降、造り込み (見映え、仕上げの良さ) および機能美 (操作性、操作感) に注力してきたが、アクセラではこれらに加え、操作の楽しさとエンターテイメントをお客様に提供するため、カスタマーデライトを取り入れた。例えば、オーディオスイッチの操作に合わせて変化する照明やイグニッション・オンに合わせてゆっくりと浮かび上がるブラックアウトメータを採用するなどしている (Fig.11)。

4.4 パッケージング

世界中のお客様の多様なニーズに応える空間を確保しながら、コンパクトなサイズと魅力的なスタイリングを両立するグローバルスタンダードパッケージを提供することを目指した。

まず広い室内を確保するために、ロングホイールベース、ワイドトレッドとし、立ち気味のタンブルホームと高めの全高を採用した。一方、ドアミラー間の寸法を国産Cカー競合車同等とし、また最小回転半径も国産Cカー平均レベルに抑えることにより、高い取り回し性も実現した。

運転席廻りでは、ステアリングの位置調整に従来のチルト (上下) 調整に加えテレスコピック機構 (前後調整) を

追加し、体格に適切な運転ポジションが取れるように配慮した。また、スイッチ類も位置や大きさの最適化を図り、人にやさしい操作性を実現している。

収納性では、大容量のグローブボックスや前席の蓋付きカップホルダ、前後席ドアのボトルホルダなど豊富な物入れを用意している。荷室についても、凹凸を極力排除した形状とするとともに、後席からアクセスできる開閉式トノカバーの採用など、使い勝手の向上に注力した。

4.5 安全性

マツダ独自のボデーコンセプト「MAGMA (Mazda Geometric Motion Absorption)」をベースとして、衝突時の衝撃エネルギーを車両全体に効果的に分散させる構造を取り入れた。まずフロント廻りでは、ヒンジピラー間にクロスカービームを設定するとともに、フロントサイドフレームに入った衝撃を外横方向、横方向、下方向に分散させる衝撃分散三叉構造を採用し、客室変形を抑えている。更に、高速衝突時にエンジン、サスペンションクロスメンバ、トランスミッションをボデーから離脱させることで、キャビンへの入力を低減した。またアッパーボデーには、高張力鋼板とテールロードブランクによる最適な補強を行っている。

安全装備面では、側面からの衝撃に対して前後席乗員の頭部を保護するように展開する「SRS (Supplemental Restraint System) カーテンエアバッグ」、更に「サイドエアバッグ」を加えた合計六つのエアバッグを設定した。その他にも、前面衝突時にステアリングコラムが水平移動する「衝撃吸収ステアリングシステム」、前面衝突時の積荷による後席乗員への傷害を最小化する「荷物侵入防止リヤシート構造」などを備えている。

また、緊急ブレーキ時にドライバによる踏み込みを補助する「ブレーキアシストシステム」を始めEBD (Electronic Brake-force Distribution)、DSC (Dynamic Stability Control) などの危険回避性能を支える制動制御システムに加え、前方と上方の照度を検知して点灯および消灯をコントロールする「オートライトシステム」や降雨状態を瞬時に判断する「レインセンシングワイパー」も採用した。

4.6 環境への配慮

環境性能では、全車「超・低排出ガス」認定 (U-LEV: Ultra Low Emission Vehicle) に対応し、特に1.5L全車および2.0LのDSC付車は2010年燃費基準も達成し、平成15年度のグリーン税制にも適合している。

また、リサイクルしやすい熱可逆性樹脂の使用範囲を拡大し、フロアマットなど複合素材の分離や解体のしやすさも向上させるとともに、市場から回収した損傷バンパーをリサイクルしブラッシュシールドに再利用している。更に、ガソリンタンク、ハーネス、電着塗装などから鉛の使用を廃止し、環境負荷物質の削減にも配慮した。

5. おわりに

以上、アクセラの開発の狙いと商品概要について簡単に紹介した。詳細な内容については、各専門分野の別稿を参照いただければ幸いである。

アクセラは、世界各市場で最激戦区とされるCカークラスに投入される商品である。本稿執筆時点で既に、欧州カー・オブ・ザ・イヤーで新型ゴルフと並んで二位に入ったのを始め、カナダ、デンマーク、チェコおよびトルコなどの国々でカー・オブ・ザ・イヤーを獲得している。これは、開発の狙い通りの商品に育成できた証であると考えている。

著者



谷岡 彰



久保田 聡

特集：アクセラ

13

アクセラ / Mazda3のデザイン Design of Axela / Mazda3

鈴木 英樹*1

Hideki Suzuki

要約

アクセラ / Mazda3はマツダの中核をなすモデルであると同時に、アテンザ、新型デミオ、RX-8に続くマツダの次世代商品群の第4弾として、マツダが総力を結集し、開発したニューモデルである。デザイン開発では新たなコンパクトカー（以下、Cカー）の基準を示し、世界の競合と真っ向から勝負する“グローバル・コンパクト・スポーツ”を具現化すべく、世界にマツダらしさをアピールし、競合車に負けない独自の存在感を主張する個性的なエクステリアデザインと乗る人に運転する楽しさと五感に訴えかける心地良さを提供するインテリアデザインを追求し、その実現に取り組んだ。

Summary

Axela/Mazda3 is the fourth all-new Mazda developed core product following the success of Atenza, New Demio and RX-8, and sets a new global standard for compact cars (C Car) in design. In order to embody “Global, Compact, Sports” which directly confront the challenges of competitors, the Axela appeals a Mazda character to the world and pursues unique exterior design that shows strong presence as well as the interior design that provides excitement with comfort and appeals to all senses.

1. はじめに

アクセラは、アテンザ以降取り組んできたマツダのブランド強化戦略を継承し、従来のCカーの概念にとらわれない新しいマツダのCカーとして誕生した。世界の市場で競合する商品力とマツダの存在感をアピールする個性的なデザインの実現を目指したクルマである。あらゆる商品領域を平均的に満たし、没個性的になりがちなこのクラスにおいては明快な個性表現を目指した。マツダのデザインDNAを集大成し、世界のどのCカーにもないユニークなデザインテーマを創造することとトータルなデザインクオリティの高さを実現することを目標にデザイン開発に取り組んだ。

2. 世界のCカー市場

世界的に見るとCカーは最も生産台数が多いクラスであ

り、マツダのグローバル戦略の上で極めて重要なクラスである。欧州で年間生産台数の上位を誇る各メーカーの代表的5ドアハッチバックが主流の市場である。北米ではエントリークラスである。これまでセダンが主流のクラスであったが近年、プロテジェ5を皮切りに他のメーカーも5ドアを投入し、新しいトレンドを形成しつつある。日本を見るとCカー市場は縮小傾向にあるが、反面、欧州Cカーが輸入台数を拡大している。イスラエル、カナダ、オーストラリアなどもマツダにとっては日本以上にボリュームが大きい市場を形成している。更に、飛躍的な市場成長をしている中国でもこのクラスはエントリーカーとしての地位を築きつつある。

このように多様でグローバルなCカー市場の中で、マツダの存在感をアピールし、マツダのブランドを浸透させるコア車種として、明確にマツダの独自性を打ち出すデザイン戦略を決定した。

*1 デザイン戦略スタジオ
Design Strategic Studio

3. デザインミッション

このような世界のCカー市場の動向とマツダの商品戦略を踏まえ、アクセラのデザインのミッションを以下の3点に定めた。

- ・マツダのZoom-Zoomスピリットを表現し、アクセラの存在感をアピールするデザインの実現
- ・マツダデザインDNAの集約とアクセラ独自の個性の表現
- ・世界に通用する高いインテリアクオリティの実現

4. デザインコンセプト

これらのデザインミッションからアクセラのデザインコンセプトを“エキサイティング&コンフォータブル”とした。それは一目見た瞬間に、運転する楽しさを予感させ、クルマ本来の運転する楽しさを表現するとともにダイナミックな躍動感を感じるエクステリアデザインと、ドアを開けた瞬間に運転し、使うことが心地良い快適性、安心感を与えるインテリアデザインが一体となったトータルデザインを目指した。

同時にアクセラのデザインターゲットイメージを鮮明にするためのデザインポジショニングを設定し目標とした。従来のCカーや競合車と一線を画すマツダ独自のよりスポーティで個性的なデザインポジショニングとした。また、4ドアと5ドア、2つのボデータイプを設定し、それぞれ異なるポジションに置いた。詳細は後述するが、2つのボデータイプがそれぞれ主流となる市場に最適化したデザインを狙った。5ドアは欧州と日本をメイン市場とし、日本および欧州のライバルたちと真っ向から勝負する。北米ではプロテジェ5が先陣を切ったスポーツ5ドアハッチバックの新しい流れを更に強化することを狙った。4ドアはメイン市場である北米でマツダの個性をアピールし、確実にカスタマーの心を捉える。欧州と日本のCカー市場に対しては新しいセダンのスタイルで市場の活性化を図ることを狙った。我々はこのポジショニングをデザイン開発の一貫した指標とし、デザイン開発およびマーケティング戦略における構築のツールとしても活用した (Fig.1)。

5. エクステリアデザイン

エクステリアデザインのテーマは躍動感と力強さである。エモーション (豊かな感情表現)、ダイナミズム (明快な力強さ)、アスレティシズム (躍動感) の表現を通して、スポーツスピリットあふれるマツダのデザインDNAをより鮮明にするとともに、世界の市場で存在感をアピールする力強いスタイリングを追求した。具体的には以下の3点に注力しデザイン開発を進めた (Fig.2-4)。

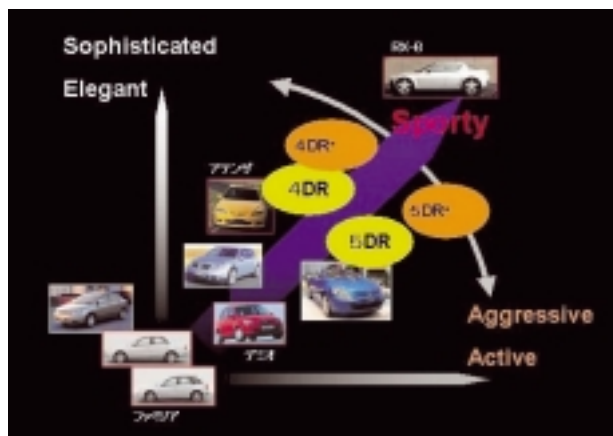


Fig.1 Design Positioning Map



Fig.2 Design Theme Sketch



Fig.3 5 Door Design Theme Model



Fig.4 4Door Design Theme Model

5.1 きびきびした躍動感の表現

従来のCカーよりサイドガラスを立てたアップライトなキャビンとフェンダの張り出しを強調したワイド感のあるボデーの構成とし、更に前後のオーバハングを短く見せることに注力し、タイト感あるプロポーションを基本骨格とした。また、シルエットやキャラクタライン、デーライト・オープニング(サイドウインドカット)等に流れるような動きを与え、きびきびした躍動感を表現した。静止した状態でも今にも動きそうな息吹やアスリートのような躍動感を感じるスタイルこそマツダデザインに共通するデザインDNAを表現したものである。

また、エクステリアからは想像できない、大人4人に快適なパッケージを持ちながらダイナミックなスタイリングを実現した点がアクセラの個性を特徴づけているといえる (Fig.5)



Fig.5 Design Development Sketch

5.2 力強さの表現

硬質、高密度感あるフォルムでどの市場環境でも負けない存在感をアピールする力強いアピランスを追求した。フロントデザインは前に向かって進む力強さを表現し、リヤ周りは鍛えぬかれたアスリートのような力強さを強調した。更にタイヤを最大限ボデーの外側に置き、ホイールアーチのクリアランスをミニマム化することで力強いボデーを支える足の強さを表現した。欧州のアウトバーンや広大な北米のフリーウェイで、また、煩雑な日本の環境の中でも埋没しない力強いスタイリングを追求した。

5.3 精緻感あるディテールデザイン

細部のデザインではヘッドライト、テールライトにシリンダ形状をモチーフにしたリングを配し、メカニカルで精緻な印象を与えるとともにエクステリアスタイルにアクセントを与えた。特に5ドア仕様に設定したLED採用のテールランプはモノトーンカラーでメカニカルフィールを更に強調したデザインとした。

これらディテールの造り込みは見る者にCカークラスとは思えない品質感を感じさせ、世界の競合に負けない品質が実現できたと考える (Fig.6)



Fig.6 Exterior Details

6. 2つのボデーデザインの特徴

先に述べたようにアクセラには2つのボデーを設定した。カスタマーのニーズおよび世界の市場に適したデザインを実現するため、5ドアと4ドアの2つのボデータイプでそれぞれの性格を明確に表現することを選択した。その結果、Bピラーから前のボデーやドアパネルは共有して異なるボデーを派生する一般的な手法を採らず、2つのボデーが100%異なるボデーを造り分ける手法を採用した (Fig.7, 8)

それぞれのボデータイプの特徴および個性の違いを顕著



Fig.7 5Door Production Design Model



Fig.8 4Door Production Design Model



Fig.9 5Door Sports Appearance Package



Fig.10 4Door Sports Appearance Package

に表すのがリヤ周りのデザインである。リヤクォータービューはドライバから他の車を見たときに最も目に触れるビューであり、マツダファミリーを強く主張するフロントデザインに対して、リヤビューはアクセラ独自の個性を最も表現する部分としてデザインした。5ドアは張り出しを強調したリヤフェンダとマッシュなりヤエンドの造形で安定感と先進性を強調し、4ドアはコンパクトなキャビンとハイ&ショートデッキでエレガントな造形の中に力強さを強調するクーベルッキングなスタイルとすることでそれぞれ独自のパーソナリティを表現している。また、2ボックスハッチバック、3ボックスセダンという異なるボデータイプそれぞれをベストなプロポーションに仕上げた。

7. スポーツ・アピアランス・パッケージ

5ドアと4ドアにはバンパ、ラジエータグリル、テールライトに専用のデザインを採用し、サイドスカートガーニッシュおよび体径の17インチホイールを与えたスポーツ・アピアランス・パッケージ（以下、SAP）と呼ぶスポーツ仕様を設定した。各専用パーツをボデーと一体化したデザインでアクセラの品質の高さと洗練されたスポーティイメージを強化するモデルと位置付けた（Fig.9, 10）。

8. インテリアデザイン

インテリアデザインは“スポーティエキサイトメントと心地良さの融合”をテーマとした。エクステリアと渾然一

体となり同じパーソナリティを表現することに努めると同時に高いインテリアデザインクオリティの実現を目指した。高いインテリアデザインクオリティの達成はグローバル戦略車として必須要件と考え、アクセラならではの味＝テイストを感じるものを目指した。単に部品の造り込みやフィット&フィニッシュの良さに留まらず、室内に座って感じる心地良さや運転操作する気持ちの良さなど、カスタマーの五感に訴えかける質感あるインテリアデザインを追求し、以下の5点に注力し開発を進めた（Fig.11, 12）。

8.1 スポーティエキサイトメントの表現

精悍な3眼メータ、3本スポークステアリング、ホールド性の良いシート、丸をモチーフにしたデザインエレメント、随所に配したメタルカラーパーツなどを採用し、スポーティで精緻なインテリア空間を表現した（Fig.13）。

8.2 シンプル&クリーンな室内空間

室内空間を構成する主要なインストルメントパネル、ドアトリム等は剛性感を感じるシンプルな面構成とした。また、全体にすっきりした印象を与えるために各部品のデザイン開発には細心の注意を払い、形、色、艶等全体のコーディネートを図ることで、シンプルでクリーンな室内空間を実現した（Fig.14）。

8.3 ストレスのない操作機能

アテンザ/Mazda6以降、取り組んできた各操作類とディスプレイ類のレイアウトの最適化を踏襲し、各操作類の機能を明快に表現するデザインを採用することで操作性の

よさを更に進化させた。センターパネルスイッチ類の優先順位に応じたサイズと位置の設定、機能を分離した3眼メータ、テレスコピックステアリングの採用、シフトストロークの縮小、等が具体例としてあげられる。また、クラフトマンシップ開発では各スイッチの操作時のストロークや操作音を造り込み、アビランスと気持ちよい操作感が協調した心地良さを追求した。

8.4 タッチ感の良い表面処理

インストルメントパネルおよびドアトリムのアップパー部分には幾何学パターン絞(表面のテクスチャ)を持つソフト素材をコーティングした。また、ドアトリムやコンソール等、体や手が直接触れる部分にはソフトな素材を採用し、

タッチ感とともに視覚的にもソフトな質感を与える表面処理を採用した (Fig.15)。

8.5 カスタマーデライトの追求

カスタマーデライトとはマツダが考えるインテリア質感作りこみの最も高いレベルの概念である。使う人に喜びや心地良い感覚を提供することを目標とするクラフトマンシップの思想である。アクセラのデザイン開発ではクラフトマンシップ開発と共同し、カスタマーデライトといえる品質の実現に取り組んだ。ブラックアウトメータ(一部車種に設定)はその具体例である。イグニッションのオン、オフでフェードするアンバーレッドの照明とブルーの間接照明のコンビネーションを採用した。また、オーディオコントロールスイッチに各スイッチのオンオフとシンクロして点灯する照明を採用した。これらのイルミネーションはスポーティな雰囲気表現するだけではなく、ソフトなムードを演出し、使う人に心地良さを与えることを意図したものである。また、操作する楽しさを提供するエンタテインメント性を持たせたものである (Fig.16)。

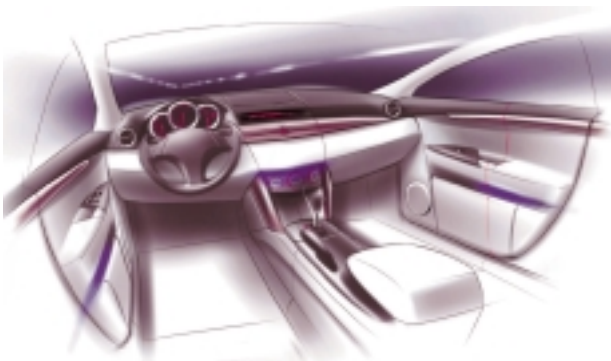


Fig.11 Interior Design Theme Sketch



Fig.12 Interior Design Theme Model



Fig.13 Instrument Panel



Fig.14 Interior Room



Fig.15 Surface Texture



Fig.16 Interior Illuminations

我々は“五感に気持ちの良い”コンセプトを具現化するデザインの実現を目指したが、以上述べたインテリアデザインの注力点を複合し、調和させることで初めてアクセラ独自のデザインクオリティと個性を持つインテリア空間が実現できたものとする。

ザインチームと、時に互いの主張をぶつけ合いながら、デザインをサポートしていただいた主査をはじめ、開発関係者にこの場をお借りして御礼申し上げます。

9. カラー&トリム

9.1 エクステリアカラー

アクセラ/Mazda3の内外装のカラーおよびトリムは各グレードの性格に対応したバリエーションを準備した。

エクステリアボデーカラーは全12色を設定した。

5ドアのイメージカラーはウイニングブルー・メタリック。フリップ&フロップを強調した鮮やかなブルーはソリッド感と力強さのあるフォルムとマッチし、5ドアのスポーティ、躍動感、若々しさを際立たせるカラーである。

4ドアのイメージカラーはチタニウム・グレー・メタリックとヴェロシティ・レッド。4ドアの持つ洗練さとエレガントなスポーティイメージにマッチしたボデーカラーである。

9.2 インテリアカラー&トリム

日本仕様を例にインテリアカラーとトリムを紹介する。全3種類のトリムを設定し、ユーザの嗜好に対応する個性表現を図った。

- (1) 23Sは最もスポーティなカラートリムとして、立体感のあるストライプパターンのファブリックを採用し、ピュアなスポーティイメージを表現した。レッド/ブルーのアクセントカラーを持つこのファブリックはスリットから光が漏れるイメージで開発したもので見る角度で表情が変わって見える狙いがある。
- (2) 20Cはブラックとベージュの内装色を基調に、ピアノブラック(光沢ブラック)のデコレーションパネルとソフトな質感を持つニットファブリックを採用した。スポーティイメージにエレガントなテイストを加味したトリムとして設定した。
- (3) 15Fはグレーの内装色を基調にカチツとしたウーヴンファブリックを採用し、軽快感と明るさのあるスポーティイメージを表現したトリムである。

10. おわりに

デザインは見る人にメッセージを送るインターフェイスであり、そのデザインから企業理念、経営戦略、商品の狙い、商品力などを感じ取るものである。アクセラのデザインを通して、マツダが目指した従来のCカーの概念を越える個性表現と品質の高さを実感していただけたと思う。そして、アクセラ開発にかけた開発陣の情熱は必ずお客様に感じてもらえると確信している。

終わりに、終始高いモチベーションを維持し、言い訳なしのデザインを目指してデザイン開発に取り組んできたデ

著者



鈴木英樹

特集：アクセラ

14

アクセラのパッケージング Package of Axela

中尾 浩 二^{*1} 長尾 冶 典^{*2} 佐賀 尚 人^{*3}
 Kouji Nakao Harunori Nagao Naoto Saga
 日 和 禎 二^{*4} 真 鍋 敏 之^{*5} 高 橋 克 征^{*6}
 Teiji Hiyori Toshiyuki Manabe Katsuyuki Takahashi

要 約

アクセラは、次世代のスポーツコンパクトカーを目指して新開発したもので、全ての領域でグローバルに通用する独自の価値を追求した。パッケージングにおいても、スポーティなスタイリングを実現しながら、世界中のユーザのニーズに対応できるグローバルスタンダードパッケージを目指した。

これを実現するために、以下に注力して開発した。

1. 実感できる使い勝手の良さを取り回しの良さ、すっきり感を実現したゆとりあるパッケージ
 - ・3ナンバーのワイドボデー、ロングホイールベース採用によるゆとりの空間
 - ・5ナンバー車と同等の取り回し性
 - ・最適な運転姿勢と優れたエルゴノミクス
 - ・使いやすく、すっきりした収納
 2. 従来のコンパクトカーを超えるエキサイティングで五感に心地よいクオリティ
 - ・センターパネルやメータ類のレイアウトなどにより優れた操作性や視認性を追求した機能美
 - ・ブルー間接照明付ブラックアウトメータ、オーディオ照明などのカスタマーデライト
- 本稿では、これらの特徴について紹介する。

Summary

Axela was newly developed, aiming to become an all-new sports compact car, and pursued unique values to be globally accepted in all areas. It also aimed to develop a global standard package, which realizes sporty styling, and satisfies all customer needs in the world.

To realize the above items, we focused on the following for the development:

1. Streamlined package with ease-of-use, good maneuverability, and ample interior space.
 - ・ Generous space, realized with wide body and long wheelbase.
 - ・ Exceptional maneuverability of the same performance level as 5-number cars.
 - ・ Optimum driving position and exceptional ergonomics.
 - ・ Ample and easy-to-use storage space.
2. Quality that surpasses the conventional compact car in terms of excitement and that is comfortable to the five senses.
 - ・ Pursued exceptional functionality with high operability and visibility, which can be achieved with center panel and instrumental layout.
 - ・ Customer delight, such as blackout type meters with indirect blue lighting and audio illumination.

This paper describes the above features.

*1, 2 企画設計部
Basic Design Dept.

*4~6 装備開発部
Interior Components Development Dept.

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

1. はじめに

アクセラは、グローバルな基準で開発されたワイドトレッド&ショートボデーで、既存の国産車をはるかにしのぐ抜群のハンドリングと走行安定性、卓越した安全性、スポーティで質感の高いスタイリング・内装デザインを目指した。パッケージングにおいても、グローバルに通用する従来のコンパクトカーの枠を超えた新基準の価値を目指した。

2. パッケージングの狙い

アクセラのパッケージングでは、躍動的で力強いスタイリングとともに、誰もが実感できるものを追求した。そのため、表面的なスペックにとらわれることなく、ゆとりある室内空間の確保から取り回しのしやすさ、荷物の積みやすさまで、多岐にわたった配慮を施した。

主な訴求ポイントは以下の点とした。

- (1) ゆとりある空間と取り回し性の両立
- (2) 優れたエルゴノミクス
- (3) 使い勝手の良い収納
- (4) 高品質な仕上げ、クラフトマンシップ

3. ゆとりある空間と取り回し性の両立

3.1 外観諸元とゆとりある空間

2,640mmのロングホイールベースと、フロントで1,530mmのワイドなトレッドを採用し、全幅で1,745mmのワイドボデーとした。更にサイドウインドの傾きをやや立たせ気味の約20°にして全高をやや高めの1,465mmとした (Fig.1)。

これらにより、ユーザの感度の高いショルダーク幅と後席膝前スペースについては、クラストップレベルのスペースを確保し、大人4人がゆとりをもって乗れる十分な室内空間を確保した (Fig.2)。

3.2 取り回し性への配慮

このクラスにとって重要なファクターである取り回し性については十分に配慮し、最小回転半径で同クラス5ナンバー車と同等の5.2mとした。これは、フロントサスペンションの各パーツの配置やワイドトレッド、ジオメトリの最適化によって実現した。更に、車両の実質の最大幅となるドアミラー間の寸法を同クラス5ナンバー車と同等の1,935mmに抑えた (Fig.1)。

これらにより、ワイドボデーながら優れた取り回し性を実現した。

4. 優れたエルゴノミクス

乗員空間は、大人4人がゆとりをもって乗れる空間を確保しながら、人にやさしい配慮が隅々にまで感じられるようにした。

4.1 誰にでも運転しやすいドライビングポジション

フロントヒップポイントをやや高めに設定し、乗降時の



Fig.1 Exterior Dimensions

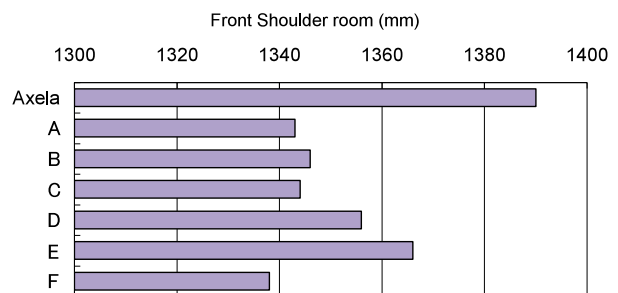


Fig.2 Interior Dimensions

筋負担を減らしてスムーズな乗り降りを実現するとともに、やや高めのアイポイントで前方視界も良くした。また、ステアリングを上下に調整できるチルト機構に加え、前後にも調整できるテレスコピック機能を追加した。更に前後で250mmのシートスライドと上下55mmのシートリフタという大きな調整幅を持たせるなど、さまざまな体格に対応できる多彩な調整が行えるようにした。これらにより、体格を問わず最適なドライビングポジションが得られるよう

にした (Fig.3)

4.2 操作のしやすさへの配慮

運転席のシートリフタは、ラチェットレバータイプとし (Fig.4)、シートスライドのレバーは、操作が容易なバータイプとするなど、簡単なレバー操作でシートを調整できるようにした。また、ハンドルから手を離さずにオーディオ操作ができるステアリングスイッチを設定した (Fig.5)。これには、夜間時イルミネーションを点灯させ、運転中の操作をより容易にした。

更に、パーキングブレーキレバーは、シフトレバー側方の前寄りに配置し、小柄なドライバがシートを前方にスライドさせた状態でもパーキングブレーキレバーを無理なく操作できるようにしたり (Fig.6)、クローブボックスリッドの開閉操作ノブ位置をドライバ側にオフセットして、ドライバからの操作にも配慮した。

4.3 疲れにくさと高いサポート性を両立したシート

アクセラのシートは、長時間走行時の疲労を軽減する姿勢の保持性と、ワインディング走行などでのホールド性の両立を狙って開発した。

(1) 長時間走行での姿勢の保持性

従来の「硬いシートの方が疲れにくい」という考え方にとらわれず、アクセラはソフト感を出しながら、疲れにくいものとした。そのために、広く体を支えて圧力を下げ、



Fig.3 Driving Position



Fig.4 Seat Lifter Lever



Fig.5 Steering Switch



Fig.6 Parking Lever

ソフト感があっても圧力の一部が抜けたり、強すぎたりしないことにも留意している。Fig.7は、ヨーロッパ車 (Seat A, B) との体圧分布の比較図である。アクセラのバックレストの体圧分布は、腰を中心にしっかりとかつ広く体を支えている。こうすれば、低い圧力でも適切な姿勢に保持でき、疲れにくい。シートAのように腰の下側で圧力の抜けが大きいと、小柄な人には腰の支持位置が高く感じられ、猫背となりやすい。また、シートBのように腰の圧力が狭い範囲で急激に高いと、長距離走行時に座面剛性が不足し、猫背になりやすい。これら猫背になる姿勢は、疲労の増加につながる。

次に、クッションの体圧分布であるが、坐骨を中心にしっかりと広く支えることを狙っている。シートAのようにシート座面上にデザイン上のキャラクターラインがあると、圧力が抜け異物感を与える。シートBでは、坐骨付近に比べて前端付近の圧力が若干高く、長時間走行では血流の悪化や圧痛の原因となる。

これに対しアクセラでは、全体に広く均等に圧力が分布しており、ソフトで疲れにくいシートになっていることが分かる。

(2) ワインディング走行でのホールド性

ホールド性では、ショルダースUPPORT部を決して窮屈にしないように適度なフィット感を与えつつ、ハード走行時

は十分なホールド性を発揮させることを狙った。そのために、シートバックのフレームは、サイド部を前方に盛り上げ、座面部を受けるスプリングは、ストロークするにつれて体を包み込むように設定した。ただし、腰位置のスプリングは姿勢支持をしっかり行うために、他のスプリングに比べて剛性を上げている。クッションは、尻形状に合わせたパンフレーム構造を採用し、座面のフィット感を向上させた。Fig.8は、同じ運転者が同じ速度で円回転をしたときのシートの体圧分布である。シートAやシートBに比べ、アクセラのシートでは運転者の背骨が曲がらず、かつシートのセンター付近にあり、コーナ内側の腰や尻の圧力が抜けていない。このことは回転時における姿勢が安定していることを示している。以上により、当初の狙いを実現できた。

5. 使い勝手の良い収納

5.1 使いやすくすっきりした室内収納機能

グローブボックスは、容量約8L、奥行き260mmで、A4の書類や2Lのペットボトルも収納できる大きなスペースを確保した。しかもリッド部には、CDケース16枚をすっきり収納できる容量約3.5Lの小物入れを設置した。これは、助手席前側に配置されていた空調ユニットを中央に集中させることにより可能となった。

また運転席と助手席の間には、内部を二層式とした大型のコンソールボックスを備え、上段のトレイには、折り畳み式ではない携帯電話も収納できるスペースを確保した。下段のボックス部は、約3.6Lの大容量を持ち、CDケースなら13枚を収納できるようにした (Fig.9)。その他大型コンソールボックスの前方には、LサイズとMサイズが置けるカップホルダを装備した。これは横開き式のリッド付で、使わない時のすっきり感を演出した (Fig.10)。

5.2 使い勝手を重視した荷室空間

リヤサスペンションのコイルスプリングをダンパと分離して床下に配置し (Fig.11)、左右サスペンションタワー間の幅をクラストップレベルの1,050mm確保した。これにより、サイドトリム部の張り出しが小さく、荷物を効率的に積み込めるワイドなラゲッジスペースを実現した。

5ドア車では、リヤシートバックを前方に倒すだけで、荷物を載せやすいフラットなフロアが実現できるものとした。更に、床下にカーケア用品などの収納に便利に使えるスペースを設け、脱着式のフレキシブルフロアボードと組み合わせることで、広いラゲッジスペースをよりすっきりと使いやすくアレンジすることができるようにした。このボードは二分割タイプで、前側のボードは荷室を上下に分割する棚として活用できるようにした。また後側のボードは、リバーシブルタイプで立てて荷室を仕切れば荷室の前後分割ができ、荷室の上下前後分割が可能である。この時、前側の荷室はシークレットボックスとしても使い、後側の

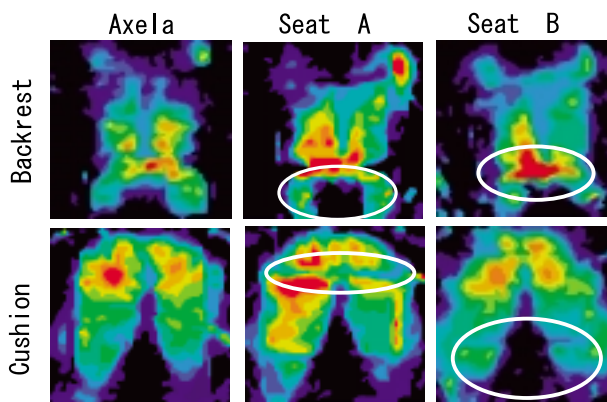


Fig.7 Seat Pressure Distribution in Long Hours Evaluation

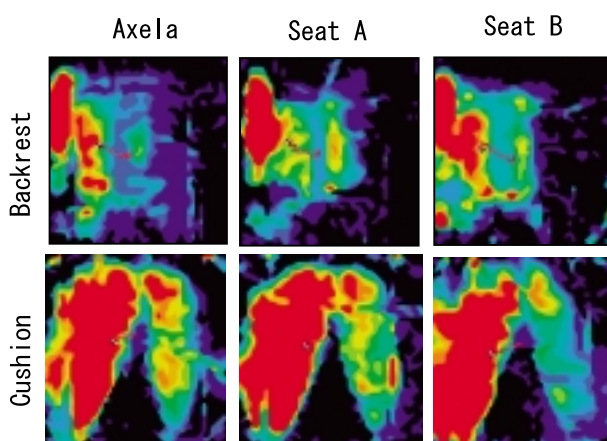


Fig.8 Seat Pressure Distribution at Maximum Lateral G



Fig.9 Console Box



Fig.10 Cup Holder



Fig.11 Rear Suspension

荷室は汚れ物を積載しても拭き取りが容易なものとした (Fig.12)

4ドア車では、トランクヒンジにダブルリンク式ヒンジを採用した (Fig.13)。これにより、リッドを開めたときにトランク内の無駄なスペースをなくすとともに、トランクヒンジが邪魔になることなく荷物が傷つきにくくなった。



Fig.12 5Door Trunk

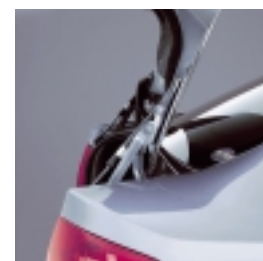


Fig.13 4Door Trunk Hinge

6. 高品質な仕上げ、クラフトマンシップ

6.1 品質感を上げる造り込み

アクセラでは、質感を向上させるために以下の3点をテーマに造り込みを行った。

(1) インパネ分割ラインの削減

インパネでは、レーザにより助手席エアバック展開ラインを加工するシームレスエアバックを採用した。また、グローブボックスの開口をインパネアッパーとロアの境目に合わせることを行い、グローブボックス専用の分割ラインを省いている。これらの手法を用いて、すっきりとしたT型インパネ本来のデザインを製品に生かすことができた (Fig.14)

(2) 内装部品の色・ツヤ・シボ合わせ

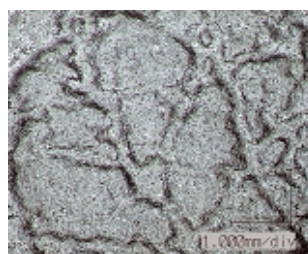
インパネの上面にTPO材 (サーモ・プラスチック・オレフィン) の表皮をPV法 (Pressure and vacuum) で貼り付けることにより、シボをデザインモデル並に再現し、同時に過剰な光沢を抑えて欧州車並の見た目の質感を出すことに成功した。Fig.15はシボ表面の拡大写真である。サンプルAは従来タイプのシボの一例で、ツヤが高く、質感があまり高く感じられなかった。アクセラでは、シボ表面や谷間に当たる部分を荒らし、射光を拡散させて、光沢を抑え質感を高く見せることを実現した。Fig.16にツヤのレベルと質感の関係を示す。サンプルAのシボに対し、アクセラのシボがツヤのレベルで約1/2、評価点では欧州車と同等以上の高得点になっていることが分かる。同様の低ツヤの表皮材はドアトリム上面にも採用し、インテリア全体に上質な統一感を持たせている。

(3) ドア開口部のポデー形状面の単純化

準外板面の育成は、バーチャル評価・育成を主体に行った。ドアの開閉機能に伴う制約条件をもとに、設計者が描いた図面をFig.17のようなバーチャル上で、開発・デザインがシンプルな面構成に修正していく手法をとった。また、ドアスイッチをラッチ部に取り込むことで、目に付く部品点数と取り付け形状を省き、よりすっきりとした見映えとした。



Fig.14 Instrument Panel Appearance



Sample A



Axela

Fig.15 Grain Surface

6.2 カスタマーデライト

マツダでは、新規性があり、お客様が見たり、触ったり、操作した時に驚いたり、喜んだりするものをカスタマーデライトと定義している。

アクセラでは、メータのブルー間接照明 (Fig.18) で雰囲気演出することに加え、オーディオの操作に連動して光が動くイルミネーションを採用した (Fig.19)

これは、オーディオの電源をONにすると光のバーが左右に伸び、OFFにすると中央に向かって光が消えていくもので、音量調整や選曲などのスイッチ操作にも連動している。これは、カスタマーデライトとしての演出だけでなく、スイッチ操作後の動作を認識する役目も兼ね備えている。通常スイッチ操作時は、アンサーバック音を発生させている。しかしオーディオスイッチは、選曲サーチのように長時間作動していることもあり、そうした場合の作動状況を確認することができるように、作動中は常に光が点燈して視覚認識が可能である。



Fig.18 Meter Illumination



Fig.19 Audio Illumination

Gloss Evaluation

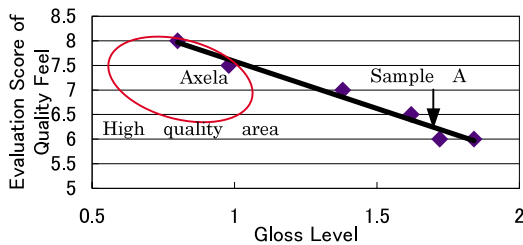


Fig.16 Gloss Evaluation

7. おわりに

アクセラのパッケージングは、デザイン・機能・品質を高いレベルで実現できたと考えている。この魅力は、お客様の期待を超えるものであり、使って頂いて必ず実感できるものと確信している。

著者



中尾浩二



長尾治典



佐賀尚人



日和禎二



真鍋敏之



高橋克征

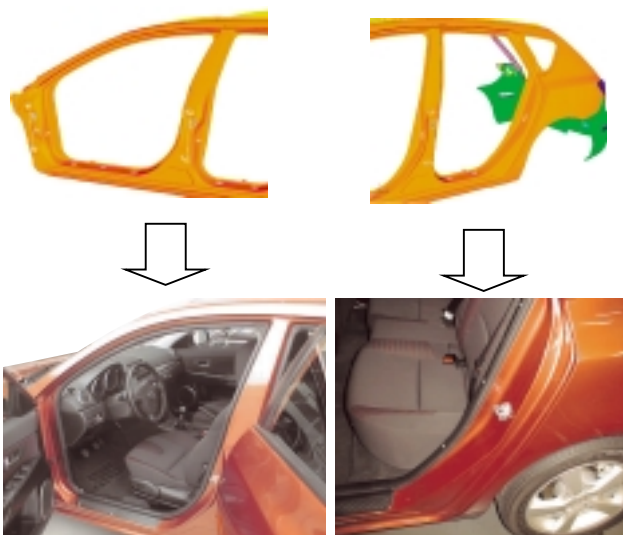


Fig.17 Virtual Evaluation

特集：アクセラ

15

アクセラのダイナミクス性能 Dynamics of Axela

和田 仁法*1 渡邊 雅哉*2 熊田 拓佳*3
 Hitonori Wada Masaya Watanabe Hiroyoshi Kumada
 高橋 宏行*4 林 義博*5 飯田 英一朗*6
 Hiroyuki Takahashi Yoshihiro Hayashi Eiichiro Iida

要 約

クラスを超えた、より高いレベルの「運転する楽しみ」を提供するため、優れたダイナミクスを実現するシャシー（サスペンション、ステアリング、ブレーキ）とボデーを開発した。

サスペンションは、フロントには液体封入式ブッシュなどを採用したマクファーソンストラット、リヤにはE型マルチリンク式サスペンションを採用し、操縦安定性と乗り心地、振動・騒音を高度にバランスさせた。ステアリングには、電動ポンプ式油圧パワーステアリングを採用し、優れた操舵フィールと低燃費を両立した。ブレーキでは、大径ブースターの採用やマスターシリンダのロストラベルの低減などによりクラストップの制動距離と優れたフィーリングを実現した。ボデーは、フレームやクロスメンバなどの大断面化やストレート化などによりボデー全体の曲げ剛性やねじり剛性を高めるとともに、局部剛性の向上にも取り組み、卓越した高剛性ボデーを実現した。

Summary

The chassis, or suspension, steering and brakes, and body used in Axela have enabled outstanding dynamics performance, which delivers superior “driving pleasure” far beyond the segment standard.

The suspension system accomplishes well-balanced performances of handling, ride comfort, and vibration/noise by adopting MacPherson strut with liquid-filled bushings for the front, and E-type multi link suspension for the rear. The steering system provides an excellent steering feel and high fuel efficiency by adopting a power-assist system equipped with an electric motor pump. The brake system accomplishes a best-in-class braking distance and an unparalleled brake feel by adopting a large-diameter booster and reducing the travel loss of a master cylinder. The body structure surpasses competitors in local body stiffness as well as global stiffness against bending and torsion by adopting the large cross-sections and straight structures of cross-members and frames.

1. はじめに

アクセラでは、コンパクトカーの常識を超える「運転する楽しみ」を提供するため、次のターゲットに取り組んだ。

操縦安定性

- ・リニアで俊敏な操縦性
- ・高速までドライバが安心して運転できる安定性

乗り心地

- ・剛性感のある、不快なゴツゴツ感を抑えた乗り心地

制動性能

- ・リニアで応答に優れた信頼感あるブレーキ性能
- ・クラストップレベルの制動距離

静粛性

- ・ロードノイズの大幅な低減

これらを実現するため、クラスを超えたプラットフォームを開発した。

本稿では開発したシャシーとボデーに関する、開発の狙い、構造と特徴、達成性能について紹介する。

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

*3, 4 シャシー開発部
Chassis Development Dept.

*5 NVH性能開発部
NVH Development Dept.

*6 ボデー開発部
Body Development Dept.

2. シャシー

2.1 サスペンション・ステアリング

(1) 開発の狙い

サスペンション・ステアリングについては、ハンドル操作に対するリニアで俊敏な車両の応答を達成し、かつ、快適で優れた安定性を実現するため、次の項目に注力した。

- ジオメトリ/コンプライアンス特性の最適化
- サスペンション取付部の高剛性化
- ボデーへの振動入力の高減

(2) 構造と特徴

フロントサスペンション・ステアリング

フロントサスペンションには、マクファーソンストラット式サスペンションを採用した (Fig.1)。ラバーブッシュを介してクロスメンバをボデーに締結することで、高いサスペンション支持剛性と、騒音・振動の抑制を両立した。更に、サスペンションからの振動入力をより効果的に遮断するため、ロアアームの後側にはブローオフバルブ付き液体封入式ブッシュを採用した (Fig.2)。このブッシュでは、二つの油室の間を低抵抗の長い流路でつなぐことにより、安定した振動吸収性を確保するとともに、油室間に設置したブローオフバルブが高周波・大振幅の入力の際にオイルを逃がすことにより、過大な荷重がボデーに伝わらないようにした。これにより、操縦安定性と乗り心地、騒音・振動を高次元でバランスさせた。

個々の部品の特性、構造、配置にも気を配った。まず、サスマウントを入力分離式にしてダンパの効きを上げたほか、ダンパとスプリングをオフセットして配置することでダンパにかかる横力を減らし、ダンパのフリクションを抑えた。また、フロント・リヤダンパともにリバウンドスプリングを内蔵させ、接地感のある安定したロールとフラットな車体の動きを実現した。更に、スタビライザのクロスメンバへの取付スパンも可能な限り広げ、スタビライザの効きを上げた。そして、ステアリングギアを通常よりも100mm程度低い位置に配置してタイロッド長を長く取ることで、ロール時のタイヤの接地性を維持しながら、タイヤのトー角がリニアに変化するようにした。これらにより、乗り心地や安定性を向上させながら、微小なハンドル操作に対する車両応答を大きく改善した。

ステアリングには、油圧システムと電動システムの長所を兼ね合わせた電動ポンプ式油圧パワーステアリングシステムを採用している (Fig.3)。油圧ポンプを従来のエンジン駆動式から電動ポンプに変更することにより、車速と操舵速度に応じて適切に油圧をコントロールできるようになった。これにより、正確でしっかりとしたステアリングフィールを実現するとともに、車両が直進している時には電動ポンプの回転を下げてエネルギー消費を抑えることにより1 - 1.5%程度の低燃費化にも貢献している。

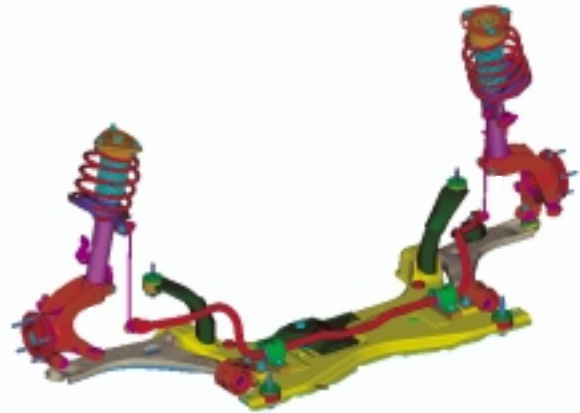


Fig.1 Front Suspension

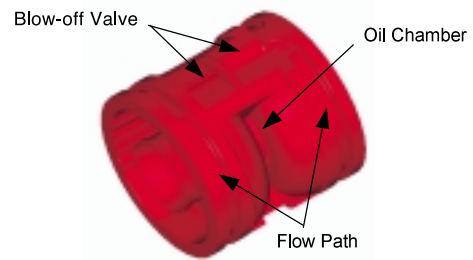


Fig.2 Liquid-filled Bushing

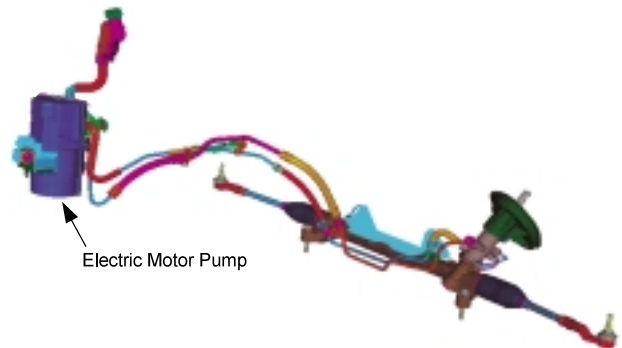


Fig.3 Electric Hydraulic Power Steering System

リヤサスペンション

リヤサスペンションには、E型マルチリンク式サスペンションを採用した (Fig.4)。これは、アテンザと同じ形式のサスペンションであり、次の四つの特徴を備えている。



Fig.4 Rear Suspension

i) ジオメトリ特性の最適化

E型マルチリンク式サスペンションでは走行時の車体姿勢や外力変化など、さまざまな状況変化に応じてタイヤの動きを適切に設定できる。たとえば、タイヤと車体を前後につなぐトレーリングリンクの車体側取付点をタイヤ中心よりも18mm高い位置に置くことで、制動時の車体のノーズダイブを小さく抑えた。また、サスペンションの前後剛性を抑えながら、キャンバ・トー方向の剛性を高め、ロールセンター軸を最適化することで、優れた乗り心地と直進安定性・ロードホールディングを実現した。

ii) サスペンション部品の高剛性化

走行中の荷重入力方向と大きさを考慮してクロスメンバ各部の剛性を引き上げた。また、トレーリングリンクのダンパ取付部もダンパ入力に合わせて高剛性化し、ハブベアリングには高剛性の第3世代ハブを採用した。このように、サスペンション各部に必要な剛性を持たせることで、ポテンシャルの高いサスペンションを実現した。

iii) プッシュ容量の拡大

フロント・リヤサスペンションともに、ほとんどのプッシュにクラス最大級の容量を持たせることで、プッシュが余裕を持って各リンクからの入力を吸収できるようにした。これにより、底つき感のないスムーズなサスペンションの動きが実現でき、リニアな車両応答に貢献した。

iv) ダンパとコイルスプリングの分離

スプリングをダンパと分離して床下に置いた。これにより、荷室の横幅の拡大に加え、ダンパのフリクションが減り、よりスムーズに減衰力が発生するようになった。

(3) 達成性能

操縦安定性

評価結果をFig.5に示す。全体としてアクセラのポテンシャルの高さがわかる。特に開発の目標である、正確で剛性感のある、安定性に優れた車両応答が実現できている。

ヨー共振周波数とヨーレイトゲインを比較した結果をFig.6に示す。アクセラは競合車と比べてヨー共振周波数、ヨーレイトゲインがともに大きく、高いリヤグリップによる優れた安定性と俊敏な応答を両立できた。

乗り心地

評価結果をFig.7に示す。減衰がよく効き、車体の動きを抑えた特性であり、ゴツゴツとした振動を効果的に低減できていることがわかる。開発の目標である、剛性感があり、不快なゴツゴツ感を抑えた乗り心地が実現できた。

荒れた路面を走行中の車体振動の大きさを比較した結果をFig.8に示す。アクセラは人間が特に感じやすい110 - 30Hzの周波数帯域での振動レベルが競合車よりも小さく、しっかりとした質感の高い乗り心地となった。

ロードノイズ

時速100kmで荒れた路面を走行した際の運転席でのロードノイズの比較結果をFig.9に示す。アクセラが優れた静粛性を備えていることがわかる。

フロントクロスメンバの高剛性化、タイヤの低ロードノイズ化やポデーパネルの工夫により、路面からの振動が音になりにくい構造を実現した。これにより、荒れた路面を走行した際の、低周波の“ゴー”という音が減り、路面変化による車室内の音の変化を抑えることに成功した。

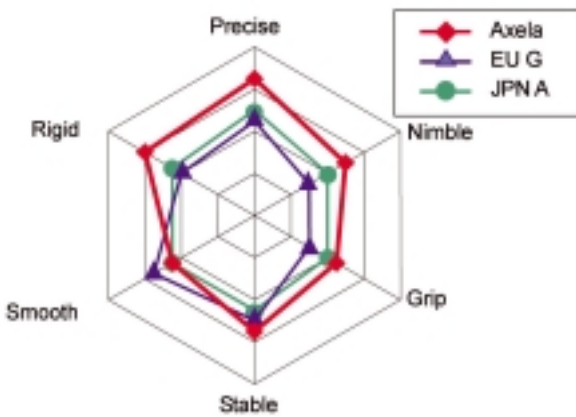


Fig.5 Steering & Handling Evaluation

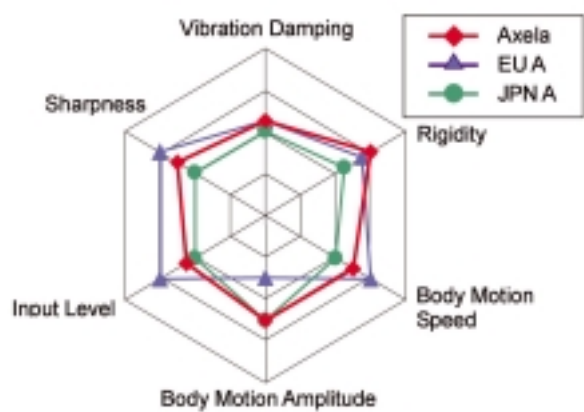


Fig.7 Ride Comfort Evaluation

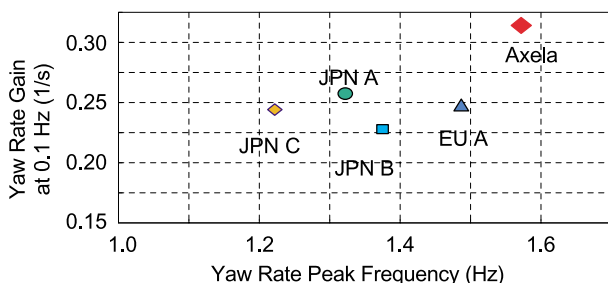


Fig.6 Comparison of Yaw Rate Response

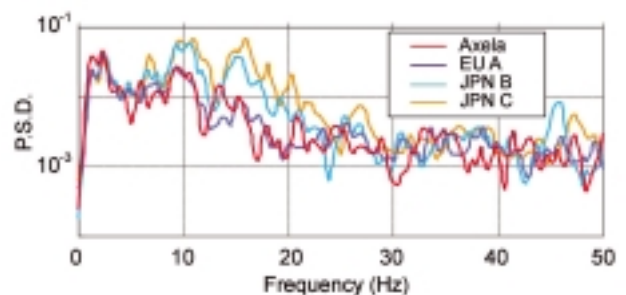


Fig.8 Comparison of Vibration Level

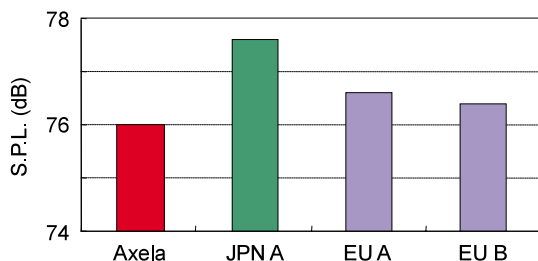


Fig.9 Comparison of Road Noise OA

2.2 ブレーキ

(1) 開発の狙い

ブレーキについては、リニアで応答性に優れた信頼感あるブレーキを実現するため、次の項目に注力した。

ペダル踏力とストローク・減速度のバランスの最適化
高いペダル剛性とブレーキが効き出すまでのペダルレベルの短縮化

クラストップレベルの制動距離

(2) 構造と特徴

マスタシリンダ・ブースタ

ペダルストロークの短縮化のため、大径のマスタシリンダを採用して内径を25.4mmとしたほか、ロストラベルを低減した。また、液圧に対する膨張率の低いブレーキホースを採用した。これらにより、ペダルの剛性感を高め、コントロールしやすいブレーキ特性を実現した。

ブースタは、大径シングル10インチサイズのバキュームブースタを採用し、高いサーボ限界を確保した。

フロントブレーキ

ロータを大径化し2.3L車はクラストップの 300mm、その他の車両も 278mmのロータを採用した。

リヤブレーキ

リヤブレーキのロータも大径化し、2.3L車は 280mm、その他の車両も 265mmの大径ロータを採用した。1.5L車の一部にはドラム式ブレーキを採用しているが、ドラム径 228mmの大径ドラムとした。

DSC・EBD・ABS・BA

アクセラではDSC（横滑り防止機構）をオプション設定した。また、EBD（電子制御制動力配分システム）、ABS（4輪アンチロックブレーキシステム）とBA（ブレーキアシスト）を全車標準装備とし、制動停止距離の短縮と車両安定性を両立させた。特にBAはストローク速度と踏力に応じたアシストを可能にする機構を備えた機械式BAを採用した。信頼性が高く、スポーツ走行を妨げないアシストシステムを実現した（Fig.10）。

(3) 達成性能

ブレーキフィーリング

評価結果をFig.11に示す。アクセラはいずれの評価項目でも競合車に比べて高いレベルにあり、バランスの取れた、優れたブレーキフィールを達成していることがわかる。特

に開発の目標である、リニアで応答性に優れた信頼感あるブレーキが実現できている。

踏力と減速度、ペダルストロークと減速度の比較結果をFig.12に示す。アクセラは踏力に対して減速度がリニアに立ち上がるほか、微小なペダルストロークに対してもきちんと減速度が発生することがわかる。ドライバにとって、コントロールしやすいブレーキ特性となっている。

制動停止距離

ヨーロッパの著名な雑誌が実施しているブレーキ性能の評価方法に基づく制動停止距離の比較結果をFig.13に示す（アクセラは同条件にて社内で計測した結果）。アクセラが、狙いどおり、比較車両中トップの制動停止距離を実現していることがわかる。

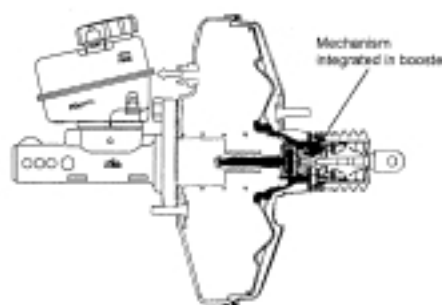


Fig.10 Example of Mechanical Brake Assist

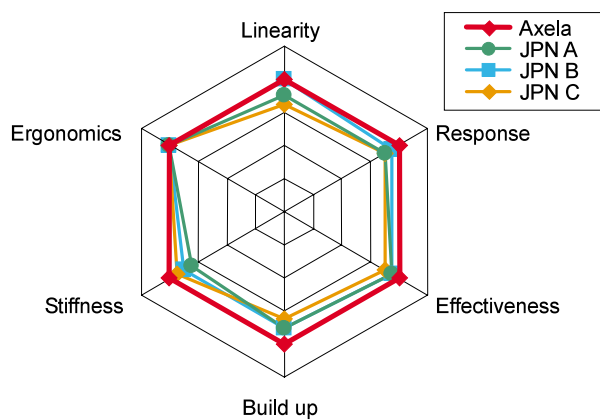


Fig.11 Brake Evaluation

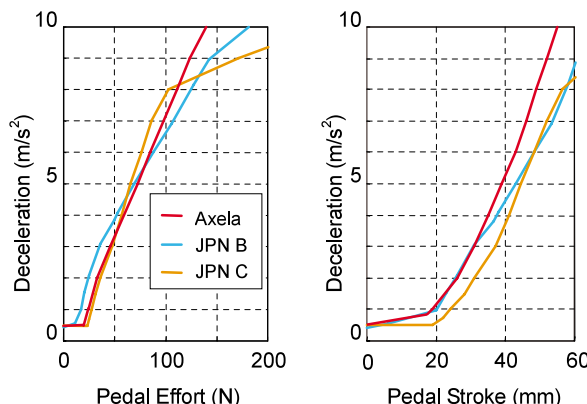


Fig.12 Comparisons of Brake Performance

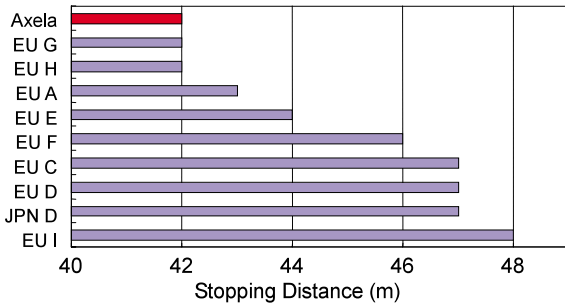


Fig.13 Comparison of Stopping Distance

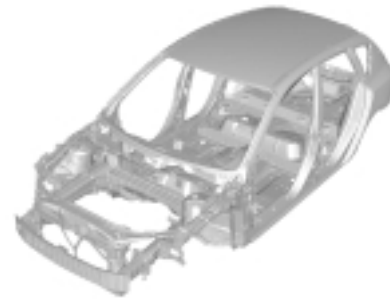


Fig.14 Body Structure Complete

3. ボデー

(1) 開発の狙い

アクセラのキーバリューの一つである“ハイバランスな運転する楽しみ”を実現できる高剛性ボデーの開発に取り組んだ。アテンザから操縦安定性に相関性の高いボデーの局所的な剛性向上に取り組んできたが、同様にアクセラでも、曲げとねじりの全体剛性だけでなく、サスペンション取付部などの局所的な剛性に注力し開発に取り組んできた。局部剛性目標は競合車の実車走行や4輪多軸加振機テスト等で測定した各部の変形量を基に設定し、目標達成にはコンピュータ解析等を駆使することで効率良く実現した。その結果、全体剛性と局部剛性の向上とを同時に実現することで競合車を凌ぐ高剛性ボデーが開発できた。ボデー全体図をFig.14に示す。

(2) 構造と特徴

ボデーフレームワーク

アンダーボデーのフレームワークをFig.15に示す。フロントサイドフレーム、サイドシル、リアサイドフレームといった前後方向の各主要フレームや、これら左右のフレームを結合する各クロスメンバの大断面化、ストレート化により車体全体の剛性を向上することができた。

フロントフロアトンネル部は縦壁立上り部にフレームを設定し、更にトンネル部フロア下には3本のクロスメンバを設定し、操舵時の車体のねじれ変形を抑え、操縦安定性フィーリングを向上した。また#4クロスメンバとリアサイドフレームの結合部はラップ代を拡大し結合部剛性を高めた。

フロントボデー構造

フロントボデー構造をFig.16に示す。

一体型のサスペンションタワーハウジングを、ダッシュクロスメンバで左右を結合されたフロントサイドフレームおよび閉断面のエプロンレインへ結合した。このサスペンションハウジングはカウルガセットにより前後方向に、またカウルクロスメンバによって左右方向に拘束することにより左右の相対変位抑制及びサスペンションストラットの支持剛性を高めた。

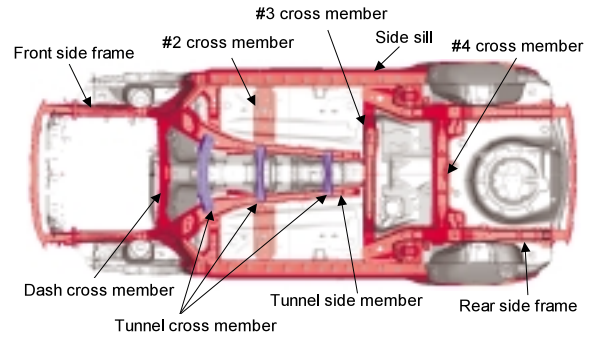


Fig.15 Body Frame Work

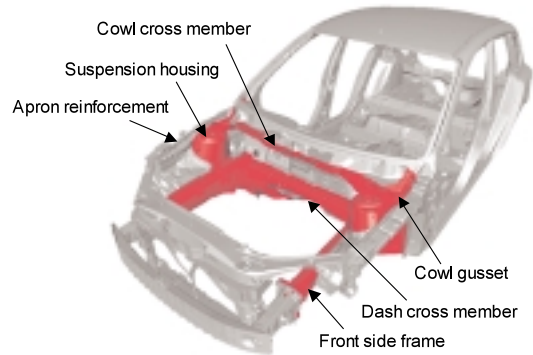


Fig.16 Front Body Structure

リアボデー構造

5ドア車のリアボデー構造をFig.17に示す。

リアサイドフレームからリアサスペンショントップにかけては厚板の補強部材で結合し、更にダンパ取付部は車室内よりガセットを重ね局部剛性を高めた。5ドア車においてはリアサスペンショントップからCピラー、リアヘッダーにかけて連続した補強部材を配置することにより#4クロスメンバからリアサスペンショントップ、リアヘッダーにかけて環状の骨格を形成した。また、ルーフとBピラーおよび、Cピラーとの結合部には発泡硬化剤を充填し、動的なボデー剛性感の向上を実現した。リアの開口部においては上下コーナ部にガセットや補強部材を最適に配置しリアサスペンション取付部剛性だけでなくリア開口部の剛性を向上できた。これらにより5ドア車はハッチバックタイプ

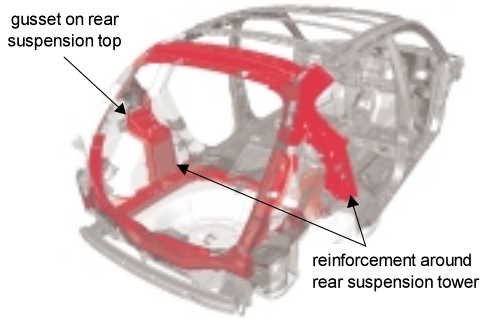


Fig.17 Rear Body Structure (5Dr)

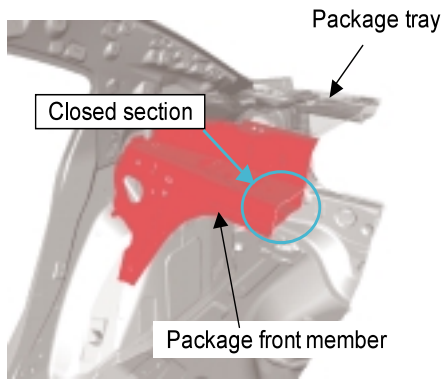


Fig.18 Rear Body Structure (4Dr)

でありながらセダン系のボデーに匹敵するねじり剛性を実現できた。4ドア車においてはFig.18に示すようにパッケージトレイの前端に閉断面を設け、キャブサイドインナーへ結合させる構造とし、剛性を向上させた。

(3) 達成性能

操縦安定性に密接に関係するボデー部位であるフロント、リヤサスペンション取付部の4輪多軸加振機による横振り加振時の変形状態をFig.19に示す。これらの個所の変形は、前項で述べた構造の採用により、操縦安定性が高いとされている競合他銘柄車と比較しても小さく抑えられて

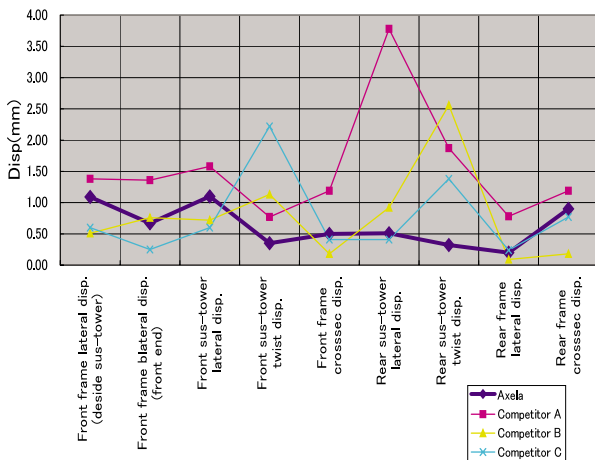


Fig.19 Body Rigidity

いることがわかる。結果、従来のコンパクトカーのレベルを超えた操縦安定性を支えるボデーが実現できている。

4. おわりに

以上、アクセラのダイナミクス性能を支えるシャシーとボデーについて、開発の狙い、構造と特徴、達成性能を簡単に紹介した。

アテンザ、デミオ、RX-8の開発を通じて培った技術と知見をもとに、マツダのDNAをコンパクトカーで実現すべく、基本を押さえながら細部へのこだわりを追求した。その結果、クラスを超えた操縦安定性、乗り心地、制動性能と静粛性を持つプラットフォームを実現できた。

このプラットフォームは、今後、様々な車種へ展開する予定である。アクセラは、このプラットフォームが持つポテンシャルを余すところなく具現化していると確信しているが、今後、更にそのポテンシャルを向上させるべく育成に努めていく。

著者



和田仁法



渡邊雅哉



熊田拓佳



高橋宏行



林 義博



飯田英一朗

特集：アクセラ

16

アクセラの衝突安全性能 Passive Safety of Axela

柴崎宏武*¹ 信本昇二*² 福谷和也*³ 角 美智雄*⁴
 Hiromu Shibasaki Shoji Nobumoto Kazuya Fukutani Michio Kado
 長井 博*⁵ 飯田英一朗*⁶ 杉本 繁*⁷
 Hiroshi Nagai Eiichirou Iida Shigeru Sugimoto

要 約

アクセラは、車の基本性能である衝突安全性能をより高いレベルで達成することを目標とした。そこで、各国の法規制より衝突速度の高い独自の厳しい衝突安全基準を設け、高剛性で強固なキャビンと、衝突時の衝撃エネルギーを従来以上に効率的に吸収して車体全体に分散する、MAGMA*を基本骨格に大幅に進化させた新型プラットフォームを実現した。前面衝突では大断面フロントサイドフレームのストレート配置や衝撃三又分散構造、側面衝突ではセンターピラーやサイドシル、フロアメンバの大断面化などによるトリプルH構造強化とサイドインパクトバーの最適配置を採用した。そして後面衝突ではリヤサイドメンバのエネルギー吸収特性を高め、国内基準より厳しい180km/hオフセット後面衝突にも対応できる構造とした。また、安全装備には、水平移動式の衝撃吸収ステアリングシステムをはじめ、カーテン&サイドエアバッグなどの乗員拘束装置や、歩行者脚部保護対応バンパなどを採用し、衝突安全性能を充実させた。

本稿では、これら衝突安全性能のうち、衝突安全ボデーの開発概要について述べる。

*MAGMA：マツダの全方位衝撃吸収構造ボデー

Summary

Axela was developed to achieve world-class high crash performance, one of basic performances of an automotive. To realize higher crash performance, a Mazda-unique crash safety standard which is severer than any regulation in the world was introduced, and a highly rigid cabin, and a new high energy absorbing platform has been realized, which includes MAGMA* drastically evolved into a basic frame. Specifically, a front crash protection has adopted a straight front-side frame with large cross-sections and a three-forked frame distributed structure, and a side crash protection has adopted a triple-H structure with a large floor cross member. For the rear crash protection, Axela, equipped with a high energy absorbing rear side member, can accommodate the 80km/h offset rear crash requirements which are much severer than domestic standards. Furthermore, Axela boasts enhanced safety equipment such as the horizontal energy absorption steering column system and a pedestrian legs protection bumper.

This paper describes overviews of a crash safety body in the crash safety performance on Axela.

*MAGMA: Mazda Geometric Motion Absorption

*1~5 衝突性能開発部
Crash Safety Development Dept.

*6 ボデー開発部
Body Development Dept.

*7 CAE部
CAE Dept.

1. はじめに

近年の衝突安全性に対する市場の関心の高まりにより、更なる安全性能の向上が求められている。そこで、最新の計算シミュレーションおよびユニット解析を中心とした開発手法を適用することで、世界レベルでのより安全な車の開発に取り組み、衝突安全性能の向上を図ってきている。

アクセラでは、万一の衝突事故発生時の乗員へのダメージを最小限に抑えるため、MAGMAを基本にした新型プラットフォームを採用し、世界トップレベルの衝突安全性能を確保した。安全装備では、前席フロントエアバッグシステムやサイド&カーテンエアバッグ、水平移動式エネルギー吸収ステアリングコラム、ISO-FIX対応チャイルドシート固定用バー、歩行者保護のためのボンネットとバンパ構造など、幅広く様々な最新技術を採用している。

本稿では、アクセラで採用した新型プラットフォームでの衝突安全車体構造を紹介する。

2. 全方位衝突安全ボデー

アクセラは市場で発生し得るあらゆる衝突形態に対応するため、衝突時の衝撃エネルギーを車両全体に分散させ、客室の変形および衝撃を抑制する優れた衝撃吸収性能をもつ新型プラットフォームを採用し、主要各国の衝突安全アセスメントNCAP (New Car Assessment Program) のクラストップの衝突安全性を実現した。

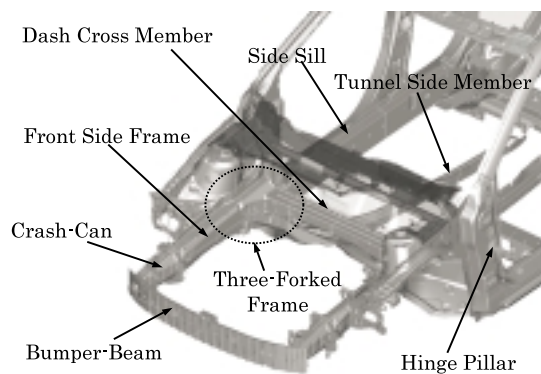


Fig.1 Body Structure for Frontal Impact

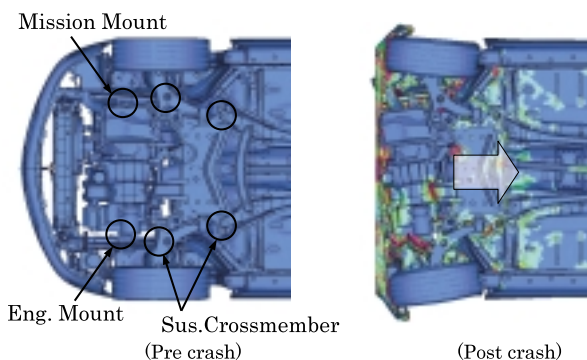


Fig.2 Frontal Impact Optimized Structure

2.1 前面衝突性能開発

前面衝突では、前方からの衝撃エネルギーをバンパとエンジンルーム部分で確実に吸収し、客室部への入力を車体全体に分散させることで、客室部の変形を抑えることが重要である。Fig.1にアクセラの前部車体構造を示す。車両最前端にあるバンパビームにはハット型の閉断面構造で1,000MPa級の超高張力鋼板を、クラッシュカンなどの構成部品には590MPa級の高張力鋼板を採用し、バンパ部でのエネルギー吸収性能を高めている。フロントサイドフレームは8角形のダブルハット型の大断面ストレート構造、フロントサイドフレームインナにはテーラードブランク材を使用し、同じ板厚で前方に440MPa、後方に590MPa級の高張力鋼板を採用し、エネルギー吸収を効率よく行う構造としている。そして、激しい前面衝突では、Fig.2のように、エンジン、ミッション、サスペンションクロスメンバを車体から離脱させ、エンジンルーム内でエネルギー吸収を高めている。

客室部へ入力される衝撃エネルギーを分散させるため、フロントサイドフレーム後部は断面を保持したままダッシュパネルを貫通させ、ヒンジピラーとサイドシル部へ結合した。Fig.3に示すように、フレームからの入力荷重は、フレーム後部を通してヒンジピラーとサイドシル部、左右のフレームを結合するダッシュクロスメンバ、フロア下のトンネルサイドメンバ、の3方向に分散させる三叉構造とした。そして、客室内にはフレームと同じ高さ左右のヒンジピラーを結合するクロスカービームを設定し、フレーム後部、ダッシュクロスメンバ、クロスカービームで形成される台形骨格により、衝突時に発生するヒンジピラーの外開きを抑え、客室の変形を最小限に抑えることがで

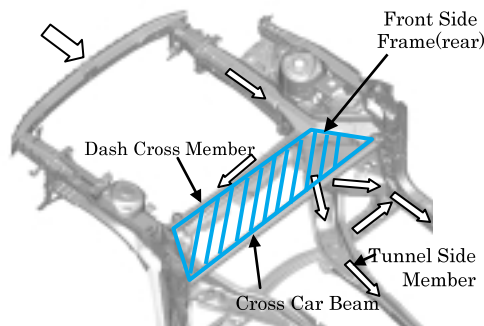


Fig.3 Energy Dispersion Body Structure

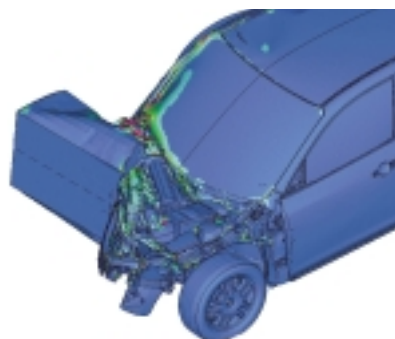


Fig.4 Frontal Impact Analysis Model

きた。また、優れた前面衝突性能を持つ新型プラットフォームを実現するために、Fig.4に示すようなCAE解析を効果的に活用した。

2.2 側面衝突性能開発

側面衝突では、車体側面と乗員との間の非常に限られた空間で衝撃エネルギーを吸収するとともに、できる限り車体全体にエネルギーを分散させることで客室部の変形を抑え、乗員に加わる衝撃を低減することが重要である。従来からマツダはトリプルH構造をボデーに採用してきたが、アクセラではFig.5のように、この車体構造を更に進化させた。車体変形抑制の要となる車体側面のセンターピラーとサイドシル、下部の2本のクロスメンバの断面拡大や骨格の結合強化構造としている。センターピラー中央のベルトライン部の補強材とクロスメンバには、590MPa級の高張力鋼

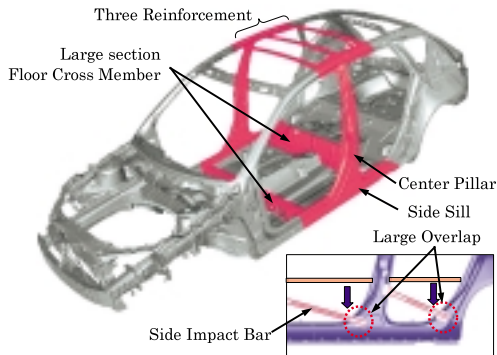


Fig.5 Triple H Body Structure for Side Impact

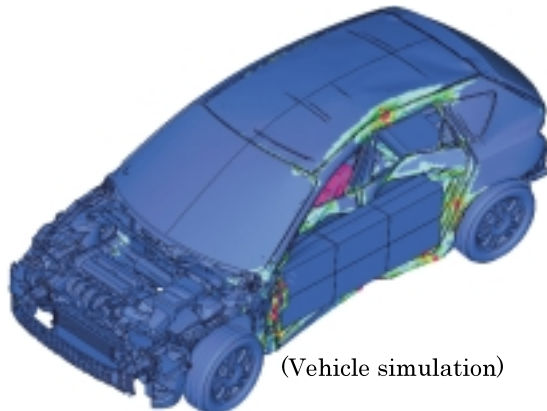
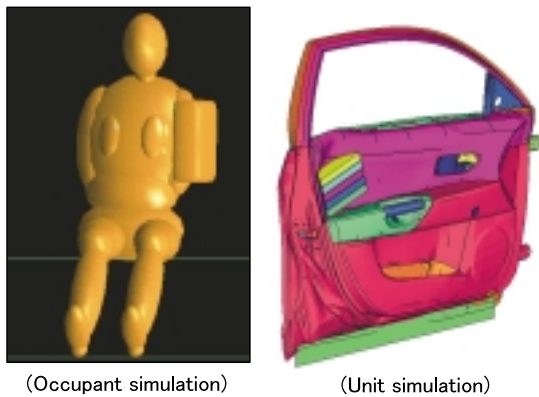


Fig.6 Side Impact Analysis Model

板を採用し、高い車体強度を確保している。また、センターピラーとリアホイールアーチ下部の形状拡大によって、車体とサイドドアのラップ量を拡大し、サイドインパクトバーを確実にラップさせることで、衝突時の衝撃エネルギーを効率的にフロア部へ分散させる構造としている。車体上部は、センターピラー部周辺に3本の補強部材を採用し、衝突時にドアに加わった衝撃を効果的に受け止める構造としている。これら車体構造とドアトリムなどの内装部品の特性最適化については、Fig.6に示す乗員挙動解析やユニットCAE解析、Fig.7に示す実車衝突現象を台上で再現できるクラッシュシミュレータなどを用いた評価検証を行い、高い側面衝突安全性能を実現した。

2.3 後面衝突性能開発

後面衝突では、乗員の生存空間の確保と後輪車軸付近に配置された燃料タンクの保護が重要である。そのため、高い荷重でリアサイドフレームを潰すことで衝撃エネルギーを吸収し、燃料タンクが配置されている位置から前方はエネルギーを効率的に分散させる構造を採用した。具体的にはFig.8のように、リアサイドフレームは590Mpa級の高張力鋼板で、3種類の板厚の異なる鋼板を組み合わせたテラードブランク材を使用した。また、フレーム断面の大型化とストレート化を行い、燃料タンクが配置されている部分は、衝突時の変形を抑えるために、前後左右を高強度のメンバで囲む構造とした。これらにより、日本の法規である50km/h後面衝突での燃料系の保護はもちろん、より厳しい180km/hのオフセット後面衝突でも、客室の変形を抑制する高い後面衝突安全性能を実現した。



Fig.7 Side Impact Crash Simulator

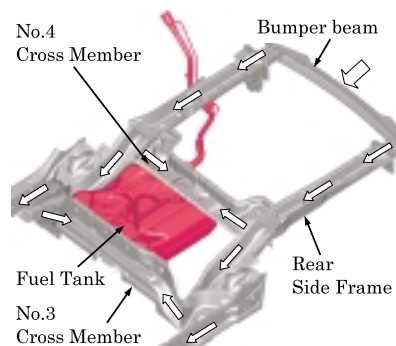


Fig.8 Body Structure for Rear Impact

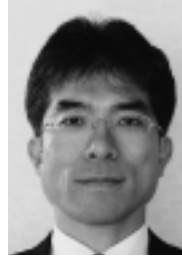
3. その他の安全装備

衝突安全性能の基本となるボデーに加え、アクセラには多岐にわたる新技術を織り込んだ安全装備を採用している。全仕向けにフロントエアバッグをはじめ、サイド&カーテンエアバッグ、プリテンション付きロードリミッターベルト、水平移動式の衝撃吸収ステアリングシステム、クラッシュブルブレーキペダル、頸部衝撃緩和フロントシートを装備し、チャイルドシート使用時の子供の安全性や歩行者保護にも配慮した。チャイルドシートは、後席左右にトップテザーアンカ付きISO-FIX対応チャイルドシート固定機構を設定し、チャイルドシートを確実にかつ簡単に取り付けることを可能とし、同時にトップテザー使用により、衝突時のチャイルドシートの前方回転を防ぐ構造としている。歩行者保護構造については、万一の対人事故の際、歩行者の頭部がボンネットに衝突して生じる傷害を低減するため、ボンネットとエンジンなどの間に十分な空間を確保し、ボンネット全面の剛性を均一化して衝撃吸収効率を高めている。また、歩行者の脚部の傷害を低減するために、フロントバンパ表面とバンパビーム間に衝撃吸収のための空間を確保し、フロントバンパ下部にリブ付スティフナ構造を採用することで、車両下への脚部の潜り込みを抑制している。更に、客室の各ピラーとサイドルーフとサイドトリム内には、衝撃吸収リブを設定し、衝突時の乗員の頭部の内装部品への二次衝突で受ける衝撃を緩和する構造とした。

4. おわりに

本稿では、主にアクセラの衝突安全ボデーについて紹介したが、マツダの取組みと、アクセラの衝突安全性能の高さを感じ取って頂ければ幸いである。

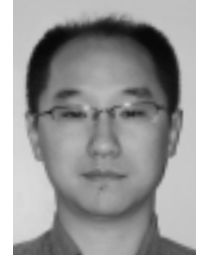
著者



柴崎宏武



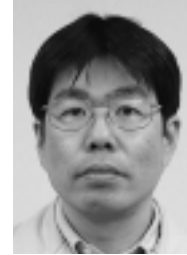
信本昇二



福谷和也



角 美智雄



長井 博



飯田英一朗



杉本 繁

特集：アクセラ

17

アクセラ / Mazda3のパワートレイン

Powertrain for Axela/Mazda3

内海 巖*1 谷口 正明*2 野崎 修*3
 Iwao Utsumi Masaaki Taniguchi Osamu Nozaki
 星野 彦一*4 金本 芳実*5
 Hikoichi Hoshino Yoshimi Kanemoto

要約

アクセラ / Mazda3のパワートレインは、マツダのブランドDNAを具現化するための出力特性改善に加え、更にNVH、環境性能及びトランスミッションの改善を図り、ドライビングプレジャーの実現に貢献しました。本稿ではそのパワートレインの概要を紹介します。

Summary

Axela/Mazda3 powertrain has contributed to realization of 'Driving Pleasure' by attaining higher output performance for embodying Mazda brand DNA and improvements in PT-NVH measures, environmental performance, and transmission. This report introduces the outline of the powertrain.

1. はじめに

アクセラ / Mazda3 (以下、アクセラ) は、アテンザ、デミオ、RX-8に続き、マツダの次世代商品の一環として開発されました。5ドアと4ドアの2ボデータイプに加え、スポーツ・アピアランス・パッケージをもつCセグメントのワールドカーです。本稿ではアクセラのコンセプトを具現化するために開発されたパワートレインを紹介します。

2. アクセラのパワートレイン

2.1 パワートレインが目指したもの

MZRエンジンシリーズはマツダの次世代を担う直列4気筒ユニットであり、3つのパフォーマンスDNAを持っています。

- ・リニア：アクセルの踏み方に応じたりニアな加速感
- ・ライプリー：アクセル操作に対して即座に車両が反応する活発さ
- ・トルクフル：市街地での軽いアクセル操作時を含めた、様々なシーンにおける力強い加速

アクセラではこれらのDNAをもとに、例えば欧州で特に評価の高いクルマにも匹敵する「運転する楽しみ」を提供できるエンジンパフォーマンスを追求しました。

2.2 パワートレイン展開

全世界の多様なお客様の個性やライフスタイルに対応するため、Table 1に示すように1.4Lから2.3Lまでの6タイプのMZRエンジンシリーズをラインアップしました。これらは、既に市場で好評を得ていますデミオ及びアテンザのパワートレインをベースとして更なる改善を図り、1.6Lエンジンはアクセラのために新規に開発を行いました。また欧州向けのディーゼルエンジン車に関しては、フォード社との共同開発を行ったパワートレインを搭載しました。本稿では日本向けのパワートレインを中心に紹介します。

Table 1 Powertrain Line-up

| Eng.Vol. (L) | T/M | EU | North America | | Japan | Other Countries |
|--------------|-----|----|----------------|----------------|-------|-----------------|
| | | | Federal States | Green States*1 | | |
| 1.4 | 5MT | ● | | | | |
| | 5MT | | | | ● | ● |
| 1.5 | 4AT | | | | ● | ● |
| | 5MT | ● | | | | ● |
| 1.6 | 4AT | ● | | | | ● |
| | 5MT | ● | ● | | | ● |
| 2.0 | 4AT | | ● | | ● | ● |
| | 5MT | | | ● | | |
| 2.0 PZEV | 4AT | | | ● | | |
| | 5MT | | ● | ● | ● | ● |
| 2.3 | 4AT | | ● | ● | ● | ● |
| | 5MT | | | | | |
| 1.6DE | 5MT | ● | | | | |

All 4ATs have active matics.
 *1: 5States of CA, NY, MA, ME, VT

*1~4 パワートレイン開発推進部
 Powertrain Development Promotion Dept.

*5 マツダモーターヨーロッパ
 Mazda Motor Europe

2.3 エンジン出力特性の改善

これまでの一般的なCセグメントカーとは異なる動力性能を実現するため、MZRエンジンシリーズならではの数々の技術をより綿密に最適化しました (Fig.1)

(1) 低抵抗エアクリーナ+等長ロング吸気マニホールド

通気抵抗の低減を図ったエアクリーナとともに、長さ約600mmの樹脂製等長ロング吸気マニホールドを採用しました。これにより、低速から高速にわたって吸気騒音を抑えながらも充填効率を高め、全域でトルクアップを実現しています。また、2.3Lエンジンに加えて2.0Lエンジンにおいても、吸気抵抗を低減するハイフローポート・シリンダヘッドを採用し、高出力化に貢献しています。

(2) VIS (バリアブル・インダクション・システム)

吸気マニホールドの実質的な長さを変えることによって、低中速回転域と高回転域それぞれで吸気効率を最適化し、全域にわたる高トルク化を実現しています。具体的には、吸気マニホールド内のバルブを4,500rpm付近で電子制御によって開閉し、低中速回転域では管長を長く、高回転域では短くコントロールします。このシステムを1.5L以上の全エンジンに採用しました。

(3) ステンレス製等長ロングブランチ排気マニホールド

排気マニホールドは全車共通でステンレス製を採用しました。これによって各気筒のブランチ部を長くかつ等長にでき、排気干渉を低減して出力・トルクを向上させるとともにスポーティな排気サウンドづくりにも貢献しています。

2.4 パワートレインNVHの改善

「リニアでライブリー、そしてトルクフル」というマツダのパフォーマンスDNAに加えて、アクセラのMZRエンジンでは、Cセグメントのアベレージを超える上質な静粛性と伸びやかで澄んだエンジンサウンドを追求しました。

(1) アルミシリンダブロック&ロアブロック

高剛性のアルミ製シリンダブロック、ロアブロックあるいはディープスカート構造を全エンジンに採用しました。これにより、エンジンとトランスミッションの結合剛性やクランクの支持剛性を高め、振動・騒音を低減しました。またクランクシャフト先端にはトーショナル・ダンパ・ブーリーを採用しました。これらによって、アクセル操作にリニアに応える「伸びやかな音質」の実現に貢献することができました。

(2) 動弁系・回転系のノイズ低減

エンジンノイズの発生源のひとつに、動弁系などから出る高周波放射音があります。MZRエンジンシリーズでは、カムとシムレスタベットの低μ表面仕上げ、動弁系の慣性質量やバルブスプリング質量の低減などにより、動弁系からの騒音を低減し、「澄んだエンジン音質」を実現しました。また、ピストンやコネクティングロッドを軽量化し、エンジンそのものが発生する音のレベルを改善しました。

(3) 吸気源音の改善

樹脂製等長ロング吸気マニホールドを採用し吸気源音のレベルを徹底的に改善しました。

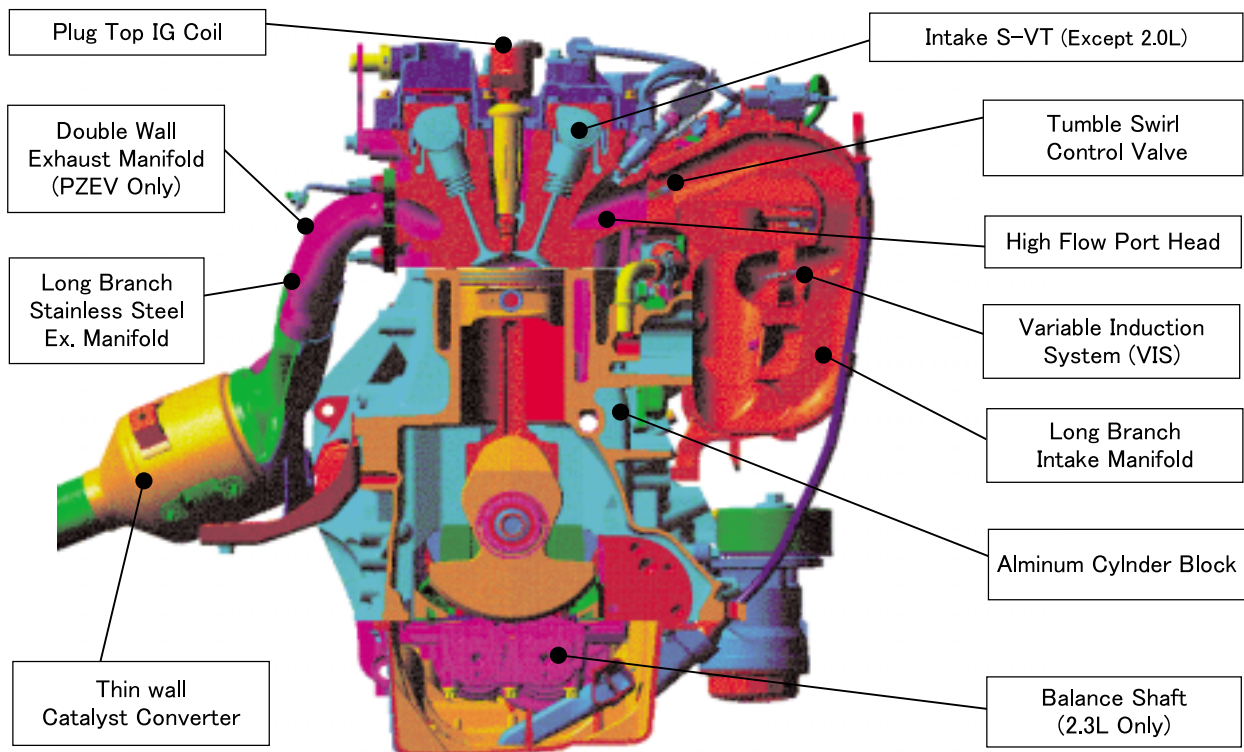


Fig.1 MZR Engine

(4) バランスシャフト (2.3L車)

2.3Lエンジンに採用したバランスシャフトは、クランクシャフトに設けたギアによって駆動され、振動・騒音を低減しています。これにより、2Lオーバーの4気筒エンジンの水準を超えるスムーズさと上質な静粛性を実現しました。

2.5 メンテナンスフリー化

また従来10万km毎に交換が必要であったカムシャフト駆動ベルトをチェーン化し、更に補機駆動ベルトにも自動調整機構を採用し、使用過程でのメンテナンスコストの削減を実現しました。

3. 低エミッション化

3.1 クラストップレベルのエミッション性能

アクセラは、ワールドワイドなレベルで高水準な低エミッション性能を実現しました (Table 2)。

(1) 北米向け

2.0L, Green States向けでは、ガソリンエンジン車にとっては、世界最高レベルにクリーンな「PZEV」規制にマツダとして初めて適合しました。また2.3Lを含めてFederal向けではTier2Bin5という最新の規制に適合しました。

(2) 欧州向け

1.4L ~ 2.0L車まですべてのガソリンエンジン車で「Stage4」規制に適合しました。

(3) 日本向け

1.5L ~ 2.3Lまで全車で平成12年排出ガス規制値の75%以下まで低減した「U-LEV ()」認定に適合しました。

3.2 エミッション, 燃費改善技術

エミッション及び燃費性能改善のために、下記の技術を採用しています。

(1) S-VT (シーケンシャル・バルブ・タイミング)

低中負荷での運転時には、吸気バルブのオープンタイミングを早くしてバルブのオーバーラップ量を拡大し、残留ガス (内部EGR) の量を増大させています。これによりポンピングロスが減少し、燃費の向上とCO₂ (二酸化炭素) 排出量の低減を実現すると同時に、EGR効果によってNO_x (窒素酸化物) の排出量も低減しています。(2.0Lを除く)



Fig.2 MZR Engine Picture

(2) 排気系の改善

MZRエンジンシリーズは、エンジン前方から吸気して後方に排気するレイアウトを採用しています (Fig.2)。吸/排気ポートの位置をこれまでと逆転させることで、排気ポートから触媒コンバータまでの距離が短くなるため、排気の温度を高く保ったまま触媒に送り込むことができます。これにより、触媒の早期活性を促し、浄化作用を向上させています。また、触媒担体の薄壁化を実現し、更に浄化性能を改善しています。PZEV適合仕様に関しては、更に2重管エキゾーストマニホールドと2.5ミルの薄壁担体を採用し触媒の活性を改善しています。

(3) TSCV & EGRシステム

吸気マニホールド内に、タンブル・スワール・コントロール・バルブ (TSCV) を設置しました。このバルブ機構が、燃焼室内のタンブル (縦渦) とスワール (横渦) の強さを最適化して空気と燃料の良好な混合状態を形成し、より安定した燃焼を促します。また、EGR (排気循環) システムを全エンジンに採用しました。多くの排気を燃焼室内に採り入れてポンピングロスを低減し燃費を向上させるほか、不活性ガスである排気が増加することで燃焼温度が下がり、NO_xの低減にも貢献しています。

(4) 軽量ピストン, ピストンリング, シムレスタベット

低μ仕上げのシムレスタベットに加え、新形状の軽量ピストンや低張力ピストンリングを採用しました。これらによってエンジン内のフリクションロスを低減し、燃費改善を図りました。

Table 2 EM Regulation Compliance

| Destination | Compliance EM | Engine |
|----------------------|------------------|----------|
| N.A.(Green States) | PZEV (LEV2LEV*1) | 2.0-2.3L |
| N.A.(Federal States) | Tier2Bin5 | 2.0-2.3L |
| Europe (Gasoline) | Stage4 | 1.4-2.0L |
| Japan | U-LEV *2 | 1.5-2.3L |

*1**2.3L *2**As of 2003CY

4. トランスミッション

アクセラで求めたドライビングプレジャーのひとつ、「リニアで爽快な加速感」は、洗練されたトランスミッションによって初めて現実のものとなります。アクセラでは、4速AT (電子制御) と5速MTをそれぞれ最適にチューンし、運転する楽しみを増幅するスポーティで快適なシフトフィーリングを実現しました。AT車については、Fun to Driveなアクティブマチック機能を全AT車に採用しています。

4.1 電子制御4速ATアクティブマッチック

(1) 小気味よいシフトフィーリング

シフトアップと、シフトダウンの変速応答をチューニングし、スポーティな小気味よさを演出しました。例えば1速から2速へのシフトアップの変速時間では、従来比較で約0.6秒から0.5秒へと約20%改善しています (Fig.3)。

(2) スローブコントロール機能

下り坂ではコンピュータが勾配を演算し、必要に応じて4速から3速へ、更に車速が低くなると2速へシフトダウンされます。このため、フットブレーキを頻繁に使用することなく、意図した車速を保つことが可能になります。上り坂では、余裕駆動力を随時演算し、シフトアップすると駆動力の不足が予想される場合には、シフトアップを抑制する制御を行います。このため、つねにスムーズな登坂走行が可能になります。このように、ドライバの感性に合ったスムーズでリニアなシフトコントロールを実現しました。

(3) 低燃費に貢献する減速スリップ制御

1.5L車にはスリップ制御を採用して減速時のフューエルカット時間も大幅に延長し、低燃費とCO₂削減を促進しています。

(4) ギア比選定

アクセラで最強のパワーを発生する23Sに搭載されるATは、4.416という低速型のギア比を採用しました。これにより、AT車でありながらもMZRエンジン本来の優れた加速性能を味わえるものとしています。

4.2 5速MT

(1) 1-2速ダブルコーンシンクロ

シンクロ負荷の特に大きな1速と2速にダブルコーンシンクロを採用しました。様々な条件下でシフト操作力を軽減するとともに、スポーティなショートストローク化を実現しています。

(2) すっきりとした上質な操作感

ロッドエンド押し付けボール背面に小径ボールを多数配した2重構造のディテントボールを採用しました。また、

シフトロッド/クランクレバー/コントロールロッドのリンク部の軸に特殊な表面処理を施したほか、テフロンコーティングの低μプッシュを採用しました。ディテントボールとの相乗効果により、摩擦係数を大幅に低減し、すっきりとした上質な操作感を実現しました。

5. おわりに

このアクセラでは、アテンザ、デミオで好評を得ていないMZRエンジンを更に進化させました。具体的には、上質なエンジン音と軽快な走り性能の実現だけでなく、環境性能もTopレベルを狙いました。またトランスミッションでも操作感、楽しさ、快適さに更に磨きをかけました。是非体感してみたいと思います。

著者



内海 巖



谷口 正明



野崎 修



星野 彦一



金本 芳実

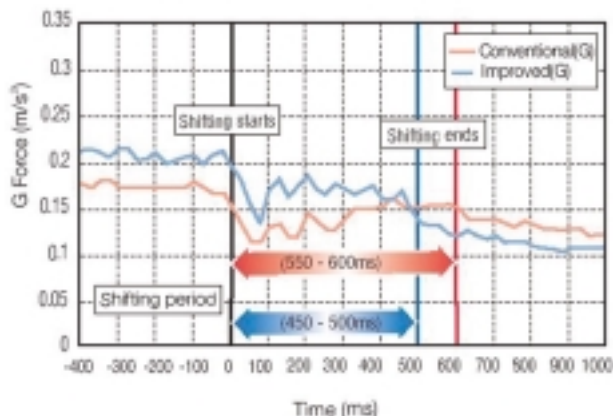


Fig.3 AT Shifting Response

特集：アクセラ

18

非対称ダンピングオートテンションの開発 Development of Asymmetric Damping Auto-tensioner

山下 佳行^{*1} 戸郷 晴雄^{*2} 石田 公雄^{*3}
Yoshiyuki Yamashita Haruo Togou Kimio Ishida
藤井 伸浩^{*4}
Nobuhiro Fujii

要約

自動車業界の大きな課題である衝突安全性能の向上に向け、よりコンパクトな補機駆動 (Front End Accessory Drive, 以下FEAD) システムが求められている。一方で各補機の駆動負荷は増加傾向にあり、メンテナンスフリーの実現と引き換えに特有の課題をもつオートテンションシステムでは、ベルトスリップなどの問題を回避するために部品追加に伴うコストアップが不可避であった。

アクセラでは、乗用車カテゴリで世界初の量産化となる非対称ダンピングオートテンションの開発により、軽量・コンパクトなFEADシステムでメンテナンスフリー、ベルトスリップノイズ抑制という商品性と低コスト化を両立することができた。

Summary

Toward the higher level of crash safety performance, a big challenge which the car industry currently faces, more and more compact Front End Accessory Drive system (FEAD) has been demanded. On the other hand, the driving load for each accessory is on the increase, and an auto-tensioner, which has issues specific to itself in spite of the realization of maintenance-free performance, inevitably required the additional cost associated with additional parts to prevent issues on belt slips or the like.

With Axela, we have succeeded in both achieving high product marketability as typified by its light-weight and compact-size FEAD system, maintenance-free performance, and reduced belt slip noise, and concurrently lower cost, through the development of Asymmetric Damping Auto-tensioner, which has accomplished world-first mass production in a passenger vehicle category.

1. はじめに

近年、衝突安全性能および快適性に対するユーザニーズのより一層の向上に伴い、それぞれ負荷の増加したオルタネータ、パワーステアリングポンプおよびエアコン用コンプレッサといった補機類をよりコンパクトなFEADシステムで実現することが求められている。一方でエンジン出力・トルク向上はエンジンクランク軸の角速度変動 (Eng.) 増大につながり、コスト・重量に対する制約の中でこれらの補機へスムーズに動力伝達するFEADシステムの設計をますます困難なものとしている (Fig.1)。

アクセラ23Sのマニュアルトランスミッション車 (MT車)

において乗用車カテゴリで世界初の量産化を実現した非対称ダンピングオートテンションは、こうした背景の中で特にFEADシステムのコンパクト化、低コスト化に貢献する画期的な技術であり、以下にその概要を紹介する。

2. オートテンションシステムの特徴と課題

Vリブベルト (以下ベルト) の伸びや摩耗に伴う張力低下を調整するために、ネジ機構で補機もしくは調整用プーリの位置を変更する必要のあった従来のシステムに対し、オートテンションシステムでは可動式のプーリとプーリをベルトに押し付けるスプリングを基本構造とするオートテンションを用いることで、ベルトの伸びや摩耗の影響を受

*1, 2 パワートレインシステム開発部
Powertrain System Development Dept.

*3, 4 第3エンジン開発部
Engine Development Dept. No.3

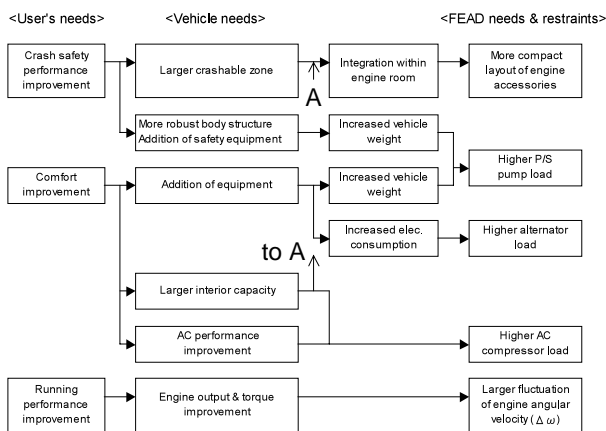


Fig.1 Needs & Restraints of FEAD

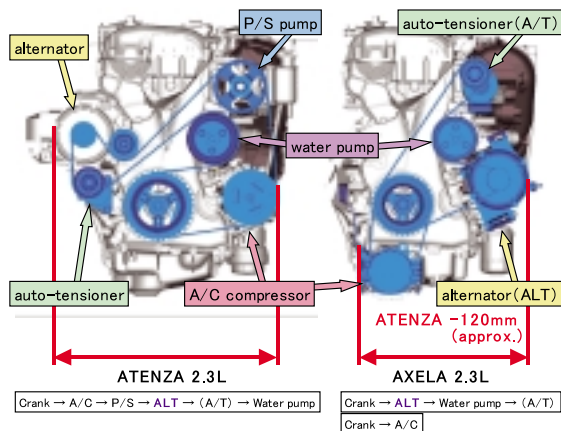


Fig.3 FEAD Layout

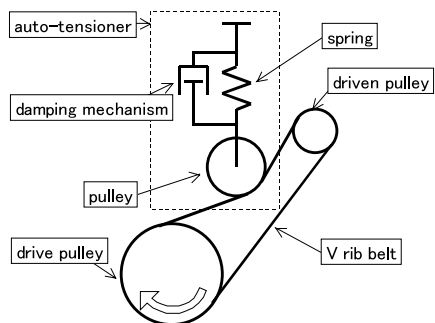


Fig.2 Structure of Auto-tensioner System

けることなく一定の張力を維持することができる (Fig.2)。ただし、可動式プーリがスプリングによってのみ位置決めされていることから、エンジクラク軸の角速度変動 (Eng.) に起因する張力変動がスプリング力を上回ると可動式プーリの揺動が発生し、ベルト弦振動等の問題が生じるため、可動式プーリの揺動を減衰する機構の付加も必要である。減衰機構には油圧ダンピング式、摩擦ダンピング式の二種が存在する。

油圧ダンピング式は高い減衰力が得られるが、部品点数が多く高コストであり、摩擦ダンピング式はコンパクトかつ低コストである反面、高い減衰力を得ることが困難である、という特徴と課題を持っている。

3. アクセラ2.3/2.0LのFEADシステム

電動油圧パワーステアリングを採用するアクセラでは、パワーステアリングポンプをFEADシステムで駆動する必要がないため、同型のMZR 1.8~2.3Lを搭載するアテンザなどとは異なるFEADシステムとなっている (Fig.3)。

オートテンショナは摩擦ダンピング式を継続して採用するが、特にエンジンルームのコンパクト化と衝突安全性能

の両立に貢献するために以下の主要な変更を行った。

- (1) エアコン用コンプレッサ (A/C comp.) をオイルパン高さに配置し、ストレッチベルトにより単独駆動化
- (2) 従来のA/C comp.位置にオルタネータを配置

(1)に関して、ストレッチベルトはベルト自身の伸縮力により張力維持を行うことで張力調整機構を廃止できるベルトである。

(2)に関して、回転慣性モーメントが大きく、かつプーリ比 (= 駆動側プーリ径 ÷ 被動側プーリ径) の大きなオルタネータはエンジクラク軸の角速度変動 (Eng.) に追従しにくいために、二つのプーリ間の回転速度差が生じて張力変動の要因となる。先に述べたように張力変動はオートテンショナのアーム揺動の原因となるため、オルタネータの配置はEng. の影響を受けにくい緩み側 (ベルト伝動順でクラクからより遠い側) とすることが一般的である。しかしアクセラでは、エンジンルームのコンパクト化と衝突安全性能の両立を優先して、オルタネータを最張り側に配置し、オートテンショナのアーム揺動抑制については減衰力を高くすることで対応した。

なかでも、トルクコンバータの作用が得られないために、運転条件によってはAT車よりもEng. が大きくなるMT車については、摩擦ダンピング式でありながら非常に高い減衰力が得られる非対称ダンピングオートテンショナを開発し採用した。

4. 非対称ダンピングオートテンショナの特徴

4.1 非対称ダンピングオートテンショナのねらい

摩擦ダンピング式オートテンショナは、プーリに連動して揺動する部位に摩擦材を設け、スプリングによりその摩擦材を揺動面に押し付けることで減衰力を発生させている。スプリングが摩擦材を押し付ける力は一定であるため減衰力も一定であり、揺動方向による差は生じない。また、

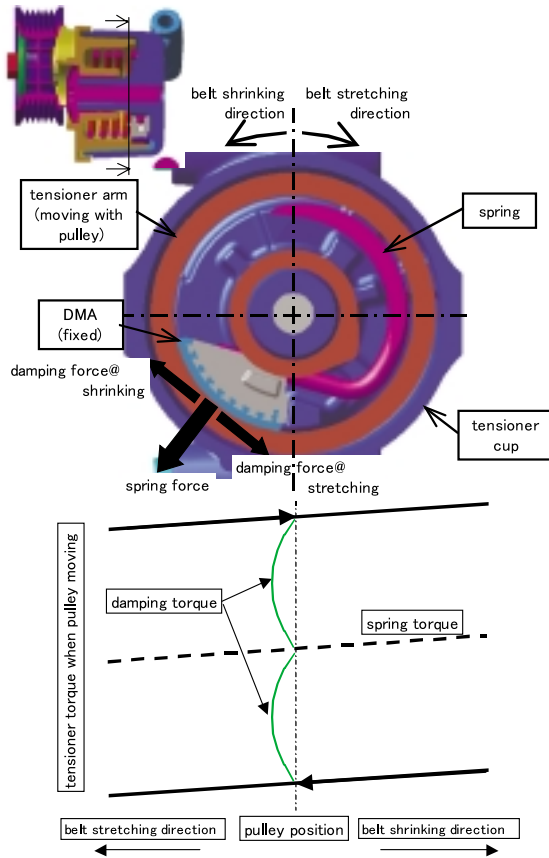


Fig.4 Structure of Normal Mechanical Auto-tensioner

アクセラに採用した摩擦ダンピング式オートテンションでは、一つのスプリングのねじりトルクによってベルト張力保持と摩擦材の押し付けの両方を行っている (Fig.4)。

このような摩擦ダンピング式オートテンションで高い減衰トルクを得るためには以下の方法が考えられる。

- ① 摩擦材もしくは摺動面の摩擦係数を増加する
- ② スプリングのねじりトルクを増加する

しかし、①では樹脂である摩擦材の信頼性上の懸念とともに、『スプリングトルク 減衰トルク』となることでプーリ位置が動かない、すなわちベルトの伸びに追従できなくなるという懸念がある。また②では、結果的にベルト張力を引き上げることになり、FEADシステム各部の信頼性確保のために追加対策が必要となる (Fig.5)。

非対称ダンピングオートテンションは、ベルトの伸び方向の減衰トルクやスプリングのねじりトルクを増加することなく、ベルトの縮み方向にのみ高い減衰力を得る、すなわち非対称な減衰トルク特性を実現することをねらいとしている。

4.2 非対称ダンピングオートテンションの構造

摩擦材を保持するDMA (Damping Mechanism Assy) は通常一つであるがこれを二分割し、一方(DMA-1)は従来どおりスプリングのねじりトルクによって摺動面であるテンションカップ内面に押し付けられる構造とし、残る一方(DMA-2)をこのDMA-1と、プーリとともに可動するアームに設けたボスに挟まれた位置に配置している (Fig.6)。

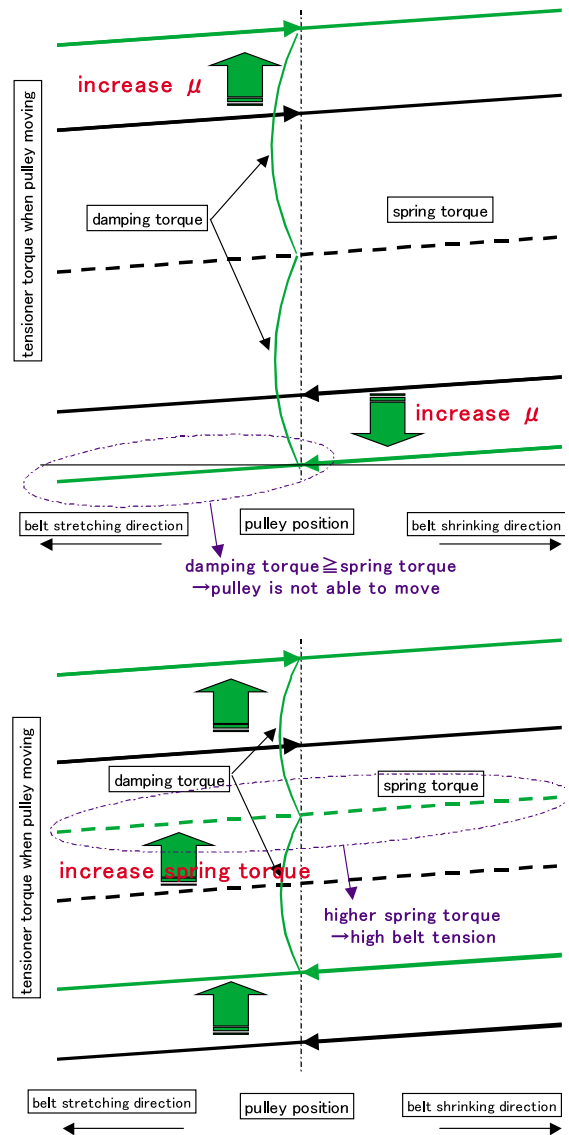


Fig.5 Methods of Getting Higher Damping

ベルトの縮み方向にアームを揺動させる力が働いた時には、この力がDMA-2をカップ内面に押し付ける力として利用されることで高い減衰トルクが発生する (Fig.7)。

ベルト伸び方向にアームが揺動する時は、DMA-2をカップ内面に押し付ける力がほとんど作用しないために、減衰トルクはほぼDMA-1によるもののみとなる (Fig.8)。

その結果、従来の摩擦ダンピング式オートテンションとほぼ同等のスプリングトルクからベルト縮み側のみ高い減衰トルクが発生することとなり、縮み側と伸び側で異なる非対称な減衰トルク特性が得られる (Fig.9)。

この考え方をういたオートテンションは一部トラック用として存在していたが、よりコンパクトさが要求される乗用車用として、より大きな非対称比『ベルト伸び側減衰トルク：ベルト縮み側減衰トルク = 約1：2』をもって量産したのは世界初の事例である。

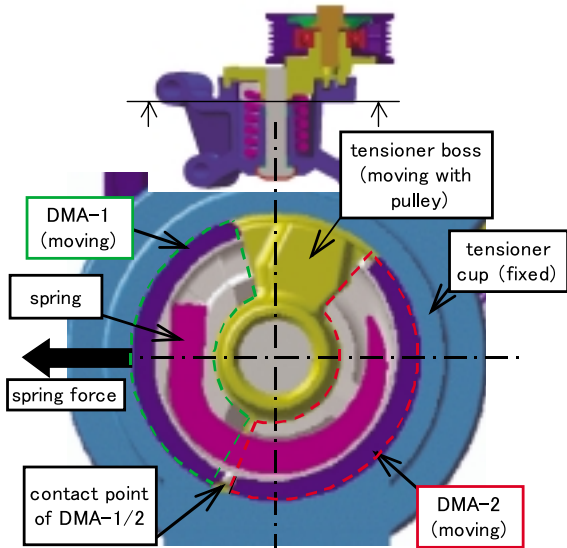


Fig.6 Structure of Asymmetric Auto-tensioner

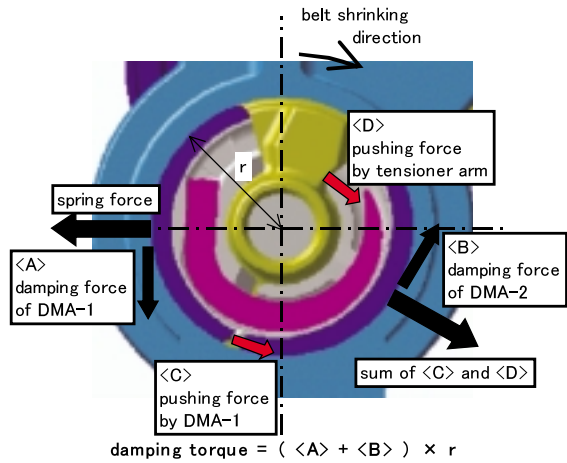


Fig.7 Damping Torque (belt shrinking direction)

5. NVH改善効果

従来型の摩擦ダンピング式オートテンションのFEADシステムで、MT車におけるエンジン低回転域での全開運転を行うとベルトノイズの発生にいたる。これは、先に述べたよう、オルタネータの回転慣性モーメントが大きいため、エンジンクランク軸の角速度変動 (Eng.) に追従しきれず、結果的に二つのプーリ間に回転速度差が生じること起因している。

二つのプーリ間の回転速度差がベルトスリップノイズにいたるメカニズムの概説図および従来型オートテンションにおけるFEADシステムの挙動解析結果をFig.10に示す。

Eng. とオルタネータの角速度変動 (ALT) の間に位相差があり、回転速度差を生じている。その結果、オルタネータがクランクよりも速い回転速度となる領域が存在する (図中①)。このとき、オルタネータ~クランク

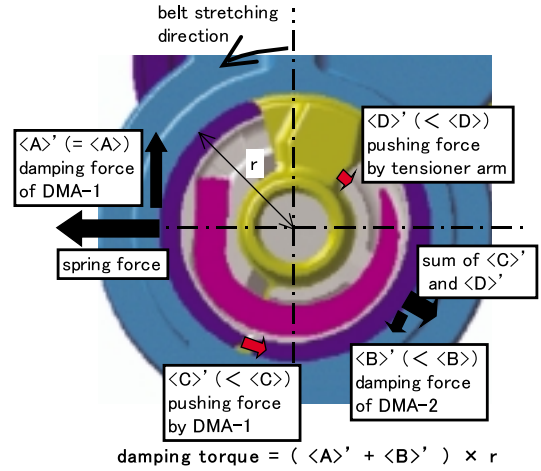


Fig.8 Damping Torque (belt stretching direction)

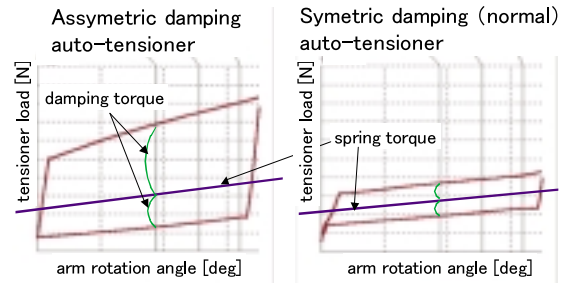


Fig.9 Damping Torque Data

間のベルト張力は低下する一方、オルタネータに引き込まれる形でオートテンション部のベルト張力が高くなる。オートテンションの減衰力が低いため、この張力変化に抗しきれずにアームが揺動を開始する (図中②)。アーム揺動中、オルタネータ~クランク間のベルト張力は低い状態が保たれ、この低いベルト張力のためにベルト弦振動が発生し (図中③)、動的にもベルト張力が低い状態が助長される。この張力低下がある限界に達したところで、オルタネータのプーリ上でベルトがスリップしノイズを発する。このことは、ベルトの速度と等価と考えられるウォータポンプの角速度変動 (W/P) をみた際に、それまでALT に追従していたものが急激にEng. に追従する挙動を示していることから説明される (図中④)。

挙動解析結果から、ALT をEng. に追従させ、二つのプーリの回転速度差を解消すればこの問題が解決できることがわかる。従来であればその手段は、回転慣性モーメントの影響をベルトに伝えなくするためにオルタネータプーリにワンウェイクラッチを設けるか、高い減衰力が得られる油圧ダンピング式オートテンションに変更するかのいずれかであった。しかし、いずれもコストおよび重量を増加させることにつながるため、オートテンションを今回開発した非対称ダンピングオートテンションに変更するとともにベルトを伸び剛性の高いものに変更することによ

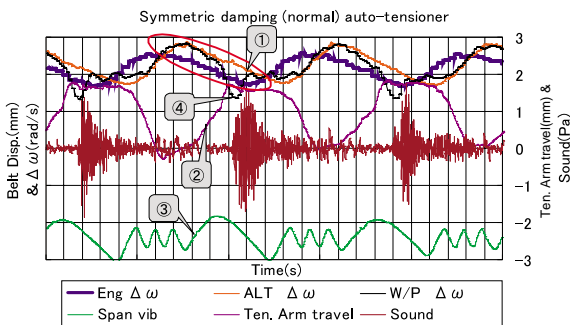
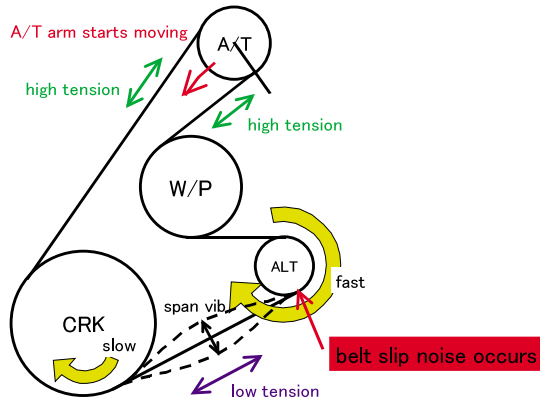


Fig.10 FEAD System Behavior Analysis (symmetric damping auto-tensioner)

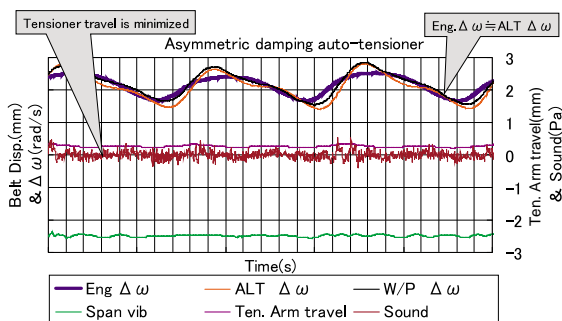


Fig.11 FEAD System Behavior Analysis (asymmetric damping auto-tensioner)

る改善効果の確認を行った。このときの、FEADシステムの挙動解析結果をFig.11に示す。

ベルト縮み側の高い減衰力により、オートテンショナのアーム揺動が抑制されており、なおかつベルトの伸び剛性も高いことからALT がEng. と位相差をもつことを規制し、その挙動は良く一致している。結果、二つのプリー間の回転速度差が極小化され、ベルトスリップノイズが解消している。

非対称ダンピングオートテンショナによって、従来の手段で免れなかったコストおよび重量増加をそれぞれコストで20%、重量で10%程度へ抑えたとともに、衝突安全性能向上に貢献するFEADシステムを構築することができた (Fig.12)。

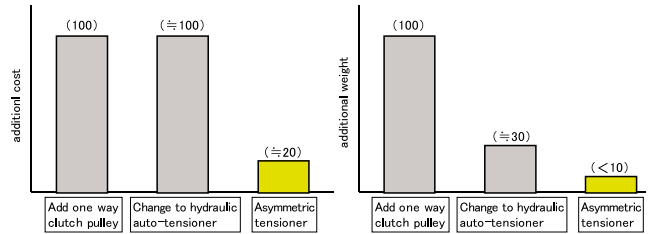


Fig.12 Cost/Weight Comparison

6. おわりに

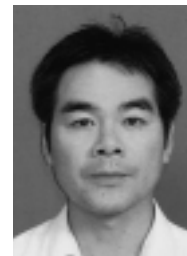
冒頭述べたように、FEADシステムに対する要求、制約はますます厳しくなっているが、今回アクセラで量産化した非対称ダンピングオートテンショナはこれらのニーズに合致した技術であると考えている。今後はこの技術をより進化させて他機種へも展開することで、高い信頼性ととも市場ニーズに合ったシステムを構築していく計画である。

最後に、アクセラでの量産化を目指した短期開発に対し、多大なるご協力をいただいた、ゲイツ・ユニタ・アジア(株)殿をはじめ関係各位に深くお礼を申し上げます。

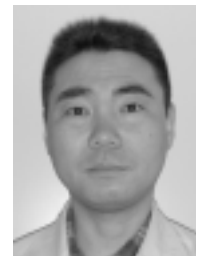
著者



山下佳行



戸郷晴雄



石田公雄



藤井伸浩

特集：アクセラ

19

アクセラのフレキシブルアクスル組立ライン構築 Achievement of Flexible Axle Assemble Line for Axela

金本 巖^{*1} 戸川 善太^{*2}
Iwao Kanemoto Zenta Togawa

要 約

防府西浦工場で2003年9月からアクセラの量産を開始した。このアクセラ導入を機に、今後継続的にお客様の求める商品力のある車をスピーディに開発・提供できるように『一度投資したら二度と投資しない、何でも流れるフレキシブルライン』をコンセプトとしたアクスル組立の絶対原価ラインを造りあげることに取り組んだ。

本稿では、組立の絶対原価の考え方とその具現化のためのライン構成方法を解説し、アクセラのアクスル組立ラインへの適用事例を紹介する。

この取組みにより、将来の新車や組立ライン間の車種移管への対応が製品接触部の治具や要具の追加・変更のみで対応可能となり、マツダのブランドDNAである『反応の優れたハンドリングと性能』を具現化する製品仕様に即応できるモデルラインを構築することができた。

Summary

At the Hofu Nishinoura Plant, the mass production of Axela has started since September, 2003. To develop and supply marketable vehicles which meet customers' demands continuously in a speedy manner, taking advantage of this Axela introduction, we have developed the Axela axle assembly line as an absolute cost line with a concept of "The flexible line which will never require additional investment and can manufacture anything."

This report introduces a philosophy of the absolute cost line for axle assembly, a method of its line configuration, and applicable cases of Axela axle assembly line.

This activity has enabled us to facilitate the introduction of a new model and the transfer of a current model from one assembly line to another only by adding or changing assembly toolings/ jigs on portions coming into contact with them, thus having built a model line which would be capable of quickly responding to product specifications embodying "responsive handling and performance" of Mazda Brand DNA.

1. はじめに

かつて画一的時代に大量生産を前提とした生産において、その原価低減を変動費のみに求め人間作業の自動化を推進してきた。しかし個性の時代へ移りかわり、顧客嗜好の多様化の中で品質やコスト面で商品力のある製品をタイムリーに提供していくためには、機種や生産台数の変動に迅速に対応可能な生産システムを作ることが求められる。

しかし、かつての自動化ラインはこの変化に対応するため、多額の改造投資が必要になったり、作業編成を阻害し固定費や変動費を押し上げて足かせとなってきた。そこで今回、絶対原価ラインを定義して組立ラインのあるべき姿を再検討し、お客様の求める車をスピーディに開発し競合力のある価格で提供可能な絶対原価組立ラインの実現を目指した。そのモデルラインとなるよう『一度投資したら二度と投資しない、何でも流れるフレキシブルライン』をコ

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

ンセプトに、新車やライン間の車種移管にフレキシブルに対応できるライン造りに取組んだ。

2. ユニット組立の絶対原価

絶対原価とは製品の構造・機能・特性により決まり、製品以外の条件（生産台数やライン形態等）に左右されない最も効率的な製造プロセスだけの正味の製造原価のことである。ユニット組立の製造原価は、作業工数を主とする変動費と設備投資の償却費を主とする固定費で構成される。

具体的にはユニット組立の絶対原価は、変動費面から言えば、作業時間が最少となるように

- ① 部品へのタッチ回数は1回
- ② 作業編成効率は100%

を満足することである。

また、固定費面から言えば、設備投資が最少となるように

- ① 初期投資の最少化
 - ・ 設備の部品へのタッチ回数は1回
 - ・ 設備負荷率100%
- ② 追加投資ゼロ

を満足することである。

ただし、品質・エルゴノミクスを満足していることを条件としている。

この考え方に基づきアクスルの組立工程を組付基準の共通範囲から工程を最小限に集約し、組立ラインのあるべき姿をFig.1に示す2姿勢組立と考えた。

すなわち、アクスルの組立工程はナックルにハブAssyを圧入しダストカバーを締め付ける工程とディスクプレートにナックルAssyを載せて、キャリア、ドライブシャフトおよびストラットAssyを組付ける工程から構成される。組立1でナックルAssyの組付けを行い、ナックルAssyを反転させて、組立2でアクスルAssyを完成させる、2姿勢での組立をアクスル組立の絶対原価ライン実現のための基本工程と考えた。

特に、絶対固定費の目標は、車種追加時に設備改造なしでアクスルを生産できるフレキシブル設備を完成することである。具体的には設備本体の仕様対応のための追加投資はゼロで、製品接触部の治具や要具の追加・変更投資のみで対応する。また、生産台数増には台数に比例した投資で対応でき、工事期間は、週末の土日ですべて完了することとした。

3. アクスル組立の現状と取組み方針

3.1 アクスル組立の現状

現状のラインは部品供給を自動化したり、大型のロボットや自動化設備で自動組付しており、設備構造は複雑となっている上に多大のスペースを必要としている。そのため、新車や組立ライン間の車種移管に対応する場合、設備改造箇所が多く多額の改造投資が必要であり、モデルチェンジ

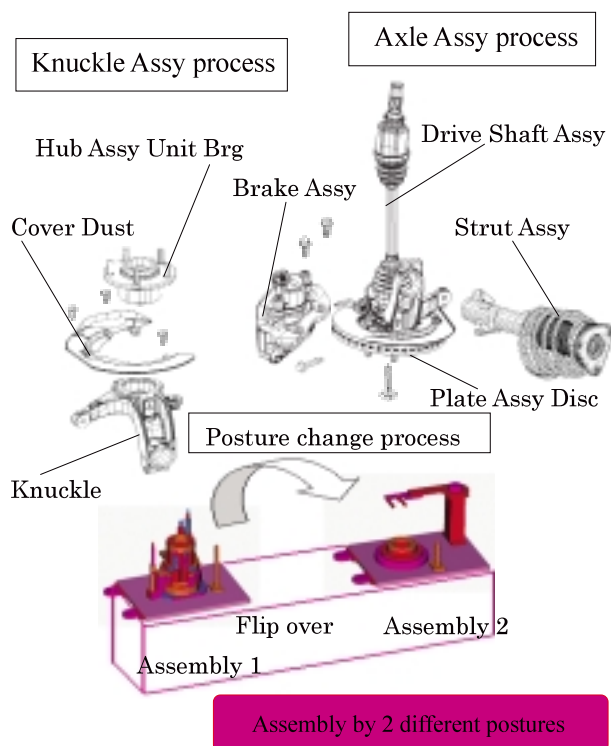


Fig.1 The Goal of Axle Assembly Absolute Cost Line

ごとに追加投資を繰り返している。

また、従来の部品の自動供給や自動組付けを行う組立ラインでは、部品供給用の間口や自動化設備で組付け不良となった場合の手直し工程、チョコ停対応の空間等を確保しているためコンベアの全長が長くなっている。このため、チョコ停復旧で作業者が長時間作業場所から離れ、稼働率の低下を招いている。更には、追加車種で自動化工程の途中にユニーク工程が発生すると、マニュアル作業では島作業（作業工程が孤立している）となり編成効率の低下を招くため、負荷率は低い自動化装置を設置しなければならない悪循環に陥っている。つまり、絶対原価の視点から評価すると自動化のために作業編成効率や設備負荷率が低下し、正味作業以外の無駄な動きが多くなっている。

これまで、品質の確保、エルゴノミクス対策や合理化のための自動化を強力に推進してきた。しかし、絶対原価ラインを具現化するためには付加価値の低い自動化装置への依存から脱却する必要がある。つまり、人がやったほうがよい作業と設備でないといけない作業を絶対原価ラインの要件に基づいてもう一度見極め、複雑な自動化設備の簡素化を図ったり、ワンタッチのマニュアル作業に置換えることが重要であると考えます。

3.2 アクセラのアクスル組立ライン取組み方針

アクスル絶対原価目標の要件から下記をライン構成の基本方針として取組むことにした。

- ① アクスルの組立工程を全車種共通の共通工程と特定の車種専用のユニーク工程に分け、ユニーク工程は自動化しない。

- ② 全車種共通工程でストローク、締付ポイント等フレキシブルな対応が必要な箇所は、マツダのアクスル全車種をカバーできる仕様を織り込む。
- ③ 手作業不可の圧入、重筋作業、高トルクの締付および品質に関する組付け・測定等は設備で行う。
- ④ 小物部品の供給、仮付けは手作業を基本とし、タッチ回数の削減と手作業領域の工程集約で効率化を図る。
- ⑤ 作業エリアは自動化設備と手作業エリアに分割し各々集約する。

4. アクスル組立絶対原価ラインの開発

4.1 絶対原価ライン実現の課題

ライン構成上の技術的な検討課題を以下に挙げる。

- (1) 自動化設備をマニュアル化することで工数増となるが、作業編成効率UPで作業員数は増やさない。
- (2) 自動化設備をマニュアル化することによりエルゴノミクス等作業環境を悪化させない。
- (3) 自動化設備に付加するフレキシブル性の範囲を決定する。

4.2 技術課題の解決活動

- (1) マニュアル化に伴う工数増懸念の検証

現行ラインにおける部品供給等の自動化を手作業に置換えることは工数増を招き、変動費のアップに繋がる事が予想された。一方、現行ラインは自動化設備が点在しているため島作業となり、待ち時間ロス・歩行ロス等が多い。今回、自動化と手作業エリアを集約することでそれらのロスを排除することができれば、手作業が増えても作業員数は増えないと考えた。

現行ラインを改造した場合と絶対原価を狙ったラインでの作業員数をシミュレーションで検証比較した結果、作業員は同数で変動費アップにならないことが判明した (Fig.2)。

- (2) マニュアル化によるエルゴノミクス悪化の対策

マニュアル作業化することで部品や機器の手扱い総重量が増加したり、無理な姿勢の作業が発生する。

手扱い重量の基準をオーバーする工程では、軽い操作力で作業を行うことができるように機器重量に合わせたアシスト力を付加する機構を採用した。

作業姿勢の改善は、作業員が正面で作業できるようにパレットの反転機構等を設け作業員が直立した姿勢で無理なく作業ができることを基本に対応した (Fig.3)。

- (3) フレキシブル化の対応範囲決定

全車種のアクスル仕様を調査し、将来の変化予測も加えて自動化設備の仕様対応範囲を決定した。

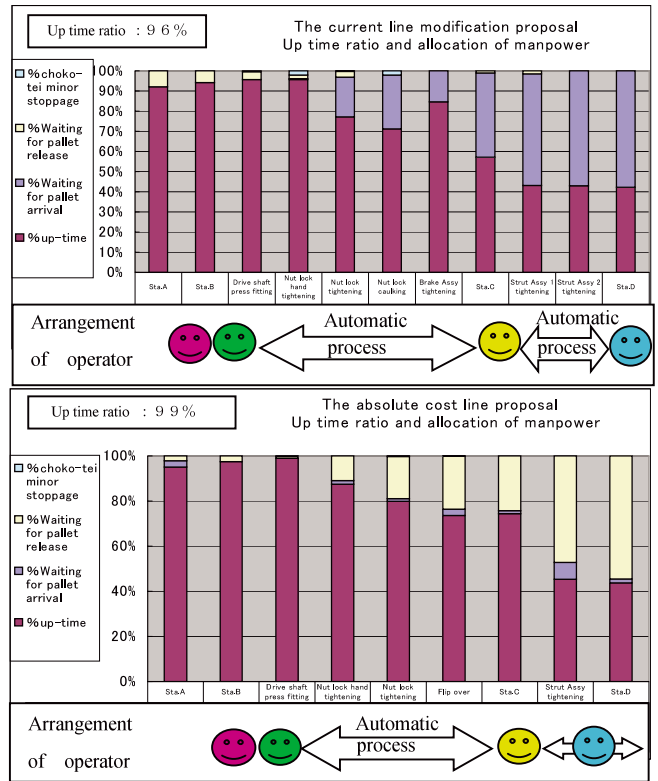


Fig.2 Verification of the Increase of Man Hours

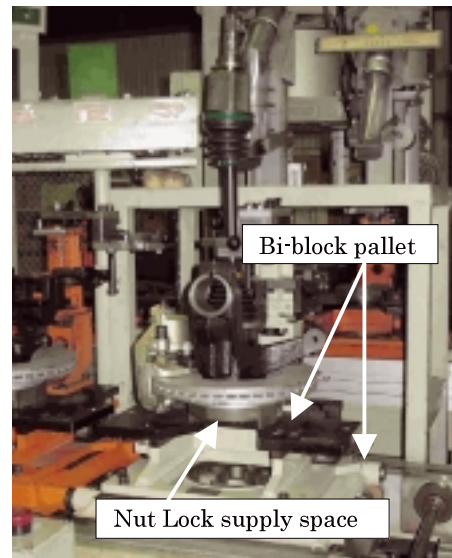


Fig.3 Pallet

5. アクスル組立ラインへの絶対原価の考え方の適用事例と結果

今まで述べた絶対原価の考え方をアクセルのアクスル組立ラインに織り込んだ内容を紹介する (Fig.4)。

5.1 適用事例

- (1) パレット (Fig.3)

パレットのサイズは今後採用予定のディスクプレートで最大の外形寸法まで搭載可能とした。また、ドライブシャ

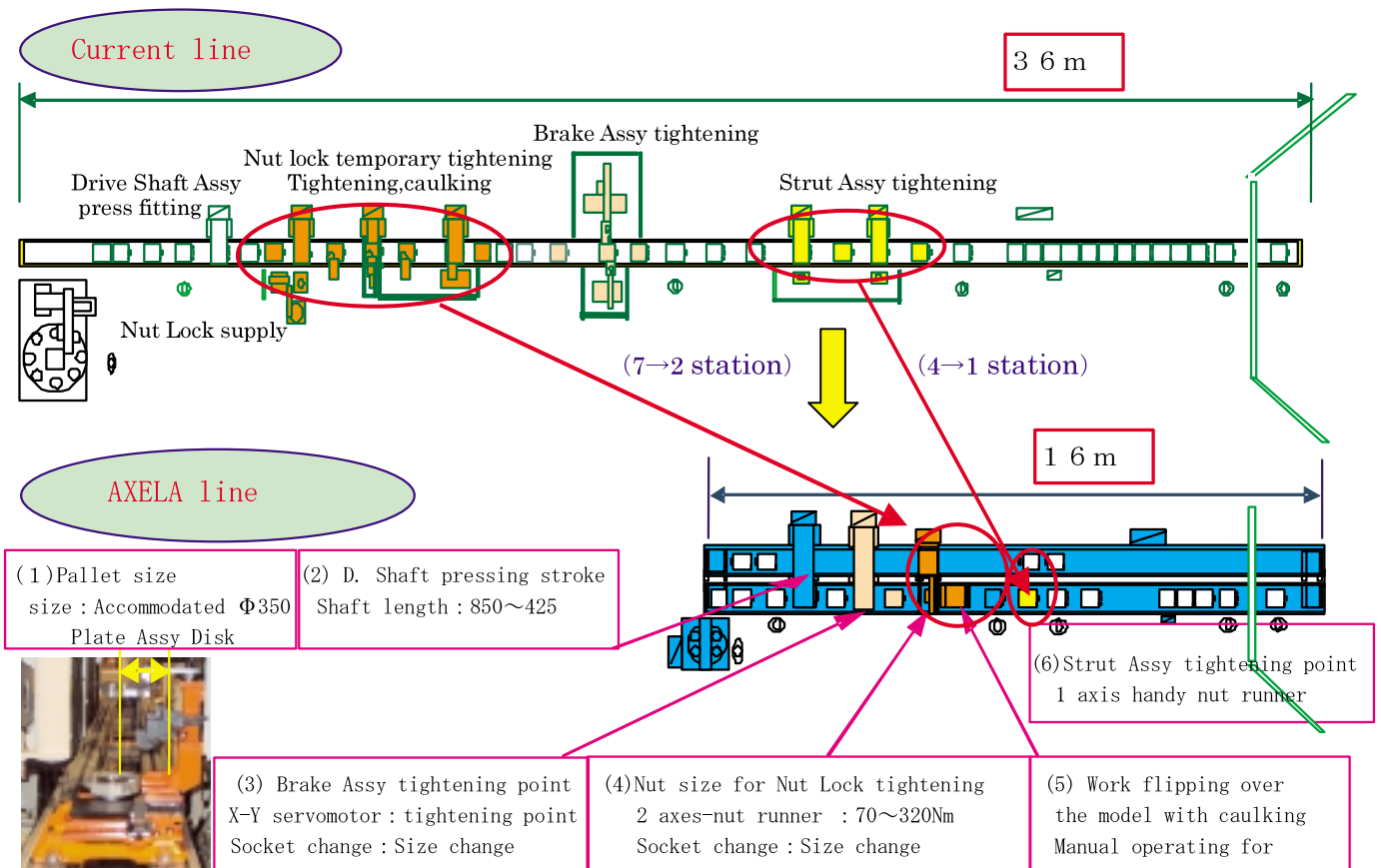


Fig.4 Item for Flexibility Worked into Equipments

フトを保持するクランプ径は今後開発予定の最大トルクに対応する軸径までとした。パレット受け面への基準箇所のサイズ違いは、ハブ外形とディスクプレートの外径とで切り分けて全機種がセットできるようにした。

また、パレットの構造を2分割構造にし、反転装置でパレットを90度反転させて従来のパレット下側の作業を作業者の正面でできるようにした。

同時にパレットの上下ベースプレート間に手が入る隙間と切り欠きを設け、ロックナットの供給を1タッチの手作業でできるようにした。この構造により、パレットの下方からロックナットを自動で供給していた従来の方法を、手作業に置換えることができた。

(2) ドライブシャフト圧入 (Fig.5)

ドライブシャフトの圧入では機種によるドライブシャフトの長さの差を最大425mmまで、中間パンチを切り替えることで対応した。

また、ロックナットを直接手で供給できるように装置の左側を開放した。これにより、ドライブシャフト圧入の前工程の作業者が圧入後にロックナット供給と仮締め作業を工程間移動なしで対応可能になった。

(3) キャリパー締付 (Fig.6)

締付ポイントを自由に設定できるようにNCサーボを採用し、パレット内であればどこでも締付ができるX-Y型ロボットを設置した。これにより、現状水平多関節のロボ

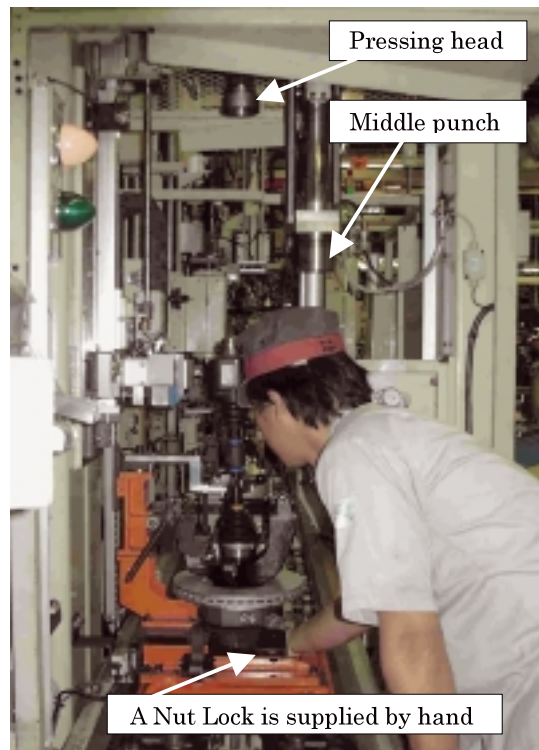


Fig.5 Drive Shaft Assy Press Fitting

ットで締付を行っている場合に比べ、省スペースでステーション間ピッチを小さくでき、パレット搬送距離を短くすることができた。

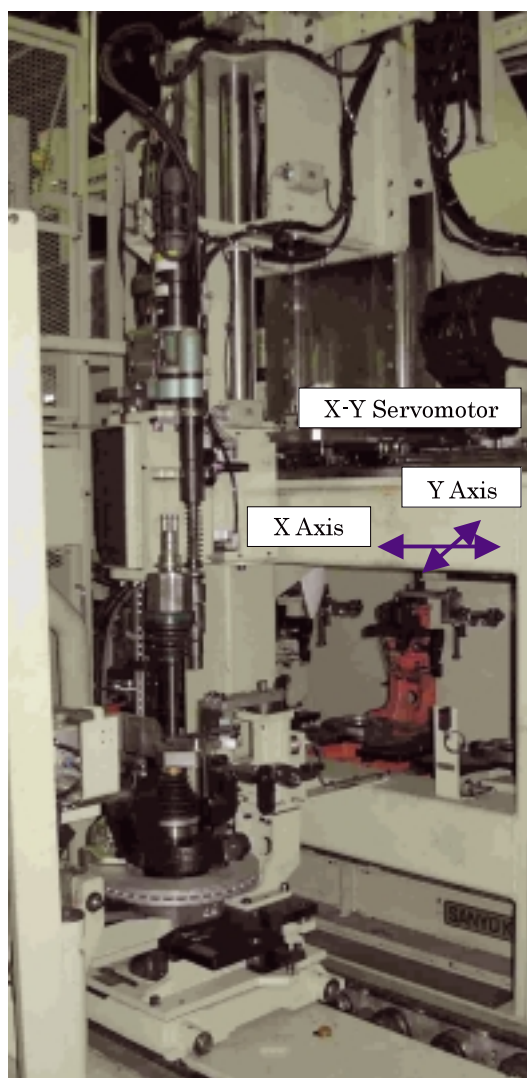


Fig.6 Brake Assy Tightening

ねじサイズが異なる場合は、ソケットチェンジャを設け2タイプまで対応した。

(4) ロックナット締付

2軸のナットランナを切り替えることで、締付トルク70~320Nmまで対応できる。

ねじサイズが異なる場合の対応は、ソケットチェンジャの採用で3タイプまで対応可能にした。

これまで締付不良時の手直しはワークをパレットから降ろして手直し治具台で対応していたが、次に述べるパレットの反転装置を活用しその場での手直しが可能にした。

(5) ロックナットかしめ (Fig.7)

新たにハンディのかしめ具を開発し、従来のパレット下側からの自動かしめを反転装置でパレットごとワークを90度反転させることで、作業者正面からマニュアルでのかしめ作業を可能にした。ハンディ化することでかしめポイントに対するフレキシビリティが確保できた。

これまでかしめ不良時の手直しも、かしめ状態が見えないためパレットから降ろして手直し治具台で対応していたが、パレットを反転させてその場でのハンディかしめを行

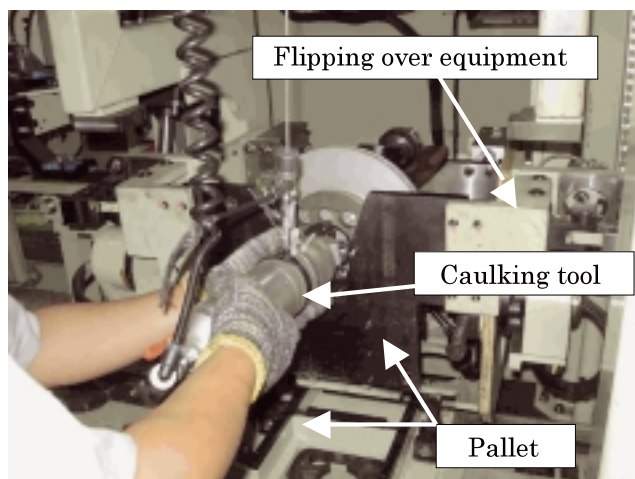


Fig.7 Flipping over equipment and Nut Lock caulking tool

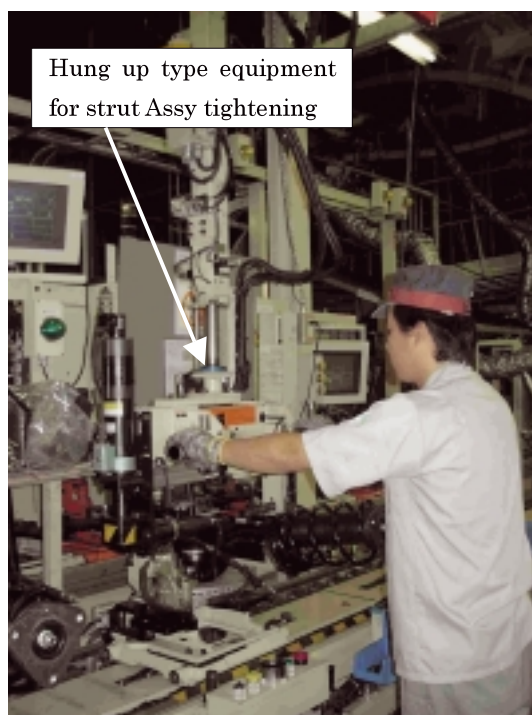


Fig.8 Strut Assy Tightening

うためアクスルを着脱するステーションが不要となった。

上記のロックナットの供給、仮締め、締付およびかしめ工程において、人と設備をうまく共存させることで、従来の7ステーションを2ステーションに集約することができた (Fig.4)

(6) ストラット締付 (Fig.8)

従来は、ストラットの締付は右と左で締付方向が逆であるため、2工程に分けて自動締付を行っていた。今回、1軸の吊り下げ型ハンディナットランナで180度旋回を可能にして、締付位置・軸数の変化に対応した。

締付の位置決めまでは人が操作するが、締付時に装置をロックし、作業者は隣の工程と作業が掛け持ちできる構造・制御にした。この結果、従来の4ステーションを1ステ

ーションに集約することができた。

5.2 結果

以上の取組みにより, Fig.4に示すように現行ラインの全長を36mから16mに半減でき, 配置人員を増やすことなくフレキシビリティの高いラインが実現できた。

6. 成果

6.1 製造原価

アクセラのフロントアクスル組立ラインの製造原価は, ベンチマーク (BM) 比67%まで低減できた。また, 絶対原価達成までの課題の50%を解決できた (Fig.9)。

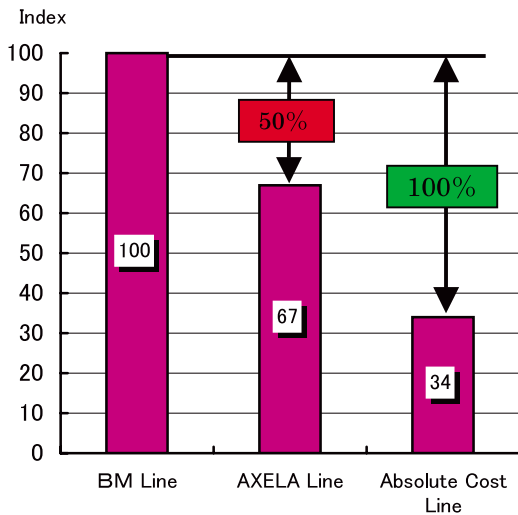


Fig.9 The Manufacturing Cost on Front Axle Assembly Line

Table 1 The Investment for Additional Models into Axela Line

○ : No countermeasures is required

| | Drive Shaft Assy press fitting | Brake Assy tightening | Nut Lock tightening | Nut Lock caulking | Strut Assy tightening | Pallet | The ratio of the additional investment |
|--------------------|---|--------------------------|--------------------------|---------------------------------|-----------------------|---|--|
| Current model A | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | 0% |
| Current model B | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | 0% |
| Current model C | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | 0% |
| New model D | ○ | ○ | ○ | — | ○ | ○ | 0% |
| New model E | ○ | ○ | ○ | — | ○ | ○ | 0% |
| Other type model F | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | 0% |
| Other type model G | Modification of the chucking unit | The addition of a socket | ○ | — | ○ | Modification of the clamping unit | 3% |
| Other type model H | ○ | The addition of a socket | ○ | — | ○ | Modification of the clamping unit and the jig | 4% |
| Other type model I | Modification of the pressing head and the chucking unit | The addition of a socket | ○ | ○ | ○ | Modification of the clamping unit | 4% |
| Other type model J | Modification of the pressing head | The addition of a socket | ○ | ○ | ○ | Modification of the clamping unit | 5% |
| Other type model K | Modification of the pressing head and the chucking unit | The addition of a socket | The addition of a socket | The addition of a caulking unit | ○ | Modification of the clamping unit | 7% |

6.2 追加投資

今回のアクスル組立ラインで, 他ラインのアクスルを生産する場合の追加投資検証結果をTable 1に示す。パレット治具の改造や要具の追加のみで1車種当たり初期投資の7%以下で対応できることが確認できた。

7. 今後の課題

究極の絶対原価ラインを目指し, タッチ回数の最少化を実現して2姿勢でアクスルAssyを組立完了させるため,

① タッチ回数を1回にするためのボカヨケ検知や仮締めを廃止できる部品形状の追究

1工程でタクト内にアクスルAssyを完結できる複合機能を持つ設備の開発

1人の作業者正面に全部品を供給できる物流システムの開発

に取組む。

今後, これらの周辺技術の進展を絶えずウォッチしながら課題解決を図り, 製造原価の低減に継続して取組む。

8. おわりに

アクセラのアクスル組立ラインを計画通りフレキシブルラインに生まれ変わらせることができ, 革新的な発想と地道な努力の重要性を痛感するとともに, マツダのブランドDNAである『反応の優れたハンドリングと性能』を実現する製品仕様に即応できる組立のモデルラインを造りあげることができ, お客様のニーズにスピーディに対応可能なシステムが構築できたと考えている。今後は, アクスル組立の全ラインに水平展開していく。

最後に, この組立ラインの導入に多大なるご協力を頂いた社内外の関係者の方々へ, 深く感謝の意を表します。

著者



金本 巖



戸川善太

論文・解説

20

ロードスタークーペの紹介 Introduction of ROADSTER COUPE

上村 博*¹ 磯部 重隆*² 鈴木 健*³
 Hiroshi Uemura Shigetaka Isobe Ken Suzuki
 山根 文昭*⁴ 武田 圭介*⁵ 姫路 吉博*⁶
 Fumiaki Yamane Keisuke Takeda Yoshihiro Himeji

要約

ロードスタークーペは、人とは違うクルマの楽しさ、美しさを求める人のために、マツダが発信するカスタマイズカー第一弾である。スポーティなダイナミズムと個性的なスタイルを両立させたデザインを特徴とし、ロードスターの持つ人馬一体の走りの楽しさを更に進化させた2シータスポーツクーペである。

本稿では、画期的ともいえる極少量生産車の車体生産対応を中心に紹介する。

Summary

“Roadster Coupe” is the first customized car Mazda has presented for the people who desire a bit different fun-to-drive and beauty of vehicle. It features the design which combines sporty dynamism with a distinct styling. “Roadster Coupe” is a two-seater sports coupe which has further developed fun drivability derived from Roadster’s “oneness between horse and rider”.

This paper presents mainly our innovative body production process for a very small production.

1. はじめに

初代ロードスターが誕生以来、数回に渡りクーペモデルの検討が行われてきたが、量産モデルとしては価格の整合性がとれず、これまで商品化することが出来なかった。しかし、極少量生産を前提としたうえで投資のミニマム化を図るとともに、生産ラインと(株)マツダE&T(以下、マツダE&T)特装工場をミックスした極少量生産に最適な生産フローを構築することで、商品化することが可能となった。

今回発売したロードスタークーペは、マツダE&Tが2002年1月の東京オートサロンに「RSクーペ」の名称でコンセプトモデルとして初めて出品し、以後、ショーでの反響を基にディテールの見直しや生産性の検討を行い、カスタマイズカーとして新たなモデルを提案したものである。

2. カスタマイズカーのマーケット

国内におけるカスタマイズカーのマーケットは2001年の年間規模で販売台数約4万台、売上高1,000億円程度と推測

されており近年拡大傾向にある。また、カスタマイズカーの祭典である東京オートサロンの入場者数も年々増加してきており、2003年1月の開催時の入場者数は3日間合計で252,849人(前年度比較: +4,957人)と東京モータショーに匹敵するイベントとして注目を集めている。

一方、自動車各社の状況として、トヨタ自動車(株)は「モデルスタ」、日産自動車(株)は「オーテック」、富士重工業(株)は「STI」といったカスタマイズブランドを各社立ち上げ、カスタマイズカー市場に参入するとともに多様化するお客様のニーズに対応する体制を構築してきている。

3. 商品コンセプト

ロードスタークーペの基本コンセプトは「50年代のちょっとレトロでヒューマンタッチの小粋で魅力的なデザインのスポートクーペ」であり、「量産のクルマにはない個性と自由な表現を持ったクルマを提供する」ことである。

最大のポイントは、ロードスター自体がもつリヤフェンダの抑揚を生かし、キャビンからリヤフェンダへと流れる流麗なラインを造形することで、50年代のスタンダードで

*1 第2プログラム開発推進室
Program Management Office No.2
*3 試作部
Prototype Fabrication Dept.

*2 車体技術部
Body Production Engineering Dept.
*4~6 (株)マツダE&T
Mazda Engineering & Technology Co.,LTD

魅力的なクーペボデーとしたことである。

また、フロントフェイスの変更やエアロパーツを追加したモデルを設定し、多様化する市場ニーズに応えた商品を提供することである。

一方、クーペ化による車体剛性の向上は、走りの楽しさを一層進化させるとともに、国内唯一の5ナンバークーペとしての希少性を合わせ持つ車両である。

4. 車種構成と主要諸元

4.1 車種構成

(1) ボデータイプは2ドアクーペのみであり、フロントバンパやエアロパーツを設定することによりエクステリアデザインに違いを持たせた (Table 1)。

車種としては、イタリアンテイストを表現したType-A (Fig.1)、クラシカルでエレガントなType-E (Fig.2)、ライトスポーツのチューニングベースとなるType-SおよびROADSTER COUPE (Fig.3) の4車種を設定している。

インテリアはType-Eがベージュ色をベースに、その他の車種はブラックをベースとしている。

パワートレイン/シャシーはベースとなるロードスターを流用搭載している。

4.2 主要諸元

スタイリングを確立させるために、キャブサイド、ルーフおよびトランクリッド等の構成部品を新規に設定しているが、重量増加はベースとなるロードスターに対して約10kg増に抑えている (Table 2)。



Fig.1 Exterior Type-A



Fig.2 Exterior Type-E



Fig.3 Exterior Type-S and ROADSTER COUPE

Table 1 Line-up

| Unique Parts (Exterior) Overview | Type-S/ROADSTER COUPE | Type-E | Type-A |
|----------------------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------|
| Front Bumper Face | Genuine Normal Type | E-Type Original | A-Type Original (FRP) |
| Front Lip Spoiler | — | — | A-Type Original (carbon) |
| Side Lip Spoiler | — | — | A-Type Original (carbon) |
| Rear Under Spoiler | — | — | A-Type Original (carbon) |
| Trunk Spoiler (Rear Spoiler) | — | — | A-Type Original (FRP) |
| Fender Arch Protector | — | — | A-Type Original (FRP) |
| Headlamp Vessel | — | E-Type Original | Genuine Accessory C/O |
| Rear Combination Vessel | — | Genuine Accessory C/O | Genuine Accessory C/O |

5. ロードスタークーペの特徴

5.1 エクステリアデザイン

マツダには世界で確固たる地位を築いた「オープン2シタスポーツ」の「ロードスター」が存在する。

ロードスタークーペでは、ロードスターのグラマラスなボデー曲面を生かした「小粋で魅惑的な2シタスポーツ

Table 2 Key Dimensions

| Model | ROADSTER COUPE | ROADSTER COUPE Type-S | ROADSTER COUPE Type-A | ROADSTER COUPE Type-E |
|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Name/Type | Mazda GH-NB6C (Modified) | Mazda GH-NB8C (Modified) | | |
| Engine | B6-ZE[RS] 1597cc | BP-VE[RS] 1839cc | | |
| Transmission | 5-speed Manual | 6-speed Manual | 6-speed Manual | 4-speed Automatic |
| Drive System | FR | | | |
| Overall Length (mm) | 3955 | 3955 | 3995 | 3970 |
| Overall Width (mm) | 1680 | 1680 | 1695 | 1680 |
| Overall Height (mm) | 1240 | 1240 | 1240 | 1240 |
| Wheel Base (mm) | 2265 | | | |
| Min. Road Clearance (mm) | 135 | 130 | 130 | 135 |
| Vehicle Weight (kg) | 1040 | 1100 | 1110 | 1090 |
| Riding Capacity (person) | 2 | | | |

クーペ」をデザインした。

全国のロードスター倶楽部の方々と語り明かした結果、出てきたキーワードは、「ほっとする」、「懐かしい」、「飽きの来ない」、「ヨーロッパの香りの」、「小粋で魅惑的な」...であり、これらの言葉の中にはスポーツカー好きユーザの思いが表現されている。

この思いを具現化するため、外観テーマとして魅惑的な造形美を持たせた「ネオ ノスタルジックデザイン」の演出を基本構想とした。

5.2 極少量生産車の車体生産対応

(1) これまでの少量生産車との相違点

これまでの派生車や限定車は、現行車と比較して変更点が小さく、対応としては主として次の2つで行われた。

ライン内の設備に改造を加え、ライン内で通常の量産車の中で生産する。

(例；MPVリヤエンターテイメント)

量産ラインで完成したホワイトボデーを台下に降ろし追加加工を加える。

(ロードスターマツダスピードVersion)

しかし、今回のロードスタークーペは、ベース車をオープンカーであるロードスターとし、プラットフォームをキャリアオーバーしてクーペタイプの車を派生させる企画であり、変更点が大きく、今までの少量生産車とは全く異なるものである。

そのため、現行の量産ラインで車体生産するには、設備改造のための多大な投資費用と改造期間を必要とし、改造によって現行車生産にも影響を与える可能性もあった。

よって、車体の生産は量産ラインを通さず、別ラインを設定することにした。

(2) ベース車からの変更点と開発条件

デザイン条件を満足させ、なおかつ型投資をミニマムに抑えることを目的に部品の新設/流用を吟味し、ベース車からの変更はFig.4に示す部品に絞り込んだ。

ベース車のアンダーボデーおよびフロント周りは流用、リヤフェンダ、ルーフおよびトランクリッドは新設、その他(クォーターインナAssembly, バルクヘッドおよびAピラーなど)は現行部品を追加加工(一部カット)して流用している。

開発条件は、以下の通り。

- ・仕 向 け...国内のみ
- ・生 産 台 数...40台/月(2台/日)
- ・生 産 期 間...20ヶ月
- ・総生産台数...800台
- ・溶 接 作 業...全て手作業(試作車同様)

(3) 生産方法

このような極少量生産車を生産するにあたり、いかにコストを抑えて生産出来るかが鍵であり、マツダの「量産開発技術」とマツダE&Tの「少量生産技術」を最大限有効

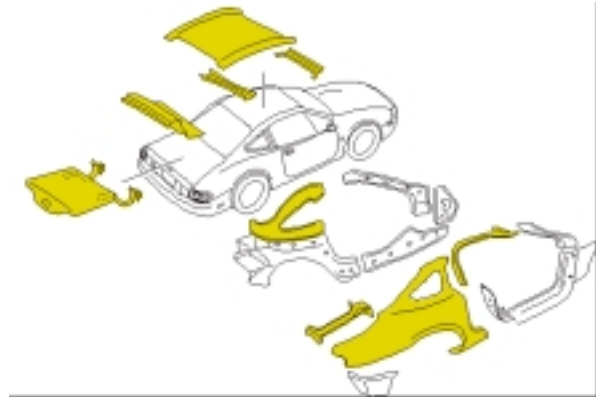


Fig.4 Changed Parts

活用して、投資のミニマム化と品質維持を両立させた、画期的な車体生産方法を立案した(Fig.5)

ロードスタークーペの車体の生産は、先に述べた通り、現行のロードスターから多くの部品を流用する。

まず、量産ラインで生産されるプラットフォームおよびその他の流用品(クォーターインナAssembly, サイドシルAssembly等)は生産工程から途中で抜き取り、マツダE&Tへ搬入する。

大物のロードスタークーペユニーク部品は主にマツダ試作部にて製作することにした。

それらの部品をマツダE&TにてサブAssemblyし、簡易ドックにて車体コンプリートに仕上げる。

完成した車体コンプリートは車体工場に搬入し、通常の車両と同じ、塗装工程、車両組立工程にのせる。

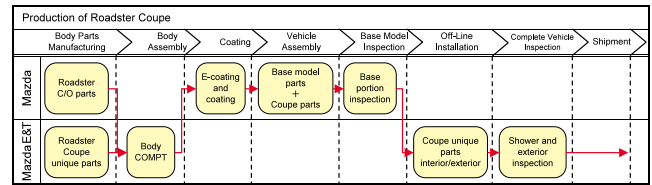


Fig.5 Production Flow

ただし、構造上、量産ラインの生産タクトで組立出来ない部品についてはマツダE&Tでの組付けとし、半完成の状態ではメインラインをオフさせることにした。

マツダE&Tでは、フロントバンパ、ウエザーストリップおよび内装等のユニーク部品を組付け、検査を行い完成となる。

(4) 低コスト、短期間で造るための取組み

極少量生産車を低コストで造るためには、投資を最少限に抑え、ライン設備を如何に効率よく活用出来るかが鍵であると考え、先に述べた生産フローを構築した。

そのための取組みは、以下の通り。

- 1) 試作型を量産転用
- 2) 車体組立治具は試作・量産を共用
- 3) 専用手動ドック
- 4) 遊休設備を最大限活用
- 5) 検査具レスの品質確認
- 6) 作業者の短期育成

以下具体的に述べる。

1) 試作型を量産転用

外板部品の生産は、生産台数が少ないことから、試作型・量産型と造り替えせず、試作型の一型で対応した。

絞り形状の深いリヤフェンダは、試作部でスタンピング・シミュレーション (Auto Form) を用いて何度も製品形状評価、成形性評価および生産性評価を行い、ボリュームのあるデザイン形状の成形を実現可能にした (Fig.6)。

2) 車体組立治具は試作・量産を共用

試作車用のボデーを作る前段階で、量産工程を想定した治具の設計・製作を試みた。試作時には、その工程数および作業性を確認し、改善を加えて量産に対応すべく育成を行った。

このことで、治具の設計・製作費用の大幅削減が可能となった。これは、現在の試作車を作る方法と同じ工程とすることを基本に置き、それに量産性をプラスするという考え方に基づいた結果である。

3) 専用手動ドック

設備費の低減として、車体組立ドックのシンプル構造化を検討した。汎用性には欠けるが、サイドフレーム形状に合わせた柱を組んだものに基準部の治具を組付ける構造を採用し、ロードスタークーペ専用のシンプルなドックとした。

また、パーツをクランプする作業も自動ではなく、すべて手動で行うことにしてコストを抑えた。

4) 遊休設備を最大限活用

車体製作時に使用する溶接機は、電極形状の異なる溶接機を数多く必要とするため、これらを新規購入すると多大

な投資が必要となる。この投資発生を抑える手段として、マツダの遊休設備をマツダE&Tの車体工場に移設し、最大限活用することを考えた。その結果、トランス・タイマーについては100%、ガンについては80%遊休設備を活用することが出来、設備投資を大幅に削減出来た。

5) 検査具レスの品質確認

通常、量産部品は単品ごとの検査具があり、その検査具によって精度保証を行っているが、ロードスタークーペは専用の検査具は設定せず、三次元測定機 (CMM) による形状測定で品質保証を行う体制を構築した。

6) 作業者の短期育成

このように、ほとんどの工程を手作りとしたことで課題となったのは、作業者の育成である。

自動化が進んだ昨今では、手作業でスポット溶接を行う作業や、鋼板をMIG溶接でつなく作業のスキルを持つ作業者は少ない。

車体製作を担当したマツダE&Tにおいてもこれらスキ



Fig.7 Hand-powered Dock

ルが必要となり、マツダに僅かに存在する熟練技能者の技術支援を受けて、マツダE&T作業者の育成・訓練を行うことにした。

その際、短期に技能を修得することを目的に、技能五輪経験者でモノ作りに情熱を燃やす若者を選んだ。

スポット作業は、量産ラインで一部手作業によるスポットが行われている工程にて訓練し、MIG溶接については、マツダの技能訓練所にて指導・教育を実施した。

また、車体をアッセンブリしていくために必要なノウハウは、試作部の熟練技能者が、試作車段階から実際の車体作りを通して指導することで習得することが出来た。

6. おわりに

以上、ロードスタークーペの開発の狙いと商品概要について簡単に紹介した。

ロードスタークーペは、狙い通り「量産のクルマにはない個性と自由な表現」を持ったクルマに仕上がったと思う。特に車体の生産方式については、マツダの「量産開発技術」

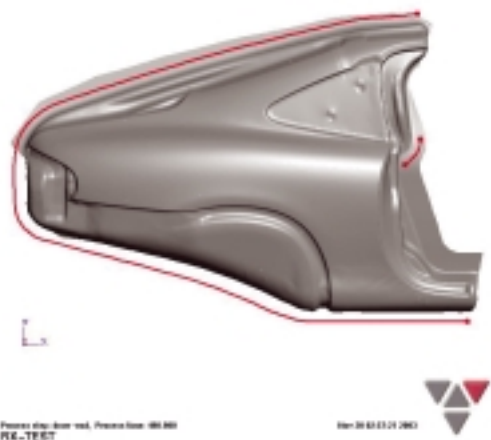


Fig.6 Stamping Simulation

とマツダE&Tの「少量生産技術」とが見事に融合することによって成し遂げられたものである。

マツダにとってラインナップのニッチを狙った商品展開は必須であり、そのためには新モデルに匹敵する少量生産車種をミニマムな投資とミニマムな期間で商品化するノウハウを持つことが不可欠である。

ロードスタークーペは、その布石となる第一歩である。

著 者



上村 博



磯部重隆



鈴木 健



山根文昭



武田圭介



姫路吉博

論文・解説

21

側突クラッシュシミュレータによる衝突安全性能開発 Development of Side Impact Performance Using Crash Simulator

元木正紀*1 福谷和也*2

Masaki Motoki

Kazuya Fukutani

伊東紀明*5 尾川茂*6

Noriaki Ito

Shigeru Ogawa

要約

近年の自動車安全性能への高い市場要求に迅速に対応するため、マツダはより安全な車を短期間で開発できる Virtual Testing に取り組んでいる。この開発では実車現象を精度良く再現できる実験手法を確立し、この実験手法を軸として実車からユニットレベルにカスケードする開発プロセスの構築と、車両テストでは計測が困難な領域のデータを計測することでCAE精度の向上を目指している。

本稿では、新しい衝突実験手法の事例として、力学モデルを使用して解析的に実車の再現精度を向上させた側突クラッシュシミュレータの技術開発について紹介する。

Summary

In order to promptly correspond to high market demands for an automobile safety performance in recent years, Mazda has been working toward further development of the Virtual Testing Technology which can contribute to short-term development of safer cars. The Technology has two aims: one is to develop the experimental methodology which can reproduce collision test phenomena with high precision, and to perform a development process in a unit level with the methodology, and the other is to improve CAE accuracy by measuring such detailed data that cannot be obtained with actual vehicles.

This paper introduces one of applicable examples of a new approach to crash testing, particularly technology development of a side impact crash simulator capable of analytically improving vehicle reproducibility using dynamic models.

1. はじめに

車の衝突時の乗員保護性能は年々向上し、死亡事故率は1980年代に比較して現在では50%近くに低減されている。しかし、側面衝突では、低減率が24%に留まり更なる安全性の向上が必要である。更に近年アメリカではSports Utility Vehicle (SUV) の増加のため、大型車両の事故時の加害性、特に側面衝突時の問題が注目されており、このような社会的背景から、アメリカの保険会社が出資設立したInsurance Institute for Highway Safety (IIHS) は、2002年からSUVが普通乗用車の側面に衝突する状態を模擬した試験を開始した。

IIHS側突試験は、米国道路交通局が従来から実施している側面衝突テスト (LINCAP) の試験方法と比較して、Table 1のオレンジ色の部分に示すようにバリアを高くし、

バリアの前面形状もSUVのような凸形状としている。更に乗員傷害値の計測には、小柄な女性の人体特性を再現させ

Table 1 Comparison of IIHS and LINCAP

| Test Mode | | IIHS | LINCAP |
|---------------------------------|--------|----------------|--------------|
| Test Velocity | | 50km/h | 62km/h |
| Club Angle | | 0° | 27° |
| Impact Point Height from Ground | | 379mm | 279mm |
| Barrier | Shape | Convex surface | Flat surface |
| | Height | 759mm | 559mm |
| | Mass | 1500 kg | 1367 kg |
| Dummy | | SID-IIIs | SID |

*1~6 衝突性能開発部
Crash Safety Development Dept.

たSID- sダミーを使用するため、乗員保護性能に対してもより厳しい評価になっている。こうした市場の高い安全性要求に応えるべく、マツダはより安全な車を短期間に市場導入できる開発に取り組んでいる。このような乗員保護性能の開発を効率的に実施するためには、クラッシュシミュレータを用いてユニットレベルで開発初期から乗員保護装備の開発を行う必要がある。これまで、技術開発では本装置を活用して前面衝突時の乗員保護性能の向上を図ってきた。本稿では、クラッシュシミュレータの適応を更に側面衝突開発の領域まで拡大するための適用技術開発について、IIHS側突を事例に報告する。

2. クラッシュシミュレータの概要

2.1 側面衝突の現象

実車の乗員保護性能を確認する側面衝突テストは、車を模擬した移動式バリアを、傷害値計測用のダミーを搭載したテスト車両に衝突させるものである。この現象を模式的に表したものがFig.1であり、バリア、ドア、ダミーの順に連続的に衝突し乗員に傷害を発生させる。この傷害レベルをダミーによって計測するようになっている。Fig.2は、この時のバリア、ドア、車体の速度の変化を示している。衝突時にバリアは車体からの反力を受けて緩やかに減速し、逆に車体はバリアからの入力で緩やかに加速し、両者は最終的に一定の速度に収束していく。一方ドアでは、バリアによって急激な局部変形が生じ、これによって乗員に

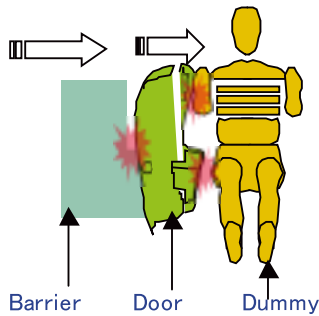


Fig.1 Side Impact Phenomena

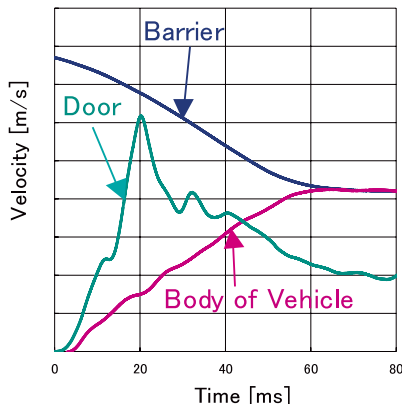


Fig.2 Velocity in the Side Impact Test

傷害を引き起こす。この急激な変形すなわちドアの進入速度を合わせることが、クラッシュシミュレータで側面衝突の乗員傷害値を再現させる重要なポイントになる。

2.2 クラッシュシミュレータの仕組みと性能

Fig.3のクラッシュシミュレータは、近年各自動車メーカーや市場評価テスト機関が導入を進めている衝突テストの台上評価試験装置である。本装置は、アキュムレータに蓄圧された油圧を制御し衝突波形を再現する機能を持ち、実際の車を衝突させずに乗員の保護性能を実験的に評価できる。側突クラッシュシミュレータは、Fig.2のドア速度波形を再現させるため、強力な減速ブレーキを装備している。本装置の能力は、600kgの積載質量時に1,000m/s²の加速と400m/s²の減速が可能である。

2.3 側面衝突現象の台上再現方法

Fig.4に示すように側突クラッシュシミュレータは、スレッド台車に入力する油圧ピストン、同台車に固定したドア、同台車上に搭載する計測用ダミーの3つの部分から主に構成されている。これらが、下記の順で作動し側面衝突現象を再現する。

- (1) スレッド台車は目標波形に合うように、ピストンからの入力で加速され、ブレーキによって減速される。

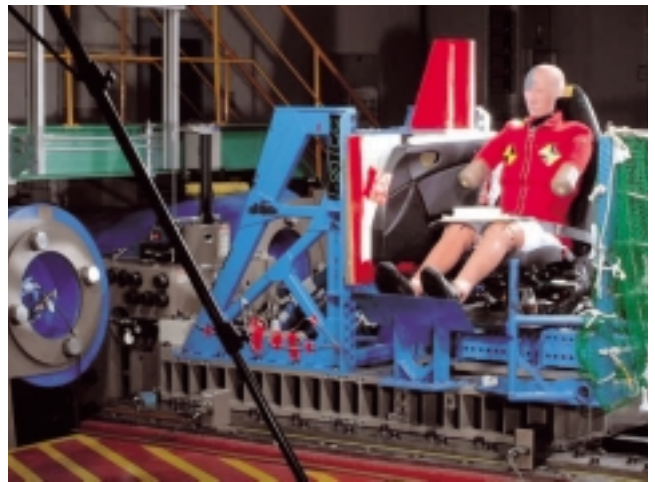


Fig.3 Side Impact Crash Simulator

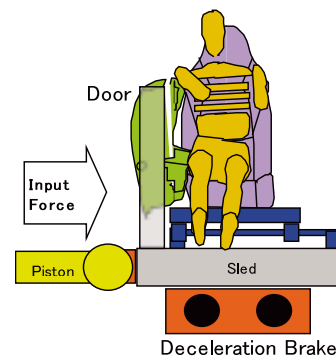


Fig.4 Methodology of Side Impact on Crash Simulator

(2) ドアも台車とほぼ等しい速度になりダミーと衝突する。この時ダミーは、スライドレール上にセットされているため、衝突まで動かず初期の位置でドアと衝突する。

2.4 IIHS側突再現の問題と課題

IIHS側突は従来のLINCAPと比較して、バリアの地上高および全高がいずれも高くかつ、バリアの前面形状が凸形状のため、試験車両側面のドアとBピラーに対して大きな変形を生じさせる。このため、乗員の胸部ダメージが大きく、胸部傷害低減技術の開発が急がれる状況である。そこで、側突クラッシュシミュレータでドアの進入速度を車両テスト状態に合わせて再現テストを実施したが、Fig.5に示すように車両テストの結果と大きな差が生じた。これを精度良く再現させるために、今回は、Fig.6に示す技術開発の考え方に基づき、SID- sダミーの傷害値発生メカニズムを力学モデルに置換えて解くことで明確にした上で、各種パラメータの傷害値への寄与度分析を行い、実車再現精度を向上させる方法を検討した。

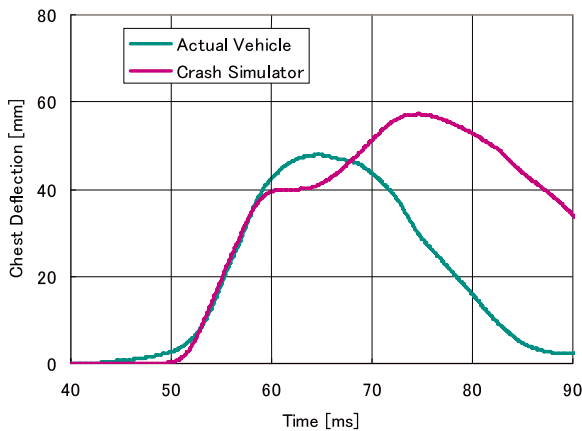


Fig.5 Chest Deflection Comparison of Actual Vehicle and Crash Simulator

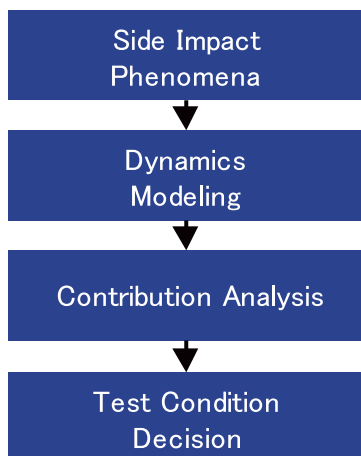


Fig.6 Methodological Development Process in Crash Test

3. メカニズムの分析とモデルの精度検証

3.1 SID- sの構造と胸部たわみ量発生メカニズム

SID- sは小柄な女性の人体特性に基づいて設計されたダミーで、Fig.7に示すように従来のLINCAPで使用するSIDと比較すると肩部荷重、胸部および腹部たわみ量、腰部荷重等の多くの入力を計測できるダミー構造となっている。これによってダミーへの入力が計測できるため、車両テストとクラッシュシミュレータテストの再現状態の比較や、力学モデルの入力データとして活用できる。

SID- sの胸部たわみ量は、Fig.8の胸部断面図¹⁾に示すように肋骨(Rib)と背骨(Spine)の間に取り付けられた変位計によって計測される。このダミー構造から考えられる胸部たわみ量は、Ribの移動量からSpineの移動量を差し引いた量となる。

このメカニズムを要因図にまとめると、Fig.9のようになり、胸たわみ量の力学モデルの基本的考え方となる。これに基づき、外力とダミー構造部品のバネ定数や質量を計測し運動方程式を立てた。これを解くことによって、その考え方の妥当性とパラメータの寄与度分析が可能になり、傷害値発生メカニズムの理解を深めることができる。

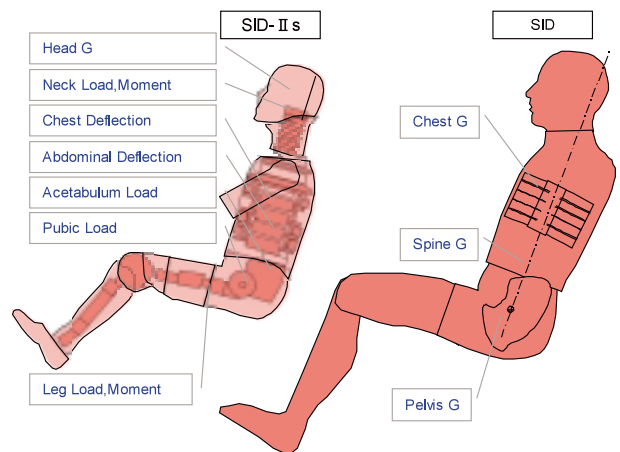


Fig.7 SID- s and SID

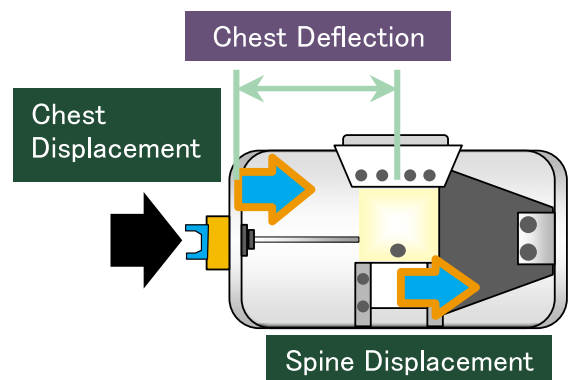


Fig.8 Chest Structure of SID- s

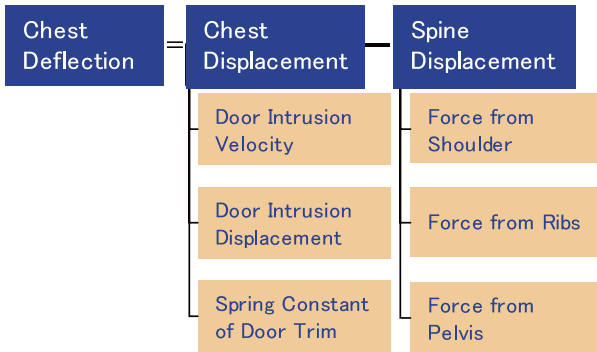


Fig.9 Analysis Chart for Chest Deflection of SID- s

3.2 力学モデルの構築

まず, Fig.10に示す外力が加わる場合の1自由度減衰系のスプリングとマスの運動方程式は, 式(1)のように表すことができる。

このスプリングとマスの組み合わせでSID- sの力学モデル²⁾を考える。しかし, SID- sはFig.11からも分かるように, 多くの部品から構成されており実物に忠実なモデルは, 非常に複雑なモデルになってしまう。今回のモデル化の目的は, メカニズムの考え方の妥当性を確認することなので, できるだけ簡素化し計算結果が実験結果と合わない時のみ, スプリングとマスをモデルに追加し計算精度を向上させた。最終的な胸部たわみ量の力学モデルは, Fig.11の1次元3自由度系のバネマスモデルとした。このモデルは m_1 から m_4 の4つのマスとこれらを結合する k_1 から k_3 の3つのバネ, および c_1 から c_3 の3つのダンパで構成されている。胸部たわみ量は, リブ変位 x_1 とスパイン変位 x_2 の差として求めることができる。このモデルの運動方程式を式(2)に示す。

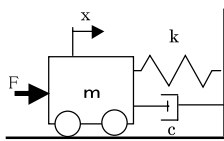


Fig.10 Spring-Mass Model with Single Degree-Freedom-System

$$F = m\ddot{x} + c\dot{x} + kx \tag{1}$$

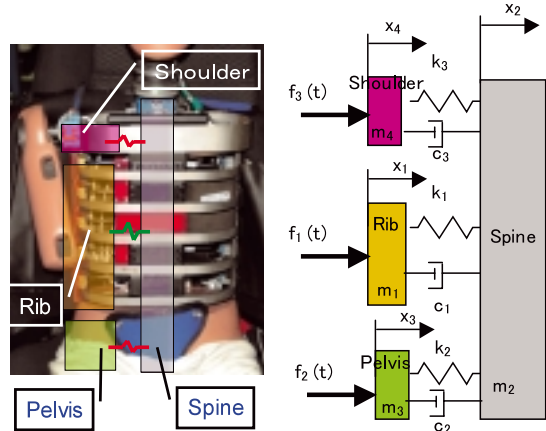


Fig.11 SID- s Spring-Mass Model with Three Degree-Freedom Systems

$$\{F\} = [M] \{\ddot{X}\} + [C] \{\dot{X}\} + [K] \{X\} \tag{2}$$

ここで $[M]$ は質量マトリックス, $[C]$ はダンピング係数マトリックス, $[K]$ はバネ定数マトリックス, $\{F\}$ は入力ベクトル, $\{\ddot{X}\}$ は加速度ベクトル, $\{\dot{X}\}$ は速度ベクトル, $\{X\}$ は変位ベクトルを示す。

$$[M] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_4 \end{bmatrix} \quad [C] = \begin{bmatrix} c_1 & -c_1 & 0 & 0 \\ -c_1 & c_1 + c_2 + c_3 & -c_2 & -c_3 \\ 0 & -c_2 & c_2 & 0 \\ 0 & -c_3 & 0 & c_3 \end{bmatrix}$$

$$[K] = \begin{bmatrix} k_1 & -k_1 & 0 & 0 \\ -k_1 & k_1 + k_2 + k_3 & -k_2 & -k_3 \\ 0 & -k_2 & k_2 & 0 \\ 0 & -k_3 & 0 & k_3 \end{bmatrix} \quad \{F\} = \begin{bmatrix} f_1(t) \\ 0 \\ f_2(t) \\ f_3(t) \end{bmatrix}$$

$$\{\ddot{X}\} = \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \ddot{x}_3 \\ \ddot{x}_4 \end{bmatrix} \quad \{\dot{X}\} = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} \quad \{X\} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix}$$

この力学モデルの再現精度検証は, 次のプロセスで行った。まず肩, 胸, 腰の個別部位毎に荷重を入力させて胸部たわみ量の実測値と計算値が合うようにパラメータを最適化した。次にこれら部位に同時に荷重を作用させて, 胸部たわみ量を比較した。

3.3 部位別シミュレーションパラメータの最適化

式(2)の連立微分方程式は、計算ソフトを用いて解を求めた。この時、質量やバネ定数等のパラメータは、実測したデータを使用した。このデータを元にしてシミュレーションとユニットテストの比較を行い、ピークレベルと波形パターンが近くなるようにパラメータの最適化を肩、胸、腰の各部位毎に実施した。Fig.12は、胸部のインパクトテストで得られた、胸部への入力荷重を示す。計算はこの値を入力荷重として行い、シミュレーション結果とインパクトテスト時の胸部たわみ量を比較したものをFig.13に示す。両波形はともに似ており、ピーク値の差も10%の範囲にあり良く一致していることが分かる。

このような個別部位テストと計算結果の比較を繰り返すことによって、パラメータの最適値を決定した。

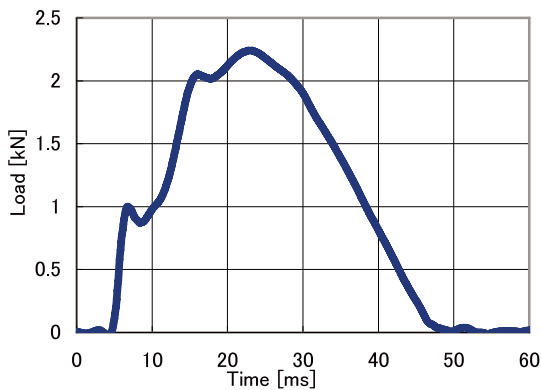


Fig.12 Measured Force for Rib

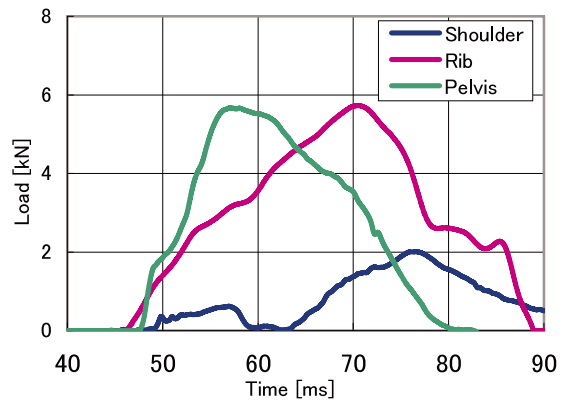


Fig.14 Measured Forces for SID-s

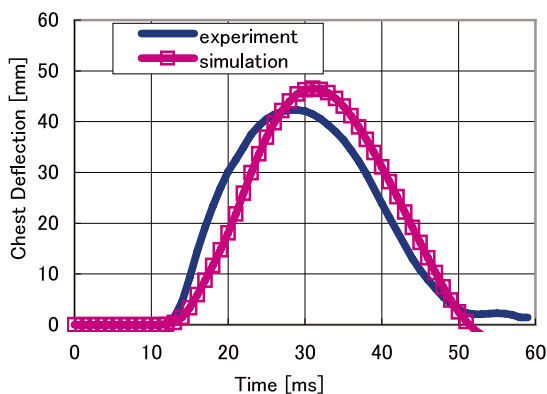


Fig.13 Chest Deflection Comparison of Experiment and Simulation

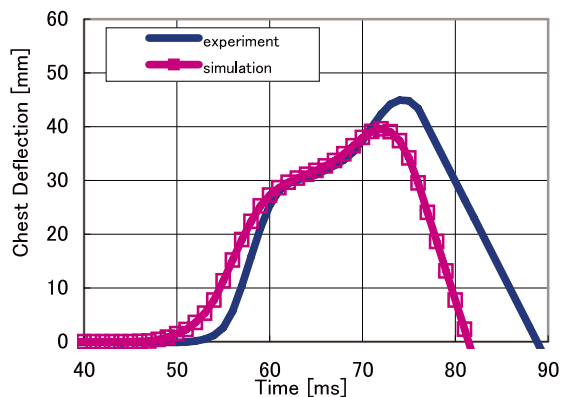


Fig.15 Chest Deflection Comparison of Experiment and Simulation

3.4 モデルの検証と結果

SID-s力学モデルの妥当性の検証は、前述の最適化したパラメータを用いて実施したシミュレーション結果とクラッシュシミュレータの実測値を比較して行った。Fig.14に、クラッシュシミュレータの実験で計測した肩、胸、腰の3点への入力荷重を示す。Fig.15は、このデータを入力荷重として計算したシミュレーション結果と実験結果の比較を示す。シミュレーション結果は実験結果に対し、波形パターンは良く似ており、ピーク値の差も10%以内で、いずれも良く一致している。

これらの結果から、力学モデルは実現象を良く再現できていることが確認できた。これはまた、考え方のベースとなっている胸部たわみ量の発生メカニズムについても妥当であることを示している。

4. 実車再現精度向上への活用

クラッシュシミュレータにおいて車両衝突テストの現象を精度良く再現することが難しいのは、その現象の要因が多くありそれぞれの寄与度を定量的に把握することが容易でないためである。今回SID-sの胸たわみ量のメカニズムについては、力学モデルを用いて妥当性の証明とパラメータの最適値が決定できたため、Fig.16に示すバネとダンパの分担荷重を明確にすることができた。これによりSID-sの実車再現テストとして設定すべき重要な条件は、ドアの進入量であり、傷害値が発生している時間内は進入量を正確に合わせる必要があることが分かった。これに従って試験条件を再設定することにより、Fig.17に示すような胸部たわみ量の再現を±10%以内の高い精度で達成することが可能となった。更に、安全な車両の要件としてドアの進入量の定量的な目標値を定めることができた。

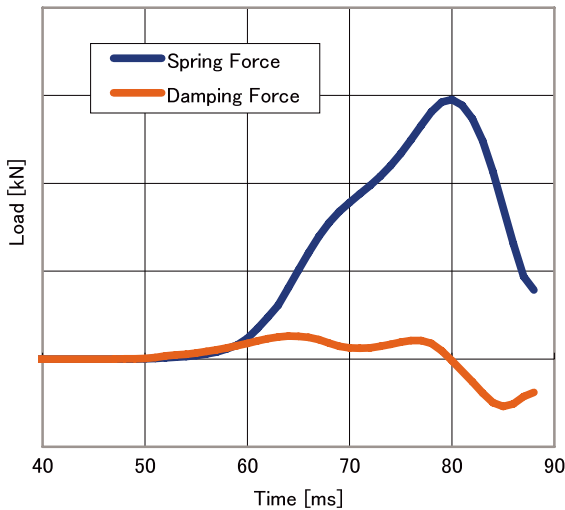


Fig.16 Comparison of Damping Force and Spring Force in Rib

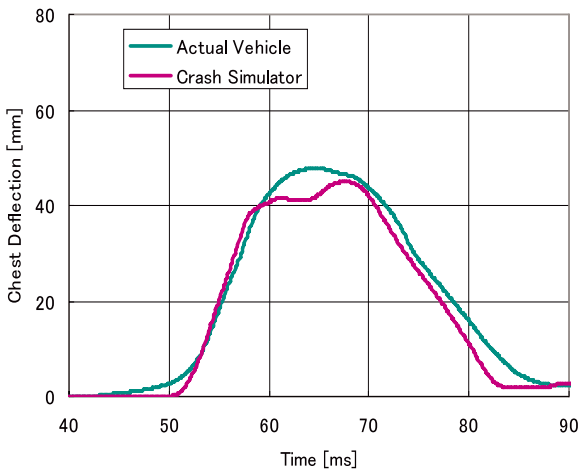


Fig.17 Chest Deflection Comparison of Actual Vehicle and Crash Simulator with Modified Test Conditions

5. おわりに

衝突現象を簡易的な力学モデルに置換え、そのメカニズムを分析する手法を用いて、クラッシュシミュレータの再現精度を向上させる技術開発プロセスの考え方が構築できた。また、この手法は他の衝突現象メカニズムを分析する手法としても応用が期待できる。今後は、他の側面衝突や前面衝突のメカニズム分析、数値解析シミュレーションの精度向上に活用し、より安全な車の開発を進めていく。

参考文献

- (1) First Technology Safety Systems : SID-II's User's Manual, Rev.3, p12 (2001)
- (2) Murthy Kowsika et al. : ES-2 Dummy : Lumped Spring-Mass Model and Parametric Evaluation of Response, ESV2003 Conference, Paper Number 398, (2003)

著者



元木正紀



福谷和也



伊東紀明



尾川 茂

論文・解説

22

マツダの機能統合型モジュールへの取り組み

State of Modularity and Mazda's Functional Integration Module

影山和宏*¹ 唐澤正人*²
Kazuhiro Kageyama Masato Karasawa

要約

1990年代前半，欧州では組み立てのアウトソースによるコスト削減を狙いとして，モジュール化が盛んとなった。マツダではそれ以前から多品種少量生産に対応すべく独自のモジュール化を行ってきた。そして2002年5月発売のアテンザ以降，デミオ，RX-8，アクセラの4車種に開発初期段階から部品の統廃合や共用化等，構造の合理化を取り込んだ「機能統合型モジュール」を新しく導入，コスト削減，軽量化，商品性の向上に大きく貢献している。

本稿では，機能統合型モジュールの成果を中心にマツダにおけるモジュール化への取り組みを述べる。

Summary

Modularity became active in Europe in the first half of 90's for the purpose of achieving cost reductions by the outsourcing of assembly processes. Mazda, on the other hand, had been promoting its own modularity before then in order to compensate for differences in MP volume from competitors by means of wide-variety/low-volume production. "Functional integration module" that can realize architectural rationalization through parts consolidation and commonality activities from the earliest stage of development has been newly introduced into four models: Demio, RX-8, and Axela following Atenza released in May 2002, and has greatly contributed to high merchantability and cost and weight reductions.

This paper introduces Mazda's approach to the modularity, focusing on the outcome of the functional integration module.

1. はじめに

1990年代前半，欧州では，組み立てのアウトソースによるコスト削減を狙いとして，モジュール化が盛んとなった。マツダにおけるモジュール化の歴史は古く，それ以前から多品種少量生産に対応すべく独自のモジュール化を行ってきた。そして，2002年5月発売のアテンザから，新しく「機能統合型モジュール」を導入，効果をあげている。

以下に，自動車業界におけるモジュール化の状況なども交えながら，マツダにおけるモジュール化への取り組みを紹介する。

2. モジュールの定義・分類

2.1 モジュールの定義

マツダでは，「メインアセンブリラインに一つのユニットとして供給される部品の集合体」をモジュールの定義としている。モジュールをカーメーカーで組み立てるのか，サプライヤに組み立てをお願いするのかに関わらず，一つのユニットとすることをモジュール化と呼んでいる。

具体的に図で説明する。Fig.1の上側がモジュール化以前の組み立てラインを表したもので，すべての部品がメイン組み立てラインで組み付けられている。そのために長いラインが必要となり，また多種混流生産に対応しにくい。例えばマツダではデミオとRX-8とが同じ組み立てラインで

*1, 2 プロセシリエンジニアリング部
Process Re-Engineering Dept.

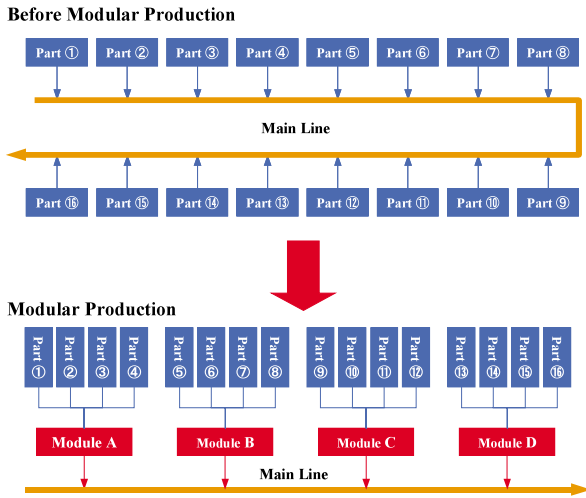


Fig.1 Module Assembly Line

生産されているが、組付ける部品点数に差があるため、部品点数が多い車種に合わせて組み立てラインを編成すると、部品点数が少ない車種が流れてきた時には手待ちの作業が生じ、非常に生産効率の悪いラインになってしまう。

これを改善し、メイン組み立てラインを平準化するために導入されたのがモジュール化である。Fig.1の下側に示すように、メイン組み立てラインに投入する前に、いくつかの部品をユニットとしてかたまりにしておくことで商品仕様の差をサブラインで吸収することができ、メインラインが短縮され、混流生産時の平準化も容易にできるようになった。このユニット、かたまりをモジュールと呼び、マツダでは、ボデー系で12、PT&シャシー系で7、合計19のモジュールを定義している (Fig.2)。

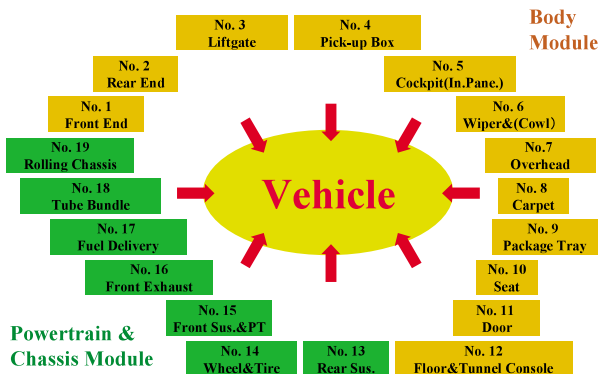


Fig.2 Major 19 Modules

2.2 モジュールの分類

次にモジュールの分類について述べる。現在マツダはモジュールを2種類に分けて考えている。

① サブアセンリー型モジュール

部品の形を変えることなく、単にサブラインであらかじめ組み立ててからメインラインに供給するものである。欧米ではカーメーカとサプライヤとの労務費の差から、組み立てをアウトソースすることで固定費を下げることを狙いとして行われているが、日本では労務費に大きな差がなく、

生産の効率化を狙いとして、カーメーカによる社内組み立てが多く見られる。

② 機能統合型モジュール

レイアウト上、近くにある部品群を一つの単位にとらえ、機能、形態なりの分析を行い、部品間の機能統合や部品廃止などのVE (Value Engineering) によって、大幅なコスト削減効果を期待するものである。

3. マツダのモジュール戦略

3.1 モジュール化に取り組む背景

今後の自動車業界を動かす主要項目の一つに中国や東欧といった新興国での新車需要の大幅な伸びが挙げられ、これにともない競争の激化が予想される。

更に、自動車業界が直面する課題として、年々厳しくなる環境規制や安全性へのニーズへの対応がある。

このような状況のもと、競争力を維持していくためには、商品力を上げ、環境や安全のニーズに応えとともに、車両価格は下げていくといった大きな課題を乗り越えていかなければならない。

そこでカーメーカはその原資を確保するために、全社を上げてコスト削減活動を行っている。マツダにおいても「業界最適コストの達成」を目指すABC (Achieve Best Cost) 活動に取り組んでいる。

そのABC活動の一つの手段が「機能統合型モジュール」である。機能統合型モジュールによるコスト削減の概念を表したものをFig.3に示す。図中A, B, C, Dは各部品のコストを表している。従来のコスト削減活動はA A', B B' といったように部品単位で行われているが、更なるコスト削減を目指し、いくつかの部品 (A ~ D) をまとめて「モジュール」という視点でコスト削減を検討することで、例えばCとDという部品を機能統合して一体化することでC' という部品になり、大幅なコスト削減が可能になる。そのときに、モジュールによっては、サプライヤにそのモジュールを開発委託することで、開発費 (OH) が多少増えても、トータルではコストが削減されている、というのが「機能統合型モジュール」の狙いである。

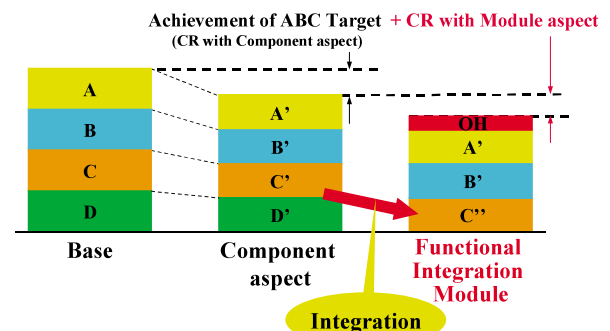


Fig.3 Effect Image on Cost Reduction

3.2 マツダのモジュール戦略

以上のような背景を踏まえ、マツダでは次の3点をモジュール戦略として掲げて活動している。

① 機能統合型モジュールに重点

モジュールは目的ではなく、コストを下げるための手段として使うというのがマツダの思いである。そのためには、コスト低減のオポチュニティが大きい機能統合型モジュールに重点をおくということが第一の戦略である。

② モジュールアセンブリラインの最適化の実施

モジュールの組み立てをいつまでもカーメーカが行うのか、あるいはサプライヤに委託するのか、あるいは外部の労働力を使うのかということを含めたサブアセンブリラインの最適化を行う。

③ B2O (Build to Order) への対応

自動車一台一台をお客様の好みに応じてカスタマイズする、いわゆる受注生産に対応できるような新しいスタイルのモジュール構造の技術開発を行う。

4. 自動車業界におけるモジュール化の現状

4.1 欧米におけるモジュール化の現状

Fig.4は1998年、アメリカの部品工業会と日本の自動車工業会とで「モジュール化が今後の車についてどういうインパクトを与えるか」について論議した内容をもとに、マツダが2002年時点の欧米一部自動車会社のモジュール化状況をまとめたものである。縦軸はカーメーカ、横軸が主要なモジュールになっている。ここに「Yes」と付いているところがモジュール化されている部分だが、欧米の場合、このYesは基本的にサプライヤが組み立てを行うということの意味している。欧州においては、近年更にアウトソーシングが拡大してきている。

| | Cockpit | Front End | Tail Gate | Door | Fr/Rr Sus | Roof |
|------|---------|-----------|-----------|------|-----------|------|
| VW | Yes | Yes | | Yes | Yes | Yes |
| AUDI | Yes | Yes | | Yes | Yes | Yes |
| BENZ | Yes | | Yes | | Yes | Yes |
| MCC | Yes | Yes | Yes | Yes | Yes | Yes |
| GM | Yes | Yes | | Yes | Yes | Yes |
| Ford | Yes | Yes | | Yes | Yes | Yes |

Fig.4 Modular Status of EU/US

欧米におけるモジュール生産工場の形式だが、これには4つのタイプがあると考えている。

① ジャスト・イン・タイム型

トラックでモジュールを運び込む形式である。アウディのインゴルスタッド工場、メルセデスのタスカロッサ工場などがこのタイプである。

② サプライヤパーク型

カーメーカの工場のすぐそばに、モジュールを組み立て

るサプライヤの工場があり、そこで組み立てたモジュールをカーメーカの工場に連結されたベルトコンベヤで運び込むタイプで、最も多く見られる。代表事例としてはフォードのザールレイ工場、バレンシア工場がある。

③ 構内外注型

「サプライヤパーク型」を更に進め、カーメーカの工場の中で、サプライヤがモジュール組み立てラインを作り、組み立てるというものである。代表事例としてはスコダのボレスラブ(チェコ)工場がある。

④ 構内同居型

カーメーカの工場の敷地内にサプライヤの工場も作られ、部品単位からカーメーカの工場の中で製造してモジュールに組み立てるというタイプがある。スマートの生産工場がこの「構内同居型」である。最終組み立ての実に90%をサプライヤが行っている。

4.2 日本におけるモジュール化の現状

次に日本でのモジュール化動向を述べる。Fig.5はFig.4と同様に作成した、日本におけるモジュール化の状況を示した表である。

1998年の時点では、アウトソーシングという観点では、カーメーカとサプライヤ間の労賃に大きな差がないということもあって、大型のモジュールはカーメーカが組み立てているのが特徴であった。ところが、その後4年間経過して、機能統合型モジュールの導入にともない、日本でも構内外注を含め、サプライヤが組み立てるケースが増えつつある。

| | Cockpit | Front End | Tail Gate | Door | Fr/Rr Sus. | Roof |
|------------|-------------------------|------------------------|---------------|----------|------------------------|------------------------|
| TOYOTA | In-house | | Supplier Assy | In-house | In-house | |
| NISSAN | Supplier Assy In-house | Supplier Assy In-house | | In-house | Supplier Assy In-house | Supplier Assy In-house |
| MAZDA | In-house | In-house | Supplier Assy | In-house | In-house | Supplier Assy In-house |
| MITSUBISHI | In-house | | | In-house | In-house | In-house |
| SUBARU | Outsourcing Assy Module | Supplier Assy | Supplier Assy | In-house | In-house | Supplier Assy |
| SUZUKI | In-house | | | In-house | In-house | |
| DAIHATSU | In-house | | | In-house | | |
| HONDA | In-house | In-house | | In-house | In-house | |

Fig.5 Modular Status of Japan

更にマツダが行った最新のベンチマークの結果では、各社とも、社内組み立てやサプライヤ組み立て、機能統合化等モジュール化を様々な方式で推進しており、モジュール化、システム化を見越した系列会社強化、グループ化等にも活発な動きが見られる。また、技術動向としては、各モジュールで対象部品範囲が拡張傾向にあり、異なる技術分野の部品の取り込みにより開発評価領域が拡大するという傾向にある。したがって、今後インテグレートには更なる総合力と、異なる技術分野をリードする能力の強化が必要になる。更に一部のカーメーカでは、コア技術へ開発リソースを集中させるためにモジュールをアウトソーシングするといった戦略もとられている。

5. マツダにおけるモジュール化の現状

このような状況の中、マツダのモジュール化の現状について述べる。Fig.6はマツダにおけるモジュール化の履歴を表している。マツダのモジュール化の歴史は古く、乗用車を製造し始めた時に、競合他社と比べて非常に台数が少なく、何とか他社の量産効果に少量生産で対抗しなければならぬということから、少量多品種の車を造っていた。そのような背景もあり、マツダは生産技術的に混流生産、サブアセンブリー型のモジュール生産を1970年代から欧州に先駆け独自に行っている。その後、コストを下げるモジュール化ということで、2002年5月のアテンザから新しいタイプの機能統合型モジュールを導入している。

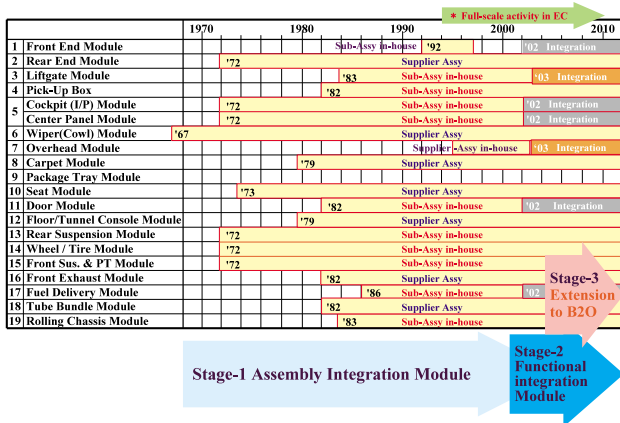


Fig.6 History of Modularity at Mazda

アテンザでは、コックピット、センターパネル、フロントエンド、フューエルタンク、そしてドアの5つの機能統合型モジュールを採用した。また、従来型のサブアセンブリー型モジュールも10種類継続しており、合計15のモジュールを採用している。

次にデミオでは、アテンザで導入した5つの機能統合型モジュールに加え、インテークモジュールを採用した。これは、エアクリーナやインテークマニホールド、エンジンコンピュータなどを機能統合したもので、約20%のコスト削減を実現している。

| | Mazda6 | Mazda2 | RX-8 | Mazda3 |
|-----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Front End | Functional Integration | Functional Integration | (Cooling-Sub) | Functional Integration |
| Rear End | x | x | x | x |
| Liftgate | x | x | x | x |
| Pick-Up Box | N.A. | N.A. | N.A. | N.A. |
| Cockpit (I/P) | Functional Integration | Functional Integration | Functional Integration | Functional Integration |
| Wiper(Cowl) | Assembly Integration | Assembly Integration | Assembly Integration | Assembly Integration |
| Overhead | Assembly Integration | Assembly Integration | Assembly Integration | Assembly Integration |
| Carpet | Assembly Integration | Assembly Integration | Assembly Integration | Assembly Integration |
| Package Tray | x | x | x | x |
| Seat | Assembly Integration | Assembly Integration | Assembly Integration | Assembly Integration |
| Door | Functional Integration | Functional Integration | Functional Integration | Functional Integration |
| Floor/Tunnel Console | Assembly Integration | x | Assembly Integration | Assembly Integration |
| Rear Suspension | Assembly Integration | Assembly Integration | Assembly Integration | Assembly Integration |
| Wheel / Tire | Assembly Integration | Assembly Integration | Assembly Integration | Assembly Integration |
| Front Suspension & PT | Assembly Integration | Assembly Integration | Assembly Integration | Assembly Integration |
| Front Exhaust | Assembly Integration | Assembly Integration | Assembly Integration | Assembly Integration |
| Fuel Delivery | Functional Integration | Functional Integration | Functional Integration | Functional Integration |
| Tube Bundle | Assembly Integration | Assembly Integration | Assembly Integration | Assembly Integration |
| Rolling Chassis | N.A. | N.A. | N.A. | N.A. |
| Modularity Total | 14/19 | 13/19 | 13/19 | 14/19 |

Fig.7 Modularity of Mazda

RX-8, アクセラにおいても同様に、機能統合型モジュール、サブアセンブリー型モジュールともに水平展開を行っている (Fig.7)

また、工場別のモジュール導入状況を比較しても、どの工場もほぼ同じレベルでモジュール化が進んでいる。防府工場ではモジュール化によって、メインラインの工程数が40%削減され、作業工数も30%短縮された。また、工場の建屋面積も15%削減している。

6. モジュール化の効果

今回実施した機能統合型モジュール導入による効果を紹介する。マツダではモジュール化の狙いをコスト削減、軽量化、共通化、クラフトマンシップ、そして生産性の向上に置いている。

6.1 コスト削減・軽量化

アテンザにおける、モジュール導入によるコスト削減および軽量化の実績をFig.8に示す。

| | WR | CR | CR by integration |
|-----------------|-------|-----|-------------------|
| 1. Front-End | 9.8kg | 25% | 3% |
| 2. Fuel-Tank | 7.9kg | 30% | 8% |
| 3. Door | 2.3kg | 21% | 2% |
| 4. Cockpit | N.A. | 10% | N.A. |
| 5. Center-panel | N.A. | 30% | 7% |

Fig.8 Effect of Cost & Weight Reduction

まずコスト削減だが、5つの機能統合型モジュールで、10%から30%の削減を達成した。ただし、この削減額の中にはモジュール以外でのVEや購買領域のCRも含まれており、純粋に機能統合によるものがどれだけかとなると、明らかに統合化されてなくなった部品、統合化されて安くなった所だけを厳密に評価して、2%から8%ぐらいといったところである。

次に軽量化だが、5つのモジュールの合計で20kg軽くなった。軽量化と燃費改善には強い相関関係があるため、今後の環境対策、低燃費を考えると、機能統合型モジュール化による軽量化は非常に大きな武器になると考えている。

具体的なコスト削減の事例を紹介する。フロントエンドモジュールとドアモジュールでは、キャリアと呼ばれる部品にガラス繊維で強化した特殊なプラスチックを使い、射出成形で作っている⁽¹⁾。

そのため成形の自由度が高く、フロントエンドモジュールでは、ラジエーター締結ブラケット、盗難防止用ブラケット、パンパ&ランプブラケット、補強用のリブなどを一体で成形し、部品点数を20点削減している。

ドアモジュールでも、インナーハンドルベース、ハーネスクリップ、ドアラッチmountブラケット、トリムブラケットなどを一体成形し、前後4枚のドアで部品点数を46点削減している (Fig.9)

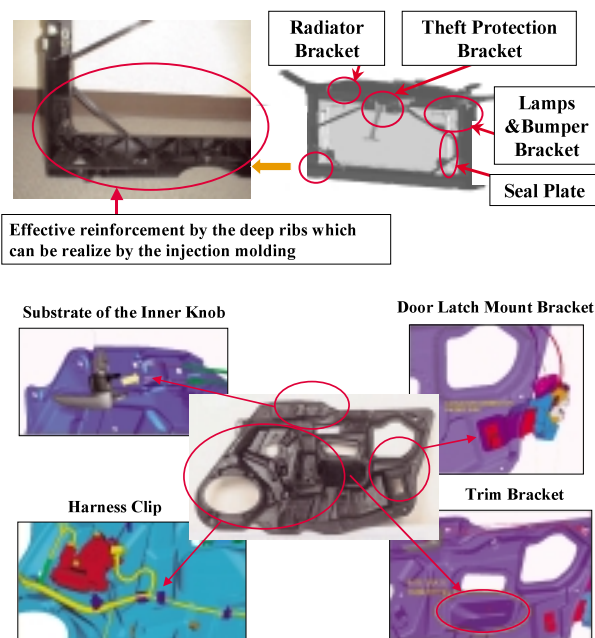


Fig.9 Front End & Door Module

また、従来のドア構造では、パワーウィンドモータやハーネスといった部品は、ドアシェルという板金部品の内側に取り付けられていた。ここは雨水などが入り込む部分で、電装部品などには防水処置が必要であった。これをモジュール化にともない取り付け位置を工夫し、水が浸入しない部分に先程の電装部品を取り付けることにした。これによって、モータやハーネスに対する防水処置が不要になったため、非防水汎用モータが使えるようになり、大幅なコスト削減が実現できた。

6.2 共通化・クラフトマンシップ

見栄え、操作性に関する効果をセンターパネルモジュールの事例で紹介する。従来のセンターパネル部分は、DINサイズと呼ばれる標準サイズのオーディオと空調コントロールの組み合わせでできていた。そのために部品と部品の継ぎ目部分の見栄えが悪くなっていた。また、標準サイズの中に様々なスイッチ類を配置しなければならず、操作性の悪い、小さなスイッチになってしまいがちであった。これを機能統合型モジュール化することで、センターパネルの幅いっぱいを使った継ぎ目のないデザインを実現し、操作スイッチも大きくすることができ、インテリアのイメージ革新に大きな効果を発揮することができた。

また、センターパネルモジュールでは、お客様に見える部分については、車種ごとにユニークなデザインとし、後側のCDプレーヤやCDチェンジャ、MDデッキやカセットデッキといったユニット部分は車種横断的に共通化し、

VE効果を出している。これがモジュール化による共通化メリットである (Fig.10)

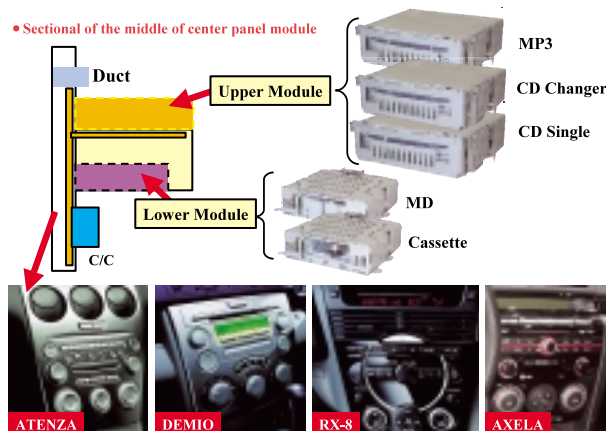


Fig.10 Craftsmanship & Commonization

6.3 生産性の向上

生産性の向上、エルゴノミクスの改善事例としてドアモジュールの例を挙げる。従来、機構部品を組み付ける際には、ドアシェルの中に手を差し込んで作業をせねばならず、作業者に負担のかかる姿勢で組み付けを行っていた。これを、ドアモジュールキャリアを採用することで、このキャリアにあらかじめ構成部品を取り付けておいてから、キャリアをドア本体に組み付けるというかたちにし、作業性を大きく改善することができた (Fig.11)。作業性の改善は、品質の向上にもつながっている。

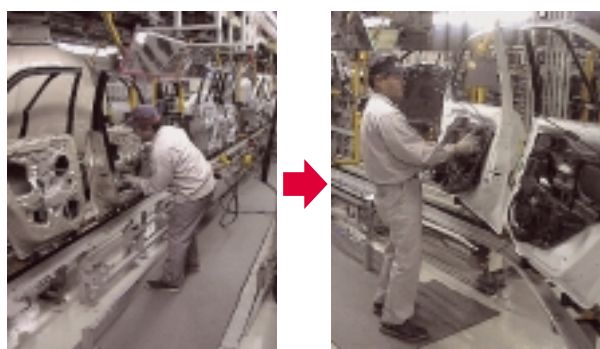


Fig.11 Improved Productivity (Door-module)

7. 今後の課題

最後に今後のモジュール化の課題について述べる。

(1) 開発調達構造の変革

モジュール化というまとまった単位でものが造られるようになると、これを誰が開発して、製造するのかといった、開発、調達両面での構造の変革が必要になる。

センターパネルモジュールの事例でいうと、従来はセンターパネル、オーディオパネル、空調パネルのそれぞれを部品サプライヤが単品で開発し、製造していたが、モジュール化によって三つのパネルが一体化されると、例えば空

調のパネルを担当していた部品サプライヤは、センターパネル全体の設計ができない限り、他の部品と統合されてビジネスがなくなってしまう。そのような全体的な開発ができる幅広い技術が必要となってくる。

(2) サプライチェーンの変革

モジュール化にともない種類が増え、大きくなるため、どこで組み立てるのかという問題が出てくる。

例えば、天井のモジュールを考えると、天井は一車種に一つしかないが、色の違い、サンバイザーの種類、盗難防止装置の有無、というように考えていくと、ある車の事例では、一車種で天井が2,880通りになる。このような場合、例えば、低価格で製造できる遠方で天井のモジュールを生産しても、部品種類が多く部品自体が大きいため、車両組立工場まで天井モジュールを輸送することが難しい。そこで、最終的には、カーメカの近くでモジュールを組み立て、ジャスト・イン・タイムで納入する必要がある。機能統合が進めば進むほどモジュールが大きくなるため、単品を製造する部分と、モジュールに組み立てる部分とが完全に分業化される。このどちらかを担当されるのか、あるいは全体の設計を担当されるのかといったように、非常にサプライチェーンが変わるだろうと考える。

そしてここでもう一ついえるのは、最終的なモジュール組み立てをカーメカのすぐそばで行わなければならないということは、必然的に地場にビジネスが残るということである。このことから、モジュール化への対応は地場産業の空洞化対策の側面を持つといえる。

このような、地場活性化、雇用対策としてのモジュール化の事例として、先程述べた、ドイツにあるフォードのザールルイ工場がある。ザールルイはかつて炭坑の町として、栄えていたが斜陽化し、州政府と第三セクターが雇用対策としてサプライヤパークを建築し、ターンキー工場としてリースしている。

この事例ほど大規模なものではないが、広島県もモジュール開発に対する助成金制度を設け、モジュール化の促進を後押ししており、今年で3年目を迎えている。これまでの採択テーマの中で、例えば、樹脂テールゲートモジュールは、マツダの次期開発車への採用が決まっただけでなく、他の自動車メーカーからの引き合いも多く、助成金の目的である地場サプライヤのビジネス拡大、雇用促進に大きく貢献している。

(3) B2O (Build to Order) への対応

将来の受注生産に対応した構造や、受発注のシステムといったものが重要になってくる。

モジュールの骨格そのものは共通にしておいて、例えば、注文で若者向けの車があれば、その共通の骨格の上に若者が好むような色であり、表面処理のインパネにする。あるいは年配の方からの注文があれば、アダルト向けのシックなインテリアにする。そういった新しい内装のコンセプト

が各社から出てきており、それに対応した開発が始まるうとしている。

8. おわりに

近年、欧米を中心に進められている「サブアセンブリー型モジュール」に関して、量産規模のハンデを克服すべく、マツダでは20年以上も前から独自に取り組んでおり、大きな成果をあげている。そのサブアセンブリー型モジュールを進化させたものとして今回アテンザに導入したのが、開発初期段階から部品の統廃合や共用化等、構造の合理化を取り込んだ「機能統合型モジュール」である。

マツダではこれが完成形だとは考えておらず、現在、前章で述べた課題を踏まえながら、更なるコスト削減、軽量化・省電力化による低燃費化、そして情報化・テレマティクスへの対応などを狙いとして、次世代の機能統合型モジュールの開発に取り組んでいる。

モジュール化は、自動車の開発、生産、調達まで、大きなインパクトを与える有用な手段である。

最終的には、こういったコスト削減、軽量化に有用な手段を活用し、ターゲットカスタマーに対して、望まれるどんなクルマが提供できるのか、どんな喜びが提供できるかが課題と考える。マツダのプロダクトフィロソフィはこのお客様の喜びを具現化したものであり、それを支えるモジュール開発を今後も積極的に推進して行きたい。

これまで述べてきたモジュール開発は、開発、生産、購買、そしてお取引先様の多くの方々と共同で行ってきた成果である。多大なるご尽力、ご支援をいただきましたすべての方々に感謝の意を表します。

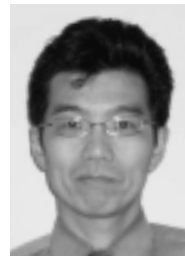
参考文献

- (1) 栃岡孝宏, 田中高廣, 杉本健一郎, 金子満晴, 森脇健二: 射出成形による樹脂製モジュールキャリアの開発, マツダ技報, No.20, P.108-114 (2002)
- (2) 岩城富士大: 自動車業界におけるモジュール化の現状とマツダの機能統合型モジュールへの取り組み, 第36回全国VE大会 (2003)

著者



影山和宏



唐澤正人

論文・解説

23 パラメトリック設計システムの開発～エンジン設計の自動化～ Automation of Engine Design Process by Development of Parametric Design System

楠 康友*1 三村 光生*2

Yasutomo Kusunoki Mitsuo Mimura

佐々木 晋*4

Susumu Sasaki

要 約

開発期間の短縮，品質向上のニーズが高まる中で，マツダは開発～生産のプロセスを抜本的に見直し，最先端のCAD/CAM/CAE/PDMを活用したデジタル革新を推進している。その中で実設計業務においては，CAD上で多くの必要要件を検証し，その検証結果をいかにスピーディに製品形状へ反映するかが，今後の更なる効率化に必要となっている。この効率化の一つの手段として，自動的に3Dモデルが生成される，パラメトリック設計システムを開発したので，エンジンのピストン設計を事例に紹介する。

Summary

With increasing needs of shorter development period and higher quality, we had drastically revised development to production processes, and have been promoting digital innovation making good use of leading-edge CAD/CAM/CAE/PDM. Through practical design tasks, we had studied a number of necessary requirements on a CAD, and found that the key to achieving higher efficiency in the future is how quickly we should reflect the study results onto each product geometry. To accomplish this target, we have developed a parametric design system which enables automatic creation of 3D models as one of means of achieving higher efficiency. This paper introduces one of applicable examples of engine, 'piston design'.

1. はじめに

顧客満足度を向上させるためには，お客様の求めている商品をいかに早く，高品質/低価格で市場投入するかが，重要になってくる。そのために，短い開発期間の中で，品質/コスト/製品機能をより高い次元で満足させようと，日々多くの実設計業務を行っている。その業務の効率化のため，3次元CADデータを基に机上検証を行い，物を作らずに設計仕上がり度を高めて行く，パワートレイン（以下PT）設計革新を進めてきた。しかし，更に短期間で製品開発を行うためには，CAD上で多くの必要要件を検証し，その検証結果をいかにスピーディに形状へ反映するかが，鍵になってくる。そこで，この効率化の一つの手段として

パラメトリック設計システムを開発したので，適用事例を紹介する。

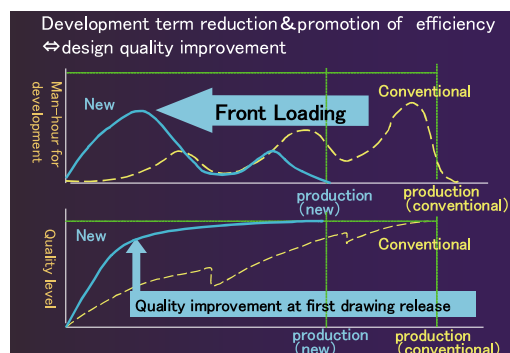


Fig.1 Intention of PT Design Innovation

*1, 2 第1エンジン開発部
Engine Development Dept. No.1

*4 R&D業務効率化推進部
R&D Administration Innovation Dept.

2. PT設計革新の全体像

2.1 PT設計革新の狙い

設計革新の狙いは、設計品質向上と開発効率化の両立にある (Fig.1)。従来の開発は、出図ごとに工数が増え、開発後半でピークを迎えた後、設計仕上がり度が目標に到達していた。そこで新プロセスでは、できるだけ工数の山を前半へフロントローディングさせ、初回出図から仕上がり度が向上した形になるように、業務整備を進めてきた。

2.2 PT設計革新のプロセス

従来は、設計部門が出力した2次元図面を基に、後工程は各々の検証要件に合う3Dデータを作成していた (Fig.2)。そして評価結果を受け取った設計部門が再検討の後、設計変更を行っていた。この無駄をなくすため新プロセスでは、設計部門が作成する3Dデータを他部門と共有しながら、同時並行検証を開発初期から進めている。そして仕上がり度を満足させた3Dデータを出図している (Fig.3)。

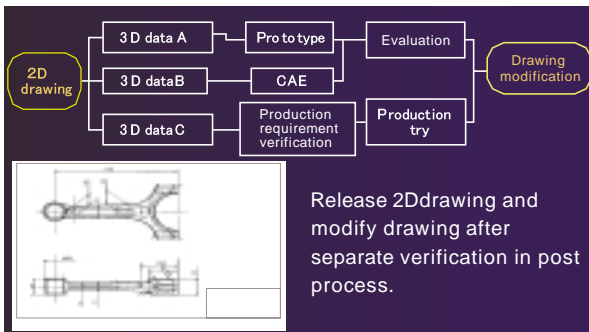


Fig.2 Conventional Process

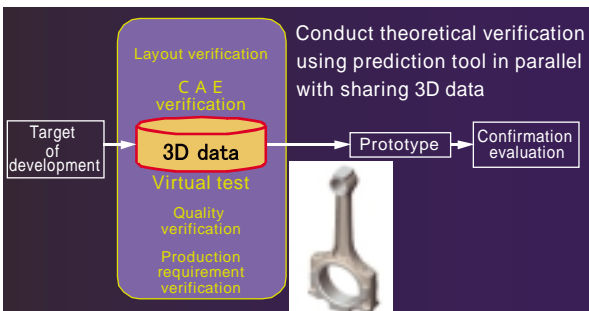


Fig.3 New Process

3. パラメトリック設計システムの概要

3.1 パラメトリック設計システムの狙い

厳しい短納期化へ対応するためには、3Dデータ作成検証 形状への反映サイクルを更に効率化する必要がある。そこで設計革新の業務整備の一環として、モデリング教育の充実によりユーザのスキルを上げ、作業手順を標準化した。またCADのモデリング機能強化と検証ツールの精度向上も推進してきた。しかし人のスキルに依存する作業や単純作業をスリム化しないと、設計品質の均一化や設

計工数の削減には限界がある。そこで次の業務整備の鍵として、自動化や最適化が重要になる。本システムの狙いは自動設計、自動検証、形状に反映する最適化の機能を柱に、短時間で設計基準に適合した3Dモデルを出力することにある。

3.2 パラメトリック設計システムの機能

部品の諸元検討の工程で、設計基準などを基に適正な諸元を入力すると、自動で3Dの実体モデルが生成される。そして設計基準や生産要件などの適合性を検証しながら、製品に求められる要求機能に沿って解析を行い、最適化する機能を持つ (Fig.4)。

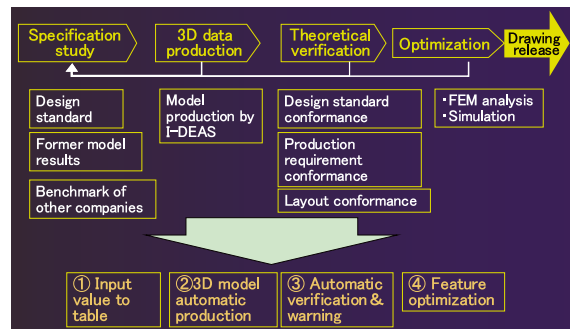


Fig.4 Function of Parametric Design System

3.3 パラメトリック設計システム適用の考え方

エンジン部品は、寸法や形状などの諸元を決定する際に、品質 / コスト / 性能など、複数の要求機能を高い次元で満足させる必要がある (Fig.5)。必然的に全ての要求機能を満たすため、多くの設計検証が必要になり、高い目標をクリアするまで 繰り返しの検証が必要になる。このような部品に本システムを適用すると、大きな効率化が期待できる。

例えば、燃焼性能など各種のエンジン性能と関連する部品が、これに該当する。そこで本論文では、その代表部品であるピストンを取り上げ、本システムを開発適用した事例を紹介する。

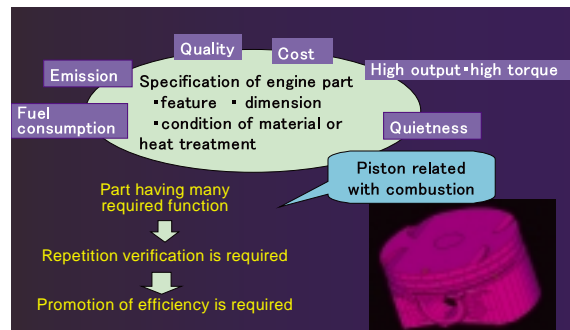


Fig.5 Adequate Part Selection

4. ピストン設計への適用事例

4.1 ピストンの概要

(1) ピストンの要求機能と設計検証項目
エンジンの要求機能をピストンにカスケードし、更にそ

の要求機能を検証すべき項目をFig.6に示す。機械抵抗低減から材質・構造まで、ピストンは高温・高圧の燃焼ガスの中で高速運動するので、多くの機能が求められる。その結果、設計検証項目として耐摩耗性からスラップ音・振動まで、多種多様な検証が必要になるなど、ピストン設計にはこれまで、多くの工数と熟練が必要であった。

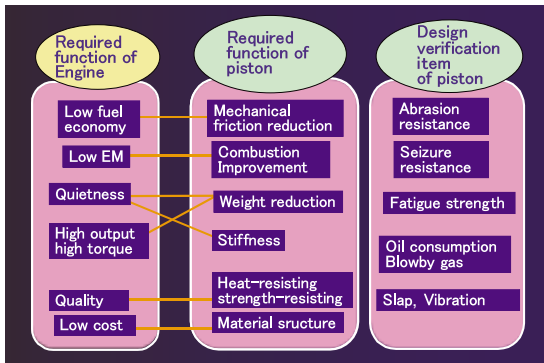


Fig.6 Required Function and Design Verification Item

(2) ピストン形状とピストン設計フロー

ピストンの主要部位は、次の通りである (Fig.7)

- ・ 圧縮比を決めるトップデッキのクラウン部
- ・ 吸排気バルブとの干渉を回避するためのバルブリセス部
- ・ 燃焼室の気密性を確保するためのランド&リング部
- ・ コンロッドを連結するための穴であるピンボス部
- ・ シリンダの中でピストンの姿勢を保つスカート部

以上の部位の中でクラウン部から設計を開始し、要求機能や設計目標に応じて各諸元を決め、最後に解析で設計仕上がり度を確認し、設計が終了する (Fig.8)。この過程で

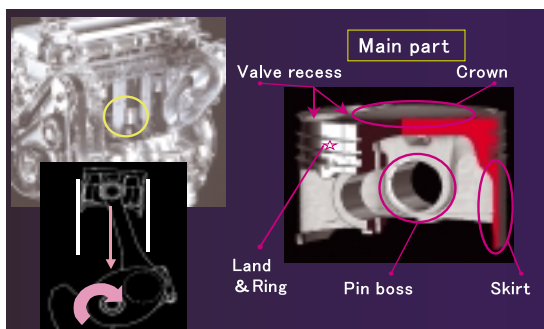


Fig.7 Piston Feature

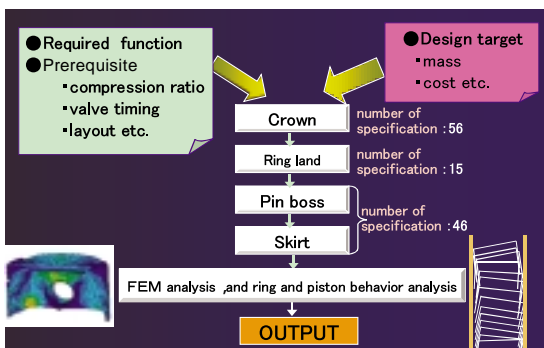


Fig.8 Piston Design Flow

決めるべき主要諸元は、合計で100個以上にもなる。

4.2 ピストン設計システムのフロー

Fig.9のように、工程①ではクラウン～スカートまでの諸元値をシステムに入力する。次に工程②では入力諸元をI-DEASマクロ (記憶した一連の操作を自動実行する機能) が読み取り、設計ノウハウを織り込んだテンプレートモデル (ピストンの要求機能に合わせて細分化され、主要部位の単位で構築された履歴を持つ、寸法駆動に適したモデル) を駆動させて3Dモデルを作る。そして工程③では3Dモデルを使ってバルブとの干渉チェックなど、設計適合性を検証する。最後に工程④では目標圧縮比を満足するクラウン形状へ合わせ込むなど、3Dモデルを段階的に変形させながら、本システムが最適値を求める。

以上のフローを実現するシステム構成は、数値入力とワーキング表示を行うGUI (Graphical User Interface) 画面、全体を制御する実行制御プログラム、そしてI-DEASから成り、一連の作業はI-DEASを操作することなく、GUI画面の中で対話式に行われる (Fig.10)。

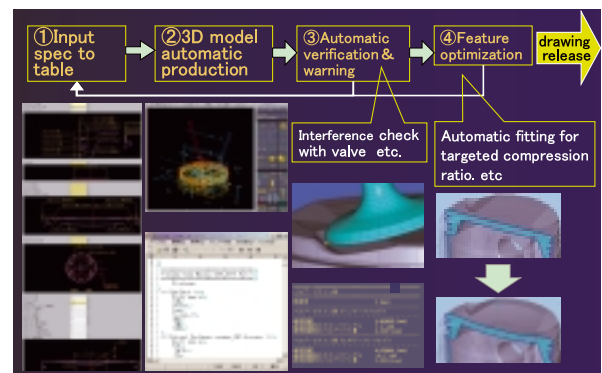


Fig.9 Flow of Piston Parametric Design System

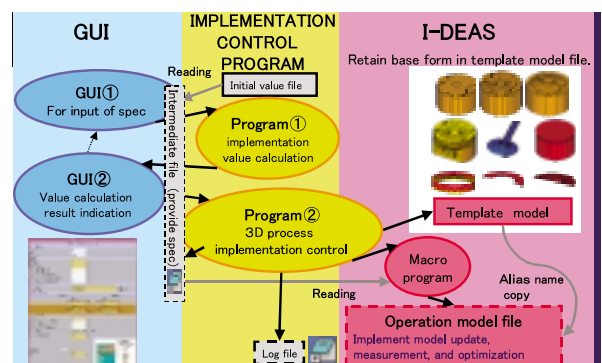


Fig.10 System Structure

4.3 ピストン設計システムの構成

(1) 工程①「表への数値入力」

諸元入力の工数を最小限に抑制するため、変更頻度の高い諸元はキー入力とし、バルブリフトデータなど膨大な情報はデータファイルで入力、そして汎用性のある諸元はプルダウン方式で選択入力する仕様とした (Fig.11)。更に標準的なデフォルト値が入力画面にあらかじめ入力されて

積を計算する (Fig.17)。この体積情報は、リングの挙動解析のための重要な入力値になる。

以上の自動検証は数分で行われ、結果はI-DEASのリスト領域に一覧表示される (Fig.18)。

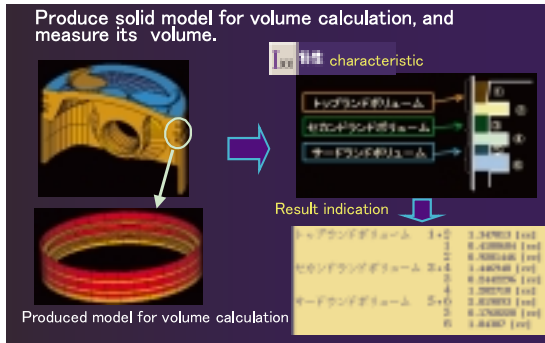


Fig.17 Ring&Land Volume Measurement

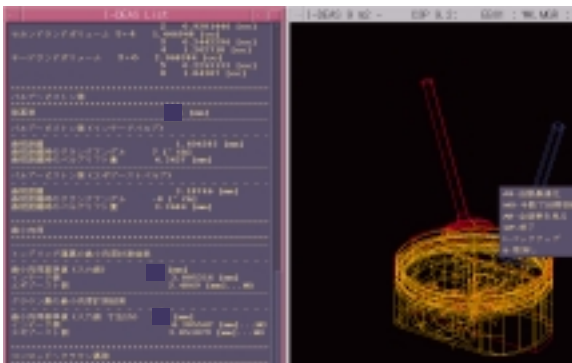


Fig.18 Result of Automatic Verification

(4) 工程④「形状の最適化」

本システムが3Dモデルを段階的に変形させながら、最適値を求める代表例を3つ紹介する。

1) 目標圧縮比への自動合わせ込み

一般的に圧縮比を変更する場合、最終チューニングをクラウン部で行う (Fig.19)。そこで本システムでは、クラウン深さをコントロールしてクラウンの凹み容積を変え、圧縮比を合わせ込むプログラミングをした。その中の最適化手法には二分法を用い、クラウン深さの探索範囲を段階的に抑制しながら、最適解を絞り込む。そして、解が設計基準内に収まっていることを確認し、目標圧縮比に合わせ込まれた3Dモデルが出力される (Fig.20)。

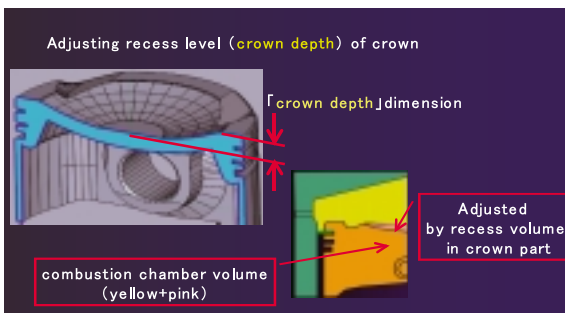


Fig.19 Fitted Part for Targeted Compression Ratio

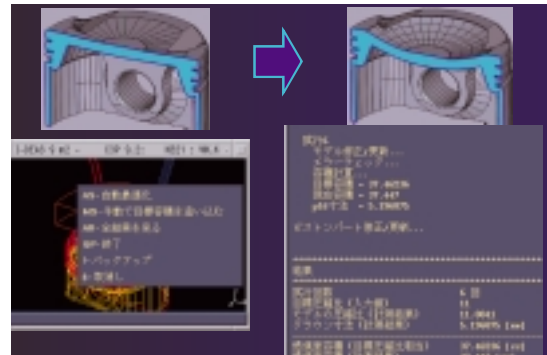


Fig.20 Fitted Piston Crown

2) FEMによる機能検証&適性化

ピストンは高温&高圧の燃焼ガスの中で、高速運動するため、疲労強度など多くの信頼性が求められる (Fig.21)。そこで本システムで自動作成された3Dモデルを活用してFEMを行い、温度&応力分布をチェックしながら、熱逃がし形状などの諸元を適性化している。

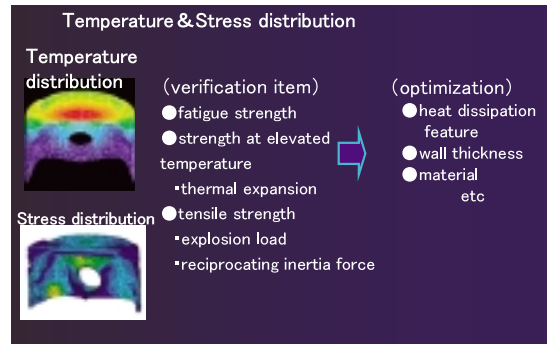


Fig.21 Functional Verification by FEM

3) シミュレーションによる機能検証&適性化

ピストンはシリンダ内を高速運動する際に挙動が乱れ、首振り現象を起こしやすくなる (Fig.22)。そこでピストン専用の挙動シミュレーションソフトで検証し、スカートの外周形状などの諸元を適正化している。

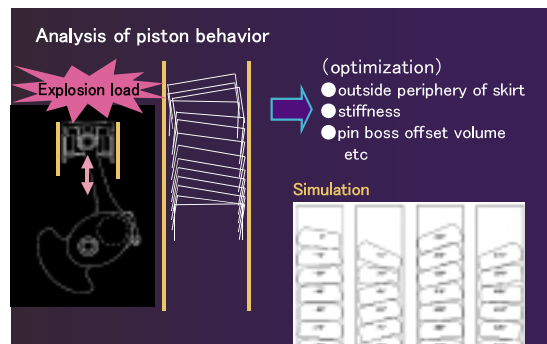


Fig.22 Functional Verification by Simulation

以上がピストンの設計フローを基に構築した本システムの紹介である。これにより、短時間で設計基準に適合した3Dモデルの出力が可能となった。

5. PT設計革新の効果

5.1 ピストン設計システムの適用効果

実設計へ適用した場合、設計工数が圧縮比変更作業で92.5%、新規設計で94%削減する効果があった (Fig.23)。これらの数字から、ピストンのように効率化が必要な部品に実務適用すれば、設計工数を1/10に削減できることが分かった。同時に初心者でも検証洩れやミスがなくなるなど、設計品質の均一化についても効果があった。

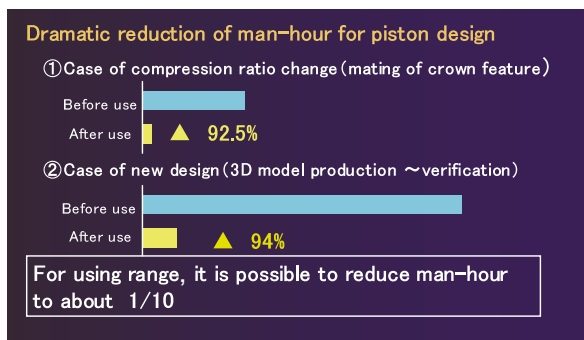


Fig.23 Effect of Using Piston Parametric Design System

5.2 PT設計革新による効率化

机上検証領域の拡大によって、物を作らずに評価できるようになり、試作&実機評価の工数が削減した (Fig.24)。またフロントローディング化を進め、初回出荷品質を向上させたことにより、図面修正の工数も削減した。更に本システムの適用により、3D作成と机上検証の工数がピストンの事例のように劇的に減少し、適用部品の拡大によって、全体工数を従来比半減できる見込みがあることが分かった。

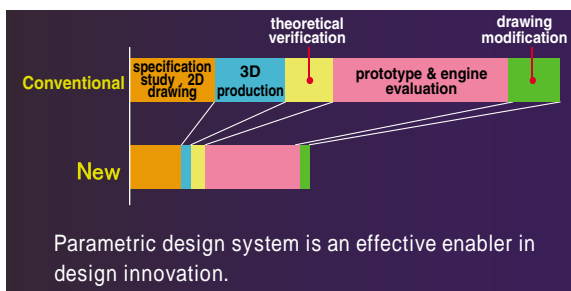


Fig.24 Effect of PT Design Innovation

6. おわりに

周知の通り製造業は、業務効率化・コスト削減・品質向上が命題である。自動車会社各社もその命題へ懸命に取り組んでいる中で、マツダは本システムを次の設計革新を担っていく有効なイネーブラーと考え、育成してきた。今後は、全社の情報データベースと本システムをリンクさせ、設計業務をトータルでナビゲーションできるまで、機能拡張したいと考えている。

最後に、本システムの開発並びに特許出願に際して、御支援して頂いた社内外の関係者の皆様に、厚く御礼を申し上げます。

著者



楠 康友



三村光生



佐々木晋

論文・解説

24

ボンゴ用触媒担持型DPFシステムの開発

Development of Catalyzed DPF System for Bongo

松江 浩太*1 柚木 伸夫*2 林原 寛*3
 Kota Matsue Nobuo Yunoki Hiroshi Hayashibara
 崎本 正嗣*4 松尾 祐児*5
 Masatsugu Sakimoto Yuji Matsuo

要約

ディーゼル車（以下DE車）の排出ガスに含まれる浮遊粒子状物質（Particulate Matter，以下PM）による大気汚染の懸念が指摘され、首都圏をはじめとする大都市圏ではDE車の運行規制が開始され始めている。ボンゴでは、そのPMの排出をほぼゼロとし、本来の直噴DE車の美点である“燃費のよさ”を活かすために、触媒担持型DPF（Diesel Particulate Filter）システムを新開発して搭載した。このシステムでは排出ガス中のPMの約90%をフィルタで捕集でき、捕集したPMはコモンレールシステムなどの電子制御により“自動的”に除去することを可能とした。これによりボンゴはクラスで初めて大都市圏でも登録・運行が可能なDE車となった。

Summary

Air pollution caused by particulate matter (PM) contained in the emissions from a diesel engine has turned into severe health problems. In the capital sphere, therefore, no duty-diesel activity has started, which imposes regulations on diesel vehicles so that they cannot be driven freely and uninhibitedly in the sphere. The Bongo has the capability of removing almost all of PM using a newly developed DPF (Diesel Particulate Filter) system which can automatically regenerate the PM trapped in DPF. The Bongo is the first-in-class vehicle to satisfy new Japanese short-term emission standards and NOx/PM law for vehicles.

1. はじめに

東京都をはじめとして大都市圏を中心にDE車から排出されるPMによる大気汚染の懸念が指摘され、NOx・PM法の施行やDE車の運行規制が始まるなど、都市圏でDE車を使用することが難しい環境になっている。一方、DEには燃費がよいという本来の利点があり、商用車ユーザからは根強い需要があるのが実態である。特にボンゴは保有ユーザの約4割（当社資料）がNOx・PM法対象地域に集中する“都市型輸送貨物車”であるため、早急な対応が必要となっていた。

今回のボンゴでは、新短期規制に適合するのを機に“大都市圏でもこれまでと変わらず使用できるDE車”を目指して、PMをほぼゼロにする“DPFシステム”を新規開発して搭載し、新短期規制、自動車NOx・PM法と首都圏ディーゼル車運行規制のすべてにクラスで初めて適合した。Fig.1にボンゴクラスの各排出ガス規制値と低減率の例を示す。

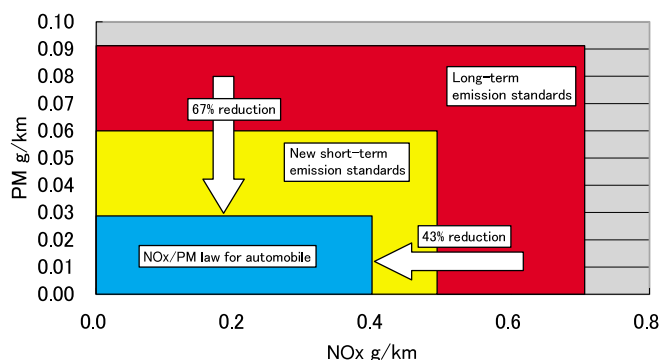


Fig.1 Changing of Emission Regulation(1.7 GVW 2.5)

2. パワートレインの特徴

Fig.1に示したように、ボンゴでは規制値ベースでPMの約70%、NOxも約40%の削減が必要であった。そこで、ベースエンジンは、マツダ6（日本名：アテンザ）などに

*1, 2, 4, 5 第2エンジン開発部
 Engine Development Dept. No.2

*3 技術研究所
 Technical Research Center

搭載し、欧州Stage4のEM規制に適合し高出力・低EMの直接噴射式DE MZR-CDとし、NOx低減のポテンシャルを確保した。これに、日本国内向け商用車用の仕様変更を行い、RF-CDTとしている。RF-CDTの諸元をTable 1に示す。

Table 1 Engine Specification

| | | |
|-----------------------|--------|--------------------------------|
| Displacement | cc | 1998 |
| Bore × Stroke | mm | 86 × 86 |
| Combustion Type | | Direct Injection |
| Compression Ratio | | 18.4 |
| Max Power | kW/rpm | 63/3500 |
| Max Torque | Nm/rpm | 178/2000 |
| Variable Swirl system | | with |
| Injection system | | Common Rail System (Denso U2P) |
| Fuel Pressure Max | MPa | 180 |
| Turbo Charger | | with (IHI RHF3H) |
| Charged air cooler | | Without |

3. 触媒担時型DPFシステムの概要

以下にポンゴに搭載したPM低減の中心技術である“DPFシステム”に必要とされる2つの機能について解説する。

- 1) エンジンから排出されるPMを捕集する機能
- 2) 捕集したPMを浄化する機能

3.1 DPFでPMを捕集するメカニズム

DPF本体の外観をFig.2に示す。

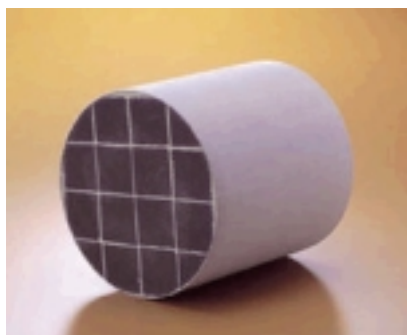


Fig.2 Outer View of DPF

DPF内部は従来から使用している排出ガス浄化触媒用セラミックス担体と同様に1mm角程度の断面を持った細かい通路（セル）に分けられており、セルの端面が交互に目封じされているのが特徴である（Fig.3）。セラミックス製の

多孔質体であるため、セル間の壁の内部は直径が数μ～数十μmの気孔が3次的に無数に連通した構造になっている。上流側が開口されたセルの入口から流入した排出ガスはセル間の壁内部の気孔を通り、下流側が開口された隣のセルから排出されるが、PMは気孔にフィルタリング（捕集）され、壁に堆積していく（Fig.4）。

PMを捕集した状態のセル拡大写真をFig.5に示す。

このメカニズムにより、DPFではエンジンから排出されるPM分の約90%を捕集・低減することが可能である。

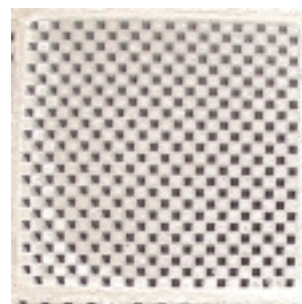


Fig.3 Close Up View of a Part of DPF Side Surface

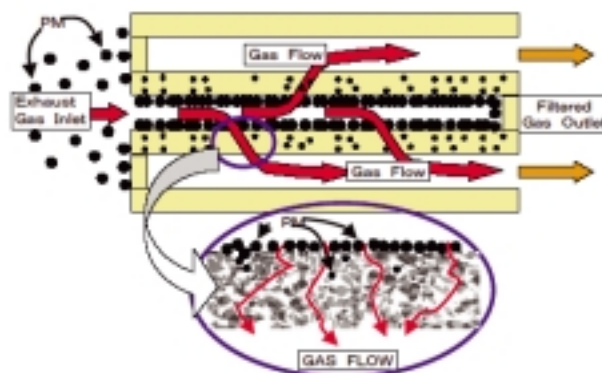


Fig.4 Mechanism of PM Trap on DPF

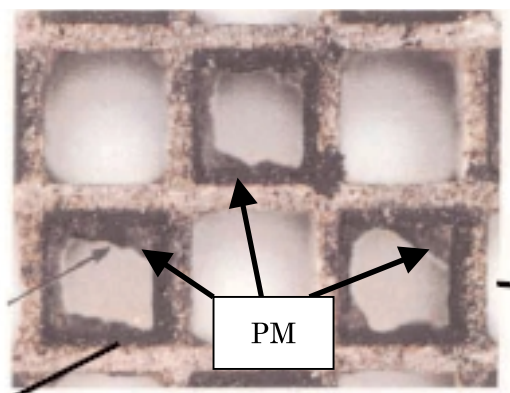


Fig.5 Cutting View of Cell with PM

3.2 PMを除去するメカニズムとボンゴのシステム

(1) PM浄化のメカニズム

PMを捕集した状態で運転を継続すると、PMの堆積が増えるに従って排気圧力が上昇し、出力の低下などにつながるため、捕集したPMを一定以上溜めず浄化する“除去作業”が必要である。

除去の方法としては、PMのほとんどが炭素(C)の化合物であることから、本システムでは“加熱して酸化除去する”メカニズムを採用しており、このメカニズムを“再生”と呼んでいる。この再生方式を採用したDPFシステムは下記の3種類に大別できる。

- 1) 外部熱源方式...外部電源を使用し、電気ヒータでPMを加熱除去する方式(レトロフィットなど)
- 2) 燃料添加剤方式...燃料中にPMの着火温度を低下させる酸化補助剤(セリアなど)を混入し、その効果でPMの酸化反応を促す方式(欧州の一部乗用車)
- 3) 触媒方式...DPFに担持した酸化触媒と排出ガスの熱を利用してPMの酸化反応を促す方式

(2) ボンゴのDPF再生方式

ボンゴには自営業者から運送業者まで幅広いユーザが存在するため 特殊なメンテナンスを要求することが難しい。そこで、ユーザのメンテナンスが不要で環境にもやさしい“触媒方式”を基本とした。触媒方式のDPF再生の特徴は、触媒の作用により、PMが自己着火で燃焼を開始する温度よりも低い温度からPMの酸化除去ができることであり、この再生方式を“連続再生”と呼んでいる。しかし、連続再生は排出ガスの温度が低い場合のPM再生速度が遅く、ボンゴの使用条件では、高速道路などの高負荷走行では十分な連続再生が可能であるが、それ以外の走行条件では連続再生だけでは十分な再生ができない。そこで、所定のPM量が捕集された時に、電子制御で自動的に排出ガス温度を上昇させ、捕集されたPMを全て燃焼させる“自動再生制御”を追加したシステムとし、再生能力を確保した。このシステムをFig.6に示す。

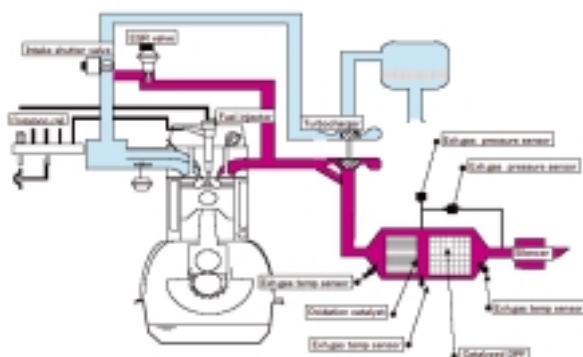


Fig.6 Schematic of DPF System for Bongo

3.3 ボンゴ用DPFシステム構成の特徴

次に、ボンゴに搭載したDPFシステムの特徴的な部品について説明する。

(1) DPFユニット

ボンゴ用DPFユニットは、前段に酸化触媒、後段にDPF担体を一体ケースに収めた“2ベッド構造”を採用して小型化を図り、車両床下への搭載を可能にした(Fig.7)。

前段の酸化触媒にはコーゼライト製担体を使用し、従来と同様の一酸化炭素や未燃炭化水素を低減する役割とともに、自動再生時に排出ガス中に供給された未燃燃料を酸化反応させ、DPF入口のガス温度を上昇させる役割を持たせている。このため、軽油成分の燃焼反応と耐熱性に優れた新開発の触媒を採用した。

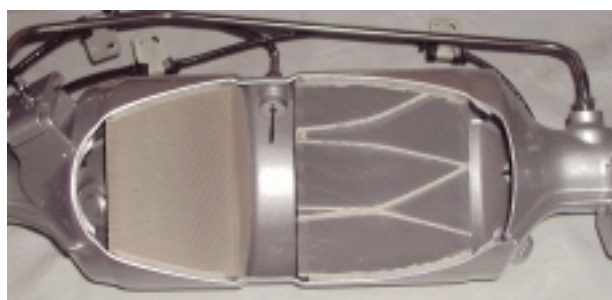


Fig.7 DPF Unit (cut model)

後段のDPFには“炭化ケイ素(SiC)”製担体(1.9L:NGK(株)製)を採用した。DPFには一般的に“コーゼライト製担体”と“SiC製担体”があるが、SiCはコーゼライトと比較して熱伝導性が10倍程度高く、捕集したPMを酸化除去する際の発熱による局所的な高温化を抑制できる。また耐熱温度自体もコーゼライトより高いため、PMを酸化除去する際の高熱に対する信頼性が高く、PMの許容捕集量を高く設定することが可能である。ボンゴでは、前述のように連続再生運転が可能な領域が高速走行などの限られた領域であり、平均的なユーザの使用形態を想定すると、数百kmに1回の自動再生が必要である。しかし、自動再生中は通常走行時より燃費が悪化するため、自動再生を実行するインターバルはできるだけ長く、かつ短時間で効率よくPM浄化をすることが理想である。そのため、再生を開始するPM捕集量を高く設定でき、自動再生実行のインターバルが伸ばせる“SiC製DPF”の特徴を利用することとした。更にDPFに担持する触媒は、PM浄化性能に優れた新開発酸化触媒として、触媒によるPM浄化の機会を最大に確保するとともに、自動再生によるPM除去が完了する時間(再生時間)の短縮を行った。これらの材料技術により、自動再生を実行するインターバルはコーゼライト担体を使用した場合の約2倍に、再生時間も数分程度に短縮でき、燃費悪化を1%以下(再生頻度を考慮した10・15モード平均値)に抑制できた。

(2) コモンレール式燃料噴射システム

ハード面はベースエンジンであるMZR-CDと同一である。RF-CDTでは従来の使い方に加え、DPFに捕集したPMを除去する“自動再生”制御のために、噴射主噴射(メイン)より遅いタイミング側での噴射可能領域を広げているのが特徴である。

(3) PM捕集量算出用センサ

DPFのPM捕集量をDPFの前後の差圧から算出するため、2つの圧力センサ(DPF前後差圧センサ、DPF前圧センサ)、3本の温度センサ(酸化触媒上流、DPF上流、DPF下流)とエアフローセンサを採用した。各センサから得られた値をベースにコンピュータでモデル演算を実施し、DPFへのPM捕集量を高精度に算出している。

(4) 電子制御吸気シャッターバルブ

自動再生時に吸気量をコントロールし、排出ガスの熱容量を低減するため、制御精度が高く応答性のよい、DCモータ駆動の電子制御式吸気シャッターバルブを採用した。吸気シャッターバルブの開度は、運転状態や環境条件などを基準にコンピュータで目標開度を算出し、TACM(Throttle Actuator Control Module)を介してフィードバック制御している。

4. ボンゴ用触媒担持型DPFシステム制御の特徴

4.1 自動再生制御実行タイミングの算出

DPFにPMを溜め続けると、前述のように、DPFが詰まって排気圧力の上昇などが懸念される。

このような状況を回避するためには、DPFに捕集したPMの量を正確に把握して、自動再生を開始するタイミングを算出する必要がある。従来、PM捕集量とDPFの前後差圧には1対1の相関があるといわれていたが、実際にはFig.8のように、同じ捕集量でも捕集量をゼロから増やしていく場合と、ある量から減らしていく場合で大きな特性差があり、従来の考え方ではDPFに捕集可能な量を超えるほどの算出誤差が出てしまうことが確認できた。

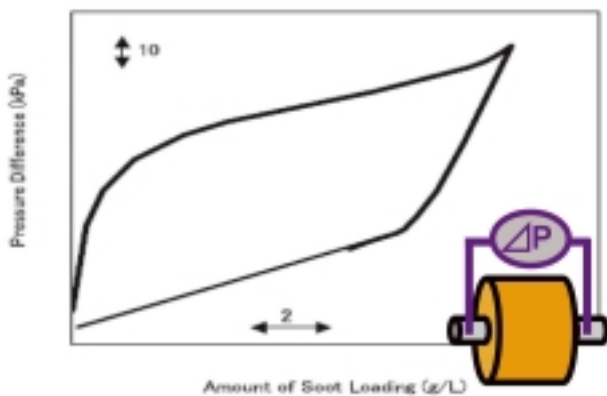


Fig.8 Characteristic of DPF Pressure Drop

この圧損特性差のメカニズムが“DPFへのPM堆積パターンの違い”(Fig.9)にあることを特定し、そのパターンをモデル化してPM捕集量算出演算に織り込むことで、算出誤差を低減した。この結果、DPFに捕集したPMの除去を開始するタイミングを正確に算出することが可能となった。

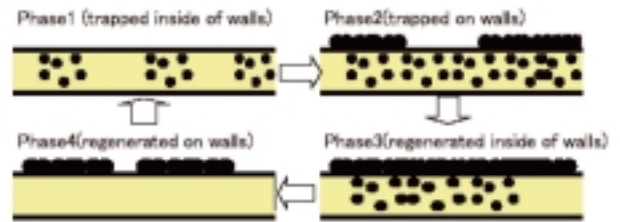


Fig.9 Patterns of PM Trap on DPF

なお、ボンゴでは、センサ類の故障やその他の不測の事態でも正確な捕集量が算出できるように、エンジンの運転履歴から捕集量を推定する方法も導入し、両方式を併用して捕集量の算出精度を向上させている。

4.2 捕集したPMの除去方法

前述のように、ボンゴ用DPFシステムでは捕集したPMを除去するために、連続再生と自動再生を使い分けている。Fig.10に運転領域ごとに適用する再生方法を示す。

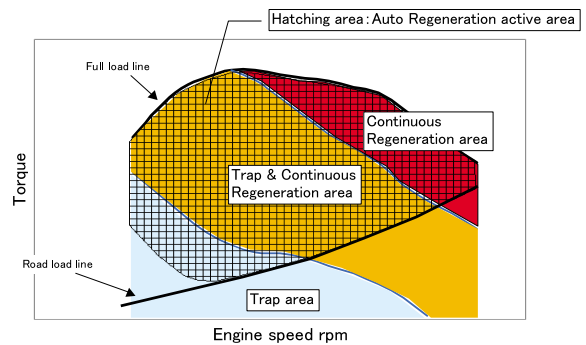


Fig.10 The Way of Regeneration

(1) 連続再生 (Continuously Regeneration area)

一般にPMの自己発火温度は約550 であるが、通常の走行シーンでは排出ガス温度がその温度に達する頻度はほとんどない。そこでDPF担体にPM酸化性能に優れた触媒を担持し、PM着火温度を100~150 低減して高負荷走行時に連続再生を可能とした。

(2) 自動再生(Hatching area : Auto Regeneration active area)

DPFに流入する排出ガス温度がPM着火温度に満たない運転領域(Trap area)や連続再生速度の遅い領域(Trap

& Continuously Regeneration area) で、PM捕集量が基準値を上回った際に自動的に制御を実行してPMを除去する再生である。自動再生では、吸気シャッターバルブとコモンレール噴射装置の総合制御を行い、排出ガス温度を上昇させてPM着火温度にして再生を行う。制御の概要を以下に示す。

1) 電子制御式吸気シャッターバルブ制御

吸入空気量を減少させ、排出ガスの熱容量を低減する。

2) 燃料噴射制御

下記2種類の噴射パターンをガス温度により使い分け、PM着火温度以上にDPF流入ガス温度を昇温してPM除去を実行する。

- ① フォロー噴射：メインの燃料噴射後の膨張行程前半のシリンダ内で着火可能なタイミングで行う噴射。エンジン出口での排出ガス温度を上昇させ、下流の酸化触媒の温度を上昇させ、維持する。
- ② ポスト噴射：シリンダ内では着火しない膨張行程中盤に行う噴射。エンジン下流に未燃燃料を供給し、酸化触媒上で酸化反応をさせ、その反応熱でDPF入口のガス温度をPM着火温度以上に上昇させる。

Fig.11に各噴射のイメージを、Fig.12に制御例を示す。

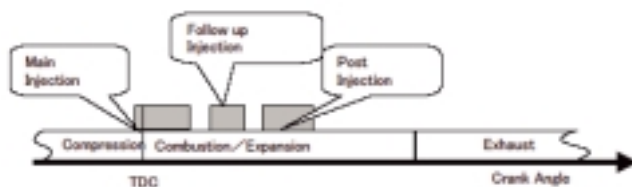


Fig.11 Image Drawing of Each Injection

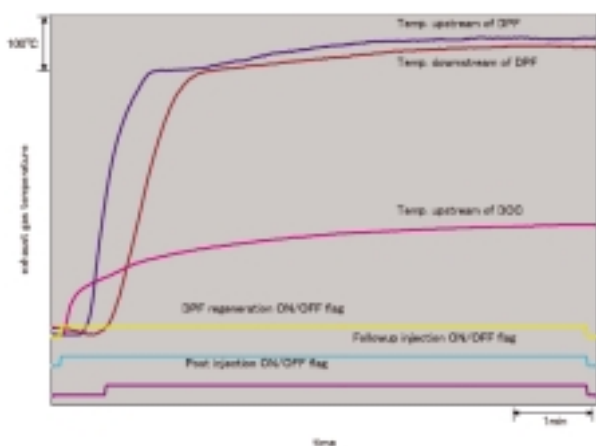


Fig.12 Temperature at Auto Regeneration

(3) 手動再生

アイドリングや極低負荷の運転領域やエンジンが暖機できていない燃焼が不安定な条件では、効率的な自動再生を行うことが難しいため、自動再生制御を停止させている。

そのため、この領域で運転を続けるとDPFにPMが捕集

され続ける可能性がある。ポンゴのDPFシステムでは、自動再生されずに高捕集量となった時、これを検出してインストルメントパネル内の“DPFランプ”を点灯させ、ドライバに告知するシステムとした。DPFランプ点灯時には、一定の車両条件が整った状況でインストルメントパネルに設けた“DPFスイッチ”を押すと、強制的に再生制御を実行し、安全にPMの除去を実施することができる。

4.3 自動再生中のドライバビリティ向上

以上の技術により、DPFへのPMの捕集と再生は可能となったが、実際にドライバに意識させずに自動再生を実行するには、自動再生制御と通常走行の切り替わり時にトルク段差が発生することを防止したり、走行中のアクセルワークに対する加減速の応答性が変化することを防止したりする必要がある。そこで、ポンゴでは自動再生時にアクセル開度やエンジン回転数から、同一運転状態で通常走行時に発生するトルクを予測し、トルク差が発生しないようにトルク補正を行う“トルク一定制御”を導入して、運転者に制御の違いを感じさせないよう配慮した。その結果、通常運転時と再生運転時で同一の加速が可能となっている。

5. システム耐久性

5.1 フルライフノーメンテナンスへの対応

ポンゴ用DPFシステムでは下記2点に注力した開発を行い、フルライフノーメンテナンスを実現した。

(1) 自動再生頻度と自動再生時のガス温度コントロール

ポンゴ用DPFシステムで耐久性のキーとなる部分は、“前段酸化触媒およびDPFに担持した触媒の耐久性”にある。酸化触媒は一般に高温条件にさらされると、貴金属のシタリングが生じ、触媒反応活性が低下する。特に自動再生中は酸化触媒とDPFが高温にさらされ続けるため、自動再生中のガス温度の影響が大きい。そこでポンゴ用DPFシステムでは、耐久性を重視した貴金属仕様を選定した上で、次の2点に着目した制御の最適化を実施し、フルライフノーメンテナンスを実現した。

- 1) 自動再生中のガス温度を常にモニタ、走行条件によらず適切な温度に保つ補正を行うことで、触媒の劣化を防止した。
- 2) 通常走行時に排出するPM量を最大限減少させるチューニングを行い、自動再生頻度を低減した。

同時に使用燃料をPM発生量が少ない“S50低硫黄燃料”に限定し、耐久性に有利な設定としている。

(2) DPFへの異物堆積の抑制

DPFに再生で除去できない異物が捕集されると、排圧上昇が生じ、出力低下などが発生する。また、常に捕集量が高めに誤算出していくため、自動再生の実行頻度が増加し、触媒の劣化も加速されていく。一方、DPFに捕集される異物の大部分は、消費された潤滑油中のアッシュ分に起因する化合物であるため、ポンゴの潤滑油にはアッシュ成分比

率の少ない最新の“DL-1 低アッシュ潤滑油”を指定している。

(3) エンジン本体に与えるダメージ

自動再生モード中のフォロー噴射の一部とポスト噴射は、噴射時期が遅く、噴霧がシリンダ壁に直接あたるケースがあるため、潤滑油の燃料希釈が発生する。ボンゴでは、エンジン信頼性に影響を与えない希釈率を把握した上で、先行実施したDPF装着車両のモニタ走行から得られた結果を基に、ポスト噴射とフォロー噴射の実行開始タイミングのチューニングを行い、排出ガスの昇温につながらない余分な噴射量を低減する制御を織り込んだ。これらにより、RF-CDT型エンジンはDPFなし従来のMZR-CDエンジンと同等の信頼性を確保した。

6. 結論

- (1) 酸化触媒と触媒担持型DPFを1コンテナに収めたDPFユニットと制御システムを構築し、ボンゴに搭載した。
- (2) DPFへのPM捕集パターンのモデル化により、DPF前後の差圧から高精度に捕集量を算出することを可能とした。
- (3) コモンレール式燃料噴射装置とDCモータ式吸気シャッターバルブの統合制御により、排出ガス温度の低い運転条件でも、捕集したPMの自動再生を可能にした。
- (4) 通常運転時と自動再生時のトルク一定制御により、自動再生を意識させないドライバビリティを実現した。
- (5) 自動再生制御とチューニングの最適化および低硫黄軽油、低アッシュオイルの採用により、フルライフのDPFシステム耐久性を確保した。
- (6) 以上の新技术を織り込んだ触媒担持型DPFシステムを搭載して排出ガス中のPMを約90%低減した結果、ボンゴは国内新短期排出ガス規制と自動車NOx・PM法にクラスで初めて適合し、更に首都圏ディーゼル車運行規制にも適合する商用車に仕上げることができた。

参考文献

- (1) 日本学術振興会高温セラミック材料第124委員会：SiC系セラミック新材料 最近の展開，東京，内田老鶴園（2001）

著者



松江浩太



袖木伸夫



林原 寛



崎本正嗣



松尾祐児

論文・解説

25

RX-8ハイドロジェンREの紹介

Introduction of RX-8 Hydrogen RE

森本賢治*1 水島善夫*2 定平誠二*3

Kenji Morimoto

Yoshio Mizushima

Seiji Sadahira

堂園一保*4 内田浩康*5

Kazuho Douzono

Hiroyasu Uchida

要約

将来の自動車用燃料として水素が期待されている。水素を燃料とする自動車として、燃料電池自動車の開発が鋭意進められているが、同様に地球環境問題への解決に貢献できる内燃機関水素自動車もコスト、量産性の面から一定の役割を果たすものと考えられる。マツダは1995年に当時の運輸省の大臣認定を受け、水素ロータリエンジン（以下RE）自動車の公道走行を実施している。当時と比べベースエンジンのRE及び周辺技術として燃料供給システムが進歩している。とりわけ軽量化、高圧化による燃料タンクの大幅な進歩が見られる。また、水素インフラ普及期においては、水素のインフラが十分整備されない状況が想定されるが、この状況下においても自動車として利便性を保つよう水素でもガソリンでも走行可能なデュアルフューエルの自動車の登場が期待される。そこで、RX-8をベースとして技術進歩を反映したデュアルフューエルの研究車両を試作した。新開発のRENESISに水素を噴射する電子制御インジェクタを追加し、直接噴射を行うことで出力の向上を図った。更に水素内燃機関で課題となるNOxの低減には希薄燃焼方式を用いた。車両技術としては、燃料電池自動車と共通の35MPaの高圧水素タンクを用い、更に前述の大臣認定取得時に織り込んだ技術をベースとした安全技術を搭載した。なお、この研究車両は2003年開催の第37回東京モータショーで技術展示を行い、好評を博した。

Summary

Hydrogen energy is greatly expectable as a promising vehicle fuel in the future. Generally, a fuel-cell vehicle has been developed as a hydrogen utilization technology, while a hydrogen-fueled internal combustion engine vehicle will have opportunities to be introduced to the market from the viewpoint of cost and mass production. Mazda obtained the certificate of the Ministry of Transport in 1995, and conducted the public road tests of the hydrogen-fueled internal combustion engine vehicle. Technologies of rotary engines, fuel supply systems, fuel tanks and so on have attained great progress since then. An experimental vehicle reflecting the technological progress was prototyped. We employed a dual fuel system to achieve high convenience even under a condition where hydrogen stations are not in good service. Direct injection of hydrogen attained by additionally installing an electronically controlled gas injector on RENESIS substantially improved engine output. Use of ultra lean combustion also reduced NOx. We adopted the safety technology based on the technologies which had been incorporated at the time of obtaining the above certificate. The same 35 MPa high-pressure hydrogen tank as in a fuel-cell car was installed. This research vehicle was exhibited at the 37th Tokyo Motor Show held in 2003 and gained public favor.

*1~5 技術研究所
Technical Research Center

1. はじめに

温暖化等地球環境問題，エネルギー問題を根本的に解決するエネルギーとして水素が注目され，実用化に向けての研究開発が進められている。例えば，経済産業省の研究補助事業として水素・燃料電池実証プロジェクト（以下JHFC）により燃料電池自動車，水素供給設備の実証研究が行われている。燃料電池自動車は，燃料電池で発電した電気エネルギーでモータを回して駆動するシステムであり，エネルギー変換効率が高く，有害な排出ガスを出さないため究極のシステムと考えられている。しかしながら，燃料電池自動車は，コスト，量産性，利便性等の観点からは本格的な普及には今しばらくの期間が必要と考えられる。

一方，内燃機関の水素自動車は，燃料電池車と同様に地球環境，温暖化等の課題解決に大きく貢献できる技術であり，マツダは環境対応技術として1990年代初頭から開発に取り組んでいる。この技術は，コスト，量産性等に優れ，比較的早期に水素を自動車用エネルギーとして本格的に導入するための有効な手段になり得ると考える。内燃機関としてREを用いた水素自動車は，タンクに水素吸蔵合金を用いたシステムで開発を行い，その一つは1995年に大臣認定を取得し¹⁾，2台で計4万kmを超える公道走行実験を実施している。水素REのベースエンジンであるREは2003年に新開発のRENESISとして出力，燃費，エミッションとも大幅な性能向上を果たし，RX-8に搭載している²⁾。また水素貯蔵技術としては，高压タンクの技術開発が進み，より高压化，軽量化が進められている。加えてガスインジェクタ技術等の周辺技術も1995年に大臣認定を取得した時点から大幅な進化が見られる。

以上を踏まえ，水素社会を早期に実現する動力源の提案として，新開発のRENESISをベースとした水素REを搭載した研究車両「RX-8 Hydrogen RE」を試作した（Fig.1）。当該研究車両に関する技術について紹介する。



Fig.1 RX-8 Hydrogen RE

2. 開発の狙い

研究車両は現在唯一のRE搭載車であるRX-8をベースに以下三項目を狙いとして開発を行った。

(1) デュアルフューエルシステム

水素でも，ガソリンでも走行可能なデュアルフューエルシステムを実現する。水素社会への移行期において水素インフラの整備されていない地域へ出かけた場合を想定し，ガソリンでも走行可能とする。

(2) 出力向上と窒素酸化物（以下NO_x）低減

水素を内燃機関に用いる場合の課題である出力の向上とNO_xの低減を図る。

(3) 35MPa高压タンク

水素燃料タンクは，多くの燃料電池自動車と共通である35MPa高压タンクとする。これは，現在燃料電池自動車において，同方式の水素供給設備の実証試験が進められており，当面燃料タンクとして主流になると考えられるためである。

3. RENESIS水素RE技術

上記狙いを実現するために織り込んだエンジン技術について紹介する。

3.1 デュアルフューエル技術

RENESIS水素REの基本構造をFig.2に示す。マツダRENESISの<Std>パワーユニット³⁾をベースとし，ロータハウジングの長軸近傍に電子制御低圧水素ガスインジェクタを付加した。直接噴射にした理由については3.2節で述べる。ガソリンインジェクタは，ベース仕様からの変更はない。水素とガスの二系統の燃料噴射系を持つことにより，要求に応じていずれかの燃料をエンジンに供給することができる。

Fig.3は水素で運転した場合の空気過剰率（以下 λ ）と点火プラグ熱価の過早着火発生限界への影響を示す。ガソリンRENESISは7~9の熱価の点火プラグを用いていることから， $\lambda=1.6$ 以上の希薄燃焼運転を行えば，ガソリンとの点火プラグの共通化が可能となり，デュアルフューエルへの対応が可能であることが分かる。水素の燃焼速度はガソリンと比較して非常に大きいため，例えば $\lambda=1$ で燃焼させると水素ノックと呼ばれる異常燃焼音が生じる。しかしながら希薄燃焼を行うと燃焼速度は小さくなり $\lambda=2$ では燃焼音がガソリンと同等になる。

水素に最適な燃焼を行うためには，最適点火時期，最適空燃比等の調整が必要であるが，本ベースエンジンは電子制御スロットルを持つため，エンジン制御ユニットのセッティングを変更するだけで，最適な水素燃焼が可能となる。

$\lambda=1.6$ 以上の希薄燃焼を行えば点火プラグ，燃焼系にお

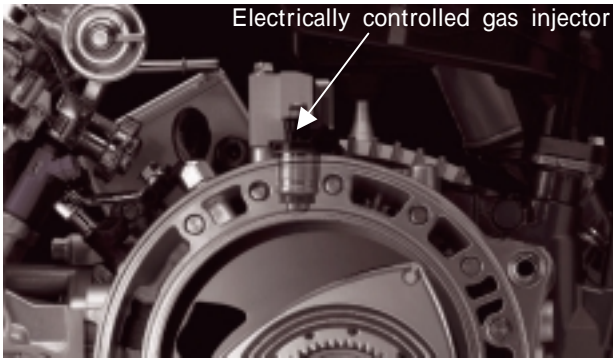


Fig.2 RENESIS Hydrogen RE

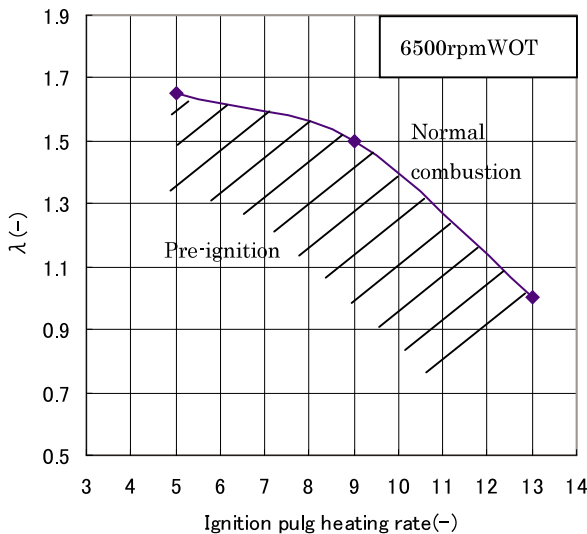


Fig.3 Effect of Spark Plug Heating Value to Pre-Ignition⁽³⁾

Table 1 Characteristics of Hydrogen⁽⁴⁾

| item | Hydrogen | Gasoline |
|--|----------------|----------------------------------|
| Chemical formula | H ₂ | C _{7.5} H ₁₇ |
| molecular weight | 2.016 | 107 |
| Chemical amount theory density (volume) | 29.53 | 1.7 |
| lower calorific value(LHV) | | |
| Calorific value per stoich. mixture (MJ/m ³) | 2.98 | 3.55 |
| Calorific value per theoretical air (MJ/m ³) | 4.23 | 3.62 |
| Ignition limit (Vol%) | 4-75 | 1.0-7.6 |
| Laminar flow combustion speed(cm/s) | | |
| stoichiometric mixture (cm/sec) | 265 | 40 |
| λ = 2 (cm/sec) | 48 | |
| Minimum ignition energy (mWS) | 0.02 | 0.24 |

いてガソリンとの共通化が可能であり、デュアルフューエルを実現できる。

3.2 出力の向上技術

Table 1に示すように、水素は混合気中に占める燃料の容積割合が高い。例えば λ = 1においては、混合気100%中、ガソリン1.7%に対して水素は29.5%もの容積を燃料が占める。その結果、多くのガソリンエンジンで用いられているような吸気管内で混合気が形成され、その後エンジンに予混合気として供給されるエンジンにおいては、吸入空気の充填量が大幅に低下する。Fig.4はガソリンの空気充填量を100%とした時の、λ = 1, 1.5, 2における水素エンジンの空気充填量を示す。λ = 1では約70%、λ = 2においても約83%に空気の充填量は低下する。空燃比が一定の場合、出力は空気充填量と比例関係にあるため、充填量の減少は出力の低下につながる。この充填量減少への対策として、吸気行程では空気のみを吸入し、圧縮行程において筒内に燃料を直接供給するいわゆる直噴技術が水素には特に有効である。Fig.5は、水素エンジンにおいての直噴化による充填量の向上率を示す。混合気中に占める燃料の割合が λ = 1では約42%の効果があるが、λ = 2では、約20%の充填量向上効果がある。なお、充填量の向上のトルク向上効果への寄与は、エンジンの出力特性、フリクションロス特性により異なるため、一律ではないが、λ = 2においても25-30%程度の効果が期待される。

直噴ガソリンエンジンの場合、部分負荷では圧縮行程の後半に噴射し混合気の成層化を行い、高負荷では、吸気行程から噴射し混合気を均一化する方法が一般的である。一方水素はTable 1に示すように可燃範囲が広いとため、全域において成層化を行う必要がなく、むしろ早期に噴射し均質な混合気を生成することがNOx低減、熱効率向上には有利である。そこで本エンジンでは、ミキシング時間を十分取り、均質な混合気が形成されよう圧縮行程の初期に噴射する方法とした。特にREは、各行程が270° CAでありコンベンショナルのレシプロエンジンの1.5倍と長く、更に筒内で発生する強い流動も加わるため、圧縮行程の初期に噴射を行えばレシプロエンジンと比較してミキシングに有利である。加えて、圧縮行程の初期に噴射することで、要求噴射圧が低くなり①高圧タンクの圧力が燃料の消費により低下してきても、低圧まで噴射ができる②燃料システムとしてCNG等で用いられている低圧ガスインジェクタを使用可能になるなどの利点も生じる。噴射圧は0.5Mpaである。

次に低圧のガスインジェクタで燃料を供給する場合に必要なインジェクタの個数について検討した。水素ガスは、その特性上大きなボリュウムのガス噴射を必要とする。例えば 80kWの出力を得るためには 水素を約2,000NL/min噴射する必要がある。今回実験に用いたガスインジェクタは、比較的容量の大きい11,150NL/minの仕様であるが、

この場合の噴射に必要なインジェクタ本数を検討した。Table 2においてAは、インジェクタをFig.6の位置に設置し、圧縮行程にのみ噴射する場合に必要なインジェクタ本数を、Bは同上設置条件で、吸気行程+圧縮行程に噴射した場合に必要なインジェクタ本数を示す。その結果、Table 2に示すように、2ロータで4本のインジェクタを設置すれば、実用走行において必要とされる3,000rpmまで完全に圧縮行程で噴射できることが分かった。またこの仕様で、吸気行程の一部にも噴射すれば7,000rpmの要求最大流量を満足することが分かった。そこで本エンジンでは、2ロータで4本即ちロータ当たり2本のインジェクタを配置することとした。具体的には、Fig.6, 7に示すようにロータハウジング長軸近傍に気筒当たり2本のインジェクタを配置した。このように、2本のインジェクタを容易に設置できるのは、REの構造上のメリットである。

以上のようにREは、構造上インジェクタのレイアウトの自由度が高く、低圧直噴機構を設けることが容易であり、

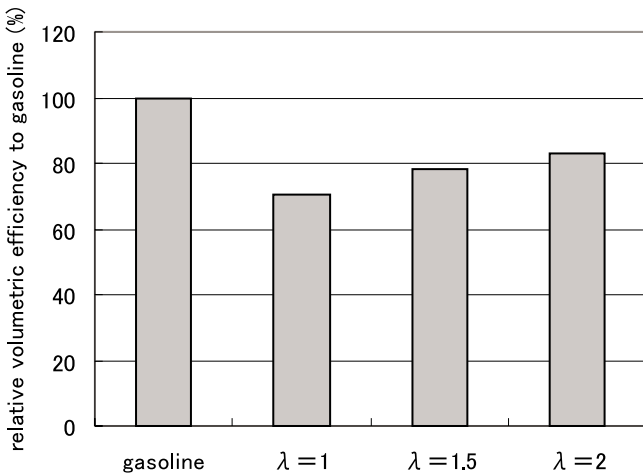


Fig.4 Comparison of Relative Volumetric Efficiency

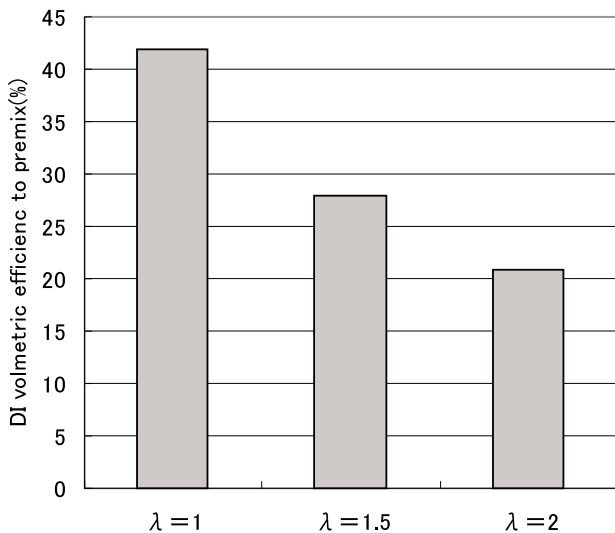


Fig.5 Effect of Volumetric Efficiency Increase with DI

Table 2 Required Total Number of Injectors (2rotors)

| Engine speed(rpm) | 1000 | 2000 | 3000 | 4000 | 5000 | 6000 | 7000 |
|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| A | 0.8 | 2.4 | 3.9 | 4.9 | 5.1 | 6.3 | 6.9 |
| B | 0.7 | 1 | 1 | 1.2 | 1.3 | 1.6 | 1.7 |

A: compression stroke

B: compression stroke+ induction stroke

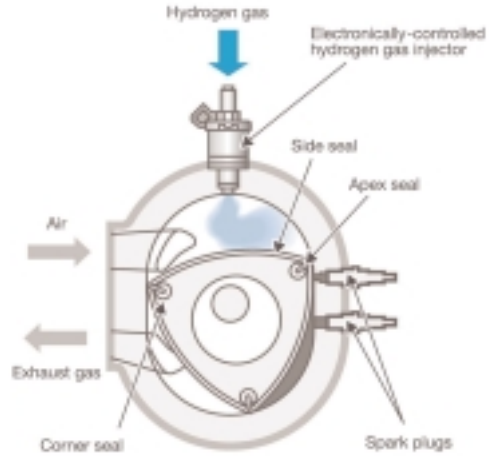


Fig.6 Schematic of RENESIS Hydrogen RE-(1)

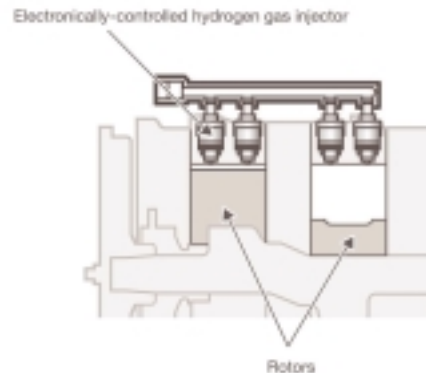


Fig.7 Schematic of RENESIS Hydrogen RE-(2)

その結果水素エンジンで課題となる出力の向上に対して有利である。

3.3 NOx低減技術

水素を内燃機関で燃焼させた場合、NOxの排出が問題となり得る。水素は、燃焼すると基本的には水が生成されるが、加えて空気中の酸素と窒素が反応しNOxが生成される。NOxを低減する手法として、 $\lambda = 1$ で運転し三元触媒により浄化する方法¹⁾、あるいは水素の広い可燃燃焼範囲を利用し超希薄燃焼でNOxの排出を低減する方法がある。Fig.8に λ とNOx排出特性を示す¹⁾。 $\lambda = 1.6$ 以上で運転すればNOxの排出量は微量である。本エンジンでは3.1節で述べたように希薄燃焼によりデュアルフューエルを実現させているので、NOx低減も希薄燃焼を基本コンセプトとした。

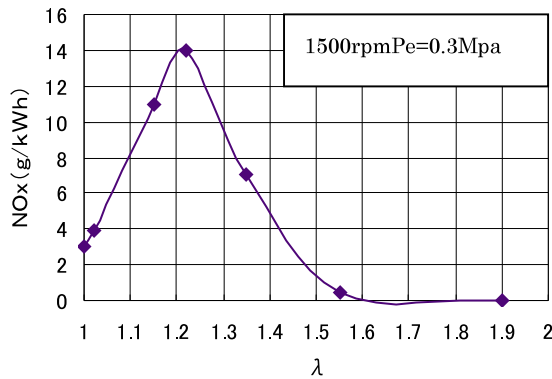


Fig.8 NOx Characteristic of Hydrogen RE⁽¹⁾

Table 3 Vehicle Main Specifications

| | | |
|------------------|-------------------------------|---|
| Dimensions | Overall length | 4435mm |
| | Overall width | 1770mm |
| | Overall height | 1340mm |
| | Wheelbase | 2700mm |
| | Track: front/rear | 1500mm/1505mm |
| | Occupancy | 4persons |
| Engine | Type | Mazda RENESIS hydrogen rotary engine |
| | Maximum power | Using Gasoline : 154kW(210Ps)@7200rpm Using Hydrogen : 81kW(110Ps)@7200rpm |
| | Maximum torque | Using Gasoline : 222N·m/5000rpm Using Hydrogen : 120N·m/5000rpm |
| | | |
| Fuel tank | Gasoline | 61L |
| | Hydrogen | 74L/35MPa |
| Transmission | Type | 5MT |
| Suspension | Suspension system: front/rear | Double wishbone/Multi-link |
| | | |
| Brake | Main brake system: front/rear | Ventilated disc |
| Tires and wheels | Tires front/rear | 225/45R18 |
| | Wheels front/rear | 18 × 8JJ |

4. 車両技術

RENESIS水素REを搭載し、更に燃料タンクとして高压貯蔵タンクをトランクルームに搭載した研究車両のレイアウトをFig.9に、車両諸元をTable 3に示す。車両技術として、水素貯蔵技術、燃料供給システム、安全システムについて以下に紹介する。

4.1 水素貯蔵技術

水素は密度が小さいため、その貯蔵方法が課題となる。一般的に水素燃料の貯蔵法としては、主として気体の状態で貯蔵する圧縮水素ガスタンク方式、液体の状態で貯蔵する液体水素燃料タンク方式、及び固体の状態で貯蔵する水素吸蔵合金タンク方式がある。Table 4にそれぞれの方式の特徴を示す。当該車両は国内の燃料電池自動車に使われていて、取り扱いが簡単で軽量の圧縮水素ガスタンク方式を採用した。タンクは軽量で、かつ水素ガスの透過防止に優位なTYPE3 (アルミライナー + CFRPフルラップ) を採用した。内容積は74L、全長約1,000mm、外形約400mm、充填圧35MPaである。タンク的一端に元弁を配し、水素の充填、放出を行う。元弁には水素の供給、緊急遮断を行う電磁開閉弁 (ノーマルクローズ)、サービス時の遮断用の手動開閉弁、タンク内のガス温度を計測する温度センサ、ライン圧を測定する圧力センサ、燃料タンクが火炎にさらされ高温、高压になった時に水素ガスを一気に放出するPRD (Pressure Release Device) が一体化されている。当該タンクは約2kgの水素を貯蔵する。この量は、エネルギー換算でガソリンの約6Lに相当し、エネルギー貯蔵量としては不十分である。水素貯蔵量の向上が今後の課題である。

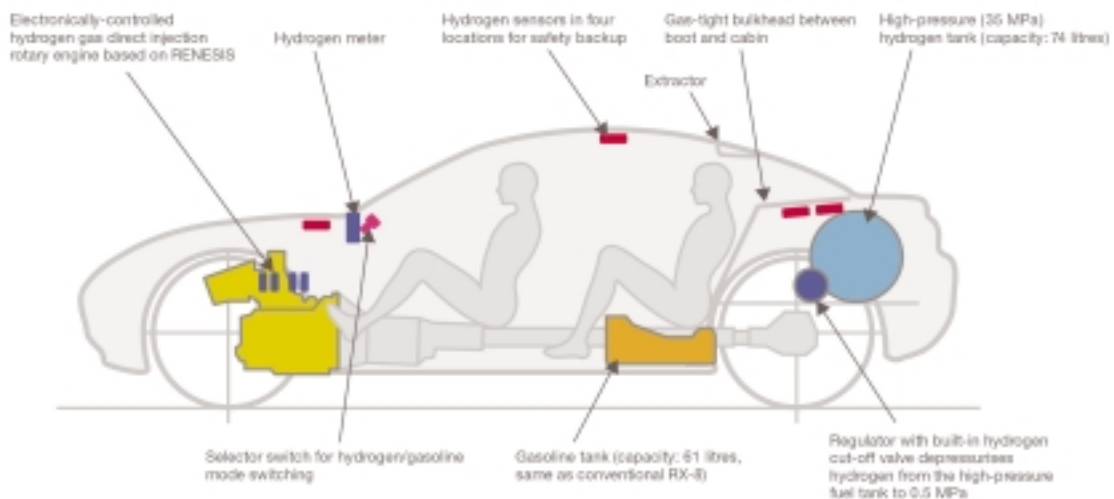


Fig.9 RX-8 Hydrogen RE Layout

Table 4 Comparisons of the Hydrogen Storage

| | | Compressed Hydrogen (35MPa) | Liquid Hydrogen | Metal hydride Hydrogen |
|------------------|-----------------|---|--|---|
| ※ Energy density | Weight(kcal/kg) | 15 | 50 | 6 |
| | Volume(kcal/L) | 7 | 23 | 15 |
| Feature | | <ul style="list-style-type: none"> •The handling (filling etc.) is easy . •The volume | <ul style="list-style-type: none"> •An energy density is high. •The boil off | <ul style="list-style-type: none"> •The low temperature start and the low weight |

※- Relative value when gasoline is assumed to be 100



Fig.10 High-pressure Hydrogen Tank



Fig.11 Filler Lid for Hydrogen



Fig.12 Filler Lid for Gasoline

4.2 燃料供給システム

当該車両は燃料としてガソリンと水素が使用できるデュアルフューエルシステムを実現している。高圧の水素タンクは、Fig.10に示すように、隔壁により車室と気密を保ち、外気との連通路を配したトランクルームに搭載している。水素充填口 (Fig.11) はガソリンの給燃口 (Fig.12) と反対側に設けた。充填用のレセプタクルは国内のJHFC^①で設置した水素スタンドに使われているものと互換性のある形式を採用し、5分以内で水素の充填が可能である。ガソリンの貯蔵にはベース車のガソリンタンク (61L) を流用している。

デュアルフューエルの燃料供給システムをFig.13に示す。最大35MPaの高圧水素はトランクルームに設置された圧力調整弁により0.5MPaまで減圧される。水素は、更に車室外に配置された配管、エンジンルーム内の遮断弁及びフィルタを介してエンジンに供給される。ガソリンは通常のカソリン車と同じシステムにより供給される。水素とガソリンの切り替え運転可能とするため、ガソリンに最適化したエンジン制御ユニットと水素に最適化したエンジン制御ユニットの2台を持つ。2台の制御ユニットは、運転席に設置した燃料切り替えスイッチにより、運転者が任意に切り替えられるシステムとした。

4.3 安全システム

安全対応の考え方は、1995年に大臣認定を取得した水素自動車^②で採用した手法を基本とし、高圧ガスに係わる技術要素を加味し、以下のように構築した。

(1) 後突時にタンクへのダメージを防ぐ燃料タンクの搭載位置

燃料タンクは、トランクルームに設置しているが、バンパ後端とタンクの間には、クラッシュスペースを設けた。

(2) 燃料システムの車室外配置

燃料タンクを設置したトランクルームとキャビンはエアタイトに分離すると同時に、燃料配管も車室外に配置した。

(3) 漏洩水素が滞留しない構造

ルーフには、室内の換気を行うため新たにエクストラクタを設置した。このエクストラクタにより、万が一車室内に水素が漏洩した場合でも、水素の滞留を防ぐことができる。

(4) 水素センサによる警報機能

キャビン、エンジンルーム、トランクルームに水素センサを設置した。水素センサとしては、1,500ppmで警報を鳴らす熱線式半導体センサを採用した。

(5) 緊急遮断弁の設置

タンク出口及びエンジン直近に電磁式遮断弁を設置し、緊急時には運転席に設置したキルスイッチを押すことにより瞬時に水素通路が遮断される機構とした。

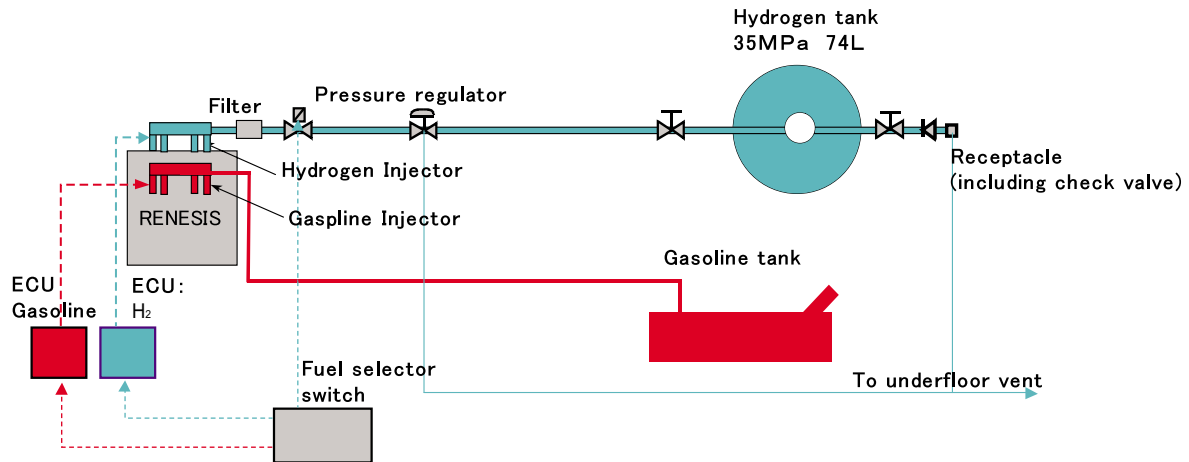


Fig.13 Fuel Supply System

5. おわりに

内燃機関の水素自動車は、燃料電池車と同様に地球環境、温暖化等の課題解決に大きく貢献できる技術である。更に、コスト、量産性の面で有利であり、また燃焼を最適に制御することでガソリンでも走行できる利点を持つ。したがって、水素インフラが十分整備されていない環境下では、水素社会への架け橋として重要な役割を果たすと認識している。更に水素社会が発達し、水素インフラも十分に整った状況下においても、内燃機関特有の軽快な走行フィーリングを持つクリーンな水素自動車として、市場の一角を占め続けるものと確信する。

参考文献

- (1) 森本 他：水素自動車の開発，マツダ技報，No.14，p.154-161（1996）
- (2) 木ノ下 他：RX-8搭載の新開発RENESIS，マツダ技報，No.21，p.11-17（2003）
- (3) 森本 他：ロータリエンジンにおける水素燃焼特性，自技会学術講演会前刷集912208（1991）
- (4) 山根：水素の物性，HESS 水素安全技術フォーラム予稿集，p.1-9（2003）

著者



森本賢治



水島善夫



定平誠二



堂園一保



内田浩康

論文・解説

26

マツダAHS安全運転支援システムの開発 Development of Mazda AHS Safety Driving Support System

山本 雅史*¹ 為貝 仁志*² 千葉 正基*³
Masashi Yamamoto Hitoshi Tamegai Masaki Chiba
藤田 健二*⁴
Kenji Fujita

要 約

車載センサで車両周辺の危険な状況をいち早く検知し、情報提供・警報・操作支援などによりドライバの安全運転を支援したり、衝突事故による被害を軽減したりするASV (Advanced Safety Vehicle: 先進安全自動車) 技術や、インフラセンサで道路状況を検知して車に伝達し、それをもとに車側で情報提供・警報・操作支援を行い、安全性を向上させるAHS (Advanced cruise-assist Highway System: 走行支援道路システム) 技術の研究開発が進められている。

2001年にはASVとAHSが協力して、ASV車両とAHS道路インフラが協調することにより安全運転を支援する「路車協調型安全運転支援システム」の実証実験システムを構築し、2002年10月から2003年3月には国土交通省国土技術政策総合研究所テストコース (以下、国総研テストコース) と実道3ヶ所においてASV/AHS共同実証実験が実施された。

我々は、ドライバの認知負担、分かりやすさの観点からドライバ受容性の高いHMI (Human Machine Interface: ヒューマン・マシン・インターフェース) を設計すること、および路車協調システムの有効性を検証することを目的に、障害物衝突防止や右折衝突防止など7システムを開発し、上記のASV/AHS共同実証実験に参加、検証実験を行った。本稿では、ASV/AHS共同実証実験におけるマツダAHS安全走行支援システムとHMIのドライバ受容性に関する基礎実験の結果を報告する。

Summary

Automobile manufactures have been aggressively conducting researches on ASV (Advanced Safety Vehicle) technologies, which prevent traffic accidents and reduce damage from the accidents. Electric-appliance makers and infrastructure manufacturers also have been making researches on AHS (Advanced cruise-assist Highway System), which employs infrastructure support for safer driving.

In 2001, automobile manufacturers, electric-appliance makers, and infrastructure manufacturers cooperated in constructing a prototype of safety driving support system with AHS road infrastructure. From Oct. 2002 to Mar. 2003, joint verification tests were conducted on a proving ground and public roads.

In order to design HMI (Human Machine Interface) which is highly acceptable to a driver, and to verify effectiveness of safety driving support system with AHS road infrastructure, we developed a test vehicle equipped with seven driving support systems such as a forward vehicle information system and a right turn collision prevention advisory system, and participated in verification tests. This paper reports an overview of Mazda AHS safety driving support system, and the results of fundamental tests for driver's acceptability of HMI.

*1~4 技術研究所
Technical Research Center

1. はじめに

最先端の情報通信技術を用いて、「人」、「道路」、「車両」を一体の交通システムとして構築することにより、道路交通の安全性、輸送効率、快適性の飛躍的な向上を実現するITS(Intelligent Transport System:高度道路交通システム)の研究開発が活発に行われている。この中核をなす技術領域としてASV技術とAHS技術がある。

ASV技術は、車載センサで車両周辺の危険な状況をいち早く検知し、情報提供・警報・操作支援などによりドライバの安全運転を支援したり、衝突事故による被害を軽減したりする技術である。各自動車メーカーは国土交通省が主導するASVプロジェクト中で様々なシステムの研究開発を進めており、マツダもこれに参加している⁽¹⁾。

AHS技術は、インフラセンサで道路状況を検知して車に伝達し、それをもとに車側で情報提供・警報・操作支援を行い、安全性を向上させる技術である。民間企業21社が設立した技術研究組合走行支援道路システム開発機構(以下、AHS研究組合)が中心となって、道路状況を検知する技術や検知した情報を車両に伝える路車間通信技術の研究開発が進められている。

2001年にはASVとAHSが協力して、ASV車両とAHS道路インフラが協調することにより安全運転を支援する「路車協調型安全運転支援システム」の実証実験システムを構築し、2002年10月から2003年3月には国総研テストコースと実道3ヶ所(東名高速道路、国道25号線、国道246号線)においてASV/AHS共同実証実験が実施された⁽²⁾。

路車協調システムにおける車側の課題の一つは、ドライバから視認できない危険状況や複数の危険対象を、短時間で正確にドライバに伝達するHMIを構築することである。我々は、ドライバの認知負担、分かりやすさの観点からドライバ受容性の高いHMIを設計すること、および路車協調システムの有効性を検証することを目的に、障害物衝突防止や右折衝突防止など7システムを開発し、上記のASV/AHS共同実証実験に参加、検証実験を行った。本稿では、ASV/AHS共同実証実験におけるマツダAHS安全走行支援システムとHMIのドライバ受容性に関する基礎実験の結果を報告する。

2. 実験システムの構成

路車協調型安全運転支援システムの狙いは、見通しの悪い道路や悪天候などの視界不良などにより、ドライバから視認できない障害物や歩行者を路側センサで検知し車両へ伝え、車側ではドライバに情報提供することでドライバに危険状況を認知させ、事故を未然に防止することである。今回、AHS道路インフラと協調した7システム(Table 1)を開発し、国総研テストコースおよび実道で行われた

Table 1 Mazda AHS Safety Driving Support Systems

| Systems | | Complex system | | |
|------------------|--|----------------|---|---|
| On roads | Forward vehicle and traffic jam information system | ● | | |
| | Road surface condition information system | ● | | |
| | Curve overshooting prevention advisory system | ● | | |
| At intersections | Right turn collision prevention advisory system | | ● | |
| | Crossing pedestrian collision prevention advisory system | | ● | |
| | Intersection stopping advisory system | | | ● |
| | Crossing collision prevention advisory system | | | ● |

ASV/AHS共同実証実験に参加し、検証実験を行った。本章では、実験で使用したインフラ実験システムの概要と実験車のシステム構成について述べる。

2.1 インフラ実験システムの概要

Fig.1に示すように、インフラ実験システムは車両、歩行者、路面状況を検出する路側センサシステムと、インフラと車両の間でデータ通信を行う路車間通信システムから構成される。

車両・歩行者の検出には画像センサとレーザレーダが、路面状況の検出にはレーザセンサが用いられている。車両センサは車両の位置・速度を、分解能それぞれ1m、1km/hで検知する。歩行者センサは歩行者・自転車の位置を分解能1mで検知する。路面センサは、路面状況を凍結、積雪、水膜、湿潤、乾燥の5状態に識別する。

インフラから車両への情報伝達は、5.8GHz帯を使用するDSRC(Dedicated Short Range Communication:狭域通信システム)によるスポット通信方式を用いており、基点ビーコンと情報ビーコンが対となって路側に設置されている。基点ビーコンは車両や歩行者の位置を表すときの原点(基点)を伝達する役割を持ち、±5mの精度で基点を検知できる。情報ビーコンは路側センサで検出された車両や歩行者の情報を伝達する役割を持つ。1基の情報ビーコンは30m程度の通信範囲を持ち、100ms周期でデータを受信する。

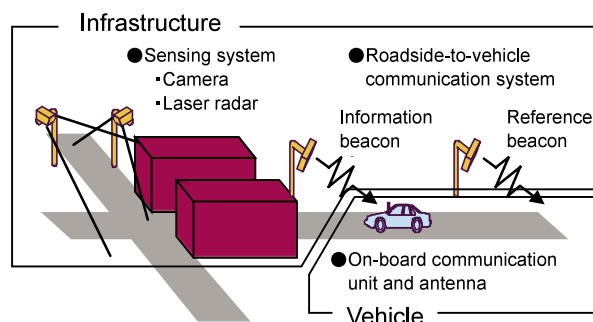


Fig.1 System Configuration of AHS Infrastructure



Fig.2 Mazda AHS Test Vehicle



Fig.4 On-board Antenna



Fig.5 Information Display

2.2 実験車のシステム構成

アンテナをベースに実験車 (Fig.2) を開発し、7システムを搭載した。実験車のシステム構成図をFig.3に示す。

(1) 車載通信機・アンテナ

路車間通信の車載通信機・アンテナは、AHS研究組合が実証実験用に試作したものを搭載した。アンテナは設置要件に基づきダッシュボード上の車体中央、できるだけ前方に、アンテナ面がフロントガラス面と平行となるように設置した (Fig.4)。

(2) 車両センサ

ベース車両に搭載されているセンサを活用し、車速信号、ブレーキ信号、ウインカ信号を検出している。

(3) 情報提示装置

ドライバーに情報提供を行う提示装置は、HMI制御ユニットとナビゲーションシステムから構成される。ドライバーへの情報提供は、ナビゲーションシステムのディスプレイを2画面に分割し、ドライバー側の画面にAHSの安全情報を、助手席側にナビゲーションの地図情報を表示する (Fig.5)。このとき、走行状況に応じてナビゲーションシステムの経路案内とAHS安全情報を選択する。

3. システム開発

システム開発にあたりドライバー受容性の高いHMIの構築に注力した。路車協調システムにおける車側の課題の一つは、ドライバーから視認できない危険状況や複数の危険対象を、短時間で正確にドライバーに伝達するHMIを構築することである。特に、同一地点で複数の情報提供システムが作動する複合システムではドライバー受容性の高いHMIがより重要となる。そこで本章では、マツダAHS安全運転支援システムの中から、単路での複合システム (前方障害物情報提供支援、路面状況情報提供支援、カーブ進入危険防止支援) と、交差点での複合システム (右折衝突防止支援、横断歩道歩行者衝突防止支援) について詳述する。

3.1 単路での複合システム

見通しの悪いカーブなどで停止車両や渋滞末尾の位置情報を獲得し、ドライバーに情報提供する前方障害物情報提供支援システム、凍結や積雪など悪路面状況を獲得し、ドラ

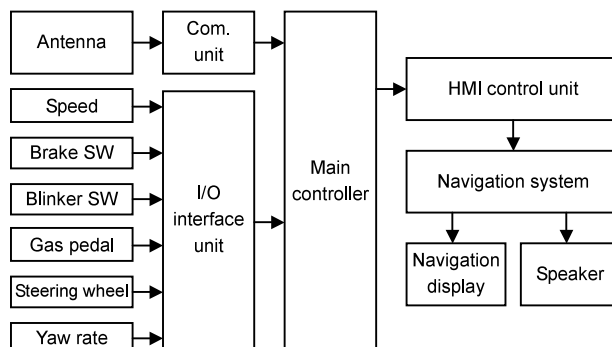


Fig.3 System Configuration of AHS Test Vehicle

イバに情報提供する路面状況情報提供支援システム、前方カーブまでの距離と半径を獲得し、カーブへの進入速度超過の場合に情報提供することでドライバーに注意喚起するカーブ進入危険防止支援システムを開発した。同一地点でこれら3システムのインフラ設備が設置されている場合、情報提供開始のタイミングは以下のロジックにより決定する。

(1) 情報提供ロジック

同一地点で複数の情報提供システムが作動する場合、走行中に多くの情報を提示するとドライバーが情報を正確に理解できない、あるいは情報を誤って理解する懸念がある。例えば、路車間通信で受信した時点で3つの危険対象の情報を同時に提供する方法は、一度に提示される情報量が多いため認知の負担が増大し、短時間で正確に内容を理解することが難しくなると考えられる。また、それぞれの開始タイミングで各危険対象の情報を提供する方法は、危険対象の位置によっては次々と情報が提供される場合がありドライバーが全ての情報を正確に理解することは困難となる、あるいは2番目の情報提供が行われた時点で最初の情報内容が頭に残らない懸念がある。そこで、緊急度に応じて最優先でドライバーに伝えるべき危険状況を1つ選択し情報提供するという考えで情報提供ロジックを設計した。

具体的には、式(1)~(3)に基づいて危険対象ごとに情報提供の開始タイミングを算出し、開始タイミングが最も早い危険対象を1つ選択してその情報提供を行う。その危険対象を通過後に次に開始タイミングが早い危険対象の情報提供を行うこととした (Fig.6)。

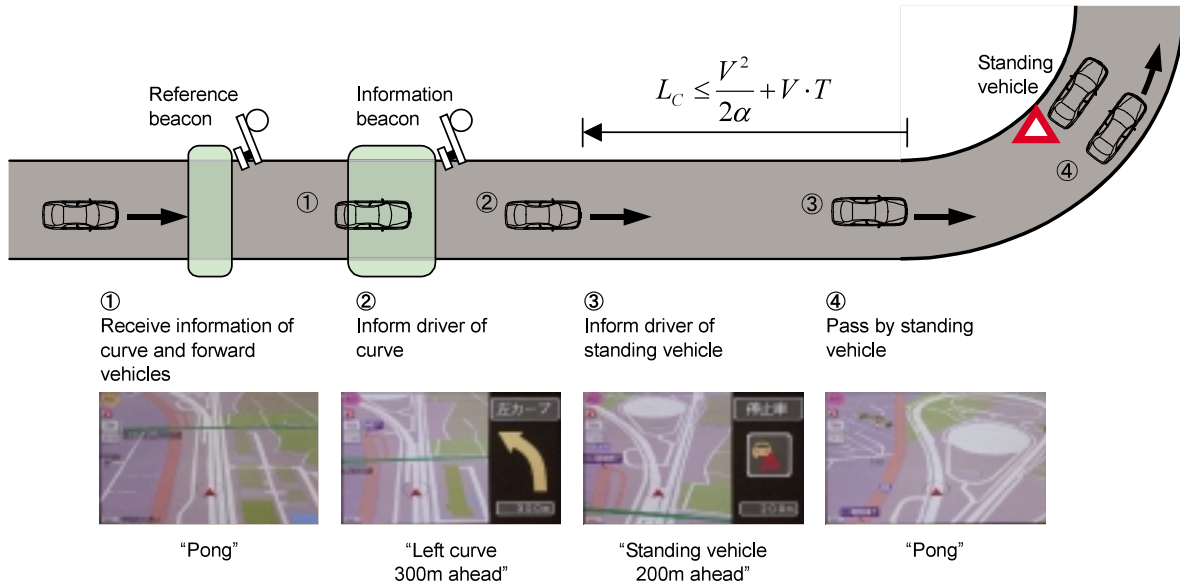


Fig.6 Complex System Operating on Roads

[前方障害物] $L_v \leq \frac{V^2}{2\alpha} + V \cdot T$: 情報提供 (1)

[路面状況] $L_R \leq \frac{V^2}{2\alpha} + V \cdot T$: 情報提供 (2)

[カーブ進入] $L_C \leq \frac{V^2 - V_t^2}{2\alpha} + V \cdot T$: 情報提供 (3)

ここで、

L_v : 停止車両までの距離 (m)

L_R : 凍結箇所までの距離 (m)

L_C : カーブ入口までの距離 (m)

V : 自車速 (m/s)

V_t : カーブの安全走行速度 (m/s)

: 通常時の減速度 (m/s²)

T : 情報提供時間 + ドライバ反応時間 (s)

(2) 実験結果

定常円部の半径が222mのカーブ途中で路側構造物があるために停止車両が視認しにくい状況において、車速 27.8m/s {100km/h} でカーブに向かって走行したときの、システム動作の検証結果をFig.7に示す。カーブ入口は基点から623m、停止車両は857mの地点にある。カーブ入口の手前279mでカーブの情報提供が開始され、カーブ入口を通過した時点で停止車両の情報提供が開始しており、設計どおりにシステムが動作していることを確認できた。このときドライバーは、通常時の減速度レベルである2.0m/s²以下でカーブ手前での減速と停止車両手前での停止ができた。この結果から、本システムの情報提供方法によりドライバーはカーブと停止車両の情報提供を正しく理解できていると考える。また、本システムはドライバーから視認できな

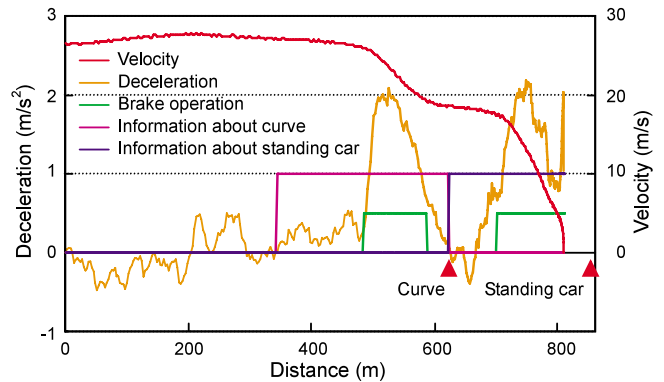


Fig.7 Experimental Result (Complex System on Road)

い危険状況を事前にドライバーに伝えることができ、余裕ある運転操作を行う上で有効であると考え。

() 事前に危険対象を認知し余裕をもって停止するときの減速度

3.2 交差点での複合システム

対向車両とすり抜け車両の位置・速度を獲得し、交差点で右折する車両のドライバーに対向車・すり抜け車両の接近状況を情報提供することで、目視確認のための頭出しを支援する右折衝突防止支援システムと、横断歩道とその周辺の歩行者の位置情報を獲得し、右折時に歩行者が見えにくい場合や対向車に気を取られている場合に、歩行者の存在を情報提供してドライバーに注意喚起する横断歩道歩行者衝突防止支援システムを開発した。同一交差点でこの2システムのインフラ設備が設置されている場合、情報提供開始のタイミングは以下のロジックにより決定する。

(1) 情報提供ロジック

単路での複合システムと同様に交差点での複合システムにおいても、両方のシステムの情報を同時に提示すると理解に時間がかかったり、ドライバーを混乱させたりする懸念

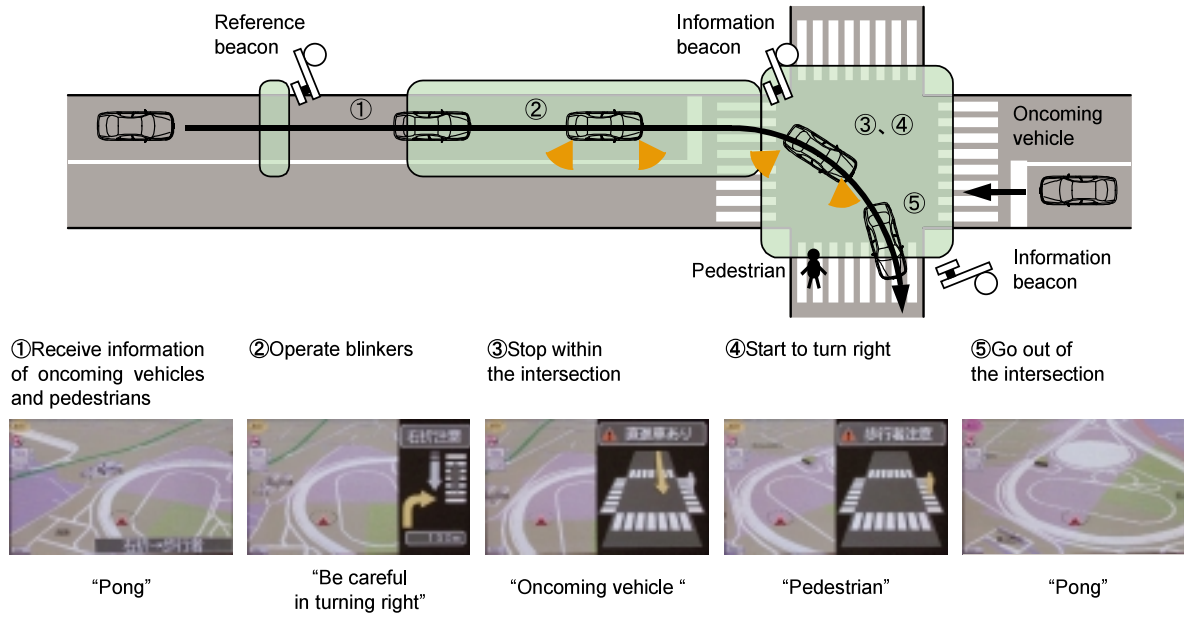


Fig.8 Complex System Operating at Intersections

がある。そこで、必要となる順に提示する情報を切り替えるという考えで情報提供ロジックを設計した。

具体的には、まず右ウインカONかつ交差点内で停止(車速5.6m/s(20km/h)以下で停止と判断)した時点で右折衝突防止支援の情報提供を行い、右折を開始した時点で横断歩道歩行者衝突防止支援の情報提供へ切り替える(Fig.8)。

この情報提供ロジックでは、右折開始を遅れなく正確に検出することが重要となる。そこで、右折開始を検知するために、ベイジアンネットを適用したドライバの運転意図推定手法を開発した。ベイジアンネットは、複数の観測可能な変数を用いて、観測できない事象の発生確率を推定できるネットワーク状の確率モデルである。今回は、ステアリング操作量、アクセル操作量、アクセル操作速度、車両のヨー角を入力変数として用いて右折発進意図を推定するネットワークを設計した(Fig.9)。

式(4)のベイズの定理において、右折発進するという事象を y 、センサがある値を出力するという事象を X とすることで、センサ出力がある値をとるときに右折発進している確率 $p(y=T | X)$ を求めることができる。

$$p(y = T | X) = \frac{p(y = T) \cdot p(X | y = T)}{p(y = T) \cdot p(X | y = T) + p(y = F) \cdot p(X | y = F)} \quad (4)$$

ただし、 $p(X | y=T)$ は右折発進後のセンサ出力分布、 $p(X | y=F)$ は右折発進前のセンサ出力分布で、走行データから予め用意しておく。

ステアリング操作量 X_1 、車両ヨー角 X_2 、アクセル操作量 X_3 、アクセル操作速度 X_4 に対する $p(y=T | X_i)$ 、およびベ

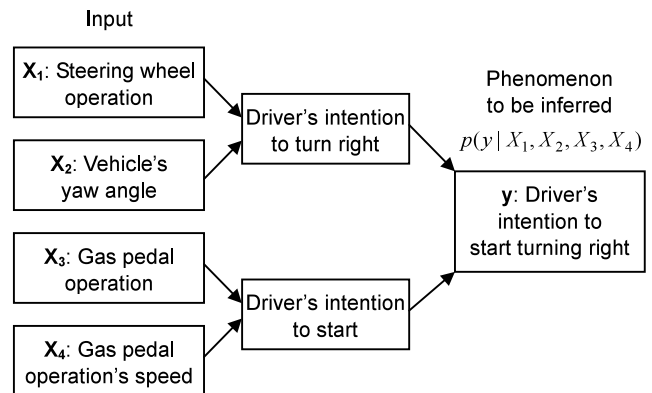


Fig.9 Designed Bayesian Network for Inferring Driver's Intention

ズの定理から導いた式(5)を用いて、右折発進の意図を確率 $p(y=T | X_1, X_2, X_3, X_4)$ の形で推定した。

$$p(y = T | X_1, X_2, X_3, X_4) = \frac{p(y = F) \cdot \prod_{i=1}^4 p(y = T | X_i)}{p(y = T) \cdot \prod_{i=1}^4 p(y = T | X_i) + p(y = F) \cdot \prod_{i=1}^4 p(y = F | X_i)} \quad (5)$$

本手法の性能検証のため、実走行による評価実験(交差点29ヶ所、被験者4名、のべ走行回数100回)を行った。センサ出力分布 $p(X | y=T)$ 、 $p(X | y=F)$ は、交差点内で一旦停止後に右折発進したときの走行データ(形状の異なる8交差点、ドライバ1名)から作成した。本手法による推定結果の一例をFig.10に示す。評価実験の結果、検知遅れがなく(走行回数の90%で検知時間が0.4秒以内)、未検知・誤検知のない高精度な推定が可能であることを確認できた。

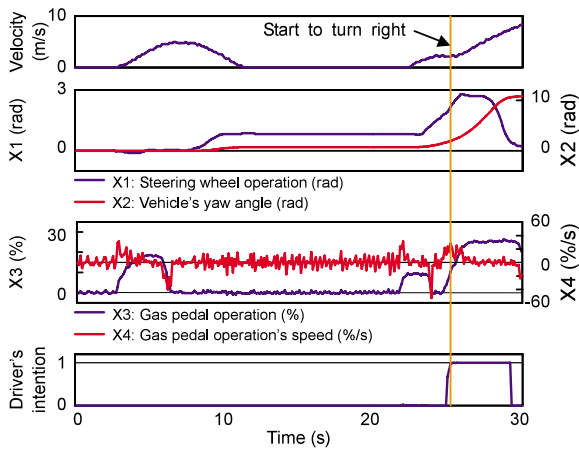


Fig.10 Result of Inferring Driver's Intention

(2) 対向車の情報提供インターフェース

右折衝突防止支援では、ドライバーが視認できない対向車を車載提示装置からの情報提供によって短時間で正確に把握する必要がある。そこで、全ての対向車の情報を提示するのではなく、最も危険度が高い対向車の情報のみを提示することにより短時間で正確な認知が可能になるという考えのもと、交差点に最も早く到達する対向車の情報を提示することとした。

また、目視確認のための頭出しが可能であるかを判断するためには、対向車の接近状況を短時間で正確に理解できる表示方法とする必要がある。そこで、位置と速度の両方を含んだ情報を提示することで対向車の接近状況を短い時間で正確に判断できるという考えのもと、対向車を矢印図形で表示し、対向車が交差点へ到達するまでの時間に応じて矢印の長さを変化させる表示方法を採用した。

(3) 実験結果

信号機のある交差点に車速11m/s(40km/h)で進入し右折したときのシステム動作の検証結果をFig.11に示す。右ウインカONかつ交差点内で車速が5.6m/s(20km/h)以下となった時点で右折衝突防止支援の情報提供が開始され、ドライバーの右折発進意図を検出した時点で横断歩道歩行者衝突防止の情報提供へ切り替わっており、設計どおりにシステムが動作していることが確認できた。

このときドライバーは、歩行者の情報が提示されてから2.1秒後にブレーキ操作を行い、横断歩道手前で停止でき

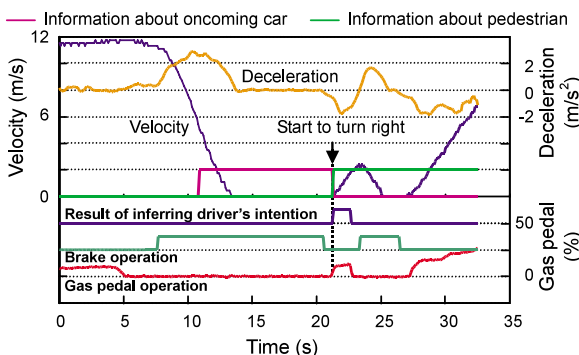


Fig.11 Experimental Result (Complex System at Intersection)

た。このときの減速度は 1.6m/s^2 以下であり、通常時の減速度のレベルであることが確認できた。この結果から、本システムでは必要となる順に情報を切り替えることで分かりやすい情報提供とすることができ、情報の切り替えタイミングは、歩行者の情報提供により余裕を持ったブレーキ操作が可能であったことから適切であると考えられる。

4. まとめ

本稿では、AHS道路インフラと協調した安全運転支援システムの開発について述べた。①緊急度に応じた情報の優先付け、②ドライバーの運転行動に応じたシステムの切り替え、③到達時間に応じた接近車両の図形表示によって、ドライバーから視認できない危険状況や複数の危険対象を、正確かつ短時間でドライバーに注意喚起できるドライバー受容性の高いHMIを構築することができた。

開発した7システムは安全運転を行う上で有効であり、特に交差点系サービスは車載センサによる実現が困難なことから路車協調システムに対するニーズは高いと考える。

最後に、本研究の多くは2002年のASV/AHS共同実証実験に参加して行われたもので、参加の機会を与えていただいた国土交通省ASV事務局、国土技術政策総合研究所、AHS技術研究組合の皆様方に深く感謝いたします。

参考文献

- (1) 山本ほか：マツダASV-2の開発，マツダ技報，No.19，p.64-72 (2001)
- (2) 技術研究組合 走行支援道路システム開発機構：第6回AHS研究報告会 資料，p.32-45 p.74-89 (2002)

著者



山本雅史



為貝仁志



藤田健二

論文・解説

27

マウント振動の奇数次・ハーフ次の発生メカニズム解明

Investigation of Excitation Mechanism of Odd and Half Vibrations at Engine Mount

熊野 昌平*¹ 榎本 正章*² 森実 健一*³

Shohei Kumano Masaaki Kashimoto Kenichi Morizane

波多野 耕二*⁴

Koji Hatano

要約

直列4気筒エンジンを搭載した乗用車で、音質悪化の主要因としてエンジン振動の奇数次とハーフ次成分の発生が知られている。発生源として指摘されているクランク軸系の振動と車体に伝えるパワープラント系の振動に相関解析を適用し、クランク軸系からの振動伝達経路を特定した。奇数次とハーフ次の伝達経路の違いから、クランク軸系の静的な剛性や曲げ共振の特性がエンジン振動に与える影響を調べることで、マウント振動の奇数次とハーフ次成分の発生メカニズムを解明した。この結果、音質改善のためのクランク軸系の設計指針を明確にできた。

Summary

It is known that poor sound quality in passenger car equipped with an in-line 4-cylinder engine is mainly caused by the excitation of odd and half-order of the engine vibration. We made a correlation analysis between the crankshaft system vibration pointed out as a generation source and power-plant vibration and clarified the vibration-transfer-pass of each order. We identified the excitation mechanism of odd and half-order of engine vibration by investigating an influence of static rigidity and bending resonance of a crankshaft on the engine vibration. As a result, we also clarified a guideline of crankshaft design for high sound quality. This paper reports investigation results of the excitation mechanism.

1. はじめに

直列4気筒エンジンを搭載した乗用車において、奇数次やハーフ次成分の騒音が音質悪化の主要因として古くから知られている。近年では、ハーフ次成分によってランブル音が発生する要因の解明¹⁾⁽²⁾や、クランク軸とパワープラントの共振特性の相対関係に起因した振動の発生についての研究³⁾が進められており、クランク軸ジャーナルの細径化の設計指針などに活かされている。

本稿は、マウント振動の奇数次とハーフ次の伝達経路および入力の違いを、クランク軸とパワープラントの両方の振動特性によって明確にすることで、発生メカニズムについて知見が得られたので報告する。

2. 研究の方法

2.1 研究の流れ

マウント振動の起振力には、多くの入力と考えられる。本研究はクランク軸系からの入力に起因した振動を扱うこととし、起振力はクランク軸のメインジャーナルを支持するベアリング位置からの入力を対象とした。

はじめに、クランク軸の5ヶ所のベアリング位置における振動と、マウント振動を同時に計測し、この2信号間の相関解析を行い、各ベアリング間で次数ごとの奇与の高さを調べた。ベアリング位置の振動は、エンジンの前面側から順に#1から5のMain Bearing Cap位置の振動とし、以後MBC振動と記す。

*1~4 技術研究所
Technical Research Center

次に、マウント振動と寄与が高いMBC振動で奇数次が励起されるメカニズムを調べた。クランク軸のジャーナル部にかかる荷重とMBC振動の関連性を調べ、同一形状で材質の異なる2つのクランク軸を用いて、マウント振動の奇数次に与える影響を明確にした。ハーフ次については、クランク軸系の動特性に注目し、フライホイールの倒れの変位を計測することでクランク軸系の共振現象を明確に示し、パワートレインの共振と連成する周波数帯域で振動が変化の様子を調べることで、クランク軸系の共振がマウント振動のハーフ次に与える影響を明確にした。以上より、クランク軸系に起因したマウント振動の奇数次とハーフ次が発生するメカニズムを解析した。

2.2 実験条件

評価に用いたパワートレインは、FF形式で横置きに搭載される2Lクラスの直列4気筒エンジンとマニュアルトランスミッションの組み合わせで、計測は主にエンジンベンチで行った。振動計測は、全開運転で、Fig.1に示す位置で3軸の加速度ピックアップによって計測した。また、フライホイールの変位計測は、シリンダブロックに取り付けた4ヶ所のギャップセンサによって、クランク軸方向を計測した。

2.3 2信号間の相関解析

エンジンのように2ヶ所の振動信号が不規則な場合の相関性を調べる手法として、2つの変動量間の統計的性質を表すコヒーレンスの算出がある。コヒーレンスは2変動間の各周波数成分ごとの線形性の程度を表すものであり、マウント振動とMBC振動の各次数成分での奇与の高さを表す指標として用いた。コヒーレンス $r_{xy}^2(k)$ は2信号間のクロススペクトル $X(k)Y(k)$ およびパワースペクトル $|X(k)|^2$ 、 $|Y(k)|^2$ を用いて式(1)で求められる。

$$r_{xy}^2(k) = \frac{\left| \sum_{i=1}^{Av} X_i(k) \cdot Y_i(k) \right|^2}{\sum_{i=1}^{Av} |X_i(k)|^2 \cdot \sum_{i=1}^{Av} |Y_i(k)|^2} \quad (1)$$

2.4 次数変換の仮説

MBC振動にハーフ次が励起される要因として、クランク軸系曲げ共振に注目した。一般に、回転物であるクランク軸系の共振周波数は、シリンダブロック等の静止座標系から見た場合に次数変換を起こすといわれている。これまでに座標変換に関する報告⁽⁴⁾はあるが、エンジンの最後端気筒の爆発による振幅変調についてはなく、以下のような仮説を立てた。

クランク軸系は回転座標系にあるため、曲げやねじれを問わず、静止座標系では式(2)に示す±1次の次数変換を起こすと考えられる。

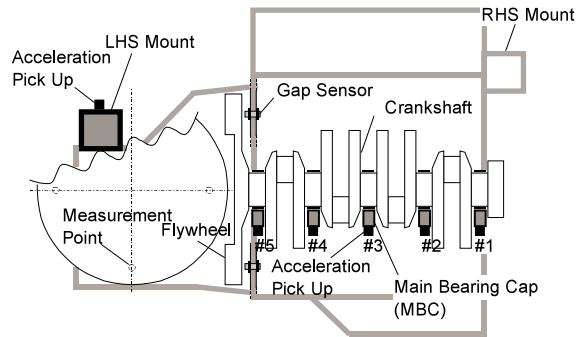


Fig.1 Schematic of Sensor Position

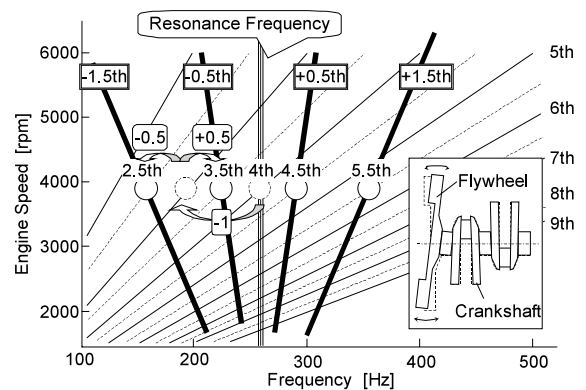


Fig.2 Assumption of Order Conversion

$$\begin{aligned} X_{Rest\ Coordinate} &= X_{Rotating\ Coordinate} e^{\pm j\omega t} \\ &= A e^{j\omega t} e^{\pm j\omega t} = A e^{j(n\pm 1)\omega t} \end{aligned} \quad (2)$$

また、クランク軸系の曲げ共振にみられるフライホイールが倒れる挙動は、爆発するタイミングで著しく変位量が大きく、エンジン1サイクル2回転あたり1回の振幅変調が起きるため、式(3)に示す±0.5次の次数変換を起こすと考えられる。

$$\begin{aligned} X_{Amplitude\ Modulation} &= (A e^{\pm 0.5j\omega t}) e^{j\omega t} \\ &= A e^{j(n\pm 0.5)\omega t} \end{aligned} \quad (3)$$

したがって、Fig.2に示すように、静止座標系におけるクランク軸系曲げ共振は、共振周波数から±0.5次もしくは±1.5次の変換を起こすと仮説を立てた。

3. 解析結果

3.1 MBC振動の寄与

これよりマウント振動に対する各MBC振動の寄与を示す。寄与の高さを示すコヒーレンスには、2信号を離散フーリエ変換した共役複素積を有限回平均して算出したクロススペクトルとパワースペクトルを用いた。平均回数は、コヒーレンスが安定し、かつ、エンジン回転数の変動幅が±100rpm以内になる20回前後と設定した。参考値とし

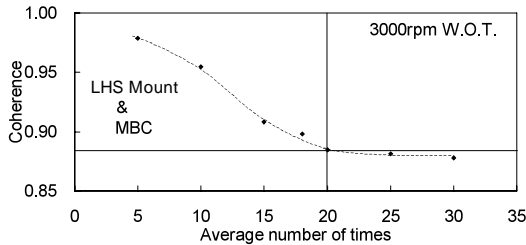


Fig.3 The Relation between Coherence and Average Number of Times

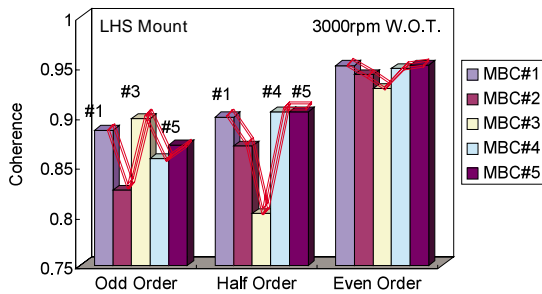


Fig.4 Difference between Coherence of MBC #1-5

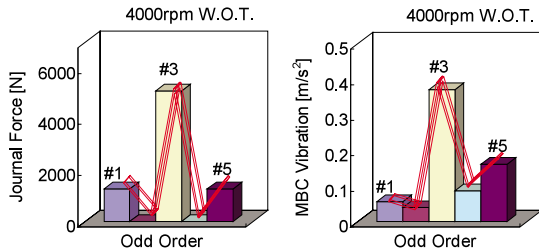


Fig.5 Comparison between Journal Force and MBC Vibration (Odd Order (5th))

てFig.3に3,000rpmの場合の平均回数とコヒーレンスの関係を示す。対象のマウントは、支持荷重の配分率が高いトランスミッション上部のLHS Mountと エンジン前面部のRHS Mountの2ヶ所としたが、両マウントともほぼ同じ傾向になったため LHS Mountの車体基準の前後方向を代表した。各MBC振動は直交座標3方向を平均化して代表した。

Fig.4に、LHS Mount振動の前後方向に対する各MBC振動のコヒーレンスを各次数で示す。各次数は平均化処理をし、4と6次を偶数次、3と5次を奇数次、3.5と4.5と5.5と6.5次をハーフ次とした。偶数次は各MBC振動とのコヒーレンスにあまり差がないのに対し、奇数次は#1と3と5、ハーフ次は#1と4と5のMBC振動とより高い寄与を示した。

3.2 奇数次の発生メカニズム

(1) ジャーナル荷重との関連

マウント振動の奇数次と寄与が高い#1と3と5のMBCで奇数次の振動が励起されるメカニズムを調べるため、クランク軸の各メインジャーナルに作用する荷重(以下、ジャーナル荷重と記す)を算出し、MBC振動と比較した。ジャーナル荷重の算出には、筒内圧力と往復慣性力の釣り合い式で隣り合う気筒を考慮した重ね合わせ法を用いている。(5)

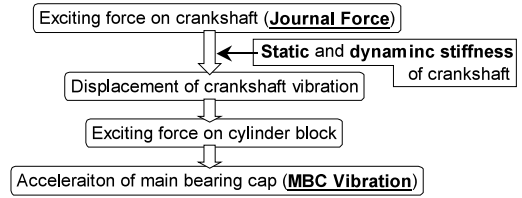


Fig.6 Flow Chart of MBC Vibration

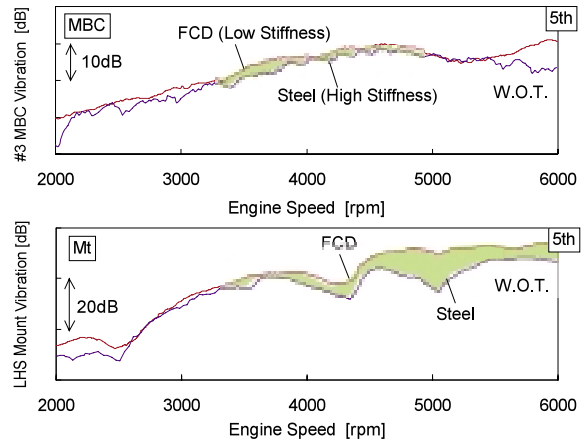


Fig.7 Comparison between Low and High Stiffness Crankshaft (Odd Order (5th))

Fig.5は奇数次を代表して5次のMBC振動とジャーナル荷重の大きさを示す。MBC振動は全開定常運転4,000rpmのときの実測値である。左図に示す各ジャーナル荷重の中で#1と3と5が比較的大きく、大小関係も右図に示す#1と3と5のMBC振動と一致することから、MBC振動の奇数次がジャーナル荷重と関連していることが分かった。

(2) クランク軸の剛性の影響

MBC振動は、Fig.6に示すようにジャーナル荷重がクランク軸の弾性変形を伴い、シリンダブロックに作用することで発生する。そこで、同一形状で材質が異なる2種類のクランク軸を用いて、MBC振動およびマウント振動を計測、次数比較することで、クランク軸の剛性の影響を調べた。材質の変更はスチールから鋳鉄にして剛性を低下させた。

Fig.7に、全開運転時の#3のMBC振動およびLHS Mount振動の奇数次を代表して5次の結果を示す。MBC振動とマウント振動の奇数次は、クランク軸の剛性が20%程度低下しても、動的な剛性の低下による周波数特性の変化はほとんど見受けられず、広いエンジン回転範囲で振動レベルが増加する傾向が顕著に見られた。したがって、奇数次は、クランク軸の動的な剛性よりも、静的な剛性の影響を強く受けることが確認できた。

3.3 ハーフ次の発生メカニズム

(1) ジャーナル荷重との関連

奇数次と同様に、#1と4と5のMBCでハーフ次の振動が励起されるメカニズムを調べるため、MBC振動とジャーナル荷重の大きさを比較した。Fig.8にハーフ次を代表し

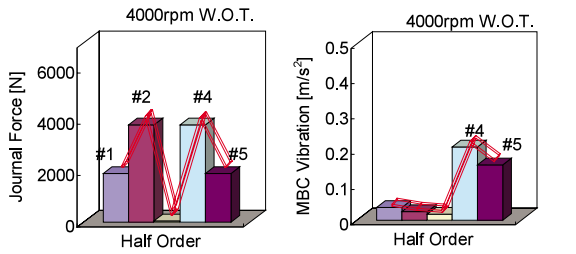


Fig.8 Comparison between Journal Force and MBC Vibration (Half Order (4.5th))

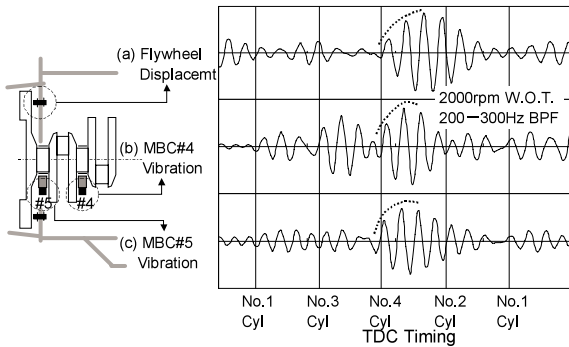


Fig.9 Timing of Amplitude Modulation

て4.5次のMBC振動とジャーナル荷重を示す。左図に示すジャーナル荷重は#1と2と4と5でハーフ次が発生するが、右図に示すMBC振動レベルは#4と5が顕著に大きく、ジャーナル荷重と同じ傾向にはならない。クランク軸を剛体と仮定して算出したジャーナル荷重は、#1と5および#2と4が対称関係になるのに対して、実測したMBC振動はエンジン後面側の#4と5のレベルが顕著に大きいことから、ハーフ次はクランク軸系の動的な剛性の影響を受けていることが考えられる。

(2) フライホイールの面振れ変位との関連

クランク軸系の動的な特性として、フライホイール側の#4と5のMBCと寄与が高いことからクランク軸系曲げ共振に注目した。一般に、クランク軸系曲げ共振はフライホイールが倒れる挙動を示すため、#4と5のMBCが影響を受けるといわれている。フライホイールの変位とMBC振動を同時に計測し、クランク軸系曲げ共振とMBC振動の関連を調べた。

Fig.9にフライホイールの変位(a) #4と5のMBC振動(b)と(c)それぞれが同期した時間軸波形を示す。共振が起こる周波数帯域の200から300Hzでバンドパス処理を行った。横軸に示す4番気筒が爆発するタイミングで、著しく(a)のフライホイールの変位(b)と(c)のMBC振動が同期して増大する傾向が見られ、クランク軸系曲げ共振は#4と5のMBC振動に影響を与えることが確認できた。

(3) 次数変換の検証

クランク軸系曲げ共振の影響が現れる周波数帯域を明確にするために、2.4節で述べた±0.5次および±1.5次の次数変換に関する仮説を、クランク軸系の加振テストおよび運転中のフライホイールの変位を計測して検証を行った。

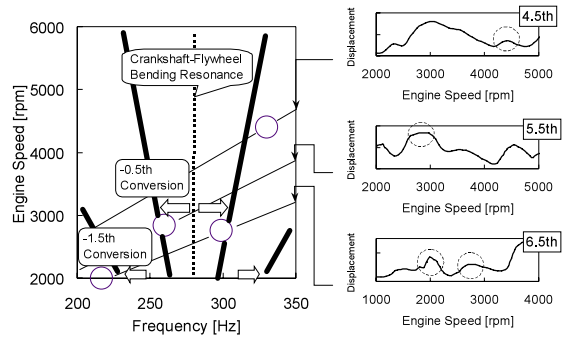


Fig.10 Crankshaft-Flywheel Bending Resonance

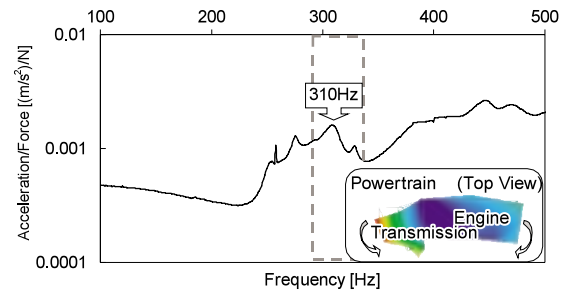


Fig.11 Powertrain Resonance

はじめに、加振テストを行い、静止状態のクランク軸系曲げ共振が250Hzにあることを確認した。次に、フライホイールの変位計測結果を次数分析し、各次数のピーク位置をキャンベル線図上にプロットした結果、Fig.10に示すように加振テストより30Hz程度高い約280Hzから±0.5次および+1.5次の次数変換を起こした領域に現れた。同クラスの数種のエンジンでもおおむね±0.5次および±1.5次の次数変換を確認しており、クランク軸系曲げ共振は、加振テストより数十Hz高い周波数から±0.5次および±1.5次の次数変換が起きることを明確にした。

(4) クランク軸系曲げ共振の影響

マウント振動のハーフ次は、#4と5のMBC振動と寄与が高く、この#4と5のMBC振動がクランク軸系曲げ共振の影響を受けることから、マウント振動のハーフ次の発生に起因していると考えられる。これまでにパワープラント共振とクランク軸系共振、両者の一致を避けることで振動を低減するという報告⁽³⁾がある。そこで、パワープラント共振との一致を回避したときに、マウント振動のハーフ次がクランク軸系曲げ共振によって受ける影響について調べた。

評価に用いたパワートレインの共振は、加振テストおよびモーダル解析を行った結果、Fig.11に示すイナータンスおよびモードシェイプが得られ、310Hzにパワープラント共振があることを確認し、また、前述したようにクランク軸系曲げ共振は280Hzであった。これらをFig.12のキャンベル線図上に示すと、クランク軸系曲げ共振の+0.5次変換がパワープラント共振に一致していた。

共振の一致を回避するために、フライホイールの形状変更を行い、クランク軸系曲げ共振周波数を低下させた。Fig.12に示すようにフライホイールの変位ピーク位置は低

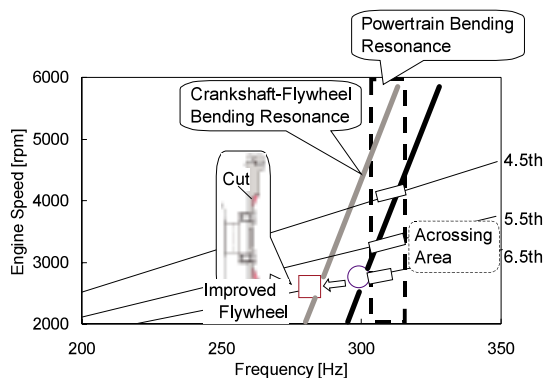


Fig.12 Crankshaft-Flywheel and Powertrain Resonance

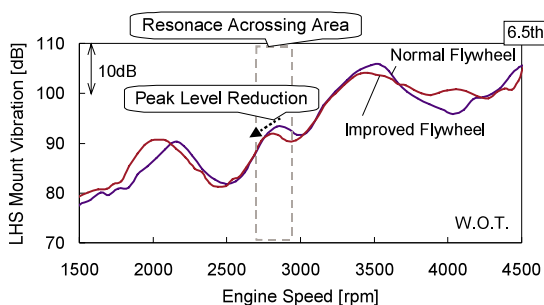


Fig.13 Comparison between Normal and Improved Flywheel (Half Order (6.5th))

周波側に移動し、共振周波数が約15Hz低下した結果、4.5と5.5と6.5次で一致していた周波数帯域を回避できた。Fig.13に、クランク軸系曲げ共振とパワープラント共振による影響が顕著に現れていた6.5次のマウント振動を示す。共振が一致していた周波数帯域で局所的に振動レベルが増大していたが、フライホイールの形状変更によって共振の一致を回避したことで、振動ピーク位置の周波数とレベルが低下することが確認できた。以上より、マウント振動のハーフ次は、クランク軸系曲げ共振が発生の要因となり、パワープラント共振と一致する周波数帯域で振動レベルが増減することを確認できた。

3.4 エンジン音質のためのクランク軸設計

以上より、クランク軸はマウント振動での奇数次やハーフ次発生大きな要因となることが分かり、エンジン音質を考慮する場合、以下の2点を両立する必要がある。

- (1) 静的な剛性を高める
- (2) 曲げ共振をパワープラント共振より40Hz程度低くする

一般的に、クランク軸は高剛性化すると共振周波数が上昇して音質に悪影響を及ぼすことがあり、100Hz以下まで下げる目的で高価なフレキシブルフライホイールなどを採用することがあるが、奇数次とハーフ次の発生メカニズムを解明したことで、共振の目標周波数を明確に設定できるようになり、クランク軸やフライホイール形状変更によって、共振現象を適正にバランスする指標ができた。

4. まとめ

クランク軸系に起因したマウント振動の奇数次とハーフ次が発生するメカニズムを解明するために、コヒーレンスを用いた相関解析を適用し、ジャーナル荷重やクランク軸系曲げ共振との関連を調べた結果、以下のことが明らかになった。

- (1) マウント振動は、クランク軸を支持する5ヶ所のMBC振動に対して、奇数次が#1と3と5、ハーフ次が#1と4と5と寄与が高い。
- (2) 奇数次の発生は、クランク軸のジャーナルに作用する荷重特性と関連があり、クランク軸系の静的な剛性の影響を強く受ける。
- (3) ハーフ次の発生は、クランク軸系曲げ共振の影響を受け、パワープラント共振と一致する周波数帯域で、振動レベルが増減する。

この結果より音質を考慮したクランク軸設計に明確な指針を加えることができた。

参考文献

- (1) 青木 他：加速時の車内音質に及ぼすパワープラント振動の影響解析，日産技報論文集，p.21-28 (1986)
- (2) 阿部 他：車室内音の音質評価と改善に関する考察，マツダ技報，6，p.44-51 (1988)
- (3) 大塚 他：クランク軸共振時の軸受加振力とパワープラント振動，自技会学術講演会前刷集，70-99，p.5-8 (1999)
- (4) 井手 他：クランクシャフト・フライホイール系曲げ振動低減によるエンジン加速音質の改善について，自動車技術，Vol.44，12，p.94-99 (1990)
- (5) 宮近 他：抵抗低減を目的としたジャーナル軸受け挙動解析，マツダ技報，2，p.101-110 (1984)

著者



熊野昌平



樫本正章



森実健一



波多野耕二

論文・解説

28

乗員体格検知システム評価シミュレーション技術の開発 Development of Simulation Technology for Occupant Classification Sensor

伊与田 輝*¹ 石川 敏 弘*² 世 戸 孝 幸*³
Teru Iyota Toshihiro Ishikawa Takayuki Seto
高 橋 恭 宣*⁴
Kiyonobu Takahashi

要 約

近年、各国の安全法規制の強化やエアバッグ、ABSに代表される衝突安全技術、予防安全技術の拡充により自動車の安全性能は向上し、自動車事故による乗員の死傷者数は減少してきている。そして、更なる安全性能の向上のためエアバッグ展開時に乗員がエアバッグにより被害を受ける展開傷害が着目されている。米国においてはエアバッグ展開による受傷危険性の低減を狙いとして乗員衝突保護に関する法規FMVSS (Federal Motor Vehicle Safety Standard) No.208が改訂され、特に先進的エアバッグ技術を含めた方法により、小柄な女性や幼児がエアバッグ展開に起因する重傷を負う危険性を低減することが求められている⁽¹⁾。

これに伴いマツダでは、エアバッグが乗員に危害を加えると考えられる状況をセンサを用いて自動検出し、エアバッグ展開の自動制御を行うシステムを開発したが、センサ開発においては様々な姿勢や走行条件での評価が必要となっている。本報告では、センサ開発において短期間で効率的な開発、検証を行うことが可能なシミュレーション技術について述べる。

Summary

In recent years, the safety performance of the vehicle has been improved, and the fatalities of occupants due to traffic accidents are on the decrease because of established stringent safety regulations in each country and enhanced passive safety technologies and active safety technologies, as represented by airbag and Anti-lock Braking System. In addition, attention has been focused on occupant injury caused by airbag deployment for higher safety performance. In U.S., FMVSS (Federal Motor Vehicle Safety Standard) No.208, which is specified about occupant protection, has been revised toward the reduction in the risk of the occupant injury caused by the airbag deployment. Especially, it is required that small women or young children who could get seriously injured by the airbag deployment should be protected from the risk by taking proper measures including the advanced airbag technology.

Therefore, Mazda has developed the system which enables a sensor to detect the presence of possible occupant's injury risk due to airbag deployment and to automatically suppress the airbag deployment. Development of the sensor, however, requires evaluations in various sitting positions and driving conditions. This report describes one of simulation technologies that enables efficient development and verification of the sensor in a short time.

*1, 2 技術研究所
Technical Research Center

*3, 4 電子開発部
Electrical & Electronics Development Dept.

1. はじめに

近年、各国の安全法規制の強化やエアバッグ、ABSに代表される衝突安全技術、予防安全技術の拡充により自動車の安全性能は向上し、自動車事故による乗員の死傷者数は減少してきている。そして、更なる安全性の向上のためエアバッグ展開時に乗員がエアバッグにより被害を受ける展開傷害が着目されている。

米国においてはエアバッグ展開による受傷危険性の低減を狙いとして衝突時の乗員保護に関する法規FMVSS No.208が改訂され、特に先進的エアバッグ技術を含めた方法により、幼児や小柄な女性がエアバッグ展開に起因する重傷を負う危険性を低減することが求められている⁽¹⁾。その法規の中で、助手席においてはTable 1に示すように幼児を代表する12ヶ月、3歳児、6歳児および小柄な女性である5%タイル女性のダミーモデルを使用したテストにおいて、エアバッグの自動的な作動停止あるいはローリスク展開を選択することが求められている。マツダでは6歳児ダミーモデル相当より小さな子供が、それらを保護するために用いられるチャイルドシートも含めて助手席に着座している場合はエアバッグを自動的に作動停止させることを選択した。

これに対応するため、幼児と小柄な女性以上とを検知分類できる乗員体格検知システムを新たに開発し車両に組み込んだ。しかし、この乗員体格検知システムの開発においては前述の法規で定められた評価に加え、実際の市場での安全性を広く考慮した各種評価が必要となり開発工数が増大する。そのため、開発の効率化が必要となってきた。

本報告では、乗員検知システム開発における各種評価をシミュレーションに置き換えることにより開発効率化を図る技術について述べる。

2. 開発のねらい

2.1 乗員体格検知システムと開発上の問題点

マツダの開発した乗員体格検知システムはシートフレームの構造体に歪ゲージを組み込んでいる。歪ゲージはFig.1に示すように助手席シートフレーム構造体の前後左右の計4ヶ所に配置しており、各点に作用する荷重を歪ゲージに生じる歪量より算出している。そして、算出された荷重を基に乗員の体格を幼児あるいは小柄な女性以上かを検知分類し、エアバッグの展開又は自動停止を決定している。

助手席乗員体格の検知において、幼児についてはそれらを保護するために用いられるチャイルドシートの重量も考慮しなければならない。しかし、それらの重量はすべてシート上面に加わるため、4ヶ所に設置した歪ゲージで計測した荷重の総和で一義的に決定できる。一方、小柄な女性又はそれ以上の体格の乗員がシートに着座した場合は乗員足部と車両床面が接触する。そのため体重は A) シートに加わる荷重、B) 足部から床面に加わる荷重に分離される (Fig.2)。しかし、計測される荷重はA)のみであり、またこのA)、B)の比率は乗員の着座姿勢や坂道、旋回およびブレーキなどの走行状況、更には車種によっても変化する。従って、B)の荷重が大きくなるような状況においては小柄な女性又はそれ以上の体格での荷重計測値は、それらよりも体重の小さな幼児の値と接近することになる。

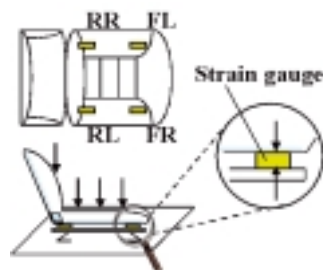


Fig.1 Layout of Strain Gauge

Table 1 Issues Related to Minimizing the Risk of Injuries and Deaths Caused by Air Bags

| Dummy | Option1 | Option2 | Option3 |
|-----------------------------|-----------------------|--------------------------------|---------------------|
| 12-month-old CRABI child | Automatic suppression | — | Low risk deployment |
| 3-year-old child | ↑ | Dynamic automatic suppression* | ↑ |
| 6-year-old child | ↑ | ↑ | ↑ |
| 5th percentile adult female | — | ↑ | ↑ |

* Dynamic automatic suppression system that suppresses the air bag when an occupant is out of position

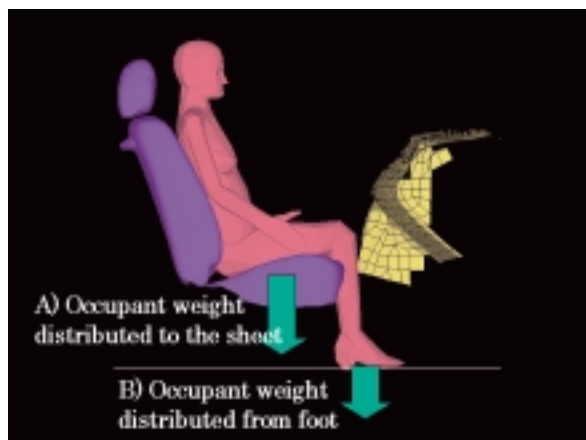


Fig.2 Distribution of Occupant Weight

よってこのような状況においても正確に幼児と小柄な女性以上とを検知分類できる乗員検知ロジックを開発するため、各種姿勢および走行条件での評価が開発車種ごとに必要となり開発工数の増大につながっている。

また、その開発および検証には米道路交通安全局指定の新ダミーの使用が前提となるが、同ダミーの構造上の都合から、実際の乗員がとる着座姿勢を全て再現させることができない。代わりに人間が実際に着座する評価も考えられるが、当局指定の新ダミー相当の体格を有しなければならないなどの問題がある。これらの問題の解決策として各種条件での評価がシミュレーションで実施可能な技術を開発することで開発の効率化を試みる。

2.2 シミュレーションモデル開発

シミュレーションモデルの開発にあたり、乗員および車両モデルには以下の要件が必要となる。

- ・指定ダミーの各部形状、重量が定義されている。
- ・人間での評価を想定し、任意の体格が定義できる。
- ・乗員がとり得る任意の着座姿勢を再現できる。
- ・シート高など車種間の違いが定義できる。
- ・車両の走行条件が定義できる。

上記要件を満足するものとしてマツダにおいて衝突解析分野で実績のあるシミュレーションプログラムのMADYMOを選択した⁽²⁾。MADYMOでは上記指定ダミーの各部形状、重量が詳細に定義されており、かつスケールリング手法を用いて任意の体格を有するダミーモデルの定義も可能である。

車両および乗員モデルは以下のように定義した。

(1) 車両モデル

フロア、インストルメントパネル、ドアトリム等のキャビン内部情報やシート高、シート角度などのシート情報をシミュレーションパラメータとして定義した。

実際のシートと同位置に荷重の測定点を定義してシート上の荷重をシミュレートした。

(2) 乗員モデル

米国成人女性5%タイルHybrid IIIダミーモデルおよび被

験者と同等の体格にスケールリングされたダミーモデルをベースとし、目標とする着座姿勢を作成し、車両のシート上へ着座させた。なお、関節など各可動部の剛性は着座姿勢等により計算の安定化のため随時変更している。

車両モデルに乗員モデルを搭載した後、停車および走行状態に応じて乗員の3軸方向に加減速度を定義している (Fig.3)。例えば、停車時は重力加速度 9.8m/s^2 をZ軸方向のみに定義し、ブレーキ時はそれに応じた減速度をX軸方向に加えて定義する。また必要に応じて車両モデルにロール角、ピッチ角を発生させることも可能である。これにより停車および走行状態に応じた車両挙動と乗員挙動を再現し、荷重測定点に生じる荷重変化をシミュレートしている。

3. 検証結果

前記に従い開発したシミュレーションモデルと実車を使用した停車状態での姿勢テストおよび走行テストの結果とを比較した結果を次に示す。

3.1 姿勢テスト

姿勢テストとそのシミュレーション結果の一例を示す。なおこの時の姿勢をFig.4に示す。乗員は米国成人女性5%タイル相当の体格を有する被験者であり、車両はミニバンタイプを使用している。姿勢Aは一般的な着座姿勢、姿勢Bはシート上で膝をかかえた姿勢である。これら姿勢について、シートに加わる荷重を実験値とシミュレーション値で比較した結果をFig.5に示す。

図より姿勢A、姿勢Bともに実験値とシミュレーション値が一致していることが分かる。すなわち、乗員足部が車

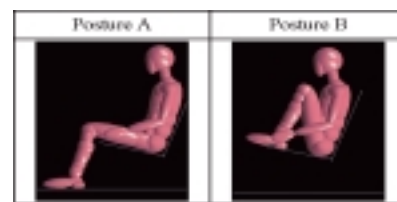


Fig.4 Example of Posture Simulations

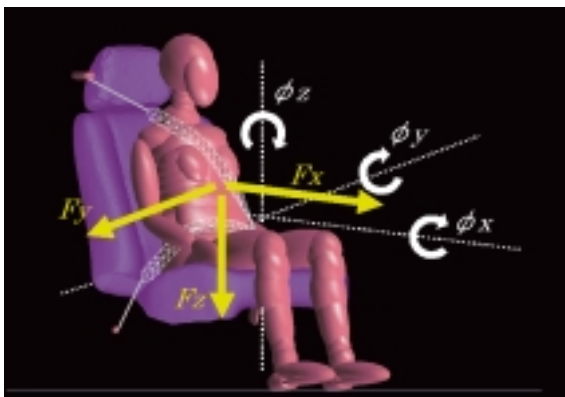


Fig.3 Description of Simulation

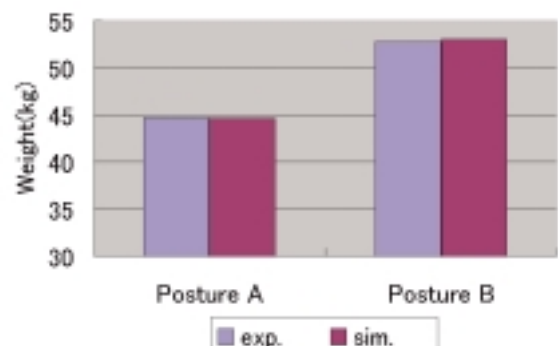


Fig.5 Comparison of Load (static test)

両床面と接触している姿勢Aにおいては、足部から床面に加わる荷重がシミュレーションモデルで精度良く再現されている。

また、これ以外に臀部位置を前後方向に移動した姿勢や、上体の角度を変化した姿勢などについても、シミュレーションモデルで精度良く実験値を再現していることを確認した。

3.2 走行テスト

走行テストをシミュレートした結果を示す。まずその一例として左旋回時に4点の各荷重検出点に生じた荷重の結果を示す。なお、車両にはミニバンタイプを使用している。旋回挙動の再現は実走行車両の横加速度および前後加速度の時間履歴を計測し、シミュレーションではそれらの加速度を乗員に発生させることで再現している。入力した横加速度および前後加速度の時間履歴をFig.6に示す。直進状態から横加速度約 6m/s^2 の左旋回に移行し、その後直進状態に戻っている。この走行時の各荷重検出点に生じている荷重の実験値とシミュレーション値をFig.7に示す。図より左旋回のため、乗員右方向に生じる遠心力の影響により、シート右側の荷重が増加し、シート左側の荷重が減少する荷重変化が実験とシミュレーションでよく合っていることが分かる。

次に平坦路、下り坂および急ブレーキ時のシミュレーション結果と実験結果を比較した図をFig.8に示す。なお縦軸にはそれぞれの走行状況において各荷重検出点の荷重の総和が安定した時刻帯における荷重の平均値を使用した。

図より平坦路、下り坂、急ブレーキと減速度が大きくなるに従い足部から床面に加わる荷重が大きくなるため、シートに加わる荷重が小さくなる現象がシミュレーションにおいても再現できていることが分かる。

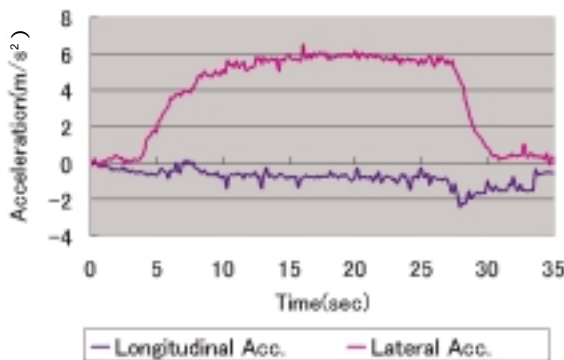


Fig.6 Acceleration which Used in Simulation

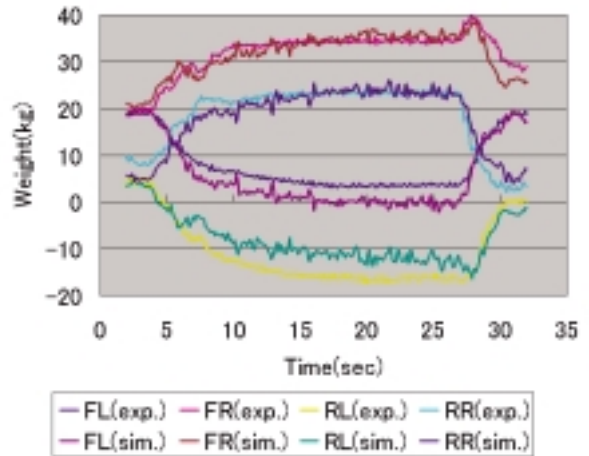


Fig.7 Sensor Value of Left Turn Situation

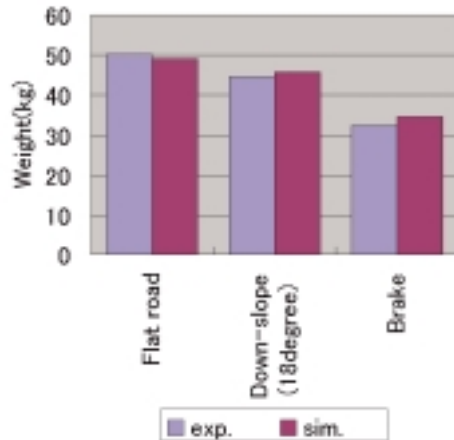


Fig.8 Comparison of Load (dynamic test)

3.3 車種比較テスト

ここではミニバンタイプ、セダンタイプの2車種においてテスト結果とシミュレーション結果を評価した結果を示す (Fig.9)。なお着座姿勢は前述の姿勢Aの場合で、図はテストおよびシミュレーションにおいて、シートに加わる荷重が乗員の総荷重に占める割合を示している。これらのシート高は約40mmの違いがあり、この影響によるシートに生じる荷重変化がシミュレーションにおいても再現できている。

以上より、今回開発したシミュレーションモデルは様々な実験状況での荷重変化を精度良く再現できることが分かった。

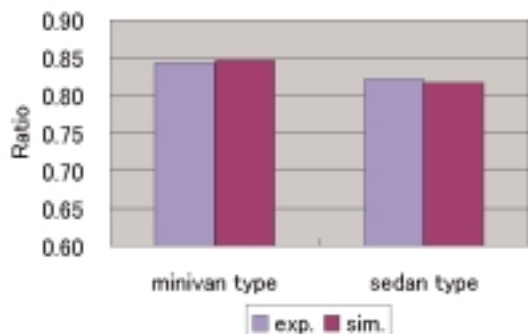


Fig.9 Comparison of Load (various vehicle type)

4. まとめ

本シミュレーション技術を適用することで様々な車種、走行条件において様々な姿勢で着座している乗員における乗員体格検知システムの出力を精度よく評価できることが分かった。これにより今までの実験による評価に比べて開発工数を大幅に低減できる。

また、各プログラム開発の初期段階に本シミュレーションで乗員体格検知システムの検知/分類に使用する荷重の推定を行うことで、試作を行うことなく、乗員体格検知システムの開発が行える目処がたった。

現在、大人の乗員を対象にして、その体格に応じてエアバッグをきめ細かく制御することによってさらに安全性を向上させる技術が研究されており、このための大人の体格識別へ本技術を展開できるよう育成して行きたい。

参考文献

- (1) Rules and Regulations, Vol.65, No.93, Federal Register (2000)
- (2) 伊東 他：衝突性能開発におけるバーチャルテストの技術開発, マツダ技報, No.20, p.139-145 (2002)

著 者



伊与田輝



石川敏弘



世戸孝幸



高橋恭宣

論文・解説

29

ドライバ個人特性の評価指標の開発 Development of Metrics for Driver's Individual Characteristics

石橋基範*¹ 大森政幸*² 赤松幹之*³
Motonori Ishibashi Masayuki Okuwa Motoyuki Akamatsu

要約

事故低減や負担軽減のため運転支援システムの研究が進められる中、ドライバとシステムの不マッチが懸念されている。その解決に向けて、システムをドライバ個々の特性に合わせる個人適応化が重要となる。従来、個人特性では年齢、運転キャリア等の属性がよく扱われてきたが、それらに加え、運転への態度や考え方(スタイル)、負担意識という心理的特性の違いによっても支援方法は異なるべきと考える。しかし、このような心理面からドライバ特性を簡便に把握する手法は少なく、容易に活用できる形で確立されていない。そこで、運転支援の個人適応化に向けた基盤技術として、ドライバ個人特性の評価指標を質問紙方式で開発した。

まず、一般ドライバを対象にした調査から構成要因を明らかにし、「運転スタイルチェックシート」(18質問)、「運転負担感受性チェックシート」(38質問)という質問紙を作成した。次に、運転支援の一事例として経路誘導を取り上げ、経路選択嗜好との関係分析から評価指標の妥当性を確認した。そして、これらドライバ特性に基づいて経路誘導ロジックを個人適応化できる可能性が分かり、評価指標の有用性が示された。

Summary

In the studies of driving support systems to reduce vehicle accidents and drivers' workload, a deviation in communication between a driver and the system has turned into a problem. To solve such a problem, the approach of "personalization" which adapts the system to driver's individual characteristics will become important. While attributes such as age and driving experience have often been used as the individual characteristics so far, in addition to the above, a driving support method may depend on psychological characteristics such as attitude for driving (so-called driving style) and sensitivity to driving workload. However, there is rarely found the method which permits the driver's characteristics to be easily identified from these psychological aspects, and it has not been established as a simple and practical form. Therefore, as fundamental technology toward personalization of the driving support system, the authors developed the metrics of driver's individual characteristics in the form of practical questionnaires.

First, "Driving Style Questionnaire" (18 questions) and "Workload Sensitivity Questionnaire" (38 questions) were developed from an investigation for non-occupational drivers, which revealed these scales. Then, focusing on route guidance as a case of driving support, the validation of the metrics was verified from a relational analysis between route choice preference and their scales. Finally, as it was found that route guidance logic could be personalized based on these driver's characteristics, the availability of the metrics was pointed.

*1 技術研究所
Technical Research Center

*2 (株)豊田中央研究所
Toyota Central R&D Labs., Inc.

*3 (独)産業技術総合研究所
National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

1. はじめに

自動車事故の低減および自動車運転の負担軽減のために、情報技術を応用した運転支援システムの研究が進められている。センサやシステムの信頼性向上を進めている一方で、ドライバがシステムを過信したり、お節介な感覚によりシステムへの不信や不使用が生じたりするといった、人間・機械系のミスマッチが懸念されている。これを解決しドライバにより優しいシステムを構築するためのアプローチの一つとして、ドライバ個々の特性に合った個人適合化の取り組みが重要となる。

このような個人適合化の基盤技術を確立するため、経済産業省の「人間行動適合型生活環境創出システム技術プロジェクト」において、(独)産業界技術総合研究所や自動車メーカーが参加してドライバ個人特性の評価指標の研究を行ってきた⁽¹⁾。

ドライバ個人特性とはある人がどういったドライバかを表現するもので、従来、性別や年齢といったデモグラフィックな属性や、運転経験年数や事故歴といった運転キャリアに関する属性等がよく扱われてきた。また、運転スキルが取り上げられることもあり、質問紙で同定・比較する手法⁽²⁾が研究されてきた。更に、違反・事故につながりやすい行動傾向も含まれると考えられ、その診断⁽³⁾が開発され安全運転教育に利用されてきた。

だが、これら従来の見方だけでは運転への影響は十分把握しきれないと考えられる。例えば若年ドライバの中でも積極的に運転する者もいれば運転を避けたがる者もいる。また、例えば初心者の中でも運転に対する負担意識の高い者もいれば負担をほとんど感じない者もいる。このように、従来の見方では同じ属性でも運転に対する態度や負担の意識といった特性が異なれば、運転支援のあり方も異なるはずである。つまり、運転支援の個人適合化に向けて、運転の背景にある個々のドライバの心理的な特性から検討することも重要である。しかし、このような心理面からドライバ特性を簡便に評価する手法は少なく⁽⁴⁾、誰もが活用できる形態として確立されていない。

本研究では、運転支援を目的としたときに運転行動や負担軽減に関与が大きいと考えられるドライバ特性として、2つの心理的な側面に着目した。1つは運転に取り組む態度や志向、考え方であり、これを「運転スタイル」と称する。もう1つは、運転により負担が生じて時として疲労へつながるが、「どういった種類の負担が続いたら疲れるから運転したくないか」という感じ方であり、「運転負担感受性」と称する。今回、運転支援の個人適合化に向けた基盤技術として、これら2つの側面について構成要因を抽出し、質問紙方式で個人特性を簡便に数量化できる手法(ここではチェックシートと呼ぶ)を開発した。そして、運転支援の一事例として経路誘導を対象とし、個人適合化の可能性を

探ることで有用性を確認した。

2. ドライバ個人特性の構成要因の抽出

2.1 目的

運転スタイル、および運転負担の構成要因を、一般ドライバを対象にした調査から明らかにする。

2.2 方法

(1) 被験者

首都圏、および大阪市近郊在住で、日頃から自動車を運転する20~60歳代の男女222名(男性114名、女性108名)とした。

(2) 質問項目の設定

人間工学研究従事者と一般ドライバの複数の者が検討し、網羅的になるよう設定した。運転スタイルについては、「車線変更してもできるだけ前に行きたい」「知っている道を選んで走る」といった運転志向や態度に関する質問を幅広く抽出し、58項目に絞り込んだ。運転負担の感じ方(運転負担感受性)については、運転中に継続的に運転支援することを想定して、「ある状況が続いたときに負担が大きくて疲れそうか」という視点で、持続的な負担を対象とした。予備検討では、日常運転で実際に疲労を感じたことがある場面を幅広く抽出した。そして、「路上駐車が多い道」「深夜に運転」といった負担が大きいと考えられる運転場面を選定し、質問として116項目に絞り込んだ。

(3) 回答方法

被験者には、質問紙での回答記入を求めた。運転スタイルについては、質問文へのあてはまり程度を「1. 全くあてはまらない」「2. 少しあてはまる」「3. かなりあてはまる」「4. 非常にあてはまる」の4段階で評価した。運転負担については、質問のような運転場面がしばらく続いたときに負担を感じる程度を、「1. 気にせず運転する」「2. 気配りしながら運転するが負担ではない」「3. 運転することを少し負担に感じる」「4. 緊張や無理をしいられて負担が大きい」「5. 負担が過大で運転したくない」の5段階で評価した。

(4) 分析方法

各質問に対する被験者の評価値をそのまま得点化して、多変量解析を行った。運転スタイルについては、各質問を変数として主成分分析を行った。運転負担については、運転特有の負担を大別した研究⁽⁵⁾より独立要因の存在を仮定できるので、主因子法による因子分析を行った。いずれも、分析打ち切り基準は累積寄与率50%以上とし、構造単純化のためにバリマックス回転をかけた。そして、運転スタイルについては主成分負荷量0.5以上を対象に主成分の解釈を、運転負担については因子負荷量0.4以上の質問を対象に因子の解釈を行った。

2.3 結果

(1) 運転スタイル

運転スタイルでは9主成分が抽出され、累積寄与率が51.5%と50%を超えた。しかし、第9主成分に含まれる3質問は主成分としての解釈が困難だったため構成要因から除外し、その結果、8主成分で累積寄与率は48.8%となった。主成分の解釈を以下の通りとした(各文尾のカッコ内数値は寄与率)。

- ① 運転スキルへの自信 (14.26%)
- ② 運転に対する消極性 (6.70%)
- ③ せっかちな運転傾向 (6.04%)
- ④ 几帳面な運転傾向 (5.19%)
- ⑤ 信号に対する事前準備的な運転 (4.59%)
- ⑥ ステイタスシンボルとしての車 (4.45%)
- ⑦ 不安定な運転傾向 (3.92%)
- ⑧ 心配性的傾向 (3.67%)

(2) 運転負担

運転負担では10因子が抽出され、累積寄与率は51.4%であった。因子のラベルと解釈を以下の通りとした(各文尾のカッコ内数値は寄与率)。

- ① 「交通状況把握」 周回交通との関わり合いや情報取り込みの煩雑さ (10.30%)
- ② 「道路環境把握」 車外環境(道路, 天候, 明るさ)の変化, 複雑さ, 悪さ (8.68%)
- ③ 「運転への集中阻害」 車内の人(自分も含む)やモノに対する配慮 (5.34%)
- ④ 「身体的活動度の低下」 運転に際しての心身状態(体調, 生活リズム)の悪さ (5.00%)
- ⑤ 「運転ペース阻害」 自分に合った運転ペースの阻害 (4.53%)
- ⑥ 「身体的苦痛」 身体的苦痛の発生, 長時間拘束 (4.17%)
- ⑦ 「経路把握や探索」 自転車位置や行先情報の取り込み, 位置関係の把握 (3.94%)
- ⑧ 「車内環境の悪さ」 車室内の環境(寒暖, 空気質等)の悪さ (3.31%)
- ⑨ 「制御操作の煩雑さ」 運転操作の煩雑さ (3.07%)
- ⑩ 「運転姿勢の悪さ」 シートやレイアウトのフィット性の悪さ (3.03%)

3. チェックシートの作成

3.1 質問の選定方法

(1) 基本的な考え方

構成要因の抽出結果に基づき、各主成分・因子に対応した尺度を構成した。質問は調査で使用したものをを用い、運転スタイルについては各主成分から2項目、運転負担については各因子から3~5項目の代表的な質問を選定した。1尺度に複数の質問を入れたのは、尺度の得点算出時に平均

処理によってできるだけ安定化させるためである。具体的には、各主成分・因子内で相関係数が高い質問と意味が類似した質問によりサブグループを構成し、各サブグループ内で主成分・因子負荷量の最も高い質問を1つ選ぶようにした。ただし、サブグループ構成によっては、1つのサブグループから複数の質問が選ばれるケースや、サブグループの主成分・因子への寄与が小さいため選ばれないケースも例外として認めた。

(2) その他の視点

運転スタイルについては、高い負の主成分負荷量を持つ質問があれば逆転項目として優先的に採用した。また、運転負担については、因子負荷量最大の質問が因子の意味を十分伝えきれていないと判断されたときには、負荷量の高い順に他の質問を検討して採用した。

3.2 チェックシートの概要

各質問への回答方法は2章の調査と同様のものとし、運転スタイルでは4段階、運転負担では5段階で得点化した。そして、尺度を構成する質問の得点平均値をその尺度の得点とした。また、運転スタイルについては、自分を良く見せようとして社会的望ましさの視点で回答していないかチェックするため、交通法規の遵守に関わる質問を虚偽発見尺度として追加した。

以上から、18問で構成される「運転スタイルチェックシート」(Driving Style Questionnaire: 以降DSQと記す)、38問で構成される「運転負担感受性チェックシート」(Workload Sensitivity Questionnaire: 以降WSQと記す)を作成した。DSQの一部をFig.1に示す。

| 【記入のしかた】 あなたの運転や、車の使い方についてお聞きします。 下にある文章に、あなたは <u>ふだんどのくらい</u> 当てはまりますか?このわくの右側を見て、当てはまる程度をもっともよく表わすように1つ選び、それぞれの文章の右の数字に○をつけていってください。 どれが良いとか悪いとか正解はありませんので、正直に答えてください。また、あまり深く考えこまずに直感で答えてください。 | 全く当てはまらない | 少し当てはまる | かなり当てはまる | 非常に当てはまる |
|--|-----------|---------|----------|----------|
| 1. 自分が車の事故を起こすことを気にしている | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 2. 気分が良くないなどによって、車の運転がおろそかになったり飛ばしたりする | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 3. 車が自分のステイタスである(カッコいい車がいり)と思う | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 4. 先の信号に引っかかれないように速度調節する | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 5. 車線変更や交差点などでは、安全確認を慎重に行う | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 16. 所要時間があまり変わらないときは、車よりもバスや電車を使う | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 17. 渋滞しているときの車線変更は苦手だ | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 18. 制限速度はいつも必ず守っている | 1 | 2 | 3 | 4 |

記入もれがないか、ご確認ください

Fig.1 Part of the "Driving Style Questionnaire"

4. 経路誘導への応用

4.1 目的

運転支援の一事例として経路誘導を対象とし、まず、運転スタイルや運転負担感受性の違いによる経路選択嗜好の

違いを検討して妥当性を確認する。更に、経路誘導の個人適合化の可能性を探ることにより、本手法の有用性を明らかにする。

4.2 方法

(1) 被験者

広島市近郊在住で、日頃から自動車を運転する20~60歳の男女128名(男性90名,女性38名)とした。

(2) データ取得方法

DSQ, WSQ, 経路選択の嗜好に関する質問紙を配付し、自宅等での回答記入を求めた。

(3) 経路選択の視点

経路選択行動の研究では、旅行時間が重要な選択基準の一つと考えられる。過去の研究事例では、旅行時間を最小化するように経路選択するクラスタが存在し、また、条件によっては最も重視される基準となることが指摘されている⁶⁾。従って、旅行時間の扱いによっては他の視点が顕在化しないことも考えられるので、旅行時間を他と分けて扱うことにした。

また、一般ドライバの男女48名に対する予備調査から、経路選択の際にドライバが考慮する交通・道路の視点として以下のことが分かった。

- ・道幅が狭い/広い
- ・遠回り/短距離
- ・渋滞/空いている
- ・信号が多い/少ない
- ・右左折が多い/道なり

これらに「あまり知らない/よく知っている」道という視点を加えて、経路選択嗜好の6視点を設定した。

(4) 経路選択嗜好の設定方法

予備検討より、被験者に絶対的な嗜好を期待して上記6視pointsの重要順位を回答させることは難しいと分かった。そこで、回答精度を確保するため、一対比較法の考え方を適用して「どちらをより嗜好するか」という相対的な価値判断を求めることにした。ここでは、旅行時間の扱いによって2種類の視点を設定した。

① 旅行時間が同じ場合

旅行時間は同じという前提下で、6視pointsの嗜好の強さを調べた。例えば、ある被験者が道幅の広さをどのくらい強く嗜好するか調べるために、次のような対からどちらを選ぶか回答を求めた。

- 1. 道幅狭い, 短距離
- 2. 道幅広い, 遠回り
- 1. 道幅狭い, 空き
- 2. 道幅広い, 混雑

...

...

道幅という視点に着目したとき、1. は「着目視点(道幅)の不利要因・他視点の有利要因」のペア、2. は「着目視点(道幅)の有利要因・他視点の不利要因」のペアとなっている。そして、2. を選択すれば、その視点(道幅の広さ)は他方の視点に影響されにくい強い嗜好と考えた。このように、6視点について有利・不利要因の総当りで質問対を作ったので、全部で15質問となった。

② 旅行時間が異なる場合

経路選択は旅行時間で決まるのか、それとも、前述の6視点である「交通・道路の楽さ」のような視pointsが優先されるのかを調べた。ここでも①同様の対を設定し、一方の旅行時間は他方よりも短くなるよう仮定した。例えば、

- 1. 道幅広い, 長時間
- 2. 道幅狭い, 短時間

という対であり、1. を「着目視点の有利要因・旅行時間が長い」のペア、2. を「着目視点の不利要因・旅行時間が短い」のペアとした(全部で6質問)。

4.3 結果

(1) 従来のドライバ属性との比較

まず、DSQやWSQが従来のドライバ属性と比べて経路選択の嗜好の違いをより明確にできるかを検討した。従来のドライバ属性として、年代(年齢層)、性別、運転歴、年間走行距離、運転頻度の5項目を取り上げ、各項目の下に分類群(例えば、性別という項目の下には男性・女性の分類群)を設定した。DSQ, WSQについては、尺度毎にその傾向が高い群(H群)と低い群(L群)の2群を設定した。具体的には、DSQでは得点が2.5以上を、WSQでは得点が3.0以上をH群に属する被験者とし、それら未満をL群とした。

そして、経路選択嗜好の各質問について、属性の5項目、DSQの8尺度、WSQの10尺度毎に、各群(属性では分類群、DSQとWSQではH/L群)で一対比較のどちらを選択したか人数をクロス集計し、群が回答選択に影響を及ぼしているかを²⁾検定によって分析した。このとき、旅行時間が同じ場合の15質問、異なる場合の6質問を別々に集計した(全21問)。更に、²⁾検定が有意傾向(p<0.1)となるケースが占める割合を算出して、属性での分類群、および、DSQとWSQでのH/L群による違いの大きさを評価した。その結果をTable 1に示すが、旅行時間が同じ場合も異なる場合も、DSQ, WSQを用いた方が有意となるケースが多かった。以上から、従来の属性項目よりもDSQやWSQの方がドライバの違いによる選択嗜好の違いをより明確にすることができ、本手法の有効性を示すものと考えられる。

Table 1 Ratio of Significant Cases in the Chi-square Test

| | | Driver's attribute | DSQ | WSQ | |
|-----------|-----------|--------------------|-------|-------|-------|
| Trip time | Same | All cases | 75 | 120 | 150 |
| | | Significant cases | 10 | 44 | 42 |
| | | Ratio | 13.3% | 36.7% | 28.0% |
| | Different | All cases | 30 | 48 | 60 |
| | | Significant cases | 3 | 17 | 18 |
| | | Ratio | 10.0% | 35.4% | 30.0% |

(2) ドライバ特性と経路選択嗜好の関係

旅行時間が同じ場合を対象として、被験者毎に、経路選択の各視点に属する質問（各視点で5問）で、その視点の有利要因（道幅が広い等）である“2.”を選択した質問数を計算した。“2.”を選択した質問数が多いほどその視点の有利さを求める、すなわち強く嗜好すると考えられる。そして、DSQとWSQの各尺度について、設定したH群とL群との間で嗜好の強さに違いがあるか、対応のないt検定で分析した。

Fig.2にDSQの「運転スキルへの自信」という尺度についての結果を例示する。レーダーチャートの軸の点数はH/L群それぞれの群内平均値であり、点数が大きいくほどその視点を強く嗜好することを意味する。t検定が有意であった経路選択の視点は5つであり、スキルに自信があるH群は「空いている」「信号の少ない」経路を嗜好し、自信のないL群は「道幅が広い」「道なり」「よく知っている」

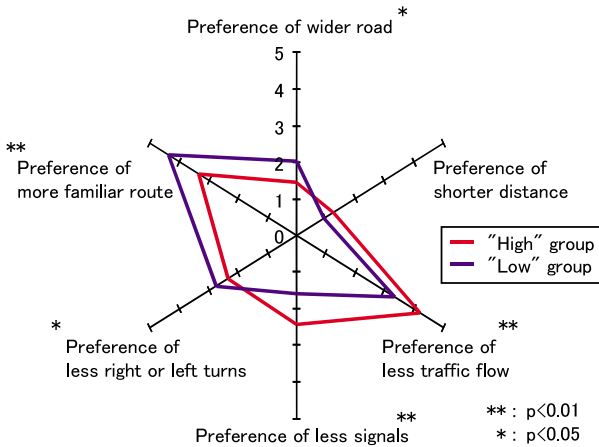


Fig.2 Relationship between the “Confidence in Driving Skill” and Route Choice Preference

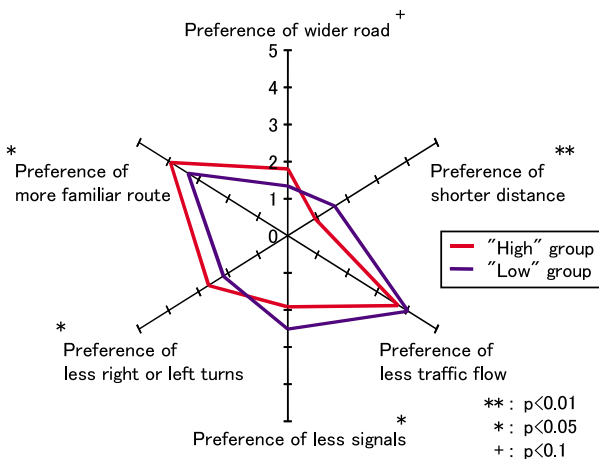


Fig.3 Relationship between Workload in the “Awareness of Traffic Situation” and Route Choice Preference

経路を嗜好する様子が分かる。また、同様にFig.3にWSQの「交通状況把握の負担」という尺度についての結果を例示する。t検定が有意（有意傾向）であった経路選択の視点は5つであり、交通状況把握を大きく負担に感じるH群は「道幅が広い」「道なり」「よく知っている」経路を嗜好し、負担の感じ方が大きくないL群は「距離が短い」「信号の少ない」経路を嗜好する様子が分かる。

このように、DSQとWSQの各尺度についてH/L群間の強さの差を分析した。その結果、DSQ、WSQともに各尺度のH/L群と経路選択嗜好との関係は、前述の例示のように納得できる合理的なものであった。また、6視点の半数以上に有意傾向（p<0.1）が認められた尺度は、DSQでは「スキルへの自信」「運転に対する消極性」「せっちな運転傾向」「心配性的傾向」の4尺度であり、WSQでは「交通状況把握」「道路環境把握」「経路把握や探索」「制御操作の煩雑さ」等の7尺度であった。これらは経路選択の嗜好に影響が大きい尺度と考えられ、経験的に納得できる結果と考えられる。

以上から、運転スタイルや運転負担感受性の違いによる経路選択嗜好の違いが分かり、妥当性が確認できた。

(3) 経路誘導の個人適合化の可能性検討

選択嗜好の違いの一側面として旅行時間が異なる場合に焦点を当てて²検定の結果を見たところ、「道幅が広い」「距離が短い」「道なり」「よく知っている」（つまり、交通・道路の楽さ）においては、DSQ、WSQとも少なくとも1つ以上の尺度について検定結果が有意であった。従って、これら4つの視点では運転スタイルや負担感受性の違いによって経路選択の嗜好が異なっていると考えられる。そこで、これら4視点について、DSQ、WSQの尺度から旅行時間と交通・道路の楽さのどちらを嗜好するドライバか判別することを試みた。

ここでは線形判別分析を用い、従属変数は被験者が選択した嗜好とした。まず、DSQ、WSQ別々に、尺度の得点を独立変数として変数増減法によって判別関数を導出した。変数投入・除去の有意水準は10%とした。次に、DSQ、WSQ毎に得られた変数を強制投入して最終的な判別関数を導出した。その結果、4視点全てにおいて判別分析は有意であり（p<0.01）、判別率は66.9%～75.4%であった。

例えば、「旅行時間の短い道」と「よく知っている道」といずれを嗜好するドライバかの判別は次式で表される。

$$\text{嗜好} = -0.34 * \text{スキル自信} + 0.73 * \text{消極性} - 0.63 * \text{事前準備} + 0.46 * \text{経路把握} + C$$

（判別率71.4%，非標準化係数，C：constant）

ここで、「嗜好」のスコアが小さいと旅行時間の短い方を嗜好することを意味する。これに基づいて係数の符号を見ると、「スキルへの自信」と「信号に対する事前準備的な運転」の高さは、旅行時間の短い方を嗜好するように作

用すると解釈できる。一方、「運転への消極性」と「経路把握の負担」の高さは、よく知っている方を嗜好するように作用すると解釈でき、いずれも納得できる結果であった。以上のように、DSQやWSQからドライバの経路選択の嗜好を判別できると考えられる。従って、ドライバの特性に基づいて経路誘導ロジックを個人適合化できる可能性が分かり、本評価指標の有用性が示された。

5. まとめ

運転支援の個人適合化に向けた基盤技術として、個人特性を簡便に数量化する手法を開発し、有用性を確認した。

- (1) ドライバの心理的側面に着目し、運転スタイルを構成する8主成分、および持続的な運転負担を構成する10因子を明らかにした。
- (2) 「運転スタイル」18質問、「運転負担感受性」38質問で構成される、質問紙方式で簡便に数量化できる手法を開発した。
- (3) 運転支援の一事例として経路誘導を対象とし、「運転スタイル」、「運転負担感受性」と経路選択嗜好との関係から本個人特性評価指標の妥当性が示された。そして、これらのドライバ特性に基づいて経路誘導ロジックを個人適合化できる可能性が分かり、本評価指標の有用性が示された。

以上から、本手法は今後運転支援の個人適合化を研究していく上で有用なツールになると考えられる。また、このようなドライバ特性データを個人適合化の基礎情報として車両内に持つことにより、経路誘導以外にも、運転支援全般にわたり個人対応のシステム制御に適用していくことが可能となる⁷⁾。

なお、本研究は経済産業省の産業技術基盤研究開発プロジェクト「人間行動適合型生活環境創出システム技術」として、(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)からの委託を受けて(社)人間生活工学研究センター(HQL)を通して実施したものである。

参考文献

- (1) 赤松幹之他：人間行動の計測技術と行動理解，ヒューマンインタフェース学会誌，Vol.3，No.3，p.167-178 (2001)
- (2) McCormick, I. A. et al.: Comparative perceptions of driver ability, Accident Analysis & Prevention, Vol.18, No.3, p.205-208 (1986)
- (3) 大塚博保他：安全運転態度検査SAS592の開発，科学警察研究所報告交通編，Vol.33, No.2，p.45-51 (1992)
- (4) French, D. J. et al.: Decision-making style, driving style, and self-reported involvement in road traffic accidents, Ergonomics, Vol.36, No.6, p.627-644 (1993)

- (5) 日本産業衛生学会産業疲労研究会：産業疲労ハンドブック，労働基準調査会，p.396-410 (1988)
- (6) 平岡敏洋他：アンケートに基づく経路選択行動分析，自動車技術会学術講演会前刷集，No.106-01，p.5-8 (2001)
- (7) Sakaguchi, Y. et al.: Measuring and modeling of driver for detecting unusual behavior for driving assistance, Proceedings of 18th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles, No.456 (2003)

著者



石橋基範



大乗政幸



赤松幹之

論文・解説

30

座圧変化に基づくドライバの疲労推定

Estimation of Driver's Fatigue

Based on Change in Body Pressure Distribution

古 郡 了*¹ 三 浦 泰 彦*² 吉 澤 公 理*³

Satoru Furugori Yasuhiko Miura Norimichi Yoshizawa

稲 目 力*⁴

Chikara Iname

要 約

長時間運転における疲労は、運転者の判断や行動に影響を与え、運転者の安全な運転を阻害するものである。疲労しても運転する機会が日常生活の中に頻繁にみられ、運転中の疲労を判定し、それに基づいて運転支援する技術が重要になってきている。そこで、疲労時に見られる姿勢変化や体動に着目し、それらを座圧センサで検出し疲労を推定する方法を検討してきた。まず、多人数の座圧変化のデータを蓄積し、疲労時の座圧変化の特徴と個人差について理解した。その結果に基づき、座圧変化から個人差を考慮して疲労を推定するアルゴリズムを開発した。

Summary

Fatigue due to long driving time will influence driver's judgment and driving behaviors, which makes it difficult for a driver to drive safely. The need for car driving often arises even under a fatigue condition in daily life, therefore a technique of determining the driver's fatigue and giving driving support based on the driver's fatigue is very important. We focused attention on changes in the posture and body movement of the driver at fatigue, and examined a method of estimating the fatigue by detecting them with body pressure sensors. First, we accumulated the data of the changes in body pressures of many people, and grasped these characteristics at fatigue and the individual variation. Based on the results, we developed an algorithm of estimating the fatigue from the changes in the body pressures in consideration of the individual variation. This paper introduces the estimation of driver's fatigue based on changes in body pressure distribution.

1. はじめに

長時間運転における疲労は、運転者の判断や行動に悪影響を与え、運転者の安全な運転を阻害するものと考えられる。視認性や操作性向上などの運転負担の軽減や、身体の支持を適切にするシート⁽¹⁾など、疲労に影響を与える車両要因を特定し、それを除去する疲労軽減を図ってきた。しかし、長距離長時間運転を余儀なくされる帰省ラッシュなど、疲労しても運転する状況は日常生活の中で頻繁に見られ、疲労した状態に応じて疲労の軽減のさせ方を変えたり、運転の支援の方法を変えたりするといった考え方が必要である。そこで、運転中の疲労状態に適合した運転支援を実現するために、疲労状態をリアルタイムに推定する技術が重要となる。

運転中に疲労すると、ハンドル、ペダルなどの運転操作は緩慢になる一方で、姿勢の変化や身体の動きなどの副次動作が増えることが知られている⁽²⁾⁽³⁾。これらの現象を用いての疲労状態を推定する技術には、ハンドル操作⁽⁴⁾、カメラによる顔画像⁽⁵⁾、音声⁽⁶⁾などをセンシングし推定する技術などが開発されているが、運転者への負荷、利用できる運転場面が制限される等の理由から実用化に至っていない。そこで、運転者に負荷を与えず、あらゆる運転場面に適用できるセンシング方法として、運転時の姿勢変化等に起因する運転者と運転席間の座圧変化をセンシングして、疲労を推定する方法に着目した。しかし、疲労による姿勢変化などの現れ方は個人差が大きく、推定する技術の開発には多人数の疲労時の座圧変化データを蓄積し、それを理解しなければならない。

*1~4 技術研究所
Technical Research Center

そこで(独)産業技術総合研究所や自動車メーカーが参加する経済産業省の人間感覚適合型生活環境創出システム技術プロジェクトに参加し、蓄積したデータから人間の行動を理解し、人に適合した支援を行う技術として、運転時疲労状態評価技術の開発を1999年11月より2004年3月までの5年間行ってきた。

ここでは、長時間運転時の座圧変化の特徴と、個人差を考慮して座圧変化から疲労を推定する方法について述べる。

2. 疲労時の座圧変化

2.1 実験方法

疲労時の座圧変化の様子や個人差を把握するために、2時間の運転模擬作業を行った時の、体圧分布の変化を計測する被験者実験を実施した。実験は開発した運転操作課題生成装置 (Fig.1) で行い、シート高は一般的なミニバンタイプに設定し、シートの前後方向とシートバックの傾きについては被験者の運転しやすい姿勢に調整した。被験者は日常的に自動車を運転するAM50%ileの男性10名(年齢: 22~37歳, 身長±標準偏差: 172.9±0.9cm)であった。運転模擬作業はFig.2に示す画面を見て、前走車両が大きくなったり、小さくなったりないようにアクセルとブレーキで制御することと、左右に外れないようにハンドルで制御する作業である。実験は同一被験者につき2回行い、実験時間帯を揃えることにより、個人内での日リズムの影響は排除した。また、10名中5名は午前、残り5名は午後

に実験を行った。



Fig.1 Driving Operation Task Creation Simulator



Fig.2 Picture of Driving Operation Task

グ周波数2Hzで計測した。本センサは、440mm×480mmで厚さ0.1mmのフィルム状になっており、10mm間隔で格子状にセンサが配置されている。長時間計測でフィルム状センサに皺がつきにくいように表面加工をし、クリープ現象(時間経過とともに出力が大きくなる)が少なくなるような感圧導電インクの採用など、長時間の体圧分布の変化が計測できるように改良した。

心理評価は運転開始時と終了時を含む10分おきに、全体の疲労感について7点法(まったくない: 1点, やや疲労を感じる: 3点, かなり疲労を感じる: 5点, 非常に疲労を感じる: 7点)で答えてもらった。

2.2 実験結果

運転開始10分経過後の体圧分布と、120分経過後の体圧分布を比較した。その結果、シートバック上部の圧力が減少する人と増加する人がいることが分かった。上部の圧力が減少した人は、肩や背の上部が座席から離れて猫背になったと考えられる。一方、上部の圧力が増加した人は肩や背の上部を座席に押し付ける反り返り姿勢になったと考えられる。猫背になった人と反り返り姿勢になった人の、シートバックの体圧分布の代表的パターンをFig.3に示す。図中の印は荷重中心位置を示し、猫背になる人は荷重中心位置が下方へ移動し、反り返り姿勢になる人は上方へ移動する傾向がある。Fig.4に猫背姿勢になる人の荷重中心位置の時間変化と近似直線を示す。荷重中心位置の時間変化には、棘状の波形が見られ、長時間の姿勢変化だけでなく、座り直しなどの瞬間的な体動も反映されていることが分かった。そこでまず、荷重中心位置の上下方向の時間変化を計算し、その近似移動量(単位時間あたりの移動量で、近似直線の勾配として算出し移動方向を正負で示す)で猫背姿勢傾向か反り返り姿勢方向を判定することにした。Fig.5には全実験(20ケース)の近似移動量を示す。20ケース中、近似移動量が負になる12ケースが猫背方向に変化すると判定された。次に、座り直しなどの副次動作が増加しているかどうか確認するために、5次近似式で荷重中心位置の基線成分を算出し、元波形から基線成分を取り除いた瞬間的変動成分を600秒ごとに加算し、その時間変化を

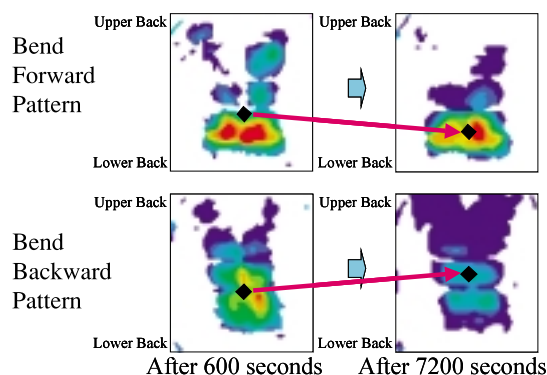


Fig.3 Change of Body Pressure Distribution of Seat Back

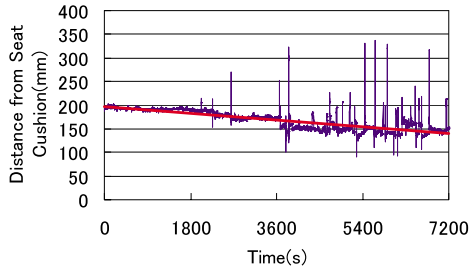


Fig.4 Change of Load Center Position (LCP)

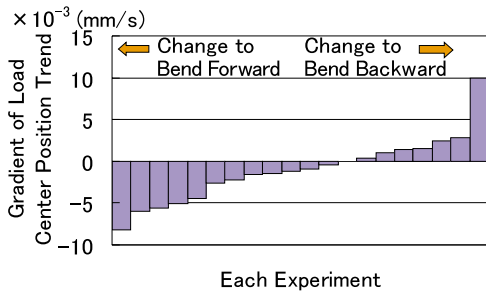


Fig.5 Amount of Approximation Movements

検討した。瞬間的変動成分の時間変化と近似直線の例を Fig.6に示す。Fig.6のように座り直し量が時間経過に対して有意に増加 ($p < .05$) したケースは、20ケース中9ケースあり、有意な減少をしたケースはなかった。残りの11ケースは有意な変化が見られず、従来から言われているような座り直しなどの副次動作の増加が、必ずしも全ての人に現れる現象ではないことが分かった。

次に、姿勢変化、座り直し量変化と疲労感の変化の関係を検討した。Fig.7は、姿勢変化として荷重中心位置の近似移動量をX軸、座り直し量変化として瞬間的変動成分に対する近似直線の勾配をY軸にとり、全実験データをマッピングした図である。図内の色数字は、2時間の実験における疲労感変化の大きさ(最大値 最小値)を示している。青字で示した実験を除いて、姿勢変化または座り直し量変

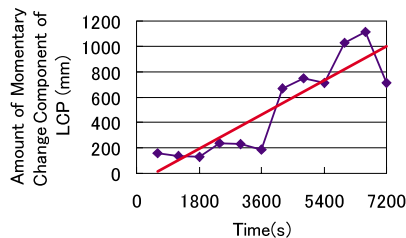


Fig.6 Momentary Change Component of LCP

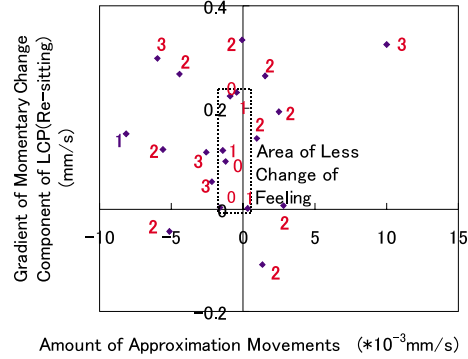


Fig.7 Relation between LCP and Subjective Fatigue

化のどちらかが大きい実験では、疲労感の変化が2または3と大きいことが分かった。

最後に、姿勢変化と座り直し量変化が個人内でどの程度保たれるのか検討を行った。2回の繰り返し実験における荷重中心位置の近似移動量の比較をFig.8に示す。Fig.8から、被験者F, H, Jを除いた7名において、姿勢変化の方向は2回の実験で同じであった。また、変化の大きさが小さい傾向の人(被験者C, D, H, I)と大きい傾向の人(被験者G)がいる一方で、2回の実験で大きさが異なった被験者(A, B, E, F, J)もいた。今回の実験からは、姿勢変化に関しては、個人特性がどの程度保たれるのかについては断定的なことは言えない。次に、2回の繰り返し実験における瞬時変動成分の総和の比較をFig.9に示す。Fig.9から、被験者D, Hを除いて瞬間的変動の総和は2回の繰り返し実験で近い値を示しており、座り直しの量についても、個人ごとに平均的なベースを持っており、疲労などの状態変化により変動しているものと考えられる。

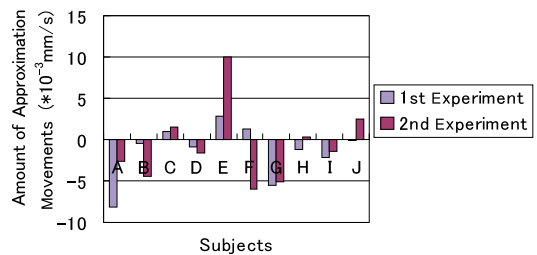


Fig.8 Comparison of Two Repeated Test (Posture)

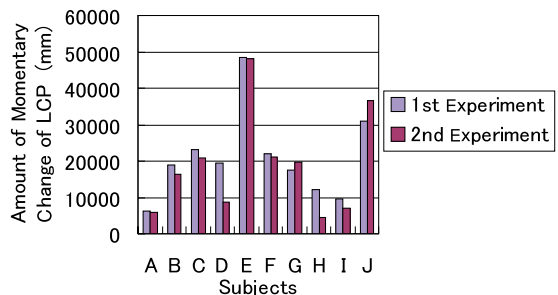


Fig.9 Comparison of Two Repeated Test (Re-sitting)

以上をまとめると、①体圧分布から得られる荷重中心位置の変化から、長時間の姿勢変化と瞬間的な座り直しの量が推定できる、②姿勢変化と座り直し量変化のどちらかが大きいと、疲労感の変化が大きくなる傾向がある、③姿勢変化には猫背姿勢になるケースと反り返り姿勢になるケースがある、④座り直し量の変化には、個人ごとに平均的なベースがある、ことが分かった。

3. 疲労推定アルゴリズムの開発

3.1 開発の方針

座圧から得られる荷重中心位置の変化に基づき、姿勢変化量と座り直し量を測定し、姿勢変化量と座り直し量から疲労感を推定するアルゴリズムを考える。個人ごとに、姿勢変化の方向や量が異なることや、疲労の徴候が姿勢変化に現れる人と座り直しに現れる人がいるなどの個人差を吸収するロバストなアルゴリズムにする必要がある。そこで、運転者個々の平常時の運転における荷重中心位置の変化の大きさと比較して、疲労を判定する手法の可能性を検討することにした。なお、将来の実用化を目指して、座圧センシングを少数の荷重センサを埋め込んで違和感をなくした市販シートで計測できるようにする。

3.2 着座接触圧力計測装置の開発

標準的な市販セダンタイプの運転席シートに、センサの違和感や異物感がないようにシートウレタン部に取り付け穴をあけ、シートバックに8個、シート座面に8個の歪式ゲージセンサ（直径12mm×高さ5mm）を埋め込んだ。センサ位置は、左右対称となるようにし、センササンプリングレンジはシートバックを5N、シート座面を20Nとした。Fig.10に着座接触圧力計測装置の外観を示す。埋め込んだセンサの位置にはマーキングした。本装置は12VDC電源で駆動でき、アンプを介して±5Vの信号をデータロガーに取り込むことができる。

3.3 実験方法

平常時の運転と疲労時の運転における座圧変化を収集するために、開発した着座接触圧力計測装置を運転操作課題生成装置上に搭載し、1セッション2時間の運転模擬作業を午前1回（セッション1）、午後2回（セッション2, 3）の3セッション行った。セッション1の前には、運転タスクに慣れさせるための練習を実施し、セッション1と2の間は昼食を含む45分の休憩、セッション2と3の間は10分のトイレ休憩をとった。また、被験者に事前に「長時間運転したとき、どのくらいの時間で休憩をとるか」を聞き、各個人が申告した休憩をとるまでの時間を平常運転時間とし、セッション1のデータのうち平常運転時間までのデータを平常運転データとした。セッション2と3は、平常運転データに対し、座圧変化が逸脱しているかにより疲労感を推定するための評価用データとした。

被験者は身長が大きく異なる男女とした。運転免許取得

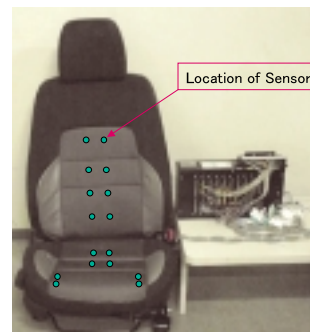


Fig.10 Body Pressure Measuring Seat

後3年以上経過した男女12名とし、体格の内訳は、145～154cm女性3名、155～164cm女性3名、165～174cm男性3名、175～184cm男性3名とした。また、年に1回以上、一日3時間以上または走行距離300km以上の長時間運転をする人とした。同一の被験者に施す2回の実験は、疲労の影響を排除するため、3週間あけた2日間で行った。

運転模擬作業は、市販の自動車運転ゲームソフトを使用し、ハンドルとペダルで制御することによりオーバルコースを反時計回りに周回する作業で、1回目と2回目では作業負荷を若干変えている。

着座接触圧力をサンプリング周波数5Hzで計測し、被験者には疲労感を100点法で10分おきに答えてもらった。また、荷重中心位置の変化が、目で見える姿勢変化と対応していることを確認するために、運転姿勢を3台のカメラで撮影し、右側面の肩位置、ヒップポイント、膝位置の3次元座標が解析できるようにした。

3.4 実験結果

シートバック8ヶ所の着座接触圧力から上下方向の荷重中心位置を、シート座面8ヶ所の着座接触圧力から前後方向の荷重中心位置を計算した。原点をシートバックとシート座面の交点とし、シートバック上部方向、シート座面前部方向が正になるように座標を決めた。Fig.11にシートバックにおける1時間分の荷重中心位置の変化と600秒ごとの平均を示す。2章で述べた姿勢変化の指標である荷重中心位置の近似移動量の代替として600秒ごとの荷重中心位置の平均を、座り直し量の指標である瞬間的変動成分の近似直線勾配の代替として600秒ごとの荷重中心位置の標準偏差を算出し、それぞれ姿勢変化パラメータ、座り直しパラメータと定義した。以後、シートバックの姿勢変化パラメータ、座り直しパラメータを B_p 、 B_r 、シート座面の姿勢変化パラメータ、座り直しパラメータを C_p 、 C_r と表記する。

平常運転データにおける B_p 、 B_r 、 C_p 、 C_r の平常運転時間までの値の最大値から最小値をそれぞれ差し引いた値を、各パラメータの平常パラメータ範囲と定義した。全実験（24ケース）の B_p と C_p 、 B_r と C_r の平常パラメータ範囲

の散布図にセッション2, 3の2時間経過後のパラメータ範囲を重ね書きしたマップをFig.12に示す。外れ値が数ヶ所あるものの、平常パラメータ範囲は赤枠内に収まっているのに対し、セッション2と3はばらつきが大きくなっていることが分かる。

パラメータ範囲は、運転開始から計測時点での各パラメータ値の最大値から最小値を差し引いた値で600秒ごとに更新される。時間経過に伴い、パラメータ範囲算出に用いる対象データが増加するので、2時間経過後のパラメータ範囲が最大となり、運転開始から2時間経過後までのパラメータ範囲の推移は単調増加となっている。

各計測時点でのパラメータ範囲を平常パラメータ範囲で除し、各パラメータの疲労判定指数とする。Table 1に各パラメータの疲労判定指数と疲労感心理評価が有意相関だった件数を示す。セッション2, 3合わせて48回の実験のうちBp, Cp, Br, Crと有意な相関があったのは、それぞれ23回, 24回, 24回, 21回となり半数以下の推定数であった。2章で述べたように、姿勢変化と座り直し量のどちらかが大きいと疲労感が大きい傾向があるので、どのパラメータの一つでも大きくなったら疲労の徴候が現れていると考え、各パラメータの疲労判定指数の最大値と、疲労感心理評価との相関分析を行った (Table 1右列)。その結果、48回中29回に有意な相関が得られ、4つのパラメータの最大値による疲労判定指数が最も当てはまりがよく、これをMAX疲労判定指数と定義した。Fig.13にはMAX疲労判定指数算出のフローチャートを、Fig.14にMAX疲労判定指数による推定値と疲労感の実測値が適合し推定が成功した事例を示す。

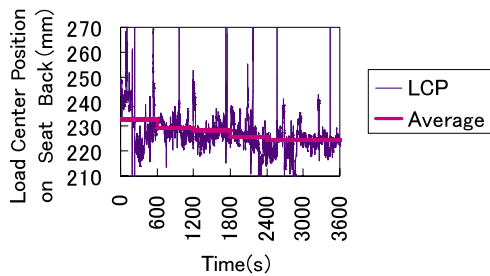


Fig.11 Change of LCP by Body Pressure Seat

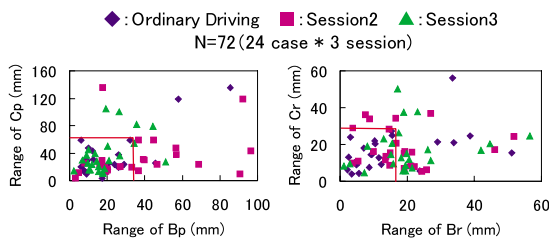


Fig.12 LCP Parameter Range of All Tests

次に、有意な相関が得られなかった事例の原因を把握するために、身長、性別の影響について検討した。Table 1のMAX疲労判定指数を見ると、セッション2, 3とも、165~174cmの男性は全実験で推定が成功しているが、それ以外の身長・性別では推定成功率が約50%であった。これは、座席の大きさが一定のために、ある身長範囲の人は座席全面で接触しているが、身長範囲以外だと接触していない位置のセンサが多くなり精度が悪化していることも原因の一つと考えられる。また、疲労とは関係なく座席への違和感が、姿勢変化や座り直しを誘発しているとも考えられる。

最後に、荷重中心位置の変化と姿勢変化の関係を確認した。3次元動作解析により、5分おきに肩、ヒップポイント、膝の座標を求めた。また、鉛直方向に対して肩とヒップポイントを結んだ線分がなす角度をトルソ角、水平方向に対して膝とヒップポイントを結んだ線分がなす角度をサイ角とし、それぞれの角度を算出した。荷重中心位置についても5分ごとに姿勢計測直前1分間の平均を算出し角度データとの相関分析を行った。また、3つのセッションは1連続データと考えてまとめて解析した。画像の計測ミス等を除き、24ケース中20ケースについて検討を行った。トルソ角とシ

Table 1 Number of Significant Correlations between Estimated Fatigue Index and Subjective Fatigue

| | Number of Panel | Number of Significant Correlation | | | | | MAX |
|----------|-----------------|-----------------------------------|----|----|----|----|-----|
| | | Bp | Br | Cp | Cr | | |
| Session2 | 145~154 Female | 6 | 3 | 2 | 2 | 1 | 2 |
| | 155~164 Female | 6 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| | 165~174 Male | 6 | 5 | 5 | 5 | 4 | 6 |
| | 175~184 Male | 6 | 1 | 2 | 2 | 2 | 3 |
| Session3 | 145~154 Female | 6 | 1 | 2 | 2 | 2 | 3 |
| | 155~164 Female | 6 | 2 | 2 | 4 | 3 | 3 |
| | 165~174 Male | 6 | 5 | 5 | 3 | 3 | 6 |
| | 175~184 Male | 6 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| Total | 48 | 23 | 24 | 24 | 21 | 29 | |

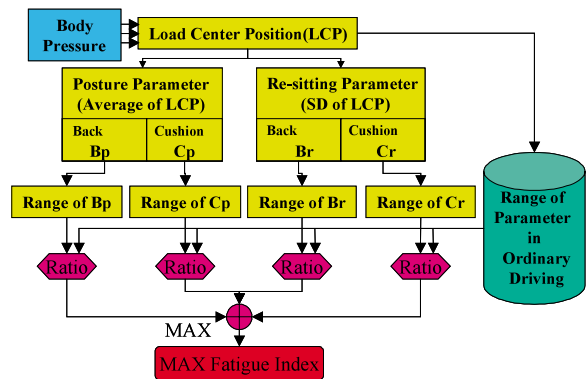


Fig.13 Flow Chart of MAX Fatigue Index Calculation

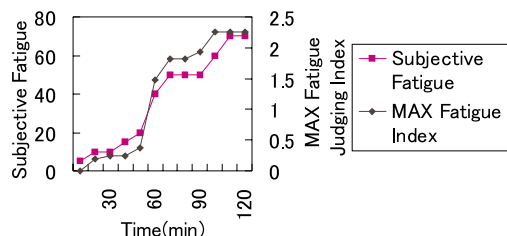


Fig.14 Estimation and Measuring Data

ートバックの荷重中心位置には20ケース中17ケースで有意な相関 ($p < .05$) があつた。また、サイ角とシート座面の荷重中心位置には20ケース中10ケースで有意な相関 ($p < .05$) があつた。サイ角と相関のなかつた10ケースについて詳細解析すると、サイ角は変化せず膝が車両前方に移動するために荷重中心位置が移動していることが分かつた。そこで膝の前後方向の移動量と荷重中心位置との相関分析を行うと、10ケース中7ケースで有意な相関 ($p < .05$) があつた。以上から、荷重中心位置の変化は目に見える姿勢の変化と対応していることが確認できた。

4. まとめ

運転疲労状態に適合させて運転支援を行うことは、より安全な運転を実現する上で重要である。そこで、運転中の疲労を運転者に負担を与えず推定する手法として、長時間運転時の座圧変化の特徴を明らかにし、座圧変化から疲労を推定する手法を開発した。

- (1) 体圧分布計を搭載した長時間運転模擬実験により体圧分布変化データを取得し、体圧分布から算出される荷重中心位置変化は、姿勢変化と座り直し変化を表していることが分かつた。また、疲労が姿勢変化に現れる場合と座り直しに現れる場合、姿勢変化の方向が猫背方向の場合と反り返り姿勢方向の場合などのケース差があることが分かつた。
- (2) 着座接触圧力センサを埋め込んだシートを用いて長時間運転模擬実験により着座接触圧変化データを取得し、取得データから荷重中心位置データを算出し疲労を推定するアルゴリズムを開発した。本アルゴリズムで、48ケース中29ケースで疲労が推定できることを確認した。それ以外のケースについては、推定できない原因特定が課題である。

今後、本アルゴリズムの実用化を進めていく上で、実走行時にも同様のアルゴリズムで疲労推定可能か検証することと、平常運転時データの蓄積方法、途中で運転者が変わった場合の推定などの使用性課題などが残っている。

なお、本研究は経済産業省の産業技術基盤研究開発プロジェクト「人間行動適合型生活環境創出システム技術」

として、(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) からの委託を受けて(社)人間生活工学研究センター (HQL) を通じて実施したものである。

参考文献

- (1) 沖山 他：シート快適性の追求，マツダ技報，No.20，p.154-162 (2002)
- (2) 長沢：人間の疲労度について，自動車技術，Vol.44，No.10，p.86-93 (1990)
- (3) 小林：自動車運転におけるヒューマン・ファクタ，自動車技術，Vol.39，No.5，p.493-500 (1985)
- (4) 中山 他：運転者負荷定量化手法「ステアリングエントロピー法」の開発，自動車技術会学術講演会前刷集，No.45-99，p.5-8 (1999)
- (5) 杉山 他：画像方式を用いたまばたき計測による意識低下検知，豊田中央研究所R&Dレビュー，Vol.31，No.2，p.51-60 (1996)
- (6) Shiomi K. : Fatigue and drowsiness predictor for pilots and air traffic controllers, 45th Annual ATCA conference (2000)

著者



古郡 了



三浦泰彦



吉澤公理



稲目 力

論文・解説

31

X線CTスキャナの導入と活用事例の紹介

Introduction of X-Rays CT Scanner and Application Examples

三宅 智史*¹ 村田 充*² 吉田 隆博*³
Tomofumi Miyake Mitsuru Murata Takahiro Yoshida
下山 英昭*⁴ 藤井 博司*⁵ 山下 耕司*⁶
Hideaki Shimoyama Hiroshi Fujii Kouji Yamashita

要 約

マツダでは、MDI (Mazda Digital Innovation) 計画の展開により、3D-CADデータに基づく商品開発が数年前から定着している。試作部門においても3D-CADデータをもとに短期間で試作部品を作り、その品質を瞬時に把握し、設計や製作工程の不良要因の特定を迅速に行うことで品質向上を図っている。

従来から試作鋳造品の品質検査は手作業による直接計測が主で、時間短縮と計測精度の向上が課題であった。また内部形状と鋳造欠陥の検査には必ず切断が必要であり、時間短縮と非破壊での内部品質の保証が大きな課題であった。これらに対し最適なツールとしてX線CT (Computed Tomography) スキャナに着目し導入した。従来から非接触非破壊で断層像を得るCTスキャナ技術はあったが、本装置の最大の特徴である高速連続撮影機能及び、製品内外部を高精度で計測し瞬時に立体画像化する機能は、業界初の技術といえる。

本装置を試作鋳造領域に活用した結果、(1)鋳造品の検査期間短縮、(2)鋳造品の確実な品質保証、を実現した。本稿ではX線CTスキャナの導入目的・装置概要・活用事例について報告する。

Summary

Mazda started to implement product development based on 3D CAD data by MDI (Mazda Digital Innovation) plan several years ago. Prototype Fabrication Dept. has been achieving quality improvement with 3D CAD data by fabricating prototype parts, grasping their quality, and diagnosing the cause of defects of an engineering or production process in a short period.

Our conventional quality inspection, which usually used manual direct measurement, had problems such as time-consuming measurement and low measurement accuracy. In particular, it was difficult to realize shorter prototype periods and positive quality assurance of proper internal shapes and no casting defects, because the quality inspection of the internal shapes of casting parts and the casting defect examination always require cutting inspection. In order to address these problems, we, having focused on X-rays CT (Computed Tomography) scanners that can take a single tomogram without destruction and contact as optimum tools have adopted the scanner this time. Our scanner is capable of high-speed serial radiography, highly precise measurement of product inside and outside, and prompt 3D image production, which has enabled us to be the first to have practicable CT scanner technology in the auto industry though the CT technology itself is previously known.

The result of the utilization of this scanner in a prototype casting area has made us achieve the following: (1) Shorter inspection period for prototype casting parts (2) Positive quality assurance of prototype casting parts. This paper makes a report of purpose of adoption and outline of the X-rays CT scanner and application examples.

*1~4, 6 試作部
Prototype Fabrication Dept.

*5 プロセスリエンジニアリング部
Process Re-Engineering Dept.

1. はじめに

マツダではMDI計画の展開により、3D-CADデータを活用した商品開発が定着している。試作鑄造工程においても3D-CADデータを活用した「試作期間短縮」と「試作品質の向上」が急務となっている。これまで製造条件設定・木型製作・鑄造の各工程では、これらを実現させるべく種々の工程革新を行ってきた。具体的には、最適な鑄造条件を効率よく得るための「鑄造CAEシステム」、また木型製作期間短縮のために「3D-CADシステム(I-DEAS)」「高速NCフライス」、鑄造品質安定化として「自動注湯マシン」がある。

一方、品質保証の要となる試作鑄造検査工程では従来からのハイトゲージを使った手作業による外観寸法検査と切断による内部品質確認を行っており、検査期間短縮と品質保証の充実が試作鑄造MDI計画の残課題であった。

この課題に対する最適な検査装置としてX線CTスキャナを導入し検査工程の革新に取り組んだ。以下にその概要と活用事例を報告する。

2. X線CTスキャナの導入目的

2.1 検査工程の革新

(1) 従来工程の課題

鑄造品の検査は、木型及び製造条件が図面要求を満足しているかを検証するトライアル鑄造検査と本生産時の払い出し検査となっている。

エンジンの中でも代表的な鑄造部品であるシリンダブロックを例に説明する。検査項目の主なものとして形状寸法・鑄造欠陥・機械的性質・気密性等があるが、中でも特に重要な内外形状と鑄造欠陥の検査について述べる。

Fig.1にトライアル鑄造検査の手順を示す。

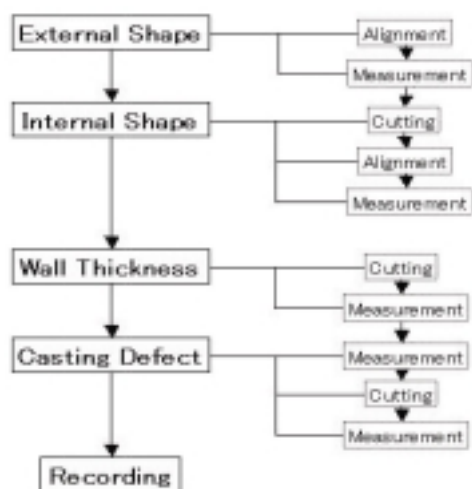


Fig.1 Inspection Process

シリンダブロックの検査部位は外部から目視できる外観形状と切断しないと目視できない内部形状に分けられる

(Fig.2)。検査手順は最初に外観形状検査を行い、次に内部を切断しながら形状・肉厚と鑄造欠陥の検査を行う。

また、払い出し検査では、図面要求の基本的な管理特性を全数検査し、内部鑄造欠陥については抜き取りによる切断検査を行う。以下に具体的な検査作業と課題を述べる。

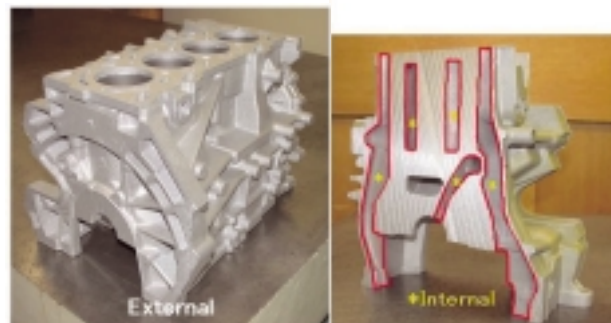


Fig.2 Shape of Block-Cylinder

1) 形状検査

二次元図面又は3D設計データからボス・リブ・フランジ等の形状要素と寸法値を読み取り、定盤とハイトゲージを用いて外観形状の検査（以下、野書）を行う。

次に内部形状は、設計図面に指示してある断面に従って切断し外観形状と同様の野書作業を行う（Fig.3）。しかし、鑄造品には凝固収縮時に残留応力を発生していることが多く、切断と同時に応力が開放され断面形状が変形し切断前の形状どおりに検査できない問題があり、非破壊検査の実現が課題であった。また設計図面の寸法読み取りから野書作業までの全てを手作業で行っているため、検査時間が非常に長く、ヒューマンエラーによる誤検査もあり、検査の自動化が課題であった。

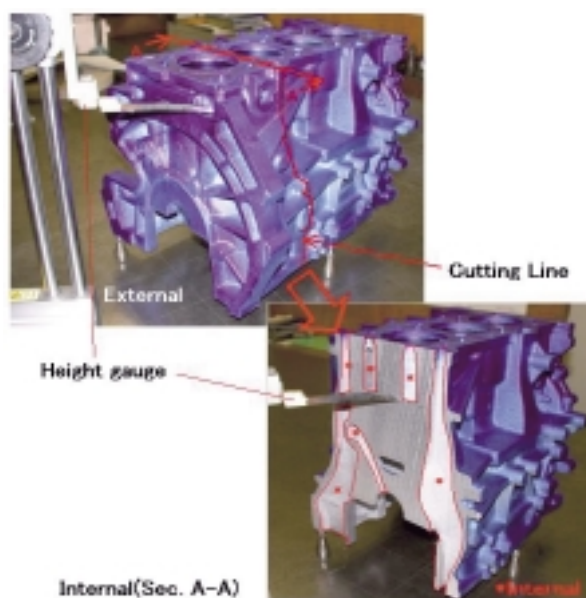


Fig.3 Inspection of Block-Cylinder

2) 鋳造欠陥検査

鋳造品を切断し、断面を目視することで鋳造欠陥検査を行っていた。しかし、この方法では全ての部位の確認には時間がかかり過ぎるため、代表的な断面しか検査することができず、全部位の内部品質保証を行うことが課題であった。Fig.4に同一鋳造品の切断断面を更に2mm削ることで鋳造欠陥が出現した例を示す。また、払い出し検査では抜き取りの切断検査であったため、後工程である機械加工後に鋳造欠陥が発見され不良品が発生する問題もあった。

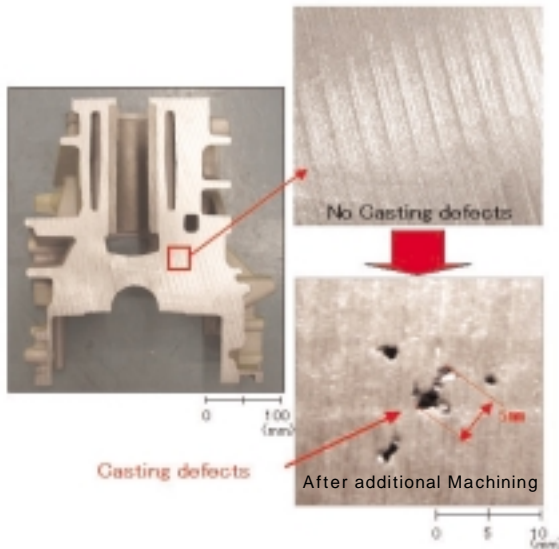


Fig.4 Casting Defect

以上のことから、従来の検査工程の問題点をまとめると次の2点となる。

- ① 検査期間が長い
- ② 品質保証範囲が不十分

(2) 革新工程とツール

検査工程の革新として検査期間を短縮するとともに、後工程に不良品を流出させないように確実な品質保証を行うことを目標とした。そのための具体的な要件は以下の5つである。

- ① 手作業野書及び切断作業を廃止し3Dデータをフル活用した検査の自動化の実現
- ② 砂型造型などの工程ごとの品質保証の強化
- ③ トライアル鋳造段階での品質ばらつきも加味した品質保証と作りこみ
- ④ 非破壊によって内部品質を保証した上での後工程払い出しの実現
- ⑤ 検査結果をデジタルデータとして管理し関係者閲覧を可能にする

これらを受けて、測定機に求められる要件を検討した結果以下の3つとなった。

- ① 非破壊での形状計測が可能
- ② 自動機による高速形状計測が可能
- ③ 3D-CADデータを用いた検査が可能

その最適なツールとして「X線CTスキャナ」を選択した。

2.2 試作鋳造検査への適用

トライアル鋳造段階では意図的に製造条件を変化させた鋳造品を作り、品質のばらつきも考慮した品質保証を行う。また払い出し検査ではトライアル鋳造段階の品質結果を加味して寸法や鋳造欠陥検査を実施し、確実な品質保証を実現させる。そのためには従来に比べ検査ボリュームは増加するが、CTスキャナの高速撮影能力により大幅に短い期間で品質保証を実現させることができた。

2.3 試作鋳造工程への適用

鋳造品完成までには木型・砂型・鋳造品と数回の形状転写工程があり、そのたびに転写誤差が発生している。従来は最終の鋳造品検査工程のみで良否判定を行っており、工程ごとの品質把握が不足していたため、不具合の起因工程を特定できなかった。特に砂型造型工程やそれを組み合わせるアッセンブリ工程では外部からの計測が困難であり、工程内の品質把握が課題であった。

そこでX線CTスキャナを活用し、従来未保証の項目を工程内で品質把握できるように変革した。具体的には砂型では寸法・内部充填率、アッセンブリ工程では組み合わせ寸法を管理し、完成した鋳造品と製造工程との因果関係を解明することで、品質向上とコストダウンを実現した。

2.4 試作鋳造工程以外への適用

X線CTスキャナの特徴として、非破壊・非接触による立体形状計測と内部密度計測がある。この機能を活かし、開発領域では熱・応力等の解析用3Dモデルの作成や市場不具合品・実験評価品の内部調査に適用する。また生産領域では試作鋳造と同様に量産準備段階の鋳造品育成に適用し、業務効率と品質向上を目指す。

3. X線CTスキャナの概要

3.1 X線CTスキャナの原理

X線CTスキャナは、X線が物質を透過する性質を利用して被検体を透過したX線透過量の差異を検出することで密度分布を計測する技術である。透過量は、X線の強度・物質の構成元素・密度・透過厚さにより異なる。導入したX線CTスキャナは、X線を発生させるX線源装置と透過量を検出するX線検出装置の間に測定物を回転させるスキャナ装置が配置され、測定物が360°回転した際の透過量データに画像処理演算を施すことで断層像が生成される。実際の断層像ではX線が通りにくい鉄のような部位は白くX線が通りやすい空気などは黒く表示される。システム図をFig.5、ターボチャージャの断層画像をFig.6に示す。

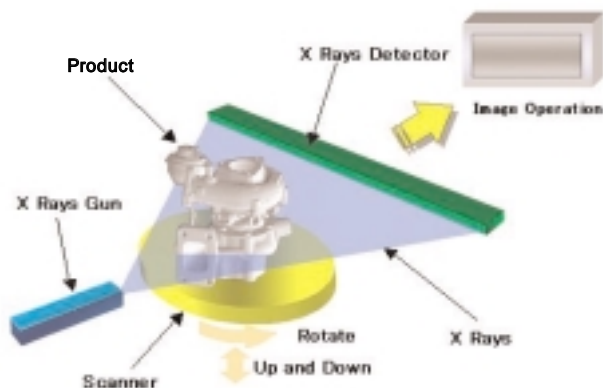


Fig.5 Principle of CT Scanning Machine

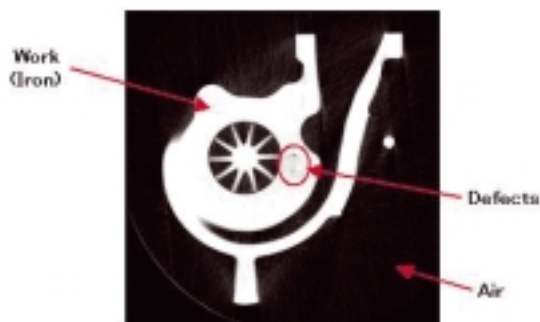


Fig.6 CT Image for Section

3.2 各装置と仕様

X線CTスキャナは、5つの装置から構成されており、各機能を以下に述べる。X線遮蔽コンテナの扉側からの外観をFig.7に示す。

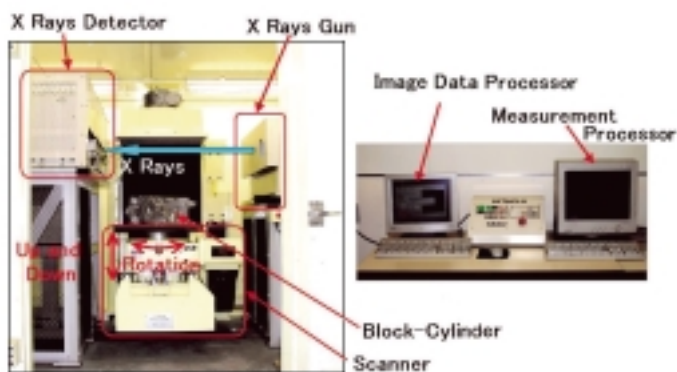


Fig.7 Outside View of CT Scanning Machine

(1) X線源装置 (X Rays Gun)

鮮明な画像を得るために、高出力X線源として電子線形加速器を使用しており、X線形状広がり 40° の扇状ビームである。

(2) X線検出装置 (X Rays Detector)

測定物を通過したX線透過強度を数百個のセンサーで検出する。

(3) スキャナ装置 (Scanner)

測定物を回転及び昇降させて断層位置と位相を制御する。

(4) 画像処理装置 (Image Data Processor)

検出器からの出力データにスキャナ装置の回転角度を加味して画像処理演算を施し、断層像を生成する。

(5) 形状計測装置 (Measurement Processor)

断層像を多数積層することで3Dデータを生成し、設計3Dデータを変換したSTL (Stereo Lithography) データと比較することで、内外部の形状と鑄造欠陥を自動計測する。X線CTスキャナの仕様をTable 1に示す。

また本設備の特徴として測定物のセット方法はターンテーブルの任意の位置に載せてクランプするだけで容易に行えるものであり、非常に短時間でセットが可能である。

Table1 Specification of CT Scanning Machine

| | |
|--------------------------------------|---|
| Max. Work Size | $\phi 600 \times 600$ Height mm 250kg |
| Precision of Dimension | ± 0.2 mm |
| Detective Capacity of Casting Defect | $\phi 1.5$ mm (Min.)---Automatic |
| Max. Size of X Ray Penetration | Iron: 130mm Aluminum: 340mm Plastic: 750mm |
| Measurement Time | 20sec./ 1 section |

4. 活用事例

4.1 鑄造品の形状検査

外觀形状はもちろんのこと、計測した3Dデータを任意の位置でスライスすることで、内部形状の計測も非破壊で非常に容易かつ短期間で行うことができた。シリンダブロックでの形状検査の出力結果をFig.8に示す。

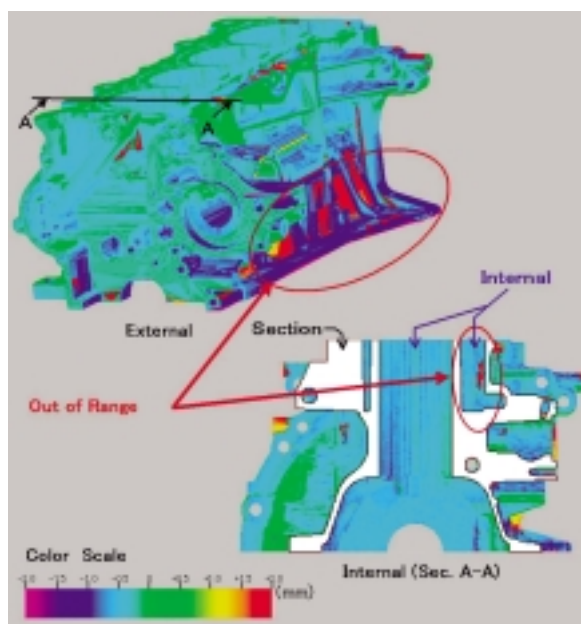


Fig.8 3D Measurement

立体形状全体で視覚的に表示できるため、形状不良の傾向が容易に把握でき、各工程関係者による不具合原因究明や対策決定の業務効率が大幅に向上した。また計測作業のほとんどが自動運転であり、他の検査との並行作業も可能となった。計測時間は従来法の約1/10であり、目標の検査期間短縮を達成した。外観計測の結果 (Fig.8) を見ると、右側下部がマイナス傾向になっており、右外側の砂鋳型が内側へ倒れる変形をしていることが分かる。また、断面A-A部でのCTデータのスライス結果も部分的に内部形状が砂型変形等により公差外れになっていることが分かる。

4.2 鋳造品の内部欠陥検出

設計3DデータとCTデータの差分比較することで、内部欠陥の発生位置と大きさが視覚的かつ容易に把握できるようになり業務効率も大幅に向上した。また鋳造方案の部位 (ゲート・押し湯等) も含めた計測も可能であり、鋳造方案と内部欠陥の関係も非破壊で把握できる。

排気マニホールドの内部欠陥検査の出力結果をFig.9に示す。内部欠陥の発生部位と大きさはCT立体像に赤色で表示されるため、部位と大きさが容易に把握できるようになった。また、欠陥部位のCT立体像をスライスすることで欠陥の内部状況も確認できる。実体品の同一断面を切断すると、同等の欠陥があることが分かる。

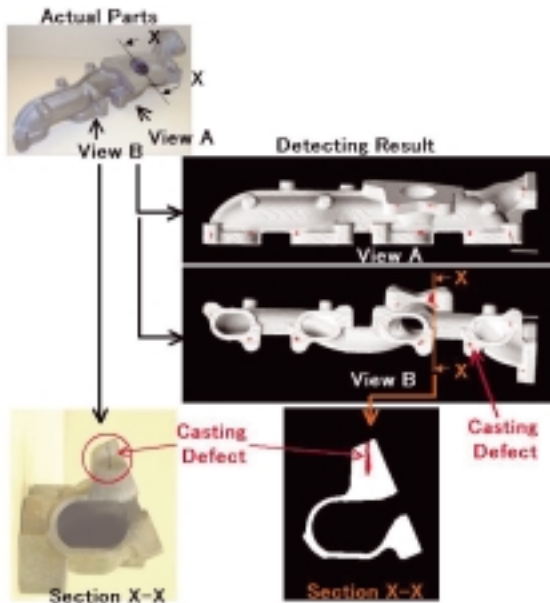


Fig.9 Detection of Casting Defects

4.3 試作鋳造工程内の品質確認

(1) 砂鋳型充填率

鋳造品質に影響する砂型の充填率把握は砂型から試験片を切り出しその重量で評価していた。そのため、測定部位が限定されることと、測定時間が長くなる問題があった。

しかし、X線CTスキャナによる密度評価機能を用いると、断層像をカラーマッピングすることで、従来法の約1/10

の時間で砂型全体の密度分布を色分けして視覚的に把握できる。また、密度評価後はその砂型を鋳造に使用可能であり、前もって砂型品質を把握した上で鋳造品の評価を行うことが可能となった。ディスクプレート砂型の充填率評価に適用した事例をFig.10に示す。緑色から青色へ変化するに従い低充填率であることを示しており、充填不良部位を容易に把握できる。この測定データは砂型造型CAEの条件設定と鋳造品質向上に活用している。

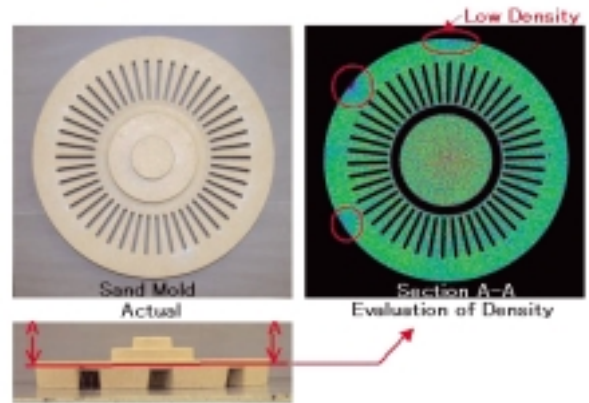


Fig.10 Density Inspection of Sand Mold

(2) 砂型のアッセンブリ状態確認

試作鋳造工程では、砂型を組み合わせその中に溶けた金属を流し込む鋳造工法を用いている。しかし、砂型は変形しやすい性質があり、組み合わせた時の内部クリアランスの保証が課題となっていた。主にトライアル鋳造段階では砂型を組み合わせた後の内部クリアランスを確認することで、確実な寸法品質の作りこみを実現させた。

シリンダヘッドの砂型アッセンブリ状態を評価した事例をFig.11に示す。8つの砂型から構成されており、製品の肉厚になる部位や砂型を固定する部位の寸法を確認した結果、A部分には隙間が生じ砂型の押さえ状態が悪くなっていることが容易に分かり、原因究明と修正を行った上で注湯工程へ流すことが可能となった。

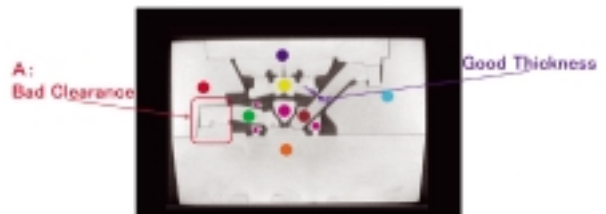


Fig.11 Clearance Inspection of Sand Package

4.4 解析用3Dモデルの作成 (試作以外への適用)

市場不具合品や衝突実験後のCADデータのない実体品にCAE解析やラピッドプロトタイプによる擬似品製作などを行うためには3Dモデルが必要である。従来は接触式の

多点計測を膨大な時間をかけて行っていた。また切断を伴う内部形状については測定データのずれが発生し、高精度の3Dデータを得ることが困難であった。よって短期間かつ非破壊での3Dモデル生成が課題となっていた。

シリンダブロックでのCAE構造解析へ適用した事例をFig.12に示す。実体品をX線CTスキャナで計測し3D化したCTデータをSTLデータに変換し構造解析を行った。従来はシリンダブロック程度の複雑形状になるとCAE解析に使用可能なデータを作成するのに数ヶ月も要していたが、X線CTスキャナを用いると約1週間の短期間で実現することができ、開発効率を大幅に向上させた。

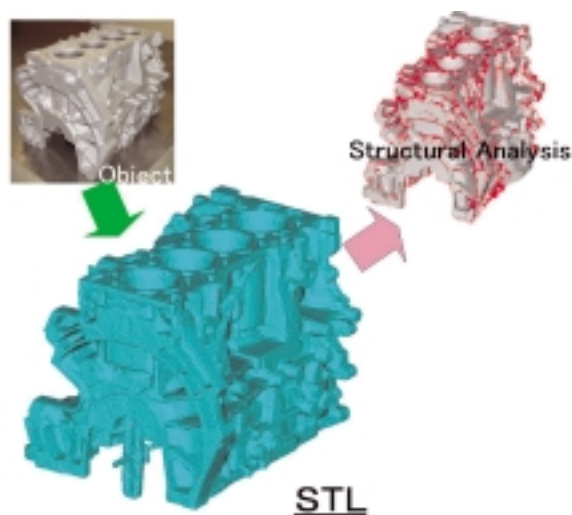


Fig.12 CAE Evaluation for Block-Cylinder

5. まとめ

以上、述べたようにX線CTスキャナを試作鋳造品の検査工程の革新に適用してきたが、以下にその効果をまとめる。

(1) 試作期間の短縮

X線CTスキャナの適用効果によりトライアル鋳造期間を従来の17日から13日に短縮することができた。本効果も含め、木型製作から鋳造品完成までのリードタイムを43日から22日に半減し、目標を達成することができた。Fig.13に試作期間短縮の内訳を示す。

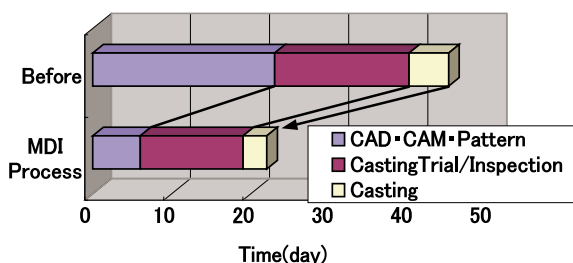


Fig.13 Innovation of Prototype Period

(2) 試作鋳造品の品質向上

鋳造工程内においてX線CTスキャナは各工程の有効な品質確認ツールとなり、それらの検査結果を冒頭で述べた鋳造CAEへフィードバックすることで、より高い精度の鋳造条件の設定ができるようになった。また、後工程への払い出し検査に活用して、後工程不良率を大幅に削減できた。

6. おわりに

鋳造業界の最大の悩みは内部品質の確認を非破壊状態で十分に行えないことであった。これを非破壊でかつ瞬時に品質確認できるようになったことはまさに、画期的なことであり、鋳造業界における品質保証革新といえる。試作鋳造領域のみならず、開発及び量産準備工程の中にもX線CTスキャナの適用を組み込み、業務効率向上に寄与させる考えである。最後に、X線CTスキャナの導入にあたりご尽力を頂いた株式会社日立製作所殿に敬意を表す。

参考文献

- (1) 原口恵次：産業用X線CTとそのデジタルエンジニアリングへの適用，日立評論，83巻，2号，p.55-56 (2001)

著者



三宅智史



村田 充



吉田隆博



下山英昭



藤井博司



山下耕司

論文・解説

32

CAEによる鋳造用鋳型設計条件の最適化 Optimization of Mold Design Parameter with CAE

垣田 健*¹ 堀 雄二*² 菅谷 智*³
 Takeshi Kakita Yuji Hori Satoshi Sugaya
 永田 亮平*⁴ 刀 祢英雄*⁶
 Ryohei Nagata Hideo Tone

要約

新型ロータリエンジン「RENESES」の基幹技術の一つである吸排気方式の変更に伴い、吸排気ポート位置精度向上が、高出力、低燃費であるエンジンを量産化するためのキー技術となった。そこで、吸排気ポートを有するサイドハウジングの寸法精度向上を狙い活動を行った。

本研究では、品質工学による網羅的なCAE解析を効率的に遂行し鋳型設計条件の最適化を行った結果、吸気ポート位置精度を60%向上することができたので報告する。

Summary

Novel exhaust port layout of a newly-developed rotary RENESES engine provides precise dimensions of intake and exhaust ports for its mass production, thus achieving high power and great fuel economy. These targets can be achieved by reducing the dimensional dispersion in casting side housing, including the intake and exhaust ports.

This paper reports that mold design parameters efficiently optimized with Taguchi method and CAE has achieved high precision - the dimensional dispersion in the intake port was reduced by 60%.

1. はじめに

本テーマの対象である新型ロータリエンジン「RENESES」の概要について述べる。ロータリエンジンはFig.1に示すように、ロータ、ロータハウジング、サイドハウジングなどの部品で構成されている。「RENESES」の基幹技術として、Fig.1に示すように従来のペリフェラル排気ポート方式からサイド排気ポート方式にしたことがあげられる⁽¹⁾。これにより、Fig.2に示すように、出力、燃費に悪影響を及ぼすオーバーラップを解消でき、高出力と低燃費を実現する。

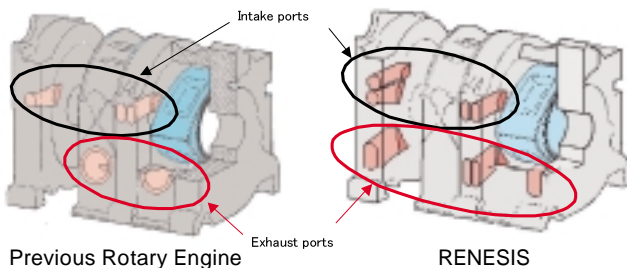


Fig.1 Exhaust Port

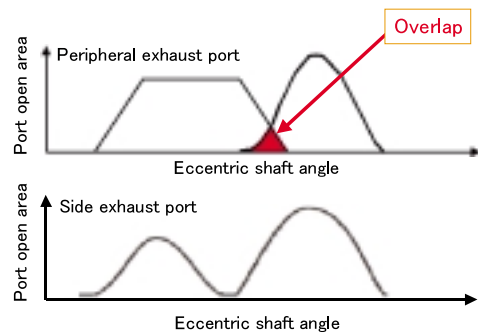


Fig.2 Port Open Area

ここで、吸排気ポートが設置されているのは、サイドハウジングという鋳造部品であり、以下に詳細を述べる。

2. サイドハウジングの生産上の課題

サイドハウジングは、Fig.3に示すように外形状を形成する主型に、中空部を形成する中子を組み付ける分割構造になっている。吸排気ポートも中子で形成され、これら中子の主型に対する位置ばらつきがFig.2に示す吸排気開口

*1~6 パワートレイン技術部
Powertrain Production Engineering Dept.

タイミングに影響してくる。このため、主型に対する吸排気ポート中子の位置ばらつき低減が非常に重要となる。これまで位置ばらつき低減に対して様々な活動を行い、主要因である鋳込み時の溶湯圧力や熱影響などに対して対策を織込んだ中子構造としており、現状の寸法精度を確保している。そこで今回は、他の要因と考えられる実際の鋳造工程における4M (Man, Machine, Material, Method) の誤差に対するロバスト性を高め、更なる寸法精度向上を図った。これは「RENESES」の高出力、低燃費の量産化には不可欠である。今回は、吸気ポートの位置ばらつきをこれまでの1/2まで低減することを目標に活動を行った。

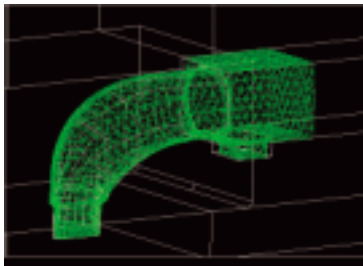


Fig.3 Mold of Intake Port

3. 位置ばらつき低減へのアプローチ

3.1 アプローチ

中子の位置ばらつきは、中子のセットの仕方、中子や主型の寸法、熱膨張などの物理的特性、鋳込み時に鋳型に加わる溶湯の浮力などのばらつきが積み重なり発生する。つまり、これら4Mの誤差に対して安定性の高い鋳型設計が必要となる。この実現のために品質工学の手法であるパラメータ設計を用いて鋳型設計を行った。

3.2 パラメータ設計

パラメータ設計とは、誤差の影響を受けにくい設計を実現する手法である。具体的には、まず目的となる特性の目標を設定(目的機能の設定)する。次に目的機能に影響する因子において、設計者が制御できる制御因子と、制御が困難な4Mといった誤差因子を設定し、制御因子を直交表に割り付け実験を行う。この際、誤差条件下での実験を行うため誤差条件の数だけ実験が増えることになる。目的機能に対する実験の出力のばらつき度をSN比という尺度を用いて評価した。

3.3 実験方法

この実験計画を行うにあたり、実体を使う実験とCAE解析とが考えられる。現在、自動車鋳造部品では商品の多様化、短サイクル化の流れから、量産準備期間短縮がもめられており、その中では、実体による実験は工数、コストがかかり、実用的とはいえない。更に、鋳造工程の4M誤差を網羅的に含ませた実験を行うには、CAEによる効率的な解析が妥当と判断した。

CAEには構造解析ソフトI-DEASを利用した。この解析ソフトは鋳込み時に鋳型へ加わる溶湯の熱影響や応力をパラメータとして入力することが可能であり、実プロセスに近い鋳造時の中子挙動のシミュレートができる。

4. パラメータ設計の実験計画

4.1 目的機能と評価方法

吸気ポート部分の鋳型寸法と鋳造後の製品寸法が比例関係になることが理想状態と考え、目的機能は転写性 $y = M$ (Fig.4)で評価した。理想的な転写とは、製品を形成する鋳型寸法(入力 M)と出来上がった製品寸法(出力 y)が一致することであり、大小様々な寸法をプロットすると両者の関係はFig.4のような原点を通る直線になる。

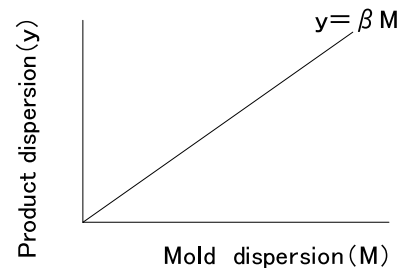


Fig.4 Purpose State of Transcript

評価方法としては、直交表の各実験ごとに誤差条件での直線関係からの隔たりをSN比で計算した⁽²⁾。

4.2 信号因子と水準

信号因子は、吸気ポートで位置精度が重要な部位の寸法とした。モデルの座標に位置精度が重要な部位を当てはめて13ヶ所のポイントの総組み合わせである78寸法を水準とし、解析データから読み取った。

4.3 制御因子と水準

制御因子は、鋳型製作から鋳込みまでの工程全体を通して、位置精度に大きく影響すると考えられる鋳型構造と設計寸法、鋳込み方案、鋳造の熱影響の中から8因子 (Fig.5)を抽出した。Table 1に制御因子の水準表を示す。この8因子をL18直交表に割り付け実験を行った。

Table 1 Control Factors and Level

| | Control factor | Level value | | |
|---|--|-------------|--------|---------|
| | | 1 | 2 | 3 |
| A | Young ratio of mold and core | Small | Normal | Large |
| B | Thermal expansion coefficient of mold and core | Large | Normal | Small |
| C | Position of center of gravity | Inside | Normal | Outside |
| D | Volume of core print | Small | Normal | Large |
| E | Dowel length of core print | Short | Normal | Long |
| F | Side clearance | Large | Normal | Small |
| G | Height clearance | Large | Normal | Small |
| H | Mold direction | Side | Lower | Upper |

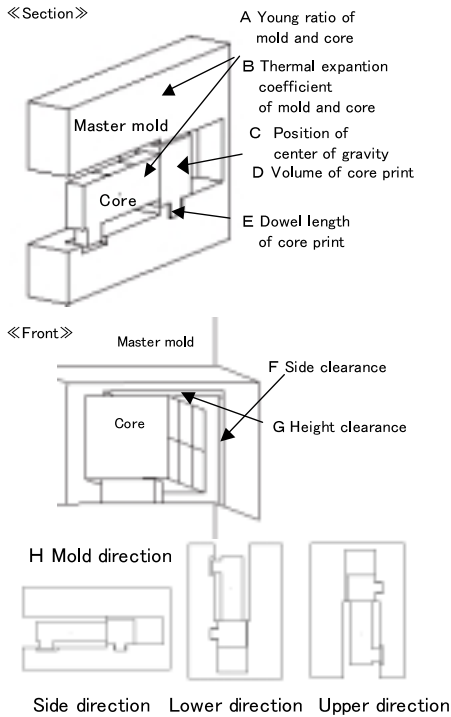


Fig.5 Influential 8 Factors on Dimension Dispersion

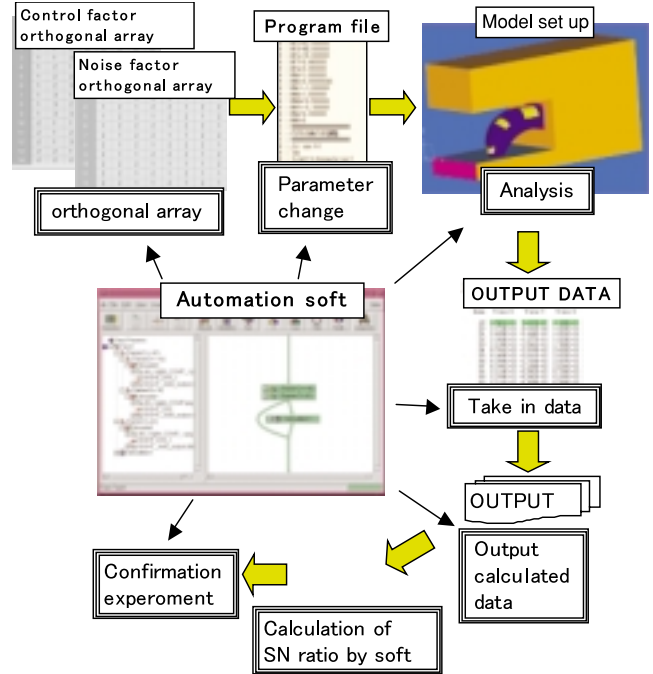


Fig.6 Automatic Analysis System Flow

4.4 誤差因子と水準

鑄造工程の4Mの誤差を網羅的に含ませた実験を行い、あらゆる条件に対するロバストな鑄型設計を追求するために、制御因子そのものを誤差としてパラメータ設計を行うこととした。つまり、制御因子をある水準に設定し設計しても製造時のばらつきや量産後の劣化などの誤差を含んでおり、これらに対するロバスト性を確保することが量産後の寸法精度の維持管理に重要であると考えた。

今回の実験では、各制御因子で考えられるばらつき幅をL12直交表に+/-側の2水準で割り付けた。Table 2に誤差因子の水準を示す。制御因子の狙い値からばらつき幅を+/-していることを示している。

Table 2 Noise Factors and Level

| Noise factor | | Level value | |
|--------------|--|-------------|---|
| A | Young ratio of mold and core | 1 | 2 |
| B | Thermal expansion coefficient of mold and core | + | - |
| C | Position of center of gravity | - | + |
| D | Volume of core print | - | + |
| E | Dowel length of core print | - | + |
| F | Side clearance | + | - |
| G | Height clearance | + | - |
| H | Mold direction | + | - |

5. 効率的な解析方法の開発

5.1 自動解析システム

今回の取り組みにおける直交表 L_{18} の外側に誤差因子の直交表 L_{12} を割り付けた直積実験では、合計234回(18 × 12 + 18)の実験回数が必要となる。

この直積実験では実験回数が多いため、条件入力やデータ解析を手作業で行うと多くの工数が必要となる。そこでI-DEASと最適化ソフト(I-SIGHT)とを連係させ、全実験を自動解析した。更に解析データからSN比を自動計算させるプログラムを開発し、全自動解析システムを構築した。このシステムにより、各パラメータの条件を入力するだけで、SN比まで自動計算させることが可能になり、解析時間をこれまでの約1/40まで短縮させることができる。システムのフローをFig.6に示す。

5.2 パラメータ検討用モデル

今回の取り組みでは、CAE解析とパラメータ設計の新しい手法としてパラメータ検討用モデルによる解析を行った。この解析の概念と効果を以下に述べる。

これまで品質工学実験では、テストピースで最適化を行い、その結果を製品の製造条件に反映させ工程の安定化を図ってきた。CAE解析においても、実物モデルの形状特性を踏まえたパラメータ検討用モデルによる最適化が可能と考えた。この手法の一番の効果は、実物モデル設計の前段階でパラメータ検討用モデルにより最適化して、その結果を実物モデルの初期設計に織込むことにより、Fig.7のワークフローに示すように実物モデルの解析や設計変更に伴う型修正などが削減でき、実物モデル設計から型完成までの期間が大幅に短縮できるという点である。

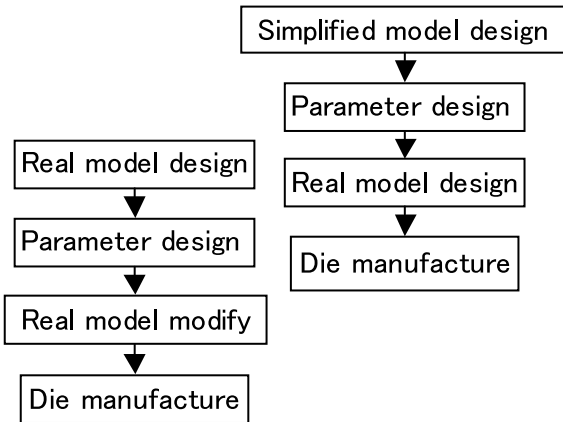


Fig.7 Die Manufacture Flow

パラメータ検討用モデルはFig.8に示すように、吸気ポートの曲面形状を排除して、四角柱を組み合わせたメッシュの粗い単純なモデルとした。このパラメータ検討用モデルは、中子や巾木の重心の位置関係や体積比は変更がないように設計した。なお、このモデルの付随効果として、解析時間を実物モデルの1/3まで短縮でき、全自動解析システムと合わせると1/120まで短縮できる点があげられる。

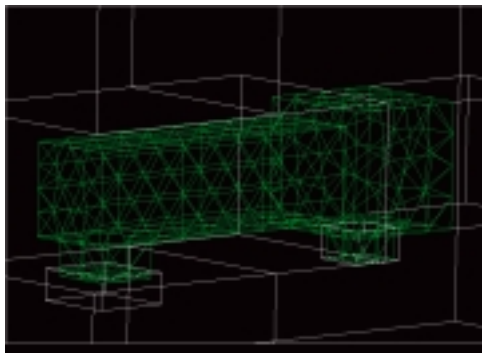


Fig.8 Model for Parameter Study

上記のようにメリットの大きいパラメータ検討用モデルの妥当性を確認するために、得られた最適条件を実物モデルにもあてはめ、利得の再現性を確認することにした。

6. 解析結果

各実験ごとのシミュレーション結果により求めたSN比の水準別平均値をTable 3に、要因効果図をFig.9に示す。

SN比の値が大きい水準はばらつきが小さくなることを表しており、この結果から最適条件の組み合わせを決定した。要因効果図より、D：巾木体積の効果が特に大きく、巾木の体積が大きいと主型に組み付けた中子が安定し、位置ズレが抑制できると考えられる。

Table 3 SN ratio Average on Each Control Factor and Level

| Control factor | | Level value | | |
|----------------|--|-------------|-------|-------|
| | | 1 | 2 | 3 |
| A | Young ratio of mold and core | 9.39 | 9.14 | - |
| B | Thermal expansion coefficient of mold and core | 9.63 | 8.57 | 9.59 |
| C | Position of center of gravity | 8.65 | 11.41 | 7.74 |
| D | Volume of core print | 5.77 | 9.7 | 12.33 |
| E | Dowel length of core print | 9.97 | 7.95 | 9.87 |
| F | Side clearance | 7.97 | 8.67 | 11.15 |
| G | Height clearance | 8.93 | 9.05 | 9.81 |
| H | Mold direction | 8.42 | 9.96 | 9.41 |

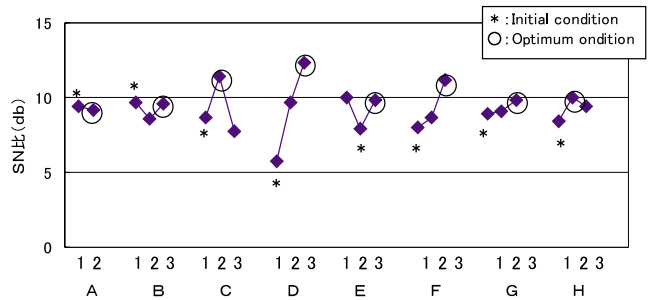


Fig.9 Factorial Effect Diagram

7. 確認実験

7.1 CAEによるパラメータ検討用モデルでの確認
 要因効果図からA₁B₃C₂D₃E₃F₃G₂H₂を最適条件としてSN比の利得を推定し、推定値の妥当性を検証するために再現性の確認解析を行った。利得の推定と確認結果をTable 4に示す。

Table 4 Confirmation Experiment

| | SN ratio | |
|---------------------------|------------|--------------|
| | Estimation | Verification |
| Optimum condition | 18.66 | 18.27 |
| Mass production condition | 3.89 | 6.18 |
| Acquisition(db) | 14.77 | 12.09 |

利得は推定の14.77dbに対し、確認では12.09dbとなり、ほぼ再現した結果となった。

7.2 CAEによる実物モデルでの確認

パラメータ検討用モデルで得られた最適条件を用いて、吸気ポートの実物モデルで確認解析を行った。確認結果をTable 5に示す。

Table 5 Confirmation Experiment with Real Model

| | SN ratio | |
|---------------------------|------------------|------------|
| | Simplified model | Real model |
| Optimum condition | 18.27 | 19.35 |
| Mass production condition | 6.18 | 5.84 |
| Acquisition(db) | 12.09 | 13.50 |

実物モデルの確認解析でも利得が13.50dbとなり、パラメータ検討用モデルと同様の結果が得られた。

これより、パラメータ検討用モデルによる解析の妥当性が確認できた。

7.3 実製品での確認

以上の結果を基に、Fig.10のように中子の巾木を拡大したところ、実際の製品の位置ばらつきを60%低減し、目標の半減を達成することができた。また、量産後現在に至るも、目標の位置ばらつきを維持管理できている。

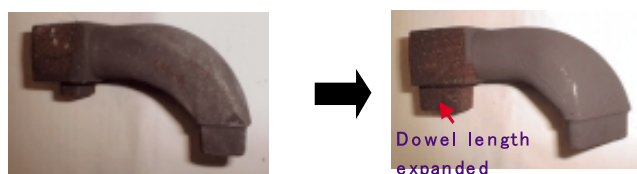
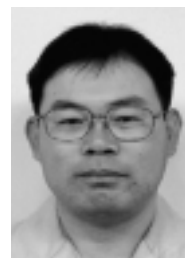
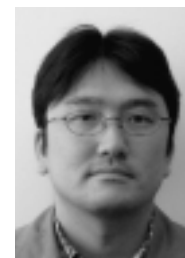


Fig.10 Present core and Improved core

著者



堀 雄二



菅谷 智



永田亮平

8. まとめ

- (1) 今回の鋳型のパラメータ設計では、サイドハウジングの吸気ポートの位置ばらつきを1/2.5まで低減できた。
- (2) CAEによる誤差因子の調合をしないパラメータ設計が有効であることが確認できた。
- (3) パラメータ検討用モデルの適用により、実物モデル設計から型製作までが大幅に効率化できるCAEパラメータ設計手法を開発した。

9. おわりに

今回の取り組みで得られた知見や手法は既にシステム化しており、現在ではパワートレイン領域のみならず車体、車両関係にも適用範囲を拡大している。今後は、シミュレーションを用いた設計プロセスを更に革新していく予定である。

最後に、この取り組みにご協力頂いた関係各位に紙面をお借りして感謝申し上げます。

参考文献

- (1) 田島誠司ほか：サイド排気ポート方式ロータリエンジンの概要，マツダ技報，No.21，p18-23（2003）
- (2) 田口玄一：品質工学講座1～開発・設計段階の品質工学，日本規格協会（1988）

論文・解説

33

エンジン組立自己完結生産システムの開発

Development of Independent Production System for Engine Assembly

品川 裕史*1 上迫 博文*2 川上 真一*3
Hiroshi Shinagawa Hirofumi Uesako Shinichi Kawakami
神南 裕巳*4 森尾 宏基*5
Hiromi Kannami Hiroki Morio

要約

昨今の自動車業界を取り巻く環境の変化や顧客嗜好の多様化により、消費のトレンドを予測することは台数的にも仕様のにも大変難しい状況にあるといえる。このような環境の中で、コストや品質面で競争力のある商品をタイムリーに提供していくためには、従来からの高効率な生産を維持した上で台数変動や仕様変動に迅速に対応可能な生産システムを作ることが求められている。本稿では、上記変動によって発生する生産タクトの変化や混流している機種間の組立時間差に、最も影響を受けるマニュアル工程のラインバランスに対して、ロスなく迅速に対応可能な自己完結生産方式に問題解決の可能性の一端を見だし、その第1ステップとして多種少量生産である旧型エンジンの組立ラインへ適用した事例について紹介する。

Summary

During the progress of changes in the surroundings of the automobile industry and a wide variety of consumer preferences, it is very difficult for us to estimate future consumption trends in production volume or specifications. To timely provide low-priced and high-quality competitive products even in these surroundings, we should create a production system that can promptly accommodate the changeable production volume or specifications while maintaining highly efficient conventional production. We found one potential solution to the issues surrounding the development of the independent production system capable of promptly responding, without losses, to line balancing of manual processes most susceptible to changes in yield cycle time caused by the changes in production volume or specifications or time differences in assembly between models on a mixed production line. This paper introduces one of applicable examples of the independent production system for a wide-variety/low-volume assembly line used for obsolete-model engines, which was adopted as the 1st step activity.

1. はじめに

地球環境や安全への関心などの社会要請や顧客嗜好の多様化、海外生産の拡大、更に世界規模での開発競争の激化に加え世界経済の先行きの不透明な今日、市場は複雑にかつ急速に変化を続けている。こうした環境下にあっても我々は情熱と誇りとスピードを持ち、積極的にお客様の声を聞き、期待を上回る創意に富んだ商品とサービスを提供

していくために、高効率かつ高品質な生産を維持した上で生産量の増減や仕様変更に対応可能な生産システムを作ることに挑戦している。

このような観点から従来のエンジン組立ライン作りを振り返って見てみると、これらの変動に即応できるラインとするために解決すべき多くの課題がある。

まず、生産量への即応という観点から見た場合、仮に生産要求台数が組立ラインの基準台数を下回る場合には、島

*1~5 パワートレイン技術部
Powertrain Production Engineering Dept.

工程の編成ロスはもちろんのこと、組み付け作業への部品供給間口が広がることから発生する歩行ロス、設備能力が余剰となるなどの固定費ロスを生みながらの生産となる。これを解決するために、生産台数の少ないものを同一ライン上に異機種混流することで生産量を確保するなどの施策を実施することもあるが、組立時間差のある機種を混流することにより作業編成が複雑となり、変動への即応との両立が課題となる。

逆に基準台数を上回る場合には、短いサイクルタイムにより、作業編成の自由度が制限され編成ロスが発生したり、能力増強のための設備対策を行う期間が必要となり、機会損失が発生することもある。また、仕様変動の観点から見ると、組立ラインには少なからず自動化設備が導入されているが、これまでのような自動化設備では、製品形状の変更や工法の変更に対して、設備そのものの構造の変更が必要なことから、多くの改造投資と改造リードタイムを要することとなる。

今回、台数変動や仕様変動に迅速に対応可能なエンジン組立システムの構築にあたり、その課題抽出と基礎技術蓄積のための第一ステップとして、月あたり数十台レベルのサービス用の少量生産エンジンを対象に一つのラインで効率的に多種生産できるエンジン組立システムの開発に取り組むこととした。

2. ライン形態の決定

今回の検討対象エンジンは7シリーズあり、各シリーズには排気量違いや仕向け地別の仕様が存在するため、対象エンジンのバリエーションをエンジン型式ではV型6気筒・直列4気筒、排気量では1.3~3.0リットルとした。機種は延べ100機種を超える。

まず、ライン形態の決定にあたってコンベアによる分業方式について検討した。これは既存の分業ラインにおいて、30~80分の作業時間差のある3シリーズのエンジンを、分岐コンベアを用いることで効率よく混流している前例があったからである。

しかし、この方式では今回の作業時間がその構造上の理由により50~200分と更に大きく乖離していること、更に生産台数が少量であり、生産計画上で平準化したり、作業編成の工夫によるロス排除が難しく、ロスが許容できないほど増大することより不適当と判断した。

よって、今回は1台のエンジンを1人の作業者が最初から最後まで組み上げることで、作業者の能力を使い切り編成効率100%となる自己完結生産方式の開発へ具体的に取り組むこととした。

3. 自己完結生産方式における課題

自己完結生産方式の採用にあたっては、コンベア作業と同等あるいはそれを上回る生産性の確保をターゲットとした。これを受けて適用前に、本方式の課題を見極めるためテスト生産を行った。比較対象を既存のコンベアラインでの分業方式による作業とし、本方式ではコンベア作業と同一の組立器具を使用してエンジン本体への50部品の組み付けにかかる作業時間の比較を行った。

結果 (Fig.1) として本方式の組立作業時間が2割程度分業方式に及ばないことが判った。

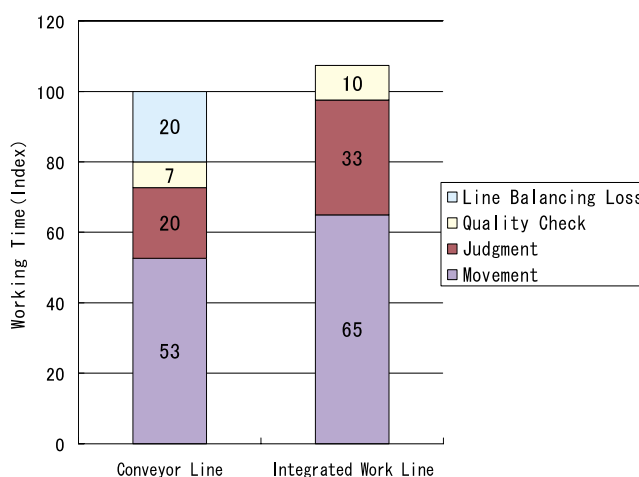


Fig.1 Working Time #1

これを各作業要素で詳細に分析することで、速度低下の要因を具体的に特定していった。

3.1 動作領域

動作領域のロスはエンジンに組み付ける部品の取り出しや、締付け・圧入・挿入工具などの組立治具の取り出し時間が余分にかかっていることで発生している。

部品や治具の取り出しについては、コンベア作業が必要な部品や治具だけが必要な工程の直近の場所に配置されていることに対して、自己完結生産方式では、すべての作業を1工程で完結させることから部品や治具を一ヶ所に持ち込んだため、取り出しのための作業動線が長くなったことが主な理由である。このため、部品や治具をいかに手元に集中配置できるかが課題となる。

またもう一つの理由としては、作業ペースの低下である。コンベア作業の場合、作業スピードはコンベアタクト以上にはあがらない反面、自作業の遅れが自覚できるため自己制御により遅れを補正することが可能となる。しかし、自己完結生産方式では体調や疲れにより作業のばらつきが発生しても、作業が遅れていることに気が付かずマイペースになってしまう。このため作業進捗を作業者に伝えることが課題である。

3.2 判断領域

判断領域のロス、コンペア作業では数分程度の短いサイクルタイム内での繰り返しとなるため、決められた作業手順の一挙手一投足まで体が覚えている。それに対して自己完結生産方式では、数十分以上の作業を一人で行うことから、次の作業が何であるかを常に頭で考える必要がある。

この結果、現在の作業に集中できず最善の作業手順が踏めなかったり、次の作業へ移るまでの判断時間を要している。この判断ロスを排除するためには、次の作業が何であるかを作業者に伝える仕組みが必要となる。

また動作ロスと同様に部品や治具が一工程に集中したため、多くの部品あるいは工具の中から、どれを選択すればよいかを選択判断する時間が発生している。これらの時間の排除には動作ロスの課題に加え、必要なものが判断なしで取り出せる仕組みが必要となる。

3.3 品質確認領域

品質確認のロスは、自分が行った作業の出来不出来を確認している時間である。コンペア方式では後工程の人が前工程の作業の出来栄をチェックしたり、ポカヨケ（フルプルーフ）により不良流出防止策がとられているのに対して、今回のテスト生産は流出防止策を講じない状態で実施していること、また自己完結生産方式特有の出来栄に対する意識の高まりが必要以上の品質確認作業を行わせていると推定される。これらの排除には、品質確認を作業者まかせにせず、ポカヨケを織り込むことが課題となる。

4. 自己完結生産システムの構築

以上の課題に対する具体的施策を織り込み、今回、自己完結生産システムを開発した（Fig.2）。以下に具体的取り組みについて説明する。



Fig.2 Integrated Work Line

4.1 作業ナビゲーション

前述のロスのうち、判断や選択に関わるロスを排除するために以下の三つの機能を織り込んだ作業ナビゲーションシステムを開発した（Fig.3）。



Fig.3 Work Navigation

(1) 音声と画面による作業指示

今回の対象エンジンでは、最高400以上の作業手順があり、更に機種ごとに異なる作業をすべて覚えてロスなく作業することは困難である。そのため、次に行うべき作業を音声で指示するとともに作業のポイント図、組付部品、使用治具などの情報を画面に表示するシステム（Fig.3,4）でサポートすることにした。次作業情報の表示は、手元のタッチスイッチ、足元のフットスイッチなどで作業しながら任意のタイミングで次の作業指示を表示することができるようにしている。また、締付け作業などのツールを使用している工程では、作業完了・品質確認の信号で次作業表示を行い作業者の負担を少なくしている。

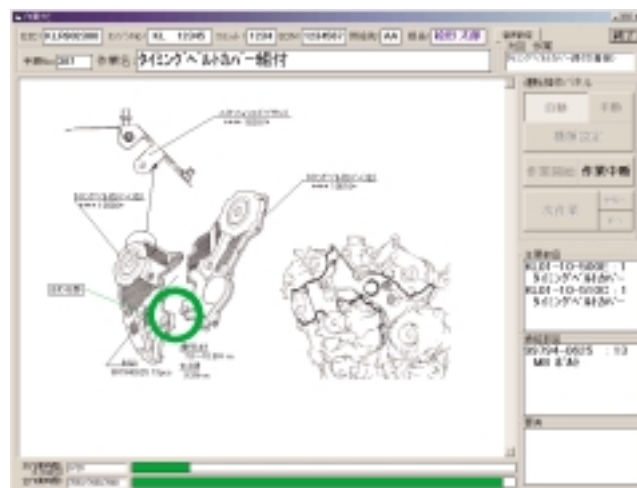


Fig.4 Example of Picture

(2) 作業と同期した設備指示とポカヨケ

音声と画面による作業指示と同時に、その作業に同期して必要なツールへの指示を行っている。具体的には、締付け作業時に、締付け位置、締付け本数、締付けパラメータを該当するツールのコントローラへ送信し、確実な品質保証を実現するシステムとしている。また、作業に応じた手持ち締付けツールの昇降などを行い動作ロスの発生防止に貢献している。

(3) 作業進捗の表示

作業の進み遅れについては、作業手順ごとの設定時間により、作業単位の進捗と全作業の進捗を進み遅れに応じた色のバーで表示し、作業者にペースメーカーとして伝えている。

このシステムのすべてのパラメータはデータベースで一元管理しており、機種追加などに対しては、パラメータの追加変更のみで対応できるようにしている。また、締付け実績などの品質実績や作業時間実績も蓄積し、改善へのアクションに繋げている。

4.2 締付けツール

自己完結生産方式において、従来のエア工具を採用した場合、締付け力が単一であり、締付けトルクや特種別に十数本のエア工具と締付けソケットが必要となるため、膨大な設置スペースを確保しなければならない。これは動作ロス・判断ロスを招く要因となるため、自己完結生産システムでは電動ナットランナを採用した。この理由は、電動ナットランナが締付けプログラムの切り替えと数本のソケット交換で柔軟に対応できることと、締付け精度が安定しているためトルクレンチによる締付け確認も廃止可能であること、更に異常締付けの検出ができるため、品質確認ロスも排除できるからである。

電動ナットランナ採用での技術的課題は、異なる締付け方法（トルク法・角度法）と広範囲なトルク（2~200Nm）の制御を可能とし、締付け順序規制がある場合には位置検出も行わなければならないことである。しかし、一般的なナットランナはトルク検出器の能力上、使用範囲が限られていることや、締付けスピードが遅いため、品質とサイクルタイムに問題が生じる。また、ナットランナを用いる場合、反力受けアームを取り付ける必要があり、作業エリアに制限が生じる。そこで、限られたスペースの中で締付けツールを収納するため、締付けの特性により2種類の高精度ナットランナを開発した（Fig.5）。

その開発にあたっては、V型6気筒・直列4気筒の7シリーズエンジンの全部位に対応でき、機種追加に伴う仕様変更が迅速に対応できることをターゲットとした。

まず、高トルク・角度法・締付け順序規制があるものは、反力受けアーム付ナットランナで位置検出をしながら締付けを行うこととし、低トルク・トルク法・締付け順序規制のないものは電動手持ちナットランナで締付けを行うこと

とした。

以上のことにより、エンジンの全締付けを2種類のナットランナで対応可能とし、締付けツールの判断ロス低減を図った。



Fig.5 Nutrunner for High Torque Use

4.3 工具の手元出し

判断ロス・動作ロスを限りなく低減するために、工具の手元出しラックを開発した（Fig.6）。これはエンジン組立

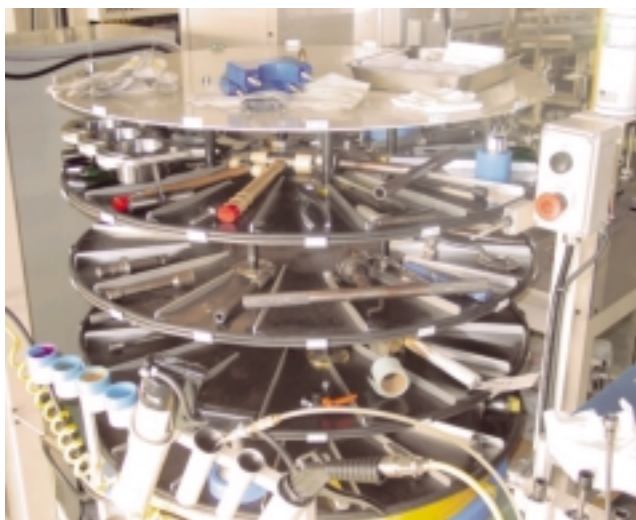


Fig.6 Tool Rack

に必要とされる締付け・圧入・挿入工具など40手順で使用する組立治具をラック内にすべて配置し、組立治具の取り出し時間の短縮を目的としたものである。

工具の取り出し位置はエルゴノミクスを考慮した上で、全作業者の平均身長から無理な姿勢なく取れ、作業動線に最短距離になるポイントとした。また、システムとして作業ナビゲーションと連動させることで、エンジン組立作業中に治具が必要となるタイミングで必要工具が手元近くに来る機構を有するものとした。更にポカヨケとして取り出し/返却確認機構を持たせている。

4.4 部品供給

今回、1台のエンジンを最初から最後まで組み上げるために、エンジン1台を構成する約150種類の部品をピッキングしながら組み付けしなければならない。そこで、今回は台車に1台分の部品をあらかじめピッキングして組み付け順に並べ、組み付け時には台車から順番に取り組み付ける方式をとった。これにより、組み付けに必要な部品を取るための歩行ロスと部品選択の判断ロスを最小化している。

5. 自己完結生産方式の効果

自己完結型生産方式で課題となる(1)動作ロス(2)判断ロス(3)品質確認ロスの増大を、作業ナビゲーションシステム/共用締付けツール/工具手元出しラック/部品マーシャリングなどの自己完結生産における基礎技術を開発し解決してきた。効果の確認として再度、自己完結生産方式によるエンジン本体へ組み付ける50部品にかかる作業時間の比較を行った。総組立時間としてコンベア生産比28%の低減を確認した(Fig.7)。中でも、動作ロスは部品取り出しや治具取り出し時間の短縮、判断ロスは部品選択時間の短縮、品質確認ロスはトルクレンチによる締付け確認の廃止の寄与する部分が大であった。これは作業ナビゲーションシステムを核とした効果によるものであり、長いサイクルタイムであっても作業者が迷うことなく、最短の行動範囲での作業が実現できたためである。

また、締付けに関しては二本の締付けツールで全250ヶ所・8サイズのボルト(2.0~200Nm/角度締め)に対応し、持ち替えロスなく、更に締付け時の反力を抑え、人間に負荷を与えない高精度締付けを可能とした。

一方で、生産の主力である中量~多量ラインへの適用という面から見た場合、コンベア分業と比較してセル単位にツーリングが必要なことから設備投資が割高となることや、一連の作業を習熟するまでに一定の期間を要することから人員の確保が容易にできないなどの新たな課題も見えてきている。

今後は、自己完結生産方式のメリットを中量~多量ラインで最大限生かすべく、これらの課題を解決し、高機能・高品質な製品をより低価格でお客様へ届けられる新しい生産システムへ発展させていく所存である。

著者



品川 裕史



川上 真一



神南 裕巳



森尾 宏基

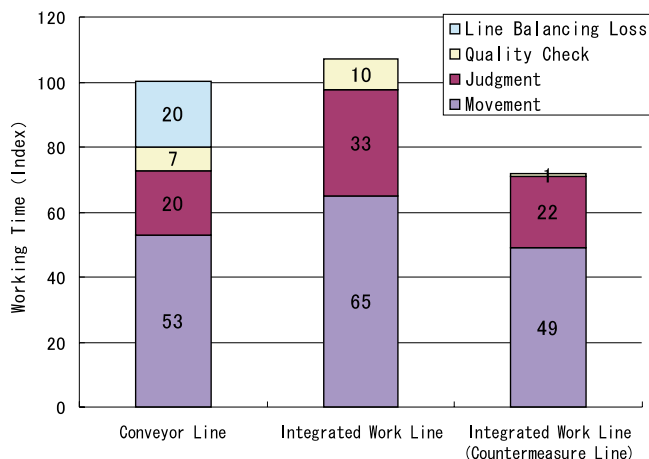


Fig.7 Working Time #2

6. おわりに

少量生産においては、従来のコンベアを使った分業生産方式と比較して、遜色ない生産性を持つシステムを確立できた。

論文・解説

34

金型加工における機械加工時間短縮 Machining Time Reduction in Die Manufacturing

大田 敦史*¹ 西本 光毅*² 井筒 幸雄*³
Atsushi Ohta Mitsuki Nishimoto Yukio Izutsu

要 約

プレス金型設計・製作では、機械加工後の磨き・調整などの職人技に依存しない金型造りを目指している。これまで、機械加工の高精度化により磨き・調整作業は大幅に削減された。しかし、高精度化の取り組みは機械加工時間を増加させ、更なる低コスト化、期間短縮等の要求に応える上で大きな課題となっている。

そこで、機械加工途中の現場作業による調整がなく、加工時間短縮を目的として、平均送り速度を向上させる高速加工技術の開発に取り組んだ。特に、加工途中の工具破損、送り速度調整の要因となっていた一定送り速度による加工に対して、工具の一刃にかかる切削量が常に一定となる可変送り速度制御技術を開発し、従来に比べ平均送り速度を大幅に向上させることができた。

Summary

In designing and manufacturing stamping dies, we aim to establish a manufacturing process independent of craftsman work, such as polishing and adjustment after machining. The attainment of high machining accuracy has so far dramatically eliminated most polishing and adjustment work. The high accuracy machining, however, has increased machining time, which has become a bottleneck in responding to the needs of further cost reduction and shorter time to the market.

Our purpose is, therefore, to shorten the machining time without need for feed rate adjustment by machine operators. For this purpose, we have developed the technology of improving average cutting speed, and more particularly the cutting feed rate variable control which can attain a constant cutting load, as compared to the constant cutting feed rate which causes tool breakage due to a change in the cutting load. Finally we increased the average cutting speed dramatically. This paper reports how we have attained machining time reduction in die manufacture.

1. はじめに

自動車製造各社は、新車開発期間の短縮に取り組んでおり、自動車パネル用プレス金型においても、金型製作期間の短縮が強く求められている。この要求に応えるため、技術革新を積み重ね、金型製作はその姿を「職人の技による造り込み」から「精密加工と数値保証組み立て」へと変わりつつある。

金型製作は、型のベースになる鋳物などを機械加工で削り、組み立てるといった工程から成り立っている。この中に

は、労力を必要とする機械加工後の型磨き、上下型組み付けによるクリアランス調整などの職人技が必要とされてきた。しかし、高度な技能を持つ職人の育成には、多大な時間を必要とするものであった。

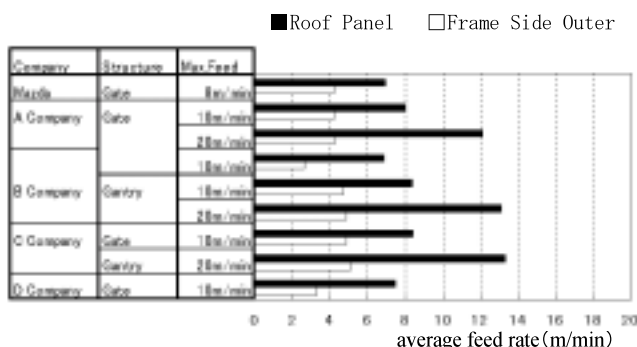
そこで、職人技を最小限とした型造りを追求するために機械加工精度を画期的に向上させ、加工のみで必要精度を満足させる、そして、加工面の精度を生かした型を組み立てる方法に変えることで磨き・調整作業を削減してきたのがこれまでの取り組みである (Fig.1)。

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



Fig.1 High Precision Surface Machining

Table 1 Comparison of Average Feed Rate



しかしながら、この機械加工精度の追究は、緻密な切削や切削に必要なNCデータ量の増大を伴い機械加工時間が増大する結果となった。従って、新しい金型造りの実現のためには、機械加工時間を大幅に削減できる高速加工の実現が重要な課題となっている。

2. 高速加工の考え方

当社では、加工を早く終わらせることを高速加工の目的としている。近年、最高送り速度が20m/minを超える大型NC加工機が登場する中、自動車プレス部品の中で最大級であるサイドフレームアウトや比較的形状が複雑な内板部品では、Table 1に示すように、各社新鋭機を最高指示送り速度で加工しても全体の切削距離を実加工時間で割った値である平均送り速度はほとんど上がっていない⁽¹⁾。

しかも、このような高速加工機の効果を得やすい金型全体の仕上げ加工の割合は4割程度である (Fig.2)。残り6割は金型全体の荒加工、隅部の小径工具による加工で占めているが、これらの加工は高速加工機使用時でも極めて平均送り速度が低いことがわかる (Fig.3)。

一方、常に新鋭機への更新、新規導入することは投資負担が大きく、また、現在の新鋭機もいずれ時代遅れとなるため旧式機の有効活用による生産性向上も求められている。

よって当社では、現有設備を使いきることを、そして次世代の設備を使いきる技術を開発していくことを重視し、平均送り速度を向上させることを目指している。

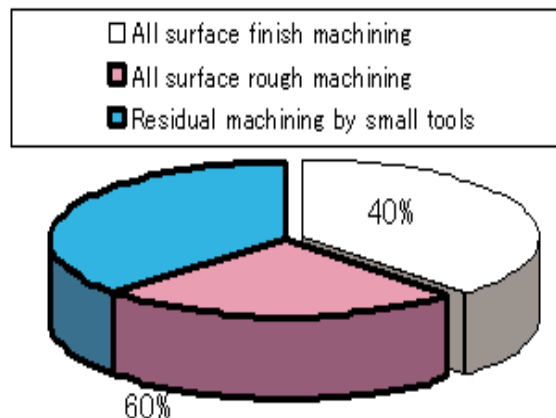


Fig.2 Rate of Machining Time

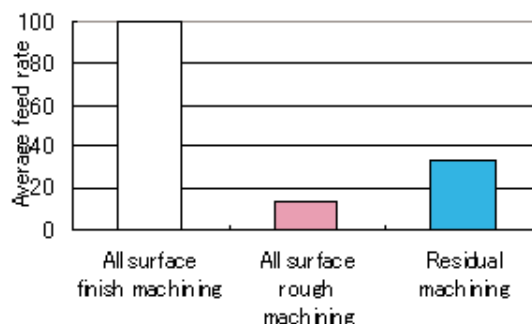


Fig.3 Comparison of Average Feed Rate Classified by Machining Process

3. 加工現場の実態と課題

自動車ボデー生産のためのプレス金型は、その多くが自由曲面で構成されているため凹凸によって切削量が変動しやすい。特に、小径工具を必要とする凹コーナー部においては急激な切削量変動が発生し、速くかつ一定送り速度の加工では、工具のチッピング、折損が発生して加工機の連続稼働を妨げていた。Fig.4は一定送り速度で加工を行った場合の切削負荷変動を表しているが、NC加工機の減速制御によってコーナー部の実送り速度が平坦部の1/10以下になっているにもかかわらず、切削負荷は10倍に急増していることがわかる。

そのため、切削量が急変する加工では、通常、経験則に基づき最悪の条件で遅くかつ一定の送り速度を指令せざるを得ない。また、場合によってはNCデータの指令値通りでは加工機を動かさない。つまり、加工機の制御だけでは不十分で、作業者の判断を頼りに加工音や工具の振れ方によって送り速度調整を行うため過剰な減速を与えてしまう。このように、加工現場には未だ現状設備でさえ使い切れていない実態が多く存在している。

一方、加工機の主軸負荷を電流などで検知しフィードバック制御で送り速度を可変する方法も知られている。しか

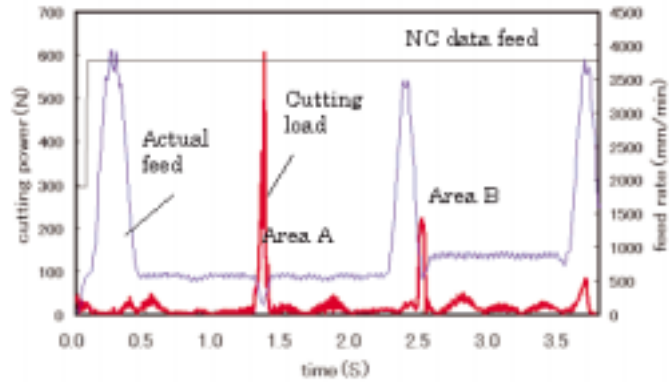
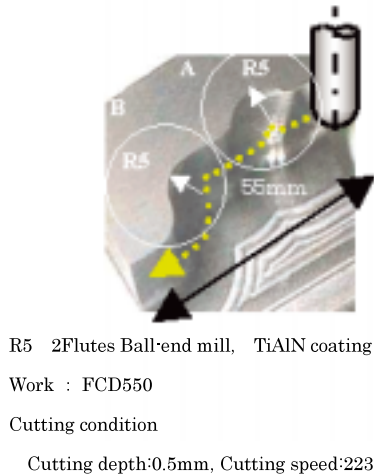


Fig.4 Cutting Load in Constant Feed Rate

し、比較的低切り込みの仕上げ加工では、負荷変動を検知しにくくこれを適用できる切削工程は限定される。

これらのことから、平均送り速度を向上させるためには、加工前に切削量変動を認知して安定させて速く削ることが可能な送り速度可変制御が重要と考えた。

4. 開発技術

以上のことから、NC加工機を動かすNCデータによる送り速度可変制御の開発に取り組んだ。加えて、送り速度可変制御の効果を発揮するための切削工具選択、ツールパス適正化など周辺技術の開発も同時に取り組んできた。

4.1 切削量変動に強い最適ツーリングの選択

切削工具の突き出し長Lと工具径Dの比(L/D)が小さいほど高速加工に適している。特に、小径工具による切削ではL/Dは重要な項目である。

ツールパス作成の簡易性から一旦全てのツールパスを計算し、そのツールパスに応じた工具長の自動設定を行う。また、決定された工具長が切削に適さない場合は、Fig.5のように1つのツールパスを分割して工具長を再決定する。

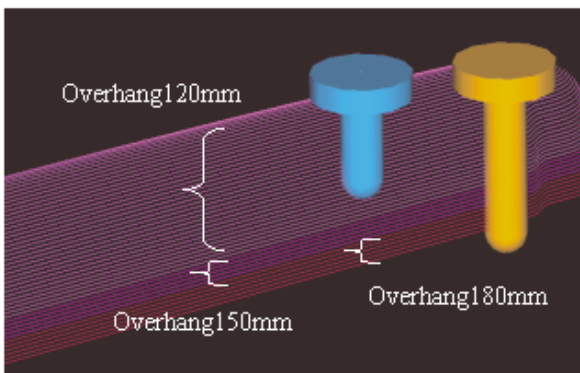


Fig.5 Tool Path Division by Tool Overhang

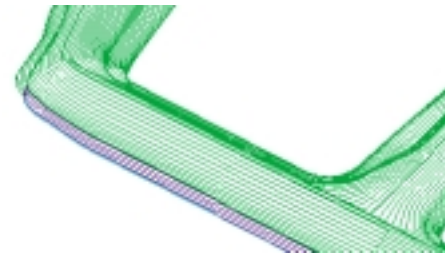


Fig.6 Machining Along Surface

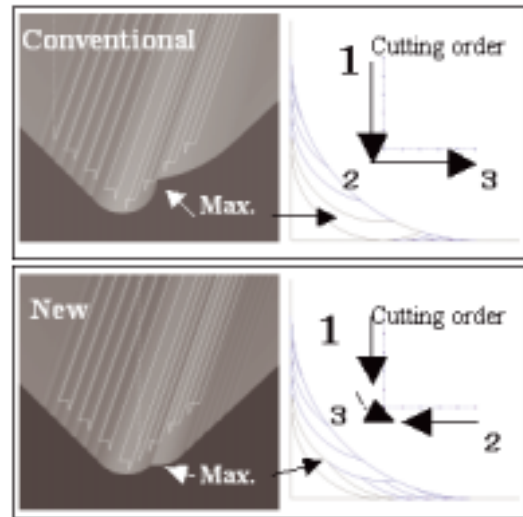


Fig.7 Maximum Cutting Volume in Concave Corner

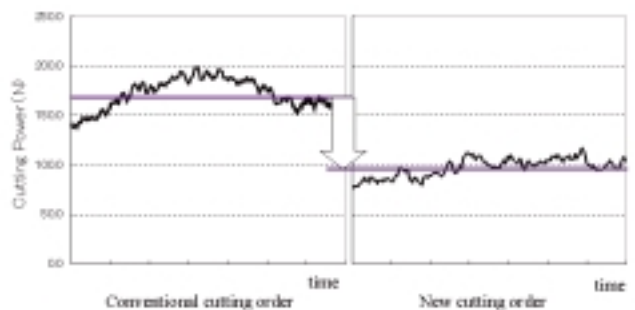


Fig.8 Decreasing Cutting Load by Cutting Order

4.2 切削量変動が少ない加工方法の設定

工具進行方向に対して切削量が急変することを防止するために、自由曲面の形状でもFig.6のような等高線に近い形状沿い加工を行う。この加工法は、加工機の減速制御も少なく高速加工に適している。

4.3 最大切削量が少ない加工順序の設定

切削条件が最悪となる最大切削量を削減できればより速く加工できる。そこで、凹コーナ部加工では、Fig.7のようにユニークな三分割外追い込み加工を行って最大切削量を削減する。Fig.8は、加工順序の違いによって切削負荷の最大値も半減できることを示しており、切削順序適正化が有効であることがわかる。

4.4 送り速度可変制御技術の開発

更に送り速度向上のためには、切削量を一定にした送り速度設定が重要であり、以下の方法で対応している。

適切な送り速度を求めるためには、切削負荷を評価して設定するべきである。しかしながら、CADデータ、ツールパスなどから切削負荷を直接算出することは技術的にも計算時間的にも難しいため、切削負荷と強い相関のある切削体積で代替し計算を簡素化した。工具一刃当たりで削り取る体積をどの場所でも同一にできるように、切削量を求めながら切削量が一定となる送り速度を逆算することが特徴である。

しかしながら、連続的に送り速度を変化させると加工機への指令数が多くなり、比較的高速域においては処理回数が増大によって逆に加工機の減速がかかる場合があるため送り速度指令数ある程度まとめる処理が必要となる。そこで、送り速度変化率を一定に与えることでこの変動範囲内では送り速度をある値にまとめ、高速域はより速い速度で、切削負荷変動が大きい低速域はよりきめ細かい送り速度が設定できるようにした (Fig.9上図)。

一刃一定体積とするための体積評価は、NCデータの構成点間を1mmごとに分割して行い、10mm間で11個の送り

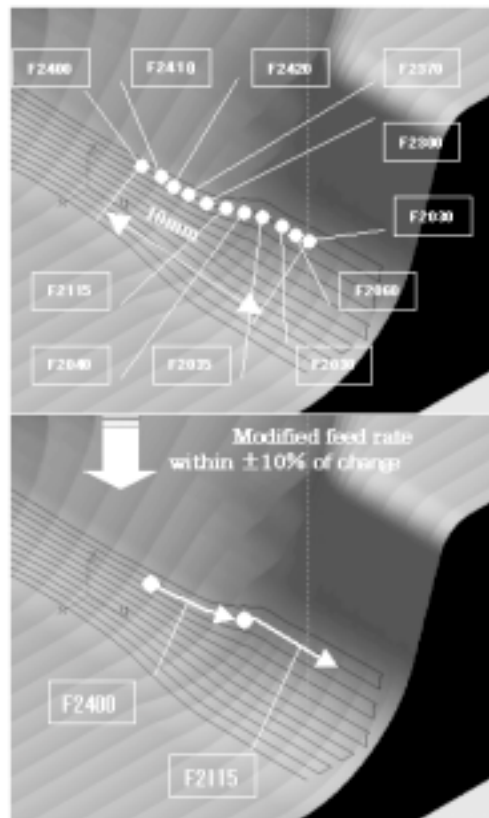
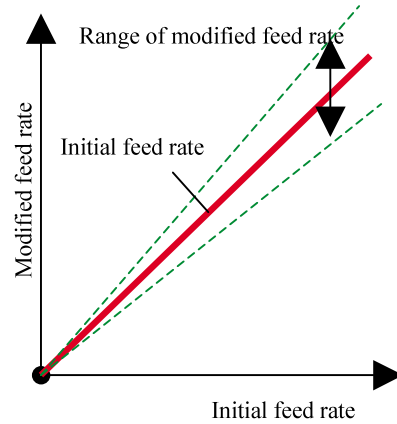


Fig.9 Smoothing of Feed Rate



R5 2 Flutes Ball-end mill, TiAlN coating, Length 60mm
 Work : FCD550
 Cutting condition
 Cutting depth:0.5~1.5mm, Cutting speed:223m/min

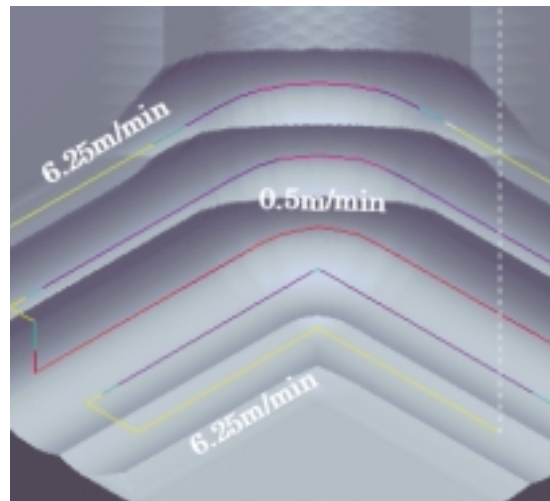


Fig.10 Result of Feed Rate Variable Control

速度指示が算出される。これを2個の指示に集約した事例をあげている (Fig.9下図)。

4.5 接触面積を評価した送り速度制御

工具の一刃で削る体積を一定にすることが基本であるが、金型形状によってはU字溝形状が存在し、このような形状の場合は工具の両刃当たりとなって切削条件が悪化する。そこで、ワークとの接触面が工具刃全体のどれくらいを占めているかを判断して適切な減速をかけている。

5. 適用事例紹介

送り速度可変制御の適用事例を紹介する。フロントフェンダのプレス金型における凹コーナ部での小径工具による切削事例をFig.10に示す。

NCデータの送り速度設定値はFig.10の右図のように切削量に応じて変化させることが可能となっている。従来、凹コーナ部全体を0.5m/min以下の一定送り速度で加工したものが、切削量の少ない範囲は6m/min以上、切削量の最も多いコーナ中心部のみ0.5m/minの低い送り速度で可変制御している。その結果、平均送り速度は3倍以上向上でき機械加工時間短縮に結びついた (Fig.11)。

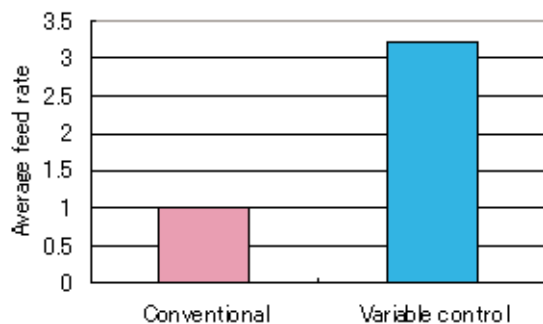


Fig.11 Comparison of Average Feed Rate

6. まとめ

現在のNC加工機のCNC制御装置だけでは、機械能力を有効活用することは困難であった。そこで、NCデータによる切削量を考慮した可変送り速度制御によって、新旧NC加工機能力に合わせた切削条件を設定することで設備によらず平均送り速度を向上させることができた。そして、安定した加工によって人による調整を不要とし無人加工の実現にもつながった。

また、製造業、特に金型製造業発展のために、この技術を有効活用する目的でCAMソフトウェアとして社外展開を行い多くの金型メーカーで採用されつつある。今後も、日本の製造業発展に貢献する技術にしていきたい。

参考文献

- (1) 西山為裕ほか：99年から21世紀を見据えた高速・高能率加工の狙い，型技術，Vol.14，No.1，p.44-49 (1999)

著者



大田敦史



西本光毅



井筒幸雄

論文・解説

35

スポット溶接モニタシステムの開発

Development of Monitoring System for Spot Welding

小田 修二^{*1} 山北 恭司^{*2} 村重 滋男^{*3}
Shuji Koda Yasushi Yamakita Shigeo Murashige

要約

スポット溶接は古くから現在に至るまで自動車構造用鋼板の主流の接合方法として用いられてきた完成度の高い接合方法であるが、残る課題の一つとして品質管理面でのチェック作業の廃止があげられる。チェック作業はその作業工数に加えて、作業のためのライン停止や抜き取り工程が必要となる。また異常発生時には、チェックした製品から異常の発生した溶接工程までの工程数分の不良品が発生する。そこで、チェック作業を自動化し、かつ溶接工程でインライン検査することが課題である。今回、スポット溶接中の電極間抵抗をモニタすることで品質管理が可能なシステムを開発し量産ラインに導入した。このスポット溶接モニタシステムによる品質保証の考え方と活用の現状について紹介する。

Summary

Spot welding is used as one of major welding methods of structural steel sheet for automobiles from past to present. One of open issues is to eliminate chisel checks in quality control. The chisel check requires the line stop for work and sampling process in addition to number of man-hours. If a problem may arise, inferior products would occur by the same number as that of welding processes ranging from a problem process to a check process. Our issue is, therefore, to automate quality verification and conduct in-line inspection in a welding process. We have developed a monitoring system which monitors the resistance between electrodes under the welding to assure positive quality control, and have introduced it into a mass production line. This paper introduces the philosophy of quality assurance and present conditions of practical use.

1. はじめに

スポット溶接は自動車構造用鋼板の接合方法として古くから用いられており、最近ではレーザー溶接やプラズマ溶接なども一部で採用されているが、今もなお主流の接合方法である。その溶接作業そのものはほぼ自動化されているが、ボデーに付着した溶接時に発生するスパッタを除去する作業や、品質管理のためのたがね試験作業は手作業である。作業環境の改善および作業工数の削減のため、スパッタの発生防止とチェック作業の自動化が課題である。

スパッタの発生防止に対しては、安定して溶接強度を確保できる最適な溶接条件の設定と、生産工程のばらつきを

低減する活動を行っている。今回、もう一つの課題であるチェック作業の自動化のため、スポット溶接中の電極間抵抗をモニタするシステム（以下、スポット溶接モニタシステム）を開発し、量産ラインに導入した。

本稿では、このスポット溶接モニタシステムによる品質保証の考え方と活用の現状について紹介する。

2. 開発のねらい

2.1 現状のスポット溶接の品質保証方法とその課題

スポット溶接の品質は、溶融部の径（以下、ナゲット径）の大きさが基準以上あるかどうかで判断する。そのため、実際に破壊してナゲット径を測定する必要があるが、実際

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

の製品を破壊することはできない。

そこで、事前に品質確認用の製品を準備し、溶接部の破壊試験を行って良好な品質が確認されたときの溶接条件を製品に適用する。この溶接条件を維持管理することによってスポット溶接品質を保証している。

この溶接条件の維持管理のため、定期的な溶接条件の測定を行っている。更に、稼動中には制御装置による監視と、周期的な製品へのたがね試験とを併用で行っている。

たがね試験は、溶接部近傍にたがねを打ち込んでナゲットの有無をチェックし、溶接が正常に行われていることを確認する。しかしたがね試験にはその作業工数に加えて、作業のためのライン停止や抜き取り工程が必要になる。また異常発生時には、前回のたがね試験を行った製品から異常の発生した溶接工程までの工程数分の製品の品質確認が必要となり、更に不良品に対して廃棄または手直し作業が発生する。そこで、溶接条件の監視を全て自動化し、溶接工程で行うことを検討した。

2.2 開発のステップ

溶接工程で溶接条件を自動で監視する方法として、スポット溶接中の電極間抵抗の測定に注目した。スポット溶接中の電極間抵抗の変化がナゲット形成過程と密接に関係していることは、これまで報告されている研究の中で明らかにされている¹⁾。ただし、めっき材の溶融過程や板の膨張など単純なナゲット形成以外の要因も電極間抵抗に含まれるため、直接ナゲット径を推定することは困難であった。

今回、直接ナゲット径を推定するのではなく、溶接条件の変化を検出する方法として、電極間抵抗を利用することを検討した。溶接条件に変動があった場合、ナゲット形成過程に影響を与えるため、電極間抵抗に大きく変化が現れることが分かった。そこで、溶接条件の変動を検出する電極間抵抗の変化をパラメータ化し判定することで、溶接条件を監視するシステムの開発を目指した。

開発のステップを、電極間抵抗による品質管理方法の確認のためサブラインをねらいとした第1ステップと、メインラインへの展開を含む第2ステップに分けた。まず、第1ステップとしてモデルラインにトリビュートのドアラインを選び、たがね試験を廃止し稼動中のチェック作業を自動化することを開発目標とした。

3. 電極間抵抗による品質管理の考え方

3.1 電極間抵抗とナゲット形成過程

溶接中の電極間抵抗の変化とナゲット形成過程との関係を確認した結果をFig.1に示す。電極間抵抗は、①通電初期に板間の接触抵抗が消失して一旦低下する。②抵抗発熱により通電路が温度上昇し、板厚の膨張と抵抗率の温度依存性により抵抗は増加する。③通電路の温度が融点を越えるとナゲットが形成され成長に伴って、通電路面積の拡大と電極の沈み込みにより抵抗は減少する。

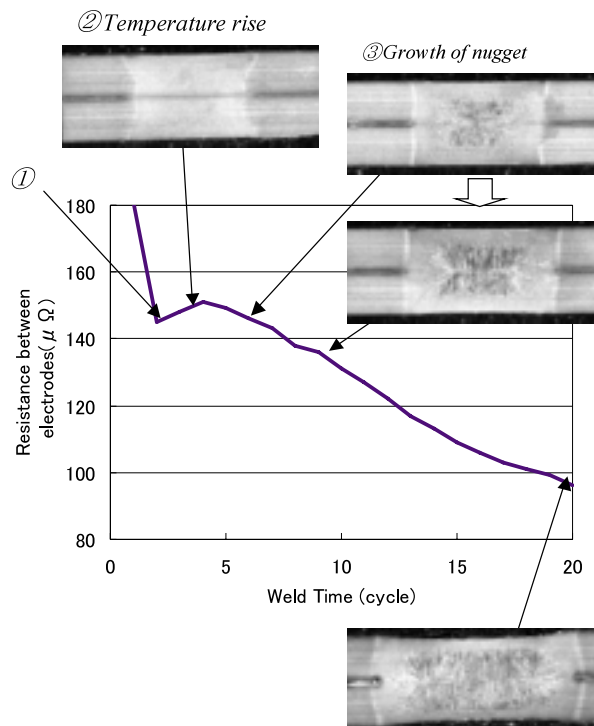


Fig.1 Resistance between Electrodes and Growth of Nugget

このように、電極間抵抗の溶接中の変化はナゲットの形成過程と密接な関係があり、ナゲットの成長に伴って抵抗が減少する傾向があることが確認できた。

3.2 溶接条件（電極先端径）の変動と電極間抵抗

次に、溶接条件の変動と電極間抵抗との関係を確認した。維持管理する条件は、溶接電流、通電時間、電極加圧力および電極先端径であり、これらの溶接条件により溶接品質は決定される。ここでは、電極先端径の変動と電極間抵抗について説明する。

電極先端面は溶接時の発熱と加圧の衝撃により損耗するため打点数が増えるにしたがって電極先端径は拡大する。電極先端径が拡大することにより通電路面積が広がり電流密度が下がるため十分な発熱が得られなくなる。電極先端径を維持するため周期的に電極先端面を研磨し先端径を再生している。

新品電極と先端径が損耗により拡大した電極における電極間抵抗をFig.2に示す。打点数が増えるにつれて抵抗のピーク以降の減少量が小さくなっていることが分かる。これは電極先端径の拡大により発熱不足となり電極間抵抗の変化量が少なくなる。この電極間抵抗の変化を、ピーク以降の減少量（以下、抵抗減少量）を判定パラメータとして捉えることにより、電極先端径の拡大を検出することが可能である。

打点数と抵抗減少量およびナゲット径の関係をFig.3に示す。打点数が増えるにつれて抵抗減少量が小さくなり、ナゲット径も減少している。

しかし、電極先端径の研磨不良などによりスパッタが発生すると、溶接中に溶融部が吹き飛び溶接部の板厚が減少するため、電極間抵抗が急激に低下する (Fig.4)。その場合は抵抗変化からスパッタ発生を検出し、異常として判断することが可能である。

電極先端径と同様、他の溶接条件の変動についても電極間抵抗により検出可能であることが分かった。

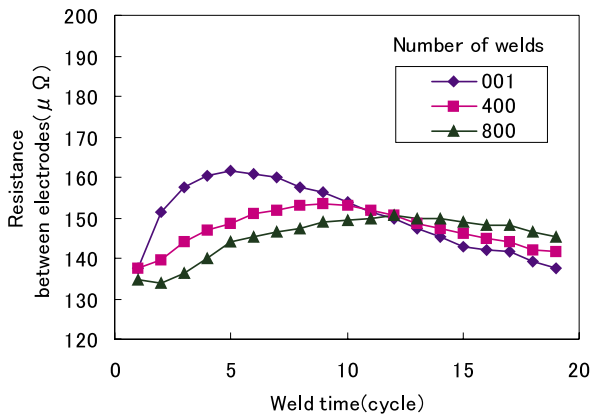


Fig.2 Resistance between Electrodes Accompanying Number of Spot Welds

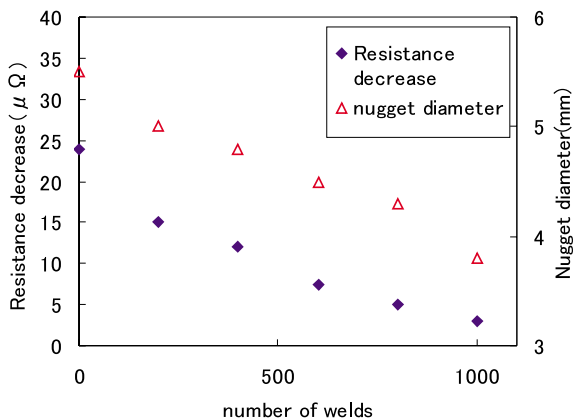


Fig.3 Resistance Decrease and Nugget Diameter

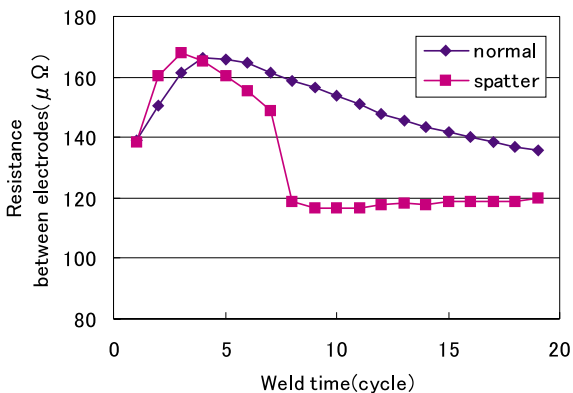


Fig.4 Resistance between Electrodes in Spatter Generating

3.3 電極間抵抗による品質管理方法

これまで述べたように、溶接条件の変動を電極間抵抗の変化から求めた判定パラメータにより捉えることが可能である。そこで溶接設備が正常に機能しているときの判定パラメータのばらつきを測定し、その範囲以上にデータが変化した場合、溶接設備に異常が発生し溶接条件が変動した可能性があるとして警報を出力させる。警報出力時には溶接設備のチェックを行うことで品質を管理することとした。

4. 溶接モニタのシステム化

量産ラインに導入するスポット溶接モニタシステムの装置構成をFig.5に示す。電極間抵抗を測定し溶接システムの良否判定を行う機能を溶接制御装置に追加した。

溶接ガンに取り付けた電圧検出線より電極間電圧値を溶接制御装置に取り込む。この電圧とトランス1次側の測定電流から換算した2次側電流値とにより電極間抵抗を計算する。溶接制御装置には、条件信号ごとに溶接条件と判定パラメータの判定レベルが設定できる。溶接制御装置は、通電中の電極間抵抗より抵抗減少量など判定パラメータを算出して判定レベルと比較し、範囲外の場合は警報をロボット制御盤に出力し、ロボットを停止する。

また、パソコンを各溶接制御装置とネットワーク接続することにより、一括して通電中の電極間抵抗値などのデータをパソコンに記録し、異常の発生時には対象号機、打点番号を表示しオペレータに知らせる。

5. 量産現場への導入

開発したスポット溶接モニタシステムをトリビュートのドラインに導入した。

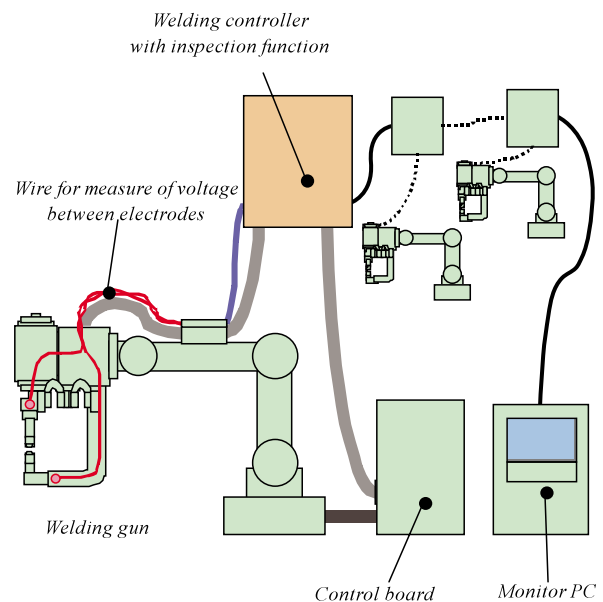


Fig.5 Monitoring System

Fig.6に溶接設備が正常に機能しているときの判定パラメータ（抵抗減少量）の推移を示す。連続打点による電極先端径の拡大により抵抗減少量が下がっているが、電極研磨により周期的に元の値に戻り、安定した推移を示している。この推移を一定期間確認し、その下限値で品質を確認して異常の判定レベルとした。

Fig.7は、同工程において電極研磨を行わず、意図的に異常状態を発生させたときの、モニタデータの推移である。打点数が増加するに伴ってモニタデータが下がっていき、判定レベルを下回った。このときの溶接部を破壊検査して確認したところ、品質基準以上のナゲット径は得られているが小さくなっており、溶接システムの異常を早期に見ることができることが分かった。

一定期間たがね試験と、スポット溶接モニタシステムによる品質管理を併用し一致度を確認した。打点位置のずれや板間隙によっても抵抗値は変動し、電極のかみ合わせが公差範囲内でわずかにずれた場合でも、溶接設備の異常と判定してしまうことがあった。しかし今回、生産工程のばらつきを抑える必要のある因子を洗い出し抑えることで、過剰な異常判定を減らすことができた。これらの結果から、スポット溶接モニタシステムにより品質管理を行うことでたがね試験を廃止し、第1ステップを完了した。

引き続きアテンザ、デミオ、RX-8、およびアクセラの一部サブラインに水平展開し、生産工程のばらつきを抑えるための課題解決を行いながらたがね試験の廃止を進めている。

今後、第2ステップとしてメインラインへ適用を拡大していく。サブラインでは薄板が中心であったが、メインラインでは総板厚も厚くなっていくため、電極間抵抗の変化も変わってくる。そのために、電極間抵抗の変化とナゲットの形成過程について、厚板にも対応した判定パラメータの開発に取り組んでいる。

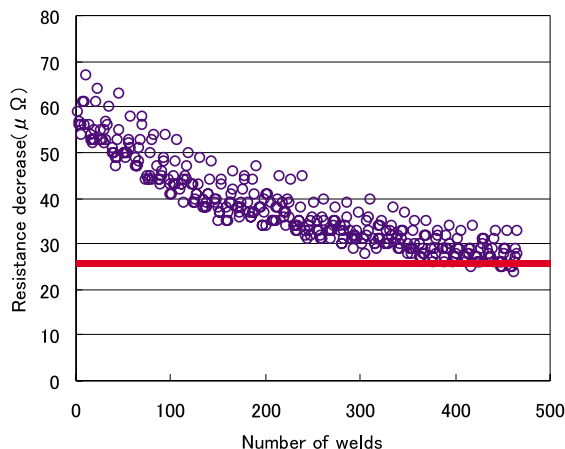


Fig.7 Resistance Decrease and Number of Spot Welds (Problem Arise)

6. おわりに

スポット溶接の品質保証方法の中で、これまでたがね試験にたよってきた部分を電極間抵抗により定量的に取り扱うことができるようになったことは、チェック作業の自動化だけでなく、溶接条件の適正化による品質の向上や予防保全に対しても有効である。また、溶接工程での全数チェックにより不良の発生を最小限に抑えることが可能となる。今後、モニタデータを量産ラインでの溶接現象の解析に用いることで、たがね試験の廃止と同時にスパッタレス活動に活用していく。

参考文献

- (1) 溶接学会抵抗溶接研究委員会：抵抗溶接現象とその応用(第1編),東京,生々文献サービス,p.96-100(1982)

著者



山北恭司



村重滋男

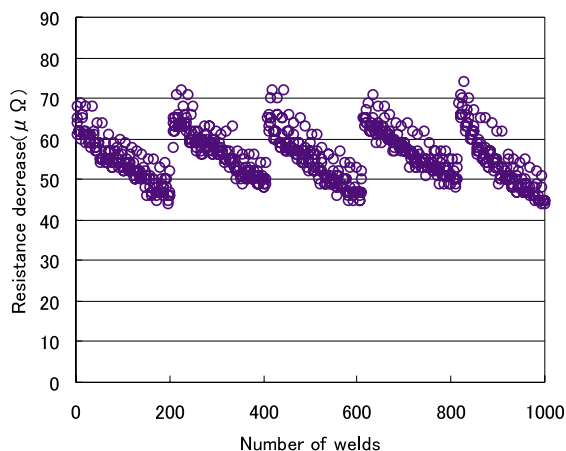


Fig.6 Resistance Decrease and Number of Spot Welds (Normal)

論文・解説

36

接着剤塗布時の形状計測技術開発 Development of Adhesive Shape Measurement System

菅 康之*¹ 木村美昭*² 美本和彦*³
Yasuyuki Kan Yoshiaki Kimura Kazuhiko Mimoto

要約

車両組立工場では、顧客満足の向上を狙いとして、量産で発生する作業や部品ロットのばらつきに対して、安定した高い品質を継続して得られる工程作りを目指している。車両組立工程には、締め付け、はめ込み、貼り付け、充填等の作業があり、管理特性も締め付けトルク、組み付け位置、挿入力、塗布形状、注入量等、多岐にわたっている。マツダではこれまで、締め付けトルク・液体注入量等の管理特性を定量的に把握し、全数管理することで、ばらつきの要因を解明して品質向上に結び付けてきた。しかし、部品の組み付け位置や接着剤の塗布形状等は、量産の中での計測が困難で定量的に全数管理できる状態には至っておらず、品質向上を図る上で課題となっている。

そこで、これらの特性のうち、後工程に対し影響が大きい接着剤の塗布形状について、量産の中で定量的に全数管理できる計測技術の開発に取り組んだ。これは、二次元レーザ変位計を用いて、塗布ノズルから出てきた直後の接着剤断面寸法を測定するもので、従来困難であった量産サイクルタイム内での全塗布領域の接着剤形状を計測することが可能となった。

Summary

We aim to create a Car Assembly process which is robust against dispersion in mass production to constantly output stably high quality. Car Assembly line has many processes such as tightening, fitting, bonding, and filling. We worked for quality improvement by quantitatively grasping control characteristics such as tightening torque and liquid filling rate and conducting total control for positive identification of a possible cause for the dispersion, however, assembly positions of parts and application shape of the adhesive were difficult for us to conduct total control quantitatively in mass production, which were issues in attaining high quality.

We worked toward the development of the instrumentation technology capable of conducting total control, quantitatively in mass production, for the adhesive shapes which may have significant loss if discrepancy flows to the downstream side. This instrumentation technology can measure the height and width of the adhesive coming out from a spreading nozzle with a 2D laser displacement pickup, thus enables us to conduct hitherto difficult measurement of the adhesive shapes in the full application range within a mass production cycle time.

1. はじめに

お客様の満足度を向上させるために、車両組立領域では、各組立工程内で確実に品質を作り込み、安定した高い品質を継続して得られる工程作りを進めている。

車両組立工程には、締め付け、はめ込み、貼り付け、充填等の作業があり、管理する特性も多岐にわたっている。

その中で、ウインドガラス等への接着剤塗布については、量産工程の中で品質を定量的に管理することが難しく、始業時に抜き取りで定量的に品質を確認し、その後は作業者の目視確認で品質管理を行っている。

そこで、接着剤の塗布品質を自工程で保証するための技術開発に取り組んだ。これは、全塗布領域において、塗布中の接着剤の断面寸法を測定し、自動判定処理することに

*1~3 車両技術部
Painting, Trim & Final Assembly Engineering Dept.

より異常時には作業員へ異常を知らせるもので、塗布不良の場合はその場で修正をかける。これにより、自工程で塗布品質を確実に保証し、後工程への不具合流出を防止する。更に、量産品質のばらつきを定量的に把握することが可能となり、ばらつきを発生させる要因を追究して、塗布品質の安定化につなげることができる。

2. 開発のねらい

2.1 接着剤塗布について

例えば、ウインドガラスをボデーへ接着するため、ウインドガラスの周囲には、Fig.1のようにウレタン接着剤が塗布される。車両のデザインによってウインドガラスの形状は大きく異なり、更に、曲面の複雑な形状であるため、全周にわたって規定の形状でウレタン接着剤を塗布するには熟練を要する作業となる。そこで、早期から、品質安定化のためにロボットでの自動塗布を進めてきたが、ウインドガラスの寸法や位置決めのため、また、吐出圧や周辺温度の変化によって、塗布した接着剤形状にばらつきが生じている。この対策として、ウインドガラスをボデーに接着する前に、作業員が目視によって塗布状態を全数確認し、塗布不良の流出を防止しているが、目視に頼らず塗布品質を確実に保証することが望まれている。

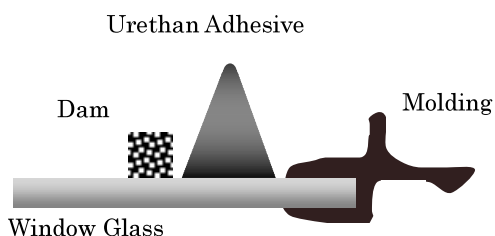


Fig.1 Image of the Urethane Adhesive Coating

2.2 これまでの取り組みと課題

これまで、接着剤塗布不良を確実に防止するために、塗布形状を量産工程内で自動計測するための活動を進めてきた。その内容は、画像処理装置やレーザ変位計を活用した方法であるが、塗布領域の一部分しか管理できないという問題があった。塗布不良は、塗布領域のどこに発生するか不確定であり、本来、全塗布領域を管理する必要がある。しかし、接着剤を塗布し、部品を貼り合わせるまでのわずかな時間内に、全塗布領域の塗布状態を計測し、よし悪しを判定するためには、高速でデータ処理できる計測技術が必要となる。更に、マツダでは複数の車種を混流生産しており、様々な形状の部品に対応する必要もあった。

2.3 接着剤塗布管理の考え方

我々は、この活動によって、後工程に不具合を流出させないこと、および、車両検査で不具合が発生した場合には、

工程内での特性データをもとに早期に問題解決できる体制作りを進めている。これらの考え方のもと、今回の取り組みでは、重要管理特性として塗布した接着剤の高さ、幅、位置を選択し、全塗布領域の品質を管理できる計測技術の開発、および、特性データを車両番号と結びつけて記録できるシステム作りに取り組んだ。

3. 計測技術の開発

3.1 計測方法の概要

これまでの自動計測は、選択した一部の塗布領域を測定するもので、計測位置に合わせて塗布工程に計測機器を配置している。そのため、部品形状が異なる場合には、形状に合わせて計測機器を移動させる必要があった。これに対し、今回の取り組みでは、接着剤の塗布ノズルに計測機器を配置し、塗布ノズルから出てきた直後の接着剤断面形状を測定する方法を構築することで、異なる部品形状でも、全塗布領域の測定を可能にするという方針で活動を進めた。

3.2 計測機器の選定

計測機器を選定するにあたり、データ処理時間の短縮が重要課題であると考えた。処理時間が速いほど測定間隔を短くすることができ、局所的な塗布不良を検出するのに有利となるからである。計測機器の候補として、レーザ変位計、画像処理装置を選び、複数機種にて比較実験した。実験は、接着剤を塗布したクォータウインドを用い、ロボットに計測機器を取り付けて、高さ、幅の計測テストを実施し、Table 1に示す項目で比較した上で選定を行った。

Table 1 Comparison of Measurement System

| Measurement system | Comparison item | | | Evaluation |
|-----------------------|-----------------|------------------------|-------|------------|
| | Processing time | Ability of measurement | | |
| | | Height | Width | |
| Displacement pickup A | 10 | ○ | ○ | ◎ |
| Displacement pickup B | 30 | ○ | × | × |
| Image Processor A | 120 | ○ | ○ | ○ |
| Image Processor B | 200 | × | × | × |
| Image Processor C | 78 | ○ | ○ | △ |
| Image Processor D | 80 | ○ | ○ | △ |
| Image Processor E | 30 | ○ | ○ | ○ |
| Image Processor F | 60 | × | × | × |
| Image Processor G | 200 | × | × | × |

その結果、検出処理時間が最も速く、高さ、幅を検出可能である2次元レーザ変位計を選定することとした。この機器は、スリット状レーザ投光部と、その反射を受光するCCDで構成されており、短時間露光でも十分な明るさの高出力スリットレーザとCCDライン数の大幅な削減によって高速での検出処理時間を実現している。

また、接着剤の高さ、幅だけの数値情報に加えて、スリットレーザの光切断画像を並行出力する機能も備えており、実際の接着剤断面形状と測定データの相関を目視で確認することができる。

3.3 計測テストの概要

実際の使用状態での実力値を確認するため、量産工程を模擬的につくった環境で計測テストを実施した。まず、テスト用ロボットに塗布ノズルを設置し、ノズルから塗出した直後の接着剤断面形状を検出できる位置に計測機器を配置した。測定物はウインドガラスに塗布して乾燥した状態の接着剤を用い、ロボットにより、スリットレーザ光が接着剤をなぞるように動作させて、接着剤の高さ、幅を計測することとした。

ガラス位置決めは、ガラスの端面を基準としてローラに押し当てて真空吸着で固定し、ローラ位置の変更で形状の異なるウインドガラスに対応できる構造とした。

計測データは、Fig.2のように接着剤断面形状の頂点部、底辺部のXY座標値が約10msec周期で得られ、接着剤の高さ、幅はこの座標値から算出する。このウインドガラス一周分のデータ群は、コントローラのメモリに一時的に保管され、作業完了により全周のバッチデータをパソコンへシリアル送信する。Fig.3に車種Aのフロントウインドガラスを用いて計測した時の接着剤高さのデータ例を示す。これは、頂点部のY方向のデータで、横軸は計測ポイント数であり、縦軸にY値を示している。計測する部位によって、接着剤の頂点位置がばらついていることが確認できる。

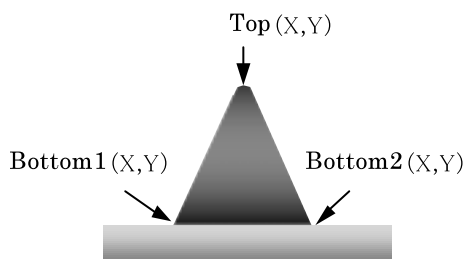


Fig.2 Measured Point

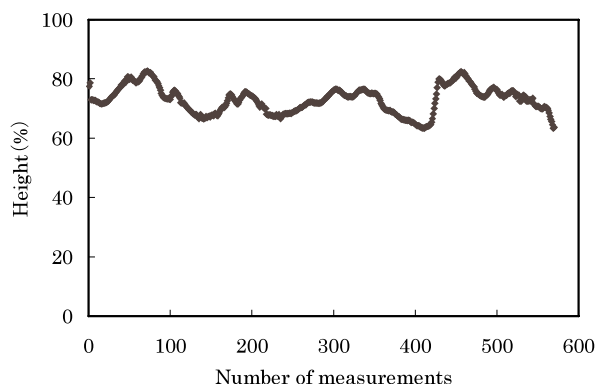


Fig.3 Example of Measurement Data

Table 2 Evaluated Item

| Evaluated item | Confirmed condition |
|----------------------------|---------------------------|
| Adjusted item | Optical amount |
| | Averaging frequency |
| | Setting of detected range |
| | Setting of detected data |
| Possibility of measurement | Height, width, position |
| Certainty measurement | Speed of robot |
| | Shape of the glass |
| | Influence of luster |
| | Repeatability of accuracy |

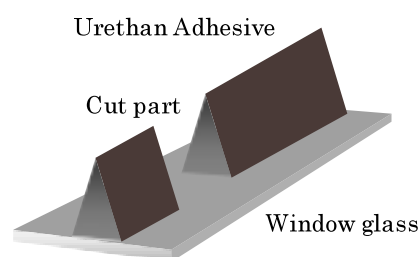


Fig.4 Image of Tested Parts

3.4 計測テスト

量産工程への適用に向けた課題の明確化と、対策の織り込みを目的として、Table 2に示す評価項目を挙げてテストを進めた。まず、計測機器の基本設定であるが、接着剤とガラス表面のセラミックは黒一色で判別が困難であるため、コントラストが強調できる光量に調整した。また、誤検出を除去するために、平均処理回数は最小とし、埃や乱反射の影響による誤検出が顕著にデータに現れるようにした。更に、必要となる検出範囲の設定や座標値の抽出方法等、基本的な設定を完了した後に、計測テストを開始した。主なテスト結果を以下に記す。

(1) 高さ、幅の計測

量産工程では、ロボットが高速で移動しながら接着剤断面形状を検出する必要があるが、その速度差によって検出精度に影響を及ぼすことが考えられる。そこで、実際の量産で考えられる高速、低速の二つの水準で検出精度に差が出るか確認してみた。

このテストでは、Fig.4のように接着剤に切り込み形状を入れて計測し、それぞれのデータを比較することとした。高さの計測結果をFig.5に示すが、速度差によって計測データに差は見られず、どちらの速度でも切り欠き形状を捉え、接着剤高さをノギスで計測した値との差は0.5mm以内であることが確認できた。

次に、計測の再現性を確認するため、30回の繰り返し計測を実施した。Table 3に計測結果を示す。高さ計測のば

らつきは目標とする±0.5mm以内であったものの、幅計測ではばらつきが大きく、目標を達成できない結果となった。

また、部品形状によって計測の再現性に差が出ることが懸念されたため、形状が大きく異なる3車種のウインドガラスを用いて繰り返し計測テストを行った。一例として、車種Aのリヤウインドガラスで実施した高さの計測結果をFig.6に、幅の計測結果をFig.7に示す。高さ計測では、ばらつき±0.5mm以内を達成できたものの、ウレタン幅の計測では、部位によって計測ばらつきが大きくなり、全ての形状で目標を達成することができなかった。

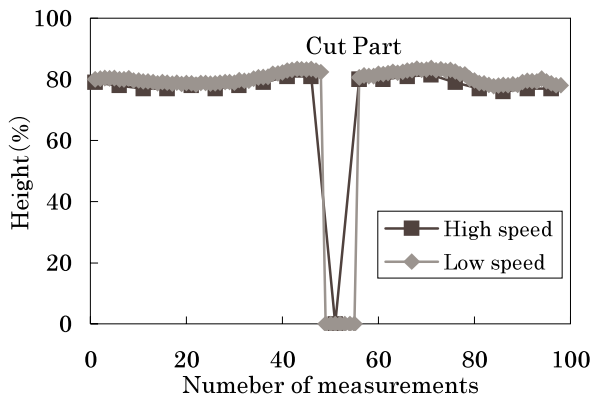


Fig.5 Influence of Robot Speed

Table 3 Result of Repeatability Test

| Height | | |
|-------------|-------------|---------------------------|
| Robot speed | Average (%) | Three sigma (Target <0.5) |
| High | 88.00 | 0.34 |
| Low | 88.73 | 0.30 |

| Width | | |
|-------------|-------------|---------------------------|
| Robot speed | Average (%) | Three sigma (Target <0.5) |
| High | 49.46 | 0.82 |
| Low | 45.67 | 1.05 |

(2) 塗布位置の計測

ウインドガラスに関して、接着剤の塗布位置はウインドガラスやモールの端を基準としている。したがって、塗布位置を計測するためには、これら端の位置の検出が必要である。しかし、接着剤を塗布するときのウインドガラスの位置決めばらつき、作業者が行うモールの貼り付け位置のばらつき、また、車種ごとのモール位置の違い等を考慮すると、接着剤の塗布形状とモールやウインドガラスの端の位置を同時に計測するためには、約80mmの計測範囲が必要となる。しかし、高さ、幅を計測するための計測機器の位置や設定条件では、計測範囲が20mmになってしまい、塗布位置を計測することができなかった。

(3) データ通信

接着剤高さ、幅の計測データは、一旦、計測機器コントローラのメモリ内に保存され、計測終了後にパソコンへ転送される。ウインドガラスの場合、全塗布領域の計測データは、頂点部と底辺部のXYデータ、および、ウインドガラスとの距離データであり、ウインドガラス一枚当たりのデータ容量は312,480byteに相当する。

一方、計測機器のシリアル転送の最高速度は38,400bpsで通信所要時間は33secかかる。量産サイクルタイム内で計測を完了するためには、通信時間を9sec以内にする必要がある。

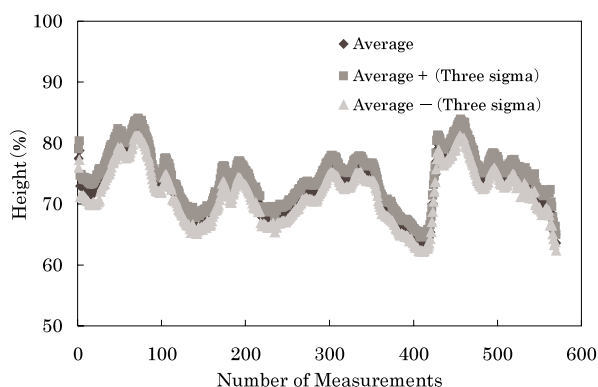


Fig.6 Example of Measurement Result of Height in A Car

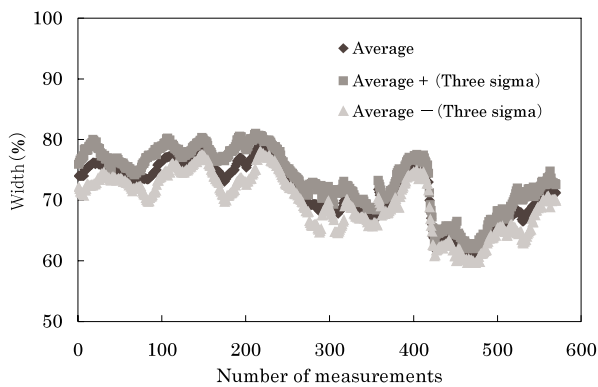


Fig.7 Example of Measurement Result of Width in A Car

3.5 課題

これらの計測テストを通じ、実際の量産工場に導入する上で、次の三つの課題が顕在化した。

- 接着剤の幅計測での再現性向上
- 接着剤塗布位置の計測方法を確立
- 通信速度の高速化

3.6 課題への対応

(1) 幅計測の再現性向上

幅計測の再現性が低下する理由として、Fig.8に示すように、接着剤の上方向から投光されたスリットレーザ光が、接着剤の斜面で反射して受光部に戻り難くなることや、接

着剤の傾きによって死角ができ、スリットレーザ光を照射できていないことが挙げられる。そこで、計測機器を傾斜させ、スリットレーザ光を斜めから照射する方法を試したところ、片側だけであるが接着剤底辺部を安定して計測できることが分かった。

この結果から、Fig.9に示す、二つの計測機器を組み合わせる方法を考案した。この場合、互いのスリットレーザ光が干渉して誤検出しないよう二つのスリットレーザ光を一つのスリットレーザ光として扱える位置に計測機器を配置することとした。この配置を決めるに当たっては、CADを用い、焦点距離を考慮しながら二つのスリットレーザ光軸が同一の平面になる計測機器の取り付け位置、角度を設定して、ロボットのハンド設計を行った。また、計測機器が傾いて配置されているため、接着剤の高さ、幅はこの傾きを補正して算出することとした。

この方法により、前述と同様の計測テストを実施した。一例として、車種Bのリアウインドガラスで実施した高さの計測結果をFig.10に、また、幅の計測結果をFig.11に示す。底辺部の検出が安定し、幅の計測においてもばらつきが±0.5mm以内となり、再現性の目標を達成することができた。

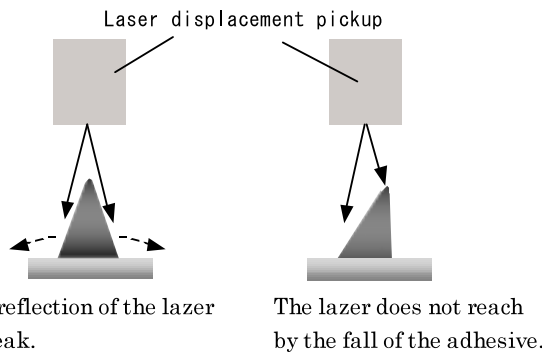


Fig.8 Factor to Obstruct Detection of Base Part

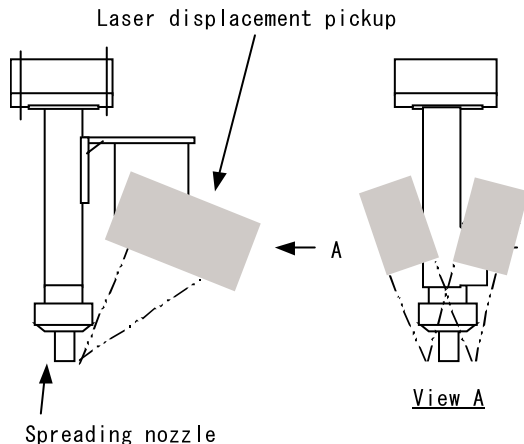


Fig.9 Arrangement of Laser Displacement Pickup

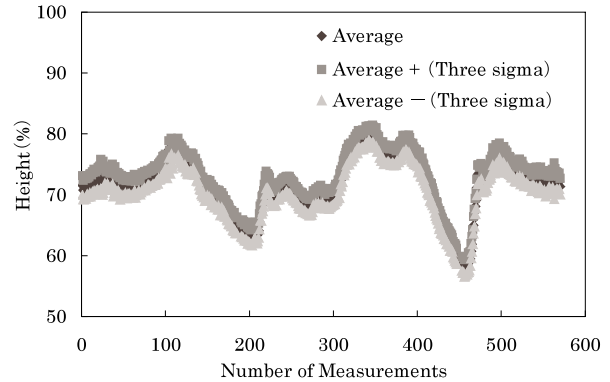


Fig.10 Example of Measurement Result of Height in B Car

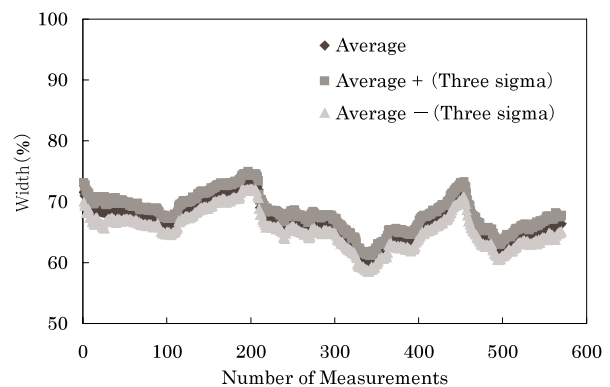


Fig.11 Example of Measurement Result of Width in B Car

(2) 塗布位置の計測

対象とする部品がウインドガラスの場合、接着剤の高さ、幅の計測と同時に塗布位置を計測するには、約80mmの計測範囲が必要であり、今回採用した計測機器では計測できない。量産工程のサイクルタイム内で計測でき、かつ、様々な形状に対応するためには、ロボットに複数の計測機器を取り付ける方法もあるが、塗布ロボットへの重量負荷の増大や、ロボットハンドと部品の干渉の恐れにより望ましくない。

そこで、接着剤塗布時の部品の位置を計測し、このデータから接着剤の塗布位置を算出する方法を立案した。

この方法は、ロボットハンドに小型の距離センサーを付け、Fig.12のようにウインドガラスの前後、左右で走査させる。ウインドガラスがない場合は、距離センサはエラー値を返してその時間を記録し、ウインドガラスがある場合は、検出した時間を記録する。そして、あらかじめ基準となるガラスの時間波形（時間をX軸、距離をY軸とした波形）と接着剤の塗布位置を登録しておき、この基準との差をずれ量として算出するものである。時間から距離への変換はロボット速度から算出する。

ここで、計測誤差要因としてロボット速度のばらつきが考えられる。そのため、計測基準となる治具によってサイ

クルごとにロボットの速度を測定し、基準との速度差を補正して検出精度を高めた。これらの施策により、量産のサイクルタイム内で接着剤塗布位置を計測することが可能となった。

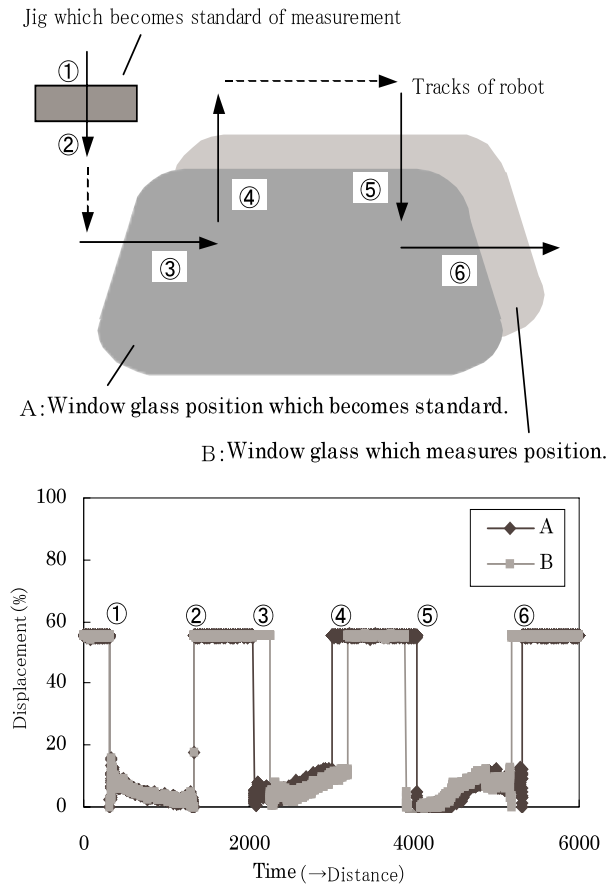


Fig.12 Method of Measuring Window Glass Position

(3) 通信速度の高速化

ガラス一枚当たりのデータ通信時間9sec以内を達成するために、塗布品質を保證する最小限までデータ容量の最小化を図った。計測機器は、12桁の通信バイトを持っており、必要精度に対して過剰な品質である。そこで、まず、必要桁数の6桁になるようにソフト変更を行い、更に、塗布不良の検出に必要な最低ピッチを確保できる走査時間を設定した。この結果、通信時間は8secにまで短縮され、目標を達成することができた。

4. まとめ

以上の取り組みにより、接着剤塗布に関し、量産のサイクルタイム内で全塗布領域の形状計測が可能となった。

本計測技術は、現在、量産工場のウインドガラスへの接着剤塗布工程に導入し、耐久性、信頼性の検証を行っている。Fig.13, Fig.14に量産工程での計測結果例を示す。

本計測技術を活用して接着剤塗布工程の品質を保證するためには、塗布の良し悪しを判定する確実性が鍵であり、計測機器が誤検出したときのデータ除去方法や、塗布不良

の判定基準を早期につくりあげていく必要がある。そのため、現在、量産での計測を全数実施して、誤検出の発生状況や塗布状態と計測データとの相関を分析し、信頼性の高いシステム構築に向けて活動を進めている。更に、今後は、接着剤塗布品質の安定化を図るため、品質に影響を与える工程内のパラメータを明確にし、ばらつきに強い工程作りを進めていく計画である。

最後に、この計測技術は、すでに車体の隙間を塞ぐシーラの塗布品質を定量化する技術としても展開を始めており、従来定量化が困難であった特性の工程内保証技術として完成させ、車両の品質向上に貢献していく所存である。

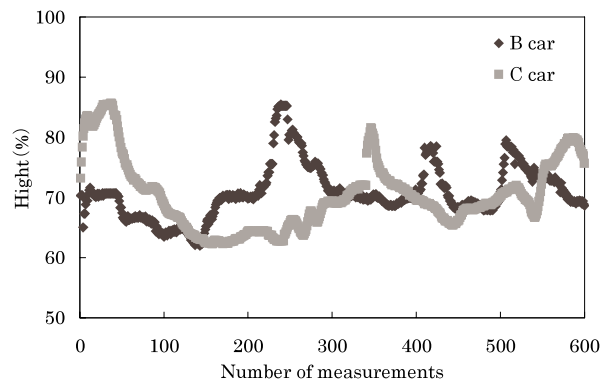


Fig.13 Example of Measurement Result of Height in Mass Production

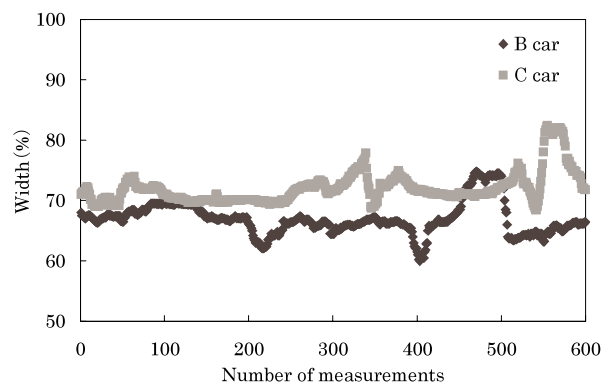


Fig.14 Example of Measurement Result of Width in Mass Production

著者



菅 康之



木村美昭



美本和彦

論文・解説

37

外装樹脂部品のFit & Finish向上 Fit & Finish Improvement for Bumper Fascia

湯野 兼 敏*¹ 西山 剛 史*² 室 本 将*³
 Kanetoshi Yuno Tsuyoshi Nishiyama Masaru Muromoto
 岩 本 道 尚*⁴ 谷 本 治 生*⁵ 近 藤 和 真*⁶
 Michihisa Iwamoto Haruo Tanimoto Kazuma Kondou

要 約

バンパは、車のスタイリングの変遷とともにボデーと一体化して、現在では、マツダブランドのフェースとして、魅力あるデザイン形成に大きな役割を果たしている。近年では、クラフトマンシップ向上のため、フェンダ等のボデーパーツと、バンパとの隙・段差を極小化して繋ぎ目の目立たないデザインに進化してきた。

我々は、これらのFit & Finishを向上するため、バンパ単体での見栄え向上や寸法精度向上につとめるとともに、車両としての品質向上のため、周辺部品の寸法誤差やばらつき、組立ばらつき等の影響を受けない締結構造に取り組んだ。

また「内捲り(うちまくり)」と呼称する新規金型構造を開発してディテールの品質を向上するとともに、CAEによる寸法予測技術等を拡充し、その成果を、アテンザ/Mazda6, RX-8, MPV, アクセラ/Mazda3に適用して、業界トップレベルのFit & Finishを実現した。

Summary

Our Bumper Fascia has been integrated with body styling to achieve an attractive shape, and has an important role as the face of Mazda Brand. To improve craftsmanship, the Bumper Fascia design has recently evolved to eliminate gap and flushness relative to peripheral parts, such as a fender and a side frame outer.

We worked for realization of perfect Fit & Finish by improving product appearance and dimensional accuracy and developed a new product structure which never be affected by assembly variations.

Through these activities, we have developed a new injection molding die called a "collapsible die", and a product deformation analysis method with CAE.

1. はじめに

バンパは車のスタイリングの変遷とともに大型化し、ボデーと一体化して、魅力あるデザイン形成に大きな役割を担っている。

近年では、マツダブランドのフェースの役割を果たすとともに、クラフトマンシップ向上のため、フェンダやサイドフレームアウト等のボデーパーツと、バンパとの隙・段差を極小化して繋ぎ目の目立たないデザインに進化してき

た。

我々は、これらのFit & Finish向上を実現するため、バンパ単体での見栄え向上や寸法精度向上につとめるとともに、部品の寸法誤差やばらつき、組立の誤差やばらつきの影響を受けない新たな締結構造の開発に取り組んできた。

本稿ではアテンザ/Mazda6, RX-8, MPV, アクセラ/Mazda3に適用した新規構造と、ディテールの見栄え向上のための新規加工法、寸法精度向上の取り組み事例を紹介する。

*1~5 車両技術部
Painting, Trim & Final Assembly Engineering Dept.

*6 ボデー開発部
Body Development Dept.

2. Fit & Finish 向上の課題

従来、バンパはポデーとは別体のイメージでデザインされ、フェンダ等のポデーパーツとの隙は2~4.5mmであった。

近年のデザインは、これらの隙・段差を極小化して緊ぎ目の目立たない一体化されたものに進化してきた。

その結果、各部品間の隙や段差は1mm以下と小さくなっており、部位によるばらつきは、0.5mm以下を確保することで見栄えを向上させる必要がある。

またフェンダ等、エッジ部分の曲げRも小さくシャープにする必要があり、バンパも金型の分割ライン等が見えないスッキリとした端末形状にするなど、ディテールにこだわった製品造りに取り組む必要がある。これらの要求に応えFit & Finishを向上するために、以下の課題に取り組んだ。

各製品の加工公差や組立のばらつきが積み重ならない構造を開発する。

バンパ単体での加工精度を向上する。

金型の分割ラインの見栄えを向上する。

3. ロバストな締結構造の採用

従来は、ヘッドランプ、バンパ等の外装部品は、それぞれ独立して車体と締結されるため、車体のバラツキと各製品のバラツキが積み重なる構造となっていた。そのため、ヘッドランプとバンパ隙等の寸法安定性を保つために、工程能力を確保するのが困難であった。

バンパと他製品のFit & Finishを向上するためには、ロバ

スト性を考慮した製品設計が必要であり、部品間の誤差が積み重ならない締結構造に取り組んだ。

Fig.1はフロントバンパとヘッドランプ下構造を示している。ヘッドランプの下側にブラケットを組み付け、ヘッドランプリテーナとヘッドランプの間にバンパを挟み込む構造として、ヘッドランプとバンパだけで寸法が保証できるようにした。

この構造は、リアバンパとリアエンドパネル等の締結構造にも採用した。リアバンパはポデーに直接差し込むことで、部品相互のばらつきを排除するとともに、剛性を確保し自重による変形等での隙や段差の悪化を抑制している。

バンパとフェンダの締結では、ブラケットを介して締結する構造を採用した。ポデーのブラケット組み付け基準近傍に、バンパ取り付け用の爪形状を形成し、ばらつきが極小化する締結構造とした (Fig.2)。

このような締結構造を採用することで、車体や部品寸法のばらつき、あるいは締結のばらつきの影響を受けず、部品間の寸法を確保して、Fit & Finish向上を実現した。

4. 総合的な机上検証技術の開発

部品間の隙と段差を極小化するためには、部品単体の寸法精度向上が重要になる。

柔らかい物であるプラスチック部品は、搬送や塗装時の加熱などによって変形しやすく、塗装治具や搬送台車などが、製品の変形に及ぼす影響を事前に予測し、治具・台車等に対策を織り込むことが重要である。

また、バンパの材料として使用されるポリプロピレンは

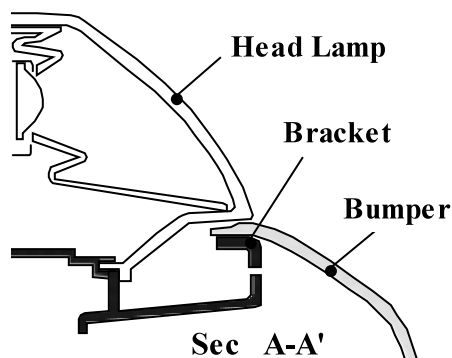
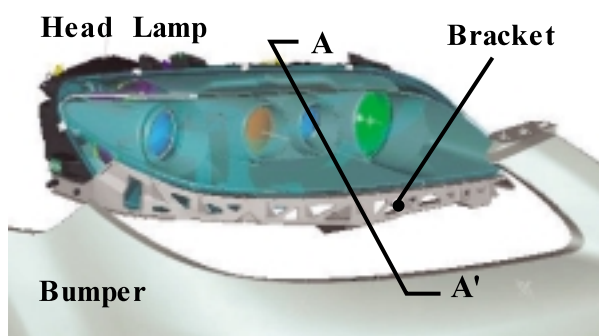


Fig.1 Assemble Structure with Head Lamp

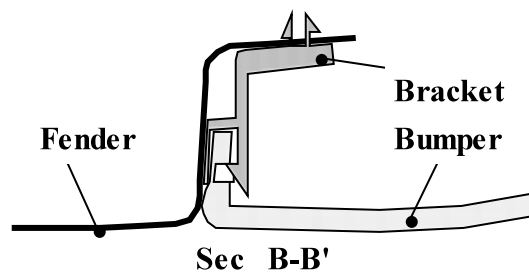
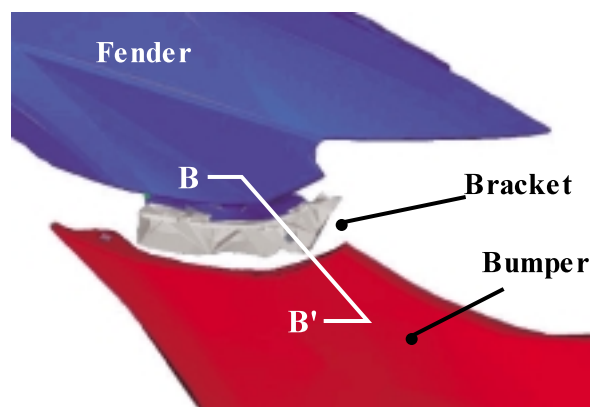


Fig.2 Assemble Structure with Fender

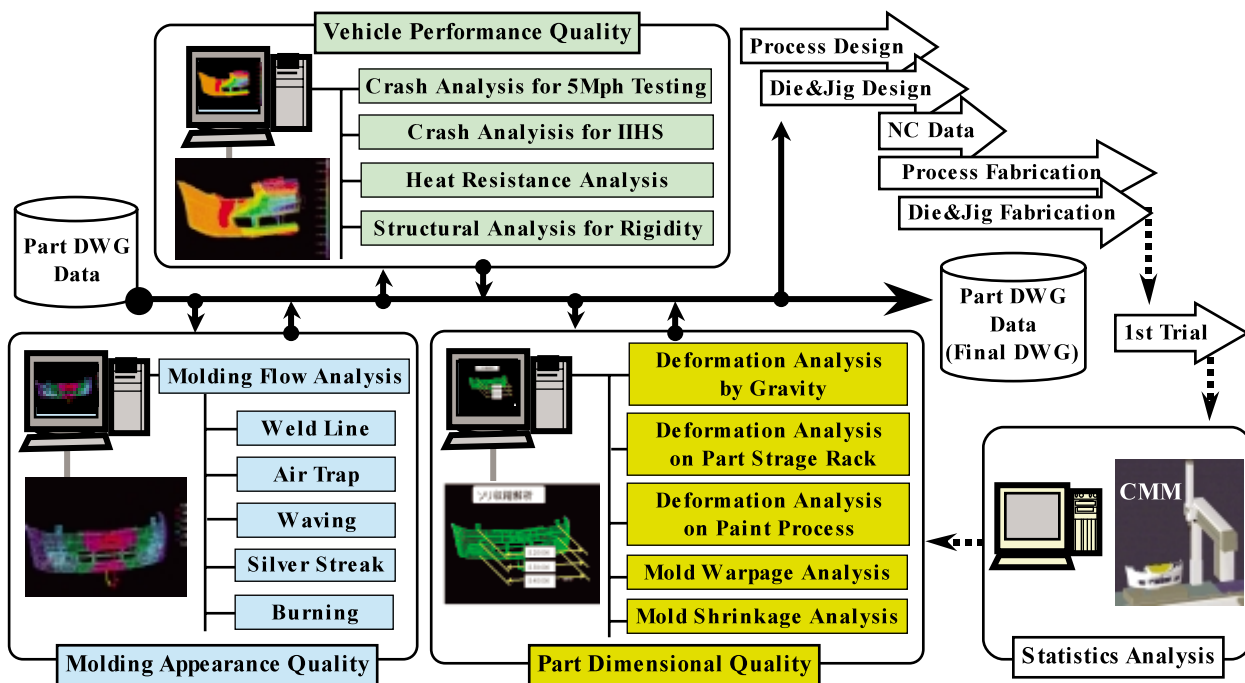


Fig.3 Dimensional Quality Evaluation System

成形後に収縮し、金型寸法より製品寸法は小さくなる。更に、塗装時にも加熱されて収縮が発生するので、寸法精度確保のためには、これらの収縮を正確に予測して事前に金型に織り込む必要がある。

当社では、バンパ等樹脂部品の、CAEを核として、機能品質と生産性をコンカレントに机上評価するシステムを構築し運用してきたが、寸法精度向上の課題に対して従来から取り組んでいる収縮解析などに加えて新たに解析技術を拡充し、運用を開始した。Fig.3にその概念を示す。

具体的には、バンパそのものの重量による変形を解析する「自重変形解析」や生産工程での変形を解析する「塗装治具変形解析」「搬送台車変形解析」を新規に開発・運用した。

また「収縮解析」等、従来から運用している解析技術についても、量産車種やトライアルの収縮データを多変量解析によって随時見直し、解析パラメータと解析ロジック修正して精度向上を図った。

4.1 塗装治具変形解析

バンパの塗装用治具は、断面に沿った形状の鉄製の治具で製作され、その上にバンパを搭載して塗装する (Fig.4)。

バンパは塗装の乾燥時の熱と自重の影響で変形を生じることがある。Fig.5は解析結果の一例である。ヘッドランプ周りや、アンダグリル開口部に応力が集中していることを示している。この解析で、製品設計・工程設計段階で変形予測が可能になり、製品形状や治具の仕様を製品形状確定前に決定できる。

4.2 台車変形解析

搬送台車は一般的にFig.6のように位置が可変の2本のバーでバンパを受ける汎用構造となっており、製品形状によ

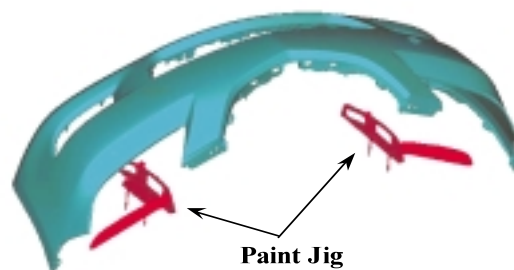


Fig.4 Bumper Paint Jig

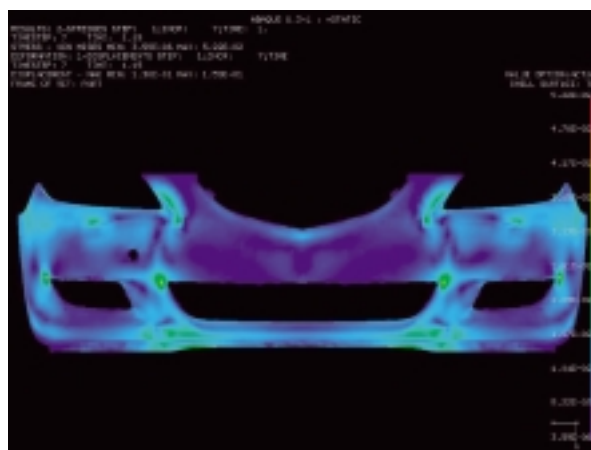


Fig.5 Paint Jig Deformation Analysis

っては把持部に応力が集中して変形し、実車の見栄えに悪影響を及ぼす場合がある。台車による変形についても、塗装治具解析と同様にCAEによる変形予測技術を開発した。

Fig.7は、台車にバンパを載せたときの解析結果の例で



Fig.6 Bar Type Bumper Rack

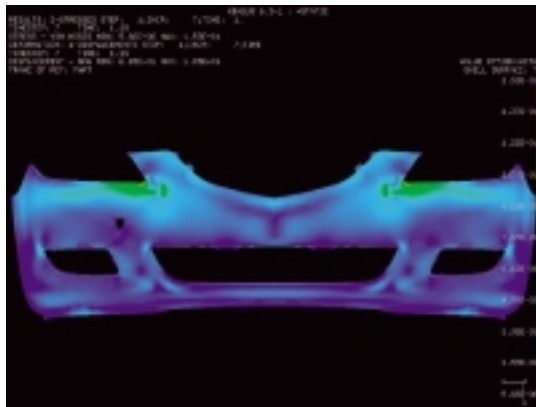


Fig.7 Rack Deformation Analysis

ある。この例ではヘッドランプ部に応力が集中し、変形することがわかる。

この取り組みで、従来の成形工程における「収縮解析」に加えて塗装や搬送時の寸法品質に及ぼす影響を事前に解析できるようになり、適用後の製品の寸法品質は大幅に向上した。

5. 金型分割ラインが見えない工法の開発

Fig.8にフロントバンパとフェンダの締結構造を示す。特にフロントフェンダとの分割部では、Fit & Finish向上の観点から、Fig.9に示すように金型の分割ラインがバンパ表面から見えない位置に設定することが望ましい。しかし、製品側の一部がアンダカットになるため、金型分割ラインを製品表面に設ける従来の設定方法や、もしくは製品コーナー部をフィレット形状からエッジ形状にデザイン変更する必要がある。

その場合、見栄えが悪化するだけでなく、塗装品質の悪化や、物流時・組立時に塗装剥がれ等、不具合の原因となり、好ましくない。

5.1 内捲り機構の概念

金型分割ラインが表面に出ない理想的な位置に設定する

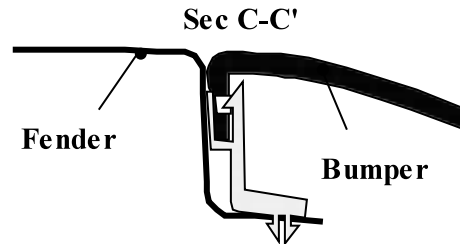
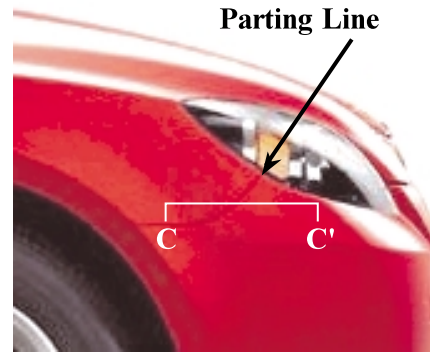
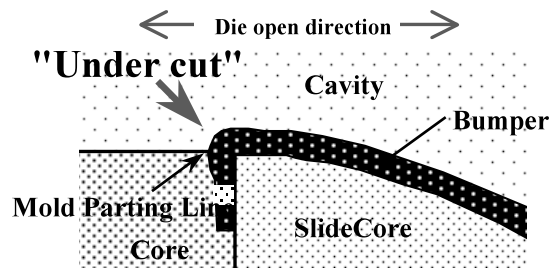
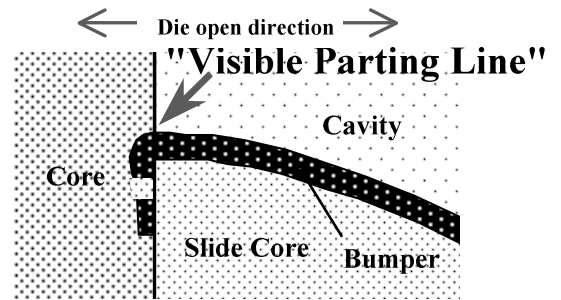


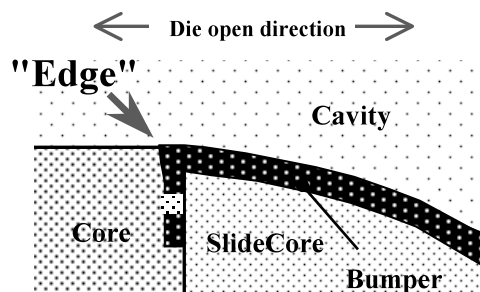
Fig.8 Assemble Structure with Fender



【Ideal Mold Parting Line】



【Conventional Mold Parting Line】 (Fillet Type)



【Conventional Mold Parting Line】 (Edge Type)

Fig.9 Mold Parting Line Design

ため、新たな型構造「内捲り(うちまくり)機構」を開発した。

Fig.10に内捲り機構を有する金型の構造を示す。内捲り機構は、キャビティとコアの金型分割面が開放される前に、製品を内側に引き込むことでアンダカットを回避し、その後型開き工程に入る機構である。

この内捲り機構の要となる製品を内側に引き込む手段は、フェンダ取り付けフランジ部の締結穴を形成するために設定されているスライドコアユニットを活用し、スライドコアの締結穴形成部を製品に把持したまま型内で内側に移動させることで製品を内側に引き込むものである。

5.2 金型構造と動作原理

Fig.11に内捲り機構を有する金型の動作原理を示す。

成形完了

型内への樹脂の充填が完了し、型開き開始直前の状態を示している。

型開・内捲り開始

金型の開放開始に伴い、成形機のエジェクタロッドがエジェクタプレート突き出し、製品をキャビティ側に押し付け固定する。コアの後退(図中左方に移動)に伴い、スライドコアユニットは傾斜コアとともに内側に移動し、製品フランジ部周辺を内側にまくりながら弾性変形させる。

型開き中

近接センサ1が検知ブロック1を検出した段階で、一旦エジェクタの加圧動作は、待機状態になる。製品は傾斜コア・スライドコアに把持され、キャビティのアンダカット

部分を回避しながら金型を開く。

型開き完了

スライドコアが抜きの状態に移動し、締結穴部をコアから外し、製品は内捲り前の状態に回復する。

製品突き出し

成形機からエジェクタロッドでエジェクタプレートを更新し、製品を型から完全に脱型する。

製品取り出し完了

スライドコアを前進後、エジェクタロッドが後退。ガススプリングの反力でエジェクタプレートは正規の位置に戻る。

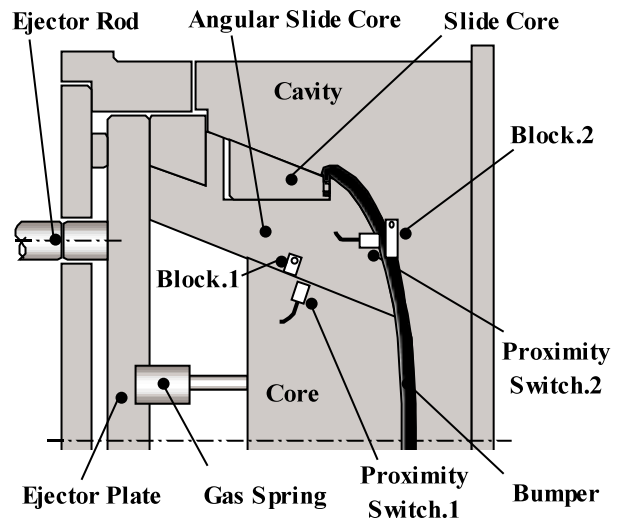


Fig.10 Die Structure with Collapsible Function

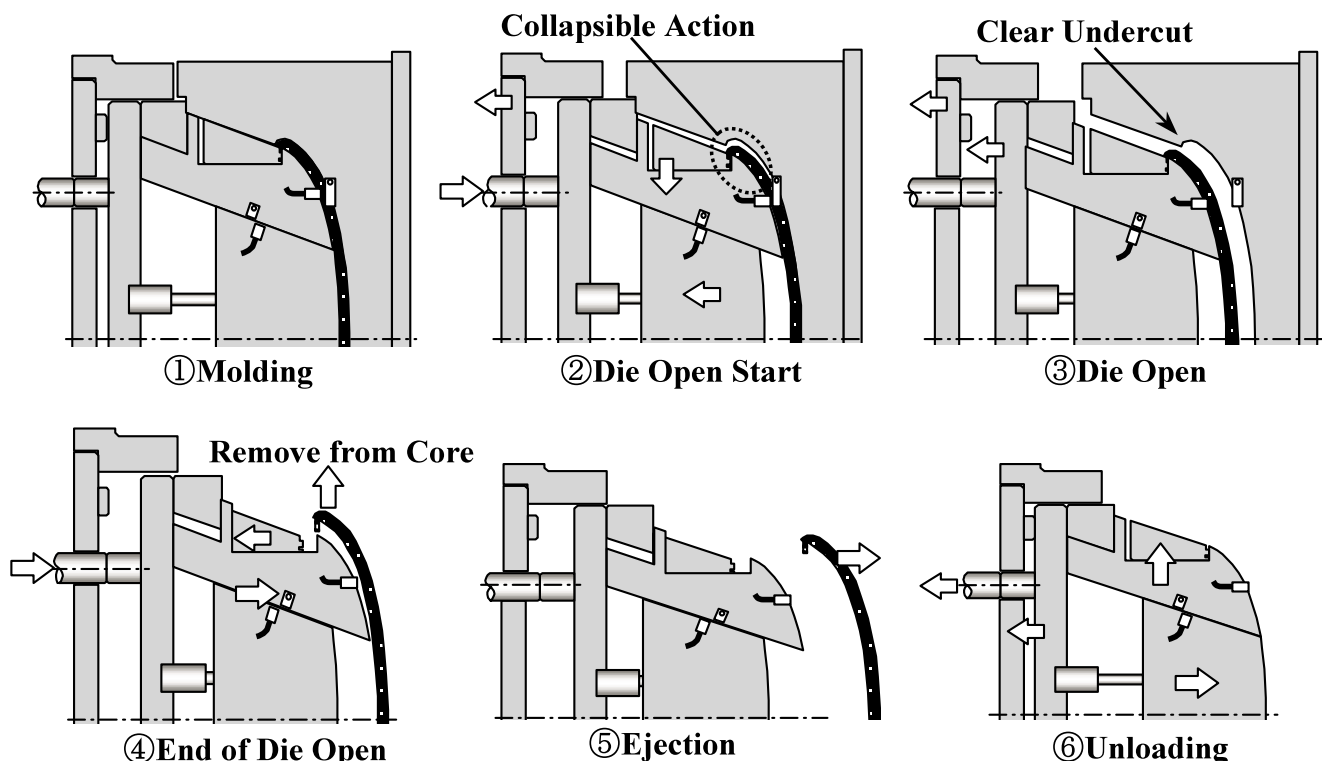


Fig.11 Collapsible Sequence

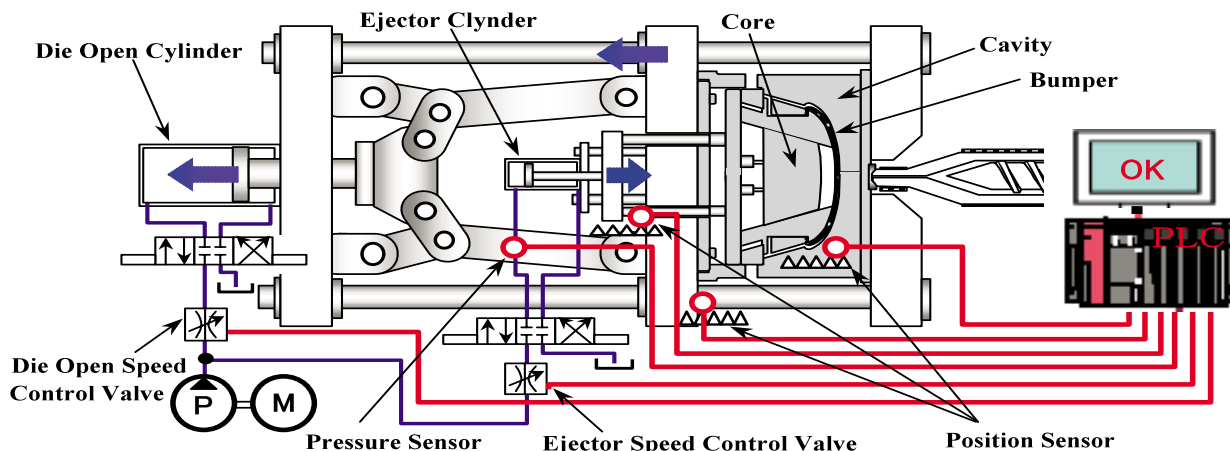


Fig.12 Ejector Synchronize Control System



Fig.13 Side View of Axela

この金型の一連の動作によって、製品のアンダカット処理から脱型までを行うことができる。

5.3 成形機の構造

型内での内捲り動作を行うため、射出成形機側ではエジェクタ動作と型開きを同期する制御機構を開発した。

Fig.12に示すように、型開動作に同期させてエジェクタロッドを押し出し、エジェクタプレートをキャビティ側に固定するように制御する。

油圧回路には流量比例弁と圧力検出機を、また同期状態を監視する位置検出器を新たに設け、動作を確実に制御できるようにした。万一、追従遅れが発生した際は、前述の金型内近接センサが検知して、成形機を自動停止させるとともに、オペレータへ異常を知らせる機能を付加した。

この新規機構開発により、アンダカット処理が可能となり、金型分割ラインをバンパ表面から見えないようにすることができた。

6. 成果・新型車への適用

以上の取り組みにより、以下の成果を得た。

ロバストな締結構造で、バンパやフェンダなどのボデーパーツ、およびヘッドランプやラジエタグリルなどの部品や締結のばらつきの影響を受けず、隙・段差特性を確保した。

成形収縮や後工程での変形等を事前に精度よく予測して、事前に対策を織り込み、部品単体の寸法精度を向上し

た。

「内捲り機構」と呼称する新規金型構造によって、金型分割ラインを製品表面に出さずに成形できるようになり、ディテールの見栄えを向上した。

成果は、2002年以降導入したアテンザ/Mazda6、RX-8、MPV、アクセラ/Mazda3 (Fig.13)に展開し、極小化されたボデーとバンパの隙・段差によって、継ぎ目が目立たず、フロントビューからサイドそしてリアビューに繋がるデザインラインを、高い品質感で実現した。

7. まとめ

これらの製品構造、量産準備プロセス、要具・設備に関わる取り組みで、業界トップレベルのFit & Finishを実現した。今後は締結構造と金型構造の更なる標準化とコスト低減、新規量産性評価手法のプロセス整備を進め、Q・C・D全体で進化させていく所存である。

著者



湯野兼敏



西山剛史



室本 将



岩本道尚



谷本治生



近藤和真

論文・解説

38

車両組立領域における構造標準化の取り組み Standardization of Vehicle Structure in Trim & Final Assembly

後藤 泰之*¹ 今井 洋一*² 青島 浩三*³
 Yasuyuki Goto Yoichi Imai Kouzou Aoshima
 村木 憲一*⁴ 藤澤 秀行*⁵
 Kenichi Muraki Hideyuki Fujisawa

要約

品質の劇的な向上を図ると同時に、競合上優位性のあるコスト構造を実現するため、生産部門も、より一層車両構造に踏み込み、問題を根源から絶つ活動が重要になっている。しかも、新型車開発期間の短縮を図る上で、量産性評価業務も、図面や試作で問題を発見し対策するという方法から、品質とコストの両面で最も優れた構造を標準化し、あらかじめ3Dデータや図面に織り込んでいく方法に変革することが必要である。

ここでは、車造りの最終工程である車両組立領域の部品組み付けを対象に、量産性に優れ、品質とコスト面で最適となる構造を構築し、標準化する取り組みとして、重要保安部品締結構造の標準化、内装/外装主要部品要素構造の標準化、この二つの活動内容を紹介する。

Summary

In order to realize a competitive cost structure while dramatically improving the quality, the activities in a manufacturing area must go further into a vehicle structure area to eradicate concerns. In addition, in aiming to shorten a new-model development period, we need to change the approach to production feasibility evaluation from the way we find concerns on drawings and at prototype builds and take corrective actions to the way we standardize an optimum structure in terms of cost and quality and incorporate it into 3D data and drawings in advance.

This report shows two of our activities to build and standardize the optimum structure in terms of productivity, quality and cost in the areas of parts assembly of the trim & final assembly process. One relates to the standardization of the tightening structure of critical safety parts and the other the element structure of major interior/exterior parts.

1. はじめに

マツダは、お客様に喜ばれる商品・サービスを提供することを品質方針として企業活動を行っている。従って、我々の目指す車造りは、魅力的で高品質な車をスピーディに開発し、しかも、すべての工場において、安定した品質の車を、働く人達に優しく、需要変動にも強いフレキシブルな生産システムの下に、低コストで量産することである。生産技術部門においても、従来の延長線上にある活動が

ら脱皮し、より高い次元での品質確保を目指し、なおかつ大幅なコスト削減を短期間で実現する、“革新的原価低減”の取り組みを展開している。

その中でも、車造りの最終工程である車両組立領域は、労働集約型の生産現場で、数多くの部品を組み付け、多様なコンプレキシティを克服しながら完成車品質の維持/向上を図るという特質から、他の領域とは異なるアプローチが必要になっている。

*1~5 車両技術部
 Painting, Trim & Final Assembly Engineering Dept.

2. 車両組立領域を取り巻く環境

2.1 多種混流生産

車両組立領域では、一つのラインで複数モデルの生産を行う、多種混流生産方式が業界全体の主流である。モデルごとに専用ラインを作る方法では、投資負担が大きく、また、モデルごとの需要変動に対し安定した操業の維持が困難である。従って、マツダにおいても、Table 1に示すように、各ラインで複数モデルの混流生産を行っている。

Table 1 Models of Each Line

| Plant | Line | Model | | | | |
|-------|------|----------------|--------------|--------------------|---------|---------|
| | | | | | | |
| F | F4 | BONGO FRIENDEE | BONGO VAN | BONGO WAGON | | |
| | F5 | DEMIO | RX-8 | ROADSTER | | |
| U1 | F6 | DEMIO | MPV | | | |
| | H1 | FA | AXELA SPORT | | | |
| H2 | FB | ATENZA SEDAN | ATENZA SPORT | ATENZA SPORT WAGON | TRIBUTE | PREMACY |

更に、一つのモデルにおいても、エンジン、トランスミッション、仕向け、そしてオーディオの種類などのオプション選択により、実際のバリエーションは莫大な数に上っており、その種類も常に変動している。

こうした条件の下で、狙いのQCD (Quality, Cost & Delivery) を実現するためには、現場主体の改善活動に頼るだけでなく、工程、設備、そして車両構造を含めた総合的な取り組みが必要である。

2.2 量産準備期間の短縮

一方、新たな施策を織り込む最大のチャンスは新型車の導入時であるが、市場の変化と多様なニーズに応えるべく、新型車の開発/量産準備期間は、今後ますます短縮していかなければならない。しかし、従来のように、膨大な数の評価項目を、新型車導入の度に繰り返す方法では、到底対応できない。従って、メリハリのある効率的な評価を可能にする取り組み、すなわち、評価が不必要な項目の拡大を図ることが重要である。

3. 革新的原価低減達成に向けての課題

3.1 絶対原価の定義と優先課題

革新的原価低減を目指して、生産技術部門では絶対原価という概念を導入している。これは、理論上必要最低限のコスト発生要素は何かを定義し、それ以外の要素はすべてロスと考え、徹底的に排除を行うことを考えるものである。

車両組立領域の車1台当たりのコストでは、その大部分を直接工労務費と減価償却費で占めており、この二つが優先的に取り組むべき削減対象費目である。また、量産準備期間の短縮を図りつつ、確実に品質を造り込むためには、量産準備業務プロセス自体の変革が不可欠である。

そこで、直接工労務費、減価償却費、そして量産準備業務の中のロスを削減することを優先課題として捉え、それぞれのロス分析と、ロス排除の方策について検討を行った。

3.2 直接工労務費の中のロス

直接工労務費の削減は直接工数の削減活動が主体になるが、直接工数の中を、価値を生んでいるかどうかという目付きで分析すると、そこには車を組むための定常作業に要する正味工数の他に、編成ロス、手直しロス、稼動ロス、そして非常ロスといったロスが存在する (Fig.1)。

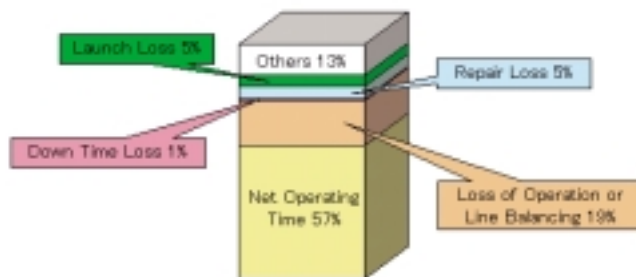


Fig.1 Proportion of Man Power in Trim & Final Process

こうしたロスは、車両構造、工程、設備、作業、そして工場管理など様々な要因が絡み合い発生しているものだが、車両構造はすべての要因の根源であり、ここにメスを入れない限り、根本的な対策とはなり得ない。

(1) 編成ロス

例えば編成ロスについて考えてみると、多種混流ラインでの代表的な編成方法であるタクト&ピッチ編成法を用いて、編成ロスの削減に努めてはいるものの、この方法とピッチゾーンの編成ロスをゼロにするには、理論上各モデルの生産比率変動がゼロでなければならない。工数の高いモデルが月平均50%の比率であっても、30~70%の間で振れるとすれば、70%に対応できる編成を考えなければならないからである。

しかし、各モデルの生産比率を完全平準化することは不可能であり、編成ロスを限りなくゼロに近づけるためには、車両構造上、モデル間の工数差をなくすか、超過する工数をサブアセンブリで吸収できる構造にしておく必要がある。

(2) その他のロス

手直しロス、非常ロスについても発生する直接原因は、作業ミスや作業不慣れなどであるが、なぜ作業ミスや不慣れが起こるのかを考えた時、車両構造がシンプルで組みやすく、しかもどのモデルも同じ方法で組めるならば、こうしたロスのほとんどは発生しない。少なくとも、モデルによって取り付け部品を選ぶ必要がなければ、仕様違いは発生せず、新型車も現行車と同じ方法で組めれば、作業不慣れは発生しない。

3.3 減価償却費の中のロス

一つのラインで複数のモデルを生産する車両組立領域では、モデルごとの量産対応投資が台当たりコストに及ぼす影響は大きい。各々の工事内容について必要最小限の投資と比較した場合、依然ロスが存在し、同じ対応をもっと安価な投資で行えるよう継続して活動をしていく必要がある。

しかし、締結ボルトが変わるために専用の締付ツールを導入するケースや、エンジンの受け位置が変わるためにソリヤパレットを作り直すケースなど、例え最低限の投資で済ませたとしても、その工事自体がお客様にとって価値のあるものとはいえない。

フレキシブルな生産システム/設備の導入を進めていく一方で、車両構造でも工夫をし、お客様にとって価値のない変更は排除していかなければならない。

3.4 量産準備段階における手戻りロス

品質不具合の発見は、上流であればあるほど流出に対するリスクは低減し、また対応に要するコストも削減できる。従って、マツダでは開発イベントである試作車評価段階までにすべての不具合を発見するべく、3Dデータ評価など量産性評価の前倒しを行っている。

しかしながら、試作車製作前に3Dデータや図面で不具合が発見できたとしても、設計変更という手戻りのロスが発生する。また、対策として周辺部品を含めた構造変更が必要であり、2次不具合の発生懸念を含め、その対策結果を評価し直す必要がある。

量産準備期間の短縮への対応という観点からも、不具合対策の構造変更が、また新たな不具合を引き起こす、といった悪循環を根本から断ち切らなければならない。そのためには、3Dデータや図面で不具合を発見し対策するという方法から更に一歩進めて、不具合の発生しない構造を最初からデータや図面に織り込むという観点が必要である。

4. 車両要素構造の標準化

4.1 車両要素構造標準化の狙い

ここまで述べてきたように、直接工務費の中のロス、減価償却費の中の新型車投資ロス、そして量産準備段階での手戻りロスを削減するには、車両構造へのアプローチが不可欠であり、その各要件はデータ作成時点で洩れなく織り込む必要がある。こうすることで、量産準備業務は従来の問題発見型から、織り込み確認型へと変革することが可能になる。

そこで、安定した品質が確保でき、かつロスを生じさせない車両構造をあらかじめ構築し、それを標準として新型車に織り込んでいく活動を2002年9月より開始した。

ただし、それぞれの車でデザイン、大きさ、および基本性能などお客様の求めるものは異なり、これらを無視した標準化はあり得ない。従って、車両要素構造、すなわち締

結構造や位置決め基準の取り方など、部品の組み付け要素についての構造標準化に取り組んでいる。

4.2 車両要素構造標準化のポイント

標準化を進めるにあたっては、積極的にロスを削減するための要件を構造に織り込まなくてはならない。そこで以下のポイントに注力して標準要素構造の構築を行った。また、各注力ポイントがどのロス削減に貢献できるかをFig.2に示す。

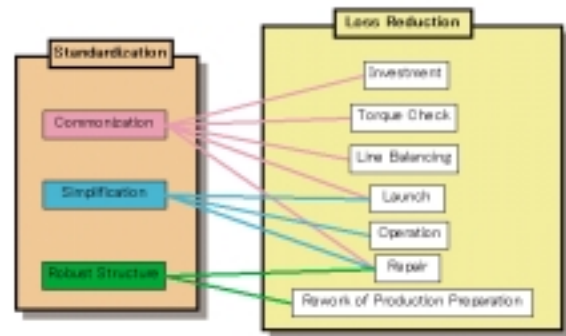


Fig.2 Effect of Standardization to Each Loss

(1) 共通化

従来は、新型車の量産準備段階において、前提の生産ラインで流れる既存モデルに構造を合わせることが主であったため、生産ラインが変わる度に共通化が崩れてしまい、結局車両構造の共通化ができないという現象を引き起こしていた。今後は全体最適の観点から構造を評価し、生産モデルやラインごとに異なる標準化を行うのではなく、横断的で網羅性のある標準構造として共通化し、車両構造パターンの削減を推進する。これにより編成ロス、品質ロス、および投資のロスなどを削減していく。

(2) 作業のシンプル化

また、各々の標準要素構造も作業がシンプルになるように考慮しなければならない。つまり、部品点数は必要最小限にし、しかも特別なスキルや無理な作業姿勢を必要としない組み付け構造を織り込み、手直しロスや非正常ロスの削減を図る。

(3) ロバスト構造

現時点では、実車評価を行って初めて顕在化する構造的な不具合が散見しているが、常に安定した品質が保てるロバスト構造を標準として確立することで、手戻りのロスを削減する。そのために、まずは量産準備段階で、既にある構造的な構造を積極的に次モデルでも水平展開させていく。

これは、品質の安定化、開発期間短縮、更には部品コスト削減にも結びつく内容であり、生産側だけでなく、開発部門やサプライヤにもメリットのあることである。

5. 標準化活動内容

5.1 標準化活動二つの切り口

以上述べてきた狙いを織り込み、標準要素構造として確立するために、二つの切り口で活動をスタートさせている。一つめが要素構造の中でもA/ARランク（重要保安部位）の締結構造に絞った標準化であり、二つめが内外装主要部品要素構造の標準化である。以下にそれぞれの活動内容について述べる。

5.2 A/ARランク締結構造標準化

(1) 活動の背景

要素構造の中でも、まず重要品質特性であるA/ARランク締結構造の標準化から活動を開始した。A/ARランクの締結箇所は、クイックレンチによるトルクチェックで全数保証を行ってきたが、工数削減、および保証精度の向上のために締付確認装置を付け、ナットランナによる締付でトルク保証を行う方法の導入を順次行っている。

しかし、ここで締付部品の対辺や締付トルクが統一できていないと、新型車の導入ごとに設備の改造が必要になり、締結パターンの数だけ装置が必要になる。そこで効率的な投資を行うためにも、締付部品と締付トルクの共通化を行う必要性が出てきた。そしてこれを実現するには、締付本数や締付部位の形状など締結構造自体を標準化しておくことがポイントとなる。こうした背景とロス削減の考え方をマッチングさせ、特に共通化に狙いを定めたA/ARランク

締結構造の標準化活動をスタートさせた。

A/ARランクの全締結部位202部位を調査した結果、その88%は何らかの違いがあることが判明し、最終的にはこれらの違いをなくし、すべての部位を1パターンに統合した標準構造を作り上げることが狙いである。

(2) 活動方法

今回の活動は、上記に示した課題を目に見えるようにした上で、全社コスト削減活動の一環として活動し、開発部門にも全面的な協力を得ることができた。従って、生産側からの提案に加え、設計における妥当性や部品コストをも考慮した標準構造の合意が形成されている。

活動のステップとして、2002年9月～2003年3月に4パターン以上の67部位について標準化を行い、それを開発中の新型車の構造に織り込むことを目標においた。まず、67部位それぞれについて、現行各車の構造を横並びで比較できるように、締結部の図、締結部品、締結本数、および締付トルクを記入した一覧表を作成した。この表を基に、設計の検討メンバと協同で、生産性を含めたコスト、共通化、そして今後の新型車を見据えた時の実現性、などを観点に、どの構造が標準となり得るかを検討した。

また活動開始時は、担当者一人ひとりが必要な情報を収集し、工程図をスキャンして貼り付けるなど、比較表の作成を一つひとつ手間をかけて行っていたが、業務を効率化し、更に領域を拡大していくためのシステム化にも取り組んだ (Fig.3)。

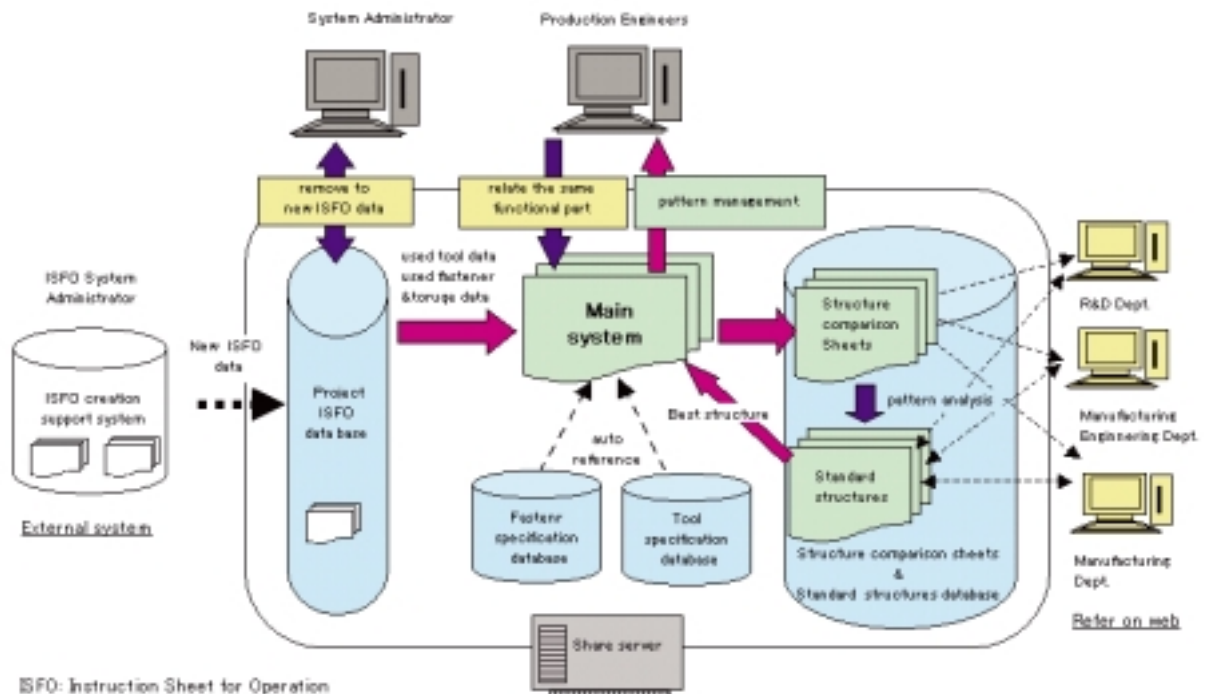


Fig.3 Outline of System for Tightening Structure Standard

現行の各モデルに使われている締結部品の番号、員数、形状、強度区分、購入コスト、使用箇所、締付トルクの指示、そして使用ツール、などの情報が効率良く収集できるように、締結部品や工具情報のデータベースを作成し、それを工程図データベースとリンクさせ、比較表の作成、標準構造の保管が行える締結構造標準化データベースを構築した。今後は更に、Webで閲覧ができるように継続して整備を行っていく。

(3) パターン数削減状況

ここまでの活動で、パターン数は活動前の平均6.2パターンから3.8まで削減の見通しが立った。しかし、目標の1パターンには、まだ大きな開きがあるため、更に新型車の担当設計者との調整や、他銘柄車の構造も参考にした結果、現段階で1.3パターンまで削減できる見込みである。

最終目標であるパターン数1へは到達していないものの、活動前に比べると大幅な共通化が見込めることから、この段階での構造を標準構造とし(例Fig.4)、新型車への織り込み活動を展開している。

(4) 今後の課題

今回、当該新型車に向けては、平均パターン数1.3の共通化レベルで構造を標準化し織り込みを進めているが、最終的にパターン数1を目指すために、適正トルクの求め方を開発とともに標準化していくこと、更には、ISO規格とJASO規格の混在をどうの方針の下で解決していくかといった課題が残っている。

また、ここまではA/ARランク締結部位の中でも、パタ

ーン数が4以上のアイテムに絞り活動してきたが、パターン数が2から3のアイテムについても、現在、54アイテム活動中である。更に、新型車への織り込みプロセスの構築も進めていく必要がある。

5.3 内外装主要部品の要素構造標準化

(1) 活動の対象

要素構造の標準化を検討するにあたり、車両部品すべてについて標準化できれば理想的だが、まず、大部分の車に共通して取り付く部品であり、新型車の量産直前まで品質育成に手間取ることの多かった、インストルメントパネルやバンパなど内外装の大物17部品から活動を開始した。

(2) 活動方法

不具合の発生しない構造をあらかじめ図面などに織り込む、という考え方自体は従来から存在していた。新型車の量産準備活動の過程で問題が発生した場合、本来どういう構造にしておくべきかを検討し、その構造を生産要件として登録後、設計基準に織り込んでいくという仕組みである。

しかし、今回の活動は単なる不具合の再発防止ではなく、品質とコスト双方を考慮し、更に車種を横断的に見た上で、最も優れた構造を標準として構築していくことを狙っている。

そこで、特に外観折り合いに関係する要件を 組み付け基準、部品固定方法、部品分割位置、部品(重ね)合わせ、の四つと定義し、過去の生産要件、他銘柄車の構造も参考にしながら、それぞれの分類ごとに最良の構造を検討した。例えば、組み付け基準はどの位置にどのような

Parts Tightening Structure Comparison

Object: Tightening of Unit-SAS Structure Gr/Design Gr: 572 Gr/OP

No.1AR57201-182

| Model Line | FAM35 FA/FA | MPV 7E | PRINSY 7E | ROADSTER 7E | TREBLITE 7E | ATENZA FA/FE | DEMO FA/FA/FE | RS-5 7E | ARISA FA | Dear Structure |
|------------------------------|---|--------------------------|---|---|---|---|--------------------------------------|---|--------------------------|----------------|
| Figure | | | | | | | | | | |
| Conf. No. | | | | | Confidential | | | | | |
| Parts Name | Special Screw | Screw | Special Screw | Screw | Special Screw | Special Screw | Screw | Special Screw | Special Screw | |
| Dimension - Pitch | M6 x 1.0 | M6 x 1.0 | M6 x 1.0 | M6 x 1.0 | M6 x 1.0 | M6 x 1.0 | M6 x 1.0 | M6 x 1.0 | M6 x 1.0 | |
| Dimension - Length | 15/9.5 | 15/10 | 15/10 | 15/10 | 15/9.5 | 15/9.5 | 15/9.5 | 15/10 | 15/9.5 | |
| Material | St | St | St | St | St | St | St | St | St | |
| Color/Plating | 115 | 115 | 115 | 115 | 115 | 115 | 115 | 115 | 115 | |
| Surface Treat. | M30T1-C | M30T1-C | M30T1-C | M30T1-C | M30T1-C | M30T1-C | M30T1-C | M30T1-C | M30T1-C | |
| Manufacture | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | |
| Category | | | | | | | | | | |
| Amount | | | | | | | | | | |
| Quantity | | | | | | | | | | |
| Quantity of Tightening | | | | | | | | | | |
| Change | | | | | Confidential | | | | | Confidential |
| Part Drawing | | | | | | | | | | |
| Tightening Pattern | GA | 1E | 1E | 1E | GA | 1E | 1E | 1E | 1E | |
| Difference from Pattern (AU) | | Tightening Part & Torque | None | Tightening Part & Torque | None | None | Tightening Part & Torque | None | Tightening Part & Torque | |
| Requirement from Design | Auto can't be used because Heater Core prevents to remove SAS | None | Auto can't be used because Heater Core prevents to remove SAS | Special nuts should be changed to general parts like "5000/500" | Auto can't be used because Heater Core prevents to remove SAS | Auto can't be used because Heater Core prevents to remove SAS | Common parts with FGD had to be used | Auto can't be used because Heater Core prevents to remove SAS | None | |
| Requirement from Production | Tools: 500P To ease to remove | Tools: 1-40 None | Tools: 500P To ease to remove | Tools: 500P To be changed to "5000/500" must be considered | Tools: 130-000 To ease to remove | Tools: 500P To ease to remove | Tools: 500P None | Tools: 500P To ease to remove | Tools: 500P None | |

Fig.4 Sample of A/AR Tightening Standard Structure

形状で設定すれば、ばらつきを最少にでき、作業性、部品コストも満足できるか、更にモデル共通の構造として成立するか、などである。

こうして検討した結果を、プレス成形、プラスチック成形など他領域の要件と整合を取った上で、部品ごとに要件を整理した標準要素構造表を作成した。

(3) 新型車への織り込みと課題

作成した標準要素構造を、直近の新型車の正式図面に織り込むべく、担当設計者への働きかけやデザインレビューでの確認などを実施してきた。その結果、正式図面段階で100%の織り込み率を達成することができた。

2003年4月以降は、前述の17部品に加え、内外装主要部品の残り19部品の標準要素構造を完成させ、後に控える新型車への織り込みを行っていく。また、この構造を生産要件に登録して、データ作成時の織り込みをより確実なものにするため、全社のホールドポイント管理の中で確認できるプロセスとする (Fig.5)。

法などを導入し、更に踏み込んだ標準構造構築の取り組みを行っていかなければならない。

著者



今井洋一



青島浩三



村木憲一



藤澤秀行



Fig.5 Process Flow for Standard Structure of Elements

6. おわりに

現在二つの切り口で取り組みを行っているが、ここまで決めてきた標準は、すでに存在する構造の中での最適構造という枠組みから抜け出せていないという、双方に共通する課題が残っている。作業をシンプルにするという観点も含めて検討は行っているものの、それが必要最小限の部品で構成されているかという点では、標準構造を更に進化させていく必要がある。この取り組みをやり切らなければ、競争に打ち勝ち、絶対原価を達成することは不可能である。

加えて、機能面での問題を発生させないために、A/ARランク締結構造の標準化活動と内外装主要部品の要素構造標準化の活動を融合させ、機能面でのロバスト構造展開レベルアップを行っていく必要がある。そのためには、実験的、SQC (Statistical Quality Control) 的アプローチ手

社外への発表論文一覧表（平成15年1月～12月）

1. 社外講演（海外）

* 所属は原則発表時点を示す

| 大会名 | 日程 | 主催 | 題 目 | 発表者 | 所 属 |
|-------------------------|------------|-----|--|---|--|
| SAE 2003 World Congress | 2003.3.3-6 | SAE | 2003-01-0121 Investigation of Acceleration Performance Feeling on a Rotary Engine Sports Car with Driving Simulator | 加村 孝信 福原 千絵 末富 隆雅 黒田 真也 佐々木健二 | 技術研究所 同 上 同 上 車両実研部 同 上 |
| | | | 2003-01-0125 Vehicle Development through “ Kansei ” Engineering | 貴島 孝雄 平井 敏彦 | 第2プログラム開発推進室 A.C.R&D |
| | | | 2003-01-0504 Accidents Data Analysis for the Real World Safety Enhancement | 河口 健二 吉村 美枝 菅原 勉 安部 晶子 尾川 茂 | 衝突性能開発部 同 上 同 上 同 上 同 上 |
| | | | 2003-01-0791 Development of Module Carriers by Injection Molding with Long Glass-Fiber Reinforced Polypropylene | 栃岡 孝宏 杉本健一郎 小川 雅規 川本 親 | 技術研究所 車両技術部 車両開発推進部 ボデー開発部 |
| | | | 2003-01-1160 Effect of Ceria content on the performance of a NOx trap | Joseph Theis Justin Ura Christian Goralski Jr. Hungwen Jen Eva Thanasiu Yasmenia Graves 高見 明秀 山田 啓司 三好 誠治 | Ford Motor Company 同 上 同 上 同 上 同 上 同 上 技術研究所 同 上 同 上 |
| | | | 2003-01-1230 Optimized Restraint Systems for Various-Size Rear Seat Occupants in Frontal Crash | 河口 健二 金子 直樹 岩本 竜彦 福島 正信 安部 晶子 尾川 茂 | 衝突性能開発部 同 上 同 上 同 上 同 上 同 上 |
| | | | 2003-01-1314 Evaluation of Aerodynamic Noise Generated in Production Vehicle Using Experiment and Numerical Simulation | 李 暉 上岡 孝志 農沢 隆秀 中村 貴樹 岡田 義浩 市川 成義 | 車両実研部 第2ITソリューション推進部 車両実研部 同上 同上 北陸先端科学技術大学院大学 |

| 大会名 | 日程 | 主催 | 題目 | 発表者 | 所属 |
|---|--------------|--|---|---|--|
| 12th International Pacific Conference on Automotive Engineering (IPC-12) | 2003.4.1-4 | SAE Thailand | Comparison of the influence of factors on engine sound evaluation in various acceleration modes | 福原 千絵 加村 孝信 末富 隆雅 黒田 真也 今西 秀樹 | 技術研究所 同上 同上 車両実研部 NVH性能開発部 |
| 18th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles(ESV2003) | 2003.5.19-22 | NHTSA/ 経済産業省/ 国土交通省 | Evaluation of pedestrian protection structure using impactors and full-scale dummy tests The effect of occupant protection by controlling airbag and seatbelt Vehicle Front Structure in Consideration of Compatibility | 石川 敏弘 是 治久 古本 有洋 黒田 晋 伊与田 輝 石川 敏弘 福島 正信 藤井 真司 安部 晶子 | 技術研究所 同上 衝突性能開発部 同上 技術研究所 同上 衝突性能開発部 同上 同上 |
| 2003 JSAE/SAE International Spring Fuel & Lubricants Meeting | 2003.5.19-22 | SAE/JSAE | 2003-01-1811 Characterization of mixture formation processes in D.I. gasoline sprays by the laser absorption scattering (LAS) technique | 李 鉄 山川 正尚 高木 大介 西田 恵哉 張 玉銀 廣安 博之 | 近畿大学 パワートレイン先行 開発部 広島大学 同上 同上 近畿大学 |
| ICLASS 2003 (International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems) | 2003.7.13-17 | Institute for Liquid Atomization and Spray Systems | Spray And Mixture Formation Processes by High-Pressure Swirl Injector For DISI Engines-Analyses Based On Laser Absorption Scattering (LAS) Measurements | 西田 恵哉 山川 正尚 | 広島大学 パワートレイン先行 開発部 |
| SICE Annual Conference 2003 in Fukui | 2003.8.4-6 | Society of Instrument Control Engineers | Measurement of driver's fatigue based on driver's postural change Objective measures to assess Workload for car driving | 古郡 了 吉澤 公理 稲目 力 三浦 泰彦 石橋 基範 倉橋 哲郎 赤松 幹之 | 技術研究所 同上 同上 同上 技術研究所 人間生活工学研究センター 産業技術総合研究所 |
| XVth Triennial Congress of the International Ergonomics Association (IEA 2003) | 2003.8.24-29 | International Ergonomics Association | A Study for the Operation of Accelerator Pedal in Vehicle Matching with the Human Characteristics | 西川 一男 農沢 隆秀 阿部 治彦 古川 浩二 | 車両実研部 同上 マツダモーターヨーロッパ(MME)フラ ンクフルト 車両実研部 |

| 大会名 | 日程 | 主催 | 題 目 | 発表者 | 所 属 |
|---|---------------|---|--|--|---|
| 18th IAVSD Symposium (International Association for Vehicle System Dynamics) | 2003.8.25-29 | Local Organizing Committee in KAIT | Effects of introversion - extraversion and task load on mental fatigue | 石橋 基範 吉田 倫幸 | 技術研究所 広島国際大学 |
| | | | Brake Judder and Shimmy Simulation Technology Development | 竹川 隆茂 | CAE部 |
| Aachen Colloquium “ Automobile and Engine Technology ” | 2003.10.6-8 | RWTH Aachen | Mazda's New Rotary Engine (RENESIS) | 橋口 匡 赤木 裕治 栗原 義則 田島 誠司 長尾 彰士 | 第2エンジン開発部 同 上 同 上 同 上 同 上 |
| | | | Mazda's New “ MZR ”1.4L/1.6L Gasoline Engine | 宮腰 勝信 | 第1エンジン開発部 |
| International Body Engineering Conference (IBEC 2003) | 2003.10.27-29 | JSAE | Application of Plasma Welding to Tailor- Welded Blanks | 猪 一郎 大西 渉 | 車体技術部 同 上 |
| | | | Effect of subframe structure on compatibility performance | 砂川 孝之 藤田 英治 田中由起子 竹原 伸 藤井 真司 福島 正信 安部 晶子 尾川 茂 | CAE部 同 上 同 上 同 上 衝突性能開発部 同 上 同 上 同 上 |
| | | | Development of integrated functions module carriers by injection molding with long grass-fiber reinforced polypropylene | 栃岡 孝宏 | 技術研究所 |
| | | | Development of Shape Fixing Press Forming Technology for High Strength Steel Sheet | 中田 匡宏 広瀬 洋三 小川 貴久 | 住友金属工業(株) 同 上 車体技術部 |

2. 社外講演（国内）

* 所属は原則発表時点を示す

| 大会名 | 日程 | 主催 | 題目 | 発表者 | 所属 |
|--|--------------|--|---|----------------------------------|-------------------------|
| 素形材技術フォーラム | 2003.1.10 | 素形材技術センター | コスワース鑄造法の開発 | 大塚 真 | パワートレイン技術部 |
| ヤマザキマザック広島地区技術セッション | 2003.1.20 | ヤマザキマザック(株) | マツダのMDI活動 パワートレイン領域の取り組み | 鳥居 元 | パワートレイン技術部 |
| 講習会「環境対応型加工技術」 | 2003.1.24 | 精密工学会 中国四国支部 | マツダにおけるセミドライ加工の取り組み | 中西 克司 | パワートレイン技術部 |
| 省エネ優秀事例発表（全国大会） | 2003.2.7 | 省エネルギーセンター | セミドライ加工による省エネルギー機械加工ラインの実現 | 山下 貢丸 中西 克司 | パワートレイン技術部 同上 |
| ヤマザキマザック MAZAK筑波フェア | 2003.2.7-8 | ヤマザキマザック(株) | マツダのMDI活動 パワートレイン領域の取り組み | 鳥居 元 | パワートレイン技術部 |
| 中国四国機素潤滑設計技術研究会 第29例会 兼 中国四国支部MD&T研究会 第27回例会 | 2003.2.28 | 日本機械学会 機素潤滑設計部門 日本機械学会 中国四国支部 | Analytical Approach of Transmission Gear Noise | 神田 靖典 | ドライブトレイン開発部 |
| 实用軽合金高性能研究会 | 2003.3.11 | 中国技術振興センター | アルミ鑄物の残留応力とその低減 | 杉本 幸弘 | 技術研究所 |
| 第4回革新的ものづくり研究会 | 2003.3.11 | 中国技術振興センター | ITS/運転支援システムの開発動向 | 藤田 健二 | 技術研究所 |
| 固体高分子形燃料電池/水素エネルギー利用成果報告会 | 2003.3.11-12 | 新エネルギー・産業技術総合開発機構 | 水素吸蔵合金タンクの安全性について | 山本 幸男 | 技術研究所 |
| 日本機械学会九州支部 第56期総会 | 2003.3.17 | 日本機械学会九州支部 | 新開発ロータリーエンジンの開発ストーリー | 田島 誠司 | 第2エンジン開発部 |
| No.03-03 シンポジウム 新開発エンジン | 2003.3.18 | 自動車技術会 | コモンレール式ディーゼルエンジン MZR-CDの開発 新型MZR 2.0/2.3Lエンジンの開発 | 片岡 一司 田中 伸彦 | 技術研究所 第1エンジン開発部 |
| H15年度西部支部総会 | 2003.3.24 | 航空宇宙学会 | エンジン燃焼技術開発へのCFD適用 | 中川 正 | 技術研究所 |
| 第91回 触媒討論会 | 2003.3.26-27 | 触媒学会 | 1B03 (RD) Ag担持ゼオライト触媒上での炭化水素の吸着・脱離挙動 | 川端 久也 住田 弘祐 重津 雅彦 高見 明秀 | 技術研究所 同上 同上 同上 |

| 大会名 | 日程 | 主催 | 題目 | 発表者 | 所属 |
|-------------------------------------|--------------|----------------------|--|---|--|
| 日本金属学会2003年春季大会 | 2003.3.27-29 | 日本金属学会 | X線回折法による自動車部材の破壊面解析 | 谷岡 真一 高藤 勝 | 技術研究所 同 上 |
| 全日本物流改善事例大会2003 | 2003.4.23 | 日本ロジスティクスシステム協会 | エンジン組立ラインにおけるフレキシブル高効率物流の実現 | 松浦 恭 | パワートレイン技術部 |
| シンポジウム「ケータイ・カーナビの利用性と人間工学」 | 2003.4.24-25 | 日本人間工学会 モバイル人間工学研究部会 | ドライブレコーダーによるドライバのハザード知覚に関する分析 | 石橋 基範 大桑 政幸 坂口 靖雄 赤松 幹之 | 技術研究所 (株)豊田中央研究所 同 上 産業技術総合研究所 |
| 第40回VS研究会 | 2003.4.25 | 日本機械学会 VS研究会 | 自動車の音質・乗心地をいかにとらえるか | 内田 博志 | 技術研究所 |
| 2003年春季大会 学術講演会 | 2003.5.21-23 | 自動車技術会 | IAFEM (Integrated Air Fuel Electrical Modules) の開発 | 高橋 博志 | 第1エンジン開発部 |
| | | | MZR 1.3/1.5L ガソリンエンジンの開発 | 宮腰 勝信 | 第1エンジン開発部 |
| | | | 環境対応塗装技術の開発動向 | 山根 貴和 | 技術研究所 |
| | | | 環境対応塗装技術の開発～中塗り/上塗りのウェットオン塗装が可能な低溶剤型塗料 | 山根 貴和 重永 勉 神田 輝夫 小笠原敏文 | 技術研究所 同 上 車両技術部 同 上 |
| | | | 交差点右折時における運転者の視認行動パターン | 末富 隆雅 内田 信行 木下 昌裕 松尾 典義 斉藤 誠一 | 技術研究所 日本自動車研究所 富士重工業(株) スズキ(株) いすゞ自動車(株) |
| | | | 生産技術業務プロセス革新 | 鳥居 元 | パワートレイン技術部 |
| | | | 内装用樹脂材料の「タッチ感」向上 | 田中 力 大西 正明 梶川 浩子 | 技術研究所 同 上 同 上 |
| | | | ボンネットの見え方が運転に及ぼす影響 | 米澤 泰延 新部 忠幸 岡本 宜久 福庭 一志 | 技術研究所 同 上 同 上 同 上 |
| 1st AUTOMOTIVE TECHNOLOGY DAYS 2003 | 2003.5.26 | (株)日経BP | マツダのアルミ車体技術 | 岩下 智伸 | 車体技術部 |

| 大会名 | 日程 | 主催 | 題目 | 発表者 | 所属 |
|---------------------------------|--------------|---------------|--|---|--|
| | | | マツダの機能統合型モジュールへの取り組み ~VEと軽量化をめざして~ | 岩城富士大 | プロセスリエンジニアリング部 |
| 第21回日本生理心理学会大会 | 2003.5.26 | 日本生理心理学会 | 産・学における心理生理学の基礎と応用, 理論と実践 | 石橋 基範 | 技術研究所 |
| 第2回生体反応を用いた交通・物流機械の評価に関する研究分科会 | 2003.6.1 | 日本機械学会 | 生体反応を用いた自動車の評価事例 | 古郡 了 石橋 基範 吉澤 公理 | 技術研究所 同 上 同 上 |
| マーケットレポート「進展する自動車用樹脂技術と今後の市場展望」 | 2003.6.1 | 矢野経済研究所 | 進展する自動車用樹脂技術と今後の市場展望 | 藤 和久 | 技術研究所 |
| LMSシンポジウム2003 | 2003.6.5-6 | エルエムエスジャパン(株) | NVH-Virtual Testing, 実験解析による音質カスケードニング | 小具 洋一 | NVH性能開発部 |
| VSTech2003 振動音響技術シンポジウム | 2003.6.5-6 | 日本機械学会 | 様々な加速シーンにおけるエンジン音質評価影響因子の比較 | 福原 千絵 加村 孝信 末富 隆雅 黒田 真也 今西 秀樹 | 技術研究所 同 上 同 上 車両実研部 NVH性能開発部 |
| | | | 重厚ドア閉め音創出技術の開発 | 内田 博志 中村 誠之 山田 勝久 長尾 邦昭 | 技術研究所 ボデー開発部 同 上 技術研究所 |
| 2003年 年次大会 | 2003.6.12-13 | プラスチック成型加工学会 | ガラス長繊維強化複合材の繊維折損防止用大型射出成形可塑化スクリュウの開発 | 金子 満晴 栃岡 孝宏 横山 和久 中島 英昭 | 技術研究所 同 上 (株)日本製鋼所 同 上 |
| | | | 車体構造用プラスチック材料の破面解析 | 谷岡 真一 高藤 勝 | 技術研究所 同 上 |
| 第11回 品質工学研究発表大会 | 2003.6.12-13 | 品質工学会 | エンジン異音パラメータの最適化 | 中津 健治 | パワートレイン技術部 |
| | | | 新型抵抗溶接条件の最適化 | 橋本 晃 奥村 信弥 山本 真司 | パワートレイン技術部 同 上 同 上 |
| | | | スポット溶接の溶接条件の最適化 | 松井 克真 福本 康博 | 第1工務技術部 パワートレイン技術部 |
| | | | 損失関数による生産技術業務の評価と課題 | 井田 吉人 鳥居 元 | パワートレイン技術部 同 上 |

| 大会名 | 日程 | 主催 | 題目 | 発表者 | 所属 |
|--|--------------|-------------------------|---|-------|--------------|
| 型技術者会議2003 | 2003.6.17-18 | 型技術協会 | 品質工学に基づくエンジンマウント系の最適設計 | 内田 博志 | 技術研究所 |
| CAE・CFD Revolution セミナー2003 | 2003.6.25-26 | (株)VINAS (株)日本SGI | STAR-CD, FieldViewを用いた設計者向けEasy CFD System「PT-ECSの開発」 | 横畑 英明 | パワートレイン先行開発部 |
| 自動車技術会九州支部 総会講演会 | 2003.6.27 | 自動車技術会九州支部 | 新型ロータリーエンジンRENESISの概要説明 | 田島 誠司 | 第2エンジン開発部 |
| 広島県音・振動技術研究会 | 2003.6.30 | ひろしま産業振興機構 | CAT/CAE活用によるロードノイズ低減 | 中野 伸一 | NVH性能開発部 |
| 自動車用アルミ接合委員会 | 2003.7.2 | 軽金属溶接構造協会 | マツダのアルミ車体技術 | 坂野 律男 | 車体技術部 |
| 「品質工学とCAE」セミナー | 2003.7.4 | (株)CRCソリューションズ | CAEを用いた鋳造用鋳型設計条件の最適化 | 垣田 健 | パワートレイン技術部 |
| CAD・CAE Process Compressionセミナー 2003 | 2003.7.8 | (株)CD-Adapco Japan | STAR-CD, FieldViewを用いた設計者向けEasy CFD System「PT-ECSの開発」 | 横畑 英明 | パワートレイン先行開発部 |
| 品質工学セミナー（生産・製造部門のためのコース） | 2003.7.10 | 日本規格協会 | 大規模量産ラインにおけるオンライン品質工学の実践 | 井田 吉人 | パワートレイン技術部 |
| 愛知県自動車整備振興会 指定第2ブロック技術委員会 | 2003.7.24 | 愛知県自動車整備振興会 指定第2ブロック | 新型ロータリーエンジンRENESISの概要説明 | 神原 伸司 | 第2エンジン開発部 |
| 第41回技術交流会 | 2003.8.1 | 自動車技術会 | コスワース鋳造法の開発 | 大塚 真 | パワートレイン技術部 |
| 中四国支部例会（放射光シンポジウム） | 2003.8.2 | 日本応用物理学会 物理学会 中四国支部 | 放射光を利用した触媒材料の浄化反応解析 | 住田 弘祐 | 技術研究所 |
| 日本機械学会 2003年次大会 | 2003.8.5-8 | 日本機械学会 | 実車風洞における自動車の空気抵抗/風騒音低減実験 | 農沢 隆秀 | 車両実研部 |
| 溶接学会 溶接法委員会 | 2003.8.6 | 溶接学会 | マツダのアルミ車体技術 | 岩下 智伸 | 車体技術部 |

| 大会名 | 日程 | 主催 | 題目 | 発表者 | 所属 |
|------------------------|--------------|---------|----------------------------|--|--|
| 2003年次大会 | 2003.8.6-8 | 日本機械学会 | 小型直噴ディーゼル機関の燃焼改善 | 志茂 大輔 片岡 一司 藤本 英史 | 技術研究所 同 上 同 上 |
| | | | 生体特性を考慮した上肢可操作性評価手法の開発 | 山田 直樹 米澤 泰延 正守 一郎 川口 克也 辻 敏夫 | 技術研究所 同 上 同 上 CAE部 広島大学 |
| 第20回品質工学セミナー -入門コース | 2003.8.21-22 | 日本規格協会 | シミュレーションでパラメータ設計をいかに活用したか | 内田 博志 | 技術研究所 |
| 構造形成技術部門委員会 | 2003.9.9 | 自動車技術会 | 環境にやさしいアルミ接合技術 | 加藤喜久生 | 車体技術部 |
| 熱処理セミナー | 2003.9.10 | 熱処理技術協会 | マツダにおける歯車の高強度化 | 織田 和幸 | パワートレイン技術部 |
| 2003年 秋季大会 学術講演会 | 2003.9.17-19 | 自動車技術会 | 圧力を用いた長時間運転時のドライバの疲労推定 | 古郡 了 吉澤 公理 稲目 力 三浦 泰彦 | 技術研究所 同 上 同 上 同 上 |
| | | | 後ヒンジドア操作における人間工学的検討 | 山田 直樹 米澤 泰延 三浦 泰彦 正守 一郎 中村 誠之 川口 克也 | 技術研究所 同 上 同 上 同 上 ボデー開発部 CAE部 |
| | | | 最適化制御による車両運動の解析 | 吉岡 透 足立 智彦 福庭 一志 高下 祐介 藤岡 健彦 | 技術研究所 同 上 同 上 東京大学 同 上 |
| | | | 筒内タンブル流動と燃焼特性に及ぼすバルブリフトの影響 | 岩井 浩平 榎原 和晃 藤本 昌彦 田端 道彦 | 技術研究所 同 上 同 上 同 上 |
| | | | 熱/振動複合疲労下における排気系部材の破壊予測技術 | 平本 健治 武重 伸秀 天野 浩平 | 技術研究所 同 上 同 上 |
| | | | プラスチックバンパーの塗膜除去技術の開発 | 森脇 健二 藤 和久 | 技術研究所 同 上 |

| 大会名 | 日程 | 主催 | 題 目 | 発表者 | 所 属 |
|---|---------------|----------------------------------|---------------------------|---|--|
| 第59回型技術セミナー | 2003.9.19 | 型技術協会 | 射出成形技術によるフロントエンドモジュールの開発 | 杉本健一郎 | 車両技術部 |
| 平成15年度省エネルギー優秀事例全国大会 | 2003.9.25 | 省エネルギーセンター 中国支部 | 摩擦熱を利用したアルミ板金部品接合技術の実現 | 妹尾 安郎 橘 昭男 高瀬 健治 | 車体技術部 同 上 同 上 |
| 第24回バイオメカニズム学術講演会 | 2003.10.4-5 | バイオメカニズム学会 | 上肢関節トルク特性を考慮した手先力操作性の解析 | 山田 直樹 正守 一郎 田中 良幸 高野 大作 辻 敏夫 | 技術研究所 同 上 広島大学 同 上 同 上 |
| 国際QCサークル大会 | 2003.10.8 | 日本科学技術連盟 | クランキングトルクチェック工程保証の確立 | 永田 哲也 下中 幸子 | パワートレイン技術部 同 上 |
| 第146回秋季講演大会 | 2003.10.11-13 | 日本鉄鋼協会 | チューブハイドロフォーミングの自動車への適用 | 岩下 智伸 加藤喜久生 浜口 照巳 | 車体技術部 同 上 同 上 |
| 中国四国機素潤滑設計技術研究会 第31回例会 中国四国支部MD & T 研究会 第29回例会 | 2003.10.14 | 日本機械学会 機素潤滑設計部門 日本機械学会 中国四国支部 | アテンザ用5MTの紹介 | 濱野 正利 | ドライブトレイン開発部 |
| 駆動系フォーラム | 2003.10.24 | 栃木富士産業(株) | 駆動系起因騒音の解析システム紹介 | 杉浦亮太郎 | ドライブトレイン開発部 |
| 03年第2回地区講演会 | 2003.10.24 | 自動車技術会 中部支部 | 新型ロータリエンジン/RENESISの概要 | 田島 誠司 | 第2エンジン開発部 |
| 経営工学会研究論文発表会 | 2003.10.24 | 日本経営工学会 中国・四国支部 | エンジン組立自己完結生産システムの開発 | 品川 裕史 川上 真一 上迫 博文 神南 裕巳 森尾 宏基 | パワートレイン技術部 同 上 同 上 同 上 同 上 |
| 日本塑性加工学会PP分科会 | 2003.10.25 | 日本塑性加工学会 | 自動車部品の高品質化，生産性向上へのCAE適用事例 | 岩本 道尚 | 車両技術部 |
| 「とことんわかる自動車のモデリングと制御2003」講習会 | 2003.10.27 | 日本機械学会 | 運転操作のモデル化とその応用 | 末富 隆雅 | 技術研究所 |
| 平成15年度（第22回）省エネルギー普及指導員養成研修会 | 2003.10.29-31 | 省エネルギーセンター 中国支部 | 交通と省エネルギー | 宮脇俊一郎 | 車両実研部 |

| 大会名 | 日程 | 主催 | 題目 | 発表者 | 所属 |
|---|---------------|-----------------------|---|---------------------------------|-------------------------|
| EDS PLM Solutions Users' Conference 2003 | 2003.10.30-31 | EDS PLM Solutionsジャパン | パラメトリック設計システム開発～エンジン設計の自動化～ | 楠 康友 | 第1エンジン開発部 |
| 第11回プラスチック成型加工秋季大会 | 2003.11.3-4 | プラスチック成型加工学会 | 熱可塑性エラストマーのタッチ感に与える組織の影響 | 大西 正明 田中 力 | 技術研究所 同上 |
| 情報化・生産性評価基準公開セミナー | 2003.11.7 | 中国生産性本部 | 情報化と経営幹部の役割 | 滝口 哲郎 | 第2ITソリューション推進部 |
| 第36回全国VE大会 | 2003.11.7 | 日本バリューエンジニアリング協会 | 自動車業界におけるモジュール化の現状とマツダの機能統合型モジュールへの取り組み～VEと軽量化をめざして～ | 岩城富士大 | プロセスリエンジニアリング部 |
| 日本航空宇宙学会西部支部講演会(2003) | 2003.11.7 | 日本航空宇宙学会 西部支部 | Application of CFD on Prediction of Aerodynamic Noise Generated in Automobile | 李 暉 農沢 隆秀 中村 貴樹 | 車両実研部 同上 同上 |
| 第54回塑性加工連合講演会 | 2003.11.7 | 塑性加工連合会 | 新型ロータリーエンジン RENESISの開発について | 長尾 彰士 | 第2エンジン開発部 |
| 第224回塑性加工シンポジウム | 2003.11.7 | 日本塑性加工学会 | 自動車産業におけるリサイクル技術 | 藤 和久 | 技術研究所 |
| MSC.Software Virtual Product Development Conference | 2003.11.11-12 | MSCソフトウェア(株) | ブレーキジャダー及びシミーの解析技術の開発 | 竹川 隆茂 | CAE部 |
| マキノJプライベートショー技術講演 | 2003.11.13 | マキノJ(株) | マツダのMDI活動・パワートレイン領域の取り組み | 鳥居 元 | パワートレイン技術部 |
| 関西潤滑懇談会11月例会 | 2003.11.14 | 関西潤滑懇談会 | 新型ロータリーエンジン RENESISの開発 | 藤本 順章 | 第2エンジン開発部 |
| 講習会「ユビキタス時代のIT技術」 | 2003.11.14 | 情報処理学会 中国支部 | 自動車開発における情報共有とナレッジマネジメントへの取り組み | 米田不仁男 | 第2ITソリューション推進部 |
| 日本人間工学会 中国・四国支部 第36回大会 | 2003.11.15 | 日本人間工学会 中国・四国支部 | 脚で踏む・脚を踏み変える動作における人間特性の研究 | 西川 一男 古川 浩二 河手 功 農沢 隆秀 | 車両実研部 同上 同上 同上 |
| 熱工学コンファレンス | 2003.11.15-16 | 日本機械学会 | 小型ディーゼル機関の燃焼改善によるNOx低減 | 志茂 大輔 | 技術研究所 |
| '03国際ロボット展 RT テクニカルセミナー | 2003.11.19 | 日本ロボット工業会 | マツダの車体組立てにおけるアルミニウム接合技術 | 神崎 晃 | 車体技術部 |

| 大会名 | 日程 | 主催 | 題目 | 発表者 | 所属 |
|-----------------------------|---------------|--------------------------------|---|-----------------------|---------------------|
| 学生自動車研究会 | 2003.11.22 | 自動車技術会 関西支部 | 新型ロータリーエンジン RENESISの開発 | 清水 律治 | 第2エンジン開発部 |
| 動力伝達系の最新技術 2003 | 2003.11.27 | 自動車技術会 | MT車の急発進トルク予測手法 | 藤川 智士 | パワートレイン先行開発部 |
| 革新的品質評価セミナー | 2003.11.27 | 日本規格協会 | オンライン品質評価 | 井田 吉人 | パワートレイン技術部 |
| 第46回自動制御連合講演会 | 2003.11.27-28 | システム制御 情報学会 | 先進安全自動車の研究開発と人間の視覚認知特性 | 山本 康典 大武 歩 呉 景龍 | 技術研究所 香川大学 同上 |
| 日本溶接協会 車両部会 講演 | 2003.11.28 | 日本溶接協会 | マツダの車体組立てにおけるアルミニウム接合技術 | 檜垣 通生 | 車体技術部 |
| パネルディスカッション, Ford CAEシンポ | 2003.12.2 | 自動車技術会 | 「エンジン開発へのCFDの活用」マツダにおける、バーチャル設計への取り組み、CFD Analysis System for Design Engineersの開発 | 本郷 均 | パワートレイン先行開発部 |
| 生産・情報/環境部会合同 セミナー | 2003.12.8 | 山口大学地域 共同研究開発 センター | 水素燃料自動車の現状と展望 | 若山 敬平 | 技術研究所 |
| Spring-8利用促進協議会 触媒評価研究会 | 2003.12.9 | Spring-8利用 促進協議会 | 触媒材料への放射光XAFS分析の利用 | 住田 弘祐 | 技術研究所 |
| 日本溶接協会 電気溶接 機部会講演 | 2003.12.10 | 日本溶接協会 | マツダの車体組立てにおけるアルミニウム接合技術 | 檜垣 通生 | 車体技術部 |
| 平成15年度支部研究発表 会 | 2003.12.10 | 日本鑄造工学会 中国四国 支部 | 自動注湯機のパラメータ設計 | 田中 裕一 | パワートレイン技術部 |
| 第29回軽金属セミナー | 2003.12.11 | 軽金属学会 | 自動車に用いられる軽金属材料および適用技術 | 西口 勝也 | 技術研究所 |
| QCサークル沖縄大会 | 2003.12.11-12 | QCサークル 本部 日本科学技術 連盟 | シリンダーブロック用刃具費削減 | 東島 秀幸 井口 陽介 | パワートレイン技術部 同上 |
| 第3回地区講演会 | 2003.12.12 | 自動車技術会 中部支部 | 環境対応塗装技術の開発動向 | 山根 貴和 | 技術研究所 |
| 第64回SMFセミナー | 2003.12.17 | 日本塑性加工 学会 板金プレス成 形分科会 | RX-8に適用したアルミ成形・接合技術の事例紹介 | 中原 孝善 高瀬 健治 | 車体技術部 同上 |

3. 社外寄稿

* 所属は原則発表時点を示す

| 寄稿誌名 | 題 目 | 発表者 | 所 属 |
|---------------------------------|---|--|--|
| 自動車技術 Vol.57, No.1, P.86-91 | モジュール化を支える自動車用プラスチック材料の現状と将来 | 藤 和久 | 技術研究所 |
| P.104-109 | エンジン製造技術の現状と将来 | 宮中 弘志 | パワートレイン技術部 |
| 自動車技術 Vol.57, No.5, P.31-36 | 陰影感が優れるベース塗料 | 古賀 一陽 高橋 敏貴 山根 貴和 阿部 一敏 | 技術研究所 同 上 同 上 日本ペイント(株) |
| P.68-73 | 環境にやさしい3ウェットオン塗装技術の開発 | 山根 貴和 重永 勉 神田 輝夫 亀迫 裕介 小笠原敏文 掛 正喜 | 技術研究所 同 上 車両技術部 同 上 同 上 同 上 |
| 自動車技術 Vol.57, No.6, P.63-68 | 環境にやさしい接合技術の開発 | 村上 土嘉 | 車体技術部 |
| 自動車技術 Vol.57, No.9, P.53-58 | ディーゼルエンジンの燃焼改善による排気クリーン化技術 | 志茂 大輔 片岡 一司 寺沢 保幸 | 技術研究所 同 上 同 上 |
| 自動車技術 Vol.57, No.12, P.52-57 | 停止距離に対するユニット特性の寄与度分析を可能にするHardware-in-the-Loopシミュレーション | 高木 章智 江口 眞 足立 智彦 福庭 一志 | シャシー開発部 同 上 技術研究所 同 上 |
| JSAE Review 24(2003), P.25-31 | An evaluation method for quality of air-fuel mixture distribution and movement in combustion chamber of DISI engine using CFD | 青木 理 山下 洋幸 藤本 英史 太田 統之 中川 正 山本 博之 | 技術研究所 同 上 同 上 同 上 同 上 同 上 |
| JSAE Review 24(2003), P.313-320 | Measurement of vehicle attitude with RTK-GPS for analyzing the vehicle motion behavior | 福庭 一志 足立 智彦 吉本 光洋 高橋 弘行 吉岡 透 | 技術研究所 同 上 同 上 同 上 同 上 |
| 自動車技術会 関西支部ニュース 第22号, P.2-3 | 射出成形ガラス長繊維強化複合材によるモジュールキャリア | 栃岡 孝宏 | 技術研究所 |

| 寄稿誌名 | 題 目 | 発表者 | 所 属 |
|--|--|---|--|
| 日本機械学会誌 Vol.106, No.1013, P.75 | 並列CAEシステムADVENTUREClusterの開発 | 秋葉 博 栗栖 徹 | (株)アライドエンジニア リング パワートレイン先行開 発部 |
| 日本機械学会誌 Vol.106, No.1014, P.22 | 構造部品用高強度射出成形ガラス長繊維強化複合材料 による機能統合型モジュールの開発 | 栃岡 孝宏 | 技術研究所 |
| 日本機械学会誌 Vol.106, No.1018, P.30-31 | 陰影感が優れる自動車塗装 | 古賀 一陽 | 技術研究所 |
| 日本機械学会論文集 (C編) 69巻 678 号, P.356-363 | 自動車開発のための仮想製品の概念と運用 | 長松 昭男 角田 鎮男 平松 繁喜 | 法政大学 CATEC(株) 第3エンジン開発部 |
| 日本機械学会論文集 (C編) 69巻 679 号, P.187-195 | 歯車箱を含むはすば歯車系の振動解析 (解析方法の 検討) | 西野 隆之 | パワートレイン先行開 発部 |
| P.196-203 | 歯車箱を含むはすば歯車系の振動解析 (軸まわりの 影響と負荷領域での振動挙動) | 西野 隆之 | パワートレイン先行開 発部 |
| アルトピア Vol.33, No.1, P.16-21 | コスワース鋳造ラインの開発 | 大塚 真 | パワートレイン技術部 |
| 可視化情報 Vol.22, Suppl. No.2, P.22- 23 | エンジンにおける燃焼現象の可視化 | 田端 道彦 | 技術研究所 |
| 型技術 10月号, Vol.18, No.11, P.52-56 | RX-8におけるプレス金型CAD/CAM活用事例 | 安達 範久 大田 敦史 | 車体技術部 同 上 |
| 機械の研究 第55巻 第6号, P.11-20 | パワートレイン開発と制御のためのモデル化手法 | 平松 繁喜 角田 鎮男 長松 昭男 | 第3エンジン開発部 CATEC(株) 法政大学 |
| 第65回 切削油技術研究会 総会資料 P.115-118 | 高能率加工の新たな展開(ビビリ安定性評価事例報告) | 松本 直樹 | パワートレイン技術部 |
| 材料 Vol.52, No.11, P.1318-1324 | 浸炭材の低サイクル衝撃疲労特性に及ぼす芯部硬さ・ 浸炭層深さの影響 | 堀本 雅之 松本 斉 牧野 泰三 村井 暢宏 織田 和幸 有見 幸夫 藤川 智士 西野 隆之 | (株)住友金属小倉 同 上 同 上 同 上 パワートレイン技術部 同 上 パワートレイン先行開 発部 同 上 |
| 省エネルギー Vol.55, No.2, P.35-37 | セミドライ加工による省エネルギー機械加工ラインの 実現 | 山下 貢丸 中西 克司 | パワートレイン技術部 同 上 |

| 寄稿誌名 | 題 目 | 発表者 | 所 属 |
|---|--|-------------------------------------|--|
| 素形材 Vol.44, No.8, P.15-19 | 高強度射出成形ガラス長繊維強化複合材による機能統合型モジュールの開発 | 栃岡 孝宏 杉本健一郎 小川 雅規 川本 親 | 技術研究所 車両技術部 商品サービスプログラム部 ボデー開発部 |
| 鑄造工学会 中国四国支部会報(こしき) No.25, P.1-5 | コールドボックス中子の寸法精度向上 | 垣田 健 | パワートレイン技術部 |
| 日本規格協会 標準化と品質管理 Vol.56, No.5, P.30-33 | 品質工学による生産革新 | 安達 範久 | 車体技術部 |
| P.37-42 | 大規模量産ラインに対するオンライン品質工学の適用の研究 | 井田 吉人 | パワートレイン技術部 |
| 品質工学会誌2003年4月号 Vol.11, No.2, P.33-39 | 品質工学で企業革新を! | 安達 範久 | 車体技術部 |
| プレス技術 11月号, P.44-48 | 自動車におけるアルミニウム加工シミュレーション | 岩下 智伸 相浦 真郎 阿賀 弘晃 中原 孝善 | 車体技術部 同 上 同 上 同 上 |
| ロジスティクスシステム「物流合理化賞特集号」 | エンジン組立ラインにおけるフレキシブル高効率物流の実現 | 松浦 恭 | パワートレイン技術部 |
| Auto Technology 3/2003, P.48-51 | Mazda's New Common Rail DI Diesel Engine | 寺沢 保幸 | 技術研究所 |
| NEDO, WE-NET 第Ⅱ期研究開発タスク5 平成14年度成果報告書, P.41-70 | 自動車用水素燃料タンクシステムの開発 2. MHタンクの安全性評価 | 山本 幸男 森本 賢治 | 技術研究所 同 上 |
| NEDO, WE-NET 第Ⅱ期研究開発タスク11 平成14年度成果報告書, P.120-134 | 水素貯蔵材料の開発 成果報告書 2.3 軽量水素吸蔵合金の開発 | 對尾 良則 | 技術研究所 |
| NEDO, HQL, 人間行動適合型生活環境創出システム技術(公開用)報告書, P.133-159 | 5. 運転時疲労状態評価技術の研究開発 | 古郡 了 | 技術研究所 |
| PETROTEC Vol.26, No.11, P.21-27 | 自動車用環境対応塗装技術の動向 | 久保田 寛 山根 貴和 重永 勉 | 技術研究所 同 上 同 上 |

編集後記

「必要は発明の母である」との言葉を引き合いに出すまでもなく、自動車技術は社会・環境的要請や様々な企業間競争の結果として進歩してきました。加えて近年は、お客様の多様化した嗜好に合った商品を競争力のある形で開発する必要性が増しています。魅力ある商品としては、これらのニーズに合わせるとともに、お客様の共感を得られる形で、作り手のメッセージを色濃く反映させる必要があると感じています。

マツダでは1999年にコーポレートビジョンを策定し、ニーズの源をお客様に置くとともに‘Zoom-Zoom’な商品を提供するブランド戦略を鮮明に打ち出しました。そして、アテンザ、デミオ、RX-8に続く次世代商品群の第4弾として、次世代スポーツコンパクト「アクセラ」を「新しい価値の創造」のメッセージを込めて世に送り出しました。

今回のマツダ技報第22号では、MDI (MAZDA Digital Innovation) における実験革新のキー技術として、次世代商品群の開発に威力を発揮している「Virtual Testing」と、その技術を駆使しマツダのDNAを体現した「アクセラ」を特集として取り上げました。特集では、マツダにとって一番の財産とも言えるエキスパート技術者自らが、そのノウハウを織り込むことで実現した、実戦的かつ高精度なシミュレーション及びラボ化技術に加え、「アクセラ」に織り込まれた様々な先進技術を紹介しています。

この技報を通して読者の皆様に、マツダの技術への積極的な取り組みと、技術者の「飽くなき挑戦」にかける魂の片鱗を感じていただくことができれば、編集に携わった者としてこの上ない喜びになります。

(笠原 哲)

編集委員会

| | | |
|-----|-------|------------|
| 委員長 | 喜田 達也 | 技術企画部 |
| 委員 | 中尾 浩二 | 企画設計部 |
| | 笠原 哲 | 操安性能開発部 |
| | 渡邊 重昭 | ボデー開発部 |
| | 中村 信弥 | 装備開発部 |
| | 三村 光生 | 第1エンジン開発部 |
| | 山田 洋史 | 技術研究所 |
| | 井田 吉人 | パワートレイン技術部 |
| 幹事 | 佐々木圭太 | 技術企画部 |
| | 大森 正志 | 技術企画部 |
| 事務局 | 世良 和美 | 技術研究所 |
| | 伊東加奈子 | 技術企画部 |

マツダ技報 第22号

発行 平成16年4月19日
発行人 金井 誠太
編集人 喜田 達也
発行所 マツダ株式会社
商品企画ビジネス戦略本部技術企画部
〒730-8670
広島県安芸郡府中町新地3番1号
電話 082(287)4106
印刷所 マツダエース株式会社
広島県安芸郡府中町新地3番1号

Mazda Technical Review No.22

April 2004
Publisher Seita Kanai
Editor Tatsuya Kita
Distributor Technology Planning Dept.
Product Planning & Business
Strategy Div.
Mazda Motor Corp.
3-1 Shinchi, Fuchu-cho Aki-gun,
Hiroshima 730-8670, Japan