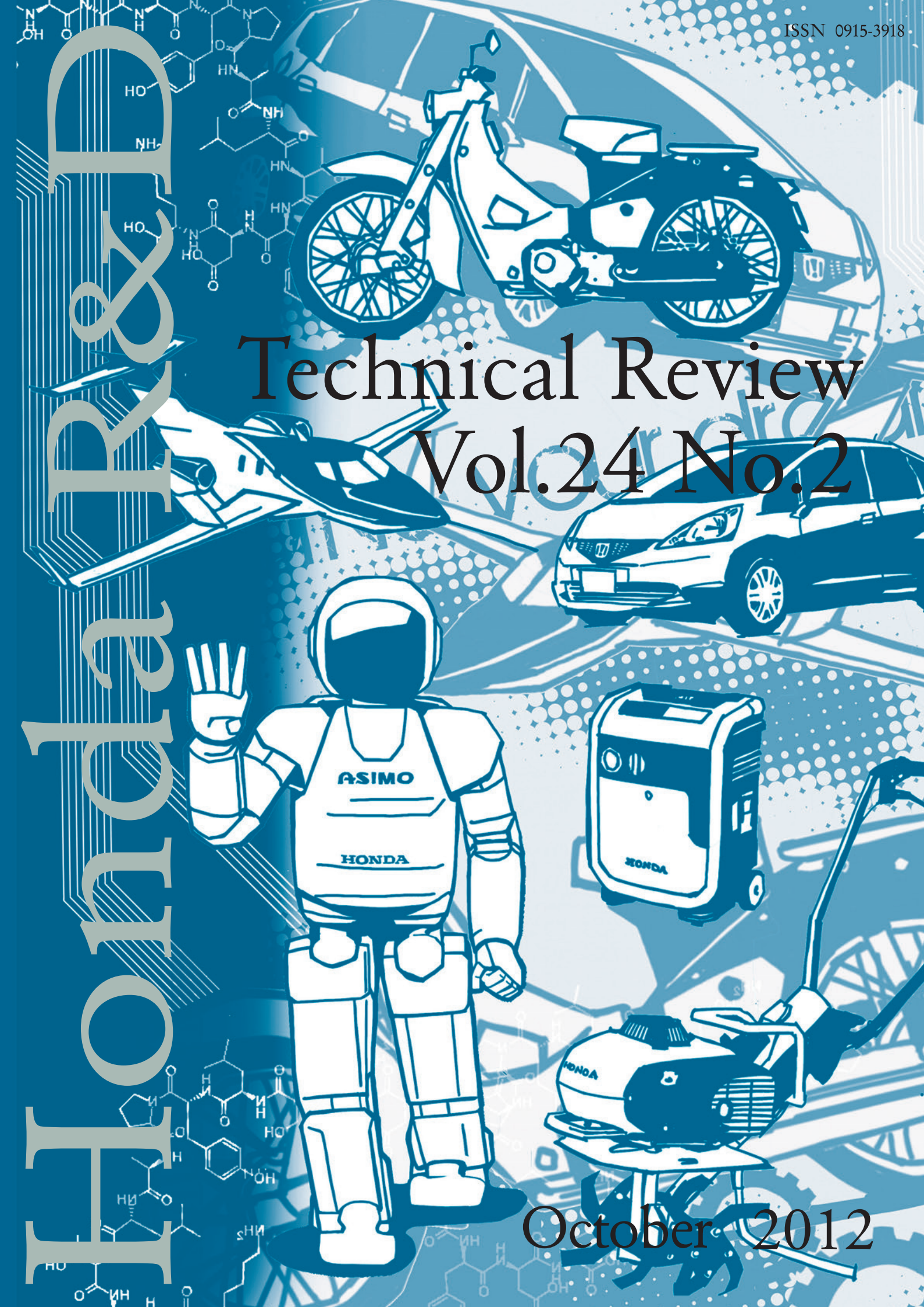
ISSN 0915-3918

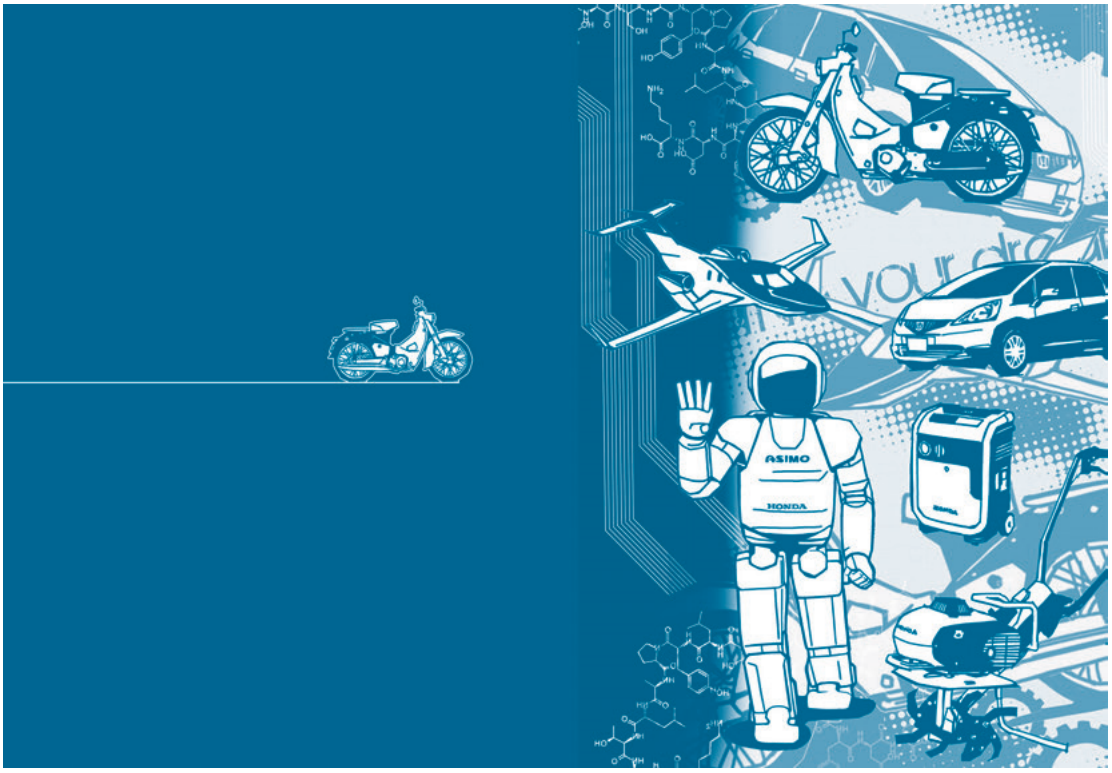
Honda R&D

Technical Review

Vol.24 No.2



October 2012



表紙の言葉

ホンダという会社は、技術とアイディアで生活を豊かにする、今も昔もそのスピリットは変わらないと信じています。

これからも、人と地球に寄り添う優しさのあるプロダクトを発信する企業であり続けたいと思っています。

そのような気持ちをデザインしてみました。



四輪R&Dセンター
加藤 文子

Technical Review
Vol.24 No.2

October
2012

Honda R&D

目　次

技術紹介

◇ 新型 Accord のデザイン ..... 奥本敏之･重原裕樹
内田　智･小林美絵 1

◇ 新型 CR-V のデザイン ..... 古仲　学･石橋丈弘
森下大介･龍　宏明 8

◇ NC700 シリーズのスタイリングデザイン ..... 工藤一浩 15

◇ NC700 シリーズの開発 ..... 小林弘毅･根来正明･大須賀貴則
三堀敏正･大島　正 23

◇ ４ストロークエンジン市販ロードレーサ NSF250R の開発 ..... 小野里富夫･倉吉良之 32

◇ 大型フラッグシップ船外機 BF250 の開発 ..... 原田義弘･石坂和弘･田中　豪
石塚邦彦･磯野史弥 40

◇ 中型車用 新型 CVT の開発 ..... 犬飼浩一郎･柴原章宏･村上康則
内野雄之･小島三千夫･西山恵以地 47

◇ 新中型マニュアルトランスミッションの開発 ..... 横山孝志･葛原敬士･萩庭正大
高橋　匠･中村　明 53

◇ 部分拡散法によるレアアース低減マグネットの開発 ..... 三好健宏･東　孝之
井上雅志･大﨑廣二郎 61

◇ 自動車用シートの耐久性を考慮したアレルゲン低減シート表皮の開発 ..... 林　里恵 67

◇ 差圧式高圧水電解型ソーラー水素ステーション（SHS2）の実証試験 ..... 長岡久史･吉田喜祐･David CUN
山下郁也･岡部昌規 72

論文

◇ 燃料電池システムにおける起動時の劣化抑制制御 . . . . . 古澤宏一朗･名越健太郎･谷本　智 79

◇ 水素吸着 MOF の設計およびその吸着特性. . . . . 古田照実･細江光矢
鹿屋　出･酒井　洋 85

◇ エタノール含有燃料に対するサクションフィルタの早期目詰りのメカニズム研究と長寿命フィルタの開発
荒井進吾･伊藤　淳･石井　翼
安藤秀昭･木下敬太･梅林不二夫 94

◇ リアルタイム空力デザインシステムの開発 . . . . . 福重貴浩･有吉斗紀知･宇田有佑
大熊友貴･岡部達哉･山本幸一
Lars GRAENING･Stefan MENZEL･Markus OLHOFER 102

◇ Mo-V 析出強化を活用した高強度および高耐摩耗性軟窒化用鋼の開発 . . . . . 増田大樹･松田英樹･山﨑歩見 111

◇ MBD 実現に向けたエンジンプラントモデルと段階的システム同定環境の構築
藤本茂希･大高義行･小堂智史 120

◇ 交通流改善およびエコドライブでの CO_2 削減ポテンシャルの推計. . . . . 今泉秀俊･仙石浩嗣 128

CONTENTS

Introduction of new technologies

◇ Styling Design of New Accord . . . . . Toshiyuki OKUMOTO・Hiroki SHIGEHARA
Satoshi UCHIDA・Mie KOBAYASHI 1

◇ Styling Design of New CR-V . . . . . Manabu KONAKA・Takehiro ISHIBASHI
Daisuke MORISHITA・Hiroaki RYU 8

◇ Styling Design of NC700 Series . . . . . Kazuhiro KUDO 15

◇ Development of NC700 Series . . . . . Koki KOBAYASHI・Masaaki NEGORO・Takanori OSUKA
Toshimasa MITSUBORI・Tadashi OSHIMA 23

◇ Development of NSF250R Commercial Road Racer with 4-stroke Engine
. . . . . Tomio ONOSATO・Yoshiyuki KURAYOSHI 32

◇ Development of BF250 Flagship Outboard Motor
. . . . . Yoshihiro HARADA・Kazuhiro ISHIZAKA・Go TANAKA
Kunihiko ISHIZUKA・Fumiya ISONO 40

◇ Development of New CVT for Midsize Vehicle
. . . . . Koichiro INUKAI・Akihiro SHIBAHARA・Yasunori MURAKAMI
Takeshi UCHINO・Michio KOJIMA・Keiichi NISHIYAMA 47

◇ Development of New Manual Transmission for Middle-Torque Engine
. . . . . Takashi YOKOYAMA・Keiji KUZUHARA・Masahiro HAGINIWA
Takumi TAKAHASHI・Akira NAKAMURA 53

◇ Development of Rare Earth-saving Magnet Using Localized Diffusion Method
. . . . . Takehiro MIYOSHI・Takayuki HIGASHI
Masashi INOUE・Kojiro OHSAKI 61

◇ Development of Anti-allergenic Compound for Durability of Automotive Seat Fabric . . . . . Rie HAYASHI 67

◇ Verification Test of High Differential Pressure Water Electrolysis-type Solar Hydrogen Station (SHS2)
. . . . . Hisashi NAGAOKA・Nobuyoshi YOSHIDA・David CUN
Ikuya YAMASHITA・Masanori OKABE 72

Technical papers

◇ Control Method to Reduce Degradation in Fuel Cell System at Start-up
. . . . . Koichiro FURUSAWA・Kentaro NAGOSHI・Satoshi TANIMOTO 79

◇ Hydrogen Adsorption MOF Design and Adsorption Characteristics. . . . Terumi FURUTA・Mitsuya HOSOE
Izuru KANOYA・Hiroshi SAKAI 85

◇ Analysis of Mechanism of Early Clogging of Suction Filter with Use of Ethanol Blended Fuel
and Development of Long-life Filter
. . . . . Shingo ARAI・Atsushi ITO・Tsubasa ISHII
Hideaki ANDO・Keita KINOSHITA・Fujio UMEBAYASHI 94

◇ Development of Real-time Aerodynamic Design System
. . . . . Takahiro FUKUSHIGE・Tokitomo ARIYOSHI・Yusuke UDA
Yuki OKUMA・Tatsuya OKABE・Koichi YAMAMOTO
Lars GRAENING・Stefan MENZEL・Markus OLHOFER 102

◇ Development of High-strength and High-wear Resistance Nitrocarburizing Steel by Precipitation
Strengthening of Mo-V Carbonitride
. . . . . Hiroki MASUDA・Hideki MATSUDA・Ayumi YAMAZAKI 111

◇ Development of High-performance Engine Plant Model and Sequential System Identification Environment
for Realization of Model-based Development
. . . . . Shigeki FUJIMOTO・Yoshiyuki OHTAKA・Satoshi KODO 120

◇ Estimation of CO_2 Reduction Potential by Traffic-flow Smoothing and Eco-driving Promotion
. . . . . Hidetoshi IMAIZUMI・Koji SENGOKU 128

新型 Accord のデザイン

Styling Design of New Accord

奥 本 敏 之* 重 原 裕 樹*
Toshiyuki OKUMOTO Hiroki SHIGEHARA
内 田 智** 小 林 美 絵**
Satoshi UCHIDA Mie KOBAYASHI

要 旨

新型 Accord は，「Excels in All Areas」をグランドコンセプトに，ユーザの心が豊かで気持ち良く，毎日誇りをもって使ってもらえるファミリーセダンとして開発した．

デザインは全体として「爽快」「先進」「上質」をテーマとし，ファミリーセダンとしての強い存在感や気持ちの良い空間を実現した．エクステリアデザインは「爽快，凝縮」をコンセプトとし，インテリアデザインは「Luxurious Modern Interior」をコンセプトとした．また，それらの特徴をより引き立たせる内外装カラーおよび内装ファブリックを開発した．

ABSTRACT

With “Excels in All Areas” as the grand concept, the new ACCORD was developed as a family sedan that could be used comfortably, and with pleasure and pride, every day.

Organized around the themes “Exhilaration,” “Advancement,” and “Superior Craftsmanship,” the design realizes a comfortable space and a strong presence as a family sedan. The exterior design was based on the concepts “Exhilaration” and “Condensation,” while “Luxurious Modern Interior” served as the concept for the interior design. Interior and exterior colors and interior fabrics were developed to further highlight these characteristics.

1．はじめに

歴代 Accord は信頼性や安全性などで多くのお客様に支持され続け，またお客様の車に対する満足度も毎回高く，特に US マーケットにおいてはミッドサイズのファミリーセダンの代名詞と呼ばれるまでに成長している．

今回で９代目となる Accord を開発するにあたり，US のファミリーセダンユーザの車の使い方を調査したところ，過去の調査では，通勤での使用がメインであったのに対し，週末もミニバンではなくセダンで家族と出かける使用頻度の増加がみられた．そうした背景には，ガソリンの高騰や環境意識の高まりにより，燃費性能の良いセダンを賢く利用するお客様が増えていることがわかった．セダンの使用頻度が多くなると，ユーザからは室内空間のさらなる快適性や，使いやすさを望まれたり，少し車のサイズが大きいという声が出てきたことも開発のヒントとなった．

我々は，お客様の心を最大限に豊かにする「Excels in All Areas」をグランドコンセプトとし，値段以上の価値を感じ，喜んでもらえるように，最適なパッケージと細部にまでこだわりをもったデザインの造りこみで，本物の価値を表現し，積極的に Accord を選んでもらえる，全世界で通用するファミリーセダンを目指した (Fig. 1)．



Fig. 1 Grand concept

＊ 四輪 R&D センター
＊＊ HONDA R&D AMERICAS, INC.

https://doi.org/10.69239/hondatechnicalreview.2012_24_2_1

2. デザインのねらい

新型 Accord のデザインは，全体として「爽快」「先進」「上質」の三つをテーマと定めて開発した．

「爽快」とは，Accord の強みのひとつでもある広い室内空間の進化を目指したテーマである．ただ広いだけではなく，視界が広く明るい空間で，ユーザが毎日気持ち良く快適に感じてもらえる空間デザインをねらっている．

「先進」とは，ユーザが直感的にわかりやすく，扱いやすい車であるために，より進んだ技術でサポートし喜んでもらえることを目指したテーマである．新しい技術を新しいデザインで表現すると同時に，人の動作や操作のしやすさもデザインの一部として取り入れ，新しい価値表現をねらっている．

「上質」とは，オーナ自身の満足や誇り，人に自慢できるような車であるために，デザインを細部にまでこだわり，造りこんだ本物の質感をねらったテーマである．

3. パッケージレイアウト

パッケージレイアウトは，燃費などの環境要件に適応したボデー骨格の最適化と，快適な室内空間の継承や新しいセダンの価値を目指した「爽快 Efficient パッケージ」をコンセプトとした．

「爽快」は，フロントガラスのラウンド形状化とフロントピラー位置の前方への移動，そしてピラーの細径化と断面形状の工夫により，よりワイドで開放感のある前方視界や快適さの向上を目指した．ホイールベースは，先代 Accord から 25 mm 短縮しているが，着座位置やシート形状の工夫により，ニースペースを 15 mm 拡大し，トップクラスのゆとりある快適な室内空間を実現している．

後席乗員を片側 15 mm 内側に移動した V 字レイアウトと，センタピラー位置の外側への移動により，後席からも視覚的な広さが感じられるレイアウトとし，爽快で新しいセダンの価値を目指した (Fig. 2)．

「先進」は，燃費の向上のために，骨格から見直し空力性能の向上を図った．ボデー全体を絞り込み，センタピラー付近を外側に張り出させ，フロントピラー，リヤピラー位置を内側に移動させた樽型フォルムにすることでボデーサイド面の空気の流れを最適化した．また室内空間を犠牲にすることなく全高を 10 mm 下げ，前方投影面積を少なくし空力性能の向上を実現した．

ボデーサイズは，前後オーバハングを短縮し，全長を 90 mm 短くすることと，ホイールベースを短縮することで，軽量化による燃費向上，そしてファミリーカーとして扱いやすいミッドサイズの最適パッケージをねらった (Fig. 3)．

「上質」は，大人四人が快適に過ごせるゆとりある空間の実現や，トランクフロアにおいても，徹底したこだわりを持ち，凹凸の少ないフラットな造形にすることで，高い品質が感じられるようにした．

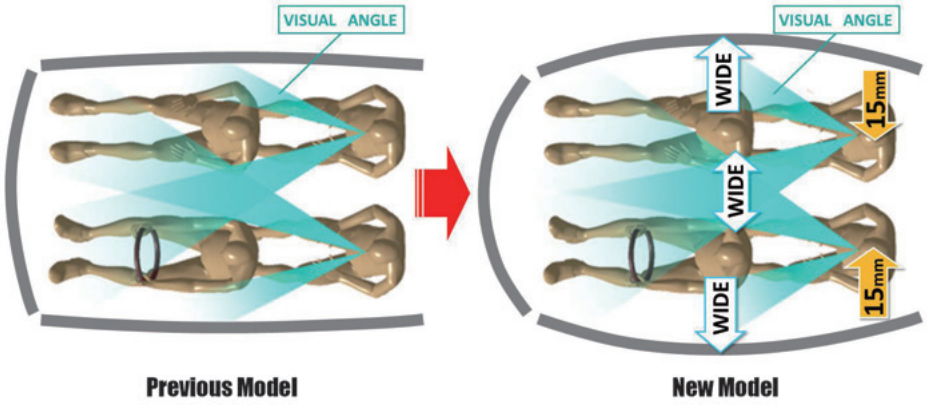


Fig. 2 Passenger layout

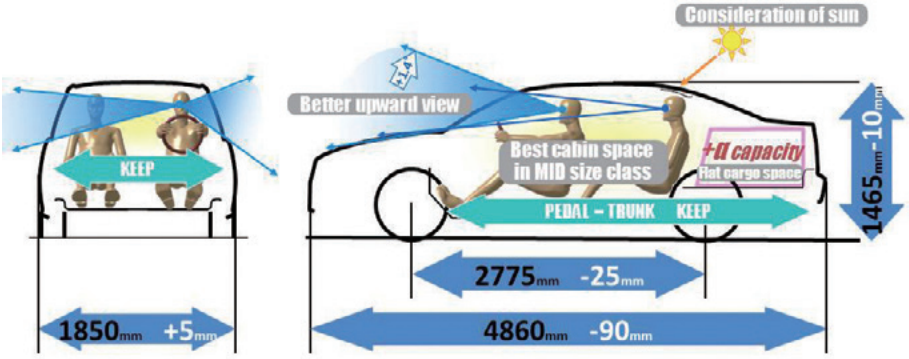


Fig. 3 Package layout

4．エクステリアデザイン

エクステリアデザインは，「爽快，凝縮」をコンセプトとし，ダイナミックで知性的な存在感のあるスタイリングとした（Fig. 4）．ここでいう「凝縮」とは，ボデー全体に面の連続性がありながら，力強く引き締まった躍動感のある彫りの深い造形を表している．

「爽快」は，細いフロントピラーや低い位置のベルトラインでガラスエリアを広く見せると同時に，三次元曲面ガラスを採用し，全体に大きくラウンドしたイメージを強調することで，室内空間の広さや快適性が外観からでも感じ取れるデザインとした．

「先進」は，フロントグリルとヘッドライトに連続性を持たせた構成とし，横方向に広がりのあるワイドで精かんな新しいフロントフェイスとした（Fig. 5）．ヘッドライトには，プロジェクタタイプを標準で採用するとともに，上級グレードの TOURING には LED ロービームを初採用し，精かんで先進性をアピールできるデザインとした（Fig. 6）．

前後バンパ下端にはメッキバーが浮いて見えるような構成でデザインし，新しい軽快なスポーティ表現をねらっている（Fig. 7）．

「上質」は，ノーズからトランクにかけて水平基調にボデー骨格を創りあげ，力強いダイナミックさや，伝統的なセダンらしい車格感を感じられるようにした．大きく見せたキャビン廻りは，車の重心の高さによる不安定さやボデーサイズの小ささを感じさせかねないが，ノーズからキャビン，キャビンからトランクへと連続性のある造形にすることで，一体感のあるしっかりとしたフォルムとしている．加えて，厚みのある力強いフード，トランク造形により，上級車のような車格感を表現している．

ボデーサイドには，彫りの深いネガ面から構成されるシャープな２本のキャラクタラインをあたえるとともに，力強い前後フェンダの張り出した造形で，ネガ面からポジ面へと変化する躍動感のある上質で立体的なサーフェースを創り出している（Fig. 8）．

リヤビューでは，キャビンからトランクへと絞り込んだ



Fig. 4　Exterior design concept



Fig. 6　LED headlight



Fig. 5　Front design



Fig. 7　Bumper design



Fig. 8　Final rendering

面と，リヤフェンダの張り出した面構成で，タイヤがしっかりと大地に踏ん張って見えるスタンスを強調し，上級車のような車格感を表現している．また大型化したトランクリッドランプや，リヤコンビネーションランプのグラフィックに繋がったメッキガーニッシュの構成で横基調を強調し，幅が広く安定感のある存在感を表現した (Fig. 9)．



Fig. 9　Rear design

5．インテリアデザイン

インテリアデザインは，「Luxurious Modern Interior」をコンセプトとし，爽快で気持ちの良い空間と見やすく使いやすいインタフェースや，高い質感をわかりやすく表現した (Fig. 10)．

「爽快」は，インストルメントパネルをシンメトリかつ横基調による横への広がりを最大限感じられるテーマにした上で，乗員が走行中にさらされ感を感じない造形ボリュームのバランスを考慮し爽快感を演出した．また，ドアライニングの表皮部分を上部まで廻り込ませたスタイリングにすることによって，肩廻りの解放感を表現したデザインテーマとしている (Fig. 11)．

「先進」は，インストルメントパネル上方エリアに表示系を配置し，見下ろし角度や視線移動を少なくすることで，より見やすい表示系とした．操作系は乗員からのリーチを近くし，空調やオーディオコントロールなどを機能別に分けることによって，よりわかりやすく，より使いやすい操作系にしている (Fig. 12)．



Fig. 10　Interior design concept

インストルメントパネルの中央部に配置した大型８インチセンタディスプレイには，燃費情報，オーディオ情報，運転支援情報等の多彩な情報を表示できる．加えて，表示画面をシンプルなグラフィックデザインにすることで，走行時の瞬間認知性にすぐれた機能的な先進インタフェースとしている．

オーディオスイッチには新たに「オンデマンド オーディオ」を採用している．これは操作性を追求したタッチパネルモニタであり，必要なときに必要なスイッチだけを最適な大きさに表示し操作することができる，直感操作に優れたインタフェースデザインで，先進性と使いやすさの向上をねらっている (Fig. 13)．

コンソール廻りは，乗員がポータブルデバイスをスマートに楽しむことができるように，USB ジャックをアクセスしやすいフロントトレイ内に新たに設置し，使いやすさの向上をねらった．

「上質」は，インストルメントパネル上部やドアパネル上部にソフトパッドを多用し，なおかつ乗員の目につきやすい所に効果的に加飾を施し，インテリア全体の質感の向上を図った．機能部品には，加飾として昼夜問わず光を反射



Fig. 11　Interior design



Fig. 12　Interface concept



Fig. 13　On-demand audio

するクロームメッキをあしらうことで認知性の向上や高い質感をねらった (Fig. 14).

コンソールサイドには大胆な大型加飾を入れるなどをして, ミッドサイズセダンとしての車格感を表現した. リヤアウトレットの位置は後席乗員がより快適に過ごせるように上方に配置した (Fig. 15).

シートデザインについては, 先代 Accord に対してステッチなどを効果的に使用し, 質感を向上させている. シートバック中央部は, くぼんだ形状のデザインとし, 乗員がより良いフィット感を得られるようにしている (Fig. 16).



Fig. 14　Chrome plating



Fig. 15　Console design

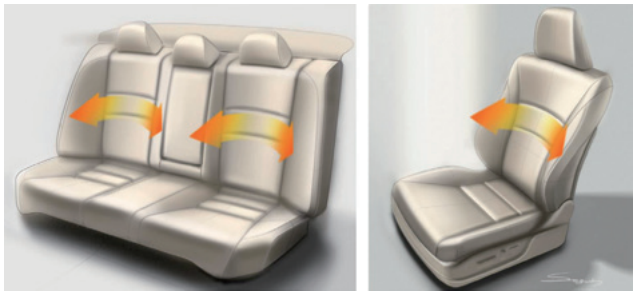


Fig. 16　Seat design

6. カラーおよびファブリックデザイン

6.1. エクステリアカラー

「LIQUID TENSION COLOR」をコンセプトに, 液体の表面に見られるような緊張感や張りのある質感をねらった (Fig. 17). ファミリーセダンらしい落ち着きのある有彩色を組み合わせたキャラクタカラー２色と, 時代にあわせ進化させたスタンダードカラー２色の新色４色を含む, トータル８色のカラーラインナップを設定した.

キャラクタカラーの HEMATITE M. と CHAMPAGNE FROST P. は, 細かい粒子の光輝材に２色性のある微量のパール顔料を配合し, 色味に複雑さをプラスした. CHAMPAGNE FROST P. は, 明るいアイボリーの中に柔らかいブルー味を感じさせ, HEMATITE M. は, 正面色がグリーン味を帯び, 底色はグレーになるよう設計した.

進化させたスタンダードカラーの MODERN STEEL M. と OBSIDIAN BLUE P. は, 過去モデルからの色の方向性をじっくり考察し, 色味の吟味を重ねた. MODERN STEEL M. は, 高い質感を表現するため, 従来よりも細かいアルミフレークを使用し, トレンド方向である赤味追加と明度ダウンを施して, シックな雰囲気と力強い立体感を表現した. OBSIDIAN BLUE P. は, いかに青くて深みがあるかという点を追求し, 従来よりも彩度の高い干渉パールを使い, 暗く深みのある底色から, ハイライトの鮮やかな青味までの美しい色変化を表現した (Fig. 18).



Fig. 17　Exterior color concept

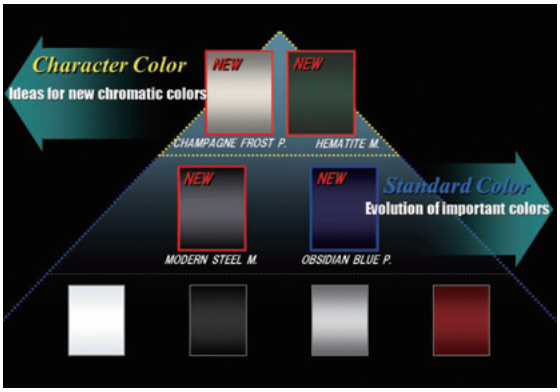


Fig. 18　Exterior color line-up

キャラクタカラー，スタンダードカラー双方の新色で表現した，上品さと進化した質感でスタイリングの存在感を一層際立たせることができた．

6.2. インテリアカラー

「Premium Harmony」をコンセプトに，品を感じさせる明るいアイボリー内装をはじめ，グレー内装，ブラック内装の三つの統一感のあるコーディネートを設定した (Fig. 19)．

アイボリー内装とグレー内装では，従来の同系色よりも彩度を抑えることでクリーンで上品な印象を高めた．いずれもスタンダードカラーのリニューアルとなる．

LX, EX, EXL の基本グレードでは，三つの内装色を設定し，新規追加の SPORTS グレードにはブラック内装とアイボリー内装の二つの内装色を設定した (Fig. 20)．

乗員が安心感や上質感を感じられるよう，ソフトパッドをドアライニング等の身体に触れる部位に追加し，よりソフトな感触や質感の向上をねらった．また，質感の高さをより感じられるようにステッチを増やし，随所に高輝度のシルバー加飾やメッキを小面積で使い，上品で上質なマテリアルコーディネートをおこなっている．

インテリア全体に配置した革シボは上質かつソフトな質感をねらい，革本来がもつ自然な風合いと立体感を表現する素材開発をした．インストルメントパネルとドアライニング上部は，表皮巻き製法を，その他の部位全般はエッチング製法をほどこし，部品ごとの製法差を考慮したシンプルなシボ構成にし，インテリア質感の統一性を高めている．

加飾は，質感の向上をねらった塗装加飾と，同じ金型でバリエーション展開できるフィルム加飾の２パターンの，トータル３タイプのラインナップ設定とした．

LX グレードに設定の METAL MESH は，メッシュ調の細かく乱反射をさせたシボにメタリック塗装をおこなうことで，塗料のクオリティだけに頼らない高輝度の金属調の塗装加飾である．

EX, EXL グレードに設定の SELENITE BROWN は，鉱石の結晶のように感じられるパターンとダークブラウンメタリックの色を組み合わせ，木目でも金属でもない新しい価値のテクスチャーを実現したフィルム加飾である．SPORTS グレードに設定の FULLGLOSS DOT BLACK は，シャープな印象のフルグロスブラックをベースに小さなシルバードットの組み合わせで精緻さを表現したフィルム加飾である．

シートトリムファブリックは，LX グレードにダブルラッセル，EX グレードにベロア調トリコットとし，安心感や厚み感のあるファブリックを設定した．SPORTS グレードにはシャープな印象を高めるソフトウィーブを設定した．EXL グレードのレザーは，従来のギャザ表現からパーフォレーションへ変更し軽快さを表現した．加えて，グラデーションパーフォレーションを，広がりのあるシートパターンデザインに追従させ，インテリア全体にテンポを生み出している (Fig. 21)．



Fig. 19 Interior color concept

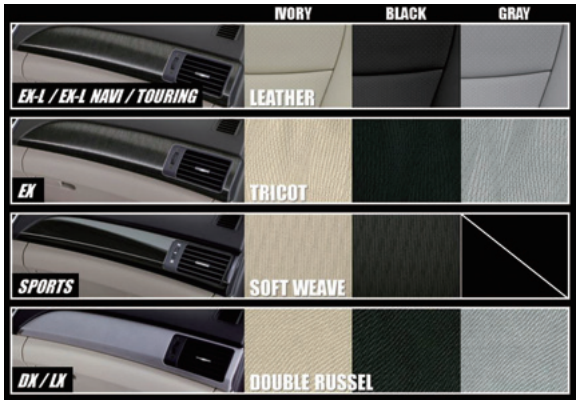


Fig. 21 Fabric design

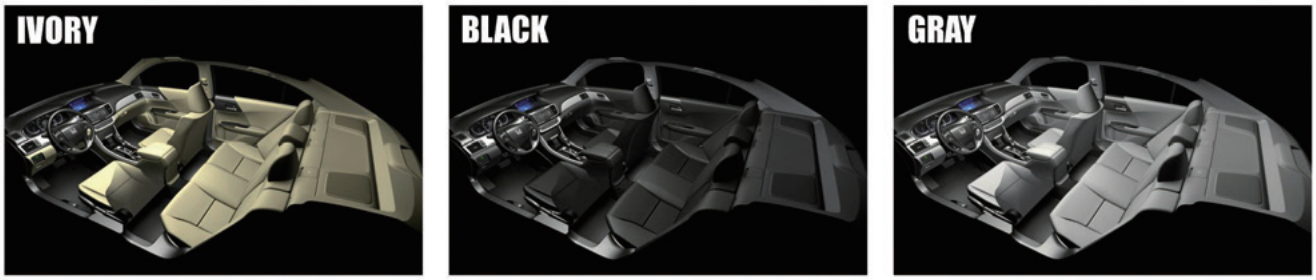


Fig. 20 Interior color variations

7．まとめ

歴代 Accord は，その時代ごとに変化し続ける社会環境やお客様の気持ちを反映した商品を造り続け，多くのお客様に支持され愛されてきた．

今回で９代目となる新型 Accord も，大きく変動する社会環境によるお客様の気持ちの変化や期待に応えるために「Excels in All Areas」をグランドコンセプトとし，積極的に Accord を選んでもらえる，全世界で通用するファミリーセダンを目指した．

デザインはユーザが毎日気持ち良く快適に感じてもらえる「爽快」と，より進んだ技術でユーザが直感的にわかりやすく喜んでもらえる「先進」，そしてデザインを細部にまでこだわり造りこんだ本物の質感をねらった「上質」，この三つのテーマを具現化することで，より多くのお客様の心が最大限に豊かになっていただけると信じている．

今後も社会環境がどう変化しようとも，社会と人と車の「調和」を目指した Accord が進化し続け，愛され続ける存在になることを願っている．

■著　者■


奥 本 敏 之


重 原 裕 樹


内 田　智


小 林 美 絵

新型 CR-V のデザイン

Styling Design of New CR-V

古仲　学*　石橋丈弘*
Manabu KONAKA　Takehiro ISHIBASHI
森下大介*　龍　宏明*
Daisuke MORISHITA　Hiroaki RYU

要　旨

新しいCR-Vは毎日の生活をアクティブ，ストレスフリー，そしてスマートにこなす乗用車を目指し開発をおこなった．

セダンなどの乗用車が持つプレミアム性や効率（EFFICIENT），ミニバンが持つ機能（FUNCTIONAL），そしてSUVの安心感（CONFIDENT）を相乗的にクロスオーバーさせることでライフステージの境界を越えた利便性と豊かなライフスタイルを自己表現できる車に仕立てる意図をもって開発をした．

エクステリアデザインは大胆で力強い造形表現と先進の機能表現を具現化するBOLD AND ADVANCEをテーマとし，インテリアデザインはゆとりある広さの表現と全てのシーンで使いやすい機能を両立するCROSS CONSTRUCTIONをテーマとした．

ABSTRACT

The new CR-V was developed as a passenger vehicle to help customers lead daily lives that are active, stress-free and smart.

The new CR-V has been developed and fashioned into a vehicle capable of a self-expression of convenience and rich lifestyles transcending the boundaries of customers' life stages. It represents a synergistic crossover of the efficiency and premium character of a sedan or similar passenger car (EFFICIENT), the function of a minivan (FUNCTIONAL) and the confidence of an SUV (CONFIDENT).

The exterior design was based on the theme of BOLD AND ADVANCE to embody an expression of a bold, strong construction and expression of advanced functionality, while the interior design was based on the theme of CROSS CONSTRUCTION to simultaneously achieve roominess and user-friendliness in any setting.

1．はじめに

開発の初期に我々チームは初代から継続しているCR-Vとお客様の関わり方，ひいてはこの車が生活の中でどのような存在でありたいのかを考えた．

この車はたとえて言うと毎朝の食パンや米飯みたいな存在でありたい．毎日の食卓に上がり，美味しく，飽きない，特別な高級品ではないが，上質さや安全にこだわりがあって，故に選ばれ，永く愛用され，無くてはならないものであって欲しい．

この車が提供する価値は常にお客様の生活に密着した機能であり，それを毎日使って生活する喜びである．その喜びの創造が開発の原点であると心に刻み，新しいCR-Vを産み出す原動力とした．

四代目となるこのCR-Vは世界各国で多くのお客様のさまざまなニーズに応える使命を持ち，Hondaにとってアコード，シビックと共に基幹グローバルモデルのひとつである．

我々が目指したことは，世界のお客様の最新のニーズを的確につかみ，さらに今までのCR-Vを越えていくCR-Vとなるように胆大心小に創り上げることである．

最新のCR-Vが最良のCR-Vとなるという，当たり前で難しいことをやりきる．それはCR-Vというアイデンティティを強く意識し，磨き上げ，明らかに新しい価値を包括する一貫性と攻めが重要となる．さらに，CR-Vという車は世界の各地域でお客様の求める車の在り方がさまざまである．例えば，北米では毎日の気軽な足として安心して扱えるコンパクトクロスオーバビークルとして，欧州やアジアではよりアップグレードでプレミアムな価値を持つ乗用車としての進化を求められる．

＊四輪R&Dセンター

https://doi.org/10.69239/hondatechnicalreview.2012_24_2_2

生き生きと豊かなライフスタイルを表現したいお客様が，アクティブに使える．日常生活やフォーマルな場など，さまざまなシーンでストレス無く使える．そしてライフステージが変化しても永く使っていただけるスマートな使い勝手を目指し，世界中のお客様の期待を超える SUPER CR-V をグランドコンセプトとした (Fig. 1, Fig. 2)．



Fig. 1　Grand concept

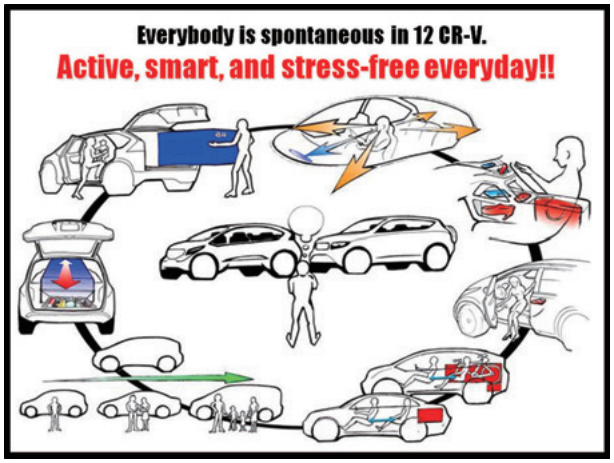


Fig. 2　Concept of customer demand

2．パッケージレイアウト

CR-V の特徴として，車の外形寸法と室内空間の重要な鍵となるホイールベースを初代から一貫して変えていないことが挙げられる．全幅，全高，全長は時代に求められる衝突安全基準やスペアタイヤの積載方法の変更，プラットホームの適正な選択等により変化しているが，ホイールベースを拡大し室内空間を広げる手段を採らないことを今回も貫いたところである．

そのうえで，先代からダウンサイジングしながらも，快適性や使い勝手を磨き上げる Honda のマンマキシマム・メカミニマム思想 (MM 思想) で攻めの進化をさせたのが四代目 CR-V の核となる価値である．世界中のお客様が毎日の生活でストレスフリーに使え，シーンを選ばない使い勝手を両立するサイズが新しい CR-V のベストサイズであると定めた．

SUPER CR-V が掲げる EFFICIENT，FUNCTIONAL，CONFIDENT の相乗効果を具現化する ADVANCED SYNERGY PACKAGE をテーマに，CR-V の利便性の向上を，よりコンパクトなサイズで実現することを目指した (Fig. 3)．

2.1. EFFICIENT PACKAGE

乗用車の効率と快適性を実現するため，燃費性能の向上のための CdA (Cd:空気抵抗の大きさを示す無次元数と A:車体の前面投影面積の積＝CdA:空気抵抗の大きさを示す係数，空気抵抗を動圧で除した値) の低減と高効率プロポーション，快適な乗車姿勢を追求した．

まず，CdA 低減についてはアンテナ部を除いたボデー全高を 30 mm (北米 2WD のみ 40 mm) 下げることで前面投影面積を縮小し，併せてルーフ後端を延長することで空力性能を向上させた．

次に，高効率プロポーションについては，先代の最終型に対し衝突性能を満たしながらボデーの前後オーバハングを北米仕様においてフロントで 10 mm，リヤで 15 mm (日本仕様においてフロントで 15 mm，リヤで 15 mm) 短縮し日常の取りまわしの気軽さを向上した．キャビンはフロントウインドウ下端の前出しとルーフ後端を延長することで，人のための空間を伸びやかに拡大した．コンパクトなボデーと伸びやかなキャビンにより独自性のある高効率なプロポーションを具現化した．

そして，長距離でも快適な移動ができる乗用車の乗車姿勢を目指し，ドライバ席はステアリングホイールを乗用車と同じ径とし，シートハイトの調整量を下方向に 15 mm 拡大した．リヤ席は足元の高さはそのままにヒップポイントを下げることで乗用車の乗車姿勢に近づけた (Fig. 4)．

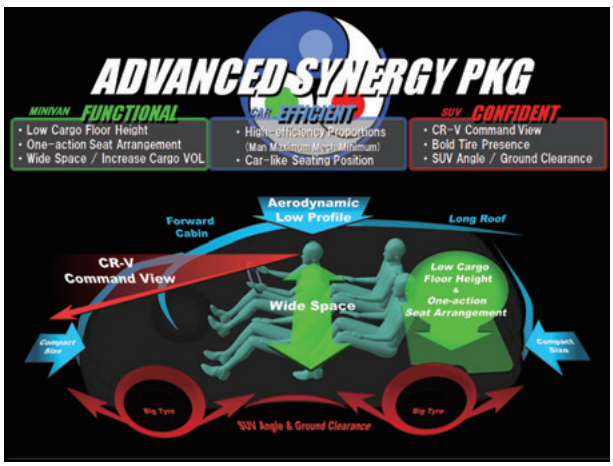


Fig. 3　Package layout concept

2.2. FUNCTIONAL USABILITY

まず，ミニバンの機能を直感的でわかりやすく使用可能とするため，1クラス上の車格を感じるワイドな空間と，低床大容量で直感的に使える荷室を追求した．

初代CR-Vでは，フロント席とリヤ席の間を行き来するウォークスルーのためにフロント席の左右の乗員の間隔を広げた着座位置とした．2代目，3代目とその位置を継承したが，3代目のユーザの声からその着座位置が1クラス上の車格感を表現していることがわかった．そこで，1クラス上の車格感を進化させるために着座位置に加えて横方向のワイドな空間を追求した．全幅の拡大やサイドウインドウを外側に移動する通常の手法は，前面投影面積を増やすことになり燃費性能に影響するため，衝突性能を満たしながらドアの断面を薄型化し，先代にたいして45 mm幅広い空間を実現した．

荷室については先代の複雑なシートアレンジを改め，ワンアクションでフラットな荷室を創出するシートアレンジを実現した．また，先代でも優位性があった低いフロアをさらに20 mm低くし，テールゲート開口部の高さも25 mm低くすることで直感的な使いやすさを実現した．容量については，伸びやかなキャビンと低いフロアにより，ダウンサイジングしながらも先代にたいして65 L大きな容量を実現した(Fig. 5)．

2.3. CONFIDENT APPEARANCES

SUVの安心感を実現するため，燃費性能の向上とどのようにバランスをとるかを追求した．

まず，ダウンサイジングしながらも，安心感や取り回しの観点から，初代から受け継がれている目線の高さや見晴らし感を継承した．

次に，車体に対してのタイヤの大きさの比率を大きくし，より安心感を実現することを追求した．歴代CR-Vはタイヤサイズを拡大することで安心感を進化させてきたが，先代のタイヤサイズをキープしながら車体をダウンサイジングしタイヤの存在比率を上げることで，さらなる安心感を実現した(Fig. 6)．

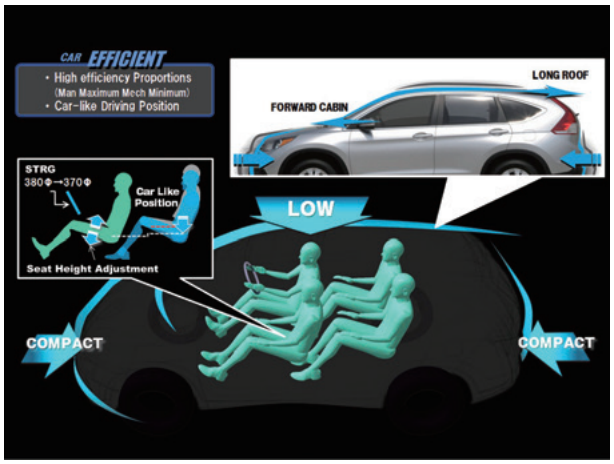


Fig. 4　Concept of efficient package

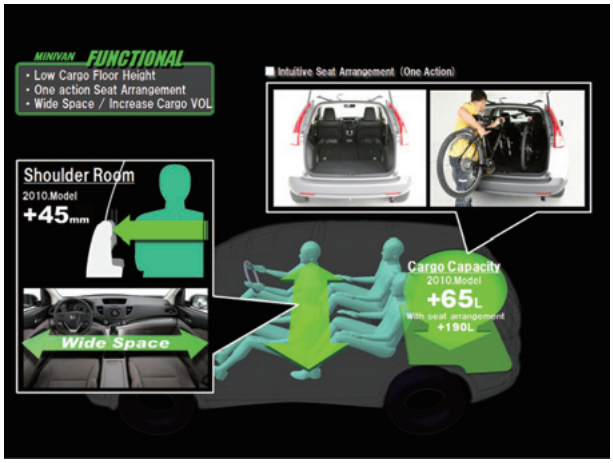


Fig. 5　Concept of functional usability

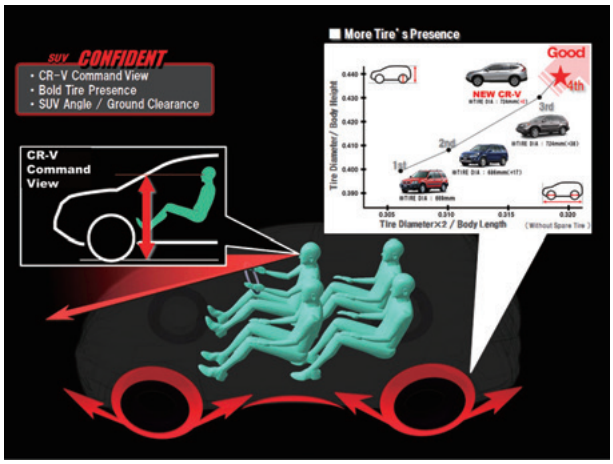


Fig. 6　Concept of confident appearances

3．エクステリアデザイン

エクステリアデザインはテーマであるBOLD:大胆で力強い車格感と，ADVANCE:高効率で新しい機能感の表現を目指した(Fig. 7)．

サイドビューは低い全高にフロントウインドウ下端を前に出すことでウインドウの傾斜を強くした．リヤガラスに強い曲率を持たせることで車体後部にクーペを思わせるシルエットを創り出した．これにより滑らかに前から後ろに流れるような乗用車的な印象を持たせた．キャビンはルーフが低くなっているが，サイドウインドウを前後にできる限りストレッチし，ベルトラインを低くすることにより大きなガラスで高い居住性を表現すると共にシャープな印象を創り上げている．サイドシルやタイヤ廻りも従来のごつごつした形状と異なり，新しいクロスオーバビークルとし

て滑らかなシルエットに沿う洗練された形状を採った.

フロントまわりのデザインは, エンジンフードをボデー全体に対して短くボリューム感のある塊で, 安心感とエンジンがコンパクトに効率良く収まるさまを表現している, そしてシンプルに一体化されたヘッドライトとグリルが互いに交錯しながら, ワイドなグリルのメッキ加飾で格上のクラス感を主張している.

リヤまわりのデザインは, リヤコンビネーションランプを縦に配することで, CR-V のアイデンティティを示した. テールゲートのガラスを強い曲率で三次元的に曲げることで荷室容量を増やしながら, シャープな方向性を描くリヤコンビネーションランプとあいまって特徴的なフォルムを創り出している.

ボデーの空力では, フロントバンパコーナからサイドにかけてしっかりと張り出した安心感ある形状にすることで寸法を稼ぎ, 最適な風の流れとの両立を達成すると共にリヤコンビネーションランプの形状を活かしコーナ部の風の流れを最適化する等, スタイリングと空力性能との相乗効果をねらった (Fig. 8).

すべての造形がコンセプトとの相反が無いように, その根拠と正当性を熟慮した. これらの手法によりダウンサイジングされた実際の寸法よりもアップスケールした印象を与え, 豊かな車格感と永く便利に使える機能感を示しながら, 明らかにこの車が次世代の CR-V であることを表現している (Fig. 9, Fig. 10).

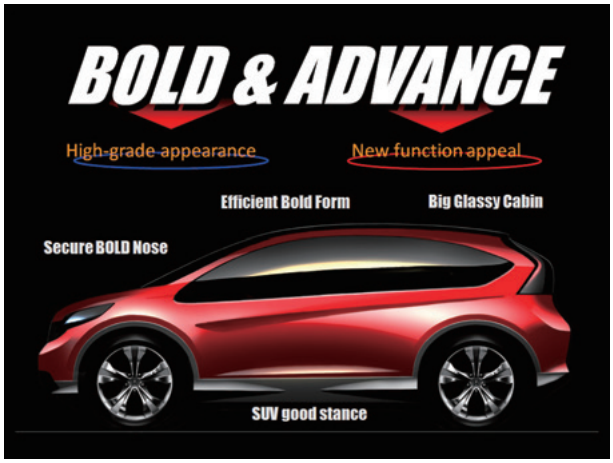


Fig. 7　Exterior design concept



Fig. 8　Aerodynamics design



Fig. 9　Final rendering



Fig. 10　Final rendering

4. インテリアデザイン

インテリアデザインは, アップスケールを感じる車格感と先進の機能性を融合する CROSS CONSTRUCTION をテーマに開発を進めた.

広々と爽快で運転して気持ち良い空間を造ることは, 初代 CR-V から受け継いでいる価値であるが, 新しい CR-V はその考え方を守りながら, さらに高めることにより, 車格感を上げることを目指した (Fig. 11). 具体的には, インストルメントパネル廻りの造形を, おおらかに流れる横基調のデザインとし, 末端がドアライニングに食い込むまで広がった形状とすることにより, 実際の寸法以上に広く, 豊かに感じられるドライバ空間を実現した. また, 基調に

合わせたワイドな加飾パネルをドライバ席とアシスタント席にあしらうことにより，上質感を高めている (Fig. 12)．

センタコンソールの形状は，寸法を目一杯生かし最大限大きなコンソールを造ることにより，ユーティリティに優れかつ立派で車格感が高く見えることに貢献している．機能的には，A4 サイズの書類がすっきり入る BOX 寸法と 500 ml のペットボトルが入るサイドポケット寸法を確保している (Fig. 13)．

先進機能としては，音楽ソースや壁紙などを表示できるセンタディスプレイを CR-V としては初めて採用し，インストルメントパネルの中央に配置した．さまざまなコンテンツ表示をステアリングスイッチで操作することにより，運転の楽しさを演出した．また，瞬間認知，直感操作を高めるために，メータは重要なスピード表示を中央に置き最大限大きく見せている．直感的にスイッチ類の配置がわかるように，オーディオパネルとヒータコントロールパネルの明確なゾーニングをおこなっている．

先進機能のセンタディスプレイについては，中央前方に配置し走行中の運転者の視線移動が少なく，瞬間認知が高まるよう工夫をした (Fig. 14)．

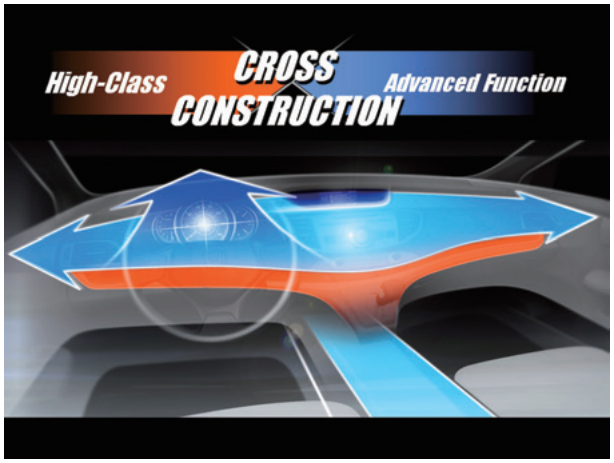


Fig. 11　Interior design concept



Fig. 12　Final rendering

シートデザインは，SUV として最適な乗降性とホールド性，乗り心地を高い次元でバランスされた形状を実現している．

荷室については，楽に操作できるワンタッチシートアレンジを実現し，トノカバーやネット付きサイドポケットの採用など，大きな荷物を簡単に積みたいというニーズや綺麗にしまいたいというニーズに応え，ユーザの使い勝手の向上を目指した．

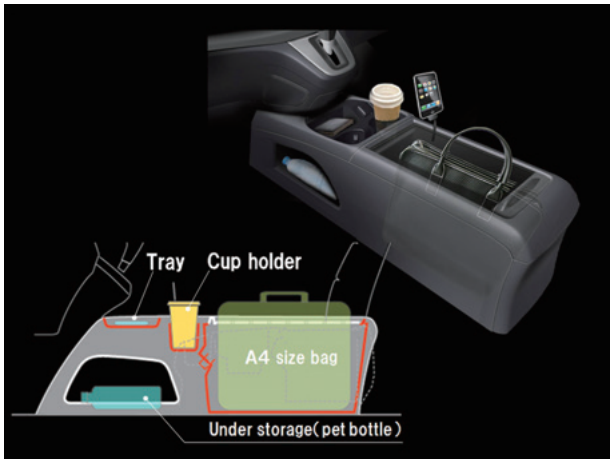


Fig. 13　Console utility

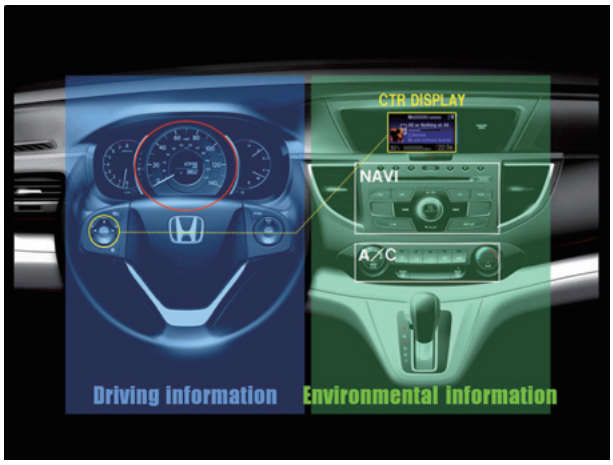


Fig. 14　Instrument panel

5．カラーおよびファブリックデザイン

前述したようにお客様が CR-V に求める在り方が多様である事を前提にしたうえで，カラー，ファブリックにおけるお客様ニーズの共通項を探ることを考えた．

お客様の生の声から導けたことは，世界中で共通して CR-V には先代より高級，上質なカラー，ファブリックが必要であるということであった．我々はこれを規定演技と考え，さらに Honda が常に提案の軸とする先進のイメージを織り込むことを志した．

ADVANCED 表現と PREMIUM コーディネートの相乗効果によって，お客様の生活を楽しく，若々しく，元気に演出することを目指し，テーマを PREMIUM & ADVANCED と定めた (Fig. 15)．

エクステリアカラーは，まずグローバルなスタンダードカラーとしてホワイト，ブラック，シルバー，ダークシルバーを継続して採用した．さらにグローバルな新色として，セダンライクでアップグレード感がある深みのあるダークブルーにスポーティで機能的な輝度感の強い金属調の質感を融合させることで，PREMIUM と ADVANCED をバランスよく両立させた TWILIGHT BLUE M を新開発した．

また，各地域のお客様の嗜好性の違いを考慮し，北米ではジェネレーション-Y 向けのビビッドレッドと継続的に幅広い年齢層に好評なメタリックグリーン，日本ではアップグード感のあるカラードブラック，中国およびその他のアジアではスポーティ感と上質感のバランスが取れたディープレッドと，それぞれの地域に最適なカラーを採用している (Fig. 16)．

インテリアカラーは，上質感を重視しながらも日常の生活で永く気持ちよく使っていただくために，汚れに十分配慮した色と素材をコーディネートしている．特に「汚れが気になる」との声が多いベージュ内装では，インテリア全体を汚れの目立ちにくい濃いブラウンで統一し，シートに上質な明るいベージュを配し，汚れに対する配慮と上質感を兼ね備えた新しいコーディネートとした．ベージュ内装の他には，世界的に人気が高まっているブラック内装とさらに北米で継続的に好評なグレー内装の，計３内装色を用意し各地域の嗜好性の違いを考慮しながら地域最適色を設定した (Fig. 17)．

インテリア全体の質感を向上するため，インストルメントパネルやドアなどインテリアのほとんどの部分を自然な表情の深い革シボで統一し，色や質感の統一感を出すことで，より居心地の良い空間を実現した．

インストルメントパネルの上部と下部の境目には，上級グレードで木目調とシルバーを融合させた加飾パネル (INSERT GARNISH) を施した．木目の持つナチュラルで上質な柄感と，強さや先進感のある金属調の質感を融合した，PREMIUM & ADVANCED を象徴する新しい手法の加飾表現をおこなった．他グレードはシルバーの加飾としている (Fig. 18)．



Fig. 15　Color design concept

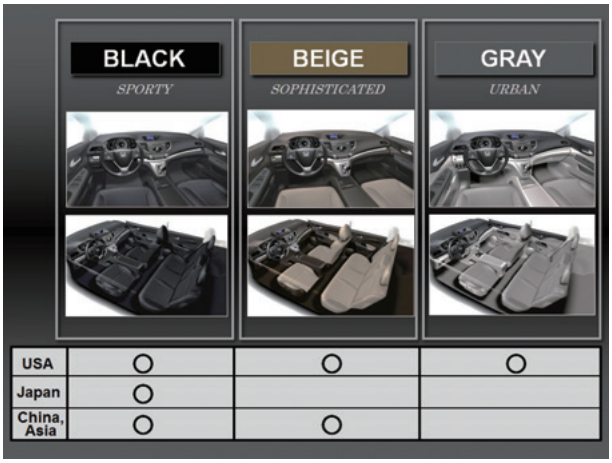


Fig. 17　Interior color line-up



Fig. 16　Exterior color line-up

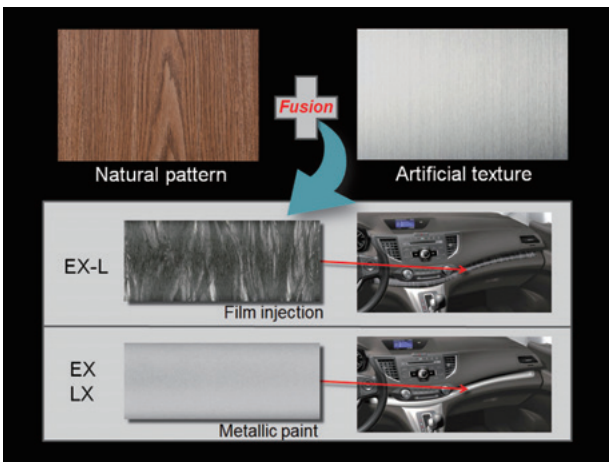


Fig. 18　Interior materials

シートファブリックは，シートメイン部にスポーティなイメージでありつつほどよい光沢を出した質感の高いスエード調素材を採用した．シートサイドは，よく手で触るところでもあり手触りの良いベロア（起毛）トリコット素材を用い，メイン部とサイド部で素材感のコントラストをつけた．下級グレードのメイン材には凹凸で柄を出したベロアトリコット素材を採用した．柄は上級，下級グレード共にメイン部には先進的な幾何調の四角い凹凸柄を基調として，印象が硬くなりすぎないように自然な波柄をほどこし，人に優しい先進表現をおこない，最上級グレードにはレザーを採用している（Fig. 19）．

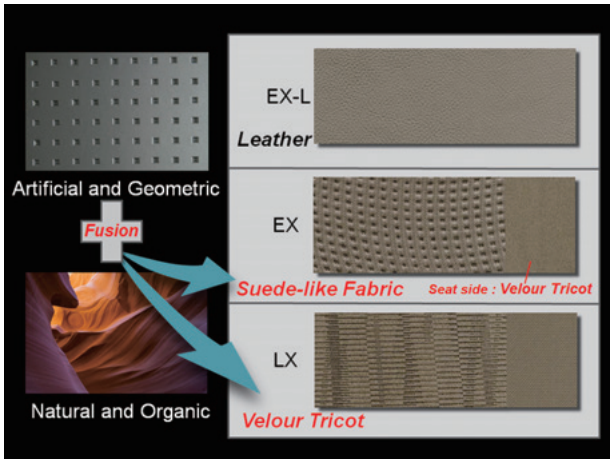


Fig. 19　Seat materials

6．おわりに

四代目 CR-V は，初代から受け継いだコンパクトなクロスオーバビークルとしてのパッケージを，世界中のお客様のさらなるニーズに応えることで進化させた．スタイリングの核となるものは，すべてこのパッケージから生まれ，カタチとして表現されている．

Honda のデザインは，パッケージの進化による新しい骨格とそれを実現する技術によってマンマキシマム・メカミニマム思想を具現化し，お客様に提案することであると考える．

この車も間違いなく Honda の強いクルマづくりの思想から発想したものであり，この車で快適な生活を送れると感じていただいた時，我々の意志が通じ，真価を得るのだと考える．

四代目 CR-V が，お客様の生活にしっかりと寄り添う車に仕上がったと確信している．

■著　者■


古 仲　学


石 橋 丈 弘


森 下 大 介


龍　宏 明

NC700シリーズのスタイリングデザイン

Styling Design of NC700 Series

工　藤　一　浩*
Kazuhiro KUDO

要　旨

NC700シリーズは日常の使い勝手や利便性，モータサイクルを扱う楽しさ，環境にも配慮し低燃費でお求めやすい価格で提供するというコンセプトで開発された．ネイキッドスポーツ，クロスオーバーコンセプト，スクーティングモータサイクルというまったく形態の異なる３モデルのスタイリングを，共通のプラットフォームを用いながら，実現したモデルである．

ABSTRACT

The NC700 series was developed based on the concept to offer user-friendliness and convenience focused on daily uses, i.e. offering the enjoyment of maneuvering a motorcycle, consideration to the environmental issues and a good fuel efficiency with a reasonable price as well. While using the same shared platform, by applying the styling techniques on these series of motorcycles, it is realized to differentiate three forms: “Naked Sports,” “Crossover Concept,” and “Scooting Motorcycle.”

1．はじめに

先進国では，モータサイクルに最高速や加速などの絶対性能を求めるといった価値観がある一方，扱いやすく安価で気軽にライディングを楽しめるモデルの要望が高まっている．そのようなお客様の志向の多様化に対し，１台のモータサイクルではなく，一つのプラットフォームを用いて，異なる３タイプのモータサイクルで答えようと考えた．しかしそれは，フレーム骨格やエンジンなどの主要コンポーネントを共用化しつつ，異なるコンセプトやスタイリングを実現するという，これまでのモータサイクルの開発の中でも類を見ない大胆な発想が求められた．さまざまなライフシーンで積極的に使いこなせる二輪車を作りたい．そのような思いでデザイン開発に取り組んだのが，NC700シリーズだった．

開発手法も含め，前例の無いまったく新しいコンセプト，パッケージング，そして価値観の具現化は，ゼロからデザイン手法を構築する必要があり，デザイナにとっても大きな挑戦となった．

2．スタイリングコンセプト

日常的な使い勝手の中でだれもが扱いやすく，よりいっそう軽快，快適で，味わい深く楽しいモータサイクルを，低燃費，お求めやすい価格で提供すること，という開発目標を受け，３モデルに共通するスタイリングのテーマを，「ライダフレンドリかつ日常域でのモータサイクル本来の楽しさを形として表現する」と定めた．従来のスポーツモータサイクルに多かった，パフォーマンス至上主義，高回転，高出力を追い求めるような価値観とは異なる，「気負わない」，「安全」，「スマート」，「環境性」等を意識したアプローチである．

先鋭化し高価格化したモータサイクルとは違う価値を求めるお客様，かつてはモータサイクルを楽しんでいたお客様，また初心者のお客様や街中での便利な足として使うお客様など，より多くのお客様の使い勝手や好みに対応できるよう，コンセプトの異なる３モデルのスタイリングを具現化した（Fig. 1, Fig. 2, Fig. 3）．

スタイリングデザインを進める上で，３モデルに共通する項目を以下の六つに定めた．

（1）Hondaオリジナルであり，独創的であること．
（2）良いデザインに国境は無いという信念のもと，どこの国にでも受け入れられるグローバルデザインであること．
（3）作り手のこだわり，メッセージがお客様に的確に伝わること．
（4）クリーンでモダンなイメージを表現し，街中において違和感なく主張すること．

＊二輪R&Dセンター

https://doi.org/10.69239/hondatechnicalreview.2012_24_2_3

（5）性能や排気量のヒエラルキーにとらわれない価値観を表現すること.
（6）お求めやすい価格を実現しながら，お客様が納得できる価格以上の質感を感じること.



Fig. 1　Concept sketch and clay model of NC700S



Fig. 2　Concept sketch and clay model of NC700X





Fig. 3　Concept sketch and clay model of INTEGRA

3．共通プラットフォームで３モデルを実現するデザインの手法

デザインをする上でもっともこだわった点は，共通プラットフォームをお客様に感じさせないことである.

ネイキッドスポーツ NC700S，クロスオーバーコンセプト NC700X，スクーティングモータサイクル INTEGRA の，それぞれのモデルが持つコンセプトの違いをスタイリングによって明確にすることが求められる.

車体全体のシルエット，フレーム形態，エンジン形式など，本来であればレイアウト上のニーズがまったく異なるこれら３モデルにおいて，プラットフォームを共通化することはたいへん困難なことである．従来のように基本レイアウトを専用設計することなく三つの異なるコンセプトを構築し，それをいかにスタイリングとして具現化するかが重要なポイントであった.

3.1. フレームボデーについて

タンクを膝で挟む形の，一般的なモータサイクルの形態を持つ NC700S，NC700X と，タンク部分をもたない INTEGRA のプラットフォームを共通化する上で，一番にブレイクスルーしなければならないポイントはフレームボデーの構造である（Fig. 4）.



Fig. 4　Perspective drawing of three NC700 series models

NC700S, NC700X のフレームボデーは，一般的なスポーツモデルと同様に，フレーム剛性確保のために，ヘッドパイプとスイングアームピボットをメインパイプで直線的につなげたいというニーズがある．そのメインパイプを視覚的に露出させることで，デザイン的にもメカニカルな表現が可能となる．しかしながら INTEGRA のフレームボデーは，フロアトンネルをできるだけ低く抑えたいという事情から，メインパイプをできるだけ低く通したいというレイアウト上のニーズがある．

本モデルでは，全高の低いエンジンユニットと組み合わせたダイヤモンドフレームによってフレーム剛性を確保し，通常のモータサイクルよりも低い位置でメインパイプを通すことを可能とした．エンジンとのフィッティング，メインパイプ曲げのポイントや溶接位置を，機能的にも視覚的にも最適になるようにレイアウトし，３モデル共通プラットフォームの要となるフレームボデーとして成立させることができた．

４．外観構成パーツと３モデルの異なるプロポーション

外観構成パーツは，３モデルのスタイリングコンセプトを明確に差別化するための機能部品である．

NC700S, NC700X は，一般のモータサイクルの基本シルエットを踏襲する点は共通である．しかし NC700S は，シンプルなスポーツモータサイクルらしく，やや前傾したスポーティ基調で，前まわりもやや低めのプロポーションが望ましい．一方 NC700X は，オンロードとオフロードを融合させたクロスオーバーコンセプトを表現するためのアップライト基調で，前まわりがやや高めのプロポーションが望ましい．

さらに INTEGRA においては，自由度の高いライディングポジションで街中の使い勝手を重視した，スクータに近い基本シルエットとなる．

このように大きく異なるプロポーションを，外観構成パーツの違いによって造り分けることが，NC700 シリーズのスタイリングデザインにおける難しさであり，醍醐味である．

4.1. NC700S のスタイリング

ネイキッドスポーツ本来の爽快さと機動力，快適性を手軽に楽しむことができるのが NC700S である．

その魅力を表現するため「The Modern Fluid Form」をスタイリングテーマとした．スポーツギヤ的要素をシンプルな立体で造形し，スタンダードでありながら強い個性とモダンさを表現した．シンプルなヘッドライトまわりと，スリムでコンパクトな必要最小限のパーツで外観を構成することも特徴の一つである．

初心者からベテランまで違和感なく受け入れられる，間口の広い分かりやすいスタイリングのネイキッドスポーツとした (Fig. 5)．

4.2. NC700X のスタイリング

オンロードとオフロード，異なる魅力が融合することで生まれる新価値を目指したのがクロスオーバーコンセプトである．

その魅力を表現するためのスタイリングテーマを「Smart Tough Body」とした．スポーティで流れるような主体色塗装部分と，プロテクタとしても機能するタフな造形の着色部分の組合せが個性となり，スマートでありながら強じんなイメージを，まさにクロスオーバーさせ表現した (Fig. 6)．

4.3. INTEGRA のスタイリング

モータサイクルの持つ走りの楽しさに，コミュータの快適性と利便性を融合したのがスクーティングモータサイクルコンセプトである (Fig. 7)．

「Energetic Elegance」をスタイリングテーマとし，スポーティでパワフルでありながらエレガントでゴージャスという，相反する要素を高い次元で捉えなおし融合させ，斬新なスタイリングを確立した．今までにない，まったく新しいコンセプトのモデルである．

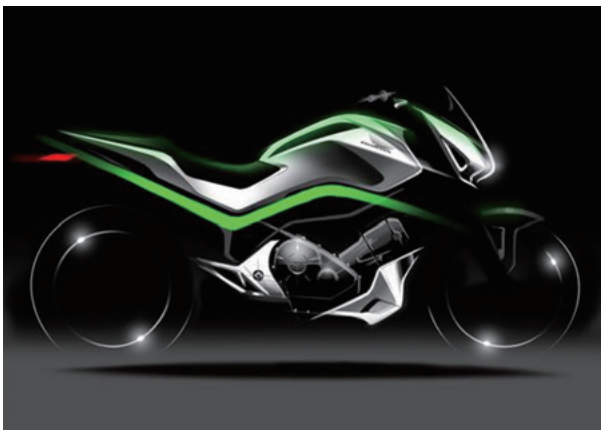




Fig. 5　Image sketches of NC700S





Fig. 6　Image sketches of NC700X

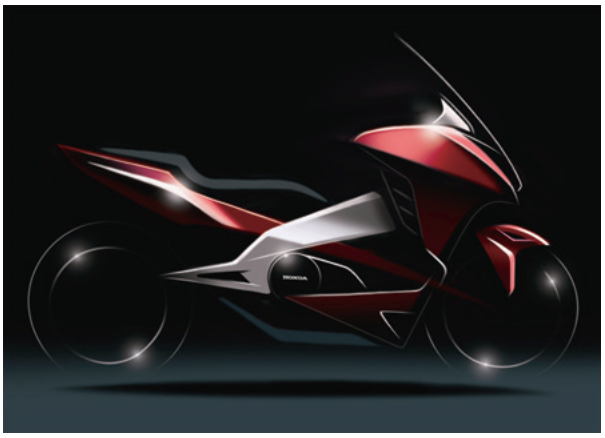




Fig. 7　Image sketches of INTEGRA

5．共通の外観構成パーツ

プラットフォーム構想とパッケージングは，本開発の根幹をなしている．

エンジン，フレームボデー，足まわり，吸気，排気，冷却，灯火器等の，シリーズで共用する主要部品は，各モデルの個性を失わせることのない，質の高いモダンでクリーンなデザインを施した．

5.1. エンジンデザイン

NC700S, NC700X, INTEGRA とまったく異なるコンセプト，それにともなう全体のレイアウトを成立させるため，エンジンを極端に前傾させる必要があった．既存のスポーツ系モータサイクルとして異例なほど前傾しているこの特長を生かし，個性的でユニークなエンジンのデザインを目指した．

３モデル共通テーマである「クリーン」，「モダン」を効果的に表現するために，左右のクランクケースカバーにモダンで立体的な造形を施した．ユニークな前傾のシルエットともあいまって，モータサイクルとしての機能美を感じさせるエンジンデザインとすることができた (Fig. 8, Fig. 9, Fig. 10)．

5.2. 灯火器デザイン

３モデルのヘッドライトに対するデザイン的ニーズは，各々のコンセプトの違いから明確に異なる．ヘッドライト周辺はモータサイクルの顔であり，最も重要なアイコンの一つであるからだ．したがってヘッドライトユニットを共用しながらも，まったく異なる個性の表現は必然となる．

核となるヘッドライトユニットの基本形状はシンプルなV字型とし，３モデルで違和感を感じないように考慮した．

NC700S では，共通ヘッドライトユニットをハンドルマウントのアルミ製ヘッドライトステーで挟み込み，ミニバイザを含めたパーツ構成とし，スポーティでモダンなフロントまわりを演出した (Fig. 11)．

NC700X は，クロスオーバーコンセプトの特徴となるノーズのあるフロントカウルに共通ヘッドライトユニットを配置し，着色樹脂によってまわりをガードするイメージの造形とした．アルミ製のメータステーも外観を構成する要素とし，タフさとスマートさを両立した顔の表現の一助とした (Fig. 12)．

INTEGRA は高級感とダイナミックさを表現するため，ボデーにビルトインした共通ヘッドライトユニットを，ウインカーポジションの機能をもつサブヘッドライトユニットで挟み込む構成とした．サブヘッドライトを含めたヘッドライトと，金属調のスクリーンステーとの組み合わせに

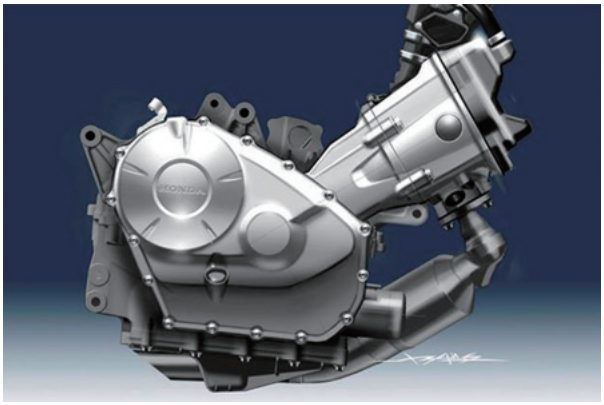


Fig. 8　Engine sketch (Right side)



Fig. 10　Engine sketch for dual clutch transmission model

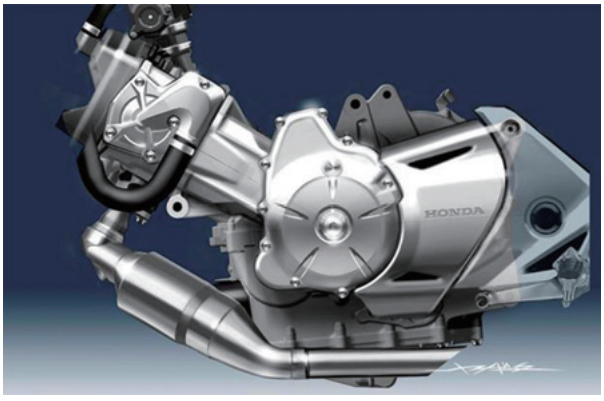


Fig. 9　Engine sketch (Left side)



Fig. 11　Front view of NC700S

より，迫力あるエレガントな顔を実現した (Fig. 13)．

完成車状態において，３モデル三様の異なる個性と表情を，妥協することなく完成させた．

5.3. メータデザイン

メータは，ライダがまたがった瞬間目に入る，コックピットの最も重要な機能部品である．

共通のメータユニットはフル液晶表示とし，シンプルで癖のない，最新モデルのメータとしてのモダンさを持ったデザインとした．その上で，３モデルバリエーションを展開する上で，周辺の造形処理との組合せによって表情が変わるよう配慮した．

NC700S は，シンプルでスポーティなハンドルマウントとし，軽快感を強調した (Fig. 14)．

NC700X は，ボデーマウントのアルミ製ステーにメータユニットをフローティングマウントし，アップライトなライディングポジションで見やすく，かつクロスオーバー的な冒険心をくすぐる演出を施した (Fig. 15)．

INTEGRA は，四輪的なコックピットをイメージしたインストルメントパネルに共通メータユニットを配置し，高級感を演出した．ライダ目線においては，包まれ感のある快適な空間を作り出している (Fig. 16)．



Fig. 12　Front view of NC700X



Fig. 13　Front view of INTEGRA

5.4. 足まわりとマフラのデザイン

足まわりの構成は基本的に３モデル共通であるが，クロスオーバーコンセプトの NC700X のみ，前後のサスペンション長を 30 mm 伸ばした．

ホイールデザインについては，モータサイクルとスクーティングモータサイクルの双方に相性が良い，軽快でモダンなデザインとした (Fig. 17)．

マフラはステンレス製で，端正なボデー形状を際立たせるため，スタンダードな形状としながらもリヤ廻りの軽快感を演出した．基本的に３モデル共通であるが，INTEGRA のみ，高級感を演出するマフラエンドキャップを採用している (Fig. 18)．



Fig. 14　Meter display unit of NC700S



Fig. 15　Meter display unit of NC700X



Fig. 16　Meter display unit of INTEGRA



Fig. 17　Front wheel of INTEGRA



Fig. 18　Muffler of INTEGRA

6. ユーティリティスペースとライディングスタイル

NC700 シリーズのコンセプトにおいて，ユーティリティスペースの存在は重要な魅力の一つである．

従来のモータサイクルは収納スペースがないのが一般的で，短距離の移動においても荷物をバックパックに収納し背負うか，リヤシート等の車体にとり付けることとなる．本格的に荷物を積載したい場合には，トップボックスやパニアケース等を車体に取り付ける必要があった．

NC700S，NC700X においては，21 L の収納スペースを備えているため，面倒な荷物の積載から開放される．

視覚的にも，走行中のモータサイクルに荷物が見えないことは非常にスマートである．

モータサイクルのスタイリングを考える上では，ライダがまたがり走行している姿も含め美しくあるべきと考える．したがってユーティリティスペースを持つことのメリットは非常に大きい．

Fig. 19 に示すとおり NC700S，NC700X では，XL サイズのフルフェイスヘルメットを収めることができるユーティリティスペースをシート前方のシェルタ部分に確保した．そのためライダがまたがった際のニーグリップの位置と一致することとなるが，レイアウトを限界まで切り詰めることで，機能的にも視覚的にも違和感のない造形を実現した．具体的には，ヘルメット収納の向き，角度，外壁の厚さ，リッドのカットライン，ロック機構などを，ミリ単位で最適にレイアウトし，かつその構造を細部まで作りこむ作業をおこなった．

その結果，スリムで自然なまとまりとなり，スタイリングと機能の融合を図ることができた (Fig. 20)．

シェルタを持たない INTEGRA についても，シート下に 15 L の収納スペースを確保した (Fig. 21)．



Fig. 19　Utility space of NC700X



Fig. 20　Shelter and seat of NC700X



Fig. 21　Utility space of INTEGRA

7. まとめ

３モデル共通したスタイリングデザインの志は，既存のモータサイクルの延長線上から一歩踏み出し，日常域でのモータサイクル本来の楽しさを形として表現することであった.

スポーツギヤをイメージし，スポーティでありながら都会的でモダンさをねらったネイキッドスポーツのNC700S，オンロードとオフロードを融合させたクロスオーバーコンセプトで，「タフ」と「スポーティ」の相反するイメージを違和感無く調和させたNC700X，スクータの便利さと，モータサイクルのスポーティさを融合し今までには無かったプロポーションを表現したINTEGRAの３モデルという，まったく異なったコンセプトのモデルを創造することができた.

今後のモータサイクルの一つの方向性として，ベンチマークとなれば幸いである.

■著　者■



工 藤 一 浩

NC700 シリーズの開発

Development of NC700 Series

小林弘毅* Koki KOBAYASHI
根来正明* Masaaki NEGORO
大須賀貴則* Takanori OSUKA
三堀敏正* Toshimasa MITSUBORI
大島正* Tadashi OSHIMA

要　旨

NC700 シリーズ（NC700S, NC700X, INTEGRA）はライディングの楽しさとコミュータの利便性を高次元で融合することを目指して開発された．個性の異なる３タイプのモデルでありながら，共通プラットフォーム，低･中速トルクを重視し，低重心化やデザイン自由度に寄与する水冷直列２気筒 670 cm^3 エンジン，軽量･コンパクトな次世代デュアルクラッチトランスミッションなどを共通の技術として採用した．優れた燃費性能と味わいある走りを両立するとともに，大型ラゲッジスペースを装備するなど，従来のモデルにない新しい価値を提案するモデルである．

ABSTRACT

The NC700 series (NC700S, NC700X and INTEGRA) was developed with the aim of realizing a well-balanced fusion of the enjoyment of riding with the convenience of a commuter-type motorcycle. Each of the three model types has a distinctive character, while utilizing the common technology such as a shared platform, a liquid-cooled in-line 2-cylinder 670 cm^3 engine, that emphasizes the torque in low-to-mid speed range and has its center of gravity in lower position to increase the degree of freedom in the exterior designing, and a next-generation dual-clutch transmission which is light weighted and compact. The models created in this development offer unprecedented values not available in former models, such as combined benefits of both excellent fuel economy and the pleasant riding quality at the same time, together with values in utilities realized by equipping a larger utility compartment.

1．まえがき

欧米におけるミドルクラス排気量 500 － 750 cm^3 程度の中型二輪車へのニーズはより多様化してきている．

先進国における，スクータなどのコミュータを含むモータサイクルの使用状況，要望などについて市場調査をおこなった．その結果，大きく分けて二つのタイプのユーザ像が見えてきた．

一方は従来から馴染みのある，絶対性能重視のスーパスポーツ系モータサイクルを楽しむタイプのユーザ像である．彼らの求めるものは，高速領域での動力性能や，ワインディングでの旋回性能の向上である．

もう一方は本モデルを開発する動機となった，性能や排気量のヒエラルキーにこだわらないタイプのユーザ像である．彼らは日常生活での扱いやすさや利便性を第一優先に考える．リーズナブルな価格帯のミドルクラスのモータサイクルを所有し，環境に配慮しながら肩肘張らずにゆったりと，郊外へのツーリングなどのライディングを楽しんでいる．また，スクータなどのコミュータユーザの中にも，コミュータの持つ快適性や利便性はそのままに，時にはスポーツバイクのようにライディング自体も楽しみたいという要望があった．モータサイクル，コミュータの枠にとらわれることなく，お客様のニーズは交錯した時代になってきている．

それらのニーズに対し，共通のプラットフォームを用いて３タイプの異なるモデルを展開し，幅広いユーザにこたえる NC700 シリーズを紹介する（Fig. 1, Fig. 2, Fig. 3）．

＊二輪 R&D センター

https://doi.org/10.69239/hondatechnicalreview.2012_24_2_4



Fig. 1　NC700S



Fig. 2　NC700X



Fig. 3　INTEGRA

2．全体概要

2.1. 開発目標

開発目標を，日常的な使い勝手の中でだれもが扱いやすく，よりいっそう軽快，快適で，味わい深く楽しいモータサイクルを，低燃費，お求めやすい価格で提供すること，と設定した．

具体的には，

（1）軽快なハンドリングと安心感のある操縦特性，快適クルージングを実現するパッケージ

（2）幅広いお客様のニーズに対応した３モデルのシリーズ展開と個性的で所有感を満たす次世代デザイン

（3）FUN モデルのさらなる利便性を向上する快適装備と豊富なオプション設定

（4）デュアルクラッチトランスミッションを装備したタイプの設定

の実現を目指すこととした．

2.2. ３モデル同時開発

従来，FUN モデルにおいては，コアとなるモデルをまず開発し，そのモデルが量産された後に共通プラットフォームのバリエーションモデルを開発するケースがある．しかしながら，量産後のモデルをベースとした場合，後発モデルの求める仕様を実現するために，プラットフォームにかかわる変更が生じてしまうなど，共通化がくずれてしまうこともあった．

今回，NC700 シリーズの開発においては，３モデルを同時並行で開発することにより，それぞれの性能を確保するための仕様を，最大限プラットフォームに反映することが可能となった．その結果，部品共用化率も最大化することができた．

2.3. 開発のねらい

2.3.1. プラットフォーム構想とパッケージング

３モデル同時開発の効果により，エンジン，フレームボデー，足まわり，吸気，排気，冷却，灯火器などの主要部品をシリーズで共用することが可能となった．また，３モデルへのデュアルクラッチトランスミッションタイプの設定を前提に，通常のマニュアルトランスミッション（MT）タイプをベースに，一部の部品の変更のみで対応可能な設計とした．両タイプのエンジンのカットモデル写真を以下に示す（Fig. 4，Fig. 5）．

効率的なパッケージングという点では，エンジンの寄与度も大きい．燃費性能を高めることで燃料タンクの小型化が可能となり，シート下に配置することができた．さらに，

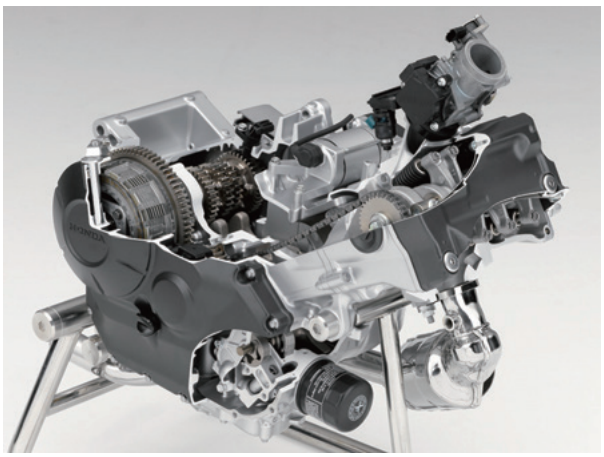


Fig. 4　Cutaway model of engine (manual transmission)

シリンダ前傾角を 62° とすることでエンジン高さを抑え，エンジンの上部空間を確保した．リヤサスペンションはプロリンクタイプを採用し，車両への搭載位置を可能な限り下げて配置した．

これらのレイアウトの工夫により，フルフェイスヘルメットが入るラゲッジスペース（NC700S/X）と，スクータを想起させる外観（INTEGRA）の両立を可能とした（Fig. 6）．

2.3.2. NC700S モデル概要

NC700S は FUN ライディングの爽快さや機動力，快適性がより手軽に楽しめるユーザフレンドリな「NEO“FUN”CTIONAL モータサイクル」を目指した．

ネイキッドスポーツのモダンでシンプルなシルエットを基調に，躍動感あふれる力強いデザインと，モータサイクル本来の操る楽しさを味わえる素直なハンドリング特性を融合した．足着き性が良く安心感のある低いシート高と軽い前傾のライディングポジションを，軽快なネイキッドスタイルと組み合わせた．これにより，スポーティな雰囲気を感じながらも，気負わず気軽にライディングが楽しめるモデルとした．

また，フルフェイスヘルメットを収納可能な 21 L のラゲッジスペースを装備しつつも，ニーグリップに代表されるライダとモータサイクルのフィッティングは従来モデル同等とした．

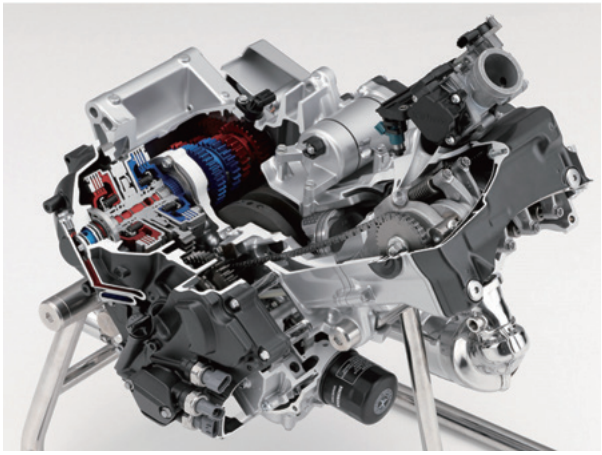


Fig. 5　Cutaway model of engine (dual clutch transmission)

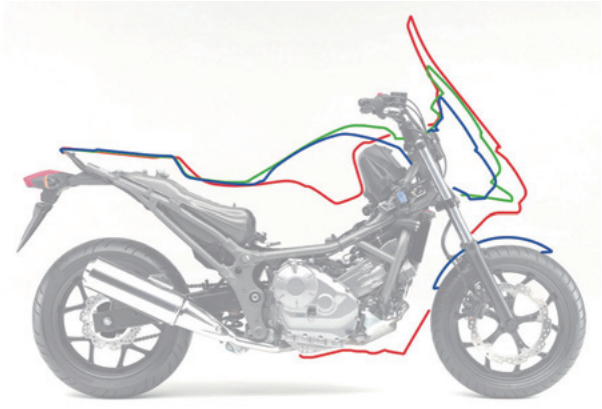


Fig. 6　NC700 platform

2.3.3. NC700X モデル概要

NC700X は異なる魅力が融合することで生まれる新価値を備えた，ニュークロスオーバーモータサイクルを目指した．

NC700S に対し前後サスペンションを延長し，都会でも，自然の中でも映える，躍動感にあふれ力強く洗練されたデザインと，見晴らしのよいアップライトなポジションによるオンロードでの快適性と行動半径を広げる機動力を両立させた．

街中での扱いのさまたげとならない，フレームマウントのフェアリングと小型スクリーンの装備により，通勤，通学など，市街地で思いのままに使いながら，時にはロングツーリングも楽しめる，自由で幅広い使い勝手を実現した．

また，NC700S 同等のラゲッジスペースを装備し，日常生活での使い勝手にも配慮をした．

2.3.4. INTEGRA モデル概要

INTEGRA はモータサイクルの走りの楽しさと，コミュータの快適性と利便性を融合した，スクーティングモータサイクルを目指した．

優れたハンドリング特性によるモータサイクル本来の操る楽しさとともに，第 2 世代のデュアルクラッチトランスミッションにより，オートマチックでありながら力強いダイレクト感ある爽快な走り味を実現した．

斬新なスタイリングに加え，パッセンジャの快適な居住性も追求した．より多くのお客様が，モータサイクルの爽快感や機動性，コミュータの利便性を高次元で両立した魅力を味わい，今までのカテゴリに縛られない自由な発想で楽しみ方を発見できるモデルとした．

3．エンジン概要

エンジンの開発目標としては，

（1）常用回転域での力強いトルク特性とワイドレシオとの組み合わせによる扱いやすい低燃費エンジン

（2）カテゴリの異なる 3 モデルで共用できる軽量，コンパクトエンジン

とした．

この目標を達成するために，NC700 シリーズのエンジンは，車体レイアウトの自由度に貢献する 670 cm^3 水冷 OHC 直列 2 気筒エンジンとした．

エンジン諸元は，ボア×ストローク ϕ 73 × 80 mm のロングストロークとし，常用回転域での走る楽しさを追求しながら，燃焼室形状やバルブタイミングの最適化，低フリクション化などにより，27.9 km/L（WMTC モード）の燃費を達成した．

また，前述のように，一部の部品の変更でMTおよびデュアルクラッチトランスミッション両方の設定を可能とした(Fig. 4, Fig. 5)．

4．エンジン詳細

4.1. エンジンレイアウト

3モデル共通のエンジンレイアウトとして要求されるのは，

(1) エンジン上部にラゲッジスペースのための空間を確保できること

(2) スクータのような足置きスペースを確保するため，エンジン幅が狭いこと

である．これら車体レイアウトに貢献する要求を満たすために，シリンダ前傾角62°(車両搭載角)の直列2気筒エンジンとした．

4.2. 常用エンジン回転域での走る楽しさの提供

4.2.1. 出力特性

出力特性は，絶対性能ではなく，常用エンジン回転域での性能を重視した．このため，従来のスポーツタイプエンジンに比べ，出力特性を低回転型とし常用域での力強いトルク特性を実現した(Fig. 7)．また，ギヤレシオも従来エンジンに比べ，ハイレシオ化することで，常用エンジン回転数を下げた．

4.2.2. 270° 位相クランクシャフト

モータサイクルの魅力の一つであるエンジンのパルス感を実現するため，不等間隔爆発となる直列2気筒270°位相クランクシャフト(Fig. 8)とシリンダヘッド分岐吸気ポート(Fig. 9)を採用した．この組合せにより，低負荷時において，第1気筒に続く点火間隔が短い第2気筒は，第1気筒の吸気負圧の影響を受け，吸入開始のポート内圧力が第1気筒より低くなる．このため，第2気筒は第1気筒に比べ充填効率が低下し，気筒間に仕事量の差が生まれる．この作用と90°の位相差を持つトルク変動により本エンジンは，V型2気筒エンジンに近いパルス感を実現した．

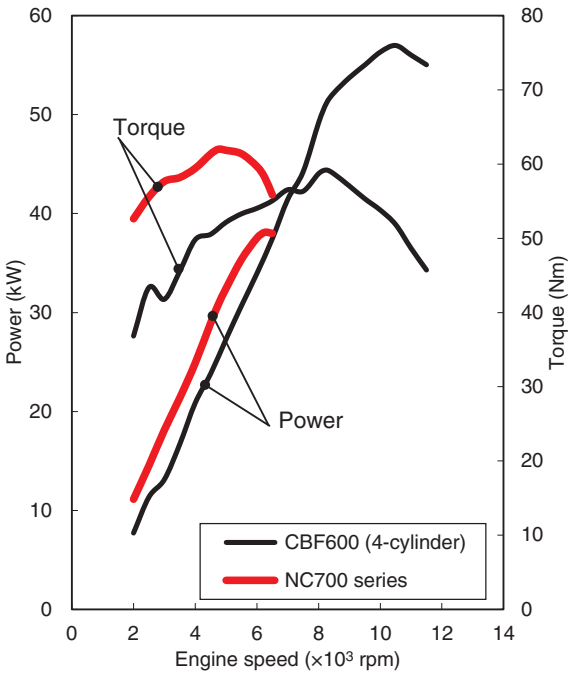


Fig. 7　Engine performance

4.3. 環境性能

燃費性能は，従来の同クラスモータサイクル(XL700V TRANSALP)に対し40%以上向上となる27.9 km/L(WMTCモード)を，燃焼効率の改善，フリクション低減，ワイドレシオ化等により達成した．燃費性能の位置づけをFig. 10に示す．

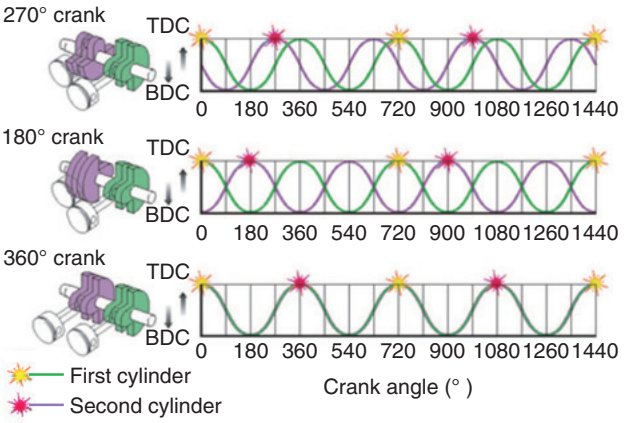


Fig. 8　Comparison of ignition timings



Fig. 9　Branched intake port

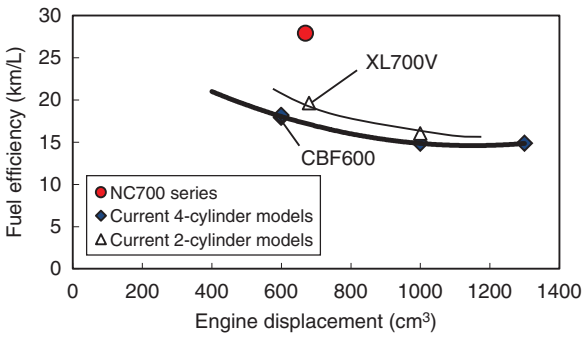


Fig. 10　Comparison of fuel efficiencies

4.3.1. 燃焼効率の改善

従来のミドルクラスエンジンは，アイドル時など低回転低負荷時の燃焼が不安定（燃焼変動率COV大）となるため，空燃比を13前後と濃くすることで燃焼を安定させていた．本エンジンでは，目標燃費達成のため，

（1）ϕ 73 × 80 mmのロングストローク化

（2）バルブタイミングの最適化

（3）ワイドギャップスパークプラグの採用

により，空燃比を理論空燃比（A/F14.7）としても，従来と同等以上の燃焼安定性を成立させることができた（Fig. 11）．

4.3.2. フリクション低減

燃費向上に寄与する低フリクション化技術として，ピストンに樹脂コーティングを施すとともに，ピストンリング張力を従来の同クラスモータサイクル（XL700V TRANSALP）の40%まで低減した．また，ロッカアームは，二輪車として初の採用（Honda調べ）となる，アルミニウム材を用いたローラ式とした．

さらに，オイルポンプをバランサーシャフトで駆動し，ウォータポンプをカムシャフトで駆動することで，機能集約による部品点数の削減と，補機駆動ロスの低減を実現した（Fig. 12, Fig. 13）．

これらの結果，従来同クラスのモータサイクルに対し摩擦損失平均有効圧力Pmfにおいて20%，エンジン回転数3000 rpm時のフリクションロスを低減した（Fig. 14）．

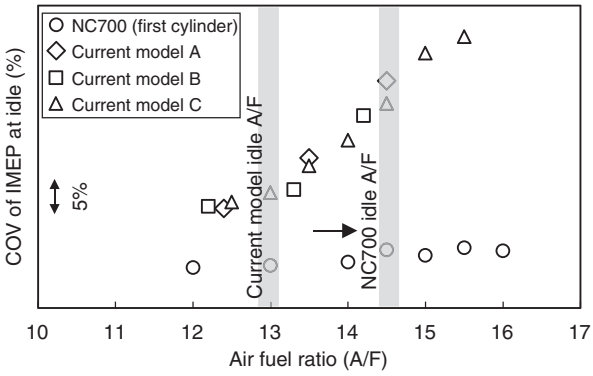


Fig. 11　Comparison of coefficients of variance (COV)

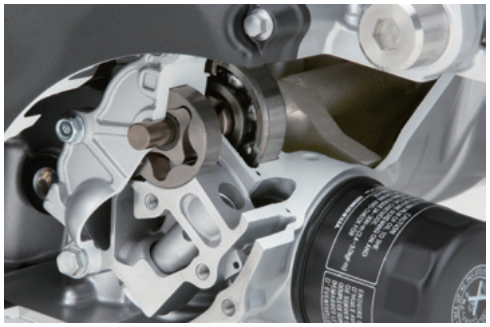


Fig. 12　Oil pump driven via balancer shaft

4.4. デュアルクラッチトランスミッションタイプの設定

NC700シリーズのエンジンには，通常のマニュアルトランスミッションタイプに加えて，デュアルクラッチトランスミッションタイプを設定した．Fig. 15にその構成を示す．

2010年に発表したVFR1200FD（デュアルクラッチトランスミッション装着車）[1]に対し，ダイレクト感や力強さなどの性能を損なうことなく，軽量化，コンパクト化を



Fig. 13　Water pump driven via camshaft

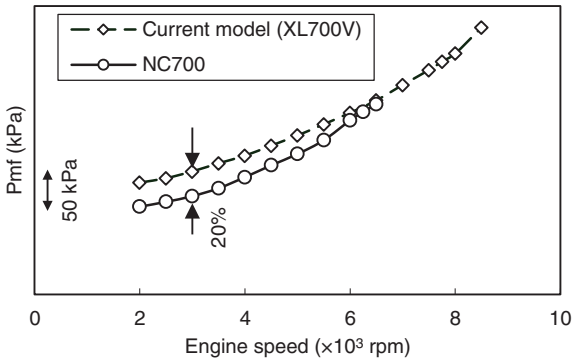


Fig. 14　Comparison of friction loss

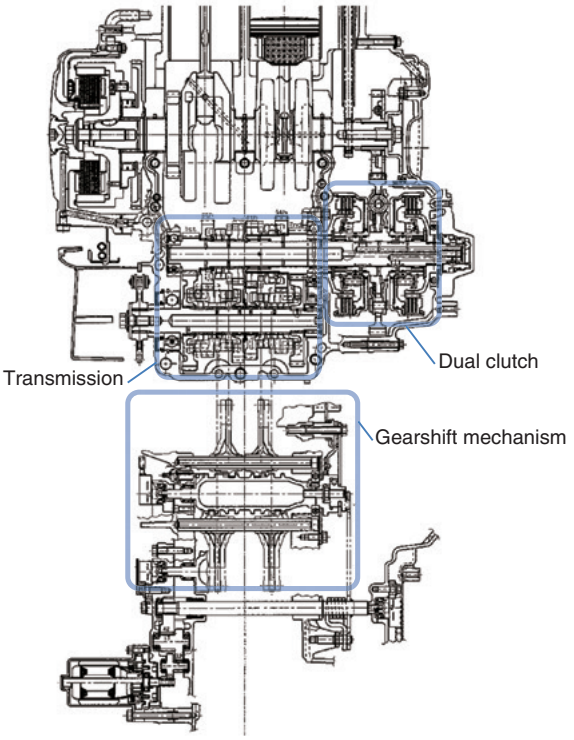


Fig. 15　Cross-sectional drawing of engine

図った．さらにマニュアルトランスミッションタイプと，エンジン部品の 85% を共用し，低コスト化も実現した．

4.5. デュアルクラッチトランスミッションの進化

4.5.1. ハードウエア

ハードウエアにおける進化は，デュアルクラッチトランスミッションの制御に欠かすことのできない油圧回路に着目しておこなわれた．

リニアソレノイドバルブの配置を，エンジン右側カバーの外側から内側に変更することで，VFR1200FD に対し油圧回路を約 40% 短縮し，応答性が高く，シームレスな変速特性を実現した．また，ソレノイドバルブの配置変更は，コストの削減とコンパクト化にも貢献した．

さらに，トランスミッションの部品点数については，オイルフィードパイプの廃止など，VFR1200FD と比較し約 20% の削減を実現した (Fig. 16)．

4.5.2. ソフトウエア

ソフトウエアにおける進化は，走りの楽しさに直結するシフト制御の見直しによっておこなわれた．

デュアルクラッチトランスミッションは，市街地走行時の燃費性能も考慮した D モードと，ワインディングロードでの，スポーツ走行を考慮した S モードの二つの AT モードを選ぶことができる．さらに左グリップ部に装備された Up/Down スイッチにてライダがギヤポジションを任意に選ぶマニュアル変速が可能な MT モードがあり，合計三つのモードの選択が可能となっている．

本開発においては，特に D モードおけるさまざまな走行環境やライダの走り方の違いに着目し，幅広く対応できるように，その守備範囲を拡大した．すなわち，D モード選択時のライダの走り方に合わせて，自動的に最適な変速制御をおこない，市街地や郊外でのリラックスしたライディングから，FUN ライディングにおけるキビキビした走りまで対応できるようにした (Fig. 17, 18)．

さらに AT モード選択時でも，Up/Down スイッチでマニュアル変速が可能であり，変速後は自動復帰機能により走行状態に応じた最適なタイミングで AT モードに復帰する制御を取り入れた．

これら制御を追加することで，より快適なライディングが可能となった (Fig. 19, Fig. 20)．

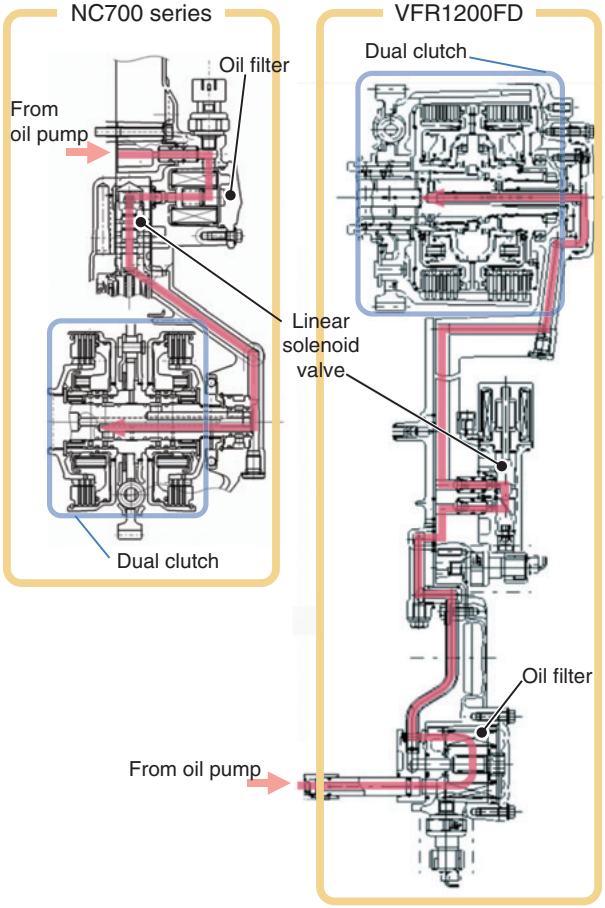


Fig. 16 Comparison of clutch oil lines

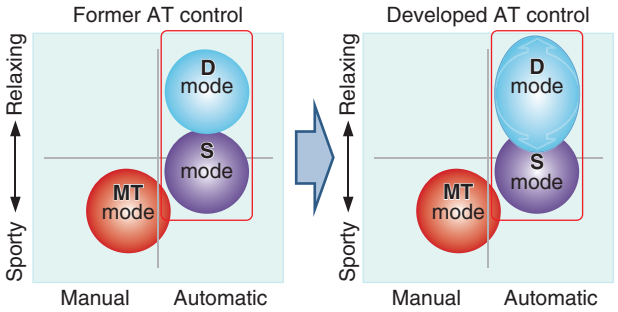


Fig. 17 Expanded D mode coverage

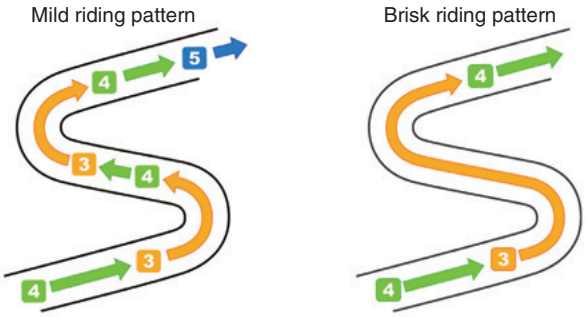


Fig. 18 Gear shifting patterns with driving inclination detection

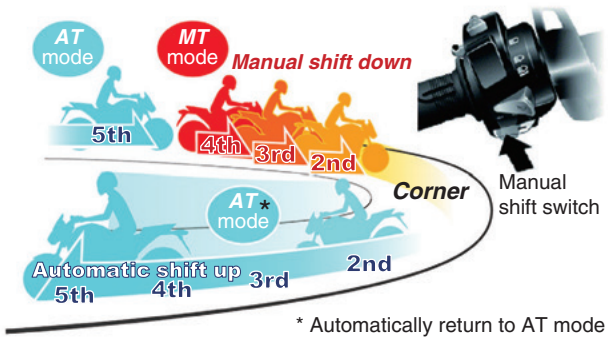


Fig. 19 Automatic return to AT mode function

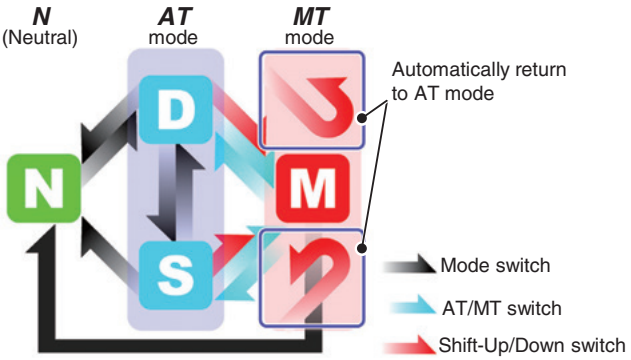


Fig. 20　Shift mode management

5．フレームのプラットフォーム化と共通パッケージ

Fig. 21, Fig. 22 に示す通り，鞍乗り型モータサイクルとスクータでは，フレームボデー形状が大きく異なっている．また，そのシルエットの違いから各部品の形状や配置も大きく異なる．今回，異なる 3 タイプのモデルで，フレームボデーのプラットフォーム化，各部品の共通パッケージ化をおこなうことが車体設計上最大の課題であった．

その課題解決のため，エンジン，エアクリーナ，燃料タンクのレイアウトなどを根本的に見直し，従来にない新しいフレームボデー構造の検討をおこなった．

5.1. エンジン搭載位置

完成車におけるエンジンの搭載位置は，特に操縦安定性に寄与する前後重量バランスにおいて重要である．NC700 シリーズに搭載のシリンダ前傾角 62° のエンジンは，全高を抑えているものの前後長は長くなっているため，搭載位置の前後自由度は限られる．

そこで，シリンダヘッドカバーにラジエータの形状に合わせた形状に設定し，フロントサスペンション全屈時のフロントフェンダとラジエータのクリアランスを確保すると同時に，車体前方のねらった位置にエンジンを配置することができた (Fig. 23)．



Fig. 21　Example of frame body for ride on type motorcycle



Fig. 22　Example of frame body for scooter

5.2. エアクリーナケース

エアクリーナケースは前傾したシリンダヘッド部の直上に，ハンドルの転舵スペース，NC700S, NC700X のラゲッジスペース，INTEGRA のシート開閉スペースを確保しながら配置した．エアクリーナ全容量を 5.8 L とし，出力，走り，騒音等の性能を達成した．Fig. 24, Fig. 25 にエアクリーナケース周辺レイアウトを示す．

また，スペースを有効活用するためにエアフィルタをエアクリーナケースのパッキン面よりも上方に突出させて配置し，エアフィルタ以降のクリーンサイドの容量を大きくとることで，力強いトルク感を実現している (Fig. 26)．

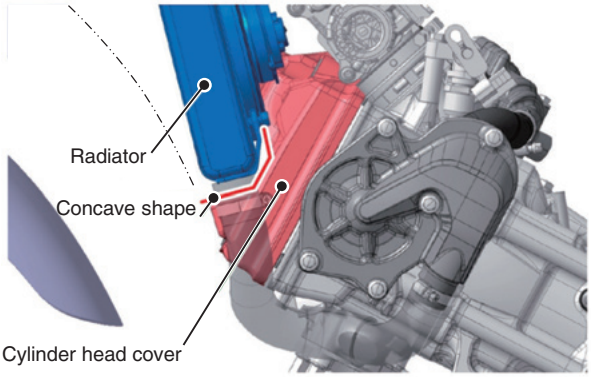


Fig. 23　Cylinder head cover shape that does not interference with radiator

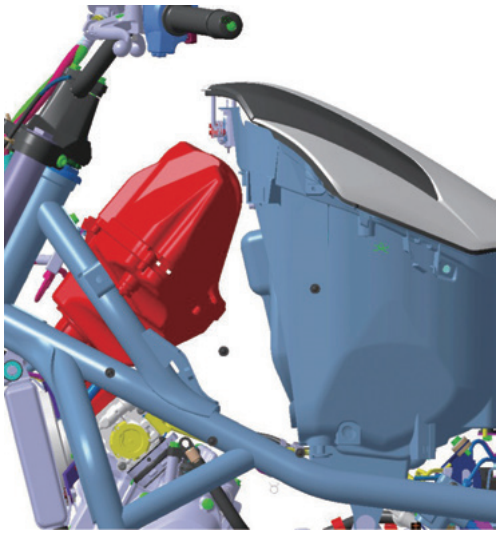


Fig. 24　Layout around air cleaner case (for NC700X)



Fig. 25 Layout around air cleaner case (for INTEGRA)

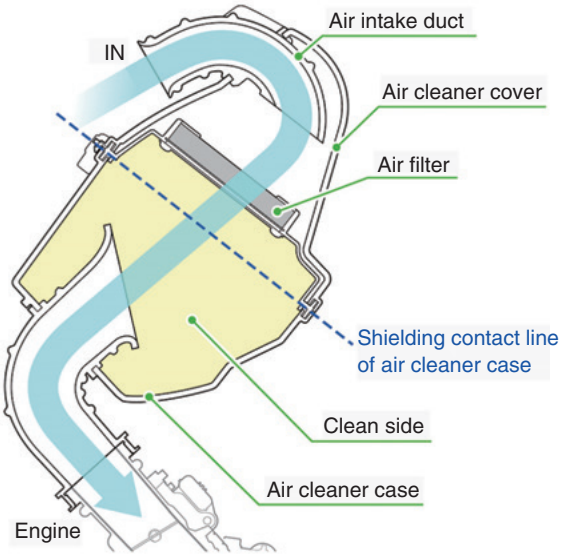


Fig. 26 Layout of air filter

5.3. フレームボデー

フレームボデーは，将来的に世界各国にて調達，製造が可能になることを視野に入れ，高張力鋼を使用せず，一般鋼を用いた．

また，３モデルそれぞれの要求を満足した形状を検討し，メインパイプを従来モデルに比べ低い位置に配置したダイヤモンド形式とした．従来モデルとの比較を Fig. 27 に示す．

フレームボデーは CAE 解析をおこない，パイプサイズ，肉厚，パイプ曲げ位置を決定し，剛性感としなやかさを両立させている．Fig. 28 に CAE 解析の一例を示す．

5.4. 燃料タンク

燃料タンクはシート下に配置し，薄型形状で容量を確保するために有利な鋼板製２ピース構造を採用した．

リヤフレームのパイプ配置は燃料タンクの下側とし，燃料タンクに直接シート荷重がかからないように，クロスプレート，ラゲッジボックスステー，リヤグラブレールを有効的に配置した (Fig. 29)．この構造は，燃料タンク鋼板の薄板化を可能とし，車体の軽量化の一助としている．

また，燃費の良い新エンジンにより，燃料タンクの小型化が可能となり，容量を 14 Ｌとした．１回当たりの給油で，従来モデル同等以上の約 380 ｋｍの航続距離を確保している．

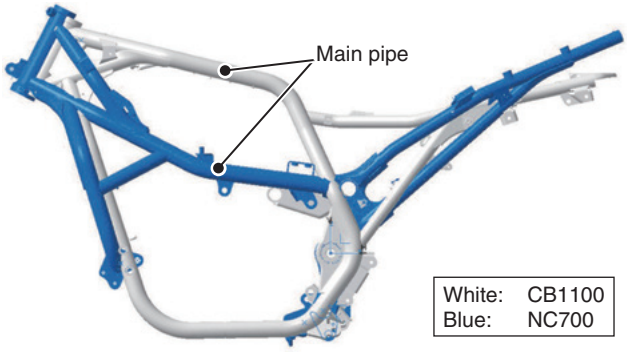


Fig. 27 Comparison of frame body pipings of CB1100 and NC700

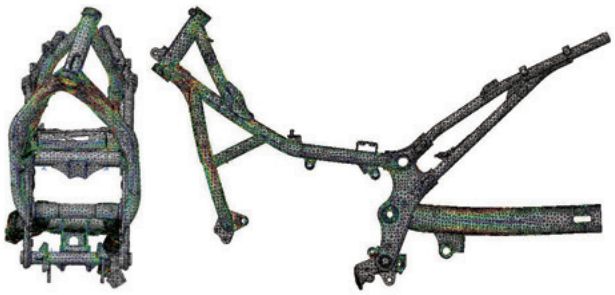


Fig. 28 Example of CAE analysis for frame body

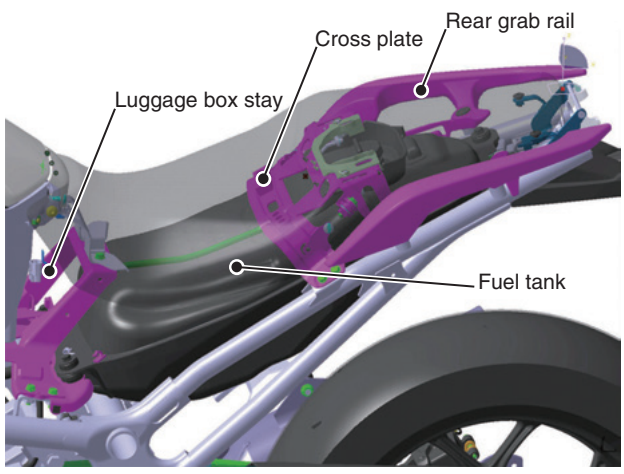


Fig. 29 Layout around fuel tank

6．まとめ

NC700 シリーズは，「日常的な使い勝手の中でだれもが扱いやすく，よりいっそう軽快，快適で，味わい深く楽しいモータサイクルを低燃費，お求めやすい価格で提供すること」を目標に開発された．３モデル共通のプラットフォーム，低，中速域のトルクを重視し，利便性やデザインの自由度に寄与する低重心の水冷直列２気筒，670cm^3 エンジン，伝達効率に優れた性能はそのままに，軽量，コンパクト化したデュアルクラッチトランスミッションなどを共通の技術として採用しつつ，それぞれ個性的な方向性をもつ３モデルの新たな二輪車を実現した．

このシリーズが新たなモータサイクルの世界を創造する先駆けになるものと期待している．

参考文献

（1）田中政隆，荒井大，渡辺純也，深谷和幸，橘髙栄治，土谷政彦，VFR1200F 用デュアルクラッチトランスミッションの開発，Honda R&D Technical Review，Vol.23，No.1，p.9-17

■著　者■


小 林 弘 毅


根 来 正 明


大須賀貴則


三 堀 敏 正


大 島　 正

４ストロークエンジン市販ロードレーサ NSF250R の開発

Development of NSF250R Commercial Road Racer with 4-stroke Engine

小野里　富　夫*　　倉　吉　良　之*
Tomio ONOSATO　　Yoshiyuki KURAYOSHI

要　旨

2012 年より二輪世界選手権レースに４ストローク 250 cm^3 エンジンを使用した Moto3 が設定されることに伴い，新開発４ストローク単気筒 249 cm^3 エンジンを搭載した NSF250R を開発した．エンジンは，充填効率向上のために前方吸気ー後方排気とし，マス集中のためにシリンダを後方に 15° 傾斜させたレイアウトを特徴とする．軽量薄型ピストンおよびナットレスコンロッドなどの採用による軽量化，オフセットシリンダおよびスカベンジポンプ付密閉式クランクケースなどの採用によるフリクション低減，ミッドシップマフラの採用によるマス集中化などにより，ロードレースの登竜門である Moto3 カテゴリ用の市販レーシングマシンにふさわしい動力性能と運動性能を実現した．

ABSTRACT

A Moto3 category that uses 4-stroke 250 cm^3 engines has been established for Grand Prix motorcycle racing from 2012. Due to this new category, Honda has developed the NSF250R, which is equipped with a newly developed 4-stroke single-cylinder 249 cm^3 engine. The new engine features an intake-from-front, exhaust-to-rear layout to increase charging efficiency, and a 15° rearward tilted cylinder to concentrate mass. A thinner lightweight piston and nut-less connecting rod are used to reduce weight, an offset cylinder and a closed crankcase with scavenging pump are used to reduce friction, and a midship muffler is used to concentrate mass. These and other measures realize engine performance and maneuverability suitable for a commercial racing machine in the Moto3 category, which is the gateway to road racing.

1．はじめに

Honda は，1976 年の MT125R から 2009 年モデルをもって生産を終了した RS125R まで，ロードレース入門用の２ストローク 125 cm^3 レーシングマシンを生産･販売し，国内外の二輪モータスポーツの裾野を広げるとともに，多くのレーシングライダを育んできた．

一方，一般市販車の環境対応のニーズがグローバルレベルで高まる中，二輪のレーシングマシンも４ストローク化がおこなわれ，2002 年には二輪世界選手権の最高峰 GP500（２ストローク 500 cm^3）から MotoGP（現在４ストローク 1000 cm^3）へ，2010 年からは GP250（２ストローク 250 cm^3）から Moto2（４ストローク 600 cm^3）へと変化してきた．そして，2012 年から GP125（２ストローク 125 cm^3）にかわり４ストローク 250 cm^3 エンジンを使用した Moto3 カテゴリが新設された．これに伴い，エントリーライダが参戦するためのマシンとして新たに NSF250R を開発した．RS125R が培ってきた二輪モータスポーツの底辺拡大という目的を継承し，RS125R のユーザが違和感なくライディングでき，エントリークラスから最高峰クラスまでのステップアップの実現に必要なライディングの基本を学ぶことが可能な，高性能で軽量コンパクトなレーシングマシンをめざした．

2．開発目標

現在，世界中でおこなわれている２ストロークの GP125 クラスはロードレースの登竜門であり，若手からベテランまで，また，ローカルレースから世界選手権までロードレースを幅広く支えている．この GP125 クラスのマシンの特徴は，若手エントリーライダにもマシンコントロールが無理なくできる車格にある．それに加え，エンジンおよび車体のレスポンス性とダイレクト感を備えていることと，さらにマシン性能を最大限に発揮させるために幅広いセッティング機能を有していることである．これらの要素を受け継ぐことを基本コンセプトとし，レーシングマシンとして高い運動性能と４ストロークエンジンの扱いやすさを具現化すること，すなわち「軽量･コンパクト･高出力･高効率」を NSF250R の開発目標とした．

＊二輪 R&D センター

https://doi.org/10.69239/hondatechnicalreview.2012_24_2_5

Table 1　Major specifications

Model name		NSF250R
Dimensions (L x W x H) (m)		1.809 x 0.560 x 1.037
Wheelbase (m)		1.219
Ground clearance (m)		0.107
Seat height (m)		0.729
Caster angle (deg)		22° 36’
Curb mass (kg)		84
Tire size	Front	90/580R17
	Rear	120/600R17
Brake type	Front	Hydraulic disk ϕ296
	Rear	Hydraulic disk ϕ186
Suspension type	Front	Inverted telescopic
	Rear	Pro-link suspension system
Frame type		Aluminum twin tube

3．機種概要

Fig. 1 に NSF250R の外観を示す．また，Table 1 に基本仕様を示す．レーシングマシンとして速さの追求を図るため，「軽量･コンパクト･高出力･高効率」をめざした結果，専用設計のエンジンと，RS125R 同等のコンパクトな車体の選択が必要と判断した．

そしてそれらを具現化するために，前方吸気－後方排気，一体クランクシャフト，スカベンジングポンプ付密閉クランク室を装備した DOHC 単気筒エンジンを新開発した．また，完成車はミッドシップマフラ，エアボックス内スロットルボデー等の採用によって，マスの集中を図った．



Fig. 1　NSF250R external view

4．パワーユニット（エンジン）

4.1. エンジン主要諸元概要と開発目標

NSF250R のエンジン外観を Fig. 2 に，RS125R との主要諸元の比較を Table 2 に示す．完成車の開発目標が，軽量でコンパクトな RS125R の高い運動性能と 4 ストロークエンジンの扱いやすさを具現化することであるため，エンジンの開発目標を以下のように設定した．

（1）吸排気系を含めたエンジンの徹底的なマスの集中化を図り，排気量が倍となる 4 ストロークエンジンを搭載しながらも，完成車としてほぼ同等の前面投影面積とする．

（2）最高出力については，RS125R に対してパワーウエイトレシオを同等に設定し，最高出力を 34 kW 以上とする．

（3）バッテリレス電子制御式燃料噴射システム（以下 PGM-FI システム）の採用によりドライバビリティの向上を図り，サーキット走行タイム，加速性能，最高速での優位性を確保する．

（4）軽量化および簡素化の観点から，スタータモータおよびキック等の始動デバイスを用いずに，押し掛け始動を可能とするためにカム式オートデコンプレッションシステムを採用し，2 ストローク RS125R 同等の押し掛け始動性を確保する．

（5）耐久性については，レース専用エンジンとして高い戦闘力を維持することを目的に各部品を有限保証としているが，全部品 2000 km 以上の耐久性確保を必須とし，主要部品の定期メンテナンスの実施により 4000 km を保証する．

4.2. 基本レイアウト

エンジンは，同じ競技専用車両である市販モトクロッ



Fig. 2　Engine external view

Table 2 Comparison of engine major specifications

	NSF250R	RS125R
Engine type	Liquid cooled 4-stroke DOHC 4-valve single cylinder	Liquid cooled 2-stroke single cylinder
Displacement (cm^3)	249.4	124.8
Bore x stroke (mm)	78 x 52.2	54 x 54.5
Compression ratio	12.3	7.98
Maximum power (kW/rpm)	35.5 / 13000	32.6 / 12250
Maximum torque (Nm/rpm)	28.0 / 11000	25.9 / 11500
Fuel supply system	Battery-less PGM-FI, GQD1A φ50	Carburetor, PJ38
Starting type / starting assist system	Push start / auto-decompression system	Push start / none
Ignition system	Full-transistor	Digital C.D.I.

サ CRF250R をベースとし，ロードレーサとしての資質と将来のポテンシャルアップに対する優位性を確保するため，動弁系廻りやクランクケースなどの大幅な変更を始めとする全部品の見直しを実施し，ロードレース専用設計とした．

エンジンレイアウトの概要を Fig. 3 に示す．エンジンレイアウトの基本は，開発コンセプトである「軽量･コンパクト･高出力･高効率」の実現に向け，まず，充填効率向上のために前方吸気ー後方排気レイアウトを選択し，ラム圧加給システムを標準装備とした．かつ，前方吸気のためのスペース確保およびマスの集中化をねらい，比較的浅いウォータジャケット高を有するシリンダを後方に 15 度傾斜させた．

また，高回転域を多用する小排気量ロードレーサとしての動弁系には DOHC 方式を採用し，Honda の量産車としては初めて吸排気両バルブにチタン材を適用した．

軸配置においては，バランサ軸をクランクシャフト上方に配置することで，エンジンの前後方向長さを縮小すると共にマスの集中化を図った．

さらに，左側カバーと左右クランクケースの下部で構成される空間をケース内オイルタンクとするセミドライサンプ方式を採用し，かつ，密閉構造のクランク室にスカンベンジングポンプを設け，ポンピングロスを低減させることにより低フリクション化を図った．

4.3. 出力特性

RS125R（2 ストローク）と NSF250R（4 ストローク）の出力特性比較を Fig. 4 に示す．フラットなトルク特性による 4 ストロークならではの扱いやすい出力特性を求め，ポート形状，バルブタイミング，吸排気系の最適化，および摩擦損失低減を図り，目標最高出力との両立を達成した．最高出力にて約 9%，最大トルクで約 8% の性能向上を実現した．

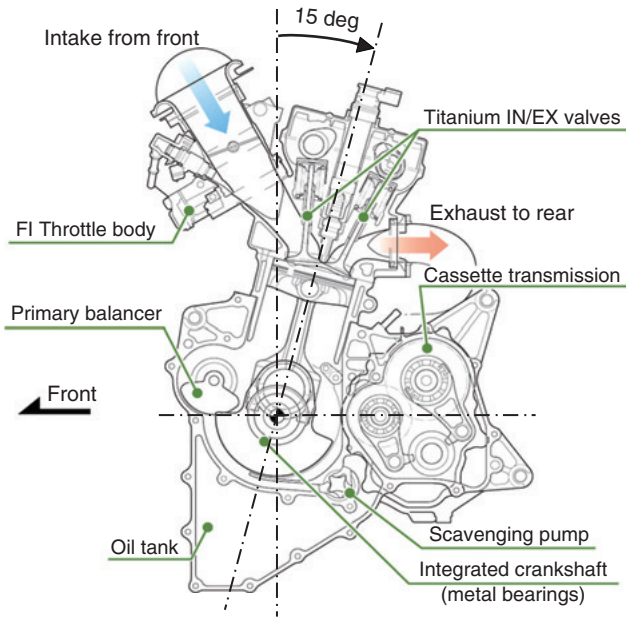


Fig. 3 Engine layout

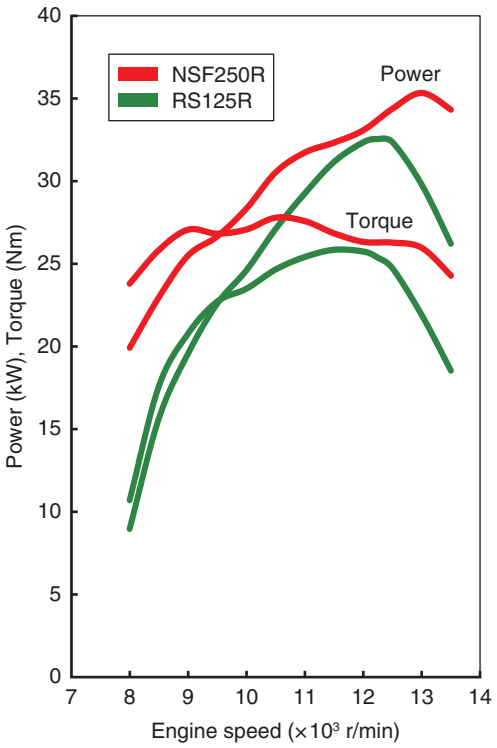


Fig. 4 Comparison of output characteristics

摩擦損失に関しては，同一ボア×ストロークのCRF250R（2009 年モデル）に対し，最高出力回転数 13000 r/min にて約 21% の低減を実現した．Fig. 5 にモータリング法にて計測された同一油温条件下での摩擦損失比較を示す．

以下，これらを具現化したエンジンの主要投入技術について紹介する．

4.4. 軽量薄型鍛造ピストン

ピストン廻りの構造図を Fig. 6 に示す．ピストンは，ボア径 78 mm に対して全高 31.5 mm と軽量薄型を採用した．高温強度に優れた A2618 材を用い熱間鍛造にて成形し，燃焼室を形成するピストンヘッド部は総削り加工にて仕上げている．また，ピストンの熱処理に関しては T6 処理を施し，レース用としての高強度化を図った．

形状検討においては，CAE 解析による検証結果を基に，ピストンの背面にはピンボス間をつなぐ２本の横リブを設け，この横リブがピストンの周壁側に向かって低くなるよう形成させることにより高剛性化と軽量化の両立を実現させた．

トップリング溝とピストンピンクリップ溝にはニッケル - リン（Ni-P）めっきを施し，耐摩耗性の向上により高性能を維持させると共に，耐久性の向上を図っている．

ピストンピンは外径 ϕ16 mm に対して全長 35 mm と短く，ピンボス面との受け幅においては片側 7.2 mm と狭いことから耐面圧上不利となる．そのため，表面処理に DLC（Diamond - Like Carbon）コーティングを施すことで，耐摩耗性の向上と低フリクション化に対応した．また，ピストンピン材にはモリブデン配合率を高めた耐熱肌焼鋼を使用している．

ピストンリングは，トップリングとオイルリングのみの２本仕様とし，トップリングの表面処理には窒化を下地に外周摺動面にイオンプレーティングを施すことで，耐摩耗性の向上と低フリクション化を図った．

これらピストン廻りの小型軽量化により，同一ボア×ストロークの CRF250R（2009 年モデル）に対し，往復運動重量部比較で約 4% の低減を達成した．

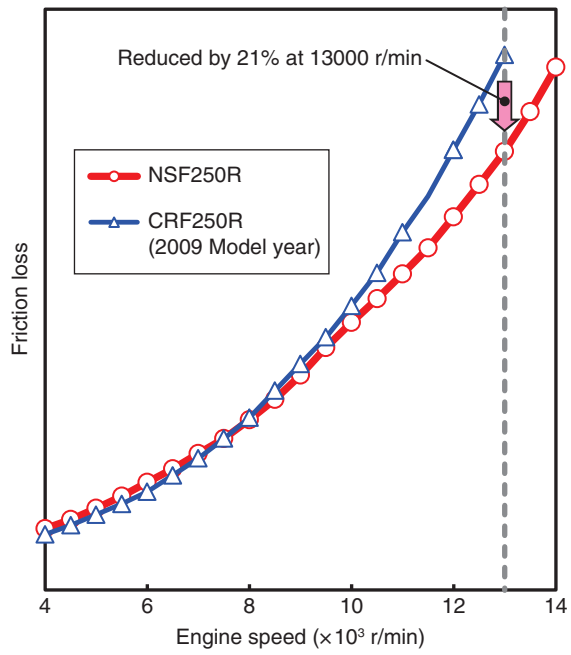


Fig. 5　Comparison of friction loss

4.5. 鍛造一体型クランクシャフトとナットレスコンロッド

クランクシャフト廻りの断面図を Fig. 7 に示す．鍛造一体構造のクランクシャフトには独自開発の高強度鋼[1]に LCN（Low Temperature Carbonitriding）処理を施し，さらにタイミングスプロケットおよびオイルポンプドライブスプロケット部には高周波焼入れの組合せを採用した．これらにより，高回転，高出力のレーシングエンジンに要求される高剛性，高精度に加え，スプロケット部の高強度化を両立させることができた．

コンロッドは軽量なナットレス式を採用した（Fig. 6）．

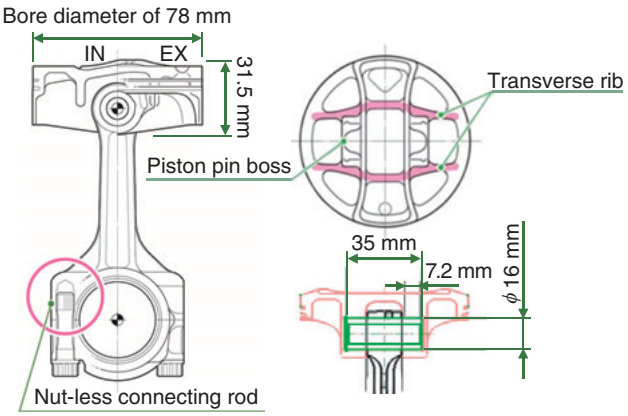


Fig. 6　Structure of piston and connecting rod

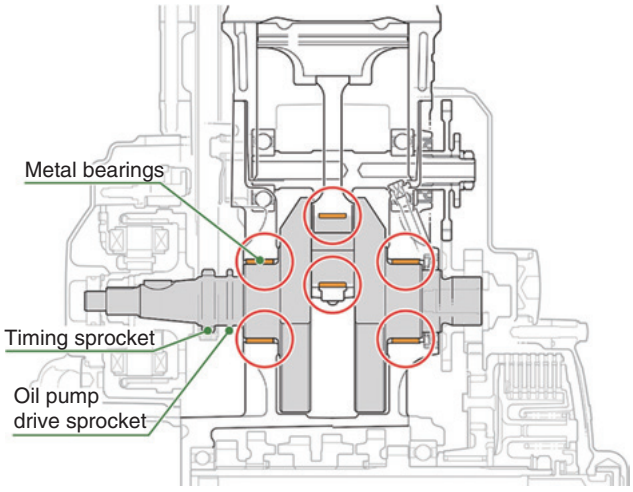


Fig. 7　Sectional view of crankshaft unit

棹側に直接切られたねじ穴をボルトで締め付けるシンプルな構造とし，従来型に比べて質量の軽減を図った．

コンロッド大端ベアリングおよびクランクシャフトジャーナルベアリングには，メタルベアリングを採用し，高出力，低フリクション化への対応と共に，エンジンのコンパクト化，軽量化を実現している．

4.6. シリンダヘッド，シリンダおよび動弁系システム

吸排気ポート形状断面図とオフセットシリンダ概要および動弁系廻りの概要を Fig. 8 に示す．

前方吸気－後方排気のレイアウトにより，ポートのストレート化が容易となる．中でもインレットポートに関しては，エアクリーナボックス内に内蔵されたスロットルボデーに装着されるインジェクタの位置を前方（進行方向側）に配置することで，ポートをより上方に立ち上げることを可能とし，高効率なダウンドラフト型のストレートポートを実現した．

シリンダには，軽量なアルミニウム合金製をベースに，ボア面にはニッケルシリコンカーバイト（Ni-SiC）の表面処理を施し，かつ，シリンダ軸を吸気側に 2 mm オフセットさせることでピストンとシリンダ間にかかるスラスト荷重を軽減し，摩擦損失の低減を図った．

動弁系については，ピストンボア径 78 mm に対して，IN バルブ径 32.5 mm × 2，EX バルブ径 26 mm × 2 の 4 バルブを設定し，両バルブ共に軽量なチタン製バルブを採用した．IN バルブには Ti-6Al-4V をベースに，鉄成分の多いオフグレードスポンジチタンを使用したチタン合金[(2)]を採用した．今回初めて量産化を実現した EX バルブには，Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo 材を改良した耐熱チタン合金を採用している．

また，バルブの挟み角は 21.5° と狭角に設定し，かつ，両バルブの燃焼室面をフラット形状とすることで，コンパクトで理想的な燃焼室形状を実現した．

カムチェーンは，高強度と低フリクション化の両立と，クランクタイミングスプロケットの必要強度を十分に確保することを目的に，ボルグワーナー社製の 96 タイプチェーンを採用し，さらなる高回転化や性能向上など将来のポテンシャルアップに対応可能な仕様としている．

カムチェーンテンショナには，シリンダ部にオートテンショナリフタを設置し，ヘッド部にマニュアルテンショナを併設するダブルテンショナ方式を採用している．高回転を多用するロードレーサの使用条件に対して安定したカムチェーン駆動を実現すると共に，実走行でのギヤシフト時などに発生する急激なクランク回転変動に伴うカムチェーン挙動の暴れ対応にも有効な手段として用いている．

4.7. 二系統分離型潤滑システムおよびスカベンジングポンプ付密閉式クランク室

二系統分離型潤滑システムの概要図を Fig. 9 に示す．クランクシャフトおよびバランサシャフトの右側にオイルシールを配し，クランクシャフトとピストン側（内燃機関側），トランスミッションとクラッチ側（駆動系側）のそれぞれの潤滑方法を二系統に分けた分離型潤滑システムを採用した．内燃機関側についてはトロコイド式フィードポンプによる圧送方式を，駆動系側については 2 ストロークエンジンと同様のオイルバス方式を給油システムとして採用している．

分離型潤滑システムのメリットは，駆動系側のオイルが内燃機関の燃焼熱を直接受熱しないことによりオイル温度の上昇が抑えられ，クラッチの小容量化による小型化が可能となることである．これによりクラッチ容量やトランスミッションなどは RS125R と同一の仕様とすることができた．

また，その他のメリットとして，内燃機関側のオイルは，トランスミッションギヤなどの摺動によって発生する摩耗

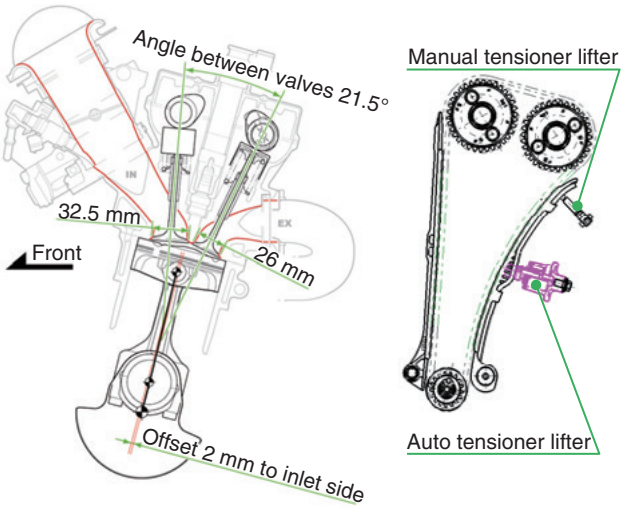


Fig. 8　Engine sectional view and valve train system

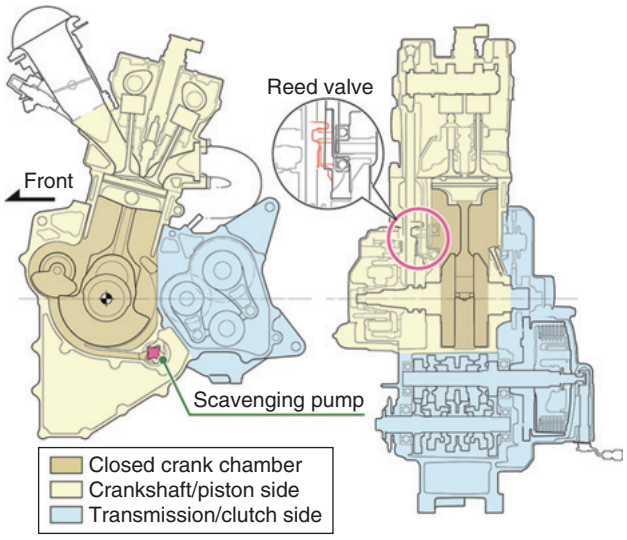


Fig. 9　Dual-channel lubrication system

粉等の混入が抑えられ，オイルフィルタを小型化できる．さらに，内燃機関側のみにモリブデン添加剤等を使用することができ，クラッチ性能を低下させることなく摩擦損失低減を図れる．

クランクケースについては，クランクシャフトとバランサシャフトおよびコンロッドとピストン廻りが格納されるエリアを密閉構造とした．オイルフィードポンプと同軸上に設けたスカベンジングポンプによって密閉クランク室内のオイルを強制排出させるとともに負圧化させることでポンピングロスを低減し，低フリクション化を図っている．

また，密閉クランク室の左上部（バランサベアリングハウジング部）にはリードバルブを設置した．エンジンの押し掛け始動時，回転数が低いためにスカベンジングポンプが有効に作用しきれず，密閉クランク室内が正圧化される．その際，リードバルブが開弁し，ポンピング圧の上昇を防ぐことで，始動に必要なクランク回転数を安定して確保できる構造とした．

4.8. オートデコンプレッションシステム

押し掛けによるエンジン始動の容易化を目的に，オートデコンプレッションシステム（自動減圧機構）を搭載した．Fig. 10 に示すように，軽量でシンプルな遠心ウェイト付カム式デコンプレッションシステムを採用した．エンジン始動時のシリンダ内の圧縮圧力を低減し，押し掛け時においても十分なクランク回転数を確保することで，ACG からの必要十分な発電量を得ることができる．これにより，バッテリレスのシステムであっても ECU の起動が可能となる．

デコンプレッションシステムの設定に関しては，開弁タイミングとリフト量の最適化および遠心ウェイトとセットスプリングとの組合せ設定によるデコンプレッション解除回転数の適正化の二点が重要なポイントである．加えて，FI セッティングの最適化を図ることで，2ストローク RS125R 同等の押し掛け始動性を確保した．

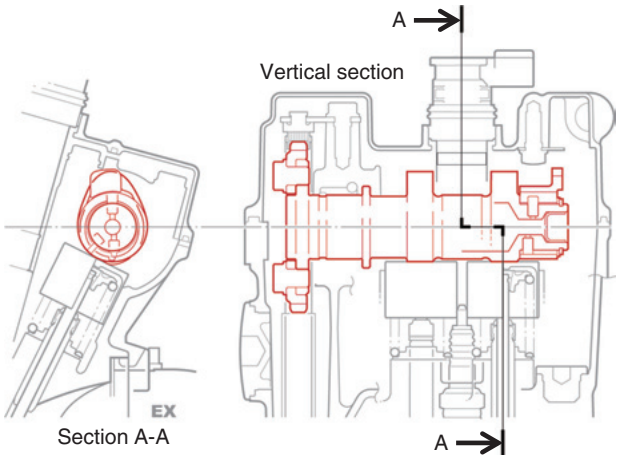


Fig. 10　Auto decompression system

4.9. カセット式トランスミッション

トランスミッションは各サーキットの特性にあわせて，最適なギヤ選択をおこなうため，交換の容易なカセット式トランスミッションを採用している（Fig. 11）．

このカセット式トランスミッションは，エンジンの脱着やクランクケースを分解することなく，短時間でメンテナンスおよびギヤ比変更を可能とし，さらに，RS125R のトランスミッションを使用可能とすることで RS125R ユーザの利便性に配慮した．

4.10. 燃料供給システムと吸気系

Fig. 12 にスロットルボデー概要を，Fig. 13 に吸気系概要を示す．スロットルボデーには IACV（Intake Air Control Valve）を採用し，PGM-FI システムによる開度制御によってスロットル全閉時の吸入空気量をコントロールすることで，4ストローク単気筒エンジンにおける強いエンジンブレーキの緩和や，ライダの好みに合った減速フィーリングの設定を可能とした．

エアファンネルは出力特性とレスポンスを最大限に引き出す全長 26 mm のショートタイプとし，アルミニウム製の削り加工を採用することで精度向上を図っている．

これらのスロットルボデー廻りは，MotoGP マシンと同様に，エアクリーナボックス内に収め，エアクリーナボッ



Fig. 11　Cassette type transmission

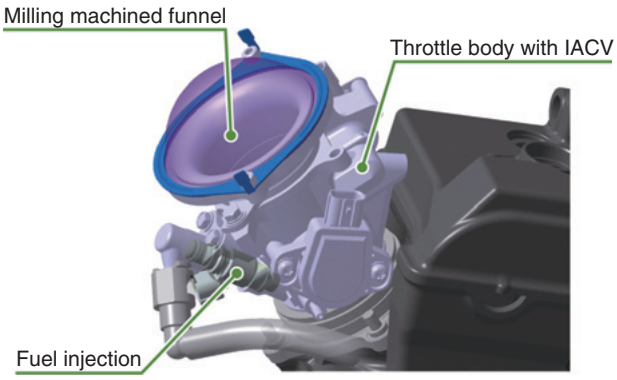


Fig. 12　Throttle body external view

クスをシリンダとラジエータとの間にレイアウトすることでマスの集中化を図りながら，限られた車体スペースを最大限に使い，大容量５Ｌのエアボックスを実現した．

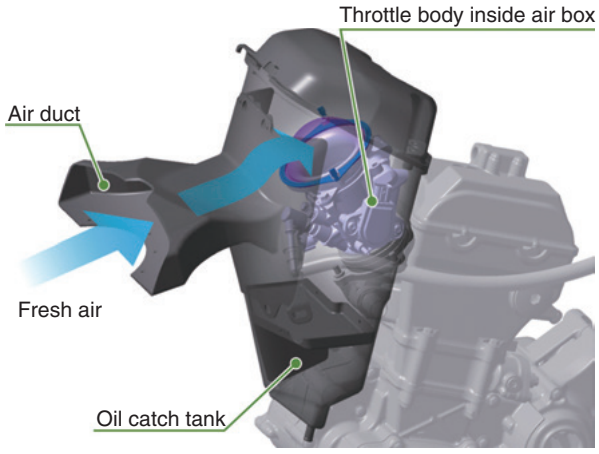
吸気に関しては，RS125R には搭載されていないラム圧加給システムを標準装備とし，ボトムブリッジ下を通過した空気が，大開口部をもつエアダクトを通って，ストレートにエアボックスに導かれ，ラム圧加給を積極的に活用することで出力向上を図っている．

4.11. 排気系

エキゾーストパイプは耐熱性に優れたステンレス製を採用した．４ストロークならではのフラットなトルク特性と目標最高出力（34 kW 以上）との両立をねらい，マフラに近づくにつれパイプ径が徐変拡大していく排気効率に優れたディフューザ形状とし，出力特性の最適化を図った．

また，排気系のレイアウトについては，後傾シリンダの後方から大きく逆Ｓ字を描くエキゾーストパイプがエンジン下部に配置したマフラへとつながる“ミッドシップマフラレイアウト”を採用した．重量物であるマフラを車体重心近傍に配置することでマスの集中化を図り，４ストローク化に伴う質量増の影響を感じさせないハンドリングを実現させた．また，容量の大きなマフラをカウル内に配置することで，空気抵抗の低減にも貢献している．

Fig. 14 に排気系レイアウト概要を示す．



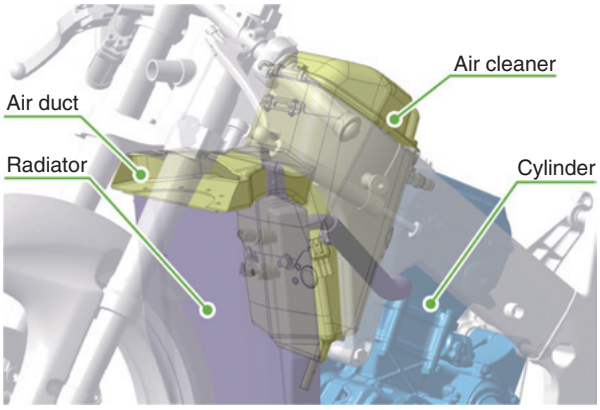


Fig. 13　Induction system

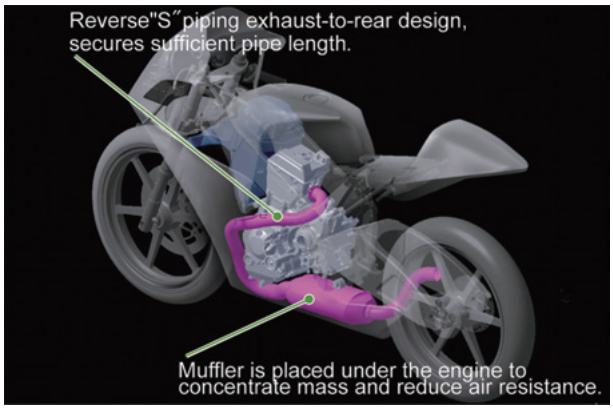


Fig. 14　Exhaust system layout

5．車体レイアウト

RS125R のコンパクトな車体を継承し，４ストローク 250 cm^3 のエンジンを搭載するパッケージングを成立させる技術手段として

（1）前方吸気，後方排気の後傾シリンダエンジン
（2）エアボックス内スロットルボデー
（3）逆Ｓ字配管のエキゾーストパイプ
（4）ミッドシップマフラ

を採用した．この完成車パッケージングにより軽量，コンパクト化が図れた．Fig. 15 に主要ディメンションとライディングポジションを示す．ディメンションについては RS125R に対しホイールベースは同等としながらも，エンジン搭載時のクランク軸中心を前方 27.4 mm，下方 51.5 mm の位置に設定した．これにより，重心高は RS125R と同等で，前輪分担荷重比を 0.7 ポイント増加させることが可能となった．さらに，完成車質量が約 9.2 kg 増加しながらもマスの集中度を高めることにより，RS125R と同等レベルのヨー慣性モーメントを達成した．このように，質量配分と重心高さの最適化を図ることで操縦性と安定性を高次元で両立させることにより軽量クラス

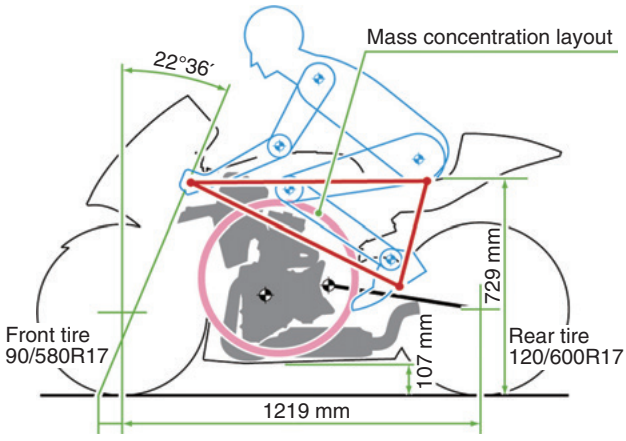


Fig. 15　Major dimensions and riding position

に求められる旋回性能を実現させた.

Fig. 16 に RS125R と NSF250R の同一ライダで同一サーキットを走行した時のコーナリング時に発生するヨーレイトの比較を示す. 旋回時, 高速域では同等であるが, 低速域では約 5% の向上を実現している.

フレームボデーは, RS125R をベースとし, フロントエンジンハンガの形状およびメインパイプの断面形状の変更により, RS125R に対し, 横剛性を維持しつつ捩れ剛性を上げるなど, NSF250R に求められる最適な剛性バランスとした (Fig. 17).

新規設計のスイングアームは, フレームとの一体感と安定性を高めることをねらいとし, フレームボデーと同様な剛性バランス手法で最適化を図り, また, スイングアーム単体としても, 重心位置を前方に移動させ, マスの集中をねらった. さらに, スイングアームとフレームボデーが, ともにしなやかに捩れるような骨格形状とした.

これらによりブレーキング時の安定性が向上し, また RS125R と同等以上のコーナリング自由度および軽快性を確保した. コーナーアプローチ時にも, 4ストローク化に伴う重量アップ分を体感させないハンドリングを実現した.

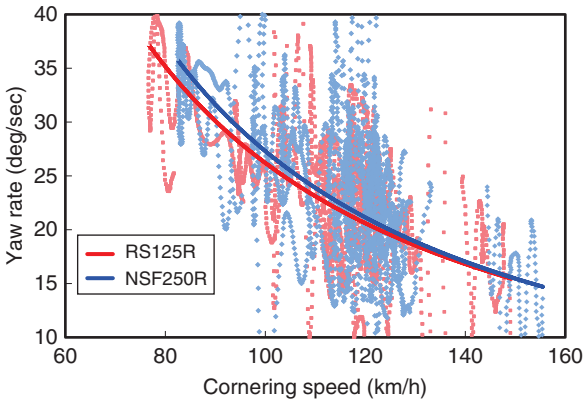


Fig. 16　Comparison of yaw rate at cornering

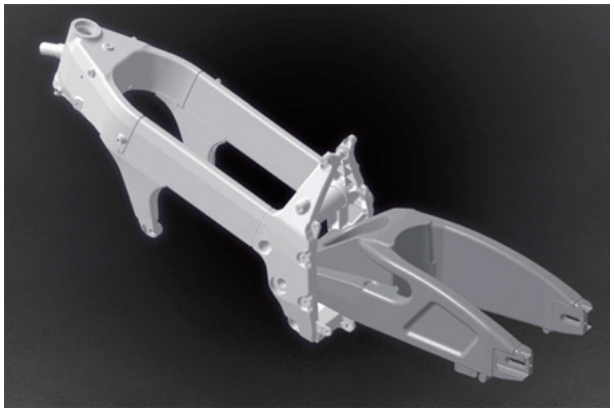


Fig. 17　Frame body and swing arm

6. まとめ

ここに紹介した技術の結集によって構成された NSF250R はトップエンドにふさわしい高性能を安定して発揮することと, だれもがその性能を手にすることが可能となり, すべてのライダの要求に必ずこたえられるものと確信している.

RS125R 同様この NSF250R が Moto3 クラスを活性化させることで, 二輪モータスポーツの底辺を拡大し, お客様と夢と感動を共有しながら, ライダには将来の MotoGP チャンピオンを創出するきっかけとなるマシンとなることを期待する.

参考文献

(1) Suwa, S., Kawaguchi, D., Murakami, A., Kimura, K., Tada, M.: Development of Nitrocarburized High Strength Crankshaft Through Controlling Vanadium Carbonitride Precipitation by Normalizing, SAE Paper, 2009-32-0076/SETC2009, 20097076(2009)

(2) Marui, Y., Kinoshita, T., Takahashi, K.: Development of a Titanium Material by Utilizing Off-Grade Titanium Sponge, SAE Paper, 2002-32-1816/SETC2002, 20024309(2002)

■著　者■



小野里富夫



倉 吉 良 之

大型フラッグシップ船外機 BF250 の開発

Development of BF250 Flagship Outboard Motor

原 田 義 弘* Yoshihiro HARADA
石 坂 和 弘* Kazuhiro ISHIZAKA
田 中 豪* Go TANAKA
石 塚 邦 彦* Kunihiko ISHIZUKA
磯 野 史 弥* Fumiya ISONO

要 旨

エンジンの高出力化を目指し，船外機初のダイレクト吸気システムを採用した大型船外機 BF250 を開発した．

エンジン燃焼室内への水浸入を防ぐためエンジンカバー内の空気を吸気していた従来構造に対し，エンジンカバー内に排水機能を有した吸気通路を形成し水を分離しながら外気を直接吸気するダイレクト吸気構造を世界で初めて採用した．これにより従来構造に対し吸気温度を低減させ，他の仕様変更と併せることで基本骨格を現行量産機種 BF225 と共用しながら 184 kW(250 馬力)を達成した．またリーンバーン制御の見直しにより燃費は同クラス船外機に対しクルーズ航行域で最大 30% 向上した．その他クラス TOP の高耐久ギヤケース，アイドリング時充電出力可変制御，シフト荷重低減制御を採用し耐久性と利便性の向上も図った．

BF250 の魅力を際立たせるため機能とデザインを高次元で両立させたパワーインテークデザインの採用により船外機フラッグシップモデルにふさわしい商品に仕上げた．

ABSTRACT

The BF250 large outboard motor was developed to achieve higher engine output using the first direct air intake system to be adopted for an outboard motor.

The conventional structure had the air intake inside the engine cover in order to prevent water infiltration into the engine combustion chamber. By contrast, the developed engine, which is the first in the world to incorporate a direct intake system, is formed with an intake duct that has drainage functionality inside the engine cover so that water is separated as outside air is inducted directly into the engine. This lowers the intake air temperature more than in the conventional structure and, in combination with other specification changes, it achieved 184 kW (250 HP) with a basic structure that is used in common with the current mass production model BF225. Revision of the lean burn control yielded a maximum 30% enhancement of fuel consumption in cruising speed range relative to outboard motors of the same class. In other respects, adoption of a high durability gear case at the top of its class, adjustable idle charge system, and shifting load reduction control system heightened both durability and convenience.

In order to accentuate the appeal of the BF250, a power intake form that achieves a high level balance of functionality and design was adopted. This raises the outboard motor to the level of a finished product well suited to be Honda's flagship model.

1．まえがき

近年，主に北米や欧州で製造されているオフショア艇と呼ばれる沖合航行可能な艇体は搭載馬力が大型化する傾向にある．また，この大型クラスと呼ばれる 147 kW(200 馬力)以上の船外機は長時間高負荷の環境下で使用されるコマーシャル用途の艇体への搭載比率が高く，高い耐久信頼性が求められる．

これらの要求を踏まえ開発された大型フラッグシップ船外機 BF250 に採用された技術について紹介する．Fig. 1 に外観を示す．



Fig. 1 External view of BF250

＊汎用 R&D センター

https://doi.org/10.69239/hondatechnicalreview.2012_24_2_6

2．大型船外機の市場環境と要望

2.1. 大型船外機の市場環境

メイン市場である北米において大型船外機を搭載可能なオフショア艇の最大搭載馬力の変化を Fig. 2 に示す.

近年，船外機各社が 184 kW(250 馬力)以上の大型モデルラインナップを充実させたことに伴い，艇体メーカも大型艇のラインナップに力を注いでいる (Fig. 2)．その大型艇に搭載されている船外機は価格と性能のバランスから 184 kW(250 馬力)が選ばれる傾向にある.

また，このクラスの船外機艇は一般的なレジャーユースのほかにコマーシャルやガバメントといったプロユースが約 30% と他の馬力帯に対し比率が高い (Fig. 3)．

2.2. 要求性能

前述より市場ではエンジン出力 184 kW(250 馬力)が望まれている．また長時間，高負荷の過酷な環境下での使用が想定されるプロユースに耐えるには高い耐久信頼性が求められる．(使用例として Fig. 4 に沿岸警備等に使用される艇体を示す.)

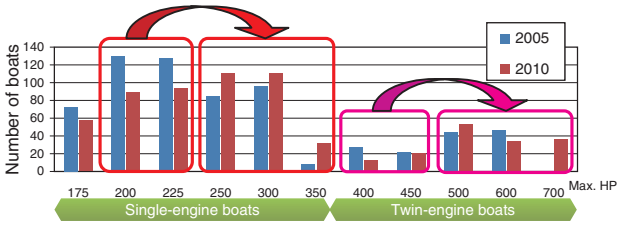


Fig. 2　Number of offshore boats by maximum mountable horsepower

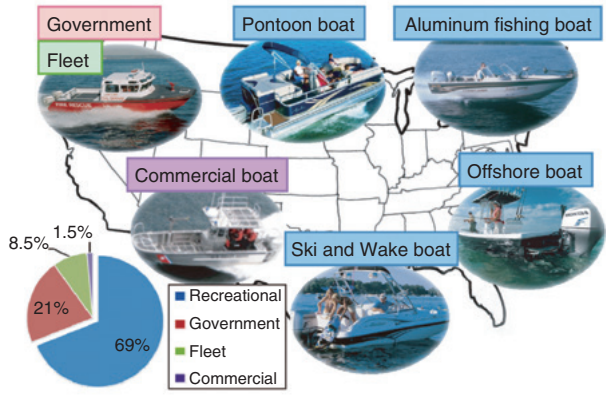


Fig. 3　Variety and percentage of large boat in the market



Fig. 4　Coastal patrol boat

Table 1　Specifications

Code name	BF250A X-type
Overall length (mm)	920
Overall width (mm)	625
Overall height (mm)	1887
Transom height (mm)	635
Dry mass (kg)	284
Engine type	4 stroke 60° V-Type 6 cylinder
Displacement (cm^3)	3583
Bore (mm) × Stroke (mm)	89 X 96
Compression ratio	10.0 : 1
Valve train	SOHC VTEC 24 valves
Maximum power (kW/rpm)	183.9/ 5800
Maximum torque (N·m)	320
Recommended engine speed range (rpm)	5300 - 6300
Fuel supply system	Programmed Fuel Injection
Ignition system	Programmed Ignition
Charge output (A)	60
Exhaust system	Through propeller hub
Gear ratio	2.00 : 1 (24/12)

3．開発のコンセプト

J.D.Power and Associates の Customer Satisfaction Index(CSI) 調査において 2005 年から 2009 年の 5 年間で 4 度 1 位を獲得するなどパフォーマンスと信頼性には定評がある現行量産機種 BF225[(1)] をベースにエンジンの最小限の仕様変更と吸気系の効率向上にて 184 kW (250 馬力) を達成しつつ，更なる信頼性向上，クラス TOP の動力性能，燃費，高いユーティリティ性を有し先進性の高いデザインを採用した Honda 船外機シリーズのフラッグシップモデルにふさわしい商品を目指して開発した.

4．主要諸元および概要

BF250 の主要諸元を Table 1 に示す.

エンジンは，BF225 の 3.5 リッター60° V6 エンジンをベースに，レジェンド用のクランクシャフト･コネクティングロッドを組み合わせストロークを 3 mm 延長し，排気量を 3.6 リッターとした．さらに圧縮比を BF225 の 9.4 より 10.0 へ変更することで高出力･高効率化を図った.

5．主要技術

5.1. ダイレクト吸気システム

前述のコンセプトより，現行量産機種 BF225 をベースに最小限の仕様変更にて出力アップを達成するため採用した技術がこのダイレクト吸気システムである.

本システムはエンジンの吸気と排熱を完全に分離し吸気温度の低減を図り，排熱は別経路からクーリングファンにより排出する構造となっている．ベース機種に対する変更点をエンジンカバーとクーリングファンおよびファンカバーの必要最小限で対応した．

なおベース機種に対する全高アップを最小限に抑えるためエンジンカバー内の空間を最大限利用し，吸気通路，排熱通路，排水通路，消音器構造を最適配置した (Fig. 5)．

以下に各要素技術の詳細について解説する．

5.1.1. 吸気冷却／水分離構造

Fig. 6 にベース機種 (BF225) におけるエンジン吸気システムを示す．BF225 に限らず他メーカを含め従来の船外機ではエンジンカバー内へ取り込んだ外気をカバー内に循環させることで，エンジン燃焼室内への水浸入防止，補機冷却，騒音値の低減をおこなった後にスロットルボデーに吸気させる構造となっている．そのため，外気温に対するスロットルボデー部の吸気温度差Δtが大きくなり，エンジン出力低下の要因となっていた．

これに対し Fig. 5 に示す BF250 のダイレクト吸気システムでは，エンジンカバーの両サイドに設けられた吸気口より吸入された外気が，エンジンカバー内のエアガイドとリヤエアダクトにより構成された吸気通路を通り直接スロットルボデーへ導かれる構造となっている．このダイレクト吸気システムにより吸入される空気はエンジンから発生した熱の影響を受けにくくなるため，Δt を従来構造比で 14℃ 小さくすることができ，エンジンの高出力化に大きく貢献している．

またダイレクト吸気化に伴い，外気を直接導入することにより吸気通路内に水が浸入することを想定し通路内に水分離排水構造を設けた．

大粒の水滴と，吸気の流速に乗って動く小粒の水滴の両方について各々に対応した構造を設定することによりスロットルボデー側への浸入を防止した (Fig. 7)．大粒の水滴については両サイド吸気口のすぐ後ろに設けた煙突状のリブにより浸入を防止する．吸気の流速に乗って本リブを通過した小粒の水滴については 180° 反転させた吸気通路を通過する際にエンジンカバー内壁へ付着させカバー内壁に設けた縦リブ (Fig. 8) により下方へ導きリヤエアダクト下端の排水口から排出する仕組みとなっている．

また排水経路としての機能と共に騒音低減の機能をもつサイドブランチ部 (Fig. 7) において，吸気脈動を利用しA点よりB点の圧力が低い状態をつくる．これにより水を圧力が低いB点に移動させ，全開時の排水性能を高めた．

5.1.2. 補機冷却構造

BF250 ではダイレクト吸気システムの採用に伴い，エンジンカバー内補機冷却をおこなうために吸気通路から独立した冷却通路が必要となった．そのため BF250 ではクランク軸直動のクーリングファンと，クーリングファンを

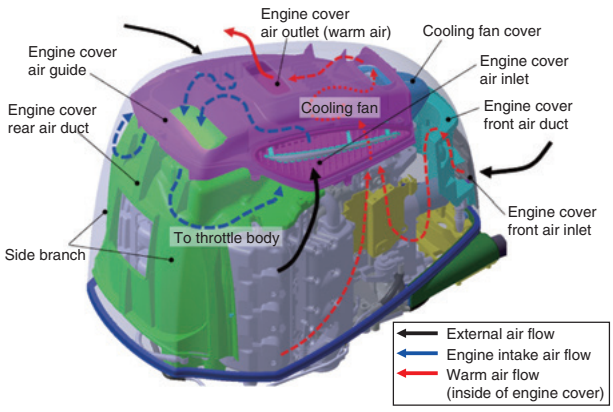


Fig. 5　Direct air intake system (BF250)

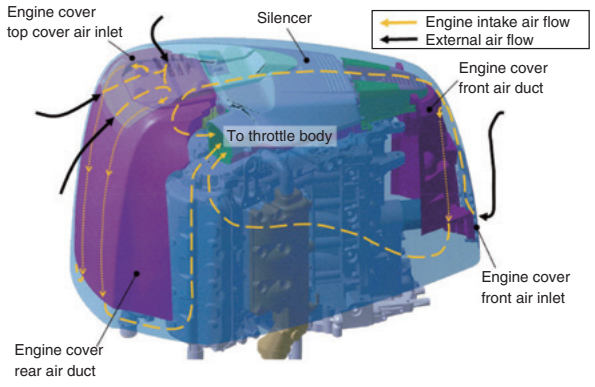


Fig. 6　Conventional air intake system (BF225)

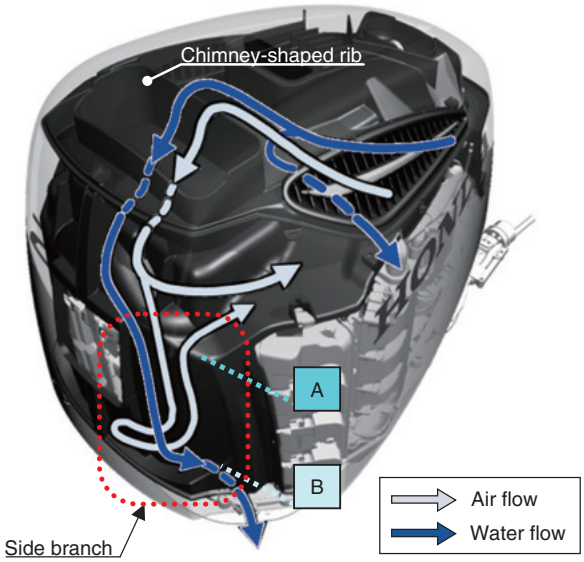


Fig. 7　Separation system of air and water

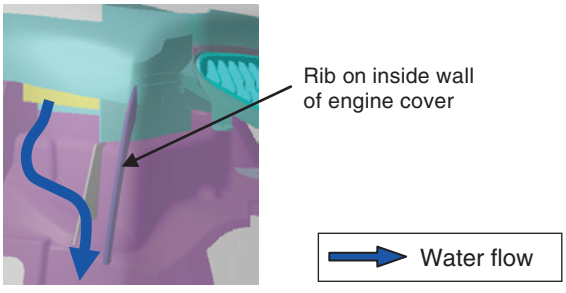


Fig. 8　Rib on inside wall of engine cover

覆うスクロール室を構成するファンカバーを新たに設置した．Fig. 9 にエンジンカバー内冷却システムの概略図を，Fig. 10 にファンカバースクロール室の形状を示す．ファンカバーA／Bで構成するスクロール室は，周辺のエンジン部品形状から独立した形状とすることで，クーリングファン周りの乱流を抑制し，クーリングファンを高温のエンジン部品から隔離し，クーリングファン周辺空気の熱膨張を抑制できるので，高いファン効率を実現することができた．その結果，エンジンカバー内の熱せられた空気をエンジンカバー外に効率良く排出できる冷却システムを構築することができ，安定した補機冷却を可能とした．

5.1.3. 騒音低減構造

ダイレクト吸気システムの採用により吸気／排熱通路を設置したため十分な容量の吸気サイレンサ室を配置できず，またスロットルボデーからエンジンカバー外部までを吸気通路でダイレクトにつないだことにより吸気音がエンジンカバー外に放出される構造となった．そこで，吸気音を低減させるため，BF250 では Fig. 11 に示すよう音波の干渉を利用した消音器であるサイドブランチ構造を採用した．

エンジンカバーとリヤエアダクトにより構成する吸気通路の途中に長さLのサイドブランチを左右両側に配置し，音波を干渉させることにより全開運転時の吸気脈動周波数である約 300 Hz の吸気音を低減することを目的とするものである．

BF250 ではダイレクト吸気構造の採用により全開運転時通過騒音[2]が既存機種に対し 4 dBA アップしたが音圧増加の要因である吸気音に対しサイドブランチ構造追加と

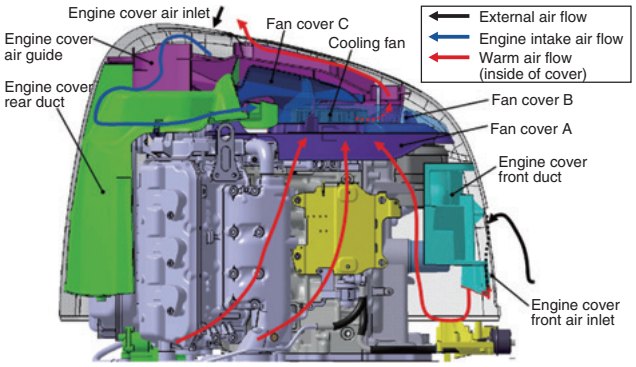


Fig. 9　Cooling fan system

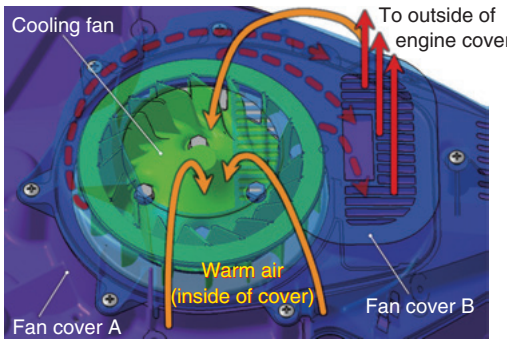


Fig. 10　Scroll shape of fan cover

吸気音の共鳴を避けるため通路管長の最適化を図ることにより吸気音を 10 dBA 低減した．これにより，通過騒音を規制値（≦ 75 dBA）以下に抑えることができた（Fig. 12）．

5.1.4. 効果（出力／燃費）

ダイレクト吸気構造の採用により，従来構造に比べて外気温に対するスロットルボデー部の吸気温度差Δtを 14℃ 小さくすることができた．結果として，吸入空気密度の増加による吸気充てん効率向上およびノッキング限界の向上による点火時期進角の相乗効果で，ピーク出力を 6.6 kW（9 PS）向上させた（Fig. 13）．

また，ロングストローク化による排気量アップ，高圧縮比化，バルブタイミング最適化，吸気バルブ傘径拡大によ

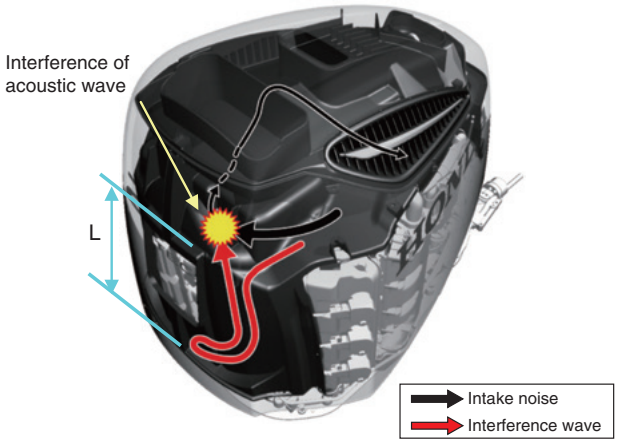


Fig. 11　Side branch system for noise reduction

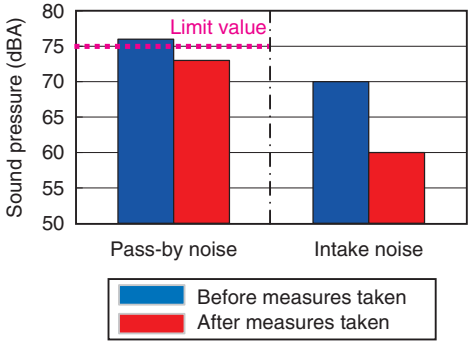


Fig. 12　Pass-by noise and intake noise

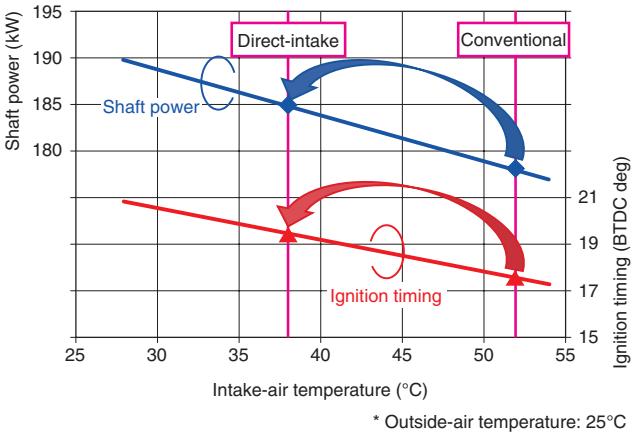


Fig. 13　Intake-air temp-shaft power/ignition timing

る吸気充てん効率向上，大径サーモスタットやピストン冷却用オイルジェットの採用によるエンジン冷却能力向上，定格回転数アップなどの効果により，基本骨格を BF225 共用としながらピーク出力 184 kW (250 馬力) を達成した．

さらに，エンジン出力の向上に加えリーンバーン制御[3]の見直しにより，同クラス船外機に対しクルーズ航行域で最大 30% の燃費向上を達成した (Fig. 14)．

5.2. 高耐久ギヤケース

Fig. 15 に BF250 のギヤケースアセンブリ構造図を示す．一般的に船外機ギヤケースのベベルギヤを収めている砲弾形状部は水中抵抗低減の目的で極力小さくすることが求められる．しかし，直径を小さくすればギヤは強度設計上不利になる．このように動力性能と強度は相反する関係にある．BF250 では耐久性向上を図るためベベルギヤ直径を BF225 に対し 10% アップした．

ベベルギヤサイズアップによる水中抵抗増加に対してはコンピュータ流体解析 (Fig. 16) によるケース形状の最適化

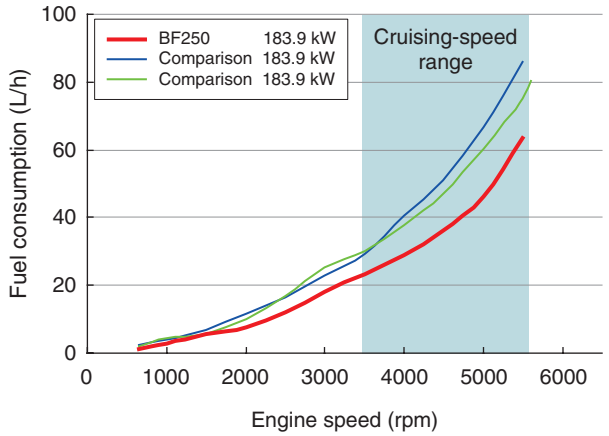


Fig. 14　Fuel consumption at cruising speed

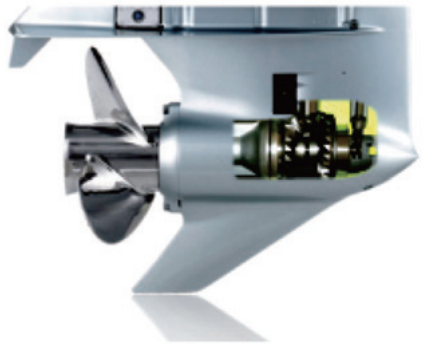


Fig. 15　High durability gear case assembly

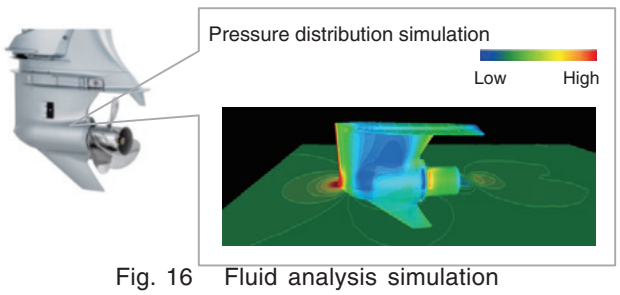


Fig. 16　Fluid analysis simulation

を実施し Cd 値を 5% ダウンさせ水中抵抗低減を図り競合他社に対し遜色のない動力性能を確保した．

またギヤ材質をニッケル・クロム・モリブデン鋼の不純物を極限まで取り除いた耐久性に優れた改良材を採用し歯面の加工精度も向上させかみ合わせのズレを減少させることにより高耐久性を実現した．

5.3. アイドリング時充電出力可変制御

アイドリング時に ECU にて AC ジェネレータの充電出力を検知し，通常のアイドリング回転数 650 rpm 時の充電出力を超える負荷が接続された際にエンジン回転数を 100 rpm 上げることにより充電出力を 29% 向上させることを可能とした．

5.4. シフト荷重低減制御

従来制御に対し，減速時に点火時期変動制御を追加することでエンジントルク変動を発生させ，シフト操作荷重を低減させた．

Fig. 17 のように ECU から検出したエンジン回転数とスロットル開度の変化からユーザのシフト操作を予測し，# 4，5，6 シリンダの点火時期をリタードさせ，エンジンのトルク変動を発生させエンジン側とプロペラシャフト側を接続するドグクラッチの伝達トルクが変動することによりドグかみ噛合い部の引き抜き荷重が低減される．Fig. 18

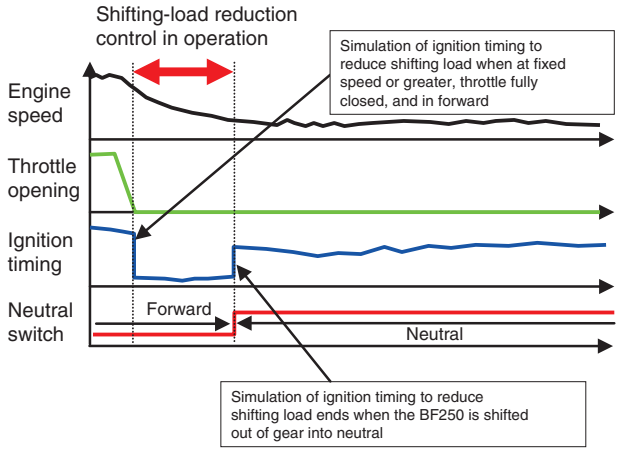


Fig. 17　Shifting-load reduction control

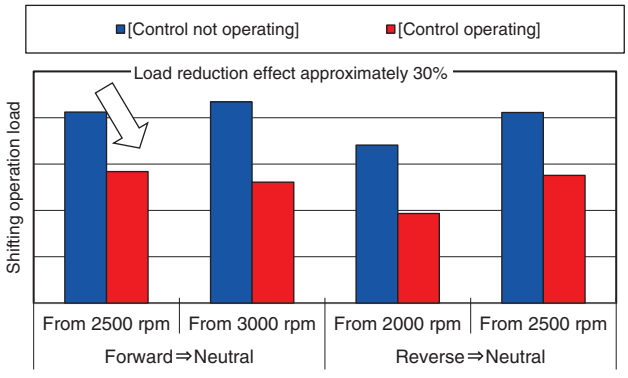


Fig. 18　Shifting-load test results

に表すようにシフト操作荷重を 30% 低減させることを可能とした.

操船者のシフト操作を専用のセンサを用いて検出するのではなく, エンジン回転数とスロットル開度の変化から予測し操作荷重を低減する新しい制御方法を開発した.

6. 新デザイン

6.1. パワーインテークデザイン

ダイレクト吸気システムを大きな特徴とする BF250 の魅力を際立たせるため, 「パワーインテークデザイン」をコンセプトとし, 以下の手法を取り入れることでデザインを具現化した.

船外機のトップカバーをユーザ目線から見たとき, 両サイドのインテークパーツによりトップカバーのボリュームを引締めシャープさをアピールした (Fig. 19).

インテーク部の中央部に日本刀をモチーフとしたクロームパーツを付けることでスピード感を際立たせると共に今までにない表現を加えた. またインテークのフィン形状はフロント側からの跳ね水の浸入を防ぎつつ吸気音を操船者および周囲への影響が少ない後方へ方向づけ, さらに新鮮なエアーを後部から取り込むといった機能とデザインを高次元で両立させた (Fig. 20).



Fig. 19 Design concept of BF250



Fig. 20 Power intake design

6.2. カラーグラフィック

カラーは従来の暖色系のシルバーではなく深みのある透明感が高いシルバーを採用し, より高品質でシャープさを訴求した. またフォントについてもスピード感と視認性を高めた新書体を採用した (Fig. 21).

これらを凝縮した BF250 の新デザインにより, Honda の BF シリーズのフラッグシップモデルにふさわしい力強さを演出できた.

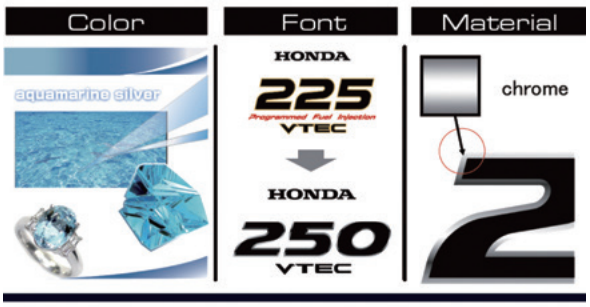


Fig. 21 Color graphic design

7. まとめ

BF250 の開発ではベース機種の基本骨格を流用しながら出力アップに加え, 過酷な使用条件にも十分に耐えうる耐久信頼性の向上と高いユーティリティ性およびデザイン性の進化を目指し開発をおこなった結果, 以下の成果を得られた.

(1) ダイレクト吸気構造を採用することにより外気温に対するスロットルボデー部の吸気温度差Δt を 14℃小さくし, 出力を 6.6 kW 向上した. リーンバーン制御の見直しにより同クラス船外機に対しクルーズ航行域で最大 30% の燃費向上を達成した.

(2) 高耐久ギヤケースを採用することにより出力アップに対応しつつクラス TOP の耐久性を実現した.

(3) アイドル時の充電出力可変制御を採用することにより充電出力を 29% 向上した.

(4) シフト荷重低減制御を採用することによりシフト操作荷重を 30% 低減した.

(5) BF シリーズのフラッグシップとして新たにパワーインテークデザインを採用したことで他社との違いを明確化し「新たなアイデンティティ」を表現した.

これらの成果を評価され, 2011 年 10 月 17 日から 19 日に米国ケンタッキー州ルイビルで開催された国際マリントレードショー「IBEX 2011 (The International Boat Builders' Exhibition & Conference)」において, 米国舟艇工業会 (NMMA) より IBEX 2011 イノベーションアワードの船外機部門を受賞した.

参考文献

(1) 角田正樹, 古谷健太郎, 大角雅之, 設楽貞文, 米沢道, 木全隆一：ホンダ船外機のフラッグシップ「BF200/BF225」の開発, Honda R&D Technical Review, Vol.14, No.1, p.11-20

(2) DIRECTIVE 2003/44/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 16 June 2003: ANNEX. I. C. 1 Noise emission levels
(3) 田中充治, 清水則和, 山本宙, 坂田繁一, 安田興次, 山岸政彦:快適装備を備えた中型船外機「BF60」の開発, Honda R&D Technical Review, Vol.23, No.2, p.21-27

■著　者■


原田義弘


石坂和弘


田中　豪


石塚邦彦


磯野史弥

中型車用 新型 CVT の開発

Development of New CVT for Midsize Vehicle

犬 飼 浩一郎* Koichiro INUKAI
柴 原 章 宏* Akihiro SHIBAHARA
村 上 康 則* Yasunori MURAKAMI
内 野 雄 之* Takeshi UCHINO
小 島 三千夫* Michio KOJIMA
西 山 恵以地* Keiichi NISHIYAMA

要 旨

省燃費性能と走る楽しさ，全世界市場への展開可能な信頼性と商品性，高出力直噴エンジン対応を高次元で達成した中型車用 CVT を開発した．国内で発売している 2.4L クラスの CVT を改良し，レシオレンジの拡大，高効率と高伝達容量を両立した高摩擦係数 CVTF，クラッチ圧常時制御などの保護制御を採用した．これらにより全長 386.5 mm，総重量 96.1 kg，最大伝達トルク 270 Nm を達成するとともに，2008 年モデル Accord 5AT 比約 10%(CAFE Comb.)，2010 年モデル STEP WGN CVT 比においても約 5%(JC08)の燃費向上を達成し，省燃費と走る楽しさを高次元で両立できる CVT 性能が得られた．本 CVT は，2012 年モデル STEP WGN，2013 年モデル Accord より適用されている．

ABSTRACT

A CVT for midsize vehicles was developed that simultaneously achieves high levels of fuel efficiency performance and driving enjoyment, reliability and marketability enabling deployment to global markets, and support for high-power direct injection engines. This was done by modifying the CVT for 2.4 L-class vehicles sold in Japan, expanding the ratio range, using CVTF with a high friction coefficient that simultaneously realizes both high efficiency and a high transmission capacity, and adopting protective control such as constant control of the clutch pressure. This enabled achievement of an overall length of 386.5 mm, total weight of 96.1 kg, and maximum transmission torque of 270 Nm, and also enhanced fuel efficiency by approximately 10% (CAFE Comb.) compared to the 2008 model year Accord 5AT and approximately 5% (JC08) compared to the 2010 model year STEP WGN CVT. Thus, CVT performance was obtained that can simultaneously realize high levels of both fuel efficiency and driving enjoyment. This CVT is applied from the 2012 model year STEP WGN and the 2013 model year Accord.

1．まえがき

昨今の自動車に求められる高い環境性能において，トランスミッション（以下 T/M）の役割は非常に重要となっている．世界的にも従来の 4AT，5AT を上回る多段 AT，デュアルクラッチトランスミッションや CVT の採用が増えてきている．Honda は 1996 年モデル CIVIC より発進クラッチ式 CVT を採用し[1]，小型車やハイブリッド車を中心に適用を拡大してきた[2),(3)]．中型車用としては 2004 年モデル Odyssey にトルコン付き CVT を採用し[4]，国内向けミニバンへ適用してきた．このクラスの中型車用 CVT は，世界的な今後のさらなる燃費向上要求に対応するため，国内向けミニバンだけでなく全世界のセダンや SUV 車へも適用が求められてきた．このような背景により今回開発した新型 CVT は，中型車に求められる走りと燃費性能を高次元で両立させることを目的として，トルク容量とレシオレンジを拡大しながら伝達効率を向上させた．また，全世界の AT ユーザに違和感なく乗り換えていただけるよう，爽快でスポーティな変速フィーリングを実現した．本稿では，この新型 CVT の開発のねらい，基本構造，主要技術について述べる．

2．開発のねらい

世界トップ性能の中型車用 CVT を開発するにあたり，下記３項目を開発のねらいとして設定した．

（1）米国での 2020 年燃費規制を達成するための高い燃費性能
（2）次世代高出力直噴エンジンへの対応と，全世界のあらゆる使われ方に対応する信頼性
（3）全世界展開可能な走りの商品性

＊四輪 R&D センター

https://doi.org/10.69239/hondatechnicalreview.2012_24_2_7

Table 1 CVT specifications

		2013 model year Accord	2012 model year STEP WGN	2008 model year Accord (5AT)	2004 model year Odyssey
Engine specification	Type	2.4L DOHC DI	2.0L SOHC i-VTEC Idle Stop	2.4L SOHC i-VTEC	2.4L SOHC i-VTEC
	Max power (kW/rpm)	137/6400	110/6200	150/7000 135/6500	118/5500
	Max torque (Nm/rpm)	243/4000	193/4200	230/4500 225/4500	218/4500
Ratio	Low OD	2.645 0.405	2.645 0.405	1st: 2.651 5th: 0.566	2.470 0.450
	Ratio range	6.54	6.54	4.68	5.48
	Secondary	1.558	1.558	-	1.514
	Final	3.238	3.238	4.437	3.350
	Reverse	0.703	0.703	2.000	1.735
	Transfer (4WD)	-	0.279/1.411	-	-
Dimensions	Overall length (mm)	386.5	386.5	379	385
	Pulley axis distance (mm)	180	180	-	170
	Weight (kg)	96.1 (Wet)	97.3 (Wet)	92.6 (Wet)	95.3 (Wet)

3. 主断面と主要諸元

中型車用新型CVT(以下 本CVT)の主断面図と外観図を Fig. 1, Fig. 2 に, 主要諸元を Table 1 に示す.

本CVTの基本レイアウトの特徴は以下のとおりである.

(1) 燃費と走りの高次元での両立を目的として, レシオレンジを 6.54 に拡大した.

(2) 半吐出切替え機構付きベーン式オイルポンプの制御を進化させ, 半吐出領域の拡大をおこなった.

(3) 電動オイルポンプを採用することで, アイドリングストップ機構に対応した.

(4) 高効率と高金属摩擦係数を両立させる, CVT フルード (以下 CVTF) を採用した.

(5) プーリ V 面の面性状の最適化をおこなった.

(6) クラッチ圧を専用リニアソレノイドで常時制御できる油圧回路とし, スロットルなどと効果的に協調させる保護制御を採用した.

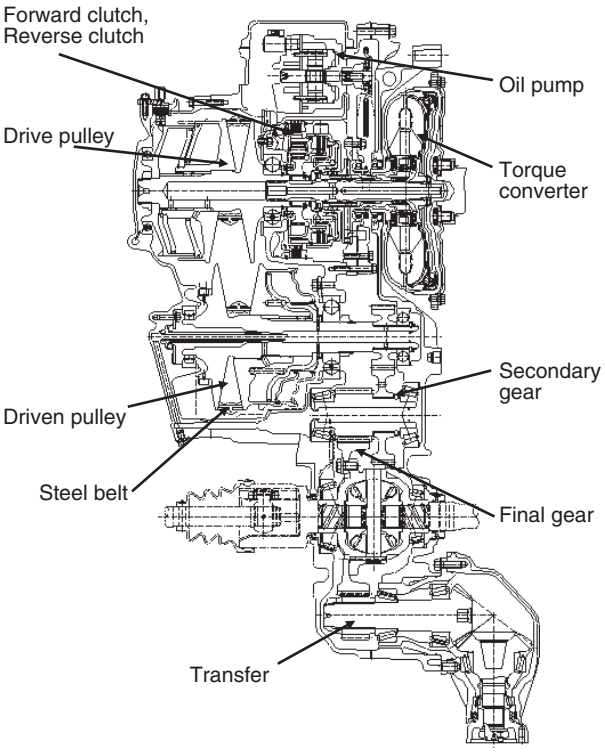


Fig. 1 Main section of CVT



Fig. 2 External view of CVT for STEP WGN

4．主要技術

4.1. レシオレンジ拡大

レシオレンジに関しては，低燃費性能および駆動力確保という，相反する内容を高次元で両立できるように，ドライブ（以下 Dr）プーリとドリブン（以下 Dn）プーリの軸間を従来型 CVT の 170 mm から 180 mm とし，レシオレンジを拡大した（Fig. 3）．

4.1.1. 燃費性能

全運転域で燃費を最良にするため，エンジンの使用領域の，燃費率の良い領域を積極的に使えるように High レシオを確保した．

4.1.2. 動力確保

各搭載想定機種および，各仕向けでの運転条件を考慮し，必要十分な駆動力を得るため，Low レシオを確保した．

上記 2 項目を主眼に，かつ従来実績のある 30 mm 幅金属ベルトの採用を前提とし，軸間距離，軸径，プーリ径およびドライブとドリブン間のベルトラインアライメント設定等の最適化をおこなった．これにより，レシオレンジは 6.54 と 2008 年モデル Accord 用 5AT の 4.68，従来型 CVT の 5.48 に対し大幅なレシオレンジの拡大を実現した．

そして良好な燃費性能と力強い加速性能，加えてスムーズな走りを実現する基本骨格を構築した．

4.2. オイルポンプ半吐出領域の拡大

本 CVT で採用しているベーンポンプのような容積型ポンプでは吐出流量が回転数に比例するため，エンジン回転数が低い領域で T/M の駆動に必要な吐出流量を確保しようとすると，エンジン回転数が高い領域で吐出流量が過剰になり，ポンプを駆動する動力が無駄に消費されて燃費が低下するという課題がある．

そこで本制御は，現在の運転状態における推定半吐出運転流量と T/M 駆動に必要な流量（変速流量，油圧回路からのリーク流量，潤滑流量の総和）の差分である余裕流量（Fig. 4）を常時算出し，その値が所定値未満の領域では可変容量ポンプを全吐出運転状態にし，所定値以上の領域では半吐出運転状態に切り替えることで走行中の燃費の向上を図っている．本制御を採用した結果，従来型 CVT に対し半吐出運転状態で走行できる領域の拡大が可能になった（Fig. 5）．

一方で半吐出運転状態への切り替え判断に使用する余裕流量は，設計諸元や試験結果に対してばらつき影響を考慮した種々のパラメータから算出しているが，必ずしも個々の運転状態と一致するものではない．そのため，計算結果と実機との間にズレが発生した場合に半吐出運転状態から全吐出運転状態へ戻すための制御も同時に適用することで制御の信頼性を確保している．

4.3. アイドリングストップ機構

軽自動車用 CVT にも採用された高効率小型電動オイルポンプを基本流用し，D レンジ停車時にエンジンをストップさせ，燃費性能の向上を図った．また，スタータモータにて駆動されるリングギヤにヘリカルリングギヤを採用し，エンジン再始動時の NV 性能向上（リングギヤ噛み合い音の低減）を図った．電動オイルポンプの配置に関しては，被水環境を考慮し，エンジン停止時の静油面より高い位置に配置する場合，サクション回路に空気が溜り，起動時のエア噛みによる応答遅れや異音が課題となる場合が有

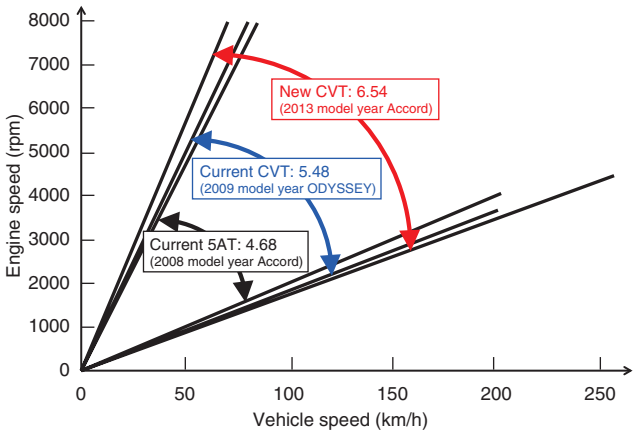


Fig. 3　Ratio coverage comparison

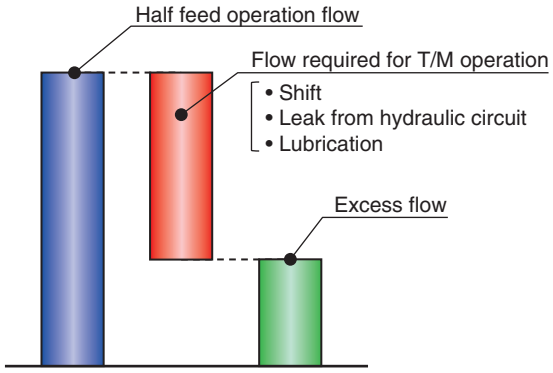


Fig. 4　Detail of half feed operation

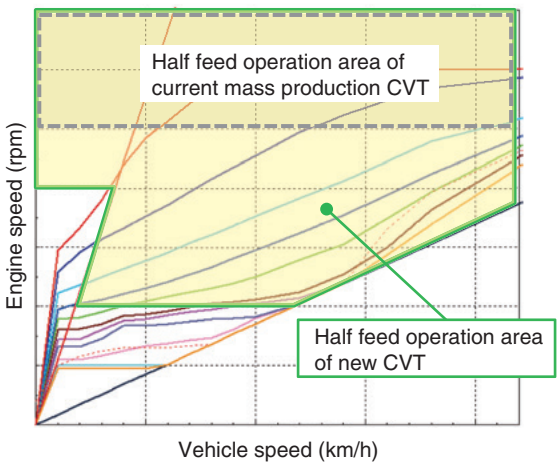


Fig. 5　Expanded half feed operation area

る．この課題を解決するために，サクション回路に油圧回路のドレンを導入して常時 CVTF で満たす構造とした．これにより，電動ポンプを油面よりも高い位置に配置することを可能とした (Fig. 6)．

4.4. 高金属摩擦係数 CVTF

CVTF に求められる性能として機械効率の向上がある．この特性を CVTF にて高める手法としては，

(1) 低粘度化による CVTF 撹拌抵抗の低減

(2) 金属ベルトとプーリ間の摩擦係数の向上による，必要プーリ油圧の低減

が挙げられる．本開発 CVTF (名称 HCF2) は，粘度調整剤の複数配合と最適量添加により，優れた常用域粘度と，せん断安定性を確保した (Fig. 7)．

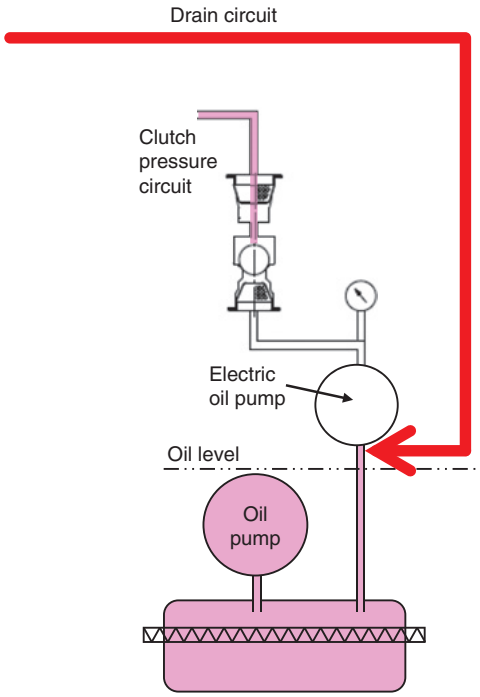


Fig. 6 Hydraulic circuit of electric oil pump

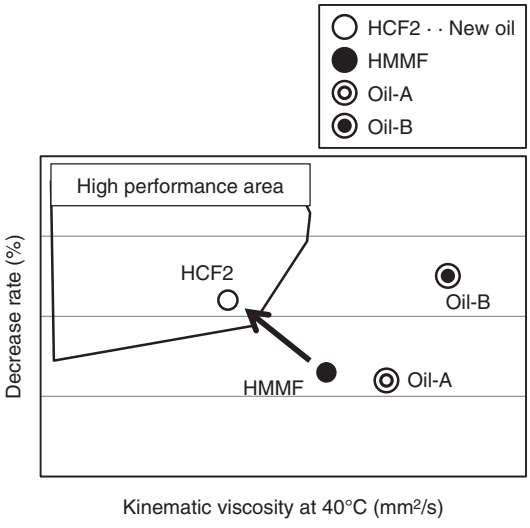


Fig. 7 New CVTF viscosity characteristics

また金属ベルト摩擦係数に関しては，新配合の摩擦調整剤と Ca 系添加剤により，量産 CVTF (名称 HMMF) に対し 10% 以上向上させた．同時に相反する特性である耐摩耗性についても新規 S 系極圧剤を用いることで，摩耗の低減を達成した (Fig. 8)．

以上より，HCF2 は業界トップレベルの高性能化を達成し，CVT 機構の高伝達容量化と低燃費化に大きく貢献した．

以上の燃費向上技術により，2008 年モデル Accord 5AT 比約 10% (CAFE Comb.)，2010 年モデル STEP WGN CVT 比においても 5% (JC08) の燃費向上を達成した．

4.5. プーリ V 表面のラッピング仕上げ

ベルト式 CVT は，ベルトとプーリ間の摩擦力によって動力を伝達するため，それらの間に一定値以上の摩擦係数が必要となる．また本構造の CVT は，ベルトとプーリ間に微小すべりが常に生じており，そのすべりを起因とした一定量の摩耗がベルトとプーリに発生する．

これらの摩耗が進展すると摩擦係数は低下傾向になることがわかっており，全世界展開を考えた場合，長距離走行しても一定以上の摩擦係数を維持する技術が必要となった．その摩耗低減策として，その対策効果が大きいプーリ V 面の面性状最適化を図った．

従来からおこなわれている，プーリ V 面の研摩仕上げ工程に対し，ラッピングフィルム粒度と加工条件のパラメータを組み合わせたラップ工程を追加した．具体的には，面性状の山高さを小さくしてベルトに対する攻撃性を低下させると同時に，谷深さを深くすることにより油膜保持性能を向上させた．これら面性状の作りこみをおこなうことで，ベルト摩耗の低減および摩擦係数低下の抑制の両立を図った (Fig. 9)．

4.6. 保護制御

本 CVT では，世界中のあらゆる車の使われ方に対応するための過剰な強度アップによる重量増を避けるため，各

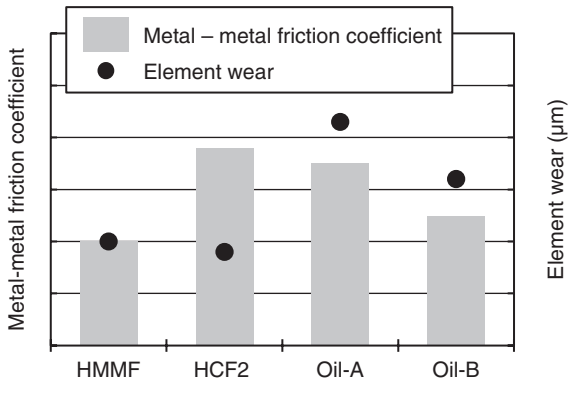


Fig. 8 HCF2 friction coefficient

部品の信頼性に応じて保護制御をおこなった．保護制御の対象一覧を Fig. 10 に示す．

4.6.1. エンジン回転数の制御

オイルポンプは，CVTF の油温に応じてエンジン最高回転数を規制し，信頼性の向上を図った．

デファレンシャルは，片輪スリップ発生時の左右差回転を規制制御し，デファレンシャルギヤの信頼性の向上を図った．

4.6.2. エンジントルクの協調制御

クラッチは，締結時のエンジントルクを協調制御することにより発熱量を低減させ，摩擦材の長寿命化を図った．

Dr，Dn プーリは，必要駆動力から入力トルクの上限を求め，プーリ入力トルク特性に応じた発進トルク協調制御を採用した．これにより，スムーズで力強い発進特性を実現しつつ，プーリ油圧を適正に制御し，信頼性向上を両立させた．

金属ベルトについては，クラッチ油圧を制御する専用のリニアソレノイドを設け，クラッチ容量をベルト伝達容量以下となるように常時制御することで，回転急変時のベルトスリップタフネスを向上させた (Fig. 11)．

4.6.3. CVTF の温度制御

CVTF は，常時油温を監視し，油温が一定値以下となるようにエンジンの上限回転数を制御することで，長寿命化を図った．

トルクコンバータは，ストール時のエンジントルクを協調制御し，内部の CVTF 温度を許容値以下に抑えることで，信頼性向上を図った．

ロックアップクラッチは，摩擦材の温度を推定し，摩擦材の許容温度以下で使用するよう，ロックアップクラッチ保護制御を採用し，長寿命化を図った．

これらの信頼性向上技術により，全長，重量とも従来の CVT と同等を維持しつつ，最大伝達トルク 270 Nm の達成と，4WD 対応，そして世界中での使われ方に対応した信頼性確保を両立した．

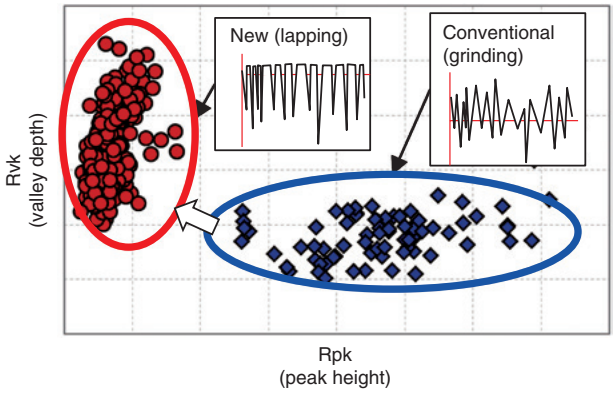


Fig. 9　Surface properties of the V-surface

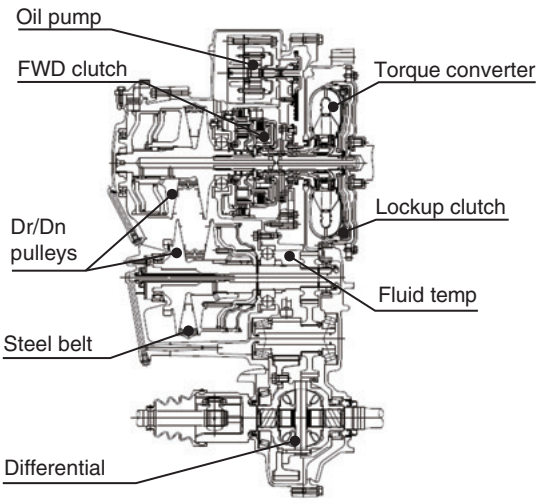


Fig. 10　Protective control subjects

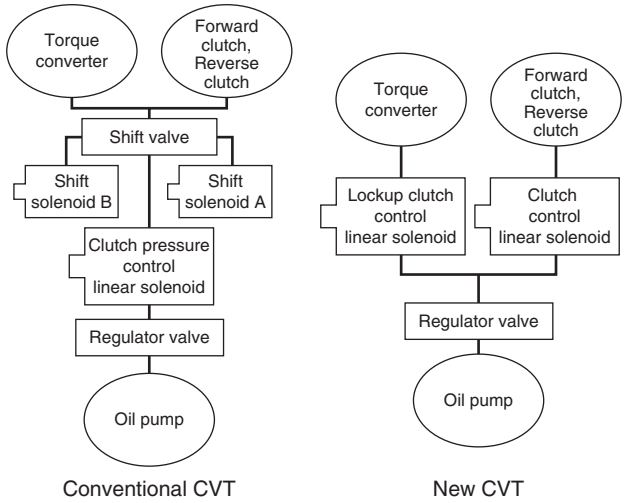


Fig. 11　Hydraulic circuit of new CVT

5．走り

CVT のスムーズな特性を生かしながらも，従来の AT ユーザに違和感なく乗り換えていただくために，ドライバの要求に素早く反応し，高く伸びのある加速感を維持して，爽快でスポーティなドライブフィールを実現した．

5.1. 発進特性

発進制御を改良し直線的でレスポンスの良いエンジン回転の吹け上がりとした．これにより，高い加速度を持続し伸び感の向上とエンジン回転上昇のリニア感向上を図った (Fig. 12，Fig. 13)．

5.2. キックダウン

ステップ変速量を大きくし，さらにステップ変速用変速ゲインを設定し変速応答を速めた．ステップ変速後は素早くリニアなエンジン回転上昇とし，さらに目標エンジン回転を高めに補正する制御とした．これにより加速力増加，レスポンス向上，加速応答の明確化，そして伸び感向上を図った (Fig. 14，Fig. 15)．

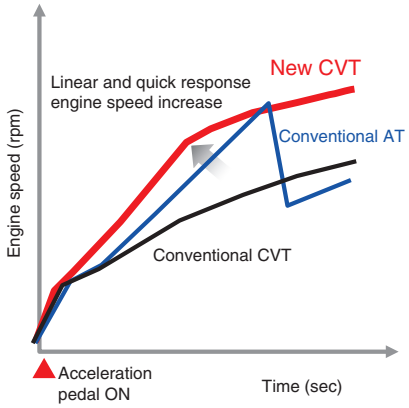


Fig. 12 Launch engine speed characteristics

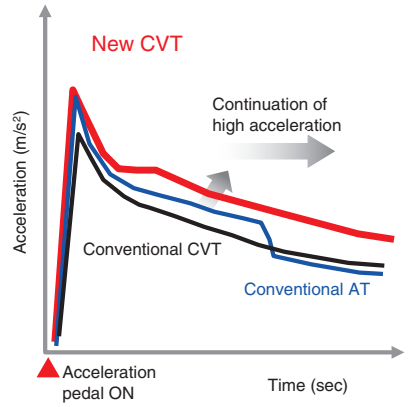


Fig. 13 Acceleration characteristics

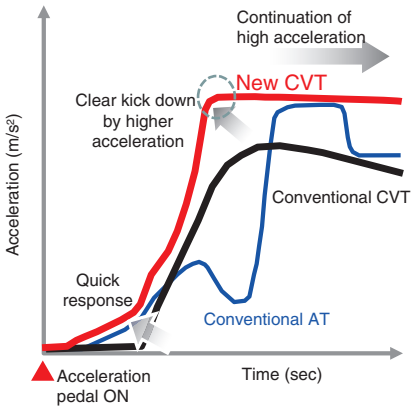


Fig. 14 Kick down characteristics

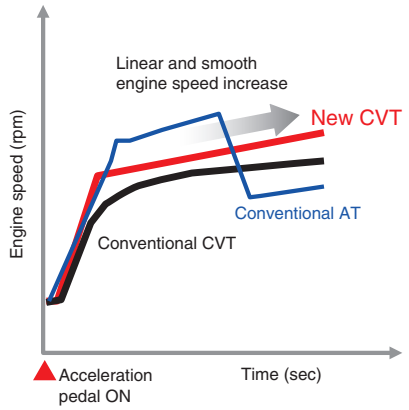


Fig. 15 Linear acceleration characteristics

6. まとめ

中型車用新型CVTを開発し，そのねらいを達成した．

USのCAFE Comb.燃費モードにおいて，従来の5ATと比べ約10%，国内のJC08モード燃費においても，従来のCVTと比べ，約5%向上させるCVT伝達効率向上を達成した．

次世代高トルク直噴エンジンや，全世界でのあらゆる使われ方に対応した信頼性を達成した．

駆動力を適正に制御し，爽快でスポーティなドライブフィーリングを提供する発進特性と変速制御技術を構築した．

参考文献

（1）大薗耕平，青木隆：全電子制御金属ベルトCVTの開発，HONDA R&D Technical Review, Vol.8, p.21-33

（2）太田庄次，國井久史，角誠，藤本修一，山口徹朗：ハイブリッドカー「インサイト」用コンパクトCVTの開発，HONDA R&D Technical Review, Vol.12, No.2, p.61-70

（3）角誠，國井久史，藤本修一，一條秀治，長谷川隆，福島幸彦：フィット用新CVTの開発，Honda R&D Technical Review, Vol.14, No.1, p.67-76

（4）佐藤洋一，浦野純司，大橋章人，左久間信次，山口正明：新型Odyssey用CVTの開発，Honda R&D Technical Review, Vol.16, No.2, p.87-94

■著　者■


犬飼浩一郎


柴原章宏


村上康則


内野雄之


小島三千夫


西山恵以地

新中型マニュアルトランスミッションの開発

Development of New Manual Transmission for Middle-Torque Engine

横山孝志* Takashi YOKOYAMA
葛原敬士* Keiji KUZUHARA
萩庭正大* Masahiro HAGINIWA
高橋匠* Takumi TAKAHASHI
中村明* Akira NAKAMURA

要　旨

当社のマニュアルトランスミッションシリーズとしては中型に相当する，最大入力トルク 300 Nm まで使用可能な新型６速マニュアルトランスミッションを開発した．このトランスミッションは従来の 235 Nm までのトルクに適用されていたモデルに対し，同サイズで最大入力トルク 300 Nm まで対応可能とした．

さらに，燃費向上を目的として伝達効率向上を図り，クラストップレベルの効率を達成した．また，スリーブ先行歯およびオフセットギヤドグを採用し，滑らかで爽快なフィーリングを達成した．メインシャフトブレーキングシステム付き常噛みリバースシステムを採用し，リバースギヤ音の静粛化とリバース操作荷重を低減した．

ABSTRACT

A new 6-speed manual transmission has been developed that supports 300 Nm of maximum input torque, which corresponds to middle torque in the company's manual transmission series. This transmission supports maximum input torque of 300 Nm in the same size as the previous model used with torque of up to 235 Nm.

To improve fuel economy, it has furthermore increased transmission efficiency and thereby achieved top-level efficiency. It also uses a preceding sleeve tooth and offset gear dog to achieve a smooth and refreshing shift feeling. It uses a constant-mesh reverse system with main shaft braking system, which reduces reverse gear noise and mitigates the load when putting the shift lever into reverse.

１．はじめに

近年，ディーゼルエンジンはダウンサイジング化が主流となり，当社でも新小型ディーゼルエンジンを開発した．

このエンジンは欧州向けの車両に搭載される予定であるが，小型車両に搭載可能なサイズで，かつ 300 Nm のトルクに対応可能な強度，信頼性を有するトランスミッションが必要となったため，高トルク対応軽量コンパクトな新型６速マニュアルトランスミッション（新 6MT）を開発した．本稿では，本トランスミッションの技術的な特徴について紹介する．

＊四輪 R&D センター

２．開発のねらい

新 6MT 開発において，開発コンセプトを高トルク容量と軽量コンパクトの両立，高効率，商品性向上と設定した．これらを具現化するために，下記項目を開発のねらいとした．

（1）最大トルク容量を 300 Nm としながらも，新小型ディーゼルエンジンとの組合せで，フィットクラスの小型車に搭載可能とするため，従来の 2.4 L ガソリンエンジン用 6MT 同等以下のサイズとする．

（2）クラストップレベルの伝達効率とする．

（3）チェンジフィーリングおよびリバース商品性を向上する．

https://doi.org/10.69239/hondatechnicalreview.2012_24_2_8

Table 1 Specifications of transmission

Transmission type		6-speed manual
Torque capacity (Nm)		300
Gear ratio	1st	3.642
	2nd	1.884
	3rd	1.179
	4th	0.869
	5th	0.705
	6th	0.592
	Reverse	3.671
	Final	3.571

3. 基本構造と諸元

ギヤトレインは，平行２軸タイプで１速から６速までを常時噛合い式シンクロメッシュ構造とした．伝達効率向上のため，かき上げ式潤滑方式を採用し，デフサイドベアリングにはボールベアリングを採用した．全長短縮とリバース商品性の一つであるリバースギヤ音低減の両立を図れる常時噛合い式リバースシステムを採用した．リバースギヤはヘリカルギヤを採用した．さらに，リバース操作荷重低減およびシンクロ引きずりトルク低減のため，リバース操作時に３速のシンクロを使用するメインシャフトブレーキシステム（MBS）を採用した．主要諸元を Table 1 に，縦断面を Fig. 1 に示す．

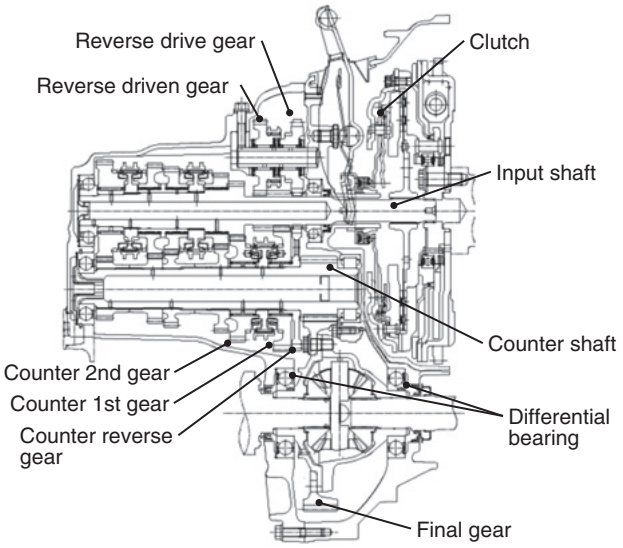


Fig. 1 Main section of transmission

4. 高トルク対応と軽量コンパクトの両立

4.1. 全長の短縮

重量増加を抑えるため，各軸間距離は据え置いた上で，全長短縮のため下記の変更をおこなった．その結果，トランスミッション全長を変えることなく高トルク対応を達成した．Fig. 2 にトランスミッション許容トルクとギヤトレインが収まるトランスミッションケース長さの関係を示す．対トルク比で従来機種に対して短縮できた．

（1）MBS 付常噛みリバースシステムの採用により，従来ギヤ端面に成形していたクラッチギヤをギヤの内側に潜り込ませることでリバースギヤを含む 1st から 2nd ギヤまでの全幅を短縮させた（Fig. 3）．

（2）1st，2nd ギヤは衝撃荷重による歯元強度の向上とギヤ音への寄与の大きい噛合い率確保という課題を両立させる必要がある．新 6MT は軽量コンパクトを考慮し，小モジュール化で噛み合い率を確保しつつ，ウォータジェットピーニング処理で高応力対応を図り，ギヤ幅の増加を最小限とした．

（3）ギヤのミスアライメント低減のため，メインシャフト，カウンタシャフト径を拡大し，剛性向上をおこなった．

4.2. 高トルク対応

従来の開発では，ギヤ歯形は理論歯形を用い，ギヤのミスアライメントは考慮しない条件で強度設計をおこない，過去のトランスミッション単体での耐久テスト結果と照らし合わせて評価をおこなっていた．しかし，この方法では実際のギヤ寿命は計算値よりも短くなる場合があった．その原因がミスアライメントによる歯当り率低下の影響であることは予想されていたが，235 Nm のトルク容量をトランスミッションの全長を増やさずに 300 Nm まで増やすためには，ギヤの強度をより精度良く予測する手法を確立することが必要であった．そのために Romax（Romax 製）を用いてギヤのミスアライメントを算出し，さらに歯形ばらつきによる強度低下を見込んだ条件でギヤ強度設計をおこない，ギヤ単体での歯元応力，歯面面圧寿命データと照らし合わせて，最小限の歯幅増加で目標トルク容量を確保した．

Fig. 4 に，ギヤ強度設計の考え方の模式図を示す．グラフの縦軸は歯元応力または歯面面圧，横軸はギヤの噛合い数を示している．S-N 線または P-N 線と目標ギヤ噛合い数，すなわち耐久サイクルの交点が，歯元応力または歯面面圧の限界値になり，歯形のばらつきを考慮した最大

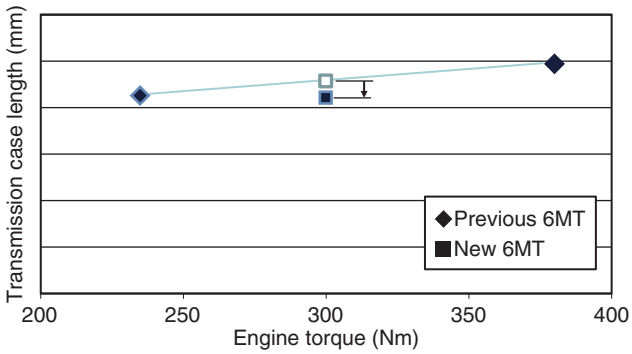


Fig. 2 Comparison of transmission case length

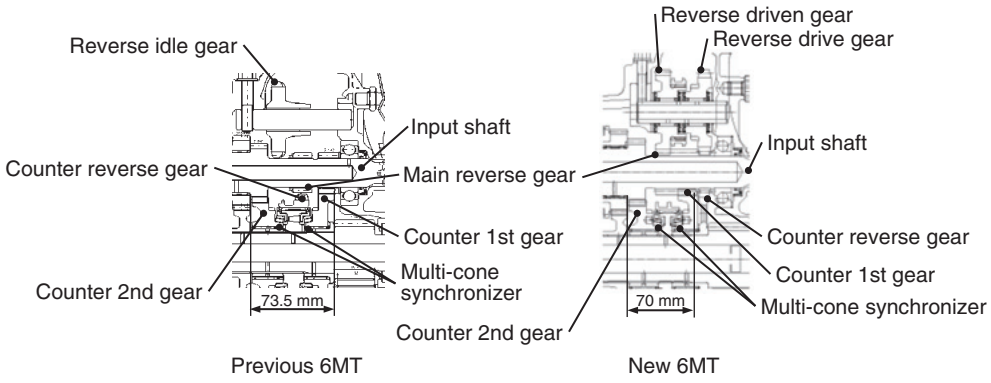


Fig. 3　Layout of 1st, 2nd and Reverse Gears

歯元応力，歯面面圧が限界値以下になるよう設定する必要がある．

Fig. 5 に 235 Nm から 300 Nm になった場合のギヤ強度成立の各要素の寄与度を 1st ギヤ歯元応力を例に示す．各速ギヤについて，ミスアライメントと歯形のばらつきによる強度低下を正確に予測することで，ギヤ幅の増加を必要最小限とした．その結果，1st ギヤは 1.5 mm，2nd ギヤは 0.5 mm，6th ギヤは 1.5 mm のギヤ幅増加となった．

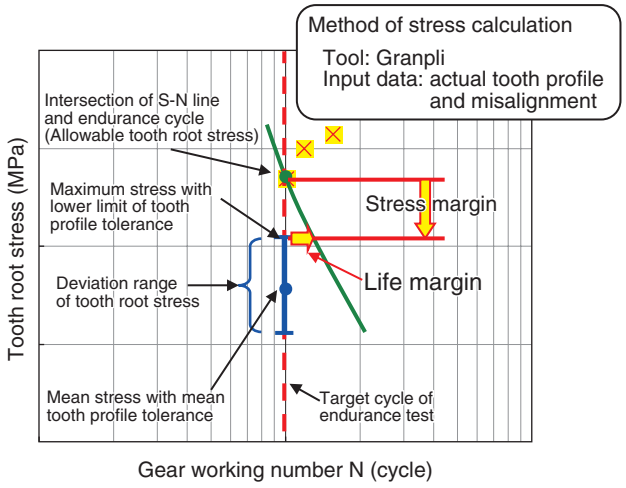


Fig. 4　Concept diagram of gear design

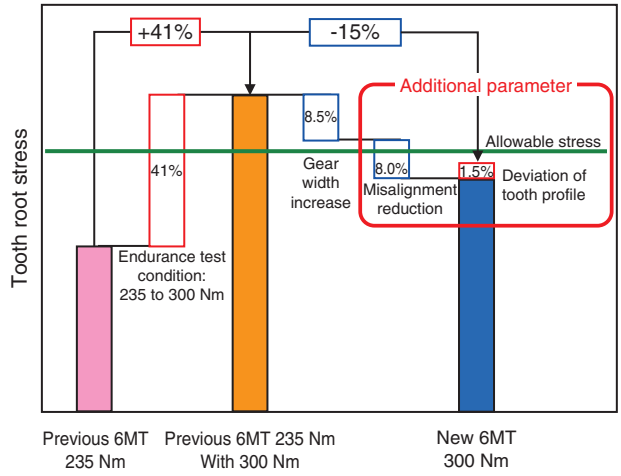


Fig. 5　Contribution to gear strength

4.3. 軽量化

高トルク化に伴うギヤのミスアライメント低減のためにメインシャフトおよびカウンタシャフトの軸外径を拡大したことで重量が増加するが，先に述べた手法で検証をおこない，ギヤ強度に影響しない限界まで軸内径を拡大し，かつ各ギヤの形状についても倒れを考慮した形状とすることで，軽量化を実施した．Fig. 6 にギヤとシャフト系の重量の従来機種との比較を示す．対トルク比で従来機種に対して軽量化を達成した．

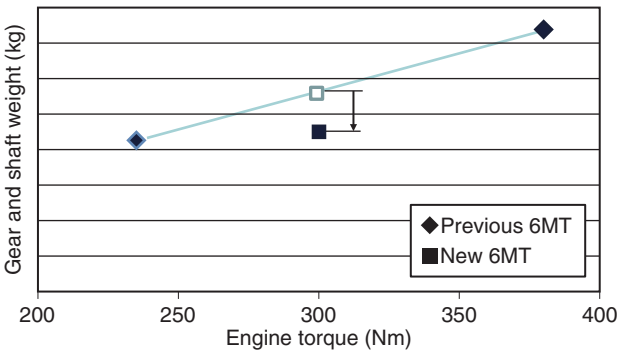


Fig. 6　Comparison of gear and shaft weight

5．伝達効率向上

下記手法により，従来の 380 Nm 対応 6MT に対し，損失トルクを 15% 低減し，従来の 235 Nm 対応 6MT 同等以上の伝達効率を達成した．

（1）かき上げ潤滑方式採用
（2）シンクロナイザの引きずりトルク低減
（3）デフベアリングにボールベアリング採用

5.1. かき上げ潤滑方式採用

最大許容トルク 300 Nm であるが，従来の 235 Nm 対応 6MT と同様のギヤかき上げ潤滑方式を採用した．ギヤかき上げ潤滑方式は，ギヤが低回転時に潤滑性が低下する課題があるが，カウンタリバースギヤの回転によってかき上げ

られたオイルを受けることで低回転時の潤滑性を向上させた．Fig. 7 に構造を示す．

5.2. シンクロナイザの引きずりトルク低減

従来はエンジン最大回転数時のシフト荷重低減を重視してシンクロナイザ容量を大きく設定していたが，ユーザの使用状況を調査し，シフト荷重の値そのものよりも，常用域でのシフト段ごとの荷重ばらつきが小さい方が好まれる結果が得られたので，目標荷重の見直しによりマルチコーンを削減し，引きずりトルクの低減を図った（Fig. 8）．また，MBS の採用により，リバース用シンクロナイザを廃止した．

5.3. デフベアリングにボールベアリング採用

他社製の 300 Nm クラスのミッションではデフベアリングにテーパーローラベアリングを採用しているが，テーパーローラベアリングは小型で大容量が得られる一方，プリロードをかけるため，効率が低下する傾向にある．本トランスミッションでは従来の 235 Nm 対応 6MT と同様ボールベアリングを採用し，伝達効率向上を図った．

まず，ボールベアリングのサイズアップをおこない，さらにベアリングの能力を発揮するために，ファイナルギヤによりかき上げられた潤滑油を低回転時でも確実にベアリングに給油できるガタープレートを採用した．Fig. 9 に構造を示す．低回転，高回転時のいずれでも潤滑油を受ける

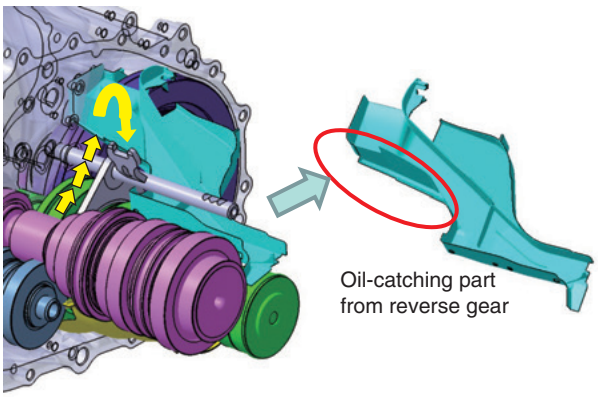


Fig. 7　Lubricating system 1
Details of main gutter plate

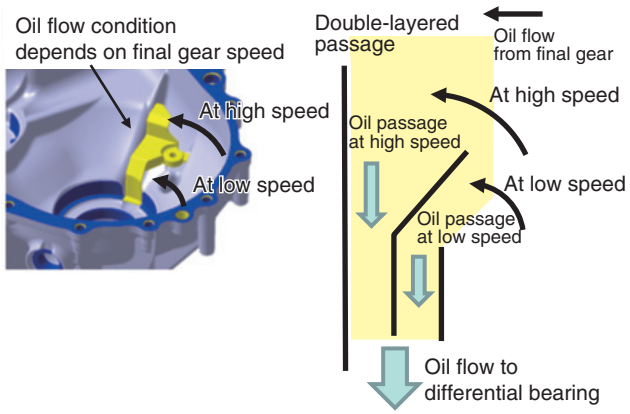


Fig. 9　Lubricating system 2
Details of gutter plate for
differential bearing

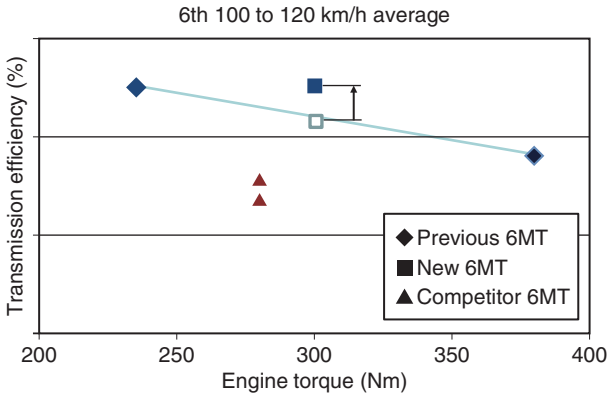


Fig. 10　Comparison of transmission efficiency

2 段構造のガタープレートを取り付けることで，従来に対し 6.6 倍の給油量を達成した．

これらの技術により，対トルク比で従来機種に対して，トルク容量を上げながらも同等以上の伝達効率を達成した（Fig. 10）．

6．商品性向上技術

6.1. チェンジフィール向上

チェンジ操作における感覚性能の観点として，以下の項目を軸としたフィーリング向上を図った．

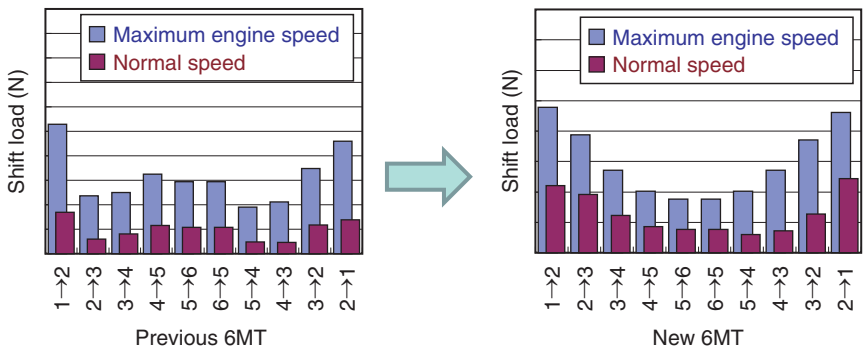


Fig. 8　Comparison of shift load

（1）吸い込まれ感
（2）わかりやすい操作フィーリング
（3）なめらかな操作フィーリング

6.1.1. 吸い込まれ感の向上

吸い込まれ感とは，シフト操作時に抵抗や凹凸を感じず，インギヤポジションに吸い寄せられるような操作感を指している．この性能向上のため，トランスミッション各部 (Fig. 11) のディテントスプリング荷重とディテント溝形状を見直し，シフト操作時の荷重が反転する操作感 (吸い込まれ) を強調させる特性とした．従来機種に対しシフトアームディテントが寄与する荷重を大きく，それ以外を小さくなるよう設計することで，従来機種に対し，吸い込まれ発生ストロークを 6 mm 短縮し，同ストローク時での吸い込まれ荷重を 4 N 増大させ，吸い込まれ感の向上を実現した (Fig. 12)．

6.1.2. わかりやすい操作フィーリング

わかりやすい操作フィーリングとは，各インギヤポジションが手の感覚で明確に区別ができ，容易に変速操作ができる操作性を指している．この性能向上のため，チェンジ操作パターンを構成する，シフトピース，インターロック，フォークピースの形状 (Fig. 13) を見直し，インギヤ後のセレクト方向のガタ (ゲート幅) を小さくすると共に，2nd から 3rd 等の斜めにシフトする際の間口 (斜めシフト幅) を広げたチェンジパターンとした．トランスミッション内部のセレクトストロークを増やし，ノブまでのレシオを小さくすることで内部のガタの影響を減らすことができた．

その結果，従来機種に対し，ゲート幅を 3 mm 低減，斜めシフト幅を 5 mm 拡大させ，わかりやすい操作フィーリングを実現した (Fig. 14)．

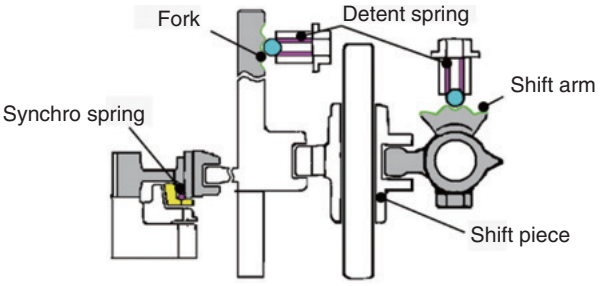


Fig. 11　Detent system

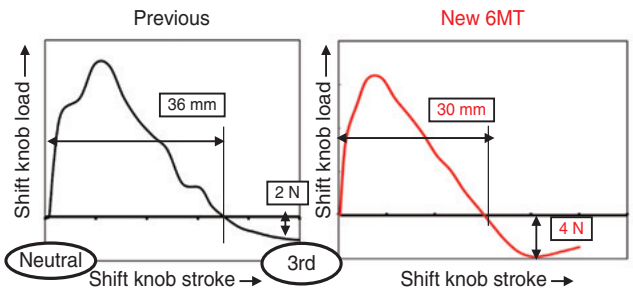


Fig. 12　Characteristic of shift feeling

6.1.3. なめらかな操作フィーリング

なめらかな操作フィーリングとは，動的シフト時のゴツゴツと感じる 2 段入り現象の発生を抑制した操作性を指している．2 段入りを抑制させるための既知の着目点は，駆動系ねじり振幅の抑制とスリーブ噛み込み時間の短縮である．従来のトランスミッション開発においてもさまざまな取り組みをおこなってきた[(1)-(3)]．ソフトウエア AMESim (LMS 製) を使用して 2 段入り現象の可視化と動的シミュレーションによる挙動解析をおこない，各パラメータの影響を定量的に評価することが可能となった．Fig. 15 にシ

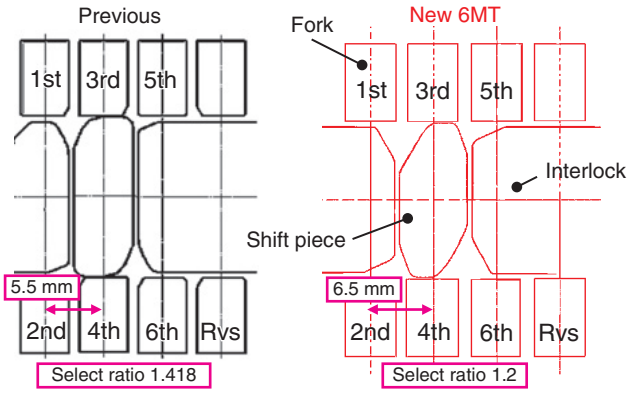


Fig. 13　Change piece layout

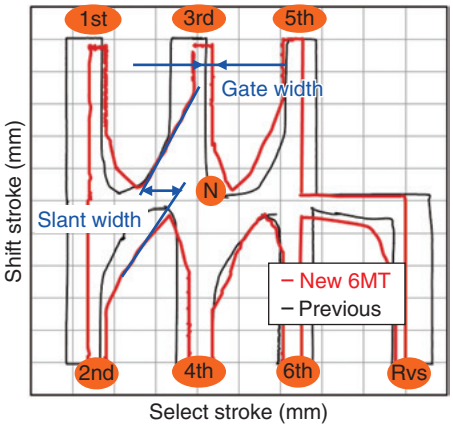


Fig. 14　Change pattern

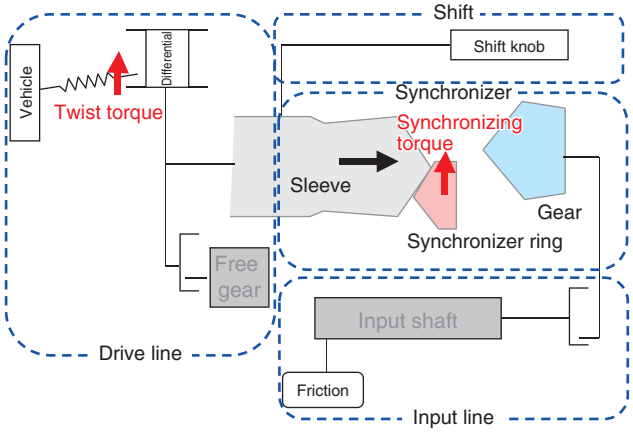


Fig. 15　Outline of dynamic simulation

ミュレーションモデル概略図と Fig. 16 にシミュレーション結果の一例を示す．スリーブ先行歯とギヤドグオフセット量により，2段入りの指標である2段入り荷重比が変化する様子がわかる．

(1) 駆動系ねじり振幅の抑制　　2段入り現象が発生する要因として，駆動系ねじり振幅が影響していることは広く知られているが，シンクロナイザ同期トルク（以下同期トルク）および構成部品の寄与がそれぞれどの程度であるか不明確であったため，従来機種の諸元での検討と官能評点との比較，およびパラメータ変化による影響確認をおこなった．その結果，同期トルク，ドライブシャフト剛性，ギヤレシオ，トランスミッションイナーシャ，シンクロ容量などの条件差によって2段入り現象の発生の仕方に差があること，1-2UP，2-3UP シフトに対し改善が必要であることが確認できた（Fig. 17）．

この結果を踏まえて，以下を採用した．

(a) ユーザの使い方を考慮したシンクロナイザサイズの適正化（5.2. 節参照）

(b) スリーブストローク低減によるトランスミッション内レバーレシオの見直し．従来の 6MT に対し，新 6MT ではスリーブ先行歯（Fig. 18）などの採用によりスリーブストロークを 8% 短縮した．

これらにより同期トルクの過大発生を抑え，駆動系ねじり振幅を低減することができた．

(2) スリーブ噛み込み時間の短縮　　同期トルクがスリーブの進行により消滅した時に，出力軸側のねじれが戻ることにより回転差が発生して同期崩れが起きるが，ス

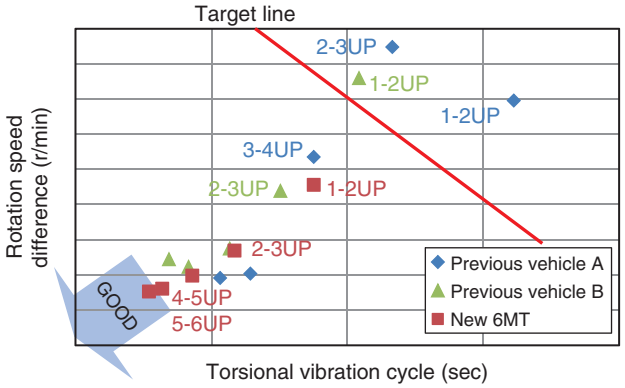


Fig. 17　Relationship of rotation speed difference and torsional vibration cycle of drivetrain

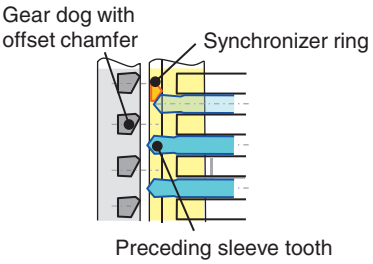


Fig. 18　Preceding sleeve tooth and gear dog with offset chamfer

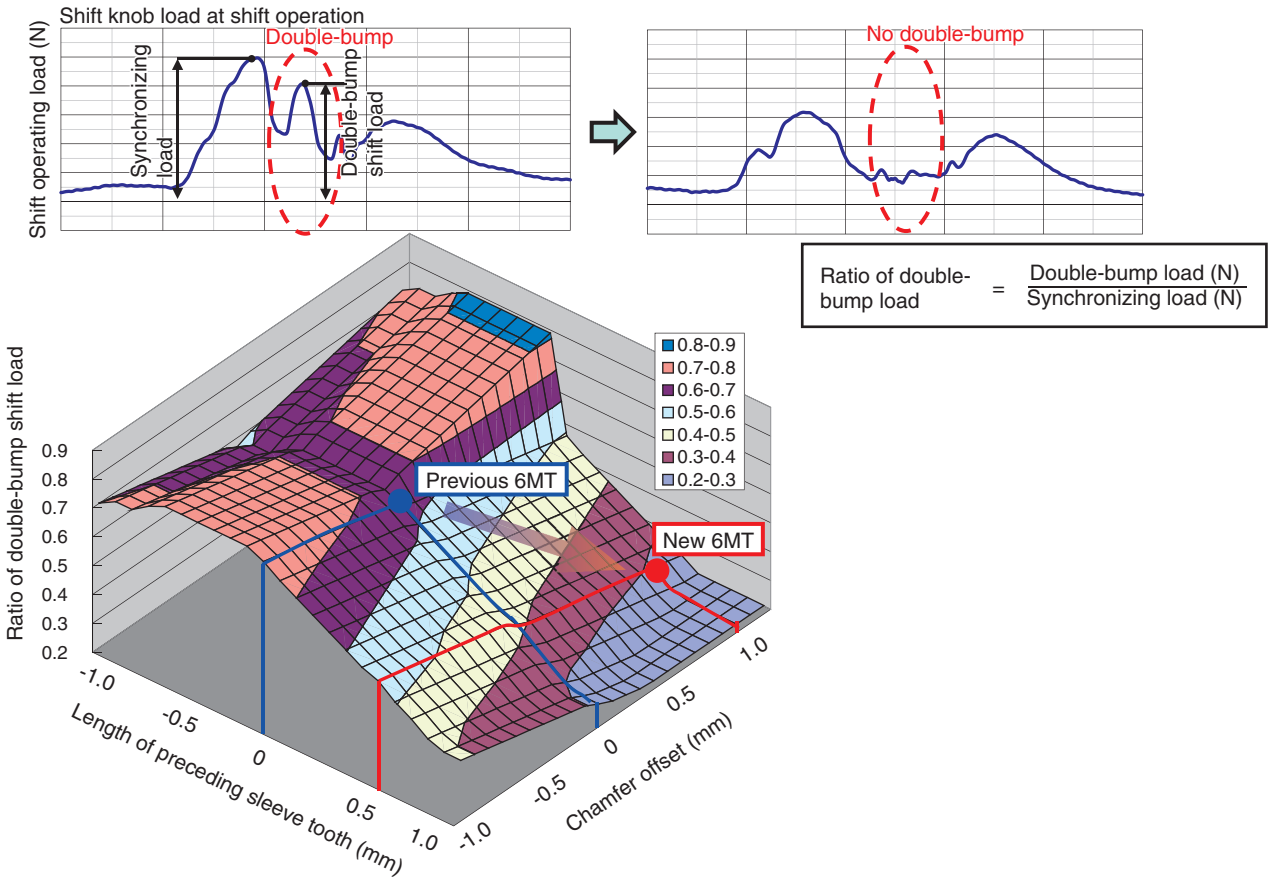


Fig. 16　Example of AMESim simulation output

リーブ噛み込み時間の短縮は，この同期崩れの時間を短縮することであり，2段入り発生頻度を減少させる効果が有る[(1)]．スリーブとギヤドグの噛み込みタイミングを早期に完了させるチャンファ形状の諸元検討をおこなった．

新 6MT のチャンファ形状は従来機種に対し，2nd は，スリーブを 0.7 mm 先行歯に，ギヤドグオフセットを 0.3 mm とし，3rd は，スリーブを 0.7 mm 先行歯に，ギヤドグオフセットを 1 mm とした．特に 2nd においてはトランスミッションの等価慣性マスが高いため (Fig. 19)，シフトダウン時のドグ掻き分け荷重も考慮して仕様を決定した．

これらの適用技術により，大幅な 2 段入り荷重の低減ができ，なめらかなシフト操作性を実現できた．Fig. 20 に発生頻度低減効果を示す．

6.2. リバース商品性

リバースシステムを常噛み化することで，リバースギヤにヘリカルギヤを採用し，ギヤ音を低減した．

従来の常噛みリバースギヤ機構において，リバースギヤ鳴り防止機構は，リバースアイドルギヤの同軸上に配置したリバース専用シンクロ (φ 44 シングル) を採用していた (Fig. 21)．しかし，リバースアイドルギヤ同軸上のシンクロナイザはレイアウト上サイズに制限があるため，リバースシフトが重くなっていた．

そこで新 6MT では，リバースシフト時に 3rd シンクロナイザ (φ 66 シングル) を作動させるギヤ鳴り防止機構を採用した (Fig. 22)．その結果，シンクロナイザの容量増加によりシフト荷重の低減を達成し，リバースギヤ音との両立を図れた．Table 2 に従来構造との比較を示す．

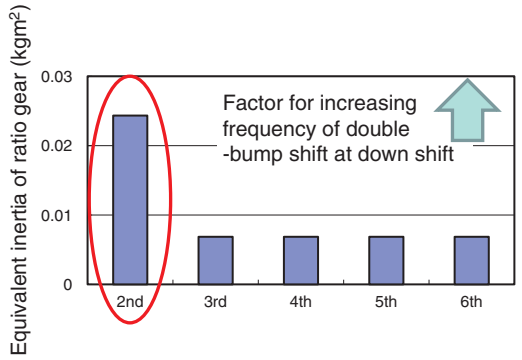


Fig. 19　Comparison of equivalent inertia of each speed ratio

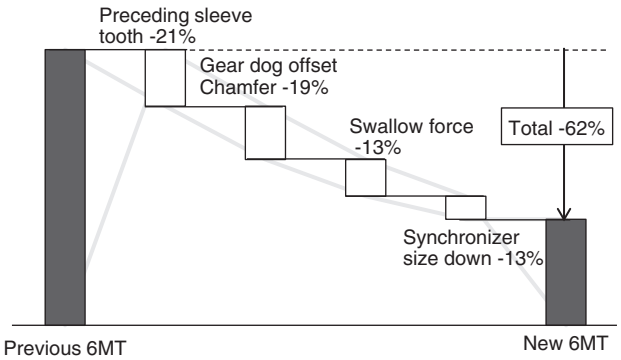


Fig. 20　Contribution to reducing frequency of double-bump shift

Table 2　Achievement of reverse system performance

Reverse system performance	Reverse gear noise	Reverse shift load
New 6MT	60 dB	59 N
Previous reverse system	60 dB	97 N
Previous sliding type	75 dB	63 N

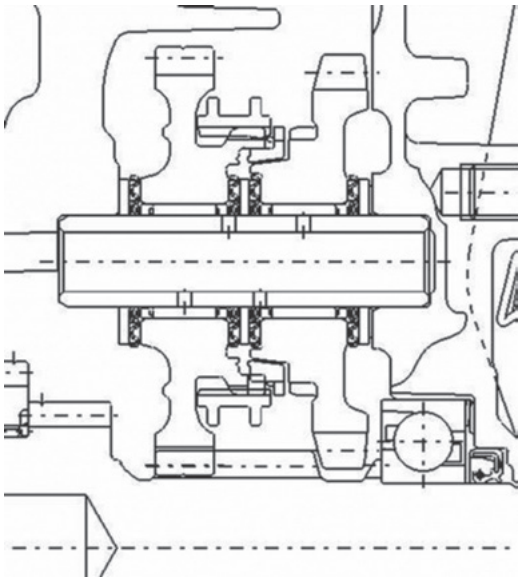


Fig. 21　Previous reverse system

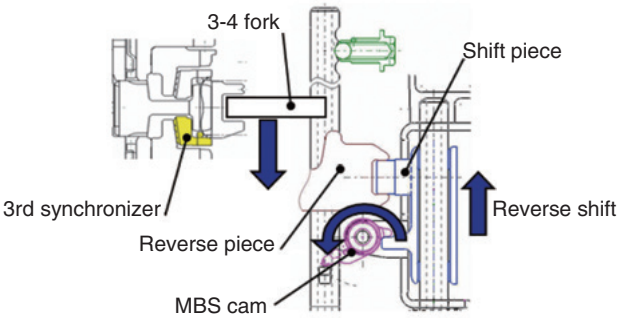


Fig. 22　Main shaft braking system

7．まとめ

下記を特徴とする新中型マニュアルトランスミッションを開発した．

(1) ミスアライメントを考慮した新ギヤ強度評価手法を用い，トルク容量 300 Nm を達成した．

(2) 新ギヤ強度評価手法により，メインシャフト，カウンタシャフトの内径拡大とギヤ形状の最適化により軽量化を達成した．

（3）かき上げ式潤滑システムの採用，シンクロナイザの引きずりの低減，デフサイドベアリングにボールベアリングを採用することにより，クラストップレベルのトランスミッション効率を達成した．
（4）ディテント機構の最適化，チェンジパターンの最適化，スリーブ先行歯およびギヤドクオフセットチャンファ採用により，吸いこまれ感のある，わかりやすく，スムースなチェンジフィーリングを達成した．
（5）常噛み式リバース機構により，リバースギヤ音を低減するとともに，リバース操作荷重を低減した．

参考文献

（1）村井章文，岡崎功二，奥野勝則：S2000 におけるスポーティチェンジフィーリング，HONDA R&D Technical Review, Vol. 11, No. 2, p.73-78
（2）藤本真二，有働秀男，北島恭司，小林省吾，岡崎功二：3L クラス新型マニュアルトランスミッションの開発，Honda R&D Technical Review, Vol. 14, No. 2, p.37-44
（3）松田健司，真仁田満，横溝幸治，岩﨑徹，萩庭正大：軽量コンパクト６速マニュアルトランスミッションの開発，Honda R&D Technical Review, Vol. 18, No. 1, p.28-33

■著　者■


横山孝志


葛原敬士


萩庭正大


高橋　匠


中村　明

部分拡散法によるレアアース低減マグネットの開発

Development of Rare Earth-saving Magnet Using Localized Diffusion Method

三　好　健　宏*　　東　　孝　之*
Takehiro MIYOSHI　　Takayuki HIGASHI
井　上　雅　志*　　大　崎　廣二郎*
Masashi INOUE　　Kojiro OHSAKI

要　旨

ハイブリッド自動車および電気自動車等の駆動用モータ用 $Nd_2Fe_{14}B$ 焼結マグネットに使用されるジスプロシウムの削減を目的として，部分拡散法によるレアアース低減マグネットの開発をおこなった．

モータ中のマグネットの反磁界分布は均一ではなく角部に集中するため，必要な保磁力分布を CAE により定量化し，その保磁力分布を満足する部分拡散マグネットの材料開発をおこなった．さらにモータ特性評価において部分拡散マグネットも従来同等の減磁特性を示すことを実証した．

レアアースの中でも資源問題が顕在化しているジスプロシウムについて，本技術によりモータ性能を維持したままジスプロシウム使用量を３割以上削減できた．

ABSTRACT

A magnet in which rare earth content is reduced by means of a localized diffusion method has been developed in order to reduce the volume of dysprosium used in $Nd_2Fe_{14}B$ sintered magnets employed in the drive motors of hybrid, electric and other vehicles.

Based on the fact that the distribution of the demagnetization fields to which the magnets in a motor are subject is not uniform, but rather concentrated at the corners of the magnets, the necessary coercivity distribution for the magnets was quantified using CAE, and a magnet with localized Dy diffusion was developed in order to realize this coercivity distribution. Evaluation of motor characteristics showed the developed magnet to possess identical demagnetization characteristics to a conventional magnet.

Dysprosium resources represent a particular issue among the rare earths more generally, and the technology developed in this project is able to reduce dysprosium use in magnets by 30% or more while maintaining motor performance.

1．まえがき

$Nd_2Fe_{14}B$ 焼結マグネットは高い磁束密度を有し，モータの高トルク化，小型化に貢献しているが，高温で使用すると磁束密度が低下しモータトルクが低下する特性を有する．この特性を補うのが，ネオジム（Nd）の一部をジスプロシウム（Dy）で置換した Dy 含有 $Nd_2Fe_{14}B$ 焼結マグネットであり，Dy の高い異方性磁界によりマグネットの高温下での使用を可能にしている．ハイブリッド自動車，電気自動車用の駆動用モータマグネットには，この Dy 含有 $Nd_2Fe_{14}B$ 焼結マグネットが使用されており，マグネットのアプリケーションの中では Dy 使用量が多く 5 wt% から 15 wt% 含まれている．

CO_2 排出量削減のため，近年車両の電動化は加速しており，Fig. 1 に示すように電気自動車などモータを搭載した車両の増加に伴いマグネットの需要も増加すると予想されている[(1)]．一方 Dy を含むレアアースは産地が限られており，現状中国産が９割以上のシェアを占める．需要の増

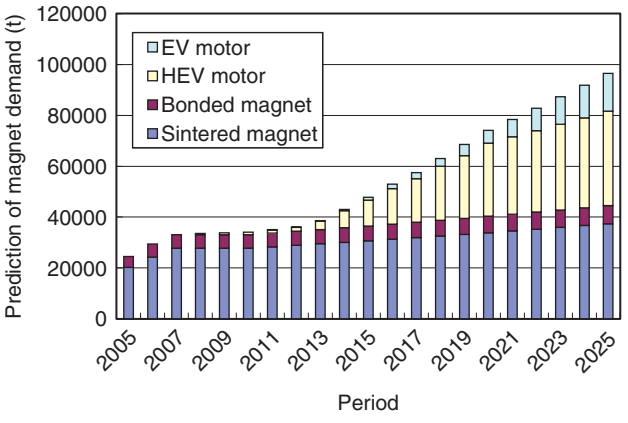


Fig. 1　Prediction of magnet demand

＊四輪 R&D センター

https://doi.org/10.69239/hondatechnicalreview.2012_24_2_9

加に対して産地が限定されているため 2011 年度より Dy の価格は大幅に高騰した．Fig. 2 にレアアースの価格動向を示す[2]．直近では下落の傾向にあるが，5 年前の水準と比べると未だに 20 倍強の価格である．今後も Dy は需給ギャップが改善されず資源枯渇するとの予測もあるため[3]，モータ用マグネットとして減磁性能を維持したまま Dy 使用量を低減することが急務である．

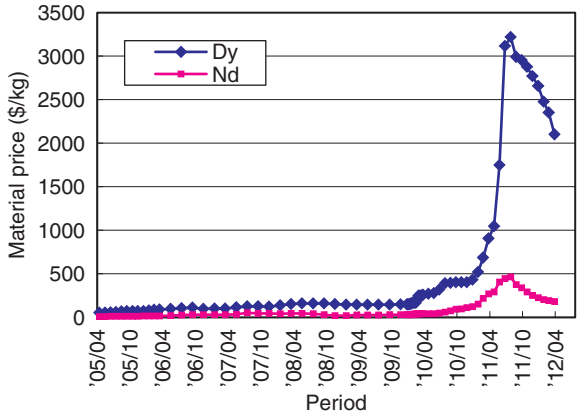


Fig. 2　Material prices for Nd and Dy

2．Dy 削減の課題

モータ内でマグネットが受ける反磁界が保磁力を上回ると，マグネットからの発生磁束が減少し，たとえ反磁界が弱くなってもマグネットの発生磁束が回復せずモータ発生トルクが低下する．この現象を減磁と呼ぶ．$Nd_2Fe_{14}B$ 焼結マグネットは高温下で保磁力が低下するため (Fig. 3)，ある限界温度を超えると減磁が起こる．Dy は Nd に対して異方性磁界が約 2 倍高いために，Dy を添加されたマグネットは保磁力が高く，減磁が起きる温度も向上する．車載環境では登坂や連続高速走行時などにマグネット温度は 160℃ から 200℃ まで上昇する．Dy を低減すると高温での保磁力も低下し車載には不適当となる．従って，Dy を削減しても減磁特性を維持する技術が必要である．

$Nd_2Fe_{14}B$ 焼結マグネットの Dy 使用量を削減する技術として，Dy を粒界に拡散させる技術が提案されている[4],[5]．粒界拡散技術とは表面に塗布した Dy を内部に拡散させる技術だが，表面近傍しか特性を向上できず Dy 削減量は約 10% から 15% にとどまる．また従来は全域で均一な保磁力のマグネットを用いており，領域ごとに特性の傾斜したマグネットを使用した例はなかった．

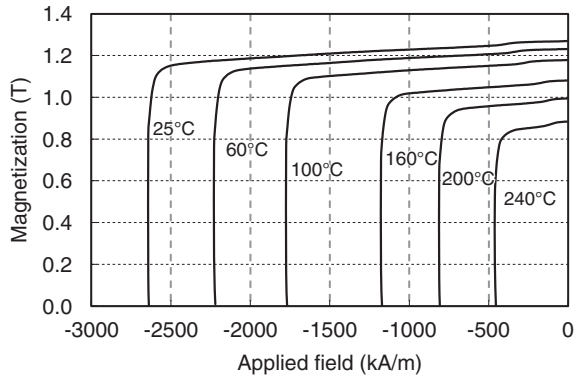


Fig. 3　Temperature-dependence of magnet property

今回，Dy の使用量を少しでも多く削減するために，必要な部位に最小限の Dy を用いることを開発のコンセプトとした．この粒界拡散技術を用いて減磁が起こりやすい角部だけ保磁力を高めれば，従来同等の減磁特性が得られると考えた．本コンセプトイメージを Fig. 4 に示す．Dy を削減しても減磁特性を維持するために，部分的な Dy 拡散技術の確立が課題である．

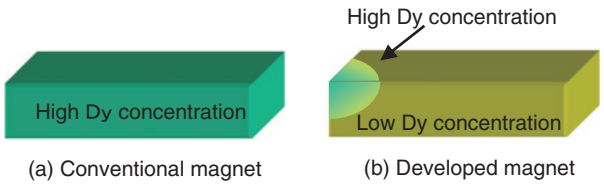


Fig. 4　Concept of reduction of Dy through localized diffusion

3．Dy 削減の検討

電磁界解析ソフトの JMAG (JSOL 製) を用い IPM (Interior Permanent Magnet) モータの減磁挙動を計算し，領域ごとに必要な Dy 量を定量化をした．

減磁する条件でモータの電磁界解析をおこない，減磁領域を特定した．この結果を Fig. 5 に示す．減磁は全域で均一に起こるのではなくロータ外周側の磁極端部から発生する．これはモータ中でマグネットが受ける反磁界が角部で大きいことに起因すると考えられる．

電磁界解析にて，領域ごとに必要な保磁力を定量化した結果を Fig. 6 に示す．マグネット仕様の考え方を Fig. 7 に示す．拡散処理前のベースマグネットに低保磁力マグネット (低 Dy マグネット) を用いた場合，同等の減磁特性を保つために角部は保磁力を高める必要があり，局部的に Dy を必要とする．ベースマグネットの保磁力をより下げれば角部に必要とする Dy は増加するため，全体での Dy 使用

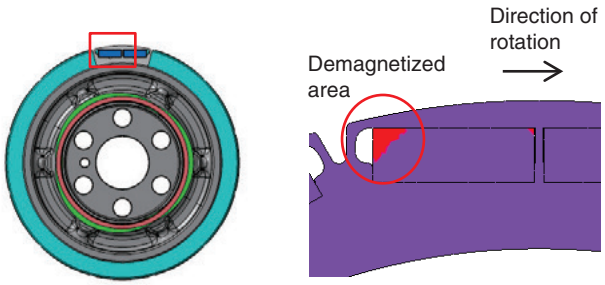


Fig. 5　Motor demagnetization area

量は極値を持つ．今回のモータの場合，保磁力が従来より550 kA/m低いマグネットを用い，角から約3 mmの領域だけ保磁力を強化し角部で従来同等にすればDyを削減できる．この場合のDy削減量は30%と試算された．

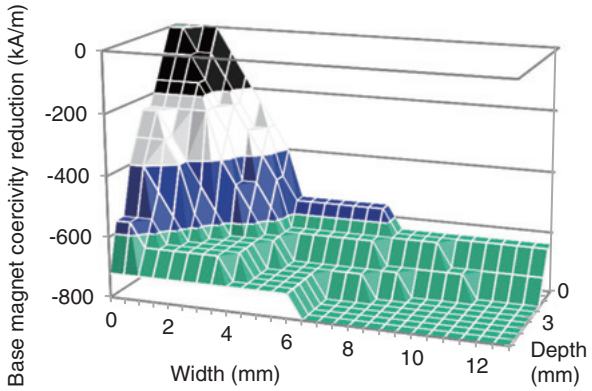


Fig. 6　Minimum Dy distribution

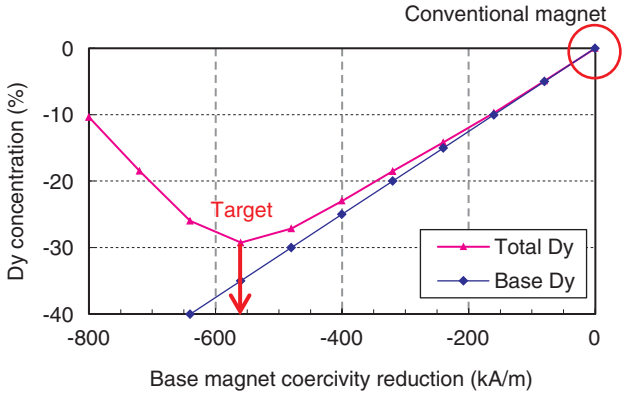


Fig. 7　Concept of base magnet

4．マグネット作成と評価手法

4.1. Dy部分拡散マグネットの作成

保磁力の強化が必要な領域にのみDyを部分的に拡散させる拡散条件を設定した．従来のマグネット製造プロセスと本プロセスの違いをFig. 8に示す．Dyを拡散させるプロセスとして，表面にDyペーストを付与し熱拡散させる工程が追加となる．Fig. 9に一般的な拡散の模式図を示す[6]．本式を元にDy拡散の支配因子を検討し，Dy表面濃度，拡散時の熱処理温度，時間，マグネット寸法と塗布面積などの因子について最適条件を設定した．

4.2. マグネット特性評価手法

Dy部分拡散マグネットの局所的なDy分布を測定するために，Vibrating Sample Magnetometer(VSM法)で部位ごとの保磁力を測定した．マグネットをFig. 10に示すように0.9 mmピッチで切出し，各領域ごとの保磁力を振動試料型磁力計にて測定した．

全体のオープンフラックスはフラックスメータにて測定した．Dy分布はElectron Probe Micro Analyzer(EPMA)で測定した．

4.3. モータ特性評価手法

前述のプロセスにて作成されたマグネットを用いてモータを作成し，特性評価をおこなった．モータ評価システム

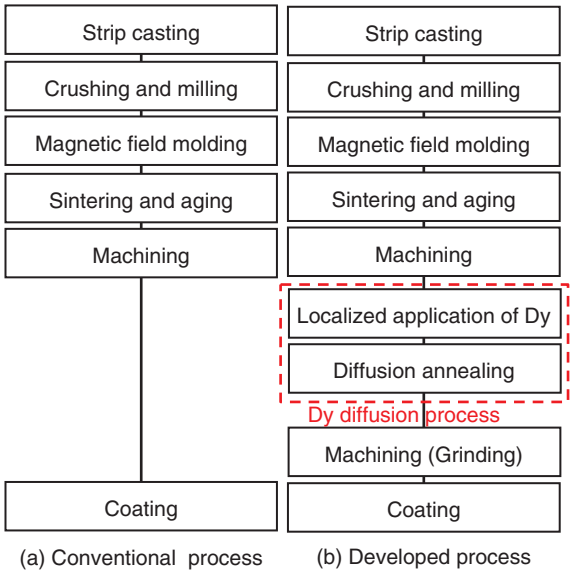
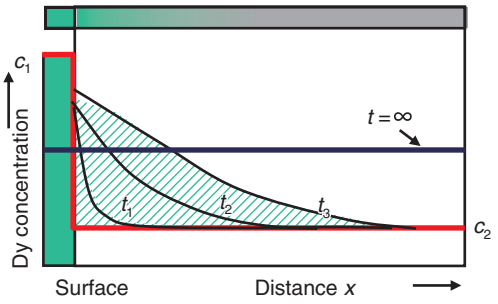


Fig. 8　Dy diffusion process



$$C = c_1 + \frac{(c_2 - c_1)}{2}\left[1 + erf\left(\frac{x}{2\sqrt{D_0 \cdot t \cdot \exp(-E/k_B T)}}\right)\right]$$

C: Dy concentration
c_1: Surface concentration
c_2: Base concentration
x: Distance
D_0: Vibration factor
t: Time
E: Activation energy
k_B: Boltzmann's constant
T: Temperature

Fig. 9　Basic diffusion model

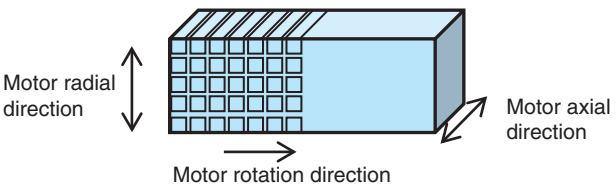


Fig. 10　Method of evaluation of coercive force distribution

の外観写真を Fig. 11 に示す．Dy 部分拡散による効果を定量化するために，拡散処理を実施しないモータについても同様の評価をおこない比較した．

トルク特性については，所定の電流を印加した際のモータ発生トルクを計測した．減磁特性については，所定温度にて最大電流を印加することでマグネットに最大反磁界を与え，その後マグネット発生磁束を評価し，電流印加前後での変化を計測した．初期値からの磁束低下率によって，減磁特性の評価をおこなった．

4.4. 減磁試験後の特性評価手法

マグネットの減磁部位を調査するために，減磁試験前後にてマグネット表面の磁束密度分布の測定をおこなった．試験前後での磁束密度の差異をとることで減磁発生部位を特定することが可能となる．測定にはマグネットアナライザを用いた．

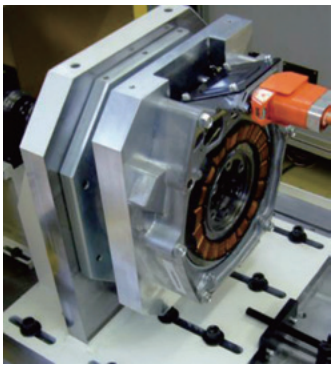


Fig. 11 Appearance of motor evaluation system

5．結果と考察

5.1. 材料評価

5.1.1. 保磁力特性

Dy 部分拡散マグネットの保磁力分布測定結果を Fig. 12 に示す．保磁力は，中央部は Dy 部分拡散処理前の保磁力と同等であるが角部に向けて保磁力が向上し，ピークである角部は目標の 550 kA/m 以上保磁力が向上していた．この結果は Dy 拡散モデルでの検討結果と一致しており，Dy の拡散濃度違いによる保磁力の傾斜を確認できた．

Dy 部分拡散マグネットの保磁力分布を，目標値と比較した結果を Fig. 13 に示す．角部から辺と平行な断面と最も拡散距離が長くなる 45° の断面の 2 平面で評価した．いずれの面に対しても必要な保磁力を満足していることが確認できた．Dy の塗布量や熱処理条件を制御することで保磁力の傾斜を制御できた．

5.1.2. 磁束密度

一般に Dy 添加によりマグネットを高保磁力化すると残留磁束密度は低下する[7]．今回試作したマグネットの磁束密度を従来の高 Dy マグネットと比較した．Dy 部分拡散処理の有無による残留磁束密度の差は認められなかった．高 Dy マグネットにおいて Dy は $Nd_2Fe_{14}B$ 相に分散して存在し，Dy と Nd の磁束が打ち消しあい全体の磁束密度が低下する．一方 Dy 部分拡散マグネットでは，融点の低い粒界領域に Dy が偏在するため，保磁力の増加に対し磁束密度の低下が抑制されたと考えられる．

Fig. 14 に Dy 部分拡散処理前後の EPMA 像を示す．拡

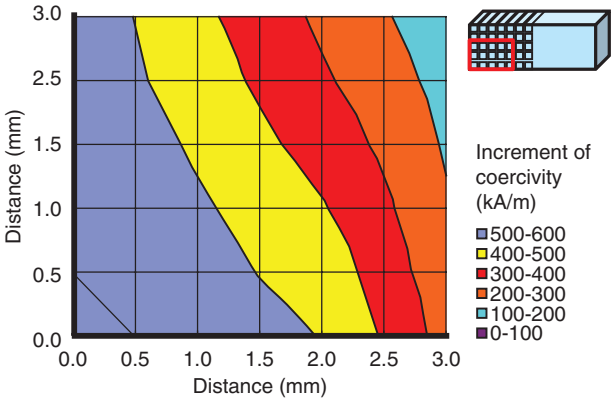


Fig. 12 Coercivity map for localized Dy diffusion process

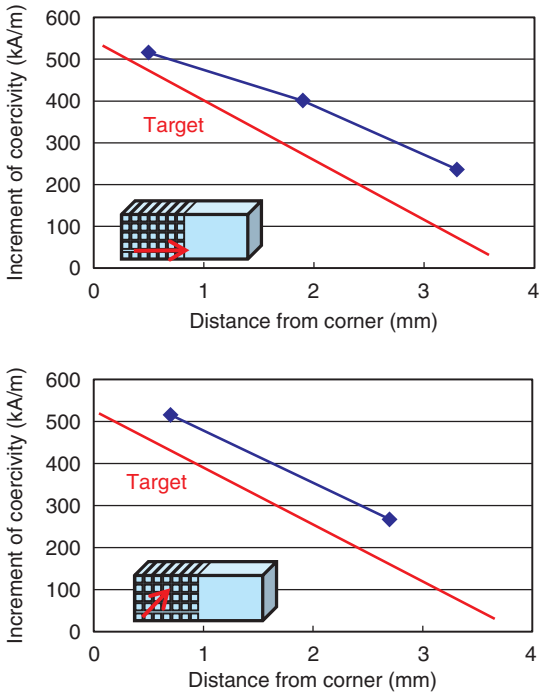
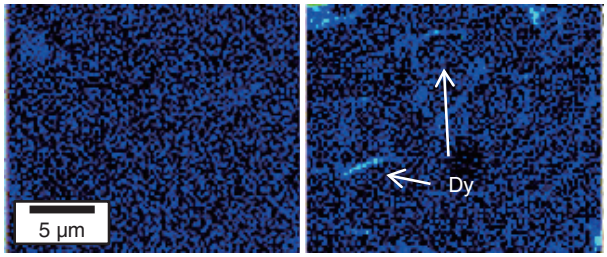


Fig. 13 Comparison of CAE analysis and magnet with localized Dy diffusion



(a) Base magnet (b) Magnet with localized Dy diffusion

Fig. 14 Cross-sectional EPMA photographs

散処理前の Fig. 14 (a) では全域で著しい濃度変化はなく Dy が均一に分散していることがわかる．拡散処理後の Fig. 14 (b) では Dy（図中白部）線状に濃化しており，$Nd_2Fe_{14}B$ 相の磁束を打ち消すことなく残留磁束密度が低下しなかったと考えられる．

5.2. モータ特性評価

5.2.1. トルク特性

Dy 部分拡散マグネットと従来の高 Dy マグネットを用いたモータテストでトルク特性を比較した．結果を Fig. 15 に示す．いずれもトルク特性は同等で Dy 部分拡散処理により発生トルクの低下が無いことが確認できた．これはマグネット単体の検証において磁束密度が低下していない結果と一致する．

5.2.2. 減磁特性

従来の高 Dy マグネットと Dy 部分拡散マグネットを用いたモータテストで減磁特性を比較した．結果を Fig. 16 に示す．開発材の Dy 含有量は 39% 低減したにもかかわらず，従来同等の減磁挙動を示した．これは Dy 部分拡散マグネットの減磁が起こり始める角部は高 Dy マグネットと同等の保磁力を有していたためと考えられる．より高温で反磁界が大きい領域での挙動は差が出ると予想されるが，

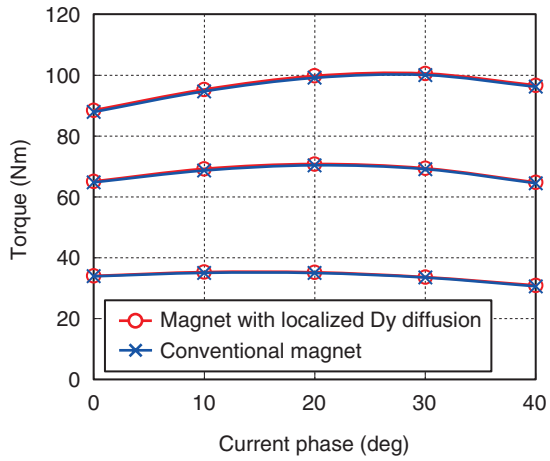


Fig. 15　Comparison of current-torque characteristics

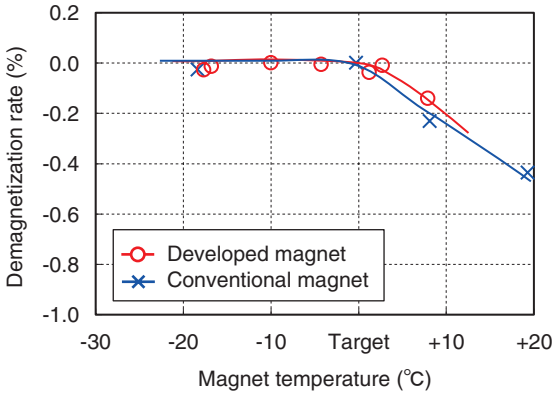


Fig. 16　Demagnetization characteristic

ハイブリッド自動車の駆動用モータの使用環境下では Dy 削減によるモータ特性への影響はないことを示している．

5.2.3. 減磁部位測定

減磁後のマグネットの減磁部位測定結果を Fig. 17 に示す．電磁界解析による減磁部位計算結果もあわせて下図に示す．それぞれ減磁領域を青枠で示す．Fig. 17 (a) の従来マグネットはマグネット角部から減磁が発生しているのに対し，Fig. 17 (b) の Dy 部分拡散マグネットはマグネット中央部より減磁が発生していることがわかる．これは，Dy 拡散によりマグネット角部の保磁力が強化されたため，最弱部が中央部になったものと考えられる．電磁界解析については，計算上は磁石内の温度勾配を表現していないため詳細な減磁領域の形状は一致しなかったが，減磁領域が角部から中央部に移動する傾向は再現されている．前述の減磁特性と合わせ，コンセプトどおりのマグネットが開発できたことを示している．

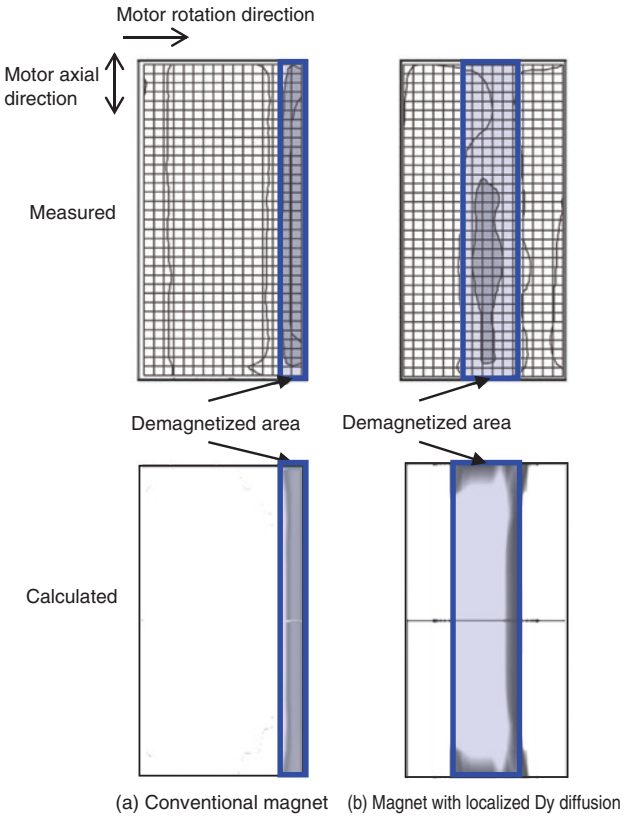


Fig. 17　Magnet flux distribution after demagnetization test

6．適用効果

角部にのみ Dy を拡散した Dy 部分拡散マグネットは，高 Dy の従来マグネットと同じモータ特性，減磁特性が得られた．Dy 使用量の削減結果を Fig. 18 に示す．保磁力の不要な領域から Dy を計 47% 削減でき，部分拡散処理で 8%Dy を使用するが，最終的に削減量は 39% となった．

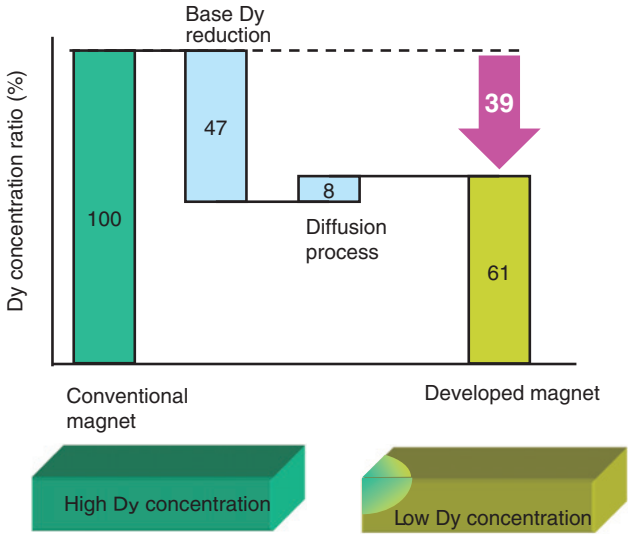


Fig. 18 Effect of application of magnet with localized Dy diffusion

7. まとめ

モータ中マグネットの反磁界分布に着目して，Dy 量を局部的に変化させた Dy 部分拡散マグネットの設計コンセプトとその製法を確立し，従来のマグネットと同様の磁気特性を示すことを実証した．マグネットのレアアース削減はマグネット業界における長年の課題であったが，本技術により Dy 使用量を 39% 低減できた．

本マグネットは今後のハイブリッド車用 IMA (Integrated Motor Assist) モータに順次適用していく予定である．

参考文献

(1) 山本日登志：希土類磁石の発展と市場動向，日中レアアース交流会議シンポジウム (2009)
(2) METAL-PAGES, http://www.metal-pages.com/
(3) Lifton, J.: The Consequences of Uncertainty in the Future Rare Earths Supply Chain, REPM 2010
(4) 中村元：粒界拡散法により作製した Nd-Fe-B 系焼結磁石，日本応用磁気学会 147 回研究会資料，p.13-18 (2006)
(5) 町田憲一：粒界拡散技術による特定レアアースを低減した高性能希土類磁石の開発，セラミックス 44，No.5, p.392-396(2009)
(6) 杉本孝一，長村光造：拡散方程式の解，材料組織学，朝倉書店，p.64-69(1991)
(7) 島田寛，山田興治：希土類磁石，磁性材料，講談社，p.114-126(1991)

■著　者■


三好健宏


東　孝之


井上雅志


大﨑廣二郎

自動車用シートの耐久性を考慮したアレルゲン低減シート表皮の開発

Development of Anti-allergenic Compound for Durability of Automotive Seat Fabric

林　　里　恵*
Rie HAYASHI

要　旨

乗員の衣服などに付着して車室内に持ち込まれるアレルゲン物質として，主にダニおよびスギ花粉が挙げられる．これらのアレルゲン物質に対して不活化性能を示し，摩耗や環境老化といった自動車の厳しい条件に耐え，未加工品同等のアセンブリ外観商品性を有するアレルゲン低減シート表皮の開発をおこなった．

上記の性能を達成するために，多数の抗アレルゲン剤の中から最適な材料を選定するとともに，配合比，粒径，バインダ剤，塗布方法について改良を加え，ねらいの性能を有するシート表皮を開発することができた．

さらにスギ花粉以外の花粉アレルゲン物質についても検証をおこない，１年を通じてアレルゲン低減効果を発揮できることを確認した．

ABSTRACT

Mite and cedar pollen allergens can be indicated as the main allergens that are carried into automobile passenger cabins, for example by adhering to the clothes of vehicle occupants. An allergen-reducing seat fabric has been developed that displays good deactivation performance against these allergens, and is resistant to the friction, environmental aging, and other severe conditions characteristic of automobiles.

In order to realize this performance, optimal materials were selected from among multiple anti-allergenic compounds. In addition, attention was paid to the compounding ratio, particle size, binding agent, and coating method in order to produce a seat fabric conforming to performance targets.

Tests of the efficacy of the seat fabric in relation to allergens other than cedar pollen indicated that it is effective in reducing allergens throughout the year.

１．まえがき

近年，日本におけるアレルギー疾患の発症率は増加傾向にあり，特に目鼻アレルギーの有症率は高い[(1)]．また健康，快適志向の高まりにより，自動車室内においても乗員への健康，快適性を配慮した機能を持たせた付加価値技術が多く提案されている．

既に量産されている自動車室内のアレルゲン低減機能を有する空調装置のアレルフリー高性能脱臭フィルタは，外気から侵入する花粉などのアレルゲン物質を低減できるが，乗員の衣服などに付着して車室内に持ちこまれるアレルゲン物質については低減できない．この経路で持ち込まれるアレルゲン物質には，花粉のみでなく目鼻アレルギーの原因となるダニアレルゲンも含まれ，特にシート表皮上へ蓄積する（Fig. 1）．

本研究は，１年を通してさまざまなアレルゲン物質に対して不活化性（低減性）を示す抗アレルゲン剤を，その耐久性およびシート本体の商品性，機能を損なうことなく自動車用シート表皮へ定着加工を施すことで，車室内の快適性を向上させることを目的とした．

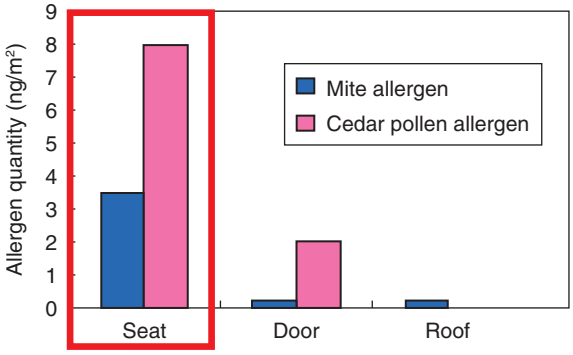


Fig. 1　Mite and cedar pollen allergen count on automotive interior fabrics

＊四輪 R&D センター

https://doi.org/10.69239/hondatechnicalreview.2012_24_2_10

2. 抗アレルゲン剤とは

一般的なアレルギー症状発症メカニズムは，肥満細胞に付着した抗体とアレルゲン物質（抗原）が接触（反応）することにより抗原抗体反応（Fig. 2）が起き，炎症物質（ヒスタミン等）が放出されることで，神経や血管を刺激し，アレルギー症状が発症することである[2]．

抗アレルゲン剤とは，アレルゲン物質を吸着して，そのタンパク質構造に作用し変性させることで，アレルゲン物質と体内の抗体との反応を抑制する物質である．

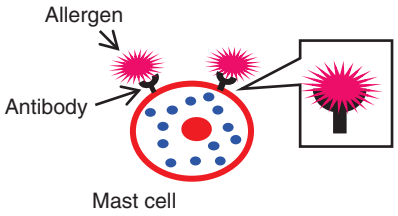


Fig. 2　Mechanism of antigen-antibody reaction

3. 開発のねらい

従来の抗アレルゲン剤加工を施したシート表皮の課題は，抗アレルゲン剤の呈色などの影響により低減対象であるアレルゲンが限定されてしまうことや，自動車室内の環境条件や摩耗による抗アレルゲン剤の性能低下，シートアセンブリ時のスチーム白化などによる外観商品性の低下などが挙げられる．

本研究で開発したアレルゲン低減シート表皮は，前述の課題を克服するとともに自動車用表皮として求められる性能を満足することを目標とした．

3.1. 不活化性能の目標設定

本研究では，低減対象とするアレルゲン物質を一般的にニーズの高いダニおよびスギ花粉とし，完成車想定条件による不活化性能の目標を定めた．

ダニアレルゲンについてはWHOにて発症しきい値が設定されている．完成車で検出されたダニアレルゲン量をもとに，一晩おいた後，WHOの発症しきい値以下となるよう，不活化率（低減率）目標を定めた．

スギ花粉アレルゲンについては，環境省[3]の花粉飛散量目安の中で最も飛散量が少ないと数値設定されている10個/cm^2以下を参考に，シート表皮上のスギ花粉アレルゲン量が常に花粉10個/cm^2以下相当となるように不活化率目標を定めた．

3.2. 耐久性目標設定検討

自動車の厳しい環境条件や摩耗などの耐久試験後でも高い不活化性能を維持できることを目標とし，耐久性，均質加工性，量産性などの観点から最適な加工法，バインダ剤選定などの検討をおこなった．

3.3. シートアセンブリ時の外観商品性保持

変色や白化などによるシートアセンブリとしての外観商品性の低下を引き起こすことなく，抗アレルゲン剤の性能を向上させるため，表皮全体へ均質に定着させる仕様を検討した．

3.4. ダニ・スギ花粉以外のアレルゲンへの効果検討

日本国内において年間を通じたアレルゲン低減シートの効果を確認するために，ヒノキとブタクサアレルゲンについても検証を実施した．

4. アレルゲン低減シート表皮の基本仕様

4.1. 抗アレルゲン剤仕様

本研究で適用する抗アレルゲン剤として，無呈色であり，耐水性が高く，熱や光などの環境条件下でも安定的である候補材料を数十種類の中から選定した．さらにその中から，ダニ・スギ花粉アレルゲン双方に対し3章の開発目標を満足する効果を発揮できるよう，水酸基をもつ芳香族ポリマと酸化ジルコニウムの2種類を配合した（Fig. 3）．

また，表皮へ加工した際，アセンブリ外観商品性へ影響する剛軟性や伸び率を保持でき，少ない塗布量で接触回数を向上させ高い不活化性能を得られるよう，平均粒子径を0.8 μmから1.0 μmと比較的微細な仕様とした．

4.2. 耐久性を考慮したバインダ剤仕様

シート乗降時等の摩耗による抗アレルゲン剤の脱落を防ぎ，抗アレルゲン剤を表皮に定着させるためにバインダ剤を混合した．バインダ剤の種類を検討した結果，難燃性や耐チョークマーク性などの性能も満足できるポリエステル樹脂を選定した（Table 1）．

4.3. シート表皮への加工方法

加工方法として，一般的に自動車のシート表皮へ樹脂加工する際に用いられるディッピング法を採用した．この方法を選定することにより，表皮全体へ抗アレルゲン剤加工

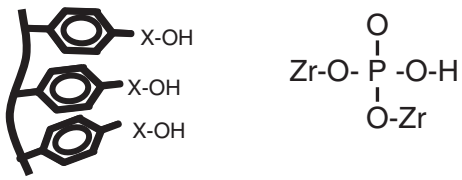


Fig. 3　Structure of anti-allergenic compounds (image)

Table 1　Test results for binder resin

Kind of binder resin	Compatibility with anti-allergenic treatment	Chalk mark resistance	Flame resistance
Polyester resin	○	○	○
Polyurethane resin	○	×	×
Acrylic resin	○	○	×
None	–	×	○

○: OK, ×: No good

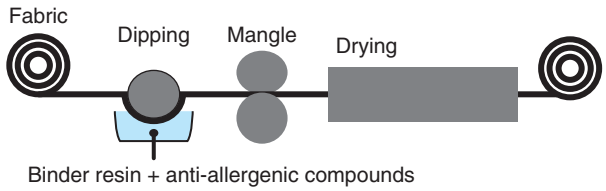


Fig. 4　Processing method for seat fabric

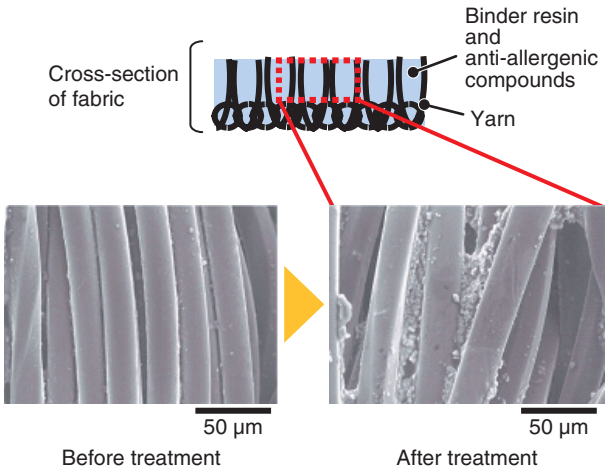


Fig. 5　SEM photograph of seat fabric

を施せるため，高い不活化性能を得ることができ，バインダ剤との併用により，耐久性向上も可能である．

Fig. 4 に工程イメージを，Fig. 5 に加工前後の表皮の電子顕微鏡拡大写真を示す．

5．性能検証結果

5.1. ダニ，スギ花粉アレルゲン不活化特性

アレルゲン不活化性能を評価するにあたり，一般的に適用されている測定方法である ELISA 法[(2)]を用いて，Table 2 の条件に基づき測定をおこなった．この条件は，Fig. 1 に示した実車に蓄積しているアレルゲン量を参考に設定した．

Fig. 6 に示す通り，ダニおよびスギ花粉アレルゲンに対し，共に 97% 以上の高い不活化性能を発揮することができた．

5.2. 自動車用シート表皮としての耐久性

自動車の厳しい環境下（熱，湿度，光）でも抗アレルゲン剤の効果が損なわれることがないか，各種耐久性試験を実施し不活化性能を確認した（Fig. 7 ― Fig. 9）．

Table 2　Test conditions for ELISA

Kind of allergen	Test piece size	Allergen concentration
Mite	25 cm²	1.575 ng/ml
Cedar pollen		0.325 ng/ml

開発したアレルゲン低減シート表皮は自動車の厳しい環境下でも，性能を保持することを確認した．さらに，シートの使い勝手を考慮し，シート表皮をテーバ摩耗試験機による摩耗試験，およびシートアセンブリでの乗降耐久試験

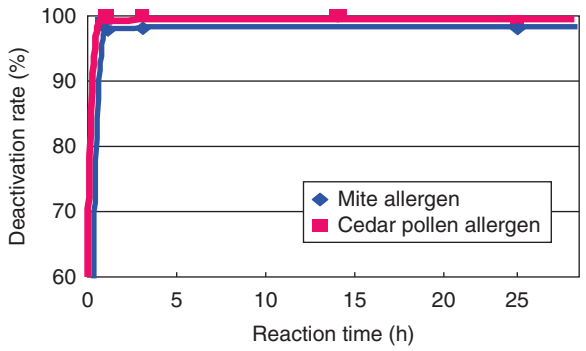


Fig. 6　Test results for deactivation rate

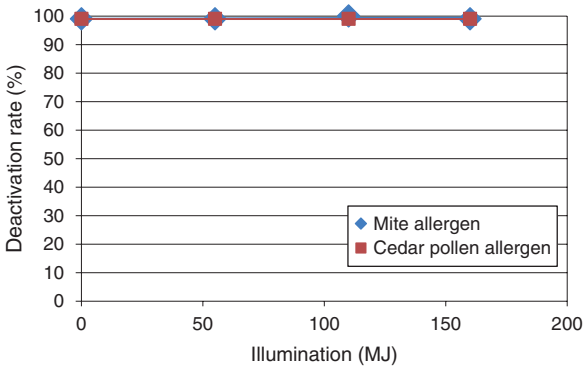


Fig. 7　Test results for deactivation rate after light resistance

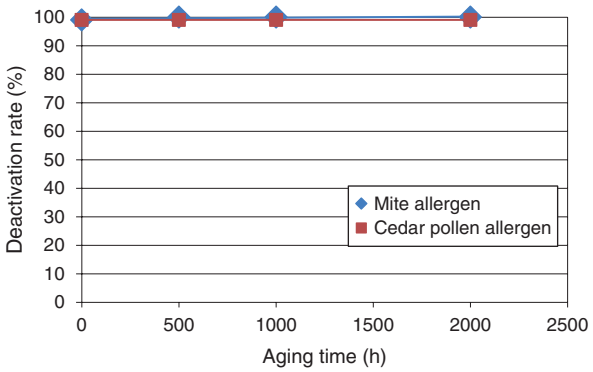


Fig. 8　Test results for deactivation rate after heat and humidity resistance

後の不活化性能の検証をおこなった (Fig. 10, Fig. 11).

結果として, 初期のみでなく, 自動車のシート表皮として想定される各種の耐久条件後においても, 不活化性能を発揮することができた.

5.3. 表皮単体性能および ASSY 外観商品性の検証

抗アレルゲン剤加工を施した製品が, シート表皮およびアセンブリとして要求される性能や外観商品性を満足することが必要であるため, これらについて検証をおこなった.

一般的に自動車用シート表皮として求められる表皮性能

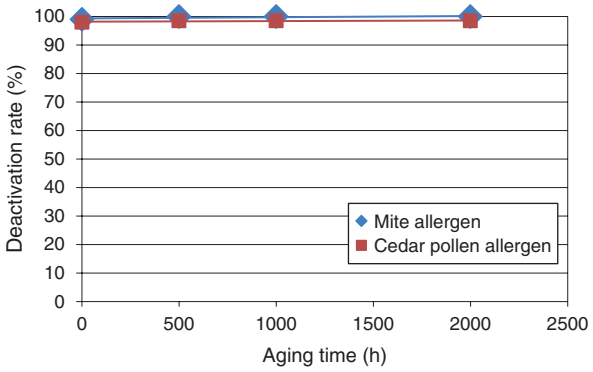


Fig. 9 Test results for deactivation rate after heat resistance (100°C)

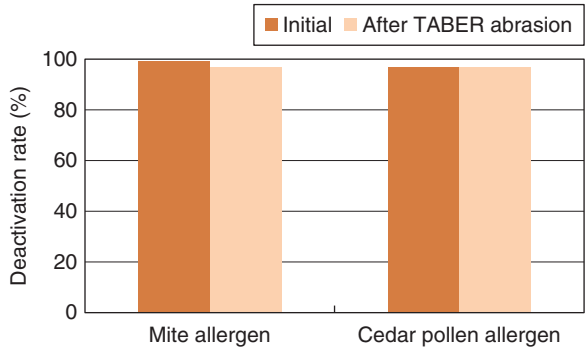


Fig. 10 Test results for deactivation rate after TABER abrasion (3000 cycles)

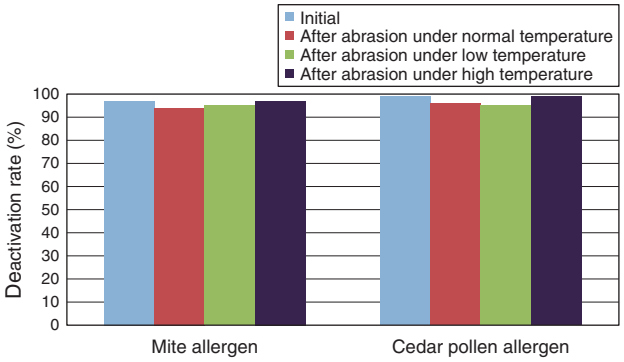


Fig. 11 Deactivation rate after ingress and egress durability

Table 3 Test results for seat fabric

Item	Non-process	Process
Constant elongation (%)	23/22	25/21
Tensile elongation (%)	93/108	103/106
Tearing strength (N)	218/173	188/155
Stiffness (mm)	33	39
Color fastness (grade)	4.5	4.5
Light resistance (grade: color change)	4.5	4.5
Heat resistance (grade: color change)	4.5	4.5
Heat and humidity resistance (grade: color change)	4.5	5.0

Table 4 Seat ASSY appearance

Seat ASSY appearance	Results
Chalk mark	None
Water mark	None
Wrinkle	None
Yarn breakage	None

(強度特性, 環境特性変退色等) の確認結果を Table 3 に示す. 加工表皮の一般性能は未加工表皮同等レベルであり, 加工による伸び率や強度の低下はほとんどない.

抗アレルゲン加工表皮について, Table 4 に示す通り, シートアセンブリでの外観検証を実施した結果, 未加工品同等の外観性を有し, またチョークマークやスチーム白化などの課題は発生しないことがわかった.

アセンブリ性検証に使用した表皮は, 外観性が確認しやすいよう, 黒色無地の表皮を選定した.

5.4. スギ花粉, ダニ以外のアレルゲンへの効果検証

日本国内において, ダニ, スギ花粉以外に目鼻アレルギーを引き起こす原因とされている春に飛散するヒノキ花粉, 夏から秋にかけて飛散するブタクサ花粉[(2), (3)]についても不活化性能の検証をおこなった. 結果を Fig. 12 に示す. ヒノキ, ブタクサ花粉アレルゲンに対しても, 開発シート表皮は不活化性能を発揮することが確認できた. 本研究で開発したアレルゲン低減シート表皮は, 年間を通して実用性が高いことがわかった (Fig. 13)[(2), (4)].

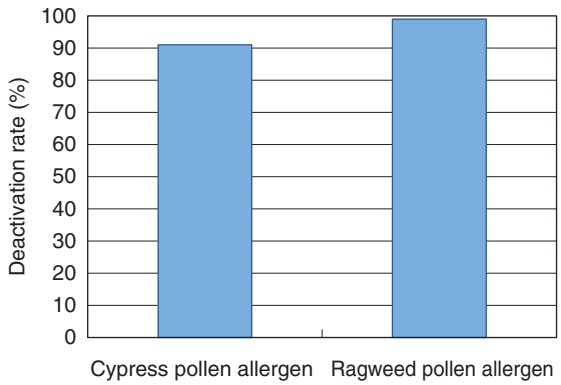


Fig. 12 Test results for deactivation rate of cypress and ragweed pollen allergens

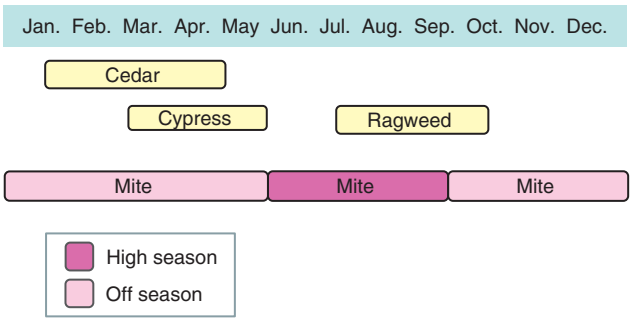


Fig. 13　Terms of pollen scatter in Japan

6．まとめ

本研究において，自動車用シートの耐久性，商品性を考慮したアレルゲン低減シート表皮を開発した．

（1）２種類の抗アレルゲン剤を配合することで，ダニ，スギ花粉アレルゲンのみならず，ヒノキ花粉，ブタクサ花粉など複数のアレルゲンにも不活化性能を発揮するシート表皮材仕様を確立した．

（2）最適なバインダ剤と加工法を選定することで，自動車のシート表皮としてさらされる耐久条件下において，不活化性能を保持できる仕様を確立した．

（3）抗アレルゲン剤を微細化し，バインダ剤で表皮全体へ均質に加工することで，シートアセンブリ外観商品性に関わる伸びや剛軟度，耐チョークマーク性を保持した．

本研究で開発したアレルゲン低減シート表皮は，N BOXにてアレルクリーンシートとして採用した．シート表皮への機能性付与技術は，商品魅力向上手段のひとつとして，幅広い適用拡大が期待される．

参考文献

（1）http://www.mhlw.go.jp/toukei/saikin/hw/hftyosa/hftyosa03/index.html

（2）佐橋紀男，高橋裕一，村山貢司：スギ花粉のすべて，(株)メディカルジャーナル社，117p.(1995)

（3）環境省：花粉症環境保健マニュアル，環境省環境保健部環境安全課，37p.(2009)

（4）森谷清樹：家の中のダニ，(株)裳華房，149p.(1990)

■著　者■



林　里恵

差圧式高圧水電解型ソーラー水素ステーション（SHS2）の実証試験

Verification Test of High Differential Pressure Water Electrolysis-type Solar Hydrogen Station (SHS2)

長岡久史* 吉田喜祐* David CUN**
Hisashi NAGAOKA Nobuyoshi YOSHIDA
山下郁也* 岡部昌規*
Ikuya YAMASHITA Masanori OKABE

要　旨

一般家庭に設置することを想定した差圧式高圧水電解型ソーラー水素ステーションを開発し，燃料電池電気自動車が必要とする水素を継続的に製造し充填する実証試験を約１年間おこなった．このソーラー水素ステーションでは，ユニット内部に搭載した差圧式高圧水電解スタックによって，水の電気分解で製造した水素を 35 MPa の圧力まで昇圧し，燃料電池電気自動車に供給することが可能である．この技術により圧縮のための機械式コンプレッサが不要になり，低騒音，高効率，小型化を実現することができた．

実証試験の結果，１年間で製造した水素量は約 120 kg であり，製造に必要な電力量は太陽電池による発電量で全て賄えることがわかった．システム初期効率は 55.5％であり，水素 1 Nm^3 あたり 6.38 kWh の電力消費であった．今後スタックおよびデバイスの効率向上等をおこなうことで，システム効率を約 70％まで向上できる見通しがある．また実証試験で得られたデータを利用した運用シミュレーションにより，貯蔵タンクを併設することで多くのユーザの利便性が向上することがわかった．

ABSTRACT

A high differential pressure water electrolysis-type solar hydrogen station (SHS2) was developed, envisioned for household use, and verification tests were conducted for approximately one year with production of hydrogen used by fuel cell electric vehicles. This SHS2 unit is equipped with a high differential pressure water electrolysis stack that raises the pressure of the hydrogen produced by water electrolysis to 35 MPa, enabling supply of the hydrogen to fuel cell electric vehicles. This technology has obviated the need for a mechanical compressor to compress the hydrogen, and has achieved low noise, high efficiency, and compactness.

As a result of the verification tests, it was found that the amount of hydrogen produced in one year was approximately 120 kg, and the amount of electric power needed for production was fully supplied by solar cells. The initial system efficiency was 55.5%, and 6.38 kWh of electric power was consumed per 1 Nm^3 of hydrogen. Increased efficiency and other such work on the stack and device is anticipated to allow system efficiency to be raised to as much as approximately 70%. Operation simulation using data obtained in verification tests showed that the convenience for most users could be increased by installing a storage tank together with the SHS2.

1．緒言

Honda はこれまで化石燃料の代替，排出ガスの削減，地球温暖化への影響の低減という観点から，水素を用いた燃料電池を次世代の究極的なパワープラントと捉え，燃料電池電気自動車の開発に取り組んできた．

この燃料電池電気自動車の燃料は圧縮された水素が主流であるが，この圧縮水素を供給するインフラは，いまだ十分とは言えない状況である．このため Honda では，車両開発と並行して燃料電池電気自動車に供給する水素の製造方法に関する研究にも取り組んでいる．

これまで，2001 年に常圧水電解型ソーラー水素ステーション（Solar Hydrogen Station 1: SHS1）を米国カリフォルニア州ロサンゼルスの Honda R&D ロサンゼルスセンタに設

＊　四輪 R&D センター
＊＊ HONDA R&D AMERICAS, INC.

https://doi.org/10.69239/hondatechnicalreview.2012_24_2_11

置し，燃料電池電気自動車が必要とする水素を継続的に製造し充填する実証試験を実施した．2003 年にはシステムの高効率化をおこなった後，4 年以上の実証試験をおこなった[1]．2010 年 1 月には SHS1 を，差圧式高圧水電解技術を利用したソーラー水素ステーション SHS2 へと更新[2)-(4)]し，約 1 年間の実証試験をおこなってきた．長期に渡って高圧水電解技術のステーションを試験した例はなく，実証試験を通して社会への受容性の確認を目的としている．

本稿では，SHS2 のシステム構成と動作の詳細を述べた後，1 年間の実証試験結果と初期のシステム効率を示し，今後の見通しについて述べる．また，実証試験結果を利用したシミュレーションによって，SHS2 の有無および貯蔵タンクの有無がユーザの利便性に与える効果を検証した．

2．SHS2 の詳細説明

2.1. システムコンセプト

SHS2 システムの全体像を Fig. 1 に示す．本システムは，機械式コンプレッサなしで燃料電池電気自動車用の水素規格を満たす圧縮水素を製造する能力を有しており，太陽電池と組み合わせることによって水素製造過程において全く CO_2 を出さないことが可能になる．

システムの仕様を Table 1 に示す．SHS2 の仕様は，将来一般家庭へ設置することを想定した仕様としている．日々の通勤での使用を想定し，燃料電池電気自動車で 1 日 40 mile 走行可能な量の水素を夜間に製造し充填するというコンセプトで製造水素流量等の仕様を設定している．差圧式高圧水電解スタックの吐出圧力は，車載タンクの充填最大圧力と同じ 35 MPa としている．

併設している出力 6 kW の株式会社ホンダソルテック製 CIGS 薄膜太陽電池[5]とは，電力系統を介して接続する形となっている．これは，太陽電池で昼間発電した電力は電力系統で利用し，車両帰宅後の夜間に電力系統からの電力で水素製造をおこなうことによって，電力系統全体で CO_2 を削減するというコンセプトとしているためである．

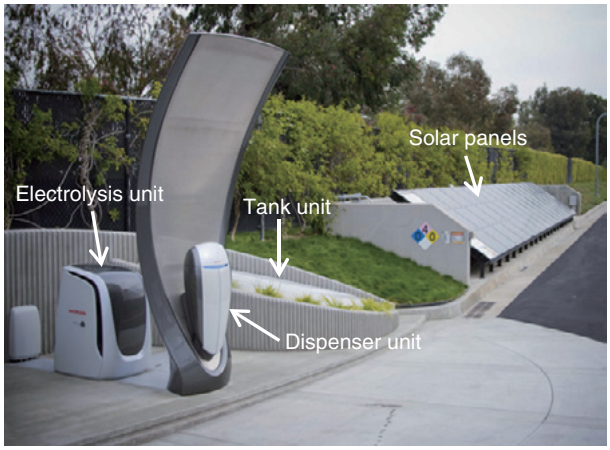


Fig. 1　External view of Solar Hydrogen Station (SHS2)

Table 1　Specifications of SHS2

Hydrogen production	Flow rate	0.7 Nm^3/hr (0.5 kg/8 hr)
	Filling pressure	35 MPa (max.) (approx. 5000 psi)
	Purity	> 99.99%
Component	Photovoltaic modules	CIGS thin-film solar cell 6 kW system (approx. 53 m^2)
	Electrolysis unit	High differential pressure electrolyzer
Utility	Electricity	240 VAC
	Water	Tap water
Unit volume		Approx. 0.33 m^3 (approx. 12 cf)

また，ユーザの利便性向上やシステム稼働率向上の検討をおこなうために，当初の計画通り 2010 年 9 月に水素貯蔵用タンクを設置した．

2.2. システム構成

2.2.1. 電解ユニット

電解ユニットは，差圧式高圧水電解スタックで水を電気分解し水素を発生させると同時に昇圧し，精製する装置である．Fig. 2 は電解ユニット内部の構成を，高圧水電解スタックを中心に，周辺デバイスの接続状態を模式的に表したものである．高圧水電解スタックは，水の電気分解によって閉ざされた空間に水素を発生させ続け，設定された圧力まで昇圧した水素を外部に供給する[6]．

電気分解に必要な純水は純水製造装置で水道水から製造され，純水循環系へ供給される．循環水ポンプでスタックへ供給された純水は，純度維持用のイオン交換樹脂を経由してスタック内各セルのアノード側に供給される．スタック内では純水が電気分解され，水素と酸素に分解される．電気分解の結果発生した酸素は，余剰の純水と共にスタックから排出され，酸素気液分離器へと送られる．純水と酸素の混合流体は，酸素気液分離器で分離され，酸素はブロワからの空気で希釈後，逆火防止機器を経由して大気に放出される．純水は循環系を通って再びスタックへ供給される．

一方，電気分解によってスタックのカソード側で発生した水素は，下流に設置された背圧弁の設定圧力（35 MPa）になるまで昇圧されていく．昇圧された水素は，高圧水素気液分離器，熱交換器，ペルチェ冷却器，吸着剤を通過することによって水分が除去され，水分濃度 5 ppm 以下のドライ水素に精製される．ここで，高圧水素気液分離器，熱交換器，ペルチェ冷却器においては，水素に含まれる液体の水分が重力によって落とされ，高圧気液分離器内に溜

まっていく．よってある決められた水量に達した時に排水しなくてはならないため，高圧気液分離器下部に設置された高圧排水ラインを適宜開放することにより排水をおこなっている．システムは排水と注水を繰り返しながら運転しており，Fig. 3 はこの排水サイクルを示したものである．Fig. 3 より排水サイクルに連動して，製品水素流量が変動していることがわかる．高圧気液分離器への注水中は，溜まっていく水の体積分だけ水素が押し出されるため，見かけ上の製品水素の量が多くなる．一方で排水中は，排水された水の体積分だけ気相の水素が膨張し，気液分離器内の圧力が低下するため，製造した水素は圧力低下分の補充に使われて，製品水素の吐出量が減少したり，完全になくなったりする．これにより，排水サイクルに伴って水素の製造と停止が繰り返されているように見えるが，平均すればスタックを流れた電流値に依存した一定量の水素が出ていることになる．吸着材による除湿は，露点の低い 35 MPa の高圧状態のまま吸着材を通すため，吸着材容量が少なくて済み，約半年で定期的に交換することとしている．

常圧水電解においてはアノード側で発生した酸素がカソード側の水素に不純物として混入するが，差圧式高圧水電解ではアノードとカソードの間の差圧が 1 MPa 以上あれば，水素中の酸素濃度を 5 ppm 以下にできることが確認されている．これにより，燃料電池電気自動車用水素燃料規格 SAE J2719[7] および ISO14687-2[8] を満たす純度の製品水素が得られる．製品水素が規格を満たしていることは，Table 2 に示すように，不純物分析によっても確認している．

このようにして製造された水素は，充填用ノズルを通じて燃料電池電気自動車のタンクに直接供給されるか，貯蔵用タンクがある場合には，貯蔵用タンクに充填され，貯蔵される．

2.2.2. タンクユニット

本システムの設置当初のコンセプトは，車両を使用していない夜間に，押し込み充填によって高圧水素を充填するというものであった．この方式であれば，高圧タンクを持つ必要がなく，システムの簡素化ができるため省スペースであり，水素の貯蔵に関する規格および法規を満たす必要がなくなり，家庭設置が容易となる．

Table 2 Hydrogen quality of SHS2

	ISO14687-2	SHS2
H_2	>99.99%	>99.99%
H_2O	<5 ppm	<1 ppm
Hydrocarbon	<2 ppm	<0.1 ppm
O_2	<5 ppm	1 ppm
He, Ar, N_2	<100 ppm	<16 ppm
CO_2	<1 ppm	<0.1 ppm
CO	<0.2 ppm	<0.001 ppm
Sulfur	<0.004 ppm	<0.0008 ppm
HCHO	<0.01 ppm	<0.001 ppm
HCOOH	<0.2 ppm	<0.001 ppm
NH_3	<0.1 ppm	<0.02 ppm
Halogenates	<0.05 ppm	<0.004 ppm

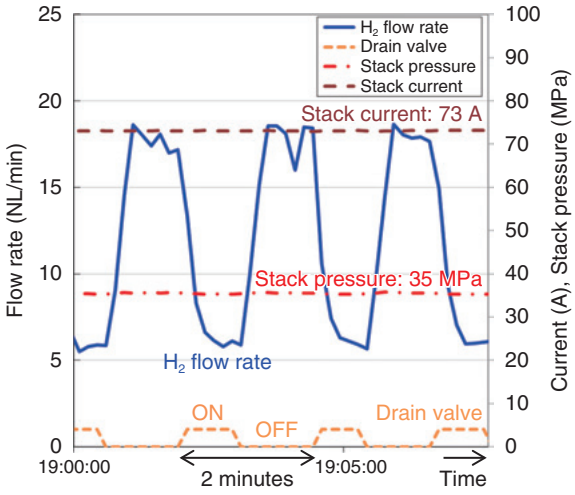


Fig. 3 High-pressure water drain cycle

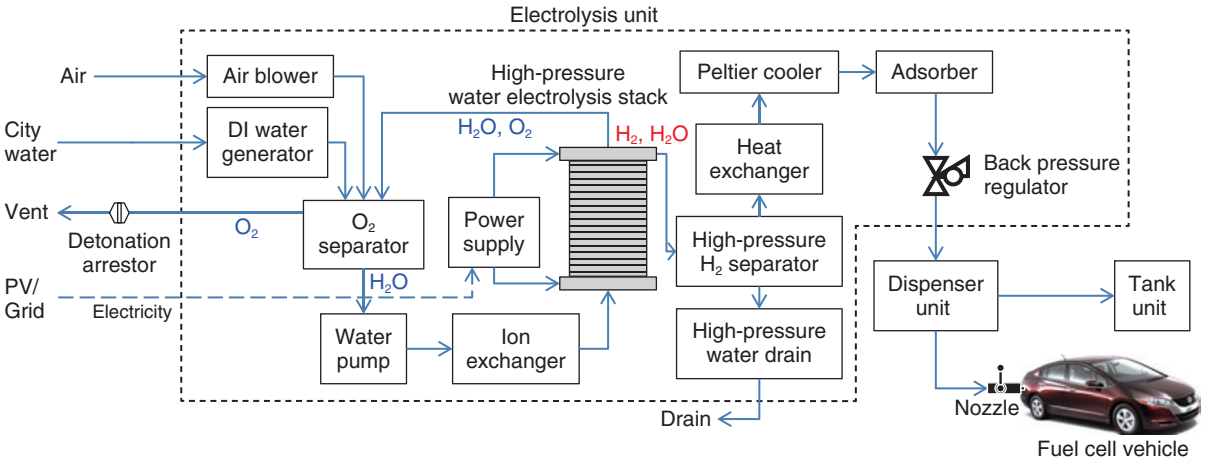


Fig. 2 Electrolysis unit configuration diagram

押し込み充填では，昇圧しながら充填するため満充填することができるが，充填に要する時間が長いというデメリットがある．一方，貯蔵用タンクを持つ場合は，タンク間の圧力差を利用した短時間の急速充填が可能になり，ユーザの利便性が向上すると共に，車両不在時にも水素製造および貯蔵ができるため稼働率が向上するというメリットがある．しかしながら，圧力差を利用するため満充填することはできないというデメリットがある．

このように貯蔵用タンクを併設して急速充填を可能にすることには一長一短があるが，今回はユーザの利便性向上やシステム稼働率向上の検討をおこなうために貯蔵用タンクを 2010 年 9 月に追加設置した．容量は 167 L であり，35 MPa の水素約 4 kg を貯蔵可能である．

2.2.3. ディスペンサユニット

Fig. 4 に示すディスペンサユニットには，ユーザがシステムを操作する操作画面や非常停止ボタン，充填用ノズル，非常時の離脱用ブレイクアウェイを装備している．

ユーザが車両に水素を充填する場合，操作画面の表示に従って車両にノズルを接続し，画面上の充填開始ボタンを押すことで充填が開始される．Fig. 5 に充填の進行を模式的に表したものを示す．貯蔵用タンクを有している場合は，まず貯蔵用タンクからの急速充填（Fast fill）が実施され，急速充填終了後に，電解ユニットで製造した水素を直接車載タンクに充填する押し込み充填（Slow fill）が開始される．



Fig. 4　Dispenser unit

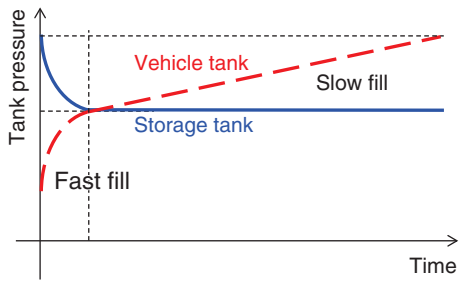


Fig. 5　Hydrogen charging sequence

3．初期性能

3.1. 効率分析

初期のシステム性能を確認するため，スタック循環水温度を定格の 60℃ 一定として運転をおこない，システム効率を測定した．効率計算に必要な水素の高位発熱量は 3.54 kWh/Nm^3 とした．製造水素流量は 2.2.1. 項で述べたように高圧気液分離器の排水サイクルにより変動するため，十分長い時間の平均値をとる必要がある．今回は 45 サイクル分（約 1 時間 20 分）の平均値を求めた（Fig. 6）．この結果，計算区間での水素製造量は 0.93 Nm^3（=3.31 kWh），消費電力は 5.96 kWh であったため，定常状態におけるシステム効率は 55.5％ であった．この値は，既存の大型水素ステーションの効率とほぼ同等である[(1)]．

スタックの効率には，電流効率，電圧効率，スタック効率（電力効率）の 3 種類があり，電流効率は理論水素発生量に対する得られた水素の割合，電圧効率は理論稼働電圧と実電圧の比率，電力効率はスタックでの水素製造効率（電流効率×電圧効率）を示している．測定および計算の結果，電流効率は 96.1％，電圧効率は 73.6％，電力効率は 70.7％ であり，これらの値はスタック単体で初期に測定した値と同等であることが確認された．

差圧式高圧水電解では，発生させた水素が酸素側に膜透過することによって，得られる水素量が減少することが挙げられる．ソーラー水素ステーション SHS2 では，機能を確実に維持するために，電解質膜の強度確保に必要な厚さに対して 2 倍の厚さの電解質膜を用いた．これにより，膜透過の量が少なくなり，水素の損失が減少することで，電流効率は良好な値が得られている．一方，電解質膜の厚さによる電気抵抗成分の増大により，電圧効率は低めの値となっている．

3.2. 消費電力分析

システム効率を算出する際，定格時の消費電力を測定し

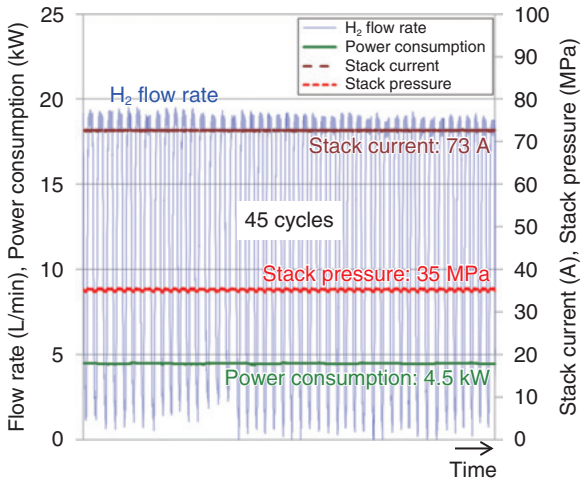


Fig. 6　Operation for efficiency analysis

ており，その内訳を Fig. 7 に示す．測定の結果 35 MPa の高圧水素を 1 Nm^3 製造するのに 6.38 kWh の電力量を必要とした．その内訳としては，水素に変換されるエネルギー量 55.5% 以外に，昇圧に必要なエネルギーが約 2.7%，スタックでの電力損失が 20.2%，電解電源の電力変換による損失が約 9.3%，補機類の消費電力総和が 12.2% となっている．項目別ではスタックでの損失が大きく，次いで電解電源の損失が大きくなっている．これより，スタック効率向上，電解電源変換効率の向上がシステム効率改善に有効であることがわかる．

3.3. 効率向上案

スタックの損失が大きい原因は，3.1. 節でも述べたように厚い電解質膜を使用していることによる抵抗増大のためと考えられる．電解質膜の厚みと種類の違いによる効率向上効果に関しては基礎的な検討をすでにおこなっており，以下に簡単に述べる．

現行の電解質膜に対して，現在検討している他の電解質膜の性能を示したものが Fig. 8 である．これより，現行の電解膜を，材質を変えることなく膜厚のみを半分とした場合，電解質膜の電気抵抗を減少させて電圧効率を向上させることができる．しかし，電解質膜が薄くなることで膜透過量が増大するため，電流効率が低下し，結果として電力効率の向上効果は少ないことがわかる．そこで，水素透過性が低く高強度の材料による電解質膜を検討している．この材質違いの電解質膜を用いた場合，膜透過量が減り電流効率が改善すると共に，高強度のため膜厚を薄くできることにより電圧効率も改善し，電力効率は約 10% 向上することがわかっている．この材質違いの電解膜については，初期テストが完了して効果を確認しており，現在耐久性の確認をおこなっているところである．

一方，システムでの効率向上案としては，大電力を変換している電解電源における損失が高いことから，変換効率を向上させた電源の開発が最も効果的と考えられる．その他各補機類の消費電力低減，運転方法の最適化等をおこなう必要がある．

これらの方策により，Fig. 9 に示すように将来的にシステム効率は約 70% が得られる見通しがあり、この値は小型水素ステーションとしては世界最高レベルである[1]．

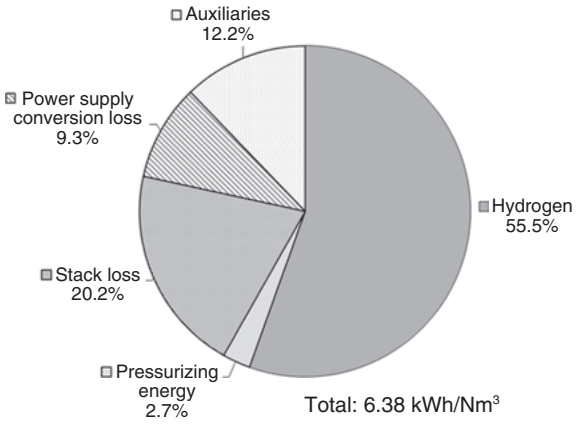


Fig. 7 Power consumption of SHS2

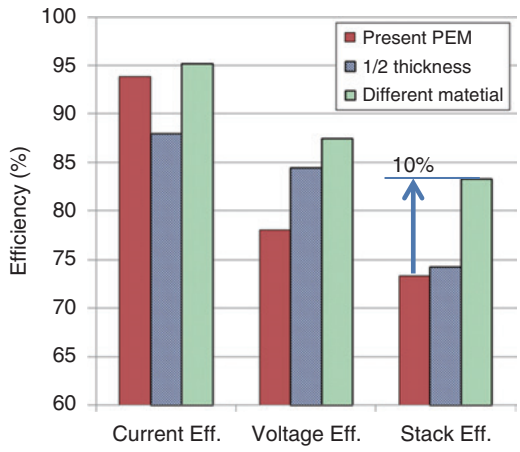


Fig. 8 Efficiency difference of alternative PEMs

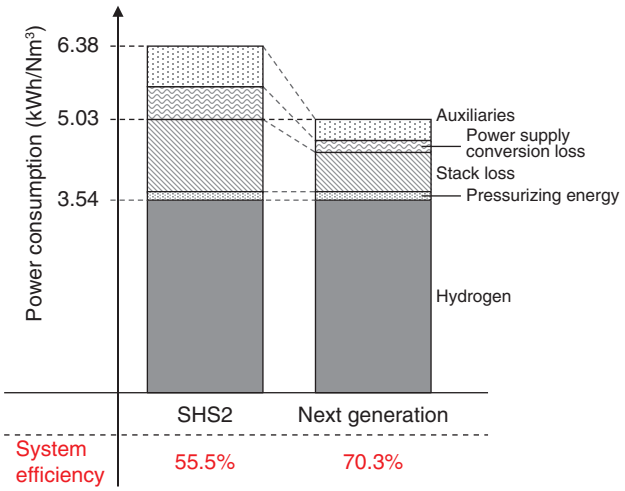


Fig. 9 Expected efficiency

4. 実証試験

4.1. SHS2 の実証試験結果

今回の実証試験は，通勤を模擬した運用をおこなう燃料電池電気自動車に対して，必要とする水素を継続的にソーラー水素ステーションで製造し充填する試験である．現地の実証試験実施者が，実際に通勤や外出等に使用している燃料電池電気自動車を用いて実施した．

Fig. 10 に 2010 年 2 月の稼働開始から 1 年間の，SHS2 による水素製造量および太陽電池による発電量の積算値を示す．本システムは 1 日 8 時間の運転で約 0.5 kg の水素を製造することができるので，参考に毎日 0.5 kg の水素を製造した場合の積算水素量を示した仮想線を引いている．すなわち，SHS2 が順調に稼働していれば，水素製造量積算値の傾きがこのラインの傾きと一致することになる．また 2010 年 9 月には，貯蔵タンクを追加設置することに

よって，24 時間稼働することが可能となった．つまり 1 日 1.5 kg の水素を製造できるようになったため，9 月以降は 1.5 kg/day の仮想線を引いている．このグラフより，事業所の長期休暇やメンテナンスの時を除いて，1 年間大きなトラブルなく稼働できたことがわかる．

1 年間の運用の結果，35 MPa での高圧水電解をおこなった時間は 1260 時間であった．起動停止は 267 回おこない，製造した水素の量は 120 kg となった．燃料電池電気自動車への充填は 268 回となり，貯蔵タンクを設置したのちは急速充填を 107 回おこなった．

太陽電池の 1 年間の総発電量は 8.82 MWh であった．本システムが前述の消費電力 6.38 kWh/Nm^3 で水素を製造したと仮定すると，1 年間の水素製造量 120 kg(1344 Nm^3) に必要な電力量は 8.57 MWh であるため，製造した水素全量分の電力量を太陽電池で賄えたことになり，システムコンセプトを実証することができた．

4.2. 実験結果を利用した運用シミュレーション

当初 SHS2 のシステムコンセプトとしては，夜間自宅での押し込み充填を基本として仕様を設定した．一方，SHS2 に貯蔵タンクを併設し急速充填を可能とすることは，2.3. 節で述べたようなデメリットもあるが，ユーザの使用状況によっては利便性が向上する可能性がある．このコンセプトを検証する手段として，実証試験結果を用いた SHS2 の運用シミュレーションをおこなった．ホームリフューエリングシステムの最大のメリットは自宅で車の燃料を充填できることと考えられることから，ユーザの利便性を測る指標として，自宅出発時の燃料レベル (Fuel level)，すなわち自宅で供給した水素の量の目安と，SHS2 の稼働率，および外部ステーションでの充填回数を設定した．

シミュレーションでは，燃料電池電気自動車の使用頻度を低 (Low)，中 (Middle)，高 (High) と仮定した運用パターンを設定し，各ユーザの運用パターンに沿って SHS2 と燃料電池電気自動車を 1 年間運用するシミュレーションをおこなった．シミュレーションに使用した数値 (車の燃費や SHS2 の水素製造効率など) は実際に運用によって得られた値を用いている．

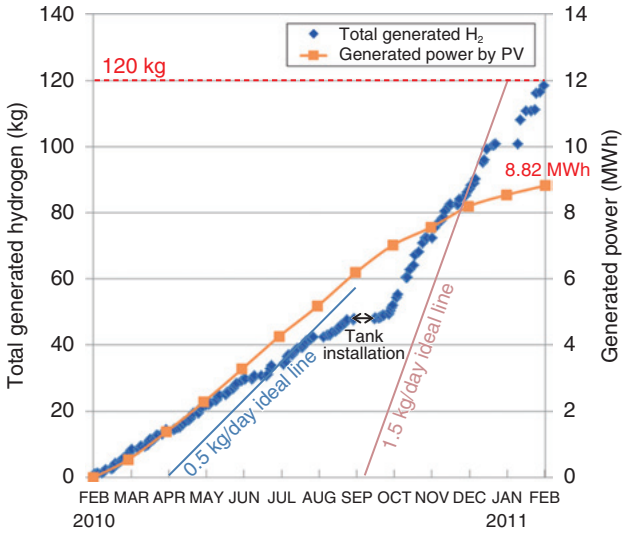


Fig. 10　Total generated hydrogen by SHS2 and power by PV

Table 3　Refueling frequency at public stations

	Current	With SHS2
High	111	52
Mid	101	31
Low	61	2

はじめに，SHS2 の有無の効果をシミュレーションした場合の，日々の自宅出発時における Fuel level の頻度分布と外部充填回数の変化を，それぞれ Fig. 11 および Table 3 に示す．Fig. 11 より当初のターゲットユーザである使用頻度低 (Low：通勤使用を想定) のユーザに関しては，SHS2 を持つことによって，Fuel level を高く保持できるようになり，必要な水素を十分供給できていることがわかる．また Table 3 より，SHS2 なしでは外部充填回数が 61 回のところを，SHS2 を持つことで 2 回まで減らせることがわかる．しかし，頻度高 (High) のユーザに対しては，夜間不在時や長距離の使用も多いため，自宅で水素を十分に供給することができず，SHS2 を保有しているメリットが少ないことがわかる．

次に，SHS2 の保有を前提として，貯蔵タンクの有無の効果をシミュレーションによって検証した．シミュレーションにより得られた Fuel level を Fig. 12 に示し，システム稼働率を Table 4，外部充填回数の変化を Table 5 に示す．ここで，想定した貯蔵タンクの容量は車のタンクと同等とした．Table 4 より，貯蔵タンクを併設することによって，頻度高 (High) のユーザに対してもシステム稼働率を向上させられる．また Fig. 12 より，Fuel level の低い状態をほぼなくすことが可能になり，Table 5 に示す外部充填回数も 52 回から 15 回に減らせることから，貯蔵タンクの追加によって水素が自宅で十分供給でき，ユーザの利便性が向上することがわかる．

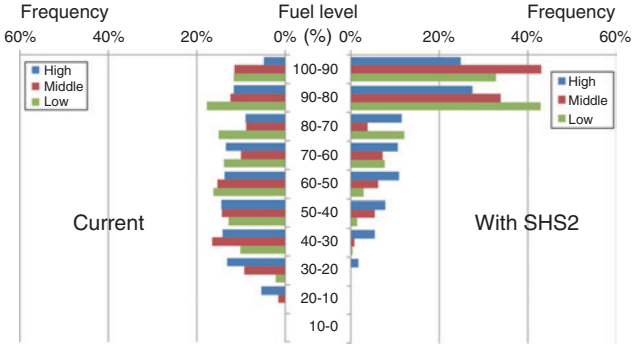


Fig. 11　SHS2 contribution for user

Table 4 System utilization rate

	No tank	With tank
High	32%	79%
Mid	44%	68%
Low	32%	52%

Table 5 Refueling frequency at public stations

	No tank	With tank
High	52	15
Mid	31	26
Low	2	0

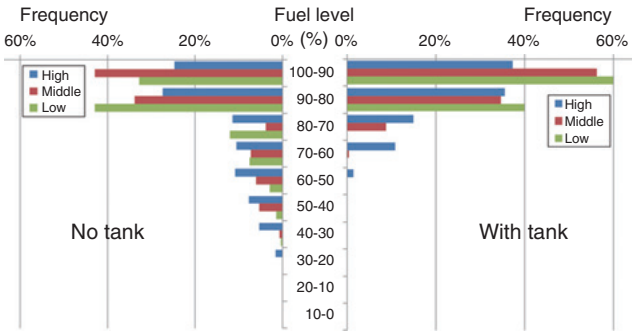


Fig. 12 Storage contribution for user

よってSHS2に貯蔵タンクをオプションとして用意することで，さまざまな使用パターンのユーザのニーズに応えることができると考えられる．

5．結論

差圧式高圧水電解型ソーラー水素ステーションSHS2を開発，設置し，以下の結論を得た．

（1）高圧水電解システムとして約1年間の実証試験を実施し，燃料電池電気自動車への水素供給を継続的におこなうことができた．これにより，システム全体での耐久信頼性が実証できた．

（2）1年間の水素製造量は120 kgであり，製造に必要な電力量は全て太陽電池による発電量で賄えることがわかった．これにより、システムコンセプトを実証することができた．

（3）運用を通じて得られたデータを利用して，仮想の運転モードを設定し，運用シミュレーションをおこなった結果，車載タンクと同等の容量を持つ貯蔵タンクを併設することで多くのユーザの利便性を向上させることができることがわかった．

（4）設置当初の初期性能を測定したところ，システム効率は55.5%であり，水素1 Nm^3 あたり6.38 kWhの電力消費であった．今後膜種の変更やデバイスの効率向上等をおこなうことによって，システム効率を約70%まで向上できる見通しがある．

SHS2については引き続き運用をおこない，長期間に渡る性能および耐久データを蓄積していく計画である．

参考文献

（1）岡部昌規，中沢孝治，樽家憲司，判田圭：太陽電池を使った水素ステーション（SHS）の実証試験，Honda R&D Technical Review, Vol.20, No.1, p.67-73

（2）中沢孝治，長岡久史，武内淳，Frank MOBURG，山下郁也，岡部昌規：差圧式高圧水電解型ソーラー水素ステーション（SHS2）の紹介，Honda R&D Technical Review, Vol.22, No.2, p.28-35

（3）岡部昌規，中沢孝治：ホンダのソーラー水素ステーション（SHS）開発の取り組み，水素エネルギーシステム，Vol.35, No.3, p.22-28(2010)

（4）岡部昌規：差圧式高圧水電解型ソーラー水素ステーション（SHS2）の開発，燃料電池，Vol.11，No.2，p.30-36(2011)

（5）http://www.honda.co.jp/soltec/cigs/index.html, 2012/5/23

（6）針生栄次，中沢孝治，樽家憲司，石川博之，岡部昌規：差圧式高圧水電解セルの構造とその性能評価，Honda R&D Technical Review, Vol.23, No.2, p.90-97

（7）SAE J2719: 2011. Hydrogen Fuel Quality for Fuel Cell Vehicles

（8）ISO/TS 14687-2: 2008. Hydrogen fuel - Product Specification - Part 2: Proton exchange membrane (PEM) fuel cell applications for road vehicles

■著　者■


長岡久史


吉田喜祐


David CUN


山下郁也


岡部昌規

燃料電池システムにおける起動時の劣化抑制制御

Control Method to Reduce Degradation in Fuel Cell System at Start-up

古　澤　宏一朗*　　名　越　健太郎*　　谷　本　　智*
Koichiro FURUSAWA　　Kentaro NAGOSHI　　Satoshi TANIMOTO

要　旨

燃料電池システムにおいて，アノード極は発電中に水素で満たされているが，停止中に外部からの空気の流入によって水素から空気に置換されてしまう．アノード極が空気に満たされた状態から起動をおこなう際に，カソード電極触媒が腐食するという課題があった．

本稿では，起動時に腐食電流を外部回路へ放電することで電極触媒の腐食を防ぐ手法を提案する．制御構築をおこなう際に，燃料電池システムにおいて，電位計測，腐食電流測定，ガス分析などをおこなう新規計測ツールを適用した．これにより燃料電池スタックの内部環境を把握しながら，水素スタベーションを考慮した最適なタイミングでの放電手法を確立することができた．制御構築した起動時ディスチャージを用いて，カソード電極の腐食抑制が可能なことを電位，腐食電流，CO_2 発生量から示し，実機試験において起動耐久をおこなうことで効果を実証した．

ABSTRACT

In the fuel cell system, the anode electrode is supplied with sufficient hydrogen during generation, but when the system is stopped, the inflow of air from the exterior replaces the hydrogen with air. When the system is started with air replacing hydrogen at the anode electrode, corrosion of the catalyst at the cathode electrode occurs.

This paper proposes a method that helps to prevent corrosion of the catalyst by discharging corrosion current to external circuits at start-up. New measurement tools including measurements of electrical potential, corrosion current, and gas analysis were applied to the fuel cell system in developing the control system. Using these tools, the internal environment of the fuel cell stack was clarified, and a method of discharge at the optimal timing with consideration of hydrogen starvation was developed. The ability of the developed start-up discharge method to control corrosion at the cathode electrode was verified by measurements of potential, corrosion current, and quantity of CO_2 generated, and durability tests using an actual fuel cell system confirmed the effectiveness of the system.

1．まえがき

近年，自動車の排気ガスに起因する大気汚染や CO_2 排出による地球温暖化，石油価格の高騰などによるエネルギー問題に対して，脱化石燃料の取り組みが推進されている．これらの課題を解決するため，当社では究極の環境適合車である燃料電池電気自動車の開発をおこなっている．

自動車用燃料電池は固体高分子形燃料電池が一般的である．この電池の特徴として低温で作動可能であり，小型でエネルギー効率が高いことが挙げられる．

Fig. 1 に燃料電池セルの構造を模式的に示す．ガスと冷媒流路を形成するセパレータ，ガスの拡散と生成水の排出を目的としたガス拡散層，触媒反応がおこなわれる触媒層，プロトンを交換する電解質膜（Proton Exchange Membrane：PEM）で構成されている．触媒層は数十 nm の

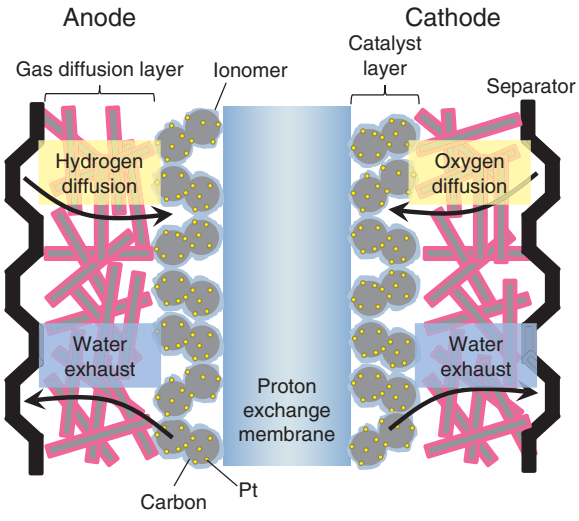


Fig. 1　Schematic of fuel cell

＊四輪 R&D センター

https://doi.org/10.69239/hondatechnicalreview.2012_24_2_12

高比表面積カーボン担体の上に数 nm の白金ナノ粒子が高分散担持されている．

燃料電池における化学反応は，まずアノード極へ供給された水素が触媒上でプロトン（H^+）と電子にわかれ，プロトンは電解質膜を通りカソード極へ移動する．カソード極では供給された酸素がアノード極から外部を通ってきた電子と電解質膜を通ってきたプロトンと結びつき，水を生成する．このときにカソード触媒上で酸素の還元反応が起き，起電力が発生するため，カソード電極触媒が燃料電池の性能に重要な役割を果たす．

またアノード触媒は燃料不足による発電によって劣化（以下，水素スタベーション）するため，発電する際は燃料不足に注意しなくてはいけない．

次に Fig. 2 に燃料電池スタックのガス，冷媒の流れを示す．セパレータ上部よりガスが発電面内へ入り，発電をおこなう．その後，消費されずに残ったガスと生成水がセパレータ下部より排出される．

燃料電池システムが発電停止直後，アノード極に水素，カソード極には空気が存在するが，一定時間を経過すると，系外から空気が流入する．これによりアノード極に空気が流入し，最終的にアノード極は空気に置換されてしまう．このアノード極とカソード極に空気が存在する状態から起動（以下，Air － Air 起動）をおこなうと，アノード極に空気が存在するため，燃料である水素を投入するとアノード電極面内にガスの混在が生じてしまう．また電極面内のガス供給にばらつきが生じるため，Fig. 3 に示すように，流路下流の水素が届きにくい箇所では，アノード電位が下がりにくく，電極面内の電位差によって腐食電流が流れる．またその対極であるカソード極の電位は上昇しやすくなり，カソード電極は 1 V 以上の高電位に曝される[(1)]．

このとき電位が高いカソード下流では式（1）のような反応が起こり，放出された電子が電極面内の電位差により電極面内を通過するため，腐食電流が流れる．この高電位により触媒を担持するカーボンが腐食することや，白金が溶出し触媒の有効表面積が減少することで，発電性能が低下する[(1)]．また電極のカーボンが腐食することにより，電極の保水性が変化することで，触媒層の排水性が低下する．これに伴いガス拡散性が低下し，燃料電池の発電性能が低下することが知られている[(2)]．

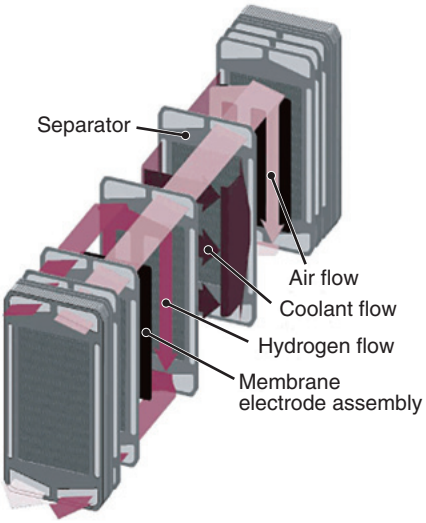


Fig. 2　Fuel cell stack configuration

$$C + 2H_2O \rightarrow CO_2 + 4H^+ + 4e^- \qquad (1)$$

また電位サイクル試験結果からも，電極触媒が高電位に繰り返し曝されることで，カーボン担体の腐食と白金の溶出が確認されている[(3)]．

Air － Air 起動時のカソード電極材料の腐食を低減する手法として，材料的な観点からの対策はいくつか報告されている[(4)]．一般的に白金担持カーボンの腐食耐性をあげるなどの対応がおこなわれている．またシステムの対応としては，アノード極とカソード極ともに閉空間とすることで，空気の流入を防ぐ手法が取られている．

本稿では制御手法の観点から腐食低減手法を考え，起動時ディスチャージの制御手法を提案する．

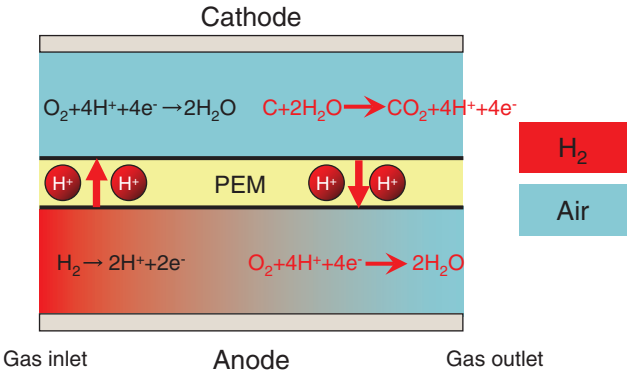


Fig. 3　Model of carbon corrosion at Air-Air start-up

2．電極材料腐食の低減手法

起動時ディスチャージとは，Fig. 4 に示すように起動時にガスを投入する際に，アノード下流で発生する腐食電流を外部回路へ放電させることである．外部回路を通った電子はカソード極へ移動し，通常の燃料電池反応に使われる．これにより流路下流において，式（1）のような反応を抑制する．また放電をおこなうことでセル電圧を低下させ，カソード電位を下げることが可能となり，カソード極が高電位になることを抑制できると考えた．

Fig. 5 に起動時ディスチャージの制御のタイミングチャートを示す．

燃料電池システムの起動開始直後に，アノードには水素，カソードには空気が投入されるが，その時に燃料電池スタックの電圧が上昇していく．従来制御は開放電圧に

なった後に放電を開始するが，起動時ディスチャージは電圧が上昇していく途中で放電をおこなう．このときガスの投入方法は変わらない．放電する方法として，ガス投入と同時に開始する方法（電流制御）と，ある程度，電圧上昇してから開始する方法（電圧制御）の２パターンでテストをおこなった．

起動時ディスチャージの制御を構築する際に注意すべき点は，アノード極の水素置換前に放電をおこなわないことである．Fig. 6 に示すように，アノード極に水素が十分にない状態で放電をおこなうことで，式（1）と同じ反応によって水素スタベーションが起こり，アノード極の電極触媒が腐食してしまう課題がある[5]．アノード極の反応に必要な活性化エネルギーがカソード側に比べ少ないため，一般的にアノード電極の触媒量はカソード電極に比べて少ない．そのためアノード電極触媒の腐食による燃料電池の性能低下への影響度が大きい．

一方，カソード極に酸素が不足している場合では，カソード極の電極触媒の腐食は発生せず，電圧低下のみが起こる．

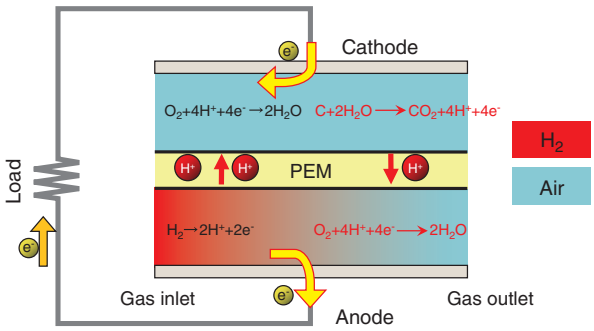


Fig. 4　Model of start-up discharge

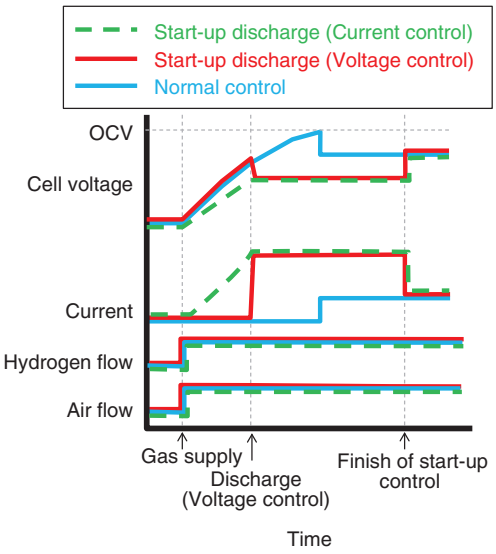


Fig. 5　Timing chart for start-up discharge

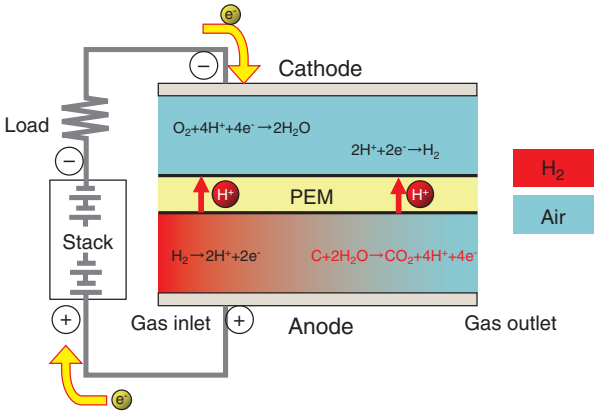


Fig. 6　Model of H_2 starvation

3．計測手法

２章で述べたように起動時ディスチャージ制御をおこなうためには，起動時の燃料電池の内部反応を詳細に把握する必要がある．燃料電池スタックだけの発電設備では，起動等の過渡状態を模擬しにくいので，燃料電池システムでの計測が必要となる．そこで電位と電流密度センサを燃料電池スタックに挟み込み，それを燃料電池システム（燃料電池スタック，ガス供給系，冷却系を含めた発電システム）に搭載して内部環境計測をおこなった．

以下の計測手法を用いて，燃料電池の内部反応の現象解明と制御構築をおこなった．

3.1. 電位計測

効果検証として，アノード極では水素不足発電によってアノード電位が上昇するため，そのような水素不足発電が起こらないかとカソード極の電位上昇が抑えられるかどうかを確認した．

燃料電池の性能を把握するパラメータとしてセル電圧があるが，電圧の挙動だけでは正確に電池内部の反応を把握することができない．セル電圧はカソード極の電位とアノード極の電位差のことであり，この両極の電位を計測することで，正確にそれぞれの電極反応の状態を把握することが可能となる．

そこで当社で開発した小型薄膜電位計測センサ[6]を用いて，電位計測をおこなった．センサの設置イメージを Fig. 7 に示す．この電位センサは自己水素発生型電位セン

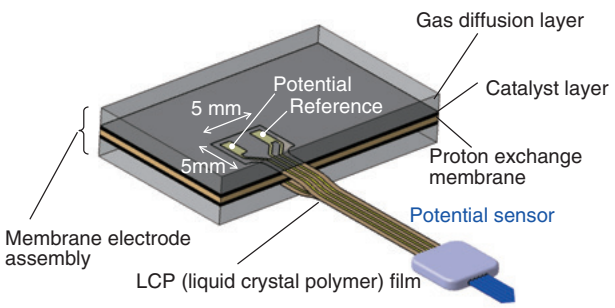


Fig. 7　Configuration of potential sensor

サである．センサの電圧印加部に 1.4 V を印加しアノード極に設置した参照極に水素を発生させる．参照極の電位を基準電位として，アノード電位はアノード極の電位と基準電位，カソード電位はカソード極の電位と基準電位との電位差とした．この方法では，Air － Air 起動のような水素が存在しない面内環境でも電位計測が可能である．

本センサを用いて，起動時のアノード極とカソード極の電位を計測しながら，起動時ディスチャージのタイミングを選定した．

3.2. 腐食電流計測

燃料電池スタック面内に挿入した電流密度センサを用いて，起動時に電極面内に流れる腐食電流を計測した．Fig. 8 に示すようにアノード極に分割した電極を設置し，起動時に発生する酸化還元電流の計測をおこなった．得られた値を積算することで電極面内全体に流れる腐食電流を求めた．起動時にはカソード極のカーボン腐食によって式（1）の現象が起こるため，特に酸化電流に注目して解析をおこなった．

3.3. ガス分析

今回，質量分析計 Hx-07i[7]（能美防災株式会社製）を用いて，起動時の電極材料の腐食によって発生する CO_2 の計測をおこなった．本計測装置は，計測するガスを特定のガス種に絞り込み，かつ吸引ガス量を低減させることで，応答性に優れている．燃料電池の触媒である白金を担持しているカーボンが腐食することで CO_2 へ変化するため，それを計測することでカーボン腐食の定量化をおこなった．

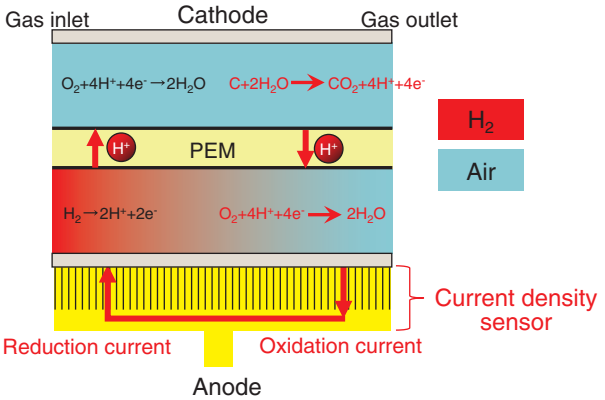


Fig. 8　Current density sensor

4．計測結果

4.1. 起動時ディスチャージ実施前

Air － Air 起動時の面内電位と腐食電流計測をおこなった．その結果を電位は Fig. 9，腐食電流は Fig. 10 に示す．

Fig. 9 の右図は，燃料電池セルを電極面内方向から見た図である．Air － Air 起動では，アノード極，カソード極ともに起動前の電位は 1 V であり，起動時に水素が電極面内に入ってくることで，アノード電位が 0 V へ低下していく．電位計測結果では，ガスの置換が遅いアノード出口付近（位置 4）ではアノード電位が 0 V へ低下しにくいため，その対極のカソード電位が持ち上げられ，高電位に曝されていることがわかる．このように電位変化から，ガスの置換速度や電極材料の腐食状況などが確認できる．

次に Fig. 10 の電極面内の腐食電流の計測結果では，起動直後から，電極面内下流部で酸化電流が多く流れていることがわかる．この結果からも，Air － Air 起動時に燃料電池スタックの流路下流において，カソード電極が高電位に曝されて，カソード電極触媒の腐食が起こるため，腐食電流が流れていることが確認できる．

4.2. 起動時ディスチャージの効果確認

電位，腐食電流，ガス濃度のデータから，起動時ディスチャージの有効性を確認することができた．

以下にそれぞれの制御手法の検討結果を述べる．

4.2.1. 電流制御

まず起動前から燃料電池に負荷抵抗を接続し，ガス投入された直後にディスチャージをおこなえるようにした（電流制御）．このときの起動時ディスチャージをおこなった際の CO_2 測定結果を Fig. 11 に示す．この結果，カソード極の CO_2 は低減できたものの，アノード極での CO_2 の発生が確認された．

これはガスの入るタイミングで，すぐに放電をおこなう

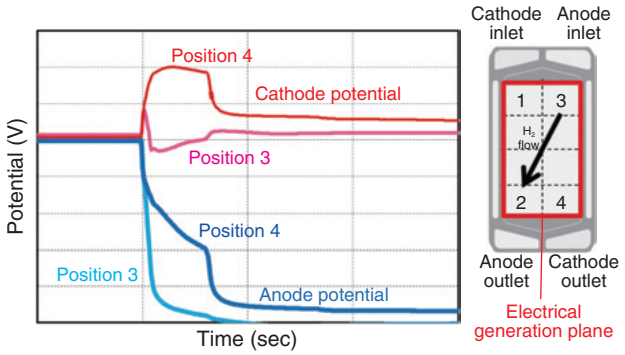


Fig. 9　Potential measurement at start-up

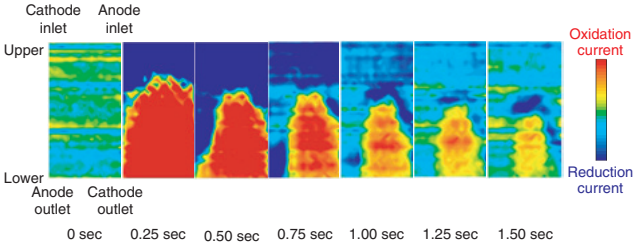


Fig. 10　Comparison of corrosion current

ことで，アノード極の電極面内が十分に水素に置換されておらず，水素の代わりにカーボンや白金等が電子を放出する反応が起こるため，アノード極での CO_2 の発生が多くなることを示している．起動時にカソードで発生する CO_2 に比べ，アノードで発生する CO_2 のほうが燃料電池の性能に与える影響は大きいため，電流制御では劣化抑制に不十分であることがわかった．

またガス分配において，積層方向の影響をうけるため，ガスマニホールドから遠い箇所のセル電圧が転極する．起動直後におこなう起動時ディスチャージでは，カソード電極材料の腐食は抑えられるものの，アノード電極材料の腐食が起きてしまうため，十分な効果が得られないと考えられる．

4.2.2. 電圧制御

次に，起動してから燃料電池が開放電圧に到達する前のタイミングで起動時ディスチャージをおこない（電圧制御），そのときの電位，腐食電流，CO_2 発生量を計測した．

電位が一番上昇しやすいカソード出口近傍の電位挙動を Fig. 12 に示す．起動時ディスチャージによって，カソード極の電位のピーク値は十分に抑制できなかったが，高電位暴露時間は削減することができた．これによりカソード高電位に曝されている間は腐食電流が流れ続け，カソード電位を抑制したところでの腐食電流の低減が可能となっていると考えられる．またアノード電位の上昇が見られないことから，起動時ディスチャージによる水素スタベーションが起きておらず，アノード極の触媒劣化を抑制できていることが確認できた．

次に Fig. 13 (a) は通常起動，(b) は起動時ディスチャージ（電圧制御）をおこなった際の電極面内の腐食電流の積算値である．これより起動時ディスチャージをおこなうことで，全体的に酸化電流の値が低下していることがわかる．特に通常起動時ではカソード出口に酸化電流が多く流れているが，起動時ディスチャージ（電圧制御）をおこなうことで，カソード出口の酸化電流を減少させることができた．

次にカソード出口の CO_2 測定結果を Fig. 14 に示す．これより，電流制御より CO_2 発生の抑制幅としては少ないが，カソード極での CO_2 発生量を低減させることができた．CO_2 測定結果からも，本制御の有効性を確認し，カソード電極触媒の腐食が低減できていることが確認できた．

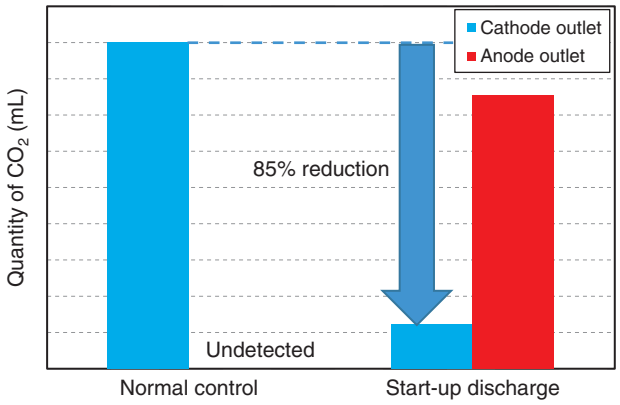


Fig. 11 Quantity of CO_2 at normal control and start-up discharge (Current control)

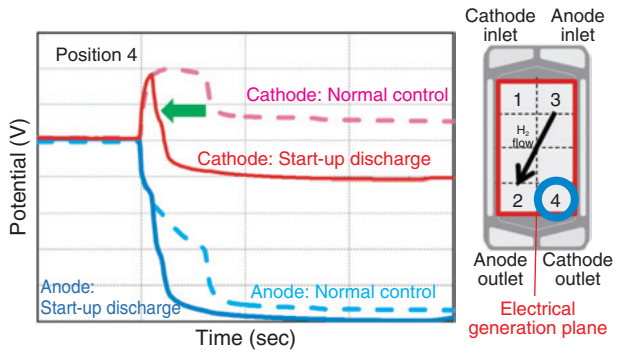


Fig. 12 Potential measurement at start-up with and without start-up discharge (Position 4)

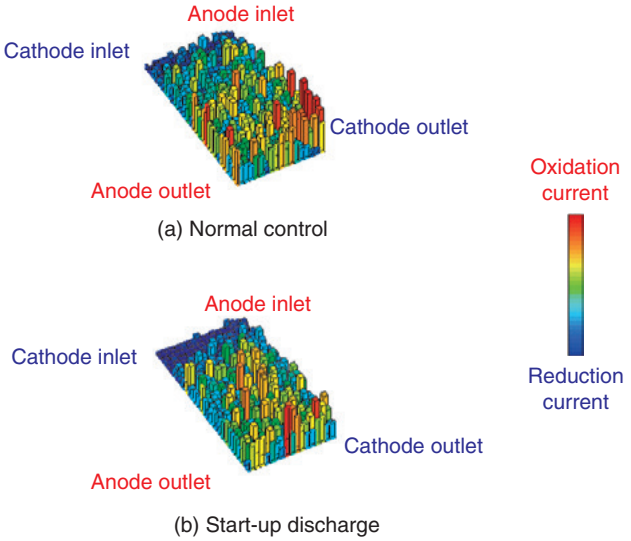


Fig. 13 Comparison of integrated oxidation current for normal control and start-up discharge (Voltage control)

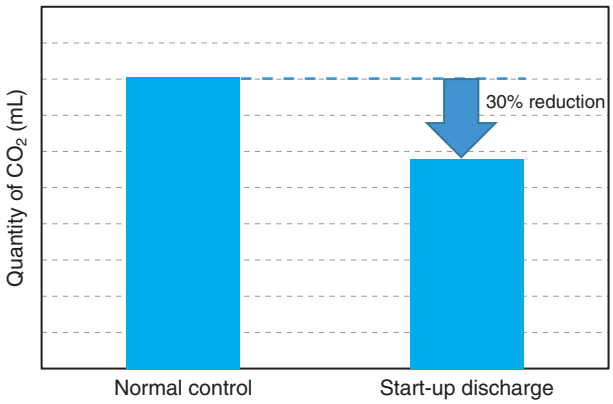


Fig. 14 Quantity of CO_2 at cathode outlet (Voltage control)

5. 実証試験

今回，構築した電圧制御の起動時ディスチャージを実機に適用し，起動耐久テストをおこなった．起動耐久モードはソーク，掃気，Air－Air起動，発電，停止の順におこなった．

Fig. 15は起動時ディスチャージ有り無しの起動停止サイクルをおこない，そのときの性能低下量を一サイクル当たりに換算した値である．

これにより，Air－Air起動時にディスチャージの制御を用いることによって，カソード電極腐食によるCO_2発生量の低減，電位抑制，腐食電流低減などの結果だけでなく，これらの複合的な効果である性能低下を半分以下に抑制できていることがわかり，本制御の有効性を確認することができた．

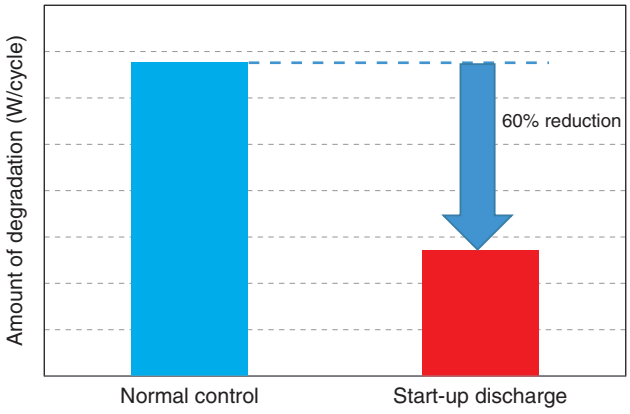


Fig. 15 Amount of degradation for normal control and start-up discharge (Voltage control)

6. まとめ

燃料電池システムにおいて，電位，腐食電流，ガス分析の複合計測をおこない，電極材料の腐食の抑制につながる起動時ディスチャージの制御構築をおこなった．

（1）起動時ディスチャージのタイミングが早い場合（電流制御）には，アノード極の水素スタベーションが発生し，電極腐食対策として十分ではない．

（2）制御構築した起動時ディスチャージ（電圧制御）を用いて，カソード電極の腐食抑制が可能なことを電位，腐食電流，CO_2発生量から示し，実機による実証試験をおこなうことで効果を確認した．

7. あとがき

内部環境を詳細に把握する技術の進歩により本制御の構築が可能となった．今回計測した電位，腐食電流，ガス分析などの環境条件を単セル評価，材料評価などにフィードバックし，さらなる燃料電池セル，材料開発強化へとつなげていく．

今後は，本計測手法を用いて燃料電池システムにおける実際の内部環境を把握しつつ，最適な発電，停止などの制御手法も構築することで燃料電池のさらなる長寿命化に向けた研究をおこなう．

また将来的にはシステム制御を最適におこなうことで，材料の腐食を抑え，より安価な材料への置換をおこない，燃料電池の低コスト化が可能になると考える．

参考文献

（1）Gu, W., Carter, R. N., Yu, P. T., Gasteiger, H. A.: Start/Stop and Local H2 Starvation Mechanisms of Carbon Corrosion: Model vs. Experiment, ECS Transactions., 11(1), p.963-973(2007)

（2）山崎薫，名越健太郎，吉田弘道：燃料電池電気自動車開発の現状と課題，自動車技術会学術講演会前刷集，No.25-10, p.1-4(2010)

（3）Takano, J., Kaji, H., Yoshida, H., Nagoshi, K.: Development of HONDA FCX, EVS24(2009)

（4）Auer, E., Freund, A., Pietsch, J., Tacke, T.: Carbons as supports for industrial precious metal catalysts, Appl. Catal. A. Gen. 173, p.259-271 (1998)

（5）Taniguchi, A., Akita, T., Yasuda, K., Miyazaki, Y.: Analysis of electrocatalyst degradation in PEMFC caused by cell reversal during fuel starvation, Journal of Power Sources, 130, p.42-49(2004)

（6）吉田弘道，小岩信基，佐藤雅彦，鈴木敏文，Honda R&D Technical Review, Vol.21, No.2, p.147-152

（7）能美隆，前川麻弥，茂木俊夫：水素イオンセンサ，水素エネルギーシステム，Vol.33, No.2, p.54-59(2008)

■著　者■


古澤宏一朗


名越健太郎


谷 本　智

水素吸着 MOF の設計およびその吸着特性

Hydrogen Adsorption MOF Design and Adsorption Characteristics

古田照実* Terumi FURUTA
細江光矢* Mitsuya HOSOE
鹿屋出* Izuru KANOYA
酒井洋* Hiroshi SAKAI

要　旨

燃料電池電気自動車に最適な水素吸着材料の設計とその合成を試みた．ここで設計，合成された Cu_2(3,5-Pyridinedicarboxylate)$_2$ 錯体は，物理吸着材料としては極めて大きい体積吸着密度を示した．比表面積が 1,000m^2 g^{-1} 程度であるにもかかわらず，高い吸着性能を示した要因として，単位体積あたりの吸着サイト数の増加，吸着エネルギーの増大，ポア形状に着目した設計が効果的であったと考える．

ABSTRACT

The project discussed in this paper attempted to design and synthesize a hydrogen-adsorbing material suitable for fuel cell electric vehicles. The newly designed and synthesized Cu_2(3,5-pyridinedicarboxylate)$_2$ metal complex displayed an extremely high volumetric uptake density for a physisorption material, despite the fact that its specific surface area was only about 1,000 m^2 g^{-1}. It is believed that the realization of an increased number of adsorption sites per unit area and increased adsorption energy, in addition to the optimized design of pore shapes, were major factors in the achieved uptake performance.

1．まえがき

現在，地球温暖化は人類が早急に解決すべき大きな課題となっている．人間活動の拡大によって大量に排出された CO_2 は地球温暖化の主要因のひとつと考えられており，CO_2 排出の低減が強く求められている．そのため，CO_2 排出を抑制する究極のモビリティとして，燃料電池電気自動車の研究が進んでいる．燃料電池電気自動車は高圧ガスタンク内に貯蔵した水素と，大気中の酸素との化学反応で発電した電気でモータを駆動し，排出されるのは水のみである．しかしながら，水素貯蔵高圧ガスタンクは，大きな容積を占め，タンク重量も重い．そのため車体の小型化，燃費向上へ向けた，水素貯蔵用材料の利用が検討されている．

水素貯蔵用材料は大きく分けて２種類あり，化学吸着による水素吸蔵合金と，物理吸着によるカーボン材料やゼオライトに代表される水素吸着材が検討されてきた．水素吸着材は，吸放出に伴う発熱量が水素吸蔵合金よりも少ないメリットがある．その結果，熱マネージメントシステムの搭載が不要となり，車体の小型軽量化へつながると期待されている．課題は吸着量が少ないことを克服することである．

最近，吸着材として多孔質有機金属錯体（Metal-Organic Framework: MOF）が注目され，多くのガス吸着特性が報告されている[(1),(2)]．MOF とは，金属核とリンカーと呼ばれる有機配位子が組み合わされた巨大分子結晶であり，それらを適切に選択することにより，細孔径，結晶系などを調整でき，その設計自由度の高さが魅力のひとつである．

本研究では，燃料電池電気自動車に最適な水素貯蔵用 MOF を独自に設計，合成し，既存の MOF（IRMOF-1[(3)]）より高い水素吸着性能を達成した結果を報告する．

2．材料の設計

燃料電池電気自動車へ適用する水素吸着材には，航続距離，車載スペース，「水素充填速度と水素放出速度」の観点から，高い重量貯蔵密度（wt%）と体積貯蔵密度（vol%），低い吸着熱（Δ H）の両立が要求される．一般に，吸着量の増加には，水素吸着サイト数を増加させることと，適正な吸着エネルギーを確保することが必要で，MOF においては，リンカーを長くすることによる比表面積の拡大により吸着サイトの増加が図られる．しかしながら長いリンカー

＊基礎技術研究センター

https://doi.org/10.69239/hondatechnicalreview.2012_24_2_13

を用いた場合，比表面積の拡大と同時に過剰なポア（空隙；pore）が導入されるため，体積密度は低下し，水素貯蔵タンクの車載スペースの拡大を招く．従って，体積密度を低下させないために，ポア体積を適正に制御する必要がある．また，我々が行った中性子散乱実験と第一原理動力学計算を用いたIRMOF-1の吸着サイト解析によれば，主要な吸着サイトは金属核周囲であり[4]，金属核を高密度に配置することも要求される．

物理吸着材においては，水素吸着エネルギー（吸着熱）を大きくすることで多くの水素を貯蔵することが可能となるが，一方で水素貯蔵の際に多量の熱が発生し充填速度が低下する．ガソリン自動車と同様な時間で水素を充填するには，水素吸着熱を10kJ mol^{-1} 以下に抑える必要がある．IRMOF-1における水素吸着熱ΔHは，4.8kJ mol^{-1} であり[13]，吸着エネルギーのより大きなMOFを設計することで，吸着量の増加が期待される．よって，吸着エネルギーを増大する手法を検討した．リンカーに関しては，N，FまたはClなどの電気陰性度の大きな原子で一部置換したヘテロ環リンカーの利用により，吸着力が増大することが知られている．このことは，Fig. 1に示した，密度汎関数法（Density Functional Theory: DFT）[5]による第一原理計算[6]，[18]，[19]によって計算したBenzene dicarboxylate（BDC）リンカー＋金属核モデルにおける水素分子の吸着エネルギーと，吸着サイト周辺の電子密度（静電ポテンシャル）解析結果からも支持される．電子が局在化する個所で水素吸着エネルギーが大きくなる傾向が予測され，水素吸着エネルギー増大のために，電気陰性度の大きな原子を配置することが有力な手段となる．金属核においては，原子の実質占有体積の縮小と吸着エネルギーの増大が求められる．配位数が比較的少なく，金属核原子の占有体積をより小さくでき，金属の表面露出による高吸着エネルギーサイトの形成が可能であることから，パドルホイール（Paddle wheel）[15]と呼ばれる二核構造が有力候補となる．DFTによる第一原理計算[6]，[18]，[19]によって計算した二核構造の水素吸着エネルギーによれば，第2周期から第4周期までの金属元素を用いた場合，そのほとんどが10-12kJ mol^{-1} となり，元素種による吸着エネルギーの大きな差は確認されなかった（Table 1）．そのため，二核構造をとる有機金属錯体として多くの合成実績を持つ[17]Cuを金属元素として選択した．

フレームワーク（骨格）の構成では，金属核の高密度化と連通細孔空間の形成の両立が必要となる．また，パドルホイール構造[15]によって形成される金属露出サイト（Cap site）を潰さない配置も要求される．そこで，三角形と六角形空孔を組み合わせたモノレイヤーをオフセットして積層することによりCap siteを維持しつつ，三角形サイトを連通孔として維持できるようにした．

パドルホイール[15]はリンカーとの結合角が90度となっており，結合角が60度である三角形フレーム構造を実現するためには不安定な状態の維持が要求される．そこで，パドルホイールを垂直配置から傾けることで，結合角のひずみを最低限とする構造を考案した．これを実現するリンカーには屈曲型のものを用いる．

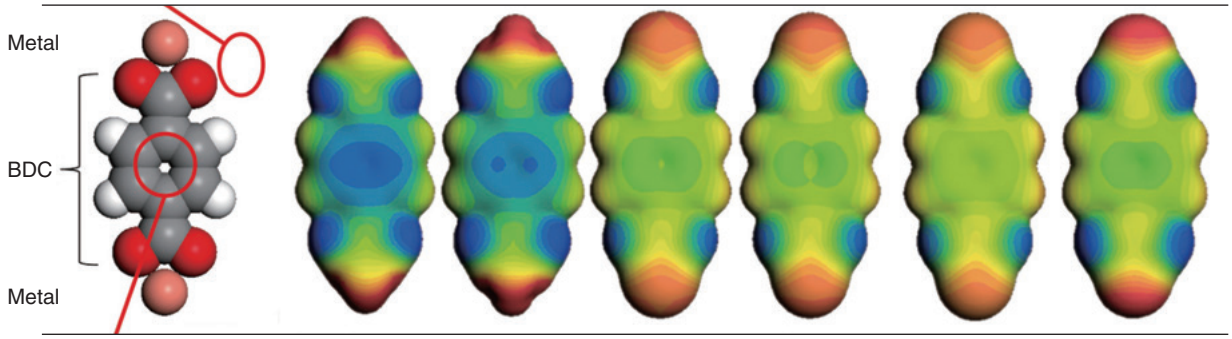
また，MOFの細孔径サイズは，吸着力と水素分子の移動性の両立の観点から適正化し，水素分子径の約2倍とした．

このように，車載に特化したMOF型水素吸着材料を設計するには特徴的な以下の指針があると考える．

（1）水素吸着量を増加させるために，単位重量当たりの比表面積の拡大のみに注目するのではなく，水素の吸着サイト密度を可能な限り増大させる．

（2）骨格を構成する原子そのものが作る占有空間（死容積）を可能な限り低減する．

Metal	Ti	Cr	Mn	Fe	Co	Cu
Adsorption energy at Oxygen-site (kJ mol^{-1})	-8.5	-8.9	-9.1	-9.2	-9.3	-10.7



Adsorption energy at Benzene-site (kJ mol^{-1})	-9.5	-9.2	-9.1	-9.0	-8.9	-9.0

Fig. 1 Electrostatic potential and adsorption energy

* Calculated with VASP-LDA-PAW. ** The red areas correspond to positively charged areas and blue areas to negatively charged areas in the electrostatic potential map. The adsorption energy tends to be larger when there is greater negative charge, or where the electrons are localized.

Table 1　Adsorption energy of paddle wheel

Core atom	Adsorption energy (kJ mol^{-1})	Core atom	Adsorption energy (kJ mol^{-1})	Core atom	Adsorption energy (kJ mol^{-1})
Li	−11.3	V	−11.0	Zr	−11.7
Be	−10.2	Cr	−11.0	Nb	−11.7
B	–	Mn	−11.0	Mo	−10.9
Na	−11.3	Fe	−11.3	Rh	−11.4
Mg	−10.7	Co	−9.7	Pd	−11.3
Al	−12.2	Ni	−11.2	Cd	–
K	–	Cu	−11.3	La	–
Ca	−10.5	Zn	−10.9	Ce	–
Sc	−10.3	Ga	–	Pt	−12.0
Ti	−9.4	Y	−10.2		

*[-] Does not form paddle wheel structure.　** Value calculated with VASP-LDA-PAW.

（3）水素吸着力の増大のために，電子局在性を強めるヘテロ環，電気陰性度の大きな原子を導入する．

（4）水素が十分に移動可能な空間を確保し，死容積となるポアの低減と拡散速度の増大を行う．

さらに，MOF の設計自由度を生かしつつ，実験的に合成可能であることなどを総合的に考慮し，Cu_2(3,5-Pyridinedicarboxylate)$_2$(Cu_2PDC_2) を設計，提案した．その構造を Fig. 2 (a) に示す．

この構造は，リンカー自身が屈曲し，電子の局在化を形成させる N 含有リンカーである 3,5-Pyridinedicarboxylate (PDC) と Cu との結合による基本骨格〔Fig. 2 (b)〕から形成されている．この基本骨格が平面的に結合することで約 6Å と約 11Å の 2 種類のポアを有する 2 次元シートを形成し〔Fig. 3 (a)〕，Cu と一部の PDC の N が結合することで ABAB スタックとなる 3 次元構造を構築している〔Fig. 3 (b)〕．空間群は $P6_3mc$ となっている．このABAB スタック

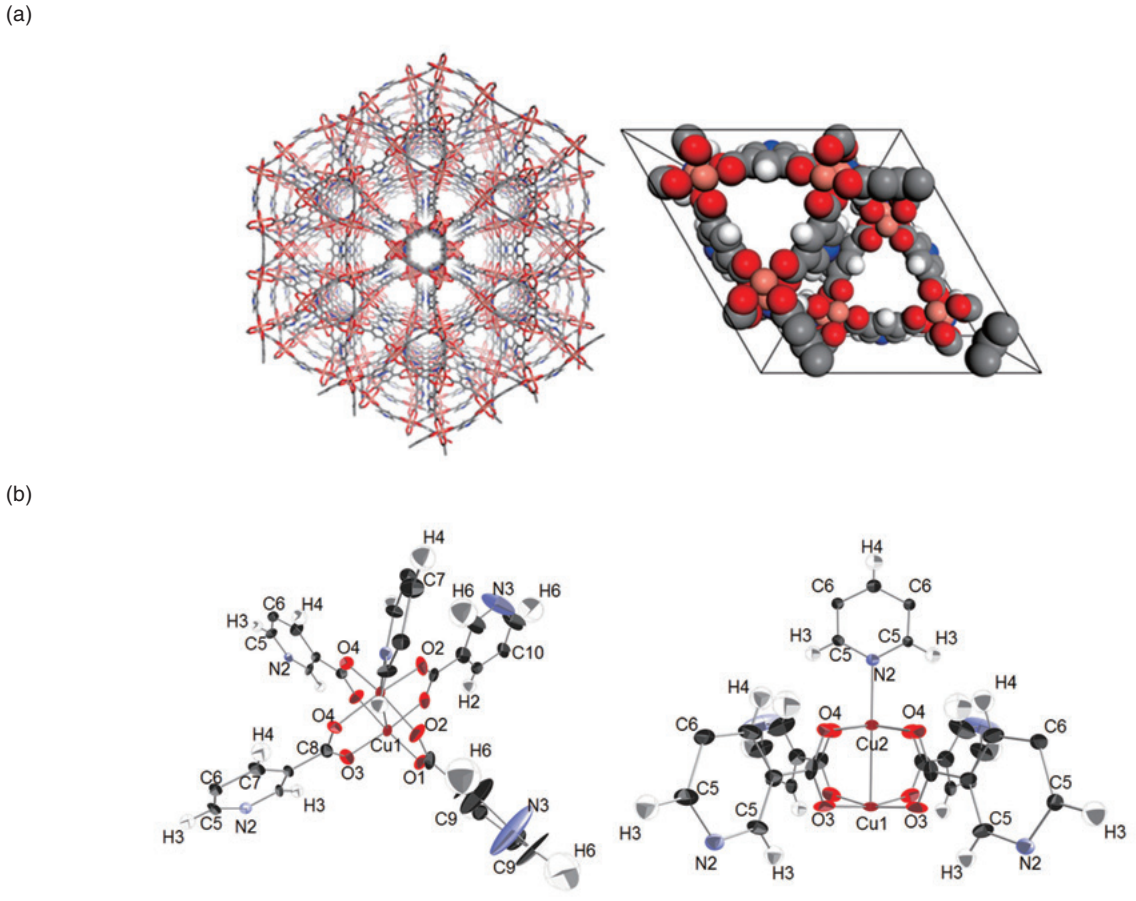


Fig. 2　(a) Overall view of Cu_2PDC_2 (left) and the unit cell (right). The space group is $P6_3mc$ (blue: nitrogen; red: oxygen; gray: carbon; orange: copper); (b) The structure of Cu_2PDC_2. The two figures are the same structure from different angles.

Table 2 The calculated and experimentally measured density of adsorption sites, pore ratio, and adsorption energy in Cu_2PDC_2 and IRMOF-1

	Density of adsorption site (nm^{-3})	Pore ratio ($cc\ cc^{-1}$)		Adsorption energy ($kJ\ mol^{-1}$)	
	Calc.	Calc.	Exp.	Calc.	Exp.
IRMOF-1	3.8	0.77	0.86	-9.4	-4.8
Cu_2PDC_2	8.9	0.50	0.46	-16.5	-6.0

はc軸を中心に60°ねじれた状態で重なっており，Fig. 3 (a) のAに示す，ポア径が6Å-11Åに連続的に変化するポアと，Bに示すポア径6Åの連通ポアをそれぞれ形成している〔Fig. 3 (a) 右図〕.

Table 2に，Cu_2PDC_2の結晶構造から予測される，吸着サイト密度，ポア比率，吸着エネルギーを示す．典型的な吸着サイトについての吸着エネルギーは，DFTによる第一原理計算[6), (18), (19)]によって算出した（DFTによる吸着エネルギーは過大に見積もられる傾向がある[4)]）．吸着サイト密度は，吸着エネルギーの大きい典型的なサイトの数から算出した．ポア比率は，Connoly surfaceから算出される値を採用した（Accelrys製 Materials Studioを使用）．また，比較のため，実験値[13)]も表記した．ポア容積は$0.5 cm^3\ g^{-1}$以下を，単位体積あたりの吸着サイト数はIRMOF-1の2倍を見込んでいる．結晶自体は多孔質ではあるが，緻密な原子配置をとっており，体積あたりのポア占有率は約1/2となっている．加えて，水素吸着エネルギーはIRMOF-1に比較して大きく，総じて，吸着量増加が期待される．

3．設計材料の合成

3.1. 合成条件の検討

提案したCu_2PDC_2錯体を合成するに当たり，(a) 金属核の配位状態と，(b) 金属核と配位子の結合エネルギーに着目した．

(a) 金属核の配位状態と出発材料の選定

Fig. 4に示すように，この錯体はCu原子を金属核に持つパドルホイールという特異な配位状態を有している．よって，Cu塩の中から，同様の構造を有する酢酸銅を出発材料として選択した．リンカーは，PDCの前駆体となる3,5-Pyridinedicarboxylic acid（PDC酸）とした．

錯体合成の反応場となる溶媒には，その中に溶解した酢酸銅のパドルホイール構造を維持する性質が必要となる．これを確認するため，SPring-8[14)]の高輝度X線を用いたCu K-edgeのX線吸収微細構造（X-ray Absorption Fine Structure: XAFS）によって，溶媒中の金属イオンの配位状態を測定[16)]した．溶媒の候補として，錯体合成では一般的な水（H_2O），エタノール（Ethanol: EtOH），ジメチルホルムアミド（Dimethylformamide: DMF），ジエチルホルムアミ

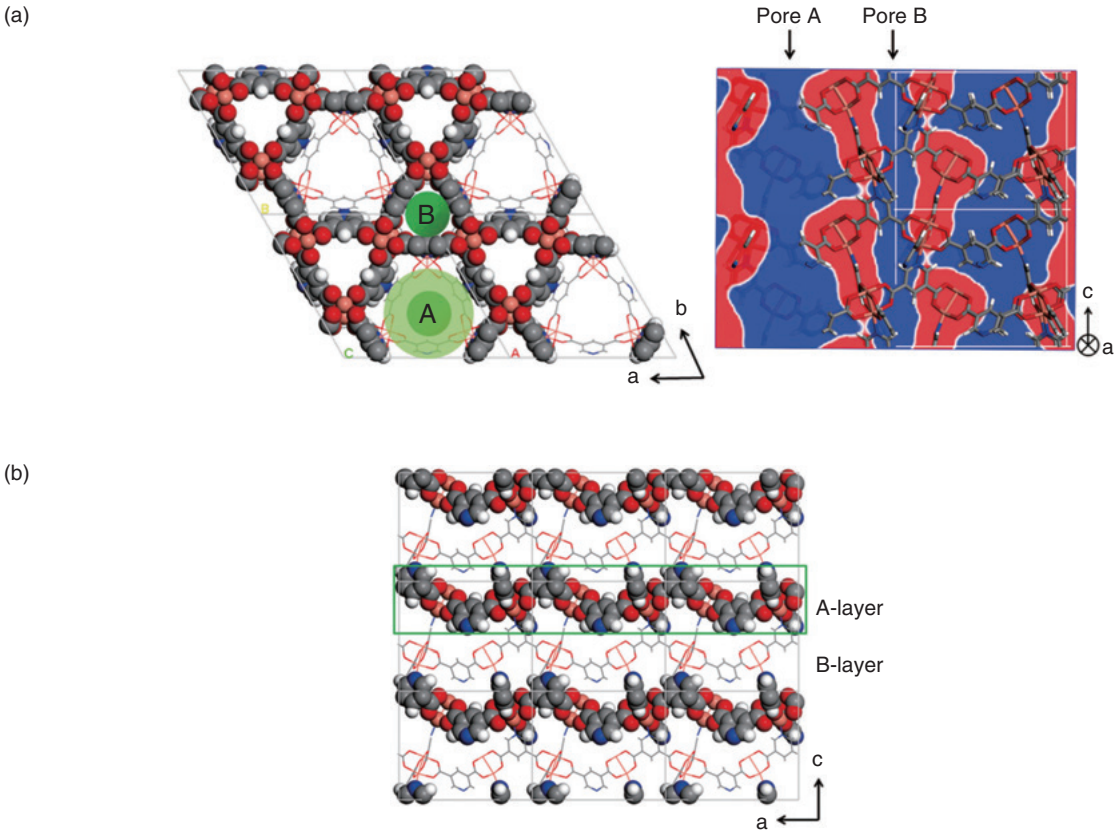


Fig. 3 (a) Pores observed from the c-axis (left) and the a-axis (right). The blue portions indicate pores in the figure to the right. Pore A consists of holes with ϕ = ~11 Å and ϕ = ~6 Å. Pore B is made up of holes with ϕ = ~6 Å; (b) The A-B stacking sequence. The rectangle shows single layer.

ド (Diethylformamide: DEF) を扱った．Fig. 5 に，各溶媒中に溶解させた酢酸銅の XAFS スペクトルを示す．図中赤破線で示した 8,985eV 付近のピークがパドルホイール構造を反映している．水においてこのピークが消失し，パドルホイール構造の崩れが生じた．極性の強い水 (水の比誘電率 80．EtOH，DMF ではその半分程度) では酢酸イオンの配位が保てなくなるためと考えられ，溶媒候補から外した．水以外の溶媒では，パドルホイール構造が維持されており，EtOH，DMF，DEF を合成溶媒として選択した．

合成検討は，選定した出発物質 (酢酸銅と PDC 酸) を候補溶媒中にそれぞれ溶解させ，行った．その結果，Fig. 6 に示すような青色溶液となった．走査型電子顕微鏡 (Scanning Electron Microscope: SEM) 観察によれば，溶液中に析出した沈殿物は，球状の凝集体であった (Fig. 6 右図)．分析の結果，凝集体は Cu_2PDC_2 錯体と同様の組成を持つ非晶質類似物質 (アモルファスライク) であり (Fig. 7 参照)，Cu_2PDC_2 錯体を得ることができなかった．

(b) 金属核と配位子の結合エネルギーに着目した条件の再検討

合成反応条件を見直すために，金属核と配位子の結合エネルギーに着目し，Fig. 8 に示したエネルギーダイアグラムを作成した．

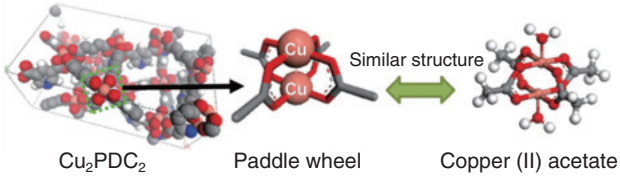


Fig. 4　Structure of Cu_2PDC_2 and coordination state of Cu

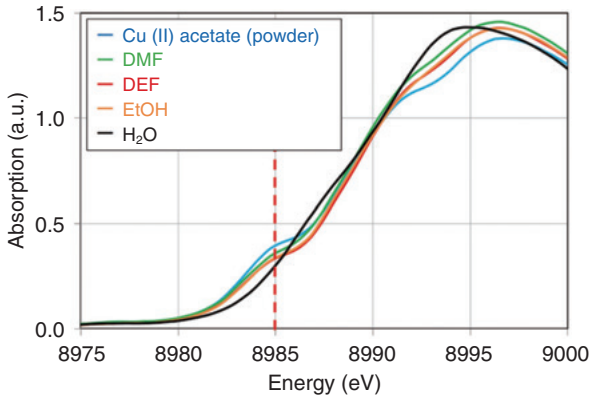


Fig. 5　XAFS spectrums of Cu acetate with solvent

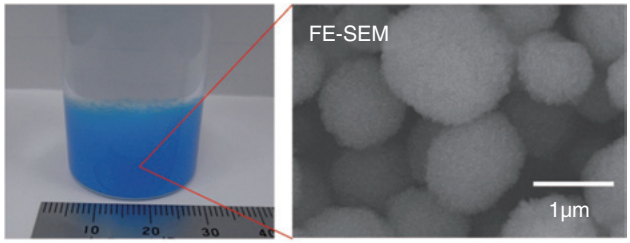


Fig. 6　SEM image of the precipitated aggregate

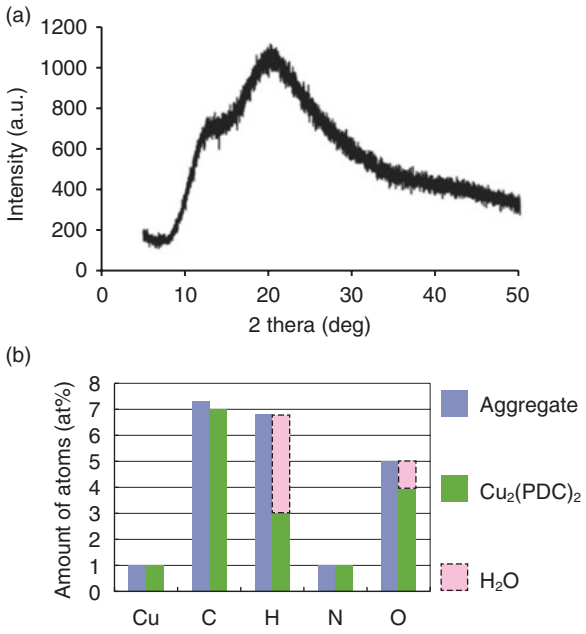


Fig. 7　Analysis results of the precipitated aggregate (a) XPRD spectrum; (b) The results of component analysis.

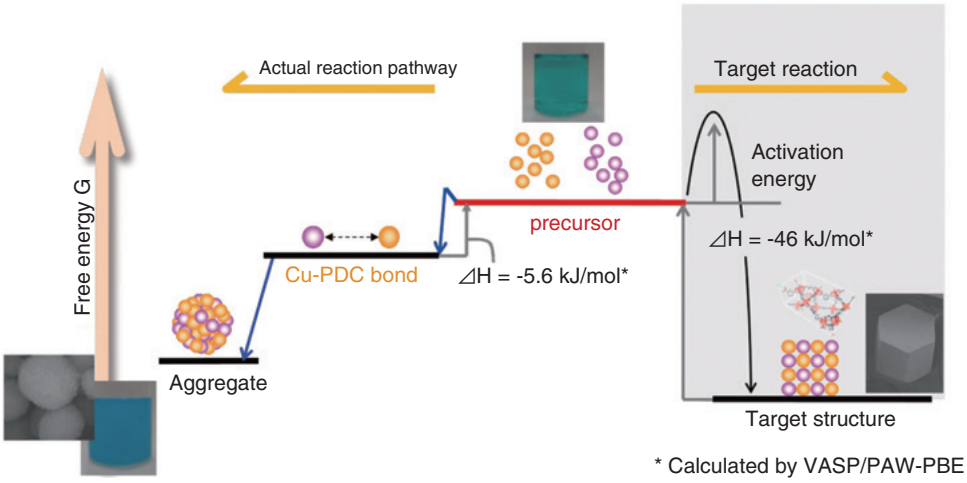


Fig. 8　Reaction pathway and energy diagram of Cu_2PDC_2

DFTに基づく第一原理計算[6),18),19)]により求めた2Cu+2PDC → Cu_2PDC_2(MOF)反応の生成エネルギーΔHは-46kJ mol^{-1}で負の値であり，目標とする合成反応(Fig. 8右への経路)は起こりうると予測された．一方で，CuとPDCの単純な結合エネルギーも(生成エネルギーΔHとして)，-5.6kJ mol^{-1}と負の値であり，CuとPDCの単純な結合が促進される方向(Fig. 8左への経路)にも反応が進み得ると予測された．しかしながら，目標構造であるCu_2PDC_2(MOF)が形成されず，凝集体が形成された事実から，Cu_2PDC_2(MOF)が構築される際の反応活性障壁(Fig. 8右への経路)は，CuとPDCの単純な結合のそれ(Fig. 8左への経路)よりも高いと考えられる．その結果，反応活性障壁の低いCuとPDCの単純な結合反応(Fig. 8左への経路)が優先的かつ速やかに生じ，凝集体を生成したと考えられる．従って，CuとPDCの単純な結合で生じる凝集体の生成を抑制･制御し，目標とするCu_2PDC_2(MOF)の合成反応(Fig. 8右への経路)を促進するための条件検討が必要となる．この反応速度制御には，酸等の助剤を添加する方法がある．金属イオンに対して有機配位子と競争的に反応させることで凝集を解消し，結晶性MOFの合成に成功した例が報告されている[17)]．よって，添加助剤となる酸について，Cu-PDC凝集体を分解(CuとPDCの結合の分離)しかつCuパドルホイール構造を維持し得る観点で検討を行った．

Fig. 9に各種の酸を凝集体に添加した際の溶液の色と，各溶液の紫外･可視分光法(Ultraviolet Visible Absorption Spectroscopy: UV-vis)スペクトルを示す．UV-visスペクトルは，XAFS同様に金属イオンの配位状態を反映したものである．

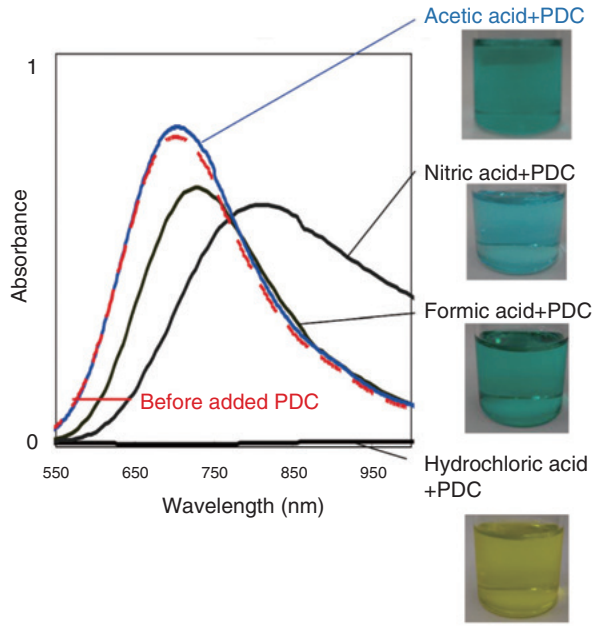


Fig. 9 Pictures and UV-vis spectrums of solution when various acids are added

いずれの酸を添加した場合も溶液が透明に変化し，Cu-PDCの凝集が解消された．また，酢酸において，UV-visスペクトルに変化が見られないことから，Cuパドルホイール構造を維持していることがわかる．このことから，酢酸はCuパドルホイール構造を維持しながらCuとPDCの結合速度を制御できる添加材であるといえる．以上から，Cu_2PDC_2錯体の合成指針を満たす出発材料として酢酸銅，PDC酸，酢酸，反応溶媒としてEtOH，DMF，DEFを選定し，これらの量比，時間，温度を適切に調整することで，Cu_2PDC_2錯体を合成した．

3.2. 合成方法

溶媒に関しては，候補であったEtOHでは結晶が析出せず，DEFでは純度の低い結晶しか得られなかった．そのため，DMFを合成溶媒に用いることとした．提案したCu_2PDC_2錯体の結晶は，バイアル瓶にDMF(N,N-Dimethylformamide; CAS No.68-12-2)9.89ml，酢酸銅一水和物(Copper(II) acetate monohydrate; CAS No.6046-93-1)51.3mg，PDC酸(3,5-Pyridinedicarboxylic acid; CAS No.499-81-0)85.9mgを添加･超音波溶解し，その後，酢酸(Acetic acid; CAS No.64-19-7)0.11mlを添加し，70℃にて一週間保持することにより得られた．この後，ゲスト分子を除去するために，室温にて$CHCl_3$(Trichloromethane; CAS No.67-66-3)への溶媒置換を繰り返し行った．得られた結晶は比較的均質であり，長手方向で100μm弱，横手方向に50μm程度であった．

3.3. 合成材料の分析

合成されたCu_2PDC_2結晶のSEM像をFig. 10に示す．基本骨格の対称性$P6_3mc$を反映した六角柱の結晶である．SPring-8の高輝度X線を用いたX線粉末回折(X-ray Powder Diffraction: XRPD)(Fig. 11)と単結晶構造解析[13)]により，Fig. 2に提案した構造と同一であることを確認した．また，XRPDによる回折ピークと計算によって求めた

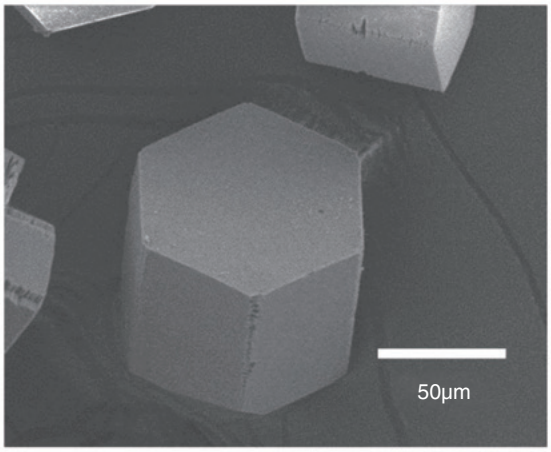


Fig. 10 SEM image of the synthesized Cu_2PDC_2 crystals

理想的な回折ピーク位置はほぼ全て１対１に対応しており〔Fig. 11 (b)〕，合成された Cu_2PDC_2 は高純度であると考えられる．

リートベルト法による構造欠陥解析においても，欠損欠陥が無い完全な構造を想定した場合に一致性が高く，欠損欠陥が非常に少ない結晶であることが示唆された[13]．また，同解析により，XRPD における実測値と計算による回折ピークとの強度の差異は，ポア内に残存する DMF などの残存溶媒に由来するものであることが示された[13]．

Brunauer Emmett Teller 法（BET 法）と Langmuir 法による比表面積はそれぞれ 1,003m^2 g^{-1}，1,033m^2 g^{-1} であった．Horvath-Kawazoe 法[11), (12]による Median ポア径は 8.9Å（Cylinder モデルを適用）であった．結晶構造が多孔質であるため，比表面積は比較的高い値を示すが，既知の高比表面積型 MOF[7)-(10]と比較するとその値は低い．ポア径は，計算上 6Å と 11Å が存在するが，それらの中間的な値を示したものと思われる．（尚，本 Cu_2PDC_2 結晶構造は，新規構造体として The Cambridge Crystallographic Data Centre に登録申請し，CCDC 791274 として登録された．）

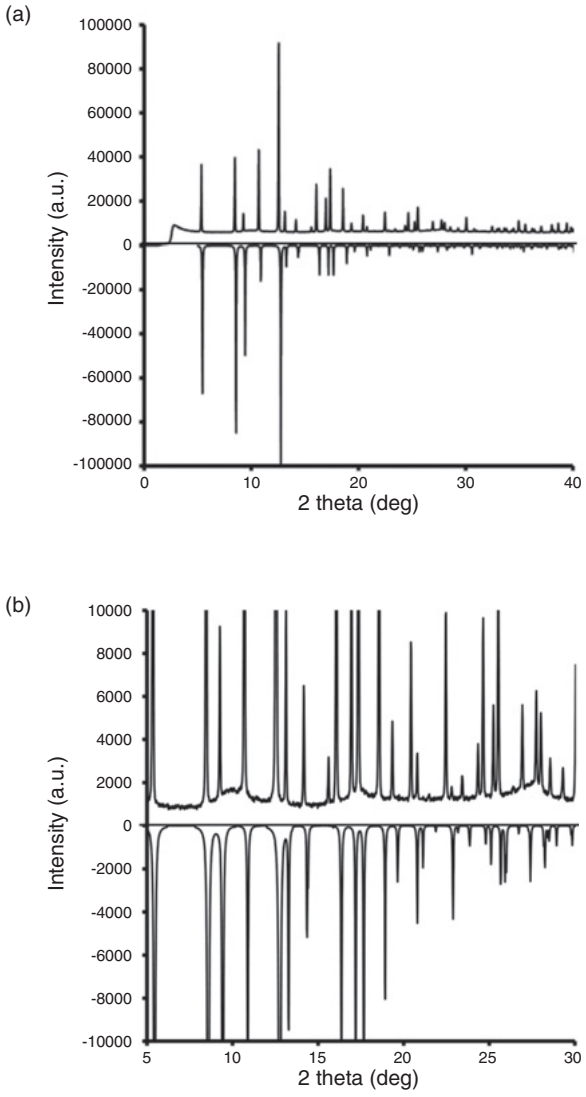


Fig. 11　XPRD spectrum of synthesized Cu_2PDC_2 crystals. (a) (Top) Diffraction pattern measured by SPring-8. (Bottom) Simulated pattern. FWHM = 0.05. λ = 1.54056 Å; (b) Highly magnified image of the low-intensity area of (a). Slight differences in peak positions are caused by differences in the lattice parameters between the actual crystal and a model crystal optimized by an LDA calculation. Measured peaks show a nearly one-to-one correspondence with the simulated peaks.

4．水素貯蔵性能

水素吸着量は PCT（Pressure Composition Temperature）測定装置により測定した．Fig. 12 (a) に 293K における水素吸着量（wt%），Fig. 12 (b) には 293K における結晶単位容積あたりの水素吸着質量（g L^{-1}）を示す．水素の圧力上昇と共に水素吸着量も上昇し，8.92MPa において 0.77wt% の水素吸着量であった〔Fig. 12 (a)〕．IRMOF-1（Fig. 12 破線）よりも高い水素吸着量を示すことは明らかで，我々の

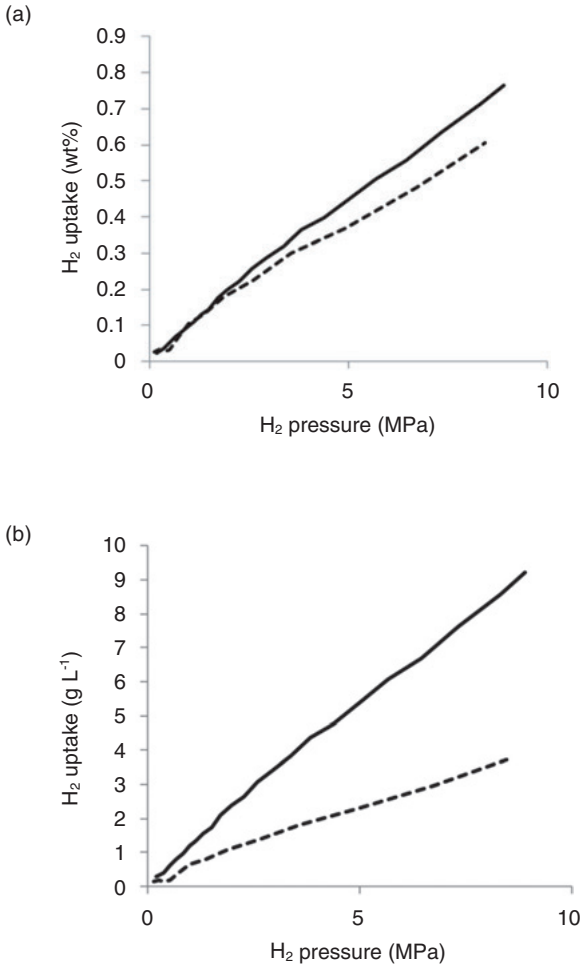


Fig. 12　Hydrogen uptake properties of synthesized Cu_2PDC_2. (a) Gravimetric uptake at 293 K, 10 MPa; (b) Volumetric uptake at 293 K, 10 MPa. Values for IRMOF-1 are shown for comparison (dashed line).

設計指針が正しかったことが示されたものと考える．また，8.92MPaにおける結晶単位容積あたりの水素吸着質量は8.66g L^{-1}と，IRMOF-1の約２倍の値を示した〔Fig. 12 (b)〕．これは物理吸着材料としては極めて高い値である．特に車載用途において，水素吸着体積密度が大きいことはタンクの低容積化に大きく貢献できる．

いくつかの温度における吸着等温線からvan't Hoff plotを用いて算出したCu_2PDC_2吸着エネルギーは6.0kJ mol^{-1}で，IRMOF-1に比べ約1kJ mol^{-1}大きな値を示した（Table 2）．この吸着エネルギー値は，設計当初の予想より小さい値ではあったが，IRMOF-1より大きく定性的な傾向はねらい通りであった．

とりわけ比表面積が1,000m^2 g^{-1}程度であるにもかかわらず，Fig. 12 (b)で示される，Cu_2PDC_2の単位体積あたりの吸着量がIRMOF-1の約２倍を示した要因は，単位体積あたり２倍の吸着サイトを有すること，吸着エネルギーが高いこと，狭いポアと広いポアを効果的に組み合わせたことであると考える．

５．まとめ

本研究では，燃料電池電気自動車に最適な水素吸着材料の設計と，その合成を試みた．ここで設計，合成されたCu_2PDC_2錯体は，比表面積が1,000m^2 g^{-1}程度であるにもかかわらず，最大水素吸着質量8.66g L^{-1}と，IRMOF-1の約２倍の値を示した．その要因としては，単位体積あたりの吸着サイト数の増加，吸着エネルギーの増大，ポア形状に着目した設計が効果的であったと考える．そして，水素貯蔵材料の構造検討と設計には，高度な解析手法によるミクロ･ナノレベルの現実を見る目と，計算科学による物性予測が欠かせないツールであると我々は確信している．

参考文献

（1）Yuan, D., Zhao, D., Sun, D., Zhou, H.: An Isoreticular Series of Metal-Organic Frameworks with Dendritic Hexacarboxylate Ligands and Exceptionally High Gas-Uptake Capacity, Angew. Chem. Int. Ed., 49, p.5357-5361(2010)

（2）Rowsell, J.L.C., Yaghi, O.M.: Strategies for Hydrogen Storage in Metal-Organic Frameworks, Angew. Chem. Int. Ed., 44, p.4670-4679(2005)

（3）Eddaoudi, M., Kim, J., Rosi, N., Vodak, D., Wachter, J., O'Keeffe, M., Yaghi, O.M.: Systematic Design of Pore Size and Functionality in Isoreticular MOFs and Their Application in Methane Storage, Science, 295, p.469-472(2002) and Supporting Information

（4）Kanoya, I., Furuta, T., Sakamoto, R., Hosoe, M., Ichikawa, M., Itoh, K., Fukunaga, T.: Anomalous Aggregation State of Deuterium Molecules in the Nanoscale Pores of a Metal Organic Framework, J. Appl. Phys., 108, p.074310(2010)

（5）Kohn, W., Sham, L.J.: Self-Consistent Equations Including Exchange and Correlation Effects, Phys. Rev. , 140, p.A1133-A1138(1965)

（6）The calculation has been performed using the ab-initio total-energy and molecular dynamics program VASP (Vienna ab-inito simulation program) developed at the Institut fur Material-physik of the Universitat Wien.

（7）Rowsell, J.L.C., Millward, A.R., Park, K.S., Yaghi, O.M.: Hydrogen Sorption in Functionalized Metal-Organic Frameworks, J. Am. Chem. Soc., 126, p.5666-5667(2004)

（8）Rowsell, J.L.C., Yaghi, O.M.: Effects of Functionalization, Catenation, and Variation of the Metal Oxide and Organic Linking Units on the Low-Pressure Hydrogen Adsorption Properties of Metal-Organic Frameworks, J. Am. Chem. Soc., 128, p.1304-1315(2006)

（9）Ferey, G., Mellot-Draznieks, C., Serre, C., Millange, F., Dutour, J., Surble, S., Margiolaki, I.: A Chromium Terephthalate-Based Solid with Unusually Large Pore Volumes and Surface Area, Science, 309, p.2040-2042(2005)

(10) Ma, S., Sun, D., Ambrogio, M., Fillinger, J.A., Parkin, S., Zhou, H.-C.: Framework-Catenation Isomerism in Metal-Organic Frameworks and Its Impact on Hydrogen Uptake, J. Am. Chem. Soc., 129, p.1858-1859(2007)

(11) Horvath, G., Kawazoe, K.: Method for the Calculation of Effective Pore Size Distribution in Molecular Sieve Carbon, J. Chem. Eng. Jpn., 16, p.470-475(1983)

(12) Dombrowski, R.J., Lastoskie, C.M., Hyduke, D.R.: The Horvath-Kawazoe Method Revisited, Colloids Surf., 187-188, p.23-39(2001)

(13) Furuta, T., Kanoya, I., Sakai, H., Hosoe, M.: Design of Improved Metal-Organic Framework (MOF) H_2 Adsorbents, Polymers, 3, p.2133-2141(2011) and Supporting Information

(14) URL: http://www.spring8.or.jp/

(15) Kato, M., Jonassen, H. B., Fanning, J. C.: COPPER (II) COMPLEXES WITH SUBNORMAL MAGNETIC MOMENTS, Chem. Rev., 64, p.99-128(1964)

(16) Dupont, L., Guillon, E., Bouanda, J., Dumonceau, J., Aplincourt, M.: SPECTROSCOPIC STUDY OF

COPPER (II)-WHEAT STRAW CELL WALL RESIDUE SURFACE COMPLEX, Environ. Sci. Technol., 36, p.5062-5066(2002)
(17) 森和亮 , 松永論 : 細孔を持つカルボン酸金属錯体の発見 , Science Journal of Kanagawa University, 20(2), p.271-274(2009)
(18) Kresse, G., Furthmuller, J.: Efficient Iterative Schemes for ab Initio Total-Energy Calculations Using a Plane-Wave Basis Set, Phys. Rev. B, 54, p.11169-11186(1996)
(19) Kresse, G., Joubert, D.: From Ultrasoft Pseudopotentials to the Projector Augmented-Wave Method, Phys. Rev. B, 59, p.1758-1775(1999)

■著　者■


古田照実


細江光矢


鹿屋　出


酒井　洋

エタノール含有燃料に対するサクションフィルタの早期目詰りのメカニズム研究と長寿命フィルタの開発

Analysis of Mechanism of Early Clogging of Suction Filter with Use of Ethanol Blended Fuel and Development of Long-life Filter

荒井進吾* Shingo ARAI
伊藤淳* Atsushi ITO
石井翼* Tsubasa ISHII
安藤秀昭* Hideaki ANDO
木下敬太* Keita KINOSHITA
梅林不二夫* Fujio UMEBAYASHI

要　旨

エタノール含有燃料に対応した長寿命サクションフィルタを開発した．小型二輪車の燃料供給系システムにおいて，サクションフィルタは燃料ポンプやインジェクタ，調圧レギュレータ等の部品を燃料中のダストから保護する機能を担っている．従来のサクションフィルタは，ガソリンと比較して，エタノール 25% 含有ガソリンではフィルタ寿命が 50% 低下することが分かっている．本研究では燃料中のエタノール濃度とダスト分散状態が相関関係を持つことに加え，エタノール含有燃料中で分散状態となったダストが多層構造のサクションフィルタを通過する過程で再凝集し，最も目の細かい最下層に集中捕捉される早期目詰まりのメカニズムを明らかにした．新しく開発した長寿命フィルタはろ過層で生じる流れ場がダスト凝集の原因であることを応用し，上層に流れ場を起こし凝集を促進させる凝集促進層を追加した．これにより，多層フィルタの目の粗い上層部でのダスト捕捉を可能とし，目の細かい最下層への集中捕捉を防ぎ，従来フィルタに対し，寿命を２倍に延ばすことを達成した．

ABSTRACT

The authors have developed a long-life suction filter to cope with fuels containing ethanol. In the fuel system of small motorcycles, the suction filter protects parts such as the fuel pump, injector, pressure regulator, etc. from dusts in the fuel. It is known that in conventional suction filters, when compared with neat gasoline, the filter life is shorter by 50% if it is used with a fuel containing 25% ethanol. In addition to the study on the correlation between the ethanol concentration and the dust dispersion in the fuel, our study has clarified how the early clogging occurs, i.e., the dusts dispersed in the ethanol-containing fuel coagulate again when passing though the multi-layered suction filter, and trapped predominantly by the lower-most layer having the finest mesh-size. Considering that the cause of dust coagulation is the flow field that occurs in the filter layer, the coagulation acceleration layer that accelerates coagulation by creating flow fields, placed in the upper layer, has been added in the newly developed long life filter. The new filter permits trapping of dusts in the coarse upper layer of the multi-layered filter, preventing concentration of trapping in the fine, lower-most layer, thus doubling the filter life when compared to the conventional filter.

1．まえがき

今日，地球環境問題，原油価格の高騰，化石燃料依存脱却等を背景として自動車用のガソリンにエタノールを混合させた燃料の販売が，世界的に拡大しており，今後もエタノール含有ガソリンを主流とする地域が増加する可能性が高まっている．こうした状況の中，小型二輪車の燃料供給系システムにおいて，燃料ポンプの吸引側に設けられたサクションフィルタがエタノール含有燃料によって早期に目詰りしてしまう事象が生じていた．サクションフィルタの目詰りは走行性能の低下に直結する．したがって，エタノール含有燃料使用に対しては予想される短めのフィルタ寿命を基準としてサービス店での定期交換が設定されていた．しかし，顧客の負担軽減の観点から，エタノール含有燃料に対応した長寿命フィルタが求められていた．

そこで本研究では，エタノール含有燃料による早期目詰

＊二輪 R&D センター

https://doi.org/10.69239/hondatechnicalreview.2012_24_2_14

まりのメカニズム解明をおこない，それを元にエタノール含有燃料においても従来のガソリンと同等以上の寿命を持つ，長寿命サクションフィルタを開発することを目的とした．

2．小型二輪車燃料供給系システムの概要

本章では小型二輪車の燃料供給系システムについて説明する．小型二輪車におけるサクションフィルタは，Fig. 1 のように，燃料ポンプやインジェクタ，調圧レギュレータ等の部品を，燃料中のダストによるダメージから保護するために設置している．小型二輪車では，Fig. 2 のように，メインフィルタをコスト削減と小型化の観点から廃止し，吸引側のサクションフィルタのみを設置する構造が主流である．ただし，メインフィルタを持たない構造においてはサクションフィルタの早期目詰まりが懸念となる．

小型二輪の場合，サクションフィルタの目詰りが生じると，フィルタと燃料ポンプ間の圧力損失が大きくなり，走行性能に支障をきたす可能性がある．このため，サクションフィルタにはより多くのダストを捕捉しつつも，早期に目詰まりしない特性が要求される．Fig. 3 に示す通り，サクションフィルタは目の大きさが異なる不織布を重ね合わせることにより，さまざまな粒径のダストを大きさごとに

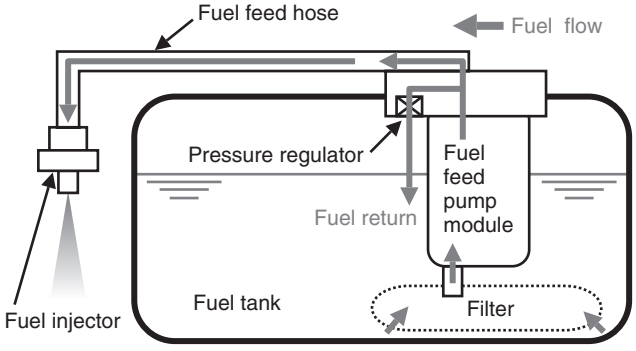


Fig. 1　Structure of fuel supply system on small motorcycles

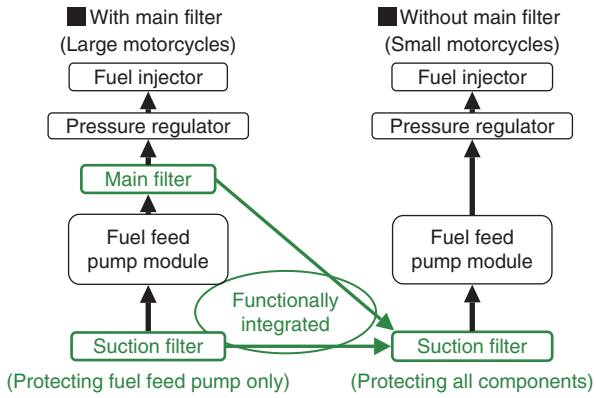


Fig. 2　Schematic diagram of fuel supply system for small motorcycles

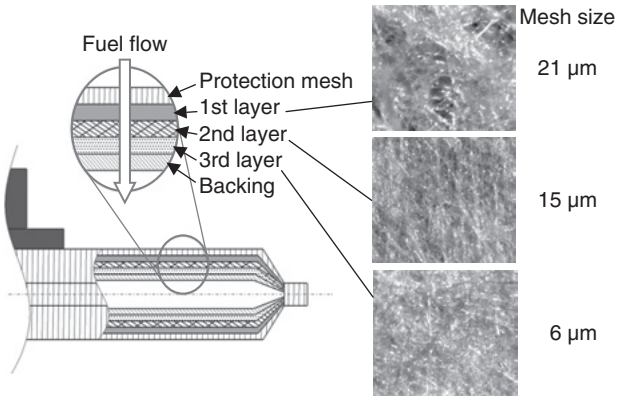


Fig. 3　Typical structure of multi-layered nonwoven fabric filter

各層で立体的に捕捉する構造になっている．なお，以後本稿におけるフィルタという表現は，この多層構造の燃料サクションフィルタを指す．

3．エタノール含有燃料によるサクションフィルタの早期目詰まり事象と課題

Fig. 4 に示すようにガソリン使用下では問題が発生しなかったフィルタが，エタノール 25% 含有ガソリン（以下，E25 と表記する）においては早期に目詰まりし，フィルタ交換距離間隔が半減する事象が確認された．早期目詰りを起こしたフィルタを観察すると Fig. 5 のようになっており，不織布の目が一番細かい（6 μm）層にダストが集中的に捕捉されていることが分かった．ここで我々は，エタノール含有率により，燃料中におけるダストの分散状態に違いがある点に着目した．Fig. 6 には E25 とガソリン中にダストを投入した時の状態を示した．これからわかるように，ガソリン中では，ダストが大きな粒状態で沈殿するのに対し，エタノール燃料中では，ダストは塊にならず，細分化される傾向にあることが確認できる．

以上を踏まえ，エタノール含有燃料中ではダストは分散されやすい特性を持ち，燃料フィルタの一つの層へ集中捕

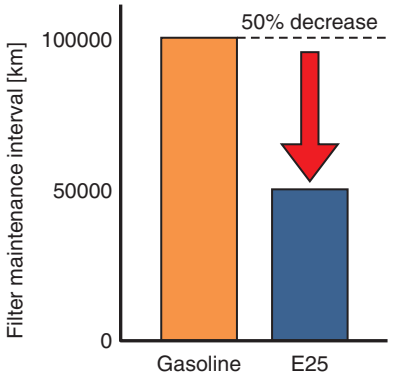


Fig. 4　Filter maintenance interval

捉されることで，早期目詰まりが発生するものと推定し，次に挙げる３点を着眼点とした．

（1）燃料中のエタノール濃度とダスト分散の関係の把握．

（2）燃料中ダストの分散状態がフィルタ目詰まりに与える影響とそのメカニズム解明．

（3）エタノール燃料に対応できる長寿命燃料フィルタの考案．

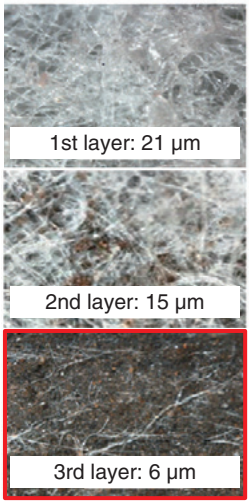


Fig. 5　States of filters in E25

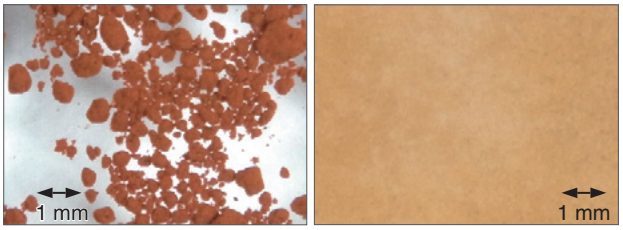


Fig. 6　Comparison of state of dispersion of dust particles in fuel

4．燃料中のエタノール濃度とダスト分散の関係の把握

燃料中ダストの分散と凝集の状態を評価し，メカニズムの解明をおこなうには，分散，凝集状態の数値化が必要とされる．本章では，燃料中ダストの性状と分散評価方法，分散メカニズムについて紹介する．

4.1. 燃料中のダストについて

自動車用燃料中には微細ダストが多く含まれている．そのダスト数は地域によって差異はあるものの，１ ml 中に１ µm 以上の粒子が 40000 から 300000 個含まれている．Fig. 7 に燃料中ダストの累積粒度分布（個数基準，各国平均値）を示す．燃料中のダストの 99% は，フィルタの最小目粗さよりも細かい 5 µm 以下である．10 µm 以下の微小ダストはコロイド分散系と呼ばれる粒子系に分類され，液中では重力や浮力の影響を受けにくく液相に漂う性質を持つ．また，燃料中のダストの 50% から 80% は SiO_2，Fe_2O_3，Al_2O_3 の３成分から成る．これは一般的な土壌の成分であり，風などで舞い上がって流通や給油の過程で燃料内に入り込むと考えられる．

4.2. 燃料中ダストの分散状態

燃料中に含まれるダストの分散状態は，レーザ回折散乱法による粒度分析測定装置で計測できる．同一の試験粉体 JIS8 種を同じ濃度で燃料に混合し，エタノール含有率ごとに計測した結果を Fig. 8 に示す．この計測結果に示す中位径とはダスト分散状態を定義する値であり，ここでは個数基準による計測法を採用している．中位径 D50% が 0.6 であれば溶液中のダスト粒子の 50% は 0.6 µm 以下の径であると定義され，数値が小さいほど分散状態にあると言える．この測定結果により，ガソリン中のエタノール濃度が上がるにつれてダストの中位径は小さくなり，エタノール 100% 中ではガソリンに比べて約 1/4 の中位径になることがわかる．すなわち，燃料中のダストはエタノール濃度が上がるほど分散すると言える．

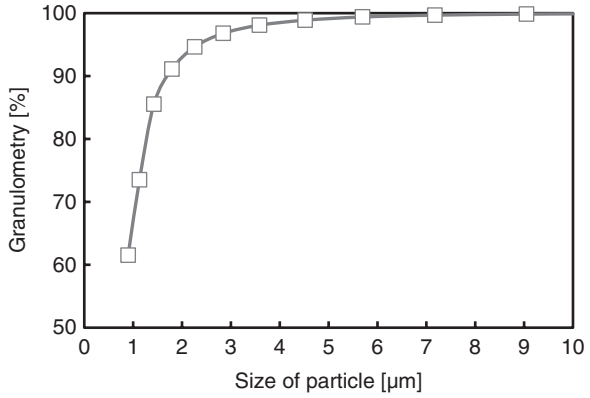


Fig. 7　Cumulative particle size distribution of average dust particles in fuel in major countries (Particle count basis)

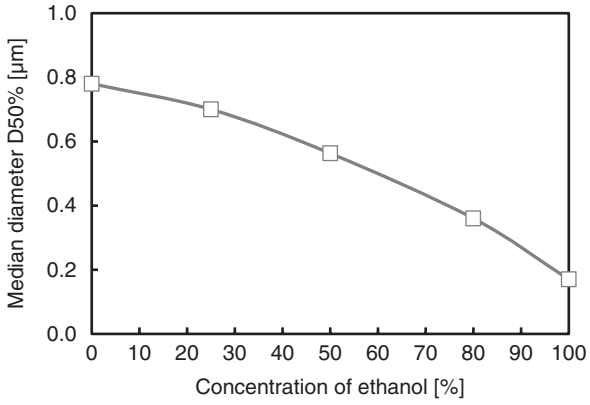


Fig. 8　Ethanol concentration in gasoline and median diameter of dust particles contained in fuel

5. 燃料中ダストの分散状態がフィルタ目詰まりに与える影響とそのメカニズム解明

ダストの分散状態がフィルタ寿命に及ぼす影響を，実機を用いて確認するには，10 万 km 相当の走行テストが必要となるため，フィルタ寿命の試験はフィルタ単体にて実施することが実際的である．ここではフィルタ寿命の評価手法と得られた結果について紹介する．

5.1. 単体試験装置の紹介

今回，用いたフィルタ寿命単体試験装置の概略図を Fig. 9 に示す．図のように試験燃料中にサクションフィルタを浸し，燃料ポンプを駆動させる．そして一定間隔で JIS8 種ダストを試験粉体として投入する．サクションフィルタにダストが詰まっていくとフィルタと燃料ポンプ間の吸入圧力（フィルタ圧力損失）が上昇する．この圧力損失が 30 kPa を越えた時点でのダスト投入量からフィルタ寿命を評価した．以下フィルタ圧力損失を圧損と表記する．

5.2. フィルタ寿命とエタノール濃度との相関

Fig. 9 の試験装置を用いて測定したエタノール濃度別でのフィルタ寿命と，中位径 D50% の結果を合わせると Fig. 10 のようになり燃料中のダストが分散状態であるほど，フィルタ寿命は短くなることが分かった．

また，早期目詰りが発生した E25 で単体テストしたサクションフィルタを分解し，各層のダスト捕捉状態を確認した結果，Fig. 11 のように実機でのフィルタ目詰まり発生時と同様に，ダストが一番目の細かい 6 μm の層に集中補足されていることが分かった．

5 章で述べたようにダストの 99% 以上はフィルタの最小目粗さよりも細かい 5 μm 以下の粒子で構成されている．それにもかかわらず，なぜろ過層を通過可能であるはずの 6 μm の層にダストが集中して捕捉されるのかという疑問に着目した．

フィルタの目よりも小さいダストが捕捉されるメカニズムを解明すべく，最も目の細かい単層（6 μm）のみのフィルタと量産仕様である 3 層の多層構造フィルタを用意し，E25 にてフィルタ寿命テストを実施した．それぞれのフィルタで投入ダスト量に対するフィルタの圧力損失の関係を Fig. 12 に示す．その結果，単層フィルタよりも多層構造フィルタのほうが，フィルタ寿命が短かかった．単層フィ

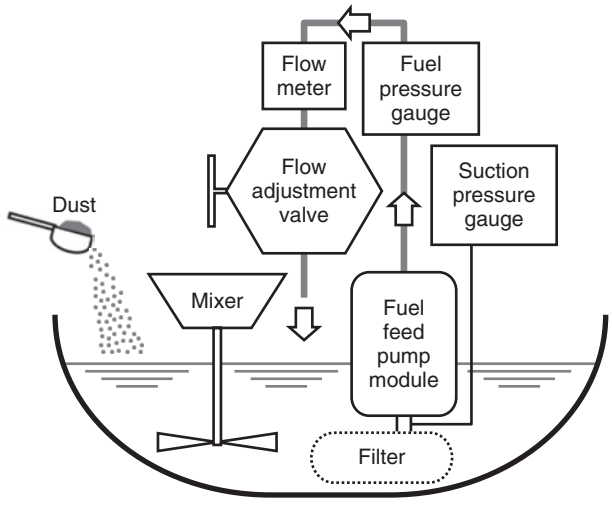


Fig. 9　Schematic view of filter test

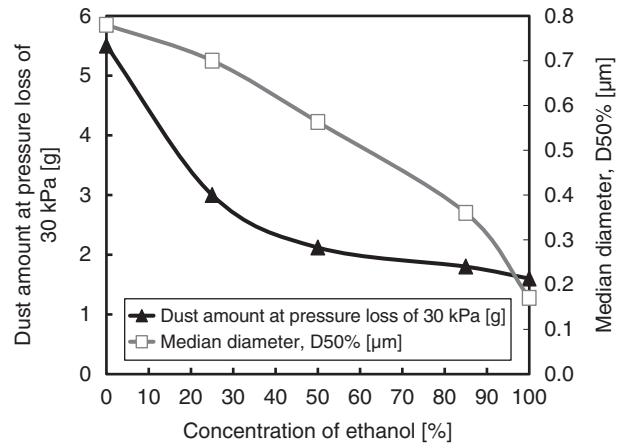


Fig. 10　Relationship between amount of dust particles and median diameter, D50%

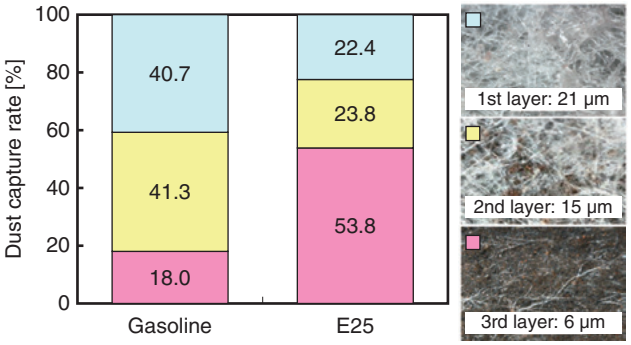


Fig. 11　Comparison of capture efficiency of filter in gasoline and E25

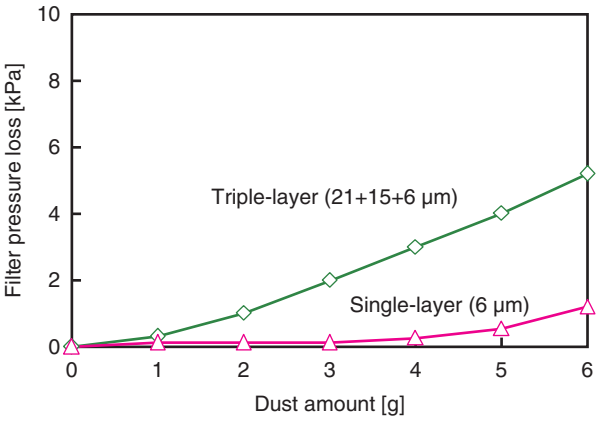


Fig. 12　Pressure loss for different filter structures

ルタの圧損がダスト 6 g 投入しても圧損 1.0 (kPa) 程度しか上がらないのは，燃料中に 90% 以上ある 5 μm 以下のダストがろ過層をすり抜けてしまうためであると考えられる．一方，多層構造では本来すり抜けるはずのダストが捕捉されていた．これはダストが多層構造のろ過層を通過する際に凝集し，目の細かい最下層で集中的に捕捉される事象であると推定した．そこでコロイド分散系である燃料中ダストに作用する力学に着目した．

5.3. 液中コロイド粒子に作用する力

コロイド化学ではコロイド粒子の分散･凝集は粒子間の斥力と引力のバランスで考えるのが一般的である．コロイド粒子を分散させる代表的な力は静電的反発力による斥力である．静電的反発力でコロイド粒子が反発する様子を Fig. 13 に示す．液中のコロイド粒子は表面に帯電することで対イオンが付着し，同符号のイオン層を形成した粒子間に静電的反発力が作用する．

コロイドを凝集させる力としては van der Waals (ファンデルワールス) 力が作用する．van der Waals 力によってコロイド粒子が凝集する様子を Fig. 14 に示す．原子間や分子間と同様，分子の集合体であるコロイド粒子にも van der Waals 力が引力として働き，その大きさは粒子間距離の六乗に反比例する．

静電的反発力 (斥力) を V_R，van der Waals 力 (引力) を V_A とし，これら二つの合力をトータルポテンシャル (V_{total}) と呼ぶこととする．コロイド粒子の分散と凝集はこのトータルポテンシャルによって決まる．これを DLVO (Derjaguin-Landau-Verwey-Overbeek) 理論と呼ぶ[1]．

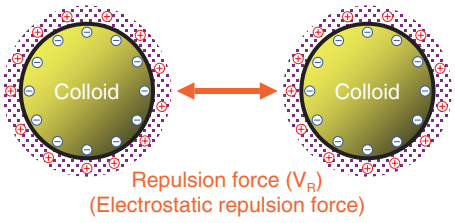


Fig. 13 Schematic representation of electrostatic repulsion force

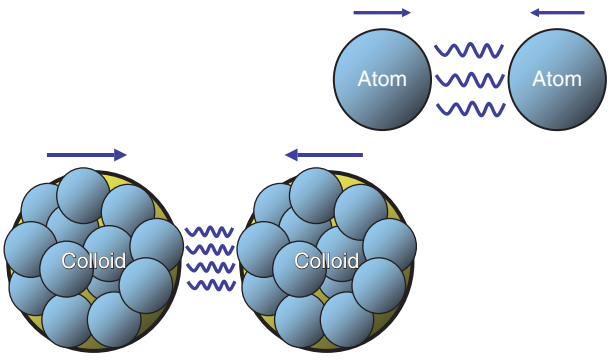


Fig. 14 Schematic representation of van der Waals force

Fig. 15 に粒子間に作用する斥力，引力，V_{total} と粒子間距離との関係を示す．粒子間距離が縮まると，静電的反発力の影響が大きくなり反発しあう．しかし，van der Waals 力は粒子間距離の六乗に反比例する性質を持つため，粒子距離がさらに縮まりおよそ 5 nm 以下になると，V_{total} は引力側に転化するとされる[1]．このことから，粒子の接触･衝突が生じ，粒子間の距離が十分に縮まると，V_{total} が引力となり，粒子の凝集につながる[4]．

5.4. 溶液の極性とコロイド粒子の分散と凝集

静電的反発力は溶液中のイオン濃度に大きく影響を受ける．イオンは水に溶け込む形で存在するため，溶液の極性によってコロイド粒子への作用に違いが生じることが粉体工学で分かっている．

ガソリンは非極性溶媒であり，液中の水分濃度が極めて低い疎水性の溶液である．水分の少ないガソリン中では Fig. 16 のようにコロイド粒子表面に付着するイオンも少なくなる[1]．そのため，静電的反発力は弱くなり，van der Waals 力が支配的となり，コロイド粒子が凝集しやすくなる．

一方，エタノールは極性溶媒で，水とガソリンの両方に混ざり，エタノール分子は水分子を吸着した親水基を軸としてコロイド表面に立って吸着し，層を形成するとされて

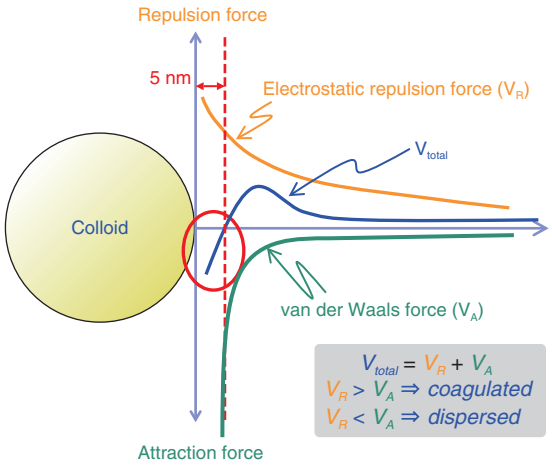


Fig. 15 Interactive action of repulsion and attraction forces and DLVO theory

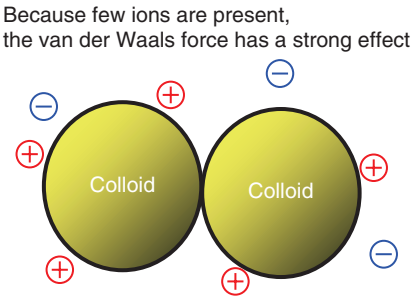


Fig. 16 Mechanism of coagulation in gasoline

いる[2]．その様子を Fig. 17 に示す．このエタノール分子による吸着層自体が斥力を生じる原因となりコロイド粒子同士の凝集を阻むため，分散しやすくなる[2]．それ故に，エタノール濃度が下がれば，コロイド表面に付着するエタノール分子による吸着層の影響が弱くなり，ダスト同士は凝集しやすくなる．

5.5. 多層構造フィルタの目詰り発生のメカニズム

DLVO 理論によると，分散していたダストを凝集させるには粒子同士の距離を近づかせる必要がある．液中でダストの距離を近づけさせるには，流速に速度勾配が発生する流れ場が必要である．流れ場の発生は円筒のような単純な形状の中の流れにおいても確認できる．円筒内の流速は円筒壁面と中心で異なるために速度勾配のある不均一な流れ場となる．この流れ場によって速度の異なるダスト同士の距離が近づくことで液中コロイドの凝集作用が働く[4]．Fig. 18 にその様子を図示する．同様に，不織布で構成されるフィルタろ過層においても，Fig. 19 に示すように，不均一な流れ場がいたるところで発生する．このことから，ダストはフィルタ繊維を通り抜ける過程で衝突を繰り返し，凝集が進むと推定される．

ガソリンおよび E25 燃料でのフィルタにダストが捕捉される様子を Fig. 20 にイメージ図として示す．ガソリンにおいては燃料中のダストはある程度凝集した状態にあり，目の粗い上層でも捕捉される．そのため，ダストの大きさごとに各層で立体的に捕捉できるため，特定の層にダストが集中することなく，多層構造を有効に使える．一方，E25 では分散状態のダストがフィルタを通過する過程でフィルタ内部の流れ場によって，凝集しながらろ過層を移動し，結果として最下層の最も目の細かい層に集中捕捉される．これがガソリンとエタノール含有燃料でフィルタ寿命に差が生じる原因である．

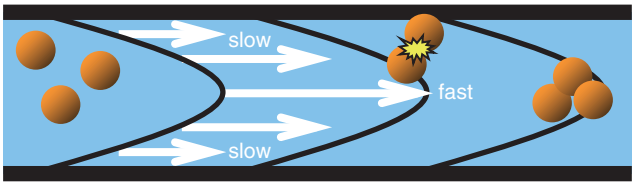


Fig. 18　Schematic representation of flow fields in cylinder

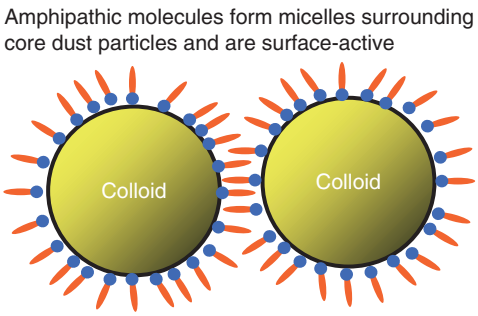


Fig. 17　Mechanism of dispersion in ethanol blended fuel

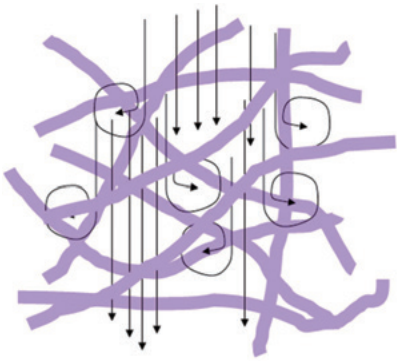


Fig. 19　Schematic representation of flow fields in suction filter

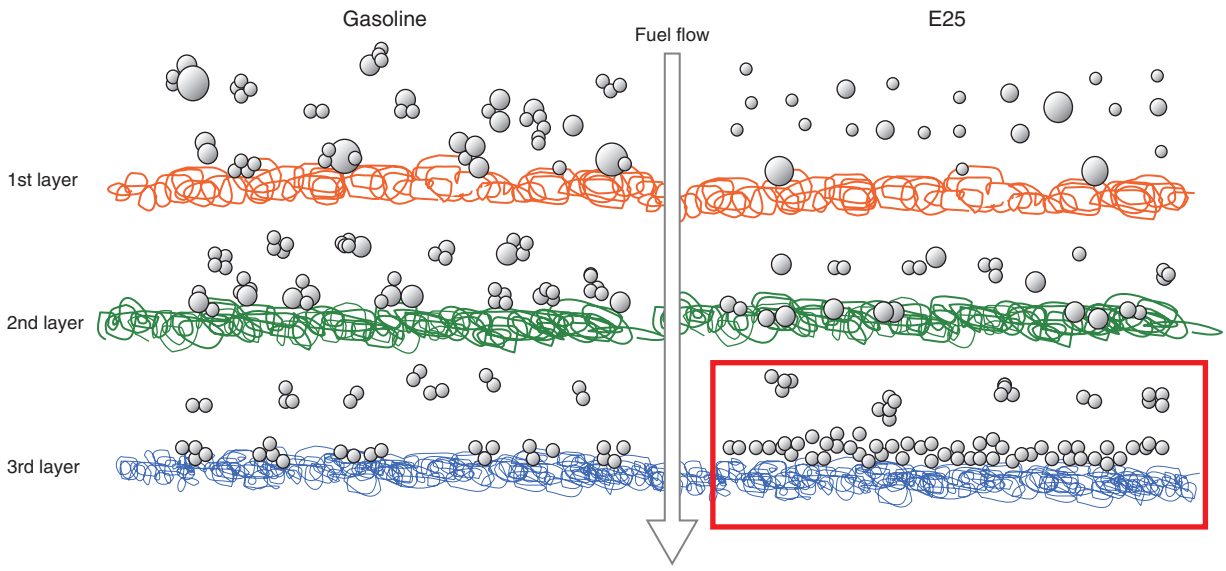


Fig. 20　Schematic representation of dust capture by the filter

以上より，エタノール含有燃料で早期に詰りが生じるプロセスは以下の３要素にまとめられる．
（1）燃料中でダストが分散状態にある．
（2）ダストがフィルタを通過する過程で凝集する．
（3）目の細かい最下層に集中する．

6．エタノール燃料に対応できる長寿命化フィルタの考案

6.1. 凝集促進層の考案

フィルタ寿命の低下の原因は目の細かい最下層へのダスト集中であり，それより上層のフィルタを有効に活用できないことにある．そこでフィルタを通過する過程でダストが凝集するというメカニズムを積極的に応用するために，フィルタの上層に海綿状の層を追加した．この層はダストがろ過層に達する前に凝集をある程度促進させることがねらいである．その働きを示したイメージ図を Fig. 21 に示す．ここでは，この層を凝集促進層と呼ぶこととし，この層を追加することにより既存のフィルタ構成を大きく変更することなく，寿命向上することをねらった．

6.2. 凝集促進層の仕様決定

凝集促進層のねらいは流れ場を生み出すことで，分散状態にあるダストを衝突させ，凝集させることである．それ故に，凝集促進層自体はダストの捕捉を目的としない．凝集促進層のイメージ図を Fig. 22 に示す．促進層の孔は流れ場を生み出し，この孔径の違いは流れ場の強弱に，凝集促進層の厚さはダストの流れ場滞留時間に影響を与える．

寿命向上効果が最大となる仕様を選定するにあたり，厚さと孔径という二つのパラメータを考慮し，ダストが促進層を通過するまでに通り抜ける不織布の平均穴数はいくつになるかという観点から凝集効果を評価した．ここで促進層の厚さを平均孔径で割ったものを通過孔数として定義する．

この通過孔数を指標として凝集促進構造の最適仕様を検討した結果を Fig. 23 に示す．通過孔数と圧力損失 30 kPa に達するダスト量の関係から，通過孔数 30 前後が最も効果が大きいことが分かる．

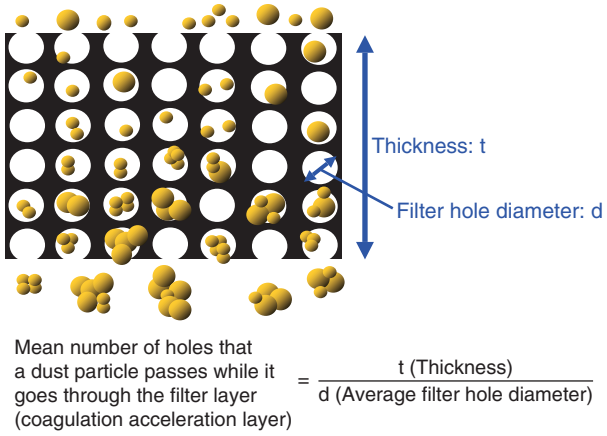


Fig. 22 Schematic representation of coagulation acceleration layer

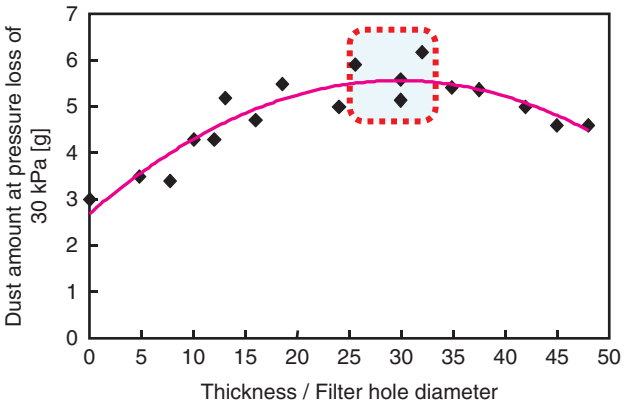


Fig. 23 Relationship between conditional parameters of coagulation acceleration layer and dust amount at predetermined pressure loss

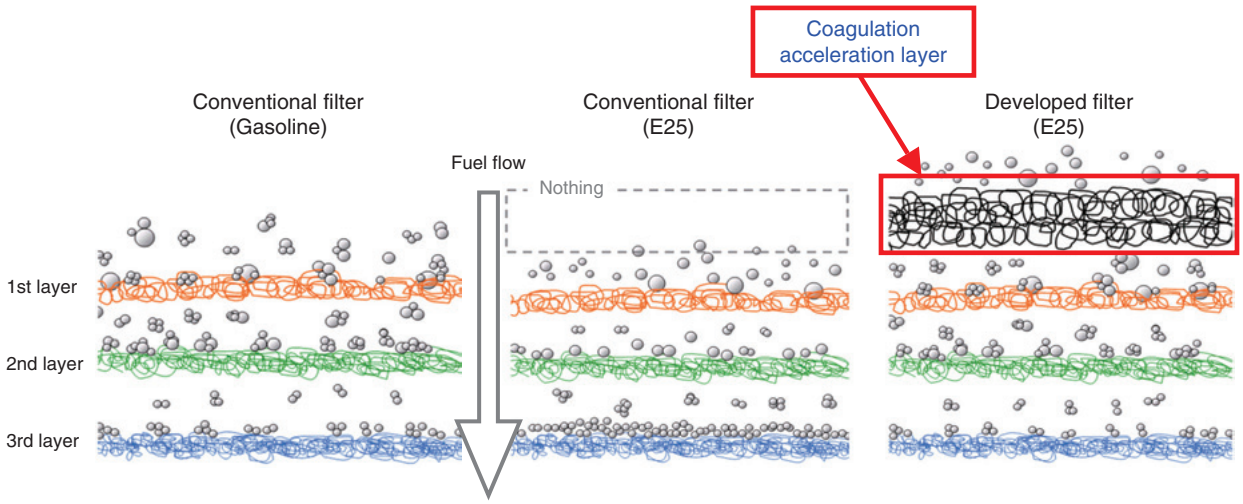


Fig. 21 Schematic representation of effect of coagulation acceleration layer

7．効果の確認

Fig. 23 の試験結果を踏まえ，通過穴数を 30 個とした凝集促進層を付与した新型フィルタを開発した (Fig. 26)．さらに E25 燃料にて従来仕様のフィルタとフィルタ寿命比較を実施した．確認の結果を Fig. 24 に示す．新型フィルタは表面積を大きくすることなく従来フィルタの 2 倍の寿命向上を達成した．ろ過層別のダスト捕捉割合も Fig. 25 に示すとおり最下層に集中することなく，ガソリン同等の捕捉割合を達成することができた．

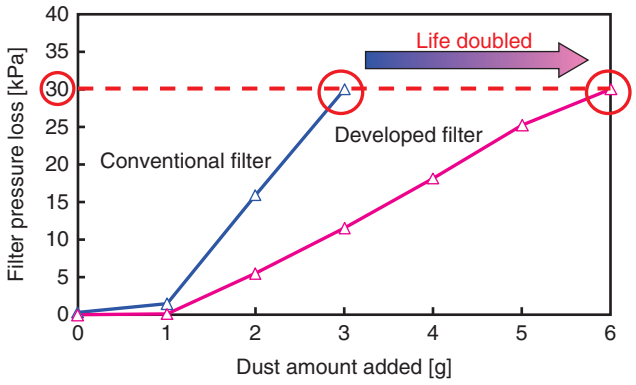


Fig. 24　Comparison of pressure loss between developed filter and conventional filter

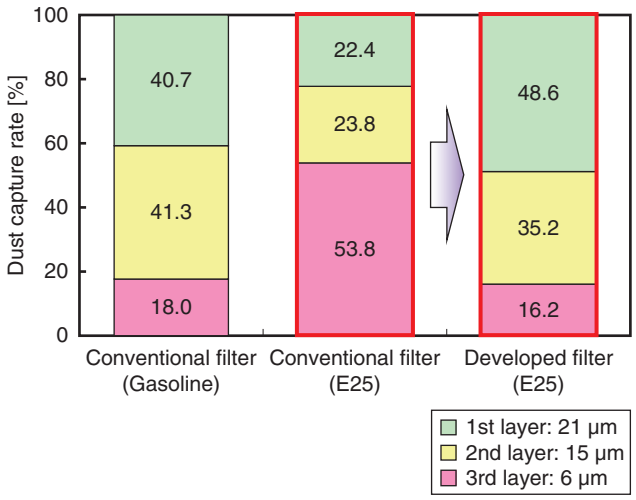


Fig. 25　Comparison of filter capture efficiency

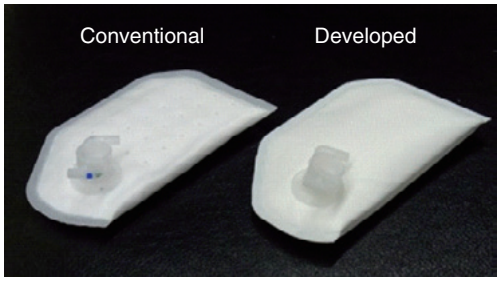


Fig. 26　External view of newly developed filter

8．まとめ

エタノール含有燃料での早期目詰まりのメカニズムを明らかにすると共に，エタノール含有ガソリンを主流とする市場に対応できる，長寿命サクションフィルタを開発した．早期目詰まりのメカニズムとして

（1）アルコール燃料ではダストが分散し，ダストが多層構造フィルタを通過する過程で凝集する．

（2）凝集したダストが目の細かい下層へ集中捕捉されることでフィルタ寿命が短くなる．

ということが解明され，この知見に基づいて最外層に凝集促進層を追加した新型フィルタを開発し，同サイズで寿命を 2 倍に向上させることを実現した．

参考文献

（1）石田尚之，東谷公，森康維：粉黛工学叢書，第 4 巻，液相中の粒子分散･凝集と分離操作 第 1 章 日刊工業新聞社，p.10-43(2010)

（2）Shinto, H., Miyahara, M., Higashitani, K.: Interaction forces between colloidal particles in alcohol-water mixtures evaluated by simple model simulations, Langmuir, 16, p. 3361-3371(2000)

（3）Higashitani, K., Matsuno, Y.: Rapid Brownian coagulation of colloidal dispersions, J. Chem Eng. Japan, Vol. 12, p. 460-465(1979)

（4）Higashitani, K., Miyafusa, S., Matsuda, T., Matsuno, Y.: Axial change of total particle concentration in Poiseuille flow, J. Colloid Interface Sci., Vol. 77, p. 21-28(1980)

■著　者■


荒 井 進 吾


伊 藤　淳


石 井　翼


安 藤 秀 昭


木 下 敬 太


梅林不二夫

リアルタイム空力デザインシステムの開発

Development of Real-time Aerodynamic Design System

福重貴浩* Takahiro FUKUSHIGE
有吉斗紀知* Tokitomo ARIYOSHI
宇田有佑* Yusuke UDA
大熊友貴* Yuki OKUMA
岡部達哉* Tatsuya OKABE
山本幸一** Koichi YAMAMOTO
Lars GRAENING *** Stefan MENZEL *** Markus OLHOFER ***

要　旨

自動車の空力性能と形状感度をリアルタイムに計算する「リアルタイム空力デザインシステム」を開発した．本システムは，近似モデル，カテゴライジング，特徴量抽出，感度解析，及び自動更新機能付 Database（DB）等の技術要素から構成され，近似モデルとカテゴライジング技術の組合せによるリアルタイム空力性能計算，感度解析技術による形状感度表示，自動追加学習機能による継続的な精度向上機能を実現している．

開発したシステムと従来の空力性能評価手法である Computational Fluid Dynamics（CFD）の計算結果を比較し，計算時間の大幅な短縮と有効性を確認した．

ABSTRACT

A real-time aerodynamic design system has been developed. The new system makes possible real-time computation of the aerodynamic performance and shape sensitivity of passenger cars. The system is made up of technological elements including approximation modeling, categorizing, extraction of feature values, sensitivity analysis and automatic database update. It realizes real-time computation of aerodynamic performance through the combination of approximation modeling and categorizing technologies, computation of shape sensitivity by means of on-line sensitivity calculations, and continuous increase in accuracy by means of automatic learning.

Computational results for Computational Fluid Dynamics (CFD) and the real-time aerodynamic design system were compared in order to evaluate the performance of the system, verifying its effectiveness and ability to reduce computation time.

1．まえがき

近年，自動車の燃費低減の要求に伴う空力抵抗低減の重要性が著しく高まっている．なかでも，商品性に大きな影響を及ぼす外観形状と空力性能の両立は大きな課題である．

現状，空力性能の評価は風洞試験，及び CFD が用いられている．風洞試験は，設備をはじめ車体モデルの製作等に多大な時間と費用を要している．一方，CFD は風洞試験と比較し大規模な設備は必要としない．さらに，飛躍的なコンピュータの高速化により計算時間が短縮され，設計ツールとして実用の域に達している．また，計算格子の生成アルゴリズムの改良による計算準備工数の飛躍的低減により，車体デザインの初期段階における空力性能評価手法として期待が大きく高まっている．車体デザインの初期段階では，形状変更の量も大きく試行回数も多くなり，計算時間短縮に対する要求も厳しくなる．CFD は流体現象の支配方程式である質量保存，運動量保存，エネルギー保存の非線形方程式を空間に生成した計算格子を用いて線形化し解くため，計算格子数の増大と共に計算時間も増大する特性を有している．現状，車体の空力性能を十分に再現する格子解像度の CFD 計算は，最新の並列計算機を用いても数時間程度を要している．計算時間以外の課題として，

＊　基礎技術研究センター
＊＊　四輪 R&D センター
＊＊＊ HONDA RESEARCH INSTITUTE EUROPE GMBH

https://doi.org/10.69239/hondatechnicalreview.2012_24_2_15

CFD の計算結果は流速，圧力等の物理量であり，これらの結果から現象を理解し性能改善のための指針決定するプロセスの困難さが挙げられる．

これらの課題を克服するために，機械学習をベースとした近似的統計モデル（以下，近似モデル）とオンライン感度解析を主要構成要素とするリアルタイム空力デザインシステムを開発した．本報において，システム構成技術，性能について述べ，本システムの有用性をデータと共に示す．

2．システム構成

本章において，リアルタイム空力デザインシステムの構成技術を示す．

2.1. システム設計

Fig. 1 に，リアルタイム空力デザインシステムのシステム概念図を示す．図の左側緑枠内は，ユーザ画面のイメージ，右側はシステム計算部を各々示している．図の左側緑枠部分に示すとおり，ユーザが形状を入力すると空力性能と形状感度をリアルタイムに表示する．図の右側は，システム計算部を示している．計算は，図に示すとおり以下の手順で実施される．

（1）車体形状から形状特徴量を抽出する．
（2）事前計算 DB から適切な所属カテゴリを選定する．
（3）所属カテゴリの近似モデルを使用し性能計算する．

2.1.1. 事前 DB の作成

リアルタイム空力デザインシステムで計算を実施するためには，事前に DB を構築し近似モデルを生成する必要がある．本節において，事前DBの構築法を述べる．Fig. 2 に，事前 DB 作成の概要を示す．事前 DB 生成のために，まずベースラインの車両形状をもとに Free Form Deformation (FFD)[1] にて変形形状を生成する．変形形状が偏らないために，実験計画法 (Design Of Experiments: DOE) の一種である Latin Hypercube Sampling (LHS)[2] を用いて FFD の変形を制御する．変形した形状に対し，CFD を用いて空力性能値を算出し，DB に特徴量と共に追加する．その後，DB 内のデータを用いて近似モデルを生成する．以上が事前 DB の生成手順であり，ベースラインの形状データ入力すれば自動的に生成される．

2.1.2. 自動精度向上機能

車体形状が事前に用意した DB 内データとの差異が大きい場合，生成した近似モデルでは十分な予測精度が得られない可能性がある．リアルタイム空力デザインシステムでは，予測精度が低いと判断される場合，2.1.1. 項で述べた処理を自動的におこない DB の追加を実施する．自動追加計算は，以下の二つの条件を満たした場合実行される．

（1）新形状が DB 内設計空間の外にある場合
（2）新形状が DB 内設計空間の疎な部分にある場合

なお，設計空間の内外判定，疎密判定には DB 内の特徴量重心からのユークリッド距離を用いている．

2.1.3. GUI 設計

ユーザの利便性を向上するために，リアルタイム空力デザインシステムは，AutoDesk 社製のソフトウェア Alias にプラグインされている．Fig. 3 に，リアルタイム空力デザインシステムの表示画面を示す．Alias のツールバーからシステムを選択し，車体諸元を入力することによりシステムの実行が可能となる．ユーザは，形状感度画面を考慮し所望の空力性能値達成まで形状変更と計算実行をおこなう．

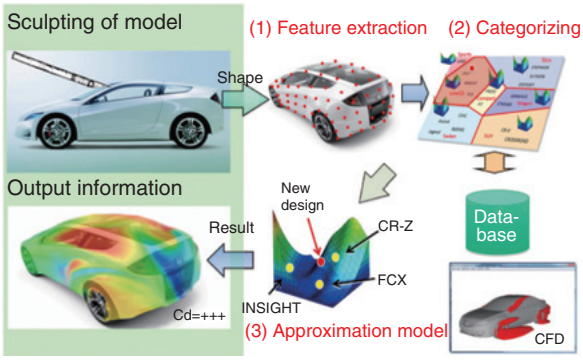


Fig. 1　Conceptual figure of real-time aerodynamic design system

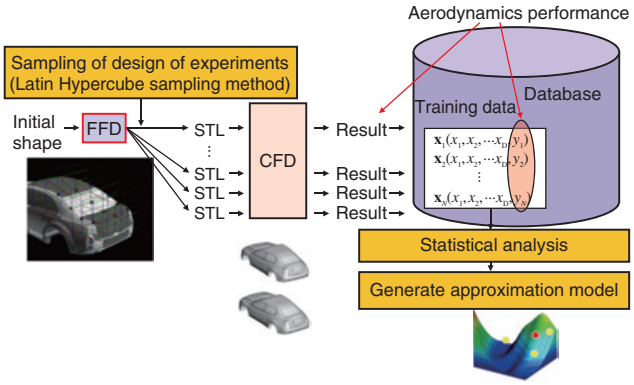


Fig. 2　Procedure of off-line learning for real-time aerodynamic design system

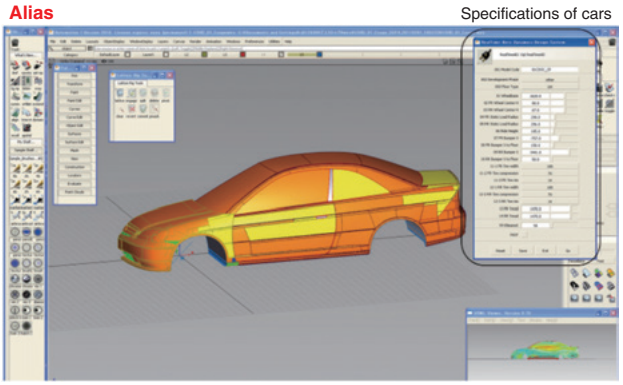


Fig. 3　GUI of real-time aerodynamic design system

2.2. データ管理

リアルタイム空力デザインシステムのDBに蓄積されるデータは，2.1.1.項で示した事前DB作成のプロセス，及び2.1.2.項で示した自動性能向上に伴うプロセスから生成される．それらのデータ管理は，オープンソースのデータ管理ソフトウェアPostgreSQLを用いておこなう．リアルタイム空力デザインシステムのDBは，形状ポリゴンデータ，特徴量データ，性能値データから構成される．DBへの書き込み等のインタフェースを含む処理のために次項以降に示すDatabase Management System(DBMS)を開発し実施している．DBMSの利用は，効率的なDB内の検索や管理を可能とする．DBMSは，近似モデル，カテゴライジング，自動精度向上機能，及び感度解析等への対応も可能となっている．

2.2.1. DB構造

リアルタイム空力デザインシステムのDB構造は，一般的なDBと同様に空力性能値に限定せず利用可能である．Fig. 4に，DBの階層構造を示す．リアルタイム空力デザインシステムのDBは，projectsとdesign processesの二つから構成されている．ここで，projectsは異なるdesign processesをグループ化する役割を担っている．

projectsは，開発段階と開発機種名をもとに生成される．実際の特徴量，空力性能等のデータはdesign processes内へ開発段階，車体データ，ユーザ名と共に蓄積される．design processes内に蓄積された各々のデータは三角形非構造格子で定義された車体表面形状データとリンク構造を形成する．

2.2.2. カテゴリの管理

DB内のデータは，形状の類似性にもとづきいくつかのカテゴリに分類される．これらは，近似モデルの精度向上と信頼性向上のために完全に自動で生成される．カテゴリ分類のために，DB内に仮想的なカテゴリの境界が実装されている．

データが追加されるたびに，カテゴリレイヤは再構築される．デザインデータの変位量の計算と近似モデルの学習は，カテゴリごとに実施される．また，変位量の計算と近似モデルの学習はカテゴリが再構築されるごとに再計算される．

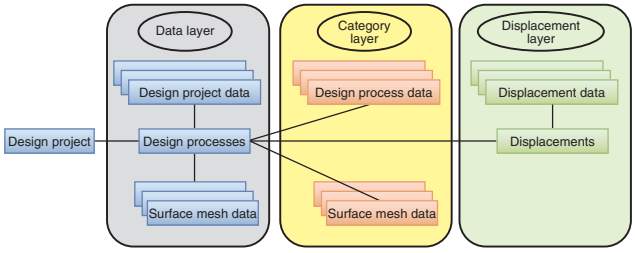


Fig. 4 Visualization of the three-layered database structure for managing design categories within the database

3. 近似モデル

リアルタイム空力デザインシステムの近似モデルは，車体形状から抽出された特徴量を入力値として空力性能を出力する関数である．近似モデルには複数のパラメータが含まれる．それらの値はDB内データを用い機械学習によって推定される．リアルタイム空力デザインシステムではKriging[3), 4)]とVariational Bayesian Sparse Regression (VBSR)[5)]の二つの近似モデル手法を用いている．以下に，近似モデル手法の概要と特徴を各々示す．

3.1. Kriging

Krigingは高精度な近似モデルを作ることが可能であるため，工学分野で広く用いられている手法の一つである．式(1)にKrigingの予測近似式を示す．

$$\hat{y} = C_0 + \sum_{n=1}^{N} C_n f_n(\mathbf{x}_p) \,. \qquad (1)$$

ここで，$\hat{y}$は近似性能値，$\mathbf{x}_p$は予測データの特徴量，Nはサンプリング点数，C_n, $f_n(\mathbf{x}_p)$は任意の係数と放射基底関数を各々示す．式(1)はKrigingによる予測がバイアスC_0に放射基底関数の重み付け和(右辺第二項)を加えたものであることを示している．Fig. 5にKriging予測の概念図を示す．

式(2)，(3)に，Krigingで使用する放射基底関数を各々示す．

$$f_n = \mathbf{R}(\mathbf{x}_p, \mathbf{x}_m) \,, \qquad (2)$$

$$\mathbf{R}(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) = \prod_{d=1}^{D} e^{-\theta^d \left| x_i^d - x_j^d \right|^{p^d}} \,. \qquad (3)$$

ここで，$\mathbf{x}_{tn}$は学習データの特徴量，dは特徴量のインデックス，Dは特徴量数，そして$\mathbf{R}(\mathbf{x},\mathbf{x})$は空間相関関数(Spatial Correlation Function: SCF)を各々示す．また，$\mathbf{R}(\mathbf{x},\mathbf{x})$に含まれる$p$と$\theta$はそれぞれ放射基底関数の広がりと滑らかさを決定付けるパラメータである．Fig. 6にpとθを各々変化させた時の放射基底関数の変化を示す．左図は，pの値が大きくなるほど放射基底関数が滑らかな凸形状になることを示している．また，右図は，θが大きいほど対応する学習点の影響がより狭い範囲に現れることを示している．

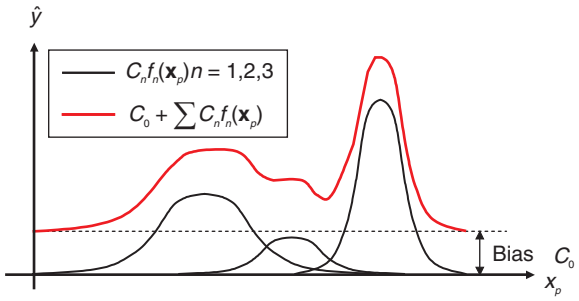


Fig. 5 Conceptual figure of Kriging

p と θ は特徴量の数だけ存在する未知のパラメータであり，推定する必要がある．パラメータ推定は尤度の最大化 (Maximum likelihood estimation: MLE) に基づいておこなう．局所解に収束するのを防ぐため，まず遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm: GA) で大域的探索をおこない，その後に局所的探索手法である Hill-climbing を用いて値を収束させる．Kriging は他の近似モデル手法に比べパラメータ数が多く近似関数の設計自由度が高いため，高精度なモデルの構築が期待できる．しかし，パラメータの推定に要する学習時間が長いことが問題である．パラメ―タの推定時間は学習データの数に大きく依存する．

3.2. VBSR

VBSR は脳活動の弁別において用いられている手法で，モデル学習時に予測に有効な特徴量が自動的に決定される特徴を有している．そのため，特徴量が非常に多い (数千以上) 問題にも対処することが可能である．式 (4) に VBSR の予測近似式を示す．

$$\hat{y} = \mu + \sigma y \sum_{i=1}^{D_{act}} w_i x_i \,. \qquad (4)$$

ここで，μ は学習データの平均値，σy は学習データの標準偏差，i は有効な特徴量，D_{act} は有効な特徴量の数，w は各特徴量の重みを各々示す．式 (4) は，VBSR による予測がバイアス (右辺第一項：μ) と線形重み付け和を足し合わせたものであることを示している．予測近似式は特徴量と重みの単純な線形結合である．Fig. 7 に，一次元問題における Kriging と VBSR の比較例を示す．図に示すとおり，Kriging では学習データ上をほぼ通過するような曲線が生成される，一方，VBSR では全ての学習データに対して距離的な偏りのない直線が生成される．

VBSR は，パラメータ推定にベイズ推定を用いる．ベイズ推定も Kriging のパラメータ推定で用いられている最尤推定と同様，統計学的なパラメータ推定法であり，パラメータを確率変数として扱うため，データの偏りなどにも対応可能である．さらにベイズ推定の大きな特徴として，パラメータのパラメータ (ハイパーパラメータ) も推定することが可能である．VBSR ではベイズ推定の特徴を生かし，パラメータ w に加え w が予測において有効か判定をするハイパーパラメータ $\boldsymbol{\alpha}$ を導入し推定することでモデル学習の際にパラメータ削減をおこなう．$\boldsymbol{\alpha}$ は自動関連決定事前分布 (Automatic Relevance Determination Priors: ARD) と呼ばれる．

VBSR のモデル学習では，w と $\boldsymbol{\alpha}$ を同時に未知数にすることを避け，変分ベイズ法を用いてそれぞれの事後分布を交互に最大化し，その値が収束するまでそれぞれのパラメータの値を更新し続ける．ここで w の更新時，しきい値を下回った w があった場合，モデル学習から除外する．これが VBSR における特徴量削減の仕組みである．VBSR は Kriging と比べて学習時間が非常に短い．さらに，Kriging 同様，パラメータは使用者の経験を必要とせず自動的に求められる．また，VBSR の学習時間は特徴量数に大きく依存する．

リアルタイム空力デザインシステムでは Kriging と VBSR を予測領域に応じて使い分けている．また，Kriging の学習時間を短くするため，Kriging の学習の際には VBSR によって削減された特徴量を用いている．

4. カテゴライジング

Fig. 8 にカテゴライジングの概要を示す．カテゴライジングは，左側に示すクラスタリングと右側に示すクラス分類の二つに大別される．事前に用意した多数のデータを類似データごとにクラスタと呼ぶグループにまとめ，分類することがクラスタリングである．一方，既に分類したデータに対し新データの所属カテゴリを予測することがクラス分類である．クラスタリング手法として，Self-Organizing Map (SOM)[6]，K-means[7]等，クラス分類手法として Neural Network (NN)[8]，Sparse Logistic

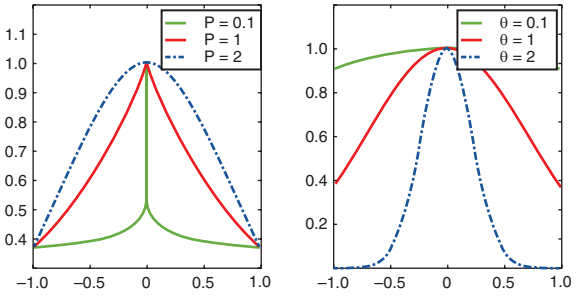


Fig. 6　Correlation of radial basis function with varying p (left), θ (right)

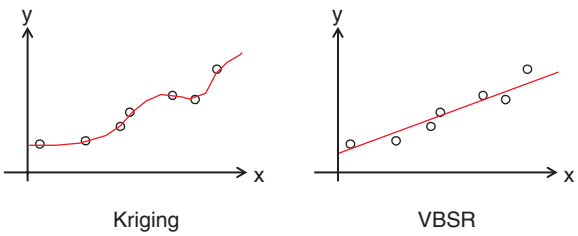


Fig. 7　Comparing phenomena of Kriging and VBSR

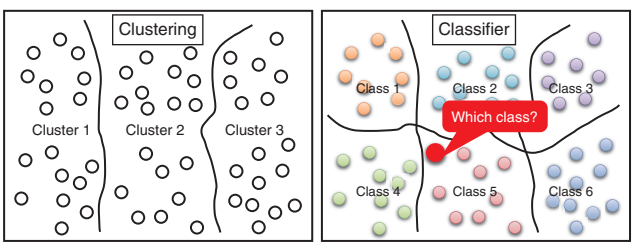


Fig. 8　Clustering and Classifier

Regression (SLR)[5], Support Vector Machine (SVM)[9] 等が挙げられる.

4.1. システムにおけるカテゴライジング

リアルタイム空力デザインシステムでは, 近似モデルによる空力性能予測の精度向上のため形状の類似性の高いもの同士をクラスタリングし, クラスタごとに近似モデルを生成している. Fig. 9 に, リアルタイム空力デザインシステムにおけるカテゴライジング技術の適用イメージを示す. 図の左側は DB 内の全てのデータに対し近似モデルを生成した例を示している. 図の右側は, DB 内のデータを形状によりクラスタリングし, クラスタごとに近似モデルを生成した例を示している.

Fig. 10 に, リアルタイム空力デザインシステム DB 内に蓄積されたデータのイメージを示す. 実際の運用においては, ベースライン形状ごとにクラス分を生成する. 各クラス内のデータは, ベースライン形状データを 2.1.1. 項で述べた方法で生成される.

新しい形状データを入力した際には, SLR を用いて所属クラスを決定する. SLR は, ロジスティック回帰分析にベイズ推定による拡張をおこなった手法であり, SLR から出力されるクラス判別のための重み推定結果を分類するクラスへの所属確率とし, クラスを割り当てる手法として適用している.

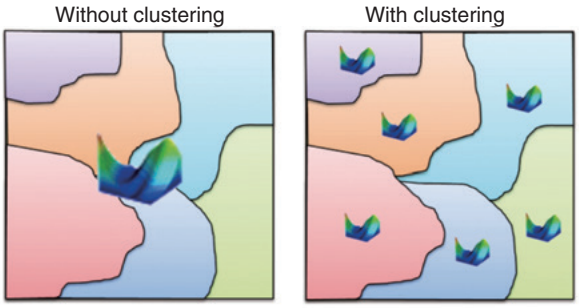


Fig. 9 Application of categorizing technique

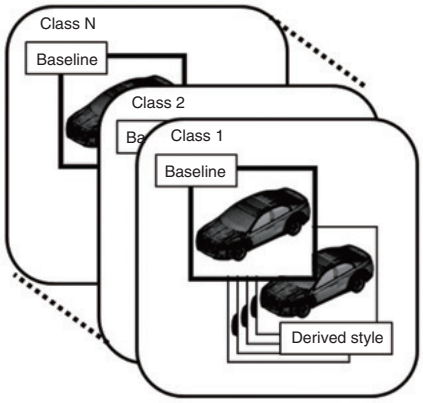


Fig. 10 Data structure image of DB

4.2. カテゴリ境界の取扱

Fig. 11 に, クラス境界部分のイメージを示す. 全体データを複数クラスに分類し, カテゴリごとに生成された近似モデルで予測する場合, クラス境界部分での予測精度に問題が生じる.

Fig. 12 に, リアルタイム空力デザインシステムで用いたクラス境界の取扱いイメージを示す. リアルタイム空力デザインシステムでは, 近似モデル精度向上のため, SLR から出力されるクラス所属確率を利用して全予測近似モデルの線形加重和を求める方法 (確率利用法) で空力性能を予測している. 確率利用法は, クラス所属確率を利用することにより, 境界線領域を各クラスで線形に補間することが可能である.

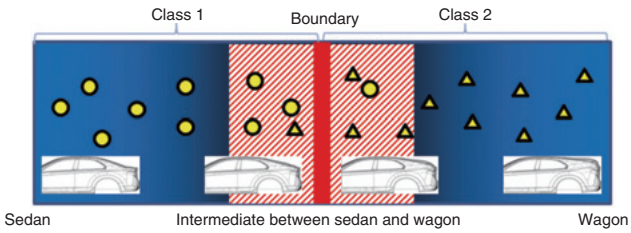


Fig. 11 Image of category boundary

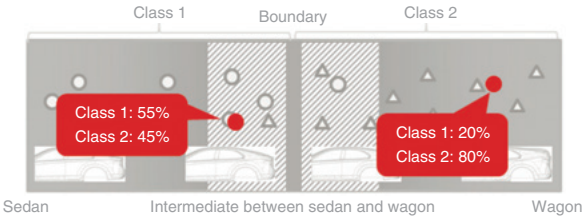


Fig. 12 Boundary treatment of real-time aerodynamic design system

5. 特徴量抽出

リアルタイム空力デザインシステムでは, 近似モデル, 及びカテゴライジングの入力値として, 車体形状を数値パラメータで表記した特徴量を使用している. 特徴量として車体表面上の位置座標, 表面角度, 及び曲率を抽出している. 以下に抽出手法の詳細を示す.

5.1. 手法の概要

リアルタイム空力デザインシステムでは, 任意な車体形状の取扱を可能とするため, 車体形状によらず安定的に所望の位置の特徴量を抽出する必要がある. 今回, Dynamic Programing (DP) マッチング[10)-12)] をベースとして改良することにより車体形状の変化に対してロバストな特徴量抽出技術を開発した. DP マッチングとは, 二つの異なる時系列パターンの各要素を紐付けする手法であり, 音声認識

などで広く利用されている．Fig. 13 に DP マッチングの例を示す．図左側の二次元グラフは，予め用意しておいた参照パターン，下側の二次元グラフはマッチング対象の参照パターンを各々示す．図，中央のカラーコンタは，参照パターンとマッチング対象の要素間の距離差の絶対値を示す．DP マッチングは，各要素間の誤差が最小となるように，参照パターンを非線形に伸縮させながら紐付けの最適経路を決定する手法である．複数の参照パターンのうちから最適経路の累積距離が最小となるものを入力パターンに最も類似したものとし選択する．DP マッチングの特徴として以下の二点が挙げられる．（1）少数の参照パターンでも入力パターンの非線形な形状変化を吸収できる点．（2）未知の入力パターンについても自動的に特徴点を求めることができる点．また，計算時間についても，DP マッチングを用いることで最適化問題を部分問題に分解して解くことができ，少ない計算量で効率的に計算をおこなうことが可能である．

DP マッチングをリアルタイム空力デザインシステムの特徴量抽出部に適用するにあたり，三次元形状から二次元断面を抽出した．精度向上のため，抽出した断面線の重心からの距離に加え，角度も考慮した一次元複素特徴ベクトル生成し DP マッチングを適用した．

5.2. 計算手順

Fig. 14 に DP マッチングの手順を示す．図に示すとおり，以下の四つの手順で特徴量を抽出する．

（1）三次元形状データから車体の 2 次元断面線を抽出する．
（2）二次元断面線を一次元複素特徴ベクトルへ変換する．
（3）DB 内のテンプレートとマッチングを実施し，特徴量抽出する．
（4）（3）で求めた特徴点を基準に車体全体から格子状に特徴量を抽出する．

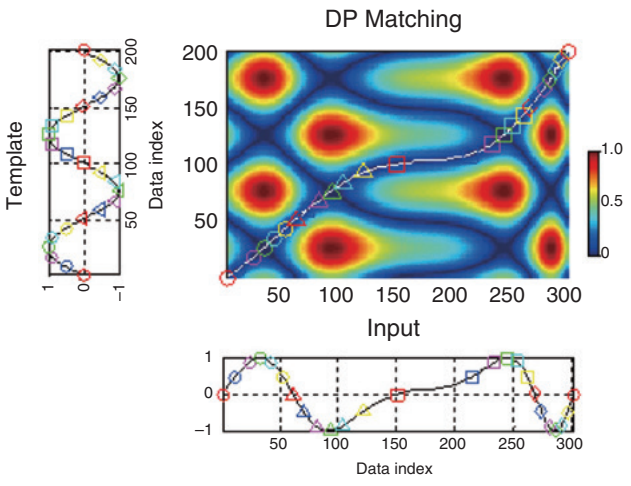


Fig. 13　DP matching method

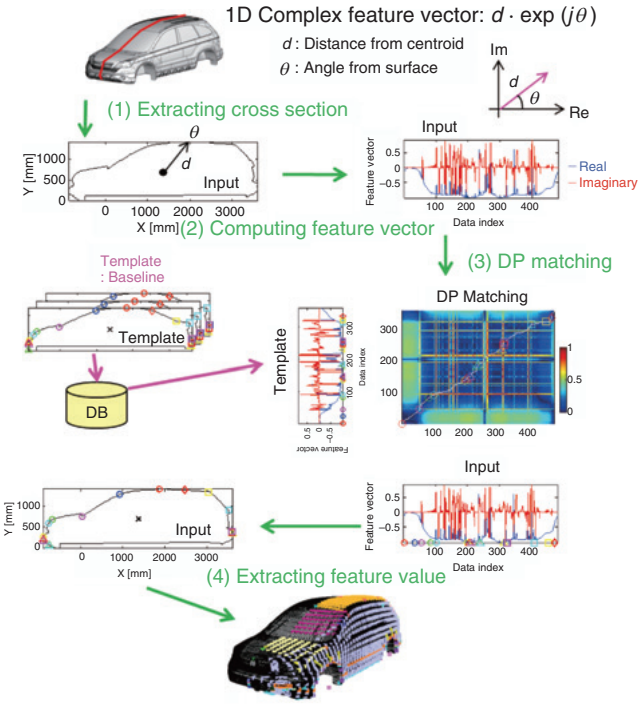


Fig. 14　Procedures of DP matching

6．感度解析

形状変更と空力性能の相関は，ユーザにとって非常に重要である．感度解析手法は，現在さまざまな手法[13]が提案されている．手法を大別すると主に二つからなる．多種多様なデータ中から感度を求める大域的手法と，着目形状との勾配を計算する局所的手法である．大域的手法は大変形を考慮できるのに比べ adjoint[14] に代表される局所的手法は小変形にしか対応できない．

リアルタイム空力デザインシステムでは，高速に大域的な感度情報を計算するためにオンライン感度解析システムを使用している．オンライン感度解析システムは，事前計算，及び自動精度向上時に蓄積された DB に直接アクセスすることで高速計算を実現している．なお，相関係数の計算手法は，Spearman[15] の相関係数を使用した．

6.1. 変位量の計算

変位量の計算は，二つの車体表面の非構造三角形データの変位を計算することにより算出している．各頂点の変位量は以下のように定義される．

$$\delta_{i,j} = (v_j - v_i) \circ n_i \,. \qquad (5)$$

ここで，δ，v，n は，変位量，頂点，法線ベクトルを各々示す．また，添え字 i, j は変位元の形状，変位先の形状を各々示す．変位先の頂点は，変位元の頂点から距離最小点を対象として選択する．

6.2. オンライン感度解析

Fig. 15 に，オンライン感度解析処理の計算手順を示す．図中のオレンジの四角が処理の内容，灰色の四角が結果，データを各々示す．図に示すとおり，車体形状から抽出した特徴量，近似モデルから出力された空力性能値がオンライン感度解析の入力となる．以下に各処理の詳細を示す．

（1）Find the best matching category

ユーザが与えた車体形状がどのカテゴリに属するか，特徴量から決定する．所属カテゴリの判別は，所属カテゴリのベースラインデータと入力形状の特徴量からユークリッド距離を求めた後，ユークリッド距離が最小なカテゴリを所属カテゴリとする．ユークリッド距離は以下のように計算する．

$$d(f^{new}, f^{base}) = \sqrt{\sum_n \left| f_i^{new} - f_i^{base} \right| \Big/ \left| f_i^{new} + f_i^{base} \right|}. \quad (6)$$

ここで，f^{new}，f^{base} は，ユーザ入力形状，カテゴリ内のベースラインデータの特徴量を各々示す．

（2）Approximate displacements

ユーザが与えたデザインと同一カテゴリに所属するデータとの表面形状の変位量は，感度解析をする上で必要である．通常一つのカテゴリには，数千個以上のデータが存在し，全ての変位を求めるためには非常に長い計算時間を要する．そこで，変位量の計算を概算することにより計算時間を大幅に短縮する手法を開発した．まず，ユーザが与えたデータに対し所属カテゴリ内のベースラインデータとの変位 $\delta^{n,b}$ を計算する．$\delta^{n,b}$ をオフセット値とし，同一カテゴリの残りの形状との変位量を概算する．以下に，ユーザが与えた形状データ n と同一カテゴリデータの変位量の計算式を以下に示す．

$$\tilde{\delta}^{n,m} = \delta^{n,b} + \delta^{b,m} + e^{n,m}. \quad (7)$$

ここで，$\delta^{n,b}$ は，ベースラインとの変位量を式（6）を用いて計算した値である．$\delta^{b,m}$ は，DB から抽出した変位量を示す．$e^{n,m}$ は，エラーである．

Fig. 16 に，変位量の計算結果を示す．左側のカラーコンタは，式（6）を用いて変位量を計算した結果であり，右側のカラーコンタは，式（7）を用いて計算した結果である．変位量のエラーは 1.8% である．

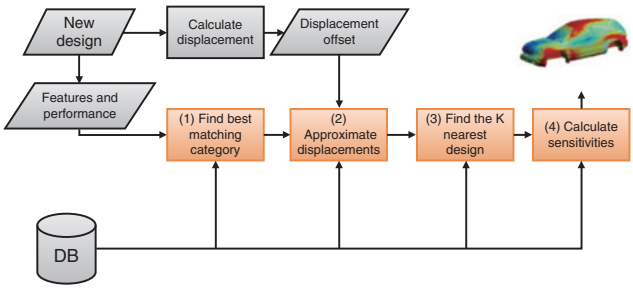


Fig. 15 Flow chart of the online sensitivity approximation

（3）Find the K nearest designs

ユーザが入力した形状に対して，類似形状を求めるために K-Nearest Neighbor（KNN）を導入した．KNN では，車体の特徴量から類似デザインを探索するのではなく，変位量から類似データを探索する．類似形状数を表す $\boldsymbol{K}$ は，経験的に決まる値であり，計算時間や探索の範囲を鑑みて設定する．

（4）Sensitivity Calculation

類似形状数 $\boldsymbol{K}$ の探索と各々の形状の変位量 $\tilde{\delta}^n$，及び空力性能値をもとに，Spearman の相関係数を計算する．ユーザが入力した形状 n 上の頂点 v_i の感度 ρ_i'' は，変位量と空力性能値の変位分を線形近似し計算する．Fig. 17 に感度解析結果を示す．出力結果は，空力性能値の増減の方向性を示す．正の値が出力された場合，車体表面の法線方向に変形させた場合空力性能値の値が増大することを示している．

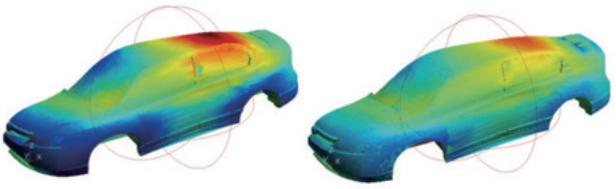


Fig. 16 Qualitative comparison between the calculated displacements on the left and the estimated displacements on the right. The displacement values are projected onto a color value between minimum (blue) and maximum (red) displacement value

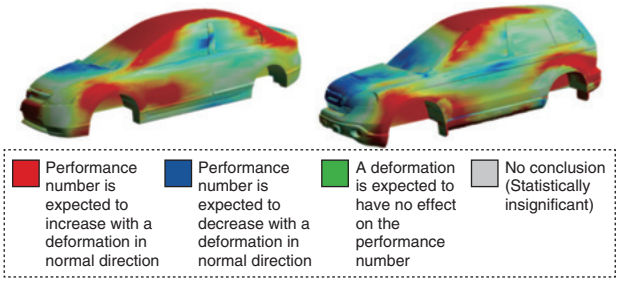


Fig. 17 Visualization of the sensitivity information, calculated concerning the Civic coupe model (left) and the CRV model (right)

7．システム性能

リアルタイム空力デザインシステムの性能を評価した．Fig. 18 に，評価法の概略を示す．まず，近似モデル生成用データと性能評価用データを 2.1.1. 項で示した手順で各々生成する．その後，生成した近似モデルを用いて性能評価用データに対する性能値を予測し，近似モデル性能を評価

する．近似モデル生成用のデータは，五つのベースラインから計 15,942 ケース生成した．同様に，評価用テストデータは五つのベースラインから 1,201 ケース生成した．なお，近似モデルの性能評価は以下の指標を用いた．

（1）正答率 τ

任意に抽出された二つのデザインの性能について，その大小関係を適切に判定できた割合で評価をおこなう．具体的には性能評価用データの中から取り出せる全てのペアについて傾向予測の成否数を調べ，その累積比率を正答率とする．この評価方法は一般的にケンドールの順位相関係数（Kendall rank correlation coefficient）とも呼ばれる．正答率 τ は以下の形で表される．

$$\tau = N_{cp} \Big/ \frac{1}{2} n(n-1) \quad (8)$$

ここで N_{cp} は傾向予測に成功したペアの数である．

（2）相関係数 r_p

相関係数 r_p は二つのデータ群（評価用データの予測値と実測値）の相関を示す指標で以下の式で表される．

$$r_p = \frac{\sum_{n=1}^{N}(y_n - \bar{y})(\hat{y}_n - \bar{\hat{y}})}{\sqrt{\sum_{n=1}^{N}(y_n - \bar{y})^2}\sqrt{\sum_{n=1}^{N}(\hat{y}_n - \bar{\hat{y}})^2}} \quad (9)$$

ここで y は N 個からなる評価用データの実測性能値（CFD 計算値）で $\hat{y}$ はそれに対する予測値である．また $\bar{y}$ は y の平均値，$\bar{\hat{y}}$ は $\hat{y}$ の平均値である．相関係数の値が 1 に近いほど相関が強く，モデルの再現性が高いことを示し，0 に近いほど相関が弱く，モデルの再現性が悪いことを示す．

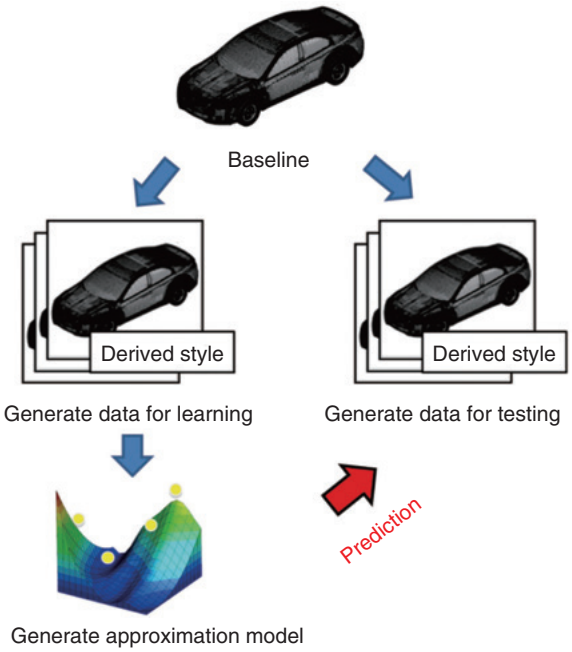


Fig. 18　Procedure of evaluation for real-time aerodynamic design system

（3）平均二乗誤差（Root Mean Square Error: RMSE）

平均二乗誤差は式（10）のように計算され，この値が大きいほど予測誤差も大きいことを示す．

$$RMSE = \sqrt{\sum_{n=1}^{N}(y_n - \hat{y}_n)/N} \,. \quad (10)$$

以上の評価指標を用いてシステムの性能を評価した．近似モデルの性能値を以下に示す．

・正答率　　：91%
・相関係数　　：0.95
・RMSE　　：1.1%

また，表示時間等を除く空力性能予測時間は数秒以内である．

以上の結果より，精度，計算時間の観点からリアルタイム空力デザインシステムの有効性が示された．

8．まとめ

リアルタイムに，車体空力性能と形状感度を計算する「リアルタイム空力デザインシステム」を開発した．開発したシステムの特徴は以下のとおりである．

・近似モデルによる高速計算
・カテゴライジング技術による複数近似モデル高精度計算
・オンライン感度計算
・自動精度向上機能

以上のシステムの性能評価を実施し以下の性能を得た．

・正答率　　：91%
・相関係数　　：0.95
・RMSE　　：1.1%
・計算時間（表示部分等を除く）：数秒以内

参考文献

（1）Sederberg, T.W., Parry, S.R.: Free-Form Deformation of Solid Geometric Models, Proceedings of ACM SIGGRAPH in Computers & Graphics, 20 (4), p. 151-160(1986)
（2）Tang, B.: Orthogonal Array-Based Latin Hypercubes, Journal of the American Statistical Association, Vol. 88 (424), p.1392–1397(1993)
（3）Forrester, A., Keane A., Sobester, A.: Engineering Design via Surrogate Modelling: A Practical Guide, Wiley, 228p.(2008)
（4）Sasena, M.J.: Flexibility and Efficiency Enhancements for Constrained Global Design Optimization with Kriging Approximations, Doctoral paper of University of Michigan(2002)
（5）Yamashita, O., Sato, M., Yoshioka, T., Tong, F.,

Kamitani, Y.: Sparse estimation automatically selects voxels relevant for the decoding of fMRI activity patterns, Neuroimage, Vol. 42, Issue 4, p. 1414-1429(2008)
(6) Kohonen, T.: Self-Organizing Maps, Springer, 501p. (2001)
(7) MacQueen, J. B.: Some Methods for classification and Analysis of Multivariate Observations, Proceedings of Fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability. University of California Press, MR0214227, p. 281–297(1967)
(8) Hopfield, J. J.: Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities, Proc. Natl. Acad. Sci. USA , Vol. 79, p. 2554-2558 (1982)
(9) Cortes, C., Vapnik, V.: Support-Vector Networks, Machine Learning, Vol. 20, Issue 3, 273-297(1995)
(10) 迫江博昭, 千葉成美 : 動的計画法を利用した音声の時間正規化に基づく連続単語認識, 日本音響学会誌, Vol. 27, no. 9, p. 483-490(1971)
(11) Sakoe, H., Chiba, S.: A Dynamic Programming Algorithm Optimization for Spoken Word Recognition, IEEE Trans. on Acoust. Speech and Signal Proc., Vol. 26, Issue 1, p. 43-49(1978)
(12) Sakoe, H.: Two-level DP-matching- -A dynamic programming-based pattern matching algorithm for connected word recognition, IEEE Trans. on Acoust. Speech and Signal Proc., Vol. 27, No. 6, p. 588-595(1979)
(13) Ascough Ⅱ, J. C., Green, T. R., Ma, L., Ahjua, L. R.: Key criteria and selection of sensitivity analysis methods applied to natural resource models, In International Congress on Modeling and Simulation Proceedings(2005)
(14) Othmer, C.: CFD Topology and Shape Optimization with Adjoint Methods, VDI-Berichte, 1967, p. 61(2006)
(15) Graening, L., Menzel, S., Hasenjaeger, M., Bihrer, T., Olhofer, M., Sendhoff, B.: Knowledge Extraction from Aerodynamic Design Data and its Application to 3D Turbine Blade Geometries, Journal of Mathematical Modelling and Algorithms, Vol. 7, Issue 4, p. 329–350(2008)

■著　者■


福 重 貴 浩


有吉斗紀知


宇 田 有 佑


大 熊 友 貴


岡 部 達 哉


山 本 幸 一


Lars GRAENING


Stefan MENZEL


Markus OLHOFER

Mo-V 析出強化を活用した高強度および高耐摩耗性軟窒化用鋼の開発

Development of High-strength and High-wear Resistance Nitrocarburizing Steel by Precipitation Strengthening of Mo-V Carbonitride

増田大樹* Hiroki MASUDA　松田英樹* Hideki MATSUDA　山崎歩見** Ayumi YAMAZAKI

要　旨

本開発材は，強度，耐摩耗性と加工性のバランスを図った軟窒化用鋼である．鍛造後機械加工時の硬度はできるだけ低くし，その後の軟窒化の熱を利用して表層，母材ともに高硬度化を図っている．それにより，従来の軟窒化材に対し，40% 以上高い曲げ疲労強度を達成した．開発材が有する高い疲労強度と加工性の両立は，Mo-V 炭窒化物析出強化を活用することで実現した．加工時は Mo，V は完全固溶させた状態に保ち，加工後の軟窒化処理時に Mo-V 複合炭窒化物を母材と整合性をもって微細析出させ，高硬度化を図っている．また，軟窒化時に生成する化合物層はもろく延性に乏しいため，アブレシブ摩耗などに不利であり，その耐摩耗性の向上には化合物層のじん性を改善する必要があった．そこで，化合物層中にも Mo-V 炭窒化物を析出させることで，化合物層の結晶粒微細化を図った．それにより，じん性を改善させ，耐摩耗性を向上させた．

ABSTRACT

The project discussed in this paper developed a nitrocarburizing steel that balances strength, wear resistance, and workability. The hardness of the steel is controlled as low as possible for machining after forging, and the heat applied in the nitrocarburizing process is then used to achieve high hardness in both the surface layer and the base material. As a result, the developed steel achieves at least 40% higher bending fatigue strength than a conventional nitrocarburized steel. The balance between high fatigue strength and workability in the developed steel is realized through the exploitation of Mo-V carbonitride precipitate strengthening. When the material is machined, the Mo and V are in a state of solid solution, but during the nitrocarburization process following machining, fine complex Mo and V carbonitrides are precipitated in lattices coherent with the base material, resulting in high hardness. The fact that the compound layer that formed during nitrocarburization was brittle and lacked ductility represented a disadvantage in terms of abrasive wear, and it was necessary to increase the toughness of the compound layer in order to increase wear resistance. The crystal grains in the compound layer were therefore refined by promoting the precipitation of Mo and V carbonitrides in the compound layer also, resulting in the realization of greater toughness and increased wear resistance.

1．まえがき

近年 CO_2 排出量など環境規制が強化される中，自動車は CO_2 排出量削減のための燃費性能向上が求められるなど，自動車の環境負荷低減に対する要望はさらなる高まりを見せている．たとえば，レシプロエンジンにおいては，ダウンサイジングによる軽量化，コンパクト化が求められている．それに伴い，エンジン構成部品をコンパクト化することが求められる．それにより，各部品への負荷は増大する傾向にあり，高強度化，さらには高耐摩耗性が必要となってきている．そのエンジン構成部品や駆動系部品などパワープラント部品の多くは，鍛造や鋳造で成形後，機械加工した後に浸炭処理や高周波焼入れ，軟窒化処理などの熱処理を加えることにより，強度，耐摩耗性の向上が図られてきた[(1),(2)]．また，機械加工工程は旋削加工やドリル加工，研磨加工と多岐にわたるため，加工性が良好である必要があり，高強度化を図る場合，加工性との両立が強く求められてきた[(3),(4)]．

このような背景の中で，軟窒化処理は処理によるひずみが小さく，寸法変化が発生しにくいことから，色々な部品で採用されている[(5),(6)]．しかしながら，高強度化のためには硬度の高い材料を適用する必要があるため，加工性の低下は避けることができず，高強度化に限界があった[(7),(8)]．

＊　四輪 R&D センター
＊＊大同特殊鋼株式会社

https://doi.org/10.69239/hondatechnicalreview.2012_24_2_16

また，一般的な炭素鋼の軟窒化時に最表層に生成する化合物層は，もろく延性に乏しい[9]ため，アブレシブ摩耗のような摩耗環境下では不利であった．

本論文では，モリブデン（Mo），バナジウム（V）の軟窒化時の析出強化を活用することで，上記課題を解決したので，そのメカニズム解析と最適合金成分設計，析出強化能を最大限発揮させる組織について述べる．

2．開発のねらい

本開発では，エンジンやトランスミッションの軽量，コンパクト化に寄与し，摩耗環境の厳しいディーゼルエンジンのしゅう動部品としても適用可能な，以下の特性を満足する軟窒化用鋼の開発をねらいとした．

（1）高強度であること
　（従来の軟窒化材に対して曲げ疲労強度 40% 以上向上）
（2）高耐摩耗性を有すること

3．材料成分設計の考え方

まず，軟窒化材におけるポーラス層，化合物層，窒化層，母材内部が指す位置を Fig. 1 に示す．ポーラス層は化合物層の一部であるが，最表層に生成する多くの空孔で形成された層である．化合物層はポーラス層の下にある鉄窒化物で形成された緻密な層である．また，窒化層は，化合物層直下から軟窒化時に窒素が拡散した深さまでの部位を示し，母材内部は窒素が拡散していない部位を示す．

3.1. 材料コンセプト

Fig. 2 に，従来の軟窒化材（以下，従来材と表記する）の鍛造後と軟窒化後の硬度プロファイルを示す．従来材の軟窒化後硬度（実線）は，鍛造後の硬さ（破線）から軟窒化による窒素の拡散で窒化層のみを強化していた．しかし，従来の手法では，高強度化のために硬度プロファイルを底上げしようとすると，鍛造後の硬さから高くする必要があり，加工性の低下は避けることができなかった．そこで，本開発では加工後に実施する軟窒化処理の熱を利用した析出強化に着目した．Fig. 3 に，開発材の鍛造後と軟窒化後の硬度プロファイルを示す．開発材は，軟窒化時に表層の窒化層部に炭窒化物を，母材内部に炭化物を析出させ（析出強化），表層，母材内部ともに硬度を底上げすることで，鍛造後の硬度（破線）は軟窒化後の硬度（実線）よりも低い状態として，加工性をできるだけ損なうことなく高強度化を達成することとし，高強度と加工性のバランスを図った．また，析出強化により，軟窒化時に最表層に生成する化合物層の強化も同時に図った．

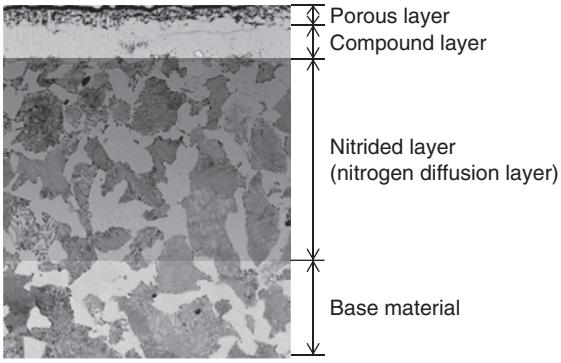


Fig. 1　Layers of nitrocarburizing steel

3.2. 析出強化の合金設計の考え方

炭化物析出強化能の高い元素として Mo，V，Nb，Ti などが挙げられる[10]．これらの各元素を S20C 炭素鋼に単独添加した場合の析出強化能を Fig. 4 に示す．Fig. 4 は横軸に 600℃ × 2 hr 熱処理前の硬度，縦軸に熱処理後の硬度を示しており，式（1）に示す硬度差 ΔHv が析出強化能を意味する．

$$\Delta Hv = (\text{Hardness after heat treatment}) - (\text{Hardness before heat treatment}) \quad (1)$$

その結果，Mo，V が析出強化能に優れていることから，Mo，V を有効活用することとした．

3.3. Mo，V 添加鋼の析出強化メカニズム（窒化層部）

従来材と Mo，V 添加鋼（以下，Mo，V 鋼と表記する）

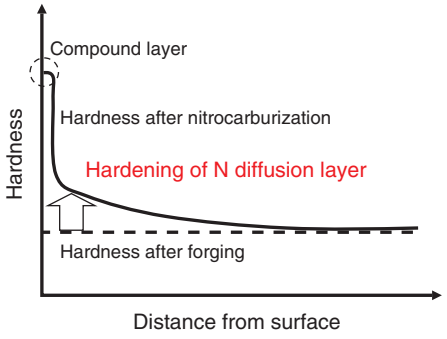


Fig. 2　Hardness distribution of conventional steel

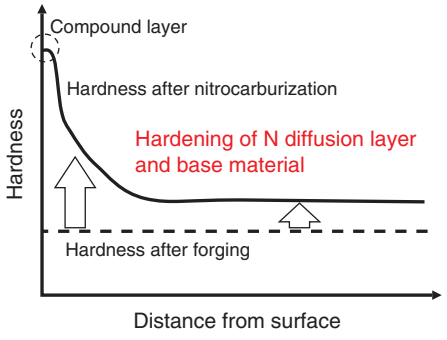


Fig. 3　Hardness distribution of developed steel

の 2 鋼種を用いて，600℃ × 2 hr 軟窒化後の窒化層中の析出物解析を実施した．従来材の窒化層部である表層 0.05 mm 深さの透過型電子顕微鏡（Transmission Electron Microscope: TEM）観察結果とエネルギー分散型 X 線分析（Energy Dispersive X-ray Spectrometer: EDS）による析出物の同定解析結果を Fig. 5 と Fig. 6 に，析出物の格子像観察結果を Fig. 7 に示す．Fig. 5 に示すように，従来材の析出物は NaCl 型結晶構造を有する．結晶方位は，観察面にて母材である Fe と $[001]\alpha//[\bar{1}01]$ 析出物であり，いわゆる Baker Nutting の方位関係で析出している．この析出物は，EDS による析出物解析結果（Fig. 6）から，Mn，Cr を多く含有しており，Mn を含有した Cr 窒化物であると判断できる．また，Fig. 5 の解析より，平均析出物サイズは 34.4 nm で析出物数 1.5×10^3 /μm^2 の分布で析出している（Table 1）ことがわかった．さらに，その析出物の格子像（Fig. 7）を観察すると，析出物が粗大凝集化した界面においては，母材 Fe 格子が切れている，つまり整合性が失われている界面（Incoherent）も観察される．

一方，Mo，V 鋼の窒化層部である表層 0.05 mm 深さの

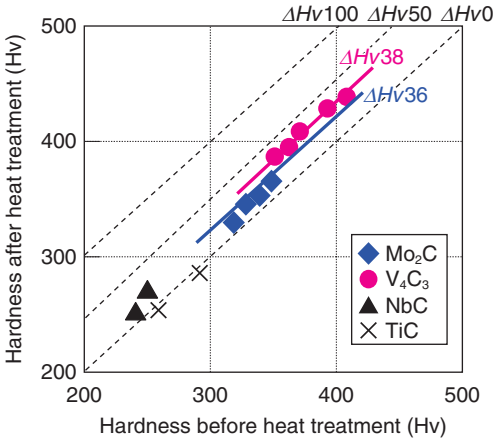


Fig. 4　Precipitate strengthening ability: ΔHv of alloy

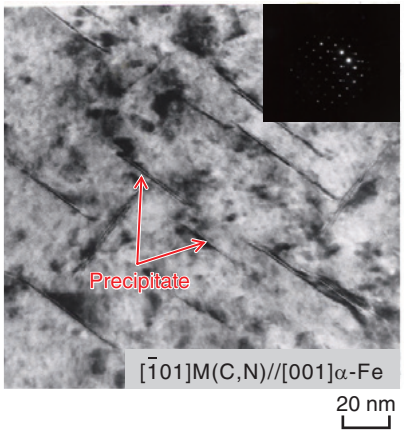


Fig. 5　Transmission electron micrograph taken from diffusion layer (0.05 mm depth) of conventional steel after nitrocarburization

Table 1　Precipitate length and number at 0.05 mm depth after nitrocarburization

	Precipitate length	Precipitate number (/μm²)
Mo,V-added steel	8.2 nm	3.8×10^4
Conventional steel	34.4 nm	1.5×10^3

TEM 観察結果と EDS 分析による析出物の同定解析結果を Fig. 8 と Fig. 9 に，析出物の格子像観察結果を Fig. 10 に示す．Fig. 8 に示すように，Mo，V 鋼に観察される析出物も NaCl 型結晶構造を有する．また，観察面にて母材である Fe と $[001]\alpha//[0\bar{1}1]$ 析出物の結晶方位関係を有しており，Baker Nutting の方位関係で析出しているのも従来材と同様である．この析出物は，EDS による析出物解析結果（Fig. 9）から，Mo，V を多く含有し，次いで Cr，Mn を含有しており，Cr，Mn を含有した Mo-V 炭窒化物であると判断できる．また，Fig. 8 の解析より，平均析出物サイズは 8.2 nm で析出物数 3.8×10^4 /μm^2 の分布となっており，従来材と比較すると微細かつ多量に析出している（Table 1）．さらに，その析出物格子像（Fig. 10）を観察すると，母材 Fe

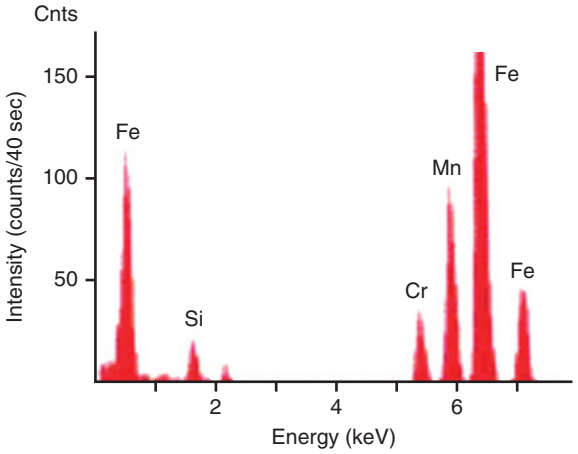


Fig. 6　Energy dispersive X-ray spectrometry analysis of conventional steel precipitate

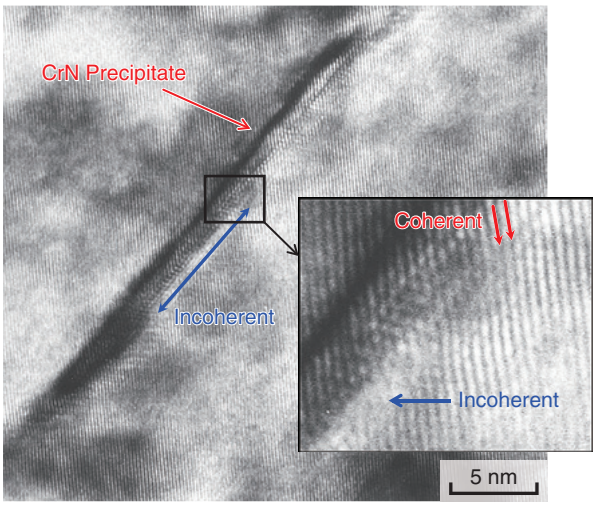


Fig. 7　Lattice image of CrN precipitate

格子と Mo-V 炭窒化物界面で格子像のひずみ（格子ひずみ）が発生していることが確認できる．また，Fe 格子が切れている界面は観察されず，母材 Fe 格子との整合性が非常に良好であることから，Mo，V 鋼には多くの格子ひずみが発生しているといえる．

以上の結果から，Mo，V 鋼は従来材と比較し，窒化層部に微細な Mo-V 炭窒化物が数多く析出し，かつ母材 Fe 格子との整合性が良好であるため，高い析出強化能を有していると考えられる．

3.4. Mo，V 鋼の析出強化メカニズム（母材内部）

次に Mo-V 鋼の窒素が拡散しない母材内部の TEM 観察結果と EDS による析出物の同定解析結果を Fig. 11 と Fig. 12 に，析出物の格子像観察結果を Fig. 13 に示す．Fig. 11 に示すように，母材内部も窒化層部同様，析出物は NaCl 型結晶構造を有し，結晶方位関係もいわゆる Baker Nutting の方位関係を有する．この析出物は，EDS による析出物解析結果（Fig. 12）から，Mo，V を含有しており，Cr，Mn を含有した Mo-V 炭化物であると判断できる．母材は窒素拡散がないため，炭化物主体の析出物であると考えられる．また，Fig. 11 の解析より，その平均析出物サイズは 6.8 nm と表層よりも微細で，析出物数 5.1×10^3 個 $/\mu m^2$ の分布で析出している．さらに，その析

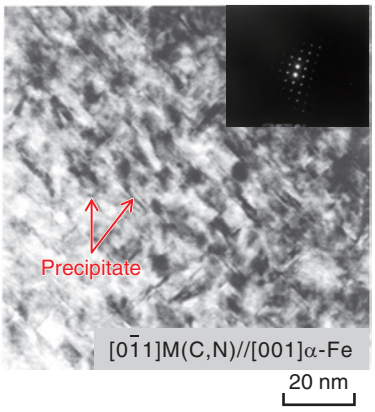


Fig. 8 Transmission electron micrograph taken from diffusion layer (0.05 mm depth) of Mo, V-added steel after nitrocarburization

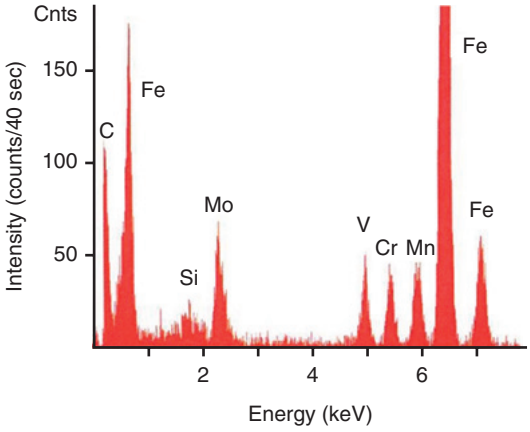


Fig. 9 Energy dispersive X-ray spectrometry analysis of Mo, V-added steel precipitate

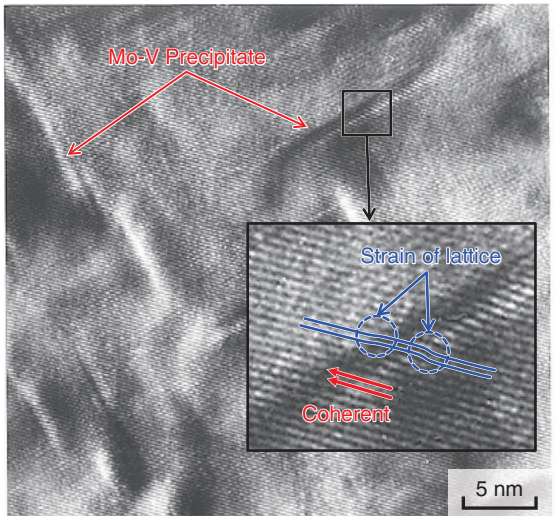


Fig. 10 Lattice image of Mo-V precipitate

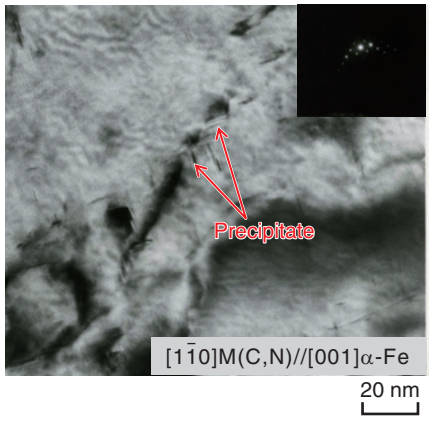


Fig. 11 Transmission electron micrograph taken from non-N diffusion layer of Mo, V-added steel after nitrocarburization

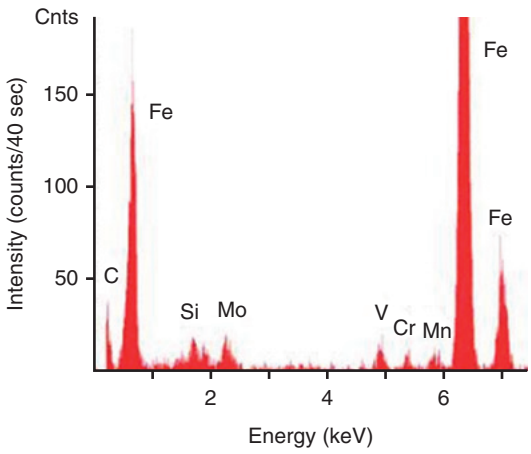


Fig. 12 Energy dispersive X-ray spectrometry analysis of inside precipitate in Mo, V-added steel

出物格子像 (Fig. 13) を観察すると，表層同様，母材 Fe 格子と Mo-V 炭化物界面で格子像のひずみ (格子ひずみ) が発生していることが確認できる．また，母材 Fe 格子が切れている界面は観察されず，母材 Fe との整合性も非常に良好である．

このように Mo，V 鋼は窒化層部および，母材内部ともに Mo-V 炭窒化物 (炭化物) による析出強化を図ることができる．この高い析出強化能が降伏強度を増大させ，高い疲労強度を発現していると考えられる．

3.5. Mo-V 鋼の化合物層耐摩耗性向上メカニズム

従来材と Mo-V 鋼の化合物層断面の TEM 観察結果を Fig. 14 と Fig. 15 に，Mo，V 鋼の析出物の EDS による同定解析結果を Fig. 16 に示す．Fig. 14 と Fig. 15 に示すように，Mo-V 鋼は従来材よりも微細な結晶粒を有している．また，Fig. 15 と Fig. 16 に示すように，Mo，V 鋼は化合物層中にも 10 nm 程度の粒状の Mo，V 炭窒化物が析出しており，この析出物がピンニング効果として働き，粒成長を抑制することで，化合物層の微細化を図ることができる．それにより，じん性の高い化合物層が形成でき，高い耐摩耗性が得られると考えられる．

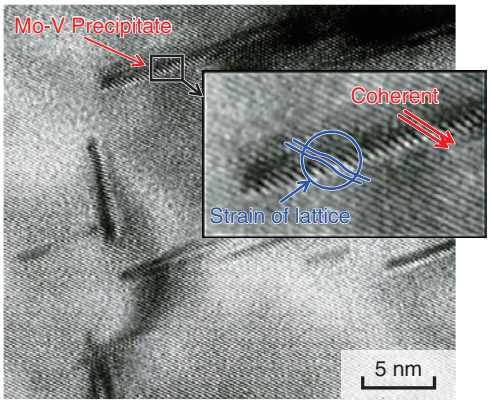


Fig. 13　Lattice image of Mo-V precipitate

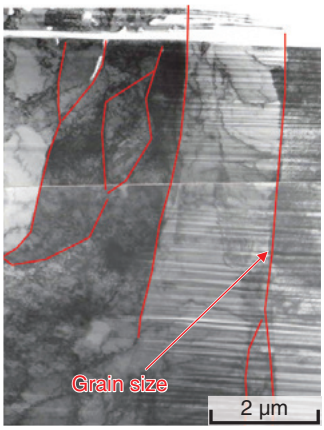


Fig. 14　Transmission electron micrograph taken from diffusion layer of conventional steel compound layer

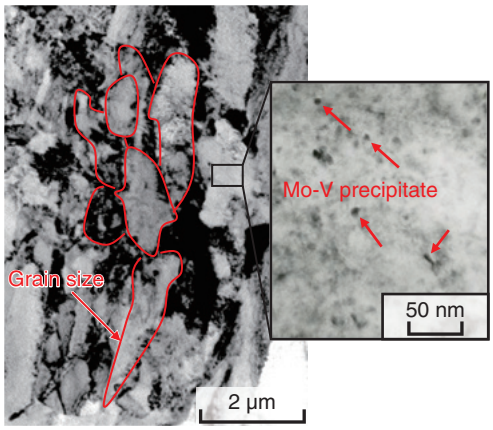


Fig. 15　Transmission electron micrograph taken from diffusion layer of developed steel compound layer

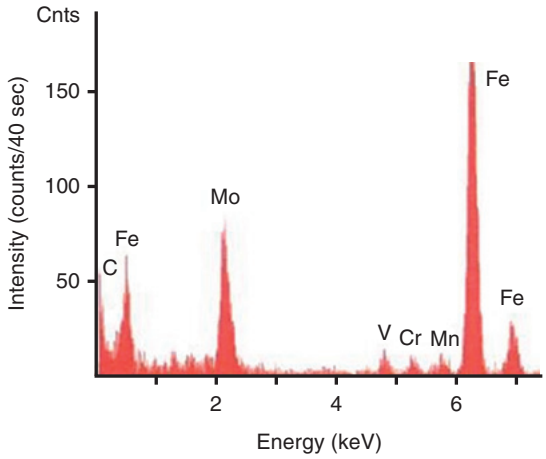


Fig. 16　Energy dispersive X-ray spectrometry analysis of precipitate in developed steel compound layer

4．材料成分設計

4.1. 目標硬度と組織

材料成分設計に先立ち，目標とする窒化後硬度プロファイルの設定をおこなった．Fig. 17 に，ねらいの疲労強度を達成するための応力勾配から要求される硬度プロファイル (実線) を示す．開発材の硬度プロファイルは，応力勾配から要求される硬度プロファイルを上回る必要がある[11)，12)]．そこで，開発材は破壊起点が 0.3 mm 深さ以上となるように軟窒化拡散深さ 0.3 mm 以上，0.3 mm 深さ硬度を 295 Hv 以上と設定した．また，表層 0.05 mm 深さ硬度は 450 Hv 以上と設定した．

さらに組織は，疲労強度と化合物層の耐摩耗性を確保するのに必要な Mo，V 析出強化能を最大限発揮するために，鍛造空冷後に Mo，V を固溶状態に保つ必要がある．鍛造後空冷時にフェライトが生成した時の，フェライト組織中の Mo-V 炭化物の TEM 解析結果を Fig. 18 に示す．鍛

造後空冷時にフェライトが生成するとMo，Vは固溶状態を保てず，Fig. 18に示すように，フェライト中にMo-V炭化物が粗大凝集化した状態で析出する．このフェライト中に析出したMo-V炭化物はFig. 11やFig. 13のベイナイト中に析出するMo-V炭化物と比べても析出物が凝集し，球状化していることがわかる．これは一般的なV非調質鋼のフェライト中の析出状態と同じであり，その後の軟窒化の熱によって，析出物がさらに粗大化してしまうため，期待された析出強化能が発現できない．フェライト組織とベイナイト組織の析出強化能を調査した結果をFig. 19に示す．横軸に窒化時間，縦軸に硬度を示しているが，フェライト組織は熱処理前後の硬度差ΔHvがベイナイト組織に比べて小さいことがわかる．したがって，軟窒化で高強度化をより効果的に図るために，組織はベイナイト組織とした．

4.2. Mo，V添加量の設定

Mo，V添加量の設定については，析出強化能の高いVから添加量を設定した．Fig. 20にV添加量と析出強化能の関係を示す．0.25 mass%以上は析出強化能がサチレート傾向を示し，また，Vは添加する程，鍛造後の母材硬度を高め，加工性を低下させる．このため，V添加量の上限を0.25 mass%とした．

次にMo，V添加量と600℃×2 hr軟窒化後の0.3 mm深さ硬度との関係をFig. 21に示す．295 Hv以上の硬度を満足するMo，V添加量として，Mo添加量ねらい値を0.20 mass%，V添加量ねらい値を0.20 mass%と設定した．

以上より，析出強化能と軟窒化後必要硬度確保の観点からMo，V添加量を設定した．また，組織をベイナイト組織とするために，C，Si，Mn，Crの添加量を調整した．

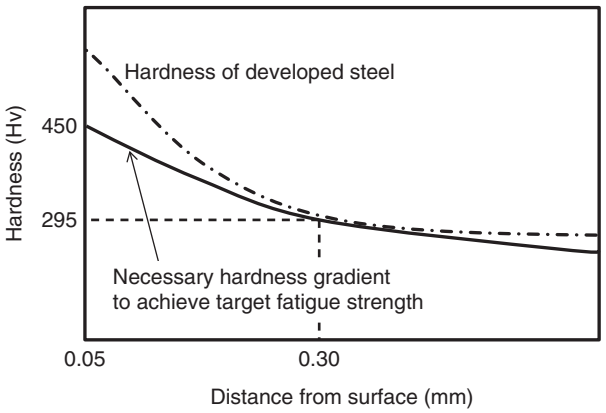


Fig. 17 Hardness transition curve design after nitrocarburization

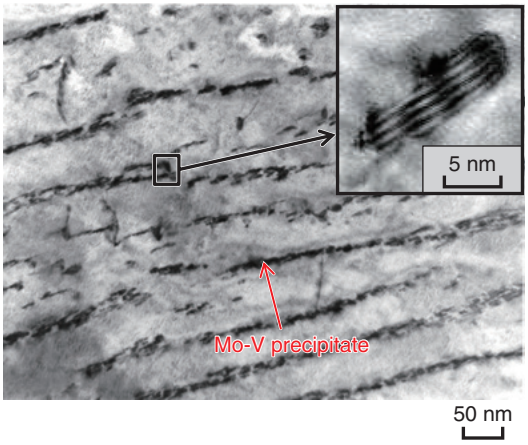


Fig. 18 Mo-V precipitate in ferrite after forging

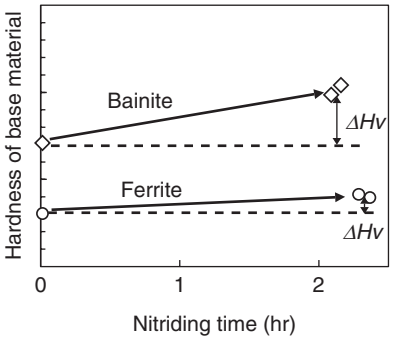


Fig. 19 Relationship between Mo-V precipitate strengthening ability and microstructure

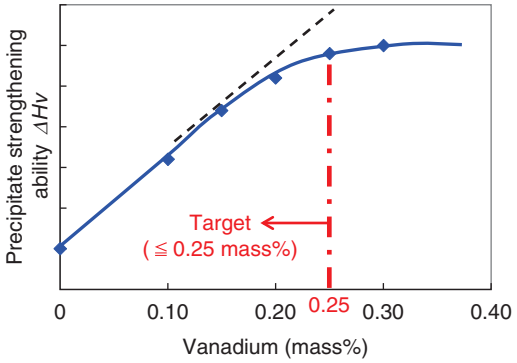


Fig. 20 Relationship between vanadium content and precipitate strengthening ability: ΔHv

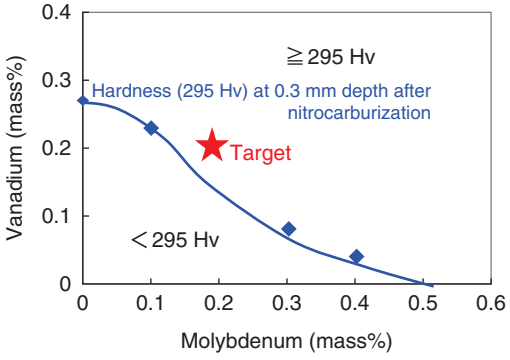


Fig. 21 Relationship between Molybdenum, Vanadium content and hardness at 0.3 mm depth after nitrocarburization

Table 2　Chemical composition of developed and conventional steel

(mass%)

	C	Si	Mn	Cr	Mo	V
Developed steel	0.20	0.50	1.85	0.20	0.20	0.20
Conventional steel	0.48	0.30	1.45	0.10	–	–

以上の検討結果により設定した代表的な材料成分を Table 2 に示す．あわせて，従来材の成分も記載した．

5．材料特性

5.1. 疲労特性

Fig. 22 に示す試験片を用いて，回転曲げ疲労試験をおこなった．試験片は 44 mm × 44 mm に非調質鍛造後，試験片形状に加工して，600℃ × 2 hr 軟窒化処理をしたものを用いた．Fig. 23 に鍛造後硬度（破線）と窒化後硬度プロファイル（実線）を示す．開発材の鍛造後硬度は 270 Hv（グラフ中青破線）程度であるものの，窒化後に内部硬度が 30 Hv 以上上昇し，窒化層部含めてねらいの硬度（グラフ中黒実線）を達成している．また，Fig. 24 に示すように，従来材はフェライト-パーライト組織であり，開発材はベイナイト単層組織が得られている．この開発材の曲げ疲労強度は，Fig. 25 に示すように，従来材に対して 40% 以上高い曲げ疲労強度を達成した．

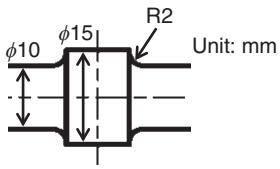


Fig. 22　Geometry of rotating-bending fatigue test specimen

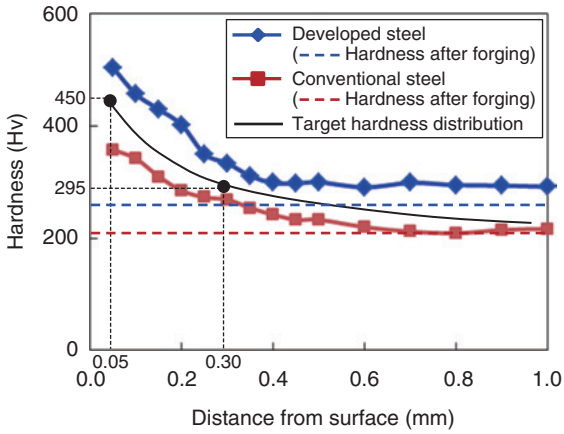


Fig. 23　Hardness distribution of test specimen after nitrocarburization

5.2. 軸メタルしゅう動部耐摩耗性

エンジン構成部品には，劣化エンジンオイルに混入するカーボン粒子のような硬質粒子によるアブレシブ摩耗に対する摩耗タフネスが求められる．そこで，L20 × W20 × H10 mm の試験片を用いて，従来材と開発材に 80 N の一定荷重でスクラッチ試験を実施し，最表層に生成する化合物層特性を評価した．スクラッチ試験は，硬質粒子によるアブレシブ摩耗に対する化合物層特性の評価に適している．

試験片は Fig. 24 に示す窒化品質のサンプルを用いており，開発材は従来材に対して約 80 Hv 程硬い化合物層を形成している．また，化合物層断面の電子後方散乱パターン（Electron Back-Scattering Pattern: EBSP）による結晶粒解析結果を Fig. 26 に示す．開発材の化合物層は結晶粒径が 1.04 μm と従来材（結晶粒径:3.12 μm）の 1/3 程度であり，微細な化合物層を形成していることがわかる．その化合物層の結晶粒微細化による耐摩耗性への効果を確認するため，化合物層の最表層に生成するポーラス層（多くの空孔で形成された層）を従来材，開発材ともに試験前に研磨

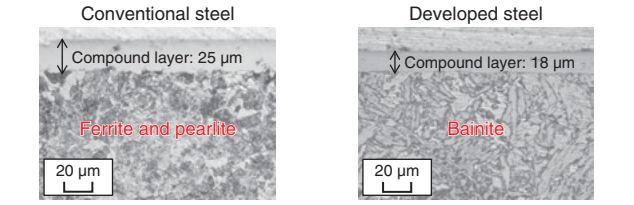


Fig. 24　Microstructure of test specimen after nitrocarburization

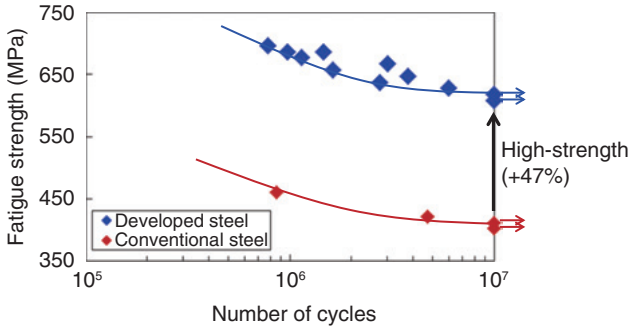


Fig. 25　Result of rotating-bending fatigue strength

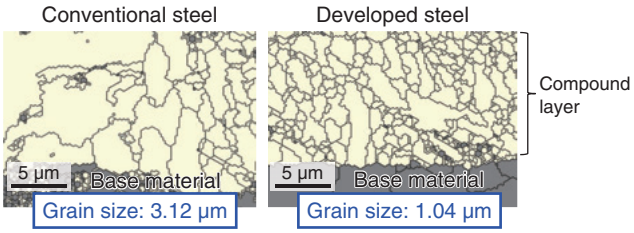


Fig. 26　EBSP analysis of compound layer

にて除去したサンプルを用いた．スクラッチ試験では，化合物層の耐はく離性を評価するため，試験後のスクラッチ痕を光学顕微鏡で観察した (Fig. 27)．その結果，従来材は全面はく離しているのに対して，開発材ははく離が発生していない．以上の結果は，開発材は高硬度でかつ，高じん性な化合物層を形成していることを示している．

また，実機エンジン環境下での耐摩耗性を評価するために，実機エンジン環境を模擬した単体テストを実施した．そのテストの概略図を Fig. 28 に示す．このテストは，カーボン濃度を高めた疑似劣化油を用い，耐アブレシブ摩耗環境の厳しいディーゼル実機エンジンでの軸摩耗を短時間で定量的に評価するのに適している[13]．その結果，Fig. 29 (横軸：時間，縦軸：摩耗量) に示すように，開発材は従来材に対して 200 hr テスト後の摩耗量が約 50% 程度に低減できており，耐アブレシブ摩耗性に優れた化合物層を形成していることを確認した．

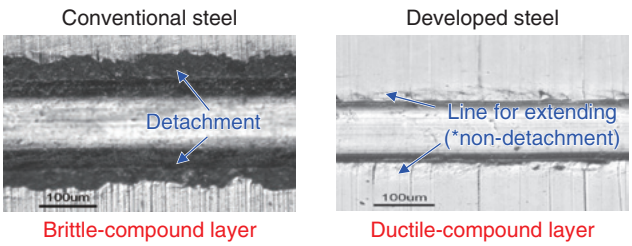


Fig. 27 Compound layer of developed steel and conventional steel after scratching test

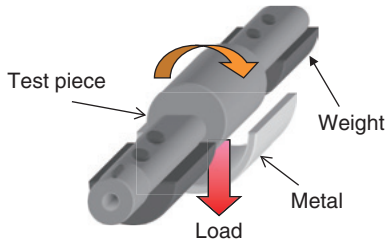


Fig. 28 Abrasion test of shaft

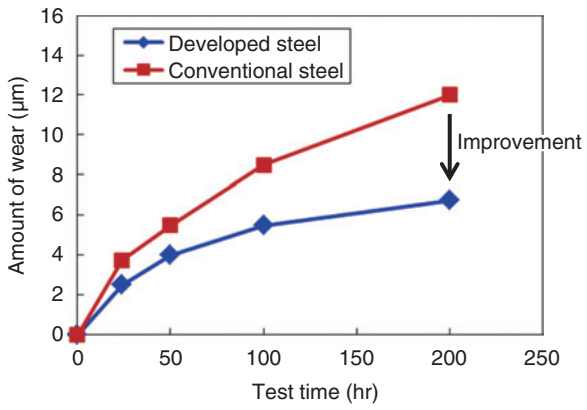


Fig. 29 Relation between test time and wear amount

6．まとめ

Mo-V 炭窒化物の析出強化を活用した高強度および高耐摩耗性軟窒化用鋼を開発した．その中で，以下のことが明らかになった．

(1) Mo-V 炭窒化物析出強化を活用することで，加工時は母材内部硬度を 270 Hv に抑え，窒化後に 300 Hv 以上まで高硬度化を図ることができ，加工性を犠牲にせずに高強度化が可能である．

(2) 組織をベイナイト組織とすることで，鍛造空冷後 Mo，V を固溶状態に保つことができ，最大限の Mo，V 時効硬化能を得ることができる．

(3) Mo，V 添加における高強度化は，軟窒化時の窒化層，母材内部での，8 nm 程度の微細な Mo-V 析出物の Fe 格子との整合析出に伴う大きな格子ひずみによるものである．

(4) 化合物層中に Mo-V 炭窒化物を析出させることで，化合物層の微細化，高硬度化を図ることができ，耐摩耗性に優れた化合物層を得ることができる．

参考文献

(1) 岩間直樹：自動車用特殊鋼部品における最近の技術動向，自動車技術，Vol.55, No.10, p.64-68(2001)

(2) 鈴木信一，谷健二：最近の窒化処理製品，熱処理，Vol.32, No.5, p.262-266(1992)

(3) 諏方悟，川口大二，村上敦，木村和良，多田雅人：焼ならしにより V 炭窒化物の析出を制御した高強度軟窒化クランクシャフトの開発，Honda R&D Technical Review, Vol.22, No.1, p.55-62

(4) 緒方健一郎：回転変動検出を用いたガソリン HCCI 燃焼安定性向上，自動車技術，Vol.66, No.2, p.15-20(2012)

(5) 紅林豊：表面処理技術と高強度鋼材の動向，日本鉄鋼協会西山記念技術講座，p.83-118(2006)

(6) 瀧谷善弘，斎藤勇，宮崎貴大，神谷啓一郎：レアメタルレス高強度軟窒化クランクシャフトの開発，Honda R&D Technical Review, Vol.23, No.2, p.66-71

(7) 野村一衛：自動車用非調質鋼における組織制御技術，まてりあ，Vol.34, No.6, p.705-709(1995)

(8) 濱崎敦，小林勇策：当社の自動車用型鍛造品への取り組み，住友金属，Vol.48, No.4, p.49-59(1996)

(9) 小林幹和，桜田徹，岡部功：ガス軟窒化およびイオン窒化材の疲労強度予測法，日本機械学会論文集，A 編，Vol.62, No.597, p.1132-1139(1996)

(10) 木村和良，高田勝典，保母誠：Mo-V 添加低炭素鋼の時効硬化特性に及ぼす合金元素の影響，電気製鋼，Vol.79, No.1, p.61-67(2008)

(11) 西坂強，佐藤康夫：フレッチング損傷防止に関する研

究，トライボロジスト，Vol.40, No.9, p.768-775(1995)
(12) 井上幸一郎，松村康志：中炭素鋼の軟窒化特性に及ぼす合金元素の影響，電気製鋼，Vol.75，No.1，p.11-18(2004)
(13) 恩田勇人，浅井鉄也，藤木賢治，工藤洋嗣，室伏和昌：高強度高周波焼入れクランクシャフトの開発，Honda R&D Technical Review, Vol.15, No.2, p.175-182

■著　者■


増田大樹


松田英樹


山崎歩見

MBD 実現に向けたエンジンプラントモデルと段階的システム同定環境の構築

Development of High-performance Engine Plant Model and Sequential System Identification Environment for Realization of Model-based Development

藤 本 茂 希* Shigeki FUJIMOTO
大 高 義 行* Yoshiyuki OHTAKA
小 堂 智 史* Satoshi KODO

要　旨

ソフトウェア開発手法の一つであるVプロセスとモデルベース開発(MBD)を合わせたMBD-Vプロセスによる開発の効率化が，各自動車メーカで進められている．このMBD-Vプロセスにおいては，設計と検証工程の対応レベルに合わせて階層化し，各階層では異なるプラントモデルを利用する．エンジン開発でこのMBD-Vプロセスを推進するにあたり，同階層モデルの一致性と異階層モデルの整合性に課題があった．そこで，同階層共通で使える高性能プラントモデルを開発し，異階層モデルを段階的にシステム同定することで，全階層で一貫したプラントモデルを使用することができる環境を構築した．この環境で作成したプラントモデルをMILS，HILS環境で動作検証し，構築した環境の有効性を確認した．

ABSTRACT

Attempts to realize more efficient development by combining the V-model, a method used in software development, with model-based development (MBD) are proceeding among automotive manufacturers. The design and test processes for this combined development method are organized into corresponding levels, and different plant models are used for each level. Attempts to employ an MBD-V-model combination in engine development presented the issues of mismatches between models on the same level, and lack of consistency between models on different levels. A high-performance plant model able to be used in both design and test procedures on the same level was therefore developed, and an environment was created making it possible to use consistent plant models at all levels by means of sequential system identification of models for different levels. The functioning of models generated by this environment was studied in MILS and HILS environments, verifying the effectiveness of the developed environment.

1．まえがき

一般的なソフトウェア開発では，以前より設計工程とテスト工程の対応関係をV型に整理したVプロセスが採用されている[1]．

Fig. 1[2]のVプロセスでは，左半分に設計工程を右下がりで，右半分にテスト工程を右上がりで並べた図として表現され，工程の繋がりがソフトウェア開発過程を表すと共に，左右の関係で設計工程の各要求がどのテスト工程に対応しているかを示している．テスト工程では，対応する設計工程の要求を基に，達成しているか否かの確認や検証をおこなう．

この左右の対応関係に応じて上下に分割したものを階層と呼ぶ．各階層では目的や視点が異なるため，要求やテスト項目も異なってくる．

一方，開発スピードや品質の向上を目指したフロントローディングを達成するための手段として，モデルベース開発(MBD)が注目されている[3]．一般的な制御ECUの

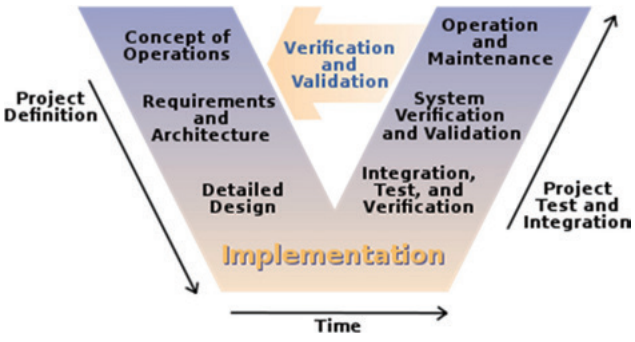


Fig. 1　Standard V-model

＊四輪R&Dセンター

https://doi.org/10.69239/hondatechnicalreview.2012_24_2_17

MBD では，コントローラと制御対象であるプラントの機能をモデル化し，開発初期から各工程においてモデルを活用する．このモデルを用いて，これまでテスト工程でおこなわれていた検証作業の一部を設計工程に前倒しすることで，仕様変更等の大きな手戻り負荷を減らし，ECU の品質向上や開発期間の短縮を実現することができる．

近年では，この V プロセスと MBD を組み合わせ，V プロセスの階層に応じたモデル化をおこなうことで，より効率的なモデル活用を目指した取り組みが各自動車メーカで進められている[4]．

Honda でも以前よりこの MBD-V プロセスを推進する試みをおこなってきた．エンジン開発における MBD-V プロセスの概略を Fig. 2 に示す．V プロセスの各階層は上から車両，システム，ハードウェアおよびコントローラ，実装に分けられ，それぞれの工程では目的に応じたモデルを用いて開発を試みている．

しかし，この MBD-V プロセスを実践するにあたり，制御対象のエンジンをモデル化したプラントモデルに対して以下のような課題があった．

一つ目は同一階層内でのプラントモデルの不一致である．MBD-V プロセスで検証の前倒しをおこなうためには，同一階層内で等しいプラントモデルを使用する必要がある．しかし，コントローラ階層では，テスト工程の Hardware In the Loop Simulation（HILS）にてリアルタイムシミュレータを使用するため，プラントモデルに求められる計算速度の制約が厳しく，設計工程での Model In the Loop Simulation（MILS）と同一のプラントモデルを使用することは困難であった．

二つ目は異なる階層間でのプラントモデルの不整合である．従来，各階層ではそれぞれ目的や視点が異なるため，各工程で独自のプラントモデルを作成し開発に利用してきた．そのため，各階層間のプラントモデルは挙動に整合がとれず，システム階層のプラントモデルで検討したシステム要件をコントローラ階層に直接反映できなかった．その結果，MBD を活用したコントローラ検証の前倒しは困難であった．

上記 2 点の課題を解決するため，まずコントローラ階層にて設計およびテストで共に使用可能な，高性能プラントモデルを開発し，次にこのプラントモデルをシステム階層から段階的にシステム同定することで，階層間で異なるプラントモデルの挙動を一致させる環境を構築したのでここに紹介する．

2．開発のねらい

今回開発した高性能プラントモデル High Performance Engine plant Model（HPEM）の必要条件と段階的システム同定環境の概要，および達成基準について以下に示す．

2.1. HPEM 開発における必要条件

コントローラ階層の HILS および MILS で共に使用可能なプラントモデルを開発するに当たり，モデル挙動と計算速度には次のような必要条件がある．

一つ目はモデル挙動の必要条件である．近年のエンジンは，制御すべきアクチュエータおよびセンサ数の増加や，厳しい法規制に対応するため，制御ロジックの複雑度が増している．排気ガス規制に対応するための空燃費フィードバック制御を例にとると，状態推定器を備えた適応制御理論に基づく制御ロジックを実装しているが[5]，このような制御ロジックの動作確認をおこなうためには，エンジンのプラントモデルが，実機エンジンの無駄時間や遅れ要素といった，時間軸に対する動的な挙動を表現でき

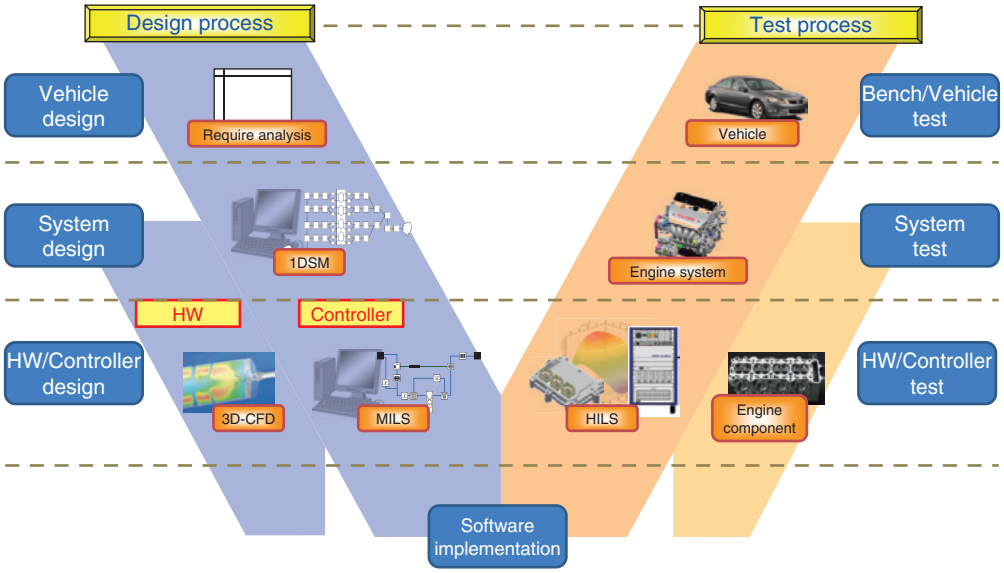


Fig. 2　Model-based development combined with V-model

る必要がある.

二つ目は計算速度の必要条件である. HILS は ECU 本体の検証を目的としたもので, 実物の ECU とプラントモデルを搭載したコンピュータと接続し, リアルタイムで動作するシミュレータである. そのため, コンピュータに搭載するプラントモデルの計算負荷が高いと, リアルタイムでエンジンの状態を算出できず, ECU の検証ができない. リアルタイムでの演算ができるか否かは搭載するコンピュータの性能に依存するが, 現在市販されているリアルタイムシミュレータは, 一般的な PC の演算処理性能とほぼ等しい. このような計算速度条件下で, リアルタイムに演算ができるプラントモデルが必要となる.

上記のモデル挙動と計算速度の必要条件のもと, 一般的な Mean Value Engine Model (MVEM)[6] をベースに, エンジン仕様に合わせてカスタマイズをおこない, HPEM を開発する.

2.2. 段階的システム同定環境の概要

まず, エンジンプラントモデルとその使用目的を, 以下に紹介する.

2.2.1. 1D-Simulation Model (1DSM)

1DSM は動径方向のみの数値流体力学 (CFD) 解析をおこなうモデルであり, 3D-CFD と比較して計算負荷が軽く, システム全体での性能予測が可能となる. そのため, システム設計工程にて, 主に吸排気諸元の検討やモード燃費計算, 簡易燃焼評価を目的として使用している.

2.2.2. Mean Value Engine Model (MVEM)

空間的広がりを考えない集中定数系で, 各燃焼サイクルの出力を時間軸で平均化して計算するモデルである. CFD 計算をおこなっていないので 1DSM よりさらに計算負荷が軽い. 反面, クランク角毎の挙動が表現できないため, ハードウェアの設計には向かない. そのため, コントローラ設計工程の MILS にて, 制御ロジックの動作確認モデルとして使用する.

2.2.3. MAP Engine Model

MAP Engine Model とは, エンジンの各コンポーネント特性を, 実験値に基づき入出力の単純な対応付けで表現したモデルである. 各状態値を高速に参照できるが, 作成に当たり全運転状態での計測又は計算データを事前に用意する必要がある. コントローラテスト工程の HILS にて ECU 本体の検証に使用されるが, アクチュエータやセンサ数が増加している現在, 全状態を網羅的に設定することは困難であり, 主に制御ロジックのデバッグや On Board Diagnosis (OBD) 検証といった限られた用途にのみ使用している.

2.2.4. 段階的システム同定フロー

本稿ではコントローラの開発フローに着目し, MVEM と MAP Engine Model の役割を HPEM で担い, 既存のエンジンから, 1DSM, HPEM を段階的に同定することで, 階層間で異なるプラントモデルの挙動を一致させる環境を構築する.

各階層間のプラントモデル挙動を一致させるため, 本稿が提案する段階的なシステム同定フローを Fig. 3 に示す. この図は使用するモデルのカテゴリと, 開発工程におけるモデルの変遷を表している. 制御対象となるエンジンプラントモデルに注視すると, 初めに既存エンジンのベンチ計測結果と 1DSM を同定し, 次に 1DSM 上で開発エンジンに合わせて諸元値の変更をおこなう. 次に変更した 1DSM の計算結果から HPEM を同定する. このような段階的システム同定を経て得られたプラントモデルを MILS および

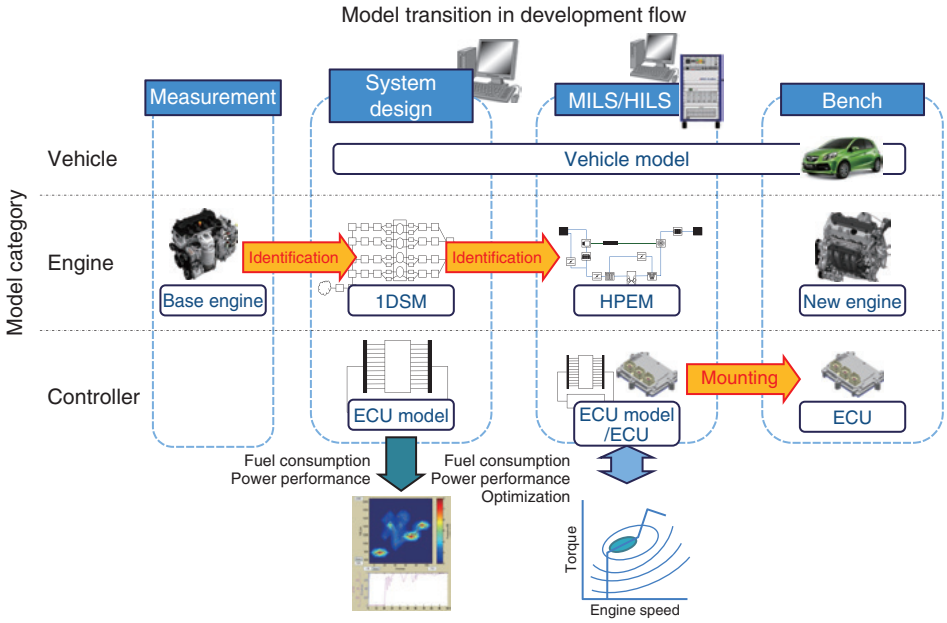


Fig. 3 Identification flow for engine plant model

HILS で使用することで，システム階層で検討したシステム要件が直接コントローラ階層に反映でき，ECU 検証の前倒しが可能となる．

2.3. プラントモデルの達成基準

2.1. 節の HPEM と段階的システム同定環境の有効性を確認するため，検証手順と達成基準を以下に示す．

2.3.1. 段階的システム同定の達成基準

段階的システム同定環境の検証として，まず，既存エンジンと 1DSM の同定結果を比較し，その誤差が許容範囲に収まっているかを確認する．次に，1DSM と HPEM の同定結果を比較し，同じく許容誤差範囲に収まっているかを確認する．達成基準として，それぞれの比較対象と許容誤差範囲を，既存エンジンと 1DSM の比較では吸排気系誤差 3% 以内，1DSM と HPEM の比較では BSFC 誤差 3% 以内に設定する．

既存エンジンと 1DSM の比較対象を吸排気系に限定したのは，1DSM における燃焼系は既存エンジンの計測結果を実験式として直接取り込むため，精度比較をおこなう必要がないためである．また，各許容誤差を 3% と定めたのは，実際のエンジンベンチの計測ばらつきがおよそ 3% であることに起因しており，この数値を達成すれば制御対象のプラントモデルとして十分な精度を満たしているといえる．

2.3.2. HPEM の達成基準

HPEM の検証として，まず段階的にシステム同定をおこなったプラントモデルを，簡易 ECU モデルと共に MILS に実装し，燃費を算出する各種モード走行にて動作確認をおこなう．次に同プラントモデルを HILS に搭載し，実物 ECU と接続して同様の動作確認をおこなう．その際，市販の HIL シミュレータを使い，計算が収束する最大のタイムステップで，リアルタイム計算ができることを達成基準に設定した．これは計算するモデルやソルバの種類によって，計算が収束するタイムステップは異なるものの，実用に耐えうるプラントモデルであることを重視したためである．

3．HPEM の開発

3.1. HPEM の構成

システム設計工程で使用される 1DSM は，クランク角度ごとの吸排気や燃焼状態の計算を逐次おこなっているのに比べ，一般的な MVEM は各燃焼サイクルの出力を時間軸で平均化した平均値モデルである．MVEM は 1 次元や 3 次元の CFD 計算をおこなっていないので計算負荷は低いが，Map Engine Model と異なり微分方程式による動的な挙動を表現できるため，コントローラ設計時の制御対象モデルに適している．

HPEM は MVEM をベースとし，HILS 用に計算負荷を低減させるべく，一般的な教科書や論文等で広く認知されている数式，実測値から作成した実験式，応答曲面を計算精度と計算負荷の観点で取捨選択した．また数式による特性の表現は，1DSM からの予測値を反映できるよう，スロットルバルブ，インテークマニホールド，シリンダ，エキゾーストマニホールド，タービン，コンプレッサ，インタークーラ，キャタライザ等，部位別に細かくモデル化した (Fig. 4)．部位別に立てた多数の式を，数式処理ソフトを用いて式の簡単化をおこなった後実装することで，さらに計算負荷を低減し，リアルタイムの演算が可能となった．

3.2. HPEM の計算概要

HPEM は，空気，EGR ガスの流れを計算する吸排気系のモデルと，シリンダにおける燃焼の計算をおこなう燃焼

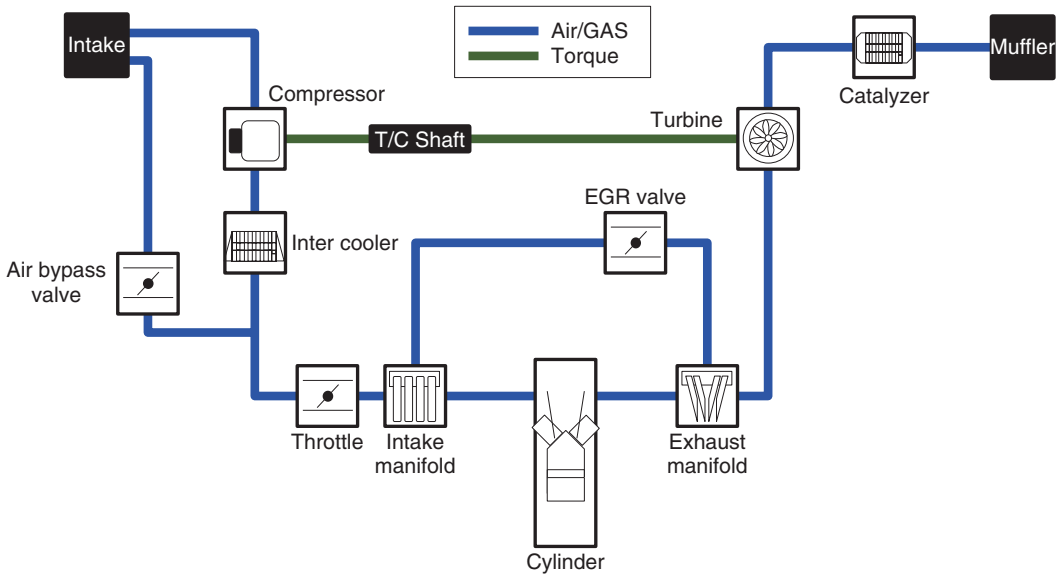


Fig. 4　High Performance Engine Plant Model (HPEM)

系のモデルから構成され，エンジン回転，ECU 指示値を起点として計算がおこなわれる．

エンジンが回転することによりシリンダに空気が吸入され，これによりインテークマニホールド圧が低下する．一方，シリンダに吸入された空気量と ECU 指示値である燃料噴射量，点火タイミングより図示平均有効圧（IMEP）が算出され，この IMEP とポンプ損失平均有効圧（PMEP），摩擦平均有効圧（FMEP），トランスミッションからの負荷トルク，エンジンの慣性モーメントからエンジン回転数を計算する．また，シリンダからの排気ガスと ECU 指示であるウェストゲート開度からタービン，コンプレッサの仕事量が計算され吸気系の空気が過給される．このスロットル前後の過給圧とインテークマニホールド圧，ECU 指示であるスロットル開度からスロットルを通過する空気量が算出される．

3.2.1. 吸気系モデル

吸排気系のモデルは，空間的広がりを考えない集中定数系の 0 次元モデルである．このモデルは気体の状態方程式（$PV=mRT$），連続の式（質量保存），熱量の関係，オリフィスの式を用いてレシーバとオリフィスにより構成される．

参考として，スロットルモデルの数式[6]を以下に示す．

$$\dot{m} = C_d \cdot A(t) \cdot \frac{p_{in}(t)}{R \cdot \vartheta_{in}(t)} \cdot \Psi\left(\frac{p_{in}(t)}{p_{out}(t)}\right)$$

$$\Psi\left(\frac{p_{in}(t)}{p_{out}(t)}\right) = \begin{cases} \sqrt{\kappa\left[\frac{2}{\kappa+1}\right]^{\frac{\kappa+1}{\kappa-1}}} & \text{for } p_{out} < p_{cr} \\ \left(\frac{p_{out}}{p_{in}}\right)^{\frac{1}{\kappa}} \cdot \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa-1}\cdot\left[1-\left(\frac{p_{out}}{p_{in}}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}\right]} & \text{for } p_{out} \geq p_{cr} \end{cases}$$

$$p_{cr} = \left(\frac{2}{\kappa+1}\right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa-1}} \cdot p_{in}$$

t : Time
$\dot{m}(t)$: Mass flow through the valve
c_d : Discharge coefficient
$A(t)$: Open area of the valve
$p_{in}(t)$: Pressure upstream of the valve
$p_{out}(t)$: Pressure downstream of the valve
p_{cr} : Critical pressure where the flow reaches sonic conditions
R : Gas constant
$\vartheta_{in}(t)$: Air temperature
κ : Ratio of specific heats

3.2.2. 燃焼系モデル

燃焼系のモデルは，実験式により定義した熱発生率とシリンダ容積を，熱力学の第 1 法則，状態方程式，比熱の関係に代入することにより筒内圧を算出し，この筒内圧を体積変化で積分することにより IMEP を算出する．この燃焼モデルにより，点火タイミングに対する出力変化や燃焼パラメータ（燃焼重心，熱発生量等）も算出可能となる．

4．段階的システム同定環境の構築

一般的に，システム同定とは同定対象に応じて以下二つの手法が存在する．

一つ目はグレーボックス・モデルの同定である．グレーボックス・モデルとは，システム構造がほぼ明らかで，対象を支配する物理方程式に基づく数式によって記述されたモデルである．ただし，このモデルでは物理特性が計測できないパラメータもあり，それらを推定するためにシステム同定をおこなう．この手法をコリレーションと呼ぶ．

二つ目はブラックボックス・モデルの同定である．ブラックボックス・モデルとはシステム構造が不明，あるいは複雑で記述が困難な場合，実際に何が起きているかという詳細に立ち入らず，入出力の数学的関係のみでモデル化されたものである．このモデルの同定には，最小二乗法などを用いて，入出力が一致するような近似式を作成する．この手法を応答曲面作成と呼ぶ．

既存のエンジンから，1DSM，HPEM を段階的に同定するにあたり，プラントモデルの各部位ごとの特性に応じて，上記のコリレーションと応答曲面作成の両手法を組み合わせて実施した．

実際の各部位の同定手順を以下に示す．初めにエンジン吸排気系に関する同定フローを Fig. 5(a) に示す．まず既存エンジンの体積効率特性を目標値とし，1DSM の体積効率が指定誤差範囲内で目標値に一致するよう，1DSM の筒内壁温度を同定パラメータとしてコリレーションをおこなった．コリレーションアルゴリズムには遺伝的アルゴリズム（GA）による最適値探索法を用いた．次にこの同定した 1DMS から，エンジン回転数，目標吸気圧，点火タイミング，VTC 等を設計変数とし，実験計画法（DOE）を用いて体積効率特性の応答曲面を作成した．そこで作成した数式を HPEM へ組み込んだ．

続けてエンジン燃焼系に関する同定フローを Fig. 5(b) に示す．既存エンジンで計測した筒内圧波形から，燃焼状態に影響する各操作量を設計変数とし，燃焼重心と燃焼期間の応答曲面を作成した．その応答曲面の数式を，1DSM の燃焼モデル Wiebe[7]の式に組込んだ．この 1DSM の燃焼出力を目標値にとり，HPEM の燃焼モデルの出力が，指定誤差範囲内で一致するよう，GA を用いて同定パラメータのコリレーションをおこなった．

最後に各コンポーネントの細かな特性やフリクションロス等も，同様の手法により既存エンジン，1DSM，HPEM の段階的システム同定をおこない，最終的に各モデルの出力トルク，BSFC が共に許容誤差範囲で一致するエンジンプラントモデルを作成した．

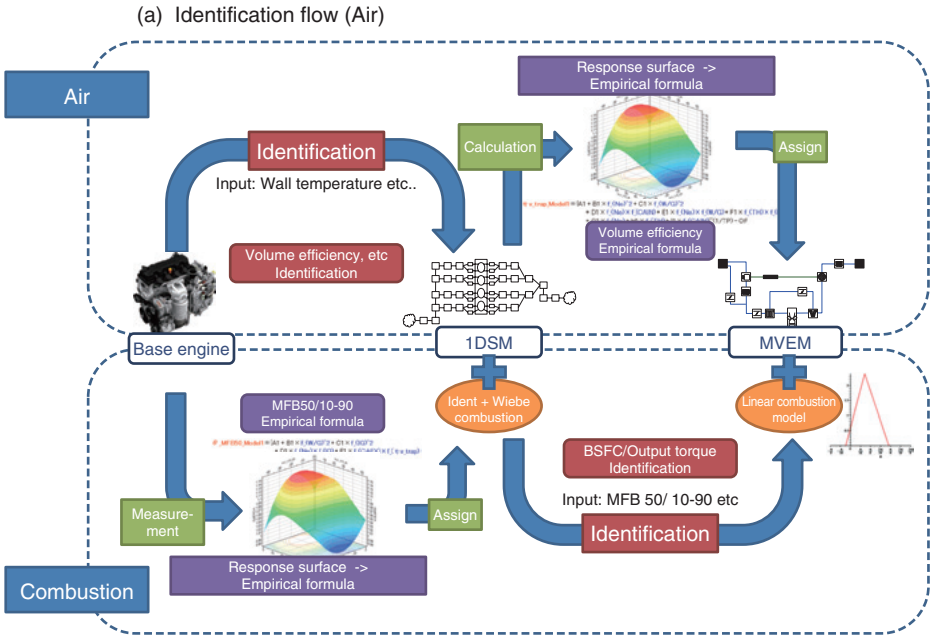


Fig. 5　Identification flow

5．プラントモデルの動作検証

HPEM と段階的システム同定環境の有効性を確認するため，それぞれに対する検証をおこなった．

5.1. 同定検証

段階的システム同定環境の検証として，まず，試作エンジンと 1DSM の吸排気系のシステム同定結果を比較した．両体積効率の比較結果を Fig. 6 に示す．

グラフは横軸に回転数，縦軸に体積効率を表している．この結果から，誤差が 3% の許容範囲に収まっていることを確認した．

次に，1DSM と HPEM の同定結果を比較した．両モデルの BSFC の比較結果を Fig. 7 に示す．各回転時における BSFC が同じく誤差が 3% の許容範囲に収まっていることを確認した．

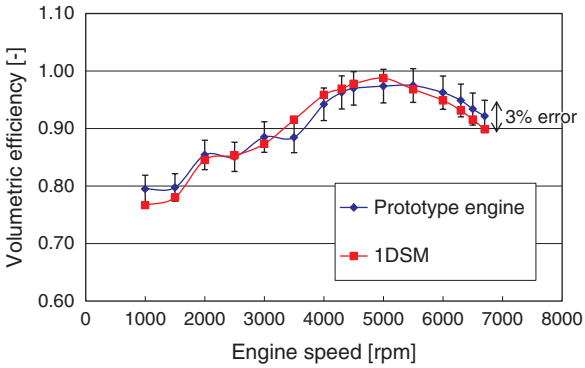


Fig. 6　Comparison between prototype engine and 1DSM

この他，各コンポーネント単位で入出力を確認し，各プラントモデルの挙動を許容誤差範囲内で一致させることができていることを確認している．

5.2. モデル検証

HPEM の検証として，まず段階的同定をおこなった後のプラントモデルを，簡易コントローラモデルと共に MILS に実装し，燃費や加速性能を算出する各種モード走行にて動作確認をおこなった．次に同プラントモデルを以下で説明する構成の HILS に搭載し，実物 ECU と接続して同様の動作確認をおこなった．

Fig. 8 に今回使用した HILS の構成を示す．HILS は，ECU とリアルタイムシミュレータを Load Rack を介して接続する構成となっている．この Load Rack はシミュレー

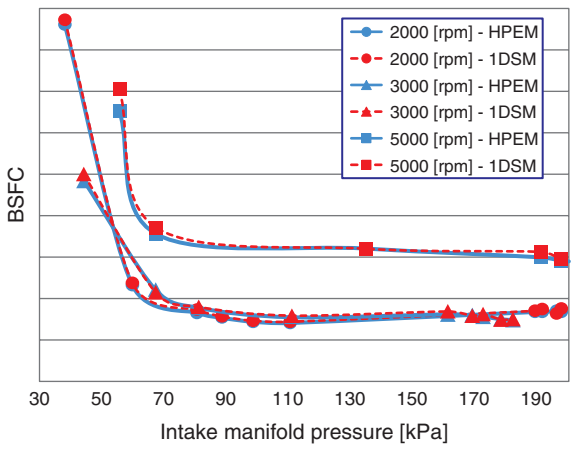


Fig. 7　Comparison of 1DSM and HPEM

タで模擬することが困難な信号を，実デバイスによって補う役割をしており，リニアソレノイド，インジェクタ，DBW，ヒータ抵抗，擬似抵抗等を内包している．

試作エンジンと HILS プラントモデルのそれぞれで，JC08 と NEDC の異なる二つの燃費モード走行をおこなった結果を Fig. 9 に示す．エンジンベンチと HILS の吸入空気量を走行モードごとに比較した．両モードとも実機に近い動的挙動を示しており，このエンジンプラントモデルが特定のモード走行に依存せず ECU 検証に利用可能な精度であることが確認できた．

また，このプラントモデルの HILS 上で計算時間を Fig. 10 に示す．グラフは各タイムステップにおいて，実際の計算時間がどれくらいかかったかを表している．今回の検証では，計算を収束させるため，サンプリング時間を 200 µsec で実行しているが，両走行モード共にサンプリングにおけるプラントモデルの計算時間は最大でも 90 µsec 未満に収まっており，リアルタイム計算をおこなうにあたり十分な計算速度を示していることが確認できた．

以上の検証から，作成した HPEM が，コントローラ階層の設計およびテストの MILS と HILS で，共に使用可能な精度と速度を満たしていることが確認できた．

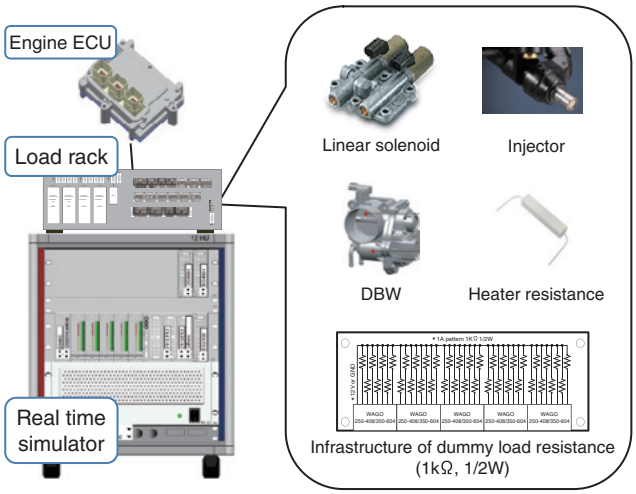


Fig. 8 Hardware-in-the-Loop Simulation (HILS)

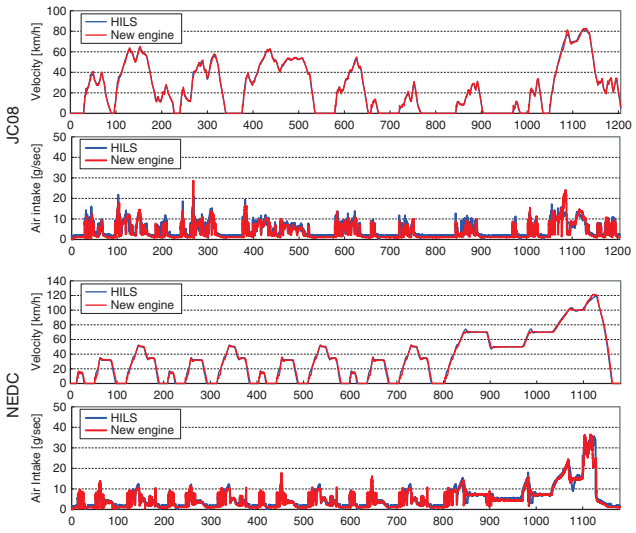


Fig. 9 HIL simulation result

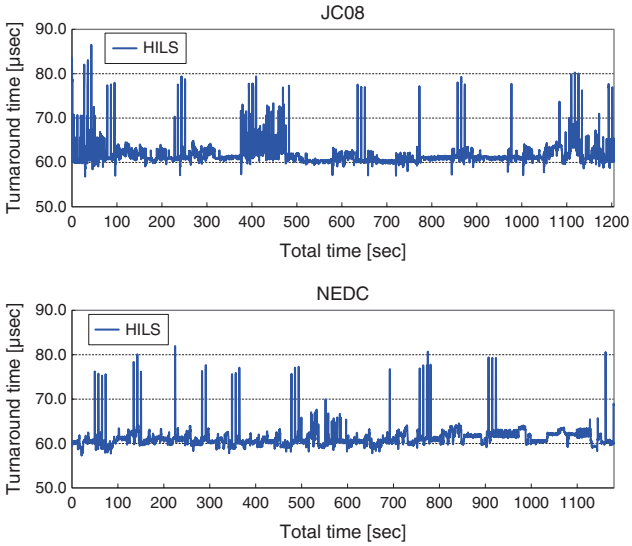


Fig. 10 Turnaround time of HIL simulation

6. まとめ

Honda で MBD-V プロセスを実現するあたり，プラントモデル上の課題となっていた，同階層モデルの不一致と異階層モデルの不整合を解決するため，以下の開発と検証をおこなった．

（1）コントローラ階層において，設計とテストで共に使用可能な HPEM を開発し，MILS および HILS にてその動作確認をおこない，同階層モデルの不一致を解決した．

（2）既存エンジンから 1DSM，HPEM と段階的システム同定をおこなうことができる環境を構築し，異階層モデルの不整合を解決した．

7. あとがき

この HPEM と段階的システム同定環境を活用することで，MBD-V プロセスによる開発効率の向上が見込まれる．今後は開発の中でこの環境を利用した新規制御ロジックの実装をおこない，MBD-V プロセスの有効性を実証していく．

MBD-V プロセスを定着させるためには，これらの環境を継続的に運用，管理していくことが重要である．また，技術者の教育にあたっては多くの課題を含んでおり，これらを乗り越えていくためには，開発メンバ全員で将来ビジョンを共有し，戦略的に推進する必要があると考える．

参考文献

（1）Forsberg, K., Mooz, H.: The Relationship of Systems Engineering to the Project Cycle, First Annual Symposium of the National Council On Systems Engineering(1991)

（2）Federal Highway Administration: Clarus Concept of Operations, FHWA-JPO-05-072, p.20(2005)

（3）Schatz, B., Pretschner, A., Huber, F., Philipps, J.: Model-based Development of Embedded Systems, Advances in Object-Oriented Information Systems, p.331-336(2002)

（4）独立行政法人情報処理推進機構：「組込みシステムの先端的モデルベース開発実態調査」調査報告書 (2012)

（5）Hasegawa, Y., Akazaki, S., Komoriya, I., Maki, H., Nishimura, Y., Hirota, T.: Individual Cylinder Air-Fuel Ratio Feedback Control Using an Observer, SAE Technical Paper 940376(1994)

（6）Guzzella, L., Onder, C.: Introduction to Modeling and Control of Internal Combustion Engine Systems, Springer(2010)

（7）Wiebe, I. I.: The Combustion Speed in Internal Combustion Piston-Engines-fuel combustion rate equation combining an empirical and a theoretical approach, Collected works of piston engine research, Laboratory of Engines, Academy of Science(1956)

■著　者■



藤本茂希



大高義行



小堂智史

交通流改善およびエコドライブでの CO_2 削減ポテンシャルの推計

Estimation of CO_2 Reduction Potential by Traffic-flow Smoothing and Eco-driving Promotion

今 泉 秀 俊* 仙 石 浩 嗣**
Hidetoshi IMAIZUMI Koji SENGOKU

要 旨

日本全国のフローティングカーデータの解析により，交通流改善とエコドライブの普及によってどの程度 CO_2 削減ポテンシャルがあるかのケーススタディを試みた．使用したデータはエコアシストが搭載されているハイブリッド自動車のものであり，これまでの研究では運転回数を重ねると約 10％の燃費向上があると報告されている．まず対象のフローティングカーデータを重回帰分析することで燃費を被説明変数とし，交通流とエコドライブに関する項を説明変数とする多項式を求めた．説明変数は現在の分布とエコドライブが普及し交通流が改善された想定条件の分布を設定した．その想定条件を多項式に反映することにより，現在と想定条件における燃費頻度分布を求め，その差から CO_2 の削減ポテンシャルを算出した．想定条件においては主に交通流改善により 18％の燃費改善ポテンシャルが算出された．一方エコドライブは，エコアシストの約 10％の改善に加え，1％の燃費改善ポテンシャルが算出された．さらに CO_2 削減ポテンシャルの３分の２が旅行速度 30 km/h 以下の走行での改善であることがわかった．

ABSTRACT

A case study was conducted by analyzing floating car data from throughout Japan to determine the CO_2 reduction potential due to traffic-flow smoothing and eco-driving promotion. The data used in this study is from hybrid cars equipped with Eco Assist, which has been reported in past studies to enhance fuel economy by approximately 10% as the number of driving times increases. First, multiple regression analysis was performed on the subject floating car data to obtain a polynomial with fuel economy as the explained variable and items related to traffic flow and eco-driving as the explanatory variables. The explanatory variables set the present distribution and the distribution under the assumed conditions of eco-driving promotion and smoothed traffic flow. These assumed conditions were applied to the polynomial to obtain the fuel economy frequency distributions for the present and assumed conditions, and the CO_2 reduction potential was calculated from the difference between the two. The assumed conditions were calculated to have a fuel economy enhancement potential of 18%, mainly due to traffic-flow smoothing. On the other hand, eco-driving was calculated to have fuel economy enhancement potential of 1% over and above the approximately 10% enhancement of Eco Assist. In addition, it was found that 2/3 of the CO_2 reduction potential was enhancement when driving at a travel speed of 30 km/h or less.

1．まえがき

温室効果ガスおよびエネルギー消費削減気運の高まりに応じ，乗用車部門においては各国の燃費規制が強化されている．一方で乗用車単体のカタログ燃費改善だけでなく，燃料の多様化，実走行における燃費を向上させるエコドライブなどの効率的利用や交通流の改善などの統合的な対策の重要性が認知されつつある．

エコドライブについては，講習会やバーチャルトレーナ，エコアシスト，外付け燃費計などによる効果が個々に評価され，10％から 30％の燃費改善効果の報告がある[(1),(2)]．また交通流改善については，信号制御の変更や道路整備，高度道路交通システム（ITS），交通需要マネジメント（TDM）などで個々にさまざまな燃費効果などの報告がある[(3)-(5)]．しかしそれらの効果は交通状況に大きく依存しており，日本全体での交通流と燃費の相関データが

＊ 四輪 R&D センター
＊＊本田技研工業株式会社

https://doi.org/10.69239/hondatechnicalreview.2012_24_2_18

ほとんど取得できなかったことから，日本全体の CO_2 削減ポテンシャルを定量化したものはなかった．

しかし著者らは携帯電話回線等を利用した車載ナビゲーションシステムから公道での走行データを分析し，エコドライブが普及し交通流が改善した想定条件における CO_2 削減ポテンシャルの算出をおこなっている[6]．

さらに本稿では CO_2 削減ポテンシャルの算出にくわえてそのポテンシャルについて分析をおこない，どのような車の使われ方で燃費改善効果が大きいか，CO_2 削減効果が大きいかを明確にする．

2．分析対象データの概要

2.1. 分析対象車両

本研究ではハイブリッド自動車のフローティングカーデータの分析をおこなった．対象ハイブリッド自動車の諸元を Table 1 に示す．本車両にはエコロジカル・ドライブ・アシストシステム（エコアシスト）が搭載されている．

エコアシストとは，Fig. 1 のような ECON スイッチを押すだけで燃費優先の制御をおこなう ECON モード機能，Fig. 2 ようにリアルタイムに燃費によい運転ができているかをメータに表示するコーチング機能，Fig. 3, Fig. 4 のようにドライバのエコ運転度を採点しアドバイスをおこなうティーチング機能のことである．

エコアシストは，5000 台の新車納入直後から半年間の燃費データ分析により，Fig. 5 のように約 10％の燃費向上効果があることが報告[1]されている．本研究においてはこのエコアシストによる約 10％の燃費向上に加えさらにエコドライブによりどれだけの CO_2 削減ポテンシャルがあるかの算出をおこなう．

2.2. フローティングカーデータ

2003 年より始まったフローティングカーデータ（以降，データと呼ぶ）による交通情報システムは，会員が走行した道路のリンク旅行時間をインターナビ情報センタで収集と処理をおこない，会員ごとの要求に応じたリンク旅行時間をカーナビに配信し，道路交通情報通信システム（VICS）情報を補完すると共に最適なルートを提供

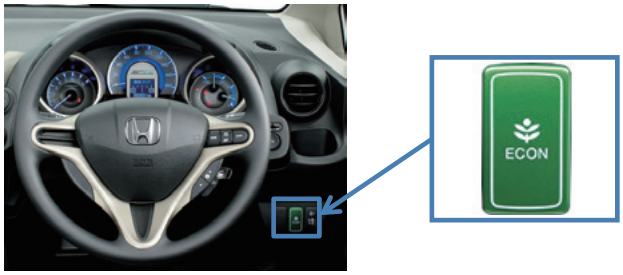


Fig. 1　ECON switch

Table 1　Specifications of hybrid cars

Type	1.3L i-VTEC+IMA
Number of engine cylinders and layout	Inline-4
Max. engine output	65 kW
Motor type	Synchronous motor
Max. motor output	10 kW
Transmission	CVT
Vehicle weight	1130 - 1150 kg

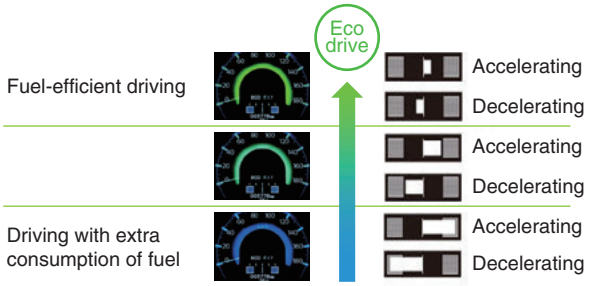


Fig. 2　Real-time fuel-efficient driving guidance at speedometer



Fig. 3　Display scores current driving performance



Fig. 4　Advice for enhancing fuel economy at Internavi system display

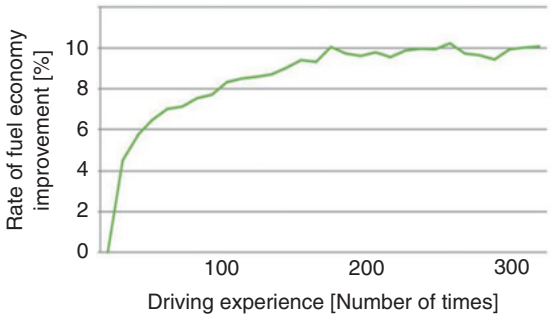


Fig. 5　Effect of fuel economy improvement due to the eco-assist system

するものである (Fig. 6).

さらに一部の車両では, 会員から燃料消費量などの情報もセンタに送信され解析し, 会員に省燃費ルートなどとして提供している.

会員からアップロードされるデータは, 平日で約 200 万 km, 土日で約 290 万 km, その累積距離は 2010 年末で約 18 億 km を超えた. Fig. 7 は 2009 年 8 月 15 日に会員からアップロードされたデータを可視化したもので, 日本中からデータを取得できているのがわかる.

本研究では, ハイブリッド自動車の 2010 年 10 月から 2011 年 6 月までに日本全国から収集された総走行距離 7882 万 km のデータについて解析をおこなった. 解析をおこなうデータは, 走行中に取得されるさまざまな種類のデータを, 各車両の一日の平均燃費, 一日の平均車速など, 一日単位で平均化した数値とした.

2.3. 現状の交通流と燃費の関係

Fig. 8 に取得されたデータの平均旅行速度と燃費および走行量との関係を示す. なお本稿における燃費は, 各燃費値 (L/km) を全体の平均燃費 γ (L/km) で除したものを燃費指数 (Fuel economy index) として表している.

データの平均旅行速度は 34.3 km/h であり, 国土交通省が 5 年ごとに調査をおこなう平成 22 年度道路交通センサスの昼間 12 時間平均旅行速度 36.4 km/h と同等である. 走行頻度は平均旅行速度付近ではなく 20 km/h から 30 km/h が大きいことがわかる.

また燃費指数も広く分布しており, 旅行速度が低いほど燃費指数が高く分布の広がりも大きい.

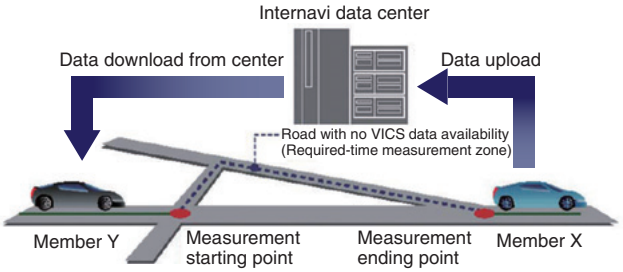


Fig. 6 Chart of floating car data traffic information system

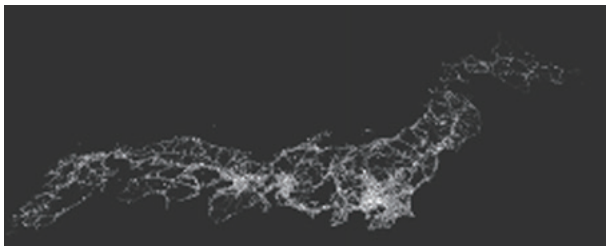


Fig. 7 Visualization of floating car data

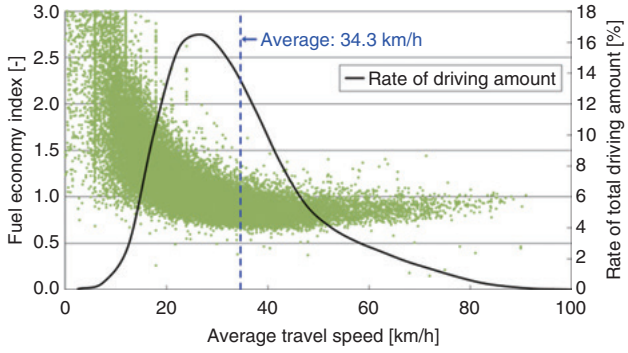


Fig. 8 Average travel speed and fuel economy index

3. CO_2 削減ポテンシャルの算出方法

3.1. 算出方法の全体像

ここではエコドライブの普及および交通流改善による CO_2 削減ポテンシャルの算出と, どのような車の使われ方で燃費改善効果が大きいか, CO_2 削減効果が大きいかを明確にする方法を示す.

3.1.1. CO_2 削減ポテンシャルの算出

本研究においては Fig. 9 のように現在と想定条件の燃費分布の差から平均燃費向上ポテンシャルすなわち CO_2 削減ポテンシャルの算出をおこなう.

現在と想定条件の燃費分布は以下の手法で作成する (Fig. 10).

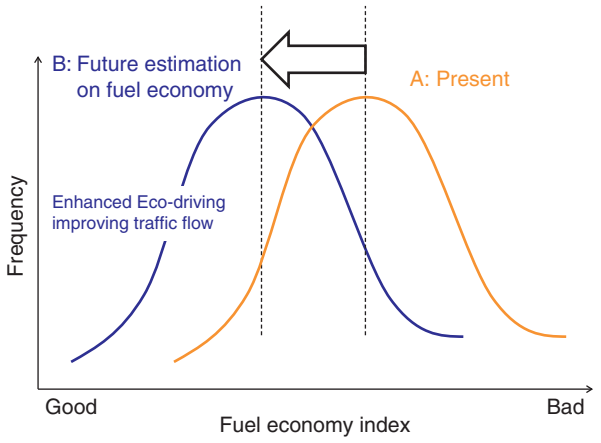


Fig. 9 How to estimate CO_2 reduction potential

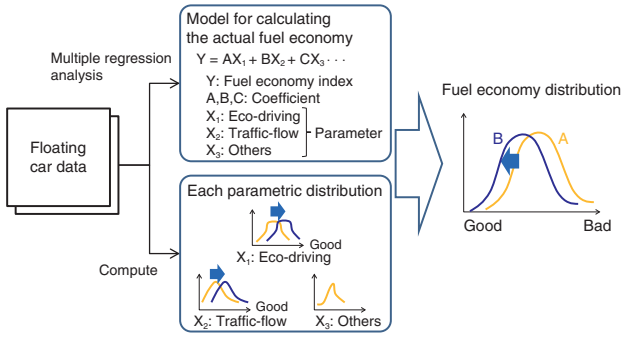


Fig. 10 How to estimate fuel economy distribution

Table 2　In-use fuel economy factors

Factors	Explanatory variable
Efficiency of engine and transmission	Average travel speed
Wasted heat from braking	Acceleration energy equivalent
Driver behavior	Eco-driving rating result
Warm up	Distance Outdoor temperature
Air conditioner	Outdoor temperature
Electricity load	Not adopted
Air pressure in a tire	Not adopted
Road surface, grade	Not adopted
Maintenance defects	Not adopted

（1）エコドライブや交通流に関する説明変数を含めた実燃費算出モデルをデータの重回帰分析により作成する.
（2）データからエコドライブや交通流に関する説明変数の分布を求める.
（3）各説明変数の分布をモデルに反映し，現在の燃費の分布を算出する.
（4）エコドライブが普及し交通流が改善した想定条件の各説明変数の分布を設定する.
（5）各説明変数の分布をモデルに反映し，想定条件の燃費分布を算出する.

3.1.2. 燃費向上および CO_2 削減分布の算出方法

どのような車の使われ方で燃費向上率および CO_2 削減効果が大きいかの明確化については，エコドライブと交通流に関する各説明変数と燃費向上率および CO_2 削減量の関係をグラフ化して分析をおこなう.

3.2. 実燃費算出モデルの作成

取得されたデータの中から無作為抽出したデータを分析し燃費指数 Y を説明する重回帰モデルを作成する.

説明変数は Table 2 で示すような試験モード以外の燃費低下要因をもとに，平均旅行速度の逆数 τ[s/m]，単位距離当たり加速エネルギー当量 A[m/s^2]，エコ運転度採点結果 P[pt：評点]，旅行距離の逆数 d[1/m]，出発地の一日の平均気温 T[℃] を採用した．加速エネルギー当量とは，大口[(7)]らの研究による増速時の到達速度の２乗値から増速時の初速の２乗値を引いたものの総和をとったものであり，エコ運転度採点結果とは，本ハイブリッド自動車に搭載されているエコアシストで算出されたドライバのエコドライブ指標での運転評価結果である（Fig. 11）．なお採用した説明変数の他に電気負荷やタイヤ空気圧などの実燃費低下要因もあるが，データ取得都合により不採用とした.

3.3. 実燃費モデル

重回帰分析により得られたモデルは式（1）となった（重相関係数 $R = 0.88$，データ数 $n = 914$）.

$$Y = 0.62 + 10.3\tau + 0.97A - 1.6 \times 10^{-3}P - 7.6 \times 10^{-3}T + 212d \quad (1)$$

データ取得都合で不採用とした説明変数があったが，非常に高い相関係数を得ることができた.

得られたモデルにおいて，交通流とエコドライブに関する各説明変数と燃費指数の関係を Fig. 12 から Fig. 14 に示す．但し，本グラフでは他の説明変数は全て平均値を代入した.

平均旅行速度が上がると燃費指数が低くなっているのがわかる（Fig. 12）.

また単位距離当たり加速エネルギー当量が低くなると燃費指数も低くなることがわかる（Fig. 13）．さらに平均旅



Fig. 11　Vehicle onboard display for eco-driving rating results

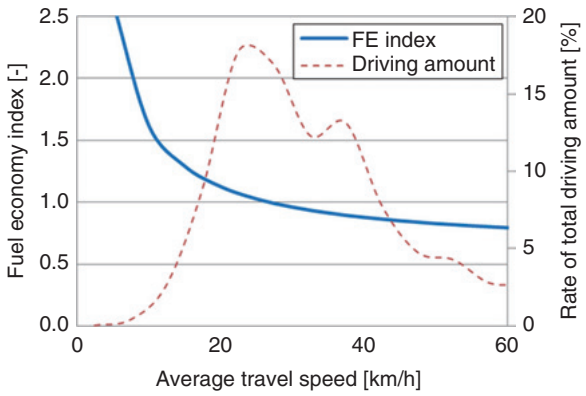


Fig. 12　Relation between average travel speed and fuel economy index for model

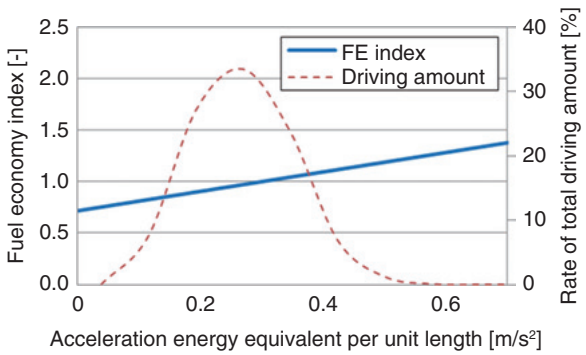


Fig. 13　Relation between acceleration energy equivalent per unit length and fuel economy index for model

行速度および単位距離当たり加速エネルギー当量については，それぞれに対する燃費が広く分布しており，それらを改善することで燃費が向上する可能性があることがわかる．

一方エコ運転度採点結果は，得点の高い所に分布が集中している (Fig. 14)．これは本ハイブリッド自動車にエコアシストが搭載されており，本データのドライバは高いエコドライブスキルを身につけているからと推測される．

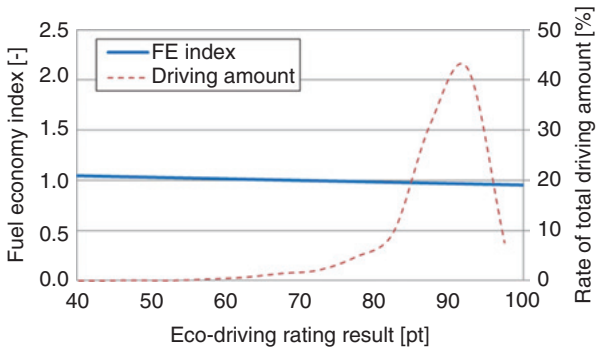


Fig. 14 Relation between eco-driving rating result and fuel economy index for model

4．CO_2 削減ポテンシャルの推定

ここでは交通流改善とエコドライブの推進が図られたと想定した条件ではどの程度の CO_2 が削減されるポテンシャルがあるかケーススタディをおこなう．

4.1. 想定条件

算出の際に分布変更をおこなう交通流とエコドライブに関連する説明変数は，平均旅行速度の逆数 τ と単位距離当たり加速エネルギー当量 A およびエコ運転採点結果 P とする．

なお単位距離当たり加速エネルギー当量およびエコ運転度採点結果の頻度は旅行速度域により偏りがあるため (Fig. 15, Fig. 16)，旅行速度域別に頻度変更をおこなう．

単位距離当たり加速エネルギー当量とエコ運転採点結果についてのここでの想定は，各旅行速度域別に前者は現在の最高値が中央値になるような頻度変更を，後者は現在の最低値が中央値になるような頻度変更を想定した (Fig. 17)．

これらはドライバが信号情報に合わせて無駄な加減速を減らすグリーンウェーブ走行支援システムなどでの実現が期待される．

一方平均旅行速度については，Table 3 のような高度信号制御[3]やバイパス整備[4]などの道路整備の過去の事例を参考にした．それぞれの施策の相乗効果なども想定できるが，ここでは 60 km/h を上限として一律 10 km/h 向上させることとした．

Table 3 Travel-speed smoothing

Type	Effect
Profile signal control	10 km/h
Bypass road construction	6 km/h

4.2. 燃費推定結果と CO_2 削減ポテンシャル

4.2.1. 交通流の改善

Fig. 18 に 3.1.1. 項の方法で算出した単位距離当たり加速エネルギー当量と旅行速度の向上による燃費分布の変化を示す．単位距離当たり加速エネルギー当量の向上により平均 8%，さらに旅行速度の向上とで平均 18% の燃費向上効果および CO_2 削減ポテンシャルがあることが算出できた．

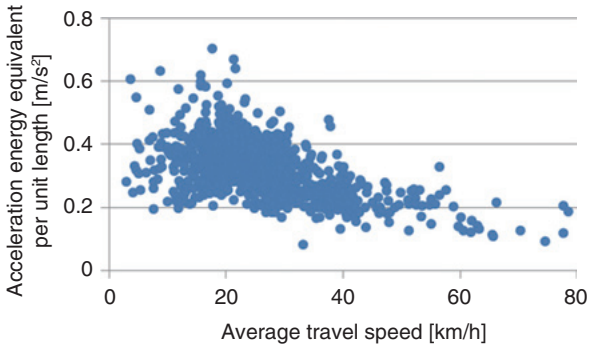


Fig. 15 Relation between average travel speed and acceleration energy equivalent

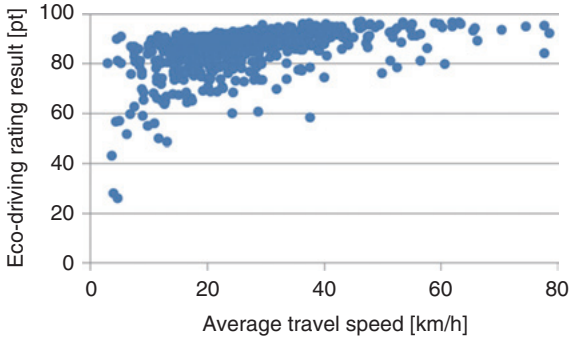


Fig. 16 Relation between average travel speed and eco-driving rating result

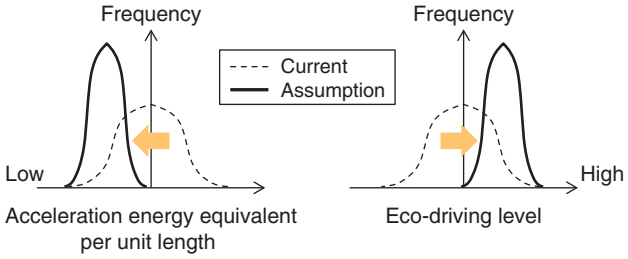


Fig. 17 Assumption for fuel economy improvement

4.2.2. エコドライブ

同じく 3.1.1. 項の方法でエコ運転度採点結果の向上による燃費変化の算出をおこなった．本ハイブリッド自動車はエコアシストが搭載されており，今井ら[(1)]の約 10％の向上に加えてさらに 1％の燃費改善効果があることがわかった．

4.3. 燃費向上および CO_2 削減分布

想定条件における燃費向上と CO_2 削減ポテンシャル分布を分析した．4.2.2. 項の結果から，本ポテンシャル算出でのエコドライブによる効果は小さいので，交通流改善すなわち単位距離当たり加速エネルギー当量および旅行速度向上での分布を分析する．

Fig. 19 は単位距離当たり加速エネルギー当量と旅行速度向上による燃費向上率の分布であるが，平均旅行速度が低く単位距離当たり加速エネルギー当量が高かったデータの燃費向上幅が大きい．特に 30 km/h 以下のデータで 4.2.1. 項で算出した平均の燃費向上率の 18％以上の効果が確認できる．

一方，走行量を加味した交通流改善による CO_2 削減ポテンシャル 18％の旅行速度別の内訳を Fig. 20 に示す．旅行速度 30 km/h 以下は燃費向上幅が大きいことに加え走行距離の多くを占めることから（Fig. 8），CO_2 削減ポテンシャルの 3 分の 2 を占めている．

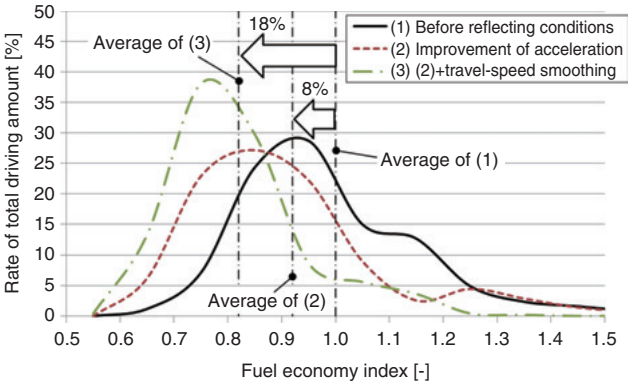


Fig. 18　Potential for fuel economy improvement

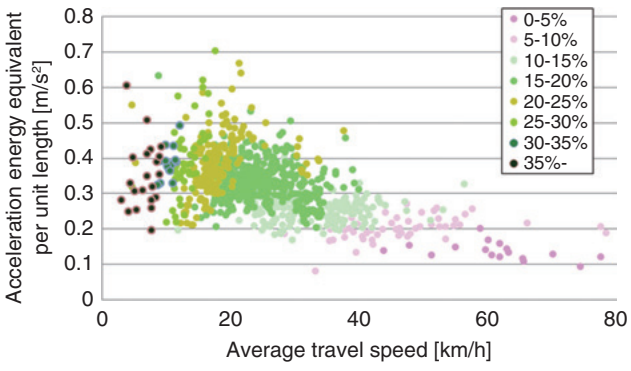


Fig. 19　Distribution of fuel economy improvement

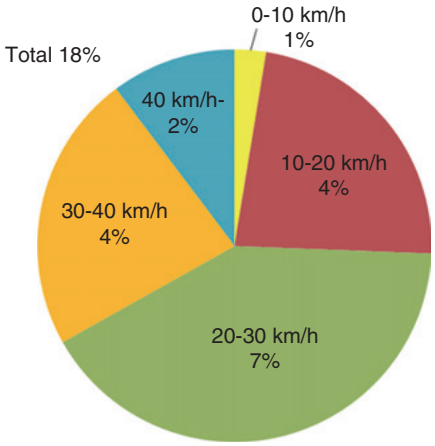


Fig. 20　Distribution of CO_2 reduction potential

5．まとめ

本研究では，フローティングカーデータから燃費指数を表す多項式を求め，想定条件における交通流の改善とエコドライブの推進による CO_2 排出量削減のポテンシャル算出を試みた．

この結果，主に交通流の改善による CO_2 削減ポテンシャルが 18％あると推計された．エコドライブについては，既往研究ではエコアシストの効果は 10％あるとされているが，さらに 1％の CO_2 削減ポテンシャルが算出された．

また燃費改善率および CO_2 削減ポテンシャルが高いのは旅行速度が 30 km/h 以下のときであることがわかった．

以上より，想定条件における交通流改善とエコドライブでの CO_2 削減ポテンシャルが推計され期待効果が大きいことが確認されたことで，車両単体での対策に加え統合的対策の重要性と都心部などの旅行速度の低い地域の対策が重要であることが示された．

なお交通流の改善およびエコドライブは，CO_2 削減だけでなく旅行時間の短縮や燃料費の削減などにも有効であるため，今後も今回の想定条件の具現化方法を検討していくと共に，今後の社会全体での取組みに期待したい．

参考文献

（1）今井武，益田卓朗，石藤雄一郎，仙石浩嗣：低炭素社会実現に向けて，テレマティクスができること－先進のテレマティクスサービスによる環境への取り組み－，自動車技術会学術講演会前刷集，No.48-10，p.11-14(2009)

（2）交通エコロジー・モビリティ財団：エコドライブの普及報告書，p.46(2007)

（3）Miyagi, H.: The Experiment on Intelligent Signal Control by Profile Signal Control, ITS World Congress (2009)

(4) 国土交通省道路局 地球温暖化防止のための道路政策会議:地球温暖化防止のための道路政策会議報告, p.22(2005)
(5) エネルギーITS 研究会, エネルギーITS の普及に向けて, p.24(2008)
(6) 今泉秀俊, 仙石浩嗣:フローティングカーデータの解析による交通流改善及びエコドライブでの CO_2 削減ポテンシャルの検討, 第 28 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス (2012)
(7) 大口敬, 片倉正彦, 谷口正明:都市部道路交通における自動車の二酸化炭素排出量推定モデル, 土木学会論文集, 695 巻, 54 号, p.125-136(2002)

■著 者■



今 泉 秀 俊



仙 石 浩 嗣

本田技術研究所　論文委員会

編集長　漆山　雄太　四輪 R&Dセンター
齋藤　俊博　四輪 R&Dセンター
馬場　雅之　二輪 R&Dセンター
金古　　章　基礎技術研究センター
笠井　聡人　汎用 R&Dセンター
石橋　正明　二輪 R&Dセンター
郷土　健二　四輪 R&Dセンター
佐々木　隆　四輪 R&Dセンター
須藤　　晶　四輪 R&Dセンター
藤平　　徹　基礎技術研究センター
塩崎　智夫　二輪 R&Dセンター
木村　芳彦　二輪 R&Dセンター
千葉　省作　汎用 R&Dセンター
友永　久人　四輪 R&Dセンター
白木　晶子　四輪 R&Dセンター
田中　公俊　基礎技術研究センター

編集協力　二輪 R&Dセンター論文委員会
汎用 R&Dセンター論文委員会
四輪 R&Dセンター論文委員会
基礎技術研究センター論文委員会
航空機エンジン R&Dセンター論文委員会
HRA 論文委員会
(HRA Technology Introduction Planning Committee)

編集後記

企業の技術者が論文を書くモチベーションは、どこから生まれてくるのだろうか。

彼らは、日々製品開発や研究プロジェクトに追われている。忙しく時間の限られている中で論文を仕上げるには、強いモチベーションが必要だろう。

論文とは、自己の研究が過去の研究に対し、新規性があり有効であるということを論理的に示したものだ。また、論文を書く目的としては、自己の研究成果を公表することで社会に貢献する、自己の成果を公知させる、成果の知材権を守る、自己の研究成果が散逸するのを防ぐ、といったことが挙げられる。

心理学者のマズローは、人間の基本的欲求を低次から、(1)生理的欲求、(2)安全の欲求、(3)所属と愛の欲求、(4)承認の欲求、(5)自己実現の欲求、の５段階に分類した。マズローの考えに照らし合わせてみると、論文を発表することへの欲求は「承認の欲求」や「自己実現の欲求」であろうから、４～５段目に位置するレベルの高い欲求だ。

論文を書くモチベーションを高めるために、金銭的報酬の賦与や勤務考課への反映などのインセンティブが挙げられることがあるが、これらは最下層の「生理的欲求」を満たすものであり、４～５段目にある欲求とはかけ離れている。また、下位の欲求が満たされないと、その上位の欲求は励起されないということであるから、１～３段階の欲求を満たす必要があるだろう。果たして、企業における現在の職場環境で１～３段階の欲求は満たされているだろうか。

企業の技術者が論文を書くモチベーションを高めるには、まず環境を整えること。それに加えて執筆者の「承認の欲求」や「自己実現の欲求」を満たすことができる、なんらかの施策が必要ということになる。

(須　藤)

Honda R&D Technical Review

©2012 株式会社 本田技術研究所(禁無断転載)

2012 年９月１日　　Vol.24　No.2

発行所　株式会社　本田技術研究所

発行人　山　　本　　芳　　春

編集人　本田技術研究所　論文委員会

事務局　〒321-3393　栃木県芳賀郡芳賀町下高根沢4630 番地
株式会社　本田技術研究所　四輪 R&Dセンター
技術広報室　第２ブロック
TEL 028-687-2023　FAX 028-677-7854

印刷所　〒351-0024　埼玉県朝霞市泉水2-8-21
協永堂印刷株式会社

Honda R&D Co., Ltd.

