ISSN 0915-3918

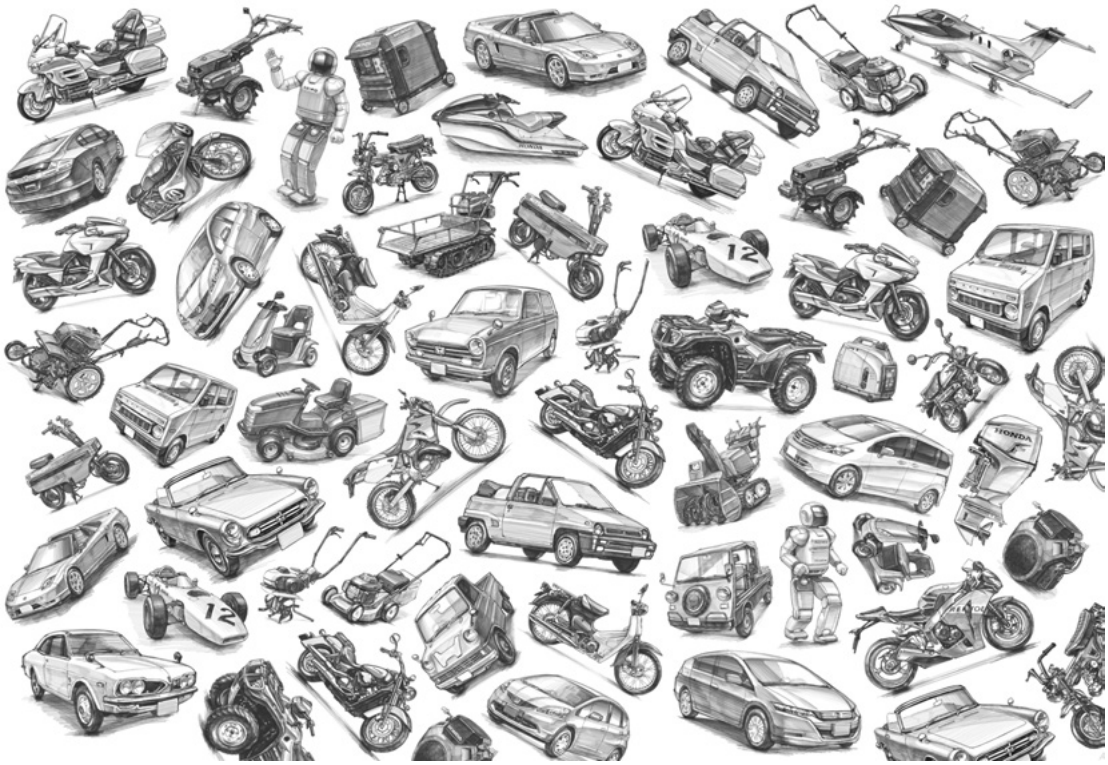
Honda R&D

Technical Review

Vol.21 No.2



October 2009



表紙の言葉

「イラストに込めた想い」

**他にはない製品カテゴリの広さは、これまでもこれからも人々の
心をワクワクさせることのできるホンダ独自の強みであると思う。
そんなひとつひとつの製品から生まれるユーザーそれぞれのストーリー。
それらがつながり合って広がるホンダワールド。**

**私の両親が出逢ったきっかけはステップバンという一台のホンダ車だった。
そこから始まった父と母のストーリー。**

**製品の先にある 1人 1人のストーリーを想像しながら、
ひとつひとつに想いを込めて描いた。**



**汎用 R&Dセンター
三輪あさぎ**

Technical Review
Vol.21 No.2

October
2009

Honda R&D

目　次

技術紹介

◇新型インサイトのデザイン …… 名倉　隆・樺山秀俊
内田　智・川村奈奈絵 ……1

◇Advanced Proud Sedanを目指したCITYの開発 …… 大岡慶一・吉田俊一・古海　洋 ……6

◇フレキシブル・フューエルモータサイクルの開発 …… 國府志朗・伊藤　淳・山田広司
堀江秀弥・窪田俊行・高橋陽一 ……16

◇カセットボンベを使用した家庭菜園用小型耕うん機 ピアンタの開発 …… 小嶋洋明・伊藤智樹
佐藤貴之・藤沼正訓 ……26

◇自立運転機能付きマイクロコージェネの紹介 …… 江口博之・末吉俊一郎・山路　健
榎本貴行・津野康一 ……37

◇V型２気筒空冷４ストローク汎用エンジン「GX690/GXV690」の開発 …… 長谷部博昭・小川和久
田島知治・金井充善 ……47

◇リズム歩行アシスト …… 安原　謙・島田　圭・小山泰司
井土哲也・菊池敬士郎・遠藤洋介 ……54

◇ディーゼル燃焼音の改善 ― 主成分回帰法を用いた伝達経路解析の適用 ― …… 久野泰宏・平出玲子 ……63

◇熱電素子を利用した車両用廃熱回生技術と燃費改善 …… 森　正芳・山上　武・織田信之
服部　真・原口友秀・空澤光将 ……68

◇走行時のボデー過渡変形予測技術 …… 久世正文・梅原康平 ……74

◇限界走行時における車両挙動の台上再現 …… 豊島貴行・James CUNNANE・Mike KENLEY ……79

◇運転席用i-SRSエアバッグシステム連続容量変化タイプの紹介 …… 長井　誠・野崎裕之・千田祐介
佐々木　裕・谷口直人・中島宗寿 ……84

◇視界制御機能付き樹脂製ウインド …… 平山貴邦・衣鳩心一・村上誠人 ……89

◇インストルメントパネル本体成形型の短期試作工法 …… 戸口康宏 ……93

◇AZ91Dマグネシウム合金インラインリサイクル技術 …… 宮下英明・川辺　剛・下田正志
望月祐仁・夏原功二 ……99

◇ CVTベルト用金属リングにおける周長精密測定と不確かさ …… 梅津健太・御子貝浩良 ……104

◇ 自動変速機用制御ソフトウェア開発への実行可能な仕様書の適用に向けた取り組み
松山芳博・萩原顕治・清野 聡 ……109

◇ Using CAD, CAE, and CAM to Enhance Automotive Body Assembly Design, Analysis, and Fabrication
Sachin K. Raje・Daniel J. Turk・Daniel A. Paolini ……118

◇ 鷹栖プルービンググラウンド GPS安全監視システム …… 唐崎英史・瀧川正人・藤井 仁・松倉剛克
小森久裕・椿 美一・武内公一 ……123

論文

◇ 二輪車の発見率を向上させる灯火器配置「FACE」デザインの研究…… 丸山一幸・堤 陽次郎・村田 裕 ……130

◇ エンジン油中すすの解析と定量手法の研究 …… 奥山庸介・下荒地大地・丸山雅司
星川 渉・松門龍司 ……136

◇ ロックアップクラッチのファイン制御 …… 武井 寛・石川 豊
齋藤吉晴・津幡義道 ……141

◇ 燃料電池スタックにおける小型薄膜電位計測センサの開発 …… 吉田弘道・小岩信基
佐藤雅彦・鈴木敏文 ……147

◇ 高回転エンジン用鉛フリー軸受の開発 …… 櫻井 輔・白石 隆 ……153

◇ 数値的アプローチによるターボラグの原理解析 …… 松本貴希・朴 辰洛・織田信之 ……159

CONTENTS

Introduction of new technologies

◇Style and Design of New Model INSIGHT ····· Takashi NAGURA・Hidetoshi KABAYAMA
Satoshi UCHIDA・Nanae KAWAMURA ····· 1

◇Development of CITY aimed at Advanced Proud Sedan
····· Keiichi OHOKA・Shunichi YOSHIDA・Hiroshi FURUMI ····· 6

◇Development of Flexible-Fuel Motorcycle ····· Shiro KOKUBU・Atsushi ITO・Hiroshi YAMADA
····· Hideya HORIE・Toshiyuki KUBOTA・Yoichi TAKAHASHI ····· 16

◇Development of Pianta Gas Canister-fueled Compact Cultivator for Kitchen Garden
····· Hiroaki KOJIMA・Tomoki ITO
Takayuki SATO・Masanori FUJINUMA ····· 26

◇Introducition of Micro-combined Heat and Power Generation Unit with Backup Function
····· Hiroyuki EGUCHI・Shunichiro SUEYOSHI・Takeshi YAMAJI
Takayuki ENOMOTO・Koichi TSUNO ····· 37

◇Development of Air-cooled, 4-stroke V-twin Cylinder General Purpose Engine GX690/GXV690
····· Hiroaki HASEBE・Kazuhisa OGAWA
Tomoharu TAJIMA・Mitsuyoshi KANAI ····· 47

◇Walking Assist Device with Stride Management System
····· Ken YASUHARA・Kei SHIMADA・Taiji KOYAMA
Tetsuya IDO・Keishiro KIKUCHI・Yosuke ENDO ····· 54

◇Enhancement of Diesel Combustion Noise for Interior Sound Quality
— Transfer Path Analysis Using Principal Component Regression Method —
····· Yasuhiro HISANO・Reiko HIRAIDE ····· 63

◇Heat Recovery Technology of Automobile Using Thermoelectric Element and Its Effect on Fuel Economy
····· Masayoshi MORI・Takeshi YAMAGAMI・Nobuyuki ODA
Makoto HATTORI・Tomohide HARAGUCHI・Mitsumasa SORAZAWA ····· 68

◇Prediction of Transient Body Deformation during Handling Maneuvers
····· Masafumi KYUSE・Kohei UMEHARA ····· 74

◇Vehicle Dynamics Simulation in Extreme Driving Conditions
····· Takayuki TOYOSHIMA・James CUNNANE・Mike KENLEY ····· 79

◇Driver-side i-SRS Airbag System with Continuously Staged Inflation
····· Makoto NAGAI・Hiroyuki NOZAKI・Yusuke CHIDA
Yuu SASAKI・Naoto TANIGUCHI・Munetoshi NAKASHIMA ····· 84

◇Plastic Window with View Control Function
····· Takakuni HIRAYAMA・Shinichi IBATO・Masato MURAKAMI ····· 89

◇Technology for Rapid Manufacture of Prototype Molds for Instrument Panels
····· Yasuhiro TOGUCHI ····· 93

◇In-line Recycling Technology for AZ91D Magnesium Alloy
····· Hideaki MIYASHITA・Tsuyoshi KAWABE・Masashi SHIMODA
Yuji MOCHIZUKI・Koji NATSUHARA ····· 99

◇Precision Measurement Method of Circumferential Length and Uncertainty for Steel Ring in CVT-pushing Belt
Kenta UMETSU・Hiroyoshi MIKOGAI・・・・・・・・・104

◇Approach to Application of Executable Specifications in Development of Automatic Transmission Control Software
Yoshihiro MATSUYAMA・Kenji HAGIWARA・Satoshi SEINO・・・・・・・・・109

◇Using CAD, CAE, and CAM to Enhance Automotive Body Assembly Design, Analysis, and Fabrication
Sachin K. Raje・Daniel J. Turk・Daniel A. Paolini・・・・・・・・・118

◇GPS Safety Monitoring System for Takasu Proving Ground
Eiji KARASAKI・Masato TAKIKAWA・Hitoshi FUJII・Takekatsu MATSUKURA
Hisahiro KOMORI・Yoshikazu TSUBAKI・Kouichi TAKEUCHI・・・・・・・・・123

Technical papers

◇Study of FACE Design, Lighting System Design for Enhanced Detection Rate of Motorcycles
Kazuyuki MARUYAMA・Yojiro TSUTSUMI・Yutaka MURATA・・・・・・・・・130

◇Analysis and Method of Quantification of Soot in Engine Oil
Yosuke OKUYAMA・Daichi SHIMOKOJI・Masashi MARUYAMA
Wataru HOSHIKAWA・Ryuuji MATSUKADO・・・・・・・・・136

◇Fine Control System for Multi-plate Lock-up Clutch Hiroshi TAKEI・Yutaka ISHIKAWA
Yoshiharu SAITO・Yoshimichi TSUBATA・・・・・・・・・141

◇Small, Thin-film Electric Potential Sensor for In-situ Evaluation of Fuel Cell Stack
Hiromichi YOSHIDA・Nobuki KOIWA
Masahiko SATO・Toshifumi SUZUKI・・・・・・・・・147

◇Development of Lead-free Bearing for High-speed, High-load Engine
Tasuku SAKURAI・Takashi SHIRAISHI・・・・・・・・・153

◇Numerical Analysis of Turbocharger Response Delay Mechanism
Takaki MATSUMOTO・Shinrak PARK・Nobuyuki ODA・・・・・・・・・159

新型インサイトのデザイン

Style and Design of New Model INSIGHT

名倉　隆*　Takashi NAGURA
樺山秀俊*　Hidetoshi KABAYAMA
内田　智*　Satoshi UCHIDA
川村奈奈絵*　Nanae KAWAMURA

要　旨

新型インサイトは世界中で課題となっている低燃費と低排出ガスをコンパクトカークラスで実現し，より多くのお客さまに使って頂きたいという願いで「新世代コンパクトスタンダード」というコンセプトキーワードのもとに開発された．

エクステリアデザインは，スタイルだけではなく，空力性能に裏付けられた走りのかたちを目指し「AERO ATHLETE」をテーマにした．

インテリアデザインは，車ならではの操る楽しさとハイブリッドの未来感，先進感を融合し，「EMOTIONAL HYBRID INTERIOR」をテーマとした．

ABSTRACT

The new model INSIGHT was developed based on the key concept - “A Compact Car Standard for the Next Generation.” During the development, the aims for the new INSIGHT were to achieve good fuel economy and low exhaust emissions in a compact class car, and to be used by even more customers.

The exterior design theme is that of an “Aero Athlete,” and aims for not only an advanced style, but also a running form backed up by proven aerodynamic performance.

The interior design theme is that of an “Emotional Hybrid Interior” that fuses the fun of driving a car with the advanced, futuristic feeling of a hybrid car.

1．はじめに

1972 年に発売した CVCC 搭載 CIVIC を皮切りに，常に環境を考慮したモデルを販売してきた．

ハイブリッドカーとしては 1999 年に初代インサイトを発売し最高の燃費性能をお客さまに提供するという目的は達成できた．しかし２シータクーペというカテゴリーのため，多くのお客さまへハイブリッドカーの良さを提供できるまでには至らなかった．

新型インサイトは低燃費，低排出ガスというハイブリッドカーの良さをより多くのお客さまへ提供できるように「新世代コンパクトスタンダード」をグランドコンセプトとして開発された．環境に優しい低燃費，低排出ガス性能を重要視し，その上で，クルマ本来の楽しさという要素と，スタンダードカーに求められる使いやすい室内とラゲッジスペースを実現した．そして廉価で実現することで，より多くのお客さまへ提供することを目指した．

Fig. 1 に 2009 年発表されたインサイトを示す．



Fig. 1　2009 model year INSIGHT

＊四輪R&Dセンター

https://doi.org/10.69239/hondatechnicalreview.2009_21_2_1

2．パッケージレイアウト

パッケージコンセプト「高効率グローバルスタンダード」を具現化するために，1425 mm の低全高なコンパクトサイズでありながら，大人が５人乗れて，荷物もしっかり積める利便性に優れた５ドアハッチバックスタイルとした(Fig. 2)．車両の全高と全幅は全世界共通だが，全長はフロントライセンスプレートの仕様により，北米仕様は 4375 mm，日本仕様は 4390 mm，欧州仕様は 4395 mm の違いがある．

FIT プラットフォームを基本とし，燃料タンクを後席シート下に変更した結果，前席乗員座面を FIT に比べて 50 mm 低くできた．

コンパクトサイズでも大人が前後に座れるように，ホイールベースは FIT から 50 mm 延長し 2550 mm とした．それにより 2003 年モデルの欧州および日本向けアコード(北米向けアキュラ TSX)と同等の空間を実現した．

クラスを超えた低床荷室は，IPU(Intelligent Power Unit)の小型化と床下配置によって，荷室容量 355 L を達成した．欧州と日本向けスペアタイヤレス仕様ではさらに 105 mm フロアを下げることが選択可能になり，荷室容量を400 L とした(Fig. 3)．

前方に配置したフロントピラーを採用したことで，サイドウインドウエリアを前方向に広げることができ，ドアミラーの取り付け形状も小型化することで，良好な前方視界を確保した(Fig. 4)．

後方視界は，薄型リヤスポイラによるエクストラウインド面積拡大で，小さい子供を想定したポールが確認できるようにした(Fig. 5)．

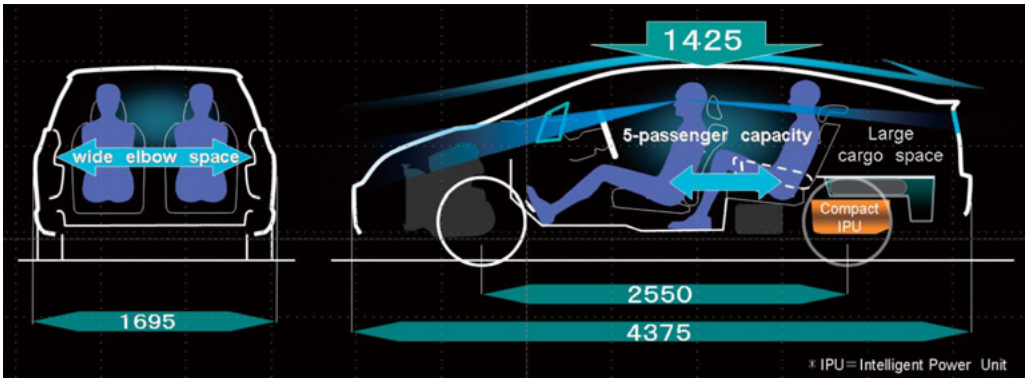


Fig. 2 Package layout (North American specifications)



Fig. 3 Luggage compartment for European and Japanese specifications



Fig. 4 Front visibility

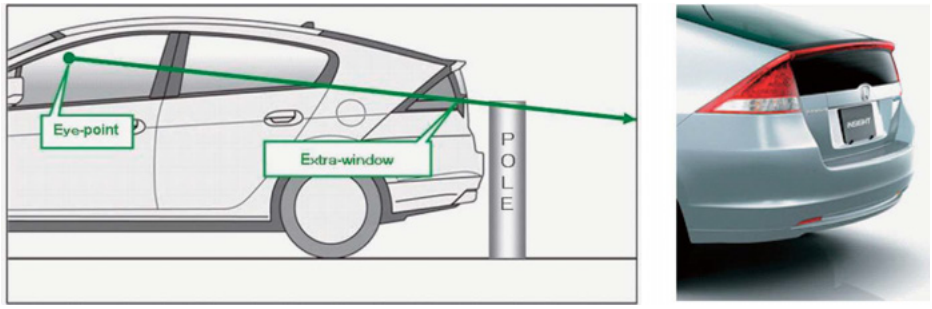


Fig. 5 Extra window

3．エクステリアデザイン

エクステリアは，空力により鍛え抜かれた力強い走りのカタチ「AERO ATHLETE」をテーマにスタイリングした．ボデーフォルムの骨格は，全高を低く押さえ，空力性能を向上させながらエンジンフード先端からキャビンに続く一体感でエンジン部をコンパクトに見せ，より先進的なフォルムとした．

ボデー横側に大胆かつシャープにはいったウェッジラインによりスピード感を表現，そのラインはキャビン周りとボデー周りの空気の流れをそれぞれ最適にできる．それを包み込むサーフェイスはアスリートの筋肉がもつしなやかな張りをイメージして造形した(Fig. 6)．

開発ではデザインイメージを固める前にモデルによる空力テストの結果をデザインにフィードバックするために同時進行させた．その結果，実車で CD 値 0.28 を達成し，空力性能に裏付けられたスタイリングにできた．

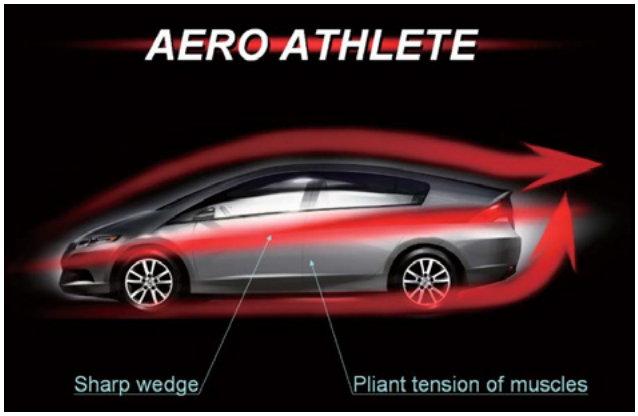


Fig. 6　Exterior design concept



Fig. 7　Final rendering

フロント周りは薄型横長のヘッドライトで，低くワイドに見せている．リヤコンビネーションランプとハイマウントストップランプを連続させ，リヤ周りの特徴とした(Fig. 7)．

リヤコンビネーションランプは先進的なデザインだけでなく，燃費向上のため，消費電力の少ないLEDを採用している(Fig. 8)．



Fig. 8　Rear combination lamp

4．インテリアデザイン

インテリアは，「EMOTIONAL HYBRID INTERIOR」をテーマにスタイリングをした．先進ドライバーズコックピットと爽快感，そして日常での使い勝手を併せ持つインテリア空間を目指した．

コックピットはHonda独自の先進インターフェイスであるマルチプレックスメータを採用し，縦基調の三角形コックピットとした．またインストルメントパネルの骨格を進行方向に向かいラウンドさせ，コックピット部を強調させると共にボリュームを軽減させた．さらにアッパー部とロア部を凹面にて構成し，クリーンな視界感と膝廻りの広さ感を実現させた(Fig. 9)．

マルチプレックスの表示類は，上段にデジタルスピードメータとアンビエントメータを表示させた．

ドライバに背景色の変化により運転状況を認知させ，低燃費走行が自然におこなえるようにした．

アンビエントメータは地球をモチーフに，「青い地球に，緑を増やそう！」という意味を込めた．

下段にはマルチインフォメーションディスプレイを中心にタコメータ，ASST/CHARG計，燃料計を配置した．機械の持つメカニカルでワクワクするような精度感をアナログで演出している．

マルチインフォメーションディスプレイには従来の車両

情報表示に加え，燃費走行時のアクセルとブレーキ操作をコーチングするエコアシストバーを表示させた．これらとステアリングを包み込むようにヒータコントロールとECONスイッチを配置し，先進性とFUN to DRIVEを高次元融合させたコックピットとした(Fig. 10)．

限られた幅の左右フロント席の間にカップホルダや小物収納(Fig. 11)に加え，コンソールボックスとアームレスト(Fig. 12)を装備し，ドライバの利便性を高めた．そしてオーディオ下にガレージオープナなどを隠せるセキュリティポケットを配置するなどダウンサイジングユーザを考慮し，実用性の向上をおこなった(Fig. 13)．

ライニング類はショルダラインを中心に上下にえぐり取る形に凹面で構成し，このクラス最大の室内幅を確保した．４人乗車時にカップホルダを二つずつ確保するなど，シンプルでクラスを超えた爽快な空間をつくり上げた．

フロントシートデザインは，腰の部分をしっかりサポートし，上半身は進行方向に向くスポーティなスタイリングとした．リヤシートはシートバック分割を６：４のフォールダウンとし５人乗車とフルフラットな荷室を両立して使い勝手を拡大した．荷室の床は二段にし，トノカバーなどの床下収納を可能とした．

さらに小窓を設けることで転がりやすい物や倒したくない物を支えるなど細心の配慮をおこなった(Fig. 14)．



Fig. 9 Interior design concept



Fig. 10 Drivers cockpit

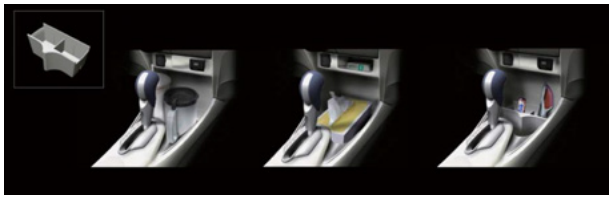


Fig. 11 Cup holder and storage

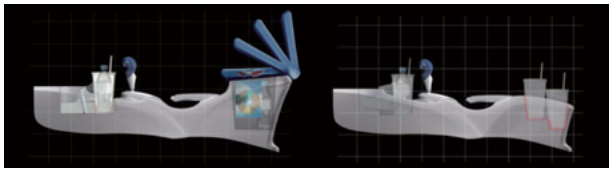


Fig. 12 Console box and armrest



Fig. 13 Lid type center pocket



Fig. 14 Interior rendering

５．カラーデザイン

ハイブリッドの異質を組み合わせるという定義に基づき，二つの要素を対比，融合させ，すべてに新規性を表現した．

5.1. エクステリア

エクステリアカラーのテーマである「ＣＬＥＡＮ，ECOLOGY，HIGH-TECH」をダイレクトに伝えた，スペクトラムホワイトパールとブリリアントスカイブルーメタリックの２色をイメージカラーとした．

新色のスペクトラムホワイトパールは新世代らしく真新しい清潔感のある白を基調に新素材を融合し，先進的色覚をねらった．光源や見る角度によって真珠が虹のように多彩発色するパール顔料を配合させることで，ゴールドのハイライト感とブルーイッシュホワイトのシェード感の２色性効果が，筋肉質のボデーフォルムやふくよかなラインをさらに際立たせた．

グリルカラーは存在感のある先進表現として大粒形高輝度メタリックを用いた．外装色すべての相性を最適化するためにライト系とミディアム系の２色設定とした(Fig. 15)．

5.2. インテリア

インテリアカラーのテーマである「有機，無機」をカラー，マテリアル，サーフェイスデザインで表現した，インテリアカラーは，安心感あるウォームグレーで全体を包み込み，操作系を先進感あるブルーとし，異色相２トーン内装とした．有彩の２色間を無彩色の金属質な加飾によって内装全体の均衡をねらった．

サーフェイスは，内装全体を質感ある革絞で調和させ，操作部をメカニカルな幾何学絞で対比させた．マテリアルは，シートセンタ部を軽量感あるメッシュ調ドット柄と，シートサイドボルスタ部を緻密で地厚のスエード調波柄で異素材を組み合わせ，抑揚あるシートフォルムを強調させた．

１タイプのインテリアカラーに対し，シートカラーは，ブルーとウォームグレーの２タイプ持つことで，効率的で明解な２タイプのインテリアとした(Fig. 16)．

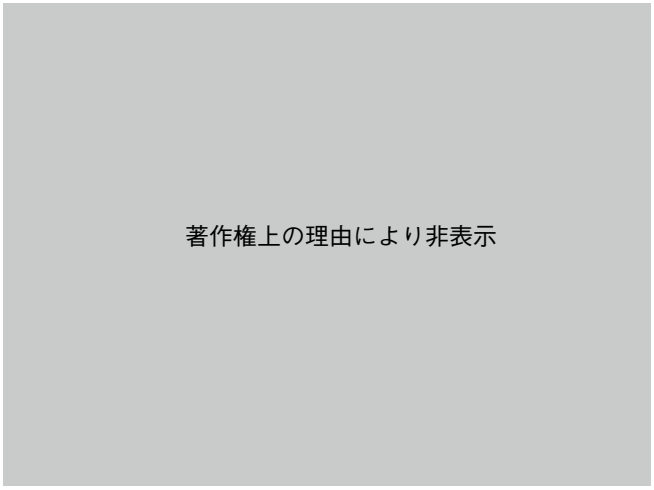


Fig. 15　Exterior image colors and grille colors

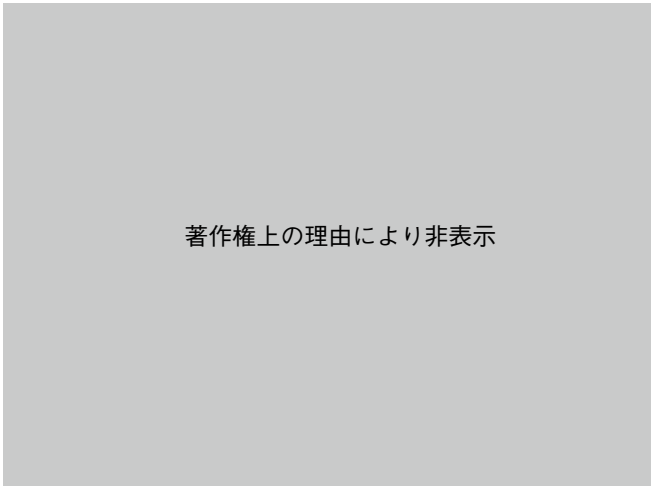


Fig. 16　Interior and material colors

６．まとめ

私たちは「新世代コンパクトスタンダード」というグランドコンセプトを基にデザインの開発に取り組んできた．全世界で大人５人が乗れて使いやすく，そして，ハイブリッドカーという先進性と車が本来持つエモーションという魅力を一つに融合することで新型インサイトのデザインを表現した．

その結果，車の未来に繋がる姿を見せることができる魅力的な車を創出できたと確信している．

いつの時代になっても地球の環境が保たれながら車にはやはり楽しさがあるということをより多くのお客様に感じて頂きたい．

この新型インサイトにより新世代の車への扉が大きく開かれることを願ってやまない．

■著　者■



名倉　隆



樺山秀俊



内田　智



川村奈奈絵

Advanced Proud Sedan を目指した CITY の開発

Development of CITY aimed at Advanced Proud Sedan

大 岡 慶 一*　吉 田 俊 一*　古 海 洋*
Keiichi OHOKA　Shunichi YOSHIDA　Hiroshi FURUMI

要　旨

新興国を中心に需要の高いスモールセダンの新たなスタンダードを目指し CITY を開発した．

開発にあたり，購入したお客様が，誇りを感じ，自慢できる一台となるように，開発コンセプトを定めた．

スモールセダンの造りの特性として，先行するハッチバックモデルをベースにするように，CITY も 2008 年モデル FIT(JAZZ)をベースとしている．

Advanced Proud Sedan のコンセプトの実現に向け，ベクトルを集中して開発したスモールセダンの CITY は，各国で好評のうちに販売されている．世界中のお客様に喜んでいただける車に仕上げることができた．

ABSTRACT

The CITY was developed with the aim of setting a new standard for small sedans that are in high demand, particularly in emerging countries.

The concept during the development process was to create an automobile that purchasing customers could take pride in owning and also be proud of themselves.

One aspect of building a small sedan is that it is based on an earlier hatchback model, and the CITY was similarly based on the 2008 model year FIT (JAZZ).

All aspects of the CITY small sedan were developed toward achieving the concept of an Advanced Proud Sedan, and the results have been favorably received in every country where it is sold. An automobile that delights customers around the world has been created.

1．はじめに

CITY は，1996 年 アジアの専用機種として販売を開始した．以来今日まで販売国を広げ，タイをはじめ中国，インドを含めアジアで６拠点，さらに南米ブラジルを加え７拠点で生産するグローバルカーとなった．

各地域で必要な仕様や装備を開発項目に取り込むことに加え，スモールセダンを求めるお客様の声の聞き取りに多くの時間を注いだ．

一方，内外装スタイリング，パッケージングを進めていく中，主要国のタイでお客様を迎えてモデル確認をおこなった．同時に，他国からもお客様を迎え，貴重な意見をモデルに反映する作業をおこなった．

また，走行性能については，タイとインドで市街地の渋滞，高速道路，郊外の一般路を走り，CITYのセッティングの方向性を絞り込んだ．

CITYの開発コンセプトは，このような背景から築き上げられた．

なお，本稿における「ベースモデル」は2008年モデル FIT(JAZZ)を指す．

2．開発のコンセプト

開発にあたり，CITYのマーケットで，多くの人々に会い，価値観を調査した．その結果，常にステップアップを考え，成功していると思われること，人から認められ，自慢できること，そして誇りが持てることが重要と考えた．所有する車には，先進感にあふれ，多くの用途に使うことで家族や他人から認められ，自慢でき，誇れることを求めている．

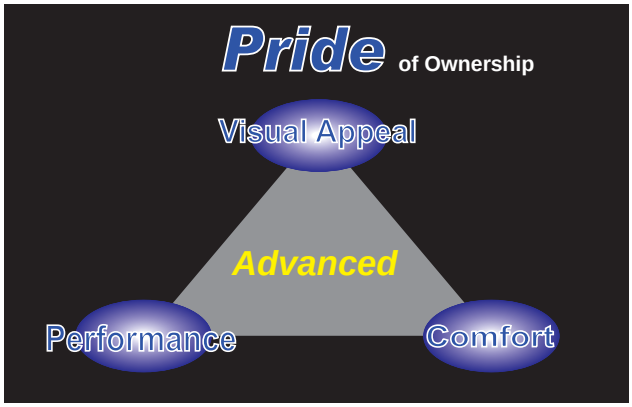


Fig. 1　Grand concept : Advanced Proud Sedan

＊四輪R&Dセンター

https://doi.org/10.69239/hondatechnicalreview.2009_21_2_2

Table 1　3 dimensions and wheelbase

	Previous CITY	Newly developed CITY	FIT (JAZZ) 2008 year model
Overall length (mm)	4390	4395	3900
Overall width (mm)	1690	1695	1695
Overall height (mm)	1485	1470	1525
Wheelbase (mm)	2450	2550	2500

CITY は，見た目で誇りが持てる「美」，使って誇りが持てる「走」「快」の魅力があり，そして「先進」が含まれた車という想いで，「Advanced Proud Sedan」(Fig. 1)とグランドコンセプトを定めた.

3．力強いスタイリング

3.1. ARROW SHOT FORM

各地域での調査を進めると，スモールセダンには，強さを伴った「美」が，共通して求められる結果が出た.

一方，スタイリングモデルに居住空間の「快」を単純に反映すると，それが明らかに外観に現れ，「美」をそこねた.

そこで，求める「美」と「快」を両立するために「ARROW SHOT FORM」というスタイリングテーマが考え出された.

人が弓を引くダイナミックな動作をエクステリアスタイリングに重ね，弓を引く時に蓄えられた力の塊を居住空間に見立てることで，「快」を包み込む力強い「美」を表現した(Fig. 2).



Fig. 2　Exterior design theme: Arrowshot Form

3.2. パッケージとエクステリアスタイリング

スモールセダンは，ベースとなるハッチバックモデルにトランクを付加した形態が主流であり，フロントから見ると区別が付かない車種も見受けられる．CITY の開発では，その道を進まず，外観に明らかな違いを創出することをねらった．販売後の市場調査で，力強いオリジナルスタイリングに好評な回答を得ている.

3.2.1. ３ディメンジョンとホイールベース

全長，全幅は，先代CITYの取り回しのよさを生かし，それぞれ 5mm の拡大とした.

全高は，フロアパネル，フロントシート骨格をベースモデルと共用した上で，可能な限り低くする検討をおこない，先代CITY に対して15mmの低減を達成した．これにはベースモデルに対してドライビングポジションの変更が必要であり，シートのレールを支えるブラケットの新規設計で 7mm，クッションウレタンの厚さとクッションスプリングの新規設計で 8mm の低減をおこなった.

ホイールベースは，セダンとしてのプロポーションの改善につながるように画像シミュレーションで確認し，ベースモデルに対し 50mm，先代 CITY に対して 100mm 延長した.

３ディメンジョンとホイールベースの数値比較をTable 1 に，CITY のパッケージデザインを Fig. 3 に示す.

3.2.2. サイドスタイリング

フード先端からルーフを通してリヤまで滑らかにつながるシルエットも，力強さと共に，重要な要素との市場調査結果を得て，サイドスタイリングに反映した(Fig. 4).

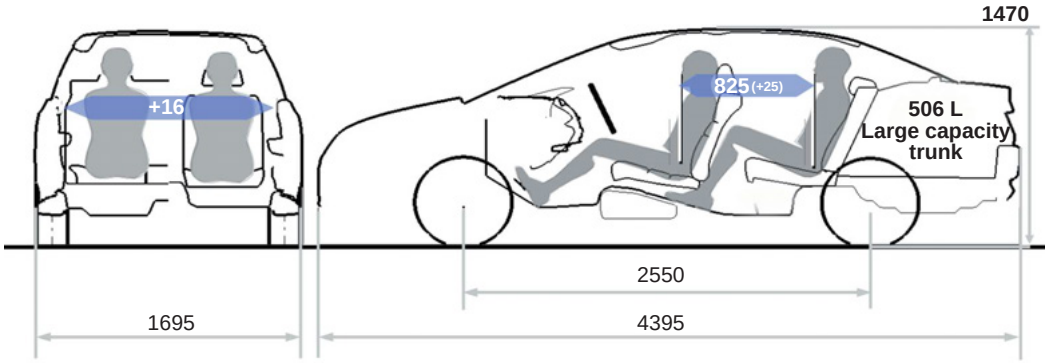


Fig. 3　Package design

ボデーサイドでは，「美」と「快」の共存を目指した．先代CITYに対して，室外幅を5mm拡大した．その中で，室内幅は16mm広げ，ボデーサイドのパネルに張りのある面を造り上げた．

前後をシャープに貫いたボデーサイドのキャラクタラインは，躍動感にあふれるスタイリングの中で，テーマとした「ARROW SHOT FORM」の矢の印象と重なる．

3.2.3. フロントスタイリング

フロントマスクは，力強さにあふれたスタイリングをねらいとした(Fig. 5)．

「目を見れば，その人間のやる気が判る，車も同じこと」というタイの販売店社長の言葉が起点となった．多くのスモールセダンのヘッドライトは，楕円形モチーフの２灯を採用している．これに対してCITYでは，薄型ワイド２灯を採用し，眼力を強めたスタイリングとした．機能的にも，横方向配光を生かすことにより，先代CITYと同等の配光性能を達成している．

ヘッドライトから連続したグリルデザインで，特徴的なフロントマスクに加え，衝突性能，歩行者保護性能，前方視界の機能要素もフロントスタイリングに取り込まれている．

3.2.4. リヤスタイリング

リヤ廻りは，印象に残る後姿の構築を目指した(Fig. 6)．

フード先端から繋がる勢いあるライン，サイド面から繋がるソリッド感，トランク容積をかせぐ造形を合わせて，ダイナミックなハイデッキスタイリングとした．

ボデーサイドのキャラクタラインは，リヤエンドの特徴的なテールライトにつなげ，矢羽のイメージを作り出した．

テールライトの構成は，サイドパネルへ搭載する一体構造とした．限られた車体幅の中で，使い勝手を考慮したトランク開口のラインと併せてテールライトのサイズ設定をおこなった．なお，一体構造の中には，欧州で求められるリヤフォグライトを内蔵する設計をおこなっている．

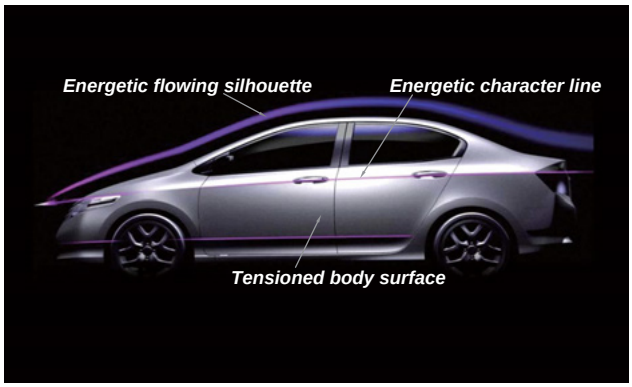


Fig. 4　Side styling : Solid and imposing design



Fig. 5　Front styling : Powerful, forward-thrusting, front-end design

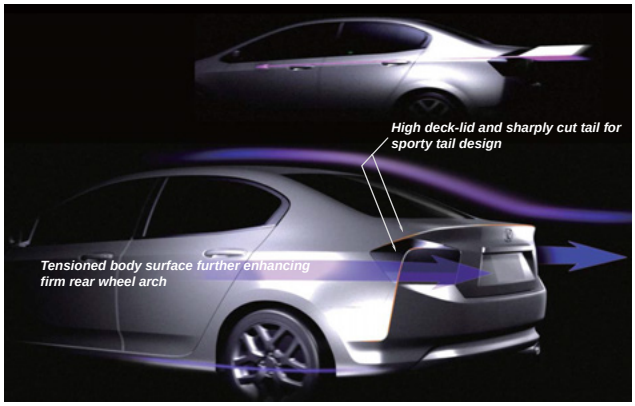


Fig. 6　Rear styling : Sharp rear-end design

4．走りの魅力創出

4.1. ガッツ＆リラクシング

販売する地域の代表として，タイとインドで競合車を含めた試乗会をおこなった．その結果，これらの地域で要求される重点を以下の２点に絞り込んだ．

１．渋滞や高速での走行に適合するパワープラントの発進，加速のレスポンス(Fig. 7)

２．市街，郊外を問わず，荒れた路面に対する乗り心地

こうして「走」のテーマを「ガッツ＆リラクシング」と定め，共用するプラットフォームをテーマの実現に向けてセッティングした．

4.2. パワープラントとエンジンルーム

搭載するパワープラントは，1.34L，1.5L i-VTECのエンジンに，それぞれMT/ATミッションを組み合わせた仕様がベースモデルと共通である．CITYはこれに加え，1.8L i-VTECエンジンにATミッションを組み合わせたパワープラントを搭載する．

エンジンルームは，サイズの大きい1.8L仕様のスペースレイアウトにより決定される．1.5Lと1.8Lエンジンのサイズ概略比較をFig. 8に示す．

ダッシュボード側は，ベースモデルと主要部位を共用することができた．しかし，バッテリーのサイズアップも含め，フロント側のスペースの拡大が必要であり，ベースモデルに対しオーバーハングを105mm延長した．1.8L仕様の

エンジンルームのプランビューを Fig. 9 に示す．このプランビューに，バッテリーを斜めに搭載することで，スモールセダンとして全長と全幅の拡大を抑制する工夫が見られる．

4.3. シャシ

「走」をつかさどるシャシについては，パワープラントと同様にベースモデルの共用となるが，車体の形態差異で，大きな違いが 3 点有る．

1．ホイールベースを 50mm 延長
2．1.8L エンジン搭載とフロントオーバハング
3．トランクルームとリヤオーバハング

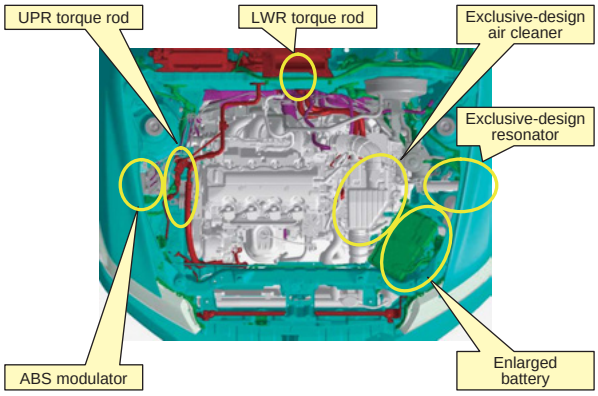


Fig. 9　1.8L engine room

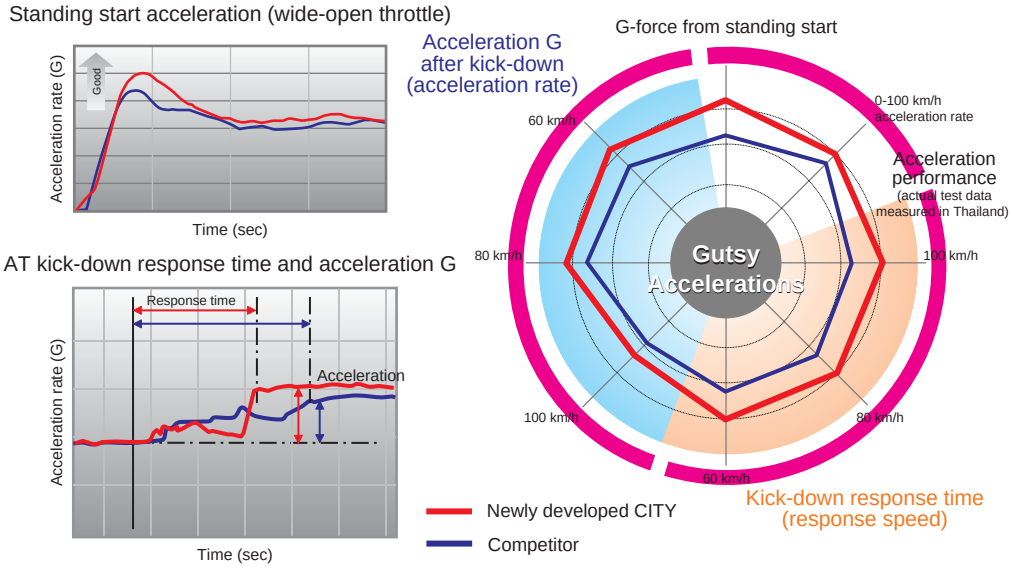


Fig. 7　Acceleration rate : Powerful Accelerations

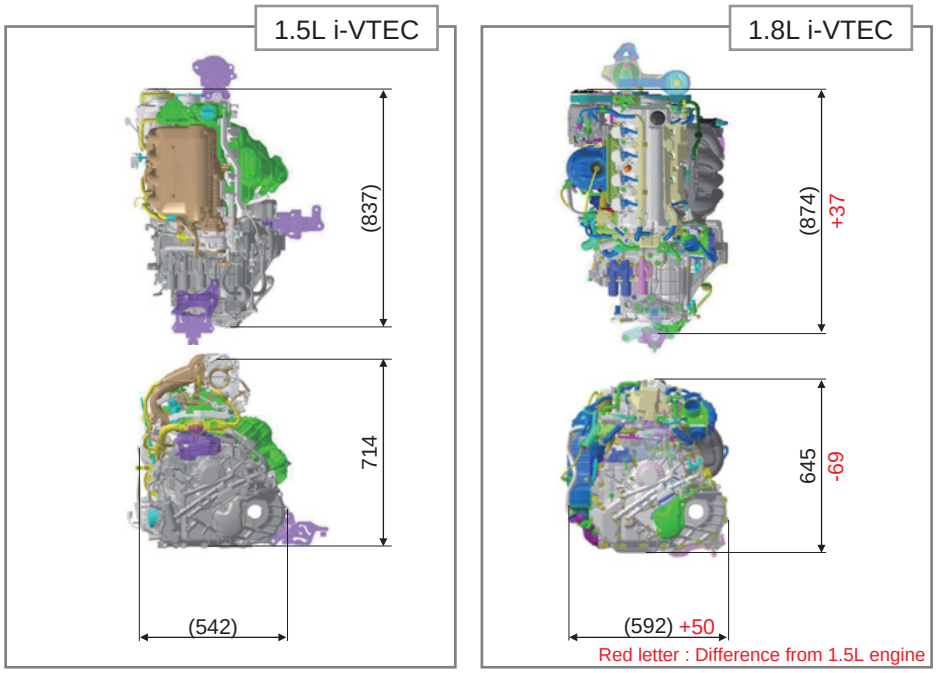


Fig. 8　Engine size comparison

また，上記に伴い，前後ウェイトバランスの違い，さらに，ねらいとする「ガッツ＆リラクシング」のテーマの実現を目指して，シャシに専用の設計とセッティングを施した．以下にシャシの構成とベースモデルとの違いを示す（Fig. 10）．

4.4. サスペンション，パワーステアリング

サスペンションは，ベースモデルのボデー構成を含めて共用化をおこない，バネレート，ダンピング定数のセッティングを専用とした．また，スタビライザの径を 21mm から 19mm に変更した．サスペンションの特性に応じて，電動パワーステアリングのデータ設定を専用とした．これらのセッティングにより，「ガッツ」な加速を支え，かつ，しなやかに乗り心地が良く，安定感も高く，すっきりとしたステアリングフィールで「リラクシング」な走りを作り上げた．

4.5. エキゾーストシステム

先に示したシャシの大きな三つの違いのすべてに影響を受けるのが，エキゾーストシステムであり，その仕様の違いを Fig. 11 に示す．

4.6. ボデー剛性

走りを支えるボデー剛性については，シミュレーションを活用した．各部位の結合剛性を高めることで，軽量かつ高剛性構造を実現した．

ハッチバックの構成と大きく異なる部位として，キャビ

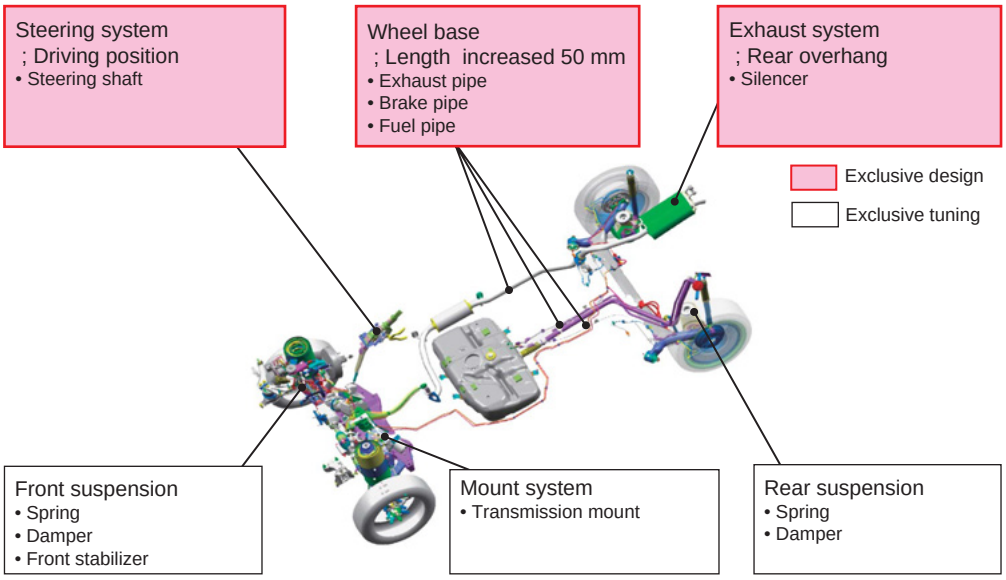


Fig. 10 Chassis platform for 1.5L

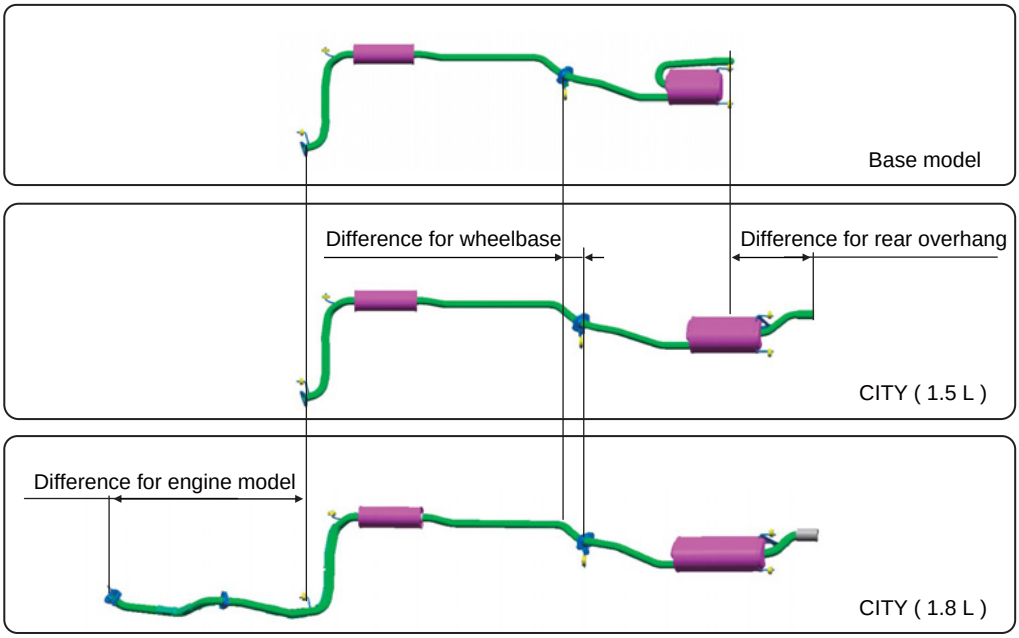


Fig. 11 Exhaust system comparison

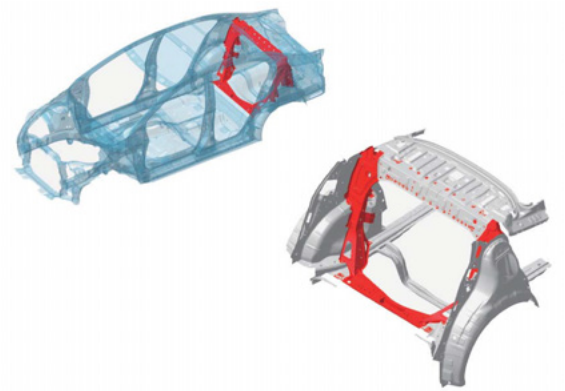


Fig. 12　Body rear bulkhead

ンとトランクルームの隔壁部(リヤバルクヘッド)は，セダンのボデー剛性の要となる部位である(Fig. 12)．ここでは，サスペンションの取り付け部であるリヤホイールハウスをベースモデルと共用した．その上で，トランクルームへの開口が広く取れ，剛性の高い骨格造りをおこなった．

5．専用設計の快適空間

5.1. おおらかさと力強さ

渋滞などによる交通環境，突然のスコールなどによる気象環境から切り離された快適な室内空間を提供したい．室内空間にいることで誇りを持てるように，おおらかさと力強さで乗員を包み込むスタイリングとした．

5.2. フロント席のインテリア

インテリアに表現される力強さは，フロント席で印象付けられる(Fig. 13)．インストルメントパネル中心のシルバー色のパネルから，フロントピラー，ドア内装，コンソールに繋がる勢いのあるキャラクタラインと色の流れに力強さが見える．

ベースモデルと共用化した躍動感あるステアリングホイールは，セダンのインテリアにも違和感無く，市場調査結果でも高評価を得ている．

メータでは，エッジライト，メタル調の段差文字盤で立体感を際立たせ，燃費計を設定し先進感を含ませた(Fig. 14)．なお，このメータは，ベースモデルと基板を共用し，外観でその違いを表現した．

5.3. リヤ席のインテリア

一方リヤ席に座ると，前方に見える力強い造形は，おおらかな流れとして感じることができる．頭上から前方へのルーフ面は，サイドを含めたガラスを通して外の風景に溶け込む広がりを見せている(Fig. 15)．

先代 CITY から 25mm 拡大された前後席のタンデムディスタンスにより，リヤ席の居住空間はスモールセダンの標準を超える広さとなった(Fig. 16)．その結果，リヤ席の居住性は，オーナ自身が乗って，また，家族，友人，お客様を乗せ，その快適さを実感することで「使って誇りが持てる」を実現した．

ウルトラシートを搭載するベースモデルに対し，CITYの



Fig. 13　Interior styling 1

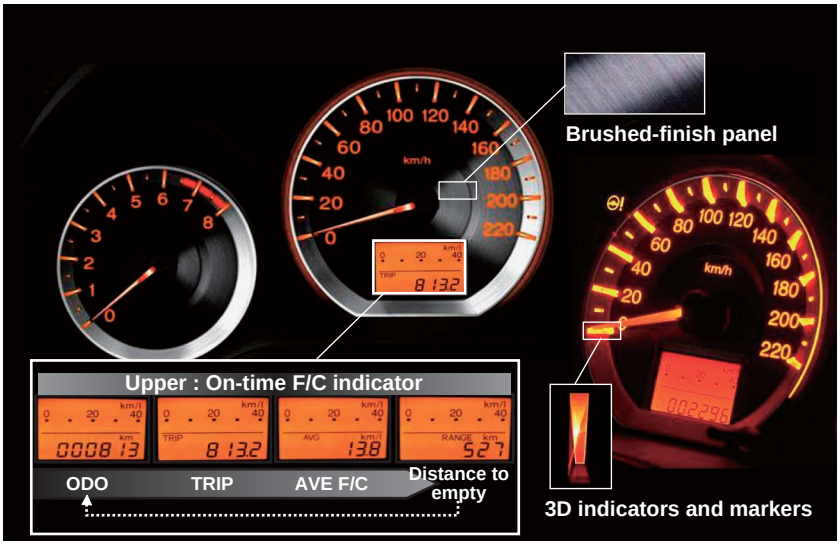


Fig. 14　Meters : Advanced meter design

リヤ席は，セダンに求められる乗り心地に着目した．クッション層を十分に確保できる固定座面とし，その下の空間を収納スペースとした．設定に際しては，調査結果を反映し，傘，靴を収納モジュールとし，着座時のかかと当たりとドア開放時に収納物が容易に見えない美観と防盗性に配慮した．



Fig. 15 Interior styling 2

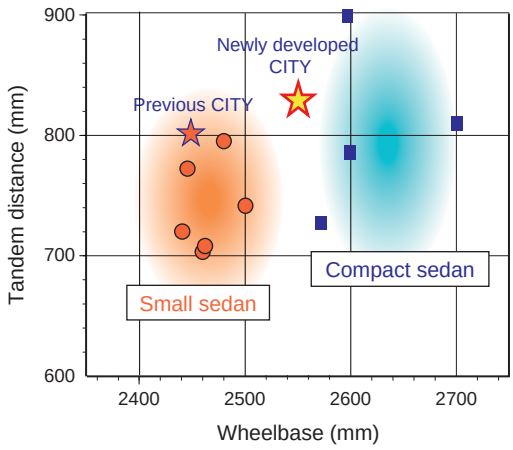


Fig. 16 Tandem distance

リヤシートバックでは，固定タイプの他，ベースモデルのロックとストライカーを共用したリクライニングの機構を上級バリエーションに採用した(Fig. 17)．

5.4. トランクルーム

ハッチバックモデルでは，カーゴルームのユーティリティを重視する．これに対してセダンではトランクの広さが求められる(Fig. 18)．競合車のトランクの使い勝手と各地域の積載荷物を調査し，506Lの大容積と，荷物の出し入れに支障の無い間口設定，トランク見切り高さの設定をおこなった．

5.5. NV 性能

乗員に快適空間を提供する NV への対応は，ベースモデルの構成を踏襲し，パッケージの差異による部分で専用の設計をおこなった．

1.8L エンジンの搭載では，マウントシステムのすべてを専用設計としている．

ハッチバックモデルと構成の異なるトランク，リヤバルクヘッド周辺の遮音，吸音処理は，専用設計となる．特に，後席乗員の快適性のために，リヤピラーでは，シートベルトリトラクタを取り付けるための大開口をシールでふさぐ遮音をおこなった．

さらに，セダンに求められる快適空間を追求し，サイドフレーム先端へのダイナミックダンパを採用した．これにより，室内のこもり音の低減をおこなった．



Fig. 17 Rear seat and under-seat tray

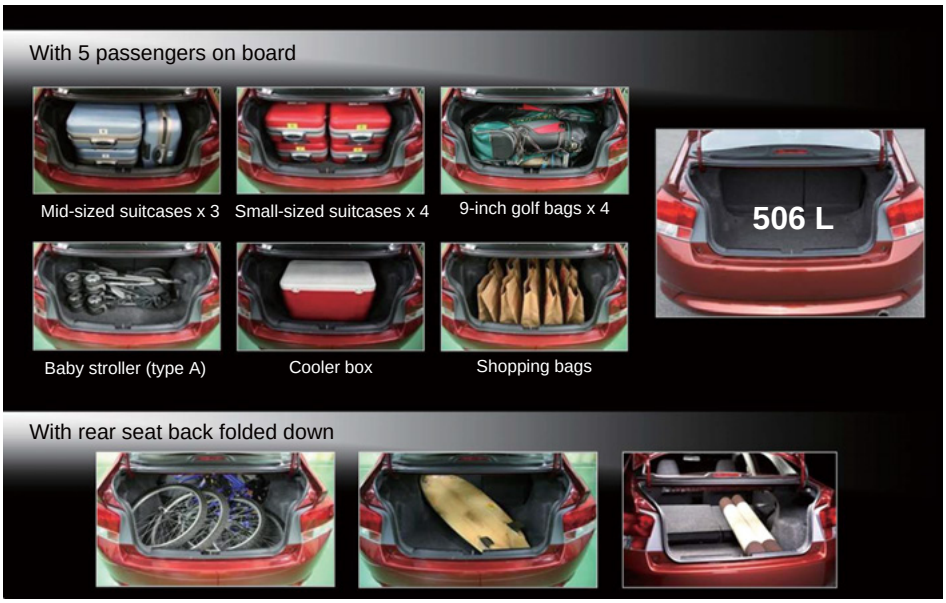


Fig. 18　Trunk room

6．先進性の演出

CITYに搭載する先進の装備には，競合する車に搭載されている装備に対して一歩進んだ，わかりやすい先進をそろえた．

日本市場では，当たり前の装備になっている燃費計は，ドライブコンピュータを連想させる先進装備に位置づけられる．発売後，燃料消費抑制の機運にも合致し，好評価を受けている．

上位バリエーションに，サイドターン内蔵のドアミラーを設定することで，シリーズ全体のイメージを向上させることができた．

同じく上位バリエーションのステアマチックは，スポーティな印象を高めている．

また，CITYを購入したお客様が，誇りを持つことができる装備として，デジタルメディアプレーヤ(以下DMPと記す)に特化したオーディオを開発し装備した．このオーディオは，販売する地域のユーザ特性に合わせて，専用開発をおこなった．

7．アドバンスド オーディオ

初期調査より，CITYを販売する地域では，車内エンタテインメントは，オーディオが関心の的である，との結果を得て，オーディオを専用に開発することとした．専用開発にあたり，下記3点をCITYの購入層のニーズの変化ととらえ，オーディオのコンセプトに取り入れた．

1．従来のスモールセダンでは，1DINサイズのオーディオの装着が一般的であった．しかし，上位セグメントで普及している洗練スタイリングのパネル一体型オーディオの装着が，スモールセダンにも広がりを見せ始めた．

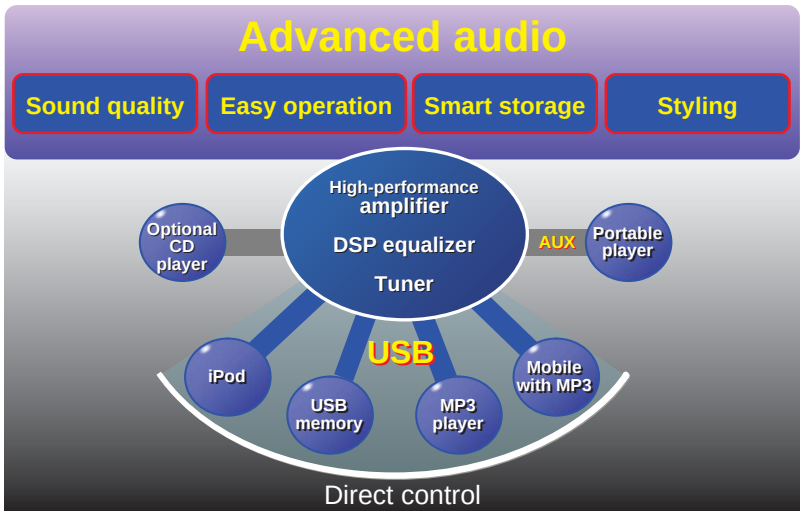


Fig. 19　Audio concept

2．携帯性に優れた DMP が，急激に普及している．
3．CITYの購入層は，パーソナルコンピュータを活用しており，多くの楽曲を圧縮音源として蓄積し，楽しんでいる．

これら3点より，CITYにふさわしいオーディオは，DMP接続を主体に設計されたパネル一体型のオーディオであると捉えた．具体的には，

1．さまざまな DMP が接続できること
2．簡単に楽曲が選べる快適な操作性を有すること
3．圧縮音源を良い音質で楽しめること
4．所有する喜びを満たす付加機能と外観意匠の先進感を持つこと

を重点に開発した．

また，CDプレーヤは，オプションでの装備とし，必要とするお客様の要求に応じて装備できるように設定した．Fig. 19 に，そのコンセプトを示す．

このオーディオは，アドバンスドオーディオと称して開発し，多くの「このような物を待ち望んでいた」という声と共に，市場で高評価を得ることができた．

7.1. 圧縮音源の再生

DMPの圧縮音源の再生を主体にするコンセプトの下，基本性能である高音質の再生性能を有することを目標に，専用にチューニングしたコンデンサ(Fig. 20)をはじめとして，各種ハードウエアのチューニングをおこなった．

時々の気分に応じて簡単に音質を変えることを可能とする DSP - グラフィックイコライザを搭載し，「ナチュラル」「リラックス」「エナジー」を選択できるようにした．加えて，圧縮により失われた音源の輪郭，余韻を強調する「MP3モード」をイコライザに付加することで，DMP 主体のオーディオとしての機能を高めた．

ヘッドユニットの性能向上と共に，6スピーカに対応した音響特性のチューニングを，販売する地域のお客様の嗜好と音源の特徴を捉えておこなった．

7.2. DMP の使い方を反映

DMPは，多量の楽曲を保存し，ストレスなく操作や選択できることが最大のメリットである．DMPの再生を主体とする車載オーディオは，楽曲を容易に選択できる操作系が必須であり，高速サーチ機能付の大型ロータリーセレクタを装備した．また，DMPのランダム再生時には，次の曲に飛ばす操作を頻繁におこなう使い方を考慮し，この操作に対応する左右のボタンを大型化した．

ステアリングホイールには，オーディオスイッチを設け，DMP 特有の使い方と合わせて，運転中の操作性向上をはかった．

7.3. メディアストレージ機能

DMPの接続が主体のオーディオを，車両と一体で開発するメリットを生かし，通例，DIN 規格に基づき設定されるオーディオユニットのハードウエアを小型，専用設計とし，DMP などの収納を可能とするポケットを一体構造とした．

ポケットには，液晶表示付の開閉ぶたを設け，車外から収納品を直視されない防盗性と，接続コネクタ，ケーブルを見せない美観を両立させた．この開閉ぶたのヒンジには，折りたたみ型の携帯電話に使用される金属カムヒンジを使用した．高品位の開閉フィーリング，耐久性の向上と共に，ポケットサイズの拡大にも寄与した(Fig. 21)．



Fig. 21　Smart storage

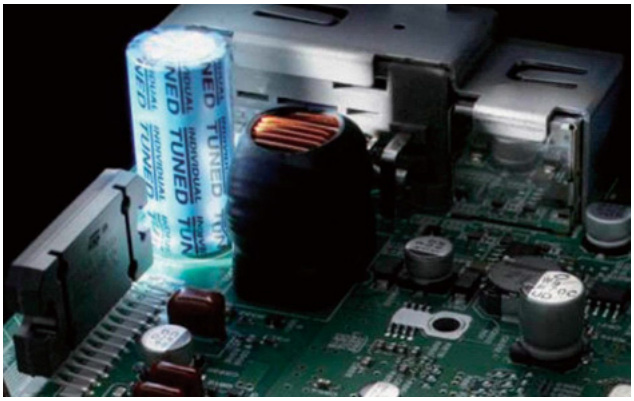


Fig. 20　Exclusively tuned condenser



Fig. 22　Advanced styling

7.4. 先進スタイリング

市場のニーズを的確に捉え，従来の規格にとらわれず，新設計のオーディオを車両一体で開発することで，スタイリングの自由度に広がりを与えた．インストルメントパネルの中心で黒く輝くオーディオは，機能に劣らない先進スタイリングを達成した(Fig. 22)．

8．むすび

ハッチバックモデルをベースとして開発するスモールセダンは，共用化，効率化が重要な命題である．CITYの開発についても，パワープラント，シャシを含むプラットフォームと，それを支えるボデー構成，内外装では，ステアリングホイールをはじめ小物類や，フロントシート骨格，メータ基板に代表される表面より隠れる部位の機能部品に多くの共用化を図り対応した．

しかしその命題以上に，本格的なセダンを求めるお客様の視点に立つことが大切なことである．市場に入り込み，その声に耳を傾け定めたコンセプトに基づき，開発をおこなった CITY は，お客様に喜んでいただける車に仕上げたことを，その販売状況に見ることができる．

■著　者■



大岡慶一



吉田俊一



古海　洋

フレキシブル・フューエルモータサイクルの開発

Development of Flexible-Fuel Motorcycle

國府志朗* Shiro KOKUBU
伊藤 淳* Atsushi ITO
山田広司* Hiroshi YAMADA
堀江秀弥* Hideya HORIE
窪田俊行* Toshiyuki KUBOTA
高橋陽一* Yoichi TAKAHASHI

要　旨

ブラジルの市場ニーズに対応したガソリンとエタノール燃料と，また両者の任意の混合でも運転できる機能を有するフレキシブル・フューエル二輪車（Flexible-Fuel Motorcycle：FFM）を開発した．四輪車のフレキシブル・フューエル車（Flexible-Fuel Vehicles：FFVs）では，低温時のエンジン始動性を確保するため，始動用ガソリンを供給するガソリンサブタンクと噴射装置を追加装備することが一般的だが，小型二輪車では，それらの装備は困難であり大きな課題であった．二輪車用システム“Mix Fuel Injection System”では，燃料のエタノール濃度範囲を判定する制御ロジックとそれに応じて低温始動が困難な場合にガソリンの給油を促すインジケータを設けることでサブタンクを廃止したシンプルなシステムとした．また，エタノール燃料の特性に対応した燃料系部品の開発をおこなった．

ABSTRACT

A flexible-fuel motorcycle (FFM), able to be operated using gasoline, ethanol, or any mixture of the two, has been developed in order to respond to the needs of the Brazilian market. Four-wheeled flexible-fuel vehicles (FFVs) are generally provided with gasoline sub-tanks and fuel injection systems to supply gasoline to enable engine start at low temperatures, but fitting this type of additional equipment in a small motorcycle represents a challenge. This was an issue in the development of the new motorcycle. The use of a control logic that judges the ethanol concentration range of the fuel and an indicator that recommends supply of gasoline when the concentration range is not optimal for low-temperature engine starts in the Mix Fuel Injection System, developed for the new motorcycle, has enabled the realization of a simple system configuration that does away with the gasoline sub-tank. In addition, fuel system components were developed considering the characteristics of ethanol.

1．まえがき

ブラジルでは豊富なサトウキビを原料にしたエタノールが生産され，40年以上前からエタノール燃料の導入が国策として進められてきた．自動車燃料として販売されているガソリンはエタノール20－25%の混合が義務付けられ，さらに 100%エタノール（水を７%前後含む含水エタノール）も販売されている．ブラジルは，国中のガソリンスタンドでどちらの燃料も入手可能な社会インフラが整った世界で最もバイオエタノールの導入が進んだ国と言える．

ブラジルでは，四輪車のフレキシブル・フューエル車（Flexible-Fuel Vehicles：FFVs）が 2003 年頃から発売され始めた．Honda からも CIVIC，FIT の FFV が発売されている(1)．ガソリンでもエタノールでも，両方を混合しても運転できるというフレキシブル・フューエル機能は，ユーザが燃料価格に応じて燃料を自由に選択できる経済性が魅力となり，現在，乗用車新車販売台数の 80%以上が FFV となり，FFV が標準と言える状態になっている．フレキシブル・フューエルの持つ経済的機能は，二輪車においても同様に求められるものであり，かねてよりその発売が要望されていた．

Honda は，2009 年からの新排出ガス規制 PROMOT3 法規に適合した“CG150 Titan”（ガソリン仕様）を発売した．その“CG150 Titan”をベースにフレキシブル・フューエル車“CG150 Titan MIX”を開発した．本稿では，その採用技術について紹介する．

2．開発のねらい

二輪車のフレキシブル・フューエル車を開発するに当り，多くのユーザにそのメリットを享受してもらえるように，ブラジルで最も販売台数の多いモデルである“CG150 Titan”をベースモデルとして選定した．そして，二輪車ユーザの

＊二輪R&Dセンター

https://doi.org/10.69239/hondatechnicalreview.2009_21_2_3

ニーズに合わせた車両となるように，次の３項目を開発目標とした．

（1）ガソリン，エタノール，混合でも運転可能なこと．

（2）ベース車両と主要部品を共用できること．

（3）二輪車ユーザのニーズに合わせた廉価な価格で提供すること．

３．開発車両

3.1. 車両外観

Fig. 1 に CG150 Titan MIX の外観図を，Table 1 に車両諸元を示す．外観上は，ベースとなった CG150 Titan とほとんど同一である．外観上の変化点はメータパネル，サイドカバー内にある交換式２次フューエルフィルタである．



Fig. 1　CG150 Titan MIX

Table 1　Body specifications

Items	Specifications
Frame type	Diamond type
Dry mass	116.4 kg
Overall length	1988 mm
Overall width	730 mm
Overall height	1098 mm

3.2. エンジン

Table 2 にガソリンモデルとフレキシブル・フューエルモデルおよびベースとなった 2007 年モデル CG150 Titan のエンジン諸元，点火，燃料供給方式の比較を示す[2]．

Fig. 2 にエンジンの外観図と酸素センサの配置を示す．

2009 年モデル CG150 Titan は，フレキシブル・フューエル車の開発を想定し，ガソリン燃料車用とフレキシブル・フューエル車用で共通のエンジン仕様を用いて開発をおこなった．エタノールによる磨耗対策としてバルブ，バルブシート材質の変更をおこなっている．

Table 2　Engine, ignition and fuel supply specifications

		2007 model	2009 model	
		Gasoline	Gasoline	MIX Fuel
Fuel		E20 - E25	E20 - E25	E20 - E100
Cooling system		Air	Air	Air
Bore x stroke	(mm)	57.3 x 58.84	57.3 x 58.84	57.3 x 58.84
Displacement	(cm^3)	149.2	149.2	149.2
Compression ratio		9.5	9.5	9.5
Valve train		SOHC	SOHC	SOHC
number of valves		2	2	2
Valve material	IN	SAE HNV3	SAE HNV3 (increased hardness)	SAE HNV3 (increased hardness)
	EX	LV21 - 43	SAE EV8 +Metallinzing	SAE EV8 +Metallinzing
Valve seat material	IN	Sinter alloy	Wear-resistance sinter alloy	Wear-resistance sinter alloy
	EX	Wear-resistance sinter alloy	High wear resistance sinter alloy	High wear resistance sinter alloy
Fuel system		Carburetor	Programmed fuel injection	Programmed fuel injection
Throttle type/Diameter	(mm)	Piston / 22.8	Butterfly / 26	Butterfly / 26
Throttle position sensor		–	On throttle body	On throttle body
Absolute pressure sensor		–	On throttle body	On throttle body
Oil temperature sensor		–	On cylinder	On cylinder
Oxygen sensor		–	Without heater	With heater
Ignition control		Engine speed table	Engine speed-throttle opening map	Engine speed-throttle opening map

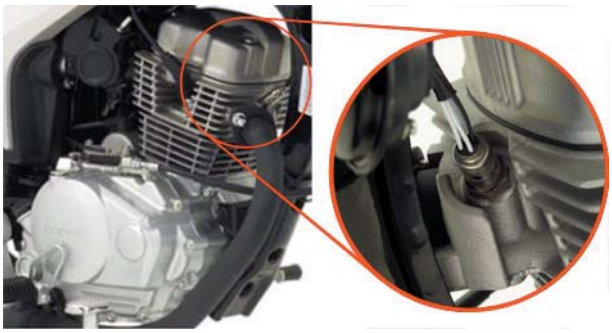


Fig. 2 Exterior view of engine and oxygen sensor

排ガス規制強化(PROMOT 2；Euro-2 相当→ PROMOT 3；Euro-3 相当)に適応するため，2009 年モデルでは燃料供給方式をキャブレタから PGM-FI に変更した．排気触媒の浄化性能を十分発揮させるため，エンジンヘッドのエキゾーストポートに酸素センサを配置し，その出力信号により燃料噴射量のフィードバック制御をおこなっている．PGM-FIにより，点火時期制御も運転負荷で変わらない回転数進角設定から回転数とスロットル開度によるマップ制御となった．

3.3. 出力特性

Fig. 3 にガソリン(エタノール 22%)とエタノール(含水 7%)でのエンジン全開出力性能を示す．燃料違いでは多少エタノールの方が出力は大きいが，ほぼ同等である．燃料によって走行性能の差はほとんどない．

4．ブラジルの燃料性状と課題

Table 3 にガソリンとエタノールの燃料性状を示す．

ブラジルの二輪車用市販燃料は，大きく分けてガソリンとアルコールの 2 種類がある．ガソリンは，純粋なガソリンではなく，ガソリンに政府の法令で 20 − 25%の間でエタノールが混合されている．アルコールは，水分を 7 %前後含んだ含水エタノールである．純粋なガソリンは一般的に販売されていない．エタノールを燃料として使用する場合に，主要な課題が三つある．

一つ目の課題は，ガソリンとエタノールの異なる燃料における燃料噴射制御の構築である．ガソリンエンジンの燃料供給システムでは，吸入空気量を計量して，その空気量に合わせて燃料噴射量を決定する．ガソリンとエタノールでは同じ吸入空気質量に対して，完全燃焼する燃料質量の比(理論空燃比)が異なり，純粋なガソリンが 14.6 に対し，エタノールは 9.0 となる．燃料がガソリンだけの場合は，一定の空燃比になるようにあらかじめ設定できるが，エタノールが混合することで最適な空燃比が大きく変化する．

エンジンの良好な運転状態を保つには，使用する燃料中のエタノール濃度を把握して，適正な燃料噴射量制御をおこなうことが必要となる．

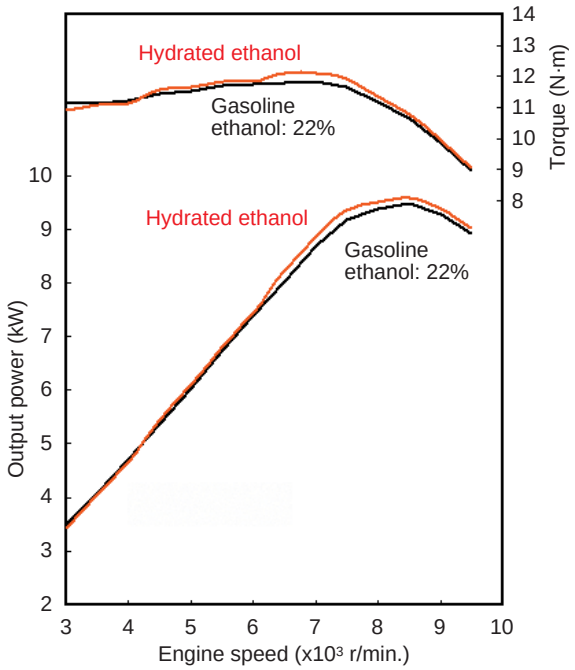


Fig. 3 Engine performance

Table 3 Fuel properties

	Gasoline	Ethanol
Specific gravity	0.73-0.75	0.79
Heating value (MJ/Air kg)	2.95	2.99
Octan number RON/MON	93/81	110/92
Stoichiometric air fuel ratio	14.6	9.0
Flash point (°C)	< -30	13
Boiling point (°C)	25-200	78
Ratio of moles before and after combustion	1.07	1.14

二つ目の課題は，低気温時のエンジン始動性能の確保である．ガソリンの引火点が−30℃以下であるのに対し，エタノールの引火点は 13℃と高いため，エタノールだけの燃料では低温条件で始動が困難になる．その対応として，四輪車の FFV では低温時のエンジン始動用にエンジンルーム内または近傍にガソリン専用のサブ燃料タンクを別に設置し，燃料噴射系統も専用で装備している．Fig. 4にCIVIC FFV の燃料タンクと燃料供給システムの配置を，Fig. 5に始動用サブ燃料系システムの配置を示す[1]．小型二輪車において，同様なシステムを追加しようとすると，搭載スペースの確保が困難であること，部品点数が大幅に増加することが大きな障害となる．

三つ目の課題は，エタノールは，金属やゴムに対して腐食性が強いことである．それに対応してエンジンや燃料供給部品の耐腐食性の向上を図る必要がある[3]．

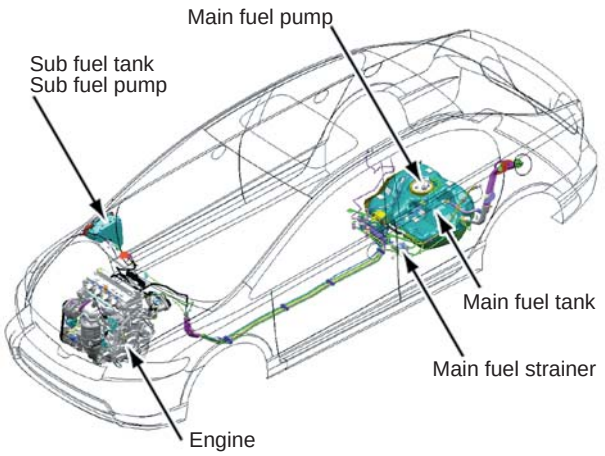


Fig. 4　Exterior view of CIVIC FFV fuel supply system

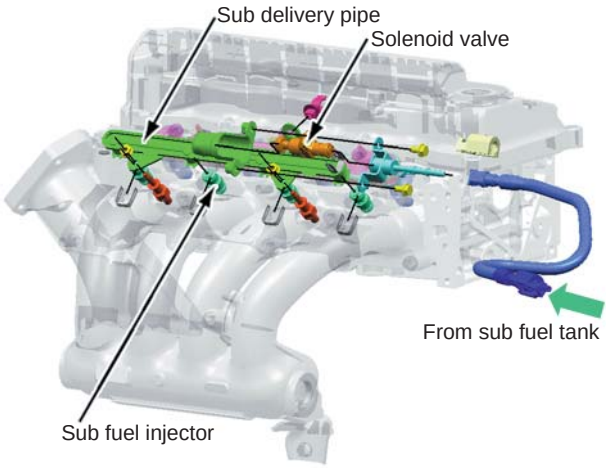


Fig. 5　Sub-fuel system for CIVIC FFV

5．フレキシブル・フューエル燃料噴射量制御

5.1. 燃料噴射制御における課題

Fig. 6 に純粋なガソリンと７%含水エタノールでエタノール混合濃度別の空気過剰率λ=1となる空燃比(A/F)の関係を示す．ガソリンのλ=1のA/Fは14.6に対し，７%含水エタノールは8.2である．Fig. 7にガソリン(エタノール濃度22%)に対し，エタノール濃度を変化させて空気過剰率λ=1になるときの燃料噴射量の変化倍率を示す．エタノール濃度が上がるにつれ要求燃料噴射量は増え，100%エタノールにおいては，ガソリン(エタノール濃度22%)の約1.5倍の燃料噴射量が必要になる．燃料に含まれるエタノールの濃度によって，燃料噴射量を大幅に調整することが必要となることがわかる．フレキシブル･フューエルシステムにおける燃料噴射制御の課題は，エンジン性能を発揮させる最適な燃料噴射量に調整することである．

5.2. 二輪車エンジンの特性

一般的なFFVでは，酸素センサ出力を用いて燃料噴射量の O_2 フィードバック制御をおこない，その結果からエタノール濃度を推定して，基準となるエタノール濃度での燃料噴射量マップに推定したエタノール濃度に応じた一定の補正倍率をかけ，燃料噴射量を調整する方式が採用されていることが多い．O_2フィードバック制御とは，排出ガス中の酸素濃度に応じて空燃比がリッチかリーンかを検知し，それを打ち消す方向で常に燃料噴射量を微調整し続けて理論空燃比に収束させる制御である．このO_2フィードバックで基準となる燃料噴射量マップに対する調整倍率を O_2 フィードバック補正係数 K_{O2} と呼ぶ．基準となるガソリン燃料だけなら，O_2フィードバック制御のK_{O2}の調整幅はわずかで済む．ところが，燃料にエタノールが加わった場合，その調整幅は大きくなる．このO_2フィードバック補正係数K_{O2}を統計的に平均化処理することで，使用している燃料固有のエタノール濃度補正値(*Ket*)を決定できる．エタノール濃度補正値(*Ket*)は理論的にはエタノール濃度だけで決まるため，これにより燃料中のエタノールの濃度を推定することが可能となる．燃料タンク内に燃料が給油されるまではエタノール濃度は変化しないので，基本の燃料噴射量マップにエタノール濃度補正値(*Ket*)をかけたマップを元に燃料噴射量を決定すれば，通常のO_2フィードバック制御でエンジンの良好な運転状態が確保できる．Fig. 8 に FFV のエン

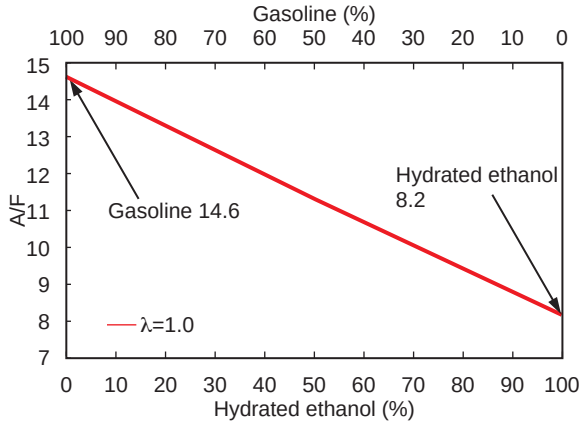


Fig. 6　Relation between A/F and ethanol concentration for λ=1

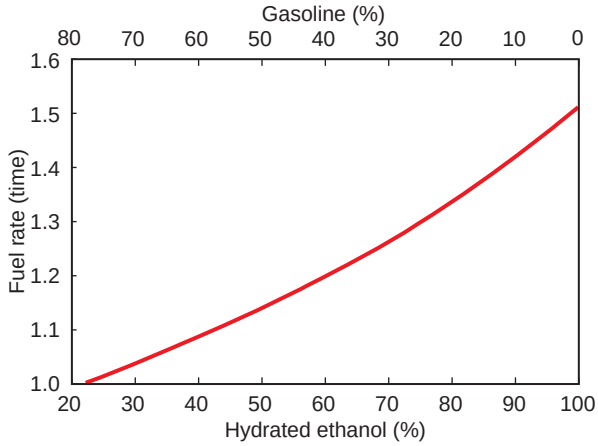


Fig. 7　Change in amount of injection demanded due to changing concentration of ethanol

ジンと燃料インジェクタ，酸素センサを含む O_2 フィードバックシステムの概念図を示す．

Fig. 9に，CG150 Titanのエンジンで，ガソリン(エタノール22%)の燃料噴射量を基準に，エタノール濃度を変化させた場合にそれぞれのエタノール濃度から決定される理論的倍率で燃料噴射を調整した場合の空気過剰率λの特性を示す．エタノール濃度によらず同じλ特性になることが期待されたが，スロットル開度20 deg以下の低負荷領域ではλが大きく変化する．すなわち，同じエタノール濃度でも運転条件によって要求される噴射量の変化倍率が一定ではない．

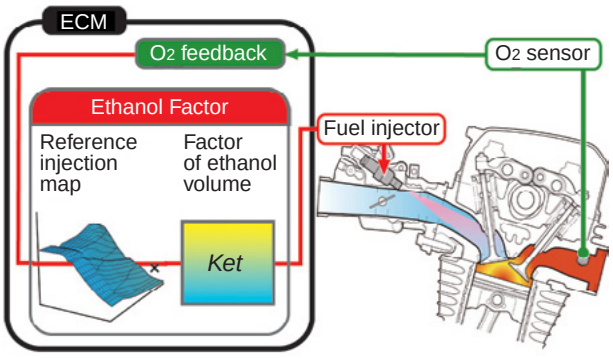


Fig. 8 Ethanol factor control diagram image of FFV

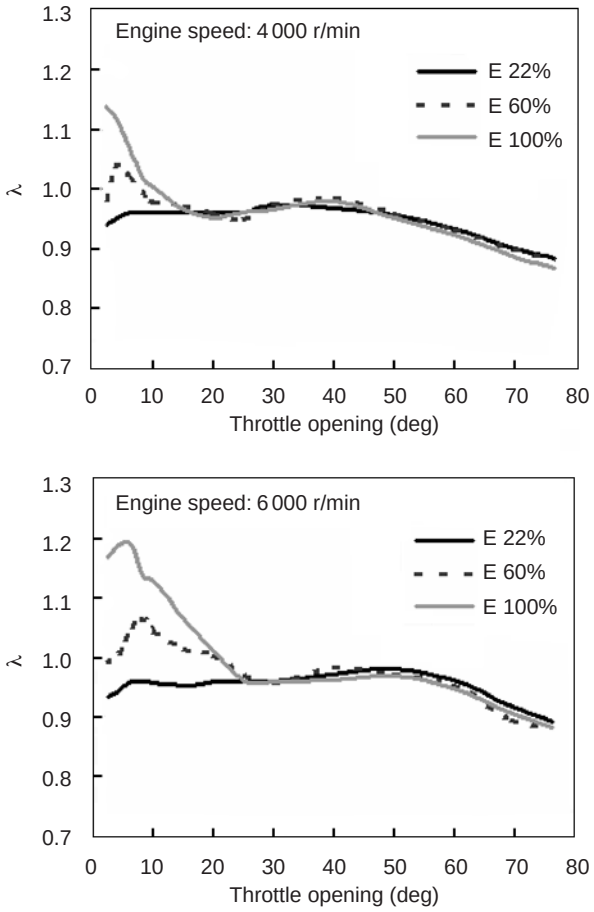


Fig. 9 λ when injection amount was multiplied at fixed rate based on difference in ethanol

この特性は，二輪車エンジン特有の大きなバルブオーバラップやサージタンクを持たない吸気系レイアウトが要因と推測される．この特性により，運転条件によらず燃料のエタノール濃度に応じて決まる一つの倍率で調整して燃料噴射量を決定するというシンプルな制御方法では，適正な燃料噴射量を供給できないという問題があることが分かった．

5.3. グループ切替え制御

二輪車のエンジン特性に対応する手法として，エタノール濃度に応じて四つの制御グループから適切な燃料噴射量を選択して切替える方式を採用した．Fig. 10に制御グループの概要図を示す．制御グループとは，エタノール濃度によって調整すべき制御項目である燃料噴射量マップ，噴射タイミング，始動噴射や暖機過程の補正，過渡期補正，点火時期などの各制御をまとめたパッケージのことを指す．そのパッケージが，四つ準備されるということである．

本システムでは，エタノール濃度の値を直接推定する代わりに，設定されたエタノール濃度範囲に応じた制御グループを選択することで適正な燃料噴射を実施できるようにしたことが特徴である．四つの制御グループの基準濃度をガソリン(エタノール 22%)からエタノール 100%の間で噴射量の要求倍率の変化率がほぼ均一になるように割り振った．Fig. 11 は Fig. 8 のグラフに，各グループの基準となるエタノール濃度を追加して示している．四段階に分けた基準となるエタノール濃度それぞれで燃料噴射量マップを設定することで，その濃度では最適な条件で運転できる．燃料噴射量マップ以外の補正制御も同様である．また，基準となるエタノール濃度以外の中間濃度においても，酸素センサ出力による O_2 フィードバック制御の補正効果で，ほとんど性能を損なうことがなく運転ができることが確かめられている．

Fig. 12に，それぞれの制御グループのエタノール濃度範囲を示す．濃度の重なる領域を持つことで，中間のエタノール濃度であっても頻繁な切替わりを発生させないようにすることができた．

5.4. マップ判定制御

使用燃料に対して適切な燃料噴射をおこなうためには，エタノール濃度に最も適した制御グループを選択する必要がある．つまり，給油によりエタノール濃度が変化して制御グループが適正でなくなった場合は，速やかに制御グループの切替えを実施しなければならない．制御グループの切替え手法として酸素センサの出力を用いて選択するアルゴリズムを採用した．Fig. 13に，グループ切替えの概念図を示す．ある制御グループを選択している場合，酸素センサの出力を基に理論空燃比に収束するよう基準の噴射量マップに O_2 フィードバック補正係数 K_{O2} をかけてリッチ・リーンを繰り返す一般的なフィードバック制御をおこなう．

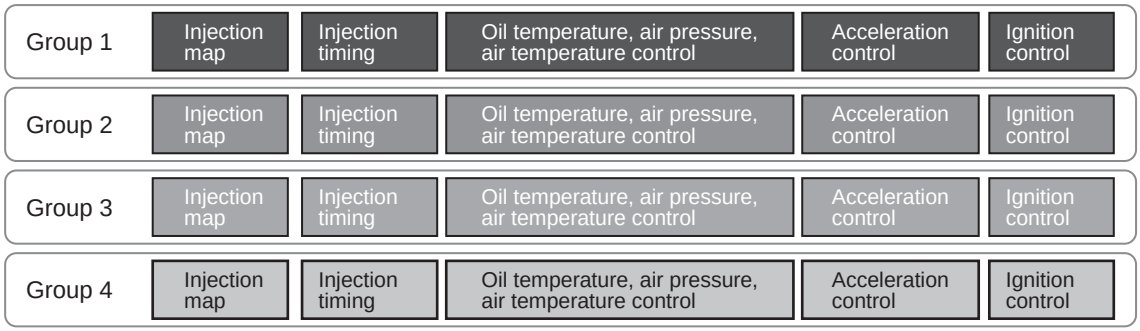


Fig. 10　Schematic diagrams of four control groups

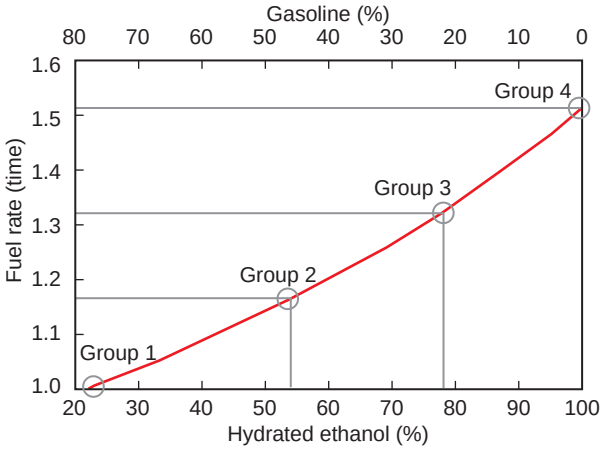


Fig. 11　Required injection multiplication based on 22% ethanol

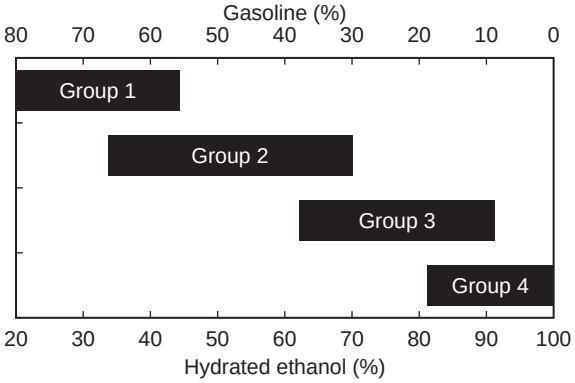


Fig. 12　Allocation of respective control groups

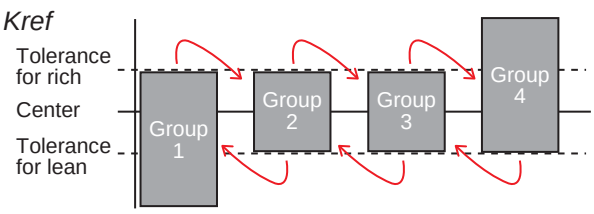


Fig. 13　Group switchover diagram

一定条件が整った場合に，O_2 フィードバック補正計数（Ko_2）を一定時間の移動平均的に統計処理したマップ判定値（$Kref$）を式（1）により算出し続ける．

$$K_{ref} = \left(\sum_{i=m-n}^{n} (Ko_{2i}) \right) / n \qquad (1)$$

$Kref$：マップ判定値
m：現在の燃料噴射回数
n：処理する燃料噴射量演算回数

そのマップ判定値（$Kref$）が，リッチ切替え判定値（Tolerance for rich）よりも大きくなった場合，あるいはリーン切替え判定値（Tolerance for lean）よりも小さくなった場合，そのときに選択している制御グループの燃料噴射量マップが適正でないことになる．すると，マップのズレを修整する方向の隣の制御グループに切替え，その制御グループの燃料噴射量マップで運転をおこなう．それでもマップ判定値（$Kref$）がリッチ・リーン切替え判定値を超える場合，更に隣の制御グループのマップに切替える．最終的にマップ判定値（$Kref$）が切り替え判定値の範囲内になる制御グループのマップに落着く．このように，O_2 フィードバック制御の結果から，最も適正な燃料噴射マップを選択することで，四つの制御グループの中で制最も適正な御グループを選択する動作をマップ判定制御と呼んでいる．Fig. 14 に，マップ判定制御の動作概念図を示す．

この制御により，燃料のエタノール濃度が変化しても，常に最適な制御グループの選択がおこなわれ続ける．さまざまな走行条件において，マップ判定制御が実施され，燃料タンク内のエタノール濃度が変化した場合は約 3 分以内に適切な制御グループを選択する迅速さを達成している．選択された最新の制御グループは，常にECMに記憶されて，次回のエンジン始動，暖機運転において最初に選択される．

5.5. 排出ガス性能

Table 4 に，ブラジルの二輪車排出ガス法規を示す．2009 年より Euro-3 同等レベルの PROMOT3 法規が施行されている．四輪車のフレキシブル・フューエル車の場合，ガソリ

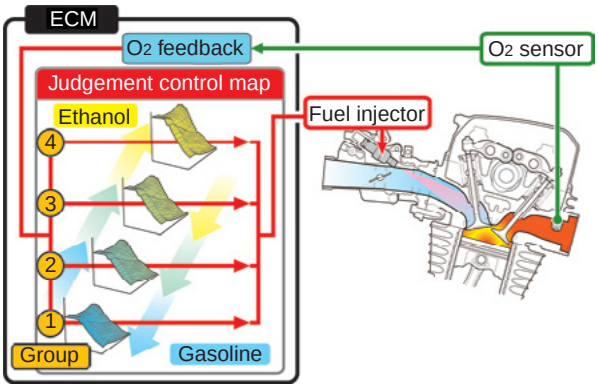


Fig. 14 Judgment control diagram map

Table 4 Emission standards for motorcycles

(g/km)

Stage	Class	CO	HC	NOx	Model
PROMOT 3	**V < 150 cm³**	**2.0**	**0.8**	**0.15**	CG150 Titan
	V ≥ 150 cm³	2.0	0.3	0.15	

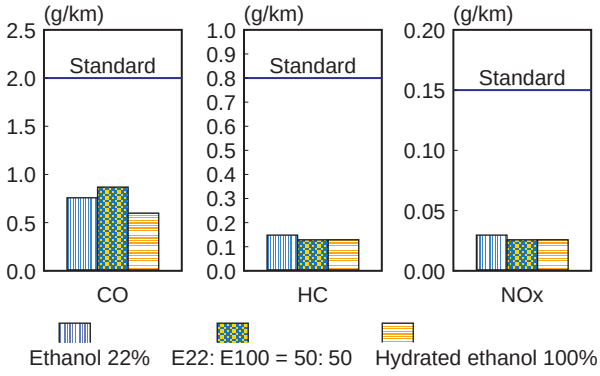


Fig. 15 Achieved exhaust emissions

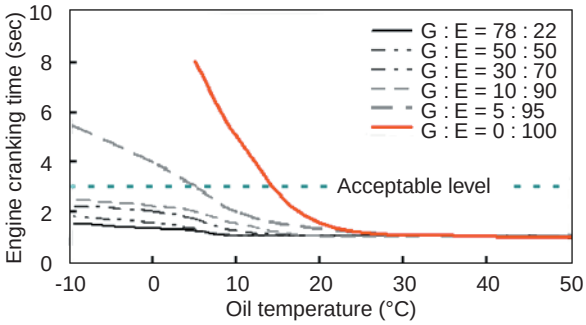


Fig. 16 Engine start time at different ethanol concentrations

ン(エタノール22%)，6.8%含水エタノール，この二つの同量の混合の燃料のいずれでも法規規制値を満足することが求められている．二輪車では，フレキシブル･フューエル車に特化した排出ガス規制は特に設けられていないものの，同様な排出ガス性能を持つことが求められると考えた．

Fig. 15に，エタノール濃度の異なる燃料での排出ガス測定結果を示す．どの燃料でも PROMOT3 法規規制値の 50 %以下を達成しており，適切な燃料噴射と排出ガス処理がおこなわれていることがわかる．

6．低温時のエンジン始動

6.1. 始動性テスト結果

エタノール燃料のエンジン始動性能における課題は，低気温になるほどエンジン始動性能が低下することである．エタノールだけの場合，氷点下では始動できない．これはエタノールの引火点が13℃と高いこと，気化潜熱がガソリンの約３倍もあることが影響している．しかし，二輪車で四輪車FFVと同様なサブタンクシステムを採用することは困難であり，サブタンクなしで始動性を確保することを目指した．Fig. 16にガソリンとエタノールの混合比率を変化させて，オイル温度別にエンジン始動するまでのクランキング時間を比較したグラフを示す．オイル温度は，外気温と同じまでエンジンが完全に冷えている状態である．エタノール100%では気温が 15℃を下回ると，エンジンの始動性が急激に低下し，5℃を下回るとエンジン始動ができなくなる．一方，燃料中のエタノール濃度が90%以下，すなわち，ガソリン濃度が10%を超えていれば，エンジン始動性能は許容レベルであることが分かった．エンジン始動時に燃料に一定濃度以上のガソリンが混合されていれば，始動用ガソリンを用いなくとも低温でも安定したエンジン始動性能が確保できることが分かった．

6.2. アルコールインジケータの搭載

ユーザがエンジンの始動性が低下しないように，外気温に応じてタンク内燃料のアルコール濃度を適正に管理することができれば，低温時のエンジン始動性を確保できてサブタンクシステムを廃止できる．そのためには，ユーザが今タンク内にある燃料のエタノール濃度を的確に知ることができて，それを基に次に給油すべき燃料を選択できることが必要である．その情報をユーザに伝えるため，二つのランプ“ MIX ”と“ ALC ”からなるアルコールインジケータをメータパネルに設置した．Fig. 17にアルコールインジケータの配置を示す．

6.3. インジケータの表示

現在のタンク内にある燃料のエタノール濃度で次回運転時に良好なエンジン始動性を確保できるか，それに対応した適切な給油の情報をユーザに知らせるため，“ ALC ”と“ MIX ”の二つのランプを組み合わせて四つのケースを表示する．ランプの点灯動作は，運転中における燃料噴射制御のマップ切替え制御の結果選択されたに制御グループに連動しておこなわれる．Fig. 18に，インジケータ表示の概要を示す．



Fig. 17　Location of alcohol indicator

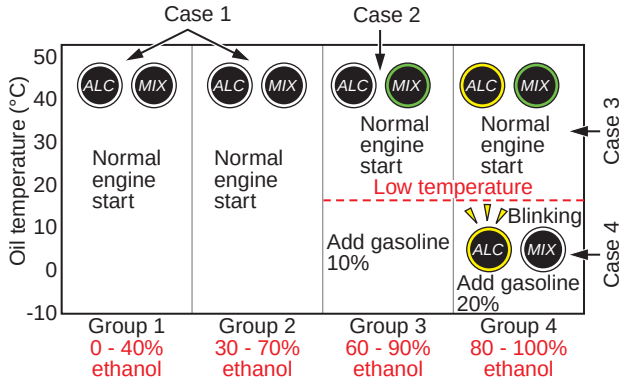


Fig. 18　Indicator functions

四つのケースの表示内容とそれによる給油のための情報を説明する．

ケース１ 制御グループ１・２

両方のランプが消えている

エタノール濃度が０%から70%の状態であり，低温時でも始動性が良好な状態．

ケース２ 制御グループ３

“ MIX ”ランプが点灯している

エタノール濃度が60%－90%の状態で，低温時に始動性が低下する可能性がある．

気温が低下する時期は給油時にガソリンを約10%以上追加給油することが必要．

ケース３ 制御グループ４

“ ALC ”ランプが点灯している

エタノール濃度が80%以上であり，低温時には始動性が極端に低下する．気温が低下する可能性のある時期には，給油時にガソリンを約 20%以上追加給油することが必要である．

ケース４ 制御グループ４（エンジン始動前）

“ ALC ”ランプが点滅している

エタノール濃度が80%以上で，気温が15℃を下回っているので，既にエンジン始動が困難になっている可能性があることを示す．

ユーザがこれらのインジケータの表示に応じて給油をおこなうことで，良好な始動性を確保することができる．

6.4. ミックス・フューエル・インジェクション

ガソリンとエタノールの混合燃料を使用する上で，制御グループとマップ判定制御により良好な運転性を確保する制御と，アルコールインジケータを装備して始動に適した燃料の混合をおこなうことで始動用サブタンクシステムを省略することができた．このフレキシブル･フューエルシステムをミックス・フューエル・インジェクションシステム（MIX fuel injection system）と呼ぶこととする．

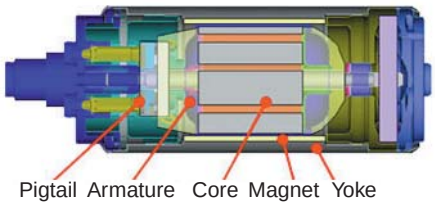
7．燃料供給系部品

7.1. 燃料ポンプの防錆

燃料系供給部品における課題は，エタノール燃料の金属を腐食させる特性への対応である．ブラジルで売られているエタノールは，含水エタノールであり７%前後の水が含まれている．その影響を最も受けるのが燃料ポンプで，ガソリン専用の燃料ポンプをエタノール燃料で使用すると金属部品の腐食により錆が発生し不動となってしまうケースが確認できた．Fig. 19に示すように燃料ポンプの各金属部位に防錆処理を実施した．

7.2. インジェクタ

Fig. 20 にインジェクタの構造図を，Table 5 にインジェクタの流量特性と材質を示す．アルコール燃料では，同じエンジン排気量でも最大要求燃料流量が増加するため，インジェクタの流量レンジを大きく設定した．また，ガソリン仕様に対して構造的には同じであるが，材質および表面処理の変更で耐腐食性の向上を図った．



Parts	Gasoline	Flexible fuel
Pigtail	Sn plating	Sn plating
Armature	None	Resin molding
Core	None	Cu-Sn plating
Magnet	Epoxy electro-deposition painting	Epoxy electro-deposition painting
Yoke	Zn plating	Cu-Sn plating

Fig. 19　Areas of fuel pump treated with rust-preventive measures

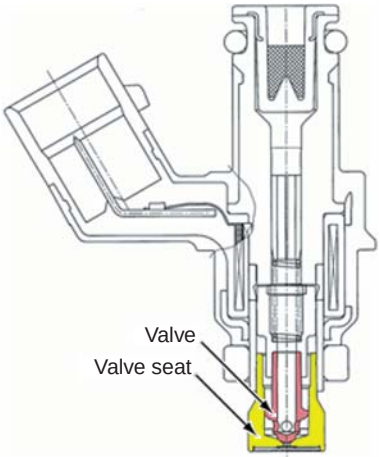


Fig. 20 Fuel injector for CG150 Titan

Table 5 Flow rate of injector and injector material of each model

		Gasoline	MIX fuel
Fuel		E20-E25	E20-E100
Fuel pressure (kPa)		294	294
Flow rate at 24 msec (mm³/st)		52.5	61.2
Material	Valve	S440C	S440C Passivating treatment
	Valve seat	S440C	S440C Passivating treatment

7.3. エタノール燃料のダストの分散

燃料中のダストは，エタノールが加わることにより，より細かく分散することが分かっている．これによりエタノール混合燃料では，燃料中のダストの分散がフィルタの目詰まりを促進させることがある．Fig. 21にガソリンとエタノールのダスト粒径別の累計分布を示す．Fig. 22に市販燃料中のダスト分散状態を示す．エタノールの方が細かいダストが多い．

7.4. 交換式燃料フィルタの採用

既存の燃料フィルタをエタノールとガソリン中で使用したとき，エタノールはガソリンに対し約三倍早く詰まり，流量低下を発生させる．この対応として，大容量の交換式燃料フィルタを追加で設置した．Fig. 23に交換式燃料フィルタの概観図を示す．Fig. 24燃料供給システムの従来のガソリン専用車との比較を示す．小型二輪車用システムではプレッシャレギュレータが燃料ポンプに一体化されていることが多い．それに対し FFM ではプレッシャレギュレータをポンプと別体化し，二次フィルタの下流に配置した．Fig. 25 に燃料系部品の配置を示す．

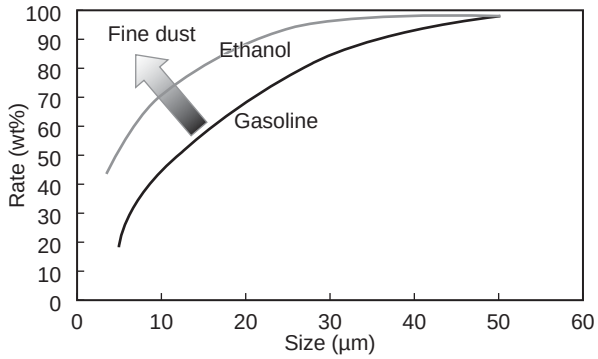


Fig. 21 Cumulative distribution of dust in fuel

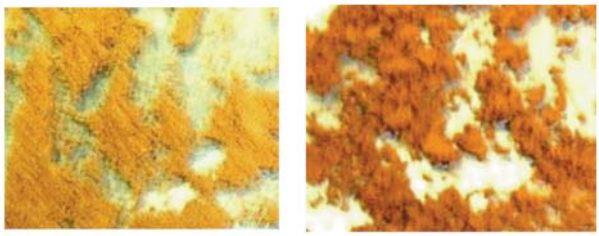


Fig. 22 State of dispersion of dust in fuel



Fig. 23 External view of stream of replacement filter

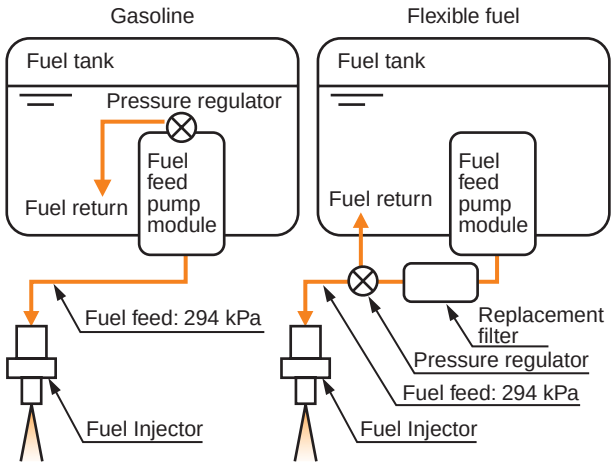


Fig. 24 Comparison of fuel feed system

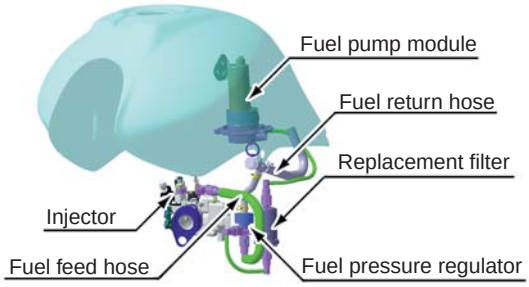


Fig. 25　Overview of fuel supply system

8．まとめ

ブラジルの二輪車ユーザのニーズにマッチしたフレキシブル・フューエル車を開発した．小型二輪車用“ミックス・フューエルインジェクション・システム”は，二輪車の特性に合わせたシンプルな構成で，フレキシブル・フューエル機能を廉価な価格で実現している．特徴は以下のとおりである．

（1）小型二輪車のエンジン特性にあったグループ切替え燃料噴射制御を採用した．

（2）燃料のエタノール濃度とそれに合わせた給油の仕方の情報をユーザに知らせるインジケータを採用した．これによりエンジン始動用のガソリンサブタンクを廃止し，小型二輪車に搭載可能なシステム構成とした．

（3）含水エタノールに対応する燃料系部品を開発した．

ブラジル初のフレキシブル・フューエル・モーターサイクルとなる“CG150 Titan MIX”が，多くのお客様に喜ばれ，四輪車と同様にブラジルの二輪車におけるスタンダードになる日が来ることを期待する．

参考文献

（1）齊木良治，中島進，中島寛明，三木健太郎，沖秀行，御領園陽一：ブラジル向け CIVIC 用 1.8L フレックスフューエルエンジンの開発，Honda R&D Technical Review, Vol.19, No.1, p.13-19

（2）俵田雄一，神戸敬司，安田幸広，矢部裕之，横山英巳：低燃費と動力性能を両立させたブラジル向け小型二輪車４ストロークエンジンの開発，Honda R&D Technical Review, Vol.16, No.2, p.65-70

（3）Nakata, K., Utsumi, S.: The Effect of Ethanol Fuel on a Spark Ignition Engine, SAE Paper 2006-01-3380(2006)

■著　者■


國府志朗


伊藤　淳


山田広司


堀江秀弥


窪田俊行


高橋陽一

カセットボンベを使用した家庭菜園用小型耕うん機 ピアンタの開発

Development of Pianta Gas Canister-fueled Compact Cultivator for Kitchen Garden

小嶋洋明* Hiroaki KOJIMA
伊藤智樹* Tomoki ITO
佐藤貴之* Takayuki SATO
藤沼正訓* Masanori FUJINUMA

要　旨

カセットボンベを使用した家庭菜園用小型耕うん機ピアンタを開発した．

カセットボンベ内のブタンは，大気圧下の約０℃にて気相，液相の相変化が起こるため，理論上気温０℃付近でボンベからの燃料取り出しと燃料供給制御が困難になる．本ガス供給システムでは，ブタンの液相取り出し方式の採用と，さらにベーパライザをシリンダヘッド排気口とマフラではさみ込むように配置したことで，ユーザが耕うん機の使用を始める３月から４月の種まき時期における外気温５℃での始動と耕うん作業を可能にした．

また，ピアンタと同排気量(49.4 cm^3)であるガソリン仕様の小型耕うん機 FG201 と比較して CO_2 排出量を約 10%削減し，エミッション性能も EPA Phase II 規制値および日本陸用内燃機関協会自主規制値に適合した．

畑での取りまわしやすさを向上させるため，耕うん爪幅を FG201 に対し 22%減としたが，耕うん力は新型耕うん爪の採用と抵抗棒の改良により FG201 に対し平均約 15%向上した．騒音も，住宅地近くでの使用を考慮して耕うん作業時のオペレータ耳元騒音で 1.5 dB(A)低減した．

ABSTRACT

A compact cultivator called the Pianta that uses a gas canister was developed for use in kitchen gardens.

The butane in the gas canister undergoes phase transition between vapor phase and liquid phase at approximately 0°C under atmospheric pressure, so that fuel supply control and removal of fuel from the gas canister become theoretically difficult at an air temperature of around 0°C. The gas supply system uses the method of removing butane in the liquid phase. It also has a vaporizer placed between the cylinder head outlet and the muffler so that users can start and operate the cultivator during the planting season from March to April, when they start working with the cultivator in outside air temperatures of 5°C.

Compared to the FG201, a gasoline-fueled compact cultivator with the same engine displacement (49.4 cm^3), the Pianta showed an approximately 10% reduction in CO_2 emissions. The Pianta's emission performance also met EPA Phase II regulation levels and Japan Land Engine Manufacturers Association self-regulating levels.

The overall width between the outer tines was reduced by 22% relative to the FG201 in order to make the Pianta easier to maneuver in the garden. However, the plow power was raised approximately 15% relative to the FG201 by the adoption of the new model tines and enhancement of the drag bar. The issue of noise when using the cultivator close to residential areas was also addressed by reducing the noise level at the operator's position by 1.5 dB(A) during operation.

１．はじめに

近年，国内のガーデニング，家庭菜園人口は団塊の世代と呼ばれるアクティブシニア層と，それらを趣味として楽しむユーザ等に支えられ年々拡大傾向にある．

ただし，これらの人々は耕うん機を含めエンジン駆動の農機具を使った経験がほとんどなく，耕うん機を購入したいという希望はあるものの，もう一歩購入まで踏みきれていないのが実情であった．また，これらの人々が耕うん機に求めるニーズの上位は，以下のような観点であることがわかった．

(１)作業機としての性能の高さ

＊汎用R&Dセンター

https://doi.org/10.69239/hondatechnicalreview.2009_21_2_4

（2）燃料の取り扱いやすさ（入手，給油，保管）
（3）耕うん機本体の保管，運搬のしやすさ
（4）住宅地近くで作業するため周囲環境への配慮
これらの要望にこたえることで，これまで耕うん機を持っていなかった，使っていなかったユーザに耕うん機を提供することが我々の強い思いとなった．

このような背景をふまえ，入手が容易で取り扱いやすいカセットボンベを使用することを中核に，「三つのカンタン」，「作業機からガーデニングツールへ」をキーワードに本商品の開発をおこなった．

また，ガスエンジンを搭載することにより，ガソリンエンジンに対し CO_2 排出量を削減することが可能であり，環境に対してより優しい商品とすることもできる．

しかしながら，ブタンの使用はもとより，カセットボンベを取り扱う商品の開発はHondaとして初めての試みであり，新たなガス供給システムの構築が必要であった．

家庭菜園用小型耕うん機，ピアンタをここに紹介する．

2．開発の方針と課題

2.1. ピアンタのコンセプト

2.1.1. 名称と商品の方向性

ピアンタのデザインスケッチを Fig. 1 に示す．

ピアンタとはイタリア語で「植物」「草木」の意味を持ち，ピアンタを通じて日本国内の家庭菜園とガーデニング市場に新たな種をまき，花を咲かせたいという思いを込めたネーミングである．Honda初のガス耕うん機であり，今後大きく育っていく姿をイメージできる愛称としている．

ピアンタでは，ベースであるガソリンエンジン搭載の小型耕うん機 FG201[(1)]が持っていた長所である
（1）信頼性の高いエンジン
（2）コンパクトなトランスミッション
（3）耕うん作業に適した質量配分
（4）メンテナンスインターバルが長く，清浄効率に優れた大型エアクリーナ
などを踏襲しつつ，ターゲットユーザを絞ったうえで前述の「三つのカンタン」と「作業機からガーデニングツールへ」をキーワードに開発を進めた．「三つのカンタン」とは「カンタン燃料」「カンタン移動＆収納」「カンタン操作」を示している．

2.1.2.「三つのカンタン」

(1) カンタン燃料　　ガソリンエンジンを搭載した従来の耕うん機では，燃料の入手，保管，持ち運びに際して，通常専用の携行缶が必要であった．燃料補給の時には，ノズル等を用いて携行缶からガソリンタンクに移し替える方法をとっていた．この作業は，一般的には手間がかかると思わせる作業であり，このことが耕うん機に触れたことのないお客様にとって今ひとつ購入に踏み切れない要因の一つになっていた．

ピアンタは，燃料に市販のカセットボンベを採用することで，ユーザの利便性の向上をはかることを目標とした．つまり，ガソリンはガソリンスタンドに行って購入しなければならないが，カセットボンベであればコンビニエンスストア等でも購入することが可能になり，カセットボンベを交換することで手を汚すことなく給油できるようになるわけである（Fig. 2）．

(2) カンタン移動＆収納　　ピアンタに限らず質量が20 kg近くある耕うん機を，手で抱えて移動させることは短い距離でも大変な作業である．

そのため，これまではエンジンの動力を利用して耕うん爪を車輪代わりに自走するか，抵抗棒をオプション設定の移動車輪に取り替えて手押しする方法が取られていた．ただし，前者は燃料を消費することになり，後者は別途車輪を



Fig. 1　Design sketch

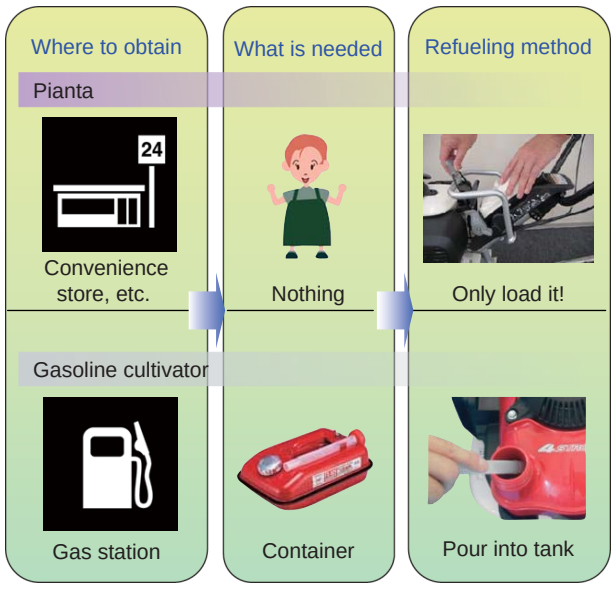


Fig. 2　Comparison between gas canister and gasoline

購入しなければならなかった．そこでピアンタでは，本体を立てるためのスタンドと移動車輪を標準装備とすることで，この課題の解決をはかることにした．

ところで，小型耕うん機を使用する環境の変化として，自宅周辺に加え市民農園など郊外での使用が増加していることがあげられる．市民農園までの移動手段としては約50%の人々が車であるという調査結果もあり，耕うん機を車載する頻度が高くなっていることがわかった．車に積み込む場合，外観シルエットはできるだけ小さい方が好ましい．そこで，ハンドルを折りたたんだ際の全高は，FG201 以下となるように目標値を設定した．

さらに，車に積んだ時や自宅での保管時に共通する課題としては，耕うん爪に付いていた土，泥が落ちて車内や保管場所を汚してしまうことであった．そこで，土が落ちることを防ぐための保管用専用ケースを設定することにした．

(3) カンタン操作　　ガスエンジン化により従来あったチョーク操作が必要なくなった．さらに，ハンドルの折りたたみ操作と，耕うん深さを調整する抵抗棒の高さ変更のロック解除が工具無しでおこなえる構造を目標とした．さらに，スロットルレバーの操作のみで耕うん作業をおこなえるシステムを採用することにより，カンタン操作の達成を目指した．

2.2. ターゲットユーザ

ガーデニング，家庭菜園人口は,「新しい趣味」として楽しむ団塊の世代の増加や，人々の「食の安全」に対する関心の高まりなどから年齢性別によらず年々増加傾向にある．そこで，このようなこれから農作業を始めようとする「耕うん機非保持者」の中で，小型耕うん機に適当な 9.9 - 105.8 m^2 (3 - 32 坪)の畑で作業しようとしているお客様，約 68 万人(日本国内)をメインターゲットとして設定した．

2.3. ピアンタのデザイン

デザインの基本コンセプトは「作業機からガーデニングツールへ」である．

(1)「親しみやすいシンプルビーンズフォルム」

小豆をモチーフとして，できるだけ丸みを帯びたデザインを目指した(Fig. 3)．また，ピアンタのエンジンの外観シルエットはベースとなったFG201よりも大きいが，全体の印象としてコンパクトに見せる効果もねらった．

(2)「高級感のあるエンブレム」

ポッティングという製造方法により通常のマークよりも厚みと透明感を向上させ，ロゴの書体や色彩からもワンランク上の高級感を感じ取れるよう目指した(Fig. 4)．

(3)「お洒落で可愛いホワイトボデーカラー」

清潔感，軽快感を訴求する白を基調とし，一般的にもたれている作業機の重い，汚いというイメージからの脱却を目指した．

2.4. ブタンガスエンジンの課題

従来からエンジンの燃料として一般的に使用されてきたガソリンおよびプロパンとカセットボンベに充てんされているブタンの蒸気圧線図[2), (3)]を Fig. 5 に示す．この図からブタンは，大気圧下の0℃付近で液相と気相に相変化することがわかる．このため，必要量の燃料をエンジンに供給するための制御が0℃を境に困難になるという懸案を持っている．つまり，低温側の燃料制御限界温度が，耕うん機側で想定する使用環境温度を満足させられるかが課題の一つとなる．ちなみに，理論的には運転可能温度の下限は上記のとおり気温0℃であるが，実際の作業では，10 ℃前後でも



Fig. 3　Bean-form design



Fig. 4　New emblem

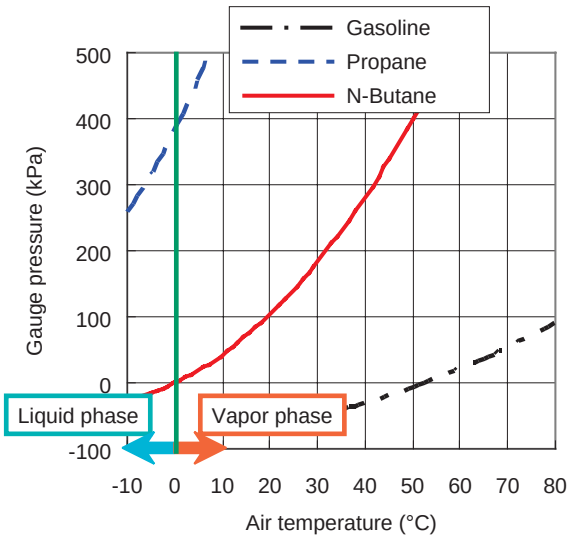


Fig. 5　Vapor pressure curve

始動が不安定になる傾向をもっている．

ところで，カセットコンロではボンベからブタンを気相状態で取り出している．この場合，ボンベ内部でブタンが気化するため，気化熱が奪われボンベの温度が０℃以下に下がり，ボンベ内部圧力が大気圧以下になってしまう．このままでは燃料吐出が不能になり燃焼に支障をきたすため，「ヒートパネル」と呼ばれるプレートを設置し，バーナの熱をボンベに伝えることによりこれを防止している．しかしながら，常に一定の燃焼がおこなわれるカセットコンロと異なり，作業負荷により発生する熱量が変化してしまうエンジンにおいては，温度コントロールが容易でないという懸案があり採用は難しい．

そこでピアンタは，常に燃料をボンベから液相で取り出し，その後に気化させる方法を採用した．この方法では，ボンベ内での気化量が少ないため，ボンベの温度低下がほとんど起こらず燃料供給が不安定になりにくい．具体的なシステムとしては，液相で取り出したブタンに熱を加えて気相化するための機構としてベーパライザが必要となる．

また，もう一つの課題は，カセットボンベ内のブタンに微量ながら混入している不純物が，ブタンの気化後に析出しブタン経路内に堆積してしまうことである．カセットコンロのようにボンベから気相で取り出す方式では，不純物はボンベ内に残るためにこのような事象は発生しないが，ボンベから液相で取り出す方式をとる場合，経路内の狭部を閉塞させることや，弁のシート部に堆積するなどして燃料供給量の制御に悪影響を与えてしまうことがある．よって，気化したブタンガスとこの不純物を分離して溜める構造が必要となる．

2.5. ピアンタの低温側使用環境温度

家庭菜園などにおける耕うん機の一般的な使われ方を調査した結果，耕うん作業をおこない始める時期は種まきをおこなう３月から４月に集中していることがわかった．その時期の各地の平均気温[4]である Fig. 6 と照らし合わせてみると，種まき作業がおこなわれる時期の外気温は５℃以上であることがわかり，このことからピアンタでは外気温５℃で始動し作業できることを目標として設定した．

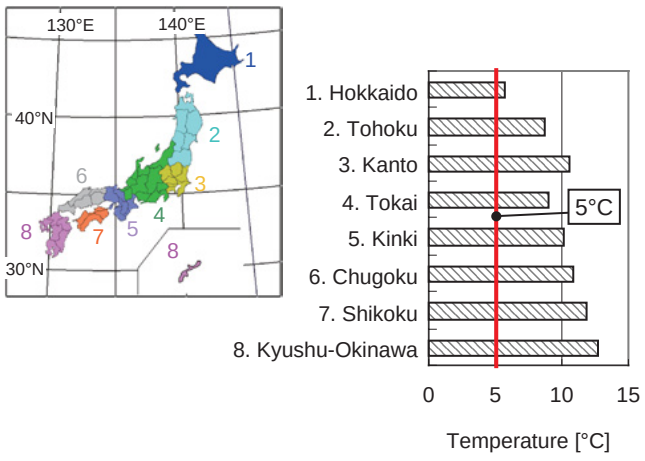


Fig. 6　Average temperature of various places from March to April

Table 1　Major specifications

Items	Developed engine
Engine type	4-stroke, single-cylinder
Displacement	49.4 cm^3
Bore × Stroke	41.8 × 36.0 mm
Compression ratio	8
Maximum power	1.2/5000 (kW/rpm)
	(1.6/5000) (PS/rpm)
Mixer	Side draft
Fuel	Butane

３．ガス燃料供給システムの概要と特徴

3.1. ガス供給システム

ベースとしたエンジンは同排気(49.4 cm^3)のガソリン仕様 GXV50 である．ガス化したエンジンの諸元と出力特性を Table 1，Fig. 7 に示す．

カセットボンベを燃料として使用するにあたり，ガス供給系部品を新たに開発した．主な構成部品を，ガスの流れの上流側から順にあげると，

（1）ボンベアダプタ
（2）ベーパライザ
（3）レギュレータ
（4）ミキサ

エンジンにおける各部品の配置を Fig. 8 および Fig. 9 に示す．このうちボンベアダプタのみがフレーム側に取り付けられており，その他部品についてはエンジン本体に取り

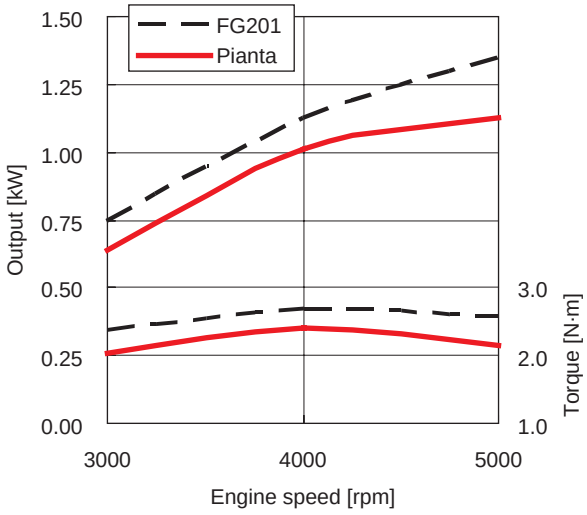


Fig. 7　Engine performance

付けされている．この図からもわかるとおり，ビーンズフォルム達成のために，コンパクトに設計した各部品をファンカバー内に効率的に配置している．

また，このガス供給システムは，以下の二つの機能を特徴としてもっている．

（1）燃料の圧力により作動する燃料閉止機構
・・・圧力検知弁

（2）クランクケース内負圧を利用した燃料コック
・・・シャットオフ

次項にてそれぞれの部品機能詳細について説明する．

3.2. 各部品の機能

3.2.1. ボンベアダプタ

ボンベアダプタの外観を Fig. 10 に示す．ボンベアダプタの主な機能としては，

(1) カセットボンベの接続　　カセットボンベを接続することにより，ボンベ内のブタンを液相状態で取り出している．ボンベとの接続方法は，カセットボンベ装てん機構において後述する．ボンベが接続され燃料を取り出す部分の構造については，カセットコンロで使用されている構造を踏襲している．

(2) 手動コック　　ノブを左右にひねることにより燃料の供給，遮断がおこなわれる．

(3) 圧力検知弁　　ボンベおよび配管の圧力が0.6 MPa以上に上昇すると，燃料通路を遮断して燃料の供給をストップし，エンジンを停止させる．メカニズムの作動イメージを Fig. 11 に示す．

配管内の圧力が設定圧を超えると，皿ばねが反転し閉止弁が通路を遮断する仕組みである．リセットボタンを押すことにより解除されるが，配管内の圧力が高いままであると再び作動するため，配管の圧力が上がった原因を取り除かなければ再度エンジンを始動することはできない．この弁機構もカセットコンロのシステムを取り入れたものである．

3.2.2. ベーパライザ

ベーパライザの機能は，ボンベから取り出された液相ブ

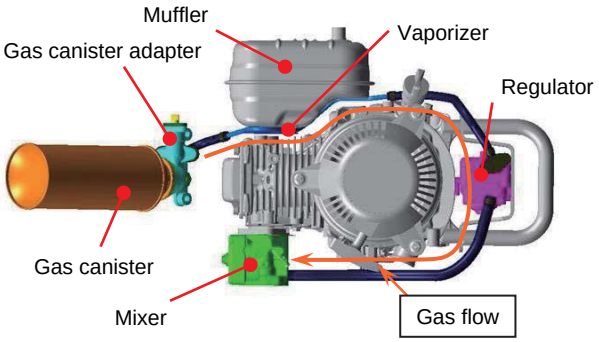


Fig. 8　Arrangement of parts

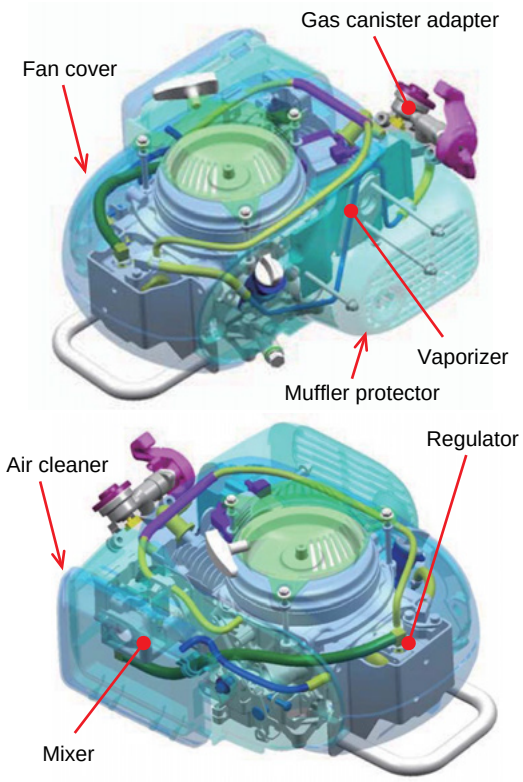


Fig. 9　Perspective view of engine

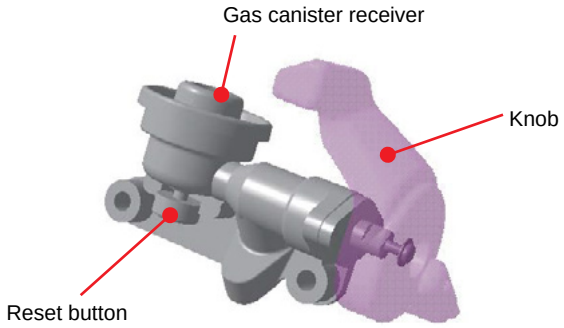


Fig. 10　Appearance of gas canister adapter

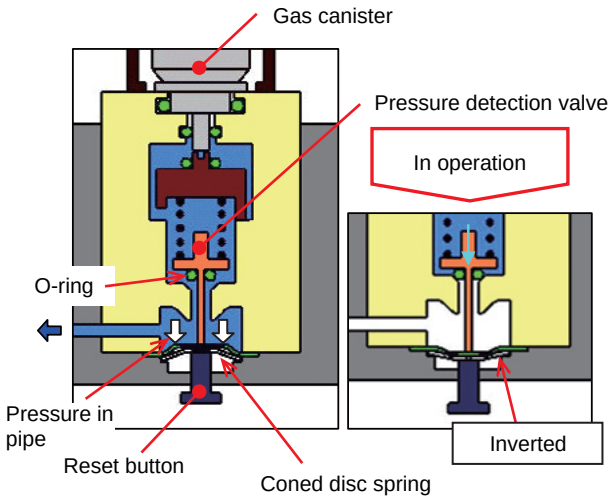


Fig. 11　Image of pressure detection valve in operation

タンをエンジンの排気熱を利用して気化させることである．外観を Fig. 12 に示す．排気熱が効率よく伝達されるようにシリンダヘッドの排気口とマフラではさみ込むように配置した(Fig. 8)．これによりプレス打ち抜きによる鉄製プレートにパイプ材をロウ付けしたシンプルな構造ながら，配管の温度上昇が早く，ブタンの気化促進がはかられたため外気温５℃での始動と耕うん作業が可能になった．

3.2.3. レギュレータ

レギュレータの外観を Fig. 13 に示す．ベーパライザで気化したブタンガスの圧力は，外気温におけるカセットボンベ内の圧力(ブタンの蒸気圧)とほぼ同一になる．排気温度にリンクして高圧にならないのは，ベーパライザがボンベアダプタを通じてカセットボンベとつながっており，カセットボンベ内の気相部がダンピングの役割を果たしているためである．ただし，外気温によって圧力が常時変動するのでは，適正な混合比で燃料をエンジンに供給するうえで不都合なため，レギュレータにて 9 - 11 kPa に調圧してミキサへ送っている．

また，カセットボンベ内にはブタンのほかに不純物が存在し，ガスが蒸発した後にこれが残留する．これをレギュレータ内で分離して下部の別室に溜めるように室内に Fig. 14 に示すラビリンス構造を配置した．Fig. 15 は耕うん作業を50時間おこなった後にカップ内に溜まっていた不純物の様子である．レギュレータ以降には不純物の流出はなく，ラビリンスの効果が確認された．

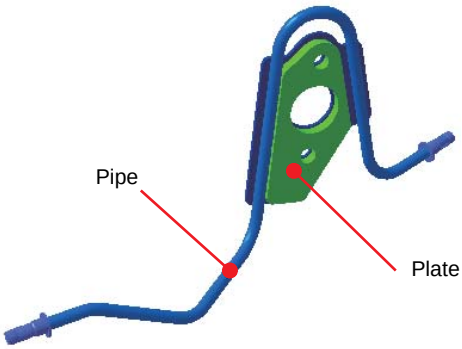


Fig. 12　Appearance of vaporizer

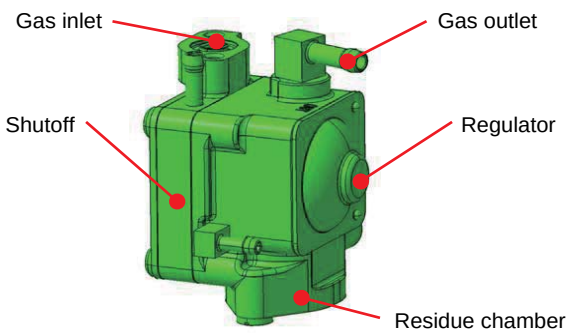


Fig. 13　Appearance of regulator

さらに，このレギュレータにはシャットオフと呼ばれる燃料コックが内蔵されている．これは，チューブにてクランクケースとつなぐことによりケース内の負圧を取り入れ，ダイアフラムの作用によりエンジンの運転中は弁を開き，エンジン停止時には弁を閉じて燃料の供給を遮断するいわゆる負圧コックである．

3.2.4. ミキサ

ミキサの外観を Fig. 16 に示す．レギュレータで調圧されたブタンガスはミキサからエンジンに供給される．ミキサにはゼロガバナが内蔵されており，このゼロガバナが吸気負圧の大きさに応じて供給するガス量を調整している．この機構によって，可燃混合気がエンジンに供給されるようになっている．

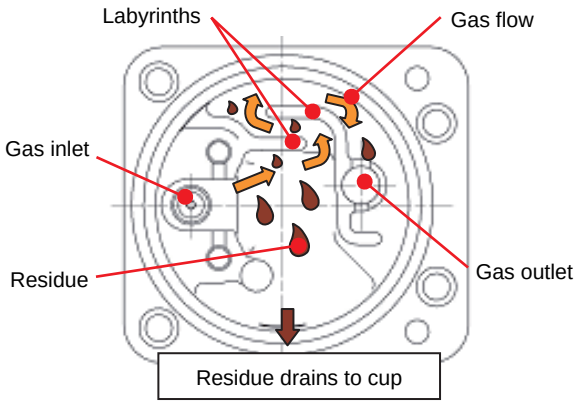


Fig. 14　Labyrinth structure in regulator chamber



Fig. 15　Residue that drained into cup (use for 50 hours)

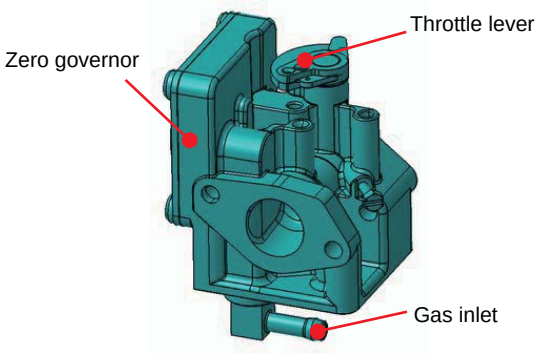


Fig. 16　Appearance of mixer

Table 2 CO_2 emission

FG201	Pianta
1.5 kg/(kW·h)	1.3 kg/(kW·h)

Table 3 Emission regulation

EPA Phase II · LEMA	Pianta
CO : 610 g/(kW·h)	286 g/(kW·h)
HC + NOx : 50 g/(kW·h)	24 g/(kW·h)

3.3. 環境性能

ピアンタの CO_2 排出量とエミッション性能を Table 2 および Table 3 に示す．ガスエンジン化により CO_2 排出量をガソリンエンジン搭載の FG201 比で約 10%削減した．また，エミッション性能についても，EPA Phase II規制値および日本陸用内燃機関協会(LEMA)自主規制値に適合している．

4．カセットボンベ装てんシステムの概要

4.1. カセットボンベの内部構造と液相供給

カセットコンロ用として市販されているカセットボンベは，その形状寸法，充てんガス成分などが JIS により規定[5]されておりピアンタもこれを使用する．ボンベの内部には，Fig. 17に示すL字状のノズルが内蔵されており，ボンベのフランジ部にある切欠きと同方向に配置されている．

ブタンを液相で取り出すには，Fig. 17 のようにノズル(切り欠き)を下向きにセットすれば液相で取り出すことが可能になる．

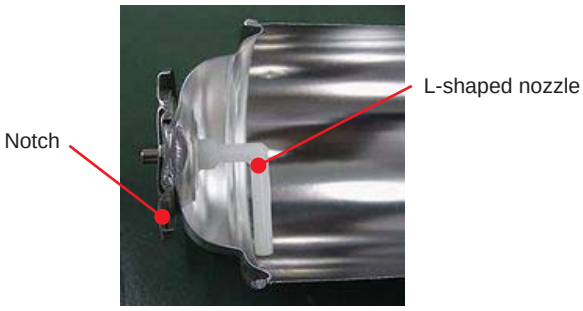


Fig. 17 Internal structure of gas canister

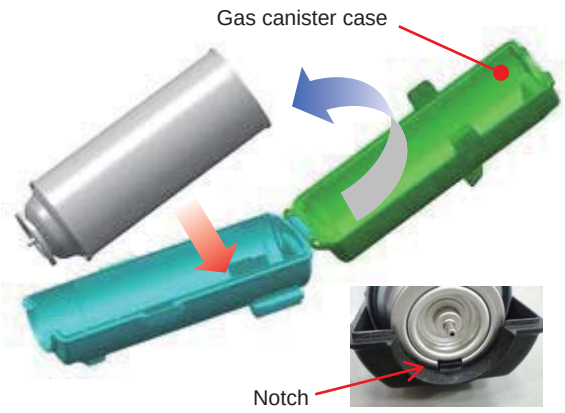


Fig. 18 Method of connecting gas canister

4.2. 装てんシステムの概要，取り付け方法

耕うん機は，場合によっては屋外に放置されることがあるため，カセットコンロに見られるボンベの装てん方法に対し，より屋外環境に適合したボンベ装てんシステムが必要であった．

そこで，ピアンタではボンベを入れるボンベケースを設定した(Fig. 18)．これにより，直射日光や雨などからボンベを保護することに加え，ユーザが正しい方向に切り欠きを合わせやすくなった．また，ボンベケースがセットされない時にボンベアダプタの口元を覆うシャッタ機構を持ち，保管時においても口元の防塵ができる構造を採用した．

ボンベケースにボンベをセットし，レシーバにスライド挿入してファスナを閉じればボンベのセットは完了である．

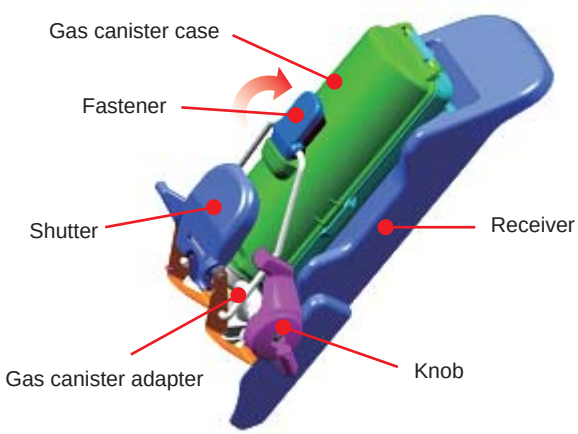


Fig. 19 Gas canister connected

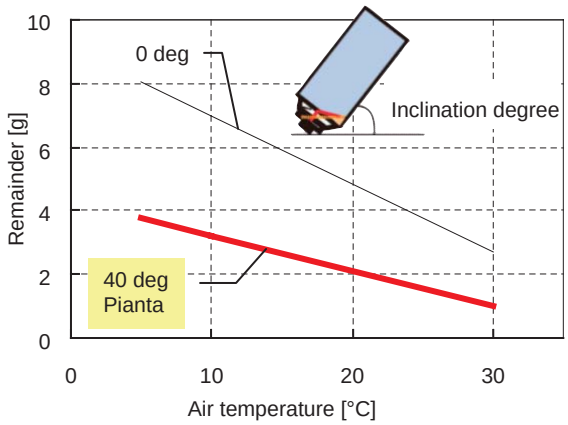


Fig. 20 Amount of gas remaining at various air temperatures

カセットボンベが装てんされた状態を Fig. 19 に示す．

さらに，この装てんシステムではボンベを水平より40°傾けてセットすることにより，外気温5 ℃(使用可能温度下限値)にてもガスの残量が 3.7 g(液相)まで使い切ることが可能になった．ボンベの傾きが0°と40°の際の外気温と，燃料切れによるエンジン停止時点でのボンベ内ガス残量の関係を Fig. 20 に示す．

5．耕うん機側の要素技術

5.1. 機体の小型化と各部操作の簡略化

ピアンタの外観と主要諸元をそれぞれ Fig. 21 と Table 4 に示す．ピアンタの開発コンセプトにしたがってシンプルビーンズフォルムとホワイトカラーを採用することにより，ガーデニングツールとしてのイメージを表現した．

ピアンタは，ガソリン仕様の小型耕うん機FG201に対し耕うん爪高さを約４%低くし，爪幅を約22%狭くした．これは，耕うん時に取りまわしやすいように機体の小型化をはかるためである．この変更に加え，ハンドルコラム部のレイアウトの見直しにより，ハンドルを折りたたんだ際の全高を 635 mm から 530 mm へと約 17%低減した(スタンド不使用時は 20%減)(Fig. 22)．



Fig. 21　Appearance of Pianta

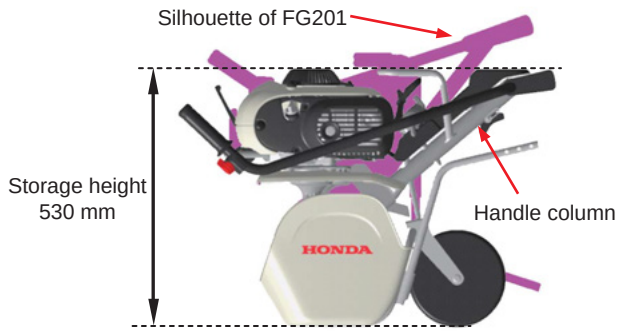


Fig. 22　Appearance of storage configuration

Table 4　Comparison between Pianta and FG201

Items	Pianta FV200	FG201
Overall length (mm)	1055	1050
Overall width (mm)	485	475
Overall height (mm)	990	995
Storage height (mm)	530	635
Dry mass (kg)	20	16.5
Tine speed (rpm)	135	135
Tilling width (mm)	350	450
Tine diameter (mm)	ϕ250	ϕ260
Starting system	Recoil starter	Recoil starter
Main clutch type	Centrifugal clutch	Centrifugal clutch
Transmission speeds	1Forward	1Forward

また，ハンドルを折りたたむ際のロック解除は，大型ノブ付きボルトを手でゆるめることでおこなう構造とし，さらに抵抗棒の高さ変更もノブを引くことでロックを解除できる機構とした(Fig. 23)．これにより両者とも工具無しでの変更作業が可能になっている．

さらに，エンジンを始動した後に耕うん作業をおこなうための操作としては，スロットルレバーを握るだけのシステムとした．具体的には，レバーを握ることでエンジン回転が上昇し，約 2700 rpm から遠心クラッチがつながり耕うん爪が回転して作業をおこなうようになっている．

以上のような機構の採用により，操作系の簡素化「カンタン操作」を達成している．

5.2. キャリースタンドとスタンド一体移動輪

ピアンタでは，専用のキャリースタンドを設定した(Fig. 24)．これにより，耕うん爪幅が FG201 に対して狭いにもかかわらず本体をより安定して置くことが可能になった．加えて，このスタンドは機体を浮かした状態にできるため，耕うん爪のメンテナンス，洗車などの作業もより容易におこなえるようになった．

また，耕うん機本体を手で持ち上げて移動する頻度を減

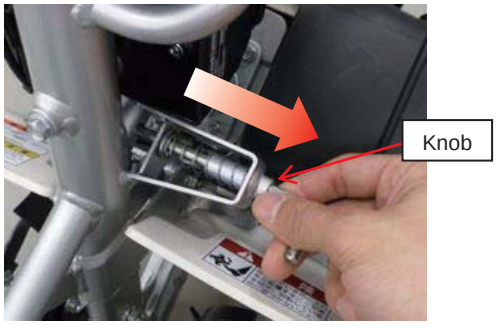


Fig. 23　Height adjustment mechanism

らせるように，スタンドには移動用タイヤを一体で装備している．さらに，スタンド左側に抵抗棒の格納ホルダを取り付けたことにより，スタンド，移動輪，抵抗棒を本体に一体化できるため，収納するうえでさらに便利なものになった．

5.3. キャリーボックスの製作

ピアンタはFig. 25に示すキャリーボックスを設定した．このボックスは，機体を持上げることなくスタンド装着状態でも前方から着脱可能な形状になっているため，取り付けやすいのが特徴である(Fig. 26)．これにより，車への搭載時や自宅での保管時に，耕うん爪などに付いた土が落ちて周囲を汚してしまうことを防ぐことが可能になった．

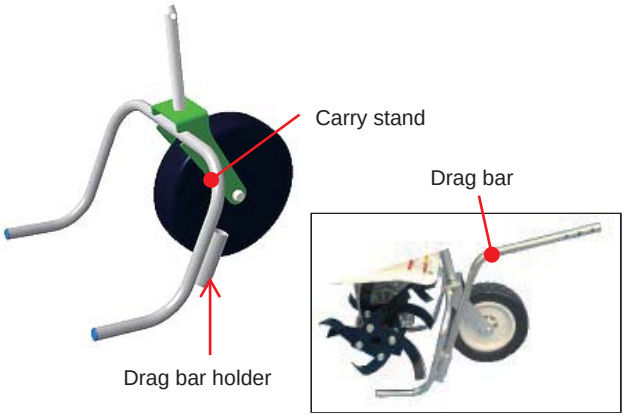


Fig. 24 Appearance of carry stand

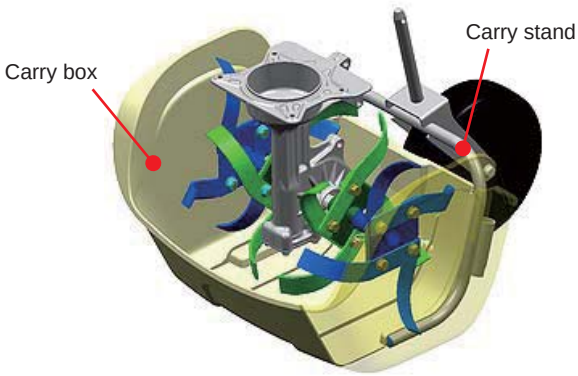


Fig. 25 Cutaway view of carry box



Fig. 26 Method of fitting on carry box

また，耕うん爪とキャリーボックス内面を接触させる構造のためボックスがガタつくことがなく，バックルなどの固定装置無しでも本体から外れない構造になっている．さらに，このキャリーボックスは，Fig. 27に示すように持ち上げて運ぶ際に耕うん爪が足に当たらないような保護カバーの役割も果たしている．

5.4. 新型耕うん爪の採用と抵抗棒の改良

耕うん爪の高さを低く，幅を狭くしたことは前述のとおりだが，一般的にこのような変更をおこなうと耕うん力(土を砕きながら前へ進もうとする力)も同時に低下してしまう．そこで，ピアンタではFG201に対し爪先端部の切削角を大きくし，爪の投影面積を約6%アップさせることで，土の掻き出し量を増加させFG201以上の耕うん力を確保した(Fig. 28)．また，抵抗棒の形状についても，曲げ角を3.4°アップすることにより土壌に対する抵抗を減らし，爪形状の変更と合わせて耕うん力を向上させている(Fig. 29)．

耕うん深さ別に作業速度を測定した結果をFig. 30に示す．耕うん深さによらず，作業スピードはFG201に対し平均して約15%向上した．



Fig. 27 Pianta configuration for carrying by hand

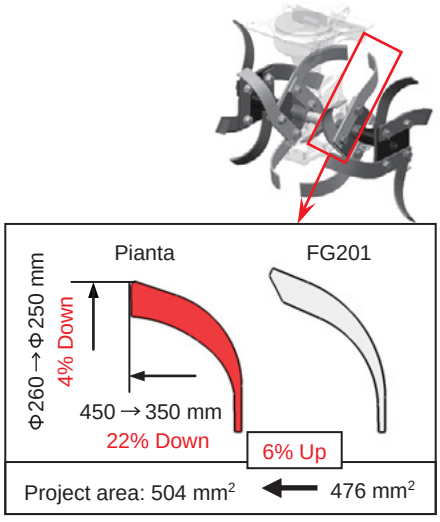


Fig. 28 Comparison of tine project area

5.5. 騒音

ピアンタの使用が想定される 9.9 - 105.8 m²(3 - 32 坪)程度の家庭菜園は，住宅地に隣接していることが多く，周辺に対する騒音の配慮も必要である．ピアンタでは，FG201 に対しマフラ容量を 370 cm³ から 790 cm³ と約２倍に変更し，エンジン全体をフルカバーすることで Fig. 31 に示すとおり耕うん時のオペレータ耳元騒音を 1.5 dB(A)低減した．

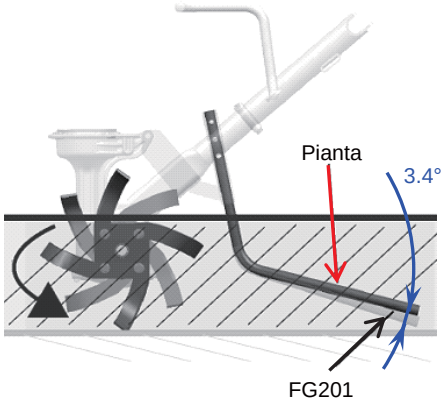


Fig. 29　Drag bar angle comparison

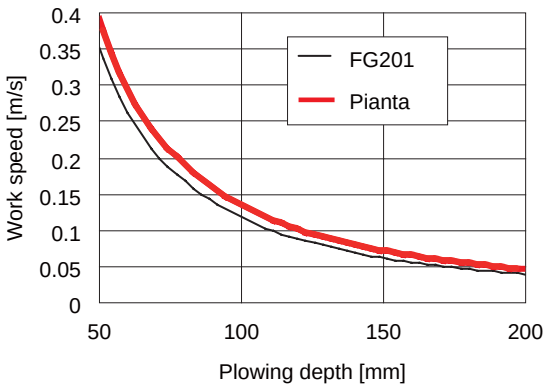


Fig. 30　Work speed

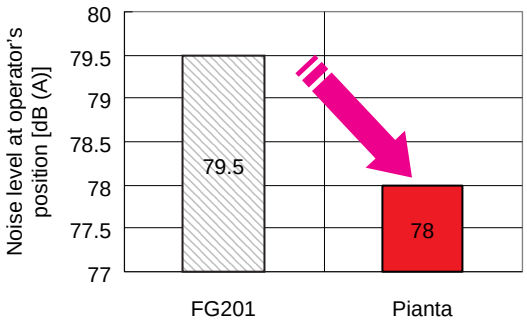


Fig. 31　Comparison of noise

６．まとめ

カセットボンベからブタンを液相で取り出すことを前提としたガス供給システムを搭載した小型耕うん機ピアンタを開発した．

（１）カンタン燃料の実現

カセットボンベを使用することにより，燃料の入手，保管，持ち運びにかかる手間を軽減した．

また，ブタン気化後に残留する不純物を分離，除去するためレギュレータ室内にラビリンス構造を配置した．

（２）カンタン移動＆収納の実現

保管時の安定配置と持ち上げて運ぶ労力の軽減のために移動輪一体キャリースタンドを，保管場所への土，泥の落下防止のためにキャリーボックスを設定した．

（３）カンタン操作の実現

ガスエンジン化によりチョーク操作が不要となった．また，ハンドルの格納と耕うん深さの変更が工具不要でおこなえるうえ，エンジン始動後はスロットルレバーを握るだけで耕うん作業が可能な操作方法とした．また，屋外環境での使用に適した新しいボンベ装てん機構を構築した．

（４）「作業機からガーデニングツールへ」

シンプルビーンズフォルムとホワイトカラーの採用により，ガーデニングツールとしてのイメージを表現した．

（５）環境性能

ガソリン仕様の GXV50 に対し，CO_2 排出量を約 10%削減，CO および HC+NOx 排出量は EPA Phase II 規制値およびLEMAの自主規制値に適合した．また，作業時耳元騒音もマフラ変更などにより FG201 に対し－1.5 dB(A)低減した．

（６）低温始動可能温度と不純物の除去

ベーパライザをシリンダヘッド排気口とマフラではさみ込むように配置して，配管の温度上昇を早めたことにより外気温５℃での始動および耕うん作業が可能になった．

（７）耕うん力の向上

投影面積を約６%UP した新型耕うん爪の採用と抵抗棒の改良により，耕うん力はFG201に対し平均して約15%向上した．

７．おわりに

カセットボンベを燃料にするなど，より使いやすく親しみやすい耕うん機となるよう開発をおこなった．結果として，耕うん機を使った経験がないユーザに対してもより身近な商品になったものと信じている．ピアンタの登場によりさらなる市場開拓がはかられ，一人でも多くのユーザに「使う喜び」を感じていただくことを願ってやまない．

参考文献

（1）笹岡雅行，池田貴志，片桐信近，佐藤貴之：小型ティラー「FG201」の開発，Honda R&D Technical Review，Vol.14, No.2, p.9-16
（2）小西誠一：燃料工学概論，裳華房，p. 84(1991)
（3）上西玄一，横山千昭，高橋信次:石油学会誌，28巻(No. 1)，p.77(1985)
（4）http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php, 2009/02/20
（5）日本工業規格 JIS S2148：1998，カセットコンロ用燃料容器

■著　者■



小嶋洋明



伊藤智樹



佐藤貴之



藤沼正訓

自立運転機能付きマイクロコージェネの紹介

Introducition of Micro-combined Heat and Power Generation Unit with Backup Function

江口博之* Hiroyuki EGUCHI
末吉俊一郎* Shunichiro SUEYOSHI
山路健* Takeshi YAMAJI
榎本貴行* Takayuki ENOMOTO
津野康一* Koichi TSUNO

要　旨

非常時にバックアップ発電機として使用可能な家庭用小型コージェネレーションユニットの開発をおこなった．

自立発電を可能とするためバッテリ，DC-DCコンバータユニット，インバータユニットを新たに開発した．DC-DCコンバータユニットは自立発電の始動時にバッテリからの電力を変換し始動装置に供給する．また，バッテリのロングライフを実現するため充電制御もおこなう.また，インバータユニットは既に販売しているバックアップ発電なしの前モデルと同一サイズながら，系統連系発電機能と自立発電機能をあわせ持つ．非常用発電機としての自立発電時の出力は前モデルに対して1.5倍に向上させた．また，バッテリアシストを併用しハイブリッド発電をおこうことにより，電気負荷の接続時の電圧変動を低減し，使用可能となる電気負荷の大きさや種類を増加させた．

ABSTRACT

A micro-combined heat and power generation (micro-cogeneration) unit which can be used as a backup power generator in an emergency has been developed. A battery, DC-DC converter unit, and inverter unit were newly developed to enable autonomous operation of the generator. The DC-DC converter unit converts power from the battery when backup operation commences, and supplies power to the starter. It also applies charging control to extend battery life. In addition, the inverter unit is the same size as the model currently on the market, which does not have a backup power function, but it incorporates both grid-connected and backup generation functions. Output power as an emergency generator during backup operation has been increased 1.5 times against the previous model. The realization of hybrid power generation through the use of battery assist has reduced voltage sag when an electrical load is connected, and thus, the amount of usable electric load and types increased.

１．まえがき

2008年に日本でおこなわれたG8先進国首脳会議においては，2050年までに世界全体の温室効果ガス排出量の少なくとも50%の削減を達成するという方向性が示され，低炭素社会に向けた取り組みが本格化してきている．一方，民生(家庭)部門の消費エネルギーは増加の一途を辿っており伸び率は著しく，エネルギー消費全体の伸びにおいても大きな要因となっている．将来的には，モビリティーの電動化などにより電力需要は増加し，安定した電力供給が必要となる．

発電機で電気を作ると同時に発生した熱を回収利用するコージェネレーションシステムは，既に工場などの大規模設備では使われていてCO_2の排出削減への効果が期待されているが[1]，小型実用化にはコスト，寿命などの課題があった．Hondaは小型ガスエンジンとインバータ発電機の技術を基にこれらの課題を克服し，2003年2月世界初の家庭用小型ガスエンジンコージェネレーションユニット(以下，マイクロコージェネユニットとする)を発売し[2]，2007年には米国でも販売を開始した．米国では大雨による河川の氾濫，巨大ハリケーンや吹雪，などの自然災害による停電が多く[3]，電力確保のための非常用発電機市場が確立している．家庭用コージェネユニットは環境負荷の低い常用発電設備であり，停電時にこれを非常用発電設備として活用できれば，セキュリティの面からお客様にとって大きなメリットとなる．

本稿では，2009年1月に米国で発売した停電時自立発電可能なマイクロコージェネユニットを紹介する．

＊汎用R&Dセンター

https://doi.org/10.69239/hondatechnicalreview.2009_21_2_5

2．製品の主要諸元

家庭用小型ガスエンジンコージェネレーションシステムとは，Honda のマイクロコージェネユニットと，都市ガス会社，給湯器メーカが共同開発した回収熱利用給湯暖房ユニットを組み合わせた住宅用エネルギー供給システムである．日本とは異なる電力事情を持つ米国においては，非常用発電機能を有するマイクロコージェネユニットの要望があると考えられる．

設置イメージをFig. 1に示す．マイクロコージェネユニットで発電された電力は，分電盤を経由して家庭内の電気製品で消費される．電気と同時にエンジンユニットから回収された熱は，日本における回収熱利用給湯ユニットでは，貯湯タンクで温水として蓄えられた後，給湯をはじめ，床暖房や浴室暖房乾燥機等に利用される．米国においては，温風暖房機にて直接空気と熱交換され温風暖房に利用される．

ガスエンジン発電機，熱交換器，系統連系インバータ等が収められたマイクロコージェネユニットの外観を Fig. 2 に，主要諸元を Table 1 に示す．従来モデルと同じきょう体内に，新たにバッテリや DC-DC コンバータユニットを搭載した．

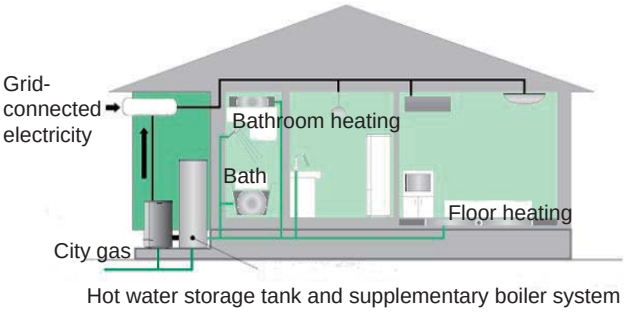


Fig. 1 Micro-cogeneration system



Fig. 2 External view of micro-cogeneration unit

Table 1 Specifications (US model)

		Normal	Boost	Backup
Output	Electricity	1Φ3W 240 V/120 V 60 Hz		1Φ2W 240 V 60 Hz
		1.2 kW	1.8 kW	1.8 kVA
	Heat	3.2 kW or more		
Power supply		Grid connection by inverter		Inverter
Heat recovery		80 °C Hot water		
Efficiency (LHV)	Electricity	23.0% or more		
	Heat	62.5% or more		
Dimensions (LxWxH)		380 × 580 × 880 mm		
Mass		82 kg		
Noise		47 dB(A)	55 dB(A)	
Engine	Type	Liquid-cooled 4-stroke OHC vertical single cylinder		
	Displacement	163 cm^3		
Starting system		Starter generator		

3．技術課題とシステム構成

本モデルでは，系統連系運転のみの従来モデルに加えてブースト系統連系モードと自立発電モード，２モードの出力設定を追加した．ブースト系統連系モードとは，発電所の能力を超えるような広域電力需要がある際に，電力会社からの要求により売電をおこなうモードである．このような要求がある状況においては，電力供給が不足している状態のため，発電出力はより大きいものが望まれる．また，自立発電モードとは前述にあるように停電時に非常用発電機として自立発電をおこなうモードである．自立発電モードにおいても発電出力には，より多くの電気負荷を使用可能とするため，より高出力が求められる．米国における弊社調査結果によるとHondaガソリンエンジン発電機EU2000iA(定格出力1.6 kVA)の購入者の23%が停電時のバックアップ電源を目的として購入をおこなっている．このため，本モデルでは自立発電モード時の出力値を 1.8 kVA とし，ブースト系統連系モードも同等の1.8 kWとした．系統連系モード時の定格出力については前モデルと同一の 1.2 kW であるため，発電出力を増加させるため入力源となるエンジンの回転数を高回転としてエンジン出力の増加をおこない，インバータユニットの出力能力の増加もおこなった．また，自立発電モードにおいては使用できる電気負荷を拡大するため，バッテリによる発電出力のアシストをおこなった．

Fig. 3 に前モデルのシステム構成を示す．マイクロコージェネユニットに搭載される系統連系インバータユニット(以下インバータとする)は，オルタネータ(以下 ALT とする)から出力される電力を整流部にて直流化し，ブーストコンバータ部にて定電圧の直流電圧に変換をおこない，

MOSFET部にて商用電源に連系可能な電力に変換し系統連系をおこなう．エンジン始動時には系統を電源とし整流部をスタータドライバ部として使用することにより，インバータはエンジン始動用のスタータドライバとしての機能をあわせ持つ．本構成によりインバータユニットはパワーラインを双方向に使用することができ[4]専用の始動装置，切替えリレー等の削減をおこなうことができた．エンジンコントロールユニット(以下 ECU ユニットとする)はエンジン制御およびマイクロコージェネユニットのマスターユニットとして運転状態の指令および管理，外部に接続される給湯ユニットまたは暖房機器との通信をおこなっている．前モデルの構成においても，始動用電子ユニットを削減することができたが，系統を電源としてエンジン始動をおこなうため，系統に停電が発生した時にはエンジンの始動をおこなうことができなかった．自立にてエンジンを始動し，発電をおこなうことと，自立発電に求められる性能を満足するための課題を以下に示す．

(1)自立始動用電源

停電時のエンジン始動用の電源を確保するためNi-MHバッテリを搭載する．バッテリにはメンテナンス回数削減のため長寿命が求められる．また，バッテリ状態の監視をおこない，停電時に確実なエンジン始動を可能とする必要がある．

(2)DC-DC コンバータユニット

低電圧のバッテリを系統電圧と同等の電圧とし，インバータに供給するため DC-DC コンバータユニット(以下DC-DCコンバータとする)が必要となる．DC-DCコンバータは大電流を扱うため，発熱と電磁波ノイズが問題となる．このため高効率かつ低ノイズのDC-DCコンバータの開発が必要となる．

(3)系統連系，単体発電可能なインバータユニット

同一のハードウェアにおいて，系統連系，ブースト系統連系，自立発電をおこなうことが課題となる．性能としては，系統連系を可能とする LC フィルタの設定において自立発電時の性能を満足し，出力は前モデルと同一サイズにおいて 1.5 倍とする．また自立発電時の使用電気負荷拡大のため，バッテリアシストによるハイブリッド発電を可能とすることが課題となる．

今回開発したシステムの構成を Fig. 4 に，具体的な手法については次項にて解説する．

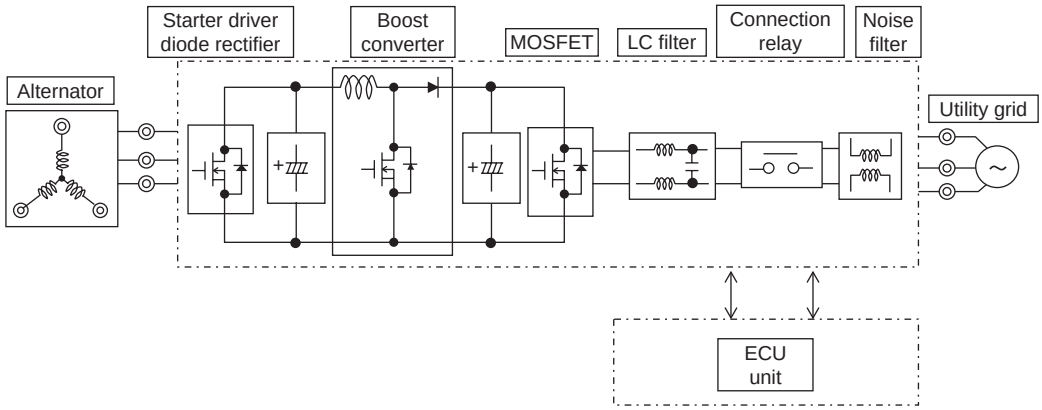


Fig. 3　Diagram of previous system

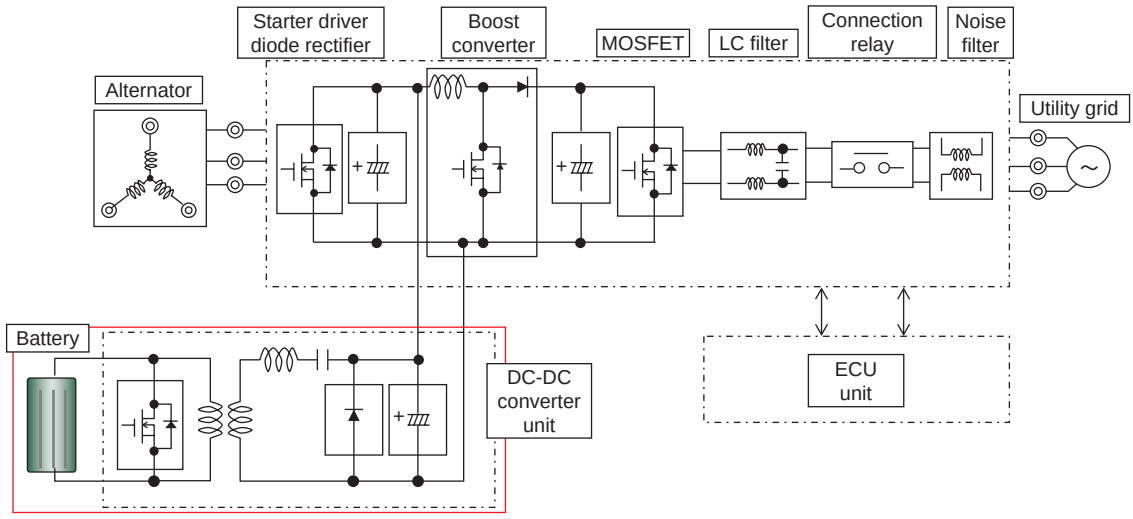


Fig. 4　Diagram of newly developed system

4．各部の機能

4.1. Ni-MH バッテリ

4.1.1. バッテリ仕様

停電時のエンジン始動用電源を確保するため，小型で高出力が可能な Ni-MH バッテリを採用した．外観を Fig. 5 に示す．定格電圧12 V，定格容量6.4 Ahであり，電流ヒューズ，温度ヒューズ，温度センサを内蔵した．Fig. 6にエンジン始動に必要な出力とNi-MHバッテリ出力の温度特性を示す．エンジン始動に必要な出力は，低温においてエンジンフリクションが増加するため高くなる．一方，バッテリ出力は低温で低下するため，特性上最も厳しい低温で要求出力を満足するようにバッテリ仕様を決定した．

4.1.2. バッテリの長寿命化技術

バッテリは，鉛バッテリに比べ２倍以上の寿命を持つNi-MH バッテリを採用した．Ni-MH バッテリは，温度が高いほど寿命が短くなる．そのことから，Fig. 7に示す外気を導入する開口部近傍にバッテリを搭載することにより，バッテリ温度上昇を10℃以下に抑えた．また充電によるバッテリ劣化を最小限にするため Fig. 8 のような間欠充電方式を採用した．DC-DCコンバータによりバッテリ電圧を常時監視し，エンジン始動が可能な SOC(State of charge)を維持するように充電制御をおこなう．エンジン始動のためにバッテリを使用したときには，DC-DCコンバータにてエンジン始動時のバッテリからの持ち出し容量を算出し充電する基本充電をおこない，その後セルの均一化と100%充電を担保するための微弱充電をおこなった．常時充電する従来方式に比べ，ワーストケースにおいてもエンジン始動が可能なSOCを維持しつつ，過充電によるバッテリ劣化を低減することが可能となった．



Fig. 5　Ni-MH battery

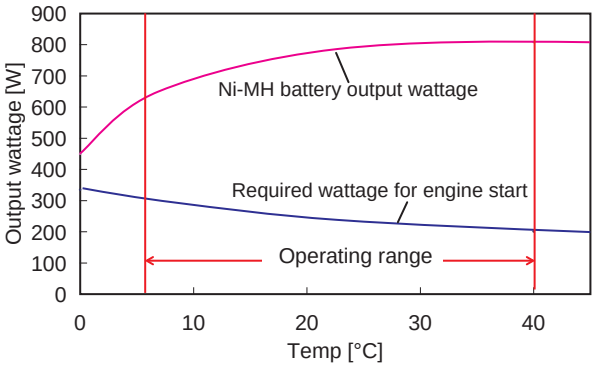


Fig. 6　Ni-MH battery output wattage

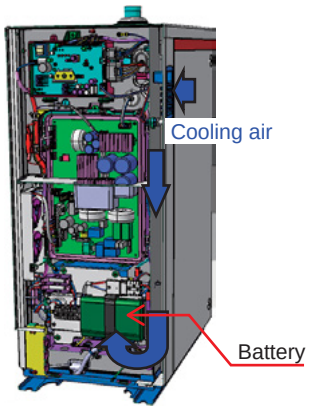


Fig. 7　Ni-MH battery layout

4.1.3. 内部抵抗によるバッテリ劣化判定

本モデルは，停電時に確実にエンジン始動をおこなうため，停電発生時以外にも，定期的にバッテリによりエンジン始動をおこないバッテリの状態を監視する[5]．放電前の電圧，電流と放電時の電圧，電流および電流補正係数，温度補正係数を用い，式(1)にてバッテリ内部抵抗 R を算出してバッテリの劣化状態を判定する．なお，内部抵抗は放電電流が規定値以上のとき，算出をおこなう．

$$R = k_i k_t (V_0 - V_1)/(I_1 - I_0)\Omega \qquad (1)$$

V_1，I_1：放電時の電圧，電流
V_0，I_0：放電前の電圧，電流
k_i，k_t：電流補正係数，温度補正係数

バッテリの劣化判定しきい値は，エンジン始動試験をおこない始動限界時の内部抵抗値とした．この定期的な内部抵抗算出によりバッテリの例外的な劣化が発生した場合においても，未然に検出することが可能となった．

Fig. 9 に本モデルにおいて想定寿命を超えたバッテリを用いた内部抵抗算出結果を示す．劣化判定しきい値に対して十分なマージンを有していることより，バッテリは，本モデルの使用条件に対して十分な寿命を有していることが確認できた．

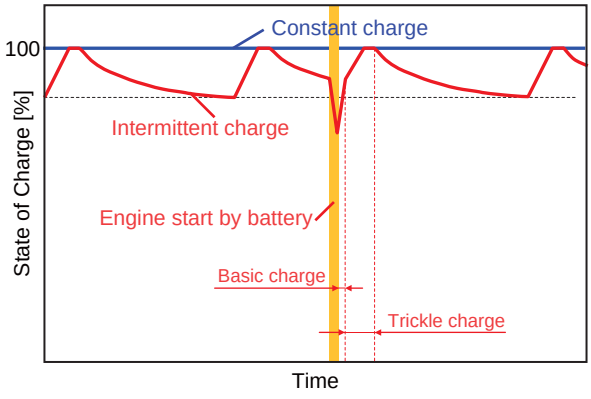


Fig. 8　Ni-MH battery intermittent charge

4.2. DC-DC コンバータ

マイクロコージェネユニットの停電時に自立運転機能を実現するために，DC-DCコンバータに求められる機能は以下のものとなる．

（1）系統電源の停電を検出する

（2）バッテリの充電制御をおこなう

（3）自立運転時のエンジン始動用の電源となる

Fig. 4 に示す DC-DC コンバータの詳細なシステム構成を Fig. 10 に示す．系統の通常電源供給状態（以下復電状態とする），停電状態を監視する系統電圧検出部，バッテリの充電制御をおこなう充電制御部，バッテリ電圧を昇圧してインバータに電源を供給する DC-DC コンバータ部にて構成する．

4.2.1. 系統電圧検出部

系統電圧検出部は系統電圧を絶縁型のトランスにより低電圧に変換後，CPUにて系統電圧の監視をおこない常時復電，停電の判定をおこなう．系統の停電状態を検出した際には，ECUユニットの指令により，エンジン始動用の電源をインバータユニットに供給するためバッテリ昇圧をおこなう．系統電圧の検出ラインに断線または短絡が発生した場合においても DC-DC コンバータの自己診断をおこなうため異常状態をユーザに通知することが可能となる．

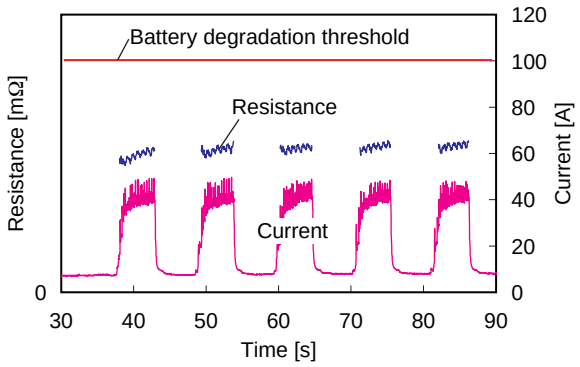


Fig. 9　Battery degradation threshold and resistance

4.2.2. 充電制御部

充電制御部はインバータより入力される系統を整流した直流電圧，またはエンジン運転時はALTの出力を整流した直流電圧を電源として降圧コンバータにて充電電流制御をおこなう．

4.2.3. DC-DC コンバータ部

復電状態において，インバータは系統電圧を電源としてエンジン始動をおこなう．しかしながら，停電時はバッテリを電源としてエンジンの始動をおこなう．インバータのハードウェアを共通化するためには，DC-DC コンバータはバッテリより入力される電圧を系統電圧近傍に昇圧する必要がある．本モデルでは系統電圧を整流した直流電圧 340 V（340 V ＝ 240 V × 1.414）に対してバッテリ電圧を約 20 倍に昇圧し 270 V とすることにより共通化を可能とした．また，エンジンアース，きょう体アースと接合するバッテリから，きょう体と絶縁されたインバータユニットに電力を供給するためDC-DCコンバータは絶縁型を使用する必要がある．バッテリより入力された電圧は Fig. 10 に示す MOSFET（Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor）で構成されたHブリッジ Sw1，Sw2 を交互にスイッチングすることにより，トランスに交流電圧の矩形波を印加する．その結果，トランスの二次側には，一次巻線と二次巻線の巻線比の電圧が交流矩形波として出力される．この交流電圧の矩形波をブリッジダイオードにて全波整流し，直流電圧とすることにより絶縁型の直流電圧変換をおこなうことができる．MOSFET は低圧大電流に対応するため，オン抵抗の小さい素子を選定した．但し，直流大電流領域でスイッチングをおこなう場合，スイッチング損失の増加による発熱，およびノイズの発生という課題がある．本モデルにおいては高効率，低ノイズを達成するため，Fig. 10 に示すように共振用コンデンサと共振用コイルを付加することにより電流共振形のゼロ電流スイッチング（以下 ZCS）を可能とした．共振コンデンサ

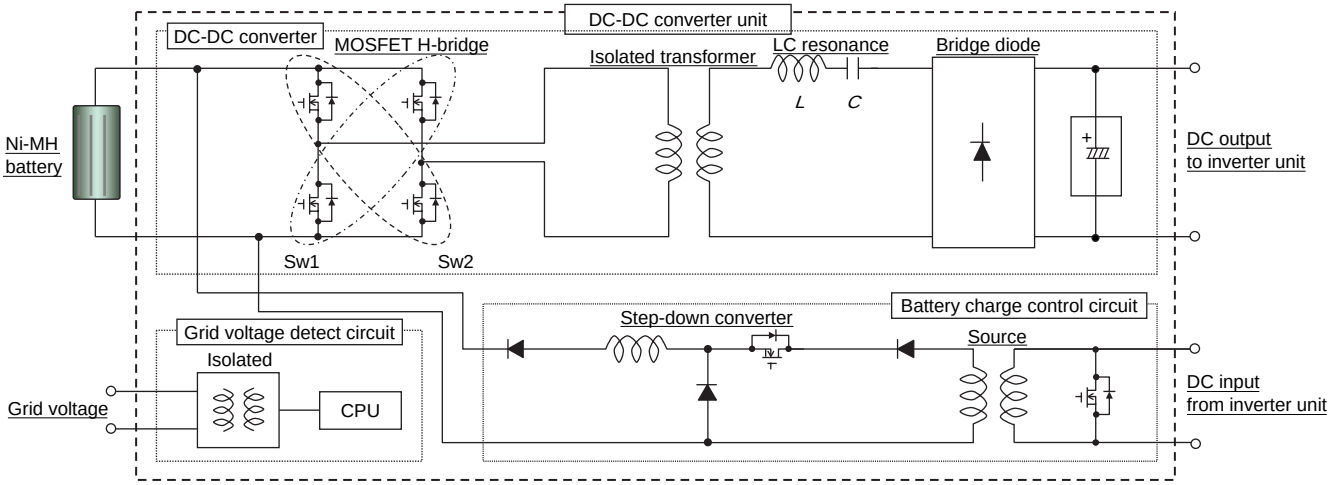


Fig. 10　DC-DC converter unit

の容量Cと共振コイルのインダクタLより共振周波数fは以下の式(2)で表される．

$$f = 1/2\pi\sqrt{L \cdot C} \qquad (2)$$

Hブリッジの Sw1，Sw2 のキャリア周波数を共振周波数fに同期させて動作させることにより電流共振による 0 A でのスイッチングが可能となる．この結果スイッチング損失を低減し高効率，低ノイズを達成することができた[6]．

また，一般家庭への設置の際には最も状態が長い待機状態の待機電力削減のため各入力回路は高インピーダンス入力とする．この結果，DC-DCコンバータの待機電力は 0.3 mW バッテリ自己放電に対して 1/100 以下の放電容量となり待機電力として無視できるレベルとすることが可能となった．

4.2.4. テスト結果

Table 2 に DC-DC コンバータの諸元を，Fig. 11 に外観を示す．また Fig. 12 に DC-DC コンバータ部のスイッチング電圧とトランス入力電流の測定波形を示す．測定した絶縁トランス一次側の電流波形(Input current 1)より電流 0 A にてスイッチングをおこなっており，ZCS 動作であることがわかる．また，スイッチング周波数は共振用コンデンサおよび共振用コイルの部品ばらつきにより共振周波数がばらつくため，スイッチング周波数の補正項をソフトウェアで設定可能とし，DC-DC コンバータの出荷時の検査において，ZCS 動作となるように補正項の設定をおこなう．Fig. 13 に入力電圧 14 V，12 V における負荷効率特性を示す．また，Table 3 にテスト結果を示す．ZCS 動作により定格(440 W)時の効率は91.6%とすることができた．またエンジン始動時に使用される最大電力時の入力電圧においても89.5%の効率を実現した．この結果，絶縁型の DC-DC コンバータとして高効率を実現し，外部からの冷却を必要とせず自然放熱のみで連続定格出力を可能とした．



Fig. 11 DC-DC converter unit

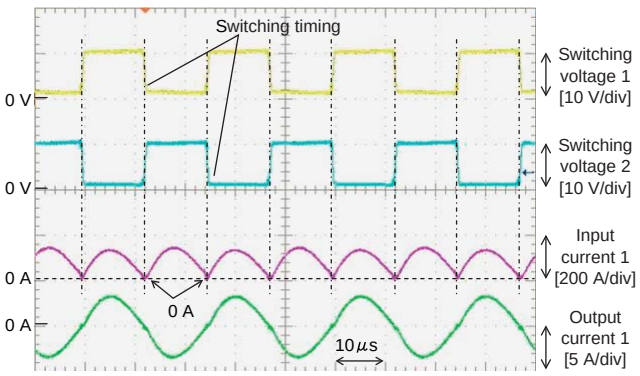


Fig. 12 Zero current switching

Table 2 Specifications (DC-DC converter unit)

Boost type	Current resonance type isolated converter
Switching type	Zero current switching
Rated input voltage	14 V
Rated output voltage	270 V
Rated output power	440 W
Switching frequency	40 kHz
Dimensions (LxWxH)	277 × 187 × 32 mm
Mass	1510 g

Table 3 Test results of DC-DC converter unit

Input voltage	14 V
Output voltage	273 V
Efficiency (rated output power)	91.6 %
Maximum output power	1168 W
Output voltage (no load)	297 V

4.3. インバータ

Fig. 4 内のインバータのシステム構成を Fig. 14 に示す．始動時にはスタータドライバ，発電時には ALT からの電力を交流／直流変換するスタータドライバ兼整流部，直流電圧を昇圧するブーストコンバータ部，直流電圧をパルス幅変調(PWM)により矩形波電圧に変換する MOSFET 部，矩形波電圧を正弦波電圧に変換するLCフィルタ，系統との接続と切断をおこなう接続リレー，ノイズを除去するノイズフィルタ，出力電流を検出する電流センサ，系統連系／自立発電用電流制限をおこなう系統連系用と自立発電用電流リミッタ，U相 - N相／V相 - N相／U相 - V相間の電圧を検出する

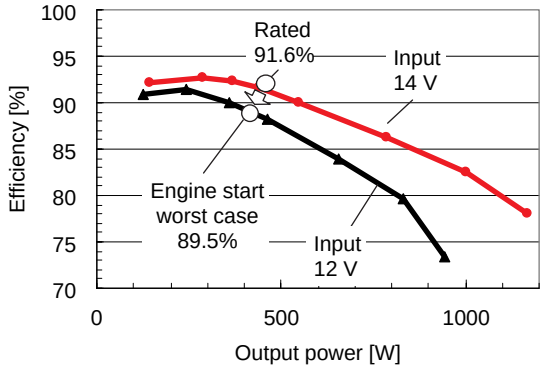


Fig. 13 Load efficiency characteristics of DC-DC converter

電圧センサ，発電制御をおこなう制御CPU，MOSFET部の駆動制御をおこなう駆動回路で構成している．

前モデルの系統連系インバータに対し，停電時の自立発電機能を追加した．また，前モデルと同一基板サイズながら，自立発電時の発電出力とブースト系統連系時の発電出力の増加をおこなっている．そのハードウェアおよびソフトウェアについて，以下で説明する．

4.3.1. 出力電力の向上

本モデルのバックアップ時の出力電力は 1.8 kVA で，系統連系時の1.5 倍である．出力電力を1.5倍にするため，LCフィルタのコイル（L）のサイズを大きくして最大磁束量を増加させ，巻き線径を太くした．また，出力が増えると，ブーストコンバータ前後の直流電圧のリップル電圧が大きくなる．このため，電解コンデンサへのリップル電流も増大し，電解コンデンサが発熱して寿命が短くなる．これを防ぐため，ブーストコンバータのコイルのインダクタンスと電解コンデンサの容量を大きくすることで，リップル電流を下げ，電解コンデンサの温度上昇を抑制した．この結果，電解コンデンサは完成機寿命の 2 倍の寿命とすることが可能となった．また，ブーストコンバータおよび MOSFET の発熱量も出力電力に比例して増大することから，高温時に作動するインバータ専用冷却ファンの追加をおこない冷却性能を向上することにより，前モデルと同一サイズながら1.5倍の出力を可能とした．

4.3.2. 自立発電機能の追加

(1) UV 間電圧検出回路の追加　系統連系時には，異常な系統電圧の検出が必要であるとともに，検出分解能を上げるため Fig. 15 に示すようにU相 - N相間電圧とV相 - N相間電圧を別々に検出していた．双方を加算することでU相 - V相間電圧を求め，比例・積分・微分制御（PID 制御）の電圧フィードバックに使用する．しかし，単体発電機として自立発電をするときには Fig. 16 に示すように単相二線で出力をおこなうため，N相が浮遊する．これは，DCからAC 出力に変換する MOSFET 部が単相フルブリッジ構成であることによる．このため，U相 - N相間電圧とV相 - N相間電圧の加算は，単純にU相 - V相間電圧にならない．これに対し，U相 - V相間電圧検出をおこなうことにより自立発電時の電圧フィードバックを可能とした．

(2) 電流リミッタ回路の追加　自立発電時の大電流負荷用に電流リミッタ回路を設置し，系統連系用の電流リミッタ回路とあわせて，２つの電流リミッタ回路を設定した．系統連系用の電流リミッタ回路は，ブースト連系時の定格電流の150%に設定した．自立発電用の電流リミッタ回路のしきい値は，水銀灯やコンプレッサ等の大電流が必要な負荷を使用可能とするため，系統連系用の電流リミッタ回路より高く設定し250%超とする．この設定値は，大電流を必要とする電気負荷の起動時や，出力短絡時に，インバータ部のスイッチング素子であるFETの熱破壊を防ぐため，シミュレーション結果とテスト結果を用いて決定した値である．自立発電時には，系統連系用の電流リミッタ回路は機能しないようソフトウェアにて設定する．

(3) 電流検出回路の変更　系統連系機能と自立発電機能では，同一の電流センサで電流を検出している．従来のインバータ発電機では，FET ブリッジのアーム電流を検出していたが，回路数削減のため，系統連系時に用いているLCフィルタ後の電流検出を共用することで電流検出を可能とした．

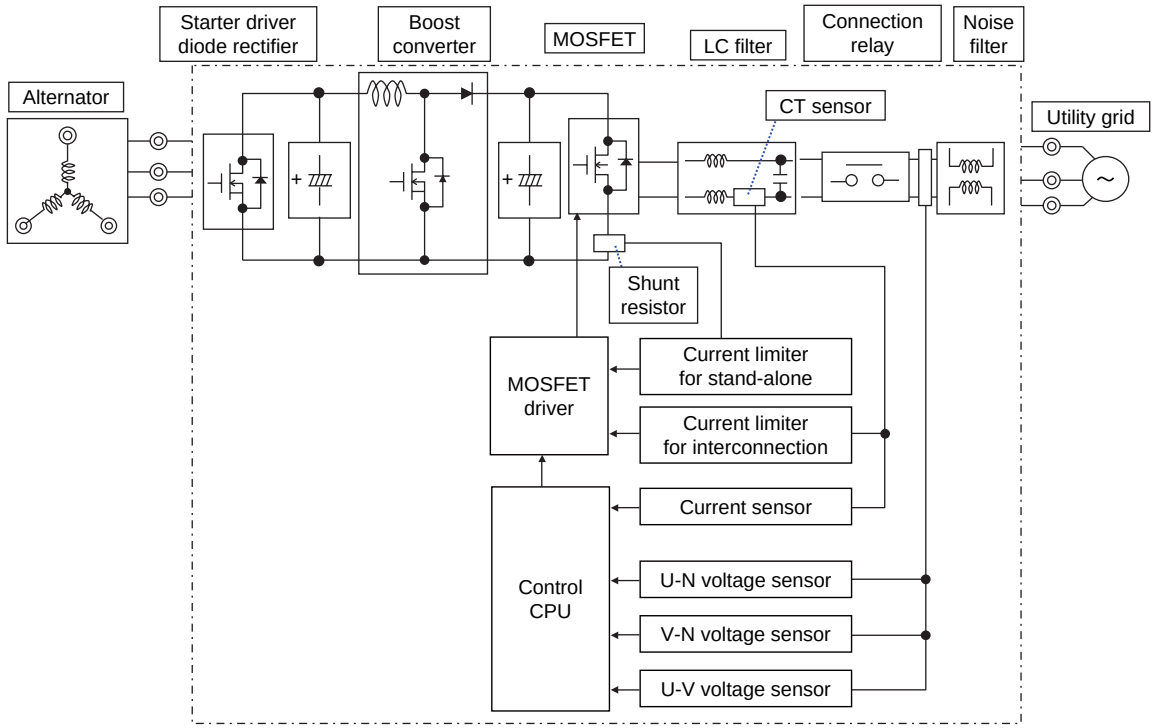


Fig. 14　Block diagram of interconnection inverter with backup function

自立発電機能では大電流が流れるため，電流センサの電流導電線を太くし，電流定格を前モデル 10 A に対して 30 A とした．この電流定格は，上述の過電流リミッタに対して充分マージンのある値とした．

4.3.3. 系統連系制御と自立発電制御

ソフトウェアにおいては，前モデルと同一 CPU において系統連系制御，ブースト系統連系制御，自立発電制御の３モードの制御をおこなった．Fig. 17に示すように各モードでの入出力レベルのソフトウェア構成を共通とすることで，ハードウェアはそれぞれのモードにおいても共通に使用することができる．自立発電時には停電状態であるため，基準となる系統電圧が入力されない．そのため，制御演算内部で系統電圧を模擬した基準(内部基準正弦波)を作成することで正弦波出力をおこなう．

実際のプログラムにおいては，系統連系制御では系統電圧に波形を重ね合わせながら出力電流を制御する一定電力制御と，自立発電制御ではどのような負荷が接続された場合でも，定格の正弦波電圧を出力する一定電圧制御という異なる２つの制御をおこなった．各モードの判定は，外部接続機器からの停電情報と DC-DC コンバータの停電情報を基におこなっている．

4.3.4. 系統連系時／自立時の発電性能

Table 4に系統連系時の発電性能を示す．系統連系時には，通常系統連系運転(1.2 kW)とブースト系統連系運転(1.8 kW)の２モードで動作する．どちらも，米国保険業者安全試験所(Underwriters Laboratories Inc.,)の定める系統連系をおこなうインバータの安全認証UL1741[7]を満足する高品質な電力出力を実現している．

系統連系時に加え，自立発電時においても，系統連系用のLC フィルタ定数の設定を用いて動作するため，整流器負荷のような電流が急変する負荷に対して出力電圧波形が歪み，歪率が約14%であった．このため，クレストファクタ(＝最大電流値／実効電流値)の大きさにより整流器負荷を識別し，歪率を小さくするフィードバック制御をおこなうことにより，Fig. 18 に示すように出力電圧の総合歪率を 4.7 ポイント低減し，9.2%を達成し，Honda のインバータ発電機と同等の性能を確保した[8]．自立発電時の発電性能をTable 5に示す．自立発電時には，定格で1.8 kVAの電力を供給し，定置型発電機の規格である UL2200[9]を満足する．

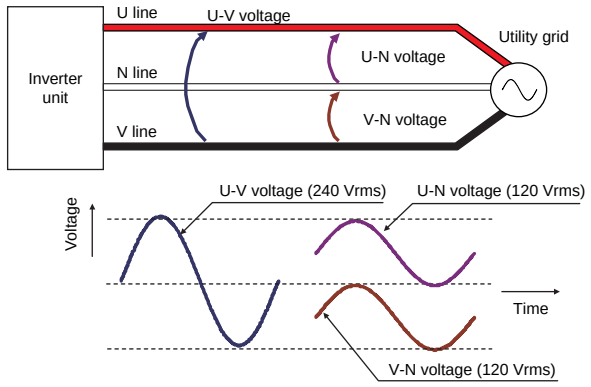


Fig. 15 Three-wire single-phase (grid connection)

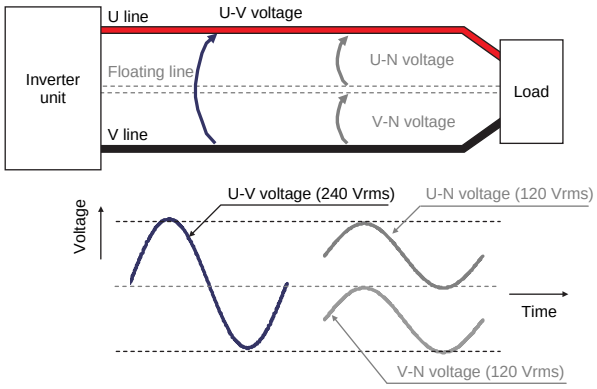


Fig. 16 Two-wire single-phase (backup)

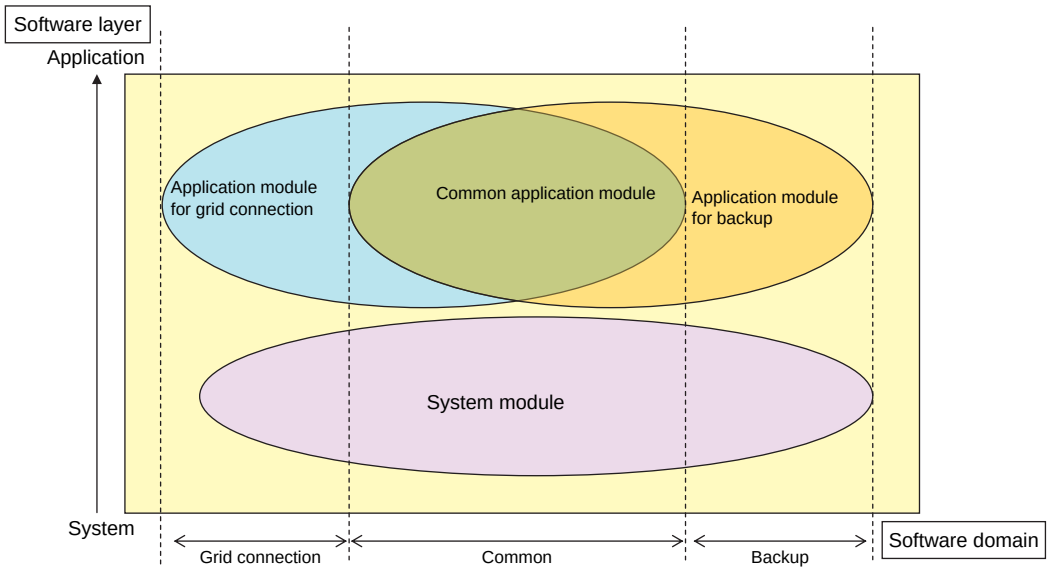


Fig. 17 Software architecture

Table 4　Power generation performance of interconnection

Output power			1.2 kW / 1.8 kW
Engine speed			1950 rpm / 2800 rpm
Rated voltage			AC 120 V / 240 V (1Φ3 W)
Rated frequency			60 Hz
Efficiency			92% or more
Power factor			97% or more
Output current distortion			
	Total		5.0% max
	Individual harmonic of odd order	3-9 order	4.0% max
		11-15 order	2.0% max
		17-21 order	1.5% max
		23-33 order	0.6% max
		35-39 order	0.3% max
	Individual harmonic of even order	2-10 order	1.0% max
		12-16 order	0.5% max
		18-22 order	0.375% max
		24-34 order	0.15% max
		36-40 order	0.075% max

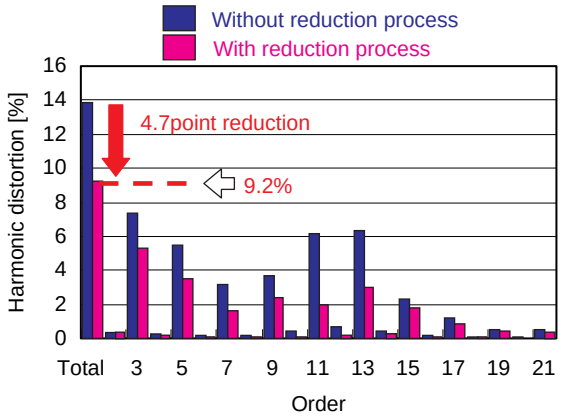


Fig. 18　Output voltage harmonic distortion With and without reduction process

Table 5　Power generation performance of backup

Output power		1.8 kVA
Rated voltage		AC 240 V (1Φ2 W)
Rated current		7.5 A
Rated frequency		60 Hz
Efficiency		92% or more
Output voltage distortion	Resistance load	3.0% max
	Rectifier load	10.0% max

4.3.5. バッテリアシスト機能

エンジン発電機はエンジン出力を電気に変換して負荷に電力の供給をおこなう．このため，定格出力に対する瞬時の出力の応答性や，モータなどの誘導性負荷の起動時における突入電流に対する応答性を向上させることが，使用可能となる電気負荷の大きさや種類を増加させ商品性の向上につながる．本モデルにおいては，バッテリと DC-DC コンバータを搭載したことにより，自立発電時にエンジンが瞬時的な過大出力を求められた際には，Fig. 19に示すようにインバータからの指令により DC-DC コンバータがバッテリ昇圧をおこないインバータにバッテリ電力を供給し，エンジン出力とバッテリ出力のハイブリッド発電を可能とした[10]．定格負荷以上の過大な負荷や，突入電流が大きな負荷が投入された際にバッテリからの電力を併用しハイブリッド発電をおこなうことでエンジンの出力をアシストする．これによりエンジンの過渡応答を向上させ，エンジン発電機としての商品性の向上が可能となった．負荷投入における電圧変動波形を Fig. 20 に示しに対して(3)の式で表される指標に基づき瞬時電圧変動率の評価をおこなった．

$$Voltage\ sag = (V1 - V2)/V1 \times 100\% \qquad (3)$$

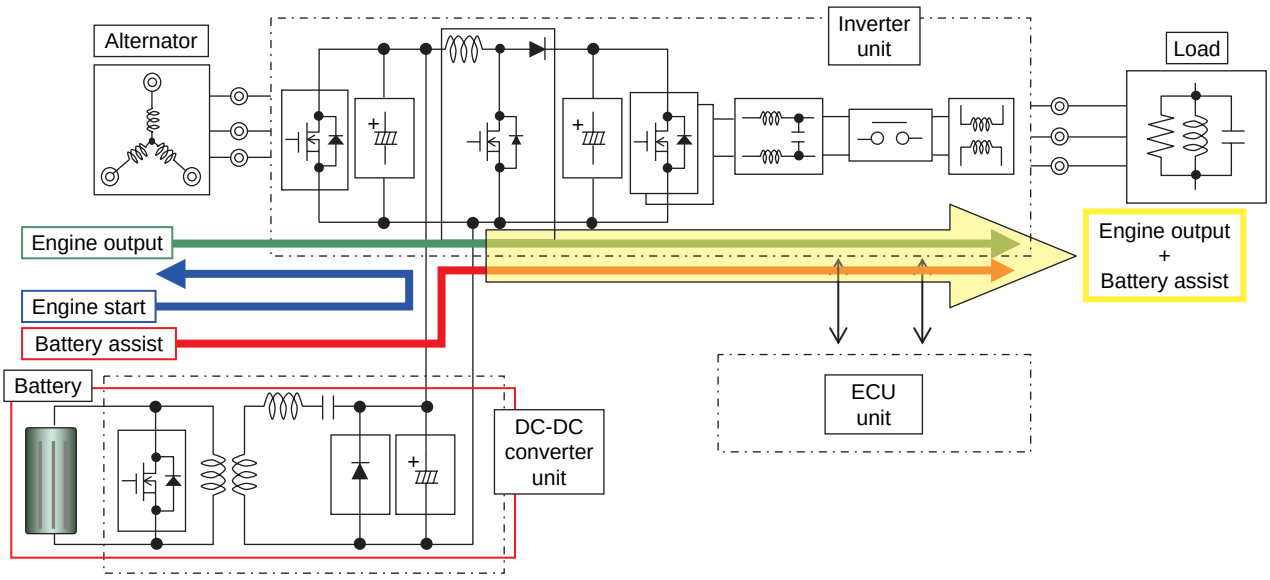


Fig. 19　Hybrid power generation

Table 6 Comparison of battery assist on-off

	Assist off	Assist on
Voltage sag	59.3%	16.6%
Stabilization time	2.54 s	1.71 s

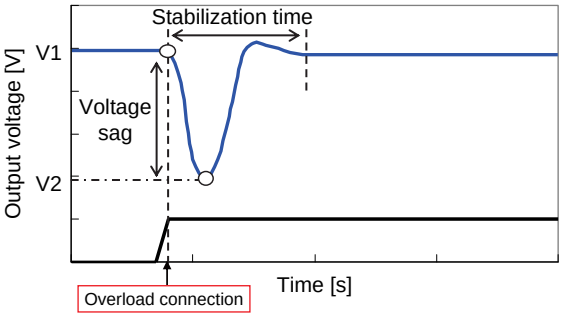


Fig. 20 Voltage sag and stabilization time

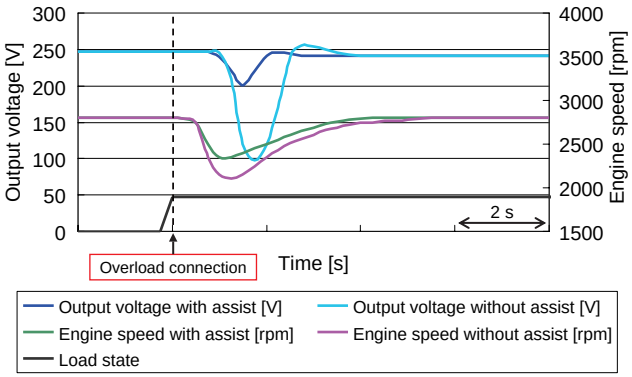


Fig. 21 Comparison of battery assist on-off

同一負荷におけるバッテリアシストの有無の差をFig. 21に示す．この結果，定格負荷に対して120%の過負荷投入時においてTable 6に示すように，瞬時電圧変動率で約40ポイント改善し，安定時間においても0.8 s改善することが可能となった．

5．まとめ

停電時に非常用発電機として機能することを目標に，下記の特徴を有する自立運転機能付き家庭用小型コージェネレーションユニットを開発した．停電時の単体発電機としてはエンジン回転数を上げることで系統連系運転のみの従来モデルに対して，1.5倍の出力を可能とした．停電時の非常用発電機としての使用時においてもマイクロコージェネユニットとして熱回収が可能なため，一次エネルギーに対して高効率な運転が可能であり，総合効率は 85.5%超となる．

（1）インバータ機能として系統連系，自立発電機能の自動切り換えを実現し，また高効率な絶縁型 DC-DC コンバータの開発により，従来モデルと同一サイズのきょう体において，自立発電機能およびハイブリッド発電機能を両立させた．

（2）従来モデルに対して，同一基板サイズをキープしながらも，エンジン回転数を上げることで 1.5 倍の出力を可能とした．

（3）効率においては，電流共振形のZCS動作により，入力電圧 14 V 出力電力 440 W において 91.6%を達成し高効率な絶縁型 DC-DC コンバータを実現した．

（4）合わせて，長寿命Ni-MHバッテリの採用，搭載レイアウトの最適化，間欠充電制御を用いることにより，メンテナンスフリーバッテリを実現した．

参考文献

（1）高橋智：本田技研工業埼玉製作所コージェネレーションシステム，コージェネレーション，Vol.19, No.1, p.77-81(2004)

（2）高石敏充，荒真人，戸川一宏：家庭用小型コージェネレーションユニットの紹介，Honda R&D Technical Review, Vol.15, No.1, p.53-58

（3）Energy Information Administration : Electric Power Monthly

（4）特開 2004-282826

（5）特開 2005-224013

（6）特開 2005-168167

（7）Inverters, Converters, Controllers and Inter- connection System Equipment for Use With Distributed Energy Resources, UL1741(2005)

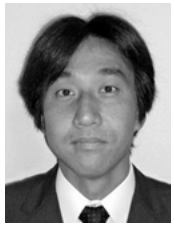
（8）Enomoto,T., Sueyoshi,S., Tsuno,K., Yamaji,T.: Research on Reduction of Harmonic Distortion of Inverter for Small Gas Engine Cogeneration System with Backup Function, SAE Paper 2009-01-0523(2009)

（9）Stationary Engine generator Assemblies, UL2200(2004)

（10）特開 2004-282827

■著 者■


江口博之


末吉俊一郎


山路 健


榎本貴行


津野康一

V型２気筒空冷４ストローク汎用エンジン「GX690/GXV690」の開発

Development of Air-cooled, 4-stroke V-twin Cylinder General Purpose Engine GX690/GXV690

長谷部　博　昭*　Hiroaki HASEBE
小　川　和　久*　Kazuhisa OGAWA
田　島　知　治*　Tomoharu TAJIMA
金　井　充　善*　Mitsuyoshi KANAI

要　旨

環境性能が高く，小型で高性能なV型２気筒空冷４ストロークの汎用エンジン“GX690/GXV690”を開発した．

燃焼室・ポート形状の改善と燃焼室周辺の冷却性改善，および点火時期の可変進角を行うことでノック発生を回避し，圧縮比を前モデルであるGX670/GXV670の8.3から9.3まで高めた．これにより出力を８%向上し，さらに触媒等のデバイス無しでEPA排気エミッション規制に適合すると同時に燃費を10%向上した．エンジンサイズについては，濾材の改良によるエアクリーナの小型化や，オイルクーラの機能を兼ねたオイルフィルタベースの採用により，全高・全幅寸法を低減し，容積で18%小型化した．また，冷却ファン・ファンカバー形状やマフラ構造等の改良により，エンジン運転時の騒音を低減し，騒音フィーリングを改善した．

さらに，運転時間計やオイルアラート表示灯を新設することで，ユーザの扱いやすさを向上するとともに，バッテリへの充電性能を向上し，より多くの作業機での使われ方に対応できるようにした．

ABSTRACT

Honda has developed GX690/GXV690, a small, high-performance, air-cooled, 4-stroke V-twin cylinder general purpose engine with an outstanding environmental performance.

In this new model, the enhanced shapes of combustion chamber and port, upgraded cooling capability around the combustion chamber, and variable ignition timing effectively suppress knocking, while increasing the compression ratio to 9.3 from 8.3 of previous GX670/GXV670, which results in 8% increase in output. Without using any catalysts, this engine with 10% of increased fuel efficiency has cleared the EPA exhaust emissions regulations. Both the decreased size of air cleaner, which was resulted from enhanced filter, and the adoption of oil filter base, which also had an oil cooler function, eliminating previous oil cooler, allowed us to reduce the total height and width of the engine, as well as the volume by 18%. The modified shape of cooling fan and fan cover, configuration of muffler, and other parts are effective to decrease the measured and perceived noises that occurred in the previous engine in operation.

As new features, we have also added an hour meter and oil alert indicator to enhance the usability of engine. Furthermore, we advanced battery charging performance to offer a diverse use in working machines.

１．まえがき

業務用作業機である発電機，建設機械，乗用芝刈機などの動力源として搭載される10 kW-20 kWの出力帯の汎用エンジンではV型２気筒のガソリンエンジンが主流である．

HondaはGXエンジンシリーズのV型２気筒エンジンとしてGX610/620を1993年に販売開始し，その後1999年にGX670を追加した．これに対し2000年以降，各社ともGXエンジンより高い出力を有するV型２気筒エンジンのラインナップの販売を開始した．これにより，高い出力のガソリンエンジンが各種作業機へ搭載されるようになってきた．一方で環境意識の高まりと作業機のエンジン搭載スペースの制約から，小型で燃費の良いエンジンへの要望が高い．

このような背景の中，前モデルであるGX670/GXV670に対し，出力を向上させた上で燃費向上と有害排気ガスの低減を両立し，エンジンサイズの小型化を実現したV型２気筒空冷４ストロークの汎用エンジン“GX690/GXV690”を開発したので，ここに紹介する．

＊汎用R&Dセンター

https://doi.org/10.69239/hondatechnicalreview.2009_21_2_6

Table 1 Engine specifications

Item		Previous engine (GX670)	Developed engine (GX690)
Engine type		4-stroke, V-90° twin-cylinder	4-stroke, V-90° twin-cylinder
Displacement	(cm^3)	670	688
Bore × Stroke	(mm)	77 × 72	78 × 72
Compression ratio		8.3 : 1	9.3 : 1
Valve train		2-valve OHV	2-valve OHV
Valve inclination angle	(deg)	0	29
Valve diameter	(mm)	Inlet: φ35, Exhaust: φ31	Inlet: φ30, Exhaust: φ26
Combustion chamber shape		Wedge type	Hemispherical type
Lubrication system		Forced feed system	Forced feed system
Ignition system		Transistorized magneto (fixed)	CDI (advanced)
Dimension (L × W × H)	(mm)	412 × 471 × 457	405 × 410 × 438
Volume	(cm^3)	88680	72730

2．開発目標

本エンジンの開発にあたっては，業務用作業機エンジンの要求に見合う作業負荷に対して十分な出力特性と燃費向上，そしてエンジンサイズの小型化を主なねらいとし，同時に有害排気ガスや騒音の低減および装備仕様の充実を目指して開発目標を次のように設定した．

（1）出力

・前モデルに対し５%アップの 16 kW 以上(Fig. 1)

（2）燃費，排気エミッション

・前モデルに対し汎用エンジンに関する EPA モード燃費[1]で 10%向上

・排気エミッション規制(EPA Phase3 Small Nonroad Spark Ignition Engine Class2)に適合

（3）エンジンサイズ

・前モデルに対しエンジン全高３%，全幅 10%の小型化

（4）騒音

・前モデルに対し騒音レベル同等以下

・騒音フィーリング改善

（5）装備仕様の設定と使い勝手の改善

・運転時間計，オイルアラート表示灯の新設

・充電容量の向上

3．エンジン基本性能

開発した GX690 エンジンの主要諸元を Table 1 に示す．エンジンブロックの構成は，シリンダヘッドとシリンダブロックを一体化したユニブロックシリンダ構造[2]の 90 ° V 型 OHV 2 バルブエンジンとした．

また，出力軸が水平方向を向くホリゾンタルタイプと垂直方向を向くバーチカルタイプのエンジンの同時開発を行い，部品の共用化を図った．ホリゾンタルタイプの外観を Fig. 2 (a) に，バーチカルタイプの外観を Fig. 2 (b) に示す．

以下にエンジン出力，燃費と排気エミッション，およびエンジンサイズについて記す．

3.1. エンジン出力

本エンジンでは高い出力と小型化の両立を実現するため，排気量は前モデルに対し３%アップの 688 cm^3 とし，エンジンの全高寸法を抑えるため前モデルに対し，ストロークは変えずにボアを 1 mm アップし，ボア／ストロークをφ78/72 mm とした．

さらに，４章に示す燃焼改善と点火時期の可変進角，そして燃焼室周辺の冷却性向上により耐ノッキング性を向上し，圧縮比を前モデルの 8.3 から 9.3 に上げた．

また，従来汎用エンジンで使われていた固定点火方式か

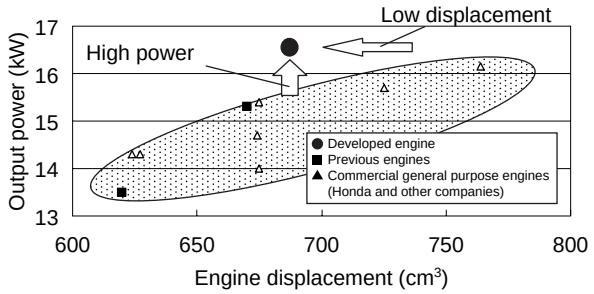
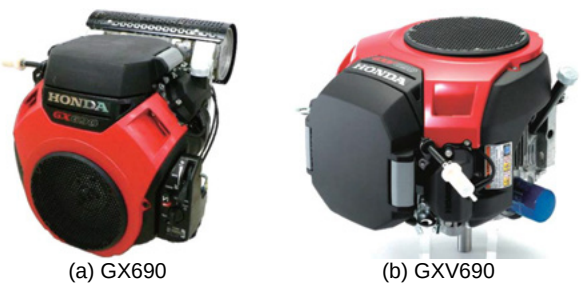


Fig. 1 Positioning of developed engine



(a) GX690 (b) GXV690

Fig. 2 External view of developed engines

ら電子進角式のコンデンサ放電点火装置を採用することで，点火時期を各エンジン回転数で可変進角設定できるようになり Fig. 3 に示すように，トルクが低回転域から全域で前モデルに対して向上した．これにより，エンジン性能曲線が示すように最大トルクは５%，最大出力は８%向上した．

3.2. 燃費と排気エミッション

Fig. 4 に本エンジンの燃費，排気エミッションの達成値を示す．以下 4.1 節に示す燃焼改善技術により，汎用エンジンに関するEPAモード運転時において，前モデルに対して10%の燃費向上をしながら，HC+NO_x 排出量を同レベルに抑え，汎用エンジンの排気エミッション規制（EPA Phase3）に適合した．

3.3. エンジンサイズ

本エンジンでは，吸気ポート長を最短に形成できる高さまでインレットマニホールドおよび気化器の位置を下げ，エアクリーナのエレメント材として単位面積当たりのダストキャッチ量の多い濾材を使用することで，濾過性能を低下することなくエアクリーナ容量を小さくし，エンジン全高寸法を 19 mm 低減した．

また，Fig. 5 に示すオイルクーラの機能を兼ね備えたオイルフィルタベースを採用することで，前モデルで適用していた二輪タイプのオイルクーラを廃止し，エンジン全幅寸法を 61 mm 低減するとともに部品点数を削減した．

この結果エンジンサイズは Fig. 6，Fig. 7 に示すように，前モデルに対し全高で４%，全幅で 13%サイズダウンし，容積で18%の小型化を実現した．これにより狭いボンネット内にエンジンを納める建設機械や発電機などの作業機にも搭載しやすいエンジンとすることができた．

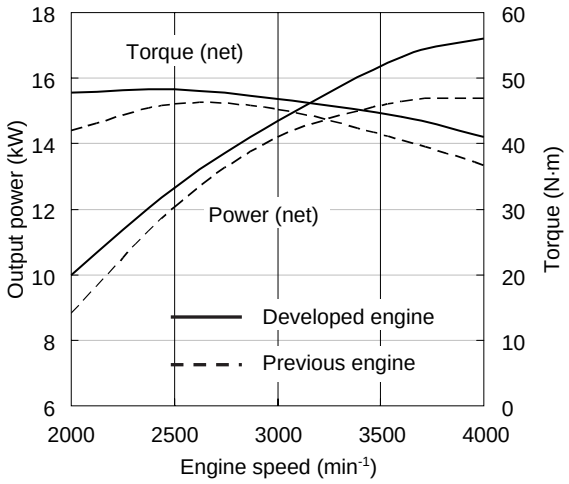


Fig. 3　Engine performance

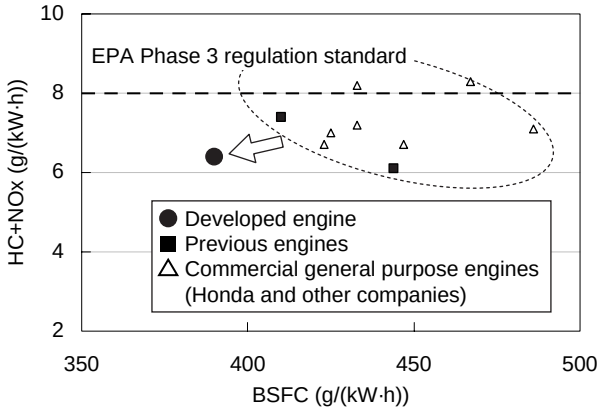


Fig. 4　Fuel consumption and mass emissions in EPA emissions mode

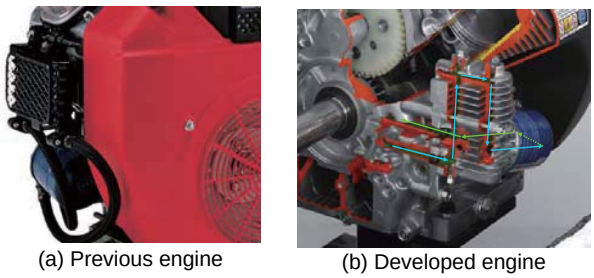


Fig. 5　Oil cooler

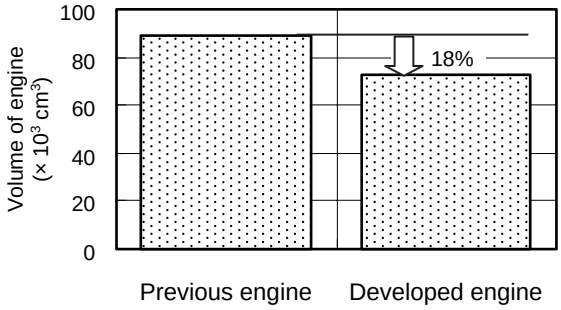


Fig. 6　Engine volume

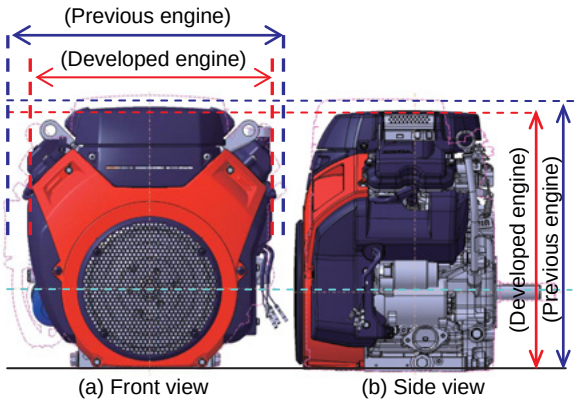


Fig. 7　External shape

4．燃焼改善技術と冷却性能向上技術

多くの汎用エンジンは空冷エンジンで，発電機に代表されるように定置運転で作業負荷が高いことから圧縮比を上げることが難しく前モデルのエンジンでは，ノッキング限界から圧縮比を 8.3 に設定していた．本エンジンでは以下

に示す燃焼室形状の改善と点火時期の可変進角，そして燃焼室周辺の冷却性向上によりノッキングを回避することで圧縮比を 9.3 まで高めて熱効率を向上させた．

4.1. 燃焼改善技術

4.1.1. 燃焼室・ポート形状

本エンジンのバルブ配置およびポート形状を，Fig. 8 に示す．前モデルでは，ウエッジ形燃焼室で平行バルブであったのに対して，バルブ角度を挟み角29 ° の放射バルブとし，シリンダヘッド側を半球型燃焼室にするのに加え，ピストン頭部も凹形状とし火炎伝播しやすい形状とした．

また，バルブ軸と吸気ポート入射方向とのなす角度を前モデルの 90 ° から 60 ° とすることで吸気ポートの流路抵抗を低減し，ポンプロス(吸気時の損失)低減を図った．さらに，Fig. 9 に示すように，吸気バルブ径を前モデルより 5 mm 小さい 30 mm にすることで吸気流速を速め，筒内流動を活性化させた．また点火プラグと燃焼室中心の距離を前モデル 20 mm に対し 9 mm とすることで，燃焼室内の火炎伝播距離を短くした．これらの燃焼改善により燃焼速度の向上を図り，耐ノッキング性を向上させた．

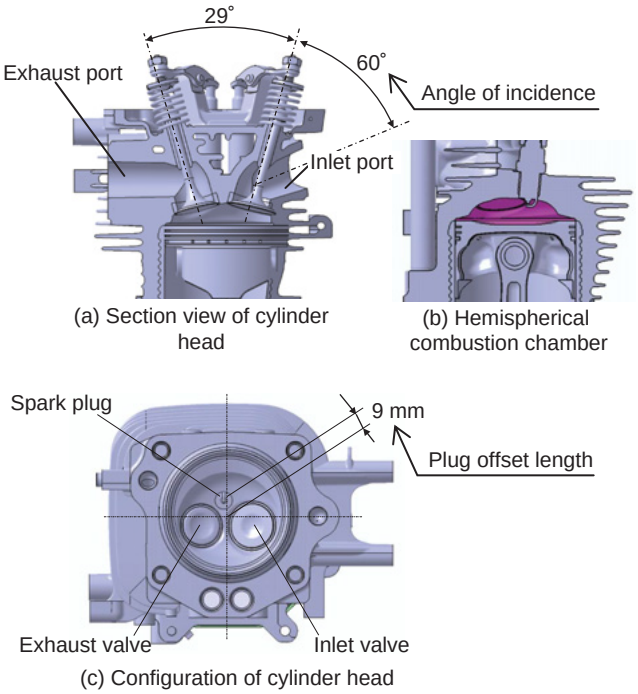


Fig. 8 Cylinder layout

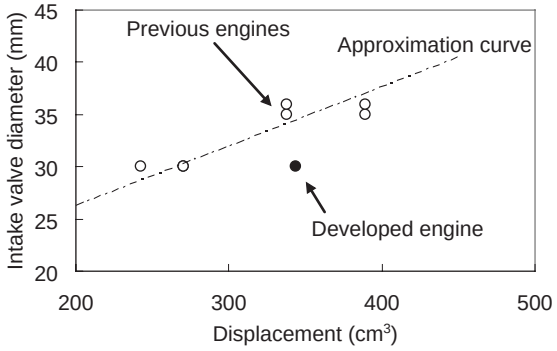


Fig. 9 Intake valve diameter

4.1.2. 電子進角式コンデンサ放電点火装置

始動性やアイドル運転時の回転安定性を損なわず，ノッキングを回避するために，前モデルの固定点火式トランジスタマグネト点火装置から，各回転数域で点火時期を可変設定が可能な電子進角式コンデンサ放電点火装置に変更した．これにより，ノッキングを回避した上で各回転数の点火時期を進角し，出力と燃費を向上させた(Fig. 10)．また，加速時マップを設定することにより，加速時の応答性向上を図った．

4.2. 冷却性能向上技術

4.2.1. シリンダヘッド

前モデルは，シリンダヘッドを分割構造としたためヘッドには締結用のボルトおよび締め付けボスがあり，冷却風の流れを阻害する要因となっていた．そこで，本エンジンでは燃焼室周辺の冷却性向上手段として，シリンダヘッドとシリンダブロックを一体で形成するユニブロックシリンダを採用した(Fig. 11)．このユニブロックシリンダにすることで，燃焼室周辺のボルトおよび締め付けボスが不要となり，燃焼室周辺へ冷却風が導入しやすくなった．

さらに，前モデルではプッシュロッド室をシリンダヘッドにアルミ一体で形成していたが，このプッシュロッド室と前述のシリンダヘッド締結用のボスを形成するためにはダイカスト製法の鋳抜きによるアルミの駄肉が生じてしま

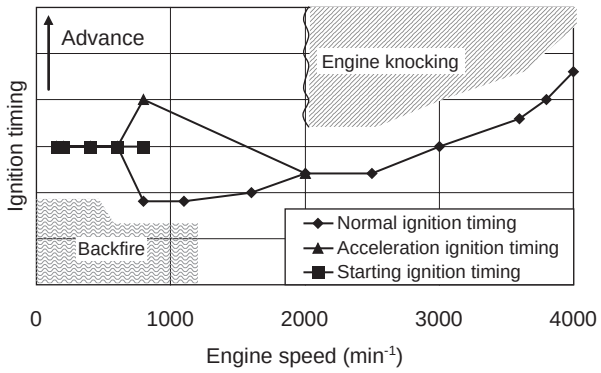


Fig. 10 Ignition timing

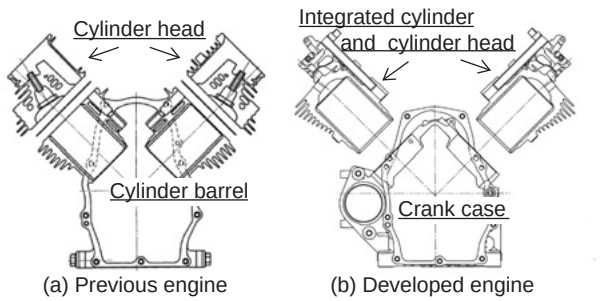


Fig. 11 Engine configuration

い冷却風通路が狭くなっていた．本エンジンでは前述のボスを廃止し，別体のアルミパイプをプッシュロッド室とすることで，同じダイカスト製法ながら鋳抜きによるアルミの駄肉を減らして，シリンダヘッド上部の冷却通路を拡大した(Fig. 12)．

これらに加え，放射バルブの採用によりバルブ間の冷却風流路断面積を 2.8 倍に拡大することで，高温となる燃焼室の排気側への冷却風通路を確保し，冷却風を効率良く流すことで冷却性能を向上させた．

4.2.2. 冷却ファン

冷却ファンは，ファン外径を前モデルに対して 228 mm から 241 mm へ上げた．

また，5.1節で後述するようにファンカバースクロール内の冷却風流れを阻害するスタッドボルトを廃止し，樹脂製ファンカバーとシュラウドによりスムーズなスクロール形状を構成した上で，冷却風を各気筒の燃焼室周辺やシリンダまわりに適切に分配することで，エンジン通気抵抗を低減させた．

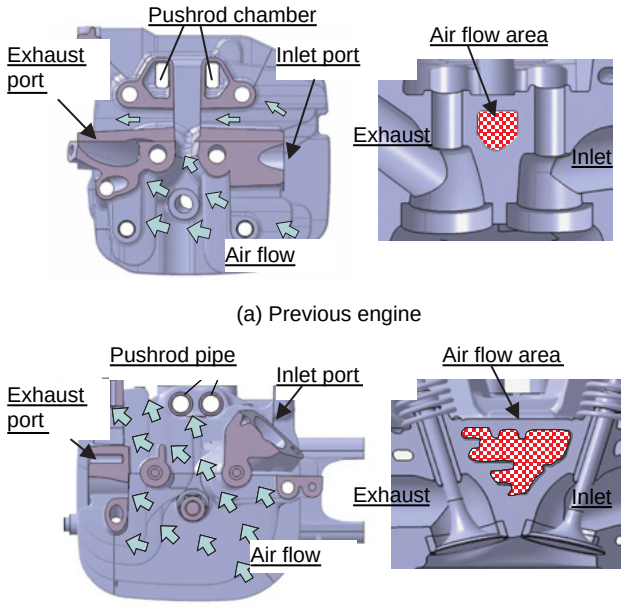


Fig. 12　Section view of air jacket

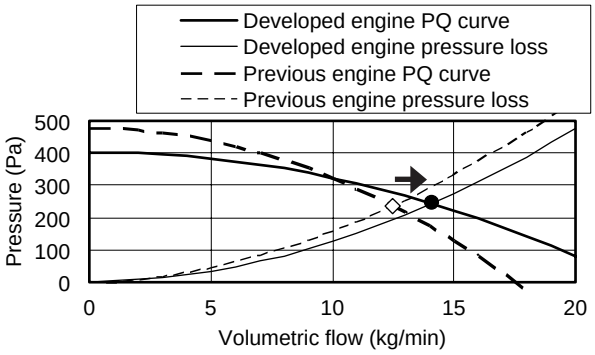


Fig. 13　P-Q curve of fan

これらにより，圧力-流量曲線とエンジン通気抵抗曲線の交点で示されるファンの作動点における風量は，Fig. 13 に示すように，前モデルに対して，同一圧力で14%向上した．

5．騒音低減技術

本エンジンでは，Fig. 14に示すように，前モデルに対して，騒音レベルを 3000 min^{-1} 定格 3/4 負荷 8.6 kW で 1.5 dBA 低減した．

この騒音低減は，Fig. 15の騒音寄与率で示すように，主に，クランクケースの面剛性アップによる放射音低減や樹脂カムギヤの使用によるギヤ音低減等による機械騒音の低減，冷却ファン･ファンカバー音の低減，および排気音の低減により実現した．

冷却ファン・ファンカバー音，排気音の低減技術について以下に記す．

5.1. 冷却ファン，ファンカバー音

冷却ファンについては，羽根の上部に副板をつけた構造とすることにより，Fig. 16に示すように翼端からの回り込

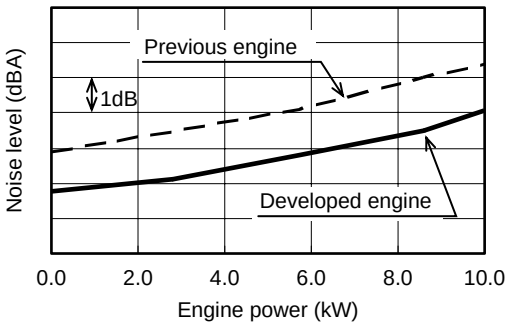


Fig. 14　Noise level (3000 min^{-1})

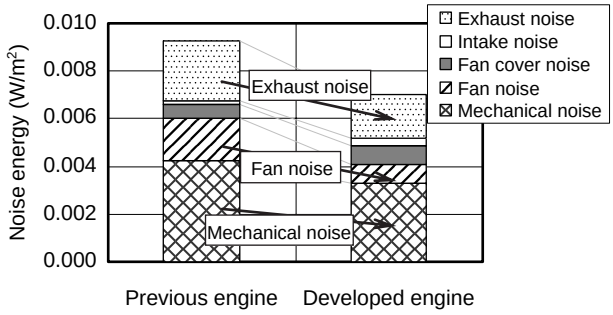


Fig. 15　Noise contribution

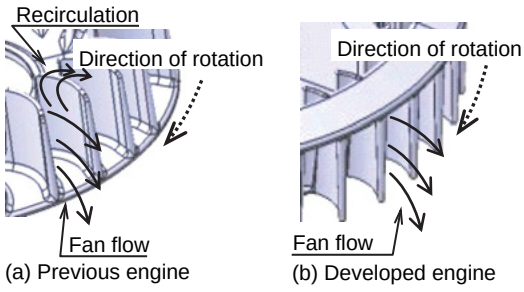


Fig. 16　Fan cover layout

みを防止し，ファン騒音を低減させた．

また，ファンカバー材料は，前モデルの樹脂材に対して約 1.5 倍の曲げ弾性率を有する高剛性樹脂材を採用することでファンカバー面剛性を上げ，Fig. 17に示すように前モデルで使用していたファンカバーを支持するスタッドボルトを廃止した．これにより，ファンによる風の流れがスタッドボルトに当たることで発生していた風切り音をなくし，ファン騒音レベルを低減させた．

以上に示した冷却ファンおよびファンカバーの騒音低減技術により，Fig. 18に示すように，前モデルに対して，ファンによる冷却風量を14%増やした上で，ファン騒音レベルを 1.5 dBA 低減した．

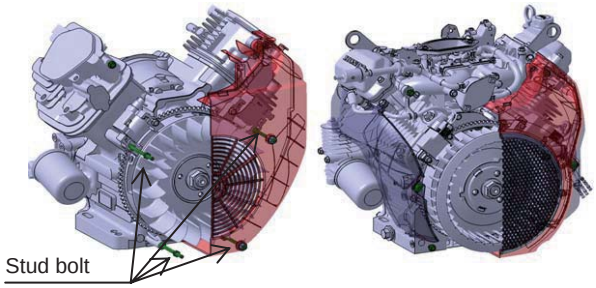


Fig. 17 Fan cover layout

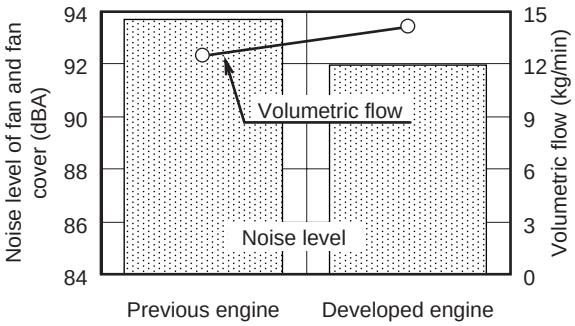


Fig. 18 Noise level of fan

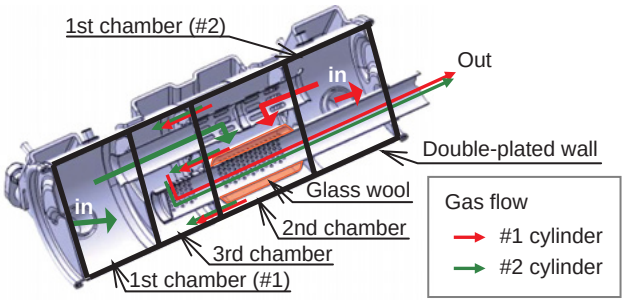


Fig. 19 Internal configuration of muffler

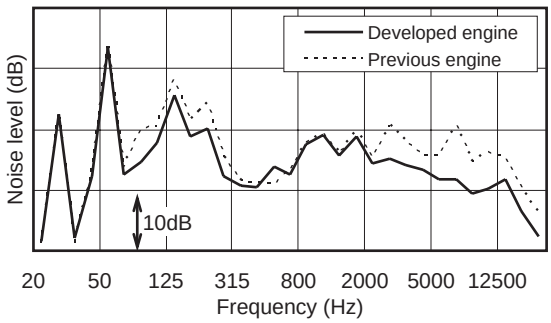


Fig. 20 Frequency characteristic of muffler

5.2. 排気音

マフラ構造を Fig. 19 に，その内容と効果を以下に示す．

（1）各気筒ごとの排気経路を３チャンバのマフラ構造とすることで 100-200 Hz の排気脈動騒音を低減

（2）外板二重巻き構造により，マフラ壁面放射音の2000 Hz 以上の周波数成分を低減

（3）最終エキゾーストパイプにグラスウールを配置し，吐出音の 2000 Hz 以上の周波数成分を低減

上記の（2）（3）の構造とした結果，Fig. 20 に示すように，耳障りな音である2000 Hz 以上の周波数成分を低減し，耳障り感の少ない音フィーリングとした．これに加え，上記の（1）の構造による，100-200 Hzの騒音低減効果により，マフラ単体騒音レベルで 1 dBA 低減した．

6．使い勝手の改善・改良

以下に本エンジンに搭載した主要な装備仕様について記す．

6.1. コントロール BOX

Fig. 21 に示すように，本エンジンではスロットルレバー，チョークノブおよびエンジンスイッチの操作部をコントロール BOX 内に集中して配置した．これにより，エンジン運転操作部の視認性が向上し，エンジン始動･停止等の操作が同じ位置で操作できるようになった．

また，新たにオイルアラート表示灯と運転時間計をコントロールBOX内に装備した．エンジン運転時にオイルが不足するとオイルアラートが作動し，エンジンが停止すると同時に表示灯が点灯する．これにより，ユーザはオイルが不足していることが即座に分かる．また，エンジンの積算運転時間が液晶に表示されることにより，オイルやエア



Fig. 21 Control box

クリーナフィルタ等の点検の目安として利用することができる．

6.2. チャージコイルの低回転域出力向上と出力アップ

バッテリ充電用のチャージコイルは従来の単極巻き線構造から多極巻線構造を採用し，充電の周波数を上げ充電効率を高めたことで，最大出力は前モデルと同等としながら，アイドル回転数領域である 1000 min^{-1} 時の充電出力特性が前モデルに対し約 1.6 倍向上した．これにより，アイドルで長時間使われる作業機でも充電性能が向上し，より多くの電気負荷を使用することが可能となった．

また，巻線構造を単相から３相化することで Fig. 22 に示すように最大回転時に26 A出力できるチャージコイルを追加設定した．これにより，大型ヘッドライトや電動工具などのより電気負荷の高い電装品を備えた作業機にも対応できるようになった．

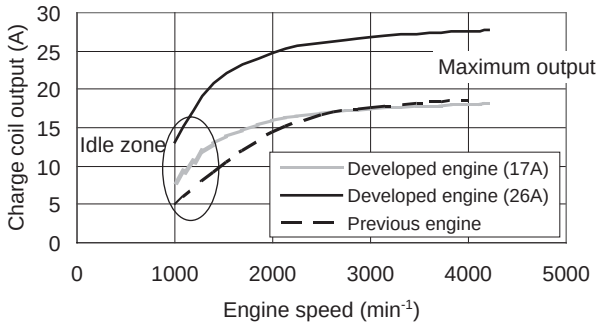


Fig. 22　Charge coil output

７．まとめ

エンジンの燃焼改善技術，冷却性能向上技術および騒音低減技術の採用より，新開発のV型２気筒空冷４ストローク 688 cm^3 汎用エンジンは下記の性能を達成することができた．

（1）出力およびトルクは前モデルに対して最大出力で８%，最大トルクで５%向上した．
（2）汎用エンジンに関する EPA モード運転時での燃費 10 %向上した．
（3）排気エミッションは触媒等のデバイス無しで EPA Phase3 Small Nonroad Spark Ignition Engine Class2 規制値に適合した．
（4）搭載互換性を持ちながら前モデルに対し体積で18%エンジンサイズを小型化した．
（5）エンジン運転時の騒音は前モデルに対して騒音レベルで 1.5 dBA 低減．騒音フィーリングも改善した．
（6）以下の装備により使い勝手が向上した．
・コントロール BOX への操作部の集中配置と運転時間計，オイルアラート表示灯の新設．
・チャージコイルの低回転充電出力性能の向上と最大充電出力 26 A チャージコイルの新設．

参考文献

（1）U.S. Environmental Protection Agency : Title 40 CFR, Part90, Subpart E, p.219-247(2000)
（2）篠田明久，森山浩，鈴木卓，田端豊：汎用V型２気筒エンジン「GCV530/520」の開発，HONDA R&D Technical Review, Vol.12, No.2, p.23-28

■著　者■


長谷部博昭


小 川 和 久


田 島 知 治


金 井 充 善

リズム歩行アシスト

Walking Assist Device with Stride Management System

安原　謙*　Ken YASUHARA
島田　圭*　Kei SHIMADA
小山泰司**　Taiji KOYAMA
井土哲也*　Tetsuya IDO
菊池敬士郎*　Keishiro KIKUCHI
遠藤洋介*　Yosuke ENDO

要　旨

姿勢，筋肉の使い方，歩幅，歩調などの歩行要素を効率的なものに誘導することによって歩行の運動負荷を低減し，しかもその誘導効果が持続して，最終的に自力でその効率的な歩行を可能とするような歩行アシストを議論する．特に歩幅と歩調のバランスである歩行比という指標を操作する，股関節の遊脚・支持脚アシスト手法を開発した．このアシスト手法を基に薄型アクチュエータ，小型電装システム，様々なサイズや体型に対応する軽量ウェアラブル機構から構成されるアシスト装置を開発した．この装置を高齢被験者が装着した時の，筋肉の活動を含めた歩行の誘導効果を検証した．その結果，装着時においては歩行比を目標近くに誘導することができた．長期適用後の計測では，アシスト装置非装着状態でも，歩幅や歩行速度の増加が維持できていることが確認できた．その際，筋肉活動のバランスも負担がある部位に集中しないバランスのとれたものに変化する傾向も確認できた．歩行速度の増加により運動量が増加したにもかかわらず，心拍数は下がっており，被験者の主観的な疲労感の低下と相関があった．これにより，楽に運動量を拡大し，身体機能を維持･向上できるツールとしての本アシストの価値を提案できると考える．

ABSTRACT

This paper discusses a novel walking assist device that assists users in adopting a more efficient posture, muscular usage and walk ratio. An assist method was developed that coordinates the walk ratio of users while increasing their propulsive force. This assist method was implemented through a hardware system that consists of low-profile actuators and compact electrical components. The device is light and adaptable to users of various shape and size. A long-term experiment showed that elderly subjects using the walking assist device were eventually able to walk with a wider stride, at a higher speed, and with a lower heart rate, without help from the device. Their balance of muscular usage also changed accordingly. Energy consumption increased according to the increase in the subjects' speed. This result suggests the possibility of using the walking assist device as a tool for increasing elderly peoples' physical activity, while reducing the level of stress this would normally produce.

1．まえがき

総務省の調査によれば，日本では 2008 年に 65 歳以上の高齢者数は 2819 万人(男 1203 万人，女 1616 万人)に達し，全人口の 22.1%を占め，本格的な高齢社会に突入した[(1)]．このような情勢の中で年齢にとらわれない生活を実践したり，積極的に地域で社会活動を行っている高齢者も多い．このように元気で生き生きとした生活を送るためには，身体機能の維持・向上が重要と考える．

高齢者の身体機能は，加齢に伴い体力の衰えとともに低下してしまう．このことは活動量を減少させるだけでなく，外出の不安などを引き起こし，ますます身体機能が低下してしまうという悪循環につながっている．身体機能の低下は主に筋力不足が原因と考えられ，米国では1990年代より

＊　基礎技術研究センター
＊＊四輪R&Dセンター

https://doi.org/10.69239/hondatechnicalreview.2009_21_2_7

高齢者においても筋力トレーニングが提言されはじめ，日本にも浸透しつつある[2]．

このような筋力不足をロボット技術で補強したり，さらには筋力を増幅するパワーアシストの研究が盛んになってきた．筋電計や力センサによってヒトの出したい力を計測し，それをアシストで増幅する装置も開発されている[3]．

一方で，同じ運動量の運動でも動き方を変化させるだけで運動負荷を下げられることが報告されている[4]-[7]．動きの中で最初から最後まで力を入れ続けるより，適切なタイミングに力を集中し，後は惰性に任せるような運動が心拍数，血圧，エネルギー消費などの低下をうながすのである[4]-[7]．

歩行においても巧みな重心移動を利用した二軸歩行というものが研究されはじめている[7]．この歩き方は着地した足，膝，股関節，肩甲骨を通る仮想の軸を竹馬のように左右交互に前に進め，上半身と下半身を捻ることなく重心を先導する歩きかたである．最近，体形や筋力的に不利だと言われている日本の陸上選手が，この二軸歩行を走りに採用し，重力や慣性を味方にすることで筋力を補い，世界的大会で好成績をおさめている[8]．

また，脳卒中患者の麻痺した肩と肘の運動再学習訓練で，ロボットが筋力増強のためではなく適切な運動の教示のために使われている[9]．対象物を掴むための肩と肘を使った適切な軌道運動をアシストし，軌道から外れた場合は負荷がかかるような教示訓練において，ロボットを使わない通常訓練よりも症状が改善されることが報告されている[9]．

本研究では，パワーに頼らず，歩き方を効率的なものに誘導し，歩行自体の運動負荷を下げることをねらいとした．さらに，その効果が身体に残り最終的には自力でできるように導くことで，自然に運動量を増加でき筋活動も結果的に活性化できるような好循環につなげることをねらった．これにより，高齢者に元気で生き生きとした生活を送っていただくことを考えた．

歩幅と歩調(歩／分)のバランスは歩行比(歩幅／歩調)と呼ばれているが，この歩行比が 0.0063 近辺から外れると消費エネルギーが高くなることが実験的に確かめられている[10]．Fig. 1は我々がそれを確認した結果である．グラフ上で同じ歩行速度でも歩行比が違うだけで消費エネルギーが異なることがわかる．高齢者では，Fig. 2のように通常速度と最大速度において歩行比が低下する[10], [11]．すなわち，歩行時の消費エネルギーが増大する傾向がある．したがって，効率的な歩行へ誘導するためには，適切な歩行比への誘導が重要となる．このような考えに基づき，本研究では，二軸歩行を基に，身体を前に押し出す推進力をアシストしつつ，また，歩幅と歩調を調整しながら歩行比を誘導するアシスト手法[12]を新たに具現化した．本稿では，このアシスト手法とそれを基に開発したアシスト装置について説明し，高齢被験者による検証結果を報告する．

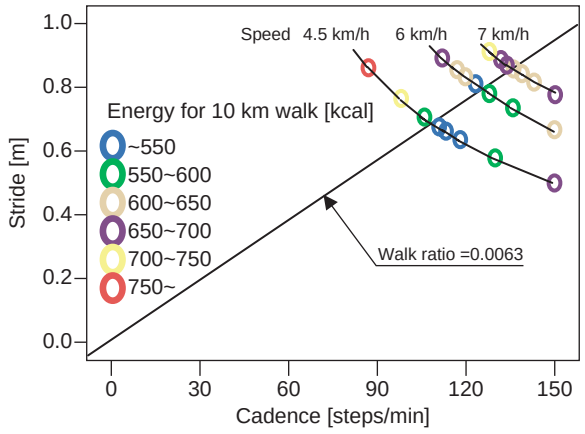


Fig. 1　Map of energy consumption by walk ratio

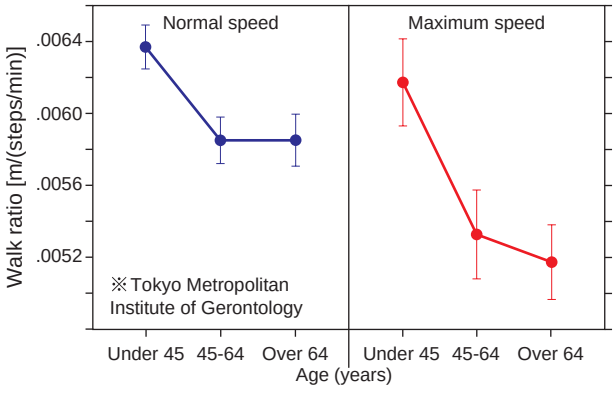


Fig. 2　Change in walk ratio with advancing age

2．アシスト手法

アシスト装置の制御コンピュータ内に，所定のリズムにしたがって歩行運動の軌道を生成するリズムパターン生成器(Rhythm pattern generator)[13], [14]を設け，これに与えるリズムと歩幅を変更する制御フローでアシストを実現した(Fig. 3)．

2.1. ヒトとアシスト装置の相互適応

他者と並んで歩くときに無意識に歩調(cadence)が揃ってしまうことがあるが，これは個々のリズムが互いに影響しあうと新たに全体的なリズムが生まれ，それぞれが意図せずそのリズムに引き込まれてしまう相互適応現象として知られている[15]．本アシスト手法はこの現象を利用し，ヒトとアシストの相互作用の結果生じる新たなリズムにヒトの歩調を引き込む．

動物の歩行などの反射的かつ周期的な運動は，脊髄にあるリズムパターン生成器によって制御されていると考えられている[13]．アシスト装置のリズムパターン生成器はこれをモデル化し，角度センサで計測されるヒトのリズム入力

に適応しながら，反射的かつ所定のリズムでアシスト・パターンを生成する．このリズムがヒトの歩行に同調しつつ，次節で述べる歩行比制御に従って変更され，ヒトの歩調を誘導する．

2.2. 歩行比制御

リズムパターン生成器のリズムは制御コンピュータ内のペースメーカによって生成する．まず，このペースメーカへ角度センサで計測されるヒトからのリズムを入力し，ペースメーカはこの入力リズムに引き込まれ，これに同調して振動する．このとき生成されるペースメーカとリズム入力の位相差を計測する．この位相差は相互適応の結果であり，これを直接制御することはできない[15]．このため，計測された位相差を評価して，アシスト装置の次の一歩のリズムを修正することによって位相差を制御する．この修正されたリズムがペースメーカの次のリズムとなる．

歩行している場所の変化は歩行比の変化で捉え，平地や階段や坂の登りでは装置の位相をわずかにヒトから進

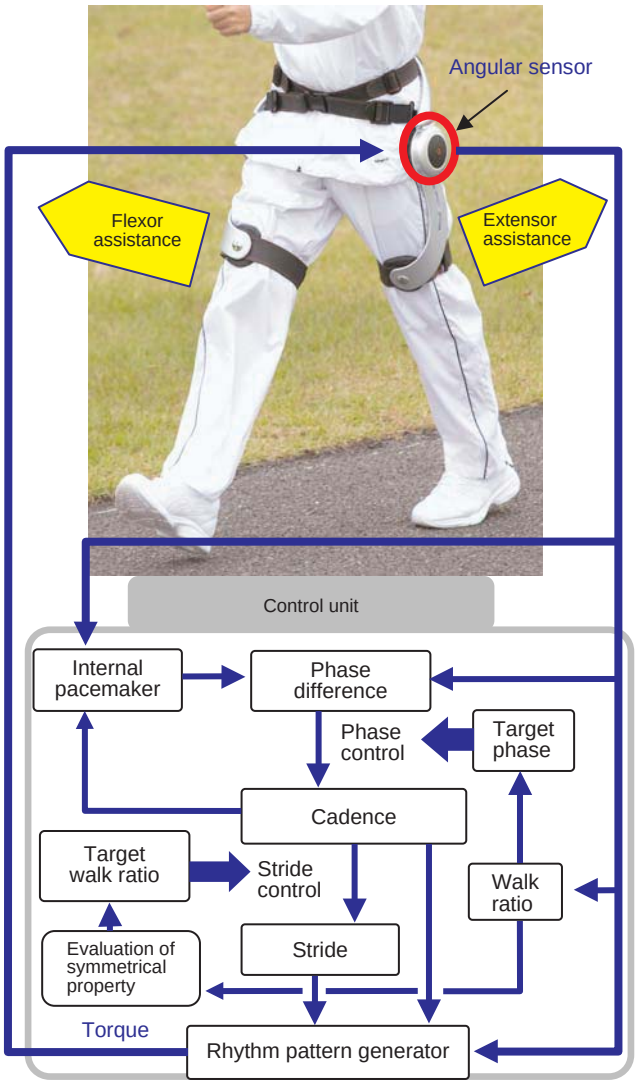


Fig. 3 Control flow for walking assist

みぎみにしてアクセルをかけ，下りなどでは逆に位相を遅らせてブレーキをかけることでヒトの歩調を誘導する．検出した位相差が理想の位相差から遅れている場合はペースメーカのリズムのペースを速め，進んでいる場合は逆に遅らせる[15]．

適切な位相差を設けることによって，ヒトが自力で簡単に止められるほどのわずかなアシスト力で脚を励振しながら，歩幅を制御することが可能になる．ブランコに乗っている子供の背中を押すように脚の振り出しや蹴り出しなどの動作の切り返し時に比較的大きなアシスト力を加え，以後は慣性で動作するために必要なアシスト力は低減する[4]-[6]．

歩幅は位相制御で設定された歩調と理想の歩行比の関係から決定し，目標の股関節角度を導きだす．このとき，左右の非対称が解消されるように歩幅を調整する．そして，大腿フレームでその角度が達成できるようにリズムパターン生成器からトルクを出力する．

2.3. 支持脚アシスト

身体を支持しながら腰を前方へ押し出し重心移動を促進するために，支持脚を後へ押しだすアシストに遊脚を前方へ振り出すアシストを同期させる．この支持脚アシストの反力によって重心を先導させ[7], [16]，それを追いかけるように遊脚が前方に振り出され着地するサイクルを繰り返す．

また，アシストで発生した力が股関節から膝，足首へと順次末梢に伝わることにより[17]，間接的に膝の曲げ伸ばしもアシストする．実際，脚の接地期間(支持脚期)に股関節をアシストすることによって膝伸展が維持され，膝折れを防止する効果も実験的に確認した．かかと接地時点で膝が伸びているように着地前から大腿を後へ押し出すアシストを強化し始める．着地後は膝を伸ばした状態で重心を高い状態に維持しながら上半身を支え，上半身が前方へ倒れこむ力が推進力になる[18]．膝が曲がった状態で着地する場合でも，膝伸展を大腿が後へ押し出されるアシストで補う．大きな筋肉が集まっている股関節廻りで主な推進力を生み出し，それを末梢に伝えていく歩きかた[4]-[6], [17]を本アシストが教師となり，ヒトに文字通り手取り足取り提示し，それをヒトが身体を通して学習することをねらった[12]．

3．アシスト装置

3.1. 機構

歩行アシストを実装するアシスト装置(Fig. 4)は，股関節軸上に配置した2個のアクチュエータ (a) とそれを支持する腰フレーム (b) とそれにワンタッチで着脱できる大腿フレーム (c) から構成する[19]．アクチュエータは，内外転自由度をもつ接合ジョイントを介して腰フレームに固定する[18]．アクチュエータから大腿フレームに伝達されるアシスト力で歩行時の大腿の屈曲／伸展の動きをアシストする．

Fig. 5 に示す小型軽量のアクチュエータは，多極ブラシレスモータと遊星減速機を組み合わせたものである[19]．装着者の腕や歩行中の周りの構造物の障害とならないように薄型である．アクチュエータ内に装備した角度センサによって，ヒトの大腿の屈伸状態を観測する[19]．センサは角度センサのみを搭載する．

腰フレーム内に制御回路やバッテリを格納する(Fig. 6)．Table 1に仕様を示す．股関節だけをアシストする構造とすることで，装置を含めた脚全体の慣性を下げることが可能となり，装置の重量を 2.8kg に抑えることができた．

3.2. フィッティング

装着は，まず腰フレームを腰周りにあてがい，前側のベルト〔Fig. 4 (d)〕を臍下丹田部分でバックルによって固定した後に大腿フレームをベルト〔Fig. 4 (f)〕で大腿周りに固定するだけである．簡単に着脱できることと椅子などへの着

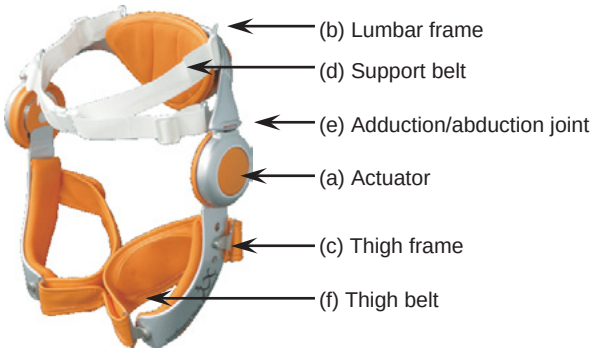


Fig. 4　Overview of walking assist device

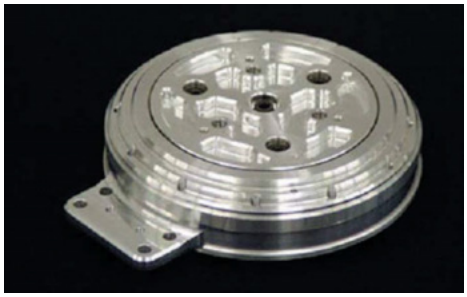


Fig. 5　Low-profile actuator

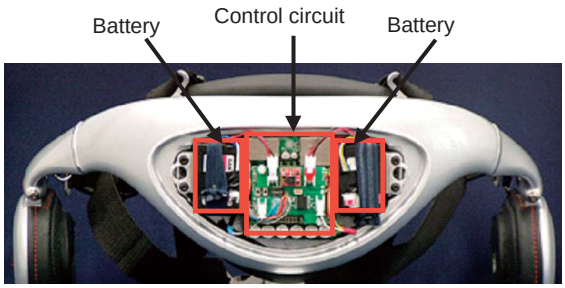


Fig. 6　Layout of control circuit and battery

Table 1　Key specifications of walking assist device

Size	3 sizes (small, medium, large) Distance between motors: (S) 312 mm; (M) 342 mm; (L) 372mm
Weight (kg)	2.8 (medium)
Drive system (motor/reduction ratio)	Brushless DC motor /10
Battery	Lithium-ion battery/ 22.2 V-1 Ah
Operating time per charge	2 hours (when walking at 4.5 km/hour)

座を念頭に大腿フレームは大腿横側から前側だけに設け，後ろ側をベルトで締める構造である．

上側のベルトは骨盤の上側を通り，アシスト力の反力によって腰部フレームが体から離れてしまうのを抑える．アシスト力の伝達効率を維持するため，アクチュエータを支持している腰部フレームを高剛性にし，ヒト身体に触れる内側にクッション材を設けた．腰部フレームをしっかり骨盤に装着できるように前側にベルトを設け，臍下5cmあたりにある丹田を押さえることによって腹圧を上げられる構造である[20]．これは袴の帯を参考にしており，骨盤が前傾状態で安定するとともに背骨が適切な形に誘導され，上半身の重さが骨盤に乗り，ヒトの骨格を通して地面に逃げる効果が古来より知られている．それと同じことを装具でも実現し，歩き出す前の立位の状態で楽な姿勢を整えた後にアシストを稼働させるように考えた．

加齢による体型変化や多様な体型に適応するため，腰フレーム，大腿フレームそれぞれをS，M，Lの3サイズ用意し，装着者の体型に一番近いものを9通りの組み合わせから選ぶようにした．これによって日本人の成人の95%が装着可能である[21]．これら2種類のフレームにサイズ調整機構を設けると機構が複雑になり，重量も増加する．それを避けるために9通りのサイズを用意した．

3.3. デザイン

デザインにあたっては，テーマを「ウェアラブル・マンマシン・インターフェース」とさだめ，ヒトと装具の一体感を最重視した．介護施設や公園など実環境下での運用を想定し，高齢者にも簡単に装着して外出できるように配慮した．ヘッドフォンやウエストポーチのようにシンプルでわかりやすい意匠を目指した(Fig. 7，8，9)．

腰廻りは，バックルやウエストベルト，サポータ類の構成により，丹田を中心に締めぐあいを調整する基本レイアウトを採用した[20](Fig. 4)．

ヒトはさまざまな素材や形態の服装を着て外出する．そして，ヒトによって体格や体形によるプロポーションの違



Fig. 7 Design proposal



Fig. 8 Color variation model

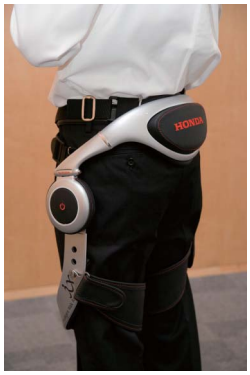


Fig. 9 Walking assist device

いも大きい．また，このような装着型の装具を身に付けることへの抵抗感にも個人差がある．このようなヒトと装具の物理的かつ心理的なズレや違和感を限りなく少なくすることをねらい，ヒトと装置が使われる環境と調和できるようなスタイリングにまとめ表現した．また，年齢性別を問わないスタイリングを心がけた．

4．検証実験

アシスト装置を高齢被験者が装着し，短期的誘導効果[11),19),22)]と長期的誘導効果[11),19)]を歩行パターンと筋活動の変化で検証した．本検証にあたって，東京都老人総合研究所の倫理委員会の承認を得た．

4.1. 短期的効果の検証

平均年齢 76 ± 2 歳の男性高齢被験者 10 人が装置を装着し，トレッドミル上を時速 4km/h で 50 分間歩行したときの歩行パターンと筋活動の変化をアシストの有無で比較した．Fig. 10 は被験者がアシスト装置を装着している写真である．

4.1.1. 歩行比誘導能力の検証

被験者の歩行比をあらかじめ計測したところ，平均で約 0.005 であり，前述のとおり 0.0063 より低い傾向にあった．歩行比の誘導能力を確認するために，歩行比の個人差にかかわらず，あらかじめ計測した値に一律 0.0005 加えた値を目標歩行比として，アシストによる歩行比の誘導効果を検証した．Fig. 11 に示すように，10 名中 9 名において歩行比を目標近くに導くことができた．

4.1.2. 筋肉活動の評価

アシストが筋活動にどのような影響を及ぼすのかを把握するために，トレッドミル上での歩行後に筋活動による糖代謝をポジトロン断層検査装置で計測した．この装置によって，歩行中の筋肉活動の累積を歩行後でも把握できる．アシストによって使われる筋肉のバランスが変化し，アシ



Fig. 10 Experiment with elderly adult

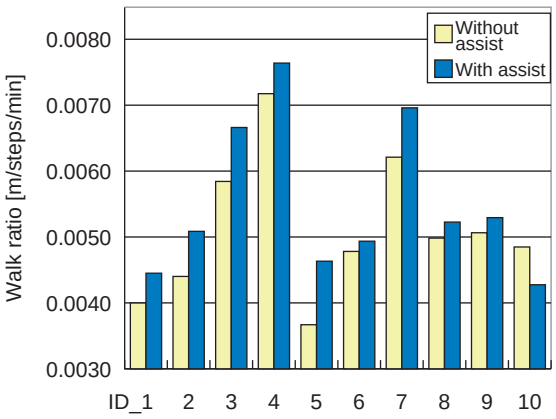


Fig. 11 Result for control of walk ratio

ストしている股関節周辺や腰廻りの筋肉活動の増加を期待した．

Fig. 12が代表的な被験者の例である．左側が非装着で，右側が装着したときの筋肉の活動を可視化したものであり，色が赤いほど活動が高いことを示す．臀部の筋肉活動の向上は認められたが，支持脚期に脚を後に押し出すための大腿後側の筋肉群の活動が低下しており，アシストがこの筋肉の負担を減少させたと考える[11]．臀部の筋肉は，接地側の反対の骨盤が下がらないように維持するために働くと言われており，歩幅の拡大に呼応して活動が増加したと考える[11]．

4.2. 長期的効果の検証

歩行比の誘導能力が確かめられたので，短期装着実験とは別の女性高齢者 13 名(平均年齢 78 ± 2 歳)を対象に，毎週２回体調に合わせて 30 分から 40 分間，歩行アシスト装置を装着して野外を歩行する実験を５ヶ月間実施した(Fig. 13)．被験者の実験開始前の平均歩行比は約 0.004 であり，毎回歩行比を 0.0005 加えた歩行比を目標として，定期的にアシストを利用することによる誘導の残存効果を検証した．

4.2.1. 歩行の評価

Fig. 14が実験開始前と３ヵ月後のアシスト装置非装着状態での歩幅，速度，歩調の比較結果である．13名のうち11名の歩幅の拡大と12名の速度の向上が確認でき，アシストによる誘導の残存効果が確かめられた．しかしながら，歩幅が広がって緩やかになるはずの歩調が速まったため，歩行比の上昇は認められなかった．また，３ヵ月後と５ヵ月後の結果に大きな差はなかった[11]．

長期実験期間中の途中の推移を見ると，歩幅の拡大は実験１－２回目にだけ見られ，その後大きな変化が無かったこと[11]から考察すると，本アシストには即時効果があるといえる．

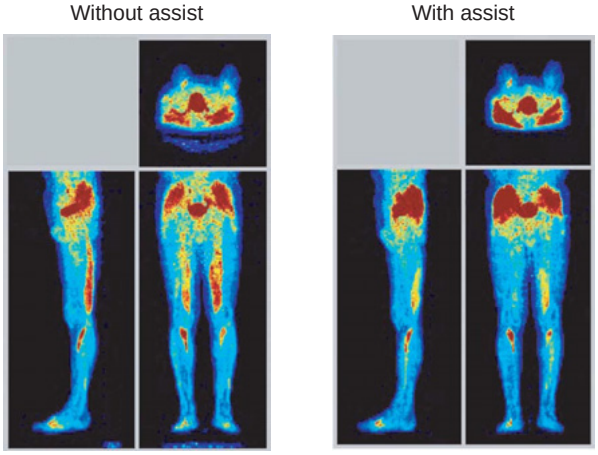


Fig. 12　Positron emission tomography muscular images

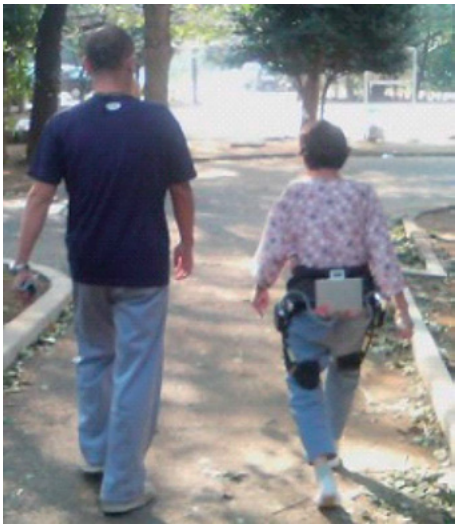


Fig. 13　Open-air long-term application for elderly subject

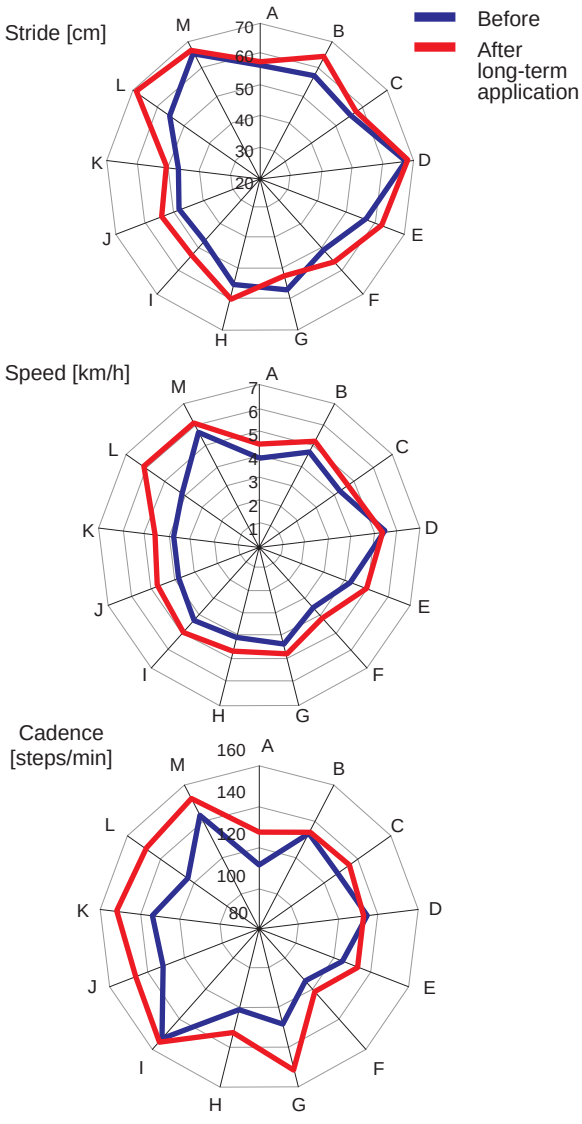


Fig. 14　Comparison of walking parameters before and after long-term application

4.2.2. 筋肉活動の評価

実験開始前と５ヵ月後のアシスト装置非装着状態での代表的な被験者における筋肉活動のポジトロン検査画像の比較を Fig. 15 に示す．速度が上昇しているので支持脚期に脚を後に押し出すための大腿後側の筋肉の活動が高まっていると考えられ，実際その傾向があった[11]．この筋肉の活動によって，推進方向への重心移動が促進され歩幅や速度の増大につながったと考える．また，各筋肉の詳しい活動増加率を調べると，膝を伸ばして身体を支える大腿前側の筋肉の活動が17%も低下しており，大腿後側の筋肉活動の向上が膝の負担を減らしていると考える[11]．日本人は骨盤が後傾傾向にあり，大腿前側の筋肉に負荷が集中する傾向にある[8]．本実験では，ねらいどおりに大腿後側も使えるようになっており，本アシストが筋活動のバランスをも効率化する可能性があることを示唆している[11]．

短期の調査のときの結果と違い，膝下の筋肉の活性が増加したが，この被験者は元々この筋肉を使った歩きをしていた．この筋肉は支持脚期に膝下を後方へ引き付け，膝伸展を維持しながら大腿が膝下より速く前方へ動くときに活動することが知られており[18]，大腿後側筋肉の活動の増加に応じて活動が高まったと考える．支持脚期に骨盤を安定させる腰廻りの筋肉活動に低下が見られたのは，歩調が速まったため支持脚期間が短くなったからだと考える．

4.2.3. 単位距離あたりの消費エネルギーと心拍数変化

屋内コースをアシストなしで12分間歩行したときの，単位時間あたりの平均消費エネルギーと平均心拍数を歩行距離で除した，単位距離あたりの平均消費エネルギーと平均心拍数の長期適用開始前からの増加率をFig. 16に示す．このように歩行距離で除したのは長期実験の前後で歩行速度が異なるからである．消費エネルギーの計測には呼気分析装置を使用した．

速度が増加したことにより，当然消費エネルギーは増加したが，それにもかかわらず，心拍数が５ヵ月後に７%低下する結果となった．心拍数の低下は心臓の負担の低下を反映していることを考慮すれば，運動量が拡大して消費エネルギーが増加しても心拍数を低く抑えられることを意味している．これは楽に運動量を拡大できるということである．

運動量が増え消費エネルギーが増加するのにも関わらず，心拍数が下がる現象はすでに報告されている[5]．これは筋活動の促進により楽に仕事がおこなわれるのと，筋肉が第二の心臓として血流ポンプとなり，循環系機能に与える負担が少なくなるからだと考えられている[5]．

ウェイトトレーニングにおける力の入れ方による比較においても，最初から最後まで力をかけるより，動作の切り返えし時だけ力を入れ，後は惰性にまかせたほうが，心拍数や主観的運動負荷が低いことが報告されている[4]-[6]．このような動きかたをすると筋肉の緊張時間が短縮し，その分リラックスする時間が延長するためと考えられている[4]-[5]．本アシストは同様の効果を生んでいる可能性があり，今後筋電計測などにより詳しく検討したい．

4.2.4. 主観的コメント

被験者からは，アシスト装置を装着しない状態でも「楽である」，「気持が軽くなった」，「歩くのが楽しい」，「以前より速く歩けるようになった」，「今まで以上に長時間歩けるようになった」といったコメントが聞かれた．

心拍数の低下は心臓の負担の低下を反映しており，これらの被験者のコメントを裏付けていた．これにより，楽に運動量を増大し，身体機能を維持・向上するための自立支援ツールとしての本アシストの価値を提案できるのではないかと考えている．

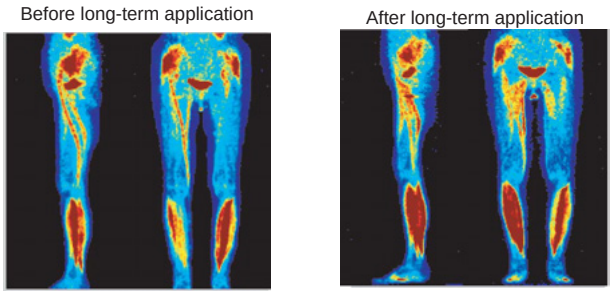


Fig. 15 PET comparison of muscular activity before and after long-term application

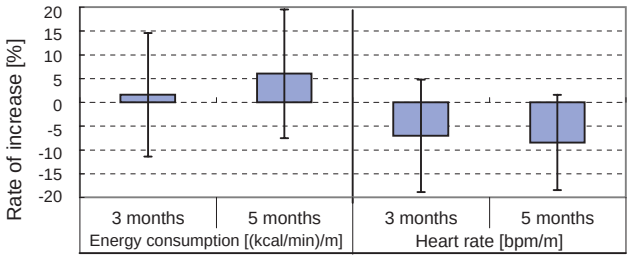


Fig. 16 Rate of increase in energy consumption and heart rate

5．まとめ

様々な歩行要素のうち，特に歩行比を指標とし，重心移動を促進しながら，それを誘導する股関節アシスト手法とそれを基にアシスト装置を開発した．高齢被験者での短期装着実験で，装着しているときの歩行比を目標どおり誘導しつつ，筋肉の負担を減少させるというアシスト効果が確かめられた．長期の定期的装着実験後，非装着の状態でも歩幅や歩行速度の増加が維持できていることを確認した．その際，大腿を後に蹴る筋肉の活動が増大し，膝を支える筋肉の一部の活動が減少している傾向があり，本アシストが筋活動のバランスも改善している傾向が確認できた．長期実

験後の計測では実験開始前と比較して運動量が拡大したのにもかかわらず，心拍数は低下しており，被験者の主観的な運動負荷の低下と相関があった．

６．あとがき

本アシスト手法は，ヒトの運動学習能力を基にヒトとアシスト装置の相互適応を特徴としている．その延長として脳卒中やパーキンソン病などの脳疾患，あるいは脊髄損傷で引き起こされる歩行障害にも適用可能と期待され，現在その価値検証を複数のリハビリテーション病院で進めている．今後，アシストの筋肉活動への影響だけでなく，姿勢への影響や歩行障害における脳・中枢神経系の再組織化などについても解析を進めていきたい．

なお，本アシスト装置を 2007 年の国際福祉機器展を皮切りに，バリアフリー 2008 やウェルフェア 2008 などの国内のいくつかの福祉機器展に出展した．

謝　　辞

現在に至るまで，実験の被験者や展示会で貴重なコメントをくださった体験者を含め，多くの方々にご協力いただいた．心より感謝を申し上げる．

特に東京工業大学大学院総合理工学研究科の三宅美博准教授には，アシスト装置とヒトの間の相互作用を考慮しながらヒトと同じ時間スケールで装置を動かす制御手法をご指導いただいた．その他，ワコール人間科学研究所，東京都老人総合研究所，中部ろうさい病院･労災リハビリテーション工学センターなどの多くの専門家の方々からもご教示いただいた．この場を借りてお礼を申し上げる．

参考文献

（１）総務省統計局ホームページ，http://www.stat.go.jp/data/topics/topi321.htm,2008/9/15

（２）根本勇，青山正恵，柳田美佳，松垣紀子，山川純，黒田善雄，木村靖夫，古武裕，樋口満：中高年齢者の健康増進のためのレジスタンストレーニングに関する研究，Journal of Exercise Science, Vol.4, p.29-38(1994)

（３）中井隆雄：表面筋電位を用いたパワーアシスト制御手法の開発と歩行支援用パワーアシスト脚 HAL －３の構築，筑波大学大学院博士課程，システム情報工学研究科，知能機能システム専攻，修士論文（2002）

（４）中村夏実，根本勇，小山裕史，黒田善雄:血圧の連続測定からみた中高年齢者のレジスタンストレーニングの安全性，デサントスポーツ科学，Vol.19, p.104-115(1998)

（５）根本勇，中村夏実，小山裕史，大門芳行，鈴木朋美，岩竹淳，黒田善雄:初動負荷トレーニングの科学的基礎，体育の科学，49 巻，p.147-156(1999)

（６）萩田太，小山裕史，藤原博康：ウェイトトレーニング法の違いが呼吸循環反応と関節可動域へ与える影響，トレーニング科学，Vol.7, No.2, p.77-84(1995)

（７）小田伸午：運動科学，丸善出版，p.225(2003)

（８）高野進:日本人のための二軸走法，スキージャーナル，p.128(2007)

（９）Volpe, B.T., Krebs, H.I., Hogan, N., Edelstein, L., Diels, C., Aisen, M.: A novel approach to stroke rehabilitation, Robot-aided sensor motor stimulation, Neurology, Vol.54, p.1938-1944(2000)

（10）長崎浩：動作の意味論，雲母書房，p.281(2004)

（11）鈴木隆雄，平田崇，及川清志，遠藤洋介，安原謙，島田圭，菊池敬士郎，井土哲也，仲貴子，木村裕一，石渡喜一，石井賢二，清水孝彦，島田裕之，古名丈人，逸見治：高齢者に対する歩行アシストロボットの効果検証研究，平成 17 年度～平成 18 年度，東京都老人総合研究所・本田技術研究所共同研究，p.113(2007)

（12）安原謙，島田圭，平田崇，菊池敬士郎，三宅美博：歩行支援ロボットによるヒト歩行運動の発達，第六回認知運動療法研究会学術集会，予稿集，p.41(2005)

（13）Taga, G., Yamaguchi, Y., Shimizu, H.: Self-organized control of bipedal locomotion by neural oscillators in unpredictable environment, Biological Cybernetics, Vol.65, p.147-159(1991)

（14）東嶋和子：脊髄損傷という足かせから解き放たれる日へ（３）ロボット技術でリハビリを支援，メディカルバイオ，11 月号，p.64-69(2007)

（15）三宅美博，宮川透，田村寧健:共創出コミュニケーションとしての人間‐機械系，計測自動制御学会論文集，Vol.37, No.11, p.1087-1096(2001)

（16）上田淳，白榮健司，小田伸午，小笠原司：コンタクトスポーツ上級者の骨盤回旋運動を規範にしたヒューマノイドロボットのモーメント補償高速歩行，日本ロボット学会論文誌，Vol.23, No.4, p.75-83(2005)

（17）鈴木秀次，藤森健，吉田雅司，小山裕史：初動負荷トレーニング動作のバイオメカニクスと神経筋制御，バイオニクス研究，Vol.9, No.1, p.26-33(2005)

（18）Goetz-Neumann, K., 月城慶一，山本澄子，江原義弘，盆子原秀三訳：観察による歩行分析，医学書院，p.186(2005)

（19）及川清志：歩行アシスト，人と共存するクルマとロボットフォーラム，予稿集，p.7-11(2008)

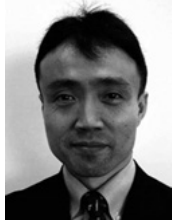
（20）ワコール人間科学研究所：スパイラルエイジング，株式会社ワコール広報室，p.98(2000)

(21) 生命工学工業技術研究所：設計のための人体寸法データ集，通産省産業工業技術院生命工学研究所，p.219 (1994)
(22) Shimada, H., Suzuki, T., Kimura, Y., Hirata, T., Sugiura, M., Endo, Y., Yasuhara, K., Shimada, K., Kikuchi, K., Oda, K., Ishii, K., Ishiwata, K.：Effects of an automated stride assistance system on walking parameters and muscular glucose metabolism in elderly adults, British Journal of Sports Medicine, Vol.42, p.622-629(2008)

■著　者■


安原　謙


島田　圭


小山泰司


井土哲也


菊池敬士郎


遠藤洋介

ディーゼル燃焼音の改善
― 主成分回帰法を用いた伝達経路解析の適用 ―

Enhancement of Diesel Combustion Noise for Interior Sound Quality
– Transfer Path Analysis Using Principal Component Regression Method –

久 野 泰 宏*　　平 出 玲 子*
Yasuhiro HISANO　　Reiko HIRAIDE

要　旨

2009 年モデル ACCORD ディーゼル開発において，車室内で聞こえるディーゼル燃焼音を改善するために，エンジンから車室内に至る燃焼音の伝達経路に着目した解析をおこなった．伝達寄与を解析するにあたり，主成分回帰法を用いた伝達経路解析を適用した．まず燃焼音で課題となった，920-2300 Hzの放射音による空気伝播の寄与度と振動伝達の寄与度を解析し，次に振動伝達成分の入力経路を確認した．その結果，従来空気伝播が主と考えられてきた高周波帯においても振動伝達成分の影響が大きいことが判明した．伝達寄与解析の結果を基に室内音改善の検討をおこなったところ，マウント振動を抑制することで伝達成分が減少し車室内の燃焼音を改善することができた．

ABSTRACT

An analysis focusing on the transfer paths of combustion noise from the engine to the interior of the cabin was conducted in order to enable enhancement of audible in-cabin diesel combustion noise during the development of the 2009 model year ACCORD diesel. Transfer path analysis using the principal component regression method was employed to analyze the degree of contribution to noise transfer. First, the airborne and structure-borne contribution for 920-2300 Hz radiation noise, which represents an issue from the perspective of combustion noise, was analyzed. Following this, the input paths for the structure-borne component were determined. As a result, it was judged that despite the fact that airborne transfer has been regarded as the major factor in the case of the high-frequency band, the structure-borne component also has a profound effect. Methods of enhancing interior sound were examined based on the results of the contribution analysis. Reducing the transferred components by controlling vibration in the mounts has enabled enhancement of combustion noise in the cabin.

１．まえがき

近年の乗用車用ディーゼルエンジンには，高出力や低燃費と厳しい排気ガス規制への対応が求められている．またあわせて，ディーゼルエンジンが搭載された自動車の商品性において，低騒音化とともに車室内の音質改善が求められてきている．

ディーゼルエンジンでは，車室内の音質にもっとも影響している音は，燃焼加振力に起因するディーゼル燃焼騒音（以下，燃焼音）である．従来，燃焼音の改善は，パイロット噴射とメイン噴射による燃焼適合で燃焼加振力を低減する方法が主であった．しかし，燃焼適合において騒音と燃費および排気ガスエミッションは相反する関係にあり，市場からの燃費向上の要求や排気ガス規制の要求が高くなるにつれ騒音低減の余地は少なくなっている．

本報告では，燃焼適合にたよらない対策の検討をおこなうために，伝達系による対策に着目した．そこで，燃焼音に主成分回帰法を用いた伝達経路解析[1]（以下，PCR-TPA）を適用し，結果より判明した伝達経路内のエンジンマウント構造に振動抑制をほどこして燃焼音を改善した事例を紹介する．

＊四輪R&Dセンター

https://doi.org/10.69239/hondatechnicalreview.2009_21_2_8

2．燃焼音の音質，特徴とこれまでの対応

燃焼音は，車室内の音色で，ガラガラ，チリチリといった変動感を伴って発生する音である．その音色は，エンジン回転や負荷，オイルや吸入空気の温度といった条件の変化により，発生する領域とレベルが変化する．

車室内音の音色解析結果を Fig. 1 に示す．完成車での燃焼音が発生の大きい場合と発生の小さい場合の比較を示す．

Fig. 1は，縦軸に社内で作成し定量化された音色指標[2),(3)]である音の変動強さを表し横軸に臨界帯域幅[3)]を示す．

これにより，燃焼音は，920-2300 Hz帯域の高周波領域(本報告では，920Hz以上を高周波とする)で発生する音であることがわかる．

従来，高周波の車室内音の低減に際しては，吸遮音材による空気伝播の改善が主であった．その理由は，1 kHz を超える周波数帯は，周波数が高くなるほど車体感度が下がってくることと，振動振幅が小さくなることの相互作用により，振動伝達がされにくいと考えられてきたからである．したがって，開発の中で有効な手段として，吸遮音材の追加適用が進められてきた．

しかし，従来の開発の中で，吸遮音材の追加適用だけでは車室内音は満足できる改善が得られないこともあった．そこで，燃焼音の車室内への進入経路を根本的に解析する必要性を感じ，PCR-TPA を用いた解析をおこなうこととした．

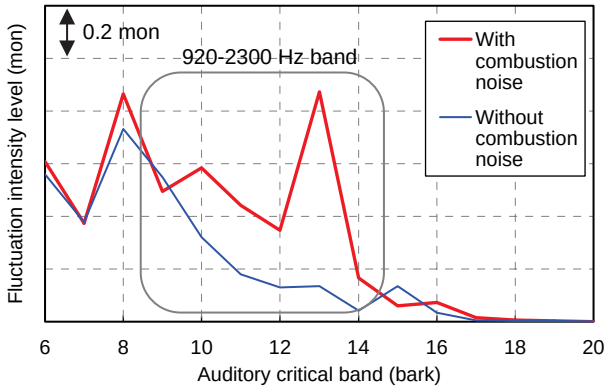


Fig. 1　Interior sound quality

3．PCR-TPA による車室内音の解析

3.1. PCR-TPA 解析の特徴と計測方法

伝達経路解析と呼ばれる解析技術は，これまで複数の手法が提案されている．これら提案された手法の多くは一般的に，実運転時の振動伝達成分と空気伝播成分を同時に計測し，それぞれの成分に分離することは困難である．音響加振力であるエンジン放射音が，構造体である車体におよぼす影響を知る方法として，エンジンと車体間の一点の音圧信号を参照点に用いると，参照点の音圧信号は同一にもかかわらず音波の方向や音源の大きさの違いにより，構造体への加振力が異なってしまう場合がある．このような場合，参照点の音圧信号と応答点の室内音とから算出する伝達関数において，加振力の影響を正確に把握できず，本来の値が得られない事象が発生し得る．この課題を解決するために一般的に用いられるのは，模擬音源を使っての加振実験である．振動伝達成分と空気伝播成分を精度よく得たい場合は，加振実験と実運転時の実験を併用しなければならず，実用性に欠ける場合がある．しかし，実運転時に振動と音を同時に計測し，それぞれの成分に分離し解析する手法として，PCR-TPA 技術が提案[1)]されている． PCR-TPA 解析を用いて寄与解析をすることで，空気伝播成分と振動伝達成分を精度よく分離し，燃焼音の車室内への進入経路を明確にすることが可能であると考え本解析に適用した．なお，寄与解析は，伝達経路解析で得られた空気伝播成分や振動伝達成分が，車室内音に占める割合を算出する方法である．

計測は，４ドアセダンの直列４気筒ディーゼルエンジンを搭載した 2008 年モデルの ACCORD の車両を使用した．データの測定点は，振動入力による固体伝達経路と音響加振力による空気伝播経路を合わせて，Fig. 2に示すような経路に対して振動と音の参照点を設定し，応答点は，助手席にダミーヘッドマイクロフォンを搭載し左右耳位置の２箇所とした．車両は，台上試験装置に設置し，エンジン負荷条件を変更しすべての参照点と応答点を同時計測した．

ディーゼルエンジンは，負荷や温度条件により燃焼が変化していき，それに伴って音色も変化していく特徴を有している．本解析では，それらの変化に対しての検証をおこなうために，暖機過程と暖機後の解析をすることとした．ここで，暖機過程とは，エンジン水温が60℃，暖機後はエンジン水温が約 80℃以上の条件とする．

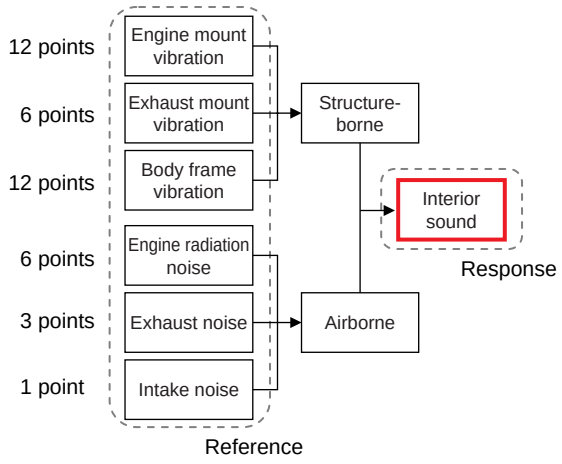


Fig. 2　Measurement setup for PCR-TPA

3.2. 空気伝播成分と振動伝達成分

Fig. 3 に，PCR-TPA により合成された暖機後の車室内音を空気伝播成分と振動伝達成分に分離した結果を示す．

燃焼音帯域である 920-2300 Hz 帯の騒音は，振動伝達成分の寄与が高いことが明確になった．

特に振動伝達成分の寄与が高い周波数は，1.3 kHz帯と1.8 kHz 帯である．1.8 kHz 帯は，Fig. 4 に示すように暖機過程と暖機後でレベルの変化が大きい．

3.3. 振動入力経路の特定

解析の結果伝達経路は，配置された全マウントのうち，トランスミッションマウント（以下，Tr-Mt），およびアッパートルクロッドマウント（以下，Up-Mt）の二つのマウント（以下，Mt）らが主であることが判明した．また，Up-Mtでは，暖機過程と暖機後で伝達されるレベルが変化することも確認された．車室内における音の全構造伝達成分と Tr-Mt の振動伝達成分の比較を Fig. 5 に，Up-Mt の伝達成分との比較を Fig. 6 に示す．

周波数 1.3 kHz 帯に，Tr-Mt の振動伝達成分の寄与が高い帯域があり，車室内音へ大きな影響を与えている．Tr-Mt は，暖機過程も暖機後も入力されるレベルの変化は少ない．

周波数 1.8 kHz 帯に，Up-Mt の振動伝達成分の寄与が高い帯域があり，暖機過程の車室内音へ影響を与えている．Up-Mt は，暖機過程と暖機後で振動伝達成分のレベルに変化が見られる．

Up-Mt において，暖機過程と暖機後で振動伝達成分のレベルに変化が見られるのは，加振力である燃焼の高周波成分が暖機過程と暖機後で変化しているためと考えられる．

これまではこの高周波の加振力の変化に影響を受ける伝達経路の特徴が明確になっていなかったために，伝達経路内での燃焼音に対する有効な改善策につながってこなかった．

しかし，本解析により車室内音の高周波成分へも振動伝達成分の存在が明確になったこと，伝達経路も特定できなおかつ燃焼の変化とともに振動伝達経路も変わっていくことが明確になったことで，それらに対する有効な改善策が検討可能になった．次に，振動伝達経路での改善による燃焼音の低減手法の検討をおこなう．

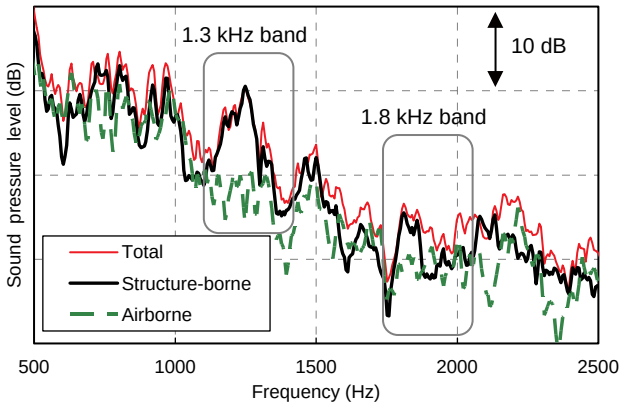


Fig. 3　Comparison of structure-borne and airborne contribution for in-cabin noise

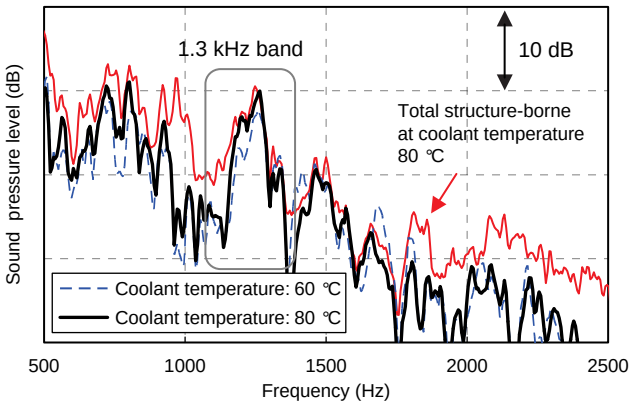


Fig. 5　Tr-Mt contribution to structure-borne noise

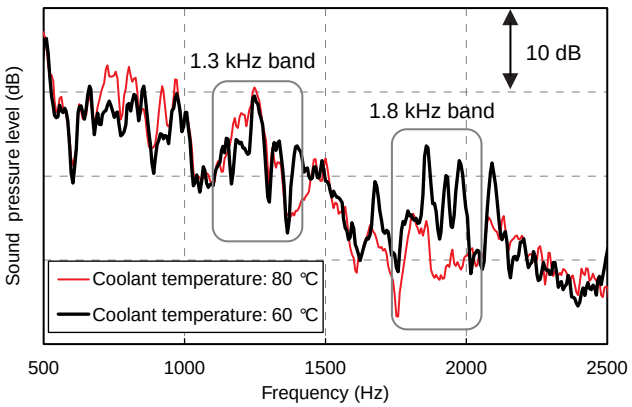


Fig. 4　Comparison of structure-borne noise by engine cooling water temperature

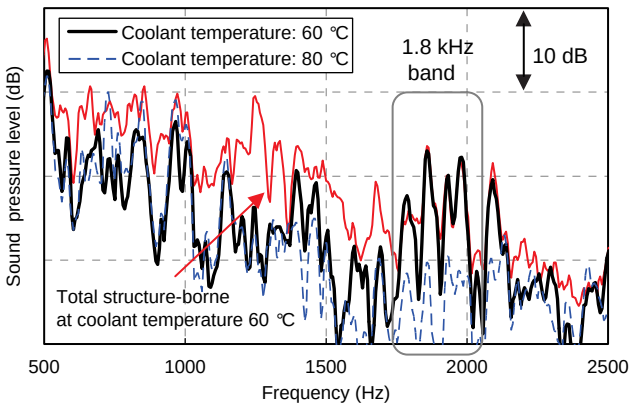


Fig. 6　Up-Mt contribution to structure-borne noise

4．振動入力の低減手法の検討と完成車改善効果

4.1. 車室内音の低減予測

PCR-TPA解析で得られた伝達成分を，経路ごとに特性を変えて室内音を再合成し，その再合成した音を聴感および音質解析にて評価するという手法を用いて，室内音の目標値を作成した．

実機計測の車室内音と再合成後の車室内音から音色解析した結果の比較を Fig. 7 に示す．この加工後のデータは，Tr-Mt 振動の 1.3 kHz 帯を変化させて得られた結果である．

Mt振動の変化により，燃焼音の音色が変化することが確認され，目標とする低減量も明確になった．また，Up-Mtに関しても同様に低減量を明確にした．

4.2. Mt ブラケットの振動伝達成分の改善

解析により，伝達経路の中で振動を変化させる要因が，Tr-Mt と Up-Mt のエンジンマウントブラケット(以下，BRKT)の形状にあるとわかった．

BRKT は，主にその形状による動的特性で，エンジンより入力された振動が増減する．高周波域の振動低減のために，その特性を利用し改善検討をおこなった．

Tr-Mt の図を Fig. 8 に，Up-Mt の図を Fig. 9 に示す．

課題となった周波数において，それぞれの BRKT に共振が存在することが判明した．特定されたモードは，以下の通りである．

(1)1.3 kHz 帯：Tr-Mt BRKT の左右方向への倒れモード
(2)1.8 kHz 帯：Up-Mt BRKT のねじれモード

主要因となるモードを特定したことから，それぞれの BRKTに振動抑制の改善策をほどこし応答低減をはかった．

改善策の適用前後で PCR-TPA 解析をおこない，車室内の Tr-Mt と Up-Mt の振動伝達成分を分離した結果を，Fig. 10 と Fig. 11 に示す．Fig. 10 は，暖機後，Fig. 11 は，暖機過程の結果を示す．

車室内音の各 Mt 振動伝達成分における改善効果は，以下の通りである．

(1)1.3 kHz 帯の Tr-Mt 振動伝達成分が約 15 dB 低減した
(2)1.8 kHz 帯の Up-Mt 振動伝達成分が約 10 dB 低減した

4.3. 完成車改善効果確認

最終的な効果検証にあたっては，改善策の適用有無で完成車室内音の計測をおこなった．

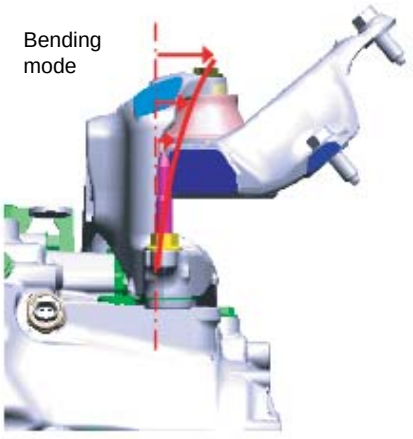


Fig. 8 Tr-Mt

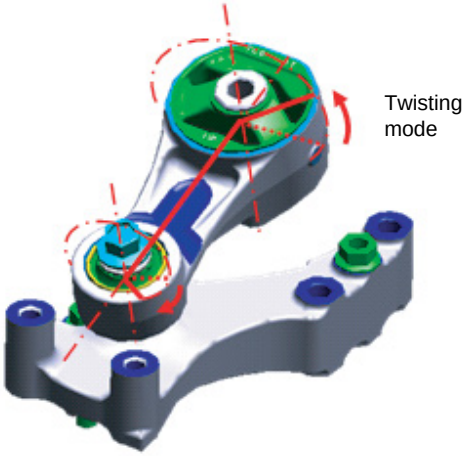


Fig. 9 Up-Mt

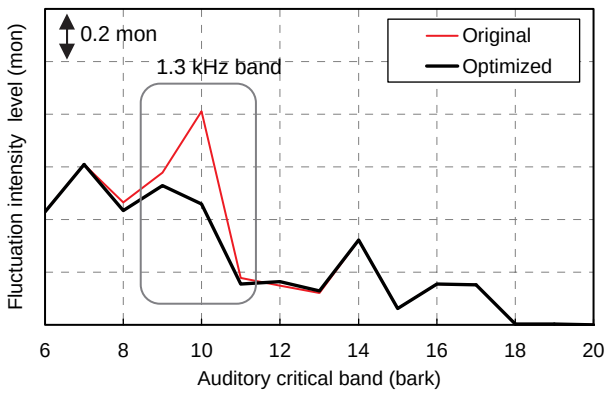


Fig. 7 Target value for optimized interior sound

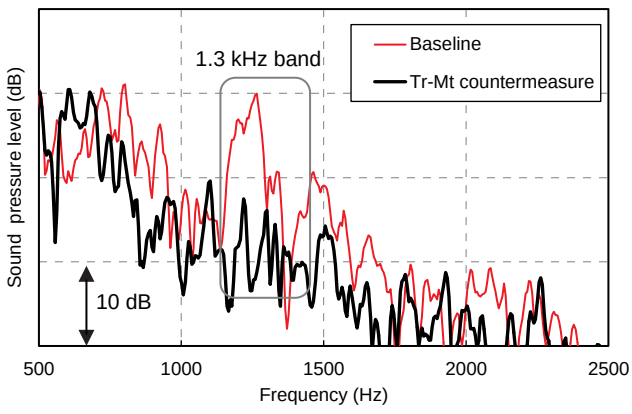


Fig. 10 Effect of Tr-Mt countermeasure on Tr-Mt's structure-borne contribution to interior sound

Fig. 12に，車室内の燃焼音の計測結果を示す．Fig. 12は，暖機過程の結果を示す．

車室内の燃焼音は，伝達経路であるエンジンMt　BRKTの振動抑制により，920-2300 Hz 帯の変動感が改善された．特に 1.3 kHz 帯(10-11 Bark)と 1.8 kHz 帯(13 Bark)の低減が大きい．車室内音で聞こえる燃焼音の帯域である 920-2300 Hz帯の振動伝達成分は，改善策により低減し，車室内のフィーリングも向上した．

この結果により，燃焼音の改善に振動伝達成分の抑制が効果的であることが明確になった．

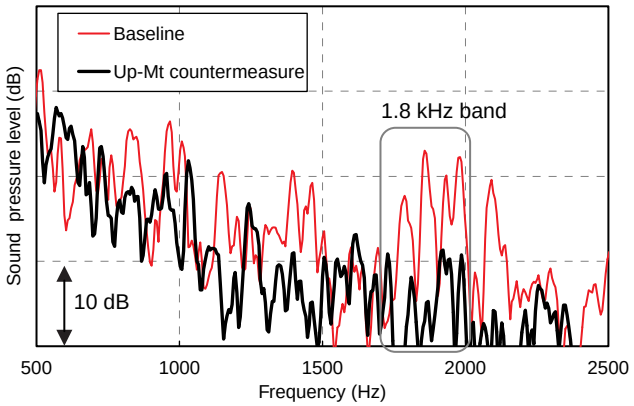


Fig. 11　Effect of Up-Mt countermeasure on Up-Mt's structure-borne contribution to interior sound

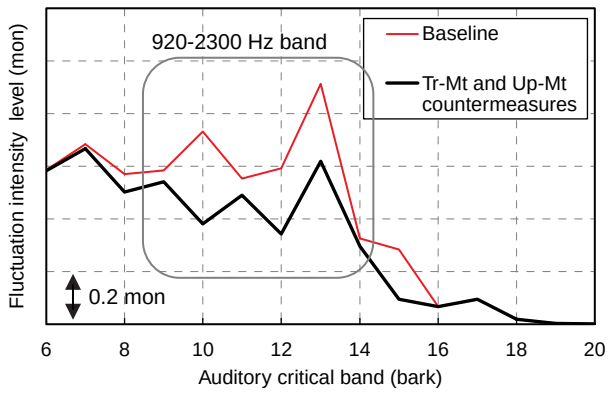


Fig. 12　Results of analysis of interior sound

5．まとめ

伝達経路解析を用いた結果，以下の知見が得られた．

(1)車室内で聞こえるディーゼル燃焼音は，空気伝播成分だけでなく振動伝達成分の影響もあることが明確になった．

(2)エンジンマウント点振動を抑制することにより，伝達成分が減少し車室内での燃焼音フィーリングが向上した．

(3)PCR-TPA 解析が燃焼音に対し有効であることがわかった．

参考文献

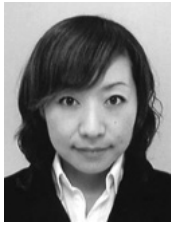
(1) 能村幸介，吉田準史：主成分回帰法を用いた車内音の伝達経路解析手法，Honda R&D Technical Review, Vol.18, No.1, p.136-141

(2) 能村幸介，吉田準史：市場の違いを考慮した自動車室内音質の定量化，自動車技術会論文集 Vol.34, No.4, p.187-193(2003)

(3) 能村幸介，岡田義裕：聴覚特性を考慮した自動車音質評価手法，HONDA R&D Technical Review, Vol.9, p.131-139

■著　者■





久野泰宏　　平出玲子

熱電素子を利用した車両用廃熱回生技術と燃費改善

Heat Recovery Technology of Automobile Using Thermoelectric Element and Its Effect on Fuel Economy

森　　正芳*
Masayoshi MORI
服部　　真*
Makoto HATTORI
山上　　武*
Takeshi YAMAGAMI
原口友秀*
Tomohide HARAGUCHI
織田信之*
Nobuyuki ODA
空澤光将*
Mitsumasa SORAZAWA

要　旨

自動車の排気熱エネルギーを対象とする熱電素子を利用した廃熱回生システムの開発に先立ち，現状の技術レベルの把握，課題，鍵となる技術を抽出するためのシミュレーション手法を開発した．

車両の燃費は，発電電力による正の効果だけでなく，それに伴う重量，背圧の増加によって，負の影響も受ける．熱電技術を生かしきった燃費効果は，これら因子が最適にバランスされた上に存在し，これらを最適化するための指針の構築もおこなった．

結果，既存の熱電素子を使った廃熱回生では，ほとんど燃費を向上させることができないことが明らかになった．燃費を改善するためには，100℃から350℃の間で性能を発揮する素子が必要であることが明らかとなり，新しい素子の開発が鍵となることがわかった．また，使い方としては，シリーズハイブリッドのように，エンジンを定点運転するほうが，一般的な車より２倍程度燃費効果が高いことも明らかとなり，素子の開発，最適な車の選定，排気系の断熱対策を含めると，３%以上の燃費改善を達成する可能性のある技術であるとの見解を得た．

ABSTRACT

Prior to the development of a heat recovery system using thermoelectric elements for automobile exhaust heat energy, simulation methods were developed to understand the current technical level and extract issues as well as key technologies.

Generated power not only has a positive effect on automobile fuel economy, but there are also the negative effects of increased weight and backpressure. Effects of fuel economy making full use of thermoelectric technology lie in optimum balance of these factors. Thus, guidelines for optimizing this balance were also developed.

The results showed that heat recovery using existing thermoelectric elements is nearly unable to enhance fuel economy. Elements that exhibit good performance within the temperature range of 100°C to 350°C should be employed, and development of new elements is found to be the key. Furthermore, investigations also showed that a heat recovery system provides approximately twice the fuel economy effects when the engine is operated at constant speed such as in a series hybrid, compared to an ordinary car. These findings provided the outlook that the combination of developing new elements, selecting the optimal car type, insulating the exhaust system, and adopting other technologies leads to enhance fuel economy by 3% or more compared to conventional levels.

１．はじめに

自動車の燃費技術は近年特に重要となってきており，さまざまな廃熱回生技術の開発がおこなわれてきている．中でも動的な要素がなく，シンプルで直接有用性の高い電気エネルギーに変換可能な熱電技術が自動車の廃熱回生手段として注目されている(1)．

しかしながら，自動車の廃熱回生においては，発電出力に着目する検討事例(2), (3)や，発電出力のみに着目して燃費に換算した検討事例(4)はあるものの，デバイスによる負の効果を適正に取り込んだ，現実的な自動車の燃費に着目したものに乏しい．熱電技術を自動車の燃費向上策として価値あるものにしていくために，具体的に何をどうすべきかについては明らかとなっていないのが現状である．

そこで，燃費に着目したシミュレーション技術と共に，最適な仕様を特定するための指針を構築して，燃費効果と開発課題を明らかにした(5)．

本稿では，シミュレーションの概要，熱電技術を用いた廃熱回生の課題，価値ある技術としていくためのコンセプトについて紹介する．

＊四輪R&Dセンター

https://doi.org/10.69239/hondatechnicalreview.2009_21_2_9

Table 1　Preconditions adopted for simulation

Precondition factors		Adopted precondition
Target of exhaust condition to be optimized		Average mass flow and temperature in US combined driving cycle
Evaluated vehicle	Type and engine displacement	STREAM 2.0L
System configuration	Heating source	Exhaust gas
	Cooling source	Coolant (90°C·3L/min. constant)
	Efficiency of voltage converter	85% constant
Heat exchanger	Sectional area of exhaust path	Equivalent to sectional area of exhaust pipe
	Fin volume	10% relative to exhaust path
	Fin material	Exhaust: SUS Coolant: Copper
Thermoelectric unit	Sectional dimensions of element	5 mm × 5 mm
	Gap between elements	1 mm
	Electrode size and material	5 mm × 11 mm × 0.5 mm Copper
	Module efficiency	45% constant

2．燃費シミュレーション

Fig. 1にシミュレーションをおこなったシステムの概要図を示す．自動車の排気ガスを加熱源とし，冷却水を冷却源とした熱電発電システムを採用した．発電電力の燃費への影響は，車両の発電機負荷を軽減することに利用し，エンジンの負荷を減らすことで燃費を改善することを前提とし，システムを設置することにより発生する背圧と重量増加の影響も合わせて車両の燃費効果を算出した．シミュレーションをおこなうにあたり，Table 1に示す前提を採用した．

シミュレーションの流れを Fig. 2 に示す．

（1）評価に先立ち，熱電システムを最適化するための車両の運転条件を定義した．

（2）熱交換器のシミュレーションをおこなった．熱交換器の発生する単位温度差あたりの熱流束密度と圧力損失は，熱交換器のサイズやフィンの仕様によって影響を受ける．三次元 CFD を用いてそれらの仕様が熱流束密度へ与える影響を算出した．この段階においては，どのような熱交換器仕様が燃費に最適であるのか判断できないため，仕様を特定することなく，その特性をマップ化した．

（3）熱電素子から有効な出力を得るためには，熱電素子を直列につないで熱電モジュールを構成する必要があるが，その際に損失が発生する．出力計算をおこなう上で，考慮すべき損失を，実際に熱電素子をモジュール化して測定をおこない，明らかにした．

（4）熱電モジュールの出力シミュレーションをおこなった．熱交換器から与えられる熱条件に対し，出力を最大にとるための素子厚さ寸法の最適化をおこなった．（2）で検討されたすべての熱交換器特性ごとに熱条件はことなるため，全仕様に対して寸法の最適化をおこなった上で出力特性をマップ化した．その際，（3）で検討した損失も考慮に入れた．

（5）熱電モジュールからの出力を有効に利用するためには，車両の要求電圧にあわせて電力を供給する必要があり，DC-DC変換に伴う損失を，実際の変換回路を用いて測定し，燃費計算の中で考慮すべき損失を明らかにした．

（6）車両に電力を供給することによる燃費向上の効果，背圧をかけることによる燃費消費の増加を実車を用いて測定し，それぞれの因子の燃費へ感度を明らかにした．

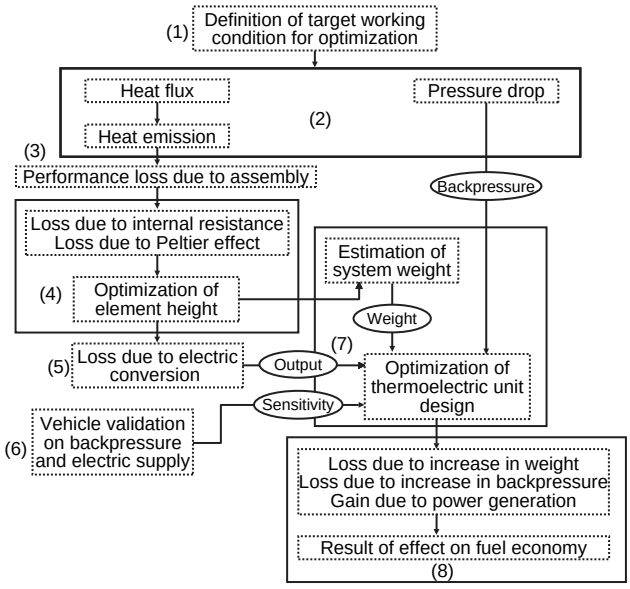


Fig. 2　Flow and factors considered in simulation

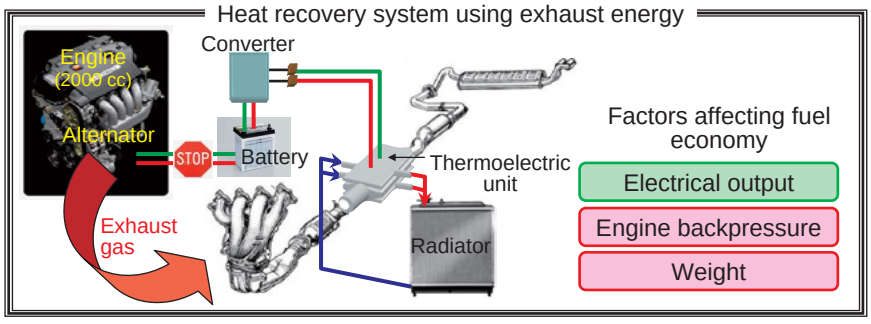


Fig. 1　General configuration of heat recovery system

Table 2 Effect of unrestrained specifications on factors affecting fuel economy

○: Has effect ×: No effect

Unrestrained specifications		Elements affecting fuel economy		
		Engine backpressure	Generated power	System weight
Heat exchanger	Fin pitch and thickness	○	○	×
Thermoelectric unit	Number of elements	○	○	○
	Element thickness	×	○	○

(7)以上の検討から得られた情報を既存の燃費シミュレーションコードに反映し，すべての燃費影響因子を考慮して，目的とする運転条件において最大の燃費効果を発揮する最適仕様を特定した．

(8)特定した最適仕様を用いて，さまざまな運転モードに対する燃費効果を計算し，熱電技術を用いた自動車の燃費向上効果を明らかにした．

先に述べたように，自動車の燃費は，熱電素子の発電出力，排気圧損，システム重量の三つの因子によって算出される．Table 2は，シミュレーションにて自由度を持たせる仕様と，それらの各因子への影響についてまとめたものである．各仕様は，複数の燃費影響因子にまたがって燃費効果を決定しており，特定の仕様を順番に最適化することはできない．そこで，すべての仕様を特定せず，各因子への影響をマップ化する必要がある．構築したマップを用いて，すべての仕様の組み合わせにおいて燃費効果を算出し，最も燃費効果の大きい組み合わせを見出すことで，最適化された仕様を特定する手法をとった．

まず初めに，圧損因子に影響を与える熱交換器のマップ化であるが，熱交換器の熱流束性能は，排気圧損(フィンの細かさ)と素子数(熱交換面積)によって決定される．Fig. 3は，CFDを用いた熱交換器性能の解析結果をマップ化したものである．排気圧損の増加を許容すれば，熱流束性能は改善するが，やがて平衡状態になることがわかる．また，素子数を増やすと単位面積あたりの熱流束は低下する傾向がわかる．

次に，出力因子に影響を与える熱電性能のマップ化であるが，出力性能は，熱電素子に発生する温度差，内部抵抗によって決定される．ここで重要となるのは，素子の厚さである．素子の厚さは，厚くすればより熱電素子の温度差が付き，より大きな起電圧を生むことになるが，同時に内部抵抗も増加し，素子から取り出せる出力を低下させる要因ともなる．熱交換器の仕様ごとに最適な厚さが存在する．Fig. 4は，熱交換器の仕様ごとに最適な素子厚さを設定し，出力性能をマップ化したものである．

熱電素子の個数には最適値が存在することがわかる．熱電素子の個数を増やすことで，起電圧を増加させる効果がある．しかしながら，熱交換器特性により，単位面積あたりに供給される熱流束が低下することで，その効果は素子数の数が増えるほど鈍化する．一方で，内部抵抗は素子の数に比例して増加し続けるため，起電圧上昇による正の効果と内部抵抗増加による負の効果のバランスがとれたところに最適な解が存在する．また，圧力損失の観点からは，フィン

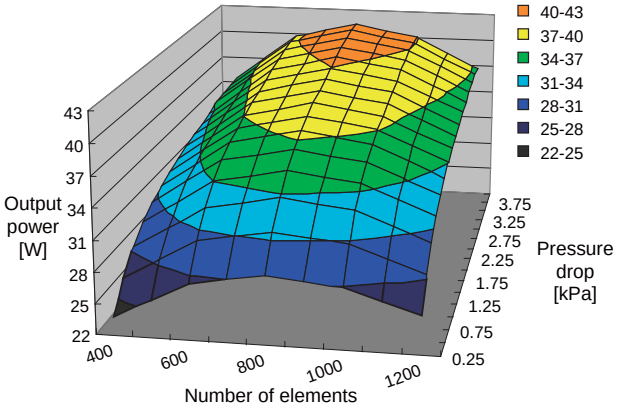


Fig. 4 Performance map of thermoelectric unit

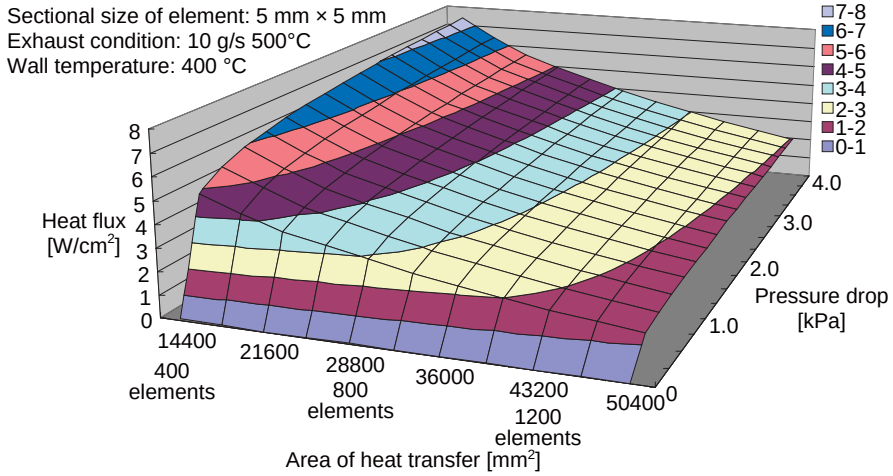


Fig. 3 Performance map of heat exchanger

を細かくすることで出力は伸びる傾向にあることがわかる．しかしながら，その効果は圧力損失の増加に対して，鈍化する傾向にある．

最後に，重量因子に影響を与えるシステム重量のマップ化であるが，システム重量は，素子の個数と厚さ，素子数に見合う熱交換器の重量，電力変換ユニット，配管，冷却水重量，などによって決定される．Fig. 5は，熱電ユニットの素子数，厚さに対するシステム重量を整理したものである．素子の厚さが増すに伴いシステム重量は増大，また，素子数が増すに従いシステム重量が増すことがわかる．

熱交換器性能，熱電出力性能，システム重量について，ある単一の仕様を特定することなくマップ化したことで，三つの燃費影響因子である圧損，出力，重量を任意に組み合わせて燃費効果を検証できるようになった．Fig. 6 に，US コンバインドサイクルでの平均の排ガス条件において，さまざまな仕様の組み合わせに対する燃費効果の算出結果を示す．圧力損失には最適値が存在することがわかる．これは，フィンが粗すぎると熱が回収できないことで発電が十分におこなえず，細かすぎると背圧上昇により，発電を上回るエンジンの効率の低下が発生しているためである．また同様に，素子の数についても最適な仕様が存在することがわかる．Table 3 に最適化された仕様を示す．システム重量は

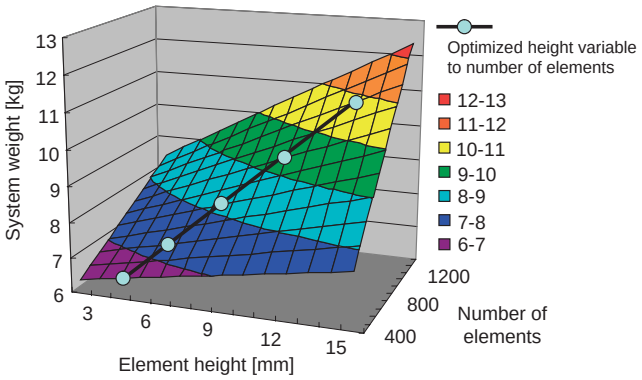


Fig. 5　Weight map of heat recovery system

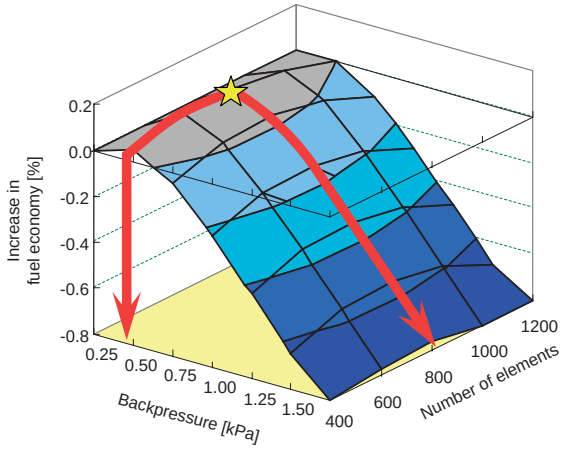


Fig. 6　Effect on fuel economy at target exhaust condition under various specifications

Table 3　Optimized specifications of thermoelectric unit

Hot side heat exchanger	Sectional size: 7 mm x 294 mm Fin specifications Fin thickness: 0.175 mm Fin pitch: 0.88 mm
Cold side heat exchanger	Sectional size: 2.5 mm x 294 mm x 2 paths Fin specifications Fin thickness: 0.03 mm Fin pitch: 0.2 mm
Element size	5 mm x 5 mm x 8.6 mm x 800 pieces
Unit weight	4.2 kg
System weight	8.3 kg

Table 4　Effect of thermoelectric generator on fuel economy

	Increase in fuel economy	Reduction of CO_2 per km
	%	g/km
LA4	0.13	0.2
HWY	0.36	0.42
SC03	0.15	0.24
US06	0.08	0.14

8.3kgであり，車両搭載に適したコンパクトなデバイスであることがわかる．Table 4に最適化された仕様の熱電発電システムを用いて，さまざまなモードに適用した場合の燃費効果を算出した結果を示す．自動車に適した搭載性は期待できるものの，現状の熱電技術を用いた廃熱回生では，燃費効果はほとんどないことがわかった．

3．エネルギー収支に基づく損失の分析

Fig. 7 に LA4 におけるエネルギー収支を示す．

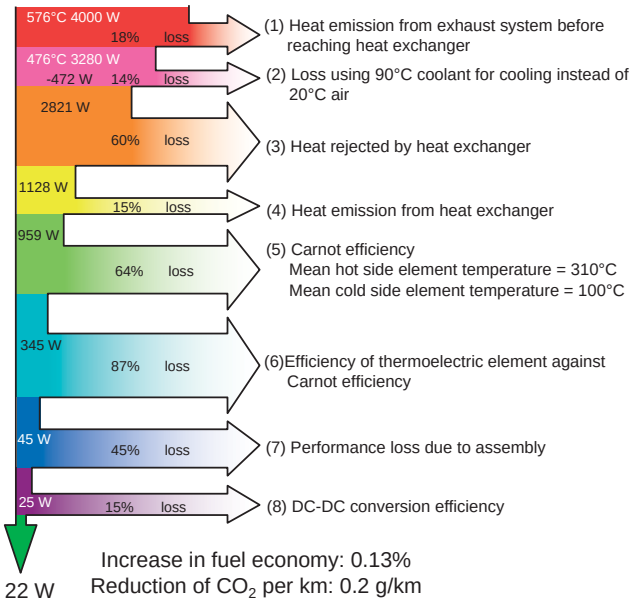


Fig. 7　Analysis of energy flow in LA4 driving cycle

まず初めに，素子の変換効率が低いことがわかる〔Fig. 7 (6)〕．Fig. 8に今回用いた素子の温度特性と，モード中に活用した素子温度を示す．最大の素子性能が得られる温度帯よりも低い領域で使用されていることがわかる．これは，Fig. 6に見られたように，素子の温度を上げようと熱交換器のフィンを細かくすると，熱電ユニットの出力は高まるものの，排気圧損が打ち勝って燃費が向上しないためである．100℃から350℃付近で性能を発揮する素子が必要とされるが，現在，その温度領域で性能を確保できる素子は存在せず，自動車の廃熱回生には，より低温域に適合する素子の開発が鍵となる．

また，本解析とは別に，実験から素子を接合する際に発生する素子へのダメージも損失の大きな部分を占めることがわかっている．熱電モジュールとして素子を接合するためにロウ付けをおこなっているが，素子へのロウ材の拡散，ロウ付け時の成分の揮発等により，45%程度の素子性能の低下が発生しており，それらの防止が効果的である〔Fig. 7 (7)〕．加えて，実機を使った排ガス系の温度測定の結果から，熱電ユニットに到達する前に放熱により18%程度エネルギーを失っていることもわかっており，こちらの対策も有効であると考えられる〔Fig. 7 (1)〕．

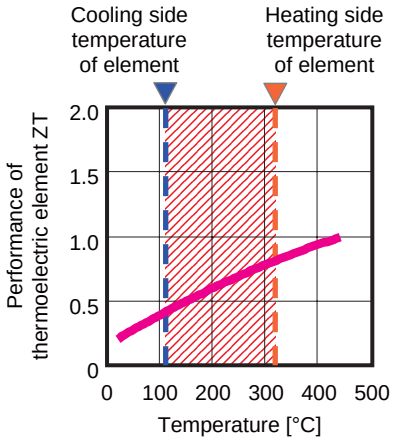


Fig. 8 Performance of thermoelectric element relative to temperature

4．さらに燃費効果を高めるためのコンセプト

前述では，エネルギー収支から見た改善箇所を提示したが，その他にも熱電システムの活用方法を工夫することにより燃費効果を向上させることが可能である．前述のような一般ガソリン車に熱電システムを適用する場合，三つの課題が発生している．

Fig. 9 は，LA4 モードを走った場合の一般ガソリン車と高負荷定点運転を前提とするシリーズハイブリッドの排気温度と，熱電の出力への影響を示している．今回評価した2.0L STREAM では，LA4 モードを走るために 10kW 程度の平均出力を必要とする．シリーズハイブリッドについては，排気量 0.65L のエンジンを使って，機関の最高効率点を維持しながら定点運転させ，走行に必要な平均出力を得る前提を採用した．また，一般ガソリン車は，2.0L STREAM を実際に走らせて測定した平均の排気温を用いた．高負荷定点運転のほうが，排気温度が高く，効率的に熱を電気に変換できることがわかる．

Fig. 10に，排ガス条件が変動した場合の燃費への影響を示す．熱電ユニットは，最適化された流量において最大の燃費効果を発揮することがわかる．一般ガソリン車は，モード中に排ガス条件が変動するため，最も頻度の高い条件に合わせて最適化される．しかしながら，常に最適化された条件下を維持することは不可能であり，効率は低下する．高負荷定点運転においては，排気条件の変動が無いため，常に最適化された条件で使うことが可能となる．

Fig. 11 にモード走行中の熱電の出力のイメージを示す．一般ガソリン車は，モード中に排気条件が変動するため，熱電からの出力電圧もそれに準じて変動する．車両の要求する電圧は一定であり，電圧のミスマッチが生じた場合には，昇圧や降圧といった電圧変換が必要となる．よって変換時に電力の損失が発生することになる．一方，高負荷定点運転においては，排気条件の変動が無いため，あらかじめ熱電の出力を車両の要求電圧になるように設定することで，15%程度の変換損失を排除することが可能となる．

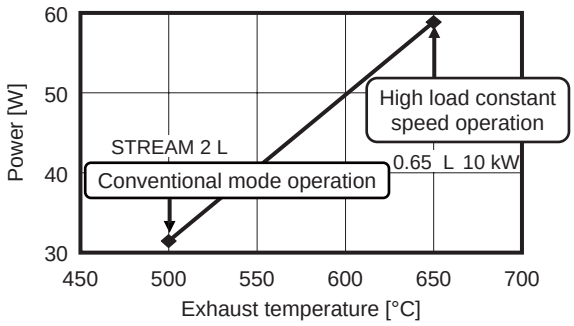


Fig. 9 Effect on output of thermoelectric unit due to difference in exhaust temperature

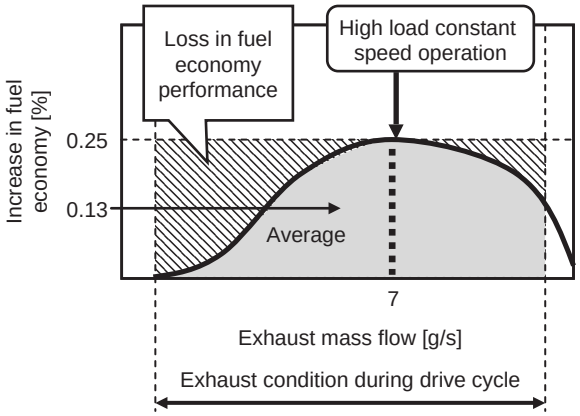


Fig. 10 Effect on fuel economy relative to exhaust mass flow

Fig. 12に，エネルギー収支から見た改善箇所，使い方の工夫を総合的に対策した場合の燃費効果の向上を示す．シリーズハイブリッドを前提に高負荷定点運転をおこない，排気温度の高温化，排気圧損の最適化，および出力電圧一定の元でシミュレーションをおこなった結果，一般ガソリン車に適用した場合と比較し，燃費効果は約２倍になるとの結果を得た．また，100℃から350℃の範囲において平均して ZT1 以上を確保できる素子開発，接合時の損失を 15% 以内に抑える手法の確立をはじめ，システムの活用方法の工夫や，断熱対策を施すことによって，燃費を３%程度向上できる可能性があるとの見解を得ることができた．

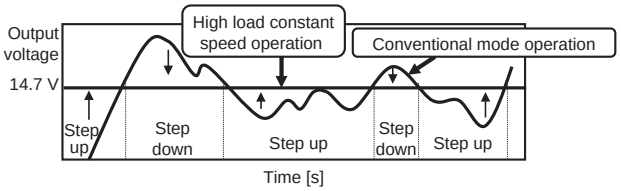


Fig. 11　Image of output voltage of thermoelectric unit during drive cycle

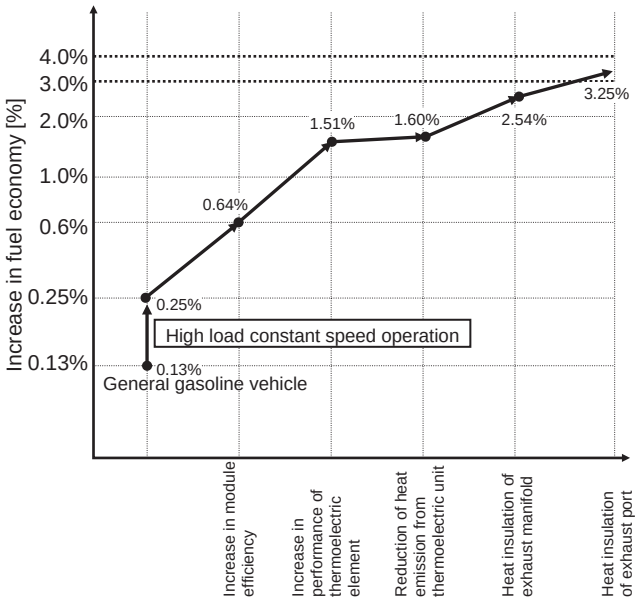


Fig. 12　Future potential of thermoelectric technology for fuel economy

５．まとめ

熱電素子を利用した車両用廃熱回生システムの燃費シミュレーション技術と指針を構築し，

（１）現状の熱電技術を活用した場合の効果および課題を明らかにした．

（２）鍵となる技術，改善手法の抽出に加え，最適な使い方を特定し，それらの対策を採用する前提でモード燃費向上を見積もると，３%程度の向上を期待できることが明らかになった．

参考文献

（１）Rowe, D.: Thermoelectric Handbook Macro to Nano, CRC Press, p. 52-1- 52-11(2006)

（２）Crane, D., Bell, L.: Design to maximize performance of a thermoelectric power generator with a dynamic thermal power source, ASME 2007 ES2007-36210

（３）LaGrandeur, J., Crane, D., Hung, S., Mazar, B., Eder, A.: Automotive waste heat conversion to electric power using Skutterudite, TAGS, PbTe and BiTe, Proceedings of the 25th International Conference on Thermoelectrics, p. 343-348(2006)

（４）LaGrandeur, J., Crane, D., Eder, A.: Vehicle fuel economy improvement through thermoelectric waste heat recovery, Proceedings of the 11th Diesel Engine Emissions Reduction (DEER) Conference(2005)

（５）Mori, M., Yamagami, T., Oda, N., Hattori, M., Haraguchi, T., Sorazawa, M.: Current Possibilities of Thermoelectric Technology Relative to Fuel Economy, SAE Paper, 2009-01-0170(2009)

■著　者■


森　正芳


山上　武


織田信之


服部　真


原口友秀


空澤光将

走行時のボデー過渡変形予測技術

Prediction of Transient Body Deformation during Handling Maneuvers

久 世 正 文*　　梅 原 康 平*
Masafumi KYUSE　　Kohei UMEHARA

要　旨

ハンドリングに影響を与える過渡的なボデー変形を予測するために，ボデーの弾性変形を考慮した機構解析モデルを構築した．Modal Forced Response 法により同定した走行時ボデー変形との比較解析をおこなったところ，車両運動性能，ボデー過渡変形，ボデーモード寄与度に良好な相関を得た．

ABSTRACT

A multi-body dynamics model that considers elastic deformation of the body was formulated in order to predict transient body deformation, a factor that affects handling. A comparative analysis with body deformation during handling maneuvers identified using a modal forced response method was conducted, and a good correlation was obtained between vehicle dynamic performance, transient body deformation, and the body modal contribution factor.

1．まえがき

ボデー特性が操縦安定性や乗心地，振動騒音など動的運転品質に影響を及ぼすことは良く知られている．

特に操縦安定性においては，ボデー特性をさまざまな手法を用いてモデル化し機構解析と組み合わせることで走行時のボデー変形を予測した事例が報告されている(1), (2)．また，タイヤ接地点分力から機構学的にボデー骨格上のサスペンション締結点における入力を同定し，それを元にボデー変形を実験とシミュレーション上で再現した例(3), (4)が報告されている．しかしながら，走行時のボデー変形を詳細に計測した事例は少ない．

本研究では，ボデー骨格上のサスペンション締結点作用力を Modal Forced Response 法を用いて同定し，モーダルモデルに入力することで走行時ボデー変形を可視化した事例を紹介する(5)．また，シミュレーションモデルはResidual Vector 法を用いたボデー弾性体モデルを機構解析と組み合わせた(6)．走行時の車両運動性能およびボデー変形同定結果と比較し本研究で適用したモデル化手法によるボデー変形についても述べる．

2．走行時のボデー過渡変形の算出

2.1. モーダル応答法

走行時のボデー変形を同定する手法として，Modal Forced Response 法を採用した．ボデー骨格上のサスペンション締結点近傍にひずみゲージを貼付し，走行時のボデーひずみを時系列データ $\varepsilon(t)$ として計測する．次に計測した車両から前後サスペンション部品ならびにパワープラント部品を外し(この状態をトリムドボデーと定義する)，n 自由度を有するサスペンション締結点入力に対するひずみゲージ応答行列 $H(\omega)$ の計測をおこなう〔式(1)〕．得られた入力応答行列の逆行列$H(\omega)^{-1}$を求め，式(2)に示す逆FFT変換をおこない，各ひずみに対するサスペンション締結点の力応答のインパルス行列 $h(t)$ を求める．これにボデーひずみ $\varepsilon(t)$ を畳み込み演算することにより走行時のサスペンション締結点の入力$F(t)$を同定することができる〔式(3)〕．

一方，トリムドボデーの骨格およびパネル，サスペンション締結点に加速度ピックアップを貼付し，ボデー上の数点を電磁加振することでボデー各部の周波数応答関数を得る．これをモード解析することでトリムドボデーのモードシェイプ Ψ_r と，系の m_r，c_r，k_r 行列($r = 1, 2, 3, \cdots$m)を求め，各ボデーモードの寄与度 $q(t)$ を変数とする２階微分方程式を記述する〔式(4)，式(5)〕．モードシェイプとモード寄与度との積和が走行時のボデー変形となる〔式(6)〕．

$$H(\omega) = \varepsilon(\omega)/F(\omega) \quad (1)$$

$$h(t) = iFFT(H(\omega)^{-1}) \quad (2)$$

$$F(t) = h(t) \otimes \varepsilon(t) \quad (3)$$

＊四輪R&Dセンター

https://doi.org/10.69239/hondatechnicalreview.2009_21_2_10

$$m_r\ddot{q}_r(t) + c_r\dot{q}_r(t) + k_r q_r(t) = f_r(t) \quad (4)$$

$$f_r(t) = \sum \psi_{i,r}{}^T \cdot F_i(t) \quad (5)$$

$$X_i(t) = \sum \psi_{i,r} \cdot q_r(t) \quad (6)$$

$h(t)$：サスペンション締結点インパルス行列
$H(\omega)$：サスペンション締結点入力　ひずみゲージ応答
$F(t)$：実車走行時のサスペンション締結点入力
$\varepsilon(t)$：実車走行時ボデーひずみ
Ψ_r：モードシェイプ($r = 1, 2, 3, \cdots$m)
$X_i(t)$：走行時サスペンション締結点変位($i = 1, 2, 3, \cdots$m)
$q_r(t)$：ボデーモード寄与度($r = 1, 2, 3, \cdots$m)
m_r：トリムドボデーモード等価質量($r = 1, 2, 3, \cdots$m)
c_r：トリムドボデーモード等価減衰($r = 1, 2, 3, \cdots$m)
k_r：トリムドボデーモード等価剛性($r = 1, 2, 3, \cdots$m)
m：トリムドボデーモード数
n：サスペンション締結点自由度数

2.2. ひずみゲージ貼付点の検討

サスペンション入力を同定するためにサスペンションのボデー側締結点近傍にひずみゲージを貼付する．走行時にひずみ量が十分に出力される箇所を選定するため，台上にてハンマリング加振によるひずみ応答テストをおこなう．また，当該ボデーの有限要素モデルを有している場合には，ひずみ応答解析をおこない，貼付点の目安とする．Fig. 1では，スプリングダンパ締結点近傍にひずみゲージを数点貼付し，ハンマリング試験をおこない，ひずみ応答を計測している．この場合では，ひずみゲージの４および６番の応答が高い．また，Fig. 2では有限要素モデルにおいても同様の試験をおこなった結果を示している．実験でひずみ応答の高い箇所がモデル上でも高い結果であることがわかる．以上のようにひずみゲージ貼付点を決定した．

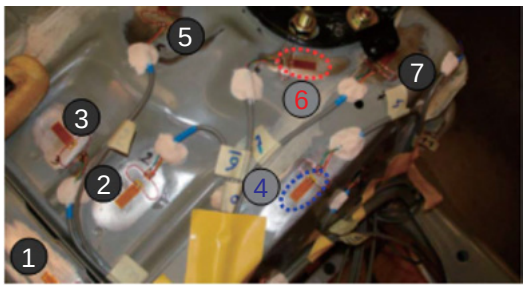


Fig. 1　Pretest for determination of strain gauge setting

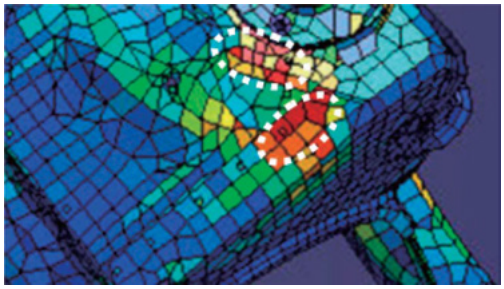


Fig. 2　Result of strain sensitivity simulation

2.3. ひずみ応答マトリクスのスクリーニング

前項にて入念に決定したひずみゲージ貼付点での計測であっても，複数のサスペンション締結点からの入力応答がノンコヒーレントな結果となる場合がある．Fig. 3に示すのは横軸に入力点，縦軸にひずみゲージ貼付点をとったひずみ応答マトリクスである．この応答マトリクスを用いて前側左右輪のスプリングダンパ締結点入力を同定すると Fig. 4 に示す結果となる．本来左右で入力値が同等であるべきであるが，ほぼ２から４倍の結果となった．

そこでコヒーレンスの閾値を設定し，それ以下の結果についてはノイズ成分と判断し，該当するひずみ応答の削除をおこなう．この応答マトリクスを用いて再び同定すると Fig. 5 に示す結果となった．左右の入力値がほぼ同等とな

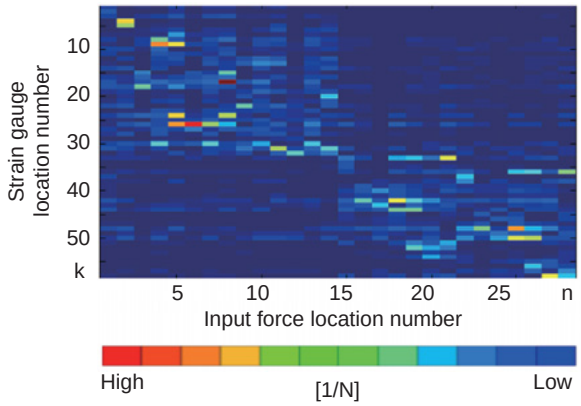


Fig. 3　Strain matrix before cleanup

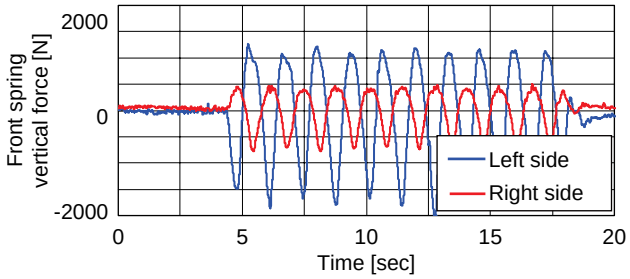


Fig. 4　Result of forced response around front spring damper connecting point before screening

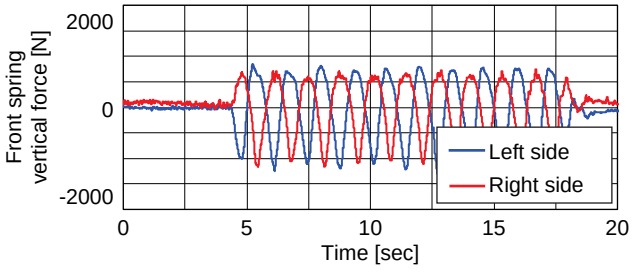


Fig. 5　Result of forced response around front spring damper connecting point after screening

り，ひずみ応答マトリクスのスクリーニングがサスペンション入力同定の精度向上に有効であることがわかる．

3．構造と機構連成シミュレーション

本研究ではボデー系部品については有限要素モデル，シャシ系部品については機構モデルにて構築する．走行状態でのボデー変形を予測するため，機構モデル内に縮約されたトリムドボデーモデルを取り込んで連成解析をおこなう．

3.1. ボデーモデルの縮退

有限要素法では約 70 万要素のトリムドボデーモデルを，Residual Vector 法を用いることにより，50Hz までの拘束モード，外点自由度を併せても 155 自由度まで縮退して低周波振動騒音事象の解析にも適用可能となるよう計算時間の低減をはかった．また，実車と計算モデルとのトータル重量差は，不足分の重量および慣性をトリムドボデーモデル内部に，弾性モードに影響を及ぼさないよう組み込んで一致させた(Fig. 6)．この縮退により，計算時間は約 1/15 以下となった．

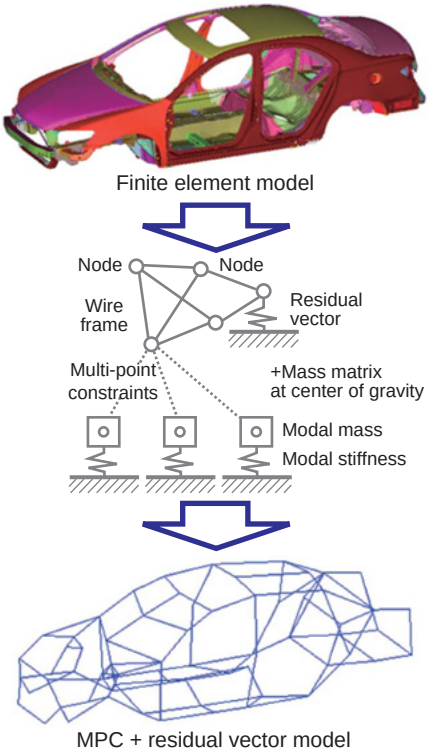


Fig. 6 Method of reduction of body model

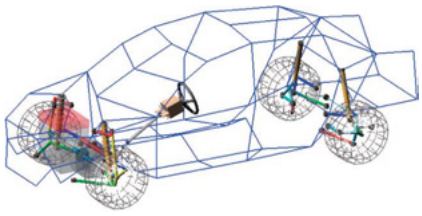


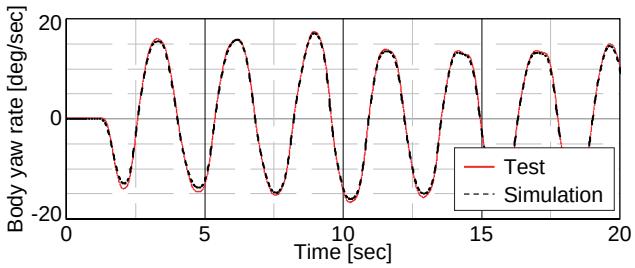
Fig. 7 Multi-body dynamics coupled with structural model

3.2. シャシ系の機構モデル化手法

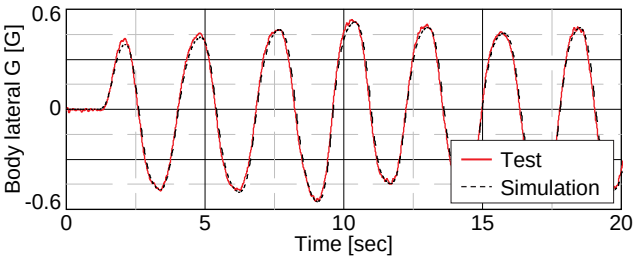
前後のサスペンション系構成部品，パワープラント系構成部品については図面情報を元に各締結点ジオメトリー，重心位置，重量および慣性項を含んだ剛体要素にてモデル化している．サスペンション部品，パワープラント部品とボデーの要素間結合特性においては，スプリング，ダンパ，ラバーブッシュの単体性能からそれらを組み込んだ実車性能まで計測結果と比較して周波数依存特性，振幅依存特性を考慮したアップデートを施している．作成したシャシモデルに対し，機構的なサスペンション特性(ホイールレート，上下動軌跡後傾角，スカッフ変化，ロール剛性，ロールステア，横力ステア)，さらにタイヤ強制加振時のパワープラント，サスペンション，ボデーの周波数特性および振動伝達率についても計測結果と比較検証した．これとボデーモデルを組み合わせた最終的な車両モデルを Fig. 7 に示す．

4．モデルの検証結果

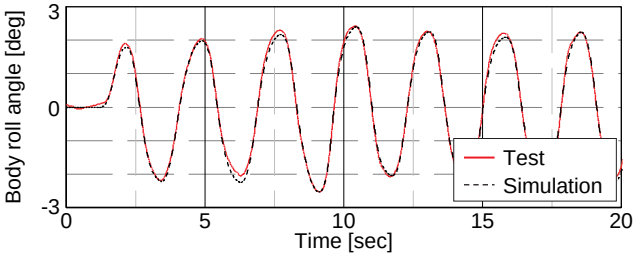
走行時のボデー変形に関して，実験結果と計算モデルとの比較をおこなった．実車計測時の走行条件としては，平坦路を時速 60km/h 一定で直進走行後，ピーク車両重心左右重力加速度(車両横G)が 0.4G となる舵角入力によるスラ



(a) Body yaw rate



(b) Body lateral G



(c) Body roll angle

Fig. 8 Vehicle dynamics during slalom maneuver

ローム走行(2.5秒／周期)をおこなった．シミュレーションでは実車操舵角および駆動力を入力し，実走行計測と条件を揃えた．

4.1. 実験とシミュレーションの車両運動性能比較

スラローム走行テストおよびシミュレーションの車両運動性能計算の結果比較を Fig. 8 に示す．車両重心上下軸周りヨー角速度，車両横G，車両重心前後軸周りロール角を比較すると時間軸上で誤差４％以内に収まり，シミュレーション上で実車の車両運動性能を精度良く再現できている．

また，フロントサブフレーム前側締結点における左右方向の荷重変動結果を実験とシミュレーションで比較したものをFig. 9に示す．この結果から実験およびシミュレーションの入力予測がほぼ一致していることがわかる．

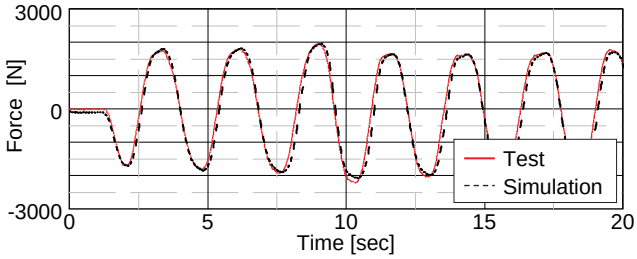


Fig. 9　Front sub-frame lateral force during slalom maneuver

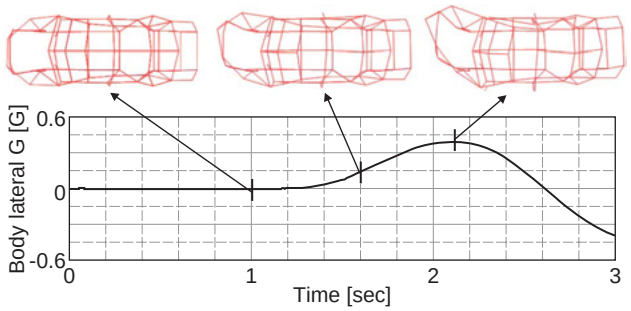


Fig. 10　Test results for body deformation

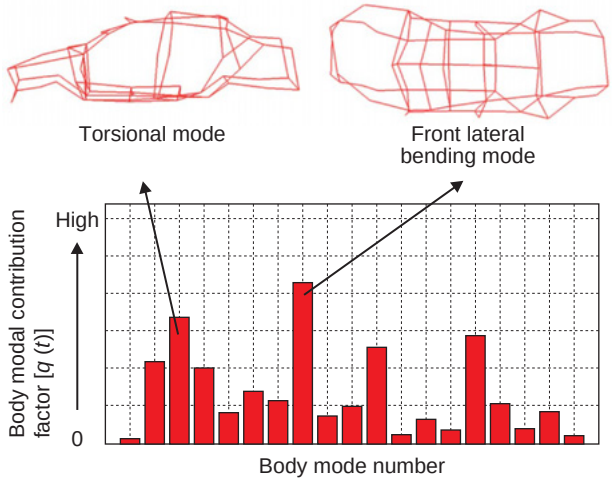


Fig. 11　Test results for body modal contribution

4.2. 走行時のボデー変形結果

走行時データから算出されたサスペンション締結点入力による，走行時のボデー変形を計算した結果を Fig. 10 に示す．時間軸でボデーの変形が過渡的に遷移している様子がわかる．

車両横Gがピークとなる時のボデーモードの寄与度を解析すると Fig. 11 のようになった．高いモード寄与度を示すのはキャビンが全体的にねじれる「ねじれモード」，前輪側のフレームが横に曲がる，「フロント首振りモード」であった．

4.3. シミュレーションによるボデー変形計算結果

弾性体ボデーを組み合わせた機構解析モデルにて実車操舵角および駆動力を入力条件としてボデー変形を計算したものを Fig. 12 に示す．スラローム走行時の各時間軸におけるボデー変形を実験結果と比較したところ，ピーク値だけでなく，過渡領域においても実験結果とシミュレーション結果でよく一致していることが確認できた．

また，ボデーの「ねじれモード」，「フロント首振りモード」の寄与が他のモードと比較して大きいことがシミュレーションにおいても確認された．

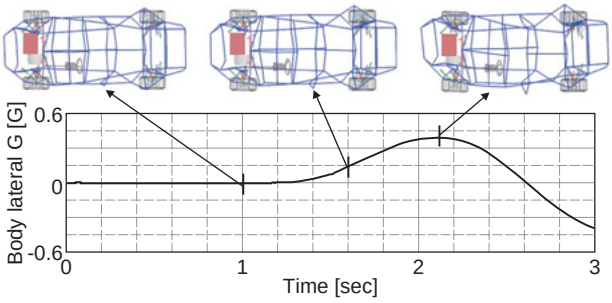


Fig. 12　Simulation results for body deformation

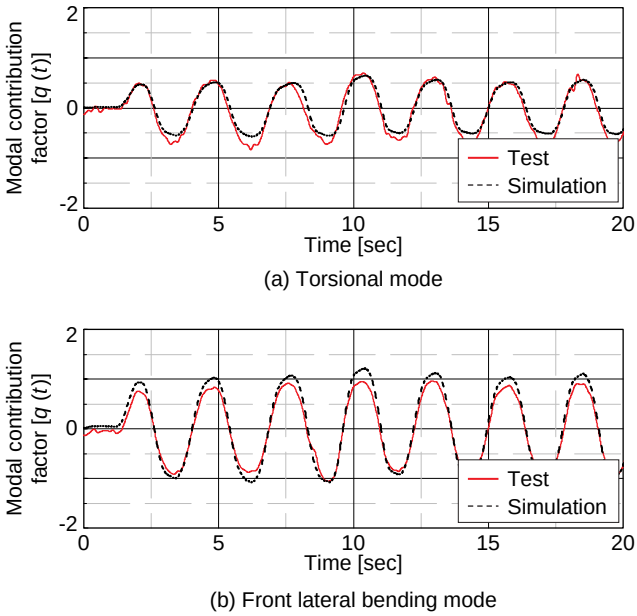


Fig. 13　Two time domain body modal contributions

走行時の「ねじれモード」と「フロント首振りモード」の寄与度について，実験とシミュレーションで比較したものを Fig. 13 に示す．

二つのモード寄与度はともに，時間軸に対して変化をしながら推移していく．また，実験およびシミュレーション結果は良好に一致している．提案する手法によってボデー変形に影響を与えるモード寄与を実車およびシミュレーションにて時間軸による解析をすることが可能となった．

5．まとめ

ボデー骨格上のサスペンション締結点入力を Modal Forced Response法を用いて算出し，従来困難であった実走行時ボデー変形を可視化した．また，シミュレーションモデルは Residual Vector を用いたボデー弾性体モデルを機構解析と組み合わせた．以上を用いて実車とシミュレーションによるスラローム走行テストの結果について，車両運動性能およびボデー変形に対するモード寄与度の比較をしたところ，良好な相関を示すことが確認できた．

参考文献

（1）小林義明，米川隆，本間和正，大榎一史：モーダル手法を用いたフルビークルシミュレーション技術の開発，自動車技術会学術講演会前刷集，No.982，p.207-210（1998）

（2）磯村吉高，尾川敏也，門奈博：実験モード解析を用いた実車走行時のボデー変形予測計算技術の開発，自動車技術会学術講演会前刷集，No.91-00, p.5-8（2000）

（3）長久真樹，日下馨，皆川正明:ハンドリングへのボデー弾性の影響，自動車技術会学術講演会前刷集，No.90-99, p.1-4(1999)

（4）白石祐二，青木弘文，北村博史，上田悦広，牛村智也:操縦安定性に及ぼす車体剛性寄与メカニズムの解明，自動車技術会学術講演会前刷集, No.101-04, p.1-4(2004)

（5）Hadjit, R., Kyuse, M., Umehara, K., Geluk, T., Mas, P.: Analysis of the contribution of body flexibility to handling and ride comfort performances, 2009 JSAE Annual Congress Proceedings, No.38-09, p.15-20(2009)

（6）山崎賢二，山本好道：Residual Vector を適用した車体弾性体モデルの機構解析への応用，自動車技術会学術講演会前刷集，No.28-02, p.17-20(2002)

■著　者■



久世正文



梅原康平

限界走行時における車両挙動の台上再現

Vehicle Dynamics Simulation in Extreme Driving Conditions

豊 島 貴 行*　　James CUNNANE**　　Mike KENLEY**
Takayuki TOYOSHIMA

要　旨

サーキット走行テストなどに代表されるような車両の限界性能を引き出す実走テストでは，計測機器の搭載による重量増や，計測機器の搭載場所の制限などから，走行中のさまざまな特性値を実測することが難しい．そこで停止状態から限界走行に至る広い範囲で，走行中の姿勢変化や発生する力などさまざまな走行状態を台上に再現することができれば，これまでは計測できなかった物理量の実測が可能となり，走行中の車両特性をより詳しく分析することができるようになる．Dynamic Vehicle Simulator(以下 DVS)は停止状態から限界走行に至る広い範囲でさまざまな車両挙動を台上に再現できうる能力をもった多軸試験機として導入された設備である．このDVSを使い，停止状態から限界走行に至る広い範囲で走行状態を台上に効率よく再現させる手法を開発した．この手法によりこれまで実走行テストでは困難とされていた限界領域の走行状態におけるさまざまな特性を台上試験から分析できるようになった．

ABSTRACT

The increased weight produced by measuring instruments and the limited space available for such instruments make it a challenge to measure vehicle characteristics in extreme driving conditions such as circuit driving that take the vehicle to its performance limits. The ability to conduct bench simulations of vehicle behavior, that consider a variety of factors such as changes in the form of the vehicle and the forces acting on it, across a wide range of driving conditions, from standstill to extreme driving, would enable the measurement of physical characteristics which has been unlikely to be measured to date. Additionally, this would contribute to more precise analysis of vehicle characteristics during driving. Honda's Dynamic Vehicle Simulator (DVS) was developed as a multi-axis test system with the capacity to enable simulation of vehicle behavior from standstill to extreme driving on the bench. A method of efficiently reproducing this wide range of driving conditions on the bench using the DVS has been developed. This method has enabled vehicle characteristics in the extreme driving range, which has previously been challenging to study in vehicle tests, to be analyzed on the bench.

１．まえがき

車両の限界性能を分析する実走行テストを実施する場合，ドライバへの負担が大きく，エンジンやタイヤの消耗も大きくなるため繰り返しテストの実施が通常の走行テストに比べて難しくなる．また，計測するための機器自体による重量増がもたらす走行性能の変化や，計測機器の取り付け箇所の制約条件などの理由から，事実上計測できない物理量も多い．

そこで，車体姿勢や発生する力など実走行におけるさまざまな状態を，台上試験機で再現することができれば，テストドライバの必要がなくなりタイヤやエンジンの消耗も軽減されるため，繰り返しテストが容易になるなどの利点が生まれ，実走テストでは計測できない物理量の計測も可能となり，より多くの視点から詳細な分析が進められるようになるなど，その意義は大きい．

しかし，停止状態から限界走行に至るさまざまな走行状態を台上試験機で再現させるためには，車体やタイヤの挙動を自由自在に制御できる多自由度の多軸試験機が必要となる．また，限界領域を使った走行では，タイヤと路面間の“滑り”や“浮き”といった状態が頻発するため試験機の制御が難しく，制御手法の構築が課題となっていた．

＊　四輪R&Dセンター
＊＊Instron Structural Testing Systems GMBH

https://doi.org/10.69239/hondatechnicalreview.2009_21_2_11

DVSは停止状態から限界走行までの広い領域を含むさまざまな車両挙動を，台上に再現することを目的として開発された多自由度の多軸試験機である．基本的にはタイヤと接する四つのホイルパンと車体と結合されるセンタテーブルとから構成され，地面に相当する四つのホイルパンとセンタテーブルをそれぞれ同時に動作させることによって，実走行時のさまざまな車両挙動を台上に再現させる(Fig. 1)．今回DVSを使い限界領域までの実走行状態を台上に再現させるため Body Centered Mode Simulation という手法を開発した．これによりサーキット走行のような激しいステアリング操作をともなう限界走行状態についても台上テストによる計測や特性分析が可能となった．

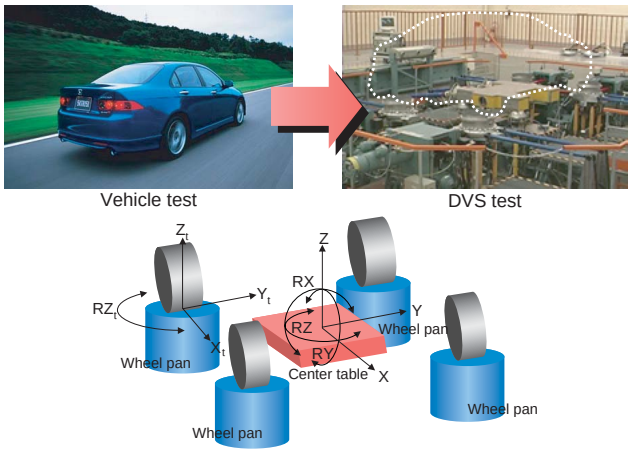


Fig. 1 Outline of DVS

2．ロードシミュレーション

ここでいうロードシミュレーションとは実走行状態をDVS 上に再現させるシミュレーション技術の総称である．ロードシミュレーションの基本は，実走行時に車両に生じている力や変位量等からあらかじめ制御目標となる物理量を同定しておき，その目標値に合うように DVS の各アクチュエータを制御することで実走行時のさまざまな状態変化を再現させることによって成る．

限界領域の実走テストでは計測できる物理量が制限されるため，計測可能な物理量から制御目標となる物理量を同定する必要がある．本取り組みではサスペンション周りの各種コンプライアンス特性の分析に焦点をあてている事から，制御目標はタイヤ接地面に生じる力とステアリング角とし，タイヤ接地面に生じる力は実走テストで計測可能な物理量から推定している．

Fig. 2，Fig. 3はタイヤ接地面に発生する前後方向の力F_xと，横方向の力 F_y を推定する基本原理を示す．F_x は前後加速度，空気抵抗，ブレーキ配分などから算出し，F_yはヨー角速度，横向き加速度，輪荷重変化，重心位置などから算出した値に，直進時に定常的に発生している対抗向きの力分を補正することによって算出される．具体的には直進時近傍で発生する対抗向きの力を F_y^P とし，F_y^P の値に対してステアリング角に応じた重み付けをPとすると，F_y^P ＊ P を補正値として加えることで最終的な制御目標F_yを得ることとした(Fig. 4)．

Fig. 5 は実際に6分力計をタイヤに装着して計測した F_y の値と，上述の手法により推定した補正有りの場合と補正無しの場合のF_yの値を比較したグラフである．この補正手法により実走時に発生しているF_yをより高精度で推定できていることが確認できる．

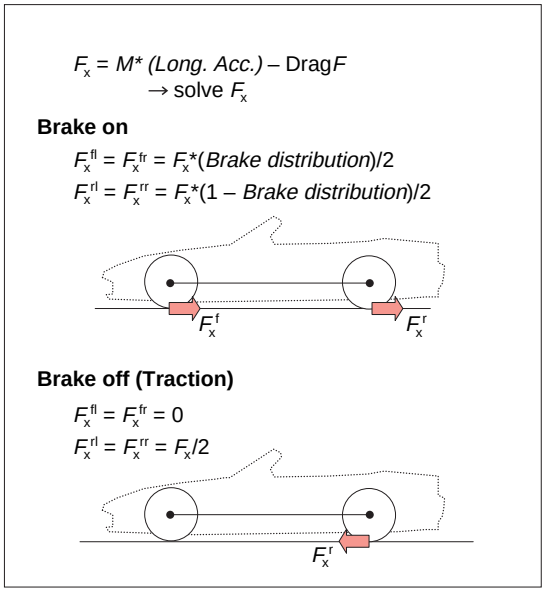


Fig. 2 Identification of F_x generated in tire

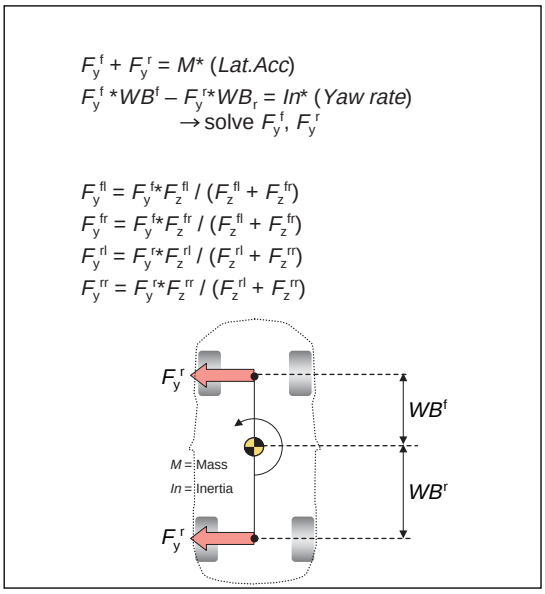


Fig. 3 Identification of F_y generated in tire

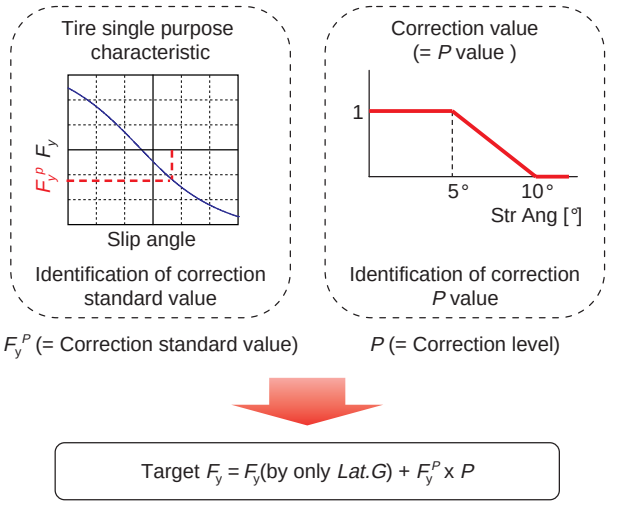


Fig. 4　Method of correction of F_y

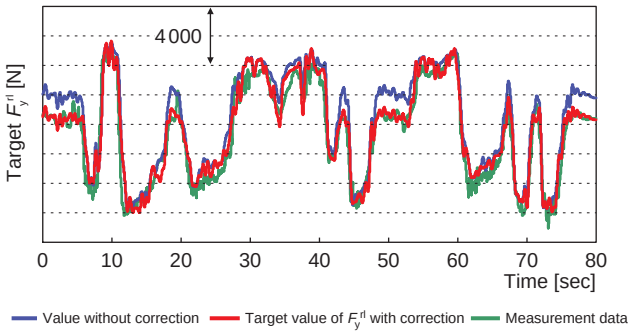


Fig. 5　Target data for F_y

3．ポジションコントロールとロードコントロール

DVSで車体や車輪の動作を制御していく場合，目標とする物理量により主に二つの制御手法に分けられる．そのひとつは位置や変位情報を目標として制御するポジションコントロール，もうひとつは力の情報を目標として制御するロードコントロールである．ポジションコントロールは変位量を正確に再現する反面，目標との微妙なズレから過剰な力が加わってしまった場合でも変位のズレを無くす方向に制御されるため，場合によっては車両を破壊してしまうという欠点がある．対してロードコントロールでは発生している力を正確に再現するため，過度な力で破壊される恐れは無いが，実際には出せない力が目標値になっていると制御不能に陥る場合がある．たとえばタイヤに接地荷重が生じていない状況では，わずかな横力が目標値となっただけでも制御不能となる．限界領域も含むロードシミュレーションでは部分的に大きな力が発生し変位量も大きく，Fig. 6 に示すように接地面に“滑り”や“浮き”という状態も発生するため，どちらか一方の制御手法だけに頼っていては再現することはできない．車両のどの部位をどちらの制御手法で動作させるかがロードシミュレーションの重要な要素となる．この二つの制御を使い分けることにより，後記のBody Centered Mode Simulationでは限界領域も含む走行状態の再現が可能となった．

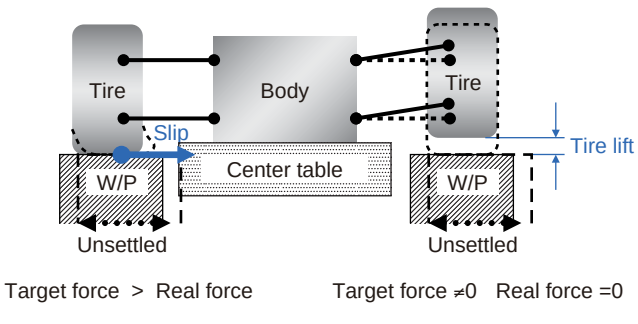


Fig. 6　“Slipping” and “floatage”

4．Body Centered Mode Simulation (BCMS)

ロードシミュレーションは車体姿勢変化の再現のさせ方により幾つかの方法に分類することができる．大きくは車体を地面に対して固定させ４輪のタイヤのみを動作させることによって実走行時の挙動を再現させる方法(Body fixed simulation)とタイヤと車体を同時に動作させて再現させる方法(Body moved simulation)との二つに分類できる．

Body fixed simulation は車体をポジションコントロール(不動)とし，車輪をロードコントロールすることによって制御目標を再現する．この方法はホイルパンのみを動かせば良いのでアクチュエータの数を減らすことができるメリットがある反面，ロール角やピッチ角変化による重力の方向がずれることや，タイヤの接地角が実走行時と異なるなど誤差要因が多く本取り組みでは採用しない．

一方Body moved simulationはさらに二つに分類でき，車体のある特定の一点を空間上のある一点に固定し，X軸，Y軸，Z軸周りの回転運動のみを再現させる方法(Pin fix simulation)[1), (2)]と，回転運動以外にも並進運動も加えて車体を６自由度全ての方向に動作させる方法に分けられる．Body centered mode simulation(以下 BCMS)は後者の一つ

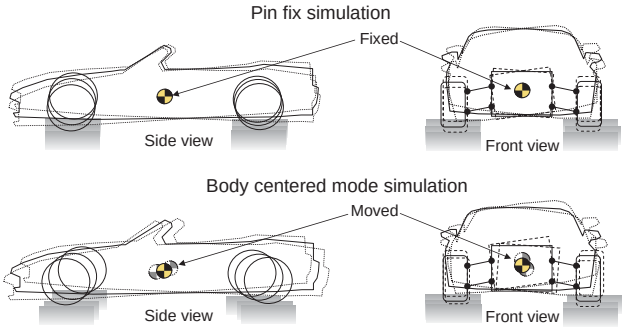


Fig. 7　Difference from pin fix simulation with BCMS

である(Fig. 7)．Pin Fix Simulation では重心点を不動にするため車体基準の座標系とを地面基準の座標系と重心位置で一致させられることから，外部からの計測が容易となり車体姿勢変化を捉えやすいという利点がある．しかし，ホイルパンがロードコントロールになるため Fig. 6 にしめすような“滑り”や“浮き”という状態が１輪でも発生するとたちまち制御不能に陥ってしまう．したがって“滑り”や“浮き”という状態が頻発する限界領域の走行では Pin Fix Simulation は不適である．

BCMS は車体を６自由度全ての方向に対して動作させる手法の一つである．タイヤの“滑り”や“浮き”に対しタフネスが高く，かつ十分な精度で台上シミュレーションを実現させることを目的として開発されたロードシミュレーションである．その基本概念を Fig. 8 に示す．BCMS では制御目標を周波数帯により高周波成分の信号と低周波成分の信号に分け，ホイルパンはロードコントロールにより高周波成分を再現し，低周波成分はセンタテーブルのロードコントロールとホイルパンのポジションコントロールにより制御される．低周波成分ではホイルパンは前後あるいは左右のホイルパンの中心が初期状態で設定される基準点と一致するようにポジションコントロールされるため，基準点に対する車体の位置は常に特定することができる．BCMS では，限界付近でタイヤ１輪に“滑り”や“浮き”が生じたとしても，ホイルパンはポジションコントロールされているため制御目標を見失うことは無い．BCMS はホイルパンとセンタテーブルの両方に多くの動作自由度を有する DVS によって初めて実現されたロードシミュレーションである．以下に BCMS の精度の検証結果を記す．

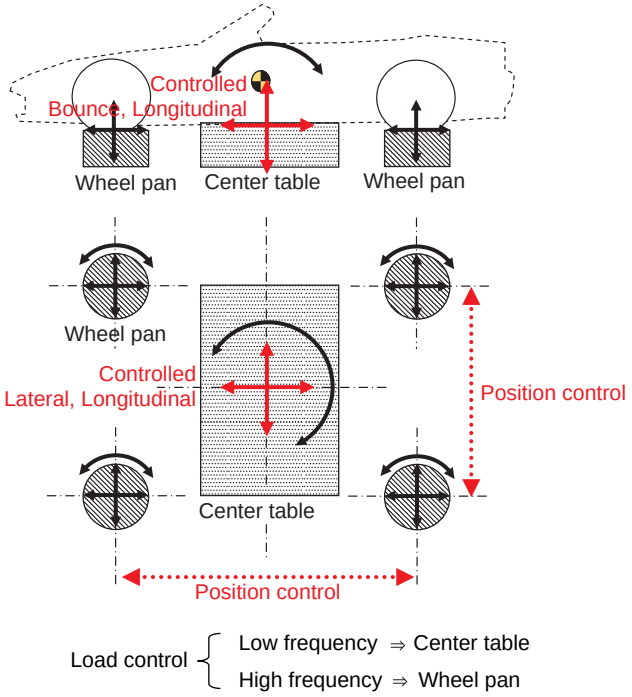


Fig. 8 Theory of BCMS

５．シミュレーションの検証

Fig. 9 は制御目標となるタイヤ接地面の力と，BCMS によってDVSに再現された実走行状態から観測された接地面で発生している力を比較したグラフの一例である．両者は互いによく一致しており，BCMS により限界領域の走行状態を台上で再現できることが検証できた．

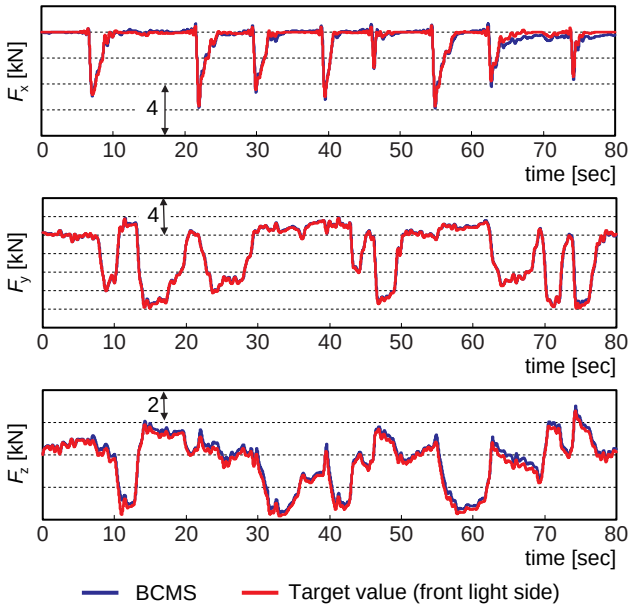


Fig. 9 Comparison between BCMS and measurement values

６．分析例

Fig. 10 は BCMS により再現された台上における実走行相当のサスアライメント変化(トー変化)特性を計測したものと，F_x の制御目標を０，続いてアライニングトルク M_z の制御目標を０，最後に F_y の制御目標を０という順で順次力を無くしていったときに現れるトー変化特性の違いを比較したグラフである．上段のグラフでは，制駆動方向に対するトー変化特性を見ることができ，中段のグラフでは，アライニングトルクに対するトー変化を見ることができる．下段のグラフでは横力に対するトー変化の様子がわかり，トー変化に関する各種コンプライアンス特性を実走行に基づいて確認することができる．これにより，特定の場所で生じている特徴的な車両挙動について，各種コンプライアンス特性からの分析が可能となる．また車体姿勢の変化などから空力特性の影響などを分析したり，実走行では計測しにくいピッチやロールについても定量的な分析を進めることが可能となった．

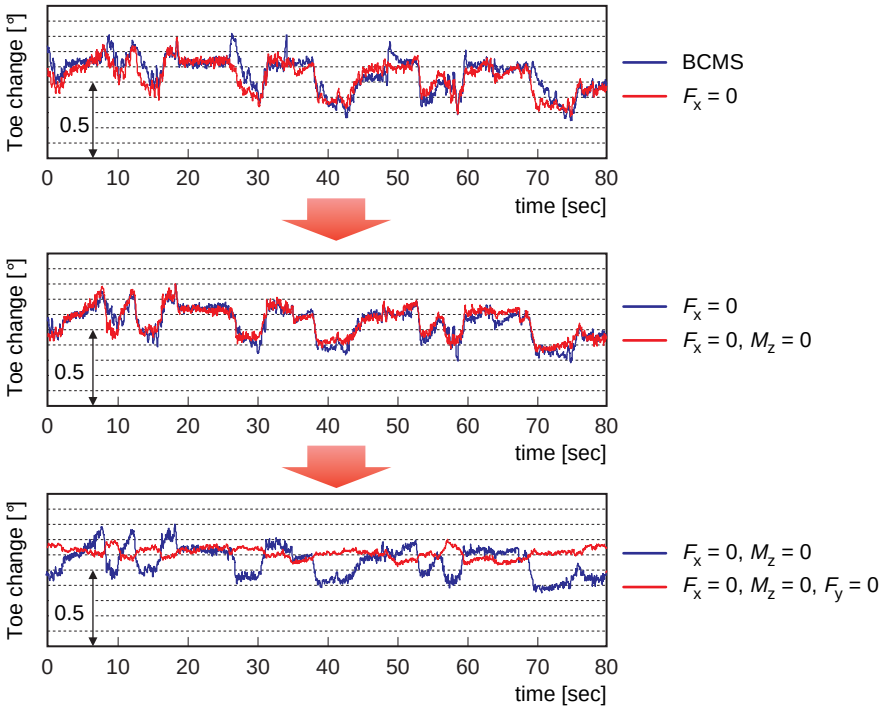


Fig. 10　Compliance characteristics of toe by F_x & M_z & F_y

7．まとめ

本研究では，停止状態から限界領域に至るさまざまな走行状態をDVSを用いて再現させ，台上試験により走行状態における各種の車両特性を分析するための技術構築に取り組んだ．以下に得られた結果をまとめる．

（1）限界領域を含む走行状態の再現では，ロードコントロールとポジションコントロールの使い分けの重要性が確認された．BCMSでは低周波成分と高周波成分に制御目標を分け，それぞれについてホイルパンとセンタテーブルの動作を分担させることで，限界領域を含む走行状態の再現が可能となった．

（2）BCMSの開発により，停止状態から限界走行までの広い範囲で走行状態が台上に再現されていることが検証された．

（3）BCMSによるロードシミュレーションにより，繰り返しテストが容易になり，計測困難な物理量の計測も可能となった．また過渡的な各種のコンプライアンス特性を実走行状態に基づいて定量的に分析することが可能となった．

参考文献

（1）堀之内克年，米川隆，加納民夫，内海聖舟：シャシー動特性解析技術の開発　第1報：シャシー動特性試験機の開発とその適用，自動車技術会学術講演会前刷集，No.964, p.113-116(1996)

（2）加納民夫，堀之内克年，米川隆，長原尚：シャシー動特性解析技術の開発　第2報：実機を用いたリアルタイムシミュレーションシステムの開発，自動車技術会学術講演会前刷集，No.964, p.117-120(1996)

■著　者■


豊島貴行


James CUNNANE


Mike KENLEY

運転席用 i-SRS エアバッグシステム 連続容量変化タイプの紹介

Driver-side i-SRS Airbag System with Continuously Staged Inflation

長井　誠*　野崎裕之*　千田祐介*
Makoto NAGAI　Hiroyuki NOZAKI　Yusuke CHIDA
佐々木　裕*　谷口直人*　中島宗寿*
Yuu SASAKI　Naoto TANIGUCHI　Munetoshi NAKASHIMA

要　旨

エアバッグシステムは，さまざまな乗員の体格や乗車姿勢，衝突形態などに，最適に乗員保護性能を発揮することが望ましい．

しかし，従来技術のドライバ側エアバッグは，さまざまな状況において，早く膨らませることや長く乗員保護性能を持続するために，エアバッグ展開による乗員への衝撃力を増大させることなく，最適な乗員保護性能を発揮するには，二段式インフレータや着座検知システムなどによる複雑な制御が必要であった．

しかし規定圧力で破断する渦巻き状の縫製技術と排気タイミング制御により，従来技術に比較しシンプルなシステムで，体格の違いや衝突の状況に幅広く対応した乗員保護ができると共に乗員への衝撃力を増大させないような，連続容量変化タイプドライバエアバッグを開発した．

ABSTRACT

It is desirable for airbags to provide optimal occupant protection performance for vehicle occupants, who come with a variety of physiques and riding postures, in a variety of collision circumstances, among other variables.

However, in order to enable the bag to be inflated more quickly and to maintain occupant protection performance over a longer period under various circumstances, current driver-side airbag systems necessitate the use of dual stage inflators, occupant position detection systems, and the like, to enable the complex control necessary for the provision of optimal occupant protection performance without increasing the risk of inflation injury upon airbag deployment.

A driver-side airbag with continuously staged inflation was therefore developed using spiral sewing technology that tears at specified pressures together with vent timing control. Featuring a simpler system than that of the existing technology, this airbag is able to provide more tailored occupant protection for a wider range of differing physiques and collision circumstances and appears to do so without increasing inflation injury risks.

1．まえがき

1987年に国産車初の運転席用エアバッグシステムを開発して以来，最適な乗員保護性能の発揮と，エアバック展開による衝撃力の最小化を高い次元で両立するという不変の課題に取り組み続け，世界初の二段点火式インフレータや乗員姿勢検知システムなどの技術を生み出してきた．

エアバッグ開発においては，乗員の体格や乗車姿勢，衝突形態などさまざまな状況が想定される．そしてそれらのさまざまな状況に対応するため，例えば，小柄なドライバは通常ステアリングに近いポジションになり，エアバッグが早く拘束することが望ましい場合がある．一方，ステアリングから遠いシートポジションの乗員はより長く乗員保護性能を持続することが望ましい場合もある．

しかし，従来技術のドライバ側エアバッグでは，早く膨らませることや長く乗員保護性能を持続するために，エアバッグ展開による乗員への衝撃力を増大させることなく，最適な乗員保護性能を発揮するには，二段点火式インフレータや着座検知システムなどによる複雑な制御が必要であった．

そこで，従来技術に比較しシンプルなシステムで，より早い展開性能およびより長い乗員保護性能を発揮し，かつ

＊四輪R&Dセンター

https://doi.org/10.69239/hondatechnicalreview.2009_21_2_12

展開による衝撃力を増大させないことを目標とした．そのために，規定圧力で連続的に容量を変化することができる縫製技術と，インフレータから発生したガスを有効に使うことができる排気タイミング制御技術の二つの新技術を有するドライバ側エアバッグを開発した．

この新構造運転席用 i-SRS(Supplemental Restraint System)エアバッグシステム連続容量変化タイプについて紹介する．

2．連続容量変化と排気制御機構

2.1. 連続容量変化技術

新構造ドライバ側エアバッグを Fig. 1 に，従来技術のドライバ側エアバッグを Fig. 2 に示す．

新構造ドライバ側エアバッグは従来ドライバ側エアバッグに，新たに二つの技術を導入した．

その技術の一つである連続容量変化技術は，エアバッグ内圧が規定内圧以上に達すると，連続的に破断する渦巻状の縫製技術の構築により達成した．

これは，エアバッグ反力を早く発生させる，乗員側への飛び出しを抑制する，エアバッグを規定内圧にコントロールしながら連続的に容量を変化させる，という三つの役割を担っている．

2.2. 排気タイミング制御技術

もう一つは，設定したタイミングまでガス排気をおこなわない，排気タイミング制御技術である．

従来技術のドライバ側エアバッグは常に開放した排気孔を備え，ガス発生時にも乗員の荷重に応じて排気孔を介したガス排気がおこなわれる．一方，この新構造ドライバ側エアバッグは最大容量付近までガス排気をおこなわないため，インフレータから発生するガスを効率良く使い，エアバッグ保護性能持続時間をより長くするとともに，低いインフレータ出力により乗員への衝撃力を緩和する，という二つの役割を担っている．

排気タイミング制御技術の構造を Fig. 3 に示す．

エアバッグを構成する乗員側のパネルとステアリング側のパネルの間に設置したベントホールフラップで排気弁をふさぎ，破断する渦巻状の縫製と共縫することで，容量変化とエアバッグ内圧に連動した排気動作が可能となった．

2.3. 展開プロセス

日本国内における自動車の安全性能評価基準の一つである JNCAP(Japan New Car Assessment Program)の AM50%ダミー(成人男性の50パーセンタイルダミー)を用いた正面衝突テストにおいて，同等の乗員保護性能を示す新構造ドライバ側エアバッグと従来技術による単一点火式ドライバ側エアバッグの，展開過程とエアバッグ内圧特性比較を Fig. 4 に示す．(インフレータ：国内シングル点火仕様)

エアバッグ点火後 17msec で新構造ドライバ側エアバッグは反力が発生する〔Fig. 4(a)〕．この時点ではガス排気をおこなわない．しかし，従来技術のドライバ側エアバッグは展開と同時にガス排気を開始する．このように新構造ドライバエアバッグの展開反力発生時間が早いのは展開初期の容積が少ないことによる．また，この効果によりエアバッグの厚さ方向のストロークが減少することから展開時の乗員との相互作用を低減することができる．Fig. 5における新構造ドライバ側エアバッグと従来技術のドライバ側エアバッグの比較から，新構造ドライバ側エアバッグは乗員側へのエアバッグの飛び出し量を低減できることがわかる．

さらに展開が進むと 27msec で従来技術のエアバッグの展開反力が発生する〔Fig. 4(b)〕．新構造エアバッグは内圧が規定値まで上昇すると，渦巻状の縫製を内側より連続的に破断し，内圧を規定値以上に上昇しないようにコントロールしながら容積の膨張が進行する．

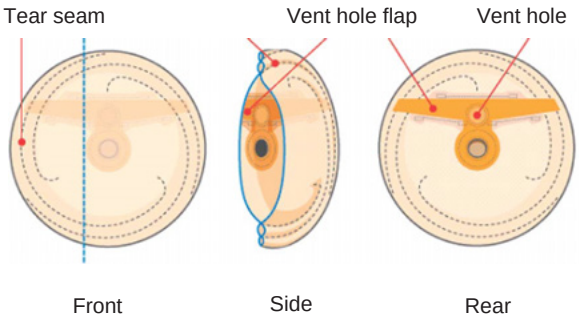


Fig. 1　New airbag structure

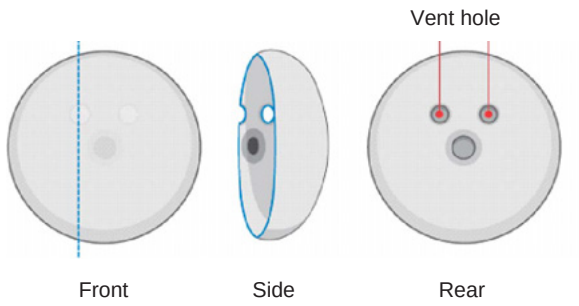


Fig. 2　Existing airbag structure

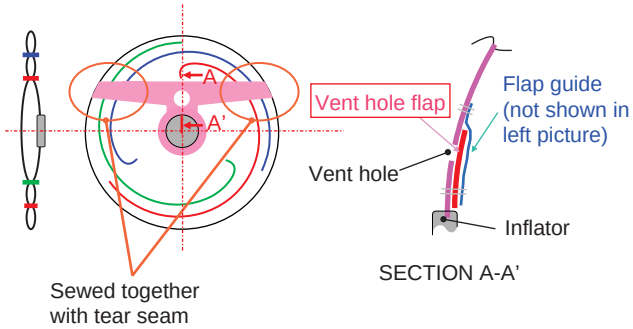


Fig. 3　Structure for control of venting

さらに展開が進み 40msec で従来技術のドライバ側エアバッグはピーク内圧に達する〔Fig. 4(c)〕．一方，新構造ドライバ側エアバッグはベントホールフラップがフリーになり，ガス排気動作に移行する．

そして 50msec でベントホールフラップがエアバッグの圧力により排気弁より押し出されガス排気がおこなわれる〔Fig. 4(d)〕．

また，新構造ドライバ側エアバッグの展開反力発生時間をT_Nに，従来技術のドライバ側エアバッグの展開反力発生時間を T_E に示す．

新構造ドライバ側エアバッグは従来技術ドライバ側エアバッグに対しおよそ 1.5 倍の長い間，展開反力〔内圧≧0 (kPa)〕を発生することができた．

また，インフレータより発生するガスを効率良く使用するため，インフレータ出力を低減することができる．

従来技術のドライバ側エアバッグに使用したインフレータ圧力に対する新構造ドライバ側エアバッグに使用したインフレータのタンク圧力比を Fig. 6 に示す．

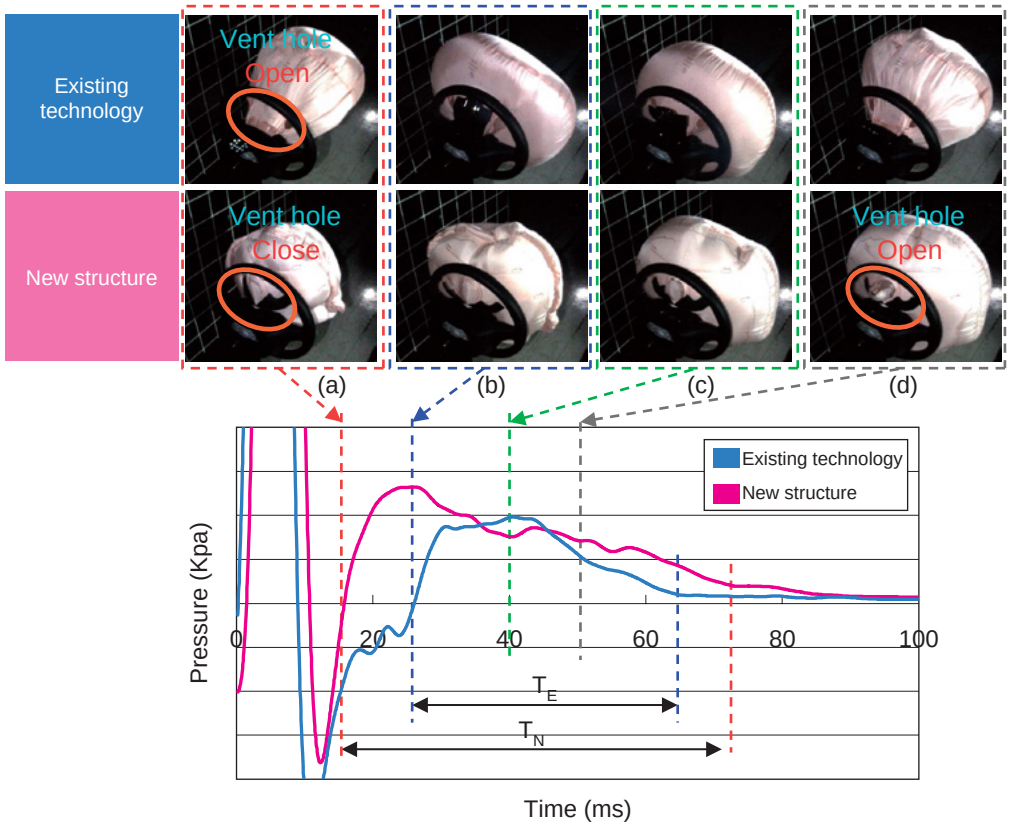


Fig. 4 Airbag pressure time histories: existing technology versus new structure with air bag deployment behaviors

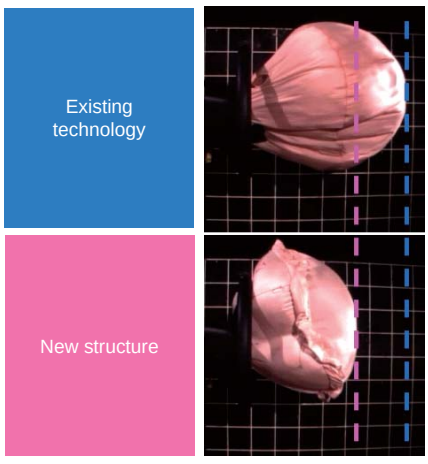


Fig. 5 Air bag shape at initial deployment stage

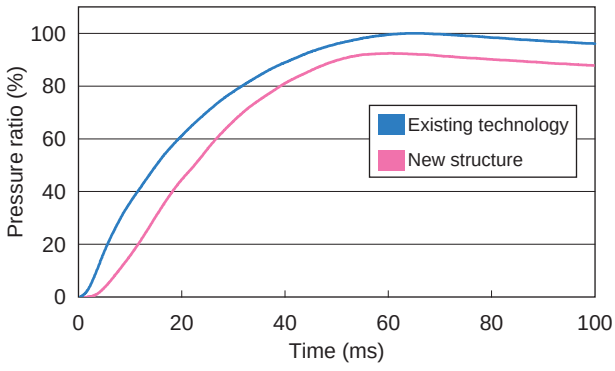


Fig. 6 Tank pressure-ratio time histories

3．性能評価

3.1. 乗員保護性能

新構造ドライバ側エアバッグと従来技術のドライバ側エアバッグの JNCAP の正面バリア衝突テストの傷害値比較を Fig. 7 に示す．（インフレータ：国内シングル点火仕様）また，このように JNCAP の正面バリア衝突テストにて同等の乗員保護性能を有する新構造ドライバ側エアバッグと従来技術のドライバ側エアバッグにて，シートを最前端に調節し，AF5%ダミー(成人女性の５パーセンタイルダミー)を着座させ，シートベルトを装着した状態で 55 km/h の正面バリア衝突テストの乗員保護過程におけるエアバッグ展開挙動を Fig. 8 に示す．

20msecで従来技術のドライバ側エアバッグに対し新構造ドライバ側エアバッグはより早くエアバッグの展開反力を発生する形状を形成することが確認できる．

このテスト結果の各傷害計測部位における従来技術のドライバ側エアバッグに対する傷害値比を Fig. 9 に示す．

結果として傷害部位すべて従来技術傷害レベルを低減した．また，頸部の傷害値比はおよそ 30%低減できた．

3.2. 低衝撃性

Fig. 8 より新構造ドライバ側エアバッグは，はじめに小容量のエアバッグを形成し，その後，放射状に膨張するため，乗員方向への飛び出し量を抑制でき，乗員への衝撃力を低減できた．Fig. 8 の 20msec より確認できる．

また，エアバッグの衝撃力を評価する手法の一つとして AF5%ダミーの胸部をエアバッグモジュールに接触させておこなう試験がある．この評価手法におけるダミーを Fig. 10 に示し，従来技術のドライバ側エアバッグの胸たわみ量に対する新構造ドライバ側エアバッグの胸たわみ量の比を Fig. 11 に示す．新構造ドライバ側エアバッグは Fig. 6 に示すように発生ガスをより効率良く使用するため，インフレータ出力を低減でき，それにより乗員への衝撃力を低減できた．

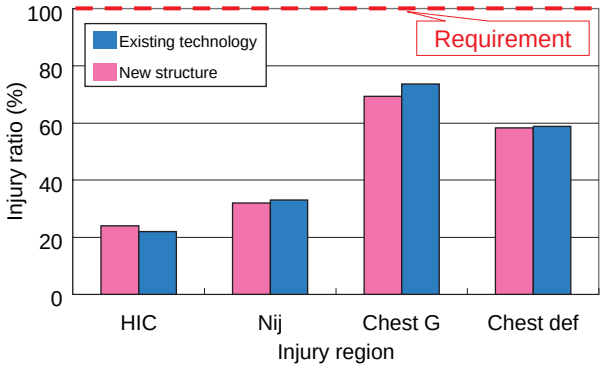


Fig. 7 Comparison of injury ratio of AM50% dummy in various injury measurement regions between existing technology and new structure

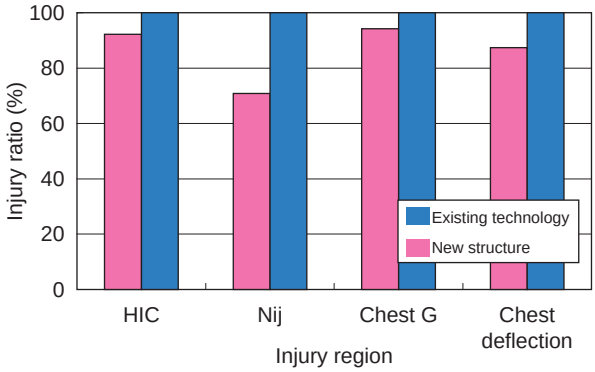


Fig. 9 Comparison of injury ratio of AF5% dummy in various injury measurement regions between existing technology and new structure

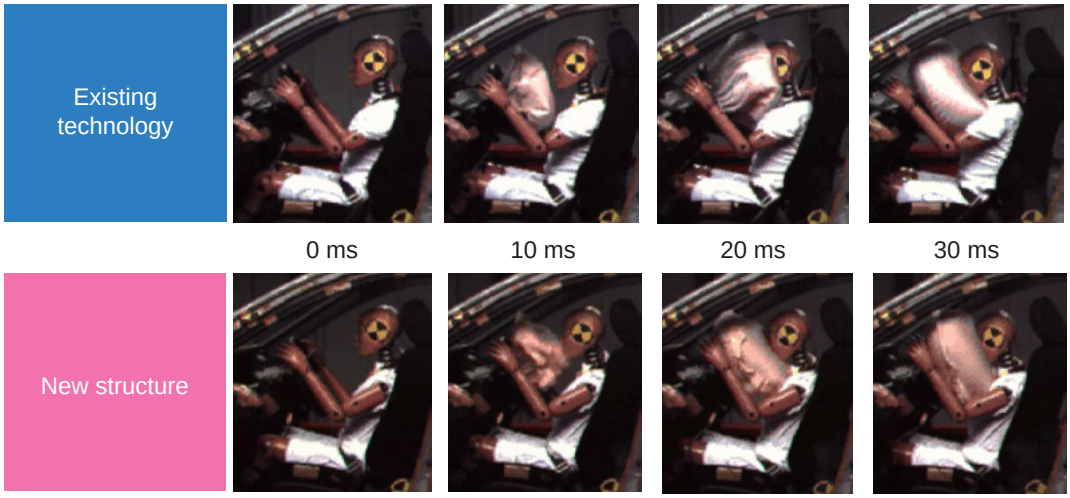


Fig. 8 Comparisons of behavior of air bag and AF5% dummy at frontmost seating position between existing technology and new structure



Fig. 10 AF 5 % dummy set for measuring impact force of air bag

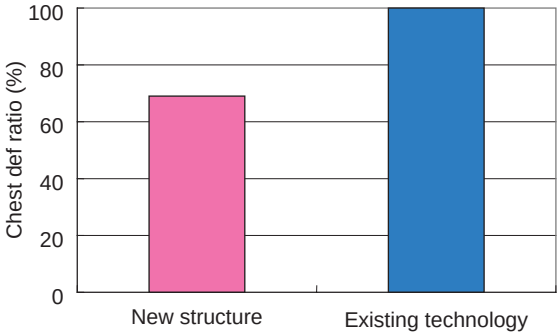


Fig. 11 Chest deflection ratio

4．まとめ

ドライバ側エアバッグの乗員保護性能を体格や衝突の状況により幅広く対応するために，

（1）連続容量変化技術

（2）排気タイミング制御技術

上記二つの技術構築から，より早い展開性能およびより長い乗員保護性能を発揮し，かつ展開による衝撃力を増大させない，新構造ドライバ側エアバッグを開発した．

今後も，実際に起こりえる事象を考慮し，エアバッグのさらなる乗員保護性能向上と衝撃力低減の，高次元での両立を目指し研究開発を続けていく．

■著　者■


長井　誠


野崎裕之


千田祐介


佐々木　裕


谷口直人


中島宗寿

視界制御機能付き樹脂製ウインド

Plastic Window with View Control Function

平 山 貴 邦*
Takakuni HIRAYAMA

衣 鳩 心 一*
Shinichi IBATO

村 上 誠 人*
Masato MURAKAMI

要　旨

角度に応じて透明度が変化する視界制御機能付き樹脂製ウインドを開発した．視界制御機能の付与には，二重像の発生が無くクリアな視界が得られる特殊高分子フィルムの中から，それぞれのウインドに適した角度と不透明度の関係を有するものを選定した．また，車室内環境で使用できるように特殊高分子フィルムをハードコート付きポリカーボネートで挟み，端部をアルミテープでシールする部品構造にした．さらに，品質を安定化させるため視界制御フィルムの圧着プロセスを新たに開発した．この部品を新型燃料電池車 FCX クラリティに搭載することにより，エクステリアデザインや車両規格を損なうことなく，ドライバの良好な後方視界と実用性あるトランク容量を両立することができた．

ABSTRACT

Plastic windows provided with a view control function that changes the level of transparency depending on the angle of view have been developed. In order to realize the view control function, special polymer films were selected which provide a clear view without ghost images and which possess a suitable relation between angle and opacity for each window. Taking the vehicle cabin environment into consideration, these special polymer films are sandwiched between hard-coated polycarbonate sheets, and the edges of the films are sealed with aluminum tape. In addition, a new film pressing process has been developed in order to help ensure stable quality. The use of the new windows in the next-generation fuel cell vehicle FCX Clarity has reconciled good rearward visibility for the driver with a practical trunk capacity, without affecting exterior design or vehicle standards.

1．はじめに

環境課題を解決するエコカーとして注目されている燃料電池車は，燃料電池スタックや水素タンクなど普通自動車にはないパワートレインを搭載している．2008 年 6 月に生産を開始した新型燃料電池車FCXクラリティのパワートレイン配置を Fig. 1 に示す．この車はこれらパワートレインを小型化し適所に配置することで，実用性を備えながら低床と低全高のスポーティフォルムを実現した(1)．

水素タンクが配置されたリヤフォルムをFig. 2に示す．トランクリッド上部にはドライバの後方視界を補助するためのエクストラウインドが設けられた．水素タンクで制限されたトランクルームにおいて実用性のあるトランク容量を確保するため，角度に応じて透明度が変化する視界制御機能付き樹脂製ウインド(以下，視界制御ウインド)を開発し，ガラス製のエクストラウインドと組み合わせて搭載した．

本稿では，視界制御ウインドの技術内容について紹介する．

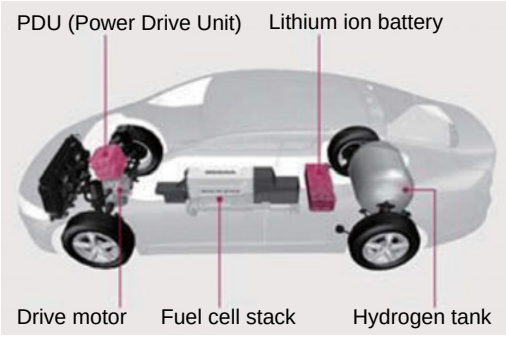


Fig. 1　FCX Clarity powertrain layout



Fig. 2　Rear view of FCX Clarity

＊四輪R&Dセンター

https://doi.org/10.69239/hondatechnicalreview.2009_21_2_13

2．トランク周りの車体設計

FCX クラリティのトランクルームを Fig. 3 に示す．水素タンクがリヤシートの後部に配置された本車両のトランク周りにおいては，実用性のあるトランク容量の確保が車体設計の鍵となる．トランク容量を確保する対策としては車体後部のオーバーハング量や車幅の拡大が考えられるが，エクステリアデザインや車両規格の制限でこれらの拡大ができない．そこで，トランクリッドの設置高さを高くしてトランクルームの高さを確保することを検討した．しかし，トランクリッドの設置高さを高くするとリヤウインドの上下幅が狭くなり，ドライバの後方視界が狭まるという課題が生じた．ドライバ後方視界を狭めることなくトランクルームの容積を拡大するため，内装部品であるリヤトレイガーニッシュおよびトランクリッドライニングにそれぞれ透明の樹脂製ウインド(以下，リヤトレイウインドおよびトランクリッドウインド)を設定した(Fig. 4)．これにより，ドライバはリヤウインドだけでなくボデーのエクストラウインドからも，二つの樹脂製ウインドを介して後方を確認することができる．



Fig. 3　Trunk room of FCX Clarity

3．トランク周辺の視界設計

Fig. 4 の構造によりドライバの後方視界は良好になったが，駐車中に車体側面および後方からトランクルーム内をのぞきこむことができるという新たな課題が生じた．トランクルーム内のプライバシを保護するためには，これら車外からの視線を抑制することが望まれる．そこで，角度に応じて透明度が変化する視界制御機能付きフィルム(以下，視界制御フィルム)を用いた視界制御ウインドを開発し，二つの樹脂製ウインドに適用することを試みた．

視界制御ウインドとドライバの視界との関係を表した平面図を Fig. 5 に示す．リヤトレイウインドおよびトランクリッドウインドには，網掛けで示したドライバのルームミラー視界および直接視界を確保することが求められる．それと同時に，車体側面に立った人のリヤドアガラス越しに注がれるトランクルーム内への視線を抑制することが望まれる．トランクルーム中央に置かれた荷物を例にとると，Fig. 5で破線に囲まれた二つの領域が視線を抑制したい領域に当たる．そこで，リヤトレイウインドにはドライバの視線が進入する角度は透明度が高く，リヤドアガラス外側からの視線が進入する角度は透明度が低い視界制御ウインドを搭載した．

また，視界制御ウインドとドライバの視界との関係を表した側面図を Fig. 6 に示す．側面図においてもリヤトレイウインドおよびトランクリッドウインドは，網掛けで示したドライバのルームミラー視界および直接視界を確保することが求められる．それと同時に，車体後方に立った人のエクストラウインド越しに注がれるトランクルーム内への視線を抑制することが望まれる．トランクルーム中央に置かれた荷物を例にとると，Fig. 6で破線に囲まれた領域が視線を抑制したい領域に当たる．そこで，トランクリッドウインドにはドライバの視線が進入する角度は透明度が高く，エクストラウインド上方からの視線が進入する角度は透明度

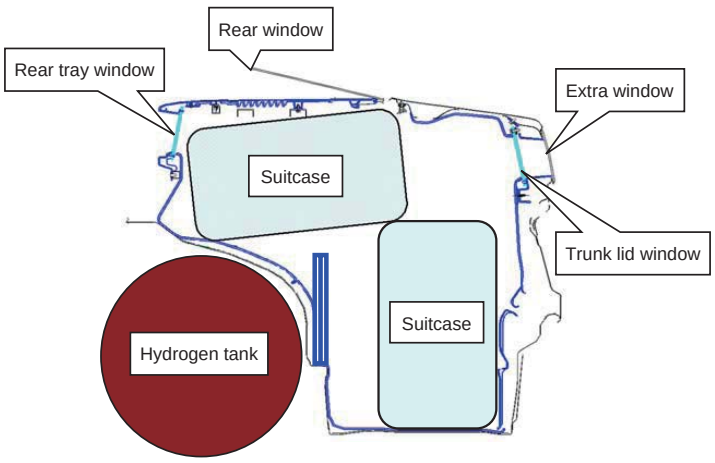
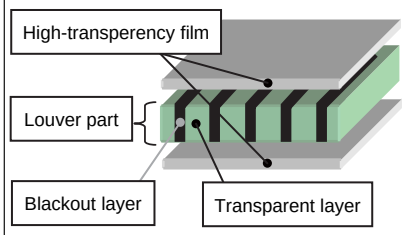
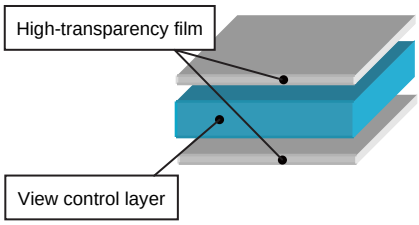


Fig. 4　Structure around trunk of FCX Clarity

Table 1　Setting angle and transparency of view control windows

Setting area	Setting angle		Setting transparency (haze ratio)
	Rear tray window	Trunk lid window	
Transparent area	From -10 to 10 deg.	From -10 to -30 deg.	20% Max.
Opaque area	From 30 to 50 deg., from -30 to -50 deg.	From 5 to 50 deg.	60% Min.

Table 2　Structures of view control films

	Louver structure film	Special polymer film
Structure		
Control factor	Light transmission	Haze ratio

が低い視界制御ウインドを搭載した．

レイアウトによる検証および実機による確認をおこなって設定した視界制御ウインドの角度と透明度の関係をTable 1 に示す．

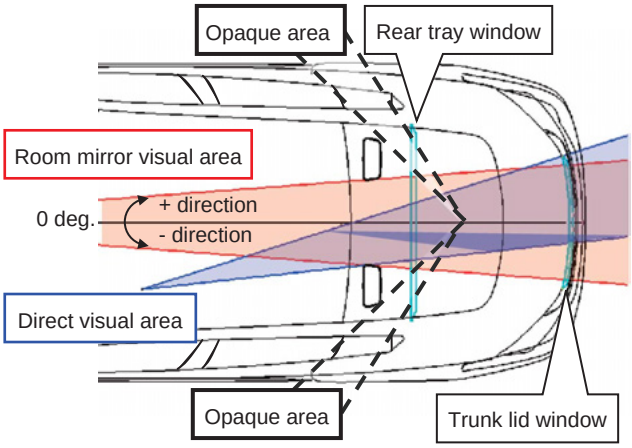


Fig. 5　Plane view of visual areas around rear tray window (for left-hand drive car)

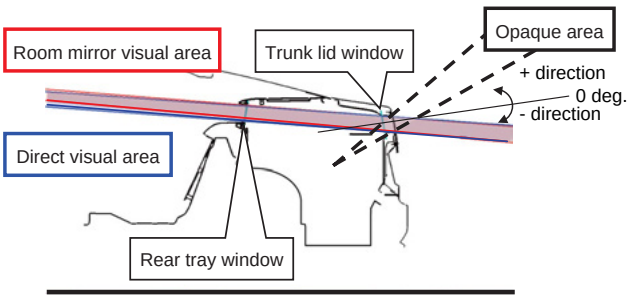


Fig. 6　Side view of visual areas around trunk lid window

4．視界制御フィルムの選定

視界制御フィルムは光の制御方法により２種類に大別することができる．２種類の視界制御フィルムの構成をTable 2 に示す．

ルーバ構造フィルムは光制御機能を有するルーバ部とその保護を目的とした高透明度フィルム部からなり，ルーバ部は透明層と遮光層とが交互に配された構造をとっている．ルーバ部は入射する角度によって開口率が変化するため，全光線透過率が変化する．全光線透過率の低い角度からフィルムを通して見た場合，得られる視界は暗く見えにくい．このような仕組みにより，ルーバ構造フィルムの透明度は見る角度によって変化する(2)．

一方，特殊高分子フィルムは光制御機能を有する視界制御部とその保護を目的とした高透明度フィルム部からなり，視界制御部は屈折率の異なる層が交互に配された構造をとっている．この規則的な高次構造は入射する角度によって光の散乱度合い(ヘイズ率)を変化させる．ヘイズ率の高い角度からフィルムを通して見た場合，得られる視界は白濁し見えにくい．このような仕組みにより，特殊高分子フィルムの透明度も見る角度によって変化する(3)．

ルーバ構造フィルムはルーバ部に光学特性に優れるシリコーンゴムを使用しているため環境耐久性に優れるというメリットを有する．しかし，異なる開口部から進入した光が干渉し合うため，フィルムを通して得られた視界に二重像が発生してしまうデメリットを有する．これに対し，特殊高分子フィルムはフィルムを通してクリアな視界が得られるというメリットを有する．ドライバの後方確認のしやすさを考慮した結果，クリアな視界が得られる特殊高分子フィ

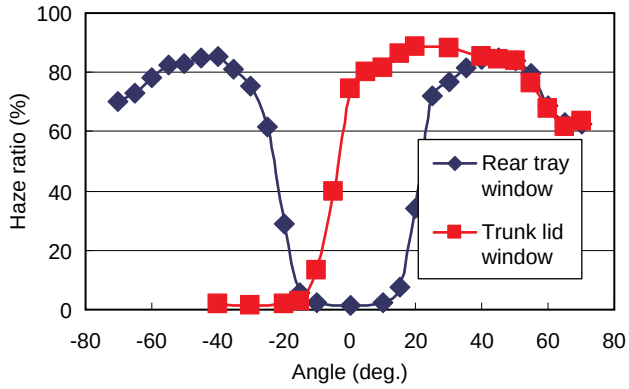


Fig. 7 Relation between angle and haze ratio for view control films

ルムを選定した．視界制御ウインドに適用した特殊高分子フィルムの入射角度とヘイズ率の関係を Fig. 7 に示す．

5．視界制御ウインド部品構造

特殊高分子フィルムを車室内環境に適用しようとした場合，二つの課題をクリアする必要があった．

一つ目の課題は傷が付きやすいことである．ドライバの後方視界に寄与する視界制御ウインドには高い耐傷付き性が要求されるが，特殊高分子フィルムは傷付きやすいことがサンプル試験により確認された．

二つ目の課題は揮発物質である．夏場炎天下に放置した車の車室内を想定したサンプル試験において，特殊高分子フィルムから発生した揮発物質は視界制御ウインド表面およびウインドガラス内面に付着し，油膜を作って曇らせる恐れがあることが確認された．

これら二つの課題を解決するため，視界制御ウインドの構造を工夫した(Fig. 8)．特殊高分子フィルム両面を粘着加工してポリカーボネートで挟み，ポリカーボネート外側を耐摩耗性の高いポリシロキサン系ハードコートでコーティングした．さらに，部品側面をガスバリア性の高いアルミテープでシールした．このような部品構造にすることで特殊高分子フィルムを車室内に適用することができた．なお，ポリカーボネート外側の外周には黒塗装を施し，黒色セラミック調の外観を付与した．

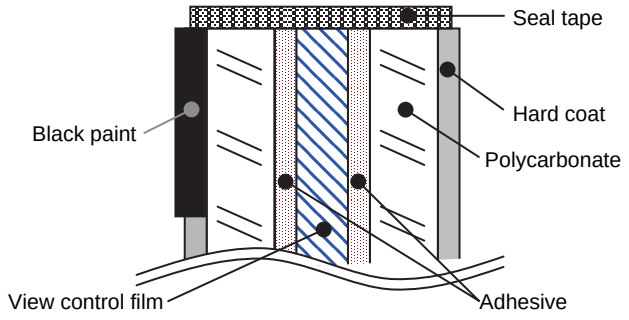


Fig. 8 Configuration of view control window

6．製造プロセス

品質を安定化させるため，視界制御ウインドの製造プロセスも工夫した．

未処理のポリカーボネートに特殊高分子フィルムを貼り付けると，熱環境下でポリカーボネート中の水分が揮発して視界を阻害することが想定された．そこで，特殊高分子フィルムを貼り付ける前にポリカーボネートを加熱乾燥した．

また，比較的大面積な部品サイズに対し視界制御フィルムを空気のかみ込み無く貼り付けるため，特殊な治具を開発し減圧下でフィルムを圧着した．

このように，視界制御フィルムの圧着に関し新たなプロセスを開発することで，視界制御ウインドの初期品質および長期品質を安定化させた．

7．まとめ

新たに開発した視界制御ウインドを新型燃料電池車FCXクラリティのトランクリッドウインドおよびリヤトレイウインドに適用した．

(1) ドライバの視線が進入する角度は低ヘイズ率に，外部からの視線が進入する角度は高ヘイズ率になる特殊高分子フィルムを用いることで，クリアな後方視界とトランクルームのプライバシ保護を両立した．

(2) 構造および材質を適切に設計した，車室内環境に使用可能な視界制御ウインドを開発した．

(3) 適切な製造プロセスを組むことで，品質を安定化させた．

視界制御ウインドを採用することでエクステリアデザインや車両規格を損なうことなく，ドライバの良好な後方視界と実用性あるトランク容量を両立することができた．

参考文献

(1) 松永稔，福嶋達也，尾島邦明，木村顕一郎，小川隆行：FCX クラリティ用燃料電池パワートレイン，Honda R&D Technical Review, Vol.21, No.1, p.7-14

(2) 岩間進：シンエツ VCF における視野コントロール技術，月刊ディスプレイ，2006 年 5 月号，p.62-69(2006)

(3) 川村和充：視野制御フィルム「ルミスティー」，新素材，11 月号，p.71-75(1993)

■著 者■


平山貴邦


衣鳩心一


村上誠人

インストルメントパネル本体成形型の短期試作工法

Technology for Rapid Manufacture of Prototype Molds for Instrument Panels

戸　口　康　宏*
Yasuhiro TOGUCHI

要　旨

自動車開発中のテスト車に使用する，インストルメントパネル本体を成形する短期試作工法を開発した．

量産部品と同様にポリプロピレンの射出成形が可能な，短期間で製作できる試作型である．この型の特徴は，重切削，放電加工をおこなわないマスタモデル反転工法を用い，型の素材にカーボン繊維を使用した強度耐久性に優れた樹脂型（カーボン型）である．

本工法により新型インサイトのインストルメントパネルを試作し，衝突試験に用いた．この試作型は従来のZAS型試作工法に対し，型製作コストは同等に抑え製作期間を20%短縮した．

ABSTRACT

A method has been developed enabling rapid manufacture of prototype molds for instrument panels used in test vehicles in the automotive development process.

The new prototype molds are produced using polypropylene injection molding, as used for mass-produced parts, enabling manufacture in a shorter period. The master model transcription method is used, obviating the necessity for heavy machining or electrical discharge machining. Carbon fibers have been used in the material for the new resin molds (known as “carbon molds”) resulting in outstanding strength and durability.

The new method was employed to manufacture prototype instrument panels for the new model INSIGHT, which were used in crash tests. The use of the new method has enabled prototype molds to be produced at the same cost as conventional ZAS molds, but with a 20% reduction in production time.

1．まえがき

自動車における衝突安全機能は重要である．衝突法規要件も年々厳しくなり，各自動車メーカは安全性を向上させている．衝突時の乗員保護にはインストルメントパネルもその役割を担っており，新車開発時の衝突試験には量産部品と同等の試作部品が必要である．

新型車の開発期間中に量産材料の部品でテストをするためには，量産型よりも短期間で安価な試作用の金型を製作し，射出成形のインストルメントパネルを成形する．

従来，試作用にはFig. 1のような亜鉛合金を素材とした簡易金型（以後ZAS型と呼ぶ）を製作し，衝突試験に必要な数量のインストルメントパネルを試作成形していた．

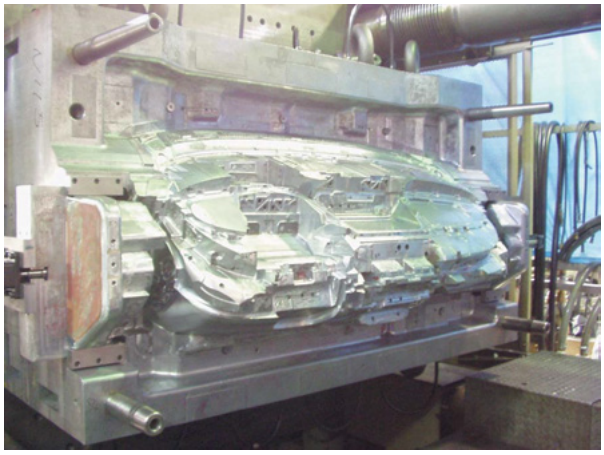


Fig. 1　ZAS mold

＊四輪R&Dセンター

https://doi.org/10.69239/hondatechnicalreview.2009_21_2_14

2．試作金型の製作期間短縮

昨今の新型車の開発期間短縮ニーズに応えるため，樹脂部品の中でも特に製作期間の長いインストルメントパネルの本体部品は，金型製作期間の短縮が課題となっていた．

通常試作用に用いるZAS型に対し製作期間を短縮するため，新たに試作金型開発をおこなった(Fig. 2)．

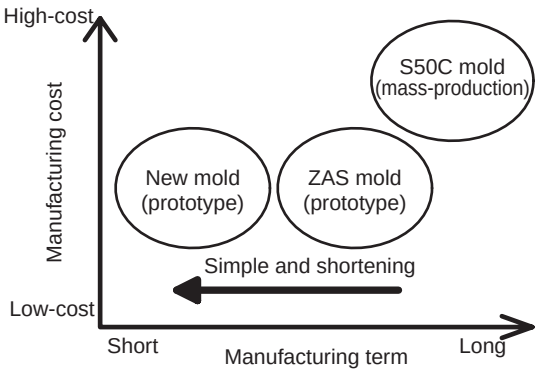


Fig. 2 Development concept for prototype mold

3．新試作型の開発

形状を作り出すには何らかの加工を必要とする．彫刻であれ粘土細工であれ，素材を盛ったり削ったりすることで新たな形状が生まれる．大量生産部品は型から製品が転写されるが元となる型の形状を作るには，型の素材を盛るか素材を削る必要がある．この加工に要する時間を削減するために，工法を検討し材料を選定して短期試作工法を完成させた．

3.1. 工法の選定

量産に用いる射出成形金型は S50C など鋼の素材を NC で切削加工により製作する．これに対して試作金型の生産数量は数百ショット程度であるため量産金型ほどの耐久性は必要ない．現状ZAS型を用いるのは，鋼に比べ鋳造で近似形状の素材を作ることが容易であり，NC切削などの加工速度を高められる素材だからである．なおかつ，量産と同じ樹脂を射出成形できるが鋼ほどの耐久性は必要無い試作工法として目的に合致している．

この従来ZAS型よりも短納期を目指すために，容易に形状が作れる方法を選定した．

まず一つめに形状を転写する反転工法にて金型を製作することにした．一般に木型と呼ばれ古代より用いられた方法であるが，近年はマスタモデルと呼びその素材は木材から樹脂に変化している．形状を作るための盛り，削り加工性は金属に比べて優れている．このマスタモデルによりインストルメントパネルの大まかな形状を作成する．

二つめは光造形に代表されるラピッドプロトタイピングである．光造形でインストルメントパネルの細かい形状を作成し，マスタモデルに組み入れて使用する．

この二つの形状製作方法を用いて Fig. 3 のように金型の形状を作成した．

また，反転工法は表面意匠の転写も可能であり，マスタモデルに皮シボ表皮材などを貼り付ければ，反転しただけで型のシボ加工は完了する．従来のZAS型ではシボ加工に要した４週間を１週間に削減できる．

3.2. 型材料の選定

形状を転写する型の材料として，一般には石膏やシリコンゴムがある．しかし，インストルメントパネル量産用のポリプロピレン材料で射出成形をおこなう型の内部には溶融樹脂の高い温度と圧力がかかる．また，反転工程に何日もかかっては ZAS 型よりも製作期間を短縮する上で不利になる．

よって，以下の条件を考慮し材料を選定した．

(１)型の製作工程

・既存設備で製作できること

・反転工程が２日以内で可能なこと

(２)型の性能

・30 MPa の成形圧力に耐えること

・200 ℃の成形樹脂に接触して破損しないこと

・成形樹脂を冷却するための熱伝導性があること

これらの条件から，型の材料には熱硬化樹脂を選定した．樹脂で樹脂を成形することになるが，インストルメントパネル量産用のポリプロピレン材料は熱可塑樹脂である．これが溶ける温度でも溶けない耐熱性を持つ熱硬化樹脂であれば，型に使用できる．これは一般に樹脂型と呼ばれ，エポキシ樹脂にアルミ粉末を混ぜた材料による射出成形型は試作工法として用いられる．しかし，携帯電話サイズのものが多く，インストルメントパネルのように大きなサイズにな



Fig. 3 Master model

ると成形時の圧力に耐えられず型が破損する事例があった．

よって，開発目標として以下の項目を挙げた．

（1）型強度：インストルメントパネルが成形できること

（2）耐久性：数百ショットの成形に耐えること

（3）物性　：ZAS 型成形品と同等であること

（4）精度　：量産品同等の肉厚と外形寸法であること

3.3. 型材料の強化方法

インストルメントパネルの成形に耐える樹脂型を開発すべく，型材料の強化をおこなった．

熱硬化樹脂の強化方法としては，繊維を用いて複合材とする FRP（Fiber Reinforced Plastics）が一般的である．ここで用いる繊維にも先に述べた材料の選定条件を考慮してカーボンを選定し，CFRP（Carbon Fiber Reinforced Plastics）で樹脂型を作ることにした．

その理由として一般にカーボンは高比強度，高比弾性率の素材として知られ，ほかにも低熱膨張率，耐熱性，化学的安定性，自己潤滑性といった特徴がある．特に着目したのは熱伝導率に優れる点であり，型材料の低い熱伝導率を上げることにつながる．これらカーボンの特性により開発目標をクリアできると考えたためである．

射出成形の型は，溶融樹脂の熱を吸収して固化させる役割をおこなう．そのため，成形により型の温度が上昇する．一般樹脂型の工法で大きな型が破損するのは，温度上昇によって型材料強度が低下し，成形時の圧力に耐えられなくなるためと考えられる．カーボンを用いて熱伝導率を上げることにより，型材料の熱吸収と放熱が早くなり温度上昇を抑え，型材料強度の低下を防ぐことができると考えた．

アイデアを実証すべくカーボン繊維とエポキシ樹脂を用いてテスト用の型を製作した．カーボン繊維は長繊維クロスと短繊維の２種類で製作し，射出成形により比較した．

長繊維クロスの積層方法はハンドレイアップであるが，手作業のため反転工程に４日かかる．さらにはインストルメントパネルの細部形状に対し長繊維クロスが追従できず Fig. 4に示す型断面イメージのように，型内部にボイドが多数発生し Fig. 5 のように射出成形圧力に耐えられず型表面が陥没した．

もう一つの短繊維を用いる方法として，簡易スプレーアップで繊維と樹脂を積層した．Fig. 6 に示すように長さ 1mm 以下のカーボン短繊維とエポキシ樹脂を混ぜてスプレーガンで吹き付ける簡易手法である．インストルメントパネルの細部形状にカーボン繊維を追従させてボイド無く積層できるうえに，反転工程は２日でできるため，短繊維スプレーアップ積層を選択した．

次に短繊維だけで積層した型が射出成形に耐える強度があるのか確認するため，大小さまざまなスプレーガンと短繊維を吹き付けて試験片を作成して引張り強度試験をおこなった．

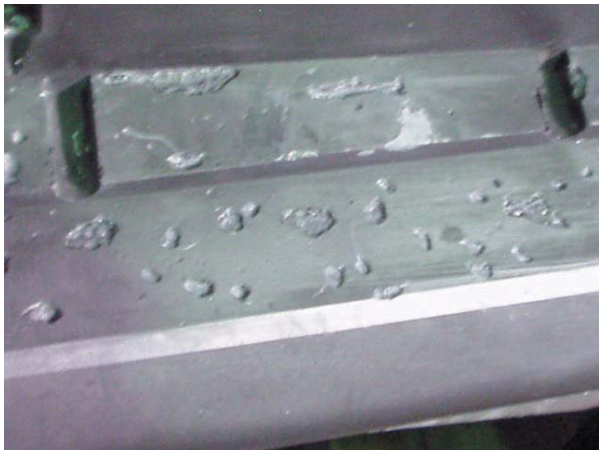


Fig. 5　Cave-in due to void

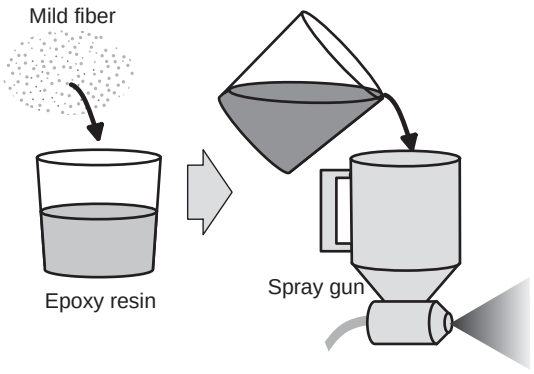


Fig. 6　Simple spray-up of CFRP

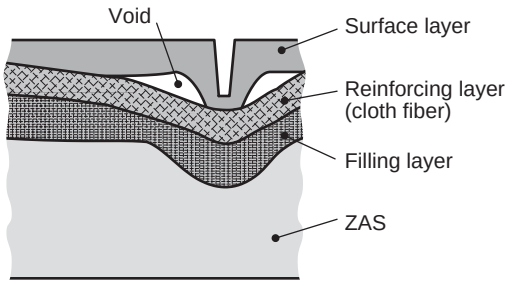


Fig. 4　Void due to lamination defect

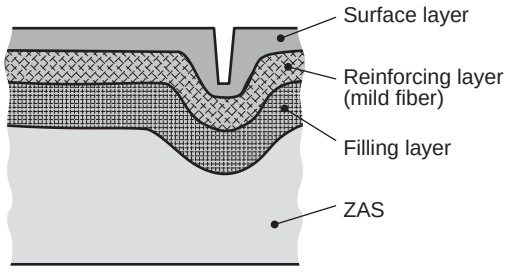


Fig. 7　Voidless lamination using spray

Table 1 Comparison of materials

	Unit	Carbon epoxy	Aluminum epoxy	ZAS
Tensile strength	MPa	63.5	52.0	244.0
Tensile elongation	%	10.3	3	4
Rockwell hardness	–	93.1 HRM	35.3 HRM	63.0 HRG

その結果，Table 1に示すように一般の樹脂型に使われるアルミ粉末入りエポキシ材料に対し引張強度を上回ることができた．さらに，伸び特性はアルミ粉末入りエポキシ材料およびZASに対しても大きい．長繊維が使えないため剛性は低下するが，伸び特性により型材が柔軟性を得たため破断しにくくなる．このため射出圧力による型の破損またはクラックへの耐性が高くなると考える．

開発型のコンセプトは柔軟性によって射出圧力に耐える成形型であり，開発目標を達成する可能性は十分にあると考え簡易スプレーアップ法を採用した．

カーボン短繊維とエポキシ樹脂を混ぜ簡易スプレーアップ法により積層する工法にて Fig. 8 のようにインストルメントパネルの中でも複雑な形状であるボスやリブを反映した試験型を製作した．

ここで試験するボスやリブの長さは，インストルメントパネル設計に適用する限界値であり，逆にこの試験型の形状要素が成形可能であればすべてのインストルメントパネルが成形できる型工法だと確認できる．

この試験型が成形圧力に耐えられるか確認するためインストルメントパネル量産用のポリプロピレン材料で射出成形試験をおこなった．

その成形試験ではZAS型同等の成形をおこない Fig. 9 に示すように 37 MPa の型内部圧力を確認したが，型が破損することはなかった．よって本工法の目標であるインストルメントパネルを成形可能な強度を有すると判断した．

なお，従来の樹脂型では細部形状に金属を埋め込み型の破損を防ぐインサートと呼ばれる手法が取られていた．インサートは Fig. 10 に示すように樹脂型が折れてしまうぜい弱部をアルミなどの金属を機械加工して埋め込み型を強化する役割を持つ．しかし，インサート埋め込み部がクラックのきっかけになることもあり，これが発端で型が破損することもあった．

開発した新試作型(以後カーボン型と呼ぶ)は素材の柔軟性を活かし，先に述べたインストルメントパネルの形状要素に合致した構造であればインサート不要で射出成形が可能である．このインサートレスも本工法の特徴であり，機械加工を削減できるため金型製作期間の短縮に寄与している．

3.4. 成形品の物性と精度

試験型は引張りなどの試験片も成形できるように設計した．同様にZAS型でも試験片を成形し，成形品の引張り強度と伸びを比較した結果，カーボン型とZAS型の成形品は同等であることが確認できた．

成形品の精度はマスタモデルの反転精度に影響されるが，試験型の成形品は肉厚，外形寸法ともに図面公差内に入ることを確認している．開発型は簡易手法で反転製作し，柔軟でありながら射出圧力に耐え，成形品は要求精度の範囲に入ることが確認できた．これらの結果をもってインストルメントパネルのボスやリブ形状が成形可能なカーボン型が完成した．

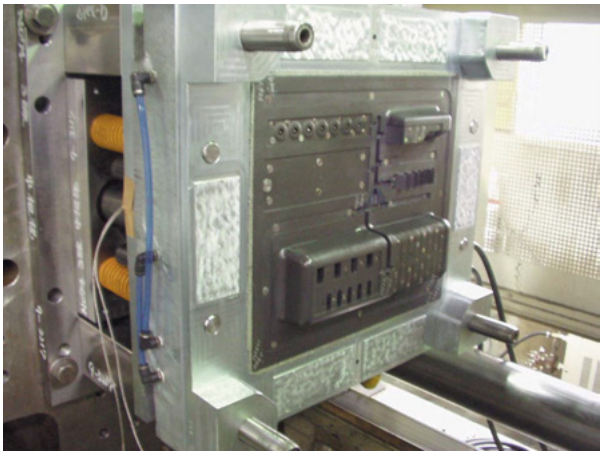


Fig. 8 Test mold

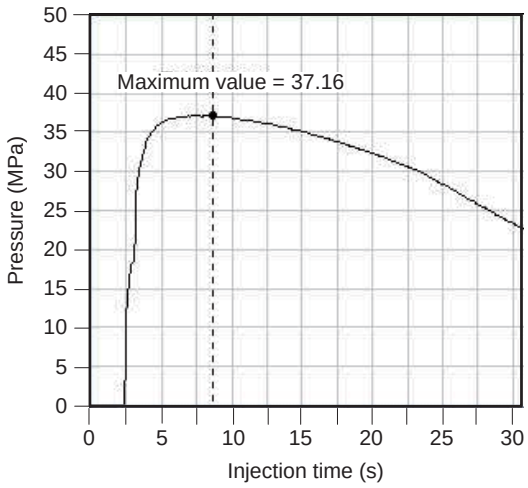


Fig. 9 Internal pressure of mold

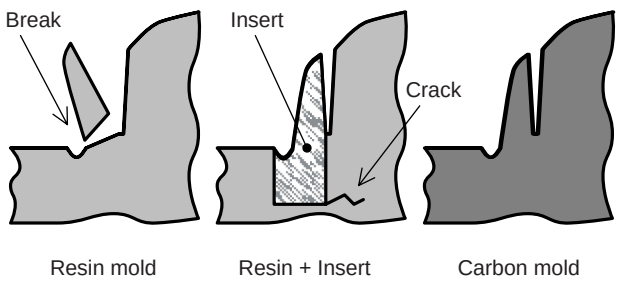


Fig. 10 Insertless molding of vulnerable sites

4．カーボン型の工法

新工法であるカーボン型の断面は Fig. 11 に示すように製品形状部を形成する CFRP と，型全体をバックアップする ZAS で構成する．いわば ZAS 型の製品部を CFRP 化したものである．その CFRP 層は Fig. 7 に示すように，表面層，強化層，充てん層の３層構造である．

インストルメントパネル成形型本体に加えて，型のアンダーカット部に組み込むスライドコアや入れ子についてもカーボン短繊維とエポキシ樹脂を混ぜて製作する．

4.1. 型本体

本体形状の元となるマスタモデルは，素材に汎用の治工具用樹脂を用い NC 切削加工にて製品形状を製作する．

ZAS コアは従来の ZAS 型と同様に消失モデルを用いた砂型で鋳造する．

CFRP 層は先に述べたように３層構造である．マスタモデルに表面層と強化層を積層する．表面層はエポキシ樹脂にカーボン粉末を混入した素材で，スプレーアップ法により積層する．次に強化層としてエポキシ樹脂にカーボン短繊維を混入した素材をスプレーアップ法により積層する．以上２層を積層したマスタモデルに Fig. 12 に示すように ZAS コアをかぶせる．ZAS コアは製品部と 15 mm のすき間を有する近似形状で鋳造し切削加工はおこなわずに製作した．このすき間にカーボン短繊維とエポキシ樹脂を混ぜた充てん層を注入する．

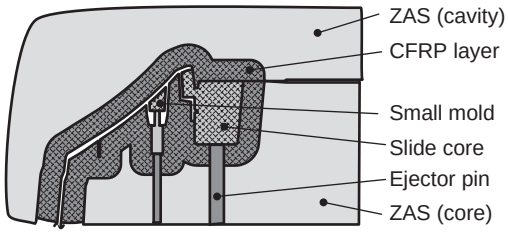


Fig. 11　Section of assembly mold



Fig. 12　Combination of master model and ZAS core

4.2. スライドコアおよび入れ子

Fig. 13 のように光造形でモデルを作り，Fig. 14 に示すように素材を注入してスライドコアや入れ子を製作する．この素材も型本体の充填層と同様に，カーボン短繊維とエポキシ樹脂を混ぜたものである．

注入した素材が硬化した後に光造形モデルから離型除去し，入れ子を取り出すのみで切削加工や放電加工は不要である．

作成したスライドコアや入れ子は，離型剤を塗布した後に型本体のマスタモデルに設置し，CFRP 層を積層することで型本体にスライドコアが入るポケット形状も反転する（Fig. 15）．ポケット形状の切削加工とすり合わせ磨き加工を削減し，金型製作期間を短縮する．



Fig. 13　Model for rapid prototyping



Fig. 14　Casting of core

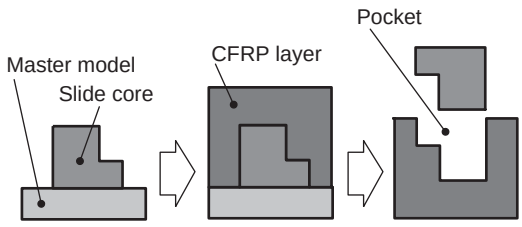


Fig. 15　Non-machined pocket

5．カーボン型の適用事例

カーボン型による試作工法は 2009 年モデルのインサイト開発時に採用し(Fig. 16)，結果として従来ZAS型に比べ製作期間を20%短縮した．インストルメントパネル本体を従来ZAS型と同等の射出圧力で成形し，衝突試験をはじめとするさまざまな試験に使用した．

耐久テストを兼ね数回に分けて 200 本成形したが，型が破損することもなく新車開発に必要な試作部品を供給することができた．

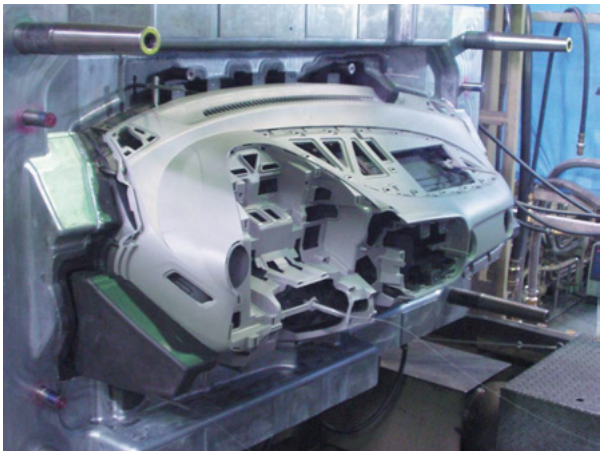


Fig. 16　Carbon mold for INSIGHT prototype

6．まとめ

カーボン型はインストルメントパネルという形状が複雑な大物成形品に特化しておこない，型製作コストは同等に抑え型製作期間を20%短縮し，短期間の試作部品供給が可能となった．複雑形状でも小物であれば NC 切削加工のマスタモデルを製作せず，ラピッドプロトタイピングのモデルのみで反転しカーボン型を製作することもできる．

ほかにもカーボン型の利点として樹脂型ならではの型改造と追加工のしやすさが挙げられる．ZAS 型では盛り削りは溶接と重切削加工が必要だが，カーボン型はパテで盛りノミで削る感覚で加工ができ，成形機から降ろすことなく型改造をおこなうことも可能である．

7．あとがき

今回の工法開発は製造技術開発の重要性と，試作部品で何を評価するのか，使用する試作部品に必要な性能は何か，試作部品を作るツールの扱いやすさとは何かを考えるよい機会となった．今後も新型車開発のスピードアップに対応するため，試作技術の開発を継続していく．

■著　者■



戸口康宏

AZ91D マグネシウム合金インラインリサイクル技術

In-line Recycling Technology for AZ91D Magnesium Alloy

宮 下 英 明* Hideaki MIYASHITA
川 辺 剛* Tsuyoshi KAWABE
下 田 正 志** Masashi SHIMODA
望 月 祐 仁*** Yuji MOCHIZUKI
夏 原 功 二*** Koji NATSUHARA

要 旨

AZ91Dマグネシウム合金製ダイカスト部品の製造時に発生するスクラップを，新塊同等の品質に再生処理し，その溶湯を鋳造工程へ連続的に供給可能とするインラインリサイクル技術とその設備を開発した．本技術により，従来の再生インゴット使用時に比べ，材料費および溶解費を約20%低減した．本技術は 2009 年モデル以降の V6 エンジン用マグネシウム合金製ヘッドカバーおよびインテークマニホールドの製造へ適用している．

ABSTRACT

An in-line recycling technology and equipment for recycling scraps generated in the process of die casting AZ91D magnesium alloy parts have been developed. The new technology enables the scraps to be recycled at the same quality as primary alloy and the molten metal to be continuously supplied to the die casting process.

Material and melting costs have been reduced by approximately 20% compared to the use of conventional recycled ingots. The technology has been applied in the manufacture of magnesium head covers and intake manifolds for V6 engines from 2009 year models onwards.

１．まえがき

近年，地球環境問題などから燃費改善のための車両軽量化は重要課題となっており，その対応手法として特に欧米を中心にマグネシウム合金を適用する動きが高まっている．Honda においてはこれまで汎用マグネシウム合金を用いたエンジンヘッドカバーやステアリングホイール，V6エンジン用インテークマニホールド（以下インマニ），耐熱マグネシウム合金を用いたオイルパンやマニュアルトランスミッションケースなどを量産化してきた．

一方，マグネシウム合金は活性度が高く，燃焼，酸化防止や耐食性確保のためにアルミニウム合金製部品に対しコスト高となり適用が限定されるケースが多く，適用拡大には低廉化が課題となっている．

アルミニウム合金製部品は鋳造時に発生する方案部，捨て打ち品，鋳造不良品といったスクラップの再利用がダイカストメーカの社内で実施可能であるのに対し，マグネシウム合金の場合は一部メーカで実施されているものの，大部分はノウハウを有する専業再生メーカにスクラップ再生を委託しているのが実態である．その結果，スクラップおよび再生されたインゴットの運送費，再生処理費，インゴット成形費がアルミニウム合金製部品と比較してコストアップ要因の一つとなっている．

＊ 四輪R&Dセンター
＊＊ 本田金属技術株式会社
＊＊＊株式会社メッツ

https://doi.org/10.69239/hondatechnicalreview.2009_21_2_15

Table 1 Chemical components of AZ91D and effect of melting

		Chemical component (wt%)						
		Al	Zn	Mn	Si	Cu	Fe	Ni
AZ91D specification (ASTM B93)	Alloy	8.5 -9.5	0.45 -0.9	0.17 -0.40	0.05 Max	0.025 Max	0.004 Max	0.001 max
	Product	8.3 -9.7	0.35 -0.10	0.15 Min	0.10 Max	0.03 Max	0.005 Max	0.002 max
Scrap	Before melting	8.8	0.80	0.19	0.03	0.003	0.0049	0.0005
	After melting	8.8	0.80	0.18	0.03	0.003	0.0055	0.0005
Primary alloys	Before melting	9.1	0.82	0.23	0.03	0.003	0.0010	0.0005
	After melting	9.0	0.81	0.22	0.03	0.003	0.0015	0.0007

2．開発のねらい

軽量マグネシウム合金製部品の適用を拡大するために，Fig. 1 に示すように AZ91D マグネシウム合金のスクラップ再生をダイカストメーカの社内で実施し，かつ，製造工程内へインライン化することにより部品製造コストの低廉化をはかることが今回のねらいであり，そのために以下の目標を設定した．

（1）方案を含むスクラップを新塊と同等品質に再生する技術を確立すること

（2）再生処理した溶湯を連続的に鋳造工程へ供給可能なインラインリサイクル設備を開発すること

3．技術課題

Table 1 に示すように AZ91D 合金は耐食性確保のため，合金および製品中の Fe，Ni，Cu 量を厳しく規定している[1]．これらの成分が溶解および鋳造過程においてどう変化するかを検証するため，AZ91D ダイカスト製品のスクラップと新塊を溶解し，横 55 mm ×縦 20 mm ×長さ 200 mmの板状テストピース金型に鋳込み，凝固させ，組織を比較することにより，スクラップ再生時の課題を抽出した．なお，溶解温度と鋳込みまでの保持時間は溶解および鋳造条件の平均値とした．

Table 1 に各々の溶解前後の成分組成を示す．スクラップ，新塊いずれも Ni，Cu については変化が見られないが，Fe が増加する傾向にある．製品規格上限に近い Fe 49 ppm のスクラップでは溶解後 Fe 55 ppm と製品規格値を越えるレベルとなった．これはマグネシウムに対する Fe の固溶限が 650℃を境に 1 ppm 以下から 30 ppm 以上に増加する[2]ことから溶解，保持の間にるつぼ中の Fe が溶湯内に溶出したものと考えられる．

テストピースの中央部を切断，研磨し，組織観察および耐食性評価した結果を Fig. 2 に示す．光学顕微鏡レベルでは差異の見られない析出物が，X線マイクロアナライザ（Electron Probe Micro-Analysis：EPMA）による分析をおこなうと新塊においては Al_6Mn であるのに対し，Fe 量の増加したスクラップでは $Al_8(Mn,Fe)_5$ の析出が見られ，耐食性の低下が確認された．$Al_8(Mn,Fe)_5$ は Al_6Mn に比べマグネシウム母相との電位差が大きく，Fe量増加に伴ってこの金属間化合物が析出し，耐食性が低下した[3]と考えられる．

また，テストピース中の含有ガス量について真空加熱融解－定容測圧法で，介在物量についてテストピース中央部を破断し，そこに観察される介在物の占有面積率で評価し

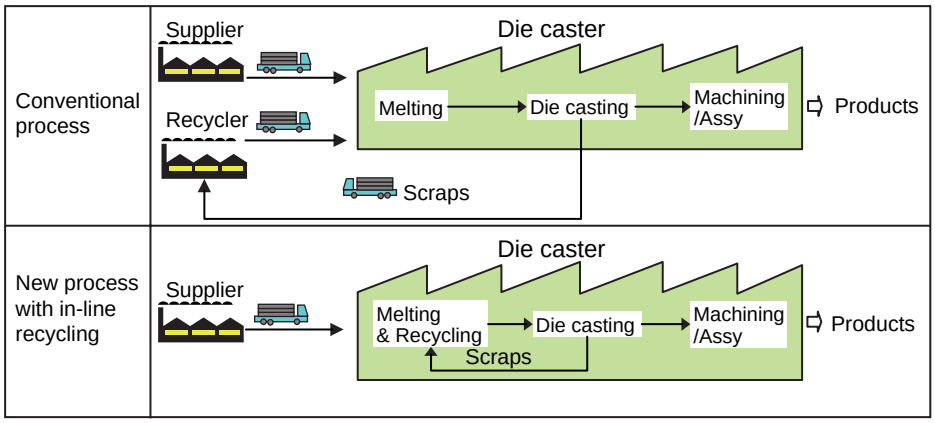


Fig. 1 Comparison of manufacturing process for AZ91D magnesium alloy parts

た結果，含有ガス，介在物のいずれも新塊に対し増加した．これはスクラップが鋳造時に巻き込んだガスや表面酸化膜を含んでいるためであり，これらを除去せずにそのまま鋳造した場合に鋳造品質や部品強度の低下が懸念される．

以上より，AZ91Dマグネシウム合金スクラップ再生における課題を以下のように設定した．

・Fe 量の低減

・含有ガスおよび介在物の除去

上記課題をクリアするため，サイクルタイム等の鋳造条件を変えること無く，新塊同等の品質に再生処理した溶湯を鋳造工程へ連続的に供給可能なインライン用リサイクル設備を開発することとした．

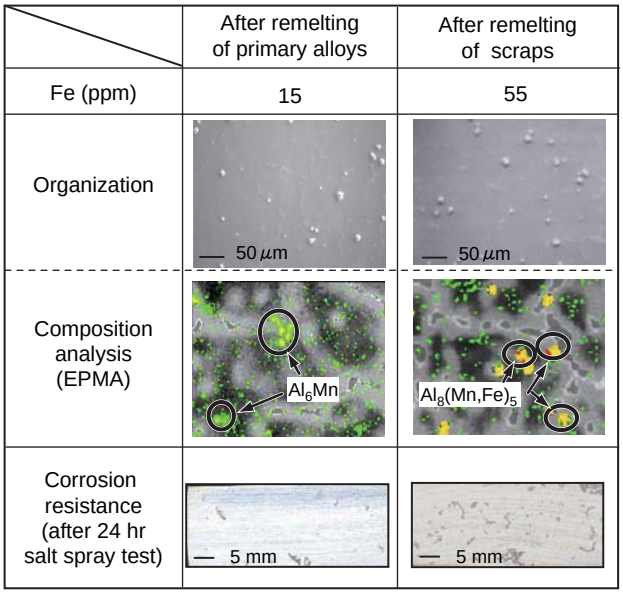


Fig. 2　Comparison of organization and corrosion resistance after remelting of AZ91D scraps and primary alloys

4．再生技術の開発

4. 1. Fe 量の低減

Holta[4]らにより報告された，Mg-9%Al 合金溶湯中の Al-Mn-Fe 金属間化合物の挙動を Fig. 3 に示す．図中の L は液相，L+ $Al_8(Mn,Fe)_5$ は液相中に $Al_8(Mn,Fe)_5$ 金属間化合物が析出することを意味する．溶湯中の Fe 量が増加するほど $Al_8(Mn,Fe)_5$ の析出範囲が拡大する．これは 3 章で述べたように，Fe 量が増加したテストピースにおいて $Al_8(Mn,Fe)_5$ の析出が多く見られたことを裏付けるものである．一方，Fe 量が一定であっても Mn 量が増加，もしくは溶湯温度が下がることで，$Al_8(Mn,Fe)_5$ もしくは $Al_6(Mn,Fe)$ が析出する．このことは Mn 量と溶湯温度を制御することで Al-Mn-Fe 金属間化合物を人為的に析出，沈降させ，Fe量の低減が可能であることを意味する．溶湯温度 660 ℃の場合 0.18%以上，670℃の場合 0.22%以上の Mn 量を確保することで合金規格上限である Fe 40 ppm を越えた場合に $Al_8(Mn,Fe)_5$ 金属間化合物を析出，沈降させ，Feを低減することが可能である．

Mn 量を確保する手法として，通常は新塊製造時に用いられる Al-Mn 合金の添加があるが，インライン化には短時間での Mn 増量が必要であるため，Mn を適正量含む新塊を一定割合で混合することで対応した．

るつぼからの Fe 溶出抑制および必要 Mn 量確保の観点から溶湯温度は低くしたいが，一方で新塊およびスクラップ中における Mn は Al_6Mn/$Al_6(Mn,Fe)$ 金属間化合物になっており，これらをロス無く溶解するには 660 ℃以上の温度が必要となる．

以上より，Mn 量と溶湯温度を制御することで，$Al_8(Mn,Fe)_5Mn$ 金属間化合物を析出，沈降させ，Fe 量を低減することとした．

4.2. 含有ガスおよび介在物の除去，低減

AZ91D合金スクラップ中の含有ガスおよび介在物を除去する方法としてフラックス添加があるが，添加後に十分な沈静時間が必要であり，インライン化には不適である．そこで，Fig. 4[5]に示すように，フラックスを使用せず，アルゴンガスのバブリングにより溶湯中の含有ガスや介在物，酸

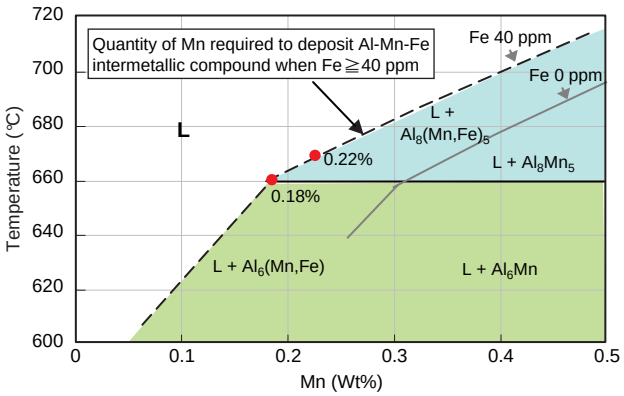


Fig. 3　Composition of Mg-9%Al–Fe-Mn alloy

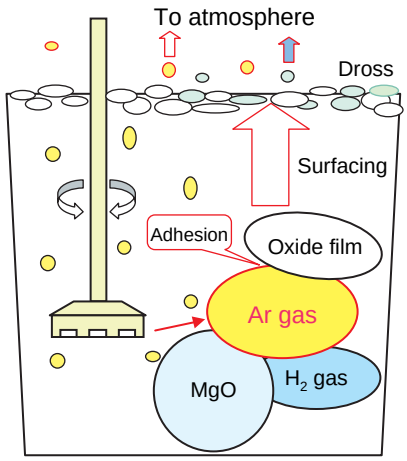


Fig. 4　Concept of reduction of gas/oxide in smelting process

化皮膜を浮上分離できる正逆反転式溶湯処理装置(6)を選定した．本装置はアルゴンガスを細かな気泡にして分散するシャフトおよびディスクが数秒ごとに正逆反転することで，溶湯表面のドロス巻き込みおよびるつぼ底部の沈降スラッジの巻上げを抑制しながらアルゴンガスを溶湯中に均一に拡散させることが可能である．そのため，処理後の沈静時間が短縮でき，インライン化に適している．

4.3. インライン用リサイクル設備の開発

インライン化を実現するためにはサイクルタイム等の鋳造条件を変えること無く，Fe低減，含有ガスおよび介在物の除去を短時間で連続的におこなう必要がある．そのためにるつぼを三槽に分割し，溶解，精錬および沈静をおこなうインライン用リサイクル炉を開発した．バーナの熱量および配置を最適化し，溶湯温度を制御した第１槽に，新塊を混合して Mn 量を調整したスクラップを投入，溶解することで $Al_8(Mn,Fe)_5$ を析出，沈降させ，Fe を低減する．第２槽に正逆反転式溶湯処理装置を設置，ディスクの回転数および反転時間，アルゴンガスの流量を最適化し，アルゴンガスを溶湯中に均一に拡散することで含有ガスおよび介在物を浮上分離する．第３槽において溶湯処理時に巻き上げたスラッジを沈降させた後，再生溶湯を鋳造工程へ供給する．

この三槽分割型リサイクル炉をサイフォン管にてダイカストマシンの手元溶解炉と連結し，再生処理のインライン化を実現した(Fig. 5)．

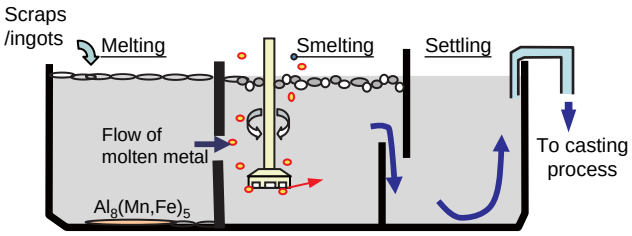


Fig. 5 Process of manufacture of AZ91D magnesium alloy parts with in-line recycling furnace divided into three rooms

Table 2 Mn and Fe content in AZ91D after in-line recycling

Material		Mn (%)	Fe (ppm)
Before recycling	Primary alloy	0.234	10
	Scrap	0.204	36
After recycling	50% scrap/primary alloy	0.217	20

4.4. 再生溶湯および製品品質

リサイクルに用いるスクラップは異物，異材の付着と混入を防止するため，製品方案部，捨て打ち品，鋳造区内不良品のみとし，スクラップの発生量と，Fe低減に必要とする新塊の Mn 量から混合比を規定した．

ヘッドカバーの鋳造にて発生したスクラップを50%混合し，再生処理した溶湯の品質を確認した例を Table 2 および Fig. 6 に示す．再生処理により Fe 量は減少，また，含有ガスおよび介在物量のいずれも新塊同等以下に低減している．この再生溶湯をダイカストマシン手元溶解炉に給湯して鋳造した製品の外観を Fig. 7 に示す．再生材を鋳造し

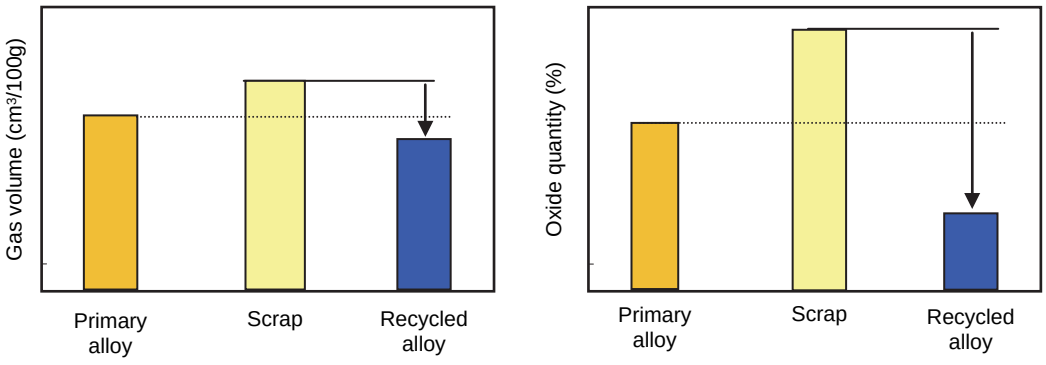


Fig. 6 Comparison of gas volume/oxide quantity after AZ91D in-line recycling



(a) In-line recycled (b) Primary alloy

Fig. 7 Comparison of appearance of AZ91D magnesium front head cover for V6 engine

た製品は新塊を用いて鋳造したものと外観品質は同等である．さらに，製品から切り出したテストピースによる強度確認結果を Fig. 8 に示す．平均強度は同等だが，ばらつきである± 3σの範囲が約 26%減少しており，新塊同等以上に安定した品質であることを確認した．

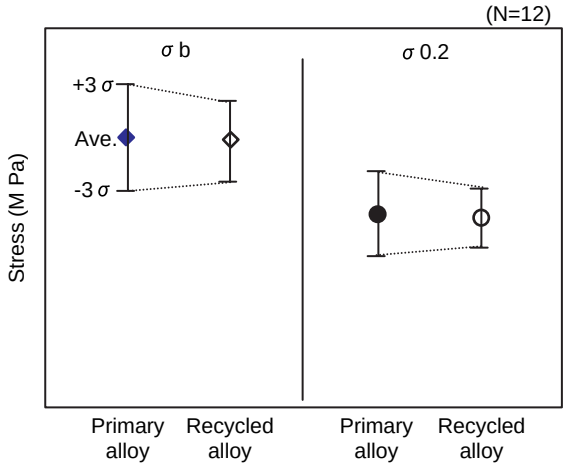


Fig. 8　Comparison of intensity of stress in test pieces taken from AZ91D magnesium front head covers

5．まとめ

AZ91Dマグネシウム合金スクラップのリサイクル技術および本技術を反映したインライン用リサイクル炉を開発し，新塊同等品質を確保しつつ，従来の再生インゴット使用時より材料および溶解費を約20%低減した．同時に再生溶湯のインゴット化，再溶解，輸送工程を無くすことにより製造時 CO_2 を約 36%低減した．本技術は 2009 年モデル以降の V6 エンジン用ヘッドカバーおよびインマニに適用した．

その技術内容は以下の通りである．

（1）Mn 量および溶湯温度の制御による Fe 量の低減，正逆反転式溶湯処理装置による含有ガスおよび介在物の除去を施すことで AZ91D 合金スクラップを新塊同等品質に再生する技術を確立した．

（2）るつぼを三槽に分割し，バーナ熱量および配置，溶湯処理条件の最適化により，鋳造条件を変更すること無く，短時間で再生処理した溶湯を連続的に鋳造工程に供給可能なインライン用リサイクル炉を開発した．

参考文献

（1）マグネシウム技術便覧　日本マグネシウム協会編：カロス出版，p.313(2000)

（2）マグネシウム技術便覧　日本マグネシウム協会編：カロス出版，p.81(2000)

（3）福崎昌宏，田村洋介，河野紀雄：AZ91マグネシウム合金における腐食挙動とミクロ組織の関係，軽金属，第55 巻，第９号，p.389-394(2005)

（4）Holta, O., Westengen, H.,Roen, J.: High Purity Magnesium Die Casting Alloys: Impact of Metallurgical Principles on Industrial Practice, Proceedings of the Third International Magnesium Conference, p.75-87(1996)

（5）http://www.j-imono.com/column/daredemo/16.html, 2008/12/22

（6）http://www.alumi-fukuoka.co.jp/shizunami/, 2009/3/19

■著　者■


宮下英明


川辺　剛


下田正志


望月祐仁


夏原功二

CVTベルト用金属リングにおける周長精密測定と不確かさ

Precision Measurement Method of Circumferential Length and Uncertainty for Steel Ring in CVT-pushing Belt

梅 津 健 太*　　御子貝 浩 良*
Kenta UMETSU　　Hiroyoshi MIKOGAI

要　旨

CVTベルト用の金属リング単体の周長精度は，耐久性確保のためにマイクロメータオーダで管理されている必要がある．金属リングの周長測定は，周長マスタリングと検査対象である金属リングの微小な長さの差を実測することを原理としている．よって周長マスタリングには，高精度な計測法と不確かさ評価が求められている．

紹介する測定手法では，周長マスタリングを二つのローラに掛け，ローラ中心間長さとリング巻きつき部のローラ半径を実測し，マスタリング周長値を定量化する．二つの測定は，高精度な三次元座標測定機を用いて高精度化を実現している．また，ローラ中心間長さとローラ半径における測定の不確かさは，それぞれブロックゲージとリングゲージの測定から定量化するものとした．

ブロックゲージとリングゲージは寸法の不確かさが保証された長さ標準器であるため，本測定手法にもとづいた周長マスタリングの測定結果は，高精度で長さのトレーサビリティが確保されることになる．

ABSTRACT

The accuracy of the circumferential length of the metal rings used in CVT-pushing belts need to be controlled on the micrometer level to help ensure the durability of the belts. The principle used in measuring the circumferential length of the metal rings is the measurement of infinitesimal differences in length between a master ring for circumferential length and the ring being examined. A highly accurate measurement method and a method of evaluating the uncertainty of these measurements are therefore necessary for the master ring for circumferential length.

In the measurement method discussed in this paper, the master ring for circumferential length is positioned between two rollers, the length between the centers of the rollers and the radii of the sections of the rollers around which the ring winds are measured, and the circumferential length of the ring is quantified. A high level of accuracy has been realized in the two sets of measurements through the use of a high-accuracy three-dimensional coordinate measuring machine (CMM). In addition, the uncertainty of the measurements of the length between the centers of the rollers and the radii of the rollers is quantified using gauge block and gauge ring measurements.

Because gauge blocks and gauge rings are instruments of a standard length with a specified level of dimensional uncertainty, the measured results for the master rings for circumferential length based on this measurement method are traceable with a high degree of accuracy.

1．はじめに

CVTベルトは複数の金属リングが積層されており，ベルトの耐久性確保のため，金属リングの周長は精密に管理されている必要がある．金属リングの周長測定は，周長マスタリング(Master Ring for Circumferential Length：MRC)と検査対象である金属リングの微小な長さの差を実測することを原理としている．

金属リング単体の周長精度はマイクロメータオーダであり，その精度はMRCの精度に大きく依存する．しかしMRCの測定精度は，従来十分に議論されていなかった．二つのローラに掛けた MRC は，ローラ中心間長さとリング巻きつき部のローラ半径を測定し，周長とする手法において，以下の課題があるためである．

(1) ローラ中心間長さ測定の高精度化
(2) 測定における不確かさ評価の複雑さ

紹介する MRC 精密測定法は，ローラ中心間の長さとリング巻きつき部のローラ半径を高精度な三次元座標測定機(Coordinate Measurement Machine：CMM)により測定する．CMM 測定による不確かさ評価は，校正されたワーク

＊四輪R&Dセンター

https://doi.org/10.69239/hondatechnicalreview.2009_21_2_16

ピースを用いた比較測定による実用的な方法が ISO/TS 15530-3[1]で提案されている．

本測定手法の不確かさ評価において，ISO/TS 15530-3 に従えば，ローラ中心間の長さとリング巻きつき部のローラ半径の測定の不確かさは，それぞれブロックゲージとリングゲージの測定から定量化できる．ブロックゲージとリングゲージの不確かさは小さいことから，MRC の測定結果は，高精度で長さのトレーサビリティが確保されることになる．

近年，生産システムのグローバル化にともない，部品の流通における品質保証を効率的におこなう技術は重要性を増している．信頼性評価の方法は ISO を中心に不確かさ評価に統一され，広く普及され始めている．

本稿では不確かさ評価の方法と，その評価法適用の事例として MRC 測定の不確かさ評価について述べる．

2．周長マスタリングの測定原理と不確かさ

2.1. 不確かさの定量手法と製品検査方法

不確かさは，測定結果からどの程度のばらつきの範囲内に真の値があるかを示すものである．不確かさは，確率的な定量表現に標準偏差 σをもちいる．例えば測定結果 a の不確かさが 2 σであるとした場合，真の値は信頼水準 95.4% の確率で a ± 2 σの範囲内に存在することになる．ここで不確かさの定量手順を以下に簡単にまとめる．

（1）測定対象 Y の不確かさの複数因子 $x_1, x_2 \cdots x_n$ を列挙する．

（2）測定対象 Y を変数 $x_1, x_2 \cdots x_n$ により数学モデル化する．

$$Y = f(x_1, x_2 \cdots x_n)$$

（3）因子 x の不確かさ $u(x)$ を個々に定量化し，因子間に相関が無ければ，Y の合成標準不確かさ $u(Y)$ を下記とする．

$$u(Y) = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)^2 u^2(x_1) \cdots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_n}\right)^2 u^2(x_n)}$$

測定の不確かさを含めた，製品の合否判定については，JIS B0641（製品の幾何特性仕様（GPS）-製品及び測定装置の測定による検査 - 第 1 部：仕様に対する合否判定基準）[2]にて規格化されている．

Fig. 1 に示すとおり，仕様の領域 1 に対して測定不確かさ U を内側に取って合否判定する．このため測定の不確かさが大きい場合には，適合の領域 3 は小さくなる．なお複数の製造現場で同一部品の合否判定をおこなうためには，不確かさの評価にトレーサビリティが考慮されている必要がある．

2.2. 周長マスタリングの測定

CVT ベルトの部品構成を Fig. 2 に示す．CVT ベルトは積層された複数の金属リングとエレメントから構成される．MRC は，金属リングから任意に選定するものとする．

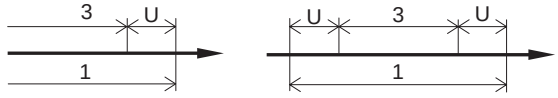
MRC 測定装置の概略を Fig. 3 (a) に示す．直径約 110 mm のローラ 1，2 に周長約 650 mm の MRC が巻きつけられている．スライダにはウエイト 20 kg が連結されており，ローラ 2 に配置されているスライダが，Y 方向に並進移動する機構なため MRC には張力が与えられる．

またローラ 1 の回転量はロータリエンコーダにより測定される．本装置は CMM の定盤上に配置され，ローラ中心間長さが測定される．なお本稿で採用した CMM の測定精度 U は，L_E をミリメートルオーダの評価長さとすると，U=0.4+L_E /1000 μm である．

ローラ 1，2 に MRC を掛け，ウエイトによる張力を発生させた状態でローラを回転させると，Fig. 3 (b) のとおり MRC内周表面とローラ円筒部の円弧形状によるセンタリング効果から，MRC 内周の円弧頂上部 S_1 がローラ 1 の円弧頂上部 H_1 と一致する．同様に MRC 内周の S_2 とローラ 2 の円弧頂上部 H_2 も一致する．

なおローラ 1，2 において，お互いの円弧頂上部の位置 Z_1，Z_2 の差異は 0.1 mm 以下に調整されている．これによりローラ中心間長さのコサイン誤差は，0.03 μm と無視できる．

このときローラ 1，2 の中心座標を測定することでローラ中心間長さ E を算出する．MRC がローラに巻きついた円弧頂上部の半径測定値をローラ 1，2 においてそれぞれ R_1，R_2 とすれば，MRC の周長値 L は式（1）となる．また



(a) Unilateral tolerance　(b) Bilateral tolerance

1: Specification zone
3: Conformance zone
U: Uncertainty of measurement

Fig. 1　Product inspection considering uncertainty of measurement

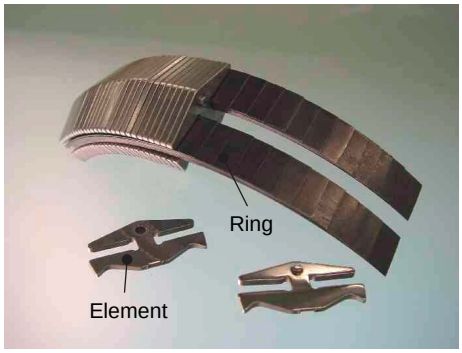


Fig. 2　Components of CVT-pushing belt

Lの不確かさ $U(L)$ は，不確かさの伝播則に従い[3), 4)]，E，R_1，R_2 に相関が無いものとして，包含係数を k とし式（2）となる．

$$L = 2E + \pi (R_1 + R_2) \quad (1)$$

$$U(L) = k \times \sqrt{4U^2(E) + \pi^2 (U^2 (R_1) + U^2 (R_2))} \quad (2)$$

ローラ１，２の中心座標の測定は Fig. 3 (a) のとおり一つのローラ円筒上に４点の測定点を均等に配置した円測定から算出するものとする．またローラ１，２の偏心によるローラ中心間長さEへの影響を補正する目的で，ローラ１，２を同期させて複数回，微小回転させるごとにローラ中心間長さを測定する．

得られた一組のデータは，ローラの回転角度に依存した偏心による系統的な変動を示し，中心間長さの数値的な補正が可能である．本測定では，15 deg刻みでローラを24回送るごとにローラ中心間長さの測定をおこなった．

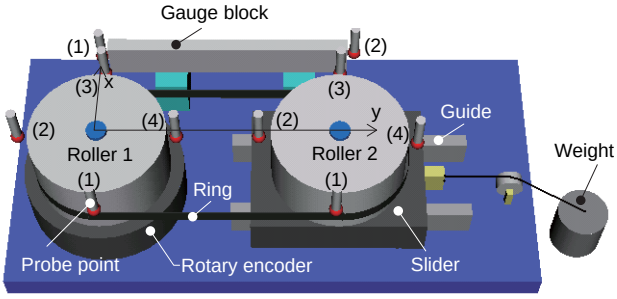
さらにローラ中心間長さの測定時に，CMMに内蔵されたスケールの，熱膨張補正の保証を目的として，ローラ中心間長さと同等な 150 mm のブロックゲージの長さ測定をおこなう．ブロックゲージの片側の端部はローラ１の中心と位置合わせされ，かつローラと平行に配置された状態である．

ブロックゲージの長さ測定結果から，CMM による長さ測定の不確かさを把握できるため，ローラ中心間長さ測定の不確かさ評価がおこなえることになる．

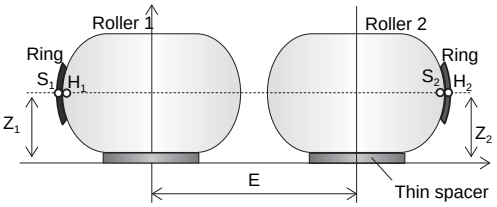
本測定では，式（1）で表された周長 L の不確かさを定量化することを目的としている．本測定法において不確かさ因子は，Fig. 4 (a) のとおりローラ１の半径 $U(R_1)$，ローラ２の半径 $U(R_2)$，ローラ中心間長さの $U(E)$ の三つに大別され，式（2）の $U(L)$ はそれらにより合成される．

また $U(L)$ の不確かさ因子の分類を Fig. 4 (b) に示す．u_c はブロックゲージの校正値と，熱膨張補正の不確かさ，u_p はローラの回転によってローラとリングの接触面が変化し生じる，ローラ中心間長さの不確かさ，u_w は金属リングの熱膨張補正の不確かさを示す．U_l は u_c，u_p，u_w による合成標準不確かさである．

さらに $U_{\Delta l}$ は CMM の円測定における測定点の配置位置や点数，被測定物の形状精度のみから決定する中心座標の不確かさに起因した，ローラ中心間長さの不確かさである．

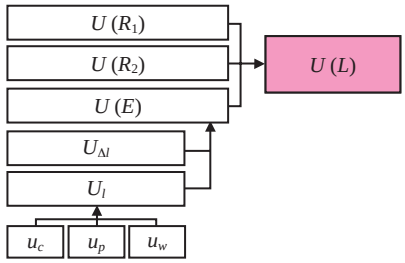


(a) Probe points position for measurement of length between two rollers using CMM

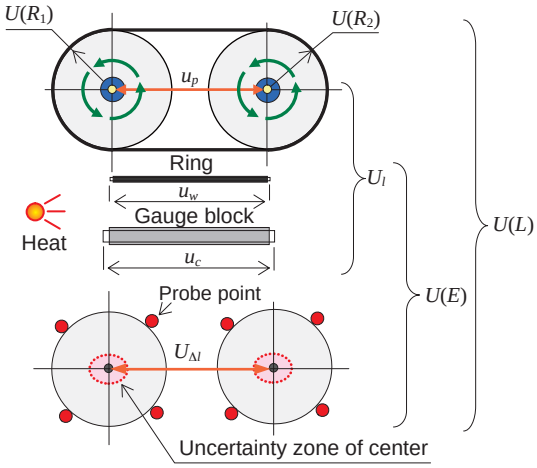


(b) Adjustment of roller's height for reducing cosine error

Fig. 3 Schematic diagram of instrument for CVT ring circumferential length measurement



(a) Combination of uncertainties for ring circumferential length measurement



(b) Classification of uncertainty sources

Fig. 4 Classification of uncertainty sources and combination for uncertainty of ring circumferential length measurement

３．周長マスタリングの測定結果と不確かさ評価

ローラ中心間長さの測定結果とローラの偏心について数値補正した結果を Fig. 5 に示す．補正前と，１次の偏心誤差が補正されたデータの平均値はともに 158.2306 mm であるが，標準偏差は補正前で 2.5 μm，補正後は 0.4 μm まで減少している．

Table 1　Uncertainty budget for circumferential length of ring measurement

Source	Symbol	Nominal value	Standard uncertainty	Distribution
Gauge block				
Length of gauge block	g^0	150 mm	50 nm	Normal
Linear coefficient of expansion	α_G	10.8×10^{-6}/K	$\pm 0.5 \times 10^{-6}$/K	Normal
Temperature of gauge block	t_G	-0.627 K	0.1 K	Rectangular
CVT metal ring				
Length between two rollers	E	158 mm	–	–
Linear coefficient of expansion	α_R	11×10^{-6}/K	$\pm 0.8 \times 10^{-6}$/K	Normal
Temperature of ring	t_R	-0.682 K	0.06 K	Rectangular
u_p [μm]			0.40	
u_w [μm]			0.14	
u_c [μm]			0.16	
$U(E)$ [μm]			0.45	
$U(R)$ [μm]			$U(R_1) = 0.46$, $U(R_2) = 0.60$	
U_l [μm]			0.37	
$U_{\Delta l}$ [μm]			0.26	
$U(L)$ [μm] (k=1)			2.6	

同一の MRC を 24 時間後に，装置へ再配置し再測定をおこなったところ，１回目と２回目のデータ平均値の差異は 0.1 μm であったことから，本測定法の再現性の高さが確認された．

MRC測定の不確かさ評価は，ISO/TS 15530-3に従い，ブロックゲージやリングゲージの校正値を参照する比較測定法を採用する．

Fig. 6 に ISO/TS 15530-3 の概念図を示す．測定の不確かさUは，測定対象と同一形状･同等寸法の校正されたワーク(Calibrated Work piece：CW)を繰り返し測定することで算出する．

u_c は CW の校正値と熱膨張補正の不確かさを総合的に評価した不確かさである．u_p は繰り返し回数 20 以上の CW 測定の不確かさである．u_w は測定対象の熱膨張補正とアライメントの不確かさを総合的に評価した不確かさである．このとき不確かさ Uは独立に評価可能な u_c，u_p，u_w による平方二乗和で算出される．

Table 1 に MRC 測定に影響する因子とその不確かさを示す．また算出したローラ中心間長さ測定の不確かさ$U(E)$，ローラ測定による中心座標算出の不確かさ $U_{\Delta l}$，ローラ半径測定の不確かさ $U(R)$ を示す．$U(E)$，$U(R)$ ともに約 0.5 μm の不確かさであった．

$U_{\Delta l}$ には，円測定における，測定点の配置位置や点数に

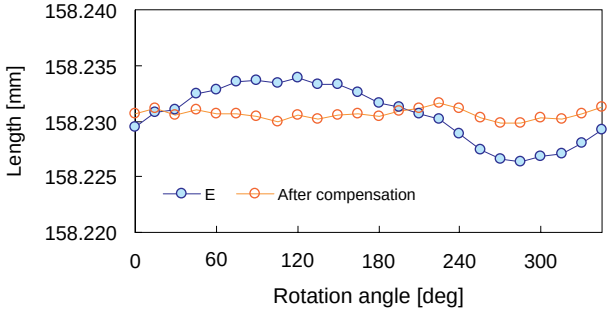


Fig. 5　Measurement of length between two rollers and compensation of perpendicular eccentricity of rollers

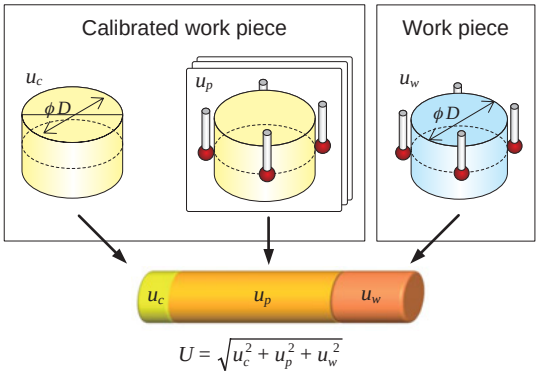


Fig. 6　Uncertainty estimation method based on ISO/TS 15530-3

よってのみ決定する中心座標の不確かさが影響する．例えば円形状に沿う均等な測定点配置で，測定点数を増大させると中心座標の不確かさは小さくなる傾向がある．本測定手法では，測定時間と精度の適正化をおこない，測定点数は４点とした．それにより $U_{\Delta l}$ は約 0.3 μm となった．

なおブロックゲージ，リングゲージ，MRCの熱膨張補正に用いた温度計は 0.0025 K の不確かさであらかじめ校正されており，MRC 測定の不確かさ $U(L)$ は，k を１としたとき 2.6 μm となった．

４．まとめ

本手法はMRCを直接測定する代わりに，高精度に加工，計測可能な直線と円形状を組み合わせて測定できる合理性の高い手段である．

製品の合否判定については，JIS B0641に代表されるように，測定の不確かさを定量化する必要性が高まっているのに対して，不確かさ算出過程を明示していくことは重要性を増すと考えられる．

高精度な測定と測定の不確かさ評価を要する自動車部品は多数あるが，重要性が高く，既存の測定方法が採用できない部品においては，不確かさ評価を考慮した測定原理の考案が求められる．

MRC精密測定と不確かさ評価について以下のとおりまとめる．

（１）MRC を単純な幾何形状である直線と円の組みあわせで，高精度な CMM により測定した．
またその不確かさは 2.6 μm であり，２回の繰り返し測定の差異が 0.2 μm であり再現性が確認された．

（２）CMM 測定における不確かさ評価規格 ISO/TS 15530-3 に準拠した方法により，長さのトレーサビリティが確保された MRC 測定の不確かさを定量化した．

（３）測定結果の不確かさが保証された MRC の提供が可能になったことで，量産現場での品質管理への貢献と事業所間トレーサビリティの確立が期待できる．

参考文献

（１）ISO/TS 15530-3:2004, Geometrical Product Specifications (GPS)-Coordinate measuring machines (CMM): Technique for determining the uncertainty of measurement- Part3: Use of calibrated work pieces or standards

（２）JIS B0641-1 : 2001，製品の幾何特性仕様(GPS)－製品及び測定装置の測定による検査－第１部：仕様に対する合否判定基準

（３）飯塚幸三：計測における不確かさの表現ガイド，日本規格協会，p.50(1996)

（４）BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAC, OIML: Guide to the expression of uncertainty in measurement, ISO First edition(1993)

■著　者■



梅 津 健 太



御子貝浩良

自動変速機用制御ソフトウェア開発への実行可能な仕様書の適用に向けた取り組み

Approach to Application of Executable Specifications in Development of Automatic Transmission Control Software

松 山 芳 博* Yoshihiro MATSUYAMA
萩 原 顕 治* Kenji HAGIWARA
清 野 聡* Satoshi SEINO

要 旨

自動変速機用制御ソフトウェア開発において制御信頼性向上と開発期間短縮を目的としてモデルベース開発の導入を進めている．その導入にあたって，MATLAB によって記述された実行可能な仕様書，すなわちシミュレーション可能なモデルの仕様書の可読性向上と，作成時間の短縮が必要であった．そこで MAAB，J-MAAB スタイルガイドなどの一般記述ガイドラインに加えて，Stateflow を中心とした結線レス，モデル分断レス手法に基づく独自スタイルガイドの開発とドキュメント生成時におけるモデル表記の後処理により，仕様書の可読性を向上させた．さらに，そのスタイルガイドに準拠したモデリングを支援する，自動変速機制御用ブロックライブラリ，定型処理の自動モデリングツール，既存変数情報自動設定ツールを開発することにより，モデリング時間を手動モデリング時と比べて，1/20 以下に短縮することができた．その結果，自動変速機用制御ソフトウェア開発への実行可能な仕様書の適用が可能となった．

ABSTRACT

Model-based development is being introduced to the development of control software for automatic transmissions in order to increase control reliability and reduce development times. The introduction of model-based development necessitates an enhancement in the readability of executable specifications formulated using MATLAB, i.e., specifications for simulatable models, and the reduction of the time for formulation of these specifications. An original style guide was developed as a supplement to the general description guidelines provided by the MAAB and J-MAAB style guides, and the like, on the basis of a method eschewing connecting lines and division of the model based mainly on Stateflow, and post-processing was applied to the expression of the model when documents were formulated. These methods increased the readability of the specifications. In addition, a block library for automatic transmission control, an automatic modeling tool conducting routine processing, and a tool that automatically sets existing variable information were developed in order to support modeling conforming to the new style guide. These tools have reduced the time for modeling to less than one-twentieth of the time for manual modeling. This has enabled executable specifications to be employed in the development of automatic transmission control software.

１．はじめに

自動車における電子制御技術の重要性が年々高まる中，制御ソフトウェアの規模，複雑さは増加の一途をたどっている．また，制御信頼性向上，開発期間短縮，コスト削減といった要求はますます高まっている．そのような中で，車載ソフトウェア開発効率化を目的とし，近年，モデルベース開発（以下 MBD）の導入が急速に進められている[1), (2)]．

MBD においては，開発の上流である設計段階において，MATLABによって記述された実行可能な仕様書，すなわちシミュレーション可能な制御モデルが作成される．作成された制御モデルは，プラントモデルと組み合わせることで仮想制御実験が可能となる．また，実装用のCコード自動生成も可能である．

一方，MATLABは記述自由度が高く，同一の制御ロジックを記述するにしても多種多彩なモデリングが可能となっ

＊四輪R&Dセンター

https://doi.org/10.69239/hondatechnicalreview.2009_21_2_17

ている．そのため可読性を低下させることにもつながり，サプライヤを含めた量産ソフトウェア開発用の制御仕様書として取り扱うことが困難であった．これに対して，自動車業界の MATLAB ユーザ団体である MAAB(The MathWorks Automotive Advisory Board)，J-MAAB(Japan MATLAB Automotive Advisory Board)では，MATLAB ガイドラインを制定し，モデリング基本ラインを定義している[3), (4)]が，走行条件や走行環境により，変速段の切替えを多用する自動変速機制御を記述する場合，条件分岐や，それに伴う Table および Map の切替えが多数発生するため，不十分であった．そこで可読性を確保するための独自の厳密なガイドライン(以下スタイルガイド)を制定したが，可読性は向上する反面，モデリング時間が莫大となることがわかった．

2．開発のねらい

MATLABモデルを量産ソフトウェア開発用の制御仕様書として取り扱い可能とするために，下記２項目を開発のねらいと定めた．

(1)MATLAB モデルの可読性確保
(2)MATLAB モデルのモデリング時間短縮

これらを実現するために本開発では以下を同時に開発する．

(a)可読性の高いモデル作成スタイルガイド
(b)モデリング時間短縮化支援ツール

3．可読性の高いモデル作成スタイルガイドの開発

スタイルガイドの開発にあたり，モデルの可読性を向上させる四つの手法を考案した．

(1)Stateflow を中心としたモデリング手法
(2)データ受け渡し用結線レス手法
(3)Table と Map 検索時のモデル分断レス手法
(4)ドキュメント生成時のモデル表記の後処理手法

以下に四つの手法の詳細について述べる．

3.1. Stateflow を中心としたモデリング手法

MATLABには大きく分けて二つの制御設計ツールが存在する．一つは Simulink で，もう一つは Stateflow である．Simulink は入力データに対して，そのデータ変換の流れを規定するデータフローの記述を得意とし，Stateflow はそのデータフローの実行順序，条件，タイミングを規定するコントロールフローの記述を得意とする．Fig. 1 と Fig. 2 にそれぞれのサンプルを示す．それぞれを制御に応じて使い分けることが可読性の高いモデリングをする上で重要となるが，自動車制御では85%以上がコントロールフローといわれている[5]．量産化された既存の制御仕様書を分析した結果，自動変速機用制御システムにおいても，大部分がコントロールフローであり，Simulink を中心としたモデリング手法では可読性が低下することがわかった．以上のことから，自動変速機用制御のモデリング手法は，Stateflow を中心とした．

3.2. データ受け渡し用結線レス手法

Simulink，Stateflow を使って制御仕様をモデリングする上で煩雑であり，かつ，可読性を低下させる要因の一つとしてデータを受け渡すための結線があげられる．ソフトウェア構造にもよるが，データの参照位置(Fig. 3の赤枠)が複数の階層にまたがって存在している場合，すべての階層に対して結線によってデータを受け渡す必要がある．モデルが大規模，かつ，多階層化し，このような変数が増加すると結線が複雑になり，可読性が低下する．

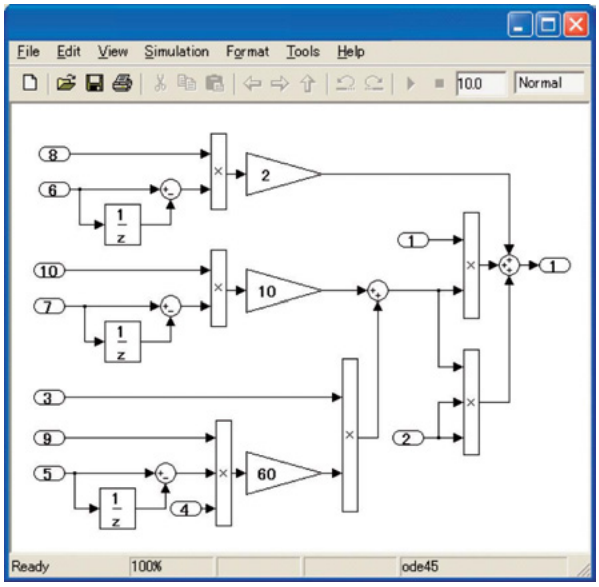


Fig. 1 Sample of Simulink model

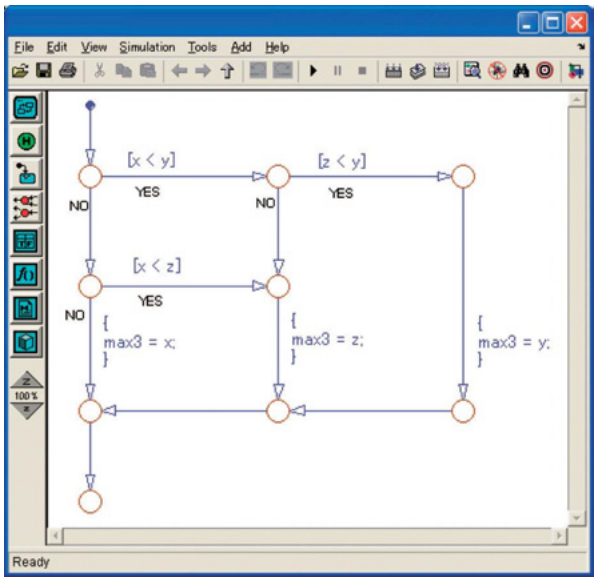


Fig. 2 Sample of Stateflow model

この課題を解決するために Stateflow 変数の変数管理手法に着目し，スタイルガイドで Stateflow チャート（以下チャート）上に記述する変数の管理則を規定した．通常，チャート上に記述する変数はすべて，マシン階層もしくはチャート階層のいずれかの階層で管理される（Fig. 4）．マシン階層で管理される変数はモデル内のすべてのチャートから，値の参照と更新が可能である．それに対して，チャート階層で管理される変数はそのチャート内でのみ，値の参照と更新が可能である．この特徴を利用し，複数のチャート間で共有する変数はマシン階層，単一のチャート内でのみ使用する変数はチャート階層でそれぞれ管理することにした．これにより複数のチャートで同一の変数を使用する場合においても，チャート間でデータを受け渡す必要がなくなり，結線不要となった．

その結果，結線の少ない可読性の高いモデル構造を実現することができた．Fig. 5 に，Fig. 3 のモデルに対して上記の変数管理手法を適用した制御モデルを示す．

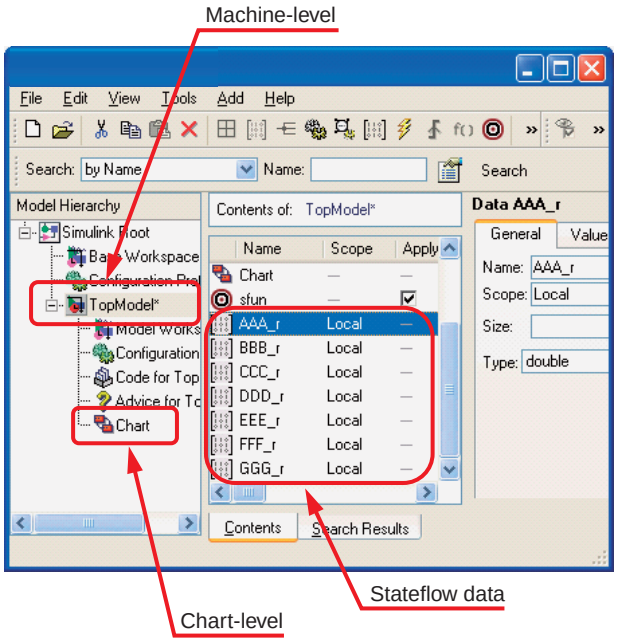


Fig. 4　Machine-level and chart-level

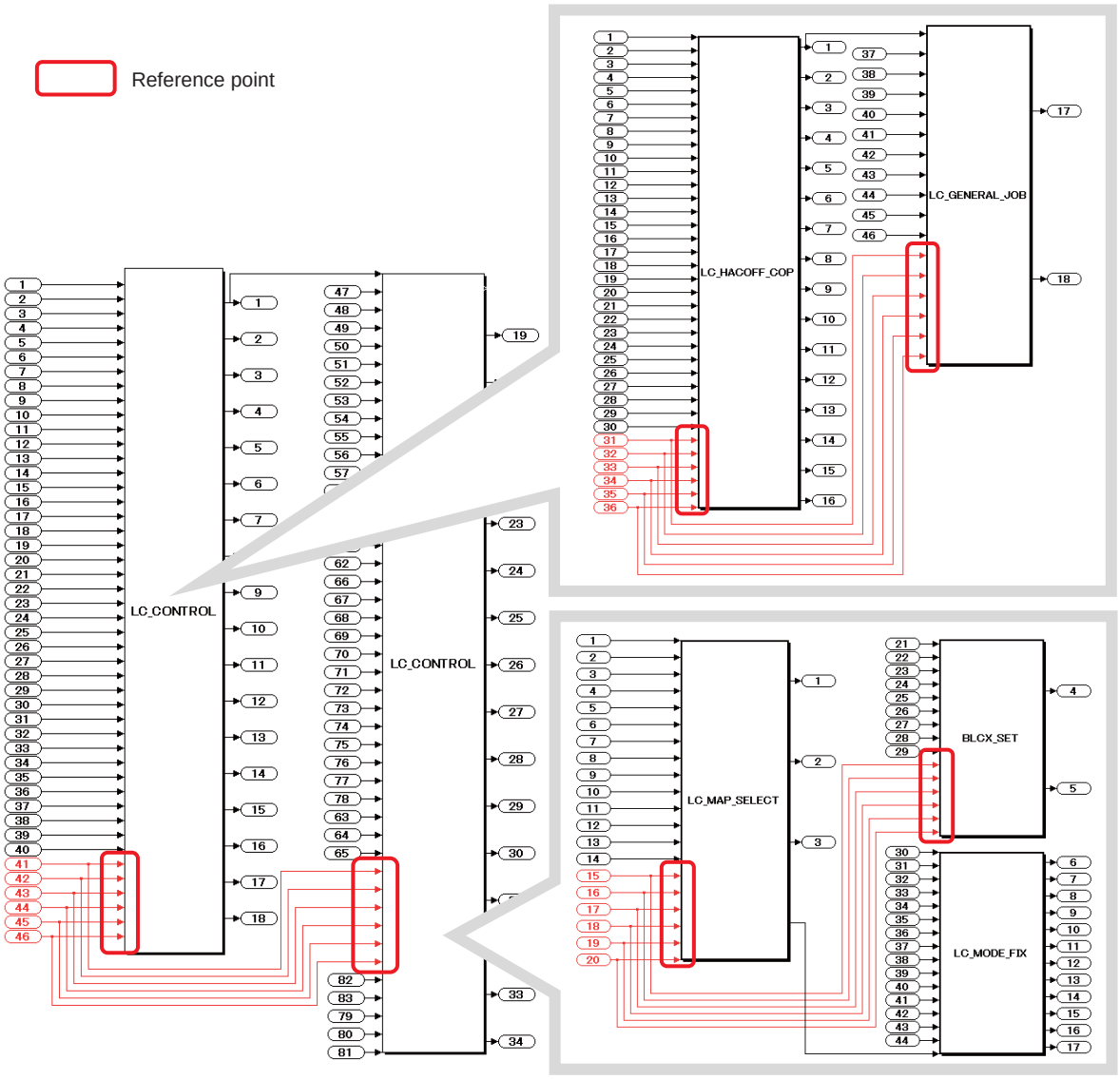


Fig. 3　Complicated model with many connecting lines

3.3. Table と Map 検索時のモデル分断レス手法

制御ロジックの中には，Fig. 6 に示す自動変速機変速特性ロジックのように，特定の引数を Table や Map に与え，その検索結果を利用して制御するものがある．この制御をモデリングするにあたり，チャート上に Table や Map 検索を直接記述することはできないため，Fig. 7 に示す Lookup Table(以下LUT)，Lookup Table(2-D)(以下LUT2D)ブロックをそれぞれ使用した．しかし，それでは Fig. 8 に示すように Table や Map 検索の前後でモデルが分断されてしまい，可読性が低下するという課題が発生した．

そこで，Fig. 9 に示すように，イベント信号と戻り値によるループ構造を用いたモデリング手法を取り入れることにした．つまり，チャート上において，Table検索をおこないたい個所で LUT ブロックを呼び出すイベント信号(Event)を出力し，それと同時に検索引数(x)を与えることでTable検索をおこない，その検索結果を再び，戻り値(y)としてチャート上に戻すという手法を考案した．これにより，モデルを分断することなく Table や Map 検索のモデリングが可能となった．

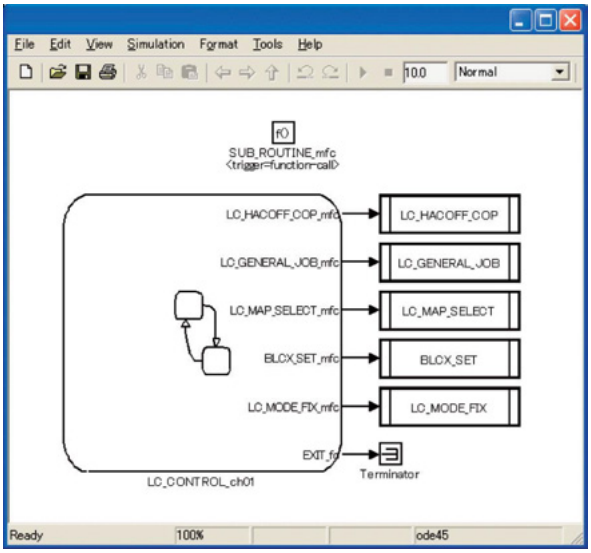


Fig. 5 Simple model with few connecting lines based on machine-level

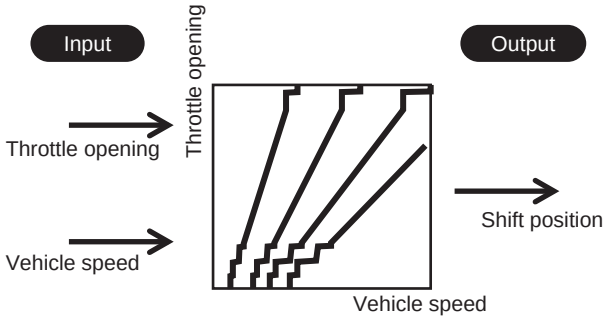


Fig. 6 Speed change characteristic logic of automatic transmission

3.4. ドキュメント生成時のモデル表記の後処理手法

量産ソフトウェア開発用の制御仕様書は，設計者だけでなく，検証者，実車およびベンチの担当者，サプライヤなど多くの開発関係者で共有される．そのため，モデルを Microsoft Office Word などの一般的なアプリケーションで閲覧可能なドキュメントにする必要があった．その際に，制御仕様書上で使用する３種類の変数(RAM，CALIB，WORKRAM)を視覚的に容易に識別できるようにTable 1のような表記ルールを規定した．また，条件分岐箇所はひし形表記とした．これらの表記ルールに合致したドキュメントをモデルから自動生成するために，はじめにスタイルガイドでチャート上に記述する変数の命名則(Table 2)を規定した．その上で，モデルの表記を Table 1 に合致するように後処理するツールを開発した．本ツールは MATLAB とドキュメント側のアプリケーションを連動させることで成立した．

まず，MATLAB 側で，変数の分類，条件分岐箇所の特



Fig. 7 Lookup Table and Lookup Table (2-D)

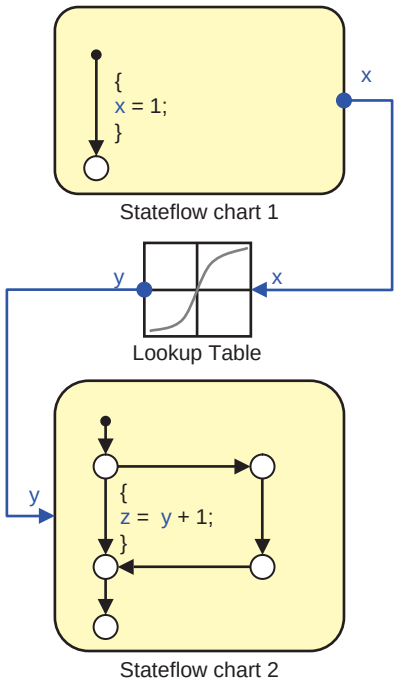


Fig. 8 Model divided into two charts by Lookup Table block

Table 1　Notation rule of variables on document

	RAM	CALIB	WORKRAM
Color	Blue	Red	Blue
Prefix	–	#	–
Capital/ Small	Capital	Capital	Small

Table 2　Naming rule of variables on stateflow chart

	RAM	CALIB	WORKRAM
Suffix	_r	–	–
Capital/ Small	Capital	Capital	Small

定，モデル画像のコピーをおこなうようにプログラミングした．変数の分類は，スタイルガイドで規定した命名則(Table 2)に従っておこなった．条件分岐箇所はチャート上の Junction(Fig. 10 の丸型のオブジェクト)および Transition(Fig. 10の矢印型のオブジェクト)の配置から特定した．Fig. 10 は，Transition 上の条件(X_r < Y)が成立した時に，その Transition の矢印の方向(z = 1)に遷移し，不成立の場合には，もう一方の方向(z = 0)に遷移することを表している．つまり，条件分岐箇所では一つのJunctionから二つの Transition が伸びていることがわかる．これをチャート上のすべての Junction に対して検索し，分析することにより，条件分岐箇所を特定した．モデル画像のコピーは，MATLAB の機能を利用し，テキスト情報を保持するために，メタ形式，すなわち画像やテキストなど複数のタイプのデータを含むデータ形式を選択しておこなうようにした．

次に，ドキュメント側のアプリケーションを起動し，モデル画像の貼り付けと表記処理をおこなうようにプログラミングした．MATLAB からドキュメント側のアプリケーションを起動するためには，MATLABでサポートされている ActiveX 機能を利用した．また，変数の着色やひし形図形への置換といった表記処理は，ドキュメント側のアプリケーションのオートメーション機能を利用して MATLAB 上から操作した．Fig. 11 に Fig. 10 のモデルから自動生成したドキュメントを示す．

以上の MATLAB とドキュメント側のアプリケーションを連動させたドキュメント自動生成ツールにより，仕様書の可読性を向上させることができた．

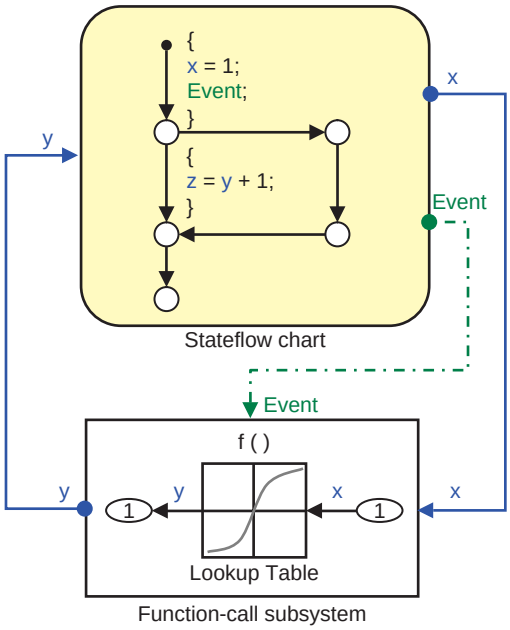


Fig. 9　Modeling method: Searching table data without division

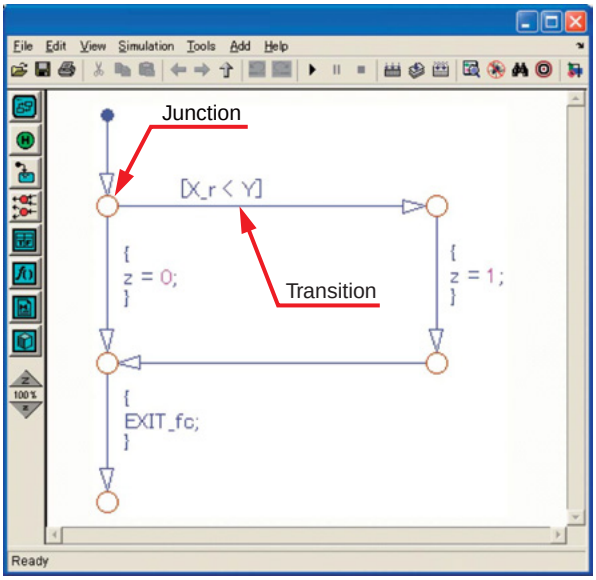


Fig. 10　Junction and transition

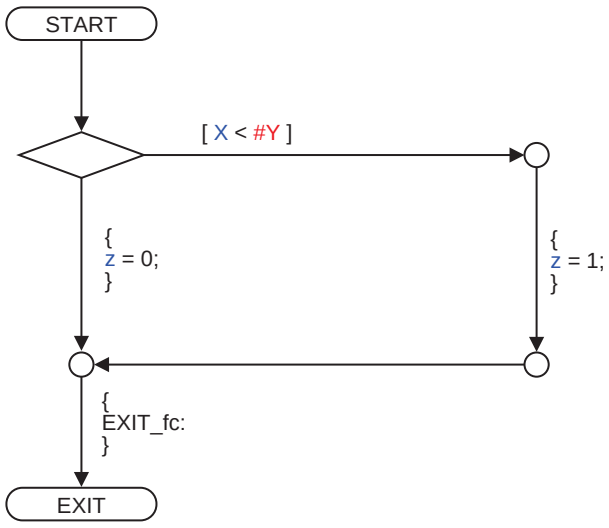


Fig. 11　Document generated from model in Fig. 10

4．モデリング時間短縮化支援ツールの開発

第3章では，スタイルガイドの開発にあたり，モデルの可読性向上をねらいとして考案した四つの手法について述べた．本章では，そのスタイルガイドに準拠した実行可能な仕様書のモデリング時間短縮をねらいとして開発した下記三つのモデリング支援ツールについて述べる．

（1）自動変速機制御用ブロックライブラリ
（2）定型処理の自動モデリングツール
（3）既存変数情報の自動設定ツール

4.1. 自動変速機制御用ブロックライブラリ

MATLAB 標準のブロックライブラリには，Fig. 12 に示すように，多種多様な制御設計用ブロックが用意されている．その中から，自動変速機制御をスタイルガイドに準拠してモデリングする際に必要となるブロックを集め，カスタマイズした独自のブロックライブラリを開発した(Fig. 13)．本ライブラリのブロックは，ブロックに設定された情報をマスク上に自動表示するようにカスタマイズした．その具体例を Fig. 14 に示す．Fig. 14 の Table 検索ブロックは Graphical User Interface（以下 GUI)に軸データ名を入力すると，その情報がマスク上に自動表示される．

この仕組みは，MATLAB の GUI 開発環境である GUIDE を利用して，軸データ名を入力するための GUI と，その入力情報をマスク上に自動表示するための M-File プログラムを作成することにより実現した．

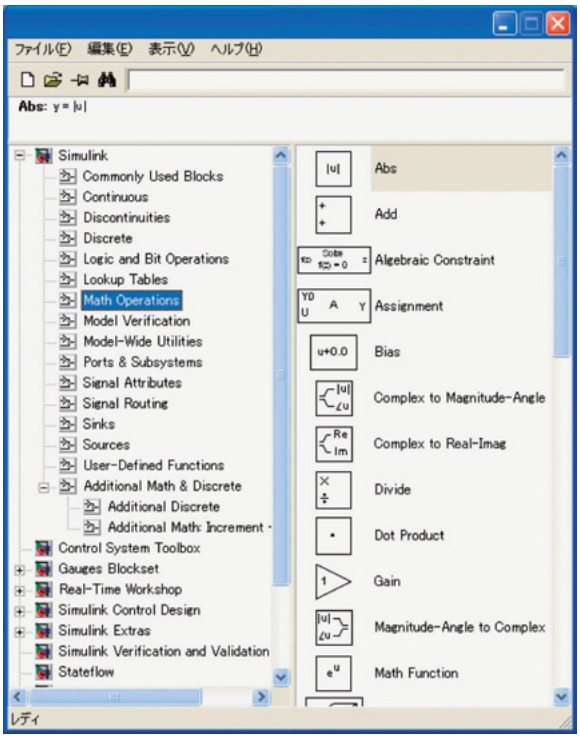


Fig. 12 Simulink library

以上の自動変速機制御用ブロックライブラリによりモデルの可読性向上とモデリング時間の短縮が可能となった．

4.2. 定型処理の自動モデリングツール

第3章で述べた，Table 検索や，Map 検索を適用した制御ロジックでは，複数の Table や Map を制御状態に応じて切替えて使用する場合がある．その場合，モデルは，Fig. 15 に示すような Switch Case ブロック，Merge ブロック，さらに，4.1節で述べたカスタマイズした Table または Map ブロックなどから構成される定型的なものとなる．しかし，切替え数が多ければ多いほど，単純なモデリング作業が増大し，モデリングエラーも増加する．

そこで，このような定型的なモデリングを自動で実行可能とする自動モデリングツールを開発した．本ツールは，設計者の情報入力用 GUI と，自動モデリングプログラムから構成した．

まず，GUI の設計にあたって，量産化された既存の自動

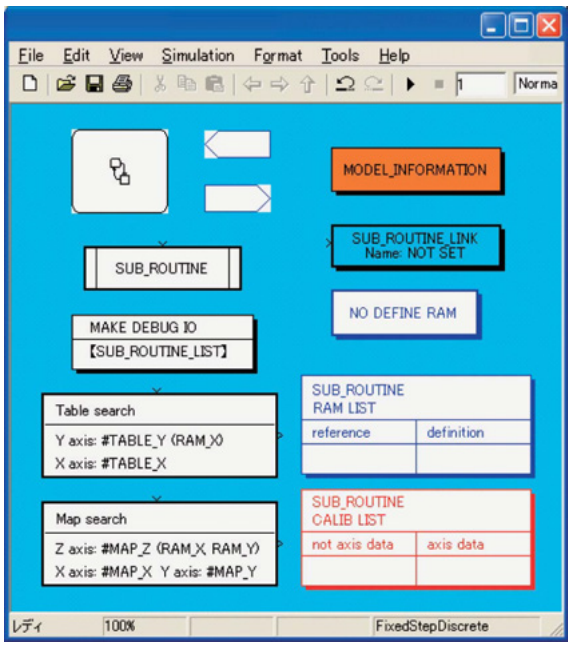


Fig. 13 Automatic transmission modeling library

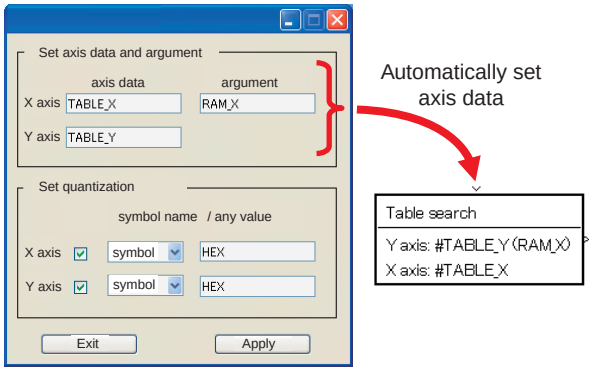


Fig. 14 GUI and customized table block

変速機用制御仕様書において，切替え制御パターンの分析をおこなった．その結果，TableとMapの切替え以外に，CALIBデータの切替え，RAM データの切替え，さらには多条件での Map の切替えなどが代表的な五つの切替えパターンであることがわかった．また，その切替え数や，切替え条件は，制御に応じてさまざまであり，高い設計自由度が要求されることがわかった．そこで，Fig. 16 に示すように，GUI 構成は，設計者が五つのパターンを自由に選択でき，さらに，切替え数や切替え条件を容易に設定できるものとした．

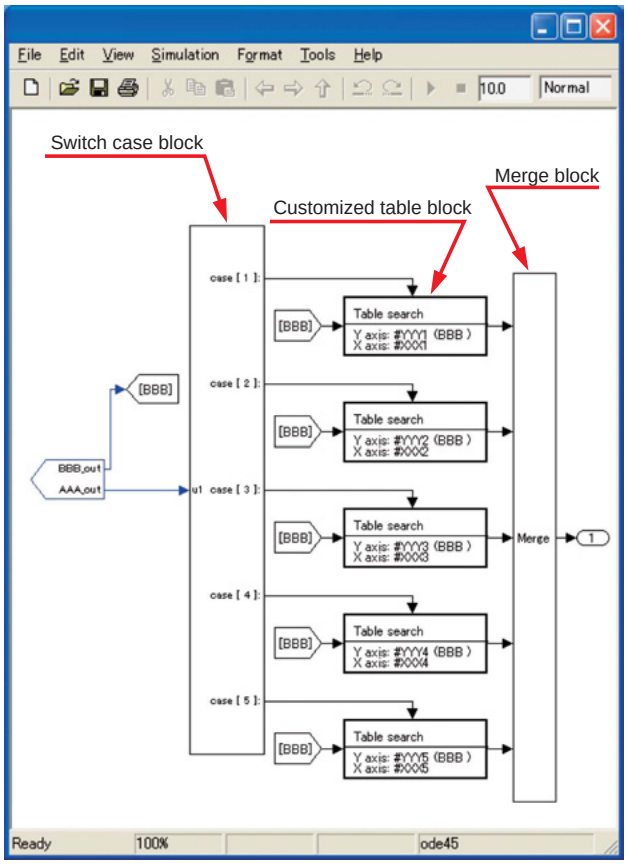


Fig. 15　Table switching model

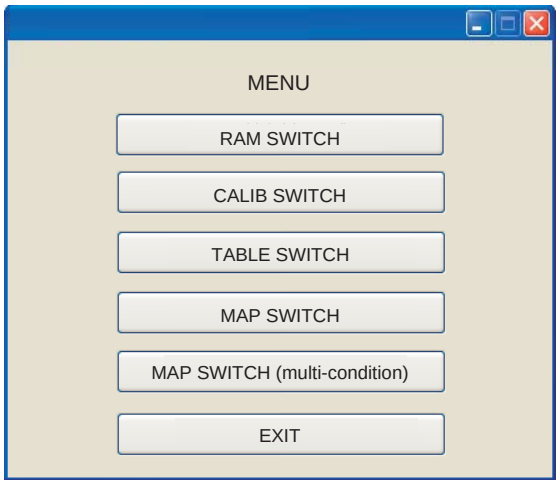


Fig. 16　GUI of auto-modeling tool

次に，GUI によって選択し，設定された情報に基づき自動的に Simulink や Stateflow によってモデリングするプログラムを作成した．そのプログラムは，下記一連の処理を自動的におこなうものとした．

（1）GUI で選択された切替えパターンに対し，自動モデリングに必要なブロックを 4.1. 節のブロックライブラリから取得し，Function-Call Subsystem 内に配置する．

（2）配置したブロックに対し，GUI で設定した情報を反映する．

（3）ブロック同士を結線する．

（4）Function-Call Subsystem のマスク上に切替えロジックを表記する．

Fig. 17 に本ツールによる自動モデリング結果を示す．

以上のGUIと自動モデリングプログラムから構成された自動モデリングツールにより，モデリング時間の短縮が可能となった．

4.3. 既存変数情報の自動設定ツール

量産ソフトウェア開発用の制御仕様書では，その中で取り扱われるすべての変数に対して，データスケール(LSB)，データタイプといった変数の精度を指定するための情報を設定する必要がある．MATLABモデルを量産の制御仕様書として取り扱う場合も同様の設定が必要となる．ここで，大規模な制御モデルにおいて，さらに莫大な数の変数に対して一変数ごとに情報設定するには，莫大な時間を要する．

一方，量産ソフトウェアで取り扱われている既存の変数については，その情報含めて，データベースで管理されており再利用が容易となっている．

そこで，データベースとリンクし，既存変数情報を自動取得，一括設定し，その設定結果を一覧表示する GUI を開発した．さらに，その変数の情報を MATLAB モデル内に保持するための専用ブロックを開発した．

データベースとのリンク，すなわち，既存変数情報の自

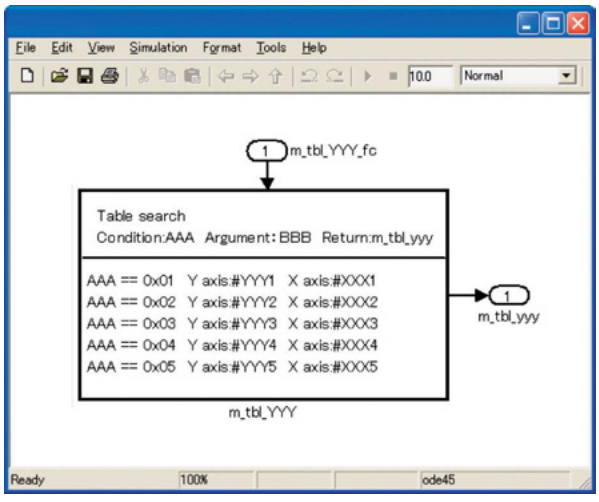


Fig. 17　Result of auto-modeling

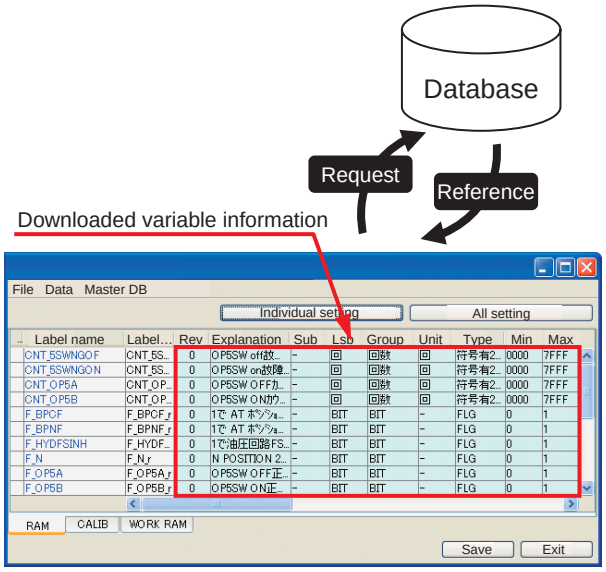


Fig. 18 Link system between database and GUI managing variable information

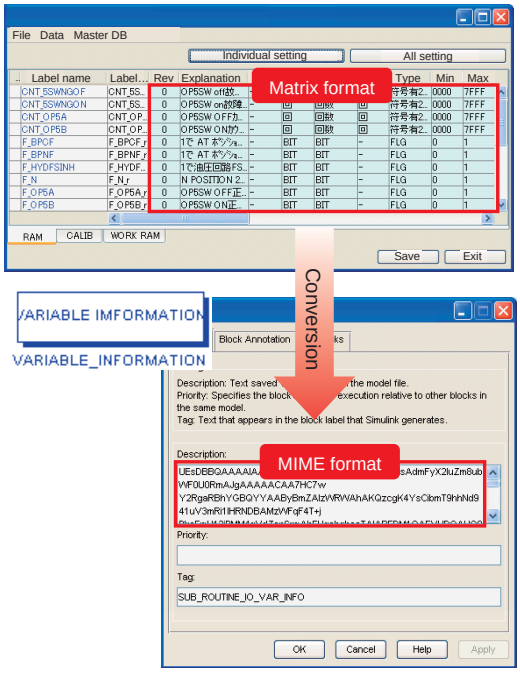


Fig. 19 Conversion of variable information format

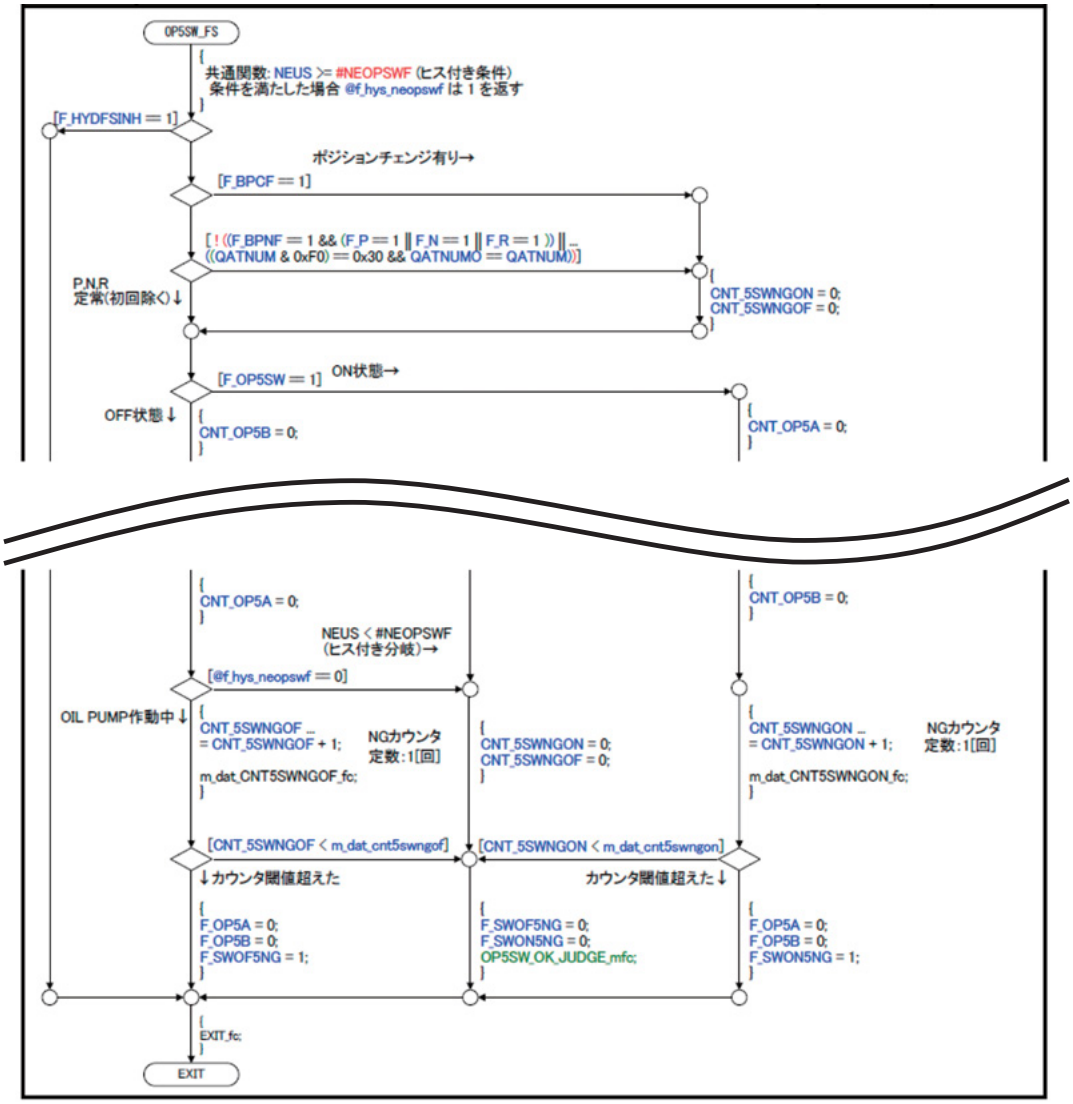


Fig. 20 Example of application

動取得，一括設定にあたっては，まず，GUI 起動時に，スタイルガイドで規定した命名則(Table 2)に従ってモデルを自動解析し，設定が必要な変数をその変数名から自動抽出できるようにプログラミングした．その上で，データベース言語の一つであるSQLを使用して，データベースから，変数名に関連付けされた変数情報を参照できるようにした(Fig. 18)．

一括設定された変数情報の MATLAB モデル内での保持にあたっては，変数情報を専用ブロックのプロパティ欄に格納できるようにプログラミングした．格納する際のデータ形式として電子メールなどで利用されるMIME形式を採用することにより，複数の変数情報から構成される行列データを一つのブロックで保持できるようにした(Fig. 19)．

以上の既存変数情報の自動設定ツールにより，モデリング時間の短縮が可能となった．

５．適用事例

開発したスタイルガイド，モデリング支援ツールを適用した自動変速機用制御ソフトウェアの実行可能な仕様書をFig. 20に示す．量産ソフトウェア開発用の制御仕様書として取り扱い可能な MATLAB モデルを，ツール導入前と比較して 1/20 以下の時間で作成できるようになった．

６．まとめ

(1)Stateflowを中心とした結線レス，モデル分断レス手法に基づくスタイルガイドの開発と，ドキュメント生成時におけるモデル表記の後処理ツールの開発により自動変速機用制御仕様書の可読性を向上させることができた．

(2)自動変速機制御用ブロックライブラリ，定型処理の自動モデリングツール，既存変数情報の自動設定ツールを開発することにより，上記スタイルガイドに準拠したモデリング時間を 1/20 以下に短縮することができた．

その結果，自動変速機用制御ソフトウェア開発への実行可能な仕様書の適用が可能となった．

参考文献

(1)大塚郁，大井正也：車載ソフトウェア開発へのモデルベース開発適用，自動車技術，Vol.60, No.6, p.80-8 (2006)

(2)箕輪信太郎，廣田俊明，横山浩紀，石黒哲矢，大塚訓：パワープラント制御ソフトの自動生成，Honda R&D Technical Review, Vol.16, No.1, p.243-248

(3)http://www.mathworks.com/industries/auto/maab.html

(4)http://j-maab.cybernet.jp/

(5)http://www.cybernet.co.jp/documents/pdf/ products/magazine/cybernet_news/no87.pdf

■著　者■



松山芳博



萩原顕治



清野　聡

Using CAD, CAE, and CAM to Enhance Automotive Body Assembly Design, Analysis, and Fabrication

Sachin K. Raje* Daniel J. Turk* Daniel A. Paolini*

ABSTRACT

Standards, processes, and software were developed to automate the process of creating the Body In White (BIW) fasteners, such as, spot welds and MIG welds. Enhancements were made to the previous process and software where the CAD data for fasteners was mostly geometric representations. The new method provides data that has complete embedded information, including actual connection properties, for the parts being welded. The key benefits include the ability to check geometry and design intent in 3D, quickly create and revise connections in finite element simulation models, and import data into weld offline teaching software to accelerate robot welding.

1. Introduction

In the late 80's to early 90's, automotive design engineers communicated weld information with symbols and annotations on drawings (Fig. 1). For spot welds, the symbols showed the location and quantity of parts connected while the annotations described the weld coordinates and the part numbers being connected. Such drawings were verified by visually contrasting the illustrations and annotations and comparing with the design intent. Once all errors were corrected, the drawing was issued and distributed. These drawings were used to create weld connections in Computer-Aided Engineering (CAE) models and welding templates for assembling prototype vehicles. In both cases, extensive labor and time were necessary to read each drawing and either manually create a weld location in a CAE model or physically measure and mark a location on a weld template.

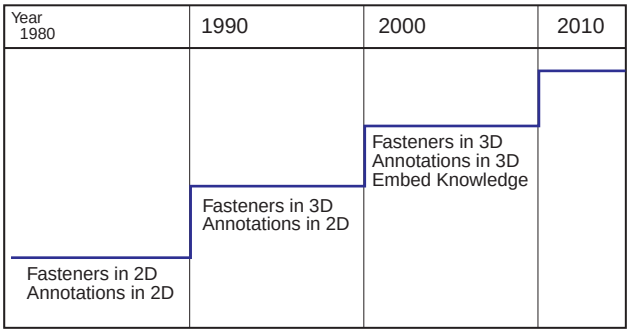


Fig. 1 History of BIW assembly data

Once we moved to welds in 3D, the process was enhanced since weld locations could be extracted into CAE software. The source of communication was based on drawings. The 2D drawing contained the weld information for both the CAE world and Computer-Aided Manufacturing (CAM) environments. As CAD systems evolved (early 2000), we could embed knowledge in 3D. This provided us with the base for significant enhancements.

2. Developing the Body Fasteners Workbench

As shown in Fig. 2, we divided the flow of BIW assembly into four phases. In phase one, the design engineer provides the necessary inputs. In phase two, the program determines the parts that are being connected, gathers information about these parts, and creates the fasteners. Phase three involves checking the data. In phase four, the assembly is made available for simulation.

The Body Fasteners Workbench was developed to help with this process. The workbench concept was chosen because of the framework inherent to the base software. The workbench consists of a collection of functions that are arranged in toolbars and grouped based on the following functions: fastener creation, operations, annotation, and reporting. The software algorithm is explained in a flowchart in Fig. 3.

During the initial stages of the software development, a worldwide team comprised of members from design, information systems, manufacturing, and tooling came together to define some common user requirements for

* HONDA R&D AMERICAS, INC.

https://doi.org/10.69239/hondatechnicalreview.2009_21_2_18

3D fasteners. Some of the standards that were developed, and used in the specifications for the software, include:

- A global unique identifier for each fastener
- 3D annotations for each fastener type
- A standard report format (CSV)

2.1. Design Phase

In the Design phase, the design engineer loads the parts that make the assembly and adds a part that will hold information about the assembly. Inputs depend on the type of fastener being created, for example, the input for a spot weld is a surface and points at which the welds have to be created. A MIG weld needs two surfaces and a curve. Sealers need two bounding surfaces while bolts need point, surface and a hole. The necessary inputs are referenced (copied in or referenced with a link) from the parts to be assembled. Once these inputs are acquired, the software starts to calculate connected parts.

2.2. Compute Phase

A key aspect of the Compute phase is calculating what parts are being fastened during the assembly process and acquiring their attributes. This could be done by asking the design engineer to select what parts are being connected, but impractical since one assembly might contain hundreds of spot welds. Furthermore, this process needs to be independent of the type of fastener being created. We investigated two methods to accomplish this.

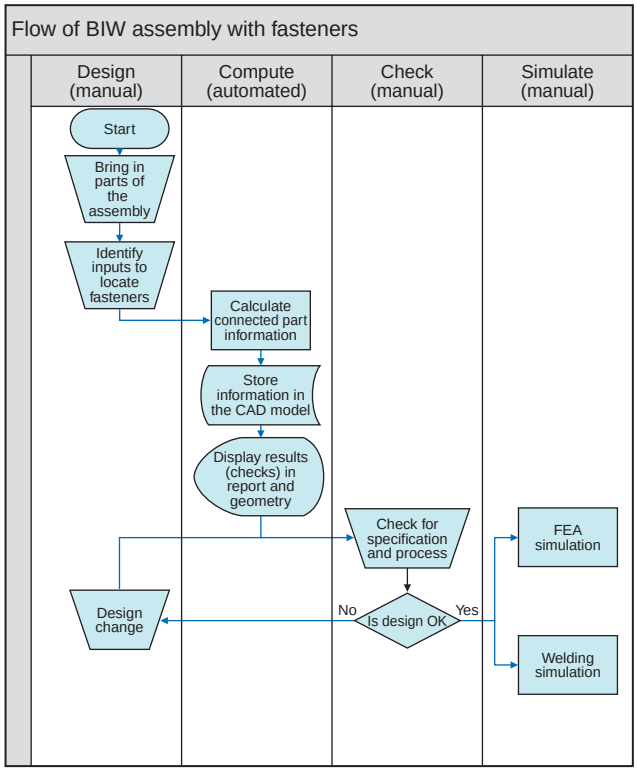


Fig. 2 BIW assembly phases

2.2.1. Methods for calculating connected parts

Cylinder Method. At the location where a fastener is needed, a cylinder with 2 mm radius and 10 mm length is created along the normal to the input surface. These dimensions were selected balancing the need to

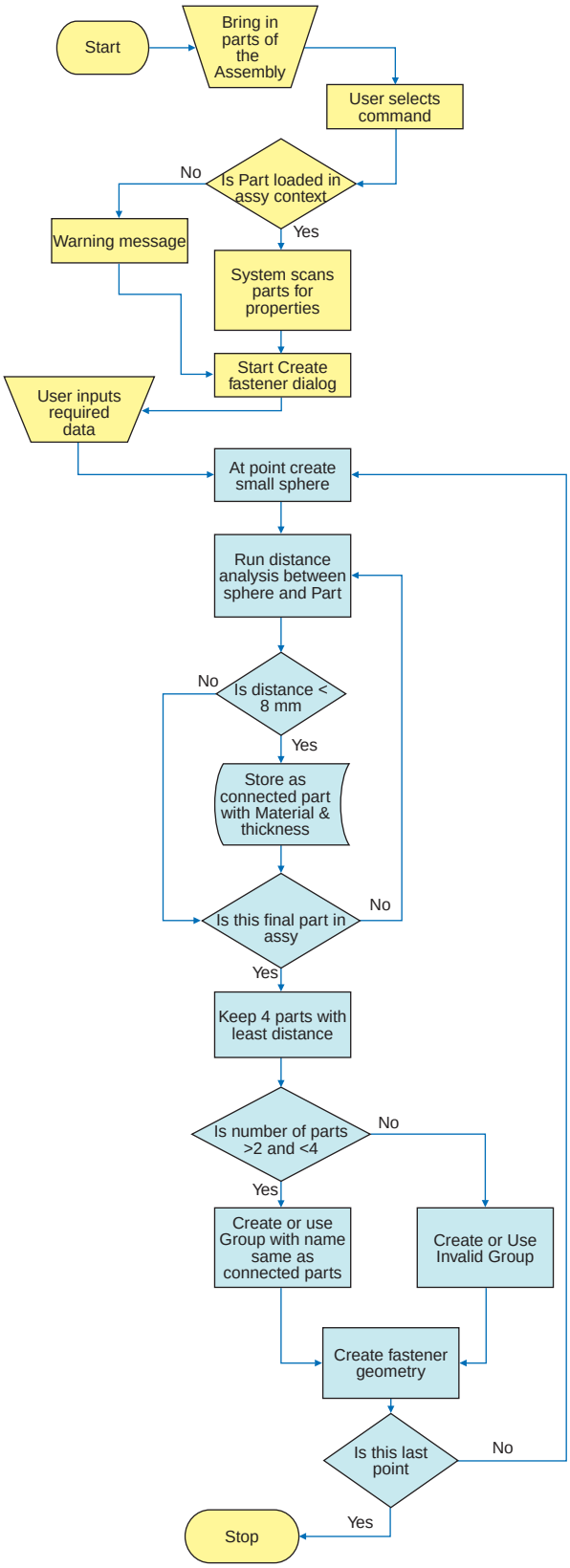


Fig. 3 Flowchart for software algorithm

capture the connected parts but remove false positives. The software computes the interference between the cylinder and all parts loaded in the assembly. Parts that interfere with the cylinder are assumed to be connected (Fig. 4).

Sphere Method. At the location where a fastener is needed, a 0.5 mm sphere is created. The software computes the distance between the sphere and all loaded parts. Parts that fall within 8 mm are assumed to be connected (Fig. 5).

Both methods return a list of parts that can be connected. However, the fastener type has to be considered to determine the relevant parts; for example, a MIG weld or sealer can connect two parts while a spot weld can connect up to four parts. Despite such restrictions, the software may still return more parts than expected (Fig. 6). In such cases, the user is prompted to select the relevant parts.

Based on our testing and the variety of fasteners that can be handled, we selected the sphere method for calculating connected parts.

After the connected parts are determined, properties are interrogated from the model and mapped from a Product Lifecycle Management (PLM) database. Part number, material, and thickness data are filtered and stored on the geometric feature.

2.2.2. Visualization

Each fastener is represented by geometry and annotations that are based on ISO and other standards. These representations have variations. A spot weld is represented based on the number of parts being connected while a MIG weld is based on the length of the weld. Additionally, the geometry has to be created with multiple visualizations, that is, Wire frame and Solids, which aid in downstream use of the data in visualization software or 2D drawing creation. Finally, the design engineer creates annotations for each fastener. Figure 7 shows an example of visualization and annotation on spot welds.

2.2.3. Data organization

A tree structure within the CAD model stores the geometry information. Good organization in the tree structure is important as it enables fast access to information. When the geometry is created, fasteners are organized in the tree by welds, sealants, bolts, etc. Welds are subdivided into Spot, MIG, and other weld types. Additionally, fasteners are grouped by the parts that are being connected as shown in Fig. 8 by the "PART2_SAE / PART3_SAE" label. All spot welds that connect these two parts are included in this group.

Once the connected parts are computed, the geometry, annotations and the organized tree is created then the data is ready for check phase.

2.3. Check Phase

Once an engineer completes creation of the fasteners, he/she uses a PLM workflow to promote the part's workflow status and start the check process. The first check is automatic, and if successful, a manual second check is started.

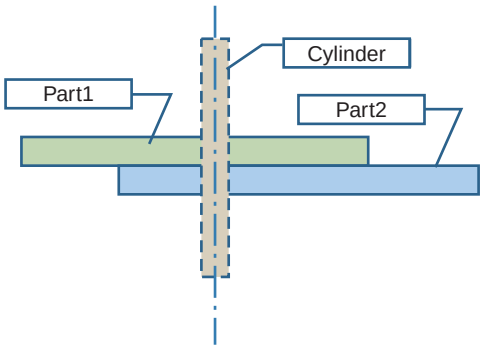


Fig. 4 Cylinder method

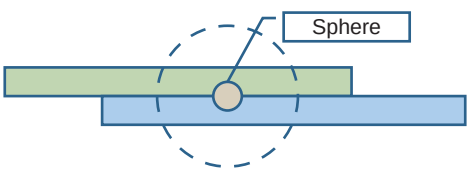


Fig. 5 Sphere method

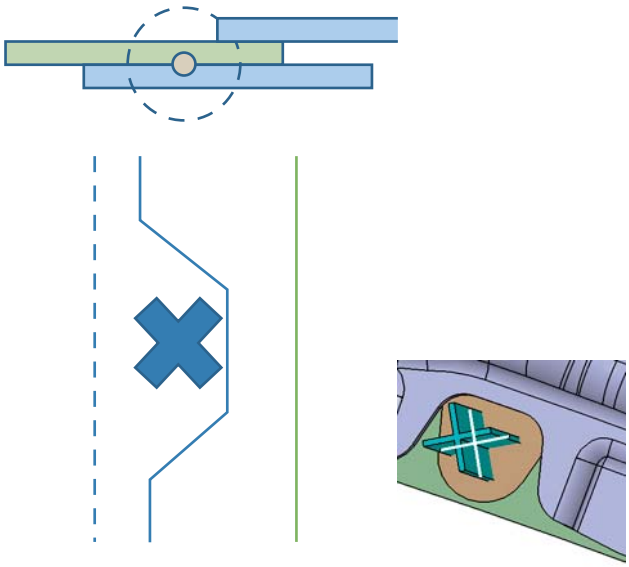


Fig. 6 Example of multiple parts identified to be connected

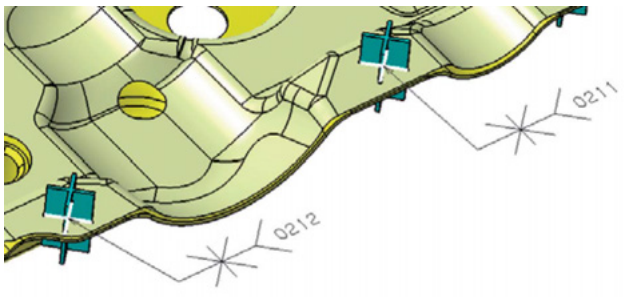


Fig. 7 Visualization and annotation on spot welds

2.3.1. Automated check

An automated program checks for invalid fastener definition, which could involve a mismatch between number of parts and the type of weld, a missing material or thickness, two spots created at the same location, or missing annotations. If problems are found, the part is demoted to the original workflow status and an e-mail sent to the design engineer with a link to the error report.

Errors can be corrected using edit functions provided for the fasteners. Individual fasteners can be modified by editing the inputs or by making corrections to the connected parts. Multiple fasteners can be modified by using a refresh function to re-compute connected parts and collect their modified properties. When there are no errors, the assembly is made available to the checker.

2.3.2. Manual check

To aid with the manual check, the information stored on fasteners can be displayed in several report formats to meet end users' needs. Such reports contain fastener information, which includes a unique identifier, location, orientation, the parts being connected, and properties (material and thickness). This report can be saved as a file that can be read by spreadsheets or other applications.

Once the checker is satisfied with the assembly, he/she promotes the file to a locked status and a Spot Weld report file is generated in a comma-separated value (CSV) format (Fig. 9). This is the same information created with the report function. The data is now available for simulation engineers to build finite element models and to fabrication engineers to start offline programming.

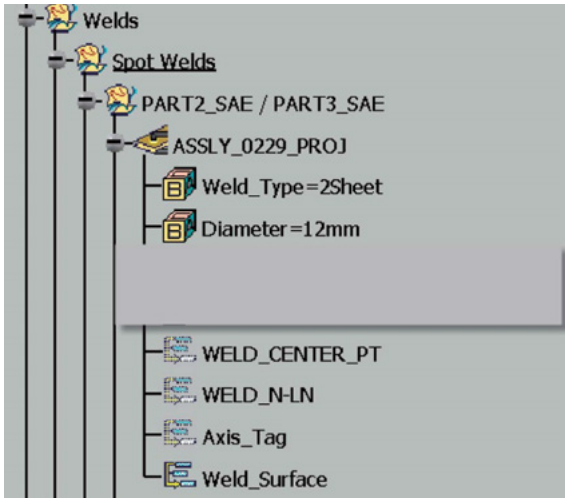


Fig. 8 Tree structure example

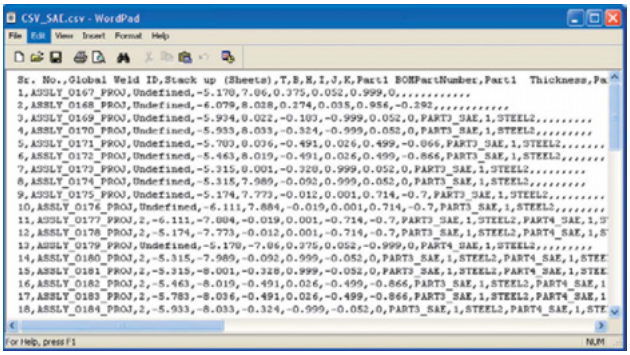


Fig. 9 Sample spot weld CSV file

2.4. Simulate Phase

2.4.1. Finite element (FE) analysis

Automotive manufacturers perform computer simulations throughout the vehicle development process. These simulations check and enhance overall vehicle performance in areas such as crashworthiness, durability, noise, vibration and handling. To perform these simulations, the engineers first create a computer model of the vehicle that is detailed enough to provide useful performance measurements. The computer model includes FE representations of each part and the corresponding connections. The most common structural connection is the spot weld. Since a typical vehicle contains approximately 4000 spot welds, it is important to have an automated process to create them.

The building of a full vehicle simulation model starts with creating FE part representations. A preprocessing software tool is used to import 3D CAD surface and solid data. As shown in Fig. 10, a mesh for each part is created in a batch process. Once all of the mesh files are created for a sub-assembly, the preprocessor loads and places the individual meshes in the correct location and labels each mesh with its corresponding part number, material, and thickness information. In order to ensure simulation results it is important that these mesh properties are consistent with the properties used by the CAD program to define the fasteners. The sub-assembly is now ready to connect the mesh parts to each other.

The connection process for the simulation model starts with the spot weld CSV file, which contains all of the necessary data to build a FE representation of the spot weld. The FE spot weld creation tool reads and processes the unique weld identification number, the number of sheet metal layers connected, the 3D location of the center of the weld, and the part numbers for each of the sheet metal layers being welded. In the simulation model building process, the welds are created on a subassembly-by-subassembly basis (Fig. 11). Once sub-assemblies are complete, groups of sub-assemblies are connected with additional spot weld files. This process continues building until the final assembly is completed. Another method would be to combine all of the spot

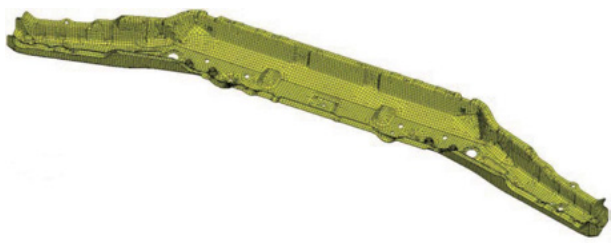


Fig. 10 Finite element part meshes

weld CSV files into one complete vehicle spot weld file and then create all of the FE spot welds at the same time.

2.4.2. Prototype fabrication

Prototype vehicles are built to confirm manufacturability and performance. Before implementing the 3D fastener environment, prototype welding was a manual process of reading individual drawings to build a weld table and printing drawings to create weld templates. The availability of the spot weld CSV file and the introduction of welding robots have reduced the overall preparation time for weld parameter development by approximately 50%. A timeline of the maturation of robotic welding processes is shown in Fig. 12.

The process starts by importing the weld information from the CSV file into the simulation environment. The result is a properly oriented weld tag for each spot weld, which allows for fast orientation and assignment of the welding robot (Fig. 13).

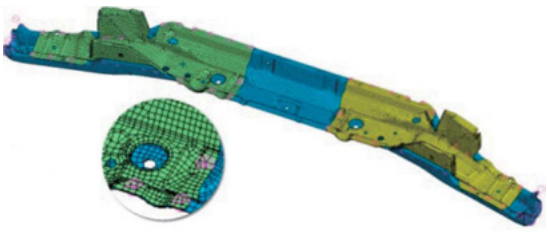


Fig. 11 Single assembly with FE connections

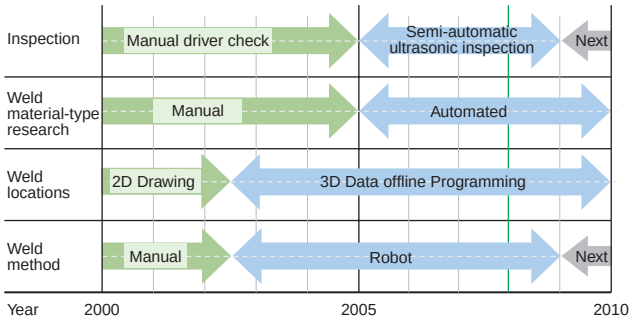


Fig. 12 Application evolutions in prototype processing

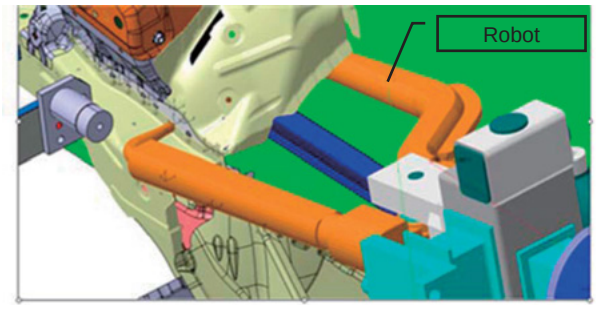


Fig. 13 Welding robot oriented based on imported weld points

2.5. Software Maturation

The software has matured in multiple versions, leading up to the current version, V4. In the initial release, V1, an interface was developed to create the geometrical data. In this version, the step of creating a CSV file was a secondary process that didn't have any interaction with the design engineer. The next version, V2, implemented real-time information gathering from a PLM system while a design engineer created fasteners. This increased the accuracy of the CSV file as more checks were done before simulation or fabrication staff saw the data. The latest versions, V3 and V4, have support for more operations like symmetry, copy paste with links, and multiple PLM systems.

3. Conclusion

The development and implementation of BIW fasteners has advanced vehicle development in many ways:

(1) Weld Design has advanced to a knowledge centric approach from the historical focus on geometry.
(2) The software has shortened the time required for design engineers and checkers to collect and display information about the BIW assembly.
(3) The task of building and updating simulation models has been simplified.
(4) The lead time to weld prototype vehicles has been reduced.
(5) The Body Fasteners software and associated standards have provided enterprise–level efficiency enhancements that benefit all facets of vehicle development.

The next step for BIW fasteners in the PLM environment is to detect changes in the assembly and manage the effect on assemblies.

References

(1) ISO 16792: Technical Product Documentation Digital Product Definition data practices
(2) JIS Z 3021: Symbolic representations of welds

■著 者■



Sachin K. Raje



Daniel J. Turk



Daniel A. Paolini

鷹栖プルービンググラウンド GPS 安全監視システム

GPS Safety Monitoring System for Takasu Proving Ground

唐崎英史* 瀧川正人* 藤井仁* 松倉剛克*
Eiji KARASAKI Masato TAKIKAWA Hitoshi FUJII Takekatsu MATSUKURA
小森久裕* 椿美一* 武内公一**
Hisahiro KOMORI Yoshikazu TSUBAKI Kouichi TAKEUCHI

要　旨

GPS安全監視システムは，テストコース内を走行する車両から送られてくる GPS 位置情報を，基地局にて受信し，コンピュータにてデータ処理することで，走行車両の状況をモニタ画面上にリアルタイムで表示する．同時にその情報から，車両走行アクシデントを判断し，発生位置の特定をおこない，緊急警報を発するシステムである．広大で起伏に富んだ鷹栖プルービンググラウンドは，監視カメラによる直接監視が難しいことから，発信機とコースの埋設センサによる監視システムを運用してきた．近年テストコースが増設され，車両走行台数も増加し，このシステムでは限界があるため，本システム採用に至った．その結果，連絡路を含めた全エリアの監視が可能となり，安全性向上と巡視要員の無人化および投資コスト 10 分の 1 を達成した．

ABSTRACT

A GPS safety monitoring system that uses receiving stations to receive GPS position data, transmitted by vehicles on a test course, has been developed. Data processing by computer enables real time display of vehicle status on monitor screens. At the same time, the system uses vehicle data to judge whether an accident has occurred, specify the location of the accident, and send out an emergency alarm. Honda's Takasu Proving Ground covers a large area of undulating ground, making direct monitoring by camera a challenge. A monitoring system based on transponders and sensors embedded in test courses has therefore been utilized in the proving ground. The number of Takasu test courses has recently been increased, and there have also been increases in the number of vehicles using the courses, bringing the former system to its functional limits. The monitoring system discussed in this paper was therefore introduced. This has enabled monitoring of the entire area of the Takasu Proving Ground, including connecting roads. The new system has increased the safety of the courses and done away with the necessity for inspection tours. The initial cost of introducing the system was one-tenth of the projected cost of extending the previous system.

1．まえがき

鷹栖プルービンググラウンドは二輪，四輪，ATVの基本骨格性能テストと，寒冷地テストを主におこなうコースであり，栃木プルービンググラウンドに対し４倍以上の広大な敷地を有する，起伏に富んだ低中高速の従来にない各種テストコースを保有している(Fig. 1)．そのため監視カメラによる直接監視が難しいことから，車両に発信機(トランスポンダ※１)を搭載し，コースの埋設センサにより，各車両の走行位置を計測し，コース内で一定時間の停止があると事故と推測するシステムを運営していた．近年テストコースが増設され，二輪，四輪，ATVの走行台数も増加し，このシステムでは性能とコストにおいて限界があり，GPS(Global Positioning System)を利用した新安全管理システムを構築し，全コースでの安全監視を可能とした．

※１トランスポンダ：TRANSmitter(送信機)とresPONDER(応答機)からの合成語で，受信した電気信号を中継送信したり，受信信号に何らかの応答を返す機器の総称である．

＊　PG管理室
＊＊株式会社スタンダード

https://doi.org/10.69239/hondatechnicalreview.2009_21_2_19

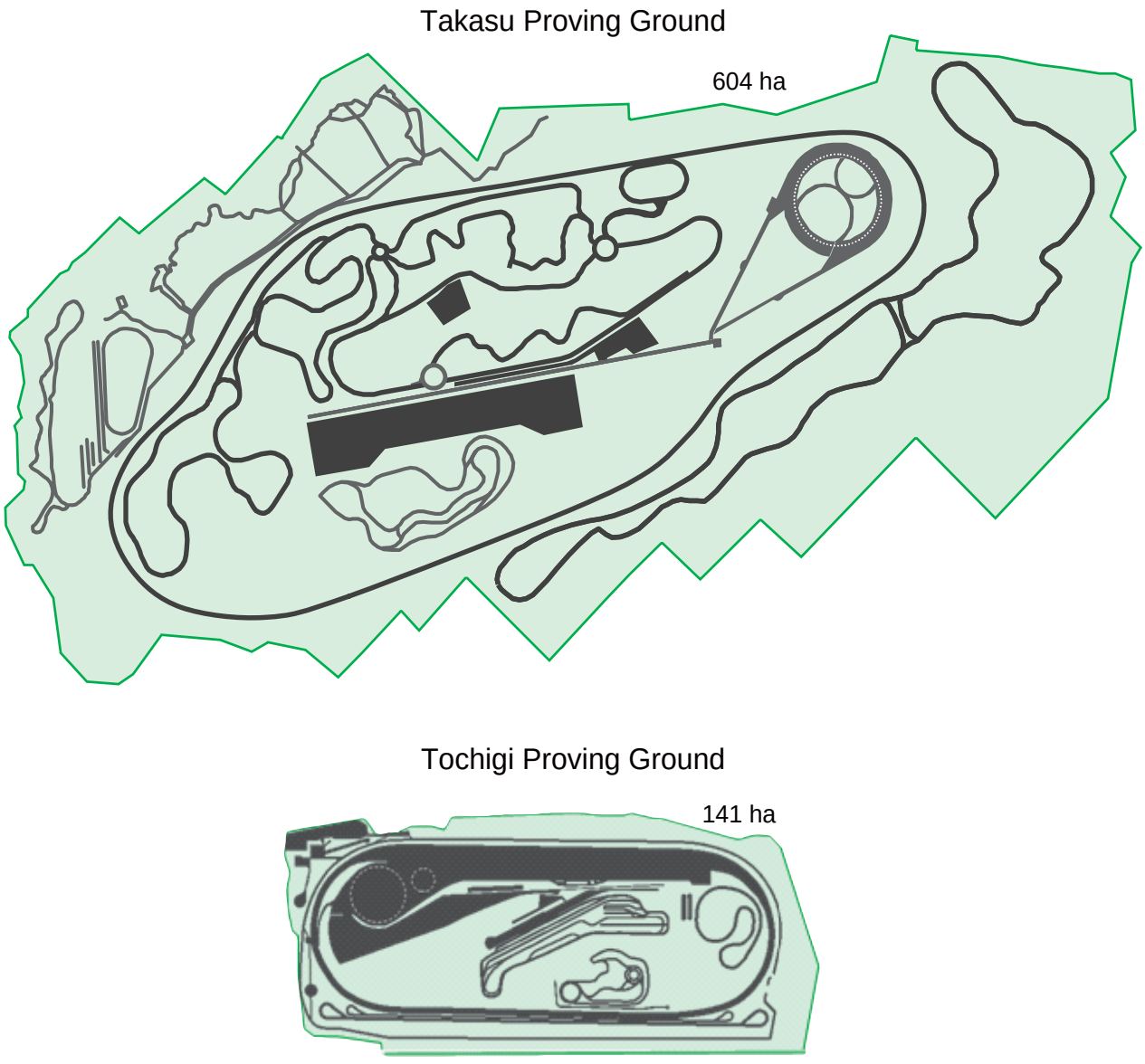


Fig. 1 Honda proving grounds

2．開発のねらい

（1）安全性向上

トランスポンダのセンサが埋設されているコースは，高速走行がおこなわれる２コースに限定し運用しているが，GPS 安全監視システム導入により，敷地内すべてのコースにおいて安全監視が可能となる．また全車両をリアルタイムに監視することにより，事故の発見だけでなく，速度違反や危険走行の監視や規制をすることで，事故の発生を未然に防止する．さらに，既存の設備との連動により

- 二次災害防止（非常警告灯および電光表示板による警告）
- 台数管理（カウンタおよびゲートによる台数制限）
- 二輪と四輪のスケジュール管理（入口電光表示による規制）

など，総合的な安全管理を実現する．

（2）移動局の小型軽量化

二輪への搭載性を留意し，総重量 200 g 以下で，１辺が 120 mm 以下とする．

（3）計測精度および信頼性

従来システムでは，積雪が埋設センサに影響を及ぼすため，冬期は立哨巡視による監視が必要であった．GPS 安全監視システムは，オールシーズン問題なく信頼性も高く，フルオートの監視システムとなり，巡視要員の無人化が実現する．

（4）コスト投資低減

センサ埋設を，仮に５コース適用拡大した場合と費用比較すると，10 分の１以上の投資低減が図られる．また，保守等のランニングコストは約２分の１となる．

3．システム構成

車両に搭載された各移動局から，位置情報等のデータが近接した各基地局に受信され，Main PC(安全監視サーバ)にて，車両挙動がリアルタイムでモニタされる(Fig. 2)．データ処理により事故発生時には警報を発し，待機しているレスキュー部隊がモニタ上の発生地点(Fig. 3)を確認し，現場に急行する．同時にコース入口ゲートは自動的に閉鎖され，電光表示板には「事故発生・走行注意」と掲示されるため，二次災害発生が予防される．付加機能としてラップタイム計測システム，テストコース受付システム，騒音監視システムとリンクしており，テストコース総合運行管理システム(Fig. 4)を構成している．

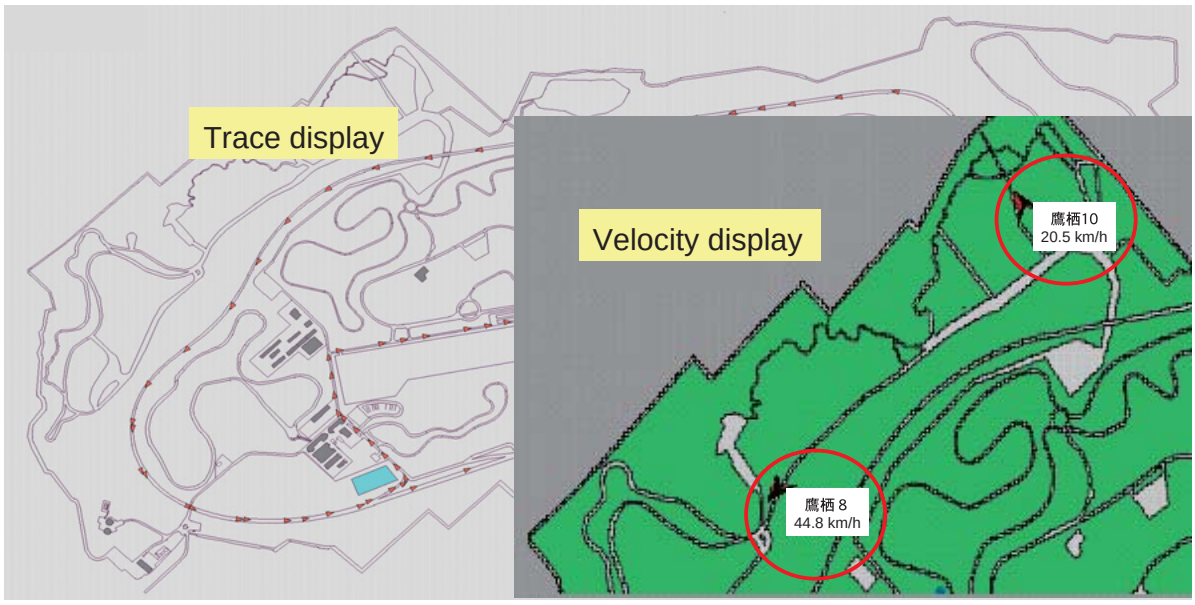


Fig. 2　PC monitor: Trace and velocity display

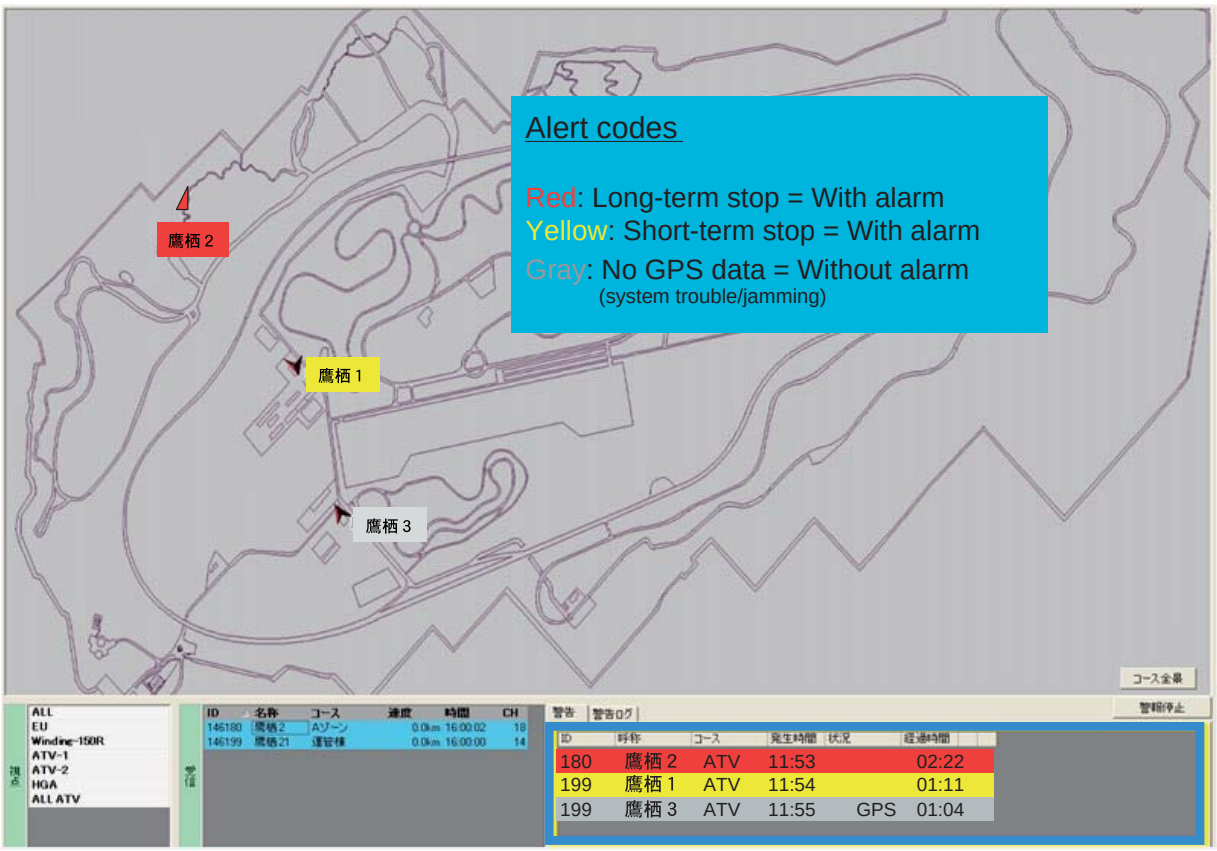


Fig. 3　PC monitor: Warning display

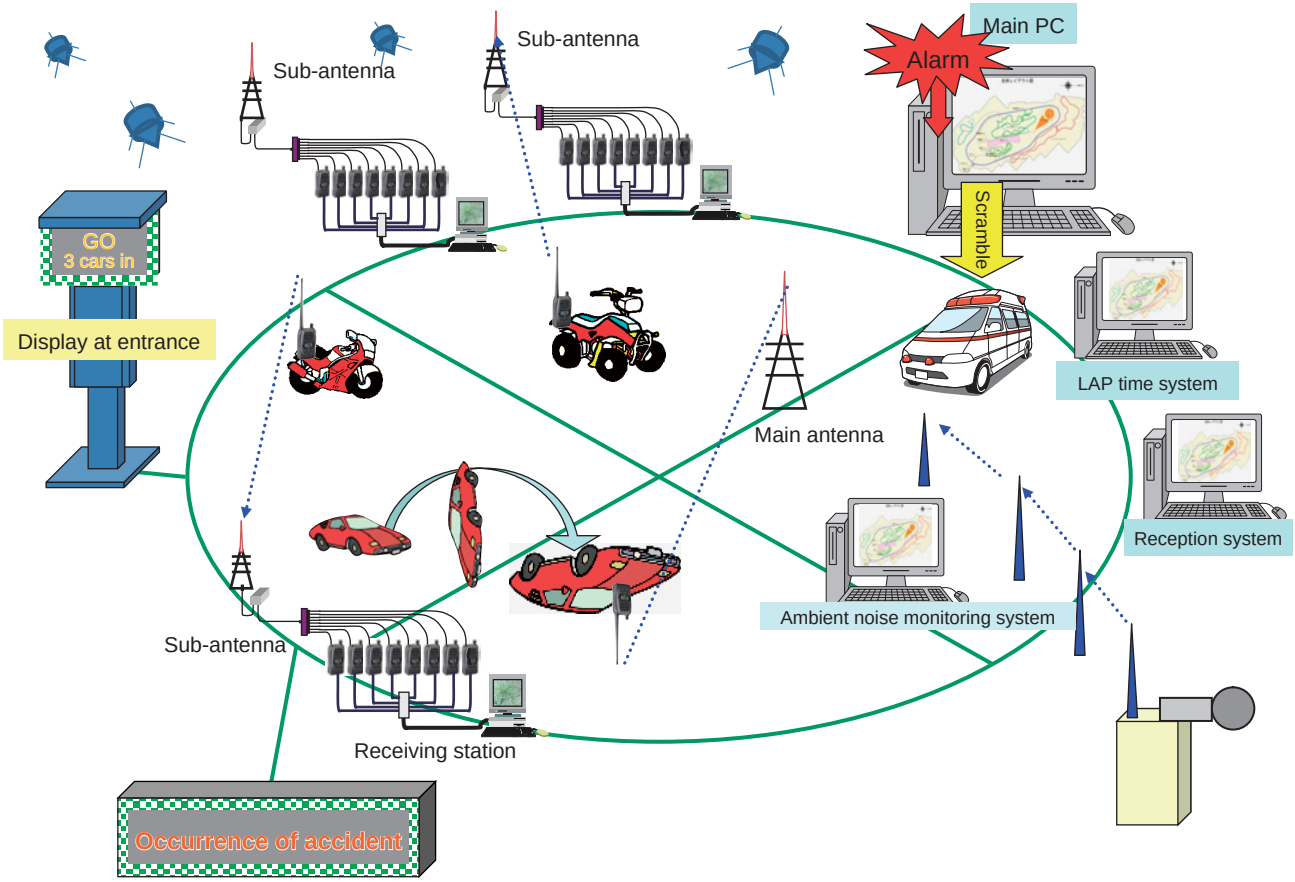


Fig. 4 System network



Size	108 × 65 × 25 mm
Weight	180 g (including battery)
Duration	5 hr

(a) Transmitting station for car and motorcycle

Size	100 × 60 × 38 mm
Weight	220 g (including battery)
Duration	6 hr
With telephone	

(b) Transmitting station for ATV

Fig. 5 Transmitting stations

Table 1　Types of wireless transmitter

Type	Access speed	Size	Investment	Transmitting cost per unite
Wireless LAN	54 Mbps	Big	Large	¥0
Cellular phone	7.2 Mbps	Big	Large	¥10,500/month
Land mobile radio	2400 bps	Compact	Small	¥400/year

3.1. 移動局

移動局はFig. 5に示すようにGPS受信機，無線機，バッテリーから構成されており，重量およびサイズは二輪への搭載を配慮し，必要最小限とした．ATV用は車のテストコース環境上，コース上でスタックすることがあるため，状況把握の必要性から通話機能付きとした．

無線通信のインフラとしては無線LAN，携帯電話，業務用無線の三つの手法を検討したが，性能を加味しながら運用効率を考慮し，業務用無線を採用した．業務用無線は他に比べ，通信速度は劣るものの，本システム採用においては許容範囲であり，小型軽量化が可能で，投資や通信費の経済的優位性が高い(Table 1)．

なお，業務用無線の移動局のスペックは下記の通りである．

・業務用無線 周波数：400 MHz 帯　出力 1W
・システム重量：190 g(バッテリー含む)
・サイズ：H25 × W108 × D65(mm)

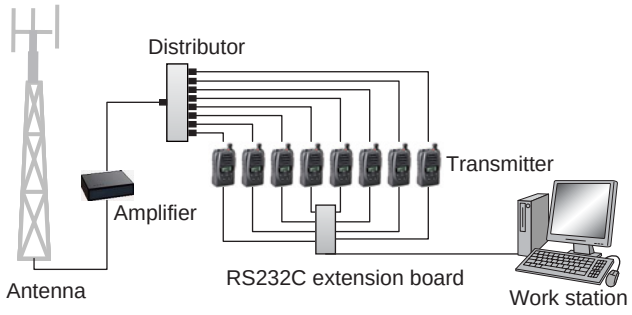
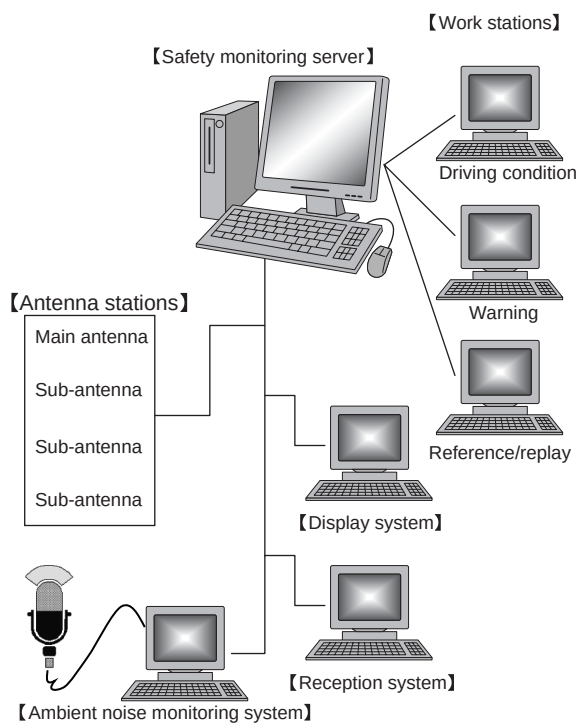


Fig. 6　Receiving stations

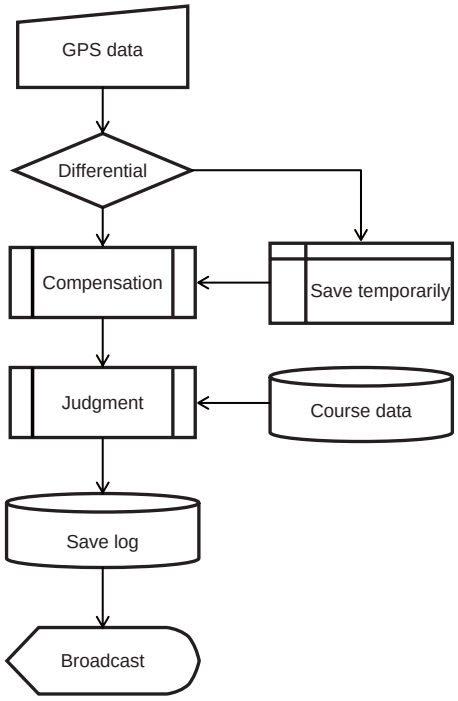
3.2. 基地局

基地局はFig. 6に示すように，メイン基地 30 m タワーと補助局小型アンテナ３か所で構成されており，各基地局に，制御端末，無線機，分配器，増幅器，RS232C拡張ボードが装備されている．

自営無線は電波障害を受けやすく，地域や地形により，アンテナの設置方法が重要となる．電波障害試験の結果，本地域においては，メインタワー１基と小型アンテナ３基の組み合わせにより，最も良好な通信環境が確保できた．



(a) Hardware



(b) Main program

Fig. 7　Data processing system

3.3. データ処理システム

3.3.1. ハードウエア

データ処理システムにおけるハードウエアの構成を Fig. 7 (a) に示す.

(1)安全監視サーバ

(2)表示端末

(3)受付端末

(4)騒音監視システム

(5)受信局

3.3.2. メインプログラム

データ処理システムにおけるメインプログラムのデータ処理手順を Fig. 7 (b) に示す.

(1)移動局からの受信データ

ID，位置情報(緯度と経度)，速度，向き，高度，日付，時間

(2)ポストプロセッシングによる位置データの補正

(3)走行コース判定

a. コースエリア判定

どのコースを走行しているか判定し，エリアを特定する.

b. 近似値(履歴データ)を優先させてコースを決定

複数のコースが近接した場所は，履歴データにて走行コースを判定する.

(4)コース情報をログに付加

(5)ログの保存

(6)データ配信

4．技術課題と対応技術

4.1. データ通信容量と移動局台数

多数の移動局の同時通信を想定し，業務用無線のデータ通信容量を確保するために，データ送信速度を 0.1Hz の中低速走行用と 0.2Hz の高速走行用の２種類のファームウエアにより，チャンネルごとに10台または，５台の移動局を設定することができる．従って最大 100 － 200 台の移動局のデータ通信が，可能となる．現状の鷹栖プルービンググラウンドの，コース走行台数キャパシティに対し，２－４倍の発展性を持たせている．またさらに GPS データから，車両停止を移動局で判断し，通信頻度を低減するファームウエアを設定することで，無駄な通信を排除している.

4.2. GPS 計測精度と事故判定

一般的に GPS は 2 m 程度の誤差が有り，衛星の角度などでさらに精度は低下する．そのためコースが隣接している場合は特にコースアウトの判断が困難となる．そこで，データ処理にて，直前の履歴データと速度データから，コースアウトかどうかを判定する．またさらなる信頼性向上に配慮し，移動局にGセンサを増設することで，車両挙動情報を付加し，高い精度で事故判定が可能となった.

5．システムの信頼性と効果

5.1. 信頼性試験結果

5.1.1. 移動局単体の環境適合性

(1)環境温度試験

－20℃から＋60℃の恒温槽内にて，10℃ごとに１時間放置する.

(2)防水試験

差圧センサ方式のリークテスタを使用し，4.9 kpaの負圧を 30 秒間加えた後，差圧リークテスタにて 0.05 kpa 以下であること.

(3)静電気試験

通電，無通電時に，アンテナに± 20 kV，本体に± 15 kV を印加する.

(4)加振試験

・振動周波数：5 - 8 Hz/8 - 30 Hz

・全振幅：3 mm/ 1mm

・試験時間：各 15 分×３方向×２波形(計 90 分)

(5)衝撃試験

高さ 120 cm から，コンクリート床に対し，各面１回５面落下をおこなう.

温度，水，静電気，振動，衝撃の各単体試験結果は基準値を達成した.

5.1.2. 車速追従性

車速が 250 km/h 以上にて受信率低下なし.

5.1.3. 警報作動応答時間

高速走行時：車両停止後 5 sec 以内で注意喚起 10 sec 以内に警報発令した.

低速走行時：車両停止後 10 sec 以内で注意喚起 20 sec 以内に警報発令した.

各条件において設定値を達成した.

5.2. 運用実績

ATVにおいては，既に４年間の運用実績があり，オールシーズンを通じてフルオート監視が可能となり，冬季においても立哨巡視要員の無人化が実現できた.

6．まとめ

鷹栖プルービンググラウンドの広大な敷地において，テストコースの拡充は現在も継続しており，将来的にも計画されている．この状況に対し，本システムはソフトウエアの書き換えだけで対応が可能であり，どのような増設に対してもすべてカバーすることができる．また，当社初のシステ

ムであり，各事業所テストコースや訓練コースへの水平展開による，安全管理向上が期待できる．

最後に，今回 GPS 監視システムの導入により，テストコース走行時の安全管理が充実し，ライダやドライバからの期待も大きい．しかしながら，テストコースの安全は自動車試験場運営において，永遠のテーマであり，鷹栖プルービンググラウンドではこれを機に予防安全から緊急事故対応まで一貫した体制を強化し，世界一安全性の高い自動車試験場の運営を目指している．

■著　者■


唐崎英史


瀧川正人


藤井　仁


松倉剛克


小森久裕


椿　美一


武内公一

二輪車の発見率を向上させる灯火器配置「FACE」デザインの研究

Study of FACE Design, Lighting System Design for Enhanced Detection Rate of Motorcycles

丸山一幸* 堤 陽次郎* 村田 裕**
Kazuyuki MARUYAMA Yojiro TSUTSUMI Yutaka MURATA

要 旨

四輪車ドライバから見た二輪車の発見を向上させるFACE(Facial Attention for Conspicuity Enhancement)デザインについて説明する．過去の研究で人の脳には顔画像に反応する部位があることが明らかにされており，二輪車の前面デザインに「顔」の要素を取り入れることで二輪車の発見率を向上させる手法を考案した．このFACEデザインのうちシンプルな灯火器の逆三角形三点配置について評価をおこない，その効果を確認した．また，我々はこのデザインの効果を評価するために，実交通環境を模した条件で発見率の評価が可能なシミュレーション手法を開発した．実環境での実験との比較により，このシミュレーション手法が，発見率の評価に利用可能であることがわかった．

ABSTRACT

The FACE (Facial Attention for Conspicuity Enhancement) design, a lighting system design that enhances motorcycle conspicuity with regard to the detection rate from the view of a driver at night, is described in this paper. Past research has shown that there is part of the human brain that reacts to the image of a face and we thought of a method to enhance the detection rate of a motorcycle by incorporating the element of a face in the front design of the motorcycle. The effect of a simple FACE design, an inverted triangular arrangement of lights, is evaluated and its effectiveness is shown. Moreover, we developed a simulation method that could be used to evaluate the enhanced detection rate of a FACE design motorcycle under conditions that are close to some real traffic environments. The method is evaluated by comparing it with the results of a full-scale test and demonstrates the method could be used to evaluate the detection rate of a motorcycle.

1．まえがき

著者らは日本の交通事故統計(1)から二輪車死亡事故のうち四輪車が第一当事者のものを抽出し，その原因の分析をおこなった．その結果，四輪車ドライバの二輪車の見落としが事故の主要因の一つであることがわかった(Fig. 1)．二輪車は四輪車に比べ車体が小さく，トラックなどの大型車両や乗用車と共に走行する混合交通環境下では，相対的に見落とされる可能性が高い．日本では二輪車の見落としへの対策の一つとして1998年に昼間点灯が義務化され，一定の効果を挙げている．しかし，この昼間点灯は四輪車が前照灯を点灯する夜間には効果を期待できない．また，最近では四輪車も昼間点灯を実施している場合や，Daytime Running Lightのような灯火器を装備している車両を街中で見かけることが多くなっており，これらの灯火器についてのルール策定が各国で進められている．さまざまな形態の灯火器が多種多様の車両に装備されるようになると，相対的に二輪車の被視認性はさらに低下することが懸念される．今後はこのような複雑な混合交通環境下においても，二輪車の被視認性を向上させる施策がよりいっそう求められる．そこで著者らは，人が生まれながら「顔」のような図形に対して高い認識能力を示すことに着目し，二輪車の前面デザインに顔の要素を取り入れることで被視認性を向上させることを試みた．顔の要素を取り込んで被視認性を向上させるこれらの灯火器デザインのことを FACE(Facial Attention for Conspicuity Enhancement)デザインと呼ぶこととした．このFACE デザインのうち，最もシンプルなものを評価し，その効果を確認した．また，この研究のために開発した評価手法の詳細についても後述する．

＊ 二輪R&Dセンター
＊＊未来交通システム研究室

https://doi.org/10.69239/hondatechnicalreview.2009_21_2_20

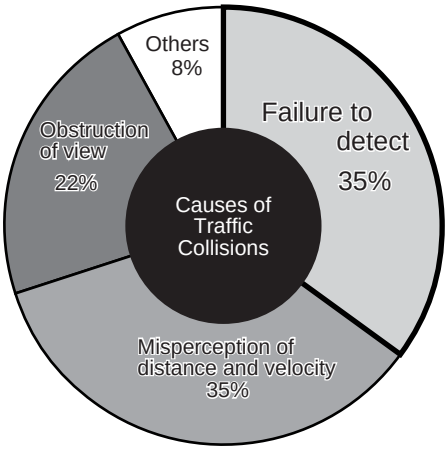
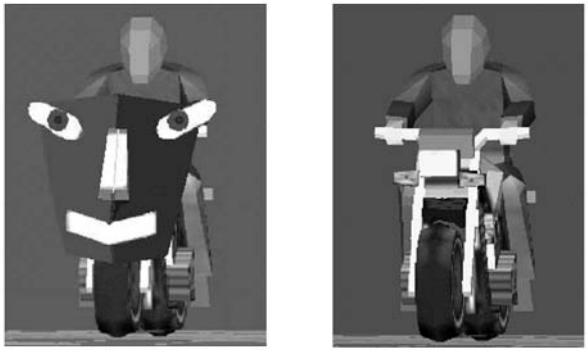


Fig. 1　Analysis of motorcycle traffic accidents in Japan

2．顔の被視認性向上効果

「顔」は人にとって日常で最も頻繁に目にする刺激の一つであり，人は「顔」から視線方向や表情など非常に多くの情報を瞬時に読み取ることができるといわれている(2)．このような人を含む霊長類の高度な顔認識能力に関しては，古くから多くの研究がおこなわれており，さまざまなことが明らかにされている．たとえば，過去の研究例ではサルの下側頭葉に，顔画像に反応する部位があることを Bruce は報告している(2)．最近では人の脳にも同様の部位が存在することが fMRI を用いた実験で確認されており(3)，側頭葉にある紡錘状回の顔領域(Fusiform FACE Area: FFA)や下後頭回の顔領域(Occipital FACE Area: OFA)が顔図形に対して高い感受性を持つことが確認されている(4)．このように人の脳には顔の認識に特化した部位が存在するため，人は顔の認知を高速におこなうことができる可能性が高い．著者らはこれらの知見に着目し，人の脳が「顔」のような図形に対して敏感に反応する部位を持つのならば，二輪車の前面デザインに「顔」の要素を取り入れることで，被視認性が向上する可能性があると考えた．まず，前面デザインに「顔」の要素を取り入れた二輪車の被視認性向上の可能性を探るため，画像を用いて，車群中に存在する二輪車が発見される確率を測定した．Fig. 2(a) は，その実験で用いた前面デザインに「顔」の要素を取り入れた二輪車である(本稿では「顔」の要素を取り入れた二輪車を以後，FACE デザインの二輪車と呼ぶ)．Fig. 2(b)は，比較対照にもちいた前照灯１灯の二輪車である．実験では被験者に FACE デザインの二輪車が存在する画像，前照灯１灯の二輪車が存在する画像，二輪車が存在しない画像のどれかをランダムに 0.5 秒間提示し，画像中に二輪が存在したかどうかを手元にあるボタンを押して回答してもらった．画像提示後は被験者が回答するまで黒い画面を提示した．被験者は日常的に自動車の運転をおこなう５名(20 歳代から 40 歳代の男性４名，20 歳代の女性１名)で，被験者１名あたり，144回の測定をおこなった．測定の結果を，Fig. 3 に示す．



(a) “FACE design” motorcycle　　(b) Single headlight motorcycle

Fig. 2　Motorcycles used for providing our hypothesis that FACE design enhances conspicuity

Fig. 3(a) は，被験者が二輪車を発見できた平均確率，発見率を示している．比較対照とした前照灯１灯の二輪車の発見率は 47.6%であり，FACE デザインの二輪車の発見率は 91.4%という結果であった．Fig. 3(b) は，被験者に二輪車の画像が提示されてから，回答ボタンを押すまでの平均時間，反応時間を示している．前照灯１灯の二輪車の場合の反応時間は 910 ms であり，FACE デザインの二輪車の場合の反応時間は 706 ms という結果であった．以上の実験の結果から，前照灯１灯の二輪車に対し，FACE デザインの二輪車は発見に関する被視認性が向上する可能性があることが確認できた．

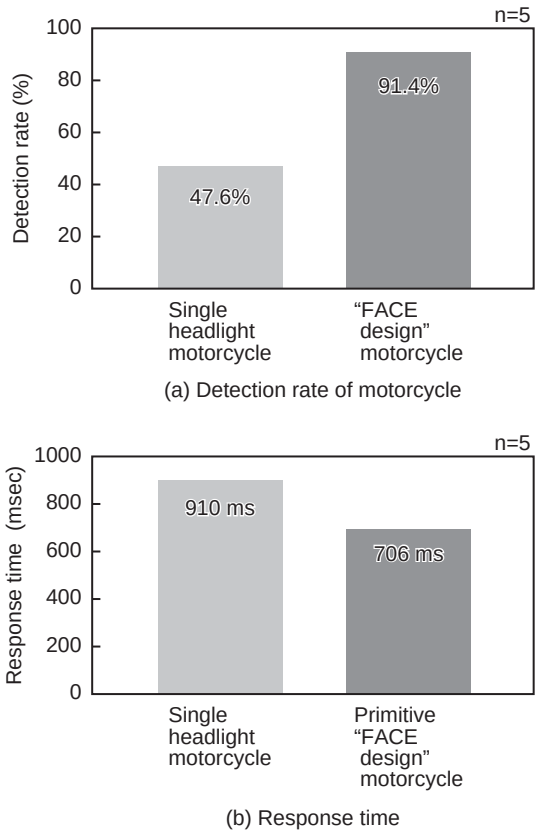


Fig. 3　Enhanced conspicuity by FACE design

3．二輪車発見率評価手法

菅原らは fMRI を用いて脳の賦活を測定し，二輪車の前面デザインの顔らしさが定量評価できる可能性を確認している[5]．しかし，fMRIは装置が大掛かりで，実交通環境下での測定には使用できない．一方，トラックなどの大型車両や乗用車などの実車を用いて混合交通環境を再現し，二輪車の発見に関する被視認性を測定するのは困難である．そこで著者らは CG 画像を用いて実交通環境と同じような視認環境下で，四輪ドライバが二輪車を発見できる確率(以後発見率)が測定できるシミュレーション手法を開発した．

夜間の発見率を測定するためには，灯火器の表現手法が重要と考えられる．前照灯など光度が高いものは，発光することで生じる視覚現象“ グレア(眩惑) ”で灯火器の形状を認識することは難しい．被視認性の評価には灯火器の見え方も含めた，総合的に評価できる手法が必要である．本手法では「コントラスト比」と「グレアの表現」が重要であると考え，これらに着目した．これらを実交通環境と合わせ込み，実交通環境に近い視認環境を再現した CG 画像を作成し，この CG 画像を用いて発見率を評価するシミュレーション手法を開発した．このシミュレーション手法の有効性を検証するために，実車との比較が可能なテストコースをベースとして CG 画像を作成し，実車との比較実験をおこなった．以下に CG 画像の作成手法と，実車での実験と CG 画像での実験の比較結果について説明する．

3.1. コントラスト比

過去の類似の研究では，実環境と CG 画像のコントラスト比を整合させることで，短時間提示時の二輪車の発見率が測定できるとの報告がある[6]-[8]．本研究でもこの手法に倣い，CG 画像のコントラスト比を実環境と合わせ込んだ．まず，我々はテストコースの CG 画像の作成をおこなった．テストコースをベースとすることで実車でも同様のテストがおこなえ，CG 画像によるシミュレーション手法の妥当性を検証することが容易なためである．CG 画像を作成するに当たり，CG 画像を表示するディスプレイの位置やコントラスト比等の性能が重要である．ディスプレイは視野の水平方向の画角が 45 度となるように，視点から 1.3 m の距離に設置することを想定した．CG 画像の視点の高さは路面から 1.2 m である．テストコースでの実測輝度は路面暗部で 1 cd/m^2，ヘッドライトが 1500 cd/m^2 から 3000 cd/m^2 であった．以上より実質コントラスト比3000以上のディスプレイが必要である．実環境にコントラスト比を整合させるには CG 画像を提示するディスプレイのコントラスト比が重要になる．我々は CG 画像の提示に我々が要求する性能を満たすプラズマディスプレイを用いた．このディスプレイのサイズは 50 インチで，輝度は暗部で 0.1 cd/m^2，明部で 400 cd/m^2 であり，実質のコントラスト比は 4000 で要求を満足する．このディスプレイを用い，製作したテストコースの CG 画像のコントラスト比を，実環境と合わせ込んだ．

3.2. グレア(眩惑)

本研究で着目したもう一つの視覚現象がグレアである．グレアとは人が明るい光を見た時に，その光源の回りに発生する放射状の光や白くぼやける現象のことである．しかし，CG 画像を表示するディスプレイの輝度は物理的な限界があるため，このグレアを実際に発生させることは難しい．その代替として CG 画像ではグレアを人為的に付加することにより，高輝度の光を擬似的に表現することがしばしばおこなわれている[9]-[13]．本研究でもこのような手法を参考にし，あらかじめ計算により作製されたグレアパターンを挿入する手法を用いた．このグレアパターンは，後述する実環境と CG 画像の比較実験で妥当性が示されている．以上を踏まえ，作成したテストコースの CG 画像が Fig. 4 である．

3.3. CG 画像と実車による実験の比較

著者らは CG 画像によるシミュレーション手法が有効であるかを検証するため，CG 画像による実験と実車による実験をおこない，結果を比較した．Fig. 5は実車での実験状況である．

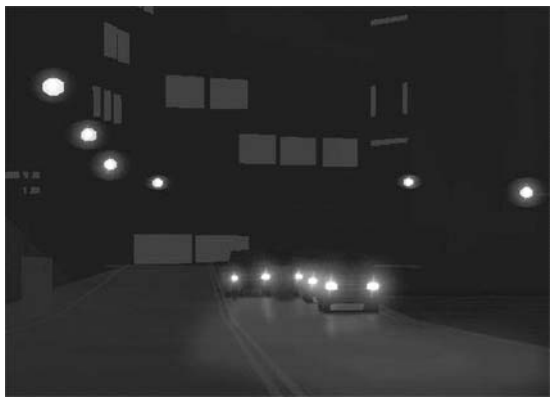
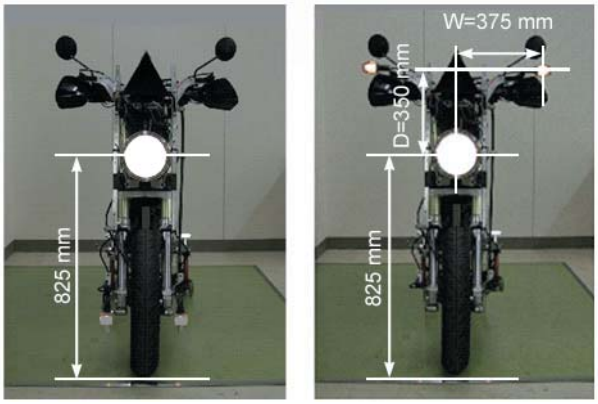


Fig. 4 CG example of test track



Fig. 5 Experiment scene at test track

実験には四輪車４台，二輪車１台を用いた．二輪車は前照灯１灯の二輪車と，前照灯１灯と上部補助灯火器(5 W 16 cd) 2灯で逆三角形三点配置を構成した仕様の二輪車を用いた(Fig. 6)．逆三角三点配置を用いたのは顔を想起させる最も単純な図形配置の一つと報告されている[14]からである．実験には Fig. 7 に示す４種の車列を用いた．それぞれの車列につき，前照灯１灯の二輪車が存在する場合，逆三角三点配置の二輪車が存在する場合，二輪車が存在しない場合を用意し，それぞれのパターンに対して２回，合計24回の測定をおこなった．被験者に提示される車列パターンはランダムである．視認時間は 0.5 秒とし，被験者にメトロノームの周期に同期して車列を観察させることで調整をおこなった．被験者には四輪車と二輪車の配置を答えてもらい，台数と配置が合っているもののみを正解とした．被験者は日常的に運転をおこなう 20 歳代から 40 歳代の男性 16 名である．Fig. 8 は CG 画像による実験と実車による実験との二輪車の発見率についての結果の比較である．結果は自動車の台数などの環境的要因の影響を少なくするために，逆三角三点配置の二輪車の発見率を前照灯１灯の二輪車の発見率で割った値で示してある．検定をおこなった結果，５%水準で有意差がない結果となった．このことからシミュレーション手法による検証手法が有効であると考えられる．



(a) Single headlight motorcycle

(b) “FACE design” motorcycle (three light, inverted triangle arrengement)

Fig. 6　Motorcycles used for experiment

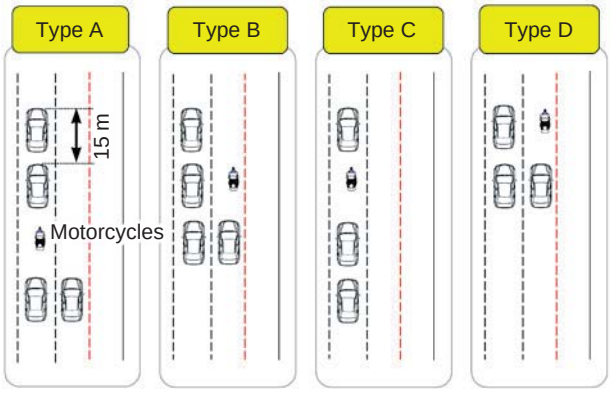


Fig. 7　Arrangements of vehicles used for tests

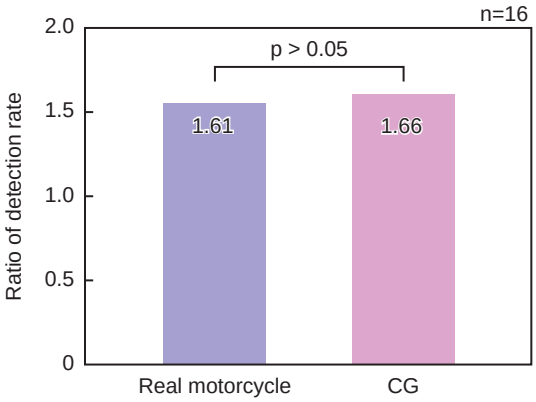


Fig. 8　Comparison of detection rate between real motorcycle and CG

４．評価に用いた実交通環境

実交通環境での評価をおこなうために，実在する交差点をモデルとして CG 画像を作成した．片側４車線で夜間の交通量が非常に多く，二輪車も多数走行する，実在する交差点をモデルとした(Fig. 9)．Fig. 10は前述の手法に従って，製作した CG 画像の例である．CG 画像の視点位置は交差点中央で右折待ちしている四輪車ドライバの視点に合わせてある．二つのモデル交差点を用意し，各交差点ごとに四輪車の配列が異なる画像を７種類作成した．これら14枚の画像に対して，更に二輪車の配置が異なるものを１－３種作成し，合計で28枚の画像を作成した．二輪車の配置は視点から 20 － 140 m の距離に設定した．基準となる前照灯１灯の二輪車が存在する画像が 28 枚，FACE デザインの二輪車が存在する画像が 28 枚，二輪車が存在しない画像が 28 枚，合計で 84 枚の画像を作成した．



Fig. 9　View of intersection



(a) Example A



(b) Example B

Fig. 10 Examples of CG simulations

5．顔要素の効果

実在する交差点をモデルとしたCG画像を使用し，FACEデザインの発見率測定をおこなった．測定したFACEデザインは逆三角三点配置である．前照灯から補助灯火器までの水平方向の距離Wを375 mm，垂直方向の距離Dを350 mmとした．また，灯火器の個数による発見率への影響と配置による影響を区別するため，対照条件としてWを375 mm，Dを0 mmとした配置の二輪車も測定した．補助灯火器(Additional light)の光度は両者とも16 cdであり，色は白色である．補助灯火器はモデルとしたポジションランプの配光特性を反映し輝度調整をおこなってある．また，基準として前照灯1灯の二輪車を同時に測定した．測定装置の構成はFig. 11である．

被験者にはこの84枚の画像をランダムに0.5秒間提示し，二輪車の存在の有無を回答させた．ハンドルには回答用のスイッチが二つあり，二輪車の存在が確認できた場合は一方のスイッチを可能な限り早く押し，二輪車の不在が確認できた場合はもう一方のスイッチを押すことで回答させた．画像提示後は被験者が回答するまでの間は黒い画面を提示した．被験者1名あたり，各画像につき2回，合計168回の測定をおこなった．被験者は日常的に運転をおこなう20歳代から40歳代の男性12名である．

評価の対象は二輪車までの距離が80 m以上のものとした．我々の過去の研究で，右折時のドライバの右折判断が変化する平均距離が80 mであり[15]，それまでに発見されることが重要だと考えたためである．

測定結果をFig. 12に示す．グラフでは前照灯1灯の二輪車に対しての発見率倍率で示してある．FACEデザインである逆三角形三点配置(W=375 mm, D=350 mm)の発見率倍率は2.4倍であった．また，対照条件の配置(W=375 mm, D=0 mm)の発見率倍率は1.6倍であった．以上の結果から前照灯と補助灯の逆三角形三点配置により発見率が向上する可能性が示された．

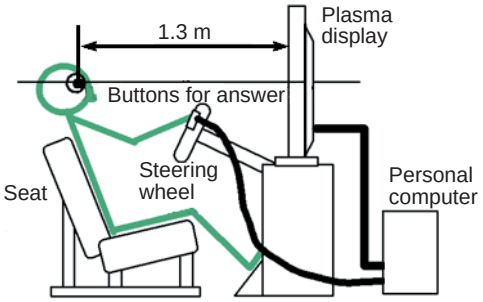


Fig. 11 Composition of experiment system

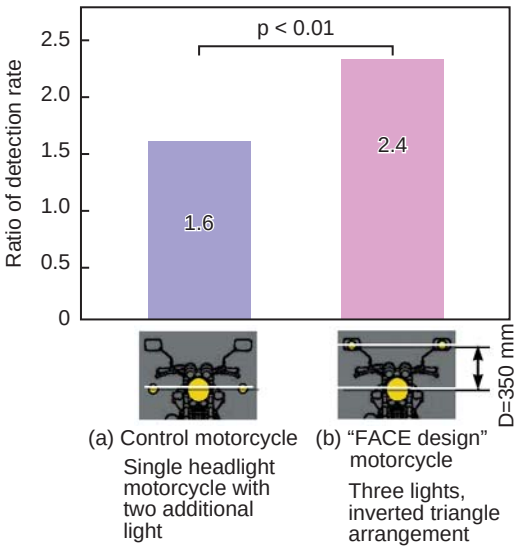


Fig. 12 Comparison of detection rate between FACE design and control motorcycle

6．まとめ

顔を想起させる最も単純な図形の一つである逆三角形三点配置のFACEデザインは，四輪車ドライバから見た二輪車の発見率を向上させることができる可能性が示された．FACEデザインを評価するために開発した実交通環境を表現したシミュレーション手法を用いた実験で，逆三角三点配置のFACEデザインの発見率は，前照灯1灯の二輪車に対して2.4倍となった．今後は多種多様な交通環境下で，二輪車の発見率を向上させるFACEデザインについて取り組んで行きたい．

参考文献

（1）（財）交通事故分析センター：交通事故統計年報平成15年度版（2003）

（2）Bruce, C. et al.: Visual properties of neurons in a polysensory area in superior temporal sulcus of the macaque, Journal Neurophysiology, Vol.46, p.369-384 (1981)

（3）Kanwisher, N. et al.: The fusiform face area : A module in human extrastriate cortex specialized for face perception, Journal Neuroscience, Vol.17, p.4302-4311(1997)

（4）Haxby, J. V. et al.: The distributed human neural system for face perception, Trends in Cognitive Science, Vol.4, p.223-233(2000)

（5）Sugawara, T. et al.: Enhancement of Motorcycle Conspicuity Using Brain Activities, Review of Automotive Engineering, VoL.27, No.3(2006)

（6）Blackwell, H.: Contrast thresholds of the human eye, Journal of the Optical Society of America, 36, 624-643 (1946)

（7）Witus, G., Gerhart, G. Ellis, R.: Contrast model for three-dimensional vehicles in natural lighting and search performance analysis, Optical Engineering, 40., 1858-1868

（8）Arnow, T., Geisler, W.: Visual detection following retinal damage, Predictions of an inhomogeneous retino-cortical model, Proceedings of SPIE, 2674, p.119-130

（9）Shinya, M., Saito, T., Takahashi, T.: Rendering techniques for transparent objects, Proc. Graphics Interface, '89 p.173-182(1989)

(10) Nakamae, E., Kaneda, K., Okamoto, T., Nishita, T.: A lighting model aiming at drive simulators, Proc. SIGGRAPH 1990, Vol. 24, August, p.395-404(1990)

(11) Spencer, G., Shirley, P., Zimmerman, K., Greenberg, D. P.: Physically-based glare effects for digital images, Proc. SIGGRAPH, August, p.325-334(1995)

(12) Rokita, P.: A model for rendering high intensity lights, Computers & Graphics, Vol. 17, No. 4, p.431-437(1993)

(13) Debevec, P. E., Malik, J.: Recovering High Dynamic Range Radiance Maps from Photographs, Proc. SIGGRAPH, August, p.369-378(1997)

(14) Yamane, S.: Population of neurons discriminate human faces, Information Processing in Brain, p.665-671(1994)

(15) Tsutsumi, Y., Maruyama, K.: Long lighting system for enhanced conspicuity of motorcycles, ESV2007, 07-0182 (2007)

■著　者■



丸山一幸



堤　陽次郎



村田　裕

エンジン油中すすの解析と定量手法の研究

Analysis and Method of Quantification of Soot in Engine Oil

奥山庸介* Yosuke OKUYAMA
下荒地大地* Daichi SHIMOKOJI
丸山雅司* Masashi MARUYAMA
星川渉* Wataru HOSHIKAWA
松門龍司* Ryuuji MATSUKADO

要　旨

遠心分離法により，エンジン油中すすを抽出し，詳細な解析をおこなった．種々の運転条件において，エンジンから排出されるすすの炭素原子結合状態を解析した結果，炭素－炭素 sp^2 結合(グラファイト構造)と水素－炭素結合の割合が多く，炭素－炭素 sp^3 結合(ダイヤモンド構造)は少ないことが示された．

水素原子と炭素原子の比率(H/C モル比)を把握すれば，すす硬度の代替指標にできることを見出した．また，すす硬度代替指標とエンジンしゅう動部摩耗との相関性について検証した．

さらに，エンジンしゅう動部摩耗との相関を取りやすくするため，軟らかな不純物を除去し，すす成分のみを定量化する手法について検討した．

ABSTRACT

Soot in engine oil was isolated using a centrifuge and subjected to an intensive analysis. The atomic bonds of the carbon in the soot discharged from the engine under various driving conditions were analyzed, and it was determined that the greatest proportion of the bonds were C-C (carbon-carbon) sp^2 (graphite structure) bonds and H-C (hydrogen-carbon) bonds, with few C-C sp^3 (diamond structure) bonds.

It was shown that the ratio of H and C atoms (the H/C mole ratio) could be used as an alternative indicator for the hardness of the soot. In addition, the project studied the correlation between this alternative indicator of soot hardness and sliding wear in the engine.

A method of removing soft impurities and quantifying the soot components in isolation was also studied as a means of more precisely determining this correlation.

1．まえがき

近年，CO_2 削減効果が大きいことから，ディーゼルエンジンが注目されている．CO_2 削減効果が大きい反面，すすを排出することも知られている．テールパイプから排出されるすすは大気汚染を引き起こす[1),(2)]．ブローバイガスとしてクランクケース内へ浸入するすすはエンジン油に混入し，しゅう動部摩耗によりエンジン耐久性の低下を引き起こす[3),(4)]．また，ガソリンエンジンにおいても，直噴化などですす発生が増加する場合があり，しゅう動部摩耗を引き起こすことが知られている[5)]．

エンジン油中のすすが引き起こす摩耗機構を，「切削(アブレシブ)摩耗」として論じることは多い[6)]．一般に，潤滑下でアブレシブ摩耗が生じる場合，摩耗度合いを左右する因子としてすす粒径，硬度，量が考えられている[7)]．

しかし，すすの粒径や量としゅう動部摩耗との相関性について検討する報告は多いものの，すすの硬度としゅう動部摩耗との相関性について言及する報告はほとんどない[8),9)]．その理由として，すす自体が微粒子であるため，直接的な硬度測定が困難な点，エンジン油中からすすを一粒ずつ抽出し，測定することが現実的でない点が考えられる．

本研究では，エンジン油中すすによるアブレシブ摩耗において，重要な性状と考えられる，粒径，硬度，量に関して解析をおこなった．特に，すす硬度については，エンジンしゅう動部摩耗と良好な相関性が取れる，新たなすす硬度の代替指標を構築した．また，摩耗への影響が大きい硬質なすす成分のみを評価できる，新規のすす定量手法を提案する．

＊四輪R&Dセンター

https://doi.org/10.69239/hondatechnicalreview.2009_21_2_21

2．研究の進め方

エンジン油中すすによるしゅう動部摩耗を把握するには粒径，硬度，量のすべてに着目する必要がある．まず，エンジン油中に存在するすすの粒径分布を調査し，その分布内でのしゅう動部摩耗に対する影響度を検証した．次に，すす硬度指標を作成するため，エンジン油よりすすを抽出し，結合状態解析と組成分析をおこなった．代替指標の妥当性検証として，エンジン台上耐久試験をおこない，硬度と摩耗との相関性を確認した．最後にすす量への着目として軟らかな不純物を除去し，より摩耗を引き起こしやすいと考えられる，硬質なすす成分の抽出法について検討した．

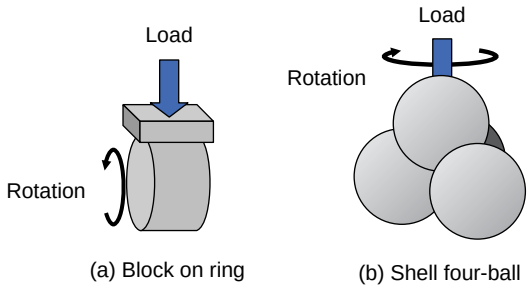
3．実験

3.1. すすの粒径分析

すす入りエンジン油をトルエンで希釈し，レーザ回折，散乱式粒度分布測定をおこなった．

3.2. すす粒径違いによる単体摩耗試験

平均粒径の異なる類似構造のカーボンブラックを用意し，単体摩耗試験をおこなうことで，すす粒径が摩耗に及ぼす影響を検証した．単体摩耗試験には，ブロックオンリングとシェル四球試験を選択した．Fig. 1に，ブロックオンリングとシェル四球試験の概略図を示す．また，Table 1に，試験条件を示す．



(a) Block on ring　(b) Shell four-ball

Fig. 1　Schematic of wear tester

Table 1　Wear test conditions

	LFW-1	Shell four-ball
Engine oil	ILSAC GF-4, 0W-20	ILSAC GF-4, 0W-20
Carbon black concentration (wt%)	0.2	0.2
Mean carbon black particle diameter (nm)	66, 95, 122	66, 95, 122
Load (N)	100	441
Operation time (min.)	180	60
Oil temperature (℃)	80	80
Rotation speed (rpm)	400	1200

3.3. すすの抽出および定量手法

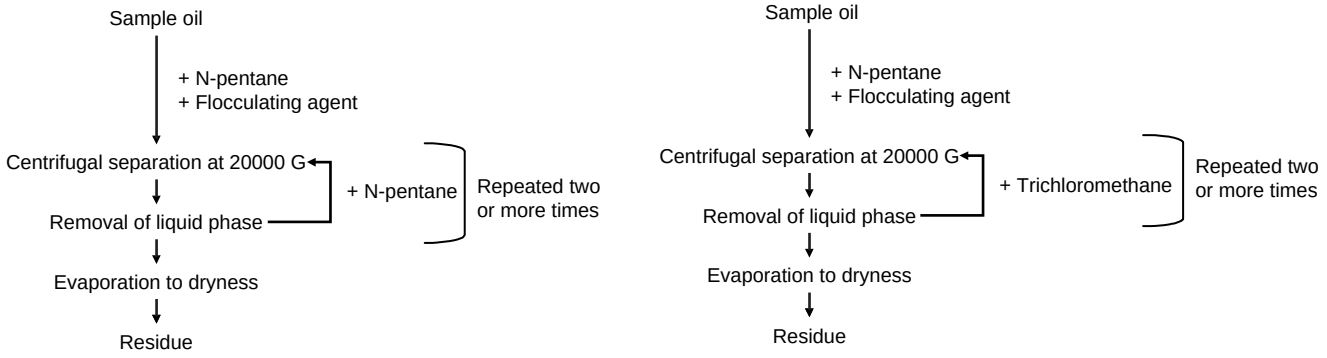
エンジン油中すすの定量分析法として，赤外分光法やTG法，遠心分離法など，いくつかの手法が知られている[8]-[10]．定量後にすすが抽出でき，抽出物の性状分析が可能なことから，遠心分離法に着目した．

本報告では，相対遠心力 20000G により抽出されるペンタン不溶解分をすす量と定義する遠心分離法を用いた[11]．また，エンジン油中のすす定量手法の提案として，抽出される不溶解分中に存在するスラッジプリカーサを除去するため，ペンタンの代わりにトリクロロメタンを用いる手法についても検討した．Fig. 2にペンタン不溶解分とトリクロロメタン不溶解分の分析手順を示す．

3.4. すす中原子の結合状態解析

DLC 膜などに代表される炭素材料の構造を同定する上で，EELS 分析(Electron Energy Loss Spectroscopy)が用いられる場合がある[12]．抽出されたすすも広義では炭素材料と捉えることができる．そこで，抽出されたすすの AES-REELS分析(Auger Electron spectroscopy Reflection Electron Energy Loss Spectroscopy)をおこなった．

Fig. 3 に AES-REELS 分析の原理を示す．抽出されたすすにおける電子線損失スペクトルより，バックグラウンドを除去した EELS 中の低エネルギー損失側である ELENS (Electron Loss Energy Near Structure)スペクトルを得た．標準試料として，ダイヤモンド，グラファイト，不定形炭素としてグラッシーカーボンのスペクトルを用い，最小二乗法



(a) N-pentane insoluble method　(b) Trichloromethane insoluble method

Fig. 2　Experimental procedure of soot quantitative analyses

Table 2 Engine specifications and test condition

Engine specs.	Number of cylinders and configuration	Inline 4
	Displacement	2354 cm^3
	Bore	87.0 mm
	Stroke	99.0 mm
	Compression ratio	10.5
Test condition	Speed	5000 rpm
Engine oil	Grade	ILSAC GF-4, 0W-20
	Spurious soot concentration (C element)	0.4 wt%
	Mean spurious soot particle diameter	100, 100, 120 nm

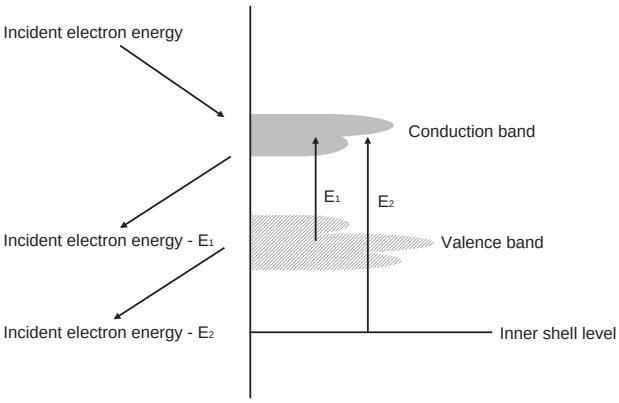


Fig. 3 Principle of EELS (schematic of energy loss and transition process in EELS)

によるピークフィットをおこなった．ピークフィット結果より，抽出されたすすの水素 - 炭素，炭素 - 炭素 sp^2 結合，炭素 - 炭素 sp^3 結合の割合を概算した．

3.5. すすの組成分析

遠心分離法により抽出された不溶解分について，燃焼法による有機元素分析を実施した．

3.6. 擬似すす入り油でのエンジン台上耐久試験

カーボンブラック入りエンジン油での耐久試験には，K24A エンジンを用いた．Table 2 にエンジン諸元，耐久試験条件，エンジン油グレード，カーボンブラックの性状を示す．

4．結果と考察

4.1. 油中すす性状の解析と硬度指標の構築

Fig. 4 に，ガソリンエンジン，ディーゼルエンジンにおける市場回収油のすす平均粒径測定結果を示す．Fig. 4 より，ガソリンエンジン，ディーゼルエンジンに関わらず，エンジンから排出されるエンジン油中すすは平均粒径が約 100nm 前後に集中していることが示された．

まず，平均粒径違いのカーボンブラックを用いた単体摩耗試験により，油中すす粒径変化に伴う摩耗影響性を検証した．Fig. 5 に，単体摩耗試験結果を示す．Fig. 5 に示すように，ブロックオンリングとシェル四球試験のしゅう動条件下において，粒径変化に伴う摩耗影響は認められなかった．

次に，すす硬度指標を検討するため，市場回収油より抽出したペンタン不溶解分の結合状態を解析した．Fig. 6 に，ペンタン不溶解分の AES-REELS 分析結果より算出した三元相図を示す．三元相図において炭素 - 炭素 sp^3 結合の割合が増加すれば，ダイヤモンドの構造に近づくため，超硬質化する．また，炭素 - 炭素 sp^2 軌道の割合が増加すれば，グ

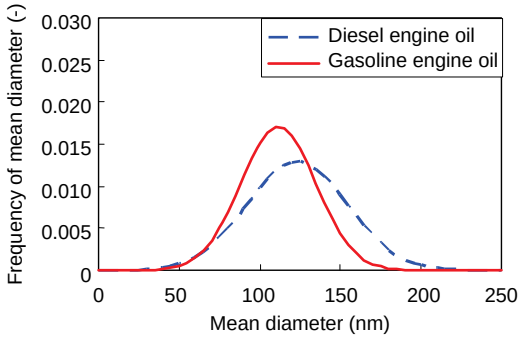


Fig. 4 Field research on mean soot particle diameter in recovered deteriorated diesel and gasoline engine oil

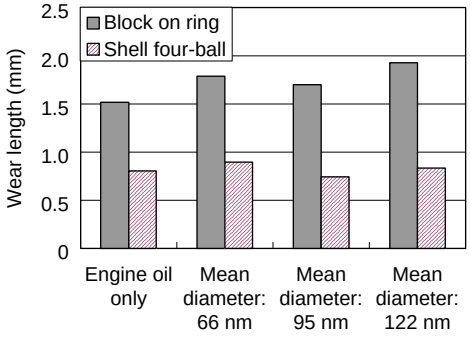


Fig. 5 Wear tester result with carbon black of different mean diameters

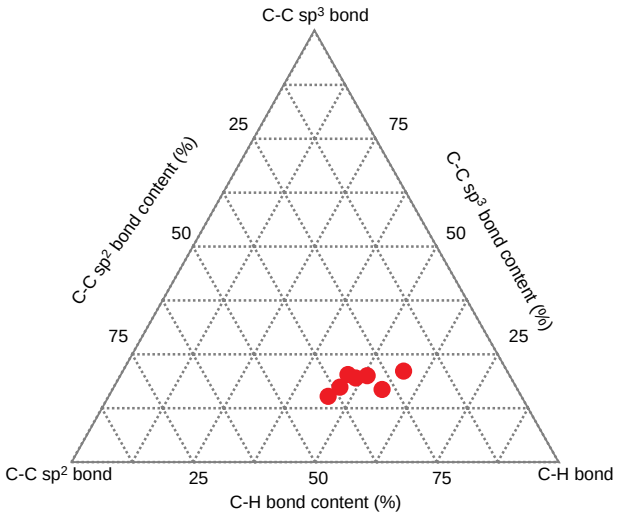


Fig. 6 Phase diagram of carbon atom binding state in soot

ラファイトの構造に近づくため，硬質化することを意味している．

一方で，水素 - 炭素結合の割合が増加すれば，軟質化すると考えられる．Fig. 6に示すように，エンジンから排出されるエンジン油中すす中の炭素原子結合状態は，炭素 - 炭素 sp^3 結合の割合が少なく，炭素 - 炭素 sp^2 結合および水素 - 炭素結合が多いことが確認された．また，炭素 - 炭素 sp^2 結合と sp^3 結合割合の分布幅に比べ，炭素 - 炭素 sp^2 結合と炭素 - 水素結合割合の分布幅の方が大きい．そのため，エンジン油中のペンタン不溶解分の相対的な硬度指標を構築するには，炭素 - 炭素結合状態を詳細に解析するよりも，炭素 - 炭素結合と炭素 - 水素結合の割合を把握することが重要と考えられる．そこで，炭素原子と水素原子のモル比(H/Cモル比)に注目し，硬度の代替指標として，H/Cモル比の有用性を検証した．具体的には，H/Cモル比の異なる擬似すすを使用し，エンジン台上耐久試験をおこない，エンジンしゅう動部摩耗との相関性を確認した．

4.2. エンジン耐久試験による硬度指標の妥当性検証

擬似すすを３種類用意し，カーボン濃度が0.4wt%となるように擬似すす入りエンジン油を調整し，エンジン台上耐久試験をおこなった．また，エンジン摩耗度合いを定量的に示す部品として，オイルポンプのインナロータに着目した．Fig. 7にオイルポンプの全体写真を示す．インナロータの摩耗が進行するとメインギャラリー油圧が低下することになる．油圧低下の原因は，インナロータに挿入されているインナロータ駆動用のオーバル形状シャフトが空転するためである．Fig. 8に耐久試験終了時点でのインナロータ写真を示す．Fig. 8 に示されるように，H/C モル比 0.35 および 0.5 の擬似すすでは，インナロータ内部が顕著に摩耗していることが確認された．H/C モル比 0.6 の擬似すすでは，150 時間までにインナロータ摩耗は認められなかった．よって，本耐久試験において，油圧低下が早く起きるほど，摩耗に厳しい擬似すすといえる．

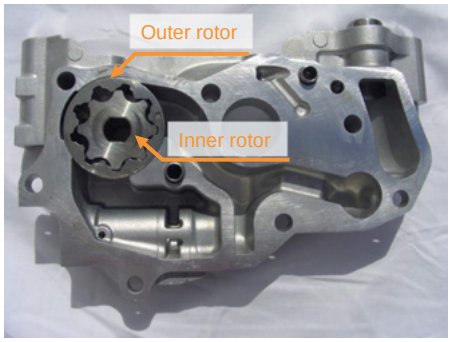


Fig. 7　Oil pump

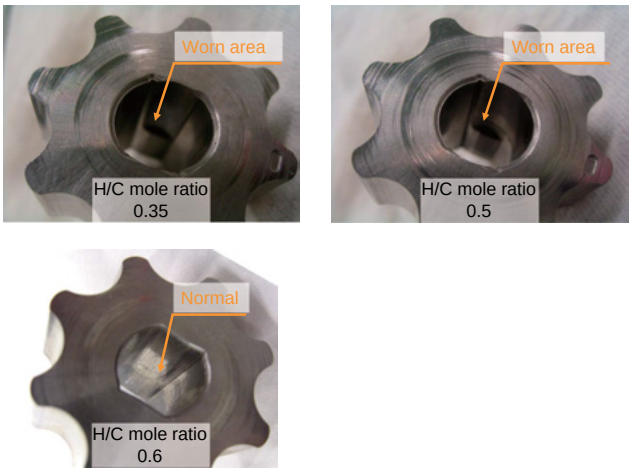


Fig. 8　Worn parts

Fig. 9 に油圧低下までの耐久時間と H/C モル比との相関を示す．Fig. 9 より，H/C モル比が低く炭素割合が高い擬似すすほど，油圧低下までに要する耐久時間が短く，摩耗に厳しい傾向が示された．従って，不溶解分中のH/Cモル比は，エンジン摩耗と相関の取りやすい，エンジン油中すすの有効な硬度指標と考えられる．

4.3. 硬質成分のみを評価可能なすす定量手法の検討

ペンタン不溶解分量とエンジン摩耗との相関を取る場合，上述したように H/C モル比の相違が課題となる．これは，エンジン油中のスラッジプリカーサがすすと一緒に抽出さ

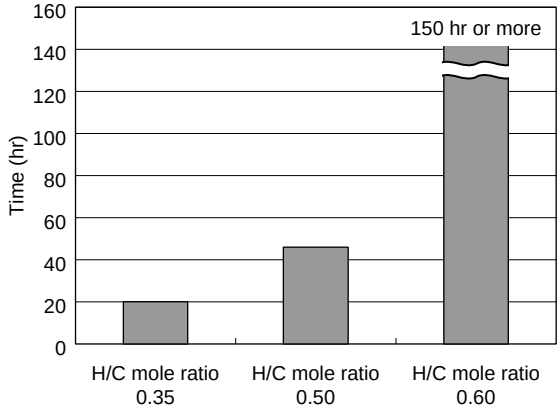


Fig. 9　Time until oil pressure reduction with soot of different H/C mole ratios

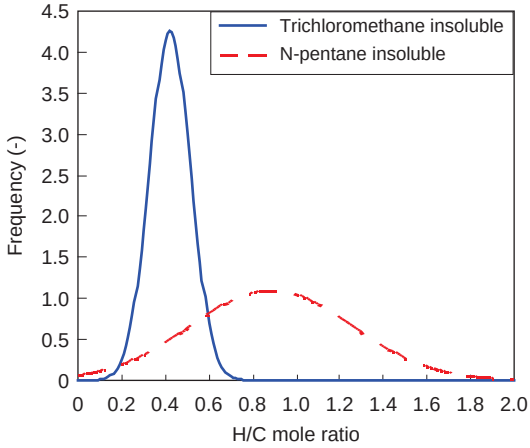


Fig. 10　Result of H/C mole ratio analyses with trichloromethane and n-pentane insoluble

れるためと考えられる．そこで，スラッジプリカーサをできる限り除去し，純粋なすす成分のみを抽出することで，抽出物の H/C モル比の相違を少なくする手法を提案する．

Fig. 10に，ディーゼル車とガソリン車の市場回収油より抽出されたペンタン不溶解分およびトリクロロメタン不溶解分の H/C モル比を示す．Fig. 10 に示すように，ペンタン不溶解分に比べ，トリクロロメタン不溶解分のH/Cモル比はシャープな分布割合になっている．そのため，トリクロロメタン不溶解分法は，より選択的に摩耗との相関性が高い硬質なすす成分を定量できることがわかった．

５．まとめ

（1）エンジン油中すす内の炭素原子では，炭素‐炭素 sp^3 結合（ダイヤモンド構造）は少なく，炭素‐炭素 sp^2 結合（グラファイト構造）と水素‐炭素結合の割合が多い．

（2）エンジン摩耗と相関性が確認されたことより，エンジン油中すすの相対硬度指標として，H/Cモル比は有用な指標である．

（3）エンジン油中すすの定量化手法として，スラッジプリカーサを除去する，トリクロロメタンを用いた遠心分離法は有用なすす定量手法である．

参考文献

（1）千葉勲，金子功，松井竜太，石原佳敬，松門龍司：DPF搭載低排出ガスディーゼルエンジンの開発，Honda R&D Technical Review, Vol.17, No.2, p.65-70

（2）神田智博，小林慎一，松井竜太，園比呂志：直噴ディーゼルエンジンの EURO Ⅳ 対応燃焼技術，Honda R&D Technical Review, Vol.16, No.2, p.139-146

（3）Tze-Chi JAO：Soot Characterization and Diesel Engine Wear, ITC Nagasaki, p.1981-1986(2000)

（4）栗原功：ディーゼルエンジン油の開発動向と油中すすのコントロール技術，日石三菱レビュー，Vol.43, No.4, p.168-174(2001)

（5）http://www.jsae.or.jp/08std/std03.html，JSAE 標準化調査報告書，エンジンオイル分科会2005年５月～2006年２月，「ガソリンエンジン油摩耗試験法標準化調査」

（6）山本英継：ディーゼルエンジンオイル中のすすの硬さに関する研究，日本機械学会講演論文集，Vol.III, No.03-1, p.137-138(2003)

（7）Tadashi Sasada：摩耗試験におけるいわゆる“ゴミ”の影響，トライボロジー会議予稿集（東京），p.25-26(2008)

（8）加賀谷峰夫：ディーゼルすすに関する検討（第一報），石油学会誌，Vol.40, No.5, p.482-487(1997)

（9）加賀谷峰夫：ディーゼルすすに関する検討（第二報），石油学会誌，Vol.40, No.5, p.488-493(1997)

（10）加賀谷峰夫：ディーゼルすすに関する検討（第三報），石油学会誌，Vol.40, No.5, p.494-499(1997)

（11）http://www.jsae.or.jp/08std/std03.html，JSAE 標準化調査報告書，エンジンオイル分科会2006年５月～2007年２月，「自動車用ガソリンエンジン機関潤滑油のチェーン摩耗試験方法開発の必要性検討」

（12）渡部孝：AES-REELS を用いた炭素材料の局所構造解析技術，神戸製鋼技報，vol.55, No.1, p.65-69(2005)

■著　者■



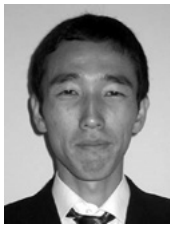
奥山庸介



下荒地大地



丸山雅司



星川　渉



松門龍司

ロックアップクラッチのファイン制御

Fine Control System for Multi-plate Lock-up Clutch

武 井 寛* Hiroshi TAKEI
石 川 豊* Yutaka ISHIKAWA
齋 藤 吉 晴* Yoshiharu SAITO
津 幡 義 道* Yoshimichi TSUBATA

要 旨

MT 車のようなダイレクト感のある走行フィーリングと燃費向上の両立を図るため，ロックアップクラッチ(以下LC)制御領域の拡大が AT 制御のトレンドとなっている．

多板ロックアップクラッチ式トルクコンバータ(以下多板LC式TC)，LCダイレクト制御回路を組み合わせ，実車走行状態に応じた LC 制御をおこなうことで，LC の応答性，冷却性，制御性を向上させ今回紹介する LC のファイン制御を実現した．

この LC 制御システムを採用することにより，従来スロットル開度の低い領域のみの適用であった LC 領域を，高スロットル開度，低車速領域まで拡大することができた．その結果，0-100km/h までの全開加速時間にして 0.2sec の短縮と US06 モードおよび実用燃費で約３%の燃費向上を両立させた．

ABSTRACT

Expanding the range of operation of lock-up clutch (LC) control to reconcile the achievement of a drive feel with a directness similar to that available from an MT vehicle and increased fuel efficiency has become a trend in the area of automatic transmissions.

The combination of a multi-plate lock-up clutch torque converter (“multi-plate LC TC” below) and an LC direct control hydraulic circuit that provide LC control in response to driving conditions has enabled the realization of a fine control system for an LC that has enhanced the response, cooling, and control performance of the LC.

The application of this LC control system has enabled the range of LC control to be expanded from the previous low throttle opening range to the high throttle opening, low engine speed range. As a result, the time for acceleration from 0-100 km/h at wide-open throttle has been reduced by 0.2 sec, and fuel efficiency in US06 mode and actual fuel efficiency have been increased by approximately 3%.

１．まえがき

近年，全世界的に地球温暖化対策への注目が集まる中，温暖化ガス排出削減の声が高まり，モータリゼーションに対しても燃費低減技術を代表とした CO_2 排出削減の要求が高まっている．一方でイージードライブの要求の高まりにより，自動変速機の占める割合は増えているが，その中でデュアルクラッチトランスミッション(DCT)のようなMT車のようにトルクコンバータ(以下TC)を持たない自動変速機の普及もこの数年で見られるようになった．このように MT 車のようなダイレクト感ある走行フィーリングが運転する喜びとして求められている．

その中で AT 車の発進デバイスである TC に対しては，ダイレクトなトルク伝達性によるドライバビリティの向上や燃費の向上などの性能を期待される．

その実現のために，多板 LC 式 TC[1), (2)]，LC ダイレクト制御回路を組み合わせ，実車走行状態に応じた LC 制御[(3)]をおこなうことで LC 応答性，LC 耐熱性，LC 制御性を向上させた．

＊四輪R&Dセンター

https://doi.org/10.69239/hondatechnicalreview.2009_21_2_22

2．ファイン制御の目標設定

LCの制御とは，車速，エンジン回転数(以下Ne)，スロットル(以下 Th)開度等の車両走行状態に応じて，LC の滑りをコントロールし，TC のトルク伝達を制御するものである．ここでLCのファイン制御とは，LCの滑りを車両状態に応じて自在にコントロールすること，すなわち全域LC制御(Fig. 1)のことである．ファイン制御を実現することで，ドライバビリティの向上，燃費の向上を達成できると考え，以下の開発目標を設定した．

(1)LC 制御範囲を全域に拡げる

(2)全域に拡大したLC制御範囲を車両走行状態に合わせ，LC の滑りコントロールをおこなう

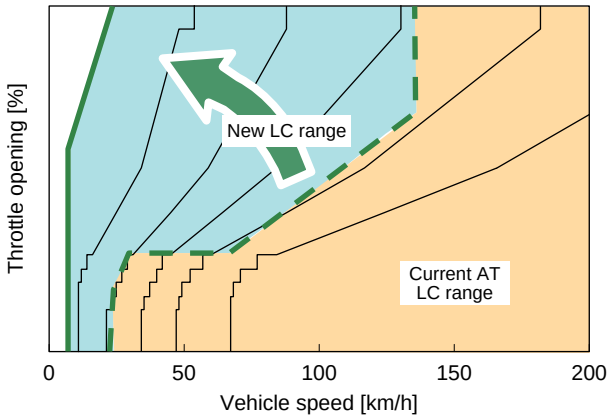


Fig. 1 Lock-up clutch map

従来のLC制御(Fig. 1 Current AT LC range)においてLC制御範囲が限定的なものになっていた要因は，速度比の高い減速時には，LCの応答に時間を要してしまうことと，高トルク時には，LC をスリップさせることで発熱量が多くなってしまうことにより，LC を OFF する制御をおこなっていたためである．よって全域 LC 制御を実現するうえでの課題として以下の項目が挙げられる．

(1)LC 応答性の向上

(2)LC 冷却性の向上

これらの課題を，多板 LC 式 TC と新開発の LC ダイレクト制御回路にて対応する．

また，LC制御範囲を，全域に拡大したうえで，十分なドライバビリティの向上，燃費の向上を得るためには，走行中の目標スリップ率のきめ細かな設定が必要となり，実車走行状態に応じた LC 制御をおこなうことで対応する．

3．多板LC式TC

3.1. 構造

今回採用している多板LC式TC(Fig. 2)の特徴を述べる．FF 車用の TC が要求されている性能に車両のハイブリッド対応，衝突時の安全性確保のための AT 全長短縮が挙げられる．Hondaは，TC流路の偏平率80%台が一般的な中，2001 年モデルより世界に先駆けて偏平率 60%台の超偏平 TC を開発し FF 車用の TC として量産をしてきた．

多板式 LC はピストン室，複数のディスクプレート，クラッチガイドなど複数部品で構成されるため，従来の流路幅では TC の軸寸法増加は避けられない．今回 FF 車へ搭載するため，ブレードとトーラス断面で構成される流路の軸寸法のさらなる短縮をおこない，従来 TC 同等の長さを実現している．

また，ピストン室が閉空間を構成していることによって変速クラッチ同等のトルク容量制御が可能となっていることが大きな特徴である．

3.2. LC 応答性

全域 LC 制御の実現のためには，LC 応答性の向上が重要である．ここで，まず LC の制御状態を説明する．単板式 LC を Fig. 3，多板式 LC を Fig. 4 にそれぞれを示す．共に LC operating pressure (LC 圧)と Torque converter pressure(TC 圧)の差圧によって，LC ピストンの作動を制御している．よって，LC応答性を向上するためには，このLC 圧と TC 圧の油圧応答性向上がポイントとなってくる．単板式 LC では，LC OFF〔Fig. 3 (a)〕から LC ON〔Fig. 3 (b)〕に移行する過程において LC 圧と TC 圧の流路が逆転することと，LC 圧と TC 圧が LC ピストン部でつながっていることが，LCピストンの応答特性を遅らせている要因となっていた．一方多板式 LC では，LC OFF〔Fig. 4 (a)〕と LC ON〔Fig. 4 (b)〕共に制御油圧は同じ動きをしており，TC 圧は油圧を一定に保ち，油圧精度向上を図った LC 圧を LC ON 状態に合わせて制御することで LC ピストンの応答性向上をはかった．

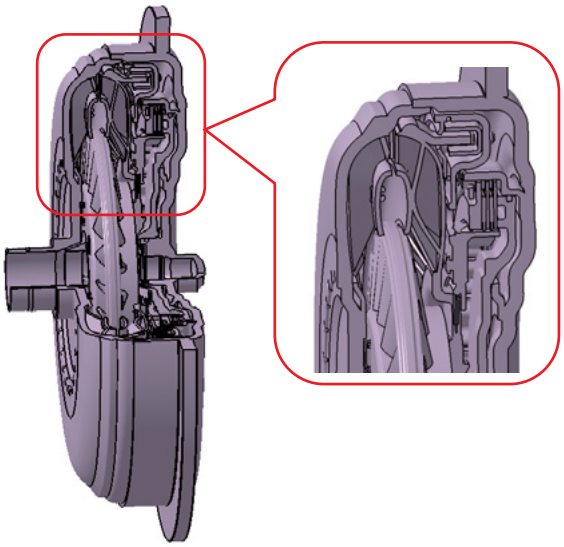


Fig. 2 Side view of developed torque converter

3.3. LC 冷却性

全域 LC 制御に大きく影響を与えるもう一つの要因として，LC フェーシング部の冷却性が挙げられる．LC フェーシングの冷却は，ATF 潤滑によりおこなっている．単板式 LC では LC ON 時に LC フェーシング材によって LC 圧と TC 圧のシールをおこなっている〔Fig. 3 (b)〕ことで ATF 潤滑をフェーシング材に効果的に流すことが難しい．一方多板式 LC では，LC ピストンが常時閉空間を構成することで，LC フェーシング材が LC 圧と TC 圧の間の作動油圧をシールする必要が無く，LCフェーシング材表面への潤滑溝の設定が可能となっている〔Fig. 4 (b)〕．

この溝に TC 圧を使って ATF を供給し，かつ TC 圧流路をピストン内径側から外径側に設けることで，遠心油圧を利用してATFをスムーズに流すことができる．さらに内径のギヤハブ部に潤滑穴を設けて効率的にATFを流すことで，冷却性能を向上させている．

4．LCダイレクト制御回路

4.1. LC 応答性

今回開発した新油圧回路は，LC応答性向上を目的としてLC圧を変速クラッチ圧同等に精度を上げるために専用のコントロールバルブを持たせる変更をおこなった．新油圧回路図を Fig. 5 に示す．

次に従来の油圧回路図を Fig. 6 に示す．LC 圧の制御は，LC 圧と TC 圧を一つの元圧より LC コントロールバルブ（以下 VLV）を使い，LC 圧と TC 圧に振り分けをおこなっていた．そのため，LC ピストンの作動に際して，LC 圧を変動させると同時に TC 圧も変動することになり LC ピストンの応答性が遅い要因となっていた．LCダイレクト制御回路は，LC コントロール VLV を LC 圧専用とし，LC ピストンの作動を LC 圧単独で制御することができ，変速クラッチ圧同等の油圧制御性に向上させている．

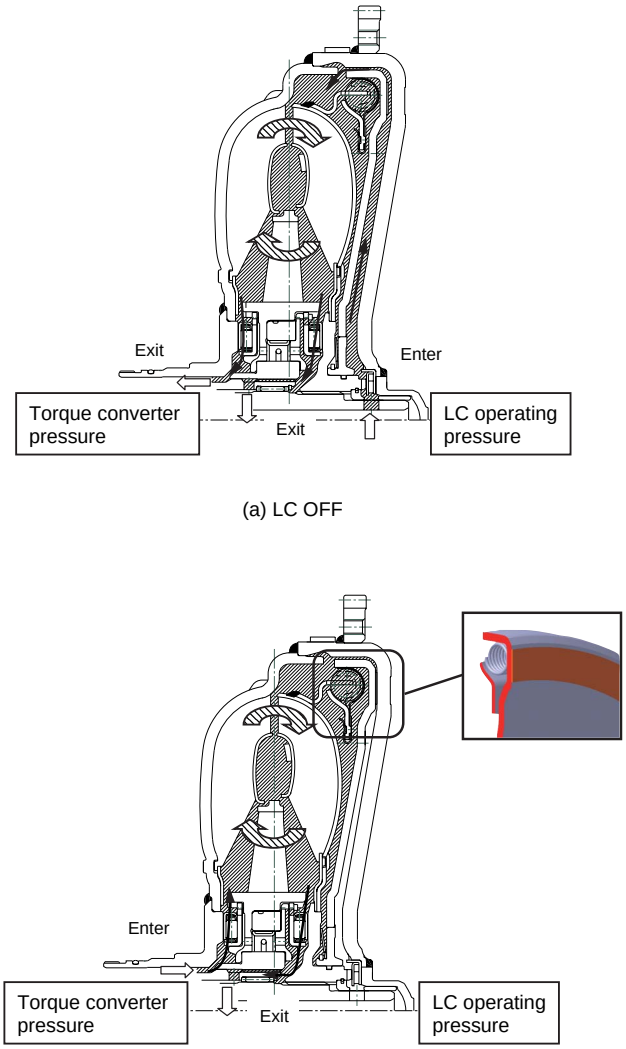


Fig. 3　Oil flow of torque converter with single plate LC (previous)

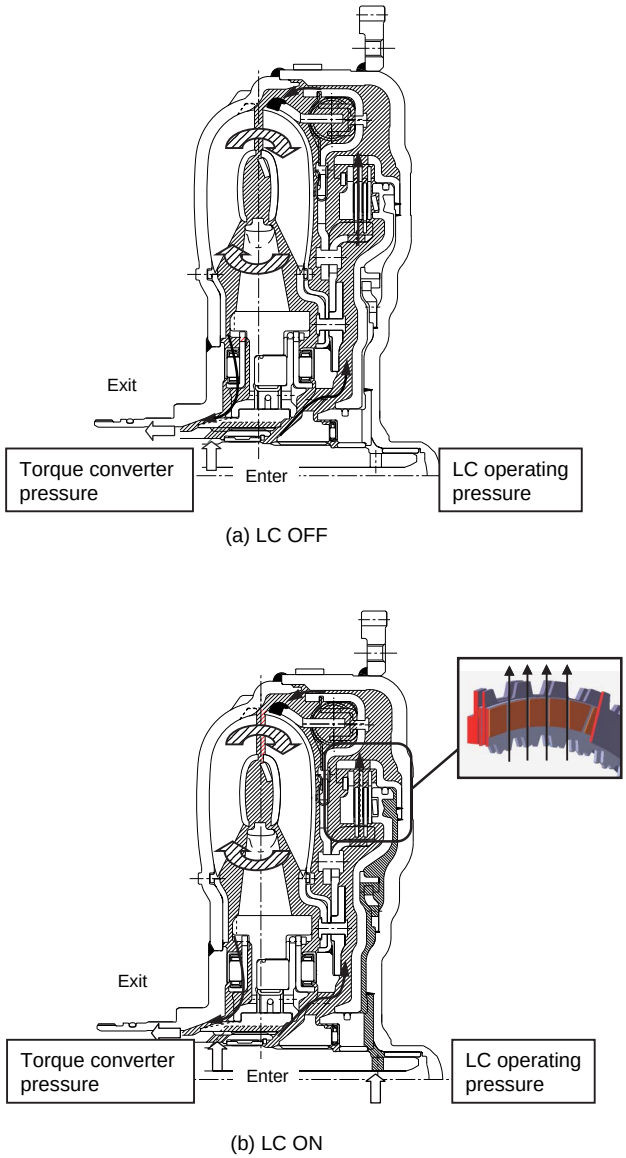


Fig. 4　Oil flow of torque converter with multi plate LC

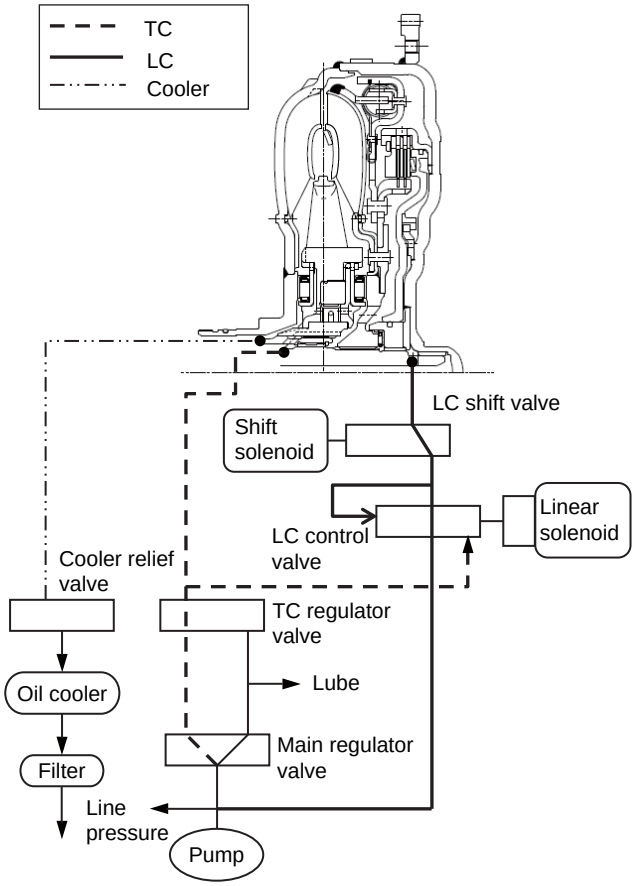


Fig. 5 Multi-plate type hydraulic circuit

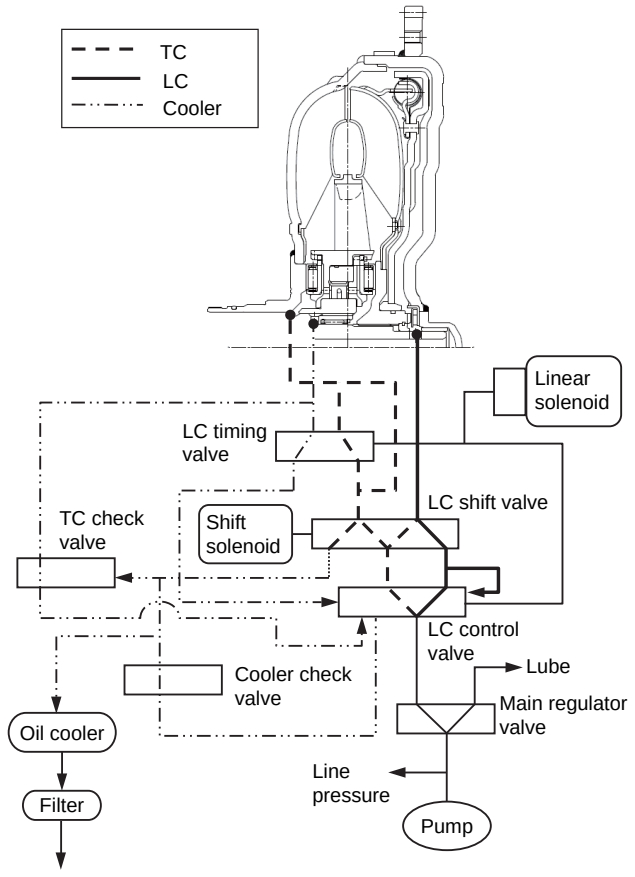


Fig. 6 Single-plate type hydraulic circuit (previous)

また，LC の制御は，LC 圧と TC 圧の二つの油圧のバランスによりおこなうことになるため，LC 圧が TC 圧を使って油圧補正できることが重要となる．そこで従来はLCコントロール VLV に対して，TC 圧の出口側圧を利用して，LC 圧にTC圧の変化の影響を持たせるよう設定していた．しかしながら，TC 圧は LC ピストンの作動による影響を受ける点，TC 内を通過した後の油圧のために走行状況によっても変化してしまう点においてロックアップクラッチの制御を難しくしていた．それに対して，LC ダイレクト制御回路では多板 LC の特徴である TC 圧が一定である点と，LC コントロール VLV に作用させる TC 圧に入り口側圧を利用することで，LC 制御の課題を取り除き，LC 圧が TC 圧を使っての油圧補正可能のまま，LC 圧の制御性を向上させた．

4.2. LC 冷却性

また今回の新油圧回路では LC フェーシング部冷却性向上を目的とした TC 内圧の高圧化をおこなった．

TC 圧の高圧化は， TC 圧専用に TC レギュレータ VLV を設置し，油圧を常時 570kPa に保ちトルクコンバータ流量を 6L/min 確保し，常に LC フェーシング材への冷却をすることにより，冷却性を向上させている．

5．走行状態に応じた LC 制御

5.1. LC 商品性

単板 LC システムに対し，LC フェーシング部の冷却性が向上し(Fig. 7)，スリップ率の制御自由度が広がった．ここで，Table 1 に温度計測条件を示す．これにより，アクセルペダル(以下 AP)操作に対してのダイレクトな反応と，伝達効率向上による力強い加速性能を得ることができ，0-100km/h までの全開加速において，0.2sec の短縮と，US06 モードおよび実用燃費において，約３%の燃費向上を達成した．

また，登坂などの走行条件に応じて適切なスリップ率を選択することで，駆動力のリニアリティを確保すると同時にスリップ率の最適化により車両の加速性能と ATF 冷却性能の向上を両立した．

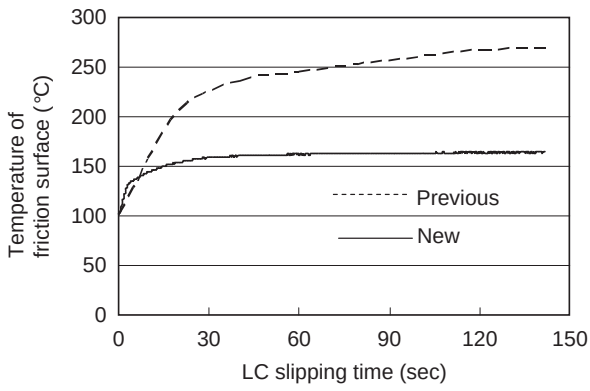
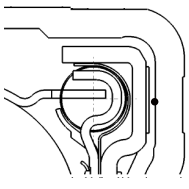
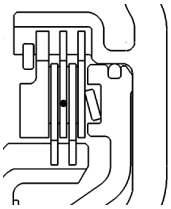


Fig. 7 Test results for facing temperature

Table 1　Test conditions

Measurement point : ●	
Single-plate type (previous) 	Multi-plate type 
ATF temperature (℃)	100
LC transmitted power (W)	3100
Cooling flow rate (L/min)	4

5.1.1. 目標スリップ率設定

スリップ率の目標値(Fig. 8)は燃費，走り感，冷却性能，ドライバ意図を両立させるために，条件として以下の三つを設定している．

(1) シフトポジション　　ドライバの意図に答えるためDレンジ，S レンジ，マニュアルレンジ選択時のスリップ率を各レンジにて変更している．

S レンジ，マニュアルレンジ選択時は，D レンジに対しタイトな設定とし，スポーツ走行意図に答える．ここで，タイトな設定とは，よりスリップ率の低い状態である．

(2) 登坂走行　　登坂走行時には，高 Th 開度，低車速領域を継続的に使用するため，LCフェーシング温度が上昇しないスリップ率を選択する．また，変速制御と協調してダウンシフトすることにより，エンジン回転領域が上昇し，よりタイトな設定に移行することで，冷却性能と走り感を両立させている．

(3) キックダウン前スリップ制御　　ドライバの加速意図に対しダウンシフトが開始する前にエンジン回転を上昇させることにより，停滞感を解消し，同時に変速ショックを低減している．

5.1.2. 減速側制御

多板 LC 式 TC において，LC ピストンの作動が TC 内部流の影響を受けにくい構造としたことで，LCの作動時間が短縮し，速度比に対して安定した LC 応答性能を得ることができた(Fig. 9)．

速度比の高い領域においてLC応答時間の向上(Fig. 8)により減速時の LC 締結が可能となったことで，従来の AT 車に対しエンジンブレーキが得られる領域を広げることができた．その利点を活かし，降坂判定時 2nd ギヤにおいて LC ON制御をすることで十分な減速性能が得られることから，ローホールド(以下 L/H)機能を廃止した．2nd ギヤにおいて LC を ON する条件としては，ドライバがマニュアルモードで 2nd ギヤを選択し，かつ降坂を検知した場合とし，LC ON状態となったことを検知した後フューエルカットし協調制御をおこなうことで安定したエンジンブレーキ性能を確保している(Fig. 10)．

L/H 機能の廃止により，約 1 kg の軽量化を実現し，フリクションが低減することで，燃費向上にも寄与している．

5.1.3. 変速時制御

全域で LC 制御を実施する際の課題として，変速ショックが挙げられる．従来は変速時にロックアップOFFにすることで，車両に伝わるトルク変動を緩和していたが，変速状態に応じてスリップ率を最適に制御することにより，変速ショックを低減した(Fig. 11)．

(1)パワーオンアップシフトにおいてはイナーシャ相開始(a)，変速クラッチの締結(b)タイミングを検知し，LC容量を制御することで，微小にスリップを発生させ，

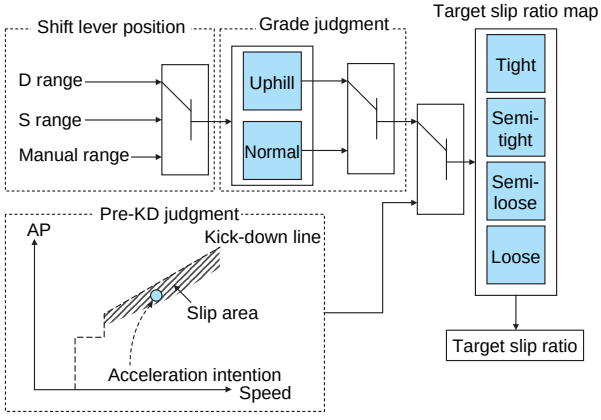


Fig. 8　System diagram of LC target slip ratio

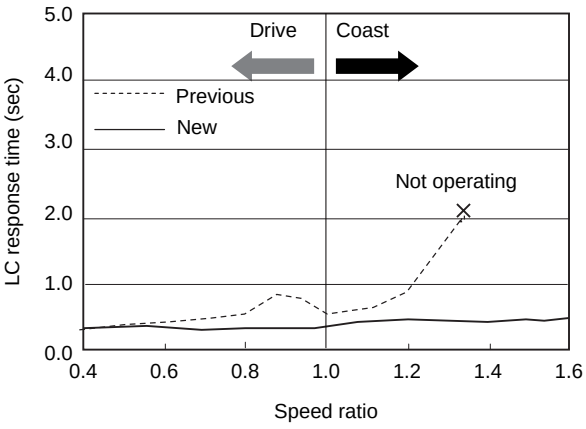


Fig. 9　Test results for LC response time

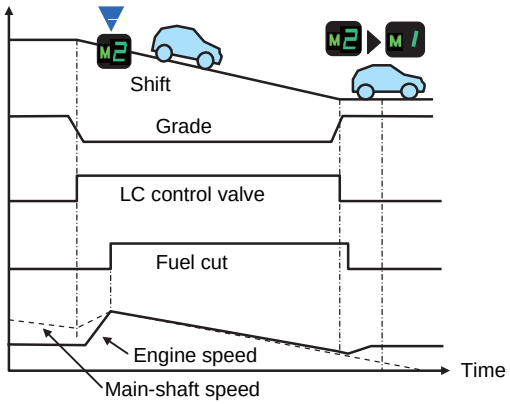


Fig. 10　Engine brake system with use of LC downhill detection

ショックを低減している．また，変速後の締結を維持することでダイレクト感の向上，および燃料消費量を低減している．

（2）パワーオンダウンシフトでは変速開始時(c)に LC 容量を下げることにより適度なスリップを発生させ，エンジン回転の上昇を早めることで応答性を向上させている．また，クラッチ締結(d)タイミングを検知し，変速の終了に対しエンジン回転数が大きく吹け上がらないようにLC ON状態に移行するように容量を制御し，スムーズな変速フィーリングと，ダイレクトな加速感，および燃料消費量の低減を両立させている．

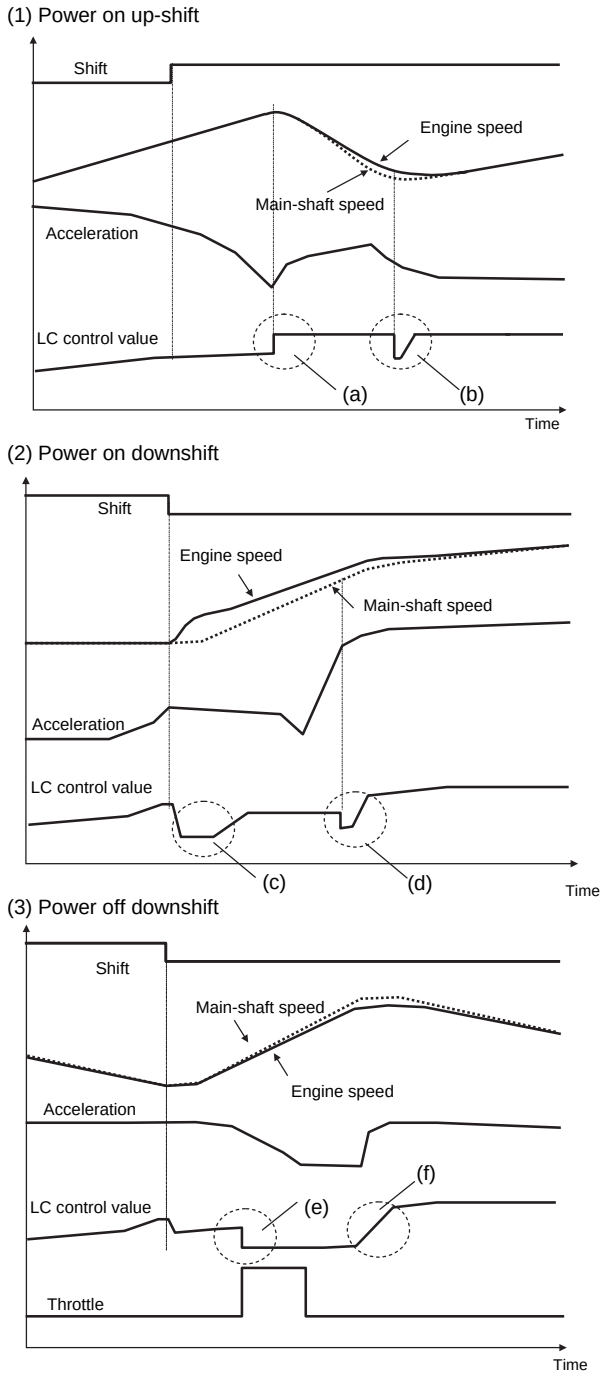


Fig. 11 Test results for LC response time

（3）パワーオフダウンシフトでは DBW 協調時(e)に LC をスリップさせることによりショックやノイズを低減し，変速クラッチ締結(f)タイミングにてLC ON状態にすることで，AP OFF時にはMT車のようなエンジンブレーキと，AP ON による加速移行時にはエンジン回転数の吹け上がりを低減しスムーズな加速性能を得られた．

６．まとめ

以下の（1）-（3）に示す，ロックアップクラッチのファイン制御の技術構築により，ドライバビリティの向上と燃費向上を達成した．

（1）多板 LC 式 TC と LC ダイレクト制御回路により LC 応答性の向上を実現した．

（2）多板 LC 式 TC と LC ダイレクト制御回路により LC 冷却性の向上を実現した．

（3）LC 制御範囲の拡大により走行状態に応じた目標LC スリップ率の設定を実現した．

これらの技術によって，0-100km/h までの全開加速時間にして 0.2secの短縮と US06 モードおよび実用燃費で約３％の燃費向上を両立した．

参考文献

（1）Abe, H., Tsuruoka, M., Muto, A., Kato, M., Fujiwara, H.: Development of Super Ultra Flat Torque Converter with Multi Plate Lock-up Clutch, SAE Paper, 2009-01-0141(2009)

（2）安部浩也，高橋徹，鶴岡政昭，高野博：多板ロックアップ式超々偏平トルクコンバータ，Honda R&D Technical Review, Vol.21, No.1, p.107-112

（3）丹羽研二：８速自動変速機の開発，自動車技術，Vol.62, No.3, p.53-57(2008)

■著　者■


武井　寛


石川　豊


齋藤吉晴


津幡義道

燃料電池スタックにおける小型薄膜電位計測センサの開発

Small, Thin-film Electric Potential Sensor for In-situ Evaluation of Fuel Cell Stack

吉田弘道* Hiromichi YOSHIDA
小岩信基* Nobuki KOIWA
佐藤雅彦* Masahiko SATO
鈴木敏文* Toshifumi SUZUKI

要　旨

電位計測は燃料電池の材料特性変化や面内環境の把握に有効であり，燃料電池の最適設計には電位分布の計測が不可欠であるが，従来型の電位計測用センサでは基準電位に水素の供給が必要なことや，構造上の制約から，面内の計測可能部位が限定されていた．これらの課題を克服するためにセンサを小型薄膜化し，自己水素発生型に改良することで，実機スタックにおける任意の位置での電位計測が可能となり，より正確なガスや水などの面内環境評価が可能となった．

ABSTRACT

Measurement of electric potential is an effective means of monitoring changes in the characteristics of the materials used in fuel cells and of obtaining an understanding of the internal environments of the cells. In addition, measurement of the distribution of electric potential is important for the optimal design of fuel cells. However, it is necessary to supply hydrogen to conventional electric potential sensors to obtain a reference electric potential, and structural constraints limit the number of points at which they can be used for internal measurements. A new small, thin-film, self-hydrogen-generating sensor has been developed in order to address these issues. The new sensor can measure potential in any part of a fuel cell stack, and enables more accurate in-situ evaluation of the gas and water environments in the fuel cells.

1．はじめに

地球温暖化や大気汚染などの環境問題に対応して，CO_2フリーとゼロエミッションの達成に向けて脱化石燃料の取組みが推進されている．その取組みのひとつとしてHondaでは純水素を燃料とする独自の燃料電池スタックの開発をおこなっている．

燃料電池の反応は水素と酸素の化学反応により電気と水を生成するものである．Fig. 1に燃料電池の構成を示す．燃料電池はガスの流路であるバイポーラプレート（Bipolar Plate），ガスを電極へ拡散させるガス拡散層（Gas Diffusion Layer：GDL），触媒反応をつかさどる電極触媒層（Catalyst

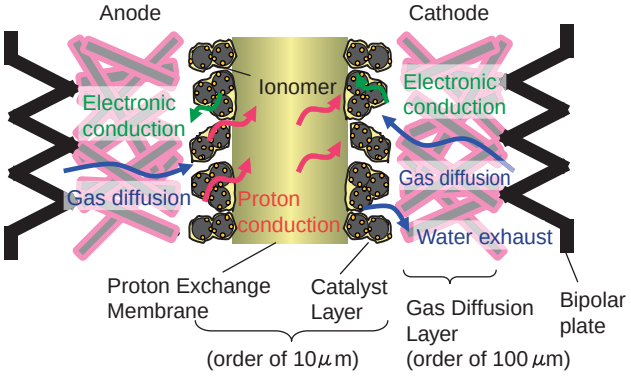


Fig. 1　Schematic of fuel cell

＊四輪R&Dセンター

https://doi.org/10.69239/hondatechnicalreview.2009_21_2_23

Layer：CL），プロトン交換膜（Proton Exchange Membrane：PEM）といった複数のミクロンオーダの層構造で構成されている[1]．アノード電極では水素，カソード電極では酸素がそれぞれ触媒上で反応することでセル電圧が発生し，PEMを介してプロトンの移動，電子の移動により発電と水の生成が起こる．

燃料電池にはこういったイオンや電子の移動など電気的なパスの確保だけでなく，反応ガスや水の均一な供給，生成水のスムーズな排出が必要であるが，電極内における微視的なガスや水の環境把握は困難なものとなっている．しかし，これらの反応は燃料電池の性能を左右するため，各環境とその機能を的確に把握し設計することが高性能，高品質な燃料電池の実現には不可欠である．

2．燃料電池スタックにおける電位分布測定の課題

2.1. 電位分布計測の必要性

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電池内部の反応状況を的確に把握することができない．そこで電圧以外に燃料電池の内部状況を把握する指標が模索されている．電位は触媒とガスの環境を推測できる指標のひとつであり，近年，燃料電池構成材料の劣化判断や電池内部の反応環境の把握に関する報告が増えている．

燃料電池は起動や停止，掃気などさまざまな作動環境下で用いられるが，それぞれの行程で材料特性変化による発電性能の低下が見られる．Fig. 2に材料特性変化の一例として，起動停止を繰り返した燃料電池の電極触媒の透過型電子顕微鏡（Transmission Electron Microscope：TEM）写真を示す．ガス入口側に比べ，出口側のPt粒子径が増大していることがわかる．Pt粒子径の増大は触媒活性を低下させ，電池性能を低下させる要因のひとつである．このような材料特性変化の分布は，主に電極面内におけるガスや水など，環境の違いにより生じる電位分布によって引き起こされ，これが電池の耐久性に影響を与えていると推測される[2]．

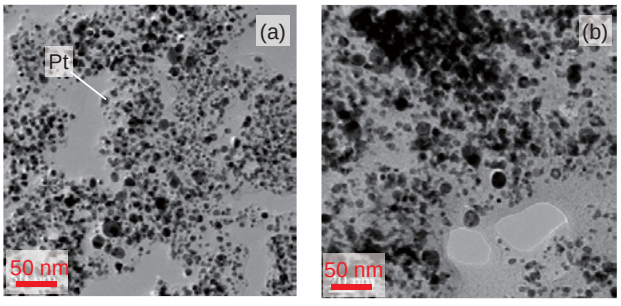


Fig. 2　TEM image of catalyst after start-stop cycle

また自動車用燃料電池スタックは高い駆動電圧を得るために数百枚もの電池単位（単セル）を積層（スタック）して構成されるため，積層位置によってもガス分配や水排出，温度環境を含めた部位ごとのばらつきが生じ，電位差が生じてしまう．

このように燃料電池の内部の環境は均一ではないため，一部分の電位計測では面内環境の正確な把握は難しい．そのため，電位の分布を多点観測することで電池内部の環境を把握する手法の実現がスタック設計において重要な課題となっている．

2.2. 従来の電位計測の課題

Fig. 3 に従来の電位計測用の単セルを示す．水素の入口流路付近に Pt 箔または Pt 線を設置し，電位の基準極（参照極）とするものである．これは Pt 表面での水素の吸着乖離反応の平衡電位を0V（基準）とし，それに対する計測部の電位差を測定時の環境電位として把握するもので，この参照極はRHE（Reversible Hydrogen Electrode，Fig. 4）と呼ばれている[3], [4]．しかしこのRHE基準による電位測定では（1）常に新鮮な水素を参照極に供給し続けないと電位の基準が保てないこと，（2）実際に電位測定をしたい部位からの距離が離れてしまうこと，（3）それにより測定に誤差を生じさせてしまうという課題がある．そのため，参照極の設置位置に水素の供給ができること，かつ参照極の位置と電位計測部が近いことが必要となる．このように従来の電位

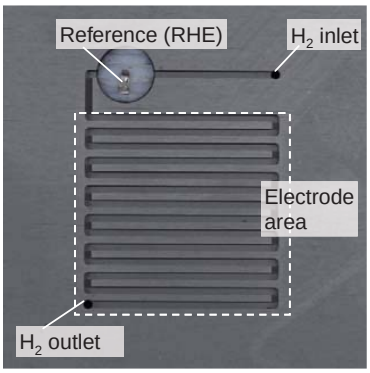


Fig. 3　Example of fuel cell with RHE

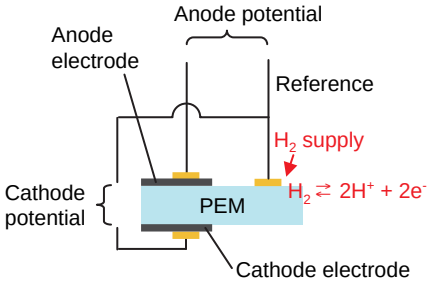


Fig. 4　Schematic of RHE

計測では参照極を取り付ける場所や測定条件に制限があるため，比較的小さな試験専用の単セル（１セル）での報告例が多く見受けられる．

また，参照極への水素供給源を発電に用いる水素と共用にした場合，上記（１）の理由から Fig. 3 に示したように，どうしても水素ガス入口付近（上流）に参照極の位置は限定されてしまう．より内部や，別の部位の電位を測定するためには，参照極用のガスラインを新たに設ける[5]必要があるが，実際のスタックでの計測を考えた場合，これは現実的ではない．

またこれらの電極を入れることでガスリークや実際の発電反応に影響を与えてしまうことも，本来の目的を損なうことになる．このように燃料電池スタックでの電位計測には，克服しなければならない多くの課題がある．

３．小型薄膜電位計測センサの開発目標

２章で述べた課題を克服し，燃料電池スタックの電位計測を任意の部位でおこなうには，従来の電位計測における参照極や電位計測部を含めた計測系を小型にし，センサ化する必要がある．そのため，センサ化に求められる要素として以下の項目を設定し検討をおこなった．

（１）参照極の構成
- 参照極用に新たな水素の供給系を必要としない
- 発電時以外にも電位計測をおこなう必要があるため，参照極に水素発生部を設けること

（２）センサの形状
- 発電環境を阻害しない：実稼動下に近い状況を作る（発電面積を大きく減らさないこと，ガスの流れを阻害しないこと）
- シール機能を低下させない厚みであること：センサ取り出し部のリークを防止する

（３）センサの材質
- 発電環境（熱水，低 pH 環境）で変形，コンタミ溶出などの材質変化がないこと
- 絶縁性と耐電圧を兼ね備えること

４．小型薄膜電位計測センサの適用結果

4.1. 電位センサの開発

Fig. 5 に小型薄膜電位計測センサを膜電極接合体（Membrane Electrode Assembly：MEA）に装入した時の概観を示す．センサは参照極と電位計測用の各電極，それらを保持する薄膜フィルムで一体化されており，挿入した部位の電位を計測することができる．

フィルムの材質には熱水環境や酸環境にも強い液晶ポリマ（Liquid Crystal Polymer：LCP）を採用し，各電極部とリード部をフィルム上にパターン形成させることでシール機能を欠損させず，かつ電気抵抗を増大させない厚みを両立させた．また，センサ電極間の耐電圧を確保するため，複層構造とした．

センサは PEM と電極触媒層を挟み込む形で配置し，その外側に GDL が位置している．また参照極および電極計測部の大きさは燃料電池の発電を阻害することがないよう，電極触媒層に対する占有面積が小さく，かつ安定して基準電位を維持できる大きさとした．

参照極には Fig. 6 に示すような水を電気分解して水素を発生させる DHE（Dynamic Hydrogen Electrode）タイプを用いた．この自己水素発生型の参照極は別途電解用の電源が必要となるが，停止中や起動前など，水素のない環境下でも計測ができ，燃料電池におけるほぼすべての環境で電位が計測できるメリットがある．

4.2. 電位センサの機能検証

本センサによる電位計測が正しくおこなわれているかを以下の方法で検証をおこなった．計測は Fig. 7 に示すように１枚の MEA の中に，本センサをそれぞれのガス入口側から出口側に向け８箇所設置し，1-8の部位におけるカソード電位とアノード電位，セル電圧の計測をおこなった．

参照極の機能としてはどのような条件下でも安定した基準電位を示すことが求められる．RHEタイプの参照極では安定した電位を保つために常に発電に用いる水素を供給しているが，DHEタイプの参照極は水の電解により生成した水素を用いて基準電位とするため，発電による供給水素の

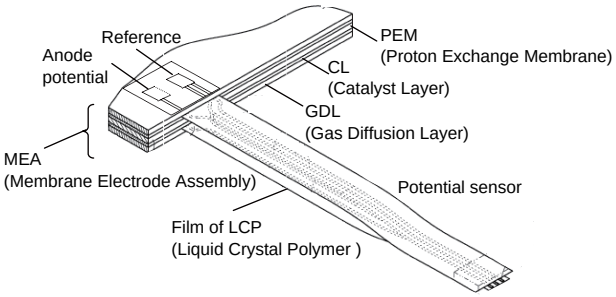


Fig. 5　Configuration of potential sensor

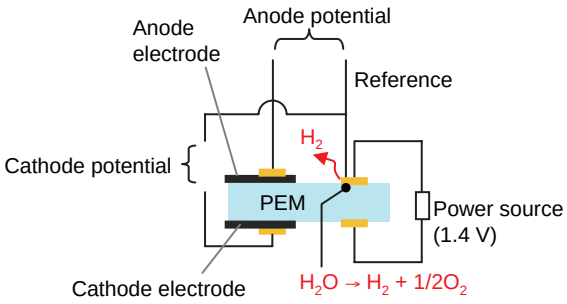


Fig. 6　Schematic of DHE

Table 1 Anode potential under H_2 and air condition

No	Anode potential (V)	
	H_2 condition	Air condition
1	0.01	1.06
2	0.00	1.03
3	0.00	1.07
4	0.01	1.05

*At 25°C, atmospheric pressure, 100% RH

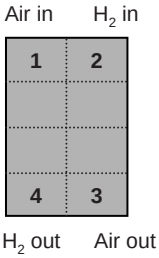
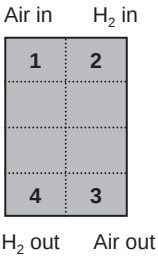


Table 2 Relation between difference of cathode and anode potential and cell potential

No	Potential (V)			
	(a) Anode	(b) Cathode	(c) (b)-(a)	(d) Cell
1	-0.01	0.79	0.80	0.79
2	0.00	0.80	0.80	
3	-0.01	0.79	0.80	
4	-0.01	0.78	0.79	

*At 25°C, atmospheric pressure, 100% RH



有無によらず各アノード電位が正確に 0V を示すことが必要となる．また各部位のアノード電位とカソード電位の電位差がセル電圧と一致することが必要である．

まず，基準電位の確認はアノードを水素雰囲気下とAir雰囲気下の２条件で，電極面内における入口側と出口側のアノード電位の計測をおこなった．Table 1にそれぞれの測定結果を示す．

水素雰囲気下では各部位ともにほぼ 0V，Air 雰囲気下ではほぼ１Ｖ(酸素の酸化還元電位付近)を示し，参照極が正しく機能していることがわかる．

また，発電時におけるアノードとカソードの電位差とセル電圧を測定し検証をおこなった．Table 2 に結果を示す．アノードとカソードの電位差とセル電圧もほぼ一致し，このことからも電位計測が正しくできていることを確認できる．

4.3. 電位センサによる電位分布の計測

Fig. 8 に実際の単セルでの電位分布計測結果を示す．なお，グラフには線を見やすくするため，代表的な入口と出口部のみのデータを記載している．測定時の運転条件は電位分布を生じさせるため，低ストイキかつ高加湿条件でおこなった．

発電の負荷に応じてそれぞれの電位は変化し，高負荷になるにつれて電極面内の電位分布が大きく変化し，出口側のアノード電位が高くなっていることがわかる．面内で出口側にゆくほど生成水のフラッディングによる水没や水素

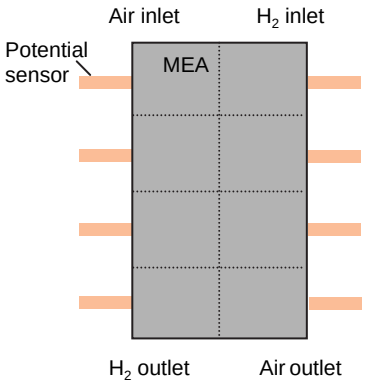


Fig. 7 Layout of potential sensor

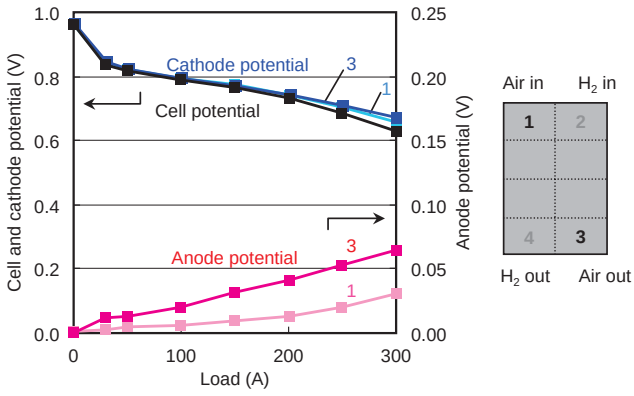


Fig. 8 Potential distribution during generation

不足によるアノード側電位上昇が起きていることが推定され，このように面内の電位分布の計測ができていることがわかる．

4.4. 燃料電池スタックへの適用結果

Fig. 9 に起動時の電位分布計測結果を示す．停止から時間が経っている場合，アノードの水素は消費され，両極がAir雰囲気となっているため，起動時にはアノード側ではAirと水素の混合状態となる．面内の電位分布を見ると水素の流れ(図中矢印)に沿って，その対極のカソード側が高電位

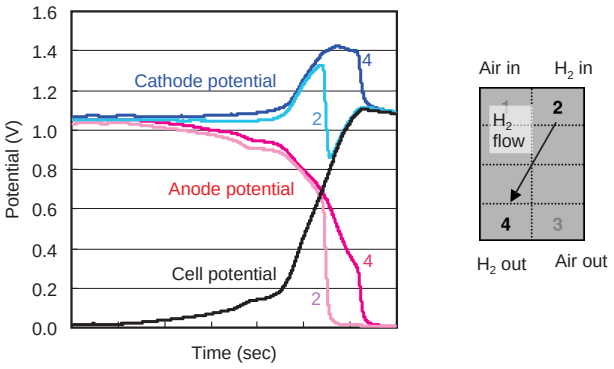


Fig. 9　Potential distribution at start-up

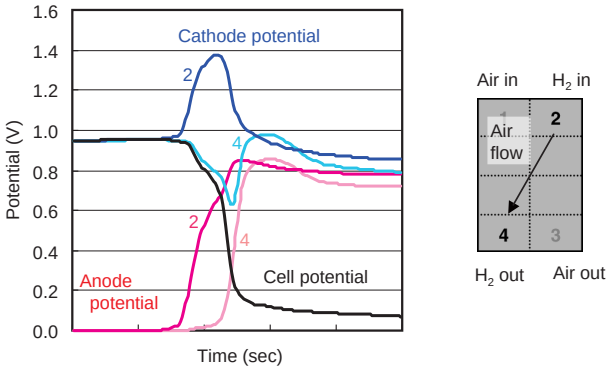


Fig. 10　Potential distribution at purge

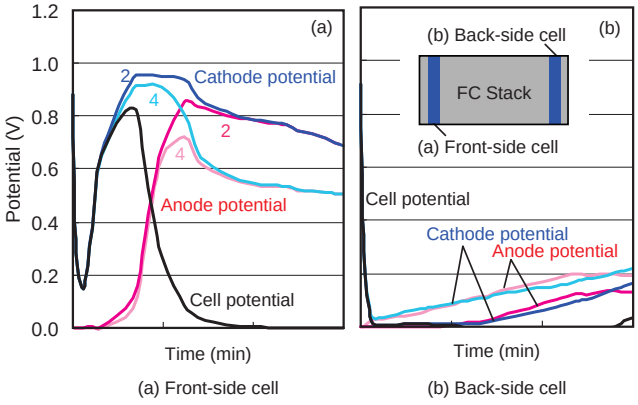


Fig. 11　Potential distribution before start-up

になり，条件によっては最高到達電位が1.4Vを超えていることがわかる．またガスの置換が遅い出口付近が最も高電位の時間が長くなっていることがわかる．この結果は前述の材料の特性変化解析の結果とも一致しており，この高電位を回避するようなシステム制御が必要である．このように電位の変化を見ることで，セル内のガスの流れを可視化することができ，ガスの置換効率を上げるセル流路設計や，高耐電位性の材料設計に関する重要な指針となりうることがわかる．

Fig. 10 に発電停止直後のアノード極へのAir掃気時の電位分布計測結果を示す．起動時と同様に，アノード面内のAirの流れ(図中矢印)に沿って，カソード側が高電位になっていることがわかる．特に入口側が最も電位が高く，材料の特性変化解析の結果とも一致する．

また，スタックにおける積層位置違いでの起動前電位状態(Fig. 11)を見てみると，積層位置により電位が異なっていることがわかる．これはソーク時間によってスタック内部のガス環境，濃度が変わっていることを示しており，停止時のシステム制御やガスマニホールドの設計指針など，燃料電池の寿命向上を図るうえでの重要な情報となる．

通常一般的に用いられる参照極(前述のRHE)では水素の供給が必要となるため，水素の供給されない発電停止中は電位計測ができない．しかし本センサは自己水素発生型であるため，このような水素のない環境(発電停止時)でも電位を計測することができるというメリットがある．

5．まとめ

オリジナルの電位計測センサにより，これまでに計測することができなかった実機における面内の電位分布，積層位置による環境分布の違いを検出し，燃料電池の材料特性変化や発電環境の把握など，電池開発における有効なツールとしてその効果を実証することができた．

(1)薄膜タイプの小型，自己水素発生型電位センサを開発することで，どのような運転環境下においても電位が測定でき，また搭載が困難な燃料電池実機スタックにも適用することができる．

(2)これまで明確に評価できなかった電極面内，積層位置による電位分布を実機で詳細に計測することができ，各作動条件における特性変化部位，材料特性変化との関係を明確にした．

(3)単セルから燃料電池スタックへの搭載も可能であり，汎用性の高いセンサであることが実証された．

参考文献

（1）日本化学会編：新型電池の材料化学，季刊化学総説，No.49, 学会出版センター，p.181-182(2001)
（2）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), 963-973(2007)
（3）藤嶋昭，相澤益男，井上徹：電気化学測定法，上巻，技法堂，p.89-95(1984)
（4）高須芳雄，吉武優，石原達己：燃料電池の解析手法，化学同人，p.81-83(2005)
（5）山田和順：PEFC の水素不足による劣化現象，第 47 回電池討論会要旨集，3A03, p.82-83(2006)

■著　者■



吉田弘道



小岩信基



佐藤雅彦



鈴木敏文

高回転エンジン用鉛フリー軸受の開発

Development of Lead-free Bearing for High-speed, High-load Engine

櫻井　輔*　　白石　隆**
Tasuku SAKURAI　　Takashi SHIRAISHI

要　旨

Hondaの高回転ガソリンエンジンをターゲットにした鉛フリー軸受の開発をおこなった．

開発手法としては既存のアルミ合金軸受表面に表面粗さと添加物粒子の配列比に着目した新樹脂コーティングを施すことで鉛フリー化を実現した．

新樹脂コーティング軸受で，従来の高回転エンジンに用いられる鉛基合金めっき軸受と同等以上の性能(耐焼付き性と耐疲労性)を達成した．

ABSTRACT

A lead-free bearing was developed for use in high-speed and high-load gasoline engines made by Honda.

The development method involved the application of a new resin coating material with optimized surface roughness and solid lubricant arrangement ratio to an existing aluminum alloy bearing surface, which realized a lead-free bearing.

The new resin coating bearings achieved performance (seizure resistance and fatigue resistance) equal to or better than that of the lead alloy plating bearings conventionally used in high-speed and high-load gasoline engines.

1．まえがき

最近のエンジン出力の増加および排気ガス規制への対応や燃費低減のため，軸受面圧は上昇し潤滑油膜厚さはより薄くなる傾向にあり，周速と面圧に代表される軸受環境は厳しくなっている[1)-4)]．

自動車用高回転エンジンのコンロッド軸受としては，通常三層銅合金が用いられ，最表層には電気めっきによる鉛基合金めっき材を用いるのが主流である．

しかし，環境負荷物質である鉛については2011年7月からヨーロッパでELV(欧州廃車)指令が施行されるため，鉛基合金めっき材は使用不可になる．そうなると自動車エンジンに用いられている既存の鉛フリー軸受では，周速20 m/s以上の高回転エンジンでの耐久性が課題となる．鉛フリー化の懸案は，荷重変動に対する変形と，局部発熱時の溶融および再凝固に対する復元を示すなじみ性が低下することである．鉛フリー化技術としては，鉛代替めっきやスパッタリングなどを用いる手法がある[5)]が，めっきは廃液処理が課題である．また，スパッタリングは装置そのものが高価なため部品へ応用するとコストが課題となる．そこで耐焼付き性を鉛基合金めっき材同等以上をねらって表面粗さと添加物粒子の配列に着目した樹脂系コーティングを用いて，高回転エンジン仕様に耐え得る鉛フリー軸受を開発したので，その技術内容について報告する．

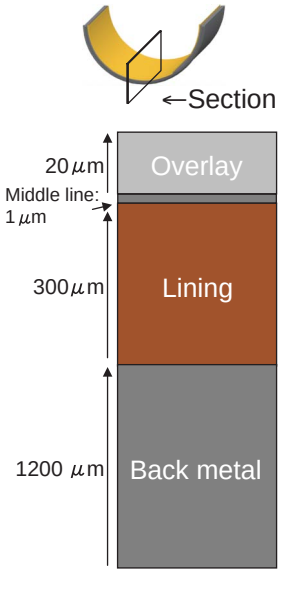
2．高回転エンジン用軸受の開発コンセプト

Fig. 1 に既存の鉛フリー軸受の使用領域を示す．Hondaでは周速20 m/s以上の高回転エンジンを量産しており，この領域で軸受に求められる要求特性としては

＊　四輪R&Dセンター
＊＊本田技研工業株式会社

https://doi.org/10.69239/hondatechnicalreview.2009_21_2_24

Table 1 Bearing specification comparison



		Lead alloy platinig	New coating material
Overlay	Material	Pb-4.5Sn-8.5In	MoS_2 : 72 mass% ± 2 mass% + PAI
	Thickness	20 μm	5 ± 2 μm
	Surface form	–	(0,0,ℓ) c axis arrangement
Middle line	Material	Ni plating (1 μm)	–
Lining	Material	Cu-3.5Sn-15Pb	Al-7Sn-3.7Si-1.5Cu
Back metal	Material	S20C	S20C

(1)耐荷重性と耐焼付き性
(2)瞬間的な荷重に対してのなじみ性
(3)油膜切れ時の固体潤滑性
が挙げられる.

これらの要求特性に対して，開発した新樹脂コーティング軸受の仕様を Table 1 **に示す．比較として従来材の鉛基合金軸受の仕様を示す.**

新樹脂コーティング材は，アルミ合金軸受表面になじみ性の向上を目的としてポリアミドイミド(以下 PAI と略す)を，また固体潤滑性の向上を目的として二硫化モリブデン(以下 MoS_2 と略す)を一定量以上配合した．コーティング厚さは 5 ± 2 μm とした．耐荷重性に対しては表面粗さと MoS_2 の結晶方位に着目し，耐荷重性を高めた樹脂コーティング仕様を開発コンセプトとした.

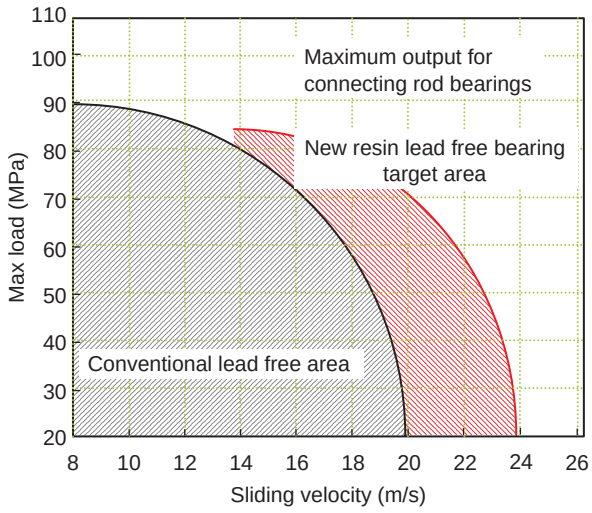


Fig. 1 Correlation of sliding velocity and max load

Table 2 Seizure test conditions

Sliding velocity	20 m/s
Bearing dimension	ϕ48 mm
Oil temperature	80 °C
Oil pressure	0.1 MPa
Clearance	65 μm
Loaded	3 kN step-up

3．技術内容

3.1. 面粗度最適化による耐荷重性と耐焼付き性の向上

新樹脂コーティング材の耐焼付き性を検証するため Fig. 2 **のような軸受試験装置を用い，静荷重単体試験をおこなった．軸受試験装置は軸を回転させ，変動荷重を与えて耐焼付き性および耐疲労性を単体で評価できる設備である．ここでは** Table 2 **に示す条件で樹脂コーティングの表面性状が耐焼付き性に与える影響を検証した.**

耐荷重性を向上させるには，軸受表面に油膜を切らさないことが重要と考え，コーティングの表面粗さに着目した．結果を Fig. 3 **に示す．表面粗さ(Rz_{JIS}[6])が粗いほど耐焼付き性が低くなる．これは，急激な荷重変動などで瞬間的に油**

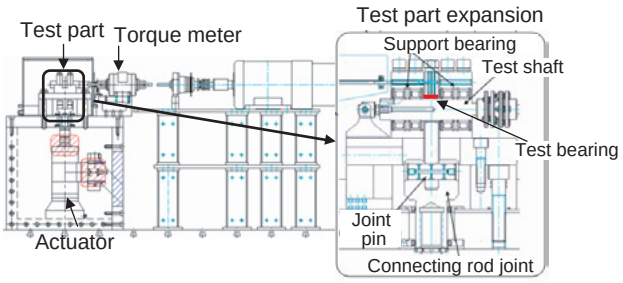


Fig. 2 Bearing rig tester

膜が切れて軸受とクランクシャフトが固体接触した場合，Fig. 4 の右側に示した SEM 表面観察結果のコーティング凸部(黒い点線部が頂点)が局部接触により発熱し，焼付きに至るためと考えられる．Fig. 4の破線部垂直断面の凸形状を Fig. 5 に示す．一方，表面粗さが平滑な場合は耐焼付き性の目標を満足し，平滑性の効果は確認できた．

以上の単体焼付き試験結果から，コーティング後の表面粗さは目標焼付き面圧を満足する Rz_{JIS}：2.5 μm 以下に設定した．

3.2. 配列比最適化による耐荷重性と耐焼付き性の向上

Fig. 6 に示すように MoS_2 には結晶方位のミラー指数で示すa，b軸を軸受円周方向とすると，これらの方向にはへき開性が有ることが知られている．これらの軸に垂直な軸受円心方向の c 軸方向には，耐荷重性に優位性を持つことが期待される．ここでは MoS_2 粒子の c 軸を揃えることで耐荷重性の向上をねらい，MoS_2粒子が規則正しく配列する割合(配列比)に着目した．静荷重単体試験結果を Fig. 7 に示す．配列比と焼付き面圧には正の相関があるという結果を得た．これは MoS_2 が六方晶型の層状結晶構造をとるため，層間の硫黄同士の結合が弱く，せん断力が加わると a，b 軸方向，すなわち軸受円周方向にはへき開しやすい傾向があるからである．一方，モリブデンと硫黄の結合は強固で c 軸(0,0,ℓ)面は耐荷重性に優れる特性を持つことから，規則正しく配列した MoS_2 粒子のへき開性が良好な固体潤滑性を示すためと考えられる．MoS_2 粒子を配列させるため，コーティング塗布後に燐片状の MoS_2 粒子が平準化するように塗布条件を設定し，配列比の設定は 80%以上とした．

軸受試験装置で周速：17.5 - 25.0 m/s までの静荷重単体試験をおこない，耐焼付き性を検証した．鉛基合金めっき材と比較した結果を Fig. 8 に示す．低周速域から高周速域まで鉛基合金めっき材と同等以上の耐焼付き性を得ることができた．これは特に MoS_2 粒子の配列比を 80%以上に設定

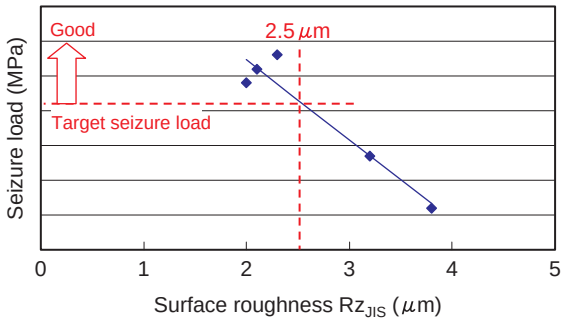


Fig. 3　Seizure resistance and surface roughness

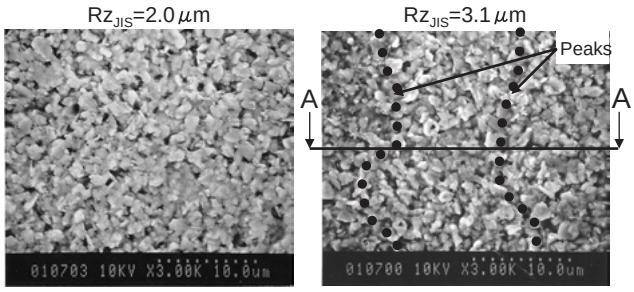


Fig. 4　SEM images of MoS_2 coating surface

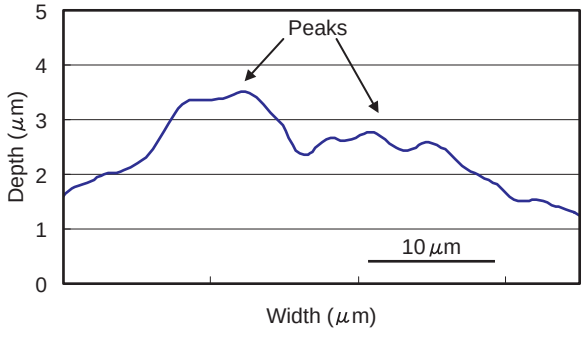


Fig. 5　A-A cross section

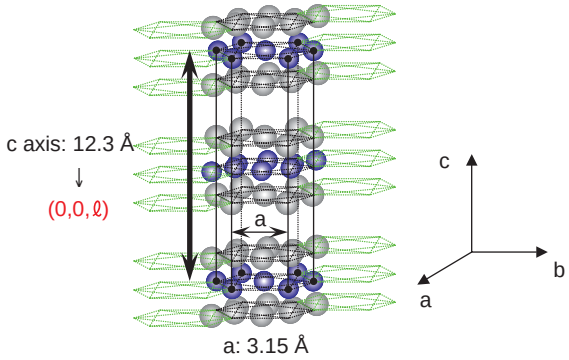


Fig. 6　MoS_2 crystal structure

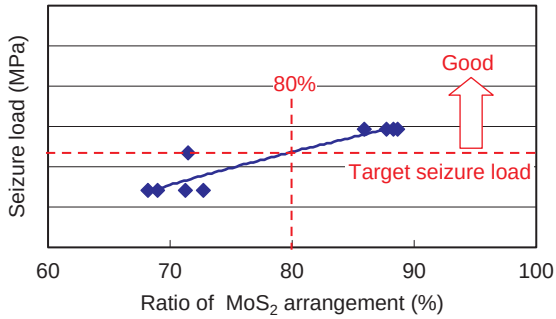


Fig. 7　Seizure resistance and MoS_2 arrangement ratio

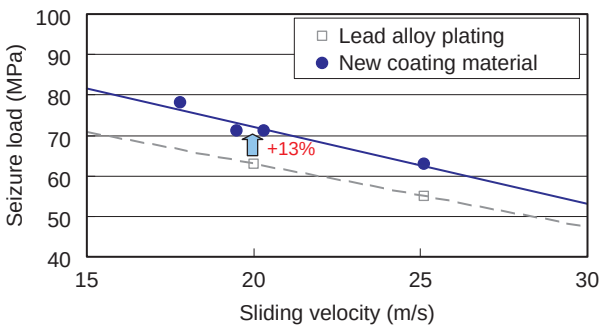


Fig. 8　Seizure resistance and sliding velocity

Table 3 Fatigue test conditions

Sliding velocity	23.3 m/s
Bearing dimension	ϕ48 mm
Oil temperature	100 °C
Oil flow-late	1 L/min
Clearance	75 μm
Loaded	100 MPa × 300 Hz sine wave

したことで，耐荷重性が向上した効果と考えられる．

また，軸受試験装置を用いた単体疲労特性は Table 3 に示すような条件下でテストした．繰り返し回数 1×10^7 回まで比較した結果，鉛基合金めっき軸受同等以上の耐疲労強度を得た．これは特に表面粗さを平滑にしたため，クランクシャフトと軸受との固体接触を伴うたたかれが抑えられ，油膜切れが起こりにくくなり，局部的な固体接触による発熱を抑えることができたためと考えられる．

3.3. 瞬間的な荷重変動に対してのなじみ性

高周速下において，軸受最表面に瞬間的な荷重がかかった場合，焼付かずになじむには最表層の耐熱性と，変形能つまり伸びと強度が鉛に近いことが求められる．

Fig. 9 に樹脂のアミド基率とガラス転移温度の関係を示す．アミド基率が高い樹脂では耐熱性に課題があると考え，自動車技術会にて報告されているように[7]耐熱温度が鉛に近い(鉛の融点327 ℃)アミド基率の低い樹脂(PAI)を選定した．次に，Fig. 10 に 200 ℃での樹脂の伸びと強度の関係を示す．先に選定した耐熱性が高い樹脂の伸びは，鉛の半分以下であるが，改良された PAI は鉛同等の伸びを持つことが知られている．

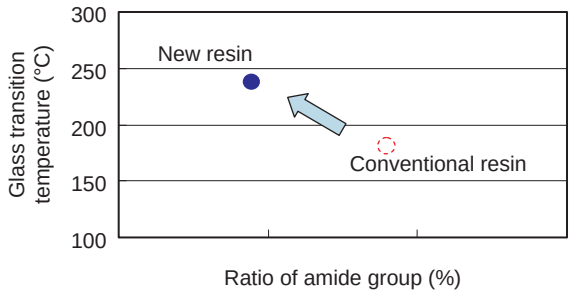


Fig. 9 Correlation of amide ratio and glass transition

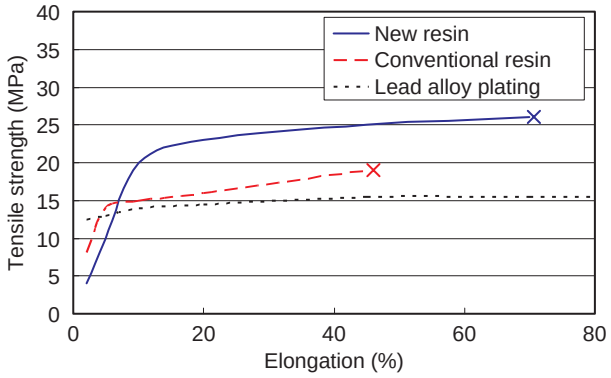


Fig. 10 Correlation of elongation and strength at 200 °C

3.4. 油膜切れ時の固体潤滑性

固体潤滑性に対しては，油膜切れ時のしゅう動性能を保証するため，3種の固体潤滑剤の中から適合性の確認をおこなった．Fig. 11 に示すようなスティックスリップ試験をおこない，Fig. 12 の結果から試験後の相手材の表面粗さが小さく，へき開性を持つ MoS_2 で良好な結果を得た．また配合量は，自動車技術会で報告されているとおり[7]，MoS_2 コーティング処理した試験片と鋼球の摩耗量測定から設定した．Fig. 13 の試験結果は，MoS_2 の配合量が 72 mass% のときに，鋼球の摩耗量が低くなることを示した．以上から樹脂コーティングに配合する添加物粒子は MoS_2 とし，配合量は 72 mass% とした．

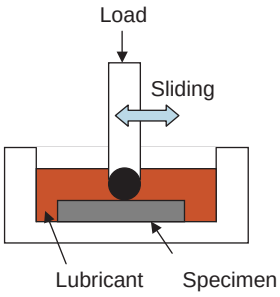


Fig. 11 Stick-slip tester

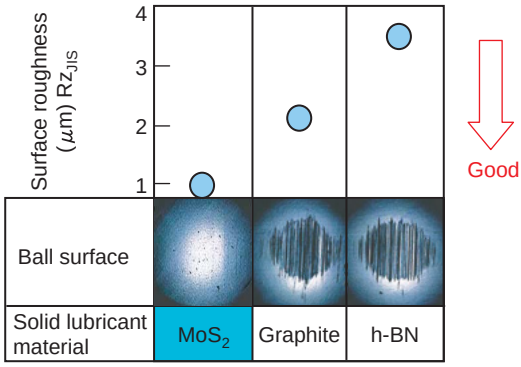


Fig. 12 Correlation of solid lubricant material and surface roughness

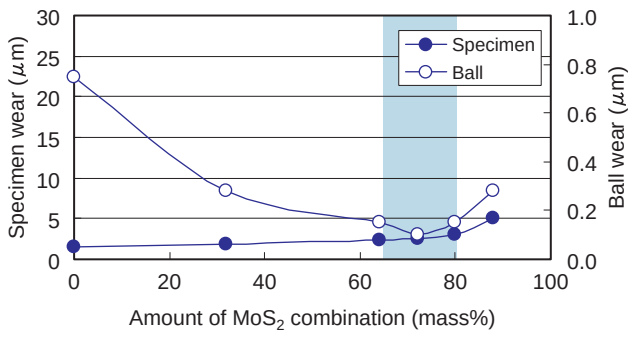


Fig. 13 Correlation of MoS_2 combination and wear

4．軸受耐久性の確認

4.1. コーティング摩滅後耐焼付き性検証

最表面の新樹脂コーティング材が摩滅したことを想定した耐焼付き性の確認をおこなった．Table 2に示した各条件で，コーティングが摩滅した後のライニングの露出率との関係を確認した．Fig. 14は新樹脂コーティング軸受が鉛基合金めっき軸受以上の耐焼付き性を持つことを示す．これは，最表層とライニング間の接着層の有無が影響しているものと考えられる．鉛基合金めっき軸受には，最表層中の錫とライニング中の錫との相互拡散防止と，めっき密着性向上を担って，1μm のニッケルめっき層がある．このニッケルめっき層はしゅう動特性が低く，露出すると焼付き性は低下する．新樹脂コーティングは最表層とライニング間の中間層が無いため，コーティングが摩滅してもしゅう動特性が保持されるようなアルミ合金ライニングが使用可能となった．

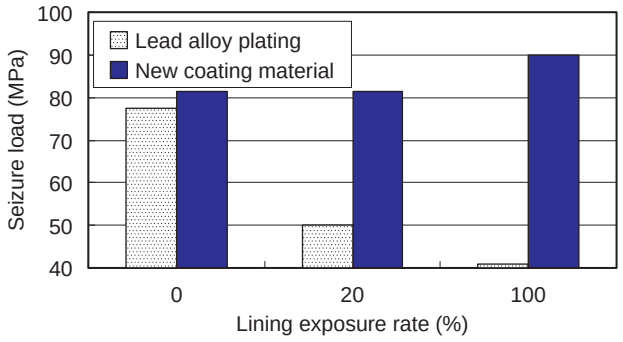


Fig. 14　Seizure resistance of lining exposure rate

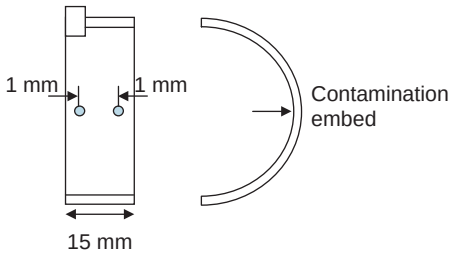


Fig. 15　Contamination trap position

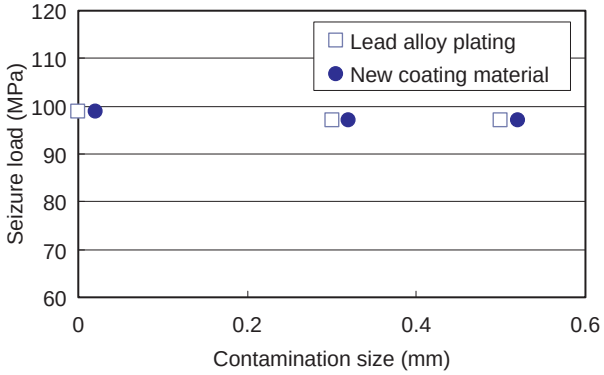


Fig. 16　Seizure resistance and contamination size

Table 4　Contamination toughness test conditions

Sliding velocity	20 m/s
Bearing dimension	ϕ48 mm
Oil temperature	140 °C
Oil pressure	1.0 MPa
Clearance	60μm
Loaded	3 kN step-up

4.2. 異物に対する耐焼付き性検証

エンジン内の異物に対する耐焼付き性を確認した．軸受試験装置を用いてテストした条件を Table 4 に示す．異物が軸受の性能に対して影響をおよぼすのはしゅう動面に埋収した時と考え，Fig. 15のようにしゅう動面直上に異物を埋収する方法で焼付き試験をおこなった．

異物は実際のクランクシャフトの加工時の切粉を採取し，長径方向の長さでサイズを選別した．異物サイズ0.5 mmまで耐焼付き性が鉛基合金めっき材と変わらないという結果(Fig. 16)を得た．これはバインダ樹脂の伸び特性，表面面粗度，MoS_2粒子の配列比を上げることにより，固体潤滑を含むなじみ性が鉛基合金めっき軸受同等になったためである．

5．実機適合性確認

開発した新樹脂コーティング軸受の実機適合性を検証するため，3.7 L V6 エンジンを用いた．実機耐久試験を実施

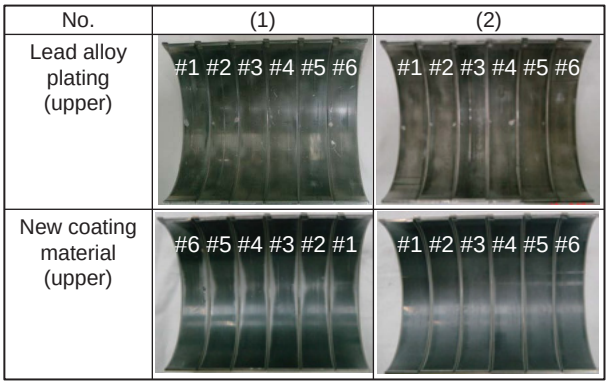


Fig. 17　Appearance of bearings after engine test

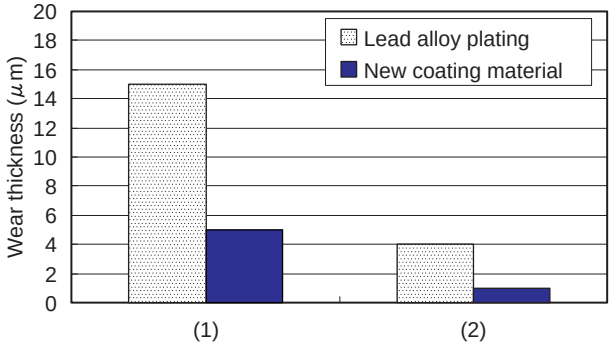


Fig. 18　Wear of durability test

Table 5 Engine test conditions

Engine	3.7L V6 gasoline	
No.	(1)	(2)
Rotations	6200 rpm*WOT	6800 rpm*WOT

し，検証部位はコンロッド軸受にて確認をおこなった．エンジン全負荷条件(WOT)を Table 5 に示す．

試験後の軸受外観を Fig. 17 に示す．いずれの試験においても軸受のしゅう動面は良好で焼付きや疲労によるクラックの発生はなかった．また，軸受ダメージについて摩耗量を Fig. 18 に示す．条件(1)では 4 - 5 μm，(2)では 1 - 2 μm であり，鉛基合金めっき軸受と比較しても良好な耐摩耗性を有しているという結果を得た．

6．まとめ

(1)耐荷重性と耐焼付き性向上のために，新樹脂コーティング材の表面面粗度とMoS_2粒子の配列比に着目し，表面面粗度：Rz_{JIS} = 2.5 μm 以下，MoS_2 配列比：80%以上に設定した．

(2)新樹脂コーティング軸受の異物混入時の耐焼付き性を検証し，異物サイズ：0.5 mm(最大長)まで鉛基合金めっき材と変わらない耐焼付き性を得られた．

(3)新樹脂コーティング軸受は実機耐久試験において焼付きの発生，および疲労によるクラックは発生せず，従来の鉛基合金めっき軸受と同等以上の結果を得た．

以上より，高回転エンジン用鉛基合金めっき材同等以上の性能を持つ新樹脂コーティング鉛フリー軸受を開発し，2008 年モデル ACURA RL のコンロッド軸受へ適用した．

参考文献

(1)三原健治，Werner Shubert，Klaus Deicke，Rolf Reinicke，Klaus Damm：高負荷エンジン用鉛フリースパッタ軸受の開発，自動車技術会学術講演会前刷集，No.148-08, p.15-18(2008)

(2)町田恭一，高橋伸一，上嶋英夫，藤木賢治：新しい軸受シミュレーション装置によるエンジン軸受評価方法の提案と高効率化，Honda R&D Technical Review, Vol.18, No.2, p.131-139

(3)金山弘，川上真也，郷原千明，不破良雄，道岡博文：固体潤滑オーバレイ付きエンジン用すべり軸受材料の開発，自動車技術会学術講演会前刷集， No.976, p.141-144(1997)

(4)後藤保明，富川貴志，須賀茂幸：高速エンジン軸受用鉛オーバレイの開発，自動車技術会 学術講演会前刷集，No.66-01, p.9-12(2001)

(5)神谷荘司，富川貴志，後藤保明，本田文洋：高周波スパッタリングにより作製した Ag-Sn 合金膜の摩擦特性，トライボロジスト，第 45 巻，第2号，p.158-165 (2000)

(6)日本規格協会編 JISハンドブック，46，機械計測，p.636 (2007)

(7)壁谷泰典，川越公男，不破良雄，斉藤康之：高速・高面圧用固体潤滑オーバレイの開発，自動車技術会学術講演会前刷集，No.9-06, p.1-4(2006)

■著 者■



櫻井 輔



白石 隆

数値的アプローチによるターボラグの原理解析

Numerical Analysis of Turbocharger Response Delay Mechanism

松本貴希* 朴辰洛* 織田信之*
Takaki MATSUMOTO Shinrak PARK Nobuyuki ODA

要旨

近年，低燃費自動車の社会的な要求が高まってきており，この要求に対する技術的な回答の一つとして，過給ダウンサイジングエンジンが注目されている．しかし，低燃費化に有利な排気ターボチャージャを用いた過給は一般的にターボラグと呼ばれるエンジン性能の低下を伴う過給応答遅れ特性を持つため，この技術の適応拡大には課題が残る．本研究では，ターボチャージャ付エンジンにおける過給応答遅れに着目し，この詳細な発生メカニズムを，数値的なアプローチを用いることで解析した．その結果，ターボラグとは過渡損失である軸慣性損失と吸気容積充填損失を一次要因として生じる遅れと，さらに一次要因を起点としたタービン作動ガス量の低下とタービン効率の低下の二次要因による遅れの複合的な要因によって発生する過給圧の応答遅れであるという結論を得た．

ABSTRACT

Social demands for increased automotive fuel efficiency are today increasing. Turbocharged downsized engines have attracted attention as one technological means of responding to these demands. Boosting technology using a turbocharger is effective in increasing fuel efficiency, but these turbochargers also display a response delay characteristic known as turbo lag, which may cause engine performance to decline. This issue impedes the broader application of this technology. The research discussed in this paper focused on turbo lag, and adopted a numerical approach to analyzing the detailed mechanism of this phenomenon. The study concluded that turbo lag is a delay in the boost pressure response that originates from a combination of factors. The primary factor in turbo lag is a delay that is due to a physical property of the turbocharger system; the secondary factor is a decreased turbine effective energy caused by a shift of operating point, resulting from the primary factors.

1．まえがき

近年，地球温暖化問題から端を発したCO_2削減問題や急騰した石油価格を背景に自動車の低燃費化に対する社会的なニーズが高まってきている．さらに，日本国内における2015年燃費規制や欧州におけるCO_2排出量規制，また，米国における新 CAFE 規制など，国単位での CO_2 排出量削減に向けた燃費法規制を整備する動きが急速に広がりつつある[1]-[3]．このような状況下において，自動車の低燃費化は，排気ガスのクリーン化と共に自動車メーカに課せられた社会的な責務となっている．

現在，低燃費化の具体的な手法として，エンジンのハイブリッド化と過給ダウンサイジング化が多くの注目を受けている．特に，過給ダウンサイジング技術はハイブリッドに対して燃費の改善率は低いものの，軽量，コンパクトで比較的安価であることから，メーカの持つ車両ラインアップの燃費を底上げする技術として注目度が高く，中長期的な技術適応拡大が見込まれている[4]．

また，過給ダウンサイジングエンジンの中でも，ターボチャージャを用いた過給は，排気エネルギーを回生利用した過給がおこなえるため，システム効率が高く低燃費化の目的に適した過給技術である．一方でターボチャージャによる過給にはターボラグと呼ばれる過給応答遅れに起因するエンジン性能の低下が広い運転領域において発生することが知られている．特に排気エネルギーが相対的に小さい低速度域の過給応答性が十分でなく，実用上の使用頻度が高いこの領域での応答遅れは，ドライバビリティ，燃費，エミッションに対して性能低下を生じさせる要因となる．今後，過給ダウンサイジングエンジンが従来の自然吸気エンジン(Natural Aspiration エンジン：以下 NA エンジン)に代わって低燃費化時代の主役に踊り出るためには，過給応答性の改善が大きな鍵になってくると考えられる．

＊四輪R&Dセンター

https://doi.org/10.69239/hondatechnicalreview.2009_21_2_25

これまで，過給応答性を改善するため多くの試みがなされ，いくつかの手法に関する論文が発表されてきたが[5]-[8]，ターボラグの発生原理の核心に触れた記述は少ない．これは，ターボチャージャが非線形要素を多く含み，また，回帰的な動作をすることから，実機を用いた現象解析が困難であったことに起因する．本稿では，ターボチャージャの物理モデルを構築し，数値的なアプローチを用いることで，過渡運転時におけるターボチャージャの詳細な挙動とターボラグの発生メカニズムを解析した．

2．過給ダウンサイジングエンジンにおける過給応答遅れの影響

2.1. 過給ダウンサイジングエンジンの燃費効果と動向

過給ダウンサイジングによる低燃費効果を示すために，現在市販されている代表的な過給ダウンサイジングエンジンとNAエンジンを抽出し，定格出力に対する排気量(Fig. 1)とNEDC[9]モードにおける燃費(Fig. 2)を比較した．まず，エンジン排気量を比較すると，過給エンジンは，NAエンジンに比べ，より小さい排気量で同等の定格出力を達成している．例えば，定格出力150 kWで比較すると，NAエンジンが約 2.8 L の排気量を必要としているのに対し，過給エンジンは約 2.0 L と約 29%小さい排気量で同等の定格出力が得られている．一方，燃費に着目すると，同様に150 kW断面では，過給ダウンサイジングエンジンを用いた車両の燃費が，約24%優れていることが確認できる．これは，過給による出力密度の向上により，NAエンジンに対して小排気量のエンジンが採用できたことで機械損失とポンプ損失が低減されたことに起因していると考えられる．また，これより，過給ダウンサイジングによる低燃費効果は排気量の縮小割合(ダウンサイジング率)に依存することが推測される．ここで，再度Fig. 1に着目すると，現在市販されている過給エンジンのダウンサイジング率はおおむね 25%－30%であることがわかる．一方，さらなる低燃費効果をねらいダウンサイジング率を 50%程度まで高めたエンジンが近年提案されてきており，高過給，高出力密度化による高ダウンサイジング率エンジンの開発がトレンドとなってきている[10]．

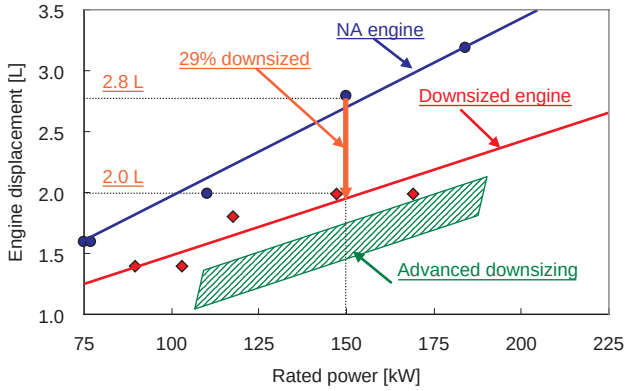


Fig. 1 Comparison of engine displacement

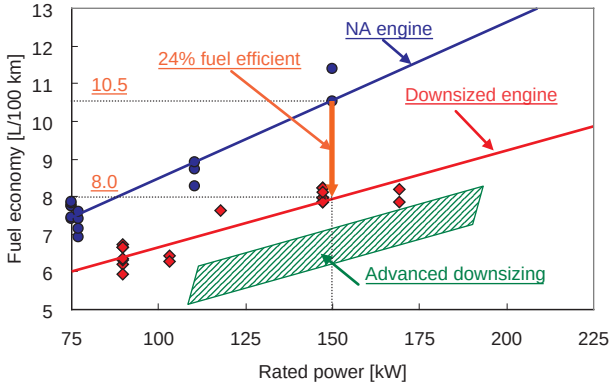


Fig. 2 Comparison of fuel consumption rate of turbocharged engine and NA engine

2.2. 過給応答性によるダウンサイジング率の制約

高過給化と高出力密度化によるダウンサイジング率の向上が低燃費化の鍵であり，開発トレンドとなってきているが，過給エンジンは設定過給圧の変更により比較的容易に出力密度を向上できることから，出力密度の向上には大きな課題を伴わない．しかし，過給エンジンの過渡応答性に着目すると，高過給化によるダウンサイジング率の向上はドライバビリティによる制約を受ける．Fig. 3に可変ベーン機構付きシングルターボチャージャを持つ直列４気筒エンジンにおける過給圧応答時間をコンター図で示す．このコンター図は，各エンジン回転数で無負荷状態から全負荷までステップ状に負荷を移行させた時の過給圧が設定過給圧まで到達するのに要する時間を示している．この結果から，エンジン回転数が低い場合ほど過給圧の応答が遅いことがわかり，例えば，エンジン回転数1500rpmでは，無負荷状態から全負荷の目標過給圧(曲線A)までの到達時間が 1.5 秒程度を要している．ここで，さらにダウンサイジング率を30%程度向上した場合を想定して，目標過給圧を曲線(B)

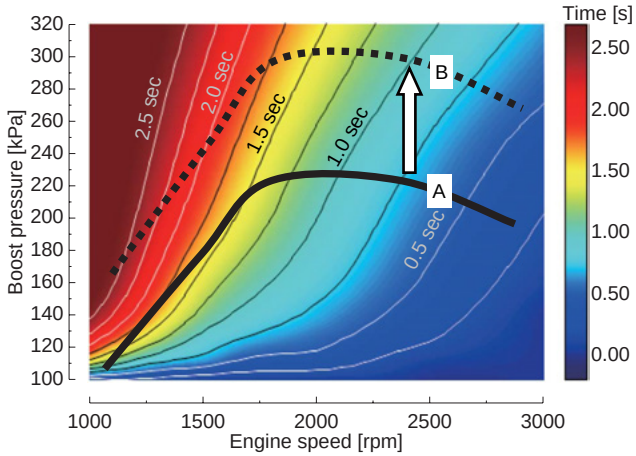


Fig. 3 Boost response time

まで上げた場合は，同じ 1500rpm では目標過給圧到達時間が２秒程度となり，約33%過給圧の応答性が低下することがわかる．したがって，高過給化によるダウンサイジング率の向上には過給応答性改善が重要な課題となる．

３．ターボチャージャの数値モデル化

3.1. 数値モデル化の必要性

一般的に，ターボチャージャ付エンジンはエンジン，タービンおよびコンプレッサが機械または流体エネルギーを介して回帰的に構成され，運転時には各構成要素間でエネルギー的なバランスを保ちながら動作する．そのため，測定可能な物理量が限定された実機解析においては応答遅れ時間などの代表的な物理量の評価はおこなえるものの，回帰的な各影響因子間でのエネルギーの授受や相互作用などの挙動を把握することは困難である．これらの解析を実施し，過給応答遅れの詳細なメカニズムを解明するには数値モデルの適用が有効であると考えられる．

3.2. ターボチャージャの数値モデル概要

Fig. 4 にターボチャージャ付エンジンのシステム構成図を示す．システムは大きく分けて，コンプレッサ，エンジン，タービンの三つの要素と，各要素をつなぐ，配管，エアクリーナ，インタークーラ，EGRバルブ，アフタトリートメント部品で構成されている．数値モデルの作成にあたり，ターボチャージャについては式(１)―式(３)で表わされる物理モデルを作成し，吸気･排気の各要素については式(４)のように流量係数を用いたモデルで構成される．また，各要素間については，エネルギー保存則と質量保存則を満たすようにモデルを構成した．

次に，本題であるターボチャージャの数値的な取扱いについて述べる．ターボチャージャの支配方程式は，式(１)で表すことができる．

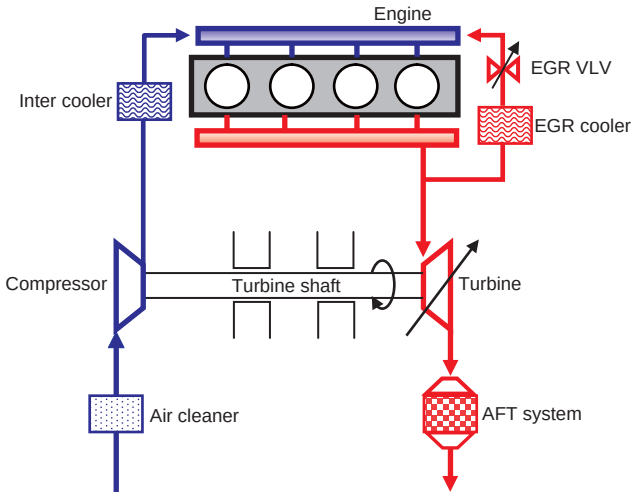


Fig. 4　Schematic diagram of turbocharger system

$$\frac{dN_{TC}}{dt} = \frac{60}{2\pi I_{TC} N_{TC}} \left(P_T - P_C - P_f \right) \qquad (1)$$

P_T：Turbine effective work [W]
P_C：Compressor output work [W]
P_f：Mechanical loss [W]
N_{TC}：Shaft speed [rpm]
I_{TC}：Moment of Inertia [kg･m²]

ここで，タービン回収仕事(*Pt*)とコンプレッサによる過給仕事(*Pc*)は，入口，出口境界条件と単体定常試験結果から求まる流量，圧力比特性と効率特性から，それぞれ，式(２)，式(３)によって求めることができる．

$$P_T = m_T \eta_T c_P T_3 \left(1 - \pi_t^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} \right) \qquad (2)$$

m_T：Working gas mass flow rate [kg/s]
η_T：Turbine efficiency [−]
c_p：Constant pressure specific heat [J/kg/K]
T_3：Working gas temperature [K]
π_t：Expansion ratio [−]
γ：Specific heat ratio [−]

$$P_C = \frac{1}{\eta_C} m_C c_P T_1 \left(\pi_c^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right) \qquad (3)$$

m_C：Air mass flow rate [kg/s]
η_C：Compressor efficiency [−]
T_1：Inlet air temperature [K]
π_c：Pressure ratio[−]

$$Q = C_D A \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \qquad (4)$$

Q：Volumetric flow rate [m³/sec]
C_D：Flow coefficient [−]
A：Cross section area [m²]
Δp：Pressure drop [kPa]
ρ：Density [kg/m³]

また，単体定常試験により求められるタービンとコンプレッサの流体的特性は，一般的に測定装置の制約により過渡解析に必要な条件範囲を網羅していないことから，本研究では，独自の線形化アルゴリズムを利用して，それぞれの特性をパラメータ化している．

また，数値モデルのプラットフォームには Math Works 社の MATLAB SimuLink を利用しており(Fig. 5)，Fig. 4 で示したターボチャージャ付エンジンのシステム構成を反映した．

3.3. 数値モデルの検証

作成した数値モデルの検証をおこなうため，可変ベーン機構付きシングルターボチャージャを持つ直列４気筒 2.2L エンジンの数値モデルを作成し，数値モデルにより予測されたターボチャージャの挙動を実車の挙動と比較した．

Fig. 6 および Fig. 7 に FTP75[11]走行時における過給圧とターボチャージャ回転数の実測値と予測値の比較結果を示す．双方の結果とも，作成した数値モデルより得られた予測値は実測値を比較的高い精度で再現できていることが確認できる．また，Fig. 6に注目すると，実車において過給圧が目標過給圧に対して遅れる現象が確認できるが，数値モデルによって推定された過給圧はこの現象をうまく再現できている．本研究では，この数値モデルを用いることで過給圧の応答遅れの原理解析を実施した．

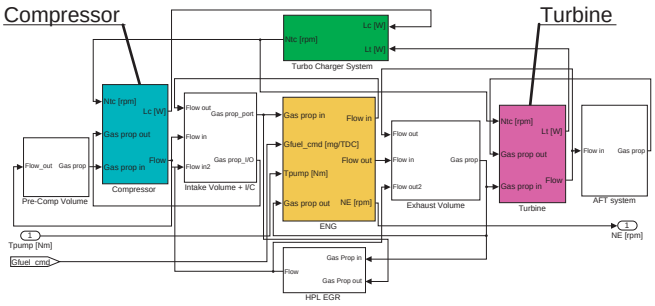


Fig. 5 Schematic diagram of Simulink model

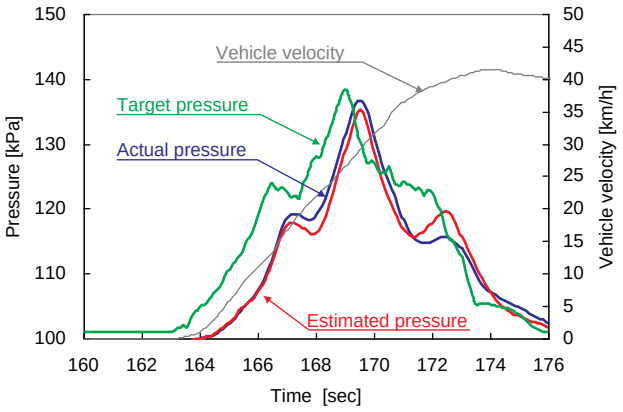


Fig. 6 Comparison of actual and estimated intake manifold pressure at FTP75

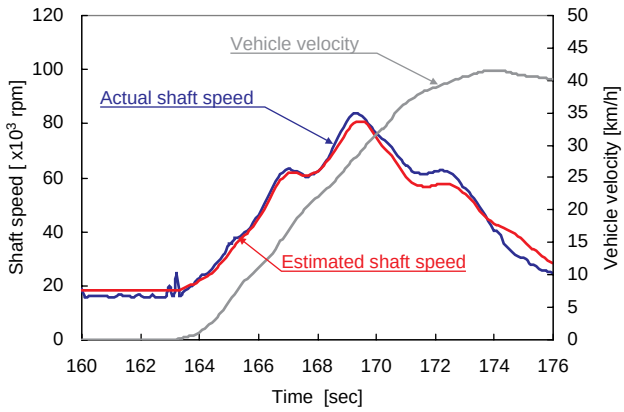


Fig. 7 Comparison of actual and estimated turbine shaft speed at FTP75

4．数値モデルを用いたターボラグ原理解析

本章では構築したターボチャージャの数値モデルを用いて過渡運転時における過給圧の応答遅れ(ターボラグ)の発生原理を解析する．解析には，精度確認の取れた，可変ベーン機構付ターボチャージャを装備するディーゼルエンジンの数値モデルを用い，特にターボチャージャの過渡応答性の影響が大きい低エンジン回転数領域における解析をおこなった．

4.1. 過給応答遅れの推定結果

Fig. 8 および，Fig. 9 にエンジン回転数が 1750 rpm の状態で，アクセル開度を 10%から 80%までステップ状に増加させたときの過給圧とターボチャージャ軸回転数の時間推移を示す．Fig. 8に表したように，アクセル開度の増加に対し目標過給圧もステップ状に変化しているが，実際の過給圧はこの変化に追従しておらず，1.37 秒の遅れを伴って目標過給圧に到達している．同様にターボチャー

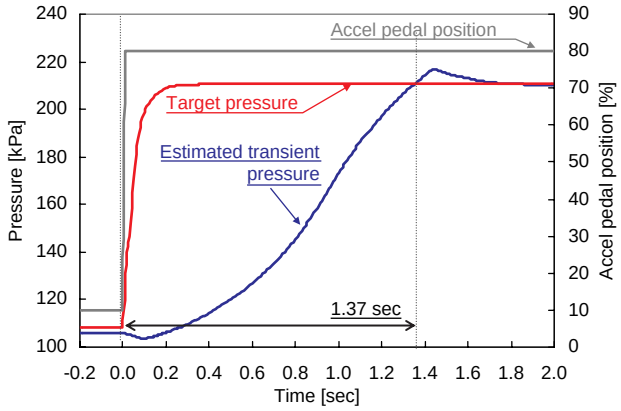


Fig. 8 Estimated intake manifold pressure response under step load condition at 1750 rpm

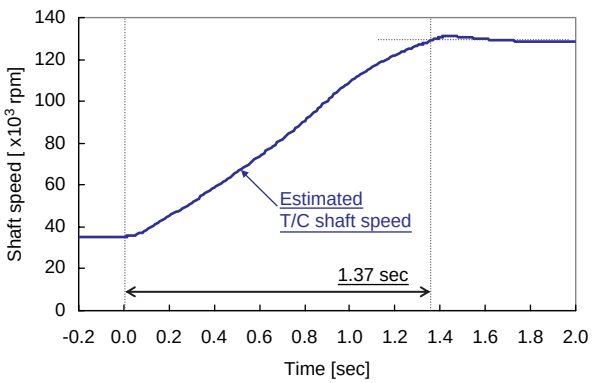


Fig. 9 Estimated shaft speed response under step load condition at 1750 rpm

ジャ軸回転数も 1.37 秒の遅れを持って定常値へ推移することがわかる．

4.2. 過渡運転時におけるエネルギー収支

ターボチャージャは排気エネルギーを吸気圧縮エネルギーに変換する一種のエネルギー変換器であるから，この遅れ挙動を解析するには，ターボチャージャ各部でのエネルギー収支を観測すると都合が良い．Fig. 10 に前節と同じ条件で過渡運転をおこなった際のターボチャージャ各部における仕事と各損失を数値モデルより推定した結果を示す．

Fig. 10 より，過渡運転時には複数の要因により定常時に比べ有効過給仕事が減少していることがわかる．過渡から定常への遷移時間のほぼ中間地点であるアクセル開度変化から 0.6 秒後断面で評価すると，定常時に比べ過渡時には有効過給仕事が約 91%程度低下している．一般的に過給応答遅れの要因として挙げられる軸慣性損失と吸気容積充填損失の二つの「過渡損失」による有効過給仕事の低下はそれぞれ，14.3%，12.3%となっており，この二つの損失だけでは，有効過給仕事低下の全容を説明することはできない．過渡時における有効過給仕事の低下に最も大きく寄与しているのはタービン回収仕事の低下で，約 64.4%の有効過給仕事低下の要因となっており，過渡時におけるタービンの挙動が過給圧の過渡応答性に大きな影響を与えていることがわかった．

4.3. タービン回収仕事低下のメカニズム

過渡時におけるタービン回収仕事の低下の要因は熱力学的な関係より導出されるタービン回収仕事の式(2)を用いると六つの要因が挙げられる．この内，定圧比熱と比熱比は想定される温度範囲では大きな変化を示さないから，過渡時におけるタービン回収仕事の低下要因はタービン作動ガス量，タービン効率，タービン膨張比，タービン流入ガス温度の四つの要因に絞り込むことができる．ここでは，定常運転時と過渡運転時で，この四つの物理量がアクセル開度変更後0.6秒断面でどのように変化しているかを比較し，タービン回収仕事の低下のメカニズムを探った．

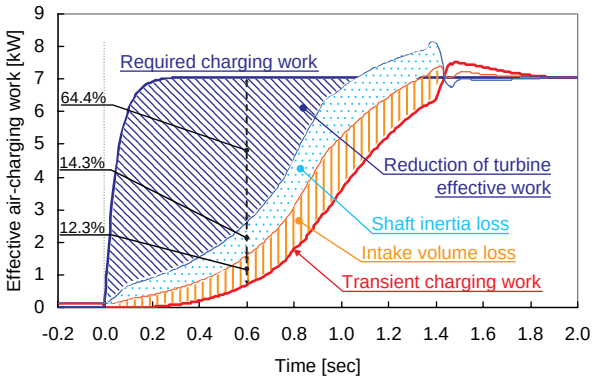


Fig. 10 Analysis of energy distribution in turbocharger system

Table 1 Variation of turbine work-related parameters under transient condition

		Steady state	Transient	Variation [%]
Mass flow rate	[kg/s]	0.0992	0.059	-41
Turbine efficiency	[%]	70.0	42.1	-39.9
Expansion ratio	[-]	1.98	2.04	+3
Inlet gas temperature	[K]	899	981	+9

Table 1 で示すように，過渡運転時には定常運転時に比べ，タービン作動ガス量とタービン効率に大きな低下が生じていることがわかる．

まず，タービン作動ガス量に注目すると，過渡時には，タービン作動ガス量は定常時に比べて 41%程度値が落ち込んでいることがわかる．タービン作動ガス量の低下は，すなわちエンジン吸気量の低下であり，過給圧の応答遅れによるエンジン充填効率の低下が原因であることが容易に推測されるが，さらに過給圧の応答遅れの要因にさかのぼると，一巡してタービン作動ガス量の低下に戻ってきてしまう．これは，Fig. 11 で示すように，タービン作動ガス供給源(エンジン)，排気エネルギー回収器(タービン)，吸気圧縮器(コンプレッサ)の間で回帰的にエネルギーが循環することに起因する．このようなシステムでは，エネルギーフローの一部でエネルギーの低下が発生すると回帰的に影響が伝播し，系全体に流れるエネルギー量が低下する．

次に，過渡運転時におけるタービン効率の低下に着目する．過渡運転時には定常時に比べて，0.6秒後断面で39.9%の効率低下が認められた．また，Fig. 12 に示すタービン効率の時間推移を解析すると，タービン効率は加速開始時に急激に落ち込み定常状態に近づくにつれて効率が回復していく様子が見て取れる．

この現象を解析するためには，タービンの流体力学的な性質について考察する必要がある．Fig. 13 に示すように，等修正回転数におけるタービン効率は膨張比に対して山型

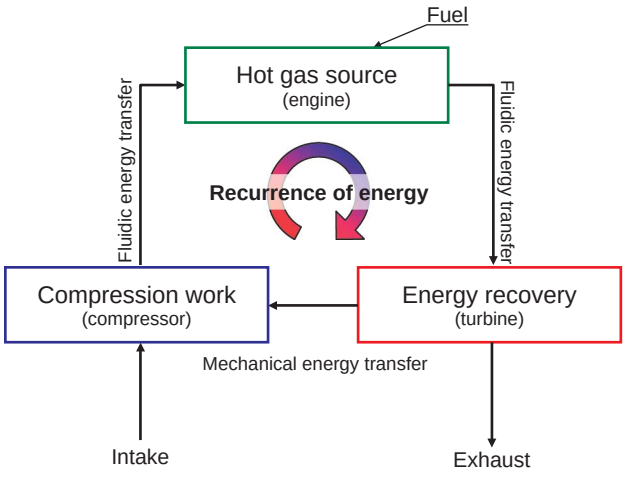


Fig. 11 Schematic diagram of recurrent energy flow in turbocharger system

の特性を持っている．これは，Fig. 14に示すように，タービンの幾何学的な形状から，タービン翼に対して作動ガスの最適な流入角(設計流入角)が存在するためで，タービン翼の周速に対して，作動ガスの等価流入速度を示す全エンタルピ速度 C〔式(5)〕が速すぎても，遅すぎてもタービンの効率は低下する．

$$C = \sqrt{2c_p T_3 \left(1 - \pi_t^{\frac{1-\gamma}{\gamma}}\right)} \qquad (5)$$

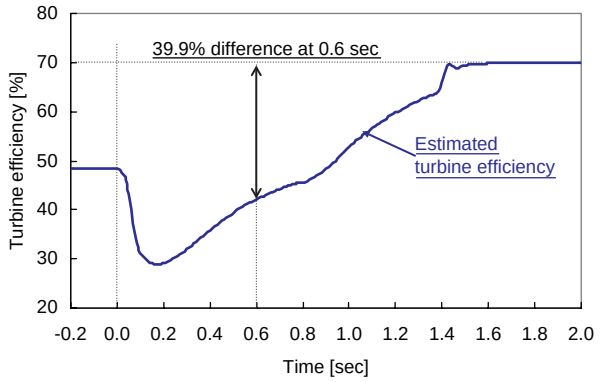


Fig. 12 Behavior of turbine efficiency under transient condition

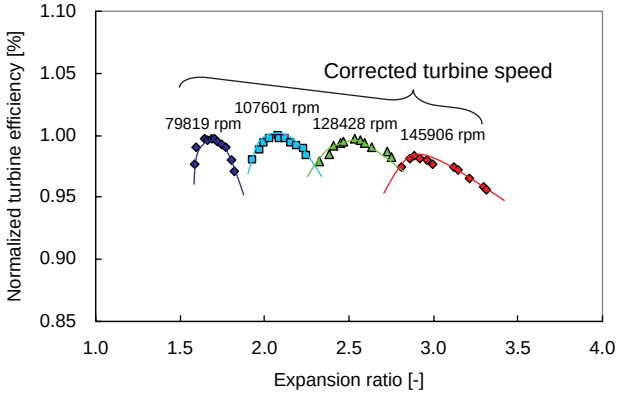


Fig. 13 Expansion ratio-dependency of turbine efficiency

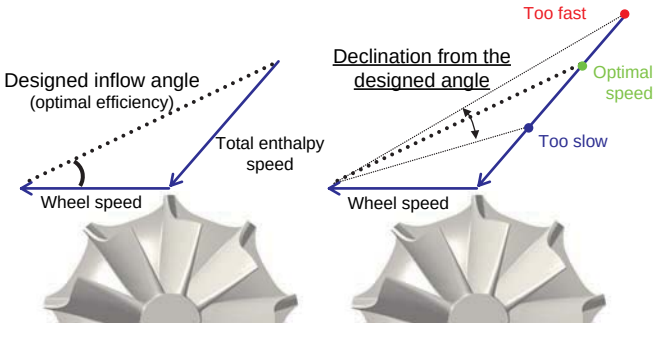


Fig. 14 Relationship between turbine efficiency and speed triangle

一般的に，タービン周速を流入ガスの全エンタルピ速度で割った値をBlade Speed Ratio(BSR)[12]と呼び，Fig. 15で示すようにBSRを用いるとタービン効率をタービン回転数に対して正規化することができる．ここで，過渡運転時のタービン BSR の時間推移(Fig. 16)を見ると加速開始時にBSRは極小値を取り，定常状態に収束するにつれてBSRは1に近づいていくことがわかる．

これは，エンジン運転負荷増大時に排気圧力は可変ベーン機構により比較的早く上昇するため，タービン作動ガスの全エンタルピ速度は急速に増加するが，タービン翼の周速はタービン軸慣性量の影響により徐々に上昇することから(Fig. 9)，過渡的にタービン翼周速に対する全エンタルピ速度が大きくなる．すなわち，過渡運転時には BSR は減少し，タービンは効率の低い領域で作動することを意味している．Fig. 16 からアクセル開度変更後 0.6 秒後の断面でのタービン BSR は 0.764 で，Fig. 15 からその BSR でのタービン効率は約 40%低下することが読み取れる．この値は過渡時のタービン効率の低下と一致することから，この現象はタービン作動点(BSR)の変化から説明できることがわかる．

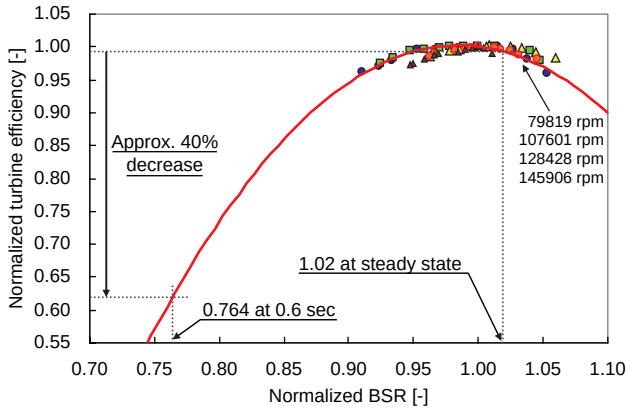


Fig. 15 Normalization of turbine efficiency in relation to turbine speed

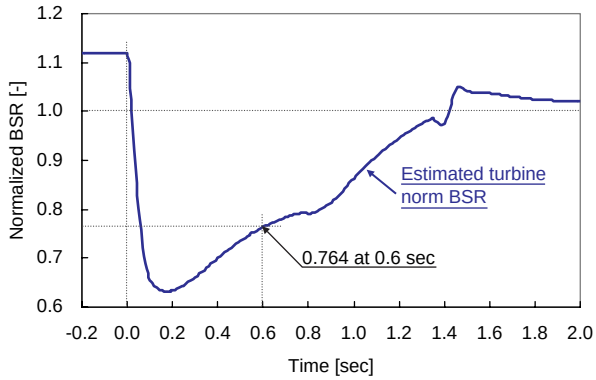


Fig. 16 Behavior of turbine BSR under transient condition

5．遅れ要因の相互作用

前述したように，一般的なターボチャージャ付エンジンではエンジン，タービン，コンプレッサが機械，または，流体エネルギーを介して回帰的に結合されており，ターボチャージャはこの回帰モデルのエネルギーバランス点で作動している．これまで，過給応答遅れの要因として「過渡損失」，「タービン作動ガス量の低下」，「タービン効率の低下」の三つの要因を挙げた．これらの要因は単独で影響を及ぼすだけでなく，相互に影響が伝播する．したがって，過給遅れの全容を把握するためには，これらの相互関係を明らかにする必要がある．本章では，遅れ要因の相互作用の一例を挙げると共に，過給圧応答遅れ要因とその因果関係を関係図にまとめる．

5.1. タービン効率低下による作動ガス量低下の誘起

まず，「タービン効率の低下」による過給圧の上昇遅れ現象の経緯をたどる．Fig. 17に示すように，ターボチャージャの過渡運転時には，急速な排気圧力の立ち上がりにより，タービンBSRが落ち込み，タービン効率，およびタービン回収エネルギーの低下が発生し，最終的に過給圧の上昇遅れに至る．ここで，過給圧の上昇遅れは，エンジン吸気量と「タービン作動ガス量の低下」につながる．つまり，「タービン効率の低下」は結果的に，もう一つの遅れ要因である「タービン作動ガス量の低下」を誘起していることがわかる．

5.2. 過給圧応答の遅れ要因と要因関係図

ここでは，二つの結合した回帰モデルを持つ重回帰モデルを用いて，これまでに得られた過給応答遅れの要因と各要因の因果関係を説明する．

Fig. 18にターボチャージャの応答遅れに関する重回帰モデルを示す．このモデルは遅れの起点となる「過渡損失」モデルと「タービン作動ガス量の低下」，「タービン効率の低下」の二つの回帰モデルによって構成される．図中には，過給応答遅れに関連したターボチャージャ内部の物理現象とその因果関係を矢印でつないで示す．

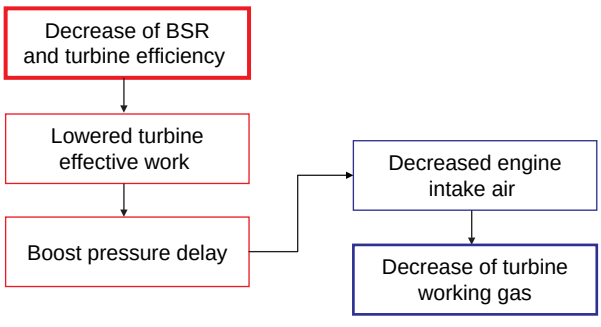


Fig. 17　Propagation of delay factors

モデルの説明は，エンジンが定常状態から高負荷状態に移行し，過給応答遅れが生じている状態から遅れが解消するまでの状態を想定し順を追って説明する．

まず，定常状態では，過給圧の遅れは発生していない．この状態から加速状態に移行すると，初めに「過渡損失」である軸慣性損失と吸気容積充填損失が発生する（図中A）．これを原因として，ターボチャージャ軸回転数の立ち上がり遅れが発生し，タービンの流体力学的な性質により「タービン効率の低下」が発生する（図中B）．また同時に，吸気容積充填損失により過給圧の立ち上がりが遅れ「タービン作動ガス量の低下」が発生する（図中C）．これらの遅れ要因は，図に示したようにそれぞれ回帰的な動作をする．ここで，それぞれの影響はタービン回収仕事の低下を引き起こすから（図中D），これら二つの遅れ要因は「タービン回収仕事の低下」の項を介してエネルギー的に結合されているのがわかる．

加速開始時には，軸回転数，過給圧共に定常値から大きく離れた値となるので，各遅れ要因は影響を及ぼし系全体に流れるエネルギー量が低下する．それによって，大きな過給応答遅れが発生するが，時間の経過と共に，積分要素である軸回転数と過給圧は上昇して行き，最終的には定常の値に収束し，これらの要因を起点に発生していた「タービンの作動ガス量の低下」と「タービン効率の低下」の遅れ要因は解消するため，ターボチャージャの運転状態は定常作動点に到達する．

以上のように，過給圧応答遅れの要因には，ターボチャージャの軸慣性量と吸気系容積による物理的な遅れ要素に起因した遅れと，これらの一次要因による遅れを起点として引き起こされるターボチャージャの作動点変化により，タービン効率とタービン作動ガスが低下する二次的な要因がある．また，二次的要因である「タービン効率の低下」と「タービン作動ガス量の低下」は「タービン回収エネルギー」の項を介して相互に影響が伝播することがわかった．

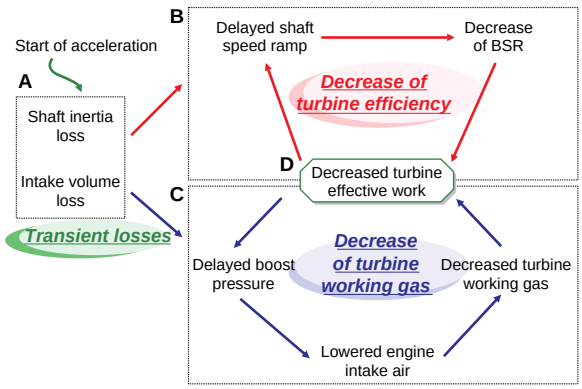


Fig. 18　Multiple recurrence model of turbocharger delay mechanism

6．まとめ

本研究において，ターボチャージャの過給応答遅れの原理解析を実施するため，ターボチャージャの数値モデルを構築した．また，構築した数値モデルは実車の過給応答特性を良好に再現できていることを確認した．

数値モデルを用いた過給応答遅れの原理解析を実施し，以下の解析結果を得た．

（1）過給応答遅れの主要因は，「過渡損失」，「タービン作動ガス量の低下」，「タービン効率の低下」の三つの要因により引き起こされている．

（2）「タービン作動ガス量の低下」と「タービン効率の低下」の二つの要因は回帰的な挙動を示す．

（3）遅れの三つの要因はエネルギー的に結合されており，相互に影響を及ぼし合う．

以上の数値解析結果を踏まえて，ターボラグとは，「過渡損失」である軸慣性損失と吸気容積充填損失を一次要因として生じる遅れと，さらに一次要因を起点とした「タービン作動ガス量の低下」と「タービン効率の低下」の二次要因による遅れの複合的な要因によって発生する過給圧の応答遅れであるという結論を得た．

参考文献

（1）http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha07/09/090702_.html, 2007/7/2

（2）http://ec.europa.eu/environment/air/transport/co2/co2_home.htm, 2008/12/23

（3）http://www.nhtsa.dot.gov/portal/site/nhtsa/menuitem.d0b5a45b55bfbe582f57529cdba046a0/, 2009/6/9

（4）Heywood, J. B., Kasseris, E., P.: Comparative Analysis of Automotive Powertrain Choices for the Next 25 Years, SAE Paper, 2007-01-1605(2007)

（5）Steidten, T., Rauscher, M., Muenz, S.: Measures to improve the transient behavior of turbochargers, ATK2008, p. 427-444(2008)

（6）Reigner, J., Zahlmann, S., Eiser, A., Fitzen, M., Kaeufler, P., Vehreschild, K., Wolf, R.: The AUDI 3.0L TFSI - The boosting system from a design and thermodynamic perspective, ATK2008, p. 255-283(2008)

（7）Barker, L., Meek, D., Martin, J.: The SuperGen Electro-Mechanical Boosting System: Concept and Experience with the First Prototypes, ATK2008, p. 343-358(2008)

（8）Mattes, W., Steinparzer, F., Nefischer, P., Prashak, N.: New BMW 4-Cylinder Diesel Engine with Dual Stage Turbocharging, 16th Aachen colloquium(2007)

（9）http://eur-lex.europa.eu/Result.do?direct=yes&lang=en&where=EUROVOC:000867&whereihm=EUROVOC:testing, 2009/6/9

（10）Fraser, N., Blaxill, H., Lumsden, G., Bassett, M.: Challenges for Increased Efficiency through Gasoline Engine Downsizing, SAE Paper, 2009-01-1053(2009)

（11）http://www.epa.gov/oms/sftp.htm#cycles, 2009/6/9

（12）Baines, N. C.: Fundamentals of Turbocharging, Concepts NREC, p. 94-95(2005)

■著　者■



松本貴希



朴　辰洛



織田信之

本田技術研究所　論文委員会

委員長	杉本　富史	四輪R&Dセンター
副委員長	水村　　榮	二輪R&Dセンター
委員	山下　　剛	四輪R&Dセンター
	漆山　雄太	四輪R&Dセンター
	佐藤　俊彦	四輪R&Dセンター
	加藤　幹夫	二輪R&Dセンター
	馬場　雅之	二輪R&Dセンター
	小屋栄太郎	二輪R&Dセンター
	塩見　和之	汎用R&Dセンター
	永野　敬二	汎用R&Dセンター
	藤平　　徹	基礎技術研究センター
	園田　豊隆	航空機エンジンR&Dセンター
事務局	郷土　健二	四輪R&Dセンター
	白木　晶子	四輪R&Dセンター
	小泉　伸一	二輪R&Dセンター
	杉本　康弘	汎用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

編集後記

第三者に文章で研究成果を伝えるということは容易なことではありません．本書は専門域以外の方の目に触れる機会も多く，そのため著者はいかにわかりやすく的確に伝わるかを念頭に置いて書くことが求められます．

今回も投稿いただいた著者の多くは論文の構想から始まり，幾度にもわたる推敲に時間を費やされたことと思います．特に初めて執筆された方は，一編をまとめあげる難しさを感じた方も多かったのではないでしょうか．その集大成である本書をようやく皆様にお届けできることを大変嬉しく思うのはもちろん，著者にはさらなる高みへ進むひとつの糧となればと願わざるを得ません．

最後になりますが，関係者の皆様方には業務多忙の中，多大な協力をいただきました．この場を借りて感謝の意を表します．また，歴史ある本書の編集に携わる幸運に恵まれた者として，今後も一層に質の向上を目指していかなければと身が引き締まる思いです．

（真島）

テクニカルレビューの事務局業務に携わり，早〇年．

担当となったばかりの頃は慣れない業務に戸惑う毎日だったことを思い出します．

それでもその都度なんとか発行までたどり着けたのは，著者はもちろんのこと，その関係室課の執筆指導者，論文委員や編集に携わる方など，多くの方々の協力のおかげと感謝しています．

時代が変わって世の中が便利になり，デジタル化が進んでも，この方々の協力がなければテクニカルレビューを発行することができません．

これからもテクニカルレビューに期待を寄せる方々の気持ちを忘れることなく，編集業務に励みたいと思っています．

（白木）

～今回は，本書の編集事務局からテクニカルレビューへの思いを一言ずついただきました．

Honda R&D Technical Review

©2009 株式会社 本田技術研究所（禁無断転載）

2009年9月1日　　Vol.21 No.2

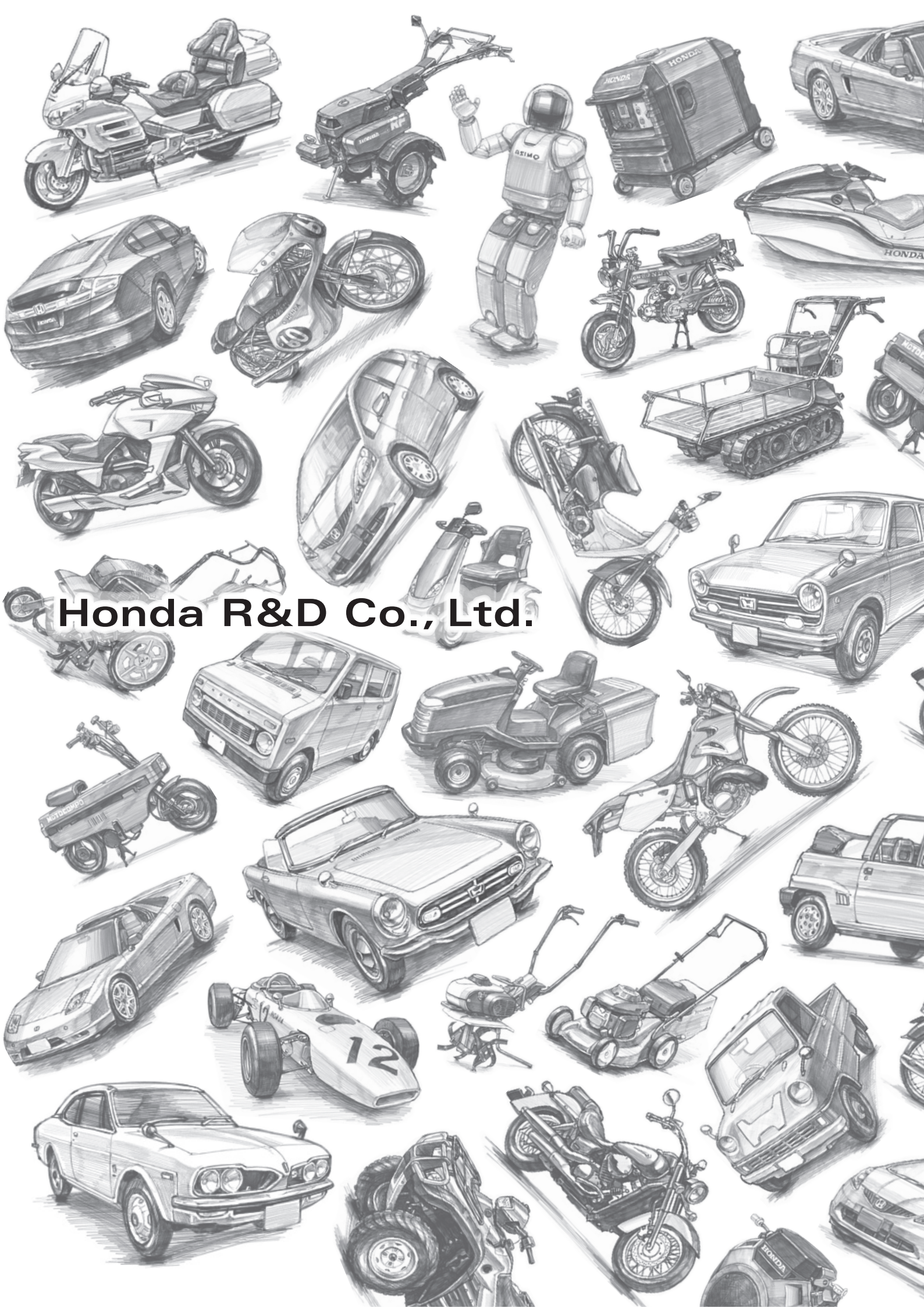
発行所　株式会社 本田技術研究所

発行人　伊　東　孝　紳

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
企画室 第４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.