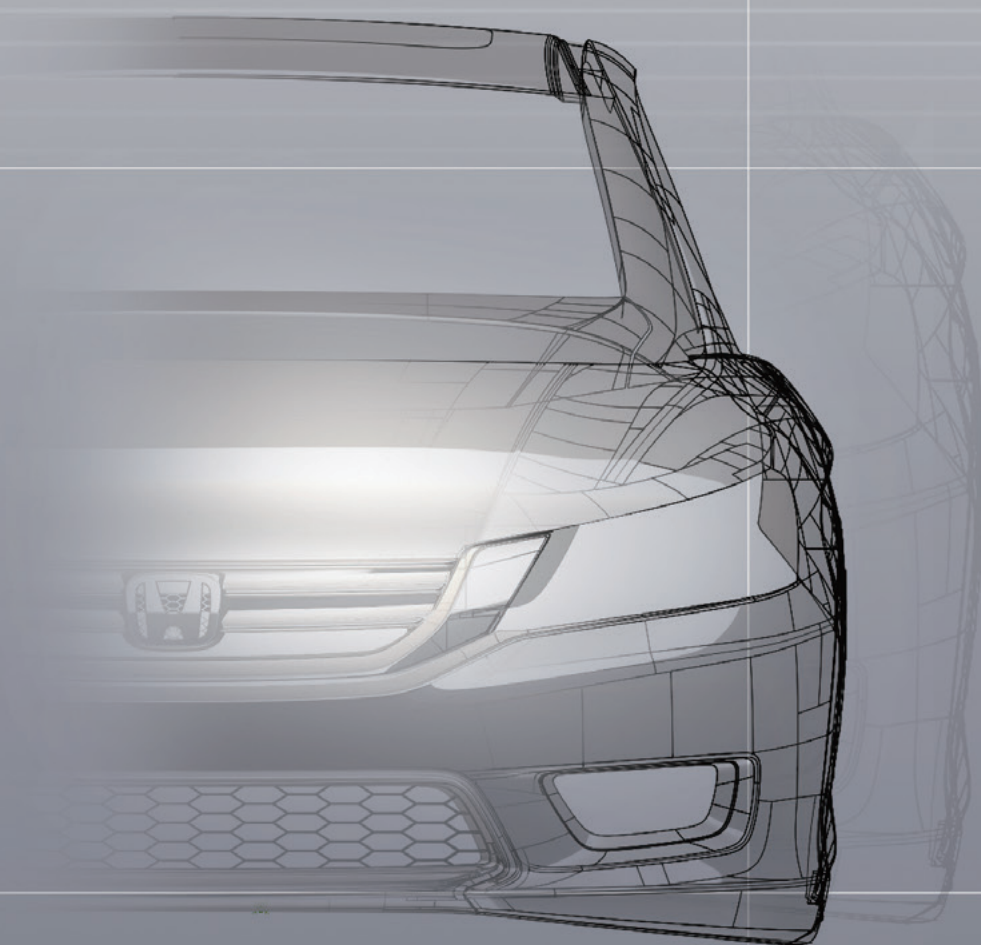
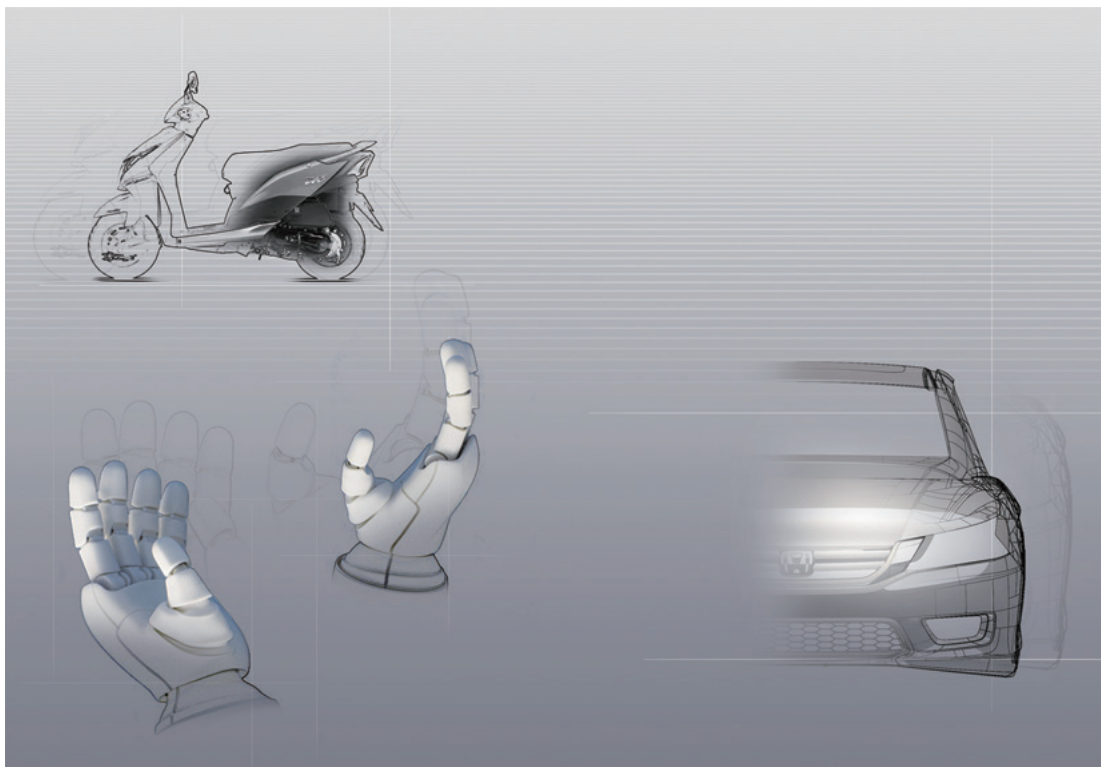


Honda R&D

Technical Review Vol.25 No.1



April 2013

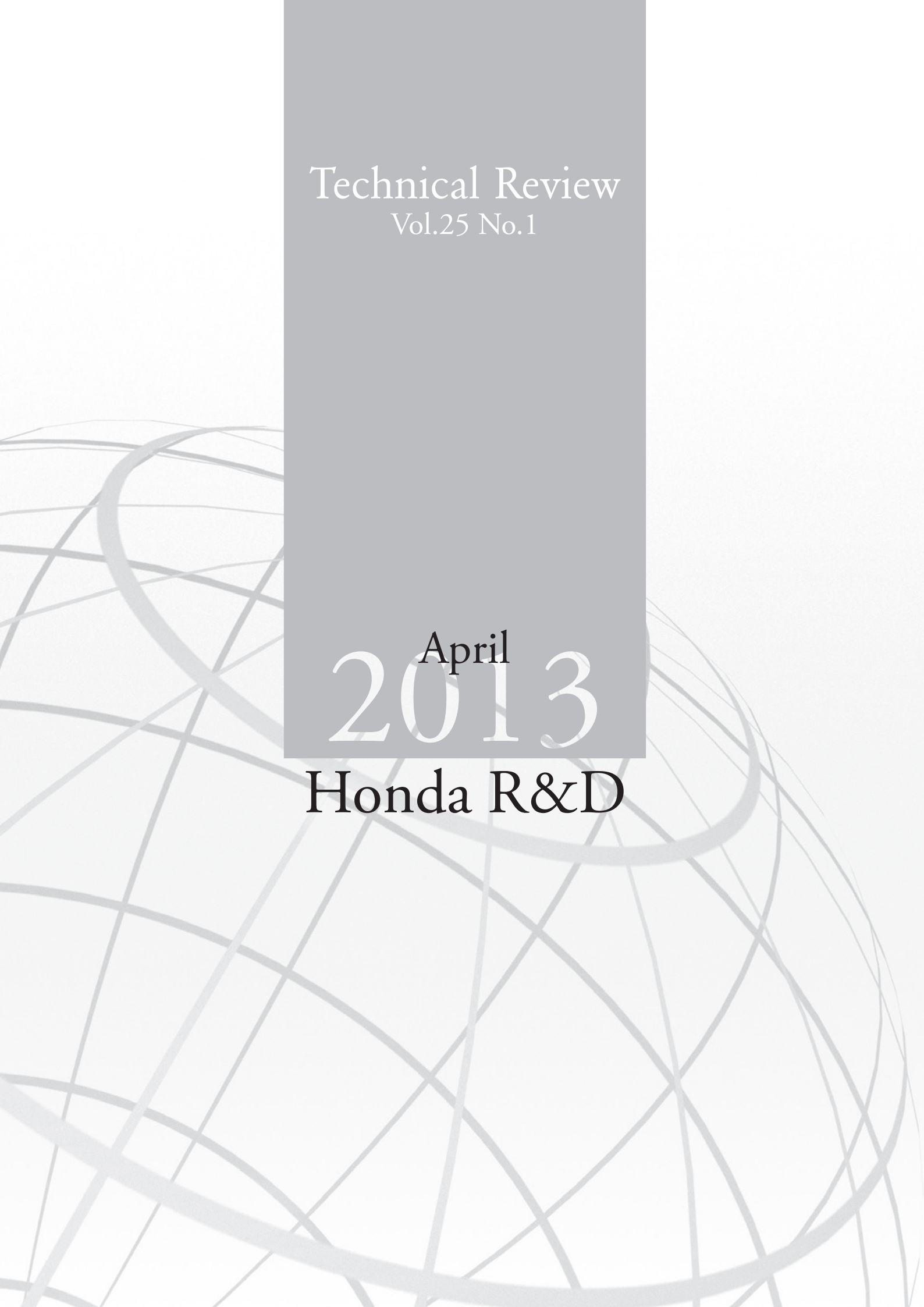


表紙の言葉

人間中心のものづくり。ホンダの現場にはこの考えが深く根付いています。
より豊かな生活のために。よりよい世界のために。
天災や経済等、たとえ厳しい状況の中でも我々は原点を忘れず最高の
ものづくりを目指します。
表紙デザインは、最新の先進技術を縦横のラインとして、今号の技術
内容イメージと組み合わせて表現しました。
ホンダから生まれた珠玉の技術の数々をご覧ください。



四輪R&Dセンター
佐川 正浩

The background features a light gray wireframe sphere. A solid gray vertical bar is positioned in the upper center, containing the text 'Technical Review' and 'Vol.25 No.1'. Below this bar, the word 'April' is written in a small serif font, followed by the large year '2013'. At the bottom, the text 'Honda R&D' is displayed in a bold serif font.

Technical Review
Vol.25 No.1

April
2013

Honda R&D

目 次

技術紹介

◇ インド向け Dio の現地スタイリングデザイン開発	齋藤和彦・荒井 崇	1
◇ 新型 ASIMO のデザイン ― 人と相手をし続けるための進化 ―	輿石 健	7
◇ 2013 年モデル US Accord の開発	河野昌明・津嶋広通・秋元幸雄 嶽 和秀・原田紀之・長岡 進・江口美彦	14
◇ Honda Moto LINC の開発	片山 睦・今野健志・丸山一幸 星 智弘・仙野雅治・片岡雄一	23
◇ EV 用バッテリーシステムの開発	姉川彰博・山本康一	30
◇ EV 用バッテリーレサビリティシステム開発	武政幸一郎・内田 翼・鶴谷泰介 富永由騎・佐藤圭嗣	35
◇ FIT EV 用充電システムの開発	村上友厚・貞野 計	41
◇ 電動サーボブレーキシステムの開発	大久保直人・西岡 崇 赤峰宏平・波多野邦道	47
◇ ダブルアームチェーンテンショナシステムの開発	関 雅夫	52
◇ 大型船外機用ギヤケースの開発	井手真一・吉ヶ崎 剛 片桐信近・清水真吾	57
◇ 機能拡大シートベルト E-プリテンショナの開発	大舘正太郎・竹村直敏	62
◇ ハイブリッドドアにおける低弾性シーラを用いた水密構造による異種金属接触腐食の防止	木村昇士・和泉浩一郎・村松佑紀	67
◇ サブフレームへ適用可能な FSW を用いたスチールとアルミニウムの連続接合技術の開発	宮原哲也・佐山 満・矢羽々隆憲 大浜彰介・畑 恒久・小林 努	71
◇ サスペンション耐久条件設定のための路面入力予測技術の構築	下平貴政・片岡俊介 森 理史・横山真吾	78
◇ 国内仕様ソーラー水素ステーションの紹介	武内 淳・中沢孝治・吉田喜祐 伊藤 潤・岡部昌規・山下郁也	85

論文

- ◇ 素反応シミュレーションを用いたガソリンエンジンにおける低回転自着火の解析 中島 進 91
- ◇ リーン NO_x 触媒の劣化メカニズム解明と耐久性向上 松尾雄一・石丸真也・橋本雅識
遠藤哲雄・松園義明・永田 誠 100
- ◇ ULEV50 規制対応のための鉄イオン交換ゼオライト触媒における NO_x 浄化挙動の解明
迫田昌史・佐藤尚宏・松永英樹 109
- ◇ 中性子ラジオグラフィを用いた水観察による燃料電池の発電環境最適化 千葉裕人・岩澤 力 119
- ◇ 太陽光下で利用可能な投影式2眼立体視システムの研究 青山千秋 128
- ◇ 球面ジョイントの非線形性を考慮した排気系共振応力予測技術の構築 米永和昭・井手晴夫・樋口正彦
堀井義和・中川博史 136
- ◇ 油圧式電子制御 AWD システムにおける油温判別手法の構築 吉野弘規 143
- ◇ 湿式多板クラッチ実働時の自励振動挙動予測技術の構築 星 崇司・南中道 隆・東上圭司
田伏 功・美浦一葉・園田修三 149
- ◇ ドッグクラッチ式トランスミッションにおけるドッグ歯の摩耗に関する研究 牧田宏之 156
- ◇ CFD 解析を用いた小型高速滑走艇における船外機の燃費と動力性能予測の研究 栗岡俊介 166
- ◇ Mg₂Si 析出強化を活用したディーゼルシリンダヘッド用再生塊アルミニウム合金の開発
伊達木孝輔・高木卓也・生友良平 174

CONTENTS

Introduction of new technologies

◇ Local Styling Design of Dio for Indian Market.	Kazuhiko SAITO・Takashi ARAI	1
◇ Styling and Design of New ASIMO – Evolution for Continuing Engagement with People –	Takeshi KOSHIISHI	7
◇ Development of 2013 Model Year U.S. Accord	Masaaki KAWANO・Hiromichi TSUSHIMA・Yukio AKIMOTO Kazuhide TAKE・Noriyuki HARADA・Susumu NAGAOKA・Yoshihiko EGUCHI	14
◇ Development of Information Services of Honda Moto LINC	Mutsumi KATAYAMA・Takeshi KONNO・Kazuyuki MARUYAMA Tomohiro HOSHI・Masaharu SENNO・Yuichi KATAOKA	23
◇ Development of Battery System for EV	Akihiro ANEKAWA・Koichi YAMAMOTO	30
◇ Development of Battery Traceability System for EV	Koichiro TAKEMASA・Tsubasa UCHIDA・Taisuke TSURUTANI Yuki TOMINAGA・Keiji SATOH	35
◇ Development of Charging System for FIT EV	Tomoatsu MURAKAMI・Hakaru SADANO	41
◇ Development of Electric Servo Brake System	Naoto OHKUBO・Takashi NISHIOKA Kohei AKAMINE・Kunimichi HATANO	47
◇ Development of Double-arm Chain-tensioner System	Masao SEKI	52
◇ Development of Gear Case for Large Outboard Motor	Shinichi IDE・Tsuyoshi YOSHIGASAKI Nobuchika KATAGIRI・Shingo SHIMIZU	57
◇ Development of New Seat Belt E-pretensioner System.	Shotaro ODATE・Naotoshi TAKEMURA	62
◇ Bimetallic Corrosion Prevention in Hybrid Doors by Means of Watertight Structure using Low-elasticity Sealer	Shoji KIMURA・Koichiro IZUMI・Yuki MURAMATSU	67
◇ Development of Steel and Aluminum Continuous Welding Technology Using FSW and Application to Subframes	Tetsuya MIYAHARA・Mitsuru SAYAMA・Takanori YAHABA Shousuke OHHAMA・Tsunehisa HATA・Tutomu KOBAYASHI	71
◇ Development of Road Input Prediction Technology for Setting of Suspension Durability Conditions	Takamasa SHIMODAIRA・Shunsuke KATAOKA Masafumi MORI・Shingo YOKOYAMA	78
◇ Introduction of Solar Hydrogen Station Installed in Japan	Jun TAKEUCHI・Koji NAKAZAWA・Nobuyoshi YOSHIDA Jun ITO・Masanori OKABE・Ikuya YAMASHITA	85

Technical papers

- ◇ Study of Low-engine-speed Self-ignition in Gasoline Engine Using Elementary Process Simulation
 Susumu NAKAJIMA 91
- ◇ Elucidation of Deterioration Mechanism and Improvement of Durability for Lean NO_x Catalyst
 Yuichi MATSUO·Shinya ISHIMARU·Masanori HASHIMOTO
 Tetsuo ENDO·Yoshiaki MATSUZONO·Makoto NAGATA 100
- ◇ Study of NO_x Reduction Behavior on Iron Ion-exchanged Zeolite Catalyst for ULEV50
 Masafumi SAKOTA·Naohiro SATOH·Hideki MATSUNAGA 109
- ◇ Optimization of Fuel Cell Generation Environment by Water Observation using Neutron Radiography
 Hiroto CHIBA·Chikara IWASAWA 119
- ◇ Projected Texture Stereo Vision System in Sunlight Chiaki AOYAMA 128
- ◇ Development of Prediction Technology for Resonance Stress of Exhaust System
 by Considering Nonlinear Properties of Spherical Joints
 Tomoaki YONENAGA·Haruo IDE·Masahiko HIGUCHI
 Yoshikazu HORII·Hiroshi NAKAGAWA 136
- ◇ Oil Temperature Classification Method for Hydraulic Electronically Controlled AWD System
 Hiroki YOSHINO 143
- ◇ Creation of Technology for Prediction of Self-excited Vibration under Operating Conditions
 for Multiple-plate Clutches Takashi HOSHI·Takashi MINAMINAKAMICHI·Keiji TOJO
 Isao TABUSHI·Kazuha MIURA·Shuzo SONODA 149
- ◇ Research on Dog Teeth Wear in Dog Clutch Transmissions Hiroyuki MAKITA 156
- ◇ Fuel Consumption and Performance Prediction in Outboard Motors for High-speed Planing Boats
 using CFD Simulation. Shunsuke KURIOKA 166
- ◇ Development of Secondary Aluminum Alloy for Diesel Cylinder Head by Mg₂Si Precipitation Strengthening
 Kosuke DATEKI·Takuya TAKAGI·Ryohei IKUTOMO 174

インド向け Dio の現地スタイリングデザイン開発

Local Styling Design of Dio for Indian Market

齋藤 和彦*
Kazuhiko SAITO

荒井 崇**
Takashi ARAI

要 旨

インドでは近年の高い経済成長と近代化に伴い、インターネットをはじめとした情報手段が身近となり、世界の情報が瞬時に手に入るようになってきている。特に若年層は先進国のトレンドに敏感で、モータサイクルやスクーターにおいても先進的なスタイリングデザインが求められるようになった。販売開始後 10 年を経過した Dio のフルモデルチェンジにおいて、インドの若者にとってあこがれであるスポーツバイクのスタイリング要素を、スクーターのフォルムの中に融合させるという手法により斬新なデザインを実現した。そしてそれは現地研究所である Honda R&D (India) Pvt. Ltd. が主体となってデザイン開発した、初のフルモデルチェンジ機種である。

ABSTRACT

Along with high economic growth and modernization, people in India can get easier access to the Internet and other means of communication to instantly acquire information from around the world. Younger people in India in particular are highly conscious of trends in the developed nations and hunt for advanced styling design for motorcycles and scooters as well. This time, the novel design was created to be applied for full model change of the Dio after 10 years since its first release, by consolidating the styling element of sporty motorcycles, which is what young folks in India are yearning for, into the styling form of a scooter. This was also the first model which experienced a full model change under the major involvement in styling design work from Indian local research and development branch of Honda R&D India Pvt. Ltd.

1. はじめに

経済成長の続くインドにおいて、二輪車の市場は 2000 年の 387 万台から 2010 年の 1182 万台へと 10 年間で 3 倍以上に拡大している⁽¹⁾。また 2011 年においても 1384 万台と前年比 117% と更なる成長を続けている。その中におけるスクーターカテゴリは、2000 年 111 万台から 2010 年 192 万台へと 10 年間で約 1.7 倍の拡大であるが、2011 年には 240 万台へと前年比 122% の伸びを見せている。

2000 年 9 月に初代 Dio (Fig. 1) は、若年層をターゲットにインド専用機種として販売開始された。当時インドにおけるスクーターは、質実剛健で実用的な家族向けの乗り物と認識されていた。また人口構成比⁽²⁾では 10 代後半から 20 代前半がもっとも多いというピラミッド構造にも関わらず、その年齢層に焦点をあてたモデルがほとんどない状況であった。

そのような市場の中、Dio は軽量コンパクトで扱いやすくスタイリッシュなデザインで、学生や働く女性に支持を受け安定した販売を続けてきた。その結果、市場で唯一の



Fig. 1 Dio 2000 model year

* 二輪 R&D センター

** Honda R&D (India) Pvt. Ltd.

スポーティなスタイリングをもつスクータとして、独自のポジションを築くことができた。しかしその後、インドは経済成長やインターネットの普及、欧米やアジアの外資系企業の進出などにより、文化やライフスタイルは大きく変貌を遂げている。特にターゲットとしている若者の志向の変化は顕著で、発売から10年を経たDioのスタイリングは新鮮味のないものと映り、市場の伸びに反し販売台数も横ばい状態となった。

2008年に同車とエンジンやフレームを共用するActiva (Fig. 2)がモデルチェンジをおこない、109 cm³の低燃費エンジンを採用したことを機に、Dioのフルモデルチェンジを現地研究所でおこなうこととなった。そこで初代モデルがターゲットとしていたインドの若者に向けたスタイリングを、改めて現代の新しい解釈で創出していくことがHonda R&D (India) Pvt. Ltd.に求められた。



Fig. 2 Activa 2008 model year

が、量販機種との部品共用などを促進することで、手の届く価格帯に設定することが可能となった。部品共用化は物流システムの脆弱なインドにおいて、サービスやメンテナンス面でも有利となる点である。

性能面では109 cm³新エンジン採用により出力が向上したため、スポーティスクータとしてトップクラスの性能を得ることになった。加えてガソリン価格が高いインドにおいて、ユーザが最も関心を示す燃費は15%も向上し、性能、燃費、価格が実利面での大きな訴求ポイントとなった。

装備面では前後のブレーキが連動して作動するCombined brake system (Combi-Brake)⁽³⁾を採用し、上級機種と比較しても遜色ないものとする事で、安全性や先進性を訴求することとなった。



Fig. 3 VFR1200F 2010 model year

2. コンセプト

インドにおける最多量販スクータのActivaは、だれにでも乗りやすく安心して購入できるモデルとしてベンチマークの地位を築いている。一方若年層には、その家族志向の保守的なデザインが理由で敬遠されている。インドの若者にとって憧れの二輪車はCBR1000RRやVFR1200F (Fig. 3)などのスポーツバイクであり、欧米の大型モータサイクル各社が続々とインドへ進出していることもそれを裏付けている。それらのバイクはたいへん高価なもので、富裕層以外にはとても手がでない商品でもある。本開発のDioでは憧れのバイクのイメージを手軽なスクータの中に実現することで、若者に訴求するということを考えた。そこから「Youngster's Honda Sporty Scooter」を機種コンセプトに定めた。Fig. 4に本開発のDioのスタイリングスケッチを示す。

若年層をターゲットとするため販売価格も重要となる



Fig. 4 Styling sketch showing “Layered design” and “Wedge shape”

3. スタイリング

3.1. スタイリングコンセプト

「Youngster's Honda Sporty Scooter」の具現化のために、若者の志向に合わせたMotorcycleと手軽なScooterの融

合を意味する「Moto-Scooter」をスタイリングのコンセプトとした。

その手法として「マス集中」「レイヤードフォルム」「ウエッジシェイプ」などのキーワードを用いて、最新 Honda スポーツバイクのイメージを取り入れることとした。具体的には VFR1200F や CBR1000RR で採用しているデザイン手法⁽⁴⁾を、スクータ向けに解釈し直し取り込んだ。

「マス集中フォルム」は、エンジン周辺にボリューム感をもち、リヤ周りを軽快に表現するという手法である。しかしボデーのボリュームがフロアを中心に前後に分かれてしまうスクータにおいては、その手法をそのまま適応することは困難である。そこでスポーツバイクのマス集中フォルムのデザインモチーフを主要な部分ごとに取り入れ、全体として「Moto-Scooter」のイメージを表現することにした。

3.2. ボデーにおける外観表現

スポーツバイクの最も特徴的な部分であるフロントカウルまわりのデザイン処理を、スクータのボデーに表現することに挑戦した。Fig. 5 に Dio 2012 年モデルの実車を示す。スクータではフロントからリヤにかけて連続性のあるデザイン処理をおこなうことが多いが、この Dio ではスポーツバイクのカウルイメージの創出のため、外観パーツをいくつかの異なる要素に分割することにした。レッグシールド部分を斜めに分割し、立体的な重なりをもたせた「レイヤード」デザインを表現した。この「レイヤード」部分により、前輪後方のボデーに当たった風を両側に逃がすといった機能を持たせている。さらに分割された部分に異なるカラーを施すことで、レイヤード部分を強調した特徴的なデザインとすることができた。

「ウエッジ」シェイプはスピード感やシャープさを感じさせる基本的な造形処理であるが、リヤボデー部にボリュームがあるスクータでは鋭いイメージを演出しにくかった。Dio では主体色となるリヤボデーカバーをコンパ

クトで鋭い「ウエッジ」形状として視覚的に独立させた。そしてフロアサイドカバーからリヤボデーカバーにかけて大胆に切り上げる形状により、軽快さとスポーティさを表現している。またフロアステップからリヤボデーカバーへつながる部分は、黒の着色樹脂パーツとすることでコントラストが強調され、視覚的なコンパクトさとボデーカバーの特徴的な形状をわかりやすいものになっている。リヤグリップは自由な形状が作りやすいアルミニウムダイカスト製とし、リヤボデーカバーと一体感がある形状により後方に伸び上がっていく「ウエッジ」形状のシルエットを構成している。スポイラのような形状にすることで、実用的な機能パーツというだけではなく、スポーティさを表現するスタイリング上の重要なパーツとしての役割を持たせた。

3.3. 機能パーツにおける外観デザイン

機能パーツの造形についてもスクータの枠にとらわれず、スポーツバイクに見られるデザイン要素や、インドユーザの志向に合わせたデザイン表現をおこなった。ヘッドライトはフロントカバーに組み込み、ボデー面との一体感のある処理とした。ヘッドライト本体は小型スポーツバイクで採用している異型デザインのリフレクタを流用し、レンズ面を専用化している。ウインカは、ヘッドライトにつながる形状とクリアレンズの採用により、シャープで個性的なフロント周りのデザインを形成している (Fig. 6)。

ハンドルカバー形状はフロントカバーの先端を尖らせた形状を反復させることで、正面や側面から見てもスピード感のあるデザインとした。カバーには通常ホーンの音の通りをよくするためにスリットをあけることが多いが、Dio では開口部がなくても十分な音量を確保するホーンの配置によって、穴のないスムーズな面形状を造ることができた。

フロントサスペンションは、乗り心地のよさに定評があるボトムリンク式を継続して採用しているが、フロン



Fig. 5 Dio 2012 model year



Fig. 6 Integrated headlight unit with turn signals

トフェンダは全体デザインに合わせた新規の形状とした。フロントフェンダのセンタ部分にエッジをたて、フロントカバー形状と呼応した面構成としている。また形状の一部はクッションユニットを保護するように下方まで伸ばし、スポーツバイクのフロントフェンダイメージを演出している。

フロントブレーキパネル横に配置されているボトムリンクカバーを、従来の目立たない存在から積極的にデザインを主張するパーツとして扱うことにした。ウエッジシェイプのデザインを施し、ボデーへのつながりを意識したダイナミックな形状にしている。

リヤ周りにおいても、スポーティでダイナミックなスタイリングを表現するために、ウインカとブレーキランプを一体化し、エッジの効いたシャープな造形のテールライトとした。価格以上の価値観を求めるインドユーザにとって、りっぱで豪華に見えることも重要な要素であるため、ウインカ内部のリフレクタをクローム仕上げとした。クリアレンズのカット形状とアンパ色のバルブの組み合わせにより、ヘッドライト周りの演出と同様に、きらびやかな印象を持った処理としている (Fig. 7)。

メータについては「Moto-Scooter」コンセプトに基づき、スポーツバイクをイメージさせる2眼のアナログ式を採用した。左側に大型の円形スピードメータ、右側にはやや小ぶりの円形フューエルメータを配置し、左右非対称の形状とすることでアグレッシブな表情をもたせた。メータダイヤルの色調も左右で異なる色を用いて非対称形状を強調するものとしている。メータを囲むハンドルカバーパネル表面にディンプル処理を施すことにより、スポーティで機能的な印象を演出している。またメータ内にもディンプルをイメージしたドットによるグラフィックを用い、パネルとの統一感のあるデザインとした (Fig. 8)。

3.4. 実用性を加味したデザイン

スクータは生活に必要な日常の移動手段であるため、Dioにおいてもスタイリングのスポーティさを表現すると同時に、実用性の向上も重要な要素として盛り込んでいる。フロア部分は幅を最大 20 mm 狭め、停車時に足が地面



Fig. 7 Integrated tail light unit

につきやすくすることで、小柄な人でも安心感を得られるように設定した。パッセンジャ用のピリオンステップは、初期モデルよりも片側で 10 mm 幅を広げ踏面の面積を増やし、より乗降しやすく安心感のある形状にしている。このステップは機能的でありながらスタイリングの一部として積極的に活用するために、ボデーから生えたウイングのような一体感のある形状のデザイン処理とした。フロア全体の角度は、初代モデルでは 13 度の傾きをもってせり上がっていたが、これを 8 度として、よりゆったりとした自然な姿勢で乗ることができるように配慮した。またシート前方下にはフックを装備し、かばんや買い物袋などを手軽にさげられるようにした。

インドのユーザにとって複数乗車が日常的なことであるため、後席の居住性も大事な要素である。特に女性の場合、サリーなどのインド独自の服装が一般的で、シートに跨って乗ることができないため、横座りで乗る頻度も多くなっている (Fig. 9)。そこでシート座面幅は家族向けスクータの Activa 並みとし、座面のせりあがり角度を 3-4 度と設定



Fig. 8 Concept sketch of asymmetrical meter panel design



Fig. 9 Female passengers in saris

することで乗りやすい形状とした。リヤグリップは横座り姿勢でも持ちやすく、小さな手の女性でも違和感なく握れる断面形状としている。

シート下のボデー内部には初代モデルよりも大きい 18 L のトランクスペースを確保した。乗車時には身の回りの小物やバックを、駐車時にはフルフェイス型のヘルメットが一つ収納可能な容量となっている。

また、路面状況がよくないインドではタイヤのパンクの頻度も高く、路肩で修理をおこなう光景もよく見られる。よって容易なパンク修理のために、リヤホイールを簡単に外せることも重要なポイントとなる。Dio においてもマフラーを外すことなくリヤホイールの脱着ができる構成を継承し、修理が簡便におこなえるような仕様としている。加えてチューブレスタイヤを採用することで、パンク時のリスクが低減されている。

3.5. カラー表現

カラーバリエーションは、定番といわれるカラーに加え、若者に向けた Dio ならではのチャレンジングなカラーを含めた 5 色設定とした (Fig. 10)。インド市場においては、定番カラーとして黒やダークシルバーなどの無彩色系が多く機種に設定されている。Dio ではターゲットを若者層としていることから、ヨーロッパの四輪車などで注目されている艶消しカラーに着目し、マットアクシスグレイメタリックを採用した。インドでスクータに艶消しカラーを適応するのは初めての試みで、先進性を印象付けるものとなった。

赤については VFR1200F のカラーイメージを分かりやすく取り入れた、スポーツレッドとフォースシルバーメタリックの組み合わせを採用した。Honda スポーツバイクとの統一したイメージカラーとすることで、Dio のスポーティさを強調している。

白は Acura で採用されて以降、インドの二輪車ユーザーに急速に人気が出てきているカラーである。Acura と共通のパールサンビームホワイトを Dio にも採用することにしたが、単色ではエレガント過ぎる印象になるため、



Fig. 10 Color lineup sketch by 3D-CG

マットアクシスグレイメタリックとの組み合わせによる 2 トーンカラーとし、スポーティさとワイルドさを加味している。

緑系は近年インドの小型スポーツバイクで使用されてきているカラーで、街中においても存在感のあるキャンディパームグリーンを採用した。遠くからでも認識できる彩度の高い色である。

五番目の色としては、光の強さや角度により色の変化が楽しめるレブロンバイオレットメタリックを採用した。紫に近い色調だが機種のねらいである若者向けのインパクトの強いカラーである。

ストライプはあえて採用せず、クローム仕上げの「Dio」ロゴの立体エンブレムと、コンセプトを示す「Moto-Scooter」マークのみを貼付し、個性的なボデー形状自体を見せる構成とした。Fig. 11 に、ターゲットユーザと実車を示す。



Fig. 11 Target user and the Dio 2012 model year

4. おわりに

拡大するインド二輪車市場では、従来の価値観による家族向けの実用的なモデルばかりではなく、若年層をターゲットとしたモデルが他社からも投入されはじめた。それらのモデルにはトレンドを牽引できるようなデザインが求められる段階に入ってきている。Dio では最新 Honda スポーツバイクのスタイリング要素をスクータのフォルムの中に融合することで、先進的なデザインを創出することができた。そしてこのデザインをインドの地から発信できたことは、今後の本格的な現地開発への大きな第一歩となった。

参考文献

- (1) <http://www.siamindia.com/scripts/domestic-sales-trend.aspx>, 2012/9/2
- (2) http://www.censusindia.gov.in/Census_Data_2001/Census_data_finder/D_Series/age_and_marital_status.htm, 2006/3/31
- (3) 西本幸正, 谷一彦:二輪車のブレーキシステムの現状と将来, 自動車技術会シンポジウムテキスト, No.0505, p.41-46(2005)
- (4) 岸敏秋:VFR1200F のスタイリングデザイン, Honda R&D Technical Review Vol.22, No.2, p.14-18

■ 著 者 ■



齋藤和彦



荒井 崇

新型 ASIMO のデザイン

— 人と相手をし続けるための進化 —

Styling and Design of New ASIMO
— Evolution for Continuing Engagement with People —

興 石 健*
Takeshi KOSHIISHI

要 旨

新型 ASIMO は「人と共存、協調して社会の中で役に立つロボット」の実現を目指したステップとして、人の存在する実環境で状況変化がわかり行動を自ら実行し動き続けることを目的として開発された。新たに、ものを操れるように5本の指が独立して動く多軸ハンド、人混在環境の中で動き続けるために俊敏性を向上させた脚、人とのやりとりをいざなう耳や胸の発光表示機能をもち、その上で全高を変えずに6kgの軽量化を達成した。

そのデザインは基本理念である“先進性と親和性の調和”の考えを昇華させ、人々の ASIMO のとらえかたを大切に、3D ソフトを用いて動いた状態を熟慮しながら、「やさしさ」「わかりやすさ」「みわけやすさ」の三つの観点を重視してすすめた。その結果、2000年の発表以来育んできた親しみやすいイメージと、新たな機能や機構による「人と相手をし続けるための進化」を具現化するデザインができた。

ABSTRACT

The new ASIMO was developed as a step toward achieving “a robot that coexists and cooperates with people and performs useful functions in society.” The purpose was to make it capable of sensing changes in the circumstances of real-life environments where people are present, to take action autonomously, and to continue acting. It has new functionality from multi-axis hands capable of independently moving five fingers to enable manipulation of objects, legs and feet made more highly responsive for the purpose of continuing operation in mixed environments with people, and light-emitting displays at its ears and chest to induce interactions with people. With all this, a weight reduction of 6 kg was achieved without changing the robot's total height.

This design assimilates the basic concept of “harmony between being advanced and being people-friendly” at a higher level. Placing importance on people's perception of ASIMO, and taking into account its state of movement using 3D software, the design was carried forward with an emphasis on the three perspectives of gentleness, comprehensibility, and distinguishability. The result was achievement of a design that conveys the friendly image cultivated ever since ASIMO was first announced in 2000, and that embodies “evolution for the purpose of continuing engagement with people” by means of new functions and mechanisms.

1. はじめに

Honda は新しいモビリティの創造の一つとして、人と共存、協調し社会の中で役に立つことで新しい価値をもたらすヒューマノイドロボットの研究をおこなってきた。その成果として2000年10月末に ASIMO を誕生させ^{(1), (2)}、国内や世界各国の人々と交流の場をつくってきた。そして2005年12月にオフィスなどの実環境で自律的に作業する能力と運動機能の向上を目的としたモデルチェンジをおこない^{(3), (4)}、受付案内やデリバリーサービスなど実証実

験を通し知見を深めてきた。その中で、人は事前に想定しない行動をとることが多く、あらかじめ定めたシナリオに沿って動く「自動機械」では十分に対応できないことがわかった。そこで、実環境で人を認識し人と相手をし続けるために、変化する状況の中で「自ら判断し行動する」能力を有する「自律機械」の実現をめざし新型 ASIMO を開発し2011年11月に発表した⁽⁵⁾ (Fig. 1)。継続して研究開発をすすめ2012年には Honda 青山ウエルカムプラザなどでの一般公開を実施している。

10余年3世代にわたり ASIMO を開発し続けることで得

*四輪 R&D センター

られた知見や、機械でありながら親しみを持って接していただける人々と ASIMO の世界観を損なわず、新しい機能と機構を不足なく実現することがデザインに求められる。

ここでは新型 ASIMO のデザイン開発について紹介する。



Fig. 1 Humanoid robot New ASIMO

2. ASIMO デザインの基本理念

ヒューマノイドロボットは人に近いかたちをしているが人ではなく機械である。あくまでも最先端の人工物としてデザインすることが一つの答えと考える。しかし人と共存するために先鋭すぎるデザインでは日常の生活空間で違和感があり人々の共感が得られ難い。また親しみやすさを求め、ぬいぐるみのようなかわいらしさをねらったデザインとしても媚びているように取られ受け入れられ難いと考える。

ASIMO の究極の目標は「人と共存、協調して社会の中で役に立つロボット」の実現である。そのためには、人に近すぎず遠すぎない受け手をおもなばかりの“心地よい距離感”で存在し、親しみを持って接することができるデザインでなければならない。機械としての先進さ、人のパートナーとしての親しみやすさ、それぞれが調和している状態を最良と考え“先進性と親和性の調和”を ASIMO デザインの基本理念としている (Fig. 2)。

先進性は時とともに変化していくものであり新しい機能

に応じて進化させ、親和性は時とともに深まる愛着を大切に育んでいくものである。それぞれを調和させたまま昇華させていくことが重要である。

3. デザインプロセス

3.1. デザインの手法

ヒューマノイドロボットは多数の機構部品をもつ (Fig. 3)。機構の成立性はもちろん動いた時の違和感のない見え方や安全安心のため、すべての部位と全身に静的／動的な検討が欠かせない。

新型 ASIMO は従来型 ASIMO の関節軸より腰部に 1 軸、両ハンドに各 11 軸増え全身で 57 の自由度をもつ。人の身近で活動するためには、これらが動くことで生じる部品間のずれを極限まで少なくし、内部機構や金属類が露出しない外観とする必要がある。そのために ASIMO のデザイン開発ではデザイナーと設計者が一丸となり、3D ソフトをツールとし、動いた状態を熟慮したデザインワークをおこなっている。実機が完成する以前に、動いた時の状態を CG アニメーションで、実空間での存在感を 1/1 モックアップで確認することでより精度の高いデザインを実現していった (Fig. 4)。

3.2. デザイン調査

ASIMO について人々がどのように感じているのか、以下の内容で調べた。

(1) 聞き取り

従来型 ASIMO をイベントなどで実際に運用しているユーザに聞き取りをおこない、以下の結果を得た。

良い点

1. 今までのイメージを継承した進化をさせていること。
2. LED で発光する表示類が良い。
3. 全体が丸みを帯びてやわらかい雰囲気になった。



Fig. 2 Basic design concept

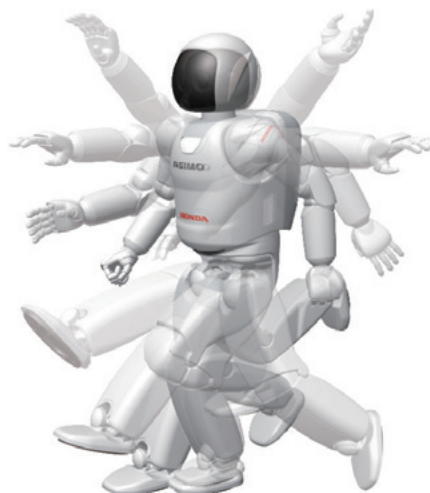


Fig. 3 Many movable parts in humanoid robot

悪い点

1. プロポーションに違和感がある。
2. かわいらしさが減り、たくましい感じになった。
3. お尻が飛び出して見えて安定感がなさそう。

(2) 特徴のとらえられ方

Honda に送られてくる子供たちの描いた絵の傾向で、以下の三点が ASIMO の特徴としてとらえられていることがわかった。

1. 顔のスモークシールド
2. バックパック
3. 幾何的な体つき

(3) 比較検討案

デザインの試案として、先進さを強調したもの、親しみやすさを強調したもの、性別を感じさせるもの、顔の表情があるものなど、従来型 ASIMO と外観イメージがまったく異なるデザイン案を複数展開し、聞き取りをおこなっ

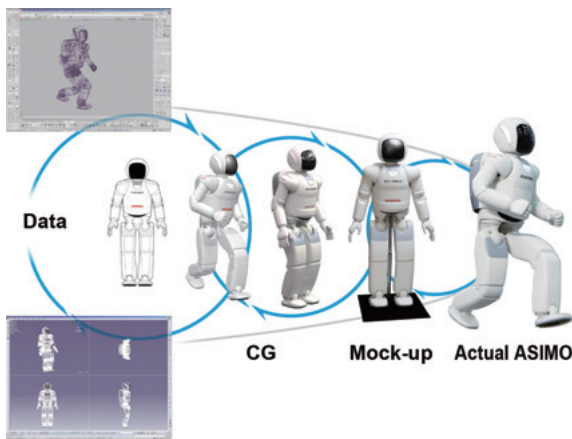


Fig. 4 Digital design process

た。結果はどれもが今までとの関連性が薄く新型 ASIMO としては違和感があるとの回答を得た。

3.3. デザインの方向性

これらのことから、2000 年の発表以来の活動で“ASIMO”のイメージはある程度定着していると考えてる。人々との関係をさらに育んでいくために、モデルチェンジに際しまったく違った姿かたちに変えてしまうことは望ましくないと考えた。新旧の世代にとらわれることなく“ASIMO”としてつながっていくデザインを念頭に置き、親しみやすいイメージを大切にしながら、機能の進化をかたちに込めていくこととした。比較として歴代の ASIMO を Fig. 5 に示す。

4. デザインのねらい

「人と共存、協調して社会の中で役に立つロボット」の実現を目指す新型 ASIMO のデザインとして「人と関わり続けるための進化」をねらい、以下に述べる「やさしさ」「わかりやすさ」「みわけやすさ」の三つの観点を重視してデザインを進めた。

4.1. やさしさ

従来型 ASIMO より全身の丸みを強め、親しみやすさを増した。機械的で煩雑に見える構成線を整理し、緩やかなやさしい面による構成とした。一方で耳部や胸部の LED パネルなど機能を持ったパーツは、はっきりとその機能を具現化するデザインとした。以下に各部位の詳細を述べる。

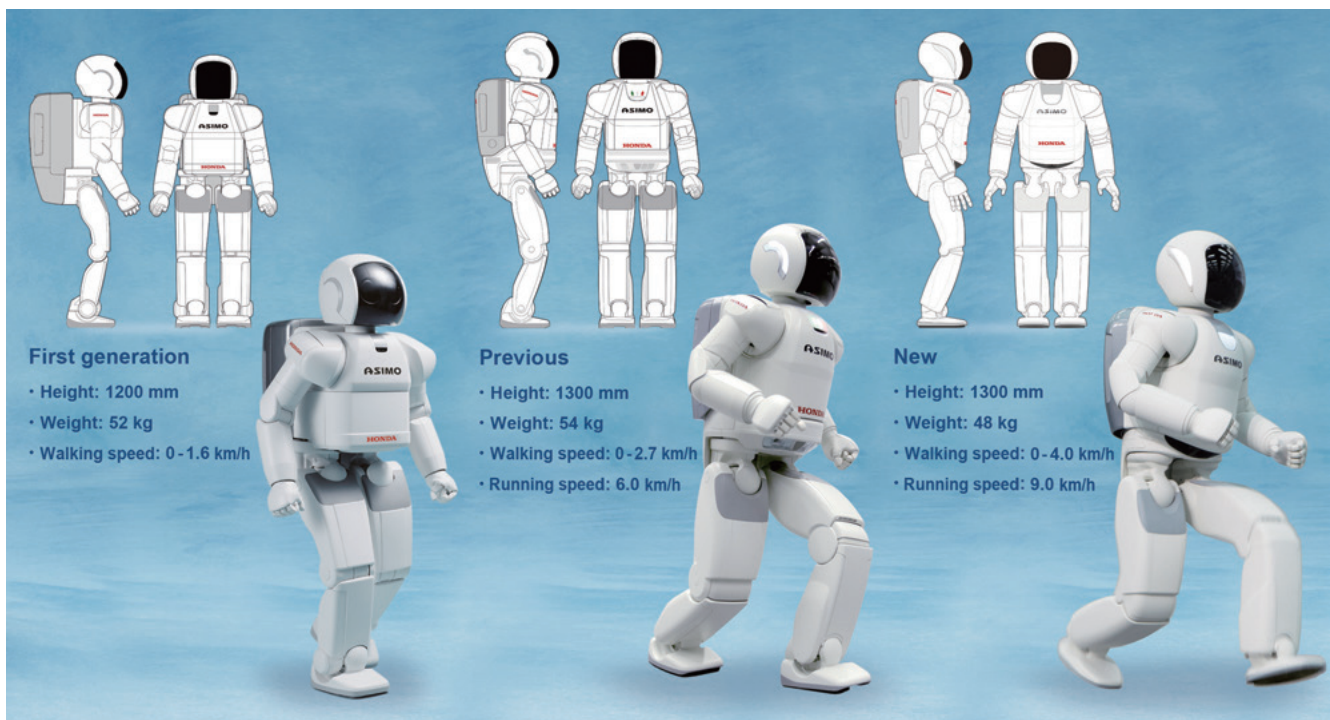


Fig. 5 Evolution of ASIMO

(1) プロポーション

上体の重量バランスをとるために設けている、頭、肩と脚のオフセットを従来型 ASIMO の 40 mm から新型 ASIMO では 20 mm にすることで、違和感を与えていた姿勢を改善した [Fig. 6 (a)].

(2) 胴体

バッテリーの効率良い配置やコンピュータなど内部部品の小型化により、従来型 ASIMO に対し背面部で 30 mm、腹部で 10 mm、合わせて 40 mm のスリム化を実現した [Fig. 6 (b)].

腰は、従来型 ASIMO から取り入れた走行時にバランスをとるための横方向 (yaw) の回転軸に、お辞儀方向 (pitch) の回転軸を加えた [Fig. 6 (c)]. これにより、表現力や物をつかむときの作業範囲も拡大した。この 2 軸が同時に動いても胴体と腰のずれを最小に止めるデザインとした (Fig. 7).

背面はバックパックの下部に排熱口と自動充電をおこなうための給電口を一体感あるデザインで設けた (Fig. 8).

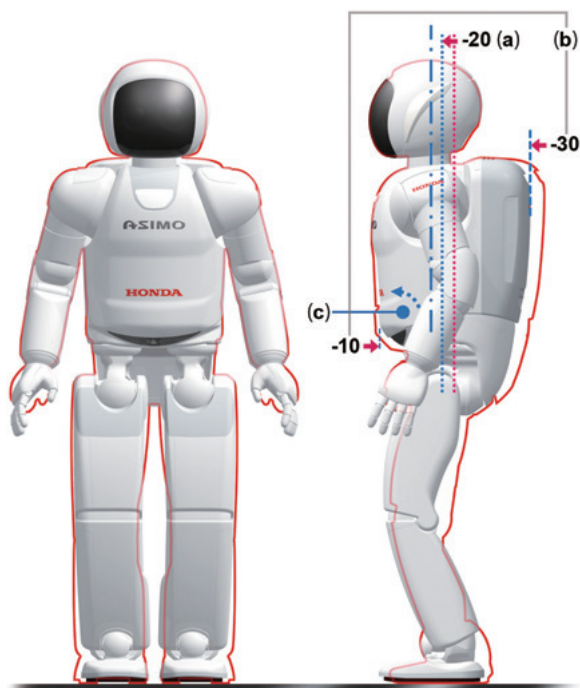


Fig. 6 Proportion (Red line: previous ASIMO)



Fig. 7 Rotatable waist

首の可動角は従来型 ASIMO の上 22 度下 19 度から、上 26 度下 32 度と 1.7 倍大きく、頭下部と背上部および胸が干渉せず、かつ胸を張ったデザインとした。

(3) 頭部

ASIMO の顔は、目の存在が感じられる濃度のスモークシールドで覆っている。これは顔の造作をはっきり見せないことで、受け手が ASIMO の表情を自由に想像できることをねらっている。

新型 ASIMO は親しみやすさをより感じさせるため頭部全体の丸みを強め、前方から見たシールドの縦と横の比率を近づけ四隅を丸くし、横から見た形状も丸みを強めた。

シールド内部に配置した、目に相当するカメラは両方の間隔を離し、下に移動することで柔和な表情とする効果をねらった。またカメラ視野角を確保するために凹凸を抑えた顔面とした。光の角度によって見え隠れする「眉毛」「口」に相当する造型ラインを太く短くすることでさらに表現を強めた。

耳部は聞こえ具合を LED の発光で表示する機能を持つ。従来型 ASIMO に対し頭部からの突出量を増やし、前方から見た角度を起こすことで発光時の被視認性を向上させた。音声認識のため全方向から集音するマイクは外から存在がわからないように、部品合わせ部分に設けたスリットの全周 8 箇所配置した。ASIMO の頭部の線画を Fig. 9 に示す。



Fig. 8 Backpack

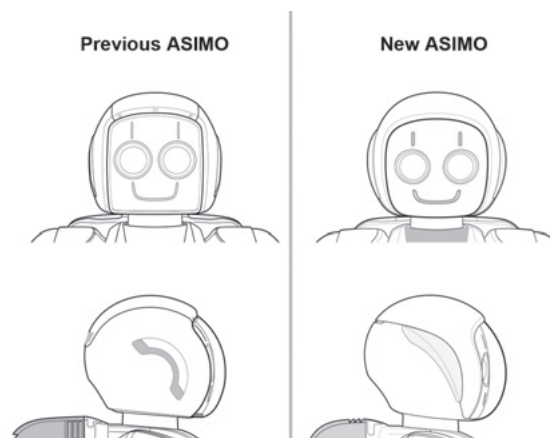


Fig. 9 Line drawing of head

(4) 腕

従来型 ASIMO の「開く、握る」しかできなかった 2 軸構造の手から、新型 ASIMO では油圧により 5 本の指がそれぞれ独立して動く機構とし、親指の可動範囲も大きくした。指先には触覚センサを内蔵している。これにより水筒の蓋を開けコップに飲み物を注ぐことや (Fig. 10)、手話表現などが可能となった。デザインは人の指先をモチーフに丸みを帯びさせた。また、指を曲げても内部の機構が露出しない関節形状とした (Fig. 11)。

手首は従来型 ASIMO の楕円断面から新型では丸断面とし可動角を増やしている。

腕は指を動かすために胸部に内蔵したモータの駆動による油圧伝達の配管が通る構造としつつ、肘を曲げたときにも部品間のずれがない一体感あるデザインとした。

(5) 脚部

新型 ASIMO は、時速 9 km の走行や、両足ジャンプなど、運動機能の大幅な向上を実現した。

脚全体のデザインはシンプルでスムーズな面を基本とし、膝の動きに連動する回転式外装機構に加え、踵のスライド式外装機構を開発し、足首の可動角を従来型 ASIMO の $\pm 24.5^\circ$ から $\pm 32.5^\circ$ へ拡大することができた。足先は四隅の角を落とすことで干渉を無くし、大きな動作の足運びを可能とした (Fig. 12)。



Fig. 10 Action that opens lid of flask

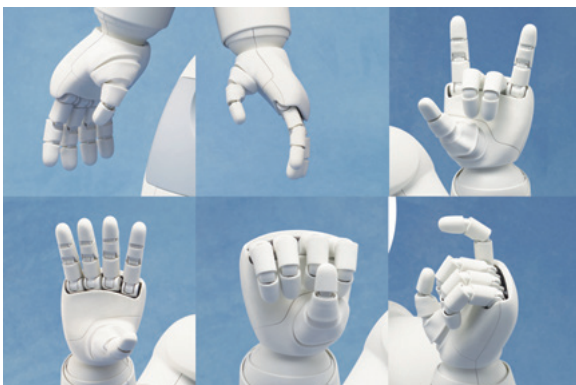


Fig. 11 Compact, hydraulic multi-axis hand

4.2. わかりやすさ

ASIMO と人が対面し直接関わる機会が増えるにつれ ASIMO が話を聴いているのか否か、話しかけていい状態なのかそうでないのかなど、今 ASIMO がどういう状態なのかが人々にわかりにくい状況が生じてきた。

そこで、ジェスチャーでの表現に加え LED による発光を補助的に使い、「光」の変化で人をいざない、やりとりを始めるきっかけとすることをねらった。そのため以下に述べる、人々が直観的にわかりやすい位置にわかりやすい発光による表示をおこなうこととした。

(1) 頭頂部前方の発光表示、気づきを示す

人の問いかけに対するリアクションとして、流れるように連続的に発光する機能をもたせた。外装裏面からの投影により、消灯時は LED の存在を感じさせない構造としている。

(2) 耳部前方の発光表示、聞こえ具合を示す

ASIMO が聞く準備が整ったときに点滅することで人にはたらきかけをおこない、集音状態に応じた段階的な発光で ASIMO が音声を聞いているレベルを表示する。

(3) 胸部の発光表示、ASIMO の現在の状態を示す

人と会話中や人の近くで活動する時には「調和、協調」を感じさせるライトグリーンで発光、ASIMO が単独でタスクを遂行している時は「誠実、冷静」を感じさせるライトブルー、それら以外の時はニュートラルなホワイートの発光をさせ、待ち時間は呼吸のようなゆるやかな明暗変化で表示する。

これらの発光表示については実際に運用していく中でよりよい「光り方のデザイン」を探究していく過程にある。Fig. 13 に発光時のイメージを示す。

4.3. みわけやすさ

オフィス、ロビーなど同じ空間の中で複数の ASIMO を同時に運用する際、外観が同じためそれぞれの区別が難しいということが起きてきた。そこで容易に識別できることをねらい、胸、肩、腿に ASIMO のイメージに沿った誰にも受け入れられやすい、ライトブルー、ライトグリーン、ラ

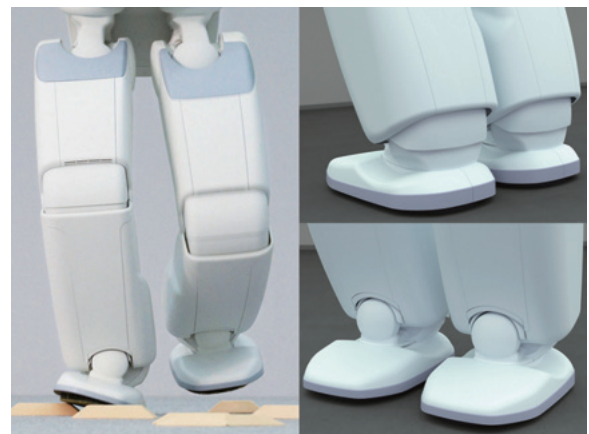


Fig. 12 Legs that move more freely

イトイエローのアクセントカラーを施し、通常のカラーと併せて運用することとした (Fig. 14, Fig. 15).

同時に、全体の基本カラーとして当初より用いていた、ASIMO の先進性と親和性を表現し、さまざまな環境にもなじむホワイト、グレー、シルバーを、より洗練されたクリーンで明るい色調へ見直しをおこなった。



Fig. 13 Expression of the light



Fig. 14 Two new ASIMOs receiving a visitor

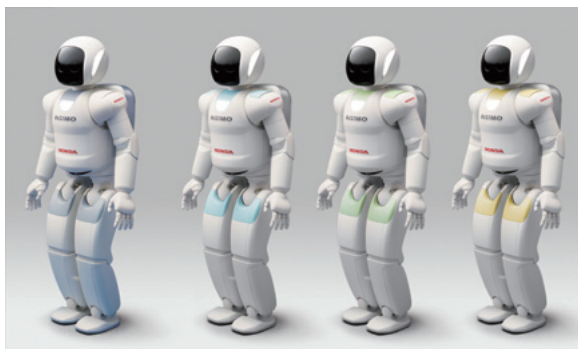


Fig. 15 Normal color and accent colors

5. まとめ

新型 ASIMO のデザイン開発は、“先進性と親和性の調和”の基本理念をさらに昇華させ、「やさしさ」「わかりやすさ」「みわけやすさ」の観点を重視してすすめた。

その結果、人々の身近で活躍することを目指し「自動機械」から「自律機械」への一步を踏み出す新型 ASIMO を人々の共感が得られるデザインで実現することができた。

6. おわりに

2011 年 11 月、Honda はロボット研究を通じて社会に貢献したいという強い思いを込めてロボット技術の応用展開に関する総称を“Honda Robotics”と定めた。

同技術に標記する“Honda Robotics ロゴマーク” (Fig. 16) は、やや上向きに首をかしげて明るい未来を見つめる ASIMO の横顔をモチーフとするシンボルマークと、アルファベット大文字で構成している“ASIMO ロゴタイプ”との関連をイメージした小文字の“Honda Robotics ロゴタイプ”で先進さと親しみやすさを、Honda のコーポレートカラーである赤いラインでロボティクスの広がりを表現したものである。

このマークに込めた想いのとおり「人と共存、協調して社会の中で役に立つロボット」のあるべき姿を求め ASIMO をさらに進化させていきたい。



Fig. 16 Honda Robotics logo mark

参考文献

- (1) 広瀬真人, 竹中透: ヒューマノイドロボット ASIMO の開発, Honda R&D Technical Review, Vol.13, No.1, p.1-6
- (2) 小池昭男, 興石健: ヒューマノイドロボット ASIMO のデザイン, Honda R&D Technical Review, Vol.13, No.1, p.7-16
- (3) 重見聡史, 河口裕一郎, 吉池孝英, 川邊浩司, 小川直秀: 新型 ASIMO の開発, Honda R&D Technical Review, Vol.18, No.1, p.38-44
- (4) 興石健: 新型 ASIMO のデザイン, Honda R&D Technical Review, Vol.19, No.1, p.6-12

- (5) 重見聡史, 川邊浩司, 中村孝広: 新型 ASIMO の開発
― 自律機械の実現 ―, Honda R&D Technical Review,
Vol.24, No.1, p.34-41

■ 著 者 ■



興 石 健

2013 年モデル US Accord の開発

Development of 2013 Model Year U.S. Accord

河野 昌明*
Masaaki KAWANO
嶽 和秀*
Kazuhide TAKE
江口 美彦*
Yoshihiko EGUCHI

津嶋 広通*
Hiromichi TSUSHIMA
原田 紀之*
Noriyuki HARADA

秋元 幸雄*
Yukio AKIMOTO
長岡 進*
Susumu NAGAOKA

要 旨

ミドルサイズのベストセラーカー、Honda 北米 Accord セダンとクーペは、2013 年モデルにてフルモデルチェンジをおこない、初代から数えて 9 代目となった。この Accord は 37 年の歴史を有しているが、特に本モデルは多くの新技術を採用している。パッケージングにおいては、独自のマンマキシマム・メカミニマム思想に基づいた効率的なパッケージ技術により、前モデルを超えるキャビンスペースの広さと荷室容量の拡大を実現しながら、セダンは 70 mm、クーペは 40 mm、全長を短くした。また、パワーtrainのラインナップは、新開発 L4 2.4 L 直噴エンジンと、VTEC 機構を追加した Variable Cylinder Management V6 3.5 L のエンジンを採用し、Continuously Variable Transmission, 6MT, 6AT の三つの変速機との組み合わせにより、高次元の走りと燃費性能を両立した。さらに、高水準の安全性能を達成し、米国の新車安全性評価プログラム、US-NCAP で最高ランクの 5 スターを達成した (Honda 社内データ)。

ABSTRACT

The Honda Accord sedan and coupe for the North American market, both best-selling mid-sized cars, have undergone a full model change with the 2013 models and are now in their ninth generation. The Accord has a 37-year history, and this model in particular has incorporated a large amount of new technology. An efficient packaging technology based on Honda's unique "man maximum, machine minimum" concept has achieved larger cabin space and greater cargo capacity than previous models, while total length of the sedan has been shortened by 70 mm and of the coupe by 40 mm. The line-up of available power trains includes the newly developed L4 2.4-liter direct-injection engine, the V6 3.5-liter variable cylinder management engine equipped with added VTEC mechanism, and the three transmission options of a continuously variable transmission, a six-speed manual transmission, and a six-speed automatic transmission. The combinations of engine and transmission achieve a high-level balance of driving performance and fuel efficiency performance. This model also achieves a high level of safety performance and was given the highest ranking of five stars in the United States New Car Assessment Program (US-NCAP). (Based on Honda in-house data.)

1. まえがき

世界的な経済不況や拡大する自動車メーカー同士の競争を背景に、ユーザのクルマを選ぶ目はますます厳しくなっており、より性能の優れたクルマを購入する傾向が強まっている。Accord が位置するミドルサイズは、各自動車

*四輪 R&D センター

メーカーから商品競争力の高い新型車が続々と発売されており、これまで以上に競争が激化しているカテゴリとなっているため、車両の性能進化が著しい。

2013 年モデル US Accord (新型 Accord) を開発するにあたり、セダンのユーザを対象に使用状況の調査をおこなったところ、通勤での使用がメインではあるが、週末もミニ

バンではなくセダンで家族と出掛けるなど、セダンの使用頻度が増えていることがわかった。その背景にはガソリン価格の高騰や環境意識の高まりなどがあることから、燃費の良さや空間の広さが定評の Accord に対する人々の期待は高いと確信した。

そこで、仕事もレジャーも大切にするユーザーに応え、なおかつクルマを賢く使い、上質なライフスタイルを表現するセダンを創造したいと考えた。今回の新型 Accord は、全領域において、秀でた性能を有するクルマを目指して開発をスタートした。

2. コンセプト

9 代目となる新型 Accord のグランドコンセプトを「Excels in All Areas」とした。さらに、前モデル Accord のデザインセンスや空間のゆとりを踏襲した「Intelligence」、Honda セダンの信頼と安心を基にした「High Quality」、次世代のミドルクラスセダンとしての「Advance」、という三つのコンセプトで知性、高品質、先進性を表現した (Fig. 1)。

(1) Intelligence

「爽快 Efficient パッケージ」とし、賢く、上質で、先進的な、細部までよく考えた知性的なパッケージを目指した。

(2) High Quality

高剛性ボデーおよび新開発サスペンションにより、軽快でスポーティなハンドリングを進化させると共に、静粛性を向上させ、洗練されたダイナミック性能を目指した。

(3) Advance

クラストップの環境性能を獲得するなど、基本的性能を進化させた。その上で、安全領域においても優れたセダンを目指して開発した。

一方クーペの前モデルは、20 代後半のパーソナルユーザを中心に、スタイリングや後席とトランクルームの広さで好評を博している。新型 Accord クーペは、こうした資質を踏襲するとともにセダンで進化させた高度な基本的性能を投入した。その上で「Aggressive & Athletic」をコンセプトに、よりダイナミックで引き締まった知的センスが漂う、大人のクーペを目指した (Fig. 2)。



Fig. 1 Exterior design (Sedan)



Fig. 2 Exterior design (Coupe)

3. Intelligence

3.1. パッケージ

パッケージレイアウトは、燃費などの環境要件や安全性能に対応したボデー骨格の最適化と、快適な室内空間の継承や新しいセダンの価値創出との両立を目指し「爽快 Efficient パッケージ」をコンセプトとした。

エクステリアは、人を中心とした Honda のスタイリング思想であるマンマキシマム・メカミニマム思想に基づき、優れた視界性能を確保した上で、燃費や空力性能の良さ、ワンランク上の広さや快適さといった、機能の本質を表現したいと考えた。そこでエクステリアのコンセプトを、空間の心地よさを表現する「爽快」と、引き締まった躍動感や空力性能の良さを表現する「凝縮」とし、ボデー面の質感にこだわるとともに、機能的な意味を持たせて造形した。全体のフォルムは、セダンらしくあるために 3 ボックスを意識しながら伸びやかな水平基調とすることで、押し出しの強さや上質なたたずまいを表現した。また、ダウンビューで、ボデー前後を絞り中央を膨らませた樽型のフォルムを造形し、さらにフロントとリヤのピラーを内側に絞りセンタピラーを外側に張り出させるとともに、三次元ガラスを全面に採用することで、空力性能を高めながら空間の広さや快適性を外観からも感じられるようにした。

インテリアは、「爽快」、「先進」、「上質」をテーマに Luxurious modern interior を表現した。具体的には、ゆとりある空間にさらなる広がり感を生み出すこと、より操作しやすい次世代のインタフェイスを実現すること、そしてワンランク高い上質感もたらすことの三つであり、これらを実現することにより心地よく快適な新しいセダンの価値を創造した。

3.2. 3 眼メータ

正統派セダンとして視認性を重視し、大径スピードメータを中央に配置した 3 眼メータとした。金属調リングをより金属らしく見える形状にすることで、精緻さをいっそう

高めた。スピードメータの中心にはインフォメーションディスプレイを採用し、外周には燃費の状況を色で表示するアンビエント照明を配した (Fig. 3)。



Fig. 3 Gauge cluster

4. High Quality

4.1. ボデー剛性

リニアなハンドリングに加え、上質な乗り心地や静粛性を実現するために、ボデー骨格全体にわたる剛性向上をおこなった (Fig. 4)。特に、走行安定性や乗り心地に寄与の高いリヤまわりの剛性を向上することで、高い性能を得ることができた。開発にあたっては、Computer-aided engineering (CAE) を駆使するとともに、テストコースでの走り込みも徹底し、構造の最適化をおこなった。構造の検討においては人の感性を大切にし、わずかな変形や振動にも注目して対策を施した。さらに、より高強度な高張力鋼板 (ハイテン材) を採用するなど、軽量化に対する取り組みもおこない、軽量かつ高剛性のボデー骨格に仕上げた。

その結果として Fig. 5 に示すように、静剛性では曲げ剛性を 34%、ねじり剛性を 42% 向上した。また、動剛性ではハンドリングの応答性に影響するフロント左右剛性を 16%、リヤタイヤの接地感や乗り心地に関わるリヤ上下剛性を 39% 向上した。さらに、リヤ接地点横剛性においても 25%、リヤダンパねじり剛性も 40% 向上し、コーナリング時におけるリヤサスペンションのジオメトリ変化を抑制し

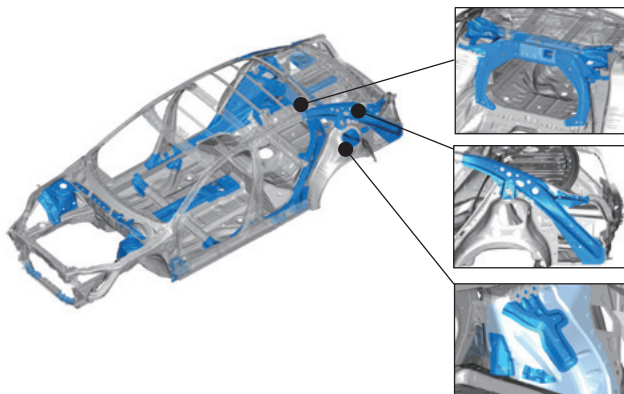


Fig. 4 Illustration of body strengthening

た。このように、フロントまわりを強化しながらリヤまわりの剛性を大きく高めることで、ハンドリングと乗り心地を高い次元で両立している。

4.2. ハイテン材適用拡大

Fig. 6 に示すように、ホットスタンプ技術によって実現した 1500 MPa 級という高強度な材料をはじめ、980 MPa 級や 780 MPa 級の高強度なハイテン材を 17.2% 採用した。この結果、ボデー骨格を 8 kg 軽量化できた。

4.3. シャシ

前モデルの強みである軽快、リニアなハンドリング性能をさらに進化させ、かつ上質な乗り心地との両立を目指し、シャシシステムを刷新した。

フロントサスペンションは軽量、かつ高効率パッケージが可能なストラットタイプを採用した。リヤサスペンションは前モデルの基本構造を踏襲し、クラストップの動的性能と上質な乗り心地性能の両立のために、サスペンションブッシュの特性を最適化した。また、電動パワーステアリング (EPS)、軽量高剛性ハイブリッドフロントサブフレーム、および優れたグリップ性能を確保しながら転がり抵抗を低減したタイヤを採用し、低燃費化にも貢献するシャシシステムを開発した。

4.3.1. サスペンション

フロントサスペンションには、前モデルを上回る動的

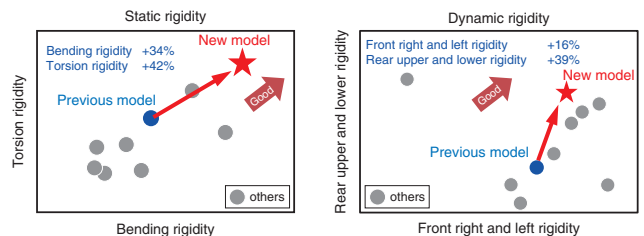


Fig. 5 Body rigidity comparison image

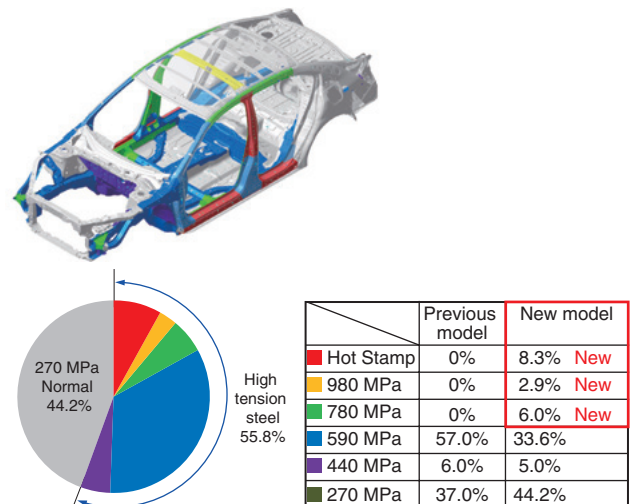


Fig. 6 High-tension steel utilization

性能を実現したマクファーソン・ストラットタイプを採用した。この新型サスペンションにより 15 kg の軽量化を実現し、さらにはフロントノーズの短縮化を可能とすることで、高効率パッケージに貢献した。動的性能については、トップクラスの性能を進化させつつ、上質な乗り心地を実現するために、新構造サスペンションダンパ、ロアアーム可動軸と同軸方向に液封コンプライアンスブッシュを採用し (Fig. 7, Fig. 8)、さらには高周波ロードノイズについても低減させた。

新たに採用したフロントダンパ内のリバウンドスプリングは、伸び側に作用し、コーナリング時の内輪の浮き上がりを抑えることで、車両のロールを低減する。その結果、高い旋回安定性を確保しながら、メインのダンパスプリングを低バネレート化することができ、乗り心地を向上した。また、ダンパの内部構造においては、バネ上挙動低減と微小操舵時のロール動き出し応答性改善のために、オイルシール部にテフロンリングを追加し、さらにはバルブにおいても新規開発したオイルに合わせた新構造を採用することで減衰特性を最適化し、フラットな乗り味を実現した。サスペンションストロークによる入力に対しては低バネレート特性に、コーナリングフォースによる入力に対しては高バネレート特性にでき、ハンドリングと乗り心地を両立した。さらにコンプライアンスブッシュを液封とすることで、高速域でのステアリング振動を低減している (Fig. 9)。

リヤサスペンションは、高性能なマルチリンク・ダブルウィッシュボーンサスペンションを継続採用し、サスペンションブッシュ、およびダンパをチューニングすることで優れた走行安定性と上質な乗り心地を実現した。

4.3.2. ステアリングシステム

ステアリングシステムには、燃費性能の高い EPS を採

用した。この EPS に装着した新型トルクセンサには、非接触タイプを採用することにより、操舵初期のセンサ検出精度を向上し、よりリニアなステアフィールを実現した (Fig. 10)。また、前モデルの強みであるきびきびしたハンドリング性能を進化させるためにステアリングレシオをクイック化した。さらには、高剛性ステアリングコラムを適用することにより、ステアリングホイールに伝わる振動を低減するとともに、操舵時の剛性感を向上した。

4.3.3. フロントサブフレーム

フロントサブフレームは、世界初となる Honda 独自のスチールとアルミニウムを接合する製法を開発することで、スチールとアルミニウムのハイブリッド構造を実現し、オールスチール製であった前モデルに対し、軽量化 (-25%)、かつ高剛性化 (+20%) を図ることができた⁽¹⁾。スチールとアルミニウムの異材接合には、新開発の摩擦攪拌接合 (Friction Stir Welding: FSW) を用いたが、この手法はスチールに重ねたアルミニウムに、回転治具を加圧させながら進行させ、スチールとアルミニウム間に

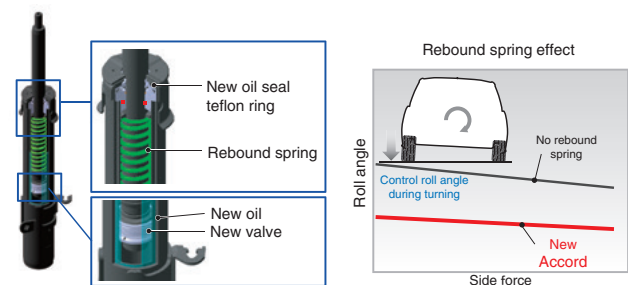


Fig. 9 Rebound spring

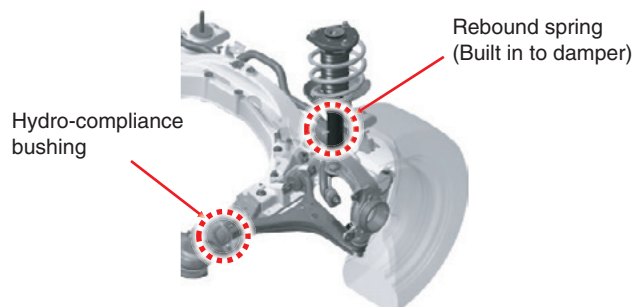


Fig. 7 MacPherson front suspension

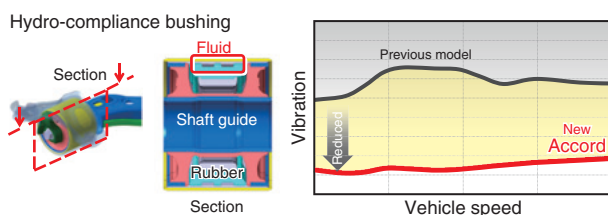


Fig. 8 Hydro-compliance bushing

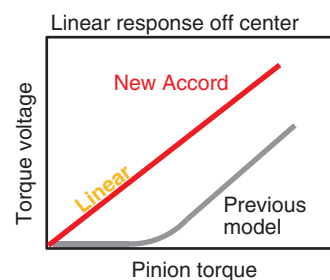
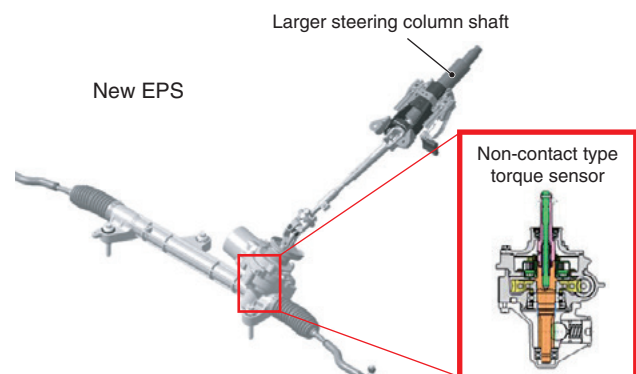


Fig. 10 EPS system

安定した金属結合を新たに生成させる接合技術である (Fig. 11).

4.4. NV 性能

上質な走りを実現するために、さまざまな走行状況や路面状況において不快なノイズや振動をきめ細かな対策で抑えた。

まず、アクティブノイズコントロール (ANC) を 2.4 L 車、3.5 L 車ともに採用した。この ANC に加えて、加速時のエンジン音に生成音を付加することで心地よい音質を実現するアクティブサウンドコントロール (ASC) を新たに採用し、発進時のこもり音を低減するとともに加速に同調したりニアなエンジン音を実現し、スポーティ感を演出した (Fig. 12)。

クーペ 3.5 L 車は、排気音をチューニングするためにサイレンサを専用設計し、ASC をよりスポーティな音質と音

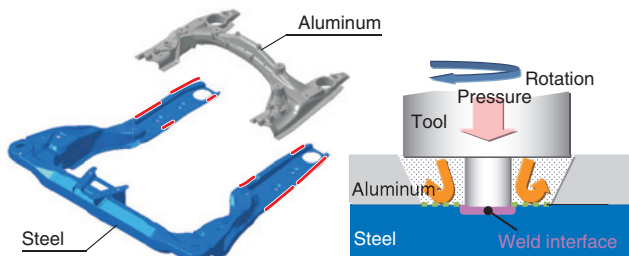


Fig. 11 FSW technology

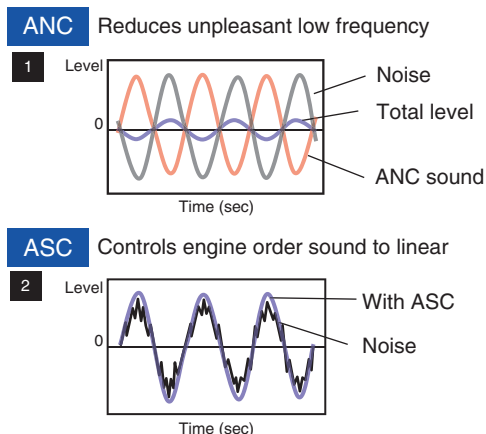
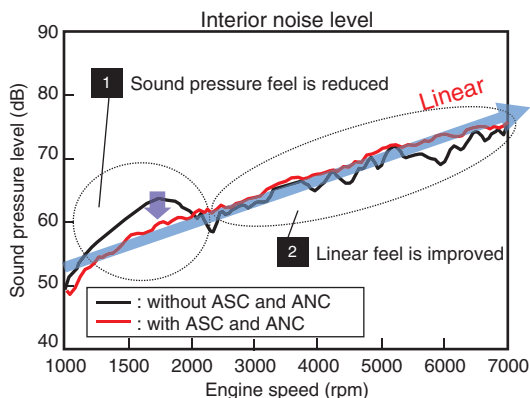


Fig. 12 Active noise control and active sound control

量にセッティングすることで、加速時の迫力とクルーズ時の上質さを両立した。

3.5 L 車に採用されているアクティブコントロールエンジンマウント (ACM) は、中低速トルクがアップした新型 V6 エンジンに対応するために、アクチュエータを 12 V 仕様から 28 V 仕様に変更することで高出力化した (Fig. 13)。高い防振性能によって気筒休止領域を拡大し、燃費性能向上に貢献している。

次に、フロントサスペンションの一新やリヤサブフレームへのダイナミックダンパの追加、サスペンション取り付け点のボデー剛性向上などによって、ロードノイズの原因となる振動伝達を抑制した。その上で、吸音および遮音材の採用を拡大するとともに構造に工夫を施した。内容としては、ダッシュボードインシュレータはゴム層をフェルト層で挟み込んだ 3 層構造として吸音に加え遮音機能も持たせた。ピラー内発泡ウレタンは 6 箇所から 10 箇所に増やし、サイドウィンドウのガラスの板厚も厚くすることでロードノイズの空気伝播音低減を図った。

また、クラストップレベルにある前モデルの風切り音をさらに低減した。空力性能に優れたボデー形状とした上で、フロントワイパの停止位置を下げ、エンジンフードからフロントガラスへの空気の流れをスムーズ化した。フロントピラーはフロントガラスとの段差を 20% 以上小さくし、サイドへの空気の流れの乱れを抑えている。

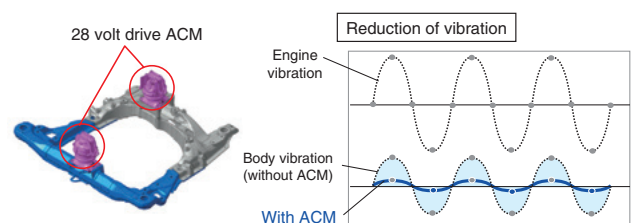


Fig. 13 Image of active engine mount control

5. Advance

5.1. エンジン

新型 Accord のエンジンは、優れた環境性能をベースに Honda ならではの運転する楽しさを追求した EARTH DREAMS TECHNOLOGY を適用した。具体的には、直噴システムの採用をはじめ、骨格から新開発した L4 2.4 L DOHC i-VTEC エンジンと、気筒休止に加えて低回転時と高回転時のバルブタイミングを切り換える V6 3.5 L i-VTEC エンジンを新たに開発した。前モデルに対して出力およびトルクを向上させると共に、新たに採用した Continuously Variable Transmission (CVT) (L4)、6AT (V6) とあわせて燃費性能も向上した (Fig. 14)。また、

California Air Resources Board (CARB) 排出ガス規制における Super Ultra Low Emission Vehicle (SULEV), Partial Zero-Emissions Vehicle (PZEV) レベルのクリーン性能も獲得した (カリフォルニア州向け CVT, 6AT 車)。

L4 エンジンは、Honda 独創の VTEC と Variable Timing Control (VTC) に加え直噴システムを採用し (Fig. 15), さらにバルブ挟み角を狭角化することにより燃焼室表面積を縮小して熱損失を低減すると共に、吸気ポートと燃焼室形状の最適化を図ることにより強い筒内タンブル流動を形成した。これにより混合気の均質化を促進して燃焼安定性を向上した。また、シリンダオフセットやタイミングチェーンのテンショナ荷重を低減するダブルアームテンショナの採用等、細部にいたるまで低フリクション化と軽量化をおこなった。

V6 エンジンは、フロントバンクの吸気側に低回転カムと高回転カムを切り換える VTEC を、リヤバンクの吸気側には低回転カムと高回転カムさらに休止カムを切り換える 3 ステージ VTEC を新たに採用した (Fig. 16)。低回転カムによって 3 気筒燃焼時のトルクが向上し、気筒休止領域

を拡大した。また、高回転カムによって高回転域の出力も高めている。

5.2. トランスミッション

L4 エンジン用としては、高精度な CVT を新開発した (Fig. 17)。直噴エンジンの高トルクに対応し、エンジン効率の良い領域を効果的に使うことができるという、高効率な CVT の特性を活かすことで、燃費性能を向上させた。また、アクセル操作に瞬時に応答する変速制御 G-design Shift により、ドライバの感覚にリニアな加速フィーリングを実現した (Fig. 18)。

マニュアルトランスミッションは、直噴エンジンの高トルクに対応し、走りと燃費性能をともに高めた 6 速 MT を新たに開発した。各部の構造や配置を工夫し、強度や伝達効率を高めながら前モデル 5 速 MT 同等の軽さとコンパクトさを実現した。

V6 エンジン用としては、中低速トルクと出力を向上したエンジン特性を最大限に引き出すために、6 速 AT を新たに採用した。多段化によるギヤレシオ幅の拡大と多板

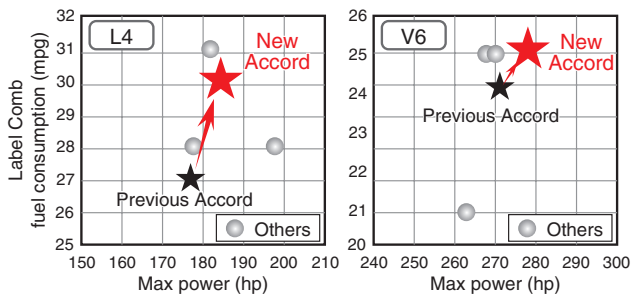


Fig. 14 Label FE-Power

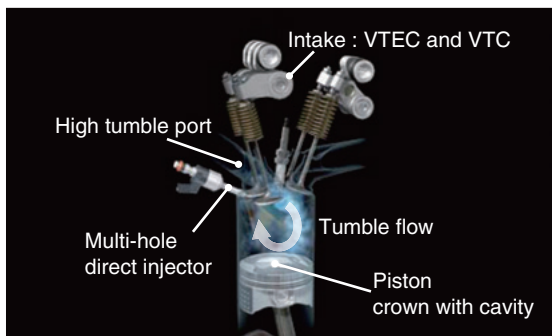


Fig. 15 Direct injection system

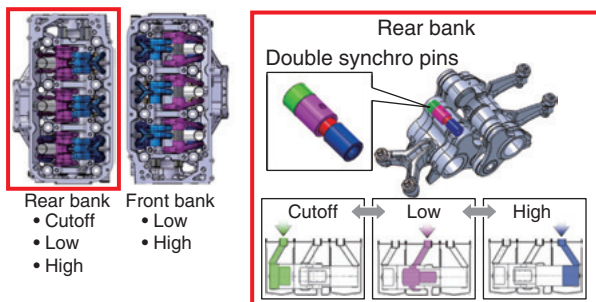


Fig. 16 VTEC structure

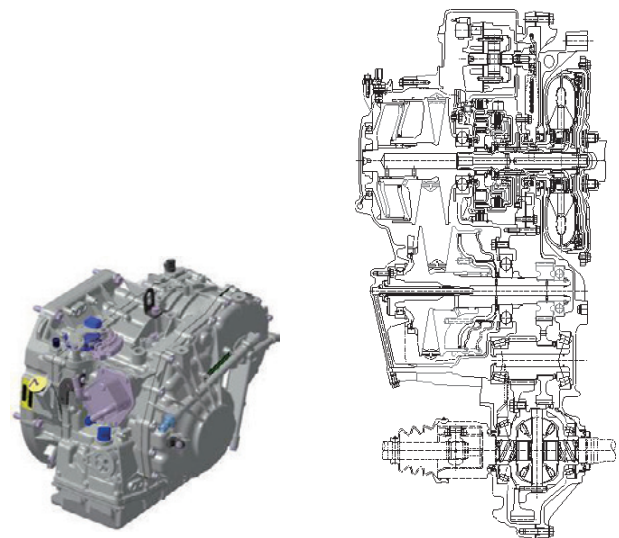


Fig. 17 CVT structure

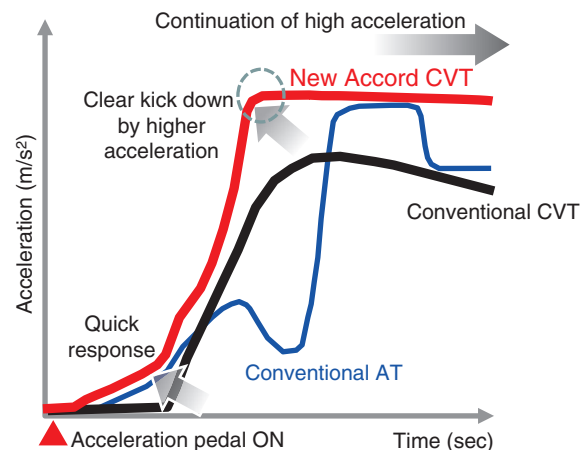


Fig. 18 Kick down characteristics

ロックアップクラッチによるロックアップ領域拡大により、燃費性能を向上しつつダイレクト感に満ちた走りを実現した。

5.3. LED ヘッドライト

新型 Accord のヘッドライトとして、ハロゲンの半分以下の消費電力で、約 2 倍の光量を持つ LED ヘッドライトを開発した (Fig. 19)。5 個の LED を使用したプロジェクタライトを二つ使用することで、優れた配光特性を実現し、より広く、より遠くまで明るく照らすことで夜間走行の安心感を高めた (Fig. 20)。

5.4. レーンウォッチ

新型 Accord では、レーンウォッチシステムを世界で初めて採用した (Fig. 21)。これは、助手席側ドアミラーの下部に設けたカメラによって、ドアミラーでは確認できない範囲の映像を 8 インチの高解像度 Wide-Video Graphics Array (WVGA) 画面に表示するシステムである。ドアミラーの視野角約 20° に対し、レーンウォッチは約 80° の範囲を映し出すため、後側方の車両などの確認をサポートできる。しかも、ディスプレイはインストルメントパネル上部の見やすい位置に設置しているため、走行視界から少ない視線移動で確認できる。さらに、目安線表示により距離感も把握しやすくした。ターンシグナルレバーの先端にあるスイッチを押すか、右ターンシグナルを出すとカメラ映像を表示する。ナビゲーションシステム装着車は、ナビゲーション表示との 2 画面表示も可能とし使い勝手の向上も図った。

5.5. Forward Collision Warning システム

新型 Accord では、追突を防止するための支援技術である、Forward Collision Warning (FCW) を採用した。この

システムは、フロントバンパ開口部に設けたミリ波レーダまたはフロントウインドウに設置した単眼カメラにて前走車を検出し、検出された前走車に接近し、追突のおそれがあると判断すると、フロントウインドウに投影する専用のヘッドアップワーニング (HUW)、メータ内の FCW インジケータランプの点滅およびブザー音で警報する。なお、ユーザの使い勝手向上のため、カスタマイズが可能であり、作動タイミングを NORMAL, SHORT, LONG と設定でき、OFF も選択可能とした。

5.6. Lane Departure Warning システム

新型 Accord では、走行時の車線逸脱を防止する支援技術である、Lane Departure Warning (LDW) を採用した。このシステムは、FCW と共用のカメラで自車線左右のレーンマークを検知し、横方向への移動速度から走行している車線を逸脱するおそれがあると判断すると、メータ内

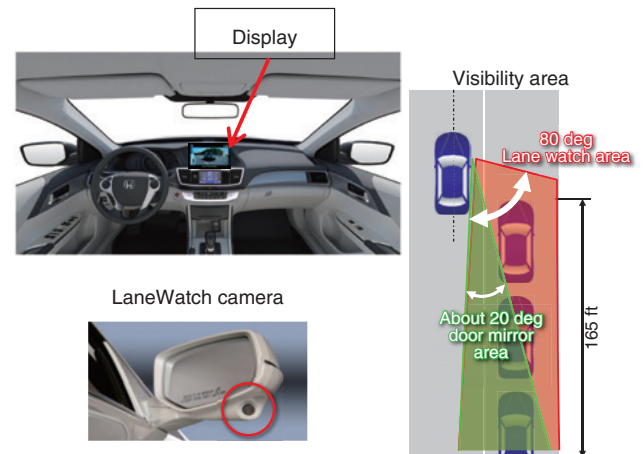


Fig. 19 LED headlight

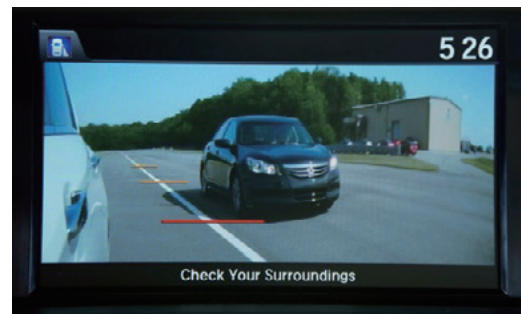


Fig. 21 LaneWatch system

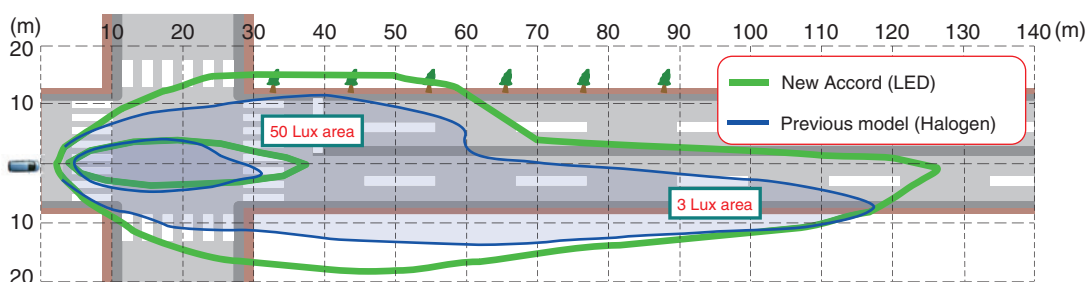


Fig. 20 Distributed headlight comparison

の LDW インジケータランプの点滅と FCW とは異なるブザー音で警報する。ユーザの使い勝手向上のため、OFF スイッチで作動と非作動を選択できる (Fig. 22)。

5.7. Audio with touch screen

新型 Accord のオーディオに、手の届きやすい位置に 5.8 インチカラー液晶の感圧式タッチパネルを備えた、Audio with touch screen を採用した (Fig. 23)。タッチパネル上に必要なボタンやアイコンのみを大きく表示して、目的の操作を迷わずにおこなうことができる。また、Pandora, Aha Radio (インターネットラジオ), Short Message Service (SMS), E メール, 携帯オーディオプレーヤ, 携帯電話 (Bluetooth 接続および USB 接続) といった多彩なソースに接続可能なシステムとした。

5.8. Honda Link

新型 Accord に採用した Honda Link は、Aha Radio に対応することで、さまざまなインターネットサービスを提供することができる。Aha Radio は、ユーザのスマートフォン (iPhone またはアンドロイド) を接続することで、Facebook, Twitter, Podcasts, Slacker Radio, 交通情報, レストラン情報などの web コンテンツにアクセス可能であり、車内でアプリケーションを楽しむことができる。

5.9. 安全性能

進化した Advanced Compatibility Engineering (ACE™) ボデーをはじめとした改善により、US-NCAP の 5 スターや、Insurance Institute for Highway Safety (IIHS) のトップセーフティピックを獲得している前モデルの安全性能

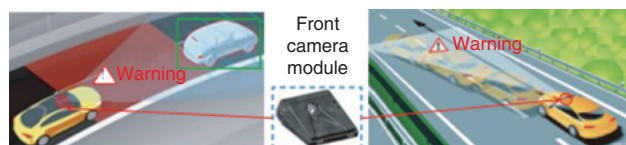


Fig. 22 FCW (Camera) and LDW image



Fig. 23 Audio with touch screen and 8-inch display

をさらに進化させ、高水準のパッシブセーフティを実現した。高効率なボデー骨格構造や、より高強度な高ハイテン材の採用などにより、衝撃吸収性能を向上させ、IIHS で新たに導入されたスモールオーバーラップ衝突や、2013 年 9 月から段階的に導入される Federal Motor Vehicle Safety Standard (FMVSS) のロールオーバー試験にもいち早く対応している。

5.9.1. スモールオーバーラップ対応

スモールオーバーラップテストとは、立ち木などへの衝突を想定したモードで、25% オーバーラップ、64 km/h (40 mph) でポール状のバリアに衝突させるテストである。

サイドフレームの外側にバリアが当たるため、いかにエンジンルーム内で衝突エネルギーを吸収できるかが課題であった。新型 Accord では前モデルから採用している ACE™ ボデーを Next Generation ACE™ ボデーに進化させて対応した。サイドフレームとロアメンバの結合効率の向上とロアメンバを高強度化することにより、エンジンルーム内での衝突エネルギーをサイドフレームも活用して効果的に吸収させた。さらに、ピラー、サイドシル、ルーフレールを高強度材で強化することでキャビンの変形を抑えている (Fig. 24)。これらにより、ACE™ ボデーではない車両に比べて、スモールオーバーラップ衝突への対応を軽量で高効率なボデー骨格で実現した。

5.9.2. ロールオーバー対応

ロールオーバー対応としては、スモールオーバーラップ対応でのキャビン強化とともにルーフ強度も耐荷重を高め、さらにロールオーバーセンサの設置をおこなった。万一の横転時に乗員の生存性を高めることに役立つとともにロール

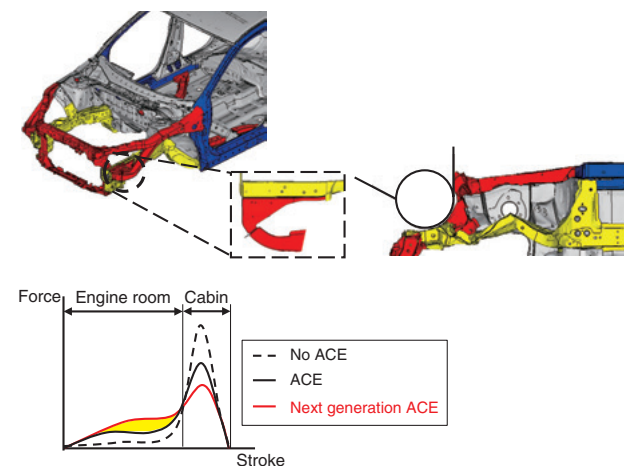
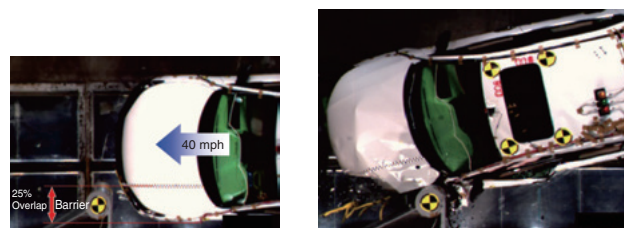


Fig. 24 Small overlap collision

オーバセンサにより最適なタイミングでサイドカーテンエアバッグを展開させる。サイドカーテンエアバッグは展開状態を持続できる構造とすることで乗員の頭部保護を図っている (Fig. 25)。

5.9.3. 新サイドエアバッグ構造

新サイドエアバッグ (SmartVent™) には、迅速に展開する高圧部と乗員に接する低圧部の二重構造を採用した。これにより、高速衝突時の乗員の傷害低減と、助手席の子供などの乗員への加害性の低減を両立させ、助手席の Occupant Position Detection System (OPDS) を不要とした (Fig. 26)。

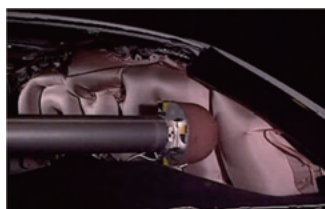


Fig. 25 Side curtain airbag

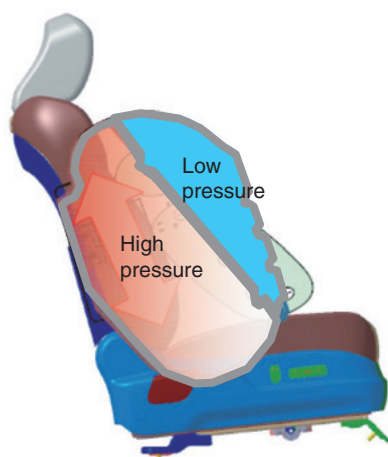


Fig. 26 Smart vent

6. まとめ

2013年モデルの新型北米 Accord は、エンジンやプラットフォームを新規開発したほか、数多くの新技術を取り入れた。このようにして、世界中のユーザに選ばれる、世界で最もバランスのよいセダンづくりにチャレンジすることで、これからの時代の要求にマッチした、最良のファミリーセダンを完成することができた。またクーペは、ダイナミックで洗練された上質なスタイリングに加え、セダンの技術を投入することで、よりアグレッシブなクルマに仕上げた。

新型 Accord は、お客様に、運転することが楽しく、安全で快適に運転する喜び、移動する喜びを感じていただけると確信している。

参考文献

- (1) 宮原哲也, 佐山満, 矢羽々隆憲, 大浜彰介, 畑恒久, 小林務: サブフレームへ適用可能な FSW を用いたスチールとアルミニウムの連続接合技術の開発, Honda R&D Technical Review, Vol.25, No.1, p.71-77

■ 著 者 ■



河野昌明



津嶋広通



秋元幸雄



巖和秀



原田紀之



長岡進



江口美彦

Honda Moto LINC の開発

Development of Information Services of Honda Moto LINC

片 山 睦*
Mutsumi KATAYAMA
星 智 弘*
Tomohiro HOSHI

今 野 健 志*
Takeshi KONNO
仙 野 雅 治*
Masaharu SENNO

丸 山 一 幸*
Kazuyuki MARUYAMA
片 岡 雄 一*
Yuichi KATAOKA

要 旨

近年、ネットワーク環境の充実やスマートフォンの普及などにより、欲しい情報を手に入れることが容易な生活環境になってきた。四輪車ユーザに対してもテレマティクスサービスなどにより、さまざまな情報が得られる環境が整ってきたが、二輪車ユーザに対してはこのような情報サービスが、これまでほとんど存在していなかった。しかしながら、二輪車ユーザには、適切な降雨降雪の事前情報や、急速に整備が進みつつある二輪車駐車場の情報など、二輪車ユーザに固有の情報への強いニーズがあった。

このような二輪車ユーザが必要としている情報を提供するために、降雨降雪マップ情報や雨具着用タイミング情報などの二輪車ユーザ向けの新サービスを開発し、メンテナンス情報や燃費情報などの既存四輪車向けサービスを二輪車ユーザ向けに一部変更した。そして、これらのアプリケーションを搭載した、世界初となる二輪車向け会員制テレマティクスサービスである、Honda Moto LINC をリリースした。

この開発により、二輪車ユーザに関わる困りごとの解決への一助となることができたと共に、二輪車利用の楽しさを拡大することにも貢献できた。

ABSTRACT

In recent years, it has become easy to obtain the desired information in our lives with the enhanced network environment, the spread of smartphones, and so forth. Telematics, together with other services, have created the convenience of a variety of information being available for car users as well. However, thus far, there has been almost no service providing these types of information for motorcycle users. At the same time, motorcycle users have been experiencing strong needs for information that is unique to motorcycle use, such as rain and snowfall information appropriately provided in advance while riding, and parking information for motorcycles as such parking facilities are increasing rapidly.

To provide the information needed for motorcycle users, new services for motorcycle users have been developed such as mapping information of rain and snowfall, and information to inform them in a timely manner as to when to put on rainwear. In addition, the existing services for car users such as maintenance information and fuel economy information have been modified to fit motorcycle users. These applications have been incorporated into Honda Moto LINC service to be released as the first known membership system of telematics services for motorcycle users.

This development has helped motorcycle users to manage the difficulties they face while riding, and has made a significant contribution to expand the joy of using motorcycles.

1. ま え が き

近年、スマートフォンの急速な普及により、いつでもどこでもネットワークや情報に繋がる社会へと変化している。Honda は従来から四輪車組込型ナビゲーション装置と携帯電話データ通信を用いたテレマティクスサービス internavi Premium Club を提供しており、リアルタイムな情報を利用した渋滞回避などで四輪車の利用を快適便利

にすると同時に、道路行政へ役立てることができる情報の提供をおこなっている^{(1), (2)}。さらに 2011 年春からはスマートフォンを利用したサービス internavi LINC の提供も開始した⁽³⁾。

一方で二輪車においては、大型ツーリングモデルのワールドウイング専用、二輪車用組込型としては初となるナビゲーション装置を開発した⁽⁴⁾。また、その他の車種向けとしては汎用的な後付型での対応としていた。しかしなが

*二輪 R&D センター

ら、そのいずれもネットワーク接続はできないために、二輪車ユーザ向けのテレマティクスサービスは存在していなかった。そこで internavi LINC と同様にスマートフォンを利用することにより、二輪車ユーザ向けテレマティクスサービスの提供が可能と考え、二輪車ユーザ向けテレマティクスサービスの開発に着手した。

二輪車版のアプリケーション開発にあたり、二輪車ユーザの困りごとの解決への一助となること、さらに二輪車利用の楽しさを拡大するような情報サービスを提供することを目的とした。

二輪車は構造や使い勝手が四輪車とは大きく異なるため、ユーザの困りごとや社会的要求も二輪車固有のものとなる。二輪車ユーザ固有の困りごとの例としては、乗員を覆い隠すような車体構造ではないための天候対応や、近年に首都圏の自治体において社会問題となった二輪車駐車場不足とその対策などが挙げられる。これら困りごとの解決には二輪車向け固有の情報が必要となる。

なお、サービスのネーミングについては、Honda ブランドにおける二輪車ユーザ向けサービスであるということを目でイメージできることが重要であると考え、四輪車ユーザ向け internavi LINC のブランドイメージを踏襲しつつ、二輪車向け固有サービスであることを明確化するために Honda Moto LINC と名付けた。

世界初の二輪車ユーザ向け会員制テレマティクスサービス Honda Moto LINC は 2012 年 4 月 12 日に運用開始した。本稿ではそのサービス内容、機能を紹介する。

2. 提供するサービス・アプリケーションの開発

二輪車ユーザが必要としている情報を提供するにあたり、四輪車ユーザ向け internavi LINC には含まれていないサービスを新たに開発する必要があった。また、四輪車向けに既に提供されているアプリケーションであっても、二輪車用に一部変更する必要があった。

これらの課題を解決するためにおこなった検討と開発の内容を以下に詳述する。

2.1. 二輪車ユーザ向けの独自のサービス

二輪車に特化した新サービスとして、降雨降雪のマップ情報、雨具着用タイミングの情報、二輪車駐車場の情報、二輪車販売店の情報、ツーリングの情報の 5 項目を開発した。以下にその個々について述べる。

2.1.1. 降雨降雪のマップ情報提供の開発

目的地への到達予想時刻の現地天気情報を提供するサービスが、既に四輪車向けサービスとして存在している。ところが二輪車でツーリングでは、移動ルート途中の天気次第で目的地そのものを変更することも少なくない。そのため、目的地付近の天気予報だけでなく、ツーリング途中

における天気現況と予報とを判りやすく提供することは、二輪車ユーザにとって、困りごと解決への一助となる⁽⁵⁾。

ツーリングで利用するための降雨降雪情報は、現況や予報が高い頻度で更新され、ルート途中およびその付近の天候状況が分かりやすいことが重要である。

さらに、インターネットや携帯ウェブサイトの既存の天気情報サービスは、表示画面が都道府県単位や地方単位で区切られている場合が多い。また、県境などの行政区画は表示されるが道路形状の表示はほとんどない。このため既存の天気情報サービスは、ツーリングルート沿いに天気現況や予報を見る用途や、任意の地域詳細を拡大して見たい場合には向いていないのが実情である。

そこで、道路地図表示の画面に降雨降雪情報を重ねて表示し、画面上での地図のスクロールと拡大縮小を可能な仕様とした。

また、降雨降雪マップで表示する気象情報には、日本気象協会 (JWA) による 10 分毎の予報情報を採用している。降雨量・降雪量の情報は 1 時間あたり 1 mm 以上、5 mm 以上、10 mm 以上、20 mm 以上、30 mm 以上、50 mm 以上の各レベル、および雪を加えた 7 種類を色別で分類し、2.5 km 四方メッシュ単位の表示とした (Fig. 1)。

現況に対する予想時刻は 1 時間の間隔で 3 時間後までとした (Fig. 2)。

降雨降雪のマップ情報は、二輪車ユーザに向けた独自のサービスとして開発を始めたが、四輪車ユーザや車を利用していない日常の場面でも役立つものと開発の途中で認知され、四輪車ユーザ向けの internavi LINC にも新アプリケーションとして追加された。



Fig. 1 Rain and snowfall map (enlarged)

2.1.2. 雨具着用タイミングの情報

二輪車で走行中に雨に降られた場合は雨具を装着する必要がある。その際には、雨具を装着し終えるまでの間、安全に二輪車を停車できるスペースの確保が必要であるが、あらかじめ雨具が必要となるタイミングが分かれば慌てずに対応できる。このような情報は二輪車ユーザの困りごとへの解決の一助となりえる⁽⁵⁾。

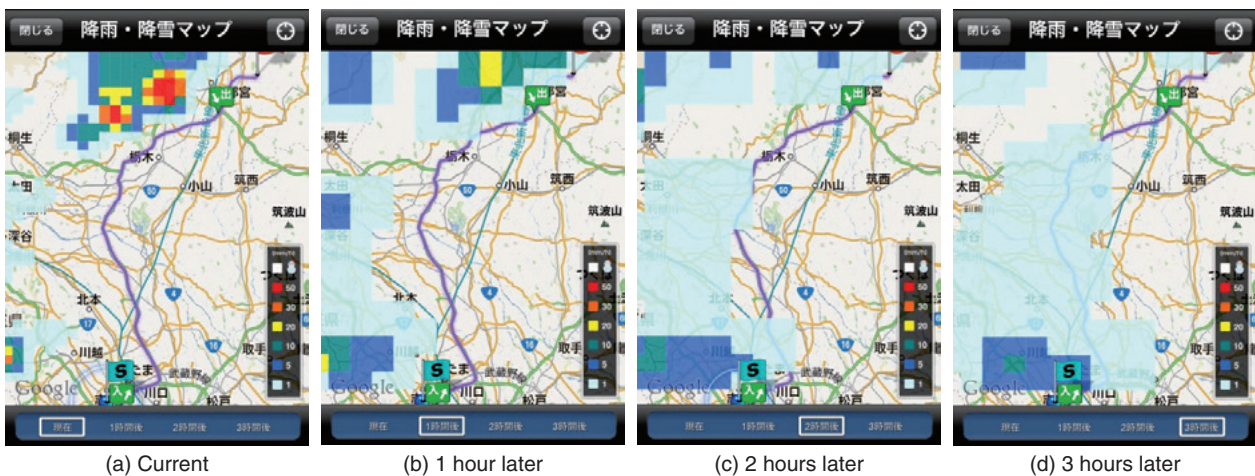
四輪車向け internavi LINC には、防災情報提供サービスの一つに集中豪雨などの大雨警報 (Fig. 3) の提供がある。そのサービスを二輪車向け天候情報として有効活用する方法を検討した。

四輪車向けの大雨警報そのままの判定閾値では、警報が鳴った頃には既に身体が雨に濡れてしまっていることは容易に想像できる。そこで大雨警報の判定ロジックはそのまま利用しつつ、判定閾値を変更することで対応する仕様とした。判定閾値は降雨降雪予報の降雨量最低値である 1 時間あたり 1 mm 以上とした。

降雨量が 1 時間あたり 1 mm 以上の場合は、雨具を着用しないと二輪車を快適に運転できないことを過去の経験に

より把握していた。しかし実際にどの程度濡れるのか、その状態が二輪車ユーザにどのように感じられるのかを、降雨降雪マップの試作版を用いて雨雲を探し、実際に走行し確認した。その結果、雨中の走行時間の長短といった条件による差はあるものの、上記のとおりに変更した値は二輪車用の雨具装着タイミングの判定閾値として適していると判断した。

また、ツーリング走行中での使い勝手として、進行方向に対して後方の雨についての通知は不要である。その一方、進行方向前方の雨については、車速に応じて通知タイミングを調整する機能があると、二輪車ユーザにとって情報の価値は高まる。そこで、ルート設定をおこなった場合には、目的地へのルート沿い進行方向に 1 時間あたり 1 mm 以上の降雨予報があり、かつ 20 分後の自車の到達予想位置がその範囲へ入る場合にアラーム表示するといった仕様とした。これにより、高速道路では車速が高いため遠くの雨を、一般道では車速が低いため近くの雨を知らせることが可能となった。さらに、ルート設定がおこなわれていない場合には、自転車位置を中心とした範囲で判定する仕様



© 2011 Google-Map data © 2011 ZENRIN

Fig. 2 Rain and snowfall map (Current condition and forecast)

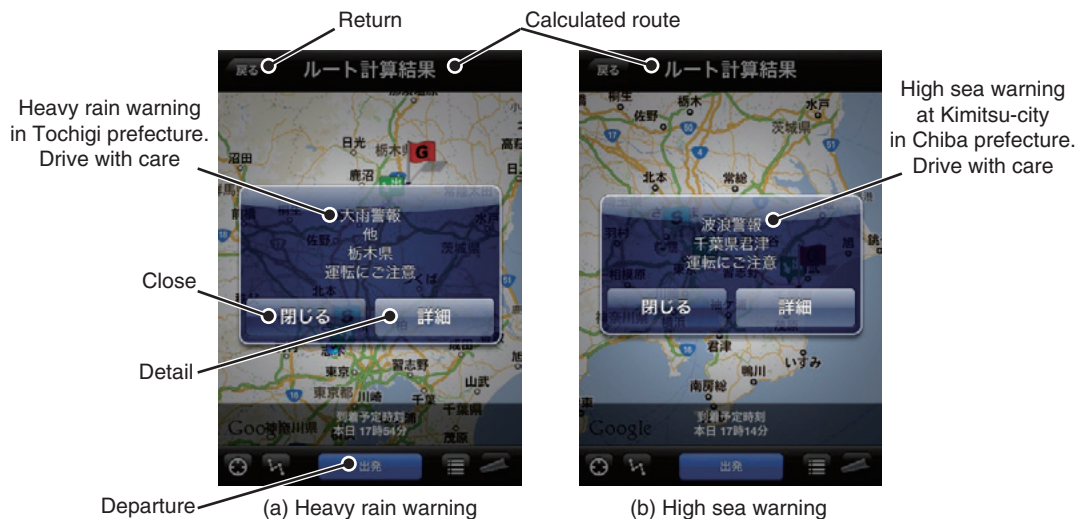


Fig. 3 Warning of bad weather conditions

とした。これにより、出発前でこれからルート設定をおこなう際にも、雨が近づいていることを知らせることが可能となっている (Fig. 4)。

このサービスは、親しみやすく覚えやすいネーミングとして「カッパアラーム」と名付けた。雨具の「合羽」と民話に登場する「河童」にちなんだものである。

2.1.3. 二輪車駐車場の情報提供の開発

二輪車駐車場 (自転車, 50 cc 以下の原付を除く) は平成 18 年 (2006 年) 以前にはほぼ存在しないに等しいといえる状態であった。この年の 6 月におこなわれた道路交通法改正にともない強化された駐車違反取締りは、二輪車、四輪車を問わずに実施された。それ以前は駐車場法の適用外だった二輪車 (50 cc 超) に関しては、駐車場の整備が進まないままであったため、東京や大阪など首都圏を中心として一時的に社会問題化した。

その結果、自治体ごとに補助金支給などの促進策が開始され二輪車駐車場の整備は始まったが⁽⁶⁾、依然として二輪車ユーザの 60% 以上が駐車場探しで困った経験をしてい

る^{(5), (7)}。

駐車場に関する情報では、混雑状況をはじめ、新設、廃止、などに関する情報の更新が重要である。整備が始まったばかりの二輪車駐車場は、新設、廃止などの変化が多く、駐車場情報データベースの更新にも多大な負担がかかった。現在は、二輪車業界団体である日本二輪車協会 (NMCA) がウェブ上で公開している、二輪車駐車場情報が日本で最もデータ量が豊富で、継続的更新がおこなわれるデータベースとなっている。

この情報をより手軽に活用できる環境を二輪車ユーザに提供することが望ましいと考え、Honda Moto LINC のトップメニュー (Fig. 5) に NMCA 二輪車駐車場情報へのリンクアイコン (Fig. 6) を加えた。それにより、二輪車ユーザが必要に応じ簡単な操作で駐車場検索をおこなえる仕様とした。

2.1.4. 二輪車販売店の情報

ツーリング先で車両トラブルが発生した場合、最寄りの二輪車販売店を容易に検索できることは、二輪車ユーザに



(a) With route setting



(b) Without route setting

Fig. 4 “Kappa” alarm



(a) Page 1



(b) Page 2

Fig. 5 Top menu

とって大きな安心感につながる。しかし、現状では日本国内の二輪車販売店情報をデータベースとしてまとめたものが無いため、既存の二輪車用ナビゲーション装置であっても二輪車販売店の検索は難しかった。ただし Honda 二輪車正規取扱店に特化すれば既にデータベース化されており、Honda ウェブサイトに検索ページが公開されている。

そこで Honda Moto LINC のトップメニュー (Fig. 5) に販売店検索へのリンクアイコン (Fig. 7) を加え、アイコンボタン操作で Honda ウェブサイトでの検索を可能にした。Honda ウェブサイト側のデータが更新されることで、スマートフォンでも最新情報が閲覧可能となる。

同時に、スマートフォンのアプリケーション間連携機能への対応を Honda ウェブサイト側にほどこした。これにより操作ボタンを一度押すだけの簡単な操作で、検索した販売店の位置をスマートフォン側のロケータの目的地設定へとジャンプさせることができる。

以上によって、販売店の検索操作からルート計算までをひと続きの操作で可能にするとともに、スマートフォン自体に負担を掛けずにサービスを提供することができた。

2.1.5. ツーリングの情報提供の開発

internavi LINC が提供している「ドライブ情報」は、おすすめスポットなどのコンテンツは充実しているものの、あくまで四輪車のドライブ向けの情報が主体である。二輪車でのツーリングと四輪車でのドライブとでは前述したように嗜好や目的が異なるため、ツーリング向けには独自のコンテンツが求められる。

Fig. 8 を用いて、出発地 IC1 から目的地 Pd への二輪車でのツーリングを計画する場合を例にして、必要な情報について説明する。

四輪車でのドライブでは一般的に目的地 Pd が旅行または移動の最終到達地点であり、出発地 IC1 から目的地 Pd へ至るルートとして高速道路 A や幹線道 B を選択する。一方、ツーリングでは幹線道の山道 C1 や小道の山道 D1、砂利道 D3 等の、目的地までの移動過程そのものを楽しむことが目的となることが多い。そのため、目的地 Pd には

折り返し地点や便宜上立ち寄る地点としての意味しかないことがある。

四輪車用ドライブ情報は、一般的に目的地 Pd の選定に際し参照することを目的として編集されるため、幹線道の山道 C1 や砂利道 D3 等の道路そのものに関する情報はほとんど掲載されていない。そのため、二輪車でのツーリングで参照する情報集としては不十分なものとなる。

そこで二輪車でのツーリングを対象とした情報集としては、目的地の推奨だけでなく、移動過程を楽しむための推奨ルートをコンテンツとして掲載したうえで、スマートフォン側のロケータでのルート計算時に推奨ルートを選択できるように連携機能を持たせることが望ましい。

Honda Moto LINC 初回リリースには間に合わなかったが、スマートフォン側のロケータとの連携機能を埋め込んだツーリング用地図の電子書籍化をおこない、2012 年 10 月末より提供することとなった^{(8), (9)}。

2.2. 二輪車ユーザ向けに変更した既存サービス

四輪車ユーザ向けの internavi LINC のサービスを基に、二輪車ユーザに有用なものとするため下記の変更を加えた。

・メンテナンス情報

定期メンテナンス部品の種類や推奨交換サイクルが二輪車と四輪車では異なるため、部品の種類や推奨交換サイクルを二輪車の基準にしたがって変更した。

・燃費情報

グラフ表示の最大目盛りが四輪車のみを想定していたため、スーパーカブ等の燃費の良い二輪車ではグラフ目盛り内に収まらない。そのため表示領域を燃費の値に応じて自動的に拡張表示するものとした。最大 100 km/L まで対応可能にした。

・会員登録

これまでの会員登録は国内向け四輪車の車台番号を用いていた。二輪車は四輪車とは、同じ国内向けであって



Fig. 6 Link icon for motorcycle parking information



Fig. 7 Link icon for dealer search

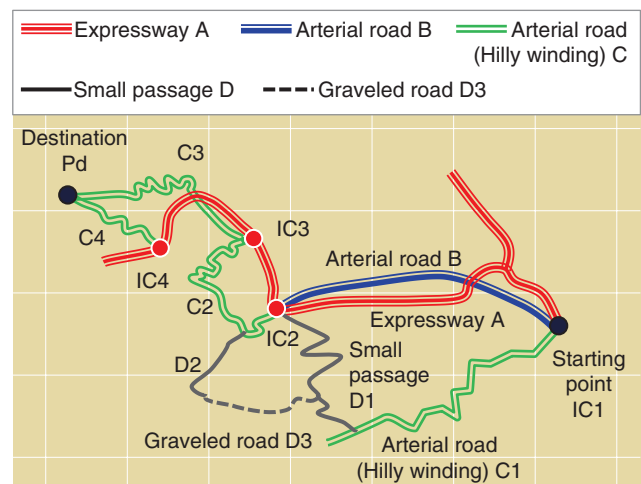


Fig. 8 Road information for motorcycle touring

も車台番号の桁数構成が異なる。そのうえ国内に多数入荷している輸入二輪車も車台番号の桁数構成が異なっている。

そこで二輪車の車台番号も登録可能な桁構成へと会員情報データベースを変更したうえで、1980年以降に販売した国内外向け500車種以上の車種データベースを用意した。これによりHondaの二輪車であれば国内向けか輸入車かを問わず登録が可能になった。

3. ユーザインタフェース

3.1. アイコンとメニュー画面のデザインコンセプト

アプリケーションの魅力は、コンテンツだけでなくメニュー画面デザインにおいても高い付加価値を求められる。優れたデザインは、使ってみようと感じるきっかけとしても重要である⁽¹⁰⁾。

Honda Moto LINCのアイコンは、スマートフォンのトップ画面に他アプリケーションのアイコンとともに並ぶため、Honda Moto LINCの「顔」と言える。internavi LINCアイコンとのデザインの整合性を保ちつつ、走行中の二輪車をイメージさせるデザインとした(Fig. 9)。

Honda Moto LINCのトップ画面はinternavi LINCのトップ画面のイメージを踏襲し、各機能アイコンは二輪車向けを意識したデザインとした(Fig. 5)。

3.2. トップ画面から各サービスへの遷移

トップ画面の機能アイコン配置はinternavi LINCを踏襲しつつも、二輪車用として想定される使用頻度の高いものをトップ画面1ページ目の上段に配列し、低いものを2ページ目に配列した。

操作性しやすさの観点で、状態遷移や操作に対する反応時間の検証をおこなった。その結果、タップ操作かスライド操作かの判断を容易とするためのボタンデザイン変更などを実施した。



Fig. 9 Honda Moto LINC icon

4. リリース後の対応

二輪車向け会員制テレマティクスサービスとして世界初となるこのアプリケーションは、4月12日にリリースされて以降、ダウンロード数の累計が最初の1か月間で1万件を超え、6か月後には2万件を超えた(Fig. 10)。

2012年11月10日までのダウンロード数累計はiPhone版が14,300件、Android版が8,500件、合計で22,800件あまりとなっている。

なおリリースに先立ち、2012年3月に国際自動車通信技術展(ATT)とモーターサイクルショー(東京・大阪)にてスマートフォンを用いたデモンストレーションをおこない、来場者から数多くの期待の声が寄せられた。ダウンロード数の推移については最初の5日間で累計5千件を超えているが、これはこのデモンストレーションによる期待効果がリリース直後に現れたと考えられる。

それ以降1日あたりダウンロード数は徐々に下降しつつも、ゴールデンウィークを含んだ最初の1か月間で累計1万件を超えた。6月以降は毎日数十件で安定し、夏休み時期でもダウンロード数の推移に大きな変化は見られなかった。

その後目立った変化が生じるのはツーリング地図の電子書籍化の発表日10月10日で、この当日から5日間にわたり100件以上のダウンロード数が続いた。実際のツーリング地図の利用開始日はまだ3週間後であるにもかかわらずダウンロード数が増加したことは、ツーリング地図に対する二輪車ユーザからの期待が大きいことを示している。3週間後となるツーリング地図の利用開始日10月31日においては、その前日からダウンロード数が1日100件を超え、それが1週間あまり続くこととなった。

Honda Moto LINCのリリース後は、二輪車専門誌をはじめとするジャーナリストの方々から「画期的」「とても便利」といった評価を頂き、特にカッパアラムには「ライダーへの愛を感じる」とのコメントもあった⁽¹¹⁾。

またHonda二輪車ユーザの皆様からは、二輪車初の取り

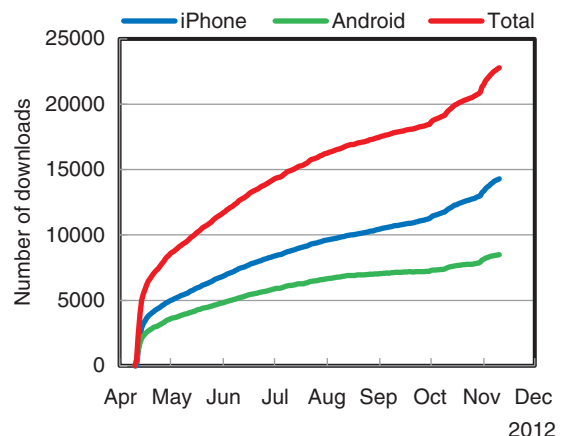


Fig. 10 Download counts

組みに対する応援のメッセージとともにアプリケーションやサービスに関する改善要望も多数頂くことができた。

5. まとめ

二輪車ユーザが必要としている情報を提供するにあたり、二輪車ユーザ向けの新サービスの開発と、既存サービスの二輪車ユーザ向け一部変更をおこない、二輪車向け会員制テレマティクスサービスとして世界初となる Honda Moto LINC を開発した。

新規に開発したサービスとして、

- (1) 降雨降雪のマップ情報提供
- (2) 雨具着用タイミングの情報提供 (カップアラーム)
- (3) 二輪車駐車場の情報提供
- (4) 二輪車販売店の情報提供
- (5) ツーリングの情報提供

さらに一部変更をおこなった既存サービスとして、

- (1) メンテナンス情報
- (2) 燃費情報
- (3) 会員登録

などを開発した。

これらの開発により、二輪車ユーザに関わる困りごとの解決への一助となることができたと共に、二輪車利用の楽しさを拡大することにも貢献できた。

6. あとがき

本サービスのリリース後お客様から頂いた高い評価と更なる改善要望に応えるべく、Hondaにとって二輪車ユーザとの新たな接点となったこのアプリケーションの改善を通して、新たな価値の提案を今後も継続していきたい。

本開発にあたり、二輪車駐車場情報の利用に関してご協力を頂いた日本二輪車協会 (NMCA) 様に紙面を借りて厚く御礼申し上げます。

参考文献

- (1) 今井武, 柘植正邦, 菅原愛子: インターナビ・フローティングカーシステムと渋滞情報について, IATSS Review, Vol.31, No.1, p.39-45(2006)
- (2) 今井武, 田村和也: フローティングカーデータ (プローブ) によるグリーン ITS へのさらなる取り組み, 自動車技術会 学術講演会前刷集, No.5-11, p.11-14(2011)
- (3) <http://www.honda.co.jp/news/2011/4110331.html>, 2011/3/31
- (4) 村澤直喜, 鈴木浩二, 安藤正訓, 西本修, 池上健太郎, 盛田裕之: 二輪車用ナビゲーションシステムの開発, Honda R&D Technical Review, Vol.18, No.2, p.75-81

- (5) 日本自動車工業会: 2011 年度 二輪車市場動向調査, 日本自動車工業会, p.32-P33, p.75(2012)
- (6) <http://www.metro.tokyo.jp/INET/OSHIRASE/2009/04/20j4u100.htm> 2009/4/30
- (7) 日本自動車工業会: 二輪車駐車環境の向上をめざして 民間駐車場事業者調査 報告書, 日本自動車工業会, p.7, p.38-42(2006)
- (8) <http://www.honda.co.jp/news/2012/2121010.html>, 2012/10/10
<http://www.honda.co.jp/MotoLINC/touringmapple/>
- (9) http://www.canvasmapple.jp/company/news/pdf/release121010_2.pdf, 2012/10/10
- (10) Josh Clark: iPhone アプリ設計の極意 一思わずタップしたくなるアプリのデザイン, オライリー・ジャパン (2011)
- (11) http://blog.livedoor.jp/youngmachine_blog1/archives/1530839.html, 2012/3/16

■ 著 者 ■



片 山 睦



今 野 健 志



丸 山 一 幸



星 智 弘



仙 野 雅 治



片 岡 雄 一

EV 用バッテリーシステムの開発

Development of Battery System for EV

姉 川 彰 博*

Akihiro ANEKAWA

山 本 康 一*

Koichi YAMAMOTO

要 旨

コンパクト性、高耐久性をねらいとしてEV用バッテリーシステムを開発した。動力源としてのバッテリーには、耐久性や回生特性に優れた東芝製リチウムイオンバッテリーSCiBを採用した。車両が求める走行レンジに必要なエネルギー量のバッテリーを最密距離で接続し、耐環境性に優れたシール構造を有するバッテリーボックス内に収納した。FIT EVの居住性を損なうことなくコンパクトに床下に設置するために、冷却のためのバッテリーファンや高圧電気安全デバイスとともにバッテリーシステムを構成した。バッテリーシステムの耐久性を検証したところ、バッテリー自身の優れた耐久性に加えて、冷却システムの効果により車両の運用期間に渡り、高いレベルを維持していることを確認した。

ABSTRACT

A battery system for EV use has been developed with the aim of realizing compactness and high durability.

The system employs Toshiba SCiB lithium-ion batteries, which display good durability and power regeneration characteristics, as the power source. Sufficient numbers of batteries to provide the energy necessary for the driving range demanded for the vehicle have been connected in a densely packed configuration and fitted in a battery box case employing a seal structure providing good environmental resistance. Together with battery fans for cooling and high-voltage safety devices, this comprises a battery system designed to be installed compactly under the floor of the vehicle without sacrificing the interior comfort of the FIT EV. In addition to demonstrating that the batteries themselves displayed good durability, verification of the durability of the battery system indicated that the cooling system helped to ensure the maintenance of a high level of performance over the entire period of vehicle use.

1. まえがき

Hondaは化石エネルギー枯渇と地球環境保護への対応の一つとして車両電動化の技術開発を進め、魅力ある商品提案をおこなってきた。2012年夏に米国と日本にてリース販売を開始したFIT EVは、ナンバーワンの電費(燃費)性能(EPA認可値 リース販売開始時)を達成するとともに、3モードドライブによる運転する楽しさも合わせて提案するEVである。これを支えるのは100 kWの高出力と20 kWhの容量を有するバッテリーシステムであり、床下に高密度パッケージで搭載されFIT EVの高い居住性に貢献している。また、冷却システムを備えることでより高い耐久性をも確保しており、使用期間に渡ってお客様の使い勝手や安心感を向上させている。本稿では、FIT EVのバッテリー

システムについて、ベースとなるバッテリーの特性とそれを踏まえたバッテリー冷却の考え方と構造およびバッテリーシステムの耐久性について述べる。

2. 開発のねらい

EVの動力源はバッテリーであるため、航続距離を向上させると一般的に必要なバッテリーの搭載量も多くなる。これにともないバッテリーの占める容積や重量も大きくなる。FIT EVのベース車両であるFITは、コンパクトなボデーながら高い居住性に好評を得ている。この優れた点を損なわないよう、必要なエネルギーを確保しながらもシステムの小型化に重きをおいて開発をおこなう必要がある。

また、EVに見られる多数のバッテリーを接続して成る

*四輪R&Dセンター

バッテリーシステムは、車両運用期間において車両性能を維持することが必要である。バッテリーの搭載数が多いEVにおいては、使用環境の違いがバッテリーの特性変化の違いにつながる。特性変化は、バッテリーの温度、State of Charge (SOC)、通電電流等の因子から影響を受ける。バッテリーの温度は、特性変化に影響を与える因子の一つであるが、バッテリー温度はバッテリーシステム内で異なる分布を持つため、バッテリーの特性に差が生じることになる。バッテリーの発熱特性とバッテリー単体の温度に対する性能変化を踏まえた上で、多数のバッテリーを一樣な温度環境下に置くことを可能とする冷却システムは車両性能を維持する上で重要なデバイスである。

EV 用バッテリーシステム開発に際して以下の2点を主要なねらいとした。

- (1) 優れた居住性に寄与するバッテリーレイアウト
- (2) 高い耐久性を維持するバッテリーシステム

3. システムの構成と性能

3.1. 冷却システムの構造と性能

冷却システムを設定する上で、米国の温度環境や交通インフラ状況、日本での急速充電のニーズ、バッテリーの温度に対して影響を与える因子に対して、特に配慮をおこなった。FIT EV 搭載のバッテリーシステムは、床下に配置され、外気を冷却風として用いている。このため走行時には駆動系からの排熱の影響 (Fig. 1) を受ける。駐車時には路面からのふく射熱の影響 (Fig. 2) も受ける。また、屋外放置時には日射による車室内の温度上昇に伴いバッテリーシステムも熱影響 (Fig. 3) を受ける。搭載バッテリー数が HEV に比べて

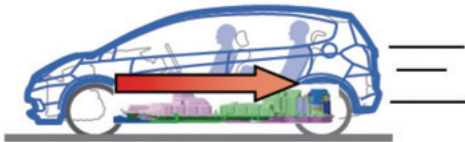


Fig. 1 Influence of exhaust heat during vehicle operation



Fig. 2 Influence of radiant heat from road

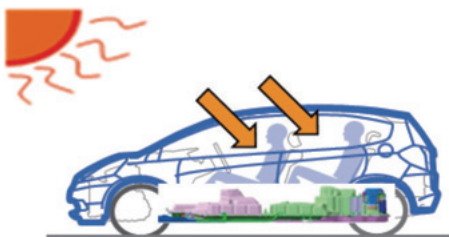


Fig. 3 Influence of sunlight when vehicle is parked

多いEVでは、これらの影響を踏まえて冷却システムを構築する必要がある。

バッテリーの冷却手法に対し、直接冷却と間接冷却の二つの方法が候補として挙げられる。直接冷却は、外気を用いた冷却風がバッテリーボックスケース内を流れ、バッテリーに当たり、直接熱交換をおこなう。間接冷却は、バッテリーの熱がバッテリー下部面から伝熱部材およびバッテリーボックスケースに伝わり、二重構造であるバッテリーボックスケース内を通過する冷却風と熱交換をおこなう。直接冷却の方がバッテリーの冷却能力は高いが、直接冷却は導入された外気に含まれる異物や塵埃や水分が、バッテリーの接続部に侵入することの防止が必須となる。FIT EV では、ユーザの使い方におけるバッテリーの発熱量の確認結果をもとに防塵や防水構造の無いコンパクトなバッテリーボックス構造が可能となる間接冷却を採用した。

間接冷却での冷却構造を Fig. 4 に示す。セル下部とバッテリーボックスケースの間には伝熱部材が設置され、バッテリーの発熱を効果的にバッテリーボックスケースへと伝える。二重構造であるバッテリーボックスケース内に設置された冷却風通路には、冷却面積を増加させ、冷却風の流れによりバッテリー温度がボックスケース全体で均一となるようにフィン状のガイドを設置した。二つのバッテリーファンにより導入された冷却風は、バッテリーボックスケース内の冷却通路を通過する際に、バッテリーと間接的に熱交換をおこなう。

冷却構造の設定においては、すべてのバッテリーに対して効率よく冷却をおこない、バッテリーの温度を所定の範囲内に収めることが可能な構造とするためにシミュレーションを繰り返しておこなった。Fig. 5 にバッテリーボックスケース内の冷却風の流れの様子を示す。冷却風は熱交換を伴いながらバッテリーボックスケース内を通過する。Fig. 6 にバッテリーシステムの冷却能力の検証結果を冷却無しの場合との比較で示す。冷却システムを持たない場合、走行と充電を繰り返した場合には温度上昇が抑制できず、バッテリーの耐久性確保のための上限温度を超えてしまう。一方で、冷却システムを備えたバッテリーシステムでは、バッテリー温度の上昇は抑制され、上限温度を超えることが無いため、

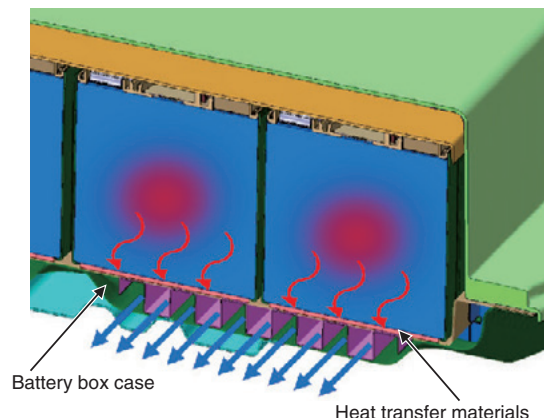


Fig. 4 Indirect cooling configuration

車両のパワーセーブも無く、継続した運用が可能である。

3.2. バッテリーレイアウト

SCiB は平均電圧が一般的なりチウムイオンバッテリーよりも低いため、高電圧化し、必要なエネルギーを確保するには多くのセル数を必要とする。このため、多くの SCiB を組み合わせたバッテリーシステムの容積は、一般的なりチウムイオンバッテリーのシステムの容積に対し、相対的に大きくなる。一方で、ベースとなる FIT の優れた居住性を損なうことなくバッテリーシステムを車両内に配置することも重要であり、ここにおいて最密なバッテリーレイアウトを検討する必要がある。バッテリーシステムの基本コンポーネントであるバッテリーモジュールの部分概要図を Fig. 7 に示す。間接冷却の採用により、セル間に冷却風を通す空間を設ける必要が無いため、モジュールにおけるセル間はセパレー

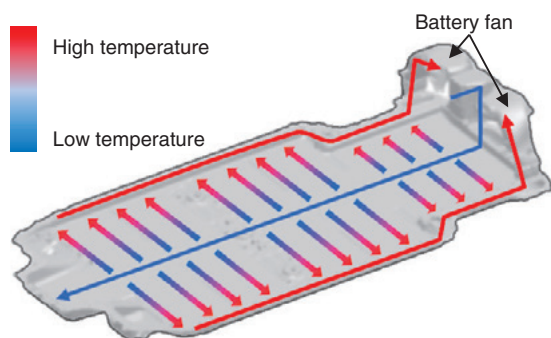


Fig. 5 Cooling air flow in battery box case

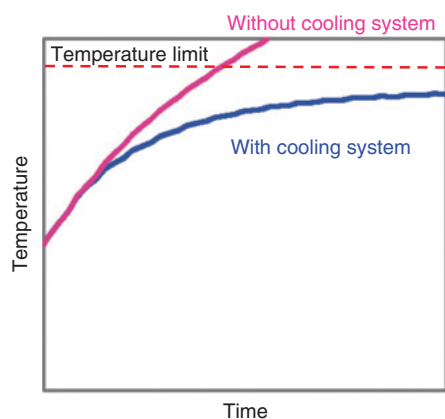


Fig. 6 Results of cooling tests

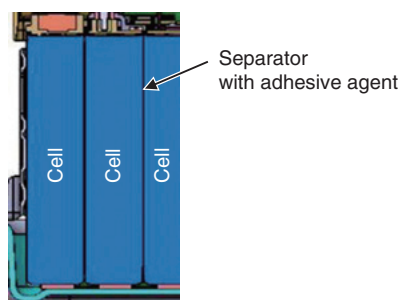


Fig. 7 Structure of battery module connection (Overview)

タを介して接着接合されており、モジュールとしての強度を確保するとともに最密な構造を成立させている。これにより、バッテリーレイアウトと優れた居住性を両立することができた。

3.3. チタン酸リチウム (LTO) 系バッテリーの特徴

一般的なりチウムイオンバッテリーは、正極に金属酸化物、負極に炭素材を活性物質として用いている。一方、今回 FIT EV で採用した SCiB は、正極に金属酸化物を用いているところは、一般的なりチウムイオンバッテリーと同じであるが、負極に LTO を活性物質として用いている点が特徴である。電極活性物質としての LTO の熱安定性の評価結果として、負極材料の Li 吸蔵時の電解液との示差熱分析結果を Fig. 8 に示す⁽¹⁾。参考文献 (1) におけるグラフにハードカーボンの結果を加えている。グラフ縦軸は、電解液との反応熱量を表している。リチウムイオン電池で用いられる黒鉛は、240℃ 付近に高い発熱ピークを示しているが、LTO は発生熱量が黒鉛の 1/10 以下であり、またリチウムイオンバッテリーの負極材として用いられているハードカーボンよりも発生熱量が小さいので、高い熱安定性を有している。

次に、一般的なりチウムイオンバッテリーの電位特性を Fig. 9 に、SCiB の電位特性を Fig. 10 に示す。

一般的なりチウムイオンバッテリーの負極は、充電時に 0 V 付近まで電位が低下するのに対し、SCiB は充電時も負極の電位が約 1.5 V で一定である。このため、SCiB の平均電圧は 2.3 V となり、一般的なりチウムイオンバッテリーの平均電圧である 3.6 V に対し低い。ところで、負極電位がリチウム析出電位近傍まで低下すると負極上にリチウム金属が析出する場合がある。リチウム金属析出はリチウムデンドライト (針状結晶) 発生の要因となり、バッテリーの可逆容量や耐久性の低下につながる。一般的なりチウムイオンバッテリーは、リチウム金属析出を避けるため、満充電時、特に低温時では、バッテリー電圧の細かなコントロールが要求されたり、満充電ができない、あるいは満充電に時間がかかる等の課題が発生する。一方、SCiB はリチウム金属析出電位近傍まで負極電位が低下することは無い。このた

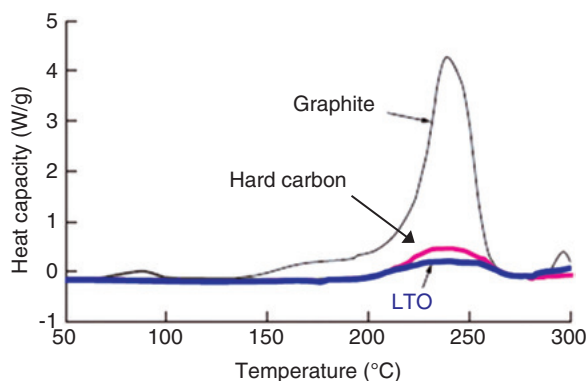


Fig. 8 Reaction heat capacity of cathode material with electrolyte during Li occlusion

め、リチウム金属析出が起こらず、可逆容量の維持や耐久性の向上につながる。

3.4. SCiB 性能

Fig. 11 に -10°C における各種バッテリーの各 SOC における回生受け入れ性を示す。SCiB は高い回生受け入れ性を有することがわかる。

SCiB は一般的なりチウムイオンバッテリーに対して、優れた耐久性を持つことが報告されている⁽¹⁾が、SOC や温

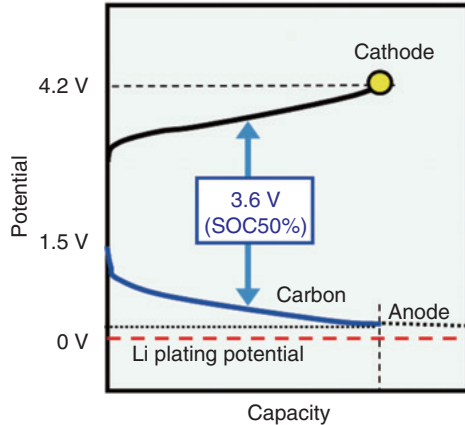


Fig. 9 Potential characteristics (Typical lithium-ion battery)

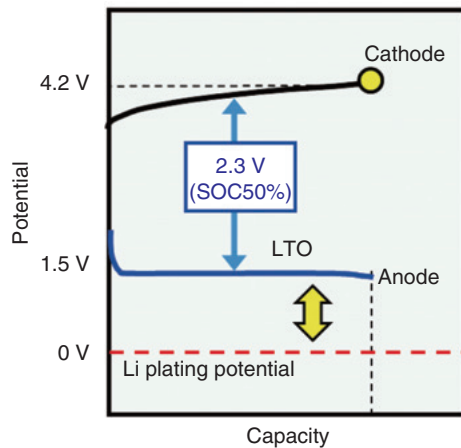


Fig. 10 Potential characteristics (SCiB)

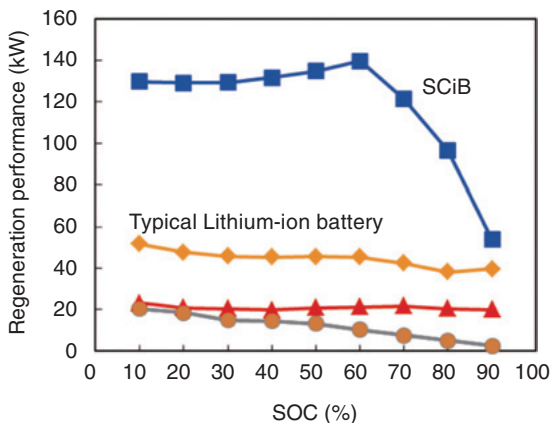


Fig. 11 Regeneration performance (-10°C)

度の影響で容量の低下や抵抗の上昇といった性能低下が発生する。代表例として、Fig. 12 に温度を 2 水準設定して抵抗の変化をテスト確認した結果を示す。45 $^{\circ}\text{C}$ の方が抵抗上昇が大きいことが確認できた。温度が高いほど、性能低下が大きくなるのは、一般的なりチウムイオンバッテリーと同じである。また、SCiB の性能変化は、一般的なりチウムイオンバッテリーと同様に時間の 1/2 乗則⁽²⁾を用いることで整理可能である。

Fig. 12 のテスト結果に対して時間の 1/2 乗則で整理した結果を Fig. 13 に示す。時間の 1/2 乗に對し、抵抗の増加は直線性を示すことを確認した。直線の傾きからそれぞれの温度における抵抗の性能変化係数が得られる。同様にして、バッテリー単体に対し車両の使い方を踏まえ、充放電サイクル時と放置時における容量と抵抗の性能変化のテスト結果から算出された性能変化係数を Fig. 14 に示す。SCiB は放置時よりも充放電時(車両走行時)に性能変化が大きいことがわかった。このような性能変化の把握から、SCiB に適した使用範囲を設定した。

また、サイクルテストや放置テスト結果から得られた性能低下係数を基に車両運用中の SCiB の性能変化が推定できる。さまざまなユーザーの使い方に対する SCiB の性能変化を推定し、検証することが可能である。さらにユーザーの使い方に対して負荷の大きな条件設定をすることで加速試験が可能である。

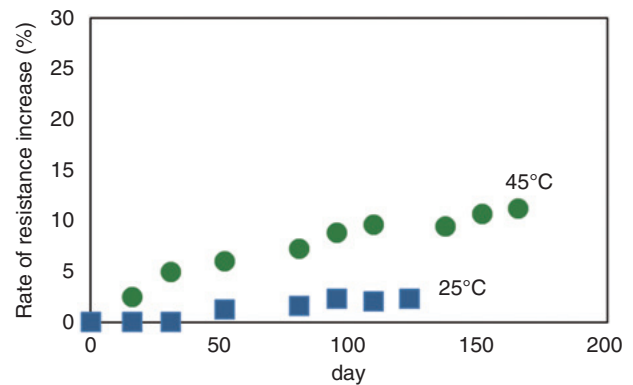


Fig. 12 Change in resistance

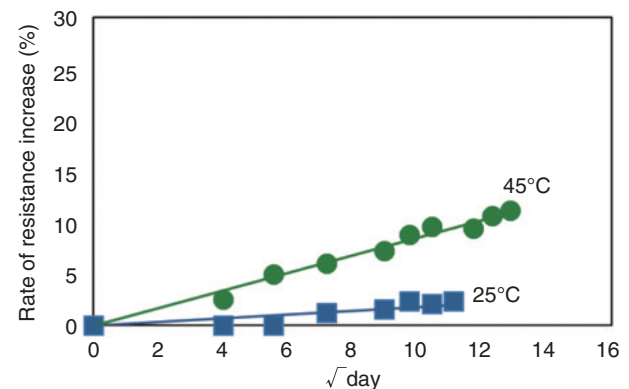


Fig. 13 Change in resistance

3.5. バッテリーシステム耐久性

EV 用バッテリーシステムの開発においては、EV が使われる地域の温度環境、交通や充電インフラ等の状況を踏まえ、バッテリーの耐久性を十分に検証しなければならない。これまでのテスト結果から温度がバッテリーの性能変化に影響を与えることが確認できたので、バッテリー発熱への配慮は必要である。HEV と異なり EV は、動力源がバッテリーのみであるため、車速が高くなるほどバッテリーからの通電電流も多くなり、バッテリーの発熱も大きくなる (Fig. 15)。ハイウェイでの走行を含めたユーザの使い方における平均車速と通電電流の分布を基に、ユーザ使用条件を網羅できる車速を設定し、発熱負荷として EV の耐久テストをおこなった。

EV の耐久テスト結果を Fig. 16 および Fig. 17 に一般的なりチウムイオンバッテリーの結果と合わせて示す。

耐久性に優れた SCiB を採用したことと冷却システムがバッテリーの温度をコントロールしていることの効果がテスト結果にあらわれている。車両運用期間における性能変化は一般的なりチウムイオンバッテリーに対し、容量で 1/5 および抵抗で 1/2 程度であり、航続距離に与える影響を大きく抑えることができた。また、抵抗上昇も FIT EV の動力性能を損なわないレベルであることも確認できた。

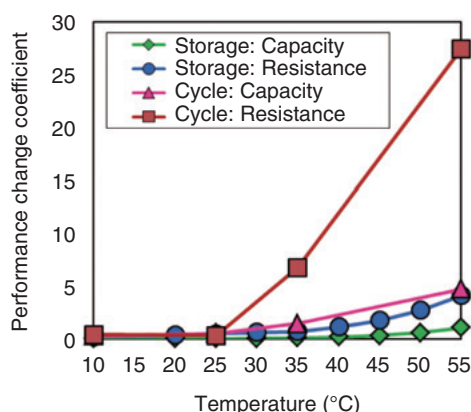


Fig. 14 Performance change coefficients (Storage, cycle)

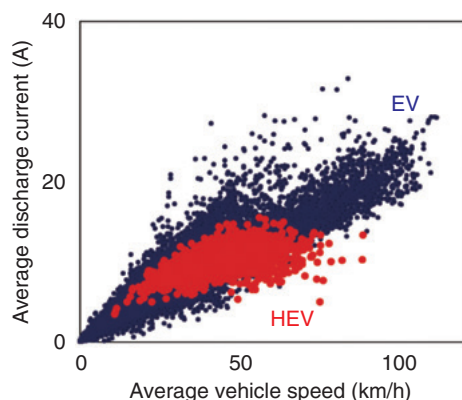


Fig. 15 Correlation between vehicle speed and battery discharge current

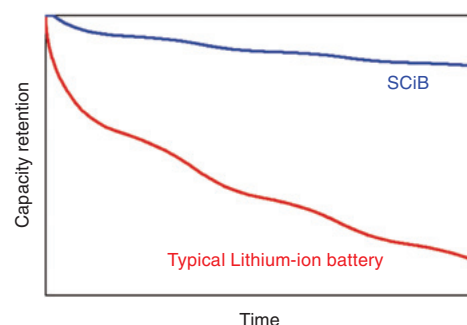


Fig. 16 Results of durability tests (Capacity)

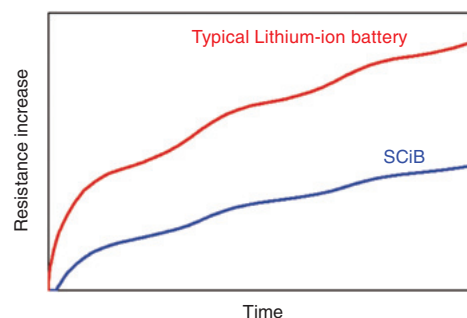


Fig. 17 Results of durability tests (Resistance)

4. まとめ

FIT EV 向けに EV 用バッテリーシステムを開発した。コンパクト化のために最密なモジュール構造としたバッテリーシステムは、床下に配置され、FIT EV の優れた居住性に貢献している。間接冷却を採用したバッテリーシステムは、すべてのバッテリーに対して効率良く冷却をおこなうことが可能であり、走行と充電の繰り返しにおいてもバッテリー温度の上昇を抑制できることを確認した。SCiB 自身の高い耐久性に加え、冷却システムの採用によって、航続距離の低下につながるバッテリーの性能変化が少ない、高い耐久性をもつバッテリーシステムを車両運用期間に渡って提供できることを実現した。

参考文献

- (1) 小杉伸一郎, 稲垣浩貴, 高見則雄: 安全性に優れた新型二次電池 SCiB_{TM}, 東芝レビュー, Vol.63, No.2, p.54-57 (2008)
- (2) 山本康一, 姉川彰博: 燃料電池自動車用リチウムイオン電池システムの開発, Honda R&D Technical Review, Vol.21, No.1, p.40-45

■ 著 者 ■



姉川 彰博



山本 康一

EV 用バッテリートレーサビリティシステム開発

Development of Battery Traceability System for EV

武 政 幸一郎*
Koichiro TAKEMASA
富 永 由 騎*
Yuki TOMINAGA

内 田 翼*
Tsubasa UCHIDA
佐 藤 圭 嗣**
Keiji SATOH

鶴 谷 泰 介*
Taisuke TSURUTANI

要 旨

EV 市場の拡大が予想され、今後本格普及期に入ると大量のバッテリーが使用されることになる。バッテリーは使用や経年劣化等により容量低下した場合は航続可能な距離が短くなってしまふ。そこでユーザ利用時のバッテリー見守りをはじめ、中古車転売時や、定置型への転用等 2 次利用時のバッテリー性能評価が重要になってくることが予想される。Honda が 2012 年夏にリース販売を開始した FIT EV には走行時や充電時に主にバッテリー関連のデータを定期的にサーバへ送信するシステムが装備されており、お客様の承諾を頂き日本の Honda R&D のサーバにて日米のデータを収集している。本システムでは、バッテリー性能把握、バッテリー劣化推定モデルの構築を目的として、データ分析や可視化を実現するための基盤を構築した。

ABSTRACT

The EV market is expected to expand, and as this happens, battery usage will increase. Batteries deteriorate with time and usage, and when battery capacity declines as a result of age-related deterioration, the cruising distance over which a vehicle can travel decreases. Therefore, it will be important mainly to monitor batteries during use but also to assess the performance of batteries during the resale of used cars and during secondary usage such as conversion to stationary batteries. Honda has equipped the FIT EV first leased in the summer of 2012 with a system that regularly sends mainly battery-related data to a server when the vehicle is travelling and when the battery is charging. Customer consent is obtained to collect data from Japan and the U.S. on the Honda R&D Japan server. The goal of this system was to determine battery performance and to build a model for estimating battery deterioration, so that a foundation for successful data analysis and visualization could be built.

1. はじめに

バッテリーは時間や使用（充電や放電の繰り返し）とともに劣化していく。劣化には主に容量低下と出力低下があるが、特に EV 向けバッテリーの場合には容量低下により走行可能距離が短くなってしまふ。これはバッテリー性能低下が車両性能低下を意味することになる⁽¹⁾。このような理由から、バッテリーの正確な性能評価ができることがユーザ利用時、中古車市場、バッテリー 2 次利用時等において、必要になると考えられ、また、今後の EV 市場において市場適応力のあるサービスを展開していく上で重要な要因となることが予想される (Fig. 1)。

* 四輪 R&D センター

** 日本アイ・ビー・エム株式会社

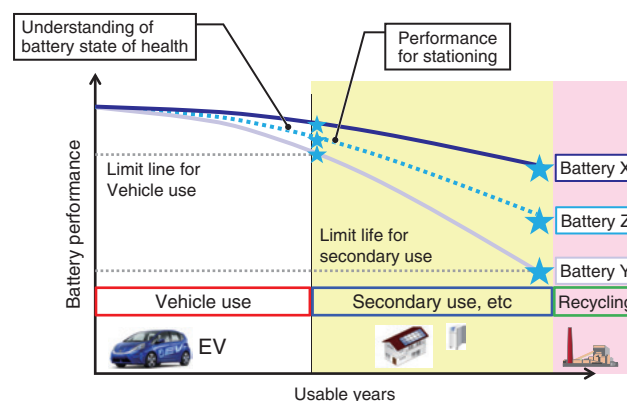


Fig. 1 Importance of battery performance understanding (EV)

今回開発したEV用バッテリートレーサビリティシステムは、個々の車両から走行時や充電時に主にバッテリー関連のデータを収録し定期的にサーバへ送信する仕組みを装備している。つまり、リース販売されるすべての車両からバッテリーに関連するデータが本システムに集約されることになり、トレーサビリティデータ（以降、トレースデータと記す）が蓄積されることになる。このトレースデータは、バッテリー状態、および車両状態を把握するための重要なデータである。このデータをリアルタイムに解析し、バッテリーの開発、およびビジネス展開やサービス展開に有効活用することが求められている。

また、ビッグデータと呼ばれる膨大なデータ（大データサイズ、複数データソース、非構造化データ、大量トランザクションなど）に対するデータ収集、およびデータ解析手法が提起されている。ビッグデータの活用とは、これまで収集されていても十分に解析されていなかったデータや解析処理に時間を要していたデータを、高速かつリアルタイムに処理することである。これによって膨大なデータの中からビジネス、サービスに活用することができる情報の可視化、分析、抽出を可能にし、さまざまなものが電子化されていく市場環境変化や価値観の多様化への迅速な対応、アクションの策定を実現する手法として注目されている。トレースデータについても、ビッグデータの一部として捉えることが可能と考える。

上記の背景のもと、本システムでは、EV車両におけるバッテリー性能把握、バッテリー劣化推定モデルの構築を目的として、収集されるトレースデータを基にしたデータ分析や可視化を実現するためのシステム基盤を構築した。

2. システム構成

2.1. コンセプト

バッテリーの使用状況は道路交通環境の差異や充電インフラの違いにより左右される。バッテリーの情報に関しては走行地域や使用状況の差異を見るために、一箇所に集約した上で解析をしていくべきと考える。よって各地域でのデータ収集後は社内イントラネットを介して日本のHonda R&D内のサーバへ集約し、逐次データ解析をおこなっている。

2.2. 車両システム

トレーサビリティ機能の搭載車両となるFIT EVは、スマートフォンアプリケーションによりエアコンのタイマー操作や充電のコントロール、充電状況の把握を可能にするための車載通信ユニット等を有している。本システムとしてはこのシステム基盤をベースに、データ収集する機能を追加できるようにした（Fig. 2）。

車載通信ユニット（TCU）より発信された車両情報は、既存の通信型カーナビ用インフラを使ってリアルタイムに

地域サーバにて受信と収集がおこなわれる。本システムでは、拠点サーバ間通信にはイントラネットを採用し、送信される車両情報は、車載通信ユニットにてバイナリデータの圧縮ファイル化がおこなわれ定期的にデータアップロードを実行している（Fig. 3）。

車両からのデータ送信に関しては、走行中をはじめ充電中もデータを送信するようにしている。

2.3. サーバシステム

バッテリートレーサビリティサーバの構成は、ブレードサーバアーキテクチャおよび仮想化プラットフォームを使用している。また、カーナビ用サーバとの拠点間通信には、Webサービス技術（SOAP over HTTP）を用い、受信サーバにてデータ受信と受信したバイナリデータのテキスト化が実施されデータ解析が可能な情報としてデータベースへ蓄積される。

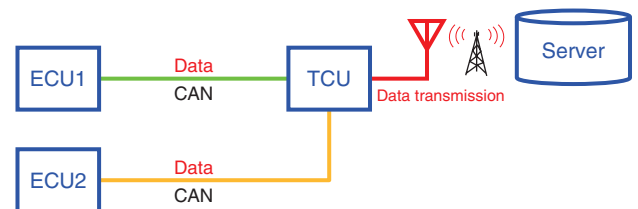


Fig. 2 Vehicle system composition

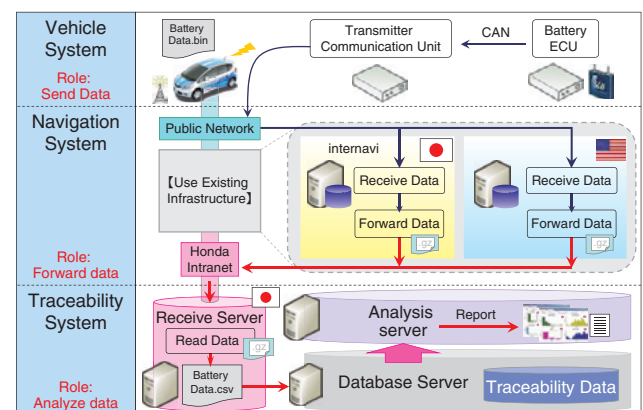


Fig. 3 Transmitting system configuration

3. バッテリー劣化推定モデルの構築

バッテリーは使用された期間や温度、充電状態（State of charge: SOC）などの履歴によって保有する容量（容量維持率）が大きく異なり、かつ、同じ容量維持率を有するバッテリーにおいても、それまでの履歴が異なると、その後の余寿命に差異が生じることがこれまでの研究で明らかになっている（Fig. 4）⁽²⁾。

3.1. 従来のバッテリー寿命推定方法

一般的に使用されているバッテリーの寿命推定の容量維持率は時間の平方根に比例する式 (1) (ルート則) で表現される。この式を用いた場合、使用履歴違いによるバッテリー容量の低下速度の違いを表現することができない。なぜなら、ルート則式は、容量維持率の変化速度 [劣化速度: 式 (1) の微分式] は式 (2) となり、使用条件とその時の容量維持率で表現されるため、Fig. 4 で示したような同じ容量維持率で異なる履歴を持つバッテリーをその後同じ使い方をした場合、その後の容量維持率を同じと判断してしまう。これでは個々のバッテリーの劣化速度に対応することの推定ができない。

$$y = 1 - a \times t^{0.5} \quad (1)$$

$$y' = -\frac{0.5}{1-y} a^2 \quad (2)$$

y : 容量維持率

y' : 容量維持率の変化速度

a : 使用条件によって決まる劣化係数

t : 使用積算時間

3.2. 使用履歴を加味した寿命推定方法

過去のバッテリー使用履歴を推定式に加えることで、上述の差異を表現可能になると考えた。過去の使用履歴の中から将来の劣化を左右する因子を明確化できれば、Fig. 1 に示す使用時、中古車市場、2 次利用における残価値の指標化、および資源有効利用の観点から検討が必要なバッテリーモジュールやセルの再中古製品化 (リマニファクチュアリング) 時の分類基準の指標化が可能になるからである。使用履歴を加味したバッテリーの寿命推定式を式 (3) と式 (4) に示す。

$$y' = -\frac{0.5}{1-y} (\alpha + b \times \beta) \quad (3)$$

$$y = 1 + \sum_{t=0}^T y' \quad (4)$$

b : これまでの使用履歴によってきまる補正係数

α, β : 使用条件によって決まる劣化係数

T : バッテリー製造日からの経過時間

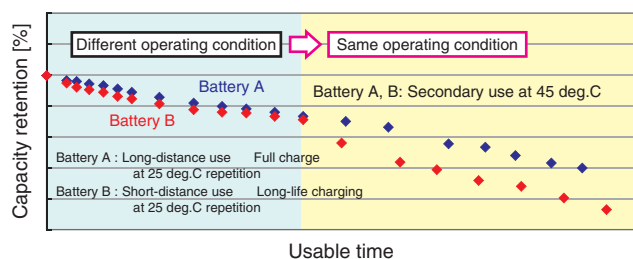


Fig. 4 Capacity retention variation by specification operating condition

式 (3) に示すように、式 (2) の劣化係数 a^2 を、使用履歴による補正係数 b を加えた 1 次式 $(\alpha + b \times \beta)$ に置換した。これにより使用履歴による劣化速度の差異を表現可能になり、式 (4) に示すように、その積算値により容量維持率の低下を推定することが可能となる。使用履歴はトレーサビリティシステムにより収集したトレースデータを用い、このデータから補正係数 b を導出する。補正係数 b は使用履歴により値が異なるため、劣化速度 y' も使用履歴により変化する。本手法を用いることにより、さまざまな使用履歴を持ったバッテリーにおいても容量維持率を推定することが可能となる。

3.3. 新しいバッテリー寿命推定方法の検証結果

バッテリー単セルを用いて、放置試験やサイクル試験などの一般的なバッテリー特性のパラメータスタディにより取得したバッテリー特性データから、先述した式 (3) 式 (4) 中の一次式係数 $(\alpha + b \times \beta)$ を導出し、推定式を構築した。この推定式の精度検証を充電、走行、放置を組み合わせる実機負荷を模擬した耐久試験で実施している。バッテリー容量の実測値と新しい寿命推定方法で導出した推定値のプロットを比較した結果、両プロットは近い推移を示すことが確認できた (Fig. 5, Fig. 6)。

また、実験車両に搭載したバッテリーを使った検証も実施している。本データは酷暑地域にて耐久走行試験を実施した際のバッテリー容量維持率の実測値と予測値をプロットして比較したものである。バッテリー単セル試験同様に容量推移が実測値と近い推移となっていることから、推定方法の確からしさを実証することができたといえる (Fig. 7)。

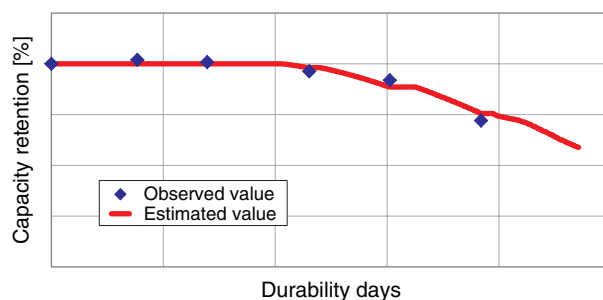


Fig. 5 Normal 200 V charge SOC limit 100% at 55 deg. C

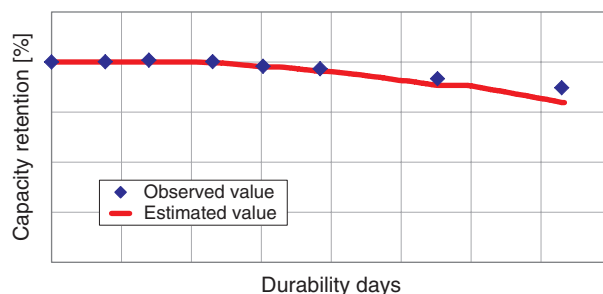


Fig. 6 Quick DC charge SOC limit 100% at 55 deg. C

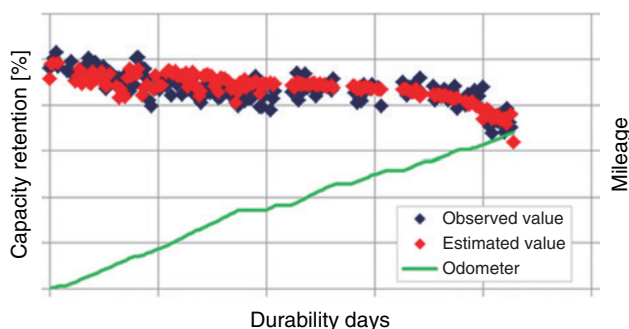


Fig. 7 Verification of life estimation method

4. 実証実験データの分析検証

Honda は EV の本格的普及に向けた課題の抽出と対応のため、また、実際の交通環境下や充電器等のインフラストラクチャにおいて、将来のパーソナルモビリティのあり方や CO₂ 低減効果の検証のために、熊本県、埼玉県、さいたま市と共同で実証実験をおこなっている。2011 年 12 月からは本システムを装備した車両を実際に投入し、自治体職員や一般ユーザによる実験走行を開始した。現在はパークアンドライドやカーシェアリング、ライドシェアリングなど地域に密着した実証実験をおこなっている (Fig. 8)⁽³⁾。

本システムはこの実証実験から運用を開始し、さまざまな検証をおこなってきている。

4.1. データの分析可視化機能の構築

本システムでは、車両からのトレースデータを、人手を介することなく自動でデータ分析、可視化をおこなうレポートシステムとした。この仕組みでは、事前に設定した加工、分析、抽出処理をおこない、結果を Web ブラウザ上に表示できるようにしている。

4.2. トレースデータ分析可視化処理

本システムにおけるトレースデータの分析、可視化処理は、以下の二つに大別される。

- (1) 現時点のバッテリー性能や車両状態等を把握することを目的とした処理
- (2) 車両 (バッテリー) ごとや過去の走行データ等を加味した統計処理

(1) に関しては、車両から送信されるデータをリアルタイムに処理し、現時点の走行、充電、放置などの走行モード分析、車両状態、累積走行情報サマリ抽出、バッテリー容量遷移抽出、およびバッテリー異常検知等を可視化するレポートシステム (コックピット) を構築した。下記に、開発した実証実験向け車両データを基にしたコックピットレポートを示す [Fig. 9(a), Fig. 9(b)]。

コックピットシステムでは、実証実験車両の総累積走行距離の表示、車両ごとのバッテリー温度、SOC、バッテリー電

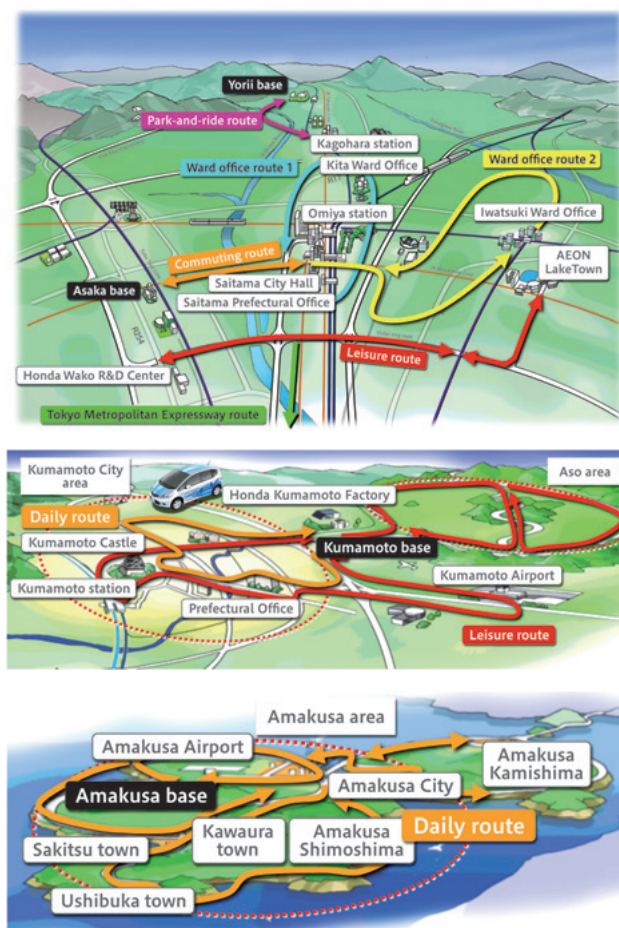


Fig. 8 Honda electric vehicle demonstration program operation area

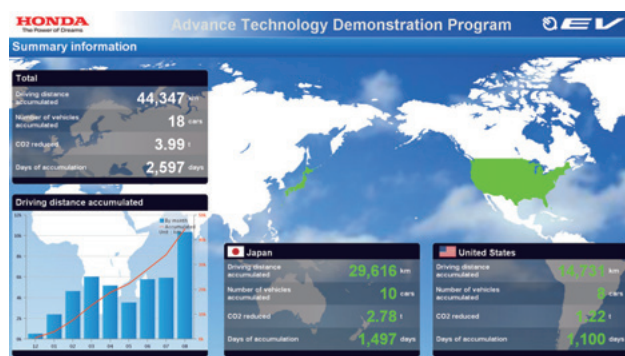


Fig. 9(a) Cockpit report: Vehicle information summary



Fig. 9(b) Cockpit report: Battery state information

流等をヒストグラム表示し、他の車両平均と比較して表示することが可能である。これによって実験車両の変化を容易に把握することが可能となっている。

(2)に関しては、車両から送信されるトレースデータ内各項目を指標とした分析レポートシステムを構築し、バッテリー性能評価、およびバッテリー劣化分析に起因する因子の抽出を目的とした定形レポート、非定形レポートを含めたさまざまな分析レポートを開発した (Fig. 10(a), Fig. 10(b)). Fig. 10(a) では、車両が継続的に運用されており、約9ヶ月の運用で総走行距離が7700 kmを超えたという状況がリアルタイムに把握できる。また、Fig. 10(b) では車両ごとの使われ方の違いが把握可能であり、1日の走行距離を分析することで、車両 A は車両 B に比べて1日あたりの走行距離が長い車両であることがわかる。

レポートシステム構築にあたり、バッテリー性能に影響を与える、または影響を与える可能性がある因子を容易に選択し、分析結果を可視化、抽出することができる拡張性のあるレポートシステム基盤が求められる。そこで本システムでは、IBM 社製ソフトウェアである IBM Cognos[®]、および IBM SPSS[®] Modeler を用いて、上記の分析レポートシステムを実現した。これらのソフトウェアを活用することにより、Web 上の Graphical user interface (GUI) ベースで各種データの多様な分析やレポートングを実現するだけでなく、統計的なモデル解析を実施することも可能になった。

4.3. データ分析結果の活用

開発したデータ解析システムは実証実験車両、およびテスト車両から送信されてくるデータの分析結果を活用し

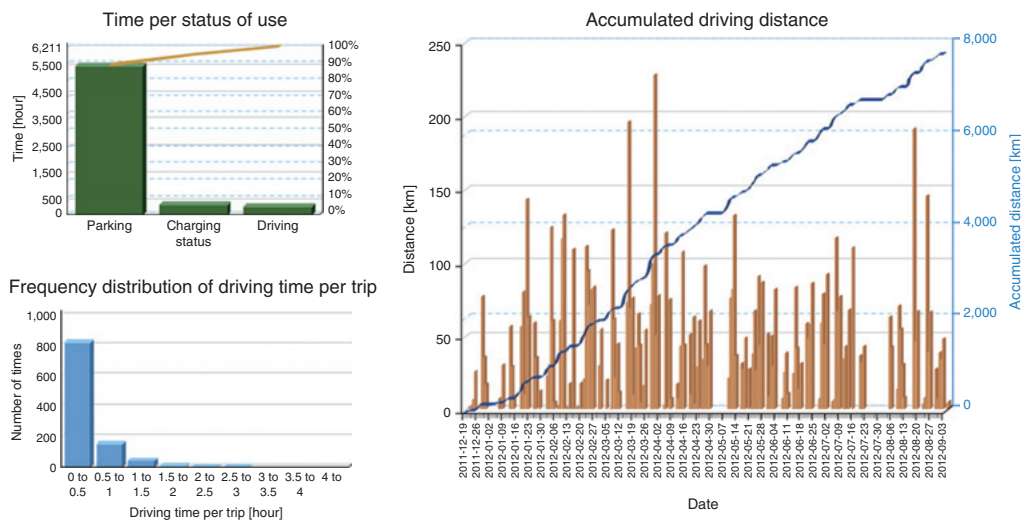


Fig. 10(a) Analysis report total mileage and operation state

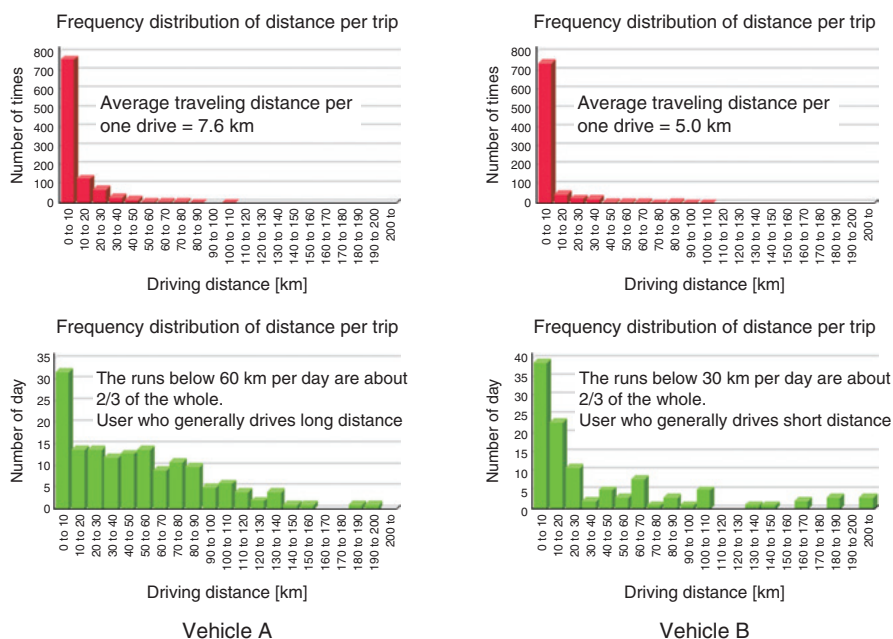


Fig. 10(b) Analysis report distribution of distance

てバッテリー劣化推定モデルの開発と検証をおこなっている。その他にもデータ分析結果の活用範囲は多くある。例えば、リアルタイムにトレースデータを収集、分析することで、走行中車両のバッテリー状況を逐次解析することが可能となる。その結果、不具合に対しての対策が可能となるだけでなく、対策実施後の経過も観察することができるようになった。具体事例として車両データのバッテリーセル電圧が想定以上にばらつく状態を早期に検知することができた。これを受けて実験車に対して、対策内容を反映したコントロールユニット用プログラムへ変更をおこなった。この対策効果に関しては、経過観察のように電圧推移を確認することができるため、対策プログラムの効果についての妥当性検証が可能となることが確認できた (Fig. 11)。

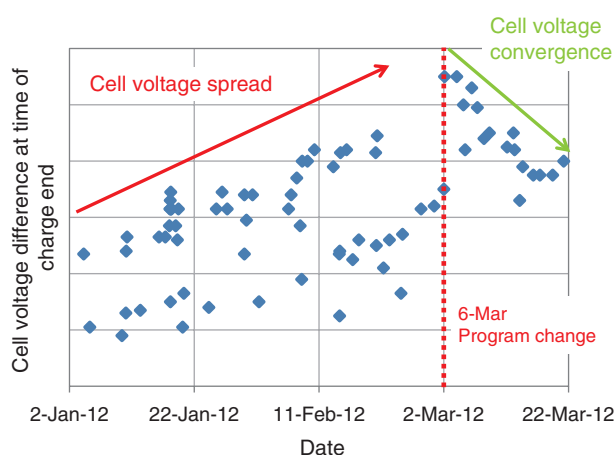


Fig. 11 Early detection and correspondence of vehicle condition

5. まとめと今後の展開

車両から送信されるトレースデータを分析、可視化することにより、現在の車両状態やバッテリー状態を把握することができた。また過去のデータや統計データを可視化することで不具合が顕在化する前に事象把握ができた。また把握だけでなく、データから特異点を抽出し、それに対する具体的な対策が可能となる拡張性のあるトレースデータの解析基盤を構築することができた。また、データ分析に併せてバッテリー劣化評価を加味することにより、バッテリー状況から容量低下等についての予兆を検知、発見することが将来的に可能となる。

2012年7月、アメリカを皮切りにFIT EVがお客様へリース販売が開始された。オーナーの同意の上でデータセンタへ集まってくるトレースデータについては、統計的に蓄積、解析をおこない今後の開発に生かし、バッテリーの性能に応じた制御や新しいサービス展開について検討をおこなっていく予定である。

参考文献

- (1) 本多啓三, 高見則雄: リチウムイオン電池 SCiB の特徴と車載電池性能, 自動車技術, Vol.66, No.9, p.23-27(2012)
- (2) 小島亮, 月森直子, 上田篤司: PHEV 用 10Ah 級リチウム二次電池の開発 (その 5), 第 53 回電池討論会論文集, 1A16 p.9(2012)
- (3) Honda 環境年次レポート 2012, EV/PHEV の実証実験, p.55

■ 著 者 ■



武政幸一郎



内田 翼



鶴谷 泰介



富永 由騎



佐藤 圭嗣

FIT EV 用充電システムの開発

Development of Charging System for FIT EV

村上 友厚* 貞野 計*
Tomoatsu MURAKAMI Hakaru SADANO

要 旨

ABSTRACT

FIT EV の高効率プラグイン充電システムを開発した。システムの開発目的はEVの普及であり、EVの使い勝手を向上させるため、短時間充電、高効率充電、安全な充電を目標に開発をおこなった。

短時間充電は日米充電環境の配電設備能力を最大限引き出せるオンボードチャージャ出力を設定することと、その性能を最大限引き出す定電力充電制御の領域を広げることによって実現した。さらに機器の作動時間を最小にすることができたため高効率充電も可能とした。その結果、開発したシステムは、最短で充電時間3時間以内という目標を達成した。

安全な充電については、充電コネクタ端子が想定した以上に使用環境下で劣化した場合に発生する異常過熱を保護するシステムを採用した。

充電リッド位置は、ユーザ宅のガレージや公共充電場の調査をおこない最適な位置に決定した。

A high-efficiency plug-in charging system has been developed for the FIT EV.

The goal of development of the system was to promote the more widespread use of EV. The development was conducted in order to increase the user-friendliness of EV with the aim of offering rapid, high-efficiency, and safe charging. The rapid charging was realized by setting the power of the on-board charger to maximize the capacity of the power distribution equipment employed in the Japanese and U.S. charging environments and expanding the range of the constant power charging control that maximizes the charger's performance. In addition, the minimization of the operating time of the charger has made it possible to realize high-efficiency charging. As a result, the developed system has realized the target of a minimum charging time of within three hours.

With regard to safe charging, the system employs protection against abnormal excess heat produced as a result of greater deterioration of the charge connector terminals under the conditions of use of the system than initially projected. The optimal positions for the charge lids were determined based on studies of the garages in users' homes and public charging stations.

1. まえがき

近年、地球的規模での環境意識の高まりと、原油供給不安定に起因するエネルギー安全保障の両面から、CO₂排出の20%を占める自動車のエネルギー効率向上の技術開発が活発になってきている。特にカリフォルニア州のZero Emission Vehicle (ZEV) 法への対応には動力のさらなる電動化が必要であり、ポスト Hybrid Electric Vehicle (HEV) として各社とも積極的なEV開発をおこなっていることは周知のとおりである。

EVは環境性能の高さだけでなく、内燃機関自動車(ICE車)に対して高い静粛性、低走行コスト等のメリットがある。Hondaは1997年に主要自動車メーカーとしては初の電

*四輪 R&D センター

気自動車EV Plusをリース販売した。EV Plusの充電システム⁽¹⁾にはプラグイン充電を採用し、4.2 kWの車載型充電器(オンボードチャージャ)を搭載した。プラグイン充電とは商用電源と車両を電氣的に接続して走行に必要なエネルギーをトラクションバッテリーに充電する方式である。FIT EVでは電費世界一と使い勝手向上を目指した。電費は充電開始からモード走行完了までに消費した電力を計測する。そのため、オンボードチャージャの高効率化が重要であり効率と出力を向上させ充電時間を短縮し、なおかつさらなる小型化を図った。

本稿では、新規開発充電システムのねらいと特徴を述べる。

2. 充電システムの課題と目標

EVに必要なプラグイン充電は、ICE車の給油に相当する。バッテリーは化石燃料よりエネルギー密度が小さいため、同等のエネルギー供給に必要な時間と回数は、給油の場合より多い。EVの普及を目指すには、この課題を解決しなければならない。

この課題を解決するため取り組むべき目標を定めて開発をおこなった。

(1) 短時間で充電できる

最短充電時間目標: 3時間以内

(2) 充電効率が高い

充電効率目標: 87%以上

(3) 安全に充電できる

3. 充電システムの概要

FIT EVに採用したシステムの概要を以下に示す。

3.1. FIT EVの充電環境

日本とアメリカの充電環境を以下に述べる。

3.1.1. 日本の充電環境仕様

日本の充電環境をFig. 1に示す。日本はCHAdeMO規格の急速充電網が整備されており、外出先での充電に十分利用できることからCHAdeMO規格に準拠した急速充電システムを採用した。50 kWでの急速充電の利用によりState Of Charge (SOC) 80%までの充電が20分で可能となった。

一方、普通充電は自宅での夜間充電が主になるため200 V充電で帰宅から外出までの間で6時間以内に満充電となる、出力3.3 kW仕様を設定した。

車載充電ケーブルは推奨充電電圧に対応した200 V仕様に加えて、緊急充電用として100 V仕様も標準搭載した。

3.1.2. アメリカの充電環境仕様

アメリカの充電環境をFig. 2に示す。現在のアメリカには急速充電網がほとんど整備されていないため急速充電シ

ステムの適用を見送った。そのかわり、普通充電の出力を可能な限り大きく設定して、充電時間を短縮した。

家屋に標準的に設置されている配電設備の能力は、32 A連続定格である。よって既設の配電設備能力を最大限に利用できる6.6 kW出力に設定し、3時間以内での充電を可能とした。

車載充電ケーブルはNEC(National Electrical Code) Article625規格の規定により、車載可能な120 V仕様のみを搭載した。

3.2. 充電システム構成

プラグイン充電システムの基本構成をFig. 3に示す。点線範囲は日本仕様の急速充電システムを示す。また、車載配置図をFig. 4に示す。

トラクションバッテリーの両極にはメインコンタクタを配置している。メインコンタクタを介してその二次側にはトラクション系統と補機系統が接続されている。

トラクション系統はトラクションインバータを介し送電

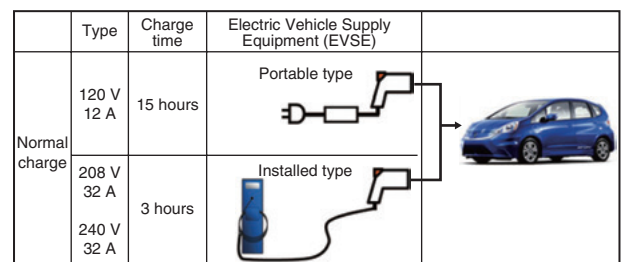


Fig. 2 Overview of charging (USA)

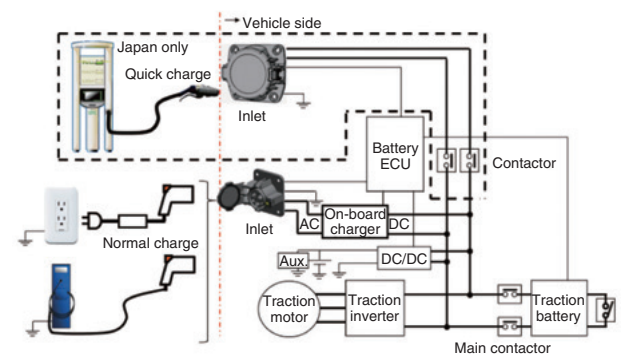


Fig. 3 Charging system

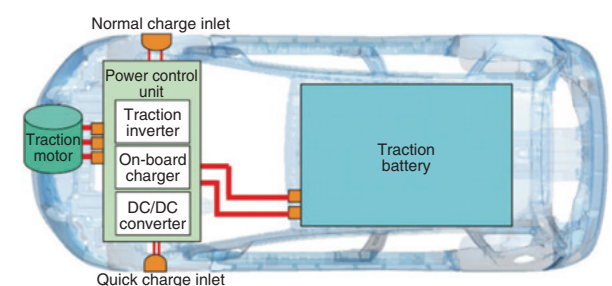


Fig. 4 Vehicle layout for FIT EV (Japan)

	Type	Charge time	Electric Vehicle Supply Equipment (EVSE)
Normal charge	100 V 12 A	23 hours	Portable type
	200 V 15 A	6 hours	Portable type
			Installed type
Quick charge	DC 50 kW MAX	20 min.	

Fig. 1 Overview of charging (Japan)

しトラクションモータへ接続され駆動力を得る構成となっている。

補機系統には DC/DC コンバータやオンボードチャージャが接続されている。DC/DC コンバータは 12 V バッテリへの電力変換をおこなない、オンボードチャージャは AC 商用電力の電力変換をおこなう。

トラクションバッテリーおよび DC/DC コンバータ、オンボードチャージャはバッテリー Electric Control Unit (ECU) により制御をおこなう。よって充電をおこなうのに必要な通信線は全てバッテリー ECU に接続されている。トラクションバッテリーの状態と充電制御には密接な関係があるため、フェール発生時には迅速なフェールセーフアクションが必要である。したがって、バッテリー状態検知と高電圧系配電制御の両機能を合わせ持つバッテリー ECU に充電制御機能をもたせた。

プラグイン充電の制御は、EV 用充電装置 (Electric Vehicle Supply Equipment: EVSE) と車両間の通信機能、充電出力指示および制御、充電系フェール検出およびフェールセーフアクションによって構成される。

3.2.1. 普通充電の構成

EVSE から入力された AC 商用電力は車両に設置されたインレットから、電力線を通してオンボードチャージャへ送電される。オンボードチャージャによって AC は DC に変換されトラクションバッテリーへ充電される。同様に EVSE とバッテリー ECU 間の通信もインレットの通信線を通り、バッテリー ECU へ接続される構成となっている。

3.2.2. 急速充電の構成

急速充電システムは CHAdeMO V0.9 に準拠するシステム構成である。

急速充電器から入力された DC 電力は、車両に設定されたインレットからコンタクトを介してトラクションバッテリーに接続し、充電される。同様に、充電器とバッテリー ECU 間の通信もインレットの通信線を通った後に、バッテリー ECU へ接続される構成となっている。

3.2.3. 充電リッドの位置

Table 1 に仕向地ごとの充電リッド位置を示す。

(1) 普通充電 普通充電は日本、アメリカともに自宅での充電が主になる。ユーザがガレージ駐車後にプラグイン充電操作をおこなうため、そのスペースを確保しやすいように、普通充電リッドはドライバ席側に設定した。

(2) 急速充電 高速道路のサービスエリアなどに設置されている急速充電スタンドは、路側帯への設置が多いため、急速充電リッドを助手席側に設定した。

4. 短時間充電の技術

短時間で充電をおこなうには、オンボードチャージャの出力アップが必要である。オンボードチャージャの外観を

Table 1 Location of charge lid

Sales area	Normal charge	Quick charge
Japan	Right side	Left side
USA	Left side	

Table 2 Comparison of on-board charger specifications

	EV Plus	FIT EV
Volume	8.6 L	8.1 L
Weight	11 kg	10 kg
Power	4.2 kw	6.6 kW
Cooling	Water	Water
Efficiency	84.4%	91.9%

Fig. 5 に示す。

Table 2 に、FIT EV と EV Plus のオンボードチャージャ仕様比較を示す。EV Plus に採用したオンボードチャージャよりも出力を向上させつつ小型化した。他社の 3.3 kW のオンボードチャージャより小さい体格で、6.6 kW 出力を得た。本チャージャの位置づけを Fig. 6 に示す。

以降に、出力を向上させつつ小型化を可能とした手法を示す。

4.1. 冷却構造

オンボードチャージャは Power Control Unit (PCU) 内

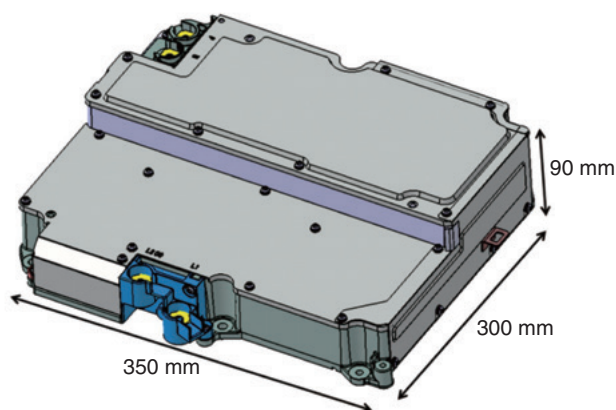


Fig. 5 External view of 6.6 kW on-board charger

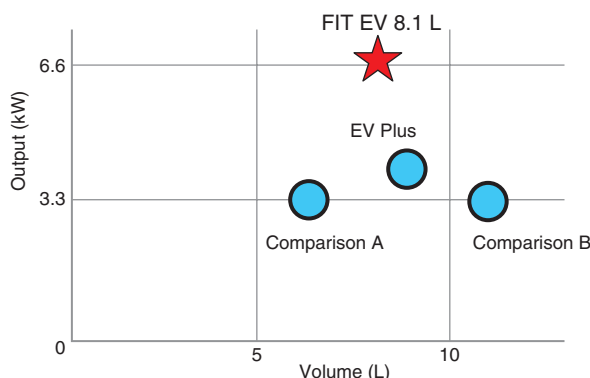


Fig. 6 Volume-power ratio

部に搭載されている。PCU は水冷用のウォータージャケットを搭載しており、オンボードチャージャはウォータージャケットに取り付けることにより冷却をおこなう。構造については Fig. 7 および Fig. 8 に示す。

4.2. 力率改善 (PFC) 回路出力電解コンデンサ削減

オンボードチャージャの回路ブロック図を Fig. 9 に示す。

力率改善 (Power Factor Correction:PFC) 回路に使用される電解コンデンサは、オンボードチャージャ内部の DC/DC コンバータ回路が正常に動作するために必要なリップル電圧と、最低電圧を確保する機能を持つ。その容量を極限まで削減することにより小型化を図る、という課題に対し以下の手法で解決した。

4.2.1. リップル電圧の増加の対策

電解コンデンサ容量を削減すると商用電源の正弦波に重畳しているリップル電圧が大きくなる。この成分は計測時

に平均値化することで打ち消されるため、商用半周期ごとに平均値化する計測手法を採用した。

4.2.2. 入力電圧急変に対する電圧変動増加の対策

電解コンデンサ容量を削減すると商用電源電圧の急変に対し変動の吸収が弱くなる。その場合でもオンボードチャージャが過電圧保護動作による充電停止に至らないように、過電圧保護よりも低い電圧にて動作を一旦停止し電圧の上昇を防ぐ構成とした。

4.3. スイッチング周波数の引き上げ

スイッチング周波数 90 kHz を採用することによりトランスなどの巻き線類に対し磁束密度を下げるができるため、コアの小型化を実現した。

また、巻き線類の電流のリップル成分が減るため、平滑コンデンサも小型化することができた。

5. 高効率充電の技術

EV 車両のエネルギー効率 (電費) は ICE 車での tank-to-wheel 効率 (燃費) になぞらえて、plug-to-wheel で評価される。電費の中の充電効率とは、コンセント出力端からトラクションバッテリー入力端までの電力入出力比である。また充電時間とは、充電残量警告灯点灯状態から満充電状態までの充電所要時間である。

したがって、プラグイン充電領域が担う電費向上対策には、コンセントからトラクションバッテリーまでの電力損失をゼロにすることが理想である。

FIT EV 用の充電システム開発では、以下に示すように、充電に関わる損失の徹底的な低減を図った結果、充電効率は 87.9% に達することができた。

5.1. 充電時間の短縮による損失低減

充電時間の短縮はユーザーメリットが大きいだけでなく、充電効率にも大きく影響する。

プラグイン充電中は、オンボードチャージャ、バッテリー冷却システム等が作動する。充電時間が長いと、これらのエネルギー損失のため、ワンチャージ当たりの充電効率が低下する。

充電時間短縮にはオンボードチャージャ出力向上に代表されるハードウェア対策と、チャージャ能力を最大限引き出す充電制御を可能にするソフトウェア対応をおこなった。

ハードウェアは、法規規格への適合と、オンボードチャージャ出力アップの観点から出力を決定した。

ソフトウェアは、バッテリー ECU が充電時の電圧特性と SOC の関係を精度よく予測することにより、ハードウェアの性能を最大限に引き出せる定電力充電の領域が最大となる制御仕様とした。充電最終ステージは定電圧充電に切り

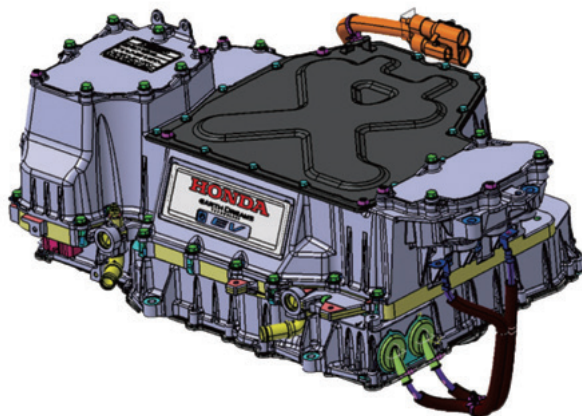


Fig. 7 External view of power control unit

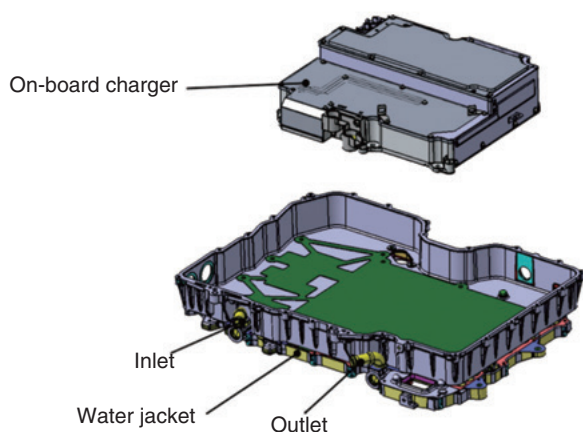


Fig. 8 Cooling structure of on-board charger

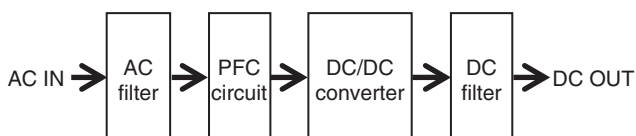


Fig. 9 Block diagram of on-board charger circuits

替え、バッテリー耐久性を低下させるオーバシュートを抑制するとともに満充電の精度を向上させた。SOC と充電電力の関係を図. 10 に示す。

5.2. オンボードチャージャの高効率設計

プラグイン充電システムにおいて、最も損失割合が大きいオンボードチャージャの損失の低減は、高効率化、小型化、軽量化、および冷却電力の低減に寄与する。

オンボードチャージャの出力電力ごとの効率を図. 11 に示す。

5.2.1. ソフトスイッチングの採用

ソフトスイッチングを採用することでスイッチング損失の低減を図った。FIT EV で採用したソフトスイッチング回路を図. 12 に示す。回路図に示すとおり共振用のチョークを回路に挿入しソフトスイッチングを実現している。

5.2.2. 整流ダイオードの低損失化

ソフトスイッチングを採用することによりサージ電圧が

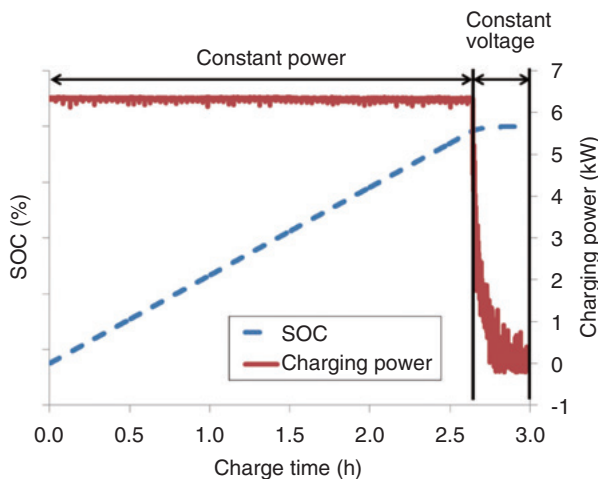


Fig. 10 Charging power control

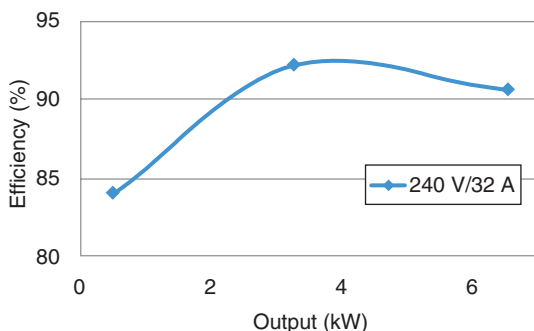


Fig. 11 On-board charger efficiency

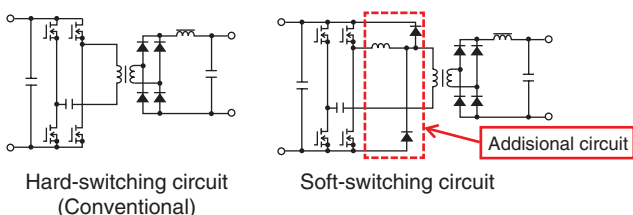


Fig. 12 Comparison of switching circuits

低減されるためダイオードの耐圧を 1200 V から 600 V に下げることができた。これによりダイオードのリカバリ電流を下げるのが可能となり、オンボードチャージャ内部 DC/DC コンバータ回路で約 1% 高効率化できた。スイッチング波形と損失を図. 13 に示す。

5.2.3. トランス、チョーク類の低損失化

(1) コイルの低損失化 高周波交流電流は表皮効果により表皮深さ分しか流れないため、交流抵抗を下げるためには電線の表面積を大きくすることが対策となる。したがってリッツ線をコイルに採用した。リッツ線の概要を図. 14 に示す。

また、コアについては総ギャップ長を変えずに個々のギャップ幅を狭め分散配置することにより、漏れ磁束がコイルと鎖交する量を減らし損失を下げた。

(2) コアの低損失化 ダスト系のコアを採用し低損失化した。ダストコアを使用した場合、ダストコアがトロイダル形状となるため気中放熱となり熱成立性が課題となる。よって、チョークを樹脂モールドすることが解決策として挙げられるが、重量が重くなってしまったためハーフモールドとした。

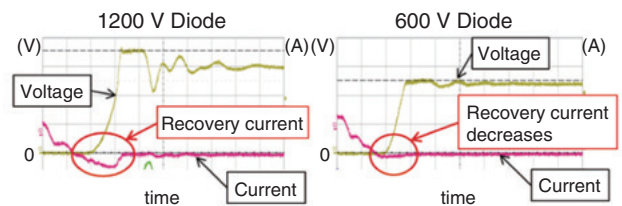


Fig. 13 Comparison of diode recovery current

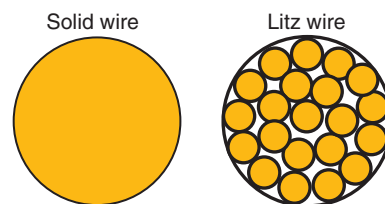


Fig. 14 Structure of solid wire and litz wire

6. 安全性向上の技術

車両に接続される充電コネクタが劣化すると、接続抵抗が大きくなり、過熱する可能性がある。そのため、インレット部の端子に過熱検出サーミスタを設け、設定した温度しきい値に達すると充電電流を絞り、充電コネクタの過熱を防止する。普通充電インレットのサーミスタ取付け構造を図. 15 に示す。

急速充電、普通充電ともに、本発熱対策仕様を採用した。充電コネクタ構成部品の耐熱温度を考慮しつつ、誤検出を起こさない値を、過熱保護のしきい値とした。

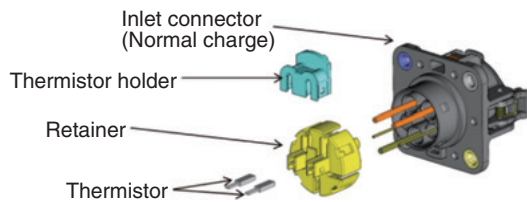


Fig. 15 Structure of inlet thermistor

7. まとめ

FIT EV のプラグイン充電システムのトータルでの高効率化、および最新技術を投入し小型軽量のオンボードチャージャを開発した。その結果、充電効率は 87.9% に達し、短時間充電、高い効率、高い安全性の目標を達成することができた。2012 年 8 月末時点の Honda 調べで世界最高の電費性能、および商品として十分競争力のある、最短で 3 時間以内という充電時間を達成した。

参考文献

- (1) 小椋正己, 鈴木茂, 松本謙次: 電気自動車 “HONDA EV PLUS” の紹介, HONDA R&D Technical Review, Vol.9, p.1-10

■ 著 者 ■



村上 友厚



貞野 計

電動サーボブレーキシステムの開発

Development of Electric Servo Brake System

大久保 直 人*

Naoto OHKUBO

赤 峰 宏 平*

Kohei AKAMINE

西 岡 崇*

Takashi NISHIOKA

波多野 邦 道*

Kunimichi HATANO

要 旨

電気自動車の電費向上、およびハイブリット車の燃費向上のため、回生ブレーキを有効に活用しつつ、良好なブレーキフィールを可能にする電動サーボブレーキシステムを開発した。本システムは、電動モータを動力源とする液圧シリンダによってブレーキ圧を制御する構成とした。この構成により、回生ブレーキと協調した精度の高いブレーキ圧制御を実現し、フィット EV において回生量が EPA 燃費基準で従来システム比 8% 向上した。また、ペダル操作部をブレーキ圧発生部から独立させて、ペダル踏力がブレーキ圧制御から影響を受けない構造にすることで、良好なブレーキフィールも実現した。

ABSTRACT

An electric servo brake system realizing good brake feel while making effective use of regenerative braking has been developed in order to increase power efficiency in electric vehicles and fuel efficiency in hybrid electric vehicles. This system controls brake pressure using hydraulic pressure cylinders with an electric motor as the drive source. By means of this configuration, it realizes high-accuracy brake pressure control that cooperates with regenerative braking, and its use in the Fit EV has increased power regeneration by 8% against a conventional system based on EPA fuel economy standards. In addition, the use of a configuration in which the pedal operation section is independent from the brake pressure generation section helps to prevent the pedal force from being affected by brake pressure control, making it possible to realize good brake feel.

1. はじめに

地球環境保護の観点から、低燃費化と CO₂ 排出低減への要求の高まりにともない、電気自動車（以下 EV）やハイブリット車（以下 HEV）などの電動パワープラント搭載車への注目が年々高まっている。これら EV や HEV は、減速時に回生ブレーキを作動させ、運動エネルギーを回生電力として回収することにより、電費および燃費を向上させることができる。したがって、減速時に効率よく発電させて回生電力量を増加させることが重要になる。そのため、ブレーキシステムには、システムの状態に応じて、ドライバが要求するブレーキ力を、摩擦ブレーキ力と回生ブレーキ力に協調配分する回生協調機能が要求される。回生ブレーキ力を発生させつつ、ドライバの意図するブレーキフィールを得るためには、回生ブレーキ力と摩擦ブレーキ力の合

計を、ドライバの要求する値に常に合わせる必要がある^{(1), (2)}。この時に、負圧ブースタを用いた一般的なブレーキシステムと同等の良好なブレーキフィールを得るためには、ペダル踏力はブレーキ圧制御の影響を受けないことが望ましい。

これまでに、回生協調機能を実現し、かつ良好なブレーキフィールを得るために、各輪のブレーキ圧を個別に制御するブレーキパイワイヤシステム⁽³⁾や、各輪同圧ながら任意のブレーキ圧が発生可能な油圧ブースタタイプ^{(4), (5)}、負圧ブースタタイプ⁽⁶⁾、電動ブースタタイプ⁽⁷⁾のブレーキシステム、などが提案されている。ペダル操作部とブレーキ圧発生部が連結したシステムでは、ペダル踏力がブレーキ圧制御の影響を受ける場合があるため、回生協調時の良好なブレーキフィール確保が課題であった。そこで、この課題を解決しつつ、回生協調機能を実現して、EV

*四輪 R&D センター

の電費向上およびHEVの燃費向上に寄与する電動サーボブレーキシステムを新たに開発した。本システムは、ペダル操作部とブレーキ圧発生部を独立させた構成とした。ペダル操作部は、ペダルストロークと踏力をシミュレートする機能を付加したものである。ブレーキ圧発生部は、電動モータを動力源とする液圧シリンダによるブレーキ圧制御で摩擦ブレーキ力を発生させ、ブレーキ圧を任意に制御するものである。

本稿では、開発した電動サーボブレーキシステムの概要、およびブレーキ圧制御、回生協調機能に関わる技術要素について述べる。

2. 開発のねらい

EVの電費、およびHEVの燃費向上とブレーキ性能を両立させるため、電動サーボブレーキシステムの開発では以下の点を主要なねらいとした。

- (1) 回生協調機能を実現し、かつ高い回生効率を実現する
- (2) 良好なブレーキフィールを確保する
- (3) 従来ブレーキシステム以上のノンサーボ性能を確保する

3. システム概要

本システムはFig. 1に示す、ペダルフィールシミュレータとタンデムモータシリンダ、ブレーキペダル、ペダルストロークセンサ、およびECUで構成される。ペダルフィールシミュレータは、ペダル操作時のペダルストロークと踏力を生成する。タンデムモータシリンダは、ペダルストロークセンサにより検出したペダル操作量に基づいてECUが指示したブレーキ圧を発生させる。

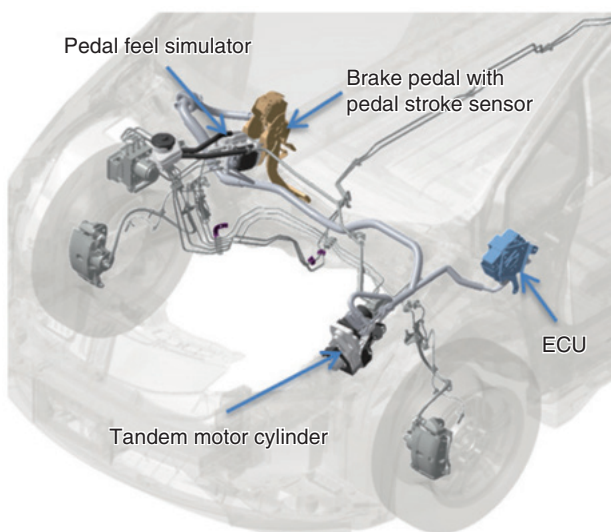


Fig. 1 Overview of electric servo brake system

3.1. ペダルフィールシミュレータ

ペダルフィールシミュレータはFig. 2に示すように、マスタシリンダとストロークシミュレータ、ソレノイドバルブ、および液圧センサで構成される。

マスタシリンダはブレーキペダルと連結され、ストロークシミュレータとは液路で接続される。その液路にはシミュレータカットバルブと液圧センサが設置される。シミュレータカットバルブはノーマルクローズのソレノイドバルブである。この構成により、ペダルストロークと踏力をシミュレートする機能を実現している。ペダル踏力特性は、ブレーキペダルのリンク比とストロークシミュレータのバネ反力特性を設定することで調整が可能である。

マスタシリンダとタンデムモータシリンダも液路で接続され、その液路にはマスタカットバルブと液圧センサが設置される。マスタカットバルブはノーマルオープンソレノイドバルブである。また、そのタンデムモータシリンダとVehicle Stability Assist (VSA) ユニットの液路は、マスタカットバルブの下流で液路が接続される。この構成により、タンデムモータシリンダで発生させるブレーキ圧を遮断するので、ペダル踏力はブレーキ圧制御の影響を受けない。また、システム起動時と停止時には、液圧回路を切り替える。

3.2. タンデムモータシリンダ

タンデムモータシリンダはFig. 3に示すように、ブラシレスモータと減速機、ボールねじ、スレーブシリンダで構成され、ブラシレスモータにはレゾルバが内蔵される。

ブラシレスモータとスレーブシリンダは減速機とボールねじを介して接続されている。ボールねじがスレーブシリンダピストンを直接押すことで、ブレーキ圧を発生させ、精度の高いブレーキ圧制御を可能にしている。

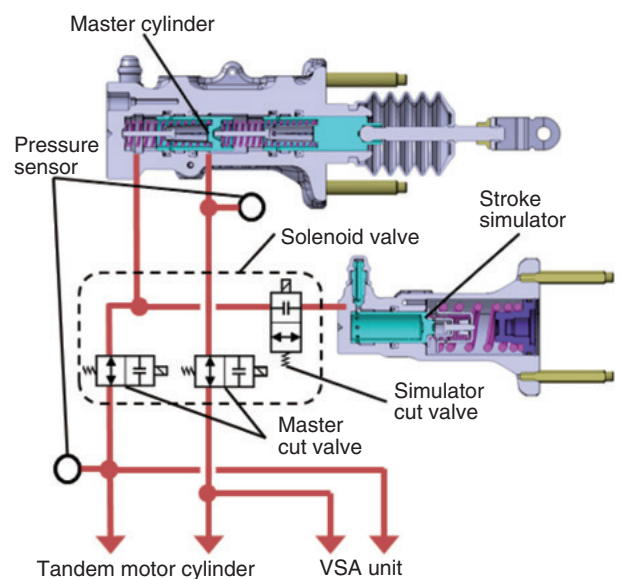


Fig. 2 Structure of pedal feel simulator

ブレーキ圧発生時の電動サーボブレーキシステムの動作を Fig. 4 に示す。ペダルストロークセンサで検出したペダル操作量に基づいて、ECU がブレーキ圧目標値を決定し、後述のブレーキ圧制御によりブラシレスモータを駆動すると同時にマスタカットバルブを閉弁することで、ブレーキ圧を発生させる。ブレーキ圧は、VSA ユニットの介してホイールシリンダに伝達される。

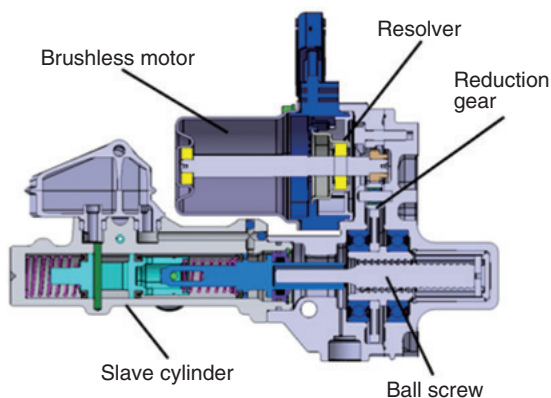


Fig. 3 Structure of tandem motor cylinder

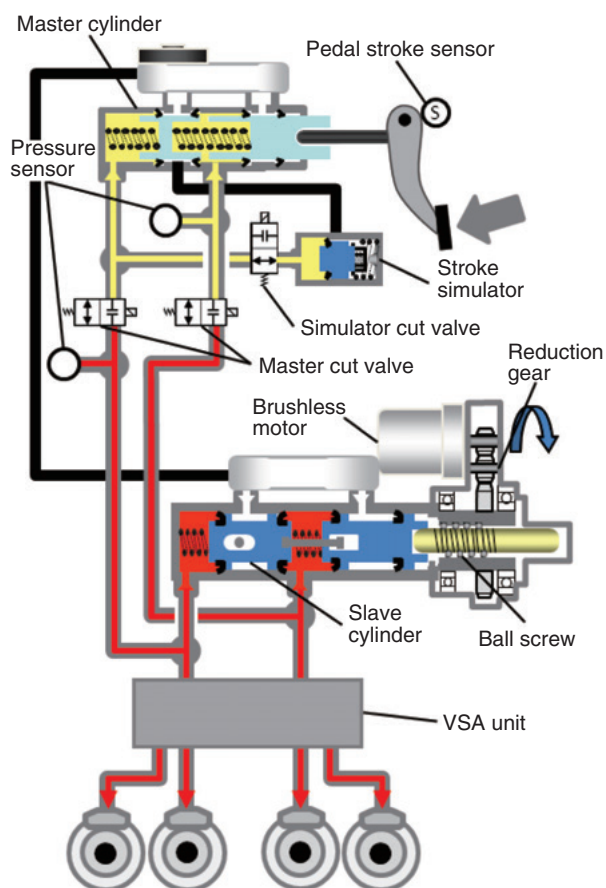


Fig. 4 System configuration diagram

4. ブレーキ特性

4.1. 基本ブレーキ特性

良好なブレーキフィールを実現するため、ペダル踏力特

性が一般的なブレーキシステムと同等になることをねらって、ブレーキペダルのリンク比とストロークシミュレータのバネ反力特性を調整した。Fig. 5 に、ペダル踏力特性について、電動サーボブレーキシステムと一般的なブレーキシステムの比較を示す。一般的なブレーキシステムと同等のペダル踏力特性を実現した。

また、制動効力も同様に、一般的なブレーキシステムと同等の特性にすることをねらい、ペダル操作量に対するブレーキ圧目標値の設定を調整した。Fig. 6 に、制動効力特性について、電動サーボブレーキシステムと一般的なブレーキシステムの比較を示す。一般的なブレーキシステムと同等の制動効力特性を実現した。この制動効力特性とペダル踏力特性により良好なブレーキフィールをもたらしている。

4.2. ノンサーボ性能

システムが停止しているなどの、ノンサーボ状態では、ペダル入力が直接マスタシリンダに伝わってブレーキ圧が発生し、ホイールシリンダに伝わる構造とした。ブレーキペダルのリンク比とマスタシリンダピストンの断面積を調整して、ノンサーボ状態でのペダル踏力 500 N 時の発生液圧を、負圧ブースタブレーキシステムの 2 倍に向上させている。

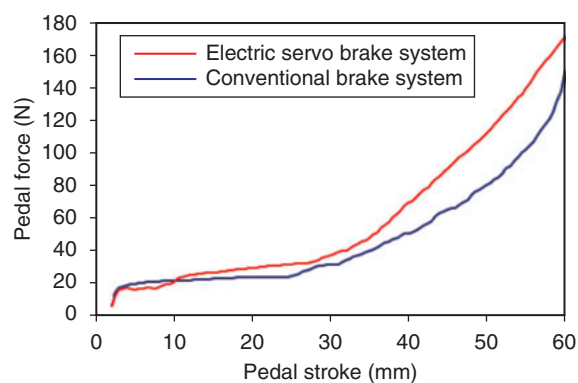


Fig. 5 Pedal force characteristic

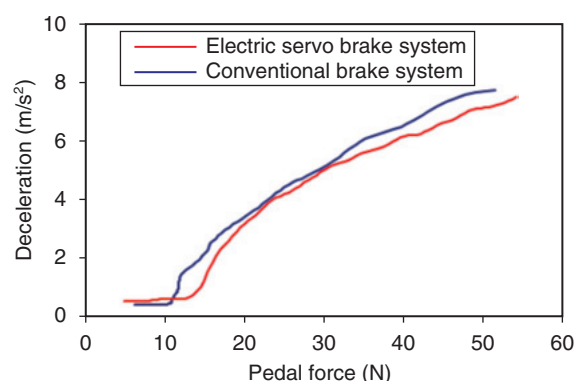


Fig. 6 Braking effectiveness

5. ブレーキ圧制御

ブレーキ圧制御は、次のようにおこなう。まず、ペダル操作量と電動パワープラントが発生できる回生トルク上限値の情報に基づきブレーキ圧目標値を決定する。次に、Fig. 7に示した液圧制御部とモータ角度制御部を介してブラシレスモータを駆動して目標のブレーキ圧を発生させる。

液圧制御部は、ブレーキ圧目標値に対応するスレーブシリンダピストンのストローク目標値を出力する。液圧制御部は、フィードフォワード部とフィードバック部から構成される。フィードフォワード部は、スレーブシリンダピストンのストロークと、発生ブレーキ圧の特性マップを用いる。フィードバック部には、マスタカットバルブ下流に配置した液圧センサ値を入力する。Fig. 8に、ブレーキ圧の応答性を示す。Fig. 8に示すように、この液圧制御構成により、ブレーキ圧の応答性と追値性を確保した。Fig. 9に、ABS作動中における、スレーブシリンダ圧の応答性を示

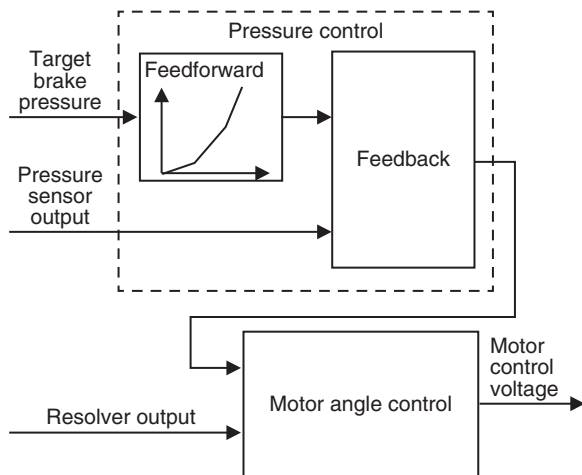


Fig. 7 Block diagram of brake pressure control

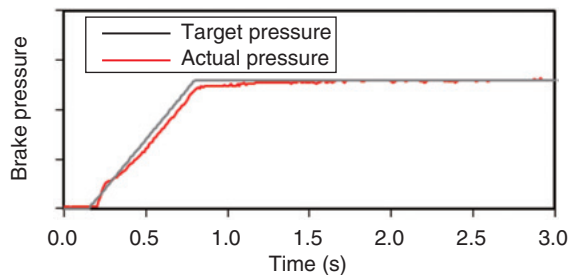


Fig. 8 Response of brake pressure

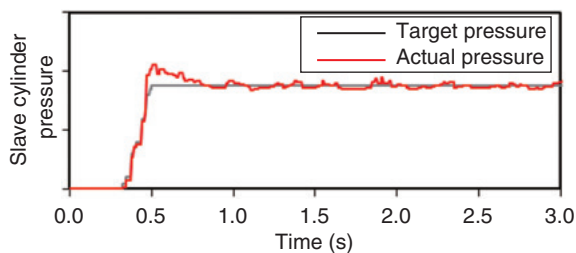


Fig. 9 Slave cylinder pressure response during ABS operation

す。ABS作動中のようなブレーキ負荷の変動がある場合に対しても、十分な制御安定性を示しており、高精度な液圧制御を実現している。

モータ角度制御部は、レゾルバによる角度フィードバック制御で構成され、モータ駆動電圧を出力する。加えて、コンパクトなモータで、高い応答性を実現するために、ブラシレスモータの高回転化を可能にする、弱め磁束制御 (Flux Weakening Control: FWC) を適用している⁽⁸⁾。Fig. 10に、ブレーキ圧とモータ速度の、ステップ応答における、弱め磁束制御ありとなしの比較を示す。弱め磁束制御の適用により、モータ回転数が30%速くなり、応答時間が25%短縮できた。その結果、コンパクトなモータで、高い応答性を実現できた。

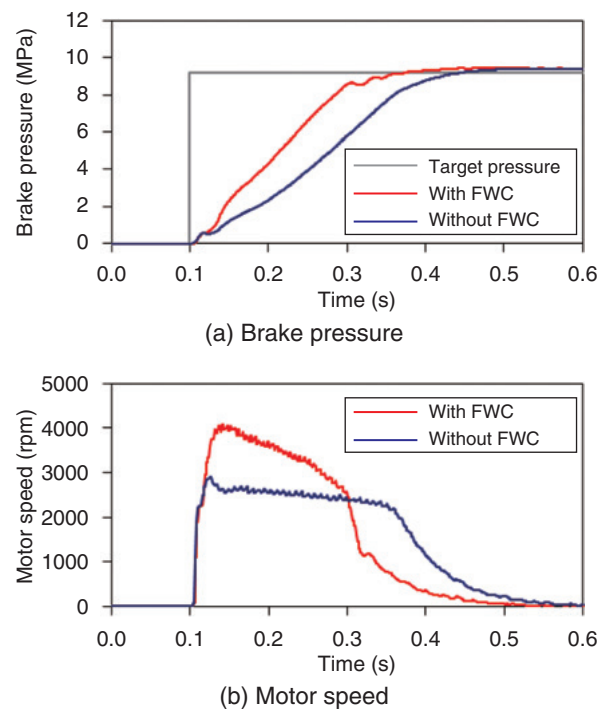


Fig. 10 Step response with flux weakening control (FWC)

6. 回生協調ブレーキ

EVおよびHEVにおいては、電費、燃費向上のために、車両走行における摩擦ブレーキの作動によるエネルギー損失の低減が、重要なポイントとなる。したがって、回生協調ブレーキに要求されるのは、摩擦ブレーキをできる限り使用しないことである。しかし、回生ブレーキは、高速走行時や停車直前など、パワープラント側の状況によっては発生できない場面がある。この場合は素早く摩擦ブレーキに切り替えなければ、ドライバの意図に反した減速度変動が発生してしまう。このため、回生協調ブレーキによって燃費を向上するには、高精度なブレーキ圧制御システムが必要となる。電動サーボブレーキシステムでは、ペダル操作部とブレーキ圧発生部を独立させた構成と、前述の高精

度なブレーキ圧制御により、高い回生効率と良好なブレーキフィールを両立させた。

Fig. 11 に電動サーボブレーキシステムにおいて、70 km/h から常用の減速をした時の、回生協調ブレーキ制御の時系列データを示す。停車間際まで摩擦ブレーキは一切使用せず、回生ブレーキのみで車両の運動エネルギーを回収している。減速度はドライバの要求どおり一定であり、回生によるブレーキフィールの変化も発生していない。停車間際から停車中にかけては、回生ブレーキが使えないため、摩擦ブレーキへの切り替えが必要となる。電動サーボブレーキシステムの高精度液圧制御の特性をいかして、摩擦ブレーキへの切り替えが完了する車速である V_e を 2 km/h まで低下させた。フィット EV では、電動サーボブレーキシステムによって回生量を EPA 燃費基準で従来システム比 8% 向上させた。

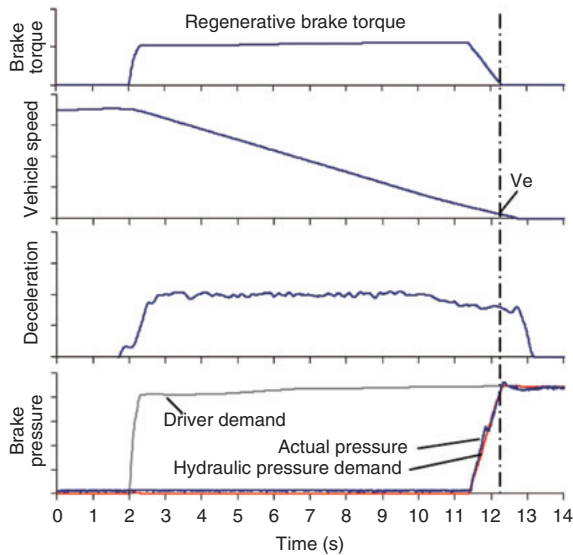


Fig. 11 Time chart of regeneration braking

7. まとめ

ペダル操作部とブレーキ圧発生部を独立させ、電動モータとボールねじ、および液圧シリンダという構造でブレーキ圧を発生させる、制御性に優れた電動のブレーキシステムを開発した。回生協調時のエネルギー回収効率を増大させるとともに、スムーズで自然なブレーキフィールをドライバへ提供できた。本電動サーボブレーキシステムの開発は、電動化車両の普及拡大に大きく貢献するだろう。

主要な技術についてまとめると

- (1) フィードフォワードとフィードバックで構成される液圧制御と弱め磁束制御を加えたモータ角度制御による、高精度で高応答の電動ブレーキ制御により、高い回生効率を実現した。
- (2) ペダル操作部をブレーキ圧発生部から独立させた構造と、シミュレータのパネ反力特性とブレーキペダル

のリンク比の最適化、および高精度で高応答の電動ブレーキ制御により、一般的なブレーキシステムと同等のブレーキフィールを実現した。

- (3) ブレーキペダルのリンク比とマスタシリンダピストンの断面積の最適化により、従来の負圧ブースタブレーキ以上のノンサーボ性能を実現した。

参考文献

- (1) Ogura, M., Aoki, Y., Mathison, S.: The Honda EV PLUS Regenerative Braking System, EVS14(1997)
- (2) Otomo, A., Sakai, A., Takasu, T., Nakamura, K.: Development of Regenerative Braking System for Hybrid Vehicle, SAE Paper, No. 1999-10-0062(1999)
- (3) Nakamura, E., Soga, M., Sakai, A., Otomo, A., Kobayashi, T.: Development of Electronically Controlled Brake System for Hybrid Vehicle, SAE paper, No. 2002-01-0300(2002)
- (4) 青木康史, 鈴木健二, 中野博士, 野尻欣主: ハイブリッド車用油圧サーボブレーキシステムの開発, Honda R&D Technical Review, Vol.18, No.2, p.60-66
- (5) 中田大輔, 中村栄治, 深澤司, 大矢健太郎: ハイブリッド車用 普及型電子制御ブレーキシステムの開発, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.108-09, p.15-20(2009)
- (6) Albrichsfeld, C., Karner, J.: Brake System for Hybrid and Electric Vehicles, SAE paper, No. 2009-01-1217(2009)
- (7) 小畑卓也, 大谷行雄, 白川直樹, 伊藤義徳, 後藤進之介, 小池雄一: 回生協調対応電動型制御ブレーキアクチュエータの開発, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.55-11, p.1-4(2011)
- (8) 杉本秀彦, 小山正人, 玉井伸三: AC サーボシステムの理論と設計の実例, 総合電子出版, 219p.(1990)

■著 者■



大久保直人



西岡 崇



赤峰宏平



波多野邦道

ダブルアームチェーンテンショナシステムの開発

Development of Double-arm Chain-tensioner System

関 雅 夫*

Masao SEKI

要 旨

チェーンシステムの機能向上を目的に、チェーンテンショナシステムに着目した。従来システムに対して新たにサブテンショナアーム（以下、サブアームという）を配置することで、レバー比効果を利用したダブルアームチェーンテンショナシステムを開発した。

その結果、コストと重量は従来システム以下にした上で、エンジン全回転域においてチェーンフリクションとチェーン張力低減を達成した。また、チェーン伸び率も従来システムより低減することができた。

ABSTRACT

Research was conducted with a focus on chain-tensioner systems in order to enhance the functions of chain systems. A double-arm chain-tensioner system was developed that differs from a conventional system in adding a sub-tensioner arm ("sub-arm" below) to make use of a lever ratio effect.

As a result, cost and weight have been reduced to levels below those of a conventional system, and chain friction and chain tension have been reduced across the entire operating range. In addition, the rate of chain elongation has been reduced compared to that of a conventional system.

1. はじめに

エンジンのカム駆動システムにおいて、チェーン駆動システムはベルト駆動システムと比べると耐久性や小型化に有利であることから、多くのエンジンで採用されてきている。しかし、チェーン駆動システムはベルト駆動システムと比べると、フリクションの増加と摩擦による伸びの観点では不利である。チェーン駆動システムにはベルト駆動システムにはない、チェーンガイドとテンショナアームが存在する。チェーンがチェーンガイドやテンショナアームとしゅう動すると抵抗が生じる。このチェーンガイドとテンショナアームのしゅう動抵抗がチェーンフリクションの90%以上を占めていることが報告されている⁽¹⁾。そのため、チェーンフリクションを低減するためには、しゅう動抵抗を低減することが有効である。エンジン排気量に対するカム駆動システムのエンジン回転数 1500 rpm におけるフリクションを Fig. 1 に示す。チェーン駆動システムはベルト駆動システムと比較すると約2倍のフリクションロスがあることがわかる。チェーン駆動システムのしゅう動抵抗低減には、しゅう動部材の表面処理等による摩擦抵抗低減手法があるが、大幅なフリクション低減効果は期待できない。そのため、チェーンフリクションを低減するために

は、しゅう動抵抗を生み出すもとである、チェーン平均張力とチェーン張力振幅を低減することが重要である。

油圧式チェーンテンショナ（以下、チェーンテンショナという）を使用したチェーン駆動システムの一例を Fig. 2 に示す。チェーン駆動システムにおいては、エンジン運転時のトルク変動などによって発生するチェーン振動を抑制するために、クランクスプロケットのチェーン噛み離れ側にテンショナアームとチェーンテンショナが配置されている。また、チェーンテンショナ内部にはチェーンに荷重を

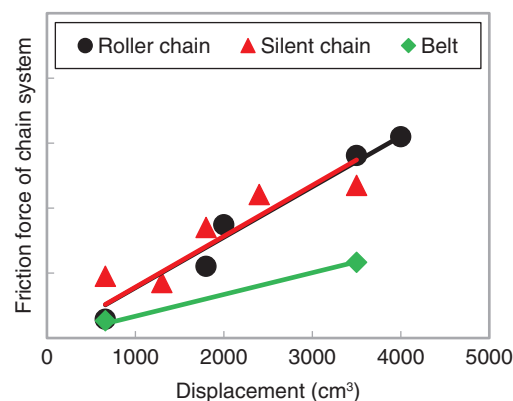


Fig. 1 Friction force of camshaft drive system

*四輪 R&D センター

与えるためのバネが配置されている。チェーンテンショナは、チェーンが緩みプランジャが伸びるときにプランジャ内部にエンジンオイルを吸い込み、チェーンが張りプランジャに付加された荷重を減衰することでチェーン張力振幅を抑制している。また、エンジンの運転が繰り返されると、チェーンが摩耗しチェーン伸びが発生する。チェーン伸びが発生すると、チェーンテンショナのプランジャも追従して伸びる。チェーンテンショナのプランジャが伸びると、チェーンテンショナ内部のバネからチェーンに与える荷重が低下していくが、荷重が不足するとチェーン挙動が不安定となり、チェーンとスプロケットの噛み合い不良などの機能的不具合が生じる。そのため、チェーンが伸びた状態でも必要な荷重を与えることができるようにチェーンテンショナ内部のバネ荷重を設定する必要がある。しかし、バネ荷重を高く設定しすぎるとチェーン伸びが発生していない初期のフリクションが増加する。このように、チェーンテンショナ内部のバネからチェーンに付加された荷重によるチェーン平均張力とエンジン運転時のチェーン張力振幅はチェーンテンショナシステムによってその値が大きく左右される。

チェーンテンショナシステムを考えると、チェーン伸びに追従するプランジャの伸び量の低減、およびチェーン伸び率が低減可能であれば、チェーン伸びが発生していない初期状態において、チェーンテンショナ内部のバネからチェーンに与える荷重を低く設定できるためチェーン平均張力が低減可能となる。また、チェーン張力振幅を低減できればチェーンフリクションの低減、およびチェーンに求められる疲労強度の値が低くなるため、チェーンのプレート枚数を低減することでコストと重量が低減可能となる。

そこで本研究においては、排気量 2.4 L のチェーン駆動システムのエンジンを用いて、コストと重量が従来システムと同等以下になることを前提として、フリクションロスがベルト駆動システムと同等になるフリクション 50% 低減を目標とした。この目標を達成するために、チェーン平均張力の低減、チェーン張力振幅の低減、およびチェーン伸び率の低減が可能なダブルアームチェーンテンショナシステムを開発した。

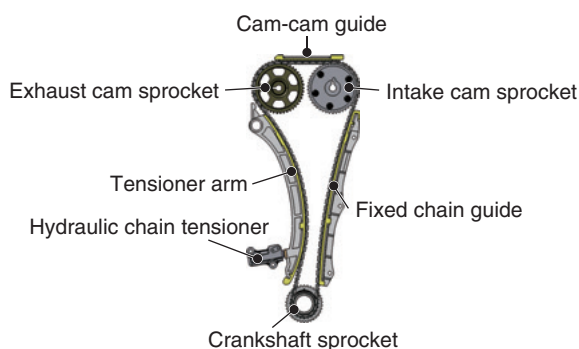


Fig. 2 Camshaft drive chain system

2. ダブルアームチェーンテンショナシステム

ダブルアームチェーンテンショナシステムの概要を Fig. 3 に示す。従来システムとの違いとして、テンショナアームとチェーンテンショナの間にサブアームが配置されている。サブアームを配置することによって、サブアームの支点とサブアームとテンショナアームの接点およびチェーンテンショナの接点にレバー比が生じる。このレバー比の効果によってダブルアームチェーンシステムは従来システムと比較して主に下記のような差が生じる。

- (1) チェーン伸びに対するテンショナアームの移動量に対して、プランジャの移動量が低減する。
- (2) チェーン張力振幅によるテンショナアームの揺動に対して、プランジャのストロークと振幅速度が低減する。
- (3) チェーン張力振幅によるプランジャへの入力荷重が増加する。
- (4) チェーンテンショナのバネからチェーンに与える荷重が低減する。

また、テンショナの配置によって下記のような効果が得られる。

- (5) チェーンテンショナのプランジャを上向きに配置することによって、エア抜き性能が向上する。
- (6) チェーンテンショナのプランジャを上向きに配置することによって、エンジン停止時のオイル抜けを防止する。

上記の効果を活用することでダブルアームチェーンシステムの開発においては次に示す機能向上を目指した。

フリクション: (1) の効果によって、チェーン伸びに対するプランジャの移動量が低減できることを利用してフリクションを低減する。

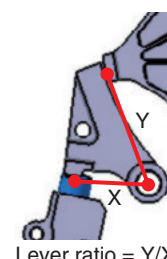
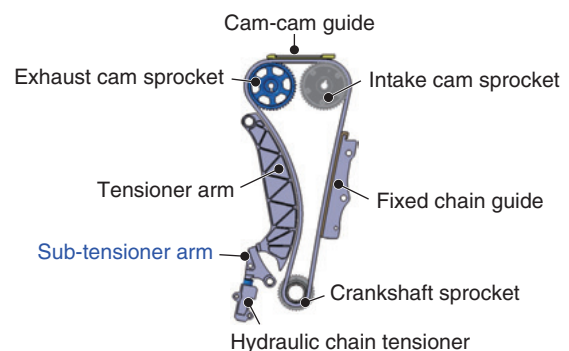


Fig. 3 Double-arm chain-tensioner system

チェーン張力振幅: (2)の効果によって、エンジン高回転時のテンショナ追従性が上がることを利用してチェーン張力振幅を低減する。
 チェーン伸び低減: (1)と(2)の効果によって、チェーンのピンとプレート間の面圧を低減できることを利用してチェーン伸びを低減する。
 コスト、重量: チェーン張力振幅およびチェーン伸び低減の達成により、チェーンのプレート枚数を低減することでコストと重量を低減する。

従来システムとダブルアームチェーンテンショナシステムのチェーン伸びに対する、チェーンテンショナ内部のバネからチェーンに与えられる荷重の変化を Fig. 4 に示す。ダブルアームチェーンテンショナシステムのチェーンに与えられる荷重の設定については、保証すべきチェーン伸び率の最大伸び率での荷重が従来システムと同等になるようにした。ダブルアームチェーンテンショナシステムは従来システムと比較してチェーン伸びが発生していない初期状態での荷重が低く設定できており、チェーン伸びに対する荷重の変化も緩やかである。これは、ダブルアームチェーンテンショナシステムはチェーン伸びに対するテンショナアームの移動量に対してチェーンテンショナのプランジャ移動量が少ないことに加えて、チェーン伸びに対するレバー比の変化および、プランジャ内部のバネからチェーンに与える荷重の伝達効率の変化等を考慮した上で設定をおこなっているためである。

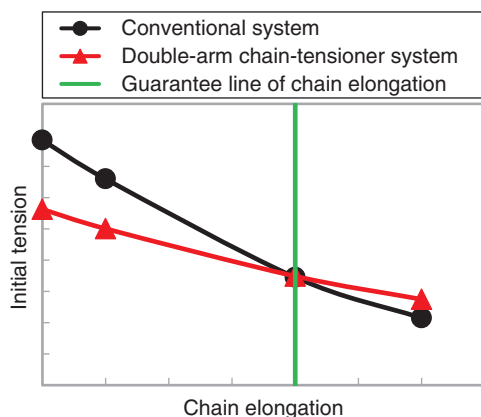


Fig. 4 Relation between chain elongation and initial tension

3. ダブルアームチェーンテンショナシステムの基本性能

ダブルアームチェーンテンショナシステムの基本性能を確認するために、同一諸元のエンジンのチェーン駆動システムのみを変更して試験をおこなった。エンジン諸元の概要を Table 1 に示す。従来システムとダブルアームチェーンテンショナシステムのエンジン運転時のチェーン張力測定結果の比較を Fig. 5 に示す。チェーン張力測定はクラン

Table 1 Engine specifications

Cylinder configuration	Inline 4
Bore × Stroke (mm)	87.0 × 99.0
Displacement (cm ³)	2354
Compression ratio	10.5
Chain type	Silent chain
Chain pitch (mm)	6.35
Number of link plates	4/3
Number of links	176
Tensioner type	Hydraulic tensioner
Number of sprocket teeth	Crankshaft sprocket : 23 Camshaft sprocket : 46

クスプロケットをロードセル化して測定し、張力は固定ガイド側をプラス、テンショナアーム側をマイナスとしている。ダブルアームチェーンテンショナシステムは、Fig. 5 より、全回転域でチェーン張力振幅が低減できている。特に、高回転側については、チェーンテンショナの振幅低減による追従性向上効果によって約 35% チェーン張力が低減している。また、チェーン張力振幅の低減効果によってチェーンのプレート枚数を少なくしてもチェーンに必要な疲労強度を満足する仕様にする事ができている。

次に、チェーンシステムのフリクション測定結果の比較を Fig. 6 に示す。ダブルアームチェーンテンショナシステ

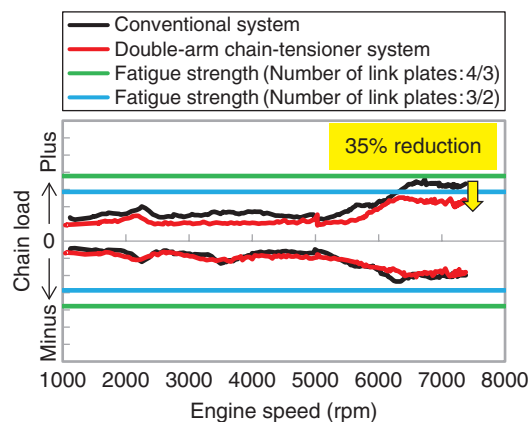


Fig. 5 Comparison of chain load

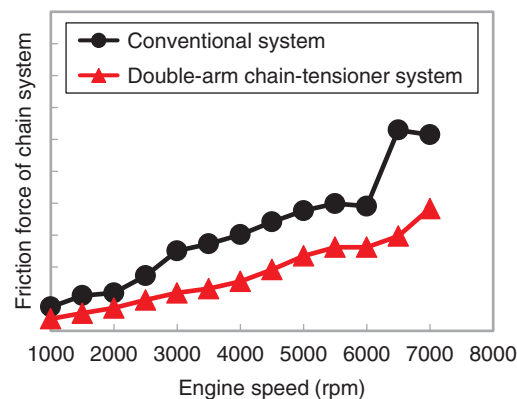


Fig. 6 Comparison of chain friction force

ムを採用することで、チェーン張力振幅およびチェーン平均張力が低減された効果により、全回転域でフリクションが低減されている。また、4000 rpm 以下の領域においては50%のフリクション低減が達成されている。

4. 信頼性評価

ダブルアームチェーンテンショナシステムの信頼性評価をおこなうために、サブアーム支点への負荷荷重が最大となる条件でのチェーンシステムの耐久試験とチェーン伸び評価試験をおこなった。チェーン張力測定結果から計算したチェーンのピンとプレート間の面圧比較を Fig. 7 に示す。また、チェーン伸び評価試験結果を Fig. 8 に示す。Fig. 5 より、ダブルアームチェーンテンショナシステムではチェーン張力振幅低減効果よりチェーンのプレート枚数を低減しても疲労強度を満足する仕様となっ

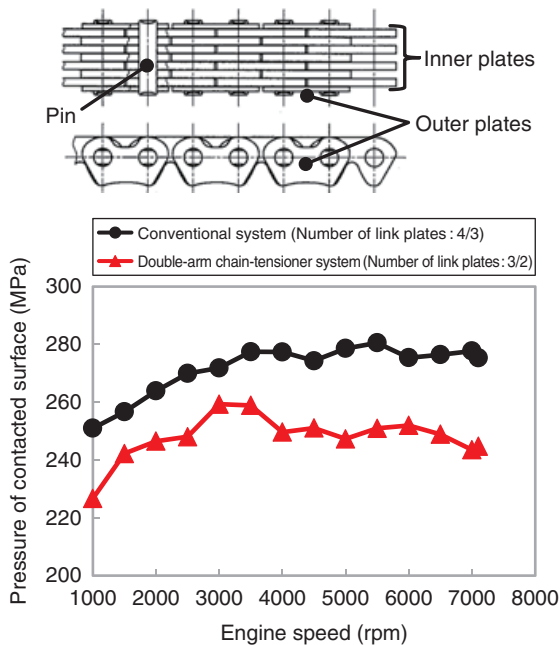


Fig. 7 Comparison of pressure of contacted surface

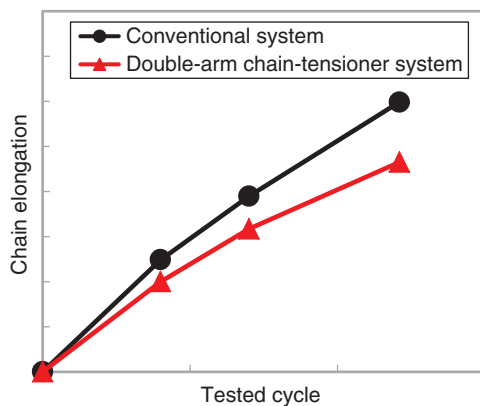


Fig. 8 Comparison of chain elongation

た。また Fig. 7 より、チェーン平均張力およびチェーン張力振幅を低減した効果によって、プレート枚数を低減しても従来システムに対して、ピンとプレート間の面圧が低減できている。以上より、ダブルアームチェーンテンショナシステムを採用することで信頼性向上が認められたため、従来システムに対してプレート枚数を低減した仕様で信頼性評価試験をおこなった。Fig. 8 より、ダブルアームチェーンテンショナシステムは、チェーンのプレート枚数を減らしたにもかかわらず、面圧低減の効果によってチェーン伸び率が従来システムに対して30%低減されている。また、サブアームへの負荷荷重が最大となる耐久試験をおこなった結果は、不具合の発生なく終了している。

5. コストと重量

従来システムとダブルアームチェーンテンショナシステムのコストと重量の比較を Fig. 9 に示す。ダブルアームチェーンテンショナシステムではチェーンのプレート枚数を低減できた効果で従来システムと比較してコストは2.5%、重量は0.8%低減することができた。

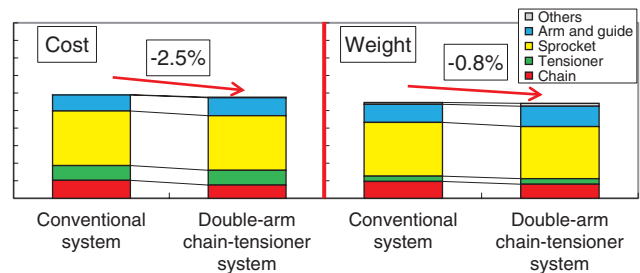


Fig. 9 Cost and weight

6. まとめ

ダブルアームチェーンテンショナシステムを開発することで以下の内容を達成した。

- (1) エンジンの全回転域でフリクション低減を達成した。特に、4000 rpm 以下の領域については50%のフリクション低減を達成した。
- (2) エンジンの全回転域でチェーン張力振幅低減を達成した。特に、高回転領域では最大で35%のチェーン張力振幅低減を達成した。
- (3) チェーン平均張力およびチェーン張力振幅を低減した効果によって、チェーンのプレート枚数を低減した。これにより、従来システムに対してコストを2.5%、重量を0.8%低減した。また、プレート枚数は低減したがチェーン伸び率は30%低減を達成した。

参考文献

- (1) 坂口元康, 山田真嗣, 関雅夫, 小岩洋二郎, 若林智弘,
山内孝宏: マルチボディダイナミクスをもちいたタイ
ミングチェーンフリクション予測, 自動車技術会学術
講演会前刷集, No.154-11, p.1-6(2011)

■ 著 者 ■



関 雅 夫

大型船外機用ギヤケースの開発

Development of Gear Case for Large Outboard Motor

井手 真一*

Shinichi IDE

片桐 信近*

Nobuchika KATAGIRI

吉ヶ崎 剛*

Tsuyoshi YOSHIGASAKI

清水 真吾*

Shingo SHIMIZU

要 旨

Honda 大型フラッグシップ船外機 BF250 の開発に伴い、現行機以上の高信頼性と動力性能を確保するため、大型船外機用のギヤケースを開発した。

軸受支持構造の見直しによるギヤ歯当たりの改善や、ギヤ材料・熱処理の見直しによる耐ピッチング性の向上をおこなった。また、高負荷耐久性を実現するギヤ諸元を採用すると共に、剛性・製造ばらつきを加味し歯当たりを有限要素法解析 (FEM 解析) 上で最適化し、製造ばらつきを低減するため歯研仕上げを採用した。

これらにより、クラストップの動力性能を満足しながら、目標とする耐久性能を実現するギヤケースに仕上げた。

ABSTRACT

As part of the development process for its flagship large outboard motor, the BF250, Honda has developed a gear case for large outboard motors in order to realize increased reliability and power performance against existing models.

Enhanced tooth contact has been achieved through redesign of the structure of the bearing mountings, and pitting resistance has been increased by modifying the gear materials and heat treatment. In addition, gear specifications making it possible to realize high durability under high loads have been employed, and the optimization of tooth contact via finite element model (FEM) analysis with consideration of stiffness and manufacturing variations has assisted in the realization of a tooth grinding process that reduces manufacturing variations.

These innovations have resulted in the realization of a gear case that achieves class-topping power performance while satisfying targets for durability performance.

1. まえがき

近年、主に北米や欧州で製造されているオフショア艇と呼ばれる沖合航行可能な艇体は搭載馬力が大型化する傾向にある。またこれらの船外機は長時間高負荷の環境下で使用するプロユースの艇体への搭載比率が高く、高い耐久信頼性が求められる。

これらの要求を踏まえ BF250⁽²⁾ の開発に伴い、大型船外機用ギヤケースに採用された技術について紹介する。Fig. 1 に外観を示す。



Fig. 1 External view of gear case

2. 大型船外機における駆動系の要求と開発のねらい

大型船外機の搭載艇は一般的なレジャーユースに対し、コマーシャルやガバメントといったプロユースが約 30% と他の馬力帯に対し比率が高い (Fig. 2)。

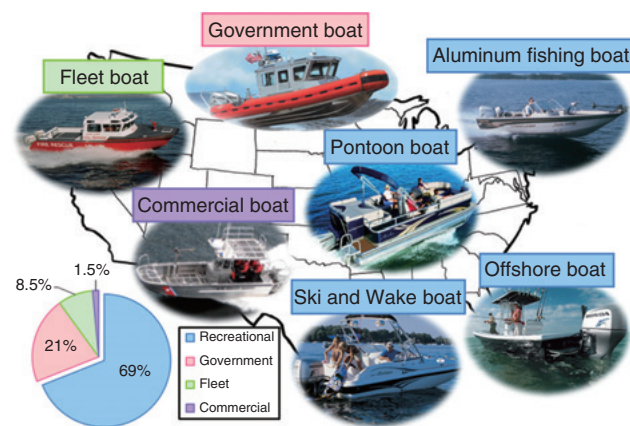


Fig. 2 Variety and percentage of large boats in the market

* 汎用 R&D センター

また、プロユースでは長時間、高負荷の過酷な条件での使用が多く、高い耐久信頼性が重要となる。

従来プロユースにおける高負荷領域 (3850 rpm-WOT) での使用時間は 30% 以内と考えられていたのに対し、Boat taxi (観光船) では二倍の 60% を占めている (Fig. 3)。

このように高負荷長時間使用される例として、Boat taxi および沿岸警備などに使用されている艇体を Fig. 4 に示す。

また、水没環境下にあるギヤケースは航行時の抵抗となるため、動力性能を満足しつつ耐久性を向上する必要がある。

以上を踏まえ本開発は、下記項目をねらいとした。

- (1) クラストップの動力性能
(最高速性能と加速性能の両立)
- (2) 高負荷長時間使用に対応した耐久性能
(単体耐久試験における従来比二倍以上の耐久性)

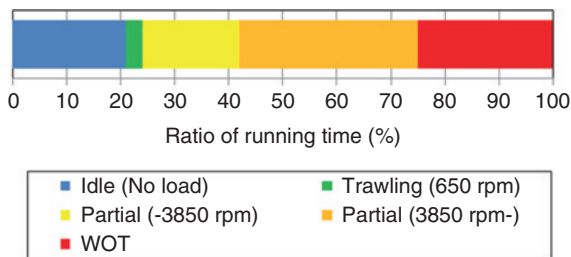


Fig. 3 Ratio of running time represented by different loads for boat taxi



Fig. 4 Boat taxi and coastal patrol boat

3. 船外機ギヤケースの基本構成

船外機ギヤケースの基本構成は、エンジン軸からの動力を、ピニオンギヤ、ベベルギヤを介して直交変換し、プ

ロペラ軸へ伝達する構成となっており、プロペラ推力の支持、水中抵抗の最小化、水密性の確保も考慮されている。この基本構成を Fig. 5 に示す。

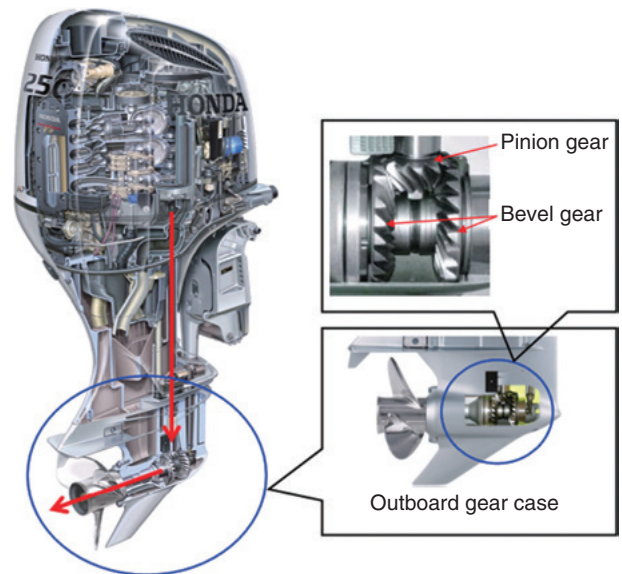


Fig. 5 Standard outboard gear case

4. 主要技術

以下に各要素技術の詳細について解説する。

4.1. ギヤケース諸元

ギヤケースの設計において、初めに減速比の設定が重要である。四輪、二輪と異なり船外機では、最終動力伝達物がプロペラであり、プロペラ直径により推進効率が異なる。本開発ではプロユースを代表する速度レンジにおいて、最も効率が良くなるプロペラ直径と減速比を選定した。従来機種との比較を含め、それぞれの関係を Fig. 6 に示す。

また、ギヤケースの減速比変更と共に耐久性向上の観点でベベルギヤ直径を従来機種比で 10% アップした。そのため、水中抵抗値は従来比 2.4% 増加したが、コンピュータ流体解析 (CFD) による表面圧力解析を活用し、最適形状とすることで、Cd 値では 5% 低減した。

CFD によるギヤケース表面圧力解析結果を Fig. 7 に示す。

4.2. 軸受配置

4.2.1. 基本軸受構造

基本軸受構造の説明の前に、大型船外機における搭載方法について説明する。一般に船外機のプロペラは、後ろから見て時計方向に回転する。この仕様をスタンダードローテーション仕様という。これに対し、Fig. 8 に示すように船によっては二機搭載して使用される場合がある。この場

合、プロペラの回転方向が同じであると、プロペラのトルク反力が大きく船の直進安定性が損なわれることから、左右のプロペラ回転を逆にすることにより、お互いのトルク反力を打ち消しあって、直進安定性を維持する方法が採用される。このプロペラが後ろから見て反時計方向に回転する仕様をカウンタローテーション仕様⁽¹⁾という。

次に現状の基本軸受構造についてみると、エンジン回転の方向は同じでもスタンダードローテーション仕様、カウンタローテーション仕様のプロペラ回転方向が異なる

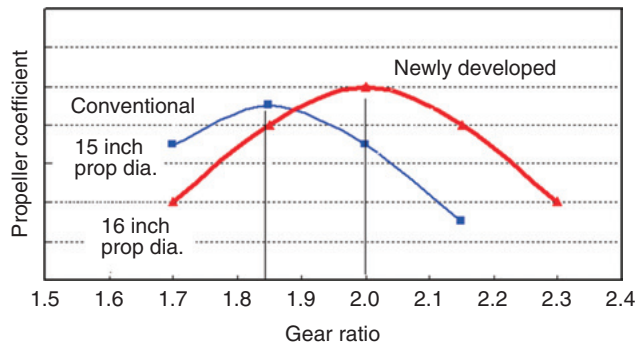


Fig. 6 Gear ratio and propeller coefficient

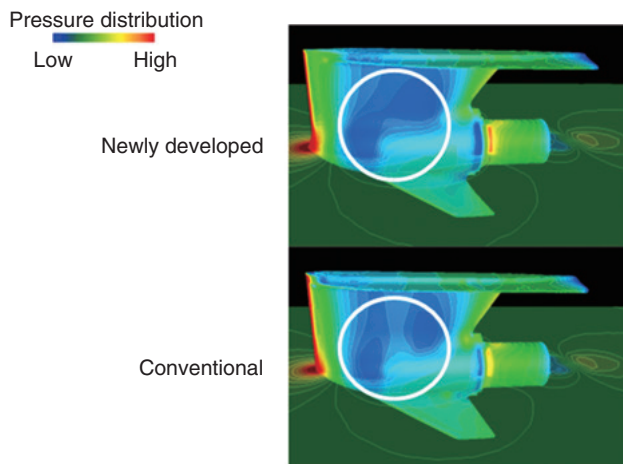


Fig. 7 Pressure distribution

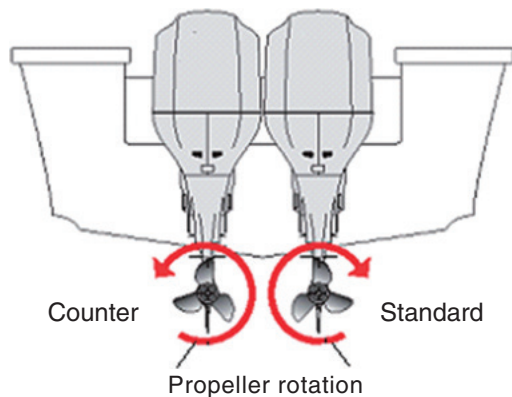


Fig. 8 Twin outboard motors

ことから、フォワードギヤの位置を前後で入れ替える必要がある。このため、軸受構造が両仕様で異なる。現状では使用頻度の高いフォワードギヤ側にスラスト荷重に対する耐力のあるテーパベアリング、使用頻度の低いリバースギヤ側にボールベアリングを使用している。

この構造の違いを Fig. 9 に示す。

4.2.2. カウンタローテーション仕様の軸受構造変更

Fig. 9 のテーパベアリングの向きに着目すると、スタンダードローテーション、カウンタローテーション両仕様とも、同じ向きであるのが見てとれる。

ここでスタンダード仕様の場合は、ギヤスラスト荷重と推力が同じ方向であり、両荷重をテーパベアリングの外輪で受けることができ、推力に拠らず歯当たりが安定する。これに対し、カウンタローテーション仕様では、ギヤスラスト荷重と推力が逆方向のため、推力がギヤスラスト荷重より大きくならないと、テーパベアリングの外輪で荷重を受けることができず、ギヤの歯当たりも安定しないという特徴を有していた。これに対し、本開発ではギヤにより分離された荷重を一つのベアリングで保持するのではなく、それぞれの荷重を受けるベアリングを設定することとし、ラジアル荷重はニードルベアリング、スラスト荷重についてはスラストベアリングで受ける構造とした。これにより、ギヤの歯当たりを常に安定させ、耐久性向上に繋げた。その構造を Fig. 10 に示す。

4.3. ギヤ材料、熱処理

ギヤの硬度については、耐ピッチング性の確保を目的とした設定をおこなった。本機では、歯研による歯型調整がおこなわれることから、その取り代分を考慮したうえで、表面起点・内部起点双方のピッチングに対する耐性を確保するためには、表面から深さ 0.3 mm 程度までの領域にお

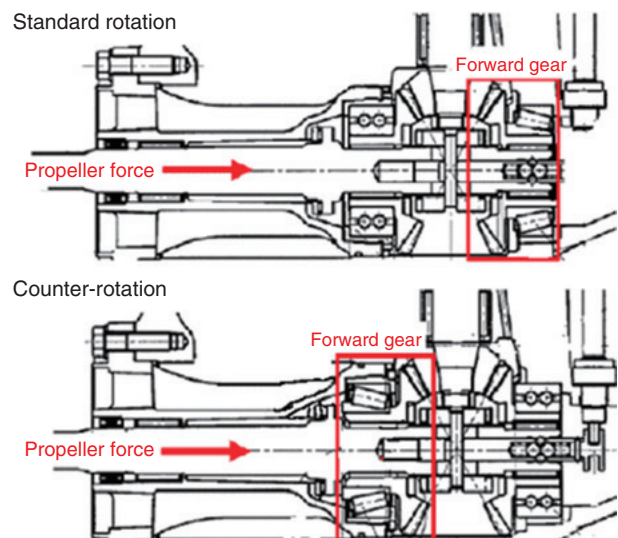


Fig. 9 Structure of gear case

いて、従来仕様と比較して高い値を維持した硬度分布が必要である。

そのために新たな熱処理条件を設定し、材料はNi 2%, Mo 0.75% 等、合金成分の多い鋼種を採用することで、ギヤに必要なじん性を確保しつつ、ねらいの硬度分布を実現した (Fig. 11)。

これらの効果を確認するためにおこなった、ローラピッチング疲労試験の結果を Fig. 12 に示す。試験体は、歯研に

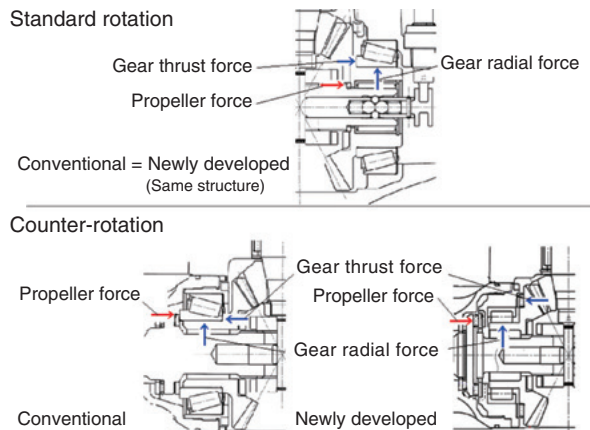


Fig. 10 Detail of gear case

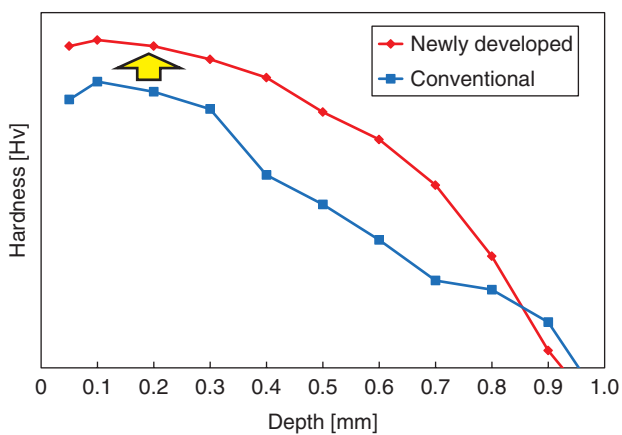


Fig. 11 Hardness distribution

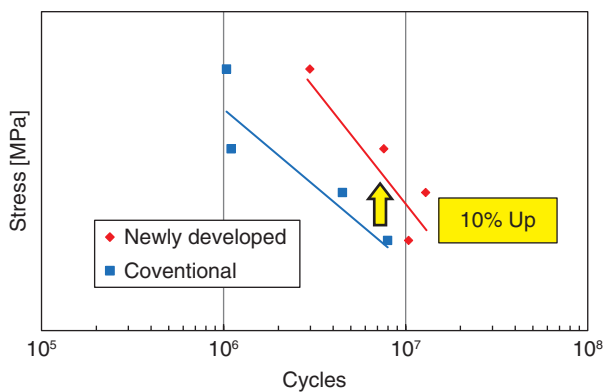


Fig. 12 Results of fatigue test for pitting

よる表面除去を含め、実際のギヤ製造工程を可能な限り模して作製した。

開発仕様は、従来仕様と比較して約 10% の耐ピッチング強度向上を達成している。

4.4. ギヤ諸元, 歯形

大型船外機用ギヤに求められる特性として、高負荷長時間運転にも耐えることが必要である。そこで本開発では歯面圧、歯元応力、剛性を両立させるため、FEM 解析を活用しながら、ギヤモジュールを最適化した。Fig. 13 に従来と本開発のギヤ形状差を示す。

大型船外機用ギヤは、高負荷で使用されることからギヤケースの変形、軸受のクリアランスから歯当たり移動量が大きく、ギヤの移動量の計測や FEM 解析を活用し歯形修正を実施し、歯当たりの適正化を実施した。また、製造時の歯形ばらつきを極力排除することを目的に歯研仕上げを採用し、歯当たりの再現性を図った。Fig. 14 に FEM 解析実施例を示す。

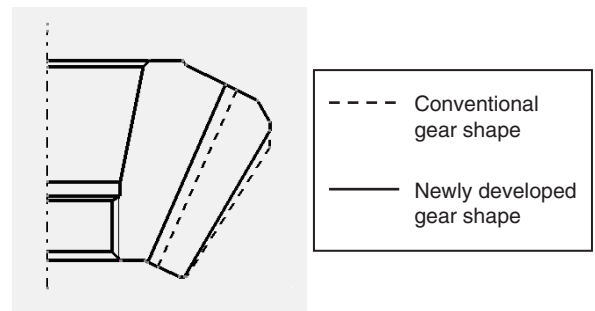


Fig. 13 Comparison of pinion gear shape

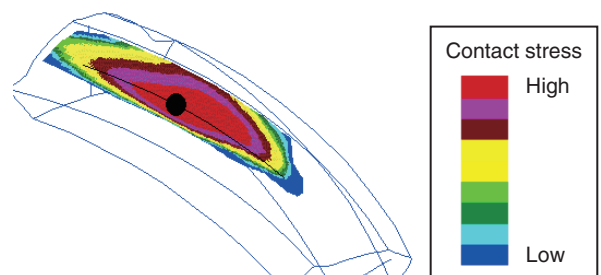


Fig. 14 Example of FEM

5. 耐久性能と動力性能

5.1. 耐久性能

ギヤケース単体耐久試験において新開発品は、従来設計品に対し、目標二倍を超える三倍の耐久時間を示した (Fig. 15)。

5.2. 動力性能

耐久性を向上させつつ、ギヤレシオの最適化およびギヤケースの水中抵抗低減で、最高速性能と加速性能を両立させたクラストップレベルの動力性能を実現した (Fig. 16).

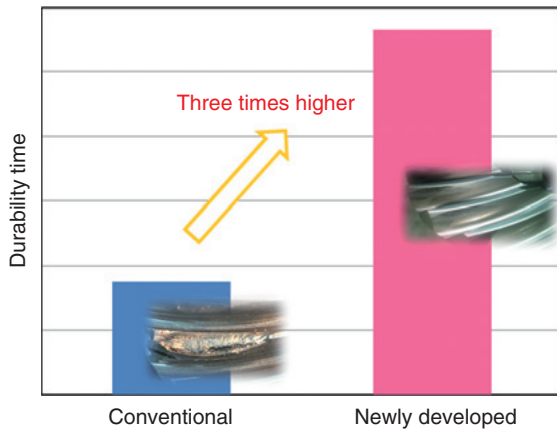


Fig.15 Durability

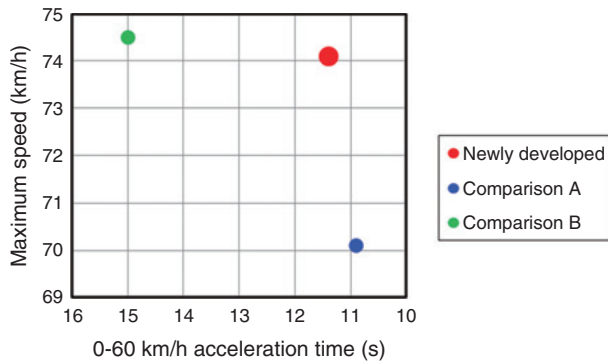


Fig. 16 Maximum speed and 0-60 km/h acceleration time

6. まとめ

大型船外機用ギヤケースを開発し、

- ・クラストップレベルの動力性能を確保
- ・単体耐久試験において耐久性が三倍に向上を達成した。手法は以下のとおり。

- (1) 減速比と推進効率の関係から、最適諸元を選定、またギヤケースの水中抵抗低減をおこなった。
- (2) カウンタローテーションの軸受構造の見直しにより、運転条件によらず安定的に歯当たりを確保した。
- (3) 材料、熱処理の見直しにより、最表面および表層を高硬度分布とし、耐ピッチング強度性能を約 10% 向上した。
- (4) 高負荷領域での耐久性を考慮し、ギヤのモジュールを最適化した。また剛性・製造ばらつきを加味し FEM 解析を活用し歯当たりを適正化すると共に、歯研仕上げを採用した。

参考文献

- (1) 角田正樹, 設楽貞文, 島崎弥, 林崎正一: 大型 4 ストローク船外機「BF115/130」の開発, HONDA R&D Technical Review, Vol.11, No.1, p.15-22
- (2) 原田義弘, 石坂和弘, 田中豪, 石塚邦彦, 磯野史弥: 大型フラッグシップ船外機 BF250 の開発, Honda R&D Technical Review, Vol.24, No.2, p.40-46

■著 者■



井手 真一



吉ヶ崎 剛



片桐 信近



清水 真吾

機能拡大シートベルト E-プリテンションの開発

Development of New Seat Belt E-pretensioner System

大 舘 正太郎*
Shotaro ODATE

竹 村 直 敏*
Naotoshi TAKEMURA

要 旨

これまで開発されてきたシートベルト E-プリテンションは、衝突軽減ブレーキシステムやブレーキアシストが作動した時のプリクラッシュ領域において、シートベルトをモータで巻き取る機能を有していたが、その作動シーンが限られていた。

今回はこの課題に対して、プリクラッシュ領域の作動範囲拡大と、日常のシートベルトの使い勝手である快適性向上を目的に、開発をおこなった。プリクラッシュ領域に関しては、シートベルト着用時の重傷事故に占めるシステム作動範囲を従来の 18% から 45% に拡大した。快適性領域に関しては、スポーツ走行時における乗員移動量および、シートベルト引出し荷重を半減、また、シートベルト着用時の巻き取り荷重を 30% 低減することにより、シートベルトの引出しを軽くし、着用時の圧迫感を低減することで快適性向上を図った。

ABSTRACT

The previous seat belt E-pretensioner that was developed possessed a function for retracting the seat belt with a motor in a pre-crash area when the Collision Mitigation Braking System or brake assistant was operated. However, that operation scenario was limited.

Development efforts to address this issue were conducted to expand the range of operation of the pre-crash area and enhance the comfort of routine use of the seat belt. As for the pre-crash area, according to an analysis of serious injury accidents in which seat belts were worn, the system operation range was increased from 18% to 45%. Regarding the comfort area, by halving the occupant movement during sports driving and the pull-out load on the seat belt, and by reducing the retraction load by 30% when the seat belt is worn, the pull on the seat belt was lightened and the feeling of pressure when wearing the seat belt was reduced, improving comfort.

1. まえがき

通常のシートベルトは、Emergency Locking Retractor (ELR) と呼ばれるロック機構を備えている。このロックは、 3.9 m/s^2 程度の加減速度の入力時や、急激なベルト引出し時に作動する。乗員着衣によるシートベルトのたるみがあるため、乗員がシートベルトで拘束されるまでに、乗員が前方に移動してしまう可能性がある。衝突時の乗員の位置や姿勢が不適切であると、乗員拘束性能を十分に発揮できない可能性がある。そのため、シートベルトリトラクタには、プリテンションと呼ばれる緊急巻き取り機能を有するものがある。これは、一定以上の減速度の前面衝突が検知されると、火薬の爆発力により、シートベルトを短時間

で巻き取り、衝突中の乗員移動量を抑制する。

しかしながら、このプリテンションは、衝突を検知して作動するため、衝突前の乗員の姿勢変化には有効ではない。北米自動車事故データベース (NASS/CDS)⁽¹⁾ によれば、衝突前、約 2 割の車両が、急ブレーキや急転舵などの回避操作をおこなっている。この回避操作により乗員は最大 10 m/s^2 程度の加速度を持った慣性力を受ける。乗員は、自らの力で姿勢を保持しなければ慣性力により、姿勢変化が生じる可能性がある。

E-プリテンションは、この衝突前の姿勢変化を低減するため、衝突の可能性がある場合に、電気モータにより、すばやくシートベルトを巻き取る機能を有している。

従来の E-プリテンションは、追突軽減ブレーキシステ

*四輪 R&D センター

ム (CMBS)⁽²⁾ が追突の危険性があると判断し緊急自動ブレーキが作動する場合やブレーキペダルを強く踏み込み、電子式ブレーキアシストが作動する場合に、シートベルトを巻き取る。

本開発の目的は、このE-プリテンショナの機能をさらに向上させることである。そのために、プリクラッシュ機能の拡充、および、従来のシステムでは解決が困難であった、スポーツ走行時の乗員の振れ感、シートベルトの引き出し荷重、巻き取り荷重および、着用時の圧迫感の改善をおこなった。

2. システム構成

Fig. 1 にE-プリテンショナシステムの車載レイアウトとシステム構成図を示す。通常のシートベルトに対する主要追加部品は、シートベルトリトラクタ駆動部とモータ制御ECUである。そのほかに、システムの構成としては、CMBSやVehicle Stability Assist(VSA)のECUなどとController Area Network(CAN)で接続されている。さらに、新型E-プリテンショナは、従来のE-プリテンショナに対して、ELRにシートベルト変位や速度を検知する回転角センサを追加し、運転席と助手席にそれぞれ装備している。

2.1. リトラクタ駆動部

E-プリテンショナのリトラクタは、通常のシートベルト

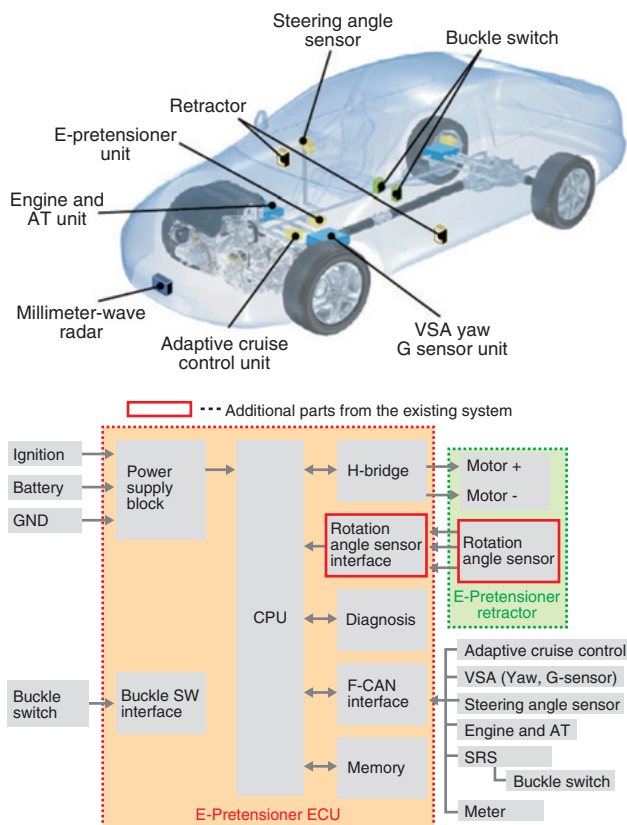


Fig. 1 Vehicle layout and system configuration diagram

リトラクタに、モータ、減速ギヤ、クラッチ機構が追加されている。システムが作動していない状態では、モータと減速ギヤは、スプールから切り離された状態である。モータ回転を順方向に通電すると、クラッチ機構が作動し、減速ギヤを介して、モータとスプールが結合され、ベルトを巻き取る。モータ回転を逆方向に通電すると、クラッチが解除し、モータとスプールが切り離される。

ギヤ構造は、コンフォート作動時のギヤしゅう動音低減のため、ギヤ材質や形状を見直している。

2.2. 回転角センサ

スピールの回転を検知することにより、シートベルトの変位や速度が得られる (Fig. 2)。

2.3. モータ制御

モータ制御は三つの制御方法があり、作動目的別に、最適な制御を用いている。

(a) モータ電流制御

モータ電流が目標電流値に近づくように、Proportion Integral Differential (PID) フィードバック制御する。モータストール時のトルクは電流に比例するため、ベルトの張力を制御できる。

(b) モータ電圧制御

クラッチ解除時には、モータに負荷がかからないため、モータが無負荷状態となり、モータ駆動電流が流れず、電流フィードバック制御できないため、一定電圧となるように、モータ電圧制御する。

(c) 定速度制御

回転角センサを用い、一定時間内の回転角センサ出力が目標値に近づくように、Duty をフィードバック制御する。

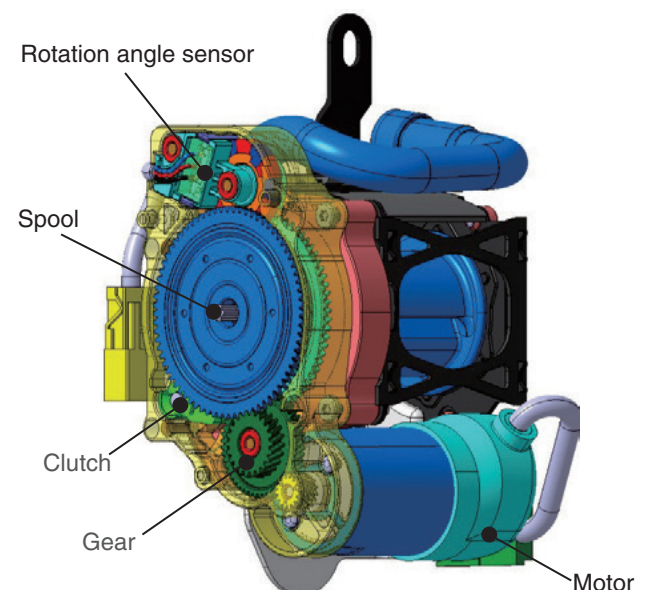


Fig. 2 E-pretensioner retractor

2.4. 電子制御ユニット (ECU)

新型 E-プリテンショナのモータ制御をおこなう ECU を開発した。一つの ECU は、一つのモータを制御する。ECU は、演算処理回路、駆動回路、CAN インタフェイスを一つの IC に統合した Application Specific Integrated Circuit (ASIC) を用い、従来品と比べて、小型、軽量化を実現している (Fig. 3)。

ECU は、CAN を通じて、CMBS, VSA, SRS などの連携システムの ECU と通信し、プリクラッシュ作動のトリガとなる CMBS や VSA の作動状態、ヨーレート、前後加速度、横加速度、シートベルト装着状態など制御に必要な信号を受信している。また、回転角センサ信号やバックルスイッチ信号の受信部も備える。これらの信号を CPU で処理し、モータを Pulse Width Modulation (PWM) 制御する。

2.5. バックルスイッチ

イグニッション OFF 時のモータによるシートベルト巻き取り機能のため、ベルト装着状態の信号が必要である。イグニッション OFF 時には、CAN からのシートベルト装着信号を受信することができないため、バックルスイッチを追加している。

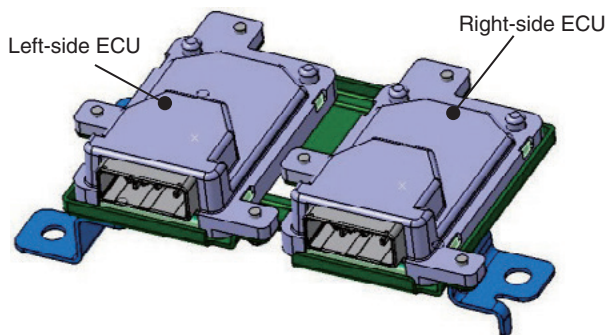


Fig. 3 E-pretensioner ECU

3. 新型 E-プリテンショナ機能の説明

新型 E-プリテンショナの機能は、緊急時に作動するプリクラッシュ緊急巻き取り時の機能と、日常使用時にシートベルト使用の快適性を高めるコンフォート機能に類別できる。従来の E-プリテンショナは緊急時のみのプリクラッシュ領域に作動するため、作動シーンが限られていたが、新型 E-プリテンショナではコンフォート機能を追加することにより、日常使用時にも作動しシートベルトの快適性を向上させた。

以下に、機能を紹介する。

3.1. プリクラッシュ時緊急巻き取り機能

通常走行状態に比べ、衝突の可能性がより高いと判断

される状況で、衝突前の乗員の姿勢変化を抑制するため、シートベルトを緊急に巻き取る機能である。電流制御によりシートベルトを巻き取る。最短、およそ 100 msec で、ショルダベルト張力 100 N 程度で巻き取ることが可能である。乗員に働く慣性力が低い状態で、高張力で巻き取ると乗員の違和感が大きいため、モータ電流の目標値は、状況に応じて設定し、下記のような場合に作動する。

(a) 横滑り、急旋回時: VSA の横滑り抑制 Active Yaw Control (AYC) 機能作動時や急なハンドル操作時に作動する (Fig. 4)。

(b) 衝撃入力時: SRS センサが衝撃を検知した場合、万一の 2 次衝突に備え作動する (Fig. 5)。

3.2. コンフォート機能

スポーツ走行時の乗員振られ感を低減し、日常使用時のシートベルトの引出しを軽くし、シートベルト巻き取り荷重を低減することにより、着用時の圧迫感を無くした。また、シートベルト着用時に、たるみを自動で巻き取る機能、および、シートベルト格納動作をアシストする機能がある。

下記の作動モードがある。

(a) ダイナミックモード

車速が設定された値以上、および、ブレーキ減速、旋回加速度が設定された値以上の場合、シートベルトのテンションを高め乗員上体振られ感を低減する (Fig. 6)。

(b) ウェルカムモード

シートベルト着用時に、シートベルトのタングをバックルに挿入後、定速度でシートベルトを巻き取り、シートベルトのたるみを巻き取る。

(c) シートベルト格納機能

シートベルトが着用状態から非着用状態に変化した場合

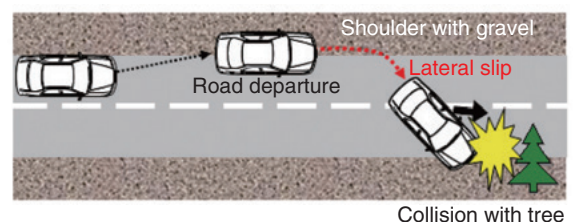


Fig. 4 Example of collision with lateral slip

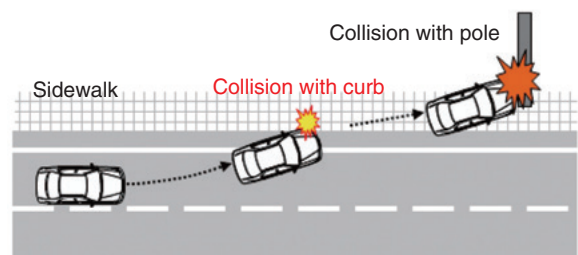


Fig. 5 Example of multiple collisions

や、シートベルトが非着用状態から引き出された後、シートベルトを格納するために定速度制御で、シートベルトを巻き取る。シートベルトの巻き取り時の違和感を抑えるため、シートベルトの巻き取り量に応じて、巻き取り速度を設定した。シートベルト着用位置から 150 mm までは、比較的速い速度でシートベルトを巻き取り、それ以降は、シートベルトを遅く巻き取ることで、乗員の腕や衣服にタングが引っ掛かり難い設定とした (Fig. 7)。

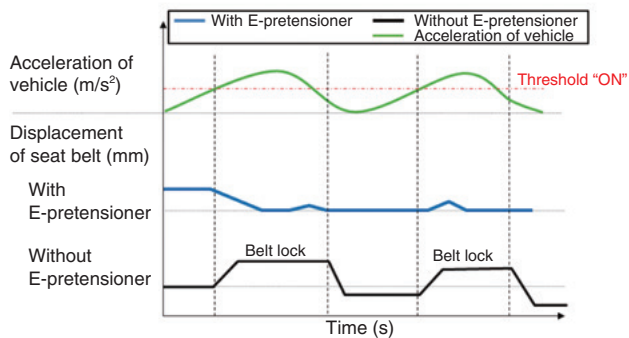


Fig. 6 Dynamic control

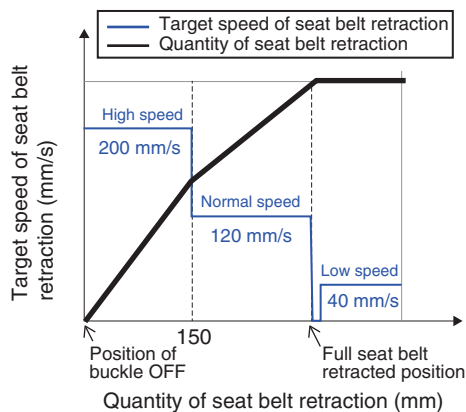


Fig. 7 Speed control in retraction function

4. 適用効果

新型 E-プリテンショナ機能の効果を以下に示す。

4.1. プリクラッシュ領域

プリクラッシュ機能の追加により、北米自動車事故データベース (NASS/CDS) によるシートベルト着用重傷事故に占めるシステム作動範囲を従来の 18% から本開発では 45% まで増加することができると推測している (Fig. 8)。

4.2. コンフォート領域

ダイナミックモードを追加することにより、ワインディングテストコースでのスポーツ走行時のシートベルト変位量を通常のシートベルト伸び出し量に対して最大で 42 mm

低減でき、乗員の上体移動量を最大で 100 mm 抑制する効果があった (Fig. 9)。

また、シートベルト格納時、スプリングによる巻き取りをモータでアシストすることにより、スプリングの強さを半減することができ、シートベルト引出し荷重を半減、および、シートベルト着用時の巻き取り荷重を 30% 低減することにより、シートベルトの引出しを軽くし、着用時の圧迫感を低減することで、シートベルトの快適性を高めた (Fig. 10)。

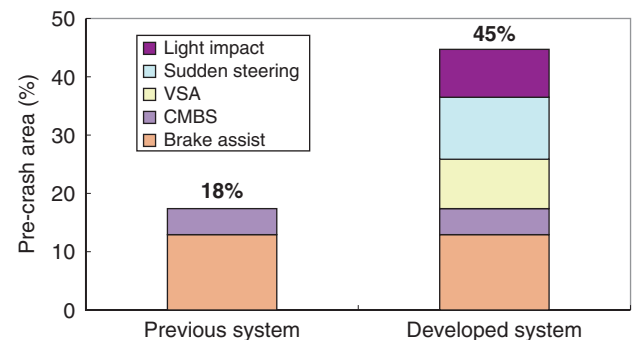


Fig. 8 Comparison of pre-crash area

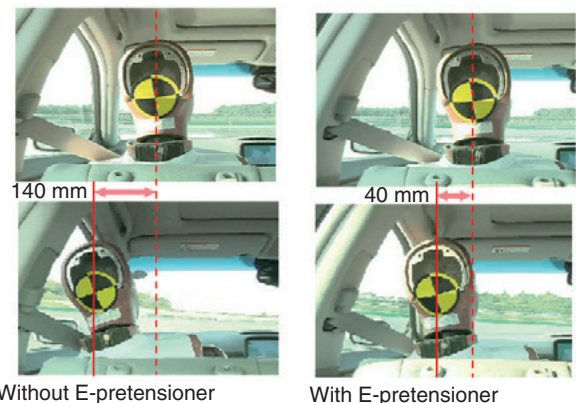
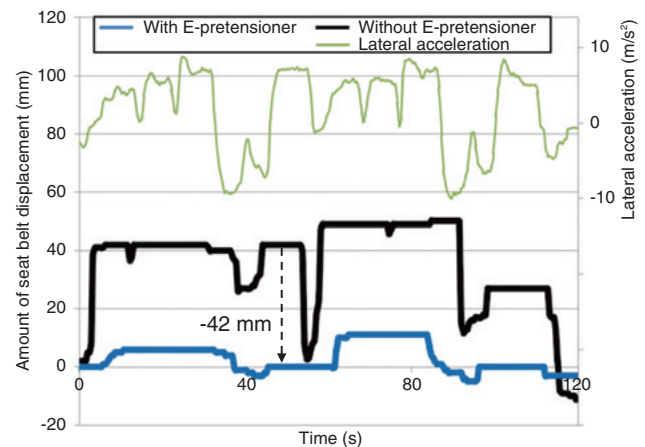


Fig. 9 Photographs of occupant posture in turn test

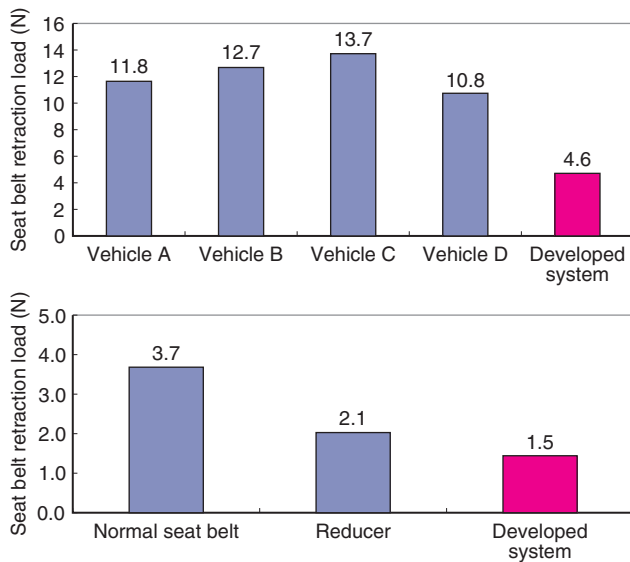


Fig. 10 Seat belt pull-out load and seat belt retraction load

5. まとめ

新型 E-プリテンショナ機能を開発し、その効果を確認した。以下にその効果を示す。

- (1) 従来の CMBS、ブレーキアシスト機能に加え、VSA、SRS システムと連携し、プリクラッシュ領域のシステム作動範囲を従来の 18% から 45% まで高めた。
- (2) 日常使用時に作動するコンフォート機能を追加したことにより、ワインディングやスポーツ走行時の乗員移動量を半減させた。
- (3) シートベルト引出し荷重を半減、および、巻き取り荷重を 30% 低減することにより、シートベルト引出しの軽さと装着時の圧迫感を低減し、シートベルトの快適性を高めた。

参考文献

- (1) <http://www.nhtsa.gov/NASS>
- (2) 上地幸一，小高賢二，赤羽博：ホンダプリクラッシュセーフティテクノロジーの開発，Honda R&D Technical Review, Vol.16, No.2, p.115-120

■ 著 者 ■



大舘正太郎



竹村直敏

ハイブリッドドアにおける低弾性シーラを用いた水密構造による異種金属接触腐食の防止

Bimetallic Corrosion Prevention in Hybrid Doors by Means of Watertight Structure using Low-elasticity Sealer

木村 昇 士*
Shoji KIMURA

和 泉 浩一郎*
Koichiro IZUMI

村 松 佑 紀*
Yuki MURAMATSU

要 旨

車体軽量化を目的とし、Honda では軽量化とコスト効率の高いアルミニウム、鋼板ハイブリッドドアを開発した。このハイブリッドドアの課題は、結合部における異種金属接触腐食である。双方の電位差による腐食が発生し、商品性を低下させる可能性がある。この課題を解決するため、シーラを塗布し水浸入を遮断することとした。このシーラには使用環境で水密性を確保することに加え、シーラ硬化過程におけるスキンパネルのひずみを防止するために低弾性係数が求められる。そこで、低弾性シーラを用いた塗布仕様を開発することでシーラ水密構造を確立した。

ABSTRACT

Seeking to realize weight savings in vehicle bodies, Honda has developed a lightweight and high cost-efficiency aluminum/steel-sheet hybrid door. Bimetallic corrosion in the area of connection between the two metals represented an issue for this door. The difference in electric potential between the two metals would promote corrosion, raising the possibility of a decline in commercial appeal. In order to address this issue, a sealer was employed to help prevent infiltration of water. In addition to providing watertightness in the use environment, it was necessary for this sealer to possess a low elastic modulus in order to help prevent distortion from being generated in the skin panel during the sealer curing process. A watertight structure was realized through the development of application specifications using a low-elasticity sealer.

1. ま え が き

近年、温室効果ガスが原因とされる地球温暖化が危惧されており、地球規模での二酸化炭素排出量の削減が求められている。自動車業界においては燃費の改善が課題であり、エンジンの高効率化や電動化、転がり抵抗の低減などあらゆる省燃費化の研究と実用化が進められている。その中で車体の軽量化は重要な要素であり、自動車メーカ各社とも車体の一部を低比重素材に置換える技術を採用している。Honda は早くからオールアルミボデーを量産適用するなど、他社に先駆け車体の軽量化を推し進めてきた。さらに、より良い商品をより安価にお客様に提供するため、低コストで軽量化できる技術開発に取り組んでいる。ドアにおいては、既に軽量のオールアルミドアの量産化を果たしているが、さらにコスト対軽量化効果の高い軽量ドアを目指し、ドアスキンのみをアルミニウムに置換したハイブリッドドアの開発を進めてきた (Fig. 1)。

一般に、アルミニウムと鋼板など異種金属材料を接触させた場合、異種金属接触腐食が課題となる。水溶液中にお

いて電位が卑な方の金属がアノードとなり単独で置かれている場合より腐食速度が増大するものである⁽¹⁾。ハイブリッドドアの開発においても、雨水等の溜まりやすいドア下端部で、これによる商品性低下の防止が課題であった。異種金属接触腐食を防止するためには、まず水との接触を断つことが重要であり、アルミニウムと鋼板結合部の水密構造を検討した。

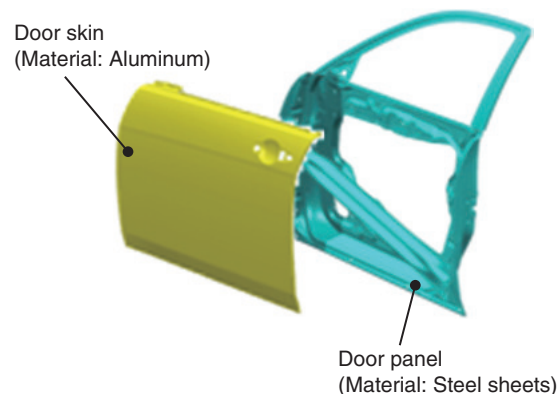


Fig. 1 Structure of hybrid door

*四輪 R&D センター

2. 課題と達成手法

Fig. 2 にドア下端部のヘミング締結構造と水浸入経路を示す。この内部に水が浸入した場合、異種金属接触腐食が発生し、Fig. 3 に示すような腐食生成物による締結の開放や外板面の膨れ、穴あき錆に至る可能性がある。このため、対策として、ドアスキンとドアパネルの合わせ面にシーラを塗布し水浸入を防止することとした。しかし、従来シーラを合わせ面に塗布すると、製造時にドアスキンにひずみが発生してしまう。そこで、ひずみの発生しないシーラ塗布仕様の検討をおこなった。

2.1. ひずみの解消

シーラは、塗装焼き付け工程で硬化する。ハイブリッドドアでは、加熱時にアルミニウムと鋼板の線膨張係数差により合わせ面に最大 1.2 mm の変位が生じる。この状態でシーラが硬化するため、冷却時にドアスキンが収縮すると、シーラにせん断力が発生する。このドアスキンの戻り力とシーラのせん断力が釣り合う位置でドアスキンが保持されるためにひずみが発生する。従来シーラは弾性係数が高くせん断力が強いので、Fig. 4 に示すようにドアスキンの変位が大きく残った状態で釣り合い、基準値を超えるひずみが発生する (Fig. 5)。ドアスキンのひずみを解消するためには、合わせ面の残留変位を 0.4 mm 以下にする必要がある。したがって、シーラは 0.8 mm 以上の変位に追従

Table 1 Mechanical properties of low-elasticity sealer

Young's modulus	Maximum elongation	Guaranteed elongation after degradation
0.22 MPa	200%	50%

しなければならない。しかし、合わせ面のシーラの厚みは 0.1 mm 程度であるため、シーラには伸び率 800% 以上の材料が必要となり、現実的ではない。そこでシーラを破断させ、ひずみを解消させることにした。シーラの破断変位を式 (1) に、破断に必要な条件を式 (2) に示す。

$$x_B = \sqrt{\{(\varepsilon_B + 1)^2 - 1\} t^2} \quad (1)$$

$$F_B = E \frac{\sqrt{t^2 + x_B^2} - t}{t} S < 76.05 \times (1.2 - x_B)^{0.56} \quad (2)$$

x_B : シーラ破断変位 ε_B : シーラ破断ひずみ

t : シーラ厚み

F_B : シーラが破断する単位長当たり最少せん断力

E : シーラ弾性係数 S : 塗布面積

式 (1)、式 (2) を満たす弾性係数の低いシーラ材料 (以下、低弾性シーラ) を選定した。その物性値を Table 1 に示す。

2.2. 水密性の確保

低弾性シーラの合わせ面塗布部分はひずみを解消するために破断させる。そこで、水密性を保証するために、はみ

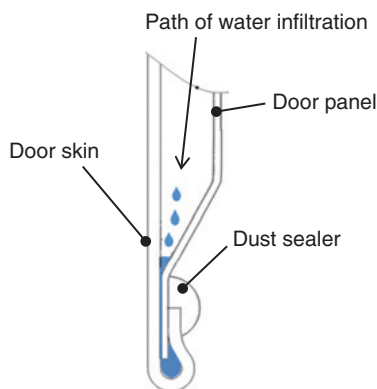


Fig. 2 Path of water infiltration into hemming structure

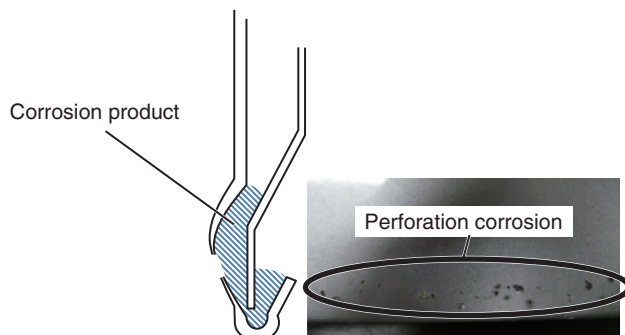


Fig. 3 Example of galvanic corrosion

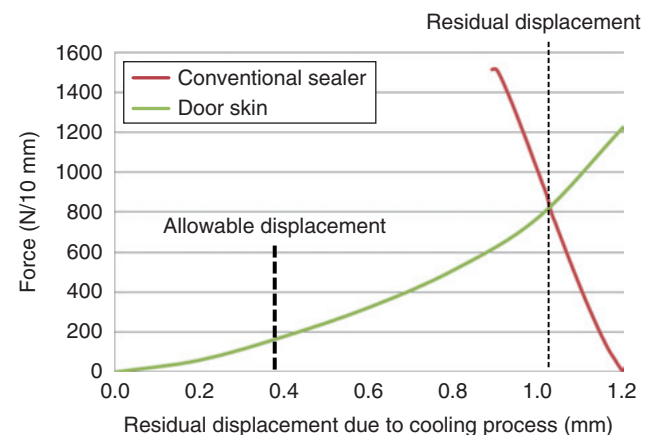


Fig. 4 Returning force of door skin and shear force of sealer

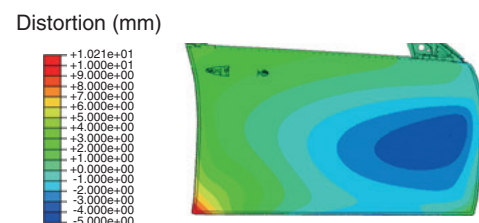


Fig. 5 Distortion in door skin with conventional sealer

出し塗布構造を考案した (Fig. 6). このはみ出し部を破断なく変位に追従させる. 合わせ面に生じる変位として, 塗装焼付け工程の変位だけでなく, 使用時に発生する変位も考慮する必要がある.

使用時に発生する変位は, 線膨張係数差による静的変位とドア開閉動作による動の変位があり, 合わせ面にはこれらの複合変位が生じる. 高温環境下では鋼板ドアパネルよりもアルミニウムドアスキンの膨張が大きいため, 合わせ面には抜け方向の変位が発生する. 酷暑地域の最高温度において, その最大変位は 0.3 mm となる. 一方, 低温環境下では, ドアパネルよりドアスキンの収縮が大きいため, 差し込み方向の変位となる. 極寒冷地の最低温度における最大変位量は 0.3 mm となる. 動の変位については, Fig. 7 に示したドアを急激に閉める強閉条件で, 最も大きな変位が発生し, その変位は抜け方向に 0.6 mm であった. 従って, 使用時に発生する最大変位は酷暑環境における強閉動作時の抜け方向に 0.9 mm となる.

以上より, 締結部に発生する変位の最大値は製造時に発生する差し込み方向の 1.2 mm であることがわかった.

最大変位 1.2 mm に対する追従性は Fig. 8 および式 (3) に示すように低弾性シーラの伸び特性と塗布厚みに依存する.

$$x = (\varepsilon^2 - 1)^{0.5} t_0 \quad (3)$$

t_0 : シーラ厚み

x : シーラせん断変位

ε : シーラ伸び率

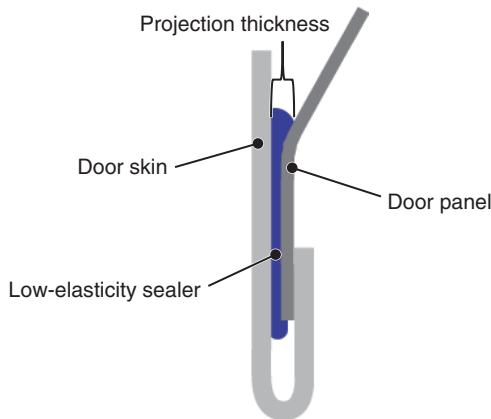


Fig. 6 Watertight structure

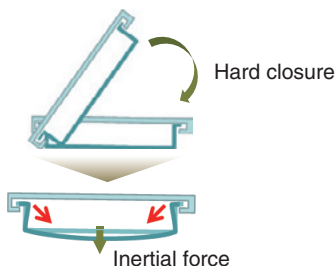


Fig. 7 Displacement by hard closure

低弾性シーラの伸び率保証値が 50% であることから, せん断最大変位 1.2 mm に追従させるための, はみ出し部の厚みを 1.0 mm と設定した.

このはみ出し部によっても前項で述べたシーラのせん断力が発生する. はみ出し部と合わせ面のシーラに発生するせん断力 F を式 (4) に示す.

$$F = E \frac{x - 0.1}{0.1} S + \int_0^y E \frac{x + \sqrt{r^2 - y^2} + r}{-\sqrt{r^2 - y^2} + r} y w dy \quad (4)$$

r : ドアパネルの立ち上がり半径 y : はみ出し高さ
 w : 塗布幅

はみ出し塗布時のせん断特性とドアスキンの戻り力の関係を Fig. 9 に示す. 低弾性シーラのはみ出し部は破断することなく変位 0 mm 付近でドアスキンの戻り力と釣り合っている. 本仕様によってドアスキンのひずみ解消と水密性確保を両立することができた.

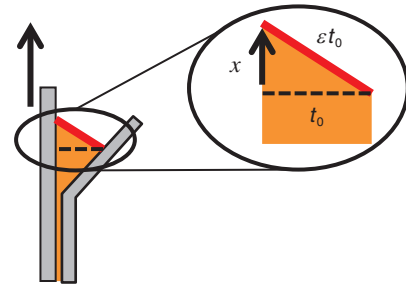


Fig. 8 Shear displacement and sealer elongation

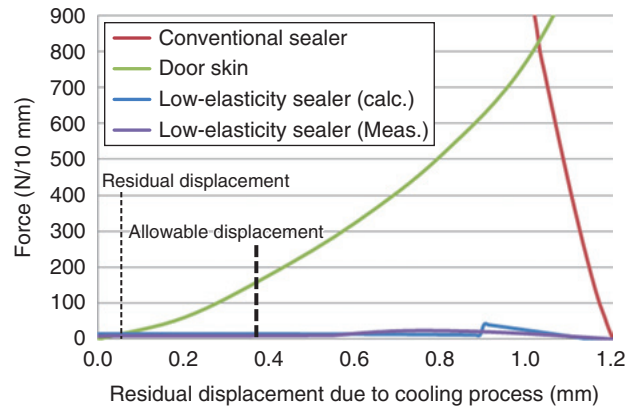


Fig. 9 Returning force of door skin and shear force of watertight structure

3. 検証結果

3.1. 低弾性シーラによるドアスキンひずみの検証

実機ドアの締結部を Fig. 6 に示す構造にし, ドアスキンに発生するひずみを測定した結果を Fig. 10 に示す. 従来シーラの結果 (Fig. 5) と比較し, ドアスキンのひずみを解消することができた.

3.2. ハイブリッドドアの実車耐食性検証

低弾性シーラを塗布したハイブリッドドアの錆耐久性を複合的な耐久性を評価する実車走行試験にて検証した。Fig. 11 に試験後のドア外観, Fig. 12 に試験後のドア下端部断面を示す。異種金属接触腐食は抑制され商品性の低下は見られなかった。

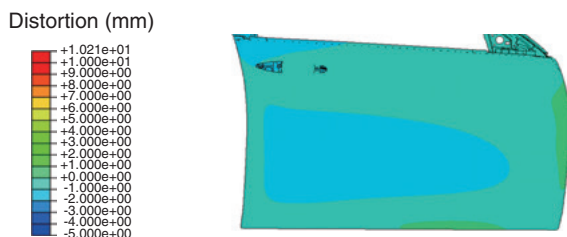


Fig. 10 Distortion in door skin with watertight structure

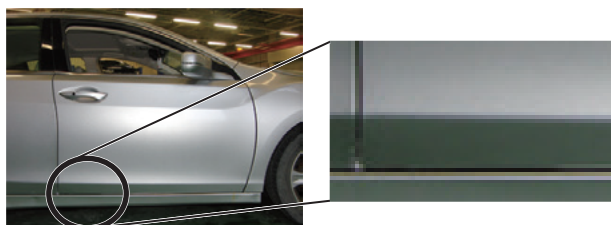


Fig. 11 Appearance after vehicle durability test

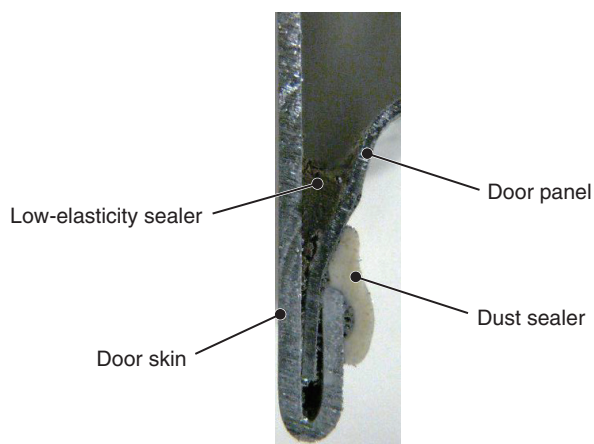


Fig. 12 Door lower edge section after vehicle durability test

4. まとめ

Honda は、生産性の高い軽量ドアとして、ドアスキンを鋼板からアルミニウムに置換したアルミニウム、鋼板ハイブリッドドアを開発した。課題であった異種金属接触腐食の防止に対し、スキンパネルのひずみを抑制する低弾性シーラの開発と変位に追従できる塗布仕様を設定することで、シーラ水密構造を確立した。また総合耐久走行試験により、十分な防錆性能が検証された。

なお、このアルミニウム、鋼板ハイブリッドドアは、2014 年モデルの新型 ACURA RLX に採用されている。

参考文献

- (1) 中山武典:金属材料の異種金属接触腐食挙動, 軽金属溶接, Vol.44, No.7, p.287-294(2006)

■ 著 者 ■



木村 昇 士



和泉浩一郎



村松 佑 紀

サブフレームへ適用可能な FSW を用いた スチールとアルミニウムの連続接合技術の開発

Development of Steel and Aluminum Continuous Welding Technology Using FSW
and Application to Subframes

宮 原 哲 也*
Tetsuya MIYAHARA
大 浜 彰 介*
Shousuke OHHAMA

佐 山 満*
Mitsuru SAYAMA
畑 恒 久*
Tsunehisa HATA

矢羽々 隆 憲**
Takanori YAHABA
小 林 努*
Tsutomu KOBAYASHI

要 旨

スチール製部材とアルミニウム製部材の接合を目的とし、Friction Stir Welding を用いてミグ溶接強度以上の連続接合技術を開発すると同時に、異種金属接合部位の防錆技術を開発した。この接合技術を量産適用するために産業用多関節ロボットを用いた独自の接合システムを開発し、従来のミグ溶接同等の効率と投資で実現した。また、接合強度を保証する非破壊のインラインシステムとして、高感度赤外線カメラとレーザ光を用いた検査システムも開発した。この技術を量産車の骨格部品であるフロントサブフレームに適用することで、前モデルに対し 25% の軽量化とサスペンション取り付け点剛性を 20% 向上させ、運動性能の向上を図り、また接合消費電力も 50% 削減することができた。

ABSTRACT

Continuous welding technology that uses Friction Stir Welding and has a welding strength equal to or above that of MIG welding was developed to weld together steel parts and aluminum parts, and at the same time technology was also developed to rustproof areas where dissimilar metals are welded. In order to apply this welding technology to mass production, an original welding system using an industrial articulated robot was developed, and application was realized with an efficiency and investment equivalent to that of conventional MIG welding. In addition, an inspection system using a highly sensitive infrared camera and laser beam was also developed as a non-destructive in-line system to assure joint strength. This technology was applied to the front subframe, which is a structural component of mass-production vehicles. As a result, compared to the previous model, the weight was reduced by 25%, the rigidity of the suspension mounting point was increased by 20%, the vehicle's dynamic performance was enhanced, and electrical power consumption during the welding process was reduced by 50%.

1. ま え が き

近年、地球環境保護のための低炭素化や省エネルギー化、燃費性能向上や運動性能向上の観点より、自動車軽量化ニーズおよび製造段階における省エネルギー化のニーズが高まってきている。フロントサブフレームに求められる機能は、サスペンション、パワープラント、ステアリングギヤボックスを保持するために十分な支持剛性を有することが必要である。また、操縦安定性能、振動騒音性能、衝突性能にも寄与する。そのため軽量かつ低コストで各必要性能を高次元で高効率に達成するために、自動車メーカー各社とも盛んに接合、構造、材料等の研究開発がおこなわれている⁽¹⁾。そのため軽量化の手法として、アルミニウム製サ

ブフレームやスチール製サブフレームにアルミニウム製メンバを機械結合する手法がある。これまでのサブフレームは、ミグ溶接を多用していることから、製造段階におけるエネルギー低減に限界があった。また、機械結合を用いた手法では点結合となるために、ウエイト低減や剛性向上も限界があり、大幅な運動性能の向上は困難である。

本開発ではミグ溶接と比較して、消費電力が少なく、製造時のランニングコストが安い Friction Stir Welding (以下、FSW) に着目し、従来のミグ溶接や機械結合に代わる異種金属接合技術を開発した。一般的にスチールとアルミニウムの接合は、十分な接合強度を得ることができず、機械結合や接着でしか接合ができなかった。また、FSW を用いた異種金属接合技術は、盛んに研究^{(2), (3)}されているも

* 四輪 R&D センター

** 本田技研工業株式会社

ののまだ実用化されておらず、防錆するための絶縁化技術も構築できていない。さらにFSWを用いる場合は大型の接合装置を使用することが知られているが、広い設置面積や多くのインフラ投資が必要である。そこで既存工場、生産ラインに適応できる省スペースかつ低インフラ投資で、一日当たり1500台以上の量産に使用されることを考慮し、生産タクトもミグ溶接同等となる接合システムを開発した。また、FSW接合部を非破壊で内部観察する手法としては、超音波検査などが従来から知られているが、接合部が部材内部となるため、容易に確認できない。そこで短時間かつ正確に接合部内部検査が可能な非破壊検査技術を開発する必要がある、独自の検査システムを構築した。

2. 異種金属接合技術開発のねらいと部品開発目標値

本技術開発のねらいは、以下の四つの項目である。

- (1) スチールとアルミニウム異種金属接合技術の確立
- (2) 防錆対応技術の確立
- (3) 産業用ロボットを用いた量産接合システムの確立
- (4) 非破壊検査技術および検査システムの確立

次に、スチール製部材とアルミニウム製部材のハイブリッドサブフレームを量産化するにあたり、目標値を以下に設定した。

- | | |
|--------------------|------------------|
| (1) ウェイト | :前モデル比 10% 以上軽量化 |
| (2) 構成部品点数 | :前モデル比 30% 以上削減 |
| (3) サスペンション取り付け点剛性 | :前モデル比 10% 以上向上 |
| (4) 接合消費電力量 | :前モデル比 30% 以上削減 |
| (5) コスト | :前モデル比 同等 |

3. スチールとアルミニウム接合手法と接合メカニズム

スチールとアルミニウムの異種金属接合には、低入熱での接合が可能なFSWを選択した。Fig. 1に示すようにFSWでは、融点以下の温度で固相接合するため、粗大で脆

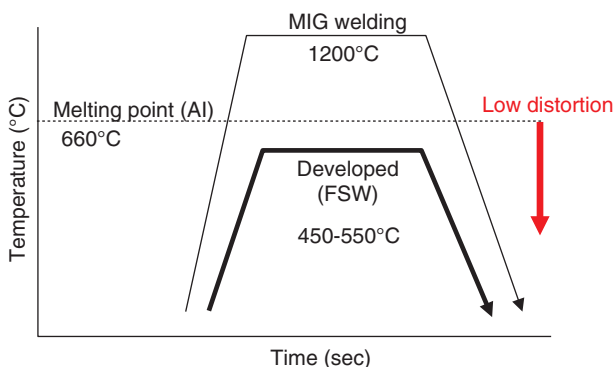


Fig. 1 Welding temperature of FSW

弱な Intermetallic Compound (以下、IMC) の形成を抑制できる。接合部は Fig. 2 に示すとおり、アルミニウム側から圧力をかけ回転しながら挿入されたツールにより、アルミニウム側が攪拌されるとともに、プローブ先端部がスチール表面のメッキ層、カチオン電着塗装、シール材などの不純物を破壊、除去し、スチールの新生面が現れ、IMC が形成されることで接合される。IMC の組成としては、 $\text{Fe}_4\text{Al}_{13}$ であることが電子回折パターンにより確認できた。また IMC の厚みは $1\mu\text{m}$ 程度に抑えられることが確認できた。Scanning Electron Microscope (SEM), Transmission Electron Microscope (TEM) の確認結果を Fig. 3 に示す。FSW の適正な接合条件設定に関しては塑性流動の安定化とプローブ挿入位置管理が重要であり、FSW の攪拌部は塑性流動の巻き上げ形態の違いから構造上の利点を考え配慮する必要がある。接合条件設定に関しては、回転数と送り速度の関係から Fig. 4 の網掛け部が適正範囲であることがわかった。挿入位置管理については異種金属接合に関して特に重要であり、プローブ挿入位置が浅い場合は界面からの不純物の排出が不十分となり安定した接合界面が得られない。反対

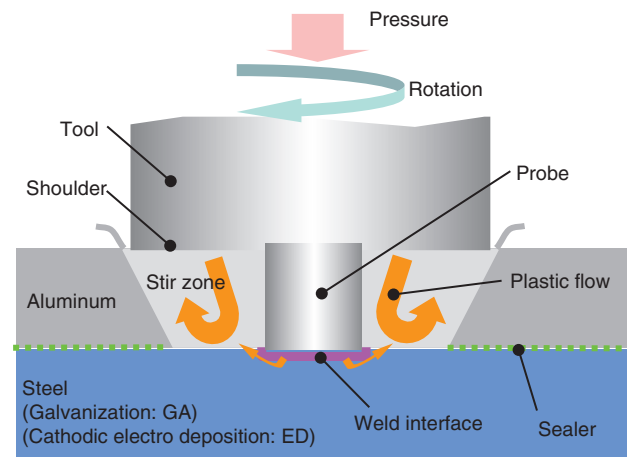


Fig. 2 Cross-sectional structure of Steel and Aluminum FSW

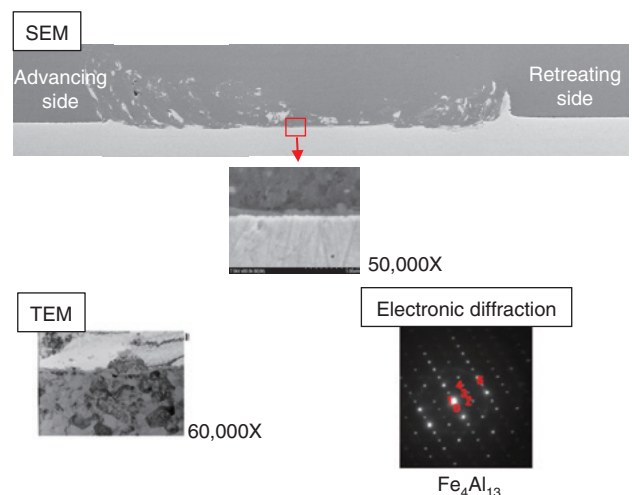


Fig. 3 Observation of IMC

にプローブ挿入位置が深すぎる場合は、界面からの不純物の排出は十分できていても、スチールとプローブのコンタクトが強すぎて、巻き上げが過大になるなど強度低下の原因にもなる。また、プローブの耐久性低下にもつながることから適正な範囲を設定する必要があった。

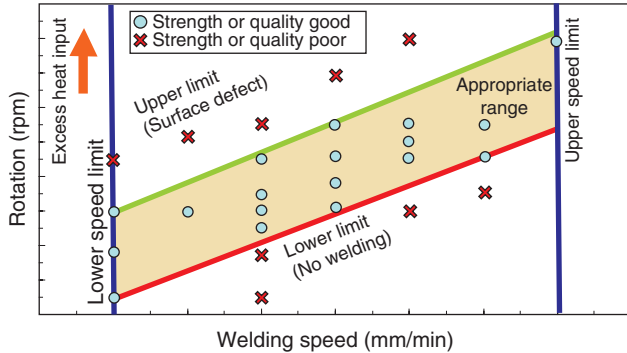


Fig. 4 Range appropriate FSW conditions

4. 防錆技術

接合部の断面模式図を Fig. 5 に示す。異材接合部近傍やエッジ部のスチール表面にはカチオン電着塗装が存在せず、メッキ層とアルミニウムが直接接触した状態となっ

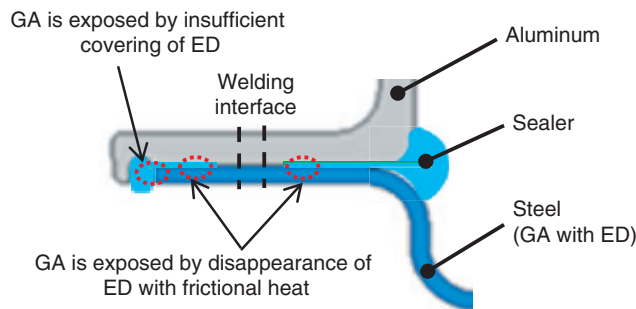


Fig. 5 Schematic cross section of welding part

Table 1 Required functions and properties for sealer

	Required function	Required property
(1)	Shut off from corrosion factors (water and corrosion current)	Water tightness, adhesion, and insulation
(2)	No failure to depend on frictional heat	Thermal stability
(3)	No failure to depend on market degradation	Durability over environment and vibration
(4)	Minimum investment in equipment and minimum cost for production control	One part agent providing cold curing

ている。このような異種金属接触部位に水等が浸入して腐食が発生するのを防ぐため、スチールとアルミニウムの間をシール材で充填する構造とした。シール材に要求される機能および物性を Table 1 に示す。これら観点から、シール材には 1 液型変性シリコン樹脂系シール材を選定した。次に、接合手順を Fig. 6 に示す。シール材を隙間なく充填するため接合前に塗布し、さらに塗布径や塗布位置を適正化した。なお、シール材の有無で接合強度を比較し、影響が無いことも確認した。また複合腐食試験機 (Cyclic Corrosion Tester: CCT) へ投入し、120 サイクルテストを実施した後の接合部近傍の断面写真を Fig. 7 に示す。シール材の無い試験片はアルミニウム側に最大深さ 0.4 mm の腐食が発生しているのに対し、シール材のある試験片は腐

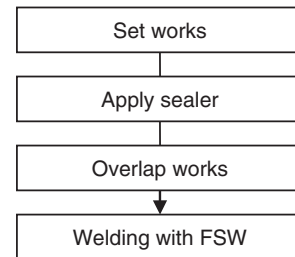


Fig. 6 Welding flow process

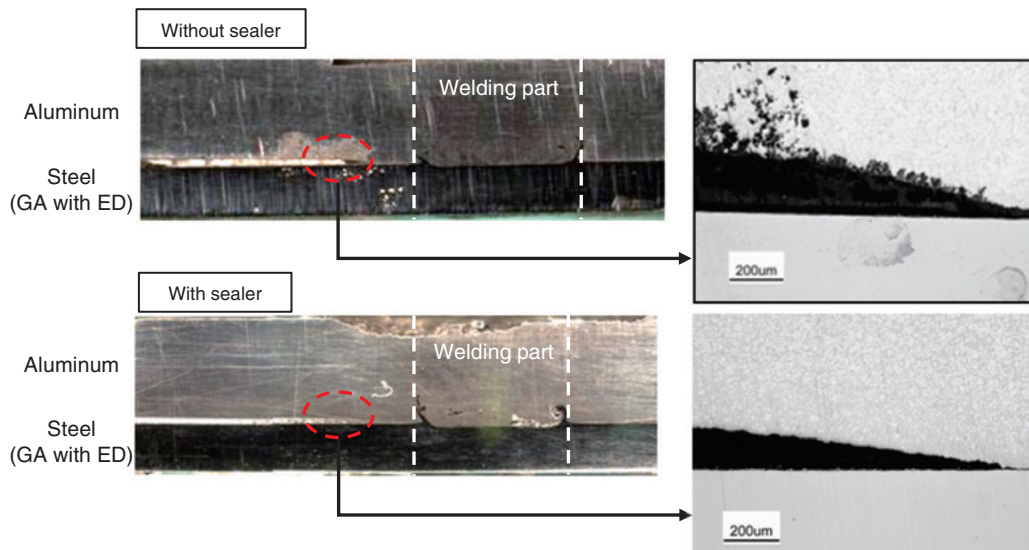


Fig. 7 Cross-sectional photos of welding test pieces with and without sealer after 120 cycles CCT

食が発生していない。このように、シール材を用いることで接合部の防錆性を確保することができた。また接合部の裏面のカチオン電着塗装が剥れたとしても、犠牲防食効果があり、防錆効果は保たれる。

5. ロボット FSW 技術

FSW 連続接合をおこなうには大型の門型接合装置⁽⁴⁾、⁽⁵⁾を使うのが一般的である。それは接合時のツールに大きな荷重がかかるため剛性の高い装置が必要だからである。この大型装置を量産に適用しようとした場合、広い設置面積 (Fig. 8) と大きな投資が必要であり、既存工場、生産ラインに導入することは困難である。そこで、産業用多関節ロボットを使い、小さな設置面積と投資を抑えられる接合装置を開発することとした。多関節ロボットによる FSW 連続接合の研究⁽⁶⁾、⁽⁷⁾もおこなわれているが、接合時の大きな荷重に耐えられる高い剛性を持った特殊なロボットの開発が必要とされていた。特に今回のサブフレーム構造における FSW 連続接合では、ツール軸方向の荷重は 10 kN 以上になる。この荷重に耐えられる特殊なロボットを開発するのではなく、ロボットに高荷重をかけないことをねら

い、Fig. 9 に示すような FSW 接合システムを開発した。この接合システムはロボットに高剛性 C 型フレーム構造の FSW 装置を搭載することで、ツール軸方向のロボット負荷を無くしている。その接合方法は、支持された接合用治具にスチール部材とアルミニウム部材をセットし、FSW 接合装置がワークを治具ごと挟んで接合をおこなう。また、C 型フレームの治具側がローラになっており接合進行方向に発生する荷重はロボットの許容荷重範囲より十分に小さくすることができた。さらに、接合速度も一般的なミグ溶接同等であり、従来の量産における生産タクトを達成できた。

この使用したロボットは 6 軸の制御をおこなっているが、本開発装置は 2 軸 (接合ツールの回転と挿入位置) をロボット自身の制御システムに組み込み、統合制御しており、接合用の特別な制御装置等を必要としないシンプルになった。このシステムは通常のロボットと同様にオンラインでもオフラインでもティーチングが可能であり、容易に二次元や三次元の接合プログラムを作成することができる。また、接合ツールの回転数や挿入位置、接合速度などを一括で制御しているのも、接合状態を常時モニタリングすることが可能であり、リアルタイムに品質管理

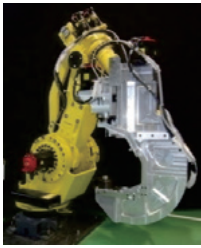
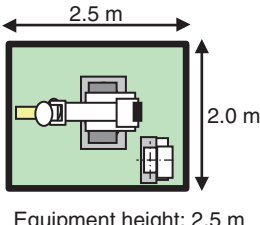
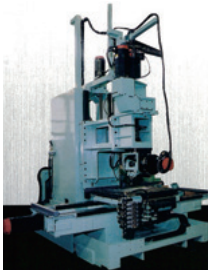
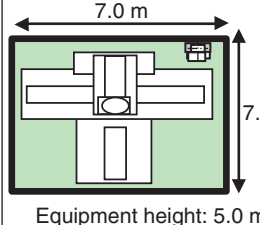
FSW unit of C-gun type robot		FSW unit of marketing	
Appearance	Ground contact size	Appearance	Ground contact size
			

Fig. 8 Comparison of FSW units

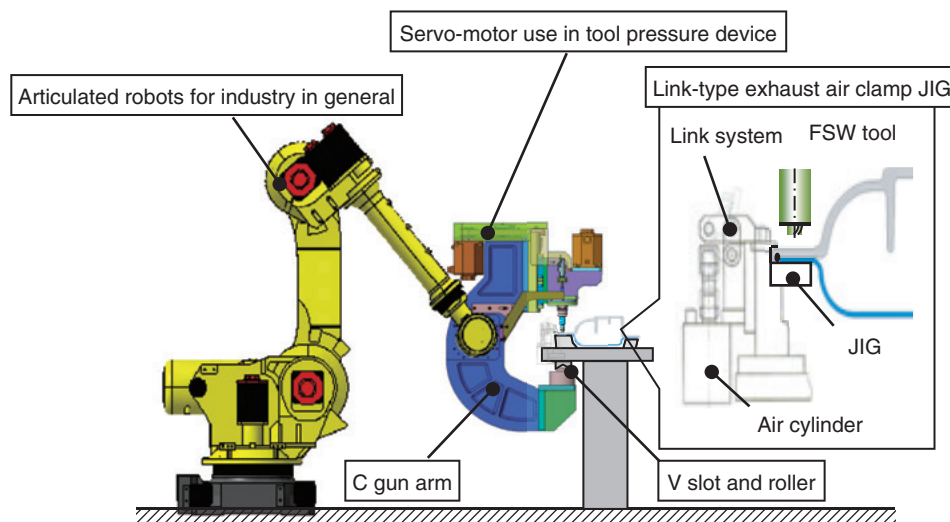


Fig. 9 FSW equipment appearance

をおこなうことができる。

産業用ロボットが使えるようになったことで、既存工場、生産ラインで安定した品質の生産が可能となった。加えてこの FSW 接合装置は、そのままアルミニウム同士の構造でも接合ができる高い汎用性を持っている。

6. 非破壊検査技術と検査システム

スチールとアルミニウムの異種金属接合部の品質管理として接合状態のモニタリングを含む条件管理と全数検査が可能でインライン非破壊検査の両者によりおこなった。既存の非破壊検査技術では異種金属接合部の品質を精度よく短時間で判定することができないことから、新たなシステムとして、光励起熱画像解析装置をベースに、レーザ励起システムを組み合わせた検査システムを開発した。このシステムはアクティブサーモグラフィの原理を用い、対象材料に適した熱源を組み合わせた構成としている。アクティブサーモグラフィは、材料に熱エネルギーを印加した時の積層方向（板厚方向）の情報を視覚化する技術である。印加した熱エネルギーを吸収した材料が素材（正常部）と異なる部位（巣、欠陥、界面など）において熱エネルギーを自己エネルギーとして放射する現象を高性能赤外線カメラで計測し周波数解析をおこなって視覚化する。従来の励起方法ではアルミニウムのような熱伝導の大きな材料の場合、熱拡散の方が深さ方向への伝熱の速さより大きくなるため精度の良い計測ができないという課題があった。そこで、照射エネルギーが大きく、出力調整（パワー密度、時間制御）が容易なレーザ装置を組み合わせ、スチール部材とアルミニウム部材の異種金属接合用にシステム構築をおこなった（Fig. 10）。また適用にあたり、以下のような特徴を考慮した。

6.1. 接合部断面構造

異種金属接合部の断面構造は以下に示すように三つに分

類できる（Fig. 11）。

- (a) IMC が形成されている熱伝導の大きい領域
- (b) IMC が形成されていないが密着していて熱伝導が (a) より低下している領域
- (c) シール材、カチオン電着塗装、空気層などにより熱伝導の著しく低い領域

この装置は、これら各領域からの反射エネルギーの位相の違いを検出し、接合品質の判断に利用する。

6.2. スチールとアルミニウム接合部構造

FSW 接合部の構造はスチールとアルミニウムの 2 部材による構造の他に一部にスチール、スチールとアルミニウムの 3 部材による構造の部分があるため、全て同じように計測ができるように反射方式を採用した（Fig. 12）。また、反射方式の場合、周辺の反射光によるノイズが影響するため、測定条件や判定値の設定および再計測手法を盛り込み反射光に対する測定精度向上を図った。

これにより接合強度と位相角の関係から判定基準の設定（Fig. 13）をおこない、本システムの採用にてインラインでの全数検査が可能となった。

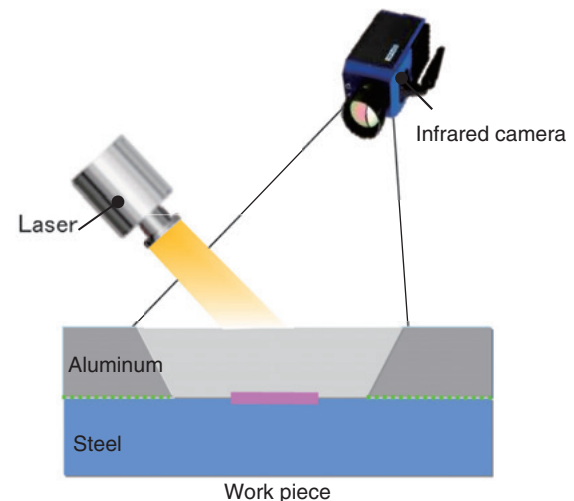


Fig. 10 Non-destructive inspection equipment

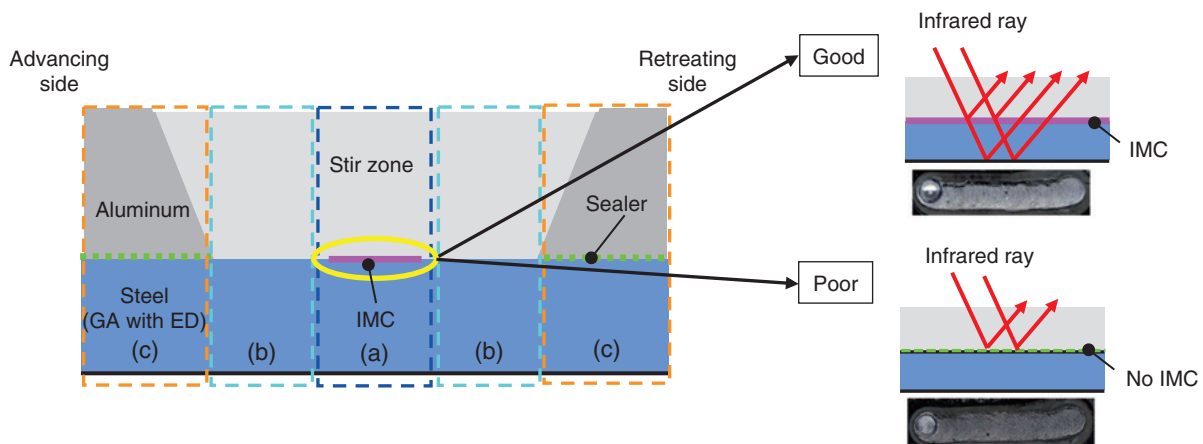


Fig. 11 Cross-section structure and judgment of welding

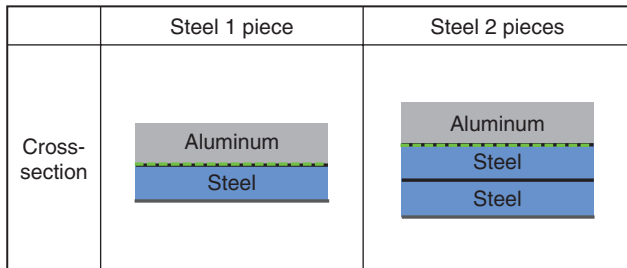


Fig. 12 Steel construction

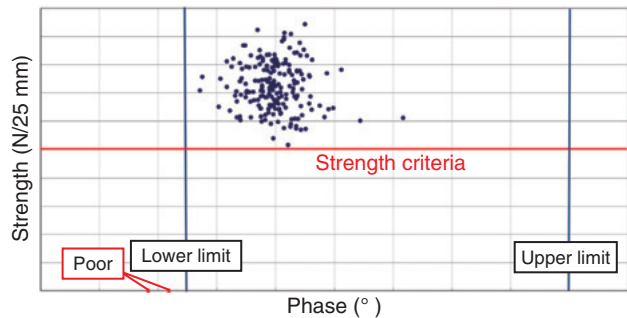


Fig. 13 Measurement result of non-destructive inspection

7. 異種金属接合技術を適用したハイブリッドサブフレームの構造

サブフレームはサスペンション、パワープラント、ステアリングギヤボックスの支持機能を有し (Fig. 14), かつ十分な支持剛性を確保すると同時に, 衝突モードのコントロールにも寄与している. 構造および材料構成を Fig. 15 と Table 2 に示す. 軽量化と構成部品点数の削減をねらい, パワープラントとステアリングギヤボックスの支持剛性を確保し向上すべく, リヤメンバをアルミニウムダイカスト製とした. また運動性能へ寄与が高いサスペンションロアアーム取り付け部にも剛性向上をねらうための配置とした. そして衝突時にはサブフレームを分断させることなく, エネルギー吸収を安定させるため, サイドメンバロ

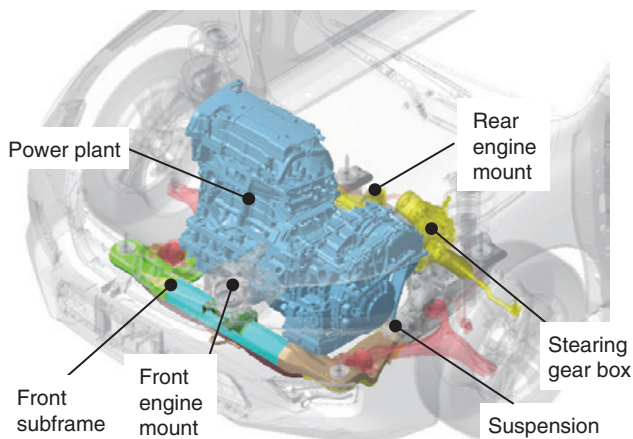


Fig. 14 Front subframe position of vehicle

Table 2 Materials of hybrid subframe for FSW

Steel parts		Aluminum parts	
Part name	Material	Part name	Material
Side member upper right-hand side	JAC270C	Rear member	Equivalent ADC3
Side member upper left-hand side			
Side member lower right-hand side			
Side member lower left-hand side			

アにはスチールシート材を採用した. 前モデルはスチールシート材メンバとアルミニウムダイカスト製メンバの構成部材を複数のボルトで機械結合していた. ハイブリッドサブフレームはスチールシート材メンバとアルミダイカスト製メンバの各々からフランジ部を形成させ, FSW による異種金属接合をする構造とした. これにより軽量化とコスト低減および省エネルギー化をねらった.

今回開発したリヤメンバは前モデルのメンバに対して, ウェイトが 3.2 倍, 製品投影面積は 2.4 倍 (Fig. 16) である. 製品形状の工夫や, 鋳造方案のコンパクト化により前モデル同一の鋳造機を用い, 1 型で 2 部品を採り, 高い鋳造品質とコスト低減を可能にした. また, FSW の接合面肉厚精度は接合品質に与える影響が大きい. このため鋳造方案と鋳造条件の適正化や, サブフレーム機能に必要な断面とリブ形状を工夫し, 湯流れ性を向上したことで, 機械的性

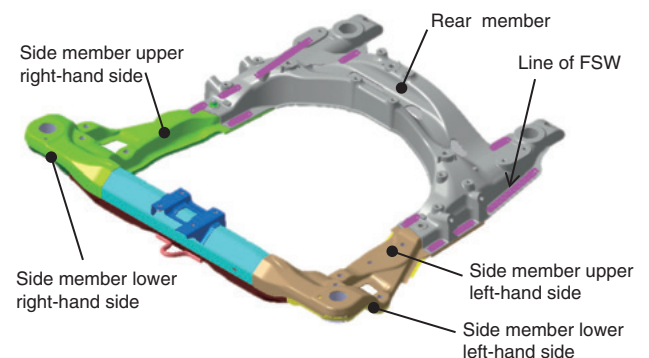


Fig. 15 Hybrid subframe components (after FSW)

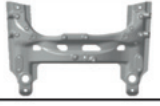
Part name	Bolt tightening member	Rear member
Model year	2008	2013
Figure		
Weight [kg]	2.62	8.41
Projection area [cm ²]	1008	2446
Casting machine/cavity	High vacuum diecast 3500 ton/2 cavity	High vacuum diecast 3500 ton/2 cavity

Fig. 16 Comparison of bolt tightening member and rear member

質を確保し、肉厚精度の向上が図れた。これにより FSW 接合面の機械加工を省くことができ、低コスト化が可能となった。以上より、アルミダイカスト製リヤメンバを採用し、FSW 異種金属接合技術を確立し適用したことで、構成部品点数は 40% 削減、ウエイトは 25% 低減、サスペンション取り付け点剛性は 20% 向上した。前モデルよりミグ溶接長も削減でき、接合消費電力量が 50% 削減できた。

8. まとめ

FSW を用いた異種金属連続接合技術を開発し、量産化技術を確立させたことで、以下の成果を得た。

- (1) 接合部の IMC メカニズムを解明し、適正な接合条件が構築できた。
- (2) 異種金属接合技術を用いた構造における防錆技術を確立した。
- (3) 産業用多関節ロボットを用い C 型フレームと治具構造、ロボット制御技術を開発し汎用性の高い量産接合システムを確立した。
- (4) 光励起熱画像解析装置をベースに、レーザ励起システムを組み合わせた非破壊検査技術を開発し、量産におけるインライン検査システムを確立した。

以上から前モデル比でウエイトは 25% の軽量化、構成部品点数は 40% の削減、サスペンション取り付け点剛性は 20% 向上し、接合消費電力量は 50% 削減できた。さらにコストは 5% 低減できた。今後異種金属接合技術およびハイブリッド構造サブフレームの適用を拡大することで、自動車の軽量化や製造における省電力化にさらに貢献することができる。

参考文献

- (1) 小林努, 佐山満, 矢羽々隆憲, 加藤高士: 燃料電池システム搭載用サブフレームにおける摩擦撹拌接合技術の開発, Honda R&D Technical Review, Vol.21, No.1, p.46-54
- (2) 下田陽一郎, 椿正己, 安井利明, 福本昌宏: 摩擦撹拌作用によるアルミニウムと鉄鋼材料の接合における接合界面形成におよぼす塑性流動の影響, 溶接学会, 第 89 集, p.142-143(2011)
- (3) 小椋智, 斎藤雄一, 西田太一, 廣瀬明夫, 西田英人, 吉田巧, 大道典子, 藤本光生: W/C ツールを用いた A3003/SUS304 摩擦撹拌接合継手の界面組織とその機械的特性, 溶接学会, 第 89 集, p.120-121(2011)
- (4) 時末光, 篠田剛, 熊谷正樹: FSW (摩擦撹拌接合) の基礎と応用, 第 7 章, 日刊工業新聞社, p.105-127(2005)
- (5) 摩擦圧接協会: 摩擦接合技術, 日刊工業新聞社, p.191-193(2006)

(6) Industrial Robot: An international Journal, Volume 31, Number 1, p.55-63(2004)

(7) Industrial Robot: An international Journal, Volume 37, Number 1, p.36-50(2010)

■著 者■



宮原 哲 也



佐 山 満



矢羽々隆憲



大 浜 彰 介



畑 恒 久



小 林 努

サスペンション耐久条件設定のための 路面入力予測技術の構築

Development of Road Input Prediction Technology for Setting of Suspension Durability Conditions

下 平 貴 政*

Takamasa SHIMODAIRA

森 理 史*

Masafumi MORI

片 岡 俊 介*

Shunsuke KATAOKA

横 山 真 吾*

Shingo YOKOYAMA

要 旨

従来、サスペンションの耐久性能試験では、実車走行により取得したホイール入力を元に耐久入力条件を設定していた。本テーマでは、機構解析によるフルビークルシミュレーションにより、実車走行なしで耐久入力条件設定に必要なホイール入力を予測する技術を構築した。走行モードは悪路、縁石、ワインディング、フルブレーキ、ポットホールブレーキを対象とし、走行モードの再現のためにデジタル路面の整備と ABS 制御のモデルへの適用をおこなった。また、重力を負荷した状態を想定した車両セットアップをおこなうことにより精度を向上できることを検証し、一つのモデルで対象とする全ての走行モードにおいて良好な精度を得ることができた。この技術により、実車走行なしでのサスペンションの耐久条件設定を可能とした。

ABSTRACT

Conventionally, durability input conditions for suspension durability performance tests have been set based on wheel input data obtained from actual vehicles. The research discussed in this paper developed a technology for the prediction of the wheel input data necessary for setting durability input conditions without using actual vehicles by means of full vehicle analysis using multi-body simulation. Rough road, curb stone road, winding road, panic braking and pot hole braking were set as the target driving modes, and digital roads were created and an ABS control model was incorporated in order to reproduce the driving modes. In addition, the fact that performing the vehicle set-up assuming the loading of gravity increased accuracy was verified, and it was possible to realize good accuracy in all the target driving modes using a single model. The developed technology makes it possible to set suspension durability conditions without using an actual vehicle.

1. はじめに

お客様のニーズに即応するための開発期間短縮や、開発費用削減のため、機構解析を用いた完成車シミュレーションがさまざまな分野で利用されている⁽¹⁾⁻⁽⁸⁾。完成車シミュレーションを用いて、開発時の試作車を削減するには、実車テストで取得しなければならない全ての項目を計算により算出する技術が必要である。車体の耐久性評価対象部品の中で、サスペンションの耐久性評価フローは次に示す通りである。試作車を用いてホイール中心に発生する荷重を測定し、そこから各部品に発生する分担荷重を計算

する。次に、その分担荷重を入力荷重として台上試験装置を用い、単品部品評価、組み付け状態の評価をおこなうフローになっている (Fig. 1)。このようにホイール中心に入る荷重の把握にのみ実車テストを必要としていることから、この実車テストによる入力測定をシミュレーションに

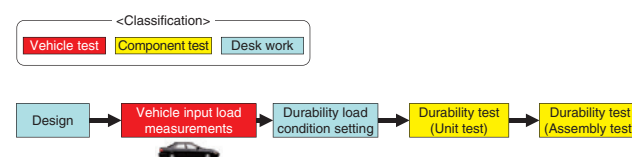


Fig. 1 Suspension development flow for durability

*四輪 R&D センター

置き換えることで、実車を用いない開発フローが達成できることがわかる。そこで、本テーマでは、機構解析による完成車シミュレーション技術を構築するために、走行モードの再現、精度向上に向けた車両パラメータ調整とツール化、精度検証をおこない、実車テスト置き換えのための十分な結果を得られたので報告する。

2. 完成車シミュレーションの概要

路面走行により発生する入力を把握するために、機構解析を用いたフルビークルモデルを構築した (Fig. 2)。

2008 年モデル FIT, 1.5 L エンジン, CVT 車のモデルを作成し検証をおこなった。悪路、縁石走行用に構築されてきた手法を参考にした⁽¹⁾⁻⁽³⁾。ボデー、サスペンションアーム、ナックル、ハブ等は剛体でモデル化し、トーションビームに対し弾性体の適用をおこなった。荷重評価用にホイール中心に 6 分力計相当のモデルを作成した。

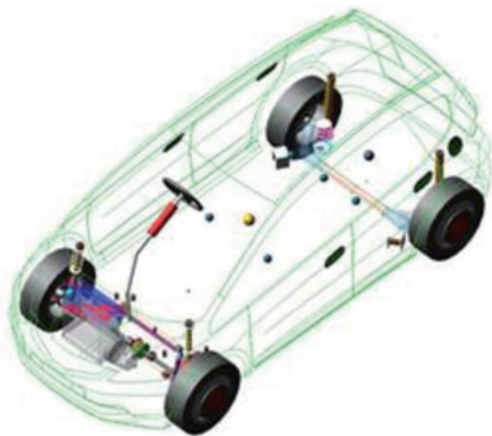


Fig. 2 Full vehicle simulation model

3.2. デジタル路面の作成

デジタル路面を作成する代表的な手法は 3 通り存在する。手法 (A) 形状を数式で表現する。2 次元または進行方向の形状を再現した 2.5 次元路面に対し使用している。

手法 (B) 3 角形パッチを使用し形状を再現する。詳細な 3 次元形状の再現が必要な路面に使用する。アスキーフォーマットで記述されることと、路面形状の表現が複雑になることで、計算コストが増大する傾向がある (Fig. 4)。

手法 (C) 格子形状を基本とし、各交差点の高さ方向のデータにより 3 次元形状を再現させる。複雑な 3 次元形状を表現する必要がある路面に使用する。バイナリーデータを使用することと、格子の概念により路面形状の表現が簡素化され、3 次元路面を計算させることによるコスト増を最小化できる⁽⁹⁾ (Fig. 5)。

Driving mode	Target load direction
Winding	Mx
Panic braking	Fx, My
Pot hole braking	Fx
Curb stone	Fx, Fz
Rough road	Fx, Fz

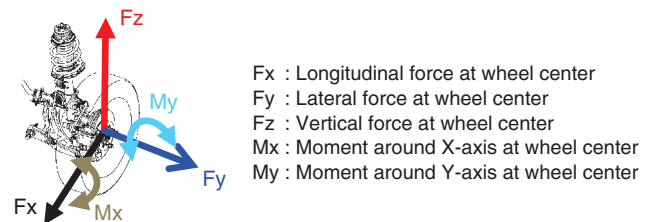


Fig. 3 Driving mode for each load direction

3. 走行再現に向けたモデル環境の整備

サスペンションには走行状態に応じてさまざまな方向の荷重が路面から入ってくる。それゆえ耐久保証のために入力方向別に走行モードが用意されている。シミュレーションで耐久条件を決めるためにはそれら全モードの走行再現が必要になる。そこで、必要な走行モードの整理、各走行モードに応じたデジタル路面の整備、タイヤモデルの選択、ブレーキ ABS 挙動再現のために、MATLAB/Simulink 制御モデルとの連成技術の適用をおこなった。

3.1. 走行モードの抽出

サスペンションの耐久条件を決めるための必要な走行モードは、ワインディング、パニックブレーキ、ポットホールブレーキ、縁石、悪路の 5 モードとなっている。走行モードと対応する目標荷重方向を Fig. 3 に示す。

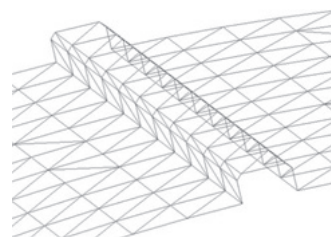


Fig. 4 Image of format (B)

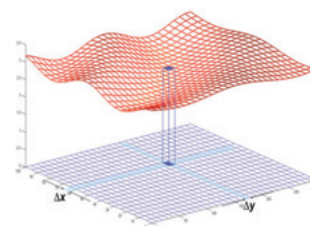


Fig. 5 Image of format (C)

本テーマでは、計算コストと路面形状の再現必要性の観点から、次のようにモデル化手法を選択し、デジタル路面化をおこなった (Fig. 6)。

フラットな平面で計算可能なパニックブレーキは手法 (A) を適用した。詳細な 3 次元路面形状が必要であるが、連続的には凹凸が存在しないモードとなっている縁石、ポットホールブレーキ、ワインディングモードは手法 (B) を採用した。複雑な凹凸が連続的に発生し、かつ高精度に形状を再現することが必要な悪路路面は、手法 (B) では計算コストの増大が著しく、計算実行に支障がでるため、形状再現性が手法 (B) より少し劣るが耐久性評価に十分な再現性が得られ、計算コストが実用的である手法 (C) を採用した。

縁石、悪路路面モデルを作成するための元データは従来の取り組みでおこなった路面計測データを使用した。ポットホールブレーキは図面データを使用した。ワインディング路面は路面計測を実施しデジタル化をおこなった。

3.3. タイヤモデルの選択

本テーマでは機構解析用タイヤモデルの中から、使用している機構ソフトとの相性や導入コストを考慮し、FTire⁽⁹⁾ または Magic Formula タイヤを選定した。その 2 種類のタイヤモデルを走行モードの特徴に応じて適用した。Magic Formula は、横力や前後力等のタイヤに発生する力を、数式を用いてタイヤモデルとして表現しており、計算コストを抑えられることが特徴となっている。一般的に車両運動解析を検討するために使用されている。一方、FTire はタイヤのスチールベルトをメッシュで表現することで、タイヤのエンベロープ特性を再現できるようにしたモデルである。そのためタイヤ接地面周辺の挙動を詳細に表現できることが計算コストが増大する。タイヤが小突起を包み込む特性であるエンベロープ特性を高精度で再現で

Table 1 Varieties of tire model

Driving mode	Tire model	
	FTire	Magic Formula
Winding		✓
Panic braking		✓
Pothole braking	✓	
Curb stone	✓	
Rough road	✓	

きるため、本取り組みのような強度耐久領域の計算から乗り心地領域の計算に使用されている。

タイヤモデル選択する上で、各走行モードにおけるエンベロープ特性の精度の必要性に着目した。ワインディング、パニックブレーキは路面の高低差や横方向の勾配を考慮する必要があるが、比較的フラットな路面を走行するモードになっている。そのためエンベロープ特性精度の必要性は低いと考え Magic Formula タイヤモデルを選択した。一方ポットホールブレーキ、縁石、悪路は大小の突起物をタイヤが乗り越すモードになっており、突起物の形状、タイヤの状態に応じて反力が異なってくることから、高いタイヤのエンベロープ特性精度が必要になってくると考えられる。よって、FTire モデルを選択した (Table 1)。

3.4. 機構と制御モデルの連成解析技術の適用

パニックブレーキやポットホールブレーキモードでは、ABS 特性の再現が重要になる。そこで ABS 特性がモデル化された MATLAB/Simulink モデルとの連成技術を適用した。モデル概要を Fig. 7 に示す。

機構-制御連成計算は MATLAB/Simulink 上でおこなった。Simulink モデルの構成は機構解析モデルを S-Function 化した機構モデルブロック、ABS 制御としてブレーキピストンの On と Off を制御するコントローラブロック、油圧量を制御するハイドロリックユニットブロックとなっている。車体挙動を機構解析モデルから取得しそれぞれのブロックで計算をおこない、各車輪に発生するブレーキピストン圧を算出することで ABS 挙動を再現した。

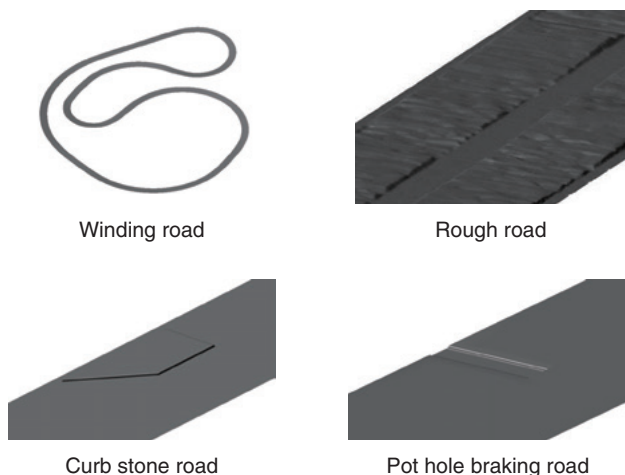


Fig. 6 Road shape for each driving mode

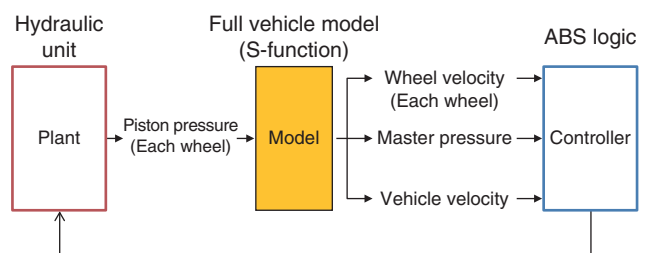


Fig. 7 Co-simulation flow in MATLAB/Simulink

4. モデルパラメータの調整

4.1. 定常円走行による精度検証

既出の論文⁽¹⁾⁻⁽³⁾で悪路、縁石の精度検証はおこなっているのですが、ワインディング、パニックブレーキ、ポットホールブレーキに焦点を合わせ、定常円走行を用いてパラメータ調整項目の絞り込みをおこなった (Fig. 8)。

旋回時の車体ロールによる外輪側フロント荷重変化を比較した結果を Fig. 9 に示す。

定常円旋回という走行モードの単純さと、目標とする走行モードの複雑さや最終的に得たい精度目標から、目標精度を 5% 以内に設定し、精度向上に取り組んだ。

4.2. 精度向上に向けた寄与度解析

精度向上に向けてモデル改良をおこなうパラメータを絞り込むために寄与度解析を実施した。下記に示すパラメータに対し実施した。その結果を Fig. 10 に示す。

- (1) 完成車質量、重心高、慣性モーメント
- (2) イニシャルトー、イニシャルキャンバ
- (3) ダンパ減衰、スプリング剛性、

バンプストップ剛性、スタビライザ剛性

- (4) プッシュ剛性、減衰

完成車質量、イニシャルキャンバ、重心高、イニシャルトーの寄与度が高い結果になった。この結果から、車両の

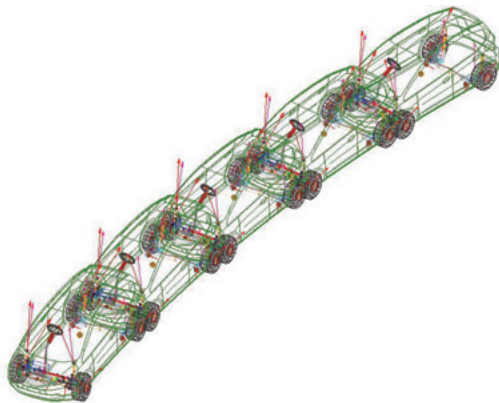


Fig. 8 Constant radius cornering

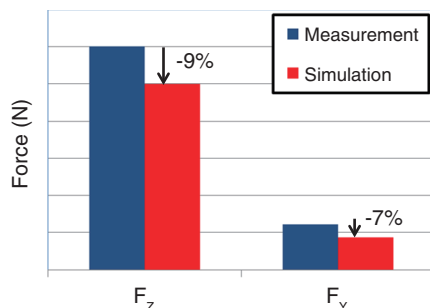


Fig. 9 Comparison of front wheel load at wheel center

初期状態を定義する車両セッティングパラメータが高寄与度であることがわかる。その次にリヤバンプストップ剛性・フロントスタビライザ剛性等の部品剛性項目が高寄与度パラメータとなった。本テーマでは、リヤバンプストップ剛性は特性計測結果を適用し、フロントスタビライザ剛性は解析で利用した仕様と同部品を実車に組み込み計測をおこなう等、誤差を最小限に抑える取り組みをおこなっている。以上の理由から、高精度化に向け、車両初期状態の再現性に着目し検証をおこなった。

4.3. 車両初期状態の再現性検証

フルビークルモデルが構築された状態から走行計算をおこなうための計算プロセスを Fig. 11 に示す。

Step 1: モデル構築時の状態で計算対象とする車両特性に合うよう車両セットアップパラメータを調整する。

Step 2: $1g$ ($1g = 9.8 \text{ m/s}^2$) 重力を与え静的な釣り合い計算をおこなう。この状態を $1g$ 重力による車両安定化状態 ($1g$ condition) と定義する。

Step 3: Step 2 の車両状態で目的の走行モードを計算する。

通常は Step 1 で車両初期状態を再現させるための車両セットアップパラメータの調整をおこなっている。しかし本来、実際の車両には $1g$ 重力が常に作用している状態であることを考慮すると、合わせるべき初期状態は Step 2 ($1g$ condition) であると考えられる。そこで Step 1 から Step 2 において $1g$ 重力を負荷したことによる車両セットアップパラメータ変化量の確認をおこなった。その結果を Table 2 に示す。

Fig. 10 の結果から注目すべき車両セットアップパラメータを重心高、イニシャルキャンバ、イニシャルトーと

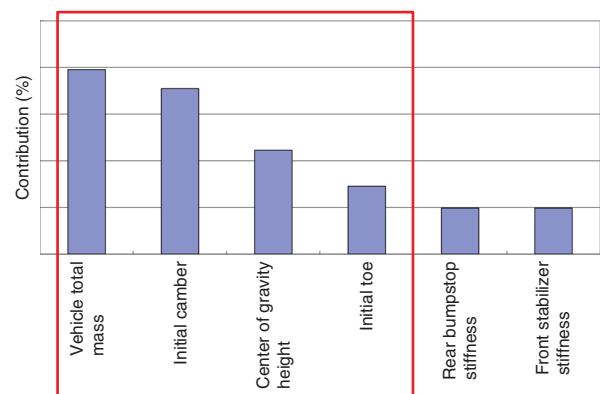


Fig. 10 Results for contribution of parameters

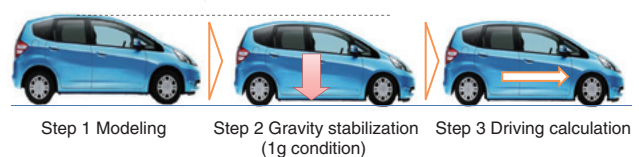


Fig. 11 Process for driving calculation

Table 2 Variation in set parameters due to 1g load

Set parameter		Modeling (Step 1)	1g condition (Step 2)	Error
Center of gravity height (mm)		494	449	-45
Initial toe (deg)	Front	0.00	0.01	+0.01
	Rear	0.10	0.34	+0.24
Initial camber (deg)	Front	0.00	-0.56	-0.56
	Rear	-1.00	-1.39	-0.39

選定した。寄与度が最も高かった車両質量は1g重力では変化しないため検討項目から除外した。

1g重力の負荷により車体セットアップパラメータが、モデル構築状態(Step 1)で設定した車両特性のねらい値から変化していることが確認できた。特に重心高やイニシャルキャンバは大幅に変化していることが確認でき、解析の高精度化に向けて改良すべき項目であることが確認できた。これは、図面情報を参照してモデル化をおこなっているが、そこで想定されている車両状態と耐久性評価に使用している車両状態が異なることが原因と考えられる。

4.4. 車両特性再現手法の改良

走行解析を高精度化させるためにはモデル構築時ではなく、1g conditionで調整する必要があると考えた。しかし、1g conditionは静的な釣り合い計算の結果であるため、それに対してモデルパラメータの調整を直接おこなうことはできない。1g conditionで大きな差が確認できた重心高に対して、Fig. 12に示す方法で1g重力の負荷による変化量を考慮して初期値を再設定した。

上記の考え方で車両セッティングパラメータを調整したモデルによる荷重比較をFig. 13に示す。

F_z 荷重差で5%、F_y 荷重差で2%と荷重移動の改善とそ

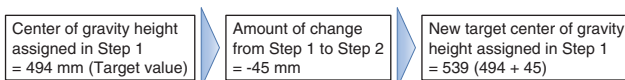


Fig. 12 Flow of adjustment of target value

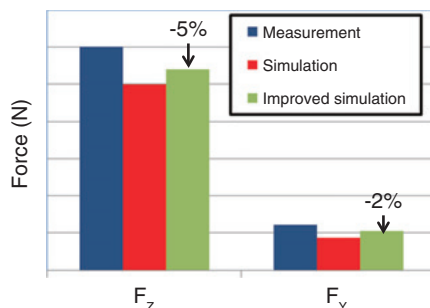


Fig. 13 Reevaluation of front wheel load at wheel center

れに伴う横力精度向上を確認でき、目標とする精度を再現できた。

4.5. 自動化ツールの作成

精度向上には、1g conditionで車両特性の調整をおこなうことが不可欠であることがわかった。

本テーマでは、できるだけ解析精度を上げるため、実車テストで管理すべき車両セッティング全項目を1g conditionでおこなうことをめざした。車両セッティングパラメータとして車高、バンプストップクリアランス、イニシャルトー、イニシャルキャンバ、重心高、重心点まわりの慣性モーメントを選択した。その中でも車高やバンプストップクリアランス、重心高は、お互いに干渉するパラメータのため収束計算のような繰り返し計算をする必要がある。それにより4.4.節でおこなった簡易的手法がとれず、調整時の作業工数が膨大となり自動車開発において対応ができなくなる。

よって、時間短縮を目的に、1g conditionを維持しながら車両セッティングパラメータ調整作業を自動でおこなうツールを開発した。その結果、調整工数を削減し自動車開発に適用可能にした。

5. 対象走行モードにおける精度検証

精度向上をおこなったモデルを使用し、対象となる走行モードにおける精度確認をおこなった。その結果をFig. 14からFig. 20に示す。

(a) Winding

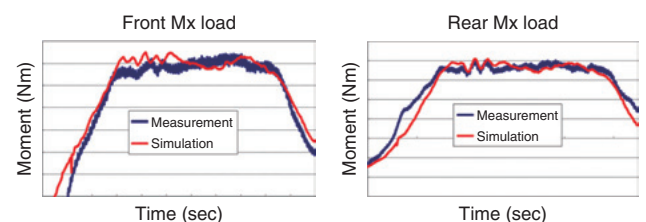


Fig. 14 Moment around X-axis at front and rear wheel center

(b) Panic braking (ABS control)

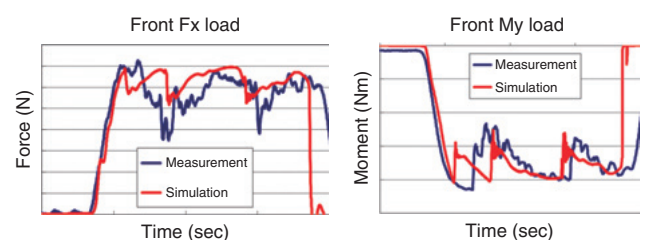


Fig. 15 Longitudinal force and moment around Y-axis at front wheel center

(c) Pot hole braking (ABS control)

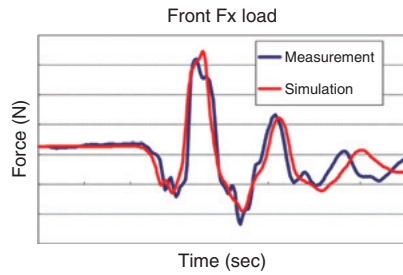


Fig. 16 Longitudinal force at front wheel center

(d) Curb stone

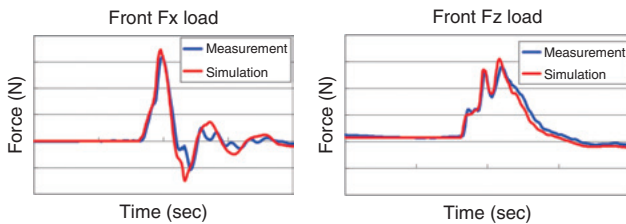


Fig. 17 Longitudinal and vertical force at front wheel center

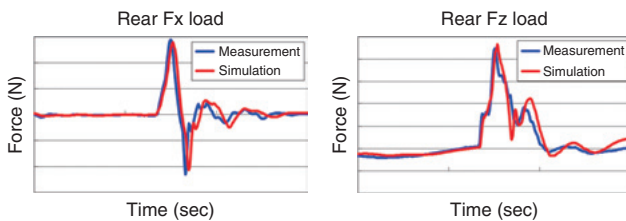


Fig. 18 Longitudinal and vertical force at rear wheel center

(e) Rough road

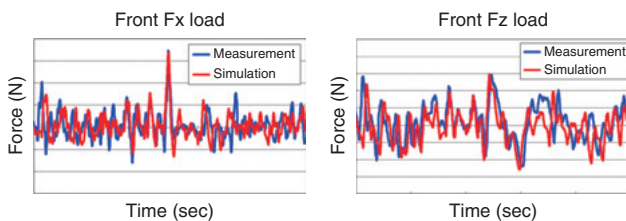


Fig. 19 Longitudinal and vertical force at front wheel center

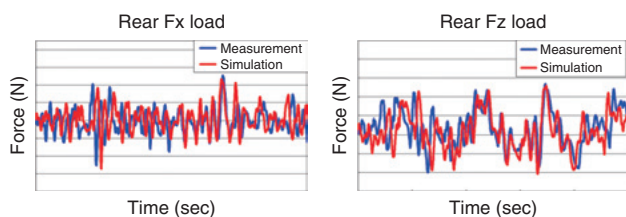


Fig. 20 Longitudinal and vertical force at rear wheel center

対象となる全走行モードにおいて対象となる荷重に関し、実車テストとの良好な相関を確認できた。これにより実車テスト置き換えに必要な精度を有しているものと考えた。

6. まとめ

サスペンション耐久条件決定のための実車入力測定テスト置き換え技術として以下の技術構築をおこない、自動車開発に適用可能にした。

- (1) 実車入力測定テストに必要な全走行モードを一つのモデルを用いた機構解析により再現させるために、デジタル路面の整備とタイヤモデルの選定をおこなった。
- (2) 精度向上のために 1g condition での車体セットアップ調整の重要性と効果を確認し、調整時間短縮のためのツール化をおこなった。
- (3) 精度検証をおこない、実車テストの置き換えに向け十分な精度を確保していることを確認できた。

参考文献

- (1) 芳賀齊:弾性体を含む機構解析による路面入力予測の精度検証, ータイヤモデルを使った耐久性入力予測ー, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.21-06, p.9-12(2006)
- (2) 芳賀齊:弾性体を含む機構解析による路面入力予測の精度検証 (第2報), ータイヤモデルを使った耐久性入力予測ー, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.136-06, p.11-14(2006)
- (3) 芳賀齊:完成車悪路走行入力予測シミュレーションの精度検証 (第2報), ータイヤモデルを使った耐久性入力予測ー, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.123-08, p.23-26(2008)
- (4) 二宮祐貴, 澤紀彦, 本間和正, 井坪孝文:サスペンション制御を考慮した悪路走行時の入力負荷予測手法の開発, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.116-09, p.9-14(2009)
- (5) 勝野雅之, 佐野雅人, 立川勝次郎:縁石衝突時の入力予測手法の開発, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.944, p.145-148(1994)
- (6) 坂井英児, 富永秀和, 加藤益久, 山本典史, 松本大樹:悪路耐久走行時のサスペンション入力予測技術開発, 三菱自動車テクニカルレビュー, No.17, p.45-48(2005)
- (7) Hauke, M.: Simulation of Full Vehicle Misuse Behavior, SAE Technical Paper, No. 2004-01-0192(2004)

- (8) <http://www.mscsoftware.com/events/vpd2006/na/presentations/53.pdf>
- (9) <http://www.cosin.eu/literature>

■ 著 者 ■



下平 貴政



片岡 俊介



森 理 史



横山 真 吾

国内仕様ソーラー水素ステーションの紹介

Introduction of Solar Hydrogen Station Installed in Japan

武内 淳*
Jun TAKEUCHI
伊藤 潤*
Jun ITO

中沢 孝治*
Koji NAKAZAWA
岡部 昌規*
Masanori OKABE

吉田 喜祐*
Nobuyoshi YOSHIDA
山下 郁也*
Ikuya YAMASHITA

要 旨

ABSTRACT

差圧式高圧水電解型ソーラー水素ステーションを日本国内に初めて、公共の場への設置例としては世界で初めて埼玉県庁の敷地内に設置した。このステーションは過去に米国での規格を満たして米国カリフォルニア州ロサンゼルス社の Honda R&D ロサンゼルスセンタに設置したが、日本国内に設置するにあたり新たに日本の法規に対応する必要が生じた。そのため、防火壁の設置、水素製造部である差圧式高圧水電解スタックの耐圧試験の実施、換気風量の変更といったシステム構成の変更をおこなった。この対応の過程で、現在の法規制では差圧式高圧水電解型ソーラー水素ステーションを家庭に設置すると想定した場合においても今回と同様の対応が必要であることが確認された。また、埼玉県の公用車として運用されている燃料電池電気自動車との実証試験において差圧式高圧水電解型ソーラー水素ステーションが安定した水素製造ができていることを確認した。

A high differential pressure water electrolysis-type solar hydrogen station has been installed on the campus of the Saitama Prefectural Office in Japan. This is Japan's first demonstration with this type of system, and the first such system in the world to be installed in a public location. A station of the same type, conforming to U.S. standards, had previously been installed at Honda R&D Americas, Inc. Los Angeles Center in Torrance, California, but it was necessary to make modifications in introducing the system to Japan in order to conform to Japanese laws and regulations. Thus, a fire-protection wall was put in place, the system ventilation airflow was increased and pressure proof tests were conducted on the high differential pressure water electrolysis stack. In the course of accommodating the Japanese laws and regulations, it was realized that under the present laws, the same configurations would be necessary when considering the household installation of such hydrogen stations. The study has also shown that this hydrogen station is capable of stably producing hydrogen in a verification test conducted in coordination with a fuel cell electric vehicle being used as an official vehicle by Saitama Prefecture.

1. まえがき

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

それに加えて、燃料電池電気自動車に低炭素で水素を供給する技術の研究が重要と捉え、将来の水素エネルギー社会の実現に向けて、太陽電池を入力電源に使ったソー

ラー水素ステーションについても研究開発に取り組んでいる。その第一歩として、米国カリフォルニア州ロサンゼルス社の Honda R&D ロサンゼルスセンタにて 2001 年 7 月から市販の機器を組み合わせたソーラー水素ステーションの実験を開始した。2003 年 10 月からは常圧水電解型ソーラー水素ステーション (Solar Hydrogen Station: SHS1)⁽¹⁾ に独自技術である常圧式水電解スタックを投入し、2010 年 1 月からは SHS1 に代わり差圧式高圧水電解型ソーラー水素ステーション (High Differential Pressure Water

* 四輪 R&D センター

Electrolysis-type Solar Hydrogen Station: SHS2)^{(2), (3)}の実証試験をおこなっている。本稿で紹介するのは埼玉県庁敷地内に設置した日本国内仕様 SHS2(以下、国内仕様)である。この設置は差圧式高圧水電解システムとしては日本国内初、公共の場への設置例としては世界初である。本システムは環境省平成 23 年度地球温暖化対策技術等新規採択案件のうち「交通低炭素化技術開発分野の小型ソーラー水素ステーションと燃料電池車を組み合わせた CO₂ 排出ゼロシステム開発」の一環として埼玉県庁、岩谷産業株式会社、本田技研工業株式会社、株式会社本田技術研究所の四者により設置されたものであり、2012 年 3 月 27 日に埼玉県庁に引渡され、二年間の期限で運用が開始された。この国内仕様は米国設置仕様 SHS2(以下、米国仕様)に対し、主に日本国内設置に向けた法規対応による変更をおこなったものである。以下、国内仕様のデザイン、法規対応、運用状況に関して紹介する。

2. デザイン

2.1. コンセプト

デザインコンセプトを Fig. 1 に示す。

国内仕様のコンセプトは米国仕様と同様に FLUID FUNCTION(流体機能)とした。SHS2 によるエネルギー生成の流れを安定感のある対称曲線面で表現し、埼玉県庁内の設置周辺環境に違和感なく融合するエリアの造作、色彩の選択と配置をおこない、先進感を訴求する外観とした。以上のコンセプトを具現化した国内仕様の外観を Fig. 2 に示す。

2.2. レイアウト

国内仕様は近い将来の小型水素ステーションの普及に向けて、日本における高圧ガス充填所の施設設計に関する法規に適合し、燃料電池電気自動車の燃料となる水素を供給する設備の検証や実験をおこなう施設となる。埼玉県知事の公用車として休日を除いてほぼ連日使用する燃料電気電池自動車への燃料充填のため、安全で誰もが確実に扱える施設として設計した。また将来の一般家庭への設置を想定して必要とされる諸条件を考慮しつつ、コンパクトであり

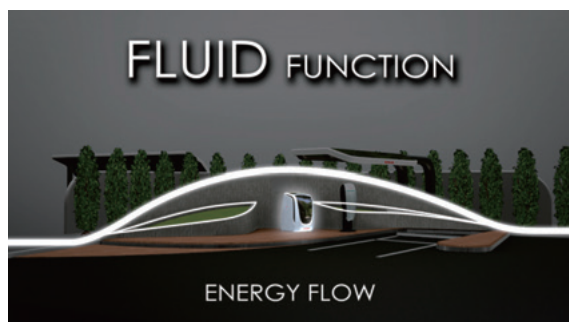


Fig. 1 Design concept of SHS2

ながら開放感のあるレイアウトとした。Fig. 3 に国内仕様の CG レイアウト図を示す。

充填をおこなう車両は、ガイドラインに沿って後進で充填位置にアプローチをおこない、ガイドによって充填最適位置に停車する。充填ディスペンサを設置したアイランドの縁石高さは 150 mm とし、また転舵ミスがあっても車両が充填ディスペンサへ衝突しないように縁石から充填ディスペンサの距離を決定した。駐車スペースには雨の多い環境を考慮し、充填時に雨に濡れることのないようルーフを設置した。ルーフは降車時のドアへの干渉や全体デザインの訴求を阻害することがないようにカンチレバー(片持ち)柱構造とし、開放感のある快適な充填エリアを完成させた。

2.3. ユーザインタフェース

米国仕様においてもシンプルかつ直感的な操作ができるようユーザインタフェース(UI)画面を構成していたが、日本国内設置に合わせ、UI 画面の改良もおこなった。Fig. 4 に UI の画面を示す。まず表示言語に関しては全て日本語とした。充填操作方法の指示に関してはアニメーションを使用することにより、より直感的に理解しやすいものとしている。また、充填状況の表示も米国仕様の数値表示から充填に合わせてゲージが増減するグラフィカルなものとし、さらに残り充填時間を表示しユーザへの利便性を高めている。



Fig. 2 External view of SHS2 installed on Saitama prefecture property



Fig. 3 System layout of SHS2



(a) Connecting nozzle



(b) Refueling

Fig. 4 UI screens of SHS2

3. システム仕様

国内仕様は、以前報告した米国仕様⁽²⁾と同様に差圧式高圧水電解システムと太陽電池を組み合わせた構成となっており、水素製造の過程で一切 CO₂ を排出しないことを特徴とする。Table 1 に SHS2 の米国および国内の仕様を示す。基本的な仕様は米国、国内ともに同一である。各仕様の異なる部分として、水素貯蔵量、太陽電池設置面積、換気風量があげられる。米国仕様は家庭用設置機の実証試験という位置づけのため、水素貯蔵量も家庭用を考慮し、少量の 4 kg (35 MPa, 167 L) とした。この貯蔵量では SHS2 の貯蔵タンクと燃料電池電気自動車のタンクの圧力差を利用して水素を充填する差圧充填のみでの充填完了圧力が低くなる。このため米国仕様は、燃料電池電気自動車に差圧充填をおこなった後、差圧式高圧水電解スタックから直接燃料電池電気自動車のタンクに水素を充填する押込み充填をおこなうことを特徴としている。一方、日本国内では法規上、充填を有人でおこなう必要があり、SHS2 の製造水素量で数時間かかる押込み充填は現実的でない。したがって、国内仕様は押込み充填をおこなわない仕様となっている。以上より、国内仕様においては差圧充填での充填完了圧力を高める必要があること、また公共の場への設置になることにより複数台への充填にも配慮し、水素貯蔵量を約 20 kg (35 MPa, 828 L) に設定した。また、太陽電池パネルには

Table 1 Specifications of SHS2

		United States	Japan
Hydrogen production	Flow rate	0.7 Nm ³ /h	
	Filling pressure	35 MPa	
	Purity	>99.99%	
	Storage	4 kg	20 kg
Component	Photovoltaic module	CIGS 6 kW	CIGS 10.5 kW
	Electrolysis unit	High differential pressure electrolyzer	
Utility	Electricity	240 VAC / 60 Hz	200 VAC / 50 Hz
	Water	Tap water	
	Ventilation	3.5 Nm ³ /min	7 Nm ³ /min
Unit volume		Approx 0.33 m ³	

米国仕様と同様に株式会社ホンダソルテック製 CIGS 薄膜太陽電池⁽⁴⁾を使用しているが、水素貯蔵量の増加に伴いより多くの水素製造量が求められることから、出力を 6 kW から 10.5 kW へと増加させている。さらに、発電量が減少する雨天時や夜間、または必要な場合には商用電力を併用して水素製造をおこなうことも可能である。

4. 法規対応

4.1. 法規概要

Table 2 に日本および米国で適用した法規と規格を示す。日本と米国では水素ステーション設置に伴う法規もしくは規格が異なる。国際的には水電解水素製造装置としての規格 ISO22734-2⁽⁵⁾ 家庭用水電解水素製造装置がすでに発行されており、米国仕様においては主にこの ISO22734-2 を適用した。ISO22734-2 以外では米国の高圧ガス取扱い規格である NFPA55⁽⁶⁾、危険区域判断規格である NFPA497⁽⁷⁾ を適用し、これらを満たすことにより水素ステーションとしての運用の認可を受けることができた。このように SHS2 はすでに米国規格を満たす装置として設計されていたが、日本国内での設置においてはさらに高圧ガス保安法、建築基準法といった法規があり、規制としては国内法規がより厳しいため、これらの法規を順守するために新たな対応が必要となった。

4.2. 日米での対応の差異

4.2.1. 日本法規への対応事項

高圧ガス保安法に定義される高圧ガス製造設備には、許可が必要な第一種製造設備と、比較的制約が少なく届出のみで設置できる第二種製造設備が存在する。本来 SHS2 はその仕様ならびに製造規模から第二種製造設備に該当する。一方、国内仕様の設置場所である埼玉県庁は商業地域にあるため、建築基準法第四十八条の用途地域の制限によって可燃性ガスならびに圧縮ガスの製造が原則として禁止されている。ただし、燃料電池電気自動車の普及に向

Table 2 Codes and standards for US and Japan

	United States	Japan
Water electrolysis applications	ISO22734-2	None
High-pressure gas applications	NFPA55	High Pressure Gas Safety Act Building Standards Act
Classification	NFPA497	JIS60079-10

けた政府の施策に伴い、第一種製造設備として許可を受けた特定圧縮水素スタンドであれば設置が認められる。したがって国内仕様は一般高圧ガス保安規則（一般則）第七条の三第二項各号、特定圧縮水素スタンドに係る技術上の基準にのっとり設計する必要があるが生じた。以下に、国内設置において改めて差圧式高圧水電解システムとして対応する必要のあった一般則の主な部分を列挙する。

- (1) システムを設置する敷地境界への防火壁の設置
- (2) タンク温度上昇を抑える消火用散水設備の設置
- (3) 火気を扱う施設から 6 m 以上の距離の確保
- (4) 計算式による強度保証もしくは耐圧試験による常用圧力の 4 倍以上で破壊無きことを提示
- (5) システム本体として防爆性能の保持

4.2.2. システム設置敷地

システム設置敷地としては 4.2.1. 項 (1) 防火壁の設置、(2) 散水設備の設置、(3) 火気施設からの距離に留意する必要がある。そこで、Fig. 3 に示したとおり、アイランドの背面を覆うように防火壁を設置した。タンク部には火災や温度上昇時のための散水設備を設置した。また、後述するように SHS2 は換気によって防爆機能を得ているが、SHS2 はリレー等の着火源を内部で使用しており、これらは火気とみなされる。よって、4.2.1. 項 (3) を満たす必要から、システムの換気を使用しているエアの吸入口をシステムから 6 m 以上離れた場所に設置した。これに対し米国においては防火壁、散水設備の設置は必要とされず、また、火気を扱う施設からの距離に関してもシステムには適用されない。しかし、NFPA55 によると水素を放出するベント管が危険源とみなされ、ベント管からシステムまでの距離が 15 ft (約 4.6 m) 以上と規定されている。よって、米国仕様ではその規定による対応のみをおこなっている。

4.2.3. スタック

高圧ガス保安法では「設計圧力を MPa であらわした数値と内容積を m^3 で表した数値との積が 0.004 以下の容器」には一般則が適用される。これを式に表すと式 (1) のようになる。一方、それ以外の高圧容器には特定設備検査規則が適用され、構造や使用する材料は一般則よりも大きな制約を受ける。

$$P \times V \leq 0.004 \quad (1)$$

P : 設計圧力 (MPa)

V : 内容積 (m^3)

差圧式高圧水電解スタックの設計圧力は 38.5 MPa であるので、内容積が 103.9 cm^3 以下であれば一般則の適用となる。ここで水電解スタックの内容積は 100.8 cm^3 であるため、一般則としての対応が可能となった。

また、4.2.1. 項 (4) のとおり、高圧容器は常用の圧力に対して十分な強度を有することを示す必要がある。一般則の例示基準には金属材料を使用した場合の耐圧計算方法が記載されており、金属材料のみで耐圧構造を保有している配管、安全弁、逆止弁、電磁弁等のデバイスに関してはその強度保証を計算でおこなうこともできる。しかし、差圧式高圧水電解スタックでは耐圧構造の一部が非金属材料である電解質膜により構成されているため、例示基準に定義された計算式では対応できない。よって、スタックに関しては実際に常用圧力の 4 倍以上である 160 MPa の耐圧試験をおこない、破壊しないことを確認した。

4.2.4. デバイスの耐圧設計

差圧式高圧水電解スタックと同様に高圧部に使用しているデバイスは 4 倍耐圧を保証する必要がある。これに対し、米国の規格では高圧部の耐圧容器は常用圧力の 2.4 倍、配管は常用圧力の 3 倍の耐圧で良い。SHS2 に使用されているデバイスは米国で使用されることを前提に選定されていたことから、改めて各デバイスが 4 倍耐圧を持つことを確認する必要がある。そこで、SHS2 に使用している各部品の洗い出しをおこなった結果、フィルタ、各種継手等がそれを満足できないことがわかった。これらのデバイスに関しては 4 倍耐圧に耐えうる十分な肉厚が確保できるよう再設計をおこなった。

また、高圧水素気液分離器、吸着筒に関してはスペース確保のために四角型の形状にてフランジ結合されていた。しかし、前述の一般則の計算式には四角型フランジの計算式が存在しないため、計算式が記載されている円柱型で再設計した。

4.2.5. 換気風量

4.2.1. 項 (5) のとおり、一般則によりシステム内で非防爆デバイスを使用するためにはシステム本体を換気防爆構造とする必要がある。SHS2 では防爆対応をおこなうために常時換気システムを用いており、米国仕様においてもこの常時換気を取り入れている。この換気防爆という考え方は、内部にて水素がリークした場合にそのリークに対して空気中の水素濃度が可燃範囲下限値の 1/4 未満である 1%

未満になるように換気をおこなうというものである。

米国の NFPA497 と ISO22734-2 においては耐圧設計がなされている部品に対し破裂や外れ等を考慮しなくてよいが、日本の高圧ガス保安法では、配管の破裂といった急激な水素放出事象を想定する必要がある。この場合の事象とは、システムが最大圧力で運転している時点で配管等の破裂が発生し、システムの製造水素全量がシステム内にリークするというものである。このときの換気度を JIS C 60079-10⁽⁸⁾にある計算式により高換気度に保つ必要があり、この条件を式(2)に示す。ここで、高換気度とはガスの放出源においてガスの濃度を瞬時に低下させる換気度のことであり、式(2)を満たすことによりガスの放出による危険を回避することができる。システムの水素製造量は 0.7 Nm³/h、内容積は 0.17 m³ であることから、式(2)により換気風量としては 5.6 Nm³/min を確保する必要がある。よって、国内仕様においては換気風量が 5.6 Nm³/min 以上となるように換気ファンを設定した。

$$\frac{f \times (dG/dt)_{\max} \times T}{C \times k \times LFLm \times 293} < 0.1 \quad (2)$$

- f : 換気効率
 $(dG/dt)_{\max}$: 最大水素製造量
 T : 周囲温度
 C : 換気風量 / 換気容積 (内容積)
 k : $LFLm$ に対する安全率
 $LFLm$: 可燃濃度範囲

4.3. 家庭設置に向けての課題

以上、日本の法規にのっとることにより、SHS2 を日本国内に設置することができた。しかしながら建築基準法によると現在の日本では水素ステーション等の可燃性ガス製造設備の設置は原則として工業地域にのみ認められている。今回の国内仕様のように特定行政庁の判断により工業地域以外に設置できる可能性もあるが、その場合でも大型設備である第一種製造設備の技術基準が適用される。よって、家庭用に設置する場合は上記防火壁や散水設備の設置、6 m 以上の火気距離の確保が必要となり一般家庭の敷地に設置するのは困難である。また、デバイスにおいても米国では耐圧要求が常用圧力の 2.4 倍や 3 倍であるのに対し、日本では 4 倍の耐圧を要求されるので、コストも高くなってしまう。以上のことから既存の日本の法律では家庭に SHS2 は設置できるものの、広い敷地と高いコストが必要となり、現実的に普及させるにはさらなる法整備が必要であることがわかった。

この研究では最終的に小型で安価な水素供給システムを家庭に設置することを目的としているため、今後 Honda として当該システムの家庭設置に向けて法整備の働きかけをおこなっていく必要がある。

Table 3 Hydrogen quality of SHS2

	ISO14687-2	SHS2 US	SHS2 JP
H ₂ (%)	>99.99	>99.99	>99.99
H ₂ O (ppm)	<5	<1	<5
Hydrocarbon (ppm)	<2	<0.1	<0.3
O ₂ (ppm)	<5	1	<0.1
He, Ar, N ₂ (ppm)	<100	<16	<0.1
CO ₂ (ppm)	<1	<0.1	<0.1
CO (ppm)	<0.2	<0.001	<0.1
Sulfur (ppm)	<0.004	<0.0008	<0.8*
HCHO (ppm)	<0.01	<0.001	<0.01
HCOOH (ppm)	<0.2	<0.001	<5*
NH ₃ (ppm)	<0.1	<0.02	<0.01
Halogenates (ppm)	<0.05	<0.004	<0.5*

* below detectable limit

5. 運用状況

国内仕様は耐圧の向上、換気風量の増強などはおこなったが、第3章にて示すとおり基本的な構成は米国仕様と同一であるためシステム効率や水素品質も米国仕様と同等である。SHS2 で製造した水素の品質を Table 3 に示す。水素品質に関しては一部検出限界値により測定しきれていない成分はあるものの、おおむね米国仕様と同等値を示している⁽³⁾。

この実証試験では燃料電池電気自動車が自治体の公用車として使われるときの使われ方や水素ステーションに対する要望を把握する目的がある。代表的な一か月の水素製造量の推移を Fig. 5 に示す。現状の国内仕様は埼玉県のパブリックユーティリティ車である燃料電池電気自動車一台で運用されており、当該車両の走行距離に応じて安定した水素製造ができています。今後、二年間の実証試験の後に最終的な実証データとして知見をまとめる。

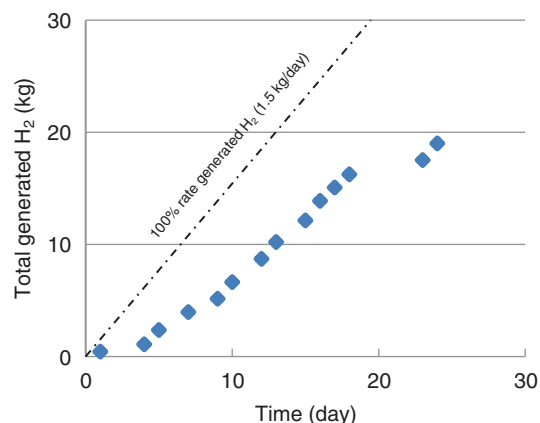


Fig. 5 Typical H₂ production at Saitama

6. まとめ

差圧式高圧水電解型ソーラー水素ステーションを日本国内に設置したことにより以下の結果を得た。

- (1) 日本における現状の水素ステーション設置に関する法規対応をおこない、日本初、また公共の場としては世界初の SHS2 を設置することができた。
- (2) 上記法規を確認した結果、家庭用に向けての法律の整備が不十分であることがわかり、将来の家庭用設置を想定した時の課題が把握でき、将来的な法整備に向けての働きかけが重要であることがわかった。
- (3) 国内仕様の初期運用の結果、システム効率、水素品質に関しては米国仕様と同じことがわかった。また、燃料電池電気自動車一台との連携において特に不具合なく運用がおこなえている。

参考文献

- (1) 岡部昌規, 中沢孝治, 樽家憲司, 判田圭: 太陽電池を使った水素ステーション (SHS) の実証試験, Honda R&D Technical Review, Vol.20, No.1, p.67-73
- (2) 中沢孝治, 長岡久史, 武内淳, Frank Moburg, 山下郁也, 岡部昌規: 差圧式高圧水電解型ソーラー水素ステーション (SHS2) の紹介, Honda R&D Technical Review, Vol.22, No.2, p.28-35
- (3) 長岡久史, 吉田喜祐, David Cun, 山下郁也, 岡部昌規: 差圧式高圧水電解型ソーラー水素ステーション (SHS2) の実証試験, Honda R&D Technical Review, Vol.24, No.2, p.72-78
- (4) <http://www.honda.co.jp/soltec/cigs/index.html>, 2012/8/24
- (5) ISO22734-2:2011. Hydrogen generators using water electrolysis process - Part2:Residential applications
- (6) NFPA55:2010. Compressed gases and cryogenic fluids code
- (7) NFPA497:2012. Recommended practice for the classification of flammable liquids, gases, or vapors and of hazardous (classified) locations for electrical installations in chemical process areas
- (8) JIS C 60079-10:2008. 爆発性雰囲気中使用する電気機械器具 - 第 10 部: 危険区域の分類

■ 著 者 ■



武内 淳



中沢 孝治



吉田 喜祐



伊藤 潤



岡部 昌規



山下 郁也

素反応シミュレーションを用いた ガソリンエンジンにおける低回転自着火の解析

Study of Low-engine-speed Self-ignition in Gasoline Engine Using Elementary Process Simulation

中 島 進*
Susumu NAKAJIMA

要 旨

ガソリンエンジンの低回転における自着火に起因する音(以下、自着火音)の低減は商品性における課題の一つである。低回転自着火音は散発的に発生し、サイクルごとのトルク変動が大きくエンジンの振動も大きい。従って、音の発生と同期させての計測が困難であり、また現象の再現も難しいため、解析は進んでいなかった。本報では、素反応シミュレーションが自着火音を発生させる燃焼を良く模擬できることを確認し、それを用いて、自着火発生時の素反応レベルにおける現象の確認と、条件変化による自着火特性の変化の確認および改善手法の検討をおこなった。確認した条件変化は混合気温度、圧縮比、空気過剰率、EGR、残留ガス、オクタン価である。また、それらの結果から再始動時の自着火の対策として、リーン化での燃料密度の低下による自着火抑制が効果的であることを確認した。また、残留ガスの低減は混合気の温度を低下させ、自着火を抑制できることがわかった。さらに、本シミュレーションの活用法として、販売地域により、オクタン価、外気温度等が変わる際の自着火特性を予測し、適切な仕様設定が机上でおこなえることを示した。

ABSTRACT

The mitigation of noise originating in self-ignition in gasoline engines at low speed ("self-ignition noise" below) is an issue in realizing increased commercial appeal. Low-speed self-ignition noise occurs sporadically, producing significant torque fluctuation and engine vibration in each cycle. Synchronizing measurements with the occurrence of the noise and reproducing the phenomenon has therefore represented a challenge, and progress has not been made in its analysis. The research discussed in this paper verified that an elementary process simulation was able to model combustion conditions in which self-ignition noise occurs with sufficient accuracy. Using this simulation, the research studied phenomena occurring at the level of elementary processes when self-ignition occurs, changes in self-ignition characteristics with changes in conditions, and methods of ameliorating self-ignition. The conditions varied in the simulations were air-fuel mixture temperature, compression ratio, excess air ratio, EGR, residual gas and octane number. The results of these studies showed that reducing fuel density by increasing leanness is an effective means of controlling self-ignition when the engine is restarted. In addition, it was shown that it is possible to control self-ignition by reducing the temperature of the air-fuel mixture through reduction of the ratio of residual gas. Further, the simulation can be utilized to predict self-ignition characteristics produced by changes in factors such as the octane number of the fuel and the temperature of the external air in different regions, and to set appropriate specifications, on the desktop.

1. はじめに

近年、地球温暖化防止等の観点から、より一層の内燃機関の高効率化が求められている。ガソリンエンジンの高効率化の手法としては圧縮比の増加、冷却水温度の高温化、過給ダウンサイジング化等が挙げられる。これらの技術は燃焼室の圧力と温度の上昇を伴うため、高吸気温時等にノッキングやプレイグニッションなどの異常燃焼の発生の可能性が高まる。異常燃焼は Fig. 1 に示すように、ノッキ

ング、低回転自着火、Low-speed pre-ignition、暴走型プレイグニッションに分類される。これまで、低回転自着火はサイクルごとのトルク変動が大きく、エンジンの激しい振動を伴うため、現象を安定して計測することが困難で、解析が進んでいなかった。これまでの研究では^{(1), (2)}条件の変化と自着火の発生時期に関する考察がおこなわれているが、自着火音が発生する条件には言及していない。また、素反応シミュレーションを低回転自着火の解析に用いた論文は少ない。中島らのガソリンエンジンにおけるアイドル

*四輪 R&D センター

回転近傍での自着火に関する研究⁽³⁾により、低回転自着火音の発生メカニズムが解明された。Fig. 2に低回転自着火音が発生する必要十分条件の燃焼を示す。エンジン回転数は750 rpm、吸気圧力は大気圧である。横軸はクランク角度で、縦軸は質量燃焼割合(MBF)と $dP/d\theta$ 、筒内圧である。クランク角度0 deg、すなわちTDC近辺で低温酸化反応が開始し、ATDC37 degで残りの約60%の混合気が自着火し、ATDC40 deg近辺の $dP/d\theta$ が最大となる角度でピストンがスリーブに接触して自着火音を生じる。本報ではそのメカニズムを基に、素反応シミュレーションにより低回転自着火音が発生する燃焼を模擬し、自着火発生メカニズムを確認し、対策の方向性を決定する。

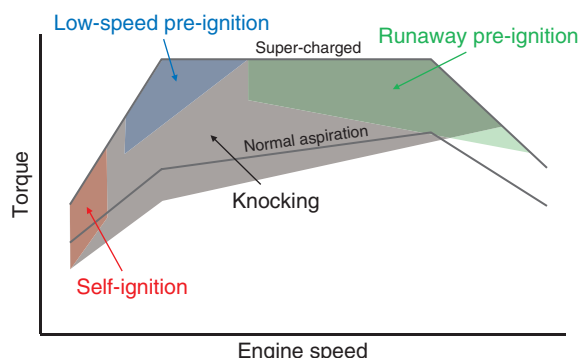


Fig. 1 Classification of abnormal combustion

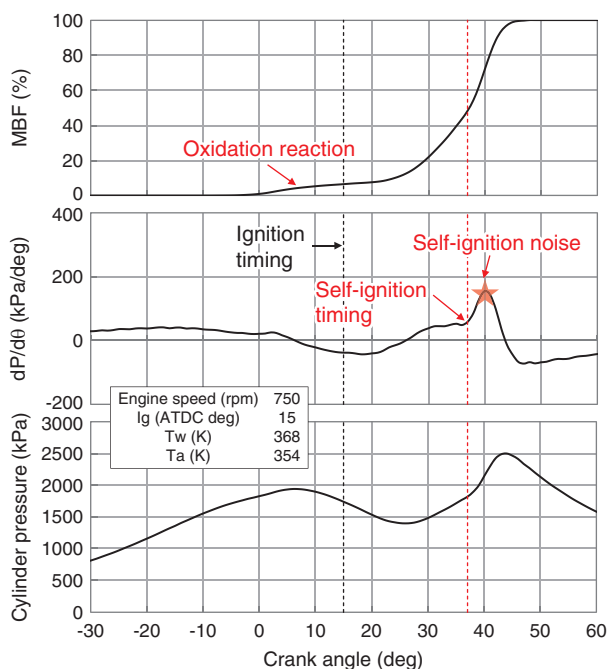


Fig. 2 Combustion generating self-ignition noise

2. 低回転自着火のシミュレーションモデル

2.1. 素反応シミュレーションの適用

計測が困難な低回転自着火はシミュレーションに置き換えて各種検討をおこなうことが望ましい。詳細に実機試験以

Table 1 Fuel specifications (RON91)

n-Heptane	0.1823
iso-Octane	0.6642
Toluene	0.1535

Table 2 Engine specifications

Fuel		Gasoline
Cylinder configuration		In-line 4-cylinder
Displacement (cm ³)		1799
Bore (mm)		81.0
Stroke (mm)		87.3
Compression ratio		10.5
Crank offset (mm)		12.0
Valve diameter (mm)	In.	32
	Ex.	26

上の情報が得られるシミュレーションとして、素反応シミュレーションが挙げられる。しかし、素反応シミュレーションは0次元シミュレーションであるため、火花点火による火炎伝播を再現することはできない。素反応シミュレーションの適用が難しい例としては、火花点火により燃焼した大部分の混合気の圧力により一部分のエンドガスが自着火するノッキングがある。しかし、自着火音が発生させる燃焼は遅角時に大きな割合の燃料が自着火するため、その時点で燃焼した混合気の割合は少なく、火花点火による燃焼の圧力等の影響は限定的であると考えられる。従って、素反応シミュレーションにより実機試験の模擬が可能であると考えられる。

2.2. 素反応シミュレーションの仕様

低回転自着火を、Homogeneous-Charge Compression Ignition (HCCI)のシミュレーションなどに使用される素反応シミュレーションを適用して検証した。以下にシミュレーションの仕様を示す。

(1) 素反応シミュレーション

CHEMKIN-PRO (Ver.2010/06/28)

(2) Model: Ignition Combustion (IC) Engine

2.3. サロゲート燃料

ガソリンはn-Heptane, iso-Octane, Tolueneの3成分の割合の変更で性状を模擬可能とされている(サロゲート燃料)^{(4), (5)}。割合は計測結果から実機試験で使用した燃料に最も近いものとした。Table 1に割合を示す。

2.4. エンジンの仕様

Table 2に実機試験およびシミュレーションをおこなったエンジンの仕様を示す。

2.5. 素反応シミュレーションと実機試験の比較

Fig. 3に実機試験と、パラメータを調整した素反応シミュレーションの結果を示す。条件は750 rpm、吸気圧力は実機試験で自着火音が生じる最も

低い温度である。素反応シミュレーションも、吸気温度は自着火が生じる最も低い温度である。横軸はクランク角度で、縦軸はMBFと $dP/d\theta$ 、筒内圧である。実機試験は質量燃焼割合から判断して、TDC近辺から低温酸化反応が生じており、素反応シミュレーションもそれを再現している。実機試験はATDC37 degまで燃焼が進行した後に、残りの約60%の燃料が自着火してATDC40 deg近辺で $dP/d\theta$ が最大となり、自着火音を発生すると考えられるが、素反応シミュレーションもATDC40 deg近辺で熱炎の発生に至る。従って、自着火が発生する最も低い吸気温度の場合は実機試験、素反応シミュレーションともほぼ等しいクランク角度において低温酸化反応を開始する。また、やはりほぼ等しいクランク角度にて、実機試験は自着火を発生し $dP/d\theta$ の最大値となり、素反応シミュレーションは熱炎の発生角度を実機試験の $dP/d\theta$ の最大値、すなわち自着火音発生角度と考えれば、火花点火による火炎伝播が模擬できなくても、素反応シミュレーションは実機試験をかなり良く再現できていると考えられる。

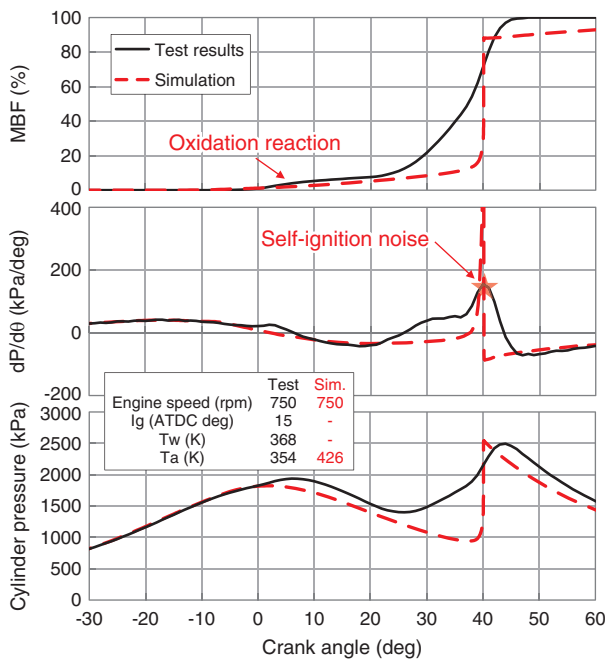


Fig. 3 Results of elementary process simulation

3. 実機試験との相関性の確認

3.1. 吸気温度の影響

低回転自着火音を発生させる燃焼を模擬できるように設定した素反応シミュレーションと実機試験との相関性をパラメータを変化させて確認する。Fig. 4に吸気温度を変更した場合のシミュレーション結果を示す。横軸はTDCを0 degとしたクランク角度で、縦軸はサロゲート燃料の3成分および酸素のモル濃度と混合気温度と圧力

である。圧縮行程が進行して温度および圧力が上昇するとn-Heptane, iso-Octaneが酸化され、酸素が減少する。この段階では酸化されにくいTolueneはほとんど酸化されない。さらに酸化反応が進行すると、燃料および酸素が急速に減少して温度および圧力が急増する。この角度を自着火が発生した角度であると定義する。吸気温度が低いと酸化反応に時間を要するため、自着火発生回転数が低くなる。Fig. 5に、吸気温度を変化させ、素反応シミュレーションおよび実機試験における自着火が発生するエンジン回転数の比較を示す。実機試験と素反応シミュレーションがよく一致することが確認できる。

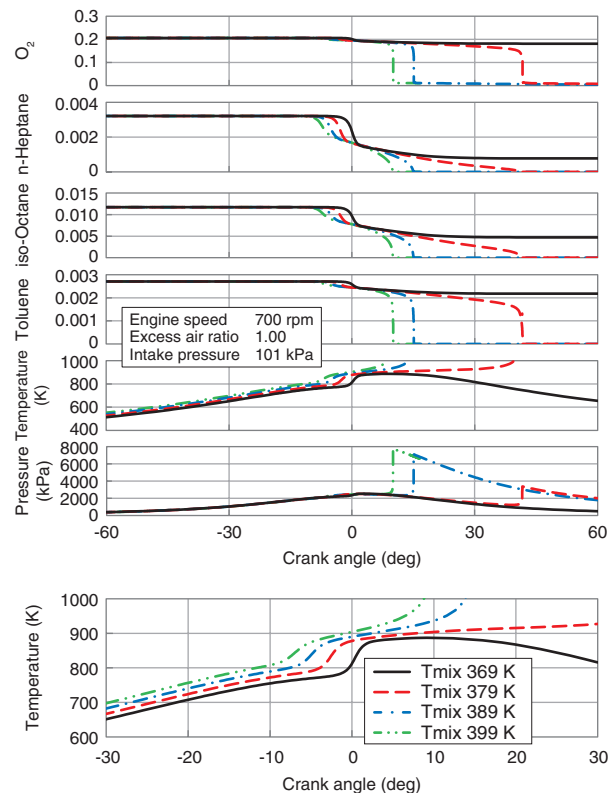


Fig. 4 Results of elementary process simulation

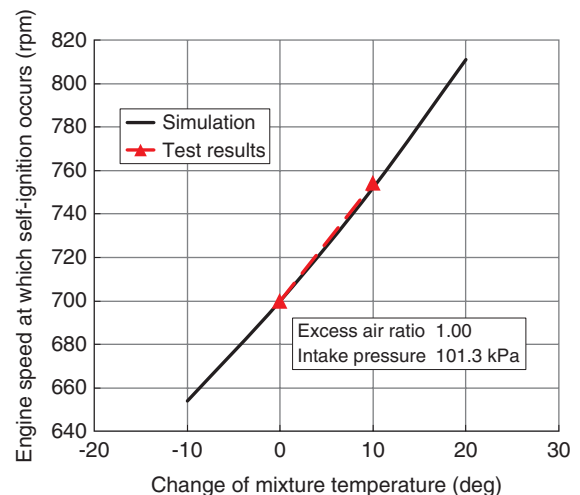


Fig. 5 Relationship between mixture temperature and self-ignition

3.2. 圧縮比の影響

圧縮比は圧力を変化させるため、自着火発生に大きな影響を与える。Fig. 6 に圧縮比を 9.5 から 12.5 まで変化したシミュレーション結果を示す。圧縮比が高いほど酸化反応の開始時期が早まり、自着火発生時期も早まることが確認できる。Fig. 7 に圧縮比と自着火発生回転数の関係を示す。吸気温度の変化と同じく、圧縮比の変化においても実機試験結果と素反応シミュレーションの結果はほぼ一致することが確認できる。素反応における重要なパラメーターである温度と圧力を変化させて、実機試験結果を再現可能

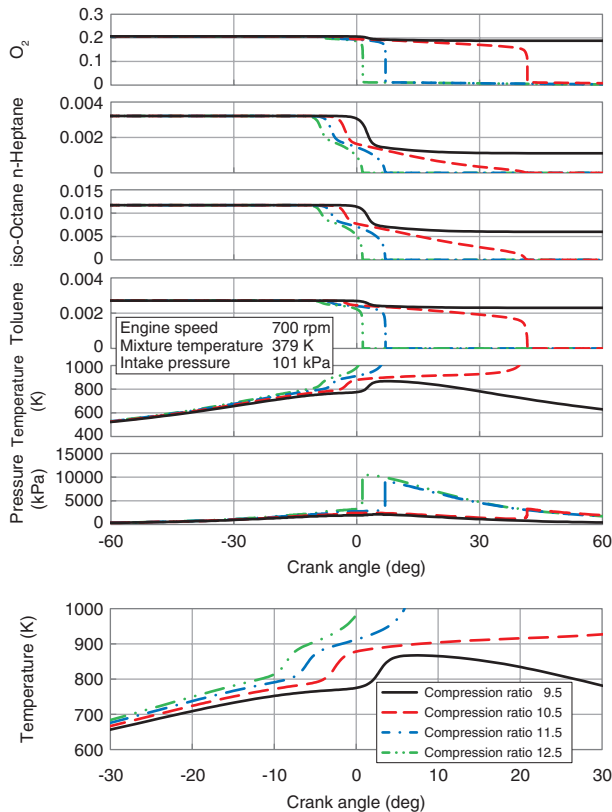


Fig. 6 Elementary process simulation of compression ratio change

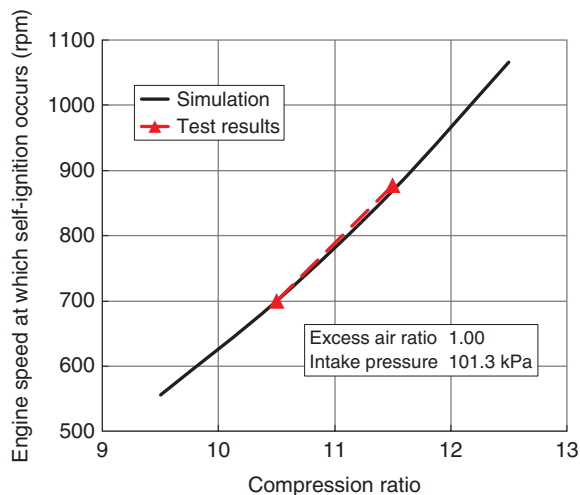


Fig. 7 Relationship between compression ratio and self-ignition

なこの素反応シミュレーションモデルを用いて、運転条件の変化が自着火に与える影響、自着火の改善手法の検討をおこなう。

4. 低回転自着火の発生メカニズム

4.1. 空気過剰率の影響

空気過剰率は自着火特性に大きな影響を与える。実機試験でも限定された条件ではリッチまたはリーン化が効果があることは確認されているが、実験の困難さから、メカニズムの解明はなされていない。実機試験による空気過剰率と自着火が発生する吸気圧力およびその条件で発生するトルクの関係を Fig. 8 に示す。リッチ化、リーン化共に理論空燃比よりも自着火が発生する吸気圧力は大きくなるが、同一吸気量での発生トルクはリッチ化の方が大きいため、リッチの方が発生するトルクは大きい。リッチ側の自着火特性が改善する理由は気化潜熱による冷却効果が大いと考えられるが、リーン側の低下の詳細な原因はわからない。そこで素反応シミュレーションにより詳細な解析をおこなう。Fig. 9 に空気過剰率を理論空燃比、 $\lambda = 1.20$ 、 $\lambda = 0.83$ と変化した場合のシミュレーション結果を示す。気化潜熱、残留ガス成分の変化等は考慮しない。また、TDC 前後の混合気温度を Table 3 に示す。

(1) 圧縮時の温度

炭化水素は多原子分子であるため、比熱比が低い。従って、比熱比は燃料の割合が少ない $\lambda = 1.20$ が大きいため、圧縮時の温度も高い。

(2) 酸化反応開始後の温度

酸化反応が始まると、燃料の割合が多い $\lambda = 0.83$ の温度上昇が大きく、 $\lambda = 1.20$ を逆転する。

自着火しやすいのはこの場合はリッチである $\lambda = 0.83$ である。Fig. 10 に空燃比を変化させた場合の自着火発生回転数の変化を示す。同一吸気圧力で空気過剰率を変化させた

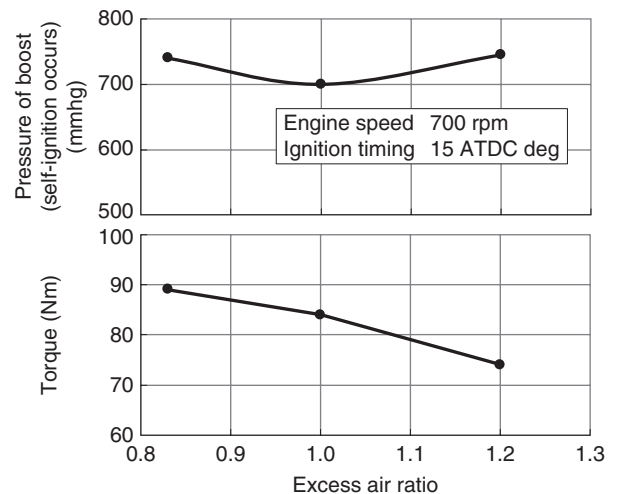


Fig. 8 Relationship between excess air ratio and pressure boost of self-ignition

Table 3 Comparison of cylinder temperature

Excess air ratio		0.83	1.00	1.20
Mixture temperature (K)	BTDC 10 deg	753	772	788
	ATDC 10 deg	1000	905	880

場合を黒線で、同一トルクで空気過剰率を変化させた場合を赤線で示す。与えた条件は Table 4 に示す。同一吸気圧力の場合はリーン化が自着火抑制に有効であるが、同一トルクの場合はリーン化すると自着火は発生しやすくなる。これは、リーン化による酸化反応の抑制効果より、圧力増加による酸化反応の促進が勝るためであると考えられる。

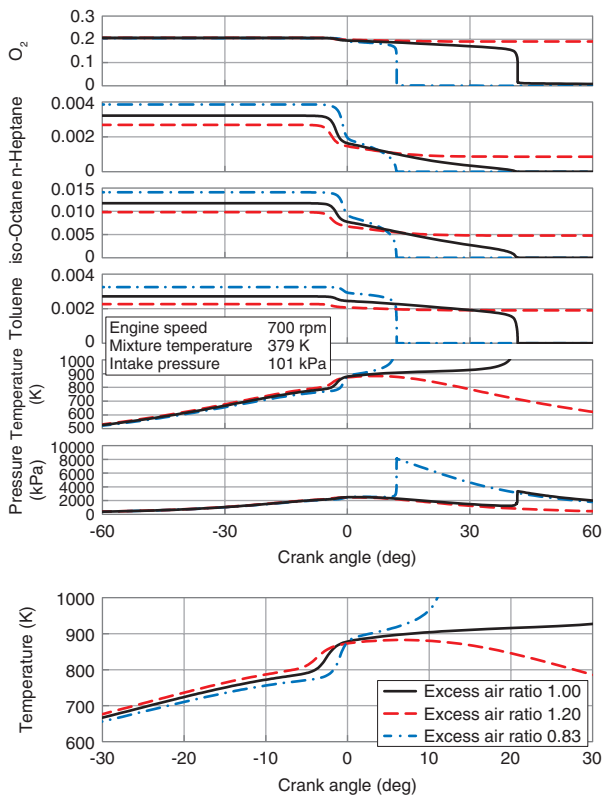


Fig. 9 Simulation results of change in excess air ratio

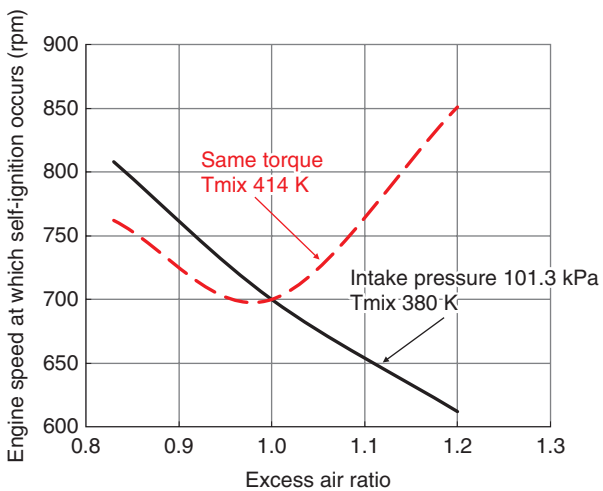


Fig. 10 Relationship between excess air ratio and self-ignition

Table 4 Conditions of simulation

Excess air ratio		0.83	1.00	1.20
Same intake pressure	Intake pressure	101	101	101
	(kPa)	84.4	84.4	101

Table 5 Comparison of cylinder temperatures

Excess air ratio		1.00	1.00	1.20
EGR ratio		0.0	0.167	0.0
Mixture temperature (K)	BTDC 10 deg	772	778	788
	ATDC 10 deg	905	853	880

また、気化潜熱による冷却効果を考慮しないシミュレーションの結果ではリッチ化も自着火が発生しやすくなったが、これは燃料の割合が大きく、酸化反応による温度の上昇が大きいためと考えられる。

4.2. EGR の影響

空気過剰率による対策は一時的であればよいが、常時用いるとエミッションの増加を招く。そこで、代替手法として EGR による抑制を検討する。燃料の希釈という点では同等の効果があることに加え、EGR は 3 原子分子である CO_2 、 H_2O が多く比熱比が小さい点でより有利であると考えられる。素反応シミュレーション結果を Fig. 11 に示す。EGR の温度は混合気と同じとする。Table 5 に燃料の希釈をリーン化および EGR にておこなった場合の TDC 近辺の混合気温度を示す。リーン化よりも EGR の方が圧縮時の温度が下が

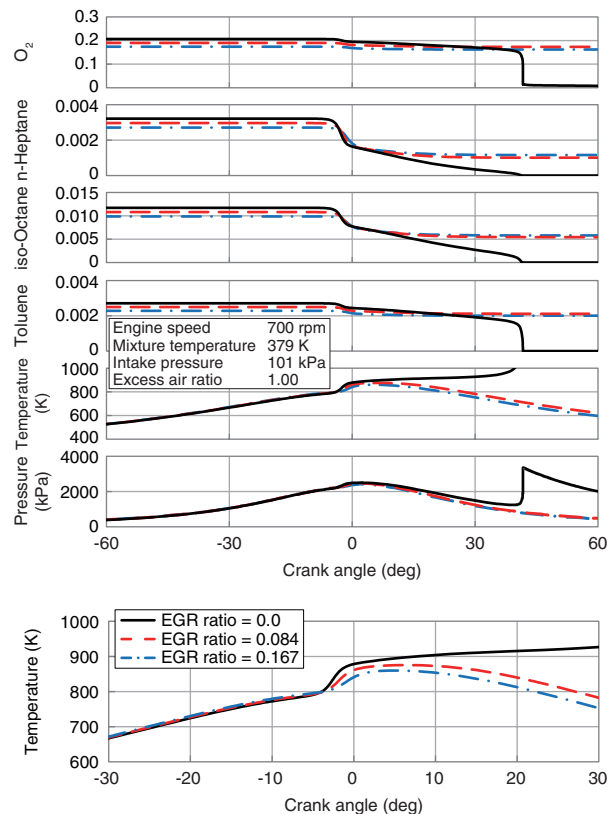


Fig. 11 Simulation results of EGR

Table 6 Conditions of simulation

EGR ratio		0	0.1	0.2
Same intake pressure	Intake pressure	101	101	101
Same torque	(kPa)	81.1	90.1	101

Table 7 Fuel specifications

RON	87	91	95	100
n-Heptane	0.2247	0.1823	0.1602	0.1256
iso-Octane	0.6215	0.6642	0.5781	0.5183
Toluene	0.1538	0.1535	0.2617	0.3561
C/H ratio (weight)	5.6717	5.6724	5.9951	6.3145

る。Fig. 12 に EGR 率と自着火発生回転数の関係を示す。同一吸気圧力で EGR 率を変化させた場合を黒線で、同一トルクで EGR 率を変化させた場合を赤線で示す。シミュレーションの条件は Table 6 に示す。同一トルクの場合は EGR 還流による改善効果はわずかである。この理由は EGR の割合に相当する分だけ吸気圧力が上昇して、酸化反応が促進されて効果が相殺されたためであると考えられる。

4.3. オクタン価の影響

混合気の自着火現象は燃料の化学構造の影響を受けやすいことが知られている^{(6), (7)}。従って、オクタン価は燃料の自着火特性の指標になると考えられる。サロゲート燃料でオクタン価を変更する場合は、オクタン価を合わせるだけでなく、C/H 比も合わせる必要がある。Table 7 に RON とサロゲート燃料の成分割合を示す。この燃料の差を確認するシミュレーション結果を Fig. 13 に示す。オクタン価と自着火特性は密接な関係があり、それは主として低温酸化反応中ではほとんど酸化されない Toluene の割合の差によることがわかる。また、RON と自着火発生回転数の関係を Fig. 14 に示す。RON はノッキングと同様に燃料の自着火のしやすさの指標にもなることが確認された。

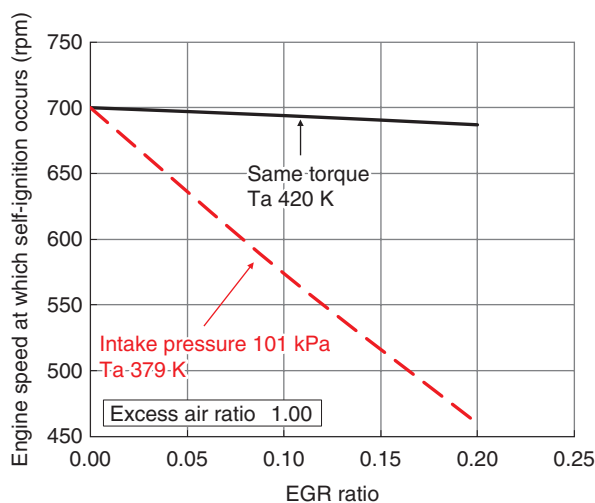


Fig. 12 Relationship between EGR ratio and self-ignition

Fig. 4, Fig. 6, Fig. 9, Fig. 11, Fig. 13 より、どのパラメータを変化させた場合でも、混合気温度が 900 K を超えると膨張行程においても酸化反応が進行して、950 K を超えると急速に熱炎の発生に至ることがわかる。

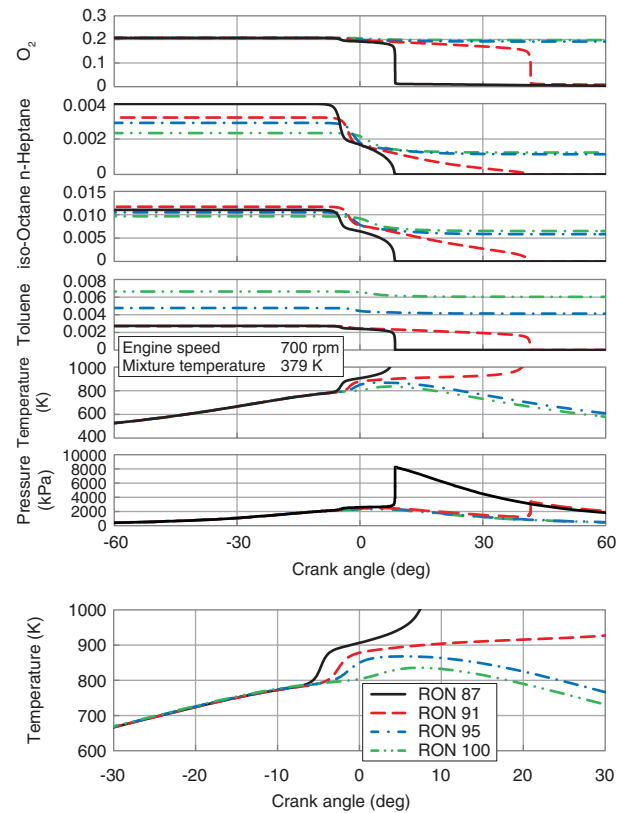


Fig. 13 Simulation of octane number

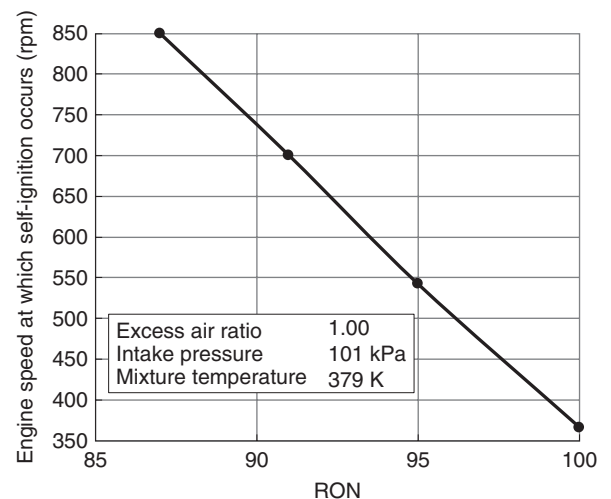


Fig. 14 Relationship between RON and self-ignition

5. 低回転自着火の対策

5.1. 残留ガスの低減

混合気温度と同等まで冷却された場合でも、EGR は自着火に対して効果が少なかった。従って、混合気の温度上昇の原因となる残留ガスは悪影響が大きいと考えられる。

Fig. 15 のようにバルブのオーバーラップを減らしたカムプロフィールにて実機試験をおこなった。吸気温度と自着火またはノックが発生する直前の点火時期とその条件で発生するトルクの関係を図. 16 に示す。全温度域で自着火特性が改善しており、トルク換算で最大 8% の改善が見られる。この実験結果を詳細に解析するために、残留ガスと混合気の温度差を全開運転相当の 700 K としてシミュレーションをおこなった。Fig. 17 にシミュレーション結果を示す。残留ガスが増加すると混合気温度が上昇し、酸化反応が早く開始されることがわかる。Fig. 18 に残留ガス割合と自着火発生回転数の関係を示す。残留ガスと混合気温度の差がないと仮定した場合を黒線で、温度差が 700 K であると仮定した場合の結果を赤線で示す。残留ガスの影響は EGR による自着火抑制効果は少なく、混合気の温度上昇による自着火促進の影響が大きいことがわかる。以上より、バルブオーバーラップの縮小による自着火の抑制の要因は、残留ガスの低減による混合気温度の低下である。また、燃料密度の増加による自着火の促進はほとんどないと考えられる。

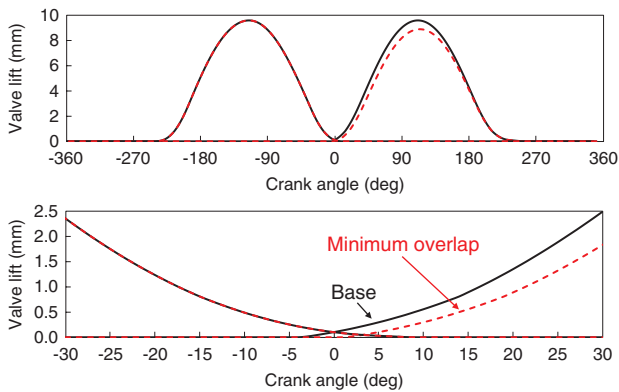


Fig. 15 Profile of reduced overlap cam

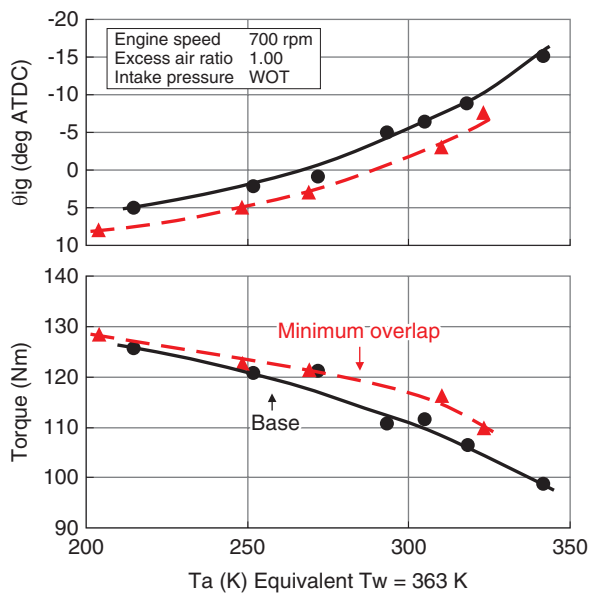


Fig. 16 Effect of residual gas reduction

5.2. 再始動時の自着火抑制

再始動時の自着火は、近年増加しているアイドルストップを採用する機種などには重要な課題である。再始動時の条件は、

- (1) 筒内の温度が高い
- (2) 吸気圧力は大気圧
- (3) フリクションは少ない

従って、自着火を回避するためには回転上昇に大きな影響がない程度のトルク低下ならば許容できる。そこで、同一吸気圧力ならば自着火抑制に効果があった空気過剰率の

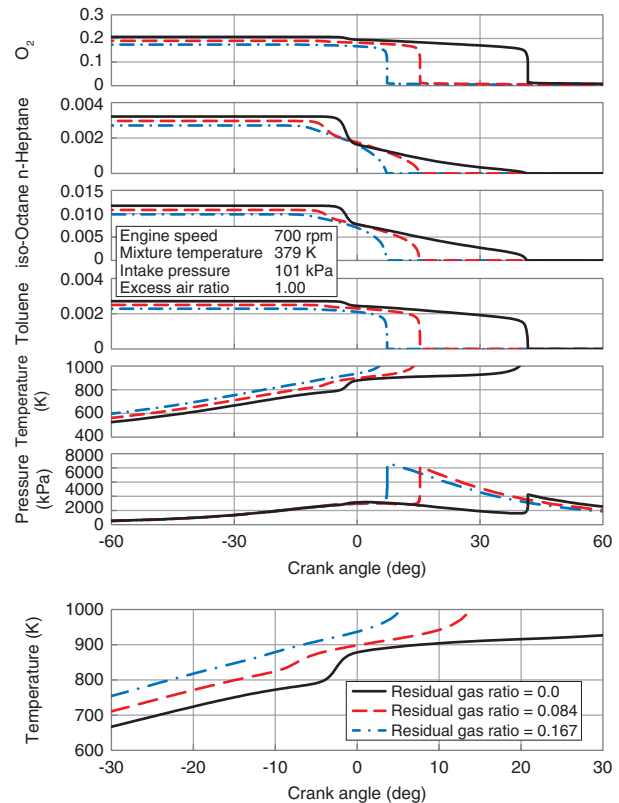


Fig. 17 Simulation of residual gas ratio change

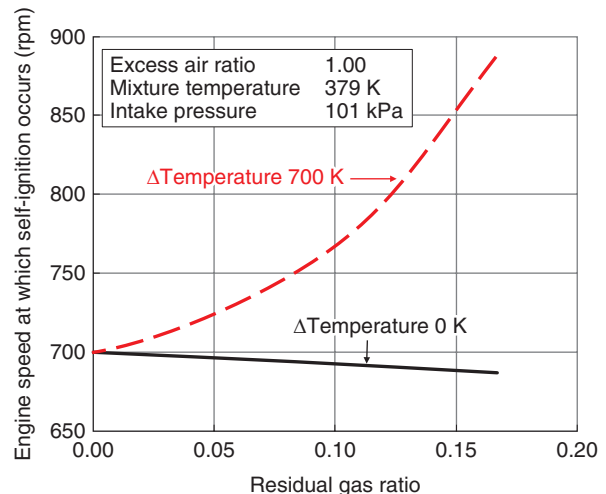


Fig. 18 Relationship between residual gas ratio and self-ignition

リーン化が改善手法として考えられる。シミュレーションの基本条件は充填効率の変化を考慮して、吸気温度を調整して実機試験相当の結果が得られるようにした。Fig. 19に再始動相当の250 rpmとアイドリング相当の700 rpmの比較を示す。再始動相当の250 rpmでは、酸化反応開始角度が遅いが、回転数が低く圧縮行程の時間が長いために自着火に至る。自着火する際の温度、圧力は異なるが、サロゲート燃料の3成分の酸化状態はほぼ同じであることが確認できる。Fig. 20に空気過剰比をリーン化させた場合のシミュレーション結果を示す。再始動はエンジン回転数が決

まっているため、本シミュレーションの結果は自着火が生じる混合気温度で示す。再始動時の適度なリーン化は自着火が生じる混合気温度が上昇し、自着火抑制に効果があることがわかる。

5.3. シミュレーション結果の活用による予測

各シミュレーション結果の組み合わせにより、販売地域、使用するガソリンの変更等、条件が変化した場合にどのように自着火特性が変化するか等のシミュレーションが可能である。一例として、圧縮比の影響とRONの影響のシミュレーション結果を組み合わせると、Fig. 21に示すように、RONを変化させた場合にRON91、圧縮比10.5と同等の自着火特性となる圧縮比が推定できる。これは一例であり、販売地域の変更等により、使用状況が変化した場合に仕様変更の机上検討等をおこなう上で有用である。

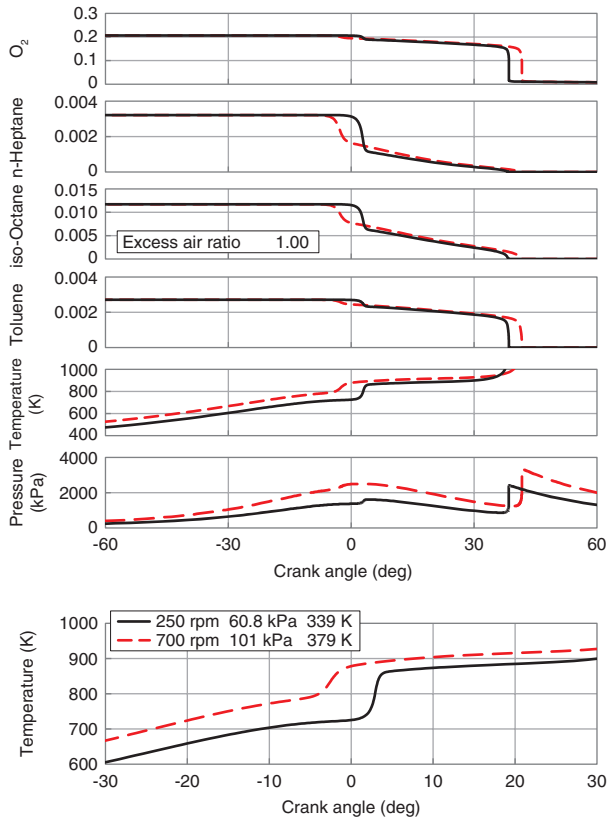


Fig. 19 Simulation at engine restart

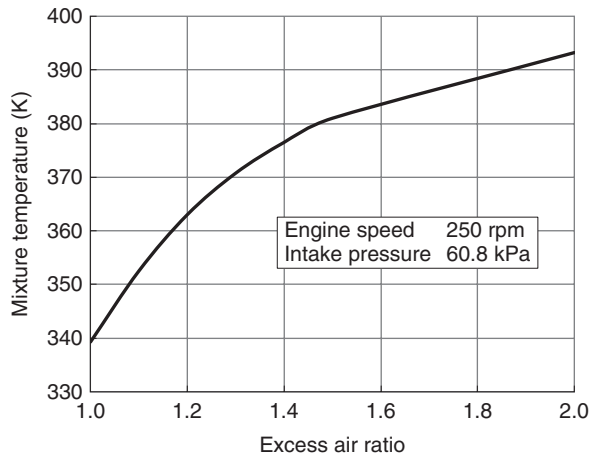


Fig. 20 Relationship between excess air ratio and self-ignition

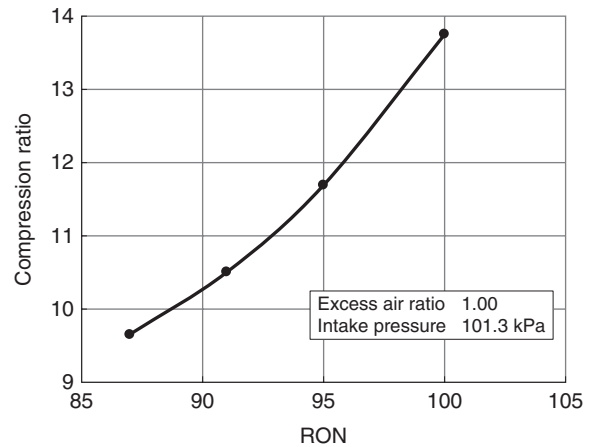


Fig. 21 Simulation of relationship between RON and compression ratio

6. 結論

低回転自着火音を生じる燃焼を模擬できる素反応シミュレーションモデルを設定し、解析をおこない以下の知見が得られた。

- (1) 低回転自着火音を発生させる燃焼のシミュレーション
CHEMKIN-PROを用い、低温酸化反応と自着火発生の開始時期および、パラメータの変更による自着火特性の変化を実測と合わせることが可能であることを示し、このモデルを用いて実測にくい低回転自着火のさまざまな検討をおこなった。
- (2) 自着火発生のメカニズム

低回転自着火音の原因となる、ATDC 40 deg 近辺での自着火は、圧縮による温度と圧力の上昇により低温酸化反応が開始し、さらに温度が上昇し、混合気温度が900 Kを超えると不可逆的に酸化反応が進行して、950 Kを超えると一気に進行して熱炎の発生に至る。

自着火を抑制する方向としては、混合気温度、圧力の低減が挙げられる。また、同一空気量の場合は空気過剰率または EGR による混合気中の燃料濃度の低減が挙げられる。また、RON が大きくなると n-Heptane に代表される直鎖系の酸化されやすい成分が減るため、自着火しにくくなる。RON は燃料の自着火しやすさの良い指標であると考えられる。

(3) 自着火の抑制手法

混合気温度の低減を実現する手法としては残留ガスの低減があり、混合気の温度の低減の効果は、燃料濃度の増加による低温酸化反応時の混合気の温度の上昇を上回ることが素反応シミュレーションにて確認された。また、再始動時は吸気圧がほぼ大気圧であるため、空気量過剰で、トルク低下が許容できるため、リーン化による自着火抑制が効果的である。

(4) 仕様検討への有用性

各シミュレーション結果の組み合わせにより、販売地域の変化、使用するガソリンの変更等、条件が変化した場合にどのように自着火特性が変化するかシミュレーションが可能であり仕様変更を検討する上で有用である。

参考文献

- (1) 森勝之, 小浜時男, 渡辺聖彦, 川辺泰之, 伊藤良秋, 鈴木道雄: ガソリンエンジンにおける自発火現象－発生メカニズムと予測手法－, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.982, p.87-90(1998)
- (2) 岩井浩平, 梅原健: 低回転・高負荷におけるガソリンエンジンの圧縮自己着火現象－前炎反応におよぼす混合気濃度・温度・圧力の影響－, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.39-00, p.5-8(2000)
- (3) 中島進, 田村友幸: ガソリンエンジンのアイドル回転近傍での自着火に関する研究, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.121-12, p.1-6(2012)
- (4) 酒井康行: 詳細反応モデルによるガソリンサロゲート燃料の着火プロセスの解析, 自動車技術会シンポジウム, No.08-08, p.28-33(2009)
- (5) 手崎衆, 山田裕之, 金子誠: 混合気の着火性制御による高圧縮比内燃機関開発に関する基礎的研究, 平成 19 年度運輸分野における基礎的研究推進制度研究成果報告, 独立行政法人 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 (2008)
- (6) 佐々木望, 中田浩一: 燃料性状がエンジンの異常燃焼に与える影響, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.126-11, p.13-16(2011)
- (7) 三好明: 燃料化学反応モデリングへの誘い, 日本燃焼学会誌, 第 50 巻, 154 号, p.37-42(2008)

■ 著 者 ■



中 島 進

リーン NO_x 触媒の劣化メカニズム解明と耐久性向上

Elucidation of Deterioration Mechanism and Improvement of Durability for Lean NO_x Catalyst

松 尾 雄 一*
Yuichi MATSUO
遠 藤 哲 雄*
Tetsuo ENDO

石 丸 真 也*
Shinya ISHIMARU
松 蘭 義 明*
Yoshiaki MATSUZONO

橋 本 雅 識*
Masanori HASHIMOTO
永 田 誠**
Makoto NAGATA

要 旨

エンジン効率向上や車体軽量化による燃費改善に伴う排ガス温度の低温化に対して、低温から高い NO_x 浄化性能を発揮するディーゼルエンジン用 NO_x 浄化システムが求められている。そこで、低温からの NO_x 後処理手法として、新しい NO_x 浄化メカニズムを用いたリーン NO_x 触媒の開発をおこなっている。このリーン NO_x 触媒は排ガス環境下でのエージングにより浄化性能が低下することが判明したため、原因を解明し、その対策をおこなった。表面分析と第一原理計算を組み合わせる解析をおこなった結果、排ガス中の硫黄が白金上に硫酸根の状態で不可逆的に吸着し、被毒することが劣化要因であることを明らかにした。また、被毒により低下する NO₂ 吸着機能と NO₂ 還元機能の改善のための触媒改良をおこない、排ガス環境下でのエージング後においても高い浄化性能を維持する高耐久型リーン NO_x 触媒を開発した。

ABSTRACT

The exhaust gas temperatures of diesel engines have been falling gradually due to engine efficiency improvement and body weight reduction. Thus, an NO_x aftertreatment system that has high NO_x conversion at lower temperature is required for these engines. To meet demand, the development of a new Lean NO_x Catalyst with a new De-NO_x mechanism has been carried out. However, it has recently been found that Lean NO_x Catalyst has a durability issue during aging in an actual exhaust gas environment. The deterioration mechanism of Lean NO_x Catalyst was clarified and durability enhancement of the material was conducted. As a result of an analysis using a combination of surface analysis and ab-initio calculation, it was found that the sulfur in exhaust gas was irreversibly adsorbed onto platinum in the form of sulfate, which reduced catalyst activity. A new Lean NO_x Catalyst that has high durability even after aging with exhaust gas was developed by improving NO₂ adsorption activity and NO₂ reduction activity, which had been degraded by sulfur poisoning.

1. まえがき

ディーゼルエンジンは熱効率が高いことから低燃費エンジンとして有望であるが、アメリカや日本、欧州などの厳しい排ガス規制をクリアするため、高性能かつ高効率な排ガス後処理技術が求められている。特にディーゼルエンジンの排ガスは酸素過剰雰囲気（リーン）であることから排ガス中の窒素酸化物（NO_x）の浄化が課題であり、さまざまな NO_x 浄化システムが提案されている（Fig. 1）。

その一つに尿素添加 NO_x 浄化システム（Urea Selective Catalytic Reduction: Urea-SCR）がある^{(1), (2)}。Urea-SCR は尿素水を用いて NH₃ 選択還元反応で NO_x を浄化するシステムであり、高い NO_x 浄化性能が得られる。しかし、尿

素用タンクやインジェクタなどの追加デバイスによるシステムコストの増加、重量増加などの課題や、尿素水から NH₃ への変換のために排ガス温度が低いときには排ガスの昇温が必要であり、燃費ロスの課題もある。

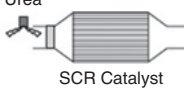
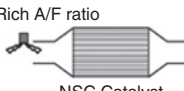
	System configuration	Equation
Urea-SCR	 SCR Catalyst	$4\text{NO} + 4\text{NH}_3 \rightarrow 4\text{N}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$ $6\text{NO}_2 + 8\text{NH}_3 \rightarrow 7\text{N}_2 + 12\text{H}_2\text{O}$ $4\text{NH}_3 + 2\text{NO} + 2\text{NO}_2 \rightarrow 4\text{N}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$
NSC	 NSC Catalyst	Lean: $\text{NO} + 1/2\text{O}_2 + \text{MO} \rightarrow \text{MNO}_3$ Rich: $\text{MNO}_3 + 2\text{CO} \rightarrow \text{MO} + 2\text{CO}_2 + 1/2\text{N}_2$ $\text{MNO}_3 + 2\text{H}_2 \rightarrow \text{MO} + 2\text{H}_2\text{O} + 1/2\text{N}_2$ $9/2\text{MNO}_3 + \text{C}_3\text{H}_8 \rightarrow 3\text{CO}_2 + 3\text{H}_2\text{O} + 9/2\text{MO} + 9/4\text{N}_2$

Fig. 1 Conventional NO_x reduction technology

* 四輪 R&D センター

** エヌ・イー ケムキャット株式会社

これに対して、追加デバイスがなく低コストでシンプルなシステムである NOx 吸蔵触媒 (NOx Storage Catalyst: NSC) システムが開発されている⁽³⁾⁻⁽⁷⁾。NSC システムは排ガス中の NOx を触媒内のアルカリ土類金属などの材料に吸蔵させ、リッチ制御により一酸化炭素 (CO) や炭化水素 (HC) などの還元剤となる排ガスを触媒に供給 (リッチスパイク) することで、吸蔵されている NOx を還元し浄化する。しかしながら、NOx 吸蔵材として主に用いられているアルカリ土類金属は、NOx を吸蔵するために約 300℃ 以上の温度が必要であり、低温から高い浄化性能を得るには多くの貴金属を使用する必要があり、コストが増加するという課題がある。

近年、エンジン効率の向上や車体軽量化により低燃費化が進むにつれて、排ガス温度が低下してきており、上述のように Urea-SCR システムと NSC システムはいずれも低温域の浄化性能に課題を有していることから、低温から高い浄化性能を有し、かつ低コストの NOx 浄化システムが求められている。

これに対して、Honda は新しい浄化コンセプトを用いた低温から高い浄化性能を発揮するリーノ NOx 触媒 (Lean NOx Catalyst: LNC) システムを提案している⁽⁸⁾。この LNC システムは NSC システムと同様に追加デバイスの必要がなく、リッチスパイクを用いて NOx を浄化するシステムであるが、NSC は低温での NOx 浄化に課題があるのに対して、LNC は新しい NOx 浄化メカニズムにより低温での浄化性能を大きく高めている。

一方、自動車触媒は過酷な排ガス環境下における高い耐久性が要求され、LNC においても耐久性が重要な課題である。LNC の耐久性を確認する中で、排ガス環境下でのエージングにおいて NOx 浄化性能の低下が明らかになった。そこで、本報告では LNC の劣化原因の解明と対策手法並びにその改善効果について述べる。

2. LNC の特徴と耐久性の課題

2.1. LNC の特徴

LNC は新しい NOx 浄化メカニズムにより低温から高い NOx 浄化性能を発揮する触媒であり、既報でその NOx

浄化メカニズムと浄化特性について報告した⁽⁸⁾。LNC の NOx 浄化メカニズムを Fig. 2 に示す。LNC は NOx 吸着還元機能を担う NOx 吸着材層と、NH₃ 選択還元機能を担うゼオライト層の二層で構成され、この二層が各々の機能を連携させることで効率的に NOx を浄化するメカニズムが特徴である。まずリーノ時に NOx 吸着材層中の Pt で NO を NO₂ に酸化し、その NO₂ を NOx 吸着材に吸着させる。その後、リッチ時に NOx 吸着材から脱離した NO₂ が Pt 上で N₂ または NH₃ に変換され、N₂ はそのまま排出されるが NH₃ はゼオライト層で再び吸着され、その後のリーノ時にゼオライト層の NH₃ で NOx を浄化する。また、NOx 吸着材に低温から高い NOx 吸着能を有するセリウム (Ce) 系材料を用いているのに加え、低い温度でも NH₃ 選択還元が可能なゼオライトを使用している。このような NOx 浄化メカニズムにより、LNC は低温から高い浄化性能を発揮することが可能な触媒である。従来の NSC と LNC の浄化特性の比較を Fig. 3 に示す⁽⁸⁾。また、このときの試験条件を Table 1 に示す。その結果、NSC は浄化性能のピークが 400℃ であるのに対し、LNC は 250℃ であり低温で高い浄化性能を有している。このように LNC は新しい NOx 浄化メカニズムにより低温から高い NOx 浄化性能を発揮する触媒システムである。

2.2. 実車エミッション試験における NOx 排出挙動

LNC を用いた排ガス浄化システムの構成を Fig. 4 に示す。本システムはエンジン直下位置に酸化触媒 (Diesel

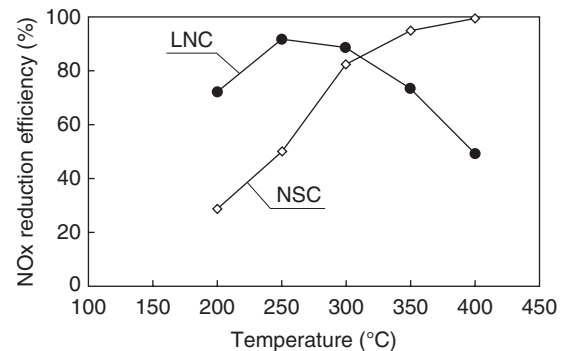


Fig. 3 Comparison of LNC and NSC in NOx reduction efficiency

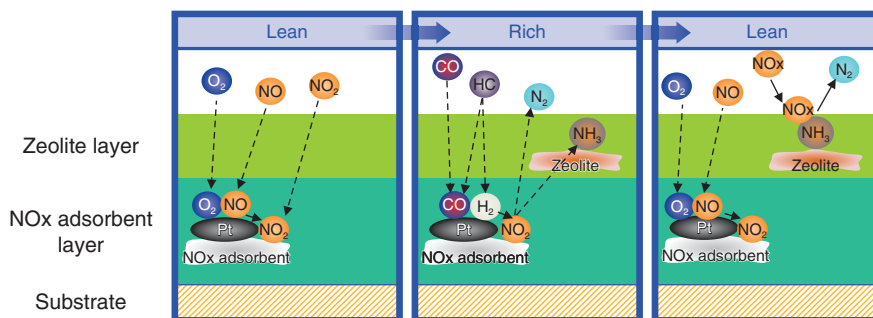


Fig. 2 Reaction mechanism of LNC

Table 1 Model gas composition for LNC and NSC

	Lean (55 sec)	Rich (5 sec)
O ₂ (%)	6	0
CO (%)	0.09	2
C ₃ H ₆ (ppmC)	500	
CO ₂ (%)	6	
NO (ppm)	110	
H ₂ O (%)	7	
N ₂ (%)	Balance	
GHSV (h ⁻¹)	50000	

Oxidation Catalyst:DOC)と触媒付ディーゼルパティキュレートフィルタ (Catalyzed Diesel Particulate Filter: cDPF)を配置し、床下位置にLNCを配置した。DOCによりCO, HCを浄化し、cDPFによりすすを除去、そしてLNCによりNO_xを浄化するシステムである。本排ガス浄化システムの耐久性を検証するため、エージング後の触媒を用いて、USのエミッション試験モードの一つであるFTP-75による実車エミッション試験をおこなった。エージングは本システムをエンジン排ガス流通下に配置し、LNC温度が一定となるようにコントロールしておこなうエンジン排ガスエージング(エンジンエージング)と、熱のみの影響を検証するため電気炉を用いておこなうエージング(サーマルエージング)の二通りの手法を用いた。二つの手法でエージング温度と時間はどちらも120000 mile走行に相当する熱負荷とし、またサーマルエージングのガス条件は酸素10%、水6%とした。

サーマルエージング触媒とエンジンエージング触媒のFTP-75モードにおけるNO_x排出挙動の比較をFig. 5に示す。サーマルエージング触媒は始動から約200秒までの暖機時以降はほぼNO_x排出が見られないのに対し、エンジ

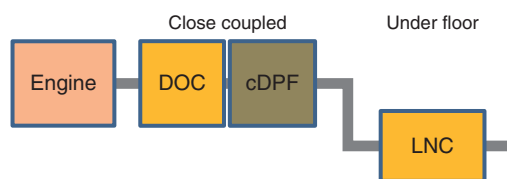


Fig. 4 Exhaust aftertreatment system using LNC
Engine: 2.2 L direct-injection diesel, close coupled catalysts: DOC 1.0 L, CSF 2.2 L, under floor catalyst: LNC 2.0 L

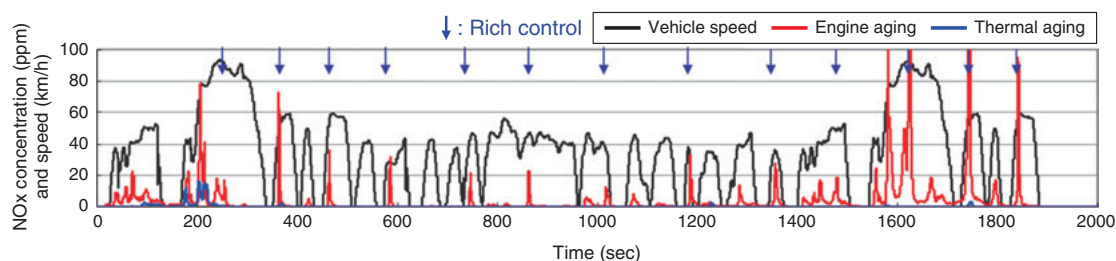


Fig. 5 Comparison of NO_x emission profile between thermal aging and engine aging in FTP-75 mode

Table 2 Model gas composition

	Lean (55 sec)	Rich (5 sec)
O ₂ (%)	6	0
C ₃ H ₆ (ppmC)	0	4000
CO (%)	0	1
CO ₂ (%)	10	
NO (ppm)	200	
H ₂ O (%)	7	
N ₂ (%)	Balance	
GHSV (h ⁻¹)	75000	

ンエージング触媒はモード全体にわたりNO_x排出が見られた。特に、Fig. 5中の矢印で示されるリッチスパイク時にNO_x排出が多い。これはリッチスパイク時に吸着材から脱離したNO_xが十分に還元されずに排出したものと推察され、リッチ中のNO_x浄化性能が低下していると考えられる。また、エンジンエージング触媒は1600秒付近の高加速によるガス流速の高い領域においてもNO_x排出がみられ、リーン中のNO_x浄化性能も低下していると考えられる。

2.3. モデルガス試験による素反応特性

次に、触媒の劣化特性を明確にするため、エミッション試験に用いたLNCをテストピースに加工し、HORIBA製モデルガス試験装置を用いて浄化性能試験をおこなった。モデルガス試験はディーゼル排ガスを模擬した代表的なガス組成とし、リーンとリッチを5サイクル繰り返し、その平均をNO_x浄化率とした。モデルガス試験結果をFig. 6に示す。また、Table 2にこのときの試験条件を示す。新品

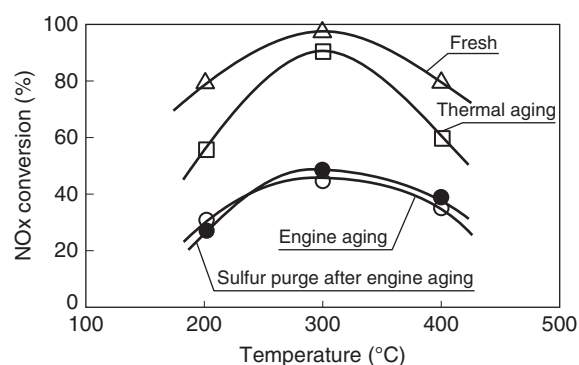


Fig. 6 Comparison of NO_x conversion between thermal aging and engine aging in model gas test

Table 3 Performance in elementary reactions

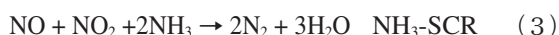
	Thermal aging (%)	Engine aging (%)	Material	Model gas composition
(1) NO oxidation	52	68	Pt	NO 500 ppm, O ₂ 0.5 %, N ₂ balance
(2) NO ₂ adsorption	75	45	Pt, Ce-compound	NO ₂ 500 ppm, O ₂ 0.5 %, N ₂ balance
(3) NH ₃ -SCR	71	69	Zeolite	NO 100 ppm, NO ₂ 100 ppm, NH ₃ 200 ppm, O ₂ 6%, H ₂ O 7%, N ₂ balance
(4) NO ₂ reduction	98	32	Pt	NO ₂ 500 ppm, CO 1000 ppm, N ₂ balance

は各温度で 80% 以上の高い浄化率が得られているが、エンジン触媒はどちらも浄化率が低下している。特に、エンジンエンジン触媒の浄化率は低く、30% から 50% まで減少しており劣化が著しい。また、NO_x を吸着または吸蔵するタイプの触媒は排ガス中の硫黄が蓄積することにより NO_x 浄化性能が低下することがわかっていることから、エンジンエンジン触媒に対してリッチガスを 650℃ で 10 分間流通させて硫黄の脱離処理をおこない、低下した NO_x 浄化性能が回復するかどうかを調べた。その結果、浄化性能はほぼ変化がなかったことから、一般的な硫黄蓄積による劣化ではないと考えられる。

これらのことから、LNC はエンジンエンジンにより熱以外の何らかの不可逆的な要因により、リーンおよびリッチの両方の NO_x 浄化性能の低下が起きることがわかった。

LNC はいくつかの素反応の組み合わせで NO_x 浄化反応が進行する触媒であることから、エンジンエンジン触媒とサーマルエンジン触媒について、以下の式 (1) から式 (4) の素反応に対応するモデルガス試験をおこない、どの素反応の性能が低下しているか把握し、それがどの材料に起因するかを調べた。確認結果を Table 3 に示す。その結果、式 (1) の NO 酸化反応と、式 (3) の NH₃-SCR 反応は二つのエンジンにおいて、ほぼ同等の性能であったが、式 (2) の NO₂ 吸着反応と式 (4) の NO₂ 還元反応はエンジンエンジン触媒において性能低下がみられた。これらの性能に関係する材料として、白金 (Pt) またはセリウム (Ce) 系材料、あるいは両方の機能低下が示唆された。

Lean phase



Rich phase



3. LNC の劣化原因の解明

LNC の劣化原因の解明のために、機能低下が示唆された Pt と Ce 系材料に対して、表面分析による形態解析と理論的裏付けを得るための第一原理計算を用いた形態シミュレーションをおこなった。

3.1. 表面分析による劣化形態解明

初めに Pt と NO_x 吸着材である Ce 系材料の熱劣化の影響を調べた。Pt や Ce 系材料は、熱によって粒子凝集が進行し性能が低下するため、凝集の指標である結晶子径の測定を X 線回折 (X-Ray Diffraction: XRD) によりおこなった。その結果、結晶子径は Pt と Ce 系材料のどちらも、サーマルエンジン触媒とエンジンエンジン触媒でほぼ同等の値となり、エンジンの違いによる熱劣化の差異は小さいことがわかった。次に、排ガス中の成分である硫黄 (S) とリン (P) などの蓄積による被毒劣化の影響を調べた。エンジンエンジン触媒への S と P の蓄積量を定量化するため、誘導結合プラズマ発光分析 (Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry: ICP-AES) をおこなった。その結果、S は 0.02%, P は 0.02% であり、燃料とエンジンオイル消費量から換算すると数十 km 走行での通過量に相当し、極微量の蓄積量であることがわかった。しかし、微量の被毒成分がある特定の部位に付着している可能性があるため、Pt と Ce 系材料の被毒成分の状態について調査をおこなった。エンジンエンジン触媒について、まず走査型透過電子顕微鏡 (Scanning Transmission Electron Microscopy: STEM) を用いた観察により Pt 粒子と Ce 系材料粒子を特定し、それぞれの粒子に対してエネルギー分散型 X 線分析 (Energy Dispersive X-ray Spectrometry: EDS) による元素分析をおこない、被毒物質が Pt と Ce 系材料のどの部分に存在するかを調査した。EDS の結果を Fig. 7 に示す。Fig. 7(a) の Pt 粒子に対する EDS スペクトルにおいて、2.3 keV 付近に S のピークが検出されたことより、Pt と S は共存することがわかった。しかし Fig. 7(b) の Ce 系材料粒子からは S が検出されず、Ce 系材料と S は共存しないことがわかった。このことか

ら、S は Pt 粒子に対して被毒していることが明らかになり、S が Pt 粒子表面に選択的に吸着していると推測した。

S が Pt 粒子表面に選択的に吸着している場合、Pt 粒子の活性表面積の低下が予想される。そこで、金属の活性表面積を測定する手法であるフーリエ変換型赤外分光法 (Fourier Transform Infrared Spectroscopy: FT-IR) を用いた CO 吸着量の測定をおこない、劣化による活性表面積の変化を調べた。その結果を Fig. 8 に示す。2090 cm^{-1} 付近のピークが Pt-CO の吸着ピークに同定される。この結果、サーマルエージング触媒に対して、エンジンエージング触

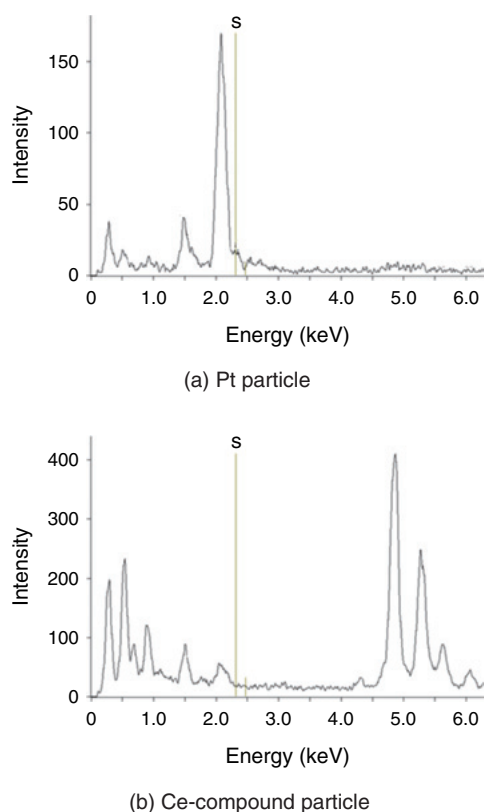


Fig. 7 EDS patterns of catalysts under engine aging

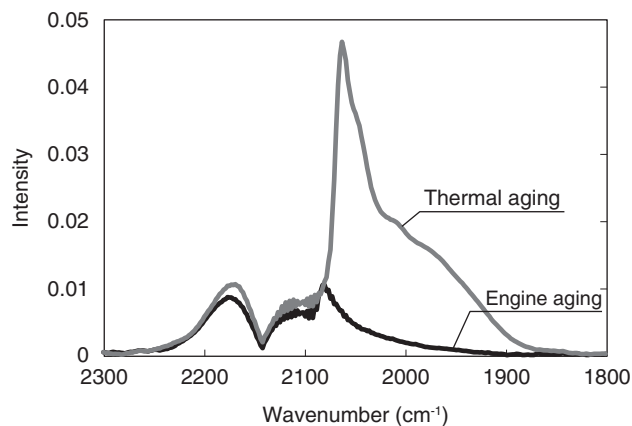


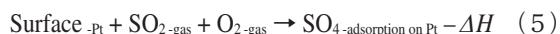
Fig. 8 FT-IR spectra of CO adsorption
Temperature: 300°C, gas condition: CO
1000 ppm, He balance

媒は Pt-CO の吸着量が小さくなっており、Pt 粒子の活性表面積が減少していることがわかった。前述の XRD の分析結果より Pt 結晶子径には、二つのエージング間で差がないことから Pt 粒子の凝集は同程度と考えられるため、この活性表面積の減少は S が Pt 粒子表面に吸着していることによるものと考えられる。

次に、Pt 粒子表面上に S がどのような形態で被覆しているかを調べるため、表面化学種の構造解析を X 線吸収端近傍構造 (X-ray Absorption Near Edge Structure: XANES) 解析によりおこなった。あらかじめ構造のわかっている硫化カルシウム (CaS)、硫酸カルシウム (CaSO₄) との比較からエンジンエージング触媒に含まれる S の構造解析をおこなった。S K-edge XANES スペクトルを Fig. 9 に示すが、エンジンエージング触媒は 2.48 keV 付近にピークトップを持ち、CaSO₄ のスペクトルと類似していることから、Pt 粒子表面上の S は硫酸根 (SO₄) として吸着していると推察された。

3.2. 第一原理計算による劣化形態検証

前節の S の吸着形態について理論的に検証するために、Pt と S の結合に関して第一原理計算をおこなった。Pt 原子 12 個からなる Pt の 111 面を切り出した表面上に、硫黄酸化物 (SO_x) 一分子 (S, SO, SO₂, SO₃, SO₄, SO₅) を吸着させたモデルを作成し、式 (5) のような反応式 (例として SO₂ の場合) における吸着エンタルピーを安定性の指標として検討をおこなった。



この計算によって求められる吸着エンタルピー (ΔH) が小さいほど Pt への SO_x の吸着状態が安定であると考えられる。その計算結果を Fig. 10 に示す。またその際の計算条件を Table 4 に示す。S に対する酸素原子 (O) の数が増えていくと吸着エンタルピーは小さくなり SO₄ で極小となっ

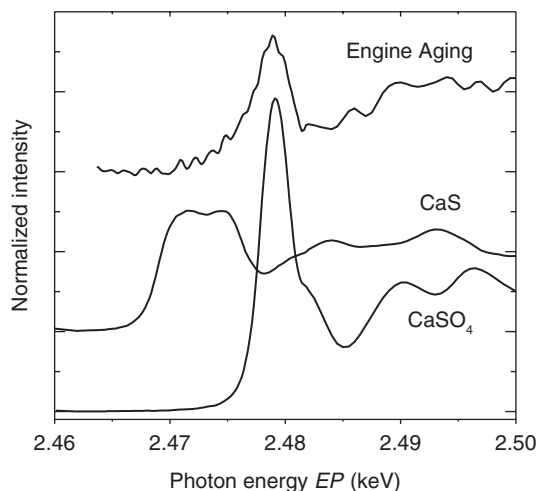
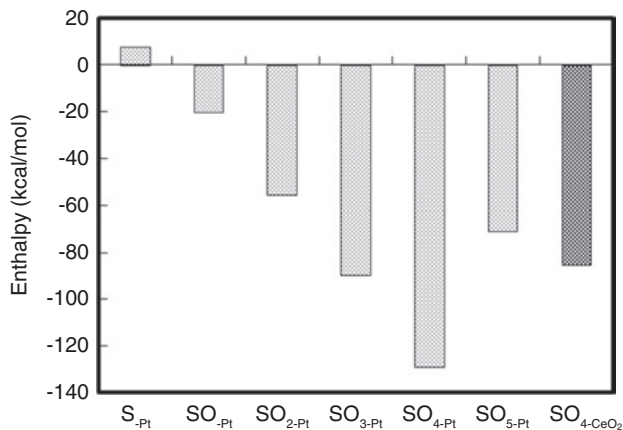
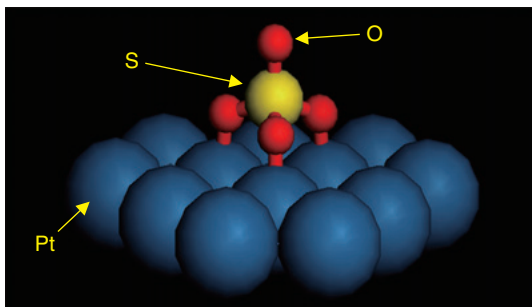


Fig. 9 XANES spectra of various samples

Table 4 Condition for ab-initio calculation

Item	Contents
Program	D-Mol3 ⁽⁹⁾
Functional	VWN (LDA) ^{(10), (11)}
Basic function	DND basis set
Inner core calculation	ECP (Effective core potential)
Model	Pt (111) surface with periodic boundary condition

た後 SO₅ では再び増加した. このことから Pt への S の被毒は SO₄ の形態が最も安定しているものと推察された. また, 比較として CeO₂ 上への SO₄ の吸着エンタルピーも示しているが, CeO₂ よりも Pt への吸着エンタルピーの方が小さく, SO₄ は CeO₂ より Pt のほうに強く吸着することが示唆された. このことから, Fig. 6 において S 脱離処理を実施しても浄化性能に回復がみられなかった要因は, Pt への SO₄ の被毒が強固であるため S が脱離しなかったためであり, Pt の SO₄ による被毒はディーゼルの実用温度域においては不可逆な劣化と考えられる. 第一原理計算により導いた Pt 上の SO₄ の結合状態のイメージ図を Fig. 11 に示す. SO₄ の Pt への被毒は三つの酸素原子が三つの Pt 原子とそれぞれ結合した形態であることから, SO₄ 一分子で Pt 表面の三原子を被毒するため, 少量でも影響度は高いと推察される.


 Fig. 10 Comparison of adsorption energy among various sulfur oxides on Pt and CeO₂

 Fig. 11 Image of SO₄ structure on Pt surface

表面分析および第一原理計算の結果を総合して考えると, S 被毒量としては微量ながら, 活性点である Pt 粒子の表面を SO₄ という強固な吸着形態で被毒することが, エンジンエージングによる LNC の性能低下の要因と考えられる.

4. LNC の劣化対策

4.1. 劣化対策の考え方

LNC はエンジンエージングにより, Pt が SO₄ に被覆されて劣化することが明らかになった. 第一原理計算から Pt 表面への SO₄ の吸着状態は熱力学的に安定性が高いことから, Pt 上の SO₄ 被毒自体を抑制することは困難であると考え, SO₄ 被毒による機能面への影響を小さくするための触媒改良を試みた. 2 章で SO₄ 被毒により機能が低下していた反応は, 式 (2) の NO₂ 吸着反応と式 (4) の NO₂ 還元反応であったことから, これらの機能に対する SO₄ 被毒の影響を軽減する触媒改良を検討した. Fig. 12 に劣化した状態の LNC における反応メカニズムを示す. まずリーン中の NOx 吸着反応において, 被毒を受けた Pt でも式 (1) の NO から NO₂ への反応は進行するが, 吸着した SO₄ 分子が障害物となり Pt 表面上の NO₂ の移動が阻害され, 式 (2) の Ce 系材料への吸着反応の速度が低下すると考えられる. また, NO₂ 還元反応においても同じく Pt 上の SO₄ 分子の存在により, 脱離した NO₂ や CO などの還元性ガスが Pt の表面に吸着しにくくなっているため, 式 (4) の NO₂ と CO の還元反応が進行せずに NO₂ が排出されると推察される. そこで, 高耐久型 LNC として Fig. 13 のような構成を検討した.

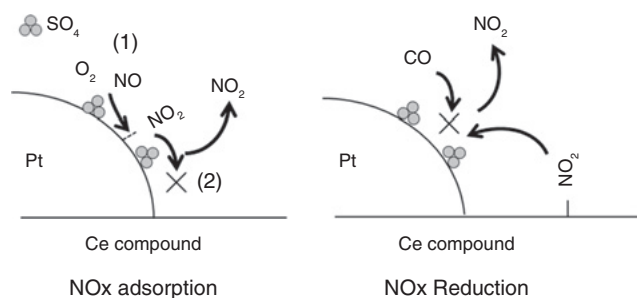


Fig. 12 Reaction mechanism of initial LNC

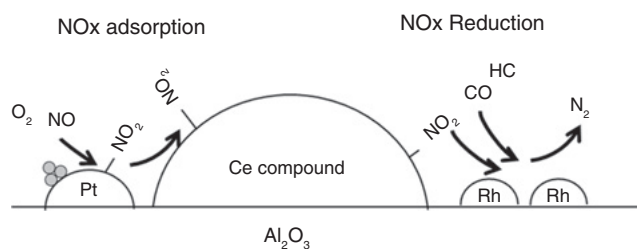


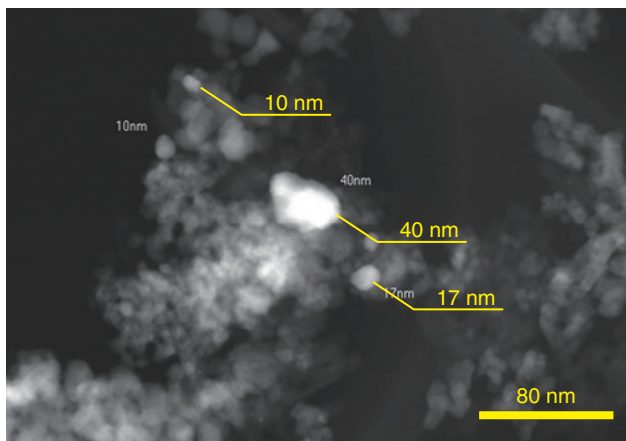
Fig. 13 Reaction mechanism of improved LNC

まず NO_2 吸着過程においては、 NO_2 を Pt 表面から Ce 系材料へいかにスムーズに移動させるかが重要である。Pt 粒子が粗大である場合、Pt 粒子と Ce 系材料の界面から離れた活性点で生成した NO_2 は、Ce 系材料までの移動距離が長く、 SO_4 により移動が阻害される可能性が高くなる。そのため、Pt 含有量の増加のように単純に Pt 活性表面積を増加させる手法でなく、生成した NO_2 の移動距離を短くするために Pt 粒子を微粒子化させることが改良のポイントと考えられる。Pt を担持する担体として NO_x 吸着材である Ce 系材料を用いていたが、高表面積アルミナ (Al_2O_3) を追加し、かつその使用量の割合を高めることで Pt の微粒子化を試みた。この微粒子化効果を STEM で確認した結果を Fig. 14 に示す。この結果、Pt 平均粒子径は Al_2O_3 未使用時の 22 nm に対し、 Al_2O_3 を使用したときは 8 nm に微粒子化することができた。

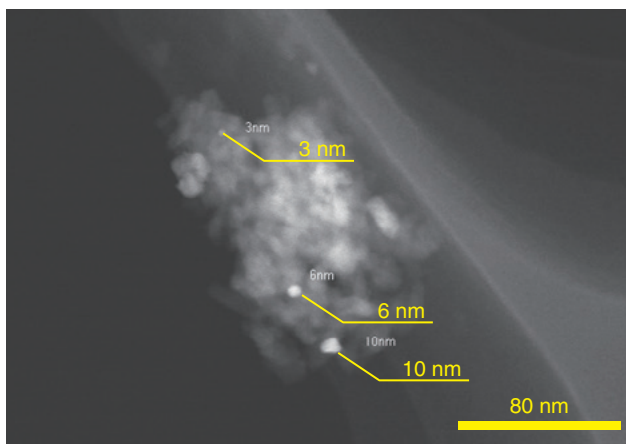
次に、還元過程においては Ce 系材料から脱離した NO_2 を貴金属上で即時に反応させることが重要である。そこで、還元反応を促進させるために、貴金属の中でも凝集し

にくく微粒子状態を維持しやすいロジウム (Rh) に着目した。微粒子状態の Rh は Ce 系材料との界面が増加するため、Ce 系材料から脱離した NO_2 がスムーズに Rh 上へ移動して反応することが可能と推察される。Fig. 15 にエンジンエージング後の Rh/ Al_2O_3 の STEM 像を示す。この結果、Rh はおよそ 2 nm の微粒子状態を維持していることがわかり、 NO_x に対する高い還元性能が期待できる。

この効果を確認するため、 NO_2 と CO のモデルガスによる昇温試験をおこない、活性温度を調査した。この結果を Fig. 16 に示す。Pt のみの LNC のサーマルエージング後は 250℃ 程度から高い浄化性能を発揮したが、エンジンエージング後では 400℃ 程度で浄化性能が発現しており、大きく活性が低下していることがわかる。しかし、Rh を添加した LNC ではサーマルエージング後とエンジンエージング後でほとんど差がなく、低温から高い活性が得られている。このように Rh の添加により、エンジンエージング後の還元性能の低下を防ぐことができた。



(a) Without Al_2O_3



(b) With Al_2O_3

Fig. 14 STEM images of initial LNC and improved LNC under engine aging

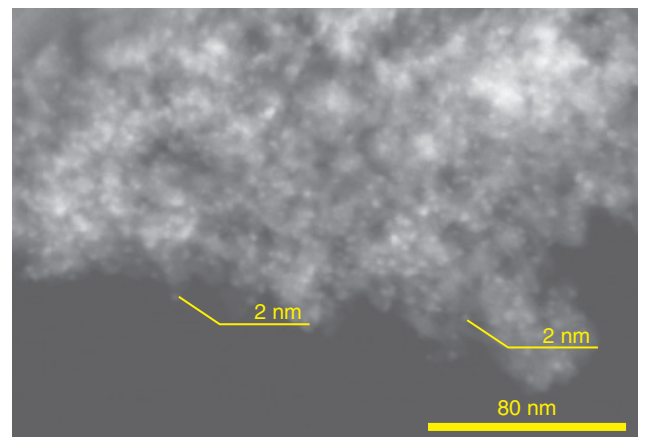


Fig. 15 STEM images of Rh/ Al_2O_3 under engine aging

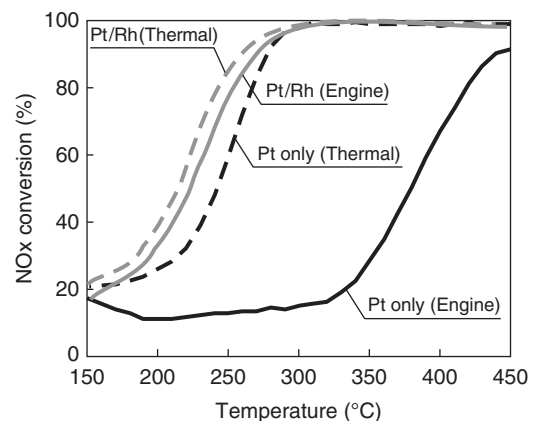


Fig. 16 Effect of Rh for improving durability under engine aging
 NO_2 reduction: NO_2 500 ppm, CO 1000 ppm, N_2 balance, GHSV 50000 h^{-1}

4.2. 高耐久型 LNC の NOx 浄化性能

改良効果を調べるため、改良前の LNC と高耐久型 LNC のエンジンエージング後の性能比較をおこなった。また、改良前の LNC のサーマルエージング後の性能も同時に比較した。この結果を Fig. 17 に示す。試験は Table 2 の条件でおこなった。高耐久型 LNC はエンジンエージング後においても、改良前の LNC のサーマルエージング後とほぼ同等の性能を発揮しており、SO₄ 被毒による影響を抑制できていることが確認できた。

また、エミッションモード走行中の NOx 排出挙動に対する触媒改良の効果を調査した。改良前後の LNC について 120000 mile 相当のエンジンエージング処理をおこなった後、FTP-75 によるエミッション試験をおこない NOx 排出挙動を調べた。この結果を Fig. 18 に示す。改良前の LNC のエンジンエージング触媒では、前述の通りリッチ時とリーン時のいずれも NOx 排出がみられているが、高耐久型 LNC ではリッチスパイク時の排出をほぼ抑制することができ、リーンの高排ガス流量時の性能も改善することができた。

このように、エミッション試験においても、LNC の課題であった排ガス環境下でのエージングに対する耐久性向上のための触媒改良が効果的であることが確認された。

5. まとめ

ディーゼル車の排ガス温度低下に対応可能な新しい NOx 浄化メカニズムを有する Honda オリジナルの LNC システム開発において、LNC の課題であった排ガス環境下でのエージングによる NOx 浄化性能低下について、劣化メカニズムの解明とそれに基づく材料改良をおこない、高耐久型 LNC を開発した。その中で以下の知見を得た。

- (1) 排ガス環境下でのエージングにより LNC の NOx 浄化性能が低下する要因の解明をおこなった結果、排ガス中の S が Pt 粒子表面上に SO₄ として不可逆吸着し、NO₂ 吸着性能と NO₂ 還元性能が阻害されるため、NOx 浄化性能が低下するという劣化メカニズムを明らかにした。
- (2) 劣化メカニズムに基づいて材料改良をおこなった結果、Pt の微粒子化による NO₂ の Ce 系材料への移動促進と Rh 添加による還元機能向上を組み合わせにより、NOx 浄化性能低下を抑制できる高耐久型 LNC 触媒を開発した。
- (3) 高耐久型 LNC 触媒を用いた NOx 浄化システムにおいて、課題であったリッチとリーン時の NOx 排出を抑制することができ、エミッション性能が向上していることを確認できた。

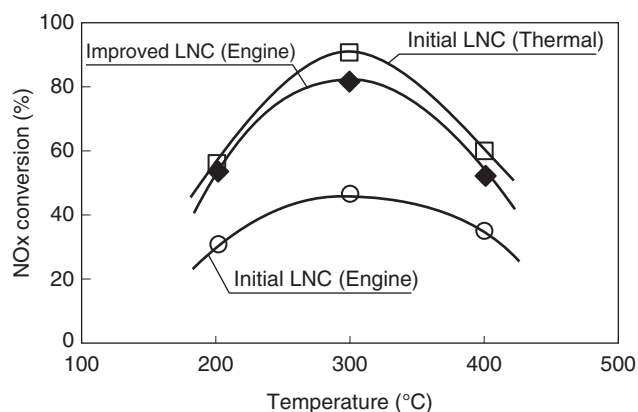


Fig. 17 Comparison of initial LNC and improved LNC in model gas test

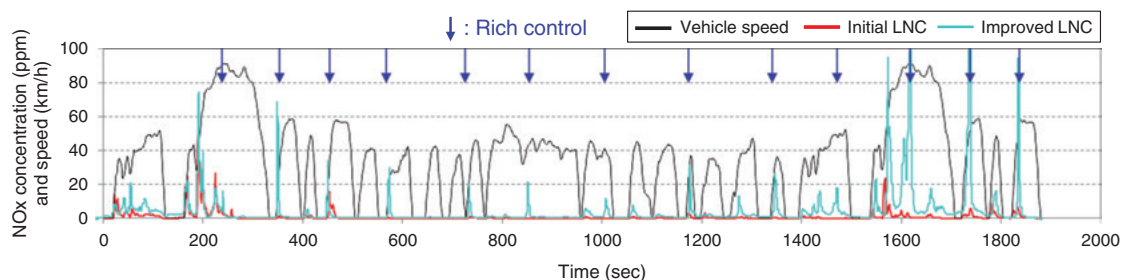


Fig. 18 Comparison of NOx emission profile in FTP-75 mode between initial LNC and improved LNC under engine aging

参考文献

- (1) Guo, G., Dobson, D., Warner, J., Ruona, W., et al.: Advanced Urea SCR System Study with a Light Duty Diesel Vehicle, SAE Technical Paper, 2012-01-0371(2012)
- (2) Moon, S., Choi, B., Lee, H., Hyun, G., et al.: Development of DPF/SCR System for Heavy Duty Diesel Engine, SAE Technical Paper, 2012-01-0369(2012)
- (3) Adouane, D., Dutilleul, H., Guibert, P., Teixeira, M. et al.: Impact of Thermal and Engine Ageing on a Fully Formulated Lean NOx Trap, SAE Technical Paper, 2012-01-1746(2012)
- (4) Kim, K., Cho, S.: The Emission Development for Lean NOx Trap System to Meet Tier2Bin5, SAE Technical Paper, 2010-01-0566(2010)
- (5) Chen, X., Schwank, J.: Investigation on NOx Storage Characteristics and Aging Influence of Lean NOx Trap Model Catalyst BaO-Pt/Al₂O₃, SAE Technical Paper, 2010-01-0364(2010)
- (6) Kouakou, A., Fresnet, F., Granger, P., and Dainhaut, F.: New Insight in Ammonia Formation During the Purge of a Lean NOx Trap in Vehicles Running Conditions, SAE Technical Paper, 2009-01-2710(2009)
- (7) AL-Harbi, M., Epling, W., Yezerets, A., Currier, N. et al.: The Effects of Thermal Degradation on the Performance of a NOx Storage/Reduction Catalyst, SAE Technical Paper, 2009-01-0631(2009)
- (8) Morita, T., Suzuki, N., Satoh, N., Wada, K., Ohno, H.: Study on Low NOx Emission Control Using Newly Developed Lean NOx Catalyst for Diesel Engines, SAE Technical Paper, 2007-01-0239(2007)
- (9) Delley, B.: An All-Electron Numerical Method for Solving the Local Density Functional for Polyatomic Molecules, J. Chem. Phys., 92, 508(1990)
- (10) Delley, B.: From molecules to solids with the DMol3 approach, J. Chem. Phys., 113, 7756(2000)
- (11) Vosko, S. H., Wilk, L., Nusair, M.: Accurate spin-dependent electron liquid correlation energies for local spin density calculations: a critical analysis, Can. J. Phys., 58, 1200(1980)

■ 著 者 ■



松尾 雄一



石丸 真也



橋本 雅識



遠藤 哲雄



松 蘭 義 明



永 田 誠

ULEV50 規制対応のための 鉄イオン交換ゼオライト触媒における NO_x 浄化挙動の解明

Study of NO_x Reduction Behavior on
Iron Ion-exchanged Zeolite Catalyst for ULEV50

迫 田 昌 史*
Masafumi SAKOTA

佐 藤 尚 宏*
Naohiro SATOH

松 永 英 樹*
Hideki MATSUNAGA

要 旨

ABSTRACT

近年のさらなるエミッション規制強化に対し、ディーゼルエンジンから排出される NO_x の浄化技術として尿素選択還元型触媒システムが注目されている。NO_x と NH₃ の反応は NO_x に対する NO₂ の比率が 50% のとき、すなわち NO と NO₂ が等量のときに高い浄化性能を示す (Fast-SCR) ことが知られている。一方、鉄イオン交換ゼオライト (Fe-Zeolite) 触媒の動的 NO_x 浄化挙動を詳細に解析した結果、NO₂ 比率を意図的に変動させることにより高い浄化性能を示すことを見出した。

上述の挙動は Fe-Zeolite 触媒に NO₂ が吸着することで NO₂ 比率変動に対する緩衝機能が発現し、触媒に流入するガスの NO₂ 比率を常に 50% に維持しなくても、触媒の反応活性点近傍では実質の NO₂ 比率が 50% となるためであると考えられる。この NO₂ 比率を意図的に変動させることを実車制御に応用することで、LEV-Ⅲ ULEV50 規制をクリアすることが可能となった。

In response to further strengthening of emission regulations in recent years, the Urea Selective Catalytic Reduction system is gaining attention as a technology for reducing the NO_x emitted from diesel engines. The reaction between NO_x and NH₃ is known to exhibit high reduction performance (Fast-SCR) when the ratio of NO₂ to NO_x is 50%; that is to say, when the NO and NO₂ quantities are equal. On the other hand, the dynamic NO_x reduction behavior of an iron ion-exchanged zeolite (Fe-Zeolite) catalyst was analyzed in detail, and the results showed that high reduction performance can be obtained by intentionally varying the NO₂ ratio.

The behavior mentioned above is thought to occur because NO₂ adsorbs to the Fe-Zeolite catalyst and manifests a buffer function with respect to NO₂ ratio variation, so the effective NO₂ ratio near the catalyst reaction active sites is 50% even when the NO₂ ratio of the feed gas to the catalyst is not constantly maintained at 50%. Application of this intentional variation of the NO₂ ratio to vehicle control enabled clearance of the LEV-III ULEV50 standard.

1. まえがき

近年、地球温暖化の原因と言われている二酸化炭素 (CO₂) の排出を削減する動きが加速している。さらに、米国カリフォルニア州の LEV-Ⅲ 規制、欧州の Euro6 規制などより厳しい排出ガス規制が施行されることが決定している。加えて、呼吸器官に悪影響を与え、酸性雨や

*四輪 R&D センター

光化学スモッグの原因物質になると言われる二酸化窒素 (NO₂) の規制も始まりつつある。また欧州の排出ガス規制では、より広範囲な走行条件に適応できる排出ガス浄化技術が求められており、主に低負荷走行である従来の新欧州ドライビングサイクル (New European Driving Cycle: NEDC) モードに対して、一般的なドライバの運転に相当する高負荷走行を追加した新しい走行モードが欧州当局

において提案、検討されている。

排出ガスの浄化技術として、ストイキ空燃比制御が主流のガソリンエンジンでは三元触媒 (Three Way Catalyst: TWC) システムが広く用いられている。一方、リーン空燃比制御を用いているディーゼルエンジンにおいては、TWC は排出ガス浄化技術として有効ではない。リーン空燃比、つまり酸素過剰雰囲気下における排出ガス浄化手法として、一酸化炭素 (CO) と炭化水素 (HC) に関しては酸化触媒 (Diesel Oxidation Catalyst: DOC) による酸化浄化が可能である。しかし、窒素酸化物 (NO_x) に関しては還元による浄化が必要であり、リーン空燃比雰囲気下では反応を進行させることが難しく、TWC とは異なる排出ガス浄化技術が必要となる。リーン空燃比雰囲気下における NO_x 浄化技術として一般的に知られているのが、NO_x をリーン時に貯蔵しリッチスパイク (燃料噴射量増による空燃比変動) で還元する NO_x 吸蔵還元型触媒 (NO_x Storage Catalyst: NSC) システムと、排出ガス中に尿素 (NH₂CONH₂: Urea) 水を噴射し生成したアンモニア (NH₃) で NO_x を還元する尿素選択還元型触媒 (Urea Selective Catalytic Reduction: Urea-SCR) システムである。NSC は後処理システムに大きな変更を必要としない反面、高濃度 NO_x に対して十分な NO_x 浄化性能を発揮するためには触媒の大容量化や貴金属の増量、NO_x 還元浄化のための最適なリッチスパイク制御等が必要であり技術難度が高く高価な貴金属を多量に使用する後処理システムとなってしまう。一方、Urea-SCR システムはその化学反応特性から高濃度 NO_x 時においても高い NO_x 浄化性能が期待でき、厳しいエミッション規制に対し達成が困難な NO_x 排出量が多い車種に対する有望な技術として研究開発が進められてきた。

著者ら⁽¹⁾は高い NO_x 浄化性能が要求されるディーゼルエンジンの低エミッション技術として、ストイキ燃焼と Urea-SCR システムの組み合わせを提案している。その研究において、厳しいエミッション規制をクリアするためには、走行モード初期の高い NO_x 浄化が最も重要であることを示している。走行モードの初期から NO_x を浄化するためには、早期に触媒システム全体を活性温度まで昇温すること、および NO_x 浄化に適した NO₂ の生成が必要である。早期昇温手法として、エンジンの燃料噴射を制御して多量の CO と HC を排出させ、エンジン直後の DOC と触媒付ディーゼルパティキュレートフィルタ (Catalyzed Diesel Particulate Filter: cDPF) で酸化し、その反応熱で昇温する方法がある⁽¹⁾。この場合、DOC と cDPF の酸化性能を強化する必要があるが、十分に暖機されている走行モードの中盤においては逆に酸化性能が強すぎて NO₂ を過剰に生成し、Urea-SCR システムの NO_x 浄化性能を低下させてしまうという課題もある。

本研究では上述の相反する課題を両立させるため、触

媒上での NO₂ 吸着に基づく NO₂ 比率 (NO₂/NO_x で算出される百分率) 緩衝コンセプトを仮定し検証した結果、NO₂ 過剰生成条件でも NO₂ 比率を意図的に変動させることで Urea-SCR システムの高い NO_x 浄化性能を維持できることを見出した。さらに、NO₂ 比率緩衝コンセプトをエンジン制御に適用することで LEV-Ⅲ ULEV50 規制クリアの見通しが得られたので、その内容について報告する。

2. Urea-SCR 触媒の NO_x 浄化特性

2.1. Urea-SCR システム

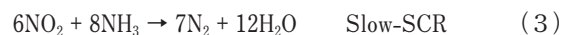
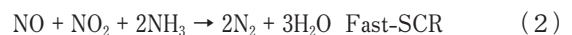
Urea-SCR システムとは、排出ガス中に Urea 水を噴射し加水分解⁽²⁾により NH₃ を生成させ、その NH₃ により NO_x を触媒上で選択的に還元浄化するシステムである。車載用触媒としては、鉄 (Fe) または銅 (Cu) でイオン交換されたゼオライト触媒が主流となっている。Urea-SCR 触媒で高い NO_x 浄化性能を得るためには以下の条件を満たす必要がある。

2.1.1. 排出ガス温度

Urea 水から加水分解により NH₃ を生成するためには排出ガス温度が 180℃ 以上であることが求められる。その温度未満で Urea 水を噴射すると副生成物の生成や排気管内で Urea の析出固化が起これ、Urea 水が NO_x の還元剤として有効に利用されない。しかしながら、Urea-SCR 触媒に用いられるゼオライトは NH₃ 吸着能を有していることから、180℃ に満たない温度条件であっても吸着 NH₃ を用いて NO_x を浄化することが可能である。ただし、NH₃ 吸着量には限りがあるため、高い NO_x 浄化性能を得るためには Urea 水の加水分解温度以上の触媒温度に速やかに到達することが望ましい。

2.1.2. Urea-SCR 触媒入口ガス中の NO₂ 比率

定常状態における NH₃ による NO_x の浄化反応には、以下の三つの反応が知られている⁽³⁾。



上記三つの反応のうち、低温から反応が進み、高い浄化性能 (>95%) が期待できる反応は式 (2) で示した Fast-SCR である⁽³⁾。Urea-SCR システムにおいて高い浄化性能を実現するためには NO₂ 比率を最適な比率 (NO₂ 比率 = 50%) に維持することが必要となる。

Fig. 1 に NO₂ 比率の違いによる反応模式図を示す。Fig. 1(b) で示される排出ガス中の一酸化窒素 (NO) と NO₂ が等量存在する場合は、式 (2) で示した Fast-SCR で NO_x が浄化される。一方、Fig. 1(a) で示される NO が余剰に存在する場合は、NO₂ と等量の NO は Fast-SCR で浄化され

余剰の NO は Standard-SCR で浄化される。Fig. 1(c) で示される NO₂ が余剰に存在する場合、余剰の NO₂ は Slow-SCR で浄化される。

2.2. Fe-Zeolite 触媒の定常 NOx 浄化特性

鉄イオン交換ゼオライト (Fe-Zeolite) 触媒の各 NO₂ 比率に対する NOx 浄化性能を、HORIBA 製モデルガス試験装置を用いて計測した。試験装置の概要を Fig. 2 に示す。水蒸気 (H₂O)、酸素 (O₂)、窒素 (N₂) のガスをマスフローコントローラ (Mass Flow Controller: MFC) で流量制御をおこない所定量混合させヒータを通して所定温度まで昇温し、その後 NO、NO₂、NH₃ を所定の比率となるよう同様に MFC を用いて制御しベースガスと混合して試験用モデルガスを調製する。調製されたモデルガスを試験触媒に流入し、試験触媒後の反応ガスを NO と NO₂ が同時に測定できる HORIBA 製 MEXA-6000FT にて計測した。以降のモデルガス試験はすべて本装置を使用して NOx 浄化性能を測定した。

モデルガスは実車モード走行時の排出ガスを模擬したガス組成をベースに、NOx 挙動観察を容易にするため、NOx 濃度を増加したガス条件組成を設定した (Table 1)。そのときの NOx 浄化性能計測結果を Fig. 3 に示す。

定常状態での NOx 浄化性能は NO₂ 比率が 50% のときに最も高い浄化率を示し、Fast-SCR 反応が高い NOx 浄化特性を示すことが確認できた。一方、NO₂ 比率が 50% を外れる領域では NOx 浄化率は低下した。エンジンから排出される NOx はそのほとんどが NO であるため、Fe-Zeolite 触媒に流入する NO₂ 比率を 50% とするためには、Fe-Zeolite 触媒上流に配置される酸化触媒で NO を適度に NO₂ に酸化させることが肝要である。

2.3. 実車における Urea-SCR 触媒システムの課題

前項では Urea-SCR 触媒システムの特徴と Fe-Zeolite 触媒の定常状態での NOx 浄化挙動を述べた。しかしながら、実車条件では排出ガスの温度、流量、NOx 濃度など Urea-SCR 反応に関わる因子が大きく変動し、定常状態のように NOx 浄化反応を安定的に発現させるのは困

Table 1 Gas conditions for various NO₂/NOx ratios

NOx [ppm]	200
NO ₂ /NOx ratio [%]	0, 25, 30, 50, 60, 75, 100
NH ₃ [ppm]	200
O ₂ [%]	6
H ₂ O [%]	7
N ₂	Balance
Space velocity [1/h]	37500
Temperature [°C]	250

難である。このことに対し、徳井ら⁽³⁾、村田ら⁽⁴⁾は Fe-Zeolite 触媒において、高 NO₂ 比率時に NO₂ と NH₃ により硝酸アンモニウム (NH₄NO₃) が生成され、低 NO₂ 比率時には NH₄NO₃ と NO が反応する機構⁽⁵⁾から、走行モード中の NO₂ 比率を 50 ± 10% の範囲内に設定することが高い NOx 浄化性能につながることを確認し、適切な酸化性能を持つ酸化触媒の選定が必要であると報告している。

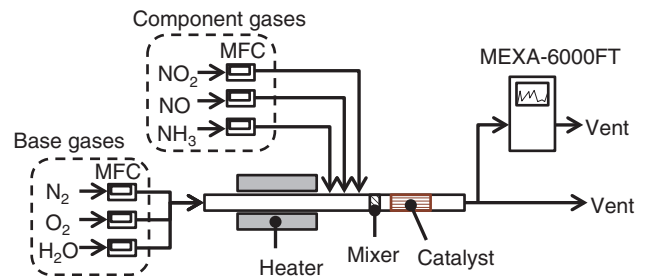


Fig. 2 Synthetic gas bench

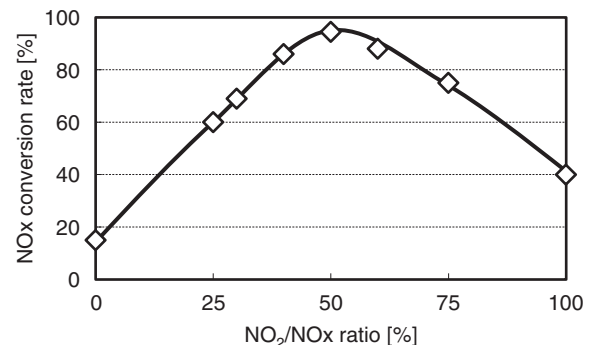


Fig. 3 NOx conversion rate at each NO₂/NOx ratio

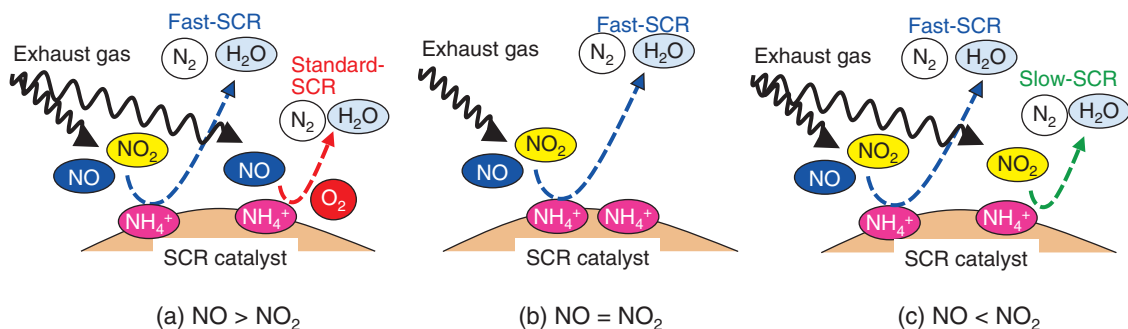


Fig. 1 Schematic illustration of NOx reduction under various steady-state conditions, (a) NO > NO₂, (b) NO = NO₂, (c) NO < NO₂

一方、最近時のエミッション規制の動向は、より実走行に根差したテスト手法の在り方が議論されており、現行の走行モードより広範囲な負荷の運転における低エミッションが要求されつつある。さらに、エミッション規制値が厳しくなるほどモード初期から高いNO_x浄化性能が要求され、より低温からNO₂を生成するために酸化触媒の性能を高める必要があり、暖機後において適切なNO₂比率(50 ± 10%)となる酸化触媒の選定が困難である。以上このように、相反する触媒特性への要求がUrea-SCR触媒システムの大きな課題となっている。

2.4. 実車環境に即したSCR触媒の動的NO_x浄化コンセプト

より実車環境に即したエミッション技術を構築するためには、Fig. 1で示した定常状態とは異なるNO₂比率が変動する動的なNO_x浄化挙動を把握する必要があると考えられる。SCR触媒の動的NO_x浄化特性に関しては、Fe-Zeolite触媒上にNO₂が吸着する挙動が報告⁽⁶⁾されており、NO₂吸着を介したNO_x浄化挙動の存在が示唆される。

そこで、Fe-Zeolite触媒へのNO₂吸着現象とNO_x浄化挙動とを合わせて考察した結果、変動するNO₂比率を吸着NO₂が緩衝すると考えるに至った。吸着NO₂によるNO_x浄化挙動の模式図をFig. 4に示す。以下、本コンセプトをNO₂比率緩衝コンセプトと記す。

Fig. 4(a)で示すNO₂比率が50%より高い場合、余剰のNO₂は触媒活性点近傍に吸着する。一方、Fig. 4(b)で示すNO₂比率が50%より小さい場合、余剰のNOは吸着NO₂と接触してFast-SCRで反応する。したがって、Fig. 4(a)とFig. 4(b)を繰り返すことにより、NO₂比率の変動幅を限定せず高いNO_x浄化率を得ることが可能となる。このようにNO₂比率緩衝コンセプトは、NO₂比率の高い条件と低い条件を意図的に繰り返させることで吸着NO₂を介した触媒上での局所的なFast-SCRを成立させ、NO₂比率が変動しても高いNO_x浄化性能を得ることができる、という新しい考え方である。

3. Urea-SCR触媒の動的NO_x浄化挙動の解明

3.1. NO₂比率変動時のNO_x浄化挙動の検証

NO₂比率緩衝コンセプトを検証するために、NO₂比率が変動した時のNO_xの動的な浄化挙動をモデルガス試験装置を用いて計測した。実車環境におけるNO₂比率変動を模擬したテスト条件(NO₂比率変動サイクル試験)を設定し、NO_x浄化特性を確認した。実車において加速時にはNO_x量が増加し、NO₂比率は低下することから、サイクル試験におけるNO₂比率変動手法はNOガス濃度を上昇させる設定とした。NH₃の濃度は急加速によるUrea噴射制御遅れを考慮し、高NO₂比率側の条件のまま一定とした。NO₂比率変動時間設定は実車の走行モードパターンを参考に高NO₂比率を30秒、低NO₂比率を10秒のサイクルとした。テスト条件をTable 2およびFig. 5に、テスト結果をFig. 6に示す。

NO₂比率を75%と30%の間で変動させたときのNO_x浄化率は、80%から100%となり平均すると90%(Fig. 6図中赤線)の浄化率を示した。ここで、定常試験結果からNO₂比率75%と30%の平均浄化率を求めると73%(Fig. 6図中青破線)であり、17%の浄化率向上が確認された。つまり、NO₂比率を変動させることで定常状態よりも高いNO_x浄化性能が発揮されており、このことは推定したNO₂比率緩衝コンセプトが発現していることを示唆している。

Fig. 6のNO_x浄化挙動を見るとNO₂比率とNO_x浄化率の間にはその挙動に時間差があることがわかる。つまり、NO₂比率が高い状態から低い状態へ変動するときはNO_x浄化率は連動して高い浄化率にシフトするが、逆にNO₂比率が低い状態から高い状態に変動したときはすぐにNO_x浄化率が変動せずに、遅れて低い浄化率にシフトする挙動を示している。このことは、低NO₂比率時にはFe-Zeolite触媒に吸着したNO₂が触媒上での局所的なFast-SCRにより消費されていると考えられ、高NO₂比率時には余剰のNO₂がFe-Zeolite触媒に吸着され、のちにFe-Zeolite触媒上の吸着サイトがNO₂で満たされると徐々に定常状態と同じNO_x浄化率に低下する挙動を示していると考えられる。

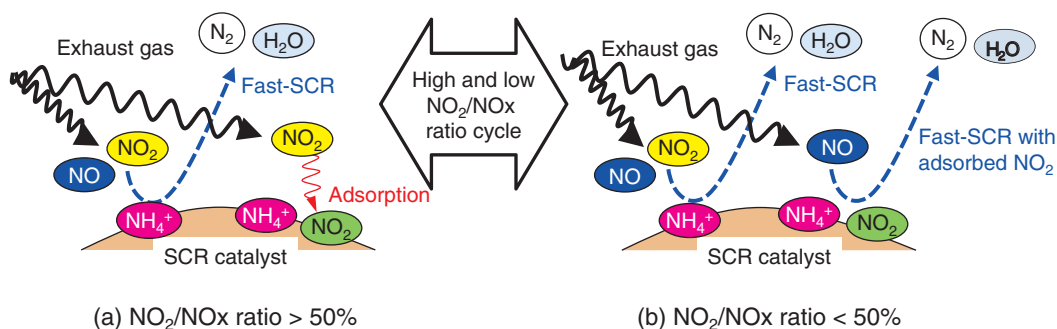


Fig. 4 Schematic illustration of NO_x reduction behavior during NO₂/NO_x ratio cycle, (a) high NO₂/NO_x ratio, (b) low NO₂/NO_x ratio

Table 2 Synthetic gas conditions for cycle test (Mode 1)

	High NO ₂ /NO _x ratio	Low NO ₂ /NO _x ratio
NO [ppm]	50	350
NO ₂ [ppm]	150	150
NO ₂ /NO _x ratio [%]	75	30
NH ₃ [ppm]	200	200
O ₂ [%]	6	6
H ₂ O [%]	7	7
N ₂	Balanced	Balanced
Time [s]	30	10
Space velocity [1/h]	37500	
Temperature [°C]	250	

Table 3 Synthetic gas conditions for cycle test (Mode 2)

	High NO ₂ /NO _x ratio	Low NO ₂ /NO _x ratio
NO [ppm]	50	150
NO ₂ [ppm]	150	150
NO ₂ /NO _x ratio [%]	75	50
NH ₃ [ppm]	200	200
O ₂ [%]	6	6
H ₂ O [%]	7	7
N ₂	Balanced	Balanced
Time [s]	30	10
Space velocity [1/h]	37500	
Temperature [°C]	250	

上述の動的 NO_x 浄化挙動の推定, つまり高 NO₂ 比率時の NO₂ 吸着, 低 NO₂ 比率時の触媒上での局所的な Fast-SCR を検証するため, NO₂ 比率変動サイクル試験の条件を変更して NO_x 浄化性能への影響を確認した。

3.2. 吸着 NO₂ による NO₂ 比率変動緩衝作用の検証

低 NO₂ 比率時において余剰 NO が発生しない条件として, NO₂ 比率を 75% から 50% の間の変動とする設定としたときの浄化性能への影響を検証した。テスト条件を Table 3 に, テスト結果を Fig. 7 に示し, 定常試験結果と比較した。

NO₂ 比率変動幅を 75% から 50% へ変更した Mode 2 テストでは, 高 NO₂ 比率および低 NO₂ 比率共に Fig. 3 に示した定常試験での NO_x 浄化率とほぼ同等の性能を示し, 3.1. 節で述べた高 NO₂ 比率時の高い NO_x 浄化性能が発揮

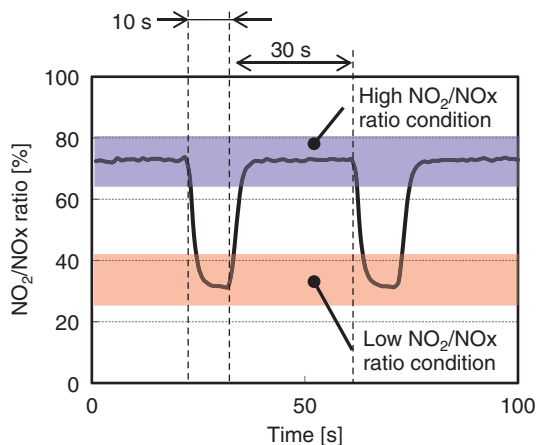
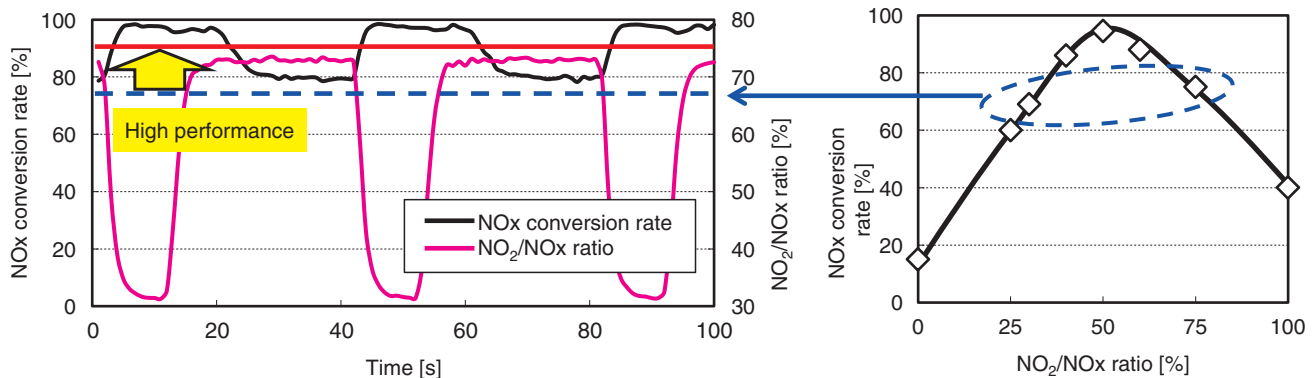
Fig. 5 Cyclic curve of NO₂ ratio (Mode 1)

Fig. 6 Results of synthetic cycle gas test (Mode 1)

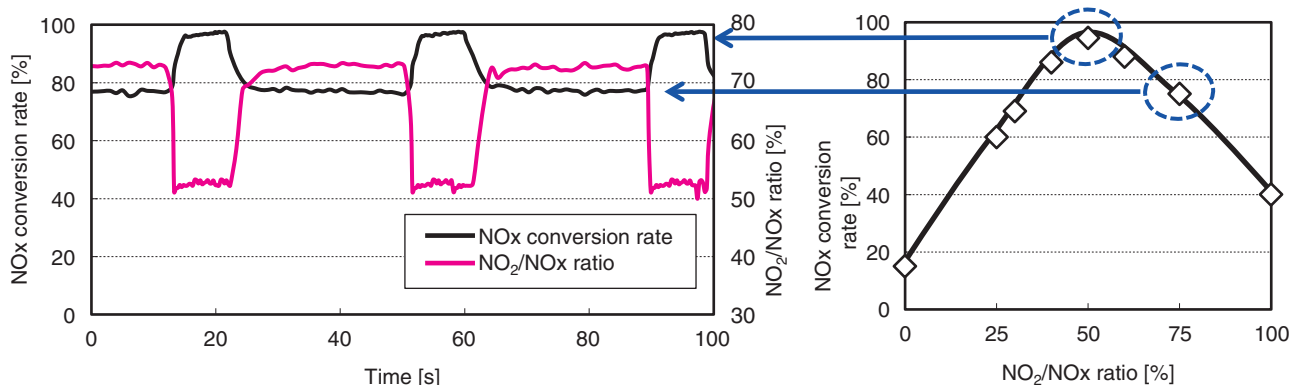


Fig. 7 Results of synthetic cycle gas test (Mode 2)

されないことが確認できた。つまり、低 NO₂ 比率側を余剰の NO が発生しない条件としたため、吸着した NO₂ が消費されず高 NO₂ 比率時の余剰 NO₂ が吸着できないため高い浄化性能を発揮できないと考えられる。したがって、Mode 2 の結果は NO₂ 比率緩衝コンセプトの考え方を支持するものと言える。

次に、低 NO₂ 比率側 (NO₂ 比率 = 30%) の時間を変更し余剰 NO の供給量を増減させることによる NO₂ の挙動の検証を実施した。Table 2 の Mode 1 に対して低 NO₂ 比率時間を 5 秒に短縮した Mode 3 を Table 4 に、30 秒に延長した Mode 4 を Table 5 に示し、NO₂ ガス挙動を詳細に検討するため、各試験 Mode における NO₂ ガス濃度の時間推移を Fig. 8 に示す。

前節と同じ条件である Mode 1 での NO₂ 濃度の挙動は高 NO₂ 比率へ切替え後 7 秒間ほど NO₂ 濃度は低いままであり、その後 NO₂ 濃度 50 ppm 付近まで上昇して定常状態 (NO_x 浄化率 78%) となる。この定常状態となった NO_x 浄化率は、Fig. 3 で示した NO₂ 比率 75% 定常状態における NO_x 浄化率と一致し、還元反応のみが起きている (Fast-SCR と Slow-SCR) ことを示している。NO₂ 濃度が定常状態に至る前の低減挙動は還元反応以外と考えられ、時間の経過とともに NO₂ 濃度が上昇することから Fe-Zeolite 触媒への NO₂ の吸着挙動と捉えることができる。

これに対し、低 NO₂ 比率の時間を短縮した Mode 3 は、定常状態に至るまでの時間が短縮されていることがわかる。逆に低 NO₂ 比率の時間を延長した Mode 4 は、NO₂ 濃度が上昇し始めるまでの時間も延長され、30 秒では定常状態に至らないことが観測された。

Table 4 Synthetic gas conditions for cycle test (Mode 3)

	High NO ₂ /NO _x ratio	Low NO ₂ /NO _x ratio
NO [ppm]	50	350
NO ₂ [ppm]	150	150
NO ₂ /NO _x ratio [%]	75	30
NH ₃ [ppm]	200	200
O ₂ [%]	6	6
H ₂ O [%]	7	7
N ₂	Balanced	Balanced
Time [s]	30	5
Space velocity [1/h]	37500	
Temperature [°C]	250	

Table 5 Synthetic gas conditions for cycle test (Mode 4)

	High NO ₂ /NO _x ratio	Low NO ₂ /NO _x ratio
NO [ppm]	50	350
NO ₂ [ppm]	150	150
NO ₂ /NO _x ratio [%]	75	30
NH ₃ [ppm]	200	200
O ₂ [%]	6	6
H ₂ O [%]	7	7
N ₂	Balanced	Balanced
Time [s]	30	30
Space velocity [1/h]	37500	
Temperature [°C]	250	

これらの NO₂ 挙動の結果から、低 NO₂ 比率の時間が長いほど、つまり余剰 NO の供給量が多いほど高 NO₂ 比率時の NO₂ 吸着量が増加していると考えられる。このことから余剰 NO は触媒に吸着していた NO₂ と局所的に Fast-SCR 反応を起こし、NO₂ を消費することで NO₂ 吸着サイトを吸着可能な状態に戻すと考えられる。

以上の検証結果と考察から前節で提案した NO₂ 比率緩

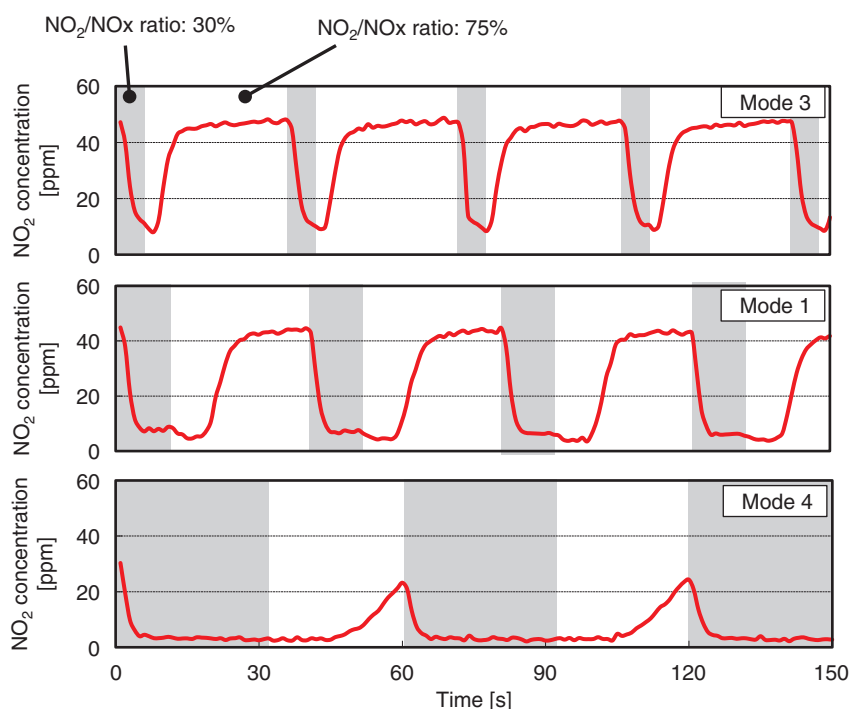


Fig. 8 Results of synthetic cycle gas test (Mode 1, Mode 3 and Mode 4)

衝コンセプトを実験的に確かめることができた。つまり、Urea-SCR システムの NOx 浄化性能を最大限に引き出すためには、Fe-Zeolite 触媒の NO₂ 吸着容量を考慮して NO₂ がスリップする前に意図的に余剰な NO を Fe-Zeolite 触媒へ供給する手法が有効である。

次章以降で NO₂ 比率緩衝コンセプトを実車システムに応用し、その効果を検証した結果について述べる。

4. LEV-Ⅲ ULEV50 への対応

4.1. 実車における Urea-SCR システム

エミッションを測定する試験車両には 2.2 L 直列 4 気筒 インタークーラーターボディーゼルエンジンを搭載した中型乗用車 (Inertia Weight: 4000 lbs) を用いた。本研究における排気系のレイアウトを Fig. 9 に示す。エンジン直後に DOC と cDPF、床下に Urea 水を噴射するインジェクタ、噴射された Urea 水を均質に触媒に流入させるためのミキサ、そして最後に Urea-SCR 触媒の順で配置される。SCR 触媒の間には NH₃ センサが設置され、最適な NH₃ 供給と NH₃ スリップの制御を可能としている。

本システムの特徴は、各々の触媒に役割を付与していることにある。エンジン直後の DOC には CO および HC の酸化浄化とその反応熱による本システムの初期昇温、cDPF には粒子状物質 (Particulate Matter: PM) の捕集浄化と白金 (Pt) 系触媒による Urea-SCR 反応に必要な NO₂ の生成、Urea-SCR 触媒には NH₃ による NOx の還元浄化の役割を持たせている。本システムは、これらすべての役割が機能することで排出ガスを効率的に低減させることができる後処理システムとなっている。

4.2. LEV-Ⅲ ULEV50 規制クリアのための技術課題

LEV-Ⅲ ULEV50 規制をクリアするためには、FTP-75 モードにおいて排出 NOx の 90% 以上を浄化する必要がある。この高い要求をクリアするため、FTP-75 モードにおける NOx 浄化領域を区分し (Fig. 10)、各領域に求められる触媒の機能を設定 (Table 6) することによるエミッション低減を検討した。

Fig. 10 の各領域における考え方は次のとおりである。領域 (A) で触媒システムを早期に活性温度まで昇温させ、領域 (B) では Urea-SCR 触媒に吸着している NH₃ を利用して NOx を還元浄化する。領域 (B) で Urea 水を噴射しないのは、触媒システムが Urea 水の加水分解温度域に達していないためである。その後に続く領域 (C) および領域 (D) では排気温度も十分に高く、Urea 水を噴射して NH₃ を生成させ 95% 以上の高い浄化率で NOx を還元浄化する。

この考え方を実現するために、DOC に対しては領域 (A) で CO および HC の低温酸化活性が、cDPF に対しては領域 (B) での低温 NO₂ 生成能力、およびエンジンが高負荷となる領域 (C) における高ガス流速 (Space Velocity: SV) 条件下での NO₂ 生成能力が求められる。本試験では走行モー

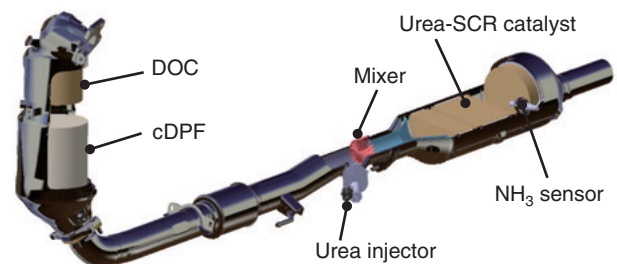


Fig. 9 Hardware configuration of Urea-SCR system

Table 6 Catalytic functions in each NOx reduction area

Catalyst	Area (A)	Area (B)	Area (C)	Area (D)
DOC	CO and HC oxidation	CO and HC oxidation to keep catalysts active		
cDPF	-	NO oxidation (NO ₂ generation)		
SCR	-	NOx reduction by adsorbed NH ₃	NOx reduction by adsorbed NH ₃ and urea dosing	

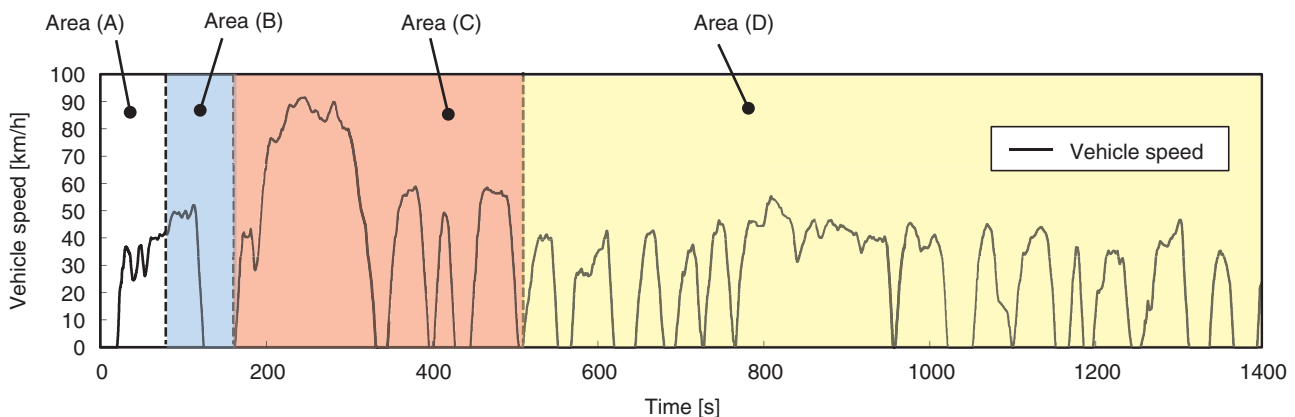


Fig. 10 Image of NOx reduction areas in Cold Transient (CT) and Cold Stabilized (CS) phases of FTP-75 mode

ド初期からの高いNO_x浄化性能が重要であることから、領域(A)および領域(B)、(C)の要求性能から酸化性能の高いDOCとcDPFを設定した。そのときの実車エミッション結果をFig. 11に示す。

FTP-75モードの領域(B)および領域(C)のNO_x浄化は期待通りの結果が得られたが、モード中盤の領域(D)ではNO_x浄化性能が低下する結果となった。Fig. 11を見ると、領域(D)ではNO₂比率が50%以上で推移しており、Urea-SCR触媒を通過した後のNO_xはほとんどがNO₂で排出されていることがわかる。これは、領域(D)においては触媒が十分に暖機されており、加えてエンジン負荷が低くSVが低いために、酸化性能の強いDOCとcDPFにより過剰に生成されるNO₂がUrea-SCR触媒に流入することに起因する。つまり、走行モード初期のNO_x浄化を重視した酸化性能の高いDOCおよびcDPFの設定では暖機後の低負荷領域でNO_x浄化性能が低下してしまうという課題が起きている。したがって、LEV-ⅢULEV50をクリアするた

めの技術課題は、触媒暖機後の低負荷領域のNO₂比率制御である。

そこで、前章で確認したFe-Zeolite触媒のNO₂比率緩衝コンセプトを実車制御へ適用しエミッション評価を実施した。

5. NO₂比率緩衝コンセプトの実車制御への適用

NO₂比率緩衝コンセプトを実車で実現するためには、NO₂比率をコントロールするエンジンシステム制御手法が必要である。そこで、排出ガス還流バルブ(Exhaust Gas Recirculation Valve: EGR valve)や燃料噴射量等を制御し、エンジンからの排出ガスを変化させることによりNO₂比率のコントロールを実施した。Fig. 12にテールパイプから過剰なNO₂が排出されるクルーズ走行条件においてNO₂比率制御を適用した結果を示す。NO₂比率を意図的に低下させるように制御(Fig. 12 緑色帯部)することでテールパ

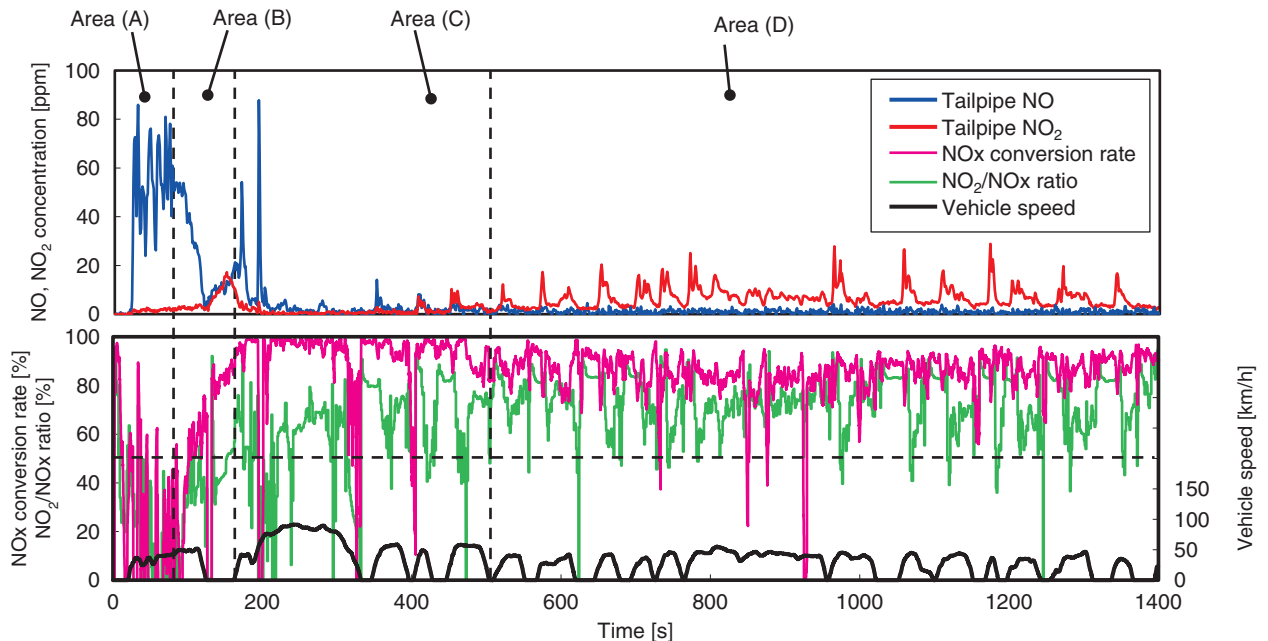


Fig. 11 Vehicle emission results by using strong oxidation catalysts (DOC and cDPF) in FTP-75 mode (CT and CS)

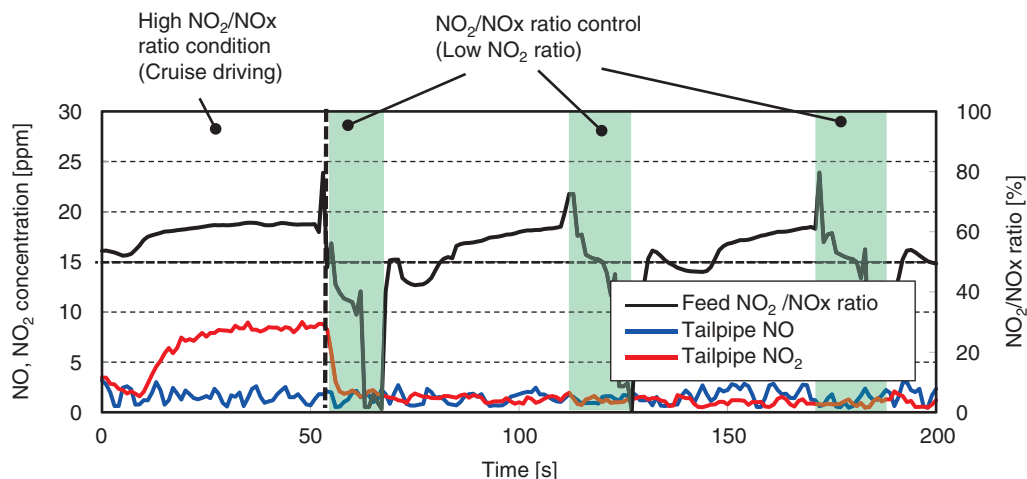


Fig. 12 Effect of new NO₂/NO_x ratio control in vehicle cruise condition

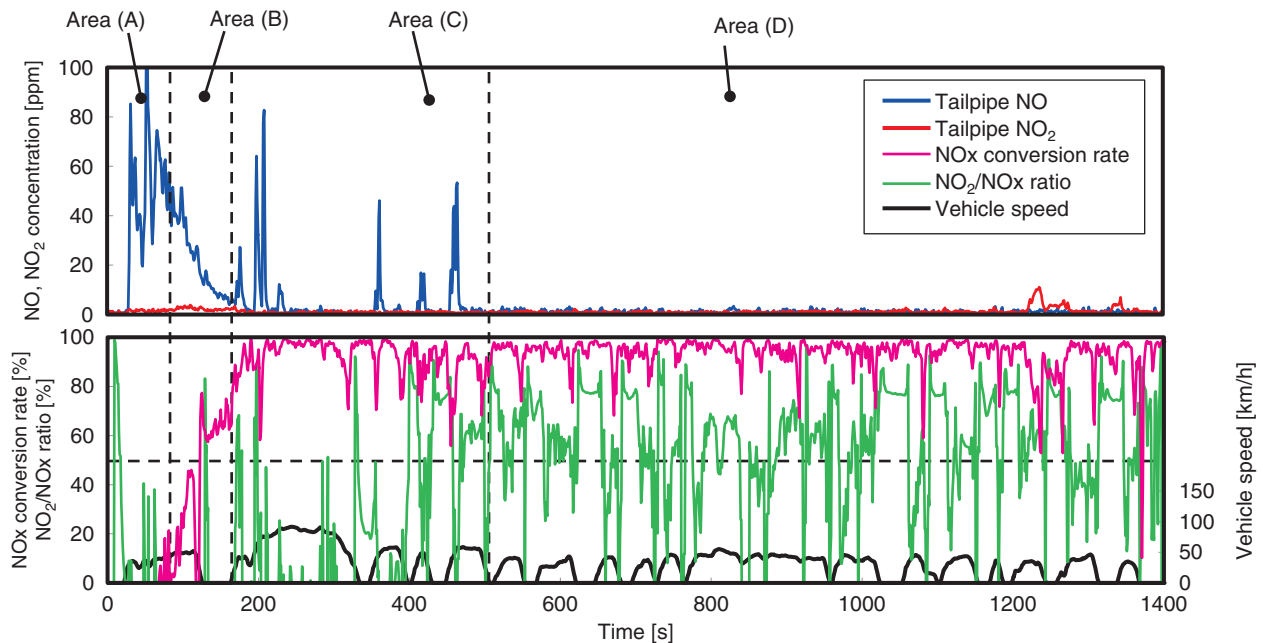


Fig. 13 Vehicle emission results by introducing new NO₂/NO_x ratio control in FTP-75 mode (CT and CS)

イプからの NO₂ 排出量は低減され、高い NO_x 浄化性能が得られることが確認された。

次に、モード走行における NO₂ 比率緩衝コンセプトの検証のため、FTP-75 モード走行時に NO₂ 比率制御を適用した結果を Fig. 13 に示す。NO₂ 比率制御の適用により加減速を伴うモード走行においてもクルーズ条件と同様に NO₂ 排出が抑制され、領域 (D) においても高い NO_x 浄化性能を発現していることが確認できた。以上のことより、NO₂ 比率緩衝コンセプトは実車環境でも効果が示され、前述の技術課題を克服する有効な手段であることがわかった。

本研究で解明した Fe-Zeolite 触媒の NO₂ 比率緩衝コンセプトを組み込んだ Urea-SCR システムによって、FTP-75 モードで NO_x 排出が 0.025 g/mile、非メタン有機ガス (Non-Methane Organic Gases: NMOG) 排出が 0.015 g/mile となり、LEV-III ULEV50 レベルのエミッション値をクリアすることができた (Fig. 14)。

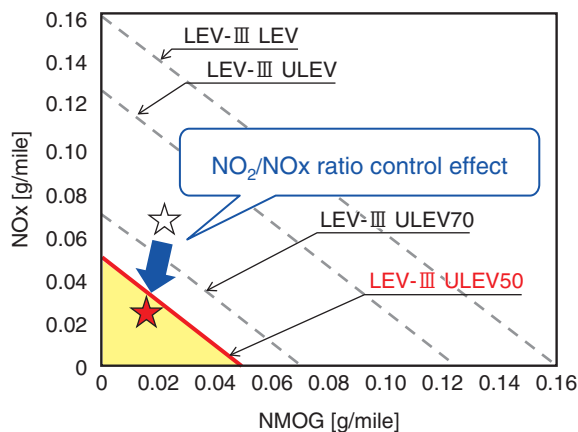


Fig. 14 NO_x and NMOG emission results in FTP-75 mode

6. まとめ

Fe-Zeolite 触媒の NO_x 浄化挙動を把握し、NO₂ 比率緩衝コンセプトを提唱した。

NO₂ 比率緩衝コンセプトは、高 NO₂ 比率時に Fe-Zeolite 触媒へ余剰 NO₂ が吸着し、低 NO₂ 比率時に余剰 NO と吸着 NO₂ により触媒上における局所的な Fast-SCR 反応が起きることを利用して、NO₂ 比率が 50% 付近をはずれても高い NO_x 浄化性能を発現させるという考え方である。このコンセプトにより、NO₂ 比率変動幅を限定することなく意図的に NO₂ 比率を変動させることで、実車環境においても高い NO_x 浄化性能を発現させることが可能となった。

このコンセプトを実車に応用するにあたり、NO₂ 比率は EGR や燃料噴射で制御可能であることを実証し、その結果、実車環境下でも高い NO_x 浄化性能を得ることができた。

以上より、走行モード初期に求められる酸化性能の高い触媒を設定することで現れる触媒暖機後の低負荷領域における NO_x 浄化性能の低下という技術課題を克服し、LEV-III ULEV50 規制をクリアすることが可能となった。

参考文献

- (1) 松永英樹, 安井裕司, 橋本英史, 佐藤尚宏, Hardam, H., 山田正俊, 高橋俊晴, Scheurs, B.: US LEV-III SULEV のためのスーパークリーンディーゼル技術, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.51-12, p.1-4 (2012)
- (2) 高島芳樹, 福井健二, 鈴木繁雄, 広田信也, 丸山昌利:

尿素 SCR 触媒解析技術 (第 1 報) - 還元剤挙動計測 -,
自動車技術会学術講演会前刷集, No.23-11, p.11-14
(2011)

- (3) 徳井貞仁, 小宮怜, 村田豊, 大聖泰弘, 鈴木央一, 石井素: 尿素 SCR システムの NO_x 浄化率向上に関する研究 (第 2 報) - NO₂/NO_x 比が NO_x 浄化特性に与える影響 -, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.143-08, p.5-10(2008)
- (4) 村田豊, 小宮怜, 金子淳司, 大聖泰弘, 鈴木央一, 石井素: 尿素 SCR システムの NO_x 浄化率向上に関する研究 (第 3 報) - 低温過渡時における高効率 NO_x 浄化メカニズム -, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.143-08, p.11-16(2008)
- (5) Grossale, A., Nova, I., Tronconi, E., Chatterjee, D., Weibel, M.: The Chemistry of the NO/NO₂-NH₃ “Fast” SCR Reaction over Fe-ZSM5 Investigated by Transient Reaction Analysis, Journal of Catalysis, 256, p.312-322(2008)
- (6) 岩崎正興, 山崎清, 坂野幸次, 新庄博文: NH₃-SCR 用 Fe/ZSM-5 触媒の調整とキャラクタリゼーション, 第 102 回触媒討論会 A 予稿集, p.157(2008)

■ 著 者 ■



迫田昌史



佐藤尚宏



松永英樹

中性子ラジオグラフィを用いた水観察による 燃料電池の発電環境最適化

Optimization of Fuel Cell Generation Environment by Water Observation using Neutron Radiography

千葉 裕人*
Hiroto CHIBA

岩澤 力*
Chikara IWASAWA

要 旨

固体高分子型燃料電池の発電には、膜電極接合体のプロトン導電性を確保するために適度な水が必要である。しかし、ガス流路やガス拡散層における過剰な水はガス供給阻害を引き起こす要因となることが考えられ、発電中の燃料電池内部の水を適切にコントロールする必要がある。

本研究では滞留水が生じるメカニズムと電圧挙動に及ぼす影響を明らかにして最適な発電条件を設定するために、中性子ラジオグラフィにて発電中における燃料電池の滞留水の状態を観察した。

中性子ラジオグラフィによる観察は燃料電池の積層方向と側面方向の2方向からおこなった。積層方向の観察では実機セルで観察をおこない滞留水と電圧挙動の相関性を明確にした。一方、側面方向の観察に用いた実験用セルでは滞留水の存在するガス流路とその原因を特定し、対策の方向性を提示した。これらの結果をふまえて、水と発電性能の観点から最適な発電環境を設定し、実車の制御に適用した。

ABSTRACT

Electric generation by a polymer electrolyte fuel cell requires an appropriate quantity of water to help ensure proton conductivity of the membrane electrode assembly. However, excess water in the gas channels and the gas diffusion layer is thought to be a factor impeding gas supply, so it is necessary to appropriately control the water inside the fuel cell during electric generation.

This study used neutron radiography to observe the state of the water accumulated in a fuel cell during electric generation in order to clarify the mechanism by which water accumulates and its effect on voltage behavior, and set the optimum electric generation conditions.

Observation using neutron radiography was performed from the two directions of the through-plane direction and the in-plane direction of the fuel cell. Observation in the through-plane direction of an actual cell clarified the correlation between the accumulated water and the voltage behavior. On the other hand, observation in the in-plane direction of a test cell determined the gas channels in which accumulated water exists and the reason for that water accumulation, and suggested directions for countermeasures. Based on these results, the optimum electric generation environment was set in terms of water and electric generation performance, and applied to the control of an actual vehicle.

1. ま え が き

1.1. 燃料電池

地球温暖化や大気汚染等の環境問題、および石油などの化石エネルギーの枯渇によるエネルギー問題に対応するためにCO₂や有害物質を排出しない究極の電気自動車である燃料電池電気自動車の開発が進められている。Hondaにおいても低温から始動可能で小型化できる固体高分子型燃料電池を用いた燃料電池電気自動車の開発を推進している。

燃料電池とは、水素と酸素の電気化学反応によって電気を取り出す発電装置である。実際の反応は、式(1)に示すアノード極における水素の酸化反応と式(2)に示すカソード極における酸素還元反応からなる。

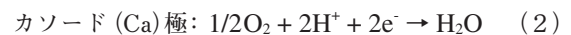


Fig. 1に燃料電池の概略図を示す。燃料電池の構造は、電解質膜 (Polymer Electrolyte Membrane: PEM) を中心に触媒層 (Catalyst layer) とガス拡散層 (Gas Diffusion Layer: GDL) を配置した膜電極接合体 (Membrane Electrode Assembly: MEA)、およびガスや冷媒の流路が形成されたセパレータから構成されている。

1.2. 燃料電池における水マネジメントの重要性

燃料電池の発電で高出力を得るためには、MEAを適度に含水させプロトン導電性を確保する必要がある。しか

* 四輪 R&D センター

し、過剰な水はガス拡散層やガス流路における滞留水となり、ガス供給を阻害して発電性能が低下し、電圧挙動が不安定になる。また、ガス供給阻害は電位上昇によってカーボンや白金を腐食し、耐久性能を低下させる原因となる。よって燃料電池の発電においてはMEAの適度な含水やガス流路の排水といった水マネジメントが重要である。近年、このような水マネジメントの重要性から、滞留水を可視化するさまざまな手法が検討されている。例えばアクリル窓を作製し直接燃料電池内を観察する手法やX線ラジオグラフィ計測および核磁気共鳴画像法(MRI)によって水を観察する手法が多く報告されている⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾。

Table 1に各可視化技術の計測速度と空間解像度および観察範囲を示す。滞留水の変化を連続的に捉えるにはアクリル窓による直接可視化方法が優れているがMEA内の水は観察できない。その他の手法はMEAの水を捉えることが可能であるが、中性子ラジオグラフィとX線ラジオグラフィは計測速度の点でMRIよりも有利であり水の経時変化を捉えやすい。

Fig. 2に中性子線とX線を照射したときの各原子に対する質量減衰係数を示す⁽⁵⁾。燃料電池内の少量の水を観察するためには、水と水を構成する原子の質量減衰係数が燃料電池部材を構成するAlやFeより高いことが有効である。X線は原子番号の増加に従い質量減衰係数が緩やかに増加する特性をもち、少量の水を切り分けることが困難である。一方、中性子線は水素などの小さな原子番号で高い質量減衰特性を示し、特に水の質量減衰係数はFeやAlに対して1桁以上高くなっている。この特性からX線よりも中

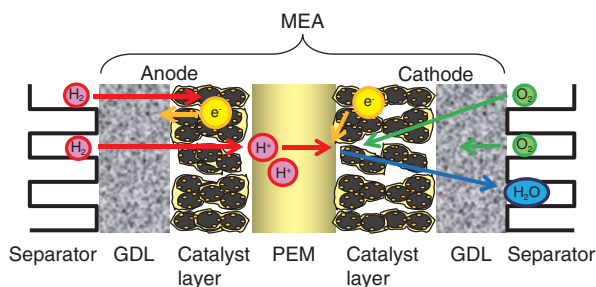


Fig. 1 Schematic image of fuel cell

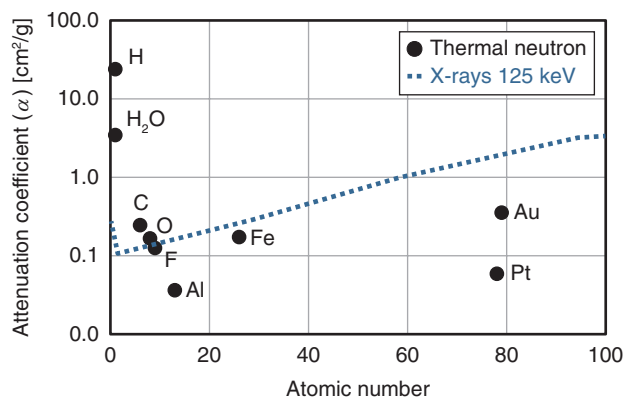


Fig. 2 Attenuation coefficient of elements

Table 1 Comparison of visualization methods

Method	Time resolution	Spatial resolution	Observation region
Neutron radiography	5-10 sec	10-200 μm	Below 300 mm
X-ray radiography	2-10 sec	1-10 μm	As required
MRI	5 minutes	10 μm	100 mm
Direct visualization	—	—	As required

性子ラジオグラフィ計測は少量の水を精度よく観察することが可能である。本研究では水の検出精度と計測速度および観察範囲を総合的に考慮して中性子ラジオグラフィを水計測技術として利用した。これまで小型セルに限定されていた中性子ラジオグラフィ計測の技術をHondaのFCXクラリティ搭載サイズに適用し、実機サイズにおける滞留水の状態を観察した。

1.3. 研究の目的

中性子ラジオグラフィを利用して、FCXクラリティ搭載サイズにおける滞留水の状態を確認することによって、滞留水と電圧挙動の関係を明らかにし、最適なスタック発電環境を実車の制御に適用することを目的とした。

2. 中性子ラジオグラフィによる水計測の原理

中性子ラジオグラフィとは、観察対象物に中性子線を照射し透過した中性子線をシンチレータで光に変換しCCDカメラなどの検出器で可視化する手法である。中性子線は透過する原子によって減衰係数が異なるため、減衰係数の大きい原子からなる部位は暗く、減衰係数の小さい原子は明るく描写される。

水の定量化は、まず発電中の中性子ラジオグラフィ画像から水の存在しない画像をバックグラウンドとして差し引くことで水のイメージを抽出する。次に、式(3)の中性子減衰特性を利用して計測対象物の厚み t [cm]を導くことにより定量化が可能である⁽¹⁾。

$$I_{out} = I_{in} \exp(-\alpha t) \quad (3)$$

ここで、 I_{in} は入射中性子強度、 I_{out} は透過中性子強度、 α は計測対象物の中性子質量減衰係数[cm²/g]を示す。本研究ではさまざまな発電条件における燃料電池内部の液水厚み t [cm]に定量化面積[cm²]を乗算して、液水を体積[cm³]として表すことにより燃料電池内部の液水を定量化した。なお、本報告の中性子ラジオグラフィ画像は水の存在しない領域を黄色、水の存在する領域を青色としてある。

中性子ラジオグラフィでの水の計測は、スイス Paul Scherrer Institut (PSI) の Electrochemistry Laboratory (ECL) と Neutron Imaging and Activation Group (NIAG) の協力のもと、PSIのNeutraにておこなった。

3. 実験

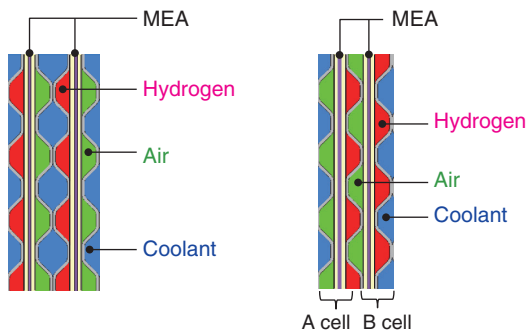
3.1. 中性子ラジオグラフィによる滞留水観察方向

一般的な燃料電池スタックは1セルごとに冷却する構造であるのに対し [Fig.3(a)], FCX クラリティに搭載されている燃料電池スタックは小型軽量化のため Fig. 3(b) に示すように2セルごとに冷却する構造となっている⁽⁶⁾. そのためカソード面が冷却される A セルとアノード面が冷却される B セルの2種類のセルが存在する. この燃料電池スタックの滞留水の面内分布と滞留位置を正確に観察するために, 積層方向と側面方向からの観察をおこなった. Fig. 4 に中性子ラジオグラフィ観察方向の模式図を示す. 積層方向 (Through-plane) からの観察では発電面全体の水の分布をとらえることが可能であり, 側面方向 (In-plane) からの観察では, MEA の滞留水と各ガス流路に存在している滞留水の位置を正確に切り分けることが可能である.

3.2. 中性子ラジオグラフィ用セルの紹介

3.2.1. 積層方向観察用実機セル

FCX クラリティに搭載されているセルの滞留水の分布状況を観察するために積層方向の観察は実機セルでおこなった. Fig. 5 に使用したセルホルダと中性子ラジオグラフィ画像を示す. 撮像範囲が広いため構造のひずみが生じ



(a) Two cooling layers per two cells (b) One cooling layer per two cells

Fig. 3 Schematic image of two kinds of stacking

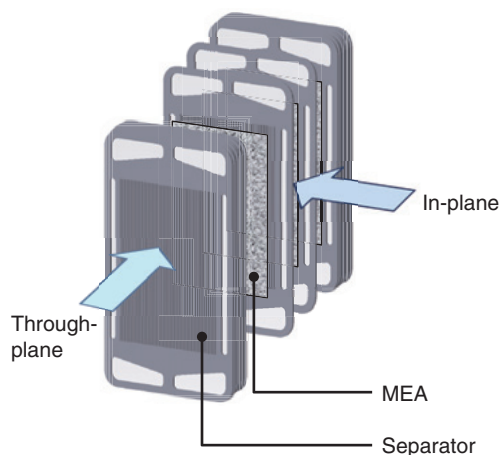


Fig. 4 Schematic image of neutron irradiation direction

ない強度と中性子透過性を考慮した材料でセルホルダを構成している. これにより, 構造を保ちつつ滞留水を鮮明に観察することが可能となった. また2セル1層冷却構造とした2セル観察 (Fig. 5) と, A セルと B セルの差異を確認するため, 個別に1セル観察することも可能である.

3.2.2. 側面方向観察用セル

実機セルでは側面方向の中性子透過距離が長く透過率が低下し, 水を計測できないので, 2セル1層冷却構造を模擬した側面方向観察セルを設計した (Fig. 6). このセルは側面方向の中性子透過性を上げるため MEA のシール構造やシール材料を工夫すると同時に, ガス流路本数を少なくしている. A セルと B セルのガス流路は全てにおいて同構造とした. また, 各セパレータの温度を熱電対にて計測することが可能である.

Fig. 7 は側面方向観察セルを中性子ラジオグラフィで可

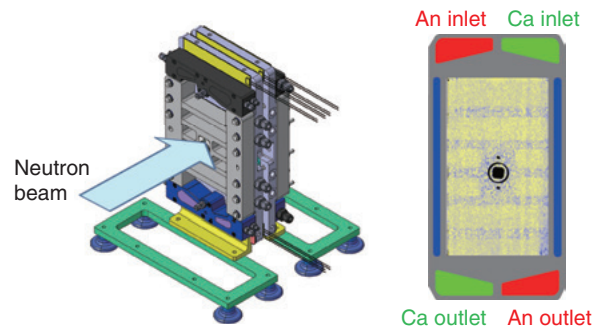


Fig. 5 Schematic and neutron images of through-plane cell

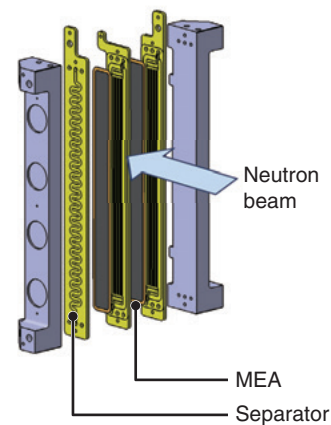


Fig. 6 Schematic image of in-plane cell

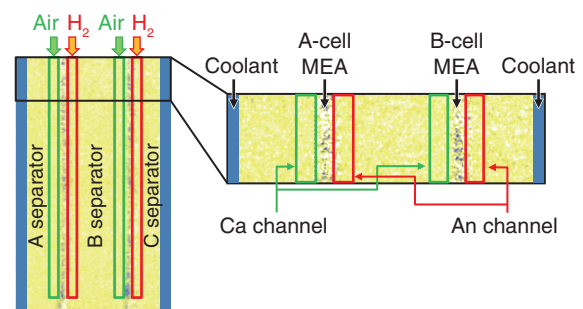


Fig. 7 Neutron radiography image of in-plane cell

Table 2 Neutron imaging condition of each cell

Imaging condition	Through-plane	In-plane
Pixel size (H × W) [μm]	100 × 100	75 × 15
Field of view (H × W) [cm]	25 × 35	25 × 5
Exposure time [sec]	5	10

視化した画像である。2セル1層冷却構造が模擬されており、隣接した2セルの両側を冷媒で冷却する構造となっている。Fig. 7中の赤枠部はアノード流路を示しており、緑枠部はカソード流路を示している。アノード流路とカソード流路に挟持されている領域はMEAである。

3.3. 実験条件

3.3.1. 中性子計測条件

中性子ラジオグラフィの計測条件をTable 2に示す。側面方向観察セルでは横方向の解像度を上げた設定とし、実機セルでは計測視野領域が広くとれる設定とした。また、側面方向観察セルは画像の解像度を上げるため露光時間を長めに設定した。

3.3.2. 発電条件

中性子ラジオグラフィ計測時の発電は滞留水による電圧変動への影響が大きい低負荷発電で実施した。発電条件は開発段階における標準発電条件をベースとして設定した。

実機セルではパラメータとしてカソードストイキオメトリと冷媒温度を変えて滞留水量を観察した。また、車載時の制御としておこなわれているアノードパージを模擬したテストもおこなった。実機適用検証テストとして上記の複合テストも追加した。発電装置はPSIの設備を使用した^{(7), (8)}。

本稿ではガスの流量をストイキオメトリで表現している。ストイキオメトリ (Stoichiometry: 化学量論) とは、式(4)より計算される値であり、燃料電池の反応に必要なガス量が過不足無く供給される場合を1として表現する相対量である。

$$\text{Stoichiometry} = \text{供給ガス量} / \text{反応必要ガス量} \quad (4)$$

3.3.3. アノードパージについて

アノードパージとは発電中に定期的にあノードの排気側の弁を開いて窒素などの発電に不要なガスを排出することである。この操作はアノードガスの水素純度を高めるだけでなく排水の観点からも有効であると考えられる。よってアノードパージの滞留水排水に対する効果を確認するために実機セルを用いてアノードパージを模擬した実験をおこなった。

4. 中性子ラジオグラフィ実験結果

4.1. 中性子ラジオグラフィにおける定量性

中性子ラジオグラフィにおける水の定量性を確認するために異なる水の厚みを計測して中性子の透過度を確認した。計測結果をFig. 8に示す。水の厚みの増加に伴い透過度が指数関数的に減少していくことが観察され、式(3)の妥当性が確認された。本研究における定量化数値は実験によって得られた定量化定数を用いて水の厚みを求めた後、定量化面積を乗算して水を体積[cm³]換算で示した。

4.2. 滞留水の現状観察と要因解析

4.2.1. 実機セルの発電時における滞留水観察

FCXクラリティ搭載サイズの滞留水の状態を確認するために実機セルを用いて発電時における中性子ラジオグラフィ計測をおこなった。Fig. 9に標準条件にて発電した際の電圧変動を示す。AセルよりもBセルの電圧変動の乱れが大きいことが確認された。

AセルとBセルの電圧変動の差異を滞留水の観点から解析するために中性子ラジオグラフィ計測をおこなった。

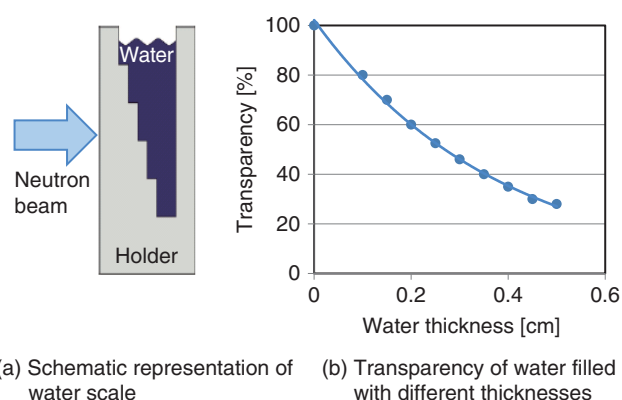


Fig. 8 Validation for water quantification

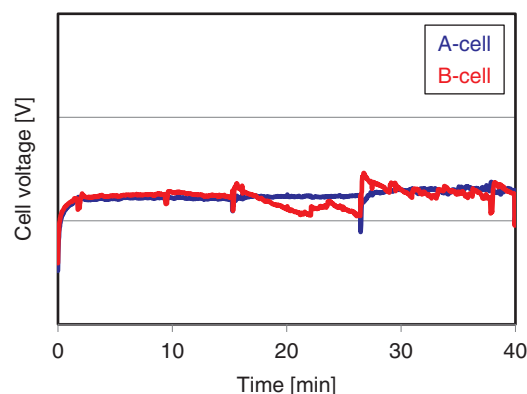


Fig. 9 Cell voltage of each cell under generation

滞留水量が一定となった発電 30 分後の画像を Fig. 10 に示す。A セルよりも B セルに多くの滞留水が観察された。また、ガス流路下部に滞留水が多く存在していることが明確になった。

Fig. 11 には標準条件にて発電した際の滞留水の変化を示す。発電初期は A セルと B セルの滞留水が同等に増加していくが、発電時間が 10 分を経過した頃から B セルの滞留水が A セルよりも多く推移していき、30 分程度で両セルとも滞留水が一定になる様子が観察された。A セルと B セルで滞留水量に違いが生じるのは結露量や排水能力の差異が原因である。また、Fig. 9 において B セルの電圧挙動が乱れる時間帯と Fig. 11 における A セルと B セルの滞留水量がかい離していく時間が等しいことから、B セルの電圧挙動の乱れは B セルに滞留水が多く存在することによってガスが供給されにくくなったことが原因と考えられる。

Fig. 9 に示した電圧挙動の 10 分ごとの標準偏差 (Standard deviation:SD) と Fig. 11 に示した同時刻帯の滞留水量の平均値との関係を Fig. 12 に示す。この結果より、滞留水が増えるほど電圧挙動が不安定になることが証明された。

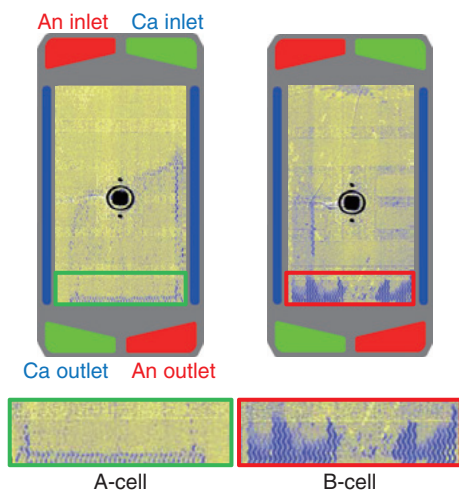


Fig. 10 Neutron radiography image of each cell

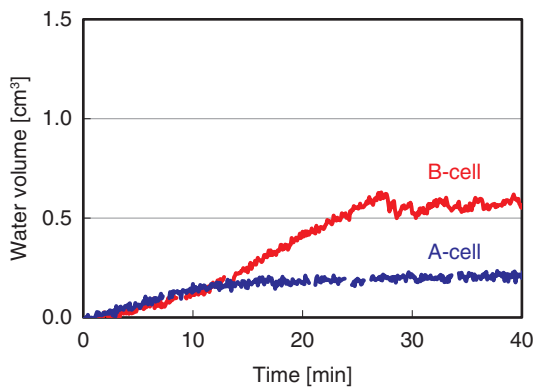


Fig. 11 Water volume transition for each cell under generation

4.2.2. 側面方向観察セル観察結果

Fig. 13 に標準条件で滞留水量が一定になるまで発電を継続した際の中性子ラジオグラフィ画像を示す。水が生成されるカソード側だけでなく、アノード側にも滞留水が存在していることが観察された。これはカソードからアノードに MEA を介して水が移動するバックディフュージョンの影響と考えられる。各ガス流路の滞留水量を定量化した結果を Fig. 14 に示す。アノードとカソードの滞留水はどちらも B セル側に多く存在していることが明確になった。セパレータ構造は A セルと B セルで同構造なので、A セルと B セルの滞留水量の差は発電環境の差に起因していることが判明した。

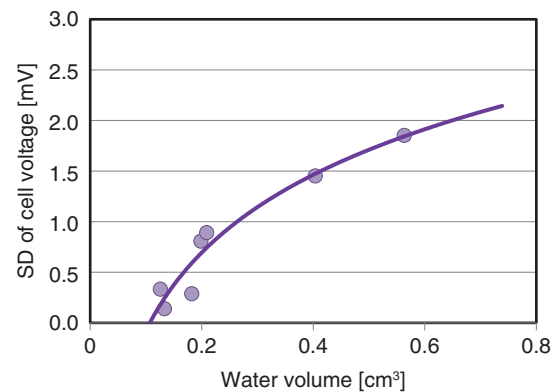


Fig. 12 SD of cell voltage at various water volumes

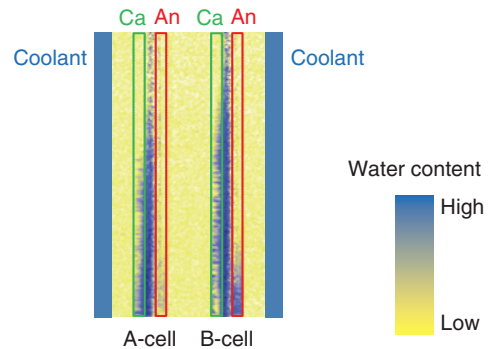


Fig. 13 Neutron radiography image of in-plane cell

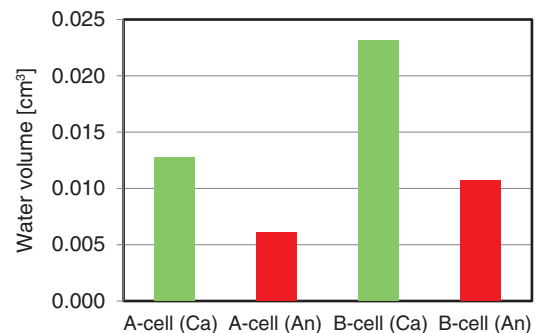


Fig. 14 Water volume of each channel

4.2.3. 2セル1層冷却構造における滞留水量差異の考察

2セル1層冷却構造におけるセル間の滞留水量の差異を検証するため、発電時の環境温度に着目した。Fig. 15に低負荷における各セパレータ温度を示す。冷却面が存在している両サイドのAセパレータとCセパレータは中心部に位置するBセパレータよりも温度が低い。また、AセパレータよりもCセパレータの温度がさらに低くなっている。これはCセパレータがアノード側に位置していて、Aセパレータはカソード側に位置することに起因すると考えられる。すなわち、Cセパレータは過電圧が低く発熱の小さいアノード側に位置し、さらに冷却面も存在するため最も温度が低くなっていると考えられる。

これらの結果からセルの環境温度はAセルよりもBセルの方が低くなっており、結露が生じやすい環境になっていることが確認された。このため、アノードもカソードもBセルの方に滞留水が多く存在すると考えられる。滞留水はガスがセルに供給されるのを阻害するため、排水性がさらに低下する原因となり、供給されるガス量の偏りがセル間に生じると考えられる。

2セル1層冷却構造では冷却面がアノードとカソードで異なるため各セルの環境温度を均一にすることは構造上難しい。よって発電中の各セルへ均等にガスを供給するためには滞留水を積極的に排出して滞留水量の差を減少させる必要がある。また、滞留水はカソード側だけでなくアノード側にも存在するためアノードとカソード両極の滞留水の低減が必要であることが示唆された。

4.3. 実機セルによる制御適用検討

実機セルと側面方向観察セルの結果より、発電中のガス流路に滞留水が存在することやセル間の滞留水量の差異がガス供給の偏りを引き起こしてセル電圧挙動の不安定性の原因となっていることが確認された。そこで、滞留水を低減させるために実機セルを用いて対策手法を検証した。

4.3.1. カソードストイキオメトリ増大効果

カソードストイキオメトリを増大させて滞留水を低減

させる効果を検証した。テストはAセルとBセルを同時に発電する2セル構造でおこなった。Fig. 16にはストイキオメトリを増大させた際の電圧挙動の関係を標準偏差で示す。ストイキオメトリが3.4以上で電圧挙動が安定化する傾向が観察された。

電圧挙動の安定化と滞留水の関係を確認するため、各ストイキオメトリにおける滞留水を計測した。Fig. 17にカソードのストイキオメトリを変化させて発電した際の中性子ラジオグラフィ画像を示す。発電エリアの滞留水がストイキオメトリ増大にしたがい減少していく様子が観察された。

Fig. 18に発電エリアのガス流路下部を定量化した結果を示す。ストイキオメトリを2.6から6.0へ増大させることによって滞留水量を50%低減することが可能となった。これはカソードの流量が増えたことによって差圧が増大し排水性が向上したためと考えられる。

Fig. 19にストイキオメトリを変化させて発電した際のセル電圧と抵抗過電圧を示す。抵抗過電圧の増加は観察されず、発電性能の向上が確認された。これらの結果からカソードストイキオメトリを増大させると滞留水が低減して電圧挙動が安定化するとともに、発電性能も向上することが確認された。

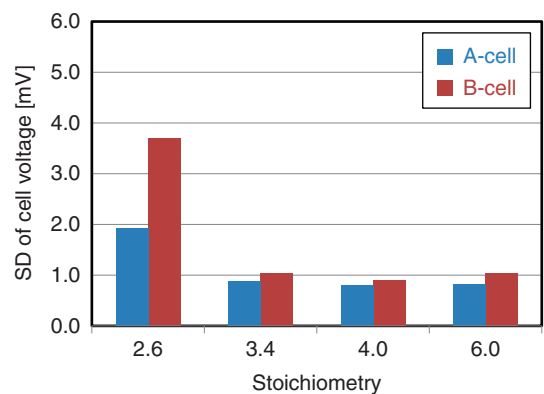


Fig. 16 SD of cell voltage at various stoichiometric quantities

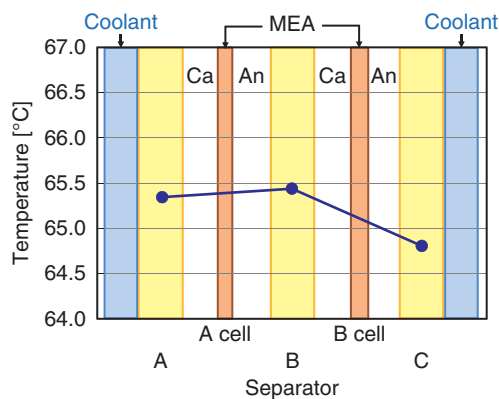


Fig. 15 Separator temperature of each cell

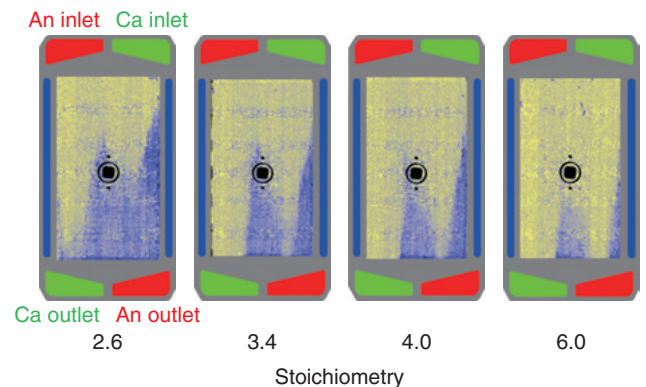


Fig. 17 Neutron radiography image at various stoichiometric quantities

4.3.2. 冷媒温度高温化の効果

冷媒温度を高温化させた際の滞留水低減に対する効果を確認した。Fig. 20 に冷媒温度と電圧挙動の関係を標準偏差で示す。冷媒温度が 72.5℃ 以上において電圧挙動が安定化する傾向が確認された。

Fig. 21 に発電エリアのガス流路下部における滞留水の定量化結果を示す。冷媒温度高温化により滞留水の低減が確認できた。これはセル内部の環境温度が上昇したことで飽和蒸気圧が上昇し結露量が減少したためと推定される。

Fig. 22 に各冷媒温度におけるセル電圧と抵抗過電圧の

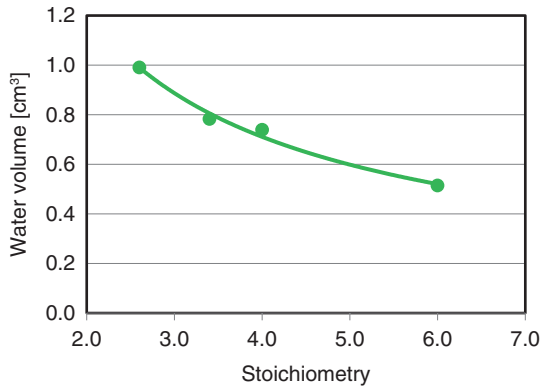


Fig. 18 Water volume at various stoichiometric quantities

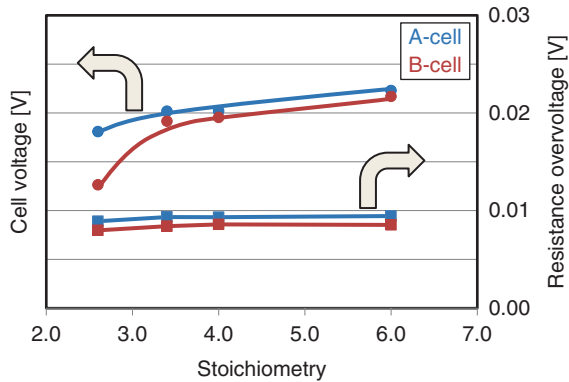


Fig. 19 Cell voltage and resistance overvoltage at various stoichiometric quantities

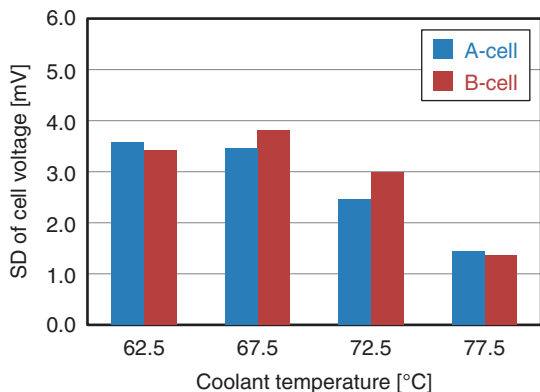


Fig. 20 SD of cell voltage at various temperatures

関係を示す。ストイキオメトリの場合とは異なり冷媒温度上昇によって抵抗が上昇し、発電性能が低下することが確認された。これはセル温度上昇によってガス流路内の滞留水を低減させると同時に MEA の含水率も低下させていることが原因と考えられる。冷媒温度高温化は滞留水低減には効果があるが、抵抗過電圧上昇によって発電性能が低下することが明確になった。

4.3.3. アノードパージによる滞留水低減効果

実車におけるアノードパージが滞留水量に与える影響を確認した。Fig. 23 にアノードパージ制御におけるセル電圧の標準偏差の変化を示す。アノードパージによって電圧挙動を改善できることが判明した。

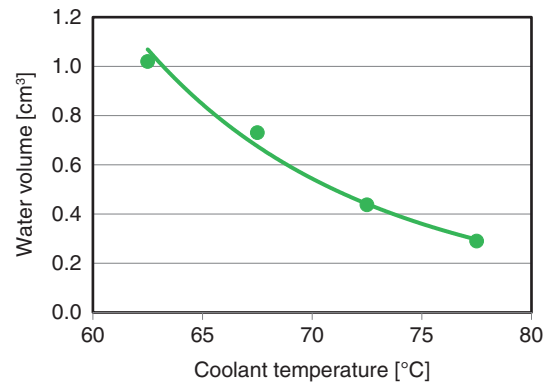


Fig. 21 Water volume at various coolant temperatures

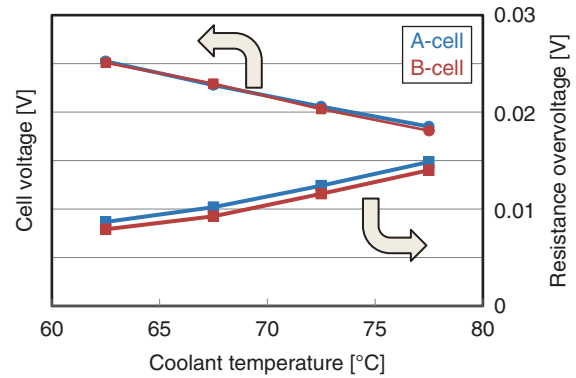


Fig. 22 Cell voltage and resistance overvoltage at various temperatures

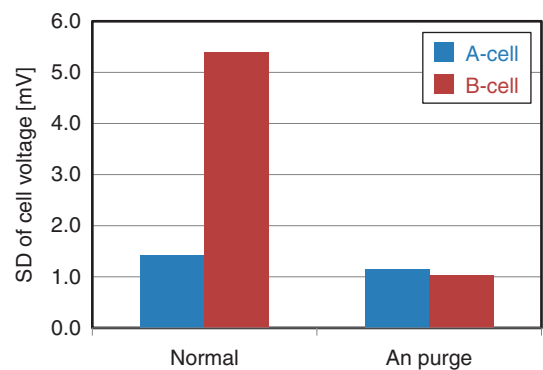


Fig. 23 SD of cell voltage before and after An purge

Fig. 24 にアノードパージ制御を開始した際の A セルと B セルのガス流路下部の滞留水量の変化を示す。アノードパージによって B セルの滞留水が低減し A セルと同等となっていることが確認された。

また、アノードパージのセル電圧への影響を Fig. 25 に示す。アノードパージによる発電性能の低下は観察されなかった。よって、ガス流路の滞留水のみが排水され、MEA の含水は保たれていると考えられる。これらの結果からアノードパージは滞留水低減効果が得られ、電圧挙動も安定し発電性能も維持できることが明確になった。

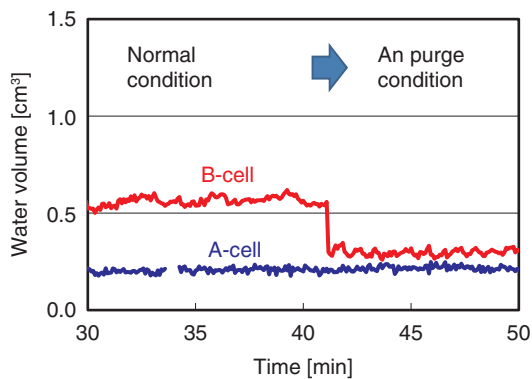


Fig. 24 Transition of water volume before and after An purge

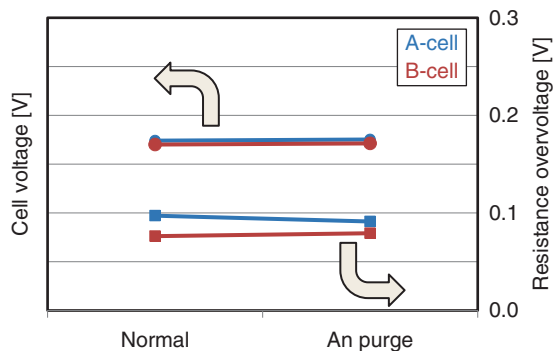


Fig. 25 Cell voltage and resistance overvoltage before and after An purge

5. 実車システムへの適用手法の検討

以上の結果をふまえて、実車システムへの滞留水低減手法の適用を検討した。実機セルの結果より性能を損なわずに滞留水を低減できる手法として、カソードのストイキオメトリ増大とアノードのパージが有効であることを見出した。上記の手法において、発電効率と燃費を低下させない範囲で調整をおこない制御として適用させた。

Fig. 26 に滞留水対策前後における発電中の中性子ラジオグラフィ画像を示す。発電時の滞留水が効果的に低減していることが確認された。

Fig. 27 に対策制御の効果を 4.2.1 項で提示した滞留水と電圧挙動の関係において示す。A セルと B セルの滞留水量を低減させ、かつ B セルの滞留水量を A セルと同等レベルに近づけることが可能となった。滞留水量の低減にともない電圧挙動の安定性も向上した。

対策制御によって滞留水量をコントロールし電圧挙動の安定化を図りつつ発電性能を維持することが可能となった。

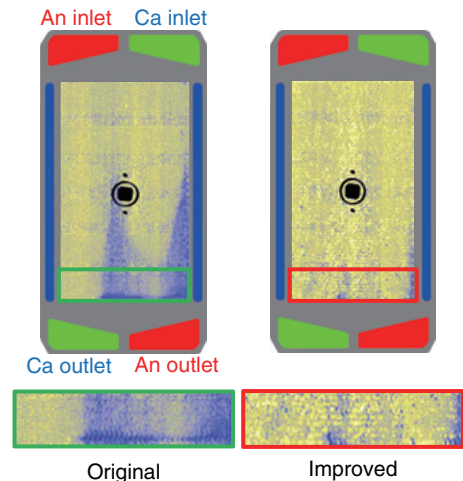


Fig. 26 Neutron radiography image of original and improved generation environment

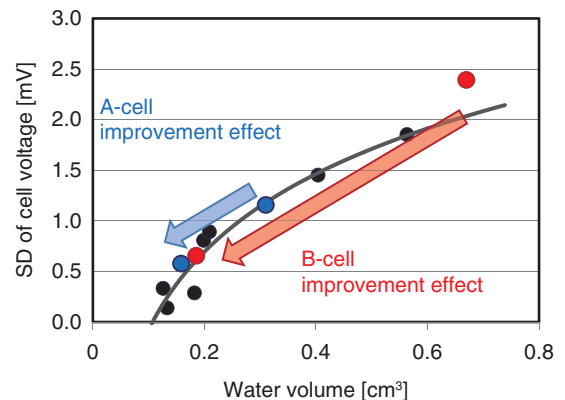


Fig. 27 Relationship of water volume and cell voltage

6. まとめ

実機セルと側面方向観察セルを用いて中性子ラジオグラフィにて滞留水を観察し、滞留水と電圧挙動の関係を突き止め、実車システムへの滞留水低減手法の適用をおこなった。以下に要約する。

- (1) 中性子ラジオグラフィで発電時の水挙動を観察することにより滞留水が発電時のセル電圧挙動に影響を与えていることを明確にした。
- (2) 側面方向観察セルによって水の滞留位置を切り分けて解析をおこなうことにより、滞留水量がセルによって異なり、その原因が発電環境に起因することを立証した。
- (3) 実機セルにて発電性能と滞留水を確認しながら滞留水低減手法を検討し、カソードストイキオメトリ増大とアノードパージ手法が有効であることを見出した。
- (4) 上記手法を実車の制御に適用し、MEAの含水と滞留水の排水を両立させて発電性能を維持したまま電圧挙動を安定化させることが可能となった。

参考文献

- (1) Wang, H: PEM FUEL CELL DIAGNOSTIC TOOLS, CRC Press, 260p.(2012)
- (2) Hickner, M. A., Siegel, N. P., Chen, K. S., Hussey, D. S., Jacobson, D. L.,: Observations of Transient Flooding in a Proton Exchange Membrane Fuel Cell Using Time-Resolved Neutron Radiography, Journal of The Electrochemical Society, Vol.157(1), p.B32-B38(2010)
- (3) Eller, J., Rosén, T., Marone, F., Stampanoni, M., Wokaun, A., Büchi, F. N.,: Progress in In Situ X-Ray Tomographic Microscopy of Liquid Water in Gas Diffusion Layers of PEFC, Journal of The Electrochemical Society, Vol.158(8), p.B963-B970(2011)
- (4) Teranishi, K., Tsushima, S., and Hirai, S.,: Analysis of Water Transport in PEFCs by Magnetic Resonance Imaging Measurement, Journal of The Electrochemical Society, Vol.153(4), p.A664-A668(2006)
- (5) 独立行政法人日本原子力研究開発機構
<http://sangaku.jaea.go.jp/3-facility/02-field/12-23.html>
- (6) 斉藤信広, 菊池英明, 中尾靖宏:FCX クラリティ搭載の新燃料電池スタック, Honda R&D Technical Review, Vol.21, No.1, p.15-22
- (7) 田中慎太郎, 田中之人:中性子ラジオグラフィによる燃料電池内部の水分布可視化, Honda R&D Technical Review, Vol.23, No.1, p.43-48

- (8) Boillat, P., Frei, G., Lehmann, E. H., Scherer, G. G., Wokaun, A.: Neutron Imaging Resolution Improvements Optimized for Fuel Cell Applications, Electrochemical and Solid-state letters, 13, B25-B27(2010)

■著 者■



千葉 裕 人



岩 澤 力

太陽光下で利用可能な 投影式2眼立体視システムの研究

Projected Texture Stereo Vision System in Sunlight

青山 千秋*
Chiaki AOYAMA

要 旨

太陽光下においても模様のない床面までの相対距離を、非接触でリアルタイムに計測できる2眼立体視カメラシステムを開発した。模様を投影した画像と投影していないときの画像を高速で交互に何枚も撮影し、それぞれの画像を画素内で積分し、画素外で差分するカメラを開発した。パルス発光による目に対して安全な Class 1 模様投影器とこのカメラを組み合わせることにより、10 万 lx の太陽光下でも反射率が 5% 以上あれば、対象の表面が無地であっても距離を計測でき、0.9 m から 1.5 m の範囲で 1 mm の距離精度を達成した。

ABSTRACT

A binocular stereo vision camera system able to measure relative distance to a non-textured floor in real time without contact even under direct sunlight has been developed. A camera that alternately captures images with and without a projected texture at high speed, integrates the respective images within the pixels, and outputs the difference between them outside the pixels was developed for the system. The combination of this camera and a texture projector using a Class 1 laser that is safe for the eyes for pulse light emission has made it possible to measure the distance to a subject with a non-textured surface even under sunlight of 100000 lx if its reflectivity is at least 5%, achieving a measurement accuracy of 1 mm in a range between 0.9 m and 1.5 m.

1. まえがき

二足歩行ロボットが自由に歩行するために、床面までの相対距離をリアルタイムで測定することが求められている。

そのために Honda では屋内での歩行を対象として床面センサ⁽¹⁾ (Fig. 1)を開発し、ASIMO に搭載した。床面セン

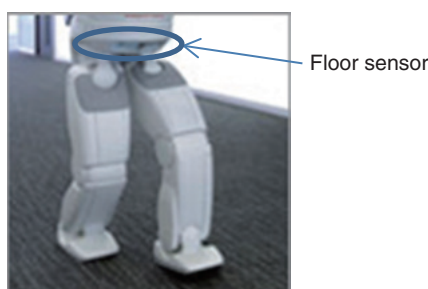


Fig. 1 Floor sensor of ASIMO

サは立体視の一手法である光切断法を利用している。この手法はライン光を投影し、その画像上の位置から三角測量の原理で距離を測定する手法⁽²⁾ (Fig. 2)であり、投影器を利用することで無地の面に対しても距離が測定できる。通常の光切断法においては、1本のライン光をスキャンして平面までの距離を測定するが、歩きながらスキャンさせると、スキャン中に平面までの距離が位置によって変化して

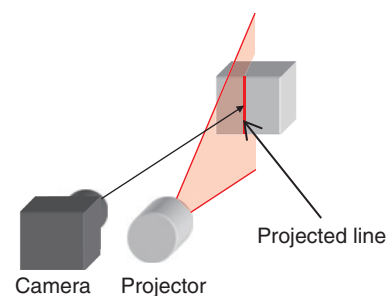


Fig. 2 Light-section method

* 基礎技術研究センター

しまうために測定できない。そこで、複数本同時に投影することで、ラインごとの同時性を保ち、平面までの距離を歩きながらでも測定可能としている。

簡易な画像処理でラインを検出するために Fig. 3 のようにライン光以外は黒く写るようにした。具体的には光源に狭帯域波長で発光するレーザを利用し、カメラには狭帯域波長だけを透過するバンドパスフィルタを取り付けた。レーザの波長を近赤外光とすることで、近赤外光がほとんど出ていない蛍光灯下ではライン光だけの画像が得られる。

ところが、太陽光下では近赤外光が非常に強いため、Fig. 4 のように床の模様が見えてしまうことがある。その場合、床の模様が線状であるとライン光とその模様が区別ができず、太陽光の差し込む窓際では利用できない。

光源の強度を上げれば相対的に環境光の影響を低減できるが、安全性に問題が生じる。レーザのようなレンズにより1点に集光できるような光源は、眼に対する安全性条件が厳しく、光源の強度を上げることは困難である。また、レーザ光源以外では距離によらず明確なライン模様を投影することが困難であり、光切断法は利用できない。

投光を用いない ASIMO の頭部でも使われている多眼立体視は眼に対して安全であるが、無地の面については距離が測定できない。三角測量の原理で距離を求めるとき、画像間で対応を取るために明確な画像の特徴を必要とするからである。床面に明確な特徴のない無地や無地に近いことは特別なことではないため、多眼立体視も床面に対する距離センサとしては利用できない。

模様がないところでも距離を出せるようにするには、数 m 程度の距離であれば模様の投影器を使って物体表面に模様を付加することで解決できる⁽³⁾(Fig. 5)。ただし従

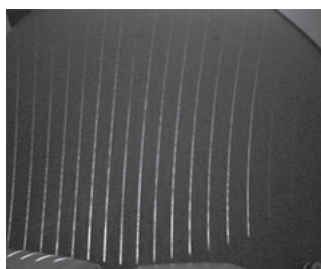


Fig. 3 Good image for floor sensor



Fig. 4 Bad image for floor sensor

来のカメラを使ったシステムでは、太陽光下においては模様が不鮮明になり測定不能であった(画像例は後述)。太陽光下でも立体視の対応処理に使える鮮明な模様が投影された画像を得られるようにすれば、無地の面でも距離が測定できるようになる。

そこで、次のような要件でシステムを開発した。

- (1) 不定形の無地の面までの距離を 0.9 m から 1.5 m の範囲で制御に十分な精度で測定すること
- (2) 10 万 lx の太陽光下で使えること
- (3) 光源が眼に対して安全であること (Class 1 に適合)

本論文では、システム原理、実装、計測結果について報告する。

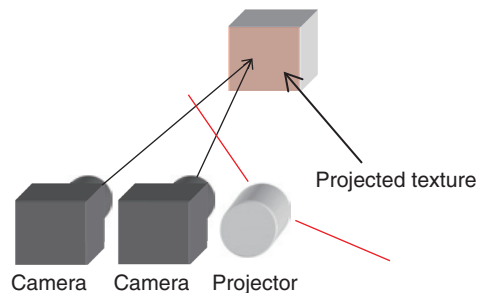


Fig. 5 Projector stereo camera system

2. システム原理

本研究では2台のカメラと1台または2台の模様投影器により投影式多眼立体視システムを構成した。そして、眼に対する安全性を確保しながら太陽光下でも模様が見えるようなカメラと投影器を開発した。

それぞれの構成要素について環境光への耐性向上の原理を説明していく。

2.1. 差分カメラ

環境光の影響を無くすために、投影したときと投影していないときの画像の差をとることで、両方に共通の環境光成分は打ち消されて無くなるという原理を利用する (Fig. 6)。仮に、投影していない環境光成分だけの2枚の画像を順に撮影し画像間の差をとると、動きのない場合は差が0 (ゼロ)になる。つまり、真っ黒い画像が得られる。

動きがある場合は画像間の時間差により撮影対象の画像位置が変化してしまっているため、差をとっても厳密な0 (ゼロ)にならない。ところが、移動しながら撮影する場合でも、10 μ sec 以下の時間間隔で撮影すると、ロボットの歩行程度では画像上で白と黒の境界であっても画像のずれによる誤差はノイズ以下になるため無視できる。しかし、10 μ sec での露光だけで十分な明るさの画像を得ようとする、光源はその瞬間に極めて明るい光を出す必要が

ある。ところが、そのような光源はロボットに搭載することは困難である。

そこで、時間差を0(ゼロ)に近づけつつ十分な明るさの画像を得るために、短時間露光画像を何枚も積分する手法をとる。この場合積分期間を5 msec とすると、時間差が50 μsec 以下であれば動きにより発生する誤差はノイズ以下となり無視できる。投影器として発光間隔が100 μsec 、発光時間が数 μsec のものは入手可能であり、5 msec の間に50回積分可能であるため画像として十分な明るさが得られる。

しかし、短時間露光した画像を撮影のたびに100 μsec 位以下で読み出して積分することは困難である。1秒間の読み出し枚数で言えば、毎秒10万枚になり、そのような高速読み出しは、大型の高速度カメラでしか実現できない。

そこで、画素内で高速にノイズもなく積分可能であることに着目し、電荷読み出しと積分動作を画素内で行わせ、差分を画素外で行うようにした。

画素構造の単純なモデル (Fig. 7) と、その画素内で発生した電子を積分する流れ (Fig. 8) を示す。単純化した1画素には中央に光電変換部(フォトダイオード)があり、左右に電荷蓄積部(キャパシタ)がある。光電変換部と電荷蓄積部の間には電子の移動を制御する転送ゲートがある。

画素構造のAからA'の間の経路におけるポテンシャルを示した図では上にあるほどポテンシャルが高いことを示し、電子はポテンシャルの低い方、つまり下へ移動していく。移動経路にポテンシャルの高いところがあると乗り越

えられずその手前に蓄積される。

一連の積分動作は、電荷蓄積部の電子を排出して0(ゼロ)にする処理から始まる。その後、光電変換部で発生した電子は転送ゲートを左右交互に開くことで、電子もその都度、左右交互に転送され、電荷蓄積部に積分されていく。積分処理を何回か繰り返した後で、蓄積された電子のレベルを読み出すことで画素信号が得られる。この転送ゲートで交互に積分する動作は1秒間に10万回以上繰り返すことが可能であるが、積分した画素信号を全画面にわたって読み出すことは最大50回程度である。

読み出した信号について同じ光強度入力で出力が同じになるように補正を行い補正後に差分を取る。画素信号はそのままでは感度差やオフセット差により、たとえ同じ強度の光が全画素に入射したとしても出力は画素ごとに異なってしまうので補正が必要である。補正することで撮影環境

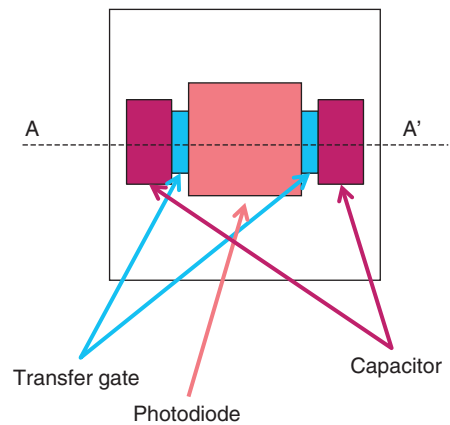


Fig. 7 Simple pixel model

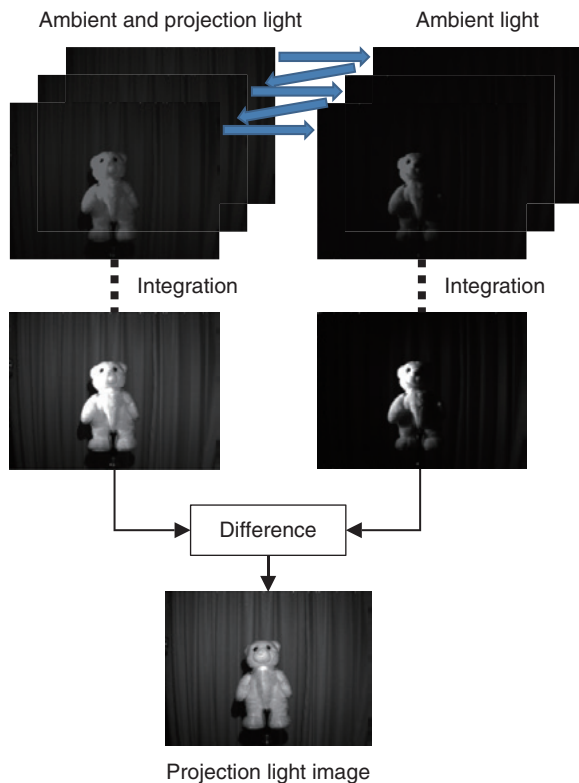


Fig. 6 Integration difference method

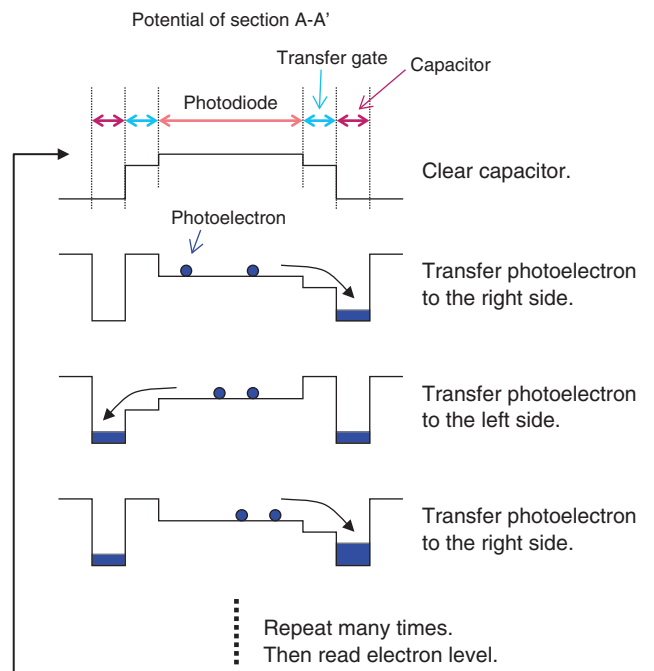


Fig. 8 Integration sequence

に変化が無ければ出力は0(ゼロ)となる。

画素内で差分を取ることは実現可能であるが、補正ができないため、差分を撮像素子内で行わないようにした。

2.2. 投影器

投影器の光源には短時間で大出力の狭帯域波長光を出力可能なことからレーザを採用した。レーザの前に拡散板を配置することで、レーザであっても光源に広がりが生じ、レンズで集光しても1点に光が集まらないようになる。拡散板により網膜上で集光されないため数十倍安全性が向上する。

模様様の投影方法にはモアレ方式を利用した (Fig. 9)。等間隔の格子を平行に離して配置することで、位置により光源が見えたり遮られたりすることで縞模様様の投影される。視点1から見た場合は格子が重なって見えることで光源がスリットの間隙から見える。見る位置を変えることで光源の見える量が減り、視点3ではスリットに遮られて光源は見えない。視点の位置に対象があるとすると視点1では明るく、視点3では暗く対象が見えることになる。つまり、視点の位置に白色の板を置いたとすると縦じまの模様様の投影される (Fig. 10)。

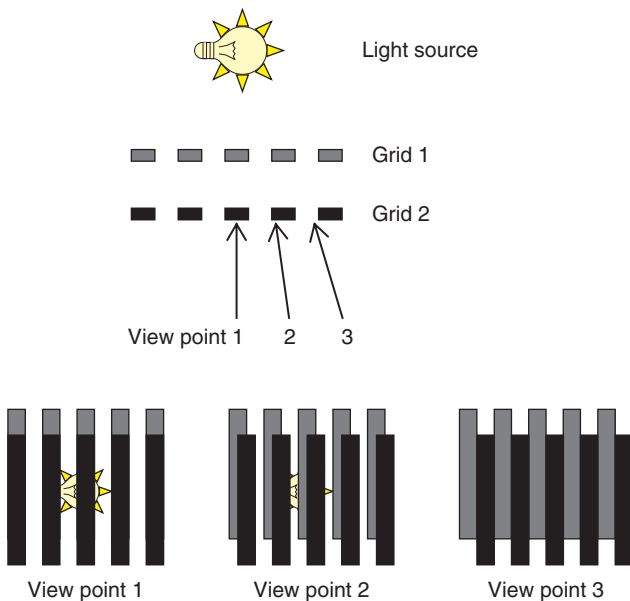


Fig. 9 Moire method



Fig. 10 Moire image

3. 差分カメラシステム

差分カメラシステムの構成要素と基本的処理について概説する。

3.1. システム構成

2台の差分カメラに1台または2台の投影器を搭載している (Fig. 11)。撮像素子の有効画素数は 640×480 、1画素の大きさは $12 \mu\text{m}$ 角、基線長は 170 mm 、レンズの焦点距離は 8.5 mm である。

差分カメラは2台のカメラヘッド、カメラ制御基板、インタフェース基板で構成されている (Fig. 12)。撮像素子から出力された映像信号は、カメラ制御基板、インタフェース基板を経てPCへ転送される。カメラ制御基板の指示により投影器はレーザダイオード (LD) を発光させる。

カメラからは積分された画像が出力され、PCによって線形補正を行った後で差分をとり立体視処理によって距離情報を得る。

3.2. 画素回路

1画素内の回路は光電変換部、転送/ドレインゲート、電荷蓄積部、読み出し回路に分かれる (Fig. 13)。光電変換部は光を電子に変換する。転送ゲートの先は電荷蓄積部に繋がっていて、発生した電子は蓄積(積分)される。ドレインゲートの先は電源につながっていて、発生した電子は消滅する。電荷蓄積部にたまった電子は読み出し回路により電流の大きさに変換されて画素の外に読み出される。今回製作した素子は電荷蓄積部を四つ持つが、差分カメラとしての動作においてそのうち二つを使用する。

画素から読み出された信号は素子内でAD変換され、14ビットのデジタル信号として外部へ出力される。

3.3. 画素構造

1画素のサイズは一辺が $12 \mu\text{m}$ の正方形である。マイクロレンズの焦点となる位置に光電変換部を配置している。光電変換部を埋め込みフォトダイオード構造とするこ

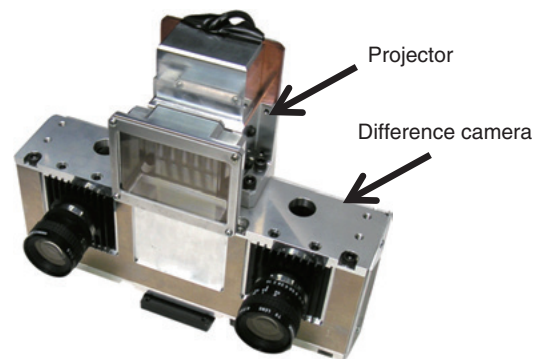


Fig. 11 Difference camera system

とでノイズの発生を低減している。光電変換部で発生した電子は転送ゲートを通して四つある電荷蓄積部のいずれか、または、ドレインゲートを通してドレインへ送られる。

3.4. 投影器

投影器は半導体レーザの前に拡散板を置き、その先に2枚の格子を配置した。投影器の光源にはピーク出力300 W、波長800 nm、最短発光間隔100 μsec の半導体レーザを使用している。縞模様を投影するために使用した格子は、線幅が0.25 mm、間隔が0.25 mmの縦縞をガラス板に

転写したものである。格子板と格子板の間隔は20 mmである。

2眼立体視用に縦縞と斜め縞の2種類の投影機を組み合わせ、誤対応が発生しないようにしている。縦縞だけでは左右の対応を取る際の探索範囲に同じパターンが繰り返り現れてしまい、距離が一つに決定できないが、斜めの縞を加えることで一つに限定され、距離が決定できるようになる。事前におおよその距離がわかっている場合は探索範囲を狭く限定できるため縦縞だけで十分である。

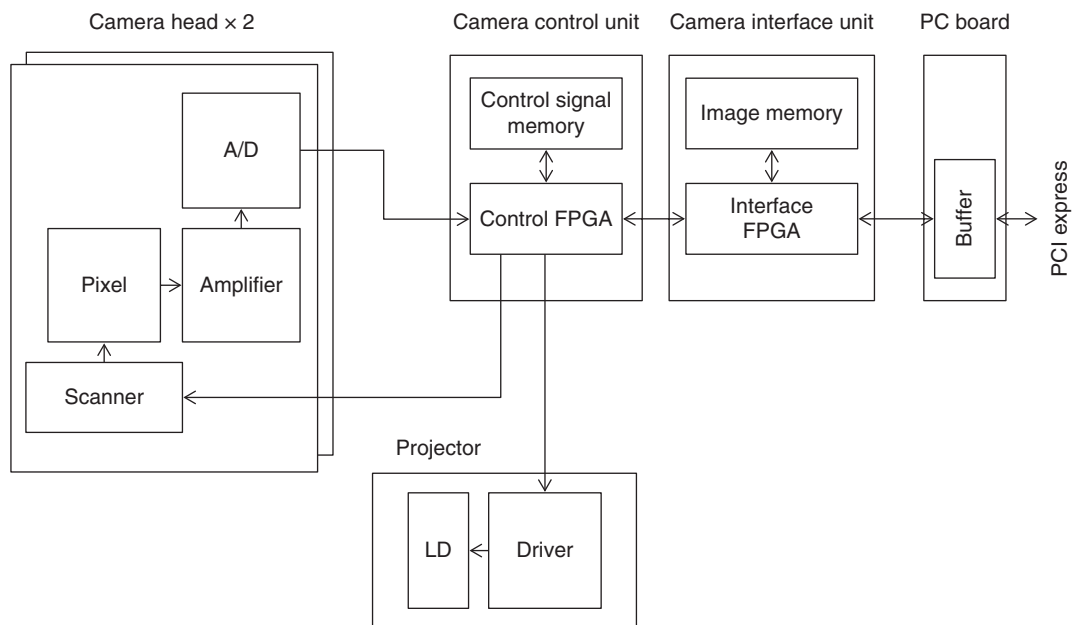


Fig. 12 Difference camera block diagram

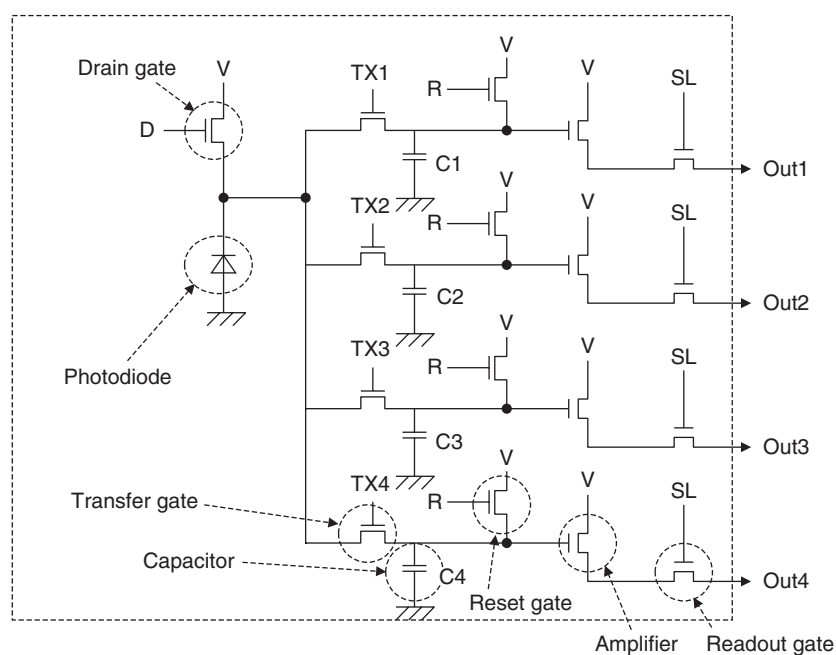


Fig. 13 Pixel circuit

3.5. シャッター制御

1回の露光期間は100 μsec 、露光回数は50回である (Fig. 14)。露光開始から終了までの時間 (露光期間) は5 msec となる。受光した光パルスで発生した電子を十分転送できる期間だけ転送ゲートを開き、それ以外では発生した電子をドレインゲートを開いて捨てている。

3.6. カメラ映像信号処理

同じ光強度の入力に対して出力が同じになるように、電荷蓄積部ごとに多段階の折れ線近似で補正する。この補正により画素間の出力値のばらつきは、光子の統計的揺らぎによって発生する除去不能なショットノイズ以下になる。

線形化した信号について差分を取る。差を取った結果としてマイナスになることがあるため、差の結果にオフセットを加えてマイナスが発生しないようにしている。

3.7. 立体視処理

入力画像のひずみを補正しエピポーラ線を合わせる変換をし、明度補正をしてから、対応処理を行う。対応付けには SAD (Sum of Absolute Difference) を利用する。対応をとる領域の大きさは横13×縦11画素である。

明度補正は領域の平均輝度で中心画素の輝度を正規化する処理で、反射率の低い領域 (暗い領域) と、反射率の高い領域 (明るい領域) の強度が同じようになり SAD の対応処理結果の信頼性を一定のしきい値で判定できるようになる。

暗すぎる領域を補正するとノイズが大きくなりすぎるので暗すぎる領域は補正しないようにしている。

4. カメラシステムの距離精度

2眼立体視カメラシステムとしての距離精度を計測した。計測対象は黒い平面と白い平面とした。黒い平面の反射率は5%で、白は83%である。外乱光としてはハロゲンライトを使用し、800 nm 付近でのパワーが10万 lx に相当するように調整して照射した。投影光強度は Class 1 で許容される最大強度の70%としている。

平面とカメラ間の距離を直動ステージで2 cm ごとに変え、検出した距離情報のうち画面中央付近の実空間で20 cm 四方の領域について平均を取ったものを平面までの距離とした。

計測に利用した画像と、発光時以外にも露光を継続する通常のカメラの露光タイミングで撮影した画像を Fig. 15 に示す。差分カメラであれば外乱光の有無によらず同様の画像が得られる。通常のカメラの場合は外乱光により飽和して映らなくなるか、飽和しないように感度を下げると模様が薄くなってしまう。通常のカメラは光源の発光期間以外にも積分動作を行ってしまうため、投影光だけによる画像の明るさを同じにしたとき、環境光が入るとより明るい画像になってしまう。つまり、環境光の影響を大きく受けてしまう。

計測結果を距離と誤差の関係としたグラフとして Fig. 16 に示す。誤差は、平均距離と真値との差の絶対値に、10回測定した距離情報の標準偏差 (σ) を3倍した値 (3σ) を加えて表示している。黒い平面を外乱光の無い条件で測定したのが黒い破線、外乱光のある条件が黒い実線、白い平面を外乱光のない条件で測定したのが灰色の破線、外乱光のある条件が灰色の実線である。

反射率や環境光によらず0.9 m から1.5 m の範囲で誤差

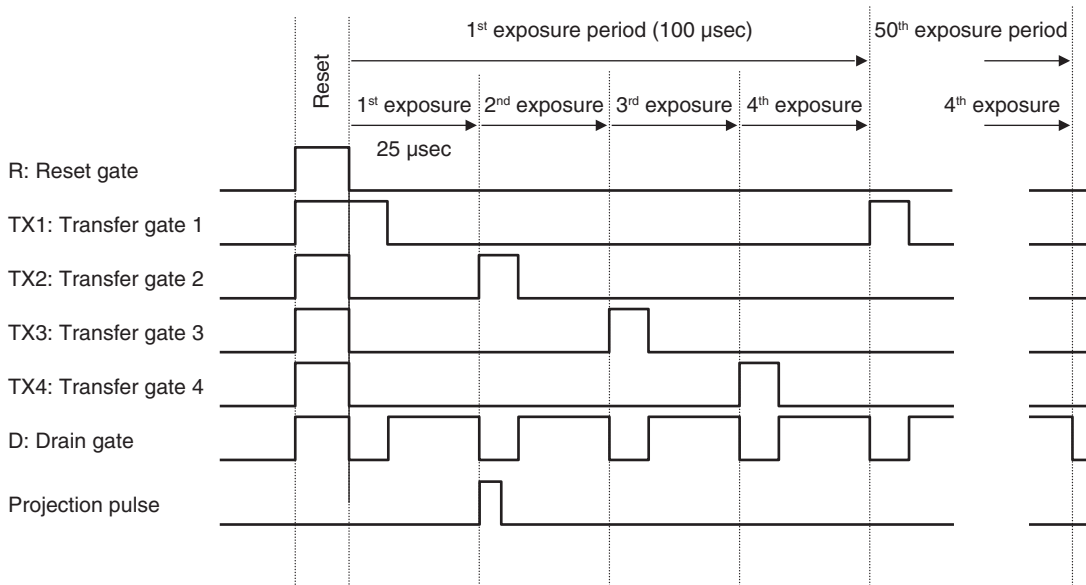


Fig. 14 Shutter timing

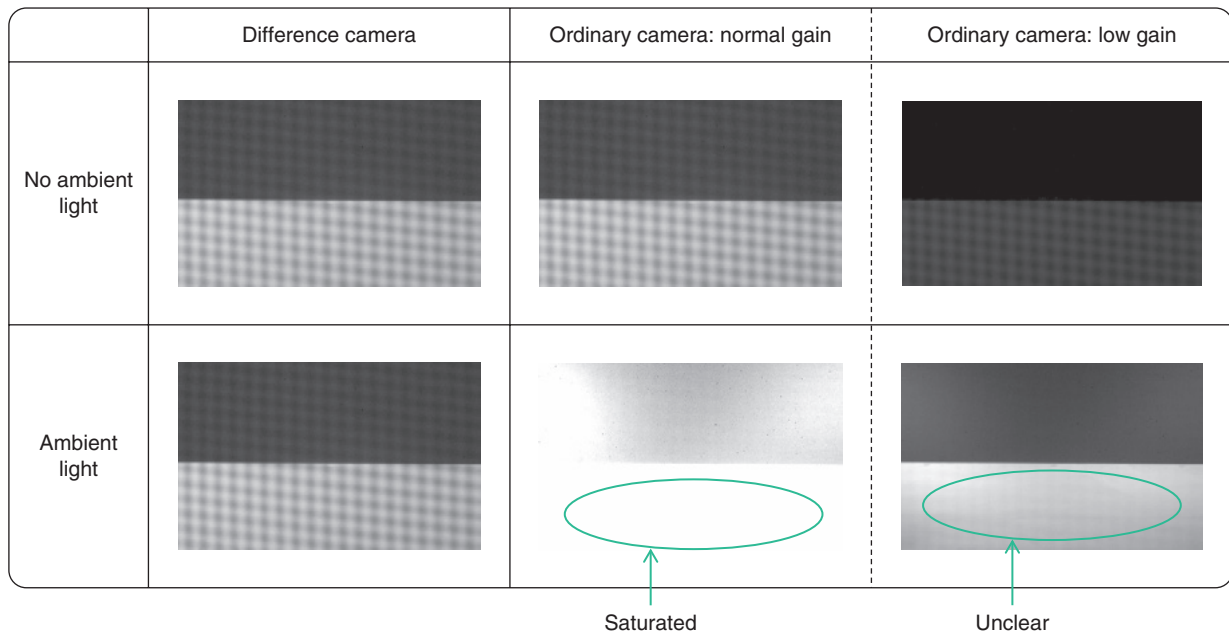


Fig. 15 Difference image and ordinary image

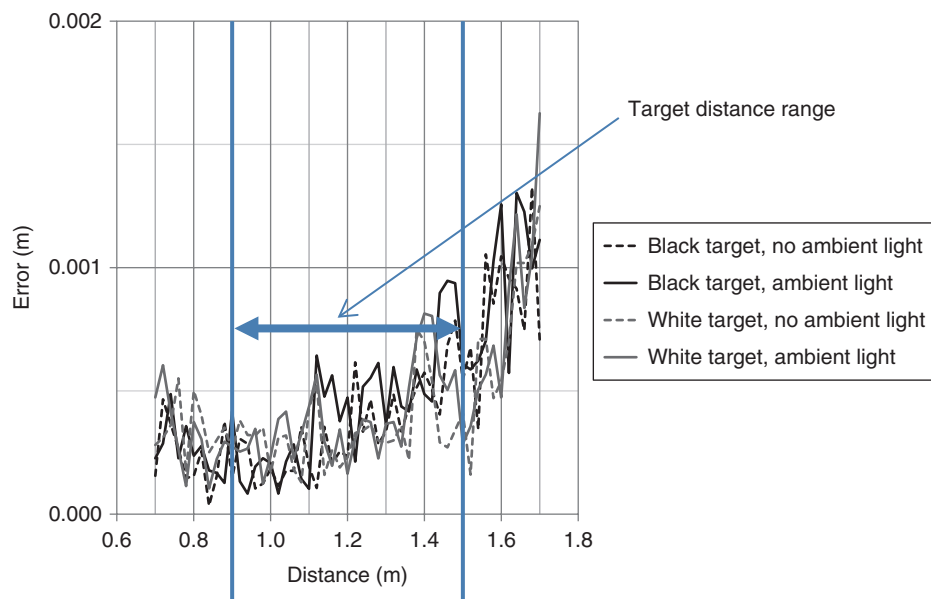


Fig. 16 Measurement error

が 1 mm 以下であることがグラフからわかる。これは歩行制御に十分な精度である。

5. 差分カメラの応用例

外乱光を除去して投光成分だけの画像が得られることから、距離センサ以外の応用として、認識性能の耐環境性向上に利用できる。つまり、屋内で照明をあてて適切な画像処理をするようなことが、屋外でも可能となる。

投影器の格子を外して模様の無い投光器として、屋外で太陽光が当たる向きを変えて画像を撮影した。その画像を

ASIMO で使用している顔認識処理に適用し、通常画像と差分画像との認識結果を比較した (Fig. 17)。

緑の四角い枠は顔検出結果の領域を示している。画像左の緑、または、赤い帯は登録してある人との一致度 (スコア) を示す帯である。長いほど良く一致していることを示す。緑であれば同一の顔であり、赤であれば異なる顔と判定している。

得られた画像から差分画像では太陽光の影響を受けていないことが明らかであり、認識結果も影響を受けていないことを示している。逆光の通常画像で画面上部に見られるゴーストも差分画像では除去されている。

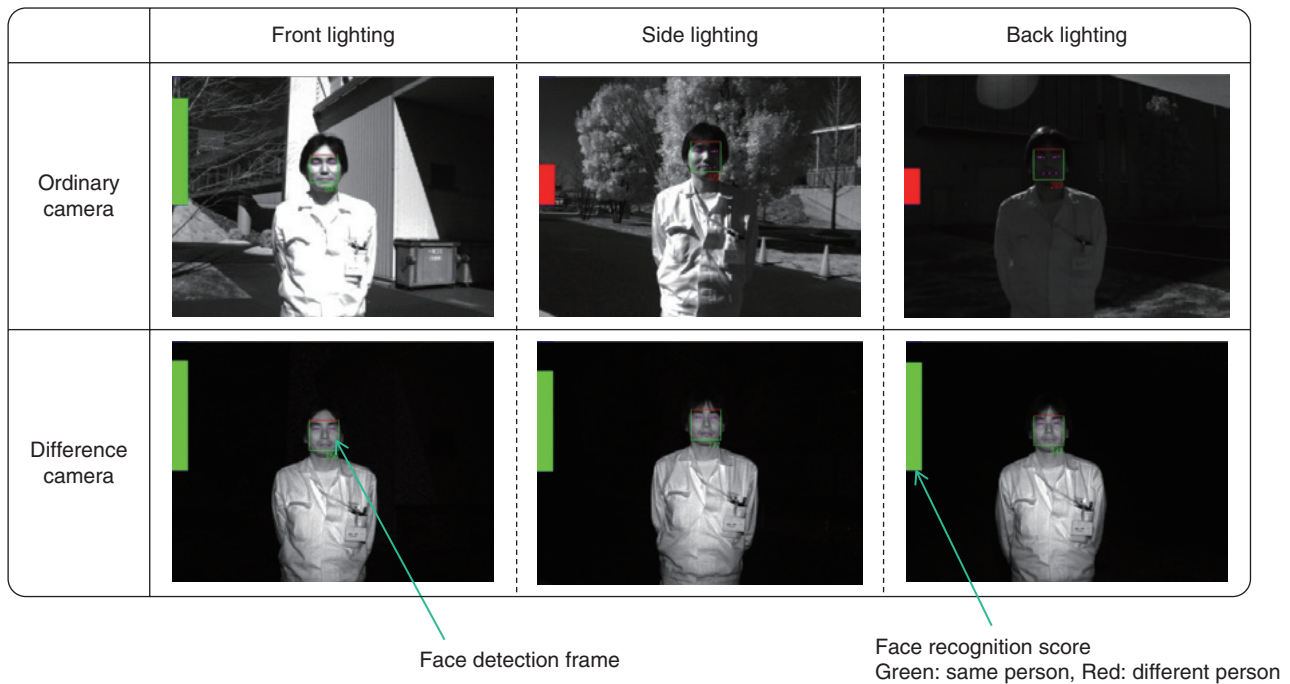


Fig. 17 Face recognition results

6. まとめ

太陽光下において無地の面に対しても距離が計測できる差分カメラシステムを開発した。

対象物の反射率や環境光によらず 0.9 m から 1.5 m の範囲でロボットの歩行制御に十分利用可能な距離精度の 1 mm を達成した。

模様のない投光をすることで顔認識精度も向上させられることを示した。

謝 辞

本研究にあたり、撮像素子開発にご指導いただいた静岡大学 川人祥二先生に紙面を借りて厚く御礼申し上げます。

参考文献

- (1) 重見聡史, 河口裕一郎, 吉池孝英, 川邊浩司, 小川直秀: 新型 ASIMO の開発, Honda R&D Technical Review, Vol.18, No.1, p.38-44
- (2) Oike, Y., Ikeda, M., Asada, K.: Design and Implementation of Real-Time 3-D Image Sensor With 640 x 480 Pixel Resolution, IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol.39, No.4, p.622-628(2004)
- (3) Konolige, K.: Projected Texture Stereo, Robotics and Automation (ICRA), p.148-155(2010)

■ 著 者 ■



青山千秋

球面ジョイントの非線形性を考慮した 排気系共振応力予測技術の構築

Development of Prediction Technology for Resonance Stress of Exhaust System by Considering
Nonlinear Properties of Spherical Joints

米 永 和 昭*
Tomoaki YONENAGA
堀 井 義 和*
Yoshikazu HORII

井 手 晴 夫**
Haruo IDE
中 川 博 史*
Hiroshi NAKAGAWA

樋 口 正 彦*
Masahiko HIGUCHI

要 旨

排気系全装状態での高サイクル振動応力を予測するため、実機応力測定と同等の結果を得られる高精度で汎用性のある予測技術を構築した。排気系高サイクル振動の現象を入力系と応答系の二つに分け、入力系は排気系に伝わるエンジン起振力の自由度と位相を複数次数考慮し、精度良く再現した。応答系は球面ジョイントの単体試験を実施し、スティックスリップ特性を取得し実験モデル化した。以上を反映することで、さまざまな排気形状に対し高精度な予測が可能となった。

ABSTRACT

A highly accurate and versatile prediction technology that provides results equivalent to stress measurement in the vehicle condition was developed. The purpose of this technology was to predict high-cycle resonance stress of the exhaust system in the fully assembled state. The phenomenon of high-cycle vibration of the exhaust system was divided into the two systems of an input system and a response system. The input system was accurately reproduced by considering the multiple degrees of freedom and multiple orders of phase of the engine excitation force transmitted to the exhaust system. The response system was experimentally modeled by conducting standalone tests of the spherical joint and obtaining the stick-slip characteristics. Application of the above enabled accurate prediction for various exhaust system shapes.

1. はじめに

近年、自動車に向上が求められている性能として燃費、エミッション、出力がある。排気系は、その性能向上のために、軽量かつ優れた昇温特性を求められるが、同時に高い信頼性を併せ持つ必要がある。

排気系の信頼性課題として、エンジン起振力に励起された共振現象による高サイクル疲労破壊があり、これを考慮した設計が必要である。

また、部品共用化の観点より、多くの車種で同一のホットエンド（主にキャタリストを含む部品）を共用しているが、コールドエンド（主にチャンバ、サイレンサを含む部

品）排気系バリエーションは増加傾向にあり、開発テスト工数増加に対する対応が求められている。同時に開発期間に対する短縮要望もあり、図面段階における短期間で精度良い高サイクル振動応力予測ができる Computer Aided Engineering (CAE) 技術構築が求められている。

従来より有限要素法 (Finite Element Method: FEM) による排気系を全装した状態での解析を、有限要素法 CAE ソフトウェアである NASTRAN による周波数応答解析を実施し、実機応力測定結果と相対比較をおこない対策検討に使用していた。

例として Fig. 1 に従来の解析手法による応力結果と、実機応力測定結果の比較を示す。モードごとの応力ピークの

* 四輪 R&D センター

** HONDA R&D AMERICAS, INC.

差が顕著な部分はあるが、対策検討用としての使用は可能なレベルである。

しかし、図面段階での仕様成立性判断をおこなうには、応力の絶対値評価が必要であり、この精度向上が課題となる。

FEMで精度の良い排気系アセンブリ解析を進めるには、部品間結合の適正なモデル化と精度の良いエンジン起振力のモデル化、さらに応答を精度良く再現するメッシュモデル作成の三つの課題がある。

とくに従来より部品間結合における条件設定の課題として、エンジンの揺動を吸収する役割をもつ球面ジョイン

ト (Fig. 2) のモデル化があった。ここには、排気ガスシールをおこなうための球面ガスケットが使用されており、特性として微小入力ではスティック状態を維持する。しかしある一定以上の入力に加わるとスリップ状態となり、フリクションを伴いながらしゅう動する。

例として Fig. 3 に球面ジョイント付き排気系のシェーカ加振テストイメージを、Fig. 4 に加振入力レベル違いによる周波数応答関数 (Frequency Response Function: FRF) の変化を示す。入力点は入力伝達効率を考慮し、今回使用したエキゾーストパイプの重心近傍とし、応答点は排気系全体の7か所の平均値として応答影響を平準化し比較した。

この結果より入力レベルが大きくなるにつれて応答レベルが低下していることが確認できる。これは球面ジョイントがスリップ状態になり、排気系が分断されることによる剛性の低下を表している。応答レベルの変化は、応力レベルと密接な関係があるため、応力精度を向上させるには、この部分が入力変化に追従して、スティックとスリップの挙動が変化するモデル構築をおこなう必要がある。これを構築するには、球面ジョイントモデルに摩擦を考慮する必要があるが、従来の解析手法は周波数軸の解析手法であり、時間により挙動が変化するこの現象を考慮することができなかった。

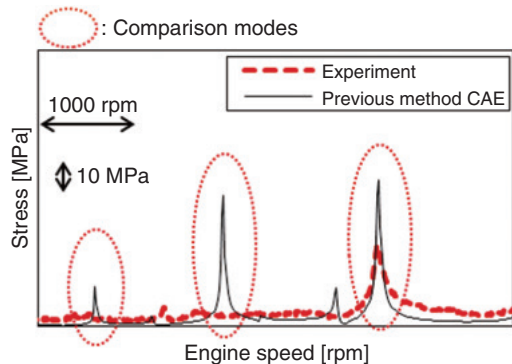


Fig. 1 Comparison of experiment and CAE by previous method

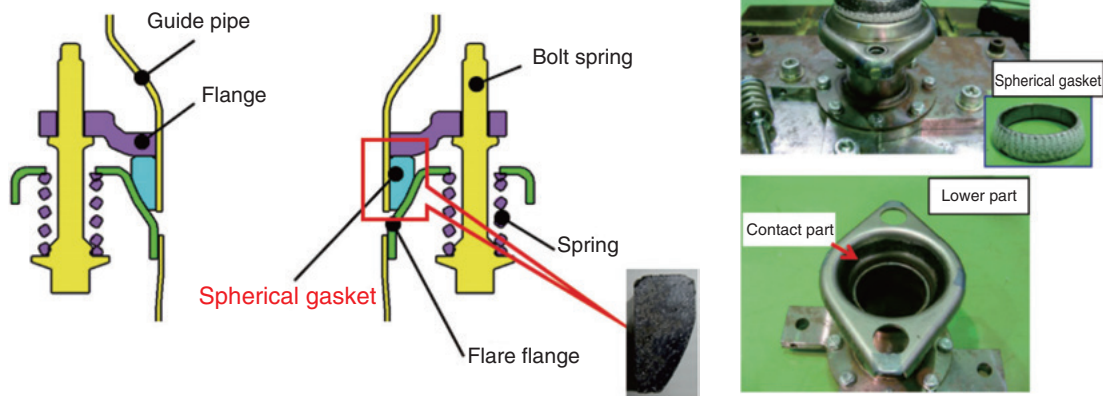


Fig. 2 Section and parts of spherical joint

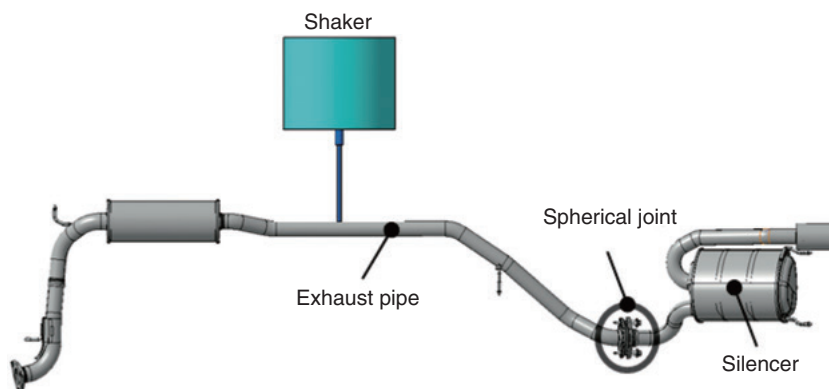


Fig. 3 Shaker test of exhaust system with spherical joint

今までも高サイクル振動挙動において、球面ジョイント挙動の影響について議論され、モデル化も試されているが⁽¹⁾⁻⁽³⁾、時間による挙動変化を考慮した解析手法がない上に、対象周波数が比較的低周波数領域に限定されており、今回求めたい高周波数領域までをカバーするに至っていない。

本稿では、排気系高サイクル振動応力予測技術として、球面ジョイントの非線形性を考慮したモデル化、エンジン起振力のモデル化、精度の良いメッシュモデル化を実施し、時間軸で解析をおこなう過渡応答解析に反映することにより、CAE 精度を向上させ、実機応力測定相当の応力予測技術構築をおこなった手法について述べる。

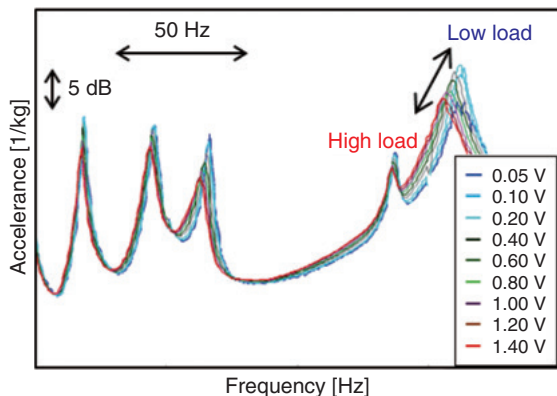


Fig. 4 FRF characteristics under different input conditions

2. 解析手法構築

解析対象部品は、排気系全装部品を構築する、直下コンバータ、エキゾーストパイプ、サイレンサとした。ここでは、Fig. 5 に示す検証用の簡易排気系を用い、手法構築を図った。

部品間の結合には球面ジョイントが使用されているため、しゅう動面にフリクションを考慮した実験モデルを定義した。

フリクションを考慮するには、排気系の時間変化による全体挙動を解く必要があり、その解析方法として過渡応答

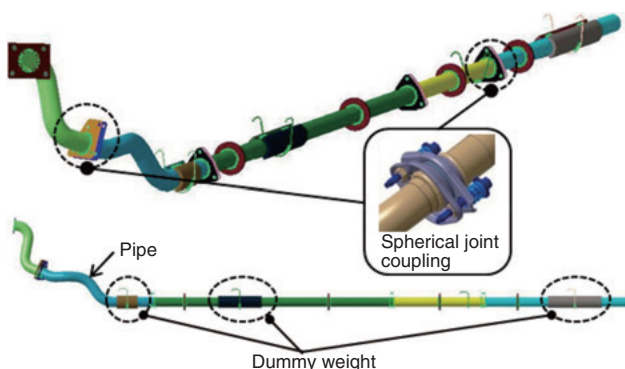


Fig. 5 Simple exhaust system layout for verification

解析があげられる。

しかし、メッシュモデルは多くの節点自由度を持つため、すべての節点自由度を用いた過渡応答解析は、計算負荷が大きくなる。これを解決するために、メッシュモデルをモーダル縮約して自由度を低減し、解析効率で有利となるモード合成法によりモーダル縮約モデルをアセンブリした。そして、このアセンブリモデルを使用した動解析結果より全体挙動を算出し、変位出力を詳細なメッシュモデルに与え、応力を求めた。

2.1. モデル構築

2.1.1. 球面ジョイント実験モデル化

球面ジョイントのモデル化には微小入力時のスティック特性と、大入力時のスリップ特性の二つの特性を考慮する必要がある。これらの特性取得方法として、球面ジョイントに単管を溶接したテスト治具を作成し、シェーカ加振テストによる回転剛性およびフリクショントルクの計測をおこなった。球面ジョイントのフリクション特性取得試験治具を Fig. 6 に示す。そして、テスト治具同様の解析モデルによる計算を実施し、テスト結果のスティック時のパネ値とスリップ時のフリクショントルクを同定することにより、スティックスリップ特性の実験モデル化を試みた。

フリクション特性取得方法として、倒れ方向の回転2自由度と、軸回り方向の回転1自由度でシェーカ加振テストを実施し、ヒステリシスループの取得をおこなった。シェーカ加振周波数は、治具の共振によるフリクショントルクへの影響を回避する必要がある。そのためにハンマリングテストによる FRF の共振周波数を確認し、この結果 (Fig. 7) より治具共振の無いことが確認できる 100 Hz での加振テストを実施した。

フリクション計測結果を Fig. 8 に示す。微小入力時はスティック特性を示しているが、ある一定の入力以上になるとスリップ特性を示し、ヒステリシスループを描く。この微小入力時の傾きはスティック時のガスケット剛性を

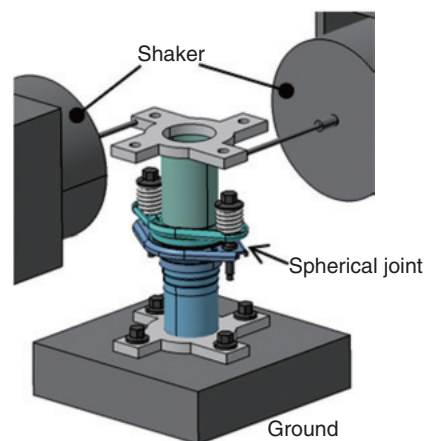


Fig. 6 Test equipment for measurement of friction characteristics

表し、ヒステリシスループの振幅は、スリップ時のフリクショントルクを表している。これらの結果よりスティックバネ定数とスリップ時のフリクション値を算出した。同時に入力違いによるフリクショントルクへの影響を確認すると、スリップ後の入力増加に対する変化は、変位は増加しているが一定の値を示すことがわかった。

次に、球面ジョイントの解析モデル概要を Fig. 9 に示す。このモデルは、入力がフリクショントルクより小さい場合は、Fig. 9 の右に示すスティックモデルはしゅう動せず、Fig. 9 の左に示すガasket 剛性を表すスティックモデルのみを使用する。入力がフリクショントルクより大きい場合は、スティックモデルに、スリップ時のフリクショントルクが追加され、しゅう動する。ここでは、回転 3 自由度

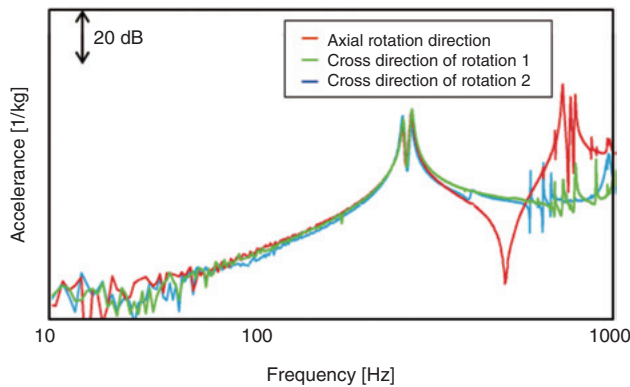


Fig. 7 FRF characteristics of spherical joint

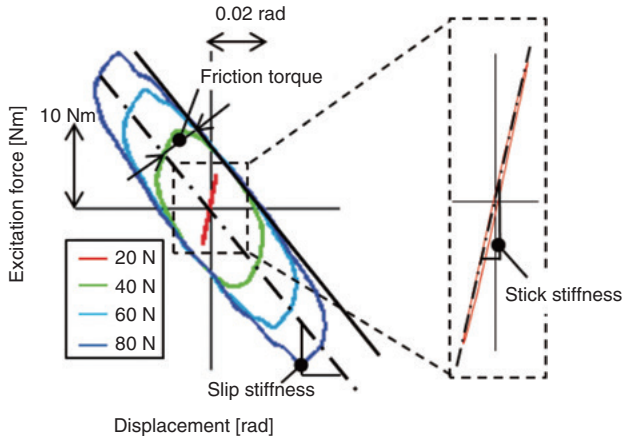


Fig. 8 Method of extracting spherical joint characteristics

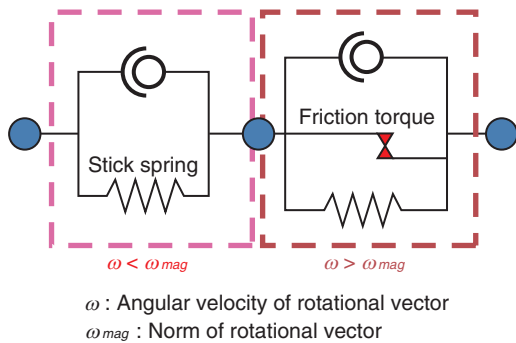


Fig. 9 ADAMS model outline of spherical joint

のフリクションを合力とする必要があるため、フリクションボールのモデルを Fig. 10 のように定義した。このモデルの回転 3 自由度のモーメントを表す式を以下に示す。

$$T_x = T_{x0} \cdot \frac{\omega_x}{\omega_{mag}}$$

$$T_y = T_{y0} \cdot \frac{\omega_y}{\omega_{mag}}$$

$$T_z = T_{z0} \cdot \frac{\omega_z}{\omega_{mag}}$$

T_{x0}, T_{y0}, T_{z0} : x, y, z 軸回りのフリクション

T_x, T_y, T_z : x, y, z 軸回りのモーメント

$\omega_x, \omega_y, \omega_z$: x, y, z 軸回りの角速度

ω_{mag} : 角速度のノルム

以上を用いて機構解析ソフトウェア ADAMS で計算した結果と、計測結果の比較結果例を Fig. 11 に示す。入力による挙動の変化とスリップトルクの比較より、このモデルの入力に対する挙動変化と、スリップ時のフリクショントルクの幅が実機を再現できていることがわかる。

2.1.2. エンジン起振力モデル化

排気系高サイクル振動の起振源には主にエンジンの主要次数振動が大きく寄与している。起振源であるエンジンから排気系に伝わる振動特性として、主に燃焼指圧加振とレシプロ系慣性力加振、そしてパワープラント共振による

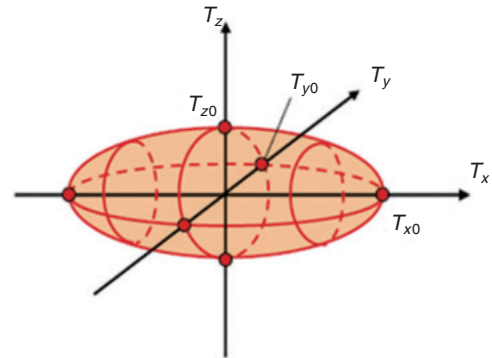


Fig. 10 Friction ball model

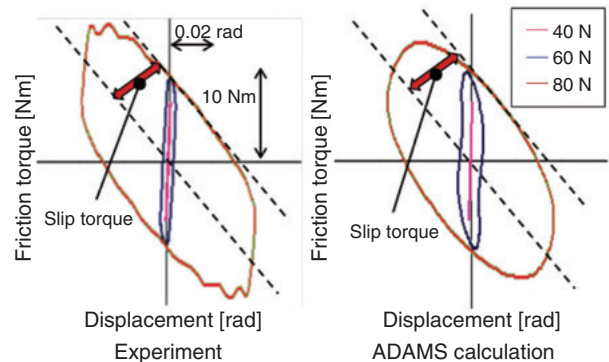


Fig. 11 Comparison of experiment and ADAMS calculation

加振があげられる。起振力を推定する手法として、レスプロ系挙動を計算し、FEMによるパワーブラント挙動を求める手法がある。しかし、この手法はモデル作成や計算に時間がかかり、今回おこなう解析には適さない。そのため、今回はこの入力境界条件の算出を、実機エンジンの起振力測定によって実施した。

エンジン起振力を精度良く計測するため、3軸加速度センサにより、エンジン側排気系フランジ加速度を計測した。だが、エンジン変位は3並進3回転自由度を持っており、通常の3軸加速度センサで回転挙動を計測することはできない。そのため、Fig. 12に示すようにフランジ締結点3点に加速度センサを配置し同時計測をおこない、計測した3点3並進自由度より、最小二乗法による1点3並進3回転自由度の位相つき剛体運動を推定した。

通常のセンサではエンジンベンチ内のノイズ影響により、安定した計測ができない。この影響を最小限とするため、チャージアンプ付きの加速度センサを使用し、センサ側で信号を増幅しノイズ影響を小さくした。

運転条件としては、アイドリングからレッドゾーンまでの指圧支配の全負荷と、慣性力支配のモータリング条件を計測した。計測した各運転条件より、排気系共振に寄与する主要次数の起振力を算出した。

2.1.3. 排気系メッシュモデル作成

解析対象部品を精度良く再現するために、メッシュモデルはシェルメッシュの4面体1次要素によるモデル化をおこない、形状が充分に再現できるメッシュサイズとした。要素サイズは、小さくするほど精度は向上するが、計算時間短縮と解析マシンの計算負荷低減の観点よりサイズを適正化した。そして、このメッシュモデルの物性値として、図面値から読み取った板厚と材料特性を定義した。また、モデル化の利便性向上として、溶接結合要素にはRigid Bar Element2(RBE2)、集中マス定義にはRigid Bar Element3(RBE3)を使用して要素数削減と簡便なモデル化を図った。

このモデルの精度検証例として、モード信頼性評価基

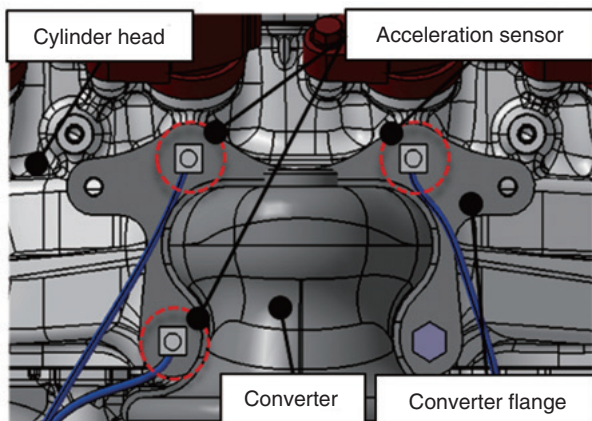


Fig. 12 Acceleration sensor installation locations

準 (Mode Assurance Criterion: MAC) を用いて、実機ハンマリング結果とのコリレーションをおこなった。コリレーション周波数は排気系アセンブリで450 Hzまでを対象とする。その比較結果をFig. 13に示す。この結果より、高い相関性が得られていることがわかる。

2.2. 動解析手法構築

動解析手法として、ADAMSを用いた過渡応答解析について述べる。

メッシュモデルをモーダル縮約し、ADAMS上で球面ジョイントのモデルを用いてアセンブリすることによって、しゅう動部のフリクションを考慮した動解析を実施した。Fig. 14にADAMSを用いた解析手順を示す。使用する各解析部品のモーダル縮約周波数は、上限周波数を上げることによりアセンブリ共振特性を高周波数まで再現することが可能となる。今回、計算時間短縮とアセンブリ共振特性の再現性の観点より、解析モデルのモーダル縮約周波数を適正化し、上限を1000 Hzとした。縮約モデルの精度検証例として、メッシュモデルの全節点自由度を考慮したNASTRANと、モーダル縮約モデルを使用したADAMSで、それぞれアセンブリ固有値解析をおこない、固有値誤

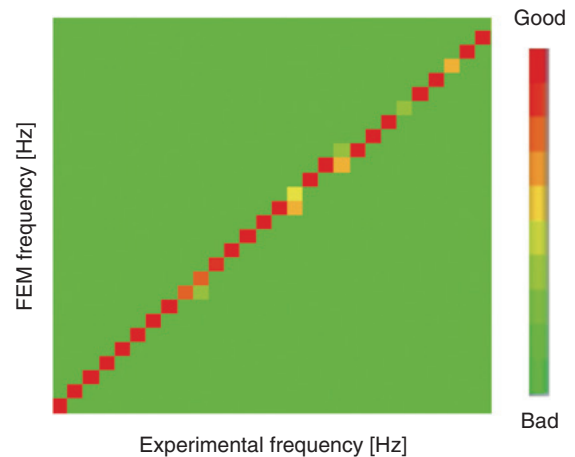


Fig. 13 MAC correlation results

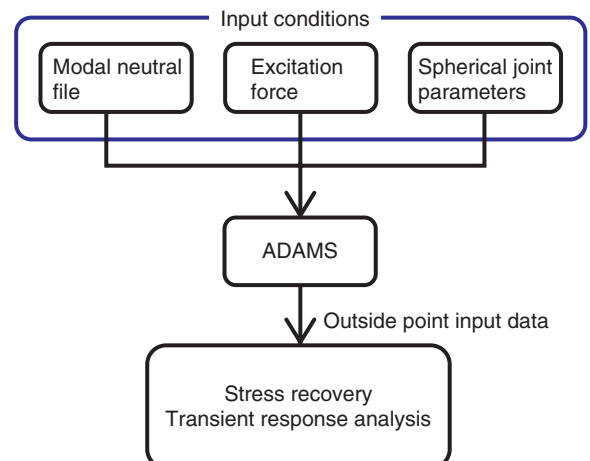


Fig. 14 Analysis procedure using ADAMS

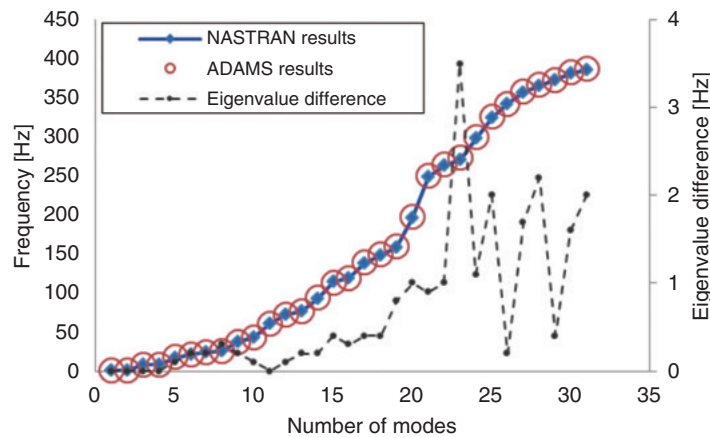


Fig. 15 Comparison of NASTRAN and ADAMS eigenvalue results

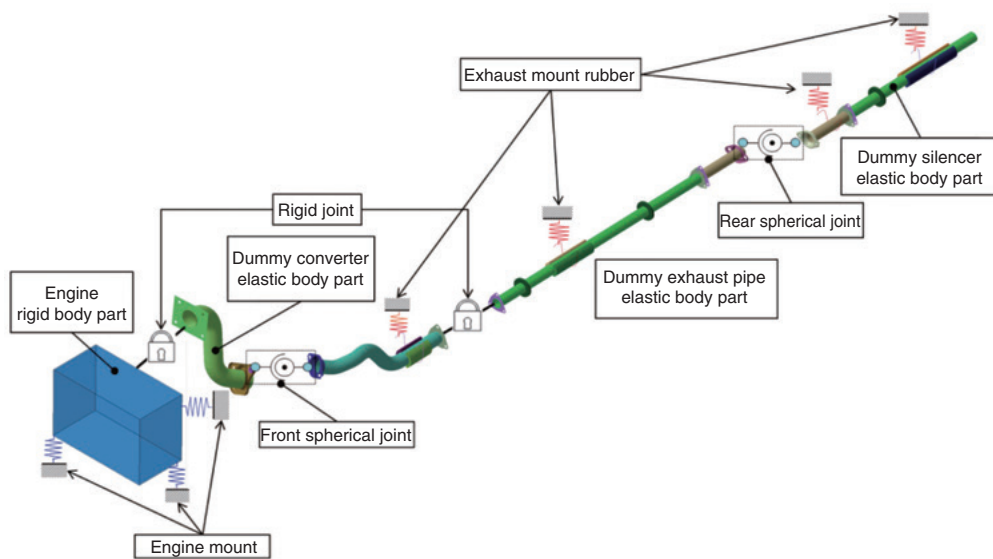


Fig. 16 ADAMS assembly model

差を確認した。比較結果を Fig. 15 に示す。この結果より固有値誤差は最大 3.5 Hz であり、縮約モデルの精度が充分であることがわかる。

この縮約モデルを、ADAMS 上で球面ガasketモデルを結合条件としてアセンブリした。ADAMS によりアセンブリした状態を Fig. 16 に示す。

入力加振データには、各計測次数成分の変位加振と位相を考慮した波形を ADAMS 上で合算したものを、時間軸の入力波形として与えた。

以上の条件で実施した過渡応答解析による、各縮約モデルの変位出力を基に、NASTRAN 過渡応答解析による応力リカバリをおこない、評価ポイントの応力を算出した。

3. 解析結果検証

3.1. 構築手法妥当性検証

解析結果検証として、従来解析と本解析手法、ならびに実機計測による応力結果比較グラフを Fig. 17 に示す。各モードの応力ピークを比較すると、従来手法で大きく応力

が発生していたモードが、本解析手法では実機同等の値になっていることがわかる。これは球面ジョイントのスティックスリップ現象により、力の伝達が分断されていることを表しており、今回構築した球面ジョイントモデルが、妥当性のあるモデルであることを示している。

3.2. 手法汎用性検証

本解析手法の汎用性の確認のために、量産車の排気系を用いた実機応力測定と、本解析手法による解析との結果比較をおこなった。対象となる排気系全景を Fig. 18 に示す。

図面段階での高サイクル振動応力予測とするために、球面ジョイント特性は今回構築したモデルとパラメータを使用した。メッシュモデルは 3D-CAD データを基にモデル化し、材料物性については剛性や密度の補正を実施せずそのまま定義した。実機応力測定と本計算手法による応力結果比較グラフを Fig. 19 に示す。

この結果より、共振周波数誤差は 3%、応力誤差は 20% であったが、図面ベースでの予測結果としては実用上十分な精度であり、本解析手法の妥当性と汎用性を示している。

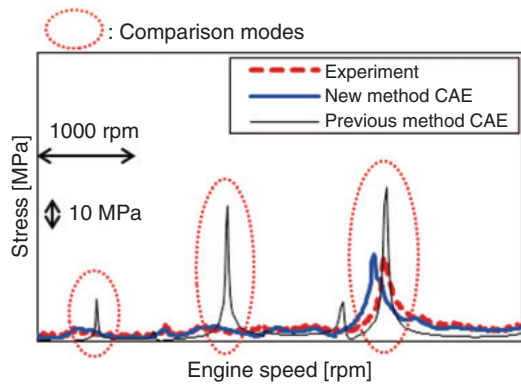


Fig. 17 Simple exhaust system model stress-analysis result

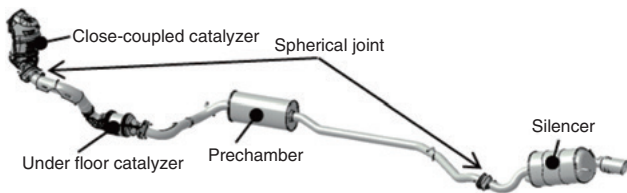


Fig. 18 Exhaust system for verification

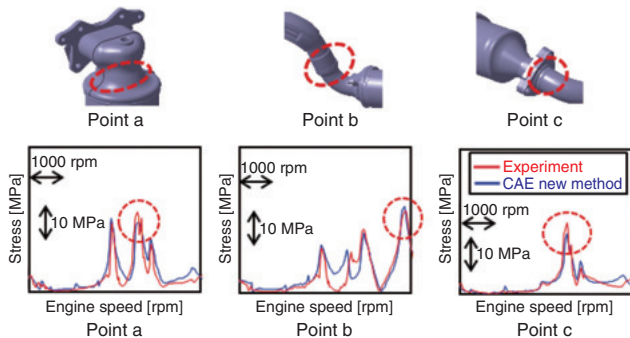


Fig. 19 Comparison of experiment and CAE by new method

4. まとめ

エンジン実用域での高精度な排気系共振応力予測技術を以下の手法によって構築した。

- (1) 球面ジョイントモデルは、実機のスティックスリップ特性を取得し、これを ADAMS モデルに反映することにより実験モデル化した。
- (2) 入力起振力を精度良く計測し、エンジン挙動と位相を複数次数考慮した入力モデルを作成し、解析入力条件として与えた。
- (3) メッシュモデルは、解析精度を充分確保できるメッシュサイズによるモデル化と、実機との MAC コリレーションを実施することにより相関性を高めた。

これによりさまざまな排気系違いの応力予測をモデルベースで実施することが可能となり、今後の試作機削減による開発スピードアップ、低コスト化、軽量化に大きく貢献できると考える。今後の発展性として、球面ジョイントが異なる車種の排気系応力予測も、今回の手法で予測可能と考える。

参考文献

- (1) 中川博史, 秋山英和, 結城一敏, 吉本秀之, 桜井雅人: 排気系における振動予測技術の開発, HONDA R&D Technical Review, Vol.12, No.2, p.127-134
- (2) 塩野目恒二, 丸山新一, 小林正成, 佐久間裕一: 球面継手を有する排気系の非線形振動解析, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.25-04, p.1-4(2004)
- (3) 杉村寛, 武井雅行, 宇野由久, 山岡裕生: エンジン・駆動系に起因する低周波振動の機構解析による予測技術の開発, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.126-07, p.13-16(2007)

■ 著 者 ■



米 永和昭



井手 晴夫



樋口 正彦



堀井 義和



中川 博史

油圧式電子制御 AWD システムにおける 油温判別手法の構築

Oil Temperature Classification Method for Hydraulic Electronically Controlled AWD System

吉 野 弘 規*
Hiroki YOSHINO

要 旨

車載制御ユニットへの実装を目的とし、油圧式電子制御 AWD システム内部の油温状態を、少ない計算コストで高精度に判別可能なアルゴリズムを構築した。対象とするシステムは、モータを用いた電動ポンプにより加圧をおこなうシステムのため、油温とモータ電流の間には相関があることが考えられる。システムの構造を理論的に解析することで、モータ電流から油温を判別するモデルは線形モデルで十分であることを導き出し、ロジスティック回帰による判別モデルの構築をおこなった。さらに、判別精度と判別頻度の両立を実現するために、連続した複数回の判別が実行された際の事後確率を、ロジスティック回帰の出力値のみから計算する手法を構築した。実際にシステムから得られたデータに対し本手法を適用することで、高精度に油温の判別が可能であることを確認した。

ABSTRACT

A low computational complexity and high-accuracy method for clarification of oil temperature in a hydraulic electronically controlled rear differential unit was developed for implementation to a vehicle control unit. Because the target system uses a motor-driven electronic hydraulic pump to increase hydraulic pressure, a correlation was considered to exist between oil temperature and motor current. Theoretical analysis of the structure of the system demonstrated that a linear model was sufficient for clarification of the state of oil temperature from motor current, and a clarification model for the state of oil temperature using logistic regression was formulated. In addition, in order to balance accuracy and frequency of clarification, a method of calculation of posterior probability when continuous multiple clarifications were executed using only the output of the logistic regression model was developed. The results of application of the method to data obtained from the actual target system confirmed that the proposed method was able to clarify the state of oil temperature with a high degree of accuracy.

1. まえがき

制御や冷却にオイルを用いるシステムにおいて、システム内のオイルの特性や状態は、システムの性能に大きな影響を及ぼす。本研究にて対象とする AWD システム⁽¹⁾では、オイルの温度がシステムの出力に影響を与えるため、油温センサにより油温情報を取得し、制御のパラメータとして使用している。AWD システムで用いられるリヤデファレンシャルの構造を Fig. 1 に示す。このシステムは、FF 車をベースとしており、前輪の駆動力を後輪へ伝達し、前後輪間で駆動力を適切に配分することで、2WD と AWD

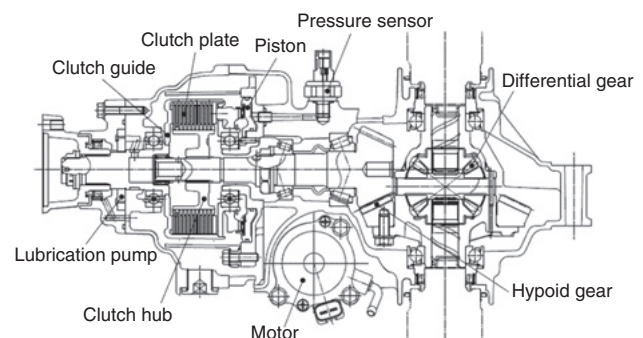


Fig. 1 Structure of rear differential system

*四輪 R&D センター

の切り替えをおこなう AWD システムである。前輪の駆動力は、プロペラシャフトから入力されたトルクを、クラッチガイドとクラッチハブの間にあるクラッチを締結させることで、ハイポイドギヤ、デファレンシャルギヤを介し両後輪へ伝達される。クラッチの締結力は、アクチュエータ（モータおよびソレノイドバルブ）を用いて油圧を制御し、その発生油圧にてシステム内のクラッチ制御油圧を変化させることで、任意に発生させることができる。システムの動作状態は加圧状態、保持状態、減圧状態の3種類がある。クラッチ制御油圧が必要な場合は、ソレノイドバルブを閉じモータを動作させ加圧をおこない（加圧状態）、制御完了を判断した時点でモータを停止し油圧を保持する（保持状態）といった動作をおこなう。その後、クラッチ制御油圧が不要になると、ソレノイドバルブを開放し減圧をおこなう（減圧状態）。

オイルの粘性が変化すると、クラッチプレート間の油膜のせん断抵抗および摩擦力が変化するため、後輪へ伝達するトルクも変化する。そのため、必要とするクラッチ制御油圧（目標クラッチ制御油圧）を決定するパラメータの一つとして油温センサの値を使用している。油温センサが正常であれば問題ないが、仮に、センサ故障等でセンサ出力値が異常値となると、真の目標クラッチ制御油圧と、各種パラメータから計算により求められる目標クラッチ制御油圧にかい離が発生してしまう。目標クラッチ制御油圧が正しく算出されない状態で走行をおこなうと、車両挙動が不安定になってしまう可能性がある。特に、オイルが低温の時に油温センサの出力値が異常値となってしまうと、リヤデファレンシャル内部のギヤに過大なトルクがかかる可能性があり、ギヤの耐久性に影響を及ぼすことが想定される。そのため、油温センサとは別の手段を用いて、現在の油温が低温か否かを判定する必要がある。

オイルの持つ物理量を得る目的で、さまざまな推定手法や判別手法が提案されているが、その中でも機械学習を用いた手法の有効性が先行研究で示されている。機械学習手法は、モデル化したいデータのみがあればモデル構築が可能のため、対象システムの内部構造を直接知ることが困難な場合でもモデルを構築できるメリットがある。Balabin らは、近赤外分光法により得られた吸収スペクトルデータに対し、k 近傍法 (k-NN) やニューラルネットワーク (ANN)、サポートベクターマシン (SVM) といった識別手法を適用し、エンジンオイルにおける鉱油と合成油の判別や粘度の判別をおこなう手法を提案した⁽²⁾。また、油入変圧器において、変圧器内の絶縁油の温度を、変圧器の負荷および雰囲気温度で学習した ANN を用いて推定する手法については複数の報告⁽³⁾⁻⁽⁵⁾がある。同様に、油入変圧器を対象とした研究では、オイル内のガス成分を特徴量とし、ロジスティック回帰および ANN を用いて、オンロードタッパ切替機の異常状態の判別をおこ

なっている事例⁽⁶⁾がある。この論文では、ロジスティック回帰に比べ ANN の判別精度が良いため、ANN を用いるアプローチの方が有効であると述べられている。

これらの報告では、ANN や SVM を用いることにより、オイルの特性を高精度に推定することが可能であることを示している。ANN や SVM は非線形モデルのため、相関関係が複雑なデータに対しても精度良く推定や判別が可能である。しかし、その反面、結果を出力する際は、数値計算により活性化関数やカーネル関数といった非線形関数を多数計算する必要がある。また、SVM ではサポートベクターのデータをメモリ内にストアしておく必要がある。自動車の制御ではリアルタイム性が重視されることが多く、計算コストやリソースの観点から望ましい手法とはいえない。さらに、これらの手法を適用したとしても、出力された値の信頼性をいかにして判断するかといった課題も存在する。

そこで、本研究では、AWD システムを対象として、計算コストを抑えつつも高精度かつ高い信頼性を有する油温判別手法を構築した。以下に詳細を述べる。

2. 油温判別手法について

2.1. 油温とモータ電流の関係

本手法では、油温とモータ電流の關係に着目し、これらのデータ間における相関をモデル化することで、油温の状態を判別する手法を構築した。本システムの加圧構造は、モータへ通電することでモータ先端に取り付けられたロータが回転し、トロコイドポンプの原理によりオイルを吸い上げる機構となっている (Fig. 2, Fig. 3)。前述のように、オイルの粘性は温度特性を持ち、低温になるほど粘性が高くなるため、ロータが受けるフリクションもこの影響を受けると考えられる。また、モータの特性より、モータへの供給電流と発生トルクの間には線形の關係がある。そのため、加圧時のモータ電流と油温の間にも相関が存在すると考えられる (Fig. 3)。

まず、油温とモータ電流の關係を明らかにするために、

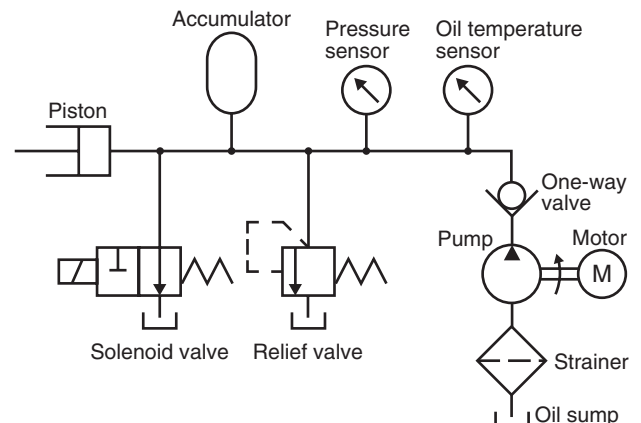


Fig. 2 Schematic of target system

システムが持つパラメータを用いて、これらの関係を定式化する。モータに対する動作指示直後の過渡状態を考慮すると、モータ電流 $I_1(t)$, $I_2(t)$ は以下の式により表される。

$$I_1(t) = \frac{V}{R} \left(1 - e^{-t/\tau_1} \right) \quad (1)$$

$$I_2(t) = \frac{1}{R} \left\{ V + \left[\frac{R}{K_T} Tq(t, temp) + V \right] \times \left[1 - e^{-t/\tau_2} \right] \right\} \quad (2)$$

ここで、

- V : モータ駆動電圧
- R : モータ抵抗
- K_T : モータのトルク定数
- Tq : モータの出力トルク
- τ_1, τ_2 : モータ特性に依存した時定数
- $temp$: 油温
- t : 時間

であるとする。式 (1) および式 (2) の電流波形の概略を Fig. 4 に示す。次に式 (1) および式 (2) を用いて、時刻 $t=0$ から $t=T$ までの電流積算値を計算する。 $t=T_1$ 時の電流はロック電流相当の電流が通電するため、 T_1 は定数とみなすことができ、また積算時間 T を任意の定数とすることで、電流積算値は以下のように表される。

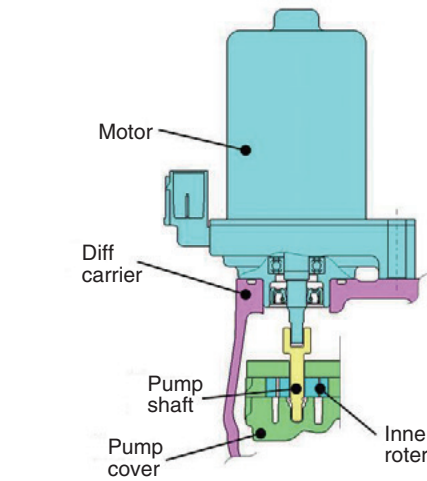


Fig. 3 Cross-section view of motor pump

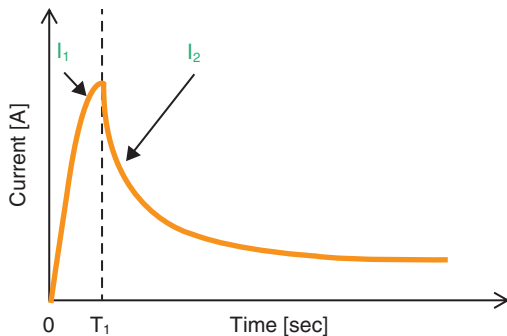


Fig. 4 Current waveform model

$$\begin{aligned} & \int_{t=0}^T [I_1(t) + I_2(t)] dt \\ &= \frac{V}{R} \left[T_1 + \tau_1 \left(e^{-T/\tau_1} - 1 \right) \right] + \frac{V}{R} (T - T_1) \\ &+ \frac{1}{R} \left[\frac{R}{K_T} \int_{t=0}^{T-T_1} Tq(t, temp) dt - V \right] \left\{ (T - T_1) + \tau_2 \left[e^{-(T-T_1)/\tau_2} - 1 \right] \right\} \quad (3) \\ &= c_1 V + c_2 \int_{t=0}^{T-T_1} Tq(t, temp) dt \end{aligned}$$

ここで c_1 および c_2 は定数である。

さらに式 (3) において、油温がある任意の値の場合を考える。すると、モータ駆動トルクに関する積分項は定数と見なせるため、式 (3) は、

$$\int_{t=0}^T [I_1(t) + I_2(t)] dt - c_1 V = const \quad (4)$$

となる。式 (4) は、電流積算値、モータ駆動電圧および油温の 3 次元データから、油温が同じ値のデータを抽出した場合、そのデータに含まれる電流積算値およびモータ駆動電圧の 2 次元データは線形となることを示している。言い換えると、これは電流積算値とモータ駆動電圧を特徴量とした油温判別モデルを構築する場合、判別の決定境界が線形となることを表している。この事実より、用いる判別モデルは、ANN や SVM といった非線形モデルではなく、より計算コストの低い線形モデルで十分であることがわかる。

2.2. 判別モデルの構築

前述の結果より、本手法ではロジスティック回帰を用いて、電流積算値とモータ駆動電圧を入力し、油温の状態を出力する 2 クラス判別 (油温が低いかな否かを判別する) モデルを構築した。ロジスティック回帰は一般線形化モデルの一つであり、外れ値 (他の値から大きく外れた値) に対し頑健であるという特徴を持つ判別手法である⁽⁷⁾。

ロジスティック回帰のモデルは

$$LOG = \frac{1}{1 + \exp(-\mathbf{w}'\mathbf{x})} \quad (5)$$

と表現される。ここで、

- $\mathbf{x}$: 入力データベクトル
- $\mathbf{w}$: パラメータベクトル
- LOG : クラスの事後確率

であるとする。 $\mathbf{x}$ は電流積算値、モータ駆動電圧の 2 次元ベクトル、 LOG は油温がしきい値以上 (もしくは以下) である確率となる。 $\mathbf{w}$ がモデルの振る舞いを決定するパラメータとなり、これは電流積算値、モータ駆動電圧および油温状態のデータから以下の計算によって求めることが可能である。

まず、各データにおける真の油温状態を t と表現する。判別するクラスが 2 クラスであるため、 $t \in \{0, 1\}$ とすると、

L 個のデータに対する尤度関数は以下の式で表現される。

$$p(\mathbf{t}|\mathbf{w}) = \prod_{i=1}^L \text{LOG}_i^{t_i} \{1 - \text{LOG}_i\}^{1-t_i} \quad (6)$$

ここで、 $\mathbf{t}$ は真の油温状態のベクトル、 LOG_i は $\mathbf{x}_i$ に対する式 (5) の値である。尤度関数の負の対数を誤差関数 $E(\mathbf{w})$ と定義すると、式 (6) より、 $E(\mathbf{w})$ は

$$\begin{aligned} E(\mathbf{w}) &= -\ln p(\mathbf{t}|\mathbf{w}) \\ &= -\sum_{i=1}^L \{t_i \ln \text{LOG}_i + (1-t_i) \ln (1 - \text{LOG}_i)\} \end{aligned} \quad (7)$$

と表現される。式 (7) を最小化する $\mathbf{w}$ が求めたい値であるが、これはニュートン・ラフソン法を用いて、以下の式を繰り返し計算することにより求められる。

$$\mathbf{w}_{s+1} = \mathbf{w}_s - \mathbf{H}^{-1} \nabla E(\mathbf{w}) \quad (8)$$

ここで、 s は繰り返し計算の回数、 $\mathbf{H}$ は $\nabla^2 E(\mathbf{w})$ により求められるヘッセ行列である。式 (5) で定義されるロジスティック回帰モデルの場合、 $\mathbf{H}$ が正定値行列となるため、式 (7) は $\mathbf{w}$ の凸関数となり、大域最適解と局所最適解が一致する。よって、式 (8) に従い計算を繰り返し、収束した $\mathbf{w}$ の値が求めたいパラメータの値となる。 $\mathbf{w}$ を決定したのち、式 (5) に対し、 $\mathbf{x}$ を与え、 LOG がしきい値より上 (もしくは下) かを判定することで、油温判別結果を出力できる。

通常のロジスティック回帰である式 (5) の場合、出力はあるデータが 1 個入力された場合の確率でしかない。そのため、判別のしきい値を低くすると誤判別の可能性が高まり、大きくすると判別がされにくくなるトレードオフが発生する。そこで、複数のデータが入力された場合の確率を計算する手法を導入し、判別精度と判別頻度の両立を可能にした。

まず、式 (5) の拡張として、 $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2$ の 2 個の入力データが与えられ、両方とも油温が低温であると判別された場合 ($y=1$ と表現) の事後確率を求めることを考える。事後確率 $p(y=1|\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)$ は、ベイズの定理により、

$$\begin{aligned} p(y=1|\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) \\ = \frac{p(\mathbf{x}_1|y=1)p(\mathbf{x}_2|y=1)p(y=1)}{p(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)} \end{aligned} \quad (9)$$

と表現できる。同じクラス内でも時間経過により油温が変化することが考えられるため、ここでは $\mathbf{x}_1$ および $\mathbf{x}_2$ に条件付き独立の仮定をおいた。

次に、 $\mathbf{x}_1$ に対するロジスティック回帰の出力を LOG_1 とおき、それをベイズの定理に従い、以下のように変形する。

$$\begin{aligned} \text{LOG}_1 &= p(y=1|\mathbf{x}_1) \\ &= \frac{p(\mathbf{x}_1|y=1)p(y=1)}{p(\mathbf{x}_1)} \end{aligned} \quad (10)$$

同様に、 $\mathbf{x}_2$ に対するロジスティック回帰の出力を LOG_2 とおくと、

$$\text{LOG}_2 = \frac{p(\mathbf{x}_2|y=1)p(y=1)}{p(\mathbf{x}_2)} \quad (11)$$

と表現できる。さらに、式 (10) と式 (11) を用いて、式 (9) を以下のように表すことができる。

$$p(y=1|\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) = \frac{\text{LOG}_1 \times \text{LOG}_2}{p(y=1)} \frac{p(\mathbf{x}_1)p(\mathbf{x}_2)}{p(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)} \quad (12)$$

また、同様の計算により、 $p(y=0|\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)$ は、

$$\begin{aligned} p(y=0|\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) \\ = \frac{(1 - \text{LOG}_1) \times (1 - \text{LOG}_2)}{p(y=0)} \frac{p(\mathbf{x}_1)p(\mathbf{x}_2)}{p(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)} \end{aligned} \quad (13)$$

と表すことができる。式 (12) および式 (13) と、 $p(y=1|\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) + p(y=0|\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) = 1$ であることより、

$$\begin{aligned} \frac{p(\mathbf{x}_1)p(\mathbf{x}_2)}{p(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)} \\ = \frac{p(y=1)}{\text{LOG}_1 \times \text{LOG}_2 + (1 - \text{LOG}_1) \times (1 - \text{LOG}_2)} \end{aligned} \quad (14)$$

となる。事前確率である $p(y=1)$ および $p(y=0)$ に関する情報は得られないため、ここでは $p(y=1) = p(y=0)$ とした。式 (14) を式 (12) に代入することで、 $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2$ が与えられた場合の事後確率は、以下の式で表すことができる。

$$\begin{aligned} p(y=1|\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) \\ = \frac{\text{LOG}_1 \times \text{LOG}_2}{\text{LOG}_1 \times \text{LOG}_2 + (1 - \text{LOG}_1) \times (1 - \text{LOG}_2)} \end{aligned} \quad (15)$$

また、同様の計算をおこなうことで、 n 個のデータ ($\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_n$) が入力された場合の事後確率は、

$$\begin{aligned} p(y=1|\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_n) \\ = \frac{\prod_{i=1}^n \text{LOG}_i}{\prod_{i=1}^n \text{LOG}_i + \prod_{i=1}^n (1 - \text{LOG}_i)} \end{aligned} \quad (16)$$

と表現できる。

式 (16) に対するしきい値として、ロジスティック回帰に対する判別しきい値よりも高いしきい値を導入し、式 (16) の判別結果を最終的な判別結果とする。これにより、信頼度の高い入力がおこなわれた場合は即時的に確定をおこない、通常レベルの信頼度の入力が連続でおこなわれた場合も確定が可能なアルゴリズムが、ロジスティック回帰モデルの出力のみで実現可能となる。式 (16) に従い、データが追加されるたびに事後確率が増加する様子を Fig. 5 に示す。Fig. 5 は、ロジスティック回帰に対する判別しきい値以上となる入力が連続でおこなわれた場合の

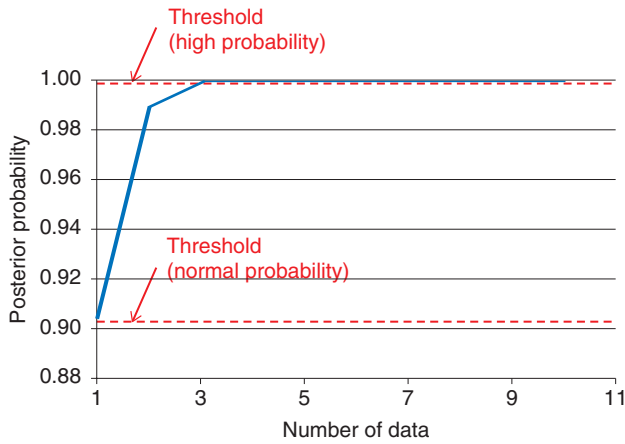


Fig. 5 Example of transition of posterior probability

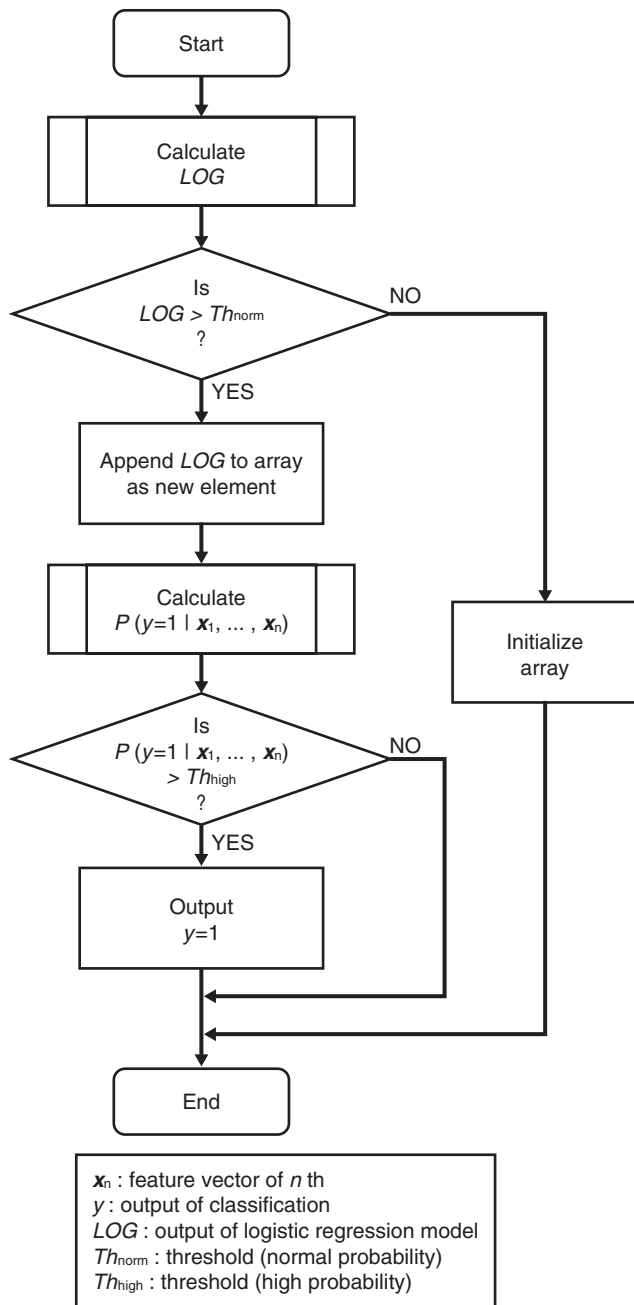


Fig. 6 Algorithm of proposed method

例を表しており、事後確率が高いしきい値を上回った場合に判別結果の確定をおこなう。アルゴリズムの全体フローを Fig. 6 に示す。

3. 実験結果

実際にシステムより得られたデータを用いて、油温がしきい値以上かを判別するモデルを作成し、判別率の評価をおこなった。モデル構築および評価は、電流積算値、モータ駆動電圧、油温状態の3次元データを用い、10-fold クロスバリデーション（データ群を10個に分割し、その内の9個をモデル構築に使用、残り1個をモデルの性能評価に使用する。これを10回繰り返す。なお、前半の9個のデータを訓練データ、後半の1個のデータをテストデータと呼ぶ。）により実施した。また、電流積算時間は150 msとした。ロジスティック回帰モデルによる判別結果を Table 1 に示す。Table 1 において、Training の列は訓練データに対する判別率を示し、Test の列はテストデータに対する判別率を示している。また、それぞれの列において、Mean の列はクロスバリデーションにより得られた判別率の平均値を、Min の列は最も低い判別率となった値を示している。

まず、訓練データに対する結果より、線形モデルでも、油温の状態を高精度に判別可能であることがわかる。本システムにおいては、特に、低温で高い判別精度が求められるが、低温ほど、より高精度の判別がおこなわれており、システム要求にかなった結果となっている。これは、低温になるほど、油温に対するオイル粘性の変化が大きく、しきい値付近のデータに対する判別率が向上するためであると考えられる。

また、テストデータに対しても、温度帯によらず、訓練データと比べて遜色ない判別率を得ることができた。これは、生成されたモデルの汎化能力が高いことを示しており、未知の新たなデータに対しても正しく判別をおこなうことが可能なモデルが構築できていることがわかる。ロジスティック回帰モデルの出力に対し、さらに式 (16) のアルゴリズムを組み合わせることで、より高精度な判別を実施することが可能である。

次に、本判別問題に対する判別モデルを、ロジスティック回帰、ANN、および SVM で構築し、3000 個のデータに対し判別計算を実行した場合の計算時間を測定した。結果を Table 2 に示す。測定において ANN と SVM は、判別精度を保ちつつ、計算コストが低くなる非線形モデルを選択した。特に、ANN については、一般化線形モデルとの差を表現する目的で、2 個の隠れユニットを持つ 2 層ネットワーク（入力 2 個、隠れユニット 2 個、出力 1 個）を用いて評価をおこなった。この結果より、判別モデルとしてロジスティック回帰を選択することで、ANN と SVM を選択した場合に比べ、計算コストを削減できることがわかる。

Table 1 Classification rate of logistic regression

Threshold (°C)	Training		Test	
	Mean	Min	Mean	Min
20	0.974	0.973	0.973	0.960
10	0.985	0.984	0.985	0.982
0	0.982	0.982	0.982	0.977
-10	1.000	1.000	0.999	0.999
-20	0.999	0.999	0.999	0.997
-30	0.996	0.995	0.996	0.992

Table 2 Computing time comparison

Logistic regression	ANN	SVM
0.14 ms	0.23 ms	0.41 ms

4. まとめ

対象とする電子制御 AWD システムにおいて、システム内部の油温状態を判別する手法を構築し、その効果を確認した。その際、モータの電流波形を定式化し、油温を固定値とした場合の電流積算値とモータ駆動電圧の関係がデータ空間において線形になることを求めることで、目的に対し必要十分な機能を持つ判別手法を選択し、計算コストの抑制を実現した。また、複数回の判別結果の信頼性を定量的に評価し、最終的な判別結果を出力するアルゴリズムを判別モデルの出力のみを用いて構築することで、計算コストを抑えつつ、最終的な判別結果の信頼性と判別頻度を両立させる手法を実現した。

参考文献

- (1) 山口暢隆, 原次郎: 軽量低フリクション電子制御 4WD システムの開発, 自動車技術会 学術講演会前刷集, No.146-12, p.19-23(2012)
- (2) Balabin, R. M., Safieva, R. Z., Lomakina, E. I.: Near-infrared (NIR) spectroscopy for motor oil classification: From discriminant analysis to support vector machines, Microchemical Journal, Vol. 98, p.121-128(2011)
- (3) Pradhan, M. K., Ramu, T. S.: On-line Monitoring of Temperature in Power Transformers using Optimal Linear Combination of ANNs, Conference Record of the 2004 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, p.70-73(2004)
- (4) Tang, W. H., Zeng, H., Nuttall, K. I., Richardson, Z., Simonson, E., Wu, Q. H.: Development of Power Transformer Thermal Models for Oil Temperature Prediction, Real-World Applications of Evolutionary Computing, EvoWorkshops 2000, Lecture Notes in

Computer Science, Vol. 1803, p.195-204(2000)

- (5) He, Q., Si, J., Tylavsky, D. J.: Prediction of Top-Oil Temperature for Transformers Using Neural Networks, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 15, No. 4, p.1205-1211(2000)
- (6) Wang, H., Liu, Y., Griffin, P. J.: Artificial Intelligence in OLTC Fault Diagnosis Using Dissolved Gas-In-Oil Information, Power Engineering Society Summer Meeting, Vol. 4, p.2422-2427(2000)
- (7) C.M. ビショップ, 元田浩, 栗田多喜夫, 樋口知之, 松本裕治, 村田昇: パターン認識と機械学習 ベイズ理論による統計的予測, シュプリンガー・ジャパン株式会社, p.177-208(2008)

■ 著 者 ■



吉野 弘規

湿式多板クラッチ実働時の自励振動挙動予測技術の構築

Creation of Technology for Prediction of Self-excited Vibration under Operating Conditions for Multiple-plate Clutches

星 崇 司*
Takashi HOSHI
田 伏 功*
Isao TABUSHI

南 中 道 隆*
Takashi MINAMINAKAMICHI
美 浦 一 葉*
Kazuha MIURA

東 上 圭 司*
Keiji TOJO
園 田 修 三*
Shuzo SONODA

要 旨

トランスミッションに採用されている湿式多板クラッチの自励振動を予測するためには、摩擦材の動摩擦特性とその使い方および駆動系の減衰特性の把握が重要である。摩擦面の温度、接触面圧の影響を受ける摩擦材の動摩擦特性について、面圧を均一化できる専用のトルク伝達特性試験装置を作成し、温度、面圧ごとにすべり速度依存性をとらえた。また、駆動系のフリクションによる損失トルクと振動発生時の実車挙動を計測し、実測値より減衰特性を求めた。得られた摩擦材の動摩擦特性とその使い方を定量的に把握するためのクラッチ FEM モデル、および駆動系の減衰特性を組み込んだトランスミッションから車体までのトルク伝達特性の挙動解析シミュレーションモデルを構築した。本手法の有用性を確認するため、自励振動を抑制するクラッチの構造をシミュレーションで検討し、実車にて振動の低減を確認した。

ABSTRACT

It is important to grasp the dynamic frictional characteristics of facing materials, their methods of use, and the damping characteristics of the drivetrain in order to predict self-excited vibration in multiple-plate clutches used in transmissions. A dedicated torque transmission characteristic test apparatus capable of equalizing the surface pressure was built to deal with the dynamic frictional characteristics of the facing materials, which are affected by the temperature and contact pressure of the friction surfaces. With this apparatus, the sliding velocity dependence was found for each temperature and surface pressure. The behavior of the actual vehicle was also measured when vibration occurs and loss torque is generated by friction in the drivetrain, and damping characteristics were determined from the measurement values. An FEM model of the clutch for the purpose of gaining a quantitative grasp of the dynamic frictional characteristics and methods of use of the facing materials obtained in this way was created, and a simulation model for dynamic behavior analysis of the characteristics of torque transmission from a transmission that incorporates drivetrain damping characteristics to the vehicle body was constructed. In order to confirm the usefulness of this method, the construction of a clutch that suppresses self-excited vibration was examined by simulation and the reduction of vibration in an actual vehicle was confirmed.

1. はじめに

燃費改善に対するユーザーニーズの高まりに伴い、軽量、コンパクトおよび低フリクションなトランスミッションが要求されている⁽¹⁾。軽量、コンパクト化への要求により、クラッチの大きさには制約があるが、一定の熱量を吸収するために耐久性も考慮しなくてはならない。この対応としては、ディスク摩擦面の内外径差を大きくとることで単位面積あたりの発熱量を抑える手法が知られている⁽²⁾。摩擦面内の面圧、温度、すべり速度は半径方向に不均一に分布しており、それらはクラッチ摩擦材の摩擦特性に大きく影響することが知られている⁽³⁾。そのため、クラッチの設計においてはクラッチ摩擦面の面圧、温度、すべり速度の分布を明らかにすることと、摩擦材そのものの摩擦特性を把

握することが重要となる。

また、低フリクションの要求に対しては駆動系のフリクションを低減することが考えられるが、このことは、一方で駆動系の減衰を減らすことになり、振動に対して不利な要因となる。駆動系で課題となる振動は、周波数が回転数に依存して変化する強制振動と、周波数が駆動系の固有値に依存し常に一定である自励振動がある。

強制振動に関しては構成部品の形状や精度を確認することで振動の発生原因や対策を検討できることが多い。自励振動においてはクラッチにすべりが発生している間は振動の振幅が増大し続ける傾向がある。自励振動はクラッチしゅう動面のすべり速度に対する摩擦係数の勾配と、駆動系の減衰特性の双方の影響を受けて発生の有無が決まるが⁽⁴⁾、クラッチの動摩擦特性の勾配および駆動系の減衰特

*四輪 R&D センター

性の定量化には不明点が多い。また、現状の車両振動シミュレーション技術は、クラッチに関しては単一の摩擦係数で表現したものが主であり、設計段階においてクラッチの構造で振動の対策を検討するには至っていない。そのため、これまでの自励振動の対策は摩擦特性に影響の大きいオイルや摩擦材の劣化を抑制する観点でおこなわれてきた^{(5), (6)}。そこで、本稿ではクラッチ摩擦材が持つ動摩擦特性とその使い方に着目した。クラッチを Finite Element Method (FEM) モデルで作成し、駆動系の減衰特性を含むプラントモデルにより自励振動発生時のトルク伝達特性がシミュレートできる挙動解析技術を開発した。これにより駆動系のトルク伝達特性が決まるメカニズムを明らかにし、自励振動の定量的な予測を可能とした。

2. 振動事象の把握

解析に用いたトランスミッションの主断面を Fig. 1 に示す。ドリブンプーリシャフト上に発進用の湿式クラッチが配置され、回転軸内部に設けられた油圧回路の圧力をコントロールすることでなめらかな発進を可能としている。

摩擦調整剤を配合していないオイルを使用することにより、実車にて振動を再現させた結果を Fig. 2 に示す。発進加速時の出力回転を高速フーリエ変換 (FFT) にて周波数分析した結果、回転数に比例して周波数が上昇する強制振動の他に、クラッチに振動が発生している領域においては、回転数に依存せずに一定の周波数でピークが現れる自励振動が確認できた (Fig. 3)。また、実車計測トルクとクラッチ差回転からトルク伝達特性を検証したところ、振動が発生している差回転領域で負勾配となっており、振動には差回転に対して負勾配のトルク伝達特性が寄与していると考えられる (Fig. 4)。

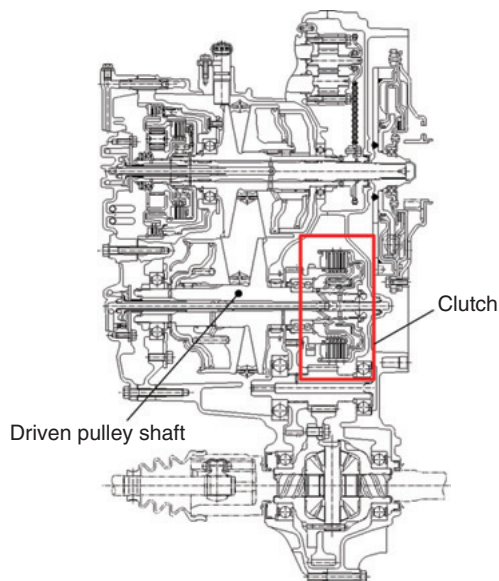


Fig. 1 Main section of transmission

次に、実車での振動発生時の摩擦面の状態を把握するために表面温度と面圧分布を調査した。係合過程の摩擦面温度を計測するために、プレートへ熱電対を埋め込んだ (Fig. 5)。内径側 A, C のプレート温度と外径側 B, D のプレート温度は上昇速度が異なり、半径方向への分布を持っていると考えられる (Fig. 6)。

面圧分布は感圧紙により測定した。その結果、表面温度と同様に半径方向へ分布をもっていることを確認した (Fig. 7)。

以上のことからクラッチ摩擦面の表面温度と面圧分布はそれぞれ半径方向に不均一であることがわかった。

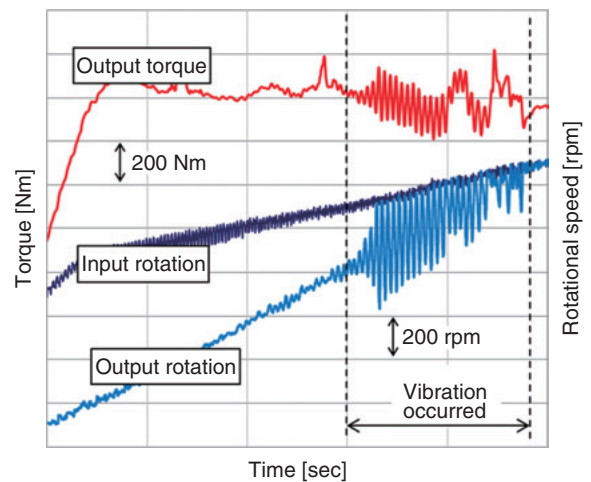


Fig. 2 Self-excited vibration measurement results

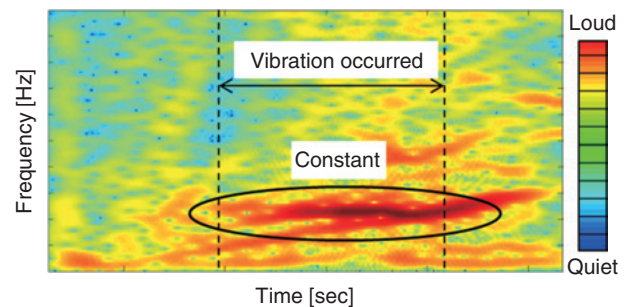


Fig. 3 Frequency analysis of vibration at starting acceleration

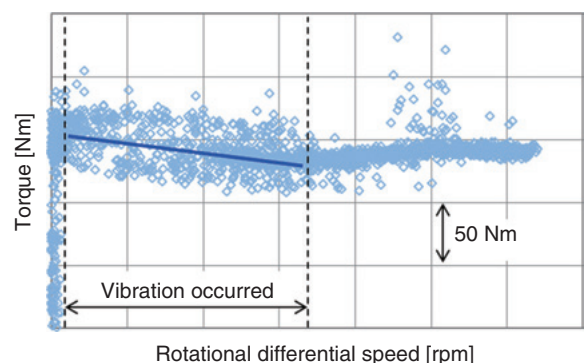


Fig. 4 Torque transmission characteristics

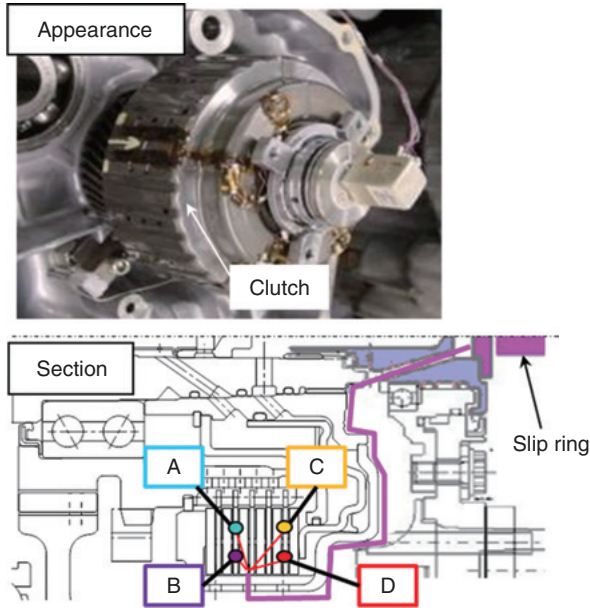


Fig. 5 Measurement points

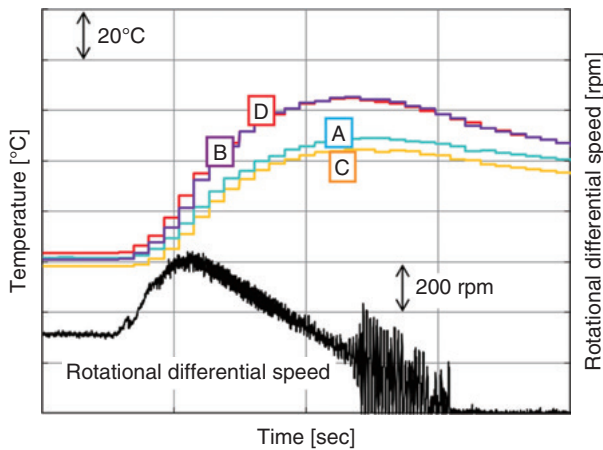


Fig. 6 Plate temperature measurement results

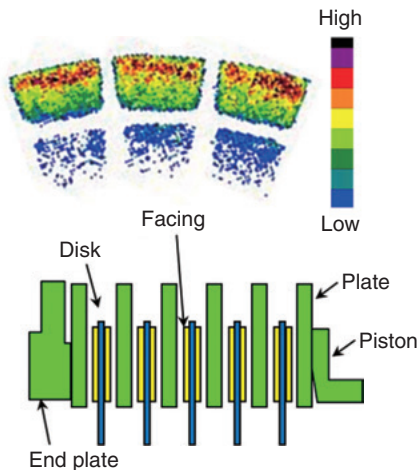


Fig. 7 Facing contact pressure distribution

3. 自励振動解析モデルの構築

クラッチの自励振動は駆動系全体のバネマス系の運動方程式で記述できる (Fig. 8). ここで I はクラッチ以降の車体のイナーシャ, K はドライブシャフトのねじり剛性, T はクラッチの伝達トルク, T_0 は静摩擦係数におけるクラッチの伝達トルク, θ_1 および θ_2 はそれぞれクラッチ駆動側および従動側の回転数を示す. このとき, 摩擦材によるトルク伝達特性 (Fig. 8 中の勾配 a) と駆動系減衰によるトルク伝達特性 (Fig. 8 中の勾配 c) を考慮する必要がある, これらの特性が振動の収束あるいは発散に影響する.

駆動系減衰によるトルク伝達特性は常に正勾配と考えられる. しかし, 摩擦材によるトルク伝達特性は摩擦特性の変化やクラッチの構造によっては摩擦面各部で摩擦係数がすべり速度に対して負勾配になる場合がある. その合計のトルク伝達特性が負勾配となった時に振動が発生すると推定した.

そこで, 実働時のクラッチ摩擦面状態を再現し, 駆動系の減衰特性を考慮可能な計算モデルを構築した (Fig. 9). クラッチ部分は FEM モデルで作成しており, クラッチ摩擦面の面圧, 温度, すべり速度の分布を考慮した. またクラッチ前後のドライブトレイン要素を 1 次元のねじり振動系モデルで結ぶことで, 実際の車両の振動を予測することが可能な挙動解析モデルとした.

3.1. クラッチ摩擦材の動摩擦特性

クラッチ摩擦材の摩擦特性を計測する試験装置として SAE#2 試験機や LVFA 試験機が知られている. しかし,

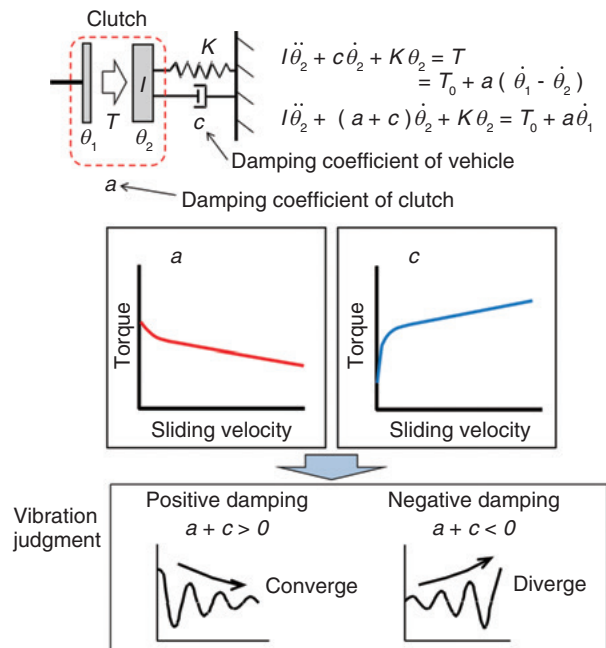


Fig. 8 Hypothesized mechanism of self-excited vibration

Table 1 Conditions of torque characteristics measurement

Contact pressure	0.5 – 6.0 [MPa]
Plate temperature	40 – 180 [°C]
Rotational speed differential	0.5 – 600 [rpm]

これらの試験機では実機相当の面圧状態での摩擦特性の計測が困難である。また、摩擦材全体を一定の温度に保持することが難しい。そこで専用のトルク伝達特性試験装置を作成した (Fig. 10)。これにより、実機相当の高面圧領域で面圧を均一に保持でき、摩擦面全体を均一な温度にコントロールすることが可能となった。本装置にてすべり速度を変化させてトルク伝達特性試験をおこなった。試験条件を Table 1 に示す。

トルク測定結果の一例を Fig. 11 に示す。まず油圧を付加し、その後回転数を目標値まで上昇させた。油圧と回転数が定常状態になったときの伝達トルクおよび摩擦面各部の温度を測定した。この試験を Table 1 に示す面圧、温度、回転数の条件下で複数回おこなった。

次に測定結果から Fig. 12 に示すような差回転ごとの動

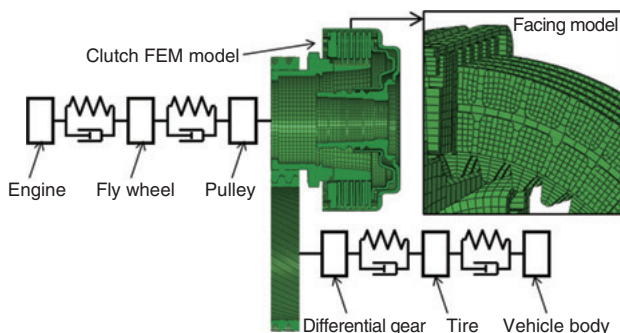


Fig. 9 Self-excited vibration prediction model

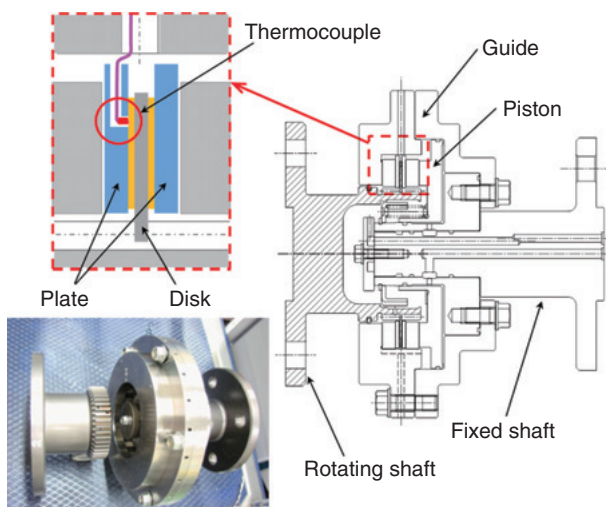


Fig. 10 Test apparatus for torque transmission characteristics

摩擦係数と温度の関係を各面圧で整理した。さらにこれを温度ごとの動摩擦係数と差回転の係に各面圧でまとめた。

得られたクラッチ摩擦材の動摩擦特性の差回転との関係を面圧別 (Fig. 13)、温度別 (Fig. 14) にそれぞれ整理した。動摩擦特性は面圧および差回転に対して依存性を示し、面圧については低面圧側が、温度については高温側がそれぞれ正勾配傾向を示した。

3.2. 駆動系減衰特性の把握

エンジンからタイヤまでの駆動系全体の減衰を考えると、エンジンからクラッチの間の減衰は振動に影響を与え

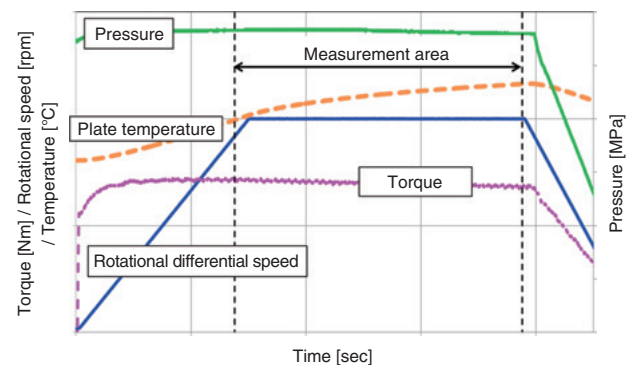


Fig. 11 Results of measurement

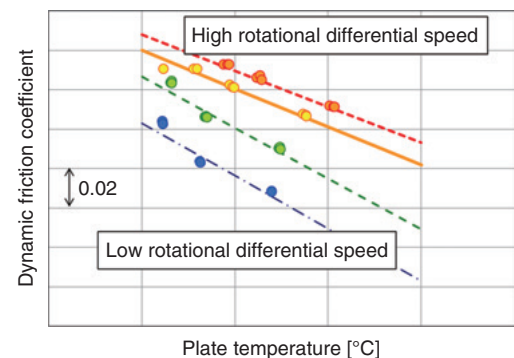


Fig. 12 Friction characteristics

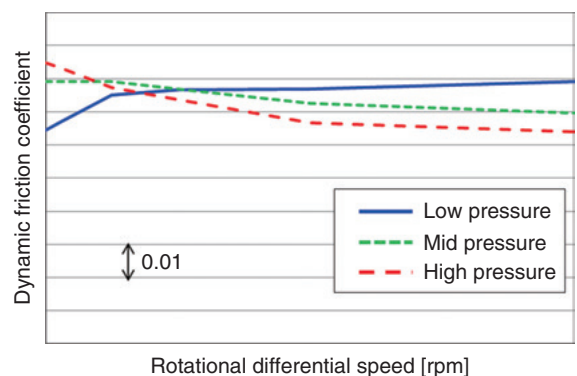


Fig. 13 Influence of pressure in dynamic friction coefficient

ないため、クラッチからタイヤの間の減衰に着目した。

クラッチからタイヤの間の減衰にはトランスミッション内部のフリクションとディファレンシャルギヤの差動が挙げられる。内部フリクションについては、クラッチディスクとプレートを取り外してディファレンシャルギヤをロックした状態で損失トルクを計測し、回転速度に対する損失トルクの関係から減衰係数を求めた (Fig. 15)。

ディファレンシャルギヤの差動に伴う減衰については測定と解析の双方から同定した。Fig. 16 に左右ドライブシャフト回転数の振動挙動の計算結果を示す。ドライブシャ

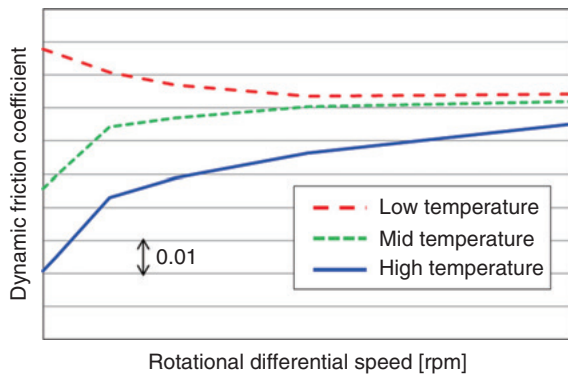


Fig. 14 Influence of temperature in dynamic friction coefficient

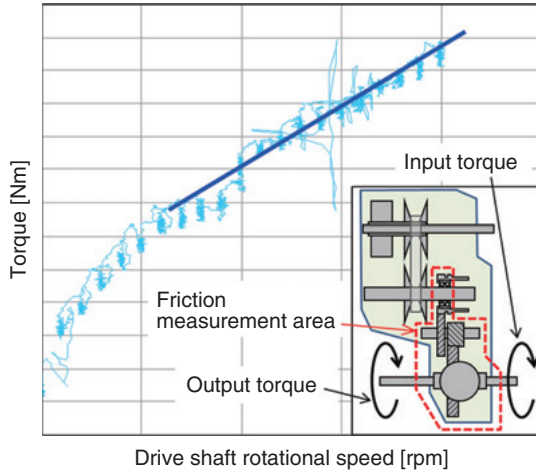


Fig. 15 Measurement of friction loss in transmission

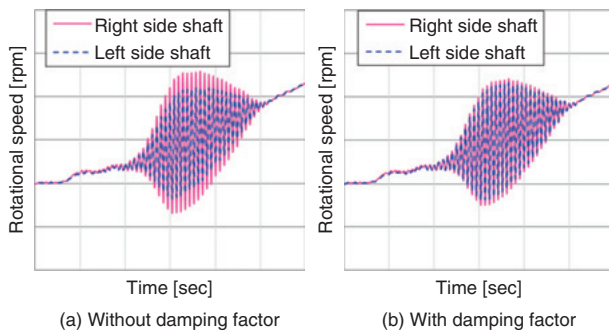


Fig. 16 Effect of differential gear damping factor

フトは左右で不等長であるため剛性差がある。そのため、ディファレンシャルギヤにフリクションがない場合は、振動発生時に左右ドライブシャフトに配分される回転数とトルクは、直進走行時であっても左右の剛性差の影響を受けて振動挙動に差が出る。一方、ディファレンシャルギヤがフリクションをもち減衰作用がある場合は、左右の振動挙動の差が低減されドライブシャフトの左右剛性差の影響を低減する効果がある。

そこで、振動を再現した実車にて、直進時の左右ドライブシャフトインボード側の回転挙動を計測した。その結果、左右の振動挙動の差は微小でありフリクションの影響が確認された (Fig. 17)。これを踏まえ、減衰パラメータを含むディファレンシャルギヤ周辺の理論計算モデルを作成し、回転挙動が実車と同等になるよう減衰パラメータを同定した (Fig. 18)。

3.3. 実現象との適合性確認

先述の摩擦特性と減衰特性を用いた自励振動解析モデルによるシミュレーション結果と、実車計測結果との比較を Fig. 19 と Fig. 20 に示す。摩擦調整剤を配合したものと同配合していない2種類のオイルによる検証をおこない、実車同等の振動発生の有無を再現した。また、振動が発生した摩擦調整剤を配合していないオイルでの検証では、周波数、振幅および振動の開始時期も実測との適合性がとれた。

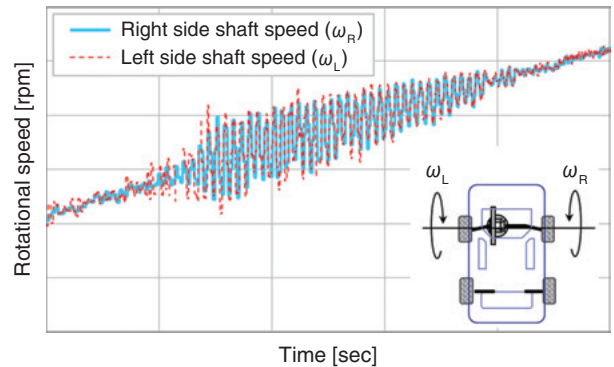


Fig. 17 Measurement of drive shaft speed

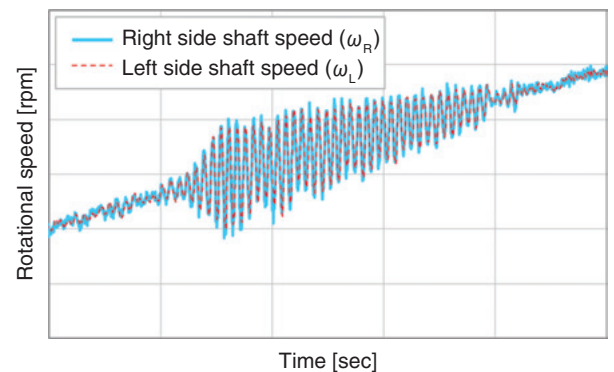


Fig. 18 Identification of damping factor

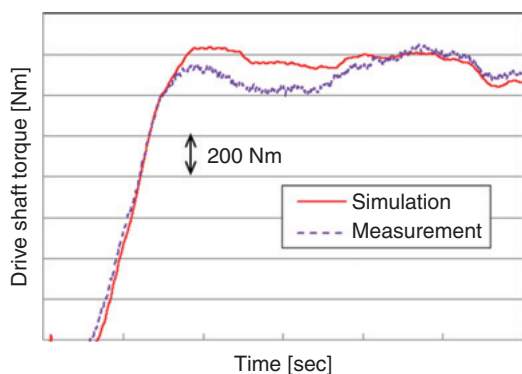


Fig. 19 Torque characteristics (oil with friction modifiers)

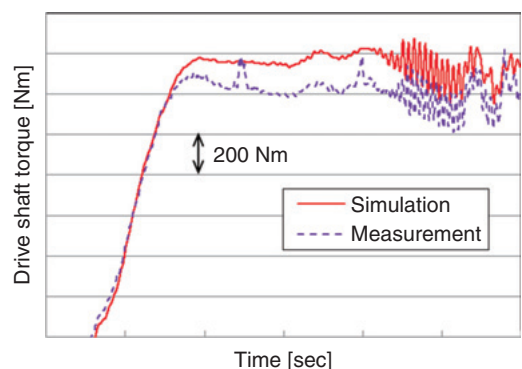


Fig. 20 Torque characteristics (oil without friction modifiers)

4. 構築技術の検証

動摩擦特性の温度、面圧、すべり速度による変化の中から可能な限り正勾配の領域を使う考え方による振動抑制を構造の観点で検討した。

測定により得た動摩擦特性において、自励振動の抑制には面圧は低い領域を使うことが効果的であり、温度は高い領域を使うことが効果的である。しかし高温領域での使用については耐久性能への影響が大きいことから低面圧化に着目した。

クラッチの基本的な性能であるトルク容量を減らさずに面圧を下げるためには摩擦面数を増やす構造が考えられる。ただしディスク、プレートをそのまま追加することや、半径方向への拡張はコンパクト化と相反する。そこで、クラッチ全体の寸法拡大を伴わず、冷却性や耐久性を維持できる手法として、ディスク芯金と薄肉化したプレート双方に摩擦材を片面貼りにするとともに、ディスク枚数を5枚から7枚へ増やす構造を検討した (Fig. 21)。

効果検証は摩擦調整剤を配合していないオイルを使用することにより自励振動を発生させやすい状況でおこなった。まず、対策仕様の自励振動の抑制効果をシミュレーションにて検証した。その結果、対策仕様では振動が低減

されることを机上にて確認した (Fig. 22)。

次に、この仕様を用いて実車にて確認をおこなった。その結果、シミュレーションと同様に振動が減少した (Fig. 23)。また、この振動波形を周波数分析した結果、自励振動が発生する周波数帯でのピークが低減していることから、本対策手法の有用性が確認できた (Fig. 24)。

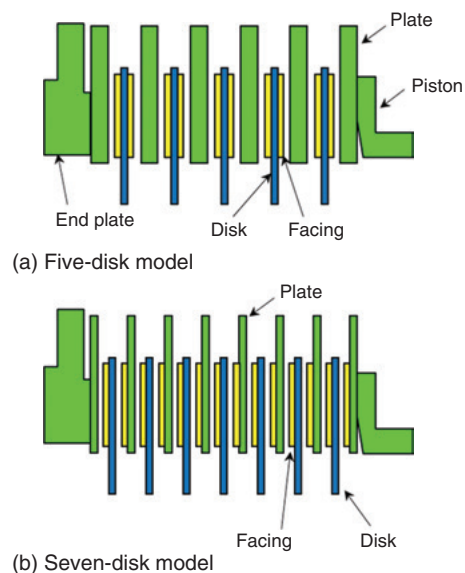


Fig. 21 Section of current and review specifications

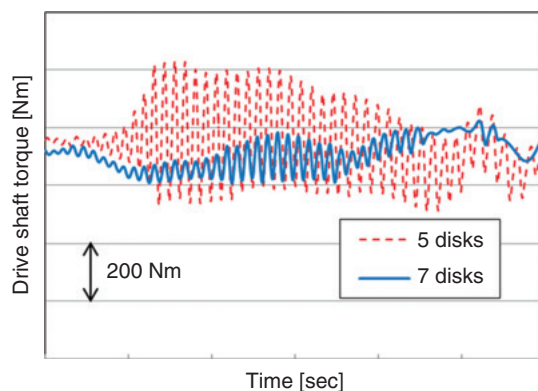


Fig. 22 Calculation results of torque characteristics

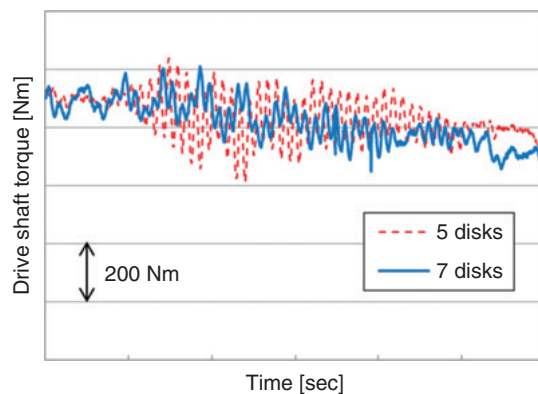


Fig. 23 Measurement results of torque characteristics

寿命化技術, トライボロジスト, 第 53 巻, 第 4 号,
 p.236-241(2008)

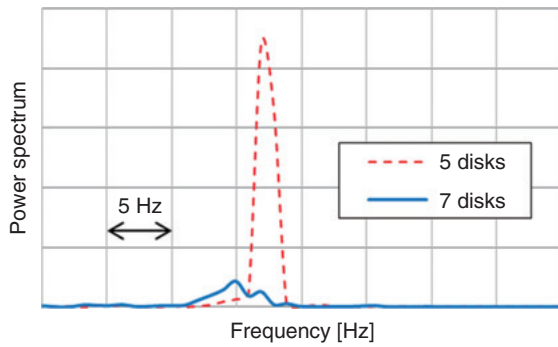


Fig. 24 Power spectrum of measurement results

5. まとめ

湿式多板クラッチ実働時の自励振動挙動予測技術について、以下の結論を得た。

- (1) クラッチ摩擦面のトルク伝達特性と駆動系の減衰値を用いて駆動系全体のトルク伝達特性が計算可能な挙動解析モデルを開発し、実車の定量的な自励振動予測が可能となった。
- (2) 振動抑制手法として、ディスク枚数を増やして摩擦材を片面貼りにした構造のクラッチを検討した。その振動抑制効果を、構築した挙動解析モデルと実車検証の双方で確認した。

参考文献

- (1) 山口正明, 大瀧光郎, 伊藤敬介, 菰澤英夫, 戸塚博彦: 新型 FIT 用トルクコンバータ付き CVT の開発, Honda R&D Technical Review, Vol.20, No.2, p.11-16
- (2) 齋藤俊博, 古手川保, 松浦吉輝, 田中征一, 大槻王一: 湿式多板クラッチの摩擦特性を考慮した耐久性予測技術の研究, Honda R&D Technical Review, Vol.18, No.2, p.155-162
- (3) Saito, T., Yamaoka, T., Kato, M., Minaminakamichi, T., Hoshi, T., Miyamoto, K.: Technology for Prediction of Torque Capacity during Operation of AT with Focus on Friction Properties of Facing Materials in Multiple Plate Clutches, SAE Technical Paper 2009-01-1255(2009)
- (4) 太斎正志: 湿式クラッチおよび湿式ブレーキにおける音響・振動, トライボロジスト, 第 35 巻, 第 5 号, p.326-330(1990)
- (5) 遠山護, 大森俊英, 三田修三: ATF 添加剤のシャダー防止作用機構解析, 豊田中央研究所 R&D レビュー, Vol.35, No.3, p.43-50(2000)
- (6) 八並憲治, サムエル ターシグニ, リー サーソフ, クリストファー クリーブランド: 自動変速機油の長

■ 著 者 ■



星 崇 司



南中道 隆



東上 圭 司



田 伏 功



美 浦 一 葉



園 田 修 三

ドッグクラッチ式トランスミッションにおける ドッグ歯の摩耗に関する研究

Research on Dog Teeth Wear in Dog Clutch Transmissions

牧 田 宏 之*

Hiroyuki MAKITA

要 旨

ドッグクラッチ式トランスミッションにおいて、ドッグ歯の過大な摩耗はトランスミッションの機能に影響を与え、スムーズな走行を阻害する要因となる。そこで、変速時のトランスミッションの挙動解析を通じて、ドッグ歯の摩耗メカニズムを明確にした。また、ドッグ歯に負荷される接触応力の計算手法を構築し、接触応力とドッグ歯の摩耗量に高い相関が得られることを確認した。

この手法を用いることで、設計初期段階においてドッグ歯の摩耗に関する精度の高い仕様検討が可能となった。

ABSTRACT

In dog clutch transmissions, the excessive wear of dog teeth affects the functions of transmission and becomes a factor to obstruct smooth operation. Therefore, a study was conducted to clarify the wear mechanism of dog teeth by analyzing the operations in transmissions during dog clutch engagement.

In addition, a method of estimating the contact stress applied to the dog teeth was developed, and it was confirmed that contact stress is highly correlated with the degree of dog teeth wear.

Use of the developed method enabled accurate investigation in the early stage of designing on specifications which are related to dog teeth wear.

1. はじめに

小型軽量化およびコストメリットの要求から、自動二輪車の有段変速機にはドッグクラッチが広く採用されている。ドッグクラッチ式トランスミッションは、シンクロ式トランスミッションのように変速時の回転差を吸収する同期機構を持たないため、ドッグクラッチへ大きな負荷が掛かる。

近年、自動二輪車エンジンの大排気量・高出力化に伴ない、駆動系部品の慣性モーメントやトランスミッションの回転数が増加し、ドッグクラッチへの負荷が増している。ドッグクラッチへの負荷が増すにつれてドッグ歯の摩耗 (Fig. 1) が大きくなり、過大に摩耗した場合には、変速不良

や走行中のギヤ抜けを発生させ、スムーズな走行を阻害する要因となる。

しかしながら、従来のドッグ歯の摩耗に関する机上検討は簡易的な計算によるものであり、仕様を決定する過程において試行錯誤を繰り返す場合があった。そこで、本研究ではドッグクラッチのドッグ歯の摩耗メカニズムを明確にするとともに、ドッグ歯の摩耗量を精度良く予測する数値評価手法を構築し、開発効率の向上を目指した。

2. ドッグクラッチ式トランスミッション概要

一般的な自動二輪車のドッグクラッチ式トランスミッションを、Fig. 2 に示す。ライダーは左足でシフトレバーを操作し、シフトレバーと結合されたシフトスピンドルを介して、シフトドラムを回転させる。シフトドラムが回転することで、シフトドラム外径部に設けられた溝に沿って、シフトフォークがトランスミッションの軸方向にスライドする。シフトフォークはドッグクラッチが設けられたシフトの溝に挿入されており、シフトがスプライン軸上をスライドしてドッグクラッチが噛合う。



Fig. 1 Dog teeth wear

*二輪 R&D センター

ドッグクラッチ噛合い時、変速対象のギヤ（シャフトに対して回転自由）とシフト（シャフトにスプライン嵌合）に回転差があり、両者のドッグ歯が噛合う際に衝撃トルクが発生する。この時、ドッグ歯が摩耗していると軸方向分力が発生し（Fig. 3）、ドッグクラッチが噛合えず、変速不良が発生する。

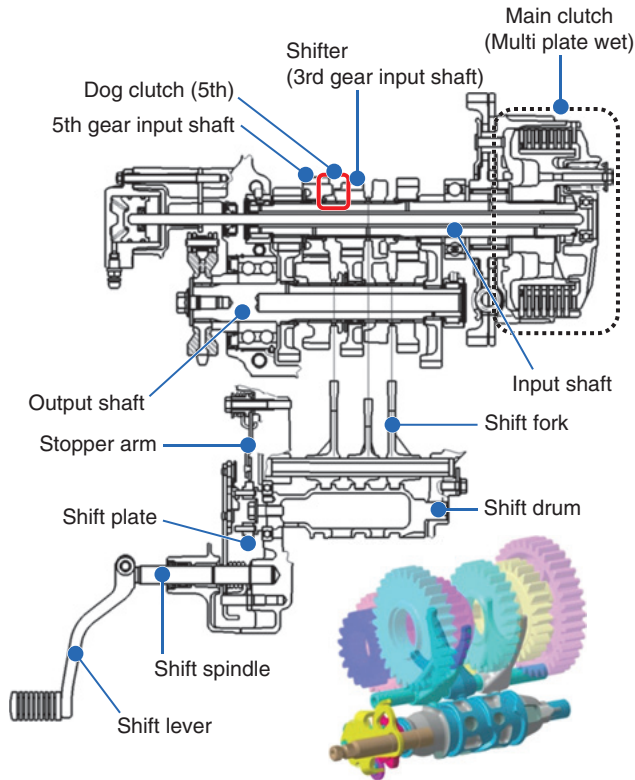


Fig. 2 Structure of dog clutch transmission

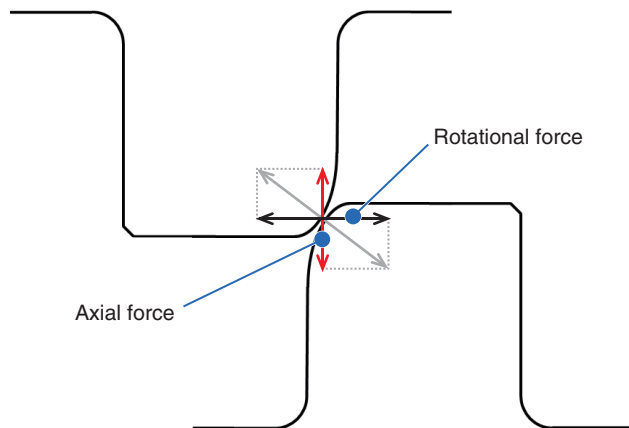


Fig. 3 Axial force on dog teeth

3. 変速時のトランスミッション挙動

ドッグ歯の摩耗メカニズムを明確にするため、変速時のトランスミッション挙動を確認した。代表例を、Fig. 4 及び Fig. 5 に示す。両図は同時に計測したデータであるが、

容易に視認できるようにインプットシャフト・トルクのみを共通データとし、データを分割して示した。

Fig. 4 に、シフトドラムとシフトスピンドルの回転角、インプットシャフト・トルクの計測データを示す。変速時は、まずクランクシャフトとインプットシャフトの間に配置されたメインクラッチにより、エンジンとトランスミッションの動力伝達が遮断される。これによって、トランスミッションに掛かっている負荷が抜けると、ライダーの操作によりシフトドラムが回転し始める。シフトドラムが回転することでシフトがスライドし、ドッグクラッチが噛合う。

ドッグクラッチが噛合った時、インプットシャフトには連続して2回トルク変動が発生している。シフトドラムはライダーから回転力を受け続けているが、ライダーはインプットシャフトに生じたトルクに打ち勝つほど大きな力を発生できないため、シフトドラムの回転が止められている。（図に示した例では、最大噛合い深さの30%程度の深さで、シフトドラムの回転が止められている。）その後、インプットシャフトに生じたトルクが抜けると、再びシフトドラムが回転し始め、ドッグクラッチが完全に噛合う。

このように、ドッグクラッチが噛合う瞬間には、シフトドラムの回転が止められるような大きなトルクが作用している。このトルクが抜けるまでは、ドッグ歯の噛合い深さは変わらない。このため、噛合いが浅い状態でドッグ歯が噛合った場合、ドッグ歯に大きな接触応力が作用する。ドッグ歯における摩耗は先端から徐々に進行していくため、このような噛合いが浅い場合の負荷が、摩耗の要因であると考えられる。

次に、Fig. 5 にエンジン、インプットシャフト、アウトプットシャフト及びリヤホイールの各角速度、インプットシャフト・トルクの計測データを示す。なお、各軸の角速度は、全てドッグクラッチがある軸へ等価した角速度である。メインクラッチによって駆動力が遮断されると、インプットシャフトは慣性で一定の角速度を維持する。アウトプットシャフトも、車体慣性で安定して回転しているリヤホイールとともに一定の角速度を維持する。ドッグクラッチが噛合った瞬間、インプットシャフトとアウトプットシャフトの角速度が急激に変化し、お互いの角運動量が交換され、1回目の衝撃トルクが発生する。この時、リヤホイールの角速度は変化していない。これは、アウトプットシャフトとリヤホイールは弛みをもったドライブチェーンを介して接続されており、両者が1回目の衝突の瞬間には分断されているためである（Fig. 6）。

その後、1回目の衝突によってアウトプットシャフトの角速度が上昇することでドライブチェーンの弛みがとれる。弛みがとれた瞬間に、トランスミッション系と車体系がドライブチェーンを介して衝突し、2回目の衝撃トルクが発生する（Fig. 6）。2回目の衝撃トルクの負荷が抜けた

後、減速側に3回目、4回目の衝撃トルクが発生しているが、この時点では既にドッグクラッチは最大噛合い深さに達しており（シフトドラム回転角が、次のギヤポジションである60 degまで達している）、減速側のトルクはドッグ歯先端の摩耗には影響しない。したがって、ドッグ歯の摩耗の要因となる負荷は、1回目と2回目の衝撃トルクである。一般的に、車体側にはリヤホイールにダンパが設けられており、車体側のねじり剛性はトランスミッションと比較し

て十分に低く、車体との衝突である2回目の衝撃トルクは1回目より小さくなる。そこで、本研究では1回目の衝撃トルクを用いてドッグ歯に掛かる接触応力（単位面積当たりにかかる力）を求め、ドッグ歯の摩耗量予測を試みる。

なお、ドッグ歯の摩耗で問題となるのは噛合い深さ方向であり、ドッグ歯の摩耗量はFig. 7のように定義し、評価する摩耗量は変速対象のギヤとシフトの摩耗量を足し合わせたものとする。

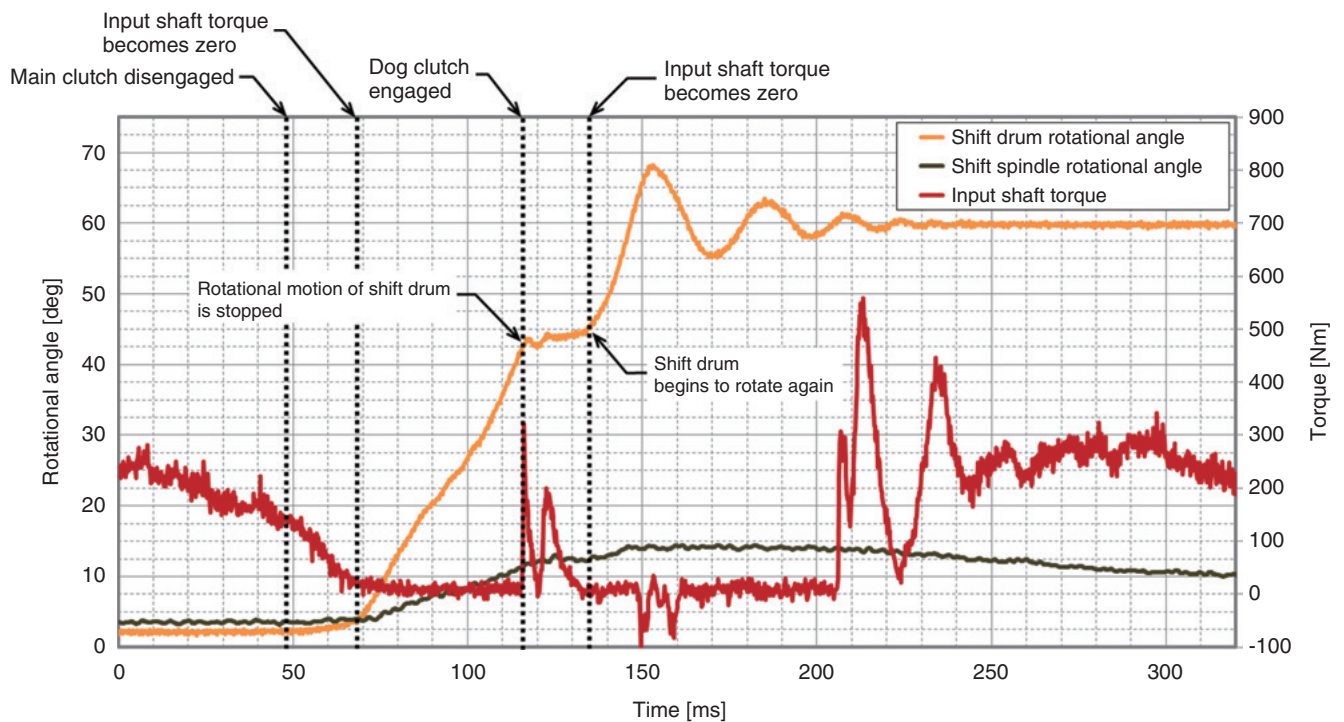


Fig. 4 Time history of rotational angle and torque when dog clutch engages

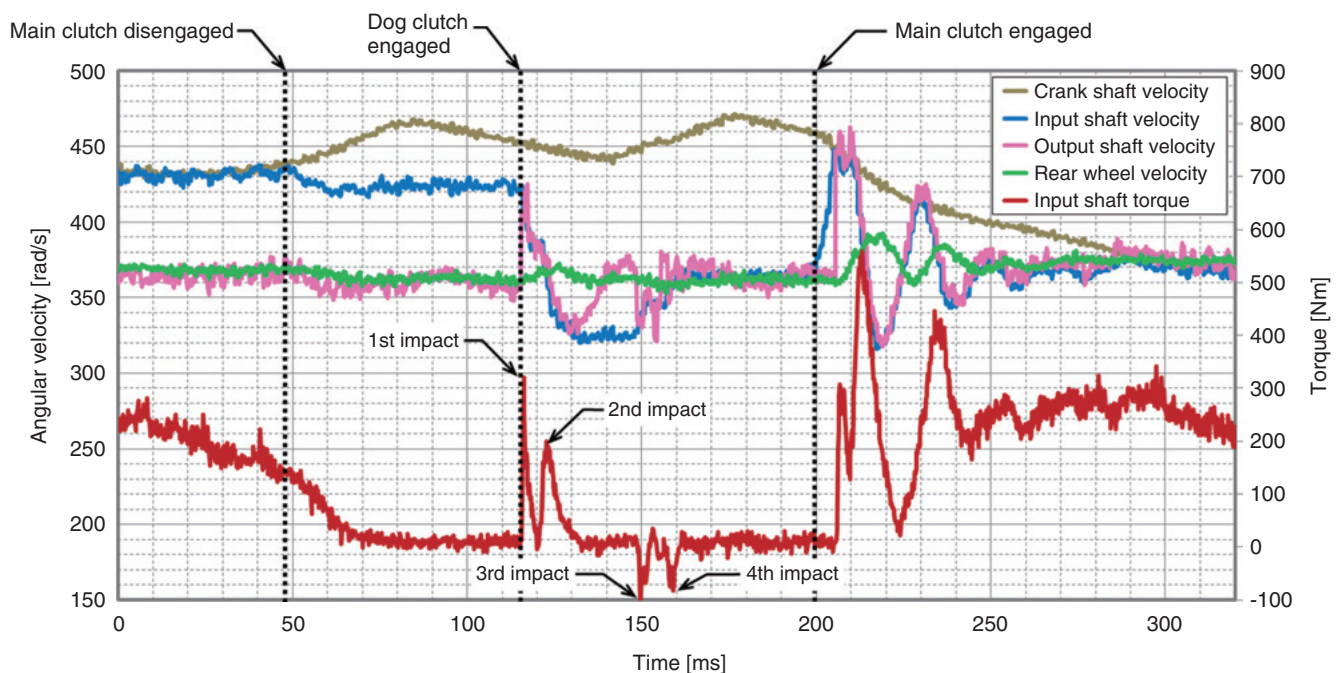


Fig. 5 Time history of angular velocities and torque when dog clutch engages

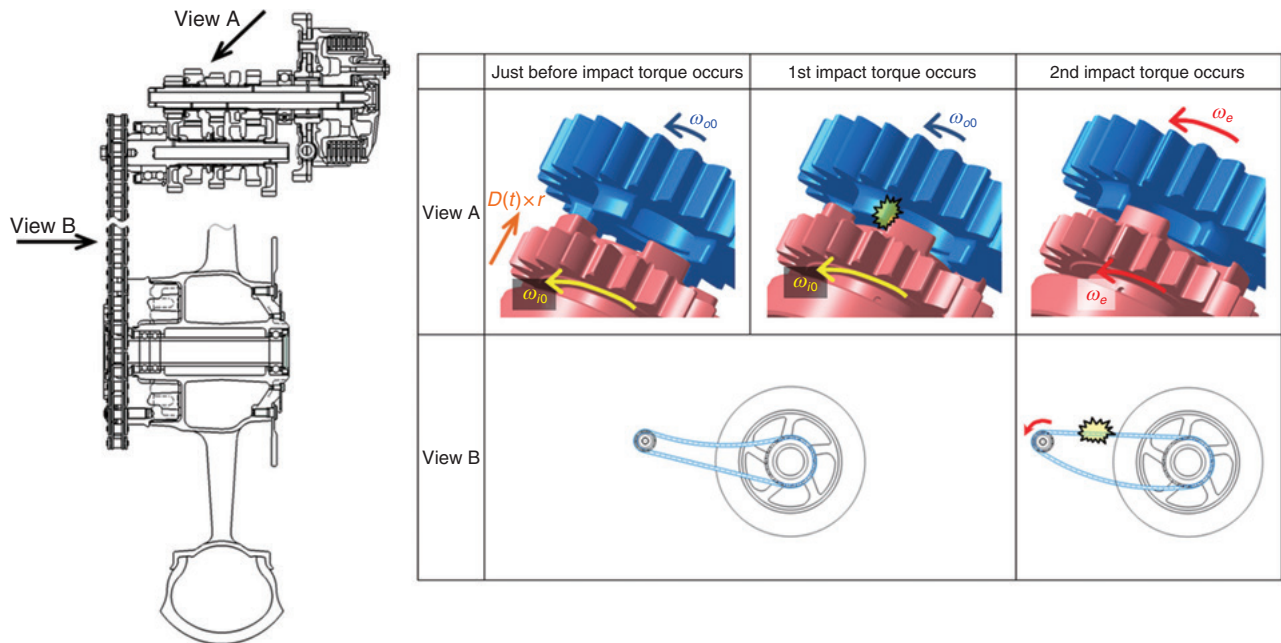


Fig. 6 Transition of drive-system action

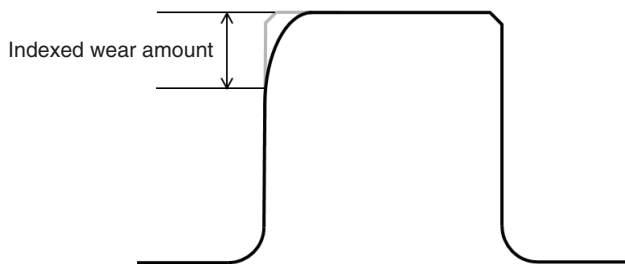


Fig. 7 Definition of Indexed wear amount

4. ドッグクラッチ噛合い時の衝撃トルク

ドッグ歯に掛かる接触応力を求めるため、まずドッグクラッチ噛合い時に生じる1回目の衝撃トルクについて考える。Fig. 2に示すようにトランスミッションは多自由度系であり、複雑な挙動を示すと考えられるが、巨視的には、回転差を持った「インプットシャフト系」と「アウトプットシャフト系」の衝突である。そこで、ドッグクラッチの衝突を「インプットシャフト系」と「アウトプットシャフト系」の二自由度系に置換して、衝撃トルクを求める。

トランスミッションの運動は回転系であるが、Fig. 8に示す直線運動の力学モデルに置き換えると、理解しやすい。まず始めに、ドッグクラッチの噛合い時に減衰を考慮する必要があるか否かを検証するため、反発係数を確認した。供試品は、一般的にトランスミッションに用いられる低炭素クロムモリブデン鋼に浸炭処理したものを用いた。トランスミッションの角速度に車体(リヤホイール)側の影響が出ないように、ドライブチェーンが無い状態で試

験を実施した結果、衝突前後の角速度から求めた反発係数は0.98であり、減衰は無視できることが確認できた。したがって、ドッグクラッチ噛合い時の運動方程式は減衰項を無視して、次式で与えられる。

$$I_i \cdot \ddot{\theta}_i = K \cdot (\theta_o - \theta_i)$$

$$I_o \cdot \ddot{\theta}_o = K \cdot (\theta_i - \theta_o)$$

なお、インプットシャフト系とアウトプットシャフト系が接触し始めた時点をも、 $t = 0$ とする。

ここで、ねじりばね定数 K は、インプットシャフト系の等価ねじりばね定数 k_i とアウトプットシャフト系の等価ねじりばね定数 k_o を直列結合したものであり、

$$K = \frac{k_i \cdot k_o}{k_i + k_o}$$

で与えられる。

次に、インプットシャフト系とアウトプットシャフト系の相対ねじれ角を θ ($\theta = \theta_i - \theta_o$)、さらに

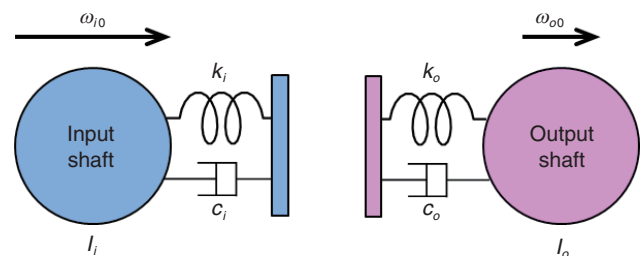


Fig. 8 Impact model

$$I = \frac{I_i \cdot I_o}{I_i + I_o}$$

とすると、運動方程式は次式のように整理される。

$$I \cdot \ddot{\theta} + K \cdot \theta = 0$$

初期条件は $t = 0$ の時、 $\theta = 0$ 、 $\dot{\theta} = (\omega_{i0} - \omega_{o0})$ であるから、解は次式で与えられる。

$$\theta = \frac{(\omega_{i0} - \omega_{o0})}{\omega_n} \cdot \sin(\omega_n t)$$

$$\omega_n = \sqrt{K/I}$$

したがって、ドッグクラッチ噛合い時の衝撃トルクを T とすると、加速側のトルクを正として、次式で表わされる。

$$T = \omega_n \cdot \frac{I_i \cdot I_o}{I_i + I_o} \cdot (\omega_{i0} - \omega_{o0}) \cdot \sin(\omega_n t)$$

また、最大衝撃トルク T_{max} が生じるのは $t = \pi/(2\omega_n)$ の時であり、 T_{max} は次式で与えられる。

$$T_{max} = \sqrt{\frac{k_i \cdot k_o}{k_i + k_o} \cdot \frac{I_i \cdot I_o}{I_i + I_o}} \cdot (\omega_{i0} - \omega_{o0})$$

I_i : インพุットシャフト系等価慣性モーメント [kg・m²]

I_o : アウトพุットシャフト系等価慣性モーメント [kg・m²]

θ_i : インพุットシャフト系等価ねじれ角 [rad]

θ_o : アウトพุットシャフト系等価ねじれ角 [rad]

k_i : インพุットシャフト系等価ねじりばね定数 [Nm/rad]

k_o : アウトพุットシャフト系等価ねじりばね定数 [Nm/rad]

ω_{i0} : インพุットシャフト系等価初期角速度 [rad/s]

ω_{o0} : アウトพุットシャフト系等価初期角速度 [rad/s]

ω_n : 固有角振動数 [rad/s]

t : 時間 [sec]

T : ドッグクラッチ噛合い時の衝撃トルク [Nm]

T_{max} : ドッグクラッチ噛合い時の最大衝撃トルク [Nm]

この最大衝撃トルク算出式の精度を確認するため、排気量 1000 cm³ の自動二輪車を用いてシフト時の回転差を変化させてトルクを計測した。なお、計測にはひずみゲージを用い、インพุットシャフト上のメインクラッチと 1st ギヤの間で測定した。試験結果と計算値を比較検証したところ、異なるギヤポジションなど、条件を変化させた場合においても誤差 10% 程度の高い精度を確認できた。代表例として、2nd ギヤへシフトアップした時の確認結果を Fig. 9 に示す。試験結果と計算値は良く一致しており、最大衝撃トルクの計算手法は妥当であることが確認できた。

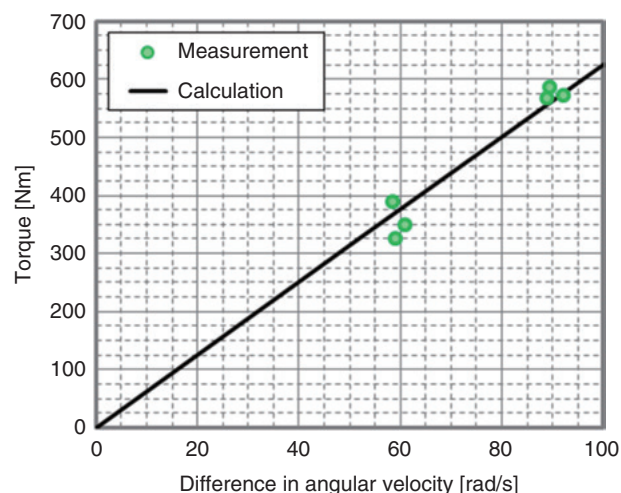


Fig. 9 Relation between impact torque and difference in angular velocity

5. ドッグクラッチの噛合い面積と接触応力

次に、ドッグ歯に掛かる接触応力を求めるため、負荷を受ける噛合い面積について考える。ドッグ歯の噛合い面積は、径方向の長ささと噛合い深さを乗じたものである (Fig. 10)。

$$A = L \times H$$

A : ドッグ歯噛合い面積 [mm²]

L : ドッグ歯径方向長さ [mm]

H : ドッグ歯噛合い深さ [mm]

径方向の長さ L は設計値から簡単に求まるが、噛合い深さ H はライダのシフトレバー操作特性 (時間に対する、シフトレバー操作部変位量の推移) や、ドッグクラッチの諸元などに影響される。そこで、噛合い深さに影響する因子を整理し、接触応力を求めることを考える。

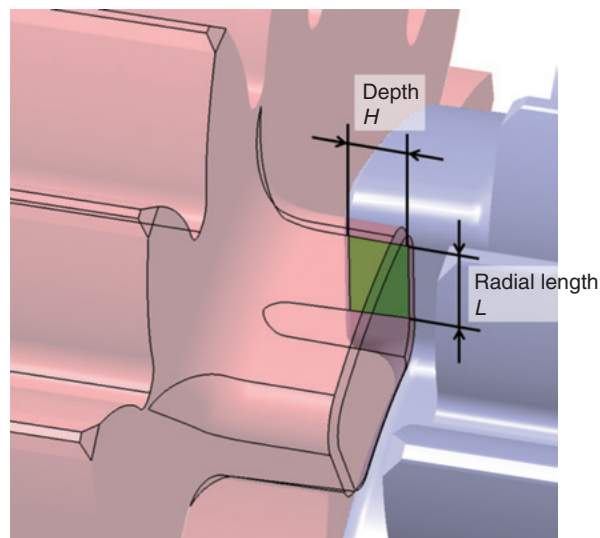


Fig. 10 Contact area of dog teeth

5.1. シフトレバー操作特性

ドッグ歯の摩耗は、エンジン回転数が高い条件下で発生しやすいことが分かっている。これは、変速時のエンジン回転数が高いほど、ドッグ歯が噛合う際の相対角速度が大きくなるためである。ドッグ歯の相対角速度が大きくなるほど、噛合い時の衝撃トルクが大きくなるとともに、噛合い深さは浅くなる。このため、ドッグ歯に掛かる接触応力が高くなり、ドッグ歯が摩耗しやすくなる。

そこで、本研究では加速時はスロットル全開でエンジン最高回転数にて変速し、減速時はスロットル全閉で変速後にエンジン最高回転数となるエンジン回転数で変速する条件で、ドッグ歯の噛合い深さに影響を及ぼす、ライダーによるシフトレバー操作特性を確認した。

5.1.1. ドッグ歯先端の当接有無による差異

ドッグ歯が噛合う時、ドッグ歯の先端同士が当接してから噛合う場合と、ドッグ歯の先端が当接することなく噛合う場合がある。両者の時間に対するシフトドラム回転角データの代表例を、Fig. 11 に示す。シフトドラムが回転し始めてからドッグ歯先端が当接するまでは、両者のシフトドラム角速度は同等である。その後、ドッグ歯先端が当接しない場合は、ほぼ一定の角速度でシフトドラムが回転し続ける。一方、ドッグ歯先端が当接する場合はシフトの動きが止められるため、シフトドラム角速度が一時的に 0 となる。当接し終わった後、シフトドラム角速度が徐々に増す特性となっており、明らかにドッグ歯先端が当接しない場合とは異なっている。したがって、シフトレバー操作特性は、ドッグ歯先端が当接するか否かで区別して考える必要がある。

本研究では、標準的なシフトレバー操作特性を求めるため、ライダー 10 名のシフトレバー操作特性を平均化し、以下の近似式を得た。

$$D_1(t) = \alpha \cdot t^4 + \beta \cdot t^3 + \gamma \cdot t^2 + \delta \cdot t$$

$$D_2(t) = \varepsilon \cdot t$$

$D_1(t)$: ドッグ歯先端が当接してから噛合う場合のシフトレバー操作部変位量 [mm]

$D_2(t)$: ドッグ歯先端が当接せずに噛合う場合のシフトレバー操作部変位量 [mm]

なお、ドッグ歯先端が当接する場合はドッグ歯先端が当接し終わった時、ドッグ歯先端が当接しない場合はドッグ歯先端がオーバーラップし始めた時を、 $t = 0$ とする。 α , β , γ , δ 及び ε は、計測結果から求めた定数である。

5.1.2. ニュートラルを通過する場合のシフトレバー操作特性

次に、1st ギヤポジションと 2nd ギヤポジションの間に

設けられているニュートラル・ポジション (以下、N と表記する) を通過する場合について確認した。Fig. 12 に 1st ギヤポジションから 2nd ギヤポジションへ変速した場合の、時間に対するシフトドラム回転角のデータを示す。なお、1st ギヤポジションはシフトドラム回転角 0 deg, 2nd ギヤポジションはシフトドラム回転角 60 deg であり、N はシフトドラム回転角 30 deg に位置している。Fig. 12 に示すデータから、N を通過した直後のシフトドラム回転角 35 deg 付近で、明らかにシフトドラムの角速度が変動していることが分かる。これは、ストッパアームのローラが、シフトプレートの N の 2nd ギヤポジション側凸部と接触するためである (Fig. 13)。

変速途中に N が無い場合、ローラは滑らかにシフトプ

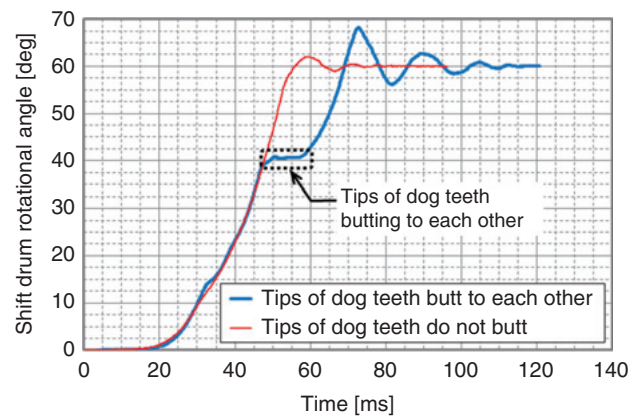


Fig. 11 Comparison of angular transition of shift drum

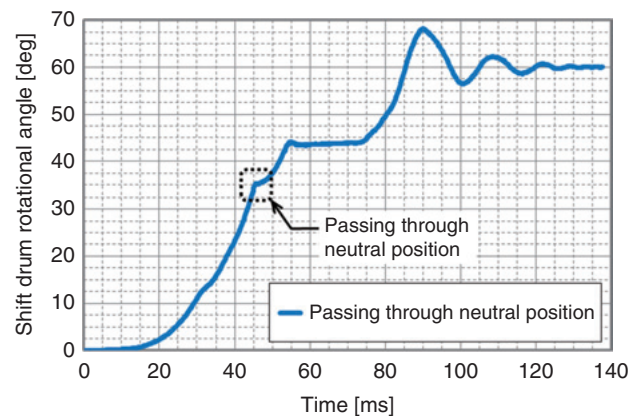


Fig. 12 Angular transition of shift drum in process of passing through neutral position

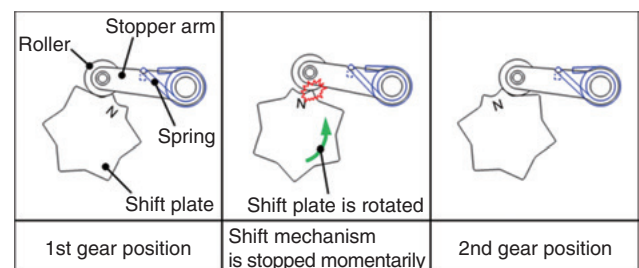


Fig. 13 Transition of shift mechanism action

レート上を移動する。一方、途中に N がある場合、ローラがシフトプレートの N の変速前のギヤポジション側 (Fig. 13 では 1st ギヤポジション側) 凸部を越えた後、ストッパアームに設けられたスプリングによって、ローラはシフトプレート中心方向に変位する。このため、シフトプレートの N の変速後のギヤポジション側 (Fig. 13 では 2nd ギヤポジション側) 凸部とローラが衝突し、シフトドラム角速度が低下する。この時、シフトドラム角速度は瞬間的に 0 まで低下し、その後、徐々に角速度が増す特性となっている。これは、ドッグ歯先端が当接する場合と同様の傾向を示している。そこで、Fig. 11 に示したドッグ歯先端が当接する場合のシフトドラム回転角データと、N を通過する場合のシフトドラム回転角データを重ね合わせて比較した (Fig. 14)。その結果、両者のシフトドラム回転角特性は同等であることが確認できた。したがって、N を通過する場合のシフトレバー操作特性は、ドッグ歯先端が当接してから噛合う場合の特性 $D_1(t)$ を用いて評価できる。

5.2. ドッグ歯先端が当接してから噛合う場合の接触応力

ドッグ歯先端が当接してから噛合う場合、当接している間はシフト操作が止められる。回転差によってドッグ歯先端の当接が解消されると、シフトが送られ、次のドッグ歯と噛合う。ドッグ歯の当接が解消されてから、次のドッグ歯に噛合うまでの時間だけ、シフトがスライドして噛合い深さを増すことができる。この時間をシフト可能時間 t_s とすると、回転差およびドッグ歯の数およびドッグ歯の角度 (Fig. 15) によって決定される。

$$t_s = \left\{ \frac{2\pi}{n} - (\theta_i + \theta_s) \right\} / (\omega_{i0} - \omega_{o0})$$

t_s : シフト可能時間 [sec]

n : 円周上に等角度間隔で配置されたドッグ歯の数

θ_i : 変速対象ギヤのドッグ歯角度 [rad]

θ_s : シフトのドッグ歯角度 [rad]

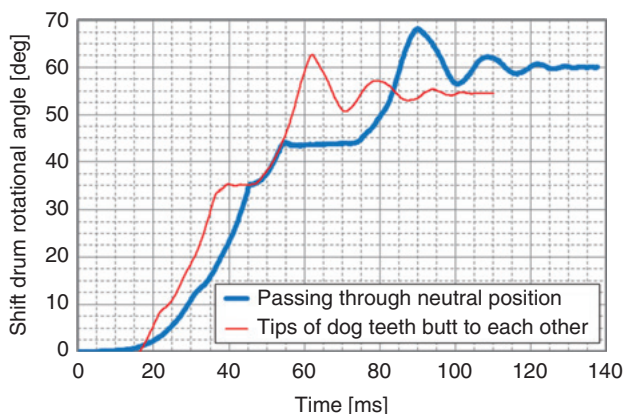


Fig. 14 Comparison of angular transition of shift drum with and without passage through neutral position

このシフト可能時間 t_s を $D_1(t)$ に代入すると、ドッグ歯が当接してから噛合う場合のシフトレバー操作部の変位量が求まる。設計値から求められるシフトレバー操作部の変位量に対するシフト変位量の比と、ドッグ歯先端の未使用時の面取り量 (以下、初期面取り量と表記する) から、ドッグ歯の噛合い面積は次式で与えられる。

$$A_1 = L \cdot (D_1(t_s) \times r - 2c)$$

A_1 : ドッグ歯先端が当接してから噛合う場合の噛合い面積 [mm²]

r : シフトレバー操作部の変位量に対する、シフト変位量の比

c : 変速対象ギヤおよびシフト、各々のドッグ歯先端の未使用時の面取り量 [mm]

以上より、ドッグ歯先端が当接してから噛合う場合の接触応力 σ_1 は、次式で与えられる。

$$\sigma_1 = \frac{T_{max} \cdot 10^3}{(P/2) \cdot n} \cdot \frac{1}{L \cdot (D_1(t_s) \times r - 2c)}$$

σ_1 : ドッグ歯先端が当接してから噛合う場合の接触応力 [MPa]

P : ドッグ歯の有効直径 [mm]

ただし、シフト可能時間が十分に長い条件下では、 $(D_1(t_s) \times r)$ が設計上の最大噛合い深さを超えてしまう場合がある。この場合は、 $(D_1(t_s) \times r)$ ではなく、設計上の最大噛合い深さをを用いて噛合い面積を求める。

5.3. ドッグ歯先端が当接せずに噛合う場合の接触応力

ドッグ歯先端が当接せずに噛合う場合は、ドッグ歯先端がオーバーラップし始めた時の位相によって噛合い深さが増化する。噛合い深さが最大となるのは、前述のシフト可能時間だけシフトが送られた場合である。また、最小噛合い深さは 0 mm をわずかに超える深さである。(噛合い深さが 0 mm では、ドッグ歯が噛合えない。) ドッグ歯が当接しない場合の噛合い深さは、この最大と最小の範囲で、任意の噛合い深さが同じ確率で発生する。そこで、噛合い深さが取り得る範囲の平均接触応力を、ドッグ歯先端が当接せずに噛合う場合の接触応力とする。

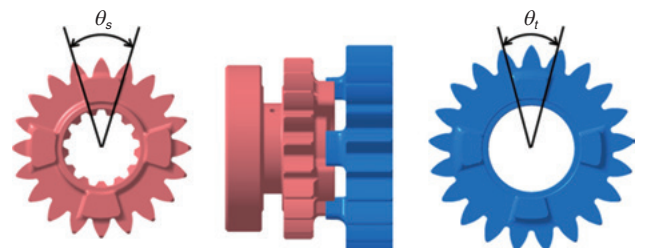


Fig. 15 Angles of dog teeth

ただし、噛合い深さがドッグ歯先端の初期面取り量以下となる場合は、面取りによって軸方向分力が発生する (Fig. 3)。このため、シフトが戻され、ドッグ歯は一度では噛合えない。このような弾かれが発生する場合は区別して考える必要があり、ここでは弾かれが発生しない条件での接触応力を考える。最小噛合い深さに 0 mm を超えて十分に小さい値として 10^{-5} mm を与えると、ドッグ歯先端が当接せずに噛合う場合の接触応力 σ_2 は次式で与えられる。

$$\sigma_2 = \frac{T_{\max} \cdot 10^3}{(P/2) \cdot n} \cdot \frac{1}{L} \cdot \frac{1}{(D_2(t_s) \times r - 2c) - 10^{-5}} \cdot \int_{10^{-5}}^{D_2(t_s) \times r - 2c} \frac{1}{H} dH$$

σ_2 : ドッグ歯先端が当接せずに噛合う場合の接触応力 [MPa]

5.4. 弾かれが生じる場合の接触応力

噛合い深さがドッグ歯先端の初期面取り量以下となる場合、前述の通り弾かれが発生する。弾かれが発生した場合のトランスミッション挙動を確認した結果、ドッグ歯が弾かれて一度噛合いが外れた後、シフト系にはライダから力が掛かり続けているため、すぐに弾かれが生じたドッグ歯の先端同士が当接する。その後、ドッグ歯先端の当接が解消されると、シフトが送られ、次のドッグ歯と噛合う。このように、弾かれが生じた場合は、1回の変速操作で2回衝撃トルクが負荷されるが、1回目の弾かれによる衝撃トルクはドッグ歯先端の初期面取り部に負荷されるため、ドッグ歯の摩耗進行には影響しない。したがって、2回目の衝撃トルクによる接触応力を求めればよい。ただし、2回目の衝撃トルクによる接触応力は、1回目の弾かれ時の影響を受けるため、まず1回目の弾かれ事象について論じる。

弾かれ発生時の衝撃トルクデータを確認すると、弾かれによる1回目の衝撃トルクはばらつきが大きく、トルクが小さい場合もあれば、非常に大きい場合もある (Fig. 16)。

この負荷の差は、ドッグ歯が衝突し始めてから噛合いが外れるまでに、どれくらい角運動量を交換したかによって決まる。このため、弾かれによる衝撃トルクが大きければ、角運動量の交換、つまりお互いの角速度の交換が進む。したがって、弾かれトルクが大きい場合、2回目の衝突時の回転差は1回目よりも十分に小さくなり、2回目の衝撃トルクは小さくなると予測される。ところが、実際には弾かれによる衝撃トルクが大きい場合でも、2回目の衝突時に大きな衝撃トルクが発生している。そこで、弾かれが発生した場合のトランスミッション挙動の詳細を確認した (Fig. 17)。

弾かれ発生時、相対的に慣性モーメントが小さいアウトプットシャフトの角速度は急激に上昇している。このため、弾かれ直後の回転差は、予測通り弾かれ直前よりも小さくなっている。ところが、弾かれた後に、一度上昇したアウトプットシャフトの角速度が、衝突前の角速度まで戻されている。このため、弾かれ後の2回目の衝突直前の回転差が予測よりも大きくなっている。これは、アウトプットシャフトの角速度が上昇することでドライブチェーンの弛みがとれ、ドライブチェーンを介して車体慣性の影響



Fig. 16 Time history of torque when dog clutch engages

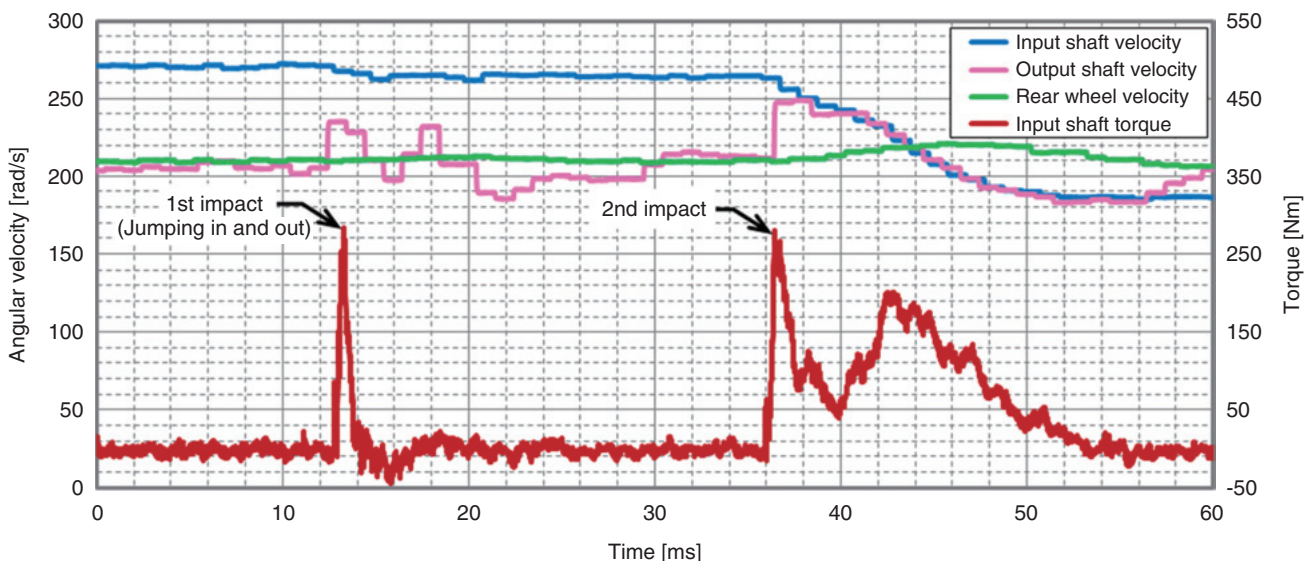


Fig. 17 Behavior of angular velocities and torque when jumping in and out

を受けるためである。車体の慣性モーメントはアウトプットシャフト系の慣性モーメントに比べて非常に大きく、アウトプットシャフトの角速度は車体と同じ角速度、つまり弾かれ前の角速度に戻される。したがって、アウトプットシャフトの角速度は、1回目と2回目の衝突前で同じである。ただし、インプットシャフトは1回目の弾かれによる角速度変化が維持されるため、2回目の衝突時の回転差は1回目の弾かれ時よりは小さくなる。

1回目の弾かれによるインプットシャフトの角速度変化量は、弾かれによって交換した角運動量の大小に依存する。弾かれ時にドッグ歯の噛合いが外れる瞬間は、衝撃トルクが最大値に至るまでの過程で訪れるため、弾かれによる1回目の衝撃トルクは0から T_{max} の間となる。弾かれによる衝撃トルクが0の場合、角運動量は交換されておらず、インプットシャフトの角速度は初期角速度と同じである。これは、弾かれが起こっていないのと同義であり、2回目(実質的には1回目)の衝撃トルクは T_{max} である。

次に、弾かれによる1回目の衝撃トルクが最大(T_{max})となる時を考える。この時、インプットシャフトの角速度は、最も低下する。1回目の弾かれによる衝突において、衝撃トルクが最大となるのはインプットシャフト系とアウトプットシャフト系の角速度が一致した瞬間である。この角速度が一致した瞬間の角速度を ω_e とすると、角運動量保存から次式が成立する。

$$\omega_e = \frac{I_i \cdot \omega_{i0} + I_o \cdot \omega_{o0}}{I_i + I_o}$$

弾かれによる1回目の衝撃トルクが最大の時、ドッグ歯の噛合いが外れた後のインプットシャフトの角速度は ω_e である。したがって、この後に生じる2回目の衝撃トルク T_{min} は、次式で表わせる。

$$T_{min} = \sqrt{\frac{k_i \cdot k_o}{k_i + k_o} \cdot \frac{I_i \cdot I_o}{I_i + I_o}} \cdot (\omega_e - \omega_{o0})$$

以上より、2回目の衝撃トルクの平均値 T_{mean} は次式で与えられる。

$$T_{mean} = \frac{1}{2} (T_{max} + T_{min}) = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{k_i \cdot k_o}{k_i + k_o} \cdot \frac{I_i \cdot I_o}{I_i + I_o}} \cdot (\omega_{i0} + \omega_e - 2\omega_{o0})$$

なお、2回目の衝突時のドッグ歯の噛合い面積は、ドッグ歯先端が当接してから噛合うため、 $L \cdot (D_1(t) \times r - 2c)$ で与えられる。ただし、インプットシャフトの角速度は初期から変化しており、シフト可能時間は次式で与えられる。

$$t'_s = \left\{ \frac{2\pi}{n} - (\theta_i + \theta_s) \right\} / (\omega_e - \omega_{o0})$$

以上より、弾かれが生じた場合の接触応力は、次式で表わされる。

$$\sigma_3 = \frac{T_{mean} \cdot 10^3}{(P/2) \cdot n} \cdot \frac{1}{L \cdot (D_1(t'_s) \times r - 2c)}$$

ω_e : 最大弾かれトルク発生直後の角速度 [rad/s]

T_{min} : 弾かれが生じた後のドッグクラッチ噛合い時における最小衝撃トルク [Nm]

T_{mean} : 弾かれが生じた後のドッグクラッチ噛合い時における平均衝撃トルク [Nm]

t'_s : 弾かれが生じた後のシフト可能時間 [sec]

σ_3 : 弾かれが生じた場合の接触応力 [MPa]

5.5. ニュートラルを通過する場合の接触応力

前述の通り、Nを通過するか否かでシフトレバー操作特性が異なるため、Nを通過する場合について考える。ただし、ドッグ歯先端が当接してから噛合う場合(弾かれが生じる場合を含む)は、N通過後にドッグ歯先端の当接によってシフト操作が止められてしまうため、Nを通過した時の影響を考慮する必要がない。したがって、ドッグ歯先端が当接せずに噛合う場合だけ、Nを通過する影響を考慮すればよい。

ドッグ歯先端が当接せずに噛合う場合、噛合い深さはドッグ歯先端がオーバーラップし始めた時の位相によって変化する。噛合い深さが最大となるのは、ドッグ歯先端がオーバーラップし始めてから、シフト可能時間 t_s だけシフトが送られた場合である。Nを通過する場合のシフトレバー操作特性は、ドッグ歯先端が当接してから噛合う場合の特性 $D_1(t)$ を用いて評価すればよいことが分かっている(Fig. 14)。ただし、Nを通過する場合に $D_1(t)$ の特性を適用し始める位置は、ドッグ歯先端がオーバーラップし始める位置ではないため、オーバーラップするまでに要する時間を考慮する必要がある。

Nを通過する場合に $D_1(t)$ を適用し始める位置は、ストップパームのローラがシフトプレートのNの変速後のギヤポジション側凸部と接触する位置である(Fig. 13)。この時点では、ドッグ歯先端はまだオーバーラップしておらず、ドッグ歯先端の間に隙間がある。この隙間を詰めるために要する時間を t_c とすると、Nを通過する場合のドッグ歯の噛合い深さの最大値は、 $\{D_1(t_s + t_c) - D_1(t_c)\} \times r - 2c$ で表わされる。 (t_c) は以下の手順で求められる。まず、ストップパームのローラがシフトプレートのNの変速後のギヤポジション側凸部と接触する位置から、ドッグ歯先端がオーバーラップし始めるまでに必要なシフトレバー変位量を設計値から求める。この変位量を $D_1(t)$ の逆関数に代入することで、 t_c が求まる。

以上より、最小噛合い深さに0 mmを超えて十分に小さい値として 10^{-5} mmを与えると、Nを通過してドッグ歯先端が当接せずに噛合う場合の平均接触応力 σ'_2 は、次式で与えられる。

$$\sigma_2' = \frac{T_{\max} \cdot 10^3}{(P/2) \cdot n} \cdot \frac{1}{L \cdot \{D_1(t_s + t_c) - D_1(t_c)\} \times r - 2c} \cdot \int_{10^5}^{[D_1(t_s + t_c) - D_1(t_c)] \times r - 2c} \frac{1}{H} dH$$

t_c : N を通過した後、ドッグ歯先端の隙間を詰めるために要する時間 [sec]

σ_2' : N を通過し、ドッグ歯先端が当接せずに噛合う場合の接触応力 [MPa]

6. 接触応力によるドッグ歯の摩耗量予測

ドッグ歯に負荷される接触応力は、ドッグ歯先端が当接してから噛合う場合、当接せずに噛合う場合、弾かれが生じる場合でそれぞれ異なる。(ドッグ歯先端が当接しない場合は、N を通過するか否かでも異なる。)そこで、各々の接触応力に発生確率を乗じ、それらを足し合わせたものを総合的な接触応力 σ とする。

$$\sigma = \sum_{j=1}^3 \sigma_j \cdot p_j$$

ただし、N を通過する場合は、ドッグ歯先端が当接しない場合の接触応力として σ_2 ではなく σ_2' を用いて評価する。また、それぞれの発生確率は次式で与えられる。

$$p_1 = \frac{(\theta_t + \theta_s)}{2\pi/n}$$

$$p_2 = (1 - p_1) \cdot \frac{D_2(t_s) \times r - 2c}{D_2(t_s) \times r}$$

$$p_3 = (1 - p_1) \cdot \frac{2c}{D_2(t_s) \times r}$$

σ : 総合接触応力 [MPa]

p_1 : ドッグ歯先端が当接してから噛合う確率

p_2 : ドッグ歯先端が当接せずに噛合う確率

p_3 : ドッグ歯が弾かれる確率

この総合的な接触応力とドッグ歯の摩耗量の関係を確認するため、諸元の異なる試作品を用い、排気量 700 cm³/900 cm³/1200 cm³ の自動二輪車で耐久試験を実施した。耐久試験の条件は、加速時はスロットル全開でエンジン最高回転数にて変速し、減速時はスロットル全閉で変速後にエンジン最高回転数となるエンジン回転数で変速するものとし、各ギヤポジションで同じ回数ずつ変速操作を行なった。なお、供試品は一般的にトランスミッションに用いられる低炭素クロムモリブデン鋼に浸炭処理したものをを用いた。また、ドッグ歯の摩耗量は形状測定機を用いて評価した。

接触応力と耐久試験後のドッグ歯の摩耗量の関係を、Fig. 18 に示す。接触応力とドッグ歯の摩耗量の相関係数は 0.96 であり、非常に強い相関が確認できた。

以上の結果から、接触応力による評価手法は、ドッグクラッチ式トランスミッションの仕様を決定する上で重要なドッグ歯の摩耗量を精度良く予測できる有効な手段であることが確認できた。

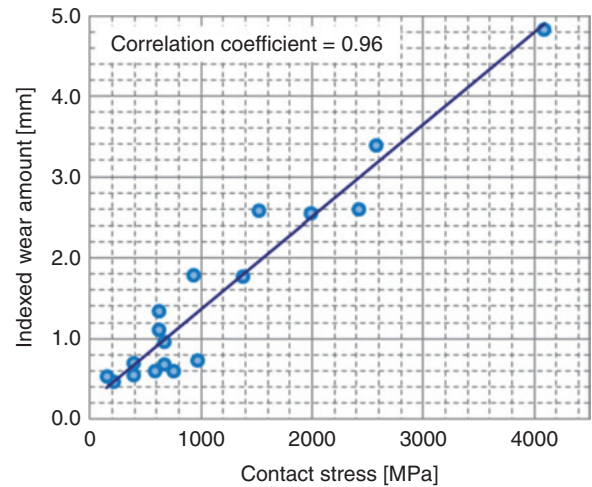


Fig. 18 Relation between indexed wear amount and contact stress

7. まとめ

ドッグクラッチ式トランスミッションにおけるドッグ歯の摩耗に関する研究を行ない、以下の成果が得られた。

- (1) ドッグクラッチ噛合い時の摩耗メカニズムを明確にした。
- (2) ドッグクラッチ噛合い時に生じる衝撃トルクの計算手法を構築した。
- (3) ドッグクラッチ噛合い時の噛合い深さに関する評価手法を構築した。
- (4) ドッグクラッチのドッグ歯に作用する接触応力計算手法を構築し、ドッグ歯の摩耗量予測を可能とした。

以上により、設計初期段階においてドッグ歯の摩耗に関する精度の高い仕様検討が可能となった。

■ 著 者 ■



牧田 宏之

CFD 解析を用いた小型高速滑走艇における 船外機の燃費と動力性能予測の研究

Fuel Consumption and Performance Prediction in Outboard Motors
for High-speed Planing Boats using CFD Simulation

栗岡 俊介*
Shunsuke KURIOKA

要 旨

本研究は小型高速滑走艇における船外機の航行時燃費と動力性能を誤差 $\pm 5\%$ 以内で数値的に予測可能なシミュレータの構築を目的とする。これまでの船外機開発の経験からプロペラの推進性能が航行時燃費と動力性能に大きく影響することに着目し、Computational Fluid Dynamics (CFD) 解析により予測されたプロペラ性能を実験的に取得したエンジン性能および燃料消費率マップと組み合わせデータベース化をおこなった。本研究で構築したシミュレータを用いて、船外機の動力性能を予測し実船の航行試験結果と比較した結果、最高船速の予測精度は $\pm 2.79\%$ (± 1.7 km/h) であり試験結果と良い一致を示した。また巡航速度による航行時燃費は試験結果に対し $\pm 4.55\%$ で予測できることを確認し、本研究の目標である予測誤差 $\pm 5\%$ を達成した。これらのことから本研究で構築したシミュレータは、これまで開発初期段階で実験的、経験的に選定してきたプロペラ選択および駆動減速比の設計において航行時燃費・動力性能に優れた仕様を、航行試験をおこなうことなく予測できることを示した。またそれと同時に航行時燃費・動力性能を両立し環境性能により優れた船外機の開発に有効活用できる可能性があることを示した。

ABSTRACT

The research discussed in this paper set out to develop a simulator able to quantitatively predict the cruising fuel consumption and cruising performance of an outboard motor used for a small, high-speed planing boat; the target accuracy for prediction was within a range of $\pm 5\%$. The research focused on the fact that the thrust performance of a propeller has a significant impact on cruising fuel consumption and cruising performance. In order to evaluate the accuracy of the fuel consumption and performance simulator, simulation results were compared with the results of a full-scale cruising test. This comparison suggested that the simulator was able to satisfactorily predict the cruising fuel consumption and cruising performance of outboard motors. In particular, prediction results agreed with full-scale measurement results to within a range of $\pm 2.79\%$ (± 1.7 km/h) for maximum speeds and $\pm 4.55\%$ for cruising fuel consumption. These results indicate that the simulator is able to quantitatively predict the cruising fuel consumption and the cruising performance of an outboard motor. More importantly, the results demonstrate that the simulator can be used to identify optimal propeller specifications and gear reduction ratios, which have traditionally been based on experience. It was therefore concluded that the simulator possesses considerable potential as an effective tool able to be used in the development of environmentally friendlier outboard motors with outstanding cruising fuel economy and cruising performance.

1. まえがき

世界で初めて開発された実用的な船外機は1900年代にアメリカで誕生した。以来100年余、船外機エンジンは小型船の小型・軽量・高出力な動力として世界中のボートユーザに喜びと役立ちを提供している。船外機は歴史的にみて

*汎用 R&D センター

大多数のエンジンが軽量でシンプルな構造の2ストロークエンジンを採用してきた。しかしながら、内燃機関全般において地球的規模で環境性能の向上が要求されており、これは船外機エンジンも例外ではない。厳しい排出ガス規制と環境基準を満たすため近年4ストロークエンジンを採用する船外機が増えてきており、船外機エンジン製造者は環

境性能と動力性能の両立に対する技術的チャレンジを継続してきた⁽¹⁾⁻⁽³⁾。近年の船外機の大排気量化、大馬力化による開発規模の拡大に対し、船外機の開発コスト低減・開発効率の向上は船外機エンジン製造者にとって最も重要な課題のうちの一つである。その開発コストの低減、開発効率の向上のための答えの一つがシミュレーションを用いた各種性能予測である⁽⁴⁾⁻⁽¹⁰⁾。

これまでの船外機開発の経験により同じ船外機エンジンであってもプロペラ仕様や駆動減速比の違いが動力性能だけでなく航行時燃費にも大きく影響することがわかってきた。我々は、このプロペラの推進性能が航行時燃費に大きく影響することに着目し、駆動減速比を含めたプロペラ推進性能を CFD 解析によって精度良く求め、実験的に取得したエンジン性能および燃料消費率マップと組み合わせデータベース化すれば、これまで実験的、経験的に取得してきた航行時燃費を開発初期段階で数値的に予測できるのではないかと考えた。

本研究では、小型高速滑走艇に搭載した船外機の航行時燃費・動力性能を誤差±5%以内で数値的に予測可能なシミュレータの構築を目的とする。

2. 燃費・動力性能予測シミュレータの概要

2.1. シミュレータのデータベース構成

本研究で提案する小型高速滑走艇に搭載した船外機の燃費・動力性能予測シミュレータは、エンジン出力・燃料消費マップ・船体抵抗・プロペラ性能の四つのデータベースから構成される (Fig. 1)。エンジン出力データベースには実験的に収集したエンジンのパワーカーブが保存される。燃料消費マップは同じく実験的に収集される。船体抵抗は実験的に収集されたデータから経験的に構築した一次元シミュレータにより数種類の船体がデータベース化され保存される。プロペラ性能は CFD 解析により予測・データベース化される。

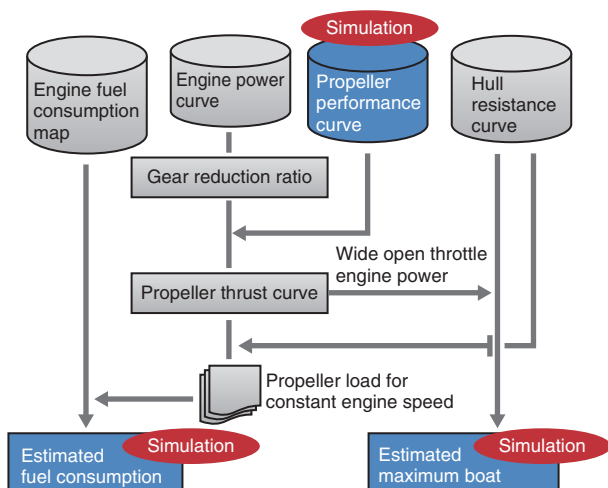


Fig. 1 Database components of simulator

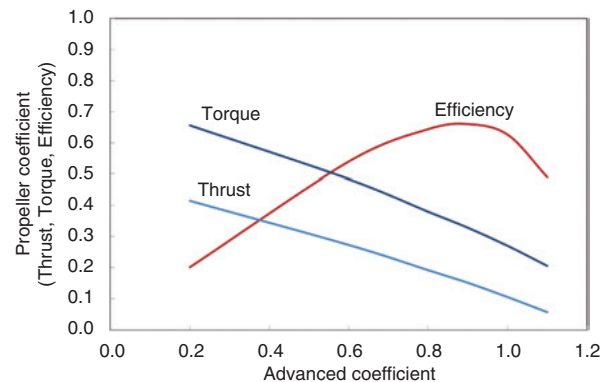
プロペラ性能の CFD 解析結果は曳航水槽による模型試験結果と比較し精度保証をおこなった。詳細は後に議論する。

2.2. 航行時燃費・動力性能予測手法

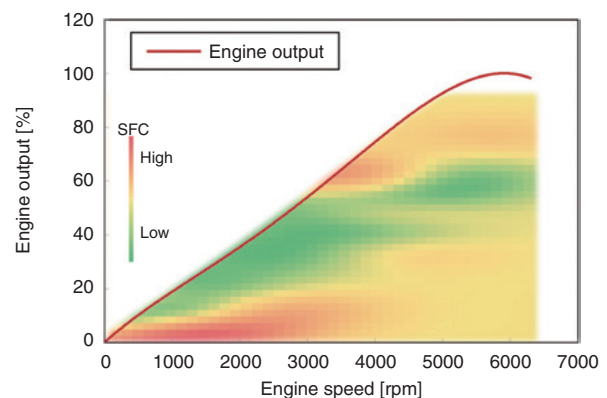
本研究で提案する小型高速滑走艇に搭載した船外機の燃費・動力性能シミュレータの予測手法を論じる。本手法は次の三つのステップで構成される。

2.2.1. プロペラ性能の予測

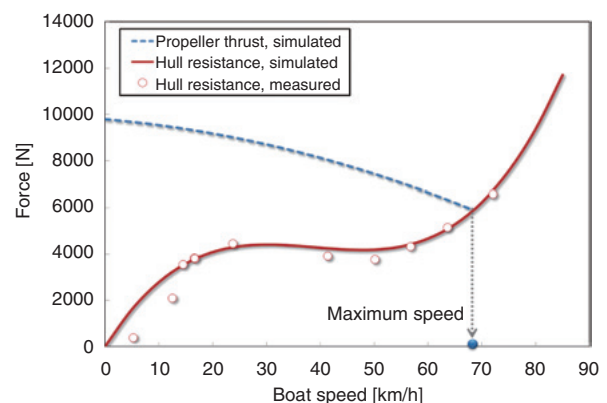
プロペラ性能線図 [Fig. 2 (a)] とエンジンからプロペラ



(a) Propeller performance curves (Nondimensionalized)



(b) Engine power curve and fuel consumption map



(c) Hull resistance and propeller thrust curves

Fig. 2 Sample diagrams of database used in simulator

軸への損失馬力およびプロペラ軸の駆動減速比を考慮したエンジン出力線図 [Fig. 2(b)] を組み合わせる。滑走艇用プロペラは一般的に 60-80% のレンジのプロペラ効率で入力トルクを推進力に変換する。このことから入力したエンジン出力に対応したプロペラ推力線図が推定できる。

2.2.2. 最高航行船速の予測

推定したプロペラ推力線図と船体抵抗線図を組み合わせる。エンジン出力線図と組み合わせられたプロペラ推力線図はエンジン回転数に対する推力線図である。この線図を船体抵抗線図と組み合わせるため、航行速度に対する推力線図に変換する。船体抵抗力とプロペラ推力が釣り合う速度が最終的な滑走艇の最高速度となる [Fig. 2(c)]。

2.2.3. 航行時燃費の予測

2.2.1. 項で算出したプロペラ推力線図はエンジン全開時の出力を使用している。航行時燃費は一定のエンジン回転、いわゆるパーシャルスロットル状態での評価をおこなうため、各エンジン回転におけるプロペラ推力線図を作成する。このプロペラ推力はプロペラ性能線図に示される効率を用いることでプロペラが吸収するエンジン馬力に変換される。各エンジン回転数のときの吸収馬力を燃料消費マップ [Fig. 2(b)] から読み取ることで航行時の燃費が推定される。

本シミュレータの構成上、予測精度は CFD によるプロペラ性能の予測精度を超えることは困難であると推察される。これまで開発初期段階で用いてきたプロペラの CFD 予測精度が $\pm 5\%$ 程度である事実をもとに、本シミュレータの目標予測精度を $\pm 5\%$ と決定した。

3. プロペラ性能の数値計算手法

3.1. CFD ソルバ

本研究では商用 CFD 解析ソフトウェアを使用してプロペラ性能を予測した。解析ソルバは非構造格子を取り扱う有限体積法ベースの CFD ソルバであり、プロペラ性能予測の CFD 解析実績が多く報告されている⁽⁶⁾⁻⁽⁹⁾。

流体方程式は一般的な非圧縮性の Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) 方程式である。本研究では Multi Rotating Frame (MRF) 法により座標系を回転させ定常解析をおこなう手法を採用した⁽¹¹⁾。離散化手法は、圧力方程式の解法に Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation (SIMPLE) 法を、運動量に関しては精度の高い Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinematics (QUICK) スキームを、その他の空間離散化精度は 2 次中心差分スキームを採用した。

3.2. 乱流モデル

CFD 解析に用いた乱流モデルについて論じる。本研究で使用した商用 CFD 解析ソフトウェアは数種類の乱

流モデルを有している。乱流モデルは解析対象の流れ場によって慎重に選定されなければならない。本研究ではプロペラ性能のデータベース化のために、数百ケースの CFD 解析をおこなうことを想定し、ロバストな性能を有する $k-\omega$ SST モデルを採用した。この乱流モデルはプロペラ性能予測の CFD 解析研究において、すでに多くの研究者によりその優位性が報告されている⁽⁶⁾。

3.3. 計算領域

CFD 解析に設定した解析領域について論じる。本研究では計算領域および計算メッシュの大きさはプロペラ直径 D により無次元化した⁽⁶⁾。これは直径の異なるプロペラ性能の予測結果に関しても精度保証が容易となり、また過去の研究結果との比較ができるという利点がある。解析領域は Fig. 3 に示す円筒領域である。プロペラを起点に上流側に $1.5D$ 、下流側に $3D$ 、半径方向に $2D$ の距離を確保した。プロペラ前後のシャフト形状は曳航水槽による模型試験と同じものを採用している。模型試験に関する詳細は後に説明する。

3.4. 計算メッシュ

CFD 解析の計算メッシュについて論じる。計算メッシュ生成は商用格子生成ソフトウェアを使用した。メッシュタイプは一般部にテトラ要素、壁面近傍の境界層にプリズム要素と呼ばれる三角柱要素を採用し壁面近傍の解析精度を向上させた。プロペラ性能はプロペラ翼表面の圧力を積分した力から算出される推力・トルクにより算出される。したがってプロペラ翼表面の計算解像度が最も重要である。プロペラ翼表面のメッシュは $D/200$ 、境界層第 1 層目を $D/1000$ 、境界層の層数は 15 層とし、境界層のメッシュ成長率を 1.05 とした。計算領域の一般部の計算メッシュはプロペラ翼表面から 1.2 の成長率により徐々に大きくなり、計算領域の一番外側のメッシュは最大 $D/4$ になるように制限した。計算メッシュの一例を Fig. 4 に示す。これらのメッシュ設定パラメータをまとめたものを Table 1 に示す。

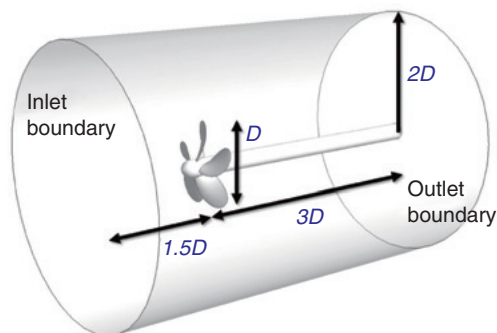


Fig. 3 Computational domain for propeller simulation

Table 1 Principal particulars of computational mesh for propeller simulations

Propeller diameter	D
Outside boundary surfaces	$D/4$
Propeller surfaces	$D/200$
1 st height of boundary layer	$D/1000$
Number of boundary layers	15
Growth rate of boundary layers	1.05
Growth rate of volume cells	1.20



Fig. 4 Propeller CAD model (left) and computational mesh (right)

3.5. 境界条件

CFD 解析に設定した境界条件について論じる。計算は定常解析でおこなわれ、座標系に一定の角速度を与える。プロペラ前方に速度の流入境界を与え、後方には圧力固定の流出境界を与える。計算領域の円筒側面にはフリースリップの壁面境界を与え、プロペラ翼面にはノンスリップの壁面境界を与える。プロペラ性能はプロペラに流入する水流の速度を変化させることで推力係数・トルク係数を算出し導出する。

4. 結果と考察

4.1. プロペラ単独性能

本研究で提案するシミュレータにおいて、プロペラ性能は船外機の航行時燃費や推進性能、駆動減速比の仕様選定を左右する重要な要素の一つである。このことから、プロペラ性能を CFD 解析により高精度に予測することはシミュレータの予測結果を高精度にすることにつながる。この項ではプロペラ性能予測における CFD 解析精度について議論する。

4.1.1. ベンチマーク計算 (排水量型船舶用プロペラ)

滑走艇用プロペラの性能予測をする前に、一般に公表されている排水量型船舶用 5 翼プロペラの実験結果を用いて本研究で使用する CFD ソルバのベンチマーク計算をおこなった。ベンチマーク計算に使用するプロペラは Seiunmaru-I と呼ばれる排水量型船舶用 5 翼プロペラで、一般にコンベンショナル型プロペラと呼ばれている。過去に多くの研究者によりこのプロペラに対する模型実験、数

値実験のベンチマーク計算がおこなわれてきた⁽⁶⁾。このプロペラの CAD モデルと計算メッシュを Fig. 4 に示す。

本研究におけるプロペラ性能は船舶工学で一般に用いられる性能線図により評価する。性能線図は前進係数 J 、スラスト係数 K_T 、トルク係数 K_Q 、プロペラ効率 η により無次元化され、以下の式で表される。

$$J = \frac{V_A}{nD}$$

$$K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^5}$$

$$K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^4}$$

$$\eta = \frac{J \cdot K_T}{2\pi \cdot K_Q}$$

ここで、 n はプロペラ回転数、 D はプロペラ直径、 V_A はプロペラ流入速度、 ρ は流体密度を表す。Fig. 5 に公知文献⁽¹²⁾による模型試験結果と CFD 解析結果の比較を示す。

プロペラのスラスト係数およびトルク係数の CFD 解析結果を模型試験結果と比較した結果、設計点 (最高効率点の約 80%) から最高効率点の間における予測精度はスラスト係数が $\pm 2.8\%$ 、トルク係数が $\pm 2.0\%$ を達成することを確認した。

4.1.2. ベンチマーク計算 (滑走艇用プロペラ)

滑走艇用 3 翼プロペラの性能予測を CFD 解析によりおこなった。CFD 解析結果の予測精度を確認するため、その解析結果を曳航水槽による模型試験を用いた実験結果と比

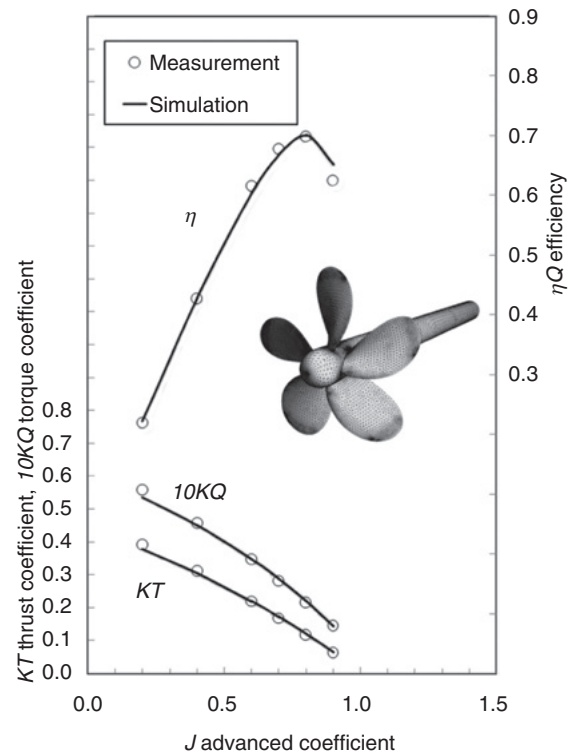


Fig. 5 Propeller performance curves compared with model test results

較した。本研究では曳航水槽による模型試験を東京都三鷹市にある財団法人日本造船技術センターにおいて実施した。試験に用いた模型プロペラおよび計算メッシュを Fig. 6 に示す。プロペラは 60% 縮尺のアルミ削り出し加工により製作された。滑走艇用 3 翼プロペラの性能も前項と同様の性能線図により評価する。Fig. 7 に曳航水槽による模型試験結果と CFD 解析結果の比較を示す。プロペラのスラスト係数およびトルク係数の CFD 解析結果を模型試験結果と比較した結果、設計点 (最高効率点の約 80%) から最高効率点の間における予測精度はスラスト係数が $\pm 4.55\%$ 、トルク係数が $\pm 4.58\%$ を達成することを確認した。本来、滑走艇用プロペラでは効率に数 % 影響すると予測されるキャビテーションの影響を考慮すべきであるが、キャビテーションを考慮した CFD 解析には安定性の課題がある。本研究では数百ケースの CFD 解析を実行するにあたり計算安定性を重視した結果、キャビテーションの影響は無視することとした。

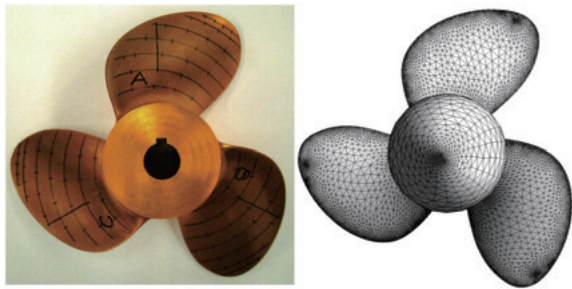


Fig. 6 Model propeller (left) and computational mesh (right)

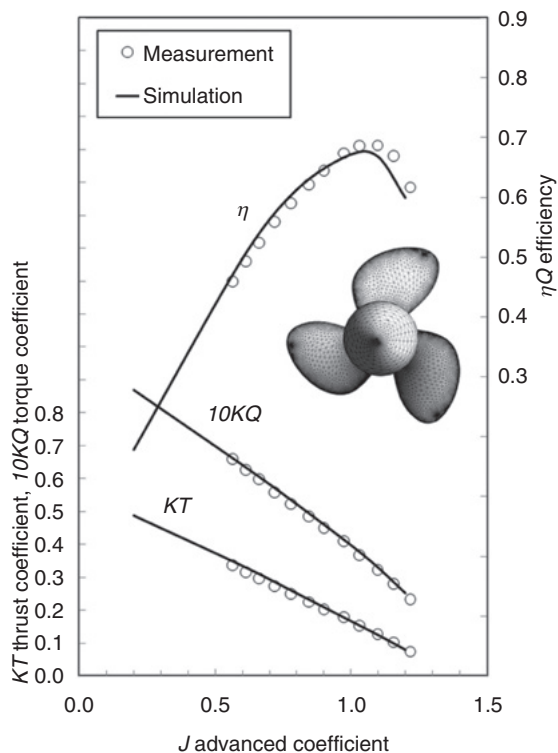


Fig. 7 Propeller performance curves compared with model test results

Table 2 Principal particulars of propellers used in evaluation of simulator

Propeller name	Photo	Diameter [inch]	Pitch [inch]	Gear reduction ratio
A-1		14.7	15.0	2.00
A-2			17.0	
A-3			19.0	
B		16.0	18.5	2.15
				2.33
				2.53
C		14.3	15.0	1.85
				2.15
				2.33

4.2. 動力性能予測

本研究で提案するシミュレータを用いて、高速滑走艇に搭載した大馬力クラスの船外機の動力性能をフルスケールサイズの航行試験結果と比較しシミュレータの予測精度を確認した。本シミュレータの動力性能の予測精度の確認に使用した滑走艇はオフショア艇と呼ばれる 3, 4 人乗りの一般的なプレジャーボートである (Fig. 8)。一般に滑走艇用プロペラは同じプロペラであっても数種類のプロペラピッチが設定されており、ユーザが最高船速重視や加速性能重視といった動力性能の特性を選択できるように販売されている。通常、船外機製造者または船外機販売店が推奨プロペラの記載されたプロペラマッチングチャートなどを利用してユーザにプロペラを提案するが、ユーザが使用する滑走艇によってプロペラ選択が異なることがある。このことから、本研究ではプロペラピッチが異なる滑走艇用プロペラおよび二つの異なる船体において動力性能の予測をおこない、予測精度を確認した。加えて、船外機駆動系の骨格である駆動減速比による動力性能への影響を確認するため、同一プロペラでの駆動減速比が異なる場合の予測も同時におこなった。Table 2 に使用した滑走艇用プロペラの仕様を示す。Fig. 8(a) の船体にはプロペラ A-1, A-2, A-3 を、Fig. 8(b) の船体にはプロペラ B, C を搭載した。

本研究で提案するシミュレータによる動力性能予測の結果、最高船速の予測精度が $\pm 2.79\%$ (± 1.7 km/h) であることを確認した。Fig. 9 に最高船速の予測結果と実船の試験結果の比較を示す。この結果は本シミュレータが船体やプロペラピッチの違いだけでなく、駆動系の骨格である駆動減速比の違いによる動力性能の予測も可能であることを示している。本シミュレータによる計算は、表計算ソフトウェアのスクリプトにより自動計算され、一つのプロペラ



(a) Boat A

(b) Boat B

Fig. 8 Small planing boats used in the simulator

仕様につき数秒でおこなわれる。また、本シミュレータは各種データを表計算ソフトウェアまたはテキストデータにより管理することが可能であり、データハンドリングが容易であるという利点を持つ。このことから、船外機開発の設計段階においても十分運用可能な機動性を有していることが確認された。

4.3. 航行時燃費予測

本研究で構築したシミュレータを用いて高速滑走艇に搭載した大馬力クラスの船外機の航行時燃費をフルスケールサイズの航行試験結果と比較し予測精度を確認した。本シミュレータの航行時燃費の予測精度の確認に使用した船体および船外機は前項と同様である。ただし、航行時燃費測定の実験条件と同一条件にするため、一定エンジン回転数による航行時の燃費を各回転数について評価した。前項と同様に、プロペラピッチが異なる滑走艇用プロペラおよび二つの船体の航行時燃費の予測をおこない、予測精度の確認をおこなった。加えて、船外機駆動系の骨格である駆動減速比による航行時燃費への影響を確認するため、同一プロペラで駆動減速比が異なる場合の予測も同時におこなった。使用した滑走艇用プロペラの仕様は Table 2 に示したものと同一である。

本シミュレータによる航行時燃費の予測結果は、実験結果と良好一致を示した。特に、滑走状態である 40 km/h 以上の航行時燃費を航行試験結果と比較した結果、予測精度は平均して $\pm 4.55\%$ であり、本研究の目標予測精度の $\pm 5\%$ を達成することを確認した。これは 4.1.2. 項のプロペラ性能のベンチマーク計算精度と同等である。Fig. 10 にプロペラ A の航行時燃費予測結果を実船試験結果と比較したグラフを示す。これはプロペラピッチの違いにより燃費の差異が生じるケースであるが、プロペラ A-3 の A-1 に対する燃費優位性を再現できている。Fig. 11, Fig. 12 にプロペラ B, C の航行時燃費予測結果を実船試験結果と比較した

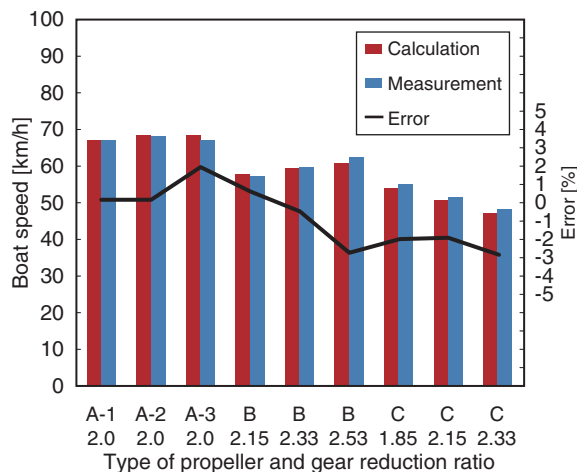


Fig. 9 Predicted maximum boat speeds and full-scale test results

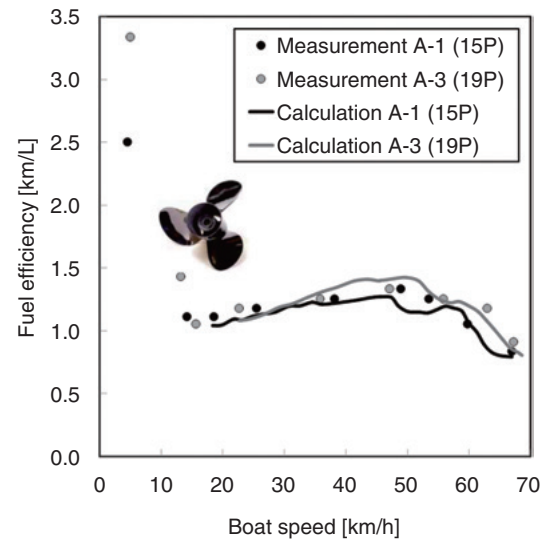


Fig. 10 Fuel consumption simulation compared with full-scale measurement results

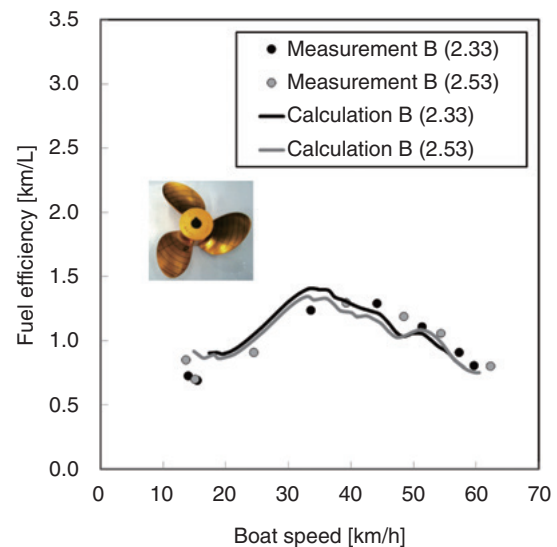


Fig. 11 Fuel consumption simulation compared with full-scale measurement results

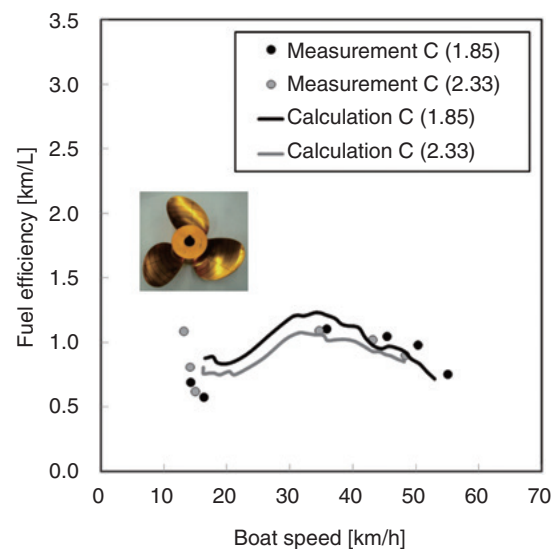


Fig. 12 Fuel consumption simulation compared with full-scale measurement results

グラフを示す。これは同一プロペラピッチで駆動減速比の違いにより燃費の差異が生じるケースであるが、それぞれの駆動減速比における燃費優位性を再現できている。

これらの結果は、プロペラ仕様の違いだけでなく、駆動系の骨格である駆動減速比の違いによる航行時燃費の予測も航行試験をおこなうことなくある一定範囲の精度で数値的に予測できることを示している。さらに、4.1.2.項で示したキャビテーションの影響を考慮せずに実用上十分な精度である $\pm 5\%$ (目標予測精度)を達成できたことは、船外機の開発初期段階、すなわち骨格設計段階において航行時燃費・動力性能を両立する環境性能に優れた船外機の開発に有効活用できる可能性があることを示している。また、本シミュレータを活用することで、船外機ユーザに対して最高船速や加速性能といった動力性能が優れたプロペラだけでなく、航行時の燃費性能が優れたプロペラを提案できることが期待できる。

5. まとめ

本研究は小型高速滑走艇における船外機の航行時燃費・動力性能を誤差 $\pm 5\%$ 以内で数値的に予測することを目的とし、予測シミュレータの構築をおこなった。これまでの船外機開発の経験から、プロペラの推進性能が航行時燃費に大きく影響することに着目し、CFD解析により予測したプロペラ性能を実験的に取得したエンジン性能および燃料消費率マップと組み合わせデータベース化をおこなった。

本研究で提案する燃費・動力性能予測シミュレータの予測精度を確認するため、予測結果をフルスケールサイズによる航行試験結果と比較した。その結果、以下の知見が得られた。

- (1) 小型高速滑走艇用プロペラのスラスト係数およびトルク係数のCFD解析結果を曳航水槽による模型試験結果と比較した結果、プロペラ性能の予測精度はスラスト係数が $\pm 4.55\%$ 、トルク係数が $\pm 4.58\%$ を達成することを確認した。
- (2) 本研究で構築したシミュレータを用いて小型高速滑走艇に搭載した大馬力クラスの船外機の動力性能を予測し航行試験結果と比較した。その結果、最高船速の予測精度は $\pm 2.79\%$ (± 1.7 km/h)であり航行試験結果と非常に良い一致を示した。
- (3) 本研究で構築したシミュレータを用いて、小型高速滑走艇に搭載した大馬力クラスの船外機の航行時燃費を予測した結果、航行試験結果と良い一致を示した。特に滑走時の航行時燃費を航行試験結果と比較した結果、予測精度は平均で $\pm 4.55\%$ であることを確認した。

以上の結果から本シミュレータの予測精度は本研究の目

標である誤差 $\pm 5\%$ を達成した。このことから本研究で構築したシミュレータは、これまで開発初期段階で実験的、経験的に選定してきたプロペラ選択および駆動減速比の設計において航行時燃費・動力性能に優れた仕様を、航行試験をおこなうことなく予測できることを示すとともに、航行時燃費・動力性能を両立し環境性能に優れた船外機の開発に有効活用できる可能性があることを示した。

参考文献

- (1) Yoshimura, H., Miyauchi, T., Tsubouchi, M.: Reduction of Fuel Consumption for Medium-sized Outboard Motors, SAE paper, 2007-32-0008(2007)
- (2) 米沢道, 松田佳之, 田和寛基, 設楽貞文, 豊後圭一郎, 鈴木幸夫: 高出力, 低燃費船外機 [BF150] の開発, Honda R&D Technical Review, Vol.16, No.1, p.29-38
- (3) Tsunoda, M., Furuya, K.: Development of the application of the automotive engine technology to the V6 four stroke outboard motor, SAE paper, 2002-32-1809(2002)
- (4) <http://hawaii-marine.com/>
- (5) Troesch, A.: Dynamics and Hydrodynamics of High Speed Craft, PASI 2010 in Dynamics and Control of Manned and Unmanned Marine Vehicles, Colombia, June(2010)
- (6) Kawamura, T.: Numerical Simulation of Propulsion and Cavitation Performance of Marine Propellers, International Propulsion Symposium IPS'10, Japan, 4-2, April(2010)
- (7) Hashiguchi, K.: Numerical Simulation of Flow around a Highly Skewed Propeller, 19th CFD Symposium, Japan, C6-1, December(2005)
- (8) Hasuike, N., Yamasaki, S., Ando, J. Okazaki, A.: NUMERICAL STUDY ON CAVITATION EROSION RISK OF MARINE PROPELLERS OPERATING IN WAKE FLOW, International Propulsion Symposium IPS'10, Japan, 4-4, April(2010)
- (9) Hong, F., Zhang, Z., Krasilnikov, V., Tang, D.: CFD Simulation and Hydrodynamic Performance Analysis for Podded Propulsors in Oblique Flow, International Propulsion Symposium IPS'10, Japan, 4-3, April(2010)
- (10) Katayama, T., Kaneko, T., Hori, Y.: Development of Estimation Method of Running Performance for Planing Craft with Outboard Engine, Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, Vol.5, p.195-203, June(2007)

- (11) ANSYS, Inc. Fluent 6.3 User Guide, Chapter 10:
Modeling Flows with Rotating Reference Frames
- (12) [http://www.nmri.go.jp/fluids/Staff/kudo/database/
SEIUN-pressure/readme.html](http://www.nmri.go.jp/fluids/Staff/kudo/database/SEIUN-pressure/readme.html)

■ 著 者 ■



栗岡 俊 介

Mg₂Si 析出強化を活用したディーゼル シリンダヘッド用再生塊アルミニウム合金の開発

Development of Secondary Aluminum Alloy for Diesel Cylinder Head
by Mg₂Si Precipitation Strengthening

伊達木 孝 輔*
Kosuke DATEKI

高 木 卓 也*
Takuya TAKAGI

生 友 良 平*
Ryohei IKUTOMO

要 旨

高い熱疲労強度が求められるディーゼル用シリンダヘッドの材料として新塊アルミニウム合金と同等の熱疲労強度を有する再生塊アルミニウム合金を開発した。ディーゼルヘッド材は従来、新塊アルミニウム合金を用いて主に Al₂Cu 析出物によって材料特性が強化されたものを使用していたが、新たに Mg₂Si 析出物を主とする析出強化機構を採用し、新塊アルミニウム合金と同等の熱疲労強度と高温強度を再生塊アルミニウム合金で達成した。また本開発材の合金設計による熱処理の溶体化時の材料軟化特性から、シリンダヘッドの耐久信頼性に影響を及ぼす残留応力も、最大 30% の低減効果が得られた。

ABSTRACT

A secondary aluminum alloy that achieves an identical level of thermal fatigue strength to a primary aluminum alloy has been developed as a material for use in the manufacture of diesel cylinder heads, parts for which high levels of thermal fatigue strength are demanded. Conventionally, primary aluminum alloys are employed for diesel heads, and their material properties are enhanced mainly by means of the Al₂Cu precipitate. The developed alloy newly applies a precipitation strengthening mechanism that functions mainly via the Mg₂Si precipitate, realizing an equivalent level of thermal fatigue strength and high-temperature strength to a primary aluminum alloy in a secondary aluminum alloy. In addition, the softening property of the developed alloy during the solution treatment process of the heat treatment, realized by means of the material's composition design, has reduced residual stress, a factor affecting the durability and reliability of cylinder heads, by a maximum of 30%.

1. まえがき

近年 CO₂ 排出量削減など環境負荷低減が求められる中、自動車に求められることは、まずは燃費性能向上である。そのためエンジンにおいては、ダウンサイジングによる高性能化、コンパクト化が推し進められており、それに連動してシリンダヘッドなどのエンジン構成部品は高温使用環境下における熱疲労強度（じん性）向上が必要となってきた。一方、自動車製造時のエネルギー低減に対する社会的要求もますます高まっている。そのため自動車用エンジン部品に使われるアルミ合金はスクラップを利用してリサイクルされる 2 次合金（再生塊アルミ）が用いられることが一般的である。

主要エンジン部品であるシリンダヘッドに着目するとその主な機能は、燃焼室の一部形成、吸気と排気通路の形成、冷却水通路の形成、周辺部品の支持である。そのシリンダヘッドの多くはアルミ合金を重力 casting (Gravity Die Casting: GDC) や低圧 casting (Low Pressure Die Casting: LPDC) で成形したのち熱処理をおこない、機械的特性を確保⁽¹⁾したうえで用いることが一般的である。その中でもディーゼル用シリンダヘッド（ディーゼルヘッド）は、高い筒内圧と温度環境にあり、特に熱疲労強度と高温強度が求められる⁽²⁾。シリンダヘッド用再生塊アルミの代表的な材料組織を Fig. 1 に示す。組織中には初晶アルミマトリックス相（以下、 α 相）と共晶 Si 相、K6 と呼ばれる Al-Fe-Si 系金属間化合物の晶出が見られ、再生塊アルミにおいて

*四輪 R&D センター

は、この金属間化合物が熱疲労強度を低下させる要因の一つとなっている。その金属間化合物の晶出を防ぐため、純アルミニウムに必要な元素を添加した熱疲労強度に優れた新塊アルミニウム合金（以下、新塊アルミ）がディーゼルヘッドには使用されており^{(3), (4)}、再生塊アルミがディーゼルヘッドに適用された例は現在まで報告がない。Honda 四輪初のディーゼルヘッドにも新塊アルミを採用した。しかし、新塊アルミは製造工程上アルミナからの製錬工程が含まれ、製造エネルギー負荷が高いため、今回、初めてディーゼルヘッドに再生塊アルミの適用を実現した。

本論文では、そのための材料技術として合金成分設計、特性向上メカニズム、機械的特性向上効果について述べる。

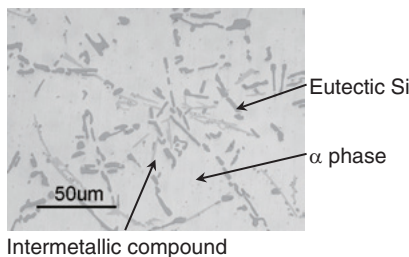


Fig. 1 Microstructures of secondary aluminum alloy for cylinder head

2. 開発のねらい

製造エネルギーの低減をねらって再生塊アルミを採用する場合、新塊アルミに対し熱疲労強度が損なわれることが大きな課題であることは前述したとおりである。また一方で、シリンダヘッドのような複雑形状の鋳物素材を熱処理する際に発生する残留応力は、エンジン運転時の筒内圧や周辺部品の圧入やボルト締結等の外的要因による発生応力と並び、耐久信頼性に影響を及ぼす重要な因子であり、残留応力の低減が大きな課題となる。

再生塊アルミによって熱疲労強度が損なわれる理由は、組織中に晶出する金属間化合物を起点とする α 相の亀裂が生じやすくなり、じん性が損なわれるからである。また残留応力が高い理由は、高温強度を確保するために強化元素を多く含むことで、熱処理時の材料硬度が高くなることによるものである。そこでじん性向上と材料硬度の低減を得るために主要強化元素であるCuの添加量を低減するという手法を選択した。ただしCuの添加量を低減するだけでは十分な高温強度が得られない。そこで高温強度を補うために入手性もよく比較的コストの安い強化元素であるMgを加えることで、微細なMg₂Si析出による強度回復を考えた。

Honda 量産ディーゼルヘッドの新塊アルミ（従来材）が有する材料特性と同等となることを目標として、以下の項

目を満足する再生塊アルミの開発をねらいとした。

- (1) 従来材同等の高温強度を有すること
- (2) 従来材同等の熱疲労強度を有すること
- (3) 従来材同等以下の残留応力を有すること

3. 材料成分設計

3.1. 材料成分設計の考え方

シリンダヘッドによく使用されるAl-Si-Cu-Mg系の熱処理型アルミニウム材料は、一般的に α 相内のCuとMg元素の時効析出強化により必要な材料特性を得ている。時効析出強化メカニズムは、Fig. 2に示すようにT6熱処理の溶体化処理時のアルミニウムマトリクス中に原子空孔が存在することを利用し、時効処理においてその原子空孔に強化元素であるCu、Mgが拡散して析出物を形成することによるものである。従来材は主にCuによる析出相の強化に必要な材料特性を得ており、この材料組織の α 相の透過型電子顕微鏡（Transmission Electron Microscope: TEM）観察結果をFig. 3に示す。 α 相中には平均サイズ118 nmのAl₂Cu析出相が存在することがわかる。一方、 α 相中のMg₂Si相のTEM観察像を見てみると組織は微細で平均サイズ3.4 nmのMg₂Si析出相が存在することがわかる。これらの組織観察から再生塊アルミでも α 相内の析出物を微細にすることが、高温強度を維持し、熱疲労強度を向上するための有効なコンセプトとなると考えた。析出物の微細化にはAl中の拡散速度がCuよりも速いMgの特性を活用

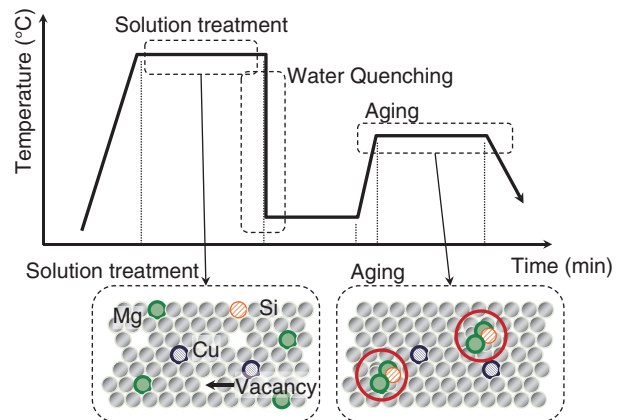


Fig. 2 Schematic illustration of Mg, Si clustering

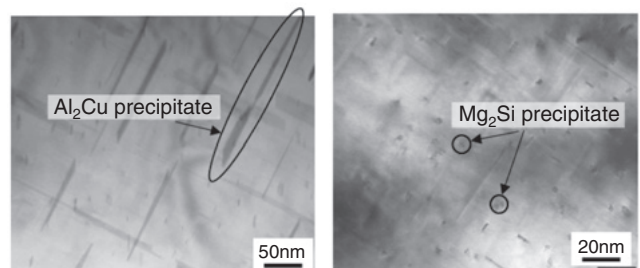


Fig. 3 Transmission electron micrograph of conventional alloy

することで、析出物の生成数を増やすことをねらった。これらのことより開発材は、従来材に対し Cu 添加量を低減し、Mg 添加量を増量する合金組成とした。

また市販の多元系時効析出シミュレーションソフト (JMatPro) を用いて得られる Mg_2Si と Al_2Cu 析出物の TTT (Time-Temperature-Transformation) 線図をもとに Fig. 4 に示すような Mg_2Si 析出物が Al_2Cu 析出物よりも優先的に析出する Cu, Mg 添加量領域を求めた。開発材は、求めた添加量領域を考慮して主要元素である Cu と Mg による析出相の析出形態を最適化し Mg_2Si 析出物を微細に析出させることをコンセプトとした。

3.2. 実験試料

アルミ合金成分と析出相との材料特性の影響を明らかにするための実験試料は、市販の AC2B 再生塊アルミニウム合金に 99.7% 純アルミニウムと Al-25% 母合金, Mg 母合金, その他不純物元素を配合し、黒鉛るつぼを用いた電気抵抗加熱炉で溶解したものを用いた。溶解温度は 760℃ 以下で、保持温度を $720 \pm 10^\circ\text{C}$ とした。さらに Ar ガスにて 12 min の溶湯処理を施し、水素ガスや介在物、酸化物の影響を排除した。その後あらかじめ 200℃ に加熱し、一定温度に保った JIS4 号舟型形状の金型中に大気圧、室温の条件下で鋳込み、試験片採取用インゴットを得た。T6 熱処理 (溶体化を $500^\circ\text{C} \times 4 \text{ h}$, Water Quenching (WQ) を $80^\circ\text{C} \times 3 \text{ min}$, 時効を $200^\circ\text{C} \times 2 \text{ h}$) を施した後、材料特性試験片はインゴット底から 10 mm の位置から採取した。残留応力試験片は、専用の金型にて鋳造を実施し、材料特性試験片同様の溶湯、溶湯処理、熱処理を施した。優先析出物の観察は、材料特性試験片と同一の JIS4 号舟型形状のインゴットを用い、時効処理 10 min を施した。Fig. 5 に各材料試験と残留応力試験の試験片形状とサイズを示す。

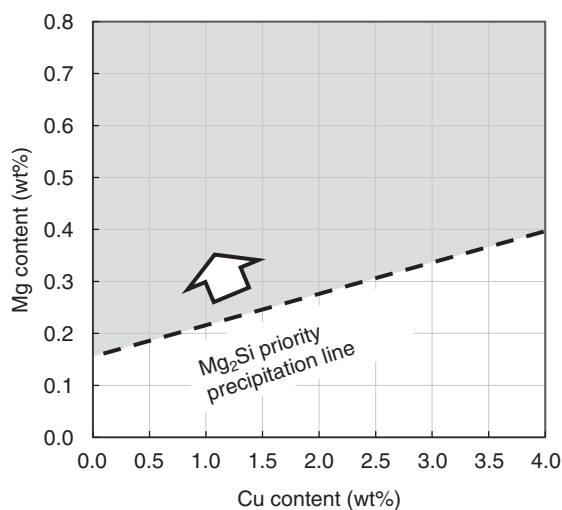


Fig. 4 Relationship of Cu, Mg content for Mg_2Si priority precipitation

3.3. 実験方法

材料特性は、抗張力、疲労強度、熱疲労強度、圧縮耐力の試験を実施し、各温度での平均値を求めた。残留応力は、常温 (R.T.) での平均値を求めた。各材料試験の試験温度を Table 1 に示す。引張試験と圧縮試験は万能試験機を用い、試験速度は 0.5 mm/min で実施した。疲労強度試験は回転曲げ疲労試験機を用い、試験回転数は 3000 rpm で実施した。熱疲労強度試験は、電気機械式油圧サーボ疲労試験機を用い、試料の熱変形と機械的変形が逆位相になる out-of-phase の条件下で 1 サイクル 5 min の正弦波で実施した。残留応力は、ひずみゲージを用いた切断法で測定した。優先析出物の観察は、3 次元アトムプローブ⁽⁵⁾、⁽⁶⁾で実施した。

	Shape and size of specimens (mm)
Tensile strength	
Fatigue strength	
Compression 0.2% proof strength	
Thermal fatigue strength	
Residual stress	

Fig. 5 Shape and size of specimens

Table 1 Test temperature conditions

	Test temperature (°C)						Soaking time (ks)
	R.T.	50	100	150	200	250	
Tensile strength	○			○	○	○	360
Fatigue strength				○	○	○	360
Compression 0.2% proof strength				○	○	○	360
Thermal fatigue strength						○	
Residual stress	○						

3.4. 基本成分設定

従来材と開発材の材料成分を Table 2 に示す。主要元素である Cu, Mg の特性影響を、これらの組成をベースにした合金で確認し、結果を以下に示す。まず熱疲労強度の影響に対しては伸び特性で判断した。その理由として熱疲労強度は、ひずみ範囲が大きく、最大ひずみが塑性域まで達することが多く、熱疲労強度と伸び特性に相関があるためである。Fig. 6 と Fig. 7 に試験温度が常温の Cu, Mg 添加量に対する抗張力と伸びへの影響を示す。Cu による特性影響は、添加量の増加と共に抗張力が向上し、その効果は 13 MPa/wt%, 伸び特性は逆に低下し、その影響は -0.4%/wt% であった。一方 Mg による特性影響は、Cu と同様に添加量の増加と共に抗張力が向上し、その効果は 83 MPa/wt% であった。あわせて特に 0.2wt% から 0.4wt% の範囲

Table 2 Chemical composition of developed alloy

	(wt%)					
	Si	Cu	Mg	Fe	Zn	Mn
Conventional alloy	6.5	3.0	0.2	0.10	0.01	0.01
Developed alloy	8.0	1.7	0.40	0.45	0.25	0.2

で伸び特性が向上していることが確認され、その効果は 1.25%/wt% であった。以上のことから、従来材では主要強化元素であった Cu は伸び特性向上の目的で添加量を低減し、その代わりに伸び特性の向上効果を活かして主要強化元素を Mg とすることで、強度を確保しながら伸び特性を向上できることがわかる。

次に強度を従来材同等とするために Cu と Mg の添加量を設定した。Fig. 7 の通り、強度は Mg 添加量 0.40wt% でピークを示したため、Mg 添加量は 0.40wt% と設定した。Fig. 8 に従来材同等の強度を有する Cu と Mg の添加量の相関関係を示す。Cu 添加量は、強度が従来材と同等になるように 1.7wt% とした。さらに強度の観点より設定した Cu, Mg 添加量での伸び特性の成立性について検討した。Fig. 9 に従来材に Fe を増量した場合の Fe 含有量と伸び特性の関係を示す。Fe 含有量を増やすことで伸び特性は低下する。この理由は前述の金属間化合物の影響によるものである。それに対し、Fig. 10 に従来材と強度の観点で設定したアルミ合金の伸び特性を示す。再生塊アルミにすることで伸び特性は損なわれるが、前述の Fig. 6 と Fig. 7 に示

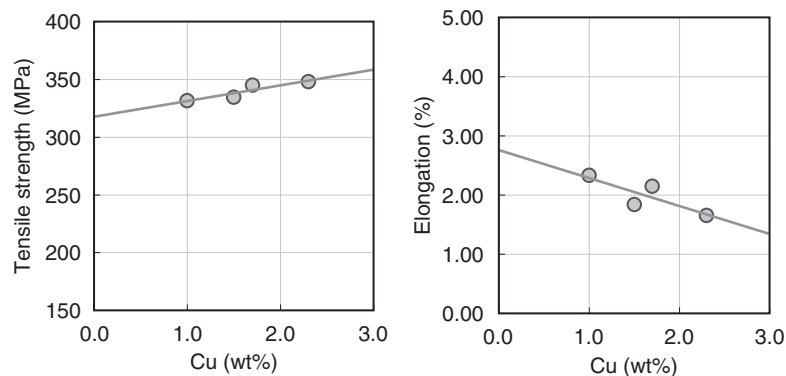


Fig. 6 Relationship between Cu content and tensile strength, elongation

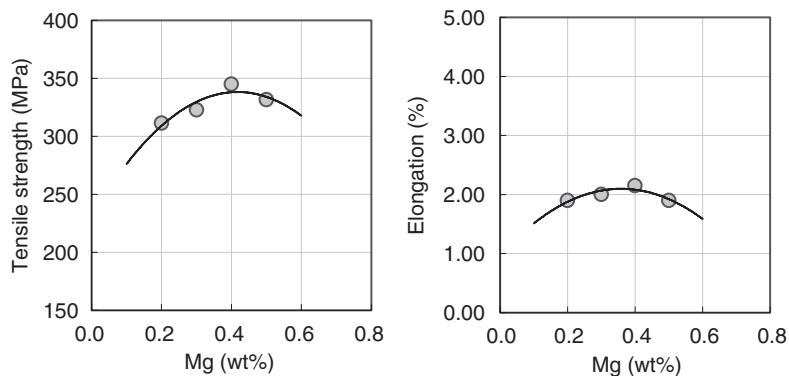


Fig. 7 Relationship between Mg content and tensile strength, elongation

す Cu と Mg の伸び特性に対する効果からもわかるように、Cu 添加量の低減と Mg 添加量の増量により伸び特性は向上し、従来材同等の伸び特性が得られる。

また主要元素以外の成分については、以下の考え方で設定した。Si の添加量設定は、鑄造性を考慮し従来材と同等の溶融温度と流動性を有するよう設定した。その他不純物である Mn, Zn, Ti, Cr, Ni, Pb, Sn の許容値は、

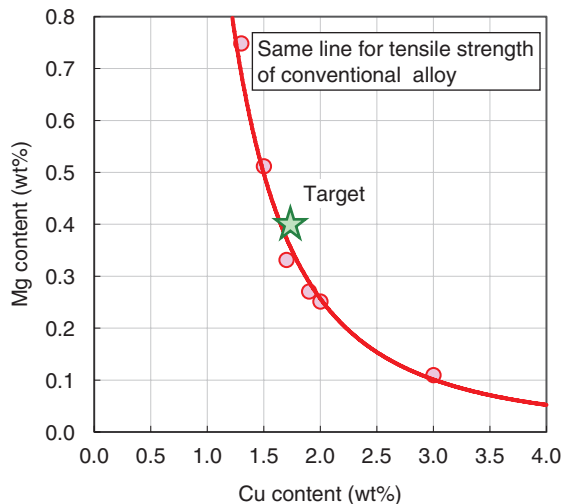


Fig. 8 Relationship between Cu, Mg content and tensile strength of conventional alloy

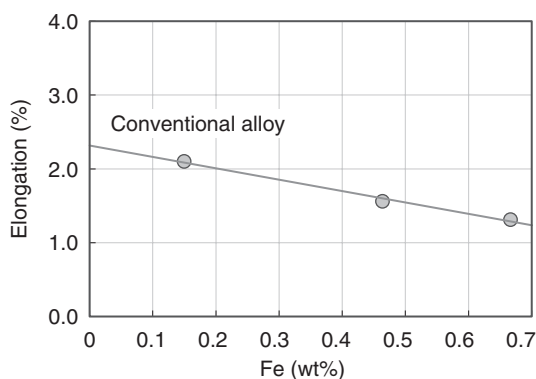


Fig. 9 Relationship between Fe content and elongation

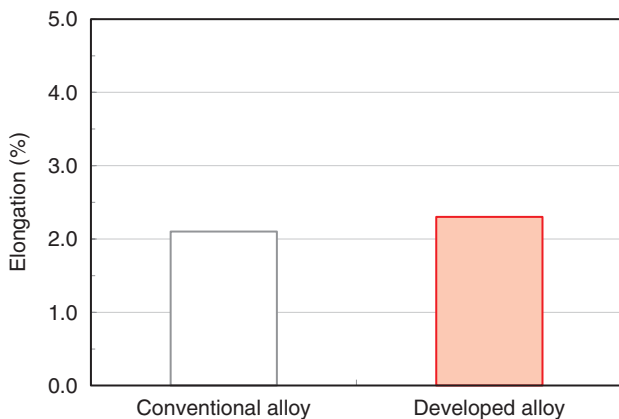


Fig. 10 Effect of elongation improvement by Cu content reduced and Mg content increased

再生塊アルミと同一とし、ねらいの特性が得られることを確認した。

3.5. Mg_2Si 優先析出確認

Mg_2Si の優先析出形態を実証するため、設定した Cu, Mg 添加量において、 Mg_2Si の優先析出が実際に発生しているかどうか確認をおこなった。析出物が形成される初期段階を TEM で観察することは困難なため、3次元アトムプローブにて観察した。3次元アトムプローブは、電界イオン顕微鏡 (Field Ion Microscopy: FIM) と飛行時間型質量分析器 (Time-of-Flight Mass Spectrometer: TOF-MS) を組み合わせたものであり、原子の分布を観察することができる。

Fig. 11 に時効処理開始直後の試験片を 3次元アトムプローブで観察した Si, Mg, Cu 元素の原子分布を示す。この結果より Si, Mg 元素の原子が集合している領域が確認され、その領域は一致していることが観察された。一方で Cu 元素には原子が集合している領域が観察されなかった。以上の結果より、Cu 添加量 1.7wt%, Mg 添加量 0.4wt% の設定において Mg_2Si が優先的に析出しており、コンセプト通りの析出形態を実現していることがわかった。

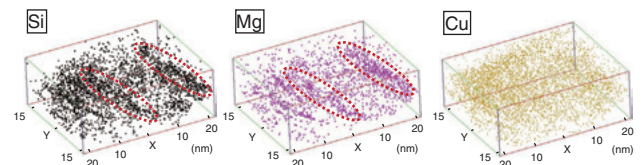


Fig. 11 Distribution of Si, Cu and Mg atoms by three-dimensional atom-probe

4. 材料特性

3.4. 節で設定した Table 2 の材料組成の開発材について以下の材料特性を確認した。

4.1. 高温強度

抗張力と疲労強度、熱疲労強度、圧縮耐力の試験結果を Fig. 12 と Fig. 13 に示す。150℃、200℃、250℃ の高温抗張力、高温疲労強度、圧縮耐力は、それぞれ従来材同等、250℃ から 50℃ までの繰返し条件での熱疲労強度は従来材同等の機械的特性を達成することができた。

4.2. 簡易試験片による残留応力

材料による残留応力差を比較するため、シリンダヘッドと同様の残留応力分布を模擬する簡易試験片にて確認した。その残留応力の確認結果を Fig. 14 に示す。残留応力は従来材に対し、引張応力発生部と圧縮応力発生部においてそれぞれ 30% の低減を確認した。残留応力は、主

に T6 熱処理の溶体化処理からの WQ 処理時において、シリンダヘッドの各部位の温度分布の差によって熱ひずみが生じることにより発生し、溶体化処理時から WQ 処理時の硬度によって影響を受ける。Fig. 15 に WQ 処理直後の材料ロックウェル硬度を示す。溶体化処理時に α 相

内の強化に寄与する Cu, Mg などの添加元素は固溶した状態になるが、従来材に対し、Cu 添加量を大幅に低減したことにより溶体化直後の材料硬度は低減している。この従来材よりも軟化する特性によってヤング率が低下し、残留応力が低減したと考えられる。なお 4.1. 節で前述したようにその後の時効処理にて従来材同等の材料強度を有することができる。

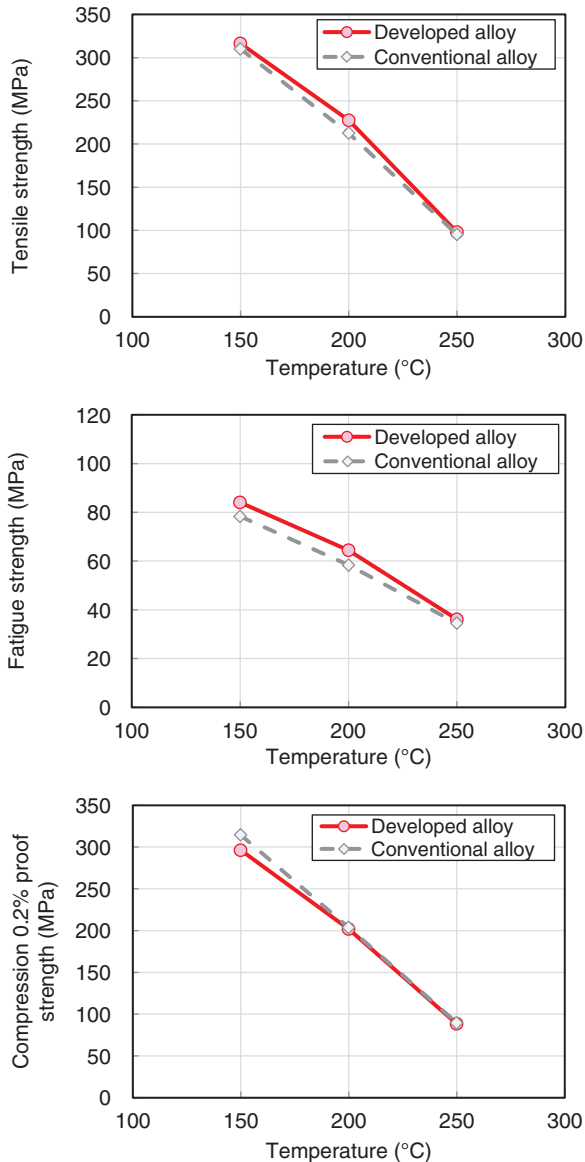


Fig. 12 Tensile strength, fatigue strength, and compression 0.2% proof strength

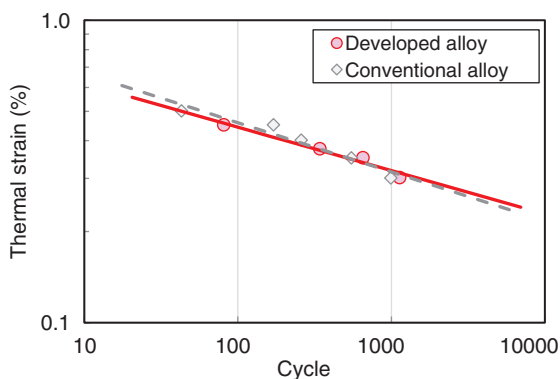


Fig. 13 Thermal fatigue strength

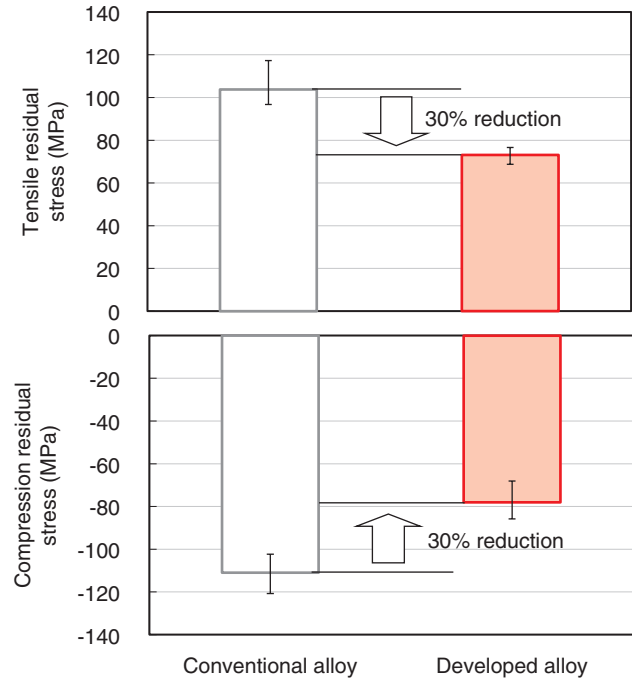


Fig. 14 Effect of developed alloy on residual stress

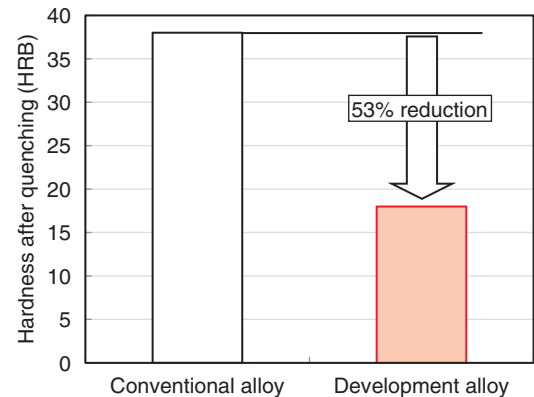


Fig. 15 Effect of developed alloy on Rockwell hardness after quenching process during T6 heat treatment

5. まとめ

ディーゼルヘッドに適用可能な熱疲労強度と高温強度を有する再生塊アルミ合金を開発した。本開発により以下のことを明らかにした。

(1) Cu 添加量 1.7wt% と Mg₂Si の析出強化の組み合わせ

により、従来材と同等の高温強度を達成した。

- (2) Mg_2Si 析出物を優先的に析出させることで、従来材と同等の熱疲労強度を達成した。
- (3) Cu 添加量を低減することで、従来材に対し熱処理溶体化時の材料が軟化し、処理後の残留応力が 30% 低減することが可能となった。

参考文献

- (1) 鈴木寿, 菅野幹宏: アルミニウム合金の時効析出, 軽金属基礎講座, 軽金属, Vol.31, No.4, p.277-298(1981)
- (2) 三上祥平, 荻野晃一, 空澤光将: ディーゼルシリンダヘッド燃焼室の低サイクル疲労破壊予測手法, Honda R&D Technical Review, Vol.22, No.2, p.141-150
- (3) 生野元, 岩永省吾, 栗野洋司: アルミニウム合金鋳物の熱疲労特性評価, 豊田中央研究所 R&D レビュー, Vol.31, No.2, p.73-84(1996)
- (4) 茂泉健, 手塚裕康, 里達雄: Cu を添加した AC4C アルミニウム鋳造合金の析出組織と熱疲労寿命, 軽金属, Vol.53, No.12, p.588-594(2003)
- (5) 宝野和博, 村山光宏: アルミニウム合金における溶質クラスターの形成と時効析出—3次元アトムプローブによる研究, まてりあ, 第38巻, 7号, p.563-572(1999)
- (6) 浅井鉄也, 瀧谷善弘, 佐野直幸, 松本斉: 焼準省略可能な高強度軟窒化クランクシャフトの開発, Honda R&D Technical Review, Vol.19, No.1, p.86-93

■ 著 者 ■



伊達木孝輔



高木卓也



生友良平

本田技術研究所 論文委員会

編集長 漆山 雄太 四輪 R&Dセンター
須藤 晶 四輪 R&Dセンター
馬場 雅之 二輪 R&Dセンター
金古 章 基礎技術研究センター
笠井 聡人 汎用 R&Dセンター
石橋 正明 二輪 R&Dセンター
郷土 健二 四輪 R&Dセンター
佐々木 隆 四輪 R&Dセンター
齋藤 俊博 四輪 R&Dセンター
藤平 徹 基礎技術研究センター
塩崎 智夫 二輪 R&Dセンター
木村 芳彦 二輪 R&Dセンター
千葉 省作 汎用 R&Dセンター
友永 久人 四輪 R&Dセンター
白木 晶子 四輪 R&Dセンター
田中 公俊 基礎技術研究センター

編集協力 二輪 R&Dセンター論文委員会
汎用 R&Dセンター論文委員会
四輪 R&Dセンター論文委員会
基礎技術研究センター論文委員会
航空機エンジン R&Dセンター論文委員会
HRA 論文委員会
(HRA Technology Introduction Planning Committee)

編集後記

Honda R&D Technical Review は 1989 年に創造的な技術者の「一流の証」の場として創刊され、10 年後の 1999 年には年 2 回および英語版発行によりコミュニケーションツールとしての強化がなされ今日に至っています。この間社会の変化はますます激しくなり、特に IT の進歩は我々の想像を超えるものがあります。

こうした背景からエンジニアは自身の専門とする領域にとどまらず、常に広い視野を持って新規分野や融合分野を開拓していかねばなりません。すなわちエンジニア相互の研鑽が重要となります。このため Honda R&D Technical Review は昨年の春にさらに 10 年先を見据えて電子書籍化、インターネット化に踏み切りました。慣れ親しんだ紙媒体を手放すことは我々にも大きな抵抗がありましたが、取えてそれを行うことで新たな可能性を手に入れようと考えたのです。

新しい技術に学術レベルでチャレンジする人を支援することも本誌の役割の一つです。コツコツ積み上げる仕事も「皆で楽しむ」「皆で誇りに思う」研究所の気風を作り上げるべく、今後はインターネットならではのコミュニケーションの仕組みも充実させていく予定です。

エンジニアにとって論文は自分の考えを説明するための重要な手段です。多忙な業務こそ宝の山という言葉もあります。ぜひこの場を利用して論文執筆へのチャレンジをお勧めします。

— (金 古) —

Honda R&D Technical Review

©2013 株式会社 本田技術研究所 (禁無断転載)

2013 年 3 月 1 日 Vol.25 No.1

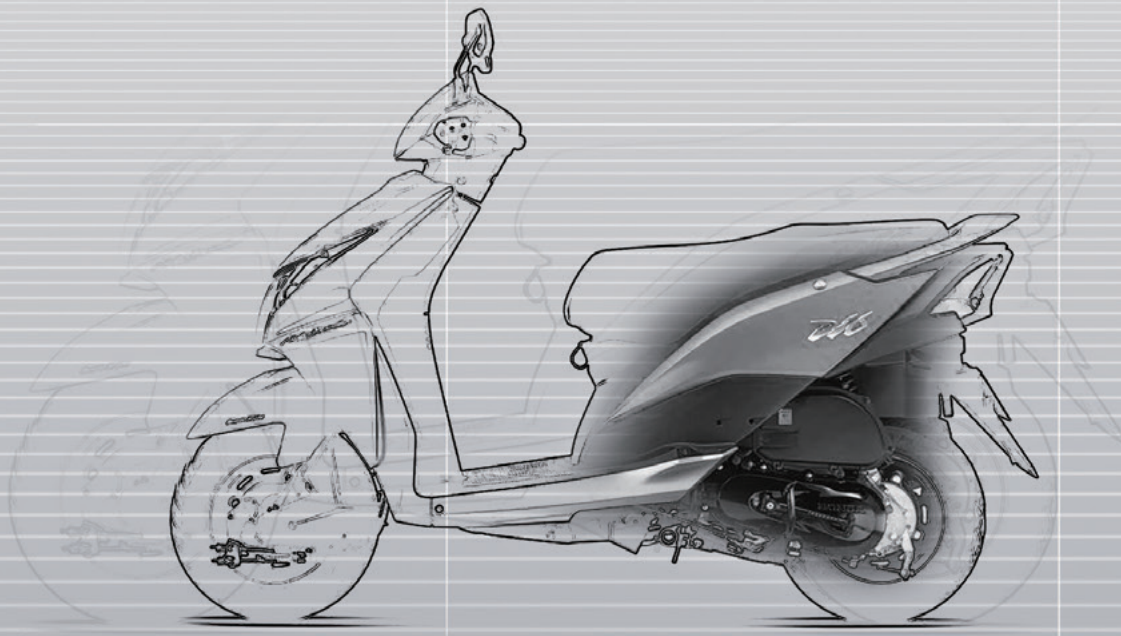
発行所 株式会社 本田技術研究所

発行人 山 本 芳 春

編集人 本田技術研究所 論文委員会

事務局 〒321-3393 栃木県芳賀郡芳賀町下高根沢 4630 番地
株式会社 本田技術研究所 四輪 R&Dセンター
技術広報室 第 2 ブロック 論文事務局
TEL 028-677-3311 FAX 028-677-7854
Tr_randd@n.t.rd.honda.co.jp

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.

