

Honda R&D

Technical Review
Vol.29 No.2



October 2017



表紙の言葉

表紙のデザインは、エンジンの燃焼室を表現したものです。
シリンダーヘッドの燃焼室部分は、とても滑らかな形状ですが、創り手の意志が明確に映されています。
流体と日々格闘する技術者の思慮がこの形になっているんだと想像しながら表面をなぞってみると、面白くも、また感慨深くも思えます。



パワープロダクツR&Dセンター
大門 路人

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.29 No.2'. The word 'October' is placed above the large year '2017', which is also centered within the gray bar. Below the bar, the text 'Honda R&D' is centered on the page.

Technical Review
Vol.29 No.2

October
2017

Honda R&D

目 次

技術紹介

◇ CBR250RR のスタイリングデザイン.....	田村健司・二股健士 宮崎寛之・西村 舞	1
◇ 新型 NSX 用 3.5 L V 型 6 気筒過給エンジンの開発	舟根 匠・古俣誠二 柿沼 隆・都知木博一	19
◇ 2018 年モデル N-BOX 用 CVT	葦澤英夫・畝山俊和	28
◇ 動的挙動解析によるハーフトロイダルバリエータのスリップ安全率設計	田中優洋・齋藤俊博・宮本浩二	35
◇ ワンパッケージ型スマート水素ステーションの開発	吉田哲也・武内 淳・浅野裕次	43
◇ CLARITY FUEL CELL 搭載の新型燃料電池用セパレータの開発.....	木村義人・小山 賢 儀賀章仁・小此木泰介	50
◇ SPORT HYBRID i-DCD 新型用モータの低鉄損技術.....	藤代 智・鈴木雄一 相馬慎吾・梶野大樹	56
◇ 電動車駆動用リチウムイオン電池性能の確率分布の推定と推移予測.....	宮下拓也・川村雅之	62
◇ 流体シミュレーションを用いたボンネビルレース車両の空力開発	吉井一真・長谷川 輝・酒井敬史 宇佐美雅貴・岡部浩司・粕渕真輔	69
◇ 自律移動車椅子のためのビーコンモデルを用いた知能化システムの構築	宮本修吾・越膳孝方	76
◇ ロボット芝刈り機の最適走行制御の研究.....	島村秀明・松井勇樹・Sebastian SCHMITT	82
◇ 二輪車向け黒色ボルトに用いる化成処理と塗装を組み合わせた表面処理の開発	吉田裕之・平山博史・井上 学 加藤靖裕・加藤丈晴・高橋孝治	87
◇ フィルムスタッキング法による CFRTF のダイレクト立体成形技術の開発	遊座嘉秀	102

論文

◇ コミュニケーションロボットのための遠隔音声認識システムの構築と実証実験	山本俊一・住田直亮・中臺一博	110
◇ 量産車開発の性能設計におけるラップタイムシミュレーション技術.....	豊島貴行・松澤俊明・牛村智也	118
◇ ガソリンエンジンの排気側バルブシート摩耗量を予測するモデルの構築 ..	志波義勝・岸和田 聡・吉井健太 佐藤範行・石井啓資・橋本 尚 藤井健史・鷹木清介・大重公志	127
◇ 材料温度特性を反映したタイヤ摩耗予測の精度向上	安藤 誉・津々見修司 納富信也・溝根哲也	134
◇ 短時間焼付に向けたウレタンクリアの硬化挙動の研究.....	橋本孝則	141

CONTENTS

Introduction of new technologies

◇ Styling Design of CBR250RR	Kenji TAMURA・Takeshi FUTAMATA Hiroyuki MIYAZAKI・Mai NISHIMURA	1
◇ Development of New 3.5 L V6 Turbocharged Gasoline Engine for New NSX	Takumi FUNANE・Seiji FURUMATA Takashi KAKINUMA・Hirokazu TOCHIKI	19
◇ New CVT for 2018 Model Year N-BOX	Hideo NIRASAWA・Toshikazu UNEYAMA	28
◇ Design of Safety Factor for Slip of Half-toroidal Variator by Dynamic Behavior Analysis	Masahiro TANAKA・Toshihiro SAITO・Koji MIYAMOTO	35
◇ Development of All-in-one Smart Hydrogen Station	Tetsuya YOSHIDA・Jun TAKEUCHI・Yuji ASANO	43
◇ Development of New FC Separator for CLARITY FUEL CELL	Yoshihito KIMURA・Satoshi OYAMA Akihito GIGA・Daisuke OKONOGI	50
◇ Technologies for Low Iron-loss in New SPORT HYBRID i-DCD Motor	Satoshi FUJISHIRO・Yuichi SUZUKI Shingo SOMA・Daiki KAJINO	56
◇ Estimation of Probability Distribution of Li-ion Battery Performance for Electrically-propelled Vehicles	Takuya MIYASHITA・Masayuki KAWAMURA	62
◇ Aerodynamics Development for Bonneville Race Car Using Fluid Simulation	Kazuma YOSHII・Akira HASEGAWA・Takashi SAKAI Masataka USAMI・Koji OKABE・Shinsuke KASUBUCHI	69
◇ Intelligent System Using Beacon Model for Autonomous Wheelchair	Shugo MIYAMOTO・Takamasa KOSHIZEN	76
◇ Study of Optimal Operation Control for Robotic Lawnmower	Hideaki SHIMAMURA・Yuki MATSUI・Sebastian SCHMITT	82
◇ Development of Surface Treatment Composed of Chemical Conversion Treatment and Paint Coating for Black Bolts Used in Motorcycles	Hiroyuki YOSHIDA・Hiroshi HIRAYAMA・Manabu INOUE Yasuhiro KATO・Takeharu KATO・Kouji TAKAHASHI	87
◇ Development of Direct Three-dimensional Shape Forming Technology of CFRTP by Film Stacking Method	Yoshihide YUZA	102

Technical papers

◇ Establishment and Experimental Demonstration of Distant Speech Recognition System for Communication Robot	Shunichi YAMAMOTO・Naoaki SUMIDA・Kazuhiro NAKADAI	110
◇ Lap Time Simulation Technology for Performance Design during Production Car Development	Takayuki TOYOSHIMA・Toshiaki MATSUZAWA・Tomoya USHIMURA	118
◇ Construction of Model to Predict Wear Amount on Exhaust Valve Seats for Gasoline Engines	Yoshikatsu SHIWA・Satoshi KISHIWADA・Kenta YOSHII Noriyuki SATOU・Keisuke ISHII・Hisashi HASHIMOTO Takeshi FUJII・Seisuke TAKAKI・Hiroshi OSHIGE	127
◇ Enhancement of Accuracy of Tire Wear Prediction Method by Reflection of Material Temperature Characteristics	Takashi ANDO・Shuji TSUTSUMI Shinya NOHTOMI・Tetsuya MIZONE	134
◇ Study of Curing Behavior of Urethane Clear for Short Baking.	Takanori HASHIMOTO	141

CBR250RR のスタイリングデザイン

Styling Design of CBR250RR

田村 健司*

Kenji TAMURA

宮崎 寛之*

Hiroyuki MIYAZAKI

二股 健士*

Takeshi FUTAMATA

西村 舞*

Mai NISHIMURA

要 旨

CBR250RR は、新たな 250 cc スーパースポーツモデルとして開発された。このモデルは、250 cc 以上のモーターサイクル市場が活性化しているインドネシアと、250 cc クラスが定着した日本をターゲットとした。このモデルをデザインするにあたり、大型モーターサイクルに見劣りしない存在感と仕様、装備によって「魅せるスタイリング」「魅せる装備」「魅せるパフォーマンス」を基本コンセプトとした。このコンセプトのもと、スタイリングデザインにおいては「Speed Shape」というキーワードを設定した。その実現のために、開発の早い段階からデザインチームと車両開発チームがともに検討を重ね、基本骨格のレイアウトからデザインした。また、カラーリングにおいても「魅せる」をコンセプトの根幹に据え、個性を持った 5 タイプのラインナップで、さまざまなお客様の嗜好にこたえた。これらスタイリングデザインとカラーリングにより「魅せるスタイリング」という所期のデザイン目標を達成した。

ABSTRACT

The CBR250RR had been developed as a new 250 cc super sports model. This model targeted Indonesia where the motorcycle market of 250 cc or larger engine displacement models is being activated, as well as Japan where 250 cc motorcycle category has been established and matured. In designing this model, the basic concept was set as “Attractive styling,” “Attractive equipment” and “Attractive performance,” which are realized by its feel of presence, design and equipment that do not look inferior compared to larger motorcycles. Under this concept, we set the keyword “Speed Shape” to the designing of its styling. In order to realize that, the design team and the vehicle development team repeatedly studied from the early stage of development, and we designed it starting with the layout of the basic skeleton. In addition, this “attractiveness” was defined as the foundation of the concept in coloring as well, and five types of color lineup were prepared individually responding to a variety of customers’ preferences. Through these styling designs and coloring we achieved the desired design goal of “attractive styling.”

1. はじめに

CBR250RR は、250 cc スーパースポーツモデルとして、新たに Honda が開発したモデルである (Fig. 1)。CBR250RR という名称は、1990 年に日本で発売されたロードスポーツバイクで用いられていたものであった (Fig. 2)。当時の CBR250RR と言えば、先進装備や先端のスーパースポーツデザインをまとった、若者のあこがれのモデルであった。このモデルから受け継いだのは、単なる名称だけではなく、「あこがれのスーパースポーツ CBR250RR」という考え方そのものである。

1990 年から四半世紀という時代の流れとともに、世界規模でモーターサイクル市場の大きな変化があった。その一つに、経済的に余裕が出てきたアジア諸国において、250 cc 以上の大型モーターサイクルの販売が増えていることが挙げられる。特に大型モーターサイクル市場が活性化しはじめたインドネシアから、若い富裕層を中心に、本格的な 250 cc ロードスポーツバイクが求められるようになった。

そのインドネシアの交通環境には、雨季の洪水による道路の冠水や、ジャカルタなどの都市部における慢性的な渋滞がある。そのような環境の中を移動する手段として、二

*二輪 R&D センター

輪車の主流は、スクーターなどのコミュータが占めることとなる。それにもかかわらず、近年 250 cc 以上のモーターサイクルの販売が増加してきている要因を明らかにするために、本モデルの開発にあたって、インドネシアにおける市場調査をおこなった。

まず我々は、大型モーターサイクルが集まる大都市の高級ショッピングモールに向かい、ここに集まるライダー達について調査をおこなった。彼らは大都市部に住む若い富裕層で、交通量が減る夜になると高級ショッピングモールや

カフェなどに、仲間とモーターサイクルに乗って集まってくる。そんなバイクコミュニティに所属するメンバ達 (Fig. 3) であった。彼らからの情報によると、インドネシアにはこのようなコミュニティが、大都市部に多数存在しているとのことである。そんな彼らの行動は、所有するモーターサイクルを自慢するように目立つ場所へと並べ、会話を楽しみ、後は夜の街を流すといったものであった。

その他ヒアリングなどの調査からも、スクーターに代表される実用本位のコミュータのユーザと、自己表現に価値を見出してお金を使うユーザとでは、その属性の違いは明らかであった。

新たに本格的な 250 cc スーパースポーツモデルを開発するにあたり、大型スポーツモーターサイクルと並べても見劣りしない、存在感のあるスタイリングと装備を目指すことが明確な課題となった。その彼らの要求にこたえるため、クラス初となる Throttle By Wire (TBW) と Accelerator Position Sensor (APS) などの先進魅力装備を採用した。また、大型スポーツモーターサイクルに採用されるような、倒立フロントフォークやアルミスイングアームなど、クラスを超えた装備と車格によって、ユーザーズを高いレベルで満たす物づくりをねらった。

これら市場調査によって導き出した方向性は、見せる場所で魅力的かつ存在感と価値を示せる、ショーオフ (みせびらかし) の要素が高いモーターサイクルの具現化であった。その車両コンセプトとして「魅せるスタイリング」「魅せる装備」「魅せるパフォーマンス」の三つを定めた。

これら車両コンセプトに共通する「魅せる」という言葉は、さまざまな 250 cc モーターサイクルを経験し、熟知している日本のユーザにおいても共通する価値となるという想いも加え、両国のユーザを見据えて開発に着手した。

本稿においては、車両コンセプトの一つ「魅せるスタイリング」を中心に述べていく。



Fig. 1 The CBR250RR



Fig. 2 The CBR250RR, 1990 model



Fig. 3 Riders of motorcycle community

2. 魅せるスタイリング

車両コンセプトの一つである「魅せるスタイリング」とは、ショーオフで際立つスタイリングを指し、見る人に「すごいバイクに乗っている」と思わせたいことである。しかし一概にショーオフと言っても、豪華な装備のツアラー (Fig. 4) や、美しいクロームメッキが施されたアメリカンクルーザタイプ (Fig. 5) など、さまざまなカテゴリが存在する。スーパースポーツタイプ (Fig. 6) のカテゴリにおい



Fig. 4 Example of tourer type motorcycle with luxury equipment (GOLDWING)



Fig. 5 Example of American cruiser type motorcycle (VT1300CX)



Fig. 6 Example of super sports type motorcycle (CBR1000RR SP2)

ては、まずだれが見ても速そうに見えることを第一優先とし、見る人にその存在感と価値を直感させることが重要となる。

3. スタイリングキーワード

－ Speed Shape －

「魅せるスタイリング」、すなわちターゲットユーザのマインドである「ショーオフ」の要求を満たす、一番わかりやすい具体例としてイメージしたのがスーパーカーであった。他を圧倒する優れたパフォーマンスを有し、たたずんでいるだけでそのすごさが伝わってくる、最大に自己表現できるあこがれの典型がスーパーカーと考えた。

停まっても秘めたパフォーマンスを外観に感じさせ、速そうに見えるその姿から、スタイリングキーワードを「Speed Shape」とした。Fig. 7 にキーワードをイメージするコンセプトボードを示す。



Fig. 7 Concept board of “Speed Shape”

4. デザインアプローチの深化

－ 基本骨格決定からの取り組み －

本稿で述べる「スタイリング」とは、内部を包み込む外形のデザイン処理とし、外形のプロポーシオンに影響を及ぼす要素を基本骨格とする。

スタイリングキーワードとした「Speed Shape」の、いわゆるスピード感の造型表現の一つの典型が、ウエッジシェイプである。そのウエッジシェイプを達成するためには、低く構えたフロントノーズと高く跳ね上がったテールまわりが重要となる (Fig. 8)。その実現のためには、各機能部品の配置、エンジンの搭載位置とそれらを包み込むフレームなどの、基本骨格 (Fig. 9) に踏み込んでデザインする必要があった。

通常の開発では、目標性能を達成するために、おおよその骨格、基本レイアウトが決まっているケースや、ベースとなる他のモデルの骨格を用いるケースがある。我々は「Speed Shape」を具現化するために、機能や性能を司る設計担当やテストライダーなどの、開発チーム全体が基本骨格のデザインに、より深く関与する必要があると考えた。そのため、まずはプロポーションに大きく影響する基本骨格からデザインすることとした。

そこで、停まっても速そうに見えること、について、



Fig. 8 Image sketch illustrating front nose postured in downward direction and vehicle tail leaping up high

チーム全体で時間をかけて徹底的に議論した。「今にも動き出しそうな形とは?」「速そうに見える形とは?」など、単純な疑問をチーム全員に投げかけた。この単純であたりまえと思われる議論により、スタイリングデザインに関する考え方を共有したことが、後々の開発にとって大きくプラスに働いた。

我々は骨格となるフレーム構成のアイデアスケッチを何案も検討し (Fig. 10), CFD 解析を用いながら、それぞれの部品の機能と性能のベストな配置を決めていっ



Fig. 9 Computer graphic of body structure skeleton

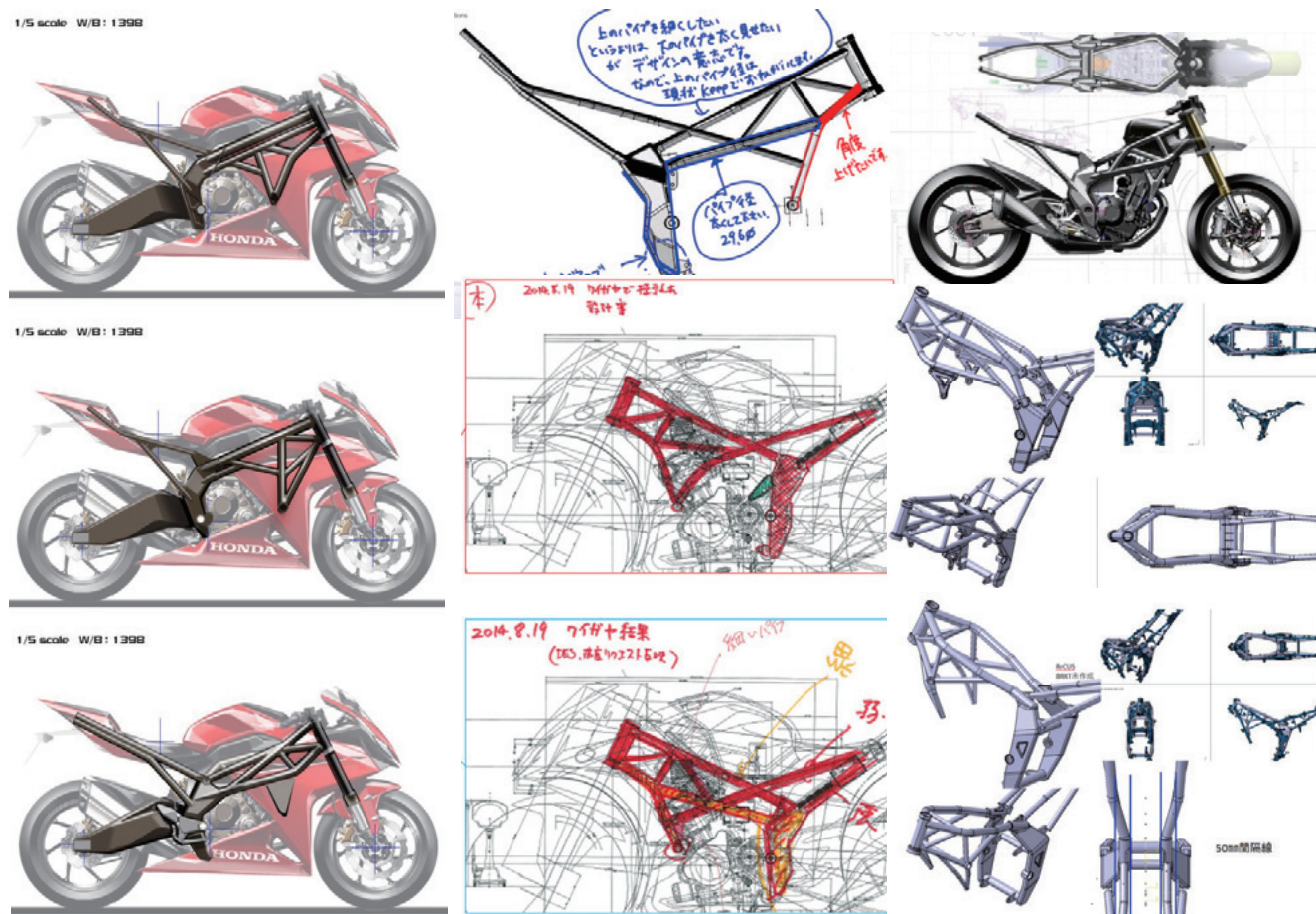


Fig. 10 Conceptual sketches for formulating frame composition

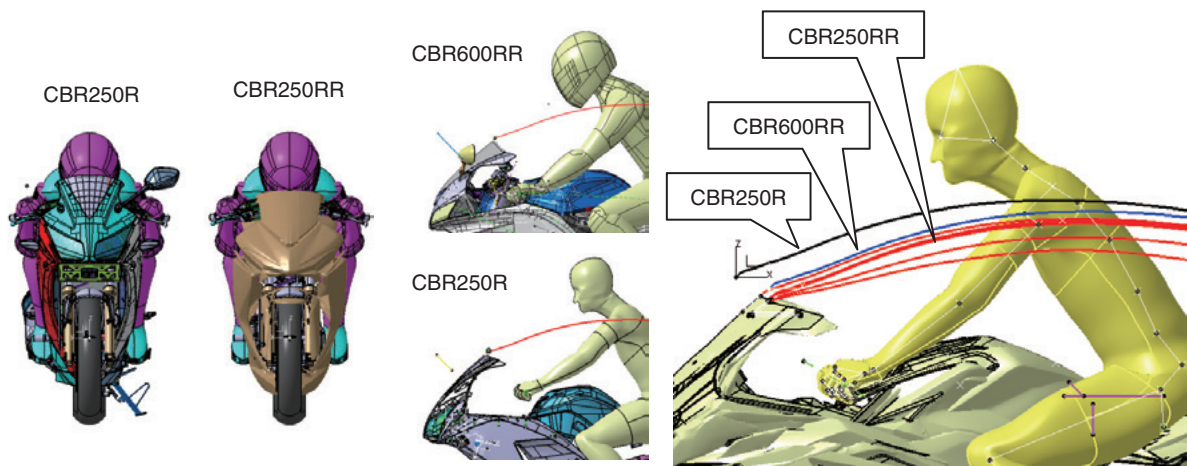


Fig. 11 Investigations through graphics drawn by conducting various analyses

た (Fig. 11). この開発メンバ全員が関わるデザインアプローチは、強いチームワークを醸成し、開発を通して発生するさまざまなハードルを乗り越え、所期に目指したデザインの達成に貢献した。

この基本骨格により、スタイリングキーワード「Speed Shape」に沿った外観デザイン案を展開していった。

5. スケッチ展開

「Speed Shape」を表現するための、スタイリングスケッチを展開した。

目指す「停まっても速そうに見える形」を、スケッチにて検討した。今にも動き出しそうなクラウチングスタートスタイルや、地面をつかんで、力強く蹴り出すような、踏ん張りの利いた足まわりのデザインなど、動きのあるデザイン案が検討された。

サーキット走行でも活躍するスーパースポーツカテゴリのモーターサイクルは、空気の壁を切り裂きながら進み、その高速域から車体をバンクさせてコーナーを駆け抜けていく乗り物である。そこで、空気を切り裂くウエッジシェイプに加え、コーナーリング時の運動性能もスタイリングデザインに表現した。そのデザイン手法において、速そうに見える機能部品と、速そうに見えるシルエットのそれぞれに考察をおこなった。

5.1. 速そうに見える機能部品

5.1.1. デザイン要素としての機能部品の重要性

車両が停まった状態において、スピードという見えないものを可視化するために、実際にはどのようなものが速そうと感じるのかについて考察した。

手始めに、モーターサイクルにおける速さの頂点であるMotoGPレーシングマシンや、600 cc、1000 ccのスーパースポーツモデルの考察をおこなった。

カウル付きの外観の印象だけではなく、ストリップ状態の車両が与える印象も研究していった。その中で、それら車両の速さのイメージは、走りの性能に直結した機能部品から受ける迫力によって形作られるものであるという結論に達した。その基本骨格は、剛性の高さを感じさせる足まわりの部品や、車体にかかる力に沿って計算されたフレームボデー、軽さと強度を両立させたアルミ製パーツなどで構成されている。それらの機能部品は、実際に作動していない状態でも、高い性能を直感的に感じさせる、外観の大きな要素となっている。

したがって CBR250RR の開発においても、高性能な機能部品を主張することは、速そうに見えるデザインを達成するうえでの、外観上の不可欠な要素だと認識された。

5.1.2. 機能部品のデザイン手法

モーターサイクルの車体を構成するすべての部品が、それぞれの役割を持つ機能部品である。その中でも特にフレームボデーと、フロントフォークやスイングアームなどの足まわり部品は、スーパースポーツモデルの走りを支える重要なアイテムである。本モデルにおいては、スイングアーム上端のラインをメインフレームのラインと合わせることで、車体との一体感を与え、停まっても地面を蹴り出す力強さと、俊敏に走る軽快さをイメージさせる、そのような機能部品のデザインを目指した。具体的なデザイン手法詳細については、ディテールデザインの章にて後述する。

5.2. 速そうに見えるシルエット

次に我々は、速いものが持つ共通のシルエットについて考察した。

高い最高速をイメージするもの (Fig. 12)、加速力をイメージするもの (Fig. 13)そして、それらを支える力強い駆動力をイメージするもの (Fig. 14)それぞれについて、次に挙げるようなデザイン要素を抽出した。

5.2.1. 「空気を切り裂き疾走する姿」

ー最高速イメージ

先端が長くとがった形状を有するシルエットは、風を切り裂きながら走る速さを表現できる。すなわち、空気を点で突き切り裂いていく鋭利な刃物のような姿は、見るものに高速で疾走する姿を連想させることができる。



Fig. 12 Example of object that recollects image of highest speed



Fig. 13 Example of posture that gives feeling of instantaneous power enabling acceleration in a moment



Fig. 14 Example of powerful body posture that gives impression of legs grabbing ground and kicking out forward

このシルエットの名称を、「ロングノーズシルエット」とした。

5.2.2. 「一瞬で加速しそうな瞬発力を感じる姿」

ー加速力イメージ

頭を下げ、前方を睨みつけるシルエットは、走り出した後のシルエットよりも速さを表現できる。すなわち、走る力を溜め込み解放する直前の姿は、内に秘める速さと、次の瞬間の爆発的な加速を見るものに連想させることができるのだ。このシルエットの名称を、「クラウチングスタイル」とした。

5.2.3. 「足が地面をつかみ、蹴り出していく力強い姿」

ー駆動力イメージ

瞬発力を持って加速し、空気を切り裂く速さを生み出すためには、その足元で確実に地面を捉え、蹴り出す駆動力がなければならない。すなわち「Speed Shape」の表現には車輪部分の存在を強調する必要がある。駆動力を象徴する、車輪をはじめとする足まわり部品を強調するため、相対的に車体をコンパクトにしていくと、全体のフォルムが自然に台形になってくる。それによって足が地面をつかみ、蹴り出す力強いシルエットを創りだすことができる。このシルエットの名称を、「台形フォルム」とした。

先に述べた機能部品のイメージの重要性とともに、下記3項目を「スピード」という概念を可視化するための重要なキーワードと捉え、スケッチを推進した。

- ・ロングノーズシルエット
- ・クラウチングスタイル
- ・台形フォルム

これらを「Speed Shape」を形作る要素としスケッチの中に表現していった。

5.3. スケッチへの具現化

5.3.1. 空気を切り裂き疾走するロングノーズシルエット

空気を切り裂く伸びやかで鋭いシルエットを、限られたホイールベースの中でいかに表現するかについて考察し

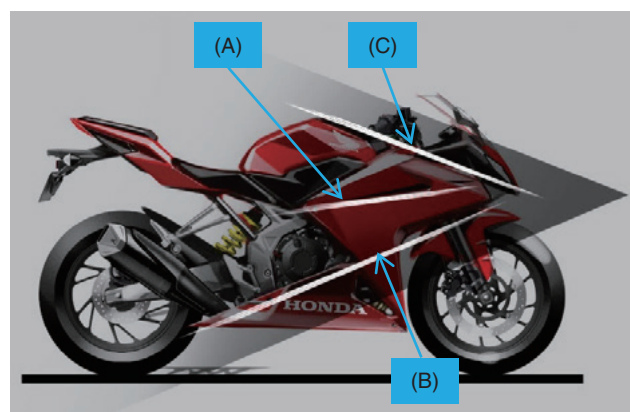


Fig. 15 Illustration of lines emphasizing long nose silhouette

た、その点に重点をおいた初期段階のアイデアスケッチを Fig. 15 に示す。鋭いナイフで切り裂いたかのようなシャープな排風口 (A) を前後に長く大胆に表現することで、空気を切り裂きながら加速する鋭さを表現した。それに寄り添うかのように通ったノーズからアンダーカウルの後端までのライン (B) は、排風口のシャープなラインをさらに際立たせ、車体全体としての伸びやかさを表現している。それらのラインと対を成すかのように通された肩からミドルカウルにかけてのライン (C) は、先の二つのラインをより鋭く印象づけ、向かってくるものすべてを切り裂いていくイメージに寄与している。

5.3.2. 一瞬で加速しそうな瞬発力を感じるクラウチングスタイル

クラウチングスタイルを表現するために、CBR1000RR のデザインフォルムの基調となっている前傾三角形 (Fig. 16) を踏襲してスケッチ検討をおこなった。

それにより、目指すクラウチングスタイルの表現はされているものの、今回求められている瞬発力のポテンシャルを感じさせるためには、さらなる前傾姿勢の強調が必要だと感じた。そこで、フロントタイヤ部分まで取り入れた、塊としての三角形を表現し、前傾を強めることとした。さらにリヤカウル部分を、それと同方向のフォルムを感じさせ

るもう一つの三角形として、明確に認識できるように配置した (Fig. 17)。それら二つの三角形の対比によって跳ね上がり感を強調し、視覚の重心を充分に前方下に移動することで、一瞬で加速しそうな姿勢を表現することができた。

5.3.3. 足が地面をつかみ、蹴り出していく力強い台形フォルム

Fig. 18 に示すような「台形フォルム」の実現のために、車体上部をコンパクトに表現することは、足まわりを強調することに大きく寄与する。しかしながら、速さのポテンシャルを表すもう一つの要素である「力強さ」のイメージを弱めることにもなる。この「力強さ」は、他を押しのける力強いオーラ、存在感を示し、圧倒的な速さを印象づける上で不可欠なものである。

この「力強さ」を表現するために、ミドルカウルとタンクからなる車体中心部を、一体化された塊として表現した。この塊感の強さが、他を押しのける力強さの表現となった。また、車体中央のピボットプレートのボリュームを増大しつつ、それに繋がるフロントカウルやミドルカウル、リヤカウル周りなどの先端部をシャープなエッジ形状としている (Fig. 19)。これによって、車体周辺部から中心部に向かってマスが集中されているイメージがさらに強調されている。このようにして、車輪部分を強調しながらも、力

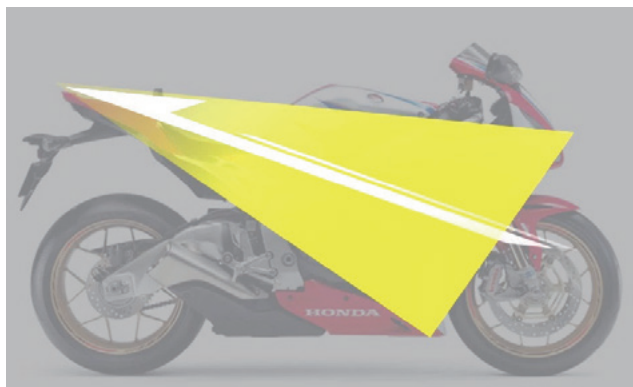


Fig. 16 Styling form symbolizing forward tilting triangle

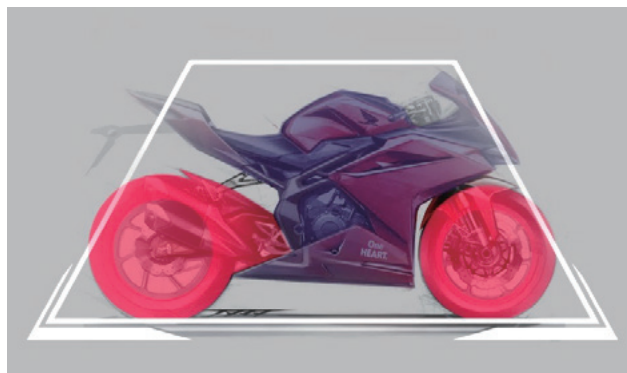


Fig. 18 Sketch showing trapezoidal design form

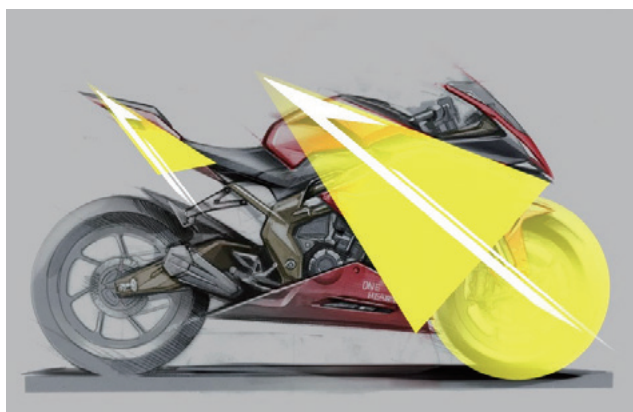


Fig. 17 Two triangles demonstrating form directed in same direction, which enhance forward slanted posture

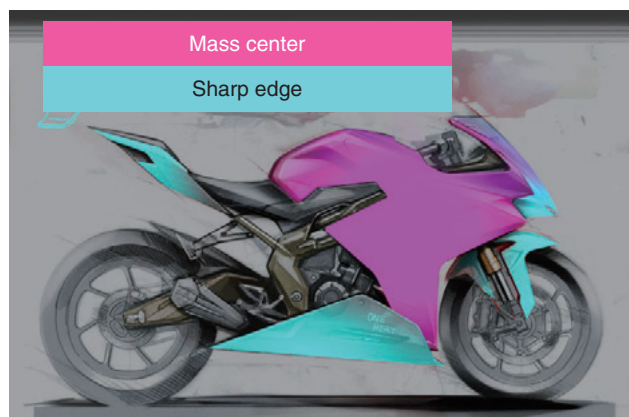


Fig. 19 Different design expression techniques depending on distances from center of mass

強さを失うことなくスピードを生み出すポテンシャルを表現することを可能とした。

これら手法をもって、台形フォルムを印象づけ、力強く大地を蹴り出すイメージを表現することができた。

6. バーチャルモデル比較による、デザイン候補の存在感検証

スタイリングの方向性がスケッチで決定すると、まずは1/2サイズのスケールモデルでの立体検討に入った (Fig. 20)。1/2サイズで検討する理由は、短時間での製作が可能なおこにえ、プロポーションの変更が容易であることなどが挙げられる。これらの特性を生かし、さまざまな立体検討で、スタイリングキーワードである「Speed Shape」の求める、停まっても速そうに見える形を導き出し、フルスケールクレイモデルの方向性を定めた。次に、光学式測定器にて1/2サイズのスケールモデルの測定をおこない、バーチャルモデル化した。それにより、大型モニター上の実寸画像を用いて、コンペティタ等を含むさまざまなモデルとの比較検討や、各部の調整をおこなった。また、このデータを用いることで、車体レイアウトの確認やCFD解析を進めることが可能となり、仕様の早期熟成を達成した (Fig. 21)。



Fig. 20 Half size clay model

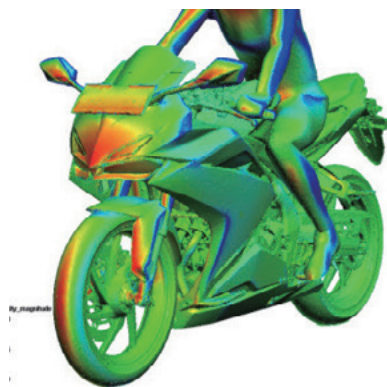


Fig. 21 Analysis of pressure distribution on cowl by CFD

7. クレイモデル作成と全体デザイン決定

1/2スケールモデルの計測データを元に、NC加工機を用いてフルスケールのクレイモデルの製作をおこなった (Fig. 22)。さまざまな検討を重ねたデータではあったが、削りだされたクレイモデルの印象は、画面上で確認したそれとは違うものであった。数値上は同じであるが「かもし出すオーラ」がまったく異なった。質量を感じる塊から来る力強さや、形状による切れ味が感じられなかった。また、ライダーがシートに座りハンドルを握った際に感じる高揚感や、人がまたがった状態で完成するモーターサイクルとの一体感が不足していた (Fig. 23)。それは、スケールモデル製作時と目の線の違いや、実際にまたぐことができないサイズの限界と考える。そこで再びクラウチングスタイルのプロポーションの作成、切れ味の演出の再構築をおこなうことにした。



Fig. 22 Production of full scale clay model by numerically controlled clay trimmer



Fig. 23 Lack of sense of unity between rider and vehicle caused by loose distances to components around rider

7.1. プロポーション —瞬発力の開放—

低く構えたフロントノーズと高く跳ね上げたりヤセクションを基本プロポーションとし、今にも動きだしそうなクラウチングスタイルを表現するために、短距離アスリートのスタート直後のフォームと筋肉の動きの考察をおこなった。

頭を下げ、さらに低い姿勢をつくり水平方向への力を生み出すこの姿勢を再現するためには、鍛え抜かれた筋肉と、地面を蹴り出す推進力と、スピード感の表現が不可欠であった。そのために、タンクを力感表現の中心とし、そこから離れるにつれて、薄さ、鋭さの表現へと変化させていった。ミドルカウルからフレーム、スイングアームへとつながる一連の流れにより、しなやかさを表現しつつ、地面を蹴り出す力強さと推進力を表現した。ローカウルは限界まで車体後方に伸ばし、前下がりの長い直線でスピード感を表現した。これらより、力を内包し爆発的なエネルギーを開放する瞬間を切り取ったプロポーションとすることができた (Fig. 24)。

7.2. タンク —圧倒的な力強さ—

立体上で最も力強さを表現したのがタンク形状であった。タンク背面をアスリートの僧帽筋、後背筋に見立て、硬い大きな塊を、原始的な道具で削り落としたかのような硬質な面表現をおこない、圧倒的な力強さを表現した (Fig.



Fig. 24 Implementation of crouching style concept



Fig. 25 Shape formation of back portion of tank expressing powerfulness (4-piece tank coverings configuration)

25). また、ニーグリップ付近を極限までそぎ落とし、引き締まったくびれを表現した。この造形は、ライダーの足つき性の良さと、スポーツライディングに最適なホールド性に寄与している。このように、複雑で面の高低差があるタンク形状の造形は、タンクカバーを左右に配するなどの工夫により可能にした。

7.3. フロントカウル —睨みつける視線—

フロントカウルに深く掘り込んだキャラクターラインやカットラインによって、歌舞伎の隈取りのような印象を付与した。さらに、低く構えたフロントノーズよりも下側に配置したヘッドライトの形状を、逆スラントにすることで、威嚇、相手を睨みつける形状にしている (Fig. 26)。

7.4. ミドルカウル —切れ味と存在感—

全体の中で一番に面積が大きいのがミドルカウルである。面積が大きいゆえに、力強さの表現を求めすぎると重さへとつながってしまう (Fig. 27)。そのため、正面から見



Fig. 26 Headlights that are gazing up from low position

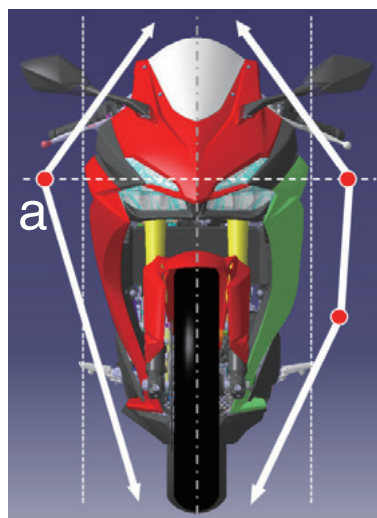


Fig. 27 Difference in impression of weighted object sense evoked by turning point(s) of outer line (ex. two points on the right side in the figure)

たシルエットにおける最外部 (a) より、ロワーカウルに向かって面全体を一気に絞り込むことで、ミドルカウルの大半の面が下向きになり、深い陰影を作る。

エアアウトレット部分は、鋭利なもので深くえぐり取られたような造形とし、凄みを演出している。

ロワーカウルとの接続部分における、深く入り組んだレイヤ構造は、カウル内の空気の流れを制御し、ライダーの居住性向上や、エンジンの熱マネジメントに寄与する。また、レイヤ部分のウイング形状の厚みを限界まで抑えることで「鋭い切れ味」を演出した。全体的には、硬質な面形状と大きくつけた面の切り替え角度によって、シャープなエッジ表現と陰影のコントラストを強く表現した。これらにより、大型モーターサイクルに負けない存在感と迫力のあるスタイリングを達成した。

7.5. リヤカウル —躍動感の演出—

リヤカウルのサイドビューにおいて、シートレールから続く後ろ上がりのラインに折れ点を設けることで、さらにテールが跳ね上がった躍動感を与えた (Fig. 28)。リヤカウル形状は、テンションを抑え、大きく張り出した上向き面と、ライダーの加重を受け止める張りのある下向き面とで構成した。これらの張り出しによって、シート部分の絞込みとの対比を強め、クラスを超えたボリューム感の演出につながった。また、前後に貫通したエアダクトにより、リヤカウルの迫力あるボリューム感と、切れ味の鋭い軽快感の両立を達成している。

7.6. クレイモデルの完成

クラウチングスタイルを表現する、鍛え抜かれた筋肉、地面を蹴り出す推進力、スピード感という概念を、フルスケールクレイモデルとして具現化した。それにより、スタイリングキーワードとして掲げた「Speed Shape」を表現する造形を達成することができた。各部のフィレットは、明確な面の切り替わりによって、より鋭角に見え、それによ



Fig. 28 Enhancement of expressions by clay model for further providing uplifting feeling

り「空気を切り裂くようなシャープさ」を表現した。また、またがった状態でライダーが目にする、圧倒的な力強さを表現したタンクの形状は、オーナーに排気量とクラスを忘れさせる迫力を持っている。これらすべての造形は「魅せるスタイリング」へとつながった。

8. ディテールデザイン

「魅せるスタイリング」のコンセプトに繋がる、ディテールデザインの具体例を以下に示す。

8.1. ヘッドライト —鋭い顔—

ヘッドライトまわりは、「Speed Shape」にふさわしい顔として、鋭い顔つきをイメージしたデザインを目指した。灯体全体は、ヘッドライトとポジションライトによる独立した4灯の構成により、個性と存在感を主張するデザインとなっている。ポジションライトは、横長に切れ上がった形状とし、獲物をねらう動物の眼光のように見せている。これが鋭い顔周りのデザインをいっそう引き立てている (Fig. 29)。この鋭い眼光を表現するために、ライトガイドによる隅々まで光る面発光を採用し、発光部の輪郭を強調



Fig. 29 Sharp face demonstrated by headlights design

している。ヘッドライトリフレクタには、RR のロゴをエッチング処理で入れている (Fig. 30)。このように、普段目にする事のない細部にも遊び心を忘れていない。

8.2. テールまわり ―先進性と速さの表現―

テールライトユニットは、フロントのデザインとの調和を考え、上下二段のレンズデザインを採用した。上段のテールライトには、通常は大型モーターサイクルに採用されるような、ライトガイドによる面発光で先進性を表現している。下段のストップライトをリフレクタータイプにすることで、上段のテールライトとの、見た目と発光時のコントラストを強調した。発光の表現を上下で違ったものにするにより、上下二段のテールライトデザインを印象づけることができるデザインとした (Fig. 31)。テールカウルには導風口を設け、走行風のマネジメントを予感させる外観とし、速さを表現した (Fig. 32, 33)。

8.3. レイヤードウイング

―速さを感じさせるディテール造型―

「Speed Shape」を完成させるための速さの表現手法として、ミドルカウルにウイング形状を有するデザインを適用



Fig. 30 RR logo on outer upside of extension of headlight reflector



Fig. 31 Two tiered arrangement of upper and lower LED taillights

した。これは、スーパーカーやF1 マシン、MotoGP マシンなどの速い乗り物が有するカナードの形状をイメージしたものである。それらが装着されている車両の外観は、走行していなくとも空気のマネジメントを連想させ、高速域での卓越した走行性能を感じさせる。このウイング形状のデザインは、「停まっても速そうに見える」スタイリングを印象づける重要な要素となった。ローカウルのサイド面から、ミドルカウルの端面をウイング形状として出した独自の構造は、エンジン冷却風の導風口としても機能している (Fig. 34)。なお、ウイング形状を取り入れたデザイン手法は、フロントまわり、リヤまわりの表現としても適用されている。

8.4. ツインマフラ ―高性能を示す存在感―

ハイパフォーマンスを象徴するツインサイレンサは、消音効果と高出力化を両立させた。目標性能を成立させるために大型化したサイレンサは、ツインタイプとすることでスリム化をはかった。幅方向を抑えることでバンク角を稼



Fig. 32 Air guiding intake openings on rear cowl



Fig. 33 Air outlets on rear cowl

ぎ、スーパースポーツに求められるコーナリング時の運動性にも寄与している。また、各サイレンサの断面を異形とすることで、見た目の大きな特長とした (Fig. 35)。このツインマフラ化によって、高出力の象徴となるパフォーマンスを表現し、大型モーターサイクルに引けを取らない迫力を与えることができた。

8.5. 大型フルデジタルメータ

ーパフォーマンスの可視化と先進表現ー

このメータにより、クラス最高の出力を誇るエンジン性能を視覚的に表現した。イグニッションキーを捻ったその瞬間に、スピードを予感させる機器であってほしい。そのようなねらいでデザインされたクラス最大の大型フルデジタルメータは、タコメータをメータユニット中央に大胆に配置したグラフィックとした (Fig. 36)。

オープニング画面は、以下の手順で表示される。まず、イグニッションキーを捻るとタコメータが最大回転数まで跳ね上がる。次に液晶のすべてのセグメントが点灯され、その直後から各セグメントがランダムに消えていく。最後に「CBR」のロゴのみが残りライダーを高揚させる。サーキット走行など、スポーツライディングを楽しむときに

は、メータの情報を瞬時に読み取れることが求められる。そのために、リッタークラスのスーパースポーツモデルには大型フルデジタルメータが採用され、さらにタコメータの上方には、LEDのシフトアップインジケータを配している。これらの表示によって、伏せたライディングフォーム時でも、メータの示す情報を視野の一部に感じることが可能となる。本モデルに採用した大型フルデジタルメータも、同様の機能を有している。核となる液晶ディスプレイには、最新の動向を捉え、枠部分の幅の細いタイプを採用し、先進性を表現した。また、ゴム製が主流の操作ボタンを、メーターパネルと同質感の樹脂製とし、ユーザの期待にこたえる外観を実現した。

8.6. 足まわり ークラスを超えた走りの予感ー

クラスを超えた走りを目指し採用された、倒立フロント



Fig. 34 Layered cowl and rear cowl expressing speed by wing shape



Fig. 35 Twin mufflers with variant cross sections



Fig. 36 Large-sized fully digitized gauge unit

フォークやアルミスイングアームも、「魅せるスタイリング」を実現する対象となった。前章でも触れたが、停まっても地面を蹴り出す力強さや、俊敏に走る軽快さをイメージさせるため、スイングアーム上端のラインをメインフレームのラインと合わせたデザインを施した。それにより、車体との一体感を有するとともに「クラウチングスタイル」の表現に大きく貢献した (Fig. 37)。また、ホイールデザインは7本スポークを採用することで、RC213V という MotoGP マシンの持つ、速く走るもののイメージを取り入れ、速さの表現を強調した。

8.7. フレームボデー —魅せる構造体—

先に述べたように、本モデルの「Speed Shape」を達成するためには、デザイナーと設計担当が、互いの領域に踏み込むレベルでの連携が必要であった。「機能的なものは美しく、美しいものは機能的である」という共通理解の下、議論を重ねることで、デザインと機能を両立させる設計の実現を目指した。

まず、基本的な考え方として、フレームを構造体として見せるデザインとした。そこで、外観魅力の高いトラス構造のパイプフレームを採用し、トラス構造を見えにくくするようなガセット類の採用を極力控えた。さらに、車体にクビレを持たせるパイプレイアウトとし、メリハリのあるボデー表現を可能とした。

また、ピリオンステップブラケットの取付け部をフレーム裏側に配置するなど、フレームパイプの外観を損なうことの無いように配慮した。それにより、ピボットプレートからリヤカウルにつながるシートレールのラインを綺麗に見せることが可能となり、「Speed Shape」の表現に寄与している。

これらディテールデザインにおいても、ねらいとしていた「魅せるスタイリング」の表現を具現化し、CBR250RR の個性を際立たせることに成功している。

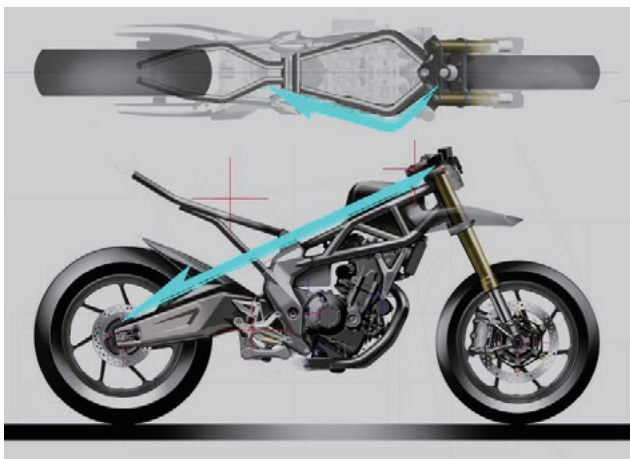


Fig. 37 Expressing unity of vehicle body by aligning main frame and upper edge of swing arm

9. カラーリング

カラーリングは、モデルのコンセプトを第一印象でお客様に伝えるたいせつな要素である。

「魅せるスタイリング」「魅せる装備」「魅せるパフォーマンス」という機種コンセプトを、この車両を初めて見るお客様に正しく伝えるには、外観にかかわる部分の考え方をぶれさせないことが重要となる。

カラーリングデザインの検討は、形状が定まってから始められる場合も多い。しかし本モデルでは、スタイリングとカラーリングのデザイナー達が、互いにその専門性を越えて意見を交換しあうことで、このぶれないデザインを実現した。

本モデルの重要なデザイン要素の一つが「ショーオフ」である。そこで、カラーリングデザインにおいても「魅せる」カラーリングを実現し、ユーザの「かっこよく見られたい」という欲求を満足させることを目指した。

我々は、本モデルのカラーリングにおける「魅せる」を実現させる要素について、トレンドに則っていること、先進的であることに加え、それぞれのお客様の「かっこよさにつながる価値観」に合っていることと定義づけた。多くの場合、カラーリングはその地域性を考慮して決定される。しかし、このモデルのターゲットユーザは、対象国にかかわらず、グローバルにトレンドや価値観を共有している人々たちである。そのためカラーリングにおいても、地域に特化したカラーリングと意識せずにグローバルに認知され、通用するカラーリングを目指した。「かっこよさに繋がる価値観」と言っても、人によって捉え方が違う。たとえば都会で洗練された走りができることがかっこいいという人もいれば、レーシングバイクこそがかっこよさの象徴だと思う人もいる。また、個性を強く打ち出し、集団の中で目立つことこそがかっこいいと思う人もいる。これら異なる価値観にこたえるため、カラーリングは全部で3テーマ、5タイプとし、幅広いユーザの嗜好に合わせたラインナップとした。

1. ストリートスポーツカラー (2タイプ)
2. レーシングスポーツカラー (2タイプ)
3. スペシャルグラフィックカラー KABUKI

以下にそれぞれのカラーリングに設けたテーマと背景について述べる。

9.1. ストリートスポーツカラー

都会の洗練されたライディングイメージを形作るために、ストリートスポーツカラーはモノトーンカラーをメインに選び、定番色として位置づけた。さらに、モノトーンカラーは使用シチュエーションを選ばず、服装に合わせやすいため、ライダーを引き立てる。地味な印象も併せ持つモノトーンカラーを採用しながらも、スーパーカーなどの

カラートレンドを参考にし、日常の使用というシチュエーションの中で「魅せる」手法を検討した。その結果、モノトーンカラーの中に彩度の高いカラーを効果的に配置する手法を用いた。

9.1.1. マットブラック

マット塗装は、表面の細かな凹凸が周囲の光を拡散することで、景色の映り込みを抑える特性があり、ステルス機などの軍用機にも使用されている。中でもつや消しの黒は、夜間活動において、敵から機体の姿をくらませる視覚的效果がある。軍用機に使用されてきた経緯と、正体をつかませない特性から、畏怖、凄み、迫力を潜在的に感じさせる色である。本モデルのコンセプトモデル (Fig. 38) は、正体不明のモデルとしてモーターショーに出展する意向があった。そのため、謎めいたふんい気を演出し、スタイリングの迫力や凄みを表現するのに効果的であることから、マットブラックを選択した。展示で好評を得たこともあり、量産モデルでも採用するに至った (Fig. 39)。また、エアインテークなどの機能部分の造形を引き立たせる効果をねらい、内側に入り込んだ面に彩度の高い赤を配色した (Fig. 40)。黒に赤の差し色は、ホンダの二輪のカラーリングにおいて人気の高い組合せという背景もあり、このマットブラックをテーマカラーと位置づけ、カタログやフォトブックに使用した。



Fig. 38 Concept Model of "LIGHT WEIGHT SUPER SPORTS CONCEPT"



Fig. 39 Matte black color applied to mass production model

9.1.2. ダークメタリックシルバー

メインターゲット市場の一つであるインドネシアでは、近年、グローバルな価値観を持つ富裕層の間で「欧州の四輪車においてはシルバーが人気である」という情報が認知されてきた。元々シルバーはタクシーなど公共の車としてのイメージが強く、個人所有の車の色としての価値は低かった。しかし、上記情報により価値が上がり、欧州メーカーのシルバーの四輪車を所有するユーザが現れはじめている。

そのような兆しはあるものの、モーターサイクルやクルマの人気色は依然黒である。黒は精悍なイメージで捉えられおり、好まれているためである。さらに、二輪市場、特にスポーツ系のカテゴリにおいては、シルバーのバリエーションはほとんどない。四輪車に比べて幅広い層のお客様を持ち、流行に左右される傾向を持つ市場ゆえに、黒、赤などの原色、レーサーレプリカカラーといった、人気色のみでラインナップされる傾向が強い。

このような背景から、本モデルでシルバーを提案したのはかなりチャレンジングであったが、ユーザの嗜好と昨今のカラートレンドから逸脱せず、先進的なイメージを表現できる手法を考えた。カラートレンドの傾向から、シルバーの色みはダークトーンを選択した。ローカウルの色はさらに濃いグレーメタリックを選び、全体の印象を引き締めつつ、相対的に車体の上半身の造形が強調される効果をねらった。カウルの重なり部分や折り返し面など、造形の特徴的な部分に配色されたイエローは、車の輪郭を表現している (Fig. 41)。彩度の高いイエローは、原色との組み合わせが難しいシルバーと組合せたときも相性が良く、アクティブで先進的なイメージを演出できる色として採用した。



Fig. 40 Red color inserted on recessed sections of cowl

このような手法を用いることで、先進的かつユーザの嗜好にも合うカラーリングを実現することができた (Fig. 42)。

9.2. レーシングスポーツカラー

レーシングスポーツカラーとして設定した2タイプは、モータースポーツに関心の高いお客様に向けて訴求するカラーリングである。モータースポーツは、世界的にも多くのファン人口を抱え、特にインドネシアでは国民的に人気が高く、バイクに乗らない人でもスポーツ観戦として楽しむような大きな盛り上がりを見せている。レーシングスポーツカラーは、ファンにとっては応援しているチームの象徴であり、所有することでファン心理を盛り上げるカラーリングである。

9.2.1. レプソルカラー

Hondaはロードレース世界選手権の最高峰であるMotoGPクラスに2017年現在も参戦し、好成績を獲得し続けている。そのMotoGPクラスにおいては、1995年よりスペインのRepsol社がHonda・レーシングのメインスポンサーとなっている。このワークスマシンや、そのカラーリングを再現した量産モデルは、通称レプソルカラーと呼ばれ、レースファンに親しまれている。



Fig. 41 Stripes arranged along contour of vehicle body



Fig. 42 Color of dark metallic silver applied to mass production vehicles

レーサーレプリカカラーは、実際のレーシングマシンとは違う形の車体に、より近いイメージで再現することが重要となる。Repsol社のワークスマシンのカラーリングは、サーキットでの走行中でもひと目でわかるよう、鮮やかなオレンジ色で塗り分けされている (Fig. 43)。量産のレプリカモデルにおいては、ステッカーを用いた手法で、この塗り分けを表現する。レプソルカラーの塗り分けのふんい気を再現するには、面積の大きいステッカーを用いる必要があった。ステッカーの面積が大きくなればなるほど、貼り付け作業における高い技術が必要となる。しかし、高い技術を有するアストラ・ホンダ・モーター（インドネシアにおけるCBR250RR生産会社）のベテラン従業員の協力を得ることによって、量産化が実現した (Fig. 44)。

このカラーリングのカタログやポスターなどに使用するメインキャラクターには、MotoGPレーサーのマルク・マルケス選手を起用した。実際にインドネシアで開催されたイベントで走行し、レースファンを大いに盛り上げた。

9.2.2. 新世代アストラ・ホンダ・レーシングカラー

アストラ・ホンダ・レーシングチームは、アジアロードレース選手権（以下ARRC）に参戦している。新世代アストラ・ホンダ・レーシングカラーは、2016年から新たに設定された、このワークスレーシングマシンのレプリカカラーである。



Fig. 43 REPSOL Honda Works Machine, the RC213V



Fig. 44 Replicated coloring reproducing that of original works machine

アストラ・ホンダ・レーシングチームのワークスマシンは、チームカラーである赤白のツートーンカラーを基調としてきた。新世代アストラ・ホンダ・レーシングカラーは、伝統の赤と白に対し、黒とグレーのグラフィックを大胆に加えることにより、全体の印象を引き締めている。車体前後を貫くグラフィックデザインは、前傾姿勢と後方に鋭く跳ね上がった造形を、より強調して表現している。本カラーにおいても、面積の大きなステッカを用いて、車体の下半分を白く塗り分けたかのように見え、軽快なイメージを表現した。これらの手法により、レプリカカラーのねらいであるスピード感の表現を達成した (Fig. 45)。

2017年のARRCアジアロードレース選手権AP250のクラスにおいて、アストラ・ホンダ・モーターは、このカラーをまとったCBR250RRで参戦を果たした。各大会でトップを獲得し続けた本チームのレプリカカラーを所有することは、レースファンのユーザにとって大きな喜びにつながっている。



Fig. 45 Coloring of Astra Honda Racing for mass production model

9.3. スペシャルグラフィックカラー KABUKI

この「スペシャルグラフィックカラー KABUKI」は、インドネシア市場向けに限定でデザインしたカラーリングである。

インドネシアのモーターサイクル市場では、ステッカやラッピングフィルムを使用した、カラーリングのカスタマイズが盛んである。そのトレンド背景を受けて、本モデルのカスタマイズカラーをメーカー側から発信するというコンセプトで、このカラーリングデザインを展開した。最初にカラーリングデザインを始める前に、市場調査の結果などを参考にデザインのテーマを検討した。いくつかのデザイン方向性を模索する中で、インドネシアにおいても、日本のアニメ文化や「かな」文字をあしらったグラフィックなどが、グローバルに通じる表現の一つとして認知されているということがわかった (Fig. 46)。また、世界的にも「クールジャパン」という言葉が、サブカルチャーのトレンドキーワードとして浸透している。このような背景から「日本」を大きなテーマとして、デザインの検討を進めた (Fig. 47)。車体全体に大胆に描かれたグラフィックは歌舞伎をモチーフとしている。モチーフとした演目は「暫(しばらく)」という古典



Fig. 46 Graphics with Japanese motifs seen in Indonesian market



Fig. 47 Conceptual sketches on coloring developed from “Japan” as design motif



Fig. 48 Coloring for mass production model with asymmetrically designed left and right graphics based on motif of Kabuki

歌舞伎の定番作で、男性を主人公に据えた脚本と、女性を主人公に据えた脚本が存在する。この演目の主人公をモチーフに、車体右側は女性、左側は男性をメインキャラクターとして描き、左右非対称の特徴的なデザインとした (Fig. 48)。筆のストロークで描かれたような線は、組み合わせると、キャラクターの髪の毛の一筋や輪郭につながっている (Fig. 49)。分割したステッカーをパズルのように組み合わせて貼ることで、離れて見た際に、カウル全体をフルラッピングしたグラフィックのように見える表現を目指した。メインのグラフィックカラーを白と黒でまとめ、前後のホイールカラーを白と黒で変えるなど、第一印象ではハイコントラストで目を引くデザインに仕上げた。その一方、近付いて見たときには、花札をモチーフとしたグラフィックが、ローコントラストで各所にちりばめられているのが認識できる (Fig. 50)。



Fig. 49 Representation of contours of face and hairs with brush stroke touch

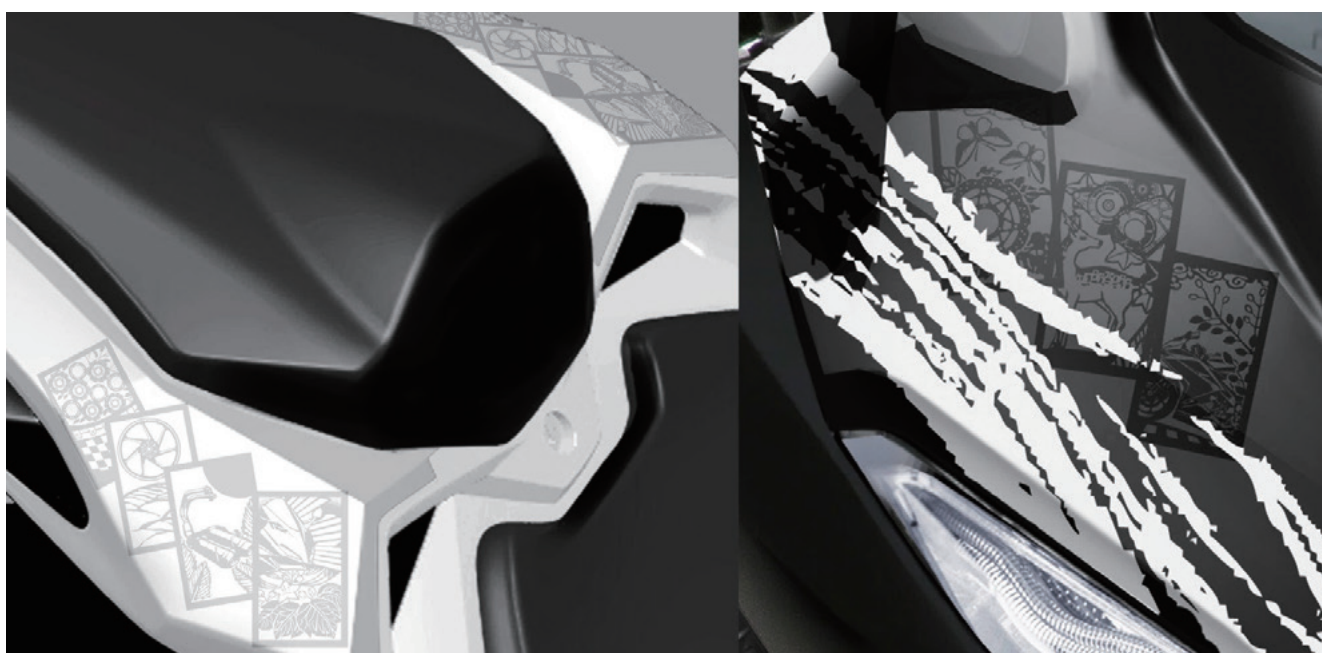


Fig. 50 Graphics featuring Hanafuda (Japanese floral playing cards) as motif

一見すると一般的に知られる花札のように見えるが、本モデルのパーツをイラスト化してあしらっており、発見したときの驚きを細部にまで仕込んでいる。このような手法を用いて、量産モデルとしてはチャレンジングな、カスタマイズカラーのようなデザインを達成した。

10. まとめ

CBR250RR のスタイリングデザインをおこなうにあたって、一貫して「魅せるスタイリング」を目指した。スタイリングにおいては、停まっても速そうに見える「Speed Shape」というキーワードを設定した。このキーワードを具現化するために、基本骨格、全体プロポーション、機能部品のディテール、カラーリングという観点で多角的にアプローチした。

「Speed Shape」を実現するために、車両設計のチームと密にコミュニケーションを取りながら、本スタイリングキーワードの実現を念頭において基本骨格を定め、他車に比しても際立つウエッジシェイプを達成した。さらに、スケッチ、クレイモデリング、そして機能部品のデザインに至る各デザイン領域で、クラウチングスタイルなどの速く見せるための表現手法を用い、「Speed Shape」デザインを実現した。また、カラーリングにおいては、グローバルに通用する魅力的なグラフィックデザインによって、このモデルの個性をより強く主張することも達成できた。本モデルは、2016 年 10 月にインドネシアで発売され、多くのお客さまから高い評価を得た。また、2017 年 5 月には日本において発売され、発表と同時に多くの注文をいただくことができた。これらユーザやメディアの評価から、デザインにおける当初の目的を達成できたと実感している。本デザインが、今後のスーパースポーツ 250 cc クラスにおける、デザインの新たな指標となるよう願っている。

■ 著 者 ■



田村 健司



二股 健士



宮崎 寛之



西村 舞

新型 NSX 用 3.5 L V 型 6 気筒過給エンジンの開発

Development of New 3.5 L V6 Turbocharged Gasoline Engine for New NSX

舟 根 匠*

Takumi FUNANE

柿 沼 隆*

Takashi KAKINUMA

古 俣 誠 二*

Seiji FURUMATA

都知木 博 一*

Hirokazu TOCHIKI

要 旨

新型 NSX のコンセプトである高い運動性能を実現するための出力性能と、時代背景に見合った環境性能を両立するため、新骨格の 3.5 L V 型 6 気筒過給エンジンを開発した。高出力と高熱効率を両立するため、筒内直噴と高タンブルポートを用いて燃焼を最適化し、左右各バンク独立のツイン過給システムや、筒内直噴とポート噴射を併用する燃料供給システムを採用した。車両運動性能の向上を目的としてパワートレインの軽量、コンパクト化と低重心化を図った。また、高出力化に対応し、スポーツ走行にも耐えうる冷却性能や骨格信頼性を確保するため、鉄溶射シリンダボアやドライサンプ潤滑システム、3 ピースウォータージャケット、スイングアーム式動弁機構、リダクションチェーン駆動方式を採用した。

この結果、最高出力は 373 kW (500 HP)、最大トルクは 550 Nm を 2000 rpm から 6000 rpm までの広範囲で発生すると同時に、欧州 Euro6b および US ULEV125 に適合した。

ABSTRACT

The concept for Honda's new NSX was to balance power performance achieving a high level of dynamic performance with a level of environmental performance meeting the demands of the times. A 3.5 L V6 turbocharged gasoline engine with a new frame was developed to realize this concept. In order to balance high power and high thermal efficiency, combustion was optimized through the use of in-cylinder direct injection and high-tumble ports, and the engine applies a twin turbocharger system featuring independent turbochargers positioned on the left and right banks and a fuel supply system combining in-cylinder direct injection and port injection. The powertrain was reduced in size and weight and given a low center of gravity in order to enhance vehicle dynamic performance. In addition, in response to the higher power of the engine, Fe spray-coated cylinder bores, a dry sump lubrication system, a three-piece water jacket, a swing arm valve train, and reduction chain drive were applied in order to help ensure cooling performance and frame reliability suited to the demands of sports driving.

As a result, the new engine achieves a maximum power of 373 kW (500 HP) and a maximum torque of 550 Nm across a wide range from 2000 rpm to 6000 rpm, in addition to complying with the European Euro6b and US ULEV125 regulations.

1. まえがき

Honda は、2016 年に北米で新型 NSX の量産を開始した。新型 NSX は 1990 年に登場した初代 NSX のコンセプトである高い運動性能と高い操縦安定性の両立を継承したスーパースポーツモデルである。

新型 NSX には革新的な複合素材を採用した軽量ボデー

*四輪 R&D センター

に 3.5 L V 型 6 気筒過給エンジンをコックピット後方に縦置きに配置し、これに 3 モーターハイブリッドシステムを組み合わせた。

本稿で紹介する新型 NSX 用 3.5 L V 型 6 気筒過給エンジンは、Honda が提案してきた環境性能と運転する楽しさを両立させた直噴過給シリーズ (Fig. 1) の中でも、特に運転する楽しさを追求したエンジンである。

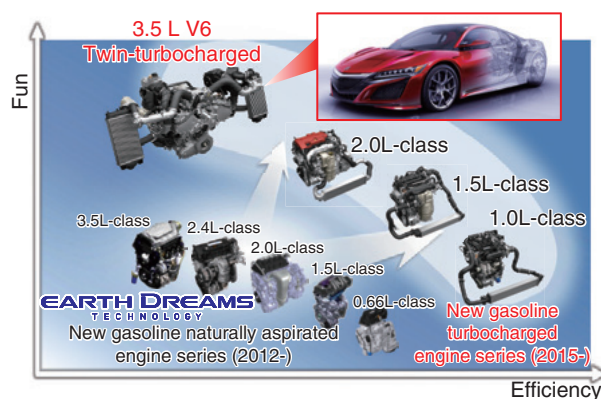


Fig. 1 Honda's series of direct injection turbocharged engines

2. 開発のねらい

NSX のコンセプトである高い運動性能を実現するための出力性能と、時代背景に見合った環境性能 (燃費, CO₂ 排出削減, 排気ガス規制) の両立を図った。また、高い操縦安定性を実現するために車両の中央部、低重心位置に縦置き搭載可能なコンパクトなエンジン骨格が必要である。スポーツ走行における高負荷かつ高加速度におけるエンジン信頼性の確保も同時に必要である。これらの要求をすべて満足するため、新たに 3.5 L V 型 6 気筒過給エンジンを開発した。主な開発目標は以下の通りである。

- (1) 最高出力 373 kW (500 HP)、最大トルク 550 Nm と各国の排気ガス規制への適合の両立
(欧州 Euro6b, US ULEV125)
- (2) 軽量、コンパクトかつスポーツ走行に耐えうる骨格

3. エンジン主要諸元

Table 1 に新型 NSX 用 3.5 L V 型 6 気筒過給エンジンと、Honda 量産の 3.5 L V 型 6 気筒自然吸気エンジンとの諸元比較を示す。新型 NSX 用 3.5 L V 型 6 気筒過給エンジンは従来エンジンに対して骨格を変更した。また、出力向上と高効率化を目的として左右両バンクにターボチャージャーを搭載した。燃焼系には高タンブルポート、筒内直噴 (DI) とポート噴射 (PI) を併用する DI+PI 燃料供給システム、吸気と排気動弁機構に油圧式 VTC (Dual-VTC) を採用した。

Fig. 2 にエンジン本体外観を、Fig. 3 に車両搭載レイアウトを示す。ドライサンプ潤滑システムを採用し、V バンク角を 75 度に設定することで、車両の走行性能向上に重要である低重心かつ省スペースなパッケージングを実現した。

Table 1 Engine specifications

Engine type	Developed	Previous
	JNC1	JNB1
Cylinder configuration	V6-cylinder	V6-cylinder
Bore × Stroke (mm)	91.0 × 89.5	89.0 × 93.0
Displacement (cm ³)	3493	3471
Intake system	Turbocharged	Naturally aspirated
Bank angle (deg)	75	60
Lubrication system	Dry sump	Wet sump
Crank journal diameter (mm)	72	72
Compression ratio	10.0	11.5
Valve train	DOHC Hydraulic VTC (Intake/Exhaust)	SOHC VTEC/VCM
Number of valves	4 per cylinder	4 per cylinder
Fuel injection type	DI+PI	DI
Maximum power (kW/rpm)	373/6500-7500	231/6500
Maximum torque (Nm/rpm)	550/2000-6000	371/4700

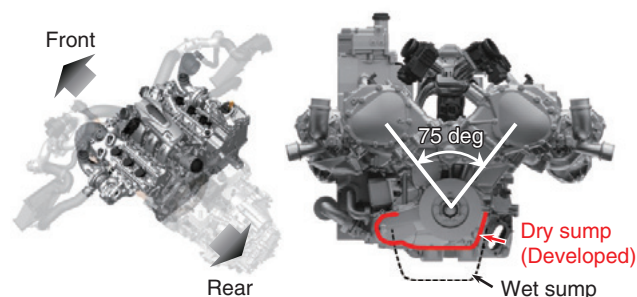


Fig. 2 Overall view of engine

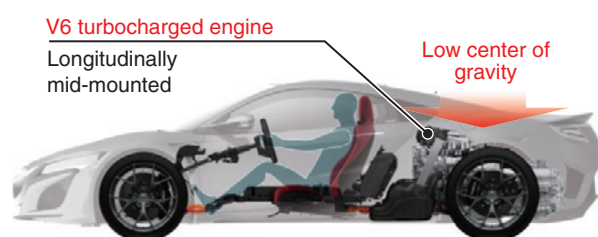


Fig. 3 Vehicle mounting layout

4. エンジン骨格技術

車両運動性能を高めるため、エンジン本体の軽量、コンパクト化をねらった。これと同時に、高出力化による発生熱量増大に対応する冷却性能、スポーツ走行に対応可能なエンジン骨格の信頼性を両立させるため、本エンジンで採用した主要なエンジン骨格技術について紹介する。

4.1. 鉄溶射シリンダボア

高出力化に対応した冷却性能、およびエンジン本体の軽

量、コンパクト化を両立させるため、本エンジンでは鉄溶射コーティングによるシリンダボア表面処理 (Fig. 4) を採用した。

冷却性能向上のため、シリンダボア間に冷却水回路を設定した。冷却水回路の形成にあたって铸造性を満足する肉厚を両側に確保する必要があるため、ボアピッチが拡大しエンジン全長が長くなり、レイアウト性の課題が発生する。従来の鉄のシリンダスリーブ (肉厚約 2.5 mm) を用いた場合、ボアピッチの拡大は避けられないが、鉄溶射コーティングを用いることでスリーブに相当する部分を 0.2 mm の薄膜に置換し、ボアピッチを 11 mm に抑えつつ軸間部に冷却水回路の設置を可能とした。また、鉄部分の肉厚を薄くしたことで、鉄スリーブに対して熱伝導率は 52% 向上 [Fig. 5 (a)], 重量は 11% 軽量 [Fig. 5 (b)] にすることができ、軽量かつコンパクトなシリンダブロックを実現した。

鉄溶射コーティングにおいては、溶射膜の密着強度の確保が必要である。溶射膜における鉄とアルミの結合力を大別すると、以下の三つに分けられ、これらに対しては溶射面の接地面積と粗さの管理が重要である。

- (1) 溶射鉄に生じる残留圧縮応力
- (2) 溶射面の下地粗さによる機械的結合力 (アンカー効果)

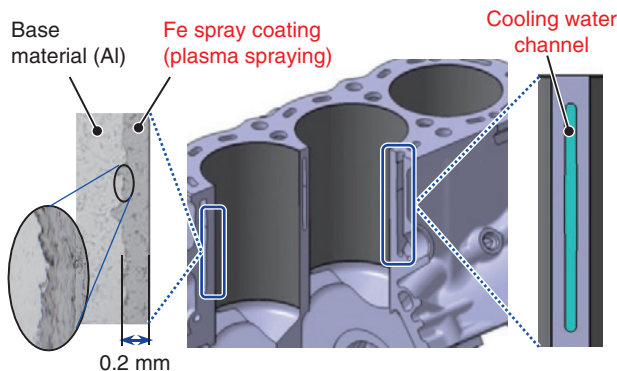


Fig. 4 Fe spray coating film and cooling water channels

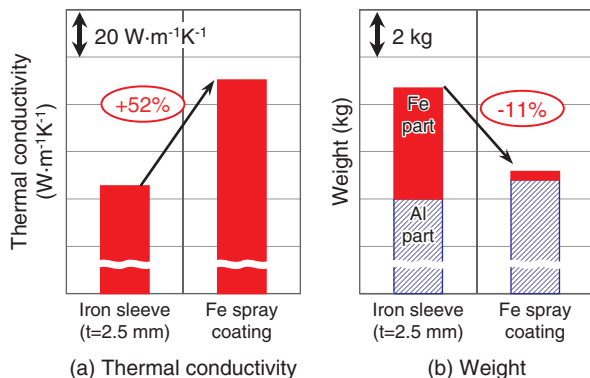


Fig. 5 Performance of Fe spray coating

(3) 溶射膜界面で発生する分子間結合力

本エンジンでは下地処理にショットブラストを用い、メディアサイズを変えることで下地粗さを調整し、適正な密着強度が得られる処理条件を選定した。

ショットブラストに用いるメディアサイズを規定し、Fig. 6 に示す範囲の表面粗さに管理することにより、目標とした密着強度を確保することができた。

この結果、実機における耐久試験においても鉄溶射コーティングの剥離の発生はなく、冷却性能と軽量かつコンパクト化、および骨格信頼性を並立させたシリンダボアを実現することができた。

4.2. ドライサンプ潤滑システム

車両運動性能の向上、および過酷な走行環境下におけるエンジン潤滑性能を確保するため、ドライサンプ潤滑システムを採用した。

ドライサンプ潤滑システムの全体図を Fig. 7 に示す。一般的なウェットサンプ式ではエンジン下部にオイルパンとオイルポンプが設置されるが、ドライサンプ式ではエンジン本体とは別にオイルポンプとオイルタンクを持つ。これによりエンジン搭載高を約 60 mm 低減することができ、低重心化により車両運動性能を向上させた。

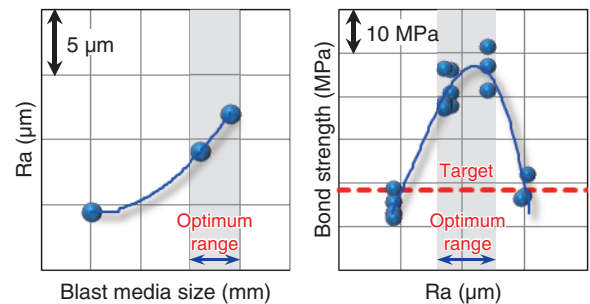


Fig. 6 Bond strength results

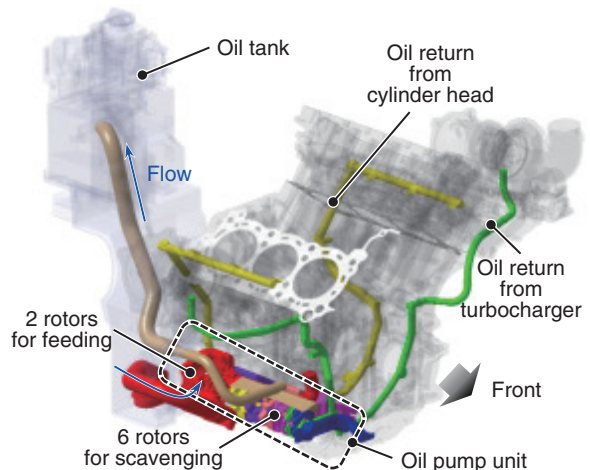


Fig. 7 Layout of dry sump lubrication system

オイルポンプユニットはエンジン右側の下部に配置し、フィードポンプおよびスカベンジングポンプを同軸に並べた一体構造とし、ポンプ回転速度を増速してロータ径を小さく設定することでコンパクト化を図った。また、各ロータの位相をずらして配置 (Fig. 8) することによりオイル吐出時の圧力脈動の抑制とポンプ駆動トルクの低減を図った。

ドライサンプ潤滑ではクランク室やカム室からスカベンジングポンプによりオイルとブローバイガスを同時に回収するため、オイルタンクにはエア混合率 (エアレーション率) の高いオイルが戻される。エアレーション率の高いオイルを供給すると潤滑不良の原因となるため、エアレーションを抑制することが重要である。このため、オイルタンク内の気液分離性能を高めると同時に、フィードポンプとスカベンジングポンプの流量割合を最適化⁽¹⁾した。

オイルタンク内の気液分離にはスワールポットと呼ばれる円筒を用いた。スカベンジングポンプから送られたオイルをスワールポット内に導入し、壁面に沿って旋回させて遠心効果により気液分離を促進しつつ、流速を落とすことでオイルが液面に突入する際のエア巻き込みを抑制する構造である (Fig. 9)。スワールポットの内径や開口部面積、導入角度などにより気液分離性能への影響があるため、CFDを用いて解析をおこない、オイル吸い口におけるエアレーションが抑制可能なスワールポット形状を選定した。

オイルタンクは Fig. 10 に示す縦長構造とし、油量設定は 4 L から 5 L とした。サーキットでのスポーツ走行を想定した車体加速度条件 (旋回 17.7 m/s^2 , 加速 9.8 m/s^2 , 減速 11.8 m/s^2) かつオイルタンク内油量が 1.0 L において、Fig. 10 内の Area (a) に示すオイル吸い口は露出せず、安定した供給が可能である。また、同条件かつ油量が 5.0 L においても、Fig. 10 内の Area (b) に示すタンク上部に設置されたブリーザ室にオイルは到達しない。

この結果、サーキットにおけるスポーツ走行時にも、オイル吸い込み不良による油圧低下や、ブリーザおよび吸気側へのオイル流入によるオイル消費などの発生はなく、良好な潤滑性能を実現した。

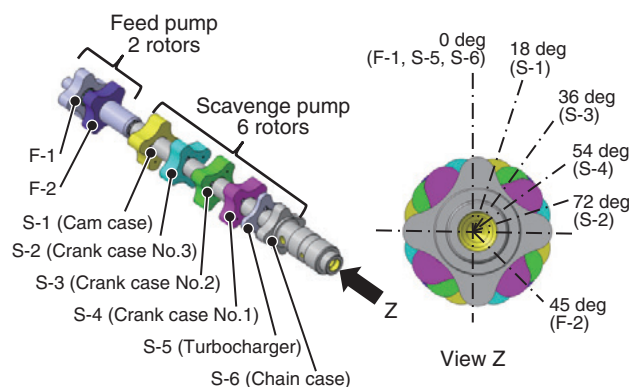


Fig. 8 Oil pump rotors

4.3. 冷却系

高出力化によりエンジン放熱量が増大するため、特に燃焼室壁面温度や排気ガス温度を低減することは重要である。本エンジンでは信頼性向上とノッキングの抑制を目的に、3ピースウォータージャケット構造⁽²⁾ (Fig. 11) を採用し、燃焼室およびエキゾーストポート周辺の積極的な冷却を図った。

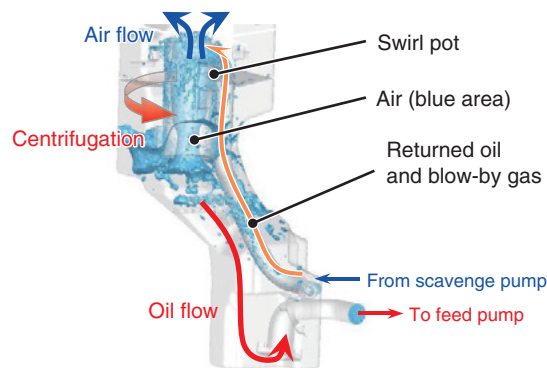


Fig. 9 Visualization of air separation in oil tank

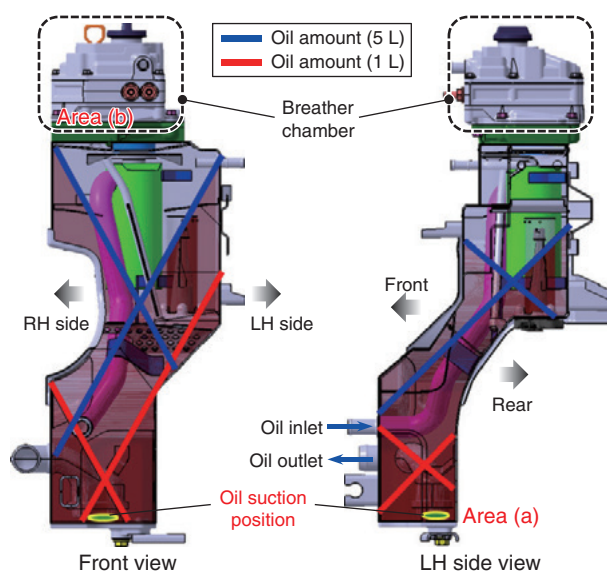


Fig. 10 Oil tank shape and oil level

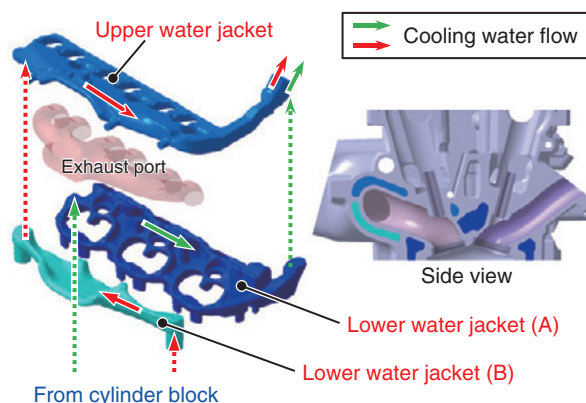


Fig. 11 3-piece water jacket

冷却水回路の検討には CFD を用いて冷却水流速分布、およびシリンダヘッド各部温度の解析をおこない、ウォータジャケットの形状を最適化した。流速分布の確認結果を Fig. 12 に示す。流れの剥離や滞留を抑制しつつ、熱負荷の高い燃焼室およびエキゾーストポート周辺には積極的に冷却水を流す形状にすることで、効率良い冷却を可能とした。

3 ピース化による伝熱面積の拡大や水流れの最適化により、従来の 3.5 L V 型 6 気筒自然吸気エンジンに対して約 14% の放熱量向上を実現した。また、シリンダヘッドの温度を低減することで熱応力の発生を抑制し、軽量、コンパクト化にも寄与した。

4.4. 動弁機構

エンジン本体の軽量、コンパクト化を図るため、スイングアーム式動弁機構 (Fig. 13) を採用した。これにより、シリンダヘッドは Honda 量産の 2.0 L 直列 4 気筒過給エンジン (DOHC) よりも断面積比で約 17% 小さく、3.5 L V 型 6 気筒自然吸気エンジン (SOHC) と同等サイズのコンパクト化を実現した。車両の限られたスペースで Vバンク角を 75 度まで広げつつ、エンジン両側に過給機の搭載を可能とし、レイアウト性の向上に寄与した。

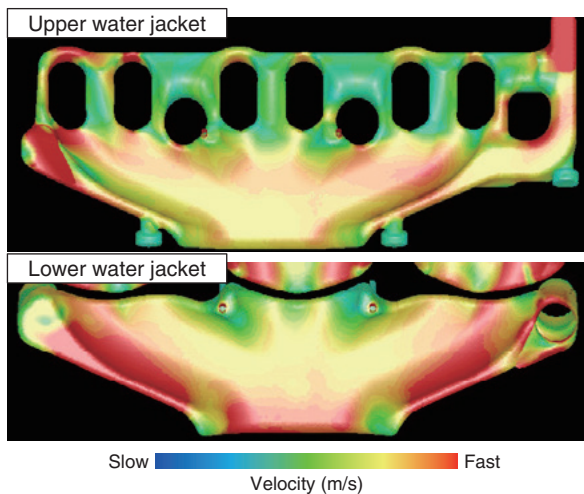


Fig. 12 Visualization of cooling water flow

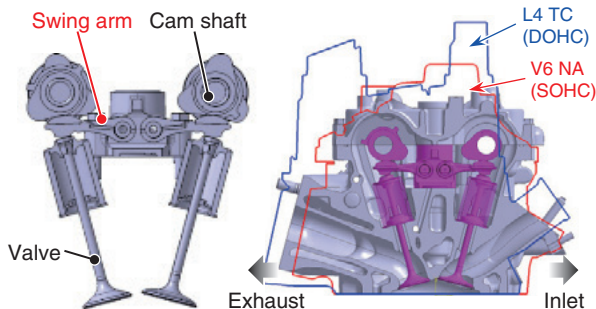


Fig. 13 Cylinder head layout

4.5. バルブタイミング駆動方式

バルブタイミング駆動方式は、発生荷重に対する信頼性向上とコンパクト化を図るため、チェーン駆動を採用した。Fig. 14 に示すようにリダクションチェーンを介して各バンクのカムを駆動させる 3 チェーン駆動方式とした。

駆動レイアウトの検討には CAE を用い、チェーン本数が異なる各レイアウトでチェーンに発生する荷重特性を比較した (Fig. 15)。いずれのチェーン本数も共振による荷重増加ポイントが存在するが、3 チェーン方式は左右バンクのカム駆動トルクが中間軸であるリダクションスプロケットを介して合成されることで、リダクションチェーンに伝達されるトルク振幅を低減することができるため、最大発生荷重が小さく、優位性のある結果が得られた。

また、リダクションチェーンはクランクシャフトの角速度変動の影響を大きく受けるため、チェーンテンショナのリリーフ油圧設定を適正化した。リリーフ油圧に対し、チェーン発生荷重とテンショナ変位はトレードオフになる。このためチェーン荷重が許容値以内となる中で、テンショナ変位を抑制可能なリリーフ油圧に設定した (Fig. 16)。

リダクションスプロケットの同軸上にはウォータポンプを配置することで、補機レイアウトのコンパクト化も同時に図った。

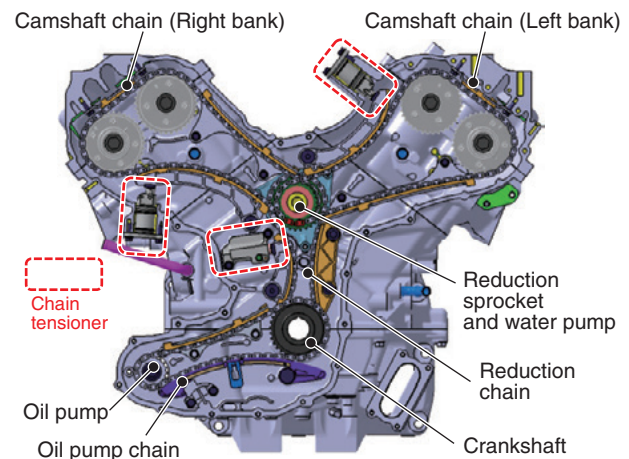


Fig. 14 Layout of reduction chain drive system

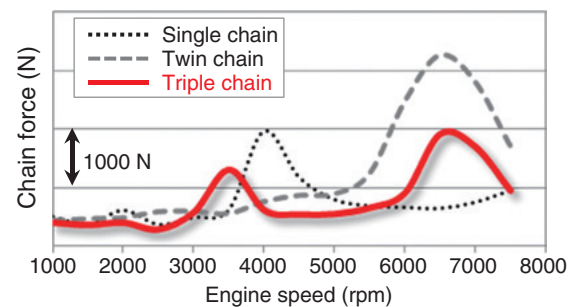


Fig. 15 Results of analysis of chain force

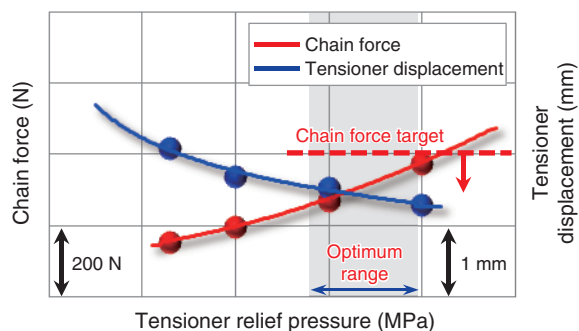


Fig. 16 Results of study of chain tensioner

5. 燃焼技術

高い出力性能と熱効率、および低エミッションを両立するため、燃焼系にはマルチホールインジェクタを用いたDIと高タンブルインテークポートによる急速安定燃焼技術^{(2), (3)}を採用した。これにより燃費およびエミッション性能向上を図った。また、高出力化のために左右バンク独立のツイン過給システム、DI+PI 燃料供給システムを採用した。これらの主要技術について紹介する。

5.1. 高タンブルインテークポート

高タンブルインテークポートを採用することにより、燃料と空気の混合を促進し、圧縮上死点付近での乱流エネルギーを高めることによって急速安定燃焼を実現した。

本エンジンのインテークポート形状を Fig. 17 に、タンブル比の実測結果を Fig. 18 に示す。従来の 3.5 L V 型 6 気筒自然吸気エンジンに対して、バルブリフト全域で 2 倍以上の高タンブル流動が得られ、燃焼安定性の向上に寄与した。

5.2. 過給技術

高出力化とレスポンス向上をねらいとして、電動ウェイトゲート式のモノスクロールターボチャージャを適用し

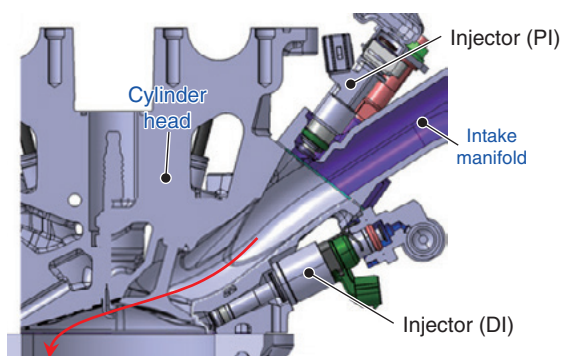


Fig. 17 Intake port layout

た。過給機を各バンクにそれぞれ配置するツインターボ方式とすることで、V 型縦置きエンジンをミッドシップに効率良くレイアウトすると共に、片側 3 気筒レイアウトとすることで排気干渉の影響を抑制した。過給機の選定には 1 次元シミュレーションを用いて全開運転時の性能を比較した。過給機の体格により低速トルクと最高出力性能はトレードオフの関係となるため、本エンジンでは目標出力を達成可能な小型の過給機を選定し、高出力性能と高トルクを両立させた (Fig. 19)。ターボチャージャはシリンダヘッドに直接マウントし、エキゾーストポートからタービンまでの管長を短縮し、過給レスポンスの向上を図った。

吸気側には高効率空冷インタークーラを適用し、エンジンの真横にレイアウトした (Fig. 20)。コンプレッサからスロットルまでの過給配管の管長を短縮することで、吸気圧損の低減を図り、過給レスポンスの向上をねらった。

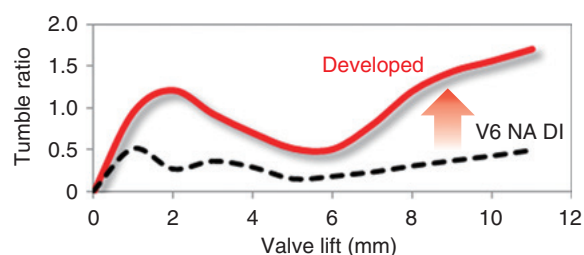


Fig. 18 Results of measurements of tumble ratio

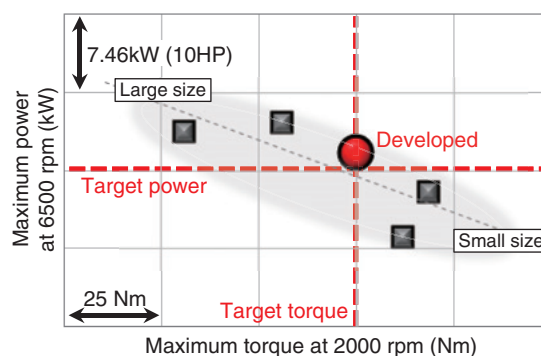


Fig. 19 Relationship between low-speed torque and maximum power

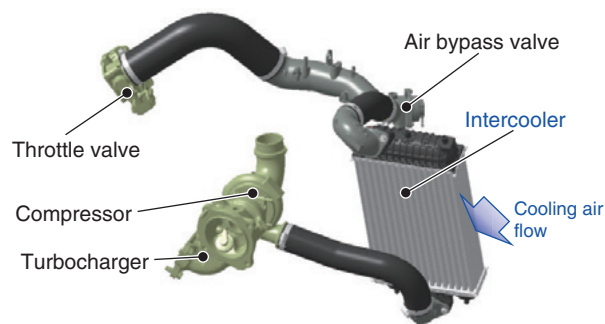


Fig. 20 Layout of turbocharger and cooling system

5.3. DI+PI 燃料供給システム

高出力化に伴う燃料流量増加に対応可能な燃料供給システムを構築するため、DI+PI 燃料供給システムを採用した。

燃料供給量増加のために DI インジェクタを大型化した場合、空気密度の小さい高地や高温環境化におけるアイドル時などの必要燃料量が微小な領域で燃料噴射量を適切に制御できない。これに対して、本エンジンでは DI インジェクタの流量レンジは従来の自然吸気エンジンと同等として低流量側の流量制御性を満足させつつ、高負荷運転時には PI で補填することで、燃料流量のワイドレンジ化を実現させた。

DI と PI のオペレーションは、燃焼安定性や正味燃料消費率 (BSFC)、エミッション性能から総合的に判断し、Fig. 21 のように設定した。

(1) 低回転の高負荷領域

Dual-VTC を用いた過給掃気領域であり、燃料が排気側に吹き抜けることを防止するため、DI を使用した。

(2) 高回転の高負荷領域

要求燃料流量を満足させるため、DI+PI 補填を実施した。

(3) パーシャル領域

パーシャル領域の設定にあたっては、実機により DI と PI の噴射比率による影響確認をおこなった。結果を Fig. 22 に示す。DI エンジンでは、タンブル流動の

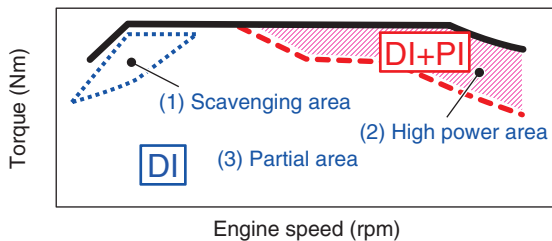


Fig. 21 DI+PI fuel injection system operation

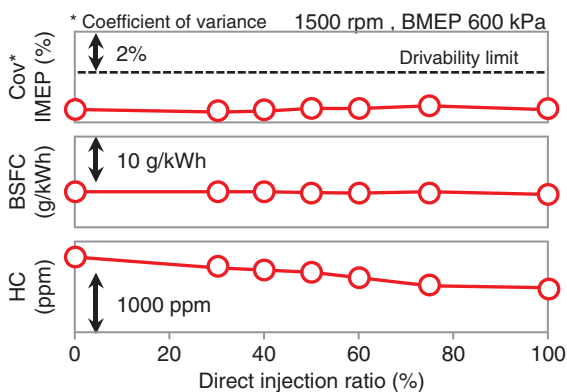


Fig. 22 Combustion characteristics by direct injection ratio

弱くなる低回転の低負荷領域において燃料の気化と混合が促進されず、燃焼安定性が低下することがある。本エンジンでは DI を基本とした燃焼設計をしており、低負荷でも強いタンブル流動が生成可能なポート形状を選定した。このため DI と PI の噴射比率に対して燃焼安定性と BSFC の変化はなく、高タンブル流動を用いた急速安定燃焼により、いずれの条件も良好な燃焼が得られている。高負荷時の強タンブル流動により PI 噴霧燃料がスリーブに付着することを抑制するため、PI 噴霧は下向きに設定した。このため、低負荷時の PI 噴射はポート下側への燃料付着が増大する。これにより、排気中の炭化水素 (HC) は DI に優位性がある。これらの結果より、パーシャル領域は DI のみを使用した。

これらのオペレーションをおこない、全運転領域で最適な燃料供給が可能なシステムを構築することができた。

6. 達成エンジン性能

6.1. 出力性能

本エンジンの出力およびトルク特性を Fig. 23 に示す。

最高出力は 373 kW (500HP) を 6500 rpm からレッドゾーン 7500 rpm まで発生し、最大トルクは 550 Nm を 2000 rpm から 6000 rpm まで発生させる。

車両の性能設計技術を用い、3 モータハイブリッドシステムを考慮し、車両の運動性能を満足するエンジン単体の出力目標を設定した。また、中間エンジン回転域はフラットトルクとすることでエンジン回転数の上昇に対して違和感なく、なめらかな加速特性を実現した。

システム全体での最高出力は 427 kW (573 HP)、最大トルク 646 Nm を発生し、新型 NSX にふさわしい高い出力性能を実現した。

6.2. 燃費性能

DI と高タンブルポートによる急速安定燃焼と Dual-

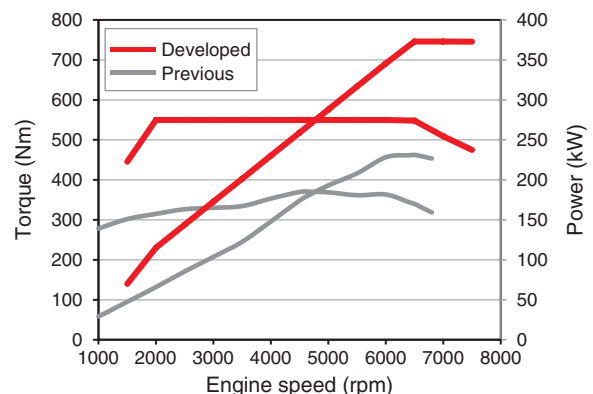


Fig. 23 Engine performance

VTCを用いた内部EGRの活用により、燃費の改善を図った。また、鉄溶射シリンダボアやクーリングチャネルピストン、高冷却シリンダヘッドにより燃焼室周辺の冷却性能を向上させ、ノッキングを抑制することで圧縮比10.0を実現した。この結果、広い運転範囲で良好なBSFC特性が得られ、最大熱効率36.3%を達成した (Fig. 24)。

実車においては、北米燃費モードでは21.1 mpg, 国内JC08モードでは12.4 km/Lの燃費性能を実現した。

6.3. エミッション性能

エミッションの低減には特に触媒冷間時のエンジン排出ガス量の低減と触媒の早期活性化が重要である。また、近年のすす排出規制の強化に対応するため、すすの発生要因となる燃料の筒内付着量を低減することが必要である。

従来のキャビティを用いたウォールガイド式の成層燃焼では、ピストン頂面への燃料付着は避けられない。本エンジンでは高タンブル流動とDIの2回噴射を組み合わせることで、ピストンへの燃料付着量を低減しつつ、点火プラグ近傍の弱成層燃焼を実現させた (Fig. 25) ⁽²⁾。

吸気行程と圧縮行程で2回噴射し、噴射量と噴射タイミングを適正化することで、燃焼が安定するプラグ近傍A/Fが得られ、従来に対してピストンへの燃料付着量を半分以下に抑えることができた。

燃焼安定性を高めた結果、点火時期を上死点前約20 degまでのリタードを可能とした。過給機の追加により熱容

量が増加し、触媒の暖機性能の低下が懸念となるが、エンジン始動後20 sec以内に300℃以上までの触媒暖機を実現した (Fig. 26)。この結果、モードエミッションは欧州Euro6bおよびUS ULEV125に適合可能とした。

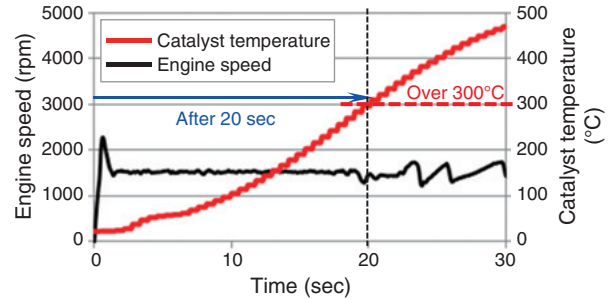


Fig. 26 Catalyst warm-up performance

7. まとめ

新型NSX用3.5 L V型6気筒過給エンジンにおいて、高い出力性能と環境性能、車両要求に合致した低重心かつコンパクトなエンジンレイアウトとスポーツ走行にも耐えるエンジン信頼性の並立を目標として開発した結果、以下を実現した。

- (1) 過給機の採用や、筒内直噴と高タンブルポートによる燃焼技術の適用、DI+PI燃料供給システムの採用により、最高出力373 kW (500 HP)、最大トルク550 Nmの高い出力特性、欧州Euro6bおよびUS ULEV125に適合したエミッション性能を両立した。
- (2) 鉄溶射シリンダボア、ドライサンプ潤滑システム、高冷却シリンダヘッド、スイングアーム式動弁機構、リダクションチェーン駆動方式の採用により、軽量かつコンパクトで低重心化を実現すると同時に、高出力化に対応し、スポーツ走行にも耐える信頼性を有するエンジン骨格を実現した。

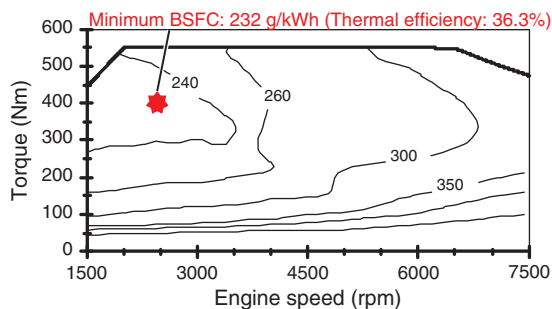


Fig. 24 Engine BSFC map

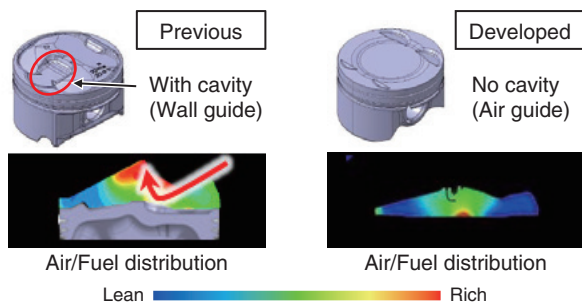


Fig. 25 Stratified combustion concept

参考文献

- (1) Furumata, S., Kakinuma, T., Tochiki, H.: Development of New 3.5 L V6 Turbocharged Gasoline Direct Injection Engine, SAE Technical Paper, 2016-01-1012, (2016)
- (2) 柿沼隆, 都知木博一, 古俣誠二, 舟根匠: 新型 3.5L V6 直噴ターボエンジンの開発, 自動車技術会 2016 年秋季大会 学術講演会講演予稿集, No. 1-125, p. 700-705, (2016)
- (3) 中野弘二, 和田裕介, 城野実考, 成廣繁: 新型直列 4 気筒ガソリン直噴過給ダウンサイジングエンジン, Honda R&D Technical Review, Vol. 28, No. 1, p. 133-139

■ 著 者 ■



舟 根 匠



古 俣 誠 二



柿 沼 隆



都 知 木 博 一

2018 年モデル N-BOX 用 CVT

New CVT for 2018 Model Year N-BOX

薮澤 英 夫*

Hideo NIRASAWA

畝 山 俊 和*

Toshikazu UNEYAMA

要 旨

2011 年に量産を開始した軽自動車用 CVT の基本骨格をもとに、高効率化を主目的に新 CVT の開発をおこない、2018 年モデル N-BOX に搭載した。

本 CVT は 2 系統吐出オイルポンプシステム、新 CVT フルードの採用およびプーリピストン径の拡大によるオイルポンプ仕事量の低減と、油面低減によるかくはん抵抗削減などの各部フリクション低減により伝達効率向上を図った。これらの技術により 2012 年モデル N-BOX 用 CVT に対して伝達効率を 2% 向上させた。

また駆動力を目標とするパワートレイン協調制御および新変速制御である G-design Shift 制御の採用により、ドライバの要求に素早く反応し、高い加速度の維持を実現することで爽快な走りを達成した。

ABSTRACT

A new CVT was developed based on the basic structure of the K-car CVT that started mass production in 2011, mainly with the goal of increasing efficiency. This new CVT was equipped on the 2018 model N-BOX.

The new CVT reduces oil pump workload with the dual-rotor oil pump system, new CVT fluid, and enlarged pulley piston diameters, and enhances transmission efficiency with reduced friction in various areas, including reduced stirring resistance due to decreased oil levels. With these technologies, transmission efficiency was enhanced by 2% over the 2012 model N-BOX CVT.

In addition, powertrain cooperative control has been adopted for better traction, together with the new shift control logic, G-design Shift logic. These changes provide quick response to driver demands and maintain high acceleration to achieve an exhilarating driving experience.

1. まえがき

近年、ますます地球温暖化等の環境問題が注目されており、自動車が排出する CO₂ の削減要求も一段と高まっている。燃費性能向上における変速機の果たす役割は大きく、またドライバに走る楽しさをもたらすドライバビリティも変速機の性能が多分に寄与する。

Honda は 1996 年モデルの CIVIC を皮切りに⁽¹⁾、省燃費性能と走る楽しさを両立する CVT の採用を拡大してきた。現在では海外向けも含め小型車⁽²⁾、中型車⁽³⁾のガソリンモデルに幅広く適用されている。

国内の軽自動車用としては、平行軸歯車式 1 次減速機構を特徴とした軽量でコンパクトな CVT を開発し⁽⁴⁾、2012 年モデル N-BOX への適用以降、順次搭載機種を拡大し軽自動車の省燃費化に貢献してきた。

今回 N-BOX のフルモデルチェンジにあたり、従来の軽自動車用 CVT の基本骨格をもとに、さらなる軽量化、伝達効率向上を実現しつつ、走る楽しさを進化させた新 CVT を開発した。本稿ではその基本構造および主要技術について紹介する。

2. 開発のねらい

新たに軽自動車用 CVT を開発するにあたり、下記項目を開発のねらいとした。

- (1) 油圧低減をはじめとしたオイルポンプ仕事量の低減と各部フリクション低減による伝達効率の向上
- (2) パワートレイン協調制御と CVT 変速制御の進化によるドライバビリティの向上

*四輪 R&D センター

3. 主要諸元と基本構造

2018 年モデル N-BOX 用 CVT(以下, 本 CVT)と 2012 年モデル N-BOX 用 CVT(以下, 従来 CVT)を比較した主要諸元を Table 1 に示す。また, 本 CVT の外観図を Fig. 1, 主断面を Fig. 2 に示す。プーリ軸間距離やプーリ部減速比は従来 CVT と同一設定とし, 最終減速比については車体軽量化に合わせ従来 CVT に対しハイレシオ化させた。

軸配置については従来 CVT と同様とし, 無段変速機構の上流に平行軸式の 1 次減速機構を備え, 2 次減速機構を廃止した 4 軸構成とした。ケース構成についてもトランスミッションケースとトルクコンバータケースの 2 点からなるシンプルな構成を踏襲しつつ, 新しい油圧制御システムやプーリ径拡大に対応させる変更をおこなった。

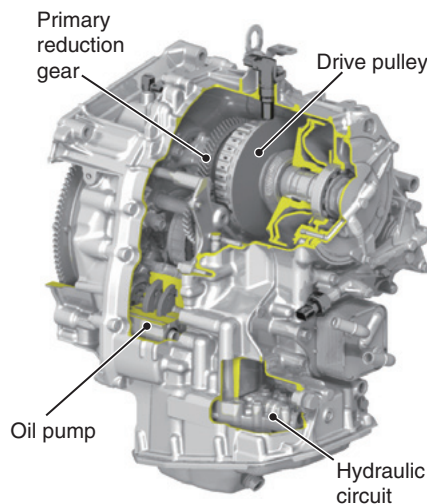


Fig. 1 Appearance of new CVT

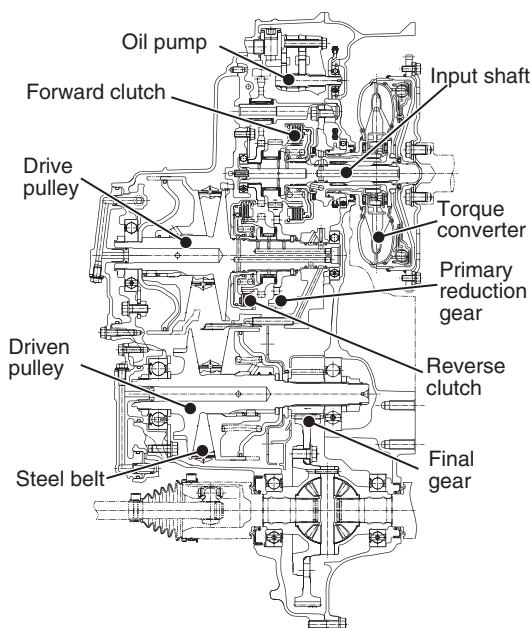


Fig. 2 Main section of new CVT

Table 1 Specifications (NA model)

			2012 model year N-BOX	2018 model year N-BOX
Ratio	Primary reduction	Forward	1.605	1.605
		Reverse	1.187	1.290
	Pulley (low – overdrive)		2.293 - 0.420	2.293 - 0.420
	Final gear		5.176	4.318
Dimension	Overall length [mm]		344.5	344.5
	Pulley axis distance [mm]		147	147
Weight (Wet) [kg]			59.6	56.9

本 CVT に組み合わされるエンジンには自然吸気 (NA) 仕様とターボチャージャ (TC) 仕様の 2 種類があり, トルクコンバータ, 前進用一次減速比と最終減速比の違いで対応する。

4. 伝達効率向上

CVT の伝達効率低下要因において, 金属ベルトフリクション, オイルポンプ駆動に伴う損失および, かくはん抵抗の三つの占める割合が大きい。本 CVT においては, 2 系統吐出オイルポンプシステム, 新 CVT フルードの採用, およびプーリピストン径拡大によりオイルポンプ吐出圧を下げ, ポンプ駆動トルクを低減した。また油面を低下させることでかくはん抵抗を減らし, 伝達効率向上を図った。

4.1. 2 系統吐出オイルポンプシステム

本 CVT では 2 対のロータを備えたオイルポンプと, 切替バルブおよび切替制御用ソレノイドを備えた油圧回路からなる 2 系統吐出オイルポンプシステムを採用し, オイルポンプ駆動トルクの低減を実現した。

4.1.1. 動作原理と油圧回路

Fig. 3(a) に従来システムのオイルポンプにおけるエネルギー損失の概念図を示す。オイルポンプの吐出圧であるライン圧は運転条件により決まる必要油圧をまかなえるように制御されている。従来のシステムでは全吐出量を一旦ライン圧まで昇圧し, 順次減圧してプーリ側圧, クラッチ圧, トルクコンバータ圧, 潤滑圧を調圧するため, 特に高油圧が必要な運転条件では損失が大きかった。

本システムでは, 従来 1 系統だった吐出を 2 系統に分け, 一方からは直接低圧の潤滑圧を吐出させることで Fig.

3(b) に示すようにオイルポンプ仕事量の低減を可能とした。具体的には Fig. 4 に示す油圧回路の通り、独立した吐出油路を持つ2対のオイルポンプロータを配し、一方のメインロータの吐出は常にメインレギュレータバルブによりライン圧に調圧される。他方のサブロータは吐出油路中の切替バルブにより、メインレギュレータバルブに送られライン圧に調圧される状態と、潤滑レギュレータバルブに送られ潤滑圧に調圧される状態を選択できる構造とした。急変速時などプリー側圧に高圧大流量が必要な運転状況では、両方のロータの吐出をライン圧とすることで十分な吐出量を確保し、定常運転や緩加速中はサブロータの吐出を潤滑圧とすることで損失の低減を図る。

以下、サブロータの吐出をメインレギュレータバルブでライン圧に調圧する状態を高圧モード、潤滑レギュレータバルブで潤滑圧に調圧する状態を潤滑モードと呼ぶ。

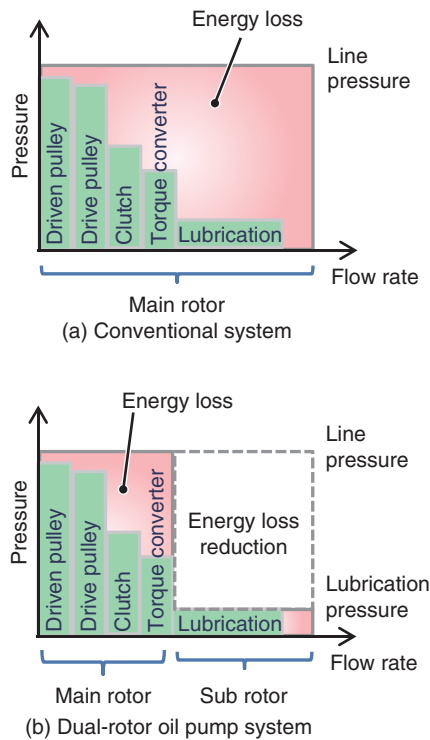


Fig. 3 Concept of energy loss reduction

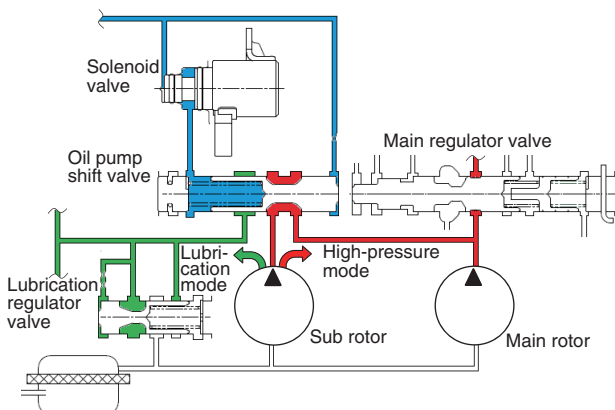


Fig. 4 Hydraulic circuit

4.1.2. オイルポンプの構造と仕様

Fig. 5 にオイルポンプの構造を示す。メインロータおよびサブロータを単一のオイルポンプ内にプレートと呼ばれる隔壁を挟んで配置し、2対のロータを1本のシャフトで駆動するコンパクトな構造とした。吸入口は共用とし、それぞれのロータに対応する独立した吐出口を設置した。

メインロータおよびサブロータの理論吐出量は、実吐出量の合計を従来システムと同等とすることと、極力省燃費効果を高めることをねらいとして、以下のように設定した。

実吐出量が同等となるメインロータ、サブロータの理論吐出量の組合せにおいて、メインロータの理論吐出量が過小であれば潤滑モードにおける駆動トルクは小さくなるものの、後述する収支判定により、潤滑モードで走行できる頻度が少なくなるため、省燃費効果は小さい。一方でメインロータの理論吐出量が過大な場合、潤滑モードで走れる頻度は増加するが、その時の駆動トルクの低減量は小さく、やはり大きな省燃費効果は得られない。

吐出量を設定するうえで、実吐出量の合算が従来のオイルポンプと同等となるメインロータとサブロータの理論吐出量の組合せにおける、定められた走行モードでのオイルポンプ駆動に要する仕事量を算出した。その結果を Fig. 6 に、メインロータ理論吐出量に対する従来システムとの仕

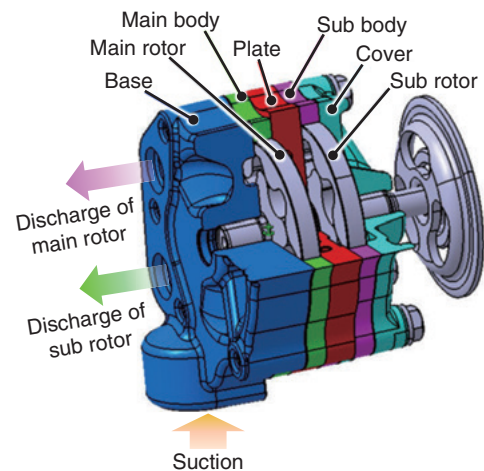


Fig. 5 Construction of dual-rotor oil pump

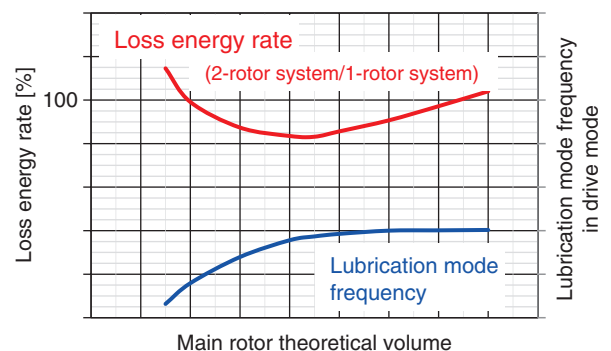


Fig. 6 Setting of oil pump volume

事量低減率および、潤滑モードで運転可能な時間頻度として示す。本 CVT では、組み合わせの中で仕事量が最小となる理論吐出量を選択することで、必要な吐出量の確保と燃費性能向上の両立を図った。

Fig. 7 に一例としてライン圧を 1 MPa で運転した場合のオイルポンプ駆動トルクを示す。潤滑モードでは従来に比べ約 30% の駆動トルク低下が得られた。

4.1.3. 吐出モード切替制御

高圧モードと潤滑モードの切り替えは、運転状態における流量収支を常時計算し、その結果に応じてモードを切り替える制御を採用した。

具体的にはメインポンプの吐出量が、変速に要するプーリ側圧流量、必要トルクコンバータ流量、各部のリーク量の総和に対し十分上回っている場合は潤滑モードとし、不足する場合は高圧モードとする制御を実施する (Fig. 8)。

4.2. 新 CVT フルード

本 CVT では、2013 年モデル中型車用 CVT から順次採用してきた新 CVT フルード⁽³⁾を採用した。その高い金属摩擦係数の効果によりトルク伝達に必要なベルトクランプ力を低下させ、ライン圧を低減させた。

4.3. プーリピストン径拡大

システムの最大圧は運転状況によりドライブプーリ側圧

もしくはドリブンプーリ側圧のいずれかになる設定であるが、ドライブプーリのピストン径拡大によるドライブプーリ側圧の低減は、特に定常走行中のライン圧低減に効果的である。本 CVT では、ドライブプーリのピストン外径を $\phi 150$ から $\phi 160$ に拡大し、およそ 15% の受圧面積拡大をおこなった。前述の新 CVT フルードによるクランプ力低減効果や、CAE を用いて効果的に応力を低減させることで (Fig. 9)、ピストン径の拡大と軽量化の両立を達成した。

4.4. オイルポンプ駆動トルク低減効果

Fig. 10 に 60 km/h 定常走行におけるオイルポンプ駆動トルク低減効果を示す。2 系統吐出オイルポンプシステムの採用による損失の低減と、新 CVT フルードの採用およびドライブプーリピストン径拡大によるライン圧低減により同条件のオイルポンプ駆動トルクを約 37% 低減した。

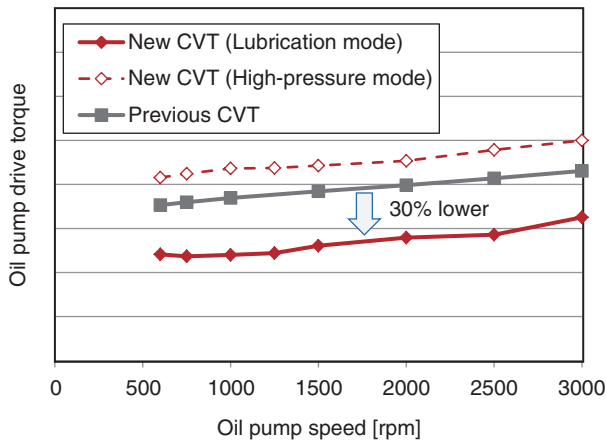


Fig. 7 Oil pump drive torque characteristic

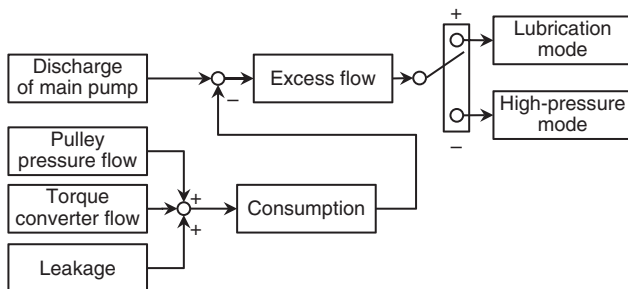
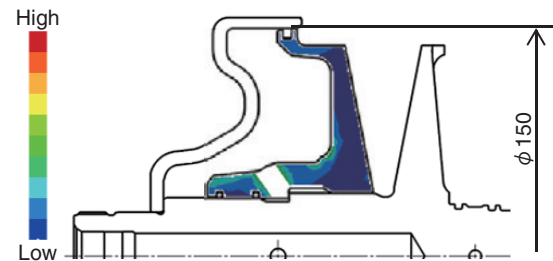
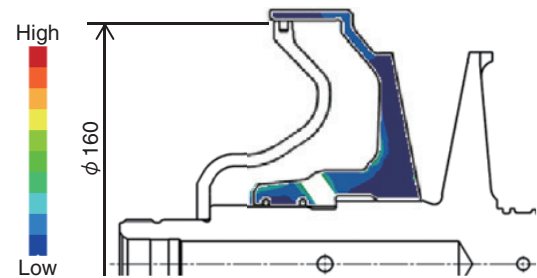


Fig. 8 Judgment of flow balance



(a) Previous CVT



(b) New CVT

Fig. 9 Drive pulley construction and stress contour

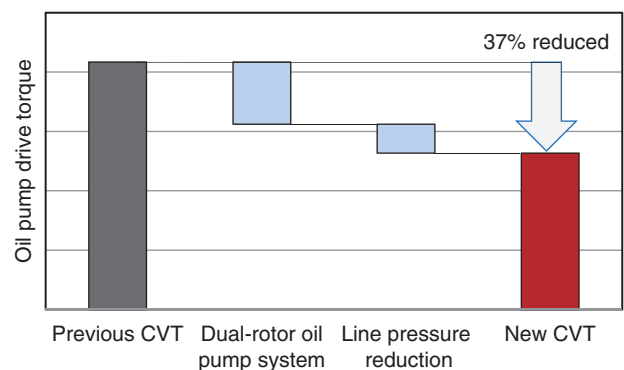


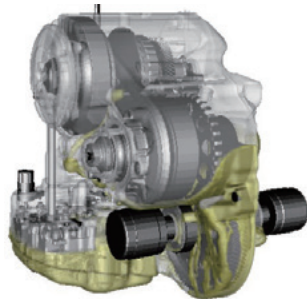
Fig. 10 Reduction of oil pump drive torque

4.5. フリクション低減

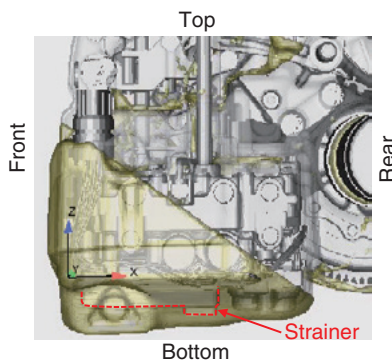
その他回転しゅう動部となるオイルシールおよびシールリングについては低フリクションタイプに変更するとともに、油面を低減することでギヤのかくはん抵抗低減をおこない、各部のフリクション低減を図った。

油面低減はかくはん抵抗を減少させる反面、加減速時や左右旋回時に変速機内でオイルが偏った際にストレーナから空気を吸入し油圧低下を引き起こす懸念がある。オイルがギヤの掻き揚げや慣性力により、変速機内の複雑な形状の隙間を移動する様子を正確に予測するのは容易ではない。従来の開発においては油面高さとストレーナの吸い口位置の設定は実験による確認が必要であった。

本開発では設計段階でギヤによるオイルかくはんとエアの巻き込みをモデル化したCFD^{(5), (6)}をおこない、加減速や左右旋回時の変速機内のオイル挙動を予測し、ストレー



(a) Fluid sloshing by gears



(b) Fluid shift during deceleration

Fig. 11 Simulated trajectory of new CVT fluid

ナ吸い口位置および必要油量を効率的に適正化し約 5 mm の油面低減をおこなった。Fig. 11(a) にギヤおよびプーリーによるオイルかくはんの様子を解析した結果と Fig. 11(b) に減速時に慣性力でオイルが偏った様子を解析した結果を示す。

Fig. 12 に新旧 CVT の車速別定常走行条件での伝達効率を示す。これまで述べた技術により定常走行における伝達効率を 2% 向上させた。またプーリシャフトの軽量化や油量削減などにより CVT の重量を約 2.7 kg 低減した。

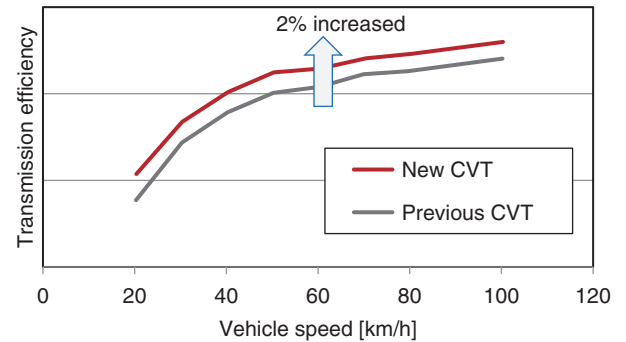


Fig. 12 Increased transmission efficiency

5. ドライブビリティ向上

本 CVT ではドライブフィール向上を目的に、駆動力を目標値とするパワートレイン協調制御およびドライバの要求に素早く反応し、高く伸びのある加速感を維持する新変速制御 (G-design Shift 制御) を採用した。これらの制御をドライバの感覚に合うように最適設計することで、爽快でスポーティなドライブフィールを達成した。

5.1. パワートレイン協調制御

Fig. 13 に従来のドライブバイワイヤ協調制御および新たに採用した駆動力を目標値とするパワートレイン協調制御の制御構造を示す。従来制御では、アクセルペダル開度に応じたスロットル開度となるため、CVT のレシオ変化に

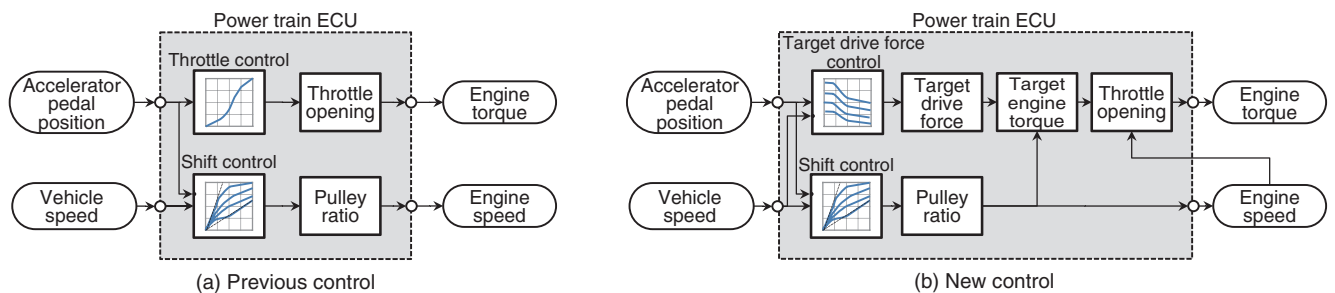


Fig. 13 Schematic diagram of cooperative control

よりエンジン回転が上昇すると、エンジン負荷が下がることで発生トルクが低下し、加速に伴い徐々に加速度が低下する傾向を示していた。

本 CVT では、駆動力を目標値とするパワートレイン協調制御を採用することにより CVT のレシオ変化に応じてエンジントルク出力が決定されるため、回転上昇によるエンジントルク低下の抑制が可能となった。

5.2. G-design Shift 制御

G-design Shift 制御では、ドライバーが操作したアクセルペダル開度およびアクセルペダルの踏み込み速度から明確な加速意志があると判定した場合、専用の変速特性に切り替えることで素早い反応と高い加速度を維持する変速特性とした。

5.3. 発進加速時の伸び感

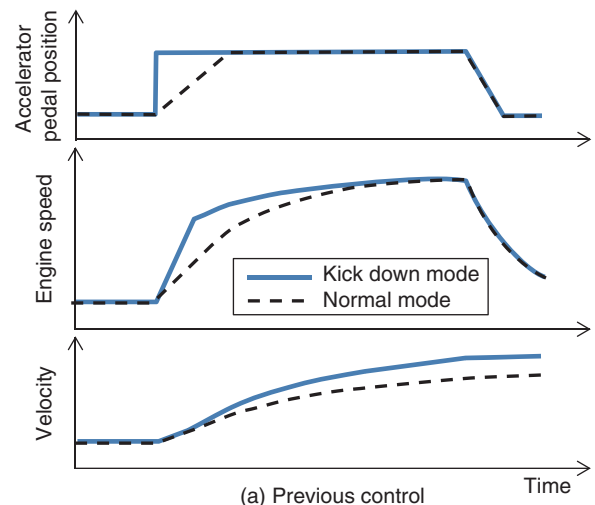
停止中など低車速域からの発進において、ドライバーの加速意志判定に応じて発進専用の変速特性に切り替え、エンジン回転上昇が継続していく変速特性とし、高い加速度を維持する伸びやかな発進加速性能を実現した (Fig. 14)。

5.4. キックダウン加速時のダイレクト感

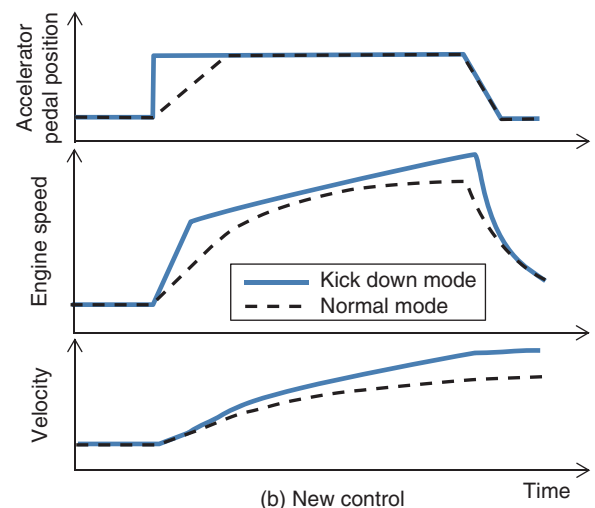
本 CVT では、キックダウンによるステップ変速後の変速特性を見直した。Fig. 15 に新旧の変速特性のイメージ図を示す。従来制御では、キックダウンによるステップ変速後は、通常モードの変速特性に収束させる変速制御としていたが、本 CVT ではキックダウンによるステップ変速後の変速特性を専用設定とし、車速とエンジン回転数が同期して上昇していく変速特性とした。

ステップ変速後の変速特性は、アクセルペダル開度に応

じてエンジン回転数が上昇する傾きを最適設計し、直線的にエンジン回転が吹け上がるダイレクト感と高い加速度を維持する加速性能を実現した (Fig. 16)。



(a) Previous control



(b) New control

Fig. 15 Kick down shift control

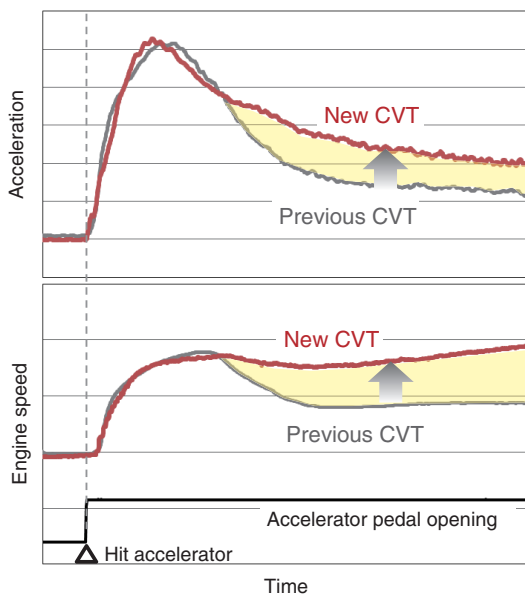


Fig. 14 Launch acceleration characteristics

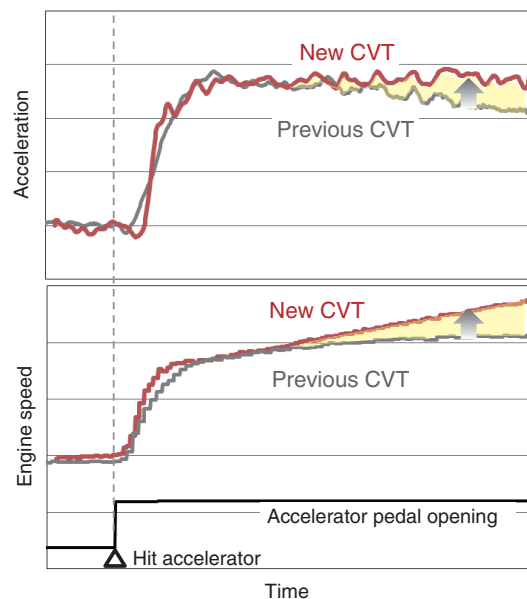


Fig. 16 Kick down characteristics

6. まとめ

軽自動車用 CVT の開発をおこない、下記の結果を得た。

- (1) 2 系統吐出オイルポンプをはじめとした伝達効率向上技術により、効率 2% 向上を達成した。
- (2) パワートレイン協調制御と新変速制御により、ドライバの感覚に合った加速フィーリングを実現した。

参考文献

- (1) 大藪耕平, 青木隆: 全電子制御金属ベルト CVT の開発, HONDA R&D Technical Review, Vol.8, p.21-33
- (2) 神田知幸, 戸塚博彦, 大沼正志, 首藤憲正, 平田智宏, 小形卯京: グローバル小型車用新 CVT の開発, Honda R&D Technical Review, Vol.26, No.1, p.40-45
- (3) 犬飼浩一郎, 柴原章宏, 村上康則, 内野雄之, 小島三千夫, 西山恵似地: 中型車用 新型 CVT の開発, Honda R&D Technical Review, Vol.24, No.2, p.47-52
- (4) 中村敬, 羽生恵一, 小西康一: 軽自動車用新型 CVT の開発, Honda R&D Technical Review, Vol.24, No.1, p.21-26
- (5) 三枝大城, 河合信治: 自動車用トランスミッション内部の潤滑性能予測技術, Honda R&D Technical Review, Vol.25, No.2, p.125-130
- (6) Saegusa, D., Kawai, S.: CFD Analysis of Lubricant Fluid Flow in Automotive Transmission, SAE Technical Paper, 2014-01-1772, (2014)

■ 著 者 ■



荻澤 英夫



畝山 俊和

動的挙動解析によるハーフトロイダルバリエータの スリップ安全率設計

Design of Safety Factor for Slip of Half-toroidal Variator by Dynamic Behavior Analysis

田 中 優 洋*
Masahiro TANAKA

齋 藤 俊 博*
Toshihiro SAITO

宮 本 浩 二**
Koji MIYAMOTO

要 旨

ハーフトロイダルバリエータの動力伝達特性を把握するために、動的挙動解析によってそのトラクション係数を予測する技術を開発した。本手法において、バリエータのモデル化には実動中の各部の弾性変形を再現できるように有限要素法を採用した。トラクション面におけるトラクションフルードのせん断特性を反映するため、4円筒試験を基に摩擦力を同定して挙動解析モデルの接触面に用いた。レシオ制御にはトロイダルバリエータの変速原理に基づいたフィードバック制御を適用した。この技術を用いてハーフトロイダルバリエータのトラクション係数に対するスリップ率の変化を定量的に予測することで、その安全率を設定することが可能となった。

ABSTRACT

In order to determine the power transmission characteristics of half-toroidal variators, a dynamic behavior analysis technique was developed to predict the traction coefficient. The approach uses the finite element method so that the elastic deformation of the parts in actual operation can be reproduced in variator modeling. As the technique reflects the shear characteristics of the traction fluid on the traction surface, frictional force was identified based on a four-roller test and used for the contact surface in the behavior analysis model. To control ratios, feedback control was applied based on the shifting mechanism of the toroidal variator. Using this technique to quantitatively predict the change in slip rate for the traction coefficient of the half-toroidal variator allows for the corresponding safety factor to be established.

1. まえがき

昨今、地球温暖化を始めとする環境問題への対応要求が高まり続けている。この要求の中、自動車開発においてもエンジンの効率向上やパワートレインの電動化などにより、環境性能の向上がなされている。トランスミッションにおいては、発進時の必要駆動力を維持しつつ巡航時の燃費を抑えるためにレシオカバレッジの拡大が求められる。有段ATでは例えば9速といった多段化によりレシオカバレッジ9.823を実現している⁽¹⁾。金属ベルト式CVTでも、副変速機を組み合わせることにより8.7のレシオカバレッジのもの⁽²⁾が実用化されている。

より一層のレシオカバレッジ拡大を可能とするトランス

ミッションとして変速比無限大変速機 (Infinitely Variable Transmission: IVT)⁽³⁾が考えられる。IVTはエンジン入力回転数に対してトランスミッション出力回転数をゼロにレシオ設定することができる。この時のレシオがGeared Neutral (GN)点であり、この点近傍では深い発進変速比を得ることができる。そのためトルクコンバータや発進用クラッチを必要とせず、滑り損失の低減や部品点数の削減が期待できる。

著者らは、変速機構部にハーフトロイダルバリエータを用いたIVTの開発をおこなった。トロイダル式が金属ベルト式に対して優位な点として、変速速度が速いことが挙げられる。バリエータ変速比を最大増速側から最大減速側まで変化させるために、金属ベルト式はプーリを20 mm程

* 四輪 R&D センター

** 株式会社アイティーオー

度ストロークさせる必要があるがトロイダル式ではパワーローラを1 mm 程度オフセットさせれば良いためである。この特長により、例えばキックダウン時の応答性を向上させることができ、加速時のタイムラグを短縮することが可能となる。また、高速回転域での使用時の伝達効率が高いという報告もされている⁽⁴⁾。

トロイダルバリエータはトラクションドライブにより動力伝達をおこなう変速機である。トラクションドライブとは二つの物体間に介在するトラクションフルードのせん断力によって動力を伝達する機構である。この時、二面間を高圧で押し付けることで、トラクションフルードは固体相にガラス転移する⁽⁵⁾。このせん断力と押付力の比であるトラクション係数を把握し、運転中に使用する値を適切に設定することは伝達効率およびスリップ信頼性の向上に繋がる。高いトラクション係数での運転は伝達効率向上に繋がるが、限界値を超えるとグロススリップ(過大滑り)状態となり動力伝達ができなくなる。

トラクション係数の予測⁽⁶⁾や実測⁽⁷⁾はこれまでもおこなわれているが、これらの研究ではその限界値に着目されており、スリップ率との関係については詳細には言及されていない。そこで本稿ではハーフトロイダルバリエータの動的挙動解析技術を開発し、実動中のトラクション係数予測をおこなった。その結果、使用するトラクション係数に対する伝達効率およびスリップ率の関係を定量的に予測することが可能となった。またその安全率の設定手法についても報告する。

2. 横置き型ハーフトロイダル IVT

2.1. IVT の構成

Fig. 1 に試作した前輪駆動車用 IVT の断面図を、Fig. 2 に IVT 増速比とバリエータ増速比の関係を示す。ダブルキャビティ式のハーフトロイダルバリエータを入力軸に配置し、動力分割用のプラネタリギヤおよびモード切替用の Low モードクラッチと High モードクラッチをカウンタ軸に配置した。ここで、Low モードとは主に発進や後退時に使用するモードであり、GN 点を含むレシオ幅に設定した。High モードはクルーズ条件を含むいわゆる CVT モードである。

2.2. ハーフトロイダルバリエータの動力伝達機構

Fig. 3 にダブルキャビティ式ハーフトロイダルバリエータの外観を、Fig. 4 に断面図を示す。車両への横向き搭載を可能とするため、縦置き型⁽⁸⁾と比較して、前後キャビティの出力ディスクおよび出力ギヤの一体化⁽⁹⁾、入力軸と入力ディスクのはめあいのインボリュートスプライン化などの変更をすることで全長の短縮をおこなっている。パワーローラはスラスト軸受を介してトラニオンによって支

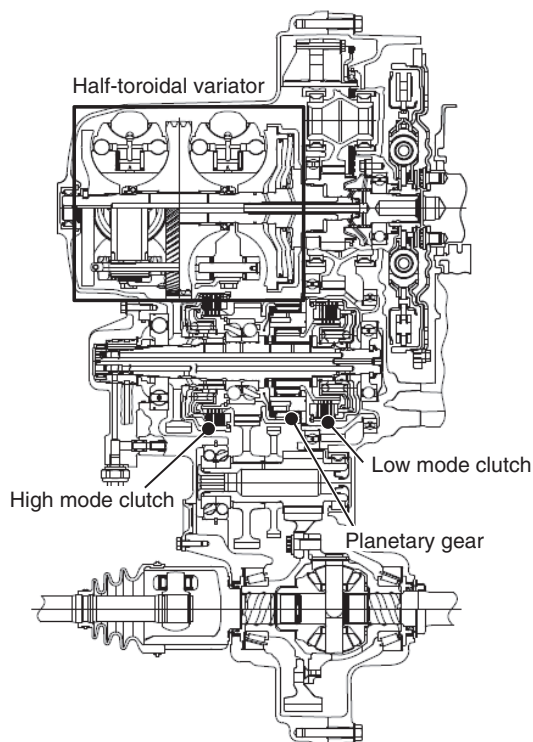


Fig. 1 Cross section of half-toroidal IVT

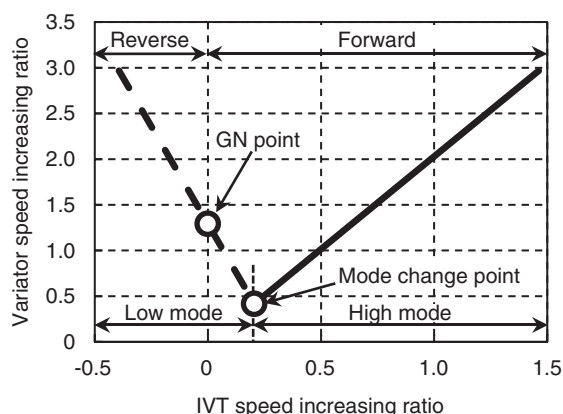


Fig. 2 Relationship between variator and IVT speed increasing ratio



Fig. 3 Double-cavity half-toroidal variator

持される。油圧ローディングピストンによって発生される軸力により、パワーローラが入力ディスクと出力ディスクに挟まれながら回転することで、Fig. 5 に示すようなトルクフローで駆動力が伝達される。

トロイダルバリエータのレシオは、パワーローラを傾転させて r_1 と r_2 の比を変更することで変化させる (Fig. 6)。 r_1 は入力ディスク上のパワーローラとの接触点半径、 r_2 は出力ディスク上のパワーローラとの接触点半径である。

2.3. 変速原理

Fig. 7 にトロイダルバリエータの変速原理を示す。ここ

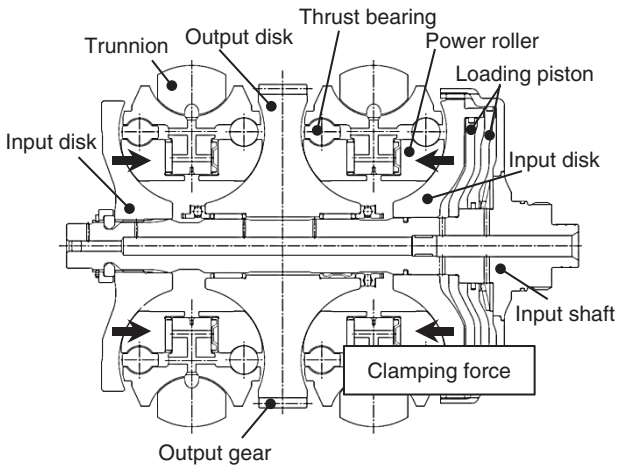


Fig. 4 Cross section of double-cavity half-toroidal variator

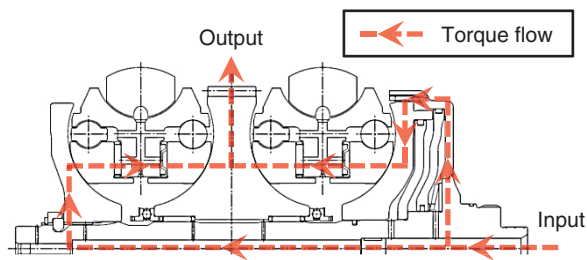


Fig. 5 Torque flow of double-cavity half-toroidal variator

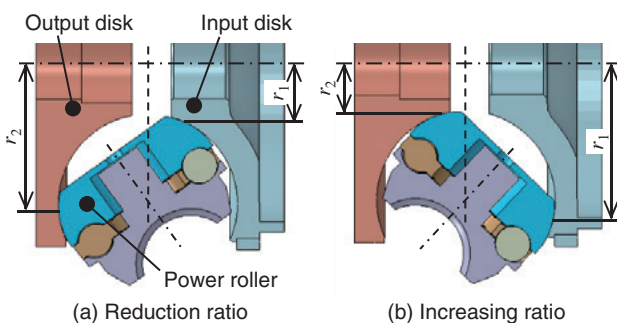


Fig. 6 Relationship between ratio and contact radius

で V_{id} は入力ディスク、 V_{od} は出力ディスク、 V_{pr} はパワーローラの各接点における周方向速度である。Fig. 7(a) のようにパワーローラの自転軸が入出力ディスクの回転軸を含む xz 平面上にあるとき、 V_{id} と V_{pr} の向きは一致し、パワーローラは傾転せずレシオは定常状態となる。Fig. 7(b) のようにパワーローラを y 軸方向へわずかにオフセットさせると、 V_{id} と V_{pr} の方向に差が生じる。この差により傾転方向の摩擦力が生じることでパワーローラが傾転運動をし始め、変速状態に移る。オフセットをもとに戻すと、傾転運動はそこで止まり定常レシオの状態になる。逆の方向に変速させたい場合は反対方向にパワーローラをオフセットさせる。

パワーローラのオフセットは、トラニオン下部に設けた油圧ピストンによっておこなう (Fig. 8)。ピストンの上部および下部にそれぞれ油圧 P_{high} 、 P_{low} を与え、増速側に変速させるときは P_{high} を、減速側に変速させるときは P_{low} を増加させることで圧力差を与え、トラニオンを上下に動かす。

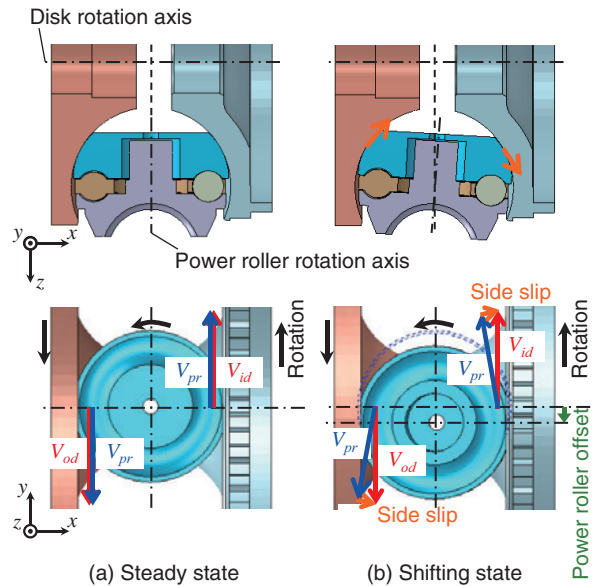


Fig. 7 Shifting mechanism

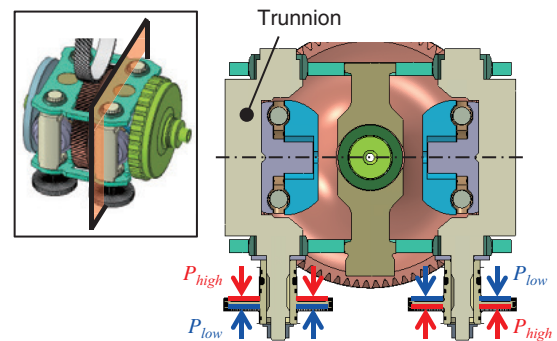


Fig. 8 Shifting piston

2.4. 動力伝達特性

Fig. 9 にハーフトロイダルバリエータの動力伝達特性 (M -Slip 特性) の概念図を示す. ハーフトロイダルバリエータのトラクション係数を M とし, 式 (1) のように定義する.

$$M = \frac{T_{cav}}{n \cdot r_1 \cdot F_c} \quad (1)$$

ここで T_{cav} はキャビティあたりの伝達トルク, n はキャビティあたりのパワーローラの個数, F_c はパワーローラと入力ディスク間の押付力である. 式 (1) の関係より, 伝達トルクに対して押付力が大きくなるほど M の値は小さくなる. この押付力 F_c は本章第2節で述べた油圧ローディング

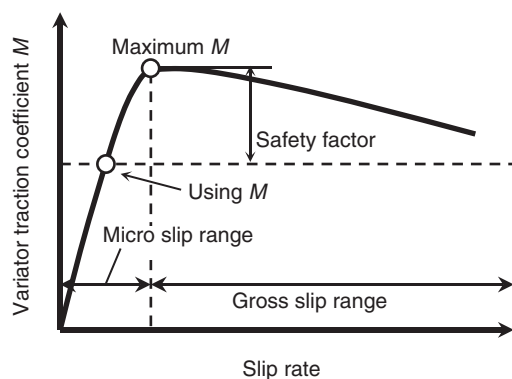


Fig. 9 Traction characteristic of variator

による軸力によって制御する. 伝達トルクに対して必要な軸力が不足するとバリエータはグロススリップ状態となりトルク伝達ができなくなる. 一方で過剰な軸力を与えることは伝達効率の低下を招くことが知られている⁽¹⁰⁾. トラクションドライブを成立させ, かつ伝達効率を低下させないためには, 運転状態に合わせて過不足なく軸力を発生させる必要がある. すなわち M の限界値をあらかじめ把握した上で, その安全率を適切に確保した状態でバリエータを運転しなければならない.

3. ねらいと目標

ハーフトロイダルバリエータの動力伝達特性を予測し, グロススリップに対する安全率をシミュレーションによって設定するため, 以下の項目を目標に開発をおこなった.

- (1) トラクションフルードのせん断特性を反映したバリエータ動的挙動解析技術の構築
- (2) トラクション係数 M と伝達効率の関係の定量化
- (3) トラクション面のスピン状態の可視化

4. ハーフトロイダルバリエータの動的挙動解析技術

4.1. トラクションフルード特性の同定

トラクションフルードのせん断特性をシミュレーションに反映するため, 実測値を基に同定をおこなった. Fig. 10 はトラクションフルードの限界せん断強度 τ_L [MPa] と圧

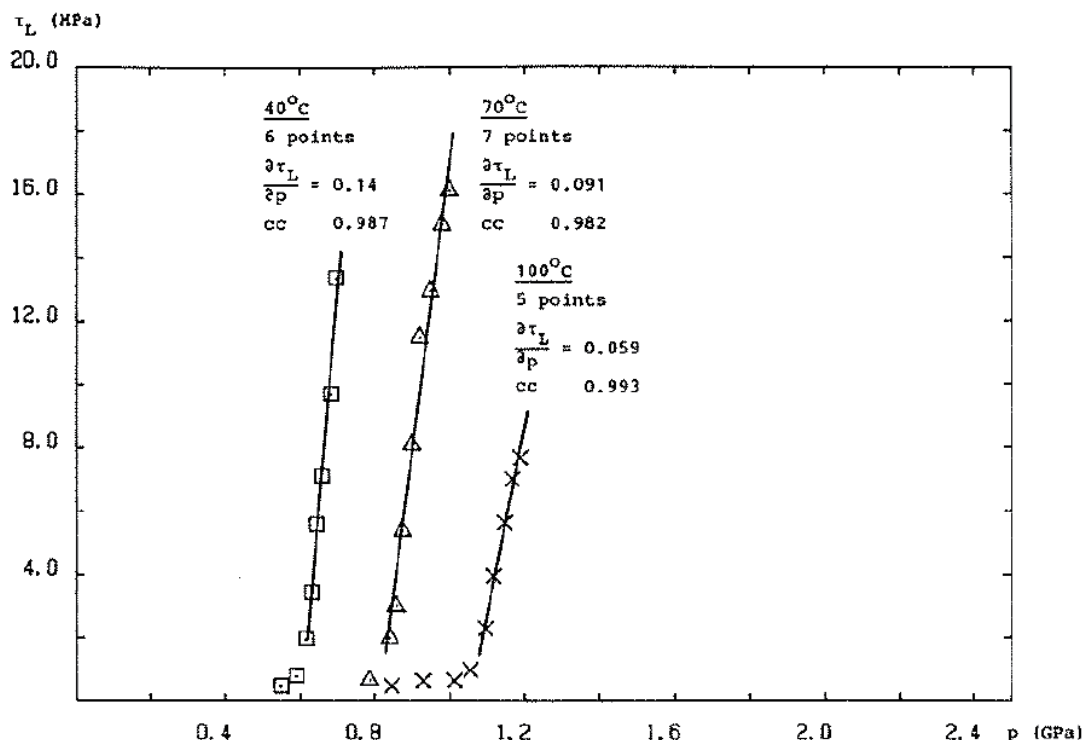


Fig. 10 Limiting shear strength for lubricant No. 9, traction fluid, as a function of pressure and temperature

力 p [GPa]の関係の例⁽¹¹⁾である。このようにトラクションフルードは高面圧条件下においてせん断強度が急激に高くなる特性をもつことが知られている。また油温およびトラクションフルードを挟む2面のすべり速度によってもせん断特性は変化する。したがって、使用するトラクションフルードのせん断力を面圧、温度、およびすべり速度をパラメータとして計測した。

トラクションフルード特性の計測には、Fig. 11 に示すような4円筒試験装置⁽¹²⁾を用いた。等速で自転する三つのアウトローラに対し、センタローラに強制的に回転速度差を与えることで相対すべり速度をコントロールすることが可能となっている。ただし4円筒試験装置では各ローラの回転軸が平行であるため、トロイダルバリエータで生じるようなトラクション面のスピンは発生しない。

挙動解析モデルではトラクションドライブ現象を摩擦伝達モデルとして扱うため、トラクションフルードのせん断力を接触面の摩擦力に置き換える必要がある。そこで、4円筒試験装置の挙動解析モデル (Fig. 12) を作成し、Fig. 13 のように計測結果と等しいトルク応答が得られるよう摩擦特性を同定した。同定モデルは弾性体とし、メッシュサイズはローラのなめらかな転動挙動が表現可能な大きさとした。

4円筒試験モデルによって同定した摩擦係数の一例として、100℃における接触面圧力ごとの値を Fig. 14 に示す。通常、計測によって得られるトラクション係数は接触面全体の平均値であるが、ここでの摩擦係数は接触面内の各計

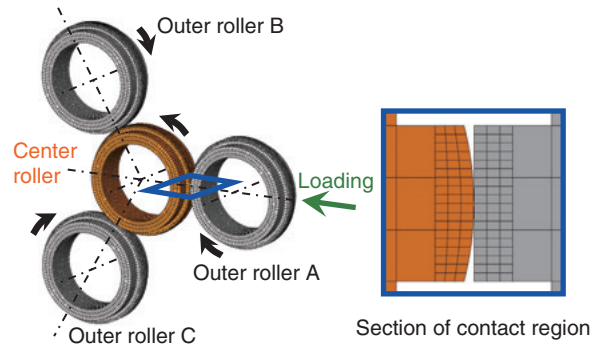


Fig. 12 Simulation model of four-roller machine

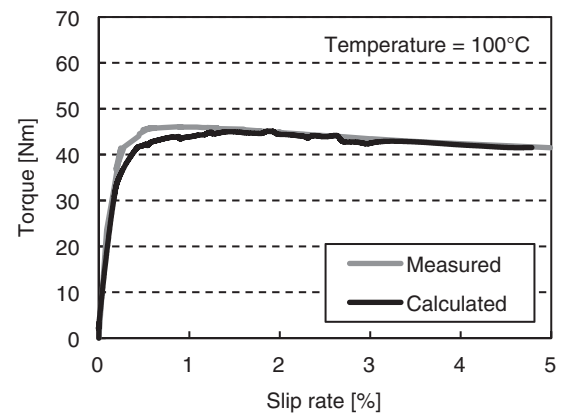


Fig. 13 Comparison between measured and calculated torque

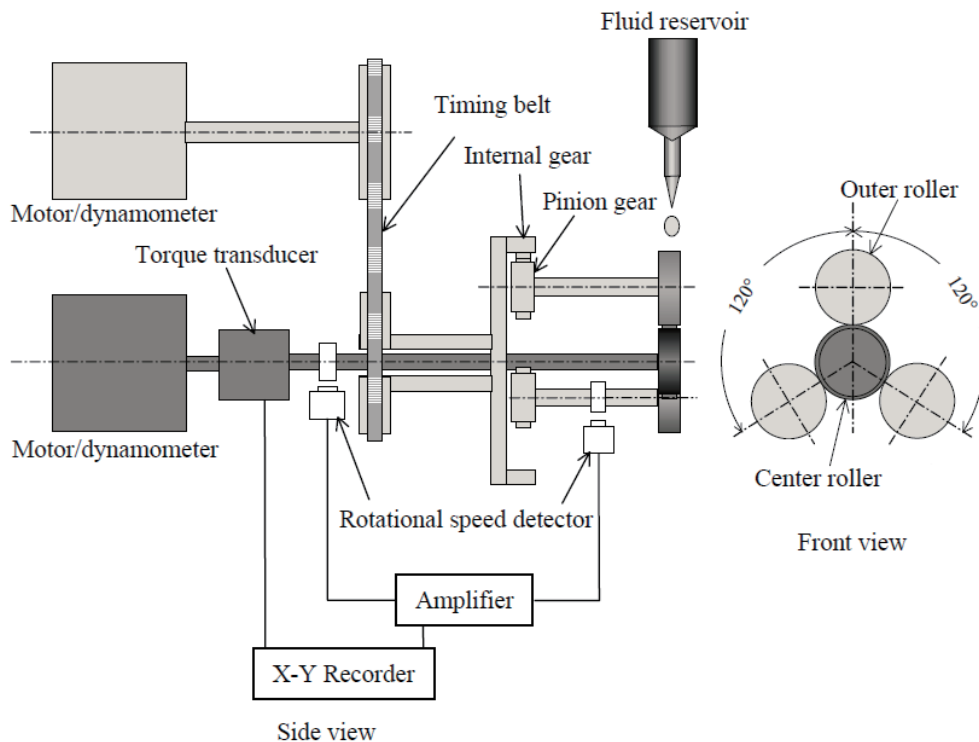


Fig. 11 Structure of the four-roller machine

算節点における値を示している。同定した摩擦係数は、高面圧条件において高い値を示すトラクションフルード特有の性質をとらえられている。

4.2. ハーフトロイダルバリエータ FEM モデル

Fig. 15 に挙動解析に用いたハーフトロイダルバリエータモデルを示す。トラクションドライブを成立させるため

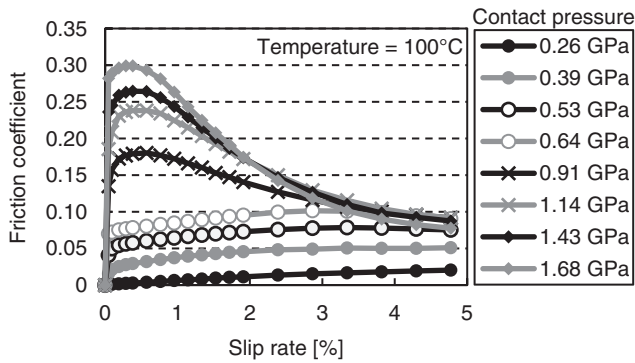


Fig. 14 Friction coefficient of traction surface for simulation model

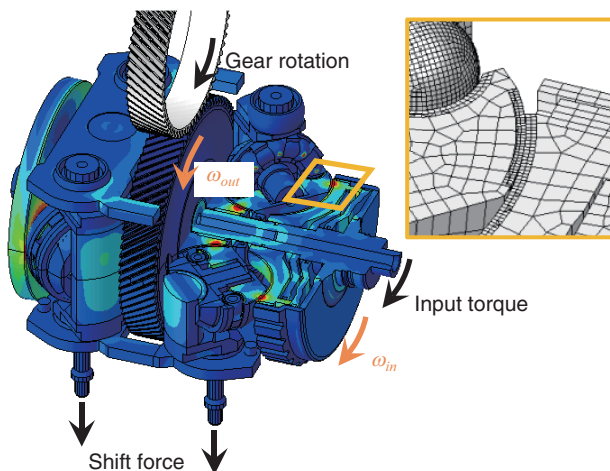


Fig. 15 Simulation model of half-toroidal variator

に必要な接触面の圧力は最大で 4 GPa 程度に達する。したがって実動中のハーフトロイダルバリエータにおいて、接触部を含む各部材は弾性変形を伴った状態で運転されている。この弾性変形を考慮するため、各部品のモデル化には有限要素法を採用した。4 円筒試験モデルによって同定したトラクションフルードのせん断特性を使用するため、トラクション面のメッシュサイズは 4 円筒試験モデルのローラ表面と等しくした。ローディングピストンに油圧を与えることで、パワーローラに所定のクランプ力を与える。また、変速ピストン油圧の代わりにトラニオン下部に軸力を直接与えることで、レシオコントロールに必要な変速力を発生させる。変速力は運転状態に基づいてフィードバック制御している。

Fig. 16 にバリエータのレシオ制御に用いたブロック線図を示す。レシオ偏差のフィードバックとオフセット変位のフィードバックから構成されている。変速比 i_v は入力ディスクの回転速度 ω_{in} と出力ディスクの回転速度 ω_{out} の比であり

$$i_v = \frac{\omega_{in}}{\omega_{out}} \quad (2)$$

で表す。オフセット変位についてはオブザーバとして推定値を用いており、センサレスとした。

Table 1 の運転条件においてバリエータの M -Slip 特性の予測シミュレーションをおこなった。Fig. 17 のように一定の入力トルクに対してローディングピストン圧を減少させてゆくことで M の値を変化させる。Fig. 18 より、シミュレーションによる M の予測値は実験値をおおむね再現できている。

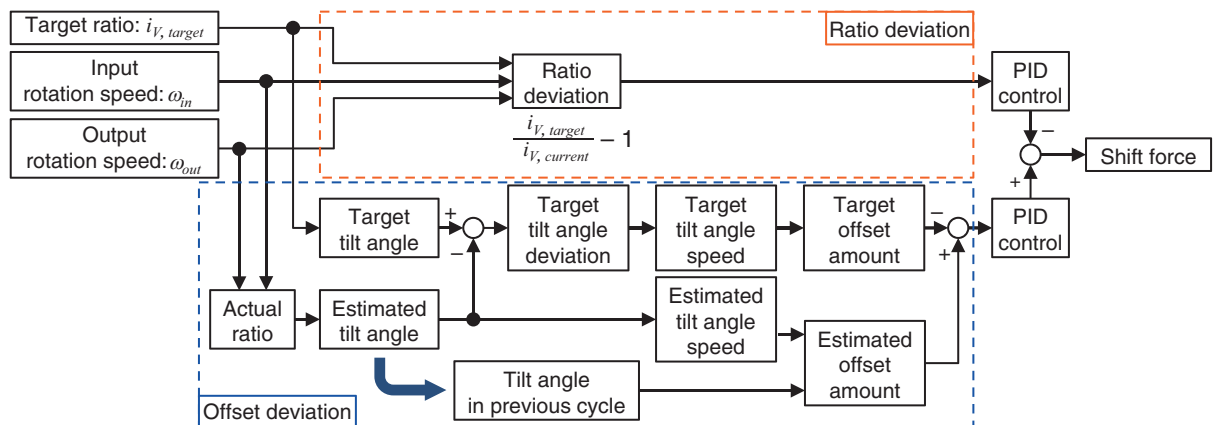


Fig. 16 Speed ratio controller

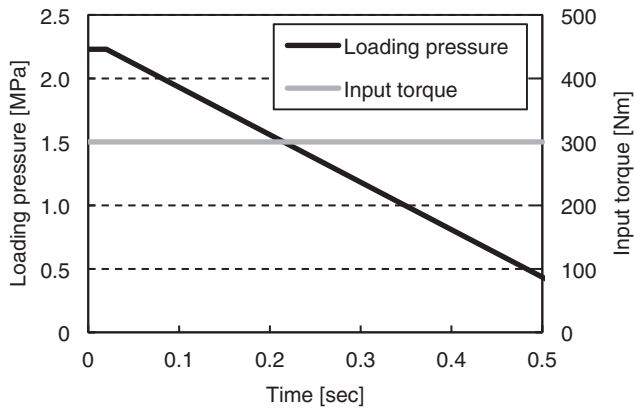
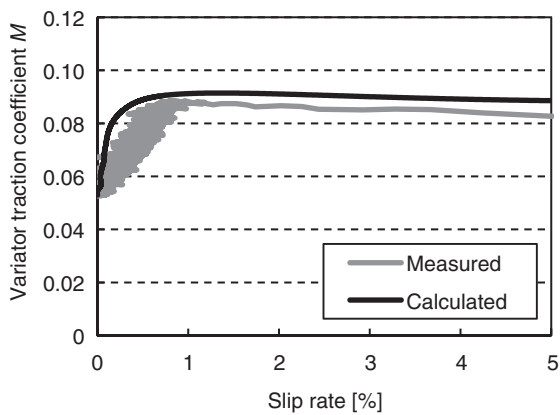
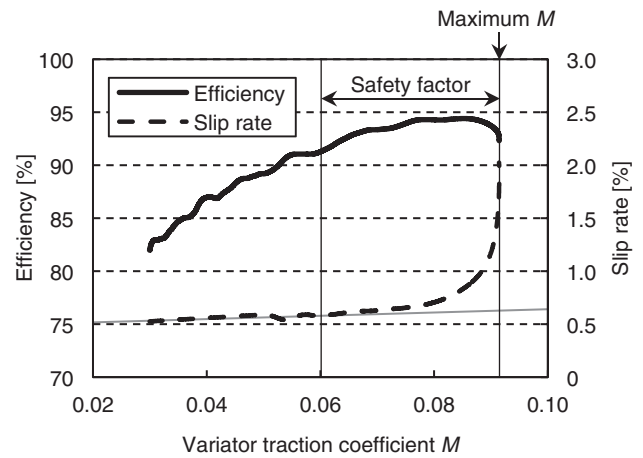
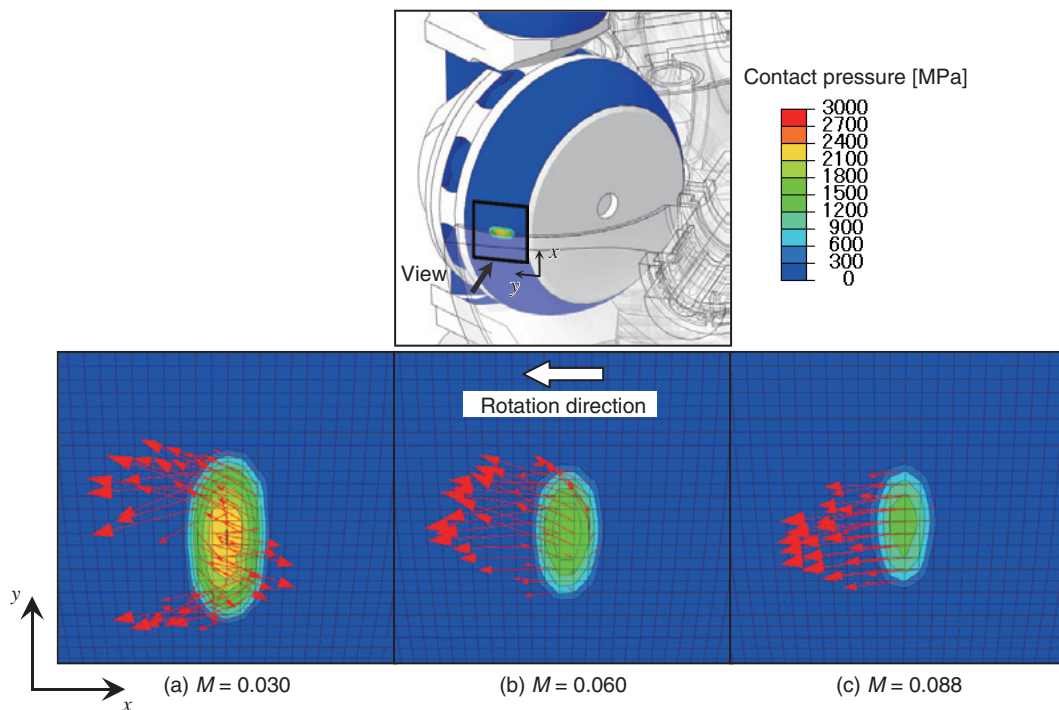


Fig. 17 Operation of loading pressure


 Fig. 18 M -Slip characteristics of variator

 Fig. 19 Relationship of efficiency and slip rate for M

 Fig. 20 Comparison of friction force vector of traction surface on power roller for difference of M

5. M の安全率と動力伝達効率

Fig. 19 はシミュレーションによって得られた M に対する伝達効率とスリップ率の関係である。Fig. 9 の通り、ミクロスリップ領域においては M が小さいほどグロススリップに対する安全率は大きくなる。しかし、Fig. 19 に示すように M が小さい領域ではバリエータの伝達効率は低く、伝達トルクに対して過剰に押付力を加えるほど伝達効率が低下するという傾向が捉えられている。この要因の一つとして、トラクション面のスピンの増加が挙げられる。パワーローラのトラクション面の摩擦力分布 (Fig. 20) より、 M が小さいほどスピンが大きくなっていることがわかる。このよう

にトルクやレシオが一定でも押付力によってトラクション面のスピン状態は変化する。また、 M が大きい領域ではトラクション面のスピンは小さいにも関わらず、Fig. 19 の伝達効率は低くなっている。これは M の最大値 (グラフ右端) 近傍においてスリップ率が急峻に増加しており、滑りによる損失が大きくなっているためであると考えられる。

スリップ率の変化の傾向は、 $M=0.06$ 近傍までは線形的であるが、 $M=0.06$ を超えると非線形に増加している。すなわち M が大きな領域では、走行抵抗の急変等により M が増加した場合にスリップ率が急峻に増加し、グロススリップに至りやすくなる。したがってスリップ率の変化が線形的かつ、伝達効率が高い点である $M=0.06$ 程度でバリエータを運転することで、グロススリップに対する安全率を確保しつつ効率の低下を抑えることができる。

6. まとめ

以下の項目を達成し、ハーフトロイダルバリエータのグロススリップに対する安全率をシミュレーションによって設定することを可能とした。

- (1) トラクションドライブを挙動解析で表現するため、4 円筒試験モデルを用いてトラクションフルードの摩擦特性の同定をおこなった。同定した摩擦特性をバリエータの有限要素モデルに用いることで各部の弾性変形を考慮した状態での動的挙動を扱うことができた。
- (2) 動的挙動解析を用いてハーフトロイダルバリエータの動力伝達特性 (M -Slip 特性) を予測した。これによってトラクション係数 M と伝達効率の関係を定量的に捉えることが可能となった。
- (3) 運転条件ごとのトラクション面の摩擦力ベクトルの状態を定量的に捉え、実動中のスピン状態を可視化することが可能となった。

参考文献

- (1) Gaertner, L., Ebenhoch, M.: The ZF Automatic Transmission 9HP48 Transmission System, Design and Mechanical Parts, SAE Int. J. Passeng. Cars - Mech. Syst., 2013-01-1276, (2013)
- (2) Okumura, N.: Development of New Generation CVT with Auxiliary Gear Box, SAE Technical Paper, 2016-01-1109, (2016)
- (3) 今西尚: 自動車用ハーフトロイダル形 IVT の研究, 横浜国立大学博士論文, (2008)
- (4) Ishikawa, K., Inoue, E., Imanishi, T.: Research of CVT efficiency -Comparison of a Toroidal CVT and a Belt CVT-, Review of Automotive Engineering, Vol. 29, No. 4, p. 479-483, (2008)

- (5) 畑一志, 坪内俊之: ハーフトロイダル CVT 車用トラクション油の開発, 表面科学, Vol. 24, No. 6, p. 351-358, (2003)
- (6) Sano, T., Tomita, M., Inoue, M., Takeuchi, Y., Yorinaga, M.: Study of the Prediction Method for Maximum Traction Coefficient, SAE Int. J. Passeng. Cars - Mech. Syst., 2013-01-0366, (2013)
- (7) 岸田寛孝, 今西尚: ハーフトロイダル CVT におけるトラクションドライブ性能の研究 (第 1 報) —限界トラクション係数の実機測定—, 自動車技術会学術講演会前刷集, No. 133-09, p. 15-18, (2009)
- (8) Nakano, M., Kumura, H., Sugihara, J., Mori, H., Maruyama, N.: Development of a Large Torque Capacity Half-Toroidal CVT, SAE Technical Paper, 2000-01-0825, (2000)
- (9) 大石保徳, 井上英司, 西井大樹: ワイドレンジ・ハーフトロイダル CVT の開発, 自動車技術会学術講演会前刷集, No. 26-12, p. 1-4, (2012)
- (10) Gecim, B. A.: Modeling and Experimental Validation of Optimized Clamp Loading in a Toroidal-CVT, SAE Technical Paper, 2004-01-0351, (2004)
- (11) Höglund, E., Jacobson, B.: Experimental Investigation of the Shear Strength of Lubricants Subjected to High Pressure and Temperature, ASME, Journal of Tribology, Vol. 108, p. 571-578, (1986)
- (12) Matsuoka, T., Ishida, N., Komatsu, S., Matsuno, M.: Development of Toroidal Traction Drive CVTF for Automobile, SAE Technical Paper, 2002-01-1696, (2002)

■ 著 者 ■



田中 優 洋



齋 藤 俊 博



宮 本 浩 二

ワンパッケージ型スマート水素ステーションの開発

Development of All-in-one Smart Hydrogen Station

吉田 哲也*
Tetsuya YOSHIDA

武内 淳*
Jun TAKEUCHI

浅野 裕次*
Yuji ASANO

要 旨

Honda 独自の差圧式高圧水電解技術を用いたワンパッケージ型のスマート水素ステーションを開発した。主要コンポーネントを 10 フィートコンテナサイズにパッケージ化し、設置面積の縮小と導入作業の簡素化を達成した。また、車両への水素充填作業が初めての人にもわかりやすいインタフェースを構築した。性能については、純水製造手法を見直して水の使用量を 10 分の 1 以下へ削減し、また、高圧水の排出技術を確認することで、水素製造装置としての耐久性を高めた。さらに、設置可能地域を準寒冷地域まで拡大するために、凍結による機能損失を防止する保温機能を追加した。これらにより、水素社会の実現と燃料電池自動車の普及促進に有効な手法として、全国の自治体等で導入が進んでいる。

ABSTRACT

An all-in-one smart hydrogen station has been developed, using Honda's original high differential pressure water electrolysis technology. The key components are packaged to be the size of a ten-foot container, reducing footprint and simplifying installation work. In addition, an interface was created to be easily understandable for those having no hydrogen refueling experience. In terms of performance, the pure water production method was revised to reduce water consumption to less than one tenth of the previous method. In addition, high-pressure water discharge technology was developed to increase the durability of the hydrogen production system. Furthermore, in order to expand the installable area to include semi-cold regions, heater functionality was added, preventing function loss from freezing. With these changes, smart hydrogen stations are being introduced by municipalities and private parties around Japan as an effective approach for achieving a hydrogen society and for promoting popularization of fuel cell vehicles.

1. はじめに

Honda はかねてより二酸化炭素 (CO₂) の排出量を削減するため、化石燃料への依存度を減らす観点から、水素をエネルギー源として走行中に水しか排出しない燃料電池自動車の開発をおこなってきた。

燃料電池自動車の燃料となる圧縮された水素を再生可能エネルギーから簡便にかつ効率良く作ることができれば、燃料電池自動車の普及にはずみがつくと同時に環境課題の解決に向け、より貢献できる。そのような考えから、Honda は車両開発と並行して水素の製造方法に関する研究にも取り組んでいる。

これまで、2001 年に米国カリフォルニア州ロサンゼルス (Los Angeles) の Honda R&D ロサンゼルスセンタに市販の機器を組

み合わせた小型水素ステーションを設置し、2003 年には独自に開発した常圧式水電解スタックを投入し、4 年以上の実証試験をおこなった⁽¹⁾。2010 年には、Honda 独自の水電解と水素昇圧機能を統合させた差圧式高圧水電解スタックを開発し、電解方法を常圧式から差圧式高圧水電解へ更新した^{(2), (3)}。これにより一般的な機械式コンプレッサを用いるステーションと比較して小型、省スペースを実現した。

2012 年 3 月には差圧式高圧水電解水素ステーションを日本国内の法規に対応させて埼玉県庁敷地内に設置し、公用車である FCX CLARITY の充填ステーションとして 3 年にわたって運用した^{(4), (5)}。この設置では、差圧式高圧水電解方式としては日本国内初、世界で見ても公共の場への設置は前例がないことから、法規適合性の検証や第三

* R&D センター X

者機関のリスク評価による安全性の検証も合わせておこなった。

一方、国の支援のもと大型の商用水素ステーションの整備も進められている。Fig. 1 に商用水素ステーションの設置状況⁽⁶⁾を示す。四大都市圏を中心に整備が進み始めているものの、燃料電池自動車のより一層の普及拡大のためにはインフラ未整備地区への水素充填装置の設置が必要である。

そこで我々は、商用水素ステーションと比べ必要な設置面積が小さくて簡易的に設置できることを目標に、主

要構成部位をパッケージ収納したスマート水素ステーション (Smart Hydrogen Station:SHS)を開発した。また、SHS をより広い地域に設置することを目指し、冬期の水凍結防止の対応を追加し設置可能地域を準寒冷地域まで拡大した。

本稿では、運用実績を積んできた埼玉県庁設置ステーション (実証試験機) からシステムをさらに発展させた SHS の概要について紹介する。

2. システム概要

Fig. 2 に SHS の概要を示す。SHS は Honda が開発を担当する差圧式高圧水電解システム (Power Creator) と岩谷産業株式会社が担当する蓄圧部、ディスペンサを一つのきょう体に収納したコンパクトな水素ステーションである。Power Creator は水の電気分解と同時に水素を昇圧し、燃料電池自動車用の燃料規格⁽⁷⁾を満たす圧縮水素を製造する能力を有している。この電気化学的な水素昇圧方法は、フリクションロスやモータ損失が発生しないため、機械式コンプレッサを用いる昇圧方法と比較して高効率である。また、再生可能エネルギー由来の電源と組み合わせれば水素を製造し燃料電池自動車に供給する段階でも CO₂ 排出量を削減することが可能となる。

SHS の主要諸元を Table 1 に示す。水素製造能力は 1.5 kg/日であり、年間最大約 550 kg の水素を供給できる。一般的な燃料電池自動車は水素 1 kg で約 100 km 走行可能なことから、車両 1 台あたりの年間走行距離を 10,000 km とした場合、SHS で供給する水素のみで約 5 台分の燃料をまかなうことができる。また、水素貯蔵量を約 19 kg とする



Fig. 1 Locations of commercial hydrogen stations, as of Jan. 2017

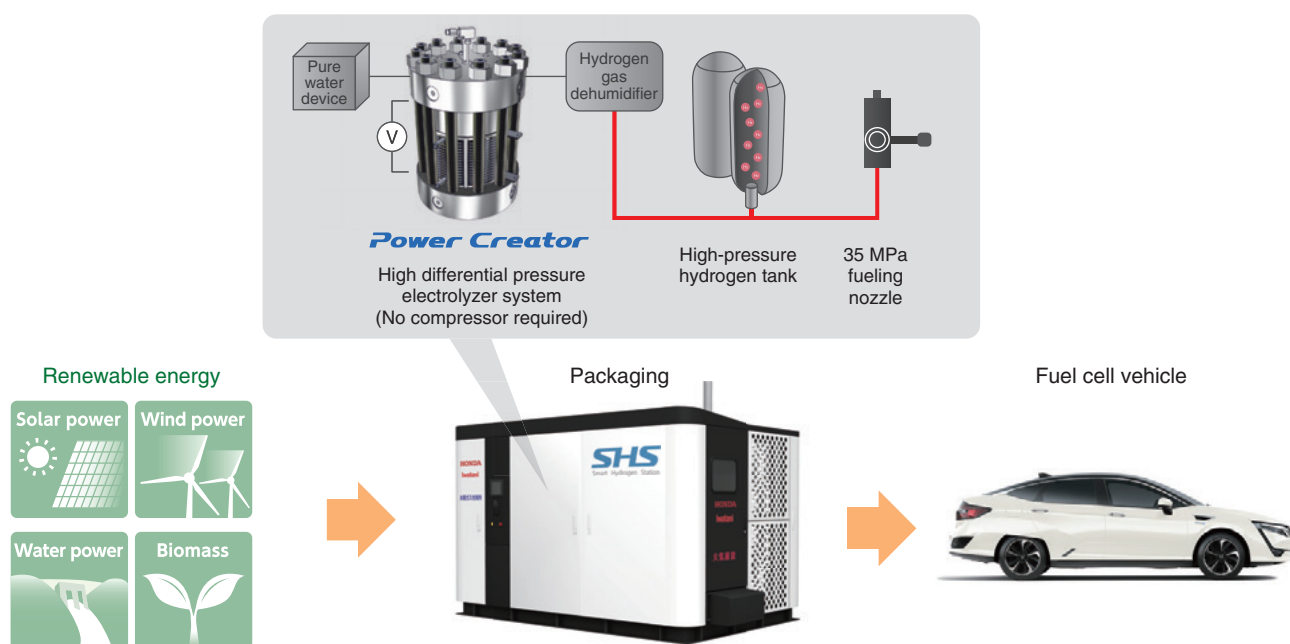


Fig. 2 Concept of SHS

Table 1 Specifications of SHS

Hydrogen production	Max capacity	1.5 kg/day (0.7 Nm ³ /h)
	Production pressure (dispensing pressure)	40 MPa (35 MPa)
	Storage capacity	Approx. 19 kg at 15°C
	Purity	>99.99%
Components	System size	W3280xD2140xH2100 (mm) Footprint: Approx. 7 m ² (10-ft container size)
	Electrolysis unit	High differential pressure electrolysis system
	Dispensing method	Double-bank cascading
	Utilities	200 V AC/tap water

ことで、複数台の車両が連続して充填する場合においても走行に十分な水素を供給できるような仕様とした。

水素がエネルギー資源として一般的に広く使われるようになる水素社会の早期の実現と、燃料電池自動車の幅広い地域への普及拡大の役割を担うために、実証試験機から下記内容を進化させた。

- (1) パッケージ化による導入の簡素化
- (2) 初めて水素充填作業をする人にもわかりやすいユーザ操作性
- (3) 水消費量の削減と、高圧水排出機構の耐久性向上
- (4) 準寒冷地域への設置拡大

3. 実証試験機からの進化

3.1. パッケージ化による導入の簡素化

これまでの実証試験機は、一般的な商用水素ステーションと同様に水素製造部、蓄圧器、ディスペンサをそれぞれ独立したユニットとして設置する手法をとっていた。しかし、こういった分散配置の方法では、ステーションの設置面積が大きくなる課題を抱えていた (Fig. 3)。また、分散するユニット間を接続する配管や配線を通すためのピット工事も必要となるため、設置工期が長期化する課題も抱えていた。これらの課題を解決することが普及の促進につながると考え、SHS はワンパッケージ化を設計のねらいとし

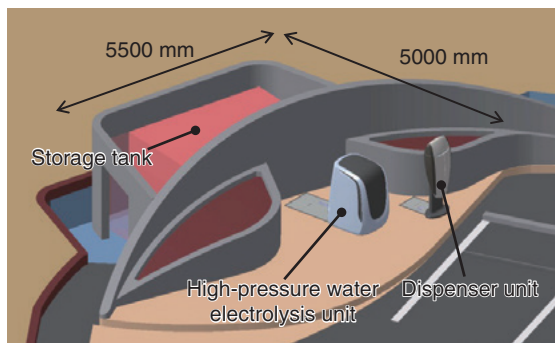


Fig. 3 External view of previous model

た。パッケージ形状は工場出荷後のトラック輸送のしやすさを念頭に輸送用コンテナを参考に検討を進めた。大きさについては輸送用としては最小クラスの 10 フィートコンテナサイズを目標と定めた。

Fig. 4 に SHS の内部構成を示す。ユーザが操作するディスペンサを前面に配置し、同じく操作対象のタッチパネルディスプレイを含む制御部を隣接する区画に設置面積が最小となるように配置した。高圧水素配管が存在する Power Creator と蓄圧器バンク切り替え用のバルブユニットは同一の区画に収納した。バルブユニットは蓄圧器の接続口の向きに合わせて正面右に配置し、高圧水素配管がシステム全体で最も短くなるようにした。

この構成により、ほぼ同じ水素製造能力と水素貯蔵量を持つ実証試験機⁽⁴⁾と比較して設置面積を約 4 分の 1 に削減できた。

また Fig. 5 に SHS のインストール作業状況を示す。工場出荷時にパッケージ製作が完了しているため、設置現場では水道と電気を接続するのみで導入が完了する。このように、導入先の基礎工事や所轄都道府県への高圧ガス設備の届出に必要な日数を除き、設置後一日で水素製造が可能となった。

3.2. 容易なユーザ操作性

車両への水素充填時にユーザが操作するのはタッチパネルディスプレイと充填ノズルの 2 点である (Fig. 6)。

タッチパネルディスプレイは、ユーザが充填操作しやす

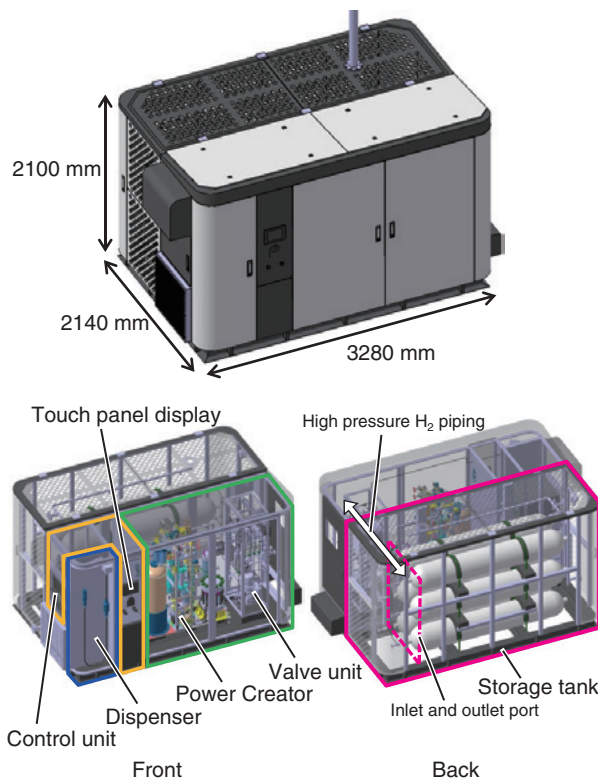


Fig. 4 Inner configuration of SHS

いように充填ノズル収納部のすぐ横に配置した。配置高さは小柄なユーザでも操作可能な高さに配置した。

Fig. 7 に充填画面操作の流れを示す。水素の車両への充填がまだ一般的に広く認知されていないことから、具体的な操作の流れを絵で表示し、ユーザに対し操作方法を視覚的にわかりやすく表示した。また、充填ノズルの水素圧力、蓄圧器の残圧力、昇圧率、温度等から計算した充填完了までの残り時間を目安として表示することで、ユーザに安心感を与えるように配慮した。

車両への充填をおこなう際、ユーザは画面の指示に従って収納扉を開けてから充填ノズルを取り出し、車両に接続する。充填ホース長さは、一般的なガソリン給油所同様にユーザが車両の停車位置に気を使うことなく充填作業が

できるように 3 m 確保し、収納扉の内側へ折り返して収納できるようにした。また、充填ノズルの収納ホルダ位置をタッチパネルディスプレイと同じ高さとし、ユーザが違和感なくタッチパネル操作からノズル操作へ移行できるようにした。

3.3. 水消費量の削減と耐久性向上

SHS は従来の実証試験期間を上回る 8 年の運用を計画している。よって、ランニングコスト低減のために水消費量の削減と、耐久性の向上に取り組んだ。

Fig. 8 に高圧水電解スタックへの電解原料水供給システムの概要を示す。塩素やミネラル成分を含む水道水を高圧水電解スタックへ直接供給してしまうと、電解効率の低下につながるということがわかっている。よって、電解原料水を供給するために水道水を純水にする純水製造装置が必要になる。これまでの実証試験機では、純水製造装置として逆浸透膜 (RO) と電気式脱イオン装置 (EDI) という共に純水製造時にイオン濃縮水を廃棄する装置を採用していた [Fig. 8(a)]。また、電解にともない高圧水素側へ移動する高圧水も廃棄していたため、電解原料水として使用する水道水の 3 分の 2 程度が廃棄されるシステムであった。

そこで、電解効率維持に必要な水質レベルの見直しと確認の結果、純水製造手法をイオン交換樹脂方式に変更し、イオン濃縮水の廃棄をなくすることが可能となった [Fig.



Fig. 5 Installation of SHS

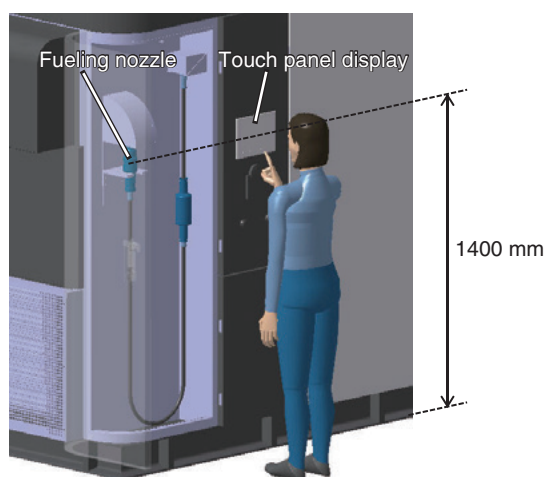


Fig. 6 User interface

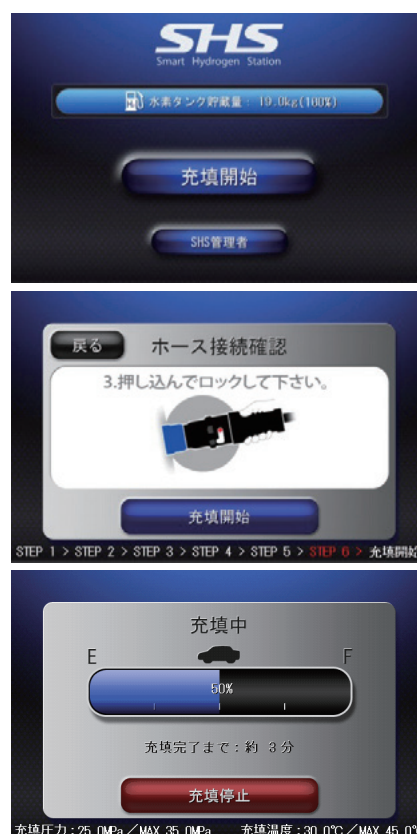


Fig. 7 Operation screen

8(b)]. また、高圧水も電解原料水として再利用するシステムにした。さらに、電解スタック発熱の冷却方法を水冷から空冷へ変更した結果、実証試験機に比べ水の使用量を10分の1以下に減らすことが可能となった。

次に、本水素製造システムの耐久性向上に向けては、高圧水の排出流路の損傷が課題となっており、排出手法の改良に取り組んだ。Fig. 9に高圧水電解システムの高圧ラインの構造を示す。高圧水電解スタックの高圧水素送出ライン中には、高圧の状態では気体の水素と液体の水が共存している。燃料電池自動車へ充填する水素については含有可能

な不純物濃度に規定があり⁽⁷⁾、水分についても分離と除去が必要となる。水分除去の一段階目として、液体の水を重力で分離する高圧気液分離器を配置した。これまでの実証試験機では、製造水素の圧力を維持しながら分離器内に溜まり続ける高圧の水を大気圧環境へ排出する手法として、複数の調圧弁を直列に配置し、段階的に圧力を下げながら排水していた。しかしながら、調圧弁内の非常に狭く短い流路隙間を水が通過して圧力が低下する過程で、水に溶け込んでいた水素が急激に発泡してしまう。この発泡現象が流路表面を傷つけてしまうため機能損失が生じた (Fig. 10)。

機能損失にいたる急激な発泡現象を抑制する手法として、調圧弁内の狭く短い隙間を通すのではなく、小口径の長い金属の微細管を通過させ、徐々に圧力を低下させながらゆっくりと水を排出する手法を採用した。この手法により、調圧弁を使用せずとも製造水素圧力を40 MPaに維持しながら、高圧水を約40 cm³/minの一定流量で排出できることが確認された。Fig. 11に微細管による排出速度の変化を示す。微細管では8000時間後も流路損傷は確認されず、8年間の運用達成の見通しを得た。

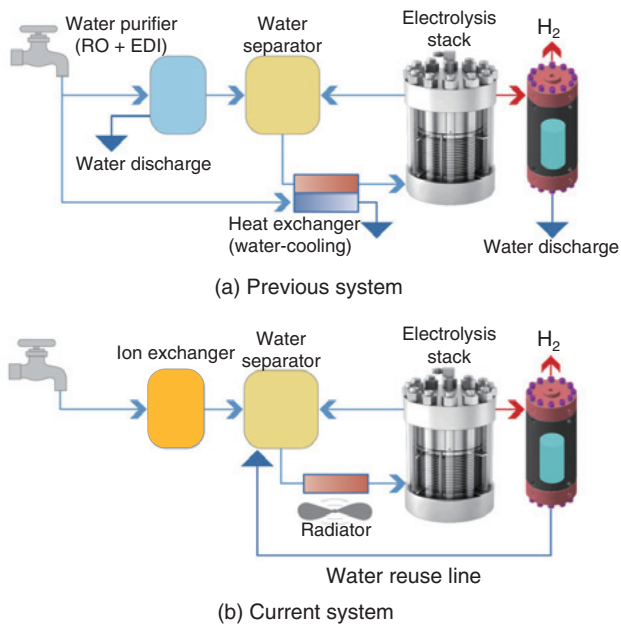


Fig. 8 Comparison of water supply systems

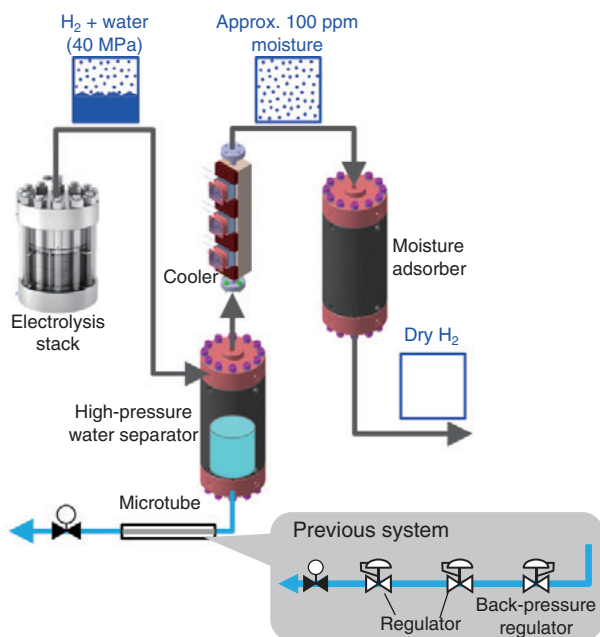


Fig. 9 Construction of water removal system in high pressure hydrogen line

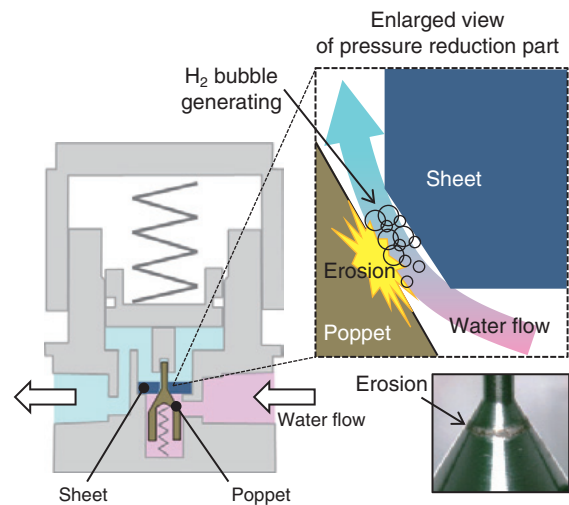


Fig. 10 Erosion mechanism of microchannel (inside of pressure regulator)

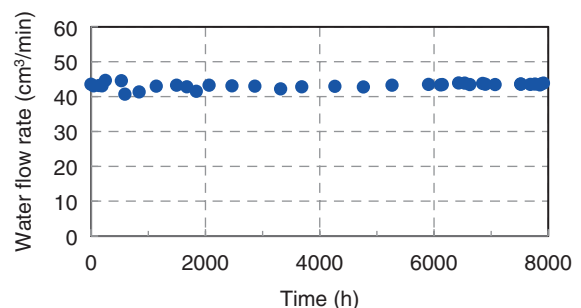


Fig. 11 Discharging water flow rate by using microtube

3.4. 準寒冷地域への設置拡大

SHS は原料としての水供給部だけでなく、高圧水素ライン内にも分離した水を保有するなど、システムの多くの部分に水が存在する。そのため今までの実証試験は冬期の水凍結のおそれのない温暖地域で実施してきた。SHS をより広範な地域に設置し水素エネルギーの利用を促進していくためには、水の凍結防止への対応が必要となる。その第1ステップとして準寒冷地域⁽⁸⁾までの設置を目指し、最低設置環境温度を -10°C と定めた。

Fig. 12 に氷点下対応の概要を示す。きょう体内は常時換気をおこなっているため、氷点下時にシステム内に存在する水が凍結しないように保温ヒータを取り付けた。また、外気に直に接している放熱器内で凍結が発生しないよう、ホース型ヒータを原料水ラインに追加した。

Fig. 13 が氷点下時の稼働データである。水温、きょう体内温度はともに 0°C 以上に保たれており、 -10°C 環境での運用が可能であることが確認された。このことより、2016年3月に宮城県仙台市において東北地方初の水素ステーションの開所が実現し、燃料電池自動車の普及拡大へ一歩前進した。

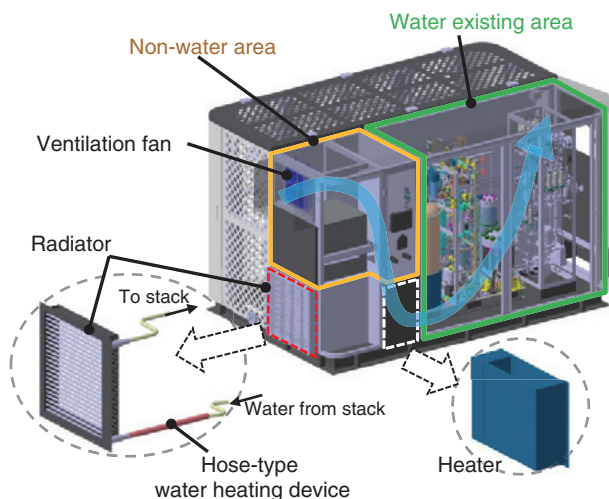


Fig. 12 Adding heating devices for semi-cold region

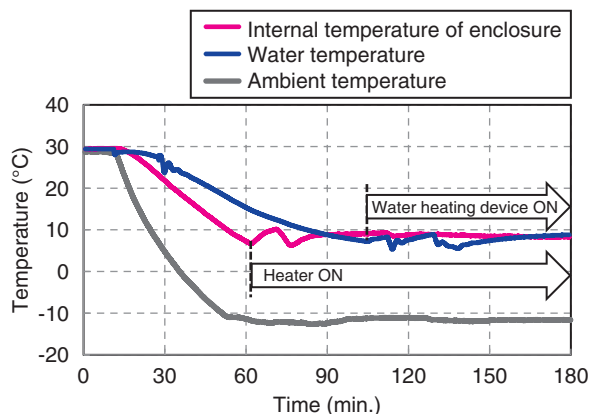


Fig. 13 Effect of heating devices

4. 設置状況

SHS は、環境省の「地域再エネ水素ステーション導入事業」が進める低炭素な水素社会の実現と燃料電池自動車の普及促進のための一つの手法として、公募と設置が進んでいる。2017年6月までに13ヶ所 (Fig. 14) に設置が完了し、公用车等の燃料電池自動車の充填ステーションとして稼働中である。今後も、要求のある地域へさらに設置を拡大し、燃料電池自動車の普及に貢献したいと考えている。



Fig. 14 Locations of SHS installations, as of June 2017

5. まとめ

ワンパッケージ型スマート水素ステーションを開発し、以下の結果を得た。

- (1) 主要コンポーネントをワンパッケージ化し、大きさを10フィートコンテナサイズとすることで、設置面積の縮小と設置導入作業の簡素化が達成できた。
- (2) ユーザ操作性を考慮し、容易に操作ができるインタフェースを構築した。
- (3) 水の消費量を10分の1以下に削減した。また、高圧水の排出手法を改良し耐久性を向上させた。
- (4) 水の凍結防止機能を追加し、設置地域を準寒冷地域まで拡大した。

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) 武内淳, 中沢孝治, 吉田喜祐, 伊藤潤, 岡部昌規, 山下郁也: 国内仕様ソーラー水素ステーションの紹介, Honda R&D Technical Review, Vol.25, No.1, p.85-90
- (5) 吉田喜祐, 三宅葵: 国内仕様ソーラー水素ステーションの実証試験結果, Honda R&D Technical Review, Vol.26, No.2, p.190-195
- (6) <http://www.fccj.jp/hystation/>, 2017/1/31
- (7) ISO 14687-2: Hydrogen fuel – Product specification – Part 2: Proton exchange membrane (PEM) fuel cell applications for road vehicles, (2012)
- (8) 国土交通省: 住宅の省エネルギー基準, (2013)

■ 著 者 ■



吉田 哲也



武内 淳



浅野 裕次

CLARITY FUEL CELL 搭載の 新型燃料電池用セパレータの開発

Development of New FC Separator for CLARITY FUEL CELL

木村 義人*

Yoshihito KIMURA

儀賀 章仁*

Akihito GIGA

小山 賢*

Satoshi OYAMA

小此木 泰介*

Daisuke OKONOGI

要 旨

CLARITY FUEL CELL の燃料電池スタックをフロントフード内に搭載するため、小型かつ耐衝撃性の高い燃料電池用セパレータを開発した。

小型化のためセパレータのシール断面形状を従来の裾野の広い台形から長方形に変更することで、シール幅を低減し、スタック容積を約 3 L 削減した。また、セパレータを樹脂およびゴムで覆い絶縁性を確保することで、一般的に用いられるエンクロージャボックスなどの防水や絶縁構造が不要となり、きょう体にシール部品を必要としない構造を確立できた。さらに、シール成形時にシール材と同じゴムで流路構造を形成することにより、部品削減と工程簡素化をおこなった。また、セパレータの四辺に樹脂製の凹凸部を設け衝突時のセパレータのずれを抑制することで耐衝撃性を向上させた。

これらの構造を有するセパレータをプレス成形、樹脂成形およびゴム成形それぞれ 1 工程で製造できる仕様とし、低コストかつ大量生産可能な製法を開発した。

ABSTRACT

A compact and highly impact-resistant fuel cell separator was developed to enable the CLARITY FUEL CELL fuel cell stack to be mounted under the front hood.

By changing the seal cross-section of the separator from the previous trapezoidal shape with a broad foot section to a rectangular shape for downsizing, the seal width was reduced and stack volume was decreased by approximately 3 L. Also, covering the separator in resin and rubber to help ensure insulation obviated the need for the waterproofing and insulating structures commonly known as enclosure boxes, resulting in a structure that does not require sealing parts in the enclosure. Furthermore, the number of parts was reduced and processes were simplified by forming a flow path structure using the same rubber as the seal materials during seal molding. Impact resistance was also enhanced by providing indented sections made of resin at the four sides of the separator to suppress misalignment of the separator during a collision.

By integrating the production processes of press-forming, resin molding, and rubber molding for making a separator having these structures into a single process, a low-cost manufacturing method that can be applied to mass production was developed.

1. まえがき

燃料電池 (FC) は CO₂ や有害物質をいっさい排出しない循環型クリーンパワートレインとして期待されている。

1999 年に自社開発の FC スタックを燃料電池実験車に搭載し、2003 年には寒冷地での始動を可能とした Honda FC スタックを発表した⁽¹⁾。2006 年にはさらに小型軽量化した V Flow FC スタックを発表した⁽²⁾。そして、CLARITY

FUEL CELL の開発においては FC スタックをさらに小型軽量化しフロントフード内に搭載⁽³⁾することを目指し、セルの小型化とスタックの耐衝撃性向上をおこなった。こうして V Flow FC スタックと比べ、スタック容積を約 18 L 削減した新型 FC スタックを 2016 年に発表した。Fig. 1(a) に V Flow FC スタック、Fig. 1(b) に新型 FC スタックの外観を示す。本稿では、新型 FC スタックに搭載したセパレータ (新型 FC 用セパレータ) について紹介する。

* 四輪 R&D センター

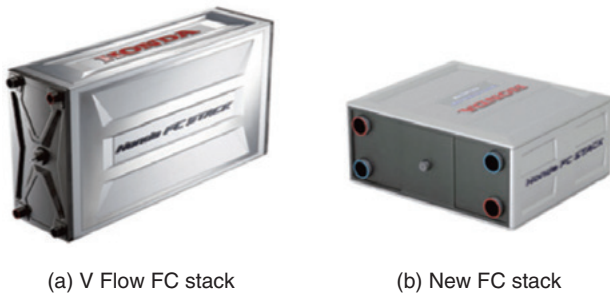
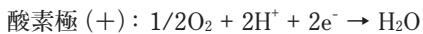
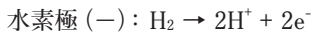


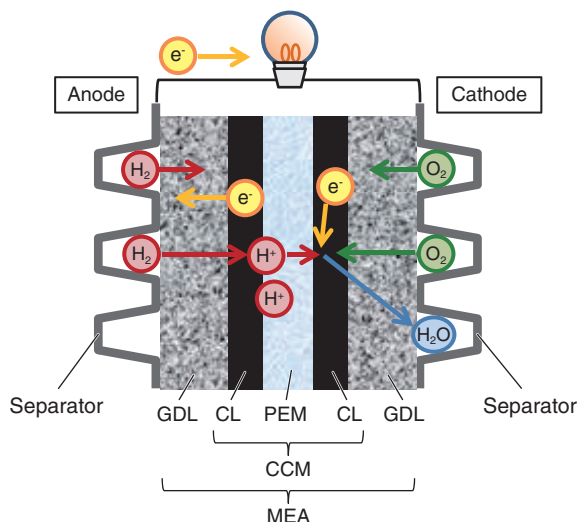
Fig. 1 Appearance of FC stack

2. セパレータとは

固体高分子型の FC は Fig. 2 に示すように⁽⁴⁾、電解質膜を用い水素と空気中の酸素との電気化学反応によって化学エネルギーを電気エネルギーに直接変換するものである。



水素イオンを伝導する電解質膜を水素極と酸素極（空気極）の二つの電極層と拡散層で挟み、膜電極接合体（membrane electrode assembly: MEA）⁽⁵⁾を形成し、この MEA を 2 枚のセパレータで両面から挟んで 1 組のセルを形成する。1 セルでは開回路時でも約 1 V の電圧しか得られないため、セルを積層することで高い電圧を発生するようにしている。



MEA: membrane electrode assembly
PEM: polymer electrolyte membrane
CL: catalyst layer
GDL: gas diffusion layer
CCM: catalyst coated membrane

Fig. 2 Mechanism of electricity generation in FC stack

セパレータは、各セルの間に挟んで水素や空気を遮断する役割を果たす板状の部品である。各セルのガスや冷媒をシールする機能の他に、ガスが流れる流路を構成し、水素や空気を送り込む機能を担っている。セパレータは、FC スタック構成部品の中で最大の容積を占めており、さまざまな車種へ搭載するためには、部品を小型化が必要がある。また、フロントフード内など衝突時の衝撃力が大きい場所へ搭載するためには、セパレータのずれを抑制しなければならない。

セパレータの製法は、車一台当たり数百枚使用するため、生産サイクルタイムを短縮していかにコストダウンするかが課題となっており、金型を用いた成形が検討されている。Honda では従来から小型化および金型成形によるサイクルタイム短縮に主眼を置き、プレス成形したセパレータ金属部に絶縁性確保のため液状ゴムを射出成形する仕様を採用している。

3. 開発のねらい

前章で述べた課題を達成するために、以下の構造を有するセパレータを開発した。

- (1) FC スタック小型化のためのシール構造
- (2) 部品削減のための絶縁被覆構造
- (3) 工程簡素化のためのゴムを用いた流路構造
- (4) 耐衝撃性向上のためのずれ抑制構造

4. 新型 FC 用セパレータの特徴

4.1. 新型 FC 用セパレータの基本構造

まず、今回開発した新型 FC セパレータの基本構造を説明する。Fig. 3 に示すように、2 枚の MEA を 3 枚のセパレータで保持し外面に冷媒を流すセル構造を従来スタックに引き続き採用している。発電に必要な水素、空気と冷媒の 3 流体は、セパレータ外周部に設置された連通孔より各セルの発電部に供給される。

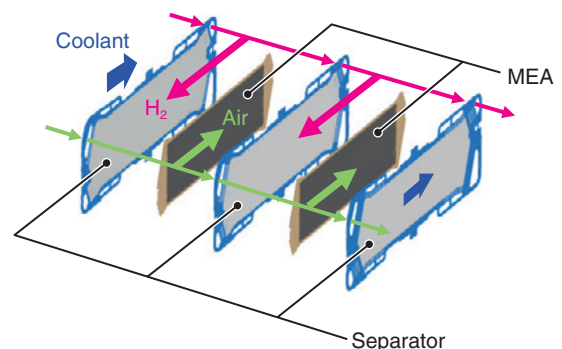


Fig. 3 One cooling layer per two cells

次に、前章で述べた(1)から(4)のねらいについて概要を説明する。Fig. 4に示すように(a)ガス、冷媒のシール構造、(b)セパレータ外周部を絶縁する被覆構造、(c)ガス、冷媒を発電部に供給する流路構造、これら三つの構造をゴムで形成している。シール構造はゴム圧縮時の反力により流体をシールするため厚肉な形状が必要となる。一方、絶縁被覆部は、そのシールのゴム圧縮を妨げることなく、かつ電気絶縁性を満足し小型化できる厚さでなければならない。また、流路構造は発電効率を上げるために、反応ガスのすべてが流体流路を流れるべきところ、反応ガスの一部が流体流路ではなく部品間の隙間に流れる、いわゆるショートカットを低減し、反応ガスを流体流路に均等に供給する必要がある。通常、プレス成形したセパレータ金属部をゴム成形用金型にセットしゴムを成形する際、固形ゴム材などを用いてコンプレッション成形する[Fig. 5(a)]。しかし、ゴム成形時に金属部に対して大きな圧力が印加される。それによって、薄い金属部が変形してしまう課題がある。また、コンプレッション成形では微細形状を作ることが容易

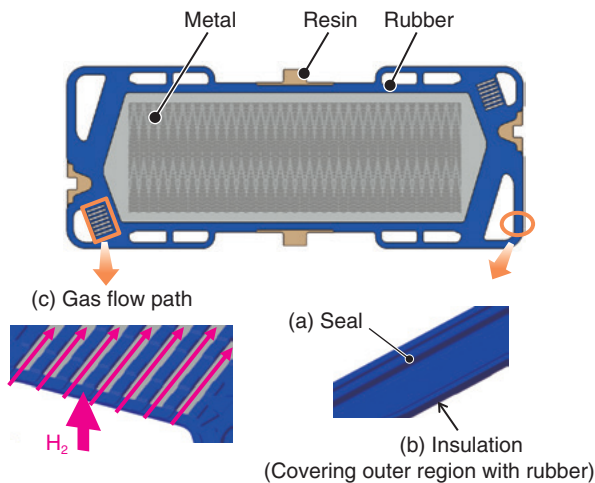


Fig. 4 New separator

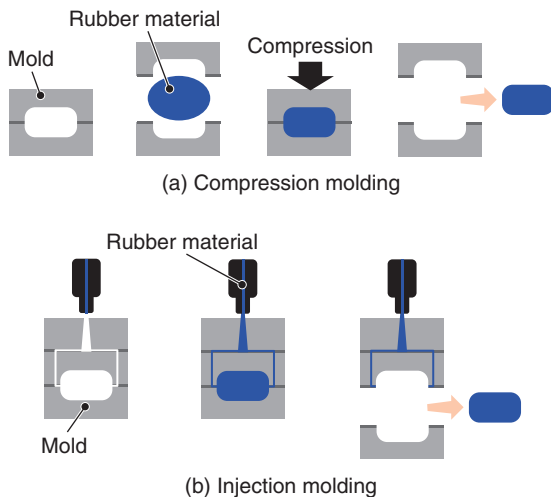


Fig. 5 Comparison of rubber manufacturing methods

ではない。そこで、低粘度の液状ゴムを射出成形する製法[Fig. 5(b)]を採用することで、成形圧力を低減し金属部を変形させることなく、金属部両面にゴムを成形することができ、また部位によってゴム厚さの異なるさまざまな形状を形成できるようになった。また、セパレータのずれ抑制構造は、衝突時の衝撃力を受けるために高強度樹脂を採用しており、セパレータ金属部に一体成形している。

4.2. FC スタック小型化のためのシール構造

小型化検討の前に、ガソリンエンジン車同等の運用年数とするため、シールの長寿命化の検討をおこなった。一般的に、シールは低圧縮率化することで圧縮永久歪を低減することができ、長寿命化することができる。低圧縮率でも高いシール荷重を得るために、圧縮時に横方向に広がり難い形状を目指した。シール断面を従来の裾野の広い台形形状に対して、新形状は長方形とした。Fig. 6は、有限要素構造解析を用い、同一シール荷重でゴムの応力を比較した結果である。新形状は従来形状よりも低圧縮率状態で同等の応力を得ていることがわかる。この形状変更により、より低い圧縮率で必要なシール荷重を得ることができた(Fig. 7)。その結果として、Fig. 8に示すようにシール荷重

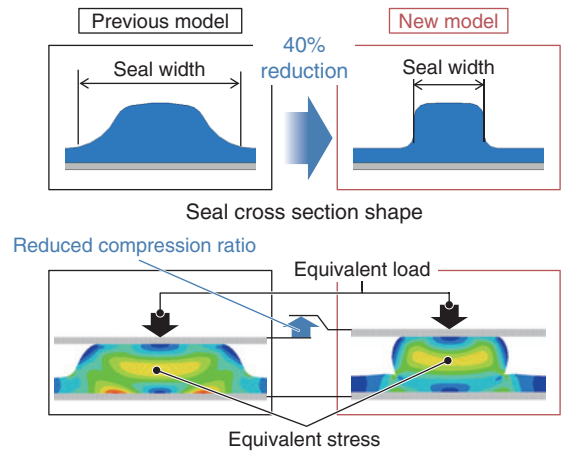


Fig. 6 Stress distribution in seal compressed state

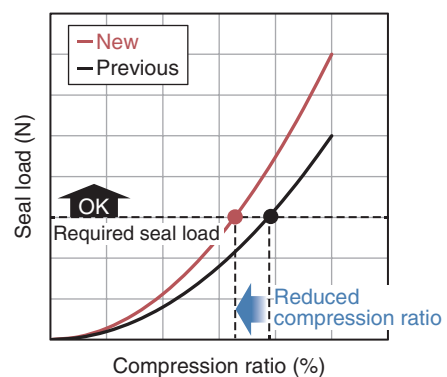


Fig. 7 Comparison of compression ratios

低下量を低減することができ、耐久性が向上した。

次に、小型化のために、従来仕様に対してシール幅の低減をおこなった。FC スタック 1 台当り約 1000 m 以上の長いシール線長を有するため、シール幅を低減できれば、スタック容積削減が可能となる。しかし、薄い金属板とシールが繰返し積層されるスタックにおいて、シール幅を減らしすぎると Fig. 9 に示すような部品の位置ずれ状態でのシール性確保が課題となる。

そこで、シール上面に平坦部を設け、部品がずれた状態でもシール荷重の低下が生じ難い形状とした。その上で、有限要素構造解析によってシール荷重の分布を予測した。部品が位置ずれを起こした場合に 2 層のシールが重ならない領域ができてしまうが、間にある金属板の剛性によりその領域にもシール荷重が発生することがわかった (Fig. 9)。シールが重ならない領域の一部をシール幅とみなすことができるため、シールが重なっている幅よりも実際のシール幅は大きくなる。この効果によりシール幅が増加した分さらに幅を低減させることができた。

必要なシール荷重が確保できる幅を見極め、従来仕様に対して幅を約 40% 低減し、スタック容積を約 3 L 削減することができた。

4.3. 部品削減のための絶縁被覆構造

高電圧となるセパレータ金属部は、外部に対して電氣的に絶縁する必要がある。一般的に個々のセパレータには絶

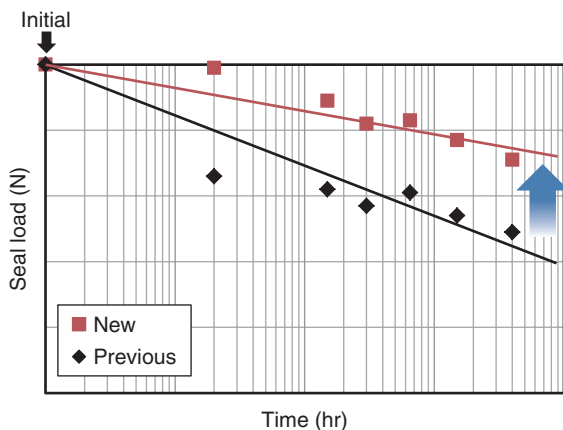


Fig. 8 Comparison of seal load behavior

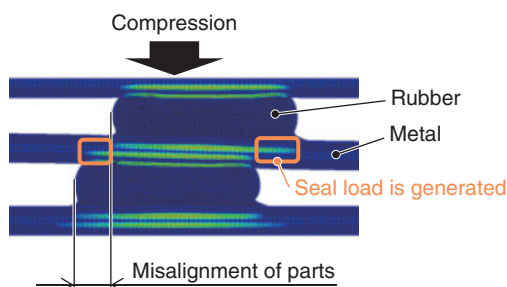


Fig. 9 Cross section of seal

縁構造を持たせずに、防水、絶縁機能を有するエンクロージャボックスの中に収める方法が知られている⁽⁶⁾。しかし、本開発では、先に述べたシールゴム成形と同時に、セパレータ金属部の外周をゴムで被覆することで、セパレータを絶縁被覆する構造を実現している。セパレータを絶縁被覆することにより、エンクロージャボックスなどの防水、絶縁構造が不要となるため、きょう体にシール部品を必要としない構造を確立できた。

セパレータの外周絶縁構造を Fig. 10 に示す。金属部に対して、樹脂をアウトサート成形しその樹脂部を覆うようにゴムを成形している。樹脂とゴムとの界面を成形時に接着することで、外部と金属を絶縁している。このような構造を採用することで、絶縁性を向上することができた。

4.4. 工程簡素化のためのゴムを用いた流路構造

セパレータには流体を発電部に供給するための導入出部が必要だが、一般的には、金属もしくは樹脂の別体部品をセパレータに対し貼り付ける構造が用いられる。しかし、その場合、別体部品およびその固定が必要となり、コストが高くなってしまう。

本開発では、先に述べた製法によるシールゴム成形と同時に、ゴムを用いて流体の導入出部を形成している。流体導入出部は、各流体間を隔てる別階層のシールと交差する必要がある。Fig. 11 に示すような橋脚構造によって実現している。金型によって一体成形しているため、寸法精度が高く、流体の安定供給にも効果がある。

次に、反応ガスの一部が流体流路ではなく部品間の隙間に流れてしまうショートカットをゴムを用いて抑制する構造について説明する。Fig. 12(a) に示すように、プレス成形された金属に対してゴムを成形する際、金型を金属に押し当てて、ゴムの流出を防ぐ金型押え部が必要となる。その部分は、金型と金属が密着しているため、ゴムを成形することができず空間が生じてしまう。そこに発電に寄与できないガスが流れてしまうため、発電効率が低下する。この

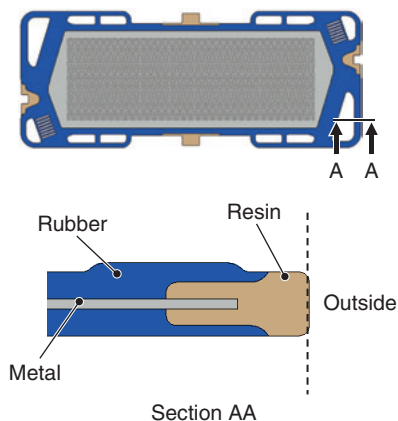


Fig. 10 Electrical insulation structure

課題に対して、Fig. 12(b) に示すようなリブをゴムによって形成し、従来あった空間をゴムで埋めることで、型押え部を確保しつつショートカットしてしまうガスを低減することができる。ゴムによるガスのショートカット抑制構造は、形状自由度が高く、微小な隙間に対しても適用できるため、有効な手段である。

ガスのショートカット抑制リブの製法特徴について説明する。一般的に、金型を二つに分割しただけでは成形品

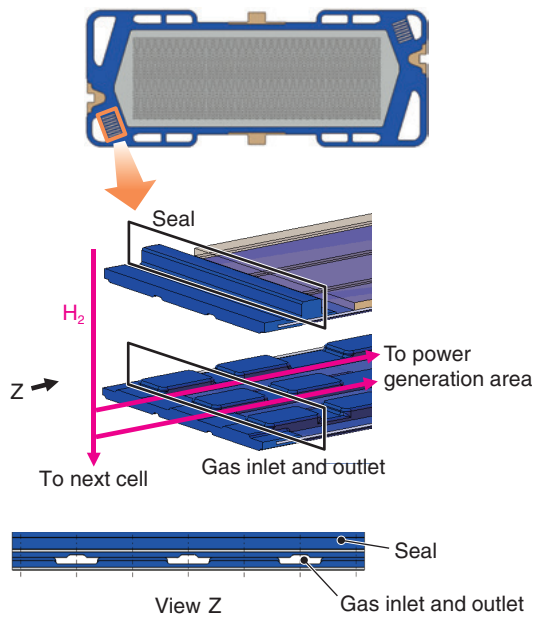


Fig. 11 Fluid inlet and outlet structure

を取り出せない凹凸形状をアンダカットといい、Fig. 13(a) のような型を分割するスライド型で対応する。しかし、リブ成形の近傍には、プレス成形部が存在するため、スライド型が設置できない。本開発では、Fig. 13(b) に示すような無理抜きと呼ばれる方法でスライド型を使わずに二方向抜き金型でゴムを傷付けることなく取り出せるように、リブの角度を検討し成形しやすい形状を設定した。

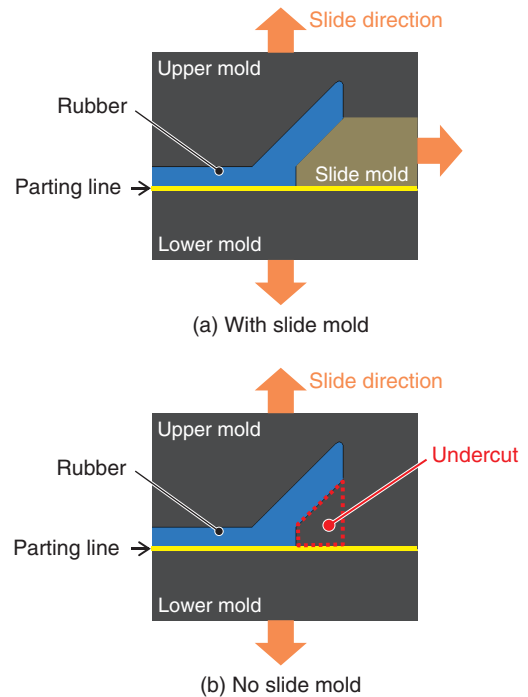


Fig. 13 Rubber undercut shape

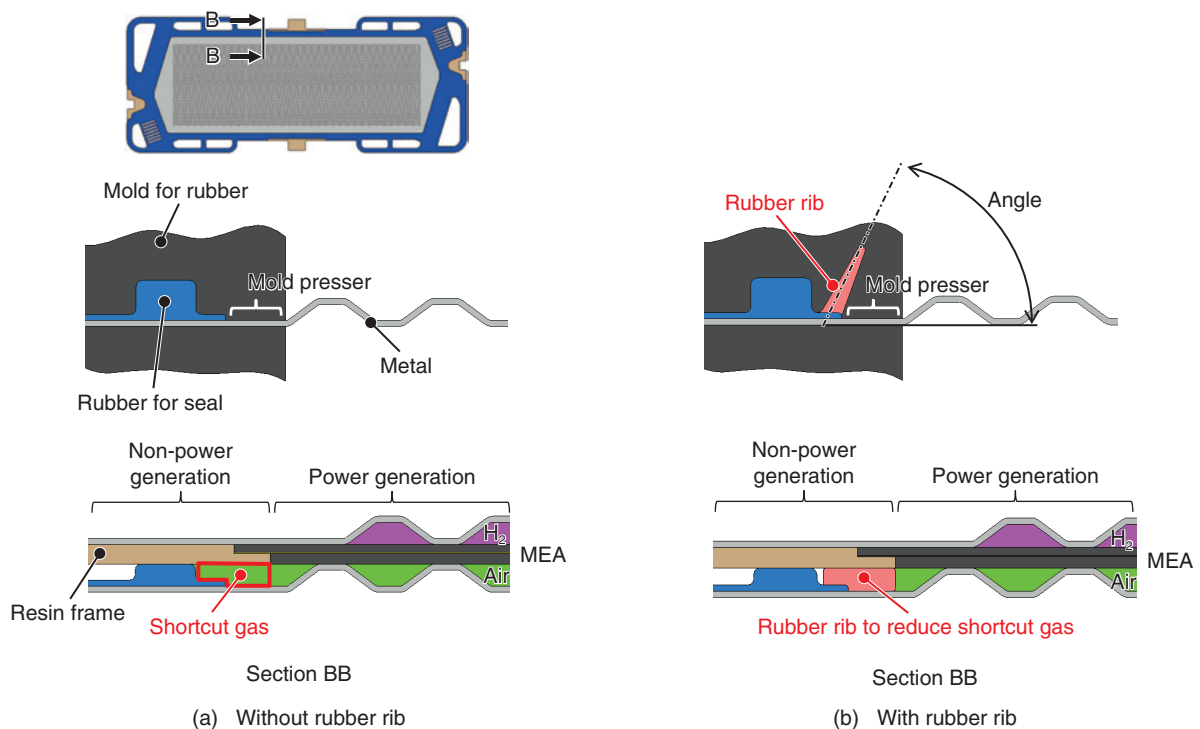


Fig. 12 Rubber rib to reduce shortcut gas

4.5. 耐衝撃性向上のためのずれ抑制構造

フロントフード内への搭載は、従来のセンタトンネル搭載よりもフロント衝突時のFCスタックに入る衝撃力が増加するため、耐衝撃性を向上させる必要がある。積層体であるスタックのセパレータに対して、強い衝撃力が入力されると部品間のずれが生じる可能性がある。そこで、Fig. 14に示すようにセパレータの四辺に凹凸部を設け、スタック両端のエンドプレートとバー締結とし、セパレータに設けた凹凸部を保持することによりセルのずれを抑制することができるバー締結1ボックススタック構造を開発した。この凹凸部は、高強度な樹脂を金属セパレータに射出成形して一体化し構成しているため、高電圧部であるセパレータと締結バーの絶縁性を確保することができる。

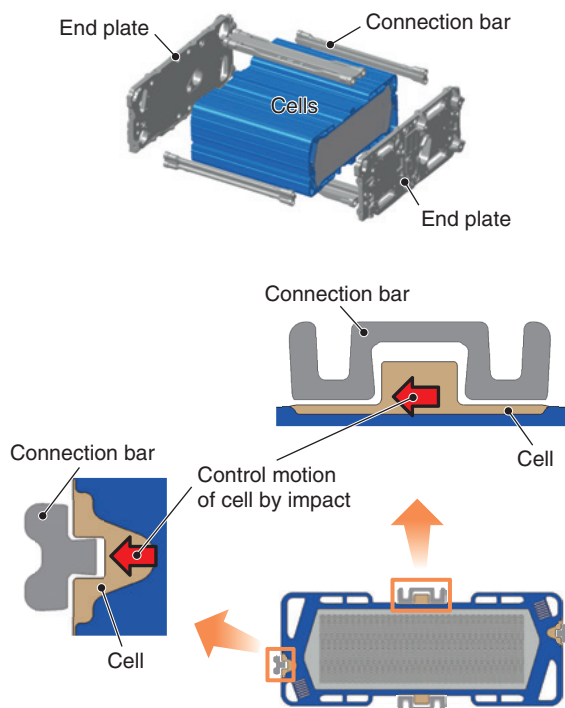


Fig. 14 Separator with high impact resistance

5. まとめ

大量生産可能な製法を用いた、小型かつ耐衝撃性の高い新型FC用セパレータを開発し、以下の成果を得た。

- (1) セパレータのシール断面形状を有限要素構造解析を用いて最適化した長方形にすることで、耐久性を向上させつつ、従来に比べてシール幅を約40%削減することができた。その結果、スタックの容積を約3 L削減した。
- (2) セパレータ絶縁被覆構造により、きょう体にシール部品を必要としない構造を確立できた。
- (3) 流体導入出部にゴムを活用することで、部品削減、工

程簡素化を達成した。また、ゴム特有の無理抜き製法を利用したガスのショートカット抑制リブによって、発電に寄与できないガスを低減することができた。

- (4) セパレータの四辺に樹脂製の凹凸部を設け耐衝撃性を向上したことで、燃料電池スタックのフロントフード内への搭載を可能にした。

参考文献

- (1) 井ノ上雅次郎, 斉藤信広, 内堀憲治: Honda FCX 搭載の次世代燃料電池スタック, Honda R&D Technical Review, Vol. 17, No. 2, p. 8-13
- (2) 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
- (3) 木村顕一郎, 河崎輝明, 大村孝之, 渥美淑弘, 清水潔: 新型燃料電池自動車CLARITY FUEL CELLの開発, Honda R&D Technical Review, Vol. 28, No. 1, p. 1-7
- (4) 佐藤雅彦, 千葉裕人, 井ノ上雅次郎: 燃料電池スタックにおけるセル面内CCM含水量分布計測システムの開発, Honda R&D Technical Review, Vol. 28, No. 1, p. 15-23
- (5) 竹中啓恭: 原理と電極反応, 燃料電池技術とその応用, テクノシステム, p. 91, (2000)
- (6) 一ノ瀬浩, 森元一, 猿橋謙: MIRAIを支える高機能FCスタックケースの開発, TOYOTA Technical Review, Vol. 62, p. 176-180, (2016)

■著 者■



木村 義人



小山 賢



儀賀 章仁



小此木 泰介

SPORT HYBRID i-DCD 新型用モータの低鉄損技術

Technologies for Low Iron-loss in New SPORT HYBRID i-DCD Motor

藤 代 智*

Satoshi FUJISHIRO

相 馬 慎 吾*

Shingo SOMA

鈴 木 雄 一*

Yuichi SUZUKI

梶 野 大 樹*

Daiki KAJINO

要 旨

新型1モータ SPORT HYBRID i-DCD 用モータにおいて、一般流通電磁鋼板材によるコスト低減と重希土類フリー磁石の採用による調達リスク回避をおこなった。ステータコアに使用する鋼板を従来の板厚 0.25 mm から 0.35 mm に変更した。板厚が増えることによる鉄損増加に対しては、ステータコアのカシメ点数と位置の見直しにより渦電流の低減によって対応した。また、ステータホルダ内径に波形状加工を施し、接触面積を削減させステータコア圧入時の残留応力を緩和することでも鉄損を低減させた。重希土類フリー磁石採用による磁石耐熱性への対応としては、磁石の配置を平行配置からロータコア内径へ深埋めしたV字配置に変更させた。これに加えて、磁石の分割数を軸方向4分割から周方向2分割に並べ、工程簡略化をおこなうながら損失を同等にすることができた。

ABSTRACT

The use of generally available materials for the electromagnetic steel sheets in a new motor for a one-motor SPORT HYBRID i-DCD has reduced costs, while the application of heavy rare earth-free magnets has assisted in the avoidance of procurement risk. The thickness of the steel sheets employed in the stator cores was increased from the previous 0.25 mm to 0.35 mm. The increased loss resulting from increased sheet thickness was responded to by modifying the number and position of the caulking dowels used in each stator core in order to reduce eddy current. Iron loss has also been reduced by machining corrugations into the inner circumference of the stator holder in order to reduce the contact area and thus reduce residual stress from press-fitting. In order to help ensure magnet heat resistance with the application of heavy rare earth-free magnets, the configuration of the magnets was changed from a parallel configuration to a V-shaped configuration fitted deep inside the inner circumference of the annulus formed by the rotor cores. In addition to this, the number of divisions of each magnet was changed from four divisions arrayed in the axial direction to two divisions arrayed in the circumferential direction, simplifying the production procedure and helping to realize a level of loss equivalent to that of the previous motor.

1. ま え が き

近年、自動車産業においては地球環境への影響から CO₂ 排出量を削減することが重要な課題となっており、電動化技術開発が益々盛んになってきている。モータ、インバータ、バッテリーという主要コンポーネントのコストはまだ高いため、世界的に広く普及していないのが現状である。より多くのお客様に乘っていただく価格帯を実現したハイブリッドシステムとして、Honda は 2013 年に 1 モータ SPORT HYBRID i-DCD を発売した。このシステムに用いた永久磁石型モータ（以下従来モータ）は Honda が独自に開発したモータであり、最高効率 96% 以上という性能

を実現した。従来モータは電磁鋼板に 0.25 mm の薄板高グレード材を採用することで電磁部の低損失化を実現していた。しかし薄板高グレード材はコストが高いことやグローバルに展開する際の材料調達リスクがある。

そこで、2016 年に発売した FREED Hybrid に本新型モータ（以下新型モータ）を適用した。一般的に流通している 35A270 グレードの電磁鋼板を用いながら、高効率なモータを実現する鉄損低減技術の開発をおこなった。

また、従来モータは高い耐熱性を実現するために、磁石に重希土類であるジスプロシウム、テルビウムを添加している。重希土類は特定の地域でしか採掘されないため材料調達リスクを伴う。そのため、重希土類フリーの技術開発

*四輪 R&D センター

をおこない⁽¹⁾、新型モータに適用した。本稿では、ステータの低鉄損化技術と重希土類フリー磁石の分割適正化について紹介する。

2. 搭載システムとモータ仕様

2.1. 搭載システム

新型モータを採用した1モータ SPORT HYBRID i-D2D のトランスミッションは、7速変速ギヤと一つのモータを内蔵している。FIT クラスに搭載可能なコンパクトサイズである。また、モータの巻線方式は分割ステータコアに銅線を巻き付ける突極集中巻方式を採用している。小型化と効率向上という相反する目標の両立を図りながら開発をおこなった。このトランスミッションの外観形状を Fig. 1 に示す。本システムは走行状況に応じてエンジンとモータの接続を切離することで、エンジンとモータで駆動するハイブリット走行、エンジンのみのエンジン走行、モータのみの EV 走行が可能である⁽²⁾。

2.2. モータ仕様

Fig. 2 にモータの外観図を示す。モータは大きく分けてステータとロータで構成される。ステータはトランスミッションケースへ締結され、三相の巻線コイルにインバータから通電することで回転磁界を発生させロータへ連続的にトルクを発生させる役割をもつ。

ステータコンポーネントでは、コーキングによってカシメられた電磁鋼板を積層してステータコアを構成している。絶縁性を保つために2分割されたインシュレータで挟み込み、マグネットワイヤを巻き付けている。その分割さ

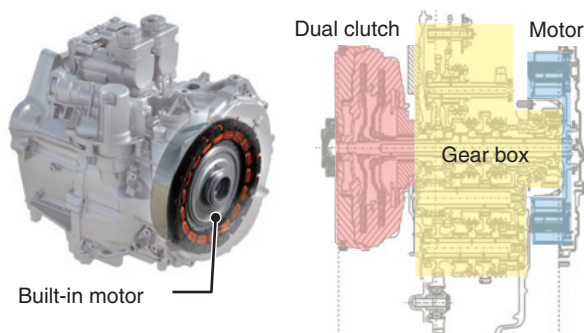


Fig. 1 Layout of 1-motor SPORT HYBRID system

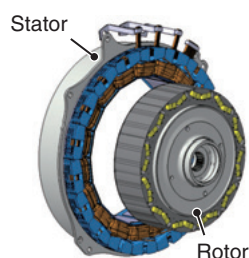


Fig. 2 Motor components

Table 1 Comparison of specifications

	Previous motor	New motor
Type	IPMSM	
Phase	3	
Number of poles	6	
Coil turns	55	
System voltage [V]	173	
Maximum motor power [kW]	22	
Maximum motor torque [Nm]	160	
Volume [L]	2.57	
Stator	Plate thickness [mm]	0.25
	Number of caulking points	2
	Holder	Press fit
Rotor	Magnet layout	Axial: 4
	Heavy rare earth magnet	Applied
	Number of magnets	96
	Magnet Br [T]	1.27
	Magnet H _{cj} [kA/m]	>2294
		Circumferential: 2
		Not-applied
		48
		1.35
		>1500

れたコアを18個で円周状に構成した後にステータホルダへ圧入して位置を規制している (Fig. 3)。

一方、ロータはトランスミッションへトルク伝達するために、磁束を生み出す磁石が挿入された電磁鋼板のロータコアをロータシャフトに圧入して構成されている。一般的に磁石は、損失低減のため複数個に分割されており、新型モータでは48個の磁石を用いている (Fig. 4)。

Table 1 に従来モータと新型モータの諸元表を示す。

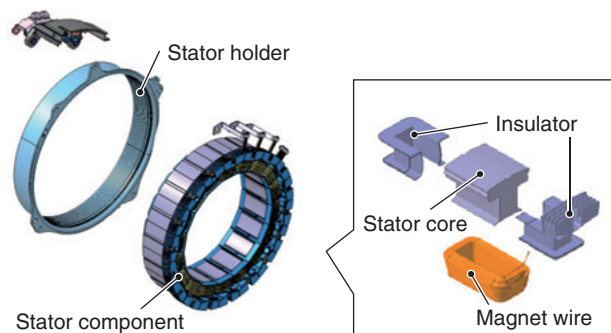


Fig. 3 Stator component parts

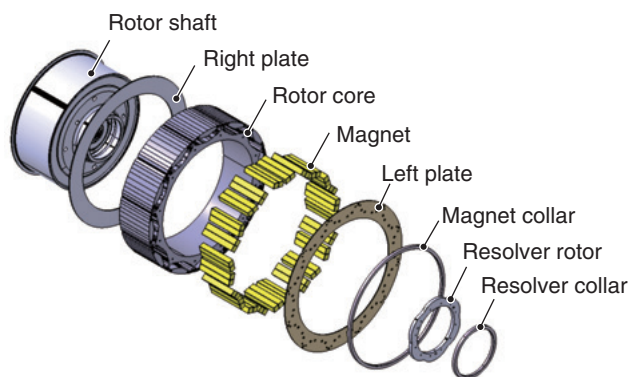


Fig. 4 Rotor component parts

3. 開発のねらい

従来モータでは、ステータコアの鉄損を低減するため 0.35 mm、0.50 mm より薄い 0.25 mm かつ高グレード材を採用してきた。一般的に流通しているグレード材を用いることができれば、グローバルな材料調達性を確保できるため、コスト低減効果が見込まれる。新型モータでは、グローバル調達も視野に入れ、ステータコアに板厚 0.35 mm の 35A270 グレードの電磁鋼板を採用した。

ステータコアに用いられる電磁鋼板の鉄損は式 (1) で求められる。鉄損は右辺第一項のヒステリシス損失と第二項の渦電流損失の和からなり、鋼板の厚みに影響を受ける。

$$W = fB^{1.6} + f^2 B^2 t^2 \quad (1)$$

B : Flux density

f : Frequency

t : Thickness

鋼板の厚みが 0.25 mm から 0.35 mm へ増えたことでモータ運転時の鉄損は、従来モータに対して 50% 増加することが磁場解析よりわかった。その鉄損増加の影響により、モータ効率は低下し、車輛の燃費低下を招くため、低損失化技術が必要となる。

また、重希土類フリー磁石を適応することで磁石耐熱性の対応が必要となる。そこで、磁石配置を従来モータの平行配置からロータコア内径へ深埋めした V 字配置に変更した。鉄損に含まれる磁石損失を低減するには磁石の分割数を増やすことで解決できる。しかしながら、一般的に磁石は細かく分割するほど鉄損が低減するが、磁石分割数が増えると加工費が増加する。このため、磁石鉄損と加工費低減の両立が必要となる。

そこで、新型モータの鉄損を従来モータと同等にするため、下記 2 項目の技術を構築した。

- (1) ステータの低鉄損失化技術
- (2) 重希土類フリー磁石の分割適正化

4. ステータの低鉄損失化技術

4.1. カシメ形状の最適化

ステータコアは磁束を通しやすい電磁鋼板材を積層したものであり、それぞれの鋼板はプレス時に成形されたコーキングによってカシメられており、その形状を維持している。従来モータは Fig. 5 に示すように積層時のねじれを抑制するため、離れた位置に円形のコーキングを 2 ケ所設定していた。

また、電磁鋼板は表面に絶縁被膜を塗布してあり、鋼板間の渦電流を絶縁することで損失を抑制している。しか

し、コーキングはプレスで成形する際に絶縁被膜を剥がし、隣り合う鋼板と接触するため、その導通部で渦電流損が発生する。

渦電流損失は式 (1) に示すとおり磁束密度の影響も大きく受ける。高回転領域は周波数が高く、また高トルク領域では磁束密度が高くなるため損失はさらに増加すると考えられる。よって Fig. 6 に示すとおり、磁束密度の変化が少ないコアティース中央部に 1 ケ所にカシメを設定することとした。カシメ点数を 1 ケ所にすることの課題として電磁鋼板を積層する際のコアのねじれがある。そこで、コーキング形状を円形から小判形状とした。コーキング形状に 2 面幅を設けたことにより、分割されたステータコアの回転方向を拘束することができた。

Fig. 7 に JC08 モード最多負荷頻度点にて磁束密度を解析した結果を示す。磁束密度が低い位置にコーキングを配置すると、ロータの位相に伴う磁束密度の変動も抑えられるため鉄損が低減できる。

4.2. 低接触圧入

新型モータのステータは円周状に 18 個に分割したコアを円筒のステータホルダへ圧入することで構成される。また、電磁鋼板の鉄損は圧縮応力下で増加することが知られており⁽³⁾、接触箇所を削減して高応力部を限定した方が全

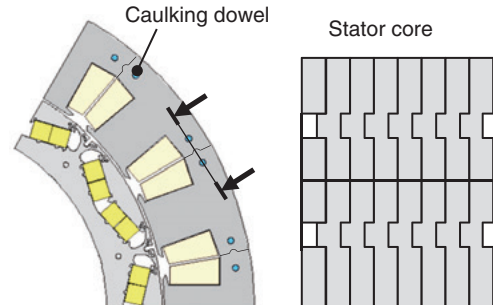


Fig. 5 Caulking dowels in stator cores

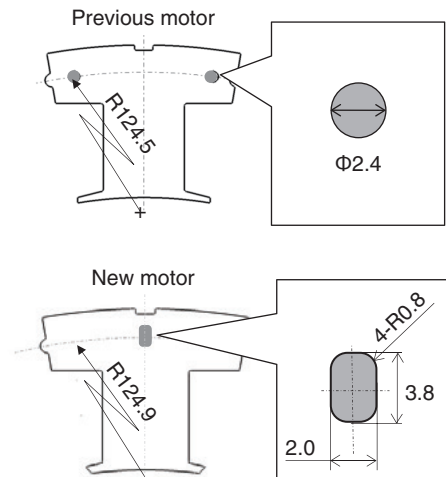


Fig. 6 Caulking shape

体の鉄損を低く抑えられると考えた。

新型モータでは、ホルダの圧入面に波形の形状を加工することでステータコアとステータホルダを波形の頂点で線接触させた。

Fig. 8 に応力解析による低接触圧入された後のステータコア圧入応力を示す。Fig. 8 図中 (5), (6) 部分の接触箇所は高い圧縮応力を受けている一方、(1) 部分は低い圧縮応力となっている。全体の圧縮応力のコンターを見ると接触面積に応じて鉄損は徐々に増加すると推定される。また、ステータコアに発生する鉄損を応力分布ごとに計算した結果、本低接触圧入によりステータ全体で平均 11% 鉄損が低減すると推定された。

Fig. 9 に実際に加工したステータホルダ内径部の写真を示す。ステータホルダの圧入面に仕上げ加工を施し、ステータホルダとステータコア間の圧入時の締め代設定が容易となる。そのため、必要な保持力と鉄損の最適設定で締め代を管理できる。

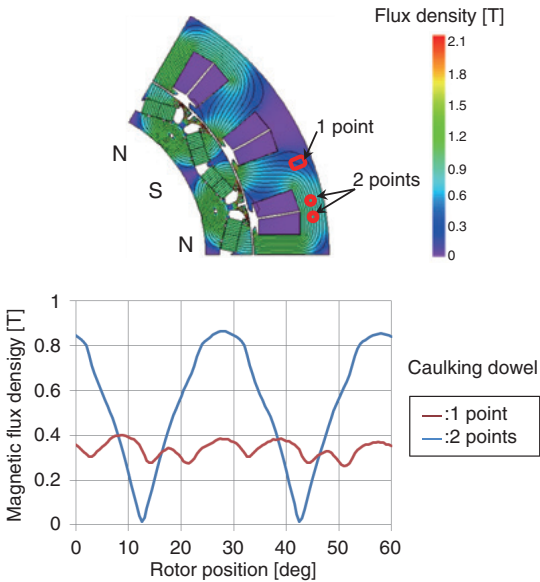


Fig. 7 Number of caulking points and results of analysis

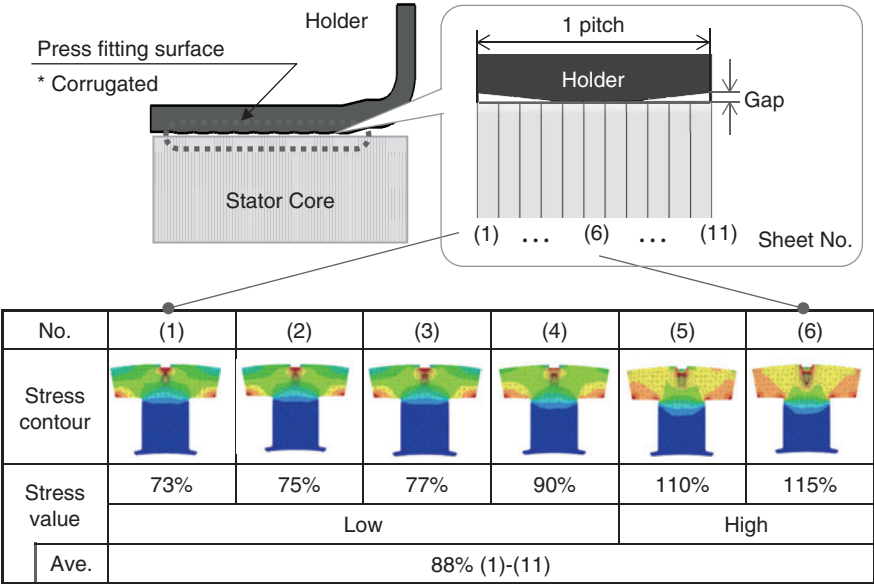


Fig. 8 Low-contact press-fitting characteristic

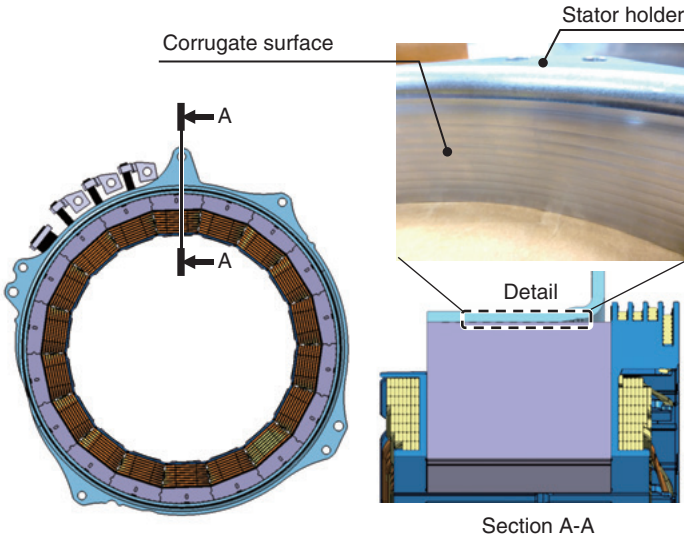


Fig. 9 Corrugated surface of stator holder

5. 重希土類フリー磁石の分割適正化

自動車に搭載される主駆動用モータは、使用環境が高温、強反磁界であるため、磁石には高い耐熱性すなわち保磁力 (H_{cj}) が求められる。重希土類フリー磁石を採用するにあたり、耐熱性の低下が課題となる。そのため、磁気回路による対策⁽¹⁾および、逆磁界を低減することが必要である。

磁石の分割数を増やすことで磁石内部渦電流損失の低減効果が得られることが知られている⁽⁴⁾。従来モータでは、磁石発熱を抑えるために極あたりに軸方向に4分割に並べる必要があり合計96個使用していた。一方、磁石の分割数に応じて加工コストの増加が生じるため、分割数を少なくすることも求められている。

Fig. 10で磁石に逆磁界を与えた時の磁石内部で発生する渦電流のコンター図を示す。磁石内で発生した渦電流が互いに打ち消し合うことで磁石端部と内部で磁石に発生する差があることがわかる。この結果、磁石内部に発生する渦電流を受ける面積を小さくするのが有効であると考えられる。

そこで、磁石分割数が最小限かつ従来モータ同等の鉄損になるように3次元磁場解析によってパラメータスタディを実施した。その結果、Fig. 11に示すとおり従来モータの

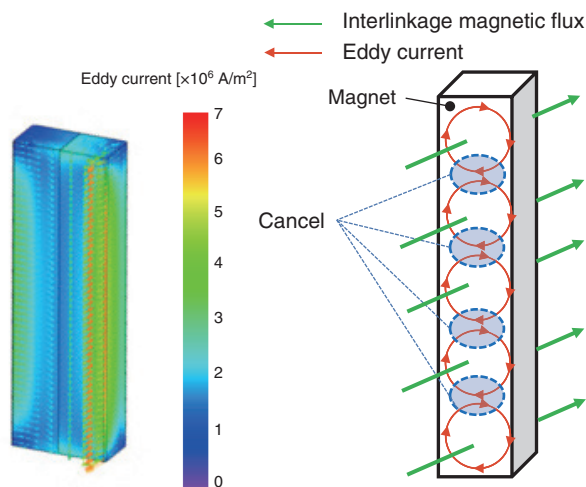


Fig. 10 Analysis of magnet loss

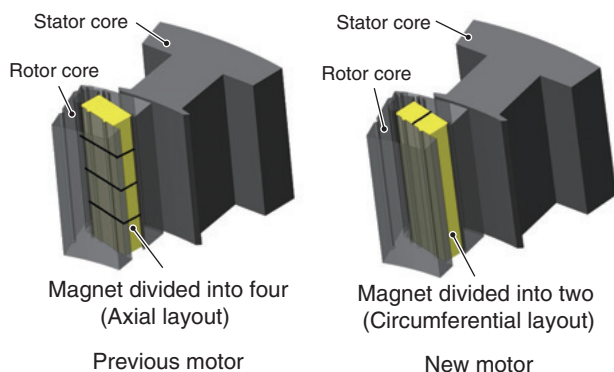


Fig. 11 Magnet division

磁石を軸方向に4分割に並べるのに対して、新型モータでは磁石を周方向に2分割に並べた。

次に、Fig. 12に磁場解析結果にて磁石分割の有無および分割配置の違いによる磁石損失結果を示す。解析条件は新型モータ体格で磁石内部渦電流損失が最も発生する7000 rpm、-30 Nmにおいて実施した。磁石を分割することで鉄損が半減できることに加え、本稿の分割手法により、従来モータ同等以下の損失にできる見通しが得られた。

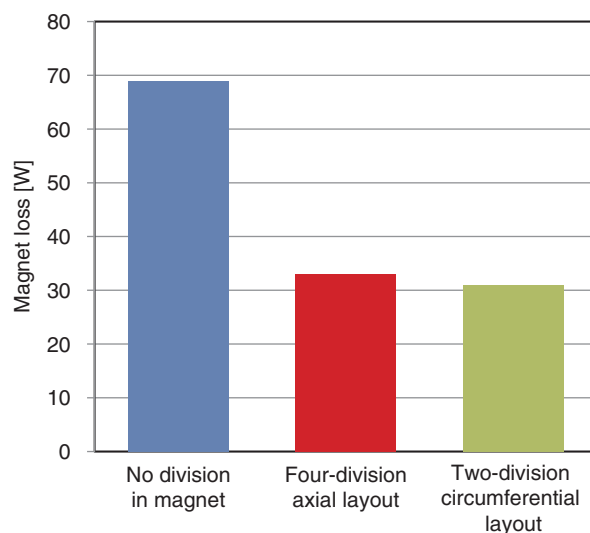


Fig. 12 Comparison of magnet loss

6. モータ損失評価結果

Fig. 13に従来モータと新型モータにおけるモータ損失の測定結果比較を示す。従来モータ損失から新型モータ損失を引いて、損失差分を濃淡で示している。燃費モードの

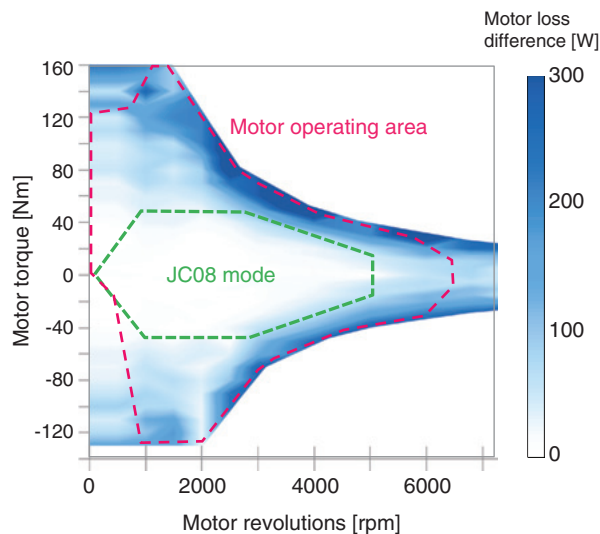


Fig. 13 Comparison of motor loss

JC08 運転領域では従来モータと同損失の結果が得られた。さらに、鉄損が大きい高回転領域および高トルク領域においては従来モータに対して損失が低減できた。

次に、JC08 モード走行時モータ損失への影響を示す (Fig. 14)。ここでは、単位時間あたりのモータ損失を積算し、従来モータをベース (100%) とする。従来モータに対して、ステータコアの一般材化によりモータ損失が増加するが、1 点カシメ、低接触圧入、磁石分割手法により、新型モータは従来モータ同等以下の損失であることを確認した。

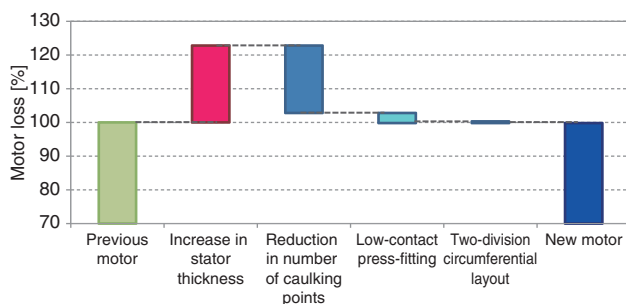


Fig. 14 JC08 mode motor loss

7. まとめ

重希土類フリーを実現した新型モータにおいて低鉄損技術を投入し従来モータと体格同等で同じ鉄損を満足させることができた。

- (1) ステータのカシメを磁束密度が低い位置に一カ所配置することで鉄損低減できる。また、ステータコアにホルダ圧入する際に接触箇所を削減させることで平均 11% の鉄損低減効果が得られた。
- (2) 重希土類フリー磁石の分割配置により必要最低限の分割数で従来品と同等鉄損にすることができた。

以上より、ステータコアの電磁鋼板に一般流通材グレードを使用し、さらに磁石の分割数を削減させることで従来モータよりコスト低減できた。

参考文献

- (1) 相馬慎吾, 藤代智, 白土英治: 重希土類フリー HEV 用モータの磁気形状研究, 自動車技術会学術講演会講演予稿集, No. 1-98, p. 39-43, (2016)
- (2) 四方哲, 鎌田剛史: 新型 HEV モータの開発, 自動車技術会学術講演会前刷集, No. 3-14, p. 1-4, (2014)
- (3) 尾田善彦, 石田昌義, 志賀信勇, 戸田広朗, 笠井勝司: 電磁鋼板の圧縮応力鉄損に及ぼす磁歪の影響, 平成

24 年電気学会全国大会, 第 2 分冊, p. 185-186, (2012)

- (4) 青山康明, 松岡孝一, 近藤稔: 永久磁石同期電動機の磁石分割による損失低減効果の解析, 平成 13 年電気学会産業応用部門大会講演論文集, p. 771-774, (2001)

■ 著 者 ■



藤代 智



鈴木 雄一



相馬 慎吾



梶野 大樹

電動車駆動用リチウムイオン電池性能の 確率分布の推定と推移予測

Estimation of Probability Distribution of Li-ion Battery Performance
for Electrically-propelled Vehicles

宮 下 拓 也*

Takuya MIYASHITA

川 村 雅 之**

Masayuki KAWAMURA

要 旨

Hybrid Electric Vehicle に搭載されたりチウムイオン電池の使い方と性能状態を、故障診断機を通じて収集した。収集データの分析により、ユーザ使用環境におけるリチウムイオン電池容量と、開発時に最も劣化が早いと想定した容量劣化予測ラインとの間にかい離があることがわかった。ユーザ使用環境におけるリチウムイオン電池性能は、初期性能ばらつき、使い方劣化ばらつき、耐久後劣化ばらつき、Electric Control Unit による性能算出誤差により構成されている。容量のかい離は、開発時に想定した性能劣化予測ラインが、上記の各性能因子のばらつきの厳しい位置づけの値が同時に発生する条件で算出されていることが原因で発生していた。

電池性能を構成する各ばらつきと、ばらつき間の相関関係を正確に把握し、それらを反映したリチウムイオン電池の劣化後性能の確率分布算出式を構築した。日本向け 2013 年モデル FIT HYBRID 126,742 台の使い方データと容量データを用いて、構築した算出式の妥当性を検証した。その結果、車両登録から 1.5 年経過後の実容量分布と、構築した式を用いて算出した 1.5 年後の推定容量分布の一致性が示され、算出式の妥当性が証明された。また、目標使用期間後の性能の予測確率分布に対し、開発時に想定した容量劣化予測ラインを用いた予測容量は 9.6σ の位置づけにあることを定量化できた。劣化後性能の確率分布を算出できるようになったことで、リチウムイオン電池の最適なコスト設計や、目標使用期間中に Hybrid Electric Vehicle の車両性能を最大限引き出すことが可能となった。

ABSTRACT

The usage and performance status of Li-ion batteries installed in hybrid electric vehicles were collected by means of fault diagnosis devices. Analysis of the collected data showed the existence of a margin between the Li-ion battery capacities in users' usage conditions and the estimated capacity degradation line that is foreseen during development to show the most rapid degradation. The distribution of the actual Li-ion battery performances in the users' usage conditions is composed of the initial performance distribution, the degradation distribution created by different usage patterns, the degradation distribution of Li-ion batteries within an identical set, and the performance calculation errors made by the electric control units. The capacity margin occurred as a result of the estimated performance degradation line foreseen during development being calculated under conditions in which the distributions of the above performance factors were simultaneously positioned at severe extreme values.

A formula, which reflects the actual distributions and the correlations between the distributions, was created to calculate the probability distribution of performance degradations of Li-ion batteries. Usage data and capacity data on 126,742 cars of the 2013 model FIT HYBRID for the Japanese market were used to verify the validity of the formula that was created. The results show that the probability distribution of real capacity at 1.5 years after a vehicle is registered agrees with the probability distribution of estimated capacity after 1.5 years as calculated using the created formula. This verified the validity of the formula. This also successfully quantified the position of the capacity estimated using the estimated capacity degradation line foreseen during development with respect to the estimated probability distribution of performance after a target use period as 9.6σ . As it became possible to calculate the probability distribution of performance after degradation, this enabled optimal cost design of Li-ion batteries, bringing out the maximum vehicle performance of hybrid electric vehicles during the target use period.

* 四輪 R&D センター

** R&D センター X

1. はじめに

リチウムイオン電池 (Lithium-ion battery: LIB) の性能とは容量または入出力特性を意味し、その使い方や使用年数に応じて劣化する。これは、LIB を搭載した Hybrid Electric Vehicle (HEV) の燃費等へ影響を与える。そのため、ユーザ使用環境で LIB の使い方や性能劣化度を把握することは、LIB を性能設計するうえで重要である。

Honda は、北米向け 2012 年モデルの Civic Hybrid を皮切りに、HEV に LIB を搭載している。LIB 開発時には、過去のユーザ使用環境サーベイや経験を元に性能設計する。そのため、LIB の使い方や性能状態を把握することを目的に、LIB を搭載したすべての HEV で、車載センサで計測した使い方データと車載 Electric Control Unit (ECU) で算出した性能データを ECU に蓄積している。蓄積されたデータは、Honda ディーラにて定期的に実施される車両点検等の際に故障診断機 (Honda Diagnostic System: HDS) を通じて収集される⁽¹⁾。収集されたデータは Honda サーバへ送信され、分析、活用されている⁽²⁾。収集されたデータを分析すると、ユーザ使用環境での LIB 容量と、開発時に最も劣化が早いと想定した容量劣化予測ラインおよび、ユーザ使用環境における入出力特性値と、開発時に最も劣化が早いと想定した入出力特性劣化予測ラインとの間にかい離があることがわかってきた。

例として、日本向け 2013 年モデル FIT HYBRID 126,742 台の ECU 算出容量と開発時に想定した容量劣化予測ラインを Fig. 1 に示す。

Fig. 1 から、開発時に想定した容量劣化予測ラインと比較すると、ユーザ使用環境での容量との間にかい離があることがわかる。

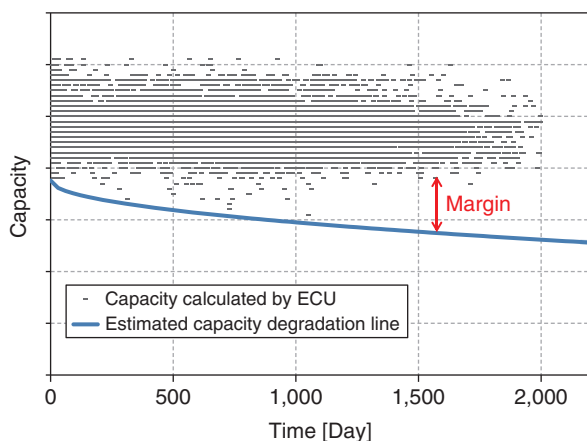


Fig. 1 LIB capacity of FIT HYBRID calculated by ECU

2. 現状課題

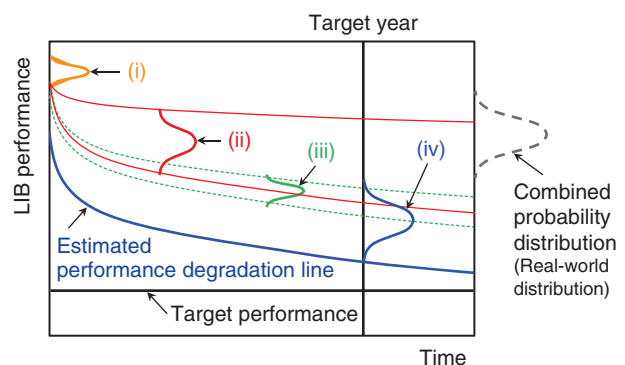
前章で記載したかい離の原因を解析するため、LIB の劣化後性能の要因を、以下の四つの性能構成因子 [(i) 初期

性能ばらつき, (ii) 使い方劣化ばらつき, (iii) 耐久後劣化ばらつき, (iv) ECU 性能算出誤差] に分解した。

(i) 初期性能ばらつきは、LIB の製造工程において、LIB の初期性能に影響を与える構成材料が LIB の個体ごとにばらつくことより生じる。(ii) 使い方劣化ばらつきは、さまざまなユーザが、さまざまな走行条件や環境条件で HEV を使用することに起因する LIB 性能の劣化度合のばらつきと定義する。使い方劣化ばらつきが生じる要因は、走行時に LIB にかかる電流負荷の差や、LIB がおかれる温度環境の差により、LIB の劣化速度が異なることである。(iii) 耐久後劣化ばらつきは、初期同一性能の LIB を同一使用条件、同一環境条件で使用する時に生じる LIB 性能の劣化度合のばらつきと定義する。耐久後劣化ばらつきが生じる要因は、劣化速度に影響を与える LIB の構成材料が製造工程でばらつくことである。(iv) ECU 性能算出誤差は、ECU が LIB 性能を算出する時に生じる誤差であり、センサ誤差や制御誤差が含まれる。これら四つのばらつきを用いることで、LIB の劣化後性能を漏れなく重複なく構成因子に分解することができる。

Fig. 2 に示すとおり、開発時に想定した性能劣化予測ラインは、各ばらつき因子の厳しい位置づけの値が同時に発生する条件で設定されている。一方で、これらのばらつきからなる開発時に設定した目標使用期間後の LIB 性能の予測確率分布を算出し、開発時に想定した性能劣化予測ラインが予測確率分布上でどのような位置づけになるか確認したことはなかった。

一般的に、LIB 性能劣化の促進因子は、LIB 温度、充放電電流値、使用充電率 (State of Charge: SOC) または電圧幅であるといわれている⁽²⁾。(ii) 使い方劣化ばらつきに着



Distribution factor		Value for estimation
(i)	Initial performance distribution	Lower specification limit
(ii)	Degradation distribution created by different usage patterns	Most severe usage profile
(iii)	Degradation distribution of LIB within an identical set	-3 σ of distribution
(iv)	Distribution created by ECU's calculation errors	-3 σ of distribution

Fig. 2 Factors of LIB performance degradation

Table 1 Usage factors in performance degradation for FIT HYBRID LIB

Usage factors in performance degradation		Test condition of durability test based performance estimation line
Drive	LIB temperature	Highest operational limit
	Charge and discharge pattern	Follows hardest pattern among all drive patterns
	Charge and discharge time	Longest time among real-world data
Park	LIB temperature	Highest temperature profile among major cities
	Voltage or SOC	Highest operational limit

目しても、例えば、FIT HYBRID に搭載した LIB の開発時に想定した性能劣化ラインは、これらの各劣化促進因子について想定されうる最も厳しい値が同時に発生する条件で算出されている (Table 1)。

しかし、LIB の使い方を分析すると、主要な劣化因子において、開発時に想定した最も厳しい使い方条件とユーザー使用条件の実態との間にかい離があることがわかってきた (Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5)。

Fig. 3, Fig. 4 から、LIB 温度、充放電電流ともに、性能劣化を促進する領域とユーザー使用環境での LIB の使い方

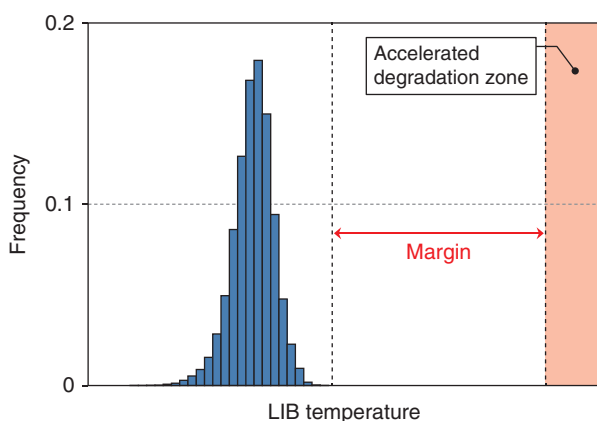


Fig. 3 LIB temperature during operation

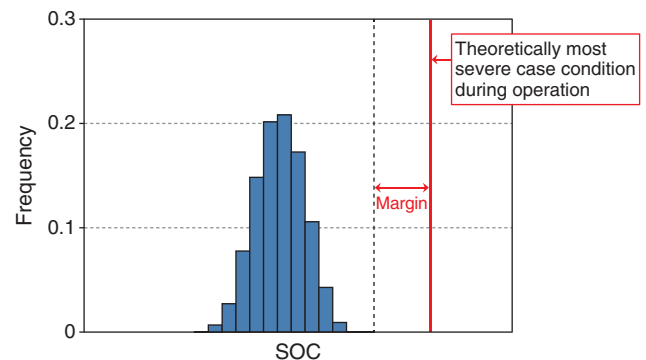


Fig. 5 SOC during park

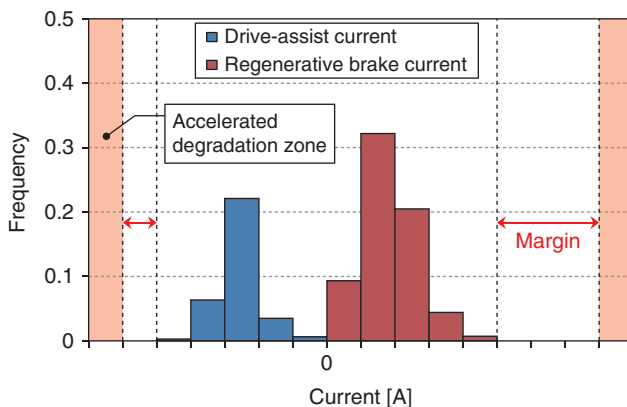


Fig. 4 Current during operation

の上限値または下限値との間にかい離があることがわかる。同様に、Fig. 5 から、想定される中で最も劣化が厳しいと考えられる SOC 値とユーザー使用環境での SOC の上限値の間にかい離があることがわかる。

これらのように、想定される中で最も劣化が厳しいと考えられる条件で LIB を性能設計した理由は、目標使用期間中に、高い信頼度で LIB の目標性能を満足させたかったためである。

一方、HEV は、目標使用期間中に燃費等の車両性能を変化させないことを前提に車両が設計される。そのため、経年劣化する LIB を搭載する場合、目標使用期間後の LIB 性能値を基準に HEV が設計される。仮に目標使用期間後の LIB 性能を過小に評価してしまうと、目標使用期間中の車両性能を過小に設定してしまうことになる。

目標使用期間中の HEV 性能を最大限引き出すためには、目標使用期間後の LIB 性能を正確に予測し、その正確な性能値を基準に車両性能を設計することが必要である。そのためには、ユーザー使用環境の実態に即して LIB 性能ばらつきの推移を正確に予測し、適切な信頼度で目標使用後の LIB 性能を設計する必要がある。LIB の性能、信頼度を定量的に設計するために、ユーザー使用環境における LIB の劣化後性能を確率分布として算出することが必要である。

3. 開発のねらい

目標使用期間中の HEV 性能を最大限引き出すことを目的とし、ユーザー使用環境における LIB 性能の確率分布の劣化推移を算出する。ECU 性能算出誤差は、車載状態での LIB 性能算出値に影響をおよぼすが、LIB 性能そのものには影響をおよぼさないで、本稿の考察対象外とし、以下 3 点を主要なねらいとした。

- (1) LIB 性能を構成する三つのばらつき (i) 初期性能ばらつき, (ii) 使い方劣化ばらつき, (iii) 耐久後劣化ばらつきを正確に把握すること。
- (2) 上記 (i), (ii), (iii) のばらつき間の相関関係 (非線形の相関関係も含む) を正確に把握すること。

- (3) (1), (2)を反映したばらつきの合成方法を構築し、ユーザ使用環境での LIB の劣化後性能を確率分布として算出すること。

4. 劣化後性能の確率分布算出手法構築

4.1. ばらつき値およびばらつき間の相関関係の把握手法
前章のねらいを達成するため、LIB 性能を構成するばらつき値および、それらばらつき間の相関関係を把握するための手法を Table 2 にまとめた。

(i) 初期性能ばらつきは、LIB 製造業者が提供する生産工程における LIB 性能値のデータから把握することができる。初期性能ばらつきデータのサンプル数、期間が不十分である場合、生産工程の工程管理基準値 (例: 設計ねらい中央値, 上下限規格値, 生産能力指数) から予測した、初期性能ばらつきを使用することも可能である。

(ii) 使い方劣化ばらつき, および (i) と (ii) の相関関係は、車両モデルおよび LIB 劣化モデルを用いて求める (Fig. 6)。車両モデルは電池の初期性能と時系列の車速, 外気温, 日射量を入力すればそれに応じた車両における LIB 印加電力推移を出力する。また、LIB 劣化モデルはその印加電力推移に応じて、LIB の電圧, 電流, 温度を時系列で算出し、その算出値の推移から LIB の劣化量を出力するモデルである。

使い方劣化ばらつきはさまざまな条件での車両の使い方によって生じる。しかし、膨大な数の車両における電力推移のパターンを実際の LIB に印加して劣化のばらつきを求めることが、資源制約上容易ではないため、モデルを用いてこのばらつきを算出している。ある初期性能の場合の使い方劣化ばらつきを求めるには、初期性能を固定してさまざまな使い方条件をモデルに入力する。そうすると、そ

Table 2 Methods to find distributions or correlations

Distribution or correlation		Method to find
Distribution	(i) Initial performance	Production history or production process
	(ii) Usage degradation	Models -Vehicle performance -LIB degradation
	(iii) Degradation within identical set	Durability tests
Correlation	(i) and (ii)	Models -Vehicle performance -LIB degradation
	(ii) and (iii)	Durability tests under various usage conditions
	(iii) and (i)	Durability tests of LIB with various initial performance levels

の使い方に応じたさまざまな LIB 劣化推移が得られる。得られた数千程度のデータから、その発生頻度を考慮して度数を足し合わせることで、使い方劣化ばらつきを把握することが可能となる。また、(i) と (ii) の相関関係の把握に関しては、同様にさまざまな使い方条件をモデルに入力するが、その際に初期性能を変化させる。こうすることで、初期性能が変化した際の劣化挙動への影響、すなわち (i) と (ii) の相関関係を把握することができる。

(iii) 耐久後劣化ばらつき, および (ii) と (iii) の相関関係, (iii) と (i) の相関関係は複数の LIB の耐久テストによって把握することが可能である。Fig. 7 に示すように、初期性能を固定して使い方を変化させる耐久テストと、使い方を固定して初期性能を変化させる耐久テストを実施することによって、ばらつき値と相関関係が把握できる。耐久後劣化ばらつきの発生要因は、初期の性能には顕在化していない LIB 工程因子のばらつきである。そのため、ど

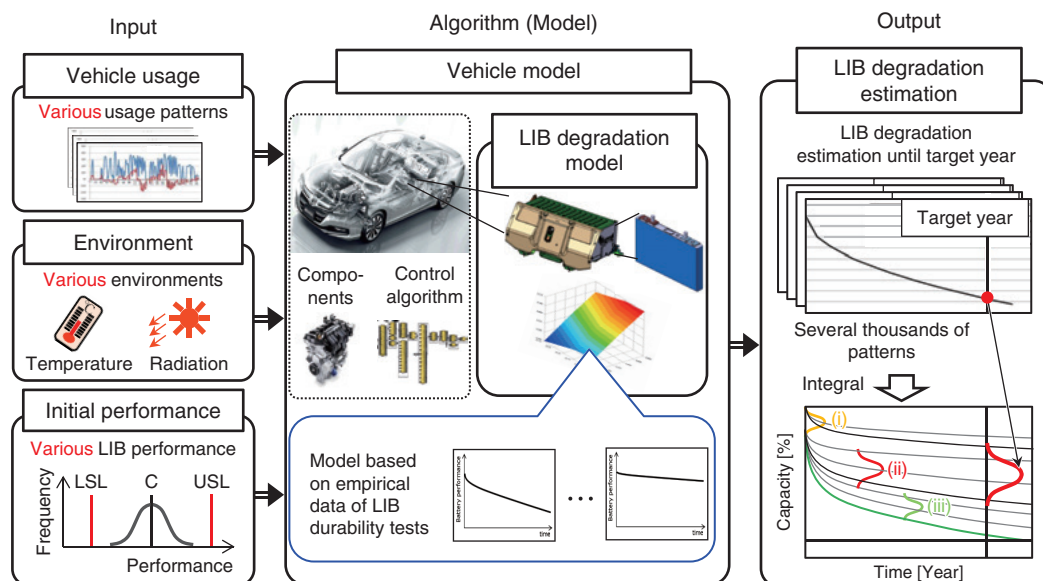


Fig. 6 Models for estimating performance degradation

らのテストの際にも複数セルの初期性能をほぼ同一に合わせ、その試供体を工程ラインから無作為抽出することが必要となる。

4.2. ばらつき因子の合成方法の構築

把握した相関関係に基づいて、(i)、(ii)、(iii)の各ばらつき因子の合成方法(畳み込み積分)を構築した。

(i)と(ii)の相関関係に関しては、モデルを用いたシミュレーションの結果、単純な線形の相関関係ではなく、条件付き分布となっていることがわかった。このことは、初期性能が異なれば、複数の異なる電力推移をLIBに印加して得られる使い方劣化ばらつきの確率分布が異なることを意味している。これは、LIBに同じ電力推移を印加しても、初期性能が違えば、LIBの使用SOC範囲や印加電流、またそれによる発熱量などが異なるためである。

また、(ii)と(iii)、(iii)と(i)の相関関係に関しては耐久テストによって、こちらも同様に線形の相関関係ではなく、条件付き分布となっていることがわかった。これは同じ初期性能から耐久テストをしても、使い方が異なれば劣化後性能ばらつきの確率分布は異なり、また、同じ使い方をして、初期性能が異なれば劣化後性能ばらつきの確率分布が異なることを意味している。

よって、車両の使い方を環境条件と走行条件に分けて、以下とおく。

初期性能: Per_{ini}

環境条件(気温、日射量の時系列データセット): Env

走行条件(車速等の時系列データセット): $User$

劣化後性能: Per

ある初期性能と環境条件と走行条件を与えた時の劣化後性能の条件付き確率密度関数は、(iii)耐久後劣化ばらつきも含めて、以下と定義することができる。

$$g(Per|Per_{ini}, Env, User) \quad (1)$$

これは、ある初期性能と環境条件と走行条件を与えると、それに応じた劣化後性能ばらつきの確率分布が一意に定まることを意味している。最終的に求めたい劣化後性能の確率密度関数 $f(Per)$ は、畳み込み積分の考え方をを用いて、この式に初期性能と環境条件と走行条件からなる確率

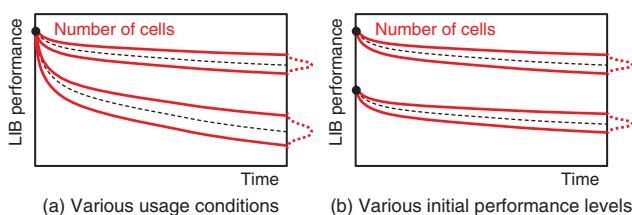


Fig. 7 LIB durability tests to obtain degradation distribution within identical set

密度関数をかけて、全範囲で積分すれば良いので、以下のように表現することができる。

$$f(Per) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g(Per|Per_{ini}, Env, User) h(Per_{ini}) u(Env, User) dPer_{ini} dEnv dUser \quad (2)$$

ここで、 $h(Per_{ini})$ は初期性能の確率密度関数で、 $u(Env, User)$ は環境条件と走行条件の同時確率密度関数である。一般的にLIBの初期性能と環境条件、走行条件には相関関係はないが、環境条件と走行条件の間には相関関係があると考えられるため、同時確率密度関数で表現している。

(1)式の条件付き確率密度関数はモデルでのシミュレーション結果と耐久劣化ばらつきテストから構築する。また、(2)式の右辺の初期性能の確率密度関数はLIB製造業者から提供されるデータを元に設定し、環境条件と走行条件の同時確率密度関数は実環境で収集した車両データから設定する。ただし、開発途中で十分な確度のデータがない場合には、予測した確率密度関数を用いても良い。目的に応じて適切な確率密度関数を設定することが必要となる。

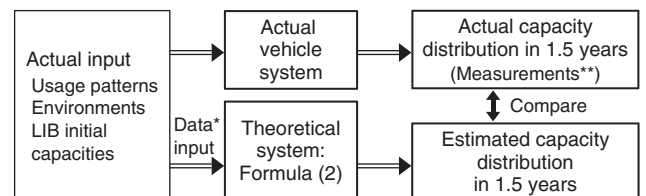
5. 算出式の妥当性および予測

5.1. 劣化後性能の確率分布算出式の妥当性検証

ユーザ使用環境におけるLIBの劣化後性能の確率分布算出式(2)の妥当性を検証するため、実車両に搭載されているLIBの実容量分布と、実際のLIBの使われ方データをもとに算出した推定容量の確率分布を比較した。両者の比較フローをFig. 8に示す。

推定容量分布が実容量分布と近しくなると、性能分布を正しく算出できていることとなり、算出式の妥当性が証明できることになる。前章と同じく、日本向け2013年モデルFIT HYBRIDのデータを活用し、算出式の妥当性を検証した。

使用する車両モデルは上記FIT HYBRIDの挙動分析用に構築したものをを用い、LIB劣化モデルはFIT HYBRIDに搭載されたLIB用に構築したモデルを用いた。走行パターン、環境条件、および実容量データはHDSより収集し、LIBの初期容量データは搭載LIBの製造業者から入手した。HDSの実容量データは車載ECUで算出した容量で



* Input data acquired through HDS or by LIB manufacturer

** Measurements acquired through HDS

Fig. 8 Analysis flow of comparison between actual and estimated capacity distributions

あるため、推定誤差が含まれる。そのため、比較条件を揃える目的で推定容量分布には、事前のテストで把握できている容量推定誤差のばらつきを付与した。

Fig. 9 に車両登録日から 1.5 年後の実容量分布と推定容量分布の比較を示す。

青で示したヒストグラムが実容量分布で、赤で示した確率分布が推定容量分布である。実容量分布と推定容量分布の中央値、分布幅、分布形状がほぼ一致していることが見て取れる。以上より、構築した算出式で正しく劣化後性能の確率分布を算出できていることを証明した。

5.2. 目標使用期間後の LIB 性能の確率分布予測

次に、目標使用期間後の LIB 性能の確率分布を算出する。この劣化後性能の確率分布と、開発時に想定した性能劣化予測ラインを比較することで、予測ラインのユーザー使用環境での位置づけを定量化した。両者の比較フローを Fig. 10 に示す。

開発時に想定した性能劣化予測ラインと、ユーザー使用環境での劣化後性能の確率分布の算出にあたり、車両モデル

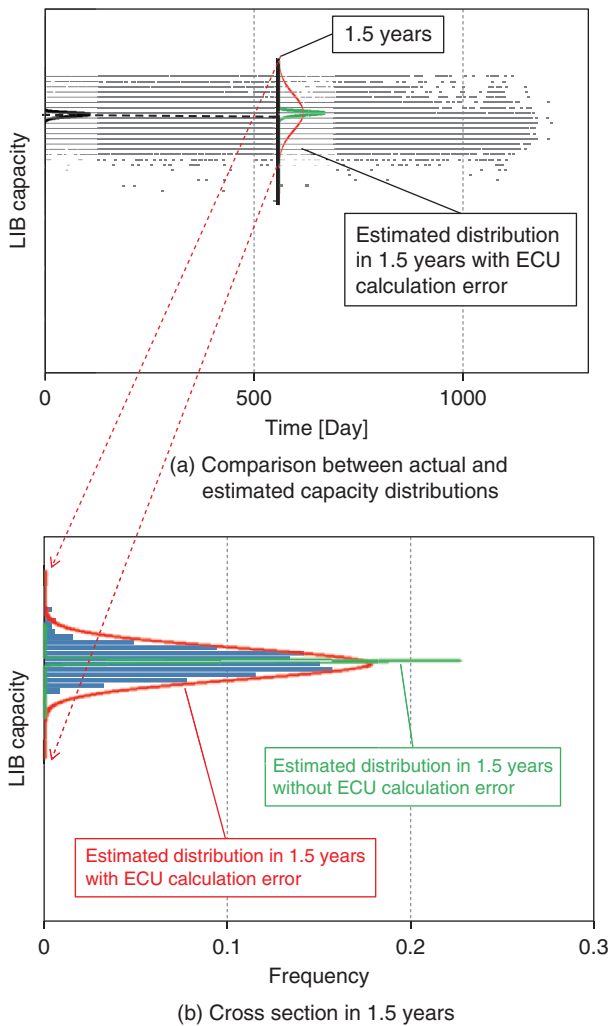


Fig. 9 Comparison between actual and estimated capacity distributions of LIB for FIT HYBRID

と LIB 劣化モデルは前項に記載のモデルで統一した。予測ラインは、2 章で記載したとおり、(i) 初期性能ばらつき、(ii) 使い方劣化ばらつき、(iii) 耐久後劣化ばらつきの厳しい位置付けの値が同時に発生するものとして算出した。一方、実環境を反映した劣化分布の算出にあたり、(ii) 使い方劣化ばらつきを算出するための走行条件、環境条件は実環境を想定したパターンが目標使用期間続くと仮定し、LIB の (i) 初期性能データと (iii) 耐久後劣化ばらつきデータは LIB 製造業者から入手した分布を使用した。

Fig. 11 に、容量と入出力特性のそれぞれに対して、目標使用期間後の LIB 性能の予測確率分布と、開発時に最も劣化が早いと想定した性能劣化予測ラインを示す。

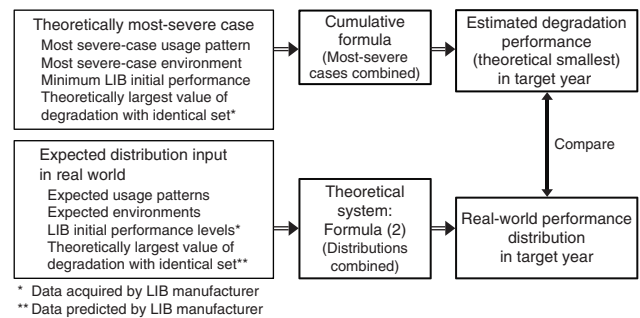


Fig. 10 Analysis flow of comparison between real-world performance distribution and theoretical smallest performance in target year

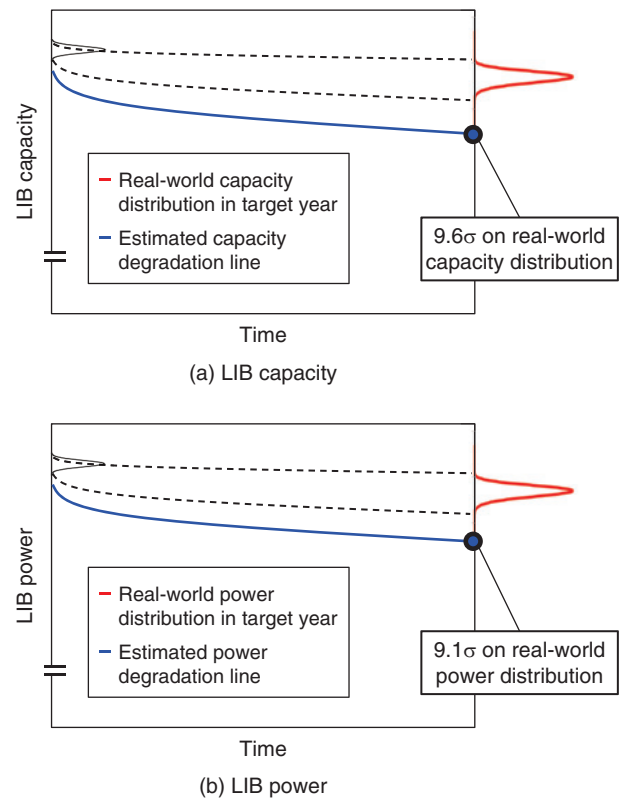


Fig. 11 Comparison between real-world performance distribution and estimated performance degradation line in target year

新規に構築した算出式(2)と入力データの分布化によって、目標使用期間後の LIB 性能を確率分布として算出することが可能になった。また、目標使用期間後の LIB 性能の予測確率分布に対し、最も劣化が早いと開発時に想定した劣化予測ラインを用いた予測性能は、容量で 9.6σ 、入出力特性で 9.1σ の位置づけにあることを定量化できた。

6. 価値

目標使用期間後の LIB 性能を確率分布として算出できるようになったことで、LIB の性能、信頼度を定量的に設計することが可能になった。仮に LIB 性能の予測確率分布に対し、過剰な信頼度で LIB 性能が設計されている場合、過剰な信頼度を最適化することにより生まれる価値は以下 2 点である。

一つ目の価値は、適切な信頼度になるまで設計性能を削減することにより、LIB コストや LIB 重量を削減できる (Fig. 12)。部品コストが安価になることで、HEV 売価を下げる事が可能となり、その価値をユーザへ還元することが可能となる。

二つ目の価値は、適切な信頼度になるまで目標使用後の LIB 性能目標を向上することである (Fig. 13)。こうすることで、LIB を搭載する車両の LIB 性能設定値を向上することができ、燃費等の車両商品性においてより性能の高い HEV を提供することが可能となる。

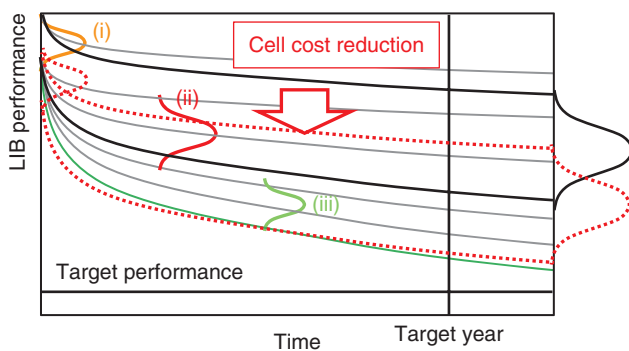


Fig. 12 First value option: Cell cost reduction

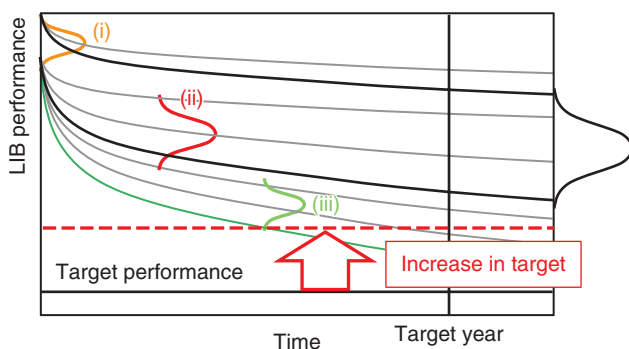


Fig. 13 Second value option: Increase in target

7. まとめ

HDS を通じて収集される、ユーザの HEV に搭載され LIB の使い方および性能データを分析し、以下の成果を得た。

- (1) (i) 初期性能ばらつき、(ii) 使い方劣化ばらつき、(iii) 耐久後劣化ばらつきの相関関係を正確に把握し、それらを反映したリチウムイオン電池の劣化後性能の確率分布算出式を構築した。
- (2) FIT HYBRID 126,742 台のデータを活用して、構築した算出式の妥当性を検証し、目標使用期間後の LIB 性能の予測確率分布に対し、開発時に最も劣化が早いと想定した劣化予測ラインを用いた予測性能は容量で 9.6σ 、入出力特性で 9.1σ の位置づけにあることを定量化できた。
- (3) LIB 性能の確率分布を算出できるようになったことで、最適な LIB のコスト設計、信頼度設計をすることが可能となり、目標使用期間中に HEV の車両性能を最大限引き出すことが可能となった。

謝辞

株式会社ブルーエナジーの井口隆明氏、倉富純一氏、落合誠二郎氏、新田和司氏、古川和輝氏には、初期性能ばらつきデータの提供や耐久後劣化ばらつきのテスト手法構築などの面で多大なる協力を頂き、心より感謝致します。

参考文献

- (1) 武政幸一郎、宮下拓也、赤松健治、羽田知史、上甲昌郎：テレマティクス技術を活用した BEV 用リチウムイオンバッテリー容量の推定と推移予測, Honda R&D Technical Review, Vol. 28, No. 1, p. 145-151
- (2) Miyashita, T., Kawamura, M.: Customer Usage and Durability of Li-Ion Batteries for Honda's Electrically-Propelled Vehicles, the 17th Annual Advanced Automotive Battery Conference, (2017)
- (3) 市村雅弘：小型リチウムイオン電池の寿命特性, NTT Building Technology Institute 2005, p. 1-7, (2005)

著者



宮下 拓也



川村 雅之

流体シミュレーションを用いた ボンネビルレース車両の空力開発

Aerodynamics Development for Bonneville Race Car Using Fluid Simulation

吉 井 一 真*

Kazuma YOSHII

宇佐美 雅 貴**

Masataka USAMI

長 谷 川 輝**

Akira HASEGAWA

岡 部 浩 司**

Koji OKABE

酒 井 敬 史**

Takashi SAKAI

粕 渕 真 輔**

Shinsuke KASUBUCHI

要 旨

Honda は米国ユタ州ソルトレイクシティのボンネビルソルトフラッツで2016年8月に開催されたBonneville Speed Weekと同年9月に開催されたMike Cook's Bonneville Shootoutに、日本独自カテゴリの軽自動車の排気量658 cm³エンジンを搭載した専用車両で参戦した。参加カテゴリで最高速となる450 km/hを達成することを目標に、限られたエンジン出力で目標速度を達成できる空気抵抗の車体形状と走行安定性を確保するため流体シミュレーションを活用し、レース車両の空力開発をおこなった。プロトタイプとレコードホルダのモデルを参考に目標とする空気抵抗の車体形状を設計した。高速走行時の車両のスピントめくれ上りを抑制して走行安定性を向上するため、レース車両には垂直尾翼と水平尾翼を取り付けた。現地で急きょ走行時の視界を向上するための形状変更が必要となったが、確立したプロセスより短期間で車両の安定性を考慮した車体形状の変更をおこなうことができた。その結果、Mike Cook's Bonneville Shootout 国際自動車連盟公認land speed recordのカテゴリA、グループ1、クラス4にて、クラス世界最高速記録となる421 km/hを樹立した。

ABSTRACT

Honda participated in both Bonneville Speed Week, held in August 2016, and Mike Cook's Bonneville Shootout, held in September 2016, at Bonneville Salt Flats near Salt Lake City, Utah (USA) using a special vehicle equipped with a 658 cm³ displacement engine for a Kei car, which is an original Japanese vehicle category. Fluid simulation was used to perform aerodynamics development for the race car to create a body shape with aerodynamic drag that enables to achieve the target speed with limited engine power and to secure driving stability. The goal was to achieve a speed of 450 km/h, which would be a new speed record for the participation category. A body shape with the target drag was designed using a prototype model, and models of record holders, as references. Vertical and horizontal wings were attached to the race car to suppress vehicle spin and flipping, in addition to increasing driving stability at high speeds. On site, it became necessary to change the shape for increased visibility while driving, but the developed process allowed for a rapid body shape change, keeping vehicle stability in consideration. As a result, the official world speed record of 421 km/h in the Category A, Group 1, Class 4 was set at Mike Cook's Bonneville Shootout (International Automobile Federation World Land Speed Records).

1. ま え が き

Honda は米国ユタ州ソルトレイクシティのボンネビルソルトフラッツで2016年8月に開催されたBonneville Speed Weekに専用の車体に日本独自のカテゴリである軽

自動車と同じ排気量のエンジンを搭載したレース車両で挑戦した。

参戦カテゴリにおける最高速度は2007年8月Bonneville Speed WeekでチームCostella Yacoucciが記録した433.686 km/h (269.480 mph)であった。そこで、目標速度を

* R&D センターX

** 四輪 R&D センター

カテゴリでの世界最速となる 450 km/h と定め、レース車両の開発をおこなった。

高速で走行する車両の走行抵抗では空気抵抗が支配的になる。そのため、限られたエンジン出力で目標速度を達成するために、目標となる空気抵抗を定め、車体形状を設計した。

レース開催地のボンネビルソルトフラッツは米国ユタ州グレートソルトレイクの西、標高約 1,200 m の高地に位置する 260 km² にも及ぶ広大な塩の平原である。コースが設定されている場所の北西には標高 2,000 m 級の山がそびえ、山から突発的に風が吹きおろすことが知られている。

過去のレースを調べると、走行途中でスピンやクラッシュをした事例があった。その原因を調べると、大会期間中、コースの路面は主催者によって整地されるが、路面状態は水分を含んだシャーベット状から砂のようなさらさらの状態などに变化しやすく、また、レースの進行とともに路面が徐々に荒れて、所々にわだちや段差が生じることがわかった。

目標速度を達成するためには、目標とする空気抵抗の達成とともに、風や路面などの外乱によりスピンやめくれ上がりが励起されない車両安定性の確保が重要となる。そこで、流体シミュレーションを活用して、目標とする空気抵抗の車体形状設計と走行環境を考慮した車両安定性の確保を目標にレース車両の空力開発をおこなった。

Bonneville Speed Week に参戦した結果、目標記録を達成することができなかったが、主催者から 9 月に開催される Mike Cook's Bonneville Shootout 国際自動車連盟 (FIA) 公認 Land Speed Record に招待され、カテゴリ A、グループ 1、クラス 4 にて、クラス世界最高速記録となる 421 km/h を樹立することができた。

本報では、流体シミュレーションを活用したレース車両の空力開発について紹介する。

2. 参戦カテゴリと車両緒元

2.1. 参戦カテゴリとレギュレーション

Bonneville Speed Week では排気量 508-753 cm³ 過給機付オートサイクルエンジンを搭載する専用車両のカテゴリに参戦した⁽¹⁾。Table 1 に参戦したカテゴリを示す。

スタート方法にレース車両を後方から車にて押し出す方法を選択した。

2.2. 車両諸元

参戦するために、SCTA official rulebook⁽¹⁾に則り、排気量 658 cm³、出力 184 kW のエンジンを搭載するボンネビル専用の車両を開発し、Honda S-Dream Streamliner と名付けた。

この車両の諸元を Table 2 に、外観を Fig. 1 に示す。

Table 1 Bonneville Speed Week of participation category

Body	BFS class (Blown Fuel Streamliner)	Turbochargers, superchargers and any choice of fuel are allowed in streamliner car
Engine	J class	508-753 cm ³

Table 2 Specifications of Honda S-Dream Streamliner

Body	Car name	Honda S-Dream Streamliner
	Length	8,500 mm
	Width	840 mm
	Height	1,185 mm
	Vehicle weight	830 kg
	Wheel base	4,800 mm
	Tire size (front, rear)	125/60R15, 115/110R15
Engine	Displacement	658 cm ³
	Bore × Stroke	66.0 × 64.0 (mm)
	Power	184 kW (250 PS)/10,000 rpm
	Torque	200 Nm (20.4 kgf-m)/9,000 rpm
	Cooling system	Water RAD, I/C
	Turbocharger	Garrett



Fig. 1 Appearance of Honda S-Dream Streamliner

3. 空力性能設計

搭載したエンジン出力を前提に、目標速度と安定性確保を達成できる空力性能要件を設定し、車両の開発をおこなった。

3.1. 車体の空気抵抗

走行中の車両では駆動力と走行抵抗が釣合関係にあるため、限られたエンジン出力で目標速度 450 km/h を出すためには、目標速度での走行抵抗である転がり抵抗と空気抵抗を、駆動力より小さくする必要がある。

空気抵抗は車体の形状、突起物などの凹凸、車体内外に出入りする流れや車体表面と空気の間で起こる摩擦によって生じ、式 (1) に示すように走行速度の二乗に比例して増加するため、高速走行時には空気抵抗 D が支配的となる。

$$D = \frac{1}{2} \rho v^2 C D A \quad (1)$$

ここで、 ρ は空気密度、 v は走行速度、 C_D は抗力係数、 A は車体の前面投影面積である。

そこで、エンジン出力 184 kW で目標速度 450 km/h を達成するため、転がり抵抗を除いた空気抵抗が $CDA \leq 0.09$ 以下となることを目標に定めた (Fig. 2)。

3.2. 揚力抑制

本車両の目標速度は航空機が離陸する速度以上となるため、車両が地面から離れることなく走行するために、車体に負の揚力 (ダウンフォース) が発生していることが求められる。そのため、揚力係数 $CL < 0$ となることを目標に定めた。

3.3. スピン抑制

路面の凸凹による車両振動や予期せぬ横風や突風などの外乱により、車両が過度に旋回するスピン現象が起こる場合がある。そのため、外乱が発生した場合でも車両がまっすぐ走行できるように安定性を確保することが必要である。

高速で走行する車両では、前後輪にかかる揚力やヨー角に対する横力とヨーイングモーメントの空力特性が車両の安定性に寄与することが知られており、直進付近の車体滑り角が小さな領域では車両の運動特性を示す指標であるスタビリティファクタによって評価できる^{(2),(3)}。

Fig. 3 に示すように、空力特性を考慮したスタビリティファクタ A_{aero} の算出式を式 (2) に示す。

$$A_{aero} = -\frac{m}{2l^2} \frac{l_f(K_f + \Delta K_{aero_f}) - l_r(K_r + \Delta K_{aero_r})}{(K_f + \Delta K_{aero_f})(K_f + \Delta K_{aero_r})} \quad (2)$$

ここで、 m は車両重量、 l はホイールベース長、 l_f 、 l_r は前後輪軸と重心位置までの距離、そして、 K_f 、 K_r は前後輪で単位スリップ角あたりに発生するタイヤのコーナリングパワーを示す。この式では、定常旋回時に発生する横力

を含む空力特性の影響を考慮するため、前後輪にかかる等価コーナリングパワーに式 (3) の ΔK_{aero_f} と式 (4) の ΔK_{aero_r} を用いている (Fig. 3)。

$$\Delta K_{aero_f} \cong -\frac{1}{2l} \frac{l_f K_f}{l_r K_r} \left(l_r \frac{\partial F_{aero_y}}{\partial \beta} + \frac{\partial M_{aero_z}}{\partial \beta} \right) \quad (3)$$

$$\Delta K_{aero_r} \cong -\frac{1}{2l} \left(l_r \frac{\partial F_{aero_y}}{\partial \beta} - \frac{\partial M_{aero_z}}{\partial \beta} \right) \quad (4)$$

ここで、 β は旋回時のスリップ角、 F_{aero_y} は車両にかかる横力、 M_{aero_z} は車両重心垂直軸周りのヨーイングモーメントである。

A_{aero} が正の場合はアンダステア特性、負の場合はオーバステア特性となる。そのため、外乱が発生した場合でも車両がまっすぐ安定して走行できるように、目標とする 450 km/h 以下の速度で、常に $A_{aero} > 0$ となることを目標に定めた。

3.4. めくれ上がり抑制

わだちや段差による路面入力により車両の姿勢が乱れ、車両先端が上向く (ピッチング) と、車体下面に流入した空気により車体に揚力が発生してピッチングを促進する、めくれ上がり現象が発生する場合がある。安定性確保のためにはピッチングが発生した場合、車両を元の姿勢に復元する力が作用することが求められる。

そこで、式 (5) と (6) に示すように、ピッチ角 α が変化しても前輪の輪荷重変動 $\Delta W_{lf_}\alpha$ と後輪の輪荷重変動 $\Delta W_{tr_}\alpha$ が常に正の値となることを目標に定めた (Fig. 4)。

$$\Delta W_{lf_}\alpha = W_{lf_}\alpha - L_{f_}\alpha > 0 \quad (5)$$

$$\Delta W_{tr_}\alpha = W_{tr_}\alpha - L_{r_}\alpha > 0 \quad (6)$$

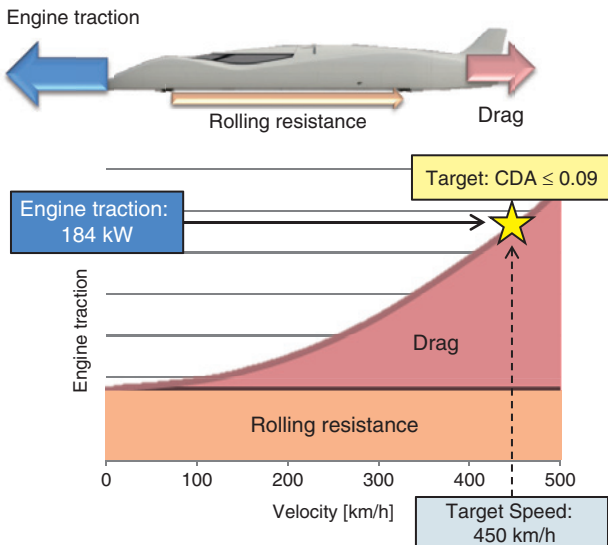


Fig. 2 Relationship between engine traction and total resistance

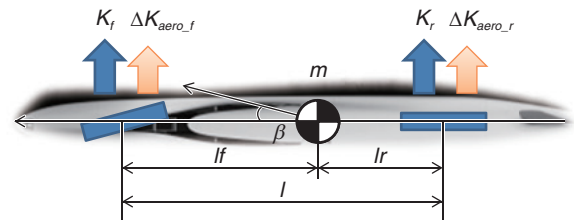


Fig. 3 Stability factor model diagram

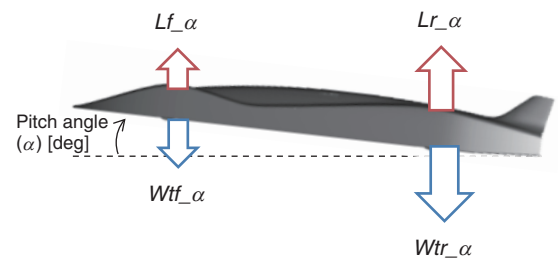


Fig. 4 Wheel load variation of car weight and lift force when pitching

Table 3 Aerodynamics design requirement

Category	Item	Target
Target speed		450 km/h
Aerodynamics	Specific drag	$CDA < 0.09$
	Body lift	$CL < 0$
Vehicle stability	Stability factor	$A_{aero} > 0$
	Wheel load variation at front and rear wheels	$\Delta W_{tf_a} > 0$ $\Delta W_{tr_a} > 0$

ここで、前後輪での車両の輪荷重を W_{tf_a} , W_{tr_a} , 前後輪に作用する揚力を L_{f_a} , L_{r_a} とする。

この章で示した目標速度と車両安定性を達成するために必要な空力性能設計要件を Table 3 にまとめる。

4. 車体形状設計

初期検討で考案されたプロトタイプモデルとボンネビルで上位の記録を保持するマシンの中で特徴の異なる3台のモデルを参考に、流体シミュレーションを活用して目標とする空気抵抗と揚力を達成するための車体形状を検討した。それらの車体形状と流体シミュレーションにより求めた断面圧力分布を Fig. 5 に、CD と CL の結果を Fig. 6 に示す。

CD はプロトタイプモデルが最小、CL は参照モデル2が最小となっていることがわかった。CL についてプロトタイプモデルと参照モデル2を比較すると、プロトタイプモデルの車体形状では最大頂点位置が車体の前方に位置す

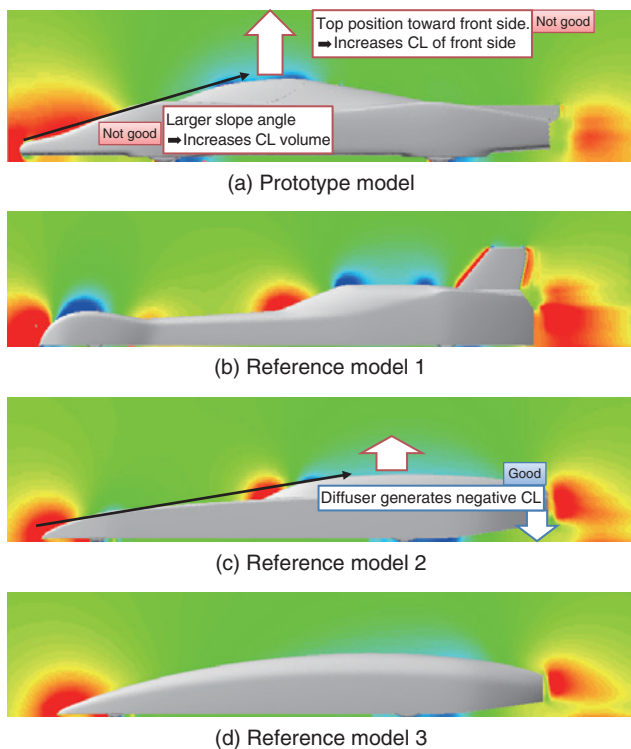


Fig. 5 Comparison of section pressure distribution of 4 models

るため前輪で正の揚力が発生していた。また、先端から頂点に達するまでの勾配が大きいと揚力が大きくなっていた。さらに、参照モデル2の結果から床下からリアエンドにかけての傾斜(ディフューザ)により負の揚力が発生させていることもわかった。そこで、CD が最小のプロトタイプモデルの形状をベースに、CL を負の値にするために頂点位置や高さ、傾斜角の寄与を検討し、修正したモデルを Fig. 7 に示す。

修正モデルの CDA は 0.085 となり、また、CL を負の値にすることができ、目標とする空気抵抗値と揚力を達成する車体形状を設計することができた。

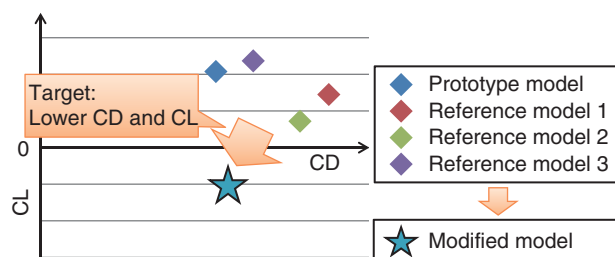


Fig. 6 CD and CL of 5 models



Fig. 7 Shape and section pressure distribution of modified model

5. 車両安定性の確認

5.1. スタビリティファクタの確認と対策

高速走行時にも車両の安定性が確保できていることをシミュレーションにて評価をおこなった。Fig. 7 に示す修正モデルの A_{aero} 計算結果を Fig. 8 に示す。この車体形状では 400 km/h を超える速度で $A_{aero} < 0$ となり、車両が不安定(オーバステア特性)となることがわかった。

原因を調べると、 M_{aero_z} の係数であるヨーイングモーメント係数 CYM のスリップ角 β あたりの値 CYM/β が大きく、車両を過度に旋回させる力のモーメントが発生することがわかった (Fig. 9)。

さらに、Fig. 10 に示す前後輪にかかる揚力係数 CL_f , CL_r を調べると、前輪のダウンフォースが後輪に対して大きいことから、前輪のコナリングフォースが後輪より強くなり、速度の上昇によりスタビリティファクタ A_{aero} が低下することがわかった。

そこで、目標速度でも $A_{aero} > 0$ となるよう、 CYM/β , CL_f , CL_r に着目して対策をおこなった。

CYM/β 低減のため、車体後方に垂直尾翼を設置した。

また、CLの負の値を保持したままCLfを弱めCLrを強めるために、垂直尾翼に水平尾翼を設置し後輪でダウンフォースを増加させる対策をおこなった。Fig. 11に垂直尾翼と水平尾翼の形状を示す。

さらに、CDやCLfとCLrのバランスを向上するために、ノーズコーン形状や、タイヤ周りの形状などの修正をおこない、レースカーの車体形状を決定した。Fig. 12にレースカーモデルの車体形状と断面圧力分布を示す。

レースカーモデルの A_{aero} をFig. 8に、CYM/ β をFig. 9に、CLfとCLrをFig. 10に示す。Fig. 8よりレースカー

モデルは450 km/h以上の速度域でも $A_{aero} > 0$ となることが確認できた。

5.2. めくれ上がり抑制の確認

目標速度450 km/hで車両がピッチングした場合において、後輪を支点としたピッチ角0 deg - 5 degの範囲で輪荷重変動を確認した。

Fig. 13にレースカーモデルの計算結果を示す。各ピッチ角において前後輪での輪荷重変動 ΔW_{tf_a} と ΔW_{tr_a} がいずれも常に正の値であることから、めくれ上りを抑制する車体形状であることを確認できた。

以上より、レースカーモデルでは修正モデルに対しCYM, CLf, CLr特性を向上させるために、空気抵抗となる垂直尾翼と水平尾翼を追加してCDAは0.089となったが、目標を達成することができた。そこで、Fig. 12に示すレースカーモデルの車体形状に基づきレース車両のカウルを製作した。

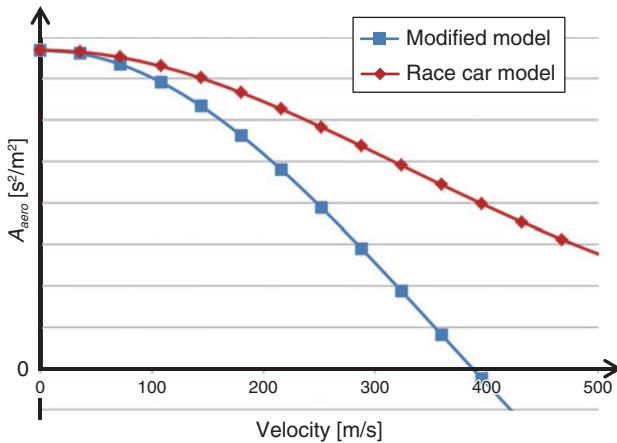


Fig. 8 Comparison of stability factor of modified model and race car model

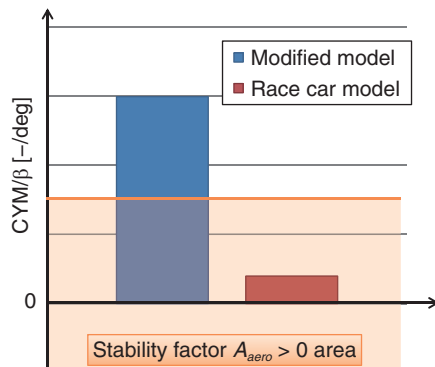


Fig. 9 Comparison of CYM/ β of modified model and race car model

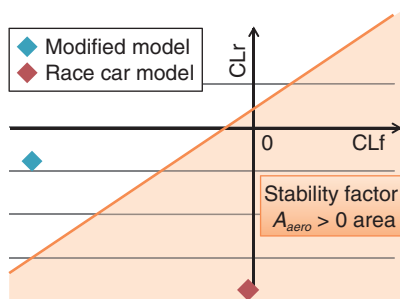


Fig. 10 Comparison of CLf and CLr of modified model and race car model

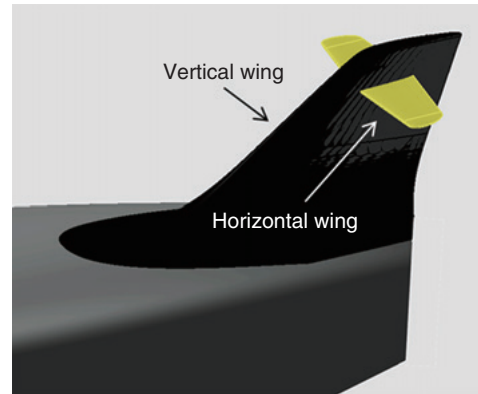


Fig. 11 Attached vertical and horizontal wing



Fig. 12 Shape and section pressure distribution of race car model

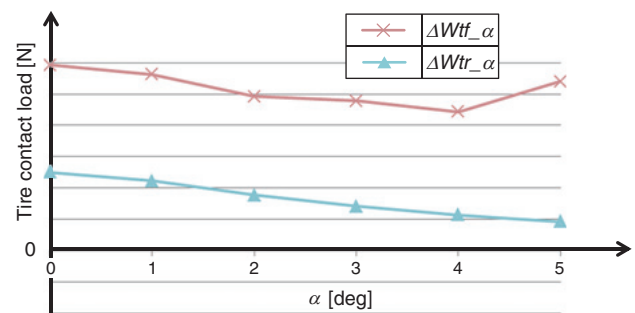


Fig. 13 Relationship between pitching angle and wheel load variation of race car model at 450 km/h

6. 車体形状の設計変更

レース車両を現地に発送する前、日本のテストコースにてドライバによる試走をおこない、車両の安定性や操縦性、視界性など運転に支障がないことを確認した。

そして、Speed Weekの2週間前に開催されたMike Cook's Bonneville Test & Tuneに参加し、レースコースでテスト走行をおこなった。Speed Weekではボンネビルソルトフラッツが環境保存地区であるため走行ラインが引かれておらず、真っ白な塩のコース路面の上に目印は1/4マイルごとに設置されているパイロンのみであった。さらに、走行時の振動によりパイロンの視認性が低くなりコースから逸脱する課題が明らかになった。この課題に対処するため、ドライバがパイロンを視認できる十分な視界を確保するような車体形状の設計変更をおこない、かつ、目標速度達成のために車体の空力性能と車両安定性の確保をおこなった。

改修後の車体形状と断面圧力分布の流体シミュレーションの結果をFig. 14に示す。CDとCLの計算結果をFig. 15に、CLfとCLrをFig. 16に、 A_{aero} の車速変化をFig. 17に、輪荷重変動をFig. 18に示す。

Fig. 15に示すように、形状変更によりCDが増加し、CLはゼロに近づいたことを確認した。

この原因は新たに取り付けたウィンドスクリーンの傾斜角度が大きく、抗力が増大し、前方視界確保のために前輪周りをカットしたことで揚力が増大したためである。

また、前輪回りで揚力が増大したためFig. 16に示すように、CLfが正の値になった。しかし、Fig. 17に示すように、 A_{aero} は高速側でより安定する方向に作用することを確認できた。

Fig. 18に示すように、形状変更によりピッチ角変化に

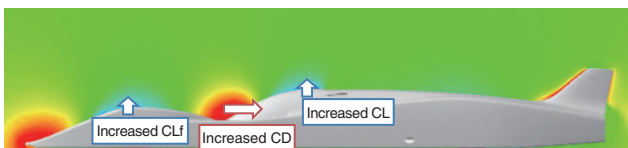


Fig. 14 Shape and section pressure distribution of race car revision model

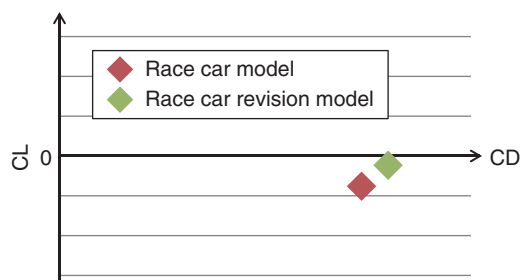


Fig. 15 Comparison of CD and CL of race car model and race car revision model

よる輪荷重変動は大きくなったが、目標とする要件は満足することを確認した。

十分な視界を確保したレースカー改修モデルは車両安定性の要件を満たすことができたが、CDAが0.097と目標を達成することはできなかった。

これらの形状設計変更と車両の安定性確認は流体シミュレーションを活用した確認プロセスが確立されていたため、3日間という短期間でできた。

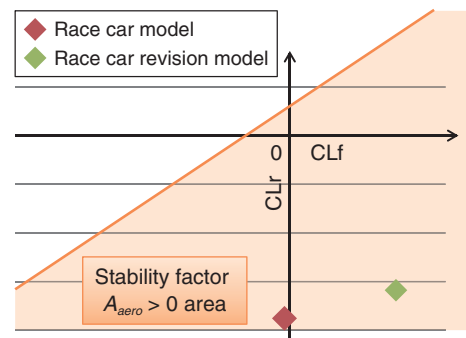


Fig. 16 Comparison of CLf and CLr of race car model and race car revision model

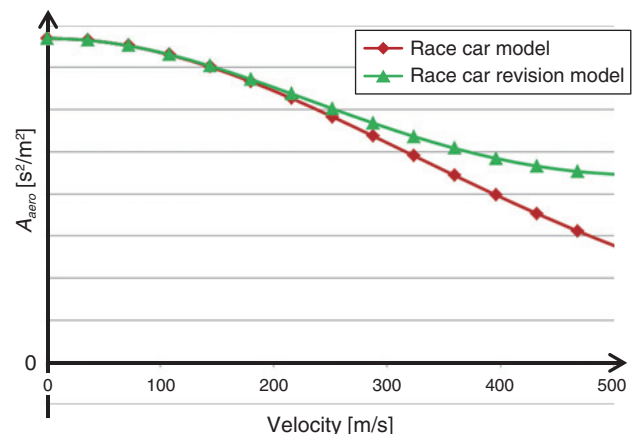


Fig. 17 Comparison of stability factor of race car model and race car revision model

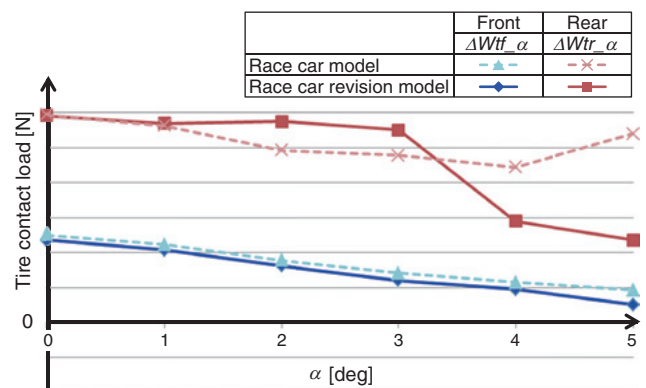


Fig. 18 Relationship between pitching angle and wheel load variation of race car model and race car revision model at 450 km/h

Table 4 Mike Cook's Bonneville Shootout (FIA recognized) participation category

Category A	Race car
Group 1	Otto cycle engine with supercharger
Class 4	Engine displacement 500-750 cm ³
Start	Flying start

Table 5 FIA Land Speed Record result

Vehicle	Honda S-Dream Streamliner
Constructor	Team Honda R&D
Driver	Hikaru Miyagi
1 mile record	261.875 mile/h (421.446 km/h)
1 km record	261.966 mile/h (421.595 km/h)

7. レース参戦結果

Bonneville Speed Week では目標とする参戦カテゴリでの記録の更新を達成できなかった。しかし、9月のMike Cook's Bonneville Shootout FIA 公認 Land Speed Record に招待され、カテゴリ A、グループ 1、クラス 4 のレースに参戦することができた。Table 4 に参戦カテゴリを示す⁽⁴⁾。

その結果、参戦カテゴリでの最高速記録となる 421 km/h⁽⁵⁾を達成することができた (Table 5)。

8. まとめ

目標速度 450 km/h を達成するためのボンネビルレース車両の空力開発において以下をおこなった。

- (1) 目標速度達成のために空力性能の比較調査検討で得られた結果から車体の抗力係数*前面投影面積 CDA と揚力係数 CL が目標値以下になるように車体形状設計をおこなった。
- (2) 車両に垂直尾翼と水平尾翼を設置することにより、車両のスピンとめくれ上がりを抑制し、高速走行の安定性を確保することができた。
- (3) 車両の視界確保をおこなうために、確立したプロセスにより短期間で空力を考慮した車体形状の設計変更と車両安定性確認ができた。
- (4) 目標速度を達成することはできなかったが、Bonneville Speed Week 後に招待された Mike Cook's Bonneville Shootout にて 421 km/h の FIA 公認のクラス世界最高速の記録を樹立することができた。

参考文献

- (1) SCTA members: 2016 SCTA Official Rulebook,

SCTA Officers, (2016)

- (2) Shibue, H. Ogawa, A.: Method of Vehicle Dynamics Analysis by Means of Equivalent Cornering Stiffness for Aerodynamic Forces and Moments, SAE Int. J. Passenger Cars - Mech. Syst. 5(2) p. 737-744, (2012)
- (3) 真塩亨, 皆川真之: 新型 CIVIC の高速操縦安定性のための空力技術, Honda R&D Technical Review, Vol. 29, No. 1, p. 17-24
- (4) <http://www.fia.com/sports/fia-world-land-speed-records>
- (5) <http://world.honda.com/automobile-technology/engineer-talk/BonnevilleSpeedWeek2016/sp/page6/>

■著 者■



吉井 一 真



長谷川 輝



酒井 敬 史



宇佐美雅貴



岡部 浩 司



粕 渕 真 輔

自律移動車椅子のためのビーコンモデルを用いた 知能化システムの構築

Intelligent System Using Beacon Model for Autonomous Wheelchair

宮 本 修 吾*

Shugo MIYAMOTO

越 膳 孝 方*

Takamasa KOSHIZEN

要 旨

Bluetooth Low Energy ビーコンを用いた自律移動車椅子を目指すための知能化システムを提案する。BLE ビーコンから得られる受信電波強度に機械学習を適用し、位置推定のためのビーコンモデルを生成する。これにより、自律移動制御の反応遅れが抑えられる。その結果、滑らかな走行、および目的地到達率が向上できる。

ABSTRACT

The system proposed is an intelligent system for autonomous wheelchairs using Bluetooth low energy beacons. A beacon model for estimating wheelchair position is generated by applying machine learning to received signal strength indicators from the Bluetooth low energy beacons. This beacon model reduces response lag for autonomous locomotion control, resulting in smooth driving and improving the destination arrival rate.

1. まえがき

近年、車両における自動運転技術が話題となっている。自動運転とは人間が運転操作をおこなわずに車両が自動で走行できることをいう。自動運転技術のねらいは交通事故削減、渋滞緩和、高齢者の移動支援など、社会課題の解決の一助となることである。Fig. 1 に、自動運転の基盤技術およびロードマップ⁽¹⁾を示す。自動運転は Advanced Driver Assistance System (ADAS) を中心としたレベル 1 と 2、条件付き自動運転であるレベル 3、そして完全自動運転であるレベル 4 に分類できる。昨今、レベル 3 以上相当の自律移動走行を目指すため、機械学習を利用したモデル予測制御 (Model Predictive Control: MPC) が考案されている^{(2), (3)}。

社会課題の一つである高齢者の移動支援に関しては、今後の超高齢社会への加速に伴い高齢者の車椅子利用の増加が予想される。しかし、高齢者が自身の思い通りに車椅子操作をおこなうことは容易ではなく、行動範囲が制限される。また、車椅子移動の介助を必要とすることが周囲の負

担増加につながる懸念される。そこで、自動運転技術を車椅子に適用した自律移動車椅子が求められる。

自動運転を実施するにあたってはカメラで白線などのラインを検知しトレース走行する手法が一般的だが、車椅子が走行する廊下や歩道は障害物が無数に存在するためラインを引くことが容易ではない場合が多い。また、目的地へ移動するためには車椅子の位置推定が必要だが、屋内では GPS による測位は利用できないため代わりの手段が必要である。代替手段の一つに Bluetooth Low Energy (BLE) ビーコンから得られる受信電波強度 (Received Signal Strength Indicator: RSSI) を用いた位置推定技術⁽⁴⁾がある。BLE ビーコンは比較的安価でバッテリーの持ちが良いという特徴がある。しかし、BLE ビーコンの設置環境によっては電波干渉が発生し、自律移動制御に用いるには精度面に課題がある。

そこで本研究では、BLE ビーコンの RSSI を機械学習にて分類し、地図上の位置との関係性を生成したビーコンモデルを提案する。この関係性により、仮に電波干渉が生じる環境状況でも逆推定的に車椅子の位置推定が可能とな

* R&D センター X

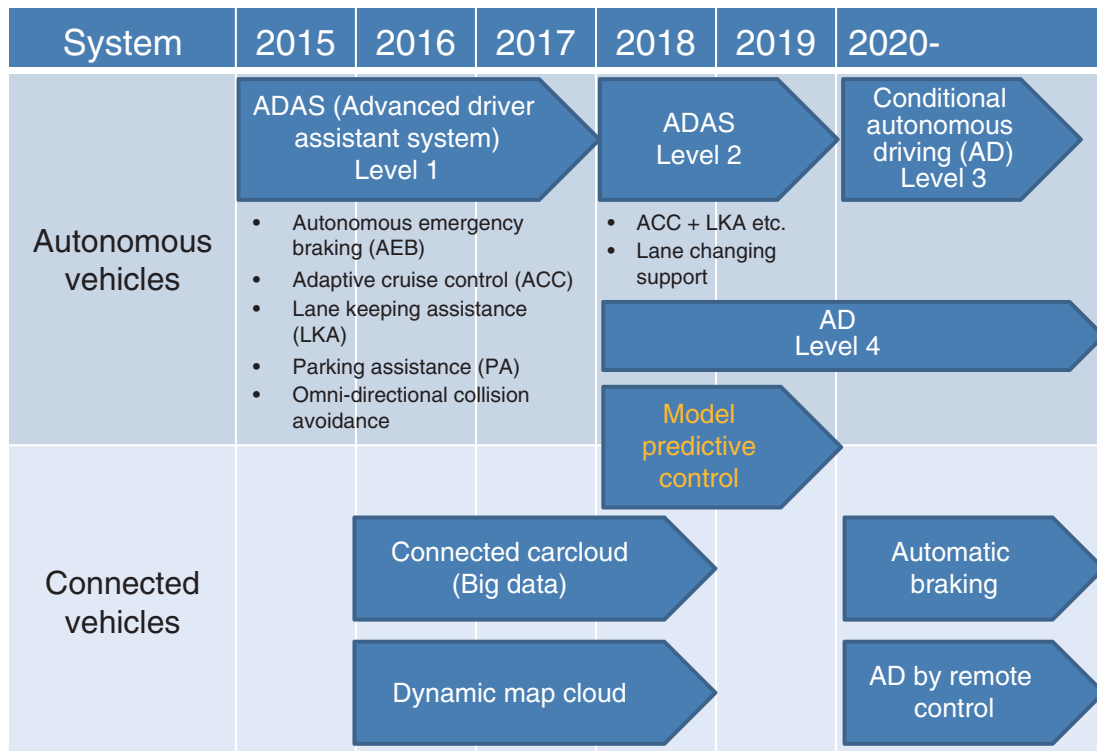


Fig. 1 Road map for autonomous driving

り、カメラによる障害物検知と組み合わせることで車椅子の自律移動が実現できる。これまで、ビーコンモデルによる位置推定とカメラを用いたコーナ部における壁などの障害物検知を結合することで、加減速の少ない滑らかなコーナリング制御法を提案してきた⁽⁵⁾。また、ビーコンモデルを用いることで、加減速変化の小さい滑らかな車椅子自律移動走行が可能となるため、バッテリー低電力消費化についても検討してきた⁽⁶⁾。

本稿では、機械学習により生成されるビーコンモデルの特徴、およびそれを用いて車椅子を自動運転走行した際の走行安定性の結果について述べる。

2. 開発のねらい

Fig. 2 に、2 個の BLE ビーコンの近くを車椅子が移動した際の RSSI 計測例を示す。横軸は時間、縦軸は RSSI

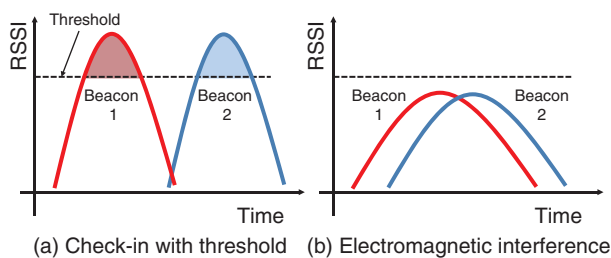


Fig. 2 Electromagnetic interference of two BLE beacons

である。従来、BLE ビーコンを位置推定に用いる場合、Fig. 2(a) で示すように RSSI にしきい値を設定しておき、車椅子の走行中に計測した RSSI がしきい値を超えたら近くの BLE ビーコンに接近 (チェックイン) したと判定する手法がある。しかし、環境によっては Fig. 2(b) のように電波干渉により計測される RSSI が小さくなることで、互いのチェックインがおこなえないという課題がある。そこで、本研究ではあらかじめタブレット端末で走行環境下の RSSI を収集しておき、機械学習を用いて RSSI を分類しビーコンモデルを生成した。

Fig. 3 に、走行をおこなう屋内のふかん地図を示す。同

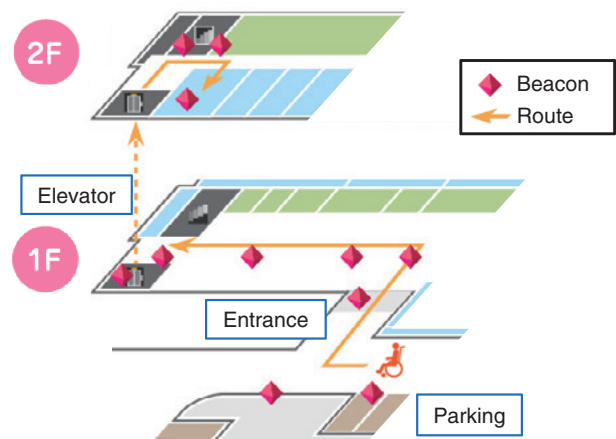


Fig. 3 Indoor map for preliminary experiment

図中、矢印で車椅子の走行経路、赤菱形で BLE ビーコンの配置場所を示す。BLE ビーコンはコーナやエレベータ付近、また走行経路に沿って配置する。

今回、ビーコンモデルによる位置推定と滑らかなコーナリングを組み合わせることで、車椅子の自律移動走行の安定率を向上させることを目標とする。ここで、自律移動車椅子における走行安定率とは、設定した目的地まで到達できること、また到達するまでに至る目標走行に対するふらつきの少なさをいう。

3. システム構築

3.1. 自律移動制御の概要

Fig. 4 に、使用する車椅子と、BLE ビーコンを示す。車椅子には BLE ビーコンからの RSSI 情報を収集するためのタブレット端末と障害物検知のためのステレオカメラが装着されている。BLE ビーコンはホシデン株式会社製で、直径 5 cm、および重量は 28 g である。コイン型電池 CR2450 を使用し、約 1 年間、バッテリー交換なしで動作する。

Fig. 5 に、提案する車椅子の自律走行を実施する制御フローを示す。本制御は、ビーコンモデルによる位置推定と、ステレオビジョンを用いた障害物検知を組み合わせることを特徴とする。

例えば、ビーコンモデルによりコーナ部であると位置推定された場合、車椅子正面に設置したステレオカメラによ

り壁や左右の障害物を検知し、操舵量の微調整をおこない車椅子をコーナリングさせる。走行するにつれて進行方向や距離の誤差が累積するため、画像処理にて BLE ビーコンと車椅子の位置関係を算出し補正をおこなう。

これらの自律移動動作を繰り返し、最終的に目的地であると位置推定した場合、車椅子の動作を停止させる。

3.2. ビーコンモデル

上述の自律移動走行制御フローにおいて、行動計画を立てるために車椅子の位置推定が必要となる。その位置は、Fig. 6 で示される目的関数 $f(X; \theta)$ によって推定できる。ここで、 f は未知の目的関数であるため、式 (1)、式 (2) で表される密度関数 $P(X|L)$ で近似できる。 μ_{jL} は平均値、 σ_{jL} は共分散値、 L は位置のラベル、 α は学習係数である。パラメータ θ は正規分布関数をモデルとし (以降、ビーコンモデル)、統計的機械学習の代表である期待値最大化 (Expectation Maximization: EM) アルゴリズム⁽⁷⁾によって求められる。

$$P(X|L) = \sum_{j=1}^K \frac{\hat{\alpha}_{jL}}{(2\pi)^{1/2} \sqrt{|\hat{\sigma}_{jL}|}} \exp \left[-\frac{1}{2} (X - \hat{\mu}_{jL})^T \hat{\Sigma}_{jL}^{-1} (X - \hat{\mu}_{jL}) \right] \quad (1)$$

ここで、学習係数 α は以下の制約を満たすとする。

$$\hat{\alpha}_{1L} + \hat{\alpha}_{2L} = 1.0 \quad (2)$$

Fig. 7 に、コーナ部における BLE ビーコンの RSSI とラベルのイメージ図を示す。まず、BLE ビーコンを走行

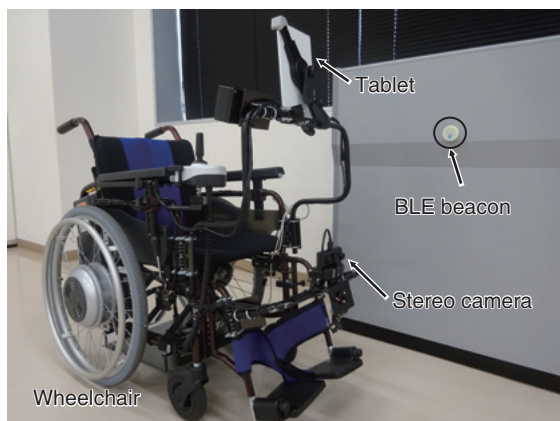


Fig. 4 Motorized wheelchair and BLE beacon

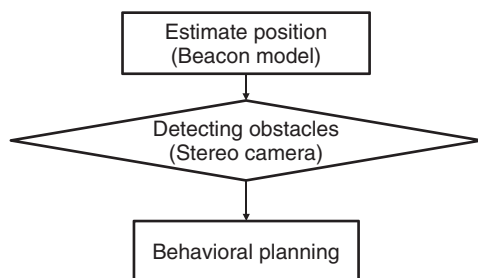


Fig. 5 Block diagram of autonomous wheelchair

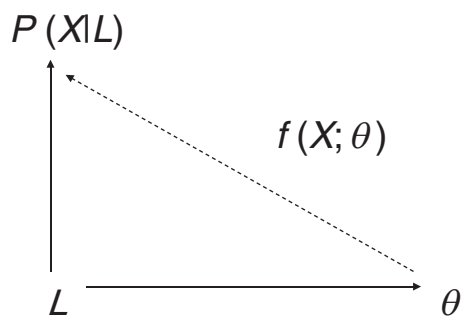


Fig. 6 Probability density function from label X

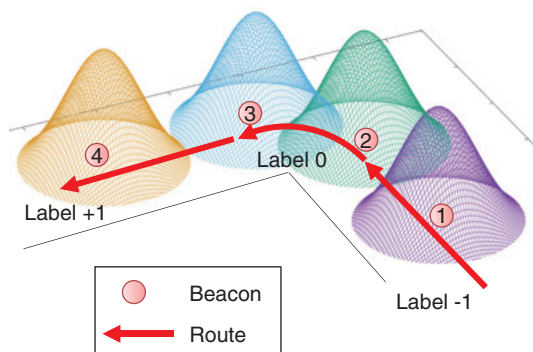


Fig. 7 Wheelchair position estimation with beacon models

ルートを沿って配置し、車椅子に装着したタブレットで走行時に得られる RSSI を機械学習用の学習データとしてあらかじめ収集する。次に、RSSI をコーナ前 (ラベル -1)、コーナ中 (ラベル 0)、コーナ後 (ラベル +1) の三つに、人為的に位置で分割してラベル化する。これらの位置は、走行時にコーナリングを開始、また終了した場所と時間を記録しておき、収集した RSSI の時間軸と同期することで求めた。これらのラベル化された RSSI にもとづき、EM アルゴリズムを適用してビーコンモデルを生成する。

Fig. 8 に、ビーコンモデル生成に適用した EM アルゴリズムのフローを示す。EM アルゴリズムは統計学において確率モデルのパラメータを最尤推定する手法の一つであり、観測不可能な潜在変数に確率モデルが依存する場合に用いられる。式 (3)、式 (4) で表される期待値 (Expectation: E) 計算のステップと、式 (5) から式 (7) で表される最大化 (Maximization: M) 計算のステップを有する。E ステップでは、現在推定される潜在変数の分布にもとづき、確率モデルの尤度の期待値が求められる。一方、M ステップでは、E ステップで求められた尤度の期待値を最大化するようなパラメータが求められる。E ステップと M ステップを交互に繰り返し、確率モデルを式 (1) に示す混合ガウス関数とみなせば、各ガウス関数を構成する平均値 μ_{jL} や共分散値 σ_{jL} が推定できる。

$$h_{ij} \equiv E[z_{ij}|x^i, \theta] \quad (3)$$

$$h_{ij} = \frac{a_j(t) / ((2\pi)^{n/2} \sqrt{|\Sigma_j(t)|}) \exp[-(1/2)(x^i - \mu_j(t))^T \Sigma_j(t)^{-1} (x^i - \mu_j(t))]}{\sum_{k=1}^K a_k(t) / ((2\pi)^{n/2} \sqrt{|\Sigma_k(t)|}) \exp[-(1/2)(x^i - \mu_k(t))^T \Sigma_k(t)^{-1} (x^i - \mu_k(t))]} \quad (4)$$

$$a_j(t+1) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N h_{ij}(t) \quad (5)$$

$$\mu_j(t+1) = \frac{\sum_{i=1}^N h_{ij}(t) x^i}{\sum_{i=1}^N h_{ij}(t)} \quad (6)$$

$$\Sigma_j(t+1) = \frac{\sum_{i=1}^N h_{ij}(t) (x^i - \mu_j(t+1))(x^i - \mu_j(t+1))^T}{\sum_{i=1}^N h_{ij}(t)} \quad (7)$$

Fig. 9 に、Fig. 7 中のラベル 0 区間で計測された BLE ビーコン 3 の RSSI を機械学習処理した例と、対数尤度とステップ数との関係を示す。対数尤度とは、学習の収束性を示す評価関数である。今回、機械学習から走行時間と RSSI とのより線形な関係性を得ることをねらいとし、情報量規準の Bayesian Information Criterion (BIC) にもとづいて Fig. 9(a), Fig. 9(b) 中の楕円で囲まれるような二個のガウス関数を抽出する。

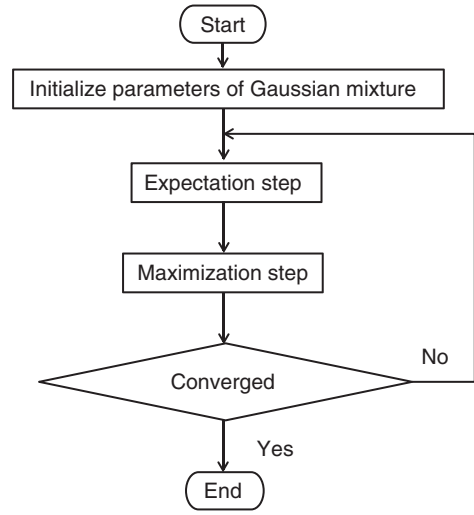


Fig. 8 Block diagram of EM-algorithm

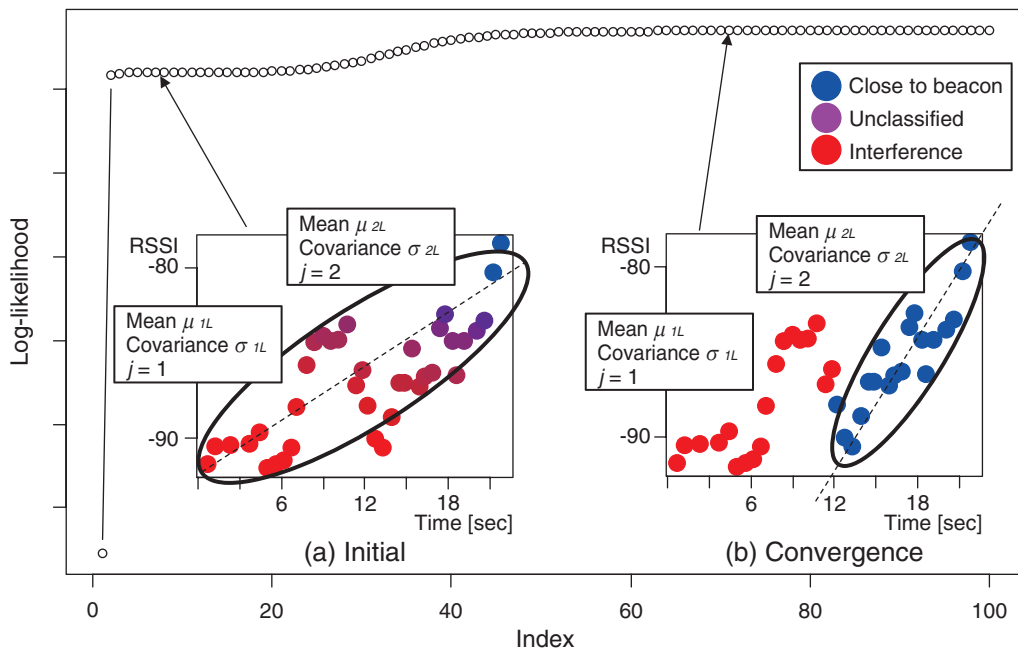


Fig. 9 Beacon models learned by machine learning and log-likelihood

Fig. 9(a), Fig. 9(b) 中の RSSI の色分けについて, 青色の時間帯は車椅子が最寄りのビーコンに接近している走行時間帯を示す. 学習過程の初期は, Fig. 9(a) のようにはっきりと RSSI のデータ構造が分類されていない状態であらわれ, その後, Fig. 9(b) のように RSSI のデータ構造が二つに分類された状態へ学習が収束する. RSSI はマルチパスの影響などにより他の RSSI と干渉し合う. そこで, 機械学習を使い最寄りのビーコンへの移動走行時間帯に対応した RSSI を選択的に抽出することで, 分離しない場合に比べアーティファクトがかなり減り, モデル精度向上が見込める. これにより, 互いに干渉し合う RSSI とラベルとの関係をビーコンモデルによって生成することができるため, Kim⁽⁸⁾らが課題としている電波干渉下での位置推定の反応遅れが解決できる.

4. 評価結果

Fig. 3 で示したふかん地図の駐車場から二階の目的地までのルートをビーコンモデルによる位置推定にて自律移動走行した場合と, しきい値による位置推定にて自律移動走行した場合の車椅子の目的地到達率 ($N=10$) を比較した. ビーコンモデルを用いた場合, 目的地到達率は 90%, しきい値判定の場合は 10% であり, ビーコンモデルの方が高い結果となった.

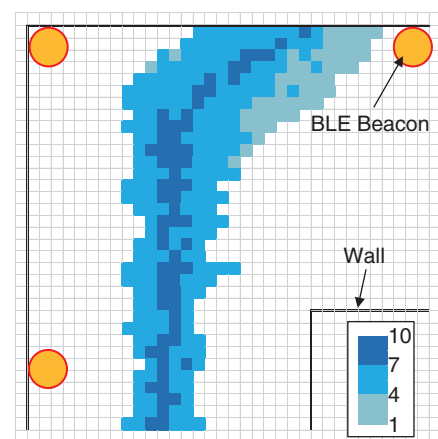
Fig. 10 に, コーナ部の走行軌跡の頻度分布図を示す. しきい値判定による走行で失敗した主な要因は, Fig. 10(a) で示すようにチェックイン判定が遅れたことでコーナリング制御が十分ではなく壁に衝突したこと, チェックイン判定ができずにコーナリング制御がおこなえず壁に衝突したことであった. 一方, ビーコンモデルの場合, Fig. 10(b) で示すように, 制御反応遅れを抑えたコーナリング制御ができた. また, 頻度分布に幅があることは目標走行に対するふらつきが発生しているといえる. Fig. 10(a) に比べ Fig. 10(b) の頻度分布の幅が狭いことから, ビーコンモデルを用いた方が目標走行に対するふらつきが少ないことがわかった.

次に, 車椅子のチェックイン判定の正誤率を, ビーコンモデルによる判定としきい値による判定で比較した. 今回用いた BLE ビーコンは通常 3 m の範囲内での位置推定に使用されるため, BLE ビーコンから 3 m 離れた場所で車椅子が静止している状態におけるチェックイン正誤率をもとめた. コーナ部におけるチェックイン判定正誤率 ($N=30$) は, ビーコンモデル判定は平均 93%, しきい値判定は平均 92% とおおむね同程度の結果であり, 生成したビーコンモデルが正しく位置推定できていることがわかった.

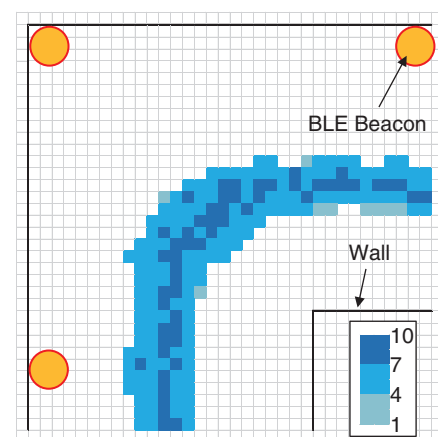
さらに, あるコーナ区間を走行した場合の, ビーコンモデルによってチェックイン判定するまでにかかる時間と,

しきい値によってチェックイン判定するまでにかかる時間を比較した. コーナ部における結果 ($N=30$) の平均値は, しきい値判定に必要な時間を 1 とした場合, ビーコンモデルでは 0.83 であり, ビーコンモデルによるチェックイン判定の方がしきい値判定に比べて短いことがわかった. これは, 車椅子が 2 km/h で走行した場合, コーナリング制御開始の位置がおおよそ 800 mm 手前から開始できることに相当する.

ビーコンモデルは過去走行時の RSSI から機械学習を用いて生成されるため, 車椅子の位置推定にビーコンモデルを適用することで, しきい値判定に比べて短時間で車椅子の位置がわかる. それにより, コーナ部に対して早めにコーナリング制御開始のタイミングを検知することができ, 結果として目的地到達率向上とふらつきを抑えた滑らかな走行につながったと考えられる.



(a) Trajectory with threshold



(b) Trajectory with beacon model

Fig. 10 Comparison between trajectory with beacon threshold and with beacon model

5. まとめ

本稿において、車椅子の自律移動制御のための知能化システムに関して述べた。

以下、得られた知見をまとめる。

- (1) 電波強度の計測で位置推定する BLE ビーコンに対し、機械学習を用いラベル化を図ることで、電波干渉を受けた場合でも車椅子の場所を把握することが可能となる。ビーコンモデルは過去の走行履歴データから生成されるため、しきい値判定よりも短時間でチェックイン判定でき、車椅子制御の反応遅れを抑えることが可能となる。
- (2) 目的地到達率はしきい値を適用した場合の 10% に対し、ビーコンモデルを適用した場合は 90% となり、提案手法の方が目的地到達率は高く、また、ふらつきを抑えた走行が実現でき、走行安定性の高さが確認できた。

参考文献

- (1) 志磨健, 永崎健, 栗山哲, 吉村健太郎, 祖父江恒夫: 自動運転の進化を牽引する基板技術, 日立評論, Vol. 98, No. 07-08, p. 488-492, (2016)
- (2) Lima, P. F.: Predictive control for autonomous driving: With experimental evaluation on a heavy-duty construction truck, The PhD Thesis of KTH Royal Institute of Technology, (2016)
- (3) Naus, G. J. L., Ploeg, J., Van de Molengraft, M. T. G., Heemels, W. P. M. H., Steinbuch, M.: A model predictive control approach to design a parameterized adaptive cruise control, Automotive Model Predictive Control, Lecture Notes in Control and Information Sciences, Vol. 402, p. 273-284, (2010)
- (4) 杉野恭兵, 大園忠親, 新谷虎松: 複数の Bluetooth ビーコンに基づくデバイスフリーな屋内測位におけるキャリブレーションについて, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 115, No. 381, p. 1-6, (2015)
- (5) 宮本修吾, 松本貴成, 川瀬広明, 樋口誠, 鳥本康夫, 越膳孝方: 機械学習を用いたビーコンモデル位置推定による車椅子制御, 計測自動制御学会, 第 4 回制御部門マルチシンポジウム, (2017)
- (6) Miyamoto, S., Koshizen, T., Matsumoto, T., Kawase, H., Higuchi, M., Torimoto, Y., Uno, K., Sato, F.: An Application Using a BLE Beacon Model Combined with Fully Autonomous Wheelchair Control, The 11th International Conference on Complex, Intelligent, and Software Intensive Systems, (2017)
- (7) Dempster, A. P., Laird, N. M., Rubin, D. B.: Maximum Likelihood from Incomplete Data via the EM Algorithm, Journal of Royal Statistical Society, Series B (Methodological), Vol. 39 (1), p. 1-38, (1977)
- (8) Kim, Y. H., Lee, S.: A Method for Stable Indoor Positioning using Beacons, Indian Journal of Science and Technology, Vol. 8, (2015)

■ 著 者 ■



宮本修吾



越膳孝方

ロボット芝刈り機の最適走行制御の研究

Study of Optimal Operation Control for Robotic Lawnmower

島村 秀明*

Hideaki SHIMAMURA

松井 勇樹*

Yuki MATSUI

Sebastian SCHMITT **

要 旨

近年広く普及し始めたロボット芝刈り機は芝地を満遍なく作業することが求められている。その芝地の形状は多種多様であるため、複雑な庭ではロボット芝刈り機が行きにくい場所ができ、全体の作業をするのに時間がかかる場合もある。本研究では、走行制御を変更し芝地全体の作業の完了を早くすることを目的とした。

従来の走行制御は複雑な庭でも全体を作業できるように設定としているため、そうでない庭ではさらに早く作業を完了させる設定が存在する可能性があった。そこで、ロボット芝刈り機が自動的に芝地の特徴を判別し、最適な走行制御の設定に切り替える手法を開発した。本研究の制御を適用することで作業時間を短くできることをシミュレーションと実機テストにて確認した。

ABSTRACT

It is necessary that robotic lawnmowers, the use of which has recently become more widespread, should be able to cover entire lawn areas. As the shapes and areas of lawns are highly diverse, in complex yards there will be areas challenging for robotic lawnmowers, and as such, the completion of work over the entire area may take some time. The research discussed in this paper sought to make it possible to complete work over the entire lawn area more quickly by modifying operation control.

As conventional operation control has been set to enable the mower to complete work in any possible yard, it is very likely that specific settings exist for specific types of yards which allow the work to be completed more quickly in that yard. The research therefore developed a method by which the robotic lawnmower automatically discriminates the characteristics of the lawn area and switches to the optimal operation control setting. Simulations and actual tests verified that the application of the control developed in this research reduces robotic lawnmower work time.

1. まえがき

Honda は 1959 年に耕うん機を商品化して以来、芝刈り機、草刈機、運搬車、除雪機等の作業機を商品化している。これらの商品により人々の重労働を軽減させることができた。

近年の世界的高齢化とともに、より少ない労力でより簡単に作業を完了させるというニーズが高くなっている。このような背景から、多くの企業が自動化した芝刈り機を販売している。Honda は 2012 年にロボット芝刈り機 Miimo の販売を開始した。

これは Fig. 1 のようにモアとドッキングステーションにより構成される。ユーザは庭を境界ワイヤで囲んで作

業エリアを定義する。モアは境界ワイヤの内側か外側かを判別することができ、作業エリア内の芝を刈りながら走り回る⁽¹⁾。

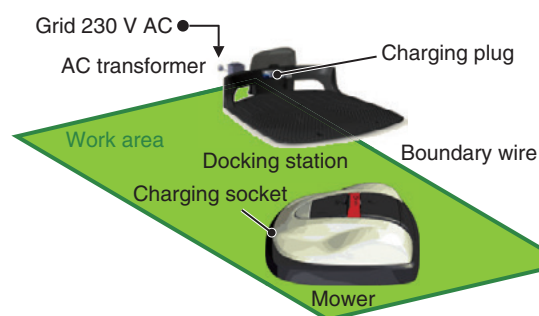


Fig. 1 Miimo configuration

* パワープロダクツ R&D センター

** Honda Research Institute Europe GmbH

モアはユーザが設定したスケジュールに従って作業をおこない、作業中でもバッテリー電力が低下した時には自動でドッキングステーションに戻り充電をおこなう。この作業を繰り返し、芝の長さを維持する。

2. 目的と目標

ユーザはモアの作業スケジュールを芝の長さを維持できるように設定する必要がある。維持するために必要な作業時間に対し短い時間を設定してしまうと、きれいな芝地を保つことができなくなる。この必要な作業時間は広い庭や複雑な庭では長くなる。複雑な庭ではモアが行きにくい場所ができ、全体の作業をするのに時間がかかるためである。このときモアは一度作業したところを何度も走っている。

一度作業したところを何度も走らなくすることで、作業できる面積を増やしたり、作業時間を減らすことができる。これによりユーザは広い庭を維持したり、庭で楽しむ時間を増やすことができる。

本研究では、走行制御を変更し芝地全体の作業の完了を早くすることを目的に、単位時間あたりの作業面積を現行と比較し 20% 向上することを目標とした。

3. 走行制御

3.1. 従来の走行制御

モアは直進と旋回を繰り返すことで作業エリア内を作業する。Fig. 2 のように作業エリアの境界に達すると、その場で旋回し、再び直進する。

同じところを何度も走行しないように旋回する角度をランダムにしている。Fig. 3 のように同じ角度で境界ワイヤに達しても、別方向へ直進する。

また、この旋回角度には制限範囲を設けている。この制限範囲は、複雑な庭でも全体を作業できるような設定としており、さまざまな庭において芝地全体の作業を完了することができる。

3.2. 最適走行制御

従来の走行制御は、旋回角度の制限範囲を固定としてい

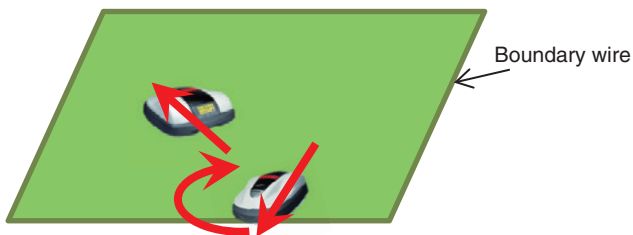


Fig. 2 Running pattern

た。このため個々の庭に対しては、より芝地全体の作業の完了が早い制限範囲が存在する。

よって本研究では、旋回角度の制限範囲を複数持ち、モアが庭形状に合わせた制限範囲を選択することで、作業の完了を早くする手法とし、このために下記 4 項目を実施した。

- (1) さまざまな庭のサンプルを用意する
- (2) 庭を特徴ごとに分類する
- (3) 庭の特徴ごとに旋回角度の制限範囲を決定する
- (4) 作業している庭に合わせて旋回角度の制限範囲を選択する

3.2.1. さまざまな庭のサンプルを用意

どんな庭があるか市場調査をおこなった。調査した庭の抜粋を Fig. 4 に示す。庭には単純な形と複雑な形があり、庭内には、木、家庭菜園用のレンガ、トランポリン等の障害物が点在している。

このように、庭を構成する要素はさまざまであり、組み合わせは無限に存在する。そこで、多くの庭を確認するため、調査した数十件の庭から二十万件の庭を自動生成した。本研究では、最大サイズを縦横 20 m に制限した。

3.2.2. 庭を特徴ごとに分類

庭进行分类するために、直進距離によるヒストグラムを用いた。前述の通りモアは直進と旋回を繰り返し作業する。Fig. 5(a) のように単純な庭では直進距離が長いときが多く、Fig. 5(b) のような複雑な庭では直進距離が短いときが多い。ヒストグラムは、直進して旋回するモアの走行パターンの中で一回一回の直進距離を確認し距離ごとにカウントし求めている。

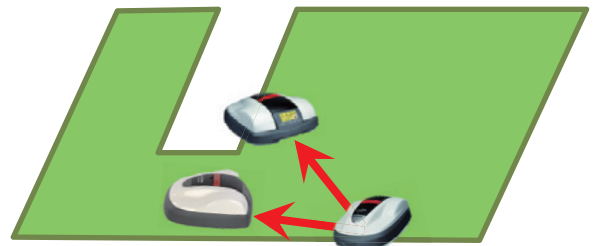


Fig. 3 Randomness of turn angle

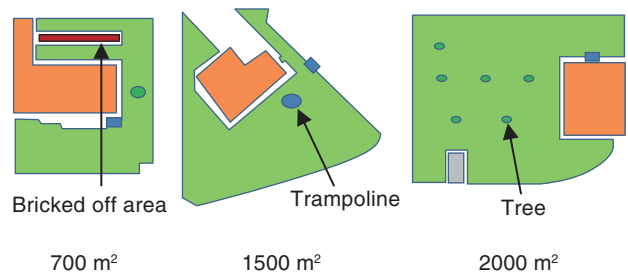


Fig. 4 Actual yard shape

Fig. 4 で示した庭形状のヒストグラムを Fig. 6 に示す。単純な形状では、直進距離が短いときの回数が少なくなっている。

求めたヒストグラムを用いて大量の庭サンプルをクラスタリング手法の K-means++⁽²⁾ で分類した。分類した結果を Fig. 7 に示す。グループの数は、分類後の各グループのヒストグラムが類似しないよう、グループ数を変えながらクラスタリングを繰り返しおこない決定した。それぞれのグループから抜粋したサンプルとヒストグラムを Fig. 8 に示す。ヒストグラムが類似する庭がまとめられていることがわかる。

3.2.3. 分類に応じた旋回角度の制限範囲を決定

グループごとに最適な旋回角度の制限範囲を決定した。最適な制限範囲を求めるために、自社開発のパラメータ

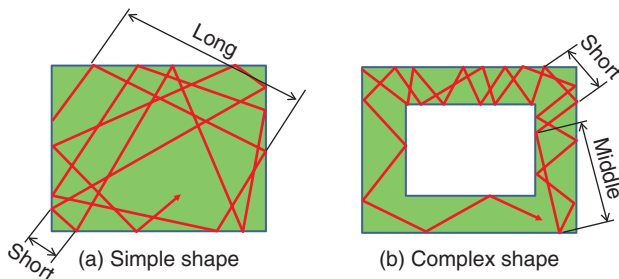


Fig. 5 Uninterrupted distance

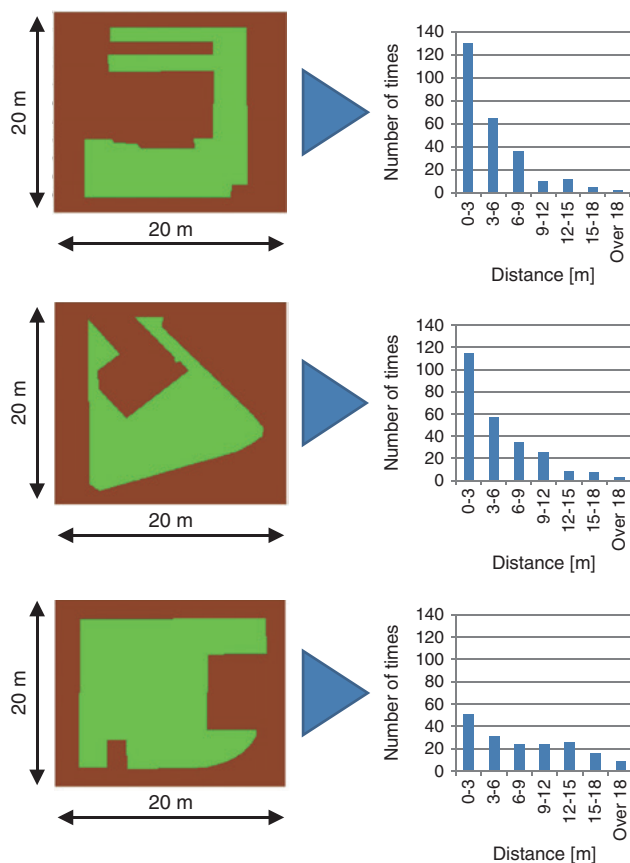


Fig. 6 Histogram for each yard shape

最適化ツールを用いた。従来機で求めた最適化手法は、最適化時に与えた初期値近辺を探索するのに対し、自社開発のツールは広範囲におよんで最適な設定を探索できる。

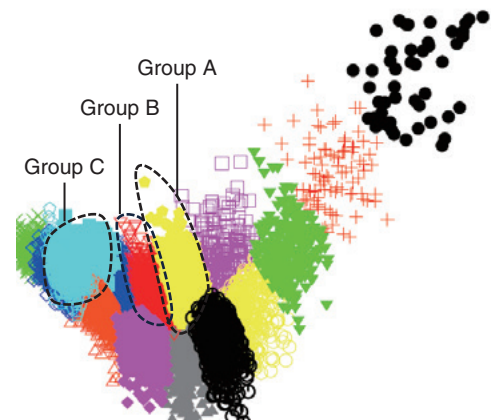


Fig. 7 Clustering

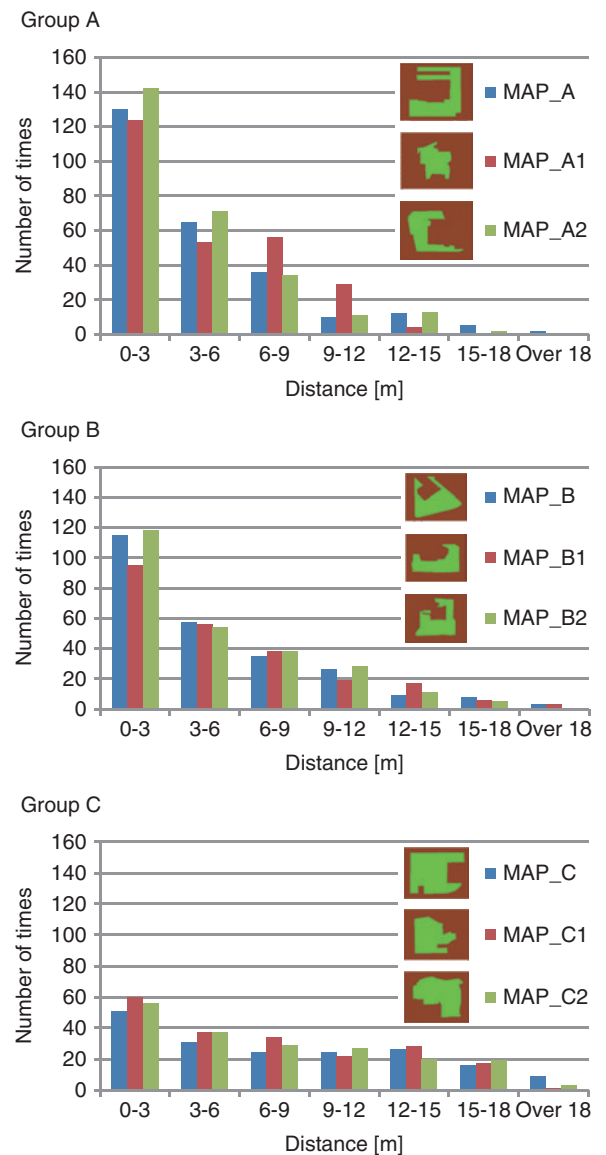


Fig. 8 Results of clustering

最適化は、グループの中から形状違いの庭を複数抽出し、それぞれの結果からグループに最適な制限範囲を決定した。各グループに対して最適化をおこない、それぞれの制限範囲を決定した。

3.2.4. 庭に合わせて巡回角度の制限範囲を選択

モアは作業している庭のヒストグラムと、各グループのヒストグラムを比較してどのグループに属しているか判断する。作業している庭のヒストグラムは作業しながら直進距離を計測し求める。求めたヒストグラムとグループ毎のヒストグラムで、直進距離ごとに回数の差を出し、それぞれ2乗したものを積算して、その積算値が一番小さいグループがモアの作業している庭に最も近いグループとなる。

Fig. 9の庭から求めたヒストグラムは、Fig. 8のグループCのヒストグラムに最も近い。

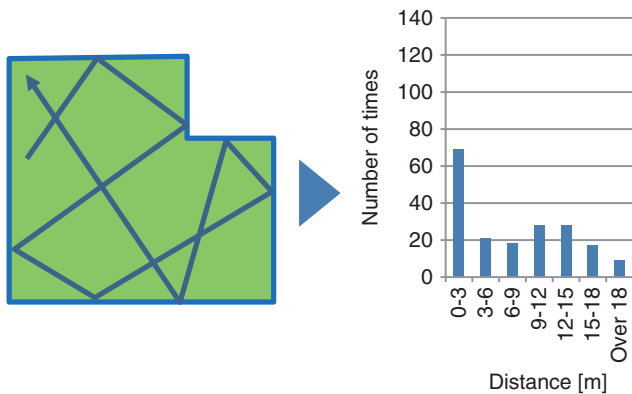


Fig. 9 Area shape and histogram

4. 検証結果

4.1. シミュレーションによる検証

各庭のグループから代表的な庭を選定してシミュレーション検証をおこなった。芝地全体の作業が完了するまでの時間から単位時間当たりの作業面積を求めた。従来の走行制御との比較をFig. 10に示す。Yard IDは複雑な形状のグループから順に番号を振っている。

従来の走行制御に比べ、すべての庭形状で単位時間当たりの作業面積が向上しており、平均で20%の改善となった。

4.2. 実機による検証

Fig. 11, Fig. 12, Fig. 13のように200 m²に統一した特徴の異なる庭形状で検証した。本テストにおいてはシミュレーション検証と同じく、芝地全体の作業が完了するまでの時間を計測し、単位時間当たりの作業面積を評価対象とした。従来の走行制御との比較をTable 1に示す。

単位時間当たりの作業面積は平均で27%向上した。

Table 1 Work area per hour for conventional control and optimal control

Yard shape	Before [m ² /h]	After [m ² /h]	Increased value [%]
Yard shape 1	98.9	122.6	24%
Yard shape 2	84.3	108.6	29%
Yard shape 3	91.8	117.7	28%

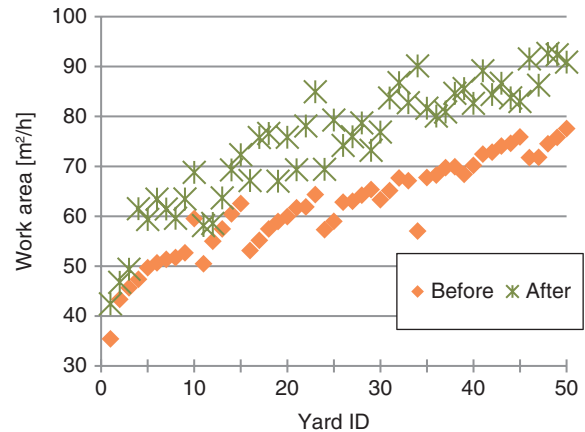


Fig. 10 Simulation analysis results

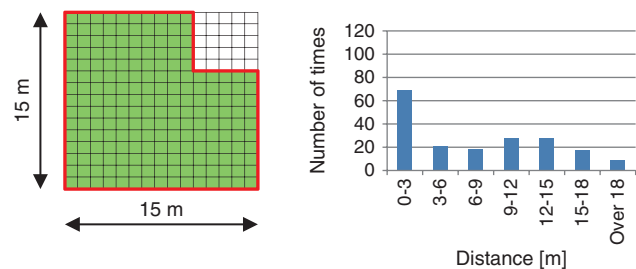


Fig. 11 Test result for yard shape 1

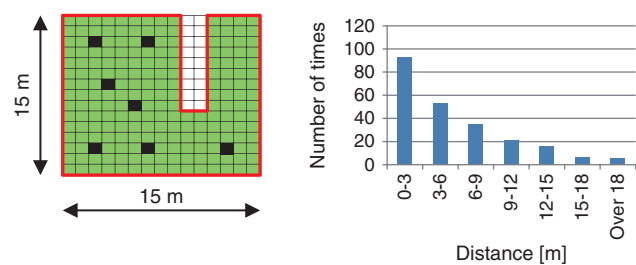


Fig. 12 Test result for yard shape 2

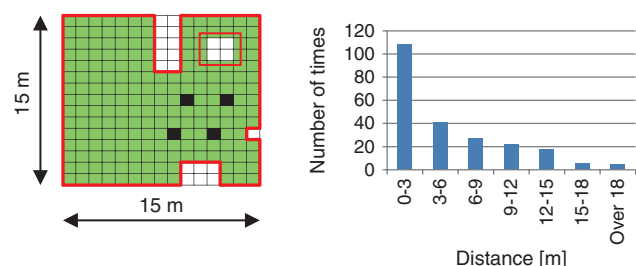


Fig. 13 Test result for yard shape 3

5. まとめ

ロボット芝刈り機の最適走行制御の研究により次の成果を得た.

- (1) ヒストグラムとクラスタリング技術により複雑度に合わせてさまざまな庭を分類することが可能となった.
- (2) ロボット芝刈り機の走行制御の旋回角度を, 分類したグループごとに最適化できた.
- (3) ロボット芝刈り機が作業をしながら, 庭の複雑度を判断し最適な旋回角度を選択することが可能となった.
- (4) ロボット芝刈り機の単位時間あたりの作業面積を平均で 27% 向上することができた.

参考文献

- (1) 川上俊明, 小林浩, 山村誠, 丸山修平: ロボット芝刈り機 Miimo の開発, Honda R&D Technical Review, Vol. 25, No. 2, p. 52-57
- (2) Arthur, D., Vassilvitskii, S.: k-means++ the advantages of careful seeding, Proceedings of the eighteenth annual ACM-SIAM symposium on Discrete algorithms, Society for Industrial and Applied Mathematics Philadelphia, PA, USA, p. 1027-1035, (2007)

■ 著 者 ■



島村 秀明



松井 勇樹



Sebastian SCHMITT

二輪車向け黒色ボルトに用いる化成処理と塗装を 組み合わせた表面処理の開発

Development of Surface Treatment Composed of Chemical Conversion Treatment
and Paint Coating for Black Bolts Used in Motorcycles

吉田 裕之*
Hiroyuki YOSHIDA
加藤 靖裕**
Yasuhiro KATO

平山 博史*
Hiroshi HIRAYAMA
加藤 丈晴***
Takeharu KATO

井上 学**
Manabu INOUE
高橋 孝治***
Kouji TAKAHASHI

要 旨

本研究は、二輪車に用いられるボルトの黒色表面処理手法の開発に関するものである。従来、黒色ボルトに用いられてきた表面処理は、多くの場合六価クロムを使用したものであった。しかし、六価クロムは有害物質に指定され、その使用が制限される状況にある。そのため、六価クロムを用いた表面処理を代替する技術の開発が進められている。そうした代替技術のうち、黒色外観を付与する技術については、外観や締結性能に課題が残されており、使用可能な箇所が限定されていた。こうした状況に対応するため、二輪車用に広く適用できる、ボルト用黒色表面処理を開発した。皮膜構成は、亜鉛めっき上に黒色三価クロム化成処理皮膜と浸漬塗装を組合せ、各々の皮膜について要件を満たす皮膜条件を設計した。また、製造条件についてもあわせて検討し設定した。その結果、二輪車用黒色ボルトとしての要求性能を広く満足できる表面処理手法を確立した。

ABSTRACT

This research relates to the development of black surface treatment bolts used for motorcycles. Conventionally, the surface treatments applied for black colored bolts have been, in many cases, the methods using hexavalent chromium. However, hexavalent chromium is designated as a hazardous substance, and its use is restricted. For this reason, the developments of technologies to replace the surface treatment using hexavalent chromium are under way. In the case of using such substitute technologies, the technology for realizing black-colored appearance did not fulfill the requirements, because of the obstacles to realize required appearance and fastening performances. As a result, those bolts were used only for limited applications. In order to cope with this situation, we developed black surface treatment for bolts which can be widely used for motorcycle applications. For the coating composition, a black trivalent chromium conversion coating film and a dip coating layer were formed on a zinc plating coating. The conditions that satisfy the requirements for individual films were also designed.

Moreover, the manufacturing conditions were examined and set as well. As a result, we established a surface treatment method that can satisfy the performance requirements as a black bolt for wider application to motorcycles.

1. まえがき

車両用機械部品の締結には、作業性や整備性、締結強度の観点からボルトが多用されている。また二輪車においては、ボルトが外観部品の一部として取り扱われることも多

い。この場合、ボルトには締結性能に加え、より優れた耐食性や外観意匠性等が要求される。そのため、二輪車用ボルトには表面処理が施される場合が多い。特に周辺部品との外観調和の観点で、金属色外観や黒色外観を与える表面処理は、車両デザインの魅力向上手法の一つとして活用さ

* 二輪 R&D センター

** ディップソール株式会社

*** 八熊鍍金工業株式会社

れている。

従来、ボルトに耐食性や外観意匠性を付与するためには、電気めっきと六価クロムを用いた化成処理を組み合わせることが多かった⁽¹⁾。たとえば、亜鉛または亜鉛合金めっき皮膜上に種々の六価クロム化成処理皮膜を施すことで、目的とする外観を得ることが可能であった。

しかし、環境負荷物質である六価クロム⁽²⁾は世界的に使用が制限される状況にある^{(3), (4)}。したがって、成分に六価クロム化成分が含まれる六価クロム化成処理皮膜は使用できなくなりつつある。六価クロム化成処理を代替する技術としては、三価クロムを用いた化成処理技術がある^{(5), (6)}。一般に三価クロム化成処理皮膜は六価クロム化成処理皮膜と比べ薄く、皮膜自体の色がつきにくい。そのため、素材の金属色外観を与えることを目的とした無色三価クロム化成処理皮膜では外観魅力が向上した。これに対して、黒色外観を付与する目的で用いられる黒色三価クロム化成処理皮膜では素材を黒色皮膜で隠蔽する必要がある。しかし、黒色三価クロム化成処理皮膜の膜厚では十分に隠蔽ができず、黒味が劣ることになる。その結果、二輪車への適用において、ボルトの使用部位によっては求められる十分な黒色外観を得られない。

一方、ボルトに黒色外観を付与する別手法として、浸漬塗装という手法がある⁽⁷⁾。しかしながら、一般に塗装膜厚が不均一になり、色むらが発生しやすいという欠点がある。そこで膜厚を厚くして対応することが多い。そのため、ボルトのねじ部にも厚い塗装皮膜が付与されるため、高いねじ精度が得にくい。

以上に述べてきたように、六価クロムを使用しないで黒色を付与し、外観意匠性とねじ精度を両立させるにはこれまでにない手法の確立が必要となる。そこで、本開発では黒色化成処理皮膜と浸漬塗装を組合せることを前提とした黒色表面処理手法を確立するための検討をおこなった。

本稿では新たに開発した黒色表面処理技術の考え方と設計手順、さらにその皮膜を得るために設定した製造条件について述べる。

2. 従来技術の課題と開発のねらい

2.1. ボルトに黒色外観を付与するための一般的な技術

ボルトに用いられる最も一般的な表面処理技術として、亜鉛めっきがあげられる。亜鉛はボルト素材である鉄よりも錆びやすいため、傷付きなどにより、鉄が表面に現れても鉄より先に亜鉛が腐食し、鉄は守られることから多く適用されている。製法としては、まず、亜鉛金属皮膜を得るために、亜鉛イオンが溶けためっき処理液中に製品素材を浸漬させ、一定の電荷を与えることで素材の表面に亜鉛金属皮膜を電気還元析出させる。しかしこのままでは、亜鉛

Table 1 Blackening surface treatments for bolts

Hazardous material	Surface treatment	Requirement					
		Fastening		Appearance quality			
		Friction control	Thread precision	Appearance	Scratching resistance	Corrosion resistance	Weather resistance
Contained	Black Zn plating using Cr (VI)	3	3	3	3	2	3
	Black Zn alloy plating using Cr (VI)	2	3	3	3	3	3
	Black Cr plating using Cr (VI)	3	2	4	4	4	3
Not contained	Black Zn plating using Cr (III)	3	3	1	1	2	3
	Black Zn alloy plating using Cr (III)	2	3	1	1	3	3
	Dip coating	2	1	3	3	3	2

4 = excellent, 3 = good, 2 = average, 1 = poor

Cr (III): Trivalent chromium, Cr (VI): Hexavalent chromium

金属皮膜が大気中で表面が酸化し、変色してしまう。そこで、次に化成処理皮膜成分が溶けた液中に浸漬させ、化成処理皮膜を析出させる。これにより、亜鉛金属皮膜の酸化による変色を防ぐとともに、素材の防錆も実現している。この化成処理皮膜は成分によって色彩を変えることが可能であり、黒色を要求される場合は黒色化成処理皮膜を付与する⁽⁸⁾。従来、この化成処理皮膜には六価クロムが含まれていたが、現在は六価クロムが含まれない三価クロム化成処理皮膜への置き換えが進められている。また、黒色を付与するために黒クロムめっきも一部使われてきたが、皮膜中に六価クロムを含んだ処理液が残存するため、現在では使用が避けられるようになっている⁽⁹⁾。

これらの手法は電気めっき技術や化成処理技術の組合せであり、膜厚のコントロールが比較的容易である。そのため、ねじ精度要求が高く、より確実な締結が求められるボルトに多用されている。

一方、浸漬塗装により黒色塗膜を付与する技術が用いられることもある。浸漬塗装とは部品を塗料に浸漬させた後、遠心分離機などで余剰な塗料を振り切り、最後に焼付けまたは乾燥をおこなう塗装方法のことである。しかしながら、塗装膜厚の管理が容易ではないため、ねじ精度を維持しづらい。したがって、その適用にはねじ形状において特殊な設計をおこなうか、塗装後のボルトに追加工するなどの特別な対応が必要とされる。

これらのボルトに黒色外観を付与する技術をまとめると Table 1 のようになる。この表が示すように、六価クロムを用いない黒色を付与する表面処理技術では二輪車に用いるボルトの要求を満足させることはできないことがわかる。

2.2. 現行黒色化技術の課題

2.2.1. 黒色三価クロム化成処理の課題

代表的な黒色化成処理である、六価クロム化成処理と三

価クロム化成処理の皮膜断面写真を Fig. 1 に示す。化成処理層の膜厚を比較しやすいように二つの写真を同じ倍率とした。最下層のボルトの素材の上に亜鉛めっき層が存在し、さらにその上に薄いクロム化成処理皮膜が形成されているのがわかる。六価クロム化成処理皮膜の膜厚は $2\ \mu\text{m}$ 程度であるのに対し、三価クロム化成処理皮膜では $0.2\ \mu\text{m}$ 程度と薄い。このため、三価クロム化成処理皮膜は六価クロム化成処理皮膜よりも薄い皮膜によって着色を施さなければならないため、安定した黒色を実現することが課題である。

三価クロム化成処理皮膜を厚く形成できない理由を、その皮膜の生成メカニズムから、六価クロム化成処理皮膜と比較しながら説明する。六価クロム化成処理皮膜と三価クロム化成処理皮膜の反応メカニズムをモデル化したものを Fig. 2 に示す。

六価クロム含有の有無を問わず、化成処理皮膜の生成は Zn の溶出がきっかけとなって始まる。皮膜を生成させるための化成処理液に、亜鉛めっきを施した素材を浸漬させると、Zn の溶出が始まる。六価クロム化成処理の場合は、その反応と共に皮膜の基材（マトリックス）となる $\text{Cr}(\text{OH})_3$ と $\text{ZnCrO}_4(\text{H}_2\text{O})_x$ が生成される⁽¹⁰⁾。この $\text{Cr}(\text{OH})_3$ は固形成分であるが、 $\text{ZnCrO}_4(\text{H}_2\text{O})_x$ は可溶成分であり、処理液中では半溶解状態となっている。そのため $\text{ZnCrO}_4(\text{H}_2\text{O})_x$ を介して化成処理液が Zn 表面に触れることができ、反応が継続的に進行する。その結果、皮膜を $2\ \mu\text{m}$ 程度まで成長させることができる。それに対して、三価クロム化成処理皮膜生成の化成処理液中で起こる反応では、 $\text{Cr}(\text{OH})_3$ は生成されるが、 $\text{ZnCrO}_4(\text{H}_2\text{O})_x$ は生成されない⁽¹¹⁾。先に述べたとおり、 $\text{Cr}(\text{OH})_3$ は固形成分であるため、化成処理液が透過することはない。そのため、一旦 $\text{Cr}(\text{OH})_3$ が亜鉛めっきの表面を覆ってしまうと、化成処理液は亜鉛めっきの表面に触れることができず、Zn は溶出しなくなる。このようにして、化成処理皮膜の膜厚が $0.2\ \mu\text{m}$ 程度という薄い状態で反応が停止してしまう。

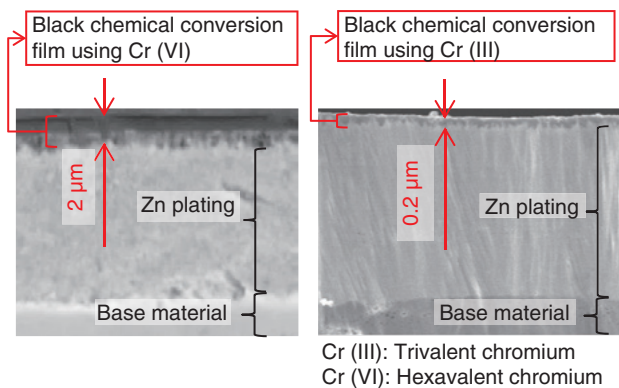
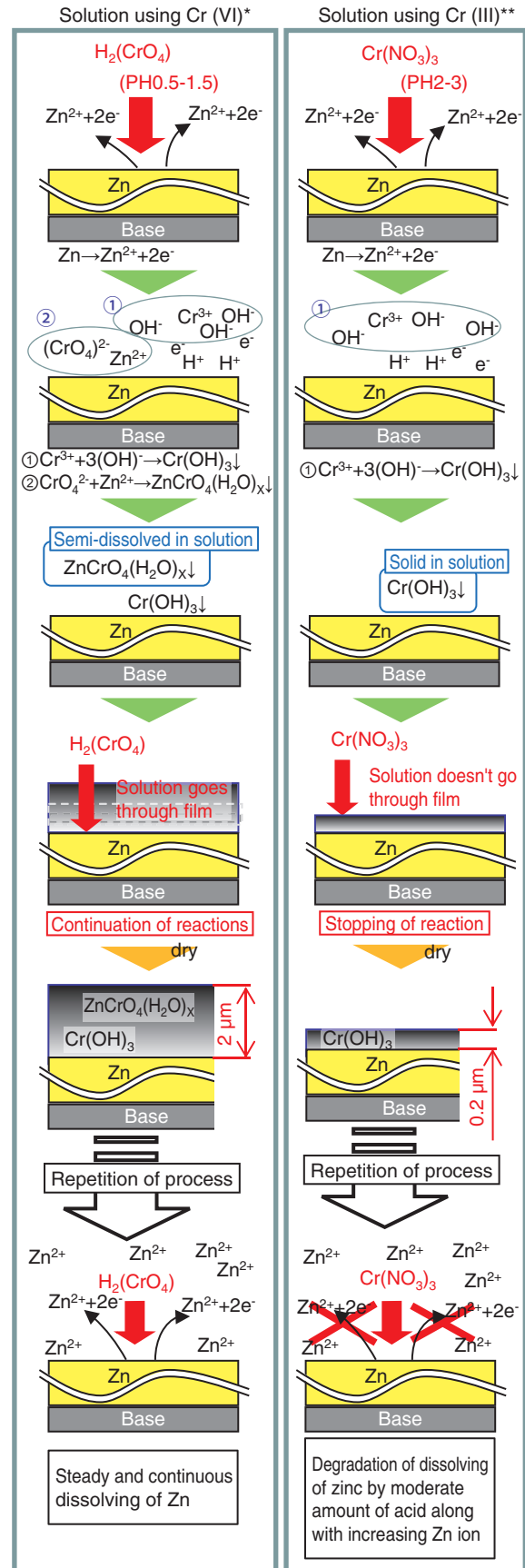


Fig. 1 Chemical conversion film using Cr (VI) and Cr (III)



*: Cr (VI): Hexavalent Chromium **: Cr (III): Trivalent Chromium

Fig. 2 Models of reaction of chemical conversion film using Cr (VI) or Cr (III)

また、六価クロム化成処理皮膜の化成処理液は、PHが0.5-1.5程度と強い酸性を示し、安定してZnの溶出が継続できる。一方、三価クロム化成処理液はPHが2-3と弱い酸性であり、処理液中のZnイオン濃度が増加するとZnが溶出しにくくなり、皮膜生成反応が不安定になる。このことも黒色が安定しない一因となっている。

以上に述べた理由から、現行、二輪車向けボルトに用いる三価クロム化成処理液では、反応が不安定にならないようにするために、処理液の交換を頻繁におこなっている。二輪車適用に最低限要求される外観を満足させるには、最も交換頻度の高い処理液条件の場合、処理液中のZnイオン濃度が5 g/Lに達するごとに交換がおこなわれる。これにより生産性が阻害され管理コストが増加する。

さらに、皮膜が薄いため耐食性が不十分であることや、締結時に工具による傷が入りやすいことも課題となる。また、黒色三価クロム化成処理皮膜は耐食性を付与するための仕上げ処理を施すことが多く、これもまたコスト増につながる要因となっている。

2.2.2. 黒色浸漬塗装の課題

黒色を付与する別の手法として黒色塗料を用いた浸漬塗装をおこなう場合がある。その工程の一例をFig. 3に示す。

この浸漬塗装の工程は、ボルトを塗料に浸漬する工程、余剰な塗料を振り切る工程、塗料を焼き付ける工程の三つの工程に分けられる。浸漬塗料では塗料の粘度を調整し、適正な遠心力で余剰な塗料を振り切ることで、着色に必要な膜厚を塗布することを可能としている。しかし、実際には、浸漬塗装によって均一な塗装膜厚が得られるように調整することは容易ではない。ボルトの部位によっては塗装

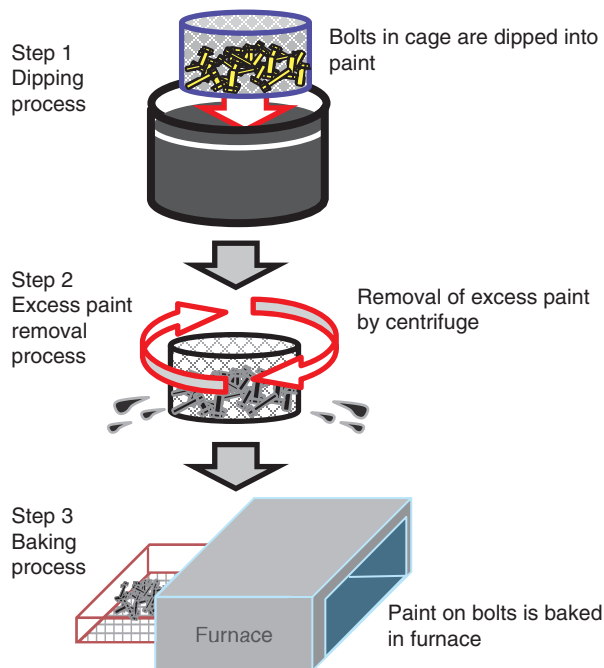


Fig. 3 Model of dip coating process

膜厚が薄くなり、素材の色が透けてしまう。すなわちボルト全体を均一に黒色にすることができない場合がある。また、塗料への浸漬時や振切り時に、ボルト同士が重なって配置された部分に塗料が付与されず、タッチマークと呼ばれる痕が残ることもある。つまり、製品表面上の位置により、十分に着色されている部位と素材の色が透けている部位が発生する。それら色の違う部位が隣り合う場合には、特に色むらが目立ってしまう。

したがって、色むらが発生しないよう、一般的にはボルト全体を厚く塗装する必要がある。場合によってはFig. 4のように、二回以上塗装する必要がある。そのため、本来は外観要求の対象とならない、ねじの谷部にも必要以上の塗膜が形成され、ねじ部は規格公差⁽¹²⁾を満足しないこともある。その結果、締結時にめねじとのかん合が阻害されるなど締結機能に支障をきたすことがある。これにより、塗装後におねじ部分に付着された余分な塗膜をそぎ落としたり、かん合するめねじの形状を見直したり、素材そのものの形状を変更したりすることが必要となる。

また、浸漬塗装に用いる塗料は、二輪車用ボルト向けに開発されたものではない塗料を流用することが多い。そのため、太陽光や腐食環境に対する耐性の要件が満たされないことがある。さらに従来から用いられているボルト用表面処理とは摩擦係数が異なる場合が多く、締結作業に関する特別な管理条件を設定する必要がある⁽¹³⁾。

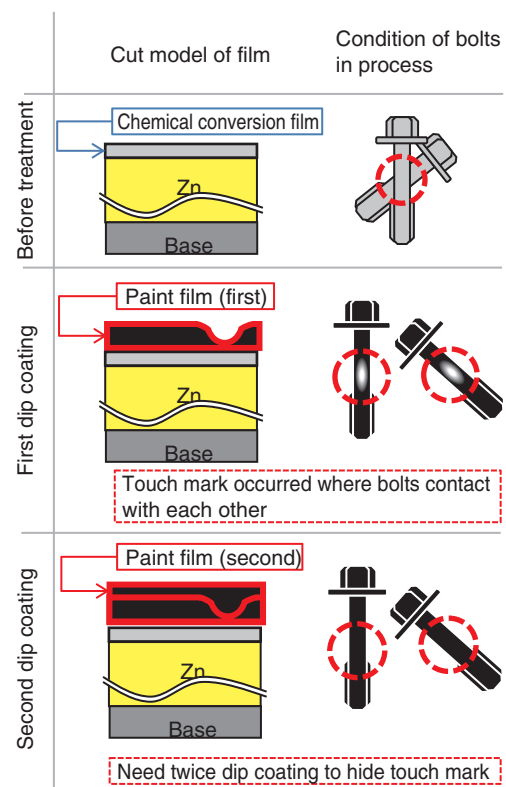


Fig. 4 Cross-sectional view of touch mark in conventional dip coating

2.3. 開発のねらい

前述した現行の黒色化技術の課題を整理し、二輪車用ボルトに要求される性能を考慮した結果、開発されるボルト着色手法が満たすべき要件として、以下を設定した。

- ・ 十分な黒色を安定して付与でき、外観の色むらがなく
- ・ ボルト締結後に工具による傷が目立たないこと
- ・ ねじ部のかん合性を阻害しないこと
- ・ ボルト締付トルクに対して適正な軸力が得られること
- ・ 耐候性を有し太陽光によって変色しないこと
- ・ 十分な耐食性を有すること
- ・ 二輪車で使用している油脂等で劣化を起こさないこと

これらの要求を六価クロムを用いずに達成するとともに、廉価な製造法とするために従来設備で量産可能な技術を用いて処理をおこなうこととした。

3. 表面処理の構成と実現手法

3.1. 表面処理によって形成する膜の構成検討

亜鉛めっき上の黒色化成処理皮膜単独、または浸漬塗装単独では上記の目標を達成できないと考え、両方を組合せる手法を検討した。薄い皮膜のままで十分な黒色外観を得るために、まず、黒色化成処理皮膜を塗装の下地として亜鉛めっき上に付与する。その上に、薄い黒色塗膜を付与して3層構造とする。従来、黒色化成処理皮膜を付与する目的は、亜鉛めっき表面の酸化防止であった。しかし、本処理における目的は、塗装皮膜の下地として付与し塗装の色むらを抑える程度の着色をおこなうこと、および、塗装皮膜の密着性の確保することである。一方、塗装皮膜の目的は十分な黒色外観を付与し維持できること、および、ボルトの締結機能を確保できることである。こうした膜構成を採用することにより、下地の黒色化成処理皮膜とその上の塗装皮膜の黒色が重ね合わされるため、塗膜が薄くても十分に均一な黒味を付与でき、求められる外観要件を満たすことができる。また、締結に対して従来のボルトと同様の取扱いができるようになる。

3.2. 塗装皮膜の下地としての黒色化成処理皮膜の実現手法

3.2.1. 皮膜設計の考え方

先に述べたとおり、黒色三価クロム化成処理皮膜は六価クロム化成処理皮膜よりも薄く、十分な黒色を付与しにくい。そのため、外観意匠性と耐食性を付与するために、通常、二回処理をおこなう。すなわち、一回目の化成皮膜処理では、粗い表面の皮膜を生成させる。これによって、皮膜上の光の乱反射などを利用して黒色外観の発現を増強させている。しかし、粗い表面の皮膜は、表面に水がたまりやすく、腐食が発生しやすい。そこで、二回目の化成処理

として表面の目どめ仕上げ処理を施す⁽¹⁴⁾。これにより化成処理皮膜が持つ腐食の開始点となる箇所を覆い、滑らかな表面が形成される。Fig. 5に示すように、化成処理のみ施した場合、表面は粗い状態であるが、目止め仕上げ処理までおこなった場合は表面が平滑になっていることがわかる。しかし、先に述べたように、本開発における化成処理皮膜に要求される特性は、下地としての着色と塗装皮膜に対する密着性である。そのため、耐食性を付与するための二回目の処理は削減できると考えた。

また、一回目の化成処理皮膜が持っている表面の粗さは、この上に施される塗装皮膜の密着性を上げるためのアンカ効果として働くため、二回目の処理を施した後に塗装する場合より耐食性は高くなると考えた。Fig. 6に、このアンカ効果についての原理モデルを示す。

Fig. 6に示したモデルを立証するために、塗装皮膜の密着力と耐食性をテストピースを用いた実験にて確認した。密着力の測定はSurface And Interface Cutting Analysis System (SAICAS)⁽¹⁵⁾を用いて測定する。Fig. 7にSAICASの測定原理を示す。

この装置を用いた測定では、微小な刃で塗装皮膜を斜め深さ方向に切削していき、刃が化成処理皮膜に到達したと同時に皮膜表面に沿って刃を移動させる。その後、剥離荷重で塗膜は剥離を開始する。さらに刃の移動を継続すると、塗膜のせん断を繰り返すごとに荷重の増減が発生する。Fig. 8にそのときの荷重変動のイメージ図を示す。ここでは、刃の移動が継続しているときの荷重の最低値を刃幅で除した値を密着力と定義した。また、耐食性の試験は塩水噴霧試験 (SST) において白錆が発生するまでの時間を測定した。

試験片の作製のために、まず軟鋼板に亜鉛めっきを施した。さらにその試験片に化成処理のみをおこなったものと

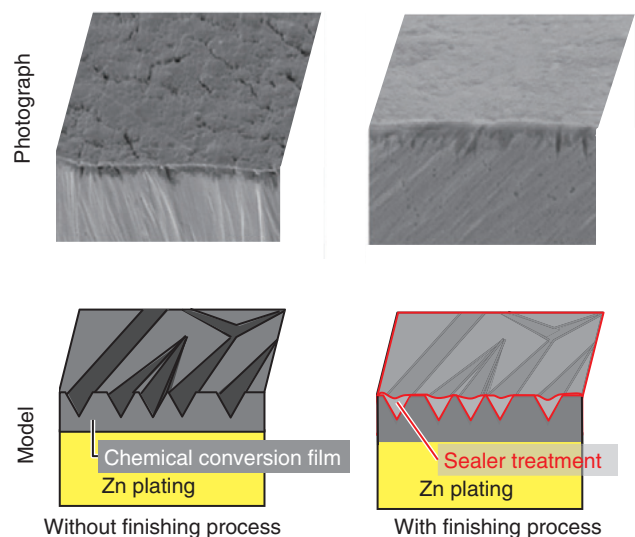


Fig. 5 Surface of chemical conversion films

目止め仕上げ処理をおこなったものを作製した。その後、試験片の表面にポリシロキサン系の塗料（後述）にて塗装を施した。この試験片で塗装皮膜の密着力の違いを確認した。また、ボルト素材に同様の表面処理を施したものを用いて耐食性を測定した。それらの結果を Fig. 9 に示す。この試験により、目止め仕上げ処理後に塗装したものより、

Table 2 Storage condition until coating process after conversion process

	Finishing	Storage condition	
		Temperature	Humidity
Storage condition A	Dry	21°C	under 40%
Storage condition B	Dry	40°C	95%
Storage condition C	Not dry	40°C	95%

化成処理のみおこなった皮膜上に塗装したものの方が密着力が高く、また、耐食性も高いことが検証された。

これらの結果を踏まえ、目止め仕上げ処理を廃止することとした。しかしながら、化成処理工程をおこなった後、塗装処理工程に移るまでの環境については、配慮が必要となる。なぜならば、化成処理のみとしたために、黒色三価クロム化成処理皮膜としては耐食性が低下し、腐食が始まる前に塗装工程をおこなう必要があるためである。したがって、化成処理皮膜を付与した後に、Table 2 に示すような条件下で放置し、その後塗装を施した皮膜の耐食性およ

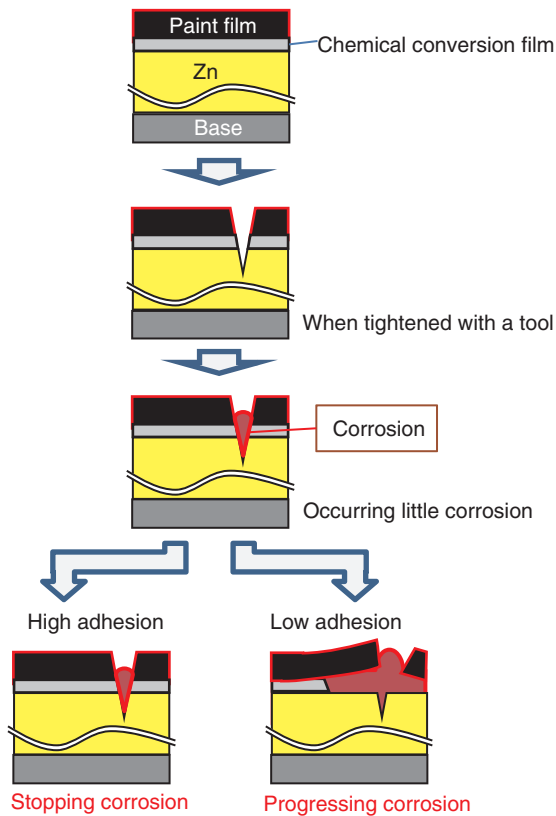
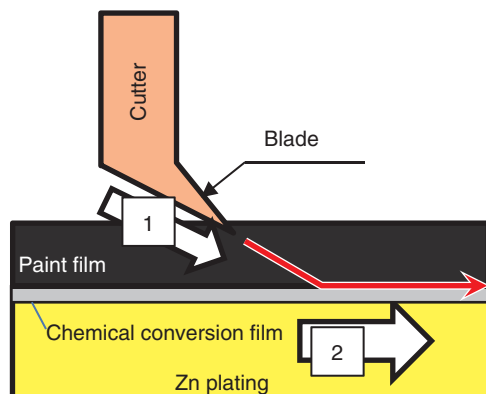


Fig. 6 Models of paint adhesion and corrosion resistance



1. The cutter advances along the direction of the blade.
2. Just after the blade touches the Zn plating layer, the cutter changes the direction to advance horizontally parallel to the paint surface.
3. The adhesion strength is measured by detecting the stress applied on the cutter.

Fig. 7 Model of SAICAS and test method

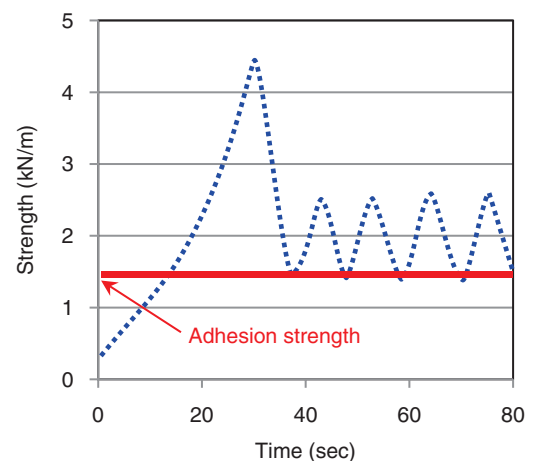


Fig. 8 Model data of SAICAS

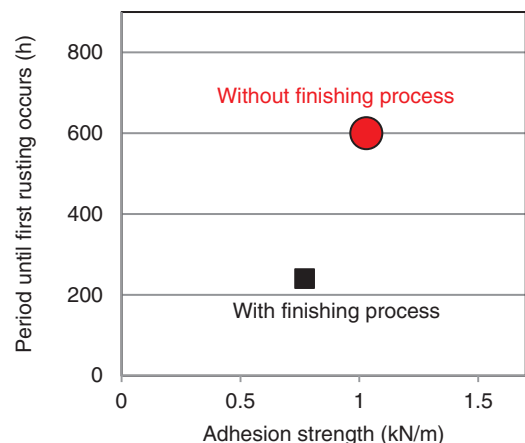


Fig. 9 Relationship between adhesion and corrosion resistance with and without finishing process after chemical treatment

び塗膜の密着性を確認した (Fig. 10, 11). その結果, 下地である化成処理後に乾燥しなかったもの, および高温高湿環境に曝露したものについては劣化を起こしていた. よって化成処理後, 乾燥させること, 高温高湿環境に放置してはならないことが明確となった.

3.2.2. 下地としての黒色化成処理皮膜の黒味設定

先に述べたように, 今回採用する手法においては, 最終的に得られる表面の黒さの度合い (黒味) は, 下地である黒色三価クロム化成皮膜の黒さと, その上の塗装膜の持つ黒さが合わさることによって発現される. したがって, 塗装する塗料を開発するためには, まず, 黒色三価クロム化成処理皮膜層で付与できる黒さ, とりわけ, 製造工程上発生しうる最も低い黒さのレベルを把握しておく必要がある.

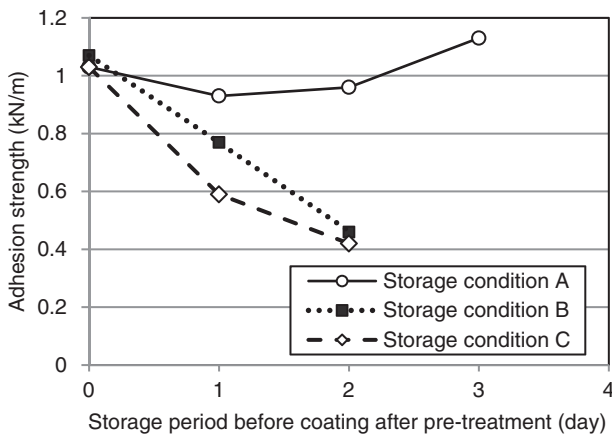


Fig. 10 Relationship between adhesion and storage period with various conditions

	Storage period			
	0 day	1 day	2 days	3 days
Storage condition A	 No rust	 No rust	 No rust	 No rust
Storage condition B	 No rust	 Whitening	 Whitening	—
Storage condition C	 No rust	 Whitening and peeling	 Whitening and peeling	—

Fig. 11 Relationship between corrosion toughness and storage period with various conditions

一方, 黒色化成処理皮膜の膜厚は化成処理液中の Zn イオン濃度に影響されるため, 発色する黒味も Zn イオンによって決定される. そこで, 最も劣化した状態における化成処理液の Zn イオン濃度を明確にし, その処理液で得られた黒色皮膜表面の黒味を定量的に評価することとした.

通常, 化成処理時に処理液の補充がなければ Zn イオンの濃度は飽和するまで上昇し続ける. しかし, Fig. 12 に示すように, 実際の化成処理工程では, 一回の処理が終わるごとにある程度の処理液が製品に付着した状態で処理槽から持ち出される. そのため, 処理液がわずかに減少する. その減少量と同じ量の処理液を補充することで, Zn イオンの飽和に向かいつつある皮膜生成反応のための処理液成分が一部除去, 交換される.

Fig. 12 に示すように, 反応, 持ち出し, 補充を繰り返した場合, n 回目の補給が終わった段階の Zn イオン量は式 (1) で表される.

$$A_n = A_{(n-1)} + x - y((A_{(n-1)} + x)/B) \quad (1)$$

A_n : n 回処理した後の化成処理液中の Zn イオン量 [g]

B : 化成処理液量 [L]

x : 一回の処理での Zn イオンの溶け出し量 [g]

y : 一回の処理で持ち出される処理液量 (= 補充量) [L]

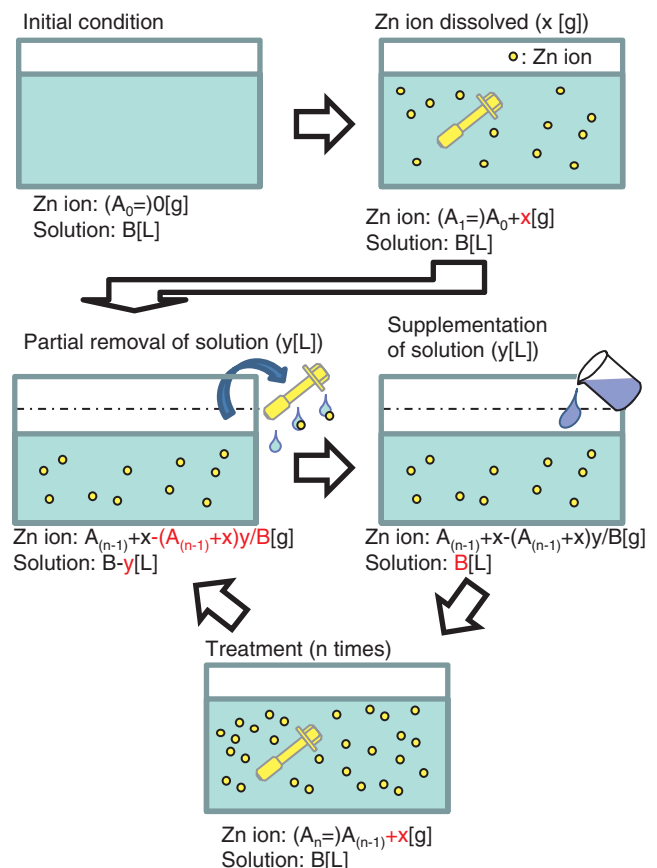


Fig. 12 Increase of zinc ion in solution and loss of solution in chemical treatment using trivalent Cr

式(1)は n が大きくなるとZnイオン濃度がある一定量に漸近することを表している。この漸近値となるZnイオン量を計算するために、式(1)の n を無限大としたときの極限式を採ると式(2)で表される。

$$\lim_{n \rightarrow \infty} A_n = x((B-y)/y) \quad (2)$$

よって、 n が十分に大きいときのZnイオン濃度 C_{Zn-ion} [g/L]は式(3)で表される。

$$C_{Zn-ion} = x((B-y)/y)/B \quad (3)$$

式(3)中の x と y の値は処理液の状態と被処理物の表面積に依存する。Znイオン濃度が最大となるのは x が最大で y が最小になるときである。量産工程にて想定されるこれらの値で試算した結果、Znイオン濃度の最大値は14.7 g/Lとなった。

この結果より、通常の量産工程では、大目に見積もっても、Znイオン濃度が20 g/Lを超えることはないと考え、この濃度を生成される皮膜膜厚の下限を考える上での条件とした。この条件を設定することで、これまで頻繁に交換していた処理液をほぼ交換なく使い続けることが可能となり、生産性の向上を図ることが可能となる。

黒色化成処理皮膜の黒味を定量的に評価するために、ハンター式色標のうち明度の指標である L^* 値を用いることとした。なお、 L^* 値が小さいほど黒味が強い。

Znイオン濃度が、上限設定値として定めた20 g/Lに達した化成処理薬剤で生成した黒色皮膜の明度を測定すると、 L^* 値は約33であった。この結果より、本明度を最も膜厚が小さくなった場合の黒味として前提に置き、浸漬塗装用の黒色塗料の設計をおこなうこととした。

3.3. 黒色化成処理皮膜を下地とする前提での塗料の設計

3.3.1. 塗装膜厚の設定

まず、浸漬塗装をおこなう際の目標膜厚を設定することとした。ここに、膜厚上限値の決定には外観ボルトとして二輪車に多用される最小のボルトであるM6ボルトのねじ精度の規格(JIS B0209)から、表面処理の目標膜厚を採用した。おねじとめねじの間の隙間が最も小さくなる状態を考え、めねじ内径が下限値で、おねじ素材外径が上限値となった場合を採った。このとき、隙間は13 μ mとなる。この条件下において、おねじの表面処理の膜厚は13 μ m以下である必要がある。亜鉛めっき層と化成皮膜層の膜厚を合計すると8-10 μ mであることから、塗膜の厚さは3 μ m以下である必要がある。

これより、本開発における塗膜厚さの目標を2 μ mに設定し、その公差として ± 1 μ mを許容することとした。なお、ボルトの表面処理として長年実績のある六価クロム化成処理皮膜において、膜厚の厚いものが2-3 μ mであることから、今回設定した膜厚の目標値は妥当なものであると判断した。

Table 3 Assessment of base paint material for bolts

	General organic paint			Organically-modified inorganic paint	
	Acrylic paint	Epoxy paint	Urethane paint	Silicon paint	Polysiloxane paint
Thin film	1	1	1	1	3
Corrosion resistance	2	3	1	2	3
Pot life	3	3	1	3	3
Hardness	1	1	1	2	3
Coloring	3	3	3	3	2
Weather resistance	3	1	3	3	3

3 = good, 2 = fair, 1 = poor

3.3.2. 塗料基材の選定

続いて塗料の基材を検討した。選択に当たっては、一般に二輪車に適用可能であるとの観点から、一般的な有機塗料と有機変性無機塗料から選択することとし評価をおこなった。Table 3にボルトの浸漬塗装に要求される塗膜の性能に対する各塗料基材の評価結果を示す。

それらの塗料基材の中で、塗料粘度が低く 2 ± 1 μ mという薄い膜厚の領域で厚さのコントロールが容易にできるポリシロキサン系塗料を基材として選定した。また、この塗料の塗膜は架橋密度が高くなるため、素材を空気中の酸素から遮断する効果が高い。そのため耐食性に対しても有利なことも選択上の利点として考慮された。

3.3.3. 塗膜中の顔料量の決定

続いて塗膜を黒色にするための着色剤の選定をおこなった。二輪車の外観部品の締結に使用されるボルトは、太陽光下にさらされる機会が多いことから、退色しにくい顔料としてカーボンブラックを主とした黒色顔料を選定した。黒色顔料の添加量は以下の順序で決定した。

外観品質の目標は黒クロムめっきと同等のレベルとした。黒クロムめっきは皮膜に六価クロムが混入するため現在は使用できないが、過去においてボルトに最も高品位な外観を付与できた技術である。その黒味をハンター式色標で測色したところ、 L^* 値は28程度であった。よって、黒味の目標を L^* 値28以下と定めた。

この目標を達成するために、塗料中の黒色顔料の添加量を決定することとした。まず黒色化成処理工程にて、Znイオン濃度が20 g/Lとなるよう調整した化成処理液を用いて、黒色化成処理皮膜を付与した試験片を製作した。続いて黒色顔料の添加量を変えた塗料を用意し、塗装膜厚が設定した膜厚の下限である1 μ mとなるように、各5個ずつの試験片に塗装した。得られた試料の L^* 値を測色した結果の平均値、および最大値と最小値をFig. 13に示す。

黒色顔料の量が塗料中に2.3%以上あれば L^* 値が28を下回ることがわかる。この結果から、化成処理皮膜と開発した塗膜を組み合わせることで、黒クロムめっきと同等以

上の外観性能を得ることが可能となった。

しかし顔料は塗料基材中に分散しているが、基材成分と結合してはいない。つまり、基材と顔料の間には構造が不連続になっている部分があり、その部分は水や腐食を促進成分が通過しやすいといえる。つまり顔料を増やすことで、基材の不連続な部分が増えると耐食性が低下することが考えられる。よって先に設定した顔料量が耐食性の観点から適当であるかの確認をおこなった。

黒色化成処理工程にて、Zn イオン濃度が 20 g/L の処理液を用いて、黒色化成皮膜を付与した試験片を製作した。そこで黒色顔料の添加量を変えた塗料を用意し、塗膜が設定した膜厚の下限である 1 μm となるように、各 5 個ずつの試験片に塗装した。黒色顔料の添加量違いの試験片に対し、480 時間の SST をおこない、表面に発生した錆の面積率を測定した。Fig. 14 にその平均値、および最大値と最小値を示す。

この結果、黒色顔料の量が塗料中に 3.0% 以下であれば耐食性を著しく低下させることはないと考えた。よって先に決定した黒色顔料の最低量と合せ、黒色顔料の量は 2.3%

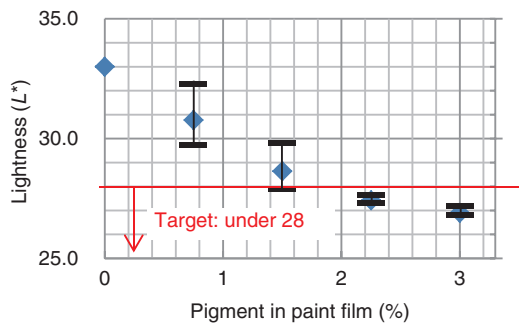


Fig. 13 Relationship between pigment content and L^* (Film thickness: 1 μm)

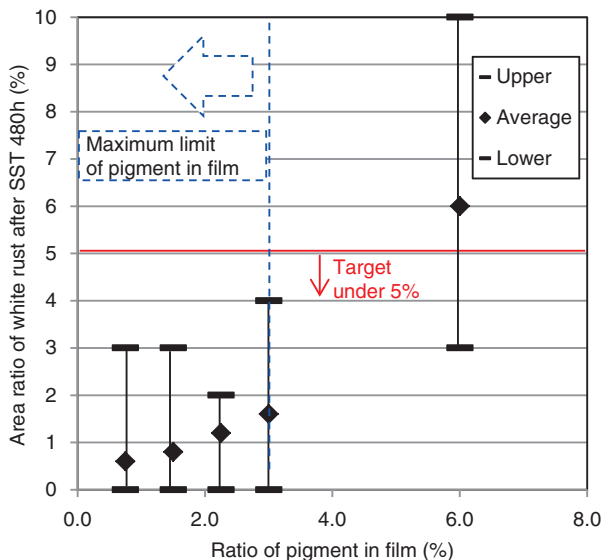


Fig. 14 Relationship between pigment content and corrosion toughness

から 3.0% の範囲とした。

3.3.4. 塗膜中の摩擦調整剤量の決定

続いて摩擦係数を調整するために、塗料中の分散性を考え摩擦調整剤を選定した。塗料中の摩擦調整剤の量と摩擦率の関係を測定し、サンプル数 5 個における平均値と最大値、最小値を Fig. 15 に示す。

その結果、従来の表面処理と同等となることをねらい、塗料中に 6-18% 添加することとした。また、摩擦調整剤も基材中に分散しており、量が増えると耐食性が低下することが考えられる。よって耐食性の観点から適当であるか確認することとした。摩擦調整剤の添加量を変えた塗料を用意し、塗膜が設定した膜厚の下限である 1 μm となるように、各 5 個ずつの試験片に塗装した。これらの試験片に対し、480 時間の SST をおこない、表面に発生した錆の面積率を測定した。Fig. 16 にその平均値、および最大値と最小値を示す。

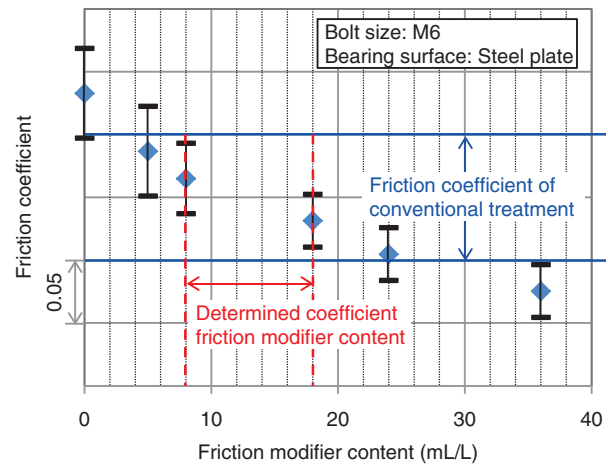


Fig. 15 Friction coefficients to friction modifier content

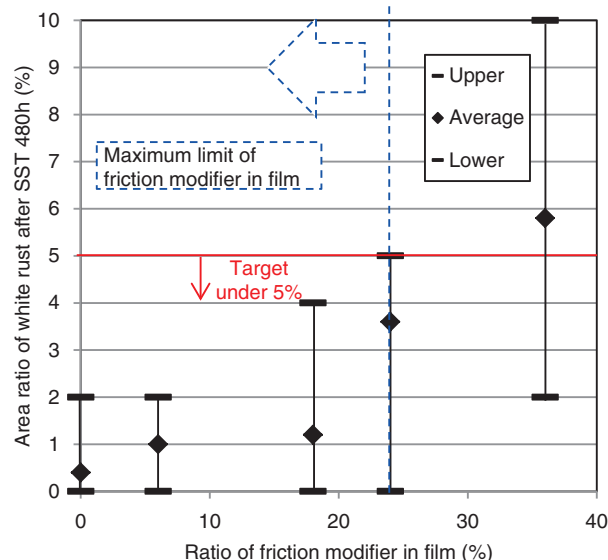


Fig. 16 Relationship between friction modifier content and corrosion toughness

この結果、22%の添加量までは著しく耐食性が低下することはなく、先に示した量6-18%の添加量では耐食性能に影響しないことが確認できた。

3.4. 浸漬塗装条件の決定

3.4.1. 浸漬塗装の浸漬振り切り条件設定

本開発では、塗装膜厚が1 μm以上かつ3 μm以下で外観や性能が維持できるように設定されている。よって浸漬塗装の工程のうち、塗装膜厚を決定するのに重要な、ボルトを塗料へ浸漬する工程と余剰な塗料を振り切る工程の条件を設定する。

目的とする塗装膜厚を安定して得るために、膜厚への寄与率が高いパラメータを抽出することを検討した。そのために、浸漬塗装工程を単純な形式にモデル化して考えることとした。

浸漬塗装工程では、被塗物を籠に入れ、塗料中に浸漬させた後、遠心振り切り機で余剰な塗料を振り切ることで塗料の膜厚を管理する。被塗物上の塗料は表面張力により連続性を保っており、被塗物の表面上を、ほぼ自由に流動することができると考えられる。したがって、被塗物上の塗料はFig. 17に示すよう遠心力により、籠の外周部まで移動する。

最外周部では、籠の外側に向かって塗料が飛散する。外周部付近のボルト上にある塗料が飛散しても、表面張力により、内側にあるボルトの塗料が、被塗物の上を伝って外周部に再び補充される。このようにして、被塗物各部における塗料の厚みは減少していくが、塗料の粘性により、厚みが一定値に至ると流動しなくなり、被塗物上に留まる。到達する厚みは籠内の位置によって異なるが、先に述べた表面張力の効果により、やがて、籠の最外周部における、遠心力 F_c と粘性力 F_v のつりあいによって、籠内全体の被塗物の膜厚がほぼ決定されると仮定した。この様子を、Fig. 18に示す模式図で表した。

これらの仮定に基づき、膜厚決定に関与する要素間の関係を式で表すことを試みた。

まず、遠心力 F_c は式(4)で示される。

$$F_c = \rho \times S \times h \times r \times (2\pi N)^2 \quad (4)$$

ρ : 塗料の密度

S : 塗料の付着している単位面積

h : 塗料の厚さ

r : 籠の中心からの位置

N : 遠心振り切り機の回転数

r は、膜厚決定に関与する籠の最外半径 r_{max} で代表した。

ニュートンの流体摩擦法則を用いると粘性力 F_v は(5)で表されることになる。

$$F_v = \frac{(\eta \times v \times S)}{h} \quad (5)$$

η : 液体粘度

v : 液体の流速

S : 塗料の付着している単位面積

h : 塗料の厚さ

v は塗料の流動速度であり、遠心力によって生ずるため、遠心力が最大となる最外周部で最大となる。最外周部の近傍においても、厚みが減少していき、一定値に至ると流動しなくなる。式(4)、式(5)より、厚みの減少に伴い、単位面積上にある塗料にかかる遠心力は減少し、粘性力は増加する。塗料の流動が止まるのは、これらがつりあいに至った状態と考えられる。すなわち、ここで $F_c = F_v$ とすると、塗料の厚さを示す下式(6)が得られる。

$$h = \sqrt{\frac{\eta \times v}{\rho \times r_{max} \times (2\pi N)^2}} \quad (6)$$

この状態に到達したときに遠心振り切り機の回転を止めると、塗料が再度被塗物の上を流動し、塗料の厚さが均一になる。その後、焼付け工程にて硬化し塗膜となる。つまり最外周部における、遠心振り切り処理終了時の到達塗料膜厚 h が一定となるよう調整すれば、被塗物全体について一定の塗膜厚さが得られることになる。関与するパラメータのうち、調整可能なのは塗料の粘度 η と遠心振り切り機の回転数 N である。もちろん、実際には、他の要因の関与も考えられるが、本開発ではこの二つのパラメータが膜厚を決定される主要因であると仮定して、検証を推進した。

この仮説のもとに、ねらいの膜厚が得られる条件を設

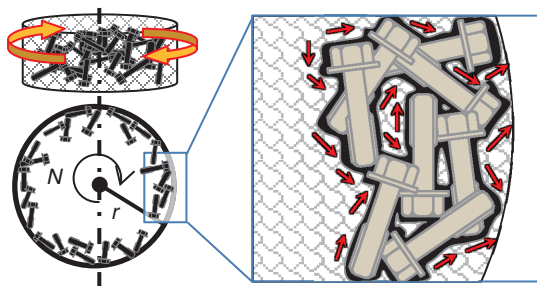


Fig. 17 Image of movement of paint in excess paint removal process by centrifugal force

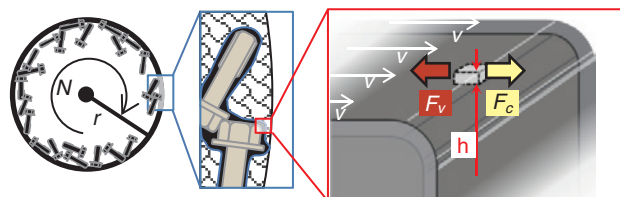


Fig. 18 Image of excess paint flinging off by centrifugal force

定するために、塗料の粘度と遠心振り機（アネスト岩田株式会社製、イワタカップ）の回転数の関係を調べるための実験をおこなった。実験結果を Fig. 19 に示す。

粘度は生産工程で広く用いられている簡易粘度計（アネスト岩田株式会社製、イワタカップ）で計測した。測定時の外気温は 35℃、塗料の温度は 25℃ であった。

得られた結果によると、おおむね式 (6) のように回転数に反比例することがわかった。また、本開発で用いている遠心振り機の常用回転数 500 rpm を前提にすると、目標の塗膜厚さ 2 μm を得るためには塗料の粘度が 9.3 s であればよいことが確認された。

続いて外気温変化などの季節的要因が塗膜厚さに与える影響を確認するために、先の実験条件に対して外気温を 10℃ に変更して実験をおこなった。その結果、塗料の粘度が 9.3 s の場合の塗膜厚さは 1.5 μm となった。ねらいの膜厚に対して 0.5 μm 程度の差が発生した。よって設定した目標により近づけるために、更なる処理条件を検討することとした。

外気温 10℃ で塗装をおこなうと塗膜厚さが薄くなる理由は、振り切り工程において塗料が振り切られていくと同時に希釈剤も蒸発するが、外気温が低いと蒸発しにくくなり、塗料の粘度上昇が遅くなるためであると考えた。

それを確認するために、外気温違いで 20 mL の塗料を直径 65 mm のピーカ内で攪拌したときの粘度上昇の違いを確認した。その結果を Fig. 20 に示す。

この結果から外気温が低いと粘度上昇が遅く、外気温が高いと粘度上昇が早くなることがわかった。つまり、粘度上昇を季節に影響せず一定にする必要がある。もう一つの要因として外気温が異なると同じ粘度の塗料であっても希釈剤の量が異なることも考えられる。本塗料は有機物であるため、温度によって塗料自体の粘度が変わる。そのため、一定の粘度とするために加える希釈剤の量が異なることに

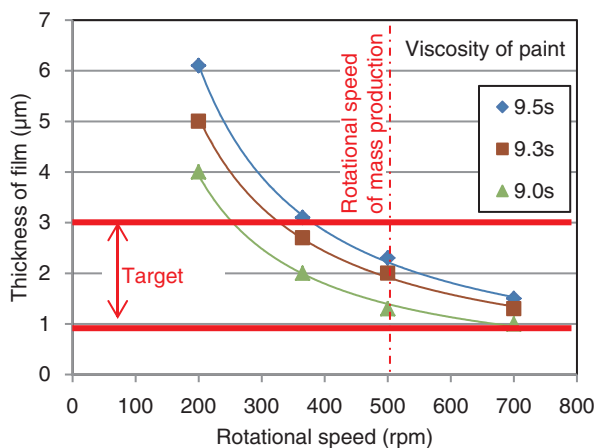


Fig. 19 Relationship between rotational speed of centrifuge and thickness of film for different paint viscosities

なる。その結果、振り切り直後の塗料の膜厚が同じであっても、希釈剤が蒸発し、硬化した後の塗膜の厚さは同じ値とならない。そこで実際の塗膜になる塗料成分の量の違いを確認するために、異なる外気温下で粘度が同一となるように調整した後、塗料の加熱残分を測定した。測定は JIS K5601-1-2 に基づいておこなった。その結果を Fig. 21 に示す。

粘度調整時の外気温 15℃ の場合と 25℃ の場合で加熱残分に 3% の差が確認された。これらの結果から、外気温が変化する場合は遠心振り機の回転数と塗料の粘度を決めただけでは求める膜厚を得られないことがわかった。

しかし外気温ごと管理条件を設定するのは現実的ではなく、また通常の霧化塗装のように外気温を一定にすることも容易ではない。また加熱残分管理は時間がかかり生産性が低下する。そこで、外気温の違いを除外するために、塗料の温度と被塗物の温度を一定にすることを考えた。温度影響を抑えるために塗料と被塗物の温度を同一にすることで、希釈剤の蒸発速度が一定となることをねらった。また塗料の温度が一定であれば、塗料の粘度管理のみで加熱残分を一定にすることができ、処理条件の管理も簡便にできる。そこで外気温を 10℃ とし、塗料温度と被塗物温度を 28℃ まで加温した上で処理したときの塗膜厚さを Fig. 22 に示す。

外気温が 10℃ であっても塗料と被塗物を加温することで、外気温が 35℃ のときとほぼ同等の膜厚が得られた。

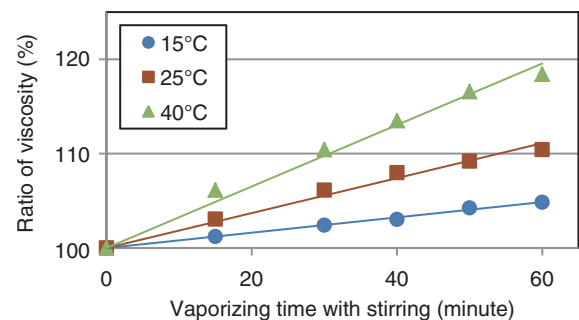


Fig. 20 Change viscosity of each temperature

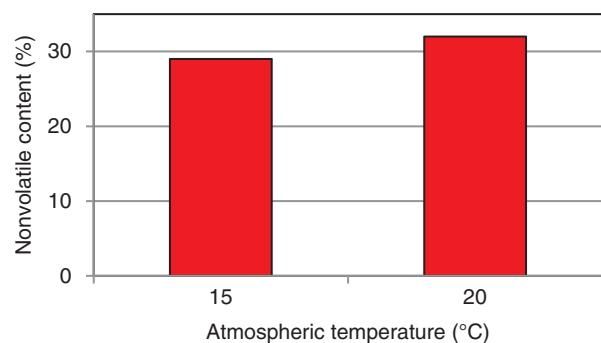


Fig. 21 Nonvolatile content of same viscosity paint under each room temperature

この結果が示すように、外気温差により生じる膜厚の差に対しては、塗料と被塗物の温度の調整により一定の膜厚を得られることが確認された。

3.4.2. 浸漬塗装の焼付け条件設定

続いて、塗料の基材として選定したポリシロキサン系塗料を硬化させるのに必要な温度条件を検討した。先に述べたように、本基材は架橋密度が高く、耐食性も期待できる。本塗料の架橋メカニズムは二つのシロキサンに熱を加えることにより OH 基から H_2O が脱離する脱水縮合であり、熱のみで反応が進む。よって塗料を硬化させるには、脱水縮合に適正な熱を加えねばならない。そこで、まず、選定したポリシロキサン系塗料で推奨されている加熱条件で焼付けをおこない、適正であるかを確認した。まず、ボルトに最も反応に時間がかかるようにするため、塗装膜厚が $3\mu m$ となるように塗料を塗布し、推奨されている $140^\circ C \times 20\text{ min}$ で焼付けたところ、良好な耐食性を有することが確認できた。

但し、二輪車用の黒色ボルトは、油圧式ブレーキシステムに使われることも多い。よってブレーキフルードがかかることも考えられる。しかしブレーキフルードは塗膜を溶解させやすいため、黒色ボルト用の塗膜はブレーキフルードに対する耐性が必要となる。そこで、塗装したボルトを $200^\circ C$ で加熱したブレーキフルードに浸漬した。 $200^\circ C$ はブレーキフルードが使用できる限界温度である。その結果、塗装皮膜が溶解する事象が発生した。そこで $140^\circ C \times 20\text{ min}$ で焼付けた塗膜は、ブレーキシシステムには適用できないと判断した。その原因としては、未反応部分が一部残っているためと考えた。一般の塗装では空気中の塵などが硬化前の塗装面に付着することによる外観不良が発生しやすい⁽¹⁶⁾。その場合、その不良部位だけを研磨し、再度塗装するリコートという外観補修がおこなわれる。リコートを施すときには、一回目の塗装と二回目の塗装の密着が課題になることがある。一般に、一回目に塗布された塗膜

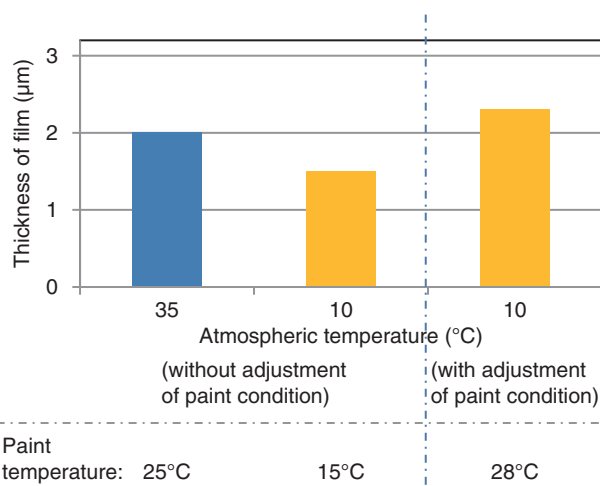


Fig. 22 Thickness of film under various seasons

表面に未架橋部分が残っていると二回目に塗装された塗膜との密着性が確保しやすい。よって少し未架橋部分を残す焼付け条件がしばしば推奨されている。今回の推奨値もリコートが前提の温度条件であると考えられる。しかし、本開発における浸漬塗装はねじ精度を満足させるために、塗膜は1層で設計している。そのため、リコートにより塗膜を2層とすると膜厚目標値の上限を超えることが容易に予想される。よってリコートによる外観補修は許容できない。したがって、1層目と2層目との密着性を確保することを目的とした未架橋部分を残す必要はないと考え、焼付け条件を変更することとした。

まず、本開発塗料を塗布したボルトを用意し、焼付け温度を変えて各 20 min 焼付けたテストピースを作製した。これらのテストピースをブレーキフルードに浸漬したのちに外観が変化するか確認した。その結果、Fig. 23 に示すとおり、塗膜を $180^\circ C \times 20\text{ min}$ ですれば、加熱したブレーキフルードへ浸漬されても溶解等の塗膜劣化が起こらないことが確認できた。以上より、焼付け温度は $180^\circ C \times 20\text{ min}$ 以上とした。

これに対して、焼付け温度の高過ぎや時間の長過ぎは、めっきの酸化を招き、想定した耐食性が得られないことも考えられる。そこで高温で長時間の焼付けをおこなっても劣化を起こさない条件を設定することとした。本開発で用いている焼付け炉は投入から、取出しまでの時間が 60 min であるため、それ以上焼付けられることはない。その範囲内で条件を設定するとともに、あわせて、工程イレギュラによるライン停止を想定して 120 min まで確認しておくこととした。

$180^\circ C$ から $20^\circ C$ ずつ温度を上昇させ、各温度で焼付け時間を変えて焼付けをおこなったサンプルについて、SST、480 時間の耐食性試験をおこなった結果を Fig. 24 に示す。

この結果、 $240^\circ C$ で 60 min 焼付けた場合、耐食性が著しく低下することがわかった。そこで、焼付け条件範囲は $180^\circ C$ から $220^\circ C$ 、時間は 20 min から 60 min とした。なお、その温度範囲ではライン停止があったとしても、直ちに不具合につながることはないこともあわせて確認できた。



Appearance of coating bolts immersed in brake fluid after baking at $140^\circ C$



Appearance of coating bolts immersed in brake fluid after baking at $180^\circ C$

Fig. 23 Appearance of coating bolts immersed in brake fluid after baking at different temperatures

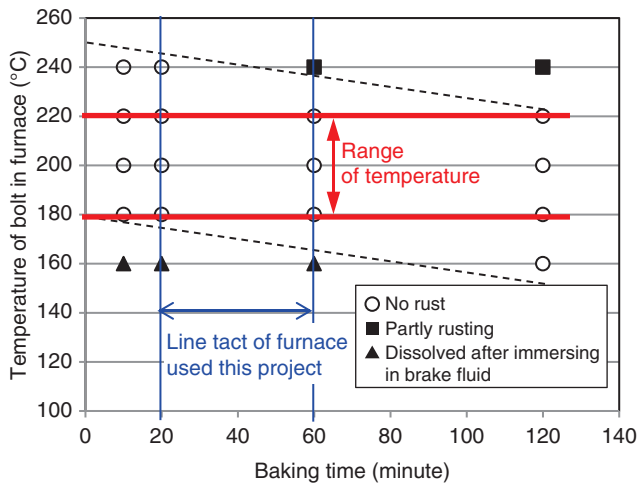


Fig. 24 Corrosion resistant confirmation result of baking temperature distinctiveness

4. 二輪用ボルトへの適用とその効果

4.1. 外観確認

実際にボルトに本開発手法を適用し、外観確認をおこなった結果を Fig. 25 に示す。下地に黒色化成処理皮膜があることで、色むらは発生していない。また、初期外観の L^* 値は 28 を下回り、黒クロムめっきと同等以上の外観を付与することができた。

続いて、締め付けをおこなった後の外観を確認する。M6 のボルトを用いて規定のトルクで締め付けた後の外観を Fig. 26 に示す。

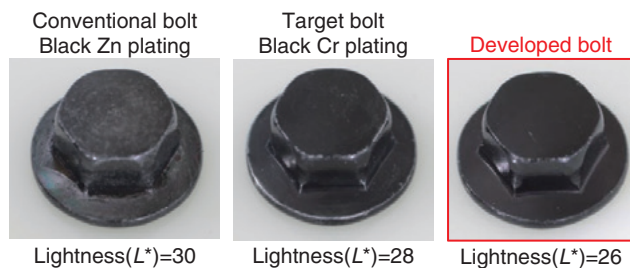


Fig. 25 Appearance of bolts

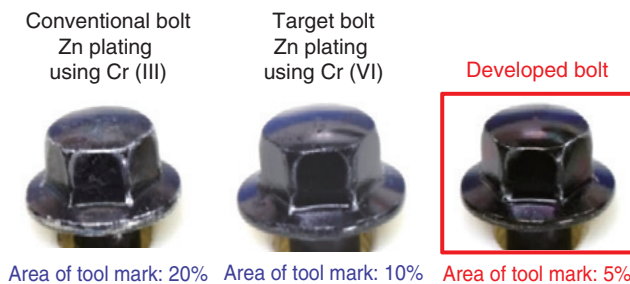


Fig. 26 Appearance of bolts after tightening

4.2. 耐食性確認

従来品と開発品のボルトをテスト車に取付け、実際の使用環境を想定したテストモードで腐食促進テストをおこなった結果を Fig. 27 に示す。この結果より十分な耐食性を有していることが確認できた。

4.3. 耐候性確認

JIS K5600-7-6 に準じた屋外暴露試験場にて 1.5 年暴露し退色度合いを測定した。JIS Z8729 に基づき色差 ΔE^*ab を確認した結果を Fig. 28 に示す。

Count of test cycles		4	12
Bolt of handle holder	Appearance		
	Developed (Upper)	No rust	No rust
	Conventional (Lower)	WR: 3%	WR: 50%
Screw of master cylinder	Appearance		
	Developed (Right)	No rust	No rust
	Conventional (Left)	WR: 3%	WR: 100% RR: 5%
Oil bolt of caliper	Appearance		
	Developed (Upper)	No rust	WR: 1%
	Conventional (Lower)	WR: 1%	WR: 100%

WR: Area ratio of white rust
RR: Area ratio of red rust

Fig. 27 Appearance of bolt after corrosion test

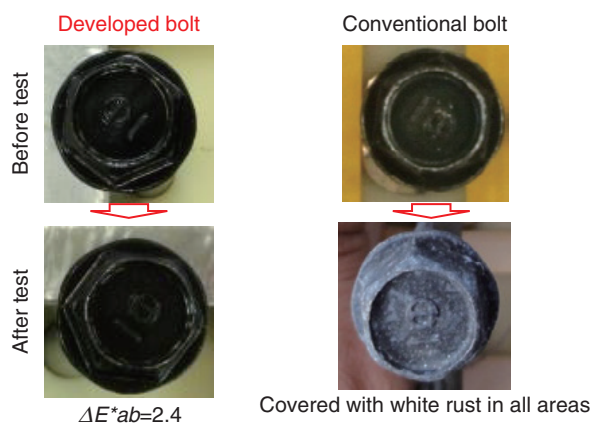


Fig. 28 Appearance before and after outdoor exposure test

着色に顔料を選択したため著しい変色は認められない。なお、従来品は白錆に覆われていたため変色の確認はできなかった。この結果により、腐食を含めた変色は現行表面処理よりも小さいため、現行品からの切り替えは可能と考えた。

4.4. 締付テスト確認

座面を SP, A6061, 塗装の3種で従来材との摩擦係数を比較した結果を Fig. 29 に示す。尚、サンプル数は10個で $\pm 3\sigma$ (標準偏差)の幅を表している。この結果より、座面がどのような材質であっても、本開発仕様の摩擦係数はばらつきは小さく、また従来材の範囲内であることが確認できた。これは従来の表面処理が積極的に摩擦係数を調整したものではないため、ばらつきが多いと考えられるが、本開発材は摩擦調整剤により積極的に摩擦率の調整をおこなった結果と考える。

4.5. 膜厚確認

設定した条件の中で膜厚が最も厚くなる条件は遠心振切り機の回転数が最も小さく、粘度が最も大きいときである。一方で膜厚が最小となるのは、回転数最大、粘度最小のときである。これら二つの条件で処理したボルトのうちそれぞれ10本の塗膜の厚さを確認した。それらの平均値および最大値と最小値を Fig. 30 に示す。いずれの条件でも膜厚は目標とする1-3 μm の範囲に入った。黒色外観が不十分となることなく、締結時のかん合性を阻害しないことを確認した。

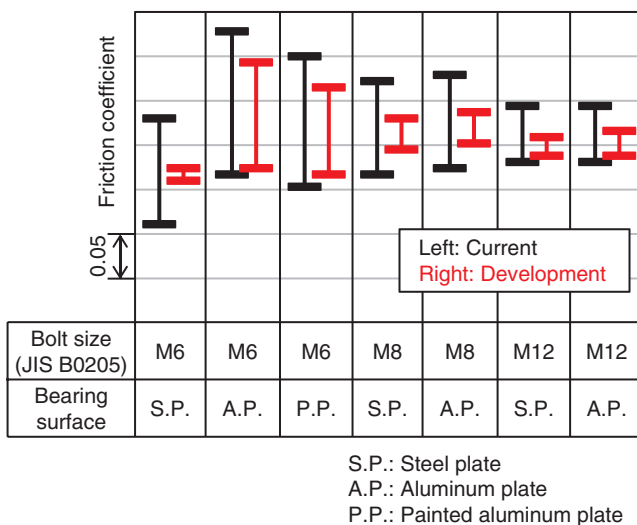


Fig. 29 Comparison of friction coefficient on various seating surfaces

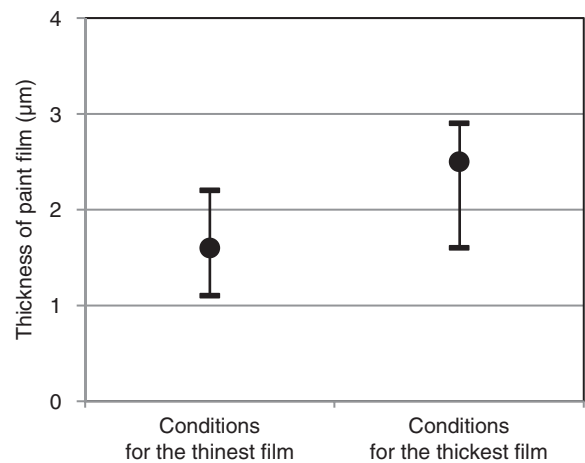


Fig. 30 Verification of film thickness deviations

5. 結論

黒色化成処理皮膜と浸漬塗装を組み合わせることで、二輪車の外観と機能要求に合致した黒色ボルト用の表面処理を開発することができた。以下に本開発で得られた知見をまとめる。

- (1) 黒色三価クロム化成処理皮膜を下地とし、その上に黒色浸漬塗装を施すという二段階で着色することで、ねじ精度を維持した上で均一な黒色外観をボルトに付与することができた。
- (2) 黒色三価クロム化成処理液の劣化メカニズムおよびその限界を明確にしたことで、塗装の下地となる黒色化成処理皮膜の色を定義することができた。同時に、設備停止が必要な処理液交換が不要になり、生産性が向上した。
- (3) 黒色三価クロム化成処理皮膜の目止め仕上げ処理を廃止することで、密着性が上がり、耐食性が向上した。また、塗装までの放置環境を規定することで、塗装下地としての黒色三価クロム化成処理皮膜の早期腐食を防ぐことができた。
- (4) 黒色塗料中に分散可能な摩擦調整剤を添加することで、求める摩擦率を有する塗膜を得ることができた。
- (5) 浸漬塗装で膜厚の厚さに寄与する因子を明確にすることで、季節変動にかかわらず、一定の膜厚を得ることができた。
- (6) リコート为前提としないことにより、プレーキフルードを使用する部位にも適用できる塗膜焼付け条件を設定できた。

本技術を用いることで、環境負荷物質を用いずとも二輪車の要求を満足することができる黒色を有した高品質なボルトが適用できることとなった。

なお、この新しく開発した皮膜は HyD-Coat (BLK) と命名されている。これは 2 種の材料を用いるという意味で Hybrid と 2 層で外観を与えるという意味で Dual、表面処理を表す Coat と黒色を示す BLK を組み合わせた造語である。

参考文献

- (1) 大阪府立産業技術総合研究所：亜鉛および亜鉛系合金めっきの防食性能, Technical Sheet, No.99040, (1999)
- (2) International Agency for Research on Cancer (IARC): IARC monographs on the evaluation of the carcinogenic risk of chemicals to humans, CHROMIUM, NICKEL AND WELDING, Chromium and chromium compounds, Volume.49, p.49-256, (1990)
- (3) Community legislation in force: (Directive 2000/53/EC of the European Parliament and of Council of 18 September 2000 on end-of-life vehicles).Official Journal L269, p.34, (2000)
- (4) Commission decision of 27 June 2002, amending Annex II of Directive 2000/53/EC of the European Parliament and of Council on end-of-life vehicles. Official Journal of the European Communities. L170, p.81-84, (2002)
- (5) 滝川和則, 宮寺勉, 大塚利明, 白川敦士, 高島光男, 松岡洋二: 6 価クロムフリー表面処理技術の開発, Honda R&D Technical Review, Vol.17 No.1, p.117-123
- (6) 花田洋一郎, 肥後信司, 大久保英明, 奥村卓司, 鍋岡和之: 6 価クロム廃止をねらいとした 3 価クロメートへの代替技術研究・開発, KOMATSU TECHNICAL REPORT, Vol.55, No.162, p.2-14, (2009)
- (7) 柏田清治: 「コスマーNC」ノンクロム型亜鉛めっき用防食塗料, 塗料の研究, No.139 p.40-44, (2002)
- (8) 榎本英彦: 表面処理による黒色化技術, 表面技術, Vol.49 No.11, p.1140-1146 (1998)
- (9) 山本良雄: 黒色クロムめっきの原理と応用, 表面技術, Vol.49 No.11, p.1147-1152 (1998)
- (10) 高崎晴之: クロメート皮膜の乾燥方法と耐食性について, 実務表面技術, Vol.24, No.10, p.489-496, (1977)
- (11) 長谷川史: Zn めっき用 3 価クロムクロメート, 表面技術, Vol.53, No.6, p.376-379, (2002)
- (12) 吉本勇: ねじの締結体設計のポイント, 日本規格協会, p.49-53, (1992)
- (13) 吉本勇: ねじの締結体設計のポイント, 日本規格協会, p.166-168, (1992)
- (14) 井上学: 6 価クロムフリー黒色化成皮膜処理技術, MATERIAL STAGE, Vol.4, No.11, p.72-76, (2005)
- (15) 水町浩, 鳥羽山満: 表面処理技術ハンドブック, 株式

会社エヌ・ティー・エス, p.71-76, (2000)

- (16) 鎌苅剛敏, 岩村達也, 井村健吾: 塗装ラインの直行率向上における塗装環境について, 塗料の研究, No.154, p.38-41, (2012)

■著 者■



吉田 裕之



平山 博史



井上 学



加藤 靖裕



加藤 丈晴



高橋 孝治

フィルムスタッキング法による CFRTP の ダイレクト立体成形技術の開発

Development of Direct Three-dimensional Shape Forming Technology of CFRTP
by Film Stacking Method

遊 座 嘉 秀*
Yoshihide YUZA

要 旨

炭素繊維強化プラスチックは、車両の軽量化に大きく寄与できるが、材料とともに製造コストが高いため、その適用が限られていた。我々は、この材料を二輪車に広く利用可能とするため、熱可塑性炭素繊維強化プラスチックを材料とし、部品を廉価に製造可能とする技術の開発をおこなった。成形には、熱可塑性樹脂フィルムと炭素繊維織物を積層し、熱プレスで成形するフィルムスタッキング法を採用しつつ、プリプレグを経ずに直接立体形状を成形する製法を開発した。本製法を適用時に、部品に発生した外観意匠性の課題を金型の温度や形状を工夫することで解決し、強度を維持しつつ繊維の乱れのない製品を実現した。なお、開発された製法は、CRF450 Rally の部品に適用され、その実用性が証明されている。

ABSTRACT

Carbon fiber reinforced plastics greatly contribute to weight reduction of vehicles, but their application has been limited due to high manufacturing cost together with the cost of materials. In order to make this material widely available to motorcycles, we developed a technology that makes it possible to manufacture the parts at low cost by using carbon fiber reinforced thermoplastic as a material. For the molding, a manufacturing method was developed to directly form a three-dimensional shape without using prepregs while adopting a film stacking method in which a stack of thermoplastic resin films and carbon fiber woven fabrics is formed by hot pressing. When this manufacturing method was applied, issues on the exterior appearances of the part were revealed. We successfully solved the issues by devising the temperature settings and shapes of the molds and realized a product without irregularities of fibers while maintaining the required strength. The developed manufacturing method was applied to the parts of the CRF 450 Rally and the practicality of the method was proved.

1. まえがき

近年その利用が急速に広がっている炭素繊維強化プラスチック (Carbon Fiber Reinforced Plastics: CFRP) は、非常に軽量で強度に優れた材料である。そのため、航空宇宙の分野においては金属に代わる構造材として用いられている。また、CFRP は四輪や二輪のレース用車両においてもその特徴を発揮してきた⁽¹⁾。CFRP は、その独特の外観から、レース車両の優れた性能の象徴となっている。さらには、軽量化とそれによる燃費向上をねらいとして、一般車両への利用拡大が期待されている⁽²⁾。しかし、量産車への適用は素材の価格以上に製造コストの高さから容易ではな

いとされてきた。その理由には、成形に長い時間がかかることや特殊な設備を必要とすること、材料の保管形態に対する要件が厳しいことなどが挙げられる。また基材となる熱硬化性樹脂は、リサイクルが容易ではないことも量産には向かないとされる一因となっている。

今回、これらの課題を解決するために、基材に熱可塑性樹脂を用いた熱可塑性炭素繊維強化プラスチック (Carbon Fiber Reinforced Thermo Plastic: CFRTP) の成形技術の構築に取り組んだ。さらに、通常、平板などの二次元的な形状を作る際に用いられるフィルムスタッキング法を用いて、深さのある複雑な立体形状を直接成形できる製法の確立を目指した。

*二輪 R&D センター

2. 製法と材料の検討

2.1. 製法検討

2.1.1. 従来製法とその課題

はじめに、製法について検討をおこなった。CFRTP は、用いられる炭素繊維の長さや繊維の連続性によって、2 種類に大別できる。一つは、織物などの長く連続した繊維を用いた製法であり、もう一つは、繊維を一定の長さに切り、短く不連続な繊維を用いた製法である。今回、検討の対象とした二輪車用部品は、構造的な機能を有する部品であると共に、外観性を求められる場合も多い。したがって、その軽さと強さに加えて炭素繊維の織り目が持つ外観意匠性が重要視される。そのため、織地模様を有する連続繊維織物を用いた製法を検討した。

連続繊維織物を用いた CFRTP は、熱可塑性プリプレグをプレス成形する手法が広く知られている。この製法の概略を Fig. 1 に示す。熱可塑性プリプレグは、スタンパブルシートとも呼ばれ、複層の繊維にあらかじめ熱可塑性樹脂を染み込ませた板状の中間材料である。このプリプレグを赤外線等で加熱し、繊維に含浸した樹脂を軟化させプレス成形をおこなう。樹脂を繊維に含浸させるプリプレグの製造工程と、製品形状に成形する工程とを分けることで製造サイクルの短縮をねらった製法である。熱可塑性プリプレグを製造する手法にはいくつかあり、その一つがフィルムスタッキング法である。フィルムスタッキング法は、フィルム状の熱可塑性樹脂と繊維を重ね合わせて加熱しながらプレスすることで繊維へ樹脂を含浸させる手法である。複層の繊維が板状になったプリプレグは硬く、繊維層同士が互いに動きを規制する。そのため賦形性が悪く、二輪車に多く用いられる複雑な形状をした部品の成形には適さない。また製品表面を平滑にするためには、樹脂を十分に流動させるために金型を加熱する必要がある場合もある。

2.1.2. フィルムスタッキング法による立体の直接成形

賦形性を向上させるためには、それぞれの繊維層が独立して自由に動くことが望ましい。そのため、フィルム

スタッキング法の素材の状態に着目した。前述のとおり、フィルムスタッキング法の素材状態では、フィルムと繊維を重ねたのみでそれぞれの層が独立している。この状態であれば、深さのある複雑な形状を成形する場合であっても繊維層が金型の形状に追従し賦形することができるのではないかと考えた。また、プリプレグ製造の工程が不要となるためコスト面や樹脂の熱劣化の面においても有利であると考えた。以上から、フィルムスタッキング法の素材状態から直接、立体形状を成形する手法を検討することとした。

今回取り組んだ製法の工程の概略を Fig. 2 に示す。

まず、通常のフィルムスタッキング法と同様にフィルム状の熱可塑性樹脂と、炭素繊維を交互に複数枚積層する。

次に、積層した素材を加熱した金型内に投入しプレス成形をおこなう。一定時間圧力を加えたのち金型を冷却し、形状が固定したら製品を取り出して成形が完了となる。

この製法を、直接立体形状を成形するという意味を含め我々はダイレクトフィルムスタッキング法と名付けた。

2.2. 基材樹脂の選定

ダイレクトフィルムスタッキング法において、基材となる熱可塑性樹脂はフィルム状の形態をとる必要がある。基材となる熱可塑性プラスチックの選定にあたり、一般に

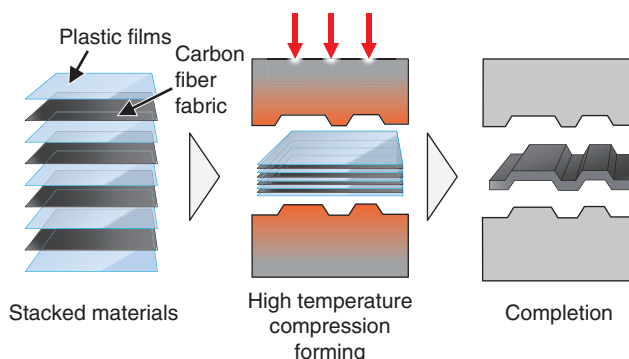


Fig. 2 Process of film stacking direct forming

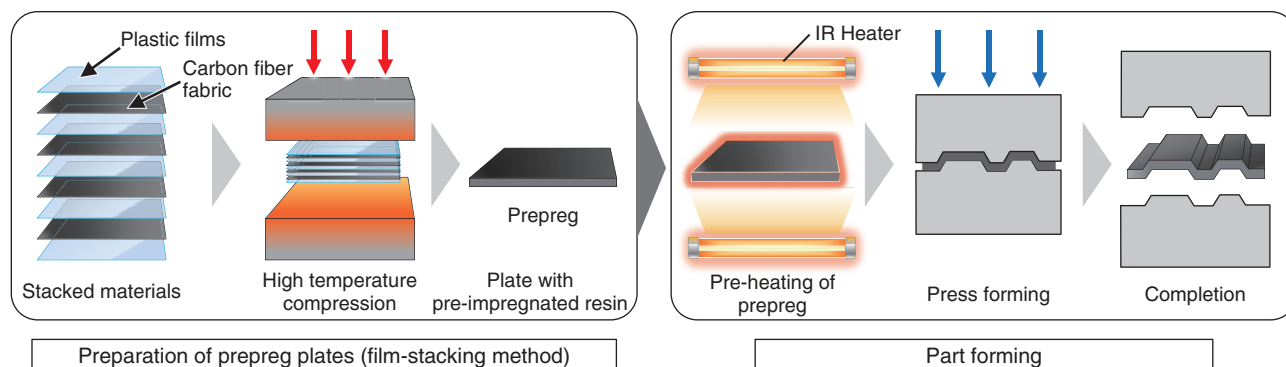


Fig. 1 Part forming using thermoplastic prepreg

Table 1 Comparison of base resins

	PMMA (Polymethyl methacrylate)	PC (Poly- carbonate)	PA6 (Polyamide 6)	PS (Polystyrene)	ABS (Acrylonitrile butadiene styrene)	PVC (Polyvinyl chloride)
Melting point (°C)	180	230	230	215	230	150
Heat deflection temperature (°C)	68	129	67	80	87	54
Flexural strength (MPa)	73	91	127	89	78	64
Tensile strength (MPa)	48	78	78	38	43	42
Stretch at break (%)	2	40	25	5	10	2

Numbers shown in the table are typical ones.

フィルム状で入手可能な材料の候補を Table 1 に示す。

車両部品の材料として使うには、曲げ強さや引張強さ、熱変形温度などの物性値は高いほうがよい。また伸び、つまり引張破断伸びについては5%程度必要である。そのため、PMMA(アクリル)やPVC(ポリ塩化ビニル)では必要な要件を満たさない。さらに、表に示した物性に加えて、耐候性や難燃性なども勘案する必要がある。また2.1.1.項でも述べたとおり、これら物性と併せて、外観意匠性が非常に重要である。炭素繊維の織り目を見せるために基材となる樹脂には高い透明度が求められる。以上の検討から、基材にポリカーボネートを用いることとした。ポリカーボネートは表中で最大の引張強さ78 MPaを持ち、曲げ強さもポリアミドに次いで高い。また、熱可塑性樹脂の中でアクリルに次いで透明度が高い。さらに、薄板のフィルム状で一般に広く流通していることも、本稿で述べる製法の構築にあたって好適な条件であると判断した。

3. 成形条件

3.1. 平板形状による成形条件確認

成形条件を確認するにあたって、最も重要な事柄は樹脂の含浸の度合いである。曲げ強さの値が高いほど繊維へ樹脂がよく含浸していると言える。そこで、平板形状のテストピースを作成し、JIS K 7074 に示される試験条件を基とした3点曲げ試験にて荷重と変位量を測定し、曲げ強さを算出した。炭素繊維織布には東レ株式会社製 C06347B (T300B 3K 綾織)を用い、この繊維を4層と樹脂フィルムを5層交互に積層する。このときの繊維の方向は上から45°、0/90°、-0/90°、-45°の一般的な疑似等方積層を用いた。この積層した素材を加熱した金型で熱プレス成形し、繊維への樹脂含浸の度合いを確認する。繊維への樹脂の含浸には温度、圧力、時間の三つの要素が関係するが、ここではその中で最も樹脂の含浸に影響する成形温度について測定結果を提示する。Fig. 3 に、成形時の金型の温度と、樹脂の含浸の指標となる試験片の曲げ強さの関係を示す。このとき成形圧力は3.6 MPa、加圧保持時間は4分とした。

ポリカーボネートは明確な融点を持たない非晶性の熱可塑性樹脂であるが、一般的には230℃近傍が融点であると

されている。融点を超え温度が上昇するにつれ、溶融した樹脂の粘度が下がる。Fig. 3を見ると、成形温度が220℃から280℃まで温度と曲げ強さはほぼ比例関係であると思われる。成形温度の上昇によって樹脂の粘度が下がり、繊維への含浸が向上していると言える。また成形温度が220℃と280℃では曲げ強さに2倍以上の差があり、低温では樹脂の繊維への含浸が不足していることがわかる。このときの試験片の断面を観察してみると、280℃で成形した試験片(Fig. 4)は繊維の奥まで樹脂が含浸していることがわかる。また230℃で成形した試験片(Fig. 5)は、繊維の表面にのみ樹脂が存在し内部に含浸しておらず、空けきとなっていることがわかる。これは、樹脂の温度が低く高い粘度であるため、十分に含浸できなかったためである。

また、成形温度280℃をピークとして曲げ強さは徐々に低下している。これは、成形時の熱によってポリカーボネート自体が劣化してきていることが考えられる。

以上から、成形温度については樹脂が十分に繊維へ含浸し、曲げ強さが最大となる280℃と設定した。

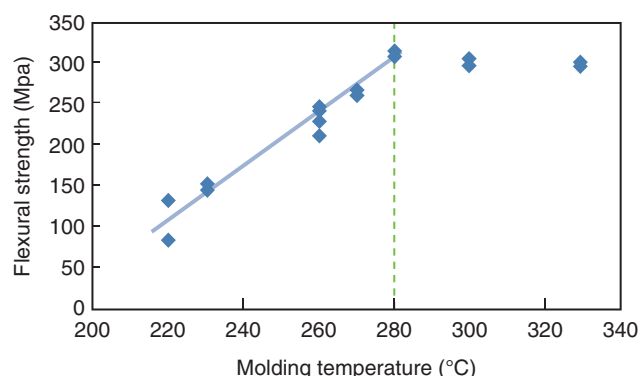


Fig. 3 Relationship between flexural strength and molding temperature

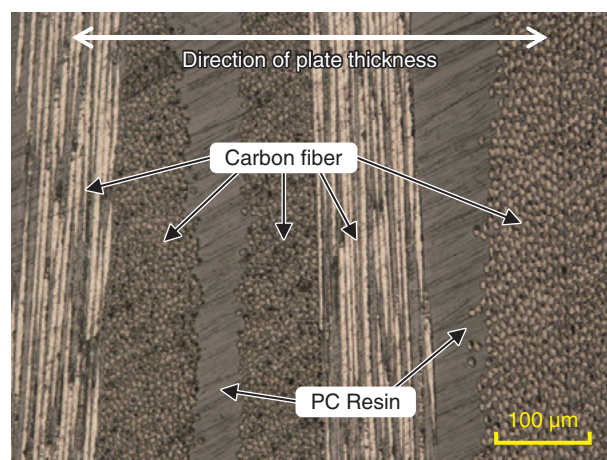


Fig. 4 Cross-sectional view of test piece with good impregnation condition of resin (TP processed at 280°C)

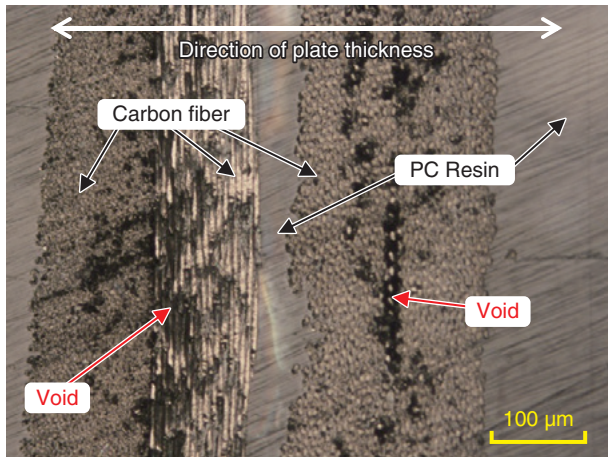


Fig. 5 Cross-sectional view of test piece with poor impregnation condition of resin (TP processed at 230°C)

4. 立体形状の成形

4.1. 立体形状成形

成形の対象とする部品は CRF450 Rally のリヤフェンダとした。この部品は、同車両の前年度モデルにおいては、オートクレーブ成形を用いて製作されており、縦横寸法が 600 mm × 200 mm、深さ方向の寸法が 120 mm ほどの部品である。製品側面に深い縦壁形状を持っており、また、部品前方部に複雑な凹凸形状を有する。テストピースで得られた成形条件を基に実際に成形をおこなった結果、水平に近い平坦な形状部分においては良好な成形状態を得ることができた。しかし垂直に近い縦壁部分や、凹凸が入り組んだ部分においてはいくつかの改善すべき点が見られた。

4.2. 繊維の断裂と露出による課題

リヤフェンダの成形品に見られた課題の中で、最も大きなものは両側の縦壁部分に発生した繊維の断裂であった。Fig. 6 に部品の左側側面の様子を示す。黄色破線で示した部分の表層の繊維が断裂し、内部の繊維が見えるのが確認できた。また赤色の破線で示した部分に至っては、繊維が全層にわたり断裂し樹脂だけになっている部分が見られる。こうした状態では、複合材としての強度が発揮できない。また Fig. 7 に示すような凹凸のある部位においては、表層の樹脂が無く、繊維が露出している部分が見られる。

これらの事象が、成形過程のどの段階で発生したのかを調べるため、上下の金型が閉じる過程に対して、素材の挙動を段階的に観察した。このとき、凸型を下に、凹型を上配置している。なお、観察は、見たいタイミングにおいて金型の動作を止め、金型を冷却することによっておこなった。この観察結果に基づき、以下に示すプロセスが推定された。素材投入後に上型が下降していくと、上型に触

れた部分から樹脂フィルムが溶融し始める。水平に近い平坦部においては、上型はおおよそ面で接触しながら降下してくるため、樹脂が繊維へ含浸させられるとともに、金型に沿った成形がおこなわれる。

これに対して、縦壁の斜度が垂直に近い部分では、樹脂が繊維に含浸するよりも早く、上下型間のクリアランスが成形前の素材の厚みよりも小さくなり、上型の角部分が最初に素材に接触する。これによって、素材表層の樹脂層を突き破る形となり、Fig. 7 に示したような表層に樹脂層が無い状態につながると考えられる。さらに、Fig. 6 に示すような、深い形状を成形する場合には、上で述べた、上型角部分の接触状態の後金型の移動が継続し、上型はさらに下方に移動する。ここで、溶融した樹脂は粘度が高く、繊維と繊維、あるいは繊維と金型との間で粘着剤のような働きをする。そのため、金型にはり付いた繊維が、金型の移動とともに引き裂かれる。

これらのプロセスを Fig. 8 に模式的に示す。

これらの原因は素材である複合層が金型の形状に十分に

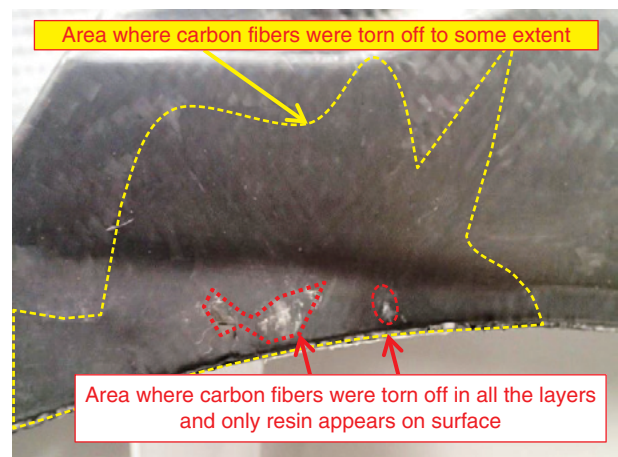


Fig. 6 Breaks of fibers appear on vertical wall section

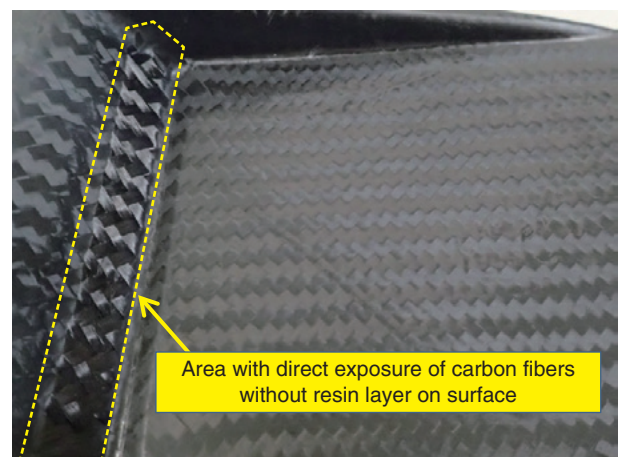


Fig. 7 Area on surface with direct fiber exposure

なじむ前に、樹脂が溶かされるということにある。金型が高温でなければ、樹脂フィルムが溶断されることはない。また樹脂が溶け、金型にはり付いていなければ繊維が引き裂かれることもないと言える。そこで、賦形前に樹脂が溶け断裂するのを防ぐために、低温の金型で予備賦形させることも検討した。しかし金型を閉じたときのクリアランスに対し、成形前の素材は約2倍の厚みがある。したがって、素材状態そのままではプレスすることはできない。また、金型に繊維の擦こんや圧こんがついてしまう。複数の金型による予備賦形を用いれば、上記のような事象を軽減することができる。しかし、本開発では複数の金型を用いず、あくまで一組の金型で、賦形と樹脂含浸のいずれの条件も満たす手法の確立を目指した。一組の金型で成形するには、一回の成形プロセスの中で樹脂を含浸させ、素材の厚みを減らす必要がある。また、複合材として強度を発揮するためにも、金型を高温にし、樹脂を溶融させ繊維に充分含浸する状態を実現しなければならない。金型を高温にすることは、賦形工程に対して支障となるが、樹脂含浸に対しては必要であり、これらを同時に満たす手法の検討をおこなった。

4.3. 金型温度差による外観意匠性向上

我々は、部品形状への賦形と樹脂の含浸の、二つの工程を上下の金型にそれぞれ分担させることはできないかと考えた。具体的には、上下の金型の温度に差をつける手法を検討した。

上型の温度は、樹脂のガラス転移点以上、融点以下に設定する。これによって、樹脂フィルムを溶かさずに軟化させ、素材を賦形させることができる。これに対して下型の温度は、樹脂の融点以上に設定し、樹脂フィルムを溶融できるようにする。これら金型温度を設定し成形をおこなったときの、金型と樹脂/繊維層の動きを Fig. 9 に模式的に示す。

上型は樹脂フィルムを溶かさず表層で滑りながら下降し、素材を下型に押し付ける。押し付けられた素材は、下型に触れた側から溶け、下型にはり付いていく。上型は素材表面で滑りながら下降するため、繊維は断裂を起こし

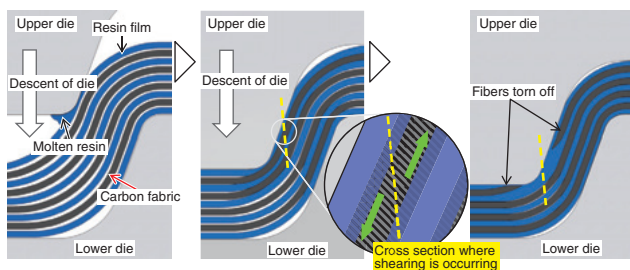


Fig. 8 Schematic views of cross sections of die, which show phenomena occurring while upper die is descending

にくい。金型が閉じると、素材は下型から伝わった温度によって繊維へ樹脂が含浸する。この手法で成形した製品を Fig. 10 に示す、外観に繊維の断裂や織りの乱れは認められない。また、形状に沿って織り目の方向がそろっており、手作業で繊維を張り込んだものに近い外観を有していると判断できる。

この結果から、上型を樹脂フィルムの損傷を抑制できる低めの温度に、下型を繊維への充分な樹脂含浸が得られる高めの温度に設定することによって、縦壁の外観上の繊維断裂を解消し、製品の意匠性を向上することができた。

4.4. 内部品質の確認と向上

4.3. 節で示した手法によって成形した製品の内部品質について、平板の TP と同様に切断し断面の観察をおこなった。Fig. 11 に天面の平坦部分の断面を、Fig. 12 に縦壁部分の断面を示す。Fig. 12 に示されているように、部分的には、樹脂が繊維束の奥まで染み込んでいる。しかし、繊維束内に大きな空けきが存在している部位もある。

これは、樹脂の温度は十分に高く粘度が低下し、繊維への含浸が十分に可能な状態であったにもかかわらず、そのプロセスが途中で停止したためであると考えられる。また

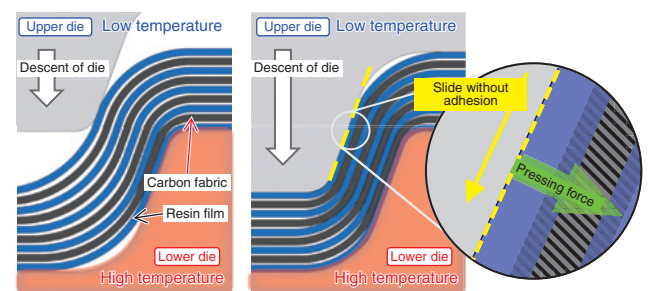


Fig. 9 Phenomena assumed to be happening between upper and lower molds while processing by developed method



Fig. 10 Appearance of vertical wall side surface when processed with developed method

もう一つの可能性として、樹脂の含浸は繊維束の全体に行き渡ったものの、その後樹脂の体積減少によって空気を生じた状態であると考えられる。

4.5. 縦壁の内部品質向上

含浸は、熔融した樹脂を流動させ、繊維束の奥へ押し込む工程である。本製法においては、プレス機によって印加される上下方向の力を用いて、樹脂を流動させるための力の発生させている。そのため、水平面に対してはほぼ 100% の力がかかるのに対し、傾斜面ではその角度に応じた分力しか作用しない。傾斜角度による圧力低下を見込んで、成形圧力を高く設定することによって、この状況に対応する手法も考えられるが、そうした手法を適用しても、ほぼ垂直な縦壁部分に十分な力がかかるほど全体の圧力を上げることは現実的ではない。なお、部分型を用いて解決する手法もある⁽³⁾。しかしこの手法は、金型の分割数が増えるため、単一型を用いた場合と比較して、加工時間とコスト増

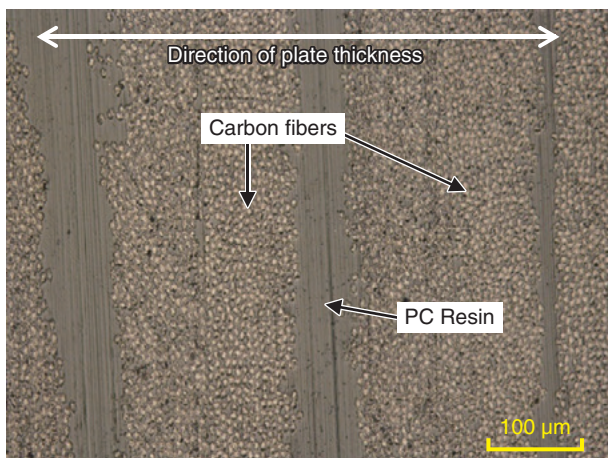


Fig. 11 Cross section of test piece at top flat part of product

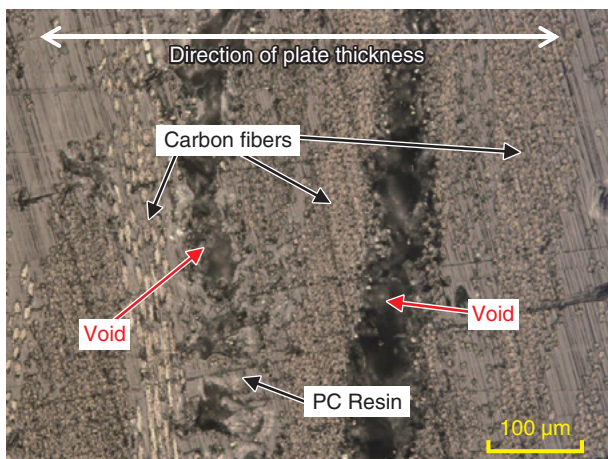


Fig. 12 Cross section of test piece at vertical wall part of product

加を伴う。またこの手法を適用する場合には、熔融した樹脂が分割された金型の間に生じたすき間に入り込むなどの懸念も考えられる。

ここで、繊維への樹脂含浸が不足するメカニズムについて改めて考察してみる。本手法においては、最終的に部品として用いられないトリム部分をキャビティの外部に持つ。そしてこの部分は、成形後の加工によって切除される。このため、キャビティの空間を完全に閉じた形状にすることはできない。これに加えて、Fig. 12 に示した部分は製品の全体形状の中で縦壁部かつトリムラインに近い部分に位置しており、熔融した樹脂が製品部に留まらずトリム部へ流出し、樹脂含浸に寄与できる圧力が十分に得られないということが考えられる。

したがって、樹脂の流出を抑制することができれば繊維への含浸を促進することができると考え、縦壁部トリムライン近傍のクリアランスを狭める方案を検討した。具体的には、上下型間のクリアランスを、繊維層の厚みを合計した値程度まで狭め、上型が下降し金型が閉じる際に樹脂の流出を抑制するようにした (Fig. 13)。

Fig. 13 に示した方案の効果と、他の面の圧力を確認するため、異なる面角度を有するテスト用の金型を制作した。テスト型は水平方向、水平面に対し 30°、45°、60°、88.55° の角度を持った合計五つの平面を含むように設計し、このうち 88.55° の面に Fig. 13 の方案を適用した。なお、88.55° の面は、90° に対して、抜き勾配 1.45° を確保したものである。この金型によって成形されるテストピースは Fig. 14 に示すような形状となり、赤く示した部位は金型が閉じ切るよう、また緑に示した部位は開放するよう設定した。各平面の形状は矩形とし、曲げ試験用の試験片 (100 mm × 30 mm) を 2 枚切り出せるよう長さ 220 mm、幅 35 mm 以上とした。また各面の中央に、面に対し垂直方向にピエゾ式圧力センサを配置し、各部における成形時のキャビティ内圧の時間変化を測定した。圧力計測は、縦壁

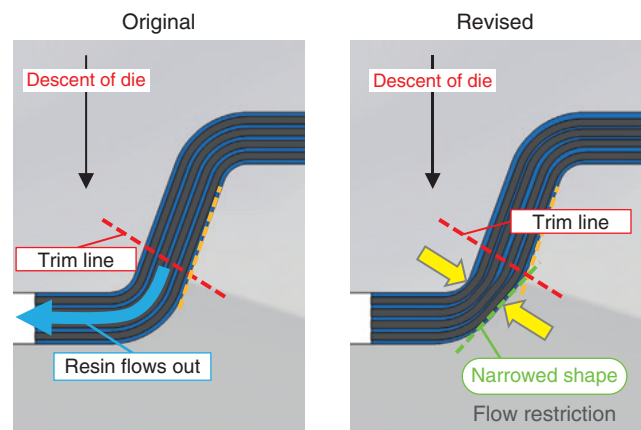


Fig. 13 Revised configuration of die with narrowed shape at resin outlet

部分の圧力に対する比較を目的とし、縦壁部と水平面のほかに、その中間である 45° の面の圧力も測定した。また、 88.55° の面に対し Fig. 13 の方案を適用していない金型も製作し、方案の効果を検証した。

なお、温度や圧力の条件については前章と同様である。測定した圧力の時間的推移を以下に示す。Fig. 15 は本方案を適用しないもの、Fig. 16 は適用したものを示す。

ここで、最初の 15 秒間程度は圧力センサに内部の物質が接触していないため、圧力を検知していない。その直後、まだ溶融していない状態の樹脂に接触し、大きな圧力を検知する。接触した樹脂は金型の温度により溶融し圧力は急激に降下する。したがって、金型内圧力の評価はグラフ中の 20 秒付近以降を対象としておこなわれた。

まず、方案を適用する前の図 (Fig. 15) を見る。 0° の水平面については、金型の下降とともに圧力は放物線的なグラフ形状を示しながら上昇している。 45° の面については、水平面に対して分力相当の圧力で推移している。Fig. 15 からわかるように、縦壁部分は、圧力が安定した後は 1 MPa 程度の圧力しかかかっていない。一方、出口を

狭めた方案を追加した Fig. 16 を見ると、縦壁部分の圧力は、30 秒付近で 2 MPa となり、その値が維持されている。100 秒ほどを経過した後は、 45° 面の圧力よりも高い値になっていることがわかる。 45° 面は、樹脂の流出が進行しているため圧力が徐々に低下していると考えられる。さらに、本方案を適用し成形したテストピースの、水平面と縦壁面から試験片を切り出し、3.1. 節と同様に曲げ試験をおこなった。その結果とそれぞれの断面を Fig. 17 に示す。

0° の水平面と 88.55° 面の曲げ強さを比較すると、その差は 6 から 8 MPa と少ない。また断面の様子からも Fig. 12 に見られたような空げきは発生していない。以上の結果からわかるように、トリム部近傍の金型のクリアランスを狭めることで樹脂の流出を抑制し圧力を保持することによって、樹脂の含浸を促進し、課題であった空隙の無い内部品質を確保することができた。この方案を、4.3. 節で述べた上下型に温度差を設ける成形手法と併せて適用することにより、縦壁部分の優れた外観意匠性と内部品質確保を実現することができた。

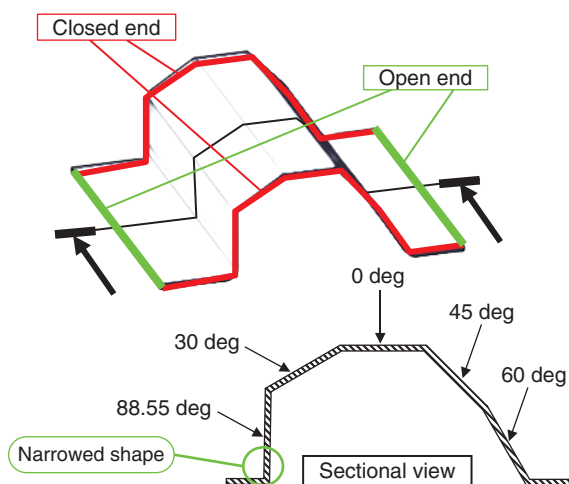


Fig. 14 Cross section of test piece for verification test of developed method

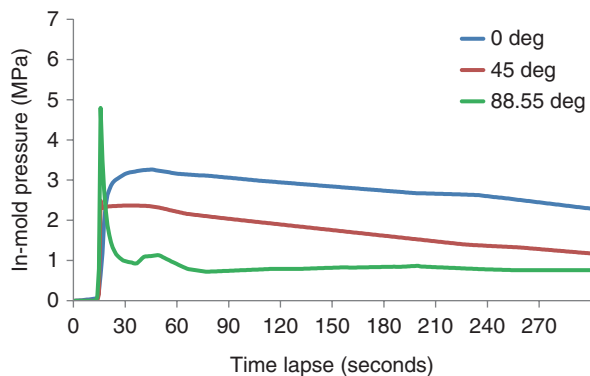


Fig. 15 Pressures in cavity to elapsed time without developed method

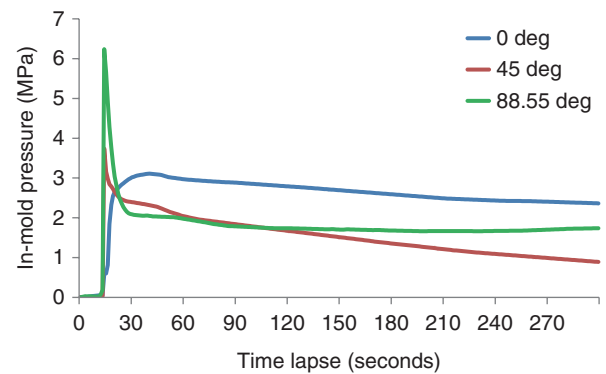


Fig. 16 Pressures in cavity to elapsed time with developed method

Plane angle (degree)	Number	Flexural strength (MPa)	Cross section
0	#1	313.60	
	#2	304.16	
88.55	#1	305.62	
	#2	298.17	

Fig. 17 Test results and cross sections of test pieces sampled from horizontal and nearly vertical walls

5. 実機への適用と成形手法応用

本技術を用いて、2016 年南米ダカールラリーに出場した CRF450 Rally (Fig. 18) のリヤフェンダ (Fig. 19), 並びに電装カバーの製作をおこなった。それらの部品は過酷なダカールラリーにおいて求められる性能と耐久性を満たすことを示した。この実績により、開発された製法で製作された部品が、実車に適用した条件においても有効であることが示された。



Fig. 18 The CRF450 Rally



Fig. 19 Rear fender of the CRF450 made of CFRTP

6. まとめ

量産二輪車へ適用拡大可能な, CFRP の成形手法を検討した。その結果, プリプレグを経ずに直接成形をおこなう, ダイレクトフィルムスタッキング法を確立し, その開発過程において下記に示す知見を得た。

- (1) 上下の金型に温度差をつけ成形することで, 繊維や樹脂を断裂させることなく形状に沿って賦形することを可能とし, 優れた外観を実現できた。

- (2) 縦壁の樹脂の含浸を向上させるために, 樹脂流出部の上下型間のクリアランスを狭めた金型構造を適用し, 垂直面においても十分な樹脂含浸を実現し, 内部品質を向上することができた。

本手法は, 今後, 量産二輪車への適用拡大が期待されている。また, 二輪車以外の部品にも幅広い応用が可能であり, 今後の展開が注目される。

参考文献

- (1) 田中尋真: F1 レギュレーションと技術の変遷: Honda R&D Technical Review, F1 Special (The third Era Activities), p. 4-11, (2009)
- (2) 山根保夫, 桜庭智裕: CFRP による軽量フードおよびリアスポイラの開発, Honda R&D Technical Review, Vol. 15, No. 1, p. 209-214
- (3) 多加充彦, 木水貢, 廣崎憲一, 来丸秀俊, 来丸雅信, 桜井義一, 南俊彦, 北文雄: 熱可塑性 CFRP を用いた自動車車体部品のプレス成形技術に関する研究, 石川県工業試験場研究報告, 64 号, p. 1-6, (2015)

■ 著 者 ■



遊 座 嘉 秀

コミュニケーションロボットのための 遠隔音声認識システムの構築と実証実験

Establishment and Experimental Demonstration of Distant Speech Recognition System
for Communication Robot

山本 俊一*
Shunichi YAMAMOTO

住田 直亮**
Naoaki SUMIDA

中臺 一博**
Kazuhiro NAKADAI

要 旨

人と自然な距離でコミュニケーションするためのロボット用遠隔音声認識技術を実現した。課題は二つあり、一つ目は周囲の残響や雑音の影響によって認識性能が低下することであり、これまでに開発した技術に加えて、残響抑圧、音源同定技術を導入して解決を試みた。もう一つは、人によって音声の周波数特性や言葉の言い回しが異なることであり、音響モデルに Deep Neural Network を、言語モデルに音声認識タスクの性質を考慮したクラス N-gram を用いることで認識性能向上を試みた。また、これらの技術をロボットシステムとして統合し、受付取次を題材とした実証実験を行った。結果として、受付取次達成率 98.3% を達成するとともに、音声誤認識の原因の分析により、性能向上のためのさらなる課題を明らかにした。

ABSTRACT

Distant speech recognition technology for a robot was implemented to communicate with humans at a natural distance. There were two issues to address. First, surrounding reverberation and noise act to reduce recognition performance. In an attempt to resolve this, dereverberation and sound source identification technology were introduced in addition to the existing developed technology. Second, speech frequency response characteristics and wording differ from person to person. To enhance recognition performance, a deep neural network was used in the acoustic model, in addition to class-based N-grams accounting for the properties of speech recognition tasks in the language model. These technologies were then integrated into a robot system to perform a themed experimental demonstration taking reception calls.

The demonstration achieved a reception success rate of 98.3% and, through analysis of the causes of erroneous speech recognition, clarified further issues to address for improving performance.

1. まえがき

人と共存し、人にサービスを提供するロボットに必要な能力の一つはコミュニケーション能力であり、日常最も使用され自然で直感的なコミュニケーション手段の一つはやはり音声でのやりとりである^{(1),(2)}。本稿では、音声認識を用いたバーバルなコミュニケーションに焦点をあてる。音声認識に関しては、昨今、スマートフォンによる情報検索など、接話マイクロホンの利用を前提とした音声入力インタフェースが実用レベルで提供されており、社会に受け入れられつつある⁽³⁾。人とコミュニケーションすることが求められるロボットにとっても、音声認識は、様々な応用

が期待できる重要な機能である⁽¹⁾。しかし、人とロボットが自然な距離で、音声でやりとりするためには、ロボットに搭載されたマイクから離れた距離で発話された音声を認識（遠隔音声認識）できる必要がある。遠隔音声認識では接話マイクロホンを使用した場合と比較して、雑音と残響により S/N 比が低下して音声認識の性能を著しく低下させるという課題がある^{(3),(4)}。本文で現れる雑音は、対象話者の音声以外のすべての音のことを表すものとする。また、日常の環境で音声認識を行う場合には、雑音など対象話者の音声以外の音が入力されるので、正しく応答するために対象話者の音声とそれ以外の音を聞き分けるという課題がある⁽⁵⁾。特に遠隔音声認識では、雑音など対象話者の

* R&D センターX

** 株式会社ホンダ・リサーチ・インスティテュート・ジャパン

音声以外の音が入力される頻度が高くなるため重要な課題となる。その他、音声認識での一般的な課題である、声質や言い回しといった個人差にも対応する必要がある⁽³⁾。

遠隔音声認識の個々の要素技術は数多く研究されており、CHiME CHALLENGE という共通のベンチマークを使用した遠隔音声認識のコンテストも行われている⁽⁶⁾。このコンテストでは、遠隔音声認識で課題となる雑音や残響への対応に焦点を当てている。一方、我々は、ヒューマノイドロボット ASIMO⁽⁷⁾を用いて、人と音声でやりとりを行うアプリケーションを題材として、遠隔音声認識技術を実用レベルで実現することを目指している。ロボットでの遠隔音声認識を実現するためには、遠隔音声認識の個々の課題を解決するだけでなく、それらの要素技術をロボット上のシステムとして統合する必要がある。また、そのシステムを長期間運用し、そのデータを解析することで、そのアプリケーションでの性能を評価するとともに、実際のお客様に使ってもらった際に起こる現場ならではの課題を明らかにすることが重要となる。このような研究例は他ではほとんど見受けられず、実証実験で取得したデータ及び結果は今後の研究開発に大きく寄与すると考える。本稿では、実現した遠隔音声認識の技術及び効果確認のために行った実証実験結果について報告する。

2. 研究のねらい

本研究のねらいは、実用レベルの遠隔音声認識の性能を向上させることと、実際に使用してトータルなシステムの中で遠隔音声認識が使用されるときに課題を明らかにすることである。遠隔音声認識を実現するには、前節で述べた通り様々な課題がある。その中で、本稿では以下の四つの課題を解決することで性能向上を試みた。

- (1) 残響による音声認識性能低下
- (2) 非目的音の音声誤認識
- (3) 声質の個人差による音声認識性能低下
- (4) 利用者の自由な言い回しによる音声認識性能低下

(1)については、残響時間が音声認識処理単位(本システムでは 25 ms)を超えると認識性能劣化が顕著になるといわれている⁽⁸⁾。我々がターゲットの一つとしている公共施設では、これ以上の残響時間が想定される。さらに、遠隔マイクは接話マイクと比較して、観測される直接音のパワーは小さくなるが、残響成分のパワーはほとんど変わらないので残響の影響が大きくなる。したがって、残響成分を除去するために Gomez らが提案した残響抑圧手法⁽⁸⁾を導入した。

(2)については、雑音を間違えて音声認識処理をすると性能が低下するため、音声認識の前処理として、目的音声か非目的音かを識別する混合正規分布 (Gaussian Mixture Model: GMM) による音源同定を導入した⁽⁵⁾。

(3)については、音声の各音素をモデル化(以下、音響モデル)する場合に、なるべく多くの人の特徴を反映する必要がある。このモデル化には従来、混合正規分布による隠れマルコフモデル (Gaussian Mixture Model based Hidden Markov Model: GMM-HMM)⁽⁹⁾が用いられてきたが、より緻密なモデル化が可能な深層学習を用いた研究⁽¹⁰⁾が近年盛んである。本研究では、Deep Neural Network による隠れマルコフモデル (Deep Neural Network based Hidden Markov Model: DNN-HMM)⁽¹⁰⁾を導入した。

(4)については、例えば、企業受付で担当者呼び出す場面を考えてみる。受付の人に「中臺様お願い致します」という人もいれば、「山本と申しますが、住田さん呼んでもらえますか」という人もいるだろう。このように、利用者が様々な言い回しで発話しても認識できる必要があり、音声認識が利用されるアプリケーションの制約もある。これらを考慮してクラス N-gram 言語モデルを導入した⁽¹¹⁾。

我々は、本当に使える技術にするためには、上記技術の個別評価だけではなく、ロボットシステムとして統合し、実際にお客様に使っていただいて効果確認を行うことが大事であると考えた。それを行うことで、本質的な課題の把握とさらなる技術開発によって性能向上がはかられていくのである。

遠隔音声認識を用いたロボットシステムの実証実験例としては、株式会社日立製作所の EMIEW3 を用いた空港案内⁽¹²⁾や Haneda Robotics Lab での案内ロボット⁽¹³⁾などがあるが、いずれも 1 週間程度の短期間であり、分析を含む結果は公表されていない(2017 年 4 月現在)。我々は、約 2 ヶ月間に渡り受付取次を題材として実証実験を行い、そのデータを分析し、課題を明らかにした。

3. 達成手段

本章では、課題を解決するために用いた個々の技術について説明する。

3.1. 残響抑圧

3.1.1. スペクトルサブトラクションに基づく残響抑圧

本節では、スペクトルサブトラクションに基づく残響抑圧手法⁽⁸⁾をオンライン処理可能に変更したアルゴリズムについて述べる。本手法では入力音声のうち残響の成分を雑音とみなし、その雑音をスペクトルサブトラクションで抑圧することで残響抑圧処理を実現している。残響成分は一般的にその性質の違いから初期反射と後期残響に分けて扱われる。本手法では、初期反射は抑圧せず、後期残響の成分を推定してスペクトルサブトラクションにより抑圧する。後期残響のみを抑圧する理由は、初期反射は直接音が到来してからそのあと比較的早い時間に到来する反射音であり、初期反射の大部分は後段の音声認識の処理単位であ

る窓長に収まるので、特徴量正規化手法であるケプストラム平均正規化やスペクトル平均正規化で抑制できるからである。

後期残響は、入力音声の短時間フーリエ変換 (short-term Fourier transform: STFT) $X(f, t)$ と後期残響の伝達関数 $H_L(f)$ から推定する。 $X(f, t)$ の時間窓に重なる過去 D フレームの STFT も考慮して、周波数ビン f , 時刻 t の後期残響 $\hat{X}_L(f, t)$ の振幅スペクトル推定値を以下の式で近似した。

$$|\hat{X}_L(f, t)| = \left\{ \frac{1}{D+1} \sum_{d=0}^D |X(f, t-d) H_L(f)|^\gamma \right\}^{\frac{1}{\gamma}} \quad (1)$$

ここで、 γ は後期残響の推定値を大きくしすぎないためのパラメータで 2 以下の値に設定し、本研究では $\gamma = 1.5$ に設定した。このように STFT でフレームに分解して過去フレームを利用することにより遅延の小さいオンライン処理を実現できている。

直接音と初期反射を含むパワースペクトル $|X_E(f, t)|^2$ を、後期残響の推定値を用いたスペクトルサブトラクションにより以下のように計算する。

$$|\hat{X}_E(f, t)|^2 = \begin{cases} |X(f, t)|^2 - \delta(f) |\hat{X}_L(f, t)|^2 & (0 \text{ より大きい}) \\ \beta |X(f, t)|^2 & (\text{それ以外}) \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 β はパワースペクトルを負の数にしないためのパラメータである。 $\delta(f)$ は事前に測定したインパルス応答を用いて、後期残響成分の推定値 $\delta(f) \hat{X}_L(f, t)$ と実際値 $X_L(f, t)$ から最小平均二乗誤差基準最適化により計算する。

出力のスペクトル $\hat{X}_E(f, t)$ は、入力 $X(f, t)$ の位相を用いて以下のように計算する。

$$\hat{X}_E(f, t) = \sqrt{|\hat{X}_E(f, t)|^2} e^{j\phi_X(f, t)} \quad (3)$$

ここで、 $\phi_X(f, t)$ は $X(f, t)$ の位相を表す。

3.1.2. 評価実験

残響抑圧の効果を確認するために、残響抑圧を適用した場合と適用しない場合の両方で DNN-HMM の音響モデルを学習させてベンチマークに対する単語正解精度の比較を行った。DNN-HMM 音響モデルの学習と学習データの詳細については 3.3. 節を参照されたい。評価用ベンチマークデータとして、Reverberation Time 20 (RT20) 法による残響時間が 1.02 秒の受付でロボットを用いて収録した受付取次の発話、例えば、「中臺商事の山本と申しますが、住田さん呼んでもらえますか」という発話を 26 人、受付取次 258 回、総単語数 5629 語を収録した。評価は単語正解精度 (Word accuracy) で行い、すべての単語の平均と各発話に

出現する各クラス (訪問者名 - 担当者名, 訪問者 - 組織名, 担当者 - 所属名, 以下, 取次必要語集) ごとの結果を Fig. 1 に示す。残響抑圧を適用した場合としない場合では、平均単語正解精度は 2 ポイント向上しており、2 項分布の差の検定⁽¹⁴⁾により危険率 5% で有意な差があった。各クラスの単語正解精度を見ると訪問者名 - 担当者名, 訪問者 - 組織で特に効果が高かったことがわかり、平均単語正解精度と同様に有意な差があった。訪問者名 - 担当者名, 訪問者 - 組織はクラス内単語数が多く音声認識が容易ではない部分なので、残響抑圧の適用による認識率向上の効果が高かったと考えられる。

3.2. 音源同定

3.2.1. 音源同定モデル

音源同定では、入力音声区間ごとに目的音声か非目的音 (雑音, 目的音声以外の音声) かを判別し、高い再現率で目的音声を判別し、その次に雑音を棄却できることを目的とする。特徴量として入力音声から抽出した Mel-Scale Log Spectrum (MSLS) 特徴量 27 次元⁽¹⁵⁾ を利用し、目的音声と雑音を GMM でモデル化して判別に使用した。入力音声区間は音声を取りこぼさないために区間の先頭と後尾にマージンを取っており、先頭と後尾は音源同定にとって不必要である。したがって、対象としたい部分と比較してパワーが小さいことを考慮して、入力音声区間の平均パワーより大きい時刻の特徴量のみ音源同定に使用した (Fig. 2)。

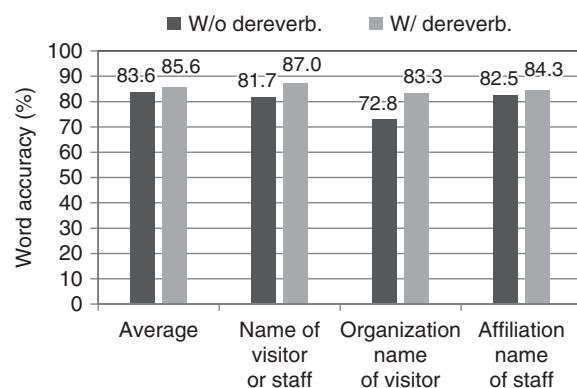


Fig. 1 Advance of word accuracy by using dereverberation

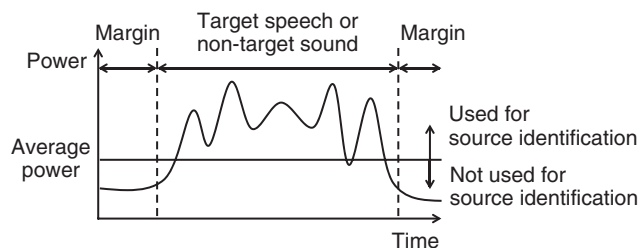


Fig. 2 Frames used for source identification

目的音声 (target) と非目的音 (non-target) の GMM のモデル化について説明する. 時刻 t の入力特徴量を x_t とすると, クラス m (target または non-target) の確率密度関数 $p_m(x_t)$ は以下のように表せる.

$$p_m(x_t) = \sum_{k=1}^K \lambda_{mk} N(x_t; \mu_{mk}, \sigma_{mk}^2) \quad (4)$$

ここで, K は混合数, λ_{mk} は混合重み, $N(x; \mu, \sigma^2)$ は平均 μ , 分散 σ^2 の正規分布の確率密度関数を表す. パラメータ λ_{mk} , μ_{mk} , σ_{mk}^2 は, 学習データより EM アルゴリズムにより推定した.

音源同定する際は, 入力音声の平均パワー P_{avg} より大きい時刻の尤度 $p_m(x_t)$ を使用して, 時刻ごとに最も尤度が大きいクラス m に投票する. 全体の合計票数で正規化したものをスコアとし, スコアが最も高いクラス m を, その発話区間の音源同定結果とする. スコア S_m は以下のように計算した.

$$S_m = \frac{1}{|T_P|} \sum_{t \in T_P} Presence_m(x_t) \quad (5)$$

$$Presence_m(x_t) = \begin{cases} 1, & m = \underset{i}{\operatorname{argmax}} p_i(x_t) \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

ここで, $P(t)$ は時刻 t の入力音声のパワーを表したとき $T_P = \{t | P(t) > P_{avg}\}$ と定義し, 入力音声の平均パワーより大きい時刻の集合を表す.

3.2.2. 学習データ

目的音声と非目的音の GMM の学習データは, 受付取次の使用環境でロボットに被験者が話しかけた音声と周囲の雑音を, 音源定位, 発話区間検出, 音源分離して使用した. 各クラスの学習データ数は, 目的音声の話者 104 人の 26,164 発話, 非目的音が 1,577 個である. 正解ラベルは音源分離した音ごとに目的音声と非目的音のラベル付けを行った.

3.2.3. 評価実験

本システムの音源同定手法の評価実験では, 受付取次使用環境でロボットに話者が話しかけた音声を収録した 2 種類の評価セットを使用した. 一つ目は前述の話者 26 人による受付取次の評価用ベンチマークデータ, 二つ目は実際にお客様に利用していただいた受付取次実証実験 (詳細は後述) のデータである. それぞれの評価セットの目的音, 非目的音の内訳を Table 1 に示す.

音源同定結果の性能を発話単位の再現率と適合率で評価した. 再現率は, 実際に目的音声 (非目的音) である発話のうち, 目的音声 (非目的音) であると予測された発話の割合を表す. 適合率は, 目的音声 (非目的音) と予測した発話のうち, 実際に目的音声 (非目的音) である発話の割合を表す. 各評価セットでの音源同定結果の再現率と適合率を

Table 1 Evaluation set for source identification

Evaluation set	Class	Number of sounds
Benchmark	Target speech	1,006
	Non-target sound	239
Reception experiment	Target speech	829
	Non-target sound	7,978

Table 2 Evaluation results of source identification

Evaluation set	Class	Recall (%)	Precision (%)
Benchmark	Target speech	96.5	91.1
	Non-target sound	94.5	80.5
Reception experiment	Target speech	87.1	34.7
	Non-target sound	95.7	98.4

Table 2 に示す. 受付取次では, 目的音声に対して高い再現率を重要視しており, 各評価セットで高い再現率を実現できた. しかし, ベンチマークと比較して受付取次運用では目的音声の再現率が低くなっている. これは, 受付取次実証実験評価セットの音の総数に対して非目的音の割合が高いことが原因であり, 非目的音の総数が多い理由は, 長時間実験を行っていたため話者がいないときに周囲の雑音を多数検出したからである. このような多数を占める雑音に対しては, 95.7% という高い再現率で非目的音と判別し棄却することができた.

3.3. 音声認識—音響モデル

音声認識では認識率が飛躍的に向上することが報告されている DNN に基づく手法のうち DNN-HMM をロボットの遠隔音声認識に適用した. ロボットの遠隔音声認識への DNN-HMM の適用に際しては, 以下の課題がある.

- (1) 大量の学習データを必要とすること
- (2) 入力音声と音響モデルのアンマッチ

一般的に, 深層学習では大量の学習データを必要とするため, ロボットの遠隔音声認識への DNN-HMM の適用においても大量の学習データを必要とすると考えられる. 従来, 我々は 82 時間の読み上げ音声コーパスを使用して GMM-HMM による音響モデルの学習を行っていたが, DNN-HMM の適用にあたっては 904 時間の音声コーパスを収集し学習に利用した.

また, ロボットに搭載されたマイクアレーを用いる遠隔音声認識では, 周囲の雑音, ロボットの自己雑音, 残響により入力音声の S/N 比が低下する. 雑音除去や残響抑圧などの前処理を行ったとしても入力音声から雑音や残響を完全に除去することはできず, 入力音声と音響モデルとのアンマッチにより音声認識率が低下する. 音声認識利用時の環境でロボットのマイクアレーを使用して音声を収録すること (以降, 実機録音と呼ぶ) によって, 入力音声と音響

Table 3 Training data of our acoustic model

Speech corpus	Style	Speech	Hours
Commercially available speech corpus	Reading	Synthesized	329
Reception speech corpus	Reading and spontaneous speech	Synthesized	453
Reception speech corpus recorded with ASIMO	Reading	Recorded with ASIMO	122
Total			904

モデルをマッチさせることが望ましいが、そのような方法で大量の学習データを準備することは容易ではない。したがって、我々は実機録音音声だけでなく、事前に測定したインパルス応答とロボット自己雑音を用いて音声認識利用時の入力音声を模擬した音声をクリーン音声から合成して音源分離と雑音抑圧の処理をした音声（以降、合成音声と呼ぶ）を学習データとした。

3.3.1. Deep Neural Network による音響モデル

DNN-HMM 音響モデルの学習とデコードには、オープンソースソフトウェアの音声認識ツールキットである Kaldi⁽¹⁶⁾を利用した。入力特徴量は MSLS 特徴量 27 次元とその前後 5 フレームを結合した合計 297 次元とし、出力をトライフォン HMM の各状態とする、全結合型の隠れ層 6 層、2,048 ユニットの DNN を利用した。DNN の学習基準には state-level Minimum Bayes Risk を利用した。

3.3.2. 学習データ量による性能検証

本研究で作成した音響モデルの性能を確認するために、学習データ量を変えたときの単語正解精度の比較を行った。学習データには Table 3 に示した合計 904 時間を利用した。受付音声コーパスと ASIMO 受付音声コーパスについては、本受付取次タスクを想定して収集した音声コーパスである。受付音声コーパスは、受付取次タスクを想定したシナリオの読み上げ音声と Wizard of Oz 法を用いて収録したタスク発話で構成される。タスク発話の収録では、話者に対してタスクは与えられるが、どのように発話するかは話者に委ねられており、話者がシステムと対話している状況を再現しているのでシステム利用時に近い音声を収録することができる。ASIMO 受付音声コーパスは、受付取次タスクを想定したシナリオの読み上げ音声の実機録音である。評価には前述の評価用ベンチマークデータを使用し、合計 5,629 単語の単語正解精度で評価を行った。学習データ量に対する単語正解精度の関係を Fig. 3 に示す。

学習データ 904 時間に対して、88.9% の単語正解精度を達成した。比較のため、評価用ベンチマークデータを従来の GMM-HMM 音響モデルで評価すると単語正解精度は 29.2% であり、大幅に性能が向上していることがわかる。

3.4. 音声認識一言語モデル

受付取次のための言語モデルで満たすべき要件を以下のように設定した。

- (1) 話者の自由な言い回しを許容すること
- (2) 担当者名、担当者所属名を漏れなくカバーすること
- (3) 訪問者名、訪問者組織名については実証実験中に収集したデータから随時追加登録できること

これらの要件を満たすために、クラス N-gram 言語モデルを使用した。話者の自由な言い回しを許容するために、多様な受付取次の言い回しを収集した言語コーパスからクラス N-gram 言語モデルを学習させた。一方、担当者名や訪問者名などをクラスにすることで、漏れなくカバーすることができ、また新しい訪問者名などの追加が容易になるようにした。クラスは、担当者名、担当者所属の会社名、担当者所属の事業所名、担当者所属の部署名、担当者所属のブロック名、訪問者名、訪問者組織名の合計 7 種類である。

作成した受付取次用言語モデルの単語数は、実証実験開始当初で 1,586 語、新しい訪問者名などを追加して実証実験終了時には 1,681 語となった。

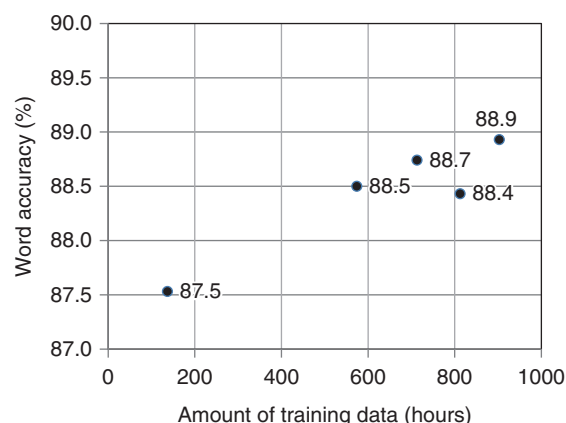


Fig. 3 Advance of word accuracy with increased training data

4. 実験

前章の技術をロボット上で統合し、一般のお客様に利用していただき、性能評価を行った。

4.1. ターゲット設定

実際に性能を評価するにあたり、タスクを明確に定め、それを一般のお客様に利用していただき評価を行った。これは、実際に一般の方に使ってもらうことで、実用に向けた現状性能を把握でき、分析を通してさらなる課題も明確になると考えたからである。ここでは、企業受付での取次タスクをターゲットとした。受付に来たお客様に担当従業員 (Person in charge: PIC) を呼び出すようにロボットへ

話しかけてもらい、実際に従業員を呼び出してもらった。音声による呼び出しの流れを Fig. 4 に示す。なお、この実証実験は弊社生命倫理委員会の承認を受けたのちに行っている。

4.2. 実験環境

実験は R&D センター X (旧基礎技術研究センター) 内の受付にロボットを設置して行った。実際に来所したお客様に音声で話しかけていただき、従業員を呼び出していただいた。

4.3. システム構成

実験で使用したシステムの構成を Fig. 5 に示す。点線枠で示した部分が本研究で取り扱った技術トピックである。実証実験では、残響抑圧、音源同定、音響モデル、言語モデルに関して、既述のアルゴリズム及びデータを適用した。

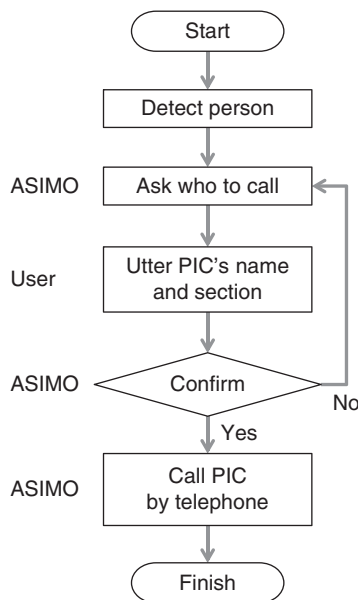


Fig. 4 Reception task flow

後段の言語理解部に関しては、ルールベースで取次必要語彙を抽出した。

ロボット対話に使用する遠隔音声認識システムは応答が速く同時に複数入力される音声进行处理できる必要がある。早い応答を実現するために、マイクアレーへ音声入力してから音声認識で処理するまでオンライン処理を実現した。同時に複数入力される音声进行处理できるように、複数の音源の方向を追跡し音源ごとに一意の ID (音源 ID) を振って管理し、音声認識システムも同時に複数の音声を認識処理できるような構成にした。

音声入力から特徴量抽出までの処理はロボット聴覚オープンソースソフトウェア HARK⁽¹⁷⁾ を用いてオンライン処理を実現した。特に、残響抑圧手法は発話単位で音声入力しなければならないアルゴリズムであったので、3.1.1. 節で述べたとおりオンライン処理可能なアルゴリズムに改良して実装した。また、音声認識システムの DNN 音響モデルを用いた音響尤度計算と重み付き有限状態トランスデューサデコーダーを用いた単語列候補探索の実装については前述の Kaldi を利用し、本研究では入力特徴量の逐次処理とスレッドによる複数音源同時処理を新たに実装した。10 ms 単位で入力された特徴量を入力された分だけ逐次的に処理でき、入力された音源 ID と特徴量列のペアごとにスレッドに分けて同時に処理できる実装にすることで、速い応答と複数音源の同時処理を実現した。

4.4. 実験シナリオ

実験シナリオに関しては、Fig. 4 の流れに基づいてシナリオを構成した。実証実験ではシステムからの聞き直しを 3 回まで許容し、正しい担当者に取次げたら取次成功とし、それ以上音声誤認識等でシナリオが進行しない場合は取次失敗とした。

4.5. 結果

2016 年 1 月から 2 月にかけて計 37 日間、受付で実験

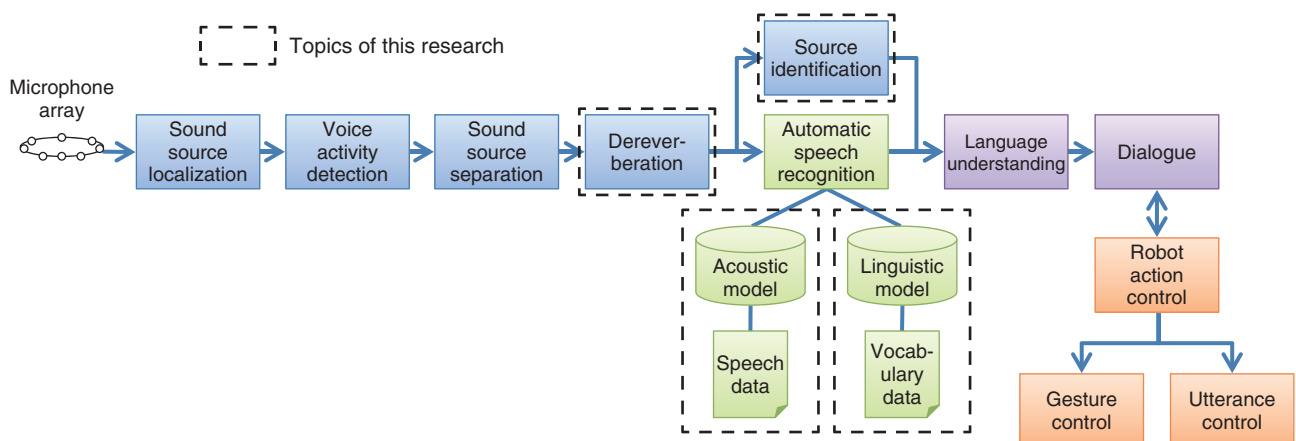


Fig. 5 Receptionist system

Table 4 Cause of error in reception experiments

Cause of error	Word error rate (%)
Unknown words	10.9
Spontaneous speech	8.8
Non-target sound and VAD	5.7
Lack of training data	4.5
Overlapping speech	3.3
Total	33.2

を行った。実際に音声で受付をした回数は延べ 303 回であった。実際にお客様が発話し、音声認識の評価に使った単語数は 4,881 語である。評価は単語正解精度と正しい担当者を実際に呼び出せた率(取次達成率)で評価した。全体の単語正解精度は 66.8% であった。その結果、取次機会 303 回中、取次に成功したのは 298 回で取次達成率 98.3% であった。

4.6. 考察

受付取次が失敗した 5 回の原因を分析してみると、置換誤りによる誤認識が 2 回、音源同定による誤同定(目的音声を非目的音として棄却)が 3 回であった。置換誤りに関しては、実際の担当者名に類似した姓名に誤認識してしまった。音源誤同定に関しては、モデルが GMM で十分記述できていない可能性があり、別のモデル化手法が必要と思われる。

音声認識に関しては、ベンチマークでは単語正解精度が 88.9% だったのに対して、実証実験では 66.8% まで低下した。実証実験での誤認識の原因を分類すると Table 4 の通りであった。これらの誤認識原因のうち以下の三つは、実用での課題を表している。一つ目は、受付取次特有であるが初めて来るお客様の名前や会社名が未知語になることによる誤認識の増加である。二つ目は、一般のお客様ではフィラーや言い誤りなど自発発話特有の現象が増加したことによる誤認識の増加である。三つ目は、ロボットが発話するタイミングがユーザにとってわからない等の原因によりロボットの発話と重なってしまうことによる誤認識の増加である。ロボットは例えお互いの発話が重なっても認識できるように対応してあるが、発話が重なってしまうと人は発話を中断してしまう場合が多く、誤認識の原因となってしまう。これは、ロボットが発話を始めるタイミングがわかりづらいということが原因であろう。但し、これらの誤認識の大部分は、取次タスクの遂行にとって致命的な誤認識ではなく、最も重要な担当者名と担当者所属名を高い精度で認識できたことにより、高い受付取次達成率が達成できたといえる。今後、受付取次より複雑なタスクを音声対話で行うためには、未知語の自動追加、自然発話特有の発話現象への対応、ユーザにとってわかりやすいターンテイキングの実現も必要になる。

5. まとめ

人と自然な距離でコミュニケーションするための遠隔音声認識技術を構築した。

本研究で提案した残響抑圧、音源同定、音響モデルを評価用ベンチマークデータで評価し、導入した技術が性能向上に効果があることを確認した。特に DNN を用いた音響モデルでは、904 時間のデータを学習させることで性能が 88.9% まで向上することが確認できた。提案した手法をロボット上で統合し、実際の受付でお客様に使っていただき、単語正解精度全体 66.8%、取次達成率 98.3% を達成した。

実証実験のデータを分析することで、さらなる性能向上のために対策が必要な課題を明らかにした。

- (1) 未知語への対応
- (2) 自発発話特有の発話現象への対応
- (3) ターンテイキング等のロボット表現

実際に毎日継続的にお客様に使ってもらうことで、データを集め、分析及び検証した本研究の実証実験は、今後、実証実験を行う上での一つのテストケースになると考えている。

今回は受付という比較的静かな場所を題材としたが、今後は、より多くの人が集まる公共施設などで雑踏音や館内放送等、高雑音への対応も重要な課題となるであろう。

参考文献

- (1) 経済産業省: ロボット新戦略ービジョン・戦略・アクションプランー, ロボット革命実現会議, (2015)
- (2) 奥乃博: ロボット聴覚の現状と展望, 日本ロボット学会誌, Vol. 28, No. 1, p. 2-5, (2010)
- (3) 河原達也: 音声認識技術の現状と将来展望, 電気学会誌, Vol. 133, No. 6, p. 364-367, (2013)
- (4) Delcroix, M., Yoshioka, T., Ogawa, A., Kubo, Y., Fujimoto, M., Ito, N., Kinoshita, K., Espi, M., Hori, T., Nakatani, T., Nakamura, A.: Linear Prediction-based Dereverberation with Advanced Speech Enhancement and Recognition Technologies for the Reverb Challenge, REVERB Workshop, (2014)
- (5) Lee, A., Nakamura, K., Nishimura, R., Saruwatari, H., Shikano, K.: Noise Robust Real World Spoken Dialogue System Using GMM Based Rejection of Unintended Inputs, Proceedings of International Conference on Spoken Language Processing, Vol. 1, p. 173-176, (2004)
- (6) Yoshioka, T., Ito, N., Delcroix, M., Ogawa, A., Kinoshita, K., Yu, M. F. C., Fabian, W. J., Espi, M., Higuchi, T., Araki, S., Nakatani, T.: The NTT CHiME-3 system: Advances in speech enhancement

- and recognition for mobile multi-microphone devices, IEEE ASRU, (2015)
- (7) 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
- (8) Gomez, R., Kawahara, T.: Robust Speech Recognition Based on Dereverberation Parameter Optimization Using Acoustic Model Likelihood, IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing, Vol. 18, No. 7, p. 1708-1716, (2010)
- (9) 鹿野清弘, 伊藤克巨, 河原達也, 武田一哉, 山本幹雄: 音声認識システム, オーム社, 198p., (2001)
- (10) Hinton, G., Deng, L., Yu, D., Dahl, G., Mohamed, A., Jaitly, N., Senior, A., Vanhoucke, V., Nguyen, P., Sainath, T., Kingsbury, B.: Deep neural networks for acoustic modeling in speech recognition, IEEE Signal Processing Magazine, Vol. 29, No. 6, p. 82-97, (2012)
- (11) Brown, P. F., Pietra, V. J. D., de Souza, P. V., Lai, J. C., Mercer, R. L.: Class-Based n-gram Models of Natural Language, Computational Linguistics, Vol. 18, No. 4, p. 467-479, (1992)
- (12) ヒューマノイドロボット EMIEW3 を活用した実証実験, 日立評論, Vol. 98, No. 12, p. 742-743, (2016)
- (13) <https://www.tokyo-airport-bldg.co.jp/hanedaroboticslab/>
- (14) 中川聖一, 高木英行: パターン認識における有意差検定と音声認識システムの評価法, 日本音響学会誌, 50 巻, 10 号, p. 849-854, (1994)
- (15) 西村義隆, 篠崎隆宏, 岩野公司, 古井貞熙: 周波数帯域ごとの重みつき尤度を用いた音声認識の検討, 日本音響学会 2004 年春季研究発表会講演論文集, p. 117-118, (2004)
- (16) Povey, D., Ghoshal, A., Boulianne, G., Burget, L., Glembek, O., Goel, N., Hannemann, M., Motlicek, P., Qian, Y., Schwarz, P., Silovsky, J.: The Kaldi Speech Recognition Toolkit, IEEE 2011 Workshop on Automatic Speech Recognition and Understanding, p. 1-4, (2011)
- (17) 奥乃博, 中臺一博: ロボット聴覚オープンソースソフトウェア HARK, 日本ロボット学会誌, Vol. 28, No. 1, p. 6-9, (2010)

■ 著 者 ■



山本 俊一



住田 直亮



中臺 一博

量産車開発の性能設計における ラップタイムシミュレーション技術

Lap Time Simulation Technology for Performance Design during Production Car Development

豊島 貴行*

Takayuki TOYOSHIMA

松澤 俊明**

Toshiaki MATSUZAWA

牛村 智也***

Tomoya USHIMURA

要 旨

量産車開発の性能設計技術を応用し、サーキット走行でのラップタイムのシミュレーション技術を構築した。量産車のモデルベース開発において使用されているデータを活用して車両モデルを作成し、そこに走行条件と路面条件をモデル化して組み合わせることで、ラップタイムの計算時間を短縮した。走行ラインについては正円弧と全緩和曲線の二つのモデルで規定することにより、すべての駆動方式の量産車について性能設計に適用できるようにした。この結果、量産車開発の性能設計において、サーキット走行でのラップタイムを仕様検討の対象項目として扱うことが可能になった。本技術を新型NSXの開発やCIVIC TYPE Rの開発において仕様検討に活用し、その考え方の妥当性と有用性を検証した。

ABSTRACT

A lap-time simulation technology for circuit driving compatible with performance design technologies employed during the development of production vehicles has been developed. The method creates vehicle models using data employed in the model-based development of production vehicles, and by combining these with models of driving and road surface conditions, reduces the computation time necessary for lap time simulation. The ability to define two models using the circular arc and whole curve transition methods makes it possible to apply the method in the performance design of production vehicles using all drive types. The method enables treatment of lap times during circuit driving as one item in the study of specifications during performance design in the development of production vehicles. The application of the method in the study of specifications during the development of the new NSX and the CIVIC TYPE R demonstrated the validity of the concept and the effectiveness of the method.

1. まえがき

システムの複雑化が急速に進む近年の自動車開発を、効率よく進めるためにはモデルベース開発が有効である⁽¹⁾。それは性能設計の時間短縮を実現させるための手法でもあるが、その技術を応用すれば、時間短縮だけでなく、新たな性能項目の検討を可能にすることができる。その代表的な性能項目のひとつが、サーキット走行でのラップタイム(以下ラップタイム)である。

これまでのラップタイムシミュレーションは主にレーシングカーの開発に活用されてきた。それらは実走による計

測テストの代用として、ラップタイムを計算で予測するという目的を主として作られたため、計算結果が実走計測の値に近づくよう誤差を小さくすることに主眼がおかれていた。そのために詳細な車両の情報だけでなく、計算対象となるコースの情報、詳細な車両の空力特性、温度変化などの走行環境に関する情報、ドライバの運転特性など、車両以外の情報も数多く必要であった。このような計算モデルの複雑化により、計算時間が長くなってしまったため、量産車開発の性能設計でラップタイムシミュレーションを使用することは容易ではなかった^{(2),(3)}。

実走のラップタイム計測結果のみでモデルフリー開発を

* 四輪 R&D センター

** HRD Sakura

*** HONDA R&D AMERICAS, INC.

進めるやり方も考えられるが、その場合テストの安全性を十分確保するためサーキットコースを占有し、運転技量の高いテストドライバを起用することが必要となる。そのような制約が多いテストを頻繁に実施することは、他の量産車の開発へ影響が出るため現実的ではない。ゆえに量産車の開発では高い運動性能を強く訴求するコンセプトを掲げた特別な車種を除き、ラップタイムを性能設計の検討項目として用いられることはなかった。

しかし、ラップタイムをすべての量産車開発における性能項目として性能設計で扱うことができれば、高性能な自動車を効率良く開発するという観点において有効である。そのためには従来のラップタイムシミュレーションとは異なる観点から、少ない情報で計算し結果を短時間で出力することが求められる。そこでモデルベース開発の技術を応用することを考えた。

2. 本技術のねらい

量産車の開発においてラップタイムシミュレーションを運用していくためには、入手しやすいデータで計算でき、限られた時間内に仕様のスタディを実施できることが必要である。またあらゆるタイプの量産車に対して実施できる汎用性が要求される。これらの点を考慮し、技術目標として以下の4項目を定めた。

- (1) 量産車のモデルベース開発の中で使われているデータを利用し車両モデルを作成できること。
- (2) 出力するまでの計算時間を短縮し、量産車開発の性能設計で運用できること。
- (3) 一般的な自動車の前輪駆動方式、後輪駆動方式、4輪駆動方式の3タイプの量産機種における性能設計で運用できること。
- (4) ラップタイム以外にも、運動性能の指標となる最大加速度、最大横加速度、最大減速度、最高速度なども合わせて出力できること。

3. ラップタイム計算の仕組み

通常の車両運動シミュレーションは、水平な平面上でコースを規定せずに走行するモデルが使用されるため、シミュレーションに必要な要素は車両条件に関する要素のみである。これに対し、ラップタイムシミュレーションは、その他に走行条件に関する要素と路面形状に関する要素が必要であり、大きく三つの要素についてモデルを定義する必要がある。

3.1. 車両条件に関する要素

ここで述べる車両条件に関する要素とは、具体的には、走る(加速性能)、曲がる(旋回性能)、止まる(減速性能)と

いった自動車の運動性能の基本要素のことである⁽⁴⁾。それらの基本要素を示す代表指標が、加速度、横加速度、減速度であり、それぞれの最大値を最大加速度、最大横加速度、最大減速度と呼ぶ。

加速性能については、車両重量、エンジンあるいはモータのトルク特性、ギヤ比、タイヤ径などからパワートレイン系のモデルを使った最大加速度を計算する。一方で車両の重量、車両の重心位置、タイヤの前後力特性、駆動力前後配分からシャシ系のモデルを使った最大加速度を計算する。この両者を比較し低い方から空気抵抗や転がり抵抗などの走行抵抗分を差し引き、各走行地点における実際の加速度を算出する。

旋回性能については、車両の重量、車両の重心位置、タイヤのコーナリング特性、ロール剛性配分、サスペンションの剛性、サスペンションのアライメント特性、ダウンフォースから最大横加速度を求める。これに空気抵抗や転がり抵抗分を差し引いて実際の各走行地点での横加速度を算出する。

減速性能については車両重量、重心位置、制動力前後配分、タイヤの前後力特性から最大減速度を計算する。これに加速性能を算出するのと同様に、空気抵抗や転がり抵抗などの走行抵抗分を差し引いて、各走行地点での実際の減速度を算出する。

以上はラップタイムシミュレーションに必要な車両条件に関する要素について述べたものだが、詳細はいずれも既報⁽¹⁾にて定義している Level 1 および Level 2 のシミュレーションモデルと同じものである。

3.2. 走行条件に関する要素

走行条件とは、サーキットコース内をどのラインに沿って走行するか(以下、走行ライン)、どのタイミングで加速するか、どのタイミングで減速をおこなうかについて規定する条件のことである。走行ラインのモデルはラップタイムシミュレーションの計算結果に影響するため、これまでさまざまな方法が提案されてきた。しかし、いずれもリファレンスデータが無い状態から理想の走行ラインを計算のみから求めようとする、最適化ロジックの構築が別途必要になり計算負荷が大きく、多くの時間を要してしまう⁽⁵⁾⁻⁽⁷⁾。そこで短時間で計算するために、実際に計測された多くの走行ラインデータをリファレンスデータとして定め、規定のルールにしたがって統計的に導いた走行ラインをあらかじめ定義しておくのが、この際、計算負荷が小さく有効である。

サーキットの走行ラインは、いずれもストレート部分とコーナ部分の二つの領域に分類できるが、コーナ部分の走行ラインの定義はラップタイムの計算結果への影響が大きいため特に重要である。従来のラップタイムシミュレーションでは走行ラインのモデルを1種類に決めているが、

すべてのサーキットと開発車両の性能設計に対応させようとするルールが複雑になってしまう。この課題を解決するために走行ラインのモデルを二種類用意し、状況に応じてモデルを使い分ける方法を用いた。ここでは二種類のモデル化の方法に対して、それぞれ正円弧法と全緩和曲線法と呼ぶことにする。

3.2.1. 正円弧法

正円弧法は、ストレート部分の走行ラインを直線で近似し、コーナ部分の走行ラインを円弧で近似して、全体の走行ラインを規定する方法である。正円弧法で規定された走行ラインの曲率半径をグラフで表したものが Fig. 1 である。ストレート部分は曲率半径が無限大になり値は定義できない。コーナ部分は曲率半径が一定値となり円弧であることを示している。この方法の利点は、加減速をストレート部分で完結でき、コーナでは一定の横加速度となるので、ストレート部分とコーナ部分に対する車両特性の影響がわかりやすいことである。またモデルがシンプルとなり計算負荷が少ない。

3.2.2. 全緩和曲線法

全緩和曲線法は、ストレート部分の走行ラインは正円弧法と同じく直線で近似するが、コーナ部分の走行ラインを円弧ではなく特定の曲線で規定する方法である。ここではこの曲線のことを緩和曲線と呼ぶ。緩和曲線は実際に計測された過去のデータ群から統計的に求めており、曲率半径に不連続点が生じないように最適経路を求める手法^{(5),(8)}と同様にして規定する。Fig. 2 は全緩和曲線法で規定した走行ラインの曲率半径をグラフに表した例である。ストレートからコーナの頂点に向かって緩和曲線の曲率半径は単調に減少していき、頂点以降は次のストレート部分に向

Table 1 Characteristics of two methods

Method	Definition of corner	Tire slip conditions	Characteristics
A	Circle	Pure	Contribution of straights and corners to lap time is clear
B	Transition curves	Combined	Radius of curvature is continuous (Locus is close to actual drive)

A: Circular arc method

B: Whole transition curve method

かって単調に増加していく。この方法の利点は、ストレート部分とコーナ部分を徐々に曲率半径を変化させてつなげており、正円弧法よりも実際の走行ラインに近いことである。特に減速度が徐々に低下しつつ横加速度が徐々に増していくような走行状態、あるいは横加速度が徐々に減りつつ同時に加速度が徐々に増していくような走行が頻繁に生じる場合には、計算結果と実走行の結果とが良く合致する。またコーナ部分全体の計算をタイヤ摩擦円⁽⁹⁾の特性を含めて計算できるところにあり、タイヤに駆動力と横力の両方が同時に発生している場合 (Tire slip conditions: Combined) も考慮した検討に適している。ただし、全緩和曲線法は、正円弧法に対して情報量が多いため計算負荷が高くなってしまふ。また直進制駆動状態と定常旋回状態に切り分けていないので、性能設計の仕様検討においてストレート部分とコーナ部分に対する車両特性の影響が明確にわかりにくい。

以上について、それぞれの方法の特徴を整理すると Table 1 のようになる。

3.2.3. シミュレーション用走行ラインの規定

実際の走行ラインは、直線と円弧と緩和曲線が複雑につながってできていると考えられる。つまりこの二つの手法を規定しておけば、原理的にはすべての走行ラインを包

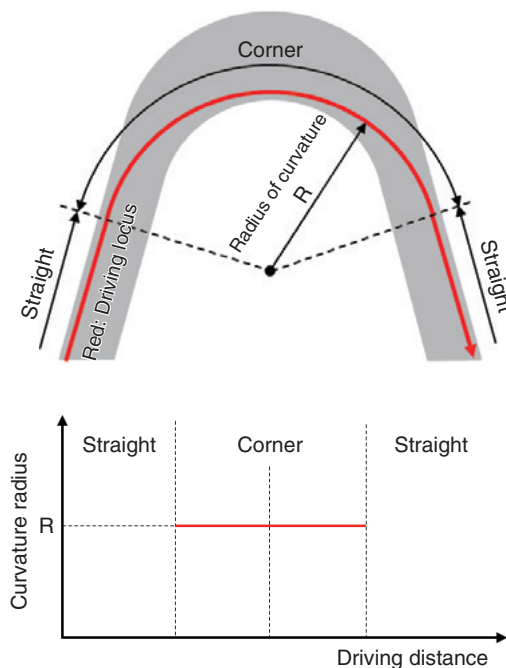


Fig. 1 Circular arc method

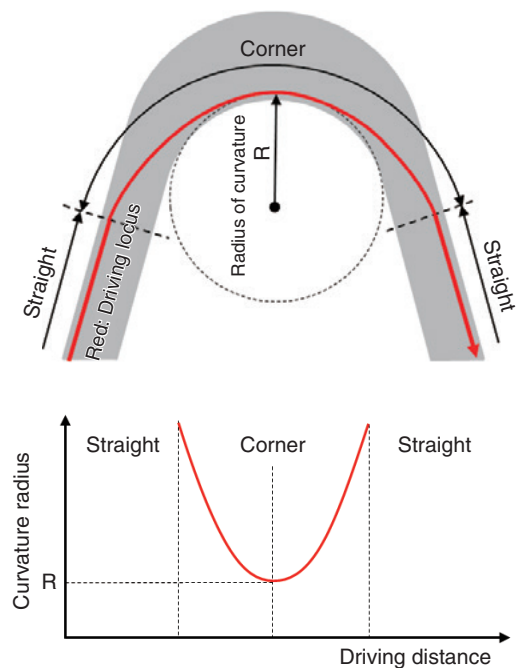


Fig. 2 Whole transition curve method

括的に表現することができる。ただし、ストレート部分とコーナ部分それぞれに対して車両特性の影響がわかりやすく、かつ計算負荷が小さいという正円弧法の利点は大きく、多くの場合、正円弧法を用いたラップタイムシミュレーションを性能設計では使用する。しかし、高出力エンジンと高性能ブレーキを搭載した前輪駆動車の場合は、コーナ部分で前輪に前後方向と左右方向に大きな力が同時に生じるので、摩擦円の特性を含めて計算しないと、実際の走行状態との乖離が大きくなり誤差を無視できない。そのような場合は全緩和曲線法によるシミュレーションを用いることによって課題を解決することができる。この二つの方法を使い分けることによってすべての車両に対してラップタイムシミュレーションを実施することが可能となった。

走行条件については、走行ラインの規定の他に、減速、旋回、加速のタイミングについても規定する必要がある。走行ラインをストレート部分とコーナ部分に分けて計算する本シミュレーションでは、減速終了点は横加速度が発生する点と一致しており、加速開始点は横加速度が0になる点と一致する。それらの点における速度を基準として、正円弧法でのコーナ部分は最大横加速度で速度一定の旋回運動となる。Fig. 3は正円弧法と全緩和曲線法のそれぞれの条件で旋回した場合、出力される横加速度と車両速度をグラフにしたものである。グラフの下にタイヤの摩擦円内において発生している力の向きのイメージを明示している。

ストレート部分における速度は、コーナ部分を抜けて横

加速度が0になる点から最大加速度で速度を上げていき、次のコーナ部分の横加速度が立ち上がる点で最大旋回速度となるように最大減速度で速度を下げる。Fig. 4は正円弧法によるストレート区間の速度変化を明示したものであり、加速開始点 x_1 を基準に最大加速度で速度を増していく計算結果ラインと、減速終了点 x_2 を基準に最大減速度で速度を落としていく計算結果ラインが点 x_3 で交わる様子を示したものである。全緩和曲線法でも考え方は同じである。

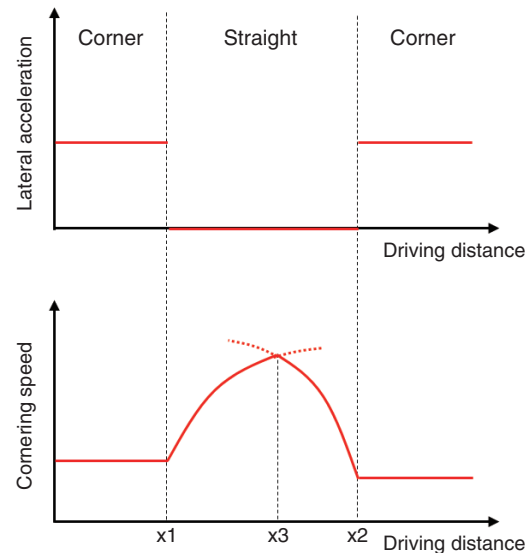


Fig. 4 Speed on straight

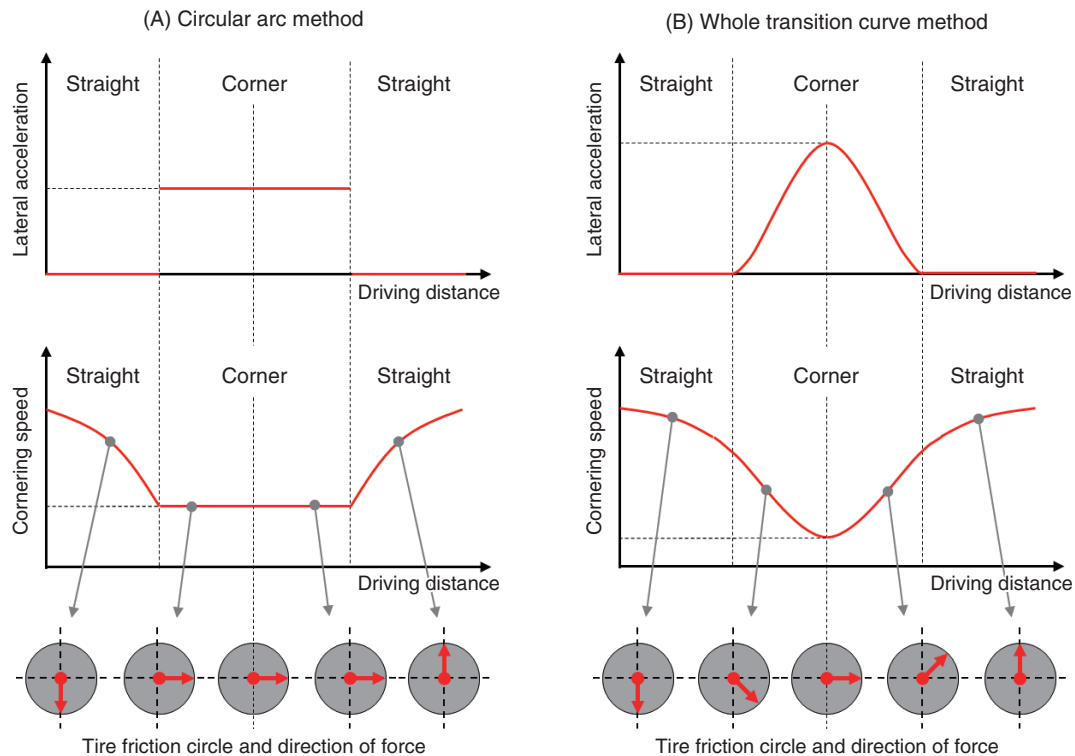


Fig. 3 Comparison of two methods

以上のように走行条件を規定すると、サーキット一周分の各地点におけるラインが Fig. 5 のように規定することができ、速度を連続的に計算できるのでラップタイムも同時に算出することが可能となる。このように最適化ロジック等は使わずにシミュレーション計算時間を短縮し、量産車の性能設計に有効なラップタイムシミュレーション用の走行ラインが規定できた。

3.3. 路面形状に関する要素

路面形状とは、スロープ（車両進行方向の勾配）、起伏、カント（車両横方向の勾配）のことである。走行路面のスロープは加減速度に影響し、カントは最大横加速度に影響する。

Fig. 6 左は路面のスロープについて示したものである。進行方向に対する路面勾配を示している。車両の制駆動時の加速度と減速度は、スロープの度合に応じて重力加速度

の影響を受け変化する。Fig. 6 の中は路面に起伏を表現したものである。このように起伏のある路面の上を走行した場合、上に凸の路面を走行する際には車両上方向に浮き上がる力が発生する。反対に下に凸の路面を走行する際には路面に押さえつけられるような下方向の力が発生する。浮き上がる上方向の力が生じている時は、タイヤの摩擦円が小さくなり、押さえつけられるような下向きの力が生じている時は摩擦円が大きくなる。その結果最大加減速度と最大横加速度の双方に影響を及ぼす。Fig. 6 の右はカントについて表現したものである。カントは車両の進行方向に対して左右に傾いた路面のことである。カントもスロープと同様に、車両の旋回時における横加速度は、カントの度合に応じて影響を受け変化する。

4. 効果検証と適用事例

ラップタイムシミュレーションの検証用車両サンプルとして、駆動型式と車両諸元が大きく異なる二車種の開発事例を示す。ひとつは新型 NSX (NSX) で、後輪に大きな荷重がかかり、かつ 4 輪で駆動するハイパフォーマンス車である。もうひとつは 2015 年モデルの CIVIC TYPE R であり、こちらは前輪に大きな荷重がかかり、かつ前輪で駆動するハイパフォーマンス車である (Table 2)。また過去の量産車開発においてラップタイム計測を数多く実施している筑波サーキットと、開発時のベンチマークとしても多用されるニュルブルクリンクサーキットの二つのサーキットでのラップタイムシミュレーションを例として述べる。なお、本計算には MATLAB を使用している。

4.1. NSX の開発

NSX は Honda の代表的な高性能スーパースポーツであり、世界 No.1 の運動性能を目指して開発された。ラップタイムのみならず、最大加速度、最大減速度、最大横加速度、最高速度などあらゆる運動性能の指標においてトップレベルの目標が定められた。

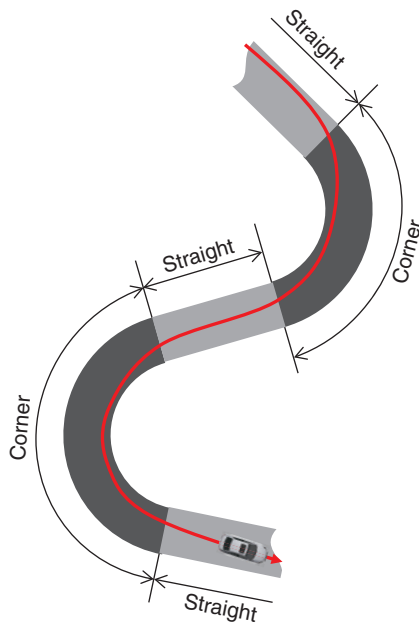


Fig. 5 Straights and corners

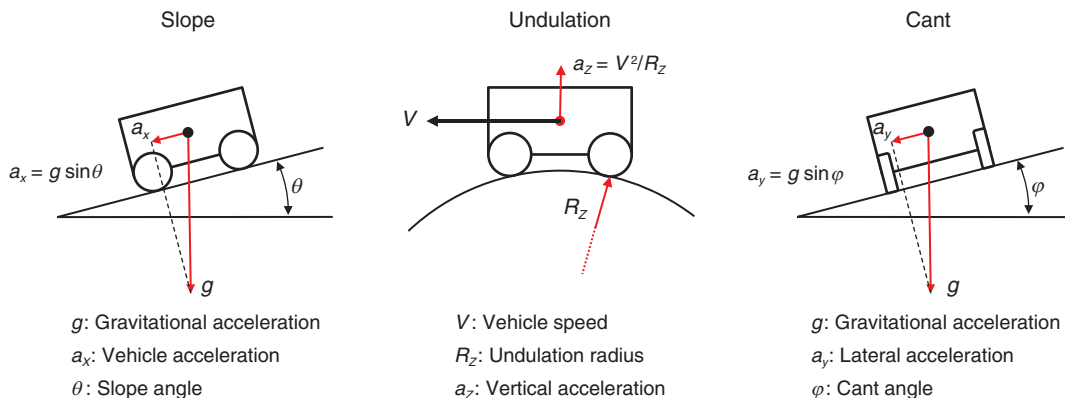


Fig. 6 Elements related to road surface shape

Table 2 Specifications of NSX and CIVIC TYPE R

	NSX	CIVIC TYPE R
External dimensions L × W × H (m)	4.490 × 1.940 × 1.215	4.390 × 1.880 × 1.460
Wheelbase (m)	2.630	2.600
Weight (kg)	1800	1380
Drive type	Engine and Motor/AWD	Engine/FWD
Maximum power (Engine/Motor) (kW)	373/200 System maximum power: 427	228
Maximum torque (Engine/Motor) (Nm)	556/366 System maximum torque: 646	400

Fig. 7 は筑波サーキットのラップタイムシミュレーション結果と実際のラップタイム計測のデータを走行履歴としてグラフ化したものである。赤の実線が計算結果、青の破線が実際の計測データを表している。このグラフから、本ラップタイムシミュレーションの結果が実走行に近い結果となっていることがわかる。

この走行履歴の計算結果を元に、ラップタイム、最高速度、最大加速度、最大減速度、最大横加速度などが導かれる。また走行履歴のデータからは、全体的に使用される速度域、ストレートやコーナの頻度、加減速の度合など、サーキットの特徴などを考察することができる。

Fig. 8 は筑波サーキットによるラップタイムシミュレーション

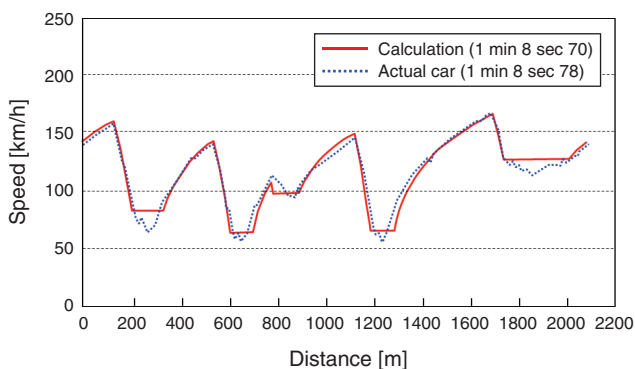


Fig. 7 Driving history

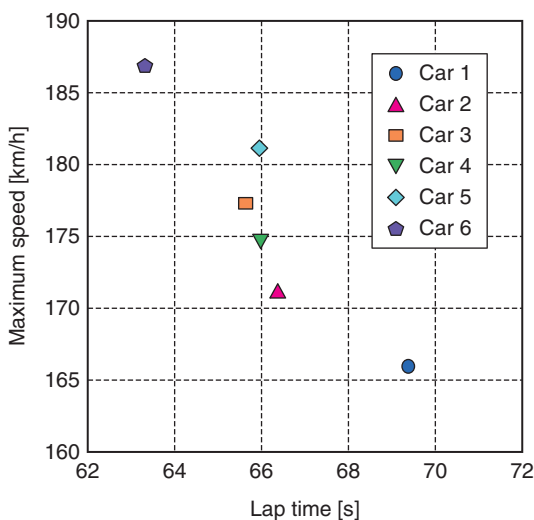


Fig. 8 Lap time and maximum speed

ションから、ラップタイムと最高速度を指標としてそれぞれ横軸と縦軸にとりグラフ化したものである。Car 1 から Car 6 はタイヤサイズ、空力特性、重量配分の条件を変えて組み合わせた計算結果から六つの異なる仕様についてプロットしたものである。ラップタイムは短い程良く、最高速度は高い程良いため、このグラフでは左上にプロットされる Car 6 が最も高性能であることを意味している。

Fig. 9 は最大横加速度を棒グラフにして出力したものである。最大横加速度は高い方が高性能であるといえるためこの棒グラフは高い程良い。

Fig. 10 は横軸にブレーキ要素を取り除いたシャシとタイヤで決まる最大減速度、縦軸にエンジン要素を取り除いたシャシとタイヤで決まる最大加速度をとりグラフにしたものである。これによりシャシとタイヤが加減速性能へ与える影響を比較できる。どちらも値が大きい程高性能であることを示しているため、右上にプロットされる車両程

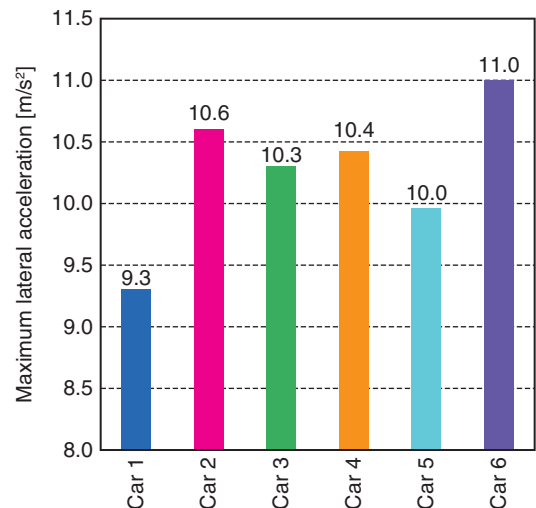


Fig. 9 Maximum lateral acceleration

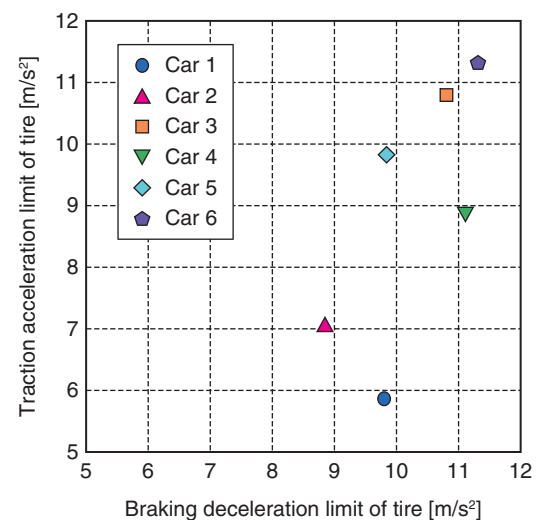


Fig. 10 Tire traction and deceleration limits

シャシのポテンシャルが高い。

以上に述べた Fig. 8 から Fig. 10 はラップタイムシミュレーションから出力される代表的な計算結果である。NSXの開発初期の性能設計ではこれらのグラフを見比べながら、さまざまな仕様について性能設計を実施した。例えばエンジンパワーの特性、タイヤのコーナリング特性、空気抵抗やダウンフォースの特性、サスペンションのアライメント特性、バッテリー搭載位置など各コンポーネント特性についてスタディし、筑波サーキットにおける目標性能を達成する仕様を見出した。

次にニュルブルクリンクサーキットを対象に性能設計を実施した例を示す。Fig. 11 はニュルブルクリンクサーキットの走行ラインをストレート部分とコーナ部分に色分けしてそれぞれのトータルをグラフ化した例である。緑がストレート部分のトータルであり、赤がコーナ部分のトータルである。Car 1 から Car 4 は競合他社のスポーツカー代表 4 種類の走行軌跡を分析した結果である。これを見るとストレート部分あるいはコーナ部分のどちらを対策するのが有効かわかる。ラップタイムを短縮するにあたりどのコンポーネントで対策することが効果的であるかをこのグラフは示唆している。例えば、コーナばかりで構成されたサーキットを走る場合には、コーナ部分の領域が多くなるため、旋回時の速度を向上させる対策により、効果的にラップタイムを短縮することができる。NSX の仕様検討ではこのような考察に基づいて、さまざまな側面から最適仕様を探索し最終的な仕様を決定していた。

Fig. 12 はコーナ部分の性能設計について検討した結果を示したものである。ハイブリッドモータ用バッテリーのレ

イアウトによる影響、スポイラ等の空力デバイスによる効果、タイヤサイズによる効果を示している。このような検討を実施しコーナ部分の合計タイムの目標とされた 234 秒以下達成の見通しを得た。

実際の開発においてもこのシミュレーション結果に基づき各仕様決定され試作車が作られた。実走行テストでもこの目標を達成することができた。Fig. 13 は性能設計の中でさまざまなパワープラント仕様を検討した結果、目標を達成するために実施した仕様の、ラップタイムと最高速度に対する効果をグラフに示したものである。

4.2. CIVIC TYPE R の開発

CIVIC TYPE R は Honda を代表する前輪駆動のハイパフォーマンス車である。CIVIC TYPE R のコンセプトは、「ニュルブルクリンクサーキットにおいて前輪駆動車で最

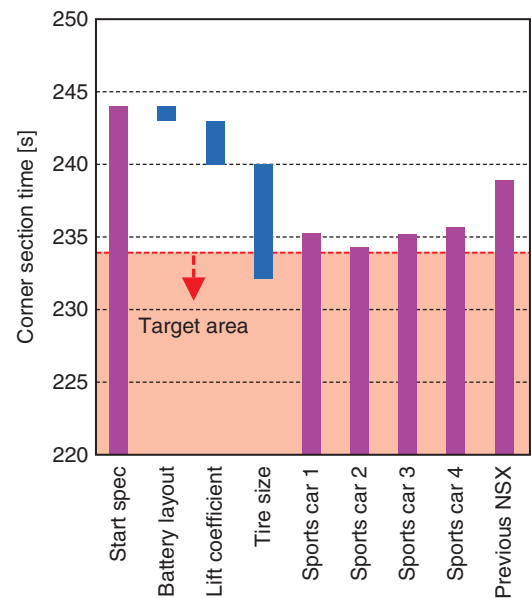


Fig. 12 Results of study of specifications for NSX

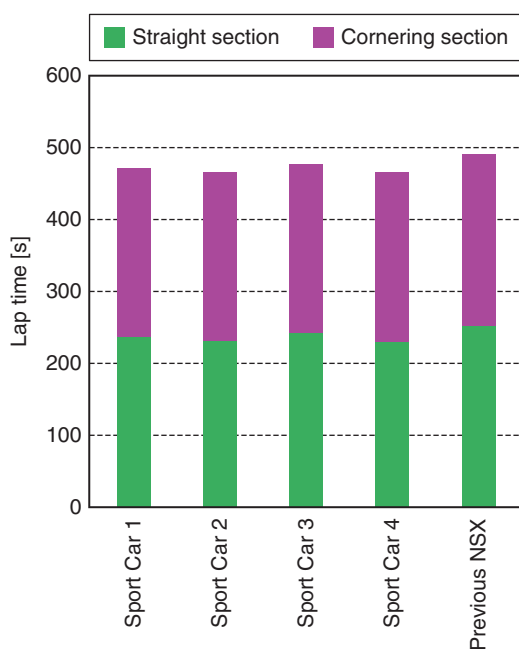


Fig. 11 Time for straight and corner

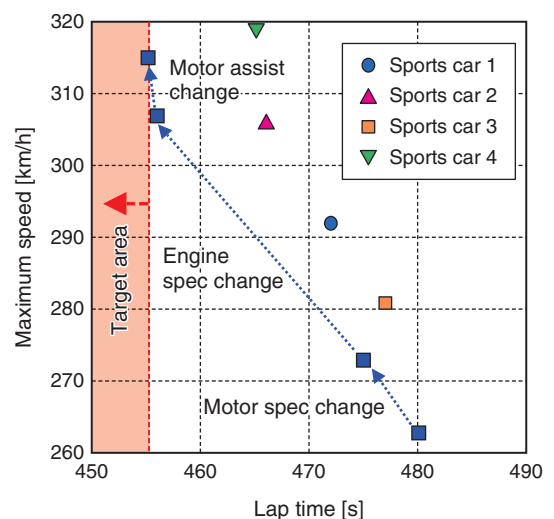


Fig. 13 Lap time and maximum speed

速」であった。具体的にはニュルブルクリンク一周のラップタイムを7分50秒(470秒)以内にするのであった。CIVIC TYPE Rのラップタイムに関する性能設計も、基本的にはNSXと同じであるが、NSXが4輪駆動車であるのに対し、CIVIC TYPE Rは前輪駆動車なので、コーナ部分では旋回横力と制駆動力の両方を担う前輪の摩擦円の使い方が重要となる。したがってCIVIC TYPE Rのラップタイムシミュレーションにおいては摩擦円のモデルを使う全緩和曲線法の方が実車計測により近い値を示す点で優れていた。CIVIC TYPE Rは正円弧法ラップタイムシミュレーションに加え、全緩和曲線法ラップタイムシミュレーションを併用して性能設計された代表事例である。

Fig. 14は全緩和曲線法でタイヤの摩擦円を規定するために計測された、接地面に発生する力をグラフにしたものである。

Fig. 15は筑波サーキットにおけるCIVIC TYPE Rのラップタイムをそれぞれ正円弧法で計算したもの(赤の実線)と、全緩和曲線法で計算したもの(赤の破線)と、実計測結果(青の破線)を比較したものである。このグラフから全緩和曲線法の方が正円弧法による計算結果よりも実計測結果に近い結果が得られることがわかる。特にCIVIC TYPE Rのようなハイパワーな前輪駆動車の場合、正円弧法による計算結果と実測値とがかなり離れてしまう傾向がある。そのような場合でも全緩和曲線法の計算モデルを規定しておくことで、性能設計の効果を必要十分な精度で進めることができるようになった。

Fig. 16はニュルブルクリンクサーキットにおけるCIVIC TYPE Rの目標タイム達成に対して、各コンポーネントに割り付けられた効果をグラフに表記したものである。エンジン出力、トランスミッションのギヤ比の仕様、車両重量、空力特性、サスペンション仕様、タイヤサイズを対策することにより、目標タイムは達成できる見通し

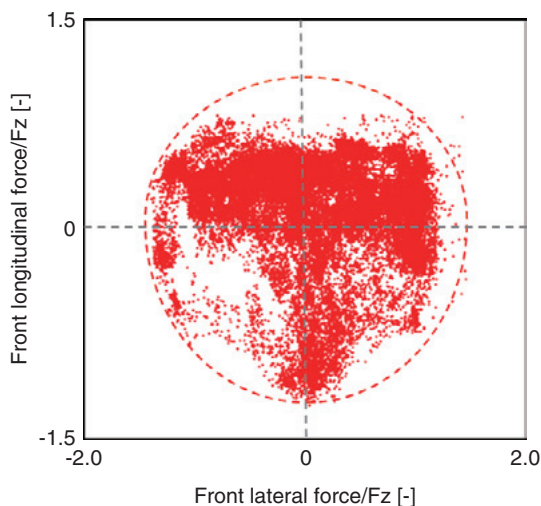


Fig. 14 Force generated on road surface

があることを示している。このように性能設計の段階で、ラップタイムシミュレーションによる各コンポーネントに対する性能割り付けが可能になった。

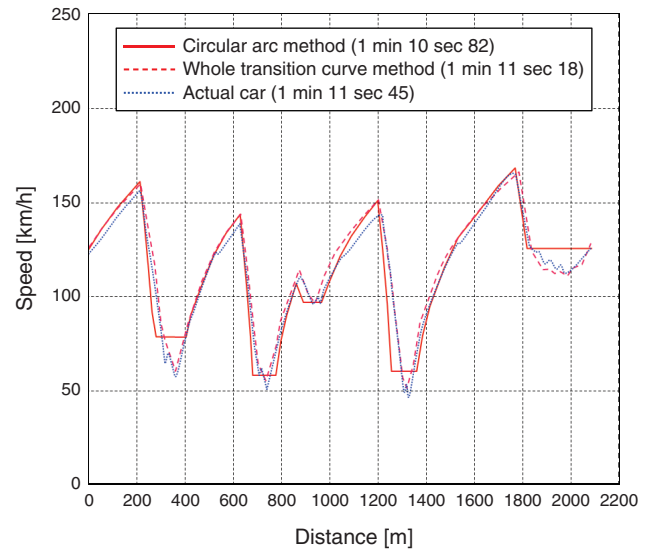


Fig. 15 Comparison of results of two methods and actually measured values

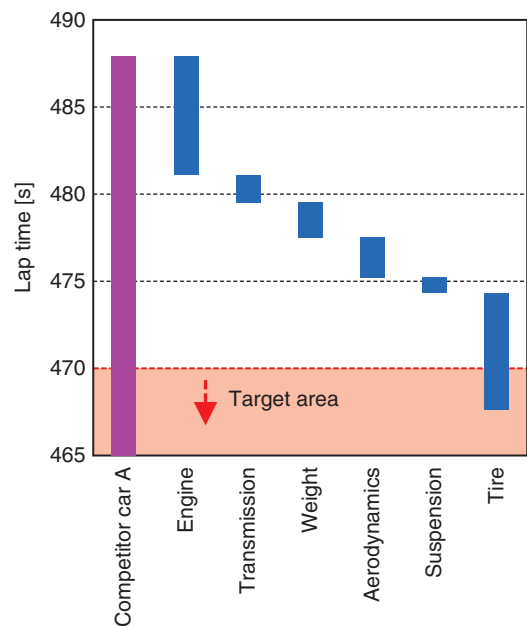


Fig. 16 Deployment of system for CIVIC TYPE R

5. まとめ

筑波サーキットとニュルブルクリンクサーキットにおいて、ラップタイムシミュレーションが量産車開発に活用された事例を2車種紹介した。このことは本ラップタイムシミュレーションモデルの考え方の妥当性と、シミュレーション技術の有用性を示している。以下に本取組の内容をまとめる。

- (1) 量産車のモデルベース開発の中で定義される条件を利用したラップタイムシミュレーションツールができた。
- (2) 走行条件と路面条件に関する要素を規定することで、計算時間を短縮し、量産車開発の性能設計に適用できた。
- (3) 正円弧法と全緩和曲線法の二つのモデルを規定することで、すべての駆動方式に対応できるラップタイムシミュレーション環境ができた。
- (4) ラップタイム以外にも、最大加速度、最大横加速度、最大減速度、最高速度などの値も出力できるようになった。

実車テストの代用としてラップタイムを予測することだけでなく、ラップタイムの目標値から各コンポーネント特性に性能を割り付け、効果的にシステム設計が進められるようにすることで、量産車開発への適用が可能となった。

参考文献

- (1) 豊島貴行, 松澤俊明, 遠藤喜章, 伊藤憲悟, 高野広喜, 牛村智也: 量産車の MBD におけるシャシ性能設計技術の構築, Honda R&D Technical Review, Vol. 29, No. 1, p. 49-58
- (2) 結城一敏, 小池明彦, 乙部豊: F1 サーキット・シミュレーション, HONDA R&D Technical Review, F-1 Special, p. 46-55, (1993)
- (3) Siegler, B., Crolla, D.: Lap Time Simulation for Racing Car Design, SAE Paper, No. 2002-01-0567, (2002)
- (4) 安倍正人: 自動車の運動と制御 第2版, 東京電機大学出版局, p. 310, (2012)
- (5) 住岡忠使, 細谷知之, 母里佳裕: 非線形モデル予測制御を用いた車両限界域制御と最速走行のための制御, 計測自動制御学会論文集, Vol. 53, No. 7, p. 385-397, (2017)
- (6) 大塚敏之: 実時間最適化による制御の実応用, コロナ社, 256p., (2015)
- (7) 住岡忠使, 西宮憲治, 飽田好恭: 非線形モデル予測制御と動的計画法を用いた他車混合交通状況における車両軌道と速度生成, 計測自動制御学会論文集, Vol. 53, No. 2, p. 198-205, (2017)
- (8) Braghin, F., Cheli, F., Melzi, S., Sabbioni, E.: Race driver model, computers and Structures Vol. 86, p. 1503-1516, (2008)
- (9) 横浜ゴム株式会社編, 第4章タイヤと路面に働く力, 自動車用タイヤの研究, 山海堂, p. 109-147, (1995)

■ 著 者 ■



豊島 貴行



松澤 俊明



牛村 智也

ガソリンエンジンの排気側バルブシート摩耗量を予測するモデルの構築

Construction of Model to Predict Wear Amount on Exhaust Valve Seats for Gasoline Engines

志波 義勝*
Yoshikatsu SHIWA
佐藤 範行*
Noriyuki SATOU
藤井 健史*
Takeshi FUJII

岸和田 聡*
Satoshi KISHIWADA
石井 啓資*
Keisuke ISHII
鷹木 清介**
Seisuke TAKAKI

吉井 健太*
Kenta YOSHII
橋本 尚*
Hisashi HASHIMOTO
大重 公志**
Hiroshi OSHIGE

要 旨

ABSTRACT

ガソリンエンジンの排気側バルブシート摩耗量を予測する技術を構築した。単体リグ試験と実機ベンチ試験における摩耗試験により、複数の因子を変数とした予測モデルを作製した。この試験によって制御可能な因子を分類するとともに、得られた摩耗量データから各因子の感度を把握した。また、材質が異なるバルブシートに本モデルを適用し、その汎用性を確認した。本モデルを活用することでシリンダヘッドの設計段階でバルブシート摩耗量を予測し、早期にシリンダヘッドの構造を工夫してバルブシートの耐摩耗性を高めるとともに、開発期間と開発コストを削減できた。

A technique has been created to predict the amount of wear on exhaust valve seats for gasoline engines. Through bench and rig wear tests, a prediction model was constructed with multiple factors as variables. Through these tests, the controllable factors were categorized, and sensitivity for each factor was determined from the measured wear data. The model was also applied to valve seats of different materials, confirming its versatility. By using the model to predict the amount of wear on valve seats in the cylinder head design phase, a cylinder head structure was quickly devised to increase valve seat wear resistance, shortening the development period and reducing development cost.

1. まえがき

近年、自動車エンジンに対する高性能化、高出力化、低燃費化などの要求に加え、環境負荷低減に向けたCO₂排出量削減が求められている。こうした要求に応えるべく、Hondaは過給機を用いたダウンサイジングエンジンの開発をおこなってきた⁽¹⁾。過給エンジンは、自然吸気エンジンと比べて燃焼ガスが高温、高圧状態となるため、エンジン性能に多大な影響を与えるバルブシートの摩耗に対して十分な注意が必要である。

バルブシートは圧縮行程で吸排気バルブと密着し、圧縮

された混合気、燃焼行程の燃焼ガスをシールする気密性が求められる。バルブシートが摩耗するとバルブとの密着性が低下し、気密性が低下する。ガソリンエンジンの吸気側バルブシートは、吸気行程の気化潜熱により冷却される。一方、排気側バルブシートは排気行程において高温、高圧の排気ガスにさらされるため、吸気側バルブシートよりも高温となる。そのため、ガソリンエンジンにおいては、吸気側よりも排気側バルブシートの摩耗量が多くなり、吸気側バルブシートよりも注意が必要となる⁽²⁾。排気側バルブシートの摩耗量を低減するには、バルブシート単体の耐摩耗を向上する、もしくはシリンダヘッド構造を工夫して排

* 四輪 R&D センター

** 日本ピストンリング株式会社

気側バルブシートの温度を下げることで求められる。バルブシート単体の耐摩耗性向上は、これまでも新材料開発がおこなわれてきた⁽³⁾⁻⁽⁶⁾。しかしながら、実機エンジンにおけるバルブシートの耐摩耗性は、単体試験で実機エンジン状況を再現できないため、実機ベンチ試験や実走試験による確認が必要である。試験で耐摩耗性が低いと判断されると、シリンダヘッド構造の再設計と試験のやり直しが発生し、開発期間と開発コストの増加につながる。最上流の設計段階でシリンダヘッドの構造を工夫し、バルブシートの耐摩耗性向上を図るためには、各試験での摩耗量を予測する必要がある。しかしながら、各試験のバルブシート摩耗はさまざまな因子によって発生しており、摩耗に対する因子感度が把握されておらず、摩耗量を予測する数式モデルが構築されていないことから、バルブシートの摩耗量を予測することができていなかった。

本研究では、各試験のバルブシート摩耗に対する因子感度を把握し、ガソリンエンジンの排気側バルブシート摩耗量を予測するモデルを構築したので報告する。

2. 本研究のねらいとモデル構築

本研究は、ガソリンエンジンの実機ベンチ試験や実走試験における排気側バルブシート摩耗量を予測するモデルを作製することをねらいとした。モデルは、バルブシート摩耗試験をおこない、試験で得られた摩耗量データから応答曲面法を用いて作製した。応答曲面法は、試験データを用いて目的変数の最適解を求める数学・統計的モデル構築手法の一つであり、限られた試験データからモデル構築するのに適している。バルブシート摩耗を発生させる複数の因子を多変数としてモデルに入力し、バルブシート摩耗量を予測する。モデルは、以下の段階を踏んで作製した。

(段階1) バルブシート摩耗の因子抽出と試験分類

(段階2) 空燃比、バルブシート面圧、バルブシート温度のモデル構築

(段階3) バルブシート変形量のモデル反映

(段階4) 燃焼ガス圧力と温度のモデル反映

(段階5) モデルの精度検証と汎用性検討

3. バルブシート摩耗の因子抽出と試験分類

Fig. 1 にバルブシート摩耗の要因と因子の系統図を示す。実機エンジンのバルブシート摩耗は、バルブとバルブシートの間で発生する摩擦力と相対滑りの2大要因で発生する。バルブが閉じる際、バルブはバルブスプリングにより衝撃をとまってバルブシートに着座する。その後、燃焼ガスの圧力でバルブがバルブシートに押しつけられることで摩擦力が発生し、バルブフェース面が微小に滑る。同時に、燃焼ガスの温度と圧力によりバルブシートは変形するため、バ

ルブと不均一に接触し、不均一な摩擦力が発生する。さらに、空燃比の変化による燃焼生成物の付着、バルブシート温度の変化による摩擦係数や耐凝着性変化など、同時にさまざまな現象が発生する⁽³⁾。以下に抽出した因子を示す。

(因子1) 空燃比

(因子2) バルブシート面圧

(因子3) バルブシート温度

(因子4) バルブシート変形量

(因子5) 燃焼ガス圧力

(因子6) 燃焼ガス温度

抽出した因子に基づき、単体リグ試験で空燃比、バルブシート面圧、バルブシート温度、バルブシート変形量、実機ベンチ試験で燃焼ガス圧力、燃焼ガス温度を制御し、バルブシート摩耗量の取得とモデルの構築を進めた。

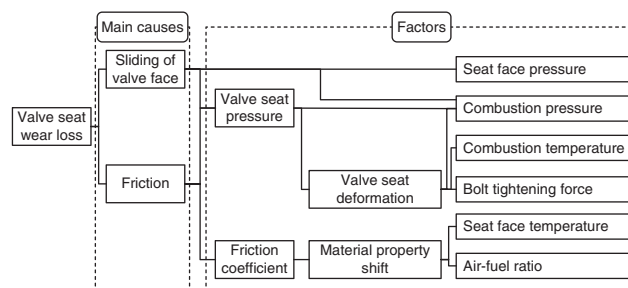


Fig. 1 Factor system diagram

4. 空燃比、バルブシート面圧、バルブシート温度のモデル構築

4.1. 単体リグ試験機概要

試験に用いた単体リグ試験機を Fig. 2 に示す。実機ベンチ試験の実機エンジンに近づけるため、実機エンジンのバルブ、Cr-Mo-Co 系硬質粒子からなる鉄系焼結合金の実機エンジンバルブシート、実機エンジンのシリンダヘッド材料で製作したセッティングプレートで構成部品として用いた。

試験条件の調整は、カム機構でバルブのリフト量を調整し、バルブ着座時のバルブシート面圧を調整した。空燃比は、バーナに供給する LP ガスと空気の混合比で調整した。また、バルブシート温度はバーナの高さを変えることで調整した。

4.2. 因子感度の把握

実機ベンチ試験の運転条件範囲で試験をおこない、バルブシート摩耗量を取得した。Table 1 に試験条件である L18 直交表を示す。Fig. 3 に L18 試験結果から得られた要因効果図を示す。要因効果図より、バルブシート温度の感度が最も高いことが把握できた。一方、空燃比の感度はバルブシート面圧と同じ感度になることが把握できた。

Table 1 L18 orthogonal table

No.	Air-fuel ratio [-]	Seat face pressure [MPa]	Seat face temperature [deg C]	Cam rotation speed [r/min]	Valve rotation speed [r/min]	Test duration time [hour]
1	11.9	12.1	240	3000	20	6
2	11.9	10.1	240			
3	10.7	12.1	280			
4	10.7	10.1	280			
5	13.1	8.1	200			
6	13.1	8.1	280			
7	14.3	10.1	200			
8	14.3	8.1	200			
9	14.3	12.1	240			
10	13.1	12.1	240			
11	11.9	8.1	280			
12	11.9	12.1	320			
13	13.1	10.1	200			
14	13.1	10.1	280			
15	14.3	10.1	240			
16	14.3	12.1	320			
17	14.3	12.1	200			
18	10.7	12.1	200			

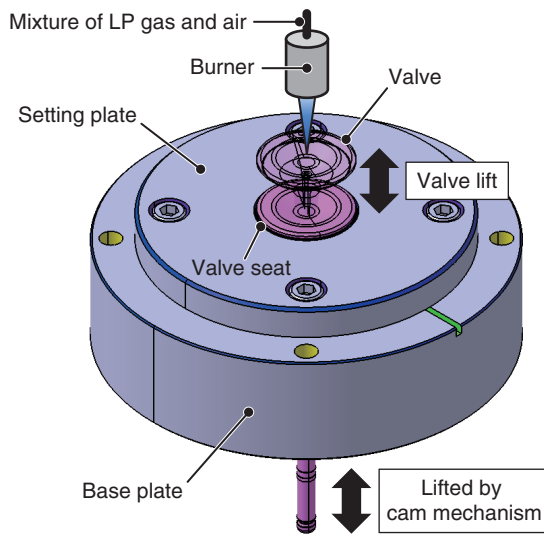


Fig. 2 Valve seat testing machine

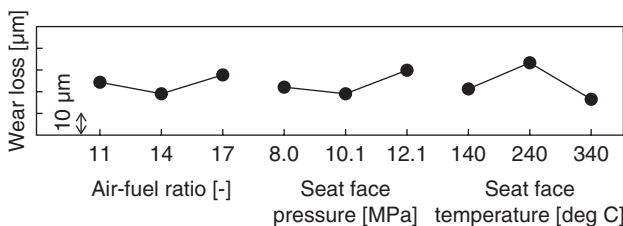


Fig. 3 Factorial effects on L18 test

4.3. モデルの構築

L18 試験のバルブシート摩耗測定結果を用いて、バルブシート面圧、空燃比、バルブシート温度を入力パラメータとするモデルを構築した。

応答曲面法としては、多項式モデルに比べて設計空間全体にわたる目的関数分布の適合性に優れている RBF ネットワークを用いた⁽⁷⁾。RBF ネットワークは、目的関数分布を基底関数の足し合わせとして近似する手法である。RBF ネットワークは目的関数 $f(x)$ を測定点 i からの距離 $\|x - x_i\|$ 、動径基底関数 $\phi(r)$ 、係数 a_i 、スケーリングパラメータ c を用いて式 (1) で近似する。

$$f(x) = \sum_{i=1}^N a_i \phi\left(\frac{\|x - x_i\|}{c}\right) \quad (1)$$

基底関数として、式 (2) で示す Hardy の Multi-Quadrics を用いた。

$$\phi(r) = (1 + r^2)^{1/2} \quad (2)$$

モデルの作成は、株式会社 IDAJ の最適化支援ツールである modeFRONTIER[®] を活用した。バルブシート摩耗量 W_0 は式 (3) で示すモデルで表現できる。

$$W_0 = f(AF, P_s, T_s) \quad (3)$$

式 (3) の各入力パラメータは、 AF : Air-fuel ratio, P_s : Seat face pressure, T_s : Seat face temperature を意味する。

4.4. モデルの予測精度検証

構築したモデルの予測精度を検証した。精度検証は、単体リグ試験条件の空燃比、バルブシート面圧、バルブシート温度をモデルに入力し、バルブシート摩耗予測量と試験結果のバルブシート摩耗量を比較することで検証した。Fig. 4 に比較結果を示す。構築したモデルは $R^2 = 1.00$ と精度良く試験結果のバルブシート摩耗量を予測できた。

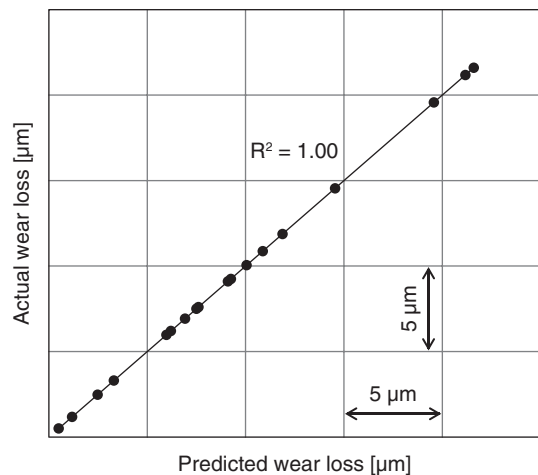


Fig. 4 Comparison between predicted wear loss and actual wear loss

5. バルブシート変形量のモデル反映

5.1. 試験機概要とバルブシート変形量測定方法

試験機は Fig. 2 で示した物と同じである。バルブシートの変形方法を示した図を Fig. 5 に示す。バルブシートの変形は、シムプレートをセッティングプレートとベースプレートの上に挟み込み、セッティングプレートを強制的に変形させることで実機エンジン相当の変形を再現した。試験開始前に三次元測定機でバルブシートを測定し、実機エンジン相当の変形状態になっていることを確認した。Table 2 に測定に用いた三次元測定機の仕様を示し、Fig. 6 に測定風景を示す。測定は以下に示す手順でおこなった。

(手順1) セッティングプレートにバルブシートを圧入

(手順2) バルブとの接触面を加工

(手順3) 加工後の接触面を測定

(手順4) シムプレートを挟みプレートを締結

(手順5) 締結後の接触面を測定

これらの手順に基づき測定した(手順3)加工後の測定データと(手順5)締結後の測定データを重ね合わせ、両データを比較することでバルブシートの変形量を算出した。Fig. 7 に算出例を示す。比較はバルブリフト軸方向をおこない、締結後の測定面がバルブリフト方向に変移している際はプラス、逆方向はマイナスとした。

Fig. 8 に本試験で再現したバルブシート変形の三次元測定結果とCAEで計算した実機エンジンのバルブシート変形結果を示す。CAEは常温でシリンダヘッドを締結し、計算した結果である。CAEのバルブシート変形振幅と周期に対し、三次元測定結果は同等の結果を示しており、本手法で実機エンジン相当のバルブシート変形が再現できた。以後、バルブシートの変形振幅をバルブシート変形量として取り扱う。

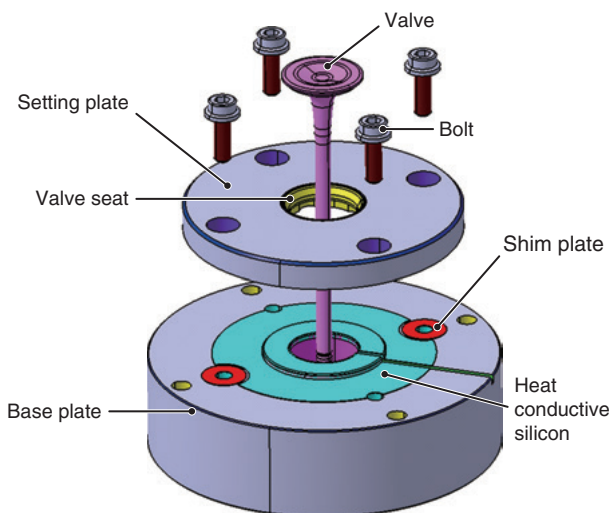


Fig. 5 Methodology of valve seat face deformation

Table 2 Measuring machine specifications

Manufacturer		TOKYO SEIMITSU ACCRETECH
Product name		SVA Fusion
Accuracy	MPE _E	1.9 + 4 L/1000 μm
	MPE _p	1.9 μm
	MPE _{THP}	2.8 μm

5.2. 試験条件と感度把握

試験は空燃比、バルブシート面圧、バルブシート温度を一定とし、バルブシートを変形させた状態と変形させてい

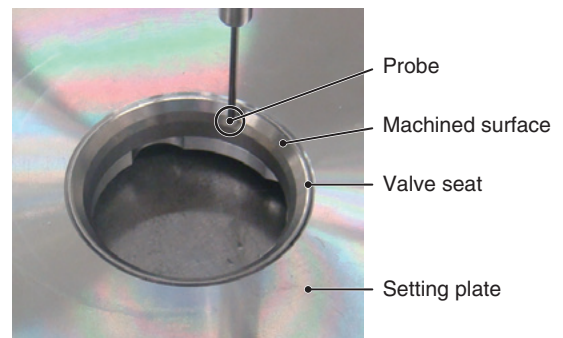


Fig. 6 Appearance of measured valve seat

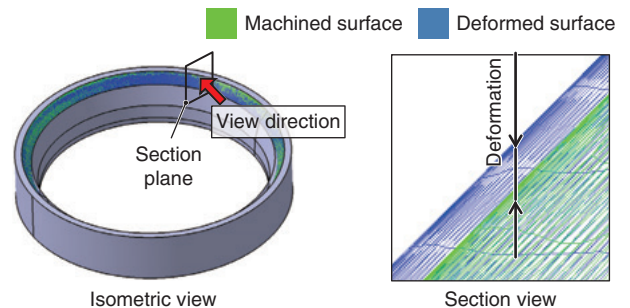


Fig. 7 Calculations for valve seat face deformation

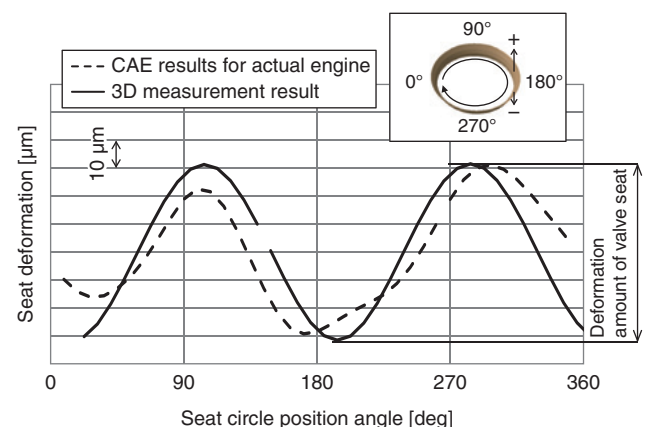


Fig. 8 Valve seat face deformation

ない状態で摩耗量を測定した。Fig. 9 に測定結果を示す。同条件でバルブシートを変形させることにより摩耗量は増加し、摩耗に対して感度があることを把握した。

5.3. モデル反映

バルブシート変形量をモデルに反映する。空燃比、バルブシート面圧、バルブシート温度を入力し、摩耗量を予測した予測摩耗量 W_0 、バルブシートの変形量 $\Delta\varepsilon$ 、係数 B から、本試験の摩耗量 W_ε を予測する式 (4) を求めた。

$$W_\varepsilon = (B \cdot \Delta\varepsilon + 1) W_0 \quad (4)$$

式 (4) により、空燃比、バルブシート面圧、バルブシート温度、バルブシート変形量を入力パラメータとして摩耗量を予測するモデルを構築した。

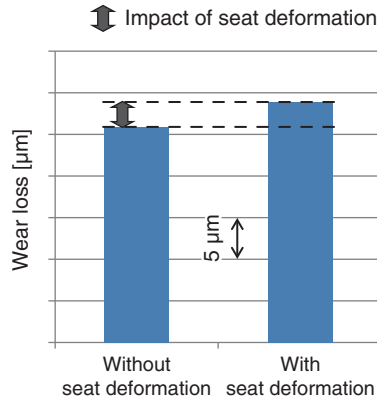


Fig. 9 Impact of seat wear loss on seat deformation

6. 燃焼ガス圧力と温度のモデル反映

6.1. 実機ベンチ試験条件と摩耗量計測

Table 3 に本試験で用いたエンジン諸元を示す。バルブシート摩耗量は放射線摩耗計測を用いて計測した。放射線摩耗計測は計測対象のバルブシートを事前に放射化し、バルブシートが発する放射線量からバルブシート摩耗量を計測する方法である⁽⁸⁾。Fig. 10 に放射線計測機概要を示し、Table 4 に試験運転条件を示す。

6.2. 試験結果と応答曲面モデル反映

Fig. 11 に燃焼ガスの圧力変化に伴うバルブシート摩耗率変化を示す。摩耗率は燃焼ガスの圧力上昇に伴い増加している。また、燃焼ガスの圧力上昇に伴い、燃焼ガスの温度も上昇する。この摩耗率増加は、燃焼ガスの圧力と温度の増加に伴うバルブの微小滑りが起因していると定義した。

本定義に基づき、燃焼ガス圧力と温度からバルブの微小滑りに伴うバルブシート面圧を CAE より算出し、燃焼ガス圧力と温度の代わりとしてモデルに反映する。バルブ

Table 3 Engine specifications

Type of engine		L4 DOHC i-VTEC Turbo
Bore × Stroke (mm)		86.0 × 85.9
Displacement (cm ³)		1996
Compression ratio		9.8
Number of valves	Intake	2
	Exhaust	2
Valve head dia./ Stem dia. (mm)	Intake	35.0/34.5
	Exhaust	29.0/28.5
Valve seat width (mm)		1.6
Valve seat base hard particles		Cr-Mo-Co hard particles
Maximum power (kW/rpm)		228/6500
Maximum torque (Nm/rpm)		400/2500-4000
Fuel type		Petrol

Table 4 Engine bench test conditions

No.	Engine speed [r/min]	Intake air pressure [hPa]	Engine power [kW]	Test duration time [hour]
1	2750	750	27	116.3
2	4500	2300	169	8.0
3	5700	1175	115	30.5
4	5700	1480	145	65.0
5	5700	1950	182	6.5
6	6500	1480	126	20.0

シート変形を考慮したモデルのバルブシート予測摩耗量 W_ε とバルブ微小滑りに伴うバルブシート面圧 P_v 、係数 D 、 E から、本試験の摩耗量 W_{total} を予測する式 (5) を求めた。

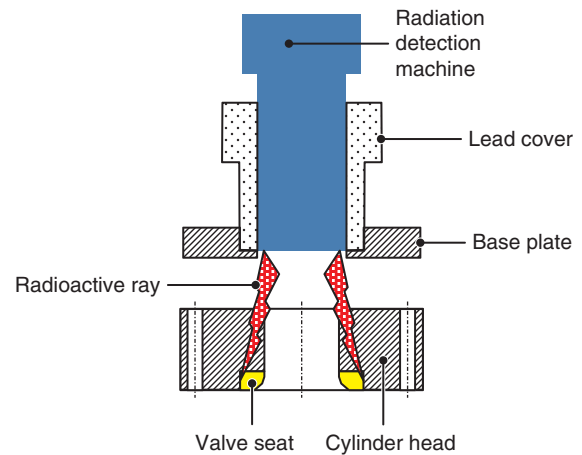


Fig. 10 Wear loss measured with radioactive rays

$$W_{total} = D \cdot \exp(E \cdot P_v) \cdot W_e \quad (5)$$

式(5)により、空燃比、バルブシート面圧、バルブシート温度、バルブシート変形量、バルブの微小滑りによるバルブシート面圧を入力し、実機ベンチ試験時の燃焼ガス圧力と温度を考慮したモデルを構築した。

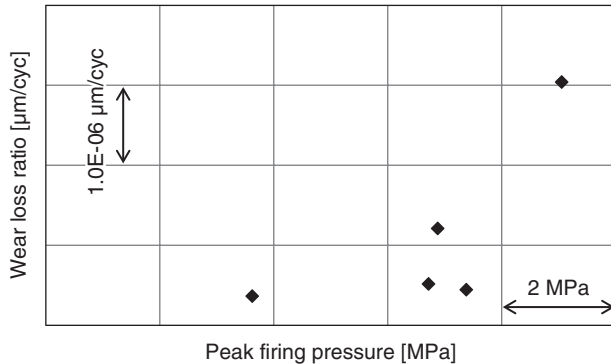


Fig. 11 Wear loss ratio and combustion pressure

7. モデルの精度検証と汎用性検討

7.1. モデルの精度検証

Fig. 12 に実機ベンチ試験、実走耐久試験のバルブシート摩耗量をモデルで予測した結果を示す。モデルは $R^2 = 0.9105$ と精度良く実機ベンチ試験、実走耐久試験のバルブシート摩耗量を予測できた。

7.2. モデルの汎用性検討

バルブシート材が異なる場合のモデル適用を踏まえた汎用性を検討する。検討する材料は、Cr-Co-Fe-Ni 系硬質粒子からなる鉄系焼結合金のバルブシート材であり、前述で検討した Cr-Mo-Co 系硬質粒子からなる鉄系焼結合金のバルブシート材と異なる。以下に示す手順に従い、バルブシート材が異なる場合のモデル適用と汎用性を検討した。

(手順1) 4.1. 節と同様に実機エンジンのバルブ、バルブシートを用いて単体リグ試験機を構築

(手順2) (手順1)の単体リグ試験にて、4.2. 節の Table 1 で示した L18 直交表試験条件から 1 試験条件を選択し、バルブシート摩耗量を取得

(手順3) (手順2)で選択した試験条件で、4.2. 節で取得したバルブシート摩耗量と(手順2)で取得したバルブシート摩耗量を比較し、モデルの摩耗補正値を算出

(手順4) (手順3)で算出した摩耗補正値でモデルを補正
これらの手順に基づき補正したモデルを活用し、バルブシート材が異なる実機ベンチ試験のバルブシート摩耗量を

予測した。Fig. 13 に予測結果を示す。予測結果は実機ベンチ試験のバルブシート摩耗量を精度良く予測できており、モデルの汎用性は高いといえる。

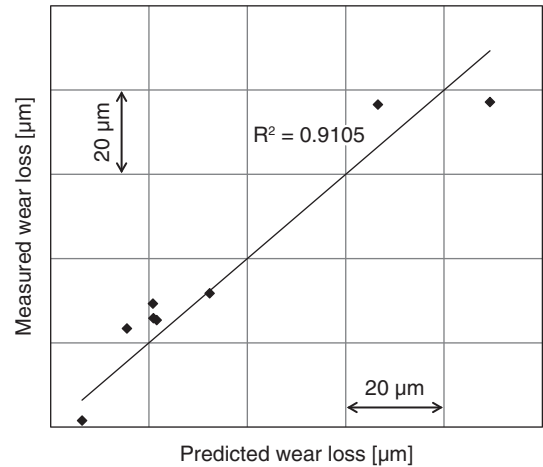


Fig. 12 Wear loss predicted with response surface model and actual road tests

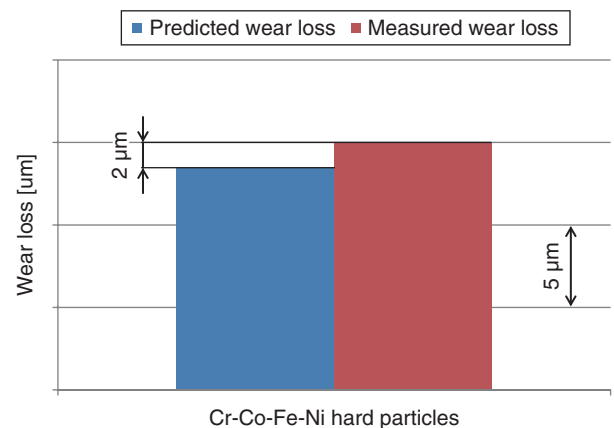


Fig. 13 Predicted results for engine with different materials

8. まとめ

本研究を通じて以下の知見が得られ、ガソリンエンジンの排気側バルブシート摩耗量を予測するモデルを構築することができた。これにより、エンジン開発最上流の設計段階で各試験の摩耗量を予測しつつシリンダヘッドの構造を工夫し、バルブシートの耐摩耗性向上を図ることで、再設計と試験のやり直しを減らし、開発期間と開発コストを削減できた。

- (1) 摩耗に対する因子感度を把握することにより、シート表面温度の感度が最も高く、留意すべき因子であることがわかった。
- (2) バルブシート変形は摩耗に対して感度があることが把握できた。

- (3) 実機ベンチ試験のバルブシート摩耗量を放射線摩耗計測手法で計測し、燃焼ガスの圧力上昇に伴って摩耗率が増加することが把握できた。
- (4) バルブシート材が異なる場合のバルブシート摩耗量も予測でき、汎用性が高いモデルが構築できた。

参考文献

- (1) 中野弘二, 和田裕介, 城野実考, 成廣繁: 新型直列4気筒ガソリン直噴過給ダウンサイジングエンジン, Honda R&D Technical Review, Vol. 28, No. 1, p. 133-139
- (2) 佐藤克明, 緑川輝明, 山崎安弘, 高橋輝夫: ガス燃料エンジン用バルブシート材の開発, HONDA R&D Technical Review, Vol. 11, No. 1, p. 149-156
- (3) 桶谷裕之, 坪田隆志, 石田正雄: 低コストエンジン排気バルブシート材の開発, Honda R&D Technical Review, Vol. 17, No. 1, p. 130-137
- (4) 河田英昭, 藤塚裕樹: Co, Pb フリー排気バルブシート材, 日立化成テクニカルレポート, 第44号, p. 31-34, (2005)
- (5) 大谷剛生, 矢畑昇, 藤本章, 江平淳: エンジン用バルブ・バルブシート材の高温衝撃摩耗特性 (マルテンサイト系耐熱鋼 SUH3 と鉄系焼結材との平面衝突の場合), 日本機械学会論文集 (C 編), 60 巻 576 号, p. 333-339, (1994)
- (6) 大谷剛生, 矢畑昇, 波多野裕輝, 眞木邦雄: エンジン用バルブ・バルブシート材の高温衝撃摩耗特性 (第2報, オーステナイト系耐熱鋼 SUH36 と二つの鉄系焼結材との平面・斜面衝突), 日本機械学会論文集 (C 編), 62 巻 598 号, p. 265-272, (1996)
- (7) 北山哲士, 酒井忍, 荒川雅生, 山崎光悦: RBF ネットワークによる逐次近似最適化 (離散変数問題への適用), 日本機械学会論文集 (C 編), 78 巻 787 号, p. 177-190, (2012)
- (8) 上本龍二, 鶴野浩行, 永野章, 大西哲也, 亀田大輔, 福田直樹, 柳澤善行, 吉田敦, 久保敏幸, 神原正: RI ビームの連続摩耗測定法への適用, 自動車技術会学術講演会前刷集, No. 30-11, p. 9-11, (2011)

■著 者■



志波 義勝



岸和田 聡



吉井 健太



佐藤 範行



石井 啓資



橋本 尚



藤井 健史



鷹木 清介



大重 公志

材料温度特性を反映したタイヤ摩耗予測の精度向上

Enhancement of Accuracy of Tire Wear Prediction Method by Reflection of Material Temperature Characteristics

安 藤 誉*

Takashi ANDO

納 富 信 也*

Shinya NOHTOMI

津々見 修 司*

Shuji TSUTSUMI

溝 根 哲 也*

Tetsuya MIZONE

要 旨

タイヤ摩耗予測精度向上のため、予測モデルのトレッドゴム粘弾性特性において、リブごとに異なる温度特性を設定することで予測誤差を低減した。また、リブごとに摩耗量を算出することで、前輪駆動車の前輪に生じるセンタ摩耗や、後輪に生じるアウトサイドショルダ摩耗など、従来は予測が容易でなかった偏摩耗予測の確からしさも向上した。この予測モデルにより、車両開発の初期段階における、転がり抵抗、ウェットブレーキ性能に加えて偏摩耗を含む摩耗量の予測が可能となるため、車両開発の効率化に寄与できる。また、実車での摩耗評価テストも削減できることから、テスト工数削減に貢献する。

ABSTRACT

In order to increase the prediction accuracy of tire wear, prediction error has been decreased by setting differing temperature characteristics for each rib in the tread rubber viscosity, characteristic of a prediction model. In addition, though previously challenging, calculation of the wear degree for each rib has increased the accuracy of uneven wear prediction, such as center wear in the front tires of front wheel drive vehicles and wear on the outer shoulders of rear tires. This prediction model will make it possible to predict the degree of wear, including uneven wear, from the initial stage of vehicle development in addition to studying rolling resistance and wet braking performances, which will contribute to increased vehicle development efficiency. By reducing the necessity of conducting wear evaluation tests using real vehicles, the model will also contribute to reducing the person-hours involved in testing.

1. まえがき

地球環境問題に対応して、燃費性能向上のためのタイヤの転がり抵抗低減が進んでいる。一般に、タイヤの転がり抵抗低減のため、ヒステリシスロスの小さいトレッドゴムを用いると、ウェットブレーキ性能も低下する。そこで、従来のカーボンブラックに加えてシリカを配合してヒステリシスロスを低減すると、ウェットブレーキ性能は向上するが、タイヤ摩耗寿命が短くなってしまう。これら相反するタイヤ性能は、トレッドパターン、内部構造、コンパウンド配合など他の設計要素と組み合わせて両立をはかる必要がある。また、これらの性能は車両性能設計への影響が大きく、開発初期の段階で精度よく予測できれば、車両開発の効率化に大きく寄与する。

この中で、摩耗寿命は、荷重、スリップ速度、ゴム物性値

や温度特性、路面や走行条件など多くの因子と設計要素の影響を受けるため予測が容易でない。このため、検証に長期間の実走試験を必要とし開発への影響が大きかった。

従来提案されてきた摩耗評価手法は、大きく実走摩耗評価と台上摩耗評価に分けられる。

実走摩耗評価では、基準タイヤと評価対象タイヤをそれぞれ実車に装着し走行するため、実際の使用環境に近い条件での評価ができるが、路面状況、運転操作、外気温や日照条件等の試験環境を一定に保つことが容易ではない。このため、主に相対的な摩耗評価として、車両開発後期に使われ、開発初期段階に適用されることは少ない。

一方の台上摩耗評価では、タイヤ単体摩耗試験機での摩耗形態と、摩耗エネルギー試験機を用いた転動タイヤ表面の摩耗エネルギー分布を組合せて評価する^{(1),(2)}。この評価手法では、試験環境を一定に保つことができ、実車を用

*四輪 R&D センター

いないため車両開発初期の検討に活用しやすい。反面、試験機の路面が実路と異なる。また、ドラム式試験機の場合は、タイヤの接地長が短くなることで接地形態に差異を生じ、ユーザ使用環境での摩耗を再現できない場合がある。また、小林らは Schallamach 理論に基づいた摩擦エネルギーとゴムの耐摩耗性を示す指標値を組合せた予測手法を提案し⁽³⁾、ショルダ部をのぞきユーザ使用環境データと良好対応することを示した。

筆者らは、前報⁽⁴⁾にて高分子材料の摩耗体積式⁽⁵⁾を基に、トレッドゴムの物性値と接地面の情報を用いる予測モデルを提案し、前輪駆動車 (FF 車) の前輪の摩耗寿命を精度よく予測した。しかしながら、前輪の偏摩耗予測と後輪の摩耗寿命予測精度に課題があることを示した。

本報では、タイヤトレッドゴムの寿命は路面温度より低い温度でのゴム物性と高い相関をもつという平山ら⁽⁶⁾の報告を基に、予測モデルのトレッドゴムの粘弾性特性にリブごとに異なる温度特性を反映できるよう修正し、後輪も含めた摩耗寿命予測と、偏摩耗予測が車両開発に充分適用できる精度をもつことを確認した。

2. タイヤ摩耗寿命予測式

前報にて、筆者らは式 (1) に示される高分子材料の摩耗体積式を応用したタイヤ摩耗寿命予測モデルを提案した。

$$V = k \frac{\mu W L}{H \sigma \varepsilon} \quad (1)$$

V : Wear volume [mm³]
 k : Constant [-]
 μ : Coefficient of friction [-]
 W : Load [N]
 L : Slip distance [mm]
 H : Rubber hardness [°]
 σ : Breaking strength [MPa]
 ε : Breaking strain [%]

前報のモデルでは、Fig. 1 に示す溝 i における摩耗寿命 L_{ti} を、リブごとの摩耗速度 V'_j とトレッド主溝深さ D_i およびウェアインジケータ高さ 1.6 mm より、式 (2) に表した。

$$L_{ti} = \frac{2 \times (D_i - 1.6)}{V'_j + V'_{j+1}} \quad (2)$$

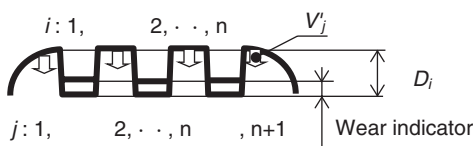


Fig. 1 Tread rib wear speed and groove depth

L_{ti} : Wear life [km]

i : Groove position No.

j : Rib position No.

D_i : Groove depth at i [mm]

V'_j : Wear speed at j [mm/km]

式 (1) の摩擦係数 μ は、温度特性を持つ貯蔵弾性率 E' と $\tan \delta$ の関数で表せる。本報では、温度特性を考慮するため、河上ら⁽⁷⁾の報告に基づき μ を式 (3) のように拡張した。

$$\mu(T) = f[\tan \delta(T), E'(T)] \quad (3)$$

$\mu(T)$: Coefficient of friction at T (°C) [-]

T : Temperature [°C]

$\tan \delta(T)$: Loss factor at T (°C) [-]

$E'(T)$: Storage modulus at T (°C) [-]

ここで、実車装着タイヤの接地面応力分布や表面温度分布は、タイヤの変形および路面との摩擦による熱に影響される。このため、リブごとの摩耗は、接地面形状やトー、キャンバ等のアライメントに依存し、異なると考えられる。そこで、式 (1) の μ を式 (3) の摩擦係数 $\mu(T)$ に置きかえ、リブごとの摩耗体積式 (4) を定義した。

$$V_j = k_j \frac{\mu_j(T) W_j L_j}{H \sigma \varepsilon} \quad (4)$$

V_j : Wear volume at j [mm³]

k_j : Constant at j [-]

$\mu_j(T)$: Coefficient of friction at j [-]

W_j : Contact patch pressure at j [MPa]

L_j : Slip distance at j [mm]

これにより、リブごとの摩耗速度 V'_j は式 (5) に表せる。

$$V'_j = k_j f(W_{aj}, W_{bj}, S_j, E'_j(T), \tan \delta(T), H, \sigma, \varepsilon) \quad (5)$$

W_{aj} : Average pressure [kg/mm²]

W_{bj} : Maximum pressure [kg/mm²]

S_j : Slip distance (calculation) [mm]

なお、式 (4) の H , σ , ε は材料項であるため本報ではリブの位置にかかわらず一定とした。また、荷重項 W , すべり量項 L はアライメントの影響を受けるためリブ位置に応じた値 W_j , L_j を用いた。

3. タイヤ接地面

接地面における、リブごとの摩耗メカニズムの違いや、前後輪で異なる摩耗事象を予測モデルに反映するために、式 (4) のリブごとの W_j , L_j , $\mu_j(T)$ 項を決定した。

FF 車に装着されたタイヤは、前輪で加減速によるセン

タ摩耗, 後輪でイニシャルアライメントによるショルダ摩耗傾向を示すことが多い。これは接地面の応力分布および熱収支条件の差が摩耗寿命に影響を与えると仮定した。この仮定を確かめるため、前後輪の接地面圧を測定した。また、前輪に生じるセンタ摩耗の原因となる加減速時の接地面せん断力の分布を計測した。後輪に生じるショルダ摩耗に対しては、トー角、キャンバ角を与えた転動中のタイヤ表面温度を測定し、接地面における摩耗エネルギーの分布について検討した。

3.1. 各リブの接地面圧

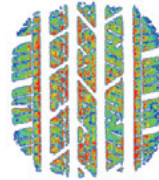
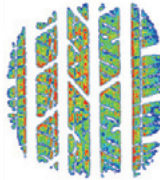
前後輪それぞれの荷重、トー角およびキャンバ角が、リブごとの荷重に与える影響を確認するため、接地面圧を測定し荷重項 W を求めた。測定結果の一例 (215/50R16 100S) を Fig. 2 に示す。リブごとの平均接地面圧 W_a と最大接地面圧 W_b の測定値、ならびにセンタリブの接地面圧を 1 とした場合のリブごとの W_a , W_b 値の割合を併記する。

Fig. 2 より、前輪と後輪とも W_a はセンタ部が高く、 W_b はショルダ部の方が高い値を示した。また、前輪と後輪の荷重、アライメント等の差により、摩耗に対する W の影響はリブごとに異なると考えた。これより、リブごとの W_a と W_b を設定することで、摩耗予測精度が向上すると考えた。

3.2. 各リブすべり量の計算値

すべり量項 L は、直接の測定が容易ではないため、前報同様、幾何学手法を用いてリブごとに算出した。結果を Table 1 に示す。

Table 1 の結果から、前輪では接地面の中央に近くなるほどすべり量が大きく、後輪ではアウト側に近くなるほどすべり量が大きくなる傾向を示し、前輪におけるセンタ摩耗、後輪におけるショルダ摩耗と傾向が一致した。

	Front					Rear				
Foot print										
Rib No.	#1 (out)	#2	#3*	#4	#5 (in)	#1 (out)	#2	#3*	#4	#5 (in)
Load [kN]	4.82					3.55				
Toe [°]	0					0.09 (in)				
Camber [°]	0					1.00 (negative)				
W_a [MPa] (%)	0.36 (94)	0.36 (96)	0.38 (100)	0.37 (98)	0.36 (94)	0.37 (97)	0.36 (95)	0.38 (100)	0.37 (97)	0.36 (95)
W_b [MPa] (%)	1.44 (160)	1.10 (122)	0.90 (100)	0.93 (103)	1.44 (160)	1.43 (130)	0.90 (82)	1.10 (100)	1.19 (108)	1.43 (130)

* Reference for maximum and average pressure

Fig. 2 Maximum and average pressure of contact patch

Table 1 Calculation results for slip distance

	Front					Rear				
Rib No.	#1 (out)	#2	#3	#4	#5 (in)	#1 (out)	#2	#3	#4	#5 (in)
Slip distance [mm]	4.43	5.26	5.49	5.22	4.61	10.14	7.21	4.13	0.74	3.03

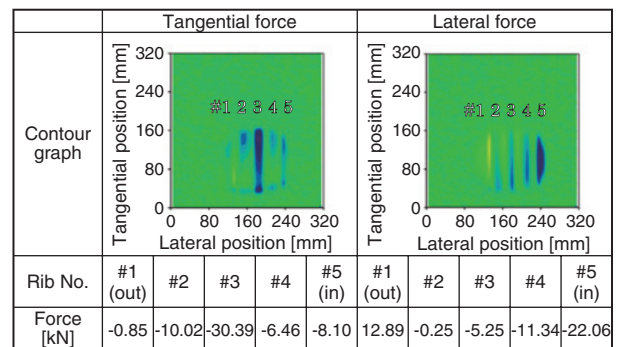
3.3. タイヤ摩耗要因分析

実車装着状態で転動した際の前輪の接地面せん断力を、株式会社エー・アンド・デイ製の Force Matrix Sensor を用いて測定した。一例として Fig. 3 に加速時、Fig. 4 に減速時の結果を示す。

Fig. 3, 4 の測定結果から、加速時はセンタリブに大きなせん断力が生じ、減速時は各リブごとに均等にせん断力が生じることが確認できた。

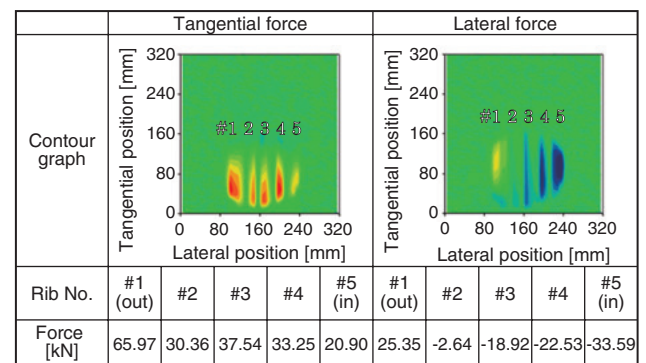
この結果は、Table 1 に示す滑り量計算結果と傾向が一致し、FF 車の前輪がセンタ摩耗する経験則にも合致した。

次に、後輪のトー角、キャンバ角が接地面温度に与える影響を確認するため、フラットベルト式タイヤ試験機を使用し、転動中のタイヤトレッド面温度を測定した。Fig. 5 にリブごとの温度測定結果、Fig. 6 にトレッド面断面の温度分布測定結果を示す。



Load: 4.3 [kN] Temperature: 25 [°C] V = 34.3 [km/h]

Fig. 3 Contact patch shear force during vehicle acceleration



Load: 4.3 [kN] Temperature: 25 [°C] V = 25.5 [km/h]

Fig. 4 Contact patch shear force during vehicle deceleration

Fig. 5の結果より、アウト側リブの温度はイン側リブに対し1.9℃低いことがわかった。

Fig. 6の結果より、トレッド面断面全体でもアウト側が低い温度を示した。

タイヤ表面におけるエネルギー収支は、すべりに伴うゴム変形による力学的エネルギーと、式(6)に示される内部ヒステリシスで生じる熱エネルギー⁽⁸⁾が散逸量と平衡することで成り立つ。このため、すべり量が大きい部位では、内部発熱は抑えられ、表面温度も低くなると考えられる。

また、タイヤのトレッドゴムは低温ほど摩耗が促進される。これにより、すべり量が大きく温度が低いアウト側の摩耗が早まる。この結果からも、提案する手法を用い各リブの $\mu(T)$ 項に温度依存する係数を用いることで、より精度の高い摩耗予測がおこなえることが確認できた。

$$W_l = \int_0^{2\pi} \sigma \dot{\epsilon} dt = \pi \epsilon_0^2 E'' = \pi \epsilon_0^2 E' \tan \delta \quad (6)$$

W_l : Strain energy [J]

σ : Internal stress [MPa]

ϵ : Strain [mm]

ϵ_0 : Maximum strain [mm]

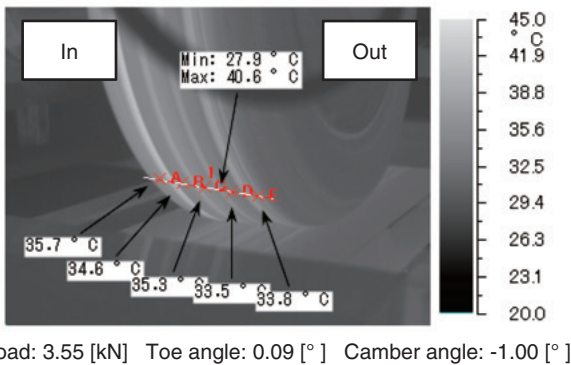


Fig. 5 Measurement of tire surface temperature on flat track

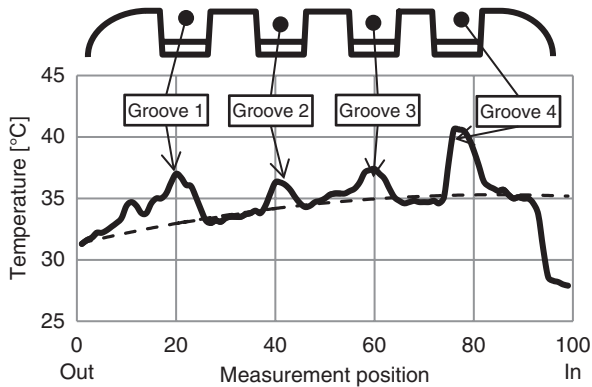


Fig. 6 Tire surface temperature distribution on flat track

3.4. 摩耗予測モデル係数算出

式(4)の $\mu_j(T)$ 項は、前報では $T = 25$ [°C]における値を用いたが、本報ではリブごとに実験的に求めた最適値を用いる。これより、式(2)の摩耗速度 V'_j を以下の式(7)より算出した。

$$\log V'_j = C_{waj} \times W_{aj} + C_{wbj} \times W_{bj} + C_{sj} \times S_j + C_{s2j} \times S_j^2 + C_{c(E')j} \times E'_j(T) + C_{c(\tan\delta)j} \times \tan\delta(T) + C_{c(H)j} \times H + C_{c(\sigma)j} \times \sigma + C_{c(\epsilon)j} \times \epsilon + k_j \quad (7)$$

C_{waj} : Coefficient of average pressure

C_{wbj} : Coefficient of maximum pressure

C_{sj} : Coefficient of slip distance

C_{s2j} : Coefficient of slip distance (square member)

$C_{c(E')j}, C_{c(\tan\delta)j}, C_{c(H)j}, C_{c(\sigma)j}, C_{c(\epsilon)j}$: Coefficient of rubber

最適値算出のため、前後輪にてリブごとの $\tan\delta$, E' の特性に基づき-60℃から40℃の範囲で変化させ、重回帰分析をおこなった。分析より得たモデルの予測結果と実走摩耗試験結果の相関係数が最大となる $\tan\delta$, E' の温度を求めた。Fig. 7, Fig. 8に計算に用いた $\tan\delta$, E' の温度と相関係数のグラフ、Table 2に最も大きい相関係数とその際の温度を示す。

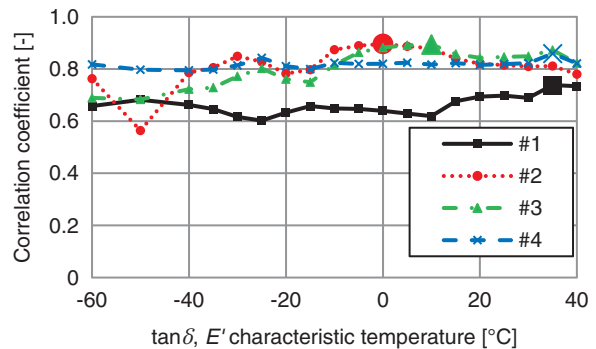


Fig. 7 Relationship between $\tan\delta$, E' and correlation coefficient for front tire

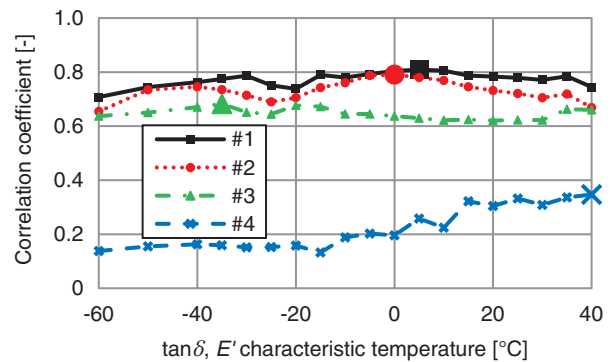


Fig. 8 Relationship between $\tan\delta$, E' and correlation coefficient for rear tire

Table 2 Maximum correlation coefficient and temperature

Groove position			#1 (out)	#2	#3	#4 (in)
Correlation coefficient [-] at temperature [°C]	Front	Current	0.766 (at 25)	0.802 (at 25)	0.800 (at 25)	0.844 (at 25)
		Proposed	0.738 (at 35)	0.896 (at 0)	0.893 (at 10)	0.859 (at 35)
	Rear	Current	0.793 (at 25)	0.311 (at 25)	0.403 (at 25)	0.145 (at 25)
		Proposed	0.809 (at 5)	0.791 (at 0)	0.683 (at -35)	0.347 (at 40)

Table 3 Results for multiple regression model coefficients

Groove position		Front				Rear			
		i = 1 (out)	2	3	4 (in)	i = 1 (out)	2	3	4 (in)
Load factor (Ave.)	Wa	0.20	-0.05	-0.05	-0.25	-0.38	-0.64	-0.63	-0.21
Load factor (Max)	Wb	0.06	-0.02	-0.02	0.02	0.04	-0.05	-0.06	-0.04
Slip distance	S	8.51	6.12	6.12	-2.23	1.78	1.33	1.17	-2.03
Slip distance (Square)	S ²	-7.22	-4.67	-4.67	12.59	-0.80	-0.97	-0.83	1.57
Material property	Cc (tan δ)	0.00	-0.35	-0.35	0.01	-0.30	-0.13	0.10	0.22
	Cc (H)	0.62	-0.25	-0.25	-0.94	-0.63	-0.15	-0.14	-0.15
	Cc (ε)	0.33	-0.20	-0.20	-0.52	-0.15	-0.04	-0.06	0.07
	Cc (σ)	-0.21	1.02	1.02	0.61	0.50	0.39	0.48	-0.16
	Cc (E')	-2.02	0.66	0.66	2.73	0.63	0.05	0.00	-0.79
Constant	k	-3.93	1.92	1.92	6.22	5.43	4.50	3.47	4.04

Table 2 より得られた、式 (8) に適用される係数を Table 3 に示す。これより、リブごとの摩耗速度式が設定できた。

4. 精度検証

タイヤ摩耗予測モデルの精度を検証するため、カテゴリ B から D の乗用車ならびに SUV を使用し 15 種類のタイヤで実走摩耗試験をおこない、前報のモデルおよび本報の提案モデルによる予測結果と比較した。

4.1. 摩耗寿命予測結果

Table 4, 5 に、前輪と後輪の実走試験による摩耗寿命と各モデルで予測した摩耗寿命を示す。

この結果を用い、実走試験による摩耗寿命に対しての各モデルの予測精度を確認した。Fig. 9 に前輪の結果、Fig. 10 に後輪の結果を示す。

Table 4 Front tire wear life

Test No.	Wear life [1000 km]														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Measurement	34.1	30.3	29.2	32.3	33.2	36.8	34.7	31.1	25.6	28.2	28.5	23.0	21.1	20.8	20.8
Current	32.4	35.1	29.8	37.3	39.7	37.1	32.9	32.9	33.3	32.7	30.6	29.9	24.9	24.6	27.1
Proposed	31.4	35.1	29.9	33.3	36.7	36.5	34.1	34.0	32.0	30.7	30.1	26.7	25.9	25.1	28.6

Table 5 Rear tire wear life

Test No.	Wear life [1000 km]														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Measurement	58.9	77.6	54.9	85.2	47.3	75.2	52.0	45.2	54.5	47.7	40.1	40.3	57.6	45.9	35.7
Current	44.1	67.2	49.3	73.8	53.1	68.5	49.3	53.1	68.7	54.1	46.1	51.1	49.0	39.8	46.6
Proposed	46.3	72.3	46.2	67.8	52.8	65.3	48.4	46.8	67.4	45.7	45.7	47.8	53.3	40.6	45.4

Fig. 9 に示すように、前輪の実走摩耗試験結果に対する予測モデル推定値の平均誤差は、前報のモデルでは 15.7% に対し、提案モデルでは 12.5% と 3.2 ポイント誤差が低減した。後輪では、Fig. 10 に示すように 16.2% に対し 13.8% と 2.4 ポイント誤差が低減した。

また、実走試験による摩耗寿命と各モデルによる予測寿命の相関係数を確認した。Fig. 11 に前輪の結果、Fig. 12 に後輪の結果を示す。

前輪の相関係数は 0.821 から 0.866、後輪は 0.760 から 0.809 と向上した。

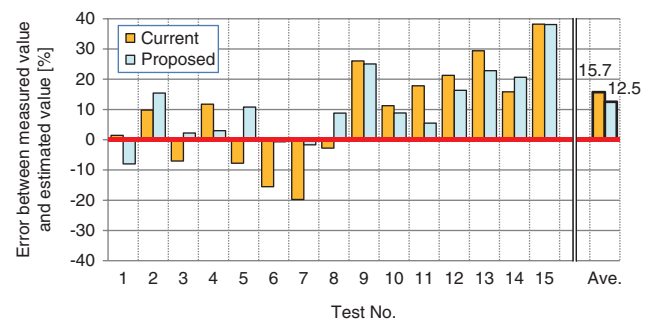


Fig. 9 Accuracy of prediction of front tire wear life for current and proposed method

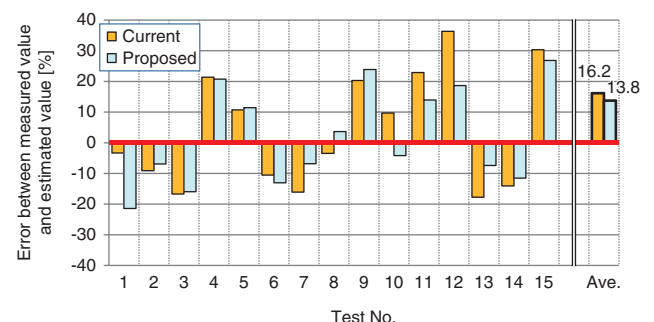


Fig. 10 Accuracy of prediction of rear tire wear life for current and proposed method

これより、温度特性を考慮することで予測精度が向上することを確認した。この予測モデルを新車タイヤ開発に適用し、前報のモデルでは実車検証の要否が判別できなかったタイヤの検証テストを削減できると考える。

4.2. 偏摩耗予測結果

μ に温度特性を考慮することで、Table 2 に示したように、前輪と後輪の溝 #2 から #4 の相関係数が向上した。

これより、偏摩耗予測の確からしさが向上したと考え、前輪と後輪の溝ごとに、実走試験結果と各モデルの寿命予測値を比較した。結果の一例 (Test No.10) を Fig. 13 に示す。

このモデルを用いることで、前報のモデルではショルダ摩耗と算出され正しく予測できなかった前輪のセンタ摩耗

傾向が予測できるようになった。後輪の摩耗についても、ショルダ摩耗の傾向は正しく予測され、溝ごとの摩耗予測値が実走試験の結果に近づいていることから、提案モデルによる偏摩耗予測の確からしさが向上した。

5. まとめ

タイヤ摩耗寿命予測モデルに対する精度向上手法を提案し、その有効性の検証をおこなった。

寿命予測モデルの摩擦係数 μ に前輪と後輪のリブごとに異なる温度特性を考慮することで、摩耗予測精度および、相関係数が向上することが確認できた。また、偏摩耗予測精度の確からしさも向上した。これより、提案モデルは、偏摩耗形態の差も含めた摩耗予測が可能であることを示した。

本モデルを実際の新車タイヤ開発に適用することで、車両開発初期の性能が検討でき、開発効率の向上に寄与する。また、実車でおこなう必要のある実走摩耗評価を削減し、開発期間短縮に寄与できる。

謝辞

この場をお借りして、接地面せん断力の計測にご協力頂いた株式会社エー・アンド・デイ様にお礼申し上げます。

参考文献

- (1) 酒井秀男: タイヤのトレッド摩耗に関する研究 スリップ速度が大きい場合の摩擦と摩耗, 日本ゴム協会誌, Vol. 68, No. 4, p. 251-257, (1995)
- (2) 山崎俊一, 鈴木忠, 藤川達夫: 室内摩耗試験におけるドラム曲率がタイヤの摩耗に及ぼす影響の理論的考察, 日本ゴム協会誌, Vol. 70, No. 7, p. 392-398, (1997)
- (3) 小林弘, 原口哲之理, 加藤康之: タイヤ摩耗寿命予測法, TOYOTA Technical Review, Vol. 50, No. 1, p. 50-55, (2000)
- (4) 津々見修司, 安藤豊, 納富信也, 溝根哲也: アブレーション摩耗の摩耗体積式を応用したタイヤ摩耗寿命予測手法の研究, 自動車技術会学術講演会講演予稿集, No. 1-176, p. 1979-1984, (2016)
- (5) Ratner, S. B., Farberova, I. J., Radybeich, O. V., Luré, E. G.: Abrasion of Rubber, James, D. I. Ed., MacLaren, London, p. 145, (1967)
- (6) 平山道夫, 西野孝: タイヤ用ゴムの実車摩耗の物性値を用いたスケーリング, 日本ゴム協会誌, Vol. 86, No. 1, p. 3-7, (2013)
- (7) 河上伸二, 平川弘, 三澤眞: ゴムのウェット摩擦係数

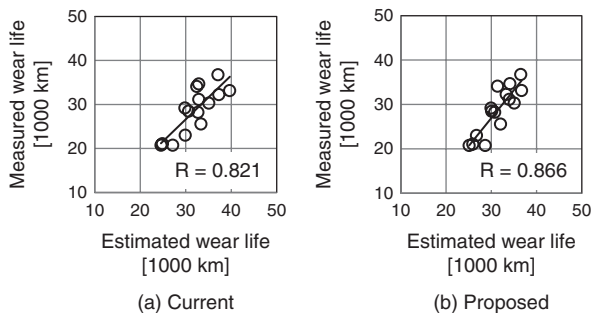


Fig. 11 Estimation and measurement of front tire wear life

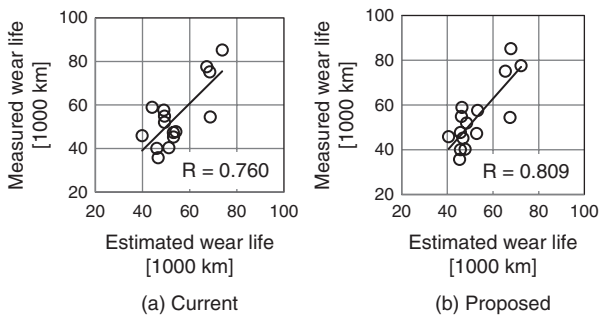


Fig. 12 Estimation and measurement of rear tire wear life

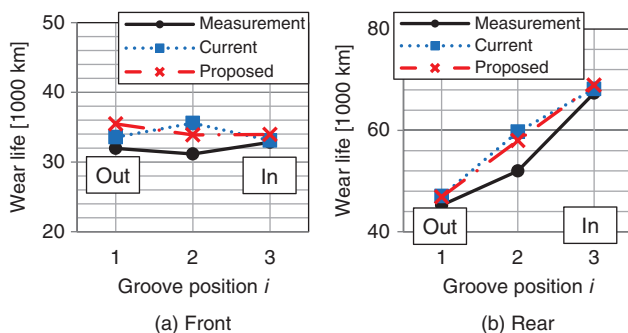


Fig. 13 Estimation and measurement of uneven wear

と粘弾性値の関係, 日本ゴム協会誌, Vol. 61, No. 10,
p. 722-727, (1988)

(8) 株式会社ブリヂストン編:自動車用タイヤの基礎と実
際, 東京電機大学出版局, p. 238, (2008)

■ 著 者 ■



安 藤 誉



津々見修司



納 富 信 也



溝 根 哲 也

短時間焼付に向けたウレタンクリアの硬化挙動の研究

Study of Curing Behavior of Urethane Clear for Short Baking

橋 本 孝 則*

Takanori HASHIMOTO

要 旨

ABSTRACT

塗装工程における CO₂ 排出削減のための焼付時間短縮に向けて、クリア塗膜の研ぎ補修に必要な硬化挙動について検討した。また、クリア塗膜からベース塗膜へのイソシアネートの移行を可能とする硬化挙動についても検討した。

その結果、焼付終了時のクリア塗膜の貯蔵弾性率を高めることで研ぎ補修性が改善することがわかった。また、貯蔵弾性率が上昇するまでの時間とベース塗膜へのイソシアネート移行量との間に相関性があることがわかった。これらの結果から短時間焼付時に必要な硬化挙動と樹脂設計の方向性を見出した。

Curing behavior required for polishing repair of the clearcoat has been studied with the aim of shortening the baking time for reducing CO₂ emissions in the coating process. The authors also studied curing behavior that enables the transition of Isocyanate to the basecoat from the clearcoat.

As a result, it was found that polishing reparability is enhanced by increasing the storage modulus of the clearcoat at the end of baking. Furthermore, it was found that there is a correlation between the time until the storage modulus rises and transition amount of isocyanate to the basecoat. The curing behavior required for a shorter baking time and directivity in resin design were determined from these results.

1. ま え が き

Honda では自動車塗装における環境負荷物質使用量の削減を目的として、揮発性有機化合物削減や脱塩素化などの開発をおこなってきた⁽¹⁾。近年では、気候変動の原因とされている温室効果ガスの排出削減が強く求められる中、自動車生産工程で排出される CO₂ の削減が重要な課題となっている。

自動車メーカー各社のボデー塗装工程においては、CO₂ 削減に向け工程を短縮した3コート2ベークの塗装システムが開発されてきた⁽²⁾⁻⁽¹⁰⁾。一方、バンパ塗装においては、ボデーに先駆けて3コート1ベークの塗装システムが導入されているが、さらなる CO₂ 削減が求められている。

バンパ塗装焼付工程において発生する CO₂ の削減のためには焼付時間の短縮化が有効である。焼付工程では、クリア塗膜の架橋形成や塗膜間の硬化成分の移行の制御に

より機械的強度や化学的耐久性などの塗膜性能を付与することが重要である。従来の焼付後塗膜の架橋形成を解析する手法では、焼付工程での硬化挙動を定性的に把握することにとどまり、塗膜性能との定量的解析はできていなかった。そこで焼付工程における硬化挙動を定量的に解析し塗膜性能との関係性を明確化することで、最適な硬化挙動を設定でき、さらなる焼付短縮化が図れると考えた。

本稿では、焼付時間の短縮化を図る上で必要なクリア塗料の焼付工程における硬化挙動と塗膜性能との関係について解析した内容について述べる。

2. 短時間焼付の課題

バンパを含む樹脂部品に使用されるクリア塗料は、水酸基含有アクリルと硬化成分のヘキサメチレンジイソシアネートの3量体(イソシアヌレートトリマー体)からなる

*四輪 R&D センター

2液型ウレタン塗料である。この塗料は、塗布工程においては取り扱いが容易な低粘度の液体である一方、焼付工程で架橋反応により三次元網目構造を形成し、強靱な被膜となる熱硬化性樹脂材料である。焼付時間の短縮化のためには、アクリル樹脂とイソシアネートの架橋反応を促進させた上で、焼付後の研ぎ補修性やユーザ使用環境における塗装密着性を満足させることが重要である。

また、パンパの塗膜構成としては、Fig. 1に示すようにベース塗膜の上にクリア塗料が塗り重ねられる複層膜となっており、クリア塗料の塗着後にクリア塗膜からベース塗膜へイソシアネートが移行することで、焼付時にベース塗膜において架橋反応が起こり、塗膜強度等が向上し塗膜密着性が発現するというメカニズムとなっている。

この塗膜に、80℃20分の焼付をおこなうことで研ぎ補修性や塗膜密着性などの塗膜性能を満足する塗膜が得られる。

焼付時間短縮化の方法としては、ジブチルスズジラウレート (DBTDL) などの硬化促進触媒をクリア塗料に添加し反応を促進することが一般的であり⁽¹¹⁾、これによりクリア塗膜の架橋反応を促進させることで、焼付時の研ぎ補修性が良化することがわかっている。一方で、クリア塗膜の架橋反応促進により、ベース塗膜へのイソシアネートの移行量が減少し、密着性が低下する懸案が生じる。そのため、焼付工程での硬化挙動と塗膜性能との関係性を明確にし、最適な硬化挙動を設定することが課題となる。

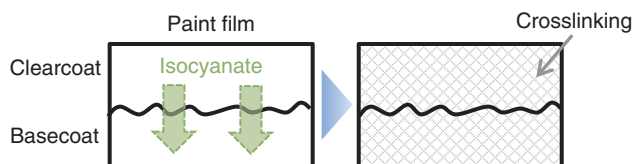


Fig. 1 Film structure of automotive bumper paint

3. 硬化挙動把握の考え方

焼付工程における架橋反応は、典型的な2分子反応ではなく、Fig. 2に示すように反応すべき官能基があらかじめ対をなしており、これらが確率過程として接続するものと推定される。特定の官能基同士が対をなすのは網目構造が運動を制限するためであると考えられている⁽¹²⁾。

Fig. 2のような特定の官能基同士 (AB) が反応し結合する反応において、反応後生成物 AB の生成速度は $k(AB)$ (k : 反応速度定数)で表される。 (AB) の消失が時間 t に比例し、 (AB) が全て反応した後の生成物を $AB(\infty)$ 、一次反応の開始時間を td とすると、式(1)のような一次反応速度式が導出される。

$$AB = AB(\infty)\{1 - \exp[-k(t - td)]\} \quad (1)$$

焼付工程での硬化挙動の把握のためには、硬化中の架橋密度変化の測定が必要である。架橋密度は硬化中の塗膜状態がほとんどの場合にゴム弾性領域にあるため、貯蔵弾性率として反映される⁽¹³⁾。そのため、硬化中の貯蔵弾性率変化の測定により、焼付工程での硬化挙動を把握できる。

焼付工程での貯蔵弾性率変化を追跡するため、Fig. 3に示すような振り子式粘弾性測定装置 (株式会社エー・アンド・デイ製 RPT-3000W) を使用した。この装置はナイフエッジを支点とした振子を塗膜と接触した状態で自由振動させ、その周期から塗膜の貯蔵粘弾性変化を算出する。素地と刃先面の間に Fig. 3のような状態でクリア塗膜が介在すると、その力学的性質の変化により振子の振動周期が変化する。振子の振動周期から、式(2)として相対貯蔵弾性 $E'r$ を求めることができる⁽¹⁴⁾。

$$E'r = (1/T^2 - 1/T_0^2)/(1/T_1^2 - 1/T_0^2) \quad (2)$$

T_0 : Swing cycle without coating film

T_1 : Swing cycle at reference point

T : Swing cycle with coating film

式(1)は $E'r$ の変化に当てはめて考えると、ゲル化反応が終結する時刻以降、式(3)に示す一次反応速度式に相当

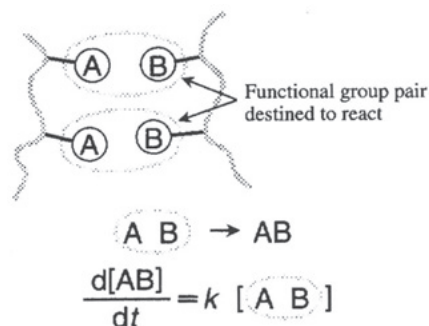


Fig. 2 Hypothetical 1st order reaction. Concentration of reaction product $[AB]$ increases in exponential function.

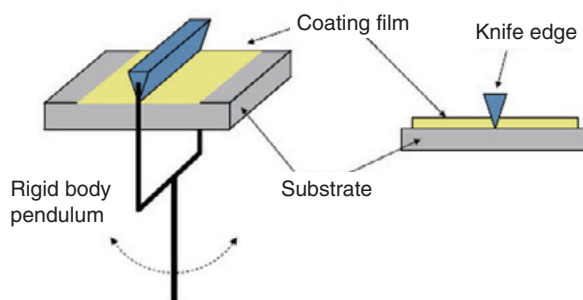


Fig. 3 Rheological measurement apparatus

する実験式に従うと考えられる。

$$E'r = E'r(\infty)\{1 - \exp[-k(t - td)]\} \quad (3)$$

t : time [min]
 $E'r(\infty), k, td$: constant

硬化過程において、 $E'r$ の変化が一次反応式に従う範囲では $E'r$ が架橋密度に比例することが確認されている⁽¹⁵⁾。

本検討ではバンパ塗膜においても、 $E'r$ を用いることで塗膜の硬化挙動を追跡できるかを確認するため、一次反応式との相関性の検証をおこなう。また、硬化挙動と塗膜性能の関係を明確化し、短時間焼付に向けた硬化挙動コンセプトを構築することを目指す。

4. 実験方法

4.1. 試料の作成方法

硬化挙動測定用の試料は、厚さ 0.5 mm のステンレス基材に焼付後の膜厚が 30 μm になるようにクリア塗料を塗布して作成した。焼付温度は、25℃ から 80℃ まで 15 分で昇温した後、80℃ または 90℃ 10 分、または 20 分で維持される昇温カーブに設定した。

研ぎ補修性および塗膜密着性確認用の試料は、ポリプロピレン素材にプライマ塗料、ブラック色のベース塗料を塗り重ねた上に、調合したクリア塗料を塗布した後、80℃ 10 分または 20 分の焼付けをおこない作成した。

イソシアネート移行量検証用の試料は、ポリプロピレン素材に、ブラック色のベース塗料、調合したクリア塗料を塗り重ね、80℃ 10 分または 20 分の焼付けをおこなった後、ポリプロピレン素材から塗膜を剥がして塗膜フィルムを単離した。

4.2. 研ぎ補修性の試験方法

研ぎ補修性は、4.1. 節で作成した試料を用いて焼付取り出し 10 分後におこなった。粗さ 2500 番の研ぎ紙を用いて 600 g の荷重を加え 15 秒間研ぎ、Fig. 4 に示すような白ボケなどの発生がなく研ぎ補修が可能かを確認した。

4.3. 塗膜密着性の試験方法

塗膜密着性は、テストピースを 40℃ の水に規定時間浸漬した後、取り出し後に基盤目試験法 (JIS K5600)⁽¹⁶⁾ をおこない、塗膜の膨れ、剥がれ等の発生がないかを確認した。

4.4. イソシアネート移行量の検証方法

塗膜フィルムのベース塗膜の裏面をフーリエ変換赤外分光光度計 (FT-IR, Thermo SCIENTIFIC 製 Nicolet iS10) で測定し、Fig. 5 に示すようなチャートからイソシアネート由来ヌレート環 (1690 cm^{-1}) とエステル (1730 cm^{-1}) のピーク強度比の測定をおこなった。ベース塗料へのイソシ

アネート配合量に対するヌレート環／エステルピーク強度比 (1690 cm^{-1} /1730 cm^{-1}) の検量線を用いて、式 (4) よりベースコート樹脂成分 1 cm^3 中に含まれるイソシアネート量を算出した。

$$\text{Transition amount of isocyanate (cm}^3\text{/Resin cm}^3\text{)} = \frac{\text{Isocyanate transferred (cm}^3\text{)}}{\text{Resin component added with transferred isocyanate (cm}^3\text{)}} \quad (4)$$

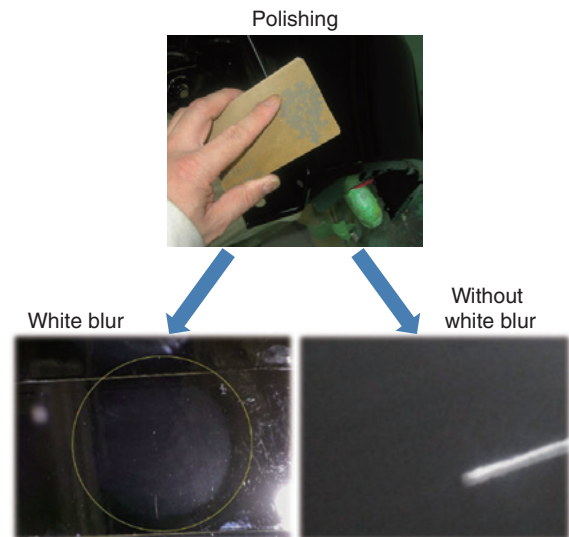


Fig. 4 Schematic diagram of repairability test

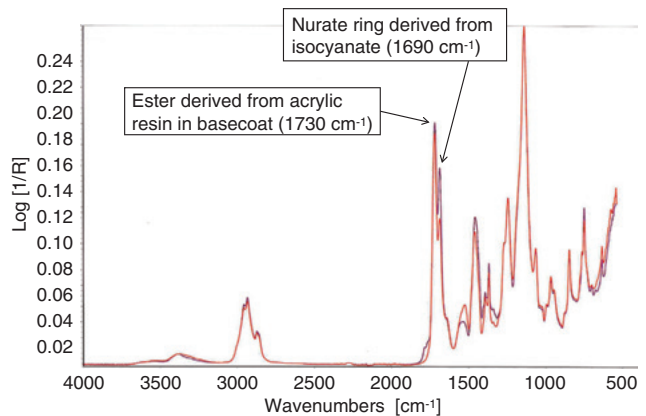


Fig. 5 FT-IR chart of basecoat film

5. 硬化挙動の実験と検証および考察

5.1. 硬化過程における $E'r$ の変化挙動と一次反応速度式の関係

バンパに使用される水酸基含有アクリル樹脂と、イソシアネートからなるウレタン結合を形成する 80℃ 焼付タイプのクリア塗料を用いて、焼付工程における $E'r$ の変化挙

動と一次反応速度式 (3) の関係について検証した結果を Fig. 6 に示す。

$E'r$ は焼付時間 25 分から 60 分で一次反応速度式 (3) に対して重相関係数 0.999 で近似する結果となった。このことから、今回使用した 80℃ 焼付タイプのクリアにおいても $E'r$ は焼付工程の貯蔵弾性率の変化を示しており、 $E'r$ を用いることで、硬化挙動の追跡が可能なが確認された。

5.2. 触媒増量が研ぎ補修性と塗膜密着性へ与える影響の結果

従来クリア塗料および触媒量を従来比 2 倍量に変動させたクリア塗料のモデル塗料で研ぎ補修性と塗膜密着性を検証した結果を Table 1 に示す。従来のクリア塗料で単純に焼付時間を短縮した場合、クリア塗膜の架橋反応が十分に進行しないため、研ぎ補修性および塗膜密着性共に不良となる。これに対して、クリア塗料への触媒添加量を過度に増やすと、架橋反応は現行同等に進行し研ぎ補修性は改善するが、密着性は不良となることがわかった。

この時のイソシアネート移行量の結果を Fig. 7 に示す。触媒量を従来比 2 倍にすることで、ベース塗膜裏面へのイソシアネートの移行量が減少していることが確認できた。

クリア塗料の触媒量の増加によりクリア塗膜の架橋反応が促進され、予想した通り研ぎ補修性が改善した一方で、クリア塗膜中での架橋反応促進により、ベース塗膜へイソシアネートの移行が抑制され塗膜はがれに至ったと考えられる。

これらのことから、研ぎ補修性を満足するために必要なクリア塗膜の焼付終了時の硬化挙動を明らかにすると共に、ベース塗膜へのイソシアネート移行に求められる焼付工程の硬化挙動を明らかにすることが重要と考えた。

5.3. 研ぎ補修性と焼付終了時の $E'r$ の検証結果

従来クリア塗料および触媒量を従来比 2 倍量に増やした

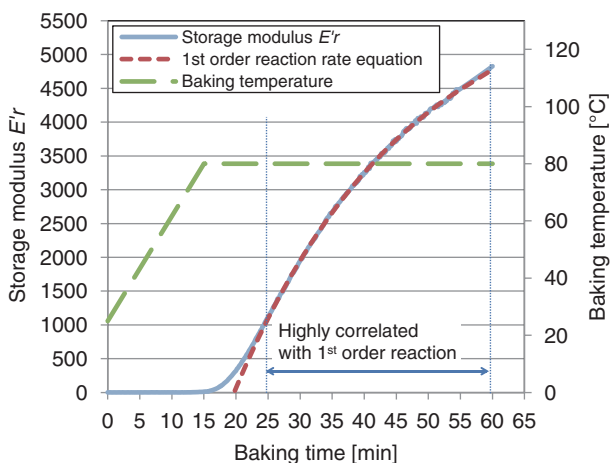


Fig. 6 Storage modulus behavior and 1st order reaction rate equation in baking process

Table 1 Result of spot repair and adhesion property

	Baking condition	Polish	Adhesion	Test number
Current clearcoat	Standard 80°C 20 min	Good	Good	(1)
	Shortened 80°C 10 min	Poor	Poor	—
Current clearcoat with double catalyst		Good	Poor	(2)

クリア塗料を用いて、研ぎ補修性と焼付経過時の $E'r$ との関係を検証した結果を Fig. 8 に示す。

焼付終了時の $E'r$ は、一定焼付条件で焼付を終了した直後の値とした。

いずれの塗料においても、 $E'r$ 2500 以上で研ぎ補修性が満足することがわかった。焼付時間の延長に伴って、水酸

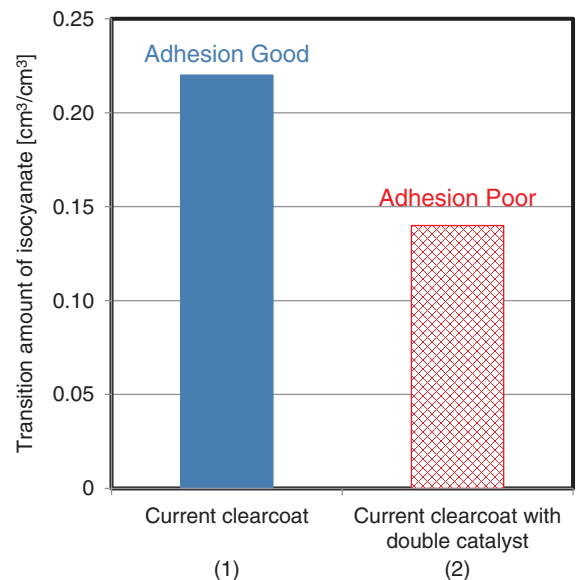


Fig. 7 Transition amount of isocyanate at increasing amount of catalyst

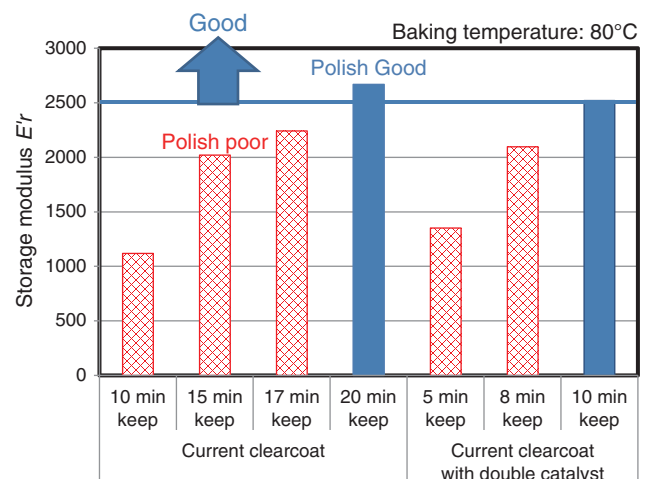


Fig. 8 Relationship between sharpness and storage modulus

基含有アクリル樹脂とイソシアネートの各官能基が十分な架橋を形成し塗膜の貯蔵弾性率が向上して研ぎ補修性の良好なクリア塗膜が形成されたと考えられる。塗料樹脂特性としては一般的に、分子量、ガラス転移温度や官能基量が高めることにより、焼付終了時の見かけの架橋密度を高められると考えられる。

5.4. イソシアネート移行量と $E'r$ 上昇開始時間の検証結果

硬化触媒量を 0.5 倍から 2 倍に変化させたクリア塗料のモデル塗料を作成し、ベース塗膜へのイソシアネート移行量と $E'r$ 上昇開始時間および塗装密着性との関係を検証した結果を Fig. 9 に示す。 $E'r$ 上昇開始時間は、測定ノイズの影響を排除し上昇開始する時間を明確化するため焼付開始から $E'r$ が 5 に達するまでの時間とした。

$E'r$ が上昇するまでの時間を遅らせることで、ベース塗料へのイソシアネートの移行量が増加し、密着性が改善することがわかった。

また、90℃ 焼付では 80℃ 焼付に比べ、 $E'r$ が上昇するまでの時間が早まると同時に、イソシアネート移行量は増加することがわかった。焼付温度が高いほど溶剤揮発が促進され $E'r$ が上昇するまでの時間が早まったのとともに、塗膜温度の上昇による塗膜溶融粘度の低下がベース層へのイソシアネートの移行を促進したものと考えられる。焼付温度を 90℃ に上昇させることは本来の目的に反して排出 CO_2 の増大につながるため、対策としては選択できないが、異なる温度でも同様の傾向があることが明らかになった。塗料樹脂特性としては一般的に、分子量、ガラス転移温度や官能基量を下げることにより、焼付初期の硬化の立ち上がりを遅延できると考えられる。

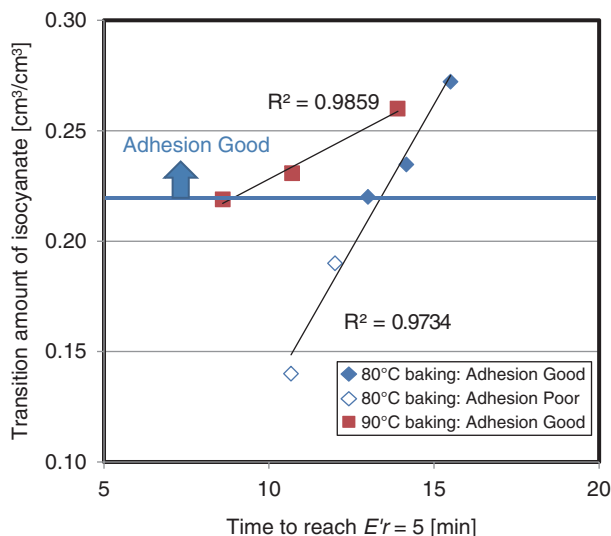


Fig. 9 Relationship between time to reach $E'r = 5$ and transition amount of isocyanate

5.5. 焼付工程短縮に向けた考察

以上の結果から、焼付工程の短縮のコンセプトを Fig. 10 に示す。研ぎ補修性を満足するためには、焼付による架橋反応により貯蔵弾性率の向上を図り焼付終了時の $E'r$ を高めることが必要であると考えた。一方、塗膜密着性を満足するためには、必要なイソシアネート移行を維持するため、 $E'r$ が上昇を開始するまでの時間を遅延する必要があると考えた。塗料樹脂特性としては、分子量、ガラス転移温度や官能基量の設計により、硬化速度の遅い樹脂と速い樹脂を組み合わせることで焼付初期と後期の硬化特性に変化をつけることで達成が可能であると考えられる。

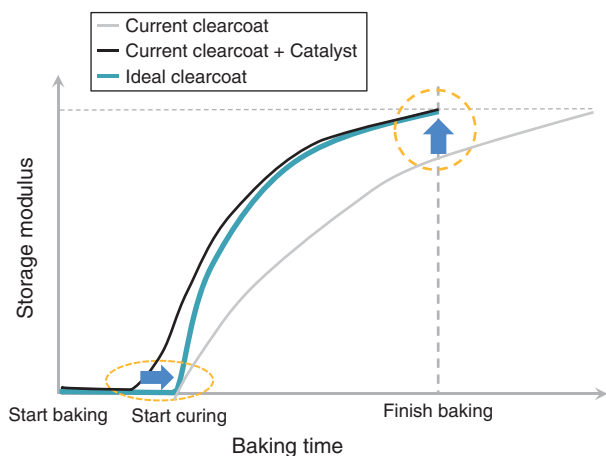


Fig. 10 Concept of storage modulus for short baking clearcoat

6. 結論

焼付工程短縮のために求められるクリア塗装の焼付時の硬化挙動について、焼付後の研ぎ補修性と塗膜密着性との関係性に着目し検討した。本研究を通じて以下の知見が得られた。

- (1) 80℃ 焼付タイプのクリア塗膜においても、焼付工程における $E'r$ は一次反応速度式に対して重相関係数 0.999 で近似し、硬化挙動の追跡が可能であることが確認された。
- (2) 研ぎ補修性を満足するためには、焼付終了時の $E'r$ を高めることが必要である。
- (3) 塗膜密着性を満足するためには、 $E'r$ が上昇するまでの時間を遅延し、ベース塗膜への硬化剤の移行量を増加させることが必要である。

参考文献

- (1) 橋本孝則, 小川剛志: パンパ用脱塩素系水性プライマ

- の開発, Honda R&D Technical Review, Vol.20, No.2,
p.56-60
- (2) 重永勉, 山根貴和, 神田輝夫, 亀迫裕介, 小笠原敏文,
掛正喜:環境にやさしい新塗装技術の開発, マツダ技
報, No.21, p.205-210, (2003)
- (3) 門脇康二郎, 遠藤貢, 平松靖博:環境対応自動車用水
性塗料の開発—水性 3WET について—, 塗料の研究,
No.144, p.50-54, (2005)
- (4) 木内純二, 秋山一成, 伊藤英樹, 有安浩治:「低炭素社
会を実現する技術」水性 3Wet 塗装の実用化, 三菱自
動車テクニカルレビュー, No.21, p.52-54, (2009)
- (5) 橋本堅, 亀迫祐介, 松田隆臣, 世良和也, 和泉昭雄, 大
谷崇:アクアテック塗装工程短縮技術の開発, マツダ
技報, No.28, p.65-69, (2010)
- (6) Kasari, A.: Future strategy for top coat system and
product in Asia, Strategies in Car Body Painting
2012 – Automotive Circle International, (2012)
- (7) Bielak, J.: Sustainable OEM coating system entering
the 21st century, Strategies in Car Body Painting
2012 – Automotive Circle International, (2012)
- (8) Kojima, K.: Development of primer process-less paint
system: SURCAR, (2013)
- (9) Draber, R.: New paint process in Valladolid plant:
SURCAR, (2013)
- (10) 小島圭介:中塗り工程レス塗装システムの開発, 日本
塗装技術協会, 平成 25 年度第 3 回講演会講演予稿集,
p. 20-22, (2013)
- (11) 江口芳雄:塗料における硬化反応論, TECHNO-
COSMOS, p.57-64, Vol.2, (1992)
- (12) 森寛爾:粘弾性測定による塗膜硬化解析, 豊田中央研
究所 R&D レビュー, Vol.29, No.2, p.55-62, (1994)
- (13) 上田隆宣, 井賀充香:塗料成膜過程および多層塗膜
の薄膜レオロジー, 日本レオロジー学会誌, Vol.39,
p.37-42, (2011)
- (14) 牛尾清治:剛体振子の自由減衰振動による塗膜形成
過程の粘弾性測定, 色材, Vol.51, No.7, p.403-409,
(1978)
- (15) 森寛爾:塗膜の硬化過程における架橋密度の追跡手
法 - 貯蔵弾性率と架橋密度の比例性 -, 色材, Vol.86,
No.4, p.123-127, (2013)
- (16) JIS K5600:2014, 塗料一般試験法

■ 著 者 ■



橋本 孝則

編集長 漆山 雄太 四輪 R&Dセンター
石橋 正明 二輪 R&Dセンター
笠井 聡人 パワープロダクツ R & Dセンター
木村 芳彦 二輪 R&Dセンター
齋藤 俊博 四輪 R&Dセンター
塩崎 智夫 二輪 R&Dセンター
白木 晶子 四輪 R&Dセンター
須藤 晶 四輪 R&Dセンター
田中 公俊 R&Dセンター X
友永 久人 四輪 R&Dセンター
中原 淳 四輪 R&Dセンター
西田 浩明 航空機エンジン R&Dセンター
野口 実 四輪 R&Dセンター
橋本公太郎 R&Dセンター X
長谷川忠明 R&Dセンター X
馬場 雅之 二輪 R&Dセンター
藤原 良也 R&Dセンター X
吉田 聡 四輪 R&Dセンター
渡邊 生 パワープロダクツ R & Dセンター

編集協力 二輪 R&Dセンター論文委員会
パワープロダクツ R & Dセンター論文委員会
四輪 R&Dセンター論文委員会
R&Dセンター X 論文委員会
航空機エンジン R&Dセンター論文委員会

仕事で他社から送付されてきた技報に目を通す機会が多く、表紙デザインからきちんと整い品格あるものや、著休め的な記事も盛り込まれた手づくり感にあふれたものなど様々あって、毎号送られてくるのを楽しみにしています。送られてきた特集号を手に取りながら、著者の足並みを揃え、完成にこぎつけられた編集委員会の皆様のご苦勞がうかがえます。

最近、オープンイノベーションという言葉をよく耳にします。オープンイノベーションとは、ヘンリー・チェスブロー博士によって提唱された考え方で、企業内部と外部の他企業、大学、地方自治体や研究開発法人などと、新価値創造のために、異業種、異分野が持つ技術やアイデア、サービス、データ、知識などを共同研究等により有機的に結合させ、革新的なビジネスモデル、研究成果、製品開発、サービス開発、組織改革、ソーシャルイノベーション等につなげるイノベーションの方法論です。すでにお気づきのとおり、論文活動にはオープンイノベーションの要素が多く含まれています。昨今、研究開発期間は短縮される傾向にあり、かつ投入できる資源も限られ、成果に直接結びつかない論文活動への理解は得にくい状況にあります。このような時こそ論文活動がオープンイノベーションの一環であることをアピールすることによって、論文執筆環境を少しでも良くしていきたいと考えます。

(友永)

発行所 株式会社 本田技術研究所

発行人 松 本 宜 之

編集人 Honda R&D Technical Review 編集委員会

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
開発戦略室 技術広報ブロック 論文事務局
TEL: 028-677-3311(代表) FAX: 028-677-7775
E-mail: Tr_randd@n.t.rd.honda.co.jp
ホームページ: <https://www.hondarandd.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.