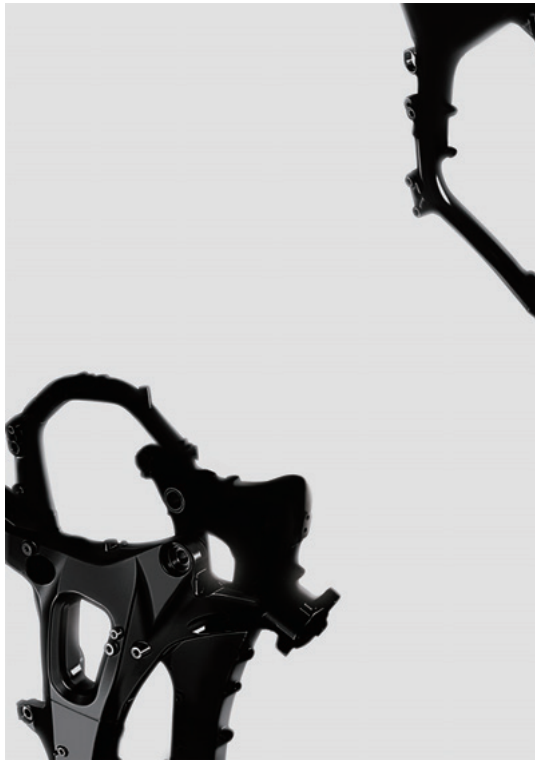


Honda
R&D

Technical Review Vol.31 No.1

April 2019



—— 表紙の言葉 ——

表紙のデザインは「ホンダ製品における機能美」をテーマとし、今回、ゴールドウィングのフレームをモチーフに表現してみました。最終的にはアウターカウルに覆われてしまうこのフレームも、技術者にとっては試行錯誤の連続で生み出された形状ですが、陰影が深くシャープで力強い造形として丁寧に表現されています。機能と美しさの調和が、内面から形成されることによって発せられるモノの力強さは、見れば見るほど手に取る人の心に強く響くものだと私は考えています。



四輪R&Dセンター
佐々木 敦

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.31 No.1'. Below this bar, the word 'April' is centered above the large year '2019'. At the bottom, the text 'Honda R&D' is centered.

Technical Review
Vol.31 No.1

April
2019

Honda R&D

目次

技術紹介

- ◇ 2018 Gold Wing のスタイリングデザイン 佐藤靖博・脇田展孝 1
- ◇ 2018 Gold Wing のスタイリングデザイン ークレイモデルー 岩田秀和 11
- ◇ 2018 Gold Wing のスタイリングデザイン ーカラーリングー 桂川 碧 18
- ◇ 2018 Gold Wing のスタイリングデザイン ーパワーユニットー 澤邊昭博 28
- ◇ 2018 Gold Wing のスタイリングデザイン ーライティングシステムー 栗城大亮 34
- ◇ 2018 年モデル PCX および PCX HYBRID の開発 大森純平・少覚 功・高山慶士 40
- ◇ PCX ELECTRIC の開発 三ツ川 誠・市川広基・大久保克幸・加藤貴朗
高橋泰史・重水信男・大久保克紀 48
- ◇ フロントフード下搭載を実現した FC 冷却システム小型化技術 濱 祐樹・永田大貴
後藤修平・高橋 謙 62

論文

- ◇ MBD 性能設計のためのトルクステアシミュレーション技術 池田直史・豊島貴行 69
- ◇ 統計タイヤモデルのタイヤ転がり抵抗推定への拡張 日下 馨・木滝泰隆・古本直己 76
- ◇ 表面分析および大規模クラスタ担持モデルを用いた第一原理計算による
リーンバーン用炭化水素浄化触媒のメカニズム解明 松尾雄一・廣瀬 哲
竹折浩樹・岡山竜也 86
- ◇ リチウムイオン二次電池のカレンダ劣化モデル開発 錢 朴・遠藤広考
古田照実・川合光幹 94

CONTENTS

Introduction of new technologies

◇ Styling Design for 2018 Gold Wing	Yasuhiro SATO・Nobutaka WAKITA	1
◇ Styling Design for 2018 Gold Wing – Clay model –	Hidekazu IWATA	11
◇ Styling Design for 2018 Gold Wing – Coloring –	Midori KATSURAGAWA	18
◇ Styling Design for 2018 Gold Wing – Power unit –	Akihiro SAWABE	28
◇ Styling Design for 2018 Gold Wing – Lighting system –	Daisuke KURIKI	34
◇ Development of 2018 PCX and PCX HYBRID	Jumpei OMORI・Isao SHOKAKU・Keishi TAKAYAMA	40
◇ Development of the PCX ELECTRIC	Makoto MITSUKAWA・Hiroki ICHIKAWA・Katsuyuki OKUBO・Takaaki KATO Yasushi TAKAHASHI・Nobuo SHIGEMIZU・Katsunori OKUBO	48
◇ Downsizing Technology for FC Cooling System Installation under Front Hood	Yuki HAMA・Daiki NAGATA Shuhei GOTO・Ken TAKAHASHI	62

Technical papers

◇ Torque Steer Simulation Technology for Performance Design in Model Based Development	Naofumi IKEDA・Takayuki TOYOSHIMA	69
◇ Expansion of Statistical Tire Modeling Method to Tire Rolling Resistance Estimation	Kaoru KUSAKA・Yasutaka KITAKI・Naoki FURUMOTO	76
◇ Elucidation of Hydrocarbon Purification Mechanism of Catalyst for Lean Burn Engine Using Surface Analysis and Ab-initio Calculation with Large-scale Cluster Model	Yuichi MATSUO・Satoshi HIROSE Hiroki TAKEORI・Tatsuya OKAYAMA	86
◇ Development of Calendar Aging Model for Lithium Ion Rechargeable Batteries	Pu QIAN・Hirotaka ENDO Terumi FURUTA・Mitsumoto KAWAI	94

2018 Gold Wing のスタイリングデザイン

Styling Design for 2018 Gold Wing

佐藤 靖博¹
Yasuhiro SATO

脇田 展孝²
Nobutaka WAKITA

要 旨

2018 Gold Wing のデザインをおこなうにあたり、次世代のお客様となる Generation X の価値観にも合致するよう、軽量コンパクト、モータサイクルらしさ、先進性、上質さをデザインキーワードとして掲げた。これらを通じて、乗り手が大人の余裕をスマートに魅せることができる、スタイリングデザインを目指した。スタイリングテーマには、「Styling with Refined Sharpness and Tension 洗練された鋭さと緊張感」を掲げた。このコンセプトには、トップアスリートが持つ、ぜい肉を削ぎ落として極限まで鍛え上げた力強いボデーや、その内側に秘められた身体能力のような、外からは見えない部分の持つ魅力をも表現したい、という想いがあった。さらに、Honda が生み出すモータサイクルの、最上位に位置するモデルである Gold Wing にふさわしい、威厳、プレミアム感、上質さを表現することに拘った。これらの想いを、各デザインスケッチ、モデリング、パーツの細部まで注ぎ込み、その魅力を次世代につなぐべく、Gold Wing のスタイリングデザインを完成させた。

ABSTRACT

In order to meet the values of our next generation of customers, Generation X, the design key words we used when designing the 2018 Gold Wing were lightweight and compact, essence of a motorcycle, advanced design, and high quality. These words were aimed at portraying a design that provided conciseness of form with the spaciousness required by an adult rider. The styling theme was “Styling with Refined Sharpness and Tension.” With this concept, we wanted to represent the vehicle body with qualities similar to those of a top athlete, refined and powerful to the utmost extent but free of excess weight and with the sense of internal physical capabilities invisible from the outside but hidden just beneath the surface. In addition, we focused on representing the grandeur, premium feel, and high quality appropriate for Gold Wing as the flagship motorcycle model produced by Honda. These ideas were incorporated into each of the design sketches and modeling activities, down to the finest details, in order to create a Gold Wing design that connected with the next generation.

1. はじめに

Gold Wing は、1975 年の発売以来の、Honda モータサイクルのフラッグシップモデルである。主に、北米の Baby boomer 世代のお客様に育てられ、モデルチェンジごとに進化を繰り返し、Gold Wing ブランドを構築して現在に至っ

ている⁽¹⁾。その豪華極まる装備と貫禄を感じさせるサイズをもって、Gold Wing は、まさに「King of Motorcycle」というコンセプト通り、モータサイクルの頂点に立ち続けた。そして、唯一無二の圧倒的な存在感は、世界中のライダーに Gold Wing の名を知らしめてきた。

¹ HONDA R&D AMERICAS, INC.

² 二輪 R&D センター

2. お客様を知る

先に述べたように、長きにわたり Gold Wing を支えてくれたのは Baby boomer 世代のお客様である。しかし 2018 年現在、Baby boomer も 60 歳以上の人たちが主流となり (Fig. 1)、車両重量の軽減や取り回し性の良さを求める声も聞こえてきている。また、この Baby boomer に続く世代、Generation X の人々にとって、現在の Gold Wing は、どのように見えているのであろうか、という思いもあった。そこで我々開発チームは、Gold Wing のメインマーケットである北米にてユーザ調査をおこなうこととした。

2.1. 継承されてきた伝統についての調査

—Gold Wing を愛してきたカスタマに遭う—

2012 年 6 月、新たに開発する Gold Wing の、ありたき姿を模索するために、毎年ニューヨーク州レイクジョージに

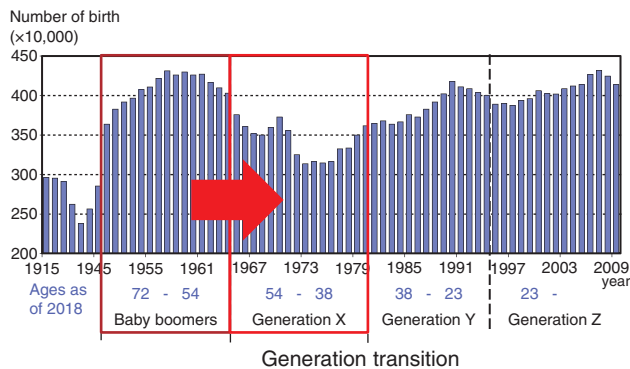


Fig. 1 Demographic distributions of Baby boomers and Generation X, and their ages as of 2018

で開催される世界最大級のツーリングモータサイクルイベント、Americade に参加した (Fig. 2)。イベント参加者は全体的に高めの年齢で、50 歳以上の人々が中心のように感じられた。

参加車両を Honda 製品に的を絞って見ると、そのほとんどが Gold Wing であった (Fig. 3)。初代から現行まで、歴代の Gold Wing が数多く集まっており、多くのロイヤルカスタマの姿を見ることができた。Gold Wing のユーザは、伸の良さそうな二人乗りの夫婦が多く見受けられ、それが大変印象的であった。

こうしたイベントを通じて、仲間とのつながりを楽しむことも、この世代の特徴の一つである。このイベントに集まった人たちの様子を見て、Gold Wing がカスタマに長く愛され、大切に乘っていただいていることを、あらためて実感した。

2.2. Gold Wing ユーザの現在

Americade に集まった Gold Wing ユーザの多くは、60 歳を超えているという印象であった。その様子から、私たちが想像していた以上に、Gold Wing は Baby boomer 世代のお客様に支えられているということを感じると同時に、次世代ユーザの顔が見えていないことに対する危機感を覚えた。Gold Wing が目指してきたものが何で、時代変化と共に不足してきたものは何だろうか、あらためて問い直す時期となっていた。

Gold Wing が、ツーリングを愛する次世代のユーザの価値観をも満足させるような、魅力あるモデルであるための、新しいコンセプトとスタイリングを検討し、お客様に訴求する必要性があると強く感じた。



Fig. 2 People gathered at Americade and their motorcycles



Fig. 3 The Gold Wings gathered at Americade site

2.3. 次世代 Gold Wing が解決すべき二つの課題

お客様とのコミュニケーションを重ねた結果、新しい Gold Wing のデザインを始めるにあたって、大きな課題が二つ見えてきた。

一つは「先進性」の不足である。歴代の Gold Wing は、それぞれの時代において最新技術を搭載し、先進的でモダンであった。しかし、2001 年発売の前モデルは、この 2012 年の調査時点において、既に 11 年もの間フルモデルチェンジをしていなかった。そのため、スタイリングのみならず、仕様装備も時代にそぐわないものになっていた。本来フラッグシップとしての Gold Wing が持つべき魅力、提供すべき先進イメージは希薄化し、競合する他のモデルにもすっかり遅れをとっていたのだ。

もう一つの課題は、「多用途性」の不足である。Customer Made Current Gold Wing と社内でも語り継がれているが、その言葉通り、Gold Wing はお客様に育てられ、その存在価値を高めてきた。しかしながら、フルモデルチェンジごとに、ロングツーリングにおける快適性、ラグジュアリー性を重視する方向で進化させてきた結果、車両が重厚長大となり、利用形態が限られてきてしまった。そのことが、結果的に Gold Wing のユーザ層を限定してしまい、モータサイクルの利用形態に多用途性を求める、他のお客様の要求にはこたえられなくなっていた。すなわちそれが、Generation X などの、次世代ユーザを取り込めないもう一つの理由となっていた。

この「先進性」の不足と「多用途性」の不足という二つの課題を解決しなければ、Gold Wing の存在に未来は無いと感じた。

2.4. デザインの方向性

前節に挙げた課題から、我々スタイリングデザイナーが解決すべきは何であるのか、より具体的な解決手段を明確にすることとした。

まず、「先進性」の不足に対しては、次世代のお客様の

価値観にフィットした先進装備を備え、機能的で魅力あるパッケージングを実現すること、とした。それにより、これからの時代に見合った最新技術をまとった、モダンな Gold Wing を表現していく。

次に、「多用途性」の不足に対しては、重厚長大路線から離れ、次世代のお客様が求めるバーサタイルな使い勝手を、軽量でコンパクトなボデーで実現すること、とした。それにより、長距離ツーリングに限らない、さまざまな局面で楽しめる Gold Wing を表現していく。

また、これまで継承されてきた快適性やラグジュアリー性も、今の世代に合わせてアップデートすることが必要である。

3. 次世代 Gold Wing デザインへの挑戦

3.1. 次世代表現と Gold Wing らしさ

「先進性」の実現は、この十数年の間に進化したさまざまな技術、インタフェースなどから、Gold Wing のコンセプトに合致したものをセレクトし、取り込むことで可能となる。

しかし、「多用途性」については、解決手段を軽量でコンパクトなボデーで実現する、としたが、そこにはデザインをする上での葛藤があった。なぜなら、先代、先々代によって受け継がれてきたように、ユーザにとっては大きくて立派なサイズ感と、プロポーションこそが Gold Wing の特徴となっていたからだ。まさにその特徴が Gold Wing の代名詞、「King of Motorcycle」を体現しているのであった。そのため、軽量コンパクトにすることで、Gold Wing らしさを失ってしまうのではないか、という懸念を抱いたのだ。

その懸念を払拭するためには、ボデーサイズをコンパクトにしながらも、風格や威厳を感じさせる堂々としたプロポーションに重きを置くスタイリングとし、Gold Wing らしさを表現することとした。

3.2. デザインコンセプトモデルの検討

具体的なスタイリングのディレクションを決めるにあたり、まずはデザインコンセプトモデル (Advanced Design 1: AD1) を作成することとなった。デザインコンセプトを、確実に製品デザインに反映することを目的とし、これまでの開発ではおこなうことのなかったアプローチである。その後、課題検証モデル (Advanced Design 2: AD2) を経て量産型モデルと、3 段階の過程を踏むが、モデル作成過程詳細については、「2018 Gold Wing のスタイリングデザイン—クレイモデル—」編⁽²⁾にて述べる。

AD1 のモデルの制作にあたり、日本、アメリカ双方の研究所のデザイナーが協力し、数多くのスケッチが描かれた。その中から、Fig. 4 に示す A 案と B 案が最終候補として選定された。



Proposal A



Proposal B

Fig. 4 Two proposed styling concepts

両案共、「先進性」と「多用途性」の要求にこたえる、モダンで軽量コンパクトなパッケージ、かつ、存在感とステータスを感じるスタイリングを意識したものであった。また、水平対向6気筒エンジンを強調し、エンジン周辺は極力機能部品を表に見せることで機能美を表現した。それは、過剰なインテグレート感を排除し、一つ一つのパーツエレメントを大切にしながらモータサイクルらしさを表現しようというものであった。

A案は、先代 (Fig. 5) のデザインヘリテージを継承し、ミドルカウル上部からパニアケース下部へつながる、後方に向かって下方に傾斜した後傾キャラクタラインと、歴代 Gold Wing の水平対向エンジンが生み出す伝統の水平基調、水平線ラインを特徴としている。それらが生み出す堂々としたたずまいのプロポーションによって、安定感を感じさせるというダイレクションを持ったデザインである (Fig. 6)。

B案は、A案と同様の後傾キャラクタラインを持つ一方で、ロアカウル下端からリヤトランクボックス下端やパニアケース下端につながる、いわば前傾キャラクタラインも併せ持つことを特徴としている。それにより、スポーティさを感じさせるダイレクションを表現したデザインである (Fig. 7)。

3.3. デザインダイレクションの決定とデザインコンセプトモデルの制作

A案、B案共に、次期 Gold Wing のデザインダイレクションとして、ポテンシャルを感じさせる仕上がりであった。両者の間での大きな違いは、歴代 Gold Wing デザインのヘリテージである水平線ラインを継承しているか否かであった。継承されてきたスタイリングでのヘリテージを捨て、新しいデザインを適用することは、大きなモデルチェンジの際にしばしば見られる手法である。しかし、果たしてそのデザインから生まれた車両を Gold Wing と呼べるのかという疑問は、Gold Wing の名前を捨てるか否か、



Fig. 5 Character lines of former Gold Wing



Fig. 6 Character lines of proposal A



Fig. 7 Character lines of proposal B

という重大な決断をも示唆していた。

Gold Wing の持つブランドイメージ、お客さまの期待、先進性の表現など、さまざまな検討を経て、最終的には、歴代の Gold Wing が継承してきた水平ラインを継承した、A 案のスタイリングダイレクションが採用となった。

そして、A 案をベースにしたモックアップモデルを制作し、チームが定めたデザイン上の想いを、余すことなく形にした AD1 が完成した (Fig. 8)。



Fig. 8 Mockup model representing selected design concept

4. 量産型モデルの制作

4.1. King から Premium へ、プレミアム性の共有

AD1 の完成により、「先進性」と「多用途性」を表現したスタイリングのダイレクションは決定した。また、本モデルの開発コンセプトとして、これまで長きにわたって Gold Wing に対して掲げてきた「King of Motorcycle」に代わり、「The Honda Premium Tourer 二人の感動にいつその輝きと充実を」が定められた⁽¹⁾。

それを受け、量産型デザインモデルの開発に携わるデザインチームメンバー全員で、開発コンセプトの核となる

Premium という言葉についての共通認識を形成することから手を付けた。

広い意味での製品、としてのプレミアム性なのか、モータサイクルにおけるプレミアム性なのか、Gold Wing に特化したプレミアム性なのかについて、それぞれのレベルを視野に入れながら議論を重ねた。その答えのヒントは、開発コンセプトの後半、「二人の感動にいつその輝きと充実を」にあった。それは、車両そのものにプレミアム性を持たせることよりも、Gold Wing と過ごすライフスタイルそのものにプレミアム性を見出すという考え方であった。

ここで見出したプレミアム性の解釈に沿って、共通のイメージを持ちやすくするために、ひとつのシナリオを作成した。それは Gold Wing に乗ったセンスの良い大人の夫婦が、ブランドショップが並ぶ高級リゾート地の街角に乗りつけるというシーンである。街中を歩くためにジャケットを着替え、馴染みのレストランで食事やお茶を楽しむ。ちょっとした買い物も、大きなトランクがあるから安心できる。そのような、今までのロングツーリング主体のユーザとは違う、「多用途性」を象徴したシナリオだ。その想いをスケッチにしたものを Fig. 9 に示す。

その風景に溶け込む大人の余裕に、周囲の人があこがれを抱くようなクオリティのデザインを目指すこととした。このシナリオに込めた想いは、各パーツのデザインを進める上で、共通したイメージの拠り所として活かされた。

4.2. 量産型モデル具現化のためのデザインキーワードとスタイリングテーマの設定

AD1 制作時に掲げた「先進性」と「多用途性」、開発コンセプトより導いた Premium を解釈したシナリオ、これらを量産型モデルにおいて具現化していくために必要なデザインキーワードとして、以下の四つを定めた。

- (1) 軽量コンパクト
- (2) モータサイクルらしさ
- (3) 先進性
- (4) 上質さ



Fig. 9 Conceptual photos of active pair with the Gold Wing

そして、それらデザインキーワードで我々が最も重視したのが(1)軽量コンパクトである。その実現のため、新たなスタイリングテーマとして、「Styling with Refined Sharpness and Tension 洗練された鋭さと緊張感」を定めた。

あらためてスタイリングテーマを明確にすることで、それぞれのデザイナーの個性やセンスを活かしながらも、全員の想いを束ねることができる。本テーマに基づいて作成した、量産型モデル向けのスタイリングスケッチをFig. 10に示す。また、上記に定めたデザインキーワードに沿って、具体的な想いや実施した内容について以下に述べていく。



Fig. 10 Drawings for designing production type model

4.3. デザインキーワードの具現化

4.3.1. 軽量コンパクト, Styling with refined sharpness and tension 洗練された鋭さと緊張感, の実現

我々が、次世代のユーザーとして注目している、Generation X世代の人々に向けて訴求したい重要なポイントとして、その使い道を制限しない「多用途性」がある。その実現のためのキーとなるのが、軽量コンパクトである。

4.1. 節に記したシナリオでイメージしたような、市街地を俊敏に走ることや、スポーティなワインディング走行に心ときめかせることもでき (Fig. 11)、そして、本来持っているツアラのポテンシャルを活かして、週末にゆったりとしたペースで快適なタンデム走行を楽しむこともできる (Fig. 12)。そういった、広い守備範囲を持った多用途性が求められるのである。

実際の造形において意識したのは、単なる表面的な形状表現で、軽量コンパクトを見せるのではなく、軽量コンパクトを成立させる内面の力強さやテンションが、形状を通じて感じられるようなデザインとすることであった。すなわち、勝つためにストイックに鍛え上げたトップアスリートやボクサの身体をイメージし、そのイメージが外観を通



Fig. 11 Driving on winding roads



Fig. 12 Touring in tandem riding

じて感じられるようにしたいと考えた。

一切のぜい肉を削ぎ落とし、究極まで砥ぎ澄まされ、凝縮された肉体の美しさと、戦いに挑む直前の張りつめた緊張感のイメージである (Fig. 13)。

4.3.2. モータサイクルらしさの表現

初代 Gold Wing は、カウルもトランクも装備しない、ネイキッドタイプのモータサイクルであった (Fig. 14)。振動の少ないエンジン特性や低い重心が、ツアラとして求められる特性に合致したことから、長距離ツアラのユーザ層からも支持された。その後 Gold Wing は、大陸横断のような



Fig. 13 Styling theme



Fig. 14 1975 Gold Wing (first generation)



Fig. 15 Horizontally-opposed six-cylinder engine and its design composing "Mechanical Line"

ロングツアーも可能とする二輪車として、さらなる熟成、進化を遂げていった。これらの変遷の中で、Gold Wing の特徴の一つである大型フェアリングのデザインは、モデルチェンジごとに車両全体にわたるインテグレートなデザインとする傾向が進んだ。そのため、当初剥き出しだったメカニカルパーツは、フェアリングやカバー類の内側に収まっていった。さらに各部デザインのインテグレート化が進むと、部品同士の合わせ構造や、パネルとその周辺の処理は、四輪車の内装にも通じるデザインとなっていった。

そこで、Gold Wing スタイリングデザインにおける伝統的キャラクタラインの一つである、前後水平に伸びる水平ゾンタルラインに、Mechanical Line と改めて名前を付けた。水平対向 6 気筒のエンジンを中心に、エキゾーストパイプなどの機能部品を積極的に見せていくデザインとし、メカニカルパーツを強調した (Fig. 15)。

これによって、車体デザイン全体が一体感を持ち、すっきりとまとまっていく一方で、メカニカルパーツが見えていた頃のモータサイクルらしさは徐々に失われていった。今回の Gold Wing の開発では、フットワークの良い、モータサイクルらしさを色濃く出したかったため、デザインのインテグレート化が過剰にならぬよう留意した。

面の表現においても、車両上側ボデー周りの躍動感のある面処理とは対照的に、エンジン周りの面には静的な表情の造形を施した。これらの面を通じて、精巧に造形された機械が発する、独特の美しさを表現しようと試みた⁽³⁾。それにより、動的な表現を施した車体上側ボデー周りとは、静的な表現を施したエンジン周りの間に、強いコントラストを意図的に与えるデザインとした。

さらに、モータサイクルらしさを表現するためのデザインは、外観的に見える部分に対してだけではなく、カバーなどで覆われる内部のメカニカルパーツに対しても施された。新しく採用されたダブルウィッシュボーン式フロントサスペンションの構成パーツ (Fig. 16) や、リヤスイングアーム、トランスミッションカバーなどである。

以上の例で示したような、機能部品をデザインする上で意識したのは、それぞれの部品が持つ意味や役割を、その形状から感じとれることだった。目指したのは、機能とデザインを高い次元で融合させた、統合的な機能美によるモータサイクルらしさの表現であった。

4.3.3. 先進性の表現

Gold Wing は、モデルチェンジごとに、その時代における最先端技術を取り入れてきた。今回の Gold Wing のスタイリングにおいても、「先進性の表現」としてのシャープな外観を、よりいっそうクールに見せる演出を施した。

車両上側のボデー周りに対し、エッジを効かせたシャープなラインと、それらラインをつなげる強い張りを持った面表現によって、若さと軽快さを感じさせる形状とした。特にフロントフェアリングに対しては、その先鋭的で躍動感溢れるイメージをいっそう強めるために、ノーズをスラントさせ、風を切り裂いて前に進んでいく、という印象を与えるような造形をおこなった。

また、車両の顔とも言えるヘッドライトには、見る人の視線をひきつける、最新の車両用灯体技術である多眼式 LED を採用した (Fig. 17) ⁽⁴⁾。

そして、常にライダーの視界に入るコックピット部分では、先進的な雰囲気醸しつつ、多くの情報を瞬時に感じ取れ、操作しやすいデザインを心がけた。さらに、二輪車では世界初の採用となる Apple CarPlay (Apple CarPlay は、Apple Inc. の商標です) の搭載により (Fig. 18)、時代に即した最新のテクノロジーを充実させ、新しい時代を生きる人たちを魅了する装備としている。

4.3.4. 上質さの表現 —おもてなしの演出—

完成車における上質さの表現は、極上の乗り心地を実現する足廻り ⁽⁵⁾ と、シルキーで低振動な水平対向 6 気筒パ

ワーユニット ⁽⁶⁾ および、スムーズな第 3 世代 Dual Clutch Transmission (DCT) ⁽⁷⁾ の組合せによって実現された。

外観デザインにおいても、上質さの表現をするために、お客様に対するおもてなしの気持ちをそれぞれの部品に込めていくことを考えた。

例えばカラーリングにおいては、今回の Gold Wing 専用 2 色の新色を開発した。高い彩度と深い陰影を持つレッドとブラウンのキャンディーカラーは、見た瞬間に人の心を突き動かす、劇的な印象の色とした (Fig. 19) ⁽⁸⁾。

また、スピードメータやタコメータには、デジタル式ではなくあえてアナログ式を採用した。そして、針や目盛盤に繊細な意匠を施し (Fig. 20)、高級腕時計のような上質感を表現した。メータの夜間照明においても、針先から金属調リングに落とし込む光の演出など、その豪華さを楽しめる工夫が施された。

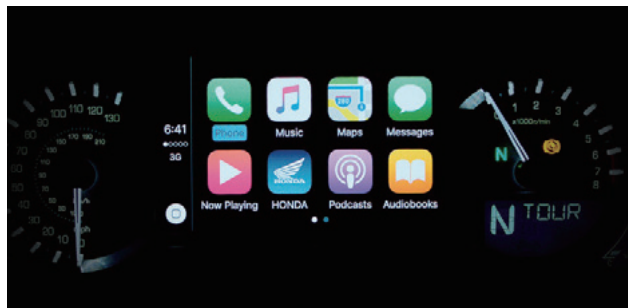


Fig. 18 Apple CarPlay



Fig. 16 Double wishbone type front suspension



Fig. 17 Multi LED configured headlight adopting latest lighting technology for vehicles



CANDY ARDENT RED



PEARL STALLION BROWN

Fig. 19 Newly designed two colors specifically for developed Gold Wing

さらに、スイッチ、ダイヤル、十字キーなど、操作者が直接触れて感じるデバイスについては、設計、テスト部門と協力し、しっとりとした感触を実現させるために、最も適した度合いのダンパ効果を付与した。それにより、操作時に指先に伝わる感触を通じて、上質さを感じとれるようにした (Fig. 21)。

また、ライダーが長時間座るシートについても、その質感と触感に拘り、専用のシボパターンを持つ表皮を開発した (Fig. 22)。それにより、単なる外観デザインにとどまらず、より高いレベルの上質感の実現を目指した⁽⁸⁾。

そして、エンブレムのデザインは、歴代 Gold Wing が継承してきた、想像上の動物である翼を持った獅子をモチーフとし、繊細かつ気品溢れる仕上げとした (Fig. 23)。このエンブレムにより、Gold Wing のフラッグシップとしての誇りと、Gold Wing を所有する喜びの表象となればとの想いを込めた。

4.4. 量産型モデルの完成

Fig. 24 に量産型車両を示す。2018 Gold Wing の開発にあたり、我々は AD1 のスタイリングダイレクションから、量産型に向けた新たなスタイリングテーマを定めた。

開発コンセプトに掲げられたプレミアム性を、イラスト化することで共有し、イメージの拠り所とした。

軽量コンパクト、先進性、モータサイクルらしさ、および上質さというデザインキーワードを定め、スタイリングテーマである「Styling with refined sharpness and tension 洗練された鋭さと緊張感」の実現を目指してきた。



Fig. 22 Texture of seat devised with high ingenuity



Fig. 20 Analog type tachometer



Fig. 23 Vehicle emblem

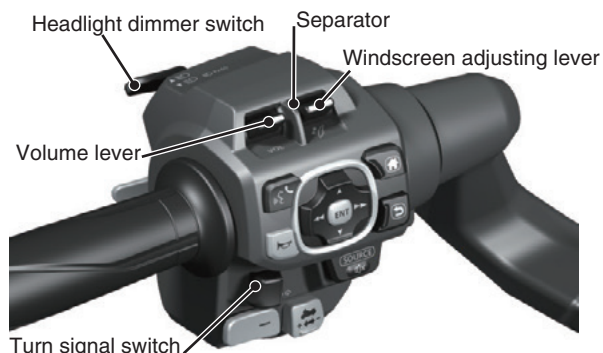


Fig. 21 Handle switch design that makes fine quality feelings through operations



The Gold Wing Tour DCT Airbag (2018)

Fig. 24 Production model of 2018 Gold Wing Tour

Generation X 世代を視野に入れ、これまで踏襲されてきた Gold Wing らしさを活かしつつも、若さを感じさせるスタイリングを実現した。

ーカラーリングー, Honda R&D Technical Review, Vol.31 No.1, p.18-27

5. まとめ

「先進性」、「多用途性」実現のために、コンパクトな車体としながらも、水平ラインを基調としたヘリテイジを守り、堂々としたプロポーションを表現した。そして歴代の Gold Wing に恥ずることのない、風格、威厳、上質さを備えた上で、大きく若返りを果たしたモデルとなった。

それにより、開発コンセプトである「The Honda Premium Tourer」を体現したスタイリングデザインを完成させることができた。

今回の開発を通して、デザイナーがその意匠に関与した部品は、大小合わせて 200 点を超えている。本 Gold Wing のデザインは、それぞれのデザインプロセスを担当するデザイナーたちの、強い想いと技によって作り上げられた集大成となっている。

長きにわたり築き上げてきた Gold Wing ブランドを、これからも後世につなげてゆくこと、世界中のお客様に愛され続けることに貢献できるデザインであることを、デザインを担当したものとして心から願っている。

参考文献

- (1) 会田樹穂子, 中西豊:2018 Gold Wing の開発, Honda R&D Technical Review, Vol.30 No.2, p.1-14
- (2) 岩田秀和:2018 Gold Wing のスタイリングデザイナー クレイモデラー, Honda R&D Technical Review, Vol.31 No.1, p.11-17
- (3) 澤邊昭博: 2018 Gold Wing のスタイリングデザイナー パワーユニット, Honda R&D Technical Review, Vol.31 No.1, p.28-33
- (4) 栗城大亮:2018 Gold Wing のスタイリングデザイナー ライティングシステム, Honda R&D Technical Review, Vol.31 No.1, p.34-39
- (5) 榎原直樹, 三代純平:2018 Gold Wing 用ダブルウィッシュボーン式フロントサスペンションの開発, Honda R&D Technical Review, Vol.30 No.2, p.44-49
- (6) 横田洋, 野島悟, 園田豊, 大崎裕介, 紺谷昌弘, 山崎寛:2018 Gold Wing 用水平対向 6 気筒パワーユニットの開発, Honda R&D Technical Review, Vol.30 No.2, p.15-28
- (7) 平山琢, 横川幸生, 藤本靖司:2018 Gold Wing 用 7 速 DCT の開発, Honda R&D Technical Review, Vol.30 No.2, p.29-35
- (8) 桂川碧:2018 Gold Wing のスタイリングデザイン

■ 著 者 ■



佐藤 靖博



脇田 展孝

2018 Gold Wing のスタイリングデザイン ークレイモデルー

Styling Design for 2018 Gold Wing
– Clay model –

岩 田 秀 和¹
Hidekazu IWATA

要 旨

2018 Gold Wing の開発は、先代の登場から 17 年という歳月を経て、Gold Wing ブランドの再構築を図るべくおこなわれた。その 17 年の間で起きた、社会、環境、人々の価値観の変化に対応するための、先進のデザイン、機能、性能の具現化を目指した。隅々まで行き届いた質の高いデザインを実現するために、3 段階のモデルを制作、推進した。スタイリングテーマとして設定された「Styling with Refined Sharpness and Tension 洗練された鋭さと緊張感」より、モデリングする際のイメージとして、機能美の極致を象徴する日本刀と、力強い筋肉を有した陸上競技のアスリートを設定した。それにより、目指した外観と、要求される機能を、高い次元で成立させ、新型 Gold Wing にふさわしい進化を実現させた。

ABSTRACT

Seventeen years post its debut, the 2018 Gold Wing was developed in the pursuit of transforming its brand. In this study, we aimed to realize advanced design, functionality, and performance that reflect various changes in the markets, including environmental concerns and transitions in people's values, experienced during those 17 years. A high-quality design that meets every aspect of the requirements was envisioned. To achieve this, design models were fabricated for three individual stages of the design process. The styling theme was determined as “styling with refined sharpness and tension.” Based on this theme, we selected the Japanese sword, katana, that symbolizes the culmination of functional beauty, and a track and field athlete, who represents power and muscularity; we set them as the symbolic images for the design. By implementing these image motifs on to the design models, the exterior design aimed for was harmoniously fulfilled with functional requirements, design evolution was achieved, and a design appropriate to representing the developed Gold Wing was established.

1. はじめに

今回開発された Gold Wing は、先代の発売から 17 年の時を経てのフルモデルチェンジとなった。この 17 年間に、社会や人々の生活、嗜好は大きく変った。先進性が求められるスタイリングデザインの分野においても、大きな変化が必要であった。

本モデルの開発コンセプトは、「The Honda Premium Tourer 二人の感動にいつその輝きと充実を」と定められた⁽¹⁾。そこには、従来の顧客に加えて、より若い世代の新しい顧客層の心をとらえること、時代の先駆者にふさわしい先進性を打ち出すこと、ロングツーリング中心であった

これまでの利用シーンを、幅広く気軽な楽しみ方にまで拡大すること、などの想いが込められている。

これらより、本来 Gold Wing が持つ力強さや、威風堂々としたスタイリングに加え、本デザインモデル制作の方向性として、以下の (a)-(c) を定めた。

- (a) 先進性を感じるスタイリングとコンポーネントの表現
- (b) モータサイクルが本来持つべき、機能と美しさが共存する、エンジンを主体とした機能部品の表現
- (c) 市街地走行からロングツーリングにまで対応するバーサタイルな使い勝手の表現

次世代 Gold Wing が Honda のフラッグシップモデルとして、これらを実現するために、目指すべき開発コンセプト

¹ 二輪 R&D センター

トを余すことなく立体物として表現する必要がある。そこで我々は、3段階のモデルを制作、推進することとした。

(1) デザインコンセプトモデル (Advanced Design 1: AD1): デザインスタディモデル

(2) 課題検証モデル (Advanced Design 2: AD2): 部品レイアウトやテスト要件との、形状整合性確認モデル

(3) 量産型モデル: 工場生産のマスタとなるモデル

本稿では、AD1について触れたのち、AD2 および量産型モデルについて詳述する。

2. 先行検討モデル, AD1, AD2 の制作

2.1. AD1(デザインコンセプトモデル)

理想のデザインを追求すべく、先行フレーム、先行エンジンのレイアウトをベースに、AD1のクレイモデリングをおこなった。

先に述べた三つの方向性より、(a)先進性を感じるスタイリングとコンポーネントの表現、については、個々のパーツの持つエレメントを強調することによるモータサイクルらしさの演出と、先進技術を取り入れたシャシとコンポーネントによる、効率的なパッケージングをもって表現した。

また、(b)モータサイクルが本来持つべき、機能と美しさが共存する、エンジンを主体とした機能部品の表現、については、水平対向6気筒エンジンを軸に、エンジン周辺の各機能部品を効果的に露出することで実現した。

(c)市街地走行からロングツーリングにまで対応するバーサタイルな使い勝手の表現、に対しては、フラッグシップモデルとしての存在感をプロポーションによって維持しながら、軽量コンパクトな車体を実現することで達成した (Fig. 1)。

2.2. AD2(課題検証モデル)

デザインの理想形として具現化されたAD1に対し、フレーム設計部門によるレイアウトの成立性と、各テスト

部門による操縦安定性、動力性能などの検証がおこなわれた。これらの結果から、求められる要件を満たすように、クレイモデル上に変更を加えていった。各コンポーネントの詳細なレイアウトを、比較、検証するために、変更後のモデルとAD1を、データ上で重ね合わせた。すると、AD1と比較して、フレームやエンジンなど、搭載コンポーネントの容量不足から、スタイリング上に、大きな差異が生じていた。グレーで示すAD1の形状データに対し、赤色で示す部分が拡大している (Fig. 2)。

これら不足部分や、求められる技術的要件を満たすようにデータ上で修正、変更した上で、NC加工機を用いてクレイモデルを制作した。これがAD2である。

2.3. AD2におけるデザインバランスの喪失

美しいデザインのフォルムを完成させるためには、前節のようなデータの補正では実現できないことは容易に予想できる。しかし、具体的な修正方向性を見定めるため、このAD2と呼ばれる課題検証モデルはどうしても必要なステップであった。

予想通り、彫りあがったクレイモデルは、AD1とは大きく印象が異なるものであり、全体的なバランスを欠いていた。その印象の違いとは、前後のマスバランスやメイン



Fig. 1 AD1 (Design concept model)

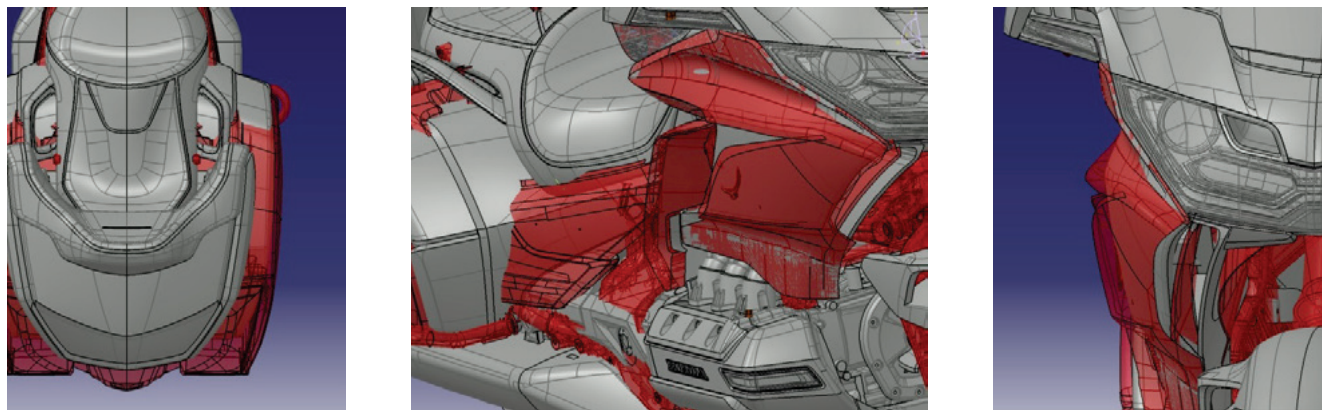


Fig. 2 Differences in styling between concept models of AD1 and AD2



Fig. 3 Beauty in form of Japanese sword

キャラクタラインのずれなど、基本的な骨格の崩れによるものだった。結果、AD1 で表現されていた力強さや、威風堂々としたスタイリングは、一切再現されていなかった。

モータサイクルをデザインする上で、カタマリの配置としてのマスバランスと、メインキャラクタラインを軸として構成される各部品の絶妙なバランスは、スタイリングの根幹をなす重要項目である。しかも、そのバランスは非常に精緻な釣り合いによって成り立っており、数ミリメートルの変化で容易に崩れてしまう。AD2におけるデザイン上のバランスの喪失は、一度完成させたAD1 に対し、データ上で構成部品を重ね、変更していく手法によって生成された結果であった。

3. 美しさの再構成―量産型モデルの制作

3.1. スタイリングの再誕生 (リボーン)

AD2 で確認できたさまざまな課題、差異や不足点の検証結果も反映し、量産型モデルを制作することとなった。AD1 に立ち返り考察することはもちろんだが、より高いレベルでのモデルの制作をするためには、AD1 を超えるデザインを目指すことが必須条件だと考えた。

まずは、AD2 の制作によって顕著になった、AD1 の持つ魅力を再確認することから始めた。AD1 の持つバランス、形状的な勢い、面の張り、さまざまな要素を自分の中で再解釈し、自身の感覚に取り込んでいった。

データを用いて「似たようなもの」を作るのではなく、自分の中に取り込んで消化吸収した要素を、自分の眼と腕で再誕生 (リボーン) させるのだ。そうした過程を経ることによって、はじめて新たな形状に命を吹き込むことが可能となるのである。

3.2. スタイリングテーマの設定と考察

上記実現のため、キーとなるスタイリングテーマを設定し、デザインメンバの間で共有した。「Styling with Refined Sharpness and Tension 洗練された鋭さと緊張感」である⁽²⁾。ここに設定された我々の意思を、モデラとしてどのように表現すべきか、さらなる考察をおこなった。

3.2.1. スタイリングテーマの考察―稜線と日本刀

「洗練された鋭さと緊張感」と聞いて、まず、自分の脳裏に思い浮かんだのが日本刀である。日本刀とは、機能に裏打ちされた鋭さや美しさ、強さを合わせ持つ造形美の象徴である。これら要素を背景として生まれる刃の稜線 (キャラクタライン) は、息を呑むほどに美しい (Fig. 3)。

文字通り研ぎ澄まされることによって生まれた機能美からは、美しさと同時に独特の張り詰めた緊張感が感じられる。一太刀で切断するために生まれた合理的で美しい稜線、刃物としての硬度と、内在するしなやかさは、鍛錬、素延べ、形成、焼き入れ、研ぎなどの工程を経て生まれた必然の形態だ。この日本刀が示す美しい稜線を、クレイモデルのキャラクタラインに重ね合わせ、スタイリングテーマである「洗練された鋭さと緊張感」を具現化していく。

3.2.2. スタイリングテーマの考察―面表現と筋肉

稜線のモチーフとした日本刀に対し、面表現のモチーフとして思い浮かんだのが、トップアスリートの筋肉であった。それも陸上競技のアスリートのような、力強い瞬発性と持久力を含んだ、極限まで鍛え上げられた筋肉である (Fig. 4)。

走る、という行為にのみ特化した筋肉は、その形状そのものが機能をあらわしている。その陸上競技アスリートの筋肉を彷彿とさせる面表現が、各部を削ぎ落とし軽量コン

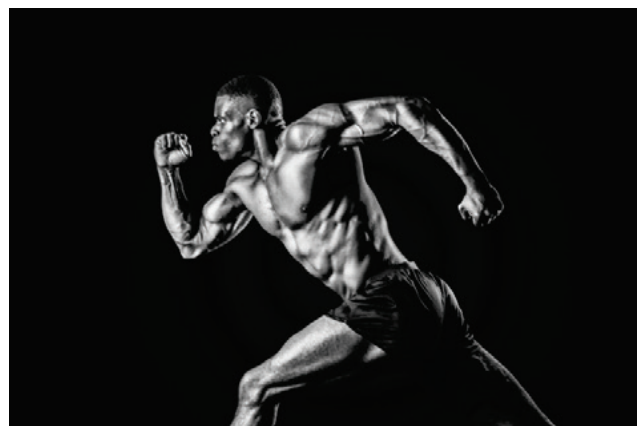


Fig. 4 Muscles appearing on body of top athlete

パクト化をねらった 2018 Gold Wing を表現する上で、最もふさわしいと考えた。

筋肉をモチーフとする上で欠かせないのが、内包する骨格との関係である。人体のデッサンや彫刻の例で言えば、それは単なる外観を写し取る作業では無いということだ。筋肉に包まれた骨格をイメージし、重力の法則に支配されたバランスや筋肉のテンションを読み取ることで、初めて正確な描写が可能となる。このような意識を欠いた造形は、見た目にも破綻する。

すなわち、新たな量産型モデルの骨格を基に、理にかなった造形、面表現無しでは、AD1 を超えるクレイモデルの造形は成立しないと考えた。

これらを踏まえ、力強い筋肉を有した陸上競技のアスリートをモチーフに、スタイリングテーマの「洗練された鋭さと緊張感」を表現していく。

3.3. 基本骨格のデザイン

「洗練された鋭さと緊張感」というスタイリングテーマは、外装デザインだけに限定したものではない。フレームやエンジンの基本骨格もスタイリングの重要な要素である。これらも同じように、スタイリングテーマを体現するものでなければならない。

具体的には、ピボットプレートからヘッドパイプに至るメインフレームに対し、形状的な絞り込みをおこなうことで、フレームのしっかりした剛性感を表した。また、角部の曲率をできる限り小さくすることで強い陰影を作りだし、さながら刀身をつらぬいて走る鎬（しのぎ）のような、美しくも緊張感を有している稜線を施した (Fig. 5)。

エンジンの外観デザインにおいては、シリンダヘッドカバーに対し、フレームに施したのと同様の、鎬をほうふつさせるような形状を表現した。さらにロアカウルに向かって急激に絞った形状とすることで、アスリートの筋肉のような力強い張り出しと抑揚のある形態を生み出した (Fig. 6)。



Fig. 5 Representation of styling concept on basic body skeleton

3.4. キャラクタライン

先代モデルでも受け継がれてきたスタイリングにおけるヘリテイジを、本開発の Gold Wing に対しても伝承させるため、以下の二つのキャラクタラインを踏襲した。Fig. 7 に先代モデルの写真とキャラクタラインを示す。

- (1) ホリゾンタルライン：水平基調の堂々とした安定感を示すライン
- (2) 後傾キャラクタライン：ディフレクタ上部からパニアケースへとつながるライン

これらのキャラクタラインに加え、本開発の Gold Wing では、新型として固有の個性を示すメインキャラクタラインを加え、計三つのキャラクタラインによってスタイリングを表現することとした。

- (1) ホリゾンタルライン (メカニカルライン)
- (2) 後傾キャラクタライン
- (3) メインキャラクタライン

なお、本開発においては、ホリゾンタルラインをメカニカルラインと名付け、エンジンをはじめとする機能部品によって、モータサイクルらしさを表すための基調ラインとした (Fig. 8)。



Fig. 6 Appearance of engine design



Fig. 7 Character lines applied to previous model of Gold Wing

新たに設定したメインキャラクタラインは、日本刀のような鋭さと美しさ、強さを合わせ持つ造形美に欠かせないラインである。本ラインを次世代モータサイクルとしての躍動感や先進感を表現するための要のラインとした。また、このラインは、データに頼ること無く、AD1 の持つシャープなイメージを再誕生させるための、造形の拠り所となった。

これら三つのラインのそれぞれを形作る、個々の部品の面表現(面質)には、極限まで鍛え上げられた陸上アスリートの筋肉が発する「力感」を表現した。

これらにより、ボデー全体をこれら個々のパーツの持つ機能美の集合体として形成しつつ、全体のマスバランスも整えた。

3.5. メインキャラクタラインを構成する主要パーツ

3.5.1. フロントフェアリング

フロントフェアリングは、造形的にはメインキャラクタラインの先端部分であり、同時にウインドプロテクションの良し悪しを大きく左右する重要な部品でもある。メインキャラクタラインを明確に保持しながらも、最高速 200 km/h を超すポテンシャルを持つ Gold Wing にふさわしいウインドプロテクション性能が必要となる。

その実現のために、プロテクション性能を保ちつつも、フロントマスク(フロントフェアリング前面)は可能な限りスラントさせ、主要なキャラクタライン以外をできる限り省いた。そして、カタマリを前方に配置し、マスフォワードな造形を強調させた。そうすることで、ロングツーリング時の快適性を確保しながらも、ショートツーリングにもフィットした、スポーティな意匠のウインドシールド形状を実現した。

機能的要件への適合性を要求されるフロントフェアリング周辺部品は、陸上競技のアスリートが風を切り、駆け抜ける瞬間の姿をイメージしてデザインした。

また、ヘッドライトからフロントフェアリングを経て

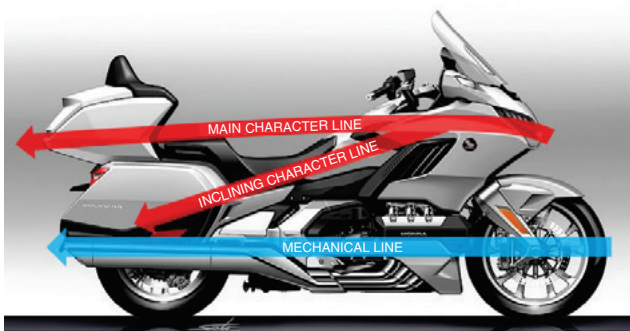


Fig. 8 Three lines that constitute styling of developed Gold Wing

ウィンカにつながる稜線(Fig. 9 中の青線)の断面は、鈍角ながらも可能な限り角部の曲率を小さくした。ここがメインキャラクタラインの始まりであり、日本刀の切先(きっさき)にあたる(Fig. 10)。

この小さな曲率による面の切り替え表現は、正面からの印象にメリハリをつけるうえで、効果的な役割を果たしている(Fig. 9)。

3.5.2. ミドルカウル、シート、トランク

ミドルカウルは、一般に、全外装部品の中で最大の面積を持っている。そのため、ミドルカウルのデザインは車両全体のデザインの印象を大きく左右する。

メインキャラクタラインを明確に表わすために、まず、ヘッドライト横の位置からパッセンジャシート上面を抜



Fig. 9 Front design fulfilling characterized design expression and performance



Fig. 10 Slanted front mask, with obtuse-angled surfaces and small radius corner, representing forward mass concentrated looks

け、トップボックスのサイドパネルへとつながるラインに一定のテンションを保持させた。さながら、切先(きっさき)から刃区(はまち)に抜ける日本刀の刃のような、緊張感のある鋭い稜線を施した (Fig. 11)。

ミドルカウル部の外形ラインは、この稜線の一部とすることで、全体を形作るメインキャラクタラインの流れに融合させた。サイドラジエータ上部にかかる面は、大胆に内側に削ぎ落とし、深い陰影を与えた (Fig. 12)。さらにミドルカウル下側部分を、インテークマニホールドへつながるように絞り込んだ。これらにより、立体的で彫刻的な表情を施した。さらに、内包される肉体のポテンシャルが内側から迫り出すような、流動的な力感を面全体に付与し、アスリートの肉体を表現した。

こうした表現を施すことによって、車体デザイン全体に一定のテンションを保持させたまま、三次元的に車体を横断するメインキャラクタラインを効果的に表すことができた (Fig. 11)。



Fig. 11 Main character line of developed Gold Wing



Fig. 12 Middle cowl with mass boldly removed inward

4. テスト車両による性能とデザインの両立性検証

お客様に快適なツーリングを楽しんでいただくことは、本開発の Gold Wingにおいても、これまで同様に重要なファクタである。そのためには、上質な乗り心地や、軽快かつ心地よい走りを提供できることが必須条件となる。しかしながら、前述した、テンションを効かせたカウルの面構成やキャラクタラインは、必ずしも風防効果に寄与するものではない。場合によっては、その効果を阻害する要因にすらなり得ることもある。したがって、デザインの求める形状と風防効果が高い形状を、高いレベルで成立させるために、0.1 mm 単位での形状変更と評価を繰り返しおこなった。

Fig. 13 に示す黄色部分が、0.1 mm 単位で変更を加えたエリアとなる。双方を成立させる形状を見出すためのトライアンドエラーは、デザイナーと技術者が連携しておこなった。それは、風洞での形状変更と、操縦安定性や動力性能のテストを繰り返すことで実現した。CFD による形状データの確認例を Fig. 14 に示す。

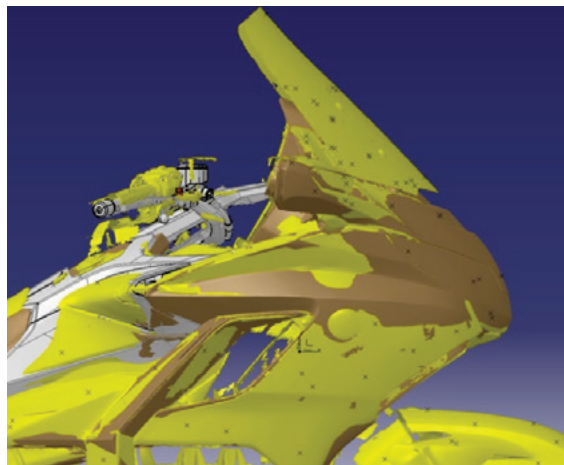


Fig. 13 Changes to satisfy design and performance requirements

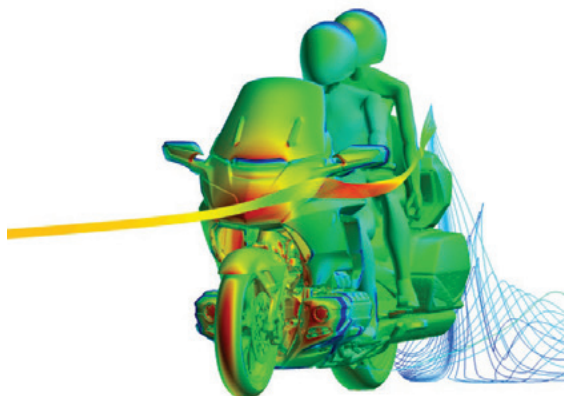


Fig. 14 Realizing compatibility between design and performance through repeated tests (example of CFD analysis)

5. モデルの完成

我々モデラに課せられる使命は、機能や性能とデザインを、高い次元で両立させ、魅力的な立体を創出することである。そのためには、平面に描かれたスケッチが示すイメージを、立体で成立させるための高い創造性が求められる。細部に至るまで一切の妥協を許さない信念と、飽くなき追求によって生まれた本開発の Gold Wing は、デザインに求められるすべての事柄に対してこだわり抜いたモデルである。Fig. 15 に完成したクレイモデルを、Fig. 16 にモックアップモデルを示す。



Fig. 15 Completed clay model of developed Gold Wing



Fig. 16 Completed mockup model of developed Gold Wing

6. まとめ

量産型モデルを完成させるためには、AD1 デザインコンセプトモデルと、コンポーネント側との要求を両立する必要があった。そのためには、クレイモデリングの段階で、再度これらを解釈しなおして、あらたなスタイリングテーマ、「Styling with Refined Sharpness and Tension 洗練さ

れた鋭さと緊張感」を追加することが有効であった。

解釈しなおした要素を、自分の眼と腕で再誕生（リボーン）させモデリングする。その際のイメージとして、「機能美の極致を象徴する日本刀」と、「力強い筋肉を有した陸上競技のアスリート」を設定し、造形していくことで、量産型モデルのスタイリングが完成した。

我々が、本開発の Gold Wing に対して創造したモデリングと、それによって生み出されたスタイリングが、お客様の高い満足度につながることを、そして、長きにわたって愛される存在になることを、切に願うところである。

参考文献

- (1) 会田樹穂子, 中西豊:2018 Gold Wing の開発, Honda R&D Technical Review, Vol.30 No.2, p.1-14
- (2) 佐藤靖博, 脇田展孝:2018 Gold Wing のスタイリングデザイン, Honda R&D Technical Review, Vol.31 No.1, p.1-10

■ 著 者 ■



岩田 秀和

2018 Gold Wing のスタイリングデザイン ー カラーリング ー

Styling Design for 2018 Gold Wing
ー Coloring ー

桂 川 碧¹

Midori KATSURAGAWA

要 旨

2018 Gold Wing のカラーリングデザインにおいて、唯一無二の「飛び抜けた存在感」を生み出すために、カラーだけではなく、素材、表面処理にまで踏み込んだカラーリングをおこなった。新色の赤色では、透明感のある彩度と深く落ち込むシェイドによって、劇的な色彩を実現した。車両の下側領域における金属質感の演出においては、全体的に黒色で覆われている中で、部分的な金属露出をすることで、より明快に金属感が向上する手法を適用した。これらの手法を持って、フラッグシップモデルとしての、「飛び抜けた存在感」を表現するカラーリングを実現した。

ABSTRACT

For the 2018 Gold Wing exterior design, the coloring design was carried out involving materials and surface treatment as well as the colors themselves, pursuing to create a “presence like no other” in its design. In the creation of the new red color, deep color saturation yet having clearness, and shadow falling to intense darkness were employed to represent a dramatic hue. In the expression of metallic feel of lower area on the vehicle body, the method, in which metallic expression is explicitly enhanced by exposed metal parts partially arranged within the whole area mainly outfitted in black color, was applied. By using those methods, the coloring design that represents the “presence like no other” deserving for the flagship model was successfully materialized.

1. はじめに

Honda 二輪車のフラッグシップモデルである Gold Wing が、前モデルから 17 年のときを経て、フルモデルチェンジされた (Fig. 1)。本開発にあたり、これまで培ってきた長距離ツアラーとしての魅力の継承と併せ、Generation X など新しい顧客層となる世代を取り込むため、開発コンセプト、「The Honda Premium Tourer 二人の感動にいつそうの輝きと充実を」が定められた。そこには、軽量化やコンパクト化、時代をリードする先進性などが盛り込まれていた⁽¹⁾。

一般的に、商品魅力を認識する第一歩は視覚情報によることが多い。そのため、色彩を含めた外観デザインが持つ影響力は大きい。特にカラーリングは、人の気持ちにダイレクトに訴えかけ、瞬時にその商品の持つコンセプトを伝えるという機能を持つものといえる。

今回この Gold Wing のカラーリングを、カラー、マテリアル、フィニッシュ (Color, Material, Finish: CMF) の全域にわたりマネージメントしていくために、存在感や

たたずまいといった、視覚を超えた感覚に訴えるカラーリングについても考察した。見た瞬間に心を震わせる色彩表現、新しい金属質感の表現、なども併せて、テーマとして設定した。



The Gold Wing Tour DCT Airbag (2018)

Fig. 1 Appearance of 2018 Gold Wing Tour

¹ 二輪 R&D センター

それぞれの具体的な取り組みについて、例を示しながら述べる。

2. Gold Wing シリーズのカラーラインナップ

まずは、2018 年モデルとして設定された Gold Wing シリーズの、全カラーラインナップを紹介する。この中から、それぞれの国や地域によってカラーの選択がされる。

今回の Gold Wing シリーズには、リヤトランク標準装備

の Gold Wing Tour と、リヤトランクレスの Gold Wing という二つのタイプのモデルが設定されている。

リヤトランク付きの Gold Wing Tour には 3 色のバリエーションを設定した (Fig. 2)。トップグレードとなる、Gold Wing Tour の Airbag 装着モデルには 2 色を用意し、うち 1 色には専用のグラフィックを施した (Fig. 3)。

また、リヤトランクレスの Gold Wing には 3 色を設定した (Fig. 4)。



Fig. 2 Color lineup of the Gold Wing Tour



Fig. 3 Color lineup of the Gold Wing Tour (airbag-equipped model)



Fig. 4 Color lineup of the Gold Wing

3. カラーリングテーマの設定

3.1. 各時代における Gold Wing のメッセージ

現代ではさまざまな商品分野において、Matured markets, 成熟市場という表現が用いられている。そのような市場状況のもとでは、商品開発においても、単に機能や性能を向上させるだけではなく、作り手の哲学や思いが重要な要素となっている。そこにお客様の共感を得ることができて、はじめて商品ブランドが形成される。

今回 Gold Wing のカラーリングデザインを検討するにあたり、お客様、ユーザに対して我々が伝えたい思いは何であるのか、歴代 Gold Wing のメッセージを振り返ることからはじめた。各時代のメッセージを Table 1 に示す。

このように、我々は Gold Wing から発信するメッセージを、時代の変化と共に進化させてきた。これらのメッセージに込められた思いの実現を通じて、Gold Wing はお客様に評価され、他のモデルとは一線を画す唯一無二の存在となっていく (Fig. 5)。

カラーリングデザインをおこなう上でも、次の世代のお客様が、Gold Wing と共に特別な時間を過ごすことができるように、という思いを込め、カラーリングにおけるメッセージとしてのカラーリングテーマを定めることとした。

3.2. 飛び抜けた存在感とカラーリングテーマ

歴代の Gold Wing が唯一無二であり続けることができ

Table 1 List of messages appeared in past catalogs

	Period	Message of catalog copy writing
1	1975-1979	King of motorcycles
2	1980-1983	The Interstate of the ART
3	1984-1987	Leading where no one can follow
4	1988-2000	An Extraordinary touring performance
5	2001-2017	Gold Wing is the gold standard of touring

た重要な要素に、その存在感がある。今回の Gold Wing では、さらにそれを超えた「飛び抜けた存在感」を表現したいと考え、新たなカラーリング手法を検討した。Gold Wing としての威厳を、ただそこに在るだけで体現されるたたくまいを通じて、感じることができることを目指した。

そもそも存在感やたたくまいといったものは、色や形といった視覚的、表面的なものに加え、質感や触覚なども含めたさまざまな感覚が影響し合うことで初めて認知されるものと考え。そのためには、単なる塗装の色調 (Color) にとどまらず、各パーツの素材 (Material) や、質感、仕上げ (Finish) の手法の違いがもたらす印象なども、統合的にマネジメントすることが必要となってくる。そこで我々は、カラーリングが持つ役割を広義にとらえ、「見た瞬間、触れた瞬間、またがった瞬間、感動し高揚させ、心震わせるもの」というフレーズを、カラーリングテーマとして掲げた。

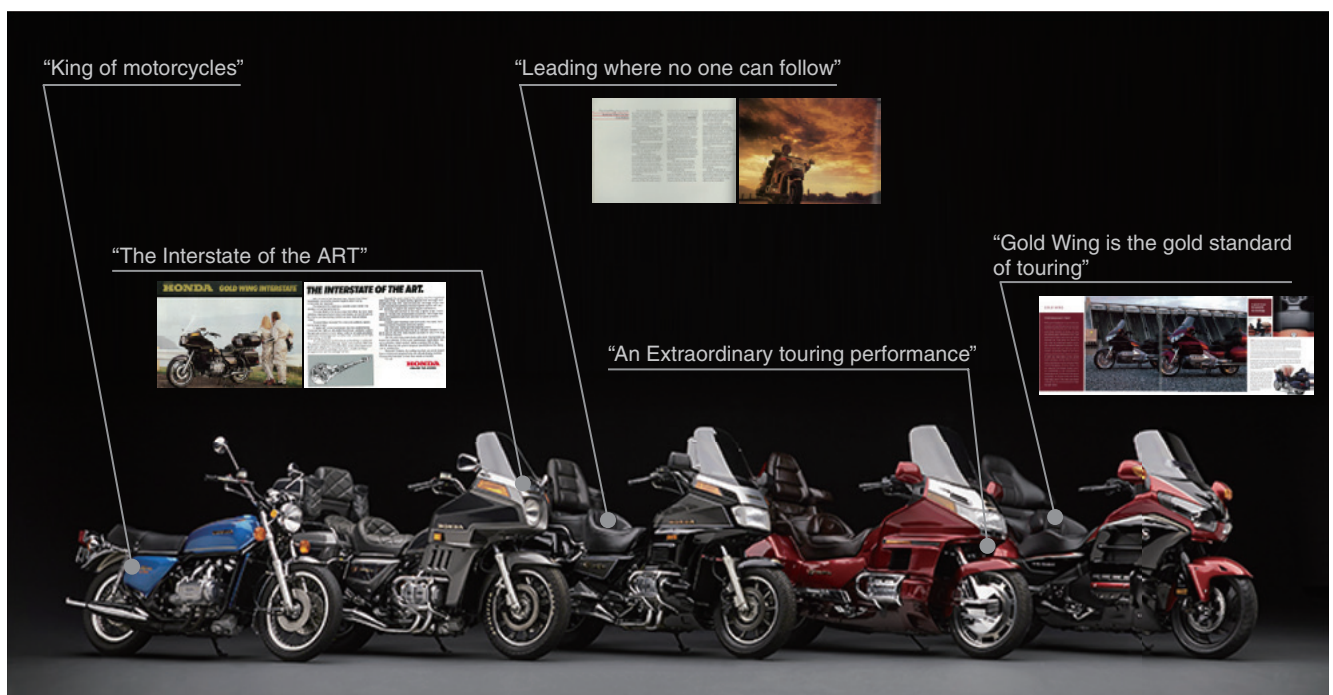


Fig. 5 Precursors of the Gold Wing

4. カラーリングテーマの実践に向けて

4.1. 統合的カラーリングマネジメント

カラーリング全体をマネジメントする観点から、それぞれの部品に対し、その役割に沿った質感処理を施すこととした。

唯一無二の存在である Gold Wing は、そのほとんどの部品が専用部品として開発される。そのため、各々の部品に対して最適な外観表現や表面処理をおこなうことができる。これは正に Gold Wing というモデルに与えられた特権である。具体的には、カラーパーツが多くを占める車両の上側領域には、高品質な塗装をはじめ、人が実際に触れる際の素材の色や触感、質感を追求し、丁寧に表現していくこととした。

一方、メカニカルパーツが多くを占める車両の下側領域には、機能と性能を支える個々の部品の存在を際立たせることを意識し、Gold Wing ならではの機能美を表現することとした。さらに、これら表情の違いによるコントラストにより、車両全体でフラッグシップモデルとしての上質感と、「飛び抜けた存在感」を表現することを目指した (Fig. 6)。

4.2. CMF

見た瞬間に心を震わせる色彩表現と、色彩を超える領域となる、マテリアルとフィニッシュについて考察した。

色彩表現については、これまでの Gold Wing においても、高級感のある色調にこだわって開発がされてきた。しかし、今回カラーリングにて付与したい、「飛び抜けた存在感」を表現するための、さらなる工夫が必要だと考えた。一瞬見ただけで心に強く残り、人の感情を突き動かす、そのような劇的な印象を与える色彩表現の実現が不可欠と考えた。

また、色彩を超える領域となる、マテリアルとフィニッ

シュによる質感表現にもこだわった。

しっとり柔らかい上質なレザーは、レザーの色だけでなく、触ったときの心地良い感触を持ち、その色と質感が一体となって記憶に残る。

また、パフやメッキを使い分けた金属パーツや、クリアコートによって塗装色に奥行きを付与するなど、フィニッシュの違いによって、赤、青といった色相だけでは表現きれない、高級感や上質感の表現もできる。

本開発においては、これら CMF 全体でカラーリングテーマを実践していく。

5. 具体的手法の紹介

劇的な印象を与える色彩を考えるにあたり、モータサイクルならではの動きや車体の姿勢にも着目した。モータサイクルは車体を傾けながらカーブを曲がる。また、路肩に停める際にはサイドスタンドを用いて、傾斜させた状態で停車させる。このような、モータサイクルならではのシーンひとつひとつが心に迫ってくるような、「飛び抜けた存在感」の表現を追求した。

5.1. 塗面表情による劇的な印象の表現

今回、Gold Wing に用いる塗料の開発にあたり、そのようなモータサイクルならではのひとつひとつのシーンが、劇的な瞬間となるように、塗面表情について熟考した。

濡れたような色の深みとハイライトに感じる彩度のきらめきと、そこからぐっと落ち込むシェイドを持つような塗装色を用いることで、対象部品の形状や、車両の動きによって切り変わる、塗面表情の落差を大きくする。そうすることで、車両の存在をより立体的に魅せ、劇的な印象を与える色彩表現ができると考えた。

本コンセプトに基づいて、今回 Gold Wing 専用に開発した新色、CANDY ARDENT RED と PEARL STALLION BROWN の2色について詳述する。

5.1.1. 新色 CANDY ARDENT RED の開発

(1) 赤という色の持つ意味と目標 赤は Honda にとって、その歴史が、常にスポーツ、パッション、チャレンジによって紡がれてきたことを物語る重要な色である。新時代のフラッグシップモデルを目指す本開発においても、これまでの赤の、さらに上をいく赤色にチャレンジしたいと考えていた。そのためには、見た瞬間に心を震わせる、上質で魅力的な赤を生み出すことが必須であった。また、色相としては、黄味にも青味にも振れず、赤の中の赤を目指した。

(2) 塗装構造による表情作り 現在、高級四輪車に採用される光輝材の多くは、ガラガラと派手に輝く大きな粒子ではなく、比較的小さな粒子を用いている。それにより、緻密さ、上質さを感じさせるのが、最近のトレンドだ。今

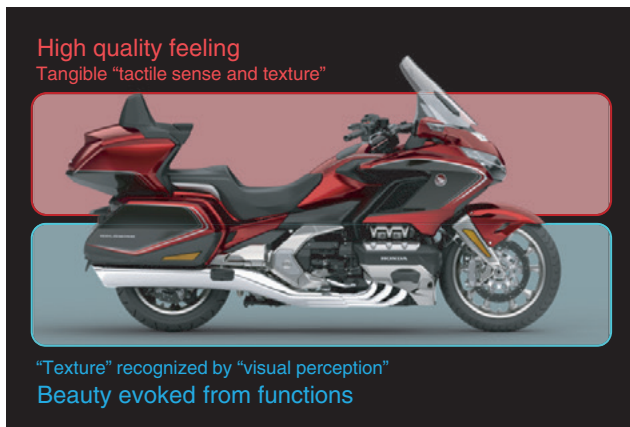


Fig. 6 Defining characteristics clearly separated in expressions of exterior color arrangements

開発の Gold Wing においても、同様の手法を適用し、劇的でありながら上質な色彩にしようと考えた。

透明感のあるカラークリアにより彩度を保ち、塗装面のスムーズな明度変化を感じさせることで、スタイリングされた形状の豊かな面を表現した。また、光の当たらないシェイド面への移り変わりでは、一気に明度が落ち込むことで、立体形状が生み出すコントラストを表現することを意識した。そのため、三層構造のキャンディ塗装仕様とし、色に奥行きを持たせ、フラッグシップモデルとしての上質感を表現した (Fig. 7)。このような色設計の下、新しい顔料や光輝材を採用しながら、繰り返し調色をおこなった。なお、ここでいうキャンディ塗装とは、金属フレークを含むベース色の上に、カラークリア層を持つ塗装仕様を指す。

(3) 確認と評価 調色中の色をモックアップモデルに塗装し、実車状態による色調確認をおこなった。塗装色は、塗られる面積や形によって見え方が異なってくるため、実際の大きさや形状を持ったモデルに塗装した状態で確認する必要がある。このように、立体による検証を何度もおこなうことで、新しいスタイリングをより美しく見せられているか、「飛び抜けた存在感」の表現ができていないか、について模索した。すなわち、車両を遠くから眺めたときにも、人の感情を突き動かす、劇的な印象を与える色彩表現となっているかどうかを検証する必要があった。

調色の最終段階には、モックアップモデルを屋外に出し、他のデザイナーにも確認を依頼した。初めてこの新色の赤を目にした彼らは、「すごい」と声に出し、驚きの表情を見せた。そして、その驚きはすぐに「良い」という言葉と共に笑顔に変わった。その一連の表情の移り変わりを見たときに、目指していた「飛び抜けた存在感」を表現できたのではないかと感じた。Fig. 8 に旧来の塗色、Fig. 9 に新規開発色を示す。

(4) 決定塗料の仕様と効果 ベースコートには、従来のアルミフレークに対し、薄く滑らかな表面を持ち反射率

の高い、次世代高輝度着色アルミフレークを採用し、より強くシャープな輝きを実現した。また、カラークリアには、ナノ顔料を採用することで透過率を高め、ベースコートに到達する光の量を格段に向上させた (Fig. 7)。これらの材料の採用により、従来のキャンディ塗装では成し得なかった、高彩度を有する高い透明感を実現し、くっきりとした明るいハイライトと、濃い陰影を表現することができた。

これらにより、しっとりとしたような色の深みと、強いコントラストによって生み出された豊かな立体感によって、Gold Wing のプレミアムツアラーとしての「飛び抜けた存在感」を表現することができた。すなわち、その色を見た



Fig. 8 Conventional candy color

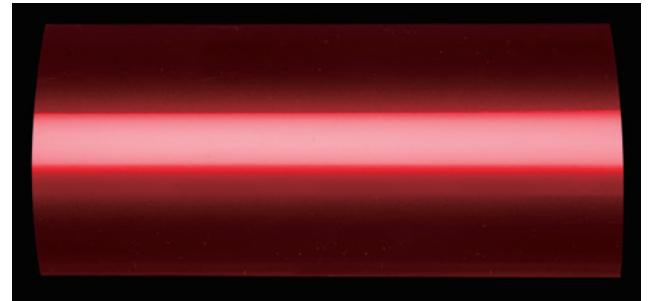


Fig. 9 Developed "CANDY ARDENT RED"

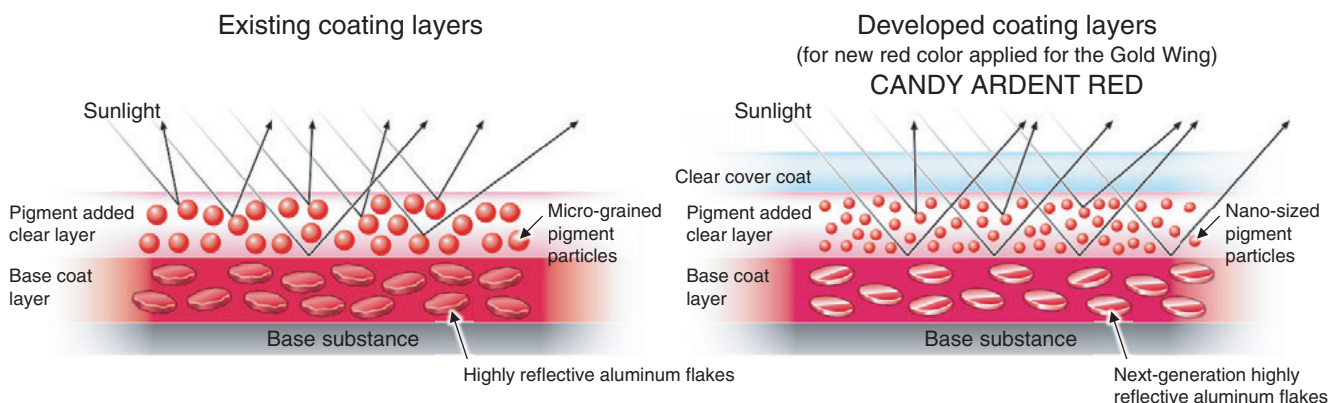


Fig. 7 Schematic drawings of paint layers comparing existing method and developed method applied for CANDY ARDENT RED

瞬間に、人の心を震わせ、人の感情を突き動かす、劇的な印象の、上質で魅力的な赤に仕上げる事ができたと考える (Fig. 10, 11, 12).

5.1.2. 新色 PEARL STALLION BROWN の開発

もう一つの新色、PEARL STALLION BROWN は、軽量、軽快なイメージの、トランクレスタイプの Gold Wing に向けた専用色として開発した。開発に際してイメージし



Fig. 10 CANDY ARDENT RED in rider's view



Fig. 11 CANDY ARDENT RED in front diagonal view



Fig. 12 CANDY ARDENT RED applied on trunk

たのは、陽光を反射するサラブレッドの躍動美だった。

モータサイクルは鉄の馬と呼ばれることがあるように、馬と重なるイメージを持っている。速さを競うために鍛え抜かれたサラブレッドの引き締まった体は、その馬の持つパフォーマンスを予見させる。筋肉の動きに合わせ、しなやかに美しい毛並みが輝く様子をイメージしながら、色の作り込みをおこなった。

前述の CANDY ARDENT RED 同様に、彩度の高さと深い陰影の両方を持たせることで、劇的な印象の色彩とした。光輝材は少粒形を選択し、スムーズな色の連続的变化による上質さを表現した。

また、このトランクレスタイプの Gold Wing は、フレームや足まわりのカラーを、ダークな色調でまとめている。詳細は6章で後述するが、それによって、スポーティさとすごみを表現した。

こうした車両全体のカラーマネージメントにより、Gold Wing のバリエーションによるコンセプトの違いを、よりいっそう明確に表現した (Fig. 13, 14)。

5.1.3. ツートングラフィックの開発

トップグレードモデルの Airbag 装着仕様車には、前述の Gold Wing 専用色、CANDY ARDENT RED を主体色



Fig. 13 PEARL STALLION BROWN



Fig. 14 Looks of PEARL STALLION BROWN in driving scene

に、奥行きを感じさせるブラックメタリックをツートンカラーとして配し、最上級グレードにふさわしいシックで豪華な存在感を表現した。さらに、ピンストライプグラフィックを添えることで、スタイリング上重要な形状やラインを強調し、本モデル特有の美しさを表現した。

Gold Wing というフラッグシップモデルゆえ、追加される専用グラフィックについても、無二の上質感と存在感を表現しつつ、伝統と共に新規性も感じるものでなければならなかったと考えていた。しかし検討当初、キャラクタラインとなる稜線に沿ってストライプラインを引いてみたが、ねらったイメージには程遠いものであった。

ストライプなどのグラフィックは、本来はボデー形状の美しさを際立て、新たな価値を加えるのが役割である。そこで、このスタイリングのキーラインを探る過程において、デザインフロアを真っ暗にし、開発中のクレイモデルに光を当てることを試みた。光源を少しずつ動かしながら、光の当て方を変え、ラインの変化がどのように現れるのかを観察した。

すると、今までメインキャラクタだと思い込んでいた、一番外に張り出している稜線部分のライン (Line 1) ではなく、影となる、下方に向いている面の奥にある谷部分 (Line 2) に、一番強い光が凝集することが分かった (Fig. 15)。そこで、この Line 2 をキーラインとして、スケッチを描き直した (Fig. 16)。



Fig. 15 Deliberation in pursuit for effective key-line



Fig. 16 Defined key-lines for decorative graphics

その結果、本モデルのスタイリングをいっそう強調しながら、プロポーションの伸びやかさも表現するグラフィックを生み出すことができた。そして、それにより、ねらいとしていた最上級グレードにふさわしいグラフィックデザインのテーマとした、シックで豪華な存在感を実現することができた (Fig. 17, 18)。

また、本モデルのピンストライプには、触れた際に段差を感じにくい 53 μm 厚の、極めて薄いストライプシートを採用した (通常は 80-135 μm)。これにより、施したストライプがボデーに溶け込んでいるような質感が表現できた。

5.2. マテリアル、フィニッシュ領域での表現

5.2.1. 質感と触感を高めたシートレザーの開発

ー革シボ柄の検討ー

「飛び抜けた存在感」を演出するには、上質感もまた重要な要素である。本開発においては、Gold Wing にふさわしい上質な手触りを実現するために、樹脂部品やシートレザーに施すシボにも深くこだわった。

特にシートレザーは、新しいシボパターンを開発し、見た目の新しさに加え、触れた際に手に伝わる温度やしっとり感といった質感 (触感) に配慮した。その材質は、他の多



Fig. 17 Fixed key-line for decorative graphic on middle cowling



Fig. 18 Appearance with finalized decorative graphics

くの二輪車と同様、Polyvinyl Chloride(PVC)レザーを採用し、上述のような、より上質な手触り(触感)にこだわり検討を重ねた。

これまで、歴代 Gold Wing のシートには、大柄な革シボ柄が用いられることが多かった (Fig. 19)。これに対し現在のトレンドは、上品さを感じさせる中サイズの革シボ柄へと移行している (Fig. 20)。そこで、現在のトレンドにマッチした、高い質感の、新規の革シボ柄を検討した。

レザーの質感は、触れたときの肌に感じるしっとり感や、温度感覚によって変化する。それらはシボ柄による微細な凹凸と肌の触れ合い方の影響が大きいため、その形状を吟味して上質感を高めていった。

また、上質なレザーかそうでないかの感覚は、視覚情報にも大きく左右される。仮に本草を用いても、艶の度合いが過度に高かった場合など、私たちの視覚を通した受け止め方は、安価なビニール製品という印象を持つことがある。そのため、艶を抑えた、上品な見た目になるような表面の加工が必要となる。

その一方、二輪車のシートは、炎天下の直射日光や風雨



Fig. 19 Large texture design of leather applied for the previous Gold Wings



Fig. 20 Medium-sized texture design of leather that makes the elegance of the current trend

にさらされ、ライディングでこすられるなど、厳しい条件、取扱いの下で使用される。そのため、傷が目立たないような配慮も必要であり、完全なマット地にすることは容易ではない。これらの条件を満たしつつ、求める上質感を達成するために、光沢の度合いやシボ柄のサイズの細かな調整と、手触りの確認を繰り返し、新しい革シボ柄を作り出すことができた (Fig. 21)。それにより、今後の高級路線の基準とも成り得る、上質で上品な質感を持ったシートレザーを開発できた。

5.2.2. 車両下側領域における機能美の表現

機能美を表現する車両下側領域において、デザイン上おこなった表面処理などのフィニッシュについて、以下に述べていく。

まず取り組んだのが、金属質感表現の検討である。車両下側領域に配置されている、エンジンをはじめとした、さまざまな部品の素材は、金属や樹脂などが混在し、複雑に入り混じった状態となっている。カラーリングマネジメント観点より、それらの部品群に対して、金属質感表現で統一したいと考えた。

最適な手法を模索するプロセスで、二輪車以外のさまざまな製品について調査していたところ、ある高級一眼レフカメラが目に留まった。それは全体の印象は黒っぽいが、各種の金属質感を、ボデーの一部や取り付けられているパーツ類で見せるデザインであった。製品全体に金属が現れているよりも、全体的に黒色で覆われている中の、部分的な金属露出のほうが、より明快な金属感を感じることができた。この体験は、黒と金属表現の対比的配置を的確にマネジメントすることで、金属感を際立たせることができる視覚的效果を気付かせてくれた。黒色に囲まれた中に表出しているボルト一本に至るまで気を配り、金属素材をどのように効果的に配していくべきかを考えた。そして、



Fig. 21 PVC seat leather with grain patterns developed this time

黒とシルバーの面積比についても、上記考察を元に決定された。以上に述べた手法をもって、車両下側領域の見せ方が決定された (Fig. 22)。

5.2.3. 新しい水平対向6気筒に対するデザイン表現

コンパクト化された新エンジンの存在感を際立たせるため、エンジンの顔とも言えるヘッドカバーを、いかに精緻に美しく見せるか検討した。従来のヘッドカバーの表面処理は、クロームメッキのようなバフクリアであったが、本モデルではサテンバフを用いたヘアライン処理とした (Fig. 23)。

従来モデルは、全体的にメッキパーツをふんだんに使用し、きらびやかで豪華な雰囲気を演出していた。対して、本モデルでは、Generation X などの新たな顧客層のデザインの志向や時代のトレンドを強く意識した。そこで周辺のフレームやサスペンションなどは、マットで落ち着いた金属質感による、機能的美しさを表現することとした。さらに、サテンバフによるヘアラインのような、手仕事の技を感じさせる処理を施すことによって、ユーザにいつそうの愛着を感じていただければと考えた。



Fig. 22 Lower area of vehicle body with coloring design having intention to make metallic feel stand out



Fig. 23 Head cover with hairline treatment

6. キャラクタの違いによる世界観の演出

5.1.2. 項の新色開発 (PEARL STALLION BROWN) でも触れたように、本開発の Gold Wing シリーズには、トランクを標準装着しない仕様がある。前述のとおり、トランクレスの Gold Wing は、見た目の軽快さからも、スポーティな雰囲気を持たせている。そのため、フレームや足まわりなどの機能パーツの色彩表現においても、CMF 全体で視覚的に感じられる違いを設け、異なる世界観を演出した。

このバリエーションでは、ほとんどの車両下側領域の部品を、質感の違う黒、もしくはダークメタリックグレーで揃え、最小限のアクセントとして、ボルトやキャップのみに輝く金属表現を入れた。ダークでローコントラストな色調とマットな質感で構成することにより、迫力あるスタイリングを強調した。車両の下側領域のフィニッシュ違いによる全体の印象の違いを Fig. 24 に示す。

これら二つのバージョンを持って、幅広いユーザの気持ちに沿えればと考えた (Fig. 25)。



Fig. 24 The Gold Wing Tour and the Gold Wing



Fig. 25 Precious time spent with the Gold Wing

7. まとめ

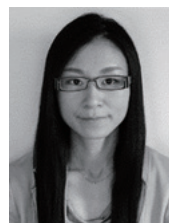
本稿においては、17年ぶりのフルモデルチェンジをおこなった Gold Wing の、カラーリングデザインに対して設定した考え方と、その具体的な展開手法についての概要を述べた。完成車全体としての質感を視野に入れ、そのものがまとう存在感までも表現するという領域にまで踏み込んで、色、素材、仕上げ処理の開発と展開をおこなった。そして、見る人の持つさまざまな感覚に訴えかける形でデザインを構成し、それを通して「飛び抜けた存在感」を表現した。

今回、このような想いを込めて展開したカラーリングデザインを通じて、人と Gold Wing が出会う一瞬を特別なものとし、心震わすロードトリップへと誘い、Gold Wing と過ごす時間をより豊かなものとするのができればと願っている。

参考文献

- (1) 会田樹穂子, 中西豊:2018 Gold Wing の開発, Honda R&D Technical Review, Vol.30 No.2, p.1-14

■著 者■



桂 川 碧

2018 Gold Wing のスタイリングデザイン ーパワーユニットー

Styling Design for 2018 Gold Wing
– Power unit –

澤 邊 昭 博¹
Akihiro SAWABE

要 旨

2018 Gold Wing のパワーユニットをデザインするにあたり、「メカニカルライン」を主眼とし、「機能美」の実現に努めた。モータサイクルの機能、性能に関心のある人の欲求に応えるため、個々の部品が持つ機能が理解しやすいデザインを心がけた。これらにより、先進性を感じるデザインを実現すると共に、最新技術に対する所有感をも満たすパワーユニットを完成させた。

ABSTRACT

In designing the power unit of the 2018 Gold Wing, we focused on mechanical lines in efforts to express a functional beauty with its exterior design. We strove for a design that clearly telegraphs the functions of the individual parts to sate the desire of motorcycle enthusiasts interested in the function and performance of the motorcycle. In implementing these design themes, we have produced a motorcycle with an advanced feel and a power unit with a finish that satisfies the itch for owning the latest technology.

1. まえがき

Honda のフラッグシップモデルである、2018 Gold Wing に搭載される、新開発水平対向6気筒 (F6) エンジンのデザインをおこなった。デザインに取り組むにあたり、車両の全体デザインにおけるエンジンデザインの役割について考えることから始めた。

まず、スタイリングテーマとして掲げられた「Styling with Refined Sharpness and Tension 洗練された鋭さと緊張感」⁽¹⁾を受け、車両上側領域における「流麗さと軽さ、Dynamic fluid-edge surface」と、車両下側領域における「機能美と先進性、Mechanical line」を二つのデザイン表現領域とし、それぞれのデザインテーマを明快にした (Fig. 1)。

エンジンのデザインは、上記「機能美と先進性、Mechanical line」の表現領域の中核を担っている。本エンジンのファイナルスケッチを Fig. 2 に示す。

そのため、本モデルの持つフラッグシップならではのプレミアム性や、唯一無二の F6 エンジンにふさわしいデザイン表現が求められることとなる。

そして、エンジンというモータサイクルにとっての心臓部に対し、強い興味を持つユーザは多い。今回設定されたデザインキーワードのひとつ、「モータサイクルらしさ」⁽¹⁾を表現するためにも、エンジンは積極的に見せていく方針とした。

それに伴い、エンジン周りのエアマネジメントに対する考え方も整理した。先代までの Gold Wing では、シリンダ

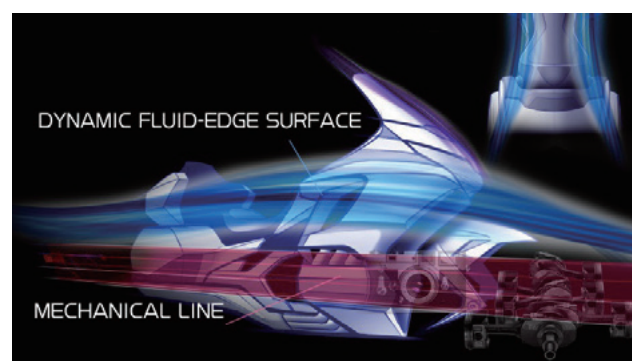


Fig. 1 Two design zones and their designated themes

¹ 二輪 R&D センター

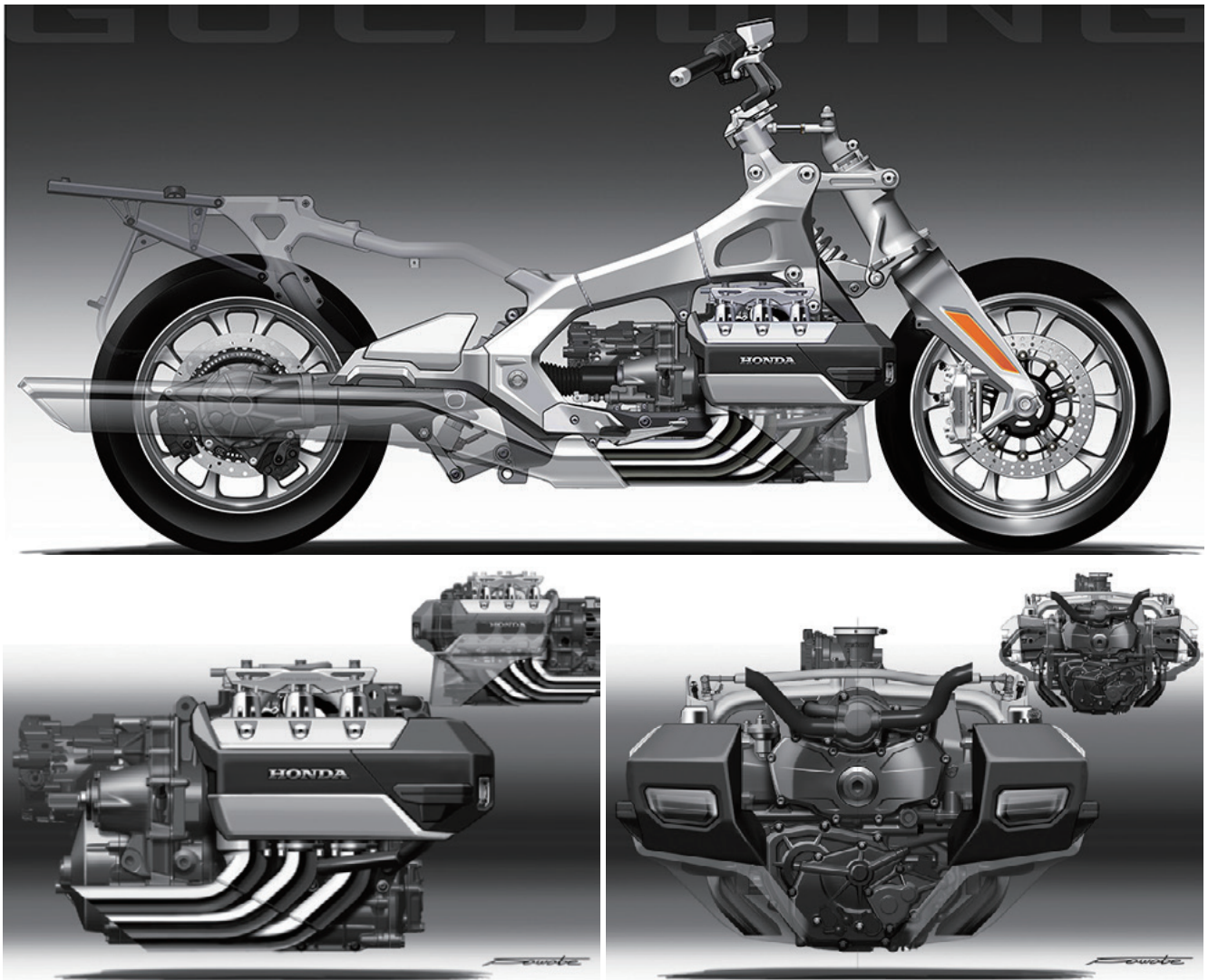


Fig. 2 Engine situated in center of mechanical line

ヘッド部分以外を全て外装部品で覆うことで、外側の空気の流れを整えると同時に、エンジンの熱からライダーを守る役割を果たしていた。

そのため、外装部品内側には、熱を逃がすための空間を確保する必要があり、車体大型化の一つの要因ともなっていた。今回はエンジンを積極的に見せるという考えのもとに、整流効果のある最小限の外装部品を用いて熱を逃し、エンジンの冷却と外装部品の小型軽量化の両立をねらった。

また、機能部品の塊であるエンジンのデザインをするにあたっては、機能を十分に理解した上でデザインをすることが必要となる。そのため、エンジン設計者と詳細に意見を交わしながらの推進となった。

それらの考え方を持って、単体で見てもメカニカルな機能が美しく表現され、クールで先進的な印象を与えるエンジンデザインを目指した。エンジンの存在を際立たせることで、決して少なくはない、前述したエンジンに興味を持つユーザーの満足感や所有感を満たしたいと考える。

2. メカニカル表現 — 機械を魅力的に表現する —

人工的に作り出された機械的な造形物は、一般的に、「円弧や直線で構成された、無機的な形状」である (Fig. 3)。そのため、デザインをする上でも、メカニカルな表現をおこなうなら、無機的な要素を用いた方が理解しやすい。

それとは逆に、植物や動物のような自然界に存在するものは、「単純な円弧や直線ではない、有機的な形状」をしている (Fig. 4)。

今回の表現領域ごとに設定されたデザインテーマ、「機能美と先進性, Mechanical line」の表現領域に沿ったメカニカル表現には、無機的な形状を積極的に取り入れることを意識して進めることとした。

2.1. 理解しやすい機能表現

エンジンのような機能部品において、単に構造のままの意匠とした場合、煩雑な形状となることがある (Fig. 5)。フ

ラグジュアリーモデルのエンジンにふさわしい質感とすることと、前章に上げたような、エンジンの外観に強い興味を持つユーザに対して、各部品の役割や構造が分かりやすく伝わるよう、各部のデザインを工夫した。

以下に、本開発でおこなった、構造や機能をイメージしてデザインをした例を紹介する。内部の構造と関連付けた

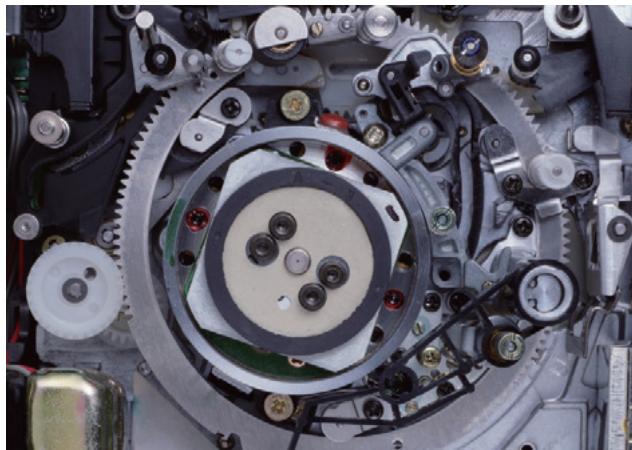


Fig. 3 Objects having mechanical and/or artificial shapes are commonly recognized as geometric shapes

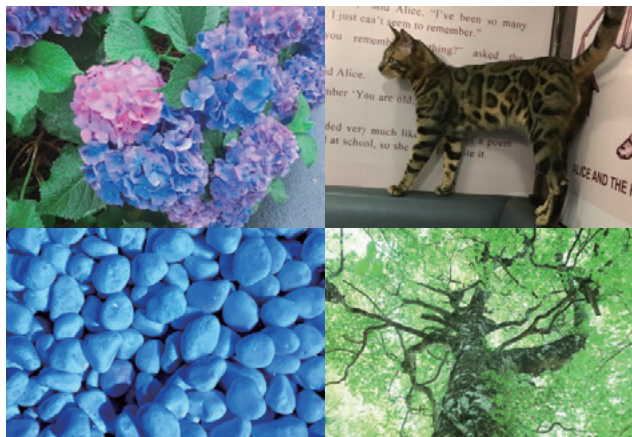


Fig. 4 Shapes of things that exist in nature are commonly recognized as organic shapes

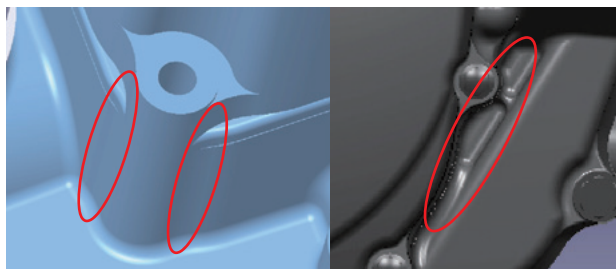


Fig. 5 Examples of things that give sense of inconsistency

デザインを付加することで、ケースやカバーの本来の役割に加え、メカニカルイメージを伝える媒体とした。

2.1.1. カムチェーンラインの表現

エンジン前面の中心に位置するフロントカバーから両翼へと広がる、シリンダ、シリンダヘッドにかけて、カムチェーンが収まる形状に合わせた段差を設けた。Fig. 6 の、赤グラデーション部分が段差となる。

2.1.2. 吸気から排気へのストレートライン

インテークマニホールドからエキゾーストパイプにかけて、上下方向に抜けるストレートラインを意識したデザインを施した。先代までのエンジンでは、バルブ配置位置の関係から微妙に前後にずれている吸排気ラインを、ヘッドカバーのボルト配置を工夫するなどしてスッキリと見せていた (Fig. 7)。本開発のエンジンでは、前後にズレのない吸排気レイアウトとなったため、上下のストレートラインを強調したデザインとした (Fig. 8)。

さらに、片側3本の排気管の配置や、集合していく様子にも配慮して、シンプルかつ機能的な外観を目指した。

2.1.3. インテークマニホールドカバーの表現

前項のストレートラインの一翼を担うインテークマニホールドカバーは、内部のインジェクタやフューエルパイプの配置がイメージできる形状とした (Fig. 9)。

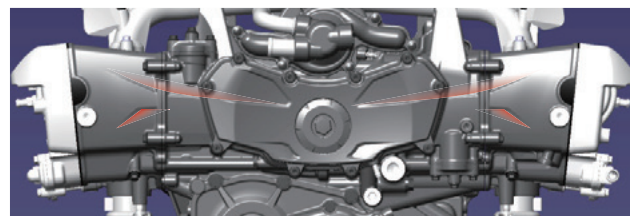


Fig. 6 Front cover design that makes viewer imagine movement of cam chain

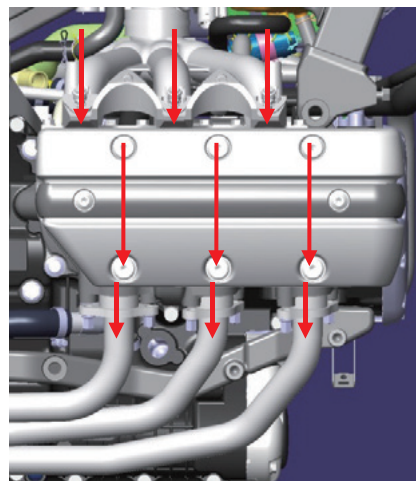


Fig. 7 Design applied to previous Gold Wing

2.1.4. 駆動系カバー 3点

フロントカバー下部の3部品、ミッションホルダ、シフトモーターカバー、リダクションギヤカバーは、完成車状態では外部からは見る事のできない駆動系部品である。しかし整備時などで外装部品を外した状態でも、エンジンデザインの印象を変えないための意匠を施した。

これらは内蔵する駆動系部品を支える機能部品であり、カバー内部には強度上必要なリブが施されている。それらリブを可能な範囲で外側に出し、外観意匠として活用する

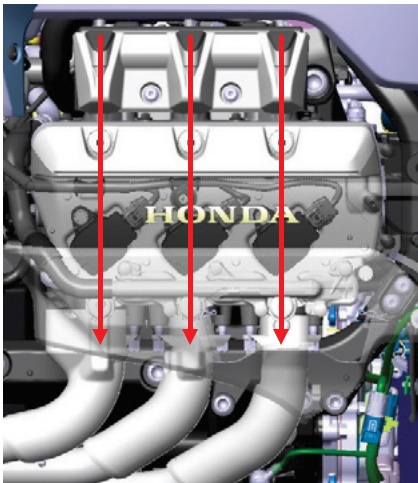


Fig. 8 Design applied to developed Gold Wing

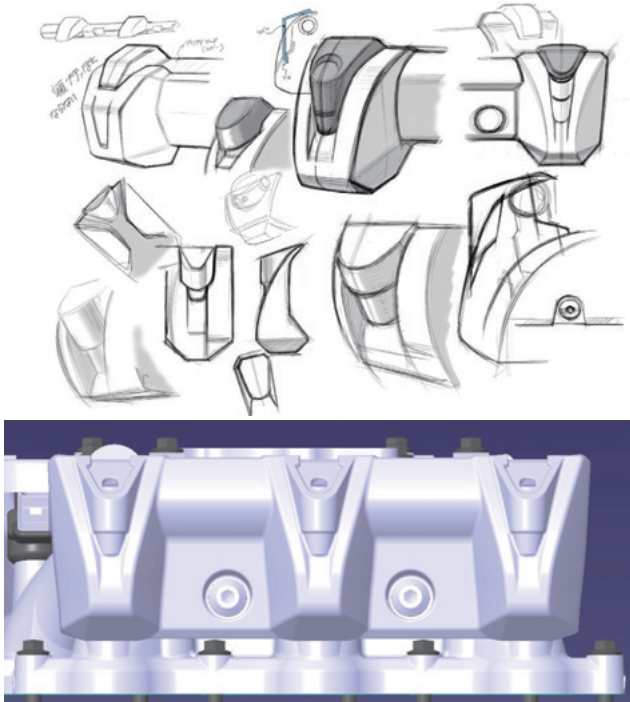


Fig. 9 Design of covering of intake manifold that makes viewer easily imagine inside structures

ことで、不要な重量増加無しに、メカニカルなイメージを付与することができた (Fig. 10)。

2.1.5. シリンダヘッドサイドカバー内部の配線

シリンダヘッドサイドカバー内部の電装パーツの配置にも気を配った。トップコイルのプラグの傾き、ホースや配線の通し方にもこだわって、カバーを外したときの見栄えに配慮した (Fig. 11)。

2.2. 多面体と基調線による機能の象徴表現

本章の冒頭に述べた、メカニカルなイメージを具体化する無機的な形状として、多面体による表現を試みた。大きな塊から機械によって切削されて生まれたような面表現とすることにより、内在する機械部品の精度の高さまで表現した。機能美と先進性の中核を担うエンジンデザインに適した表現手法となったと考える (Fig. 12)。

特に中心的存在となるアルミニウム製のヘッドカバーにおいては、サテンバフによる金属質感表現を可能とするため、ボルトの締め付け座面やカムチェーン室周辺の凸凹を可能な限り減らし、シンプルな面形状とした (Fig. 13)。Fig. 14 に今回適用した多面体活用のデザイン、Fig. 15 にそれとは対象的な有機的な面形状のデザインの例を挙げる。

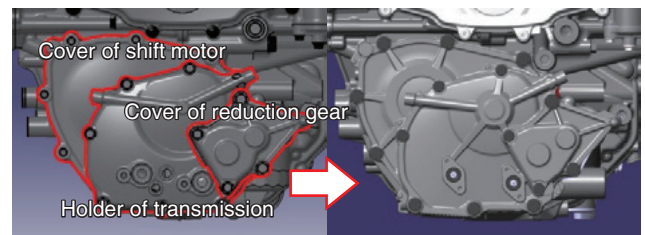


Fig. 10 Covering of drive system that is divided into three pieces

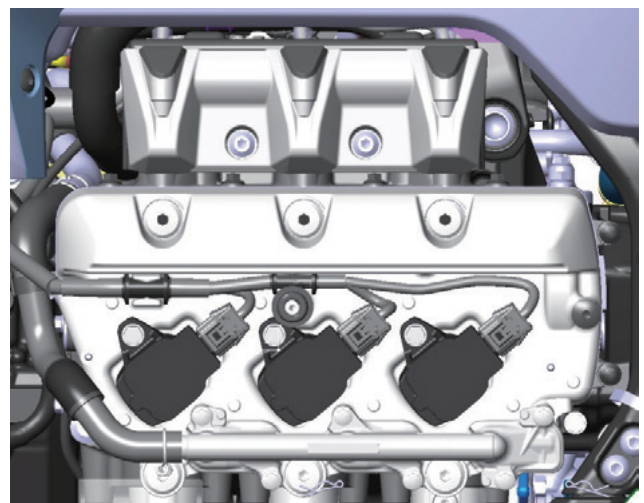


Fig. 11 Consideration on appearance when covering is removed

また、このエンジンを核としたメカニカルラインは、Gold Wingのプロポーション上のキーとなる前後に水平な基調線でもある。エンジンの部品のデザインをおこなうに



Fig. 12 Engine parts constituted by polyhedrons

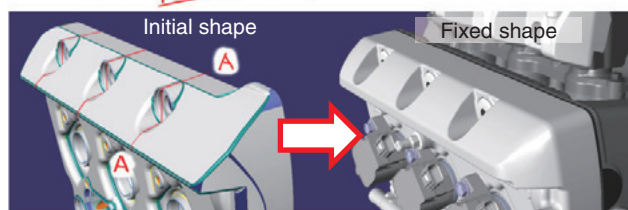
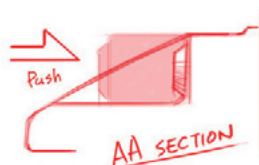


Fig. 13 Simplified surface shape for "polishable shape"

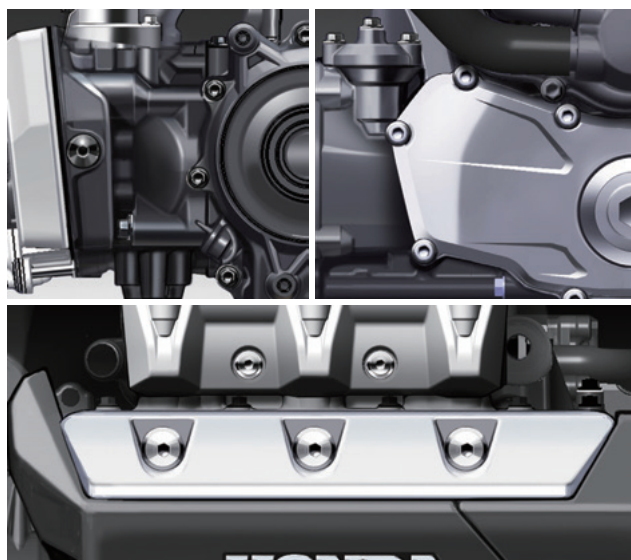


Fig. 14 Designs applied to developed Gold Wing

あたり大切にしたのは、基本となる各部構成要素が車体全体の基調線の方向と合っていることである (Fig. 16)。これにより、車体全体に一体感が生まれ、デザインが煩雑になることなく、車両下側領域のデザインテーマ「機能美と先進性、Mechanical line」にもつなげることができた。



Fig. 15 Example of design using organic shape elements

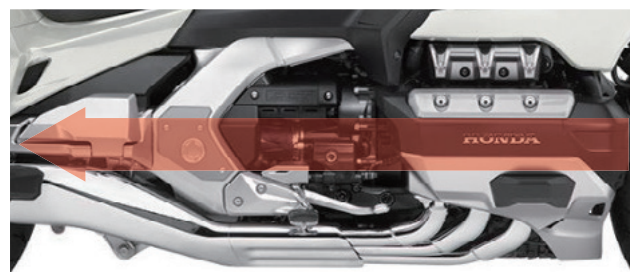


Fig. 16 Integrating components with base character line of the vehicle design

3. エンジンデザインの主張を補助する演出 —細部へのこだわり—

3.1. ケース締め付けボルト受け部の形状

本開発のエンジンでは、ボルト締め付け袋部といった極めて小さな部分に対しても形状の見直しをおこなった。エンジンケース面に 20 箇所あるボルト締め付け袋部は、一般的な丸みを帯びた半球体の形状となっていた。しかし、本開発では、多面体を多用したシャープなエンジン周りのデザインとマッチするよう、端部を円錐状に削り落とした形状とした (Fig. 17)。このような変更は、決して目立つものではないが、全体の調子を整える上で大切な配慮といえる。

3.2. ボルトの選択

新たに M6 ボルトにおいても、ボルトの頭が凹形状となっているフランジボルトを積極的に採用した。その駄肉を削ったシャープな形状から、メカニカル感を演出すると共に、微小ながらも軽量化にも寄与した (Fig. 18)。

3.3. 目立たせない工夫 — コンパクト化 —

エンジンや車体を保護するためのエンジンガードやパニアケースのガードに対し、本モデルのメカニカルラインに調和するデザインを施した。先代 Gold Wing においてクロームメッキで統一感を出していたガード類の機能はそのままに、パイプ径を必要最小限とし、コンパクトなカバーで覆うデザインとした (Fig. 19)。カバーの形状は周囲のデザインとなじむシンプルなものとし、色調は主張を抑えた黒とした。また、材質はラバーとし、路面への接触時に破片などが発生しないように配慮した。

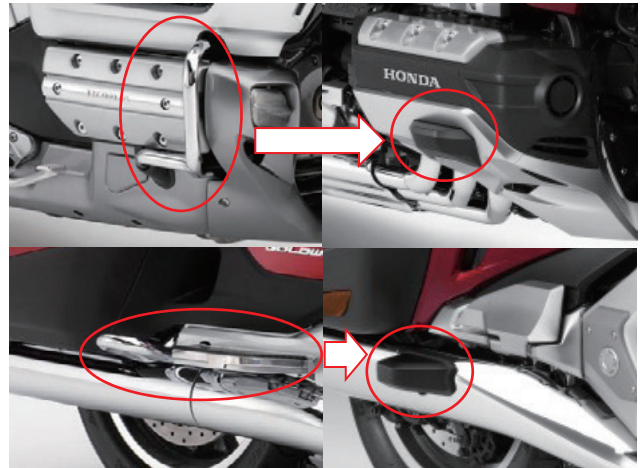


Fig. 19 Design making components inconspicuous

4. まとめ

Honda のフラッグシップモデルである Gold Wing に搭載される、唯一無二の F6 エンジンにふさわしい、機能美と先進性を表現した。エンジンというモータサイクルにとっての心臓部に対し、外観はもとより、普段は外からは見えない細かい部品にいたるまで、明快なデザインテーマを持ち、意思を込めてデザインをおこなった。メンテナンス時などには、さらなるデザイナーのこだわりを感じていただければと思っている。

今回の Gold Wing のエンジン意匠を通じ、こうしたデザイナーからのメッセージがユーザに伝わることを、心から願っている。

参考文献

- (1) 佐藤靖博, 脇田展孝: 2018 Gold Wing のスタイリングデザイン, Honda R&D Technical Review, Vol.31 No.1, p.1-10

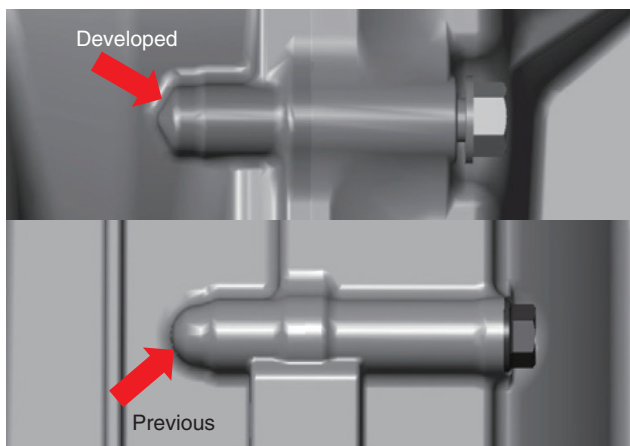


Fig. 17 Example of design applied to fine part (Shape of receptacles for bolts used for fastening engine case)

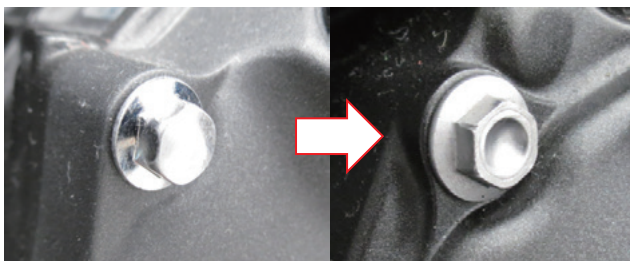


Fig. 18 Adoption of flange bolt contributing to the mechanical appearance and weight reduction

■ 著 者 ■



澤 邊 昭 博

2018 Gold Wing のスタイリングデザイン ーライティングシステムー

Styling Design for 2018 Gold Wing
– Lighting system –

栗 城 大 亮¹
Daisuke KURIKI

要 旨

2018 Gold Wing のライティングシステム (灯火器) のデザインをおこなった。機能と外観の両面から先進性を表現すべく、LED を用いた多眼式ヘッドライトによる表情づくりにチャレンジした。また、Gold Wing のアイデンティティとなっている「ウイングライン」を新たなライティングシステムによって構成し、そのアイデンティティを車体前後に配することで、車体全体のイメージの統一を図った。先進性と伝統を重んじたライティングシステムの実現によって、本 Gold Wing のデザイン開発に大きく寄与した。

ABSTRACT

We created a design for the lighting system of the 2018 Gold Wing motorcycle. To express a sense of innovation in terms of both function and appearance, we attempted to use multiple-eye LED headlights to create a “facial expression” for the motorcycle. In addition, we re-created the “wing line,” the pattern which represents an important part of the brand identity of the Gold Wing, using the new lighting system. We unified the impression given by the overall body of the motorcycle by incorporating the wing line pattern in the designs for both the front and the rear of the body. Our new lighting system design values both innovation and tradition, and it represents a big contribution in the development of the new design of the Gold Wing.

1. はじめに

2018 Gold Wing (Fig. 1) のライティングシステムをデザインするにあたって、新たな個性を打ち出すと同時に、Gold Wingらしさの表現が望まれた。

Gold Wing の顔となるフロントフェアリングには、翼を左右方向に大きく広げるように、ヘッドライトとウインカが配置されている (Fig. 2)。我々は、その形状から「ウイングライン」と名付け、ひとつのデザインアイデンティティとして継承してきた。本開発においても、そのアイデンティティを引継ぎながら、先進性を象徴する技術の導入と、個性ある表情作りが求められた。

また、リヤコンビネーションライトのデザインにおいては、フロント部分が与えるイメージをリヤ部分にも反映するという、統一感の演出に挑んだ。本モデルのスタイリン



The Gold Wing Tour DCT Airbag (2018)

Fig. 1 The 2018 Gold Wing Tour

¹ 二輪 R&D センター



Fig. 2 The Gold Wing in former generations

グテーマ、「Styling with Refined Sharpness and Tension 洗練された鋭さと緊張感」⁽¹⁾を具現化するための、ライティングシステムデザインによるアプローチについて、以下に述べていく。

2. フロントデザイン

Gold Wing は、その時代の先進技術を取り入れたデザインによって先進性を引き立たせ、それぞれの時代を象徴してきたモータサイクルである。また、それがひとつのアイデンティティにもなっている。

そこで、ヘッドライト用光源として二輪車にも普及が始まっている LED を採用し、LED だからこそ実現できる新しいウイングライン、新しいフラッグシップの顔づくりにチャレンジした。

2.1. ヘッドライトデザインのキーコンセプト —ウイングラインの継承と進化—

一般的に採用されている LED 灯火器は、主照明灯にリフレクタタイプを、ポジションライトに導光棒を用いたタイプが多い。しかし、時代の先進技術と呼べる先進性を表現すべく、ヘッドライトには、片側 5 個、両側で計 10 個のレンズを備える多眼式照明法によるロービームを採用した。また、立体的で奥行きのある形と光り方をする導光レンズをトリムラインに採用した。

多眼式ヘッドライトは、二輪車としては世界で初めての採用となる。そのような象徴的キャラクタによって、ライティングシステムのデザインにおいても、Gold Wing の唯一無二の「存在感」を表現したかった (Fig. 3)。

フラッグシップとしての威厳を帯び、信頼がおける風貌を備え、ステイタスを感じさせるとともに、精やかな顔つきを表現することを目指した。その実現を考えたとき、表情を形作る上で、ヘッドライトによる「目」の果たす役割は大きかった。

2.2. 二灯式ヘッドライトにおける多眼式 LED による表情づくりの研究

2.2.1. 二灯式ヘッドライトにおける二眼と多眼の印象の違いのスタディ

(1) 二眼の限界 LED が採用される以前は、プロジェクタランプやリフレクタを用いてヘッドライト部の意匠が構成されていた。左右二灯式ヘッドライトの場合、それぞれに瞳を持つ二眼式ヘッドライト (以下、二眼式) となる。灯火器は表情づくりに大変重要で、特に二眼式の場合、人は無意識に「目」として認識する傾向がある⁽²⁾。そのため、光源が瞳の役割となる二眼式の場合は、フロントデザインは動物的な表情になることが多く、新しさを表現するという点では限界を感じていた。

(2) 多眼でのチャレンジ 光源が分散する多眼式で構成した場合、それが二灯式のヘッドライトであっても、核となる瞳部分は存在しなくなる。そのため、動物的な表情というより、無機質的な、あるいは昆虫の複眼的な、今まで見たことのない異質な印象を与えることとなる。そこに



Fig. 3 Wing Line implemented in lighting system design (top: developed design, bottom: previous designs)

新しさを表現することができる可能性を見出し、多眼式でのスタディがはじまった。

あえて、無機質になりがちな多眼式というモチーフを用いながら、意思の感じられる表情にするための考察をおこなった。

(3) 二眼の表情例 ヘッドライトによる表情づくりを検討するにあたり、まずは表情の表現がしやすい二眼式でのスタディから入った。二眼式の瞳の位置や大きさの違い、また、それらとレンズ外形(輪郭)との組合せを変えた意匠例を図に示す(Fig. 4)。

これらの例に示すとおり、単純な要素の組合せによって、威圧感を感じる表情も、やさしく落ち着いた表情も、さまざまに表されることがわかる。

(4) 多眼の表情例 同様の試みを多眼式でおこなった例を示す(Fig. 5)。図からわかるように、多眼式の場合、瞳を感じさせる部分を失うため、表情を表すのが容易ではないことがわかる。

(5) 目の周りの形状による表情の発見 人間や動物の表情が、いったい何によって決定されるのかについて、あらためて考察をおこなった。

Fig. 6に、ライオンとハクトウワシの、目とその周囲の眉にあたる部分や眉間の動きを表す写真を示す。

これら動物の表情を観察すると、やはり目の輪郭と瞳の位置関係は、表情に大きな影響を与えていることがわかる。しかし、その表情を形成しているのは目だけでなく、眉や眉間など、目の周辺要素の形状が重要な役割を果たしていることがわかった。

そこで、本開発のGold Wingの表情づくりは、ヘッド

ライトの表情に加えて、周囲要素の意匠を効果的に活用した、顔全体のデザインで取り組むこととした。

2.2.2. 隈取(くまどり)の活用

前項のスタディより、目の周囲の要素によって表情づくりをおこなう例の一つとして、歌舞伎役者が顔に施す隈取に注目した。

隈取は、顔の筋肉や血管を誇張するために描かれたものと言われ、舞台を遠くから見る人にも、役者の表情が一目見てわかるようにする役割を果たしている(Fig. 7)。



Fig. 6 Examples of facial expressions of animals



Fig. 4 Examples of facial expressions constituted by binocular lighting designs

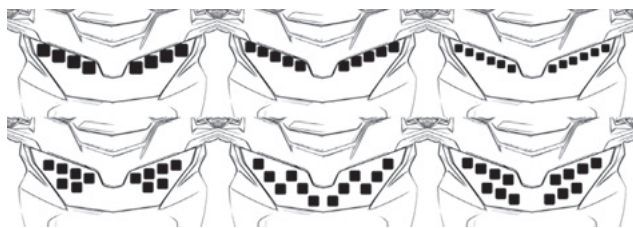


Fig. 5 Examples of expressions constituted by multiple-eye lighting designs



Fig. 7 Kumadori (shadings on face)

隈取を形成しているデザイン要素で重要な役割を果たしているのは、表情を誇張するラインである。この隈取の例に示されるように、瞳そのものではなく、周囲に配置されるラインの構成によって表情を表すことができると考えた。

そこで、ヘッドライトレンズのアウトラインだけではなく、内部の導光レンズによるトリムラインも併せて用い、表情を表すためのラインとして活用することで、フロント部分の表情を形成していった (Fig. 8)。

2.2.3. ハイビームの作り込み

ハイビーム用灯体は、リフレクタタイプを採用した。通常であればリフレクタは、鏡のように周囲を反射するため、明るく目立つ存在となる。

そこでリフレクタを導光レンズの奥に、多眼レンズ下部などの黒いエクステンションを写し込むように配置した。それにより、リフレクタがブラックアウトされ、多眼レンズと導光レンズが強調されるようにした (Fig. 9)。



Fig. 8 Styling design sketches of vehicle front



Fig. 9 Difference in appearance due to difference in structure of reflector

2.2.4. 多眼式 LED ヘッドライト構成パーツへの造り込み
灯体全体のデザインだけではなく、ヘッドライトを構成しているパーツ一つ一つにもこだわりを持って、デザインの造り込みをおこなった (Fig. 10)。

多眼レンズで構成されるロービーム用灯体は、各々のレンズを囲むエクステンションにおいても、立体感のある形状や、シボを入れる範囲など、細部にまでこだわって意匠を施した。

また、光学的に制約の多い導光レンズについては、立体的で奥行きのあるムラのない均一発光を実現し、どの角度から見ても美しい隈取を表現した。

2.3. 二灯多眼式ヘッドライトの完成

片側 5 個、両側で計 10 個のレンズを備える多眼式照明法を用いた、ヘッドライトのデザインが決定した。

左右に振り分けられた多眼式 LED は、灯体の輪郭や、眉間などの周辺形状と導光板による、隈取表現の効果により、精かな表情をたくわえる「目」となった。

本開発における一連のスタディにより、LED を用いた多眼式ヘッドライトの表情作りに、周辺のラインを活用するという、新しい手法を見出すことができた。

また、導光レンズを用いた隈取は、ウインカーポジションライトとのコンビネーションにより、左右に広がるウイングラインを構成する役割も担っている。そのウイングライン先端部は、極力車両の外側に配置し、他車からの視認性向上にも貢献している (Fig. 11)。

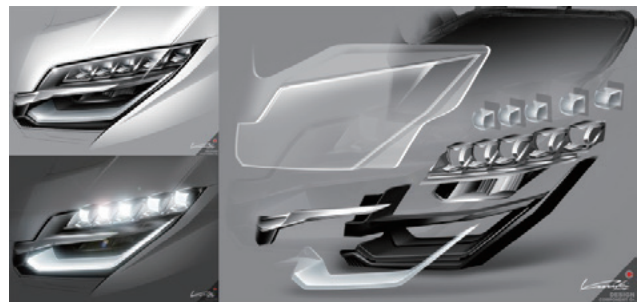


Fig. 10 Drawing showing emitted lights and sketch showing individual components



Fig. 11 Front view of finished design

3. リヤコンビネーションライト

3.1. フロントデザインとの統一性

ヘッドライトによって形成された、ウイングラインのキャラクターを、リヤコンビネーションライトにも採用した。

車両の表情を印象付けるという観点では、リヤの灯体よりもフロントに配置される灯体が注目されがちである。しかし、路上でふと気がついて車両を目にするときに、フロント部分は一瞬で過ぎ去ってしまうのに対し、リヤ部分はその後を追うように、より長い時間観察される。また、車列を成して走行する場合には、後続車から継続して目視され、自然と見られる時間が長くなる。

このように、リヤ部分の表情作りは、車両を印象付ける上で、フロント部分と同様に重要なのである。

本開発の Gold Wing では、リヤコンビネーションライトにもウイングラインをモチーフとしたデザインを施した。それは、前から走って来た Gold Wing が眼前を走り去り、そのうしろ姿となったときの効果を考えたものである。フロント部分で印象付けられたウイングラインの光が、まるで車両を通り抜け、その余韻を眺めているように感じられることをねらった。

このように、車両をずっと目で追い続けたいくなるような衝動を起こさせるような、強い印象を残すことのできるリヤコンビネーションライトのデザインを実現したかったのだ (Fig. 12)。

このようなデザインが実現できたのは、左右にパニアケースを持つ、Gold Wing というモデルならではの利点でもある (Fig. 13)。

3.2. 光り方の統一

表情を表すためにヘッドライトで造り込んできた、二灯式多眼や隈取などの要素をリヤコンビネーションライトでも踏襲し、前後で統一された表情を生み出した (Fig. 14)。

また、さらなるデザインの統一感を持たせるために、光り方の形状だけでなく、灯体内部の光学的な構造も、フロントに採用した構造に近いものにした。

ヘッドライトの多眼式ロービームにあたる部分は、リヤではストップランプ部にあたる。リフレクタを分割複数配置し、同様に独立したカットを施したアウトレンズとの組合せで多眼を表現した。

ヘッドライトにおける立体的な導光レンズ部分は、テールランプ部にあたる。リフレクタとインナレンズを組み合わせることで、フロントと同じように立体的で均一な発光を表現した。

ヘッドライトのハイビームにあたる部分は、リヤのウインカ部にあたる。ハイビーム用灯体と同様に、リフレクタタイプを採用している (Fig. 15)。



Fig. 13 Styling sketch of vehicle rear

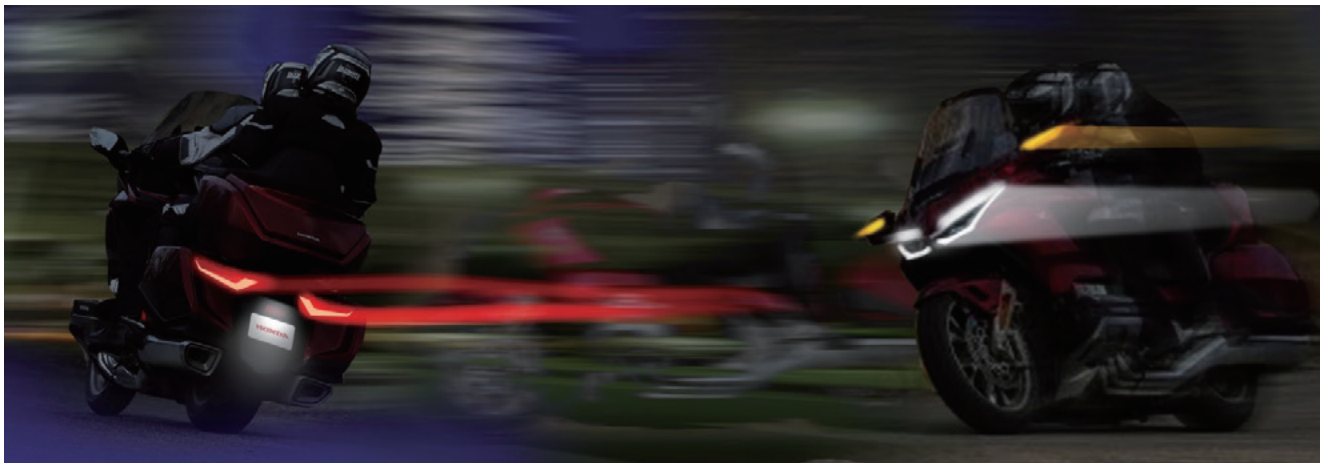


Fig. 12 Expression created by light emissions when vehicle has travelled away



Fig. 14 Unified characteristic impression applied to front and rear lighting systems

3.3. 最終的なリヤデザインの完成

以上に述べたように、リヤ部に対しても、フロント部と同様に特徴的なウイングラインを形作った。それにより、新しい Gold Wing にふさわしい、印象的なテールライトを実現することができた。また、左右へ伸びやかな光を演出することに成功した。光の幅が広がることで、ねらいの一つであった被視認性の向上も実現された (Fig. 16)。



Fig. 15 Sketches of parts constructing combination light



Fig. 16 Rear view of finished design

4. まとめ

2018 Gold Wing にふさわしいライティングシステムをデザインした。その特徴的なデザイン手法を以下に示す。

- (1) LED を用いた多眼式ヘッドライトによる表情作りに向けた、周辺部分のライン作りを活用する新しい手法を創出した。
- (2) ウイングラインをモチーフとした、フロントとリヤの灯体デザインにより、前後で統一された表情を生み出した。

先進技術を用いながら、これまでにない Gold Wing 独自の表情と先進性を表現することができた。アイデンティティとしてのウイングラインも継承し、Honda フラグシップとしてのプレミアム性を生み出すことに貢献した。

参考文献

- (1) 佐藤靖博, 脇田展孝: 2018 Gold Wing のスタイリングデザイン, Honda R&D Technical Review, Vol.31 No.1, p.1-10
- (2) 丸山一幸, 堤陽次郎, 村田裕: 二輪車の発見率を向上させる灯火器配置「FACE」デザインの研究, Honda R&D Technical Review, Vol.21, No.2, p.130-135

■著 者■



栗城大亮

2018 年モデル PCX および PCX HYBRID の開発

Development of 2018 PCX and PCX HYBRID

大 森 純 平¹
Jumpei OMORI

少 覚 功²
Isao SHOKAKU

高 山 慶 士¹
Keishi TAKAYAMA

要 旨

今回で4代目となる2018年モデルPCXは、フレームの基本構造見直しによる軽量化と高剛性化、および足まわりの軽量化による運動性能の向上、ならびにエンジン性能を改良することで、上質で余裕のある走りを実現した。また新たに、クランク軸に直結したACGスタータを駆動アシストとして利用するハイブリッドモデルPCX HYBRIDを開発し、ダイレクトで楽しい走行フィーリングを実現した。

ABSTRACT

In the fourth-generation model of the 2018 PCX, the basic structure of frame was reviewed to make it lighter and rigid. Weight reduction was also adapted to its wheels. These enhancements contributed to its increased dynamic performances. The engine performances were enhanced as well, and all these features made it possible to provide a high-quality riding with composure of rider's mind. In addition, we developed hybrid model PCX HYBRID that uses an ACG starter directly connected to a crankshaft as a drive assist system and realized pleasurable ride feeling with a more direct drive response.

1. まえがき

アジアを中心に拡大傾向にある小型スクータ市場において、2009年にグローバルモデルとして登場した初代PCXは、さまざまな価値を生み出し、それまでの125 ccスクータの概念を打ち破った。それらの価値は、

- ・ 扱いやすい125 ccサイズの車体に取り入れたワンランク上のゆったりとしたライディングポジション
- ・ 高級感のあるスタイリング
- ・ 快適で上質な走り
- ・ 優れた環境性能

であり、PCXのパッケージングはこれらを同時に成立させた。これによりPCXシリーズは、ASEANをはじめとする地域では上級のコミューターとして、また日本や欧州などでは従来の同クラスのスクータと比較してワンランク上の商品として、世界各地の人々に高い支持を得てきた。その後も150 cc仕様PCX150の追加も含め、常に125/150 ccスクータのパッケージングの理想を追求しながら進化を続け

てきた。

今回紹介する4代目の2018年モデルは、フルモデルチェンジとして開発をおこなった(Fig. 1)。このモデルは従来のPCXシリーズモデルが持つ魅力の核を引継ぎながら、さらに魅力を発展させるべく開発した。開発指針として、新しさ、走行性能、心地よさ、使いやすさ、経済性を掲げ、これらすべてが従来モデルを上回るレベルを目指した。

また新たに、量産二輪車として世界初(Honda調べ)となるハイブリッドシステムを開発し、PCX HYBRIDに搭載した(Fig. 2)。これは、車両加速時にクランク軸に直結したモータによるアシストをおこなうシステムである。これによって、同クラスの従来機種では成し得なかった走行フィーリングを実現することができ、お客様に“走る喜び”をいっそう体感していただきたいという開発チームの想いを実現した。

本稿ではPCXおよびPCX HYBRIDに採用した新しい技術について紹介する。

¹ 二輪 R&D センター

² R&D センターX

3. PCX の開発



Fig. 1 The PCX (2018)



Fig. 2 The PCX HYBRID (2018)

2. 開発コンセプト

開発をスタートさせるにあたり、ASEAN 各国の現ユーザーに対して市場調査を実施した。その結果、上級スクーターとしてポジショニングがされていた従来の PCX に対して、ユーザーは大きな不満を感じていないことがわかった。また、PCX を購入できる自分の豊かさを表現したいという気持ちが強いことがわかった。

そこで、本開発では、PCX の魅力の核を受け継ぎ、さらにその魅力を進化させることを目指した。そのため、開発コンセプトは、初代 PCX から受け継がれてきた「Personal Comfort Saloon」とした。

開発テーマは、より豊かさを表現できるように「世界中のユーザーの優越感を満たすプレミアムな日常の足」とし、次の三つの開発目標を設定した。

- ・ 運動性能を向上させた上質で余裕のある走り
- ・ 新しい高級感の表現
- ・ 更なる便利な使い勝手

また、いっそうの先進性と高級感の実現と走る楽しさの向上を目的として、ハイブリッドシステムを採用したタイプの設定をおこなった。

3.1. 軽量化および運動性能向上

車両運動性能を向上させる手段として、軽量化と車体剛性の向上を図った。

フレームボデーは Fig. 3 に示す従来のアンダーボーン構造から Fig. 4 に示すダブルクレードル構造とした。またフレームにボルトマウントされるフロントカバーステーを金属から樹脂へ変更した。これらにより、フレームとフロントカバーステーをあわせた質量を、従来のモデルに対し 2.4 kg 軽量化を達成した。また、フレーム剛性に関しては、縦剛性を 50.4%、ねじれ剛性を 2.9% 高めたことによりサスペンションの作動性向上と、安定性の向上に寄与した。

フロントおよびリヤのタイヤ、ホイールも刷新した (Fig. 5)。従来のモデルに対し幅を広げたタイヤを採用し、それにともない、ホイールも軽量化をねらい新たに設計した。スポーク本数を、従来モデルの 5 本から 8 本に増加させ、リムにかかる円周方向の応力をさげることでリムを薄肉化した。またフロントホイールはハブに中空部を設け、リヤホイールはハブを薄肉化した。これらにより、従来モデルに対しフロントホイールは約 7% (-0.2 kg)、リヤホイールは約 11% (-0.5 kg) の軽量化を達成した。

これらにより、ライダーの入力に対しスムーズに気持ちよく車両が反応する運動性能を実現できた。

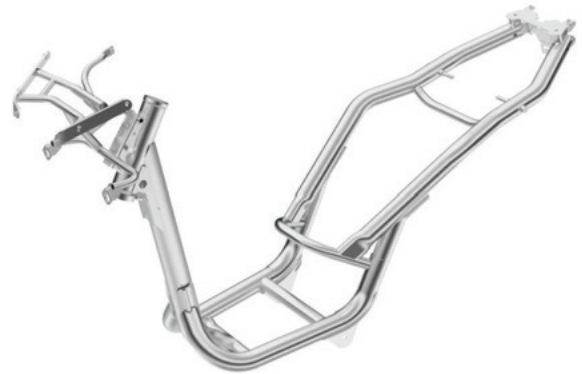


Fig. 3 Frame of previous model



Fig. 4 Frame of developed model

3.2. ガソリンエンジン動力性能向上

目標とした上質で余裕のある走りをエンジン開発の観点で捉えると、出力は向上させながら、ライダーにリラックスして気持ちよく走ってもらえる特性にすることであると考えた。ベルトコンバータの変速回転数を高回転側にシフトすると、振動が増加し快適性が低下してしまうので、低回転域の出力を維持しながら高回転域の伸びがあるエンジン出力をねらい開発をおこなった。

本機種では EURO4 相当の排気ガス規制に適合させることが開発目標の一つであったため、排気系レイアウトを見直し、触媒の大型化を図った。その上で、スロットルボアサイズの大径化 (125 cc のみ) と、マフラ内部のエキゾーストパイプ構造をストレート化することで、高回転域の出力向上を図った。エアクリーナの容量を 1 L 拡大し、吸気ダクトおよびコネクティングチューブを含めた吸気経路について Fig. 6 に示す CFD 解析を活用し、通路内の流速と圧力バランスを最適化した。これらにより低中回転域エンジン出力を前モデル同等としながら、スロットル操作に対しすばやくエンジンが反応するエンジン出力特性を作りこむことができた。

さらに、ライダーの入力に対してスムーズに気持ちよく反応するように FI セッティングを改良した。これにより、

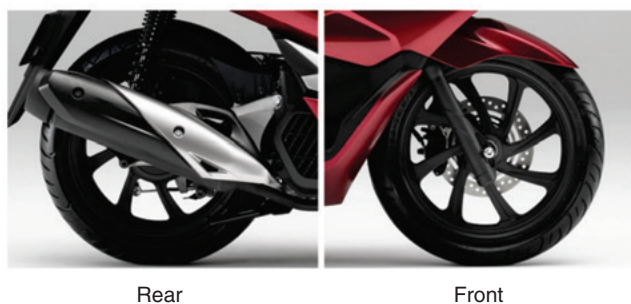


Fig. 5 Wide tire and newly designed wheel

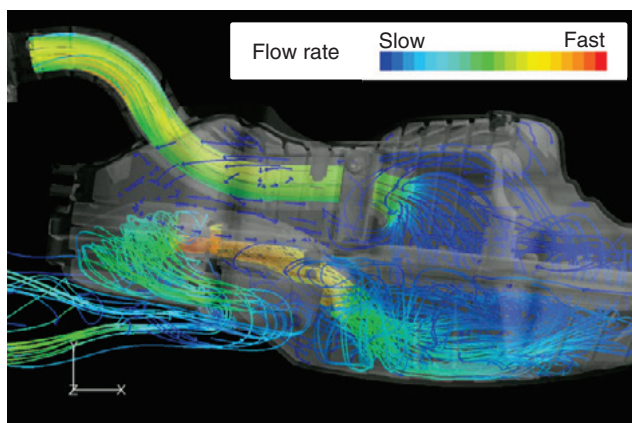


Fig. 6 Example of CFD analysis in air cleaner case

Fig. 7, Fig. 8 で示すように、前モデルエンジン出力に対し、同等の変速回転数と低速域の加速力を保ちながら、高速域での伸びのある走りを実現し、上質で余裕のある走りを達成した。

運動性能の向上も合わせ、通勤からツーリングまでの幅広い用途において、より楽しく活躍できるモデルにすることができた。

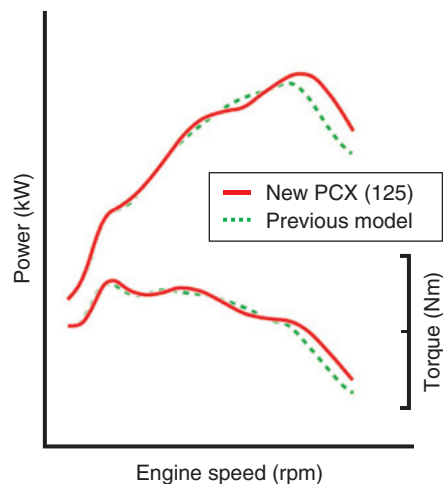


Fig. 7 Engine performance (PCX)

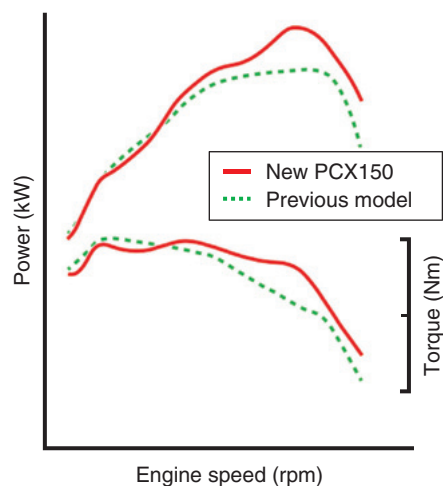


Fig. 8 Engine performance (PCX150)

4. PCX HYBRID の開発

4.1. ハイブリッドシステムのねらい

従来のこの排気量クラスのスクーターでは、スロットルを開けてから車体が反応するまでに、ベルトコンバータの特性により、短時間ながらタイムラグがあり、マニュアルトランスミッション車のようなレスポンスが実現できなかった。

た、これはバイク好きの顧客がスクータを敬遠する一つの要因ともなっている。本 PCX では、このレスポンスを改善し、より楽しい走行を実現できる手法の検討をおこなってきた。

そして、その実現手法の一つとして、入力に対し即座に反応する電動モータの出力特性を利用し、ガソリンエンジン出力とのハイブリッドとすることで、従来のスクータには無いダイレクトで楽しい走行フィーリングの実現をねらうこととした。

なお、PCX HYBRID の性能に係わる数値はすべて日本向けの 125 cc エンジンを搭載したハイブリッドモデルとする。また、比較するガソリンエンジンモデルも 125 cc の 2018 年モデル PCX とする。

4.2. ハイブリッドシステム概要

4.2.1. コンパクトなシステムレイアウト

ハイブリッドシステムを採用する上で最も重視したのは、二輪車としての機動性を低下させないことであった。ハイブリッド車は駆動用バッテリーや複雑な制御システムを搭載することとなり、質量が増加し、車体サイズを大型化するのが一般的であり、二輪車としての機動力が失われてしまうことが課題であった。そこで、PCX HYBRID では PCX が本来持っている機動力を損なうことなく、快適で上質な走りを維持し、街中で気軽に使える車体とするため、ガソリンエンジンモデルの PCX のボデーに納まるコンパクトなシステムとすることを目標とした。

システムのシンプル化、ガソリンエンジンモデルとの同一のボデーの使用を念頭に置いた結果、パラレル方式を採用することとした。これは、ACG スタータ⁽¹⁾により駆動アシストをおこなうものである。ACG スタータは、ガソリンエンジンモデルにおいて始動と発電を担い、また、クランク軸に直結配置されている (Fig. 9)。また、スタータのコア材に、ハイブリッド駆動モータ用電磁鋼板を採用することで、より鉄損の少ない専用モータとし、始動系を含むエンジンの基本構造を変えずにコンパクトなユニットを実現した。

ハイブリッドシステムを構成するパーツ類の配置を Fig. 10 に示す。モータアシスト制御を担う Power Drive Unit (PDU) は、エンジン制御を担う Engine Control Unit (ECU) の実装部品のサイズダウンや、電源部の発熱損失を低減することでレイアウトの集約化を図り、ベースの ECU のサイズを維持しながら一体化を実現した。

ダウンレギュレータは、灯火器や鉛バッテリーなどの一般電装部品への電力供給を担う。ジャンクションユニットは、12 V の外部電源にて非常時に始動できる機能を有す。この二つのユニットと後述するリチウムイオンバッテリーをまとめて配置することで配線などの短縮化を実現した。

これらによりハイブリッドシステムのパーツ類は、ガソ

リンエンジンモデルの外観を崩さずレイアウトでき、コンパクトなシステムを達成した。

4.2.2. システム動作概要

システムの作動イメージを Fig. 11 に示す。モータアシストはアイドリングストップの再始動時とライダーが操作するスロットルの操作速度があるしきい値を超えた場合におこなわれる。アシストトルクの制御は、スロットル開度とエンジン回転数およびリチウムイオンバッテリーの残容量と温度より、PDU が最適なアシストトルクを発生させる指令値を算出しおこなわれる。

モータアシスト作動時以外は、ACG スタータが発電し、リチウムイオンバッテリーを充電する。

4.2.3. アシスト時間設定

アシスト時間はバッテリーサイズに与える影響が大きいため、使い勝手から許容できる必要最小限の時間となるよ

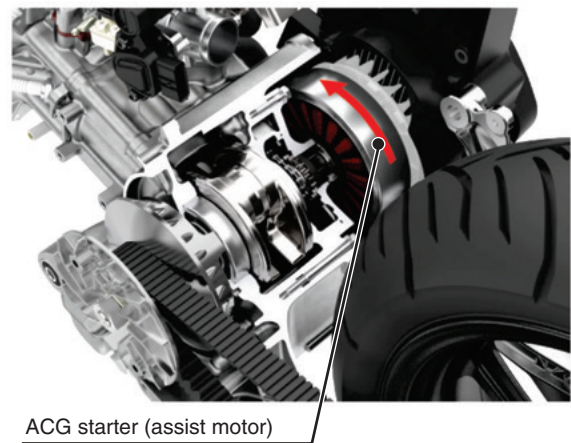


Fig. 9 ACG starter (assist motor)

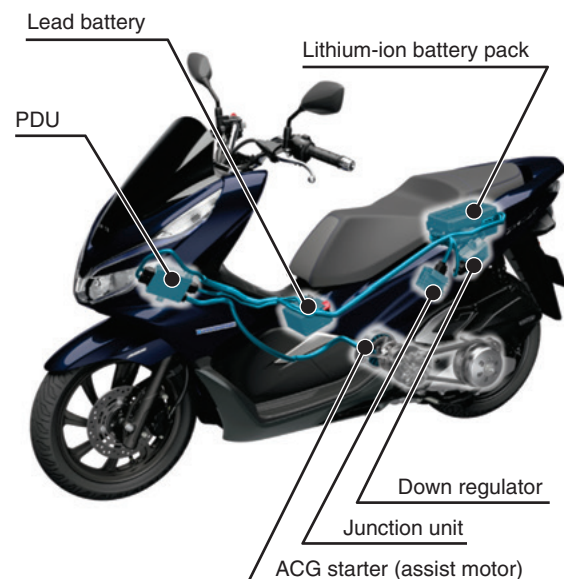


Fig. 10 Layout of hybrid system parts

う検討した。急加速をすることが多いタイのユーザ使用の状況を中心に計測をおこない、スロットルを開けてから車速コントロールのためにスロットルを戻し始めるまでの時間の頻度として、Fig. 12 と Fig. 13 の結果が得られた。この時間が3秒以内となる割合が、Fig. 12 に示す市街地では約90%、Fig. 13 に示す郊外では約80%となっている。この結果から、アシスト時間を3秒に設定することで、加速時の大部分をカバーできることがわかった。

一方、3秒間のアシスト後にただちにアシストを終了した場合、駆動力変化量が大きく走行フィーリングに影響が出るが予測された。そのため、アシスト量を徐々に減らす時間を1秒間設け、合計最大4秒間のアシスト時間となるように設定した。また、その後は徐々に発電負荷が上昇する制御とし、違和感の無い心地よい走行フィーリングを実現することができた。

4.2.4. リチウムイオンバッテリー

システム部品の中でモータ駆動用バッテリーは最大の大きさとなる。二輪車の機動性を損なわずに搭載するための小型化への要求と、アシストに必要な放電出力を満たすため大型化への要求が相反し課題となる。

そこでまず、要求されるアシスト出力とアシスト時間から、車両に搭載可能なサイズ、質量を満足するバッテリーとして高出力タイプの円筒型 ($\phi 18 \text{ mm}$) リチウムイオンバッテリーセルを選定した。

高回転までアシストをおこなうため、セル電圧 3.6 V のバッテリーセル 14 個を直列とし電源電圧を高めた。アシスト要求出力、および低温かつ低バッテリー残量 (State Of Charge: SOC) で要求されるエンジン始動出力を満足させるため 2 並列とした。その結果、セルレイアウトは 14 直列 2 並列の構成となり、定格電圧 50.4 V 、定格容量 3.8 Ah (192 Wh) とした。

バッテリーパックはバッテリーの温度や SOC、充放電

などを管理するバッテリーマネジメントユニットを一体化し、防水性能として IEC60529 の保護等級 IPX5 のパック構造とした。以上により Fig. 14 に示すように、車両に搭載可能なコンパクトなサイズのバッテリーパックを実現した。リチウムイオンバッテリーパックのサイズは $205 \text{ mm (L)} \times 134 \text{ mm (W)} \times 90 \text{ mm (H)}$ 、質量 2.6 kg である。

4.2.5. モータアシストによるパフォーマンス向上

モータ出力は 1.4 kW/3000 rpm 、 4.3 Nm/3000 rpm と

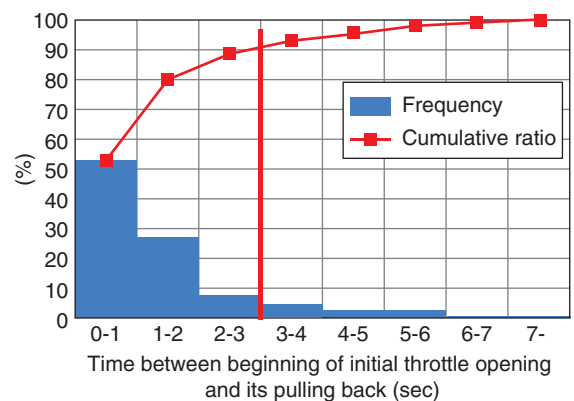


Fig.12 Measurement results for throttle-opening time (urban area driving in Thailand)

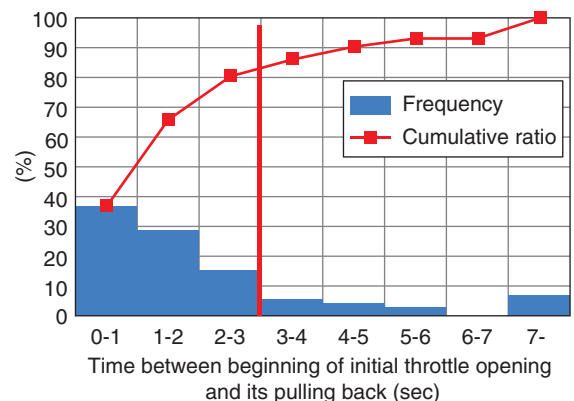


Fig. 13 Measurement results for throttle-opening time (suburban area driving in Thailand)

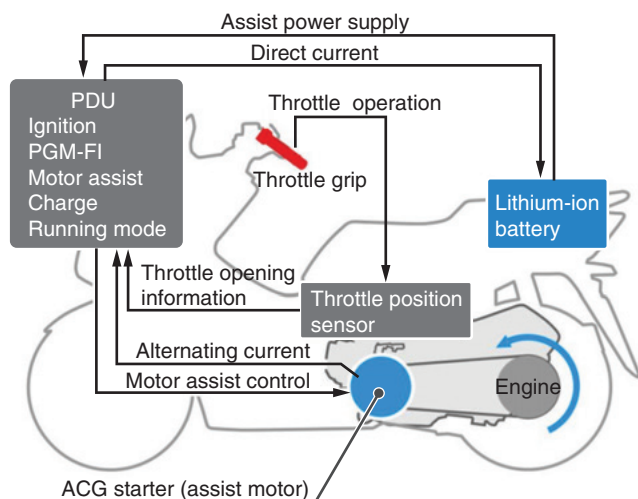


Fig. 11 Overview of hybrid system



Fig. 14 Appearance of lithium-ion battery pack

した。ガソリンエンジンモデルに対して、125 cc モデルでエンジン出力と合算した場合、Fig. 15 のとおり、4000 rpm で約 33%、5000 rpm で約 22% のトルク向上ができ、トルクフルなアシストを実現した。

Fig. 16 は停車状態からスロットルを全開で加速したときのエンジン回転数の変化をガソリンエンジンモデルと比較したものである。なお、試験条件等は社内試験規定に基づいて実施した。ガソリンエンジンモデルでは 4 回目の燃焼で遠心クラッチの接続回転数に到達していたのに対し、ハイブリッドモデルは 3 回目の燃焼で到達していることがわかる。すなわち、素早く反応するモータでのアシストにより、アイドリングストップからの発進について、始動か

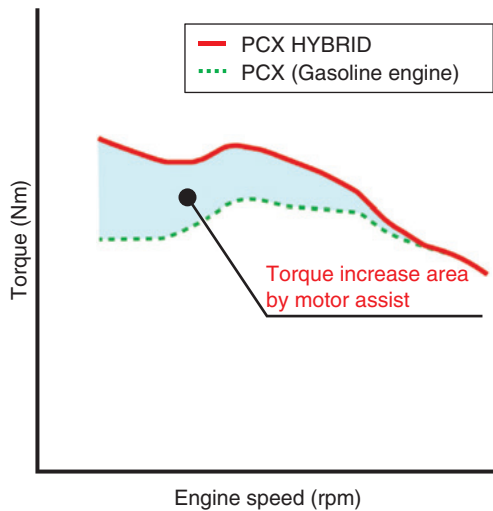


Fig. 15 Increase in torque by motor assist at wide open throttle (WOT)

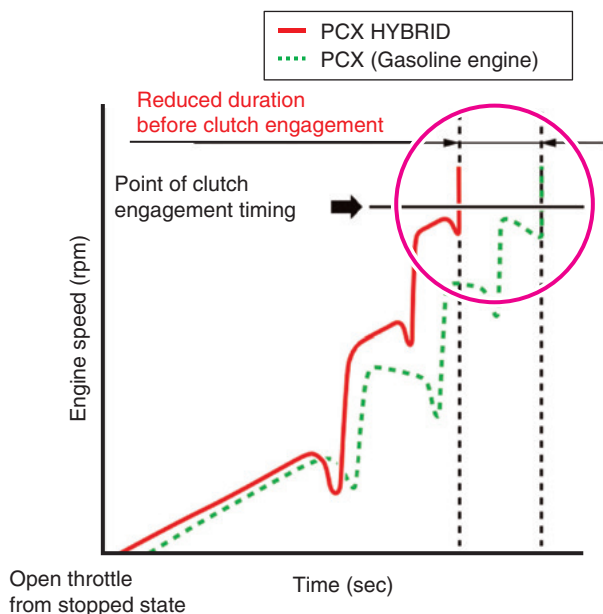


Fig. 16 Comparison of duration before clutch engagement

ら遠心クラッチ接続までの時間をおよそ 20% 短縮することに成功した。これらにより、ダイレクトな加速フィーリングによる街中での発進加速の敏捷さとコーナリングでのすばやいたラクション特性などを得ることができ、よりワクワクできる楽しい走行フィーリングを実現できた。

また、Fig. 17 に示すように、ハイブリッドモデルは、停止からのスロットル全開の発進加速で 50 m 走行する間に、ガソリンエンジンモデルに対して約 2 車身 (4 m) の差が生じた。同様に、40 km/h からのスロットル全開の加速については、200 m 走行する間に約 3.6 車身 (7 m) 差が生じた。以上の結果より、モータアシストにより、動力性能についても向上が図れたことが確認できた。

4.2.6. アイドリングストップ作動待ち時間の短縮

これまで PCX のアイドリングストップの作動は、停車から 3 秒経過後としていた。これは渋滞路などでの発進停止の繰り返し時に頻繁にエンジンが停止すると再発進時のタイムラグが煩わしく感じるためであった。PCX HYBRID ではモータアシストにより早いクラッチ接続が可能となり、タイムラグによる煩わしさが感じにくくなるため、アイドリングストップ作動待ち時間の短縮検討をおこなった。ライダーが感じるタイムラグの煩わしさと再発進性の安心感のバランスを追求したセッティングをおこなうことで Fig. 18 に示すように、従来モデルに対し 2.5 秒短縮した。その結果、停車から 0.5 秒経過後にエンジンを停止することができ、排出ガスの抑制と街乗りの静粛性に寄与した。

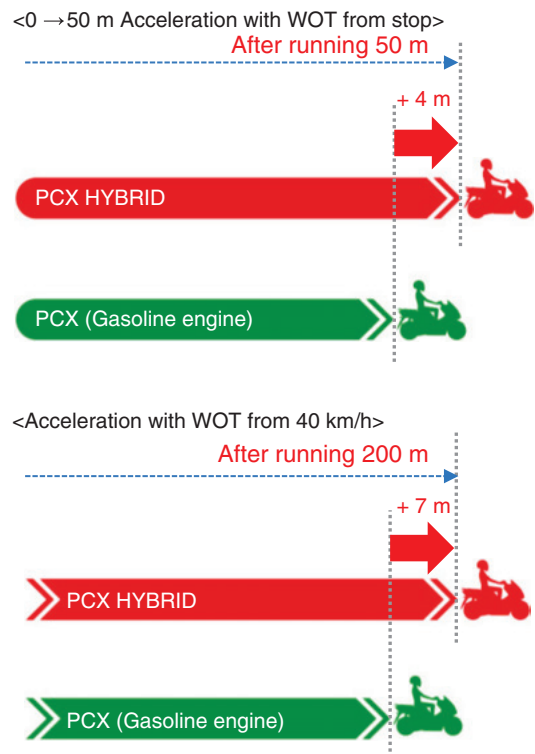


Fig. 17 Comparison of power performance

4.2.7. アシスト力特性の変更による走行モード切替え

仕様の作りこみをおこなっていく段階で、公道走行が可能で法規を満足した試作車を作成し、ナンバ取得の上で公道での適合性テストを実施した。その結果、渋滞路で要求されるアシスト力とワインディングで要求されるアシスト力では、同じスロットル開度においても要求が異なることがわかった。

よって走行モード切替え機能を追加し、走行シーンやライダーの好みにあわせて、モータのアシスト特性の切替えを可能にした。

メインスイッチオン後はDモードとし、リラックスした快適な走行と適度なアシストを両立できる設定とした。一方、Sモードはアシスト力を強めることにより、スポーツ性の高い走行が可能となり、走る楽しさをより感じられる設定とした。具体的には、スロットル全開時のアシスト力は変わらないが、低中開度でのアシスト力が Fig. 19 の例のように開度ごとに異なるセッティングとした。これらのモードの切替えは、左側ハンドルスイッチのモード切替えスイッチ (Fig. 20) によって渋滞やワインディングなどシーンに合わせ走行中にもおこなえるようにした。

4.2.8. ハイブリッド車用スピードメータ表示

ハイブリッドシステムのさまざまな情報をわかりやすく表示するために専用メータを採用した。スピードメータ、時計、平均燃費などのガソリンエンジンモデルと同様の表示に加え、ハイブリッドタイプ専用仕様として、以下項目を追加した。

- ・ 走行モード表示 (D/S/アイドリングモード)
- ・ モータによるエンジンへのアシストレベル
- ・ リチウムイオンバッテリーへのチャージレベル
- ・ リチウムイオンバッテリー残量
- ・ リチウムイオンバッテリーインジケータ

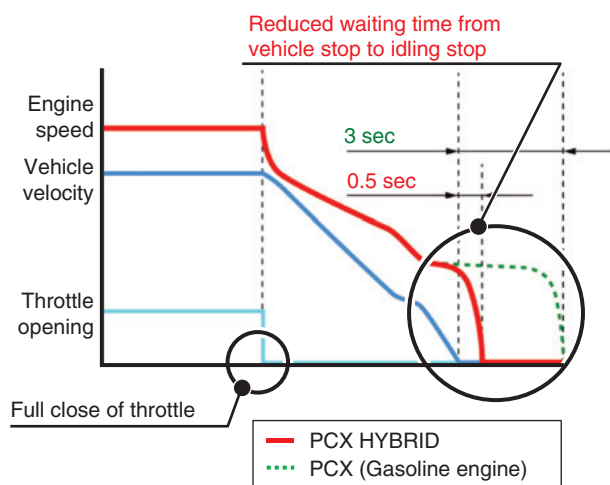


Fig. 18 Reduced waiting time for idling stop system operation

Fig. 21 にセンタディスプレイを示す。また、Fig. 22, 23 に示すようにアシストレベルおよびチャージレベルは、それぞれ5段階および2段階のバーグラフとして表示した。

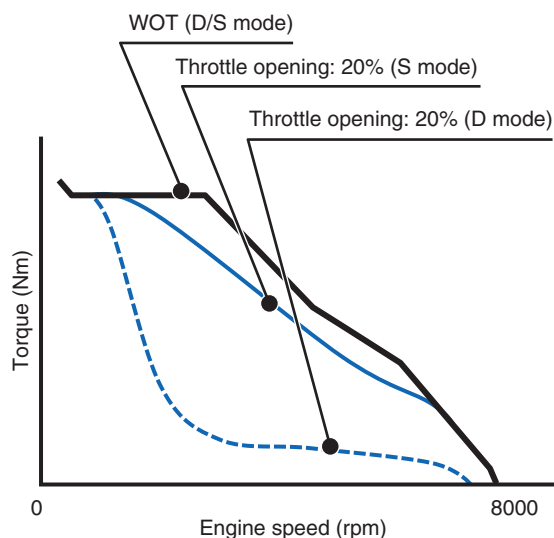


Fig. 19 Example of torque difference due to difference in assist mode

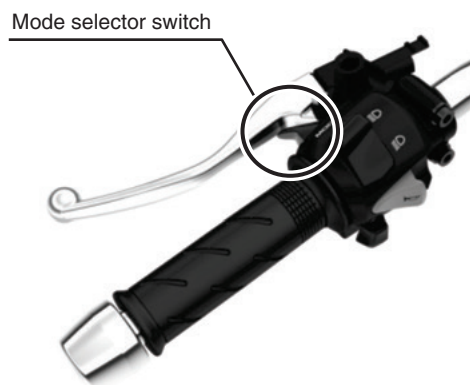


Fig. 20 Mode selector switch

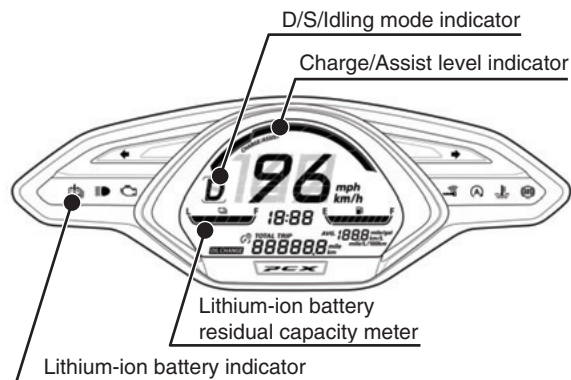


Fig. 21 Speedometer for PCX HYBRID



Fig. 22 Assist level indicator (at maximum level)



Fig. 23 Charge level indicator (at maximum level)

5. まとめ

4代目としてフルモデルチェンジをおこなった2018年モデルPCXは、フレームボデーとホイールの刷新および吸排気系を改良した。新しい排ガス規制(EURO4相当)を満足させながら従来モデルを超える機能性能を達成し、通勤からツーリングまで幅広く、より楽しく活躍できるモデルにできた。

PCX HYBRIDは、PCXのパッケージングを最大限に流用しながらハイブリッドシステムを必要最小限とするとともに、モータの専用化とアシスト時間の適正化をおこなった。その結果、街中での発進加速の敏捷さや、コーナリングでのすばやいトラクション特性などの性能を得ることで、よりワクワクできる楽しい走行フィーリングを実現し、量産二輪車初のハイブリッド車を提供することができた。

本ハイブリッドシステムは、二輪車における新しい商品魅力技術の一つの形として今後お客様に受け入れられ発展していくことを期待する。

参考文献

- (1) 柳沢毅, 山西輝英, 宇津木克洋, 永露敏弥: PCX用アイドリングストップシステムの開発, Honda R&D Technical Review, Vol.22, No.2, p.78-84

■著 者■



大森 純平



少 覚 功



高山 慶士

PCX ELECTRIC の開発

Development of the PCX ELECTRIC

三ッ川 誠¹
Makoto MITSUKAWA
高橋 泰史¹
Yasushi TAKAHASHI

市川 広基¹
Hiroki ICHIKAWA
重水 信男²
Nobuo SHIGEMIZU

大久保 克幸¹
Katsuyuki OKUBO
大久保 克紀²
Katsunori OKUBO

加藤 貴朗¹
Takaaki KATO

要 旨

日本に加え ASEAN の二輪販売主要国の交通環境下での使い勝手を満足する電動二輪車 PCX ELECTRIC を開発した。

PCX ELECTRIC では着脱式バッテリーシステムを搭載することで実質的な充電待ち時間ゼロを実現した。また、EV システムとしては、コンパクト設計と完成車パッケージングおよび 48 V 系着脱式バッテリー 2 個を直列に接続した 96 V 系のシステムを採用した。これらのシステムを、2018 年型 PCX をベースとした車体に搭載することにより、モータ出力 4.2 kW、最高速度 60 km/h、航続距離 41 km (60 km/h 定地走行時) を実現した。

また、バッテリーの車体への固定とコネクタのかん合を 1 アクションの操作で可能とした利便性の高いバッテリー着脱機構を開発した。

ABSTRACT

We developed the electric motorcycle model “PCX ELECTRIC” that satisfies usability under the traffic environment in Japan and ASEAN’s motorcycle sales major countries. The PCX ELECTRIC features easily removable battery packs, which practically helps eliminate the waiting time associated with charging the battery. The compactly designed EV system, which is efficiently packaged in the vehicle, uses two removable 48 V battery packs connected in series to realize a 96 V system suitable for driving the electric motorcycle. The EV system mounted on the body of the 2018 PCX achieves a motor power of 4.2 kW, top speed of 60 km/h, and cruising range of 41 km (at a steady 60 km/h).

In addition, we developed a highly-convenient battery attaching system that enables fixing of the battery to the vehicle body and engaging of the connectors with a single action operation.

1. まえがき

Honda は、「2020 年製品 CO₂ 排出量原単位低減目標：2000 年比で 30% 低減」を策定し、目標達成の施策の一つとして、製品の電動化を位置づけている。

これまでの Honda の電動二輪車では、1994 年に「CUV-ES⁽¹⁾」を官公庁や地方自治体などに販売した。さらに 2010 年に「EV-neo^{(2), (3)}」を配達業務をおこなう企業向け中心に販売するなど、国内原付一種カテゴリー（排気量 50 cc 以下または定格出力 0.6 kW 以下）の市場に向けた展開を図ってきた。その結果、充電時間が長いことや実用航続

距離の不足などの電動二輪車特有の課題があることがわかった。

これらの課題を踏まえ、世界のより多くの人々に電動二輪車を体験していただくことを目指し、PCX ELECTRIC を開発した。具体的手段として、着脱式バッテリーシステムを採用し、実質的な充電待ち時間をゼロとすることと、より現実的な航続距離を確保できるバッテリー容量とした。Fig. 1 に PCX ELECTRIC の外観を示す。

本稿では、この電動二輪車 PCX ELECTRIC に採用した技術を紹介する。

¹ 二輪 R&D センター

² R&D センター X



Fig. 1 The PCX ELECTRIC

2. 開発のねらい

2.1. 開発コンセプト

開発コンセプトは、「EV 体験を広げる e-Comfort Saloon」と定めた。Comfort Saloon はベースモデルである 2018 年型 PCX⁽⁴⁾ が初代から受け継いできたコンセプトであり、ワンランク上の上質感を持つ商品であることを意味している。そこに電動二輪車の持つ魅力を付加したのが本モデルのコンセプトであり、これを世界のより多くのお客様に体験していただきたいという意味を込めたものである。

これまでに市販された電動二輪車 CUV-ES, EV-neo では、日本国内市場での販売に留まってきた。しかしながら、CO₂ 排出量削減への関心の高まりは日本をはじめとした先進国に留まらず、進展国にも拡大を見せている。

こういった状況を背景に、PCX ELECTRIC では日本に加えタイ、ベトナム、インドネシアの ASEAN 三カ国を販売対象国として加えることとした。

ASEAN 三カ国においては、日本の原付一種相当モデルの販売実績は無く、主要販売モデルは日本の原付二種（排気量 125 cc 以下または定格出力 1.0 kW 以下）相当のモデルである。そこで、原付二種相当の他のモデルや四輪車との混合交通でも安心して走行が可能な出力目標と、日々の使用において必要な航続距離目標を明確にし、目標設定をおこなった。

2.2. 着脱式バッテリーシステム

過去市販した二つの電動車モデルでは、車両に固定されたバッテリー搭載方式を採用してきた。EV-neo では、集配車両として、配達と配達のための待機時間で継ぎ足し充電をおこなうことを想定していた。そのため、普通充電器に加

え急速充電器を設定し、業態に適した充電器を選択できるようにした。

しかしながら、フードデリバリーなどに代表される配達現場では、事業者が車両の運行時間を事前に把握することは容易ではない。そのため、車両が充電中であっても、配達要請に応えなければならず、出勤に必要なバッテリー容量への回復が不十分なケースが発生した。この課題は一般ユーザー向けのモデルでも同様に課題となることが予測された。

そこで、PCX ELECTRIC では急速充電に代わる方法として、あらかじめ充電済みのバッテリーを待機させることで、実質的に充電待ち時間をゼロにすることが可能な着脱式バッテリーの採用を決定した。

着脱式バッテリーのもう一つのメリットとしては、充電場所の自由度が広がることが挙げられる。車両から外したバッテリーは、専用充電器により車両駐車位置以外でも充電することが可能となる。特に、車両駐車スペース近傍に電源が無い環境、例えばアパートやマンションの駐輪場など、個人での電源工事が容易ではない場所でも電動二輪車を使用することが可能になる。

一方、Honda は 2015 年の東京モーターショー (TMS 2015) で着脱式バッテリーのプロトタイプを出展し、将来各種 Honda 製品に共通で使用できるコンセプトを提案している (Fig. 2)。

- (1) そこで、このコンセプトに基づき小型二輪 EV や超小型四輪 EV (Mobile Battery-EV: MBEV) などのモビリティだけではなく、ハンディタイプ蓄電器 (Battery Inverter Power Supply: BIPS) などの汎用エネルギー製品等への将来展開も考慮し着脱式バッテリーの基本仕様を以下のように定めた。体積: 約 7 L (小型二輪の搭載スペースを考慮)
- (2) 電池容量: 20.8 Ah
- (3) 出力: 2.5 kW 連続 10 分以上 (小型二輪の登坂性能を考慮)
- (4) 電圧: 50.4 V (UN R136 で規定される安全低電圧に収めるため)



Fig. 2 “Honda Smart Mobility City” at TMS 2015

このバッテリーをベースとし、「実質的待ち時間ゼロとより現実的な航続距離」の目標に対する詳細仕様の検討をおこなった。

2.3. 動力性能

電動二輪車の出力向上のためには、モータの大型化はもとより、電源であるバッテリー、モータコントロールをおこなう Power Control Unit (PCU) の大型化は避けられない。これらは高価格化と車重の増加に直結する課題である。

また、バッテリーの基本仕様は前述のとおりに定めたため、出力向上には複数のバッテリーパックを接続することが必要になる。PCX ELECTRIC では2個のバッテリーを直列に接続することで、電源電圧を高め、放電電流を低く抑えることで、電線の大径化を避けることとした。

これにより、後述するモータの最大出力を 4.2 kW とすることができる。これを前提として、各地域での使い勝手に即した完成車動力性能を検討することとした。

まず、タイ (バンコク)、ベトナム (ハノイ)、インドネシア (ジャカルタ) の市街地において、マニュアルミッションの小型二輪車および CVT のスクータの走行速度データを計測し、Fig. 3 に示す走行速度頻度分布を得た。

国によって頻度の差異はあるものの、20-50 km/h の速度域の使用頻度が 60-70% 程度を占めており、最高速度は 60 km/h 以下で 90% 以上のカバーが可能であることがわかった。

この結果に基づき、動力性能の目標として最高速度を 60 km/h 以上とすることとした。

2.4. 航続距離

電動二輪車において、カタログなどに掲載される航続距離の基準は各国で異なる。国内においては、原付一種相当のモデルでは 30 km/h 定地で表記されるが、実際の使い方によっては実力値と大きく乖離する。これは、一定速度での走行ではなく、加速と減速を繰り返すことにより消費電力率が変化するためである。そこで、今回の開発では航続距離の基準を、より実用に近い加減速がモード中に含まれる内燃機関搭載車の排気ガス測定モードの一つである WMTC モードとし、目標を設定することとした。

前述の動力性能同様、三都市において、ユーザの一日あたり走行距離の聞き取り調査をおこない、Fig. 4 に示す走行距離分布を得た。

国により差異はあるものの、50 km/day で各国 80% 以上のユーザ使用距離をカバー可能であり、1 充電での航続距離の目標は WMTC モードに相当する社内試験値で 50 km 以上とした。

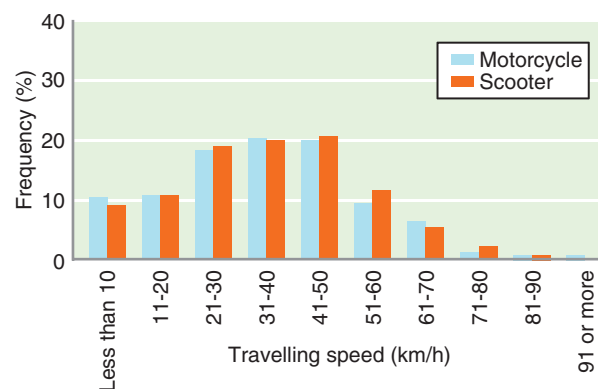
2.5. 完成車パッケージ

日本と ASEAN 三カ国を含むグローバルモデルとして

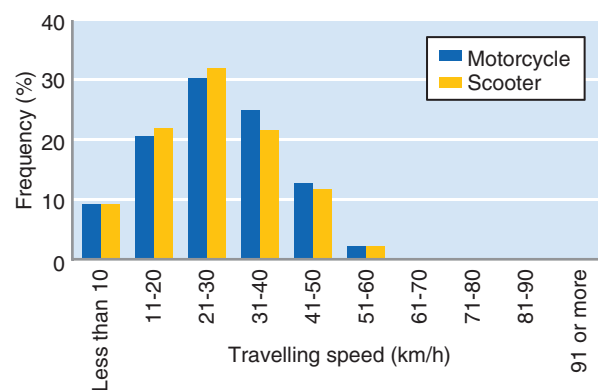
販売をおこなうことに加え、各国での完成車組立ての実施を視野に入れた検討を進めた結果、ベース車両は 2018 年型 PCX⁽⁴⁾ を選定することとした。

PCX は、このクラスのスクータとして、取り回しのしやすい車体サイズとゆったりとしたライディングポジションを両立したワンランク上の質感、そして走る楽しさなどを特徴とし、日本や東南アジアの人々を中心に世界各国で高い支持を得ている。

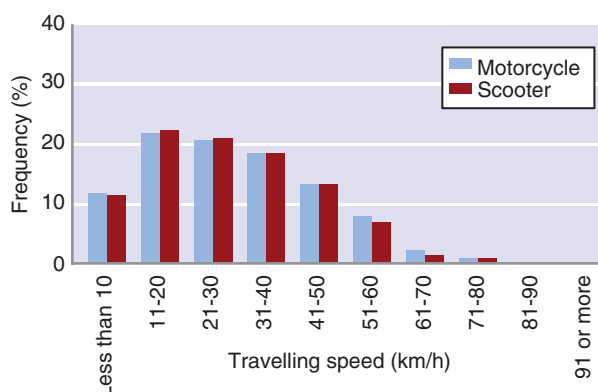
この PCX に電動パワーユニットを搭載することで、多くの人々に受け入れられる電動二輪車を実現できると考



(a) Thailand (Bangkok)



(b) Vietnam (Hanoi)



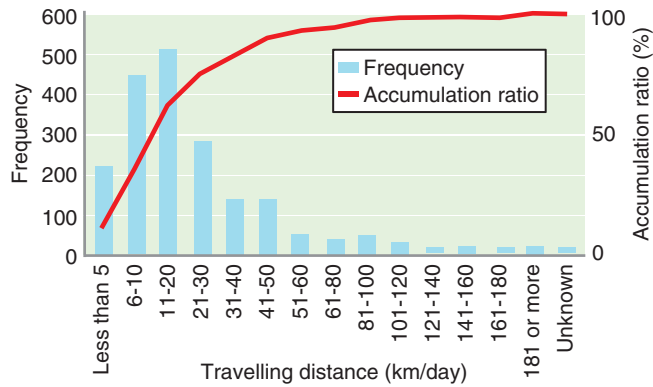
(c) Indonesia (Jakarta)

Fig. 3 Distribution of running speed in three countries

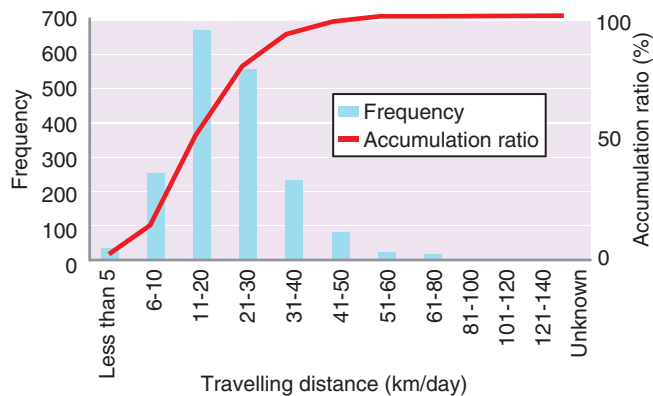
えた。そこで、既存のガソリンエンジン搭載モデルに、必要最小限の変更で搭載することを目標とし、コンパクトな EV システムを目指した。主要パーツの配置を Fig. 5 に示す。

これは、システムの小型化に加え、新規の専用部品を避けられない EV 部品以外でのコスト増加の抑制にもつながった。

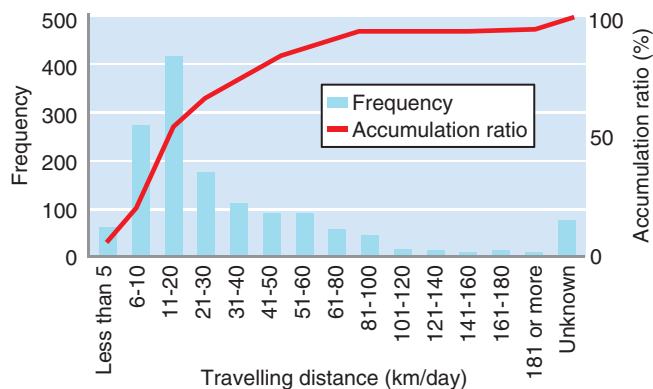
より広く電動二輪車に触れていただく機会を提供すべく、日本および ASEAN 諸国での小型コミュニティユーザに



(a) Thailand (Bangkok)



(b) Vietnam (Hanoi)



(c) Indonesia (Jakarta)

Fig. 4 Daily running distance in three countries

にとってふさわしいモデルはどうあるべきかという観点から、車両諸元の検討をおこない、以下のような完成車としてのねらいを定めた。

- ・先進性: エンジン搭載モデルとの違いを明確化する
 - 新開発 EV システムを採用すること
 - 専用スタイリングアイテム
- ・利便性: シンプルで扱いやすいこと
 - 市街地の混合交通で快適な走行が、可能なこと
 - シンプルな操作が可能なこと
- ・機能性: 安心して使えること
 - 航続距離: 1 日の走行をカバーできる航続距離を達成すること
 - 着脱、可搬型バッテリーを採用すること
 - 出先でも充電可能なオンボード充電器を採用すること

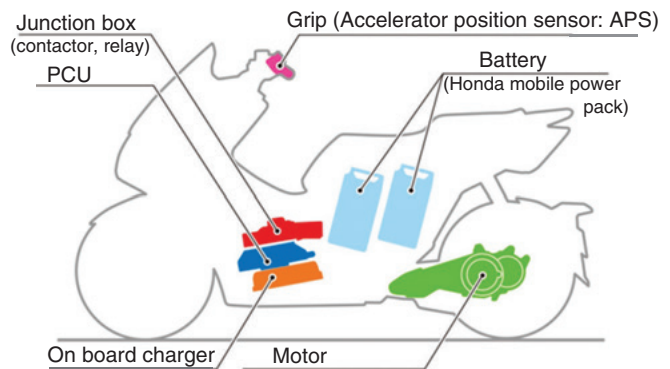


Fig. 5 Layout of EV components

3. EV システム

3.1. システム概要

システムのブロック図を Fig. 6 に示す。メインスイッチ (Main SW) を ON にすることによるシステムの起動や、アクセルグリップを開けることによる走行など、基本操作は従来のガソリンエンジン搭載車と同一となるように構成した。

EV システムの起動パターンとしては、走行時と車載充電時の 2 パターンがあり、それぞれの起動シーケンスについて以下に説明する。各シーケンスの比較は Fig. 7 に示す。

まず、走行時の起動シーケンスは以下のとおりである。

(1) PCU とメータの起動

ユーザがメインスイッチを ON にすることで、12 V バッテリーにより Power Control Unit (PCU) やメータを起動する。

(2) BMU 起動と通信の開始

PCU が 48 V バッテリーの Battery Management Unit

(BMU)を起動し、各ユニット間の通信を開始する。ユニット間の情報のやり取りは、Fig. 8に示すとおり、CAN通信を採用している。

(3) システムスタンバイ

PCUは各ユニットにおいてTable 1に示す項目に異常が無いことを確認し、高電圧システムをスタンバイ状態にさせる(3.2. 節 PCU に詳細記載)。

(4) 走行開始

ユーザがスタートスイッチ(Start SW)を押すと走行可能状態となり、以降アクセルグリップを回すと走行できる。

次に、車載充電時の起動シーケンスは以下のとおりである。

(1) PCU とメータの起動

ユーザが充電プラグをコンセント(AC100 - 250 V)に挿すとPCUやメータが起動する

(2) BMU 起動と通信の開始

走行時起動シーケンスと同じ

(3) システムスタンバイ

PCUは各ユニットにおいてTable 1に示す項目に異常が無いことを確認し、高電圧システムをスタンバイ状態にさせる(3.2. 節 PCU に詳細記載)。

(4) 充電開始

2個の48 Vバッテリーへの並列充電を開始する。

このように本システムは、動力電源として48 Vバッテリーを使用し、走行時や車載充電時はPCUが、車両全体の電力システムについての総合制御をおこなう。

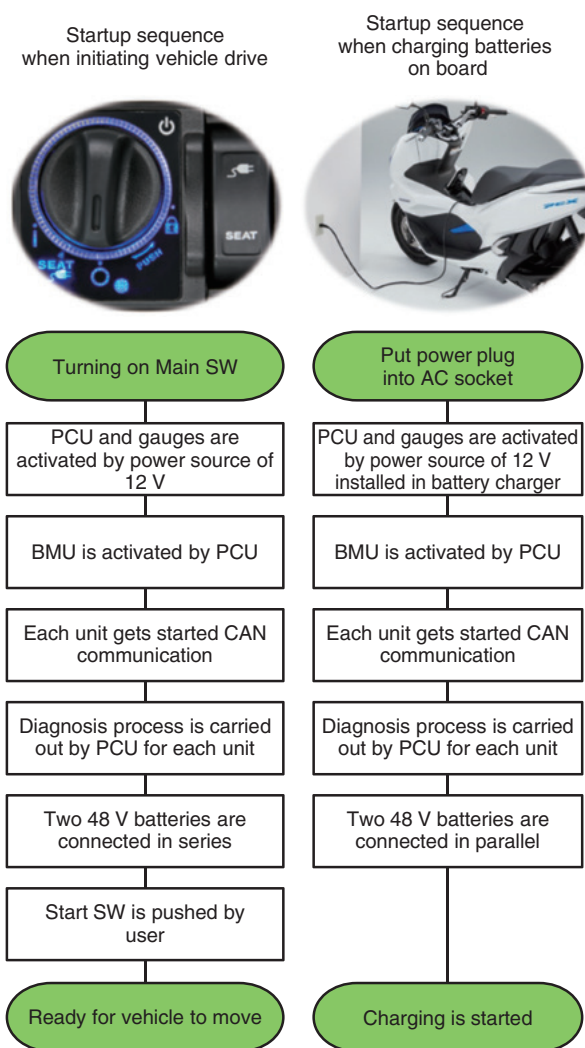


Fig. 7 Comparison of startup sequences

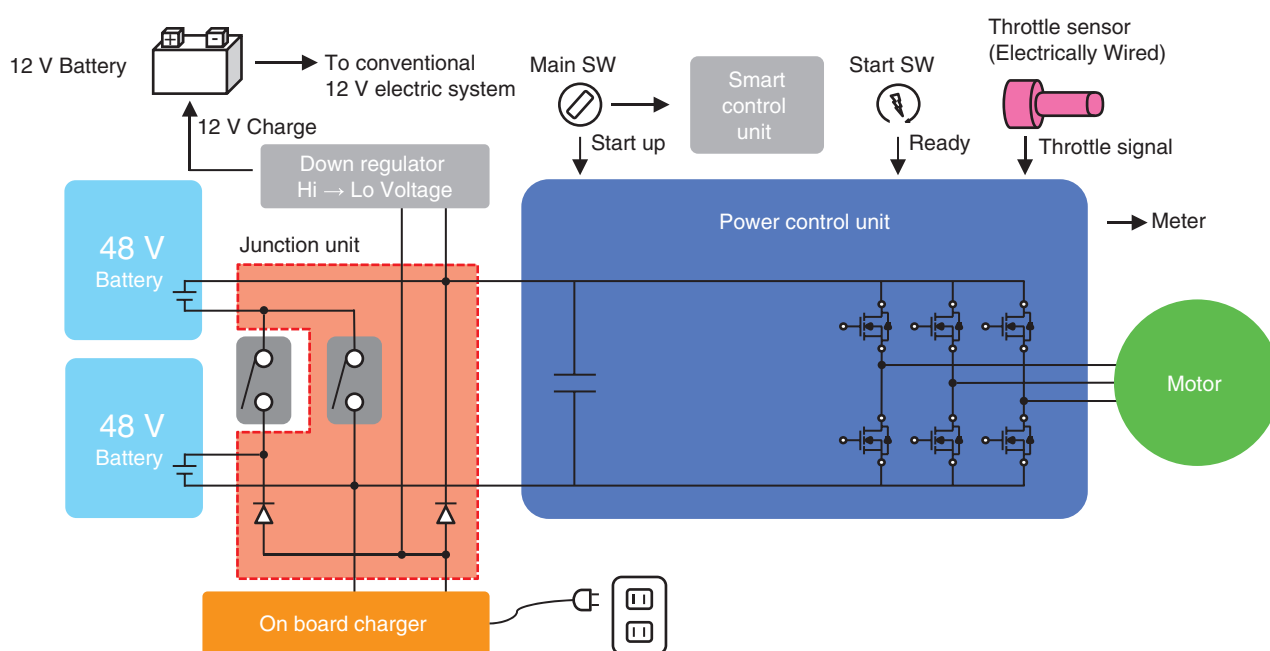


Fig. 6 EV system diagram

Table 1 Malfunction detection during run and charge startup sequences

Subjects of monitoring	When initializing for vehicle running	When initializing for charging
Throttle sensor malfunction	✓	
Functional flaws of PCU	✓	✓
Malfunctions of motor sensors	✓	
Functional or communication flaws of charger		✓
Unusual conditions of 48 V batteries	✓	✓
Malfunctions of junction unit	✓	✓
Unusual conditions of down regulator	✓	

✓: to be checked

3.2. PCU

PCU の機能の詳細を以下に説明する。

走行時は、PCU がメインコンタクタを駆動させ、2 個の 48 V バッテリーを直列接続し、システム電圧を 96 V 系にする (Fig. 9)。これにより 48 V 系で同出力を確保するシステムに対して電流が抑制できるため下記二つの優位性をもたらすことができた。

- ・ バッテリーと PCU 間の高電圧系ケーブルの電力損失を約 6 割抑え、システム全体の効率を向上した
- ・ ケーブル断面積を約 25% 縮小することができ、軽量化と省スペース化が可能となった

外部電源からの充電時は、PCU がリレーを駆動させ、2 個の 48 V バッテリーを並列接続し、システム電圧を 48 V 系にする (Fig. 10)。これにより、2 個のバッテリーの放電状態が異なる場合でも均一な充電を可能とするシステムとした。

また、前述のとおり同一仕様のバッテリーを 2 個搭載するが、各バッテリーから送られてくる残量や温度などの情報を見分けて、適切にモータ出力を変化させる必要がある。

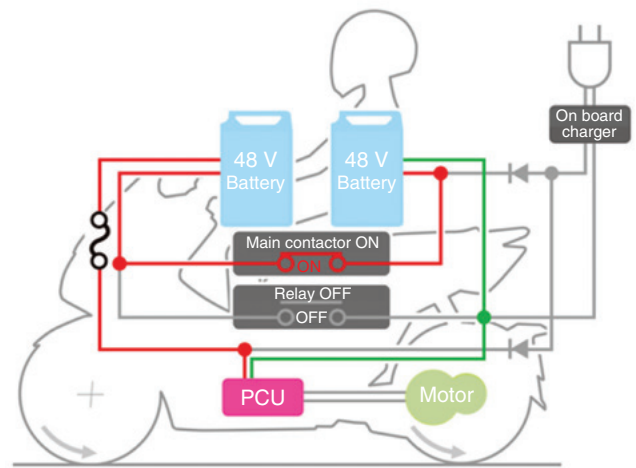
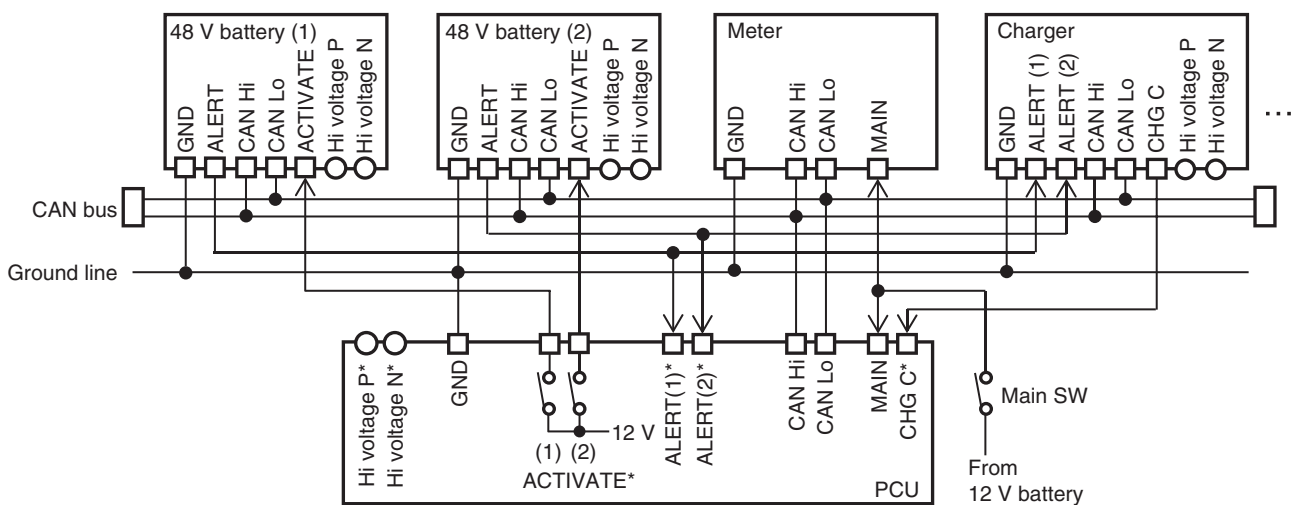


Fig. 9 Diagram of 96 V system



* Details

ACTIVATE: 12 V startup to battery from PCU

ALERT(1)/(2): Detect Battery(1)/(2) connection

CHG C: 12 V startup to PCU from charger

Hi Voltage P/N: Hi voltage positive/negative (connection not shown)

Fig. 8 CAN bus and 12 V system

そのため、車両起動時に PCU が各バッテリーに CAN ID を付与し、バッテリーからの送信データの識別を可能にした。Fig. 11 にフローチャートを示す。

このように、PCU は、車両全体のシステムを統括するために、各ユニットの状態を常時監視し、モータ出力制御や車両の安全を保護するための制御、メータユニットへの情報送信などをおこなう。

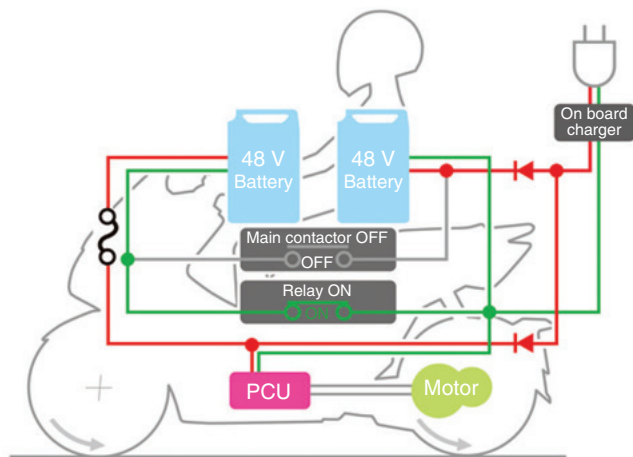


Fig. 10 Diagram of 48 V system

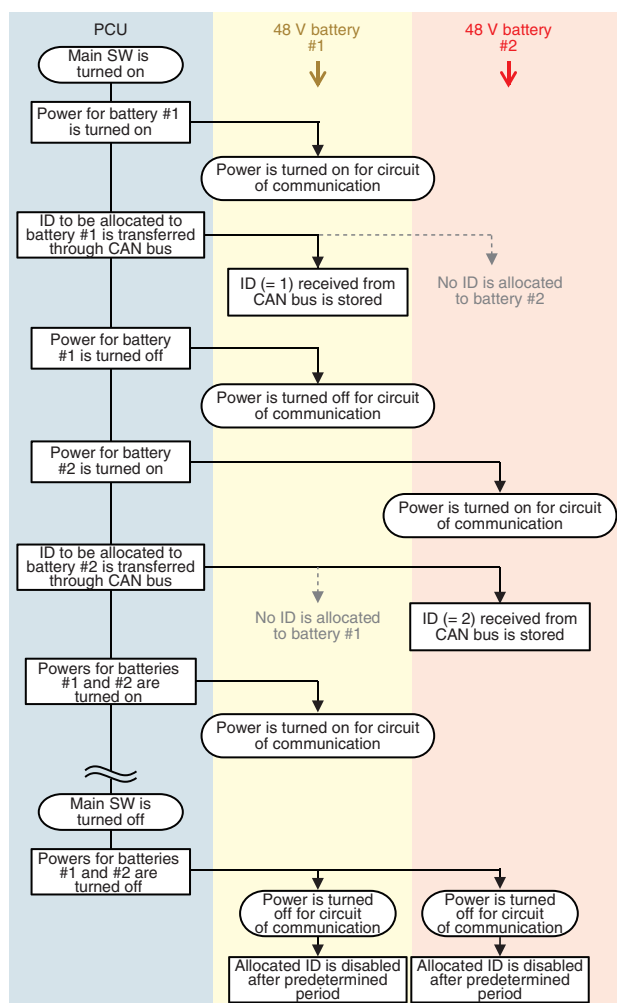


Fig. 11 Flow chart of battery ID assignment

Table 2 Comparison of motor specifications

	EV-neo	PCX ELECTRIC
Rated power (kW)	0.58	0.98
Maximum power (kW)	2.8	4.2
Maximum torque (Nm)	11	18

3.3. モータ

モータは、広範な回転数域の効率向上が必要となるため、磁石トルクに加えてリラクタンストルクを併用する磁石埋め込み型 (Interior Permanent magnet: IPM) 構造を採用した。EV-neo に対し、ステータおよびロータ構成は同等であるが、Table 2 に示すように、要求性能が EV-neo よりも高いため、ステータコイルの線径、コイル巻き数および積厚を変更し、かつ後述するバッテリーシステムの組合せにより最大 4.2 kW のモータ出力を実現した。

通常モータは高い出力を確保するためには冷却が必要となり、オイルポンプやラジエータ、クラッチなどが付加される。しかし、本モデルにおいては軽量かつコンパクトなシステムを実現するために冷却機構を持たないシステムとすることを目指した (Fig. 12)。

Fig. 13 に示すようにモータの低回転領域は発進時の加速や登坂力が必要のため、モータ軸トルク 18 Nm を有する。トルクと相電流値はおおよそ比例関係にあるため、低回転やモータロックを維持すると、非常に高い相電流をモータに流し続けることになるため、モータ温度が上昇し、モータが破損する恐れがある。

そのため、ステータのコイルエンドにサーミスタを取付け、コイル温度を PCU が検出し、温度保護しきい値を超



Fig. 12 Motor structure

えた場合に、第1段階で出力を制限する。さらにコイル温度が上昇する場合は、第2段階として出力を停止するよう制御している。

また、サーミスタの取付けはメンテナンス性を考慮し、ボルトオン構造とした。サーミスタステーを板ばね構造とし、Fig. 14に示すように、サーミスタ本体の感受点をモータコイルに押し付け接触させることにより、安定したコイル温度検出を実現することができた。

3.4. バッテリー

バッテリーは、堅牢、コンパクトでありながら、デザイン性を兼ね備える着脱式の可搬型バッテリー「Honda Mobile Power Pack™」を開発した (Fig. 15)。Table 3に基本仕様を示す。

セル、バッテリーコネクタ、BMUなどの効率的な配置等により、エネルギー密度をEV-neoに対し約3倍に高めることができた (Fig. 16)。これにより、PCX EVの車体に収まるサイズとすることができた。外観は、ねじやボルトを露出させないスマートなデザインとするため、押出し成型のアルミ筐体やトップケースなどの3ピース構造とした。また、バッテリーの持ち運びの利便性を高めるため、ハンドルをT字形状とし、さまざまな持ち方、持ち上げ方に対応できるようにしている (Fig. 17)。

コネクタ構造は、着脱による繰り返し挿抜に対して十分な挿抜耐久性と高通電電流を両立させる必要がある。そのため、端子の接圧やかん合位置、挿入方向を補正できる構造および、多接点式端子を採用したコネクタを開発した (Fig. 18)。これにより、電気自動車などの充電コネクタが準拠しているIEC62196の挿抜試験の要件である10,000サイクルを超えても安定した電気的特性を示し、一般の同

形状の端子と比べ高い耐久性を得ることができた。また、50 A以上の許容電流を達成した。

さらに、可搬型という特性から、バッテリー単体での被水や落下に対しての対策が必要となる。

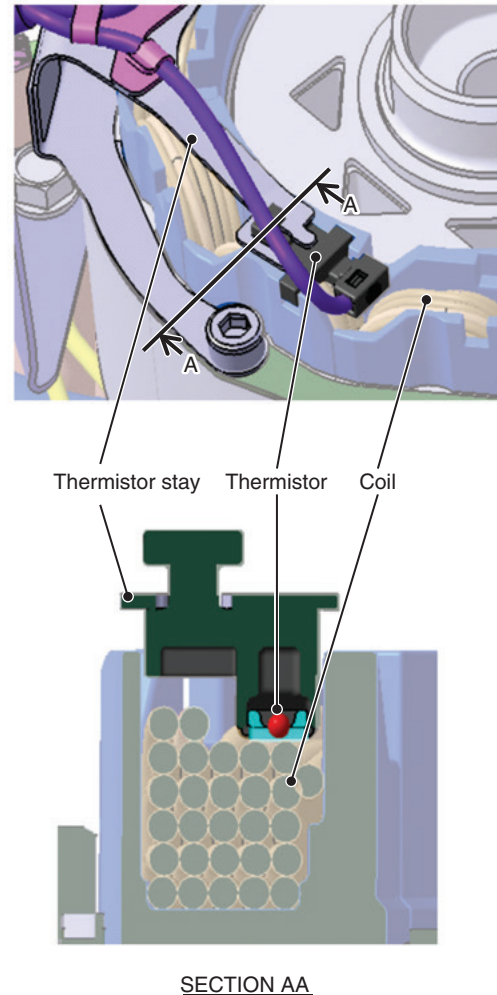


Fig. 14 Motor thermistor structure

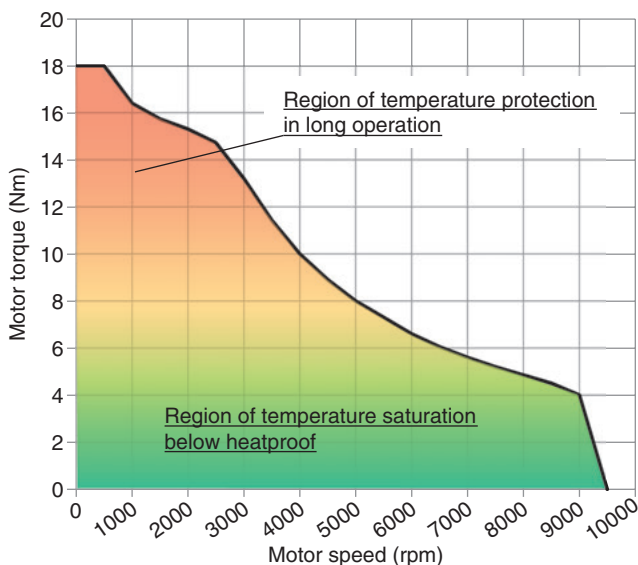


Fig. 13 Torque characteristics of motor



Fig. 15 Honda Mobile Power Pack™

Table 3 Basic specifications of removable battery

Voltage	50.4 V
Capacity	1,052 Wh Min
Volume	7.1 L
Outside dimension (H × W × D)	296 mm × 178 mm × 155 mm
Weight	10.9 kg Max

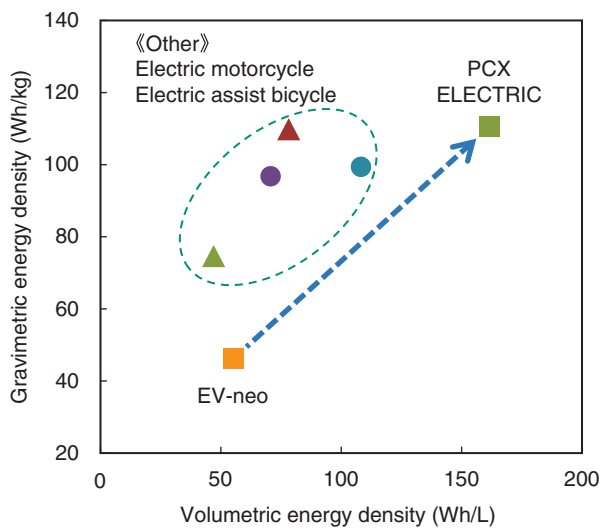


Fig. 16 Comparison of energy densities



Fig. 17 Methods of hand-carrying battery

被水については、筐体が損傷を受けても防水性が損なわれないよう、筐体内部に防水構造を設けた。

落下については、下記に述べる対策をおこなった。

外装筐体から内包するリチウムイオンセルおよびBMU基板などへの衝撃伝達を軽減するため、バッテリー内部に衝撃吸収構造を採用した。この衝撃吸収構造は、コンパクト化の実現のために衝撃吸収部材を追加すること無く、Fig. 19 (a)に示すように、リチウムイオンセルを保持するセルホルダ外郭にスリットを設けることで実現した。一方、車載することを考慮すると、走行振動による内部共振を回避する必要もある。しかし、衝撃吸収と共振回避は相反する要素である。この課題を解決するため、衝撃吸収構造のスリットの変形による衝撃吸収のCAE解析と振動共振試験結果から衝撃吸収と共振の回避するばね特性(定数)を導き出し、衝撃吸収構造のスリットの幅、間隔のセッティングによりそのばね特性を実現した。Fig. 19 (b)にスリット部変位のCAE解析の一例を示す。その結果、

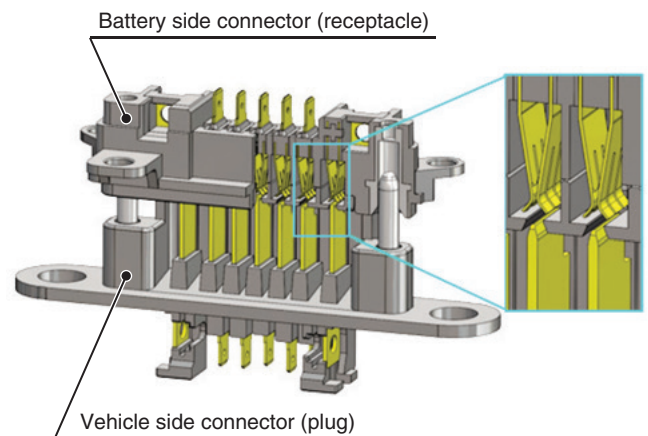
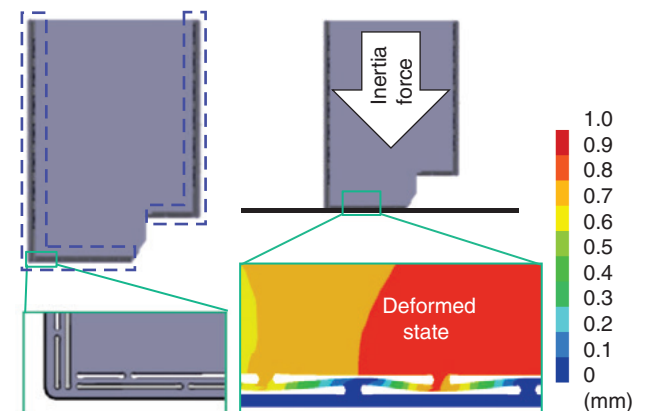


Fig. 18 Internal structure of connector



(a) Area of energy-absorbing structure (b) Example of CAE analysis about shock absorption at time of fall

Fig. 19 Shock-absorbing structure for battery

UN R136 Part2 で規定される 1 m 落下試験において、発火発煙等が発生しない安全性と走行振動に対する耐久性を両立することができた。

また、持ち運びを前提としたバッテリーは筐体がコンパクトなため、強制空冷等の冷却装置の付与が容易ではないため、充放電による発熱が課題となる。そこで、アルミニウム製の外装筐体へ効率的に放熱がおこなえるようにセルの配置や熱伝導シートの位置、ポッティング量など放熱構造を適正化した。これにより自然空冷構造で、40°C 環境下で 2.5 kW を連続 10 分間出力することを可能とした (Fig. 20)。

さらに、セル温度低下は充放電サイクル耐久寿命にも大きな効果が有り、バッテリーパックの高寿命化も可能とした。

3.5. バッテリー着脱機構

着脱機構はバッテリーの固定とコネクタのかん合の機能を満足する必要がある。以下に、それぞれの機能を説明する。

3.5.1. バッテリーの車両への固定

Fig. 21, 22 にバッテリー固定構造の構成部品および作動原理を示す。ユーザがロックプレート回転させると、それに押されるようにバッテリーホルダーが内側へ回転し、バッテリーを上から押え込み固定する。

また、車両走行時の振動により、バッテリーに力が作用してもロックプレートが回転しない構造とするために、ロックプレートとバッテリーホルダーの回転軸を直交させ、かつ固定完了後のそれぞれの接触面は平面とした (Fig. 23)。

3.5.2. コネクタのかん合

Fig. 18 に車両側のコネクタ (プラグ) とバッテリー側のコネクタ (レセプタクル) の動作原理を示す。バッテリーを挿入する際の荷重がプラグ、レセプタクルに加わらないよ

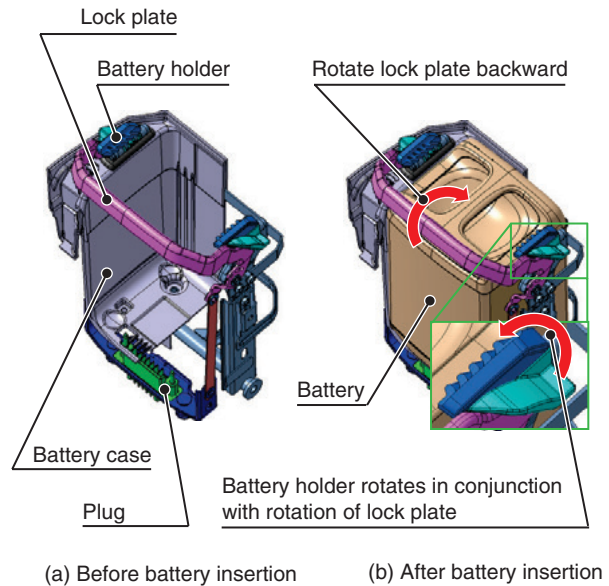


Fig. 21 Structure and operating principle of battery attaching system

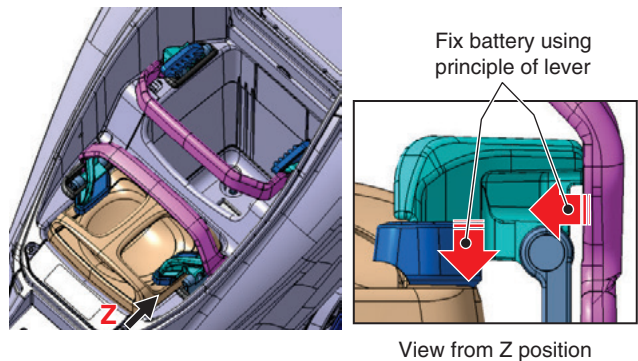


Fig. 22 Operation of lock plate to secure battery in holder

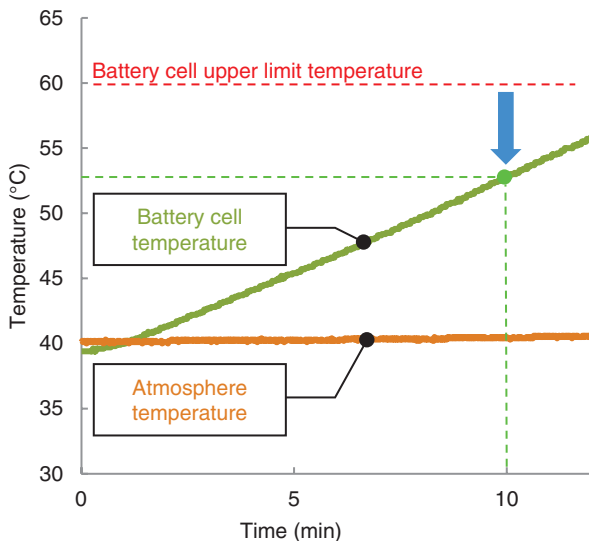


Fig. 20 Temperature of battery cell at 2.5 kW discharge for 10 min

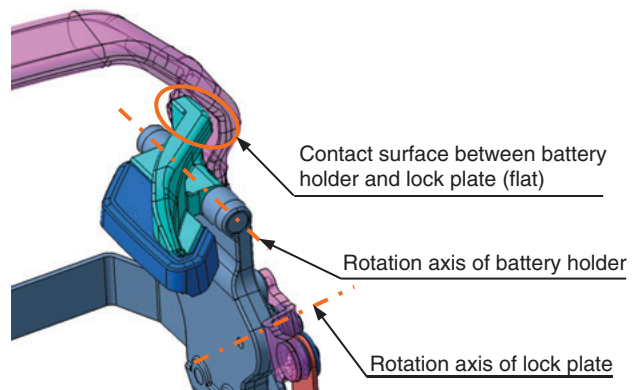


Fig. 23 Battery holder and lock plate pivoting axes and their contact surface

うにするために、プラグはバッテリーボックス底面より下側に配置され挿入時にはプラグ、レセプタクルのかん合はおこなわれない。

ロックプレートを回転させるとこれに連結されたプラグホルダが上昇し、プラグ、レセプタクルが初めてかん合する構造となっている (Fig. 24)。プラグは各種構成部品の公差を吸収するために、プラグホルダにスプリングを介したフローティングマウントされている (Fig. 25)。さらにスプリングによりプラグはかん合方向に常に荷重を与えるため、車両走行時のプラグとレセプタクルのかん合を維持する。

以上により、バッテリーホルダによるバッテリーの固定および、プラグホルダの上昇によるコネクタのかん合という二つの機能を、ロックプレートの操作のみで可能とし

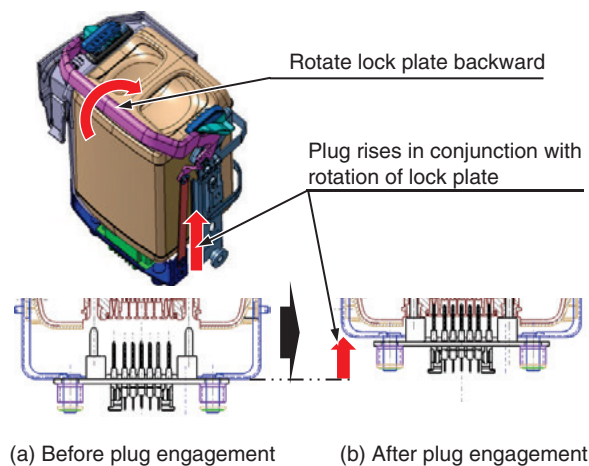


Fig. 24 Connector engaging operation

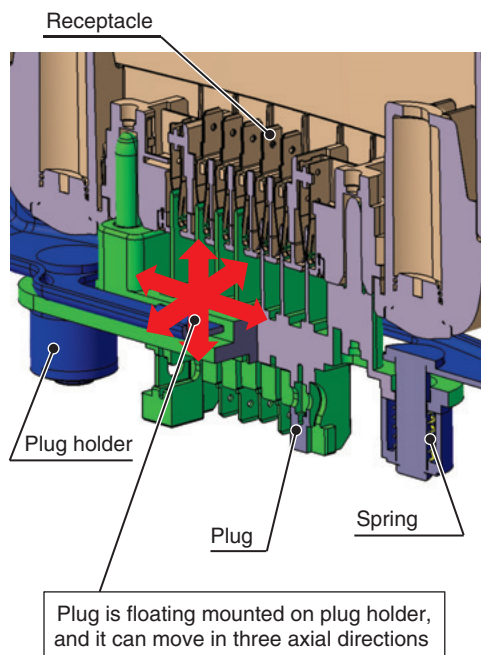


Fig. 25 Floating mount system of plug

た。さらに、ロックプレートの操作完了後にシートを閉じると、シートから伸びたストッパによりロックプレートが戻らない設定とした。これにより、走行中のバッテリーの固定、コネクタのかん合維持に対する信頼性をより高めることができた (Fig. 26)。

3.6. 充電システム

充電は2種類の方法でおこなうことができる。

一つ目は、前述のとおり、バッテリーを車両に搭載したままの状態、車体に内蔵された AC ケーブルを外部電源と接続しておこなう充電方法である。車載充電では2個のバッテリー (充電時は並列接続にておこなう) の満充電までの時間は約6時間である。充電状態はメータユニット内の表示で確認できる。

二つ目は、バッテリーを車両から取り外しての充電方法である。外したバッテリーを外部電源につないだ専用充電器 (Fig. 27) に接続しておこなう。1個のバッテリーの満充電までの時間は約4時間である。充電状態は専用充電器

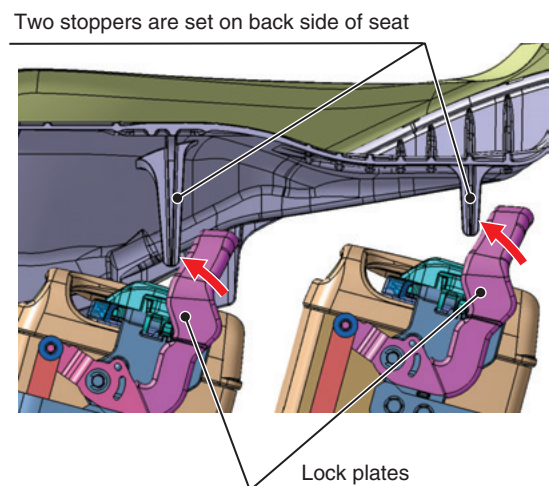


Fig. 26 Under-seat stoppers of lock plates



Fig. 27 Special charger for Honda Mobile Power Pack™

のインジケータで確認できる。なお、専用充電器はバッテリーを挿入する際の荷重がプラグおよびレセプタクルに加わらないようにするために、油圧ダンパで支持された可動底板を採用した。これにより、バッテリーは挿入後、油圧ダンパの作用により、ゆっくりと下降しプラグとレセプタクルがかん合する (Fig. 28)。また、車両のプラグかん合機構と同様に、プラグはフローティングマウント構造となっている。

以上の二つの充電方法により、屋外にコンセントがある家では車体側プラグを使った充電を、また、マンションなどの室内ではバッテリーを車両から取り外しての充電など、ユーザの生活スタイルにあわせ、充電方法を選択できるシステムとした。

3.7. 完成車パッケージング

コンパクトな EV システムの採用により PCX と同等の車体サイズを維持し、快適で上質な走りを実現した。

3.7.1. ディメンジョンおよび、ライディングポジション

PCX のシート下部分に、前後に 2 個バッテリーを配し、車体骨格の中に着脱機構を搭載し、車体カバーやシート形状を PCX と共通とし、ゆったりとしたライディングポジションを継承している。一方で、後部バッテリーとリヤタイヤの可動スペースを成立させるため、PCX に対しホイールベースを 65 mm 延長した。しかし、専用設計したばね下

Table 4 Specifications for PCX ELECTRIC

Dimensions L x W x H	(m)	1.960 x 0.740 x 1.095
Wheelbase	(m)	1.380
Ground clearance	(m)	0.132
Seat height	(m)	0.760
Vehicle curb mass	(kg)	144
Rated power	(kW)	0.98
Maximum power	(kW/rpm)	4.2/5,500
Maximum torque	(Nm/rpm)	18/500
Cruising range at 60 km/h	(km)	41
Main battery	Type	Lithium ion
	Battery (V) / (Ah)	50.4 V / 20.8 Ah x 2
Tire size	Front	100/80-14M/C 48P
	Rear	120/70-14M/C 55P

マウントリヤフェンダにより、車両全長は 35 mm 延長に留め、押し歩きや街中での走行時の取り回しの良さを実現している。Table 4 に主要諸元を示す。

3.7.2. フレームおよびパワーユニットハンガ

フレームの生産設備を PCX と共用にするためにフレーム側ピボット、ヘッドパイプ下端、リヤサスペンションの取付け位置は同位置とし、基本骨格を共通とした。一方で、走行性能は、ホイールベース 65 mm 延長、車両重量 13 kg 増でも同等のハンドリングを目指した。このため、パワーユニットの最小化に伴ってその懸架には、専用設計のパワーユニットハンガを採用した (Fig. 29)。また前後の取付け部をラバークッションとすることで、路面からの入力を吸収できる構造とした。これに加えて、フレーム剛性の適正化と前後サスペンションのセッティングをおこなうことで、振動の少ない EV のパワーユニットの特性を活かした上質な乗り心地と PCX 同等のハンドリングを実現した。また、最高速度は 60 km/h、航続距離は 57 km (WMTC モー

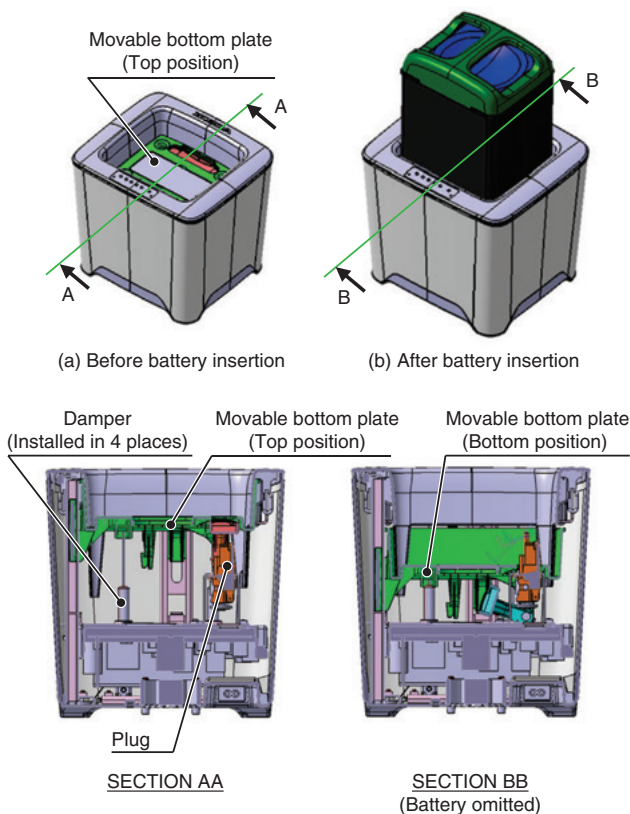


Fig. 28 Structure of special charger

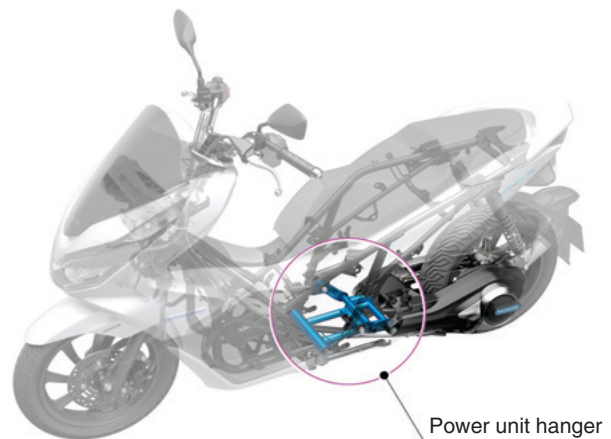


Fig. 29 Power unit hanger

ド相当の社内試験値) および 41 km (60 km/h 定地走行時) を達成した。

4. スタイリングデザイン

4.1. スタイリング

スタイリングは 2018 年モデル PCX および PCX150 を踏襲している。スタイリングコンセプトを「美しさと力強さ」とし、主体色部を、一つの大きなフォルムと捉え、その中に緊張感と柔軟性のある造形を施し、高級感と新しさを表現している (Fig. 30)。

また、PCX ELECTRIC の特徴として、パワーユニットまわりに専用のデザインを施している (Fig. 31)。

円形のモータカバーによって、EV の象徴であるモータの存在を強調し、リヤフェンダを樹脂、その取付け部品をアルミとした専用のばね下マウントタイプとすることで、PCX シリーズの中でも、EV としての特別感を表現している。

4.2. カラーリング

EV のクリーンなイメージと特別感を演出する専用カラーリングとして、キャンディーブルーをアクセントに使ったパールホワイトを採用した。

4.2.1. 灯火器

ヘッドライト (Fig. 32)、テールランプ (Fig. 33) は PCX HYBRID と共通である。ヘッドライトはシグネチャーライト裏側のブラケット色をブルーとし、テールランプはストップランプ点灯部のインナーレンズをブルーとすることで、灯火器消灯時には、その部位がブルーに見えるように設定した。

4.2.2. エンブレム

Honda の EV であることが一目でわかるように、PCX エンブレムはキャンディーブルーを採用している (Fig. 34)。また、ELECTRIC 専用のエンブレムも設定している (Fig. 35)。



Fig. 30 Side view



Fig. 32 Headlight



Fig. 31 External view of power unit



Fig. 33 Tail light



Fig. 34 Emblem of PCX



Fig. 35 ELECTRIC exclusive emblem

5. まとめ

日本に加え ASEAN 三カ国（タイ、ベトナム、インドネシア）の交通環境下での使い勝手を満足する電動二輪車 PCX ELECTRIC を開発した。

着脱バッテリーシステムを採用することにより、従来課題であった充電待ち時間を実質的にゼロにすることを可能とした。また、48 V 系バッテリー 2 個を直列に接続した 96 V 系 EV システムを採用することにより、モータ出力 4.2 kW、最高速度 60 km/h、航続距離 57 km (WMTC モード相当社内試験値) および 41 km (60 km/h 定地走行時) を実現した。これにより、日本および ASEAN の各国において、UN R136 対応の先進電動二輪車を提供することができた。

最後に、今回開発した PCX ELECTRIC は今後インドネシアをはじめとする各国での実証実験にも活用され、着脱可搬型バッテリー Honda Mobile Power Pack™ を中心とした電気を「つくる、つなげる、つかう」⁽⁵⁾の世界実現に向けた検証をおこなっていく予定である。

参考文献

- (1) 中澤祥浩, 熊谷千昭: 実用電気スクーターの開発, HONDA R&D Technical Review, Vol.6, p.17-23

- (2) 長敏之, 本田幸一郎, 味村政秀: ビジネス用電動二輪車 EV-neo の開発, Honda R&D Technical Review, Vol.23, No.2, p.13-20
 (3) 小林直樹: ビジネス向け電動二輪車「EV-neo」用駆動モータの開発, Honda R&D Technical Review, Vol.24, No.1, p.27-33
 (4) 大森純平, 少覚功, 高山慶士: 2018 年モデル PCX および PCX HYBRID の開発, Honda R&D Technical Review, Vol.31, No.1, p.40-47
 (5) https://www.honda.co.jp/smartcommunity/ceatec2017/pdf/mobilepowerpack_jp.pdf

■著 者■



三ッ川 誠



市川 広基



大久保 克幸



加藤 貴朗



高橋 泰史



重水 信男



大久保 克紀

フロントフード下搭載を実現した FC 冷却システム小型化技術

Downsizing Technology for FC Cooling System Installation under Front Hood

濱 祐 樹¹

Yuki HAMA

後 藤 修 平¹

Shuhei GOTO

永 田 大 貴¹

Daiki NAGATA

高 橋 謙¹

Ken TAKAHASHI

要 旨

CLARITY FUEL CELL のFCパワープラントのフロントフード下への搭載を実現するために、FC冷却システムを小型化する技術を開発した。FCスタックは、金属セパレータの腐食予測技術で腐食電流量を精度よく見積り、冷媒の電気伝導率の低減と、セルの絶縁ゴム除去により小型化した。FC冷却デバイスは、配管長を短縮でき、かつ圧損増加にともなう大型クーラントポンプが必要とされない範囲に冷媒電気伝導率を設定した。FC冷却システムは、FCスタックおよびFC冷却デバイスの小型化の寄与度が大きい範囲において、冷媒の電気伝導率を低減した。冷媒の電気伝導率を低減するために、部品からのイオン溶出低減と冷媒の分解抑制を図るとともに、溶出したイオンを常時除去するFC冷却システムを構築した。これらにより、FC冷却システムを前モデル比20%小型化し、世界初5人乗りFCVセダンパッケージを実現することができた。

ABSTRACT

Technology for downsizing the fuel cell cooling system was developed in order to realize installation of the fuel cell power plant under the front hood of the CLARITY FUEL CELL. The fuel cell stack was downsized by accurately estimating the amount of corrosion current by using technology for predicting corrosion of the metal separator, decreasing the conductivity of the coolant, and removing the insulation rubber from the cell. For the fuel cell cooling device, the conductivity of the coolant was set within a range that would enable piping to be shorter and not necessitate the large-scale coolant pump used when a pressure drop increase occurred. In the fuel cell cooling system, the conductivity of the coolant was decreased within the range that would make a large contribution to downsizing the fuel cell stack and the fuel cell cooling device. In order to decrease the conductivity of the coolant, a fuel cell cooling system was built that would decrease ion dissolution from parts, inhibit degradation of the coolant, and constantly remove dissolved ions. These measures achieved a fuel cell cooling system that was downsized 20% over the previous model and succeeded in realizing the world's first five-passenger fuel cell vehicle in a sedan package.

1. ま え が き

2016年に発表した新型の燃料電池自動車(Fuel Cell Vehicle: FCV)であるCLARITY FUEL CELLは、内燃機関(Internal Combustion Engine: ICE)を搭載した車両と変わらない5人乗りFCVセダンパッケージを世界で初めて実現することを開発のねらいとした。そのために燃料電池(Fuel Cell: FC)パワープラントを2009年モデル(09MY)

より小型化することで、床下からフロントフード下への移設を実現した⁽¹⁾(Fig. 1)。その利点は、ICE車同様に5人乗りを実現でき、かつFCV専用の車体開発が必要ないことである。

そのためには、FCパワープラントを小型化させつつ耐衝撃性を09MY比4倍まで向上させる必要があり、技術難易度が高い⁽¹⁾。

2016年モデル(16MY)FCパワープラント小型化対応技

¹ 四輪R&Dセンター



Fig. 1 Schematic drawing of FC power plant for new CLARITY FUEL CELL

術の一つとして、本稿では、FC 冷却システム小型化について紹介する。

2. FC 冷却システム小型化の目標と課題

2.1. FC 冷却システムの構成

CLARITY FUEL CELL に搭載している FC スタックを含めた FC 冷却システム図を Fig. 2 に示す。

FC 冷却システムは、FC スタックと FC スタックで発生する熱を外部へ放熱するための FC 冷却デバイスで構築されている。

2.1.1. FC スタック (FC stack)

本稿で検討した FC スタックの構成を Fig. 3 に示す。

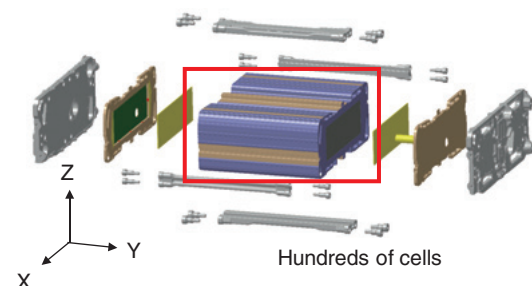
(a) に示す FC スタックは車両の動力性能確保に必要な電力を供給するため、セルを数百枚積層する構造とした。(b) に示すセル構造は 2 枚の膜電極接合体 (Membrane Electrode Assembly: MEA) を 3 枚の金属セパレータ⁽²⁾で保持し、2 セルごとに冷媒を流す構造を採用した。

FCV に採用している固体高分子型の燃料電池は、電解質膜を用い燃料の水素と空気中の酸素との電気化学反応によって得られる化学エネルギーを電気エネルギーに直接変換するシステムである。電気化学反応時に発生する熱は金属セパレータを介して冷却デバイスを循環する冷媒と熱交換し排出される。(c) に示すように冷媒は入口側の冷媒連通口 (Coolant manifold) から冷媒流路を通り冷却面に供給さ

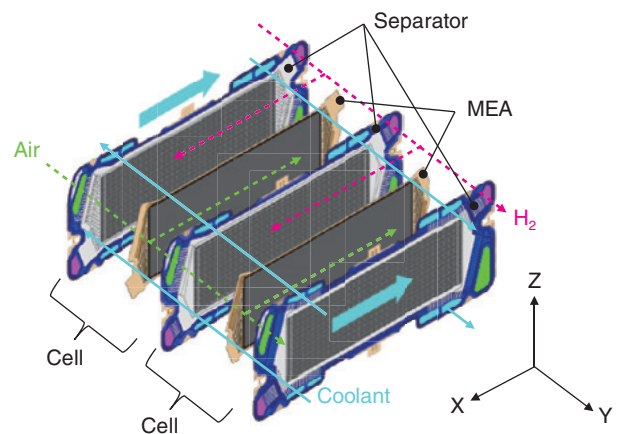
れ、出口側の冷媒連通口へ冷媒流路を通り排出される。

2.1.2. FC 冷却デバイス (FC cooling device)

Fig. 2 に示す通り、FC 冷却デバイスは冷媒を循環させるクーラントポンプと熱を外部へ放熱するラジエータ、ラジエータとそのバイパス回路への回路の切り替えをおこなうサーモバルブで構成した。イオン交換器は車両の電気安全性確保と FC スタックの腐食を防ぐために、冷媒内部のイオンを除去する目的で従来から適用しており、一般的な燃料電池冷却システムに採用されているデバイスである。排熱回収回路は低温時の燃費向上のため、冷媒を介して FC スタックの熱を回収しヒータシステム回路へ供給する目的で設置した。



(a) Components of FC stack



(b) Cell structure

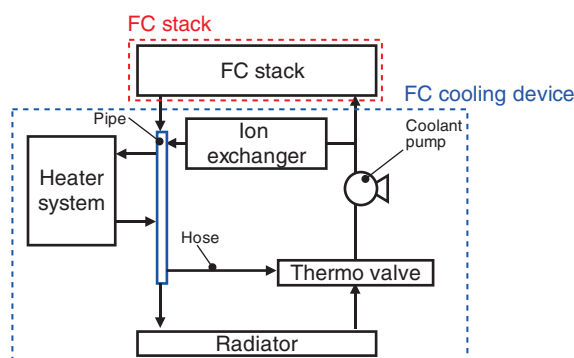


Fig. 2 Schematic diagram of FC cooling system

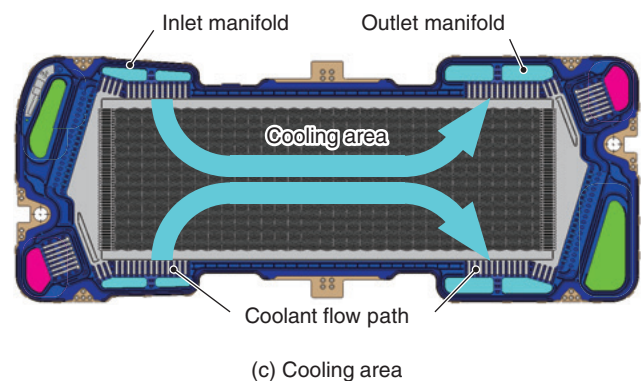


Fig. 3 Inside of FC stack, cell component, and cooling area

2.2. FC 冷却システム小型化の目標と達成手段

FC パワープラントをフロントフード下に搭載可能とするために、FC パワープラントを V6 エンジン同等の容積にすることを旨とした⁽¹⁾。そこで、FC 冷却システム小型化にあたり、構造と機能の両面でアプローチすることを検討した。FC 冷却システムの機能を維持しつつ冷媒経路構造を見直すことで、FC スタックの容積を 09MY 比較で 20 ポイント低減することを目指した。

FC スタックは数百枚のセルによって構成されており、セルの厚みを低減すると小型化に大きく貢献できる。そこでセル厚みに寄与する絶縁被覆ゴムを削除することに着目した。

09MY および 16MY FC スタックの冷媒流路構造を Fig. 4 に示す。まず 09 MY および 16MY 冷却面を正面図に示す。次に冷却流路構造の高さの変化と、連通口から冷媒流路の絶縁ゴム被覆距離の変化を示す。

09MY の冷媒流路は金属セパレータの腐食を防ぐため、冷媒流路の上下左右を絶縁ゴムで覆われた構造としていた。それに対し 16 MY では冷媒流路の上下に配置された絶縁ゴムを削減する構造とした。また、冷媒流路高さ h_{09MY} と h_{16MY} は同等の値を設定した。その結果、冷媒流路の圧損を増加させることなく、セルとして被覆ゴム 2 層分の厚みを低減した。

また、セル面積について 16MY は連通口から金属面まで

Table 1 Three functions for FC cooling system

Function	Parameters	Issues of downsizing
Stack cooling	• Coolant flow • Heat exchanger rate	Decrease in cooling performance
Insulation	• Insulation resistance • Coolant conductivity	Decrease in insulation resistance
Corrosion resistance	• Cell thickness • Insulation distance • Coolant conductivity	Increase in metal corrosion

の絶縁ゴム被覆長 l_{16MY} を 09MY の l_{09MY} に対し短くすることで、セル面積を縮小した。

これら構造の見直しにより FC スタックの容積を 20% 小型化した。

2.3. FC 冷却システムの機能

FC 冷却システムに求められる三つの機能と、機能に影響するパラメータおよび小型化の課題を Table 1 に示す。

FC スタック冷却性能は、FC スタックやラジエータへ流入する冷媒流量、およびそれぞれの熱交換効率により、外気への放熱量により決定する。クーラントポンプやラジエータの小型化を実施すると、冷媒流量および外気への放熱量が減少し冷却性能を低下させる。そのため、小型化はコンポーネントレベルではおこなわず配管長の短縮により達成することとした。

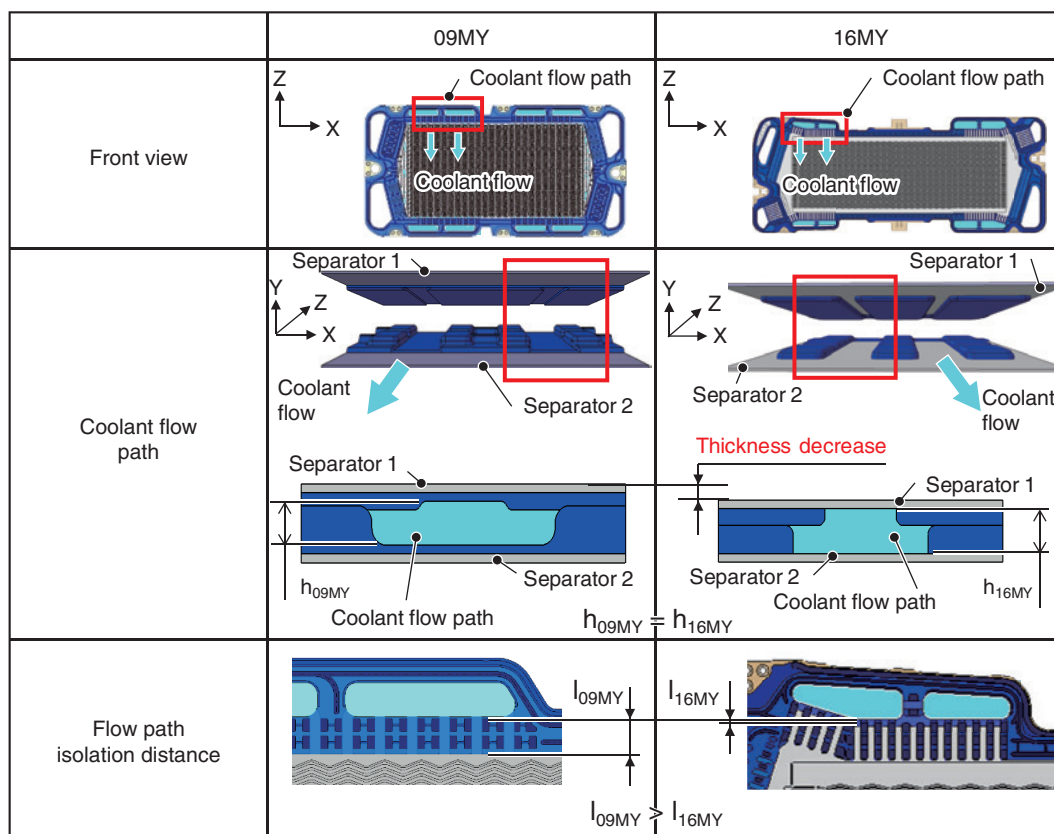


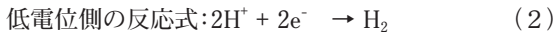
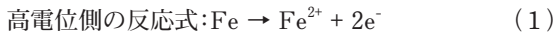
Fig. 4 Detail of coolant flow path

FC 冷却システムの絶縁性は車両電気安全を維持するために必要であり、FC スタックとグラウンドまでをつなぐ配管長さと冷媒の電気伝導率に依存する。小型化をすると前述したとおり配管長が短くなるため、絶縁抵抗値が低下する。そのため必要な絶縁抵抗値を確保するためには、冷媒の電気伝導率を前モデルよりさらに下げる必要がある。

FC セパレータ耐腐食性は、Fig. 5 (a) に示す金属セパレータの冷媒流路で発生する酸化還元反応による金属セパレータの腐食を抑制し、その強度を保持するために必要である。

冷媒経路は Fig. 3 (c) に示すように導電体である冷媒が常に存在するため、回路の形成を防ぐことが構造上できない。

Fig. 5 (b) に示す通り、金属セパレータの腐食は冷媒流路のステンレス露出部で発生する。主な反応は、高電位側 (1) でステンレス主成分の鉄が溶出し、低電位側 (2) で水素が発生する酸化還元反応である。



冷媒流路のステンレス材料が溶出すると、強度が低下し差圧による変形や、孔食が発生する。

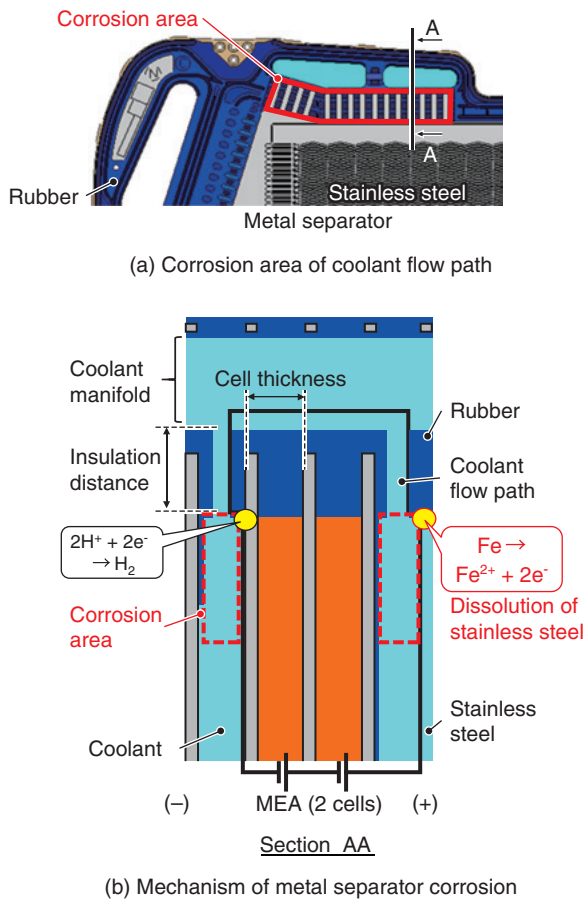


Fig. 5 Outline of metal corrosion

FC 冷却システム小型化のためにセル厚みや絶縁距離を低減すると、各部位が受け持つ電気抵抗が小さくなることで、冷媒流路に流れる腐食電流量が大きくなり、金属セパレータの腐食が促進する。小型化と金属セパレータ耐腐食性を成立させるためには、冷媒の電気伝導率を下げることに有用である。

この FC スタックの腐食電流量を精度よく算出するために検討した等価回路図を Fig. 6 に示す。

冷媒連通口に流れる電流を I_A 、冷媒流路に流れる電流を I_B 、冷媒連通口の抵抗を R_A 、冷媒流路の抵抗を R_B とした。

この等価回路を用いて最も大きな腐食電流である $I_{B(n+1)}$ を算出⁽³⁾し、横軸にセル厚み、絶縁距離、冷媒の電気伝導率の比率、縦軸に腐食電流量の比率をとり、09MY を 100% とした場合の効果を図 7, 8, 9 に示した。Fig. 7 より、Fig. 3, 4 に示した Y 方向に小型化できるセル厚み

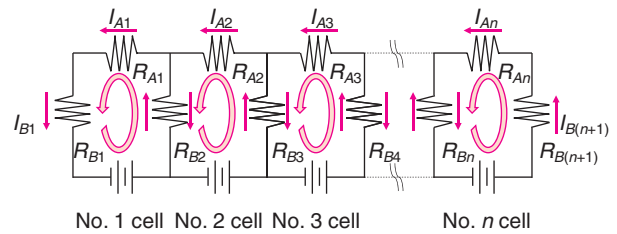


Fig. 6 FC stack circuit diagram

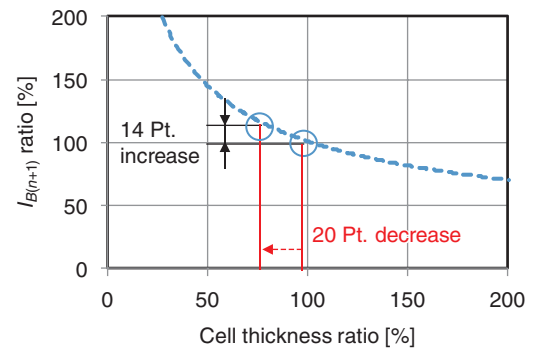


Fig. 7 Influence of cell thickness ratio on $I_{B(n+1)}$ ratio

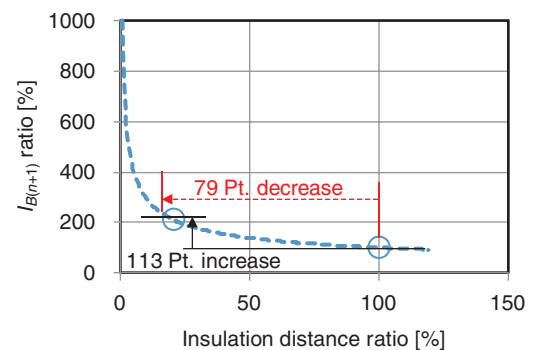


Fig. 8 Influence of insulation distance ratio on $I_{B(n+1)}$ ratio

を 20 ポイント低減すると、 R_A の抵抗が小さくなるため腐食電流量 $I_{B(n+1)}$ が 14 ポイント増加する。また、Fig. 8 より絶縁ゴムを除去して Fig. 3, 4 に示した Z 方向に小型化できる絶縁距離を 79 ポイント減少させると腐食電流量が 113 ポイント増加する。これらのセル厚みと絶縁距離の低減による腐食電流量の増加に加え、FC スタック積層数、冷媒連通口断面積および使用環境の影響により、腐食電流量は増加する。これらを低減するためには、Fig. 9 に示すように腐食電流量に大きく寄与する冷媒の電気伝導率を下げるのが効果的である。このため、09MY に対しセル厚みと絶縁距離の低減による腐食電流量の増加分 59 ポイント、他の腐食電流量上昇分 37 ポイント冷媒の電気伝導率を低下させることで、16MY の目標を設定した。

これらから、FC 冷却システムに求められる機能を確保するためには、FC スタックと FC 冷却デバイス影響を与える冷媒の電気伝導率が重要なパラメータであることが抽出できた。Fig. 10 は横軸に冷媒の電気伝導率の 09MY に対する比率、(a) の縦軸に FC 冷却デバイス容積の比率を、(b) の縦軸に FC スタック容積の比率を示す。横軸、縦軸ともに 09MY を 100% とし、冷媒の電気伝導率低減による FC 冷却デバイスと FC スタックの小型化の寄与度を表現している。

Fig. 10 (a) の (1) 領域で示す通り、FC 冷却デバイスは電気伝導率比を 100% から低下させると絶縁抵抗値が増加す

るため、配管長を短縮することができ、容積は緩やかに低下する。また (2) の領域に示す冷媒の電気伝導率比 4% 未満の FC 冷却システムを構築するには、FC スタック入口にイオン交換器を設定し、流入する冷媒中のイオンを直前で除去する必要がある。しかし、その位置にイオン交換器を設定すると圧損が増大するため大型クーラントポンプが必要になり、(2) 領域に示すように FC 冷却デバイスの容積が大きくなる。

同様に FC スタックは、Fig. 10 (b) の (3) 領域に示すように、100% から 4% まで冷媒の電気伝導率比が低下すると、セルの厚みや絶縁距離が受け持つ各部位の絶縁抵抗値が低減できるため、絶縁ゴムの被覆量を削減することができ、FC スタックの容積は低下する。(4) の領域である 4% 以下の冷媒の電気伝導率比では、金属セパレータの腐食が低減されるのみで小型化の寄与度が小さい。

そのため、小型化寄与度が大きい領域に冷媒の電気伝導率を設定し、FC 冷却システムの小型化目標を達成することにした。

3. 低電気伝導率 FC 冷却システムの構築

冷媒へのイオン溶出の原因は主に、冷却システム部品やヒータシステム部品からのイオン溶出や、冷媒の分解によるイオン生成である。イオン溶出量の低減の対策を施したとしても、部品からのイオンの溶出や冷媒の分解によるイオンの生成は常時起きる。そのため、FC 冷却システム系内の冷媒低電気伝導率を維持するためには二つの課題を同時に達成する必要がある。

- (1) 部品からのイオン溶出低減と冷媒の分解の抑制
- (2) 溶出したイオンを常時除去する FC 冷却システムの構築

3.1. イオン溶出量の抑制

既に 09MY においても FC 冷却経路で使用している部品に対するイオン溶出量抑制対策をおこなっており、それ

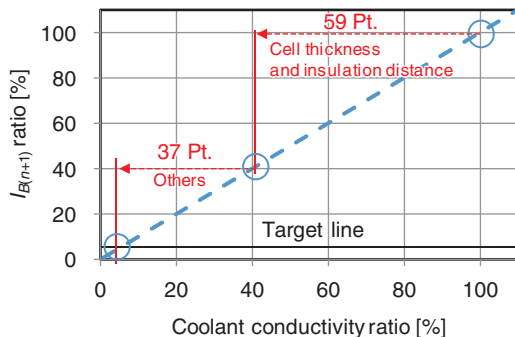
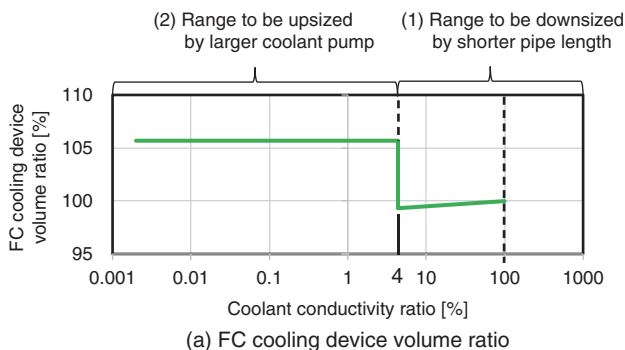
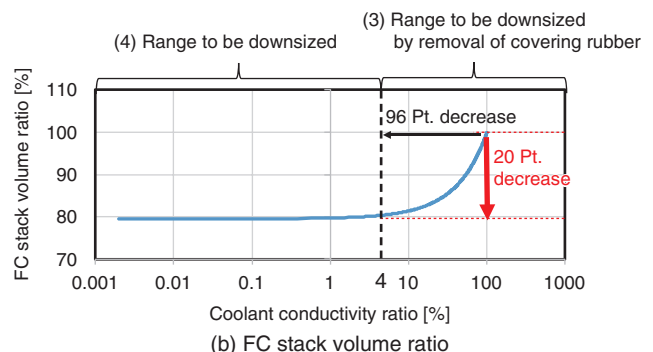


Fig. 9 Influence of coolant conductivity ratio on $I_{B(n+1)}$



(a) FC cooling device volume ratio



(b) FC stack volume ratio

Fig. 10 Volume ratios of FC cooling device

Table 2 Electric conductivity reduction method of FC coolant system

Parts	Method
FC radiator	Adopt flux reduction
Resin parts	Adopt low ion dissolution material
Hose	Adopt low ion dissolution material
Coolant	Add oxidation inhibitor

Table 3 Electric conductivity reduction method for heater system parts

Parts	Method
Heater core	Adopt flux reduction
Resin parts	Adopt low ion dissolution material
Hose	Adopt low ion dissolution material

らの手段を Table 2 に示す。ラジエータ製造にはイオン溶出の少ない製法を採用した。またパイプなどの樹脂部品やゴムホースは、イオン溶出が少ない材料を選定し採用した。冷媒については、熱分解によるイオン溶出を抑制するため、酸化抑制剤を添加した。

09MY に対して 16MY は、FC スタックからの廃熱を暖房に有効活用するシステムを追加しており、ヒータシステム部品に対しても低電気伝導率対策が必要となった。その対策手法を Table 3 に示す。ICE 車仕様に対して、ヒータコアは製法による低イオン溶出対策を実施し、パイプなどの樹脂部品やゴムホースは他の FC 冷却部品同様にイオン溶出量が低い材料を選択し採用した。

これらの対策により 16MY においては、ICE 車仕様のヒータシステム部品を採用した場合に対してイオン溶出物を 75 ポイント減らすことができ、FC 冷却システム全体としても 09MY 同等のイオン溶出量に抑えることができた (Fig. 11)。

3.2. イオン溶出物の常時除去

先に述べたイオン溶出物の抑制対策だけでは、電気伝導率を低く維持することは容易ではない。特に、車両が長期間放置されると溶出イオンが各部品内部に滞留してしまい、起動時に FC スタックへ一時的に電気伝導率が高い冷媒が流入してしまう。このようなケースでも、速やかにイオンを除去し電気伝導率を下げる必要がある。その達成手段としてイオン交換器へ冷媒を常時流すバイパスシステム構成を採用した。

イオン交換器を FC スタックと直列に配置すると、システム全体の圧損が増加するが、Fig. 2 に示すようにイオン交換器を FC スタックに対して並列配置すると、圧損が低下するため小型のクーラントポンプを選択できる。これにより、クーラントポンプ容積を 40 ポイント低減することができた。

常時イオン除去するシステム構成によるメリットは、暖機時にあらかじめラジエータバイパス回路内のイオンを除去することが可能となるため、暖機後にラジエータ回路からイオンが流入したとしても、混ざり合うことで上昇幅を抑制することができることである。

3.3. 低電気伝導率維持性能

前述した対策を採用した FC 冷却システムの低電気伝導率維持性能について、Fig. 12 に示す。一時的に電気伝導率が上昇するような場合でも、速やかに低電気伝導率化を実現しその状態を維持することができる。

暖機運転時 (Fig. 13) には、起動直後にラジエータバイパス回路内に滞留したイオン溶出物が流入することにより、一時的に電気伝導率が上昇する。しかし、イオン交換器へ

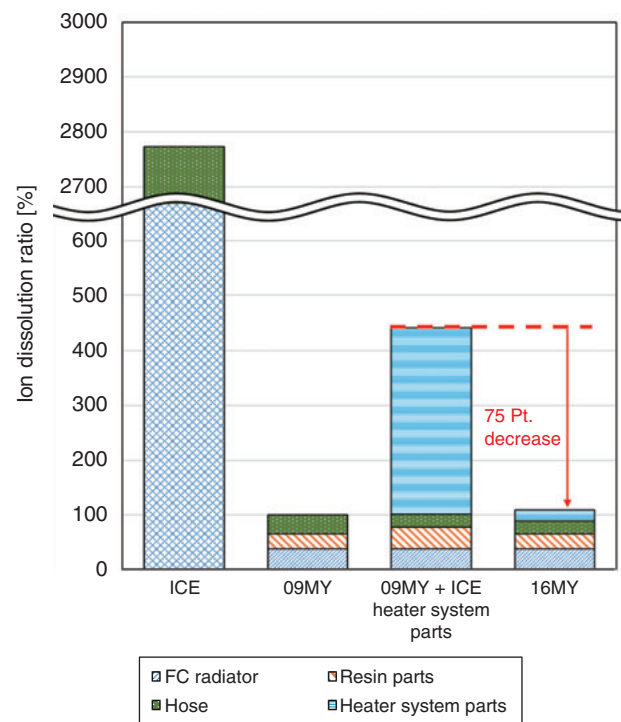


Fig. 11 Ion dissolution ratio in FC cooling system

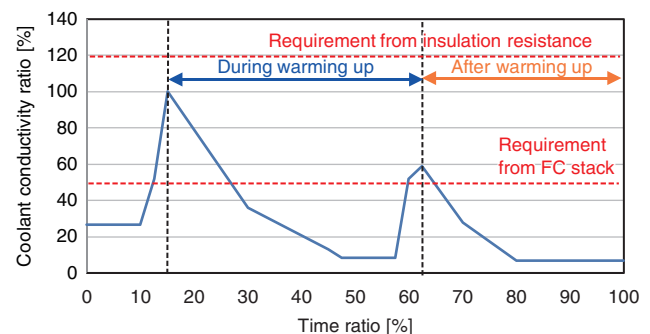


Fig. 12 Performance of keeping low coolant conductivity

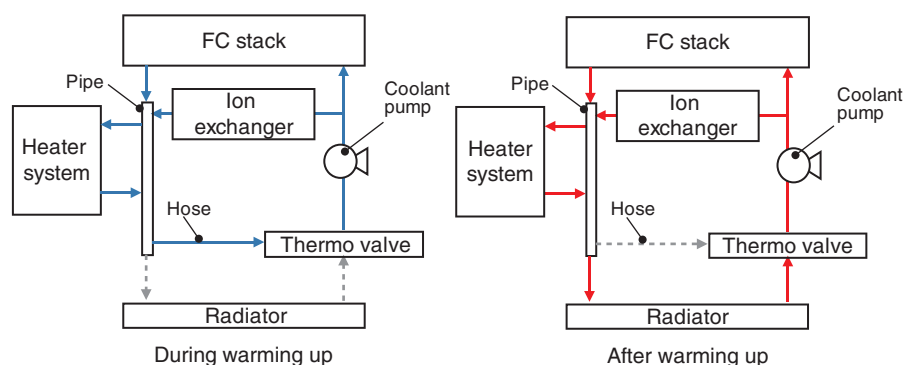


Fig. 13 Diagram of FC cooling system

常時冷媒を流すことにより速やかに電気伝導率を低下させることができ、維持することができる。

また、暖機完了後 (Fig. 13) にはラジエータ回路内部に滞留したイオン溶出物が流入するため、再び電気伝導率が上昇する。その後は常時イオン溶出物が除去されるため、速やかに低電気伝導率となり維持することができる。

サーモバルブにより暖機運転時と暖機完了時にラジエータバイパス回路とラジエータ回路を切り替えるシステム構成となっているため、暖機完了前にラジエータバイパス回路内のイオン溶出物を除去することができる。そのため、暖機完了後にラジエータ回路からイオン溶出物が流入しても、イオン溶出物の少ない冷媒と混ざり合って電気伝導率の上昇幅を抑制することができる。

4. まとめ

- (1) 金属セパレータの腐食予測技術で腐食電流量を精度よく見積り、冷媒の電気伝導率を低下させるとともに、セルの絶縁ゴム除去により FC スタックを小型化した。
- (2) 各配管長を短縮し、かつ圧損増加による大型クーラントポンプが必要とされない範囲に冷媒電気伝導率を設定することで FC 冷却デバイスの小型化を実現した。
- (3) 上記 FC スタックおよび FC 冷却デバイスの小型化の寄与度が大きい範囲において、冷媒の電気伝導率を低減するとともに、部品からのイオン溶出低減と冷媒の分解抑制と、溶出したイオンを常時除去する FC 冷却システムを開発した。

以上により、CLARITY FUEL CELL の FC 冷却システムにおいて前モデル比 20% の小型化を達成することで FC パワープラントをフロントフード下へ搭載することが可能になり世界初 5 人乗り FCV セダンパッケージを実現することができた。

参考文献

- (1) 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
- (2) 木村義人, 小山賢, 儀賀章仁, 小此木泰介: CLARITY FUEL CELL 搭載の新型燃料電池用セパレータの開発, Honda R&D Technical Review, Vol.29, No.2, p.50-55
- (3) 濱祐樹, 後藤修平: 燃料電池用ステンレスセパレータのセル間腐食の予測技術, 自動車技術会 2018 年春季大会学術講演会講演予稿集, No.46-18, p.1-6, (2018)

■ 著 者 ■



濱 祐 樹



永 田 大 貴



後 藤 修 平



高 橋 謙

MBD 性能設計のための トルクステアシミュレーション技術

Torque Steer Simulation Technology for Performance Design in Model Based Development

池田 直史¹
Naofumi IKEDA

豊島 貴行¹
Takayuki TOYOSHIMA

要 旨

MBD 性能設計において、発進時のトルクステアを検討できるデファレンシャルギヤモデルを考案した。定数として扱われていた駆動トルクの左右分配比に、ドライブシャフトの左右不均等なねじり剛性により生じる回転数の左右差を考慮する要素を追加することで、過渡的な左右トルク分配比を再現できるモデルに拡張した。提案手法では、トルクステア発生メカニズムの本質を簡易なモデルで表すことにより、従来は機構モデルによる詳細なモデル化を必要とした過渡的な駆動トルクの左右差の寄与が、MBD 性能設計において検討できるようになった。その結果、開発初期の性能設計において、対策手法を定量的かつ効率的に検討できるようになった。提案手法を 2016 年モデルの量産車開発に適用し、その有用性を確認した。

ABSTRACT

A differential gear model was devised that can be used to examine torque steer when the vehicle is launching from standstill in MBD performance design. The model was expanded to enable reproduction of the transient left-right torque bias ratio, which was previously treated as a constant, by adding an element that takes into account the left-right difference in rotational speed derived from uneven torsional stiffness of driveshaft. Conventional methods needed a complex model using a multibody dynamics model. The proposed method uses a simple essential model to express the torque steer mechanism. This enabled analysis of the contribution due to the difference in transient drive torque in MBD performance design. As a result, countermeasure methods could be quantitatively and efficiently examined in performance design in the initial stages of development. The proposed method was applied to development of 2016 model year mass-production vehicles, and its usefulness was confirmed.

1. まえがき

近年、環境に配慮した車社会へ向けて自動車には、走る・曲がる・止まるの基本性能に加えて、環境性能などより多くの性能が求められ、これらの要望に応えるための機構や構造はより複雑になっている。また、自動車開発では、開発期間の短縮とコストの削減も求められる。そのため、開発を効率よく進めるための手段としてモデルベース開発（以下 MBD）の重要性は、ますます高まっている⁽¹⁾。Fig. 1 は、量産車の開発プロセスを V-Model で表したものである。赤枠で示す MBD の対象領域では、自動車の各コンポーネントの要素をシミュレーションモデルに組み込むことで

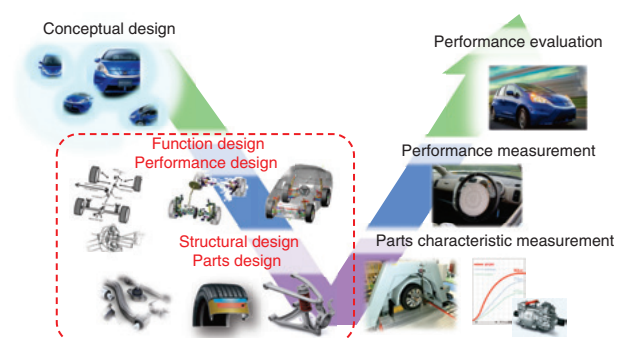


Fig. 1 Positioning of MBD in V-Model process

¹ 四輪 R&D センター

検討項目を拡張することができる⁽²⁾⁻⁽⁴⁾。

環境性能向上の手段として、パワーユニットに小排気量ターボエンジン（以下、小型T/C）や、EVに代表される電動モータを搭載する車両の普及が進んでいる。Fig. 2は、これらパワーユニットのトルク性能の一例を示している。小型T/Cは、過給効果により従来の自然吸気エンジンと比較して、低回転から大きなトルクを発生することができる特徴を持つ。また、電動モータは内燃機関と比較して、低回転からさらに大きなトルクを発生することができる。

前輪駆動車では、発進時の大きな駆動トルクによりドライバの意図しない方向にステアリングホイールがとられ、車両が曲がろうとする場合がある。この現象はトルクステアと呼ばれ、一般にドライバの不安要素となる。このトルクステアの低減には、左右のドライブシャフト等長化、ねじり剛性差やドライブシャフトとホイール回転軸との結合部の角度の左右差の低減、そして、キングピンセンタオフセットの短縮などの手法が一般的である^{(5), (6)}。そのほか、大トルクエンジンを搭載する一部の車両では、キングピンセンタオフセットを短縮する機構をサスペンションに追加する場合もある^{(7), (8)}。

小型T/Cへの置換や電動モータの搭載は、燃費性能の向上に加え発進性能も向上するため、ますます増加する傾向にある。そのため、トルクステアを課題とする車種の増加が予測される。開発効率の向上のためには、初期段階でトルクステアの影響を予測し、対策が立案できるシミュレーション技術の構築が必要となる。

トルクステア特性の予測には、Fig. 3のような機構モデルを用いたフルビークルモデル計算が用いられる^{(9), (10)}。機構モデルによる解析では、構成要素を詳細にモデル化することで高い計算精度を得られるが、モデル化に必要な情報を収集し、計算に反映するためには多くの時間と作業を要する。また、開発初期段階で、モデル化に必要な情報を

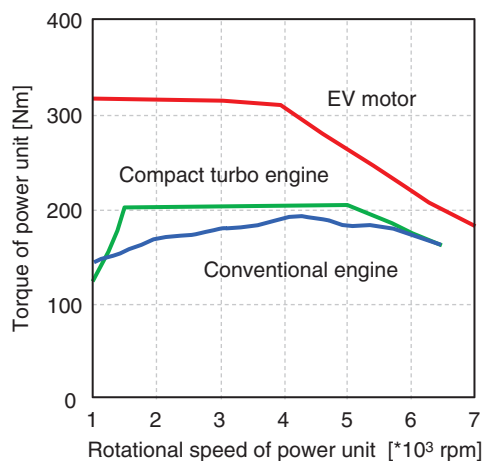


Fig. 2 Typical torque characteristics curves of different power units

すべて取得することや機構モデルの特性を変更することは容易ではない。

簡易的にデファレンシャルギヤの左右トルク分配比を定数として扱うことが考えられるが、この場合、左右輪に分配される駆動トルクの差が実際よりも大きくなるため、量産車開発において他の性能項目同様の精度でトルクステアの影響を予測することは容易ではない。

そこで、本質的なトルクステア発生メカニズムを把握することで、開発初期の性能設計に適用可能なデファレンシャルギヤモデルのモデル化手法を検討した。

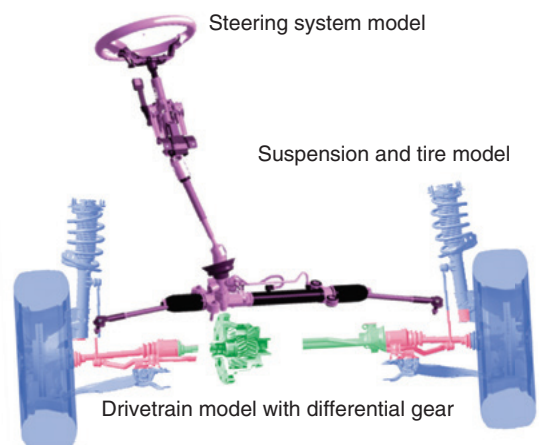


Fig. 3 Schematic image of component models for full vehicle torque steer simulation

2. トルクステア発生メカニズム

左右輪の不均等な駆動トルクが原因となり、不均等なキングピン軸周りのトルクがステアリングホイールに伝達されることで、トルクステアは発生する。不均等な駆動トルクの発生は、以下三つのメカニズムが主要因となる。

- (a) ドライブシャフトとホイール回転軸の結合部の角度の左右差
- (b) ドライブシャフトねじり剛性の左右差
- (c) デファレンシャルギヤによる分配トルクの左右差

ドライブシャフトは、サスペンションの動きに追従できるように、通常ユニバーサルジョイント等を介してホイールの回転軸と結合される。結合部に角度がついた状態で、駆動トルクが伝達されると、その結合部にはホイールの回転軸とその直交する軸周りにトルク分力が発生する。Fig. 4は、ドライブシャフトとホイールの回転軸との結合部の模式図である。

左右のドライブシャフトに分配される駆動トルクを T_d 、ドライブシャフトとホイールの回転軸との結合部の角度を

θ_{o_i} とすると、ホイールの回転軸に直交する軸周りのトルク M_{o_i} は、式 (1) で表される⁽¹⁾ ($i = L$ or R).

$$M_{o_i} = T_i \cdot \sin \theta_{o_i} \quad (1)$$

また、キングピン傾角を θ_{z_i} とすると、キングピン軸周りのトルク $M_{KP_1_i}$ は、式 (2) となる。

$$M_{KP_1_i} = M_{o_i} \cdot \cos \theta_{z_i} \quad (2)$$

ここで、結合部の角度やキングピン傾角はサスペンションとパワートレインの揺動により変化する。 θ_{o_i} は左右差がある場合が多く、 M_{o_i} も左右で異なるため、トルクステア発生要因となる。

パワートレインから出力されたトルクは、デファレンシャルギヤを介して左右のドライブシャフトに分配される。この時、ドライブシャフトのねじり剛性に左右差があると、左右で過渡的な回転数差が発生する。理想的には、左右駆動輪の回転速度差を吸収し、両輪に等しい駆動トルクが伝わることを望ましい。しかし、実際のデファレンシャルギヤでは、内部に歯車の摩擦等のフリクション要素を有しているため、フリクションにより差動が制限される範囲で、デファレンシャルギヤが分配するトルクに左右差が生じる。このトルク差が左右の駆動力の差となり、キングピン軸周りのトルクにも左右差が発生する。このトルクを過渡的な駆動トルク差に起因するキングピン軸周りのトルクと呼ぶ。このトルクが過渡的なトルクステア発生要因となる。Fig. 5 は、デファレンシャルギヤを含む駆動系の模式図である。過渡的な駆動トルク差に起因するキングピン軸周りのトルク $M_{KP_2_i}$ は、タイヤ半径を R 、キングピ

ンセンタオフセットを ζ_z とすると、式 (3) で表される。

$$M_{KP_2_i} = \frac{T_i \cdot \cos \theta_{o_i}}{R} \cdot \zeta_z \cdot \cos \theta_{z_i} \quad (3)$$

すなわち、トルクステアを予測する場合は、デファレンシャルギヤおよび左右ドライブシャフトの剛性差により生じる左右の駆動トルク差に起因するキングピン軸周りのトルクを、シミュレーションモデルに考慮する必要がある。ステアリング機構に伝達されるトルクは、キングピン軸周りのトルクとリンク効率から決まるステアリングラック軸に生じる合力 (以下 F_{Rack}) で計算できる⁽²⁾。トルクステアの低減には、 F_{Rack} の最大値の低減が必要となる。

機構モデルを用いたフルビークルモデル計算では、デファレンシャルギヤの機構を詳細にモデル化することにより、過渡的な左右トルク分配比を精度よく再現できる。しかし、機構モデルの場合でも、左右トルク分配比を定数で扱った場合は、過渡的な駆動トルク差に起因するキングピン軸周りのトルクを再現できない。

そこで、ドライブシャフトの過渡的な回転数差に応じた左右トルク分配を、機構モデル相当の精度で再現できるデファレンシャルギヤモデルを検討することとした。

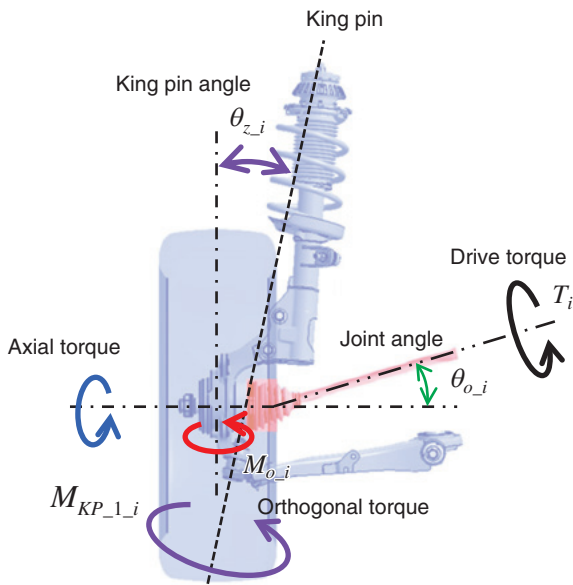


Fig. 4 Schematic expression of drive torque components around wheel hub

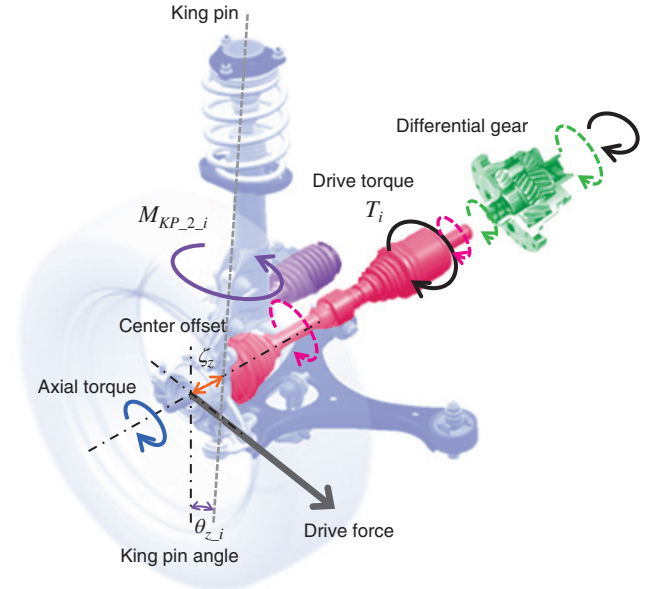


Fig. 5 Schematic expression of transient torque around king pin due to drive shaft stiffness

3. デファレンシャルギヤモデル

3.1. モデル概要

左右のドライブシャフトに分配される駆動トルクをそれぞれ T_l , T_r とすると、駆動トルク T および左右駆動トルク差 ΔT は、式 (4) と式 (5) で表される。

$$T = |T_l + T_r| \quad (4)$$

$$\Delta T = |T_l - T_r| \quad (5)$$

また ΔT は、デファレンシャルギヤの高回転側のトルクに対する低回転側のトルクの比であるトルク分配比 (以下 TBR) を用いて式 (6) と式 (7) で表される。

$$TBR = \left(\frac{T}{2} + \frac{\Delta T}{2} \right) / \left(\frac{T}{2} - \frac{\Delta T}{2} \right) \quad (6)$$

$$\Delta T = T \frac{(TBR-1)}{(TBR+1)} \quad (7)$$

内部フリクションがないデファレンシャルギヤモデルでは左右に分配される駆動トルク T_l , T_r は同一となり, TBR は 1 となる。実際のデファレンシャルギヤでは, 内部のフリクションにより差動が制限されることでドライブシャフトの左右回転数差が発生するので T_l , T_r は同一とならず, TBR は 1 より大きな値をとる。

一方, ドライブシャフトに分配される駆動トルク T_i は, ドライブシャフトのねじり剛性 k_i に応じたねじれ角 θ_i を生じさせる。式 (8) に示す。

$$\theta_i = \frac{T_i}{k_i} \quad (8)$$

この時, 左右でねじり剛性が異なるとねじれ角にも差が生じ, ドライブシャフトに左右回転数差が生じる。式 (8) から, この過渡的な回転数差は, ねじれ角差の時間変化 $d\Delta\theta/dt$ であり, 式 (9) で表される。

$$\frac{d\Delta\theta}{dt} \approx \frac{1}{2} \frac{dT}{dt} \left(\frac{1}{k_l} - \frac{1}{k_r} \right) \quad (9)$$

式 (9) は, 過渡的な回転数差 $d\Delta\theta/dt$ が, 駆動トルクの時間変化 dT/dt に依存していることを示している。つまり, ドライブシャフトねじり剛性の左右差が回転数差 $d\Delta\theta/dt$ となって駆動トルク差 ΔT を変動させるので, 先に述べた TBR も変動して連成問題となり, 解析的に解くことは容易ではない。

提案するデファレンシャルギヤモデルでは, Fig. 6 に示すように, 左右ドライブシャフトの回転数差が, 境界回転数差 N より小さい場合, 回転数差に応じて TBR が変化する特性を有すると仮定しモデル化をおこなった。また, 比較として TBR を定数で扱ったモデルも同時に示す。

TBR を定数とした場合に対し, 提案モデルの TBR は左右ドライブシャフトの回転数差により変化し, 回転数差がゼロで下限値となり, 回転数差の増加に伴い線形に増加し, 境界回転数差 N に達すると上限値一定となる。

以上の仮定を置くと, TBR は, $d\Delta\theta/dt$ の関数として式 (10) で表され, 左右駆動トルク差 ΔT は, 式 (11) で表される。

$$TBR \left(\left| \frac{d\Delta\theta}{dt} \right| \right) = \begin{cases} \frac{(TBR_{max}-1)}{N} \cdot \left| \frac{1}{2} \frac{dT}{dt} \left(\frac{1}{k_l} - \frac{1}{k_r} \right) \right| + 1 & \left(\left| \frac{d\Delta\theta}{dt} \right| < 1 \right) \\ TBR_{max} & \left(\left| \frac{d\Delta\theta}{dt} \right| \geq N \right) \end{cases} \quad (10)$$

$$\Delta T = T \cdot \left[TBR \left(\left| \frac{d\Delta\theta}{dt} \right| \right) - 1 \right] / \left[TBR \left(\left| \frac{d\Delta\theta}{dt} \right| \right) + 1 \right] \quad (11)$$

式 (11) より, T が大きいほど ΔT は大きくなり, 式 (10) より, dT/dt が大きいほど TBR は大きくなることを示している。したがって, $T \cdot dT/dt$ が最大値をとる時に, 最大の左右駆動トルク差が生じる。過渡的な駆動トルク差に起因するキングピン軸周りのトルク $M_{KP,2}$ は, 左右駆動トルク差 ΔT を用いて, 式 (3) から求めることができる。この時, 左右輪に分配される駆動トルクは, ドライブシャフトのねじり剛性が高い側が高トルク側となる。

3.2. 効果検証

MBD 性能設計ツールに提案モデルを組み込んだモデルとこれまでの TBR を定数で扱ったモデルによるトルクステアシミュレーション結果を, フルビークルモデルの計算結果と比較した。計算条件を Table 1 に示す。

Fig. 7 は, 計算に用いた駆動トルク, $T \cdot dT/dt$, および提案モデルを用いた F_{Rack} の時系列応答である。 $T \cdot dT/dt$ が最大値となる 1.4 秒後付近で最大の F_{Rack} が生じた。

Fig. 8 は, MBD 性能設計ツールとフルビークルモデルの計算結果における, F_{Rack} 最大時の回転数差と TBR との関係を, Fig. 6 で仮定した特性に重ねたグラフである。提案モデルを用いた MBD 性能設計ツールの結果はフルビークルモデルでの結果とほぼ同等となることがわかった。

Fig. 9 は, 駆動トルクにより生じる F_{Rack} を比較した結果であり, 駆動トルク差およびホイールの回転軸との結合部の駆動トルク伝達に起因する F_{Rack} への寄与をメカニズムごとに色分けして示している。本技術を用いた計算結果は, フルビークルモデルの計算結果と同等であり, MBD 性

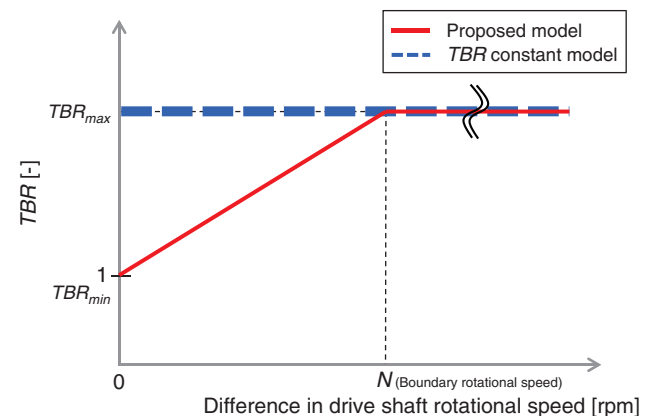


Fig. 6 Proposed TBR characteristic of differential model

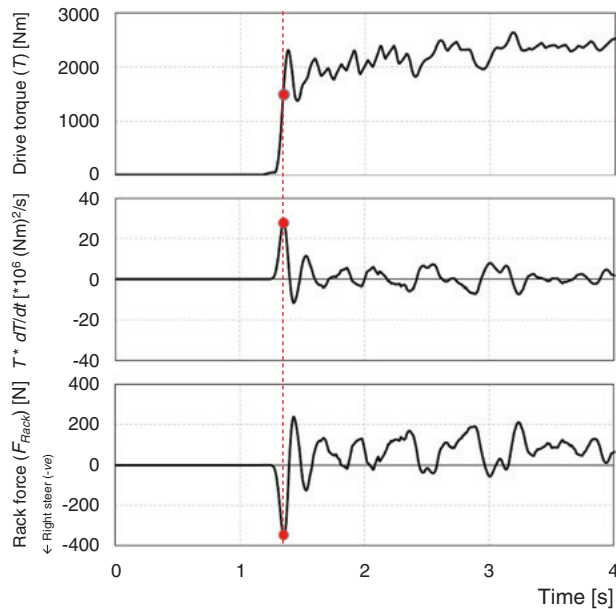
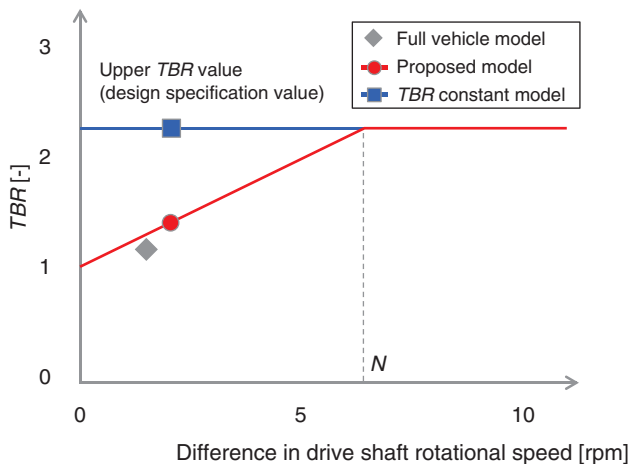
Table 1 Calculation parameters and conditions

Weight: 1400 kg, Wheel base: 2.6 m, Center offset: 50 mm

Items	Note
Proposed method	TBR is variable depending on differences in rotational speed ($1 \leq TBR \leq 2.25$)
TBR constant	TBR is constant at design specification value ($TBR = 2.25$)

能設計ツールにおいてもトルクステアを定量的に計算できることがわかった。

一方、 TBR を定数で扱った場合、駆動トルク差に起因する寄与が大きく計算されるため、フルビークルモデルの詳細計算結果に対して F_{Rack} が大きくなり、予測精度も低下した。このことは、Fig. 8 で TBR が実際よりも大きな値を仮


 Fig. 7 Input torque (upper), proposed index (middle), and F_{Rack} (bottom) from proposed simulation

 Fig. 8 TBR characteristics used in calculation

定していることを意味している。

また、本技術で構築したモデルを用いて、ドライブシャフトねじり剛性、ホイールの回転軸との結合部の角度、そして、キングピンセンタオフセットを変更した、 F_{Rack} への寄与をフルビークルモデルの計算結果と比較したものを Fig. 10 に示す。また計算条件を Table 2 に示す。いずれの場合も F_{Rack} がフルビークルモデルの計算結果と良く合致していることがわかった。

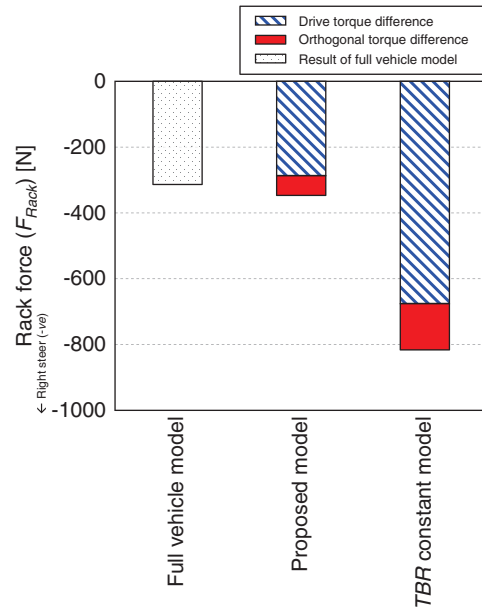
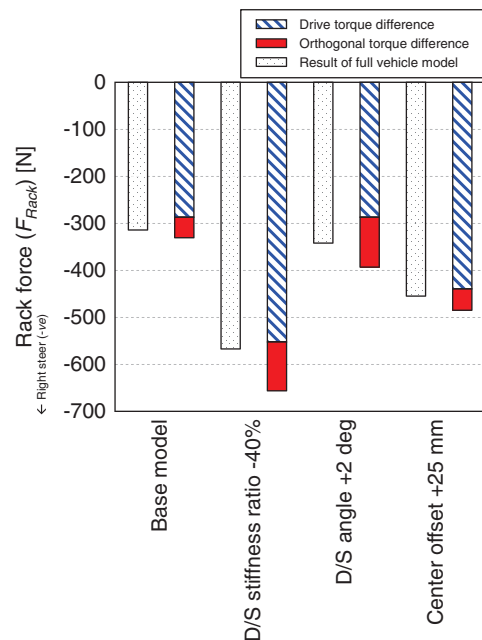

 Fig. 9 Difference in F_{Rack} between proposed and TBR constant model compared with result of full vehicle model

 Fig. 10 F_{Rack} factor analysis results of proposed model compared with results of full vehicle model

Table 2 Calculation parameters for model verification

Weight: 1400 kg, Wheel base: 2.6 m, Center offset: 50 mm

Items	Note
D/S stiffness ratio -40% (Drivetrain effect)	Decrease D/S stiffness ratio by 40%
D/S angle +2 deg (Drivetrain effect)	Increase D/S joint angle by 2 deg
Center offset +25 mm (Chassis effect)	Increase center offset of front suspension geometry by 25 mm

D/S: Drive shaft

以上の結果より、提案モデルは、過渡的な TBR の変化を、より詳細な機構モデル相当の精度で再現できるモデルであることが確認できた。また、提案モデルを組み込んだトルクステアシミュレーションモデルは、左右駆動トルク分配を精度良く再現できることがわかった。これにより、本モデルは、ドライブシャフトやサスペンション特性に代表される駆動系およびシャシ系部品による各対策手法を、開発の初期段階から精度よく、効率的に検討できることがわかった。

4. 適用事例

2016 年モデルの量産車プラットフォーム開発において、本技術で構築したデファレンシャルギヤモデルを MBD 性能設計に適用した事例を示す。開発では、燃費効率の向上を目的としたパワーユニットの小型 T/C への変更が計画にあり、駆動トルクの増大によるトルクステアの発生が懸念された。そこで、本技術を用いてトルクステアの影響を定量的に予測し、対策を立案した。

Fig. 11 は、本事例の初期仕様に対する駆動系および

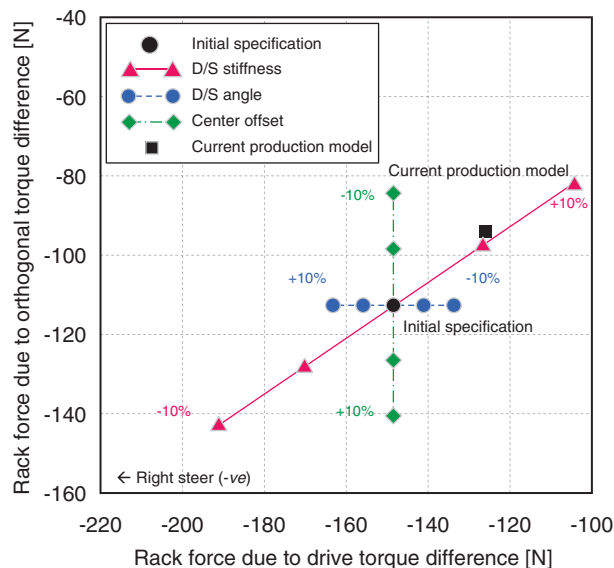


Fig. 11 Sensitivity of countermeasure items

Table 3 Countermeasure list

Weight: 1530 kg, Wheel base: 2.7 m, Center offset: 78 mm

Items	Note
D/S stiffness	Increase D/S stiffness by +6%

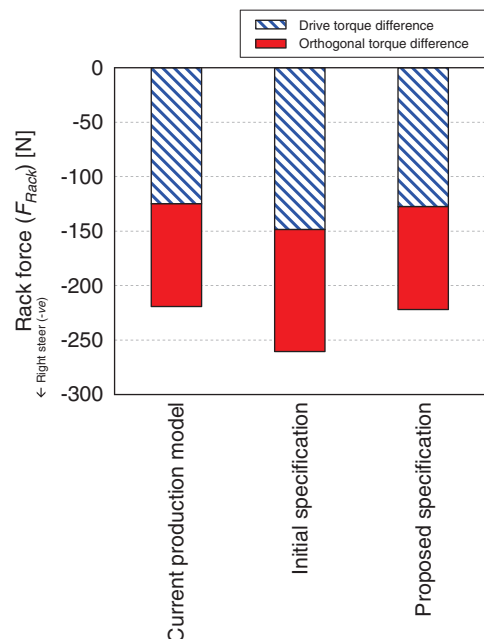
シャシ系対策手法の F_{Rack} に対する感度を示している。対策手法には、ドライブシャフト剛性、ドライブシャフトの結合部の角度、キングピンセンタオフセットの変更を想定し、それぞれ $\pm 10\%$ 設計値を変更して感度を計算した。横軸は過渡的な駆動トルク差に起因する F_{Rack} への寄与を、縦軸はホイールの回転軸との結合部の駆動トルク伝達に起因する F_{Rack} への寄与を表している。

寄与分析から、目標である小型 T/C への変更前の F_{Rack} 相当に開発車両を対策するには、ドライブシャフトねじり剛性を 6% 程度増加させる手法が効果的であることがわかった。

本技術を用いると、各対策手法がトルクステアのメカニズムごとにどのように寄与するのかを定量的に理解しながら仕様検討ができ、合理的な性能設計をおこなう有効な手段となる。

Table 3 に、小型 T/C を搭載した車両に実施したトルクステア対策仕様の計算条件を示す。

Fig. 12 に、小型 T/C 搭載前後の開発車両および提案仕様の F_{Rack} の計算結果を示す。対策としてドライブシャフト剛性 6% 増加により、 F_{Rack} は、小型 T/C 搭載前と同等になることがわかった。

Fig. 12 Difference in F_{Rack} between initial specification and proposed specification

このように、実際のプラットフォーム開発の初期段階に本技術で構築したシミュレーションモデルを適用することで、トルクステアの定量的な予測に基づいて駆動系およびシャシ系部品による対策手法を得ることができ、本技術の有用性を確認することができた。

5. まとめ

過渡的な左右トルク分配比を、より詳細な機構モデル相当の精度で再現できるシミュレーションモデルを考案した。

- (1) トルクステアの要因となる左右不均等な駆動トルクの発生メカニズムを三つの左右差要素に分けてモデル化した。
- (2) *TBR* を回転数差による変数として扱うことにより、詳細モデル同等の精度で計算できるデファレンシャルギヤモデルを考案した。
- (3) 本技術を MBD 性能設計ツールに適用することにより、開発初期の性能設計において対策手法を定量的かつ効率的に検討することができるようになった。

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) 豊島貴行, 畔勝良友, 小林佳亮, 池田直史, 高野広喜, 小島勲: MBD のための極低速走行操縦性シミュレーション技術, Honda R&D Technical Review, Vol. 30, No. 2, p. 106-113
- (3) 豊島貴行, 畔勝良友, 池田直史: 量産車のモデルベース開発における横風安定性評価シミュレーション技術, Honda R&D Technical Review, Vol. 30, No. 1, p. 61-68
- (4) 豊島貴行, 松澤俊明, 牛村智也: 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, Honda R&D Technical Review, Vol. 29, No. 2, p. 118-126
- (5) 自動車技術会: 自動車技術ハンドブック 設計 (パワートレイン) 編, p. 266-289, (2015)
- (6) 特開 2009-255833
- (7) Dornhege, J., Nolden, S., Mayer, M.: Steering Torque Disturbance Rejection, SAE International, 2017-01-1482, (2017)
- (8) <https://www.honda.co.jp/tech/auto/dual-axis-strut-suspension/page2/>
- (9) Woo, S., Park, S., Oh, Y.: Solution for the Torque

Steer Problem of a Front-wheel Drive Car with a High-torque Engine in Vehicle Development Stages, SAE Technical Paper, 2007-01-3656, (2007)

- (10) Dornhege, J.: Torque Steer Influences on McPherson Front Axles, 2002 European MSC.AMUS User Conference, (2002)
- (11) Gillespie, T. D.: Fundamentals of Vehicle Dynamics, SAE International, 297p., (1992)

■ 著 者 ■



池田直史



豊島貴行

統計タイヤモデルのタイヤ転がり抵抗推定への拡張

Expansion of Statistical Tire Modeling Method to Tire Rolling Resistance Estimation

日 下 馨¹
Kaoru KUSAKA

木 滝 泰 隆¹
Yasutaka KITAKI

古 本 直 己¹
Naoki FURUMOTO

要 旨

開発初期の性能設計に用いる統計タイヤモデルの手法を用いて、タイヤのサイズと内圧のみから転がり抵抗を推定できるよう統計モデルの機能を拡張した。市場で多く流通しサイズも豊富な銘柄のタイヤを選び、コンパウンドと構造を揃えた転がり抵抗の測定結果から、タイヤサイズの転がり抵抗への影響が定量化できた。得られたモデルは、サイズと内圧を変化させた場合の転がり抵抗の増減を精度良く再現できることが検証できた。本モデルを用いることで、膨大な時間の掛かるタイヤ測定をおこなわずに、操安性と燃費性能を両立させる仕様を机上検討できるようになった。

ABSTRACT

The “statistical tire model” method, which is used for performance design in the early stages of vehicle development, was applied in order to expand its function to estimate the rolling resistance of tires just from the information of tire size and its inflation pressure. The influence of tire size on RRC became quantified by using measured rolling resistance of tires that have variation in both its sizes and inflation pressures yet that have the same structure and rubber compound. As a result, a model with good precision was obtained that can estimate the increase/decrease of the rolling resistance with respect to the reference tire if the tire size and its inflation pressure were given. The proposed model made it possible to conduct quantitative parameter studies without carrying out time consuming individual tire measurements.

1. まえがき

自動車は、パーソナルモビリティの利便性を提供することで私たちの生活を豊かにすると同時に、操縦安定性、衝突安全性、居住性や乗心地、省資源性、など多くの背反性能を高いレベルで並立するよう性能を高めてきている。近年では地球温暖化を防止するため、パワープラントの革新による省燃費化技術が進み、シャシ技術においても、低転がり抵抗タイヤで燃費を向上しつつ、操縦安定性や制動性能などを向上する技術が進化している⁽¹⁾。

一方で、これらの性能進化を支える開発技術に目を向けると、複雑化するメカニズムを理解してモデル化し⁽²⁾⁻⁽¹⁰⁾、定量予測に基づいて合理的に設計検討をおこなう性能設計手法が発展してきている^{(11), (12)}。

車両開発の初期には、この性能設計の技術を駆使し、限られたコストやレイアウト制約のもとで目標性能を達成できるよう基本設計をおこなう。また、複数車種の基本設計を一括で企画するプラットフォーム開発では、多くの派生車種を考慮して包括的に設計計画を定めるため、今まで以上に各部品の特性を定量的に把握することが必要になってきている。

自動車の基本性能である走る、曲がる、止まるを支えるシャシ部品について考えると、性能寄与が最も大きい部品の一つであるタイヤは、そのサイズがホイールベースやトレッドなどの車両基本諸元にも影響し、また、その特性や内圧は操縦安定性、制動性能、乗心地、静粛性および燃費などの性能に大きな影響を与える。

プラットフォーム開発でも、そのプラットフォームがカ

¹ 四輪 R&D センター

バーするすべての車種を考慮し、必要十分なタイヤサイズが入るようあらかじめ空間レイアウトを設計しなくてはならない。

このように、タイヤの諸特性を定量把握することは重要な技術課題であるものの、開発初期にタイヤの詳細モデルを入手することは容易ではないため、これまでは、タイヤメーカーに特性予測を依頼したり、市販タイヤを膨大な工数を掛けて解析するしか方法がなく、迅速かつ簡便にタイヤの特性を推定できる技術が望まれていた。

この課題を解決するために、任意のタイヤサイズの平均特性を統計的に予測する統計タイヤモデルと呼ぶ手法を開発し、シャシ初期設計の主に操縦安定性の領域へ適用してきた⁽¹³⁾⁻⁽¹⁵⁾。

この統計タイヤモデルは、数多くのタイヤ特性の情報から一般化されたタイヤ特性を予測できるため、サイズをパラメータとして性能を検討でき、タイヤに求められるさまざまな性能と空間レイアウトを満足するパレート解の探索を効率的におこなうことが可能となる。また、タイヤ特性を理解して設計できるので初期設計の質的向上が図れる。さらに、先行開発やそれぞれの派生機種の開発段階でその都度実施していたタイヤ計測を経ずに性能検討が可能となるので、開発効率の面でも大きな改善が見込める。

そこで、この統計タイヤモデルの手法を、今回、操縦安定性としばしば背反となる転がり抵抗係数 (Rolling Resistance Coefficient: RRC) の予測へも展開し、操縦安定性と転がり抵抗を同時に検討できる環境構築を進めたので、本稿で報告する。

2. 統計タイヤモデル

タイヤモデルは過去 50 年間でさまざまな複雑さと精度のものが提案されてきたが、理論モデルに分類される詳細物理モデル、シンプル物理モデル、そして実験同定モデルに分類される補間近似モデル、特性同定モデルの 4 カテゴリーに大きく分類される⁽¹⁶⁾。

統計タイヤモデルは実験同定モデルの一形態であるが、Magic Formula を代表とする今までのモデルが一つ一つのタイヤ特性を精度良くモデル化しようとする個別的タイヤモデルとすると、統計タイヤモデルはタイヤという部品を群としてとらえ、その性質をサイズや内圧といったメタ情報も含めて一括してモデル化する一般化タイヤモデルと言える (Table 1)。

この統計タイヤモデルは、タイヤサイズや内圧といったメタ情報だけから所望のタイヤ特性を略推定できるので、開発初期にタイヤサイズを決定するための効率的な手段となる。

従来の統計タイヤモデルでは、タイヤのサイズと使用時の内圧 P や荷重 F_z を与えると、コーナリングパワー C_p 、

Table 1 Major prevailing tire models for vehicle dynamics compared with proposed statistical model

Model type	Model name	Modeling approach	Data for model identification	Tire size parameterization
Experimental model	Statistical model	Fitting tire test data from multiple tires using regression technique	From multiple tires	Single model for various size
	Magic Formula, SWIFT, etc.	Fitting full scale tire test data by regression technique	From individual tire	Individual model for each tire
	Interpolation model, etc.	Distorting, rescaling and combining basic characteristics		
Theoretical model	Fiala model, Brush model, etc.	Using simple mechanical representation	From individual tire	Individual model for each tire
	FEM tire model, FTire, RMOD-K, etc.	Describing tire in greater detail		

縦ばね特性 K_z 、動荷重半径 DLR 、タイヤ重量 WT 、接地面積 SS などについて、そのサイズの平均的特性を推定することができた⁽¹⁵⁾。

タイヤサイズ決定には上記の操縦安定性や乗心地に関連する特性に加え、これらと背反する RRC 特性も検討する必要があるが、RRC はタイヤの転動による変形が熱に代わるメカニズムをモデル化する必要があり、技術的難易度が高く、これまでは簡易的に検討する手法がなかった。

今回は、モデル化のための実験条件を工夫した上で、統計タイヤモデルの手法を適用し、RRC へのサイズと内圧の影響を定量化することができたので、その基本的な考え方、同定手法および応用方法について次章以降で解説する。

3. RRC 推定

3.1. タイヤ RRC 特性

タイヤの転がり抵抗とは、タイヤが転動する時に生じる進行方向逆向きの抵抗力をいい、抵抗値を接地荷重で割った RRC で代表される。

RRC は通常の乗用車用タイヤでは $80 - 100 \times 10^{-4}$ 程度の値となり、近年の低損失ゴムコンパウンドを使用した低燃費タイヤでは 60×10^{-4} 程度の値をとる。

走行時の消費エネルギーの内、タイヤの転がり抵抗によるエネルギー損失が約 1/3 を占めるため、RRC の低減はシャシの省燃費性能を高めるために重要な技術である。

タイヤの転がり抵抗は原理的にタイヤの変形がコンパウンドのヒステリシス特性によって熱エネルギーになるため発生するので、式 (1) のような速度依存性がある⁽¹⁷⁾。

また RRC は、タイヤの変形を支配するタイヤの内部構造にも影響を受けるので、低損失ゴム材料を用いたり、ゴムの使用量を減らしたり、余裕あるタイヤサイズの選択や高い内圧設定で転動時の変形を抑制したりすることで低減が図れる (Fig. 1)。

$$f_R = f_{R0} + f_{R1} \left(\frac{V}{100} \right) + f_{R4} \left(\frac{V}{100} \right)^4$$

where

$$\begin{cases} f_R: \text{RRC} [-] \\ V: \text{Tire rolling speed [km/h]} \\ f_{R0}: 0.0080 \text{ to } 0.0100 [-] \\ f_{R1}: 0.0010 \text{ to } 0.0025 [\text{h/km}] \\ f_{R4}: 0.0002 \text{ to } 0.0004 [\text{h}^4/\text{km}^4] \end{cases} \quad (1)$$

しかしながらこれらの手法を採ると、タイヤの重要な機能であるグリップ性能や強度耐久性を低下させてしまったり、タイヤの縦ばねが高くなって乗心地の低下を招いたりしてしまう。

よって、低 RRC による省燃費性能と、シャシに求められる操縦安定性や快適性などの性能とは、一般に背反問題を形成する。

われわれが着目したタイヤサイズと RRC との定量的な関係を効率的に検討できるようにするためには、このコンパウンドや構造を揃えた実験データを取得し、サイズと内圧の影響のみを抽出してモデル同定する必要がある。

3.2. 統計 RRC モデル

タイヤの RRC の基本的な性質を明らかにするために、市場で多く流通しサイズバリエーションも豊富な低燃費銘柄のタイヤをサンプルケースに選び、この RRC を精密に測定した結果からモデル同定をおこなった。

計測したタイヤの幅 (以降, W)、扁平率 (H)、リム径 (D)、ロードインデックス (L)、使用条件である内圧 (P)、荷重 (F_z)、そして RRC についての統計値を Table 2 に示す。

計測は、それぞれのタイヤのサイズと内圧から規定される許容荷重の 80% の荷重で、内圧を一定に保ちながら十分なウォームアップをおこなった上で実施した。

計測して得られた転動速度に対する RRC の特性を Fig. 2

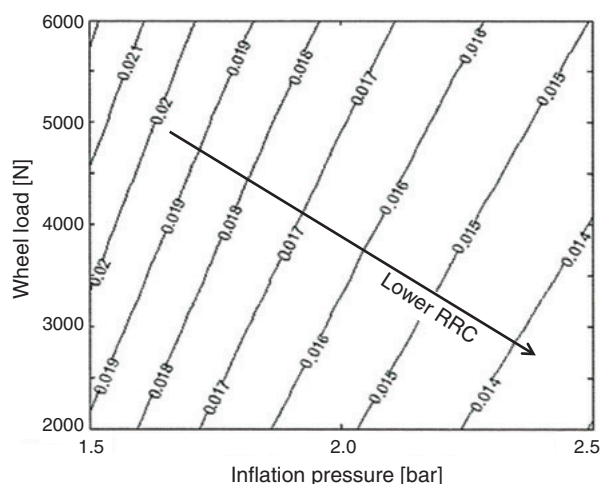


Fig. 1 Example of tire RRC with respect to wheel load and inflation pressure from reference

Table 2 Statistics of tire parameters of 31 cases

	Tread width, W [mm]	Aspect ratio, H [%]	Rim diameter, D [inch]	Load index, L	Inflation pressure, P [kPa]	Normal load, F _z [kN]	RRC at V=80, [×10 ⁻⁴]
Average	202.1	56.3	16.0	89.2	250.6	4.6	69.1
Median	205.0	55.0	16.0	91.0	220.0	4.9	68.4
Std.Dev. σ	17.4	6.2	1.2	5.1	44.9	0.6	7.2
Minimum	155	45	13	73	210	2.89	54.0
Maximum	225	65	18	97	340	5.74	85.8
Max.-Min.	70	20	5	24	130	2.85	31.8
	(4.03σ)	(3.23σ)	(4.17σ)	(4.7σ)	(2.89σ)	(4.45σ)	(4.39σ)

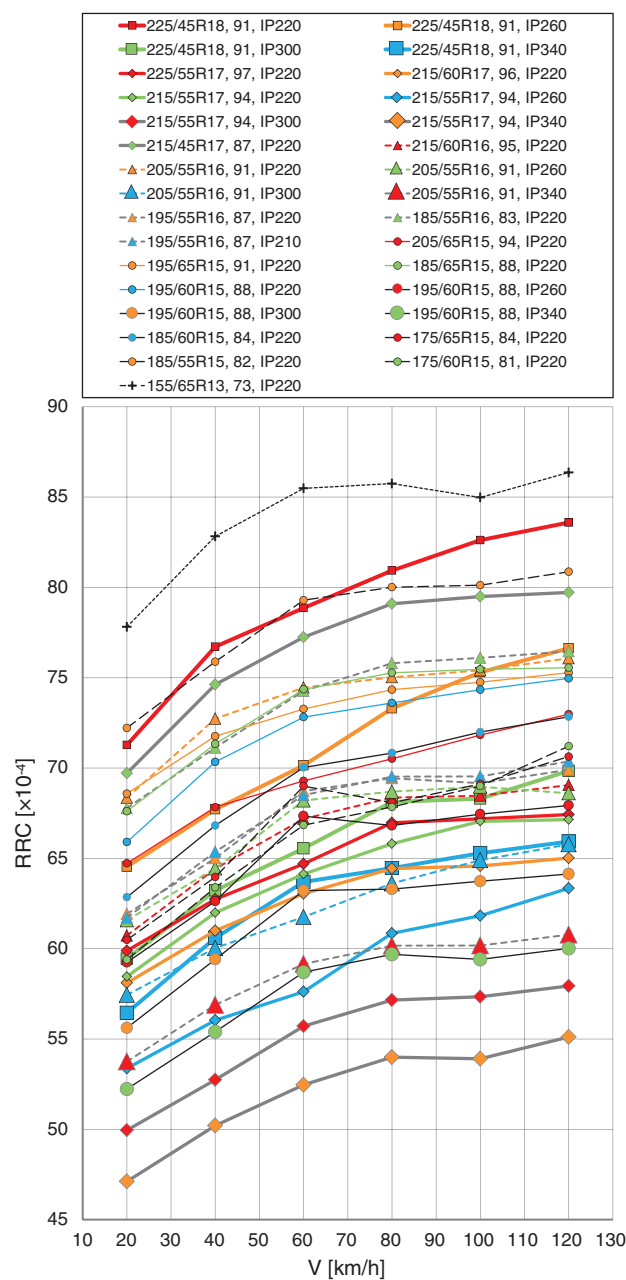


Fig. 2 Measured tire RRC vs rolling speed of 31 cases with normal load F_z equal to 80% of the load index's maximum load and with regulated inflation pressure

に示す。コンパウンドや構造が同一の銘柄のタイヤでも、サイズや内圧が異なれば RRC が大きく変化することがわかった。

RRC の速度依存性については式 (1) に基づいて推定が可能なので、本稿では速度 80[km/h] の時の RRC 値をそのタイヤの RRC 代表値として用いた。

Table 3 に、No.12 の 205/55R16 91, $P=220$ [kPa] の RRC 値を基準に各タイヤの 80[km/h] における RRC を相対値で示す。なお、基準とした No.12 のタイヤサイズはサンプルのタイヤサイズ W , H , D , L , P の中央値である。

得られたデータに対して、まず、タイヤサイズパラメータ W , H , D , L と使用条件 P , F_z と RRC の相関性を分析するため、散布図をプロットした (Fig. 3)。

Fig. 3 の対角に並ぶヒストグラムはそれぞれのパラメータの出現頻度、散布図は対角に並んだパラメータ間の相関をマトリクス状に表現したものである。散布図中の直線は相関の線形近似を表す。

例えば、Fig. 3 の一番右上のプロットは、x 軸が RRC, y 軸がタイヤ幅 W の散布図で、右下がりの近似直線は RRC が大きいほど W が小さくなっていることを表す。また一番左下のプロットはこの x 軸と y 軸が入れ替わったプロットとなる。

Fig. 3 のヒストグラム分布をみると、計測したタイヤは W , H および D に関してバリエーションを付けたサンプルが確保できている。 W , H および D のそれぞれの相関からは、 D が大きくなるほど W は大きく、 H は小さくなっているが、これは物理的因果関係ではなく、市場に出回っている大径タイヤは幅広で扁平なものが多いという製品ラインの傾向によるものである。よって、 W , H , D をモデル同定の際に、相互に独立した入力パラメータとして採択した。

また、タイヤの容量のパラメータとしてロードインデックス L を、タイヤ変形量を支配するパラメータとして F_z と P を入力パラメータに加える。今回、計測荷重 F_z は L で

Table 3 Measured RRC relative to No.12* case, with various tire size, load index, inflation pressure, and normal load
* Tire size 205/55R16 of No.12 is a median of sample cases

No.	Tread width, W [mm]	Aspect ratio, H [%]	Rim diameter, D [inch]	Load index, L	Wheel size on measurement	Inflation pressure, P [kPa]	Normal load, F_z [kN]	RRC at $V=80$, [$\times 10^{-1}$]
1	225	45	18	91	18x8J	220	4.85	107.9%
2	225	45	18	91	18x8J	260	4.85	97.7%
3	225	45	18	91	18x8J	300	4.85	90.8%
4	225	45	18	91	18x8J	340	4.85	85.9%
5	215	45	17	87	17x7.5J	220	4.27	105.4%
6	225	55	17	97	17x7.5J	220	5.74	89.3%
7	215	55	17	94	17x7.5J	220	5.25	87.7%
8	215	55	17	94	17x7.5J	260	5.25	81.1%
9	215	55	17	94	17x7.5J	300	5.25	76.2%
10	215	55	17	94	17x7.5J	340	5.25	72.0%
11	215	60	17	96	17x7.5J	220	5.59	85.9%
12*	205	55	16	91	16x6.5J	220	4.85	100.0%
13	205	55	16	91	16x6.5J	260	4.85	91.6%
14	205	55	16	91	16x6.5J	300	4.85	84.8%
15	205	55	16	91	16x6.5J	340	4.85	80.2%
16	195	55	16	87	16x6.5J	220	4.27	92.5%
17	185	55	16	83	16x6J	220	3.82	101.0%
18	215	60	16	95	16x6.5J	220	5.44	91.1%
19	185	55	15	82	15x6J	220	3.73	106.7%
20	195	60	15	88	15x6J	220	4.41	98.1%
21	195	60	15	88	15x6J	260	4.41	89.1%
22	195	60	15	88	15x6J	300	4.41	84.4%
23	195	60	15	88	15x6J	340	4.41	79.6%
24	185	60	15	84	15x5.5J	220	3.92	94.4%
25	175	60	15	81	15x5.5J	220	3.63	90.4%
26	205	65	15	94	15x6J	220	5.25	94.0%
27	195	65	15	91	15x5.5J	220	4.85	99.1%
28	185	65	15	88	15x5.5J	220	4.41	100.3%
29	175	65	15	84	15x5.5J	220	3.92	90.7%
30	155	65	13	73	13x4J	220	2.89	114.3%
31	195	55	16	87	16x6J	210	4.27	92.7%

定まる最大荷重の 80% に設定したため L との相関はほぼ 1 になっているが、これにも因果関係はないと仮定した。

タイヤサイズや内圧と RRC との関係には非線形性も存在すると考えられるので、これを表現するためにこれらパラメータの二乗項も入力パラメータとして考慮した。採択した入力パラメータの妥当性については後に考察する。

以上の仮定の下で、タイヤサイズのパラメータ W , H , D , L および使用条件のパラメータ P , F_z で RRC を推定する統計 RRC モデルを式 (2) で定義した。

このモデル定義式に Table 3 の計測データを与え、誤差の最小二乗法の式 (3) からモデル係数 a_1 から a_{12} までを同定した。

$$RRC(a_1, a_2, \dots, a_{12}/W, H, D, L, P, F_z) = a_1 W + a_2 W^2 + a_3 H + a_4 H^2 + a_5 D + a_6 D^2 + a_7 L + a_8 L^2 + a_9 P + a_{10} P^2 + a_{11} F_z + a_{12} \quad (2)$$

where $\begin{cases} W: \text{Tread width [mm]} \\ H: \text{Aspect ratio [\%]} \\ D: \text{Rim diameter [inch]} \\ L: \text{Load index} \\ P: \text{Inflation pressure [kPa]} \\ F_z: \text{Normal load [kN]} \\ a_i: \text{Coefficients of RRC multi-regression model} \end{cases}$

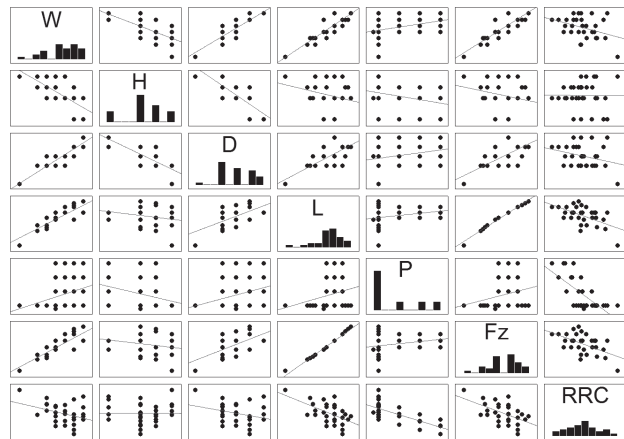


Fig. 3 Correlation overview of sample tire information for “Stat RRC” - W , H , D , L , P , F_z , and RRC

Table 4 Identified model parameters for statistical RRC model

Model coefficient	Identified value	Note
a_1	3.62E-2	W
a_2	-1.07E-4	W^2
a_3	-1.06E-1	H
a_4	7.51E-4	H^2
a_5	-8.34E-1	D
a_6	2.38E-2	D^2
a_7	8.61E-2	L
a_8	-9.61E-4	L^2
a_9	-4.09E-3	P
a_{10}	4.55E-6	P^2
a_{11}	7.78E-1	Fz
a_{12}	5.90E+0	y-intercept

$$\frac{\partial J}{\partial a_k} = 0 \rightarrow a_k \left| \frac{\partial J}{\partial a_k} = 0 \right. \quad (k = 1 \text{ to } 12) \quad (3)$$

where

$$J = \sum_{i=1}^n [RRC_i - RRC(a_1, a_2, \dots, a_{12}/W_i, H_i, D_i, L_i, P_i, Fz_i)]^2$$

このようにして得られた統計 RRC モデルの係数を Table 4 に示す。

4. 計算結果

4.1. RRC 予測結果

同定された統計 RRC モデルに、タイヤサイズ、ロードインデックス、内圧および荷重を与え、RRC を推定した結果を Table 5 に示す。また、この推定値と計測した RRC との相関を Fig. 4 に示す。

統計 RRC モデルの実測値に対する相関は補正 $R^2 = 0.913$ となった。

補正 R^2 とは自由度調整済み決定係数（もしくは寄与率とも呼ばれる）であり、提案モデルが RRC のサイズや内圧による変動のおよそ 9 割を説明しているということを示している。したがって、開発初期段階でタイヤサイズや内圧を変更して RRC など諸性能を検討する場合、本稿で提案する統計 RRC モデルは十分な検討精度を持つ。

しかし、Fig. 4 より、標準誤差は $\sigma = 2.13 \times 10^{-4}$ 程度あることや、予測式で表現しきれていない寄与率が 1 割程度残っていることなど、性能設計に当たってはこれら見積り誤差を念頭に置く必要がある。

タイヤ幅 W 、扁平率 H 、リム径 D 、ロードインデックス L 、内圧 P に対する転がり抵抗係数 RRC のプロットを推定値と計測値を重ねてプロットし、Fig. 5 に示す。

Fig. 5 を見ると、それぞれのサイズパラメータに対する RRC 推定値がおおむね良好な精度を持っており、実測値の $\pm 2.13 \times 10^{-4}$ 以内に分布していることが確認できる。

Table 5 Estimated RRC by statistical RRC model

Tire size and IP	Measured RRC at V = 80 in relative form	Estimated RRC at V = 80 in relative form	Error [%]
225/45R18, 91, IP220	107.9%	105.7%	-1.0%
225/45R18, 91, IP260	97.7%	98.0%	0.2%
225/45R18, 91, IP300	90.8%	91.9%	0.5%
225/45R18, 91, IP340	85.9%	87.2%	0.6%
215/45R17, 87, IP220	105.4%	105.4%	0.0%
225/55R17, 97, IP220	89.3%	87.5%	-0.8%
215/55R17, 94, IP220	87.7%	89.3%	0.8%
215/55R17, 94, IP260	81.1%	81.7%	0.3%
215/55R17, 94, IP300	76.2%	75.5%	-0.3%
215/55R17, 94, IP340	72.0%	70.8%	-0.5%
215/60R17, 96, IP220	85.9%	86.7%	0.4%
205/55R16, 91, IP220	100.0%	99.3%	-0.3%
205/55R16, 91, IP260	91.6%	91.6%	0.0%
205/55R16, 91, IP300	84.8%	85.5%	0.3%
205/55R16, 91, IP340	80.2%	80.7%	0.3%
195/55R16, 87, IP220	92.5%	94.6%	0.9%
185/55R16, 83, IP220	101.0%	94.8%	-2.9%
215/60R16, 95, IP220	91.1%	89.7%	-0.6%
185/55R15, 82, IP220	106.6%	104.8%	-0.9%
195/60R15, 88, IP220	98.1%	97.2%	-0.4%
195/60R15, 88, IP260	89.1%	89.6%	0.2%
195/60R15, 88, IP300	84.4%	83.4%	-0.5%
195/60R15, 88, IP340	79.6%	78.7%	-0.4%
185/60R15, 84, IP220	94.4%	95.1%	0.3%
175/60R15, 81, IP220	90.4%	96.4%	2.8%
205/65R15, 94, IP220	94.0%	96.8%	1.3%
195/65R15, 91, IP220	99.1%	99.6%	0.2%
185/65R15, 88, IP220	100.3%	95.5%	-2.3%
175/65R15, 84, IP220	90.7%	91.2%	0.2%
155/65R13, 73, IP220	114.3%	114.0%	-0.1%
195/55R16, 87, IP210	92.7%	96.7%	1.9%

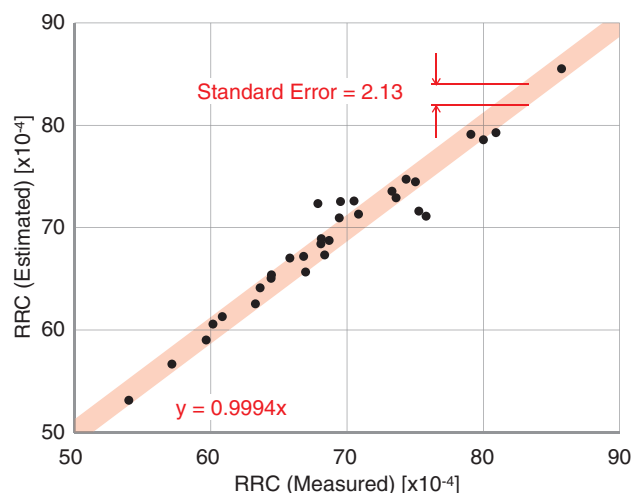


Fig. 4 Correlation between measured RRC and estimated RRC from statistical RRC model with W , H , D , L , P , and Fz given

Table 6 Multiple regression model - Stepwise verification using forward selection method

Model ID	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Independent parameters	W	W,H	W,H,D	W,H,D,L	W,H,D,L,P	W,H,D,L,P,Fz	W,H,D,L,P,Fz,W ²	W,H,D,L,P,Fz,H ²	W,H,D,L,P,Fz,D ²	W,H,D,L,P,Fz,L ²	W,H,D,L,P,Fz,P ²	W,H,D,L,P,Fz,Fz ²	W,H,D,L,P,Fz,W ² ,H ²	W,H,D,L,P,Fz,W ² ,H ² ,D ²	W,H,D,L,P,Fz,W ² ,H ² ,D ² ,L ²	W,H,D,L,P,Fz,W ² ,H ² ,D ² ,L ² ,P ²	W,H,D,L,P,Fz,W ² ,H ² ,D ² ,L ² ,P ² ,Fz ²
Statistics																	
R	0.367	0.516	0.554	0.639	0.906	0.907	0.912	0.957	0.935	0.926	0.908	0.947	0.960	0.968	0.968	0.972	0.973
R ²	0.135	0.266	0.307	0.408	0.821	0.823	0.831	0.916	0.875	0.857	0.824	0.897	0.922	0.937	0.937	0.945	0.946
Adjusted R ²	0.105	0.213	0.230	0.317	0.785	0.779	0.780	0.891	0.836	0.814	0.771	0.865	0.894	0.910	0.906	0.913	0.910
Standard error	6.832	6.404	6.336	5.967	3.345	3.395	3.385	2.384	2.920	3.117	3.455	2.650	2.349	2.169	2.260	2.132	2.163
Coefficients																	
y-Intersept	1.33E+0	2.16E+0	2.78E+0	1.80E+0	2.66E+0	3.19E+0	4.79E+0	8.36E+0	9.14E+0	-5.89E+0	3.39E+0	6.83E+0	7.56E+0	9.65E+0	4.88E+0	5.90E+0	2.37E+0
W	-2.04E-3	-3.97E-3	-1.73E-3	9.64E-3	8.12E-3	7.21E-3	-2.42E-2	-5.69E-3	-3.18E-3	8.74E-3	7.21E-3	8.15E-3	2.34E-2	4.51E-2	3.08E-2	3.62E-2	4.18E-2
H		-7.82E-3	-1.20E-2	8.07E-3	-1.46E-3	-3.21E-3	-9.33E-3	-1.33E-1	-1.91E-2	1.11E-3	-3.40E-3	2.88E-3	-1.47E-1	-1.31E-1	-1.08E-1	-1.06E-1	-1.19E-1
D			-5.24E-2	-2.36E-2	-5.75E-2	-5.98E-2	-8.15E-2	-9.39E-2	-9.75E-1	-5.24E-2	-6.08E-2	-3.67E-2	-7.77E-2	-7.24E-1	-7.33E-1	-8.34E-1	-1.08E+0
L				-3.26E-2	-2.25E-2	-2.81E-2	1.11E-2	-1.32E-2	3.57E-2	1.97E-1	-2.80E-2	-1.77E-1	-4.97E-2	-3.93E-2	9.68E-2	8.61E-2	2.40E-1
P					-1.50E-3	-1.49E-3	-1.54E-3	-1.46E-3	-1.71E-3	-1.51E-3	-2.94E-3	-1.68E-3	-1.41E-3	-1.54E-3	-1.54E-3	-4.09E-3	-3.81E-3
Fz						6.53E-2	-1.46E-1	2.46E-1	-1.76E-1	1.04E+0	6.54E-2	2.80E+0	4.82E-1	4.57E-1	7.62E-1	7.78E-1	6.06E-2
W ²							7.12E-5						-7.03E-5	-1.32E-4	-9.25E-5	-1.07E-4	-1.27E-4
H ²								9.77E-4					1.13E-3	9.56E-4	7.78E-4	7.51E-4	8.25E-4
D ²									2.78E-2				2.04E-2	2.38E-2	2.05E-2	2.38E-2	3.11E-2
L ²										-2.03E-3					-1.02E-3	-9.61E-4	-1.75E-3
P ²											2.63E-6					4.55E-6	4.09E-6
Fz ²												-1.79E-1					7.24E-2

4.2. モデル検証

同定した統計 RRC モデルの妥当性を検証するため、重回帰分析のステップワイズ変数増加法によって、さまざまな入力パラメータの組み合わせをもつモデルの同定精度を求め、提案するモデルと比較した。結果を Table 6 に示す。提案モデルは Model 16 である。各モデルの補正 R² と標準誤差をそれぞれ Fig. 6 と Fig. 7 に示す。

Table 6 より、変数を増加させていくと補正 R² が増加して再現性が高まり、合わせて標準誤差が小さくなってモデル精度が向上してゆく様子がわかる。

例えば入力パラメータが W だけの Model 1 は補正 R² (寄与率) は 0.105, 入力パラメータを W と H に増やした Model 2 は 0.213 なので、パラメータ W, H の RRC への寄与率はそれぞれ 10% 程度あると分析できる。

Model 4 から 5, および, Model 7 から 8 に着目すると、それぞれ内圧 P と偏平率の 2 乗 H² が変数として加わった際に補正 R² は 0.317 から 0.785 および 0.780 から 0.891 へと大きく改善されることから、入力パラメータの内圧 P と偏平率の 2 乗項 H² がそれぞれ 47% と 11% 程度の寄与を持つことがわかる。

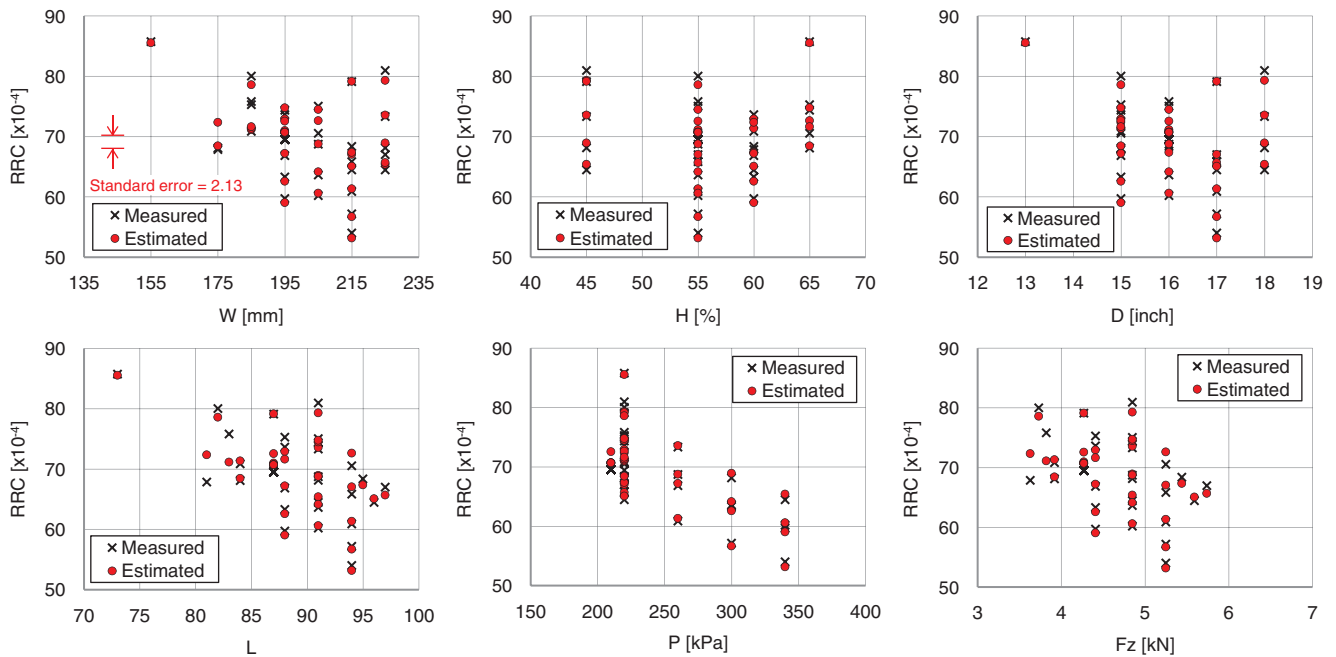


Fig. 5 Comparisons between measured RRC and estimated RRC with respect to W, H, D, L, P, and Fz

しかしながら、提案モデルの Model 16 にさらに荷重の 2 乗項 Fz^2 が加わる Model 17 では補正 R^2 が低下し標準誤差も大きくなってしまふ。これは、RRC は荷重 Fz に関しては線形で近似する方が適切であることを示している。

以上のような検証作業から、提案モデル Model 16 は、サ

イズや内圧の RRC への寄与を高い精度で予測できる再現性の良いモデルであることが確認できた。

なお、Model 8 はよりシンプルながらも補正 $R^2 = 0.891$ と予測精度が良好であるため、次章でロバスト性の観点で考察する。

5. 応用例および考察

5.1. ロバスト性に関する考察

Fig. 8 は、提案モデル Model 16 と、よりシンプルなモデル Model 8 から推定された RRC を、さまざまなタイヤサイズについて実測値と並べてプロットしたものである。

Model 8 は W , H , D , L , Fz および H^2 を変数とするモデルであるが、その推定値は実測値の近傍にあり、標準誤差も Model 16 の $\sigma = 2.13 \times 10^{-4}$ に対して $\sigma = 2.38 \times 10^{-4}$ と 11% 程度の増加に留まっている。

Fig. 9 に、今回 RRC の基準として用いた 205/55R16 91, IP=220 のタイヤ幅 W だけを 145 から 235 へ変動させた、仮想サイズの RRC 推定値を、Model 16 と Model 8 に関して点線で示す。

Model 16 の RRC 推定値は上に凸の形状を描き、計測したサンプルタイヤのサイズを外れる $W < 155$ や $W > 225$ の領域で RRC が大きく低下する予測値を算出してしまう。これに対して、よりシンプルな Model 8 では、タイヤ幅 W が増加すると RRC が低下する線形の傾向を予測する。

タイヤ幅と RRC との関係を考察すると、一般に荷重一定の条件でタイヤ幅が狭くなるとタイヤ接地長は長くなり、ヒステリシスを生じるトレッド面の屈曲変形は大きくなる。したがって Model 16 のタイヤ幅が狭くなる $W < 155$ の外挿領域で RRC が低下するという予測は、この一般傾

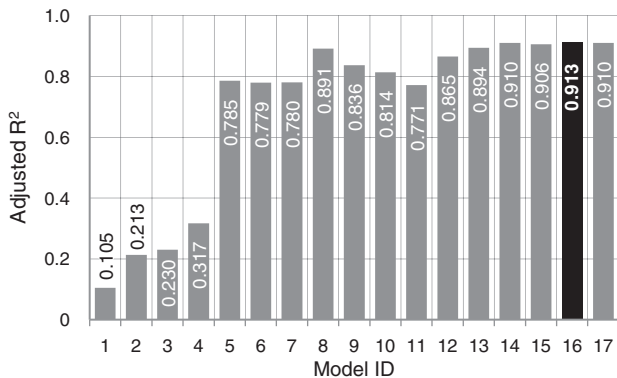


Fig. 6 Adjusted R^2 of multiple regression models

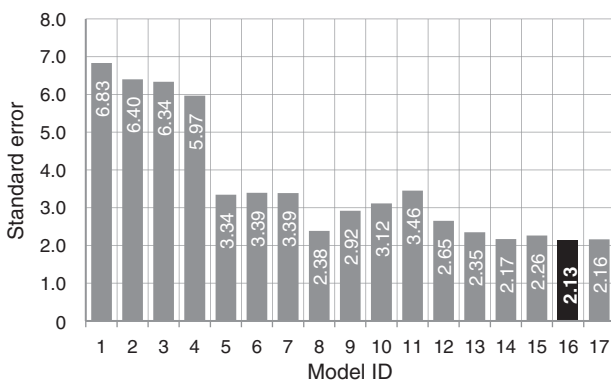


Fig. 7 Standard error of multiple regression models

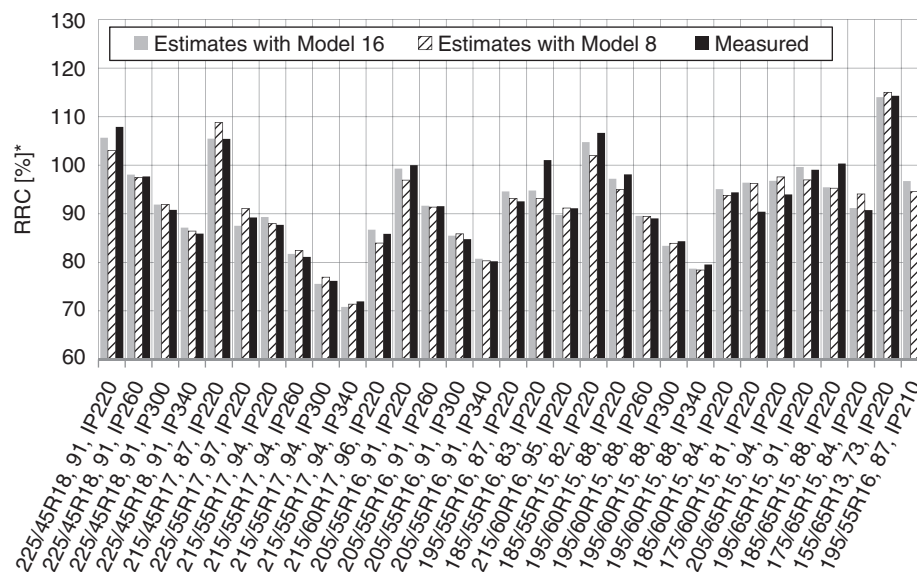


Fig. 8 Comparison of estimates of RRC from Model 16 and Model 8 with measured RRC (relative to 205/55R16's)

向と合致しない。これに対してシンプルな Model 8 は、タイヤ幅 W と RRC の関係を線形で近似するので、この定性的考察と傾向が一致する。

この考察から、少なくともタイヤ幅に関しては Model 16 は与えられたサンプルの範囲では高い再現性を示すものの、この範囲を外れると予測精度が低下してしまう可能性がある。統計 RRC モデルを使用する際は、サンプルで与えられた範囲内の精度を重視したモデルを使用するか、精度はやや劣るもののロバストで一般傾向を捉えたモデルを使用するか、目的に応じて適切なモデルを選択することも必要であることがわかる。

5.2. サイズ感度分析

これまでの開発では、候補タイヤの RRC 特性とコーナリング特性はすべて実測して定量的な性能設計を実施してきたが⁽¹⁸⁾、提案した統計 RRC モデルを先に報告した統計 C_p モデルと組み合わせると、燃費が良く、操縦安定性も良い初期仕様を机上検討で探索することが可能となる。

Fig. 10 に、205/55R16, $L=91$, $P=220$ [kPa] のタイヤの W , H , D , P をそれぞれ変動させた場合の統計モデルによる C_p と RRC の予測感度を示す。

リム径 D を 16 inch から 17 inch へ上げた場合のプロット $D+1$ を見ると C_p が 4% 増加して RRC も 5% 改善される予測である。よって、タイヤ外径は大きくなるものの、リム径を上げることは操縦安定性と燃費を両立できるサイズであることがわかる。

同様に、タイヤ幅 W の +10 幅広化も、 C_p が 4% 増加し、さらに RRC も 8% 低減する予測である。

これに対して、内圧 P を +20 高内圧化しても C_p は 1%, RRC は 4% の改善に留まる。タイヤ内圧による対策は、サ

イズ変更と比べると相対的に効果が小さいことが定量的に明らかにできる。また、偏平率 H を -5 偏平化しても C_p は 5% 向上するが RRC は 13% も増加してしまい、操縦安定性と燃費がトレードオフしてしまうこともわかる。

例えばある基本プラットフォームから重量増加を伴う SUV を派生車種として作る場合、重量増加に対応した運動性能を確保しつつ良好な燃費を実現するには、リム径を上げタイヤ幅も広げるためのタイヤサイズ変更とその空間レイアウトが必要であることを示している。

次に Fig. 11 に、225/45R18 のケースで同様の感度を計算した結果を示す。

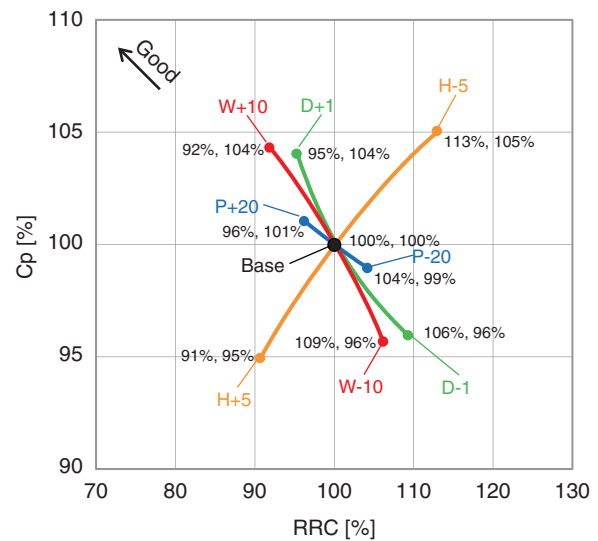


Fig. 10 Sensitivities of tire parameters W , H , D , and P of 205/55R16 tire on both cornering stiffness and RRC

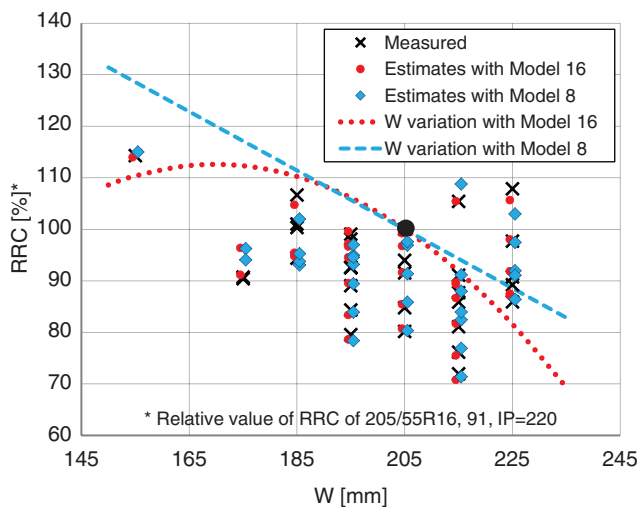


Fig. 9 Comparison of estimates of RRC from Model 16 and Model 8 with measured RRC with regard to tread width W

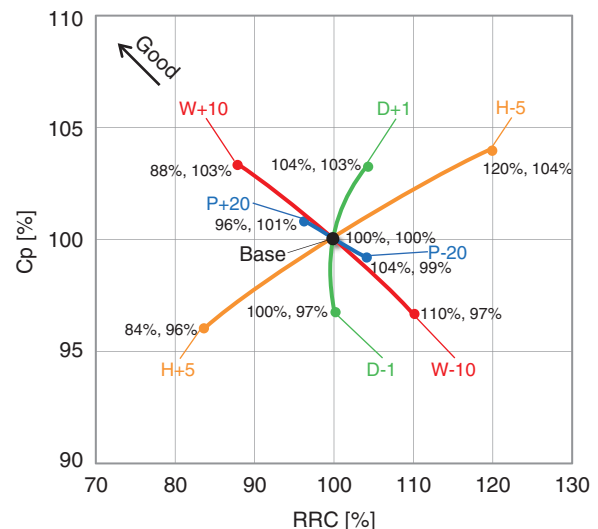


Fig. 11 Sensitivities of tire parameters W , H , D , and P of 225/45R18 tire on both cornering stiffness and RRC

サイズパラメータ W , H , P の感度の傾向はほぼ 205/55R16 と変わらないが, C_p 感度はやや低めに, RRC 感度はやや高めに予測される結果となった。また, D の RRC に対する感度はかなり低くなり, プロット D+1 のケースでは, リム径を上げて RRC が増加してしまうという現実には起こりえない予測結果となってしまった。

この例では, Table 2 で示したサンプル統計の一番外れた W , H , D をもつサイズを中心に感度解析しているが, サイズパラメータがモデル化に使用したデータサンプルの外挿となるケースの予測は本モデルでは担保できないことがわかる。

こうした予測精度の低下を防ぐためには, さらにバリエーションを付けたサンプルを基データとしてモデル同定するとともに, モデル同定用のデータと検証用のデータとを分け, 一方のデータでモデル化して, 他方のデータで統計検定をおこなう作業を繰り返しながらモデルの確からしさを上げる改良作業が必要である。また, 本手法を適用するに当たっては, 用途によってモデルを使い分けるノウハウ蓄積も必要である。

タイヤの RRC に関しては, タイヤ温度を考慮した補正法なども提案され始めており⁽¹⁹⁾, 自動車の低燃費化が進むにつれてより高い精度で予測する技術が求められるようになってきている。本統計タイヤモデル化手法を拡張してゆけば, 既存のタイヤ計測データを活用した計測レスの初期検討環境を整備でき, コンベンショナルなシャシ開発の効率化と性能向上を大きく支援することが可能である。

6. まとめ

本稿では, 設計初期に合理的かつ効率良くタイヤサイズと特性を定められる統計タイヤモデルの手法を, タイヤの転がり抵抗係数の予測に拡張し, 以下の知見を得た。

- (1) タイヤのコンパウンドや構造を同一銘柄に揃えた RRC 計測データから, タイヤサイズと内圧が RRC を支配する重要因子となっていることがわかった。
- (2) コンパウンドとタイヤ構造が一定の場合, タイヤサイズと内圧の情報だけから RRC を推定するモデルを構築でき, 補正 $R^2 = 0.913$ と再現性が良好である。
- (3) 統計 RRC モデルを統計 C_p モデルと組合せると, 操安性と燃費性能を両立できるタイヤサイズを, 机上検討でき, 膨大な工数を掛けていたタイヤ計測を省略することが可能となる。

本稿で報告した統計 RRC モデルも, コンパウンドのヒステリシス特性, タイヤ重量, タイヤの接地面積や接地長などタイヤ単体の計測データも取り入れたさらなる一般化を図っていきたい。

参考文献

- (1) 渥美淑弘, 鈴木浩義, 宮崎武司, 亀本修吾, 日下馨: CLARITY FUEL CELL の運動性能, Honda R&D Technical Review, Vol.29, No.1, p. 37-42
- (2) 樋口実, 日下馨, 渋谷宏一, 村岡尚彦, 塚越誠: ハンドリングの予測技術の研究 - 動特性を考慮した非線形タイヤモデルの開発 -, HONDA R&D Technical Review, Vol.7, p. 87-97
- (3) Kusaka, K., Higuchi, M., Shibusawa, K., Muraoka, N., Tsukagoshi, M.: Transient Tire Model for Handling Analysis and Prediction, Proc. of The Eighth International Pacific Conference on Automotive Engineering, (1995)
- (4) 塚越誠, 首藤拓也: 部品の弾性変形を考慮したサスペンション特性解析, Honda R&D Technical Review, Vol.15, No.1, p. 195-202
- (5) Kusaka, K., Higuchi, M., Hirata, H.: Handling Analysis and Prediction During Cornering - The Analytical Prediction of Vehicle Cornering Maneuver with respect to Driver-Vehicle System Characteristics, Proc. of The Ninth International Pacific Conference on Automotive Engineering, (1997)
- (6) Nagahisa, M., Kusaka, K., Minakawa, M., Nirei, T.: The Influence of Body Flexibility on the Handling Characteristics, Proc. of The 10th International Pacific Conference on Automotive Engineering, (1999)
- (7) Kusaka, K., Nagahisa, M., Nishimura, T.: An Influence of Body Lateral Bending on Handling Characteristics, Proc. of The 11th International Pacific Conference on Automotive Engineering, (2001)
- (8) 皆川正明, 中原淳, 二宮次郎, 織本幸弘: 路面からタイヤへの伝達力の指向性を利用した振動伝達低減手法 - 第 2 報: 路面入力実測によるばね下過渡振動解析 -, 自動車技術会学術講演会前刷集, No. 53-99, p. 5-8, (1999)
- (9) Nakahara, J., Minakawa, M., Gipser, M., Wimmer, J.: A Modeling Approach for Suspension Friction Consisting of Several Sets of Friction Elements and Springs in Series, 9th Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology, (2000)
- (10) Nakahara, J., Minakawa, M.: Validation of Ride Comfort Simulation using a Test Vehicle, which Measures Road Profile and Vehicle Vibration Simultaneously, 5th Stuttgart International Symposium, (2003)
- (11) 大滝雄介, 日下馨, 中原淳, 久世正文: ハンドリングと乗心地を両立するための非線形 CAE 技術, Honda

- R&D Technical Review, Vol.29, No.1, p. 151-159
- (12) 豊島貴行, 松澤俊明, 伊藤憲悟, 遠藤喜章, 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
- (13) 鈴木朋和, 日下馨: 複数タイヤのデータ群から同定
する「統計タイヤモデル」, Honda R&D Technical
Review, Vol. 24, No.1, p. 85-91
- (14) Kusaka, K., Nagayama, N.: A Statistical Tire Model
Concept - Applications to Vehicle Development, SAE
Technical Paper 2015-01-1578, (2015)
- (15) 日下馨, 長山信行: 統計タイヤモデル研究 - CP, Kz,
DLR 推定への適用 -, 自動車技術会シンポジウム
No. 21-15, シンポジウムテキスト, p. 59-69, (2016)
- (16) Pacejka, H.: Tire and Vehicle Dynamics, Third
edition, Butterworth-Heinemann, p. 672, (2012)
- (17) Pauwelussen, J. P.: Essentials of Vehicle Dynamics,
Butterworth-Heinemann, p. 20-21, (2014)
- (18) 酒井智紀, 日下馨, 佐藤祐二: フラットベルト式サ
スペンションタイヤ試験機, Honda R&D Technical
Review, Vol.25, No.2, p. 64-69
- (19) 穂高武, 三浦秀樹: タイヤ温度に着目した走行抵抗補
正技術の研究, 自動車技術会 2018 年秋季大会学術講
演会講演予稿集, p. 1-6, (2018)

■ 著 者 ■



日 下 馨



木 滝 泰 隆



古 本 直 己

表面分析および大規模クラスタ担持モデルを用いた 第一原理計算によるリーンバーン用炭化水素浄化触媒の メカニズム解明

Elucidation of Hydrocarbon Purification Mechanism of Catalyst for Lean Burn Engine
Using Surface Analysis and Ab-initio Calculation with Large-scale Cluster Model

松 尾 雄 一¹

Yuichi MATSUO

竹 折 浩 樹¹

Hiroki TAKEORI

廣 瀬 哲¹

Satoshi HIROSE

岡 山 竜 也¹

Tatsuya OKAYAMA

要 旨

リーンバーン用炭化水素浄化触媒として Pt 担持酸性担体触媒は高い浄化性能を示す。その要因解明のため X 線吸収端近傍構造解析等による Pt 粒子の表面状態分析と、大規模クラスタ担持モデルおよびスラブモデルを用いた密度汎関数理論による第一原理計算をおこなった。この結果、酸性担体を用いた場合、Pt 粒子が金属状態に保持されていることがわかった。さらに Pt 粒子内部には電荷の分布が存在し、担体と近接している Pt 原子が正に帯電することで酸素が吸着しにくい状態になっていることもわかった。これらの結果から Pt 担持酸性担体の高い浄化性能の要因は、酸性担体の電子的作用により担体に近接している Pt 表面の酸素吸着が抑制されることでパラフィンに対して高い活性を持つことがわかった。

ABSTRACT

When a platinum supported acidic support catalyst is used as a hydrocarbon purification catalyst for lean burn engines, it shows a high level of purification performance. In order to elucidate the causal factors, the surface state of the platinum particles was analyzed by an X-ray absorption near-edge structure analysis and ab-initio calculations, with a density functional theory using a large-scale cluster model and slab model, were carried out. The results showed that platinum particles retain a metallic state when acidic support is used. It was also found that there is a distribution of charge in the platinum particles, and when platinum atoms in proximity to the support are positively charged, they are in a state that tends to resist the adsorption of oxygen. It was found from these results that the high level of purification performance of acidic supported platinum is due to the electronic activity of the acidic support, which helps to prevent oxygen adsorption on the surface of platinum in proximity to the support so that the catalyst yields high activity with respect to paraffin.

1. ま え が き

温室効果ガスのひとつといわれている CO₂ の低減は人類にとって喫緊の課題である。自動車から排出される CO₂ を低減するためには、エンジンの熱効率向上が重要であり、リーンバーンが注目されている。Honda では、点火アシスト均質リーンバーン (Homogeneous Lean Charge Spark

Ignition: HLSI) をひとつの解決策として研究を報告している^{(1), (2)}。

しかし、リーンバーンに伴うリーン排ガス雰囲気において、ストイキ雰囲気では通常用いられる三元触媒では、窒素酸化物 (NO_x) だけでなく炭化水素 (HC) の浄化効率が低下してしまうという課題があった。Fig. 1 にストイキとリーンの排ガス中の HC 濃度と HC 種の割合を示す^{(3), (4)}。リー

¹ 四輪 R&D センター

ン排ガスはHC濃度が高く、その中でもパラフィンの割合が高いことがわかる。また、Fig. 2にHC酸化反応の温度特性を示す。オレフィンや芳香族に対してパラフィン浄化される温度が高く、浄化されにくいことがわかる。これらの要因でリーン雰囲気においては浄化効率が低下すると考えられる。

これに対して我々はPt担持酸性担体触媒がパラフィン酸化反応に有用であることを見出してきた^{(3), (4)}。Fig. 3にPt酸性担体触媒の反応イメージを示す。パラフィンの酸化反応には貴金属の中でもPtが高活性であることがわかっており、パラフィンと酸素がPt粒子表面に吸着され、Pt表面でCO₂とH₂Oに変換され、脱離するというスキームである。リーン雰囲気においてはストイキ雰囲気に対し過剰に酸素が存在するため、Fig. 3(a)のように酸素がPt表面へ吸着し表面を被覆することでパラフィンの吸着が阻害され反応性が低下する。これに対しPtを担持する担体として酸性度の高い材料を使用することにより、高いパラフィン酸化活性が得られることを見出した。酸性担体を用

いた場合、Fig. 3(b)に示すように酸性担体の電子吸引効果によりPt粒子が電子不足になり、Pt表面と酸素の結合力が低下することでPt表面の酸素被覆が抑制され、パラフィンと酸素がPt表面で反応しやすくなると推察してきた。しかし酸性担体によるPtからの電子吸引効果や、Pt表面の酸素吸着抑制効果などについて詳細な解析や理論的な裏付けは十分ではなかった。そこで、本研究では表面分析などの実験的アプローチと、第一原理計算を用いた理論的アプローチを組み合わせた研究コンセプトにより、パラフィンを効率よく浄化するPt担持酸性担体触媒の高活性メカニズムを立証することを目的とした。

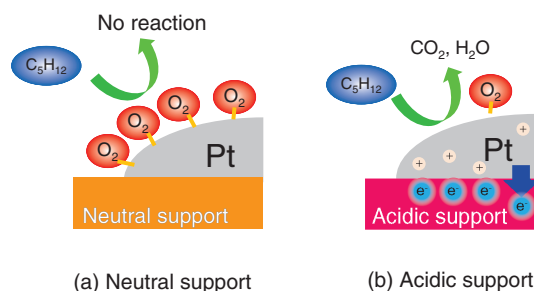


Fig. 3 HC purification mechanism of Pt supported catalyst

2. 研究コンセプト

本稿はリーンバーン排ガス中のパラフィンを効率よく浄化するPt担持酸性担体触媒の高活性メカニズムについて以下のようなコンセプトで研究をおこなった。

Pt担持酸性担体触媒の構成のイメージをFig. 4に示す。触媒材料として酸性酸化物担体の表面にPt粒子が担持されている。この触媒材料がハニカム表面にコートされ、リーンバーン排ガス浄化触媒として用いられる。

このPt担持酸性担体触媒に対し、Fig. 3で示した推定反

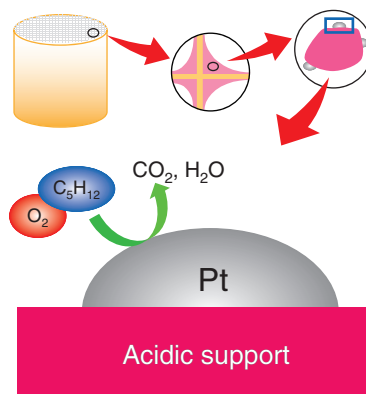


Fig. 4 Pt supported catalyst configuration

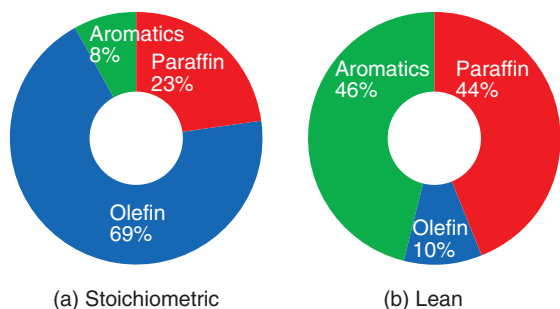


Fig. 1 HC composition in exhaust gas (HLSI, Ne: 1500 rpm, BMEP: 450 kPa)

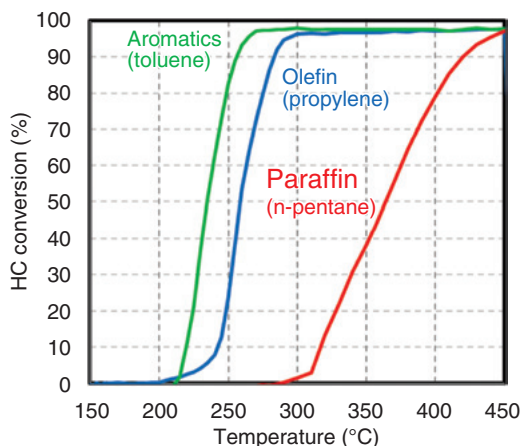


Fig. 2 Oxidation characteristic of HC (Catalyst: Three way catalyst, Aging: 750°C, Evaluation: O₂ 7%, HC 1200 ppm, CO 3000 ppm, NO_x 70 ppm, CO₂ 8%, H₂O 7%)

応スキームの裏付けをおこなうため、担体材料として酸性度の異なる SiO_2 、 Al_2O_3 、 MgO の三種をモデル材料とした。そして、これらを用い以下の(1)から(3)に示す方法で活性評価、物性解析、理論計算をおこない総合的に考察した。

(1) Pt 担持触媒の活性評価

各触媒についてパラフィン酸化反応試験により求められた反応速度と、CO 吸着量測定から求められた Pt 表面積を用いて Pt 一原子あたりの反応速度を算出することで活性を計測する。

(2) 物性解析による高活性メカニズム明確化

各担体材料についてアンモニア昇温脱離法 (NH_3 -TPD) により表面酸点数を算出し各担体の酸性度を求める。さらに Pt 担持触媒について酸素昇温脱離法 (O_2 -TPD) により Pt 表面への酸素吸着量を測定する。次に X 線吸収端近傍構造解析 (X-ray Absorption Near Edge Structure: XANES) により Pt 粒子の電子状態を調査する。これらを総合して担体の酸性度が Pt 粒子や Pt 表面状態へ与える影響から(1)で計測した活性差の要因を推定する。

(3) 理論計算による推定の裏付け

各材料の大規模 Pt クラスタ担持モデルと、電子状態を意図的に変化させた Pt スラブモデルを用いた酸素吸着特性の電子状態計算をおこない、(1)および(2)で明らかになった担体酸性度が活性や物性に与える影響についての理論的な裏付けを得る。

本研究においては特に(3)の大規模 Pt クラスタ担持モデルを用いた電子状態計算の取り組みがポイントと考えている。第一原理計算は金属などの電子密度計算が可能であり、自動車触媒でも多く用いられてきた^{(5), (6)}。しかし計算コストがかかるため原子数の制限があり、また、複数元素の組み合わせ構造に対する計算は容易ではなかった。このため実触媒と同等サイズの金属粒子径の担持モデルの計算についての検討例は少なかった^{(7), (8)}。それに対し本稿はモデル化手法効率化と計算機能力の拡張により、大規模な Pt クラスタを担体に担持した数百原子の構造モデルの計算がおこなえるようになったため、より実際に近いクラスタサイズの計算に取り組むこととした。

一方、Pt 表面への酸素吸着状態の第一原理計算においては、計算コストの大きな大規模クラスタ担持モデルを用いずに、Pt クラスタ表面の電荷状態を模擬した Pt スラブモデルを用いて計算を実施した。ここで、スラブモデルとは特定指数面を最表面とし、周期境界を持つ板状モデルのことである。酸素分子吸着は Pt 金属表面の局所的に起こる現象であるため、吸着への影響が特に大きいと考えられる箇所の原子のみをスラブモデルで表現することにより、短時間で効率的に計算結果を得ることを試みた。

以上のような研究コンセプトにより、リーンバーン用 HC 浄化触媒としての Pt 担持酸性担体触媒の高活性メカニズムの解明をおこなった。

Table 1 Oxide materials

Type	Support material
Acidic oxide	SiO_2
Neutral oxide	Al_2O_3
Basic oxide	MgO

Table 2 Model gas composition

	Concentration
CO (ppm)	3000
HC (ppmC)	1200 ($n\text{-C}_5\text{H}_{12}$)
NO (ppm)	70
O_2 (%)	7
CO_2 (%)	8
H_2O (%)	7

3. 実験および計算方法

3.1. サンプル

Pt を酸性度の異なる担体材料に担持し Pt 担持触媒として用いた。酸性担体材料としては SiO_2 、中性担体材料としては Al_2O_3 、塩基性担体材料としては MgO を用いた (Table 1)。各担体材料に硝酸 Pt 水溶液を含浸し、蒸発乾固させ、 150°C で 15 時間大気中で乾燥後、 500°C で 2 時間大気中で焼成して触媒材料とした。分析には、担体材料粉末および触媒材料粉末を用い、反応試験には触媒材料をコーゼライトハニカムにコーティングして用いた。使用したハニカムは 900 セル、2.5 ミル、直径 1 インチ、長さ 30 mm である。

3.2. 反応試験方法

触媒の浄化性能評価はモデルガス反応装置を用いておこなった。モデルガスの組成は Table 2 に示し、空間速度は 100000 h^{-1} である。モデルガス流通下において触媒を室温から 400°C まで昇温させ、触媒出口ガスを分析し触媒前後の浄化率を算出した。触媒は 750°C で 20 時間水熱条件で Aging して用いた。

3.3. 分析方法

3.3.1. Pt 表面原子数計測

Pt 表面原子数は CO 吸着量により計測した。前処理は He 気流下 400°C まで昇温後、 H_2 雰囲気にて 15 分 400°C 定常とした。その後、He 気流下で常温まで降温後、 200 mm^3 の CO パルスを出口 CO 濃度が安定するまで 3 回以上注入し、吸着量を計測した。

3.3.2. 酸性度測定

酸性度の評価は NH_3 -TPD によりおこなった。これは塩基性の NH_3 の吸着量が多いほど酸性度が高いという特性から酸性度を評価する手法である。He 雰囲気にて 500°C

で 60 分, さらに 0.5 %NH₃ 流通下にて 100℃ で 60 分前処理後, He 流通下で 100℃ から 600℃ まで昇温し, 四重極質量分析計にて NH₃ 脱離量の定量をおこなった.

3.3.3. 酸素吸着量測定

酸素吸着量の測定は O₂-TPD によりおこなった. 酸化雰囲気 500℃ 60 分の前処理後, He 流通下で常温から 900℃ まで昇温し, 四重極質量分析計にて酸素脱離量を定量した.

3.3.4. 電子状態解析

Pt 粒子の電子状態を調べるため XANES 測定をおこなった. 分析装置は九州シンクロトロン光研究センター(課題番号:1606044G)の BL-11 ラインを使用し, 分光器は Si(111)2 結晶分光器, 検出器はイオンチャンバを用いた. 測定は真空中において透過法により Pt-III Edge スペクトルを取得し, 解析をおこなった.

3.4. 第一原理計算方法

3.4.1. 大規模クラスタ担持モデルの作成

理論的に電子状態を計算するためには担体上の Pt 担持状態をモデル化する必要がある. 大規模クラスタ担持モデルを作成するにあたり, 第一原理計算により最終的に得られる安定構造の原子配置ならびに電子状態が, 初期原子配置に依存した状態になってしまう可能性が考えられる. そこで初期原子配置に関しては Fig. 5 (a), (b) に示すように, 手動で Pt 原子を配置せず, 原子間のエネルギー場をマクロに考慮できる古典的な分子動力学 (Molecular Dynamics: MD) を用いて大まかな原子配置をおこない, その後, 量子力学を考慮している第一原理計算により詳細に安定構造を計算し, Fig. 5 (c) のようなモデルを完成させるという手順でモデル作成をおこなった.

以上のように分子動力学計算と第一原理計算を組み合わせる手法を用いることで, より現実に近い Pt 担持状態を, より効率的にモデル化することができると考え実施した. 具体的には直径約 1 nm の Pt 粒子が酸化物担体に担持されている状態を模擬するため, 約 100 原子からなる Pt クラスタが 5 層程度の酸化物担体上に存在するモデルを作成した.

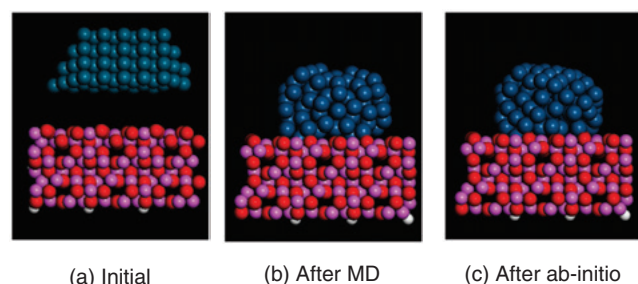


Fig. 5 Cluster model of Pt supported catalyst

Table 3 MD calculation conditions

Item	Detail
Software	LAMMPS
Potential	Lennard-Jones
Simulation time, Time step	500.0 ps, 1.0 fs
Ensemble condition	NVT

Table 4 Ab-initio calculation conditions

Item	Detail
Software	DMol ³
Functional	PBE (GGA)
Basis set	DNP basis set
Core treatment	DFT Semi-core pseudopotential

3.4.2. 分子動力学計算

酸化物担体の原子は固定した状態で, 担持する Pt 原子のみに初速を与えて計算を実施した. 詳細な計算条件を Table 3 に示す.

3.4.3. 第一原理計算

本稿では密度汎関数理論による第一原理計算を用いて Pt の電子状態解析をおこなった. この際に担持された Pt の電子状態解析をするための Pt 担持クラスタモデルと Pt への酸素吸着を解析するための Pt スラブモデルをそれぞれ使い分けた. Pt 担持クラスタモデルの計算では, 酸化物担体において Pt が担持されていない側半分を固定した状態で構造最適化計算を実施した. また Pt スラブモデルは 8 層 32 原子モデルとし, 酸素分子と最表面から 3 層の Pt 原子を構造最適化計算対象とした. いずれの計算も Table 4 の条件で実施した⁽⁹⁾⁻⁽¹¹⁾.

4. 実験および計算結果

4.1. Pt 担持酸化物触媒の活性評価

酸性度の異なる各酸化物に Pt を担持した Pt 酸化物触媒のパラフィン浄化性能試験, および CO 吸着量測定による表面 Pt 量の算出をおこなった. 浄化活性の指標として, Turn Over Frequency (TOF) を用いた. TOF は以下の式 (1) であらわされるように, 活性金属一原子当たりの単位時間当たりの反応回数を示す数字であり, 活性指標として一般的に用いられている.

$$\text{TOF (/sec)} = \text{反応速度 (mol/sec)} / \text{表面活性金属量 (mol)} \quad (1)$$

浄化性能評価結果の 300℃ での反応速度と表面 Pt 量から, 式 (1) を用い TOF を求めた結果を Table 5 に示す. この結果から酸性担体を用いた触媒である Pt/SiO₂ の TOF

Table 5 Calculation of TOF in Pt supported catalyst

Catalyst	Conversion (%)	Pt amount (μmol)	TOF (/sec)
Pt/SiO ₂	48.0	2.4	0.44
Pt/Al ₂ O ₃	70.0	29.0	0.04
Pt/MgO	30.0	28.0	0.02

が最も高いことがわかった。また Pt/SiO₂ 触媒は表面 Pt 量がほかの二つより一桁小さいことから、Pt 粒子の凝集が進行していると推察されるが、それにもかかわらず、表面の Pt 原子の活性は高く保たれていることがわかった。

4.2. 物性解析による高活性要因推定

4.2.1. 酸化物担体の酸性度調査

各酸化物について NH₃ 吸着量の測定から酸性度の評価をおこなった結果を Table 6 に示す。この結果、想定通り SiO₂, Al₂O₃, MgO の順で NH₃ の吸着量が多く、この順に酸性度が高いことが確認できた。

4.2.2. Pt 表面への酸素吸着特性

Fig. 3 に示したように酸性担体のパラフィン浄化性能が高い要因は Pt 表面上への酸素吸着が抑制するためと推定していた。そこで Pt 酸化物触媒への酸素吸着特性を把握するため、O₂-TPD による酸素吸着量を測定した。この結果を Table 7 に示す。酸素吸着量は Pt/MgO, Pt/Al₂O₃, Pt/SiO₂ の順で高かった。つまり、酸性度の高い SiO₂ を担体に用いた触媒は、Pt への酸素吸着を低減させる効果があることが示唆された。この効果により酸性度の高い担体材料ほど Pt 表面の吸着酸素が少なく状態となりパラフィンが Pt 表面に吸着しやすくなることで酸化反応が進み、TOF が高くなったと推察した。

4.2.3. Pt 電子状態分析

Pt への酸素吸着が抑制される要因は各酸化物上の Pt 粒子の電子状態が異なるためと推定し、XANES 測定をおこなった。このとき金属状態の比較用として Pt 箔、酸化物状態の比較用として PtO₂ 片についても測定をおこなった。この結果を Fig. 6 に示す。この結果から、SiO₂ 上の Pt を示すピークが最も Pt 箔のピークに近く、Al₂O₃, MgO の順にピーク位置が PtO₂ 片の方向にシフトすることがわかった。つまり SiO₂ 上の Pt が最も金属状態に近いことが示唆され、このことから Pt/SiO₂ 触媒は Pt 表面への酸素吸着が抑制されていることが確認できた。

4.3. 理論計算による推定の裏付け

4.3.1. クラスタ担持モデルによる第一原理計算

物性解析により Pt 粒子の電子状態が酸化物触媒の性能向上へ影響していることが示唆された。そこで担体が Pt 粒子に対しどのような電子的な影響を及ぼしているかを明らかにするため、Pt クラスタを酸化物担体上へ配置したク

Table 6 Amount of NH₃ adsorption in NH₃-TPD

Material	NH ₃ ads. ($\mu\text{mol/g}$)
SiO ₂	63
Al ₂ O ₃	23
MgO	2

Table 7 O₂ adsorption amount on Pt in O₂-TPD

Catalyst	O ₂ ads. ($\mu\text{mol/g}$)
Pt/SiO ₂	4
Pt/Al ₂ O ₃	12
Pt/MgO	50

ラスタ担持モデルの電子状態計算をおこなった。Fig. 7 に各酸化物のクラスタ担持モデルを示す。いずれも酸化物担体上に Pt クラスタが球状に担持された状態で安定化した。担体材料が異なることにより Pt クラスタ形状は異なる結果となった。これは、担体材料と Pt クラスタの相互作用の仕方が異なるためと推察される。

これらの Pt クラスタモデルに対し、Pt クラスタの電子状態を把握するためクラスタ全体に対し、Hirshfeld 電荷解析をおこなった。この結果を Table 8 に示す。この結果、SiO₂, Al₂O₃, MgO の順で正の電荷量が高いことがわかった。つまり担体の酸性度が高いほど Pt クラスタの電子が欠乏していると解釈でき、これは酸性酸化物担体の

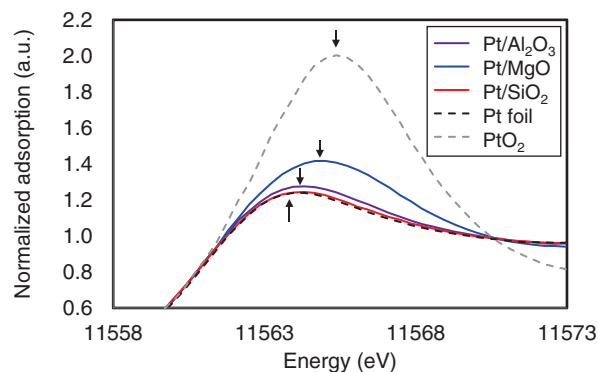


Fig. 6 XANES spectrum of Pt supported catalyst

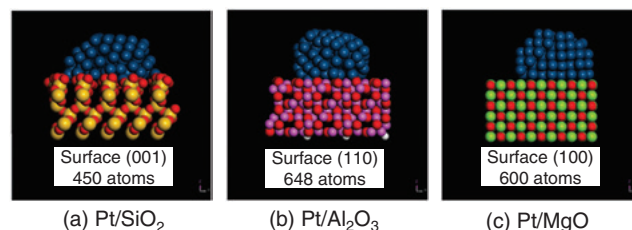


Fig. 7 Cluster models of Pt supported catalyst

Table 8 Charge of Pt cluster

	Pt/SiO ₂	Pt/Al ₂ O ₃	Pt/MgO
Total charge of Pt cluster	5.93	3.1	0.19
Maximum + charge	0.32	0.31	0.06
Maximum - charge	-0.02	-0.04	-0.05

電子吸引力が他の酸化物と比較して大きいことが要因と考えられる。

さらにPtクラスタを構成する一原子ごとの電子状態計算により、Ptクラスタ内の電荷分布を調べた。Fig. 8 (a)-(c)にPtクラスタの電荷分布を示す。図中のXY平面付近が担体酸化物との接点であり、モデル中のPtクラスタ内の全原子をそれぞれの座標に示し、電荷値を色分けしてプロットした。(a)から(c)のいずれの図においても、Ptクラスタ内に電荷分布に偏りが生じており、担体との接点付近に正の電荷が集中し、クラスタ上部へ負の電荷が集中して

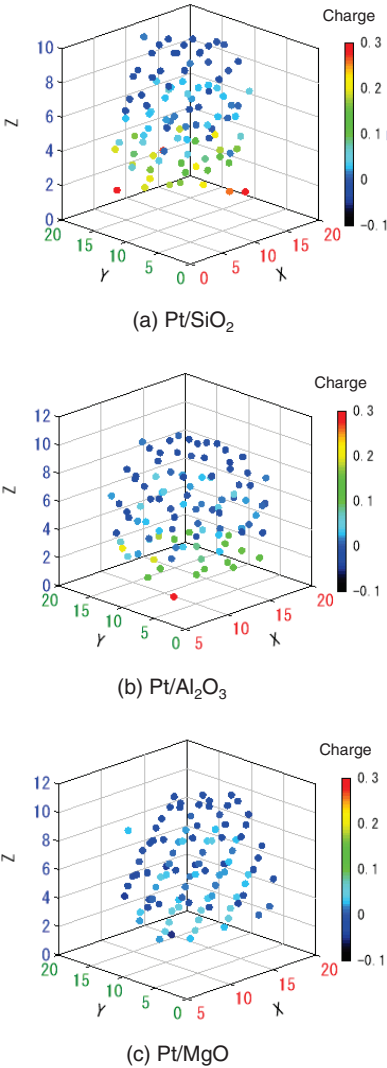


Fig. 8 Charge distribution of Pt cluster

Table 9 Charge level of Pt surface

Total charge amount	-3	-1	0	1	3
Charge level of surface Pt atom	-0.240	-0.093	-0.017	+0.060	+0.212

いた。特に Fig. 8 (a) の Pt/SiO₂ における Pt クラスタの電荷分布では担体接点付近に顕著に正電荷が局在した。これは酸性担体である SiO₂ の電子吸引効果により担体との接点付近の Pt から担体へ電子が移動したことにより Pt クラスタ下部が逆に正に帯電したためと推察される。

以上から、クラスタ担持モデルによる第一原理計算により、担体の酸性度が高いほど電子吸引効果が大きいため、Pt 粒子全体がより大きく正に帯電し、かつ界面近傍に正電荷が集中するような状態になっていることがわかった。

4.3.2. スラブモデルによる Pt への酸素分子吸着

Fig. 8 において、Pt クラスタの表面電荷状態が酸性担体と塩基性担体で異なることがわかり、特に酸性担体においては Pt クラスタの上部は負に帯電し、逆に担体近傍部は正に帯電していた。そこでこの帯電状態の違いが酸素の吸着特性に影響を与えているのではないかと推定した。まず Pt クラスタの上部や担体近傍部を再現した Pt スラブモデルを作成し、酸素吸着エネルギー比較をおこなうことで Pt クラスタの表面電荷状態が酸素吸着特性にどのような影響を与えるかを検討した。そこで Fig. 9 (a) のような Pt₃₂ 原子のスラブモデルを作成した。

次にスラブモデルの Pt 表面の帯電状態を制御するため、Fig. 9 (a) に示すようにスラブモデルに対し -3 から +3 までの電荷を投入したモデルを用い、第一原理計算を実施した。この結果、Table 9 に示すように電荷投入により、Pt スラブモデルの表面電荷を -0.240 から +0.212 の範囲で変化させることができた。また Table 8 の三つの Pt クラスタモデルにおける Pt 原子の電荷状態の範囲である -0.05 から +0.32 を、およそ再現できていることが確認でき、Pt クラスタの上部と担体近傍部の表面状態を模擬できていると考えた。

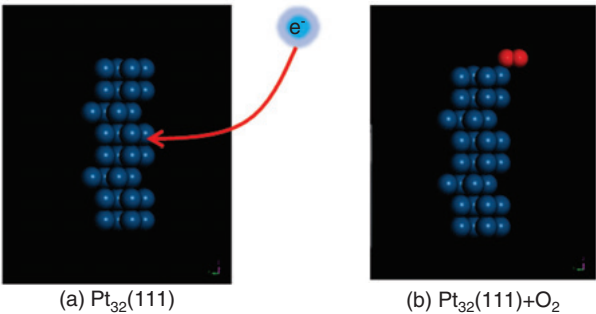


Fig. 9 Pt slab model and Pt+O₂ slab model

4.3.3. スラブモデルによる Pt への酸素吸着特性計算

次に Pt 表面電子状態が酸素吸着特性に与える影響を把握するため Fig. 9 (a) で示したスラブモデル表面に O_2 分子を吸着させたモデルを作成した。模式図を Fig. 9 (b) に示す。このモデルに対し第一原理計算をおこない、式 (2) を用いて吸着前後のエネルギー計算から、 O_2 吸着エネルギーを算出した。



この結果を Fig. 10 に示す。電荷投入量が大きいくほど ΔE_{ads} は大きくなり、電荷量 +3 においては、安定化計算後は Pt 表面から酸素が離脱してしまった。つまり、Pt 表面が正電荷になるほど酸素の吸着状態は不安定となり、吸着しにくい状態となることを示している。このことから、Fig. 8 (a) の Pt クラスターの担体近傍部の Pt 表面には正電荷が集中していたが、担体近傍部の Pt 表面は酸素吸着しにくい状態となっていると考えられ、Pt 担持酸性担体は担体近傍部の Pt 表面が高活性点となり反応を促進させると考えられる。

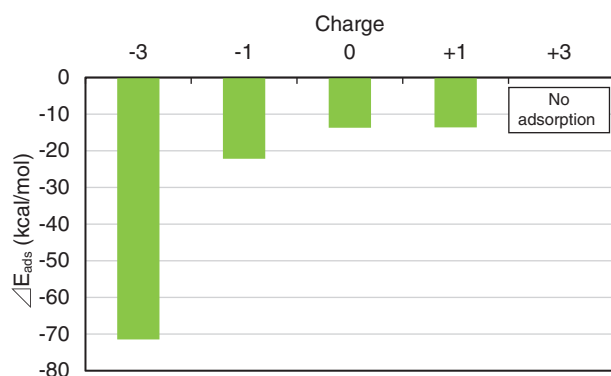


Fig. 10 Oxygen adsorption energy on Pt surface

5. 考察

これまでの結果を整理すると以下ようになる。まずモデル材料として選定した SiO_2 , Al_2O_3 , MgO を用いた Pt 担持触媒のパラフィン酸化反応は、 SiO_2 が最も TOF が高く高活性であり、酸性担体を用いることで高いパラフィン酸化性能が得られることが確認できた。また物性解析により担体の酸性度が高いほど Pt 粒子の電子状態は金属状態であり、酸素吸着が抑制できていることから、酸性担体を用いることで Pt が酸化されにくい状態に保たれることがわかった。さらに第一原理計算より酸性担体は担体近傍の Pt 表面が正電荷を帯びた状態となり、酸素吸着状態が不安定

化することから、酸素吸着が抑制されることが理論的に裏付けられた。

これらの結果から、酸性担体によるパラフィン酸化性能を促進するメカニズムを Fig. 11 のように表した。酸性担体が Pt 粒子から電子を吸引することにより、Pt 粒子は電子欠乏状態になる。この電子吸引効果は特に酸性担体と近接している Pt 原子に作用し正に帯電させるため酸素が吸着しにくくなる。この結果、パラフィンの吸着が阻害されず、パラフィン酸化反応が進行しやすくなる。このように当初推定していた反応メカニズムを活性評価、物性解析、理論計算を組み合わせることにより裏付けを得ることができた。

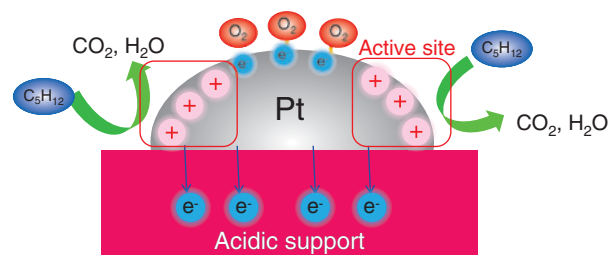


Fig. 11 Schematic image of HC oxidation on Pt supported catalyst

6. まとめ

リーンプール用 HC 浄化触媒として Pt 担持酸性担体触媒の高性能要因について、 SiO_2 , Al_2O_3 , MgO を酸性、中性、塩基性のモデル材料として選定し、活性評価、物性解析および第一原理計算によりメカニズム解明に取り組み、以下のことがわかった。

- (1) 活性評価により、担体の酸性度が高いほどパラフィン浄化性能が高いことがわかった。
- (2) 物性解析により、酸性担体上の Pt 粒子は金属状態に保持されやすく、Pt 表面への酸素吸着が抑制されることがわかった。
- (3) 第一原理計算により、酸性担体上の Pt 粒子は正に帯電しており、担体近傍の Pt 粒子表面において特に正電荷が集中することがわかった。また、正電荷を帯びた Pt 粒子表面には酸素が吸着しにくいことがわかった。

これらのことから、Pt 担持酸性担体触媒の高い浄化性能の要因は、酸性担体の電子的作用により担体に近接している Pt 表面の酸素吸着が抑制されることで、高い活性を持つことであると立証できた。

参考文献

- (1) Hanabusa, H., Kondo, T., Hashimoto, K., Sono, H., Furutani, M.: Study on Homogeneous Lean Charge Spark Ignition Combustion, SAE Technical Paper, 2013-01-2562, (2013)
- (2) Hanabusa, H., Kondo, T., Hashimoto, K., Furutani, M.: Study on Cyclic Variations of Laminar Flame Speed in Homogeneous Lean charge Spark Ignition Combustion, SAE Technical Paper, 2016-01-2173, (2016)
- (3) Takeori, H., Hosoe, H., Morita, T., Endo, T.: A Study of Aftertreatment System for Spark-Assisted HCCI Engine, SAE Technical Paper, 2015-01-2013, (2015)
- (4) Takeori, H., Wada, K., Matsuo, Y., et al.: Study of an Aftertreatment System for HLSI Lean-burn Engine, SAE Technical Paper, 2018-01-0945, (2018)
- (5) 松尾雄一, 石丸真也, 橋本雅識, 遠藤哲雄, 松蘭義明, 永田誠: リーン NO_x 触媒の劣化メカニズム解明と耐久性向上, Honda R&D Technical Review, Vol.25, No.1, p. 100-108
- (6) Hashimoto, M., Nakanishi, Y., Koyama, H., et al.: Development of Low Temperature Active Material for Three Way Catalyst, SAE Technical Paper, 2016-01-0932, (2016)
- (7) Li, L., Larsen, A. H., Romero, N. A., Morozov, V. A., Glinsvad, C., Abild-Pedersen, F., Greeley, J., Jacobsen, K. W., Nørskov, J. K.: Investigation of Catalytic Finite-Size-Effects of Platinum Metal Clusters, J. Phys. Chem. Lett. 4, p. 222-226, (2013)
- (8) Ishimoto, T., Koyama, M.: Electronic Structure and Phase Stability of PdPt Nanoparticles, J. Phys. Chem. Lett. 7, p. 736-740, (2016)
- (9) Delley, B.: An All-Electron Numerical Method for Solving the Local Density Functional for Polyatomic Molecules, J. Chem. Phys., 92, 508, (1990)
- (10) Delley, B.: From molecules to solids with the DMol³ approach, J. Chem. Phys., 113, 7756, (2000)
- (11) Vosko, S. H., Wilk, L., Nusair, M.: Accurate spin-dependent electron liquid correlation energies for local spin density calculations: a critical analysis, Can. J. Phys., 58(8), 1200-1211, (1980)

■ 著 者 ■



松尾 雄一



廣瀬 哲



竹折 浩樹



岡山 竜也

リチウムイオン二次電池のカレンダー劣化モデル開発

Development of Calendar Aging Model for Lithium Ion Rechargeable Batteries

錢 朴¹

Pu QIAN

古田 照実³

Terumi FURUTA

遠藤 広考²

Hiroataka ENDO

川合 光幹³

Mitsumoto KAWAI

要 旨

リチウムイオン二次電池の解析結果に基づいた新たな寿命予測モデルを開発した。これにより、保存時間に依存した正確な電池容量劣化状態の予測と、予測に必要な実験データ取得時間の短縮が可能となった。本モデルには、それぞれの劣化原因が電池内で起こる電気化学反応であることに着目して、温度とエネルギーの項を有するモデル式を採用した。確立した式中に必要な係数は、温度で3水準、充電深度で3水準の合計9水準で実施した加速劣化保存試験の結果から、カーブフィッティングをおこなうことにより決定した。65℃、充電深度80%の加速劣化保存試験では、得られた係数で予測した結果が実験値と一致した。本モデルを適用することで劣化した電池の充放電曲線も予測できるため、電池端子電圧からSOCを推定することへの応用が期待される。

ABSTRACT

A new life prediction model was developed on the basis of lithium ion rechargeable battery analysis results. This makes it possible to predict an accurate battery capacity fading status that is dependent on storage time and to shorten the time for acquisition of experimental data required for prediction. For this model, attention was focused on the fact that the various causes of aging are electrochemical reactions that occur within the battery, and model equations that have terms for temperature and energy were adopted for this model. The variables that are required in the established equations were determined by curve fitting with the results from accelerated calendar aging tests conducted at three temperature conditions and three state of charge conditions, for a total of nine conditions. The variables obtained from the accelerated calendar aging test conducted at 65°C and state of charge of 80% yielded prediction results that matched the experiment values. Since this model can also be applied to predict the charge and discharge curves of a battery that has aged, it is anticipated that the model can be further applied to estimate the state of charge from the battery terminal voltage.

1. まえがき

リチウムイオン二次電池の普及に伴い、充放電の繰返しによる劣化(サイクル劣化)、保存による劣化(カレンダー劣化)を問わず、劣化状態の解析と残存寿命の予測ニーズが高まっている。補修部品としてのスペアバッテリーは需要がある限り生産終了後も10年以上の長期供給が必要となる場合があり、必要な長期保管条件を設定する上で寿命予測技術が必要となる。また、非常用電源として用いる場合は長期間待機状態での機能保証が必要であるため、カレンダー

劣化による寿命予測は重要な技術である。現在、開発期間短縮のニーズにより2年程度の限定試験データから10年以上の寿命予測がおこなわれている⁽¹⁾⁻⁽⁶⁾。この場合、実使用温度より高い温度や高い充電状態(State of Charge: SOC)で加速劣化保存試験をおこない、Arrheniusの式を用いて使用想定温度領域で生じる劣化を予測する手法が用いられている。Suら⁽⁴⁾はカレンダー劣化による容量減少の結果から、劣化速度を温度とSOCの関数としてArrheniusの式に類似した式を導出した。しかし、電池の劣化は単一の要因により起きるものではない⁽⁷⁾⁻⁽¹⁰⁾ため、単一の式で

¹ 四輪 R&D センター, 博士(工学)

² R&D センターX

³ 四輪 R&D センター

劣化速度を求めることは値の正確性に課題が残ると考えられる。また、Ouyang ら⁽⁵⁾はサイクル劣化の原因を移動リチウムの損耗、すなわち正負極間を往復するリチウムイオンが Solid Electrolyte Interphase (SEI) に捕捉され、正負極間を往復するリチウムイオンが減少することと単極容量減少に分割し、それぞれの劣化速度を Arrhenius の式で表したが、C-rate の効果を表現する際に経験式の要素を取り入れた。これらいずれにおいても劣化メカニズムに基づかない経験式が含まれており^{(4), (5)}、短期間の限定試験データから長期間の寿命予測をおこなう場合の値の正確性に課題が残ると考えられる。

前報⁽⁷⁾で筆者らは高出力用リチウムイオン二次電池のカレンダ劣化メカニズムを解明し、その主な原因が移動リチウムの損耗と正極容量減少であることを明らかにした。(以降、この二つの原因を劣化メカニズムと表記する。)そこで本研究では、この劣化メカニズムに基づき物理法則に則った予測式を構築することで、短期間の実験から得られたデータを基に、より正確なセルの容量減少の予測手法を確立することを目的とした。

2. 予測モデルの構築

2.1. 従来モデル式の課題

前述したように、保存試験期間を短縮するため、加速試験をおこない、Arrhenius の式を用いて使用想定温度領域で生じる劣化を予測する手法は従来広く提案されている⁽¹⁾⁻⁽⁶⁾。しかしこれらの手法には大きく分けて二つの改善が望まれる。一つ目は、電池の容量減少を正極と負極に分けた式を適用する必要があること、二つ目は、劣化と SOC の関係を予測式に適用することである。

前者は、すでに報告⁽⁷⁾したように、電池の劣化は単一の化学反応によるものでないため、一つの式では電池容量減少を正確に表現できない⁽⁸⁾⁻⁽¹⁰⁾ことによる。後者は、Arrhenius の式が SOC との関係を明確に表現していないことによる。実際、Fig. 1, Fig. 2 に示したように正極、負極とも SOC (電位) に依存した劣化挙動を示すが、予測式が SOC に依存したものでなければ、種々の SOC 条件下で試験をおこない、SOC 依存性を取得する必要がある。試験条件削減の観点から、劣化と SOC の関係を含めた予測式が必要となる。

2.2. Arrhenius 式の SOC 依存への拡張

電池の劣化メカニズムは、電気化学反応を伴う物質の形態変化と捉えることができる。本稿で用いた電池では、移動リチウム量損耗は SEI 生成に、正極活物質容量減少は結晶構造変態に起因している。このような状態変化は、Fig. 3 (a) に示したように、Arrhenius の式により表現できる。状態 A から状態 B への遷移過程 (化学反応過程) にお

ける化学反応速度 k は、状態遷移過程における活性化エネルギー E_0 と温度 T を用いて表現されている。さらに、電極電位すなわち SOC の依存性を与えるため、Fig. 3 (b) に示したように、状態 A 側のエネルギーを外部電位 V だけ引き上げる。これにより、初期 E_0 であった活性化エネルギーは、 αV だけ小さくなる。ここで α は移動係数で 0.5 程度の値をとる。よって、外部電位 V に依存して反応速度が速くなることが期待できる。この考え方を基本にモデル式の定式化をおこなった。この SOC 依存性の考え方は Butler-Volmer の式⁽¹¹⁾の過電圧依存の表現と同じであるため、以降、この SOC 拡張した Arrhenius の式を Butler-Volmer の式として扱う。

2.3. 移動リチウム損耗のモデル式の導出

前報⁽⁷⁾で報告したように、SEI は移動リチウム、すなわ

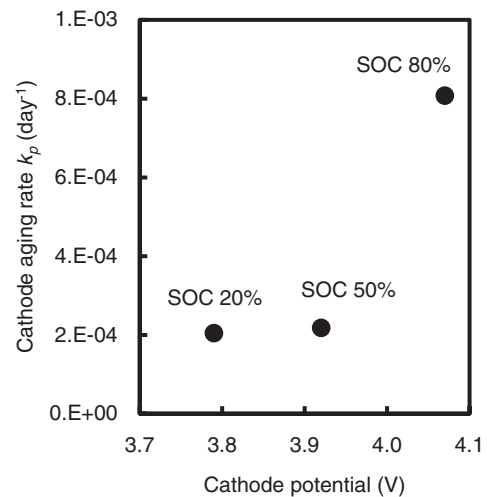


Fig. 1 Cathode aging rate. $Q_{cathode}(t) = (1 - k_p t) Q_{cathode-initial}$ (aging condition: 65°C)

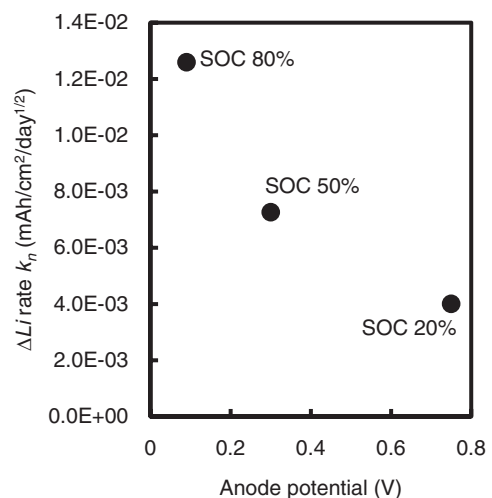


Fig. 2 Anode ΔLi increasing rate. $\Delta Li(t) = k_n \sqrt{t}$, $\Delta Li = Q_{shift} + Q_{cathode}$ (aging condition: 65°C for 100 days)

ち正負極間を往復するリチウムイオンを含む電解液成分の分解生成物が負極表面に堆積したものであり、これにより移動リチウムの損耗が生じている。この分解は電気化学還元反応によるもの^{(7), (12)-(19)}であるため、Butler-Volmerの式より、その速度は負極の電極電位、反応温度と反応物の濃度によって決まる。反応物は電解液に大量に存在し、電池生涯寿命にわたってその濃度変化が無視しうると仮定されるので、反応物の濃度は定数として扱い得る。負極の電極電位はSEIの電気伝導性を考慮し、以下の考えにより補正をおこなった。

理想的なSEIは電気的絶縁体であり、リチウムイオンのみを伝導できる固体電解質膜であるが、実電池のSEIは電解液中成分のドーピング効果によりわずかな電気伝導性があるといわれている⁽¹⁵⁾⁻⁽¹⁷⁾。リチウムイオン二次電池の緩やかなSEI成長はこのようわずかな電気伝導性に起因している。この場合、SEI成長の活性化エネルギーは

電解液成分の反応平衡電位と電極電位の差から、さらにSEIの電気伝導抵抗による電圧降下分を差し引いた値になる。反応平衡電位における活性化エネルギーの項を $E_{0,n}$ 、負極過電圧を V_n とおいた場合、活性化エネルギーはFig. 3 (b)の示すように $\alpha_n V_n$ 低下し、 $(E_0 - \alpha_n V_n)$ となる。また、SEIの厚さを x 、SEIの電気伝導率、電気抵抗率をそれぞれ σ_{SEI} と ρ_{SEI} とおくと、活性化エネルギーの項はさらに $\left[E_{0,n} - \alpha_n \left(V_n - \frac{F}{\sigma_{SEI}} x \right) \right]$ となる。ここで、 F はファラデー定数である。したがってSEI成長速度 $\frac{dx}{dt}$ はButler-Volmerの式^{(11), (15)}により式(1)で表せる。

$$v_{Li} = \frac{dx}{dt} = \frac{N_s - \Delta Li}{N_s} \frac{M_{SEI}}{F \rho_{SEI}} A_n \exp \left(-\frac{E_{0,n}}{RT} \right) \exp \left(\frac{\alpha_n V_n}{RT} \right) \exp \left(-\frac{\alpha_n F}{RT} \frac{1}{\sigma_{SEI}} x \right) \quad (1)$$

ここで t は時間、 N_s は負極中の移動リチウムのモル数、 ΔLi は移動リチウム損耗のモル数、 M_{SEI} はSEI成分の分子量、 A_n はArrhenius式の頻度因子、 R は気体定数、 T は絶対温度、 α_n は移動係数である。

ここで k_{s1} 、 k_{s2} をそれぞれ

$$k_{s1} = A_n \exp \left(-\frac{E_{0,n}}{RT} \right) \exp \left(\frac{\alpha_n V_n}{RT} \right) \quad (2)$$

$$k_{s2} = -\frac{\alpha_n F}{R} \frac{1}{\sigma_{SEI}} \quad (3)$$

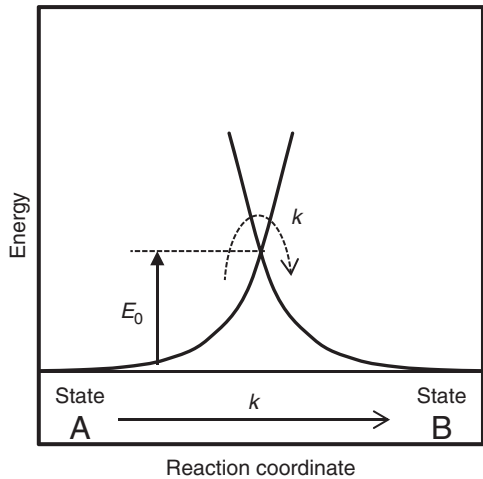
とおくと、式(1)は式(4)のように表せる。

$$v_{Li} = \frac{dx}{dt} = \frac{N_s - \Delta Li}{N_s} \frac{M_{SEI}}{F \rho_{SEI}} k_{s1} \exp \left(-\frac{k_{s2}}{T} x \right) \quad (4)$$

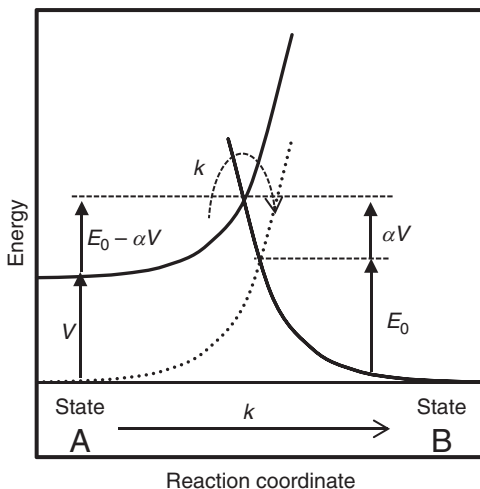
一方、 k_{s2} の項はSEIの電気伝導性を表しており、これは半導体の電気伝導メカニズムと同様と考えられる⁽¹⁵⁾。半導体では電気伝導性がキャリアの散乱に起因するため、温度の $3/2$ 乗に比例することが知られている。そのため、 k_{s2} は式(5)のように $T^{3/2}$ の関数として表せる。

$$k_{s2} = k_{2a} T^{\frac{3}{2}} + k_{2b} \quad (5)$$

上記式(1)から式(5)において、 V_n 、 T および時間 t は実験条件より設定され、変数 A_n 、 $E_{0,n}$ 、 α_n 、 k_{2a} 、 k_{2b} は電気化学測定から求められた移動リチウム損耗量からフィッティングにより求めることができる。具体的な利用データ群は3.1. 節の冒頭に記載する。



(a) Activation energy in transition from State A to State B



(b) Changes in activation energy in case of application of electric potential

Fig. 3 Potential expansion of Arrhenius law in state transition of chemical reaction

2.4. 正極活物質容量減少のモデル式の導出

正極容量減少は正極活物質の部分的結晶構造変化によるものであり^{(7), (20), (21)}, その速度 v_p は反応温度と正極電位に支配される。負極と同様に Butler-Volmer の式⁽¹¹⁾により, v_p は式 (6) と式 (7) で表せる。

$$v_p = k_p \quad (6)$$

$$k_p = A_p \exp\left(-\frac{E_{0,p}}{RT}\right) \exp\left(\frac{\alpha_p V_p}{RT}\right) \quad (7)$$

ここで, k_p は実験で求められた正極活物質の結晶構造変化速度, A_p は Arrhenius 式の頻度因子, $E_{0,p}$ は反応平衡電位, α_p は移動係数, V_p は正極電位である。負極と同様に V_p , T および時間 t は実験条件より設定され, 実験で k_p を求め, 式 (6) と式 (7) を用いたカーブフィッティングで A_p , $E_{0,p}$, α_p を求めることができる。なお, V_n , および V_p は電池の SOC-OCV (Open Circuit Voltage: 開回路電圧) 曲線から近似的に求められるため (Fig. 4), 実験条件として定めるのは SOC と保持温度 T である。

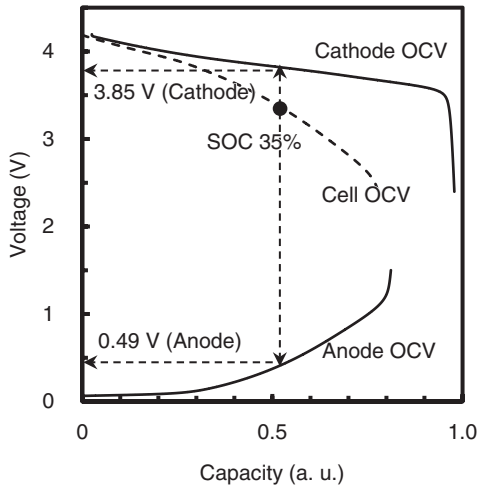


Fig. 4 Calculation of electrode potential from SOC-OCV curve

3. 解析結果および考察

3.1. 移動リチウム損耗量の予測計算

移動リチウムの損耗量 ΔLi の計算には前報⁽⁷⁾で示した電気化学測定の結果と式 (8) と式 (9) を用いた。電池の保存期間は 180 日までのものとし, SOC=80%, 50%, 20%, 温度 65°C, 55°C, 45°C の条件をそれぞれ用いた。

$$\Delta Li = Q_{shift} + \Delta Q_{cathode} \quad (8)$$

$$Q_{shift} = Q_{R, cathode} - Q_{R, anode} \quad (9)$$

ここで Q_{shift} はずれ量, $Q_{R, cathode}$, $Q_{R, anode}$ はそれぞれ正負極の残放電容量, $\Delta Q_{cathode}$ は正極容量減少値である。

式 (8) で求められた移動リチウム損耗量と, モデル式 (2) から式 (5) を用いてフィッティングすることにより, 各係数 A_n , $E_{0,n}$, α_n , k_{2a} , k_{2b} を求めることができた。検証のため, これらの値を再びモデル式に代入することにより移動リチウム損耗量の予測をおこなった (Fig. 5)。図中の各シンボルマークが実測値であり, ラインは予測値を示す。180 日以降の移動リチウム損耗量を予測した結果は実測値と一致した。この結果は, 実験期間を超えた長期の移動リチウム損耗量も予測できることを示している。

3.2. 正極活物質容量減少の予測計算

正極の容量減少値 $\Delta Q_{cathode}$ は前報で報告したように直接実測でき, その経時変化を Fig. 6 に示す。この値を用い,

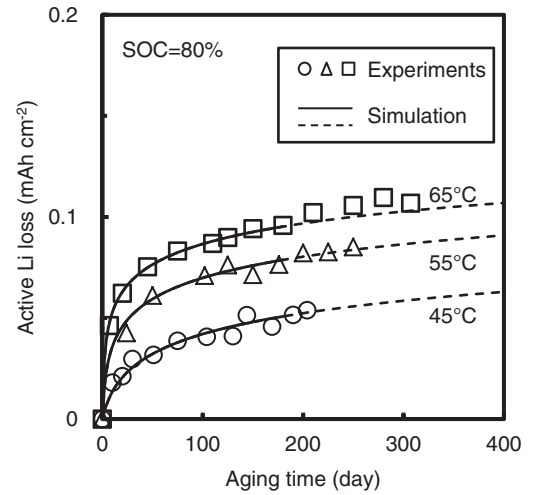


Fig. 5 Parameter fitting for active Li loss by SEI growing

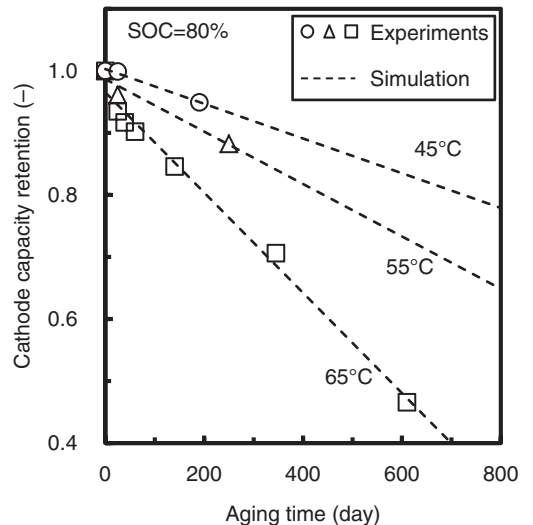


Fig. 6 Parameter fitting for cathode capacity fading

式(6)と式(7)にしたがって、カーブフィッティングすることにより各係数 A_p , $E_{0,p}$, α_p を求めた。

3.3. 電池容量維持率予測計算

3.1. 節, 3.2. 節で求めた各係数を代入したモデル式から, 所定時間経過後の正負極それぞれの充放電曲線とそのずれ量 Q_{shift} を求め, Fig. 7 の概念にしたがいフルセルの充放電曲線を再構築した。その結果, 所定 SOC, 所定温度において所定時間後の電池充放電特性および容量が予測できた。これにより容量が設定下限値を下回る, 電池寿命の予測が可能となった (Fig. 8)。Fig. 8 図中の保持温度 65°C では, 180 日までのデータから求めたパラメータを用いているが, それ以降に現れる容量維持率変化における特徴的な折れ曲がり点 (Fig. 8 中矢印) を含め 610 日までの実験結果と一致し, これを予測することができた。Fig. 5 と Fig. 6 に示した実験結果より, 温度が異なる (55°C と 45°C) 条件や SOC が異なる (50% と 20%) 条件においても, 劣化の原因が 65°C, SOC 80% 時と同様であることから, 本モデルを適用することは妥当である。これらの条件において, 容量減衰率が增大する領域まで試験をおこなっていないが, その時期を予測することができた [Fig. 8 (a)], [Fig. 8 (b)]。また, 温度 25°C の予測結果 [Fig. 8 (a)] が示すように試験をしていない条件の予測も可能である。

Fig. 9 (b) に SOC 80%, 55°C における特定日数である 453 日および 1220 日において再構築された放電曲線を示す。電池の劣化に伴い, 放電曲線も変化することが予測された。この放電曲線と電極間電圧を用いることで実情に即した SOC を推定することも可能となり, 車載電池残容量推定への応用が期待できる。

また, 本手法は長期にわたる寿命予測が可能であること

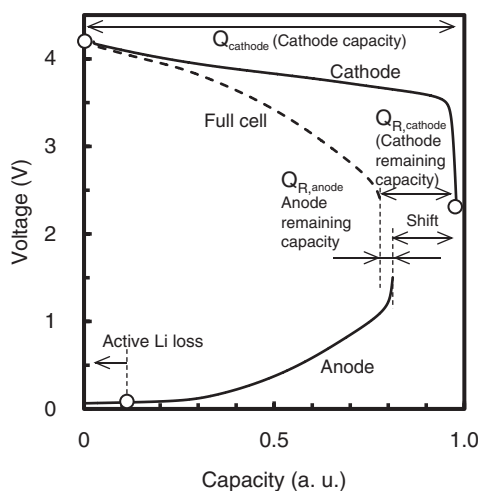


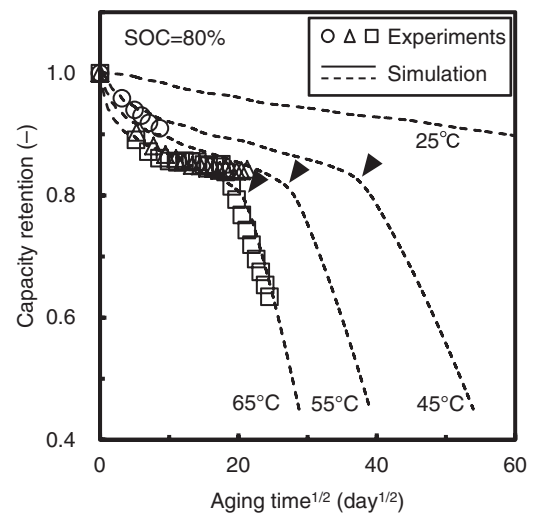
Fig. 7 Schematic drawings about cathode capacity, capacity shift between anode and cathode, and full cell capacity

から補修部品としての電池を保管する環境の制約条件の検討も可能である。例えば保管期間 15 年 (5475 日), 容量維持率 80% 以上となる制約温度, SOC を求めた (Fig. 10)。これにより, 空調管理をおこなわない場合においても保管庫の温度を想定できれば, 適切な保管 SOC を決定できる。

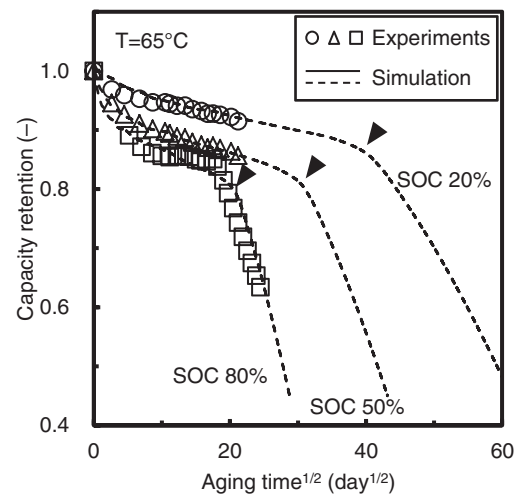
このように本モデルは物理モデルとして構築されているため, 半年程度の短期間の保存期間, およびより少ない試験工数である, 温度 3 水準, SOC 3 水準の計 9 水準で長期の寿命予測が可能となっている。

3.4. モデル化の考察

これまでに示したとおり, 構築されたモデル式に温度と



(a) Temperature variable (aging condition: SOC=80%)



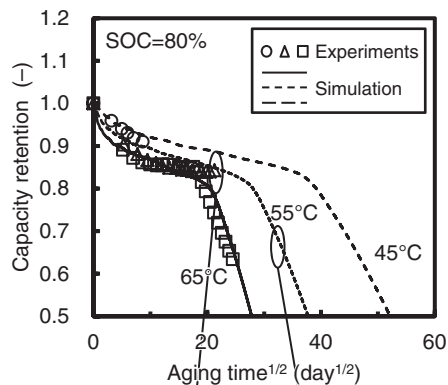
(b) SOC variable (aging condition: T=55°C)

Fig. 8 Results of capacity retention prediction by using the model developed in this work

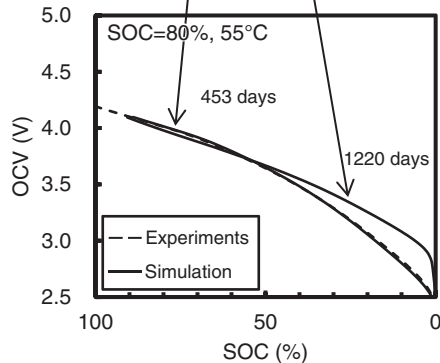
SOC を入力すれば任意の時間の電池容量と放電曲線の予測ができる。これにより、劣化マップ作成における試験数を半分に削減できる可能性がある。

また、前報⁽⁷⁾の劣化メカニズムが適用できる範囲であれば、すでに報告した高出力用電池に限らず、高容量型電池、および、サイクル劣化への適用も可能である。

一方、本モデルは実験結果を基にカーブフィッティングで係数を求めている。この場合、試験に用いた電池の個体差や測定誤差を考慮する必要がある、予測結果にも誤差が生じることを考慮する必要がある。また、温度 65℃、SOC=80% の加速劣化条件において、電気化学試験で測定された移動リチウム損耗量と予測値にわずかな不一致が見られた。この原因は正極で起きる電解液の酸化反応によって移動リチウム損耗量が相殺されることに起因していると考えられる^{(8), (22), (23)}。本モデルにおいて、この酸化反応は正極の容量減少に含めて一括で処理しているが、酸化反応速度が速い温度領域と SOC 条件においてはこの酸化反応が無視できなくなることが考えられる。予測精度をより高めるためには、今後の課題として酸化反応の項もモデル式に入れる必要があると考えられる。

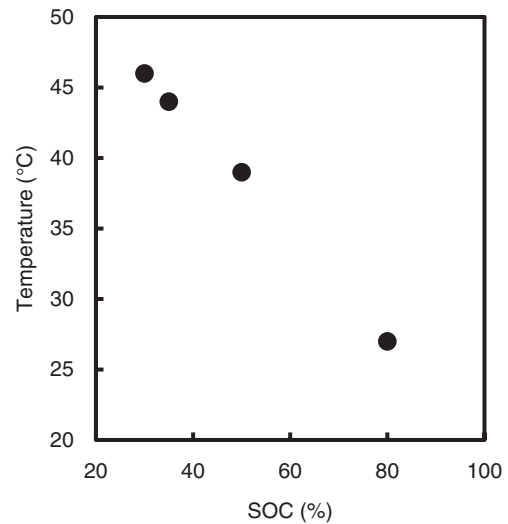


(a) Simulation results of capacity fade during calendar aging

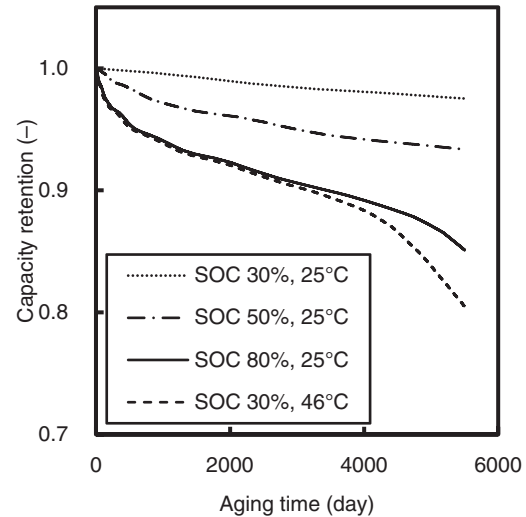


(b) Simulated SOC-OCV curves for 453 days and 1220 days at 55°C

Fig. 9 Simulation results of capacity fade and SOC-OCV curves



(a) Storage conditions that will result in a capacity retention rate of 80% after 15 years (5475 days)



(b) Simulated calendar aging results near room temperature

Fig. 10 Simulation results of temperature and SOC constraint conditions for long term storage

4. まとめ

解析結果により解明された電池劣化のメカニズムに基づいて新たな寿命予測モデルを構築した。本稿では劣化メカニズムが電気化学反応に起因することに着目し、Arrhenius の式を出発点とし、SOC (電位) を加味した予測モデルを新しく構築した。モデルの係数は実験結果を基にカーブフィッティングにより求めた。得られた係数から、劣化後の電池の充放電曲線が予測できた。その充放電曲線から電池容量を算出し、あらかじめ決められた容量下限値に達する時間、すなわち電池寿命が予測できた。本モデルは物理

モデルとして構築されているため、半年程度という短期間の加速劣化保存試験期間と、温度最少3水準、SOC 最少3水準の計9水準という限定された実験結果から求めた係数より長期の寿命予測が可能となっている。その結果、従来手法では予測できなかった容量維持率の折れ曲がり挙動も、本モデルにより予測が可能となった。これにより補修部品としての電池を保管する環境の制約条件設定等への応用が期待される。また、予測された充放電曲線と電極間電圧を用いることで実情に即したSOCを推定することが可能となり、車載電池残容量推定への応用も期待される。

参考文献

- (1) Wang, D., Coignard, J., Zeng, T., Zhang, C., Saxena S.: Quantifying electric vehicle battery degradation from driving vs. vehicle-to-grid services, *Journal of Power Sources*, Vol.332, p.193-203, (2016)
- (2) 関志朗, 三田裕一, 小林剛, 竹井勝仁, 池谷知彦, 宮代一, 寺田信之: 次世代自動車用高性能リチウムイオン電池の寿命評価試験 (第1報) - Mn系小容量セルを用いたサイクル・保存特性 -, 電力中央研究所報告, Q09023, (2010)
- (3) Zhang, Q., White, R. E.: Capacity fade analysis of a lithium ion cell, *Journal of Power Sources*, Vol.179, p.793-798, (2008)
- (4) Su, L., Zhang, J., Huang, J., Ge, H., Li, Z., Xie, F., Liaw, B. Y.: Path dependence of lithium ion cells aging under storage conditions, *Journal of Power Sources*, Vol.315, p.35-46, (2016)
- (5) Ouyang, M., Feng, X., Han, X., Lu, L., Li, Z., He, X.: A dynamic capacity degradation model and its applications considering varying load for a large format Li-ion battery, *Applied Energy*, Vol.165, p.48-59, (2016)
- (6) 石川洋明, 梅田実, 曾根理嗣, 内田勇: 市販リチウムイオン二次電池の見かけの劣化活性化エネルギーと充放電活性化エネルギーの比較, *分析化学*, Vol.62, No.11, p.1029-1035, (2013)
- (7) 銭朴, 木下智博, 酒井洋, 古田照実, 川合光幹: 高出力用リチウムイオン二次電池の容量劣化解析, *Honda R&D Technical Review*, Vol.30, No.2, p.89-98
- (8) Lewerenz, M., Marongiu, A., Warnecke, A., Sauer, D. U.: Differential voltage analysis as a tool for analyzing inhomogeneous aging: A case study for LiFePO_4 /Graphite cylindrical cells, *Journal of Power Sources*, Vol.368, p.57-67, (2017)
- (9) 小林剛, 庄野久実, 小林陽, 宮代一, 三田裕一: リチウムイオン電池劣化解析手法の開発 (I) - 正・負極電位解析による電池容量低下要因の解析 -, 電力中央研究所報告, Q10026, (2011)
- (10) 本藏耕平: リチウムイオン電池の劣化予測に向けた放電曲線の数理モデル構築, 九州大学大学院工学府博士論文, (2015)
- (11) Bard, A. J., Faulkner, L. R.: Chapter 3, Kinetics of electrode reactions, *ELECTROCHEMICAL METHODS: Fundamentals and Applications*, Second edition, Wiley, p.87-107, (2001)
- (12) Barré, A., Deguilhem, B., Grolleau, S., Gérard, M., Suard, F., Riu, D.: A review on lithium-ion battery ageing mechanisms and estimations for automotive applications, *Journal of Power Sources*, Vol.241, p.680-689, (2013)
- (13) Ziv, B., Borgel, V., Aurbach, D., Kim, J., Xiao, X., Powell, B. R.: Investigation of the Reasons for Capacity Fading in Li-Ion Battery Cells, *Journal of the Electrochemical Society*, Vol.161, A1672-A1680, (2014)
- (14) Aurbach, D.: Review of selected electrode-solution interactions which determine the performance of Li and Li ion batteries, *Journal of Power Sources*, Vol.89, p.206-218, (2000)
- (15) Peled, E.: The Electrochemical Behavior of Alkali and Alkaline Earth Metals in Nonaqueous Battery Systems--The Solid Electrolyte Interphase Model, *Journal of Electrochemical Society*, Vol.126, No.12, p.2047-2051, (1979)
- (16) Peled, E.: Film forming reaction at the lithium/electrolyte interface, *Journal of Power Sources*, Vol.9, p.253-266, (1983)
- (17) Peled, E., Menkin, S.: Review—SEI: Past, Present and Future, *Journal of The Electrochemical Society*, Vol.164, No.7, A1703-A1719, (2017)
- (18) Nguyen, D.-T., Kang, J., Nam K.-M., Paik, Y., Song, S.-W.: Understanding interfacial chemistry and stability for performance improvement and fade of high-energy Li-ion battery of $\text{LiNi}_{0.5}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.3}\text{O}_2$ /silicon-graphite, *Journal of Power Sources*, Vol.303, p.150-158, (2016)
- (19) Wang, A., Kadam, S., Li, H., Shi, S., Qi, Y.: Review on modeling of the anode solid electrolyte interphase (SEI) for lithium-ion batteries, *Computational Materials*, Vol.15, p.1-26, (2018)
- (20) Nayak, P. K., Grinblat, J., Levi, M., Wu, Y., Powell, B., Aurbach, D.: TEM and Raman spectroscopy evidence of layered to spinel phase transformation in layered $\text{LiNi}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{O}_2$ upon cycling to higher voltages,

- Journal of Electroanalytical Chemistry, Vol.733, p.6-19, (2014)
- (21) Hausbrand, R., Cherkashinin, G., Ehrenberg, H., Gröting, M., Albe, K., Hess, C., Jaegermann, W.: Fundamental degradation mechanisms of layered oxide Li-ion battery cathode materials: Methodology, insights and novel approaches, Materials Science and Engineering B, Vol.192, p.3-25, (2015)
- (22) Malmgren, S., Ciosek, K., Hahlin, M., Gustafsson, T., Gorgoi, M., Rensmo, H., Edström, K.: Comparing anode and cathode electrode/electrolyte interface composition and morphology using soft and hard X-ray photoelectron spectroscopy, Electrochimica Acta Vol.97, p.23-32, (2013)
- (23) Sinha, N. N., Smith, A. J., Burns, J. C., Jain, G., Eberman, K. W., Scott, E., Gardner, J. P., Dahn, J. R.: The Use of Elevated Temperature Storage Experiments to Learn about Parasitic Reactions in Wound LiCoO_2 /Graphite Cells, Journal of the Electrochemical Society, Vol.158, Issue 11, A1194-A1201, (2011)

■ 著 者 ■



銭 朴



遠藤 広考



古田 照実



川合 光幹

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
	伊藤 浩	二輪 R&Dセンター
	岩舘 徹	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
	桂井 隆	四輪 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
	白木 晶子	四輪 R&Dセンター
	須藤 晶	四輪 R&Dセンター
	友永 久人	四輪 R&Dセンター
	中原 淳	四輪 R&Dセンター
	中村 美香	R&Dセンター X
	西田 浩明	航空機エンジンR&Dセンター
	馬場 雅之	二輪 R&Dセンター
	藤原 良也	四輪 R&Dセンター
	山本 若登	R&Dセンター X
	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

30 年前 (1989 年) に, Honda R&D Technical Review の Vol.1 が発行されました。そこには最近では当たり前の用語 (自動運転, AI, ハイブリッド, 電動化, 燃料電池, etc.) は, もちろん見当たりません。隔世の感があります。現在の社会環境を予測できた自動車会社, 技術者は, 当時ではいなかったと思います。正確に予測する事ができない多様な時代になったということでしょうか。さらにこの先の 10~30 年で, 社会はどのように変わっていくのでしょうか。脱石油, 低炭素, 多様性といった Key Word は見かけますが, 「正解は?」となると断言することは難しいですね。「その時」にならないと「正解」は見つからないという気がします。地球温暖化, 人口増加, 食糧難といったような待ったなしの課題と向き合ってみますと, 過去 30 年より, 将来 30 年の方が, 厳しい時代であることは間違いないでしょう。

とは言え, 研究所の役割を社会に発信し, 技術の蓄積を続けるための Technical Review の発行は, 「正解」を見つける手段として必要だと考えます。読者側であった小生が, 編集側になるとは思ってもいなかったのですが, Vol.31 No.1 をお届けします。

(西田)

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.