

Honda R&D

Technical Review
Vol.32 No.2

October 2020



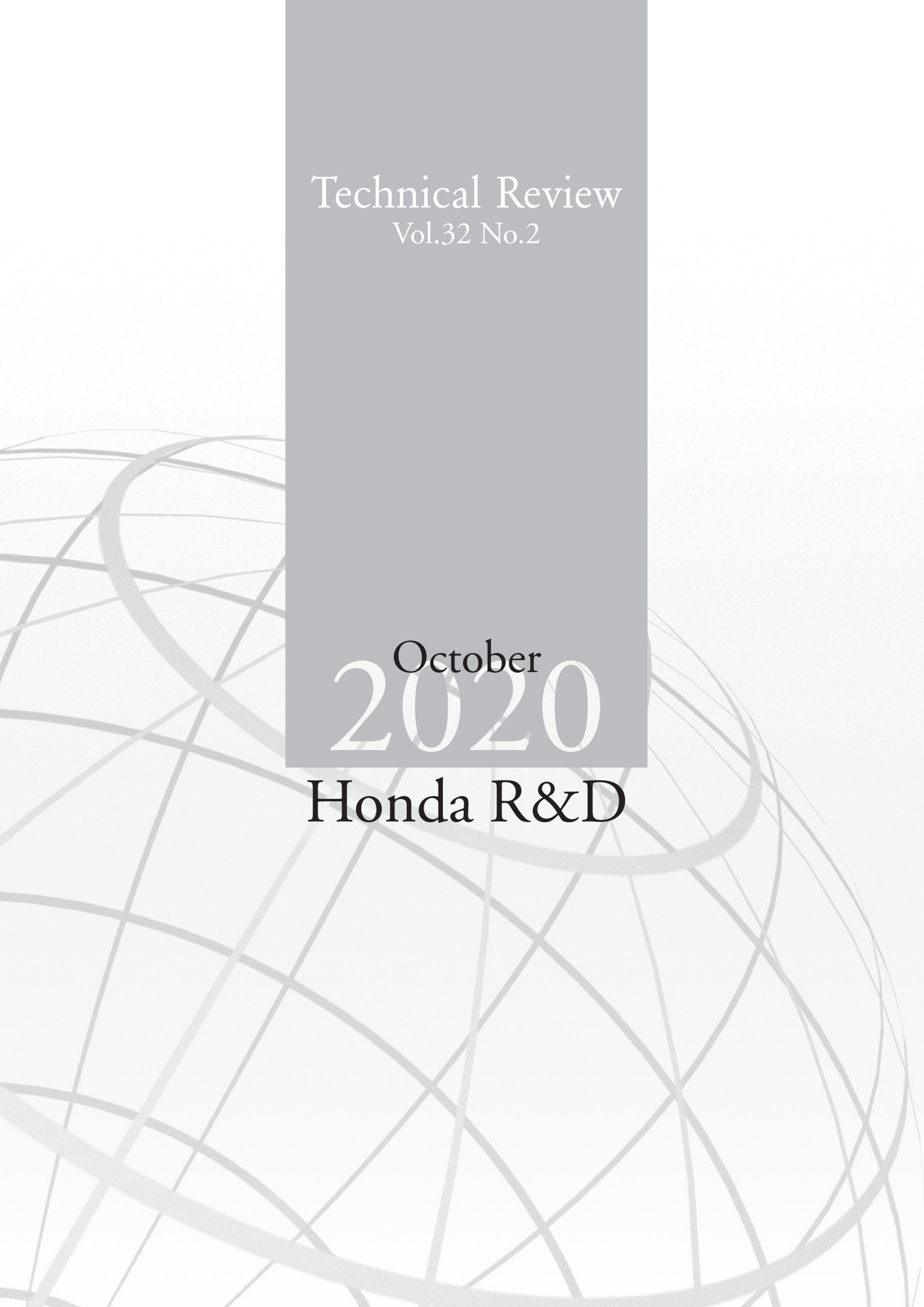
表紙の言葉

今作はN-VANの内装からスリットの要素を抽出し、抽象的な空間構成を制作しました。

スリットを多用したパネルデザインとすることで、ハードな使い方をしても傷が目立たないようになると同時に、空間の広がりを実際立たせる効果を兼ね備えています。機能的な価値と視覚的なエモーショナル価値を併せ持つことはプロダクトデザインにおいて重要な要素であり、後に技術者達の思いを込めたこの製品はマスターピースとして名を連ねることができるのだと思います。



デザインセンター
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.32 No.2'. Below this bar, the word 'October' is centered, followed by the large number '2020'. At the bottom, the text 'Honda R&D' is centered.

Technical Review
Vol.32 No.2

October
2020
Honda R&D

目次

技術紹介

- ◇ N for work 積む・運ぶ生活を豊かに広げた N-VAN のデザイン 山口真生・加藤千明
柳本佳久・石田憲行 1

- ◇ 2020 CRF1100L Africa Twin の開発 森田健二・岡田 望
岡村広志・鈴木将太 17

- ◇ 2020 CRF1100L Africa Twin Adventure Sports ES 用電子制御サスペンションシステムの開発
岡村広志・津田 剛・小河原充史 27

- ◇ 2020 CRF1100L Africa Twin Adventure Sports に搭載した二輪車用追加光源式コーナリングライト
木崎徳次郎・佐藤宏貴 35

- ◇ ニュース記事を話題にできる音声対話システム検証のための実験環境 本田 裕・高津弘明
松山洋一・小林哲則 42

- ◇ 案内ロボット運用システムの開発 西宮憲治・金子真也 51

- ◇ 小型二輪車用デバイスレススタンプル強化技術 藤久保 誠・中村洋平・井上陽介
亀田圭悟・日高葉月・及川浩信 56

- ◇ 2020 年モデル CITY 用高効率 CVT 隅田聡一郎・村上好文・中曽根牧人 69

- ◇ 2020 年モデル FIT 用小型パワーコントロールユニット 西尾仁志・近藤康彦・上野雄一郎
野中賢一・檜村之哉・武林賢一 76

- ◇ フローフォームを用いたリバースリムアルミホイールの 1 ピース製造手法
大橋正義・澤井宗美・酒井智紀
小林絵里菜・鈴木秀之・川上 穰 82

- ◇ 四輪開発業務における生産性向上のためのエキスパートの知識 経験 思考の構造化と活用
安原重人・吉本 毅・岡田英之 89

- ◇ 実験と第一原理計算およびマテリアルズインフォマティクスの統合フローによる自動車排ガス用合金触媒の探索
廣瀬 哲・三上仁志・迫田昌史
竹折浩樹・岡山竜也 97

- ◇ マテリアルズインフォマティクスを活用した高効率開発のための材料データベース
伊藤 剛・石井達子・本田 寛
杉本 直・豊岡洋一・古沢透流 107

論文

- ◇ 高容量リチウムイオン電池への三次元構造電極の適用検討 田名網 潔・磯谷祐二・青柳真太郎
奥野一樹・竹林 浩・妹尾菊雄・細江晃久 115
- ◇ HEV モータ用マグネットワイヤ絶縁被膜の低誘電率化 金子遼太郎・西山忠夫・梓沢慶介 125
- ◇ 自由記述キーワード抽出法による日本と米国の自動車ユーザ主観価値の分析
日下 馨・神田稔也・中島健彰
粥見哲也・益田綾子 132
- ◇ 屋外不整地におけるロボットの自律移動を目的とした路面の走行可否判定手法の構築
日高真太郎・根本教男 140

CONTENTS

Introduction of new technologies

◇ “N for Work” N-VAN Design Enriches Possibilities for Life with Loading and Carrying Maki YAMAGUCHI·Chiaki KATO Yoshihisa YANAGIMOTO·Noriyuki ISHIDA	1
◇ Development of 2020 CRF1100L Africa Twin	Kenji MORITA·Nozomi OKADA Hiroshi OKAMURA·Shota SUZUKI
17	
◇ Development of Electronically-controlled Suspension System for 2020 CRF1100L Africa Twin Adventure Sports ES Hiroshi OKAMURA·Tsuyoshi TSUDA·Atsushi OGAHARA	27
◇ Cornering Lights of 2020 CRF1100L Africa Twin Adventure Sports Using Additional Light Source Tokujiro KIZAKI·Hiroataka SATO	35
◇ Experimental Environment for Verification of Speech-based News Delivery System Hiroshi HONDA·Hiroaki TAKATSU Yoichi MATSUYAMA·Tetsunori KOBAYASHI	42
◇ Guide Robot Management System.	Kenji NISHIMIYA·Shinya KANEKO
51	
◇ Development of Deviceless Tumble Enhancement Method for Small Motorcycles Makoto FUJIKUBO·Yohei NAKAMURA·Yosuke INOUE Keigo KAMEDA·Hazuki HIDAKA·Hironobu OIKAWA	56
◇ Development of High-efficiency CVT for 2020 Model Year CITY Soichiro SUMIDA·Yoshifumi MURAKAMI·Makito NAKASONE	69
◇ Small Size Power Control Unit for 2020 Model Year FIT Hitoshi NISHIO·Yasuhiko KONDO·Yuichiro UENO Kenichi NONAKA·Yukiya KASHIMURA·Kenichi TAKEBAYASHI	76
◇ Development of One-piece Reverse Rim Aluminum Alloy Wheel Using Flowforming Process Masayoshi OHASHI·Muneyoshi SAWAI·Tomonori SAKAI Erina KOBAYASHI·Hideyuki SUZUKI·Minoru KAWAKAMI	82
◇ Modeling and Utilizing Expert’s Knowledge, Experience, and Thinking in Automobile Development Shigeto YASUHARA·Takeshi YOSHIMOTO·Hideyuki OKADA	89
◇ Search for Alloy Catalyst for Automobile Exhaust Gas by Means of Integrated Flow of Experiments, First-principles Calculation, and Materials Informatics Satoshi HIROSE·Hitoshi MIKAMI·Masafumi SAKOTA Hiroki TAKEORI·Tatsuya OKAYAMA	97
◇ Material Database for Efficient Development Using Materials Informatics Tsuyoshi ITO·Satoko ISHII·Hiroshi HONDA Nao SUGIMOTO·Yoichi TOYOOKA·Toru FURUSAWA	107

Technical papers

- ◇ 3D-structured Cathode Electrode for High Capacity Lithium-ion Battery
..... Kiyoshi TANAAMI・Yuji ISOGAI・Shintaro AOYAGI
Kazuki OKUNO・Hiroshi TAKEBAYASHI・Kikuo SENOO・Akihisa HOSOE 115
- ◇ Low Relative Permittivity of Magnet Wire Insulation Coating for HEV Motor
..... Ryotaro KANEKO・Tadao NISHIYAMA・Keisuke AZUSAWA 125
- ◇ Analysis of Subjective Values of Car Users in Japan and U.S. Using Free Description Keyword Method
..... Kaoru KUSAKA・Toshiya KANDA・Takeaki NAKAJIMA
Tetsuya KAYUMI・Ayako MASUDA 132
- ◇ Traversability Analysis for Mobile Robot Navigation in Rough Terrain
..... Shintaro HIDAKA・Norio NEKI 140

N for work

積む・運ぶ生活を豊かに広げた N-VAN のデザイン

“N for Work”

N-VAN Design Enriches Possibilities for Life with Loading and Carrying

山口 真生¹

Maki YAMAGUCHI

柳 本 佳 久¹

Yoshihisa YANAGIMOTO

加 藤 千 明¹

Chiaki KATO

石 田 憲 行¹

Noriyuki ISHIDA

要 旨

N-VAN は ACTY VAN の後継車として 19 年ぶりにフルモデルチェンジされた軽バンである。Honda は創業以来、お客様の生活を豊かにするための体験価値を追求してきた。Honda Design では、これをエクスペリエンスデザインと呼び、お客様の体験価値をさらに深く考えてクルマをデザインしている。N-VAN の開発においても、このような考えに基づき、お客様の理解を深めるために働く人や荷物を積む・運ぶ人たちの現状をリサーチした。デザイナー自らパッケージモデルを使い、どのような荷物をどう積むか、積みこむときの問題は何か、苦勞するポイントはどこか、などを体感・体験する試行錯誤を重ねた。その結果、機能を重視するお客様と、機能に加えスタイルも主張したいお客様の二通りがあると考えた。まず機能を重視するお客様に対し、身体になじんだ使いやすい道具のようになる、「積む運ぶ生活の道具」というコンセプトを掲げた。そして「自在感」「安心感」「しっかり感」「機能美」の四つのキーワードを中心に、ベースとなる G および L グレードをデザインした。この G および L グレードを基盤として、機能に加えスタイルも主張したいお客様の個々の世界観に応えるために、+STYLE グレードを設定した。この二つのグレードで、毎日の積む・運ぶ生活になくてはならない道具になるような、新しい軽バンの新基準を創出した。

ABSTRACT

The N-VAN is a microvan that as successor to the ACTY VAN represents the first full model change in 19 years. Since the time of its founding, Honda has pursued experiential value that would help enrich customers' lives.

Honda Design refers to this as experience design and engages in vehicle design that ponders ever more deeply about the customer's experiential value. N-VAN development was also based on this kind of thinking, and in order to reach a deeper understanding of the customer, research was done into the actual circumstances of people who work and people who engage in loading and carrying cargo. The designers themselves worked with package models and went through repeated trial and error to experience directly how different cargo would be loaded, what kinds of issues would be encountered when loading, what points people would have challenging with, and so on. As a result, it was decided that customers are of two types, those who emphasize functionality and those who also like to emphasize style in addition to functionality. First, for customers who emphasize functionality, the concept of “a tool for a life that involves loading and carrying things” was determined, with the idea that the vehicle would become like a familiar tool that is easy to work with. The base G and L grades were designed around the keywords of “a feeling of flexible usability,” “a feeling of unstressed security,” “a feeling of solid stability,” and “beautility.” With these G and L grades as a foundation, another grade called +STYLE was configured to support a world view of each customer who places importance on style in addition to functionality. With these two grades, a new standard was created for a new microvan that becomes an important tool for everyday lives that involve loading and carrying things.

1. はじめに

N-VAN は、19 年の長きにわたりお客様に愛されてきた ACTY VAN をフルモデルチェンジした軽バンである。軽自動車 N シリーズの展開は、N-BOX はファミリー、N-WGN はパーソナル、N-ONE はカップル向けと、お客様の用途に合わせ、軽カテゴリ全方位に車種を配置する計画である。N-VAN はこの第 6 弾であり、商用と趣味層をねらう軽バンとして開発された。

開発を始めるにあたり、軽バンのマーケティングリサーチをおこなったところ、19 年前とは状況がかなり変化し

ていることがわかった。軽バンを使ったビジネスとして、大きく変化があったのは、インターネット販売の普及によって小口配送の増加がみられたことや、車両を商店として活用する新しい移動ビジネススタイルや、移動ビジネスに場所を提供するビジネスの広がりなどである。こういった変化に伴い、従来のユーザ層は中高年男性が多いと想定していたが、女性や高齢者、個人で起業する若者などが増えていることがわかった。

また、軽バンに求められるものもただの商用車から変化しており、おしゃれに働きたい、体に気遣って働きたい、楽に運転したい、狭い路地でも歩行者に対し威圧感を与え

¹ デザインセンター

ない、などの要望があった。また、自動車への社会的要請として、お客様の安全志向の高まりにも応える必要がある。こういったことを、足を使ったりリサーチやグループインタビューなどを何度も繰り返すことで体感、理解した。19年前はいかに荷物を多く積めるかが勝負であったが、今の現場は荷物の積載性を求めながら作業効率を上げたい、身体を気遣って働きたい、高い安全性が欲しい、といった

人へのやさしさや配慮が大切だと理解した。

このようなリサーチから Fig. 1 に示すように、N-VAN のグランドコンセプトとして「日本の積む・運ぶ生活のために」を掲げた。機能を重視して働く人に加え、スタイルを気にして働く人の生活が豊かになることを追求し、使い切り空間、スムーズな走りと燃費、人へのやさしさという三つの柱をテーマとし、次世代軽バンの新基準となることを目指した。



Fig. 1 Base concept

2. 積む運ぶ生活の道具のコンセプト

Honda は従来より、お客様の生活を豊かにするため体験価値を追求するデザインをおこなってきた。お客様の期待を理解し、実際の行動や体験において提供価値を実感していただく体験価値デザインを、Honda ではエクスペリエンスデザインと呼んでいる。このエクスペリエンスデザインを今まで以上に進化させることで、お客様への提供価値をさらに高めることを目指している。

通常のデザイン開発では、パッケージ、インテリア、エク

ステリアと個々にデザインを進めるが、N-VAN ではこのエクスペリエンスデザインの考えに基づき、お客様の体験価値をさらに深く考えたトータルデザインをおこなった。車が毎日の積む・運ぶ生活になくってはならない、身体になじんだ使いやすい道具ようになる。そんな体験価値を提供しようと決め、「積む・運ぶ生活の道具」を共通コンセプトとした。

まず、車の骨格を作り出すパッケージデザインとインテリアデザインは、Fig. 2 に示すように「積む・運ぶ生活の道具」を「自在感」「安心感」「しっかり感」の三つで表現しようと考えた。



気持ち良くはたらける、使いやすくうれしいなる
Users can work well and feel happy about ease of use

積む・運ぶ生活の道具

Tool for a life that involves loading and carrying things

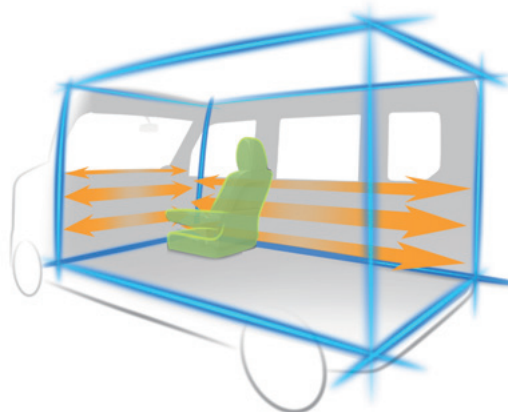


Fig. 2 Experience of N-VAN design concept

2.1. 自在感

お客様のとにかく積みたい、効率を上げたい、という気持ちに応えるため、Fig. 3 に示すように低床大空間、助手席側ピラーレス、助手席ダイブダウンを採用した真四角な

大容量空間を実現した。車の外まで動線と考えた助手席側大開口とリヤ側大開口で、さまざまな使い方が可能な自在性を感じる空間を創出した。

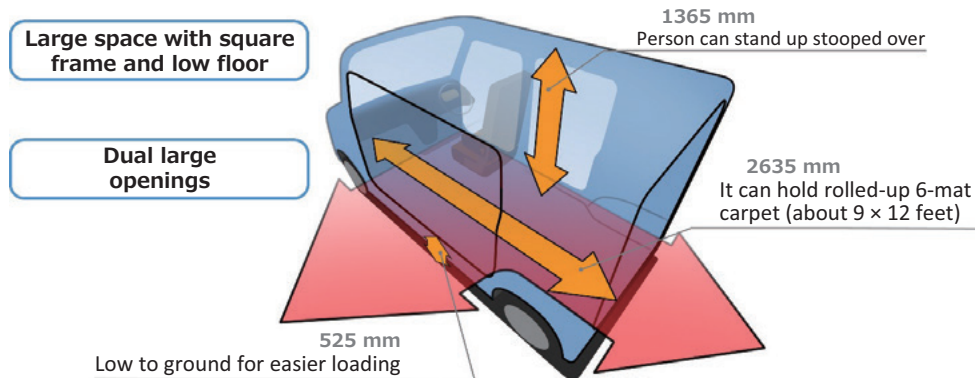


Fig. 3 Space that gives feeling of flexible usability

Fig. 4 に示すように床面の地上高が大きくなる ACTY VAN の MR レイアウトより、FF レイアウトの方が荷室空間の天地が広くとれるため、N-BOX の FF プラットフォームを用いた。

さらに商用イメージを超えたスタイルを提案することで、軽バンの使い勝手の可能性を大きく広げることができると考えた。

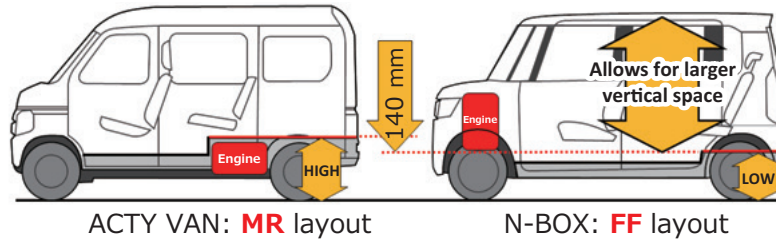


Fig. 4 FF layout

今までの積む・運ぶを超える次世代の積む・運ぶ空間について、パッケージモデルを使い、本当に使えるのか、どう使うのか、などを検証するために Fig. 5 のようにチームメンバーが自ら体感する 3 次元のワイガヤをおこなった。

Honda には、机上の空論ではなく実際に「現場」に赴き「現物」を確認し「現実」を直視した上で問題解決を図る三現主義という考え方がある。この三現主義に基づくことで、結果として真四角な低床大空間が具現化できた。



Fig. 5 Package models used in 3D Y-gaya discussions to find ways of “using space completely”

さらに、このワイガヤで、従来のフロント乗員位置後方を荷室と考えた空間の使い方を覆す、助手席ダイブダウンシートを考案した。Fig. 6 に示すように、助手席側フロアを

フラットにすることで、助手席足元からテールゲートまで 2635 mm もの長尺物が入る水平な荷室空間が実現できた。

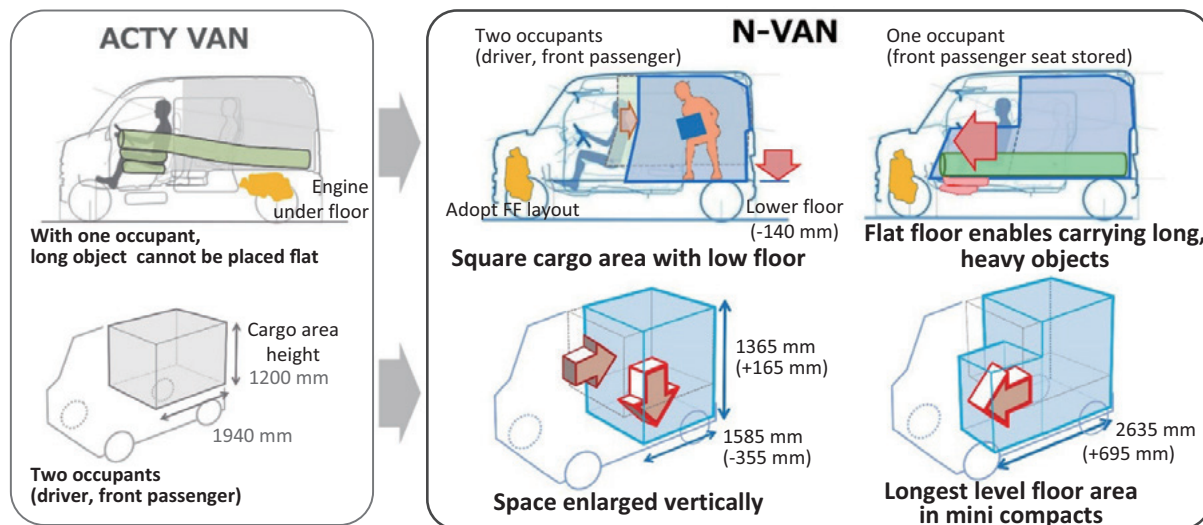


Fig. 6 Different ways to use space

また、助手席側のピラーをドア側に移し、側面が大開口になる骨格とした。これにより Fig. 7 に示すように、積み・運ぶにおける従来の後ろ側の動線に、助手席側からの新たな動線を加えた。同時にアクセスできる二つの動線を実現することで、歩道側からの安全な積み下ろしや移動店舗の

カウンタとしての利用、後方が狭い駐車スペースのテールゲートを開けられない場所での車内外へのアクセスなど、さまざまなシーンでまったく新しい自在な使い勝手を創出した。



Fig. 7 Conceptual images of uses for new lines of flow and dual large openings

さらに Fig. 8 に示すように、板で柵などが作れるようにユーティリティーナットを多数組み込んだ垂直な鉄板平面を設定した。助手席ダイブダウン時にドライバーの足元への物の飛込みを防止するペダルスタック防止ボードを追加した。

また、夜の作業も安全におこなえるよう、助手席側大開口の外までを照らせる位置にルームライトを設定した。さらに、荷物フックを使い勝手の良い配置にするなど、徹底的に機能性を追求した。



Fig. 8 Comprehensive functionality enhancements

この自在な空間により Fig. 9 に示すような、建築内装部材やオートバイなど長くて重い物の積載や、車内で接客

も可能な店舗やオフィスとしての活用など、さまざまな積む・運ぶ生活としての活用が可能となった。

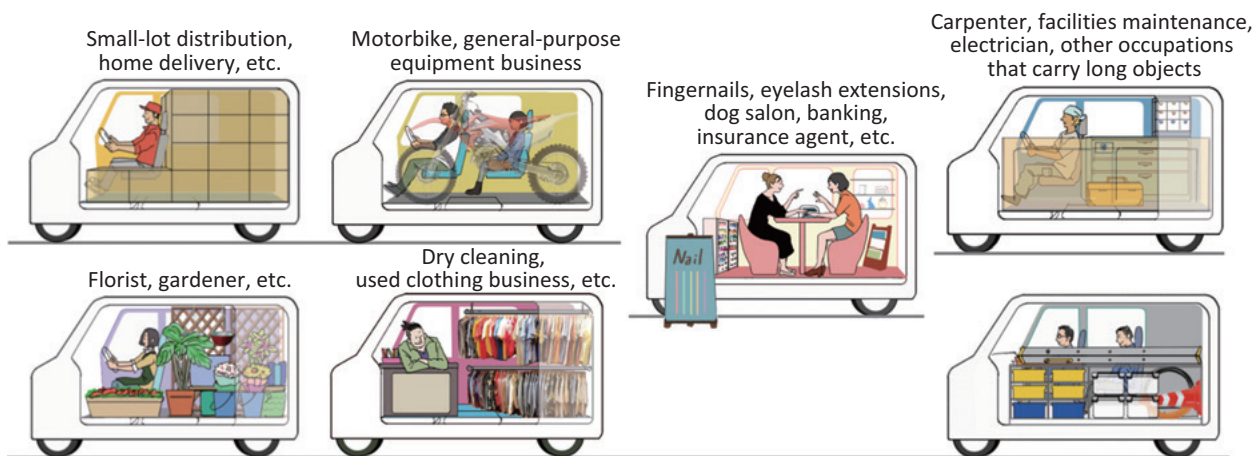


Fig. 9 Conceptual images of uses for large space with low floor

2.2. 安心感

宅配などの仕事で軽バンを使う場合、街中での運転はストップ アンド ゴーが繰り返され、乗り降りの回数も多くなる。このような動作を一日中繰り返すドライバーにとって、使いやすく疲れにくい乗車環境を検討した。その結果

Fig. 10 に示すような、体の軸を整えた状態で保持するヨガのようなイメージを考えた。これを運転姿勢の方向性として定め、高齢者や小柄な女性にも応えられ、姿勢が崩れない、身体への気配りの行き届いた運転席を目指した。

"Maintaining good posture" as in yoga pose

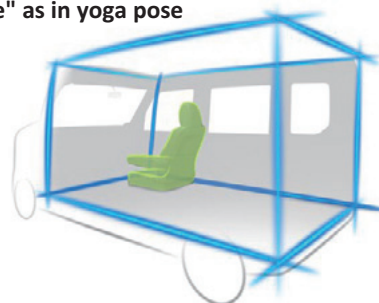


Fig. 10 Driver's seat with sense of unstressed security

ペダルについては、FF レイアウトの採用により相対的にフロントタイヤを前方に移動させることで、Fig. 11 に示すようにドライバにより正対する位置にレイアウトした。

Driving position on par with passenger cars

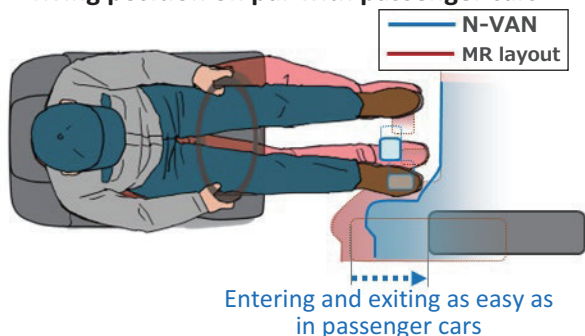


Fig. 11 Driver's seat helps maintain good posture

ヒップポイント設定は、Fig. 12 に示すように腰の上下方向の移動が少なく乗り降りがしやすい位置にした。

Hip-point for less movement by the center of the body

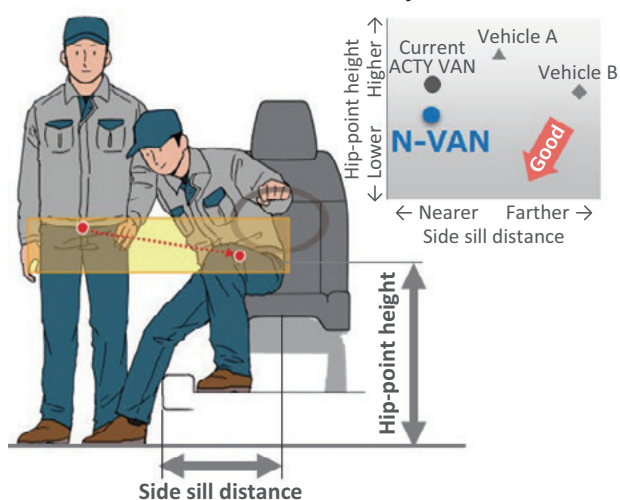


Fig. 12 Greater ease of access

シートのデザインでは、Fig. 13 に示すように運転席については身体への気配りが行き届いた安心感と商用としての機能性を重視した。他の3座は低床のフラットな隙間のない床面を作り出すためのデザインをおこなった。

Driver's seat provides feeling of unstressed security and functionality

Three passenger seats give balance of seating comfort and low-floor utility



Fig. 13 Seating by function

運転席のシートは身体へのやさしさと商用としての機能が体感できることが大切である。そこで乗用車と同等の、ゆったりしたサイズのシート骨格を使用した。さらにデザイナーが実際にシートのウレタンを削り、何人もの人に座ってもらいまた削るというように、三現主義に基づいたデザインをおこなった。最終的にシートバックの下部は、体の横揺れをしっかり抑え、腰痛が軽減できるボルスタ形状とした。その形状はFig. 14 に示すように、CIVICのTYPE Rと同様のしっかりと腰を固定するデザインになった。また上部は、後方確認の振り返りがスムーズにおこなえるように形状をフラットにした。シートクッション外側は、毎日200回も乗り降りするような宅配業務などを考慮し、楽な乗り降りが可能なように高さをできるだけ低くおさえた。

乗り降りでこすれる部位には縫製箇所を設定しないように、クッション上面からクッション下部にかけて一枚の表皮を張って破れにくくした。



Line of hip area
N-VAN
CIVIC TYPE R



Fig. 14 Comparison of seat-back sections

さらに休息中に心地よく休息できるよう、Fig. 15 に示すような大型のヘッドレストとフルリクライニング機構も採用した。また楽に運転できるように上級グレードには大型のアームレストを設定した。また、車内での書類作成や食事などに役立つよう、助手席をテーブルとして使用できる。

新しい機能が付与されたダイブダウンシートの操作部は、使い方がわかりやすく、暗い所でも見やすくするために、レバーやストラップをオレンジ色にした。このように誰でも運転しやすい、ずっと働ける安心感のある運転席を実現した。



Fig. 15 Front seats

働く人達が傷だらけの内装の車に乗っていると、仕事の依頼主からの信用を落としてしまう可能性がある。そこで、Fig. 16 に示すようにドアとライニングの表面のテクスチャを上下で分け、人が触れる上側には肌触りの良い皮調のテクスチャを、荷物が直接当たり傷つきやすい下側には

梨地のテクスチャを採用した。

さらに Fig. 17 のように、表面に凹凸のスリット形状をつけることで、平らな面と比較して傷が目立たないような配慮をした。

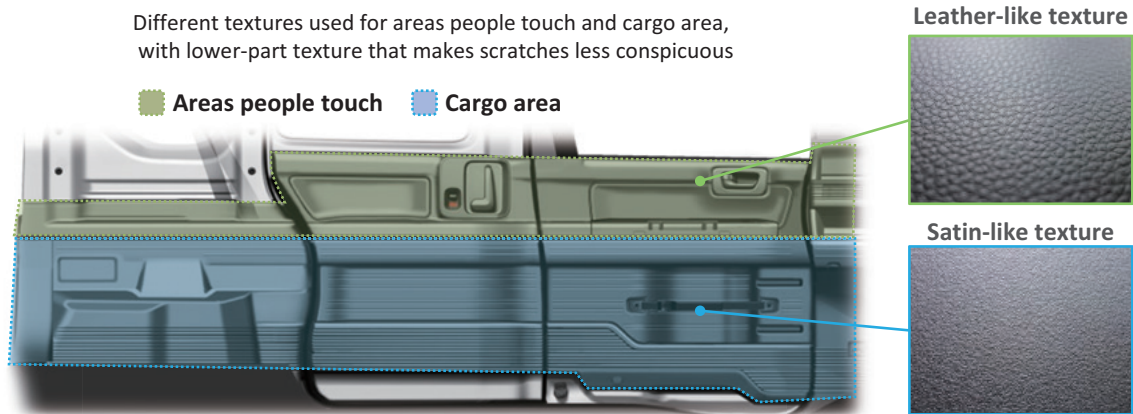


Fig. 16 Measure 1 to keep appearance attractive longer

Scratches stand out on flat surface

Stripes help prevent scratches from cargo

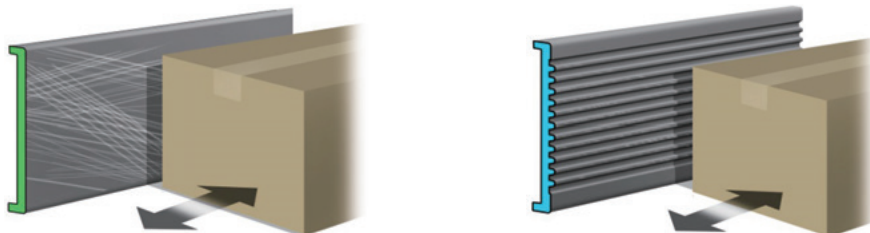


Fig. 17 Measure 2 to keep appearance attractive longer

カラーバリエーションはお客様の使い勝手に合わせた2種類を用意した。Gグレードのインテリアカラーは、法人を初め会社所有の車両として使用されることを考えた。そこで Fig. 18 に示すように、さまざまな人が自由に使用しても傷が目立ちにくく、広さを感じ、いつまでも安心して

気持ちよく使用できるグレー内装とした。

Lグレードのインテリアカラーは個人所有の車両として丁寧に使用されることを考えた。クリーンな道具イメージをねらって、清掃しやすく汚れの沈着を目立たせないダークトーン内装とし、安心感を表現した。

G grade: Grey interior finish for spacious feeling and making scratches unnoticeable



L grade: Dark tone interior finish makes even accumulated grime unnoticeable



Fig. 18 Interior color variations

2.3. しっかり感

市場のリサーチから、もっと収納が欲しいというお客様の要望を把握した。そこでインストルメントパネルやトリム周りを、整理整頓できる棚とすることを考えた。

棚の厚みが薄いと堅牢さに欠け弱々しく見えるため、道具としての魅力に欠ける。そこで、Fig. 19 に示すように棚にしっかりとした厚みのある梁を通すべくスタイリングを進めた。

Thin shelves seem flimsy, lack robustness



Thick, solid shelves look robust



Fig. 19 What robust shelves are

お客様の業務では A4 サイズ程度の資料を使うことが多いので、まず A4 サイズが載るトレイとティッシュボックスが入るポケットを設定した。それらを起点に Fig. 20 に示すようにアッパー、ミドル、ロアに一本ずつしっかり感のあ

る梁を通した。この横に通した三本のしっかりとした梁のモチーフの流れを、ドアからサイドライニング後端まで通し、インテリア空間が梁で囲まれたデザインとした。これらにより道具の持つ堅牢なしっかり感を空間全体で演出した。

Balancing solid stability of shelves with that of tools

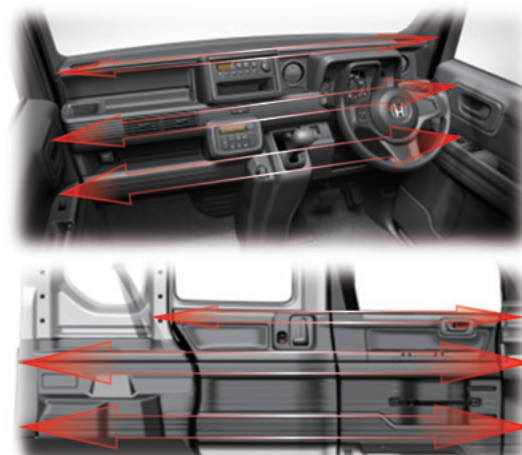
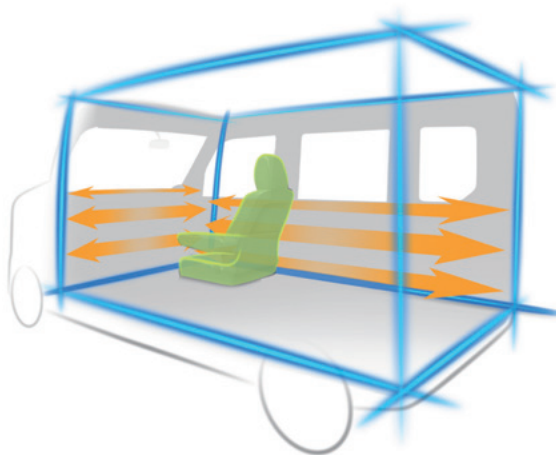


Fig. 20 Three beams expand across the entire area for a feeling of solid stability

コンセプトに忠実に、自在感、安心感、しっかり感を表現することで、空間全体が積む運ぶ生活の道具という一つの使いやすさを感じる塊のようなデザインとなり、自在に

使えそうな、安心してずっと働けそうな、長い間使えそうな、体験価値を感じることができる、Fig. 21 に示すようなエクスペリエンスデザインインテリアを創出できた。



Fig. 21 Interior as a whole

2.4. エクステリアデザイン

エクステリアスタイリングは、身体になじんだ使いやすい道具でありたいという「積む運ぶ生活の道具」をコンセプトに、Fig. 22 に示すような二つのキーワードを定めた。一つは、プロの道具として、積める、使えるといった「機能美」、もう一つは、使う人だけでなく、周囲にも安全、信頼を与える「安心感」である。これをエクステリアスタイリングコンセプトとし、機能と安心感を融合させたデザインで次世代の積む、運ぶを表現した。これらのコンセプトを基に、まず無駄を省きシンプルに機能が表現できることを心

がけてデザインした。究極の姿は重機や工作機器によく見られる、機能重視で割り切った角張った道具感である。しかし、それでは威嚇するような強さが出てしまう。軽バンは宅配などの仕事で狭い路地などに入っていくことが多いため、歩行者への威圧感が無い方が良い。そこで道具感を漂わせながらも周りの人にも安心感を与えるバランスを追求した。Fig. 23 に示すように、いかにも商用車という簡素な感じでもなく、乗用車のようなスタイリングでもない、機能と安心感を融合させたエクステリアデザインを完成させた。



Fig. 22 Exterior concept



Fig. 23 Simple design fusing functionality and feeling of unstressed security

また、たくさん積めることの表現も検討した。その結果がスクエアフォルムである。たくさんの荷物が積みそうな四角い箱状のスクエアフォルムをつくるために、Hondaでは今までなかったフラットなボデーパネルが必要とされた。フラットな形状にすると、そのままでは強度を保つために厚い鉄板が必要である。そこで、3本のビードを入れることで強度を確保した。Fig. 24の右側の図はフロントドアの断面をデフォルメしたものである。一つの大きな面で作ると強度が弱くなるため、大きく三つの面で構成した。上部と下部の角R部を真ん中の3本ビードでつなげた。一見シンプルでフラットに見える大きな面だが実は複雑な面構成でできている。このように、特徴的な3本ビードはデザインだけでなく機能から生まれたものである。このビードデザインのモチーフはジュラルミンのスーツケースで、実際の強度とともにデザイン的な強さ感や傷の目立ちにくさをねらっている。また、商用車の場合、会社や店舗の名前、マークなどをボデーにペイントするケースが多い。そこで、開発中にお客様の意見を聞くなどビードの凹凸によるマークなどの見え方を検証した。

たとえ擦りキズが付いた場合でも、ビードの凸部分が削れる程度ならマークなどへのダメージが少ないといった意見を頂き、それを考慮し凸形状を設定した。

ルーフ形状も軽量化のため、板厚を薄くしている。お客様が洗車する際に脚立に乗って手をつくポイントを見極め、箱型デザインとして丸くなりすぎないギリギリの丸みで強度を持たせられるようボデー設計部門と調整しながら最適な形状をつくり上げた。フロント廻りのデザインも「機能」と「安心感」の両立を検討した。威圧感のない誠実で端正な顔で周りの人に安心感を与えたいと考えた。お客様はヘッドランプを目、ラジエータ開口を口と擬人化して捉える傾向が強い。そこでヘッドライトは大きく水平基調で優しさを表現し、ラジエータ開口部も水平基調で必要最小限の大きさにとどめ、端正な表情を作った。またヘッドライトは表情だけでなく、Fig. 25に示すように安全性を第一に考えデザインした。ヘッドライトを極力高い位置に配置し、大きく、明るく光るようにリフレクタを設計した。ターンシグナルはより上側、より外側で光るようにした。

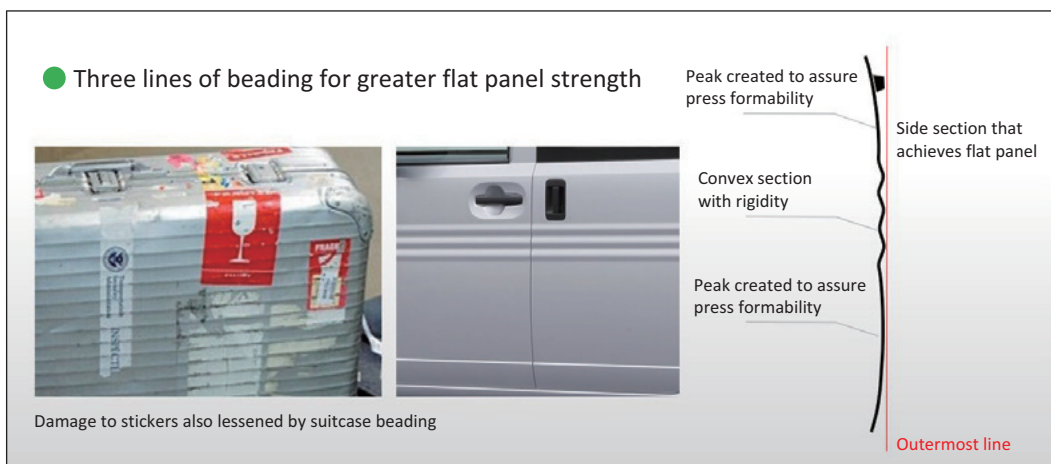


Fig. 24 Design with three lines of beading born from function

ポジションランプは外側までライン発光させて車幅をしっかりと見せ、被視認性を向上させた。また、ラジエータ開口を最小限にとどめることで空力を向上させ、燃費向上へ貢献した。リヤは大開口テールゲートを実現するために、Fig. 26 に示すようにコンビネーションランプを縦型とし、可能な限り細くして開口を広げるデザインとした。

また、軽バンのリヤコンビネーションランプはリヤバンパなど下の方に配置するのが定石となっている。しかし安全性を考慮し、後方の車両からの視認性を高めるために、LEDを使った極細デザインとすることで高い位置に配置した。よって機能と安心感を融合させたシンプルデザインを作り上げた。

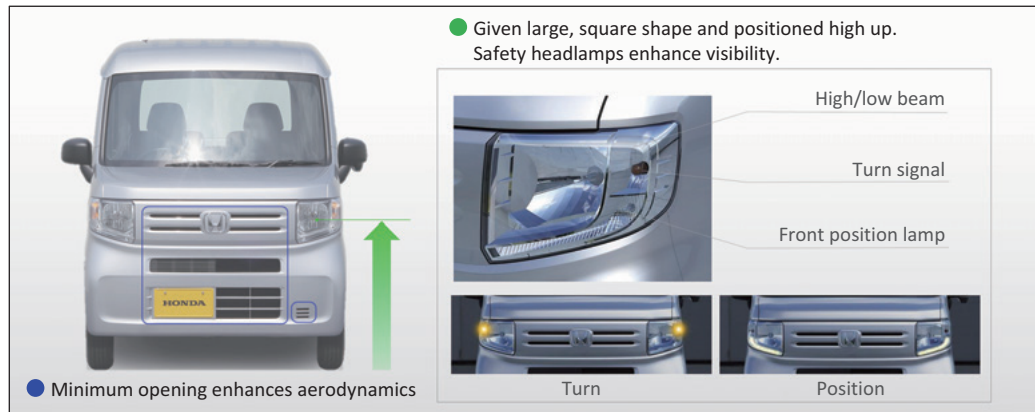


Fig. 25 Lights designed with primary concern for safety

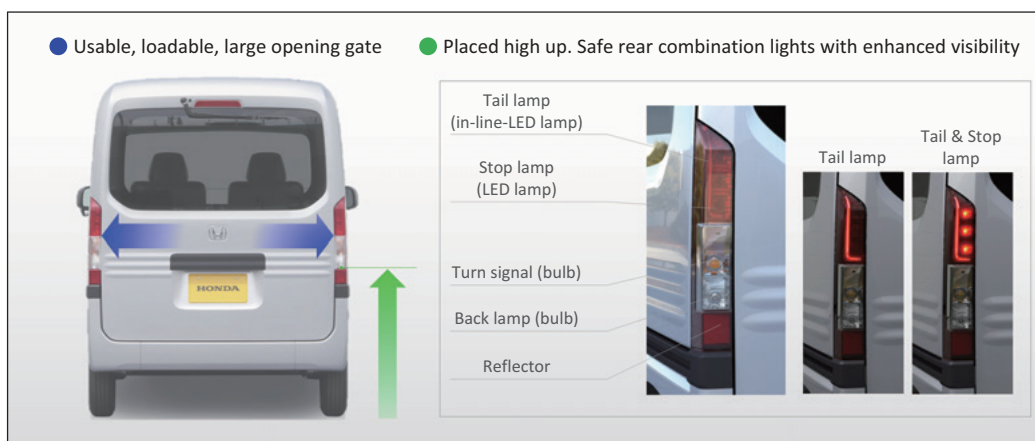


Fig. 26 Rear combination lamp design achieves balance of large opening and safety

3. +STYLE グレード

機能に加えスタイルも主張したいお客様の個々の世界観に応えるため、個性を主張できる+STYLE グレードを設定した。明るく楽しく使うお客様には+STYLE FUN、クールなカッコよさにこだわるお客様には+STYLE COOL と、2種類を用意した。

3.1. +STYLE グレードエクステリアデザイン

+STYLE FUN はお客様を笑顔で迎える VAN スタイルを目指した。クルマの表情はヘッドライトのデザインが最も影響を与える。そこで、CG 上で何度も検証し、1/1 モデルに移行してからも試行錯誤を繰り返すことで、Fig. 27 に示すような表情をつくりあげた。第二世代の N-BOX の発

売以降 N シリーズでは、光った瞬間に N シリーズとわかる丸く光るポジションランプをデザインアイコンにしている。これを+STYLE FUNでは踏襲した。Fig. 28 に示すように、LED 導光リングのポジションランプの内側にプロジェクタタイプ LED のハイ/ロービームを配し、ターンシグナルは被視認性の良い外側に配置した。さらに、ハウジングをブラック塗装するなどオリジナリティを創出した。フロントグリルは+STYLE COOL と同じ部品だが、3 本のバーの真ん中だけはプラチナ調クロームメッキとした。上下の 2 本はボデー同色とすることで、まったく違う楽しい雰囲気を表現した。ホイールキャップには、部分的にピアノブラック調塗装を施すことで楽しさを表現した。L グレードに対して顔まわりとホイールキャップ色のみ変更することで、大きく個性を変え、親しみやすい楽しげな表現ができた。



Fig. 27 Van style greets customers with smile



Fig. 28 Detailed design expresses sense of fun

+STYLE COOL で目指したのはお客様をクールにカッコよく迎える VAN スタイルである。紫などダーク系のボデーカラーでメッキをきらめかせるといった従来からの手法は、カスタム系のお客様にとっては普遍的な価値として根強いと認識した。また、仕事の道具である以上、カスタム方向にいき過ぎないことにも留意した。例えば内装業者として施工現場の家の前に停めたときの施主へ与える印象、といったことに配慮した。そこで目立ち過ぎず、カスタム系ユーザの気持ちを裏切らないバランスをねらった。Fig. 29 に示すようにある程度は目立ちながらも、派手すぎ

ないスタイリッシュなデザインにまとめ上げた。

クールにスタイリッシュに見せるために、まず Fig. 30 に示すようにロールーフにしてテールゲートスポイラを装着した。顔まわりは、メッキグリルでヘッドライトとの一体感を出すなど、押し出しの強さとワイド感を演出した。LED フォグランブはクロームメッキのガーニッシュで縁取り、ライセンスガーニッシュもクロームメッキの光り物とした。リヤコンビネーションランプはクリアレンズにしたうえで、内部に部分的にブラック塗装を施すことにより、クールなカッコよさを表現できた。



Fig. 29 Van style greets customers with cool look



Fig. 30 Detailed design expresses sense of cool

3.2. エクステリアカラー

商用車としての軽バンのエクステリアカラーは白かシルバーの2択といわれる。しかし、女性の社会進出を始めとする働く環境の変化に伴い、機能に加えスタイルも主張したいお客様のライフスタイルやビジネスを表現する上でカラーバリエーションは重要だと考えた。そこで、Fig. 31のようなラインアップを展開した。

N-VAN 専用新色であるガーデングリーンメタリックは、Fig. 32に示すように幅広くさまざまな生活に馴染むと共に、個々のスタイルも際立たせる色を目指して開発した。

幅広いライフスタイルを表現できるナチュラルなグリー

ンをベースに、ハイライト部をベージュとした。見る人によって大きく色の印象が変化する、人の気持ちによりそったナチュラルな色とした。

さらに、さまざまなライフスタイルやビジネスシーンでの利用を考慮し、爽やかな印象のブリリアントスポーツブルー・メタリックと、やさしさを感じるプレミアムピンク・パールを加えた。限られた色数ではあるが、カラーパレットが最大限に広く感じられるよう設定し、お客様それぞれの個性を主張でき、スタイルに合った色を選んで頂けるよう配慮した。

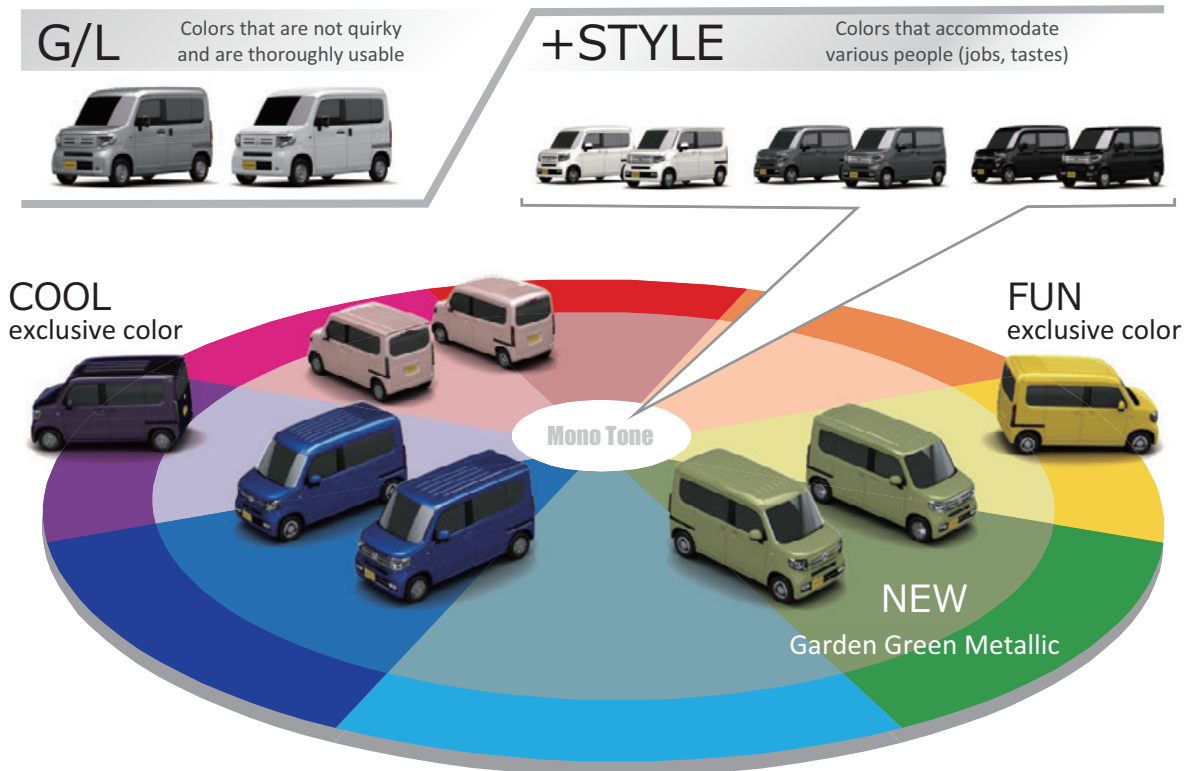


Fig. 31 Line-up of exterior colors



人の気持ちを豊かにするナチュラルカラー

Natural colors that enrich people's feelings

Fig. 32 Concept of exclusive new color, Garden Green Metallic

3.3. +STYLE インテリア

+STYLE のインテリア CMF は、Fig. 33 に示すようにスタイリッシュで高品質な道具感の演出を目指した。

L グレードの内装をベースに、フロントドアライニングにファブリックを貼りこみ、インストルメントパネルを左右に貫く梁に硬質感のあるシルバ加飾を配した。ステアリングホイールやドアハンドルまわりに施したシルバーやピアノブラック調加飾のコンビネーションと合わせ、ベースとは異なる機能に加えスタイルも主張したいお客様に応える世界観を演出した。

加飾部は傷付きにくさ向上をめざし、製造時にフローマークが出にくいようメタリック粒子の粗さをコントロールした原着樹脂で、質感の高いシルバーを表現した。

モノトーンでコーディネートしたインテリアにアクセントカラーとしてエクステリアカラーを効果的に取り入れるために荷室上部のパネルには内装材を設けず、しっかりと塗装できるよう調整を重ねた。

スタイルも主張したいお客様の個性や雰囲気合わせた室内空間を演出可能にした。



Fig. 33 Conceptual images of +STYLE interior CMF

4. N-VAN の創出した積む・運ぶ生活の豊かさ

Honda は創業以来、「現場、現物、現実」の三現主義思想でお客様の生活を豊かにすることを追求してきた。その思想を元に、Honda Design は変わり行く時代の中で、お客様の生活をさらに深く考え、体験価値が得られるエクスペリエンスデザインをおこなっていく方針である。N-VAN デザインは、その方針に沿い、時代に合った「積む・運ぶ生活」

をさらに豊かにするため、徹底的に課題を抽出し、お客様の期待を実現する次世代の価値を創造することで、次世代軽バンの新基準を創ることを目標に開発を進めた。機能を重視するお客様には、Fig. 34 に示すように、機能を突き詰めた G および L グレードを提案。機能に加えスタイルも主張したいお客様には、Fig. 35、36 に示すようにスタイルが主張できる +STYLE グレードの提案をおこない、積む・運ぶ生活の豊かさを広げた。

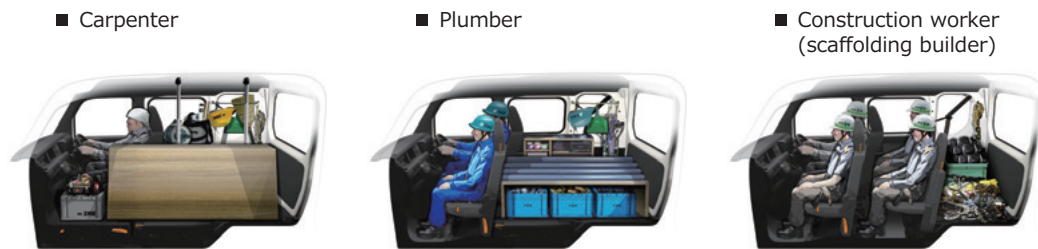


Fig. 34 G and L grades



Fig. 35 +STYLE FUN grade



Fig. 36 +STYLE COOL grade

我々は、N-VAN が身体になじんだ使いやすい、毎日の積む・運ぶ生活になくてはならない道具になるという体験価値を、お客様が感じていただけることを切に願っている。そのときはじめて N-VAN が軽バンの新基準として世の中に受け入れられたと考える。

5. まとめ

19 年ぶりにフルモデルチェンジされた軽バンである N-VAN において、エクスペリエンスデザインの考え方に基づき、お客様の体験価値を深く考えた、積む・運ぶ生活を豊かに拡大するデザインをおこなった。

その結果、毎日の積む・運ぶ生活になくてはならない道具になるような、新しい軽バンの新基準を創出した。

お客様がコトを創造できる道具 = N-VAN

Tool for customers to create events and experiences = N-VAN



沢山の積む・運ぶ生活を豊かにしたい!

We want to enrich many lives with loading and carrying things!

Fig. 37 N-VAN goal

■ 著 者 ■



山口 真生



加藤 千明



柳本 佳久



石田 憲行

2020 CRF1100L Africa Twin の開発

Development of 2020 CRF1100L Africa Twin

森 田 健 二¹

Kenji MORITA

岡 村 広 志¹

Hiroshi OKAMURA

岡 田 望¹

Nozomi OKADA

鈴 木 将 太¹

Shota SUZUKI

要 旨

2016年に復活を遂げた Africa Twin は、オフロード走行とツーリング走行をどちらも楽しめるアドベンチャーモデルとして高い支持を得ている。本開発では、2016年から4年を経てモデルチェンジを実施し、エンジン、車体骨格、足回り、外装すべての刷新をおこなった。その結果、排気量拡大による出力向上や完成車重量の低減を達成した。これによりオフロード走行をより楽しめる Africa Twin と、装備の充実を図りより快適なツーリングを可能とする Africa Twin Adventure Sports を実現した。

ABSTRACT

Ever since the revival of the model name in 2016, Honda Africa Twin has been well-supported by the customers as an adventure motorcycle enjoyable on off roads as well as for touring on pavement. After four years since the initial launch in 2016, a full model change has been conducted in this project, renewing everything from the engine, frame body, suspension to the exterior, gaining more power by the increased engine displacement while reducing weight of the complete motorcycle. Accordingly realized are the more off-road friendly Africa Twin, and the Africa Twin Adventure Sports more suitable for touring with abundance of extra equipment for long, comfortable rides.

1. まえがき

初代 Africa Twin は、パリ、ダカールラリーで1986年から4年連続優勝を達成したNXR750の技術をフィードバックして開発されたアドベンチャーモデルである。ラリーで勝つためには過酷な道を駆け抜ける高い走破性と、長時間のライディングで集中力を保てる快適性が必要となる。この高い走破性と快適性を併せ持つのが Africa Twin である。

1988年に初代 Africa Twin として XRV650 が誕生した。その後、排気量拡大などモデルチェンジをおこないつつも2003年にその生産を終了した。その後も愛好家からの Africa Twin 復活を望む声は強く、2016年に CRF1000L Africa Twin⁽¹⁾ として復活を遂げた。さらに2018年には、よりツーリング走行を楽しめる Africa Twin Adventure Sports をタイプ追加することでアドベンチャーモデルとしての楽しみの幅を広げた。2020年モデルでは、これら二つのタイプそれぞれの世界観を確固たるものにすべく、復活後4年でモデルチェンジを実

施し、エンジン、車体骨格、足回り、外装、すべての刷新をおこなった。それがオフロード走行をより楽しめる CRF1100L Africa Twin (Fig. 1) と、より快適なツー



Fig. 1 CRF1100L Africa Twin

¹ 本田技研工業株式会社

Table 1 Comparison of specifications and equipment between developed and previous models

Item	Developed model		Previous model	
	CRF1100L Africa Twin	CRF1100L Africa Twin Adventure Sports	CRF1000L Africa Twin	CRF1000L Africa Twin Adventure Sports
Displacement (cm³)	1083		998	
Bore x stroke (mm)	92.0 x 81.5		92.0 x 75.1	
Maximum power (kW/rpm)	75/7,500		70/7,500	
Maximum torque (Nm/rpm)	105/6,250		98/6,000	
Curb weight (kg)	226 {236}	238 {248} [240 {250}]	230 {240}	243 {253}
Seat height (mm)	870 850 (Low position)	870 850 (Low position)	870 850 (Low position)	920 890 (Low position)
Fuel tank capacity (L)	18.8	24.8	18.8	24.2
Windscreen	Low height	High height (Manually adjustable)	Low height	High height
Tire	With tube	Tubeless	With tube	
Electronic suspension	-	- [Equipped]	-	-
Headlight	LED	LED	LED	
Cornering light	-	Equipped	-	
Meter	LCD		LCD	
Display	6.5-inch touchscreen colored TFT		-	
Apple CarPlay*	Adopted		-	
Cruise control	Equipped		-	
Riding mode select	4 fixed modes and 2 user modes		3 fixed modes and 1 user mode	
ABS mode select	2 modes (on- and off-road)		-	
Torque control	7 levels and off setting		7 levels and off setting	
Wheelie control	3 levels and off setting		-	

Numbers in { } show DCT model.

Numbers in [] show optional electronic suspension model.

*Apple CarPlay is trademark of Apple Inc.

リングを可能とする CRF1100L Africa Twin Adventure Sports (Fig. 2) である。

以下にそれぞれの特徴である、オフロード走行のための進化とツーリングのための進化を中心に解説していく。

なお、本稿ではそれぞれのモデルを以下のように呼ぶこととする。

前モデル STD: CRF1000L Africa Twin

前モデル AS: CRF1000L Africa Twin Adventure Sports

本モデル STD: CRF1100L Africa Twin

本モデル AS: CRF1100L Africa Twin Adventure Sports



Fig. 2 CRF1100L Africa Twin Adventure Sports

2. 開発のねらい

Africa Twin が歴代守り続けているものは、オフロード走行とツーリング走行のどちらも楽しめるということである。前述のとおり、前モデルには STD と AS の二つのタイプがある。STD にはスリムで軽量の車体による軽快にオフロードを走行できる特徴、AS には大容量の燃料タンクと大きなフェアリングにより存分にツーリングを楽しめる特徴を持たせている。

本モデルでは、これら二つのタイプの特徴をより確固たるものにするために、STD のオフロード走行性能に磨きをかけ、AS ではより快適なツーリングを楽しめることをねらいとした。しかしながら前モデル AS をベースにさらなるツーリングでの快適性の進化を図る場合、装備の追加などによる重量増など、オフロード走行性能の低下が考えられる。また、STD におけるオフロード走行性能の進化も限定的となる。そこで本モデルにおいては、すべての部品の見直しをおこなって、オフロード走行性能に優れた STD と、ツーリングのための進化を図った AS の実現を目指すこととした。Table 1 に主要仕様装備一覧を示す。

3. オフロード走行のための進化

大型オン／オフロードモデルカテゴリの中で、Africa Twin の持ち味とされている圧倒的な軽快性をさらに進化

させた。ここでは、以下の三つに絞って述べる。

- (1) エンジンおよび車体の軽量化
- (2) 完成車のマスの集中による慣性モーメントの低減
- (3) フレーム剛性の見直し

3.1. 軽量化

本モデルにおいては、後述する排気量拡大による動力性能の向上や装備の充実を図りながらも、強度などの一般特性を同等以上に確保しながら完成車全体重量と比較して、前モデルに対し STD で 4 kg, AS で 5 kg の軽量化を達成した。

3.1.1. エンジンの軽量化

本モデルでは、動力性能向上のためにエンジン排気量の拡大をおこなった。通常排気量の拡大は、エンジンサイズの大形化および出力向上に伴う各部強度の向上のため、エンジン重量の増加を伴うことが多い。しかし本モデルでは、前モデルに対しマニュアルトランスミッションモデルで 2.5 kg, DCT モデルでは 2.2 kg のエンジンの軽量化を達成した。Fig. 3 に本モデルに投入したエンジンにおける主要技術を示す。また、以下にエンジンの軽量化の核となった技術について解説する。

エンジン全体の重量軽減は、Fig. 4 に示すピストン、クランクシャフト等の主運動系部品の重量をいかに抑えられるかに大きく依存する。排気量拡大の手段として選択したストローク拡大は往復部の慣性力を増加させる。強度確保のために往復運動部品が重くなると、往復部の慣性力はさらに増大し、その慣性力に対応すべき部位も重くなる。よって、往復部慣性力を前モデル同等に抑えることをねらいとして、前モデル同等の耐久性と 8.9% の軽量化目標を設定した。

往復運動部の軽量化実施内容について、ピストンとピストンピンについて述べる。ピストンは最適な肉盗み形状を実現するため、型抜き方向を変更しピストン頭部の重量を

低減させた。ピストン頭部の軽量化は、ピストンピンを中心とした回転方向の慣性を低減し、ピストンスカート部とシリンダとの衝突音の低減につながる。これにより衝突音の抑制のために必要であったピストンスカート面積を縮小でき、さらなる軽量化が可能となった。結果 Fig. 5 に示すように、スカート幅を 11.4 mm, 全高を 3 mm 短縮し、頭部の肉盗みと合わせてピストン単体で 7% の軽量化を達成した。

ピストンピンは負荷を受けた変形時において、スムーズな潤滑を確保する事が求められる。前モデルでは、肉厚による剛性で変位を抑制し、一定の隙間を確保し油膜を保持して対応していた。本モデルでは、より硬度が高く油膜保持性の高い表面処理を採用することで、円環剛性を下げながらも耐久性の確保が可能となり、外径は同じまま内径を

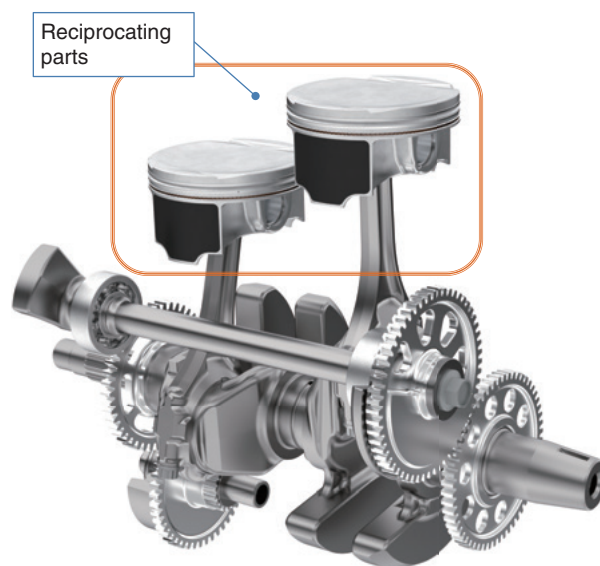


Fig. 4 Reciprocating parts in main motion system

Changed point	Displacement increased	1
	TBW: throttle boar diameter increased	2
	Exhaust gas control valve	3
Weight reduction technology	Aluminum cylinder liner	4
	Balancer gear: scissors mechanism eliminated	5
	Optimized reciprocating parts' shapes	6
	Manual transmission: clutch size reduced	7
	DCT: gear material changed	8
Characteristic technology	Biaxial primary balancer	9
	2 spark plugs per cylinder with phased firing	10
	270° phased crankshaft	11
	Built-in oil tank dry sump system	12

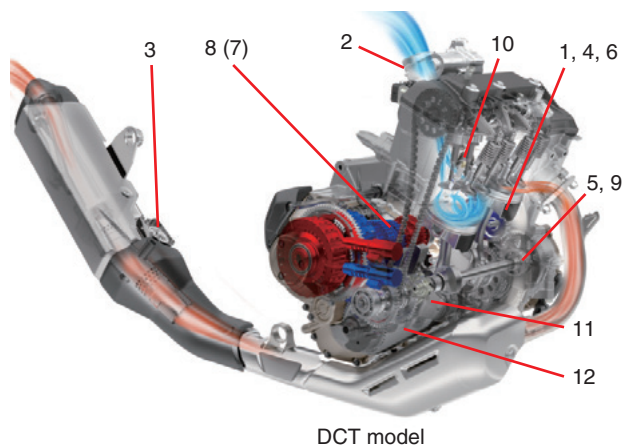


Fig. 3 Key technologies of powertrain

1.8 mm 拡大し 32% 薄肉化した (Fig. 5). これによりピストンピン単体で 19% の軽量化を達成した. その結果, 往復運動部品合計で 8.9% の軽量化を達成し, 往復部慣性力は前モデル同等とした.

また, ギヤ駆動音の低減のために, 前モデルで採用していたバランサギヤとプライマリギヤのサブギヤ機構を廃止し軽量化を図った. Fig. 6 に代表としてフロントバランサギヤ部の前モデルとの構造比較を示す. サブギヤ機構は, 2 枚のギヤを重ねて相手ギヤを挟み込むことで, ギヤ間のバックラッシュが無い状態としているが, 本モデルではギヤの歯面仕上げ製法の変更による歯厚公差の縮小と, 各ギヤ軸間距離の公差縮小などにより, バックラッシュを低減し, ねらいの性能を得ることができた. Fig. 7 にフロントバランサギヤ部の社内エキスパートによるギヤ音評価ポイントの比較を示す. 前モデルに対し, バックラッシュのレンジを 26% 縮小し, 目標の音性能を達成した.

クランクシャフトは 6.4 mm のストローク拡大に伴い大型化するが, 各部の肉盗み量を増やすなどの細部の形状変更と, サブギヤ機構の廃止に伴うギヤ幅の縮小 (Fig. 6) により, 前モデルとほぼ同等の重量とした. 結果, 排気量拡

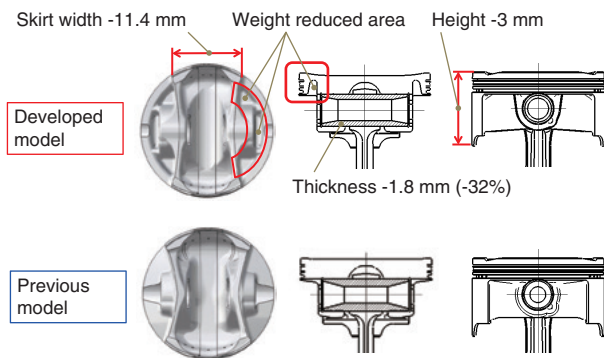


Fig. 5 Comparison of reciprocating parts

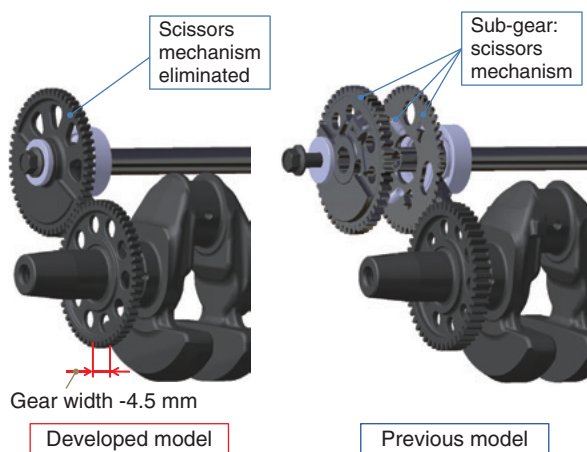


Fig. 6 Comparison of front balancer gear

大にもかかわらず, 主運動系部品の合計重量は前モデルに対し -820 g となる軽量化を達成した.

主にこれらの主運動系部品の軽量化の効果により, ストローク拡大関連以外の, エンジン主要部品の軸間距離やエンジンの全幅を前モデル同等に抑えることができた. ほかにもシリンダスリーブ材質を鋳鉄からアルミニウム複合材料へ変更, クラッチのコンパクト化, 高強度な材質に変更することでギヤ幅の縮小などによる軽量化をおこない, 出力を向上しながらも前モデルより軽量なエンジンとなった (Fig. 8).

3.1.2. 車体の軽量化

徹底した軽量化をねらいとし, 車体強度と剛性, 材質, 製造方法について細部に渡り検討をおこない, 基本骨格から新設計した. Fig. 9 に本モデルの車体軽量化に寄与度の大きい部位を示す.

フレームボデーは, 前モデルのスチール製の前後一体構造に対し, 本モデルではリヤフレームをボルトオンタイプの分割構造とし, リヤフレームの材質を軽量なアルミ製とした. スチール製のメインフレームは, 3.3. 節で後述する剛性バランスの見直しを図ることで, フロントクロスパイプの廃止を可能とした. また, 各エンジンハンガーの細部形状変更により, 従来同等のエンジン搭載性を確保しながら

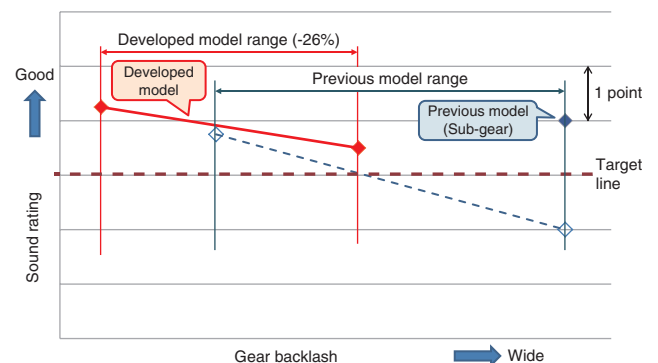


Fig. 7 Comparison of front balancer gear sound ratings

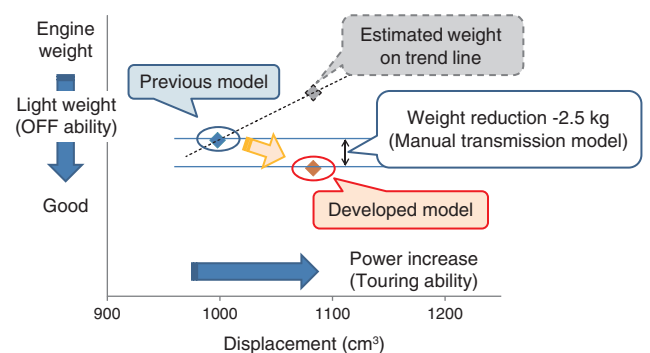


Fig. 8 Comparison of engine weights

ら、右側ロワパイプをボルトオンタイプの分割式から溶接一体構造に変更した。さらに、ピボットプレートには前モデル同様にプレス製法のプレートを2枚重ね合わせたモノカ仕様を踏襲するが、内板に600 MPa級の高強度鋼を採用し、内板を板厚1.6 mmから1.4 mm、外板を1.8 mmから1.6 mmへそれぞれ薄肉化した。

アルミ製のリヤフレームとスイングアームにおいては、設計自由度が高い鋳造材と耐久性の高い鍛造材を組合せ、それらを押し出しパイプで連結する仕様とすることで軽量化を実現した (Fig. 10)。これらの結果、フレームボデー全体で1.8 kg、スイングアームで0.5 kgと、基本骨格部品で2.3 kgの軽量化を実現し、完成車全体の軽量化に大きく寄与した。

3.2. 完成車のマス集中による慣性モーメントの低減

運動性能を向上するためには、ヨー／ロール／ピッチ3軸の完成車の慣性モーメントを低減させることが重要となる。特に路面の起伏や凹凸が激しいオフロード走行においては、旋回や上下動の動きに対する慣性モーメントを低減させることが、軽い取り回しと路面外乱に対する収束の良い車体挙動につながり、荒れたオフロード路面をより安心して走破することを可能とする。そのためには車体の重心位置から離れた部品の軽量化が求められる。

特に前述したリヤフレームとスイングアームの軽量化はマスの集中化に大きく寄与している。さらに、環境適合性のために、排気触媒を排気ガスの浄化をより効率的におこなえる排気ポート近傍の車体前方に移動した。この配置変更を活用し、車体後部における重量物であるマフラを車体重心位置に85 mm近づけることができた (Fig. 11)。

これら手法によるマス集中の結果、運動性能向上に寄与するヨー慣性4.0%、ピッチ慣性9.5%の低減を実現した (Fig. 12)。

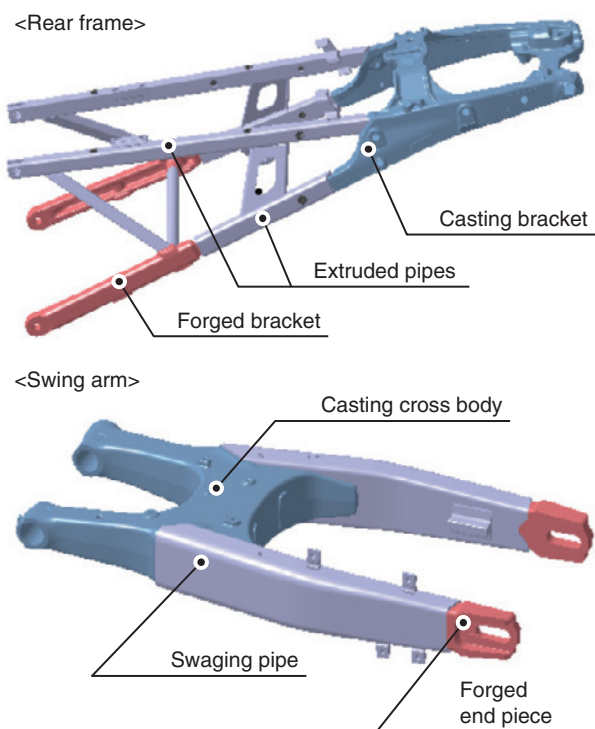


Fig. 10 Configurations of rear frame and swing arm



Fig. 11 Comparison of muffler size

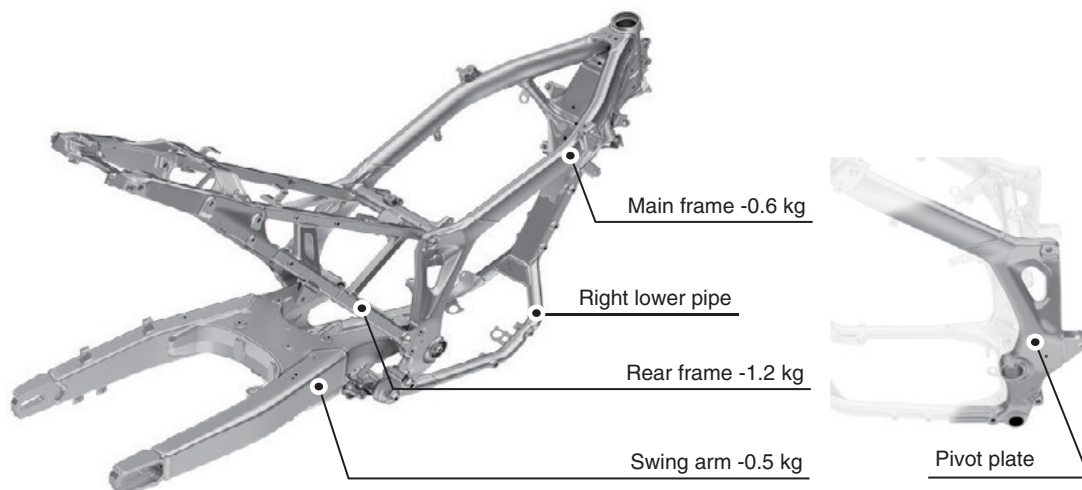


Fig. 9 Main points of modification of frame body and swing arm

3.3. フレーム剛性の見直し

路面外乱による車両の上下動が激しく、滑りやすい路面のオフロード走行では、外乱に対し穏やかに車体挙動を収束させ、ライダー操作に対しフレームボデー全体がたわみ、追従する性能が求められる。これが、ライダーの安心感と疲労低減につながる。本モデルではこの柔軟性を追求し、過酷な道を安心して走破できる、Africa Twinらしいハンドリングに磨きをかけることをねらいとした。

前モデルでは、路面反力や制動時におけるメインパイプの変位をフロントクロスパイプで抑制していた。本モデルでは、ヘッドパイプ周辺のカセットの形状変更による補強や、左右のメインパイプの全幅を 20 mm 狭めて平行に近づけるレイアウトへの見直しなどでメインパイプの変位を抑制し、フロントクロスパイプの廃止を可能とした (Fig. 13)。これにより、従来同等のフレームボデーの強度

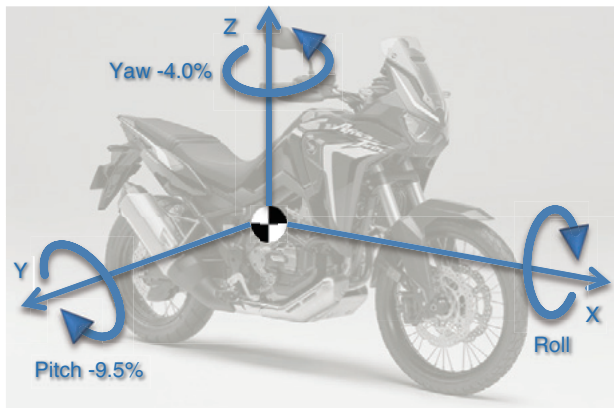


Fig. 12 Result of moment of inertia

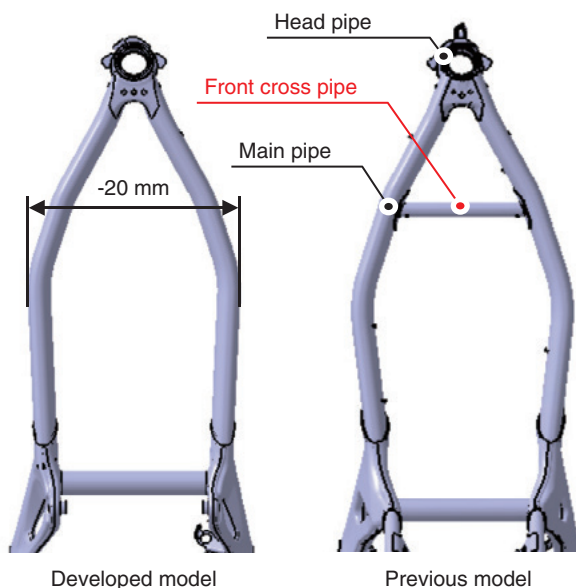


Fig. 13 Top view of main body frame

耐久性や制動安定性を確保しながら、横方向の柔軟性を得ることができた。Fig. 14 に前後タイヤの接地点に横方向に荷重入力した際のフレームボデーの CAE 解析データの一例を示す。本モデルではピボットプレートからメインパイプにかけて、応力が広い範囲に分散されていることがわかる。これはフレームボデー全体がたわんでいることを示しており、外乱に対して穏やかに車体挙動を収束させる特性につながっている。この特性によりオフロード走行でも安心できる旋回特性が得られた。さらに、フレーム剛性の低減により軽快なハンドリングとなり、オフロード走行をより楽しめる性能を実現した。

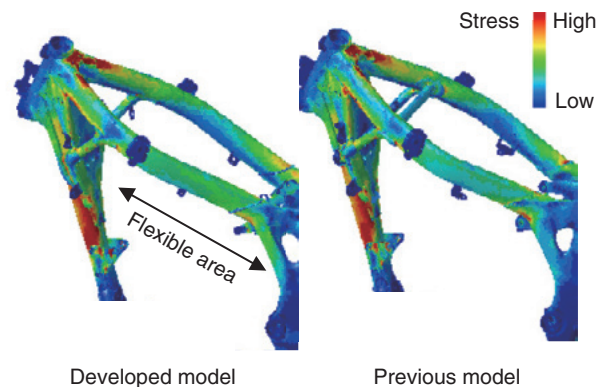


Fig. 14 Frame body analysis result

4. ツーリングのための進化

ツーリングでは長距離／長時間の走行に対して、心身ともに疲れにくくすることが重要である。心理的な疲労に対しては、動力性能の向上をもって対応した。これにより、前モデルに対して低回転での余裕あるトルクフルな走りや、タンデムや積載状態の走行でもストレスの無い加速が可能となり、心理的余裕が生まれた。また、身体的疲労に対しては、走行風から身を守るための防風性能の向上を図った。さらにはライディングポジションの見直しやシート快適性向上をおこなったが、ここでは、以下の二つに絞り述べる。

- (1) 動力性能の向上
- (2) 防風性能の向上

4.1. 動力性能の向上

歴代の Africa Twin が最も重視しているのは、お客様が多用する常用回転域での出力特性である。しかし、メインマーケットである欧州での使い勝手では、高速道路などでの加速性能も重要な要素である。余裕を持ったストレスフリーな加速ができることで、快適性を向上させることが可能となる。本モデルでは、あらゆる回転域からでも十分な

加速力が発揮できるように、全域で6%以上の出力向上を目指した。軽量化とのバランスを鑑み、排気量を前モデルに対し85 cm³アップの1083 cm³(設計値)とした。合わせて吸気排気諸元などの仕様見直しを図った結果、前モデルに対して、出力は全域で6%以上、最大で8%の向上を達成した (Fig. 15)。これによって、前モデルに対して約5%の加速性能の向上を達成した (Fig. 16)。

全域での動力性能向上を図ることで、積載状態などの車両のコンディションや、登坂や高速走行時などのシチュエーションにかかわらず余裕を持った走りが可能となり、ツーリングでの快適性を高めることが可能となった。また、オフロード走行の面においても、パワフルな動力性能ならではのライディングを楽しむことに寄与している。

4.2. 防風性能の向上

本モデル AS における防風性能は、ライダーへの風当たりを軽減することで、長距離ツーリング時の快適性を向上し

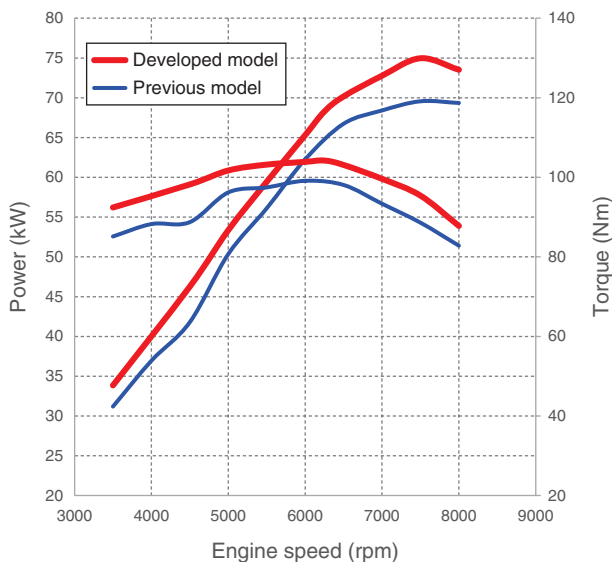


Fig. 15 Engine performance

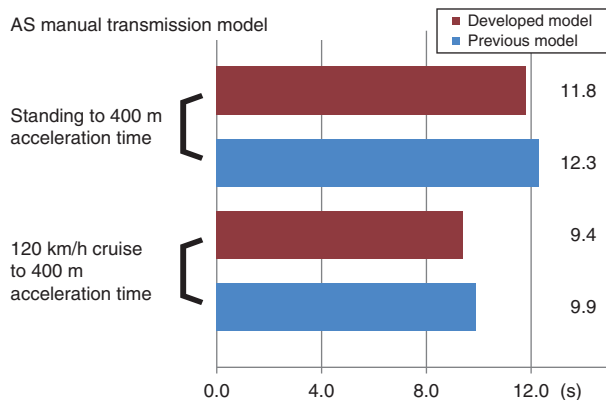


Fig. 16 Comparison of acceleration performance

た。ここでは、ライダーの頭部周辺と胴体部周辺それぞれの防風性能について解説する。

4.2.1. 頭部周辺の防風性能

本モデル AS では、頭部周辺の防風性能向上のため、STD に対して215 mm 長いロングタイプのウインドスクリーンを採用した (Fig. 17)。また、ウインドスクリーン取り付け部には、手動式5段階可変構造を採用した。角度を設けた二つのレールとリンクで構成された可変構造を持ち、左右のノブを操作することにより、スクリーンの5段階調整が可能となっている (Fig. 18)。この構造により、5段階目で60 mm の高さ変化と5°の角度変化を設定することが可能となり、防風性能を変化させている。

Fig. 19 にライダーの頭部周辺の空気の流速分布を表したCFD 解析の結果を示す。1段階目では、前モデルのAS 同等の防風性能をねらった。本スクリーンのライダーの頭部周辺への風当たりを軽減する効果によって、長距離ツーリング時の快適性を確保した。2から5段階目は、ライダーの姿勢や体格に合わせて調整可能とした。前モデル同等の1段階目に対し、5段階目では頭部付近の風圧が低減しており、防風性能が向上していることがわかる。

4.2.2. 胴体部周辺の防風性能

本モデル AS では、胴体部周辺の防風性能向上のため、STD に対してフェアリングの専用設計をおこない、全幅+50 mm とした。Fig. 20 に乗員の腰周辺の空気の流速分布を表したCFD 解析の結果を示す。フェアリング形状の違いにより、乗員への風当たりを軽減させていることが確認できる。

以上の結果、前モデル AS が持っていた快適性に加え、乗員の姿勢や体格に合わせて調整可能なウインドスクリーンの採用とフェアリング形状の変更により、ライダーへの防風性能を向上させ、身体的疲労軽減を実現した。

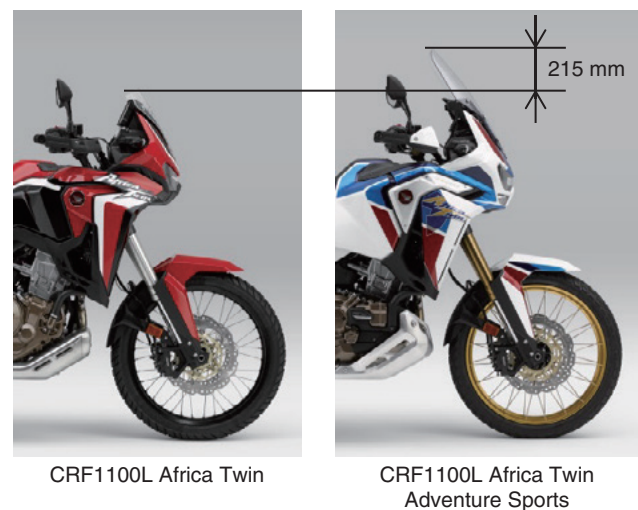


Fig. 17 Comparison of screen height

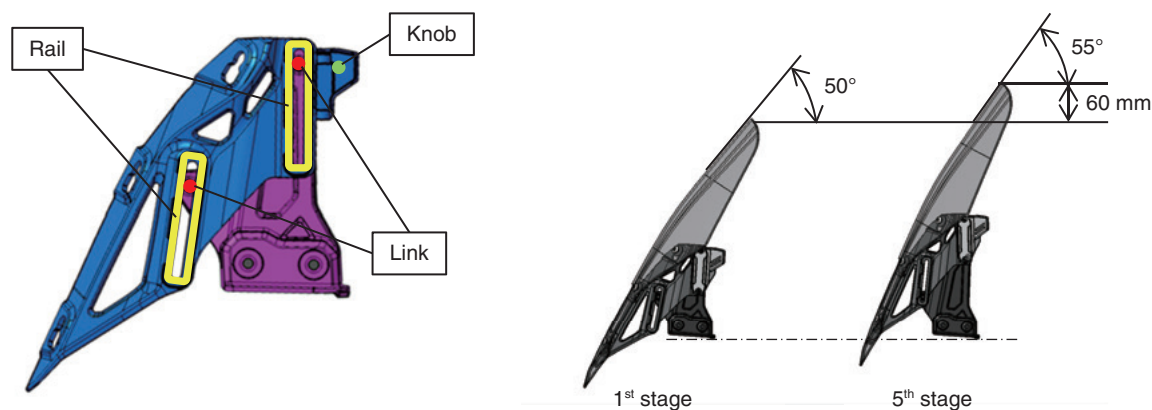


Fig. 18 External view of manually adjustable windscreen

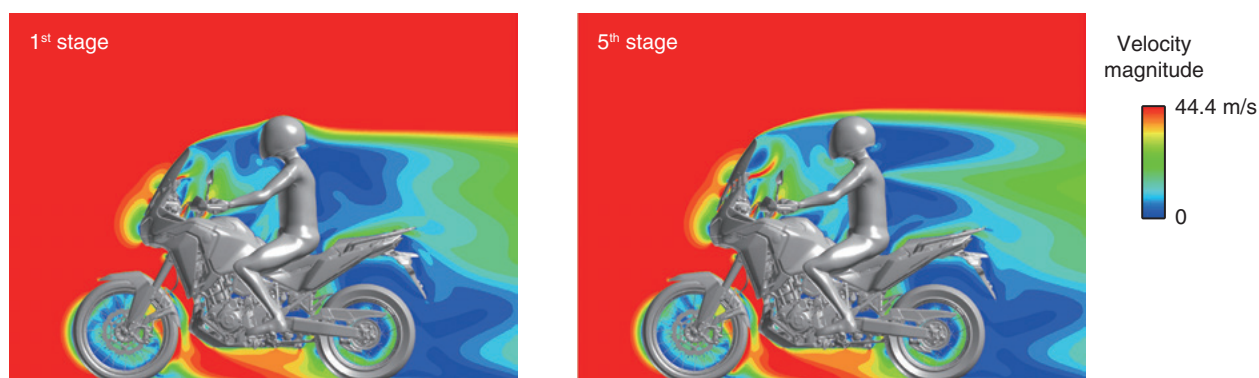


Fig. 19 Result of velocity distribution analysis of upper body by CFD

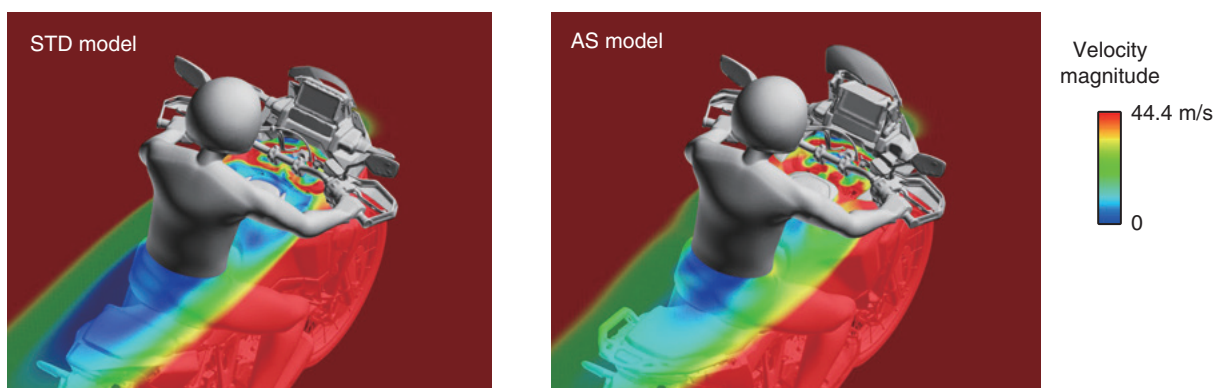


Fig. 20 Result of velocity distribution analysis of lower body by CFD

5. 車体制御の進化

車体制御における進化も実現した。車体慣性計測装置 (Inertial Measurement Unit: IMU) の装備によって、Fig. 21 に示すピッチ／ロール／ヨーの角速度と、前後／左右／上下の加速度の六つを計測し、車体の動作状態をリアルタイムで把握することが可能となった。この情報を活用することで、各種制御の精度が大幅に向上し、よりスムーズな車体の挙動を実現した。IMU による制御項目を以下に示す。

(1) Honda Selectable Torque Control (HSTC):

駆動力によるタイヤの空転、横滑り時の挙動を緩和するための駆動力制御

(2) ウィリーコントロール:

フロントリフトアップ時のピッチ角と角速度を制限するための駆動力制御

(3) ABS:

コーナリング中のブレーキ挙動の緩和制御およびブレーキ時のリヤタイヤの浮き上がりを防止するためのブレーキ液

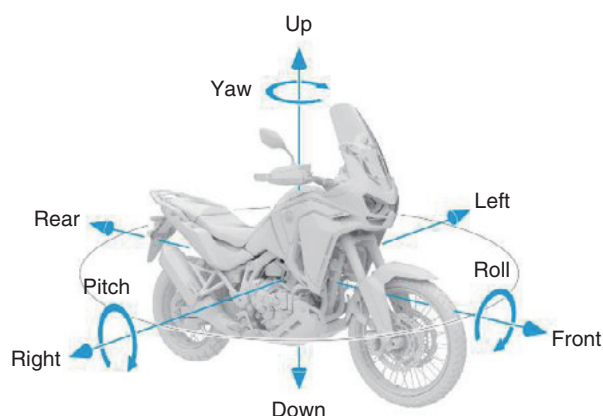


Fig. 21 Vehicle motion direction component from IMU

圧制御

(4) DCT の動作判定制御:

登坂／降坂やコーナリング中の DCT による意図しない変速を防止するための変速タイミング制御

(5) コーナリングライト (AS のみ):

バンク角に応じてコーナの先を照らすためのライトの点灯制御⁽²⁾

(6) 電子制御サスペンション (AS のみにタイプ設定):

ブレーキングやジャンプ時の車体挙動を適正化するための減衰力可変制御⁽³⁾

(7) クイックシフタ (オプションパーツ):

コーナリング中のシフト正確性を高めるための誤操作判定制御

6. Human Machine Interface (HMI) の進化

タッチパネル式 6.5 インチ TFT ディスプレイを採用 (Fig. 22) することによって、ライダーと車両双方向の情報伝達の使い勝手の向上を図った。



Fig. 22 Multi-information display

豊富な情報を見やすくするために大型カラー液晶を採用。ライディングに集中しつつも、メータからの情報を的確に認識することが可能となった。さらに多くの機能の設定を感覚的に操作できるように、停止時にはタッチパネルでの操作も可能とした。また、Fig. 23 に示すとおり USB ケーブルにて iPhone と接続することによって Apple CarPlay が利用可能となる。ナビをはじめとする各種アプリは、Siri による音声操作をすることで利便性が大きく向上した。



Fig. 23 Apple CarPlay

7. 開発成果

本モデルの開発では、出力向上と完成車重量を低減させることにより、オフロード走行をより楽しめる Africa Twin と、装備の充実を図りより快適なツーリングを可能とする Africa Twin Adventure Sports を実現した。出力では排気量拡大により全域で 6% 以上の向上を達成し、重量では主にエンジン、フレームなどの主要部品の見直しによって軽量化を達成した。本モデル STD では、前モデル STD に対し 4 kg の軽量化により、オフロード走行のための進化をした。本モデル AS では、防風性能向上をはじめ多くの快適装備を追加しつつも、前モデル AS に対し 5 kg の軽量化を達成し、全域で向上した動力性能と相まって、ツーリングのための進化を果たした。

前モデルから踏襲したコンセプト「Go anywhere 一日常のコミューティングから広大な夢の大地を走破できる、真の本格アドベンチャーモデル」を、より高い次元で実現した Africa Twin で新たな冒険を楽しんでいただきたい。

参考文献

- (1) 飯塚直, 山倉裕, 今井良幸, 飯田晃祥, 菅野剛, 中村公紀, 小山信也, 中村健一郎, 小野和彦: CRF1000L Africa Twin の開発, Honda R&D Technical Review, Vol. 28, No. 2, p. 9-20
- (2) 木崎徳次郎, 佐藤宏貴: 2020 CRF1100L Africa Twin Adventure Sports に搭載した二輪車用追加光源式

コーナリングライト, Honda R&D Technical Review,
Vol. 32, No. 2, p. 35-41

- (3) 岡村広志, 津田剛, 小河原充史: 2020 CRF1100L
Africa Twin Adventure Sports ES 用電子制御サス
ペンションシステムの開発, Honda R&D Technical
Review, Vol. 32, No. 2, p. 27-34

■ 著 者 ■



森田 健二



岡田 望



岡村 広志



鈴木 将太

2020 CRF1100L Africa Twin Adventure Sports ES 用 電子制御サスペンションシステムの開発

Development of Electronically-controlled Suspension System
for 2020 CRF1100L Africa Twin Adventure Sports ES

岡村 広志¹
Hiroshi OKAMURA

津田 剛¹
Tsuyoshi TSUDA

小河原 充史¹
Atsushi OGAHARA

要 旨

ABSTRACT

Africa Twin はオフロード走行とツーリング走行をどちらも楽しめる大型アドベンチャモデルである。2020 年モデルとして新たに電子制御サスペンションを採用した、CRF1100L Africa Twin Adventure Sports ES を開発した。二人乗りや多くの荷物を積載して高速巡航するツアラ用途から過酷なオフロード用途まで、幅広い用途のそれぞれで最適な性能を発揮する四つのサスペンションモード (HARD, MID, SOFT, OFFROAD) を設定した。このサスペンションモードに加え、エンジン出力特性、エンジンブレーキ特性、クラッチ特性 (DCT モデルのみ)、ABS 特性、の計五つの要素を統合制御したライディングモードを設定した。走行中でもライダーがハンドルスイッチ操作一つで選択でき、走行シーンと車両のコンディションに応じて、ライダーが意のままに操れる特性を得られるシステムを実現した。

The Honda Africa Twin is a full-scale adventure model featuring off-road and touring capabilities. As a 2020-year model, we have developed the CRF1100L Africa Twin Adventure Sports ES equipped with the new electronically-controlled suspension. Four suspension modes (HARD, MID, SOFT, OFFROAD) are provided to help ensure optimum performance in the wide variety of usage from high-speed long touring with a passenger and/or luggage up to challenging off-road riding. The riding modes are designated taking into account such five parameters as the engine power, the engine brake, the clutch characteristics (DCT model only), and the ABS characteristics in addition to the suspension modes. The rider can select any mode from the handlebar switch even when riding to adjust the motorcycle characteristics to best-suit his/her desire depending on the situation and vehicle conditions.

1. まえがき

2016 年 CRF1000L Africa Twin は、オフロード走行とツーリング走行をどちらも楽しめる大型アドベンチャモデルとして開発された。2018 年には、よりツーリングの快適性を高めた Adventure Sports をタイプ追加し (以下 AS タイプ)、アドベンチャモデルとしての楽しみの幅を広げた。サスペンションストロークを約 20 mm アップしたことによるサスペンション性能の進化は高い評価を得ることができたが、シート高も高くなったことで乗る人の体格を選ぶ

モデルとなった。

2020 CRF1100L Africa Twin は上記モデルの後継車として開発された。本モデルではさらなるオフロードの走破性に磨きをかけた CRF1100L Africa Twin と、快適装備を付加しツーリングの快適性をより高めた CRF1100L Africa Twin Adventure Sports の、二つのコンセプトを掲げ開発をおこなった⁽¹⁾。これら両タイプは、オフロード走破性と扱いやすさを両立したコンパクトな車体サイズに統一するため、シート高 870 mm を完成車目標とし、足つき性の向上を図りながら、それぞれの特長をさらに進化

¹ 本田技研工業株式会社

Table 1 Specification comparison of previous models and developed models for export (US, EU)

		2018 model		2020 model	
		AS	STD	AS	STD
Front suspension stroke	[mm]	252	230	230	
Rear axle travel	[mm]	240	220	220	
Seat height	[mm]	920	870	870	

させることとした。サスペンション長は、2018年モデル CRF1000L Africa Twin を踏襲したフロントサスペンションストローク 230 mm、リアアクスルトラベル 220 mm に統一した (Table 1)。

パリダカールラリーレーサの DNA を継承するモデルとして、オフロード走破性の高さと長距離巡航における快適性を両立させることは必須条件である。特に AS タイプにおいては、高速道路の巡航や、山々を越えてのワインディング、そして未舗装路までも駆け抜ける、幅広い走行条件でもより安心して走行できることが求められる。温度や天候、路面状況などの環境変化が大きい中で、二人乗りや多くの荷物を積載することもあり、車両のコンディションも幅が広い。このように、多種多様な走行シーンにおいてそれぞれに適した性能を発揮し、安心かつ快適な走行を可能とすることで、「どこまでもいける」長旅の夢を実現するモデルを提供したいと考えた。これら幅広い要求にこたえる手段の一つとして、我々は電子制御サスペンションの採用を検討した。

本稿では、電子制御サスペンションを採用した 2020 CRF1100L Africa Twin Adventure Sports ES (以下、本開発モデル) における制御やセッティング、およびその特長について解説する。Fig. 1 に本開発モデルの外観を示す。



Fig. 1 2020 CRF1100L Africa Twin Adventure Sports ES

2. 開発のねらいとシステム概要

Africa Twin には 2018 年モデルからライディングモードシステムを投入している。これは、走行シーンと車両のコンディションに応じてモードを選択し、ライダーが意のままに操れる特性を提供することをねらいとしている。

前モデルにおけるライディングモードシステムでは、エンジンに関連する、エンジン出力特性、エンジンブレーキ特性、駆動力特性の組合せで構成されていた。本開発モデルでは車両を操るための三要素である、走る、曲がる、止まる、の基本性能すべてを統合制御しシステムの進化を図った。本システムでは、エンジン出力特性、エンジンブレーキ特性、クラッチ特性 (DCT モデルのみ)、ABS 特性、さらにサスペンション特性の五つの要素を統合制御している。各モードの想定シーンと完成車特性を Fig. 2 に示す。

ライディングモードシステムは、走行中でも左側ハンドルスイッチでモード選択が可能で、スロットルグリップをいったん全閉にすることで切替えが完了する。なお、停止中は 6.5 インチ TFT 液晶パネル、Multi-information display の画面をタッチすることでも選択可能である (Fig. 3)。

Africa Twin で想定される幅広い走行シーンや車両のコンディションにおける完成車特性の要求を満たすためには、サスペンションに対する要求も大きく変化する。本開発モデルでは、自由度が高く幅広い減衰力特性の設定ができること、ライダーの操作や車両の走行状態に合わせてリアルタイムで減衰力特性を可変させ、車体挙動を制御することを求めた。これら要求を満足する電子制御サスペンション SHOWA EERA を活用し、あたかもセッティングの異なる複数のサスペンションを備えたような仕様の実現を図ることとした。

ライディングモードと連動するサスペンションモードは、多種多様な走行シーンにおいて乗り心地とハンドリングのトータルバランスに優れた MID モードと、その他の代表的な走行シーンにそれぞれ最適化した三つの特性を HARD, SOFT, OFFROAD モードとして設定した。それぞれの走行シーンとサスペンションモードのポジショニングを Fig. 4 に示す。また、各モードの具体的なねらいを以下に記す。

- (1) HARD: オンロードツアラ用途に特化したモード
過度な姿勢変化を抑制し、積載、二人乗り走行での快適性と高車速なオンロード走行での安定性を向上
- (2) MID: 最もトータルバランスに優れたモード
多種多様な走行シーンにおいて乗り心地とハンドリングを両立
- (3) SOFT: 悪路や滑りやすい路面コンディションでの走行に特化したモード
スムーズで柔らかい乗り心地性能を追求し、快適性と安心感を向上

Riding mode		Suspension mode	Road condition	Characteristic
TOUR		HARD	On-road	More sportier and stable riding even with passenger and full luggage
URBAN		MID	Variety	The most balanced in various situations (The Africa Twin)
GRAVEL		SOFT	Uneven road, gravel, wet	More secure and comfortable on unstable roads
OFFROAD		OFFROAD	Off-road	Maximize real off-road performance

Fig. 2 Presumed situations and riding characteristics



Fig. 3 Multi-information display and left handlebar switches

Suspension mode	Tandem and full luggage	Highway	Winding road (high speed)	Winding road (tight corner)	City road	Uneven road	Wet	Off-road (for beginners)	Off-road (for experts)
HARD									
MID									
SOFT									
OFFROAD									

Fig. 4 Optimized conditions image

(4) OFFROAD: オフロードでの自在なハンドリングに特化したモード

起伏の激しい路面の追従性や大荷重の衝撃吸収性に優れ、オフロード走破性を向上

3. システム構成

3.1. 電子制御サスペンションの基本構成

Africa Twin に採用する電子制御サスペンションシステムには、砂利の飛散や泥水の付着など過酷なコンディションでの走行においても、システムの耐久信頼性を満足することが求められる。また路面追従性の良いサスペンションを追求するためには、ばね下重量は軽量であることが重要である。そのため、フロントフォーク右側にストロークセンサを内蔵したセンシング機能、左側にカートリッジと電子制御バルブを備えた減衰力制御機能を分散配置した SFF-CA⁽²⁾、リヤクッションはメカニカルバルブと電子制御バルブをシリンダ外側の上部に直列配置した BFRC⁽³⁾ 構造をベースとした。これにより、ストロークセンサと電子制御バルブ、およびハーネス類はすべて車体上部に配置し保護する構成が可能となり、システムの耐久信頼性とばね下重量の軽量化の双方に寄与している。前後ともにオイル流路内にリニアソレノイド駆動式電子制御バルブを配置し、電子制御バルブとメカニカルバルブを併用し減衰力を発生する。前後サスペンションの構成を Fig. 5 に示す。

3.2. 電子制御サスペンションシステム

電子制御サスペンションシステムのサスペンションモ-

ドは、ライダーが選択したライディングモードに連動して切り替わる。フロントフォークのストロークセンサ、Inertial Measurement Unit (IMU) および FI-ECU から車両の走行状態を常時センシングし、サスペンション専用 ECU に情報を集約している。サスペンション ECU からの電流指令によりリニアソレノイドを駆動させ、電子制御バルブ部のオイル流路をリアルタイムに変化させることで減衰力特性を可変することができる。電子制御サスペンションシステム回路を Fig. 6 に示す。

本開発モデルに適していると判断した、SHOWA EERA の特長を以下に述べる。一つめは、サスペンションストロークセンサからサスペンションストローク速度 (Velocity of Piston: VP) を演算し、VP に応じて制御バルブを駆動し減衰力特性を可変させる VP-MAP 制御である。これにより、減衰力可変幅の中で自在な減衰力特性の設定を可能とする。二つめは、センシングした車体情報から減衰力を可変させるまでに最大 15 ミリ秒 (0.015 sec) 以内の高速な応答性である。

前者を活用することで、Africa Twin で想定する幅広い走行シーンや車両コンディションに合わせて、乗り心地やハンドリングの違いを明確に表現した四つのセッティングを設定した。また、極低速 VP のみに絞って減衰力を極端に低く設定することで、サスペンションの伸び縮みの切り替わりが速く、滑らかな作動性に優れた質感の高い乗り心地を付与した。

また後者を活用し、ストロークセンサ、IMU、FI-ECU の情報から、減衰力の可変量とタイミングの最適化を図った。想定するさまざまなシチュエーションでの走行テスト

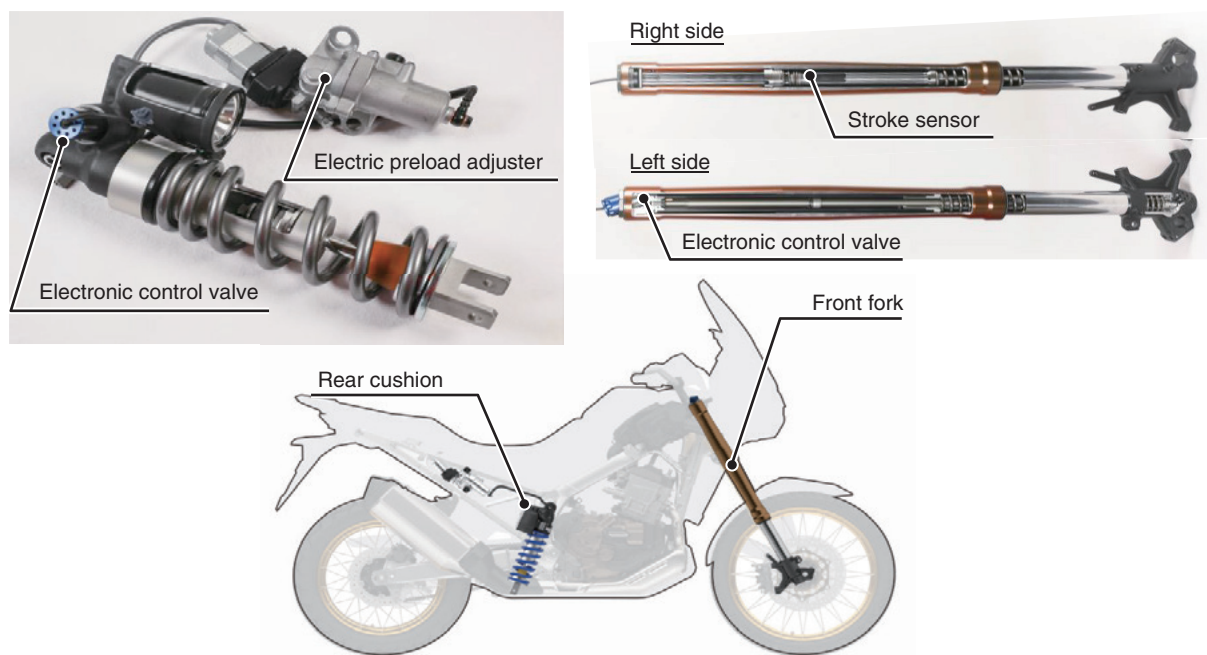


Fig. 5 Electronically-controlled front fork and rear cushion

を重ね、ライダーの操作や路面状況の変化に瞬時に対応し減衰力を可変させながら、急激な変化量を抑制し徐変させている。これにより、違和感のない自然な電子制御の介入を追求した。

また、電子制御サスペンションを採用するにあたっての配慮として、配線の断線や故障などの電子制御の異常発生を検知した場合は、MID モードと HARD モードの中間域の減衰力特性となる基本構造とした。最大や最小の減衰力で固定されることはない。そのため、旅行先で異常が発生した場合でも、コンベンショナルなサスペンション装着車として、乗り心地やハンドリングを大きく損なうことなく旅を続けることを可能とした。

アドベンチャモデルが要求する過酷な使用環境下での耐久信頼性、幅広い性能要求を満足させる最適な電子制御サスペンションシステムである。

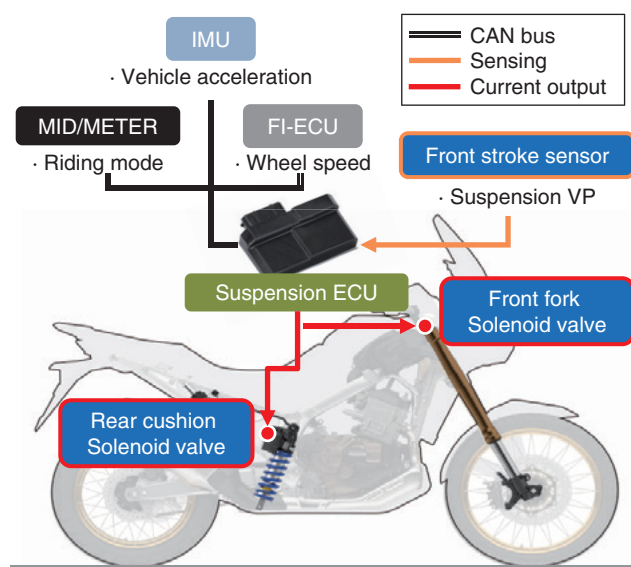


Fig. 6 Overview of control system

4. 各サスペンションモードのセッティング概要と適用技術

Africa Twin で想定される多種多様な走行シーンにおいて、乗り心地とハンドリングを両立するトータルバランスに優れた、MID モードを設定した。その MID モードをベースとし、各サスペンションモードのねらいと、セッティングを実現した手法について、以下の 3 項目について解説する。

- (1) OFFROAD モード：サスペンション VP に応じて徐々に減衰力が高まる減衰力セッティングとジャンプ着地制御
- (2) HARD モード：高荷重や高速走行に適した最も高い

減衰力セッティングと減速制御

- (3) SOFT モード：柔らかい乗り心地を追求した最も低い減衰力セッティングと車速連動制御

各適用技術については実測の走行データで効果を示す。この章で比較するモデルは、前後サスペンションストロークが同一で電子制御のないサスペンションを採用した、2020 CRF1100L Africa Twin Adventure Sports (以下 Without ES タイプ) とした。

4.1. OFFROAD モード (ライディングモード: OFFROAD)

OFFROAD モードでは、オフロードでの自在なハンドリングを実現するための、オフロード走行専用セッティングとした。路面の起伏が激しく、大小さまざまな凹凸が続くオフロードの走行では、路面追従性と大荷重の衝撃吸収性を両立したサスペンション特性が求められる。

フロント側の減衰力は路面追従性を良くするために、サスペンションがゆっくり動く領域では低い減衰力とした。また、大荷重の衝撃吸収性と車体挙動のすばやい収束のために、サスペンションの動きが速い領域では高い減衰力とした。Fig. 7 に示すように他の三つのモードとは異なり、サスペンション VP に応じて減衰力が徐々に高まるプロ

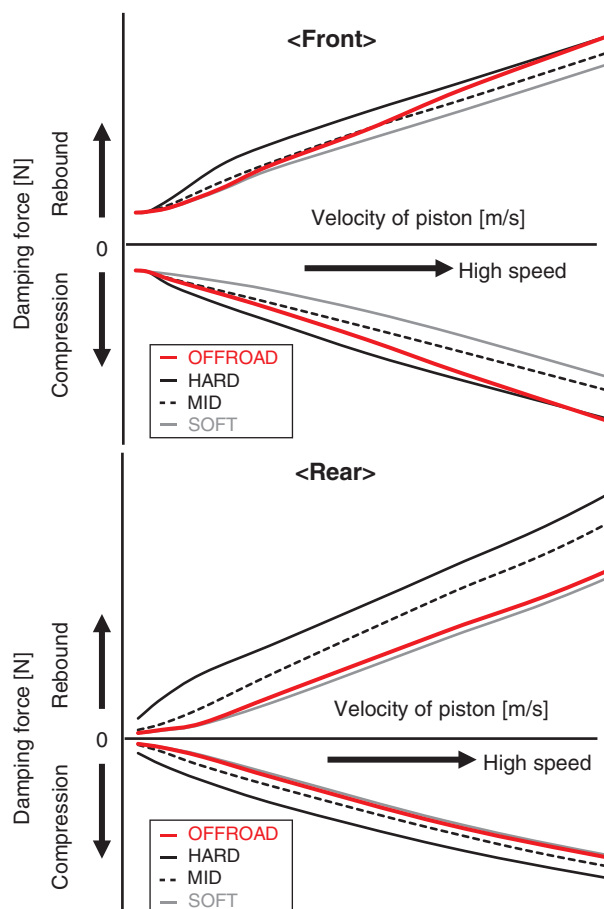


Fig. 7 Comparison of damping force characteristics of each mode

グリップ特性を付与した。また、砂地などの軟質なオフロード路面では、フロントタイヤが沈みこみ、荷重がフロント寄りに移行するため、ハンドルが左右にとられやすくなる。そこでフロント縮み側の減衰力を、低速 VP から高めた設定とした。リヤ側の減衰力は SOFT モードに対し全域で減衰力を高めることで、より過酷な路面コンディションでも走破性を高めた設定とした。

さらに、ジャンプからの着地時の衝撃低減をねらった、ジャンプ着地制御を付与した。IMU の三軸加速度の合算値から車両のジャンプ状態を検知し、着地に備えて前後サスペンションの減衰力を瞬時に高めるといったものである。Fig. 8 に、社内で定めたジャンプ台からの着地における走行データを示す。OFFROAD モードでは、着地時のばね上の上下加速度が、Without ES タイプに対し 41% 低減しており、着地の衝撃が低減されていることがわかる。オフロードでのファンライディングや、路面の起伏変化による不意なジャンプにおいて、サスペンションの底付きの衝撃を緩和し、ライダーの安心感を高める制御を実現した。

4.2. HARD モード (ライディングモード: TOUR)

HARD モードでは、積載や二人乗り走行などの、ばね上質量が増加する高負荷条件でも快適に走行できる、オンロードツアア用途に特化したセッティングとした。また、ワインディング路でのハイペースな走行や高速道路の巡航など、より高速域での高い安定感を発揮する特性の実現をねらった。

そのため、加減速や旋回時における過度な姿勢変化を抑制し、車体挙動を安定させるため、低速 VP から最も減衰力を高めた設定とした (Fig. 9)。ハンドリングに寄与の大きい低速 VP 領域で、MID モードに対し、フロント縮み側 25%、伸び側 20%、リヤ縮み側 40%、伸び側 75%、減衰力を高めた。特にリヤ側の減衰力を大きく高めることで、積

載や二人乗り走行時のばね上質量が増加した車両コンディションでも、衝撃吸収性と車体挙動が穏やかに収束する特性を維持することを可能とした。

さらに、制動時にフロント側が沈みこみ前のめりの姿勢となるノーズダイブを緩和する減速制御を取り入れた。これは、IMU から車両の減速状態を検知し、減速度に応じてフロント縮み側とリヤ伸び側の減衰力を一時的に高める制御である。Fig. 10 に平坦な舗装路で、車速 80 km/h か

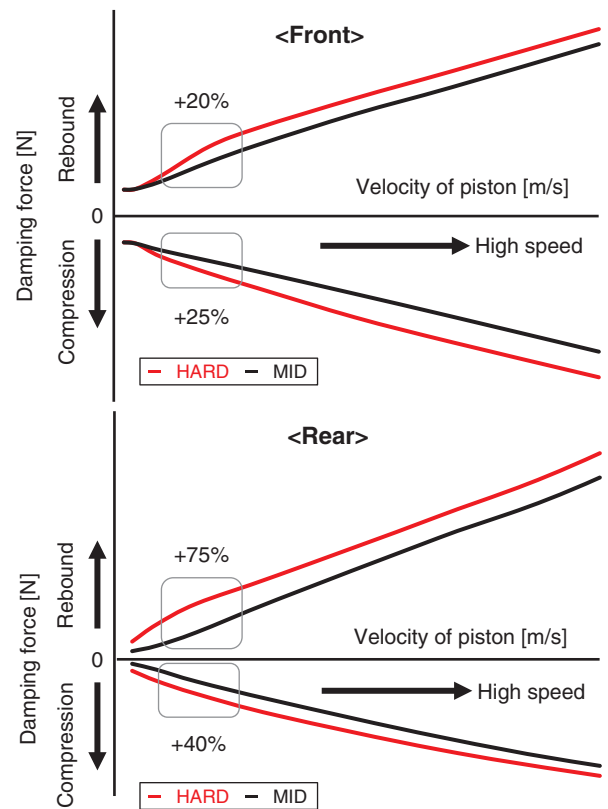


Fig. 9 Damping characteristics of HARD mode

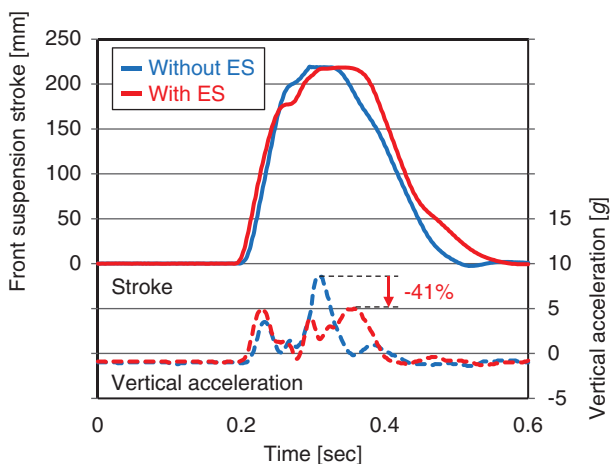


Fig. 8 Front suspension stroke and vertical acceleration of sprung mass when jump landing

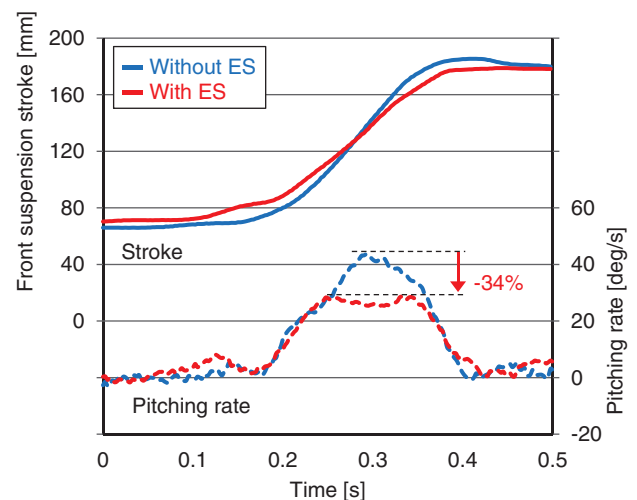


Fig. 10 Front suspension stroke and pitching rate when braking hard

らの制動時における HARD モードの走行データを示す。Without ES タイプに対し制動時のフロントサスペンションのストローク変動がゆるやかで、車両のピッチ角速度が 34% 低減している。制動時のノーズダイブが抑制されており、穏やかな車体挙動が実現できた。

4.3. SOFT モード (ライディングモード: GRAVEL)

SOFT モードでは、柔らかい乗り心地を追求し、不安定な路面状況でも快適で安心に走破できる、アドベンチャアラならではの用途に特化したセッティングとした。荒れた路面や滑りやすい路面の走行では、サスペンションを滑らかに作動させライダーに伝わる衝撃を吸収し、路面追従性の良い特性とすることでタイヤの接地荷重を常に安定させることが求められる。

そのため、SOFT モードは最も低い減衰力の設定とした。乗り心地性能に寄与の大きい中速 VP 領域で、MID モードに対し、フロント縮み側 20%、伸び側 10%、リア縮み側 15%、伸び側 30% 低い減衰力としている。しかし、高車速走行時に減衰力が低すぎると車体挙動の収束も低下する。この高車速走行時の安定感と低車速走行時の乗り心地を両立するため、走行速度に応じて二つの異なる減衰力特性を付与した車速依存制御を設定した。車速 80 km/h 以下の低車速用 (V0) と、130 km/h 以上の高車速用 (V1) の、二つの減衰力特性を設定し、その間の特性については、変化量を徐変させることで自然な車体挙動を実現した。V0 と V1 それぞれの減衰力特性イメージを Fig. 11 に示す。V1 の減衰力特性は V0 に対し、フロント縮み側と、前後の伸び側の減衰力を高めている。

小さな凹凸が連続する石畳路の同一区間を、車速 60 km/h で直進走行したときのばね上の上下加速度の平均値を比較した (Fig. 12)。SOFT モードでは、Without ES タイプに対して 15% の低減となっており、ライダーに伝わる衝撃が緩和されていることがわかる。柔らかい乗り心地のフィーリングが、データにも示されている。

4.4. ABS 連動制御

急制動をおこなった際の ABS 作動時に、その作動を知らせるキックバックとは別に、車体を揺り返すピッチング挙動が発生することがある。これは、ABS の制御によりブレーキの液圧が下がる瞬間、急制動でかかっていたフロントタイヤの接地荷重が減少し、フロントサスペンションが縮み側から伸び側の動きに移行することによって生じる。この伸び側の動きを最小限に抑えることができれば、急制動時のタイヤ接地荷重が安定し、揺り返し挙動も抑制することが可能となる。

本システムでは、ABS が作動する急制動を検知してフロントブレーキの液圧が下がった際に、フロント伸び側の減衰力を高め伸び側の動きを抑制する、ABS 連動制御を新

たに開発し、すべてのサスペンションモードに適用した。Fig. 13 に平坦な舗装路で、車速 40 km/h から ABS が作動する急制動をおこなった際の MID モードの走行データを示す。ABS 作動中の車両のピッチ角速度が Without ES タイプに対し 45% 低減している。ABS 作動時の揺り返しのピッチング挙動を抑制し、穏やかな車体挙動を実現した。

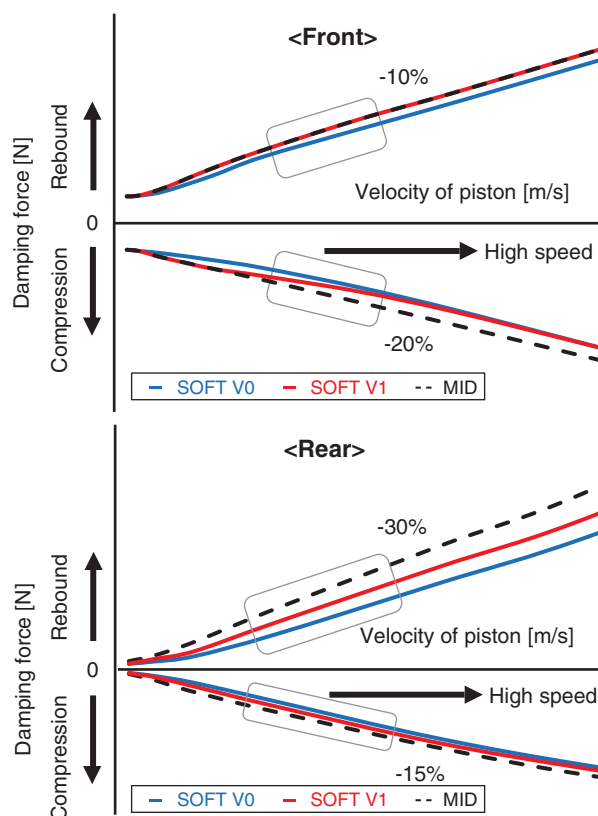


Fig. 11 Damping characteristics of SOFT mode

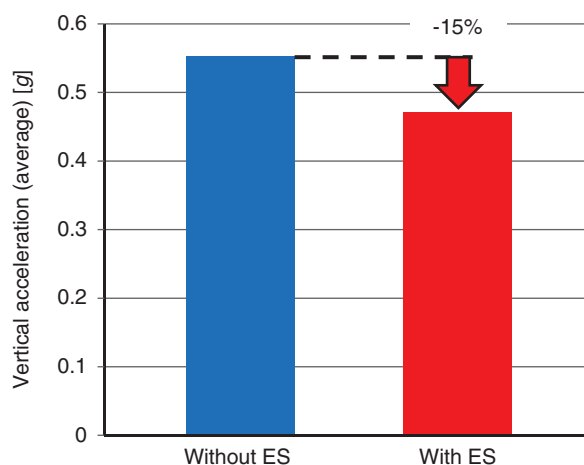


Fig. 12 Vertical acceleration of sprung mass when passing through cobble stone road

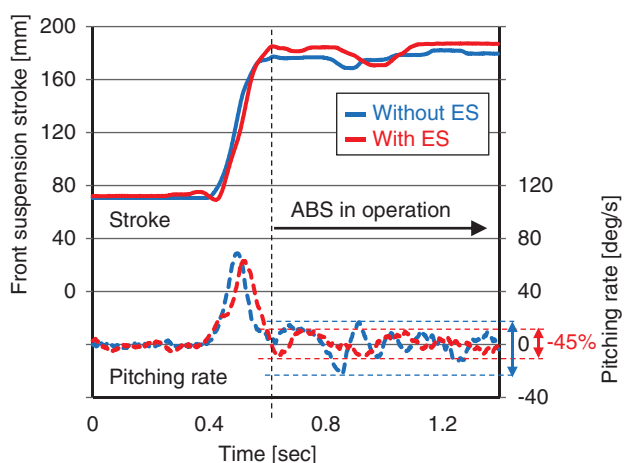


Fig. 13 Front suspension stroke and vertical acceleration of sprung mass when braking hard

5. まとめ

2020 CRF1100L Africa Twin Adventure Sports ES にむけ、新たに電子制御サスペンションシステムを開発した。採用した SHOWA EERA の特長である、自由度の高い減衰力特性のセッティングと車両の走行状態に応じて瞬時に減衰力を可変する制御を組合せることで、二人乗りや多くの荷物を積載してのツアラ用途から過酷なオフロード用途まで、幅広い用途のそれぞれに適した性能を発揮する四つのサスペンションモードを設定した。このサスペンションモードを含めた、エンジン出力特性、エンジンブレーキ特性、クラッチ特性 (DCT モデルのみ)、ABS 特性の五つの要素を統合制御したライディングモードを設定した。走行中でもライダーがハンドルスイッチ操作一つで選択でき、走行シーンと車両のコンディションに応じて、ライダーが意のままに操れる特性を得られるシステムを実現した。アドベンチャーマインドをかきたて「どこまでもいける」をいつかは自らの手で実現したくなる、旅のパートナーとして末永く愛用いただききたい。

参考文献

- (1) 森田健二, 岡田望, 岡村広志, 鈴木将太: 2020 CRF1100L Africa Twin の開発, Honda R&D Technical Review, Vol. 32, No. 2, p. 17-26
- (2) https://www.showa1.com/jp/technology/motorcycle/eera_sff-ca.html
- (3) https://www.showa1.com/jp/technology/motorcycle/bff_bfrc-lite.html

■ 著 者 ■



岡村 広志



津田 剛



小河原充史

2020 CRF1100L Africa Twin Adventure Sports に 搭載した二輪車用追加光源式コーナリングライト

Cornering Lights of 2020 CRF1100L Africa Twin Adventure Sports Using Additional Light Source

木 崎 徳次郎¹
Tokujiro KIZAKI

佐 藤 宏 貴¹
Hirotaka SATO

要 旨

2013年に国際連合規則の改正以降、コーナリングライトは二輪車への装備が認められ、今日までに複数の二輪車に搭載されている。我々はツーリング時の快適性、つまり、中速域を重視し郊外路に適したコーナリングライトを開発し、CRF1100L Africa Twin Adventure Sportsに搭載した。コーナリングライトを設計する上で必要な、バンク角に応じた作動範囲の設定、追加光源による配光の設定、誘目性の抑制、の三つの要素についてCRF1100L Africa Twin Adventure Sportsを用いて検討した。コーナリングライトの作動範囲は、実際の夜間走行時のバンク角発生頻度から設定し、追加光源による配光は、すれ違いビームと同程度の明るさの照射範囲をコーナリング方向に照射するように設定した。また、誘目性については、コーナリングライト点灯時の、徐々に100%点灯させる制御と、ON/OFFにヒステリシスを設定することで抑制した。これらにより、ツーリングに適したコーナリングライトを実現した。

ABSTRACT

After the revision of United Nations regulations in 2013, cornering lights are permitted for motorcycles. A number of cases of cornering light applications to motorcycles are seen up until now. We have developed the cornering lights for comfortable touring, especially suitable for riding suburban roads mainly at moderate speeds, and applied to the CRF1100L Africa Twin Adventure Sports. Using the said motorcycle, we conducted studies on the three key factors in the designing of cornering lights; the setting the operating range according to the bank angle, the setting the light distribution with an additional light source, and the control of visual distraction. The operating of cornering lights is determined from the frequency of bank angles measured from actual night riding. The distribution of light from the additional light source is determined so as to illuminate the cornering direction at the same intensity as the dipped beam. Regarding the visual distraction, the cornering lights are designed so as to increase intensity gradually after turning it on until reaching 100%. A hysteresis is also set in the switching to help prevent flickering. With these measures taken, the cornering lights suitable for touring have been realized.

1. 序論

一般に、四輪車で採用されているベンドライティングは、ハンドル切れ角に応じて進行方向を照射している。その方式には、すれ違いビーム（LOビーム）をハンドル切れ角方向へ移動させる方法と、専用に配光設計された追加光源を点灯させる二つの方法がある⁽¹⁾。

対して二輪車で採用されているコーナリングライトは、コーナリング時のハンドル切れ角では無く、バンク角に応じて進行方向を照射する追加光源を点灯させる方

式のみが国際連合規則（UN規則）^{(2),(3)}で認められている（2013年制定）。今回我々は、このHonda二輪初となる、追加光源式コーナリングライトを、「過酷な大地を越えて冒険の道へと誘う True Adventure」を基本コンセプトとしたCRF1100L Africa Twin Adventure Sports（CRF1100L AS）⁽⁴⁾へ搭載した。CRF1100L ASにおける快適技術のねらいは「どこまでも行ける High touring ability」でありロングツーリングを想定している。そこで本コンセプトにおいて、特にコーナリングライトが視認性を支援するであろう夜間の郊外路を代表的なシチュエーションと想定した。そ

¹ 本田技研工業株式会社

の夜間の郊外路において、バンク角が増加しても進行方向内側の路面照射範囲が保持されることをねらった開発をおこなった。CRF1100L AS に搭載した、コーナリングライトの点灯状態例を Fig. 1 に示す。

CRF1100L AS では、LED 光源を用いたコーナリングライトを、左右のヘッドライトの下にそれぞれ3灯配置した。バンク角が深くなるとともに、外側から順に追加点灯していく (Fig. 2)。

二輪車のコーナリングライトを設計する上での必要な要素は以下の三つである。

- (1) バンク角に応じた作動範囲の設定
- (2) 追加光源による配光の設定
- (3) 誘目性の抑制

本稿では、CRF1100L AS でのコーナリングライト開発における三つの要素それぞれの検討結果について次章より概説する。



Fig. 1 CRF1100L AS with right cornering light turned on

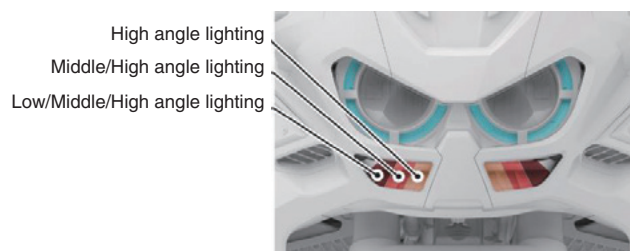


Fig. 2 Lighting pattern of cornering light of CRF1100L AS

2. バンク角に応じた作動範囲の設定

2.1. バンク角の発生頻度

二輪車ではバンク角に応じてコーナリングライトの照射をおこなうため、その角度を検知してコーナリングライト

の作動範囲を設定する必要がある。

UN 規則において、バンク角 5° 以下でのコーナリングライトの作動は対向車のドライバーに幻惑を与える可能性があることから許されていない。そこで、路面の凹凸等によるセンサ読み値の変動および加減速によるヘッドライト配光状態の変動へ配慮し、バンク角 10° 以上から作動させることとした。

我々は、コーナリングライトの作動角度を決定するために、CRF1100L AS を用いて、以下の実走行データより夜間走行におけるバンク角度の頻度を測定した。

夜間に環境照明設備が少ない、弊社テストコース内にある EU 郊外路コース⁽⁵⁾にて、CRF1100L AS で走行した際のバンク角の発生頻度を計測した。身長 170 cm から 180 cm の複数名のテストライダーが、走行したときの車体慣性装置 (Inertial Measurement Unit: IMU) が計測したバンク角発生頻度を Fig. 3 に示す。

横軸が角度、縦軸の棒グラフが相対発生頻度、線グラフが相対累積発生頻度である。

夜間に CRF1100L AS で郊外路を走行した際のバンク角の発生頻度は 10° から 24° まではほぼ同程度であり、99.9% が 34° 以内であった。

2.2. 各ランプの作動バンク角の設定

前節の実験データより、郊外路走行時における CRF1100L AS のバンク角範囲は 10° から 34° と幅広い。そこで CRF1100L AS には、追加光源を片側に三つ設け、それぞれの作動角度をバンク角 10° 以上、 18° 以上、 26° 以上とし、 8° 間隔で3等分するように設定した。コーナリングライトの作動角度を等間隔に設定することで、バンク角が深くなっていく過程での作動タイミングが均一になることをねらった。Fig. 4 に作動バンク角とコーナリングライトの点灯パターンを示す。

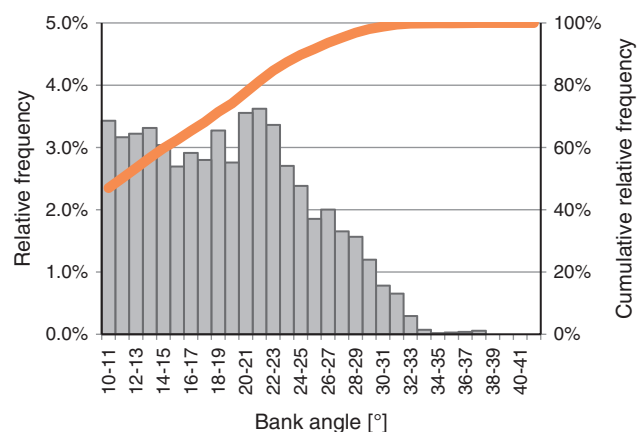


Fig. 3 Bank angle frequencies when tested on EU suburban course at night using CRF1100L AS

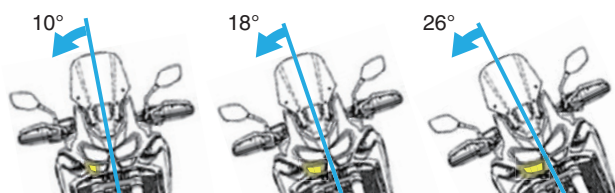


Fig. 4 Threshold bank angle and lighting pattern of cornering lights in CRF1100L AS when leaning right

各バンク角で作動したコーナリングライトは、バンク角が深まっていく過程で追加点灯する設定となっている。すなわち、バンク角がそれぞれの作動バンク角を下回るまで消灯しない。このため、18°以上で作動するコーナリングライトが点灯した際には2灯点灯、26°以上で作動するコーナリングライトが点灯した際には、3灯すべてのコーナリングライトが点灯することとなる。

3. 追加光源による配光の設定

3.1. 配光方向決定のパラメータ

対向車のドライバーへの幻惑防止のために、通常ヘッドライトの配光は上面がカットされている。二輪車はコーナリング時にバンクするため、進行方向内側の照射範囲が減少してしまう。そのため、減少した照射範囲を補う方向にコーナリングライトの配光を設定する必要がある。Fig. 5に右側コーナに対してバンク角が深くなるほど進行方向内側の照射範囲が減少するイメージを示す。

四輪車はハンドルの動きに応じて前輪の舵角が変化し、その角度から旋回半径が決まるため、ベンドライティングの照射方向は一意に定まる。対して二輪車は遠心力と路面反力が釣合うようにバンクして旋回するため、バンク角と速度の釣合いの結果から旋回半径が決まることになる。

そのため二輪車のコーナリングライト照射方向は、バンク角だけでなく旋回時の速度と併せて設定する必要がある。CRF1100L ASでは中速度の郊外路走行を想定したことから、旋回時の速度を50 km/hとして検討をおこなった。

3.2. 配光方向の設計

既に二輪車用として量産化、搭載されているコーナリングライトには、旋回半径が大きい高速道路を想定した遠くを照らす高速走行タイプと、旋回半径が小さい市街地の交差点などを想定した近くを照らす低速走行タイプがある (Fig. 6)。

高速走行タイプは、コーナがゆるやかな高速道路での視認性向上をねらいとしているため、バンク角が深くなるほど照射位置が遠方に伸びていく設定となっている。また、低速走行タイプは、市街地の交差点などでの視認性向上をねらいとしているため、バンク角が深くなるほど照射位置がバンク方向内側に伸びていく設定となっている。このように、それぞれの目的に合った配光方向となっている。

我々はCRF1100L ASのコンセプトから、郊外路のカーブを想定した中速走行時での視認性向上をねらいとし、中距離を照らす配光設計をおこなった。郊外路は照明環境を期待できない場所も多く、コーナリングライトの有用性をライダーが感じる機会も多いと考えた。時速50 km/hで、コーナリングライトの1灯目が点灯する10°バンク時の旋回半径は、約110 mとなり、2.5秒間走行⁽⁶⁾した未来位置とコーナリングライト発光部を結ぶ直線の角度はおおよそ

Type	High-speed riding	Low-speed riding
Illumination image		
Add direction image (3 additional light sources)		

Fig. 6 Examples of cornering lights for motorcycles

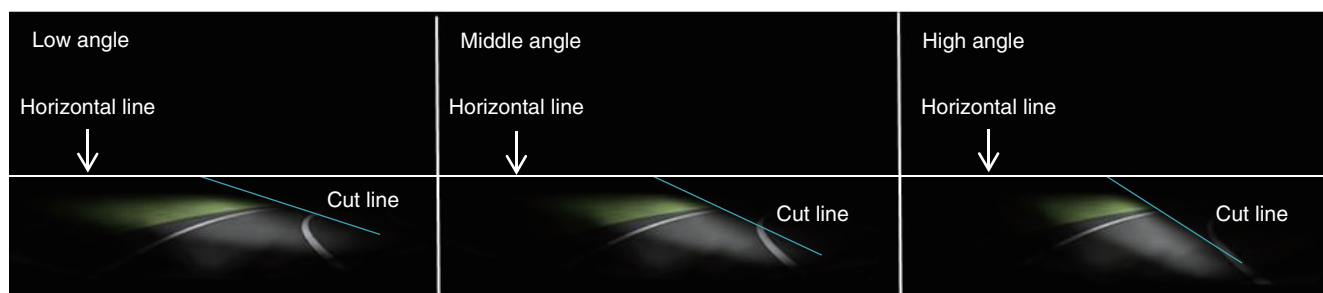


Fig. 5 Area lacking illumination inside of going direction as bank angle increases when only LO beam used

9°である。また、時速 50 km/h で、コーナリングライトの 3 灯目が点灯する 26°バンク時の旋回半径は、約 40 m となり、2.5 秒間走行した未来位置とコーナリングライト発光部を結ぶ直線の角度は、およそ 25°であった。これらにより配光方向をその中心となる 17°に設定した (Fig. 7)。

3.3. 配光範囲の設定

配光設計の基準となる明るさを決めるため、身長 165 cm から 180 cm の複数名のライダーにより LO ビームで前述の EU 郊外路コースを走行し、安心して走行できる路面照度を確認した。その結果、8 lx 以上の照射範囲 (8 lx 帯) が十分に明るいと感じたライダーが多かったため、コーナリングライト照射範囲の明るさの基準を 8 lx 帯以上とした。Fig. 8 に CRF1100L AS の LO ビーム 8 lx 帯を示す。図から CRF1100L AS の LO ビーム配光は、奥行き 5 m-30 m、幅 6 m の範囲の路面を含むように照射していることがわかる。

我々はコーナリングライトの 8 lx 帯が LO ビームの 8 lx 帯に対して違和感がない照射範囲となるように、奥行き 15 m-25 m、バンク方向に 6 m の幅を覆うように配光設計をおこなった。その範囲を Fig. 8 にオレンジ枠で示す。

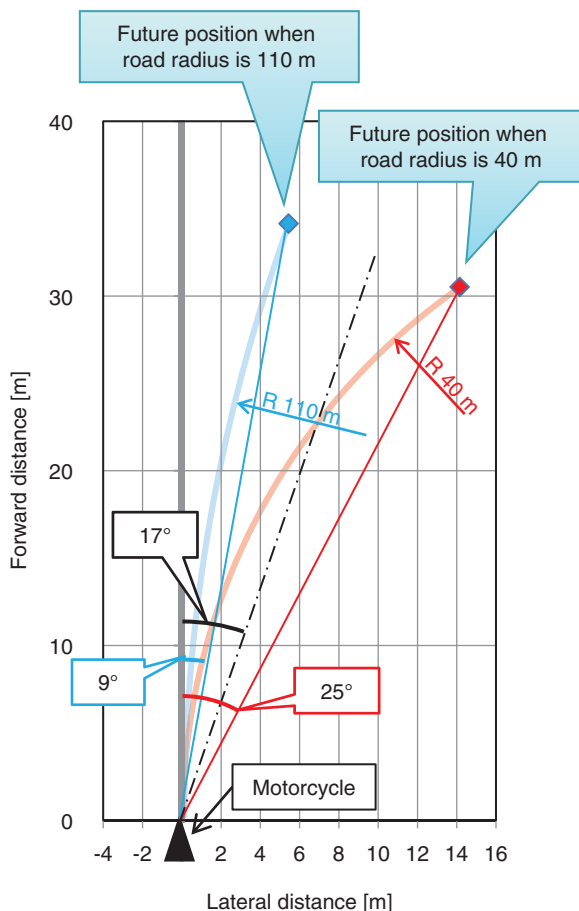


Fig. 7 Future positions after traveling for 2.5 sec on road having turning radius of 110 m and 40 m, and line in middle

3.4. 動的配光設計

Fig. 6 に示したように、コーナリングライトの配光については、その目的に応じて、バンクが深くなるほど配光範囲が遠方に伸びるものや、バンク方向内側に伸びるものがある。どちらもバンク角が深くなる時は速度が増していると想定し、その配光範囲を増加速度と想定する曲線半径に応じて移動させている。

一方、昼間におけるコーナリング中のライダーの視線はコーナ出口方向に向けられており、コーナリング中に視線を変えることは少ない。そこで我々は、夜間であってもライダーの視線が極力移動しないような配光設計をおこなった。すなわち、バンクが深くなっても進行方向内側の路面照射範囲を保持するような配光設定とした。Fig. 9 に右側の各バンク時のコーナリングライト有無での 8 lx 帯の路面配光を比較した図を示す。実線が LO ビームと共にコーナリングライトが点灯した際の 8 lx ライン、破線が LO ビームのみ点灯した際の 8 lx ラインである。

Fig. 9 に示すように、LO ビームのみ点灯してバンクすると路面照射範囲が減少し、進行方向の 8 lx 帯が確保されない。対して、コーナリングライトを搭載することで進行方向の 8 lx 帯が確保されることがわかる。

このコーナリングライトを CRF1100L AS に実装し、前述の EU 郊外路コースを、身長 165 cm から 180 cm の複数名のテストライダーが走行し、コーナリングしやすい配光であるこ

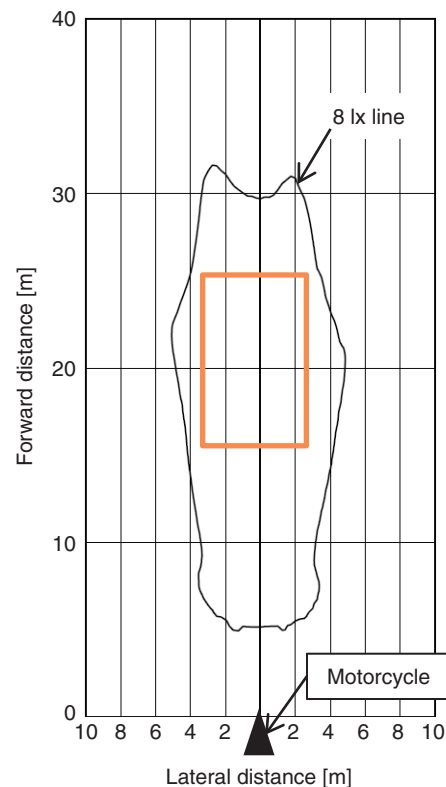


Fig. 8 LO beam light distribution

とを確認した。Fig. 10に右コーナ走行時のLOビームのみの進行方向内側の路面照射範囲とコーナリングライトがある場合の進行方向内側の路面照射範囲のCGの対比を示す。

コーナリングライトがある場合、進行方向内側の路面照射範囲が保持されることがわかる。

4. 誘目性の抑制

コーナリングライトはバンク角によって点いたり消えたりする。ライトの点滅というその性質から、ライダー本人や周囲の運転者に対する誘目性、すなわち不要な注意を引き

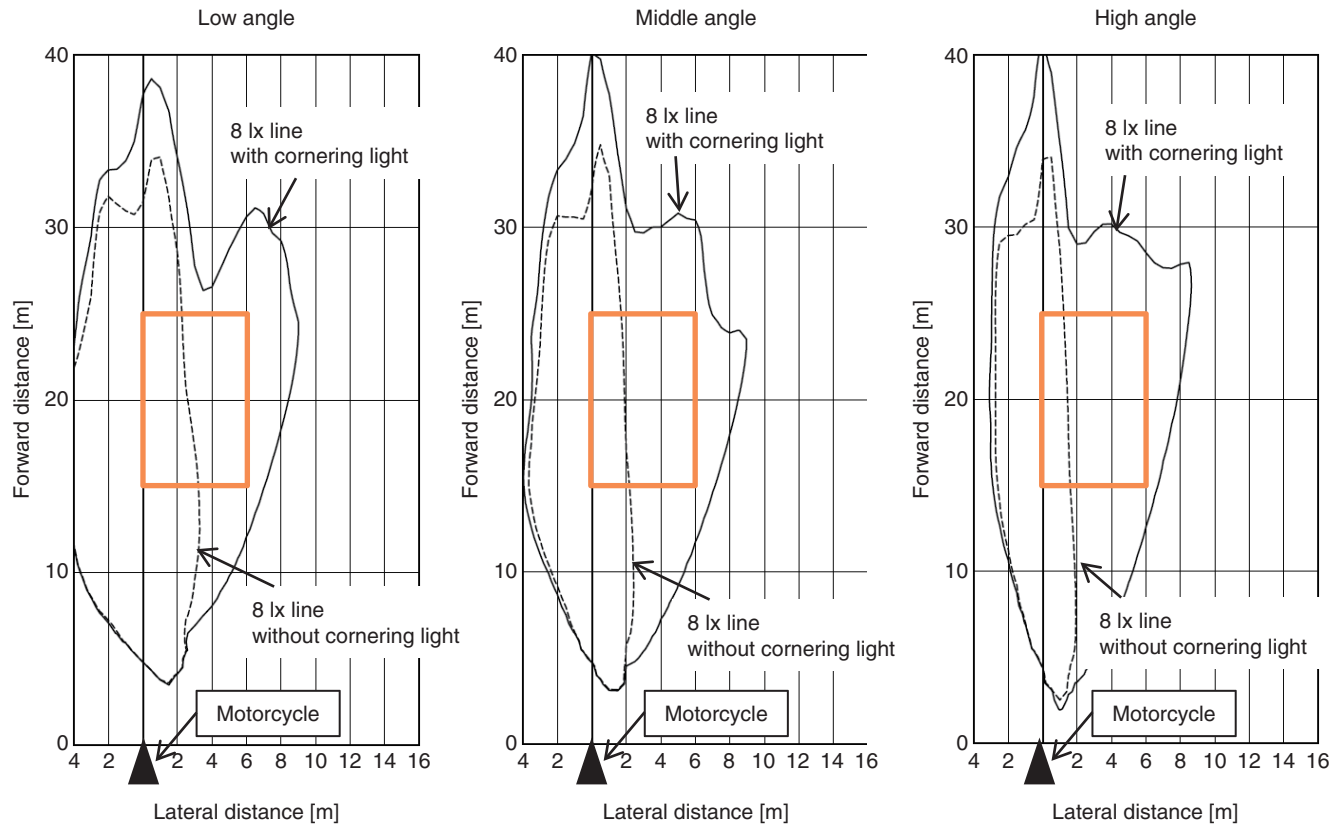


Fig. 9 Comparison of light distribution with and without cornering lights at each bank angle when right cornering

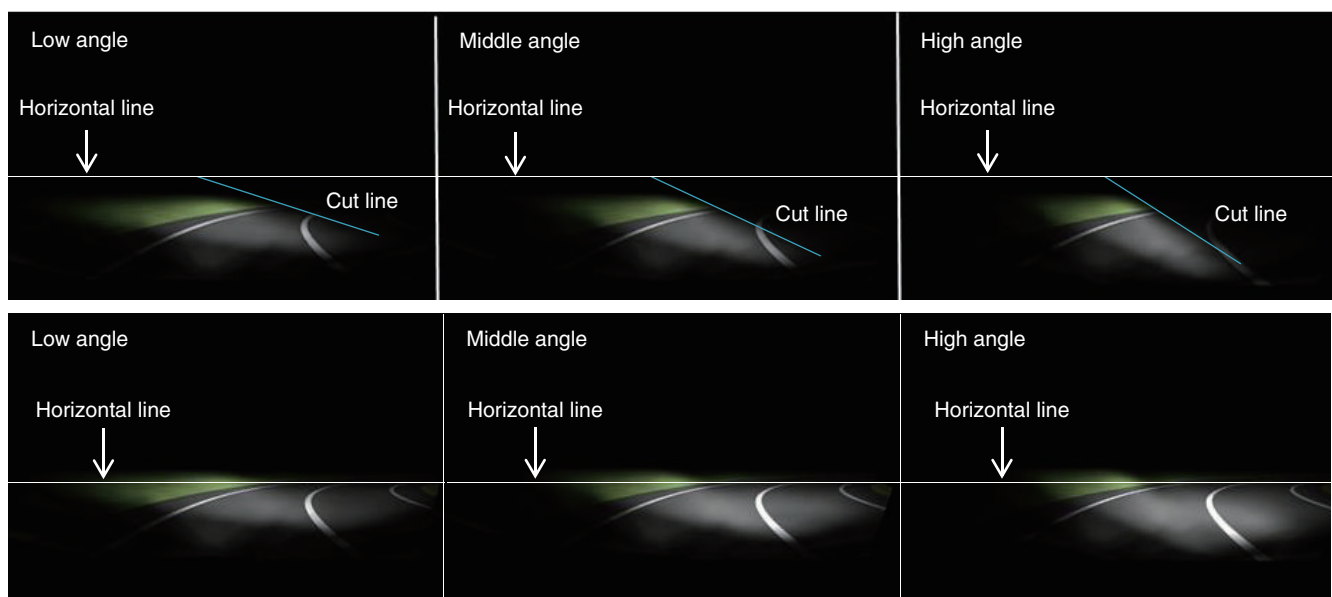


Fig. 10 Comparison of CG pictures of illuminated road surface in right corner when only LO beam is provided and when cornering light is provided

付けないための配慮が必要となる。その対策として、追加光源作動時の急激な明るさの変化や、素早く点いたり消えたりする追加光源 ON/OFF 時のフリッカ現象に対して以下の設定をおこなった。

4.1. 追加光源作動時の点灯時間

コーナリングライト作動バンク角にて、不足した路面照射範囲を補うように追加の配光がされることで、そのエリアにおける急激な明るさの変化が発生する。そのため、追加光源作動時にライダーの視線を不自然に誘導しない配慮が必要となる。CRF1100L AS では、前章で述べたライダー視線における路面照射範囲の保持に加え、明るさの変化がライダーの目に急瞬に感じないような、徐々に点灯させる方式を取り入れた。フィラメント電球に比べ点灯応答速度に優れた LED 光源⁽⁷⁾であるがゆえに、意図的にコントロールする必要がある。

LED 光源を徐々に点灯させる時間については、点灯開始から 100% 点灯までの時間を 0.1 秒から 0.5 秒までの範囲とし確認試験を実施した。前出の EU 郊外路コースにおいて、車速 50 km/h をコーナ進入速度とし、0.1 秒刻みで時間を変更し確認した。社内エキスパート 10 名による評価の結果、0.1 秒では急激に感じ、0.3 秒では遅過ぎたため、0.2 秒が最適であることが分かった。

4.2. 追加光源 ON/OFF 時のフリッカ現象

CRF1100L AS のコーナリングライトの点灯は、前述のようにバンク角 10° から 34° までも 8° 間隔で 3 等分するように設定した。何の配慮もおこなわない場合、コーナリングライトの ON/OFF となるバンク角を行き来することで、コーナリングライトが素早く点いたり消えたりする、フリッカ現象が発生する。特に作動最小角度である 10° 付近では、車線変更などの軽いバンク操作でも追加光源の点灯、消灯が確認された。そこで、点灯開始よりも点灯終了を浅いバンク角に設定、すなわちヒステリシスを設けることでフリッカ現象に対応することとした。

点灯開始角度と点灯終了角度のヒステリシスについては、1° から 0.5° 刻みで確認をおこなった。EU 郊外路コースを車速 50 km/h で走行した際のフリッカ現象は、ヒステリシス設定 1.5° ではまだ感じやすく、2° 以上でほぼ解消されるという検証結果となった。よって、3 段階全ての点灯タイミングにヒステリシスを設定し、点灯作動開始バンク角を 12°, 20°, 28°, 点灯停止バンク角を 10°, 18°, 26° とした。Fig. 11 に各バンク角によるコーナリング時のヒステリシス設定イメージを示す。

4.3. 実車テストによる確認結果

これらの結果より、点灯開始から 100% 点灯までの時間を 0.2 秒に設定し、点灯開始角度と点灯終了角度のヒステ

リシスを 2° に設定することで、コーナリングライトの点灯によりライダーの視線を不自然に誘導しないことと、点灯、消灯によるフリッカ現象の解消を確認した。

これらの設定により、急激な明るさの変化やフリッカ現象による、ライダー本人や他の運転者に対する誘目性を抑えることを実現した。

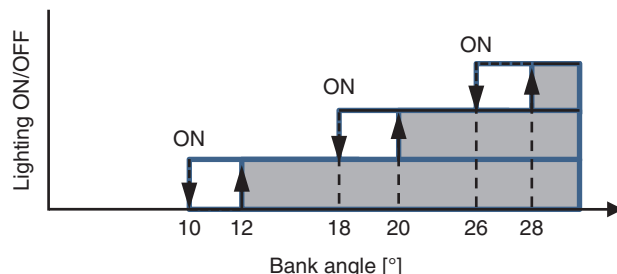


Fig. 11 Hysteresis set at each threshold bank angle

5. 結論

我々は CRF1100L AS のコンセプトに添った、ロングツーリングにおける夜間の郊外路を想定した二輪車用コーナリングライトを開発した。また、以下の三要素をそれぞれ設定した。

(1) バンク角に応じた作動範囲の設定

搭載を想定した車種を用いて、実際の夜間バンク角の発生頻度を確認することで、コーナリングライトに必要な作動範囲を設定した。

(2) 追加光源による配光の設定

バンク時の配光を、LO ビームの 8 lx 帯照射範囲に対して違和感が少なくなるように設定した。

(3) 誘目性の抑制

明るさの急峻な変化やフリッカ現象による誘目性を抑制するために、コーナリングライト点灯時の、徐々に 100% 点灯させる制御と、ON/OFF の点灯タイミングにヒステリシスを設定した。

CRF1100L AS の進化したツーリング走行性能をコーナリングライトと共に夜間でも楽しみ、また、夜間でしかできない体験をしていただきたい。

参考文献

- (1) 石黒浩二, 山田有二:世界初インテリジェント AFS の制御仕様開発, デンソーテクニカルレビュー, Vol. 9, No. 2, p. 137-141, (2004)
- (2) <http://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/2013/r053r3e.pdf>

- (3) <http://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/2013/R113r3am1e.pdf>
- (4) 森田健二, 岡田望, 岡村広志, 鈴木将太: 2020 CRF1100L Africa Twin の開発, Honda R&D Technical Review, Vol. 32, No. 2, p. 17-26
- (5) <https://www.honda.co.jp/environment/face/case40/episode/episode01.html>, 2020/5/21
- (6) 日本道路協会: 道路構造令の解説と運用, 日本道路協会, 667p., (2004)
- (7) LED 照明推進協議会: LED 照明ハンドブック (改訂版), オーム社, 248p., (2011)

■ 著 者 ■



木崎徳次郎



佐藤宏貴

ニュース記事を話題にできる音声対話システム 検証のための実験環境

Experimental Environment for Verification of Speech-based News Delivery System

本田 裕¹

Hiroshi HONDA

松山 洋一²

Yoichi MATSUYAMA

高津 弘明²

Hiroaki TAKATSU

小林 哲則²

Tetsunori KOBAYASHI

要 旨

Web上に配信されているニュース記事を話題として、情報伝達をしながら、ユーザの発話へ多様に応答できる独自の音声対話システムを開発した。従来の音声対話システムでは一問一答型が主流であり、ニュース記事のようなまとまった情報の伝達には適していない。また、ニュース記事の読み上げシステムの場合は、ユーザが質問をはさむことができない。そこで、会話用要約技術、パラ言語認識器、間の調整、音声合成器といった音声対話システムに関する新たな要素技術を開発し、Web上にリアルタイムに配信されているニュース記事を話題にして日本語で音声対話が可能な実験システムを構築した。これにより、さまざまな利用シーンでシステムの検証を容易におこなうことができるようになった。今後、本システムを実用化することにより、運転中にドライバの話し相手となるような音声対話が可能となる。

ABSTRACT

An original spoken dialogue system was developed that is capable of diverse responses to user utterances while communicating information using news articles distributed on the Internet. Most conventional spoken dialogue systems are question-and-answer types, and are not suited to communicating large amounts of information such as news articles. In addition, users are unable to interrupt news article read-aloud systems with questions. Therefore, new key technologies related to spoken dialogue systems were developed, including conversation summarization technology, a paralinguistic recognizer, pause adjustment, and a speech synthesizer, and an experimental system was constructed that is capable of spoken dialogue in Japanese using news articles distributed in real time on the Internet. This enabled easy system verification in various usage scenarios. Practical application of this system will enable spoken dialogue in the manner of a conversation partner for drivers while driving.

1. まえがき

自動車業界はグローバルで事業環境が急激に変化しており、CASE(コネクテッド、自動運転、シェアリング、電動化)をはじめとする新技術や新サービスの開発が急速に進んでいる。特に、コネクテッド技術の進化により、ドライバは車内にいながらさまざまなサービスを享受できるよう

になりつつある。近年、AIスピーカのように音声対話が可能な車内向けシステムの普及が進んでいる。その一例としてHonda Personal Assistantがあり、ドライバの発話から意図を理解し、音楽再生やルート検索、マニュアルの提示といった機能を提供している。

このような車内での音声対話システムは、コネクテッド技術の進展により進化しており、これまで車載器で処理を

¹ 本田技研工業株式会社

² 早稲田大学、博士(工学)

していた音声認識や言語理解などがクラウド上で実行されるようになった。その結果、システムの性能が飛躍的に高まり、音楽配信や地理情報などのクラウドサービスとの連携も広がっている。

また、今後の自動運転の普及により、車内での時間の使い方も変わろうとしている。これまでドライバは運転に集中しなければならなかった。しかし、必要なときだけ運転をおこなうのであれば、移動中に自由に使える時間が増え、外部とのコミュニケーションに対するニーズも高まる。その過程にある現在の自動運転レベルでは、ドライバは常に前方を注視しなければならないという制約がある。そのため、音声だけでコミュニケーションをおこなえる、音声対話システムの価値は高いと考えられる。このように、CASE時代においては運転中にドライバの話し相手となるような音声対話システムへの要望が高まると思われる。

そこで、我々は Web 上でリアルタイムに配信されているニュース記事について、情報伝達をしながら、ユーザの発話に応じた多様な応答をおこなうことができる独自の音声対話システム⁽¹⁾の開発をおこなってきた。

さらに本研究では、このシステムの検証のために構築したユーザがタブレット端末を介して音声対話を可能とする実験環境について紹介する。

2. 音声対話システム

2.1. 従来型の音声対話システム

AI スピーカをはじめとする従来型の音声対話システムは一问一答や読み上げが主流である。

一问一答の場合、ユーザが「今日の天気は？」と発話すると、システムは「今日の東京の天気は晴れです。」といったように一つの問いに一つの答えを返す。この手法では、システムから自発的な発話はおこなわないため、ユーザは自由に対話をおこなうことはできない。

また、読み上げの場合は、ユーザが「今日のニュースは？」と発話すると、システムが「第 19 戦メキシコ GP の決勝レースが 10 月 29 日午後 1 時 10 分よりおこなわれました。午前中は青空が広がった天候も…」のようにニュース記事を読み上げる。よって、この手法でも、ユーザが質問を発話しても、システムは回答をおこなわないため、ユーザは対話をおこなうことはできない。

このような従来型音声対話システムは、一般に Fig. 1 に示すように音声認識器、対話管理部、音声合成器で構成されている。まず、ユーザ発話の音声が入力されると音声認識器によりテキストへ変換される。続いて、変換されたテキストは対話管理部に渡される。対話管理部は、シナリオのデータベースを参照し、ユーザ発話の意図に応じた応答文を生成する。最後に、生成された応答文は音声合成器に渡され、システム発話の音声が入力される。

2.2. 提案する音声対話システム

そこで、提案する音声対話システムでは、Web 上に配信されているニュース記事を話題として、ユーザとこのシステムとの自由な対話を実現するものである。これにより、システムが「第 19 戦メキシコ GP の決勝レースがおこなわれたんだって。」と発話した際に、ユーザが「いつ？」と質問をすると、システムは「10 月 29 日午後 1 時 10 分だよ。」といった応答をおこなうことが可能となる。

従来システムの技術では、システムが伝達中の情報についてユーザが質問をおこなっても応答をすることができなかった。また、ユーザからの質問を受けてから応答処理をおこなっているため、即応性の高い対話をおこなうことができなかった。本システムは Fig. 2 に示すように対話前処理部と対話処理部で構成されている。対話前処理部では、Web 上のニュース記事を収集して解析することで、ユーザに伝達する発話計画データベースやユーザからの質問に対する応答データベースを事前に作成する。

この対話前処理部と対話処理部により、従来のシステムでは容易ではなかった情報伝達中の質問応答と即応性の高い対話を実現した。

2.2.1. 対話前処理部

対話前処理部では、会話所要約技術を使用してニュース記事からシナリオと質問応答を生成する。会話所要約技術は Fig. 2 中のシナリオ生成部と応答生成部で実現される。本システムに入力されるニュース記事は書き言葉で表現されており、音声による伝達には適していない。そこで、対話前処理部では、ニュース記事を会話用に要約し、話し言葉に変換する。要約された文は発話計画データベースに格納し、要約に用いられなかった文は応答データベースに格納する。また、Wikipedia などの Web 上の情報を用いて、ニュース記事から抽出した単語の定義を生成し、質問応答に用いる。

2.2.2. 対話処理部

対話処理部では、発話計画データベースの情報を音声合成し、ユーザに伝達する。また、ユーザ発話を認識すると、発話内容に応じて応答データベースの情報を利用して応答をおこなう。

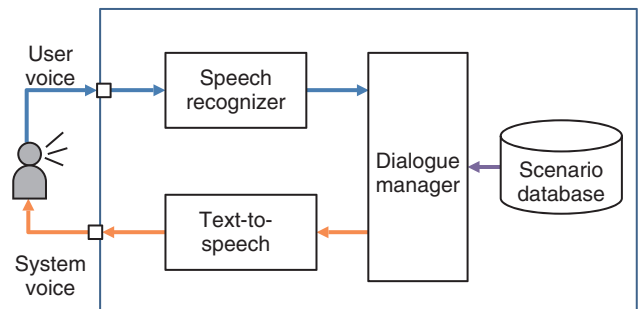


Fig. 1 Architecture of conventional system

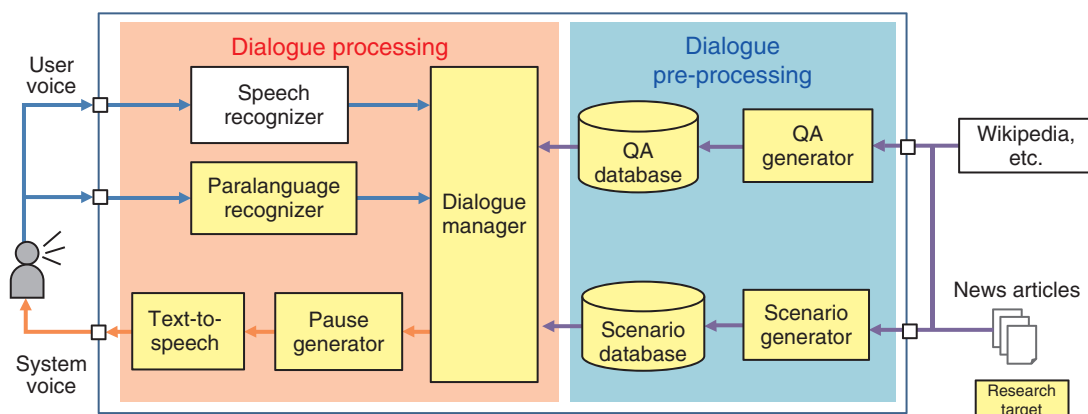


Fig. 2 Architecture of proposed system

対話処理部は Fig. 2 中のパラ言語認識器を備えており、発話意図に応じてシステムアクションをおこなう。パラ言語とは、イントネーション、リズム、ポーズといった周辺言語情報である。

例えばシステムが「第 19 戦メキシコ GP の決勝レースがおこなわれたんだって。」と伝えた際に、ユーザが「メキシコ GP?」と発話した場合、従来の音声認識のみでは「メキシコ GP」というテキスト情報しか取得できないため、ユーザの意図を解釈できない。6 種類のパラ言語を認識することで、ユーザ意図が疑問なのか反復要求なのか識別する。文の語尾のイントネーションが上がっているような場合、システムはユーザが疑問を問いかけていると判断し、「メキシコ GP っていうのは…」と質問応答をおこなうことができる。文の語尾のイントネーションが下がっている場合、ユーザが同意して欲しいと判断し、「そう。メキシコ GP」と反復をおこなう。

また、対話処理部には、Fig. 2 中の間の調整部を備えており、システム発話の間の調整をおこなうことで、ユーザが質問しやすく、理解しやすい会話のリズムを実現した。本システムでは、発話内の文節間および発話間の間を推定して、システム発話に挿入する。これにより、ニュース記事のようなまとまった情報を伝達する場合でも、ユーザが理解しやすく、発話中でも割り込みやすい間を実現した。

さらに、対話処理部では、ニュース記事のようなまとまった量の情報を伝えるため、談話構造上の発話の役割に応じたメリハリのある話し方が可能な音声合成器を搭載した。

3. 要素技術

3.1. 会話用要約技術

ニュース記事から会話用の要約を生成するため、深層学習を用いた要約モデル⁽²⁾を開発した。

3.1.1. 単語重要度推定モデル

ニュース記事から要約を作成するために、記事から重

要文を抽出した。重要文抽出のモデルには最大被覆モデル^{(3), (4)}を用いた。最大被覆モデルでは、制限の文数に収まる範囲で重要単語をできるだけ多く被覆する文集合を抽出した。記事内の重要単語を抽出するため、従来は分類や回帰に使用される機械学習の手法である random forest によって推定した値を用いていた。今回は重要単語の抽出に深層学習を適用した。

深層学習を用いた単語重要度推定モデルを Fig. 3 に示す。本モデルは、BERT⁽⁵⁾を用いており、文脈を考慮して単語の重要度を推定する。BERT とは、大量の文書データを用いて事前に学習することで、タスクの性能改善を図る自然言語処理モデルである。学習データは、ニュース記事 100 本について、3 人の作業者が要約したものを使用した。モデルに入力する補助情報には、以下 12 種類の情報を用いた。

- (1) 品詞大分類、品詞細分類、活用形、活用型、カテゴリ、ドメインといった形態素情報
- (2) 単語の出現頻度を表す指標値 (Term Frequency: TF)
- (3) 単語の希少性を表す指標値 (Inverse Document Frequency: IDF)

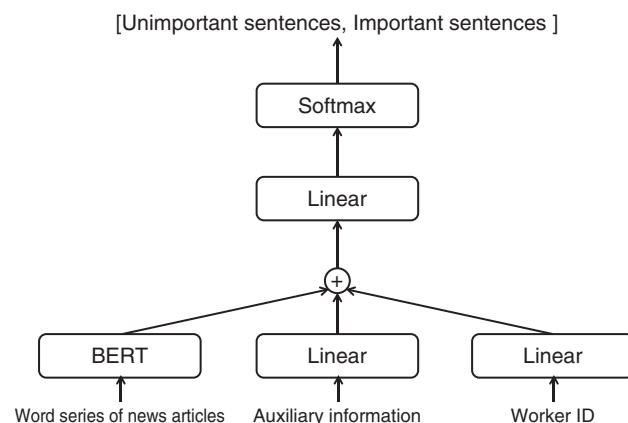


Fig. 3 Word importance estimation model

- (4) TF と IDF の積 (TF-IDF)
- (5) 単語がタイトルに含まれているかどうか
- (6) 括弧内の単語かどうか
- (7) 記事における文と段落の位置
- (8) 固有表現クラス
- (9) 係り受けの種類
- (10) 係り受け木 (文節の係り受け関係を表す木) の深さ
- (11) 係り元の文節数
- (12) 文頭からの文節の位置

作業員 ID は、複数の作業員のデータを混ぜて学習させるためのもので、作業員情報を 1-of-k で区別して与えた。1-of-k とは、一つの成分が 1 で残りの成分がすべて 0 のベクトル表現である。

モデルの評価結果を Fig. 4 に示す。評価尺度にはテキスト要約の評価値の一つである ROUGE-1 を用いた。ROUGE-1 は 1.0 に近いほど良い評価を表す。BERT による事前学習なし、補助情報なしで単一作業員のデータを用いて学習したモデルを SEM1、これに事前学習をおこなったモデルを SEM1_pre、さらに補助情報を加えて学習したモデルを SEM1+_pre、作業員 2 人のデータを用いて学習したモデルを SEM2+_pre とした。比較のため、random forest の結果を RF、作業員の結果を Human、ランダムに文を抽出した結果を Random、記事の先頭から K 文抽出したときの結果を LEAD として算出した。実験の結果、提案手法である SEM2+_pre の結果が最も良く、従来手法の random forest と比べて高い性能を達成した。

3.1.2. 文圧縮モデル

ニュース記事は書き言葉で記述されているため、一文に含まれる情報量が多い。そこで、一文に含まれる情報量を削減し、文圧縮をおこなうことで、話し言葉で伝達するのに適した形に変換した。文圧縮は文節レベルの系列ラベリング問題として定式化した。系列ラベリング問題とは、系列の各要素に適切なラベル列を付与する問題である。本研究では、文節単位で発話に含めるか否かをラベル付けた。

深層学習を用いた文圧縮モデルを Fig. 5 に示す。本モデルは、BERT を用いた。BERT で得られた単語の埋め込み表現を self-attention⁽⁶⁾ によって文節ごとに組み上げてい

る点が、単語重要度推定モデルと異なる。学習データは、単語重要度推定モデルと同じくニュース記事 100 本について、3 人の作業員が要約したものを使用した。モデルに入力する補助情報は、単語重要度推定モデルで使った補助情報から文と段落の位置を除いたものとした。

モデルにテストデータを入力し、正解率 (Accuracy) で評価した結果を Fig. 6 に示す。BERT の事前学習なし、補助情報なしで単一作業員のデータを用いて学習したモデルを SCM1、これに事前学習をおこなったモデルを SCM1_pre とした。さらに補助情報を加えて学習したモデルを SCM1+_pre、作業員 2 人のデータを用いて学習したモデルを SCM2+_pre とした。比較のため、補助情報と文節を構成する単語出現頻度のベクトル (bag of words) を素性として、時系列データを扱える深層学習モデルの一つである双方向 LSTM を用いて文圧縮した結果を BiLSTM として算出した。また、作業員の結果を Human、ランダムに文節を選択したときの結果を Random、文圧縮をおこなわなかったときの結果を NoCompression として算出した。実験の結果、提案手法である SCM2+_pre の結果が最も良く、BiLSTM と比べて高い性能を達成した。

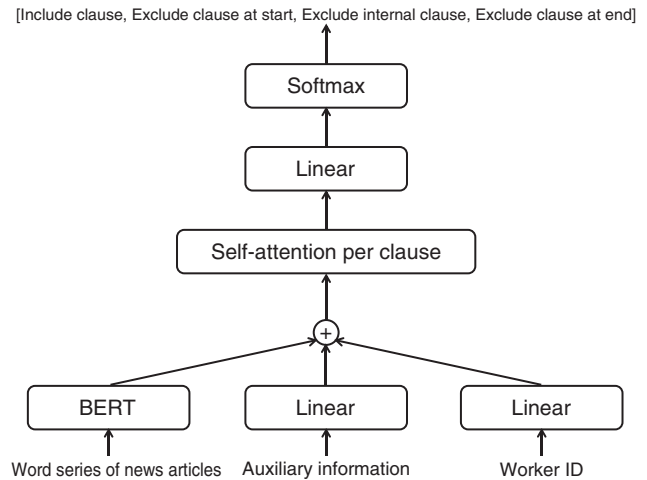


Fig. 5 Sentence compression model

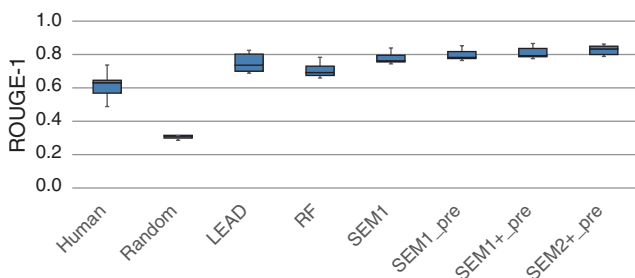


Fig. 4 Evaluation results of important sentence extraction

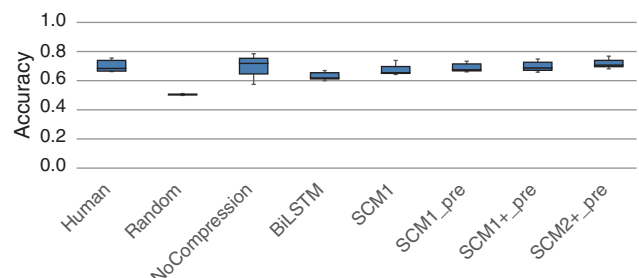


Fig. 6 Evaluation results of sentence compression

Table 1 User intention types, their effects, and corresponding system actions

Effects	User intention	System action
Increasing information	Question	Answer
	Request supplement	Provide explanations
	Request repeat	Repeat
Decreasing information	Disinterest	Change topic
	Already known	Omit details
Avoiding overlaps	Wait request	Listen

Table 2 Discrimination results of intention recognition

		With BERT pre-training With auxiliary information			With BERT pre-training Without auxiliary information		Without BERT pre-training Without auxiliary information	
		P	P+U	P+U+S	P+U	P+U+S	P+U	P+U+S
Question	Majority vote	0.920	0.958	0.962	0.957	0.961	0.940	0.951
	At least one vote	0.920	0.957	0.961	0.953	0.956	0.923	0.938
Request supplement	Majority vote	0.836	0.911	0.913	0.901	0.906	0.895	0.896
	At least one vote	0.827	0.882	0.887	0.881	0.887	0.847	0.865
Request repeat	Majority vote	-	-	-	-	-	-	-
	At least one vote	0.700	0.826	0.832	0.795	0.805	0.784	0.805
Disinterest	Majority vote	0.893	0.913	0.908	0.903	0.898	0.898	0.897
	At least one vote	0.797	0.811	0.805	0.810	0.804	0.804	0.803
Already known	Majority vote	0.818	0.939	0.939	0.939	0.939	0.939	0.939
	At least one vote	0.702	0.825	0.831	0.817	0.828	0.806	0.817
Wait request	Majority vote	0.716	0.885	0.865	0.885	0.858	0.845	0.838
	At least one vote	0.614	0.688	0.692	0.688	0.689	0.634	0.672

3.2. パラ言語認識器

ユーザの発話意図に応じたシステム応答を実現するため、深層学習を用いてユーザの発話意図認識モデルを生成し、パラ言語認識器⁽⁷⁾⁻⁽¹¹⁾を作成した。

ユーザの発話意図を認識するモデルを Fig. 7 に示す。本モデルは時系列の音声を入力すると現時点で予測される発話意図のラベルを出力する。学習には本システムとの約 2000 回の対話から作成した発話意図データセットを用いた。本データセットは、ユーザ発話に対して Table 1 に示すユーザ発話意図のラベル付けをおこなうことで作成した。

まず、音声を短い時間で切り出してスペクトログラムを生成し、CNN Autoencoder に入力した。CNN Autoencoder とは、教師なしで特徴量を抽出可能な深層学習モデルである。CNN Autoencoder の中間層から得られる韻律特徴量を識別部 (P) に入力することで、発話意図のラベルを推定できる。ユーザ発話の音声認識結果や直前のシステム発話を識別部 (L) に入力することで、最終的なラベルを推定する。識別部 (L) は BERT による事前学習を適用した。

本モデルによる発話意図の認識結果を Table 2 に示す。P はユーザ発話の韻律のみを用いて推定した結果、P+U は

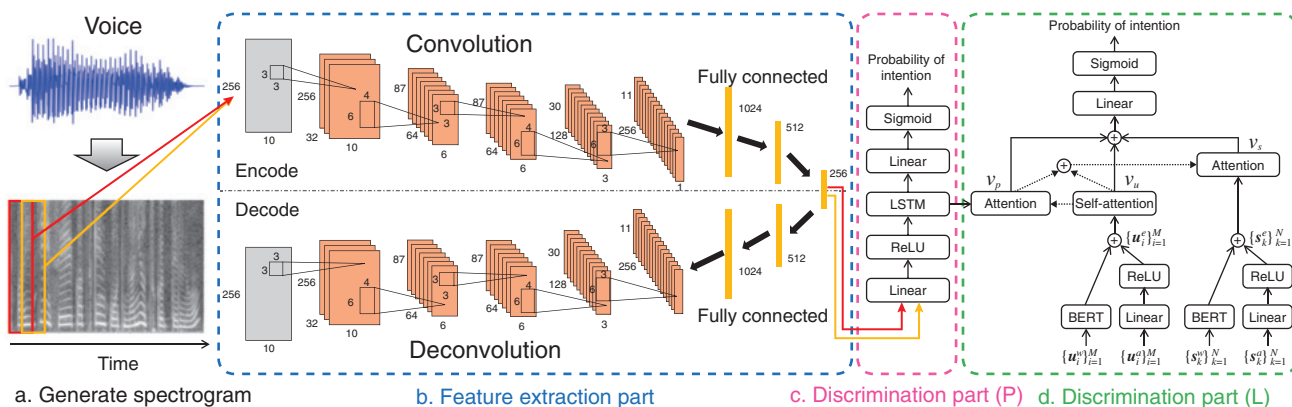


Fig. 7 Intention recognition model

ユーザ発話の韻律とその音声認識結果を用いて推定した結果、そして、P+U+Sはユーザ発話の韻律とその音声認識結果に加えてシステム発話を用いて推定した結果である。ユーザ発話の韻律に加えてユーザ発話の音声認識結果を入力することですべての意図の精度が高まった。BERTによる事前学習をおこなうことによっても精度が高まった。

3.3. 間の調整

深層学習を用いてシステム発話の間（ポーズ）を推定⁽¹²⁾することで、ユーザが質問しやすく、理解しやすい間を実現する機能を開発した。

3.3.1. 発話内文節間ポーズ推定モデル

発話内の文節と文節の間のポーズを推定するモデルをFig. 8に示す。本モデルは双方向LSTMを用いており、前後のLSTMの状態に基づいて文節間のポーズを決める。モデルにはLSTMにより文節の文字を入力した。

モデルの学習には要約、口語化したニュース記事100本を声優に発話させて作成したポーズ長タグ付きコーパスを使用した。収録にあたり、声優には以下の3点について注意するよう指示した。

- (1) 聞き手に理解させるつもりで発話すること
- (2) 相手に理解させるために重要な箇所と重要でない箇所をメリハリつけて発話すること
- (3) 発話中に質問が割り込まれる可能性を意識し、質問が予想される場所に自然な間を入れること

本モデルによるポーズの推定値と正解の誤差のヒストグラムをFig. 9に示す。0.2秒未満の誤差の割合は77%であった。

3.3.2. 発話間ポーズ推定モデル

発話と発話の間のポーズを推定するモデルをFig. 10に示す。現在の発話と次の発話の情報を用いて発話間のポーズを推定した。発話間のポーズは特徴量に、発話内文節間ポーズ推定モデルのLSTMの最後の隠れ層の値を用い、線形回帰モデルの一つであるBayesian ridgeモデルによ

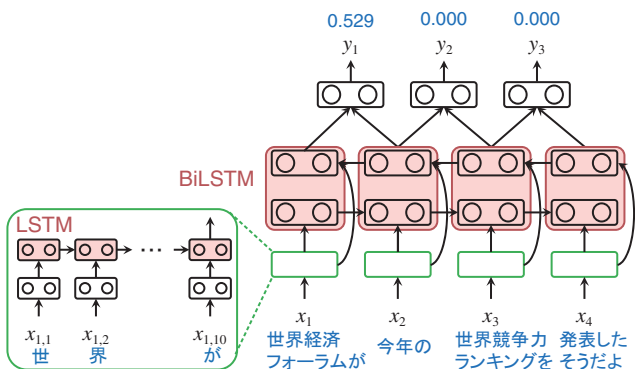


Fig. 8 Pause estimation model between phrases in utterance

て推定した。学習には発話内文節間ポーズ推定モデルと同様にポーズ長タグ付きコーパスを使用した。本モデルによるポーズの推定値と正解の誤差のヒストグラムをFig. 11に示す。0.5秒未満の誤差の割合は75%であった。

3.4. 音声合成器

ニュース記事のようなまとまった量の情報を伝えるため、発話の談話構造上の役割を利用して、メリハリのある音声合成器⁽¹³⁾を開発した。発話文を「発話節」という新規

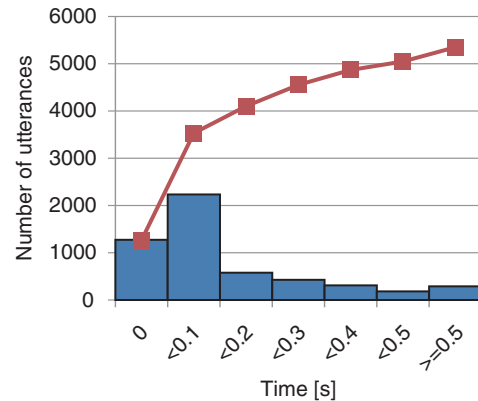


Fig. 9 Pause error between phrases in utterance

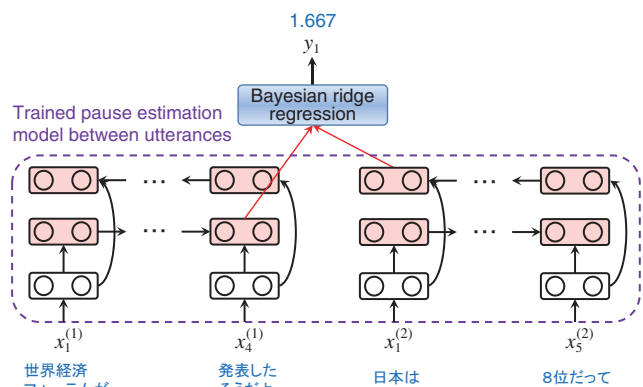


Fig. 10 Pause estimation model between utterances

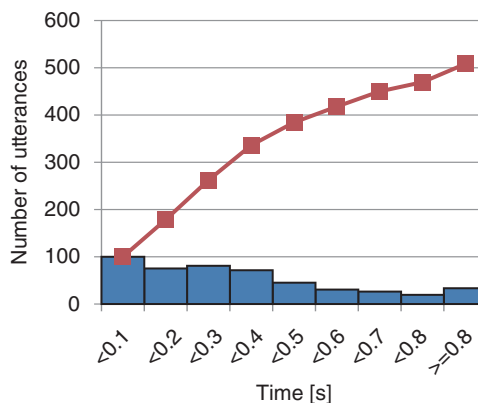


Fig. 11 Pause error between utterances

情報が複数含まれず、一息で発話する単位に分割する。その上で、発話節の役割を最も伝えたい内容を含む文(核)、核を伝えるためのリード文(前置き)、情報を補足する文(補足)の三つに分類し、これらを音声合成の補助情報として利用する。これにより、発話系列全体で韻律や間の制御を可能とした。発話節の役割の例を Fig. 12 に示す。音声合成の基盤システムには深層学習に基づく音声合成システムである Merlin⁽¹⁴⁾を採用した。

3.4.1. 音声合成モデル

深層学習による音声合成モデルを Fig. 13 に示す。本モデルでは、入力に言語特徴やフレーム特徴に加えて発話節の位置と役割を表す特徴(発話系列特徴)を与える。発話節の位置は、現在の発話が段落内の何番目であることを示す情報である。

音声合成モデルの学習には、ニュース記事 39 本を声優が読み上げたデータセットを使用した。読み上げ原稿にはあらかじめ発話節の役割を示してあり、声優には以下の 3 点について指示をおこなった。

- (1) 核の役割の内容を聞き手にはっきり伝わるように話すこと

Paragraph	Position	Role	Content of spoken phrase
1	1	Front satellite	宇宙を観測しているロシアの電波望遠鏡があるんだけど
	2	Nucleus	それが正体不明の「強い信号」を検知したっていつて注目を集めてるんだって
	3	Rear satellite	世界中の天文学者に衝撃が走っているらしいよ
2	1	Nucleus	信号はヘラクレス座の近くの恒星から届いたんだって
	2	Nucleus	その星は地球から約95光年離れていて
	3	Rear satellite	惑星も持っているみたい
3	1	Front satellite	地球外文明の進歩度を表す基準っていうのがあって
	2	Front satellite	それと照らし合わせたんだけど
	3	Nucleus	地球よりはるかに進歩した文明の可能性があるんだって
	4	Rear satellite	まだ確実なことはわからないんだけどね

Fig. 12 Example of discourse structure

Table 3 Comparison of performances with and without utterance sequence features

	F0-RMSE	dur-RMSE	MCD	BAD
Base line	36.420	4.779	5.064	0.660
Proposed model	35.435	4.768	5.047	0.659

- (2) 聞き手がうなずきながら聴いていることを想定し、途中で大きく間を空けることなく話すこと
- (3) 日常会話のような口調で聞き手にニュースを伝えるつもりで話すこと

10 分割交差検定で音声合成モデルの出力と元データの音響特徴量の誤差を計算した結果を Table 3 に示す。F0-RMSE, dur-RMSE はそれぞれ基本周波数、音素継続長の平均二乗誤差平方根を表している。MCD, BAD はそれぞれメルケプストラムひずみ、帯域ごとの非周期性指標のひずみを表している。メルケプストラムひずみとは、元データと音声合成モデルの出力の差異を測る客観指標値である。発話系列特徴を加えることにより、ベースラインに比べて基本周波数、音素継続長の誤差が小さくなった。メルケプストラム、非周期性指標についてもわずかに改善がみられた。

4. 実験システム

走行中の車両内で、多くのユーザがさまざまなシーンで利用して本システム評価をおこなえるようにするため、2.2. 節で述べた提案システムをもとに、タブレット端末を介してユーザが音声対話可能な実験システムを構築した。

実験システムの構成を Fig. 14 に示す。Web 上のニュース記事の収集と解析は対話前処理サーバでおこなう。対話前処理サーバは Web 上から定期的にニュース記事を収集することで、ユーザにリアルタイムに情報を提供できる。

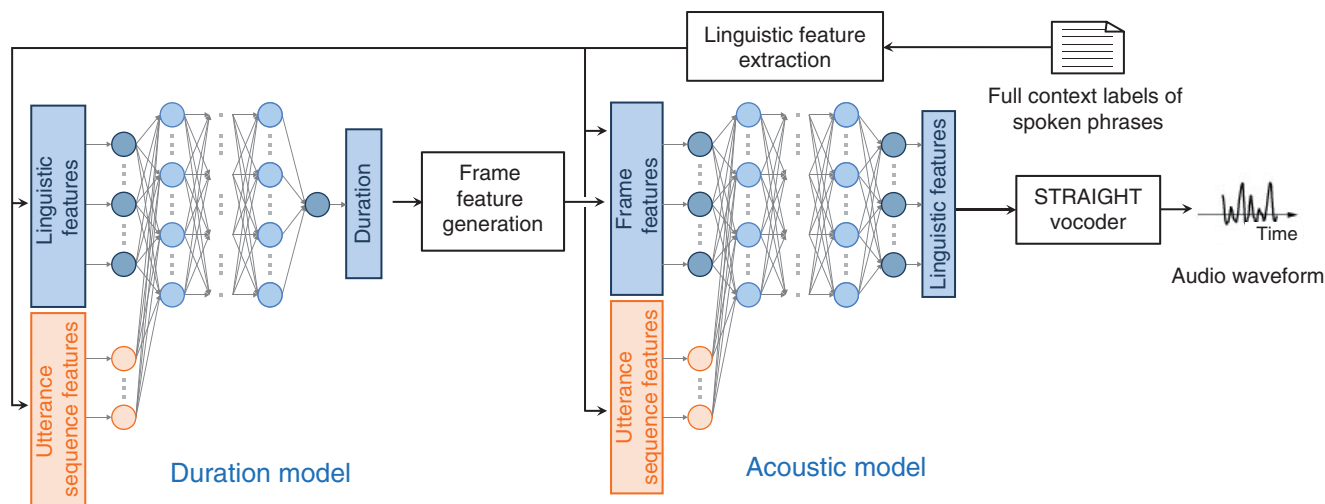


Fig. 13 DNN speech synthesis model considering utterance sequence features

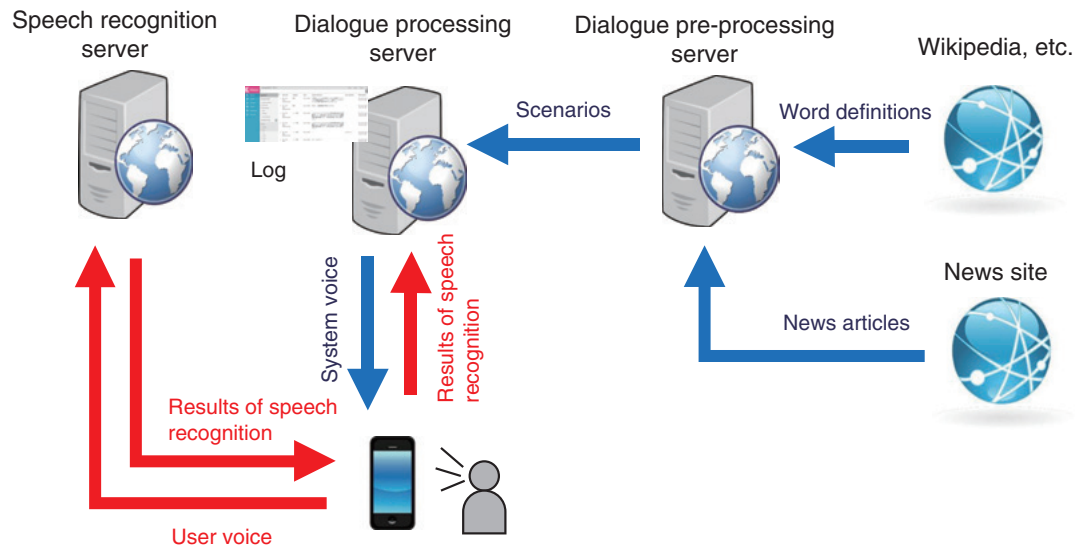


Fig. 14 Experimental system

発話計画の音声合成などは対話処理サーバがおこない、ユーザはタブレット端末を介して対話をする。音声認識には Google 社が提供する音声認識クラウドサービスである Google Speech API を使用した。

実験システムの利用例を Fig. 15 に示す。本実験システムは、日本語のニュース記事を用いており、日本語で音声対話ができる。ユーザはタブレット端末が備えるスピーカとマイクを利用して音声対話をおこなう。ユーザは Web に配信されている旬のニュース記事を知ることができ、疑問に思ったことをシステムに質問することができるようになった。

このシステムを活用することで、利用意欲に対する主観評価や、情報伝達効率などの測定ができる。今後このように、音声対話システムの有効性を検証していく所存である。



Fig. 15 Example of using experimental system

5. まとめ

会話用要約、パラ言語認識、問の調整および音声合成といった音声対話システムの要素技術開発に取り組んだ。また、それらの技術を組み込んでタブレット端末を介して対話可能なシステムを構築した。

従来型の一問一答型のシステムやニュース記事読み上げシステムに比べて、本システムは情報伝達中の質問応答と即応性の高い対話が可能となる。

今後は、本システムを実際に車内で使用した際の評価や日本語以外の言語へ対応していきたい。

参考文献

- (1) 高津弘明, 福岡維新, 藤江真也, 林良彦, 小林哲則: 意図性の異なる多様な情報行動を可能とする音声対話システム, 人工知能学会論文誌, Vol. 33, No. 1, p. 1-24, (2018)
- (2) 高津弘明, 本田裕, 藤江真也, 林良彦, 小林哲則: 会話によるニュース記事伝達のための要約, 言語処理学会第 25 回年次大会発表論文集, p. 518-521, (2019)
- (3) Gillick, D., Favre, B., Hakkani-Tür, D.: The ICSI Summarization System at TAC 2008, Text Analysis Conference (TAC) 2008, (2008)
- (4) Takamura, H., Okumura, M.: Text Summarization Model based on Maximum Coverage Problem and its Variant, Proceedings of the 12th Conference of the European Chapter of the Association for Computational Linguistics, p. 781-789, (2009)

- (5) Devlin, J., Chang, M.-W., Lee, K., Toutanova, K.: BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding, Proceedings of NAACL-HLT 2019, p. 4171-4186, (2019)
- (6) Lin, Z., Feng, M., dos Santos, C. N., Yu, M., Xiang, B., Zhou, B., Bengio, Y.: A Structured Self-attentive Sentence Embedding, Proceedings of the 5th International Conference on Learning Representations, p. 1-15, (2017)
- (7) Takatsu, H., Yokoyama, K., Matsuyama, Y., Honda, H., Fujie, S., Kobayashi, T.: Recognition of Intentions of Users' Short Responses for Conversational News Delivery System, Proceedings of the 20th Annual Conference of the International Speech Communication Association, p. 1193-1197, (2019)
- (8) Yokoyama, K., Takatsu, H., Honda, H., Fujie, S., Kobayashi, T.: Investigation of Users' Short Responses in Actual Conversation System and Automatic Recognition of their Intentions, Proceedings of the 2018 IEEE Workshop on Spoken Language Technology, p. 934-940, (2018)
- (9) 横山勝矢, 高津弘明, 本田裕, 藤江真也, 小林哲則: 会話におけるニュース記事伝達のための発話意図の分類と認識, 第 123 回音声言語情報処理研究会, 2018-SLP-123 巻, 5 号, p. 1-8, (2018)
- (10) 高津弘明, 横山勝矢, 本田裕, 藤江真也, 林良彦, 小林哲則: 会話によるニュース記事伝達のための発話意図理解, 人工知能学会第 32 回全国大会論文集, 4Pin1-29, p. 1-4, (2018)
- (11) 横山勝矢, 高津弘明, 本田裕, 藤江真也, 林良彦, 小林哲則: 会話によるニュース記事伝達のための発話意図分類とデータベースの構築, 人工知能学会第 32 回全国大会論文集, 3Pin1-23, p. 1-4, (2018)
- (12) 高津弘明, 横山勝矢, 本田裕, 藤江真也, 林良彦, 小林哲則: 会話によるニュース記事伝達のための間の調整, 言語処理学会第 24 回年次大会発表論文集, p. 212-215, (2018)
- (13) 高津弘明, 福岡維新, 藤江真也, 岩田和彦, 小林哲則: 会話によるニュース記事伝達のための音声合成, 人工知能学会論文誌, Vol. 34, No. 2, p. 1-15, (2019)
- (14) Wu, Z., Swietojanski, P., Veaux, C., Renals, S., King, S.: A study of speaker adaptation for DNN-based speech synthesis, Proceedings of the 16th Annual Conference of the International Speech Communication Association, p. 879-883, (2015)

■ 著 者 ■



本田 裕



高津 弘明



松山 洋一



小林 哲則

案内ロボット運用システムの開発

Guide Robot Management System

西 宮 憲 治¹
Kenji NISHIMIYA

金 子 真 也¹
Shinya KANEKO

要 旨

案内ロボットシステムは、ロボットが公共の空間で案内サービスを実行するシステムである。複数種類・複数台のロボットが協調しながら効率的に案内サービスを実行するために、運行管理を担う「案内ロボット運用システム」を開発した。ロボットの移動範囲やインフラ構築の制約にしばられないように、クラウドおよびIoT通信を用いてシステムを構築した。公共の施設で案内サービスを想定した実機確認をおこない、ロボットの運用が適切にできることを確認した。

ABSTRACT

We have developed the guide robot system to help efficiently give directions to people in public spaces. The ‘management system’ for guide robots can facilitate effective collaboration between multiple units and types of robots in operation by using fleet management algorithm and communication channels through clouds and IoT technologies. It would expand the area in which the robots can operate as well as overcoming some restrictions in network availability. We have tested the system with robots in a public facility, simulating a real-life guiding service, and successfully confirmed its functionality.

1. はじめに

Honda は 2030 年ビジョンにおいて、「すべての人に、『生活の可能性が広がる喜び』を提供する—世界中の一人ひとりの『移動』と『暮らし』の進化をリードする—」というステートメントを示している⁽¹⁾。また、「人と共存、協調して社会の中で役に立つロボット」の実現を目指して、ASIMO に代表されるロボティクス技術の開発に取り組んできた⁽²⁾。

この取り組みの一つとして、人混在環境で稼働する案内ロボットシステムを開発した。一般の利用者にロボットによる案内サービスを提供することで、ロボットの社会実装に向けた課題を探るためのものである。案内ロボットシス

テムは、受付ロボットと誘導ロボットの二種類のロボットで構成されている (Fig. 1)。

複数台のロボットを連携して運用するために、運行管理・情報連携をおこなう案内ロボット運用システム (運用システム) を合わせて開発した。ロボットから送られてくるデータをもとに、運用システムが案内ジョブを適切に割り振ることで、円滑に案内サービスを運用することができる。ロボットの移動範囲やインフラ構築の制約にされないように、クラウドおよびIoT通信を用いてシステムを構築した。

ここでは、運用システムのシステム方式について紹介する。

¹ ライフクリエーションセンター



Fig. 1 Guide service scenario

2. 案内ロボットシステムの構成

案内ロボットシステムは、利用者に対して目的地までの行き方を示す「道順案内」と、目的地まで付き添う「誘導案内」の二種類のサービスを提供する。これらのサービスを、受付ロボット [Fig. 1(a)] と誘導ロボット [Fig. 1(b)] が役割を分担しつつも協調しながら実行する。受付ロボットは、利用者が目的地を音声入力とタッチパネル入力で指定すると、そこまでの道順を示す (道順案内)。次に誘導ロボットが、目的地まで利用者を導きながら案内する (誘導案内)。

受付ロボットが受けた誘導案内の依頼を誘導ロボットに割り振るのが、運用システム [Fig. 1(c)] である。運用システムは、誘導案内のニーズに適宜応えるために、誘導ロボットの位置や稼働状態をリアルタイムで監視して適切に配車している。このように、二種類のロボットと運用システムが連携して道順案内から誘導案内にスムーズに引き継ぐことで、利用者は不慣れな場所でも迷わずに目的地にたどり着くことができる。

3. 運用システムの役割

運用システムは主に二つの役割を持つ。

一つ目は、受付ロボットから送られてくる誘導案内依頼 [Fig. 2(a)] に応えるために、誘導ロボットを適切に配車することである。誘導案内依頼には、利用者が行きたい目的

地と顔認識用データが含まれている。顔認識用データは、受付ロボットが道順案内中に利用者の同意を得たうえで取得するデータであり、誘導ロボットが誘導中に使用する。運用システムは、受付ロボット付近で待機している複数台の誘導ロボットの中から、稼働状態やバッテリー残量などを考慮して1台を選択する。誘導ロボットは、利用者を誘導するために、自律移動の機能と顔認識の機能を持つ。自律移動は、目的地に向かって経路を計画し障害物を避けながら移動する機能であり、顔認識は、誘導ロボットの後方に搭載されたカメラで利用者を特定し、位置関係を認識する機能である。顔認識機能により、利用者の歩行速度に合わせたり、離脱を認識したりすることができる。運用システムは、自律移動と顔認識に必要なデータをコマンドとして送信し [Fig. 2(b)], 誘導ロボットはそれらのデータを受信して誘導案内を開始する。

二つ目は、受付ロボットと誘導ロボットの稼働状態を監視し、エラー情報を運用担当者に通知することである。運用システムは、誘導案内中は常にタスクの進捗状態を監視している [Fig. 2(c)]。あるタスクが完了した時点で次のコマンドを送信する。また、運用担当者は、誘導ロボットの位置や稼働状態を確認する運用モニタを携帯しており、トラブルが発生した場合は、運用モニタを通してどこでどのようなエラーが発生したか、詳細な情報を確認することができる [Fig. 2(d)]。

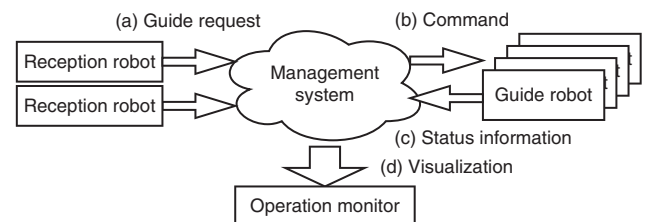


Fig. 2 Guide robot system configuration

4. 運用システムの構成

運用システムは、Honda Robotics as a Service Platform (Honda RaaS) と案内クラウドアプリケーション (案内クラウド) で構成されている。Honda RaaS [Fig. 3(b)] はロボティクスサービスを開発・運用するためのプラットフォームであり、通信やデータ収集などの汎用的な機能を備えている⁽³⁾。対して案内クラウド [Fig. 3(a)] は、案内に特有な機能を実現するために新規に構築した。案内クラウドは、Honda RaaS から共有されたデータを元に、案内ジョブ管理とロボット稼働状態監視をおこなう。Honda RaaS と案内クラウド間は、データストリーミングと REST API で連携している [Fig. 3(c)]。受付ロボット・誘導ロボット・運

用モニタとは、IoT 通信などを利用してインターネット接続している。運用担当者は、運用モニタを使って稼働状態を確認するとともに、ユーザ登録やデバイス登録などの設定作業をおこなう [Fig. 3(d)]。

このシステム構成は、開発と運用の両方に利点がある。開発における利点は、Honda RaaS のセキュアな通信・デバイス管理・データ可視化などの機能を活用しているため、アプリケーション開発にリソースを集中できることである。運用における利点は、専用のサーバや Wi-Fi を使用していないため、ロボットの移動範囲やインフラ構築による制約がないことである。

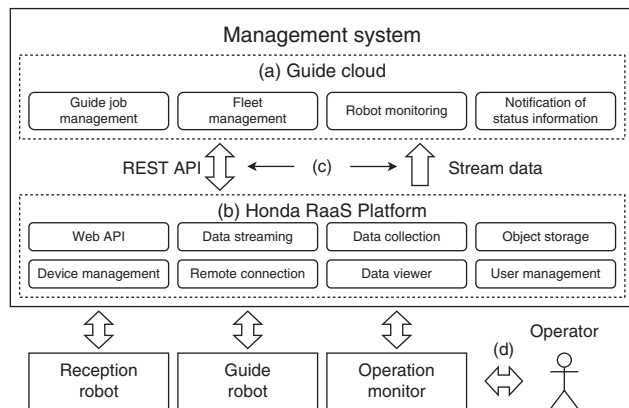


Fig. 3 Management system configuration

5. 案内クラウドの機能

案内クラウドは、案内サービスを提供するために、案内予約や誘導ロボット選択などの案内ジョブ管理を実行している。また、不測の事態に備えてロボットの稼働状態を監視している。

5.1. 案内ジョブ管理・配車

案内ジョブは、利用者に対して提供する案内サービスの一単位である。それぞれの案内ジョブは、予約中・案内中・キャンセル等の状態を持ち、運用システムは、複数の案内ジョブを同時並行で進捗管理している。

誘導案内開始までのシナリオを順を追って説明する。まず、利用者が目的地を音声やタッチパネルで入力し検索して指定する。目的地の指定が完了したら、受付ロボットはそこまでの道順を表示する [Fig. 4(a)]。利用者が受付ロボットを操作している間に、運用システムは、誘導ロボットの稼働状態やバッテリー残量などを考慮したうえで、1 台を選択してスタンバイ指令を送信する。誘導ロボットは誘導案内に備えてスタンバイする [Fig. 4(b)]。ここで利用者の希望によって、道順案内のみで終了する場合があります、そ

の場合はスタンバイを解除する。

誘導案内を利用する場合は、受付ロボットから目的地情報と顔認識用データが運用システムに送信される。誘導ロボットは、運用システムからこれらのデータを受信して誘導案内を開始する [Fig. 4(c)]。

なお、この案内シーケンスは受付ロボット・誘導ロボットそれぞれ数十台程度まで拡張して運用可能な設計にしている。また、受付ロボット付近に待機している誘導ロボットを位置情報をもとに選択するため、運用中に誘導ロボットの待機場所を柔軟に入れ替えられるように考慮している。

5.2. ロボット稼働状態監視・通知

誘導案内で、誘導ロボットは一連の三つのタスク、お迎え [Fig. 4(d)]、誘導 [Fig. 4(e)]、帰還 [Fig. 4(f)] を順番に実行する。それぞれのタスクごとに、目的地や動作方法が異なっている。お迎えの時は、利用者のもとに移動し、あいさつをして行き先を伝える。誘導中は、利用者との位置関係をカメラで認識しながら、自律移動の速度を調整してい

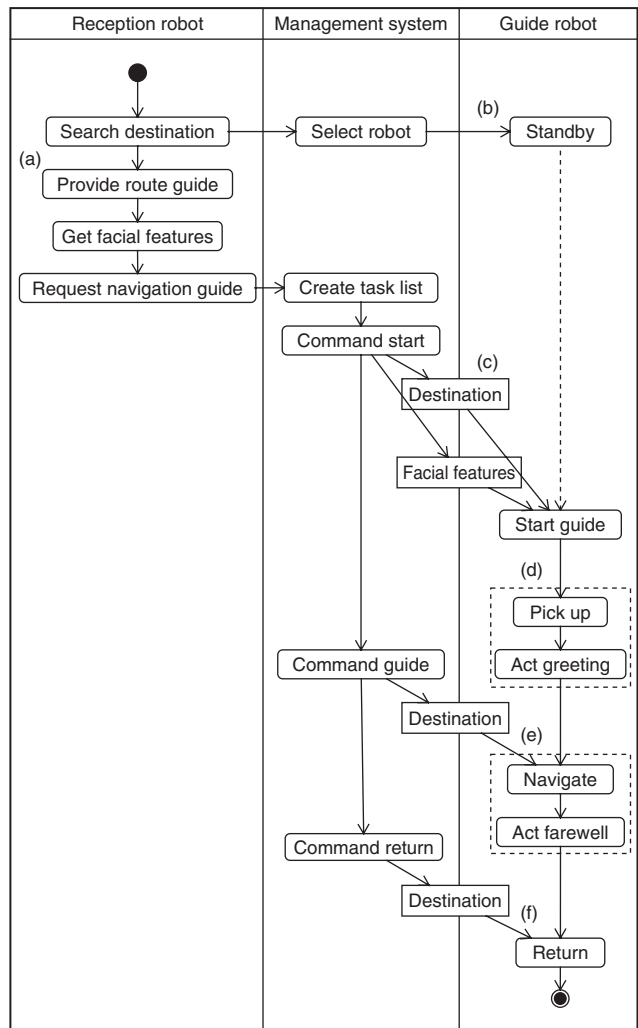


Fig. 4 Guide sequence

る。あわせて巡回する方向などを利用者にわかりやすいように、誘導ロボット本体に搭載されたスクリーンに表示したりする。目的地に到着したら、そのことを知らせるとともに、お別れのあいさつをする。帰還は単独で拠点まで移動する。

運用システムは、誘導ロボットが誘導案内を開始する時点で、案内ジョブ監視シーケンス (Fig. 5) を開始する。タスクの進捗状態を監視し、実行が完了した時点で次のタスクに必要な情報を送信している。この監視シーケンスは、誘導案内を実行する分だけインスタンスが生成されるため、計算リソースを節約することができる。

誘導案内中に不測の事態やシステムトラブルが発生し、継続できなくなる場合がある。運用システムは、誘導ロボットからのエラーメッセージを、運用モニターやメールを通じて運用担当者に通知する処理をおこなっている。

運用システムの内部では、タスクをタスクリストとして JSON フォーマットで設定している。JSON は柔軟にデータを追加し拡張できるため、原理的にはいくつでもタスクを増やして設定することが可能である。それぞれのタスクには、目的地名、目的地座標、タスクタイプなどを設定する (Fig. 6)。

```
{
  "robotId": "xxxxxxxx-xxxx-xxxx-xxxx-xxxxxxxxxxxx",
  "taskList": {
    "Type": "GUIDE",
    "task": [
      {
        "id": 1,
        "type": "picking_up",
        "goal": {
          "name": "meeting_point1",
          "coordinate": [
            "3.11",
            "-4.67",
            "1.59"
          ]
        }
      },
      {
        "id": 2,
        "type": "guide",
        "goal": {
          "name": "McDonald's",
          "coordinate": [
            "-4.12",
            "6.67"
          ]
        }
      }
    ]
  }
}
```

Fig. 6 Task list example

6. 実機確認結果

ある公共の施設で、案内サービスを想定した実機確認をおこなった。その施設は、屋内でありながら東西南北約 500 m の広さがあり、多くのテナントが営業している。不慣れた利用者にとっては、どちらの方向に行けば目的地にたどり着けるかわかりにくい場合があるため、ロボットによる案内サービスのニーズがあると考えた。

運用システムのテストでは、システムが設計通りに案内ジョブ管理・配車を実行しているか、IoT 通信を経由してロボットの稼働状態を監視できるか、などの観点で確認をおこなった。

準備においては、現地に専用のサーバやネットワーク設備を設置することなくテストを始めることができた。テスト条件は、初期段階の運用確認として、実際の運用台数よりも少ない受付ロボット 1 台と誘導ロボット 2 台とした。

テストにおいて、運用システムが以下のように機能したことを確認した。

- ・稼働状態やバッテリー残量の条件に基づいて、2 台の誘導ロボットから適切な 1 台を選択することを確認した。
- ・目的地や顔認識用データを、誘導ロボットに適切なタイミングで送信すること等を確認し、誘導ロボットが利用者を正しく認識して、お迎え・誘導・帰還と設定されたタスクを実行した。
- ・施設全域を移動している誘導ロボットとデータの送受信をおこない、遅滞なく誘導ロボットの稼働情報が更新されることを観測することで、IoT 通信を用いて、ロ

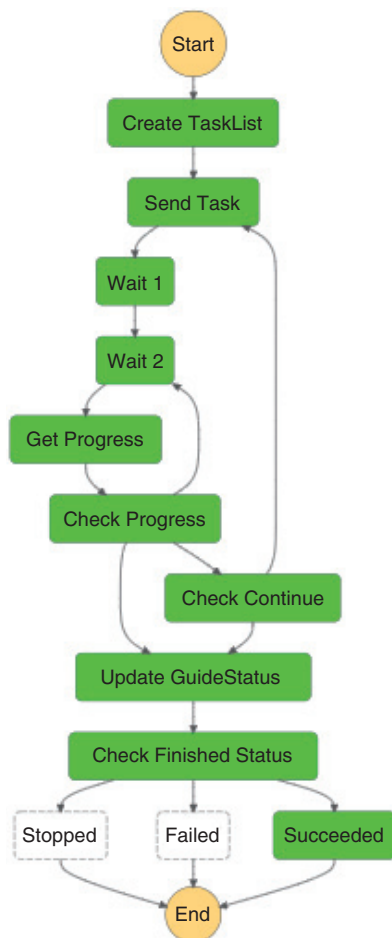


Fig. 5 Guide job monitoring sequence

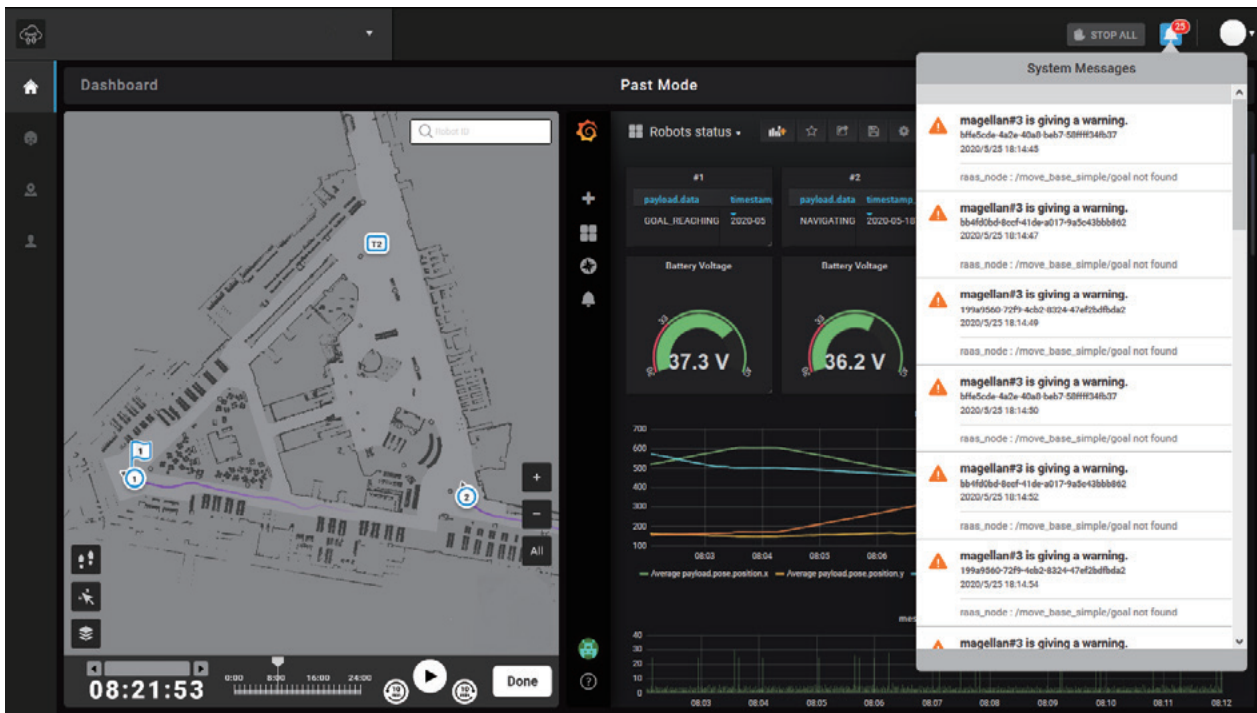


Fig. 7 Operation monitor

ロボットの監視やコマンド送信が安定的にできることを確認した。

運用システムの動作確認結果例として、運用モニタ (Fig. 7) のキャプチャ画像を示す。運用モニタに、地図上でのロボットの位置や軌跡、ロボットごとのバッテリー電圧などの詳細な内部状態を表示し、観測することで、運用システムがロボットの稼働状態を監視していることを確認した。あわせて、トラブル発生時にはエラー情報が表示され、運用担当者に通知することを確認した。

以上の結果から、運用システムが設計通りに案内ジョブ管理・配車を実行していること、IoT 通信を経由してロボットの稼働状態を監視できることが確認された。

7. まとめ

案内ロボット運用システムを、クラウドおよび IoT 通信を用いて構築した。ロボットによる案内サービスを実現するために、Honda RaaS の汎用的な機能を活用しながら、案内ジョブ管理・配車・ロボット稼働状態監視などの機能を新規に実装した。公共の施設で実機を用いたテストをおこない、複数種類・複数台のロボットが運用システムを通して情報連携しながら、適切に動作することを確認した。

現地に専用のサーバやネットワーク設備を設置する必要がないため、ロボットの移動範囲の制約がなく、すぐに使用を開始することができる。クラウドおよび IoT 通信を利用した汎用的な機能に、特定のサービス機能を追加するこ

とでシステムを構成するこの手法は、さまざまなロボティクスサービスを展開するうえで有効と考えている。

参考文献

- (1) <https://www.honda.co.jp/sustainability/report/pdf/2019/Honda-SR-2019-jp-016.pdf>
- (2) 重見聡史, 河口裕一郎, 吉池孝英, 川邊浩司, 小川直秀: 新型 ASIMO の開発, Honda R&D Technical Review, Vol. 18, No. 1, p. 38-44
- (3) 東治臣: Honda RaaS Platform クラウドとロボティクスを融合させるプラットフォーム - Robotics as a Service Platform, Honda R&D Technical Review, Vol. 32, No. 1, p. 32-41

著者



西宮 憲治



金子 真也

小型二輪車用デバイスレスタンブル強化技術

Development of Deviceless Tumble Enhancement Method for Small Motorcycles

藤 久 保 誠¹
Makoto FUJIKUBO
亀 田 圭 悟¹
Keigo KAMEDA

中 村 洋 平²
Yohei NAKAMURA
日 高 葉 月¹
Hazuki HIDAKA

井 上 陽 介²
Yosuke INOUE
及 川 浩 信¹
Hironobu OIKAWA

要 旨

小型二輪車を対象として、吸気通路の切り替え機構を用いずに低負荷領域のみのタンブルを強化する技術をCFDにより探求した。バタフライ式スロットルバルブの下流では、スロットル低開度領域において吸気流が逆流する現象が発生する。スロットルバルブの下流に吸気ポートを上下に分割する隔壁を設置することで一方の流路に逆流を捕捉できることが確認された。さらに、隔壁の位置を最適化することで、大半の吸気流を一方の流路に集約し、タンブル流の生成に必要な流量が得られることが確認された。実機エンジンの燃焼指圧解析により、低負荷領域における燃焼期間がコンベンショナルポートに比べて短縮し、ねらいどおりのタンブル特性になっていることを確認した。この結果、完成車のWMTCモード燃費で1.7%の向上が得られるとともに、EURO5/インドBS-VI排気ガス規制値に適合した。量産化にあたっては、ポート中子に隔壁部を形成するスリットを設けることで、隔壁を鋳造一体成形した。これにより、専用部品の付加や、既存設備の変更を加えることなく実用化を可能とした。

ABSTRACT

Using the CFD and targeting at small motorcycles, we have pursued a technology that can enhance the tumble flow in the cylinder only in a low load range of the engine without the need to use any intake path switching mechanisms. In a throttle body with a butterfly valve, a reverse flow occurs after the intake air has passed the throttle valve when the throttle valve opening is small. We have confirmed that installing a flow separator behind the throttle valve that vertically divides the intake port flow can successfully capture the reverse flow into one of the two flow paths. Furthermore, we confirmed that optimizing the separator position can capture most of the intake air into one path, thereby gaining the required amount of flow that can generate tumble in the combustion chamber. Through the analysis of combustion pressure of an actual engine, we have confirmed that the combustion period in the low load range is shorter in the new design than in the conventional port design, which proves that the target tumble effect has been achieved. With the new design applied, the emission norms of EURO5 and India's BS-VI are satisfied as well as improving the fuel economy of the motorcycle by 1.7% in the WMTC mode. For mass production, the separator is created as an integral part of the inlet pipe casting by incorporating a slit in the port core. This enables application of the new tumble port design without adding extra parts or modifying existing production equipment.

1. ま え が き

近年、地球温暖化抑制の観点から、各産業分野へのCO₂削減の要求が高まっている。モビリティ分野においては燃費の改善が急務となっている。その中で、高いEGR導入量やリーン混合気の条件下における燃焼促進を目的として、吸気の筒内流動を強化する手法が広く研究されている。流

動強化の手段としてタンブルの生成が有効である。既に、吸気ポート形状の工夫でタンブルを強化する手法が広く研究され実用化されている^{(1), (2)}。秋本らと中山らはポート内に仕切りを設けた上で、流路の切り替え機構を付加することでタンブルを強化する技術を乗用車用に実用化している^{(3), (4)}。

しかしながら、車両サイズが小さく廉価な小型二輪車へ

¹ 本田技研工業株式会社

² 先進パワーユニット・エネルギー研究所

この技術を適用する場合、流路切替えのための専用部品や制御システムの追加が必要となるため、搭載性やコストインパクトが課題となる。その対応策として、白砂らは吸気バルブをボア外周方向にオフセットすることでタンブルを強化する手法を考案した⁽⁵⁾。インレットバルブの低リフト時にシリンダ壁面を用いて開口部の一部をマスキングする。これによりエキゾースト側へ向かう流れが増加しタンブルを強化できる。

しかしながら、この手法では実用域のみならず高負荷領域においてもタンブルが強化されるため、小型二輪車に適用した場合、急速燃焼に起因する騒音が課題となった。小型二輪車の多くはエンジンが露出しており運転者へ騒音が伝わりやすい。加えて、クランクシャフトの支持にボールベアリングを使っている点も騒音に対して課題となる。そのため、タンブル強化の度合いに制約があった。

そこでこの開発では、小型二輪車への適用に向けて、吸気流路の切り替え機構を用いずに低負荷領域のみタンブルを強化する技術を探索した。CFD にてスロットルバルブ周りの流れの解析をおこない、ポート内の逆流現象がスロットル低開度領域で起きることを確認した。加えて、ポート内に隔壁を付加することで、分割されたポートの一方に逆流の一部を捕捉できることが確認された。実機のポートにおいてこの現象を活用することで、切り替え機構を用いずに低負荷領域のみタンブルを強化する技術を構築した。

さらに、この技術を量産適用するにあたり、中子造型金型の型割り方向を変更した。吸気ポートの中子に隔壁部となるスリットを設けた。これにより、専用部品の付加や、既存の鋳造設備に変更を加えることなく、吸気ポート内の隔壁を鋳造一体成形する技術を確立した。

2. 目標値の設定

研究を進めるにあたり、実機試験と CFD により目標値の設定をおこなった。

2.1. 供試エンジンとタンブル強化領域の設定

実験には小型スクーター用のエンジンを用いた。Table 1 に供試エンジンの主要諸元を示す。Fig. 1 に供試エンジンの吸気通路断面図を示す。スロットルバルブはバタフライタイプで、この図において時計回りに開く。インジェクタはインレットパイプの湾曲の外側に配置されている。

この供試車両の燃費改善に有効なエンジン回転数、スロットル開度領域を把握するために、WMTC モードにおけるエンジン回転数とスロットル開度の頻度を確認した。Fig. 2 にその頻度マップを示す。アイドリングを除くと、スロットル開度は 30% 以下が主な使用範囲である。中でもエンジン回転数 4000 rpm 前後、スロットル開度 15% から 30% の使用頻度が高いことがわかった。以上より、

Table 1 Vehicle and engine specifications

Engine type	Forced air cooled, 4-stroke, single-cylinder, gasoline engine
Bore × Stroke [mm]	50.0 × 63.1
Displacement [cm ³]	124.9
Compression ratio	10
Valve diameter [mm × number]	Intake: $\phi 25.5 \times 1$ Exhaust: $\phi 21 \times 1$
Valve lift [mm]	Intake: 6.3; Exhaust: 6.2
Ignition system	Full transistorized
Fuel system	Fuel injection
Throttle bore diameter [mm]	$\phi 22$
Maximum power [kW/rpm]	6.1/6500
Maximum torque [Nm/rpm]	10.3/5000
Transmission	CVT
Vehicle dry weight [kg]	107
WMTC mode	Class 1

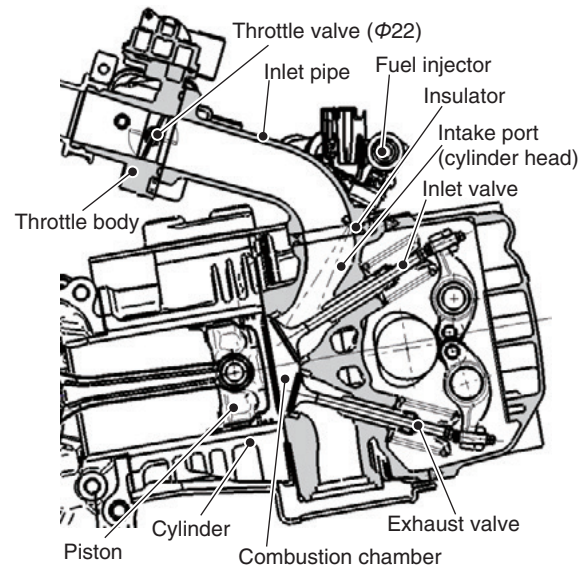


Fig. 1 Section of test engine (conventional port)

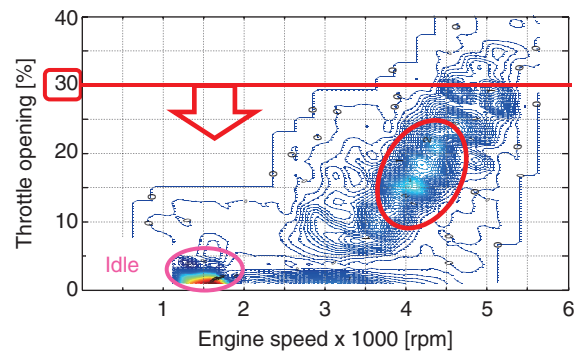


Fig. 2 Distribution of throttle opening and engine speed in WMTC mode

タンブル強化をおこなうスロットル開度領域は15%から30%と設定した。

2.2. タンブル比の目標値の設定

タンブル比の目標値の設定にあたっては、スロットル開度に応じてタンブル比を任意に調整できるタンブルコントロールバルブシステム (Tumble Control Valve: TCV) を用いて実験をおこなった。スロットル開度に対するタンブル比特性の評価は、定常流試験でおこなった。タンブル比の定常流試験方法とタンブル比の定義については、白砂らの文献に準じる⁽⁵⁾。

Fig. 3に低負荷時のTCV付きタンブルポートの断面図を示す。インレットパイプより下流の流路に隔壁を設置し、低負荷用ポート (Partially Open Throttle ポート: POT ポート) と高負荷用ポート (Wide Open Throttle ポート: WOT ポート) に分離した。ポート入り口の両者の断面積は1:1である。

スロットルバルブが開く方向は、バルブ全開時にTCVが隔壁に干渉しないように、この図で反時計回りとした。スロットルバルブ開口部を通過した流れは、TCVにより向きを強制的に変えられ、POTポートに流入する。その結果、スロットルバルブから流入した全流量に対するPOTポートの流量比率が高められる。POTポート出口はエキゾースト側への流れの指向性を高め、かつ壁面からの剥離を容易とする形状としている (Fig. 3中の拡大図丸部)。

2.2.1. タンブル比の上下限目標の設定

Fig. 4にスロットル開度25%におけるタンブル比とBMEP 250 kPaにおけるBSFC改善率の関係を示す。なお測定条件は、エンジン回転数4000 rpm、空燃比(A/F)はストイキ14.7、点火時期はMBTとした。タンブル比が

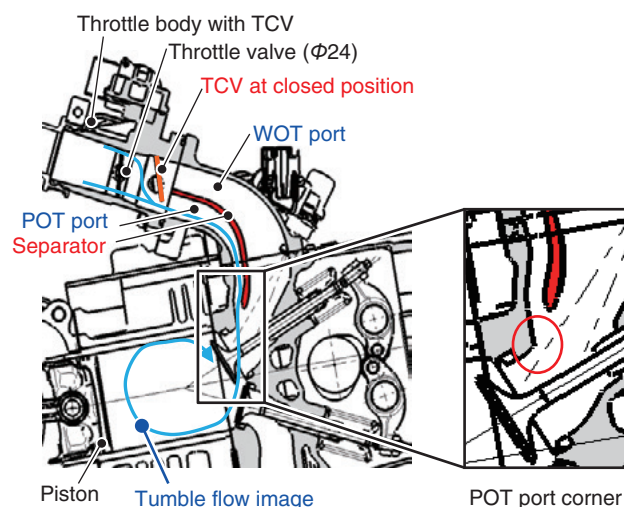


Fig. 3 Tumble port with TCV and detail of POT port exit

増すに連れ、燃焼速度の上昇に伴う等容度の増加により、BSFC改善率が上昇する。タンブル比1.5以上でBSFC改善率がサチュレート傾向を示した。この結果より、目標とするタンブル比の下限値を1.5とした。

またタンブル比がエンジン騒音に与える影響をエキスパートによる評価で検証した。スロットル開度は25%とした。タンブル比が高くなるに連れて燃焼速度が高まり、筒内圧力の上昇率($dP/d\theta$)が増加する。これにより、クランクシャフト軸受部のクリアランスに起因するエンジン騒音が増加する。Fig. 4に示したタンブル比2.0以下であれば、騒音は許容レベルであることが確認された。この結果より、目標とするタンブル比の上限値を2.0とした。

Fig. 5にコンベンショナルポートのタンブル比特性を示す。スロットル開度30%以下ではタンブル比は1.5を下回り、30%以上の開度では、タンブル比は1.6から1.7の間でほぼ一定値となる。

前述した試験結果より設定したタンブル比の目標値とそのスロットル開度領域を赤枠で示す。

2.2.2. POTポート流量比率の目標設定

CFDを用いてTCV付きタンブルポートの流れの解析をおこなった。解析モデルはRicardo社の方式を元に、通路

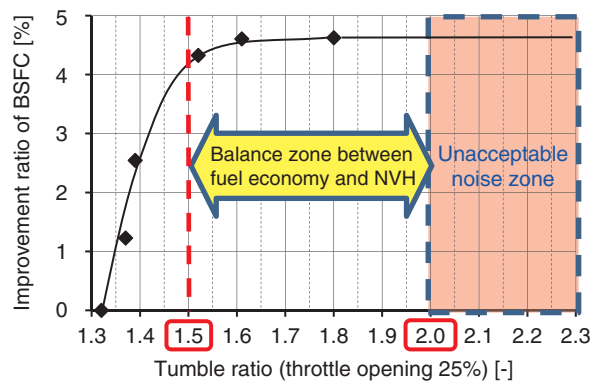


Fig. 4 Relationship between improvement ratio of BSFC, evaluation of engine noise, and tumble ratio

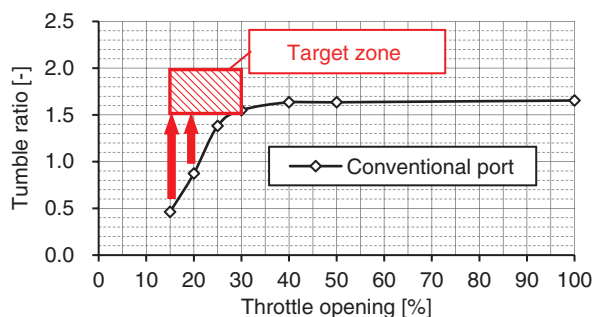


Fig. 5 Tumble ratio characteristics and target zone

形状をモデリングした。解析モデルと計算条件を Fig. 6 に示す。解析の詳細については、白砂らの文献に準じる⁽⁵⁾。スロットルバルブ開度は、最もタンブル比の向上が求められる 15% とした。

タンブル比の目標下限値 1.5 を達成する POT ポートの流量比率 RQ_{POT} を調べた。 RQ_{POT} の定義を以下に示す。

$$RQ_{POT} = \frac{Q_{POT}}{Q_{ALL}} \times 100$$

RQ_{POT} : POT ポートの流量比率 [%]

Q_{POT} : POT ポートの流入体積流量 [m^3/s]

Q_{ALL} : 全流入体積流量 [m^3/s]

Fig. 7 にスロットルバルブ開度を 15% に固定した上で、TCV の開度を任意に設定した際の、POT ポート流量比率 RQ_{POT} とタンブル比の関係を示す。解析の結果、目標とするタンブル比 1.5 以上を得るためには POT ポート流量比率 RQ_{POT} を 83% まで高める必要があることがわかった。

2.2.3. 全負荷におけるポート有効開口面積の目標設定

コンベンショナルエンジンと同等の出力を得るために、各インレットバルブリフトに対する有効開口面積 (Z 特性) の目標値はコンベンショナルポートと同等とした。

以上の TCV 付きタンブルポートの実験結果より、TCV 無しタンブルポートシステムの各目標値を以下に設定した。

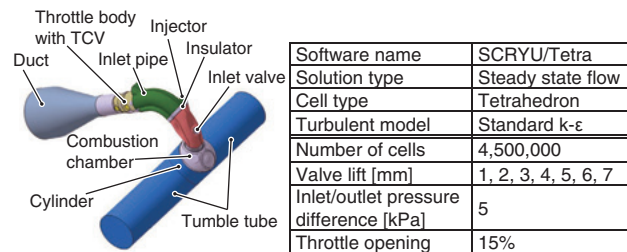


Fig. 6 Model of tumble port with TCV and analysis condition

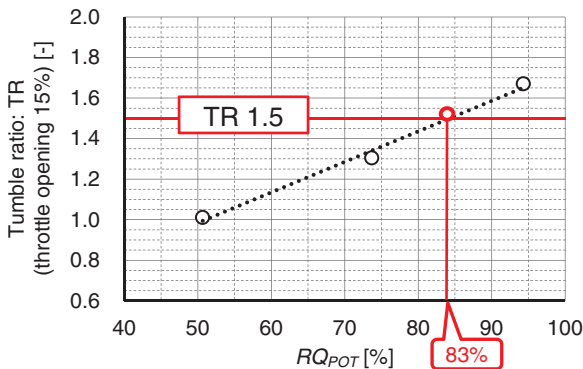


Fig. 7 Relationship between RQ_{POT} and tumble ratio

- (1) CFD におけるスロットル開度 15% 時の POT ポート流量比率 RQ_{POT} は 83% 以上
- (2) 実機の定常流試験におけるタンブル比はスロットル開度 15% から 30% で 1.5 以上 2.0 以下
- (3) ポートの定常流試験におけるスロットル全開時の有効開口面積はコンベンショナルと同等

3. TCV 無しでタンブルを強化する手法の探索

本章では、TCV 無しでタンブルを強化する手法の検討に先立ち、スロットルバルブ下流で発生する現象を把握するために、基礎的な流れの解析をおこなった。

3.1. 流れ解析による探索 (CFD)

3.1.1. 円筒直管における解析モデル

Fig. 8 に解析モデルの全体図を示す。直管形状での流れ解析において、スロットルボデー内部の流路形状は実機と同一とした。スロットルボデー出口からの円筒直管は実機のインレットパイプからシリンダヘッドの吸気ポート出口までを想定した長さとした。Fig. 9 にスロットルバルブ周りの拡大図を示す。スロットルバルブはバタフライ式で、この図において時計回りに開く。スロットルボア径は 22

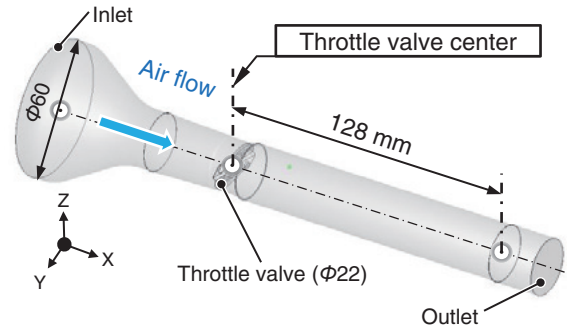


Fig. 8 CFD model for straight port

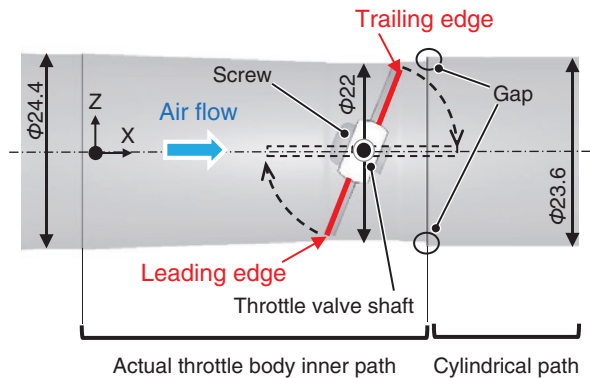


Fig. 9 Detail of throttle valve

mmとした。なお本項では、バタフライバルブ端部の内、上流側に開く側をリーディングエッジと呼び、下流側に開く側の端部をトレーリングエッジと呼ぶ。

3.1.2. 円筒直管における解析結果

前章と同じく CFD 解析条件としてスロットル開度は15%，入り口と出口の差圧は5 kPaに設定した。Fig. 10にスロットルバルブ下流の解析結果を示す。解析結果における流線のコンタは流速を示し、白色の矢印は主たる流れを示す。

なお、Fig. 10の(a)，(b)，(c)各々に示した流線とその透視方向を以下に説明する。

- (a) トレーリングエッジ側の開口部を通過した流線のみをZ軸上方向から透視した図
- (b) トレーリングエッジ側、リーディングエッジ側の開口部を通過した流線と、管路を側面(Y方向)から透視した図
- (c) リーディングエッジ側の開口部を通過した流線のみをZ軸下方向から透視した図

以下に各図の流れの特徴を説明する。

(a) からは、トレーリングエッジ側の開口部を通過した中央流れはZ方向上端を直進する。開口部の両端を通過する端部流れ(ⅡB)は、円筒面に沿う形で下流に向かいながらY軸方向に拡散する方向へ流れる(ⅡA)。また、端部流れは、中央流れよりおそく、かつ、(c)で示すリーディングエッジ側の収束した流れの流速よりおそいことがわかる。

(b) からは、バタフライバルブのリーディングエッジ側、トレーリングエッジ側の各開口部における流入量の総流入に対する比率はそれぞれ47%と53%であり、ほぼ均等であることが確認された。またトレーリングエッジ側の端部流れが、バタフライバルブ背後へ逆流する現象が確認された(ⅢA)。

(c) からは、リーディングエッジ側の流れは流路中心へ収束するように流れている(I)。これはリーディングエッジ側の中央流れは直進するが、開口部の両端を通過する端

部流れが円筒面に沿う形でZ方向下端に向かって流れる。そして中央流れと合わさるためである。

3.1.3. トレーリングエッジ側の逆流

逆流する要因について以下に説明する。

Fig. 11にFig. 8のXZ断面におけるスロットルバルブ下流の圧力分布を示す。バタフライバルブ背後に低圧部(1)と両開口部直後に局所的な低圧部(2)が確認される。

まず、トレーリングエッジ側の流速のおそい端部流れが低圧部(1)に引き戻され、Fig. 10に示す、逆流ⅢAとなる。次にリーディングエッジ側の局所的な低圧部(2)に吸い寄せられ、スロットルバルブ背後まで導かれる(Fig. 10ⅢB)。その後、下流に向かうリーディングエッジ側開口部から流入する収束した流れに合流する(Fig. 10ⅢB)。最終的に合流した流れは、壁面から離れて管路の中心方向へ寄りつつ下流に流れる。

3.1.4. 隔壁付き円筒直管における解析モデル

前項で得られたトレーリングエッジ側の逆流が、リーディングエッジ側の主流に合流する現象(Fig. 10, 11)に着目した。リーディングエッジ側に隔壁を設けて、POTポートを形成しトレーリングエッジ側の逆流を捕捉することで、 RQ_{POT} を高められると考えた。Fig. 12に解析モデルを示す。先の円筒直管の解析モデルをベースに隔壁を管路

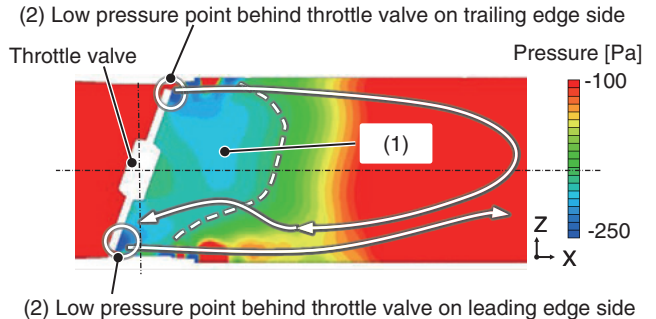


Fig. 11 Distribution of static pressure and aperture flow

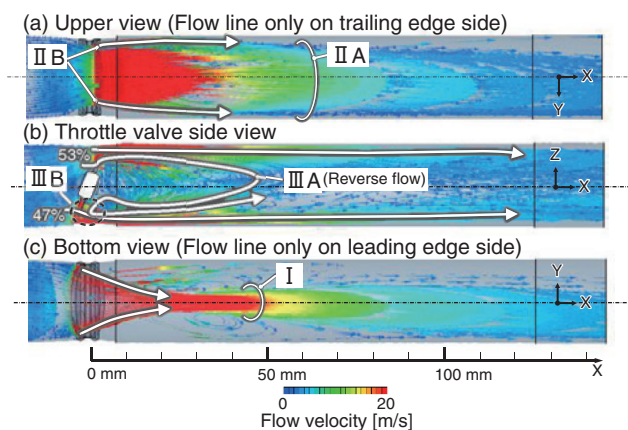


Fig. 10 Flow line for straight port on each side view

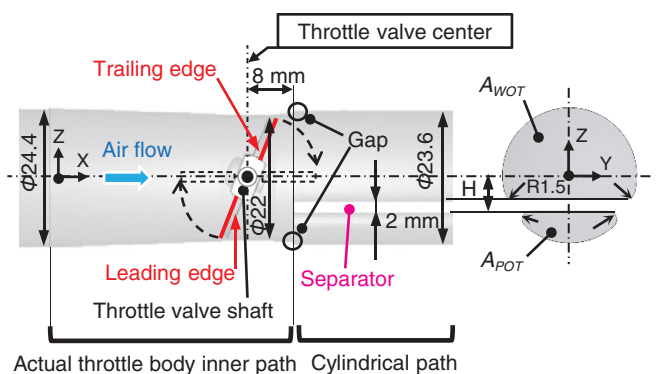


Fig. 12 Detail of throttle valve and separator plate

軸心とスロットルバルブ軸心に対して平行に設置した。その長さは供試エンジンへの適用を想定しスロットルバルブ下流 8 mm の位置から 128 mm の位置までの 120 mm とした。隔壁により POT ポートと WOT ポートが形成される。先に述べた解析結果に対して隔壁追加のみの変化を調べる為、隔壁付きの円筒部の径は隔壁無しの円筒部の径と同一とした。また下流に向かって POT ポートと WOT ポートの断面積変化はなく、出口近傍で再び POT ポートと WOT ポートが合流する形とした。隔壁の厚さは量産の適用を考慮して、鋳造時の一般的な厚さである 2 mm とした。隔壁を設置した際の隅部は解析する上で、悪影響を与えないよう半径 1.5 mm の曲線で繋いだ。

3.1.5. POT ポート断面積比と POT ポート流量比率の関係

最初に、POT ポート断面積比と POT ポート流量比率の関係を調べた。POT ポートの断面積比 RA_{POT} は以下のように定義した。

$$RA_{POT} = \frac{A_{POT}}{A_{POT} + A_{WOT}} \times 100$$

RA_{POT} : POT ポート断面積比率 [%]

A_{POT} : POT ポート断面積 [m^2]

A_{WOT} : WOT ポート断面積 [m^2]

隔壁の高さ H を変えることで RA_{POT} を変化させた。スロットルバルブ開度は 15% とした。

Fig. 13 に各 RA_{POT} における解析結果を示す。解析結果

における流線のコンタは流速を示し、白色の矢印は主たる流れを示す。解析結果の右側のグラフは各 RA_{POT} における RQ_{POT} と POT ポート出口の平均流速を示す。なお、解析結果の左側に管路の断面形状を示す。

解析の結果、いずれの断面積比率においても以下の現象が確認された。

1. スロットルバルブの総流入量に対する各開口部の流量比率は、リーディングエッジ側は 47%、トレーリングエッジ側は 53% であった。隔壁の有無による差異は確認されなかった。
2. トレーリングエッジ側で発生する逆流は隔壁に沿ってスロットルバルブ背後に導かれ POT ポートに流入する。
3. いずれの RA_{POT} でも RQ_{POT} がリーディングエッジ側の流入比率 47% に対して増加している。

次に、 RA_{POT} と RQ_{POT} の関係を Fig. 13 右側のグラフで説明する。

ポート断面積比 RA_{POT} が 16% から 29% の範囲で RQ_{POT} は 83% 以上を達成しており、 RA_{POT} が 20% のときに RQ_{POT} は最大となる。

RA_{POT} が 10% と 40% の場合は RQ_{POT} の目標値に達しなかった。その理由を以下に考察する。

RA_{POT} 10% では RQ_{POT} が 69% であった。POT ポート開口面積 A_{POT} がスロットルバルブ開口面積に対して近づき、スロットルバルブ開口面積に対する比率は高くなる。すると POT ポートへ流入できる流量は他の RA_{POT} (20%, 30%,

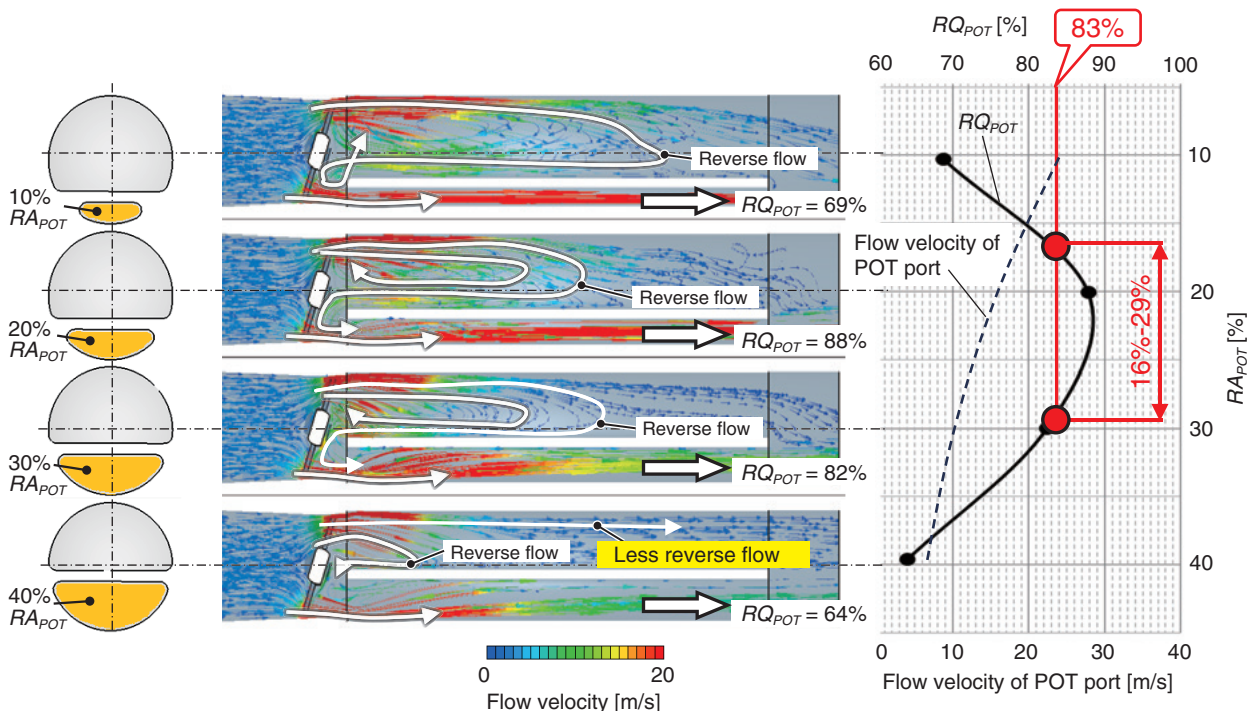


Fig. 13 Result of CFD analysis for straight pipe with each RA_{POT} (throttle opening: 15%)

40%)より抑制される。逆流する流線の量は多いが、リーディングエッジ側のPOTポートへ合流せずトレーリングエッジ側に合流している。

RA_{POT} 40%では RQ_{POT} が64%と低くなる。WOTポート側の逆流するスペースが十分に確保されないため、逆流量が減少する。トレーリングエッジ側の流れは逆流せず下流へ流れる流量が増加する。

上記の確認結果より、合流した流れを十分に流入させることができるPOTポート断面積と逆流が発生するためのスペースが重要であることがわかった。

POTポート流量比率 RQ_{POT} が高く、POTポート流速を高い仕様とするために、 RA_{POT} を20%と決め、次項にて詳細な流れ把握をおこなった。

3.1.6. 隔壁による逆流のPOTポートへの捕捉効果

Fig. 14に $RA_{POT} = 20\%$ における流れ解析結果を示す。主たる流れを白い矢印で示す。Fig. 15にXZ断面の圧力分布解析結果を示す。解析結果より以下のことがわかった。

Fig. 10で説明したリーディングエッジ側の収束する流れ(I)と、トレーリングエッジ側の拡散する流れ(II A, II B)が同様に発生する。

トレーリングエッジ側の拡散する流れは、Fig. 15に示す(1)部の低圧部によって、逆流する(Fig. 14, III A)。

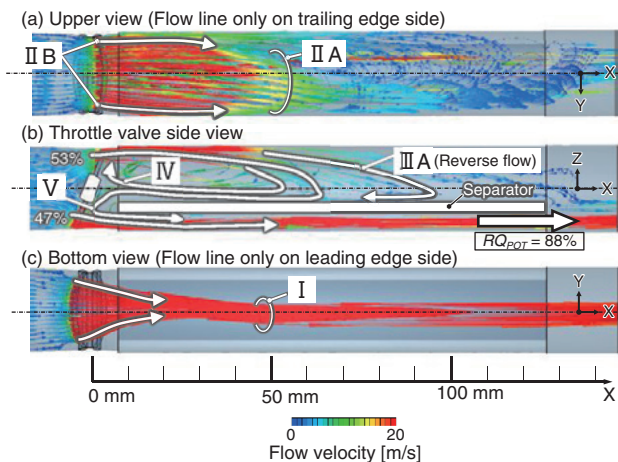


Fig. 14 Flow line for straight port with separator plate

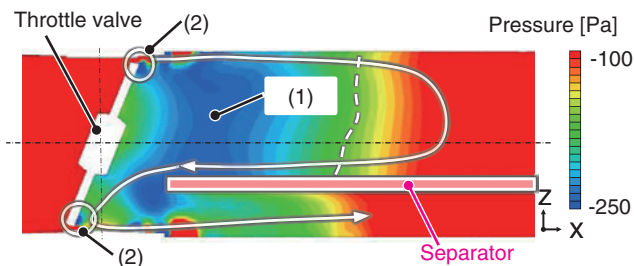


Fig. 15 Distribution of static pressure with separator plate

逆流した流れは隔壁に沿ってスロットバルブ背後に導かれる。

その後、逆流した流れはFig. 15に示す(2)部の局所的な低圧部に導かれ、二つの流れに分かれる(Fig. 14, IV)。

リーディングエッジ側の負圧に吸い寄せられた流れはPOTポートに流入する(Fig. 14, V)。

上記IVの流れが、リーディングエッジ側開口部を通過した収束する流れに合流する(Fig. 14, V)。

その結果、 RQ_{POT} が88%に達する。

以上より、隔壁の設置により形成されるPOTポートに吸気流の大半を集約できることが確認された。

次に、POTポートの流量比率とスロットル開度の関係を調べた。 RA_{POT} は20%とし、スロットル開度のみを変更して確認をおこなった。

Fig. 16に RQ_{POT} とスロットルバルブを通過する全体積流量(Q_{ALL})、スロットルバルブのリーディングエッジ側を通過する体積流量(Q_{LEAD})、POTポート体積流量(Q_{POT})を示す。スロットル開度が大きくなるに連れて Q_{ALL} は二次曲線的に増加するが、 Q_{POT} は Q_{ALL} に対して緩やかに増加する。そのため、 RQ_{POT} はスロットル開度に応じて低下する。

以上の結果から、スロットル開度30%以下の領域の RQ_{POT} が高められることにより、タンブルを強化できるのではないかと考えた。

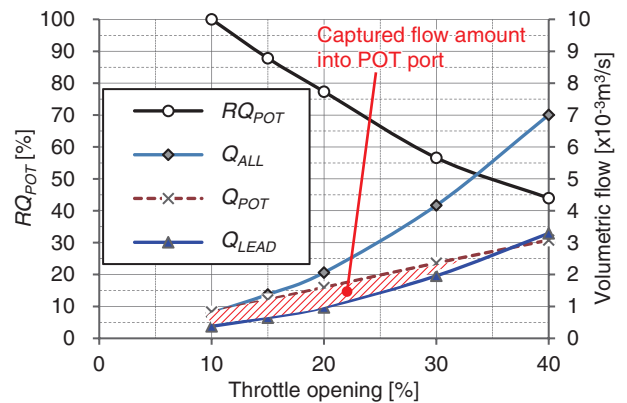


Fig. 16 RQ_{POT} , Q_{ALL} , Q_{POT} , and Q_{LEAD} vs. throttle opening

4. 実機ポート形状における効果の検証

本章では、隔壁の設置によりポート内逆流がPOTポートに捕捉される現象が、実機ポート形状においても再現するか否かの確認をおこなった。

4.1. 実機ポート形状における解析モデル

Fig. 17にTCV無しタンブルポートの断面図を示す。

RQ_{POT} を前述の円筒直管 CFD 解析で得られた 20% としインレットパイプの流路を隔壁で POT ポートと WOT ポートに分けた. POT ポートの出口の形状は前述の TCV 付きタンブルポートと同じである. POT ポート入り口からシリンダヘッドの POT ポート出口までは断面積はほぼ変化しない. スロットルボア径は 22 mm とし, スロットルバルブシャフトの中心位置とスロットルバルブの回転方向は供試エンジンと同じである.

4.2. 実機ポート形状における解析結果

Fig. 18 に TCV 無しタンブルポートの流れ解析結果を示す. バタフライバルブの上側開口部を通過した流れを青色, 下側開口部を通過した流れを赤色で示す. なお, 図は吸気バルブのリフト 6 mm のときの流れを示している. 解析の結果, スロットルバルブより下流で湾曲したポート形状においても, WOT ポート側で発生した逆流がリーディングエッジ側の流れに合流する現象が確認された. また, POT ポートの流量比率 RQ_{POT} は 91% と, Fig. 14 に示した円筒直管における 88% に対して増加した. これはバルブガイドの存在により, WOT ポートの通気抵抗が増し POT ポート側により多く流れるためと推測した. さらに筒内へ流入後にタンブルが生成されていることがわかる.

以上より, 実機形状の TCV 無しタンブルポートにおいても逆流が POT ポートに捕捉される現象と POT ポートの流量比率 RQ_{POT} の向上効果が確認された.

TCV 無しタンブルポートの RQ_{POT} 91% は Fig. 7 に示す目標値 83% を上回っており, タンブル比の下限目標値 1.5 以上を得られると考えた. しかしながら, Fig. 5 に示すコンベンショナルポートのタンブル比はスロットル開度 15% から 30% にかけて増加している. そのため, TCV 無しタンブルポートにおいても, 上記スロットル開度範囲におい

てタンブル比の上限目標値 2.0 を超える可能性があると考えられた.

RQ_{POT} を低減させるために隔壁をスロットルバルブから遠ざけることで, 逆流の捕捉量を低減できるか否か検討をおこなった. その結果, 隔壁を 10 mm 短縮することにより RQ_{POT} が 83% となることがわかった⁽⁶⁾.

Fig. 19 に隔壁を短縮した断面図と, その解析結果を示す.

以上の結果から, TCV 無しタンブルポートにおいて目標とするタンブル比特性を達成する見通しが得られた.

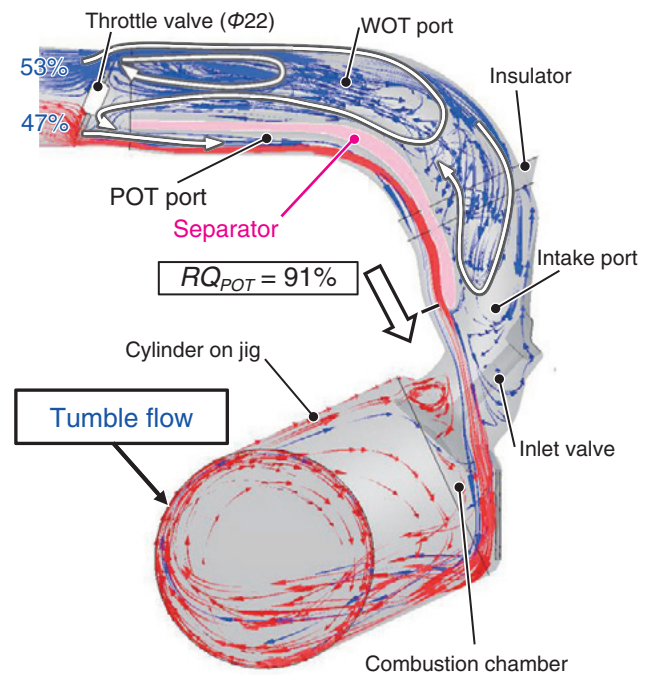


Fig. 18 Result of CFD analysis for flow of tumble port without TCV (throttle opening: 15%)

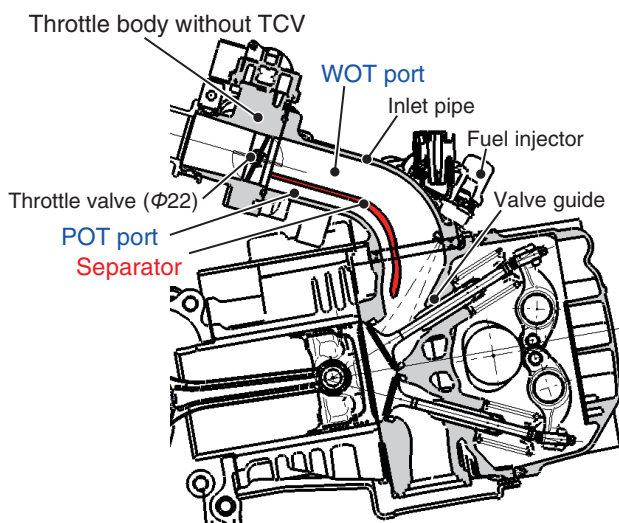


Fig. 17 Tumble port without TCV

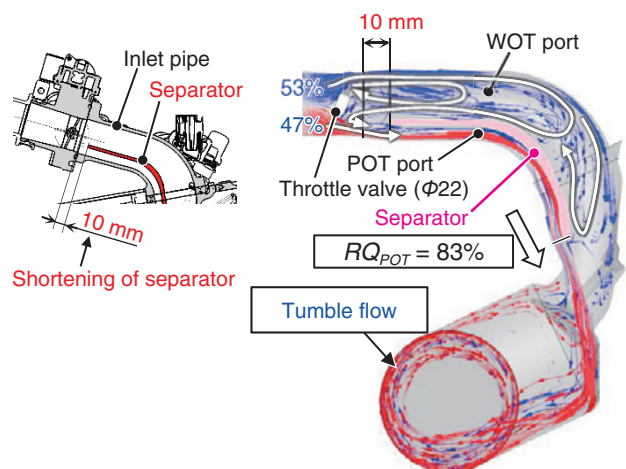


Fig. 19 Result of CFD analysis for flow of tumble port without TCV using short separator (throttle opening: 15%)

5. 実機による効果の検証

本章では、供試実機エンジンによる確認結果を述べる。

5.1. タンブル比特性の検証

Fig. 20 にタンブル比の実測結果を示す。TCV 無しタンブルポートでスロットル開度 15% においてタンブル比は目標値下限 1.5 を達成した。また、スロットル開度 20% と 25% においてタンブル比は各々、1.8 と 1.9 であり目標値上限 2.0 を下回った。以上の結果より、TCV 無しタンブルポートにおいて目標とするタンブル比が得られることが確認された。

5.2. タンブル比下限 1.5 の燃費改善効果の検証

Fig. 21 に、BMEP 250 kPa (スロットル開度約 15%) におけるエンジン単体での正味燃料消費率 BSFC を示す。なお、TCV 付タンブルポートについては、タンブル比の下限目標 1.5 になるように TCV 開度を調整した。測定条件は、エンジン回転数 4000 rpm、A/F は 14.7、点火時期は MBT であり各仕様で同一とした。TCV 付きタンブルポート、TCV 無しタンブルポートの BSFC は、コンベンショナルポートに対してそれぞれ 2.0%、1.7% と改善した。以上より、タンブル比を 1.5 以上に強化することで、燃費の改善効果が確認された。

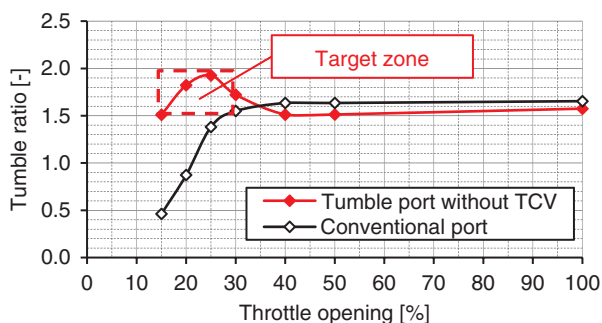


Fig. 20 Characteristic of tumble ratio

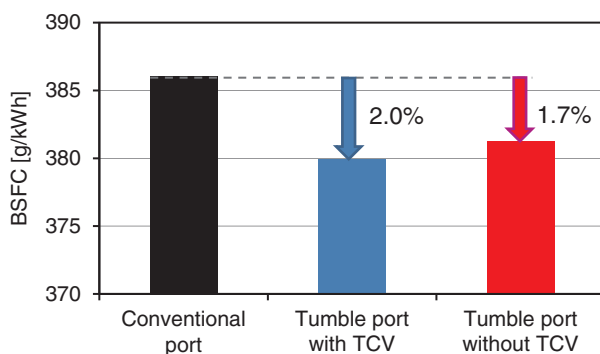


Fig. 21 BSFC results at BMEP of 250 kPa

5.3. タンブル比上限 2.0 のエンジン騒音の検証

Fig. 22 にエンジン騒音の評価結果を示す。スロットル開度 30% 以下ではタンブルポートの評価は低下するが、許容レベル以内であることが確認された。また全負荷 (WOT) は、全ポート同等で良好なレベルが確認された。これは、Fig. 20 に示す全負荷時のタンブル比はコンベンショナルポートと同等レベルであるためと考えられる。

以上より、低負荷領域の目標タンブル比 2.0 以下で自社騒音評価を満足できる結果を得た。

5.4. ポート有効開口面積の検証

Fig. 23 に、インレットバルブリフトに対する有効開口面積 Z 特性を示す。TCV 無しタンブルポートの Z 特性は、リフト 1 mm から 6 mm の間でコンベンショナルポートと同等であった。また 6 mm 以上では Z 特性が低下することを示した。この Z 特性が低下する原因は、WOT ポートの流れと POT ポートの流れが衝突する際に乱れの渦が発生し、その影響によりバルブシート入口部で流入面積が制限される為と推測した。供試エンジンのバルブの最大リフトは 6.3 mm であるため、実用上の Z 特性はコンベンショナルポートと同等と見なせる。

5.5. 燃焼指圧測定に基づく検証

TCV 無しタンブルポートとコンベンショナルポートの

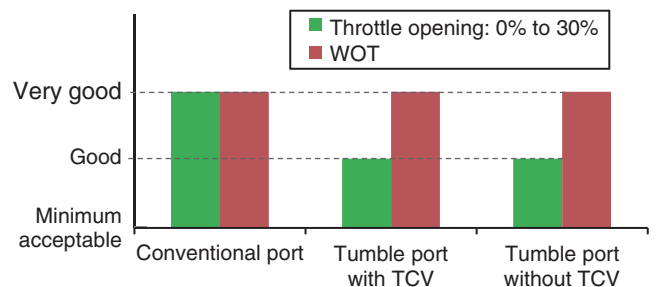


Fig. 22 Crank-noise evaluation (in-house standards)

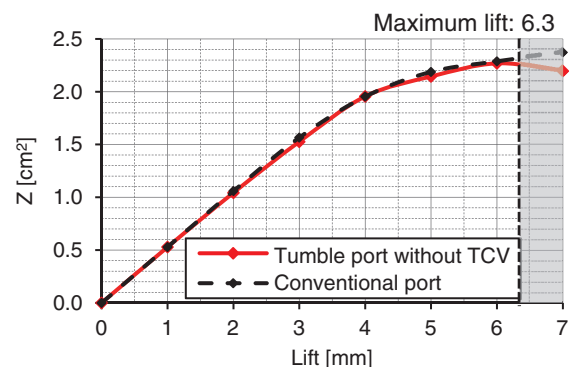


Fig. 23 Characteristics of effective opening area

各負荷の等容度, 初期燃焼期間 (IG-MFB 10%), および主燃焼期間 (MFB 10%-90%) を検証した. エンジン回転数 4000 rpm, A/F 14.7, 点火時期 MBT における各結果を Fig. 24, 25, 26 に示す.

各結果ともコンベンショナルポートに対し, TCV 無しタンブルポートは低負荷領域で急速燃焼化, 高負荷領域で同等レベルの結果を示し, タンブル強化がねらいの特性になっていることを示唆した.

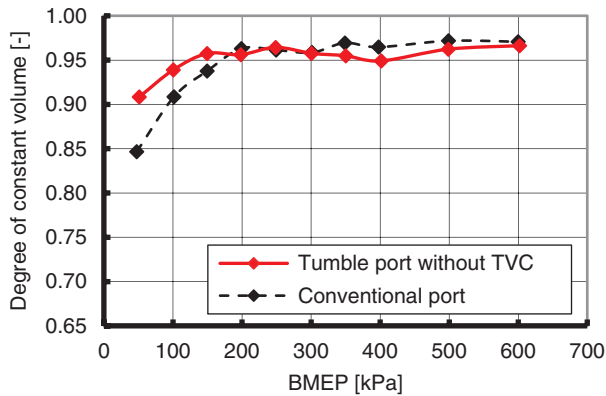


Fig. 24 Characteristics of degree of constant volume

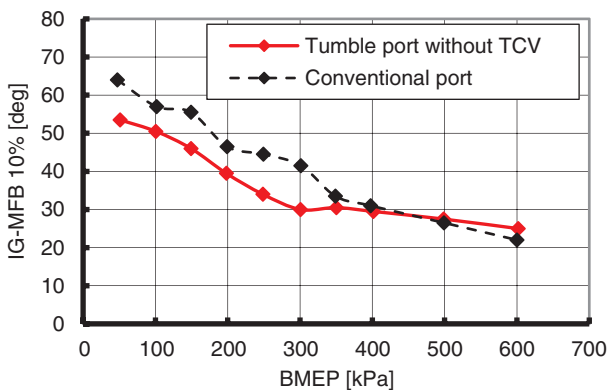


Fig. 25 Relationship between IG-MFB 10% and BMEP

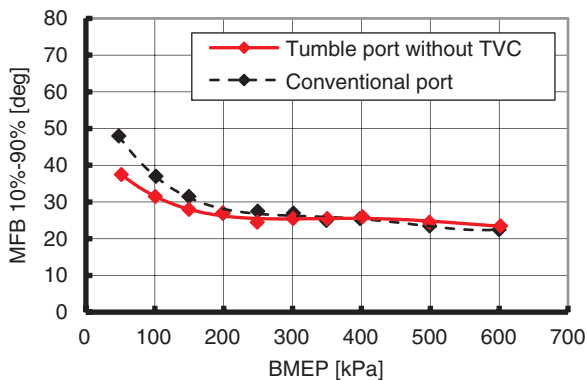


Fig. 26 Relationship between MFB 10%-90% and BMEP

Table 2 Improvement rate of fuel economy compared to conventional port

WMTC Class 1	Idle-stop on	Idle-stop off
Tumble port without TCV	+1.7%	+1.8%
Ref. Tumble port with TCV	+2.0%	+1.7%

Table 3 Results of emission measurements

EURO5/India's BS-VI WMTC Class 1	CO [mg/km]	THC [mg/km]	NOx [mg/km]
Emission regulations	1000	100	60
Tumble port without TCV	293	34	11
Conventional port	274	54	12
Ref. Tumble port with TCV	268	34	16

5.6. 完成車両における検証

完成車両にて WMTC モード燃費, 排気エミッション測定をおこなった. それぞれの結果を Table 2, 3 に示す. WMTC モード燃費は, アイドルストップ使用時に 1.7%, 不使用時で 1.8% の改善が確認された. 排気エミッションも EURO5/インド BS-VI 規制値に適合させ, コンベンショナルポートと遜色ない排出値を達成した.

以上の結果より, 切り替え機構を用いず, 低負荷領域のみタンブル強化が得られ, WMTC モード燃費で 1.7% の向上と, EURO5/インド BS-VI 規制値に適合した. ポート有効開口面積とエンジンノイズはコンベンショナルエンジン同等の結果を得た.

6. 隔壁付きタンブルポートの製造技術

隔壁付きタンブルポートの量産事例として, 別部品の平板を挿入した物や, 平板を鋳包んだ技術が乗用車用として実用化されている⁽³⁾. しかしながら, 小型二輪車にその技術を適用する場合, 吸気ポートの曲率に対する制約やコストインパクトの観点から現実的ではない. また, 既存設備の転用の観点からも課題となる. そこで我々は既存設備に変更を加えずに隔壁を一体成型する製法の確立を目標に定めた.

6.1. ポート中子造型金型の構想

隔壁を鋳造一体で成形する手法として WOT ポートと POT ポートの中子を別々に造型して接合する手段もある. その場合, 中子金型が 2 型必要になる. また, 接合の工数増や位置関係のずれによる寸法精度の低下が考えられる.

我々はポート中子の型割を従来の上下割から左右割にすることで WOT ポートと POT ポートを一体で成形することとした. 隔壁となる部分はスリット状に形成される.

Fig. 27 に従来ポートと隔壁付きタンブルポートの中子形状を示す。図中の破線は中子型のパーティングライン、矢印は型割の方向を示す。

中子造型金型を左右割にすると、Fig. 28 に示すバルブガイド部が型開き方向に対し逆勾配となる。その対応として、バルブガイド部を形成するためのスライド型を追加した。Fig. 29 に造型金型の模式図を示す。

図は左から順に、型が閉じた状態、中子砂が充填された状態、型が開いた状態の断面を示す。可動型の開閉時に固定型に連結された傾斜ピンがガイドとなりスライド型が開閉する構造とした。スライド型の開閉方向は可動型の開閉方向に対し垂直となる。

6.2. 製造性の検証

タンブルポート中子の造型性とシリンダヘッドの鋳造性を一般的な製造条件で確認した。砂中子は、バインダとしてフェノール樹脂 1.4 wt.% をコーティングしたレジンコートサンド (Resin Coated Sand: RCS) を使用した。

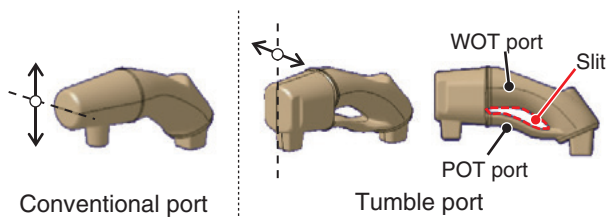


Fig. 27 Core shape of conventional port and tumble port

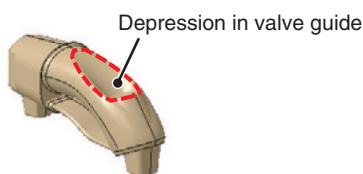


Fig. 28 Place of depression in valve guide

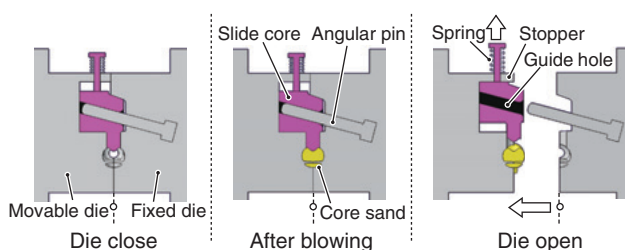


Fig. 29 Schematic diagram of tumble port core mold

Fig. 30 に RCS の諸元と造型後のタンブルポート中子の外観を示す。

POT ポート部の中子品質に課題がないことが確認された。

Fig. 31 にシリンダヘッドの隔壁部の切断面を浸透探傷検査 (レッドチェック) したものを示す。

隔壁部のアルミ充填性、内部品質ともに課題がないことを確認した。

6.3. 中子砂の排砂性検証

鋳造工程で中子の排砂が不完全な場合、後工程での検査項目が増えコストアップの要因になりうる。排砂の方法として、打撃振動を与え中子を崩壊させるハンマリングと、熱処理炉で加熱し砂焼きをおこなう方法が一般的である⁽⁷⁾。砂焼きは中子除去において有効な手段であるが、熱を加えることによる鋳物の変形、設備、時間およびエネルギーを多く費やしてしまうなどの課題がある⁽⁷⁾。そのために、排砂工程で排砂を完了することが望まれる。Fig. 32 に製造工程図を示す。鋳造後に排砂をおこない、その後、熱処理へとつながる。

タンブルポートはコンベンショナルポートに対し、狭小な POT ポートを持するため、タンブルポート中子の排砂性に懸念がないか検証をおこなった。排砂性の検証は、既存のハンマリング装置でおこなった。

Resin [wt.%]	1.4
Bending strength	405
Melting point [°C]	102
Grain size [AFS]	69

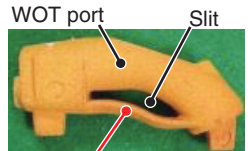


Fig. 30 Specification of RCS and appearance of tumble port core

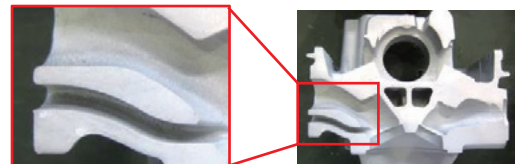


Fig. 31 Fillability and internal quality (dye penetrant test)

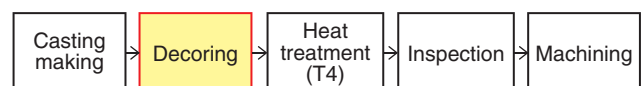


Fig. 32 Process chart

6.3.1. ハンマリングによる排砂性の検証

Fig. 33 にハンマリング装置の外観を示す。打撃振動によりポート内に残留した中子砂が排出されている様子が確認できる。

最適な振動条件を探るために以下の実験をおこなった。ハンマに付加するエア圧に対する振動加速度と排砂率の変化を確認した。なお、排砂率は、インテーク中子の重量に対する排出された中子砂の重量比率で定義した。Fig. 34 に実験結果を示す。エア圧 0.3 MPa 以上で振動加速度が 44 g 以上となり、排砂率 100% を得られることが確認された。

6.3.2. 熱処理による砂中子の崩壊性検証

万が一、チッピング後も POT ポートに砂中子が残留した場合を想定し、熱処理による砂中子の崩壊性を検証した。砂中子は、Fig. 30 に示すフェノール樹脂 1.4 wt.% をコーティングした RCS で造型される。フェノール樹脂は熱により酸化分解が促進され、気体生成物となる。酸化分解温度を確認するため、RCS の熱重量示差熱分析 (TG-DTA) を実施した⁽⁸⁾。Fig. 35 に分析結果を示す。428°C に酸化反応を示す発熱ピークが認められ、本製品の溶体化処理温度 500°C では酸化分解が終了する。その結果、バインダ機能を担うフェノール樹脂が完全に消失し、Fig. 36 のように砂中子が崩壊することを確認した。

POT ポートの燃焼室側出口が鋳バリで閉塞した場合、POT ポートの砂中子はインレットパイプ側しか空気に触れないため、フェノール樹脂の酸化分解が内部まで進まない可能性が考えられる。そこで、POT ポートの閉塞状態を簡易的に再現したテストピースを用いて、熱処理による砂

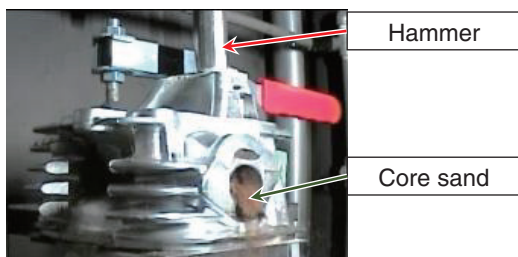


Fig. 33 State of decoring

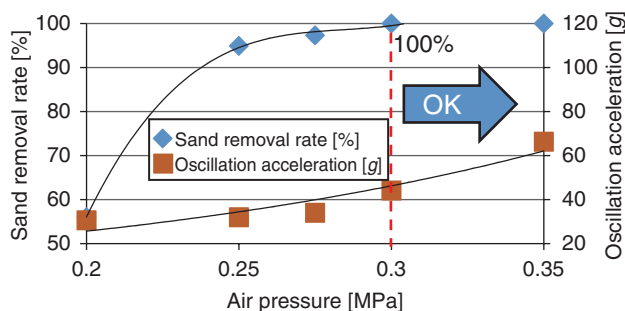


Fig. 34 Sand removal rate of intake port (after decoring for 30 seconds)

中子の崩壊性を検証した。Fig. 37 にテストピースの模式図を示す。空気に触れる開口部の断面積は、POT ポートの断面積に合わせた。Fig. 38 に加熱時間と砂中子崩壊長さの関

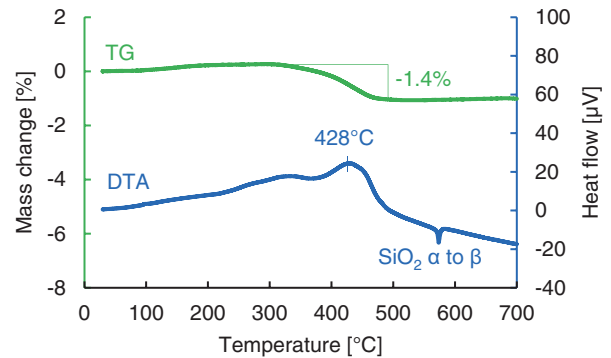


Fig. 35 TG-DTA curves at heating rate of 10°C/min

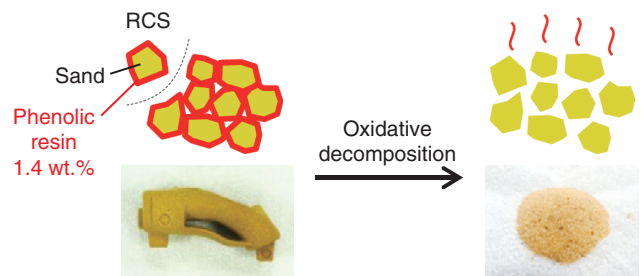


Fig. 36 Sand core collapse

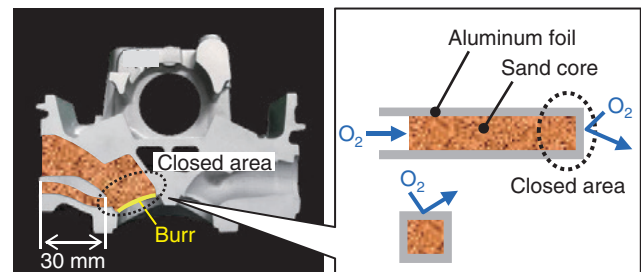


Fig. 37 Schematic diagram of test piece

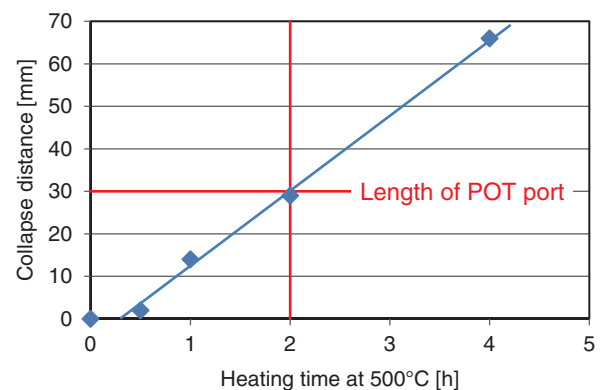


Fig. 38 Effect of heating on sand core collapsing

係を示す。加熱時間に比例して崩壊が進み、2時間でPOTポート長さ30mm相当が崩壊することが確認された。熱処理時間内で十分に崩壊する見通しを得た。

以上の結果より、吸気ポートの隔壁を鋳造一体成形する製法を確立した。この技術により、既存の鋳造設備に変更を加えることなく実用化が可能となった。

7. まとめ

流路の切り替え機構を用いずに低負荷領域のみタンブルを強化する廉価な技術を構築した。

この技術は、以下の知見に基づく。

- (1) スロットルバルブ下流においてトレーリングエッジ側では拡散するおそい流れが発生し、リーディング側では収束する速い流れが発生する。
- (2) トレーリングエッジ側の拡散したおそい流れは、スロットルバルブ背面部に発生した低圧部に引き寄せられ逆流する。
- (3) 隔壁をスロットルバルブ軸に対してリーディング側に設置することにより、逆流した流れが隔壁に沿ってスロットルバルブ背後の低圧部に導かれる。その後リーディングエッジ側の収束する流れに合流し、全流量の80%を超える流れがPOTポートへ捕捉される⁽⁹⁾。
- (4) 実機エンジンの燃焼指圧解析より、低負荷領域における燃焼期間がコンベンショナルポートに対し短縮し、ねらいどおりのタンブル特性になっていることを確認した。
- (5) 完成車のWMTCモード燃費で1.7%の向上と、EURO5/インドBS-VIの排気ガス規制に適合した。
- (6) 吸気ポートの中子造型金型を左右割構造とすることで、中子に隔壁部を形成するスリットを設けた。この中子を用いることで、吸気ポートの隔壁を鋳造一体成形する製法を確立した。

この技術により、静粛性と動力性能を損なわずに実用域の燃費性能を高めることが可能となった。また、専用部品の付加や、既存設備に変更を加えることなく実用化を可能とした。

参考文献

- (1) 葭原泰司, 中田浩一, 高橋大志, 大村哲生, 太田篤治: 高効率エンジンを実現するための高効率タンブルポート開発, 自動車技術会 2016年春季大会学術講演会 講演予稿集, No. 59-16, p. 1425-1430, (2016)
- (2) Abidin, Z., Hoag, K., McKee, D., Badain, N.: Port Design for Charge Motion Improvement within the Cylinder, SAE Technical Paper, 2016-01-0600, doi: 10.4271/2016-01-0600, (2016)

- (3) 秋本晃, 岩村一洋, 澁井敦, 片倉祐一, 堀智宣, 佐々木礼, 保坂浩, 石田礼, 森川弘二: 新世代水平対向ガソリンエンジンの開発—燃焼設計と燃費性能改善について—, 自動車技術会論文集, Vol. 42, No. 4, p. 835-838, (2011)
- (4) 中山智裕, 加藤真亮, 武藤涼: ガス流動制御を用いたガソリンエンジンの熱効率向上, 自動車技術会論文集, Vol. 49, No. 5, p. 974-979, (2018)
- (5) 白砂貴盛, 齋藤秀輝, 野村友和: 吸気バルブオフセットとスキッシュによる燃焼改善技術の研究, Honda R&D Technical Review, Vol. 25, No. 2, p. 109-124
- (6) Nakamura, Y., Inoue, Y., Fujikubo, M.: Tumble Flow Enhancement Applied for Low-Load Condition of Engines by Utilizing Reverse Flow Phenomenon in Intake Port, SAE Int. J. Adv. & Curr. Prac. in Mobility 2(2):985-1001, doi:10.4271/2019-32-0509, (2020)
- (7) 藤井真, 下藤潤平: 共振型高加速度振動機を利用した中子落とし装置と内面研掃装置の開発, 日本鋳造工学会 第163回全国公演大会 日本鋳造協会 平成25年度秋季大会 講演概要集, p. 104, (2013)
- (8) 津越敬寿: 入門講座 分析機器の正しい使い方 熱分析, ぶんせき 2017年12月号, p. 568-574
- (9) <https://www.honda.co.jp/tech/motor/item-eSTT/>

■ 著 者 ■



藤久保 誠



中村 洋平



井上 陽介



亀田 圭悟



日高 葉月



及川 浩信

2020 年モデル CITY 用高効率 CVT

Development of High-efficiency CVT for 2020 Model Year CITY

隅 田 聡一郎¹
Soichiro SUMIDA

村 上 好 文¹
Yoshifumi MURAKAMI

中曾根 牧 人¹
Makito NAKASONE

要 旨

ABSTRACT

燃費性能と動力性能を高次元で両立させることを目標として、2020 年モデル CITY 用 CVT を開発した。

新機構として、ロッキング位置変更ベルトおよび複合 V 面形状プーリ、機電直列配置オイルポンプシステムを採用した。これにより、金属ベルト式 CVT の主要損失を低減し、動力伝達効率を向上した。新機構を組み合わせるにあたり、CVT として損失低減効果を発揮できるように CVT 制御の最適化を実施した。

また、燃費性能を最適化する制御による動力性能低下がないように、ドライバの加速意思を CVT 制御の切り替えによって実現した。CVT の変速制御目標を駆動力とすることで、駆動力の落ち込みがない設定とした。さらに、ステップシフトを採用することで、車速がエンジン回転数にリニアに追従し、駆動力に伸びを感じられる設定とした。

その結果、New European Driving Cycle モードにおいて、CVT として従来モデルに対し CO₂ 排出量を 5.7 g/km 削減した。また、2020 年モデル CITY として、タイの第 2 期エコカー政策の基準となる CO₂ 排出量 100 g/km 以下を達成した。

A CVT has been developed for use in the 2020 model year CITY with the aim of realizing a good balance between fuel efficiency and power performance.

As new mechanisms, the developed CVT employs a belt with a modified rocking position, pulleys with multiple V-surface shapes, and mechanical and electric oil pump systems in series connection. The application of these technologies has made it possible to reduce the main sources of loss in a metal pushing V-belt CVT and to increase power transmission efficiency. When these new mechanisms were combined, CVT control was optimized in order to help ensure a reduction of loss in the CVT itself.

In addition, the driver's intention in accelerating the vehicle is realized by switching CVT control in order to help ensure that there is no decline in power performance, due to the application of control that optimizes fuel efficiency. By setting drive power as the target parameter for CVT shift control, it has been possible to help avoid decline in drive power. Furthermore, the application of stepped shift has meant that vehicle speed follows engine speed linearly, and vehicle occupants experience an increase in drive power.

As a result, the CVT has realized a reduction of 5.7 g/km in CO₂ emissions against the previous unit in the New European Driving Cycle mode. In addition, the 2020 model year CITY meets the 100 g/km or below CO₂ emissions standard for the second phase of Thailand's eco-car project.

1. ま え が き

近年、世界的な環境問題への対応として、各国の環境規制は厳しさを増している。こうした世界の動向を受けて、自動車用パワートレインは電動化へ急速にシフトしている。しかし、新興国をはじめとした電動車両の拡大が容易でない国々において、動力を内燃機関のみとする従来車両の燃費向上は急務である。こうした背景から、内燃機関を熱効率が高い領域で運転できる変速機として、無段変速機

(以下、CVT)の適用が拡大している。適用される車両は、Honda のみならず、軽自動車から小・中型自動車を中心に国内外問わず幅広い車種に及ぶ。ここで、Fig. 1⁽¹⁾に JC08 モードにおける金属ベルト式 CVT の損失内訳を示す。これより、金属ベルトとオイルポンプの損失が全損失の 6 割以上を占めることがわかる。そのため、大きな損失を生じる機構部品について、さまざまな対応が実施されている。ベルト損失への対応は、発進ギヤ付き CVT⁽²⁾などが挙げられる。オイルポンプ損失への対応は、同軸 2 ポートオイ

¹ 本田技研工業株式会社

ルポンプシステム⁽³⁾などが挙げられる。つまり、CVTは車両燃費性能に優れるものの、変速機としての動力伝達効率には多くの向上させる余地があることを示す。

本開発では、金属ベルト式 CVT の主要損失低減により、タイの第 2 期エコカー政策 (以下、Eco2) をはじめとした、各国の環境規制に適合させることを目指した。また、新型 CITY は、New European Driving Cycle (以下、NEDC) モードにおいて CO₂ 排出量 100 g/km 以下の燃費性能と、動力性能を両立させることを目指した。

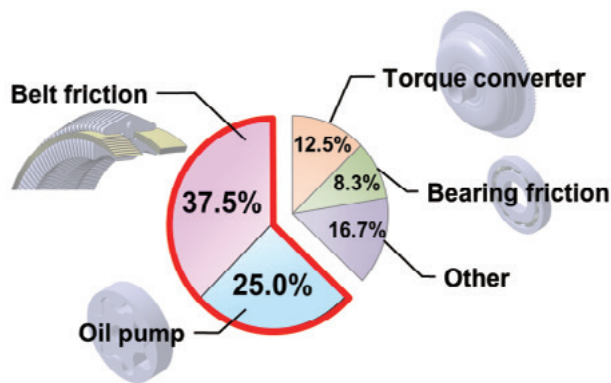


Fig. 1 Breakdown of power consumed in CVT

2. 開発のねらい

金属ベルト式 CVT (Fig. 2) は、ベルトが一對の固定プーリと可動プーリに挟み込まれ、その摩擦力により駆動プーリから従動プーリに動力を伝達する。可動プーリは油圧推力により駆動側および従動側で無段階に位置を変えられるため、巻きかけられたベルトも無段階に位置を変化させ無段階変速が可能となる。この無段階に変速比を選択できる特徴から、内燃機関の熱効率が高い領域を維持することができ、車両燃費性能が高い変速機として適用が拡大している。

金属ベルトは、その部品構成からしゅう動箇所が多く、プーリ巻きかけ径に依存したベルト内部損失を生じる⁽⁴⁾。オイルポンプは、プーリやトルクコンバータ、クラッチ、潤滑など要求の異なる作動油条件を一つのオイルポンプで担う。そのため、常に高压多流量の仕事要求され、オイルポンプ損失が大きくなる⁽⁵⁾。ベルト／プーリは、摩擦で動力を伝達するため、高いプーリ挟圧力を必要とする。この大きな力は、しゅう動箇所の多い金属ベルトの損失に、しゅう動荷重として影響する。また、プーリ挟圧力が高いほど、オイルポンプ仕事も大きくなり損失を増大させる。また、新型 CITY に搭載されるエンジンは、燃費性能向上のため、従来の 1.5 L 自然吸気から 1.0 L 過給機付

に変更されている。内燃機関変更による出力特性変化に対し、駆動力を目標値とするパワートレイン協調制御 (以下、G-design shift) を採用した。

これらの観点より、損失低減の方向性を以下三つとした。

- (1) 金属ベルト内部でのしゅう動に起因した摩擦損失を低減させること。
- (2) CVT に必要なオイルポンプ仕事を圧力および流量で分担し、仕事を最適化すること。
- (3) 動力性能を低下させずに損失低減効果を発揮できるよう、CVT 制御を最適化すること。

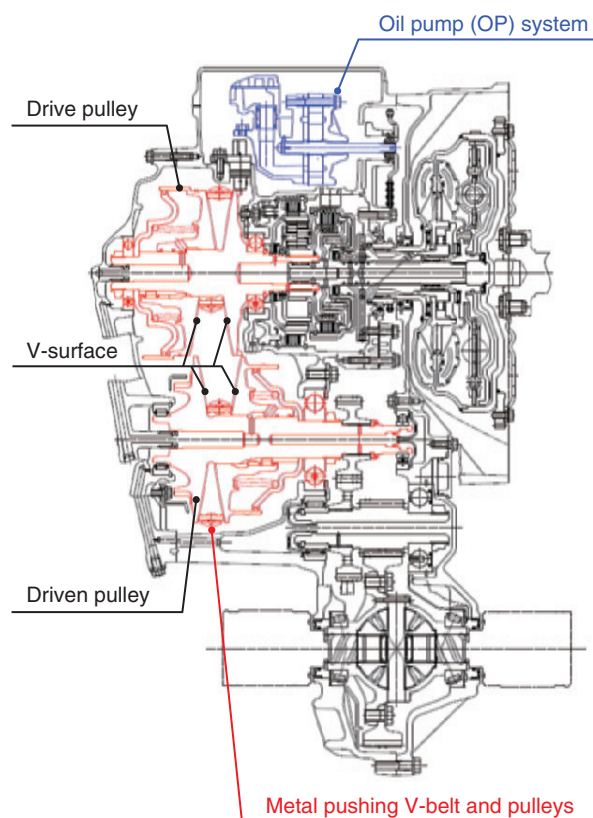


Fig. 2 Main sections of new CVT

3. 適用技術

金属ベルト式 CVT の主要損失低減を目的として、新たなベルト／プーリおよびオイルポンプ (Fig. 2) を採用した。

3.1. ベルト／プーリ

金属ベルトは、エレメントとリングより構成される。ベルトがプーリに巻きかけられた際、プーリ中でのエレメントとリングの回転半径には幾何学的な差が生じる。エレメントとリングは相互に拘束がないため、回転半径差による金属ベルト内部での差回転を持つ。エレメントとリング

は、差回転によるしゅう動からベルト内部での摩擦損失を生じる。単位時間当たりの摩擦損失は、しゅう動部の摩擦係数、しゅう動部に発生する垂直荷重と相対速度の積で与えられる。この損失の関係より、摩擦損失の低減をしゅう動部のしゅう動距離と荷重、二つの低減により実施した。採用したベルト／プーリの主要諸元を Table 1 に示す。これら摩擦損失を低減することにより、動力伝達効率を変速比幅平均で 0.9% 向上した⁽⁴⁾。

3.1.1. ロッキング位置変更ベルト

金属ベルトは、エレメント相互が押し合うことで動力を伝達する。この押し合う位置（以下、ロッキング位置）とリングのプーリ内回転半径差を小さくすることで、相互の差回転によるしゅう動距離を低減することができる。ベルトしゅう動部のしゅう動距離は、半径差に比例する。

Table 1 および Fig. 3 に示すように、ロッキング位置を 1.00 mm から 0.55 mm に縮小することで、幾何学上 45% のしゅう動量を低減することができる。

3.1.2. 複合 V 面形状プーリ

CVT は、車両の走行状態に合わせてプーリ挟圧力を変化させながら、伝達トルクに対応し変速比を決定する。駆動および従動プーリの挟圧力関係も都度変化する。このとき、プーリ V 面の小径側を狭角にすることで、トルク伝達に必要なプーリ挟圧力を低減できる。これにより、金属ベルトしゅう動部の荷重を低減することができる。対して、プーリの大径側は、広角とすることで変速比を決定するプーリ挟圧力を低減できる。これにより、CVT に必要なシステム最大油圧 P_H を低減することができる。これら特徴を活かし、プーリの V 面形状を複合形状とした。プーリの変更に際して、動力伝達の安定性を確保するため、エレメントの V 面形状についてもプーリ同様に複合形状とした (Fig. 4)。 P_H の低減は、オイルポンプの仕事も減らすことができるため、オイルポンプの損失低減にも寄与する。

3.2. 機電直列配置オイルポンプシステム

オイルポンプ仕事は、必要駆動力として要求される油圧と流量との積で決定する。CVT においては、他の自動変速機と違いトルクコンバータと潤滑に要する低圧多流量に加え、ベルト挟圧力やクラッチの締結に要する高圧少流量二種類の仕事が必要である。そのため、ベルト挟圧力に応じた高圧と、潤滑状態を維持できる多流量を一つのポンプで担わなければならない。よって、これらを包含する最大枠の仕事が要求されるが、高圧多流量領域のオイルポンプ仕事がそのままオイルポンプ損失となる (Fig. 5)。

しかしながら、メカニカルオイルポンプ（以下、メカ OP）の仕事はエンジン回転数に依存する。オイルポンプ仕事を最適化するためには、さまざまな運転条件で効率の良い回転とするために、エンジン回転数と独立した駆動方式が必要であり、電動オイルポンプ（以下、電動 OP）をメ

Table 1 Specifications of pulley and belt

Item		Current model	New model	
Pulley	Distance between pulley axes	156 mm	156 mm	
	V-surface	Single angle 11 deg	Multiple angle 9 deg / Round	
Belt	Element width	24 mm	24 mm	
	Rocking position	1.00 mm	0.55 mm	
	V-surface	Single angle	Multiple angle	
		11 deg	Grooved	9 deg : Grooved
				Curved : No groove
#1 ring diameter	208.8 mm	208.8 mm		

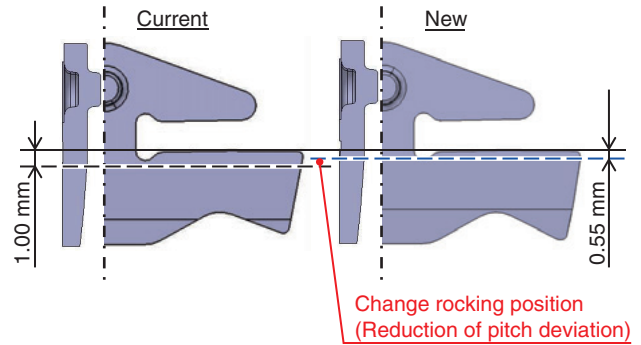


Fig. 3 Comparison of current and new elements

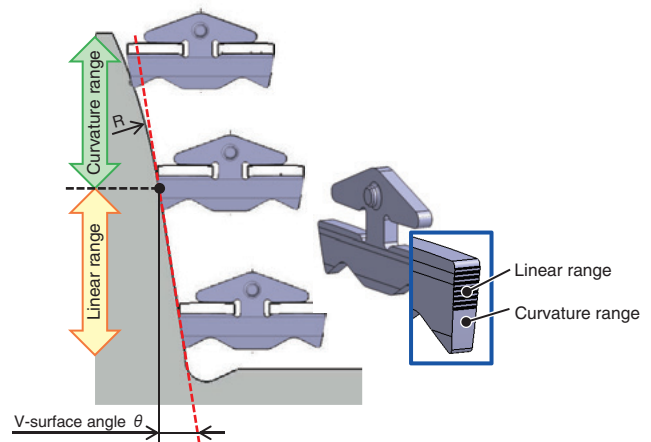
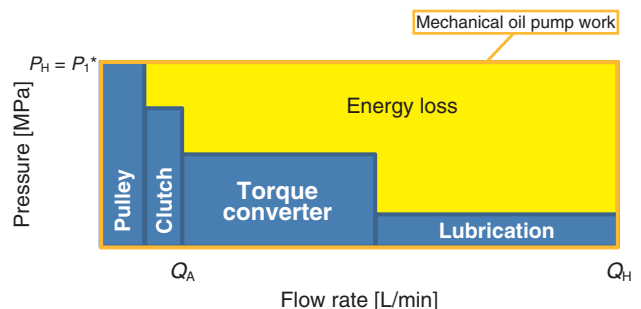


Fig. 4 Pattern diagram of pulley and belt



* P_1 : Hydraulic pressure from mechanical oil pump

Fig. 5 Oil pump work in CVT

カ OP に加えて採用した⁽⁵⁾。異なる二つのオイルポンプを採用することで、二種類の仕事を分担しオイルポンプ損失を低減できる。オイルポンプシステムを構成するにあたって、電動 OP に機能失陥が生じた場合においても、走行に支障をきたさない油圧回路とした (Fig. 6)。二つのオイルポンプを直列に配置とすることで、常に基準油圧をメカ OP で保証する。電動 OP は、メカ OP から送られた作動油に対して、昇圧する形で高压少流量に対応する。

これによって、オイルポンプシステムは高压多流量に対応する必要がなくなり損失を低減することができる。また、駆動方式をエンジン回転数に依存しないモータ駆動としたことにより、仕事量を任意に決めることができるためオイルポンプ仕事を最適化できる (Fig. 7)。

電動 OP を駆動するモータ体格については、オイルポンプ損失の低減に必要な発電機 (以下、Alternating Current Generator: ACG) 仕事を考慮して決定した。本 CVT においては、CITY 用の変速機として必要となる仕事量から、燃費性能を優先して 100 W を選定した (Fig. 8)。採用したオイルポンプシステムの主要諸元を Table 2 に示す。この技術を採用することにより、動力伝達効率を変速比幅平均で 0.7% 向上した。

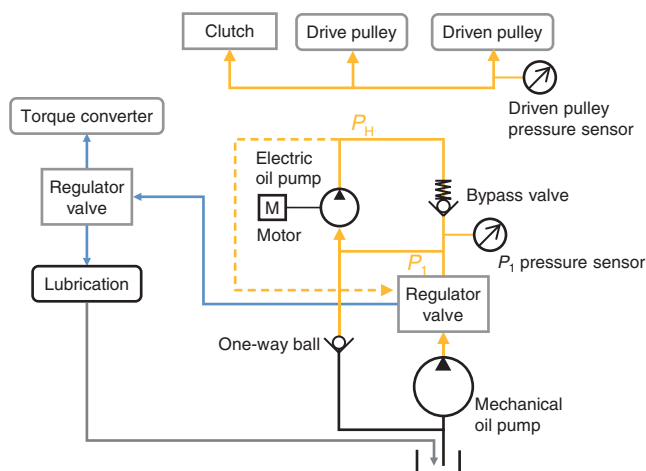


Fig. 6 Hydraulic circuit

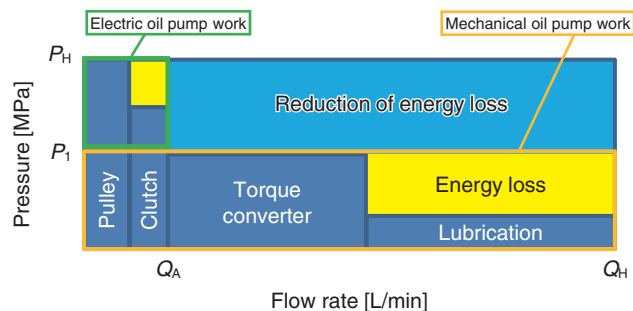


Fig. 7 New oil pump system for CVT

Table 2 Specifications of new oil pump system

Item		Current model	New model
Drive system	Mechanical	Adopted	Adopted
	Flow rate	Up to 72 L/min	Up to 72 L/min
	Discharge pressure	0.2 - 4.9 MPa	0.2 - 4.9 MPa
	Electrical	Not adopted	Adopted (100 W)
	Flow rate	—	Up to 5.8 L/min
	Discharge pressure	—	0.2 - 1.8 MPa

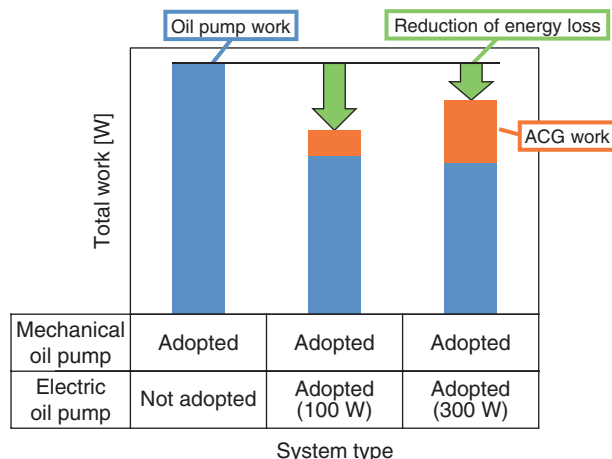


Fig. 8 Effect of reduction of energy loss

4. CVT 制御

本 CVT には、二つの機構に対して新たな技術となるベルト／プーリおよびオイルポンプシステムを採用した。その他、損失を低減するため構成部品の見直しを実施した。これらの各々の損失低減効果に対し、CVT として動力伝達効率を発揮するために CVT 制御の最適化をおこなった。また、燃費性能と動力性能を両立させるため、G-design shift を採用することでリニアな加速フィールを表現した。

4.1. 燃費性能

プーリは、回転体であると同時に油圧機械でもある。金属ベルトによって駆動軸と従動軸が接続され、2 軸間に引き合う力が働く。これにより、ベアリングには大きな荷重が掛かる。また、可動プーリは油圧室を備え、オイルポンプの作動油圧で金属ベルトを挟み込む。つまり、プーリの要求挟圧力によってオイルポンプ仕事が増加すると同時に、その他ベアリングなどへの負荷も変化する。今回新たに採用したベルト／プーリおよびオイルポンプシステムでは、プーリ挟圧力への昇圧を目的として電動 OP を採用した。電動 OP 駆動には電力消費を伴うため、車両の運転状態に合わせた効率的な駆動制御を実施した。ベルト／プーリは、複合 V 面形状を採用することで、必要プーリ挟

圧力（つまり、最大油圧 P_H ）を低減させている。ベルト挟圧力を下げることは、結果としてベルト／プーリ間での摩擦損失低減にもつながる。オイルポンプシステムは、機電直列配置とすることで、高圧少流量の仕事電動 OP が担う。つまり、最大油圧 P_H が高いシステムほど、その損失低減効果を発揮する。

これら各機構の損失低減手法の違いを考慮した上で、CVT としてより効率的となるシステム駆動を目指した。電動 OP は運転条件に合わせて動作を停止することができるため、電力消費も抑制できる。こういった機構選定の利点を活かして CVT 制御に反映した。

Fig. 9 に実走時におけるオイルポンプシステムの動作と、動力伝達効率および各機構の損失低減効果を示す。

(1) アイドリングストップ（停車時）

アイドリング時は、エンジン出力の一部をメカ OP 駆動に用いても燃費性能に変化はない。そのため、従来と変わらず電動 OP は作動させない。また、新型 CITY は、燃費性能の観点からアイドリングストップを採用した。アイドリングストップ時は、電動 OP を駆動することでエンジン再始動時のプーリ挟圧力復帰遅れを補助する。電動 OP 駆動による ACG 仕事は発生するが、アイドリングによる燃料消費を抑制できる。

(2) 発進

発進時、トルクコンバータによるトルク増幅を受けて、必要プーリ挟圧力は高くなる。また、Low レシオからの変速をするため、変速に伴う流量が必要となる。電動 OP は変速流量を確保しつつ、高いプーリ挟圧力 P_H を昇圧で担うことで、

メカ OP は発生油圧を潤滑圧まで低減することができる。この結果、オイルポンプの仕事分担をすることができ、オイルポンプシステムの駆動損失を大きく低減できる。

(3) 発進からの加速

発進加速は、駆動力を下げながら車速を上昇させる。このとき、変速比は緩やかに High 側に変速する。つまり、伝達動力および変速速度共に発進時より低くなる。また、複合 V 面形状プーリを採用したことで、必要なプーリ挟圧力 P_H も低減できる。そのため、電動 OP の駆動回転数上昇によって、メカ OP の仕事を潤滑圧のまま維持することができる。この結果、オイルポンプシステムの増加仕事は、電動 OP 駆動回転数上昇分のみとなり発進時同等の損失低減効果を維持できる。

(4) クルーズ

クルーズ時は定常状態で、変速比は High 側を維持する。High レシオは、複合 V 面形状プーリおよびロッキング位置変更ベルトの動力伝達効率が高い領域であり、燃費性能に大きく寄与する。また、必要なプーリ挟圧力 P_H も低減でき、変速流量も必要としないため、電動 OP 駆動回転数も抑制できる。この結果、ベルト／プーリおよびオイルポンプシステム双方の損失低減効果が得られる。また、ベアリングなど各部摩擦損失も包括的に低減することができるため効果が大きい。この際、オイルポンプシステムの総仕事量に対し、電動 OP の駆動電力を考慮して損失低減効果がないと判断した場合は電動 OP を作動させない。

(5) クルーズからの再加速

再加速時は、駆動力を確保するために Low 変速をおこ

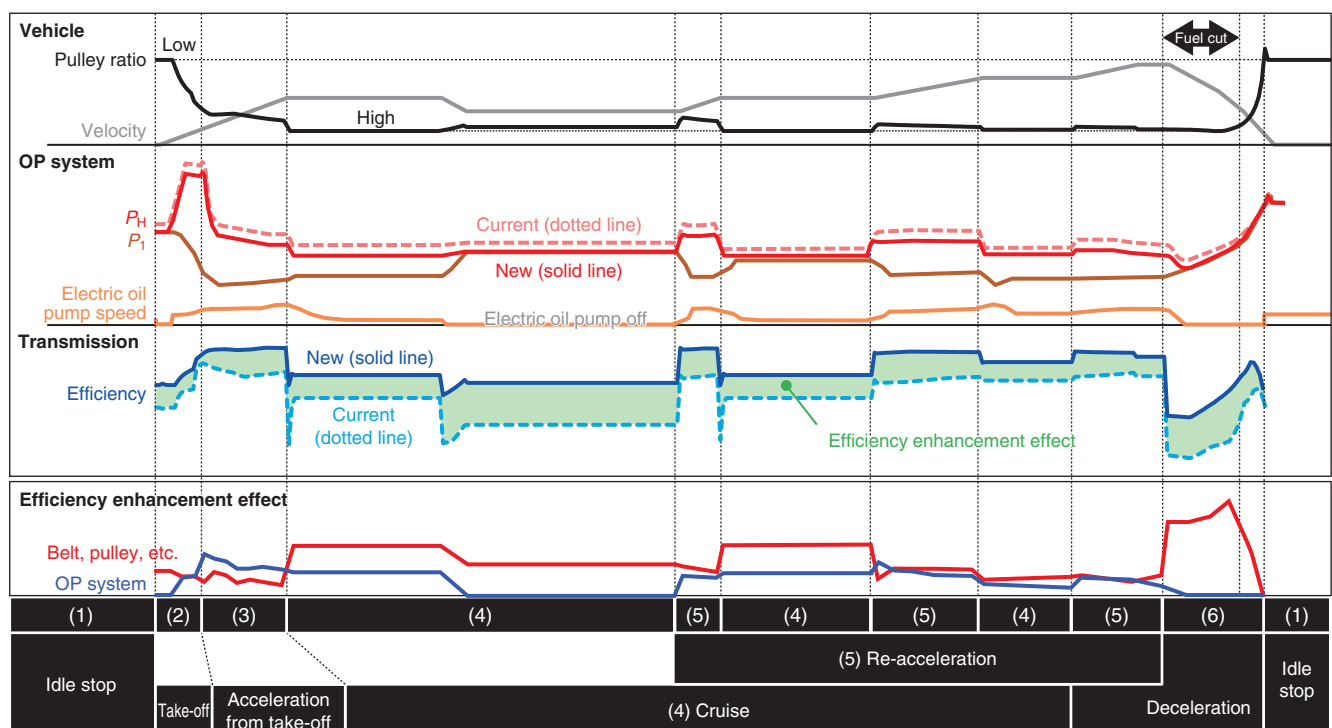


Fig. 9 Operation of new CVT

なう。Low 変速に伴い、必要なプーリ挟圧力 P_H は上昇する。このとき、変速量は小さいため必要流量も小さい。オイルポンプシステムの仕事増加分を電動 OP にて担うことで、メカ OP の仕事を低減することができ、オイルポンプシステムの駆動損失を低減する。

(6)減速

減速に入ると、エンジンは燃料噴射を停止する。このため、燃料を消費しないことから電動 OP も作動させない。燃料は消費しないものの、ベルト／プーリなどによる動力伝達効率向上効果により、変速機の引きずり損失を大きく低減することができる。

このように、損失低減効果を燃費性能に十分活かすように CVT 制御を実施した。

4.2. 駆動力デザイン

新型 CITY は、燃費性能の向上を目的に変速機以外にも多くの改良を実施している。搭載されるエンジンも、燃費性能を向上させる内燃機関として、排気量 1.5 L 自然吸気から 1.0 L 過給機付へと変更されている。小排気量とすることで燃料消費を抑えつつ、過給機によって最大出力を従来同等まで引き出すことが可能である。しかし、発進時など過給機が作動するまでは、1.0 L 自然吸気エンジンの出力特性となる。つまり、最大出力を発生するまでの時間が長くなる。その対応として、CVT ではドライバの加速意思に対して変速制御を切り替えることで燃費性能と動力性能の両立を達成した。ドライブフィールを維持するため、目標駆動力に対して変速比を決定することで、駆動力の落ち込みがない制御とした。これにより、エンジンの出力特性差を感じさせないリニアな加速フィールを達成した。また、アクセル全開時に、有段変速機のような変速とする全開ステップシフト制御を適用した。これにより、車速がエンジン回転数にリニアに追従し、駆動力に伸びを感じられる設定とした。発進加速時の実走データを、従来モデルと比較し Fig. 10 に示す。最大駆動力発生後、駆動力が落ち込

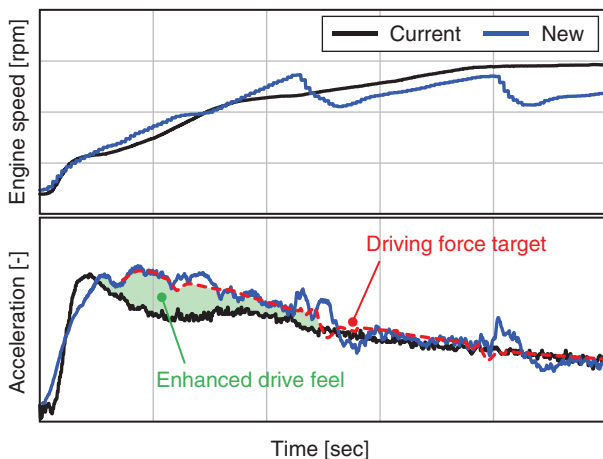


Fig. 10 Step-shift operation

まないよう目標値に追従させることで、新型 CITY のドライブフィールを向上させた。

5. 燃費性能と動力性能

本 CVT を搭載した 2020 年モデル CITY は、NEDC モードにおいて、CO₂ 排出量 100 g/km 以下を達成した。CVT の損失低減効果としては、CO₂ 排出量 5.7 g/km の削減となる。また、Fig. 11 に示すように、従来モデルに対して大幅な燃費改善と同時に動力性能も向上させた。

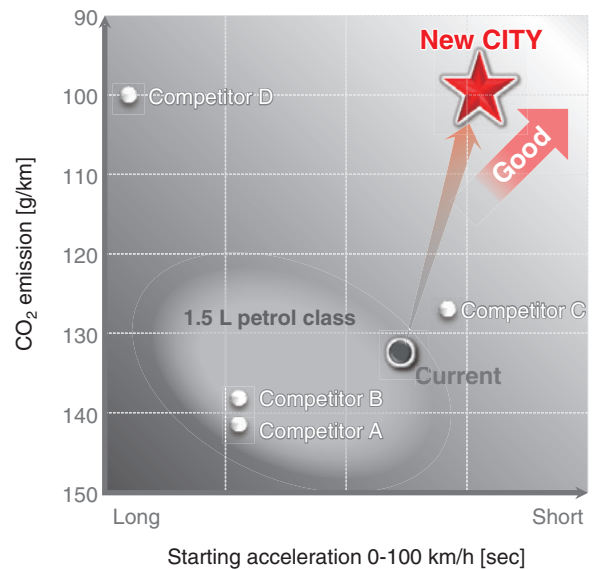


Fig. 11 Performance of new CITY

6. まとめ

2020 年モデル CITY 用の変速機として、高効率 CVT の開発をおこなった。これらの新技術、および制御を実装した本 CVT を採用することで、燃費性能と動力性能を両立させた。CVT として従来モデルに対し CO₂ 排出量を 5.7 g/km 削減した。また、タイ Eco2 基準となる CO₂ 排出量 100 g/km 以下を達成した。

- (1) 新技術として、ベルト／プーリにロッキング位置変更ベルトおよび複合 V 面形状プーリを採用した。また、オイルポンプシステムに機電直列配置オイルポンプシステムを採用した。その結果、動力伝達効率を変速比幅平均でベルト／プーリ 0.9%、オイルポンプシステム 0.7% 向上した。
- (2) 上述二つの新技術を採用するにあたり、損失低減効果を十分活かせるよう CVT 制御を最適化した。
- (3) 燃費性能に最適化された CVT 制御としながらも、ドライブフィールを維持するため、駆動力を目標とする

変速制御を実装した。また、ステップシフトを採用することで、車速がエンジン回転数にリニアに追従し、駆動力に伸びを感じられる設定とした。

参考文献

- (1) 坂上恭平:CVT のベルト挟圧力最適化に向けた瞬時安全率推定法, Honda R&D Technical Review, Vol. 31, No. 2, p. 81-89
- (2) 友松大輔, 志水政紀, 山口賢一, 桑原信也, 深尾光博, 田邊道徳, 大槻武:新 2.0L 用発進ギヤ付 CVT の開発, 自動車技術会 2018 年春季大会学術講演会講演予稿集, No. 70-18, 文献番号 20185322, (2018)
- (3) 大形勇介, 二宮啓輔, 栗澤伸平, 田村直己:燃費, 静粛性, ドライバビリティを改良した CVT の開発, 自動車技術会論文集, Vol. 44, No. 5, p. 1211-1214, (2013)
- (4) 隅田聡一郎, 矢ヶ崎徹, 青木亮太, 浅井光:複合 V 面形状プーリおよびピッチ位置変更ベルトによる金属ベルト式 CVT の動力伝達効率向上, Honda R&D Technical Review, Vol. 31, No. 2, p. 74-80
- (5) 原田雅道, 坂上恭平, 中曽根牧人:オイルポンプの機電直列配置による CVT の燃費向上技術, Honda R&D Technical Review, Vol. 31, No. 2, p. 31-36

■ 著 者 ■



隅田聡一郎



村上好文



中曽根牧人

2020 年モデル FIT 用 小型パワーコントロールユニット

Small Size Power Control Unit for 2020 Model Year FIT

西 尾 仁 志¹

Hitoshi NISHIO

野 中 賢 一³

Kenichi NONAKA

近 藤 康 彦²

Yasuhiko KONDO

樫 村 之 哉³

Yukiya KASHIMURA

上 野 雄 一 郎²

Yuichiro UENO

武 林 賢 一³

Kenichi TAKEBAYASHI

要 旨

Honda では 2020 年モデル FIT 用に第 3 世代小型車向けパワーコントロールユニット開発をおこなった。

小型化に対してはパワーコントロールユニットの主要構成部品であるパワーモジュールに使用されるパワー半導体に RC-IGBT を採用し前後方向長さを 12% 削減した。第 2 世代では制御基板であるモータ ECU と駆動回路基板であるゲートドライバに分割されていた制御基板を統合し、それにより各基板間を接続するハーネスを削減し小型化をおこなった。キャパシタに関しては Voltage control unit 制御の電流追従性を向上させることで容量を 50% 低減した。これら技術を投入したことにより、PCU 内部に 12 V DC-DC コンバータを内蔵したうえで、容積 8.5 L を達成し、小型車両への搭載可能な最大出力 267 kVA の PCU を開発することができた。

ABSTRACT

Honda has developed a third-generation power control unit for compact cars for the 2020 model year FIT.

Downsizing was achieved by employing RC-IGBTs in the power semiconductors used in the power module, which is the main component of the power control unit. This reduced the longitudinal length by 12%. The control boards that were divided into a motor ECU (control board) and a gate driver (drive circuit board) in the second-generation unit were integrated to reduce the wire harnesses that connect each board, achieving further downsizing. The capacitance of the capacitor was reduced by 50% by enhancing the current followability of voltage control unit control. The application of these technologies realized development of a PCU with output power up to 267 kVA that achieves a volume of 8.5 L even with the 12 V DC-DC converter incorporated into the PCU, which enables mounting in a compact car.

1. まえがき

近年、自動車の普及拡大に伴う課題は、走行中の CO₂ 排出による地球温暖化および大気汚染である。

これらの課題に対する解決手法の一つとして排ガスを低減するための自動車の電動化が挙げられる。Honda は 2 モータハイブリッドシステムである SPORT HYBRID Intelligent Multi-Mode Drive (以下、i-MMD) システムを 2013 年に開発した⁽¹⁾。i-MMD システムは主として高電

圧バッテリーより電力を供給しモータで走行する EV ドライブモード、エンジンを発電機としてモータに電力を供給してモータで走行するハイブリッドドライブモード、エンジンドライブモードの三つの走行モードを実現している。パワートレインは、エンジン、トラクションモータとジェネレータモータを内蔵した電気式 Continuously Variable Transmission (CVT)、パワーコントロールユニット (Power Control Unit: PCU)、インテリジェントパワーユニット (Intelligent Power Unit: IPU) で構成されている。

¹ 先進パワーユニット・エネルギー研究所

² 本田技研工業株式会社

³ 株式会社ケーヒン

PCU は高電圧バッテリーとトラクションモータおよびジェネレータモータの電力変換機能を担っており、モータ出力および燃費に影響する。車両搭載位置は第1世代2モータハイブリッド (GEN1) 用 PCU ではエンジンルーム内の車体に固定されたフレームにマウントされていた。

2016 年には、エンジンルーム内への搭載性向上および高出力密度化に対応した第2世代2モータハイブリッド (GEN2) 用 PCU を開発した⁽²⁾。GEN2 PCU ではトランスミッション直上に搭載され、エンジンルーム内にコンパクトに搭載されている。これにより多様な車両に対して 12 V バッテリーをエンジンルーム内に搭載することが可能となった。これはキャビンスペースの拡大に貢献している。

2018 年には、第3世代2モータハイブリッド (GEN3) 用 PCU として GEN2 PCU では車両後方に搭載されている IPU に内蔵されていた 12 V DC-DC コンバータをエンジンルームに搭載される PCU に内蔵した GEN3 PCU⁽³⁾ を開発した。

従来 Honda の i-MMD システムを搭載している車両は、セダンや SUV など中大型向けの車両が対象であった。Honda では電動化のさらなる拡大を目指し、FIT を代表とした小型車両への搭載を目標とし開発をおこなった (Fig. 1)。さらに小型車に対し、人が使う空間を最大限に広げるという Honda 独自のマンマキシマム・メカミニマム思想のもと車両の開発目標を設定し、GEN2 では車両後方に搭載されている IPU に内蔵されていた 12 V DC-DC コンバータをエンジンルームに搭載される PCU に内蔵した。小型車両では Fig. 2 に示すようにエンジンルーム内の搭載可能容積が小さく GEN2 システムのままでは搭載ができなかった。

そのため、サイズを低減した小型車向け第3世代2モータハイブリッド (GEN3S) 用 PCU が必要であった⁽⁴⁾。

12 V DC-DC コンバータを内蔵しつつ前後方向長さで 10% の削減、搭載容積 8.6 L を目指した構成を開発目標とした。

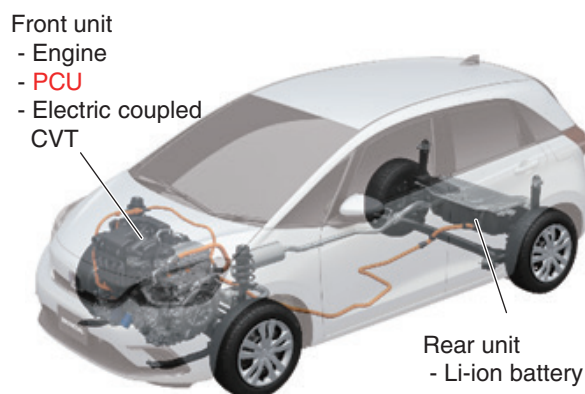


Fig. 1 Position of PCU in SPORT HYBRID i-MMD

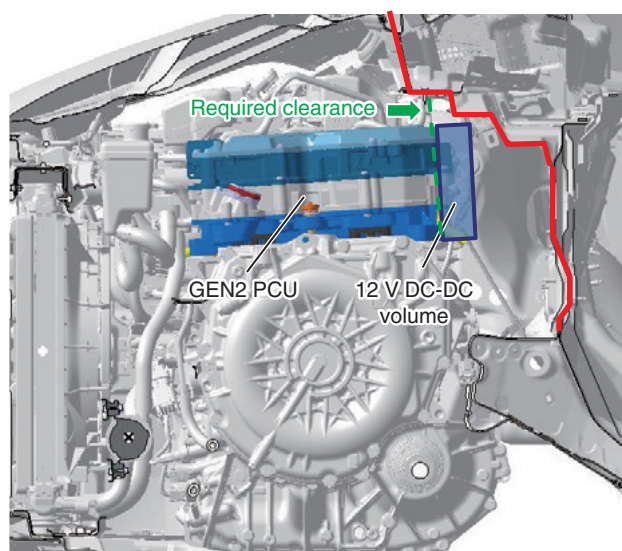


Fig. 2 Layout of PCU in SPORT HYBRID i-MMD

2. FIT 用小型 PCU の紹介

PCU の構成部品を Fig. 3 に示す。

GEN3S PCU の構成は、モータを駆動する二つのインバータおよび最適な電圧に制御する VCU、それらを統合制御する制御基板 (ECU) で構成されている IPM (Intelligent Power Module) を主要部品としている。IPM はトラクションモータ、ジェネレータモータ、VCU 用のパワー半導体をウォータージャケット上一面に配置しその直上に制御基板を配置する構成とした。これに加えて、電圧を平滑化するキャパシタ、昇圧回路部品であるインダクタ、通電電流を検出する電流センサを備える。側面にはトランスミッションに内蔵されるモータと直接接続するための 3 相コネクタを備えている。また前述した、12 V DC-DC コンバータを PCU に内蔵した。

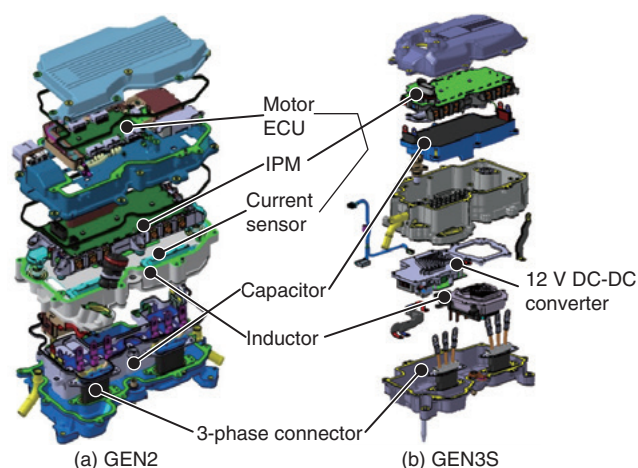


Fig. 3 Exploded view of GEN2 and GEN3S PCUs

Table 1 Comparison of GEN2 and GEN3S specifications

Item	GEN2	GEN3S
Maximum total output power [kVA]	388	267
Maximum boost voltage [V]	700	570
Motor maximum output current [Arms]	320	270
Generator maximum output current [Arms]	155	155
DC-DC converter output voltage [V]	-	12
DC-DC converter maximum output current [Arms]	-	140
Volume [L]	8.9	8.5
Weight [kg]	14.3	13.4

小型車両への搭載を目標としているため、車両に搭載可能な空間は従来に対して狭くなっている。また、Table 1に示す通り求められる出力は GEN2 と比較して小さくなっている。

内部部品を求められる仕様にあわせてサイズダウンをおこなうことは可能であるが、前述する 12 V DC-DC コンバータを新たに内蔵するにはさらなる小型化が各部品に求められることとなる。そのため、PCU に内蔵される部品の増加に対して構成部品を統合することで部品点数の削減をおこなっている。その結果、GEN2 に対して 12% の前後方向の寸法低減、12 V DC-DC コンバータを内蔵しながらも GEN2 比で 4.4% の容積低減し、目標を達成した (Fig. 4)。

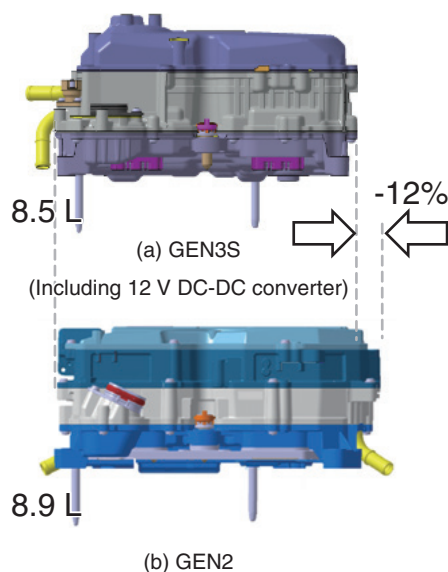


Fig. 4 Comparison of GEN2 and GEN3S sizes

3. 主要技術

PCU 構成部品として占有率の高い部品は、パワーモジュール (PM)、キャパシタ、制御基板と各信号を伝達するためのハーネスが挙げられる。

PM は半導体を平面配置しているため、回路を構成するきょう体を含め PCU の前後方向長さを決めている。また、キャパシタは GEN2 では PCU 下層部の容積の大部分を占めており、12 V DC-DC コンバータを内蔵するため容積の低減をおこなった。

さらに GEN2 では制御基板が分割されていたため、接続ハーネスを含め、これらの要素を低減または部品の統合をおこなうことで PCU の小型化をおこなった。

主な開発技術は以下の 3 点となる

- (1) PM に搭載する半導体として Reverse-conducting insulated gate bipolar transistor (RC-IGBT) の採用
- (2) 制御基板の統合
- (3) キャパシタ容量の低減

3.1. パワーモジュールの小型化

以前より、ハイブリッド向けトラクションモータは高出力が求められるため、駆動用スイッチング素子であるシリコンパワー半導体では IGBT とダイオードが使用されていた。これらの半導体を実装した PM のサイズにより PCU の長さが決まるため、GEN3S PCU では RC-IGBT を採用した。

RC-IGBT の構造概要を Fig. 5 に示す。

従来の車両用インバータは IGBT とダイオードが別々に実装されており、半導体の温度を測定する温度センサは IGBT 上にも実装されていた。

本開発の RC-IGBT は、Fig. 5 (b) に示しているように同一半導体内部で IGBT とダイオードの領域が存在しており、IGBT でありながらダイオードとしても動作可能な新しい半導体デバイスとなる。同一半導体内部に IGBT とダイオードの領域を持つことにより従来 IGBT とダイオードそれぞれの半導体で有していた耐圧保持領域 (ガードリング) を共有することで半導体サイズを低減することができた。

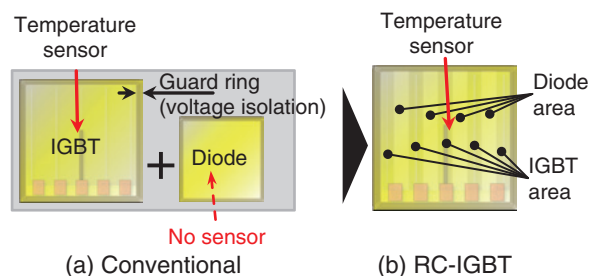


Fig. 5 Comparison of conventional chips and RC-IGBT chip structures

また、従来の構成では IGBT 側には過熱保護用の温度センサを備えているが、ダイオード側には備わっておらず、IGBT 側にある温度センサからの温度推定をおこない過熱保護していた。この手法は半導体温度を温度センサで直接測定する場合に対し推定誤差が大きい。半導体の使用可能上限温度に対し、誤差を考慮して使用温度範囲を限定する必要がある、ダイオードは必要以上のサイズが求められていた。RC-IGBT を採用することで、搭載されている温度センサでダイオード領域まで温度保護が可能になり、ダイオードを必要最小限のサイズへ縮小することができた。

その効果を Fig. 6 で示す。それぞれの半導体で必要だったガードリングを共用することで 33%、ダイオード面積で 64% を削減することで、半導体面積全体として、30% もの小型化を実現している。これにより PM 前後方向の長さを 12% 低減し PCU の小型化に貢献した。

3.2. 制御基板統合による小型化

IPM は、モータ ECU からゲートドライバに指令を送り、それにより VCU やモータおよびジェネレータインバータを駆動する。またそこに制御用の電流センサや電圧センサが接続される。GEN2 PCU ではこれらの部品を搭載する基板は独立しており、ハーネスケーブルによりモータ ECU に接続されていた。外部 ECU との接続はコントロールコネクタを介し PCU と接続されており、PCU 内部ではハーネス接続により基板と接続した。Fig. 7 に従来構造との比較を示す。

GEN3S PCU の開発ではこれらの部品の統合をおこない PCU 容積を低減した。

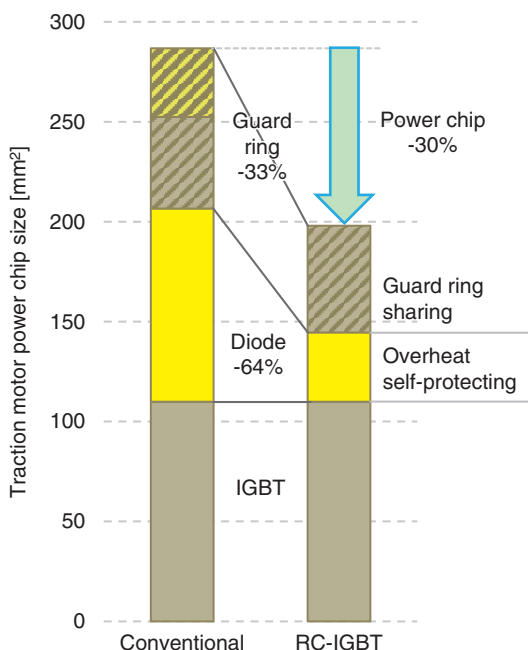


Fig. 6 Comparison of conventional and RC-IGBT semiconductor areas

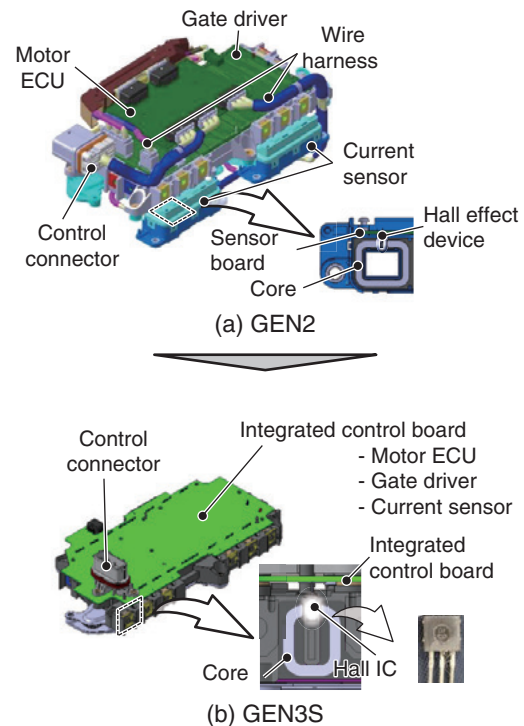


Fig. 7 Comparison of GEN2 and GEN3S circuit structures

外部からの指令を受け取るコネクタは基板上に直接搭載することで接続ハーネスを削減した。コネクタは信号ピンにより統合基板に対して接続される。

モータ ECU とゲートドライバは統合制御基板として一体化をおこなった。この基板は従来のゲートドライバに対し高密度実装技術、電圧センサ回路を 1 パッケージ化するなど回路実装技術の進化により達成した。従来分割されていたモータ ECU とゲートドライバの 2 枚の基板を統合化し PM 上に搭載している。

また従来磁束コアと磁束を計測するホール素子とそれを制御する基板で構成されていた電流センサを、PM ケースに内蔵した磁束コアと統合制御基板に実装されたホール IC を組み合わせることで電流センサの機能を構成している。構造は従来と同様に七個のセンサがあるが、それを一括で組み付ける精度や組み付け後にセンサを補正する技術を開発することで実現した。それにより 50% の高さを低減した (Fig. 8)。

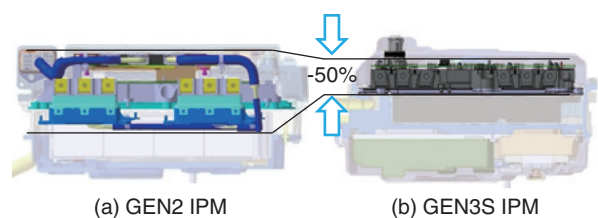


Fig. 8 Comparison of GEN2 and GEN3S IPM structures

3.3. キャパシタ容量低減

キャパシタは GEN2 PCU では全体高さの半分を占めていたが、VCU の制御技術の向上によりキャパシタ容量を 50% 低減した。また、容量低減に伴う熱課題を冷却流路の工夫で解決した。

キャパシタは VCU 電圧源として機能するが、理想的な電源にはならず、インダクタ電流が変動すると内部インピーダンスの影響で電圧が変動する。この電圧変動は制御に影響を及ぼし、さらに電流変動が大きくなる。インダクタ電流変動の増加を防ぐために、電圧変動幅が規定されており、GEN2 PCU では容量の大きなキャパシタを使用して電圧を平滑していた。

VCU の制御は電圧変動の増大に対して電流制御、電圧制御のカスケード制御、および外乱オブザーバ、Duty 推定演算機、Duty 相殺演算機を新規に開発し、これらを用いることにより幅広い周波数領域にわたり電圧共振ゲインを抑制し、負荷電流の AC 成分を低減した。この VCU 制御により、Fig. 9 に示すようにキャパシタ容量を 50% 低減することができた。

一方で、キャパシタ容量を低減すると内部インピーダンスが上昇する。これにより自己発熱量が増加するが、冷却流路の工夫により解決した。キャパシタは発熱量が低いため、水冷ではなく自然放熱部品であり、外部環境からの熱影響を受けやすい。キャパシタ自体の耐熱温度は使用される材料により決まる。そのため、温度上昇要因である、環境により熱せられた温度、および通電により自己発熱する温度の合計を耐熱温度以下とする必要がある。PCU はエンジンルームに搭載されているため環境による温度上昇が大きい。

GEN2 i-MMD から採用しているトランスミッション直載 PCU 構造では Fig. 10 (a) に示すようにキャパシタは、IPM の下側にあり、トランスミッションやエンジンの熱影響を受けやすい構造であった。GEN3S PCU ではこの外部環境の熱影響を低減するためにキャパシタを Fig. 10 (b) に示すように、冷却流路で囲む構造を採用した。

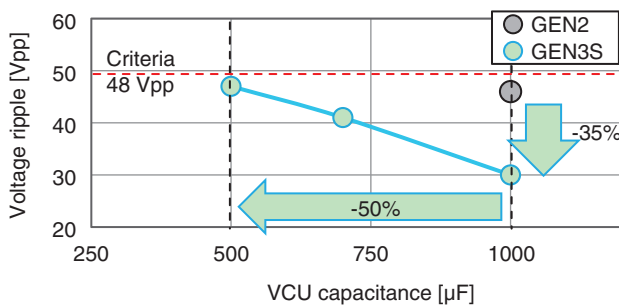


Fig. 9 Comparison of GEN2 and GEN3S VCU capacitance

これに伴い GEN2 では車両前方側から冷却水を入れ PCU 内部を通り車両後方側から排出していた構造に対し、GEN3S は冷却水の出入り口を車両前方側に集約することでエンジンルーム内部の冷却配管を削減することができエンジンルーム占有スペースを削減することにも貢献している。

キャパシタは直接水冷していないが、冷却水路に囲まれていることにより外部から受ける熱影響を防ぐことができる。Fig. 11 に容量削減の概要を示す。

キャパシタの自己発熱は 2 倍以上に増えているものの、外部から受ける熱影響を 46% 低減しているため、最大到達温度として、従来同等以下とすることができた。

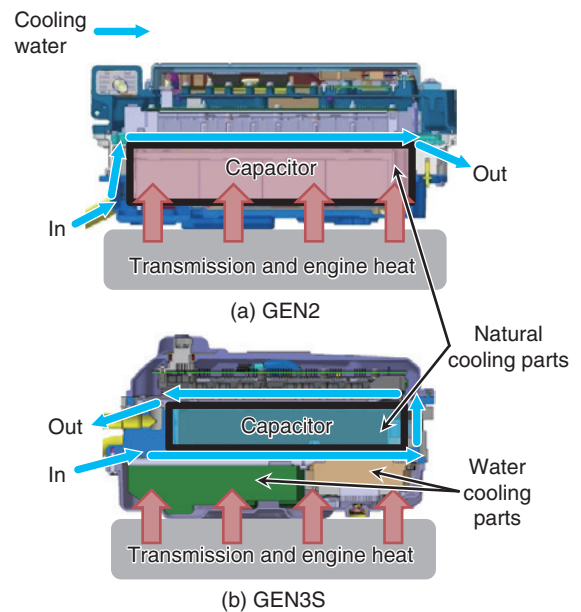


Fig. 10 Difference of capacitor structures

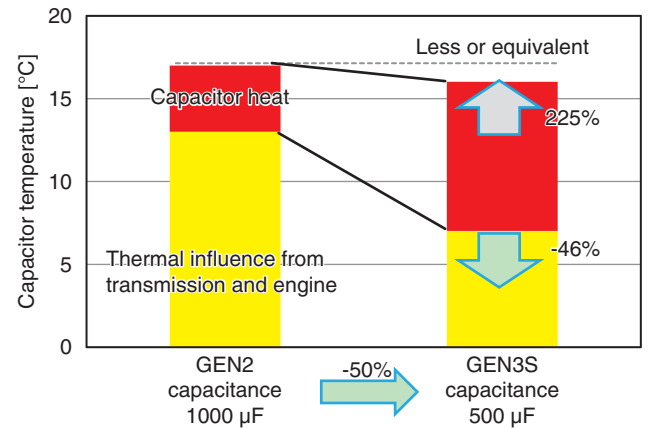


Fig. 11 Comparison of GEN2 and GEN3S capacitor temperatures

4. まとめ

小型車両への i-MMD システムの搭載を目的とした PCU の小型化に対して、以下の技術開発により、目標を達成した。

- (1) パワー半導体に RC-IGBT を採用し、PM 前後方向の長さを 12% 低減した。
- (2) 制御基板、電流センサの統合により IPM の高さを 50% 低減した。
- (3) キャパシタ容量を VCU 制御開発、新規冷却構造の採用で 50% 低減した。

以上により、PCU 内部に 12 V DC-DC コンバータを内蔵したうえで、容積 8.5 L を達成し、小型車両への搭載可能な最大出力 267 kVA の PCU を開発することができた。

参考文献

- (1) 黒木次郎, 大塚浩: SPORT HYBRID i-MMD システム用のモータと PCU の開発, Honda R&D Technical Review, Vol. 25, No. 2, p. 41-47
- (2) Kashimura, Y., Negoro, Y.: Transmission-Mounted Power Control Unit with High Power Density for Two-Motor Hybrid System, SAE Technical Paper, 2016-01-1223, (2016)
- (3) Ozuchi, Y., Tomokage, R.: Transmission-Mounted Power Control Unit Including 12-Volt DC-DC Converter for Two-Motor Hybrid System, SAE Technical Paper, 2018-01-0457, (2018)
- (4) Nonaka, K., Takebayashi, K., Kashimura, Y., Ueno, Y., Kondo, Y.: Development of New Power Control Unit with Small Size and Low Cost for Small Hybrid Vehicle with Two-motor Hybrid System, SAE Technical Paper, 2020-01-0458, (2020)

■ 著 者 ■



西尾 仁志



近 藤 康 彦



上野 雄 一 郎



野 中 賢 一



檜 村 之 哉



武 林 賢 一

フローフォームを用いたリバースリムアルミホイールの 1ピース製造手法

Development of One-piece Reverse Rim Aluminum Alloy Wheel Using Flowforming Process

大橋 正義¹
Masayoshi OHASHI
小林 絵里菜¹
Erina KOBAYASHI

澤井 宗美¹
Muneyoshi SAWAI
鈴木 秀之²
Hideyuki SUZUKI

酒井 智紀¹
Tomonori SAKAI
川上 穰²
Minoru KAWAKAMI

要 旨

車両の意匠性を向上するため、同一サイズでも視覚的に大径に見えるリバースリム構造のアルミホイールを、軽量かつ低コストで製造する手法を開発した。GDC 製法のフローフォーム工程における金型の構造とリム部の加工工程を見直し、加工方法と加工条件を最適化した。その結果、リバースリムホイールを1ピースで製造することができた。リバースリム化することでホイールのディスク面とビードドロップエリアの間に生じる無駄肉を低減することができ、18インチ以上のホイールで5%以上軽量化ができることをCAE解析により確認した。次に、18インチのホイールを試作しCAE通りの軽量化ができることを確認した。さらに、スポーツタイプの車に使用されているホイールの試作もおこない、軽量にデザインされたホイールでも2%以上軽量化できることを確認した。

ABSTRACT

In an attempt to increase freedom of design in automobiles, a method of manufacturing aluminum wheels with a reverse rim configuration that realizes lower weight and lower cost has been developed. The configuration of the molds and the machining process for the rim in the GDC flowforming process were modified, and the machining method and machining conditions were optimized. This made one-piece manufacture of reverse rim wheels possible. CAE analysis verified that by converting wheels to reverse rim types, it would be possible to reduce the excessive thickness between the disk surface and the bead drop area of the wheel, reducing the weight of wheels of 18 inches or more in diameter by 5% or more. Next, a prototype of an 18-inch wheel was produced, and it was verified that its weight was reduced in accordance with CAE results. In addition, a prototype of a wheel employed in sports-type vehicles was produced, and it was verified that a weight reduction of 2% or more had been achieved despite the fact that the wheel had been designed to realize reduced weight.

1. まえがき

アルミホイールは自動車のファッション性を向上させる商品として、自動車用品店などでさまざまな意匠を持つものが多数販売されている⁽¹⁾。カスタマイズの目的で大径化による意匠性向上をねらったホイールサイズの拡大(インチアップ)をおこなうユーザも多い。

しかし、タイヤ外径を変えずにホイールをインチアップ

すると、タイヤの扁平化と高内圧化によりタイヤの横力特性が変化し振動遮断性能も低下する⁽²⁾。また、ホイールを1インチ大きくすると、一般的にホイールの重量が増加し加速性能と燃費が低下する。さらにアルミ素材の使用量が増えるため材料コストも上昇する。

アルミホイール形状の一つにリバースリムホイールがある。このホイールではリム部の内側から外側へかけての形状を反転し、ホイールリム外側部の内径を大きくすること

¹ 本田技研工業株式会社

² 光生アルミニウム工業株式会社

でホイールのスポーク部を長く見せることができる。

しかし、リバースリムホイールはリム部とスポーク部を分割して製造してから接合する必要があるため、一体成型されたアルミホイールより重く、かつ、コストが高くなってしまう。

そこで著者らは、量産されているアルミホイールの製造設備を改良しリバースリムホイールを1ピース化する手法を開発した。

Fig. 1 に同一デザインのノーマルリムホイールとリバースリムホイールを示す。図に示されるようにリム部のリバース化により、インチアップしたようなデザインに仕上げるができる。さらに、無駄肉も削減ができることから同一デザイン同一サイズでも重量が低減できた。

以下に、その製造方法について紹介する。

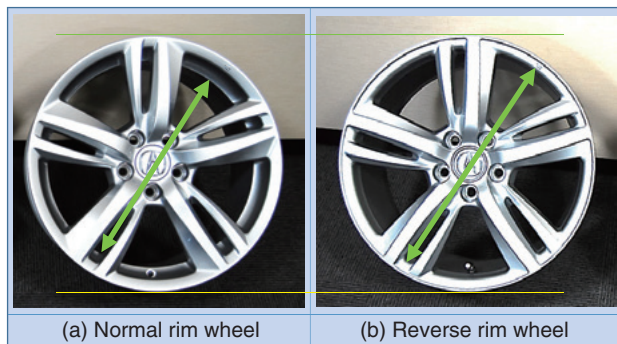


Fig. 1 Appearance of normal rim wheel and reverse rim wheel

2. リバースリムホイールの概要

まず、ホイールのリム構造について説明する。Fig. 2 にホイールにタイヤを組み付ける装置の外観写真を、Fig. 3 にホイールにタイヤが装着されるまでの工程を示す。

タイヤ組み付けには、まずタイヤチェンジャの回転テーブルにホイールを固定し、その上にタイヤを配置して、作業をおこなう。ホイールリム外径より小さいタイヤのビード部を通すため、ホイールには内径を絞ったビードドロップエリアが設けられている。

このビードドロップエリアがディスク面に近い位置にあるホイールをノーマルホイール、ディスク面と反対側のインナフランジ側にあるものをリバースリムホイールと呼んでいる。リバースリムホイールの場合、ノーマルリムホイールとは逆にインナフランジ側からタイヤを組み付ける。

Fig. 4 にノーマルリムホイールとリバースリムホイールの断面構造を示す。上記のタイヤビードドロップエリアが (a) のノーマルリムホイールではデザイン面を構成するディスク近傍にある。このため、デザイン部が絞られるこ



Fig. 2 Tire changer machine

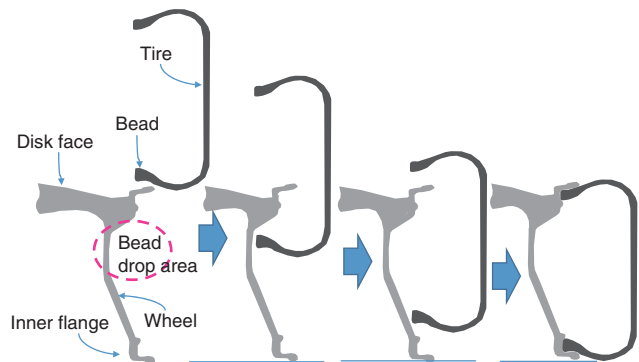


Fig. 3 Tire assembly procedure for normal rim wheel

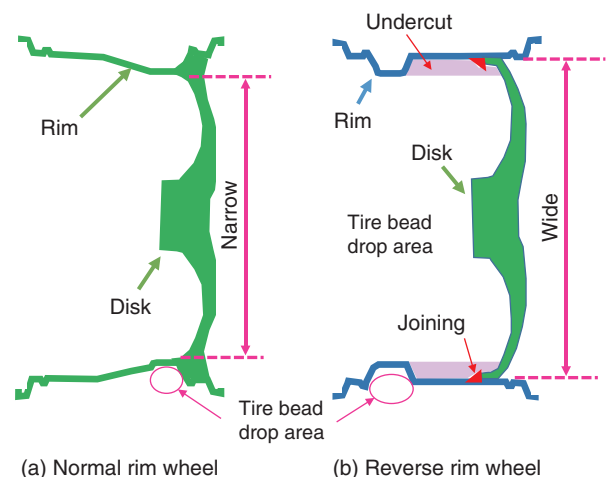


Fig. 4 Sectional view of normal rim wheel and reverse rim wheel

とになり、意匠性にも影響をおよぼす。これに対し、(b)のリバースリムホイールでは、リムの最小直径部をディスク部から離せることでデザイン部への影響を無くせ、ディスク部を大きく見せることが可能となる。

しかしリバースリムホイールは Fig. 4(b) に示すようにリム部にビードドロップエリアによるアンダカット部が生じるため、パーツを二つまたは三つに分割しそれらを溶接やボルトで結合するため製造コストが上昇する。

そこで、量産されているアルミホイールの製造設備を改良しリバースリムホイールを1ピース構造で製造することで、量産ノーマルリムホイール同等のコストで製造できる生産技術を考案した。

さらに Fig. 5 に示すように、ノーマルリムホイールではディスク面とビードドロップエリアの間に生じる無駄肉をリバースリム化で低減することができる。

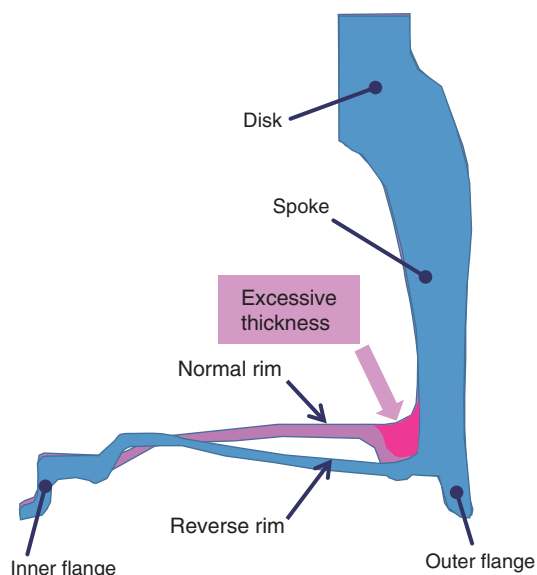


Fig. 5 Image of weight reduction

3. 従来のアルミホイールの製造方法

ホイールは路面入力を車体へ伝えるための大切な部品である。ホイールとタイヤは、アウトフランジ部とインナフランジ部の両側で接触している。アウトフランジ部はデザイン面が近傍にあるため剛性が高いが、インナフランジ部は剛性が低いことにより負荷応力が高くなるため、強度、品質の安定化が重要となる。

近年、ホイールの大径化により、インナフランジ部は一層の強度、じん性の向上とその品質管理に注意をしなければならぬ部位となってきている。

アルミホイールの製造法には鍛造製法と鋳造製法がある。鍛造品は強度が高いが製造にコストがかかるため、一般的に量産車用のアルミホイールには鋳造製法が用いられ

ている。

その鋳造方法には Low Pressure Die Cast (LPDC) と Gravity Die Cast (GDC) の2種類がある。

Fig. 6 に LPDC の製造工程を示す。LPDC では強度が必要なインナフランジ部が金型に溶湯が入るゲート部から離れているため、溶湯の凝固が速くアルミ合金の結晶粒が微細となり、強度が高くなる。

Fig. 7 に GDC の製造工程を示す。GDC は LPDC より簡易な設備で鋳造できる製法だが、インナフランジ部から溶

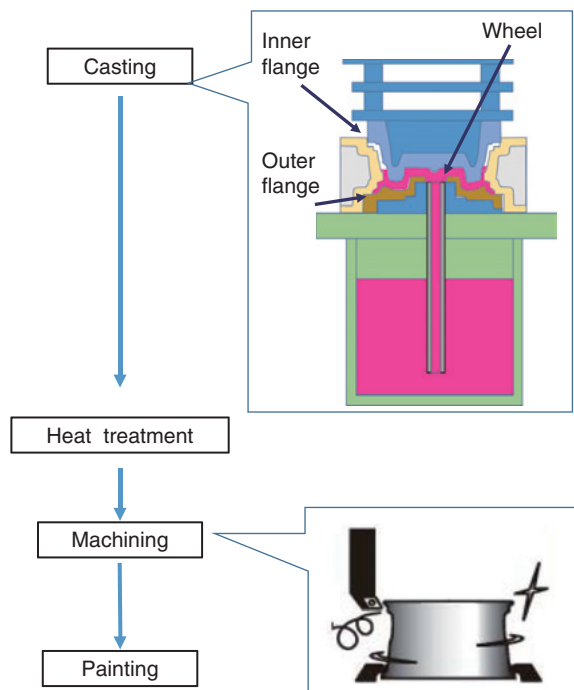


Fig. 6 LPDC production process

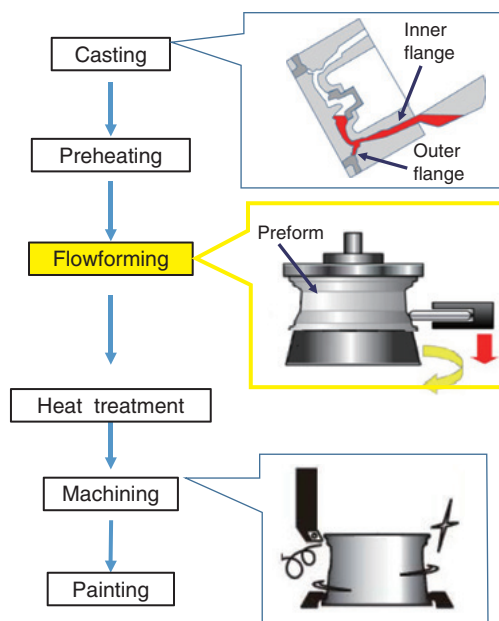


Fig. 7 GDC production process

湯を入れるため、凝固速度が遅く結晶粒度が大きくなり、LPDC 同等の強度とじん性は得られない⁽³⁾。

そのため GDC 製法では、鑄造ラインの後に、フローフォーム加工機を設置し、アルミホイール素材（プリフォーム）を鑄造した後、再度予熱して、塑性加工によりインナフランジ部の強度とじん性を高めている。

このフローフォーム製造工程を Fig. 8 に示す。予熱したプリフォームはディスク面をアッププレートでフローフォームマシンに押さえ込んで固定し、外側から回転するローラでマンドレルに押し付けながら回転して成型される。この工程を経ることで、インナフランジ部に必要な強度とじん性が得られる。

いずれの製法でも、成型のあと、再度、熱処理をおこなひ、切削加工と塗装をおこなって製品を仕上げる工程となっている。

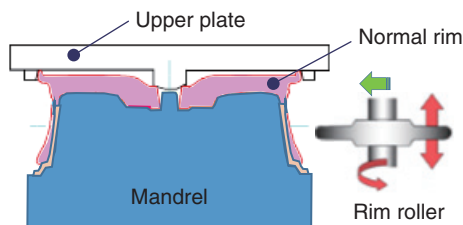


Fig. 8 Flowforming for normal rim wheel

4. リバースリムホイールの製造方法

4.1. フローフォームを活用したリム部の成形手法

リバースリムの形状にはアンダカット部があるため、LPDC 製法では切削加工が増え、歩留まりが下がってしまう。また、コスト上昇を低減するためには、通常の設備と工程をできるだけそのまま使用することが求められる。

そこで、本開発ではフローフォーム成形の設備と工程を一部改良してアンダカット部を成型するため GDC 製法を選択した。

インナフランジ側が絞られた形状を従来と同じ製造ラインで成形するため、鑄造段階では通常どおりインナフランジ側が外側に開いている素材を作製し、その後の工程で、逆テーパ部をフローフォームで成形する手法を考えた。

従来のフローフォーム成型では、しごき加工部位が常にマンドレルに接触しているため、ホイール中心がずれないため片側のローラの一つで加工が可能である。

しかし、リバースリムホイールでは、加工部位にマンドレルと接触しない部分が生じるため、一方向からの荷重ではリムが偏心するため加工が容易でない。

そこで、加工時のリムの偏心を低減するため、Fig. 9 に示すような二つのローラで両側から同時に荷重を加えられ

る対向2ローラ方式を考案した。

Fig. 10 に試作加工機のマンドレルとローラを示す。このように対抗する二つのローラはマンドレルの中心軸に対象になるように設置した。

試作機によるフローフォーム加工の Fig. 11 に様子を示す。

4.2. 最適な加工条件の設定

量産のノーマルリムホイールのフローフォームの加工条件の管理項目としては、加工温度、ローラしごき条件など

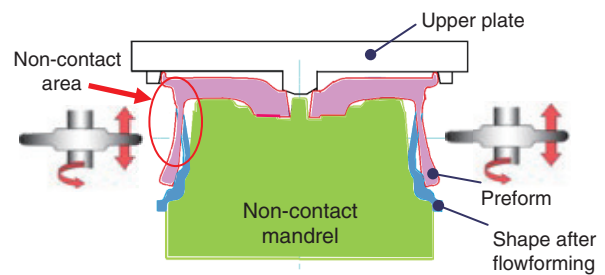


Fig. 9 Non-contact mandrel for reverse rim wheel

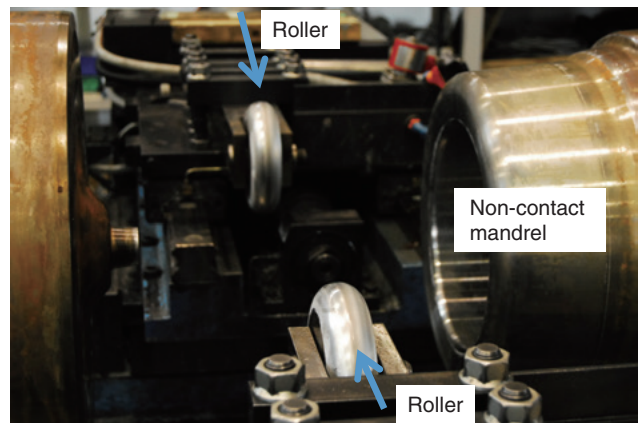


Fig. 10 Proposed test machine for flowforming

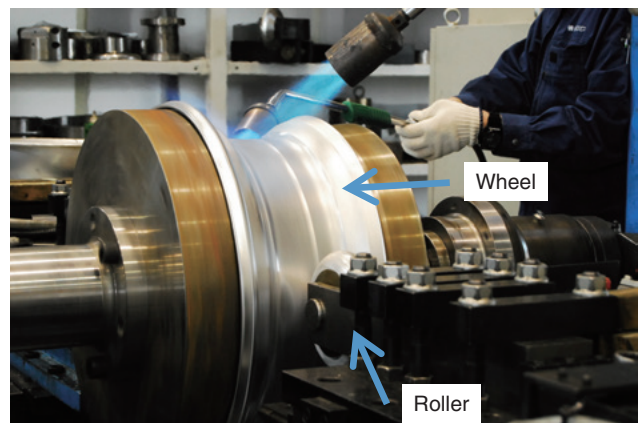


Fig. 11 Flowforming trial using two rollers

がある。フローフォーム加工では大きな荷重をかけて成形することで加工回数を減らしコストを低減できる。しかしリバースリムのプリフォームとマンドレルの間には非接触の部分があるため、ローラに過大な荷重を掛けた場合、リムに大きなひずみが発生しリム割れが発生する。

それらの課題を対策するには、設備能力を考慮した上で負荷を制御しながらフローフォーム加工をする必要がある。

そこで関連する加工温度とローラしごき回数の二つの項目に着目し、条件の最適化を実施した。

まず加工温度の設定について述べる。フローフォーム加工時の鑄造素材の予熱温度は、加工時のローラ押し込み荷重の低減のために重要である。Fig. 12 にホイールに用いられるアルミ合金 JIS AC4CH 合金のホイールから切り出した試験片による高温材料特性を示す。AC4CH 合金の降伏強度は温度とともに低下し、それとは逆に伸びは増加することがわかる⁽⁴⁾。

量産のノーマルリムホイールのフローフォーム加工温度は 300℃ 前後であるためこの温度でフローフォーム試験をおこなったところ、リム内周に Fig. 13(a) のようにクラックが発生した。そこで、上記の事前試験の結果から、降伏強度が約半分まで低下し、また伸びが二倍に上昇する 400℃ でフローフォーム加工をおこなった結果、リムのク

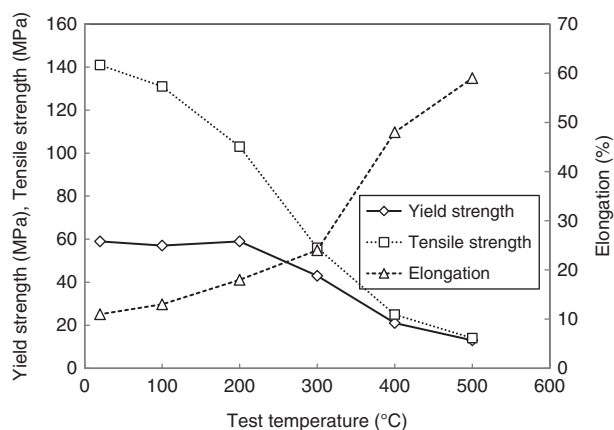
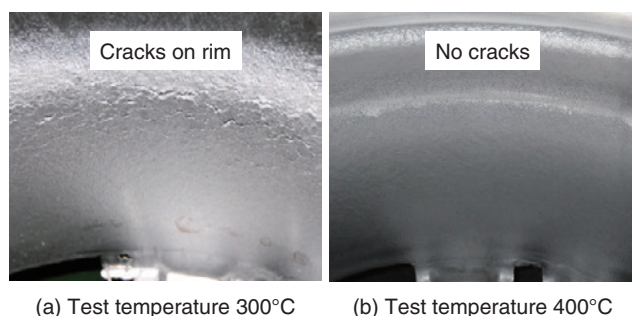


Fig. 12 Mechanical properties of JIS AC4CH



(a) Test temperature 300°C

(b) Test temperature 400°C

Fig. 13 Interior of rim after flowforming process

Table 1 Test results of temperatures

Temperature	300°C	350°C	380°C	400°C	420°C	450°C
Result	Crack	Crack	No crack	No crack	No crack	No crack

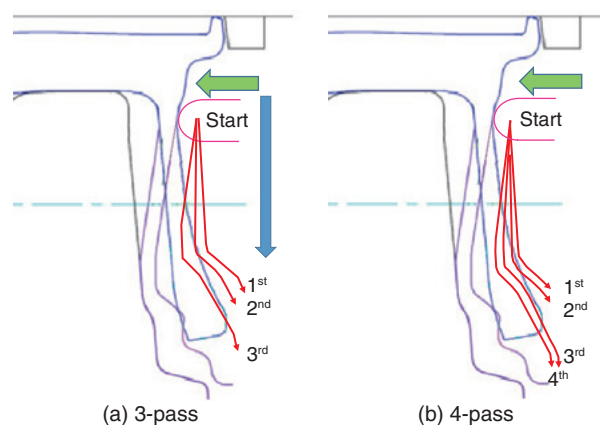
ラックは発生しなかった。

クラック発生が防止でき、量産性を考慮した最適な加工温度範囲を確認するために各種温度で加工試験をおこなった。Table 1 に各温度での試験結果を示す。380℃ 以上の温度ではクラックの発生はないことがわかったが、温度が高すぎると素材強度が低下しすぎ予熱炉から素材を取り出す際や、搬送時やマンドレルにセットする際に搬送ロボットのチャッキングでホイール素材を変形させてしまう恐れがあり量産生技性上好ましくない。そこで 400℃ を温度条件として設定した。

次にローラがリムをしごく最適な回数の検討をおこなった。量産のノーマルリムホイールのフローフォーム加工において、ローラしごき回数は、荒形状成形用ローラが 1 回から 2 回、インナフランジ部の成形用ローラが 1 回の、合計 2 回から 3 回で完了する。これに対し、リバースリムホイールのフローフォーム加工は、先に述べたようにマンドレルに接触しない部分を少しずつ加工する必要があるため、しごき回数が増加する。そこでしごき回数の設定を変えて試作をおこなった。ローラの動作軌跡を Fig. 14 に示す。

ローラは、スタートの位置から緑矢印方向に荷重を負荷しながら赤線の軌跡で青矢印方向に移動する。ひずみを分散させるためにさまざまな軌跡で加工をおこなった。3 回加工では一回当たりの加工度が大き過ぎリムの内面側にクラックが発生したが、4 回で加工をおこなうことでクラックの発生は抑えることができた。

以上のように、フローフォーム加工方法の改良と加工条件の最適化により、量産ノーマルリムホイール同等のコストでリバースリムホイールを製造する生産技術を構築した。



(a) 3-pass

(b) 4-pass

Fig. 14 Motion of roller while flowforming

5. 効果の検証

5.1. CAE による外観と軽量化の効果予測

ホイールサイズとデザインが異なる4タイプのホイールをリバースリム化した場合の、3Dモデルを用いた算出結果を Fig. 15 に示す。

いずれの製品においても、リバースリム化をすることで、視覚的に大きく見え、かつ、軽量化ができることがわかった。

一般的なデザインホイール A, B, C ではサイズが大きくなるほど軽量化効果が高くなった。

例えば SUV 車両は車体が大いいため、それに伴いホイールも大径になる傾向があるが、リバースリムホイールにすることで、インチアップをおこなわずともホイールを大きく見せられ、インチアップ分の重量削減と同一サイズでのリバースリム変更による重量削減の両方が効果として期待できる。

また、ホイール D は、重量低減をねらって開発された軽量ホイールであるが、リバースリム化することでさらに軽量化できることがわかった。

5.2. リバースリムホイールの実機検証

CAE の効果実証を Fig. 15 のモデル A, D でおこなった。モデル A は Fig. 1 に示したように視覚的に大径に見せることができた。また重量もノーマルリムホイールに対し、650 g 軽量化ができ CAE で予測した効果と一致した。

軽量モデルであるホイール D は、2015 年モデル Civic

Type-R のホイール (サイズ:19 インチ×8.5J) である。このホイールをリバースリム化したものを Fig. 16 に示す。リバースリム化によりスポークの長さは、ノーマルリムの 440 mm からリバースリム化で 464 mm となり、約 1 インチ長く見せることができた。

このようにリバースリム化により内部空間が広くなり、よりスポーティな印象のホイールとなった。Fig. 17 に実車に搭載した状況を示す。

また重量についても 1 本当たり 250 g の重量低減ができ、CAE 解析結果と一致した。

Fig. 18 にリバースリムホイール採用による重量削減部位を示す (緑色部が低減部位)。既に軽量化されたホイールであっても、リバース化によりディスク面とビードドロップエリアの間にある無駄肉を取り除くことで軽量化効果があることがわかった。

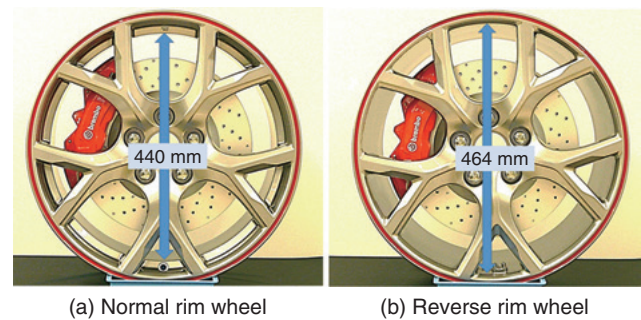


Fig. 16 Appearance of normal rim wheel and reverse rim wheel



Fig. 17 Reverse rim wheel on sport type car

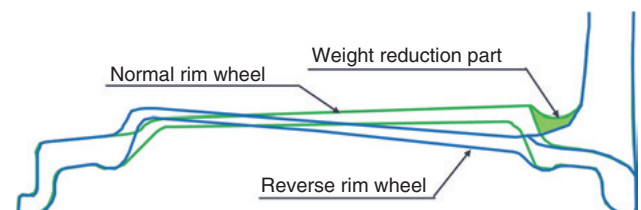


Fig. 18 Area in which weight is reduced in reverse rim wheel

Size	Normal rim wheel	Reverse rim wheel	Weight reduction
Wheel A 18 × 7.5J	 12.40 kg	 11.75 kg	-0.65 kg -5.24%
Wheel B 19 × 8.0J	 13.56 kg	 12.48 kg	-1.08 kg -7.96%
Wheel C 20 × 8.5J	 15.08 kg	 13.95 kg	-1.13 kg -7.49%
Lightweight wheel D 19 × 8.5J	 11.91 kg	 11.66 kg	-0.25 kg -2.10%

Fig. 15 CAE results for appearance and weight

以上のようにリバースリム化により、ノーマルリムホイールと同一のデザインでありながらインチアップと同等の視覚的大径化による意匠性向上と、無駄肉の低減で、18インチ以上のホイールで5%以上軽量化が可能であることを確認した。

また、軽量にデザインされたホイールでも2%以上軽量化できることを確認した。

6. まとめ

本稿において開発した生産技術手法を適用したことで、視覚的に大径に見えると同時に軽量化ができるリバースリムホイールを1ピースで製造することができた。

- (1) 対向ローラによるフローフォーム加工を考案し、既存ラインの設備を活用した安価な1ピース構造のリバースリムホイールを製造する手法を構築した。
- (2) フローフォーム加工において予熱温度を400℃、ローラしごき回数を4回とし、クラックや微小クラック等の肌荒れのない最適な加工条件を設定した。
- (3) CAEで予測した形状を実現でき、ねらい通りの軽量化効果が得られることがわかった。
- (4) リバースリム化により、ノーマルリムホイールと同一のデザインでありながらインチアップと同等の視覚的大径化による意匠性向上と、無駄肉の低減で、18インチ以上のホイールで5%以上軽量化が可能であることを確認した。また、軽量にデザインされたホイールでも2%以上軽量化できることを確認した。

参考文献

- (1) 青山元男:Part10 走行装置, クルマのしくみ, ナツメ社, p. 173, (2008)
- (2) 野崎博路:基礎自動車工学, タイヤの力学, 東京電機大学出版局, p. 5, (2017)
- (3) 日本材料学会編: 3章強度の基本特性, 改訂 材料強度学, p. 50, (2009)
- (4) 軽金属協会編: 8章工業用材料, アルミニウム材料の基礎と工業技術, p. 306, (1985)

■ 著 者 ■



大橋 正義



澤井 宗美



酒井 智紀



小林絵里菜



鈴木 秀之



川上 穰

四輪開発業務における生産性向上のための エキスパートの知識 経験 思考の構造化と活用

Modeling and Utilizing Expert's Knowledge, Experience, and Thinking in Automobile Development

安原 重人¹
Shigeto YASUHARA

吉本 毅¹
Takeshi YOSHIMOTO

岡田 英之¹
Hideyuki OKADA

要 旨

設計業務における業務効率の向上を目的として、暗黙知として属人化しているエキスパートの知識と思考を構造化することに取り組んだ。

通常は文書化され管理されている手順書やチェックリストなどから、言葉を抽出し、それらを設計情報と作業手順に分類した上で、二つの機械構文を用いて構造化した。さらにエキスパートの暗黙知である知識、思考の両方を発言から直接抽出することで、情報の鮮度と量を短期間で確保するとともに、エキスパートが自身の経験値から実行する思考を構造化しモデルに反映した。そのモデルの業務での有効性検証をおこなうため、対人ではなく機械から示唆を得るシステムを構築し、実際の衝突性能の設計業務に適用した。その結果、従来のように手順書のみを参照したケースに対して、本モデルを用いて業務をおこなったケースでは、効率よく業務を進めることが可能となり、約半分の時間で目標を達成できることが確認できた。

ABSTRACT

Measures were taken to realize the structured knowledge and thinking of experts, personalized in the form of tacit knowledge, for the purpose of enhancing the development efficiency of design work.

In this approach, the words are extracted from procedure manuals, checklists, and so on, that are usually put into written form and managed. Those words are categorized as design information and work procedures, after which they are structured using two types of machine languages. By further extracting both the knowledge and thinking that are the tacit knowledge of an expert directly from statements, the newness and quantity of the information were assured within a short time. At the same time, the thinking that experts perform based on their own empirical values was structured and incorporated in a model. In order to verify the effectiveness of that model in operation, a system for obtaining suggestions not from other people but from machines was constructed and applied to design work on actual crash safety performance. The results confirmed that, by comparison with conventional cases in which only procedure manuals are referred to, cases in which the present model was used to perform work showed that it became possible to advance the work efficiently so that goals could be achieved in approximately one-half the time.

1. まえがき

Connected, Autonomous driving, Shared, and Electric (CASE) に代表される新しい技術への対応は、自動車メーカーにとって大きなチャレンジである。また、CAFE に代表される環境要件や乗員を保護するための安全要件は年々厳しくなっている。そのためにエンジニアは車両開発において安全性、法規、コスト、生産性などさまざまな側面について考える必要がある。グローバルな規模で高品質な設計をおこなうためには、世界の各拠点の多数のエンジニアの間で

同じ設計品質を維持する必要がある。こうした背景から、業界を問わずさまざまな分野において AI が活用されており、ビッグデータを用いたソリューションが提案されている。

現状の開発において、多くのエンジニアが実物による評価の代替としてシミュレーションを活用し、検討時間を短縮している。しかし、近年ではシミュレーション精度向上に伴うモデル規模の拡大によって、1 サイクルの計算時間も年次で増加している。経験の浅いエンジニア (ビギナ) においてはトライアンドエラーによってより多くの時間を必要としてしまい、次世代技術の研究開発をはじめとした創

¹ 本田技研工業株式会社

造的な業務に振り向ける時間の確保が課題となっている。一方、エキスパートは合理的な仮説や理論を元に、無駄な手順を踏まずに効率よく検討をおこなっている。それは、過去の膨大な失敗経験から学びを得ているからであり、成功するために適切で必要十分な手法を瞬時に選択することができる。

このようなエキスパートのスキルを設計業務の効率化を目的として活用するために、画像、グラフ、写真を使用したプレゼンテーションソフトなどを用いて、検討方法を設計マニュアル等に記載することを試みた。しかし、エキスパートの思考過程は暗黙知であることが多く、文章化されて形式知化されていないことから、その知見の構造化が課題となっている。エキスパートの知識と思考を構造化する手法の一つとしてAIの活用が挙げられる。しかし、ディープラーニングを用いたAIの活用事例は多いものの、莫大な量のデータをコンピュータが決めたルールで処理するため、その解に至った経緯や根拠は専門家でもわからず、プロセス自体がブラックボックス化する懸念がある。かつて1970年代にスタンフォード大学で医療用のエキスパートシステムとしてMYCIN⁽¹⁾が開発された。MYCINは500程度の規則からなる知識データを持ち、医師からの問いかけに対し、「はい/いいえ」で応答し、最終的に推奨される療法を示すことができたが、実際の現場では使用されなかった。これはコンピュータが誤った回答を出した場合、推奨される療法に対してのトレーサビリティが不明確なことから、課題発生時に判断の根拠を振り返ることができないという課題があったからである。

品質の保証が重要である車両開発の分野においてAIを活用するためには、医療や司法など重要な結論を下す分野と同様に、開発者が結論の根拠を示す必要がある。

このような背景を鑑み、今後、より多くの課題に対して少ない原資で対応するためには、過去の検証結果に基づく膨大な開発過程である経験と知識を、属人的ではなく組織全体として蓄積、活用し、既知の課題に対する開発工数を低減する開発体質への脱却が必要である。そこで本研究では、エキスパートの知識と思考を構造化し、設計業務に活用できるシステムを構築することに取り組んだ。

2. 本研究のねらい

2.1. 概要

本研究では、エキスパートの知識を構造化したものを知識モデル、くわえてエキスパートの思考を構造化したモデルをエキスパートモデルと定義した。

まず、設計における知識の構造化方法として、機械構文であるGoal Structuring Notation (GSN)⁽²⁾とSystem Modeling Language (Sys ML)⁽³⁾を組み合わせる手法を検証した。資料から抽出した単語を二つの機械構文で構造化

し、両者を繋げることで知識モデルを構築した。次に、文書化された資料がなくてもエキスパートの発言から直接知識の構造化を可能とする方法を検討し、モデル構築の高速化を図った。さらにエキスパートが持つ暗黙知の中から上位概念を抽出し、報酬の概念を用いることによりエキスパートの思考を構造化した。最後に、構築したモデルを実際の設計業務に適用し、工数削減効果を評価した。Fig. 1にエキスパートモデルが世界中で活用されているありたい姿を示す。多くの拠点で多くの人員が異動、出入りしながら業務していることから、世界規模でみると、技術の伝承や蓄積がより大きな課題となっている。それに対し構造化したエキスパートの知識と経験を一箇所に集約することで、だれでもどこでもエキスパートの知識と経験を活用できるようにすることをねらいとする。

2.2. ありたい姿へのアプローチ

Fig. 2にありたい姿へのアプローチを示す。ビギナは、開発業務に必要な知識と経験を持っていないため、余分な業務を実行しがちである。ビギナでも効率良く業務を進めることができるように、エキスパートの知識と思考をモデルとして構造化するアプローチをおこなう。ビギナはモデルを活用することにより、開発業務に必要な時間を削減することができ、創出した時間で創造的な業務を推進することができる。

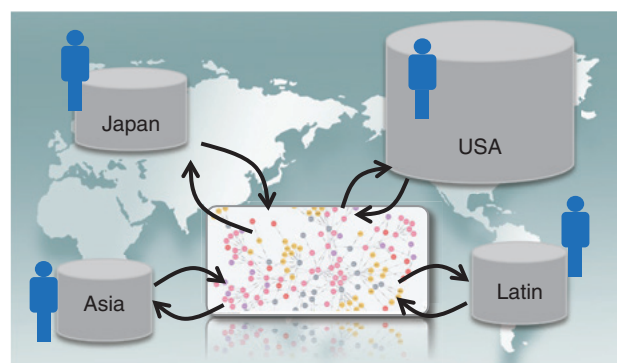


Fig. 1 Expert model utilized globally

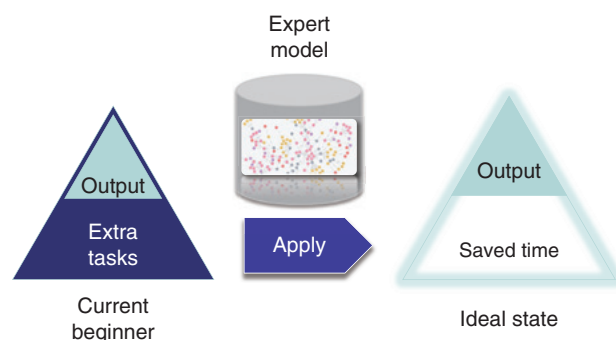


Fig. 2 Concept of expert model

Fig. 3 にエキスパートモデルとの対話を示す。Fig. 3(a) に示すように、従来の業務においては、知識と経験は属人化していることから、伝承や教育は人から人へアナログな情報伝達でおこなわれている。本提案では、Fig. 3(b) のようにユーザがシステムと対話し業務推進に必要な示唆を得ることを構想した。

2.3. システムの四つのステップ

本研究のシステムは、Fig. 4 に示すように四つのステップでの展開を構想している。

「おしえる」

エキスパートや技術文書から知識や経験と思考を抽出し、機械へ入力できる言語として構造化する。その構造化されたモデルをシステムへ逐次入力することでエンジニアがシステムから示唆を得られる状態にする。

「きく」

ユーザがシステムを介してエキスパートモデルへ問いかけをおこない、エキスパートモデルから検討方針の示唆を得る。

「ためる」

エキスパートモデルを使えば使うほど、応答を含めた履

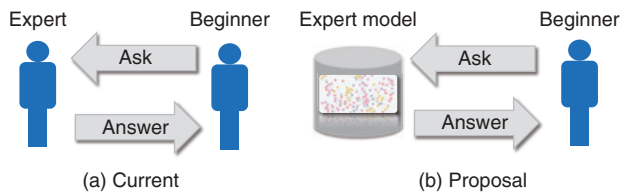


Fig. 3 Interaction with expert's knowledge

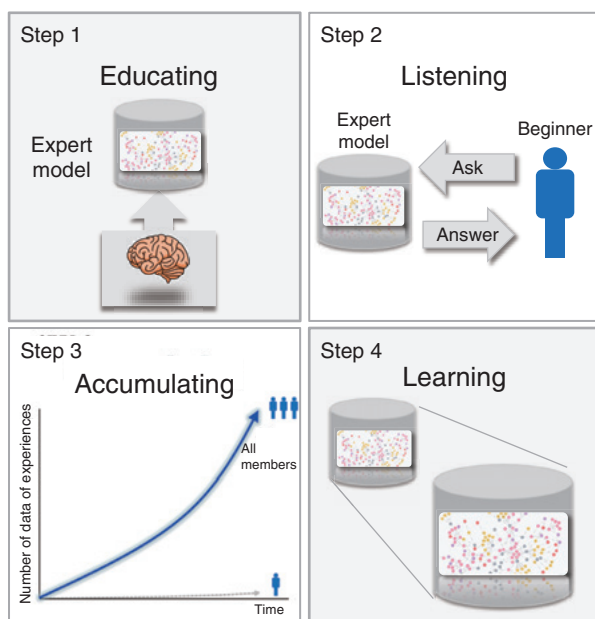


Fig. 4 Four step approach

歴が経験値としてモデルに蓄積される。多くのユーザが使用することでさらに経験値を飛躍的にためることができ、これにより情報は常に最新の鮮度を保つことが可能となる。「まなぶ」

モデル自体が知識と因果関係を用いて自己学習することで、人間の経験を越えたモデルに進化する。

設計開発現場は全世界に展開されており、多くのユーザがこのモデルを使用することで知識がたまり、モデルが自己学習することでさらに成長する。上記のような、四つのステップを経ながらエキスパートモデルは進化していくと考えられる。本稿では四つのステップを通じて核となるエキスパートモデルへの「おしえる」について、構造化手法と検証結果を説明する。

3. 「おしえる」

3.1. モデル化プロセス

モデルを構築する手順を Fig. 5 に示す。エキスパートの知識と経験を記した過去の資料や検証結果、さらにエキスパートの話し言葉などから暗黙知を抽出し、知識モデルを構築する。次にエキスパートから上位概念を抽出して、知識モデルと組み合わせることでエキスパートモデルを構築する。

暗黙知の可視化と構造化について Fig. 6 に示す。

エキスパートの脳内の経験に基づく知識は、他人から見ることができない暗黙知であり (左下)、それを手順書や発言からテキストデータを用いて可視化された状態 (左上) として抽出する。さらに機械が解釈できるように構造化 (右上) し知識モデルを構築する。しかし、手順書作成の作業はかなりの時間を要するために、その間に情報が更新されることもありうる。そこで今回は暗黙知の資料化を経ずに直接発言から知識モデルを構築することとした。このようなプロセスを踏むことにより、より短期間でモデル化が可能になる。エキスパートの暗黙知から直接知識と経験を抽出し構築した知識モデルは、エキスパートの経験に基づくこととなり、そこから得られる示唆は過去の開発経験や検証

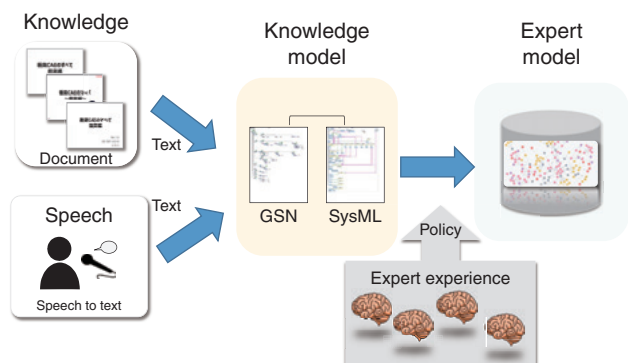


Fig. 5 Model construction process

結果といった根拠に基づくものにすることができる。

3.2. 知識のモデリング

実業務で用いられる設計手順書は、人間にとってはわかりやすいが、ある程度の専門知識や言葉の意味が理解することができる前提で記述されている。また、その領域での当たり前の作業手順や言葉の定義づけは省略されていることもあり、その領域で知識を持つ人のみが文章の意味を理解することが可能になる。しかしその文章は機械にとってはそれぞれの言葉の意味や定義づけがなされていないので解釈することは容易ではない。よって、記述されている手順書を機械が解釈できる言語で構造化する必要がある。そのために、まず資料からテキストとして文章を抜き出し、単語に分解する。そして、専門用語の辞書を用いて単語を属性別に分類する。

手順書の中身は設計情報の記述と設計手順の記述が混ざりあって存在しているため、各々異なる手法で構造化をおこなう必要がある。そこで本研究では、設計情報は SysML を用いて構造化した。SysML はシステムの構造を表すために利用される構文であり、構成要素をツリー構造として表現したり、その構成要素間の関係性を表現したりできる。このため、部品を設計するための情報の構造化に適している。一方、設計手順の構造化は GSN を用いた。GSN は設計品質を可視化するために利用される構文である。GSN では上位目標を下位目標に分解して表現することができる。この GSN を用いることで下位目標の妥当性をその目標に対する証拠に基づいて説明し、上位目標が特性基準を満たすことを説明することができる。そのため、部品の目標を満たすための設計手順の構造化に適している。このように GSN と SysML をそれぞれ構造化しさらに繋げることで、初めて設計手順と部品構造が結び付けられ、知識を構造化することができる。

具体的な例として一流のシェフのみが作れるカリカリなピザの作り方を SysML と GSN で構造化したものを Fig. 7

に示す。SysML においてピザの構成が構造化されている。ピザは生地、トマトソース、トッピングから構成される。さらに生地は小麦粉、塩、イースト、水から構成される。

一方 GSN ではカリカリのピザを作るための設計手順が構造化される。生地において (1) カリカリのピザを作ることが上位目標となり、そのために (2) 小麦粉、水、塩とイーストをよく混ぜる。次は (3) 生地の表面がなめらかになるまで打ち付けることが下位目標となる。表面がなめらかになるまで打ち付けることが SysML において生地に対する制約条件となり、(4) GSN と SysML をつなぐ役割を担う。このように GSN と SysML とがつながることによって、はじめてピザの構成と手順が明確になり、ピザのレシピが完成したことになる。レシピがあればビギナでもカリカリのピザに到達することができるため、この手法により一流のシェフの知識が構造化できたといえる。

この構造化手法を、衝突安全領域のエキスパートが設計する安定したエネルギー吸収を達成するためのフレーム構造設計にあてはめた例を Fig. 8 に示す。

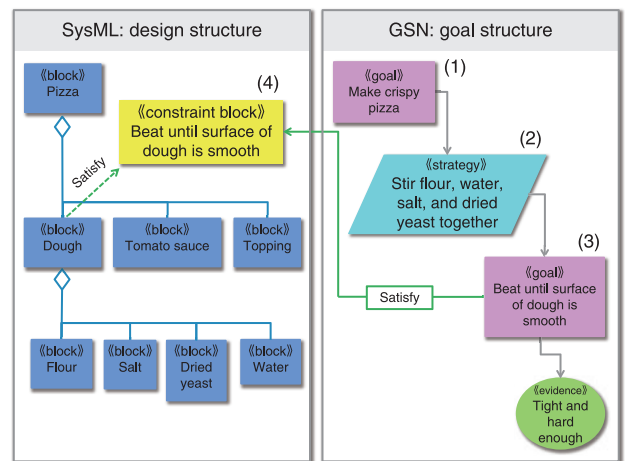


Fig. 7 SysML-GSN model of making crispy pizza

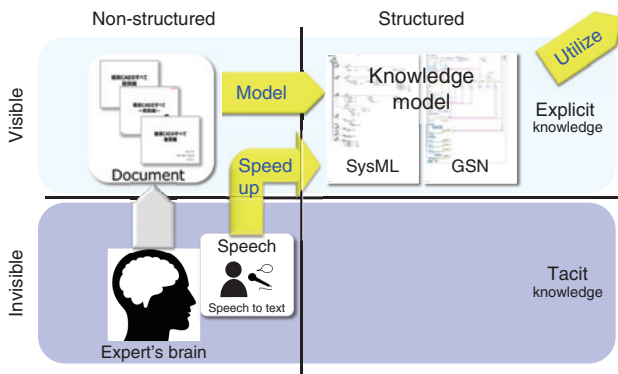


Fig. 6 Visualization and structurization of invisible knowledge

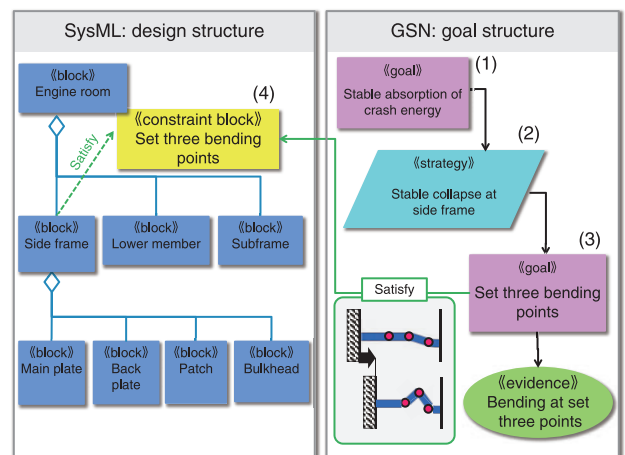


Fig. 8 SysML-GSN model of side frame design

SysML において衝突時のエネルギー吸収をおこなうエンジンルームの車体構成部品が構造化される。エンジンルームはサイドフレームとロアメンバ、サブフレームで構成される。またサイドフレームは本体、バックプレート、パッチ、バルクヘッドといった部品で構成される。一方 GSN では安定した衝突エネルギー吸収をするための設計手順が構造化される。(1)安定した衝突エネルギー吸収が上位目標となり、それを達成するために(2)安定的にサイドフレームを座屈変形させることが必要となる。次に(3)安定的に座屈変形させるために、Fig. 9 に示すように、座屈変形点を三つ設定することが下位目標となる。座屈変形点を三つ設定することが SysML におけるサイドフレームに対する制約条件となり、(4)GSN と SysML をつなぐ役割になっている。つまり安定的な衝突エネルギーの吸収のために必要な手順と構成が明らかになり、上位目標に達するためのレシピ、つまりエキスパートの知識が GSN と SysML を用いて構造化できたことになる。

3.3. モデル化手法の高速化

かつて 1980 から 1990 年代にかけた第二次 AI ブームの中で、専門家の知識をコンピュータで扱うエキスパートシステムが研究されたが 1990 年以降には衰退してしまった歴史がある。当時複雑な課題を解くために用いていた If 文のルールは難解であり、またプログラミング自体も容易ではなかった。よってシステムを活用するための入力作業はその技能を習得した技術者による限られた作業であった。そのため、インプットに膨大な時間がかかることと、限られた技能を習得する難易度も合わさり、必要な情報の量と鮮度を保てなかったことが衰退の要因である。

現在のようにプログラミングが発達した時代においては、手順書などの文書データがある分野では、3.2. 節で述べたように、手順書から言葉を抜き出すことが可能なため、比較的容易にモデルが作成できる。しかし、知識を示

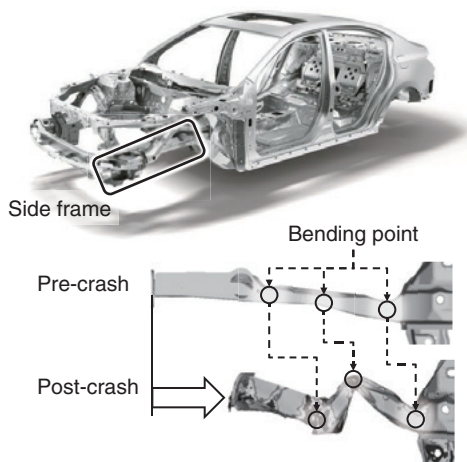


Fig. 9 Three bending points of side frame

す手順書などの文書データが無い分野では、構造化以前にまず文書作成が必要になる。これまでに実施した、ある機能の文書作成では約三年の年月を要したことで、発行時にはすでに更新が必要な情報になっているものもあった。文書作成により知識を一元化する目的は達成できたが、最新情報を開発に活用することができなかった。一方で、開発の現場ではエキスパートが実践するディスカッションや講義などの中で、日々新しい知識が生まれている。このように、話し言葉から知識を抽出し構造化することが可能になれば、情報の鮮度を保つことができる。そこで本研究では、Fig. 10 に示すように、高速化の手法として資料を経ずに発言から直接モデリングする技術を構築した。手順として、まずエキスパートにヒアリングをおこない知識を話してもらい、発言は録音され、音声認識によってテキストに変換される。文書からテキストを抽出したときとは異なり、自然会話による発言はあいまいさがあるため、それを取り除いて構造化するために文脈解析と照応解析をおこなった。

自然会話の内容は、その場に居ない第三者が理解しようとしても、何について発言しているのかわからないことが多い。その場合、知識の構造化をすることは容易ではない。そこで、文脈を特定するために Fig. 11 に示すように文脈解析をおこなった。

発言内容の「サイドフレームの発生荷重が未達であった」という文章に対して文脈解析をおこなうと、未達という単語からその文章が目標について発言しているとわかるようになる。よって、この文章を構成する単語は目標を記述する GSN の属性に則り正しく構造化することができる。

次に、文章をまたいで照応する「あれ」や「それ」に対応するための照応解析を Fig. 12 に示す。自然会話による発言では照応詞を用いた複数の文章が途切れ途切れになることが多い。それをそのまま構造化すると、構造も途切れ途切れになるため、知識としては不十分になってしまう。それ

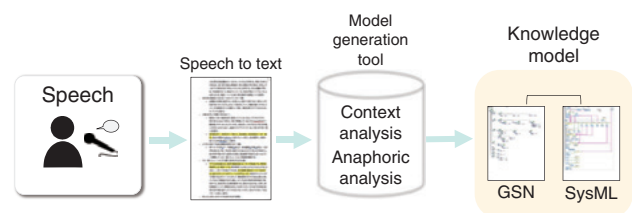


Fig. 10 Speech-to-knowledge model process

Speech	Context analysis
Force generated at the side frame did not reach the target.	About goal
He was the president of this company.	About person
Higher the deformation, higher the injury value.	About collision

Fig. 11 Context analysis

を防ぐために照応解析を用いて、先行詞と照応詞を繋げることにより、単語の関係性が途切れることなく構造化することができた。このように照応解析と文脈解析を知識構造化の生成ツールに実装し、話し言葉から資料を経ずに構造化することができた。

3.4. エキスパートの思考の構造化

ビギナとエキスパートの思考の違いを Fig. 13 に示す。知識と経験が少ないビギナは、課題達成までの道筋がわからずに業務に取り組む。一方エキスパートは、経験と思考を自分の脳内で構造化しているため、知識として持っているだけではなく、課題達成までの道筋を状況に応じて適切に組み立てることができる。エキスパートはこのような思考を長年の経験から得ている。失敗をした経験においては、その発生要因を特定して、本質を表す上位概念として脳内に記憶して活用している。上位概念とは「つまり・・・だ」と表現される文章であり、固有の属性は外されて一般化しているため、異なる事例においても失敗を未然に防ぐ行動の選択に利用することができる。この上位概念を可視化するために失敗学⁽⁴⁾を用いた。失敗学は発生した不具合の要因分析から、本質の要因に至る手法を体系化したもの

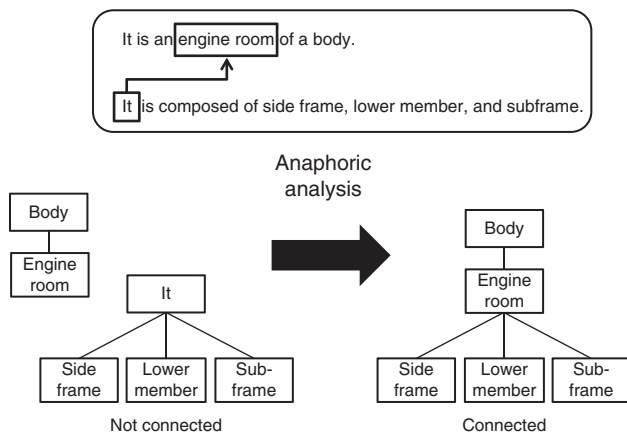


Fig. 12 Anaphoric analysis

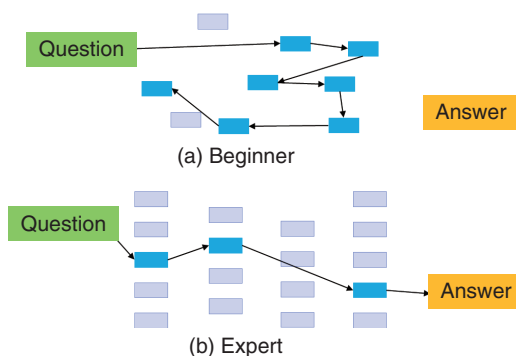


Fig. 13 Comparison of beginner's and expert's thinking

であり、上位概念の抽出に利用されている。まずは、実際の過去の業務から不具合の事例を集め、当事者からヒアリングをおこなった。次に、失敗学に則り過去トラブル集を作成し、上位概念を収集した。

このように失敗から抽出した上位概念は、不具合を未然に防止するための指針、すなわちエキスパートが選択する行動である。この行動をビギナに示唆するために、行動に応じた報酬付けをする手法を検討した。Fig. 14 に上位概念による報酬付けの例を示す。行動に応じた得点として報酬を定めた。上位概念に則った行動には高い報酬、逆に反する行動にはマイナスの報酬を設定する。最も報酬が高くなる手順を選択すれば、ユーザは優先度の高い手順を選ぶことが可能である。

Fig. 15 に報酬を用いた優先度の示唆の概念を示す。ここでは、ゴールである衝突目標を達成するために、まず何をすべきかの GSN を例としている。次におこなう作業が並列で記述された場合、優先度の示唆がなければビギナは誤った作業をおこなってしまう。それに対し、報酬を用いることで、上位概念に基づいた目標を設定するという手順に最も高い報酬が与えられ、ユーザはこの手順が最も優先度が高いことを理解できる。

Fig. 14 に示したこの報酬付けのルールは、エキスパートモデルが示唆する正しさの根拠となる。そのため、この根拠は経験やロジックなど人間が納得できる妥当性が必要であり、人間が責任をもってルールを保守していくことを想定している。ここまで解説した内容で知識と思考の構造化に取り組み、車両骨格の性能設計に関する 29,429 個の設計情報を構造化したエキスパートモデルを構築した。

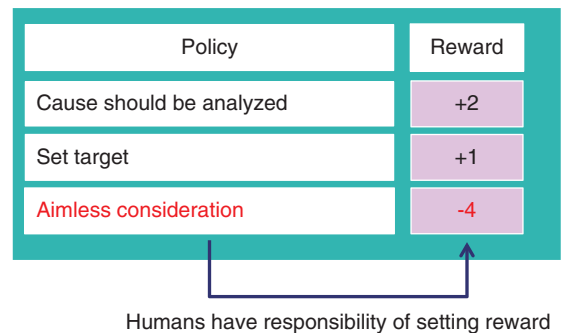


Fig. 14 Description of policy and reward



Fig. 15 Reward suggesting correct strategy

3.5. 効果検証

エキスパートモデルの活用による工数の削減効果を検証するために、衝突安全業務におけるシナリオを以下のように設定した。「車両重量がベース車両より 100 kg 増える場合のオフセット衝突モードにおいて、サイドフレームの発生荷重を目標の変形状態を達成しながら 100 kN から 150 kN に上げるための設計をおこなう」。検証は、ほぼ同じ技能レベルで開発未経験な若手エンジニアを二人選出し、エキスパートモデルの使用の有無での目標達成の到達度を比較した。一人は手順書のみを参照し業務にあたり、もう一人はエキスパートモデルを使用し示唆を得ながら業務にあたった。二人の目標達成度とそれに要した業務時間を比較して効果の検証をおこなった結果を Fig. 16 に示す。エキスパートモデル無しの場合、サイドフレームの発生荷重が目標荷重に達するまでに 142 h を要した。ただし、目標の変形状態までは達成できなかった。一方、エキスパートモデルを使用した場合、62 h で発生荷重と変形状態の目標を達成することができ、56% の業務時間の短縮効果となった。

Fig. 17 に削減効果の内訳を示す。エキスパートモデルを使用した場合では解析の実行回数が少ないことがわかる。特に計算に時間のかかる大規模解析の実行数が 7 cycles から 4 cycles と少なく抑えられている。

	Result	Required time
Without model	Target missed	142 h
With model	Target achieved	62 h

Fig. 16 Verification result of analysis time reduction effect

Without model	Small scale CAE 14 cycles	Large scale CAE 7 cycles
With model	5 cycles	4 cycles

Fig. 17 Breakdown of analysis reduction

Fig. 18 にプロセスの検証結果を示す。手順書のみを使用したエンジニアは解析や対策においての段階的なねらいを定めることができなかった。それにより導出を求められているサイドフレームの具体的な仕様の検討作業において、大規模解析を実行したことで、時間を多く費やし、結果として変形状態の目標を達成することができなかった。

一方、エキスパートモデルを活用したエンジニアは、必要十分な手順の示唆を得ることができた。その示唆によって、ベース車両の現状を把握した上でねらいを定め、各段階での課題の設定をおこない、具体的な仕様を検討することが実行できた。これにより自身に経験がなくてもすべての設定された目標を達成することができた。このことからエキスパートモデルを活用することによる開発時間短縮効果が確認できた。

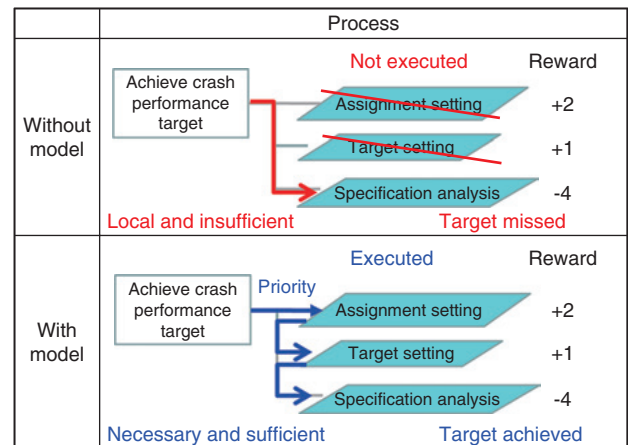


Fig. 18 Verification result of design process

4. まとめ

暗黙知であったエキスパートの知識と思考を構造化する手法を確立し、エキスパートシステムの「おしえる」ステップに必要なエキスパートモデルを構築した。

- (1) 知識を GSN と SysML を用い二つを連鎖させて、知識モデルとして構築した。
- (2) 知識モデルを発言から資料を経ずに高速に構造化する手法を構築した。
- (3) 知識モデルに対し、エキスパートの上位概念に則った行動に高い報酬を与えることで、エキスパートの思考プロセスを再現できるエキスパートモデルを構築した。
- (4) 本研究で構築したエキスパートモデルを活用したことによる業務時間の短縮効果を確認した。

今後は本研究で確立した手法でのエキスパートモデルの規模の拡大に向け蓄積、記載データの収集を実施する。ま

た「きく」「ためる」の STEP に基づいて通常業務に活用するためのシステム開発を推進する。さらに「まなぶ」につなげるための分析、マイニング、蓄積、機械学習の技術との互換性を視野に入れて、より広範囲にわたり活用を可能にするために研究を継続する。

参考文献

- (1) Buchanan, B. G., Shortliffe, E. H.: Rule-Based Expert Systems - The MYCIN Experiments of the Stanford Heuristic Programming Project, Addison-Wesley Publishing Company, (1984)
- (2) Origin Consulting (York) Limited: GSN Community Standard, Version 1, (2011)
- (3) Object Management Group: OMG Systems Modeling Language, Version 1.5, (2017)
- (4) 濱口哲也: 失敗学と創造学―守りから攻めの品質保証へ, 日科技連出版社, p. 53-66, (2009)

■ 著 者 ■



安原 重人



吉本 毅



岡田 英之

実験と第一原理計算および マテリアルズインフォマティクスの 統合フローによる自動車排ガス用合金触媒の探索

Search for Alloy Catalyst for Automobile Exhaust Gas by Means of Integrated Flow
of Experiments, First-principles Calculation, and Materials Informatics

廣瀬 哲¹
Satoshi HIROSE
竹折 浩樹¹
Hiroki TAKEORI

三上 仁志¹
Hitoshi MIKAMI
岡山 竜也¹
Tatsuya OKAYAMA

迫田 昌史¹
Masafumi SAKOTA

要 旨

ABSTRACT

自動車排ガス浄化用触媒に用いられる貴金属使用量を低減できる合金触媒の探索を効率的におこなう新たなフローを構築した。このフローの特徴は、従来からおこなわれてきている触媒活性試験や光電子分光法など実験的手法と、計算機を用いた第一原理計算ならびにマテリアルズインフォマティクスそれぞれの特徴を機能的に統合したことである。まず初めに実験と第一原理計算を併用して一酸化窒素の還元反応解析をおこない、触媒性能指標となる電子状態密度を設定した。次にその電子状態密度を目的変数として、マテリアルズインフォマティクスと第一原理計算を用いて二元系合金触媒の性能序列を予測した。そして性能上位と計算された十数種類の二元系合金触媒を実際に合成し性能測定をおこなった。その結果、現在触媒の活性金属として主に用いられているパラジウム触媒より高性能を発揮する合金触媒を創出することができ、統合フローの有用性を確認できた。

A new integrated flow has been developed that makes it possible to efficiently search for alloy catalysts that reduce the amount of precious metals employed in catalysts for the purification of automotive exhaust gases. The distinctive feature of this flow is that it functionally integrates the properties of the conventionally performed test methods such as catalyst activation tests and X-ray photoelectron spectroscopy with those of first-principles calculations and materials informatics, performed using computers. First, experiments and first-principles calculations were used together in order to conduct an analysis of the nitrogen monoxide reduction reaction, and a density of state was set to function as an index of material performance. Next, the performance rank of binary alloy catalysts was predicted using first-principles calculations and materials informatics, with this density of state as the target variable. More than 10 binary alloy catalysts calculated as displaying performance in the top rank were actually synthesized and their performance was confirmed. The results showed that it was possible to create an alloy catalyst that displayed a higher level of performance than a catalyst using palladium, the main active metal in use in current catalysts, demonstrating the usefulness of the integrated flow.

1. まえがき

近年の世界的な地球環境保全に対する要求の高まりに応じて、走行中の自動車の排ガスに含まれる二酸化炭素(CO₂)ならびに一酸化炭素(CO)、炭化水素(HC)、窒素酸化物(NO_x)の排出量のさらなる低減が求められている。走

行中のCO₂排出量低減に関しては、ハイブリッド車に代表される車両の電動化により実行力ある対策が推進されている⁽¹⁾。それに対しCO、HC、NO_xの排出量低減は三元触媒を用いた後処理により対応している⁽²⁾。その触媒材料はアルミナなどの酸化物の表面に白金(Pt)、パラジウム(Pd)、ロジウム(Rh)という貴金属の微細粒子を高分散に担持し

¹ 先進技術研究所

た状態で用いられている (Fig. 1). それら貴金属の資源量は元来少なく、調達リスクが高い物質⁽³⁾であり、今後の世界的な自動車排ガス規制強化と新興国における自動車販売台数の増加に対応するために貴金属使用量の低減が求められている。

そのため、従来から触媒の浄化活性種となる貴金属の有効活用に観点を置いた種々のアプローチがおこなわれてきている。その代表的な例が、貴金属を担持する酸化物の改良である⁽⁴⁾。これらのねらいの一つは自動車排ガスのような高温かつ酸化還元雰囲気変動が大きい環境下においても酸化物上の貴金属粒子を高分散状態で維持し続けるというものである。ただし分散性向上には原理的に限界があると考えられる。その他のねらいとしては、担体効果⁽⁵⁾と呼ばれる担持金属と酸化物の相互作用による浄化性能向上がある。しかしその機能発現メカニズムは未解明な部分が多く、効果も不明確なのが現状である。今後このような触媒の酸化物改良アプローチだけで、排ガス浄化用触媒の貴金属の総使用量をさらに低減していくことは容易ではない。

一方、別のアプローチとして活性種自体の改良が考えられる。活性種には経験的に貴金属元素だけが極めて有効であることはよく知られている。しかし貴金属だけが有効に働くメカニズムの解明はまだ不十分であり、酸化物と比べて材料開発も進んでいなかった。その理由として触媒反応は非常に速く進行するため、実験的手法だけではメカニズム解明に限界があったと考えられる。そのため新たな活性種の探索手法は、理論にもとづくというよりは、それまでの経験や知見に頼った実験的手法が主となり材料開発に時間を要していた。

しかし、近年、計算機能力の飛躍的な向上により材料の研究開発環境が大きく変わってきている。

一つはガスと活性金属の反応メカニズム解明に対して第一原理計算を用いた電子状態解析によるアプローチが盛んにおこなわれるようになってきたことである⁽⁶⁾⁻⁽¹²⁾。ただし現状は自動車排ガスのように反応ガス成分が多数あり、酸化還元反応が共におこるような複雑な触媒反応すべてをシミュレートしようとするとは莫大な計算コストがかかり現実的ではないため計算対象を絞る工夫が必要である。

もう一つは膨大なデータを容易に扱える機械学習を使ったマテリアルズインフォマティクスと呼ばれる広範囲を効

率的に探索できる手法が活発に用いられるようになってきていることである^{(13), (14)}。この手法は、適切な目的変数と説明変数を準備することができれば、今までの経験や知見の範囲を超えた材料探索が可能となる。ただし、触媒の活性種探索に応用するためには、反応メカニズムに則った目的変数と説明変数を設定する必要がある。

そこで本研究では近年、急速に進化してきている材料研究開発環境を活用し、実験、第一原理計算とマテリアルズインフォマティクスを統合した探索フローの構築を目指すと同時に、今まで比較的材料開発が進んでいなかったと考えられる触媒の活性種の改良に着目した。そして、貴金属使用量の低減と浄化性能の維持向上を同時に達成する合金活性種の効率的な探索とその実証を目的とした。

2. 材料探索コンセプトと統合フロー

本材料探索のコンセプトは、計算機能力を最大限利用し第一原理計算とマテリアルズインフォマティクスによって実験を極力減らして材料探索を効率的におこなうことである。そのため次のような統合フローを検討した。

はじめに実験と第一原理計算を用いて材料探索指標となる電子状態密度を設定する。次に第一原理計算とマテリアルズインフォマティクスを繰り返し活用し高性能となり得る材料を絞り込む。そして最後に候補材料を実際に合成し性能確認を実施し確定する。

このように材料スクリーニングの大部分を計算でおこなうことで、通常実験において一度に合成可能な水準数は限られているため、探索範囲を広げると材料合成と性能試験の実施回数が増えて時間を要するという実験の探索の課題を解消する。また第一原理計算の課題である計算条件設定については、実験的に浄化性能と相関のある反応を計算条件とした。そしてマテリアルズインフォマティクスで課題となる反応メカニズムに則した目的変数と説明変数の設定については、実験と第一原理計算で確認した実際の触媒性能とリンクする電子状態密度を目的変数とし、説明変数には元素の化学的基礎パラメータを設定した。以上のように、実験の課題は計算で、また計算の課題は実験を用いて補い合うことで実験と計算のかい離を防ぎ、機能的に統合した探索フローの構築を目指した。

そこで探索フローの比較を Fig. 2 に示す。従来の探索フローでは材料合成と触媒活性試験を実験的に繰り返し、性能が高い材料を探索する。そのため探索範囲が増えるほど期間が長期化する状況となり得る [Fig. 2(a)]。一方で今回検討した統合フローは、既に合成できている材料を用いて絞り込んだ条件のもと、計算で材料を探索し、高性能が見込まれる材料のみ実際に合成して性能を確認する。そのため広範囲の探索を比較的短期間で実施できるとともに実際の材料合成数を極力減らすことができる [Fig. 2(b)]。

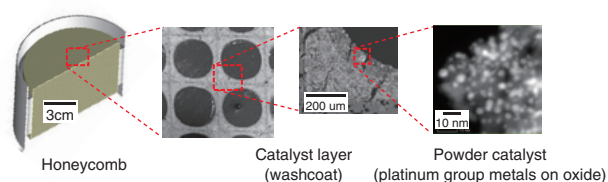


Fig. 1 Layout of catalyst material in exhaust system

なお本研究では CO や HC の酸化反応より熱力学的に不利な還元反応であるため、浄化が進行しにくいと言われている⁽¹⁵⁾一酸化窒素 (NO) を対象とし、三元性能の中で重要な NO-CO 反応に着目した。また NO 還元反応の経路のなかでも最重要とされている^{(16), (17)}NO の解離吸着反応を対象として実験と第一原理計算による反応解析をおこなった。材料探索の目的変数とする電子状態密度を実際に変化させて具現化する手法としては、活性金属の合金化により電子状態密度の制御をおこなうこととした。今回は合金の基本となる二元系組成で探索を実施した。

以下に本研究で提案する統合フローに沿った具体的な取り組み内容を示す。

(1) 実験による触媒反応と活性金属の電子状態密度の相関性の把握

触媒活性試験と吸着種解析ならびに電子状態密度の解析により NO の還元性能と触媒金属の電子状態密度の相関性確認を実験的におこなう。

(2) 第一原理計算による反応の電子状態密度解析

第一原理計算を用いて、反応に関与する電子状態密度を解析し、マテリアルズインフォマティクスを用いて材料探索する際に目的変数とする局所電子状態密度 (Local Density of State: LDOS) 指標を設定する。

(3) マテリアルズインフォマティクスによる合金探索

LDOS 指標を目的変数として、比較的データ数が少なくても予測精度が優れるスマートマテリアルズインフォマティクス (SMI)⁽¹⁸⁾と第一原理計算を繰り返し用いて高性能となり得る二元系合金を計算で探索する。

(4) 二元系合金触媒の合成とキャラクタリゼーション

計算で性能上位となった二元系合金組成を実際に合金触媒として合成する。そして合金化状態ならびに電

子状態密度を実験で確認する。

(5) 二元系合金触媒の性能評価

触媒活性試験により実性能を評価する。

以降に上記五つのパートごとに研究内容を紹介する。

3. 材料探索手法と結果

3.1. 実験による触媒反応と活性金属の電子状態密度の相関性の把握

3.1.1. 実験方法

(1) 触媒合成手法 6 種類の単金属触媒を一般的な水溶液による含浸担持手法により作製した。触媒の酸化物にはすべて γ - Al_2O_3 を使用した (Table 1)。

(2) 触媒性能評価 触媒活性試験は常圧固定床流通式反応装置にてモデルガスを用いておこなった。触媒重量は 100 mg, ガス総流量は 400 ml/min とした。前処理として 500°C で還元処理を施した後、触媒性能評価を 500°C から 50°C 刻みで温度を下げながらおこなった。模擬排ガス条件 (Table 2) と排ガスにおける NO 還元反応の代表的な反応性を評価するための NO-CO 条件 (Table 3) の 2 種類の反応ガス条件で実施した。

(3) 吸着種解析 NO の解離特性の指標となるイソシアネイト (NCO) 種の吸着量測定をおこなった。拡散反射法 (Diffuse reflectance infrared Fourier transform spectroscopy: DRIFTS) で NO-CO 逐次反応形式にて実施した。前処理として 500°C で還元処理を施した後 200°C へ降温した状態で本測定を実施した。ガス流通手順としては NO を流通した後 N_2 にてパージし、CO を流通した後 N_2 でパージした後、2210 cm^{-1} 付近の NCO 種ピーク強度測定を実施した。

(4) 触媒の電子状態解析 電子状態解析には X 線光電子分光 (X-ray photoelectron spectroscopy: XPS) を用いた。測定条件は、真空雰囲気下で MONO (Al) 線源、電圧 15 kV, 電流 10 mA, 測定エネルギー帯は -15 eV から 40 eV までとした。サンプルは前処理として 500°C で還元処理をおこなった後、不活性ガス雰囲気で大気非暴露状態を維持したまま測定装置に導入し測定した。

3.1.2. 実験結果

最終的には排ガス環境下で使用されるため、模擬排ガス条件と NO-CO 条件で NO 還元性能にかい離が生じないことを事前に触媒活性試験にて確認した (Fig. 3)。その結果、模擬排ガス条件と NO-CO 条件における NO 還元率の傾向には相関があることが示されたため、以降は NO-CO 条件で解析を進めることにした。

次に NO 還元の重要な反応経路と言われている解離による反応パスイメージを Fig. 4 に示す。実験的に NO の解離反応と還元性能の相関を調べるため、解離特性を DRIFTS にて評価した。その際、直接的に N 原子や O 原子を観測で

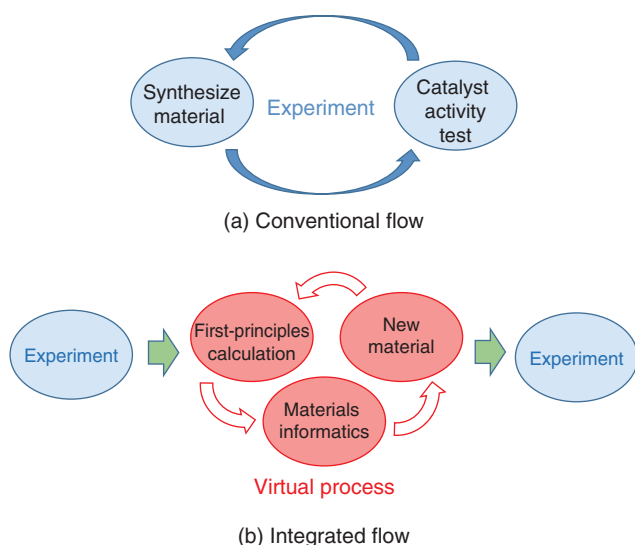


Fig. 2 Comparison of material search flows

Table 1 Sample catalyst

Catalytic active metal	Support oxide
Pd, Pt, Rh, Cu, Ag, Nd	γ -Al ₂ O ₃

Table 2 Simulated exhaust gas composition

Gases	Concentration
NO (ppm)	500
CO (ppm)	5000
C ₃ H ₆ (ppm)	400
H ₂ (ppm)	1700
O ₂ (ppm)	4900
CO ₂ (%)	14
H ₂ O (%)	10
N ₂	Balance

Table 3 NO-CO gas composition

Gases	Concentration
NO (ppm)	1000
CO (ppm)	1050
N ₂	Balance

きないため、解離吸着したN原子にCOが結合して生成されるNCO種の吸着強度を解離特性として評価した。

その結果、NO解離特性とNO還元率には高い相関が認められた (Fig. 5)。よってNOの解離反応は、NO還元反応にとって重要な反応であることを確認した。

一般的に分子の解離現象の駆動力は、NOのように不対電子を持つ分子の場合、反結合性軌道への電子供与による不安定化が考えられる (Fig. 6)⁽¹⁹⁾。

その供与電子の供給源は、NO分子が吸着する触媒金属と捉えるのが合理的である。よって、触媒金属からNO分子への電子供与により解離反応が発現し、その電子供与の起こりやすさ、起こりにくさは触媒金属の電子状態密度に

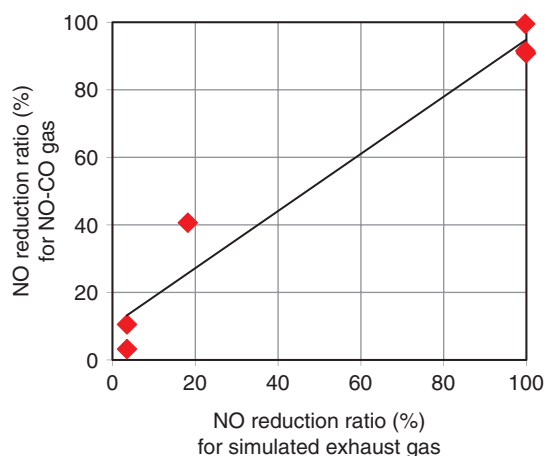


Fig. 3 Correlation between purification ratio for NO-CO gas and simulated exhaust gas

依存すると考えた。そのため触媒金属の電子状態密度の違いによりNOの解離特性にも違いが出ていると推察した (Fig. 7)。そこでXPSで触媒の価電子帯の電子状態解析をおこなった。そして触媒の酸化物の影響を差し引いて触媒金属のみの価電子帯の電子状態密度 (Indexed valence 値) とNOの解離特性の相関性確認を実施した。

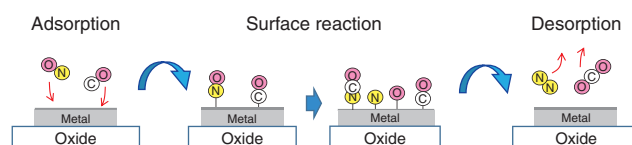


Fig. 4 Image of reaction path for NO reduction

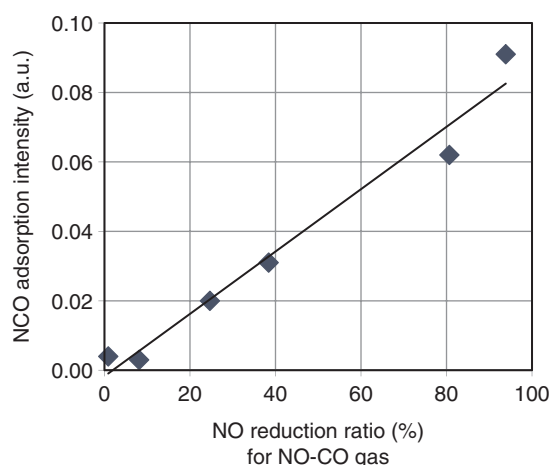


Fig. 5 Correlation between NO reduction ratio and NCO adsorption intensity

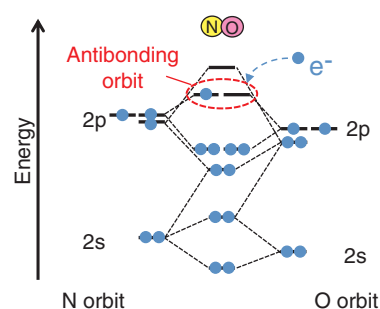


Fig. 6 NO molecular orbit

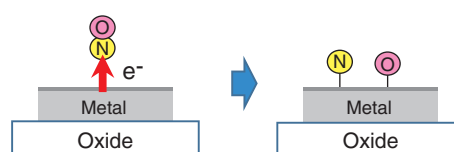


Fig. 7 Model of NO dissociation by electron donation

その結果, Fig. 8 に示すように高い相関関係が示され, 触媒金属から NO 分子への電子供与が示唆される結果を得られた.

これまでの一連の NO 還元に関する実験で得られた結果をまとめると以下になる.

- ・ 模擬排ガス条件における NO 還元率と NO-CO 条件における NO 還元率には相関が得られた.
- ・ NO 還元において NO 解離反応は重要な反応経路であり, 解離特性と還元性能に相関があることを確認した.
- ・ NO の解離特性は触媒金属の Indexed valence 値と相関が認められた.

以上から, 触媒金属の電子状態密度と NO 還元性能の間には相関関係が成立すると考え, 第一原理計算による詳細な電子状態解析をおこなうこととした.

3.2. 第一原理計算による反応の電子状態解析

NO 還元において重要となる NO の解離反応は触媒金属からの電子供与によって発現することを理論的に裏付け, またマテリアルズインフォマティクスにおける電子状態密度の探索指標を設定するため, 第一原理計算を用いた電子状態解析を実施した.

3.2.1. 計算方法

第一原理計算の代表的手法である密度汎関数法 (DFT) によって NO 解離吸着過程の電子状態解析を Table 4 に示す条件で実施した⁽²⁰⁾. 遷移過程の解析には Nudged Elastic Band (NEB) 法⁽²¹⁾を使用した. その計算条件を Table 5 に示す.

3.2.2. 電子状態密度の計算モデル

計算モデルには代表金属として Pd を使用した. また原子配置は, Pd (111) 3 層スラブモデルの最表面上に反応開始状態として NO 分子を, また反応終了状態として N 原子ならびに O 原子を配置した (総原子数 38). それぞれの配

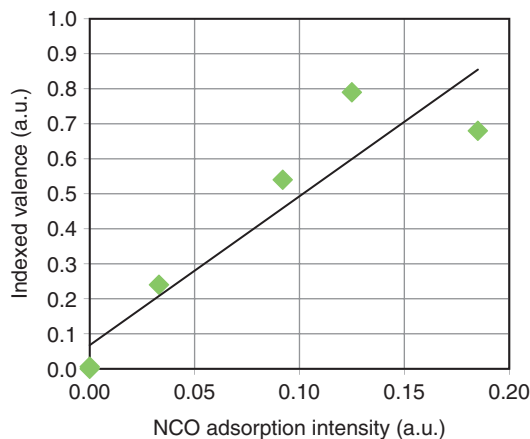


Fig. 8 Correlation between NCO adsorption intensity and indexed valence of catalytic active metal

Table 4 First-principles calculation conditions

Item	Detail
Software	Quantum espresso
Functional	PBE -GGA
Cutoff energy	35.0 Ry
K-points	$3 \times 3 \times 1$
SCF conv.	1E-07
Magnetism	Spin-unpolarized

Table 5 NEB calculation conditions

Item	Detail
Number of images	11
Optimize scheme	Quick-min
Path threshold	0.05 eV/Ang
Spring constant	0.1 a.u.

置はあらかじめ構造最適化計算した上で吸着安定位置を決定した. その結果として, fcc hollow site に NO 分子が N 原子と Pd が接して直立吸着している状態を始状態 (Image 0) とし, O 原子が隣接 fcc hollow site に解離吸着する状態を終状態 (Image 10) と設定した (Fig. 9).

3.2.3. 計算結果

NEB 法によって構造最適化した後の Image 0 から Image 10 までの N 原子と O 原子間の距離 (Fig. 10) を示す.

その結果, 直立吸着していた NO 分子が Pd 表面へ倒れ Image 5 以降で徐々に N 原子と O 原子の距離が広がり最終的に解離することがわかった. そこで遷移過程における電子状態解析を実施した. その際, O 原子に着目して電子状態解析をおこなった. その理由として O 原子は始状態で Pd 表面から最も離れており, 終状態で Pd 表面に吸着するため軌道混成による電子状態変化が最も大きくなると考えたからである. Fig. 11 に Image 0 から Image 10 までの O 原子の p 軌道の LDOS 変化量をカラーマップで示す. Image 6 以降で 0 eV 付近 (白破線内) の LDOS が急激に増加することが確認された. これは NO の解離過程で Pd か

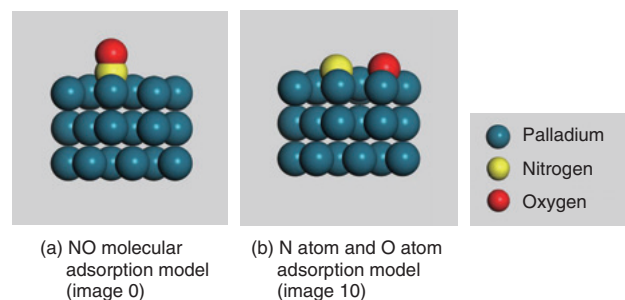


Fig. 9 NO adsorption model

ら O 原子 (NO 分子) のフェルミ準位付近へ電子が供与されたことを示しているものと考えられる。

以上, N 原子と O 原子の配置変化ならびに電子状態密度変化から, フェルミ準位付近の電子状態密度が NO の解離反応に関与していると考えた。そしてフェルミ準位付近の電子状態密度が高い合金触媒は NO への電子供与が活発になり NO の解離特性を高められ, 最終的に NO 還元性能の向上を期待できると考えた。そこで本研究ではフェルミ準位付近に特定のエネルギー帯を設定し, その範囲における LDOS を材料探索指標とした。

3.3. マテリアルズインフォマティクスによる合金探索

3.2.3. 項で設定した LDOS 指標値を目的変数に設定し, その値が大きくなるような二元系合金を, 比較的データ数が少なくても予測精度が優れる SMI⁽¹⁸⁾ を用いて探索した。なお本研究における計算の役割は探索期間の短縮であり, 最終的な性能確定は実験にておこなうことをコンセプト

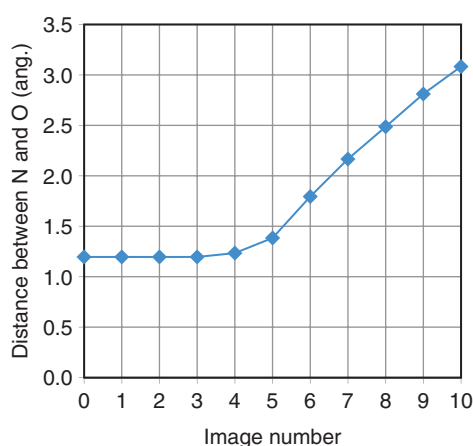


Fig. 10 Distance between N atom and O atom for each image

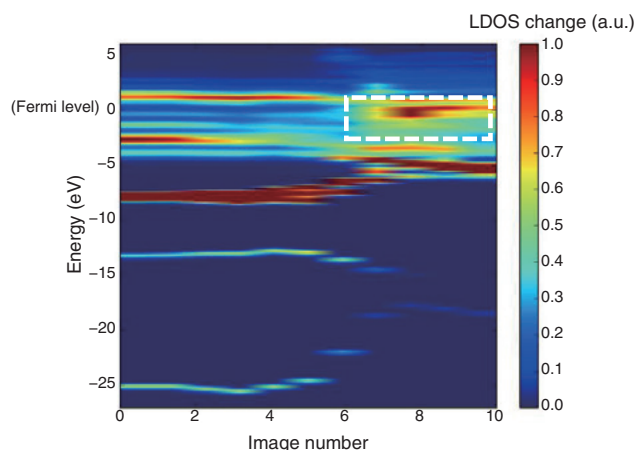


Fig. 11 Change in LDOS of oxygen p orbital during NO molecular dissociation process

Table 6 First-principles calculation conditions

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

トとしたため, 電子状態密度の計算モデルは面心立方格子 (FCC) ベースの結晶構造, 組成比は原子比率 1 : 1 で完全固溶しているモデルとした。

3.3.1. 電子状態密度計算モデルと計算条件

原子配置は異種原子が完全固溶し均等に配列したバルクモデル [Fig. 12(a)] を作成した。計算手順は, バルクモデルで構造最適化計算を実施した後, (111) 面で切り出した 6 層スラブモデル (総原子数 24) を作成し [Fig. 12(b)], 再び構造最適化計算を実施した。そして最表面の異種 2 原子についてフェルミ準位付近の特定エネルギー帯の LDOS を算出した後, Pd のそれで規格化した値を LDOS 指標値 (Indexed LDOS) とした。計算条件を Table 6 に示す⁽²²⁾⁻⁽²⁴⁾。

3.3.2. LDOS 指標値に対する予測モデルの作成

目的変数に最表面異種 2 原子の LDOS 指標値を設定し, 説明変数に元素の化学的基礎パラメータを用いた予測モデルを SMI により作成した (Fig. 13)。

まず一回目の予測モデル作成では, 単金属 48 種と二元系合金 42 種の合計 90 種の LDOS 指標値を用いた。その

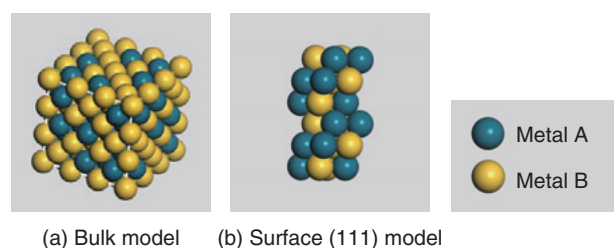


Fig. 12 First-principles calculation model

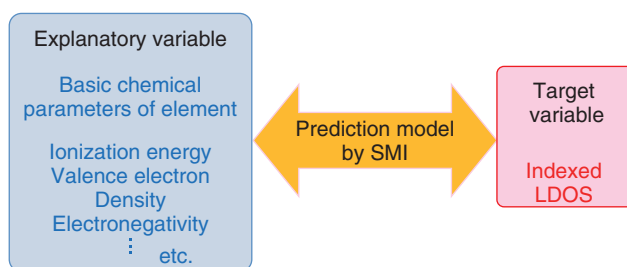


Fig. 13 Prediction model for indexed LDOS

結果から LDOS 指標値が高いと予測された二元系合金の数十種類を DFT で計算確認した後、学習点としてさらに追加して予測モデルを更新した。このようなアクティブラーニングを数回おこない予測モデルの精度を向上させた。そして最終的に合計 164 種類の単金属および二元系合金の LDOS 指標値による予測モデルを作成した。

3.3.3. 二元系合金予測モデル作成結果

予測モデルのフィッティング結果ならびに交差検証 (Leave-one-out cross-validation: LOOCV) 結果を Fig. 14 に示す。

フィッティング結果ならびに LOOCV 誤差は、説明変数に化学的基礎パラメータを用いて作成したモデルとしては、いずれもおおむね良好であった。放射性元素や気体元素などとの組み合わせを除いた単金属および二元系合金組成 2048 通りの中で、すでに排ガス浄化触媒として用いられている Pd や Rh, Pt の三つの貴金属は、いずれの LDOS 指標値も 30 位以内の上位にランクされる結果となった。このように経験的な知見と照らし合わせても、今回作成した LDOS 計算モデルおよび予測モデルの妥当性は高いものと考えた。

3.4. 二元系合金触媒の合成とキャラクタリゼーション

3.3.3. 項の予測モデルより得られた LDOS 指標値が大きい二元系合金組成の中から、実際に合成可能と考えられる合金触媒の合成をおこない、その合成状態を確認した。

3.4.1. 二元系合金触媒の合成手法

触媒合成手法は異種金属の極端な分離析出やコアシェル型⁽²⁵⁾のような相分離析出になることを避けるため、異種金属元素の同時析出が可能な液相還元法⁽²⁶⁾を用い合金化した粒子を γ - Al_2O_3 上に担持した。なお金属元素の還元電位差が大きく同時析出が容易ではないと想定される系、あるいは還元剤の還元電位以上の元素を含む系についてはアー

クプラズマを用いて γ - Al_2O_3 上へ直接スパッタリングすることで合成した⁽²⁷⁾。

3.4.2. 二元系合金触媒のキャラクタリゼーション

γ - Al_2O_3 酸化物上で合金粒子になっていることを確認するため、X ray diffraction (XRD) による構造解析、Scanning transmission electron microscope-energy dispersive X-ray spectroscopy (STEM-EDS) による粒子分布測定ならびに元素分析をおこない合金触媒合成の成否を総合的に判断した。

代表例として、液相還元法で合成した PdCo 合金触媒の XRD 測定結果を示す (Fig. 15)。回折ピーク解析の結果、Pd(111) と Co(111) を示す回折角度にピークが現れていない一方で、それらの回折角度の間に PdCo 固溶体合金を示すピーク (矢印) が確認された。

このように XRD による構造解析で固溶体合金化が確認されたサンプルについては STEM-EDS 分析をおこなった。そこで PdCo 合金触媒の観察結果ならびに元素分析結果を示す (Fig. 16)。

原子番号に起因してコントラスト差が得られる高角環状暗視野 (HAADF) 像より γ - Al_2O_3 酸化物上に金属粒子が高分散していることが確認された。また EDS マッピングによる元素分布状態解析から Pd と Co がほぼ同じ位置に存在していることがわかった。そこで、XRD 測定結果と STEM-EDS 観察結果より PdCo は合金粒子

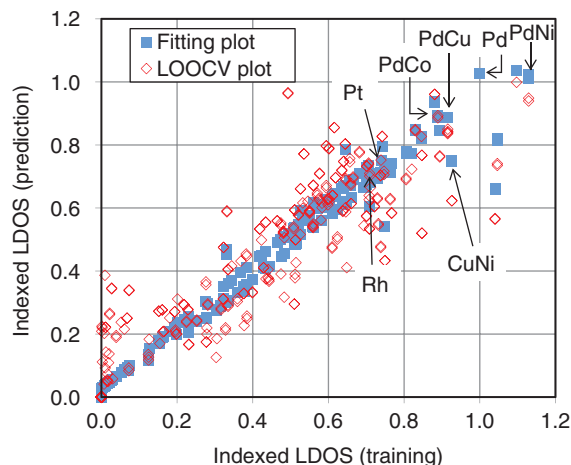


Fig. 14 Fitting result and LOOCV result

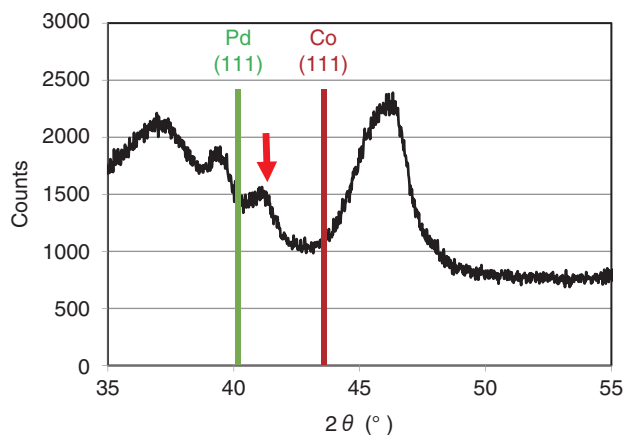


Fig. 15 XRD profile of PdCo alloy catalyst

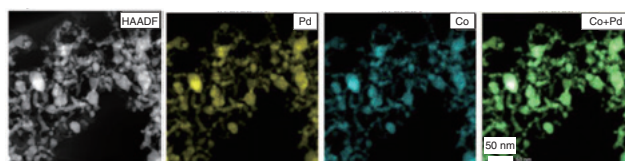


Fig. 16 STEM-EDS analysis of PdCo alloy catalyst

Table 7 Results of synthesis of alloy catalyst

Alloy system	Synthesis		Indexed valence (a.u.)
	Method	Success or failure	
Pd (Ref.)	Liquid phase reduction	S	26.1
PdNi	Liquid phase reduction	S	30.2
PdCu	Liquid phase reduction	S	12.2
PdCo	Liquid phase reduction	S	36.0
PdAu	Liquid phase reduction	S	6.2
PdAg	Liquid phase reduction	F	-
AuNi	Arc plasma	S	11.9
CuNi	Liquid phase reduction	S	9.1
CoNi	Liquid phase reduction	S	5.1
CoRe	Arc plasma	F	-
CoGe	Arc plasma	F	-
NiSn	Arc plasma	F	-
MoNi	Arc plasma	F	-
NiW	Arc plasma	F	-
CoMo	Arc plasma	F	-
NiRe	Arc plasma	F	-
CoCu	Arc plasma	S	11.2

として γ - Al_2O_3 酸化物上に存在していると判断した。同様に各種合金触媒の合成成否を判断した。また合金触媒であると判断したサンプルに関しては XPS による電子状態測定も実施し、担持金属濃度当たりの Indexed valence 値を算出した。

計算による絞り込みで候補となった二元系合金の触媒合成方法ならびに合成成否とそれら合金触媒の Indexed valence 値の一覧を Table 7 に示す。

4. 二元系合金触媒の性能評価

合金触媒の新品時の性能評価を 3.1.1. 項 (2) の NO-CO 条件でおこない Indexed valence 値に対する 300℃ における触媒性能の相関関係を評価した (Fig. 17)。触媒性能指標には、以下の式 (1) で表される Turnover Frequency (T.O.F.) 指標を用いた。なお反応面積 (Reaction surface: S)

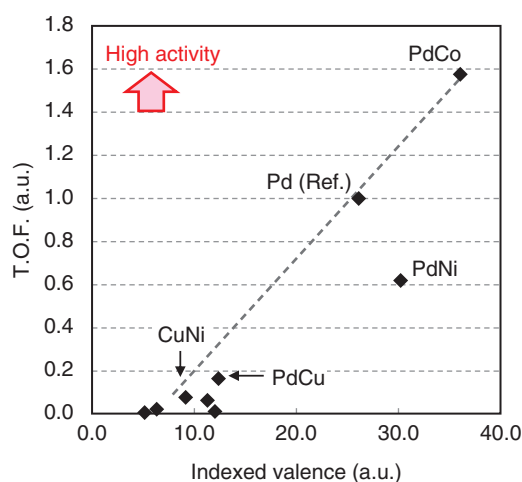


Fig. 17 T.O.F. against indexed valence for various alloy catalysts

はそれぞれの合金触媒の実際の担持量と平均粒子径から算出した。

$$T.O.F. (\text{mol/sec}\cdot\text{m}^2) = A (\text{mol/sec}) / S (\text{m}^2) \quad (1)$$

A : Reaction molecule amount per second

S : Reaction surface

その結果、予測通り Indexed valence 値が大きい合金触媒は還元性能が高い傾向が得られた。特に PdCo 合金触媒は Pd 触媒 (Ref.) の約 1.6 倍の性能を示した。そこで、PdCo 合金触媒について、3.1.1. 項 (2) の模擬排ガス条件においても性能評価を実施した。その結果を Fig. 18 に示す。

PdCo 合金触媒は Pd (Ref.) 触媒に対して Pd 含有量は重量比で Pd 触媒の約 2/3 であるにもかかわらず 300℃ から 400℃ の範囲で Pd 触媒より優れた還元性能を示した。

以上より、当初の目的である貴金属使用量を低減しつつ還元性能は維持向上する合金触媒を探索し実証することができた。

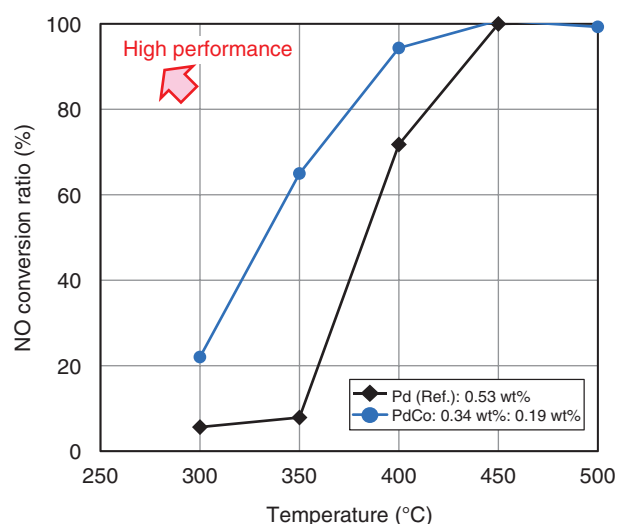


Fig. 18 Results of performance evaluation on condition of simulated exhaust gas composition

5. まとめ

- (1) 実験と第一原理計算およびマテリアルズインフォマティクスを機能的に統合した材料探索フローを構築し、その有用性を示した。ポイントを以下に示す。
 - ・実験にて NO 還元性能と NO 解離特性、および NO 解離特性と触媒金属の価電子帯の電子状態密度にはそれぞれ相関があることを確認した。
 - ・第一原理計算を用いて NO 解離反応に関与する電子状態解析をおこない、フェルミ準位付近の特定エネ

ルギー帯の LDOS を材料探索指標として設定した。

- ・指標化した LDOS を目的変数としてマテリアルズインフォマティクスと第一原理計算を繰り返し実施することで、高性能となり得る二元系合金組成を効率的に探索した。

- (2) 本研究の探索フローによって性能上位となった二元系合金触媒を合成し、Pd 使用量を 30% 削減しつつ Pd 触媒の性能を上回る PdCo 触媒を創出した。

なお本研究で用いた統合フローの基本的な考え方は触媒材料に限らず幅広く応用が可能のため、今後さまざまな材料探索に展開活用が期待できる。

参考文献

- (1) 大須賀稔, 山岡士朗, 伊藤浩道, 佐野博久, 石橋融, 中菌義盛:自動車分野における地球環境と都市環境への配慮, 日立論評, Vol. 99, No. 5, p. 532-539, (2017)
- (2) Rood, S., Eslava, S., Manigrasso, A., Bannister, C.: Recent advances in gasoline three-way catalyst formulation: A review, Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, Vol. 234, Issue 4, p. 936-949, (2020)
- (3) 独立行政法人 物質・材料研究機構:全面代替に向けた材料戦略の視点, 材料と全面代替戦略~NIMS における取り組みからその可能性を探る~, p. 5-21, (2009)
- (4) 小澤正邦:環境浄化触媒材料の微細構造制御と高機能化 -アルミナ触媒担体を例として-, 粉末および粉末冶金, 第 64 巻, 第 5 号, p. 230-237, (2017)
- (5) 上松敬禧, 中村潤児, 内藤周式, 三浦弘, 工藤昭彦: 6 章 触媒反応場の構造と物性, 触媒化学, 朝倉書店, p. 99-126, (2004)
- (6) Hammer, B., Morikawa, Y., Norskov, J. K.: CO Chemisorption at Metal Surfaces and Overlayers, Physical Review Letters, Vol. 76, No. 12, (1996)
- (7) Hammer, B., Norskov, J. K.: Theoretical surface science and catalysis -Calculation and Concepts, ADVANCES in CATALYSIS, Vol. 45, (2000)
- (8) Kishi, H., Padama, A. A. B., Arevalo, R. L., Moreno, J. L. V., Kasai, H., Taniguchi, M., Uenishi, M., Tanaka, H., Nishihata, Y.: A Theoretical study of the reactivity of Cu₂O(111) surface: the case of NO dissociation, J. Phys. Condens. Matter, Vol. 24, No. 26, (2012)
- (9) Kasai, H., Padama, A. A. B., Nishihata, Y., Tanaka, H., Mitachi, C.: Elements Science and Technology Project: Design of Precious Metal Free Catalyst for NO Dissociation, J. Jpn. Petrol. Inst., Vol. 56, Issue 6, p. 357-365, (2013)
- (10) Gajdos, M., Hanfner, J., Eichler, A.: Ab initio density-functional study of NO adsorption on close-packed transition and noble metal surfaces: II . Dissociative adsorption, J. Phys. Condens. Matter, Vol. 18, Issue 1, p. 41-54, (2006)
- (11) Li, X., Gao, H.: DFT Analysis of NO Adsorption on the Undoped and Ce-Doped LaCoO₃ (011) Surface, Materials, Vol. 12, Issue 9, p. 1379-1394, (2019)
- (12) Ito, T., Shimizu, Y.: Activation energy calculation of NO-CO reaction on rhodium surface by density functional theory, Catalysis Today, Vol. 332, p. 272-279, (2019)
- (13) Seko, A., Togo, A., Hayashi, H., Tsuda, K., Chaput, L., Tanaka, I.: Prediction of Low-Thermal-Conductivity Compounds with First-Principles Anharmonic Lattice-Dynamics Calculations and Bayesian Optimization, Phys. Rev. Lett., Vol. 115, Issue 20, Article No. 205901, (2015)
- (14) Seko, A., Hayashi, H., Tanaka, I.: Compositional descriptor-based recommender system for the materials discovery, J. Chem. Phys., Vol. 148, Issue 24, Article No. 241719, (2018)
- (15) 阿部秀樹:自動車排出ガス触媒の現状と将来, 科学技術動向 2010 年 12 月号, 科学技術政策研究所 科学技術動向研究センター, p. 8-16, (2010)
- (16) 松本益明:Pt(111) 表面上の一酸化窒素吸着構造, Journal of the Vacuum Society of Japan, Vol. 52, Issue 2, p. 47-55
- (17) 堂前和彦:排ガス触媒のオペランド解析, まてりあ, 第 52 巻, 第 12 号, p. 563-566, (2013)
- (18) 古川敦史, 池田知廣, 岡山竜也:スマートマテリアルズインフォマティクスを用いた材料研究手法, Honda R&D Technical Review, Vol. 29, No. 1, p. 84-90
- (19) Atkins, P., Overton, T., Rourke, J., Weller, M., Armstrong, F.:第 2 章 分子構造と結合, シュライバートキンス 無機化学 (上) 第 4 版, 東京化学同人, p. 49-104, (2008)
- (20) Paolo, G., Stefano, B., Nicola, B., Matteo, C., Roberto, C., Carlo, C., Davide, C., Guido, L. C., Matteo, C., Ismaila, D., Andrea, D. C., Stefano, G., Stefano, F., Guido, F., Ralph, G., Uwe, G., Christos, G., Anton, K., Michele, L., Layla, M. S., Nicola, M., Francesco, M., Riccardo, M., Stefano, P., Alfredo, P., Lorenzo, P., Carlo, S., Sandro, S., Gabriele, S., Ari, P. S., Alexander, S., Paolo, U., Renata, M. W.: QUANTUM ESPRESSO: a modular and open-source software project for quantum simulations of materials,

- J. Phys. Condens. Matter, Vol. 21, No. 39, 395502, (2009)
- (21) Jonsson, H., Mills, G., Jacobsen, K. W.: CHAPTER 16; Nudged elastic band method for finding minimum energy paths of transitions, Classical and quantum dynamics in condensed phase simulations, World Scientific, p. 385-404, (1998)
- (22) 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., Vol. 58, p. 1200-1211, (1980)
- (23) Delley, B.: An All-Electron Numerical Method for Solving the Local Density Functional for Polyatomic Molecules, J. Chem. Phys., Vol. 92, Issue 1, p. 508-517, (1990)
- (24) Delley, B.: From molecules to solids with the DMol³ approach, J. Chem. Phys., Vol. 113, Issue 18, p. 7756-7764, (2000)
- (25) Alayoglu, S., Eichhorn, B.: Rh – Pt Bimetallic Catalysts: Synthesis, Characterization, and Catalysis of Core – Shell, Alloy, and Monometallic Nanoparticles, J. Am. Chem. Soc., Vol. 130, Issue 51, p. 17479-17486, (2008)
- (26) 山内美穂: 無機ナノ粒子の構造制御による新機能発現, 表面科学, Vol. 38, No. 1, p. 24-29, (2017)
- (27) Hinokuma, S., Misumi, S., Yoshida, H., Machida, M.: Nanoparticle catalyst preparation using pulsed arc plasma deposition, Catal. Sci. Technol., Vol. 5, Issue 9, p. 4249-4257, (2015)

■ 著 者 ■



廣瀬 哲



三上 仁志



迫田 昌史



竹折 浩樹



岡山 竜也

マテリアルズインフォマティクスを活用した 高効率開発のための材料データベース

Material Database for Efficient Development Using Materials Informatics

伊藤 剛¹
Tsuyoshi ITO
杉本 直¹
Nao SUGIMOTO

石井 達子¹
Satoko ISHII
豊岡 洋一¹
Yoichi TOYOOKA

本田 寛¹
Hiroshi HONDA
古沢 透流¹
Toru FURUSAWA

要 旨

情報科学を応用して特性予測をおこなうことで実験による試行錯誤を削減するなど、高効率な材料研究をおこなえるマテリアルズインフォマティクスの活用を促進するため、材料データと関連情報を統一された形式で格納、管理、出力できる包括的な材料データベースを構築した。

データベースのツール選定と内部構造の構築において、利用者のユーザビリティや専門性などの違いを考慮することにより、約1万件におよぶ各材料分野の試験データと標準物性の格納が完了した。

これによって、マテリアルズインフォマティクスの活用上の課題であるデータクレンジングにかかる工数を低減できることに加えて、設計やCAEなどで必要となるデータの入手が容易となり、業務効率向上と開発費の削減に貢献できることが確認できた。

ABSTRACT

A comprehensive material database that enables the storage, management and export of material data and related information in a standardized format has been constructed to promote the use of materials informatics to achieve highly efficient materials research, such as the application of information science to predict physical properties in order to reduce experimental trial and error.

Usability and user differences such as expertise were taken into account when selecting the database tools and creating the internal structure. As a result, storage of around 10,000 test data and standard properties in various material fields has been completed.

It was confirmed that this enables a reduction in the work time required for data cleansing, which is an issue for use of materials informatics. It also facilitates the acquisition of data needed for design and CAE, etc., and helps to increase operations efficiency and reduce development costs.

1. まえがき

経済のグローバル化や急激な地球温暖化の進行などにより、自動車各部品の軽量化、低コスト化、高機能化などへのニーズが高まっている。自動車部品を構成する材料についても、鉄鋼材料と比べて密度の低いアルミニウムや樹脂材料へ置換するための材料や製造プロセスの開発が進められてきた⁽¹⁾⁻⁽³⁾。一般的にこのような開発過程では、組成や製造条件の異なるさまざまな試作材を合成し、試験片で基礎物性を取得する経験則的手法がとられる。しかしながら、接着剤、触媒、磁石などの機能材料やアディティブマニュファクチャリング (AM)⁽⁴⁾のような新しい製造プロセス

では、材料特性に影響する要因が多岐にわたり、その要因解析のための基礎物性の取得にかかる費用と工数が膨大となる。そこで、近年では材料科学と機械学習を融合したマテリアルズインフォマティクス (MI) によって、試験結果から材料特性を予測する手法が注目されてきている⁽⁵⁾。

MIでは、材料特性を目的変数、組成や製造条件などを説明変数とし、統計処理によってそれらの関係性を導きそれをもとに材料組成や製造プロセスの最適化をおこなう。したがってMIを活用するためには、材料特性の測定データが一定量必要となるのみならず、必要な関連情報が揃っていることや、データ形式が揃っていることが前提条件となる。しかし実際には、データ所有者の専門性、役割、スキル

¹ 本田技研工業株式会社

Table 1 Comparison table of DB software

	Requirements	DB Software		
		Software [A]	Software [B]	GRANTA MI
Input	Material name, standard name and product name can be input together	+++	+++	+++
	Attributes can be added easily, and input template is created automatically	+	++	+++
	Unit can be converted automatically	+++	+++	+++
	Links between data can be created easily	+	++	+++
Display	Display items and layout can be changed according to the purpose	+	+++	+++
	Graphs can be superimposed easily	+	+++	+++
	Graphs can be created from the results of search and statistical processing	+	++	+++
Search	Complex search including process and test conditions can be performed	+	++	+++
Export	Data can be exported in Excel, PDF, CSV format, etc.	+	+++	+++
	Works with Abaqus, LS-Dyna, FEMFAT, Nastran, Enovia, CATIA, etc.	++	+++	++
Administration	Access can be controlled by data, folder or database	+	+++	+++
	Revision and release history remains	+	+++	+++
	Easy modifications for large amounts of data	+	+	+++
	Reliability rank of data can be displayed	+	+++	+++
Cost	Reasonable purchase price and maintenance cost	+++	+	+++

などには個人差があるため、データの分布や試験条件、単位などの情報が欠落したり、材料名として商標名や略称を使用するなどの表記のばらつきが存在したりする。そのため、データ所有者が複数に渡する場合などは、所有者を特定したうえでデータを集約し、必要な関連情報が揃っているものを選別し、データの配置、単位、用語の表記などの形式をそろえたデータリストを作成し、さらに目的に沿ったデータ変換などをおこなってはじめて解析に着手できることとなる。このようなデータを収集、変換、整理するデータクレンジングに要する作業は、MIを含む機械学習にかかる工数の7割を占めるともいわれ、MIを活用する上での大きな課題となっている^{(6), (7)}。

2. 開発のねらい

MIを活用した効率的な材料開発の実現には、材料データベース(DB)へ材料試験データとともに製造条件などの付帯情報を構造的に格納し、それらを定型的に出力することによりデータクレンジングを迅速化することが必要である。さらに、材料試験データとともに設計やCAEに用いる代表的な材料特性が材料DBに一元的に格納し共有されれば、データの標準化、問い合わせ工数抑制、ノウハウの共有、業務負荷の平準化などのさまざまな業務効率の向上や開発コストの削減が期待できる。

そこで、我々は下記の2項目をねらいとした新たな材料DBの構築をおこなうこととした。

- (1) 効率的なMI活用のためのデータクレンジングの迅速化
- (2) 業務効率向上と開発コスト削減のための材料データの一管理

3. MI活用に向けた材料DB

インターネットなどで一般に公開されている材料DB^{(8), (9)}では、社内の試験データを機密保持しながら柔軟に格納することは容易ではない。また、企業内で運用されている多くの材料DBは、ヤング率や密度などの特定の材料特性がリスト化されたものであり、その他の材料特性や詳細な試験データを格納するには多額のシステム改修費が必要となる。さらに、材料DBを構築し長期的に機能させるには、利用者が求める情報が格納されていることだけではなく、ニーズの変化に応じて容易にデータを登録、修正、検索、活用ができるという利便性を考慮する必要がある。

これらを踏まえ、DB構築にプログラミング言語などの専門スキルを必要とせず、柔軟に修正が可能な市販のDBソフトウェアを使用し、利便性の高いDB構造の設計とデータの蓄積をおこなった。

3.1. DBソフトウェア選定

DBソフトウェアの選定にあたり、社内外で実績のある複数のソフトウェアについて、入力機能、表示機能、検索機能、出力機能、管理機能、利用コストなどの事前評価をおこなった。Table 1にそれらをまとめたものを示す。この結果、ソフトウェアBとANSYS社製GRANTA MIがほぼ同等の評価となったが、入力テンプレートの自動生成、複雑な条件での検索と出力、データの一括修正などが可能という特長を重視し、最終的にGRANTA MIを選定した。

Fig. 1にGRANTA MIのシステムの概要を示す。一般のWebアプリケーション同様、各ユーザおよびDB管理者は、

クライアント PC よりイントラネット経由で Microsoft IIS にログインし、GRANTA MI の中核システムである MI Sever でアクセス権の判定やデータ処理がおこなわれ、Microsoft SQL Server 内の複数の DB にアクセスする。また、管理者は利用者の担当業務や専門性の違いによって、データを閲覧、入力、出力が可能な範囲を制限することができる。

3.2. DB 構造の設計

材料分類ごとに、自動車の適用部品とそれらに求められる特性を Fig. 2 に示す。このように、金属では強度や剛性、樹脂材では耐候性や粘性、磁性材では磁気特性など、材料分野ごとに取扱うべき材料物性が異なるため、それに伴い試験方法や登録項目が多様となる。また、製造方法についても、鋳造、圧延、焼結、射出成型、AM などさまざまなものが存在し、それぞれ異なるパラメータを使用するため、

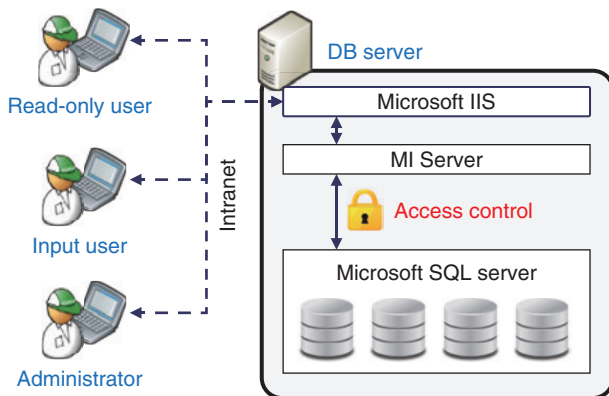


Fig. 1 System configuration of GRANTA MI

個別の DB で管理するほうが効率的である。

一方、設計業務や CAE 解析では広範囲の材料の代表特性値や判定基準値が用いられるが、それらについてもサプライヤや試験環境などが異なる大量の試験データが基になっている。例えば材料の疲労強度基準を設定する際は、想定される使用温度域の各温度で 10 本から 30 本ずつの試験がおこなわれ、さらに表面粗さ、硬さ、品質などによる強度ばらつきの影響が考慮される。そのため、代表値と実データは別に管理する必要がある。

そこで、DB 構造としては Fig. 3 に示すように、代表特性を管理する Design and simulation DB と、材料分野ごとの試験データを管理する Metal DB, Resin DB などの DB に分離する構造とした。さらに、Design and simulation DB では、代表値や保証値などの補足情報と共に物性値を管理する領域 (Design table)、CAE の目的別に特性値を管理する領域 (Simulation table)、部品別に適用材料を管理する領域 (Application table) に分け、相互にリンクする構造とした。一方、試験データを管理する各 DB では、同一の材種でも複数の製造条件で材料試験をおこなうことが想定されるため、材料名リストを管理する領域 (Material list table)、組成や製造条件などの関連情報を管理する領域 (Pedigree table)、各種試験条件とデータを管理する領域 (Test data table) を分け、相互にリンクする設計とした。

こうすることで、設計や CAE の担当者は材料の専門知識が乏しくても業務上必要な代表的な材料特性に迅速にアクセスできるほか、必要に応じてそれらの生データについてもさかのぼって確認することができる。また、材料分野ごとに異なる特殊な試験データや製造条件についても柔軟に入出力することが可能となるため、材料担当者がデータを蓄積し再利用することが容易となる。

	Metals	Polymers	Magnetics and catalysts	Chemical
Parts	 Body, cylinder block, gear, etc.	 Bumper, tire, oil, engine cover, etc.	 Rotor, stator, converter, etc.	 Door, color, seat, etc.
Material	Steel, aluminum, magnesium	Resin, rubber, oil, long life coolant	Ceramics, magnet, precious metal	Adhesive, paint, fabric
Demanded properties	Fatigue strength, elongation, rigidity, weldability, heat resistance, etc.	Environmental resistance, wear resistance, fluidity, etc.	Core loss, flux density, conversion efficiency, etc.	Adhesion strength, anti-corrosion performance, viscosity, etc.

Fig. 2 Material classification and required properties

3.3. データ入力支援機能の追加

前述した GRANTA MI は、入力項目の設定と同時に自動的に入力テンプレートが作成される特長を有するが、初期設定では入力内容への制約がない。そのため、不特定多数のユーザがデータを自由に入力した場合、材料の分類方法やデータの充実度に差が生じ、データクレンジングの負担軽減にはつながらない。例えば樹脂材料では、ベース樹脂、ISO 規格、社内規格、サプライヤのグレード名などさまざまな分類情報を正確に入力する必要がある。また、金属材料では、疲労試験の結果と共に軸方向や曲げ方向などの負荷条件を残す必要がある。しかし、これらの情報に欠落や誤記がある場合、データの修正が必要となるだけでなく、必要なデータが検索できないなどの不都合につながる。

そこで、必要なデータが正しく検索できるように、入力テンプレートへ以下に示すような入力支援機能を追加した。

- (1) 項目の説明: 項目名に対する解釈の違いを最小限とするため、項目の説明と実例を示した。
- (2) 選択リストの設定: 入力する単語表記をそろえるため、分類など記入内容が限定される項目はプルダウンメニューからの選択とした。
- (3) 画像ファイル名入力: 大量の画像の入力を効率化するため、テンプレート上の画像ファイルの名称が自動的に記入される機能を追加した。
- (4) 自動記入: ID などの管理上のルールに沿って記入されるべき項目は自動記入とした。
- (5) 内容チェック: テキスト、数値、日付などのデータ形式が正しいことや、必須項目が記入されていることをインポートの前に確認できるようにした。

Table 2 Number of records

Material categories	Databases	
	Design and simulation	Metal, resin, etc.
Metals	755	7104
Resins	304	363
Rubbers	87	495
Magnetics	121	785
Fluids	49	66
Catalysts	0	394

3.4. 材料データの一元管理

MI を活用するにはより多くの実験データが準備できることが望ましい。しかし、材料データは試作材の合成と試験片の作成を伴うため、数千、数万といった量のデータ取得は容易ではない。そこで、少ないデータ数においても特性予測が可能となるスマートマテリアルズインフォマティクス手法⁽⁵⁾を活用し、予測が可能となるデータの数を検討した。ここでは、人工データによるデータ数と予測誤差の把握および触媒、磁石、熱電材料の実データでの検証がおこなわれ、その結果、予測が有効に機能するには1件につき少なくとも数十から百データが必要と述べられている⁽⁵⁾。これを踏まえ、本DBでの蓄積データ数の目標値は自動車に用いられる主要500材種の合計として1万件と定め、体験型社内セミナーなどの入力促進活動をおこなった。その結果、Table 2に示すように2020年4月時点までの約3年間で目標数相当のレコードの登録が完了した。これは、航空機用材料DBのMMPDSの1130件、

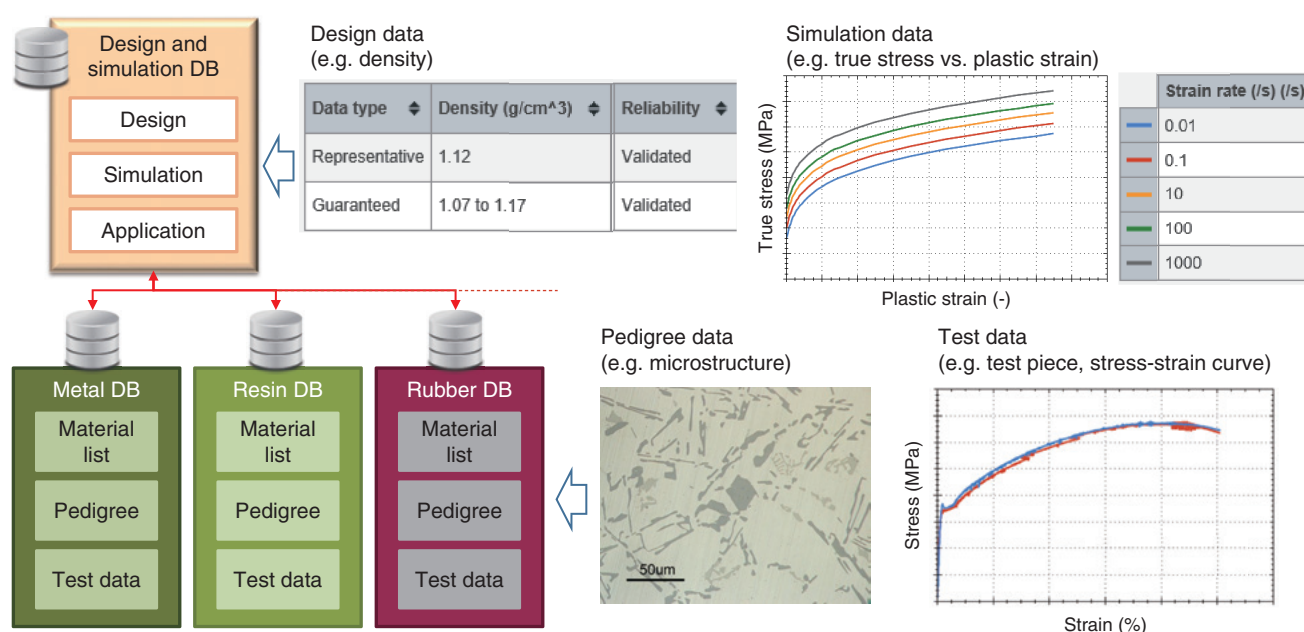


Fig. 3 Structure of database and example data

金属材料 DB の MI-21 の 6600 件に匹敵する量となっている。

4. 技術適用事例紹介

4.1. MI 活用による新規材料開発の促進

これまででは、MI を活用するためには、材料の製造条件や試験条件が明らかな試験データを収集、選別しデータ形式を揃えるといったデータクレンジングに多くの工数をかける必要があった。しかし、本 DB では蓄積された試験データを関連情報と共に統一された形式で格納および出力ができるため、データクレンジングを大幅に削減して MI を活用することが可能になる。一例として、Fig. 4 に化成材の試験データを格納および出力した結果を示す。ここでは、化成材を構成する化合物の組み合わせの情報とともに、接合強度と粘性の測定結果をリンク形式で格納し、さらに 25 通りの試験結果をリスト形式で出力している。このように、入力テンプレートに従ってデータを入力することにより、データ変換は従来同様に必要となるものの、データ収集、データ選別、形式統合にかかる時間が大幅に短縮されるため、Fig. 5 に示すようにデータクレンジングにかかる総時間を 80% 以上削減することができた。

続けて、この試験結果を MI に適用し材料特性を予測した結果を Fig. 6 に示す。ここでは、DB より出力した 25 個の試験結果より各構成要素と各材料特性の相関を求め、そ

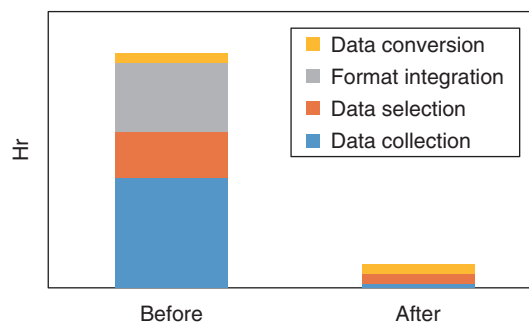


Fig. 5 Change in data cleansing time

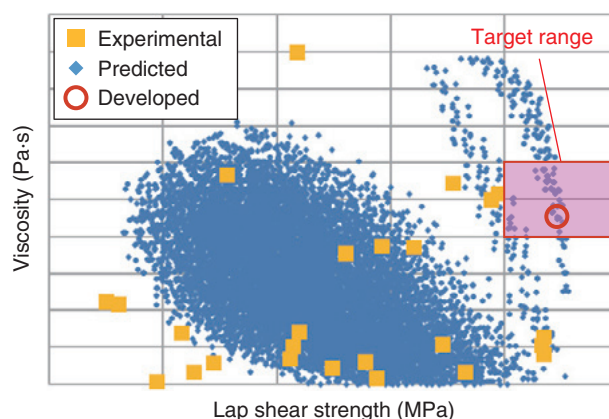


Fig. 6 Property predicted results of adhesive materials

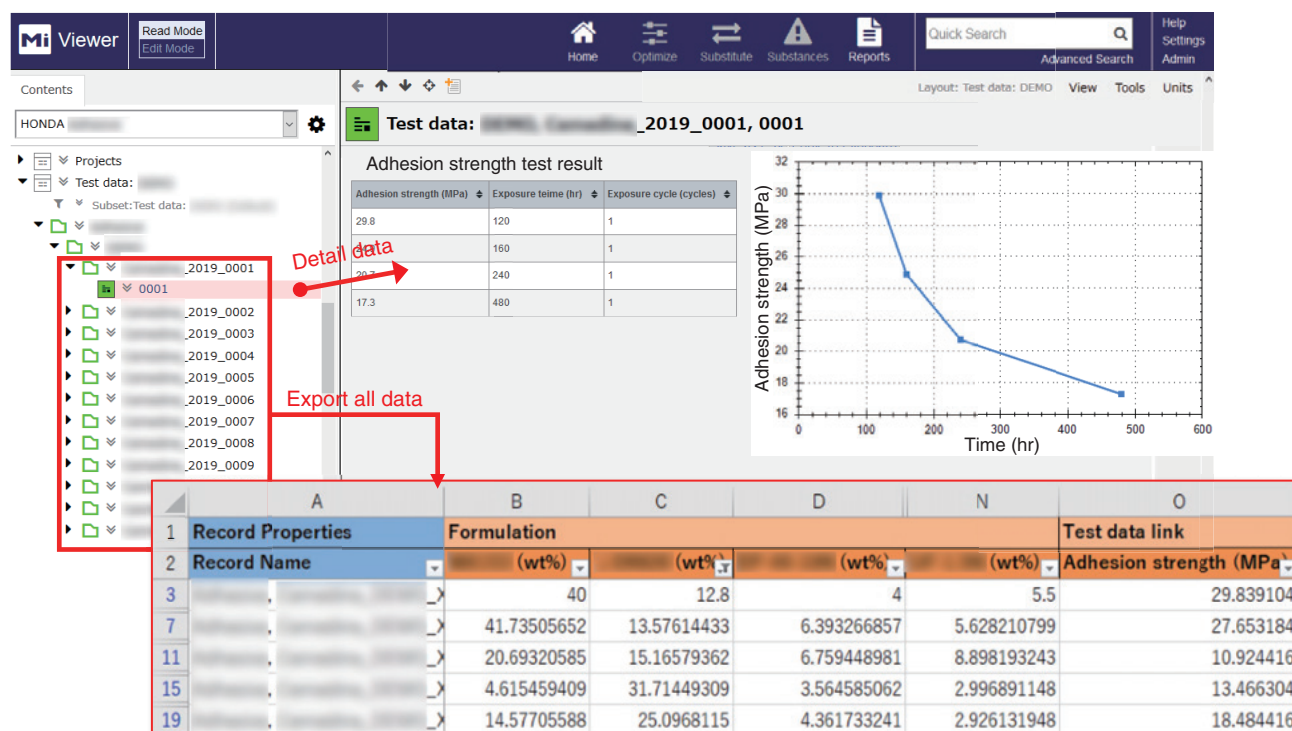


Fig. 4 List output of adhesive test data

れをもとに 40 万通りの構成要素の組み合わせにおける未知の接合強度と粘性を予測しプロットしている。この図より、自動車製造ラインで求められる粘性範囲で、高い接合強度が得られる構成要素の組み合わせを効率的に抽出することが可能となる。一例として、Fig. 6 に赤丸で示した開発材における材料特性の実測値と予測値を比較し Fig. 7 で示す。以上のように、本 DB へ蓄積したデータと MI を併用することにより、未知の材料特性を高い精度で予測でき、新規材料開発の方針が得られた。

4.2. 業務の効率化

材料担当者は、部品ごとの使用環境負荷を考慮して機能を検証することを業務の一端としておこなう。例えば、ゴム材料は使用温度と材種によって機能を維持できる寿命が変化するため、個別の部品ごとに寿命検証を実施し必要に応じて大量の材種から代替材料を検討する。この場合、従来では比較対象となる全材料の耐熱性データを収集し、Excel 上の作図によって比較をおこなう必要があったが、本 DB では Fig. 8 に示すように蓄積されたデータから各材料の耐熱特性を重ねて表示することが可能となるため、より短時間で広範囲の材料から使用環境に適した材料を検討することが可能となる。また材料特性が不明な材料であっても、過去データからおおよその特性を推定することも可能となる。一例として、Fig. 9 に電磁鋼板の 160 件の個別の磁気特性測定データから、低周波域と高周波域の鉄損の値を抽出し X-Y グラフで表現した例を示す。この図より、各特性の相関が板厚によって異なることを定量的に表現することが可能となるため、特性が測定されていない板厚の材料に関しても、より正確な推定が可能になる。

設計業務においては、材料特性から材種の選定をおこなう際に本 DB を利用することによる効率化が見込める。一例として Fig. 10 に 200 種以上登録されている鉄鋼材料データのうち、800℃ での代表特性として耐力が 80 MPa

以上かつ引張強度が 100 MPa 以上のものを抽出した結果を示す。本 DB では、このように要求特性値の範囲のほか、保証値や代表値などの付帯情報により材料を検索できるため、専門の材料担当者に問い合わせなくとも設計者自身が材料の候補を絞り込むことができる。これにより、設計者の作業効率が向上するほか、社内で標準化された物性値での設計検討が浸透し、設計品質の向上や開発の手戻り抑制につなげることが期待できる。

さらに、本 DB では CAE の目的別に材料モデルを保管しているため、例えば国内の自動車開発で使用している衝突解析向けの材料特性を海外の開発現場でも同じ用途で活用することが可能となる。これにより CAE 作業の効率化が見込める上、これまで材料モデル構築のために部門ごとに重複しておこなわれてきた材料試験の費用を削減することが可能となる。その結果、Fig. 11 に示すように材料 DB 導入にかかるライセンスやサーバー管理費用等を加算しても約 41% もの材料特性取得費用の削減になると試算することができる。

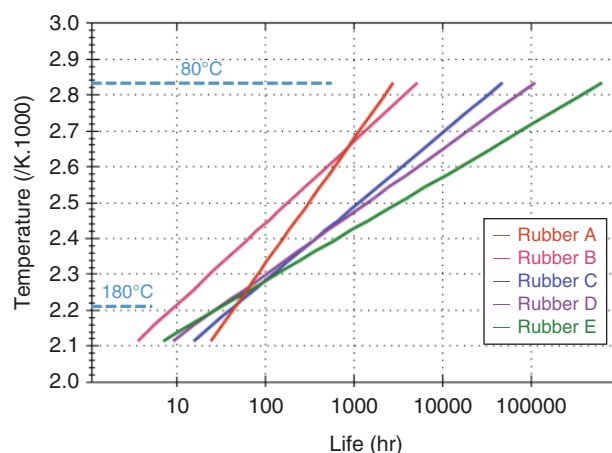


Fig. 8 Temperature and lifetime of rubber materials

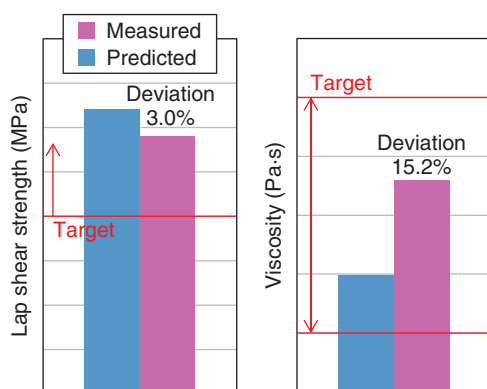


Fig. 7 Properties of developed material

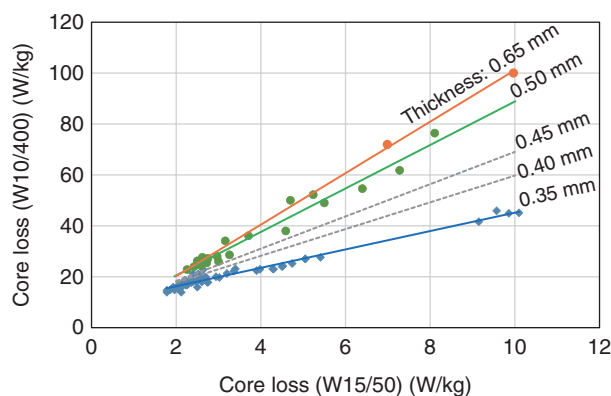


Fig. 9 Relationship of core losses by frequency of electrical steel sheet

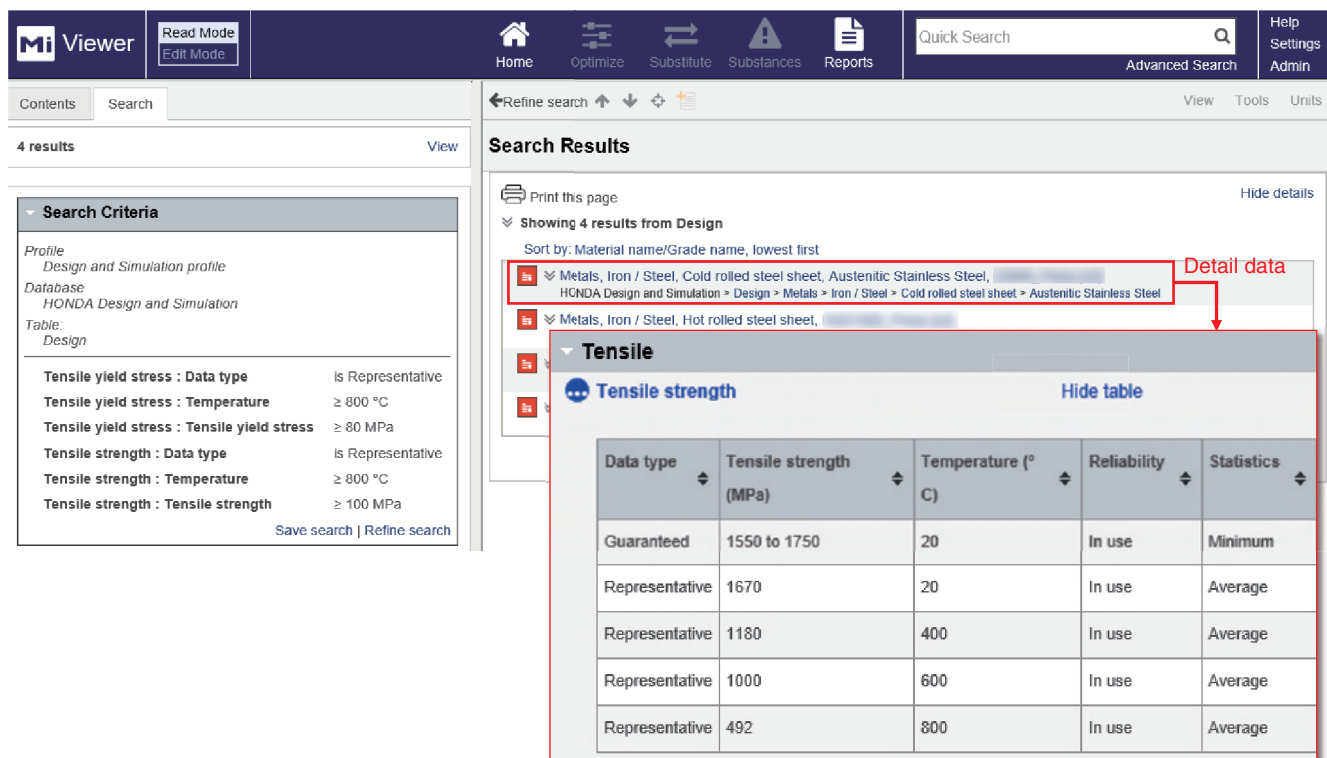


Fig. 10 Search results by material properties

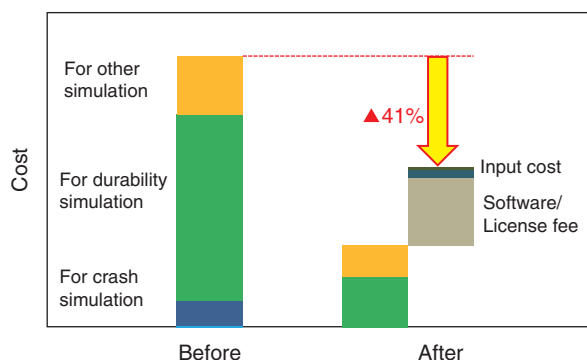


Fig. 11 Material property measurement cost for simulation model

5. まとめ

MI の活用による開発業務の効率化を目的として、社内の多様な材料データを付帯情報と共に構造的に格納、管理、出力できる材料 DB を設計構築した。これによって得られた以下のような効果について述べた。

- (1) 本 DB へ蓄積したデータと MI を併用することにより、未知の材料特性を高い精度で予測でき、新規材料開発の方針が得られた。
- (2) 材料分野ごとの試験データを関連情報と共に構造的に格納し出力することで、MI を利用する際の課題で

あったデータクレンジングにかかる工数を大幅に削減できた。

- (3) 設計や CAE に用いる標準的な材料特性を材料試験データと分けて管理する構造とすることで、各担当者自身が必要とする材料特性にアクセスできるほか、国内外の開発部門とデータを共有することで、材料モデルの構築にかかる材料特性取得費用を削減できることを示した。

参考文献

- (1) 今西智之, 朝見明彦, 実吉勇一郎: アルミニウム中空ダイカスト大型軽量サブフレーム, Honda R&D Technical Review, Vol. 29, No. 1, p. 43-48
- (2) 山根保夫, 桜庭智裕: CFRP による軽量フードおよびリアスポイラの開発, Honda R&D Technical Review, Vol. 15, No. 1, p. 209-214
- (3) 鷲頭和裕, 武石伊久雄, 佐藤直樹, 大岸秀高, 田畑勝宗: マグネシウム高圧ダイカスト製インテークマニホールドの開発, Honda R&D Technical Review, Vol. 17, No. 2, p. 32-37
- (4) 浅沼雅彦, 遠藤恒雄, 酒井仁史: アディティブマニファクチャリングを用いたスターリングエンジン熱交換器製作手法の紹介, Honda R&D Technical Review, Vol. 28, No. 1, p. 166-173

- (5) 古川敦史, 池田知廣, 岡山竜也: スマートマテリアル
ズインフォマティクスを用いた材料研究手法, Honda
R&D Technical Review, Vol. 29, No. 1, p. 84-90
- (6) <https://findy-code.io/engineer-lab/machine-learning-tough-work>
- (7) 則尾新一: トヨタ自動車九州(株)における「機械学習
の人財育成・教育」の取り組み, 品質, Vol. 49, No. 2,
p. 160-164, (2019)
- (8) Metallic Materials Properties Development and
Standardization (MMPDS), 14th Edition, Federal
Aviation Administration, p. 2535, (2019)
- (9) <https://www.totalmateria.com/>

■ 著 者 ■



伊藤 剛



石井 達子



本田 寛



杉本 直



豊岡 洋一



古沢 透流

高容量リチウムイオン電池への三次元構造電極の適用検討

3D-structured Cathode Electrode for High Capacity Lithium-ion Battery

田名網 潔¹
Kiyoshi TANAAMI
奥野 一樹⁴
Kazuki OKUNO
細江 晃久⁴
Akihisa HOSOE

磯谷 祐二²
Yuji ISOGAI
竹林 浩⁴
Hiroshi TAKEBAYASHI

青柳 真太郎³
Shintaro AOYAGI
妹尾 菊雄⁴
Kikuo SENOO

要 旨

ABSTRACT

リチウムイオン電池の性能向上を目的として、三次元構造体を電極の集電体に適用する検討をおこなった。

単位面積当たりの電極合剤塗布量である目付け量を、正極で 150 mg/cm² まで向上することが可能であることを確認した。その電極を適用した場合の体積エネルギー密度を計算した結果、集電箔電極に対し体積エネルギー密度を 10% 増加できることを明らかにした。

正極の目付け量を 90 mg/cm² と固定し、集電箔電極と三次元構造電極を比較した結果、活物質と集電体の接触面積が増加することにより、初期の抵抗値が集電箔電極に対し、17% 低減できることを確認した。また、サイクル試験における抵抗増加率が、集電箔電極では 149% に対し、三次元構造電極では構造変化が抑制されることにより、29% に抑制されていることを確認した。

三次元構造電極をリチウムイオン電池に適用することで、体積エネルギー密度の向上に加え、課題である抵抗増加と耐久性低下の抑制が両立できることを明らかにした。

A study was made of 3D structuring applied to electrode collectors for the purpose of heightening lithium-ion battery performance.

It was confirmed that loading, which is the electrolyte composite coating amount per unit area, could be increased to 150 mg/cm² on the cathode. The results from the calculation of energy density when that electrode was applied clearly showed that energy density could be increased 10% with respect to the foil-coated cathode.

The results from comparison of the foil-coated cathode and 3D-structured cathode with the cathode loading fixed at 90 mg/cm² confirmed that increasing the contact area of the active material and the collector can reduce the initial resistance by 17% with respect to the foil-coated cathode. It was also confirmed that, while the resistance increase during cycle testing was 149% for the foil-coated cathode, this amount was held to 29% for the 3D-structured cathode because of the suppression of structural change.

It was verified that application of the 3D-structured cathode in a lithium-ion battery could achieve a balance between enhancing energy density and addressing the issue of suppressing the increase in resistance and the decrease in durability.

1. まえがき

低炭素社会の実現に向け、自動車の CO₂ 排出量の削減は重要課題であり、自動車の電動化による燃費改善、電気自動車の本格的な普及が、その重要な対策である^{(1), (2)}。そ

のためには、リチウムイオン電池の体積エネルギー密度の向上が重要課題となる^{(3), (4)}。

リチウムイオン電池の内部断面は、Fig. 1 に示すように正極、負極、セパレータ、電解液で構成され、電極（正極、負極）は、活物質、導電助剤、結着剤、集電体で構成されて

¹ 先進技術研究所

² 先進技術研究所、博士（学術）

³ 先進パワーユニット・エネルギー研究所、博士（工学）

⁴ 住友電気工業株式会社

いる。体積エネルギー密度 (Wh/L) は、容量 (Ah) × 電圧 (V) ÷ 体積 (L) で算出される。電池の容量は、電極中の活物質の単位体積当たりの容量と、その充填量で決定される。

一般的なりチウムイオン電池の電極は、Fig. 2 に示す工程で製造される。Fig. 2(a) に示すように各材料を溶媒と一緒に混練し、合剤スラリーを調整する。次に、Fig. 2(b) に示すようにコーターにより金属箔の集電体表面に合剤スラリーを塗布した後、乾燥させて溶媒を蒸発させる。その後、Fig. 2(c) に示すようにロールプレスで加圧成型することで、電極が完成する。

体積エネルギー密度を向上させるために、活物質の高容量化や高電圧化への取り組みが活発であるが、耐久性や安全性の低下などの課題が存在する⁽⁵⁾⁻⁽¹⁰⁾。

一方で、活物質は変更せずに、電極の単位面積当たりの塗布量 (以下、目付け量) を増加させることで、電極の積層数が削減される。その結果、セパレータや集電体の使用量が削減でき、セル内部における活物質割合が増加することで、電池の体積エネルギー密度を向上させることが可能である。目付け量を増加させるために、集電箔の表面に合剤スラリーを大量に塗布する必要があるが、合剤スラリー量の増加に伴い、表面を平坦に維持することが容易ではなくなるため、目付け量には上限がある⁽¹¹⁾⁻⁽¹³⁾。また、目付け量

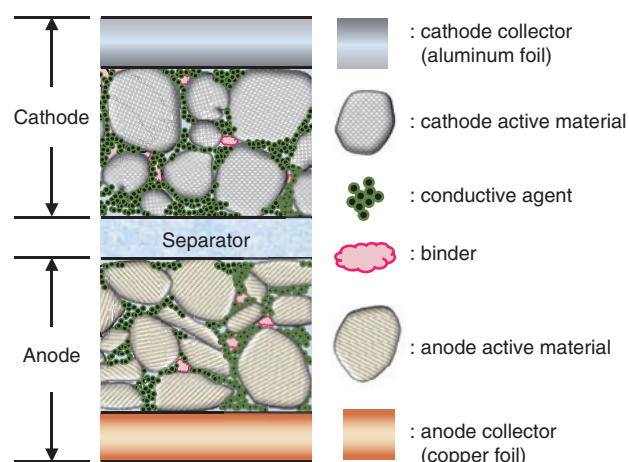


Fig. 1 Schematic section drawing of lithium-ion battery

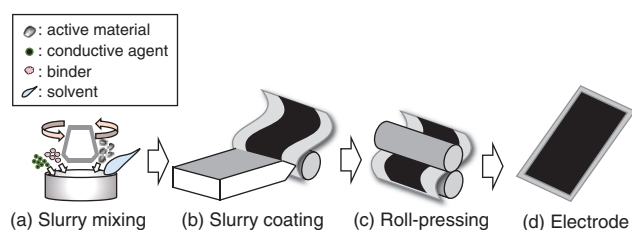


Fig. 2 Schematic view of lithium-ion battery electrode processes

の増加に伴い電極の膜厚が増加することで、電池の内部抵抗の増加や、構造劣化が生じることにより、耐久性が低下する課題がある⁽¹¹⁾⁻⁽¹³⁾。近年、電極を複合構造とすることで、目付け量を増加させる検討がされている⁽¹⁴⁾⁻⁽²⁴⁾。また、ニッケル水素電池ではニッケルの多孔体を集電体に適用することで、目付け量の向上を実現している⁽²⁵⁾⁻⁽²⁷⁾。

アルミニウムの三次元構造集電体は、500 μm 以上の厚さと共に 90% 以上の高い空隙率を有するため、その空隙へ活物質を充填することにより、目付け量が増加し体積エネルギー密度の向上が可能となる。さらに、アルミニウムの高い電子伝導性による抵抗低減、三次元骨格構造による耐久特性の向上が期待でき、体積エネルギー密度の向上における課題の対応技術と考えられる。

2. 集電体設計指針

前章で示したように、リチウムイオン電池において、セルサイズを一定とし、活物質材料を固定した条件下では、セルの体積エネルギー密度を向上させるためには、セル内部の活物質充填量を増加させることが必要である。その電極の設計指針は、電極の目付け量を向上させることである。

従来の集電箔電極は、正極においては、目付け量 90 mg/cm^2 程度までは試作可能であるとされていた⁽²³⁾⁻⁽²⁷⁾。一方で、三次元構造集電体は、Fig. 3 に示すように金属多孔体であり、その空隙に電極合剤スラリーを充填することで目電極面積当たり 150 mg/cm^2 以上の目付け量が可能であることが確認されている⁽²⁸⁾。

セルサイズを一定とし、活物質材料と電極中の活物質割合を固定し、通常集電箔を使用した電極と、三次元構造集電体を使用した電極 (三次元構造電極) で、それぞれ目付け量を変更させた場合のセルの体積エネルギー密度を計算した。計算条件を Table 1 に、計算結果を Fig. 4 に示す。Fig. 4 に示すように、今回の計算条件において、目付け量 150 mg/cm^2 で比較すると、集電箔電極のセルの体積エネルギー密度は 599 Wh/L に対し、三次元構造電極では 641 Wh/L であり、7% の増加が期待できる。また、試作可能な集電箔電極の目付け量の限界は 90 mg/cm^2 あるので、集電

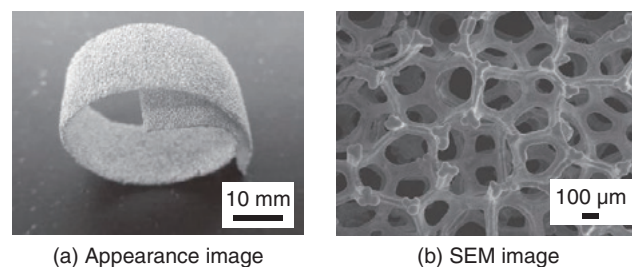


Fig. 3 Images of 3D-structured collector

Table 1 Calculation conditions of electrode

Cathode active material	$\text{LiNi}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{O}_2$
Cathode active material content	94 wt%
Cathode collector foil	Al 15 μm
Cathode 3D-structured collector porosity	97%
Anode active material	Graphite
Anode active material content	96.5 wt%
Anode 3D-structured collector porosity	97%
Element ratio	83 vol%
Anode collector foil	Cu 8 μm
Separator	15 μm
Negative/Positive ratio	1.05
Cell volume	360 mL

Table 2 List of cell components

	Cathode loading (mg/cm ²)	Cathode thickness (μm)	Number of electrodes (-)	Capacity (Ah)	Energy density (Wh/L)
Foil collector	90	250	40	57	581
3D-structured collector	150	469	24	61	641

箔電極の体積エネルギー密度の限界は 581 Wh/L となり、三次元構造電極を適用した場合 10% の体積エネルギー密度の増加が期待できることになる。そのセル構成を Table 2 に示す。電極の積層数が 40 枚から 24 枚に削減されることで、他の部材使用量が削減された結果、体積エネルギー密度が増加することがわかる。

また、Fig. 4 より三次元構造電極は正極が 90 mg/cm² 以上の目付け量で、集電箔電極の体積エネルギー密度を上回ることがわかる。

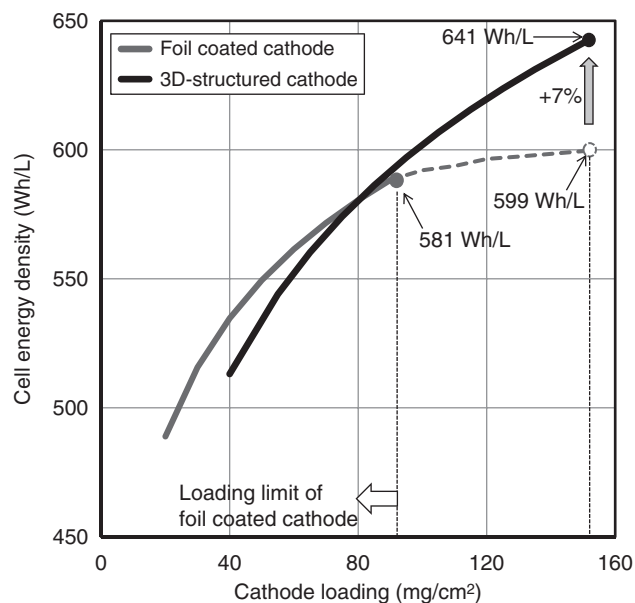


Fig. 4 Comparison between foil coated cathode and 3D-structured cathode

Fig. 5 に三次元構造集電体の空隙率を変化させた場合の、空隙率と体積エネルギー密度の関係の計算結果を示す。正極の目付け量は 90, 120, 150 mg/cm² の 3 パターンで計算した。集電箔電極の体積エネルギー密度の上限を超える空隙率は、90 mg/cm² では 97% 以上、120 mg/cm² では 93% 以上、150 mg/cm² では 89% 以上となる。

以上の結果から、集電体の設計指針は、目付け量を増加させるために、三次元構造体の空隙率を向上させ、活物質の充填量を増加させることである。具体的には、集電体の空隙率を 97% とし、目付け量 150 mg/cm² の電極を作製することで、集電箔電極適用セルに対し、体積エネルギー密度が 10% 向上することを明らかにした。

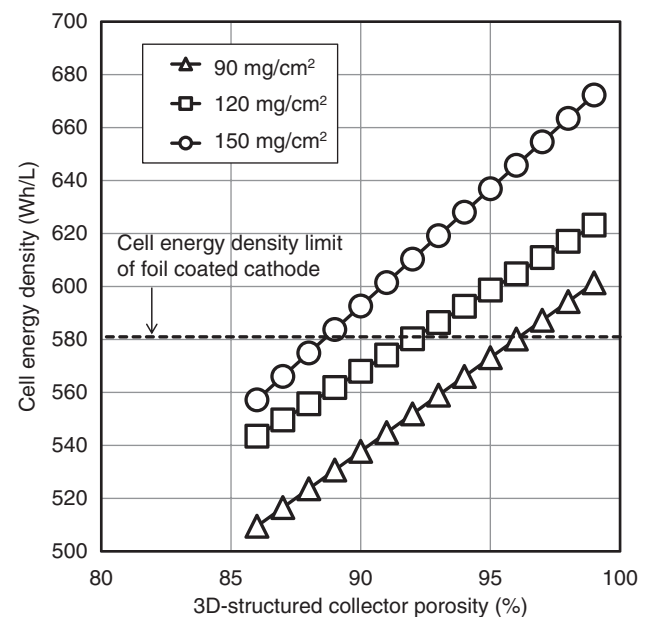


Fig. 5 Relationship between 3D-structured collector porosity and cell energy density

3. 実験方法

3.1. セル部材

3.1.1. 三次元構造集電体

正極集電体は住友電気工業株式会社製のアルミニウムのセルメットを使用した^{(28), (29)}。代表的な物性一覧を Table 3 に示す。セルメットは、Fig. 6 に示すように連続気泡を有する発泡樹脂に導電化処理をおこなった後、メッキ法によりアルミニウムを付与し、発泡樹脂を除去することで得ることができる⁽³⁰⁾。

3.1.2. 正極

活物質として三元系層状酸化物 $\text{LiNi}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{O}_2$

Table 3 Physical property values of Celmet

	Aluminum-Celmet
Porosity (%)	97
Average pore size (μm)	550
Specific surface area (m^2/m^3)	5500
Thickness (μm)	1000
Area density (g/m^3)	100

(NCM), 導電助剤としてアセチレンブラック (AB), 結着剤としてポリフッ化ビニリデン (PVDF) を使用し, 組成比を NCM/AB/PVDF = 94/4/2 wt% とした. 合剤スラリーを三次元構造集電体に充填して目付け量の適用範囲を確認した. 次に, 目付け量が $90 \text{ mg}/\text{cm}^2$ となるように充填し, 電極密度が $3.2 \text{ g}/\text{cm}^3$ になるように 120°C のロールプレスでプレスして電極を完成させた. 一方, リファレンス電極は $15 \mu\text{m}$ のアルミニウム箔に塗布し, 両面目付け量を $90 \text{ mg}/\text{cm}^2$, 電極密度を $3.2 \text{ g}/\text{cm}^3$ になるように作製した. また, 三次元構造集電体の網目構造に活物質のサイズが与える影響を確認する目的で, 活物質をそれぞれ平均粒子径 $d_{50} = 5 \mu\text{m}$, $7 \mu\text{m}$, $10 \mu\text{m}$ の 3 種類で作製した.

3.1.3. 負極

活物質として天然黒鉛 (Gr), 導電助剤として AB, 結着剤としてスチレンブタジエンゴム (SBR), 増粘剤としてカルボキシメチルセルロース (CMC) を使用し, 組成比は, Gr/AB/SBR/CMC = 96.5/1/1.5/1 wt% とした. 上記合剤を, $10 \mu\text{m}$ の銅箔に, 両面目付け量が $45 \text{ mg}/\text{cm}^2$ になるように塗布した. その後, 電極密度が $1.5 \text{ g}/\text{cm}^3$ になるように室温のロールプレスでプレスして, 電極を完成させた.

3.1.4. セパレータ

厚さ $15 \mu\text{m}$ ポリエチレン微多孔膜を使用した.

3.1.5. 電解液

溶媒は, エチレンカーボネート (EC), ジメチルカーボネート (DMC), エチルメチルカーボネート (EMC) の混合溶媒とし, 比率を EC/DMC/EMC = 30/40/30 wt% とした. 混合溶媒に支持塩の六フッ化リン酸リチウム (LiPF_6) を 1.2 モル濃度で溶解させて電解液とした.

3.1.6. 外装体

厚さ $150 \mu\text{m}$ のラミネートフィルムを使用した.

Table 4 Test cell components

Cathode active material	$\text{LiNi}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{O}_2$
Cathode active material content	94 wt%
Cathode loading	$90 \text{ mg}/\text{cm}^2$
Cathode density	$3.2 \text{ g}/\text{cm}^3$
Anode active material	Graphite
Anode active material content	96.5 wt%
Anode loading	$45 \text{ mg}/\text{cm}^2$
Anode density	$1.5 \text{ g}/\text{cm}^3$
Electrolyte	1.2 mol LiPF_6 EC/DMC/EMC = 30/40/30 wt%
Separator	$15 \mu\text{m}$
Negative/Positive ratio	1.2

3.2. セル作製方法

正極を $30 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$, 負極を $34 \text{ mm} \times 44 \text{ mm}$ になるように打ち抜いた. セパレータを $40 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ に打ち抜き, 負極, セパレータ, 正極, セパレータ, 負極となるように, 積層してエレメントを作製した. ラミネートフィルムを $88 \text{ mm} \times 220 \text{ mm}$ に打ち抜き, 二つ折りにして, その内部にエレメントを挿入し, 電解液 1 mL を注液し, 脱泡封止して, ラミネートセルを作製した. セルはそれぞれ 3 個用意し, 評価結果として, その平均値を採用した. セルの構成を Table 4 に示す.

3.3. セル評価方法

3.3.1. 定格放電試験

セルの容量を確認する目的で実施した. エージング処理として, セルを 25°C の恒温槽に設置し, 上限電圧を 4.2 V として 0.1 C で定電流 (CC) 充電し, 定電圧 (CV) 時間を 1 時間とした定電流定電圧充電 (CCCV) をおこない, 1 時間休止し, 下限電圧を 2.5 V として 0.2 C で CC 放電することを 1 サイクルとして計 5 サイクル実施した. セルの容量は, 上限電圧を 4.2 V として 0.3 C で CC 充電をおこない, CV 時間を 1 時間として充電した後, 1 時間休止し, 下限電圧を 2.5 V として, 0.3 C で CC 放電したときの容量とした. なお, C レートの定義は, 1 時間で満放電する電流値を 1 C とし, $\text{C} = \text{セルの容量 (Ah)} \div \text{満放電時間 (h)}$ で

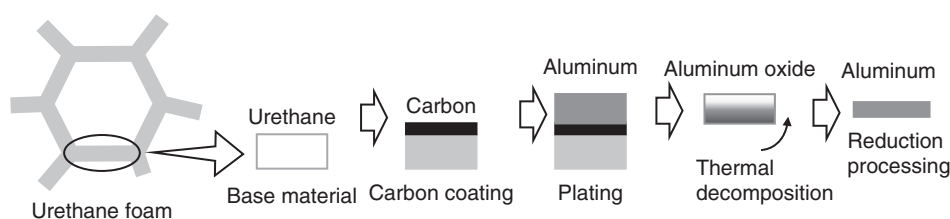


Fig. 6 Schematic processes of production method of Aluminum-Celmet

示される。つまり、セルの容量が一定の場合、0.5 C は 2 時間で満放電する電流値であり、2 C は 0.5 時間で満放電する電流値である。

3.3.2. 10 秒直流抵抗値 (10-sec DCR)

セルの内部抵抗を評価する目的で実施した。セルの充電深度 (SOC) を 50% に調整した。次に、各設定電流値で 10 秒間放電し、0.1 秒、1 秒、10 秒放電時の電圧を測定した。設定電流値は、0.3 C、0.5 C、0.75 C、1.0 C、1.5 C、2.0 C、2.5 C とした。横軸に電流値、縦軸に電圧として、各電流値に対する各時間の電圧をプロットし、その傾きを抵抗値とし、10 秒での抵抗を全体抵抗値とした。また、主たる抵抗成分を、0.1 秒時の抵抗値 (0.1-sec DCR) を電子抵抗、0.1 から 1 秒までの抵抗値 ((1-0.1)-sec DCR) を反応抵抗、1 から 10 秒までの抵抗値 ((10-1)-sec DCR) をイオン拡散抵抗とみなすこととした⁽³⁰⁾。

3.3.3. C レート放電特性

各放電電流値における、容量を評価する目的で実施した。上限電圧を 4.2 V、下限電圧を 2.5 V として、放電電流値を、それぞれ、0.3 C、0.5 C、0.75 C、1.0 C、1.5 C、2.0 C、2.5 C としたときの容量を計測した。

3.3.4. サイクル試験

セルの耐久性を評価する目的で実施した。セルを 45℃ の恒温槽に設置し、上限電圧を 4.2 V、下限電圧を 2.5 V として、放電を 0.5 C の CC 放電、充電を 0.5 C の CCCV とし CV 時間を 1 時間とし、休止時間は 1 時間として計測した。200 サイクルごとに、恒温槽を 25℃ にして 0.3 C での放電容量を確認した。600 サイクル終了時には 10-sec DCR を測定した。

3.4. 電極の分析

3.4.1. 粒子径分布解析

活物質粒子の粒子径を定量化する目的で、粒径分布測定を、Beckman Coulter 社製 LS13320 により測定した。

3.4.2. 走査型電子顕微鏡 (SEM)

電極中の活物質と集電体の接触状態を確認する目的で、クロスセクションポリッシュで断面を制作し、Carl Zeiss 社製 ULTRA55 型 SEM を用いて観察した。

3.4.3. 細孔分布測定

電極のサイクル試験前後における細孔分布の変化を定量化する目的で、Quanta Chrome 社製全自動細孔分布測定装置 Pore Master 60-GT を用いて水銀圧入法で測定した。

4. 結果と考察

4.1. 正極目付量確認

Fig. 7 に三次元構造集電体に、 $d_{50} = 7 \mu\text{m}$ の粒子径の活物質を使用した合剤スラリーを充填して、目付け量の範囲を確認した結果を示す。Fig. 7 より、膜厚と目付け量が線

形の関係であり、スラリーが 40 から 165 mg/cm^2 の範囲で安定して充填されていることがわかる。従って、目付け量 150 mg/cm^2 での電極の作製が可能であることが確認され Fig. 4 に示した体積エネルギー密度の達成が可能であることを明らかにした。

以降の試験は、集電箔電極と三次元構造電極の比較を目的として、集電箔電極の作製が可能な上限の 90 mg/cm^2 で、各電極を作製し評価した比較結果を示す。

4.2. 粒子径と電極特性

Fig. 8 に、定格放電試験における放電曲線を示す。リファレンス電極と三次元構造電極で、開回路電圧 (OCV) と放電容量が同一であることを確認し、いずれの電極でも活

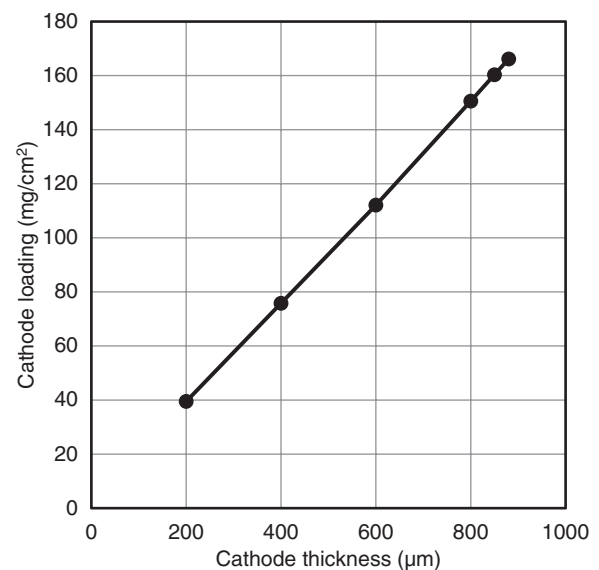


Fig. 7 3D-structured cathode loading

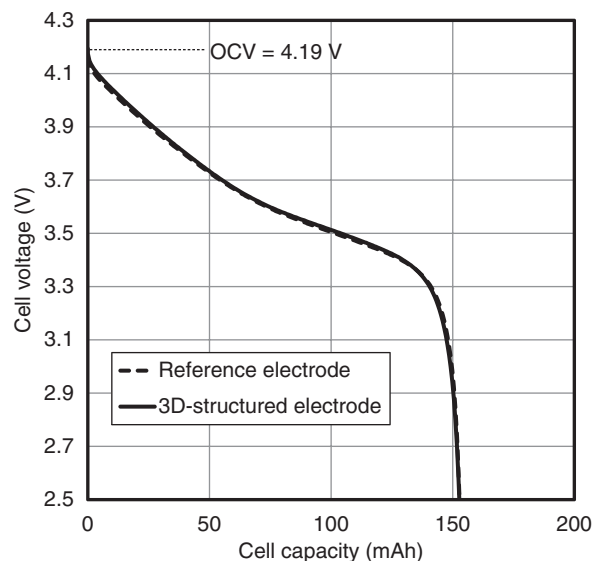


Fig. 8 Discharge curves at 0.3 C

物質が十分に機能していることを確認した。

Fig. 9 に 10-sec DCR の結果を示す。リファレンス電極に対する三次元構造電極の全体抵抗値は、(a) $d_{50} = 5 \mu\text{m}$ 、(b) $d_{50} = 7 \mu\text{m}$ で、それぞれ 17%、22% の抵抗抑制を確認し、0.1-sec DCR の寄与分はそれぞれ 19%、15% であった。したがって、三次元構造集電体の適用により、電子抵抗が抑制されることが明らかになった。一方で、(c) $d_{50} = 10 \mu\text{m}$ においては、全抵抗値において 8% の増加、0.1-sec DCR では 6% の増加を確認した。

Table 5 に各活物質粒子に対する D_{10} (頻度の体積累積が 10% になる粒子径)、 D_{50} (頻度の体積累積が 50% になる粒子径)、 D_{90} (頻度の体積累積が 90% になる粒子径) の粒子径を示す。Table 5 より、(a) と (b) は D_{90} の範囲が $8.1 \mu\text{m}$ 以下であることが確認できた。一方で、(c) は D_{90} の範囲が約 $16.1 \mu\text{m}$ 以下であることが確認され、(a) と (b) に対し、(c) は粒子径サイズに大きな差異があることがわかった。

Fig. 10 の (a) $d_{50} = 5 \mu\text{m}$ と (c) $d_{50} = 10 \mu\text{m}$ に三次元構造電極の断面を SEM で観察した結果を示す。SEM 画像より、(a) $d_{50} = 5 \mu\text{m}$ では、活物質が三次元構造集電体の網目構造の内部に侵入し、図中の実線が示すように、集電体のアルミニウムに活物質が様に接触していることが確認できる。一方で、Fig. 10 の (c) $d_{50} = 10 \mu\text{m}$ では、集電体のアルミニウム近傍に存在している活物質の一部が、図中の破線が示すように、集電体に直接接せず隙間がある状態を確認した。これは、電極合剤を三次元構造集電体に充填する際に、網目構造の奥のアルミニウム骨格が湾曲している領域に $10 \mu\text{m}$ 以上の活物質粒子が均一に侵入することが容易ではなくなるためと考えられる。アル

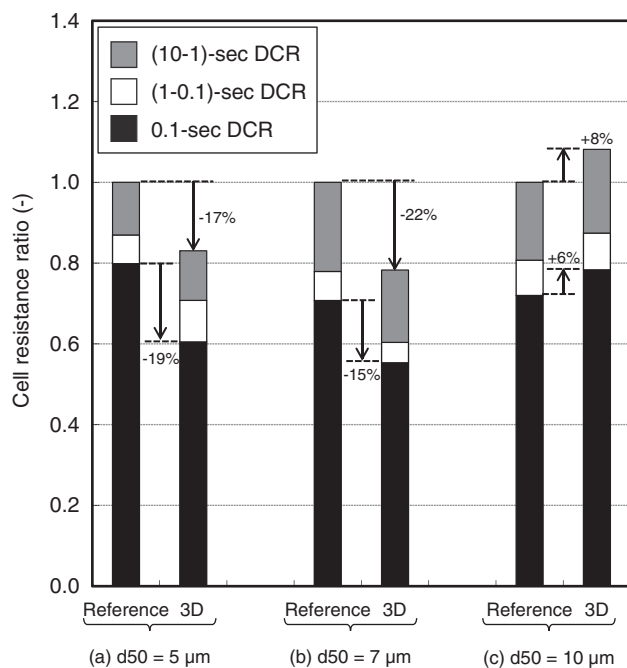


Fig. 9 Results of 10-sec DCR

Table 5 List of particle sizes

	$D_{10} (\mu\text{m})$	$D_{50} (\mu\text{m})$	$D_{90} (\mu\text{m})$
(a) $d_{50} = 5 \mu\text{m}$	2.5	5.0	7.5
(b) $d_{50} = 7 \mu\text{m}$	2.7	7.0	8.1
(c) $d_{50} = 10 \mu\text{m}$	6.1	10.1	16.9

ミニウムと接触している活物質には電子の供給が直接おこなわれるが、接触していない箇所への電子の供給は、他の活物質や助剤を介しての電子の供給となるため、抵抗が増加する。つまり、活物質の粒子径が異なることで、活物質と集電体の接触状況が変化し、集電体からの電子伝導の状態が変化することで、0.1-sec DCR の抵抗値が変化すると考えられる。

この結果から、本報告で用いた三次元構造集電体に適用する活物質は、粒子径が $d_{50} = 7 \mu\text{m}$ 以下であると、抵抗が抑制されることが明らかになった。

4.3. 電極特性

4.3.1. レート放電特性

Fig. 11 に $d_{50} = 5 \mu\text{m}$ の C レート放電特性評価における容量維持率を示す。三次元構造集電体による容量維持率の特性向上効果は、1 C 以上の領域で確認できた。2.5 C において 3% の維持率増加であった。

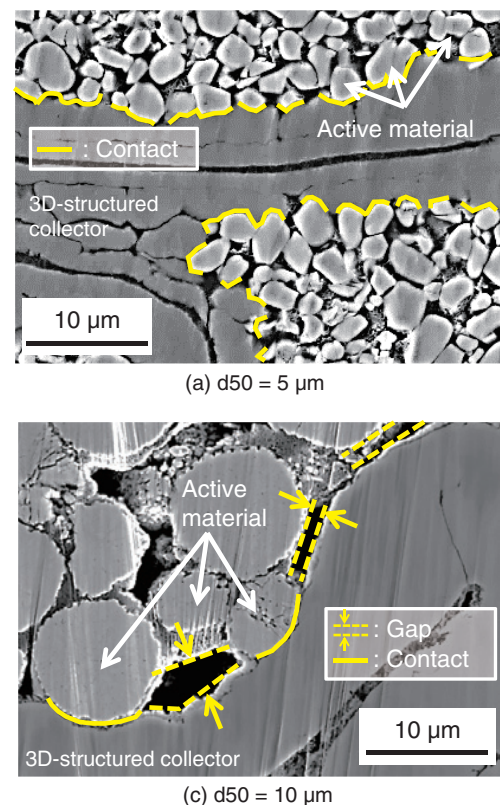


Fig. 10 Cross-section SEM images of 3D-structured cathode

Fig. 8 に 0.3 C, Fig. 12 に 2.5 C におけるリファレンス電極と三次元構造電極の放電曲線をそれぞれ示す. 0.3 C では, 放電曲線が一致しており, 二種類の電極での違いがないことが確認できた. また, 放電開始 0.1 秒後の電圧降下も両電極ともに, 20 mV 以下となっていた. これに対し, 2.5 C では, 明確な違いが確認された. 放電開始 0.1 秒後の電圧降下が, リファレンス電極で 301 mV, 三次元構造電極で 181 mV となっており, 120 mV の差が確認された. この電圧降下は IR 損失であり, Fig. 9 における電子抵抗の抑制と同様の傾向である. この差は, 三次元構造集電体の比表面積が $5500 \text{ m}^2/\text{m}^3$ であり, リファレンス電極に対し表面積が 5 倍以上に増加することで, 集電体と活物質との接触面積が増加し, 界面の電子伝導性が向上したために生じたものと考えられる. さらに, アルミニウムの骨格が, 電極全体に分布することで, 電極厚さ方向への電子伝導性を向上させていることも考えられる. 一方で, 0.1 秒以降

の放電曲線は同様の形状を示していることから, イオン拡散性は同等であることがわかる. IR 損失を抑制していることにより, 放電カットオフ電圧への到達が遅れることで, 高レート領域での容量増加につながるということがわかる. 以上より, 三次元構造電極では, 電子伝導性の向上により, 放電直後の電圧降下が抑制され, 高レート領域の容量維持率が向上することを明らかにした.

4.3.2. サイクル試験

Fig. 13 に 45°C サイクル試験における容量変化率を示す. 600 サイクルにおけるリファレンス電極の容量維持率が 77.4% であるのに対し, 三次元構造電極の容量維持率は 87.9% であり, 三次元構造電極においては容量維持率が向上していることが確認された. これは, 三次元構造を成すアルミニウムの骨格がサイクル試験中に構造を保持し, 電

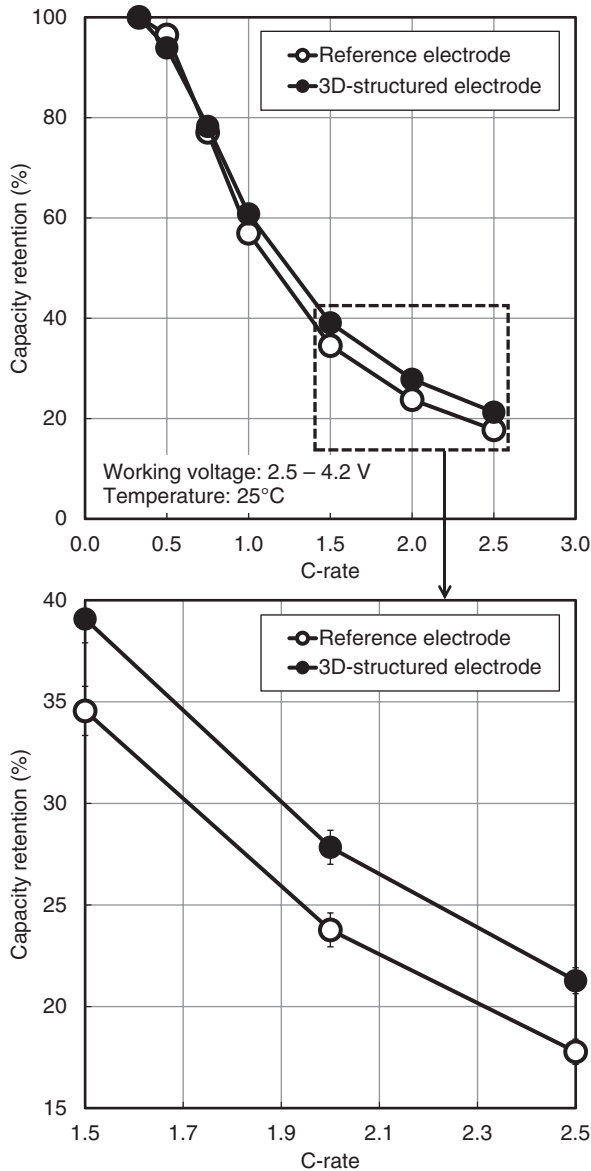


Fig. 11 Capacity retentions at different C-rate

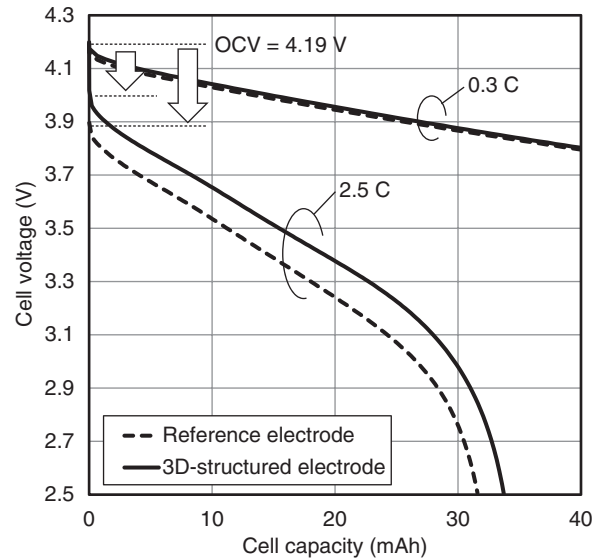


Fig. 12 Discharge curves at 2.5 C

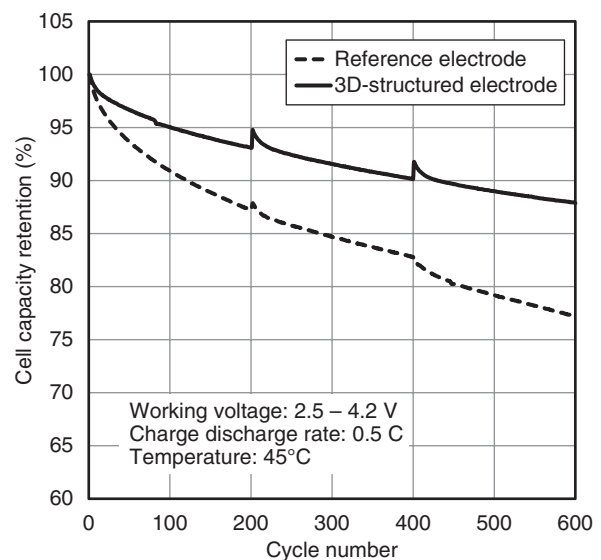


Fig. 13 Cell performances of capacity retention

極中の各構成材料の結着を維持することで、活物質が孤立することを抑止しているためと考えられる。

Fig. 14 にサイクル試験の前後における、リファレンス電極、三次元構造電極の全体抵抗値はそれぞれ 149%、29% の増加率を示し、0.1-sec DCR はそれぞれ 141%、14% の増加率であった。上記結果から、三次元構造電極においては、電子抵抗の増加が抑制されるため、全抵抗成分の増加が抑制される。一方で、リファレンスの集電箔電極では、厚膜化の影響により、集電体からの活物質の剥離や、合剤内での活物質滑落が生じるため、活物質への電子導電パスが断裂し、抵抗増加が加速すると考えられる。

また、サイクル試験の前後における (10-1)-sec DCR の増加率は、リファレンス電極で 74%、三次元構造電極では、18% であった。(10-1)-sec DCR は、イオン拡散抵抗であるので、電解液が共通である場合、電極構造に依存する抵抗成分とされる⁽³⁰⁾。本試験では、10-sec DCR 全体の中で、(10-1)-sec DCR の抵抗の占める割合は 20% 以下であるが、三次元構造電極によるサイクル試験中の抵抗増加の抑制を確認した。Fig. 15 にサイクル試験の前後における、電極の細孔分布を示す。サイクル試験の前後において、リファレンス電極の平均細孔径は 65 μm 縮小したのに対し、三次元構造電極では 15 μm の縮小に留まった。また、空隙率は、Fig. 15 から算出した結果、リファレンス電極では 15% 減少し、三次元構造電極では 12% の減少であった。これらの結果から、三次元構造電極では、アルミニウム骨格により、電極の細孔や空隙の構造変化が抑制されることで、サイクル試験の前後における、イオン伝導パスを維持することが可能となり、抵抗増加を抑制していると考えられる。

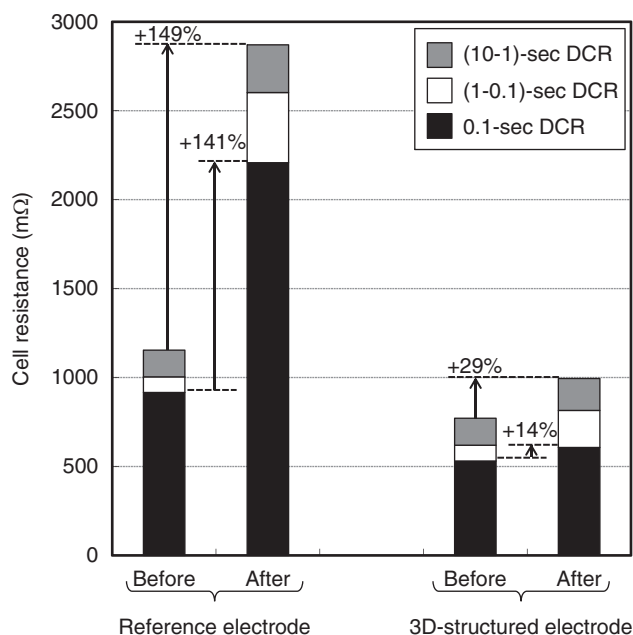


Fig. 14 Performance of cell resistance retention

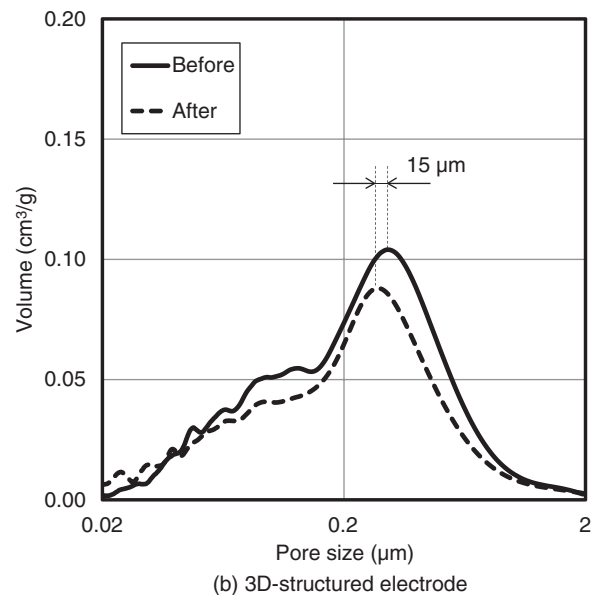
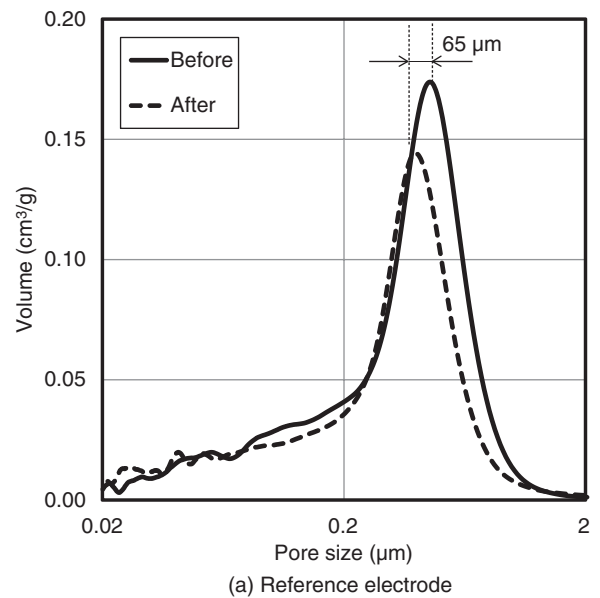


Fig. 15 Electrode pore distribution before and after cycle test

5. まとめ

アルミニウムの三次元構造集電体を、リチウムイオン電池の正極集電体に適用することで、体積エネルギー密度の向上を確認すると同時に、その課題であるセル内部抵抗増加、耐久性低下を抑制する効果を確認することを目的としてセル評価を実施した。その結果、以下の結論を得た。

体積エネルギー密度に関しては、目付け量を 150 mg/cm² とした電極が作製可能であること確認し、電極積層数削減による効果で、10% 向上する計算結果を得た。

セル内部抵抗に関しては、従来の集電箔電極に対し、抵抗低減を確認した。活物質の粒子径が d50 = 7 μm 以下であ

ると、集電箔電極に対し全体抵抗値で 17%, 0.1-sec DCR で 24% 低減され、電子抵抗低減の寄与が大きいことを確認した。この要因は、活物質と集電体の接触性が向上するためであると考えられる。

耐久性に関しては、サイクル試験において、容量維持率の向上、抵抗増加の抑制を確認した。600 サイクル後の容量維持率は、集電箔電極が 22.6% の低下に対し、三次元構造電極では 12.1% の低下に抑制されることを確認した。抵抗増加率は、全抵抗値において集電箔電極は 149% の増加に対し、三次元構造電極は 29% に抑制されることを確認した。この要因は、アルミニウムの骨格が構造を保持し、電極中の各構成材料の結着を維持することで、活物質が孤立することを抑止しているためと考えられる。

これらの結果から、三次元構造電極をリチウムイオン電池に適用することで、体積エネルギー密度の向上が可能であることに加え、課題である抵抗増加と耐久性低下の抑制が、両立できることを明らかにした。

参考文献

- (1) 山田興一: 明るく豊かな社会に向かって - 2050 年での電力、自動車部門のゼロカーボン化 -, 自動車技術, Vol. 73, No. 11, p. 4-10, (2019)
- (2) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構: 次世代自動車の分野におけるスマートコミュニティインフラと標準化のあり方に関わる検討, (2016)
- (3) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構: EV・PHV ロードマップ検討会報告書, (2016)
- (4) 吉野彰, 佐藤登: 車載用リチウムイオン電池の高安全・評価技術, シーエムシー出版, 296p., (2017)
- (5) Matsunaga, T., Komatsu, H., Shimoda, K., Minato, M., Kamiyama, T., Kobayashi, S., Kato, T., Hirayama, T., Ikuhara, Y., Arai, H., Ukyo, Y., Uchimoto, Y., Ogumi, Z.: Structural Understanding of Superior Battery Properties of Partially Ni-Doped Li_2MnO_3 as Cathode Material, The Journal of Physical Chemistry, Vol. 7, p. 2063-2067, (2016)
- (6) Tabuchi, M., Kageyama, H., Shibuya, H., Doumae, K., Yuge, R., Tamura, N.: Stepwise charging and calcination atmosphere effects for iron and nickel substituted lithium manganese oxide positive electrode material, Journal of Power Sources, Vol. 313, p. 120-127, (2016)
- (7) Yabuuchi, N., Nakayama, M., Takeuchi, M., Komaba, S., Hashimoto, Y., Mukai, T., Shiiba, H., Sato, K., Kobayashi, Y., Nakao, A., Yonemura, M., Yamanaka, K., Mitsuhashi, K., Ohta, T.: Origin of stabilization and destabilization in solid-state redox reaction of oxide ions for lithium-ion batteries, Nature Communications, vol. 7, p. 1-10, (2016)
- (8) Nakajima, M., Yabuuchi, N.: Lithium-Excess Cation-Disordered Rocksalt-Type Oxide with Nanoscale Phase Segregation $\text{Li}_{1.25}\text{Nb}_{0.25}\text{V}_{0.5}\text{O}_2$, Chemistry of Materials, Vol. 29, p. 6927-6935, (2017)
- (9) Luo, K., Roberts, M. R., Hao, R., Guerrini, N., Pickup, D. M., Liu, Y., Edstrom, K., Guo, J., Chadwick, A. V., Duda, L. C., Bruce, P. G.: Charge-compensation in 3d-transition-metal-oxide intercalation cathodes through the generation of localized electron holes on oxygen, Nature Chemistry, Vol. 8, p. 684-691, (2016)
- (10) 辰巳国昭, 岡田重人, 境哲男, 金村聖志, 渡邊正義, 菅野了次, 辰巳砂昌弘, 林晃敏, 吉武秀哉, 内本善晴, 河村純一, 駒場慎一, 藪内直明, 萩野理加, 森田昌行, 吉本信子, 坂田二郎, 作田敦, 柴部比夏里: リチウムイオン 2 次電池の革新技術と次世代 2 次電池の最新技術, 技術教育出版, 216p., (2013)
- (11) Zheng, H., Li, J., Song, X., Liu, G., Battaglia, V. S.: A comprehensive understanding of electrode thickness effects on the electrochemical performances of Lithium battery cathodes, Electrochimica Acta, Vol. 71, p. 258-265, (2012)
- (12) Singh, M., Kaiser, J., Hahn, H.: Thick Electrodes for High Energy Lithium Ion Batteries, Journal of the Electrochemical Society, Vol. 162, Issue 7, p. A1196-A1201, (2015)
- (13) Singh, M., Kaiser, J., Hahn, H.: A systematic study of thick electrodes for high energy lithium ion batteries, Journal of Electroanalytical Chemistry, Vol. 782, p. 245-249, (2016)
- (14) Orikasa, Y., Gogyo, Y., Yamashige, H., Katayama, M., Chen, K., Mori, T., Yamamoto, K., Masese, T., Inada, Y., Ohta, T., Siroma, Z., Kato, S., Kinoshita, H., Arai, H., Ogumi, Z., Uchimoto, Y.: Ionic Conduction in Lithium Ion Battery Composite Electrode Governs Cross-sectional Reaction Distribution, Scientific Reports, Vol. 6, p. 1-6, (2016)
- (15) Li, J., Gao, Y., Liang, X., Park, J.: Ultra-Thin Coating and Three-Dimensional Electrode Structures to Boosted Thick Electrode Lithium-Ion Battery Performance, Batteries & Supercaps, Vol. 2, p. 139-143, (2018)
- (16) Zhao, R., Liu, J., Gu, J.: The effects of electrode thickness on the electrochemical and thermal characteristics of lithium ion battery: Applied Energy, Vol. 139, p. 220-229, (2015)
- (17) Liu, W., Chen, Z., Guangmin, S., Yongming, L., Hye, R.,

- Liu, C., Yao, H., Bao, Z., Cui, Y.: 3D Porous Sponge-Inspired Electrode for Stretchable Lithium-Ion Batteries, Vol. 28, p. 3578-3583, (2016)
- (18) Rakebrandt, J. H., Smyrek, P., Zheng, Y., Seifert, H. J., Pfleging, W.: Laser processing of thick Li(NiMnCo)O₂ electrodes for lithium-ion batteries, Proceedings of SPIE – The international Society for Optical Engineering, Vol. 10092M, p. 100920M-100920M-7, (2017)
- (19) Chen, Y., Elangovan, A., Zeng, D., Zhang, Y., Ke, H., Li, J., Sun, Y., Cheng, H.: Vertically Aligned Carbon Nanofibers on Cu Foil as a 3D Current Collector for Reversible Li Plating/Stripping toward High-Performance Li-S Batteries: Advanced Functional Materials, p. 1906444-1906455, (2019)
- (20) Pei, F., Fu, A., Ye, W., Peng, J., Fang, X., Wang, M., Zheng, N.: Robust Lithium Metal Anodes Realized by Lithiophilic 3D Porous Current Collectors for Constructing High-Energy Lithium-Sulfur Batteries, ACS Nano, Vol. 13, p. 8337-8346, (2019)
- (21) Zhao, L., Sun, Y., Cai, L., Mitrovic, I., Taylor, S., Chalker, P., Yang, L., Zhao, C.: 3D-structured multi-walled carbon nanotubes/copper nanowires composite as a porous current collector for the enhanced silicon-based anode, Journal of Alloys and Compounds, Vol. 803, p. 505-513, (2019)
- (22) Zheng, Y., Seifert, H. J., Shi, H., Zhang, Y., Kübel, C., Pfleging, W.: 3D silicon/graphite composite electrodes for high-energy lithium-ion batteries, Electrochimica Acta, Vol. 317, p. 502-508, (2019)
- (23) Roberts, M., Huang, A. F., Johns, P., Owen, J.: Dip-spin coating of reticulated vitreous carbon with composite materials to act as an electrode for 3D microstructured lithium ion batteries, Journal of Power Sources, Vol. 224, p. 250-259, (2013)
- (24) Wang, J., Liu, P., Sherman, E., Verbrugge, M., Tataria, H.: Formulation and characterization of ultra-thick electrodes for high energy lithium-ion batteries employing tailored metal forms, Journal of Power Sources, Vol. 196, p. 8714-8718, (2011)
- (25) 本多正明: 発泡金属の技術進展とアルカリ二次電池の高性能化, まてりあ, Vol. 38, p. 470-474, (1999)
- (26) 吉永弘, 和田仁, 境哲: Ni 水素電池用高性能片状金属粉とそれを用いた電極作製技術の開発: 粉体および粉末冶金, Vol. 47, p. 61-67, (2000)
- (27) 福永浩, 岸見光浩, 松本修明, 田中俊樹, 岸本知徳, 尾崎哲也, 境哲男: 非発泡正極を用いた HEV 用ニッケル水素電池の高性能化, Electrochemistry, Vol. 74, p. 385-393, (2006)
- (28) 西村淳一, 奥野一樹, 木村弘太郎, 後藤健吾, 境田英彰, 細江晃久, 吉川竜一: 蓄電デバイスの高性能化に寄与する新しい集電体「アルミセルメット」の開発: SEI テクニカルレビュー, 第 182 号, p. 34-38, (2013)
- (29) 境田英彰, 後藤健吾, 木村弘太郎, 奥野一樹, 西村淳一, 細江晃久: 三次元連続気孔を有するアルミ多孔体 (アルミセルメット), SEI テクニカルレビュー, 第 190 号, p. 78-83, (2017)
- (30) Kisu, K., Aoyagi, S., Nagatomo, H., Iwama, E., Reid, M. T. H., Naoi, W., Naoi, K.: Internal resistance mapping preparation to optimize electrode thickness and density using symmetric cell for high-performance lithium-ion batteries and capacitors, Journal of Power Sources, Vol. 396, p. 207-212, (2018)

■ 著 者 ■



田名網 潔



磯谷 祐二



青柳真太郎



奥野 一樹



竹林 浩



妹尾 菊雄



細江 晃久

HEV モータ用マグネットワイヤ絶縁被膜の低誘電率化

Low Relative Permittivity of Magnet Wire Insulation Coating for HEV Motor

金子 遼太郎¹
Ryotaro KANEKO西山 忠夫²
Tadao NISHIYAMA梓 沢 慶 介³
Keisuke AZUSAWA

要 旨

ABSTRACT

HEV モータ用に耐熱性と絶縁性を両立させた絶縁被膜を開発した。ポリイミド樹脂に対して、独立した気泡を均一に分散させることで、温度指数が 250℃ という高い耐熱性を持ちながら、比誘電率をポリエチレンなどの低誘電率材料と同等水準の 2.4 まで下げる技術確立した。本技術により従来のマグネットワイヤに対して絶縁性を維持しながら被膜厚さを約 20% 低減することができ、導体断面積が約 6% 増加した。その結果として新開発モータの損失を従来モータ比で 5% 低減することができた。

An insulation coating that achieves a balance of heat resistance and insulating properties was developed for use in HEV motors. Technology was established that lowers the relative permittivity as low as 2.4, which is at the level of polyethylene and other such low-permittivity materials, while also having heat resistance with the high temperature index of 250°C by causing independent gas bubbles to be dispersed evenly in polyimide resin. This technology made it possible to maintain the insulating properties of conventional magnet wire while reducing the coating thickness by approximately 20% and increasing the cross-sectional area of the conductor by approximately 6%. As a result, losses in newly developed motors were successfully reduced by 5% relative to conventional motors.

1. ま え が き

近年、車両の走行中における CO₂ 排出削減や低燃費化への要求から Hybrid Electric Vehicle (HEV)、Electric Vehicle (EV) といった電動車両の普及が急速に進んできており、今後も燃費規制の強化により電動化はさらに加速される見込みである。また、適用車種についても小型車両から大型車両、ミニバンや SUV などさまざまな種類の自動車への適用が広がっている。特に小型車両へ搭載するためには、駆動用モータに対しては高トルクと高出力特性を維持しながら小型化することが求められる。しかしモータ特性向上のための電流増加やモータ体格の小型化による熱容量の低下により、モータ温度の上昇が課題となっている⁽¹⁾。発熱源であるマグネットワイヤの発熱を低減するには導体断面積拡大による通電時の抵抗低減が効果的である。モータ体格を維持しながら導体断面積を拡大するには絶縁

被膜を薄くする必要があるが、主要機能である絶縁性が低下する。被膜厚さを薄くしつつ絶縁性を維持するには、絶縁被膜における比誘電率の低減が有効となる⁽²⁾。

最も効果的に比誘電率を低減できるアプローチとしては樹脂の多孔質化が知られている。絶縁体の中で最も比誘電率の低い気体を樹脂に分散させることで、樹脂単体では得ることのできない比誘電率を達成することが可能になる。また、樹脂の多孔質化は絶縁性の向上だけでなく軽量性或吸音性、断熱性、緩衝性などさまざまな特性を向上させることもできる⁽³⁾⁻⁽⁵⁾。絶縁用途としての多孔質化の研究も多数報告⁽⁶⁾⁻⁽⁸⁾されているが、マグネットワイヤの絶縁被膜として実用化された例はない。実用化のためには、数 μm サイズの独立した気泡が被膜全体で均一に分散されていることが要求される^{(9), (10)}。

樹脂の多孔質化は物理的手法と化学的手法の二つのアプローチに大別される。物理的手法の代表例としては二酸

¹ 先進技術研究所² 本田技研工業株式会社³ 先進パワーユニット・エネルギー研究所

化炭素などの超臨界流体を用いた手法がよく知られている^{(9), (11), (12)}。しかし超臨界法は高圧環境が必要であるため、非連続生産となり生産性が低いことが課題である⁽¹³⁾。一方、化学的手法は熱膨張性の発泡剤を利用した手法が一般的であるが、形成される気泡サイズが大きくなってしまふことや隣接する気泡同士が連通孔を形成してしまふ気泡の独立性を保つことが容易ではない^{(9), (14)}。そのため、超臨界流体を用いた物理的手法と発泡剤を用いた化学的手法は絶縁被膜の多孔質化には適していない。

そこで我々は外殻を有する気泡形成材を用いた熱化学法を適用することで、多孔質化された絶縁被膜を実用化した。本技術をマグネットワイヤの絶縁被膜として適用することによって、新型モータの損失を従来比で5%低減した。本稿では、車載用駆動モータにおける絶縁被膜設計の考え方と開発モータとしての気泡被膜の最適設計およびモータ特性として評価した結果について述べる。

2. 絶縁被膜設計の考え方

車載用駆動モータには回転数を高精度に制御できるインバータが用いられているが、インバータの高速スイッチングに伴うパルス電圧の急峻な立ち上がりや、インバータの出力インピーダンスとモータの入力インピーダンスの不整合などにより、高電圧のインバータサージ電圧がマグネットワイヤに印加される。インバータサージ電圧のピーク値は通常のインバータ電圧の2倍程度⁽¹⁵⁾となることもあり (Fig. 1)、マグネットワイヤの絶縁保証が重要である。

マグネットワイヤの絶縁保証のために重要な特性の一つに部分放電開始電圧 (PDIV) がある。ワイヤ間に生じた電位差が PDIV を超えると絶縁被膜間の空間で部分放電と呼ばれる微小な放電が発生する。Fig. 2 に示すように、部分放電が発生し続けると放電の衝突エネルギーにより絶縁被膜が侵食され、最終的には絶縁破壊による短絡が起こり車両停止に至ってしまう恐れがある。そのため車載モータに

対しては気圧が低くなる高地や高温などの厳しい環境下においても、部分放電が発生しないように絶縁被膜を設計する必要がある。

その設計指針としては式 (1) に示す Dakin の式が広く知られており、PDIV は被膜厚さと比誘電率の関数となる。PDIV 向上には式 (1) に示すように、被膜の厚膜化もしくは比誘電率の低減が有効であるが、厚膜化はスロット内の導体占積率を低下させモータ容積効率の低下につながる。そのため、HEV や EV などの電動車両駆動に求められる小型かつ高効率なモータ用のマグネットワイヤでは、絶縁被膜における比誘電率の低減が重要である。

$$PDIV = A \times (2 \times t / \varepsilon_r)^{0.46} \quad (1)$$

A : Constant

ε_r : Relative permittivity

t : Thickness of coating

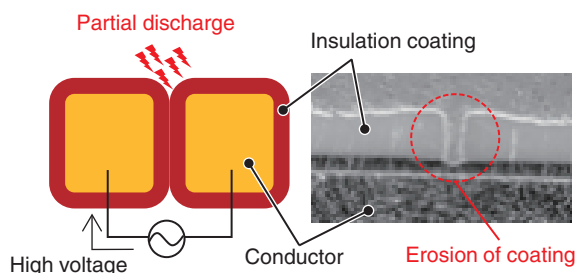


Fig. 2 Partial discharge of magnet wire and example of erosion of insulation coating

3. 絶縁被膜の低誘電率化

3.1. 低誘電率化の課題

Fig. 3 に主な絶縁樹脂の温度指数と比誘電率の関係を示す。温度指数とはマグネットワイヤ用絶縁被膜の耐熱性の指標の一つである⁽¹⁶⁾。HEV などの駆動用モータの有機部材には耐熱性や耐油性、耐薬品性などのさまざまな特性が求められる。そのため、駆動用モータにおけるマグネットワイヤの絶縁被膜にはポリアミドイミド (PAI)、ポリエーテルエーテルケトン (PEEK) やポリイミド (PI) などのスーパーエンジニアリングプラスチックに分類される絶縁樹脂がよく用いられている。しかしそれらの比誘電率は 3.1 以上であり、ポリエチレン (PE) やポリテトラフルオロエチレン (PTFE) のような比誘電率の低い材料より 30% 以上も高く、絶縁特性が低いという課題がある。一方、PE やポリプロピレン (PP) は絶縁樹脂の中で 2.2-2.3 の低い比誘電率を示すが耐熱性が低く、登坂時や高速走行時などで高温環境下となる車載用駆動モータには不向きである。ま

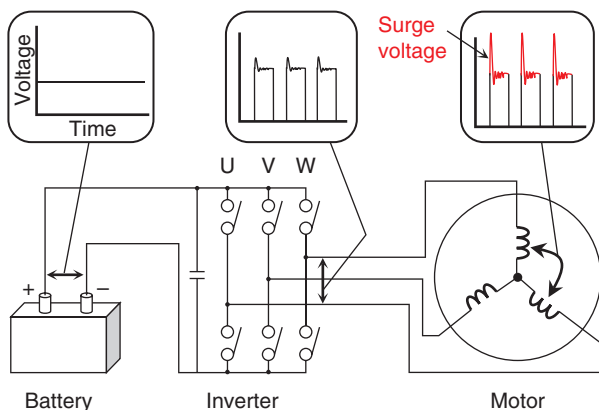


Fig. 1 Schematic diagram of inverter surge voltage

た PTFE などのフッ素樹脂は密着性や機械特性が低いため、導体との密着性や耐加工性が要求されるマグネットワイヤには適さない。

そこで耐熱性や密着性などのマグネットワイヤの絶縁被膜として必要な特性を満足しつつ比誘電率の低い絶縁被膜の開発を検討した。比誘電率の低い絶縁被膜を開発する上でベースとする樹脂には Fig. 3 に示すように、高い耐熱性を有し比較的比誘電率の低い PI を選択した。PI の比誘電率を下げる手法はいくつか報告⁽¹⁷⁾されており、式 (2) に示す Clausius-Mossotti の式に従い、イミド基濃度を下げるとしくはかさ高い構造にするとといった化学構造設計はその一つである。しかし、いずれの手法も比誘電率は 2.7 程度までは下げられるものの PI の長所である耐熱性が下がってしまうことが報告されている⁽¹⁷⁾。またフッ素変性による比誘電率の低減も報告⁽¹⁷⁾されているが、前述同様に特性が背反し、特に密着性の低下が課題となるため、マグネットワイヤの絶縁被膜への量産適用は容易ではない。

$$\varepsilon_r = \frac{1+2(P_m/V_m)}{1-(P_m/V_m)} \quad (2)$$

P_m : Molar polarizability

V_m : Molar space occupied volume

3.2. 気泡分散による樹脂の低誘電率化

樹脂単体ではマグネットワイヤに必要とされる特性を満足しながら比誘電率を低減することは容易ではないため、絶縁体の中で最も比誘電率の低い気体に着目した。PI 樹脂内に気泡を形成させ、比誘電率を下げる手法はこれまでに多数報告^{(6), (8), (17), (18)}されているが、駆動用モータの絶縁被膜として実用化された例はない。Fig. 4 に今回試みた気泡分散による樹脂の比誘電率の低減手法をマグネットワイヤの絶縁被膜への適用観点で整理した。

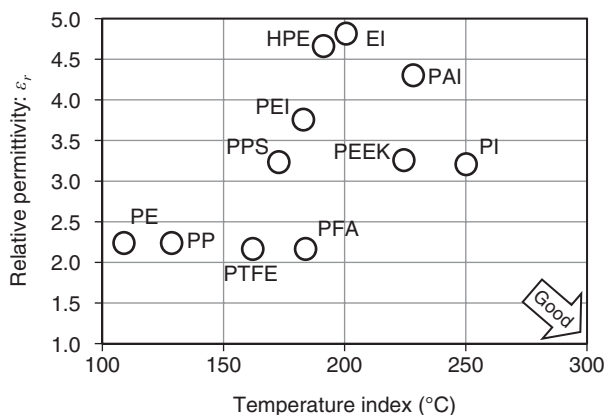


Fig. 3 Relationship between temperature index and relative permittivity of main insulating resins

超臨界法は高圧環境が必要な製法であるため、バッチ炉での製造が必要となり大量生産には向かない。また中空粒子を用いた気泡形成は従来のマグネットワイヤのプロセスに適用可能であるが、被膜形成の原料となるワニスの主成分で PI の前駆体であるポリアミク酸との密度差が大きいため分離しやすく、ワニスの保管安定性に課題がある。また一般的な熱化学法による気泡形成では、気泡化する際に隣接する気泡とつながり連通孔となるため、モータの冷却に用いるオイルの染み込みや絶縁破壊電圧 (BDV) の低下の懸案がある。そこで我々は一般的な熱化学法の課題である連通孔を解決するために、外殻を有する気泡形成材を用いた熱化学法により気泡を独立させることを検討した。

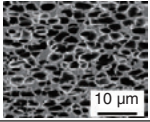
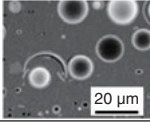
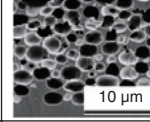
Item	Supercritical method	Hollow material method	Thermochemical method
SEM image			
Gas bubble size	1 - 5 μm (Large variation)	15 μm - (Large size)	3 μm (Controllable)
Gas bubble connection	Connected	Not connected	Connected
Varnish stability	Stable	Not stable	Stable
Continuous productivity	Not acceptable	Acceptable	Acceptable

Fig. 4 Methods and characteristics of gas bubble dispersion for insulation coating

4. 気泡被膜の最適設計

車載駆動モータのマグネットワイヤの絶縁被膜として量産適用するために重要な設計要素である気泡率、気泡径および気泡の均一分散性について以下で述べる。

4.1. 気泡率

絶縁被膜全体に対する気泡の体積比率 (気泡率) と比誘電率の理論式として、式 (3) の A. S. Windeler の式がよく用いられる。

$$\frac{\varepsilon_i - \varepsilon_r}{\varepsilon_i - \varepsilon_a} = \frac{F}{100} \cdot \frac{3\varepsilon_r}{2\varepsilon_r + \varepsilon_a} \quad (3)$$

ε_i : Relative permittivity of resin

ε_r : Relative permittivity of entire insulation coating

ε_a : Relative permittivity of gas (=1.0)

F : Porosity (%)

Fig. 5 に気泡被膜の気泡率と比誘電率の関係を示す。ねらい通り気泡率が上がるほど比誘電率が下がっており、理論式とほぼ一致していることを確認した。開発モータの損失低減目標値から導体断面積および被膜厚さの目標値を定め、必要絶縁性も考慮して比誘電率の目標値を 2.7 以下と定めた。比誘電率 2.7 以下を達成する気泡率は理論式から 15% 以上となる。

気泡率が上がるほど絶縁性には有利な一方、耐加工性が低下することが課題となる。Fig. 6 に気泡率 30%、気泡径 3 μm の PI 気泡被膜モデルに対して引張応力を与えたときに PI に発生する応力分布のシミュレーション結果の一例を示す。気泡近傍の PI に応力集中が見られ、不均一な応力分布になっていることがわかる。気泡率が上がるほどこの応力集中は顕著となり、これが被膜伸び低下の原因となる。

Fig. 7 に気泡被膜の適用を検討した開発モータのステータコンポーネント中のマグネットワイヤの加工形状を示す。開発モータは小型、高効率のために 4 本の平角マグネットワイヤを U 字形状に成形したユニットコイルを密に重ね合わせてステータコア内に一括挿入し、接合により導

体を結線する組立て方式⁽¹⁹⁾を採用している。そのため、U 字形状に成形する際に気泡被膜に対して大きな引張変形が生じる。その最大引張伸びは 45% 程度にもなる。

これらを考慮して、気泡率を変えたサンプルの引張試験をおこない、気泡率と被膜伸びの相関を検証した。Fig. 8 に今回の実験で得られた被膜の気泡率と破断伸びの関係を示す。シミュレーションどおり気泡率が上がるほど破断伸びは低下し、反比例の関係にあることがわかった。この結果から、マグネットワイヤの成形で発生する最大伸び 45% で破断しない気泡率は 33% 以下であることがわかった。

4.2. 気泡径

気泡内での放電と被膜厚さのばらつき精度の観点から最適な気泡径を検討した。放電と空間ギャップの関係を示す式 (4) として Paschen の式が広く用いられている⁽²⁰⁾。Fig. 9 に式 (4) における圧力を大気圧下 (1013 hPa) としたときに得られる火花放電電圧と電極間距離の関係を示す。グラフからわかるように 22 μm を最小値にして電極間距離がそれより小さくなると火花放電電圧は高くなり、8 μm 辺

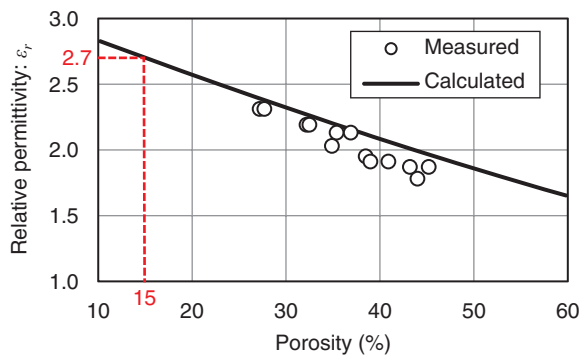


Fig. 5 Relationship between relative permittivity and porosity of PI

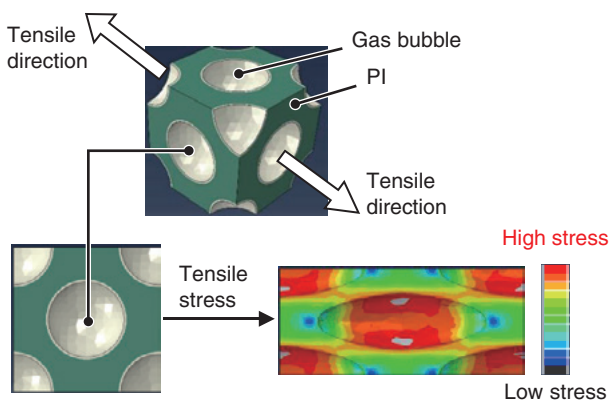


Fig. 6 Simulation results of elongation and stress distribution of bubble film

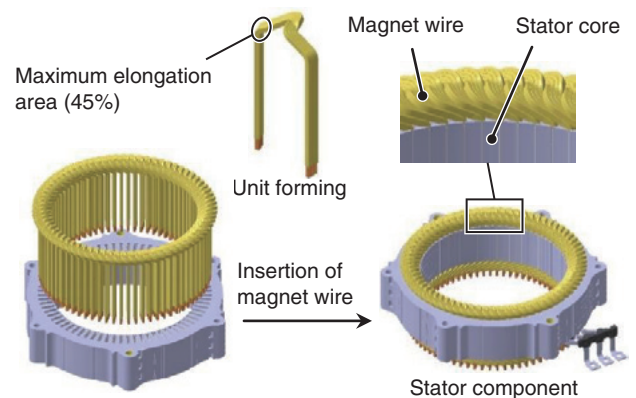


Fig. 7 Shape of magnet wire in stator component

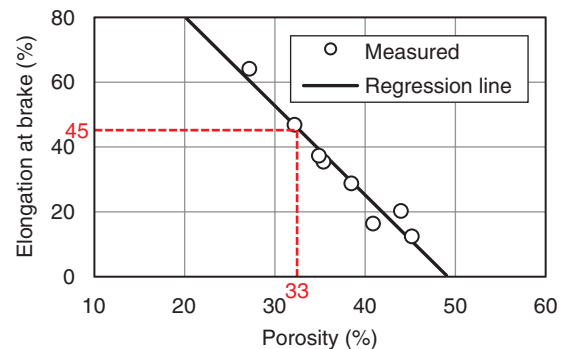


Fig. 8 Relationship between elongation of insulation coating and porosity of PI

りから急激に高くなる。これは 8 μm 以下の電極間距離では数千 V 程度の高電圧下においても放電が発生しないことを意味する。

$$V_s = \frac{B(Pd)}{\log(Pd) + C} \quad (4)$$

V_s : Spark discharge voltage (V)

P : Barometric pressure (hPa)

D : Electrode distance (μm)

B, C : Constant (Air: $B=94.5, C=0.095$)

Fig. 10 に放電発生エリア (a) と電極間距離 8 μm 以下 (b) での放電発生有無のメカニズムイメージを示す。Fig. 10(a) のように放電は電極間に生じた電位差により発生した電界によって空間に存在する初期電子が加速され、酸素などの空気中の分子に衝突し電子をはじき出す。この現象が連続的に起こることで、放電が成長する。しかし Fig. 10 (b) のように電極間距離が小さい場合、初期電子が加速するのに十分な距離が確保されないため、分子への衝突により電子の放出が起こるエネルギーに達さず放電が起きない。Yanaze らは気泡径と気泡内での部分放電の関係を検証し、

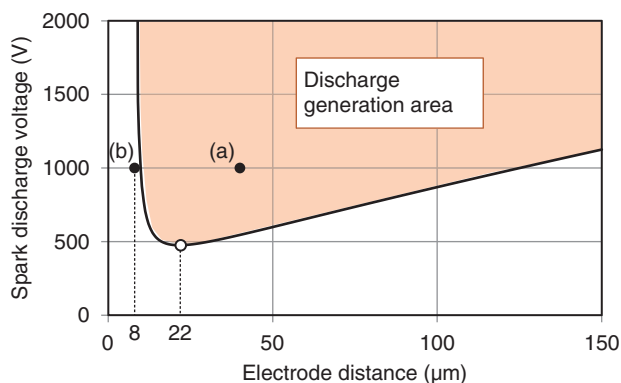


Fig. 9 Relationship between spark discharge voltage and electrode distance

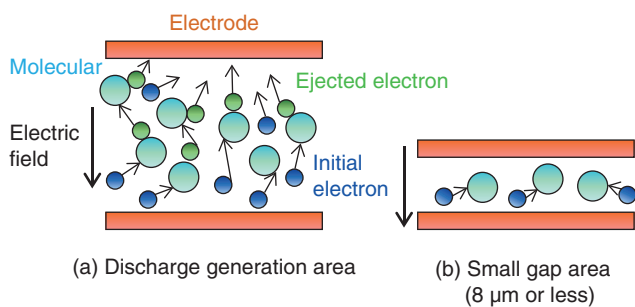


Fig. 10 Schematic diagram of discharge generation mechanism

34 μm の気泡径では部分放電が発生するが、5 μm および 11 μm の気泡径では気泡内で放電が起きないことを実証報告⁽²¹⁾しており、式 (4) の考え方を支持する結果であった。以上のことから絶縁被膜中の気泡径が 8 μm 程度以下であれば気泡内で放電が起こることはなく、比誘電率を低減することができると考えた。

また、絶縁被膜の塗装は一般的に生産性の観点から導体上に数 μm オーダの厚さで塗装し、それを規定の回数繰り返すことで所定の膜厚を得る。そのため、1 回当たりの塗布膜厚に対して気泡形成材の径が大きい場合、表面性状が粗くなり膜厚のばらつきが大きくなる。そのため膜厚を均一化するために、気泡径となる気泡形成材の径のオーダは数 μm となるようにした。

4.3. 気泡の均一分散性

開発モータでは台当たり全長数百メートルのマグネットワイヤを使用している。被膜内の気泡が密集してしまうと成形時に被膜割れが発生し、逆に気泡が少ないエリアではある条件下において部分放電が発生する可能性がある。そのため、気泡が被膜内に均一分散されていることが求められる。Fig. 11 に被膜の焼付け工程と気泡被膜の形成プロセスを示す。まず気泡の元となる気泡形成材が配合された PI ワニスが導体にコーティングされ、次に焼付け炉内で PI ワニスの硬化と気泡形成材における内部成分の熱による気化が進行し、最終的には硬化が完了した PI と気泡形成材の外殻が残ることで気泡被膜が形成される。そのため、PI ワニス内の気泡形成材の分散性が被膜内の気泡の均一分散性を左右する。

Fig. 12 に気泡形成材の分散度合いが異なる 3 種類の PI ワニスの概念図と粒度分布およびそれらを用いて試作した気泡被膜の表面外観写真と断面 SEM 像を示す。A, B,

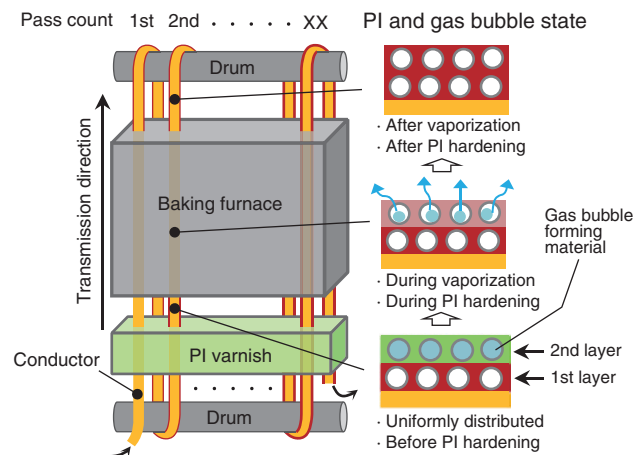


Fig. 11 Schematic diagram of developed magnet wire coating process and gas bubble formation

Cの順で分散度合いが高くなり、Cは気泡形成材が均一に分散されている状態である。Aのワニスには粒度分布から気泡形成材の凝集が観測され、でき上がった気泡被膜の表面はそれに由来して表面が粗く、断面からも気泡が凝集していることを確認した。Bのワニスでは粒度分布から2次および3次凝集に由来するピークが観測され、Aよりは改善されているものの形成された被膜は表面外観および断面SEMから部分的な凝集が観察された。Cのワニスには粒度分布から気泡形成材の径と一致するピークが観測され、単分散であることが確認された。そして、でき上がりの被膜表面も滑らかな外観であり、断面SEM像からも気泡が均一に分散されていることを確認した。以上より、PIワニス内の気泡形成材の分散性をコントロールすることで気泡が均一に分散された絶縁被膜が得られることがわかった。

Fig. 13 に最適設計の結果得られた開発品のイメージ図および断面SEM像を示す。外殻があることで近傍の気孔と連通することなく、数 μm サイズの独立した気泡が均一に分散していることがわかる。外殻はマグネットワイヤの加工時に生じる伸びを考慮して、伸びのある材料組成としている。

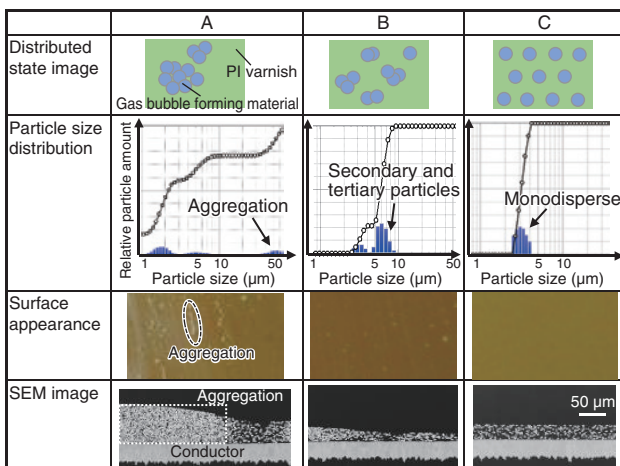


Fig. 12 Comparison of three types of PI varnishes with different degrees of dispersion

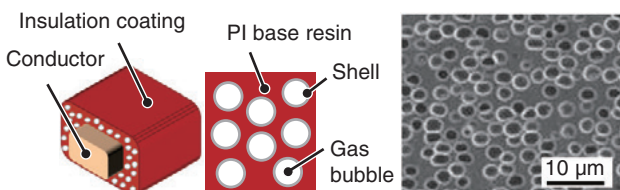


Fig. 13 Schematic diagram and cross section SEM image of newly developed insulation coating

5. 開発品の特性およびモータ損失低減効果

5.1. 気泡被膜の絶縁性と耐熱性

Fig. 14 に従来品⁽¹⁹⁾および開発品の比誘電率と温度指数の位置づけを示す。PIに独立した気泡を均一分散させることで、PIの高い耐熱性を維持しつつ、比誘電率を2.4まで下げることができ、耐熱性と絶縁性を両立したこれまでにない領域の絶縁被膜を開発することができた。

5.2. モータ損失低減効果

Fig. 15 に今回開発したモータの損失低減効果を示す。従来技術モータ⁽¹⁹⁾に対してマグネットワイヤの膜厚を約20%低減し、導体断面積を約6%増加させることができ、5%の損失低減効果を確認した。その他に磁気回路の最適化によるトルク増加分の電流低減や低損失制御などの技術を合わせて採用することで、モータ全体の損失はトータル14%低減させることができた。

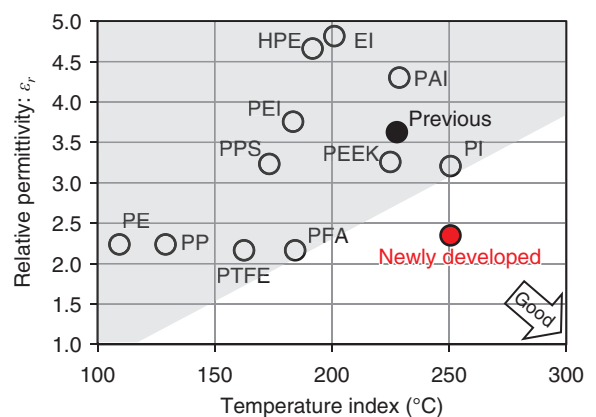


Fig. 14 Positioning of relative permittivity and temperature index of developed insulation coating

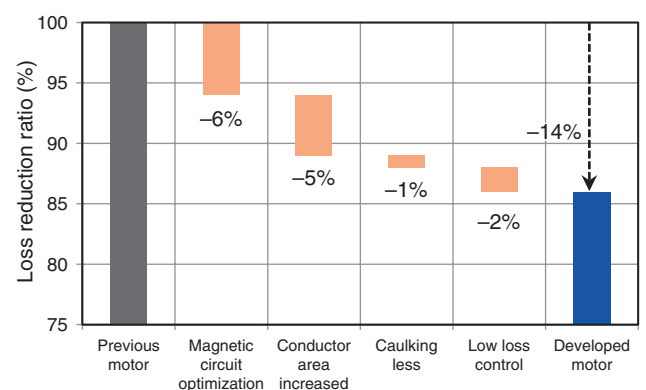


Fig. 15 Loss reduction effect of developed motor

6. まとめ

- (1) マグネットワイヤの絶縁被膜に気泡被膜を適用するに当たり、外殻を有した気泡形成材を用いた熱化学法を用いることで、数 μm サイズの独立気泡が均一に分散された気泡被膜を得ることができた。
- (2) この気泡被膜を新型モータのマグネットワイヤに適用することによって、モータ損失を従来比で 5% 低減した。

本技術は、マグネットワイヤの絶縁被膜としては世界で初めて実用化に成功したものであり、本技術を採用したモータは 2020 年 2 月発売の FIT e: HEV に搭載されている。

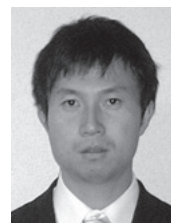
参考文献

- (1) 大上真樹, 井上雅志, 高松宏光, 鎌田太一郎, 赤井健一: ハイブリッドシステム用新構造モータの開発, 自動車技術会 2016 年春季大会学術講演会講演予稿集, No. 45-207, p. 1100-1105, (2016)
- (2) 春野健太郎, 八代亮久, 佐野新也, 滝澤敬次, 水谷竜彦: 小型ハイブリッド車用 新型モータの開発, 自動車技術会 2016 年春季大会学術講演会講演予稿集, No. 45-206, p. 1095-1099, (2016)
- (3) 伊藤彰浩: ネットワークポリマーの発泡成形における気泡構造制御, ネットワークポリマー, Vol. 35, No. 4, p. 176-186, (2014)
- (4) 吉本明史, 小林秀敏, 堀川敬太郎, 谷垣健一: ポリイミド発泡体の衝撃圧縮特性, 日本機械学会関西支部講演会講演論文集, No. 134-1, p. 3-21, (2013)
- (5) 佐々木良平, 竹盛寛, 石沢和彦, 東勝美: 多孔質吸音材を用いた吸音材の音響特性—フェルト状吸音材の航空エンジンへの適用についての考察—, 日本航空宇宙学会誌, 第 27 巻, 第 304 号, p. 250-258, (1979)
- (6) 日本ポリイミド研究会: 最新ポリイミド—基礎と応用—, 株式会社エヌ・ティー・エス, p. 270-326, (2002)
- (7) 青井信雄: 低誘電率化をめざした層間絶縁膜技術, 応用物理, 第 68 巻, 第 11 号, p. 1263-1266, (1999)
- (8) 住ベリサーチ株式会社: 第 5 章, ポリイミドの特性とその改良, 躍進するポリイミドの最新動向 V, p. 152-158, (2013)
- (9) 日本ポリイミド研究会: 最新ポリイミド—基礎と応用—, 株式会社エヌ・ティー・エス, p. 283, (2002)
- (10) 住ベリサーチ株式会社: 第 5 章, ポリイミドの特性とその改良, 躍進するポリイミドの最新動向 V, p. 153, (2013)
- (11) 西川茂雄: 超臨界 CO_2 を用いた高分子加工技術, 日本ゴム協会誌, 第 77 巻, 第 10 号, p. 343-347, (2004)
- (12) 大嶋正裕: 超臨界流体とポリマー物性, 日本ゴム協会誌, 第 77 号, 第 8 号, p. 266-271, (2004)
- (13) 市川健太郎: 第 5 章 応用展開, プラスチック発泡技術の最新動向, 株式会社シーエムシー, p. 176, (2015)
- (14) 木原伸一, 孫穎, 滝島繁樹: 第 2 章 気泡構造制御, プラスチック発泡技術の最新動向, 株式会社シーエムシー, p. 22-61, (2015)
- (15) 繰返しインパルスにおける部分放電計測調査専門委員会: 繰返しインパルスにおける部分放電計測とインバータサージ絶縁, 電気学会技術報告, 第 1218 号, p. 9, (2011)
- (16) JIS C 3216-6: 2011, 巻線試験方法
- (17) 後藤幸平: 第 9 章, 低誘電率ポリイミド, ポリイミド材料の基礎と開発, 株式会社シーエムシー出版, p. 102-105, (2011)
- (18) 株式会社東レリサーチセンター: 第 5 章, 有機高分子多孔質体の応用展開, 有機高分子多孔質体の技術動向, p. 207-210, (2009)
- (19) Inoue, M., Takamatsu, H., Ogami, M., Ninomiya, K., Ito, K., Shibata, T.: New-Structure Motor for Full Hybrid Electric Vehicle, SAE Technical Paper, 2016-01-1225, (2016)
- (20) 電気学会: 第 II 部, 第 1 章, 火花及びコロナ, 放電ハンドブック, オーム社, p. 104, (1962)
- (21) Yanaze, N., Kozako, M., Hikita, M., Tomizawa, K., Ohya, M.: Partial Discharge Inception Voltage and Breakdown Voltage of Micro Cellular Resin, 2015 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), 4B-13, p. 370-373, (2015)

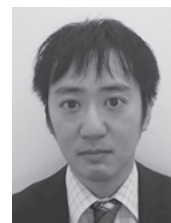
■ 著 者 ■



金子遼太郎



西山 忠 夫



梓 沢 慶 介

自由記述キーワード抽出法による 日本と米国の自動車ユーザ主観価値の分析

Analysis of Subjective Values of Car Users in Japan and U.S.
Using Free Description Keyword Method

日 下 馨¹

Kaoru KUSAKA

粥 見 哲 也¹

Tetsuya KAYUMI

神 田 稔 也¹

Toshiya KANDA

益 田 綾 子²

Ayako MASUDA

中 島 健 彰¹

Takeaki NAKAJIMA

要 旨

Honda フィロソフィの一つである「お客様の喜び」について調べるため、自動車の魅力や価値についてのキーワードを収集する調査を日本と米国で実施した。数量化Ⅲ類の手法である離散データの特異値分解を使い、得られたキーワードデータをクラスタとして可視化した。そして、それらクラスタに含まれるキーワード群を分析者が意味的に解釈することで、ユーザが感じている自動車の魅力と価値の概念構造を捉えた。そして、日本および米国の自動車ユーザとも共通して経済性や燃費性能は重要と捉えていること、日本では操縦性や安全性が重視される一方、米国では信頼性、資産価値、積載性、快適性が重視されているという、日本と米国の差異が解釈できるようになった。さらに、調査の際に収集したユーザ属性を分析することで、年齢による価値の差異や、性別による価値の嗜好も視覚化された。また、Honda と Acura のブランド認識の差が、信頼性、資産価値、プレミアム価値といった価値概念の差にあることも説明できた。

ABSTRACT

In order to investigate “Customers’ Joy,” one of Honda’s philosophies, a survey was conducted in Japan and the United States to collect keywords concerning the attractiveness and value of automobiles. The collected data was visualized as clusters of keywords by using the singular value decomposition method on discrete data, which is a quantification type III of statistical analysis. Then, through semantic interpretation of the keywords belonging to these clusters, the concept structure of the attractiveness and value of automobiles perceived by automobile users was clarified. As a result, it was noticed that both Japanese and U.S. users share common values on economy and fuel efficiency, while Japan users value handling and safety and U.S. users value reliability, asset values, loading capacity, and comfort. In addition, the differences of value by age and value preferences by gender were also visualized by analyzing user attribute data collected in the survey. The differences in brand recognition between Honda and Acura were also explained by the differences in value concepts of reliability, asset values, and premium values.

1. ま え が き

Honda 創業者は「研究所は人間の気持ちを研究するところであって、技術を研究するところではない」という言葉を遺しており、お客様に喜んでもらえる価値を研究することが商品づくりをする上で重要であると説いている。その理念は「お客様の喜び」を追求するフィロソフィとして現在にまで引き継がれている^{(1), (2)}。

自動車ユーザの価値観を調べるには一般的にはアンケート調査などを実施することが多い。ところが、アンケート

調査の設問には、質問者が得たいと思っている意図が入り込み、結果の客観性に影響を与えることが知られている^{(3), (4)}。このため、ユーザの感じる価値を研究するためには、客観性のある新しい調査手法が必要とされている。また、国や文化や経済発展のレベルによっても大きく異なる多様な価値観を、収集した客観的なデータを使って分析していく手法も必要となってくる。

近年、発達が著しい AI 技術の領域をみると、自然言語解析と数量化Ⅲ類の手法^{(5), (6)}を組み合わせ、膨大な非定量データから本質の因子を抽出する技術が発達している。

¹ 本田技研工業株式会社

² ライフクリエーションセンター

これは、キーワードや図形などの離散データ群を出現頻度などを使って数量化し、特異値分解で因子を分析して対象を理解する手法である。

そこで、本研究では、質問者の意図が入り込まないようなアンケート方式を採る。具体的には、自由記述式のアンケートで、自動車ユーザが自由に自動車の魅力や価値についてキーワードで回答できるようにして言語データを収集する。そのとき同時に、ユーザの挙げたキーワード間の結び付きの強さも設問で数量化する。

そして、取得したキーワード間の関連性に数量化Ⅲ類の手法を適用することでキーワードをクラスタリングし、ユーザが自動車に感じている魅力や価値を解明してゆく。

2. 手法

2.1. 調査方法

本研究では、2017年、Hondaの主要な市場である日本と米国でそれぞれ5,000名の自動車ユーザにWebアンケート形式の調査を実施し、回答を得た。その際、ユーザの年齢や男女比率は日本、米国のそれぞれの人口比率に近くなるようサンプリングを調整した。

調査協力者には、まず、現在最もよく使っている車の名前と、別の車を買うとしたらどんな車を選ぶかを回答してもらった。買いたい別の車については、車名、カテゴリどちらでも可とした。次に、それらの車やカテゴリを選んだ理由や気に入っている点について4語、自動車を選ぶとき何を重視するかについて6語の合計10語を、自由にキーワードを記述する形式で回答してもらった。そして、自分の挙げた車の名前とキーワード合わせて12個を一对比較して表示し、キーワード間の関連性を、強い関係がある、少し関係がある、関係は弱い、ほぼ無関係、の4段階で評価してもらった。さらに、設問以外に年齢や性別や年収などのユーザ属性も、個人を特定できないよう配慮の上で同時に収集した。また、今後普及が見込まれる電気自動車(以降、EV)の魅力についても調査できるよう、調査協力者の中にEVユーザが市場占有率に近い割合で含まれるようにした。

2.2. 分析手法

収集データは、日米でそれぞれ独立して分析した。以降、日本市場での調査を日本版、米国市場での調査を米国版と記す。

Fig. 1のように回答を得たキーワード間の関連性を表したマトリクスを5,000名分合算し分析をした。合算する際、同じキーワードが一定以上出現する頻出キーワードのみを分析対象とした。その結果、全部で日本版では410語、米国版では475語を解析対象とした。

頻出キーワードの上位10項目は、日本版では、燃

費、デザイン、色、価格、安全性、運転しやすい、軽自動車、乗り心地、内装、安全であった。米国版では、price, color, safety, comfort, style, reliable, size, gas mileage, quality, designであった。

多変量解析の中には、回帰分析に代表される目的変数をもつ手法と、目的変数をもたない手法がある。後者のうち、説明変数が非定量的なカテゴリデータの場合に用いられる数量化Ⅲ類の手法を、今回得られたキーワードデータの分析に適用した。

数量化Ⅲ類は、対応分析とも呼ばれ、カテゴリデータに主成分分析の手法を拡張し、複数の説明変数から潜在変数を見出し、その潜在変数におけるキーワードの空間配置をおこなう⁽⁷⁾。潜在変数を見つけるために、マトリクスの行成分と列成分の相関をできるだけ大きくするように係数を付ける。これを繰り返すことで独立した2軸に基づく、各キーワードの空間配置が可能になる(Fig. 2)。

得られたキーワードの空間配置はFig. 3のような極座標で表せ、以下の三つの指標で解釈することができる。

- (1) 極座標角の小ささ : キーワード間の関連性の高さ
- (2) 極からの距離 : キーワードの独立性の高さ
- (3) プロット円の大きさ: キーワードの出現頻度

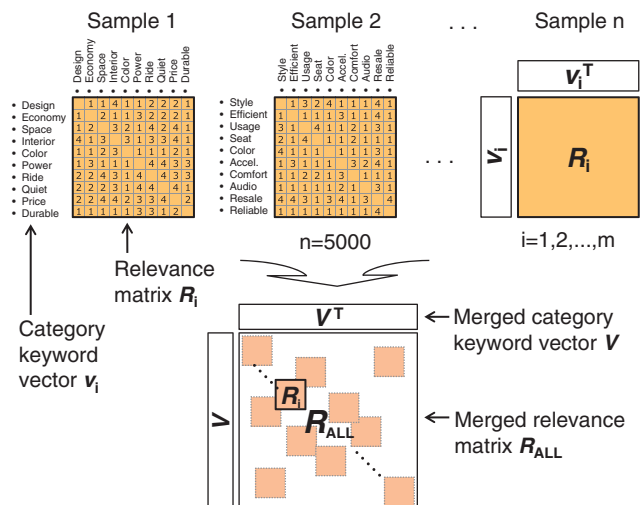


Fig. 1 Schematic image of creation of keywords and their relevance matrix from 5,000 samples

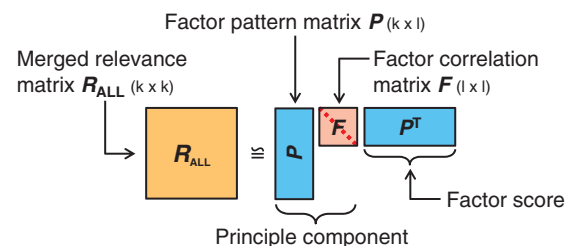


Fig. 2 Schematic image of quantification type III method and singular value decomposition on relevance matrix

空間配置をおこなうことで、クラスタ分析で標準的に使われるデンドログラムのように線が入り乱れて煩雑化することなく、キーワードの解釈が可能になった。

配置されたキーワードを解釈するために、主に極座標角ごとのクラスタをいくつか設定した。

このクラスタに含まれるキーワードを分析者が解釈することで、自動車ユーザが自動車に感じている価値の構造を解釈した。また、本手法を日本および米国のそれぞれのユーザに適用して得られた分析結果を比較し、考察をおこなった。

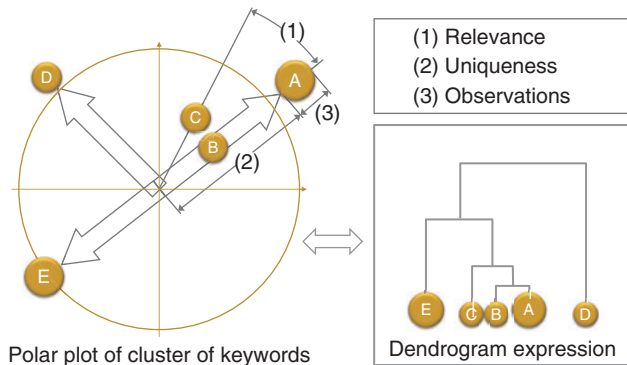


Fig. 3 Polar plot of cluster of keywords

3. クラスタ分析

3.1. 日本

Fig. 4 は、日本のユーザが回答した自動車の魅力と価値に関するキーワードをプロットしたものである。

図中左上には自動運転、左下には維持費が安い、右下には色というキーワードが、極からそれぞれの方角に最も離れてプロットされている。このような位置関係は、それらキーワードが相互に関連性が低く、独立した魅力や価値とユーザに感じられていることを意味している。

さらにそれぞれのキーワードと同じ方角に並ぶキーワードは、関連性のある魅力や価値の概念を表すキーワードであり、クラスタを形成している。外側に配置されるキーワードはそのクラスタを特徴づける独特な魅力や価値を、内側のキーワードは他キーワードとも関連性が高いより一般的な魅力や価値を表している。

また、大きい円でプロットされている燃費、デザイン、価格、色、安全性などは、多くのユーザに挙げられたキーワードであり、広く支持された魅力や価値を表している。

このようにキーワードの空間配置を読み解いてクラスタを意味的に解釈すれば自動車の魅力や価値にはどのような概念があるかを分析していくことができる。

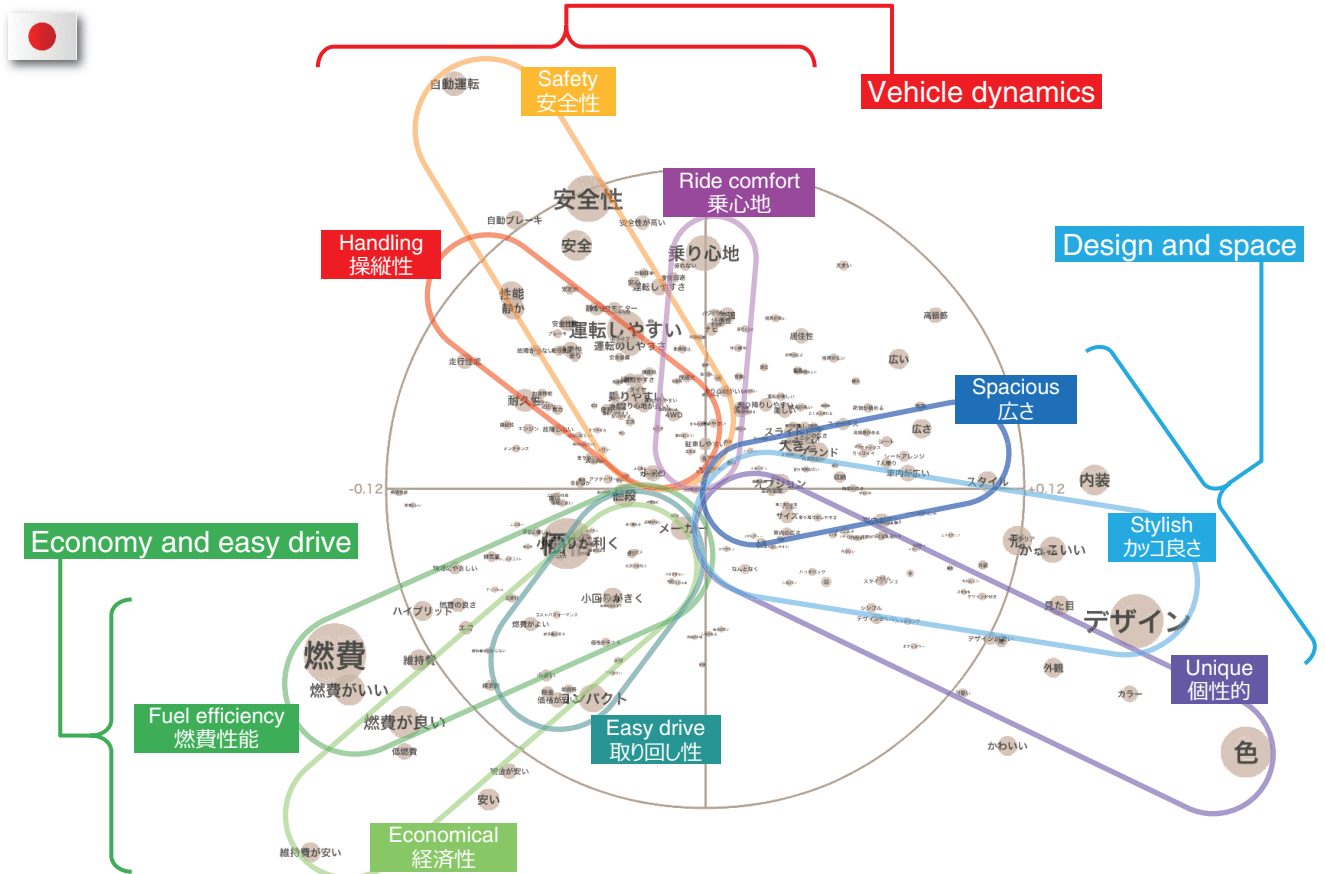


Fig. 4 Comprehensive polar plot of keywords of car values from Japanese car users

以上のような解釈の仕方を、最初に、Fig. 4 の左上方向に分布する大きなキーワードのクラスタに適用し、分析してみる。

図中、左上外側に自動運転というキーワードがプロットされている。これはこのクラスタを代表する魅力や価値のキーワードである。同じ方向には、自動ブレーキ、安全性、安全、バックモニタなどのキーワードが並んでいる。よって、このクラスタを意味的に解釈すると、自動車の安全性に関してユーザが感じている魅力や価値の概念を表していると考えられる。

安全性のクラスタの左には、性能、静か、走行性能、運転しやすい、乗りやすいなどのキーワードがやや方向を変えて並んでいる。これはユーザが自動車を操縦するときに感じる魅力や価値の概念と解釈できるので、操縦性のクラスタと名付けた。

安全性のクラスタの右には、乗り心地、疲れない、快適、快適性、ナビなどのユーザが自動車から受動的に感じるキーワードが並んでいる。これは乗心地の価値概念を表すクラスタと解釈できる。

以上を要約すると、左上の大きなクラスタは、安全性、操縦性、乗心地という価値概念が緩やかに集まったクラスタであり、広義に解釈すると Vehicle dynamics と名付けられる概念構造を形成しているといえる。

このクラスタを良く見ると、運転しやすい、運転のしやすさ、運転しやすさや、あるいは、安全性、安全、安全性が高いなど、似た意味のキーワードが近い位置にプロットされていることがわかる。これは、本手法が似た概念を近傍に空間配置できていることを示している。また、それら類似概念のキーワードの分布範囲が本手法の分解能をおおよそ表しているといえる。なお、運転しやすさのキーワードが極座標で中央寄りにプロットされているのは、他の魅力や価値とも関連が深いためと考えられる。

次に、図の左下部分の大きなキーワードクラスタに着目する。図中では、燃費、燃費がいい、燃費が良いというキーワードが顕著で、ハイブリッド、環境に優しいなどのキーワードも同じクラスタに存在する。これらは一般の自動車ユーザには燃費性能の価値概念としてくくられていると解釈できる。

その燃費性能クラスタの下には、維持費が安い、安い、税金が安い、維持費、などのキーワードが並び、極に近いところにも、価格、値段という頻度の高いキーワードが大きな円でプロットされている。これらは燃費性能以外の経済性の価値概念と解釈できる。

また、経済性のクラスタの極に近い部分には、コンパクト、小回りが利く、小回りがきく、などは、われわれが取り回し性能と呼ぶ価値概念であることから、取り回し性のクラスタと解釈した。

以上を要約すると、この左下の大きなクラスタは、燃費

性能、経済性、取り回し性、と解釈できる価値概念が集まったクラスタであり、全体で Economy and easy drive と名付けられる魅力や価値の概念構造を形成していると考えた。

次に、図の右半分の大きなキーワードクラスタに着目する。図中、一番外側のキーワード、色の方向に、カラー、外観、かわいい、などのキーワードが並んでいる。これは、色を中心とする個性を表すクラスタ、個性的という価値概念であると解釈できる。また、その上の、デザイン、見た目、カッコいい、形などのキーワードは、主に形状の良さに感じる魅力の概念であるので、カッコ良さの価値概念と解釈した。

また、やや内側に分布している、広さ、車内が広い、室内が広い、シートアレンジなどのキーワードは、外観形状とも関連する室内空間の価値を表すので、広さの価値概念と解釈した。広さのクラスタは他の魅力や価値とも関連性があるため内側に分布していると考えた。

以上を要約すると、右半分の大きなクラスタは、個性的、カッコ良さ、広さという価値概念の集まったクラスタであり、全体として Design and space という魅力や価値の概念構造を形成していると分析した。

以上の解釈より、日本のユーザは自動車に以下の魅力や価値を感じており、それぞれ、より個別的価値に分解できる価値概念がゆるやかに結合していると考えられる。

- (1) Vehicle dynamics は、安全性、操縦性、乗心地の個別価値で構成される価値概念である
- (2) Economy and easy drive は、燃費性能、経済性、取り回し性で構成される価値概念である
- (3) Design and space は、カッコ良さ、個性的、広さで構成される価値概念である

3.2. 米国

米国についても、日本と同様に分析をおこなった。得られたキーワードプロットを Fig. 5 に示す。

極から距離が離れてプロットされている顕著なキーワードを調べると、図中右上に color、左に gas mileage、右下に roomy がある。

まず、図中右上のキーワード color と同じ方向には red, blue, white という具体的色名のほか、attractive, stylish, sporty, pretty, sexy, luxury, beautiful, cool など、ユーザの感動や驚嘆につながるキーワードが多く並んだ。これらは自動車に感じる特別性を表すクラスタであると解釈し、プレミアム性の価値概念と名付けた。

また、その下の、looks, look, appearance, exterior などのキーワードは形状的な美の価値概念を表すクラスタと解釈し、美しさと名付けた。

さらに下側には、style, styling, design, sleek などと同時に、sunroof, leather, leather seats, heated seats など、さまざまなオプション装備のキーワードが並んでいた。

よって、自分好みの自動車にできるカスタム性の価値概念であると解釈した。

以上を要約すると、右上のキーワードクラスタは、プレミアム性、美しさ、カスタム性という価値概念が大きなクラスタを形成しており、全体として Style and design と呼べる魅力や価値の概念であると意味付けた。

次に、図中、一番左側の gas mileage の方向に着目すると、good gas mileage, fuel efficiency, fuel economy などが並んでおり、日本と同じく燃費性能の概念のクラスタと解釈した。

また、燃費性能のクラスタの下にも economical, gas, fuel, hybrid, affordable, cost, good price など日本と同じ経済性の概念のクラスタが存在する。environmental も hybrid の右下に位置し、経済性クラスタ近傍に位置している点は日本と同様であった。

さらに経済性クラスタの下を見ると practical, towing, ease of use などのキーワードが並んでおり、車を道具として使う際の用途的価値、実用性の概念と解釈した。

燃費性能クラスタの上に日本の調査ではほとんど現れないキーワード reliability, dependable, durability, maintenance などのハードウェア的な信頼性の概念クラスタがある。さらにその上には reliable, warranty, resale value という自分の車の価値が目減りしないことの価値と

呼べる概念のクラスタがある。これらはそれぞれ信頼性、資産価値の概念と解釈した。これらのクラスタはその出現頻度も顕著であるため、米国独特の魅力や価値のクラスタであるといえる。

以上を要約すると、左側の大きなキーワードクラスタは、燃費性能、経済性、実用性、信頼性、資産価値の概念が関連し合った全体として Economy and secure と呼べる概念の大きなクラスタを形成しているのが、米国の特徴である。

その他にも、左上内側には、日本の Vehicle dynamics に属するキーワードがやや広がりをもって分布している。米国の調査ではこれら機械的性能ともいえるキーワードクラスタは顕著には見えないが、この極座標プロットの独立した2軸と直交する三番目の軸方向にキーワードが分布していると推察される。そこで米国でも Vehicle dynamics を一つの魅力や価値のクラスタとして定義することにした。

また、米国ユーザ調査で出現頻度が高く、特徴的なキーワードが集まっているのが右下のクラスタである。

極から距離を置く顕著なキーワード roomy の方向には、cargo space, storage, size, luggage space などの荷物の積載性に関する価値のクラスタが存在する。これは積載性の概念と解釈した。

その少し右上には leg room, room, space, comfort,

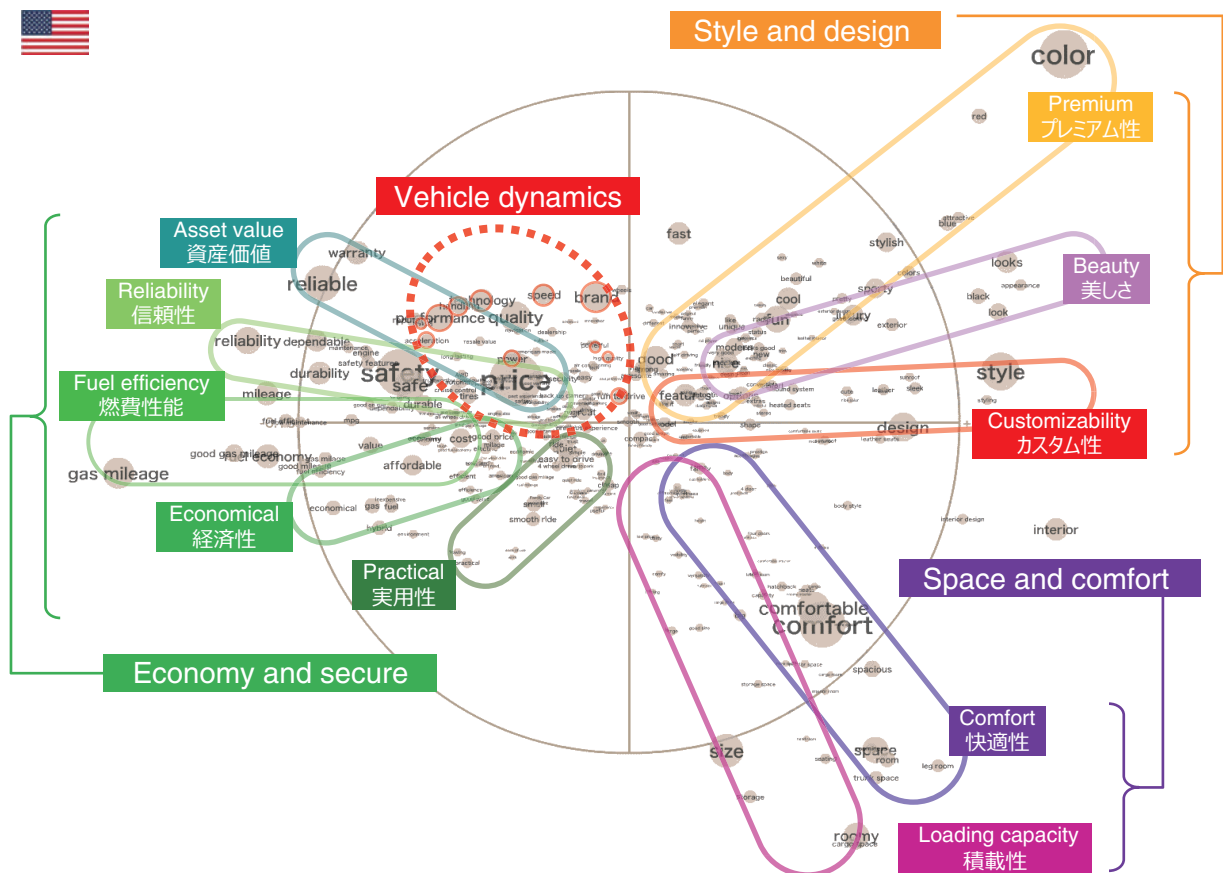


Fig. 5 Comprehensive polar plot of keywords of car values from U.S. car users

comfortable など、乗員にとっての空間価値のクラスタがあり、これは快適性の概念と解釈できる。

これら積載性と快適性のクラスタはキーワード数、出現頻度とも顕著で、日本ではこのようなキーワードクラスタは形成されていなかった。これらも信頼性、資産価値などと並んで、米国に特徴的な価値クラスタといえる。よってまとめると、右下のクラスタは Space and comfort の価値概念であると解釈した。

以上、米国の分析結果をまとめると、米国の自動車ユーザは Style and design, Economy and secure, Space and comfort そして Vehicle dynamics という魅力や価値を感じており、それぞれは、以下のような価値概念がゆるやかに結合していると考えられる。

- (1) Style and design は、プレミアム性、美しさ、カスタム性の個別価値で構成される価値概念である
- (2) Economy and secure は、日本とほぼ同じ燃費性能、経済性、実用性に加え、米国独特の信頼性、資産価値で構成される価値である
- (3) Space and comfort は、米国独特の積載性、快適性で構成される価値である
- (4) Vehicle dynamics は、日本と同じ安全性、操縦性、乗心地の個別価値で構成される価値である

4. 考察

本手法を用い、一般的なアンケートでも分析の対象とする年齢、性別、自動車のブランド認識や、これから普及が進むであろう EV が持つ魅力や価値についても、客観的な解釈を試みた。

4.1. 年齢および性別

Fig. 6 は、ユーザの各年齢層の位置を、日本と米国で男

女別に Fig. 4 ならびに Fig. 5 に重ねたものである。

日本と米国とも、年齢層ごとのプロットはおおよそ直線状に分布し、かつ、年齢層が高いほどプロットは矢印方向に移動していく傾向がある。また、この傾向は男女で共通していることがわかる。魅力や価値クラスタの意味合いを考察すると、若いほど官能価値であるデザインの近傍に、年配ほど実用価値である機能の近傍にプロットがあるのが、日本と米国で共通している。

次に日本における男女の違いに注目すると、男性は年配ほど Vehicle dynamics などの機能的価値に、女性は Economy and easy drive の用途的価値に近い位置に重心が位置している。そして、男女のプロットはかなりかい離している。たとえば、男性向けに機能的価値を訴求したクルマは、そのままでは用途的価値に重きを置く女性には魅力が薄く映る可能性がある、といった考察もこの図からできる。

また、女性の中でも 25 歳から 39 歳の比較的若い年齢層の 3 つのプロットはかなりデザイン方向に重心があるので、この層への訴求には、用途的価値に加え、色のバリエーション充実やデザインに力を入れることが効果的であることを示唆している。一方で、50 歳以上の女性のプロットの位置を見ると、この層に訴求するためには、取り回し性、経済性、燃費性能などを充実させる必要があると推察できる。

次に米国を見ると、若いほどデザイン近傍に重心がある点や、年齢が高いほど Economy and secure などの実用価値近傍に重心がある点は日本と似ている。しかし、米国では日本とは異なり 20 歳から 39 歳の相対的に若い男性の方がよりデザイン方向外側に重心がある。従って、米国ではデザインは若い男性へより訴求効果が大きい可能性がある。なお、米国の男女プロットのかい離は日本と比べるとやや小さく、日本より自動車に求める価値に男女の違いが

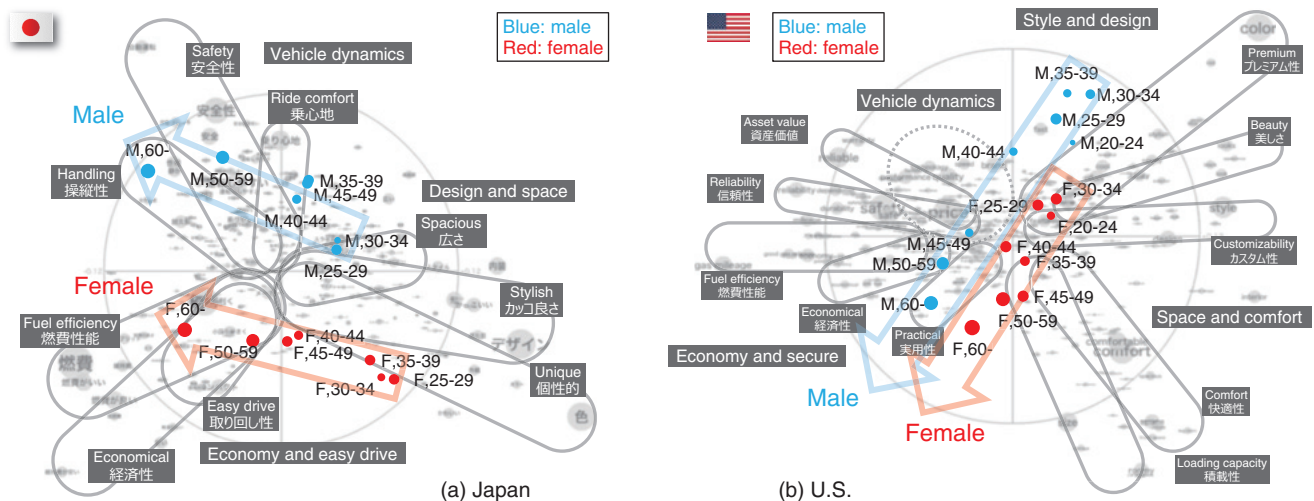


Fig. 6 Transition of values by age and gender in Japan and the U.S.

少ないと思われる。

これら年齢層や性別による価値観の違いは、商品や技術を企画開発する際、単一商品で複数のユーザ層、例えば若いユーザと年配ユーザ、の求める価値を共に満たすことができるのか、できるとすれば何がポイントかを分析するのに有効である。プラットフォームを共有化するグローバル車種の開発では、発売するそれぞれの国や地域に対応する商品開発が求められる。さまざまなユーザの価値観を理解した商品づくりには、本手法のような分析手法が必要となって来ると思われる。

ただし、単年度調査のみでは、求める価値が年齢とともに変化していくのか、世代により求める価値が特有なだけなのかは峻別できない。これらを明確にするには、継続調査と定点分析が必要であることには注意を要する。

なお、同様な分析は、ユーザの住んでいる地域、休日の過ごし方、職種、年収など広範な属性についても応用可能である。

4.2. ブランド

Fig. 7 は、米国のユーザが所有している自動車のブランドの重心位置を Fig. 5 に重ねてプロットしたものである。

米国の Honda ユーザが挙げたキーワードの重心は、左側やや上、他自動車ブランドと比べて最も外側にプロットされた。この位置は Economy and secure の信頼性や資産価値のクラスターの方向にあるので、Honda 車はこれらの価値で他ブランドより相対的に認知されていると解釈できる。

また、Acura ユーザの重心は右上の Style and design 方向の比較的外側にプロットされた。この領域には BMW、Mercedes-Benz、Audi、Lexus などのプレミアムブランドがあり、一番外側の BMW は最もユーザ認識されているといえる。Acura は BMW に次いで外側に位置していること

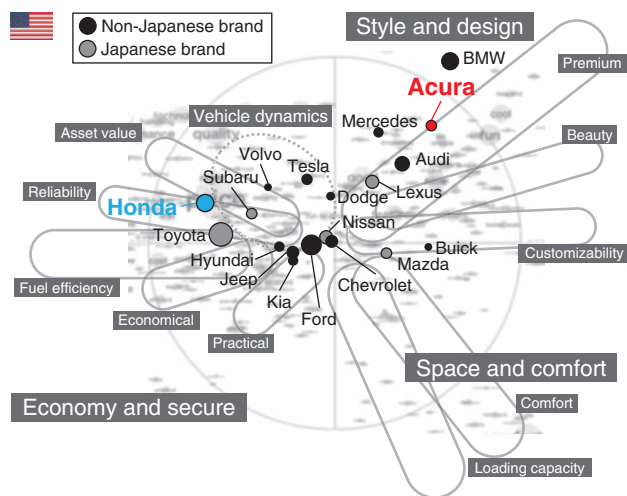


Fig. 7 Center positions of users' value keywords by each automobile brand (magnified plot)

から、これらブランドと近い魅力や価値でユーザに認知されていると解釈できる。

4.3. EV

Fig. 8 に、米国の EV ユーザ、将来 EV を買う可能性があるという回答したユーザ、および EV に消極的なユーザの重心位置を示す。

EV ユーザおよび EV を買う可能性があるユーザは、極座標のやや上側の Style and design のプレミアム性クラスター近傍に重心があり、これはプレミアムブランドの重心位置と近い。これは、米国では EV がプレミアムブランドと同じような魅力や価値としてユーザの目に映っていることを示唆している。Table 1 に EV ユーザと EV に消極的なユーザが挙げたキーワード上位 10 項目を比較する。6 キーワードが共通しており、また、EV ユーザが特別な環境価値を挙げていないことから、上記の推察が妥当であることが確認できる。

一方、EV に消極的なユーザの重心を見ると、Economy and secure の実用性と Space and comfort の積載性に近い位置に重心がある。将来、EV 普及を目指すには、こうしたユーザの価値観にも応えられるようなコンセプトの商品を作り出していく必要がある。

4.4. 日本と米国の共通性と特異性

日本と米国のユーザにおいて、色やデザインと経済性や燃費性能はともに共通した魅力や価値の概念であった。

この中でも日本のユーザに特徴的なのは、Design and space の大きな概念クラスターに広さの概念が加わっていたこと、および、Vehicle dynamics の機械的性能を重視していることであった。日本では、広さや機械的性能を訴求する商品づくりがお客様の喜びにつながる可能性がある。

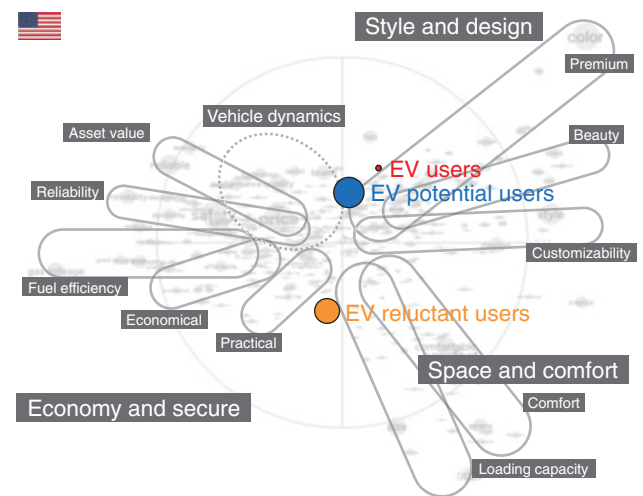


Fig. 8 Center positions of value keywords from users, potential users, and reluctant users of EV

Table 1 Comparison of keywords cited by EV users and EV reluctant users

EV users [%]	Keyword	EV reluctant users [%]	Keyword
14.15	Color	25.63	Price
13.21	Price	22.50	Color
12.26	Safety	20.43	Safety
11.32	Design	19.99	Comfort
11.32	Good	13.90	Style
10.38	Comfort	12.52	Reliable
9.43	Gas mileage	10.99	Size
9.43	Quality	10.17	Comfortable
9.43	Brand	9.26	Gas mileage
8.49	Comfortable	8.78	Safe

一方、米国のユーザでは、Style and design の価値概念クラスタにカスタム性の概念が加わったり、Economy and secure クラスタに信頼性、資産価値などの概念が加わっているのが特徴であった。米国では、オプション装備を充実してカスタム性を向上させたり、信頼性や耐久性を徹底的に高めて故障の不安を解消したりしてあげればユーザの価値につながると思われる。また、米国では積載性や快適性が Space and comfort の大きな価値概念クラスタを形成していたので、例えば、機能性を重視するピックアップトラックにも、乗心地が良好な大きなキャビンがあれば大きな魅力と映ることが示唆されている。

逆に日本では顕著であった、自動運転というキーワードを含む Vehicle dynamics の価値は、米国ではあまり顕著ではなかった。米国ユーザが自動車の機械としての性能だけではなく、日本よりバラエティに富んださまざまな価値観で自動車を選んでいる様子がうかがわれる。米国のユーザに商品を提供する際には、日本とは異なるこうしたお客様の心理を研究し、お客様の価値を追求する重要性が、具体的なデータで明らかにされたといえる。

5. まとめ

本研究では、漠然とした自動車に対する魅力や価値を分析するため、これまでのアンケート調査とは異なる自由記述式キーワード調査法とそのクラスタ化手法を用いて、以下の知見を得た。

- (1) キーワードクラスタの意味的解釈による自動車の魅力や価値の分析、およびその概念構造の解明。
- (2) 日本と米国の差異分析、ユーザ属性分析、ブランド認識分析への適用による本手法の拡張性の例示。

本調査の日本版で顕著なキーワードであった自動運転は、これに先立つ2年前の同様な調査では抽出されていなかったことがわかっている。衝突被害軽減ブレーキやADAS(先進運転支援システム)が認知され、自動運転へのユーザの関心も高まりを見せているが、本調査はそうした

変化を客観的に捉えられているといえる。同様に考えると、その他のキーワードについても自動車ユーザの価値観を的確に捕捉している確度が高いと思われる。

本研究の手法がこれからも発展し、Honda の目指す「お客様の喜び」がますます広がる一助となることを期待してやまない。

参考文献

- (1) 日本経済新聞 2013 年 5 月 5 日：『春秋』欄
- (2) ホンダ月報, No. 4, S26 年 12 月報, (1951)
- (3) 林知己夫, 鈴木達三: 社会調査と数量化—国際比較におけるデータの科学 (増補版), 岩波書店, p. 76-86, (1997)
- (4) Podsakoff, P. M., MacKenzie, S. B., Lee, J.-Y., Podsakoff, N. P.: Common Method Biases in Behavioral Research: A Critical Review of the Literature and Recommended Remedies, Journal of Applied Psychology, Vol. 88, No. 5, p. 879-903, (2003)
- (5) 林知己夫: 数量化理論とその応用例 VIII, 科学基礎論研究, 9 巻 4 号, p. 153-159, (1970)
- (6) 林知己夫: 数量化の方法, 東洋経済新報社, 6 章, p. 71-86, (1974)
- (7) Loehlin, J. C., Beaujean, A. A.: Latent Variable Models (Fifth Edition), Routledge, Ch. 5, p. 171-178, (2017)

■著 者■



日 下 馨



神 田 稔 也



中 島 健 彰



粥 見 哲 也



益 田 綾 子

屋外不整地におけるロボットの自律移動を目的とした路面の走行可否判定手法の構築

Traversability Analysis for Mobile Robot Navigation in Rough Terrain

日 高 真太郎¹

Shintaro HIDAKA

根 木 教 男¹

Norio NEKI

要 旨

本研究では、ロボットが屋外不整地において自律移動を行うために必要な路面のモデル化および同路面の走行可否判定手法を構築した。本手法は、多くの先行研究と同じように、三つのステップから構成される。同ステップは、まず、(1)ロボットの周辺路面をグリッド分割し、(2)各グリッドについて路面モデルを生成したのち、(3)同モデルを評価することによって同路面の走行可否判定を行うというものである。本手法は、モデル化する路面のグリッドサイズを最適化することにより、屋外不整地の路面を平面でモデル化することの妥当性を担保することができる点で新規性を有しており、さらに計測点群の外れ値や最大最小値付近のノイズに堅牢かつ設定パラメータが少ないという特徴を有する。傾斜や凹凸面、障害物を含む屋外不整地環境に本手法を適用した結果、ロボットは路面の走行可否判定を正しく行い、同環境における自律移動をすることができた。

ABSTRACT

For the research described here, the road surface necessary to enable autonomous navigation by a robot in rough terrain was modeled and a method of traversability analysis of that road surface was created. As in much preceding research, this method consists of three steps, which are (1) dividing the road surfaces around the robot into grids, (2) generating a road surface model of each grid, and then (3) performing traversability analysis of those road surfaces by evaluating those models. The new contribution made by this method is that, by optimizing the grid size of the road surface to be modeled, it can assure the validity of modeling a road surface on rough terrain by means of planes. In addition, this method is robust with regard to outliers and noise near maximum and minimum values in a measurement point cloud, and the small number of setting parameters is another distinguishing characteristic. Application of this method to an environment of rough terrain, including slopes, uneven surfaces, and obstacles, made it possible for robots to correctly perform traversability analysis of road surfaces and to navigate autonomously in that environment.

1. 序論

近年、少子高齢化の影響による働き手不足などの社会的背景を受けて、物資運搬や農作業を行う農業用ロボットをはじめとした、屋外不整地自律移動ロボットの需要が増加している⁽¹⁾。屋外不整地環境においてロボットが自律移動するためには、ロボットはカメラやLight Detection and Ranging(LIDAR)などのセンサから得られるデータを用いてロボットの周辺路面における高低差や傾斜を認識し、同路面について走行可否判定を行う必要がある。

屋外不整地におけるロボットの自律移動を目的とした、

路面の走行可否判定手法についての先行研究は、路面モデルに用いる情報の種類と同路面のモデル化手法の2軸によって分類できる。路面モデルは主に、画像データから得られる視覚情報、点群データから得られる幾何情報、加速度データなどから得られるその他の情報のうち、いずれか、もしくは複数の情報を組み合わせることによって構築される。その構築手法は、あるルールに基づくモデルベース、もしくは機械学習ベースのうちのいずれかを用いることがほとんどである。

機械学習ベースの手法は、近年活発に研究されており、点群の幾何情報と光の反射強度からなる入力に対して、人

¹ ライフクリエーションセンター

の操縦軌跡を教師データとして与えることにより、路面の走行可否判定を行うモデルを得る手法⁽²⁾や、点群データから得られる height map をグレースケール画像化し、同画像を分割した複数のパッチに対して、シミュレータ上で動かしたロボットの走行実績を教師データとして与えることで、パッチごとの走行可否判定を行うモデルを得る手法^{(3), (4)}、RGB 画像から得た複数の特徴量からなる入力に対して人が画像ごとの走行可否判定結果を教師データとして与えることにより、走行可否判定を可能にする手法⁽⁵⁾や、同手法と未来の予測画像を組み合わせた手法⁽⁶⁾などがある。また、複数の情報を組み合わせた手法も多く、画像データから得られる不整地推定やテクスチャ推定の結果に加え、Inertial Measurement Unit (IMU) から得られるロボットの振動情報も加味した手法⁽⁷⁾や、セグメンテーション画像と、同画像についての幾何学的特徴を組み合わせて路面上の障害物の踏破可否を判定する手法⁽⁸⁾などが研究されている。

これらの手法はモデルベースでは表現が容易ではない走行可否判定の関数を表現することができるため、大変有用である。しかしながら、一般的に学習ベースの手法は、学習データに含まれないような未知の環境への適用性において課題がある。屋外不整地移動ロボットは、未知環境の走行が想定されているものも多いため、同課題によって、手法の走行可否判定結果のパフォーマンスの低下が懸念される。また、ロボットの走行性能や、要件によって学習データのラベルが異なるため、異なるロボットに手法を転用する場合や、要件が変わった場合においては、学習データの再構築が必要であり、手法の利便性に課題がある。

未知環境への適用性や、利便性についての優先度が高い場合については、モデルベースの手法が有効である。モデルベースの手法の多くは、まずロボット周辺の路面をグリッド分割し、LIDAR や深度カメラによって得られる点群データから、その幾何学的特徴を用いてグリッドごとに路面をモデル化し、同モデルに基づいて走行可否判定を行うものである。先行研究には、点群の分散共分散行列の固有ベクトルと固有値から、路面の傾きと表面の粗さをモデル化し、それらに対して設定したしきい値によって走行可否判定を行う手法^{(9), (10)}や、Random Sample Consensus (RANSAC)⁽¹¹⁾によってグリッドごとの路面を平面式でモデル化し、その傾きの大きさと、グリッドの連続性から走行可否判定を行う手法⁽¹²⁾などが存在する。また、路面モデルの傾きや分散などのパラメータから、重み和などの評価関数を定義し、走行可否判定を行う手法^{(13), (14)}や、同パラメータの程度を定義したファジィメンバーシップ関数を用いて、ファジィ推論によって走行可否判定を行う手法⁽¹⁵⁾など、独自の評価指標を定義して走行可否判定を行う手法も数多く存在する。しかしながら、それらの多くは、以下に示す三つの課題を有する。

(1) 障害物を含む路面の適切なモデル化

上述したように、多くのモデルベースの手法は、路面モデルの構成要素として平面を用いるが、障害物を含む路面を計測している場合においては、平面は地面点群と障害物点群の双方の影響を受ける。特に平面の傾きについては、路面に対する障害物の領域が占める割合の違いによってその値が大きく異なる。このため、同影響を考慮しなければ、場合によっては手法の意図に沿わない平面が推定される事象が発生し、走行可否判定の基準が成立しなくなる。したがって、障害物を計測した際の路面の適切なモデル化は課題である。

(2) 点群の計測ノイズに堅牢な路面のモデル化

屋外不整地では、日照環境や路面の反射特性の影響で、計測する点群情報にはノイズが多分に含まれる場合がある。その中でも特に外れ値や計測点群の最大最小値付近にあるノイズは走行可否判定結果の誤りの原因となる。したがって、路面のモデル化の際には、実用上それらのノイズの考慮が必要不可欠である。

(3) 設定パラメータの簡略化

路面のモデル化や、走行可否判定指標について、重みづけのための変数や物理的な意味が煩雑な指標を用いると、パラメータのチューニングが煩雑で、走行可否判定の性能低下につながるほか、手法の汎用性が低下する。したがって、手法の設定パラメータはシンプルかつ直観的であることが望ましい。

そこで本稿では、これらの課題を解決する走行可否判定手法の提案を行う。すなわち、路面を平面でモデル化することの妥当性を担保し、さらに計測点群の外れ値や最大最小値付近のノイズに堅牢かつ手法に用いる走行可否判定基準を表わすパラメータがロボットのシステムインテグレータに依らず、ロボットの登坂性能、踏破性能のみに依存して定まる手法の構築を目指す。

2. 不整地での適切な走行可否判定手法

提案手法の構成は、1章で示した様々な手法と同様に、(1)ロボットの周辺路面のグリッド分割、(2)各グリッドについて路面モデルの生成、(3)モデルの評価による路面の走行可否判定、の3パートからなる。

本章では、まず2.1.節において障害物が存在しない自然地形路面を仮定し、同路面における走行可否判定手法について述べる。同手法も、多くの先行研究と同様に、路面を平面でモデル化するものである。加えて、統計的手法を複数含んでおり、路面の計測点群の外れ値や最大最小値付近のノイズを除去できるという特徴がある。

2.2.節では、障害物を含む地形における走行可否判定手法について述べる。障害物を含む路面は、障害物を含まない路面とは幾何学的性質が異なる。したがって、前章でモ

デル化手法の課題として述べた通り、平面を用いて障害物を含む路面をモデル化すると、その不適切性により、同平面が走行可否判定に関して誤判定の要因となる場合がある。しかしながら、提案手法においては、(1)のグリッド分割において、同グリッドの分割サイズを適切に定義することにより、障害物を含まない自然地形路面のモデル化手法を、障害物を含む路面に対してそのまま適用しても、モデルの妥当性を損なわずに走行可否判定を行うことが可能となる。

2.1. 自然地形における走行可否判定手法

(1) ロボットの周辺路面のグリッド分割

適当な大きさの正方形のグリッドに分割する。本節においては、多くの先行研究と同じようにグリッド分割についての制約は設ける必要はない。

(2) 路面モデルの生成

まず、路面を (a) 代表平面の推定、(b) 代表平面の表面形状のモデル化、(c) 外れ値の分離、の三つの手順によってモデル化する。その概観を Fig. 1 に示す。

(a) 代表平面の推定

分割された各グリッドに RANSAC⁽¹⁾ によって代表平面を推定する。RANSAC では、外れ値の個数が少なく、かつ外れ値以外の点群に適合する平面が得られるため、計測ノイズの外れ値の影響を受けにくい平面が推定される。

(b) 代表平面の表面形状のモデル化

平地やうね道、傾斜などの屋外の自然地形は、高度が連続的に変化する。そこで、各グリッド内の高度のばらつきはガウス分布 $N(\mu, \sigma^2)$ に基づいていと仮定する。ここで、 μ は (a) の手順で推定した代表平面とし、 σ は同 μ に対する全点群の Root Mean Square (RMS) 値で近似する。

(c) 外れ値の分離

代表平面からの距離が $\pm 2\sigma$ の領域 (以降、有効モデル領域と呼ぶ) を定義し、同領域外の点群を除去する。路面モデルが厳密にガウス分布に従うならば、代表平面から符号付距離が最大側と最小側

の点群が、それぞれ 2.5% 程度除去される。同処理は、計測点群の外れ値や最大最小値付近のノイズの除去を目的としている。場合によっては、路面モデル自体の点群の一部も除去されうるが、地形が連続かつ密であれば、除去された点群の値は、有効モデル領域の境界内かつ境界近傍の点群で近似できる。

(3) 走行可否判定

各グリッドに生成した路面モデルについて、下記の二つの基準に基づいて走行可否を判定する。

$$T_1 = \begin{cases} 1 : \theta \leq \theta_{lim} \\ 0 : \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

$$T_2 = \begin{cases} 1 : d_{max} - d_{min} \leq h_{lim} \\ 0 : \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 θ は代表平面の傾きの絶対値、 θ_{lim} はロボットが上り下り可能な傾斜角の絶対値、 d_{max} は有効モデル領域に含まれる点と代表平面の符号付距離の最大値、 d_{min} は同最小値、 h_{lim} はロボットが踏破可能な障害物高さの最大値である。なお、本稿では上ることのできる坂の最大傾斜角の絶対値と下ることのできる坂の最小傾斜角の絶対値を等しいものとし、 θ_{lim} を用いているが、二つの値が異なる場合は、 θ が最小傾斜角と最大傾斜角の間にあるときに $T_1 = 1$ となるように式 (1) を設定すればよい。式 (1) は傾斜の走行可否判定指標、式 (2) は凹凸の走行可否判定指標を表す。先行研究では、式 (2) の代わりに、凹凸の走行可否判定指標として分散や標準偏差を用い、同指標に対してなんらかのしきい値を与えるものが多い。そのような手法は、路面のモデルが (2) (b) で仮定したようにガウス分布に完全に従う場合においては、しきい値の与え方によっては式 (2) と同じ意味合いを持ちうる。しかしながら、路面モデルがガウス分布から多少逸脱し、推定平面に対する凹の程度と凸の程度が同一でない環境に対しては性能が低下することが予想される。そこで本手法では、式 (2) のように有効モデル領域内の点群の peak to peak の値を凹凸の走行可否判定指標とすることで、路面がガウス分布から逸脱した際の手法の堅牢性を高めている。

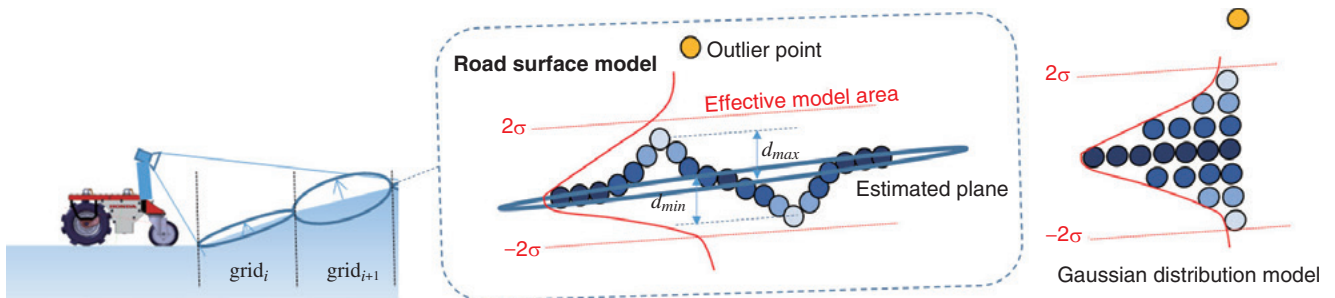


Fig. 1 Road surface model based on Gaussian distribution

走行可否判定指標は, T_1, T_2 を用いて,

$$traversability = T_1 \cdot T_2 \quad (3)$$

と定義する. $traversability = 1$ ならば走行可能, 0 ならば走行不可能である.

2.2. 障害物を含む地形での走行可否判定

走行路面上の障害物を Fig. 2 (a) のようにモデル化する. 実際のロボットでは3次元平面モデルを用いているが, ここでは簡略化して2次元の直線モデルを用いて説明する. 同モデルでは, 障害物を, 一辺の長さが l のグリッドで区切られた走行路面に対して, 高さ h の凸部分が占有率 α の割合で存在しているものとして表現する. すなわち, h と α の値を変えることにより, 段差などの障害物を表現できる. 本節では, 同障害物モデルを含む路面に対して, 路面の分割グリッドのサイズを適切に設定すれば, 前節で示した走行可否判定手法をそのまま適用することができることを示す.

そのためにまず, グリッドの分割サイズについて最適化が必要である理由を具体例を用いて示す. Fig. 2 (a) で示した障害物モデルを含む路面に対して, 2.1. 節の (2) (a) の手順によって推定される, 分散が最小の理想的な代表平面は Fig. 2 (b) のようになる. $\theta_{lim} = 25 \text{ deg}$, $h_{lim} = 0.05 \text{ m}$ の走行性能を有するロボット (以降, 同走行性能を有するロボットをロボット A と呼称する) が, 同障害物を含む路面モデルに対して走行可否判定を行うことを考える. Fig. 3 は, グリッド一辺の長さ $l = 0.05 \text{ m}$ のときに同グリッドを $\alpha = 0.25$ の割合で占有する高さ $h = 0.03 \text{ m}$ の障害物を認識したときの判定図である. 式 (1) において, $\theta = 33.1 \text{ deg} > 25 \text{ deg}$ より $T_1 = 0$, 式 (2) において $d_{max} - d_{min} = 0.0251 < 0.05$ より $T_2 = 1$ なので, 式 (3) より, $traversability = 0$ である. よって, 本来は十分に踏破可能な障害物であるのにも関わらず, 走行不可能と判定していることが分かる. 同事象は, 路面モデルを代表平面で表現する手法全般で生じうる事象で, グリッドサイズが小さいと, 路面が障害物を含んだ時に代表平面の傾きが急になることが原因である. 同事象によって, ロボットの走行性能に基づく踏破可能な障害物高さと走行可否判定の結果の間にかい離が生じ, ロ

ボットの走行可能領域が減少する. 一方で, グリッドサイズが大きくなると, それに伴って路面の分解能が低くなるため, ロボットの運動に制約が生じる. したがって, 障害物を含む路面の走行可否判定においては, これらの問題を生じさせないように, 走行可否判定のかい離が最も少なくなるようなグリッド分割手法が必要である.

提案手法は, そのようなグリッド分割手法を確立した. 上述した走行可否判定の誤りは, グリッドサイズに応じて, 走行可否を分かたず障害物の高さが変化し, 同高さが実際のしきい値 h_{lim} とかい離するため生じる. そこで, θ_{lim} , h_{lim} の走行性能を有するロボットが, グリッドの一辺の長さ l で周辺路面を認識し, 2.1. 節で示した走行可否判定手法を行うとき, グリッドの占有率 α の障害物に対して, ロボットが内部で走行不可能と判定する高さを $h_{internal}(\alpha, l)$ と定義する. 導出方法は後述するが, 例えば, Fig. 3 に示した例の場合, このロボットが内部で走行不可能と判定するしきい値は, $h_{internal}(0.25, 0.05) \approx 0.015 \text{ m}$ であり, 設定したしきい値 $h_{lim} = 0.05 \text{ m}$ との間に乖離がある. これにより, 上述した通り, $h_{internal}(0.25, 0.05) < h < h_{lim}$ の範囲にある高さ $h = 0.03 \text{ m}$ の障害物に対する走行可否判定について誤判定が生じる.

$h_{internal}(\alpha, l)$ の導出方法は, 下記に示す Algorithm 1 によって表現できる.

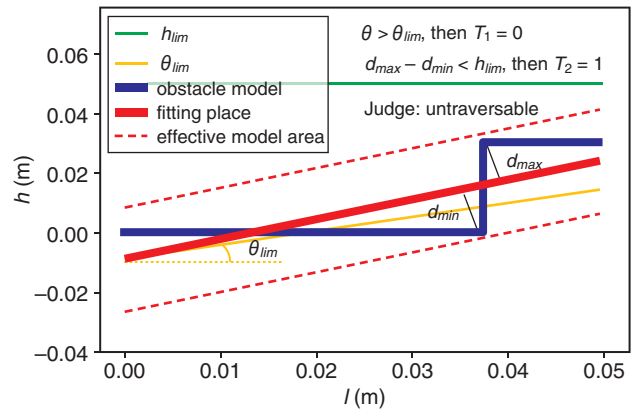


Fig. 3 Example of incorrect estimation result ($l = 0.05 \text{ m}$, $\theta_{lim} = 25 \text{ deg}$, $h_{lim} = 0.05 \text{ m}$)

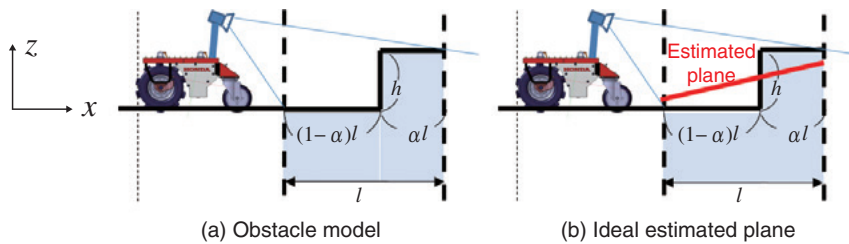


Fig. 2 Definition of obstacle model and traversability estimation of obstacle

Algorithm 1: $h_{internal}(\alpha, l)$

```

1  $h \leftarrow \text{null}; \text{traversability} \leftarrow \text{True}$ 
2 while traversability do
3    $h \leftarrow h + \Delta h;$ 
4   traversability  $\leftarrow \text{Judge}(\theta_{lim}, h_{lim}, l, \alpha, h);$ 
5 return  $h;$ 

```

ここで、 $\text{judge}(\theta_{lim}, h_{lim}, l, \alpha, h)$ は、本節で定義した l, α, h によって表現される障害物モデルに対して、2.1. 節で示した走行可否判定手法を、 θ_{lim}, h_{lim} をしきい値として有するロボットに適用した時の走行可否判定結果を返す関数である。

l がある値をとるとき、高さ h の障害物について、 $h < \min_{\alpha} h_{internal}(\alpha, l)$ ならば必ず走行可能、 $\max_{\alpha} h_{internal}(\alpha, l) < h$ ならば必ず走行不可能、 $\min_{\alpha} h_{internal}(\alpha, l) < h < \max_{\alpha} h_{internal}(\alpha, l)$ ならば α の値によって走行可否が変化する。

ここで、 l がある値をとるとき、 $\min_{\alpha} h_{internal}(\alpha, l) \approx h_{lim}$ となる場合を考える。このとき、 $h < h_{lim}$ の障害物に対しては走行可能、 $\max_{\alpha} h_{internal}(\alpha, l) < h$ の障害物に対しては走行不可能と正しく走行可否判定をすることができる。一方で、 $h_{lim} < h \leq \max_{\alpha} h_{internal}(\alpha, l)$ の障害物に対しては走行不可能であるのにも関わらず、 α の値によっては、走行可能と誤判定する場合がある。しかしながら、走行可否判定の更新周期が十分ならば、ある路面を一度走行可能と判定しても、ロボットが移動し、 α の値が変化する過程で、走行不可能と修正することができる。したがって、 $\min_{\alpha} h_{internal}(\alpha, l) \approx h_{lim}$ を満たすようなグリッドの辺の長さ l を設定すれば、ロボットは、走行性能に基づいて設定した h_{lim} を満たしながら、路面の走行可否判定を行うことが可能である。

そこで、式 (4) のような目的関数 $J(l)$ を定義し、式 (5) のように、 $J(l)$ を最小化する l をグリッドの 1 辺の長さとして与える。

$$J(l) = h_{lim} - \min_{\alpha} h_{internal}(\alpha, l) \quad (4)$$

$$l = \arg \min J(l) \quad (5)$$

ただし、式 (5) は下記の制約下での解とする。

$$h_{lim} - \min_{\alpha} h_{internal}(\alpha, l) > 0 \quad (6)$$

式 (4)、(5) により、 $\min_{\alpha} h_{internal}(\alpha, l) \approx h_{lim}$ が成立するので、上述した通り、ロボットは走行性能に基づいて設定したしきい値 h_{lim} を守りながら走行可否判定をすることができる。式 (6) は、ロボットがしきい値 h_{lim} を守ることができる範囲で、路面の分解能を最も高くする役割を果たす。

例えば、ロボット A について同手順（ただし、 $\Delta h = 0.001$ m としている）を当てはめると、目的関数は Fig. 4 のようになり、式 (5)、(6) より、 $l = 0.21$ m が求まる。

以上より、Fig. 2 (a) のように定義された障害物モデルに対して、本節で示したグリッドサイズ l の制約を与えれば、2.1. 節に示した自然地形における走行可否判定と同じ手法で、障害物の踏破可否判定を行うことができる。以上の手法をまとめると、Fig. 5 のようになる。

なお、式 (6) の制約の下では、 $\min_{\alpha} h_{internal}(\alpha, l)$ がロボットが内部で走行不可能と判定するしきい値となるため、実用的には同値が許容できる値の範囲内であれば、 l は必ずしも式 (5) によって決定する必要はなく、式 (5) の解近傍の切りの良い数値を用いればよい。

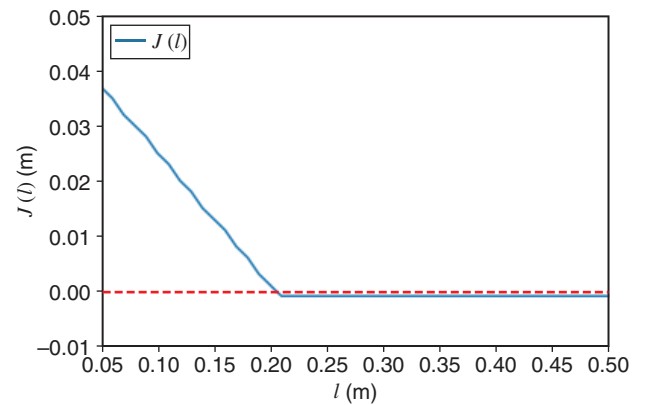


Fig. 4 Objective function of grid size optimization ($\theta_{lim} = 25$ deg, $h_{lim} = 0.05$ m)

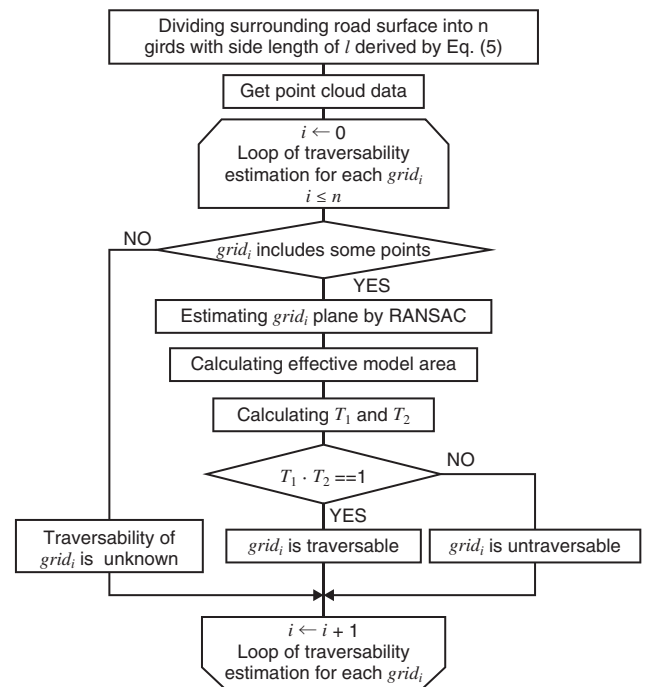


Fig. 5 Flowchart of proposed method

3. 実験条件

2章で示した提案手法の有効性を検証するにあたり、用いたロボットを Fig. 6 に示す。このロボットはステレオカメラを搭載しており、前方のカメラで路面の点群を取得することができる。ロボットの走行性能を示す各しきい値は、 $\theta_{lim} = 25 \text{ deg}$, $h_{lim} = 0.05 \text{ m}$ の固定値とした。同じしきい値は、路面に対する車輪のグリップ力が十分に得られることを仮定し、同条件下で車輪の半径を考慮して算出した。

グリッドサイズ最適化手法の有効性検証には、平坦な路面に設置した角材を用いた。この角材は、ロボットが走破不可能な障害物高さのしきい値よりもわずかに低く、横幅 0.31 m, 縦幅 0.04 m, 高さ 0.04 m とした。

屋外不整地環境におけるロボットの走行可否判定手法の有効性検証には、Fig. 7 に示すような砂利道や芝面、木やその幹、突起上の障害物や傾斜などを含む屋外不整地環境を用いた。Fig. 7 の中央の図は模式図であるが、実環境における芝面や舗装路などの路面属性ごとの割合は模式図の面積比とほぼ一致している。斜面はいずれも不整地路面であり、傾斜角はおおよそ 5 deg から 40 deg の範囲内で一様ではなく、走行可能な傾斜角の領域と、走行不可能な傾斜角



Fig. 6 Test robot with stereo camera

の領域が混在していた。芝面は高さが 0.05 m 未満であり、走行可能領域であった。一方で芝上の障害物や木々はいずれも高さが 0.05 m よりも大きく、走破不可能領域であった。砂利道はおおよそ高さ 0.04 m 以下の石で敷き詰められており、多くの部分は走行可能領域であったが、石が密集し重なっている部分は高さが 0.05 m を超えていたため、走行不可能領域である。なお、Fig. 7 の環境は濡れた路面や砂場などのような車輪のグリップ力が低下する路面は含まず、いずれの路面も車輪のグリップ力が十分に得られる環境であった。以上のように実験環境として設定した Fig. 7 の環境は、屋外不整地環境の網羅性を完全に満たすものではないものの、ロボットが走行可能となる領域、不可能となる領域のいずれも含む多様な属性の路面をもった環境であった。

4. 結果と考察

4.1. グリッドサイズ最適化手法の有効性検証

2.2. 節に示したグリッドサイズの最適化手法の有効性を検証した。まず 3 章に示したロボットの走行性能に対して同最適化手法を適用し、グリッドの辺の長さを $l = 0.20 \text{ m}$ とした。3 章で述べた通り、 θ_{lim} , h_{lim} は固定値を用いるので、グリッドの辺の長さ $l = 0.20 \text{ m}$ も固定値である。なお、このときのロボットが内部で走行不可能と判定するしきい値は $\min_{\alpha} h_{internal}(\alpha, 0.20) = 0.047 \text{ m}$ である。これに対して $l = 0.10 \text{ m}$ の場合を比較対象とし、2.1. 節で示した手法による走行可否判定結果を比較した。路面に設置した角材に対して、 $l = 0.10 \text{ m}$, $l = 0.20 \text{ m}$ の 2 パターンについて走行可否判定を行った。その結果を Fig. 8 に示す。矢印の向きは、各グリッドの代表平面の法線ベクトルの向きを示し、矢印の色は Table 1 の定義の通りである。

角材の高さは h_{lim} より低いため、同角材を含む路面は、

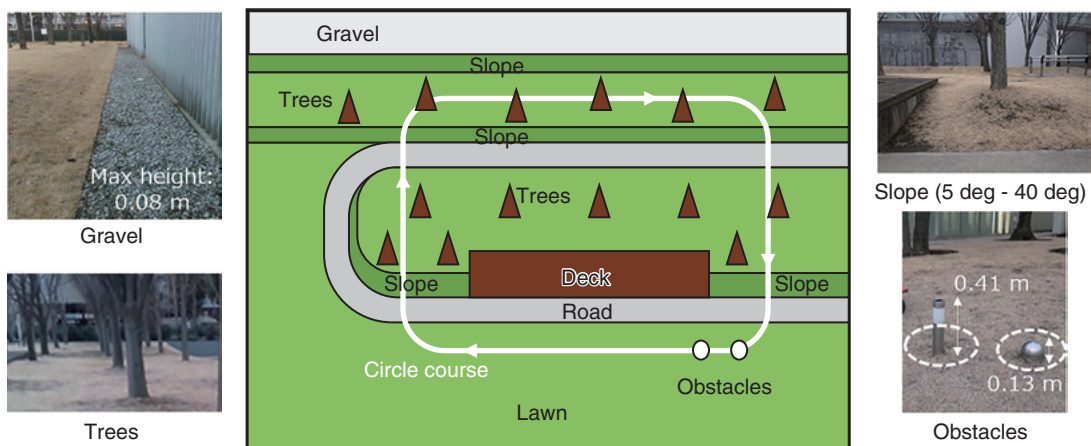


Fig. 7 Test environment

Table 1 Definition of arrow color

	$T_2 = 0$	$T_2 = 1$
$T_1 = 0$	Clear Red	Red
$T_1 = 1$	Clear Black	Green (traversable)

本来は走行可能であるが、 $l = 0.10$ m の場合においては、Fig. 8 (a) に示したように、角材を含むグリッドの代表平面の傾きが、ロボットの登坂可能な傾斜のしきい値を上回ることによって $T_1 = 0$ となり、結果として同路面が走行不可能と判定された。これより、路面の走行可否判定について、同路面をグリッド分割し、同グリッドの推定平面の傾きを走行可否判定の要素として用いる手法については、グリッドのサイズを適切に規定しなければ走行可否判定に誤りが生じることが分かった。一方で $l = 0.20$ m の場合においては、同様の事象は起こらず、Fig. 8 (b) に示したように、同角材を含む平面は、走行可能な路面として正しく判定された。さらに、角材を動かすことにより、グリッドにおける角材の占有率を小さくしたり、複数の角材を並べることで、同占有率を大きくしたりしても、判定結果は変わらず、角材を含む路面が走行可能な路面として正しく判定された。以上より、2.2. 節で示したグリッドサイズの最適化手法の有効性が示された。

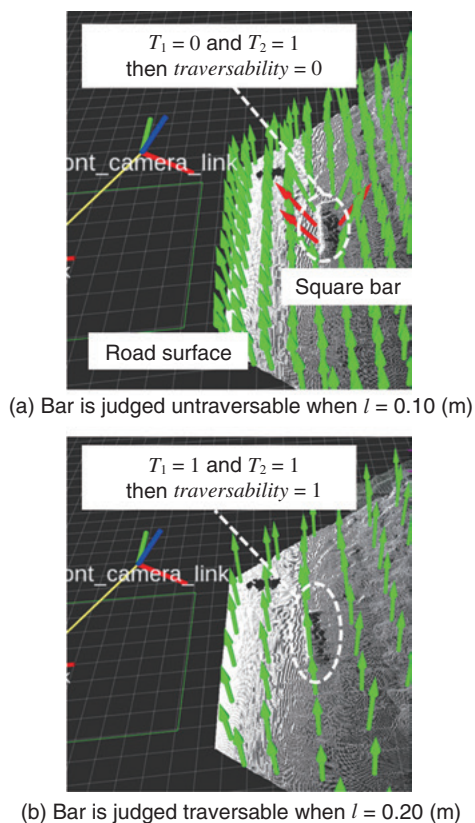


Fig. 8 Grid size optimization

4.2. 屋外不整地環境における提案手法の有効性検証

Fig. 7 に示す環境において、提案手法の有効性検証を行った。グリッドの一边の長さは、前節に倣って固定値の $l = 0.20$ m とした。

自然地形における走行可否判定結果の一例を Fig. 9 (a), (b) に示す。(a) は Fig. 7 中の斜面を、(b) は砂利道を、それぞれ認識した図である。Fig. 9 (a) には、走行可能と判定された緑の矢印の領域と、式 (1) の指標より走行不可能と判定された赤い矢印の領域が存在している。緑の領域の傾斜は 24° 、赤い領域の傾斜は 31° であり、およそ $\theta_{lim} = 25^\circ$ を境に斜面の走行可否判定ができたと考えられる。

Fig. 9 (b) は、凹凸の高低差が約 0.04 m の路面に対しては、走行可能と判定された緑の矢印が存在している。一方で、凹凸の高低差が約 0.08 m の路面に対しては、Clear Black の矢印が存在していることから、式 (2) で走行不可能と判定できたことが分かる。

Fig. 7 中に示す周囲コースにおけるロボットの自律走行実験では、ロボットは傾斜や芝地などの自然地形の走行可否判定に加え、木やその幹、Fig. 7 中に示した障害物を含む路面の走行可否判定 [Fig. 9 (c)] をしながら、 0.85 m/s の速度で同周囲走行を行うことができた。

今後は、(1) 手法の適用環境の網羅性の検証を目的とした、様々な形状や大きさを有する障害物を含む環境におけるテストや、(2) 手法の堅牢性の検証を目的とした、センサーの計測ノイズの出やすい環境におけるテスト、(3) 手法の利便性の検証を目的とした、様々なロボットを用いた走行可否判定テストなどを実施することによって、手法の有用性を引き続き検証していく。

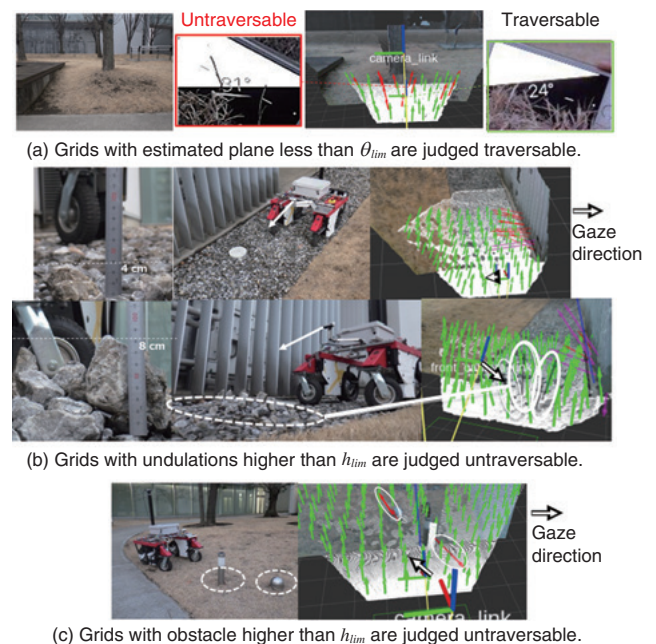


Fig. 9 Result of traversability estimation

5. 結論

本稿では、ロボットが周辺路面をモデル化し、同モデルに対して走行可否判定を行う手法を提案した。提案手法は、路面モデルの要素として推定平面を使用する多くの既存手法が抱える、障害物計測時の路面モデルの不適切性についての課題に対して、周辺路面のグリッド分割に制約を与えるという解決方法を示した。これにより、路面を平面でモデル化することの妥当性を担保することができ、提案手法は同点で新規性を有している。

また、同手法は、理論的に計測点群の外れ値や最大最小値付近のノイズに対して堅牢であり、手法に必要なパラメータはロボットの踏破可能な障害物高さ h_{lim} 、上り下り可能な最大傾斜角度 θ_{lim} のみに基づいて決定されることから、特定の実機に依存しない利便性の高い手法であると言える。

今後は、手法の適用環境や適用するロボットについての網羅性の検証や、同手法の堅牢性の検証などを実施し、手法の有用性を引き続き検証していく。

6. おわりに

最後に、本研究の展望について述べる。提案手法は、ロボットの走行性能を表す θ_{lim} , h_{lim} の値から、ロボットの周辺路面を分割する際のグリッドサイズを決定し、同路面に対して走行可否判定を行うものである。したがって、本研究では対象外とした路面の物性や状態に基づく θ_{lim} , h_{lim} の推定ができれば、ロボットが路面の情報から動的に θ_{lim} , h_{lim} を変えながら、それに応じてグリッドのサイズを適切に変更し、走行可否判定を行うことができるようになることが予想される。このような手法の拡張によって、提案手法の適用環境の網羅性はさらに向上し、より汎用性の高い走行可否判定手法が実現されと考えている。

参考文献

- (1) Duckett, T., Pearson, S., Blackmore, S., Grieve, B.: Agricultural robotics: the future of robotic Agriculture, UK-RAS White Papers, EPSRC UK-Robotics and Autonomous Systems Network, (2018)
- (2) Suger, B., Steder, B., Burgard, W.: Traversability analysis for mobile robots in outdoor environments: a semi-supervised learning approach based on 3d-lidar data, In: Proceedings—IEEE international conference on robotics and automation, p. 3941–3946, (2015)
- (3) Chavez-Garcia, R. O., Guzzi, J., Gambardella, L. M., Giusti, A.: Image classification for ground traversability estimation in robotics, Proc. 18th Int. Conf. Adv. Concepts Intell. Vision Syst., p. 325–336, (2017)
- (4) Chavez-Garcia, R. O., Guzzi, J., Gambardella, L. M., Giusti, A.: Learning ground traversability from simulations, IEEE Robot. Autom. Lett., vol. 3, no. 3, p. 1695–1702, (2018)
- (5) Hirose, N., Sadeghian, A., Vázquez, M., Goebel, P., Savarese, S.: Gonet: A semi-supervised deep learning approach for traversability estimation, Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robots Syst., p. 3044–3051, (2018)
- (6) Hirose, N., Sadeghian, A., Xia, F., Martín-Martín, R., Savarese, S.: Vunet: Dynamic scene view synthesis for traversability estimation using an RGB camera, IEEE Robot. Autom. Lett., vol. 4, no. 2, p. 2062–2069, (2019)
- (7) Bekhti, M. A., Kobayashi, Y.: Regressed Terrain Traversability Cost for Autonomous Navigation Based on Image Textures, MDPI. applied sciences. Vol. 10, no. 1195, (2020)
- (8) Schilling, F., Chen, X., Folkesson, J., Jensfelt, P.: Geometric and visual terrain classification for autonomous mobile navigation, 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), p. 2678–2684, (2017)
- (9) Bogoslavskyi, I. Vysotska, O., Serafin, J., Grisetti, G., Stachniss, C.: Efficient traversability analysis for mobile robots using the kinect sensor, European Conference on Mobile Robots (ECMR), (2013)
- (10) Škoda, J.: 3D Navigation for Mobile Robots, (2017)
- (11) Fischler, M. A., Bolles, R. C.: Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography, Communications of the ACM, 24(6):381–395, (1981)
- (12) Braun, T., Bitsch, H., Berns, K.: Visual terrain traversability estimation using a combined slope/elevation model, in LNCS, vol. 5243, (2008)
- (13) Chilian, A., Hirschmuller, H.: Stereo camera based navigation of mobile robots on rough terrain, Intell. Robots and Systems (IROS), p. 4571–4576, (2009)
- (14) Ye, C., Borenstein, J.: A Method for Mobile Robot Navigation on Rough Terrain, Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation, p. 3863–3869, (2004)
- (15) Tanaka, Y., Ji, Y., Yamashita, A., Asama, H.: Fuzzy Based Traversability Analysis for a Mobile Robot

on Rough Terrain, Proceedings of the 2015 IEEE
International Conference on Robotics and Automation,
p. 3965-3970, (2015)

■ 著 者 ■



日高真太郎



根木教男

編集長	漆山 雄太	先進技術研究所
	石橋 正明	本田技研工業 二輪事業本部 ものづくりセンター
	伊藤 浩	本田技研工業 二輪事業本部 ものづくりセンター
	古賀 響	ライフクリエーションセンター
	鈴木 俊次	先進技術研究所
	須藤 晶	先進技術研究所
	桃原 茂郎	本田技研工業 四輪事業本部 ものづくりセンター
	直江 学	ライフクリエーションセンター
	中村 道郎	本田技研工業 二輪事業本部 ものづくりセンター
	西田 浩明	先進パワーユニット・エネルギー研究所
	山田 想	ライフクリエーションセンター
	山本 若登	先進技術研究所
	渡邊 生	先進パワーユニット・エネルギー研究所

編集協力

本田技術研究所	先進技術研究所 論文委員会
	先進パワーユニット・エネルギー研究所 論文委員会
	ライフクリエーションセンター論文委員会
本田技研工業	二輪事業本部 ものづくりセンター論文委員会
	四輪事業本部 ものづくりセンター論文委員会

最初に、今回の Honda R&D Technical Review へ執筆、協力を頂いた皆様に心より感謝申し上げます。日頃の多忙な業務の合間を縫いながら、原稿を執筆する作業は、苦勞されることと思います。しかし今回は、2 月頃からのコロナ禍の影響に加えてさらには、Honda に対するサイバー攻撃や 7 月の豪雨など、不測の世情がいくつも重なりました。2020 年 4 月から本田技術研究所の体制が大幅に変化し、関係者同士のちょっとした打ち合わせやデータの再確認など、今まで大した負担にならなかった作業も、これらの状況下では大変な苦勞であったかと推察されます。

編集委員会も例外ではなく、すべてオンライン会議でした。お互いの顔を見ることがなくすべての査読が行われ、かつ著者との校正作業を行うこととなり、これまでとは勝手が異なる状況となりました。しかし、この状況が非常に困難であり、状況が好転すればまた 1ヶ所に集まった会議形態にすべきか、といわれるとそうでもないと実感しました。6 月頃、オンラインでの講義やミーティングを余儀なくされる大学生と話す機会がありました。そこで、コロナ禍で変化した価値観について聞いてみました。その答えは、『友人と会う機会が減ってしまったのは寂しいが、講義やミーティングはオンラインの方が効率的だということが良くわかった』、というものでした。言われると確かに、“あたりまえ”の非効率を見直す、そんな時期なのかもしれません。

私事ですが、今回の編集委員会参加は 4 年ぶりでした。本号を 4 年前の内容と比べてみますと、情報活用技術やロボティクスに関する投稿が増え、研究所の変化を実感しております。そのため、査読する自分の知識を着実にバージョンアップしつつ、技術の本質を見失わない“目”が必要なのだと感じられました。最後に、広範囲にわたるコンテンツを、一つの書籍に混ぜ込み、それでいて違和感なく編集される本 Technical Review は、他に類がない書籍だと思います。読者の方々におかれましては、ご自身の専門でない分野を覗いてみる、本書がそんな契機の一つになれば幸甚であります。

(直江)

発行所 株式会社 本田技術研究所

発行人 三 部 敏 宏

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 先進技術研究所
 統合マネジメントブロック 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

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.