

Honda R&D

Technical Review Vol.33 No.1



April 2021



表紙の言葉

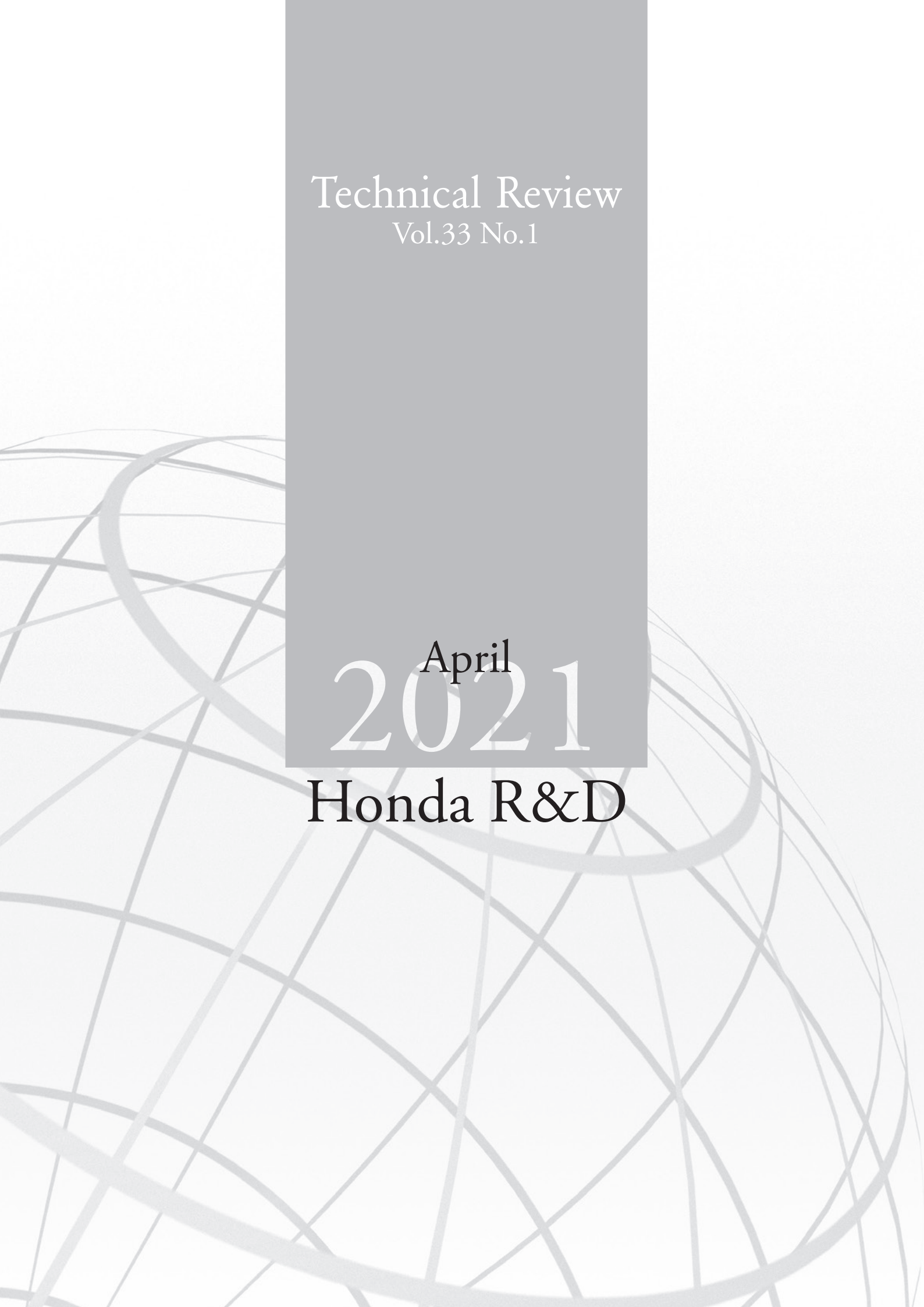
表紙デザインでは「往復動による高伝熱可能なヒートパイプ」よりピストン内部のヒートパイプ構造をモチーフとして制作しました。

モビリティの中でも特にモーターサイクルは、カタチに機能からの必然性が色濃く表れていると私は考えています。

今回用いたピストン内部のヒートパイプは本来見えない構造体ですが、生き物の骨格同様に機能から生まれた必然の産物だと捉えた上でそれらを魅力的に見せる手法を用いました。



デザインセンター
大山 良平



Technical Review
Vol.33 No.1

April
2021

Honda R&D

目次

特集

- ◇ 空港案内ロボットシステムの開発とデザイン 斉藤陽子・奥石 健 1
- ◇ 空港案内受付ロボットの開発 大西潤哉・益田綾子・大林千尋
川崎雄一・竹部雄貴 9
- ◇ 空港案内誘導ロボットにおけるロバストなフォロワ認識機能の研究 沙 子鈞・名取洋一・有泉孝裕 18

技術紹介

- ◇ 2020 CRF1100L Africa Twin のカラーリングデザイン 桂川 碧 26
- ◇ 無限音階のコンセプトを利用した電動化車両向けアクティブサウンドコントロール技術
王 循・前坂拓摩・井上敏郎 36
- ◇ 電磁接触器が励振する電動車騒音の予測技術 下村章人・外山直基
川辺正道・佐藤嘉實 43

論文

- ◇ 真実接触と油膜による摩擦係数算出モデルとその検証 (ピストンリングとスリーブ)
古賀秀晴・松本謙司・小野佑樹 50
- ◇ 往復動による高伝熱可能なヒートパイプ (自動車用エンジンピストン適用検討) 松本謙司 57
- ◇ 三次元網目構造電極を適用した高容量リチウムイオン電池の内部抵抗低減
田名網 潔・田中俊充・磯谷祐二・青柳真太郎
細江晃久・竹林 浩・奥野一樹・山本琢磨 66
- ◇ ケイ酸塩系無機バインダを用いた高性能 Si 負極 高橋牧子・木下智博・田名網 潔・青柳真太郎
向井孝志・池内勇太・坂本太地・山下直人 78
- ◇ リチウムイオン電池用電解液の酸化電位と絶対ハードネスの関係 森田善幸・前山裕登・古川敦史 86
- ◇ 腸骨荷重の 3 軸計測によるサブマリン現象の予兆検出 前原一範・伏見匡洋・有馬哲寛
伊藤重雄・三上秀則 93

CONTENTS

Special Edition

- ◇ Development and Styling Design of Airport Guide Robot System
 Yoko SAITO・Takeshi KOSHIISHI 1
- ◇ Development of Reception Robot for Airport Guidance
Junya ONISHI・Ayako MASUDA・Chihiro OBAYASHI
 Yuichi KAWASAKI・Yuki TAKEBE 9
- ◇ Research of Robust Follower Recognition Function for Airport Guide Robot
 Zijun SHA・Yoichi NATORI・Takahiro ARIIZUMI 18

Introduction of new technologies

- ◇ Coloring Design for 2020 CRF1100L Africa Twin..... Midori KATSURAGAWA 26
- ◇ Active Sound Control Technology for Electrified Vehicles Based on Concept of Shepard Tones
 Xun WANG・Takuma MAESAKA・Toshio INOUE 36
- ◇ Technology for Prediction of Contactor Noise for Electric-powered Vehicle Batteries
Akito SHIMOMURA・Naoki TOYAMA
 Masamichi KAWABE・Yoshimi SATO 43

Technical papers

- ◇ Proposal and Verification of Friction Coefficient Calculation Model by True Contact and Oil Film
 (Evaluation of Piston Ring and Sleeve)
Hideharu KOGA・Kenji MATSUMOTO・Yuki ONO 50
- ◇ Heat Pipe with High Heat Transfer Rate by Reciprocating Motion
 (Examination of Application to Automotive Engine Piston)
 Kenji MATSUMOTO 57
- ◇ Reduction of Internal Resistance in High Capacity Lithium-ion Batteries with 3D Lattice-structured Electrode
 Kiyoshi TANAAMI・Toshimitsu TANAKA・Yuji ISOGAI・Shintaro AOYAGI
 Akihisa HOSOE・Hiroshi TAKEBAYASHI・Kazuki OKUNO・Takuma YAMAMOTO 66
- ◇ High Performance Si Negative Electrode Composed of Silicate Inorganic Binder
 .. Makiko TAKAHASHI・Tomohiro KINOSHITA・Kiyoshi TANAAMI・Shintaro AOYAGI
 Takashi MUKAI・Yuta IKEUCHI・Taichi SAKAMOTO・Naoto YAMASHITA 78
- ◇ Oxidation Potential and Absolute Hardness Relationship in Lithium-ion Battery Electrolytes
Yoshiyuki MORITA・Hiroto MAEYAMA・Atsushi FURUKAWA 86
- ◇ Predictive Technique for Seat Belt Submarining Injury by Triaxial Iliac Load Cell
 Kazunori MAEHARA・Masahiro FUSHIMI・Tetsuhiro ARIMA
 Shigeo ITO・Hidenori MIKAMI 93

空港案内ロボットシステムの開発とデザイン

Development and Styling Design of Airport Guide Robot System

齊藤 陽子¹
Yoko SAITO

興石 健²
Takeshi KOSHIISHI

要 旨

「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、人々が行きかう公共空間の一つである空港施設内で案内サービスを行うロボットシステム開発において、コンセプトを「つき添う羅針盤」と定めた。空港関係者、Honda 所員の家族へのアンケート調査を実施し、生の声を聞き潜在的な要望を探りながらデザインを熟成させた。開発の進捗に連動した駆動機構の改良や各種センサ類の成立性を精査し、モックアップや試作機を経て受付ロボットと誘導ロボットを親しみやすく機能的なデザインとして具現化した。

お客様が戸惑うことなく利用できるインタフェースと、空港利用者が混雑する環境でも人と同じように誘導移動できる技術を開発し、コンセプトに沿ったサービス提供の可能性を空港施設実地にて検証した。

ABSTRACT

In an effort to create “a robot that coexists and cooperates with people and performs useful functions in society,” the concept of a “Compass to Accompany” was formulated during the development of a robot system to provide a guide service inside an airport facility as one public space in which individuals are coming and going. A questionnaire was administered to airport staff and to families of Honda employees, and a design was brought to fruition that entails identifying a potential request while listening to a live voice. Thorough consideration was given to enhancements to driving mechanisms and to the feasibility of various types of sensors associated with advancements in development; mockups and prototypes were obtained; and reception and guide robots were realized as easy to talk to, functional designs.

Development efforts yielded an interface that guests can use without confusion and a feature capable of performing guided movement in the same manner as a human, even in an environment crowded with pedestrians, confirming the potential of offering a service consistent with this concept in an actual airport setting.

1. 背景

1.1. Honda ロボティクス開発の背景

Honda は 2030 年ビジョン「すべての人に、『生活の可能性が広がる喜び』を提供する」を掲げ、その取り組みの一つとして ASIMO に代表されるロボットの開発⁽¹⁾を継続して推進してきた。さらに人のすばらしさが際立つロボティクス社会の実現を目指し、ロボットが単なるデモンストレーションではなく実際に人の役に立ち人と共存する姿を模索した。

近年、テレワークや Web 会議などのリモート環境を前提とした生活様式への変化、人を介さないサービスへの需要など、社会環境の変化や生活レベル向上への関心から人と共存可能なロボットの需要がより高まってきている。また労働力不足の解決策としてもロボットが期待されており、その分野として配送・清掃・案内業務が挙げられる。とりわけ案内業務においては多様な国や地域の人々に対応するための多言語対応が重要な課題であるが、国内に多言語で情報提供できる人材を確保することは容易ではない。スマートフォンなどの個人情報端末が普及し多言語での地

¹ ライフクリエーションセンター

² デザインセンター

図アプリを使った情報提供も進んでいるが、ある程度のメディアリテラシーが必要とされる上、施設内探索など移動を伴う困りごとと解決のために自身の端末で享受されるサービスには限界がある。

我々は、施設が提供する既存サービスとロボットシステムの連携により施設利用者が知らない場所でも戸惑うことなく移動できるシステムの実現を目指した。

1.2. 空港案内ロボット開発の背景と概要

本開発では検証先の施設を成田国際空港（以下、成田空港）とし、成田国際空港株式会社とともに空港におけるロボット利活用に関する共同研究を実施した。成田空港はイノベーションの推進による生産性革命のためにロボット導入を計画・実施している公共空間施設である⁽²⁾。我々は空港関係者と、空港利用者や施設運営側の困りごとを解決し、かつ先進的なアプリケーションを模索しながら Fig. 1 のようなロボットの利活用イメージを検討した。そして人の多い環境でスムーズに移動するロボットの自律移動技術活用のうち、技術課題の多いチャレンジングなテーマとして案内サービスを設定した。案内は配送や清掃と比較して、ロボットが混雑環境を人と同じスピードで移動し、対向者や障害物検出時に止まることなくスムーズによけることを要求されるためである。両社間でこのような議論過程を経て空港案内ロボットシステムの開発を開始した。

空港利用者を待ち受ける時の案内ロボットシステムの姿を Fig. 2 に示す。本システムは、広い施設の中でロボット案内サービスの存在をアピールし、またロボットの住み家として位置づけたロボットホーム、その中でお客様と接し受付案内を担当する受付ロボット、ロボットホームを始点に空港内を移動しながら実際にお客様を目的地まで誘導案内する誘導ロボットで構成し、それらを運用システムと名付けたクラウド上のシステム⁽³⁾により連携させ運用する。

空港利用者のロボット使用の流れは Fig. 3 の通りである。受付ロボットはタッチパネル式のディスプレイに目的地までの地図やお勧めの店舗などの情報を表示し、お客様とインタラクションを取りながら詳しくじっくりと案内を

行う。その一方で誘導ロボットは表示する情報を絞り軽量化することで、運動性能を向上させ人々が行きかう空間をきびきびと案内を行う。受付ロボットと誘導ロボットに役割を分けているが、それぞれはシームレスにつながり、お客様に案内サービスを提供する。

これらの実現により、お客様にはロボットに目的地まで案内されたという新しい体験、成田空港には案内サービスの新しい形を提供できる。そしてロボットが人と共存する環境下で働き続け人手不足を補う新たなサービスを創出する。

本稿では、案内ロボットシステムのコンセプトとデザインについて、そして新たに開発した機能と成田空港での検証について紹介する。

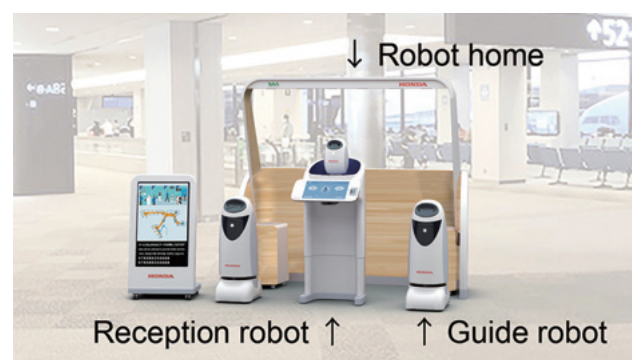


Fig. 2 Robot home, reception robot, and guide robot



Fig. 3 Utilization flow of guide robot service

2. コンセプト

人々が行きかう公共空間をスムーズに移動し、人に不安を与えず案内サービスを行うロボットにふさわしい佇まいや仕草を検討し、さらに案内サービスを受けるお客様の気持ちはどんな状態が望ましいのかを考察し、そのコンセプトを「つき添う羅針盤」と定めた (Fig. 4)。

「つき添う」は心地よい距離感で気にかけてくれ、安心できる存在であることを示し、「羅針盤」は目的地への方向とルートを示す正確無比なツールであることを示す。空港で出会い案内サービスを受けたあと、また会いたくなるような心に残る存在となることを目指している。



Fig. 1 Image of robot utilization at airport



Fig. 4 Development and styling design concept

3. 誘導ロボットのデザイン

3.1. デザインプロセス

外観デザインの変遷を Fig. 5 に示す。

まず、UNI-CUB⁽⁴⁾で開発した自在移動機構をベースに機能最優先の極めてシンプルなデザインとした [Fig. 5(a)]。

次に成田空港で人が少ない時間帯に Fig. 6 で示すように、パネルで作成した疑似モデルを持ち込み、使用されているカートやベビーカーなどの比較を行い、それらに埋没しない存在感をもつが威圧的ではない全高 1100 mm 前後をロボットの最適サイズと定めた。駆動機構は人の中での活動で考えられる多方向からの入力に対しても均等に反応でき、かつ床面投影面積を最小化できる、ボール駆動^{(5),(6)}に移行した。デザインは仮にロボットが転倒した場合に転がり続けることを防ぐ六角断面のボディ形状で推進した [Fig. 5(b)]。

試作機での動作テストを行いながらリファインを進め 2018 年 4 月に国際空港展に出展し、将来の空港でのサービスの姿を示した。さらにグラフィックを変更し 2019 年 1 月にラスベガスで実施された電子機器見本市 CES にて P.A.T.H. Bot と称し動的展示を行った [Fig. 5(c)]。デザインへの反響は、決して否定的ではないものの印象には残りにくいものでもあった。これは人々が物珍しさからロボッ

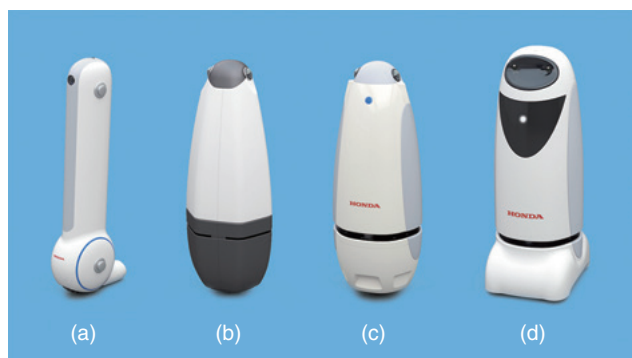


Fig. 5 Design process

トに近づくことで案内業務に支障が出る懸念を払拭するため、あえて無機質な外観としたことに起因すると考えられた。空港内で実際にロボットに案内をしてもらうお客様の気持ちからすると、もう少し血が通った感じがする、生きているようなデザインが望ましいと思われ、3.2. 節で述べるデザイン調査の結果、および 3.3. 節で述べる ASIMO デザインとの共通イメージを反映させ、つき添う羅針盤コンセプトに昇華させた。

さらに空港でのテストを繰り返し、より認識精度を向上させるためにボディ両サイドに配置していた魚眼カメラを、5 眼レイアウト (前方二つ・上方二つ・後方一つ) の広角カメラに変更し、駆動機構は走行時の安定性を向上するため、ボール駆動から差動二輪駆動とした。この駆動方式では真横への移動ができずインタラクションの表現が限られるものの、取り扱いが容易になり挙動の安定度が増し、視覚的な安心感を高めることができた [Fig. 5(d)]。

3.2. デザイン調査

つき添う羅針盤コンセプトを現す外観デザインとして、つき添う感＝親しみやすさを重視した丸みを帯びた案、羅針盤＝機能性を重視した直線的な案、そしてそれぞれの特徴をもつ中間的な案を検討し、原寸大モックアップを作成した。さらに案内サービス中のロボットが表示するサインエージ動画を作成し、PC 画面上で確認できるようにした。

それらを空港スタッフの方々や Honda 所員の家族に見ていただき、ヒアリングとアンケート調査でコンセプトが狙い通りに受け取られるか否かを確認した。結果は当初の予想通り、親しみやすさを重視した案の評価が高かったものの、肝心の目的地までの正確な案内は難しい印象を与えていた。その他の案は案内をして欲しいロボットに該当しないとの回答が得られ、いずれの案もコンセプトに達していないことが分かった。

また特筆すべきは、子供と大人では回答の差異が見られなかったことが挙げられる。子供は親しみやすい案のポイントが高くなることを予想していたが、そのようなことはなかった。



Fig. 6 Study of robot heights in Narita Airport

3.3. ASIMO デザインとの共通イメージ

ASIMO が 20 年にわたり一定の人気を得ることができている理由として、親しみやすさを狙った媚びたデザインではなく、そのコンセプト「先進性と親和性の調和」(Fig. 7)の通り、機能に実直でシンプルなデザイン⁽⁷⁾に由来するものと考えている。空港案内ロボットも ASIMO と同様にシンプルで機能的なかたち、それでいて冷たなく生きている雰囲気をもたせることを狙い、顔の形状、丸みのあるボディ、腕を想起させるサイドパッド、サイネージエリアをデザインした。さらに外観塗装色を ASIMO と同じホワイト・グレー基調とした (Fig. 8)。その結果、空港内で案内サービスを行うのに理想的と考えられる、つき添う羅針盤コンセプトを親しみやすく機能的なデザインで具現化することができた。

3.4. サイネージのデザイン

空港内でお客様を誘導案内するにあたり、最適なサイネージを検討した。空港利用者がいない時間帯に、Fig. 9 に示すように既存のリモコン式ロボットに小型モニターを設置の上、サイネージ情報を表示し、お客様に扮した所員が後をついて行き案内誘導を疑似体験した。その結果、以下のことが分かった。

- ・ 表示内容が多いと画面を注視し、周囲を見ず危険。
- ・ 情報量が多いと、その理解のために歩行速度が遅くなる。
- ・ 案内をされるお客様に加え、周囲の方々への表示も必要。

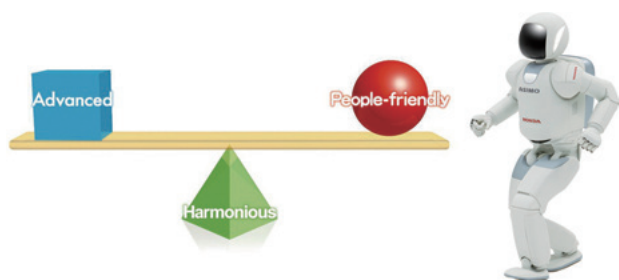


Fig. 7 ASIMO design concept



Fig. 8 Final design

そこで必要な時に必要な情報のみをシンプルに表示することをサイネージの方針とし、下3つの観点で整理を行い、Fig. 10 で示すようにボディ前面と背面にサイネージ表示エリアを設けた。前面は案内されるお客様と周囲の人々に向けて、背面はロボットの後方について歩くお客様に向けての情報表示を行う。

- ・ 案内開始時:目的地を表示する。表示図形は空港で使用しているピクトグラムに準ずる。
- ・ 移動タイミング:曲がる方向、危険回避、停止
- ・ 相手を認識している時:挨拶や気配り

上記に加え 3.2. 節で述べたデザイン調査の際、成田空港のユニバーサルデザイン推進者からの指摘として、色覚弱者には白地に青文字などの表示ではコントラストが弱く識別しにくく、黒地に白や黄色でコントラストを最大限高めることが最良であるとの重要な知見を得た。そこで視力が弱くなっている高齢者や色覚弱者に対しての識別性を上げ



Fig. 9 Simulated experience of temporary guide robot



Fig. 10 Guide robot signage displays

るため、黒色画面に白の発光色とし、待ち受け、挨拶、案内中、到着などサインージ表現を作成した。

4. 受付ロボットのデザイン

人々が戸惑うことなく自然に空港案内サービスをご利用いただくには、どのようなアプローチが望ましいか考察した。通常は人と人が相対するのが理想と考えられるが、言葉が通じない心配や、案内サービスカウンターが混雑し忙しそうのため遠慮したりなど、人であるがゆえに躊躇してしまう場合もある。一方で完全な機械式の受付は合理的ではあるが、使い方が馴染めず不安になってしまうこともあり、案内サービスとして十分とは言えないシーンもある。単なる画面のインタフェースではなく、Fig. 11 に示すようにフィジカルな存在であるロボットが相手をしてくれる方法が、人々を惹きつけ、より安心感が得られ有効であると考えた。

空の旅という非日常の楽しい世界へ誘う存在として、達磨、招き猫、福助など古より人々の心をとらえている神的なオブジェのプロポーションを参考に、誘導ロボットとの共通性をもたせた外観デザインとした。お辞儀 (a)、かしげ (b)、振り向き (c) などの動作でお客様に対応する。また、19.5 インチの大きなタッチパネル式のディスプレイで目的地の情報を詳細に表示することで視覚的にお客様の理解を高めることを狙った。ロボットとタッチパネル部は、車いすユーザの方、背の高い方、それぞれ無理のない姿勢での対応を可能とするため、電動昇降式とした⁽⁶⁾。

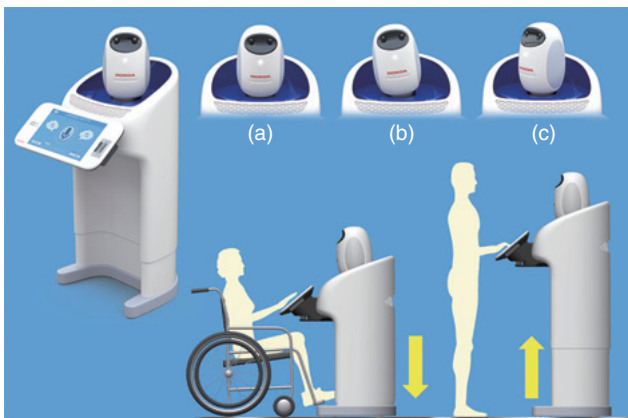


Fig. 11 Reception robot design

5. インタラクションデザイン

5.1. 笛の音とボディアクション

受付案内では、人型でないロボットが人間の言葉をちぐはぐに話すことは違和感を生じさせるため、言語に影響さ

れない音とボディアクションによる働きかけが効果的であると仮定した。空港内は館内アナウンスや雑踏雑音が多いが、その中でより人の耳に届く効果を狙い、ロボットの発する音は笛の音 (雅楽で用いる竜笛) をモチーフに作成した。

受付ロボットの稼働時、誘導ロボットの誘導案内中にメロディを奏で、揺動や回転などのシンプルなボディアクションをすることで受け手側の想像を促すことを狙った。あくまでも主体はお客様側にあることを大切にしている。

5.2. 印象付けるかたち

空港に訪れる外国人の方々にさりげなく日本を感じていただくことを狙い、Fig. 12 に示す平安時代より用いられている日本古来の伝統模様である麻の葉文様を誘導ロボットでは背面の通風孔に、受付ロボットはスピーカー部に配置した。



Fig. 12 Japanese traditional pattern, Asanoha

6. システム構成と特徴

6.1. システム全体構成

案内ロボットシステムはロボットホーム、受付ロボット、誘導ロボット、運用システム、および空港からリアルタイムで提供される情報で構成される (Fig. 13)。

ロボットホームは、受付ロボットと誘導ロボットの住み家としての位置づけである。混雑した中でも際立つよう目印に背の高い構造物を置き、目に留めた空港利用者がロボットの役割を分かるようデジタルサインボードで説明をする。誘導ロボットは案内を終えたあとロボットホームに戻り、専用の充電器でバッテリーに充電をして次の案内の準備に入る。誘導ロボットの詳細は 6.2. 節にて述べる。

運用システム⁽³⁾は、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の運用管理を担う。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ことが狙いであり、そのためクラウドおよびIoT通信を用いたサーバレスな構成としている。

空港からリアルタイムで提供される情報は、目的地の検索時に使用する。これにより、空港内にあるインフォメーションセンターでの対面案内やデジタル案内板などの、他

の案内サービスが提供する回答と同一の地図や名称を用いて情報を提示する。また、フライトの時刻やゲート番号に変更があった場合も、その最新フライト情報を参照可能とし、お客様の混乱を防ぐ。

受付ロボットは、お客様のニーズから目的地を探して地図と経路を表示する機能と、誘導案内に必要な情報を運用システムにアップロードする機能を有する。案内サービスを受けるお客様が最初に接する点であり、戸惑うことなく利用できるインターフェースとすることを狙いとした。詳細は、「空港案内受付ロボットの開発」⁽⁸⁾にて述べる。

6.2. 誘導ロボットの特徴・機能

誘導ロボットは、お客様を目的地まで誘導移動する機能と誘導完了後に元の位置へ戻ることが役割である。混雑した中でもスムーズに移動することが狙いであり、そのため人とのすれ違い時や進行方向にある障害物を検出しても止まったりせず、人と同じようななめらかな経路を取ることが特徴である。

ハードウェア構成を Fig. 14 に、主要諸元を Table 1 に示し、この構成と諸元設定となった空港の環境条件と考え方を述べる。

- (1) ロボットの全高は、3.1. 節で述べた通り人やカートなどで混雑した環境でも周囲の人から視認されやすく、かつ威圧感の出ない値と定める。
- (2) フットプリントは、周囲の人の歩行の妨げとならないよう、またスムーズな経路選択ができるサイズを定め、車輪レイアウトはモータによる駆動輪2輪、並列オムニ車輪による従動輪4輪とする。
- (3) 重心位置は、障害物や構造物に接触してもバランスを崩して転倒しないよう低重心とする。そのため、機能上レイアウト位置に制約のない部品を下部にレイア

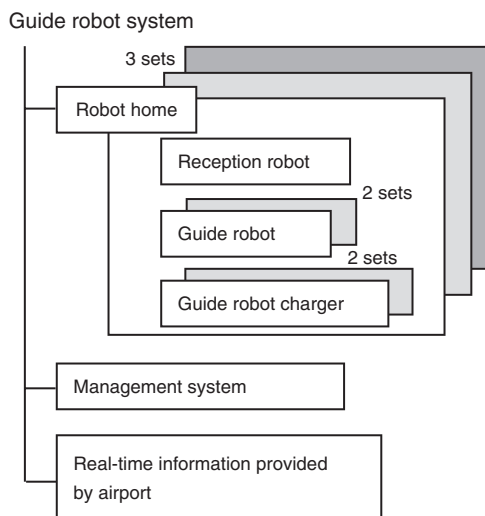


Fig. 13 Guide robot system architecture

Table 1 Guide robot specifications

Height [mm]	1080
Footprint [mm]	410 (Width) x 510 (Depth)
Height of center of gravity [mm]	300
Weight [kg]	33
Speed [m/s]	Max. 1.11 (4 km/h)
Acceleration [m/s ²]	Max. 1.67 (6 km/h/s)
Slewing angle speed [deg/s]	Max. 90
Braking distance [mm]	350 or less
Allowable difference in height [mm]	Max. 5

ウトする。

- (4) 移動速度、加速度、旋回角速度、制動距離は人と同じような移動が可能となるように定める。
- (5) ロボットが踏破すべき段差は、最大段差からマージンをもって定める。段差踏破時の電装品の衝撃緩和のため、サスペンションを実装する。空港内最大段差は床面の種類(短毛カーペット・リノリウム・化粧タイルなど)が変わる場所などでの3 mmである。また階段などの大きな段差にはロボットは侵入しないこととしている。
- (6) カメラは、3.1. 節で述べた通り5眼レイアウトとする。前方カメラは人・物体検出に、上方カメラは天井特微量抽出による自己位置認識に、後方カメラは誘導されるお客様(フォロー)認識に用いる。
- (7) プロジェクタは、3.4. 節で述べた通りの要件実現のため

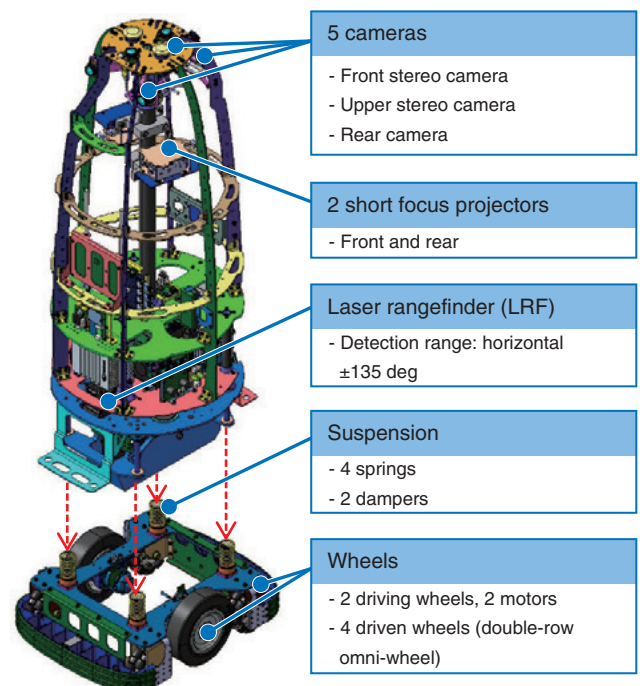


Fig. 14 Hardware configuration of guide robot

め、短焦点プロジェクタを前方表示・後方表示の2台搭載する。

- (8) レーザーレンジファインダ (LRF) は、前方の人・物体検出と自己位置認識に用い、人や空港内構造物を検出できる高さにレイアウトする。

誘導ロボットの自律移動の特徴は、混雑環境下でも人と同じように誘導しながら移動ができることにある。この特徴を定量化するため、誘導ロボットが移動可能な混雑の目標レベルを定める。混雑状況指標としてサービスレベルの定義⁽⁹⁾を用い、「歩行者が各自の歩行速度を選択したり追い抜いたりする自由度が制限される状況」レベルを目標レベルとした。このレベルを選択した理由は、空港内混雑環境でありうるサービスレベルのうち、誘導ロボットの自律移動において最も難しいレベルであるためである。これ以下のレベルでは人が少なくロボットは簡単に移動をすることができ、またこのレベル以上の混雑であると経路選択の自由が完全になくなることで、経路選択に関する難度が下がる。

誘導ロボットのフォロウ認識、自己位置推定、障害物(人)回避の各機能についてそれぞれ混雑環境における課題と解決策を挙げる。

- (1) フォロウ認識では、混雑環境下でフォロウと誘導ロボットの間に他の空港利用者が交差することによる、フォロウ隠れが発生しても認識を続けられ、フォロウが心地よいと感じる距離を保つ。この機能の詳細は、「空港案内誘導ロボットにおけるロバストなフォロウ認識機能の研究」⁽¹⁰⁾にて述べる。
- (2) 自己位置推定では、混雑環境下で単一のセンサでは周囲の構造物の情報取得ができなくとも、複数のセンサ(LRF, カメラ, 慣性センサ)で取得した情報を組み合わせることで自己位置ロストを防ぐ⁽¹¹⁾。
- (3) 障害物(人)回避では、混雑環境下での人の行動予測が及ばずロボットがぎこちない動きとならないよう、人の回避行動を教師データとして学習実装し、人と同じようなスムーズな回避経路を選択する⁽¹²⁾。

7. 実現性の検証

期間を連続する3か月間(休日を除く)、稼働時間を9時から17時の8時間、場所は階段・エレベータを使用せずに移動できる1フロア全域と定め、サービス実証を行うことを想定した。また、お客様にサービスを提供する機会を増やすため、ロボットホームをフロア内に3か所設置することとした。以上より、実証期間内で案内を体験するお客様数は、受付ロボットによる経路案内を4500組以上、誘導ロボットによる目的地までの誘導案内を1000組以上となると想定した。また、毎日2万人の空港利用者が受付ロボットと誘導ロボットが人と共存して働いている姿を目に

することが可能である。

上記のように想定した条件の下でのサービス実証が実現可能であることを検証するため、空港利用者が行きかう成田空港内で、受付ロボット、誘導ロボット、およびこれらをつなぐ運用システムで案内ロボットシステムを稼働させ、Fig. 3で示したロボット使用の流れを模擬した。Fig. 15は開発関係者がお客様に扮して実施した検証の様子である。

一方、一般のお客様へサービスを提供するならばこの構成では不足事項が出るであろうと想定し、教育された専用スタッフを配置することで、徹底したオペレーションができるよう対策した。言い換えれば、サービス実証においては人手により対処することに定めた、以下のような項目が今後の完全自動化のための課題として明確に洗い出された。

- ・ ロボットホームでの接客面での機能補充

デジタルサインボード説明で分からなかったお客様からの質問回答や混雑時のサービス待ち時間の提示、タッチパネルの使い方が分からなかった場合の説明を自動化する。

- ・ 専用スタッフの作業簡便化

誘導ロボットのバッテリー充電、両ロボットの消耗箇所チェック・メンテナンス時期の把握、日報記入などの日々のルーチンワークを自動化、または電子化する。

- ・ 誘導ロボットの機体面の機能拡充

案内中のお客様、および周囲の空港利用者からの移動中の問いかけに対応できるようインタラクションインタフェースを追加する。



Fig. 15 On-site simulation at Narita Airport

8. まとめ

新たなロボットシステムの開発は、Hondaだけでなく共同研究先である成田空港にも有用とし、さらに空港利用者の満足につなげる必要があるとして、空港で活躍するロ

ボットサービスの新しい姿を描いた。つき添う羅針盤コンセプトを定め、それに基づく受付ロボット、誘導ロボットを親しみやすく機能的なデザインで具現化した。

これら2種類のロボットを運用システムで連携する空港案内ロボットシステムを構築し、空港利用者が行きかう成田空港内で実現性の検証を実施した。

その結果、空港内で役割をもった先進的なロボットが連続してサービス提供するために必要な知見を得ることができた。

9. おわりに

空港などの公共施設やレストランなどのサービス施設は多種にわたる業務の省人・効率向上のため技術的に解決すべく日々取り組んでいる。この中でロボティクス技術は生活様式の変化によりさらに不可欠なものとなっており、ロボットが当たり前のように役割をもって稼働する風景は近々現実のものとなるであろう。

人と共存する環境下で働く自律移動ロボットの実現には多段の課題が屹立しているが、必要なステップはデモンストレーションを重ねることではなく、現場でロボット運用の課題洗い出しとその解決策を繰り返し検証しながら社会的な認知につなげていくことである。

本開発で得られた知見を活かし、Hondaが目指す人のすばらしさが際立つロボティクス社会の実現のため、引き続き取り組んでいく。

参考文献

- (1) 重見聡史, 河口裕一郎, 吉池孝英, 川邊浩司, 小川直秀: 新型 ASIMO の開発, Honda R&D Technical Review, Vol. 18, No. 1, p. 38-44
- (2) https://www.naa.jp/jp/ir/keieikeikaku_2019_2021.html, 2019/03/28
- (3) 西宮憲治, 金子真也: 案内ロボット運用システムの開発, Honda R&D Technical Review, Vol. 32, No. 2, p. 51-55
- (4) 矢田渉, 達富由樹, 長谷川誠: UNI-CUB の開発, Honda R&D Technical Review, Vol. 27, No. 1, p. 36-43
- (5) Lauwers, T. B., Kantor, G. A., Hollis, R. L.: A Dynamically Stable Single-Wheeled Mobile Robot with Inverse Mouse-Ball Drive, Proceedings 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, p. 2884-2889, (2006)
- (6) 熊谷正朗, 落合恭也: 玉乗りロボットの開発 第一報 ロボットの実装と基本制御, 東北学院大学工学部研究報告, 第48巻第1号, p. 32-41, (2014)

- (7) 奥石健: 新型 ASIMO のデザイン - 人と相手をし続けるための進化 -, Honda R&D Technical Review, Vol. 25, No. 1, p. 7-13
- (8) 大西潤哉, 益田綾子, 大林千尋, 川崎雄一, 竹部雄貴: 空港案内受付ロボットの開発, Honda R&D Technical Review, Vol. 33, No. 1, p. 9-17
- (9) ジョン・J・フルーイン, 長島正充 訳: 歩行者の空間: 理論とデザイン, 鹿島出版会, 206p., (1974)
- (10) 沙子鈞, 名取洋一, 有泉孝裕: 空港案内誘導ロボットにおけるロバストなフォロウ認識機能の研究, Honda R&D Technical Review, Vol. 33, No. 1, p. 18-25
- (11) 特開 2020-160594
- (12) 特開 2020-160603

■ 著 者 ■



斉藤 陽子



奥石 健

空港案内受付ロボットの開発

Development of Reception Robot for Airport Guidance

大西潤哉¹

Junya ONISHI

川崎雄一¹

Yuichi KAWASAKI

益田綾子¹

Ayako MASUDA

竹部雄貴¹

Yuki TAKEBE

大林千尋²

Chihiro OBAYASHI

要 旨

案内ロボットシステムは、ロボットが成田国際空港で案内サービスを実行するシステムである。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2種類のロボットが協調しながら案内サービスを実行する。受付ロボットは、お客様の窓口となるロボットであり、お客様が目的地を音声とタッチパネルで入力すると、道順を示し、運用システムを通じて誘導ロボットに目的地を送信する。この受付ロボットの開発にあたり、案内ロボットサービスのつき添う羅針盤というコンセプトを分解した機能として、多様なお客様への対応（多言語対応・昇降機能）、戸惑わない対話（音声認識・対話エンジン）、違和感の無いロボットの応答（動き・音・画面）を実現した。ユーザ評価の結果、80%の調査参加者から空港にあれば使ってみたいという回答を得た。

ABSTRACT

We proposed a novel guide robot system that uses robots to provide guidance at Narita International Airport. The system implements the guidance through collaboration between robots having two different service roles: a reception role and a guide role. The reception robot greets guests, shows the route to a destination identified by a guest through voice and touch-screen input, and, by means of the Guide Robot Management System, communicates the destination to the guide robot. As this reception robot was developed, the concept of “Compass to Accompany” in the guide robot system was implemented through the functions of universal design (multilingual support and height adjustment), impasse-free dialogue (voice recognition and dialogue engine), and natural responses from the robot (motion, sound, and display). In user evaluations, 80% of survey participants indicated that they would like to try using the system if it becomes available at an airport.

1. 背景

Honda は 2030 年ビジョン「すべての人に、『生活の可能性が広がる喜び』を提供する」を掲げ、その取り組みの一つとして ASIMO に代表されるロボットの開発⁽¹⁾を継続して推進してきた。

ロボットでの代替が求められている分野として、配送・清掃・案内業務が挙げられる。近年、課題となっているサービス業や流通業などでの労働力不足、とりわけ案内業務においては訪日外国人観光客の受け入れが増えていることか

ら、多様な国や地域からの人々に対応するための多言語対応が重要な課題である。しかしながら国内に多言語で情報提供できる人材を確保することは容易ではない。多言語での情報提供の環境整備は、スマートフォンなどの個人情報端末の普及によって進んでいるが、ある程度のメディアリテラシーを要求されることから、多言語対応可能なロボットが求められる。

空港案内ロボットシステム⁽²⁾は、成田国際空港（以下、成田空港）で案内サービスを行うことでロボットに目的地まで案内されたという新しい体験をお客様に提供して新し

¹ ライフクリエーションセンター

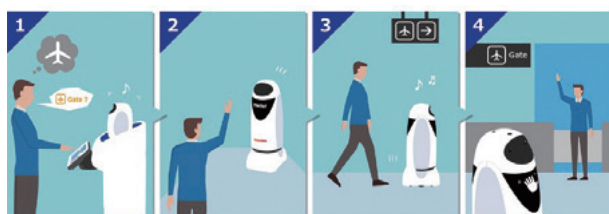
² ライフクリエーションセンター、博士（工学）

い案内サービスの可能性を示すとともに、ロボットがデモンストレーションではなく人の役に立ち人と共存している姿への転換を目的とする。

Fig. 1 に示すように、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2種類のロボットが協調しながら案内サービスを実行する。Fig. 1(b) の受付ロボットは体を揺らしてお客様の注意をひき、お客様が近づいてくるとそちらに体を向ける。お客様がタッチパネルで言語を選択すると受付ロボットはタッチパネルのある正面を向く。

Fig. 1(a) の1で示すようにお客様が行先を話すと、受付ロボットはうなずき動作をし、タッチパネルディスプレイに候補リストが表示される。お客様が候補リストの中から行きたい場所をタッチすると目的地までの地図や目的地の詳細情報が表示される。ロボットと一緒に行くをお客様がタッチすると、Fig. 1(a) の2, 3, 4で示すように Fig. 1(c) の誘導ロボットは運用システム⁽³⁾を通じ、受付ロボットから目的地とお客様顔情報⁽⁴⁾を受け取り、お客様を導きながら案内する。受付ロボットと誘導ロボットに役割を分けているが、それぞれはシームレスにつながり、お客様への案内サービスを提供する。

本稿では、空港案内ロボットシステムにおける受付ロボットについて述べる。



(a) Scenario



(b) Reception robot

(c) Guide robot

Fig. 1 Guide service overview

2. 受付ロボットのコンセプトとシステム構成

案内ロボットサービスはつき添う羅針盤というコンセプトを設定している。つき添うは心地良い距離感で気にかけてくれ、安心できる存在であることを示し、羅針盤は目的地への方向とルートを示す正確無比なツールであることを示す。

受付ロボットの開発においては、つき添う羅針盤という設定コンセプトを以下の(1)から(3)のコンセプトにさらに分解した。これら三つのコンセプトを実現する機能として多言語対応、昇降機能、音声認識、対話エンジン、動き・音・画面の五つの機能がある。Fig. 2 にコンセプトと機能の対応関係を示す。

- (1) 多様なお客様への対応 (多言語対応・昇降機能)
- (2) 戸惑わない対話 (音声認識・対話エンジン)
- (3) 違和感の無いロボットの応答 (動き・音・画面)

多様なお客様への対応は、外国人だけでなく公共の場所での利用ということから車いす使用者などへの対応もできるように設定し、機能として多言語対応、車いす使用者にあわせた高さに調整する昇降機能を実装した。戸惑わない対話は、メディアリテラシー能力に寄らず情報を入手できるように、音声認識・対話エンジンを実装した。違和感の無いロボットの応答は、ロボットに應對してもらった体験をお客様に提供するために、お客様のアクションに対する応答として動き・音・画面を実装した。

これら機能を実現するための受付ロボットのシステム構成を Fig. 3 に示す。本システムはカメラやマイク、Laser Range Finder (LRF) による入力系、入力された画像や音声、点群データを認識する認識系、動作生成系、検索系から構成される。

お客様が近づいてきたことを LRF によって感知したときやマイクからの音声入力があったときにロボットの動作・音が生成され、コンセプトである違和感の無いロボットの応答が実現される。マイクからの音声入力は多言語対

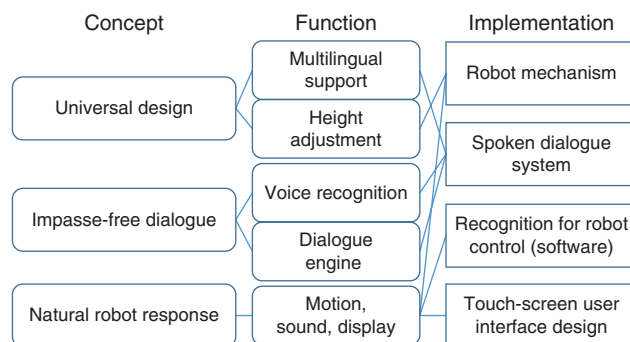


Fig. 2 Table of correspondences among concepts, functions, and implementations

応の行先検索にかけられ候補をディスプレイ表示する。車いす使用のお客様対応時にはスタッフによって使いやすい高さに設定される。

また、運用システム及び誘導ロボットと通信を介して連携し、お客様の目的地を誘導ロボットに引継ぎ、スムーズな案内を実現している。

上記で述べた五つの機能は、Fig. 3 に示したシステム構成に加え、ロボット機構、音声対話システム、認識制御、タッチパネルユーザインタフェースの四つの技術を組み合わせることで実現される。これら四つの技術は、五つの機能との関係とともに Fig. 2 の第3列目に示されていて、その技術内容を、3 から 6 章において説明する。また 7 章では、これら五つの機能の改善点を把握するため、感性的評価を行った結果を述べる。

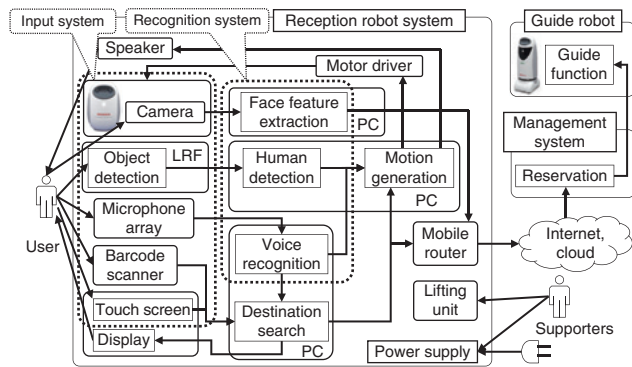


Fig. 3 System diagram

3. 受付ロボットの動作・昇降

3.1. ロボットの動作機構

お客様が受付ロボットに近づき、タッチパネルを操作し目的地検索を開始すると受付ロボットはシーンにあわせた動作を実行する。実際の動作概要を Fig. 4 に示す。

このような動作を実現するためのロボットの動作機構を Fig. 5 に示す。ロボットがお辞儀やかしげといった動作を実現するために、ロボット底部を中心として X, Y, Z 軸を直交させ、各軸を中心として回転可能な構造としている。また、リンクを用いた駆動機構とすることにより、ワイヤハーネスの屈曲を最小限にでき、空港での長期間の運用を可能とした。3 軸の交点となる部分にユニバーサルジョイントを採用し、上下にスライドする軸受けとリンクを介して接続することで、回転を許容しつつ前後、左右方向の動きを伝達している。これら機構部分は株式会社アークとの共同開発である。

このような動作機構によって、コンセプトである違和感の無いロボットの応答を実現している。

3.2. 昇降機能

多様なお客様への対応として、様々な身長や車いす使用者のタッチパネル画面の見やすさや、マイクの集音性能を向上させるために昇降機能を備えている。昇降機構について Fig. 6 に示す。



(a) Turning around (tracking person) (b) Bowing (receiving voice input) (c) Tilting (searching)

Fig. 4 Robot motion examples

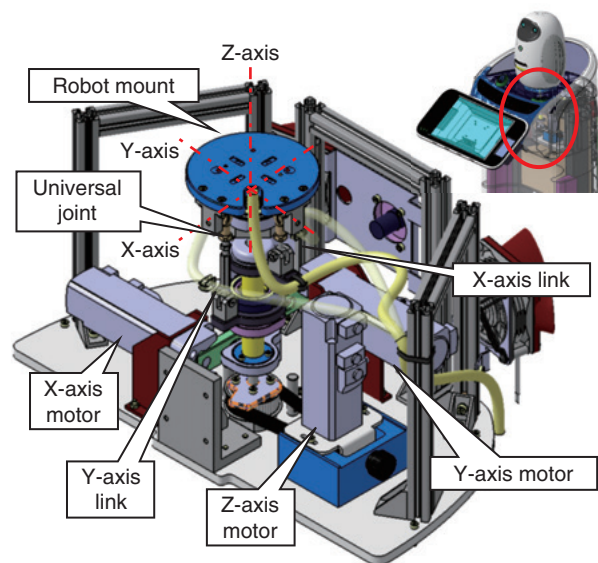


Fig. 5 Robot drive mechanism

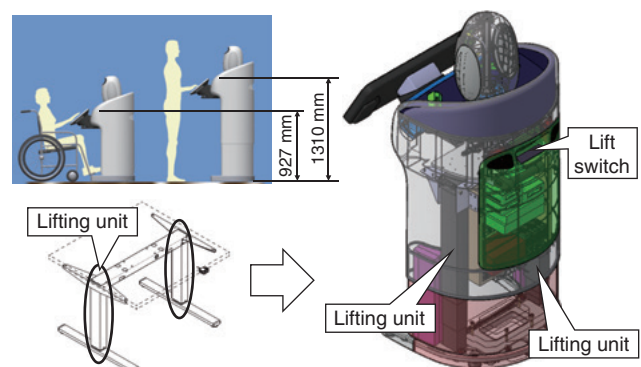


Fig. 6 Lifting mechanism

車いす使用者から欧米人の高身長までカバーできるように、タッチパネル面の高さが927から1310 mmまで可変する仕様としている。昇降ユニットには市販の昇降デスク用のユニットを流用している。

このような昇降機構によって、コンセプトである多様なお客様への対応を実現している。

4. 音声対話システム(マイク・対話エンジン)

Fig. 7に音声対話検索システムのシーケンスを示す。お客様が発話するとマイクが音声信号に変換し、Voice Activity Detection (VAD)によって人の有声部分の信号だけが取り出される。処理後の音声を対話エンジンであるHoundifyに送信し、認識・理解した目的地検索結果が返されタッチパネル画面上に表示される。お客様が検索結果一覧から一つを選択すると、成田空港公式アプリ(NariNAVI)から情報を得て、その詳細情報(地図含む)を表示することができる。

4.1. マイク

音声認識用マイクロフォンは、空港での騒音環境下での正確な音声認識を行う必要がある。音声認識・対話エンジンの設計要件として、空港内を模擬した騒音環境下におい

て、音声認識結果のCharacter Error Rate (CER)を10%以下、音声認識結果の文意を考慮した認識評価であるタスク失敗率を15%以下と設定した。設定値は音声認識・音声対話技術を開発するフェアリーデバイセズ社の公共施設での音声応答サービスの知見に基づいている。

マイクロフォンアレイはフェアリーデバイセズ社製のバー型16chマルチマイクロフォンシステムを使用する。マイクロフォンアレイを用いれば、雑音下でも音源の方向を推定したり、特定の方向から到来する音源のみを分離抽出したりすることが可能になる。お客様の想定立ち位置からの音と周囲の騒音を分離して、お客様の発話音声だけを取り出すようパラメータ調整を行い、CER2から4%程度、タスク失敗率11%程度を達成し、スムーズな音声認識を行うに十分であるとした。なおマイクロフォン付近でのお客様の想定入力音圧は65から75 dBとしている。

4.2. 対話エンジン

多様なお客様に対応するため、対話エンジンはSoundHound社に依頼して音声対話AI開発プラットフォームHoundifyを改修して使用している。この対話エンジンは日本語、英語、中国語、韓国語の4言語において日常会話に近い言い回し及び単語を認識できるように想定対話のレベル分けを行い、ユーザとしてこれぐらいは回答して欲しいというレベル分けを行い、基準内、基準外とも70%程度認識できる。音声認識・対話エンジンの設計要件として、7章でのユーザ評価の結果を受けて許容レスポンス時間を音声入力から結果表示まで3秒以内とした。従来は音声ファイルから一旦テキストに変換して対話エンジンにかけるが、使用している対話エンジンHoundifyは音声ファイルから直接レスポンスを生成するのでレスポンス時間を短縮でき、音声入力から3秒以内で結果を表示できた。

5. 認識制御(ソフトウェア)

お客様を呼び込むことを目的とし、ロボットがお客様に顔を向ける機能を実現するため、周囲の人検出、対象ユーザ選択及びロボット姿勢制御をシンプルに構成した。

周囲の人を検出する方法としてLRFを用いて足や胴体を検出する方法が提案されている⁽⁵⁾⁻⁽⁷⁾。受付ロボットが設置される環境では、ロボット周囲に複数人が移動またはたたずんでいることが想定されるため、胴体をLRFにより検出することとし、人の胴体をライン走査できる高さ範囲とした。ロボットには高さを調整する昇降機能があるが、お客様がタッチパネル操作位置に立つまでロボット高さは標準高さにしており、標準高さで車いすから高身長の人までLRF検出できることを確認した。この計測エリア

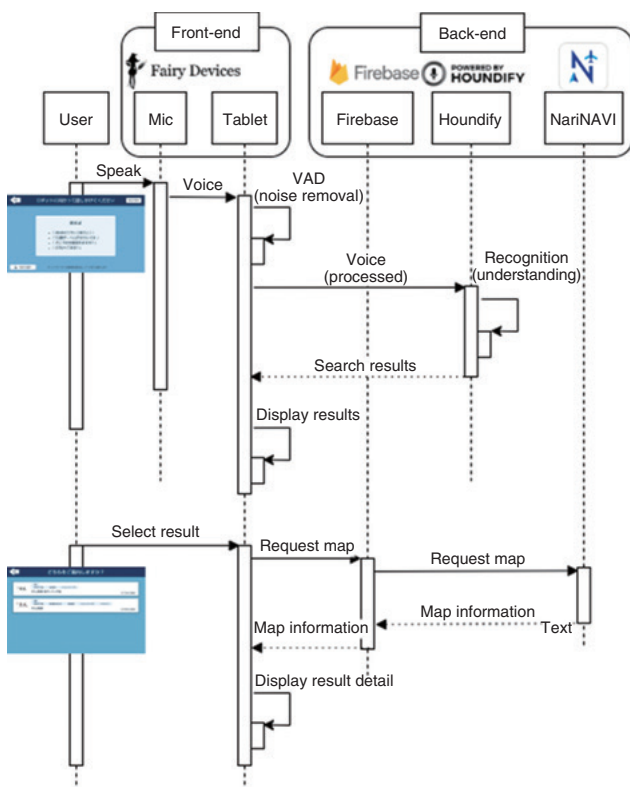


Fig. 7 Sequence diagram for dialogue search engine

及び設置位置の概要をロボットの頭上から見た図として Fig. 8 に示す。

人検出について Fig. 9 に概念図を示す。LRF で測定された点群のうち、点群を基準とした近傍の点の差分があるしきい値以内の集合をクラスタとした。人間の胴体に属するものは大まかに楕円をとると仮定し、クラスタの幅と向きでクラスタが人かどうかを判断した。具体的には、式 (1) に示すクラスタ端点間距離 $\|v_w\|$ が人の胸幅に収まる、

$$l_{\min} < \|v_w\| < l_{\max} \quad (1)$$

とする。ここで $l_{\max}$, $l_{\min}$ は身体胸幅長の最大値及び最小値である。いずれも人体寸法の胸幅を基準に実験的に調整した。

受付ロボットに興味のある人は、ロボットに対して身体を向いていると考えられる。人の向いている方向については、Fig. 9 での人と判断された人クラスタ端点間の中点から、クラスタ中心へむすんだベクトル v_c と LRF 原

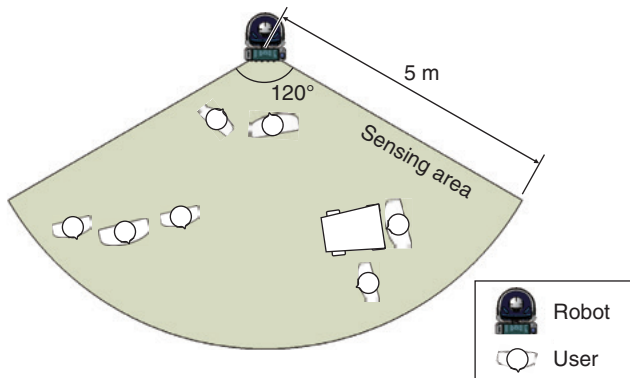


Fig. 8 LRF sensing area

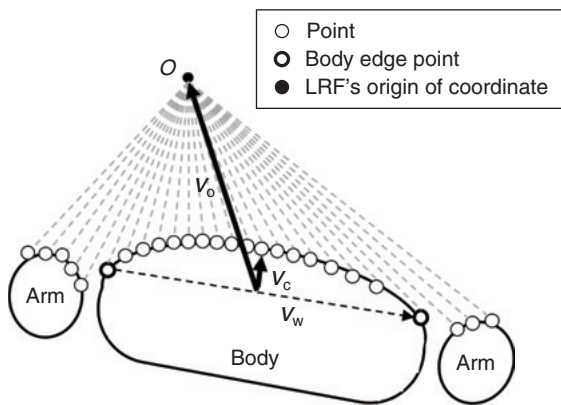


Fig. 9 Definition of vectors for detecting people from point cloud data

点 O へむすんだベクトル v_o のコサイン類似度が式 (2) となる人クラスタをロボットの方を向いている人として扱った。

$$\cos(v_o, v_c) > 0 \quad (2)$$

ロボットの方を向いている人の中で、ロボットからの距離 v_o が最短の人が対象ユーザとして選択される。ロボットの姿勢制御は、この対象ユーザとロボットの位置関係から、ロボットの向くべき姿勢角に変換し、これを制御入力とする姿勢角制御系とした。対象ユーザがタッチパネルを操作すると 3.1. 節で説明した動作を行う。

6. タッチパネルユーザインタフェース設計

6.1. 設計思想

すべてのお客様に対して戸惑わない対話を実現するため、ロボットの前方にタッチパネルを設置する。お客様はタッチパネルを操作することで、受付サービスを受ける言語を選び、目的地の検索方法としてロボットとの音声対話から絞り込むか、タッチパネル上に表示される一覧画面から絞り込むかを選択できる。このように様々なお客様のニーズに対応できるシステムであることが特徴の一つである。

6.2. ユーザインタフェースフロー

タッチパネルの画面構成やユーザインタフェースフローは 7 章で行ったユーザ評価調査の結果に基づいて構成した。お客様がタッチパネルに向かい、Fig. 10 の 1 に示すようにチュートリアル画面で該当する言語を選択し、個人情報保護に関する同意画面、ロボットの注意事項の説明画面を承認すると、Fig. 10 の 2 のように音声チャット画面が表示される。受付サービスではロボットとの対話を楽しむことも目的の 1 つであるため、音声対話での検索を一覧からの検索よりも優先した。その後、Fig. 10 の 3 のように検索結果のリスト一覧が表示される。リスト一覧の上部には検索した文字が表示されるため、音声認識が間違っている場合はその画面でお客様が気づけるようにした。リストから目的地を選択し、画面上の表示をタップすることで、Fig. 10 の 4 のように目的地の詳細な情報が記されている結果画面に推移する。検索開始から検索完了までを最少 3 タップとし、ユーザビリティを向上させた。結果画面では NariNAVI を使用し、現在地から目的地までの地図が表示される。地図上にランドマークを載せることで、お客様にとってのわかりやすさを向上させた。最後に、目的地にロボットと一緒に向かうか、お客様ご自身で向かうかを選択すると、受付サービス終了を示す画面が表示される。



Fig. 10 User interface flow

7. ユーザ評価調査

7.1. 目的

本調査は2章で述べた機能の改善点を把握するため、以下の点に着目し、感性的な評価を行った。

1. タッチパネルの使いやすさ
2. ロボットの印象
3. 受付サービスに対する感情や利用意向

7.2. 調査手法

調査参加者は日本人5名(男性2名, 女性3名), 外国人5名(男性3名, 女性2名)であった。日本人は日本語が母語の日本国籍, 外国人は英語が母語の海外国籍の者とした。年齢や音声認識端末・ロボットとの会話経験の頻度に関して、できるだけ多様となるように選定した。

調査は2020年1月から2月にかけて本田技術研究所の和光ビルで行った。ビル内の会議室に実際の案内サービス提供環境に近い状態を再現した。調査はユーザビリティテスト及びインタビューを用いて行った。調査参加者は受付サービスを利用して、六つの課題に取り組んだ。課題の内容の一例として、ラウンジに行きたいことを伝えた上で、その場所に、ロボットと一緒にいく依頼をすることが挙げられる。調査者は調査開始時に調査参加者に調査内容の説明を行い、インフォームドコンセントの手続きを踏んだ。

タッチパネルの使いやすさの評価では、先行研究⁽⁹⁾を参考にし、今回の受付サービスの評価に適した質問紙を用いた。調査参加者はすべての課題終了後に、質問紙に対して1(そう思わない)から5(そう思う)の5段階で評価を行った。評価後のインタビューにおいて、評価の理由を確認した。

ロボットの印象の評価では、Human Robot Interaction (HRI) 分野で標準化されている評価指標であるGODSPEED⁽¹⁰⁾を用いた。これはHRI分野における主要な5つの概念(擬人化, 有生性, 好感度, 知性の知覚, 安全性の知覚)から構成された質問紙である。例えば擬人化の場合、「偽物のような-自然な」という対の言葉が用意され、偽物のように感じた場合は1点、自然に感じた場合は5点のように5段階で評価を行う。それらに加え、独自の4項目として「自分に無関心な一気にかけてくれる」、「不安を感じる-安心を感じる」、「不快な-心地良い」、「不正確な-正確な」を用いた。これは今回の案内サービスのコンセプトであるつき添う羅針盤を評価する項目として選出した。調査参加者はすべての課題終了後に質問紙に対して評価を行った。評価後のインタビューにおいて、評価の理由を確認した。

受付サービスに対する感情や利用意向の評価では、Affect Grid⁽⁸⁾という評価指標を用いた。Affect Gridはその時に持つ感情を二つの直交する軸(快-不快と活性(覚醒)-不活性(眠気))で表現する。調査参加者は「少し快でかなり覚醒している」のように、2軸それぞれの度合を10段階で評価し、2軸で構成される平面上の対応する点に印をつけた。調査参加者は課題遂行前及び一つの課題を終えるごとに、感情状態に関して評価した。これは受付サービス

体験前後や体験中における感情の時系列変化を検討するためである。評価後のインタビューにおいて、受付サービス全体の印象や実際に空港でこのサービスに遭遇したことを想定した際の利用意向を確認した。

本調査は、事前に本田技術研究所の研究開発における生命倫理委員会の承認を受けて実施している。

7.3. 調査結果と考察

タッチパネルの使いやすさについて、全参加者の調査結果を Fig. 11 に示す。青線が日本人の評点平均値、赤線が外国人の評点平均値である。平均評定値は、日本人参加者が 3.57 であり、外国人参加者が 4.06 であった。

インタビューも含めた調査結果から、五つの改善点があることが推察された。それらは、音声入力時の反応（認識の遅さ、認識成功のわかりづらさ、認識失敗時の対応）、マイクボタン（ボタン動作のわかりづらさ、話しかける場所のわかりづらさ）、一覧表示（項目のまとまりのなさ、挙動の不便さ）、地図画面（地図の小ささ、拡大ボタンのわかりづらさ）、キーボード入力（文字入力のわかりづらさ）であった。この結果を踏まえ、4 章で述べた音声対話システムに対して 3 秒以内という許容レスポンス時間を設定した。また、6 章で述べたタッチパネルの画面構成やユーザインタフェースフローは、上記の結果に基づいて構成した。

GODSPEED の指標を用いた全参加者のロボットに対

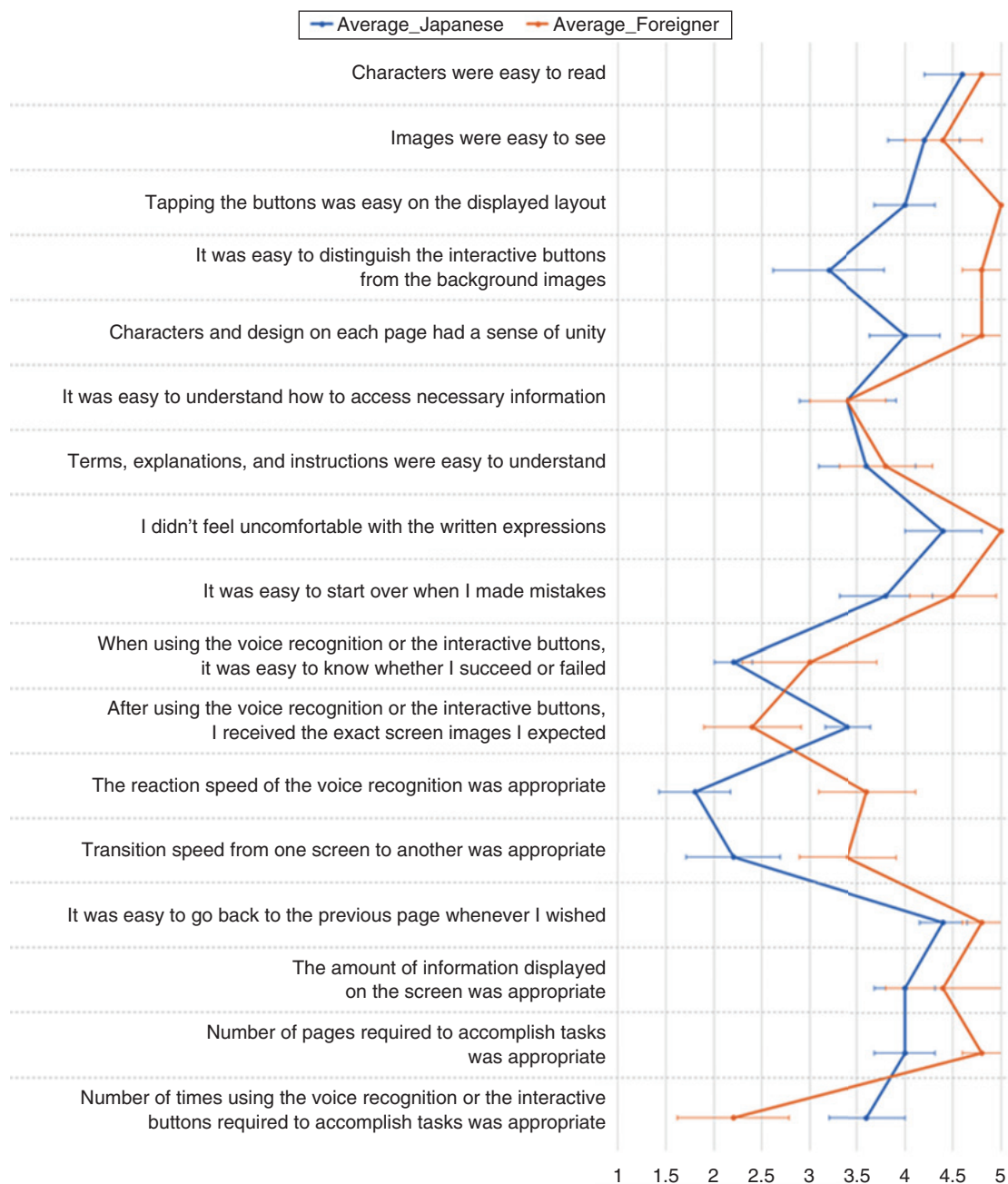


Fig. 11 Evaluation results for touch screen usability

する印象の調査結果を Fig. 12 に示す。青線が日本人の評点平均値、赤線が外国人の評点平均値である。擬人化に関して、外国人は日本人と比較して平均的に肯定的な評価傾向であった。有生性に関して、外国人は日本人と比較して平均的に肯定的な評価傾向であった。好感度に関して、日本人・外国人いずれも高く評価する傾向であった。知性の知覚に関して、日本人・外国人いずれも高く評価する傾向であった。安全性の知覚に関して、日本人・外国人いずれも平均的に類似した評価傾向であった。追加した独自の4項目は日本人・外国人いずれもポジティブ方向の評価傾向であったが、外国人の方が平均的に高い評価傾向であった。

インタビュー調査から以下のようなことが推察された。擬人化、有生性の評価は、ロボットの容姿、動きや音などによるフィードバックが関連し、おおむねポジティブな影響を与えた。好感度、知性の知覚、独自項目の「気にかけてくれる」「正確な」の評価は、タッチパネルのネガティブな評価がロボットの印象にネガティブな影響を与えた。本来は別のシステムであるタッチパネルのネガティブな評価がロボットの印象へも影響を与えることが判明したため、タッチパネルの使いやすさについての評価から導出された改善点を修正した。また、今回の案内サービスのコンセプトであるつき添う羅針盤を評価する項目として選出した4項目への評価結果から、コンセプトに近い印象を調査参加者はロボットから感じたかと推察できる。

Affect Grid の指標を用いて全参加者の受付サービスに対する感情を分析したところ、受付サービス中の感情変化には、課題がどの程度スムーズに遂行できたかが大きく寄与していた。課題実施前は受付サービスに関する好奇心や期待感を持っていたが、課題実施後はタッチパネルの仕様

により課題がスムーズに遂行できないため、課題実施前よりも不快方向に変化した。受付サービスの利用意向について、タッチパネルの改善点が解消されることを前提に、調査参加者 10 名中 8 名が実際にこのサービスに空港で遭遇した場合、利用してみたいと答えた。その理由についてインタビューを行ったところ、日本人と外国人では異なる傾向を示した。日本人からは同伴者や周囲の人々の存在を考慮した意見が挙がり、受付サービスの利用意向に関してネガティブな意見も挙げられた。その一方で、外国人は受付サービスの利用意向に関しておおむねポジティブな意見を述べた。このように、利用意向は個人特性と大きく関係し、特にロボットとの会話経験や他人からどう思われるかなどによって、利用意向が変化する可能性があることがわかった。これらの調査結果から得られた改善点を設計に反映した。

8. まとめ

成田空港で案内サービスを実行する案内ロボットシステムを開発し、その中の受付ロボットの技術について紹介した。受付ロボットの開発においては、案内ロボットサービスのつき添う羅針盤というコンセプトを分解して、多様なお客様への対応、戸惑わない対話、違和感の無いロボットの応答とし、それぞれに対応する機能すなわち多言語対応・昇降機能、音声認識・対話エンジン、動き・音・画面を実装した。ユーザ評価の結果、案内ロボットサービスのコンセプトに近い印象を調査参加者はロボットから感じており、コンセプトに沿ったロボットを開発することができた。インタビュー調査から、タッチパネルのネガティブな評価がロボットの印象にネガティブな影響を与えており、本来は別のシステムであるタッチパネルのネガティブな評価がロボット自身の印象へも影響を与えることがわかった。一方で、タッチパネルの改善点が修正されればという条件つきではあるが、調査参加者のうち 80% が実際に空港でこのサービスがあれば利用したいと回答したことからサービスとしての有用性もあることがわかった。

参考文献

- (1) 重見聡史, 河口裕一郎, 吉池孝英, 川邊浩司, 小川直秀: 新型 ASIMO の開発, Honda R&D Technical Review, Vol. 18, No. 1, p. 38-44
- (2) 斉藤陽子, 興石健: 空港案内ロボットシステムの開発とデザイン, Honda R&D Technical Review, Vol. 33, No. 1, p. 1-8
- (3) 西宮憲治, 金子真也: 案内ロボット運用システムの開発, Honda R&D Technical Review, Vol. 32, No. 2, p. 51-55

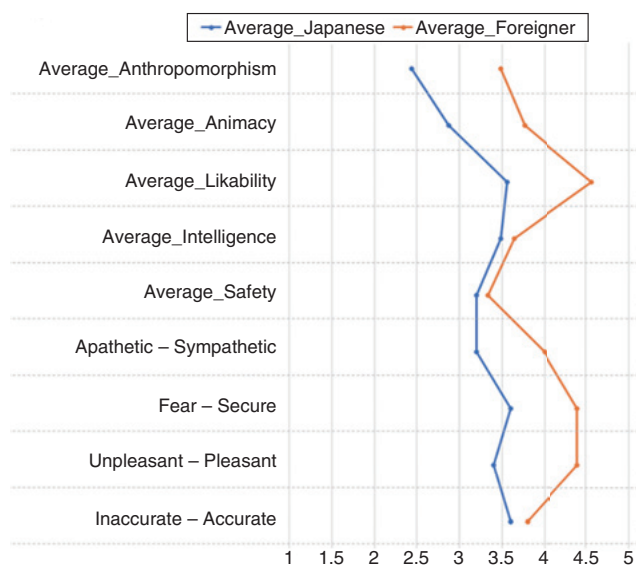


Fig. 12 Evaluation results for impressions of robot

- (4) 沙子鈞, 名取洋一, 有泉孝裕: 空港案内誘導ロボットにおけるロバストなフォロウ認識機能の研究, Honda R&D Technical Review, Vol. 33, No. 1, p. 18-25
- (5) Chung, W., Kim, H., Yoo, Y., Moon, C.-B., Park, J.: The Detection and Following of Human Legs Through Inductive Approaches for a Mobile Robot With a Single Laser Range Finder, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 59, No. 8, p. 3156-3166, (2012)
- (6) Jung, E.-J., Lee, J. H., Yi, B.-J., Park, J., Yuta, S., Noh, S.-T.: Development of a Laser-Range-Finder-Based Human Tracking and Control Algorithm for a Marathoner Service Robot, IEEE/ASME Tran. Mechatronics, Vol. 19, No. 6, p. 1963-1976, (2014)
- (7) Nakamori, Y., Hiroi, Y., Ito, A.: Multiple player detection and tracking method using a laser range finder for a robot that plays with human, Robomech Journal 5, 25, (2018)
- (8) Russell, J. A., Weiss, A., Mendelsohn, G. A.: Affect Grid: A Single-Item Scale of Pleasure and Arousal, Journal of Personality and Social Psychology, Vol. 57, No. 3, p. 493-502, (1989)
- (9) 西本光司, 南部美砂子, 伊藤恵: リモート・ユーザビリティテストの実施容易性と有効性の評価実験, 日本ソフトウェア科学会第31回大会講演論文集, 一般6-4, p. 480-485, (2014)
- (10) Bartneck, C., Kulić, D., Croft, E., Zoghbi, S.: Measurement Instruments for the Anthropomorphism, Animacy, Likeability, Perceived Intelligence, and Perceived Safety of Robots, International Journal of Social Robotics, p. 71-81, (2009)

■ 著 者 ■



大西潤哉



益田綾子



大林千尋



川崎雄一



竹部雄貴

空港案内誘導ロボットにおける ロバストなフォロワ認識機能の研究

Research of Robust Follower Recognition Function for Airport Guide Robot

沙 子 鈞¹
Zijun SHA

名 取 洋 一²
Yoichi NATORI

有 泉 孝 裕²
Takahiro ARIIZUMI

要 旨

案内ロボットの実用化に対して、ホスピタリティは重要な要素である。本稿では、案内対象者の認識機能、すなわち、フォロワ認識機能を定義し、ハイブリッドな手法を提案した。本手法は、顔認識、人物追跡と Person re-identification の三つの技術を融合することで、それぞれの技術特性を活かし、ロボット視点におけるフォロワまでの認識距離や照明の変化、物や人によるフォロワの隠れなどの課題に対するロバスト性の向上を図った。成田国際空港内での実証実験を通じ、フォロワ認識機能の案内誘導ロボットサービスへの実用化の見通しを立てた。

ABSTRACT

Hospitality is a key factor for the success of guide robot service. This paper defines a new recognition function called follower recognition, and proposes a hybrid approach to realize the follower recognition function. This approach creates a fusion of facial recognition, human body tracking, and person re-identification algorithms and takes advantage of the respective technological characteristics to realize robust follower recognition against issues such as recognition distance change, illumination change, and occlusion from the robot's perspective. The proving test result at Narita International Airport showed that the proposed approach is practical in guide robot service.

1. まえがき

少子高齢化に伴う労働人口の減少、単身高齢世帯の増加や、生活様式の多様化や効率化に伴う生活レベル向上への関心の高まりによって、人と共存し協調するサービスロボットの需要が高まっている。例えば、人々が行き交う環境下での自律移動可能な誘導ロボットの社会実装がある⁽¹⁾。今回我々は、人と共存、協調しながら社会の中で役立つロボットの実現を目指し、成田国際空港（以下、成田空港）内でロボットが案内対象者（フォロワ）を目的地まで先導するフォロワ認識機能を実装した空港案内ロボットシステムを構築し、実証実験を行った。本システムでは、ロボットに目的地まで案内されたという新しい体験を人々に提供し、新しい案内サービスの可能性を示すとともに、ロボットがデモンストレーションではなく、実世界で人と共存し人の役に立つことを目的とする⁽²⁾。

本案内サービスの詳細は参考文献^{(2),(3)}に述べられているが、その流れの概要を Fig. 1 に示す。ステップ1のように、フォロワは空港内に設置された案内サービス受付用のロボット（受付ロボット）とのインタラクションにより、目的地設定などの案内受付を行う。この際にフォロワの顔識別用の登録画像が受付ロボットにより取得され、その特徴量を運用システムへ転送する。続いて誘導ロボットは、目的地や顔の特徴量を運用システムから取得し、案内を始める（ステップ2）。案内中はステップ3のように、誘導ロ

るが、その流れの概要を Fig. 1 に示す。ステップ1のように、フォロワは空港内に設置された案内サービス受付用のロボット（受付ロボット）とのインタラクションにより、目的地設定などの案内受付を行う。この際にフォロワの顔識別用の登録画像が受付ロボットにより取得され、その特徴量を運用システムへ転送する。続いて誘導ロボットは、目的地や顔の特徴量を運用システムから取得し、案内を始める（ステップ2）。案内中はステップ3のように、誘導ロ

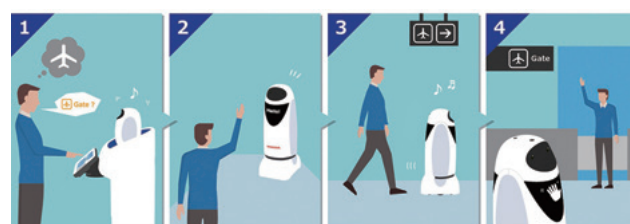


Fig. 1 Utilization flow of guide robot service

¹ ライフクリエーションセンター，博士（工学）

² ライフクリエーションセンター

ボットは Fig. 2 に示す後頭部のカメラよりフォロワの位置を認識し、フォロワの移動スピードに合わせて自動的にスピードを調整し、適切な距離を保ってフォロワを先導する。目的地に到着すると案内サービスを終了し、受付に帰還する(ステップ4)。

フォロワに『ロボットに案内してもらった』という体験を提供するためには、目的地に向かって単調に移動するロボットに付いて行ってもらうだけでは不十分であり、自身に合わせてロボットが動作しているとフォロワに感じてもらう必要があると考える。つまり、Fig. 2 のように心地よい距離感で、フォロワの移動ペースに合わせてロボットが進行することで、「案内してもらっている」と感じてもらう。このようにロボットがフォロワのペースに合わせて動作することは、案内サービスのホスピタリティを向上させることにつながり、案内サービス全体の満足度が向上すると考えている。そのためには、ロボットの動作が不自然でこちないものとならぬように、フォロワの位置を安定して認識し続けることが肝要である。本稿では、空港内という複雑な屋内環境下を自律移動する案内ロボットに搭載可能な、ロバストなフォロワ認識機能の実現手法を提案し、空港内の撮影データを用いた評価を通してそのロバストな認識性を示す。以下、第2章では従来手法とフォロワ認識の関係について述べ、第3章では提案手法によるフォロワ認識について述べる。第4章では評価データについて説明し、第5章で評価結果と提案手法の有用性について考察する。

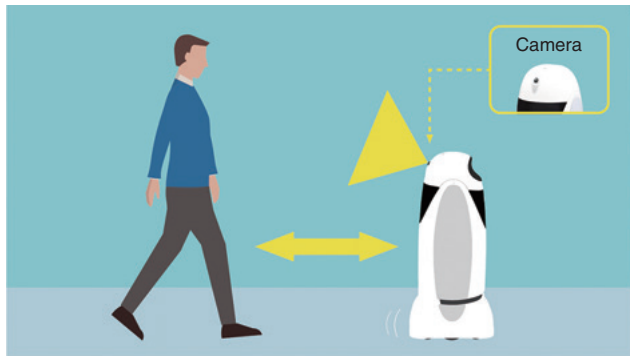


Fig. 2 Adjustment of distance from follower

2. 従来手法

フォロワ認識機能とは、移動という動的な環境下において、先導する誘導ロボットの視点からフォロワである人の相対位置を安定的に認識し続けるものである。誘導ロボットがカメラを用いてフォロワの相対位置を認識し、それに伴い移動速度を調整することで適度な相対距離を維持する技術は、本稿執筆時点で調べる限りでは前例がない。

フォロワ認識を対象とした研究や開発事例が少ない一

方で、フォロワ認識と同様にロボット視点から人との動的な相対位置を認識する技術として、Fig. 3 のようにロボットが人に付いて行く人追従⁽⁴⁾機能が挙げられ、1990年代から活発な研究開発が行われている⁽⁵⁾⁻⁽⁷⁾。フォロワ認識との最大の違いは人がロボットの先を先導することであるが、動的で複雑な環境下において人を認識するという点でフォロワ認識と共通の課題が多く、多種多様なセンサやアルゴリズムを使用した対応手法が研究開発されている。Pierre⁽⁸⁾は単眼カメラによるコンピュータビジョンの手法から人認識、追跡を行っている。Chen ら⁽⁹⁾と Wang ら⁽¹⁰⁾はステレオカメラやRGBD 画像によるコンピュータビジョンの手法と深度情報で人追従を実現した。Leigh ら⁽¹¹⁾と Peng ら⁽¹²⁾と Germa ら⁽¹³⁾は、Laser range finder (LRF) や超音波センサ、Radio frequency identifier (RFID) などを用いて追跡することで実現した。

近年、Fig. 4 に示すようにカメラ間やフレーム間で全身/半身像から人物を同定する Person re-identification (Person re-id)⁽¹⁴⁾技術が進化してきた。Person re-id は、主



Fig. 3 Person following

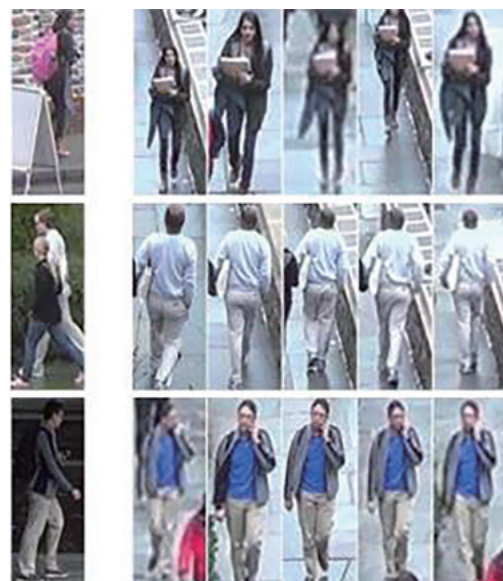


Fig. 4 Person re-id

に人物の全身カラー画像を入力し、深層学習モデルにより人物の形状や色といったアピランスの特徴を抽出し、登録画像から取得した同特徴と比較することで、同一人物が照合を行う技術である。著者らはロボット視点画像への Person re-id 技術の適応化について取り組んだ⁽¹⁵⁾。Person re-id 技術の個人認証精度は顔識別より低いが、姿勢変化や距離変化に高いロバスト性を持つため、人追従にもフォロー認識にも適応性があると考えられる。一方で事前に認識対象者の全身/半身像の登録が必要という前提条件がある。

フォロー認識機能の実現に当たってはこうした人追従に関する従来手法が参考になると考えられるが、一方でフォローの顔が見える、フォローの行動が予測しにくい(よそ見、寄り道、急停止、U ターンなど)など、人追従とは異なる特性もあり、必ずしも人追従と同様な手法が適しているとは限らない。

フォロー認識を実現するには、従来手法をベースにして、フォローの顔認識(顔検出、顔識別や顔追跡を含む)、人物追跡や特別な装置(RFID など)や目印(QR コードなど)によりフォローを認識し続ける手法が考えられる。しかし、それぞれには以下に述べるような課題がある。

顔認識を利用する場合、移動に伴い周辺環境が動的に変わったり、視点が低かったりすることに起因するロボットならではの課題(認識距離、照明変化、画像ブレ、カメラ画角からの見切れ、物や人による隠れ(オクルージョン)など)に対するロバスト性が極めて低い^{(16),(17)}。例えばフォローが横を向くことなどによる顔の見切れや、屋内移動に伴う急激な照度変動により、たちまち顔を見失ってしまう。また、少しでもロバスト性を上げるために、様々なバリエーションの顔画像を事前に取得し登録しておくことも考えられるが、受付ロボットにおける顔識別用画像取得時に、姿勢を変えて何度も撮影することは、ユーザビリティの観点からも好ましくない。

人物追跡とは、時系列のフレーム間で、追跡対象の近隣領域において、人物の比較的単調な特徴量(例えば、色、エッジなどの局部特徴や人物検出結果のバウンディングボックスの相対位置)を比較することによって追跡を実施するものである。この人物追跡を利用する場合、案内開始時に何らかの手法でカメラに写っている人物がフォローであることを認識する必要がある。また追跡中には、前述の顔認識と同様にオクルージョンなどにより追跡に失敗するケースが多発することが予想される。その上、人物追跡だけでは個人の識別はできないため、追跡失敗から回復することができない⁽¹⁸⁾。

特別な装置や目印を利用する場合、案内時に携帯したり装着したりというフォローへの余計な負担が生じ、ホスピタリティやユーザビリティの低下を招く。さらに RFID では対象が近くに存在することは分かるものの、対象の相対位置が分からない。

このように、従来手法に基づく個々の技術によるフォロー認識機能には、高いホスピタリティを持つ誘導ロボットの実現に向けて課題がある。

3. 提案手法

2章で述べた従来手法の課題を解決し、ロバスト性の高いフォロー認識機能を実現するため、本稿では、顔認識、人物追跡と Person re-id 技術を融合したフォロー認識手法を提案する。提案手法では、RGB 単眼カメラ画像に対して、顔認識と人物追跡の組み合わせによりベース機能を構築し、そこに Person re-id を組み合わせるという2段階の手法を取った。多様なセンサを組み合わせるのではなく、単眼カメラのみを使用したのは、誘導ロボットの安全性(衝突・転倒時の衝撃低減)やペイロード、コスト面などに起因している。

3.1. 顔認識 / 人物追跡の融合によるフォロー認識

ここでは顔認識と人物追跡の特長を融合する手法を提案する。Fig. 5 に顔認識 / 人物追跡の処理の概略を示す。顔認識 / 人物追跡はカメラより得られる画像から、顔と人物の検出を行い、検出された顔領域に対しては顔追跡 ID を、人物に対しては人物追跡 ID をそれぞれ付与する。顔領域に対しては、事前に登録したフォローの顔特徴との相違度を算出し、識別スコアを求める。識別スコアがしきい値を超えている場合、その顔は登録済みのフォローの顔であると判定(顔識別成功)し、フォローに対応する顔追跡 ID を更新する。追跡は顔と人物に対しそれぞれ行い、追跡成功時はそれぞれ同一の追跡 ID が保持される。

Fig. 5 に示す Fusion の処理は顔認識と人物追跡の結果

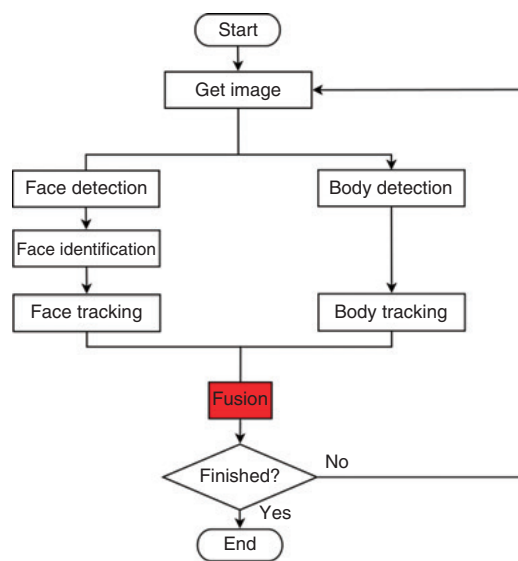


Fig. 5 Flow chart of Face/Body tracking based follower recognition

の融合処理である。具体的な融合手法を Fig. 6 に示す。検出 / 追跡された顔と人物の各バウンディングボックスの相対位置関係を用いて、同一人物に対する顔追跡 ID (face_id) と人物追跡 ID (body_id) を紐付け、フォローに対応する顔追跡 ID と人物追跡 ID を更新する。Fig. 6 中に赤く示す顔バウンディングボックスと人物バウンディングボックスの相対位置による紐付け判断の例を Fig. 7 に示す。このようにフォローに対応する顔と人物の追跡 ID を束ねて保持することによって、いずれか一方の認識が失敗しても、相互補完によりフォローの認識を継続できることが期待できる。すなわち、顔認識に失敗しても、紐付けされた人物 ID

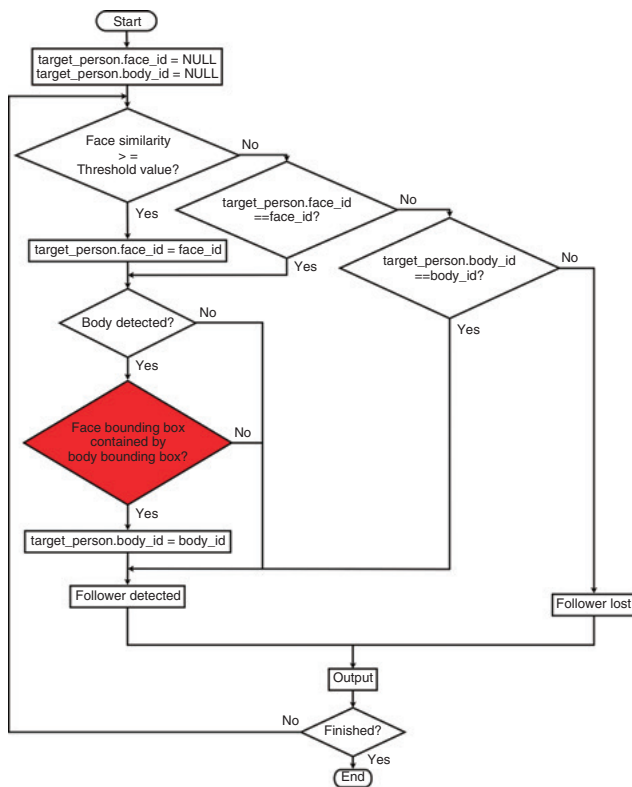


Fig. 6 Flow chart of Face/Body tracking fusion

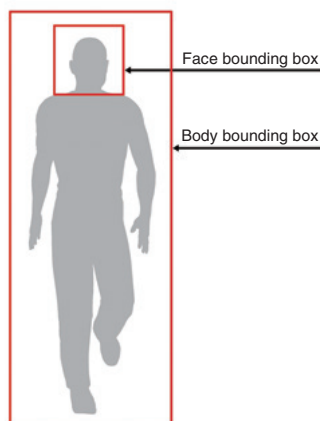


Fig. 7 Link of Face/Body bounding boxes

の追跡が成功していればフォローの認識継続が可能である。逆に人物が検出 / 追跡できなくとも、顔が検出でき認識に成功していればフォローを認識可能である。

しかしながら、空港のような複雑な環境下では、顔認識と人物追跡に同時に失敗する可能性があり、安定したフォロー認識の実現には更なるロバスト性の向上が求められる。

3.2. 顔認識 / 人物追跡と Person re-id の融合によるフォロー認識

前述の顔認識 / 人物追跡の融合手法を補い、フォロー認識に更なるロバスト性を与えるために、本手法では Person re-id を用いる。Person re-id は、顔認識に比べ、オクルージョンや遠距離 (低解像度) の画像に対しても、全身像 / 半身像から人物の同定が可能であり、顔認識 / 人物追跡の融合手法が認識できない場面においてもフォローを認識できる可能性が高い。一方で、照明や顔の向きなど、認識に理想的な条件下においては、顔認識に比べ識別性能は劣る。また、扱う特徴量が多いため処理負荷が高く、顔認識より低速である。さらに、フォローの全身または半身の登録画像が必要であるが、案内サービス受付時は、受付ロボットのカメラからはフォローの顔が主体に撮影される。以上の理由から、本手法では信頼性が高い顔認識に基づき、高速な顔認識 / 人物追跡による認識成功結果を主体として活用し、Person re-id を補助的に用いる。

処理概要を Fig. 8 に示す。図中の赤枠で示した部分は Fig. 5 の顔認識 / 人物追跡手法に当たる。顔認識 / 人物追跡手法と Person re-id 手法は独立して処理が進む。まず、

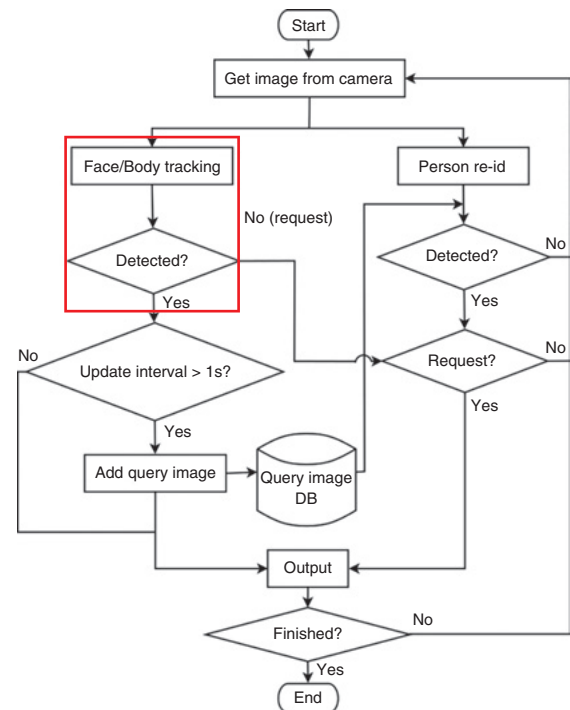


Fig. 8 Fusion of Face/Body tracking and Person re-id

顔認証 / 人物追跡手法によるフォロー認識結果を確認する。顔認識 / 人物追跡によるフォロー認識成功中は、一定時間ごとに Person re-id 用の全身登録画像を取得し、データベースに追加更新する仕組みとしている。これにより直近のフォロー全身画像を保持することができるため、照明環境の変化や、例えば上着を脱いだり、バッグを持ち換えたりといった姿の変化に対しても、認識のロバスト性向上が図れる。顔認識 / 人物追跡手法によるフォロー認識失敗時には、Person re-id の処理結果を最終的なフォロー認識結果として使用する。このようにして顔認証 / 人物追跡による手法と Person re-id を融合することで、それぞれの弱点を相互に補う効果的なフォロー認識機能の実現が期待できる。

4. 評価データ

本機能の検証は、Fig. 9 に示すように、実際に案内ロボットを動かす成田空港第1ターミナル出国エリアにおいて実施した⁽¹⁹⁾。3章において提案した手法の性能を定量的かつシーン網羅的に評価するため、案内経路として十分な距離と途中様々な環境変動を含んだ映像を評価データとして使用した。

具体的には、実際の誘導ロボットを模した台車に高さ1 m、仰角 25° でカメラを設置し、第1ターミナルの中央ビルから第4サテライトの端までの間を、実際の案内を模して移動しながら解像度 2056 × 1542、撮影速度 10 fps で取得した約9分間 (5541 フレーム) の映像データを用いた。テストデータ取得時の誘導ロボットは、フォロー認識による速度調整を行わなかった。また被験者であるフォローは、ロボットに案内されている状況を模擬してロボットと距離を取りながら追従するが、途中、空港内の店舗前で立ち止まったり、左右をよそ見したりするなど、様々な動作を取った。テストデータの一部を Fig. 10 に、その撮影場所

を Fig. 9 上に示す。逆光や照明機器の変化などによる照明変動、誘導ロボットの移動に伴う画像ブレ、フォローの行動変化に伴う、顔の向きの変化や距離変動、見切れ、マスク脱着、人や物との交差によるオクルージョンなど、環境が動的に変化することによってロバストな認識機能が求められる状況を多様に収録した。図中の赤マークは被験者のフォローである。

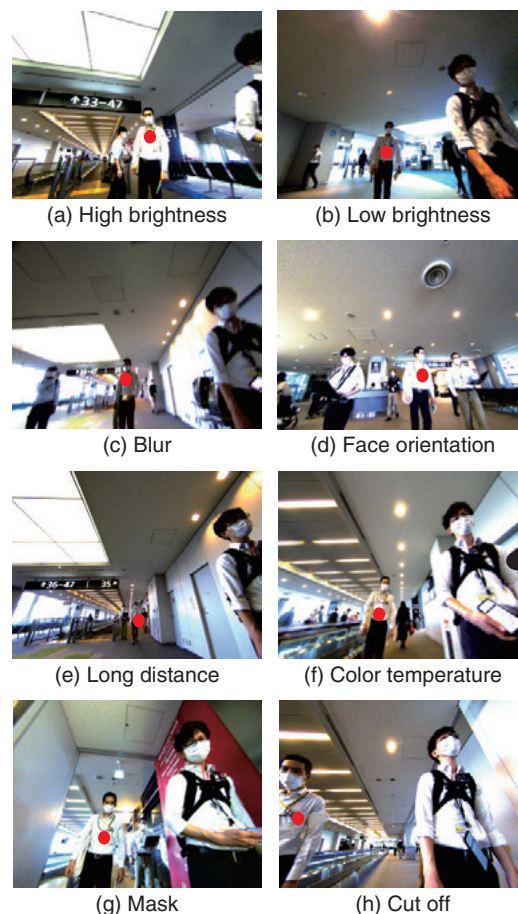


Fig. 10 Scenes that call for robust recognition

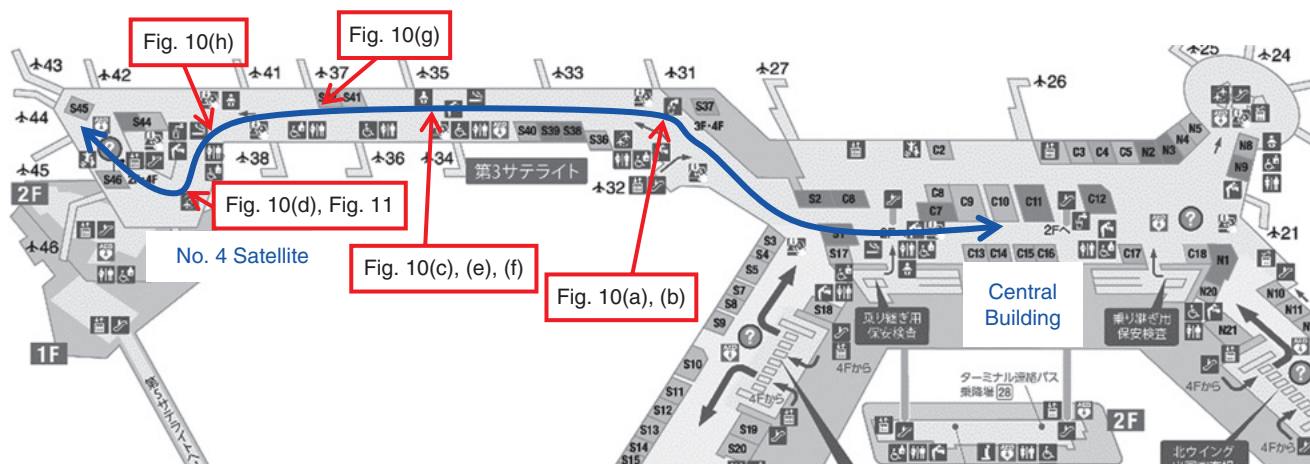


Fig. 9 Evaluation test path on 3rd floor of Narita Airport Terminal 1

5. 評価結果と考察

フォロー認識の処理結果のイメージを Fig. 11 に、撮影場所を Fig. 9 上に示す。Fig. 11(a) は顔認識 / 人物追跡手法により、顔認識と人物追跡に成功し、それぞれのバウンディングボックス (この場合橙色枠) が紐付けできた場合である。Fig. 11(b) はマスクの影響で顔認識が失敗したが、紐付けている人物追跡が成功した場合である。Fig. 11(c) は顔認識 / 人物追跡の両方が失敗したが、Person re-id により認識できた場合である。いずれの手法でも失敗しフォロー認識失敗に至った場合が Fig. 11(d) である。

提案手法を 4 章で説明したデータで評価した結果を Table 1 に示す。評価は、Fig. 11 で示したように、処理結果のバウンディングボックスがフォローを囲んでいるかどうかを目視で確認することで行った。Table 1 内の True Positive とは、フォローを正しく認識したと判定したフレーム数である (TP)。False Positive とはフォローでな

Table 1 Results

	Total (Frame)	True Positive (Frame)	False Positive (Frame)	False Negative (Frame)	Success (%)
Face/Body (1)	5541	4540	0	1001	81.9
Person re-id (2)	1001	835	32	134	83.4
(1) + (2)	5541	5375	32	134	97.0

い人をフォローと認識したフレーム数である (FP)。False Negative とはフォローがいるが認識できなかったフレーム数である (FN)。Success とはフォローの認識成功率である。つまり、全 5541 フレームのテストデータ画像に対して、顔認識 / 人物追跡融合手法のみでの認識成功は 4540 フレーム、FP は 0 フレーム、FN は 1001 フレームであり、認識成功率は 81.9% であった。顔認識 / 人物追跡で失敗した 1001 フレームに対して、Person re-id 手法によりフォローと正しく認識できたのは 835 フレーム、FP は 32 フレーム、FN は 134 フレームであり、Person re-id 手法での認識成功率は 83.4% であった。以上より、顔認識 / 人物追跡と Person re-id を融合した提案手法による最終的な認識成功率は 97.0% であった。

Fig. 12 は評価に使用したテストデータについて、フォロー認識結果から推定したロボットからフォローまでの推定距離を時系列にプロットしたものである。グラフは顔認識 / 人物追跡手法単体の結果を橙色、Person re-id 単体による結果を青色で示している。フォローまでの推定距離は、フォローを検出したバウンディングボックスのサイズによって推定したものである。推定距離が lost にプロットされているフレームは、フォロー認識に失敗したシーンである。この内同一フレームに対して橙色で lost にプロットされながら、一方で青色で推定距離がプロットされている箇所は、顔認識 / 人物追跡手法で失敗したが、Person re-id によって正しくフォローを認識できたシーンである。Fig. 12 の赤枠はその一例であるが、フォローとの距離が離れたため、顔認識 / 人物追跡手法では認識失敗したものの、Person re-id によって認識成功していることが分かる。

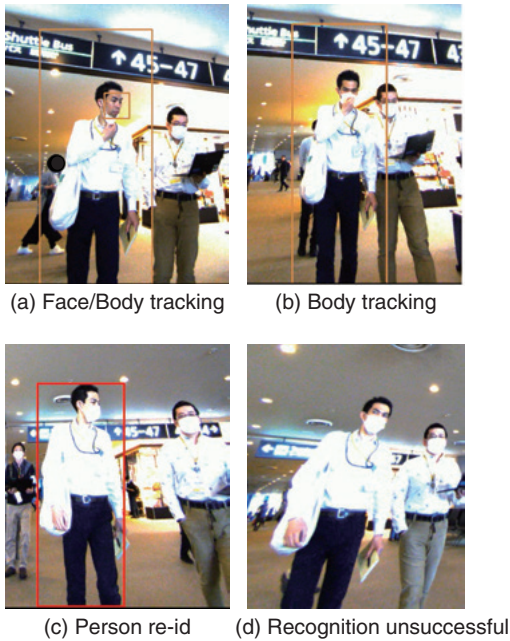


Fig. 11 Result images of proposed follower recognition

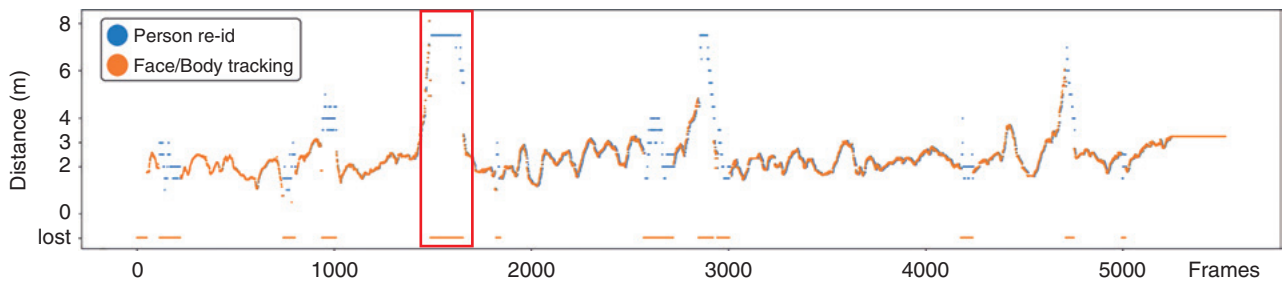


Fig. 12 Estimated distance

このように、顔認識／人物追跡手法と、Person re-id 手法を融合させることで、安定したフォロー認識を実現できている。Fig. 10 に示したロバスト性が求められるシーンは顔認識／人物追跡手法ではいずれも認識失敗であったが、Person re-id により認識成功に至っており、狙い通りの効果を果たしていることが分かる。

一方で Table 1 の結果から、Person re-id でも認識できず最終的にフォロー認識に失敗したシーンが全体の約 3% の 166 フレーム存在した。フォロー認識の失敗で起こり得る事象としては、(1)FP のフォローがないのにいると認識し、フォローでない人を案内し続けてしまう場合と、(2)FN のフォローがあるのにいないと認識し、フォローがあるのにロスト判定に至る場合がある。両者とも失敗が継続するほど案内サービスへの影響は大きくなる。今回の評価では、(1)のケースが連続で発生した期間は最大で 1.5 秒であった。本案内システムでは誘導ロボットの最高速度を 1.11 m/s としているため、この場合約 1.7 m ロボットが空走することになるが、前回認識に成功した位置から大きく離れておらず、再認識後に距離調整が十分可能な距離であると考えられる。(2)のケースが連続で発生した期間は最大で 3 秒であった。このシーンは Fig. 10(h) でも示したフォローがロボットに対して横並びに近い状態で歩行しており、画角からほとんど見切れている状態であった。本案内サービスでは、案内開始時にフォローに対して、ロボットの後ろに原則として付いて行くことを事前説明するが、このような横並びや画角からの大きな逸脱も想定して、ロスト判定時には誘導ロボットは減速モードになる。減速によりフォローはロボットの異変に気付きやすくなり、ロボットの後ろに戻ってもらう機会が増えることで、再認識の可能性が上がることを期待できる。再認識後は通常速度に復帰するため、数秒程度の FN ならば支障はないと考える。以上より、本稿で提案する、顔認証／人物追跡と Person re-id を融合し、それぞれの強みを活かし相互に弱点を補う効果的なフォロー認識手法は、環境変動の激しい空港内の案内に対して十分な認識性能を達成していると言え、実用化に向けた目途が立ったと考えている。

ここからはフォロー認識失敗の要因について解析する。失敗の最大要因として、そもそも Person re-id 処理を行う前段の人物検出処理自体が失敗していることが確認された。その数は認識失敗 166 フレーム中の 96 フレームにのぼり、フォロー認識失敗のうちの 60% 弱を占めている。残りの 40% は Person re-id の誤認識である。Fig. 13 に誤認識の一例 (FP) を示すが、誤認識された人物の見た目とフォローの見た目が似通っており、人間でも一見して間違える可能性があるものである。実用化を見据えた場合、このようなフォロー認識に失敗したシーンを認識するために、本手法内の各認識処理 (顔認識、人物検出、人物追跡、Person re-id) においてより固有の環境に適したアルゴリズム

を選択する、学習データを精査し増やす、様々なセンサを活用した相互補完等の改良を加えるなど、更なる精度向上を図ることが今後の課題として考えられる。



Fig. 13 Person re-id False Positive

6. まとめ

本稿では、空港案内ロボットシステムにおける誘導ロボットにおいて、単眼 RGB カメラを用いたロバストなフォロー認識手法を提案した。提案手法では、顔認識／人物追跡手法と Person re-id 手法という既存認識アルゴリズムを効果的に融合し、動的な空港環境下において頻繁に発生する、人の混雑によるオクルージョン、移動による照明変化、フォローの動きによる認識距離の変化や顔の向きの変化などの、フォロー認識率を低下させる様々な課題に対してロバスト性の向上を図った。空港内で撮影した評価データの 97% で認識に成功し、高いロバスト性を達成していることを確認した。

参考文献

- (1) Velentza, A.-M., Heinke, D., Wyatt, J.: Human Interaction and Improving Knowledge through Collaborative Tour Guide Robots, 2019 28th IEEE International Conference on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN), p. 1-7, (2019)
- (2) 齊藤陽子, 興石健: 空港案内ロボットシステムの開発とデザイン, Honda R&D Technical Review, Vol. 33, No. 1, p. 1-8
- (3) 大西潤哉, 益田綾子, 大林千尋, 川崎雄一, 竹部雄貴: 空港案内受付ロボットの開発, Honda R&D Technical Review, Vol. 33, No. 1, p. 9-17
- (4) <https://talorongilad.com/research-laboratories/follow-me-design-for-person-following-robots/>, 2021/01/19

- (5) Azarbayejani, A., Pentland, A.: Real-Time Self-Calibrating Stereo Person Tracking Using 3-D Shape Estimation from Blob Features, Proceedings of 13th International Conference on Pattern Recognition, Vol. 3, p. 627-632, (1996)
- (6) Wren, C. R., Azarbayejani, A., Darrell, T., Pentland, A. P.: Pfunder: Real-Time Tracking of the Human Body, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 19, No. 7, p. 780-785, (1997)
- (7) Darrell, T., Gordon, G., Harville, M., Woodfill, J.: Integrated Person Tracking using Stereo, Color, and Pattern Detection, Proceedings. 1998 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), p. 601-608, (1998)
- (8) Pierre, J. M.: End-to-End Deep Learning for Robotic Following, Proceedings of the 2018 2nd International Conference on Mechatronics Systems and Control Engineering, p. 77-85, (2018)
- (9) Chen, B. X., Sahdev, R., Tsotsos, J. K.: Person Following Robot Using Selected Online Ada-Boosting with Stereo Camera, 2017 14th Conference on Computer and Robot Vision (CRV), p. 48-55, (2017)
- (10) Wang, M., Su, D., Shi, L., Liu, Y., Miro, J. V.: Real-time 3D human tracking for mobile robots with multisensors, 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), p. 5081-5087, (2017)
- (11) Leigh, A., Pineau, J., Olmedo, N., Zhang, H.: Person Tracking and Following with 2D Laser Scanners, 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), p. 726-733, (2015)
- (12) Peng, W., Wang, J., Chen, W.: Tracking Control of Human-Following Robot with Sonar Sensors, International Conference on Intelligent Autonomous Systems, p. 301-313, (2017)
- (13) Germa, T., Lerasle, F., Ouadah, N., Cadenat, V.: Vision and RFID Data Fusion for Tracking People in Crowds by a Mobile Robot, Computer Vision and Image Understanding, p. 641-651, (2010)
- (14) Gou, M., Karanam, S., Liu, W., Camps, O., Radke, R. J.: DukeMTMC4ReID: A Large-Scale Multi-Camera Person Re-Identification Dataset (Open Access version), 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops, p. 10-19, (2017)
- (15) Sha, Z., Zeng, Z., Wang, Z., Natori, Y., Taniguchi, Y., Satoh, S.: Progressive Domain Adaptation for Robot Vision Person Re-identification, MM '20: Proceedings of the 28th ACM International Conference on Multimedia, p. 4488-4490, (2020)
- (16) Chen, J., Chen, J., Wang, Z., Liang, C., Lin, C.-W.: Identity-Aware Face Super-Resolution for Low-Resolution Face Recognition, IEEE Signal Processing Letters, Vol. 27, p. 645-649, (2020)
- (17) Yuan, J., Chen, H., Sun, F., Huang, Y.: Multisensor information fusion for people tracking with a mobile robot: A particle filtering approach, IEEE Trans. Instrumentation and Measurement, Vol. 64, No. 9, p. 2427-2442, (2015)
- (18) Ruan, W., Liu, W., Bao, Q., Chen, J., Cheng, Y., Mei, T.: POINet: Pose-Guided Ovonic Insight Network for Multi-Person Pose Tracking, Proceedings of the 27th ACM International Conference on Multimedia, p. 284-292, (2019)
- (19) <https://www.narita-airport.jp/jp/map?terminal=1&map=3>, 2021/01/12

■ 著 者 ■



沙 子 鈞



名 取 洋 一



有 泉 孝 裕

2020 CRF1100L Africa Twin のカラーリングデザイン

Coloring Design for 2020 CRF1100L Africa Twin

桂 川 碧¹

Midori KATSURAGAWA

要 旨

2016年に発表されたAfrica Twinは、その再興を掲げて、トリコロール、CRF Rally カラー、モノトーンカラーの3タイプのカラーバリエーションを展開した。それらは単純なカラーバリエーションではなく、主たる使用用途と連動させた、カラーリングごとに違う世界観を持つ特徴的なものとなった。2020年モデルでは、オフロード走行をより楽しめるAfrica Twinと快適なツーリングのための進化を図ったAfrica Twin Adventure Sportsの二つのタイプを設定した。カラーリングを検討するにあたっては、それぞれのカラーが持つ特徴やヘリテージとリンクさせることにより、さらに深化した世界観を表現した。

ABSTRACT

In 2016, Honda revived the iconic Africa Twin with three color schemes: Tricolor (red/blue/white), CRF Rally (red/black/white), and monotone (black, silver). Instead of being simple color variations, they create distinctive moods for the respective models with differing primary usage. The 2020 model has two versions: the Africa Twin with enhanced off-road riding experience, and the Africa Twin Adventure Sports with enhanced comfort for touring. In considering the color schemes, we sought to express a deeper worldview of the iconic model by linking each color scheme to its own characteristics and the model's heritage.

1. まえがき

1988年にデビューした初代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。その高いオフロード走破性とフルフェアリングを備えたユニークなスタイリングは、欧州を始めとした多くのお客さまの支持を得た。その後、排気量拡大などモデルチェンジをおこないながらも2003年に生産を終了した。

2016年、Africa Twin復活を望むお客さまの声に応える形で、「Go anywhere－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、本格アドベンチャーモデル」を基本コンセプトとした、CRF1000L Africa Twinを発売した。Africa Twinの後継モデルとしてその伝統を踏襲しながらも、環境性能や次世代モデルとしてふさわしい技術⁽¹⁾

を取り込むことでアップデートし、日常から週末の冒険まで幅広く楽しさを広げるモデルとした(Fig. 1)。



Fig. 1 The 2016 CRF1000L Africa Twin

¹ デザインセンター

2018 年には、基本となる Africa Twin (STD) に対しガソリンタンク容量を増やすなど、より長距離のツーリング走行を楽しめる Africa Twin Adventure Sports (AS) をタイプ追加し、アドベンチャーモデルとしての楽しみの幅を広げた (Fig. 2)。

2020 年、フルモデルチェンジを果たした Africa Twin は、スリムで軽量の車体による軽快なオフロード走行をより楽しめる STD タイプ (Fig. 3) と、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 AS タイプ (Fig. 4) として各仕様を刷新し、二つの先鋭化させたモデルに仕上げられた⁽²⁾。

二つのタイプとなった 2020 CRF1100L Africa Twin のカラーリングを検討するにあたり、これまで設定されてきた 3 タイプのカラーが、各々どのようにユーザに受け入れられ、それぞれの世界観を確立させていったのか考察をおこなった。

本稿では、上記考察の結果と、それらを踏まえた 2020 モデルにおける具現化手法について述べる。



Fig. 2 The 2018 CRF1000L Africa Twin AS



Fig. 3 The 2020 CRF1100L Africa Twin STD



Fig. 4 The 2020 CRF1100L Africa Twin AS

2. 2016 年モデルから 2019 年モデルのカラー考察

2016 CRF1000L Africa Twin 開発時におけるカラーリングテーマの根幹は、「Africa Twin ブランドの再興」であった。

トリコロール、CRF Rally カラーという大きなイメージカラーの 2 色と、新価値提案の位置づけとなるモノトーンカラーを設定した⁽³⁾。これら 3 タイプのカラーリングコンセプトを以下に示す。

- ・トリコロール: Africa Twin ブランド再興の象徴
- ・CRF Rally カラー: 最新ダカールラリーレーサの勢いの表現
- ・モノトーンカラー: 大人のツアラーとしての新しい価値

2.1. カラー別生産 (販売) 比率

まずは 2016 年のモデル復活以降のカラーヒストリーおよび生産台数に占めるカラー比率の確認をおこなった (Fig. 5)。累計 10 万台を超える生産台数の 8 割を欧州向けが占めることから、主に欧州ユーザの好みを反映したデータとなっている。設定した 3 タイプのカラー比率は当初、トリコロール、CRF Rally カラー、モノトーンカラー各々が拮抗していた。その後 Africa Twin ブランド再興の象徴として位置づけられたトリコロール人気が高まっていくが、2018 年に追加された AS タイプが、初代モデル (Fig. 6) をイメージしたトリコロールのみの設定だった影響も大きい。

2.2. 各カラーに対するユーザの想いとデザイナーの「気づき」

2016 年モデルの発売以降、上記カラーごとの生産台数の推移を観察し、アンケートの自由記述欄等、世界中のお客さまの声に耳を傾け続けることで、カラーリングに対する「気

づき」を得た。それは、トリコロール、CRF Rally カラー、モノトーンカラーに対し、お客さまは単純なカラーバリエーションの一つとして捉えているのではなく、主たる使用用途と連動させて選択をしているということであった。

大型モータサイクル自体が趣味性の強いプロダクトゆえ、購入する際のカラー選択にこだわりはあるだろう。しかしながら Africa Twin の場合は「このカラーでないと Africa Twin ではない」、もしくは「このカラーだからこそ良い」という、それぞれのカラーリングに対するユーザの想いに、明確で強いイメージの違いが存在した。

それが Africa Twin のカラーバリエーションならではの特異的な一面であった。

2.3. 各カラーリングの考察

2.3.1. トリコロール

トリコロールは Africa Twin の復活を強く市場に印象付けるため、ブランドイメージの継承の象徴として設定した。初代 Africa Twin (Fig. 6) がまとっていたカラーリングであり、欧州では Africa Twin = トリコロールというイメージが広くお客さまに浸透している。そのトリコロールに対し、すべてが新しくなった新世代モデルにふさわしいイメージになるようアップデートをおこない 2016 年モデルとして採用した。

また、トリコロールは伝統的な Honda のレーシングカ

ラー⁽⁴⁾としても認知されている。遡れば 70 年代のロードレーサにはじまり、モトクロスのチームウェア、世界耐久選手権レーサの活躍、80 年代の WGP レーサやパリダカールレーサから最新のレーサレプリカモデルへと連綿と続いている。従って、初代 Africa Twin を知らないお客さまにも、伝統のレーシングカラーとしての魅力を感じていただくことができるカラーとなる。

トリコロールの Africa Twin は、かつてのパリダカールレースの舞台であるアフリカ大陸を、トリコロールをま



Fig. 6 The XRV650, first generation Africa Twin launched in 1988

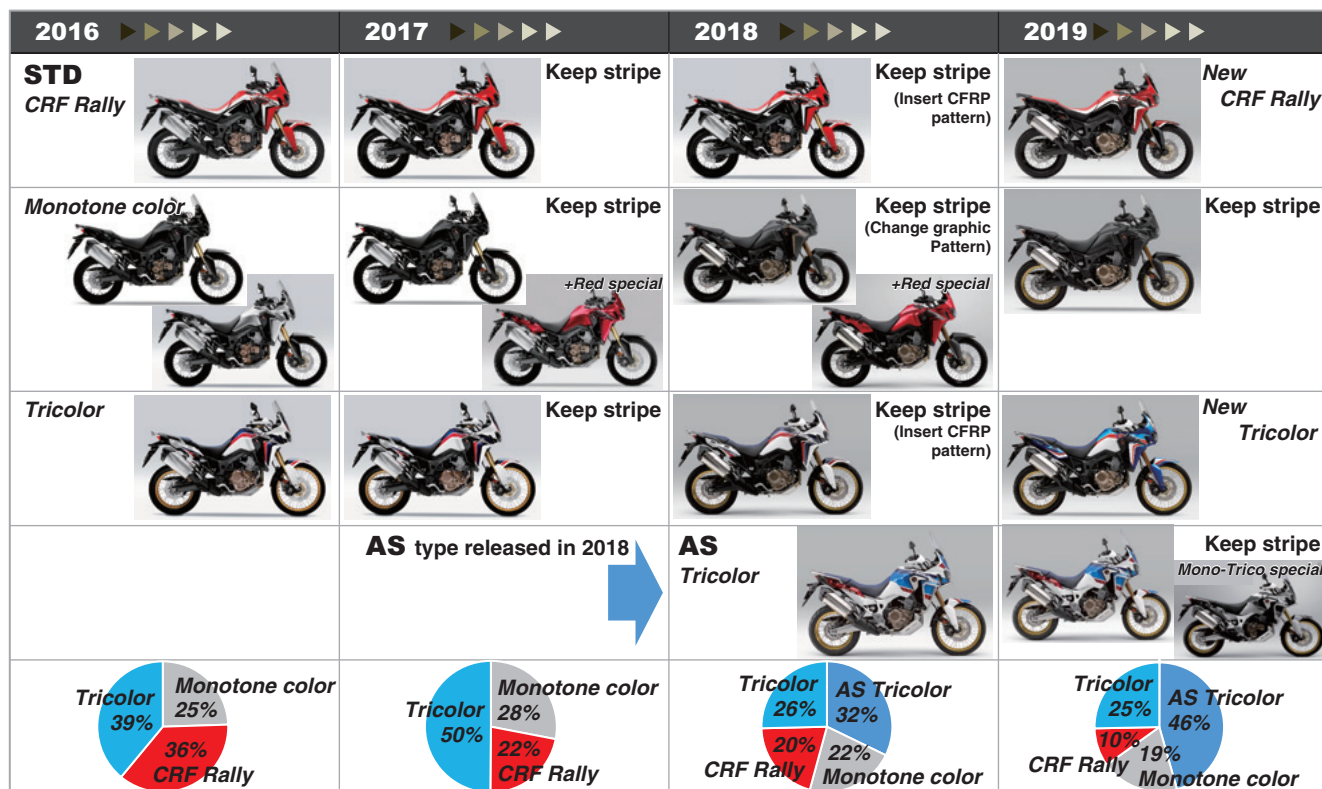


Fig. 5 Changes in color lineup and production ratio

として駆け抜けた NXR750 (Fig. 7) の象徴である⁽³⁾。見果てぬ大地を旅することができるモータサイクルであり、そういった旅情をも想起させるモデルでもある。パリダカールレースに夢中になっていた、若き日の自分自身を重ね合わせる年配のユーザなど、お客さまとの対話を繰り返すことで、Africa Twin × トリコロールは、一人ひとりのバイクライフ上の思い出までも連想させる組み合わせであることがわかった。これらから、最も熱心な Honda ファンや Africa Twin ファンの皆さまの共感を得るカラーとして選ばれていることを理解した。

2.3.2. CRF Rally カラー

最新の Honda ダカールラリーレーサの勢いを、ワークスレーサである CRF450 Rally (Fig. 8) のカラーリングを取り入れることで表現し、新しい時代のアドベンチャーモデルとしての存在感を示した (Fig. 9)。

アンケート結果からは、カラーコンセプトどおりに、最新ダカールラリーレーサのイメージで捉えているお客さまが多い一方、赤という色そのものが持つ強くかっこ良さや、Honda のオフロード車といえば伝統的に赤といったイメージ (Fig. 10) で選択されているお客さまも多かった。



Fig. 7 The NXR750 conquers African continent



Fig. 8 High-performance CRF450 Rally currently used in Dakar Rally

70 年代中盤より Honda のオフロードバイク、モトクロスレーサは、赤をイメージカラーとして訴求していた。そういったイメージが持つシンプルな要素が、お客さまに共感され、シャープな印象やレースシーンで活躍している Honda を連想され選ばれていることがわかった。

2.3.3. モノトーンカラー

モノトーンカラーは、特定の強いイメージにとらわれることなく、幅広い大人のライフスタイルを意識したカラーリングとして、シックな色調や強く強い印象の色調で構成した (Fig. 11)。



Fig. 9 The 2016 Africa Twin coloring design based on the CRF450 Rally



Fig. 10 The Honda CRF series



Fig. 11 The 2016 Africa Twin in monotone (silver)

目立ちがちなレプリカカラーを避けるという意味で選択されることも多い色合いではあるが、Africa Twinの場合はより積極的に選ばれている印象が強い。「アドベンチャーモデルには乗りたいが、オフロードにはいかず、きれいに乗りたい」、「フットワーク軽く、通勤に大型オン／オフモデルを乗りこなすビジネスマン」、「週末はパートナーと揃いのウエアで長距離快適ツーリング」などといった、自分のライフスタイルや走りのスタイルに合わせた選択肢となっている。

2.4. AS タイプ追加による専用トリコロール (2018 CRF1000L Africa Twin AS)

アドベンチャースポーツとしての世界観をさらに高めるために、2018年にタイプ追加されたAfrica Twin ASタイプのカラーリングは、2016年モデル以降のカラー別出荷比率の変遷と、主要市場である欧州からの声を鑑みて検討した。直近の2017年モデルにおいて、すでにトリコロールが半数を占めるようになり、その人気ぶりを示していた (Fig. 12)。

よりツーリング走行を楽しめるようビッグタンクを搭載し、旅を想起させるASタイプには、トリコロールが一番適しているのではないかと考えた。

また2018年は、1988年にXR650、初代Africa Twinが誕生してちょうど30年になる特別な年であった。

これらより、初代のトリコロールをほうふつさせる30周年記念カラーとして設定し、2トーン塗り分けを多用したスペシャルモデルにふさわしい演出を施した (Fig. 13)。

さらにAfrica Twinの世界観を演出するため、30周年記念マークの月桂樹をタイヤパターンで表現し、この30年間、お客さまがAfrica Twinと共に走り続け、想いを寄せ続け下さったことに対する感謝を表現した (Fig. 14)。

結果、2018年モデルにおけるSTDタイプのトリコロールとASタイプのトリコロールの合計は、全体の60%に迫るようになった (Fig. 15)。

2.5. Africa Twinのカラーバリエーションの特徴とブランドの再興

このように、初代が興したAfrica Twinというブランドを、強く確立されたものにするためのカラーアプローチを2016年よりおこなってきた。お客さまがAfrica Twinに求めるイメージは、モータサイクルに接してきた時代背景や、オン／オフ車ゆえの幅広い使用用途によって醸成され



Fig. 13 The 2018 CRF1000L Africa Twin AS



Fig. 14 30th anniversary mark

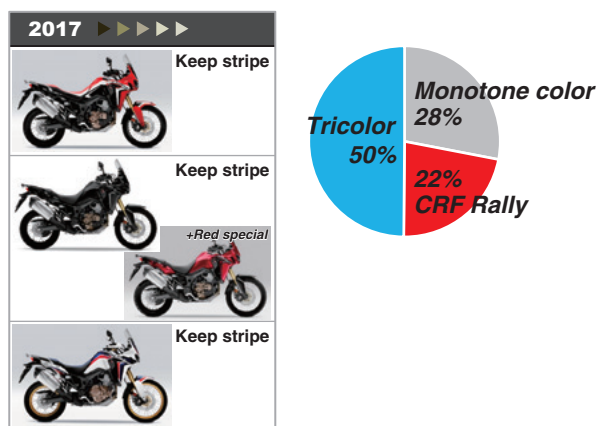


Fig. 12 Shipment volume for 2017 model by color

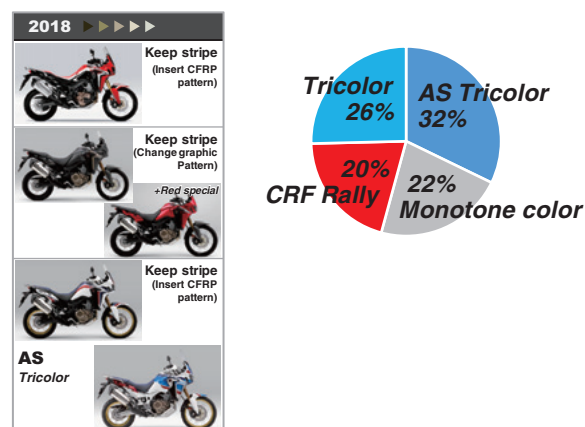


Fig. 15 Shipment volume of 2018 model by color and type

た想いによって変化する。アイコニックなトリコロールと CRF Rally カラー、そしてモノトーンカラーは、そういったお客さまそれぞれの想いに応えると同時に、Africa Twin のカラーバリエーションが持つ特徴となった。発売後 5 年で 10 万台を超える販売実績と、トリコロールを中心にバランス良く各カラーが受け入れられていることから、ブランドの再興は達成できたと考える。

3. 2020 年モデルカラーリングコンセプト および手法

2020 年モデルのカラーリングを検討するにあたり念頭に置いたのは、単純なカラーバリエーションではなく、各カラーがそれぞれの Africa Twin を表現しているという稀有なモデルだということである。

2020 年モデルの大きな特徴は、オフロード走行をより楽しめる STD (Fig. 3) と、快適なツーリングのための進化を図った AS (Fig. 4) という二つのタイプに先鋭化し、それぞれの機能⁽²⁾を充実させたことだ。これは、上記「各カラーがそれぞれの Africa Twin を表現している」とリンクし、カラーリングにおいても、それぞれのモデルコンセプトを的確に表現できるということとなる。Fig. 16 に、それぞれのカラーの住み分けを表現したコンセプトボードを示す。

STD タイプを、大型ながらもタイトな車体でオフロードでの運動性を求めるオン／オフモデル、新しい Africa Twin と解釈し、従来の CRF Rally カラーをイメージカラーとする一方、都会的なエクストリームスポーツイメージのモノトーンカラーモデルを設定した。

AS タイプは、従来の Africa Twin の持つ、アフリカの砂漠を疾走していたパリダカールモデルの印象を継承するツアラとし、伝統のトリコロールをイメージカラーとした。また、AS タイプの特徴を活かすべく、アーバンユースからツーリングまで幅広くこなす大人のツアラをイメージしたモノトーンカラーモデルを設定した。

以下にそれぞれのタイプ、カラーリングごとに施した具体的手法を述べる。

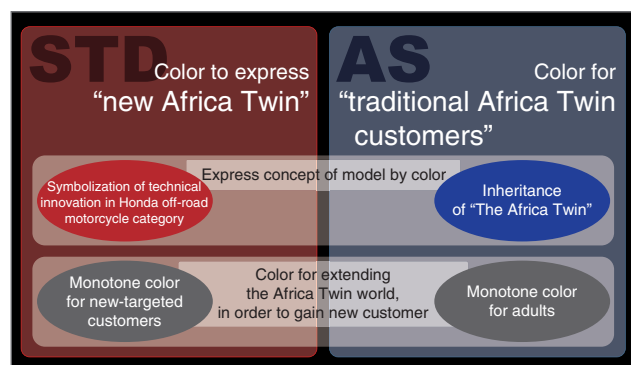


Fig. 16 Coloring concept of 2020 model

3.1. 2020 年 AS タイプ トリコロール

より快適なツーリングを可能とするための進化を果たした AS タイプは、お客さまと共に世界中を旅してきた初代 Africa Twin をほうふつさせる、伝統のトリコロールを中心に据えた。

カラーリングコンセプトを「New Interpretation of Heritage」とし、伝統をモダンに解釈することでトリコロールの深化を図った (Fig. 17)。

2018 年に発表された AS タイプのトリコロールは、先述のように初代 Africa Twin へのオマージュ (Fig. 18) を込めた、横方向へ流れるグラフィックであった (Fig. 19)。

2020 年モデルではモダンさの表現手法として、ジオメトリックな表現を採用した。このジオメトリックなグラフィックを前後方向のラインを意識して配置することで、大容量ガソリンタンク擁した AS タイプの外観を引き締める効果もねらった (Fig. 20)。

またフロントビューでは、2018 年モデルではミドルカウル前縁まで青を回り込んで入れることによって、横方向の堂々とした印象を演出した。しかし 2020 年モデルでは、ミドルカウル前縁を白にし、縦長の印象を与えている



Fig. 17 The 2020 Africa Twin AS in Tricolor



Fig. 18 The 2018 CRF1000L Africa Twin AS with the XRV650, first-generation Africa Twin

(Fig. 21). それにより、コーナリングライト⁽⁵⁾の装備で大きくなったフェアリング全体のボリューム (Fig. 22) に対し、スリムな印象となる効果を得ることができた。堂々とした印象を演出した 2018 年モデルに対し、ツーリング時



Fig. 19 Graphics accentuating lateral flow



Fig. 20 Geometric graphics accentuating longitudinal flow



Fig. 21 Difference in impression in front view by their coloring design

の扱いやすさが感じられるデザインを心がけた。

これら手法を用いて、伝統とモダンの融合と、実際に軽くなった車体の取り回しの良さをも表現することで、伝統のトリコロールの世界観を深化させた。

3.2. 2020 年 STD タイプ CRF Rally カラー

オフロード走行をより楽しむように、スリム化と軽量化を施した STD タイプは、オフロード走破性の高い、最新 Rally レーサとリンクする CRF Rally カラーを中心に据えた。

最新の CRF450 Rally のカラーリングは、赤の比率を多くすることで、より強い印象を持たせている。そこで、カラーリングコンセプトを「VIVID RED HONDA」とし、強さと軽快さを表現するレーサイメージの強化を図った。

Honda のモトクロスレーサを象徴する色である赤の面積を拡大し、よりアグレッシブな強さと、スポーティーさ、軽快感、俊敏さを表現した (Fig. 23)。

また、従来の CRF Rally カラーが赤と白を隣接させたグ



Fig. 22 The 2020 Africa Twin AS equipped with cornering lights



Fig. 23 The 2020 Africa Twin STD in CRF Rally color scheme

グラフィックだったものに対し、黒を間に入れて隣り合う色同士の明度差を出すことで、引き締まった色彩表現をおこなった (Fig. 24)。

これらにより赤を際立たせ、CRF Rally カラーの強さを表現することができた。

これら手法を用いることで、スポーティーさ、軽快感、俊敏さがあがりながらも、各色の印象を鮮烈に見せ、よりアグレッシブな強さを表現することができるグラフィックとし、シャープな印象やレースで活躍している Honda の世界観を深化させた。

3.3. 2020 年 AS および STD タイプ モノトーンカラー

3.3.1. AS タイプ モノトーンカラー

AS タイプに初めてモノトーンカラーを設けるにあたり、現代の多様な価値観を持つ大人のお客さまへ広く訴求していくことを強く念頭において検討した。

カラーリングコンセプトを「Adventure Elite」とし、シックな装いでツーリングはもとより、日常使う街中でも映え、所有のステータスも感じるギアとして、ダークカラーを用いて高い質感を見せることを意識した。

グロスブラックの主体色とアルミパーツの組み合わせが生み出す質感のコントラストは、ハイテクな大人の持ち物を想起させ、堂々としたアドベンチャーモデルでありながらクールな印象の 1 台に仕立てることができた (Fig. 25)。

3.3.2. STD タイプ モノトーンカラー

STD タイプにラインナップされたモノトーンカラーは、CRF Rally カラーでも用いられた赤いアルミサブフレームを効果的に使用し、きびきびとした機動性を感じられるようなグラフィックとした。

カラーリングコンセプトを「MODERN EXTREME SPORTS」と定め、若いマインドを持ったユーザに向け、エクストリームスポーツの持つスピード感を表す直線的な

グラフィックを配した。

都会的な洗練さを表現するため、アグレッシブなイメージのエクストリームスポーツと親和性の高いマットブラックを主体色に選定し、流行を捉えたトレンド感と押し出しの強さの両立を図った (Fig. 26)。

これら 2 タイプのモノトーンカラーは、トリコロールや CRF Rally カラーとは異なる Africa Twin の世界を、幅広いお客さまに訴求するためのモデルとして設定した。これら手法を用いることで、オフロードイメージの強いアドベンチャーモデルに、ハイテク、モダン、都会的な洗練といったイメージを付加し、新しいライフスタイルや走りのスタイルの世界観を深化させた。

以上により、2020 Africa Twin AS タイプおよび STD タイプすべてのカラーが定まった。本章冒頭に掲げたコンセプトボードに対応した、カラーリングバリエーションを Fig. 27 に示す。



Fig. 25 The 2020 Africa Twin AS in monotone (black)



Fig. 24 Differences in details of painted parts between 2016 and 2020 models



Fig. 26 The 2020 Africa Twin STD in monotone (black)



Fig. 27 Coloring variations of the 2020 Africa Twin STD and AS

4. デザインディテール

これまで述べてきたカラーリング同様に、ロゴタイプデザインやシボデザインも、その商品の持つコンセプトを伝えるという重要な役割を担っている。Africa Twinの世界観をより魅力的に形創るためにおこなった以下の内容について述べる。

4.1. ロゴタイプデザイン

2016年モデルでは、STDタイプ、ASタイプ共にシリーズとして共通したAfrica Twinロゴタイプデザインを採用していた (Fig. 28)。2020年モデルでは、モダンにリデザインした共通のAfrica Twinロゴタイプをベースに (Fig. 29)、ASタイプのみアフリカ大陸のフォルムをアイコンニックに表現した要素を加え、ロゴタイプマークとして差別化した (Fig. 30)。

これはかつてのパリダカールラリーのように、広大な夢



Fig. 28 Logotype of the 2016 Africa Twin



Fig. 29 Logotype of the 2020 Africa Twin

の大地を走破するAfrica Twinの世界を感じてもらうためのデザインである。2020年モデルASタイプで強化された、長距離移動の快適性と冒険心のシンボルとしての想いを、このロゴマークデザインに表現した。

4.2. シボデザイン

シボデザインは、摩擦の必要度に応じた滑り性の調整や、傷を目立たせないといった機能的側面と、見た目の上質感の付与、すなわち質感向上において重要な役割を持つ。

今回、シボにおける新しいデザイン表現を目指し、外部デザインスタジオとの共同作業による検討もおこなった。

本格オフロード性能という機能面のみならず、オーナーの感性を刺激し所有欲を満たす「躍動感を与えるパターン」をテーマとし、絞り込んだ3案をFig. 31に示す。さらに実際の部品に施した際の見映えなども踏まえディスカッションを重ね、B案をベースに微調整を加えたパターンに決定した。シボが施された状態をFig. 32に示す。

B案は、Africa Twinの「Go anywhere」という基本コンセプトから、広大にそして複雑に続いていくラリー競技におけるコースをイメージし、ジオメトリックな処理をしたパターンとして導き出したものである。

ランダムロードと名づけたこのパターンは、またがった瞬間に目に入り、躍動的な気持ちで乗車してもらうことをねらいとして、ユーザの目に留まるタンク上面やスピードメータ周りのカバーに施した。



Fig. 30 Logotype mark of the 2020 Africa Twin AS

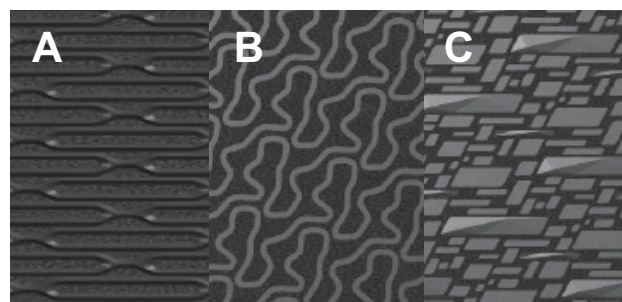


Fig. 31 Candidates for textured pattern

Africa Twin の使い勝手から、雨、風、砂などの自然の織りなすさまざまな条件下での耐久性が求められる。そのため新たなシボパターンの採用時は、汚れの落ちやすさなどの確認もおこなっている。

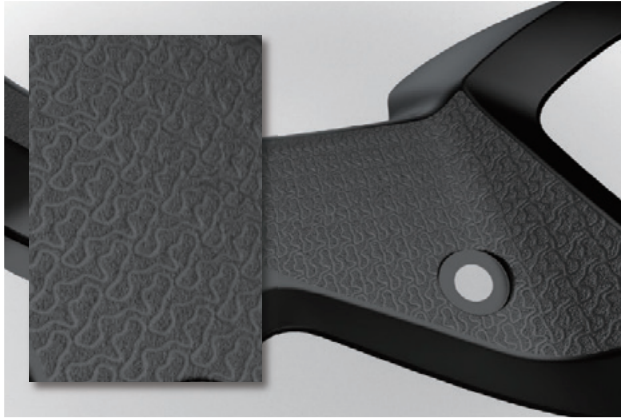


Fig. 32 Textured pattern and applied part

5. まとめ

2016 年モデル以来、Africa Twin のカラーバリエーションは、お客さまの持つそれぞれの Africa Twin に対するイメージにより、カラーリングごとに違う世界観を持つ特徴的なものとなった。

継続しておこなってきたカラーリングアプローチは、お客さまの強い想いとしてのブランド醸成につながった。

2020 年モデルで先鋭化した STD タイプと AS タイプの機種コンセプトと、それぞれのカラーリングが持つ特徴をリンクさせることで、さらに深化した世界観を表現し、Africa Twin ブランドをより確固たるものとするをねらった。

これからも Africa Twin がお客さまと共に走り続け、人生にいつも寄り添うそんな心強い相棒であり続けることを願っている。

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) 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
- (3) 小松昭浩, 桂川碧: CRF1000L Africa Twin のスタイリングデザイン, Honda R&D Technical Review,

Vol. 28, No. 2, p. 1-8

(4) <https://www.honda.co.jp/design/colors/tricolour/sp.html>

(5) 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

■著 者■



桂川 碧

無限音階のコンセプトを利用した電動化車両向け アクティブサウンドコントロール技術

Active Sound Control Technology for Electrified Vehicles Based on Concept of Shepard Tones

王 循¹
Xun WANG

前 坂 拓 摩²
Takuma MAESAKA

井 上 敏 郎²
Toshio INOUE

要 旨

モータによる電動走行の特徴であるシームレスな加速にマッチした車内音を実現するために、電動化車両向けのアクティブサウンドコントロール技術を開発した。本技術は、無限音階の考え方に基づいたサウンドを、車速に同期して生成することを基本とする。無限音階理論をもとに生成したメイントーンに、あらかじめ設定した周波数比で複数のサブトーンを重ね合わせることで、更に自由度の高い加速サウンドを実現できる。本技術によってエンジンサウンドとは異なる、電動化車両にマッチした音色を有する加速サウンドを実現した。

ABSTRACT

Active Sound Control technology for electrified vehicles was developed in order to realize vehicle interior sound levels matching the seamless acceleration that is characteristic of driving under electric motor power. This technology takes the fundamental approach of generating sound based on the conceptual approach of Shepard tones and synchronizing it with the vehicle velocity. The main tones generated according to the theory of Shepard tones are superimposed with multiple sub-tones at preset frequency ratios. This approach can produce acceleration sounds with further increased freedom. An acceleration sound that differs from engine sound and has sounds matched to the electrified vehicle has been realized by means of this technology.

1. まえがき

地球温暖化などの環境問題の対策の一つとして、ハイブリッド車、燃料電池車やバッテリー電気自動車を含む電動化車両 (x Electrified Vehicle: xEV) の開発と普及が進んでいる。一方、パワープラントの電動化は、車両室内音のデザインに新たなチャレンジをもたらしている。モータによる EV 走行時に内燃機関 (エンジン) が発生する音が無くなることで車室が静かになる反面、車両加速中に乗員が音から感じる加速感が低下する⁽¹⁾。更に、加速サウンドという車両のアイデンティティを形成する一つの要素も失う。

従来のエンジンによる室内音は、騒音として感じられることも多いが、車両の加減速を乗員に認知させる機能だけでなく、自動車メーカーごとの個性を表現できる要素でもあり、各社がブランド性を含めて加速サウンドを構築してきた^{(2),(3)}。著者らはこれまでに、エンジン車に対し

加速感の向上とブランド性を有するサウンドの構築を狙いとしたアクティブサウンドコントロール (Active Sound Control: ASC) 技術を構築し、多くの車種に量産適用してきた⁽²⁾。

Fig. 1 はそのシステム構成を示す。この技術は、コントローラエリアネットワーク (Controller Area Network: CAN) から取得したエンジン回転数に同期したエンジン次数音成分を生成する。ASC-ECU (Electronic Control Unit) で生成された音源信号はオーディオと共用したスピーカから車室内に発せられ、室内音と合わせて加速サウンドとなる。

xEV は、EV 走行時にモータによる音が比較的小さいため、走りだしから高速までシームレスに加速していくという特徴に適した加速サウンドを生成できる新しい ASC 技術が必要であると考えた。

本稿は、新たに開発した xEV-ASC 技術のコンセプト、システム概要および車両適用事例について述べる。

¹ 先進技術研究所, 博士 (工学)

² 先進技術研究所

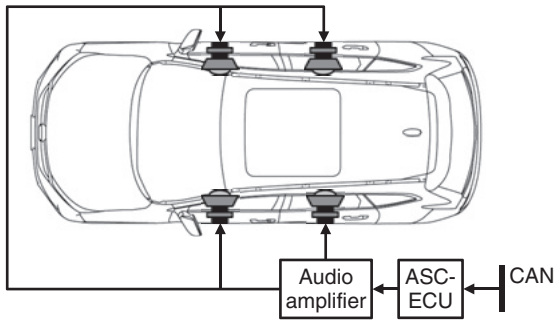


Fig. 1 ASC system configuration

2. xEV-ASC のコンセプト

xEV-ASC を検討するにあたり、以下3点を狙いとした。

- (1) 車速や加速に同期した音色変化の実現
- (2) EV 走行らしい加速感を表現できる音色の実現
- (3) 自由度の高い音色調整

2.1. 車速との同期

モータによる EV 走行時には、車両の加速を表現するために、車速変化そのものに同期したサウンドの音色変化が望ましい。また、EV 走行時の動力源であるモータの回転数も車速に比例する。そこで、xEV-ASC は、車速をリファレンス信号とした加速サウンドを生成する。

加速サウンドの周波数と車速の関係を式(1)に示す。

$$f(v) = R \times v + F0. \quad (1)$$

ここで、 v は車速、 R は周波数変化率、 $F0$ は周波数軸の切片を表す。Fig. 2は式(1)による加速サウンドの周波数設定例を示す。周波数変化率は加速感に影響する要因の一つであるため⁽⁴⁾、Fig. 2のEx.1に示す車速変化に対して周波数変化が緩やかな場合、加速感を感じにくい。一方、周波数変化率を大きくしたEx.2では高車速で高周波の音となり、耳障りとなる。そこで、Ex.3のようにステップ状に周波数を上昇させていく設定にすると、高い周波数変化率を維持しながら耳障りにならない周波数帯域で演出することが可能であるが、ギアチェンジのあるAT/MT車のような音となり、モータによる走りだしから高速までシームレスに加速していくEV走行らしい加速感を表現することが難しい。

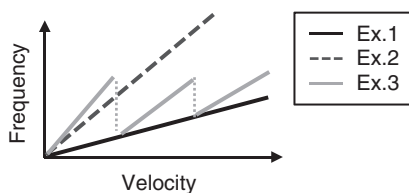


Fig. 2 Typical sound settings according to Eq. (1)

このように車速に同期したASCにおいて、加速サウンドを耳障りにならない周波数範囲に保ちながらシームレスな加速感を表現することが技術課題となる。

2.2. 無限音階の応用による xEV サウンドの音色実現

上記の技術課題を解決するために、音楽や映画の効果音でも用いられている無限音階⁽⁵⁾の応用を考えた。

無限音階とは R. N. Shepard により考案されたオクターブ単位で隔てられた正弦波を重ね合わせた音^{(5),(6)}であり、この音を繰り返して再生すると、聴覚上の錯覚が引き起こされ、音程が上がり続けるように感じられる。

Fig. 3は一般的な音階と無限音階を鍵盤上で示したものである。Fig. 3(a)のように一般的な音階では紙面右方向に進むにつれ、音高が半音ずつ高くなっていき、ド(C)から12個分進むと、1オクターブ高いCとなる。一方、無限音階はFig. 3(b)に示すようにオクターブ違いの複数の音で構成されている。これらの音を同期させて再生し、連続的に1オクターブ上げると、単音の場合は1オクターブ上がって感じられるが、無限音階では元の音に戻ったように感じられる。つまり、無限音階の音列を連続再生すると、音が高がり続けているように錯覚するのである。

この現象を理解するため、無限音階の模式図をFig. 4(a)に示す。高さ方向は周波数の高さ、円周方向は音階上の高さを表す。赤枠は無限音階のCの和音であり、他の音階は

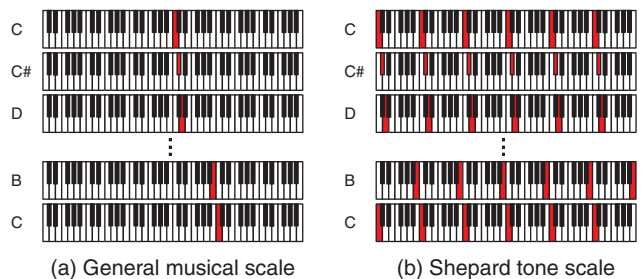


Fig. 3 Musical scale on keyboard for piano

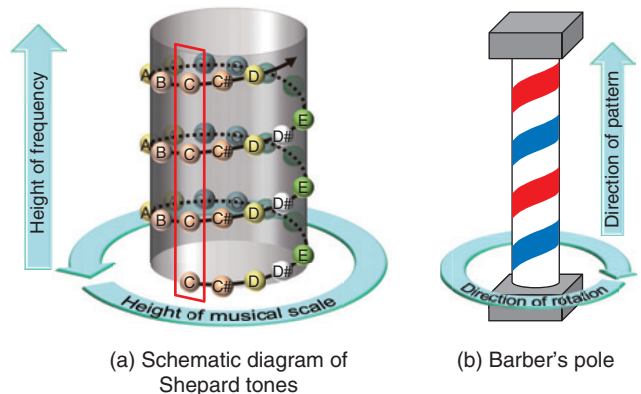


Fig. 4 Shepard tones and barber's pole

円周方向に並んでいる。反時計回りに各音階を連続再生することで、図中らせん状の矢印のように音が上がり続けるように感じる錯覚が引き起こされる。類似の錯覚を利用したものとして、Fig. 4(b)に示す理髪店などの看板で広く用いられているサインポールがある。こちらは回転することで赤と青の線が上がり続けているような視覚上の錯覚を引き起こすものである。

この無限音階が2.1.節の課題解決に利用できると考え、車速に同期しつつ無限音階を応用した加速サウンドを生成するxEV-ASC技術の開発をおこなった。

2.3. トーンの設定によるxEVサウンドの音色調整

無限音階は、オクターブ違いの音の重ね合わせ⁽⁵⁾であるため、実現できる音色が限られている。そのため、それぞれの車両のアイデンティティを表現するために、従来の無限音階による音色だけでは不十分と考えた。

音色調整の自由度を向上するために、無限音階の特徴を有しながら、音楽理論にある和音の構成方法を加速サウンドの生成に応用することを考えた。本来の無限音階であるオクターブ関係にある正弦波のセットをまずメイントーンとして定義する。このメイントーンに対し、一定の周波数比を持った音をサブトーンと定義する。メイントーンに加えて複数のサブトーンを生成することで、豊富な音色を実現することを考えた。

3. xEV-ASC システム

Fig. 5はxEV-ASCシステムのブロック図を示す。本システムは、車両状態取得、音色生成、車室内音場補正、音量調整、の四つのモジュールで構成されている。音色生成モジュールには、新たに開発した無限音階を応用した音色を

車速に同期して生成するASC技術を用いる。

3.1. 車両状態取得

車両状態取得モジュールはFig. 5に示すように、CANより加速サウンドを生成するために必要な車速、アクセルペダル (Accelerator Pedal: AP) 開度、ノーマルやスポーツなどの車両走行モード情報を取得する。また、車速をもとに車両の加速度を内部で計算する。

3.2. 音色生成

加速サウンドの音色は、その構成周波数と各周波数成分の大きさにより決まる。音色生成モジュールはFig. 5のように、無限音階に基づいた構成周波数の算出、各周波数の正弦信号の生成、正弦信号の振幅調整、の三つのプロセスでメイントーンとサブトーンを生成して音色を構成する。

3.2.1. メイントーンの生成

メイントーンの生成について、基本周波数 f_0 は式(2)から式(5)に示されるように算出される。

$$f_0(n) = F_{\min} \times a^{\left(\frac{v(n) - V(n)}{k}\right)}, \quad (2)$$

$$\text{If } f_0(n) \geq F_{\max}, V(n) = v(n), \quad (3)$$

$$\text{Else if } f_0(n) < F_{\min}, V(n) = v(n) - \Delta V(n), \quad (4)$$

$$\text{Else, } V(n) = V(n - 1). \quad (5)$$

ここで、 n は離散時間、 $F_{\min}$ と $F_{\max}$ はそれぞれ下限周波数と上限周波数、 a は車速 v の指数関数の底、 V は基本周波数 f_0 が上限周波数になった時の車速、 k は周波数変化率調整係数を表す。これらの中で、 $k, a, F_{\min}, F_{\max}$ が制御パラメータである。以上から、基本周波数 f_0 は車速に応じて、 $F_{\min}$ と $F_{\max}$ の間に指数的に変化することがわかる。加速に伴い、 f_0

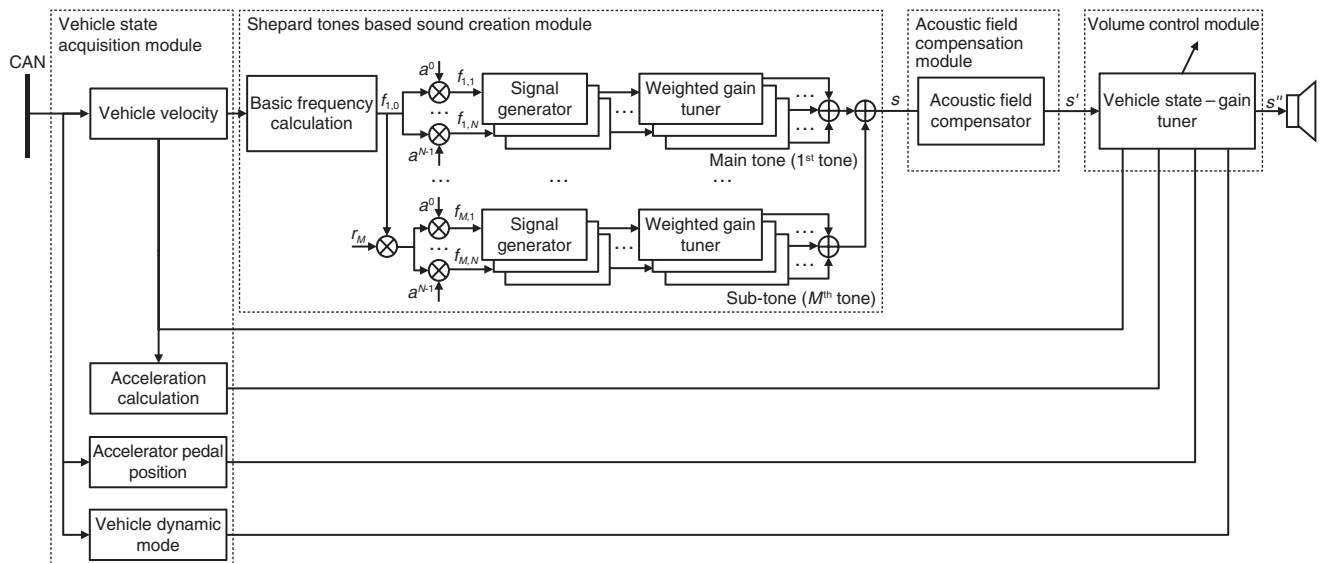


Fig. 5 Block diagram of xEV-ASC system

が $F_{\max}$ を上回る場合、式 (3) により、 V に $f_0 = F_{\max}$ 時の車速 v を設定することで f_0 を $F_{\min}$ に戻す。減速時に、 f_0 が $F_{\min}$ を下回る場合、 f_0 を $F_{\max}$ にするために、 V に $v - \Delta V$ を設定する。ここで、 ΔV は f_0 が $F_{\min}$ から $F_{\max}$ まで上昇した時の車速変化量を表し、式 (6) に示すように算出できる。

$$\Delta V = k \log_a \frac{F_{\max}}{F_{\min}}. \quad (6)$$

ΔV は、 $k, a, F_{\min}, F_{\max}$ を用いて算出し、制御パラメータとして事前に決定する。

メイントーンの N 個目の構成周波数は、 f_0 に基づき、式 (7) と式 (8) に示すように算出される。

$$f_N(n) = f_0 \times a^{N-1}, \quad (7)$$

$$\text{If } f_N(n) \geq F_{\max}, f_N(n) = f_N(n) \times \frac{F_{\min}}{F_{\max}}. \quad (8)$$

必要な構成周波数の数 $N_{\max}$ は、 $a, F_{\min}, F_{\max}$ より決まる。

$$N_{\max} = \log_a \frac{F_{\max}}{F_{\min}}. \quad (9)$$

式 (7) と式 (8) により、任意の隣接する二つの構成周波数の比は常に定数 a となる。 $a = 2$ の場合、加速サウンドの構成周波数は本来の無限音階であり、常にオクターブの関係を保ち、調和な音になる。Fig. 6 は、式 (2) から式 (8) によって計算された六つの成分を含む無限音階の周波数構成例を示す。

各周波数成分の正弦信号 s_N は、それぞれの周波数に基づき信号発生部によって生成され、Fig. 7 に示す二つの重み付きゲインを調整することで、それぞれの正弦波の大きさを決定する。

$G_S(f)$ は、 $F_{\min}$ と $F_{\max}$ の範囲内で低周波数と高周波数の音をスムーズにフェードイン、フェードアウトさせることで、無限音階による聴覚上の錯覚を引き起こすための重み付きゲインであり、Fig. 8 にその設定例を示す。 $G_S(f)$ と式 (2) から式 (8) を用いることで、Fig. 9 に示す無限音階の特徴を有する加速サウンドを車速に同期して生成できる。

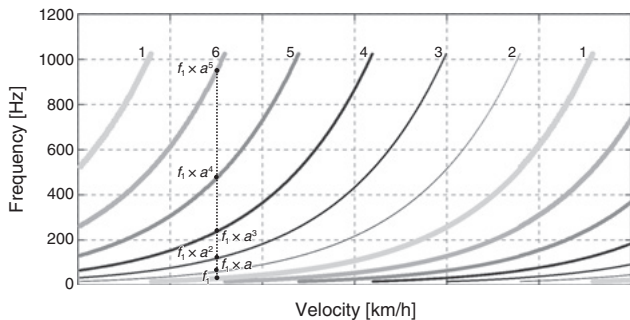


Fig. 6 Example of calculated frequencies

$G_N(v)$ は、車速に基づく各周波数成分の重み付きゲインである。Fig. 10 に示す設定例のように、車速に応じて周波数成分の大きさの比例を変えることで、音色を調整できる。

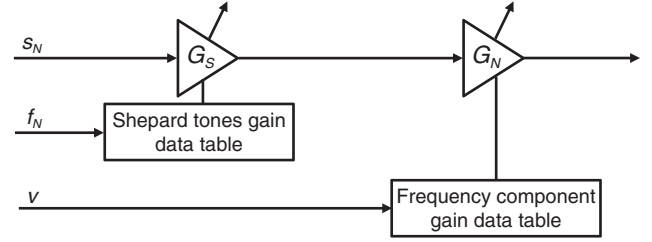


Fig. 7 Block diagram of weighted gain tuner

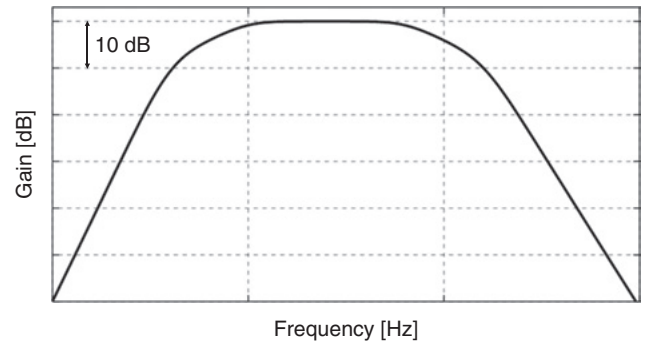


Fig. 8 Example of Shepard tones gain $G_S(f)$

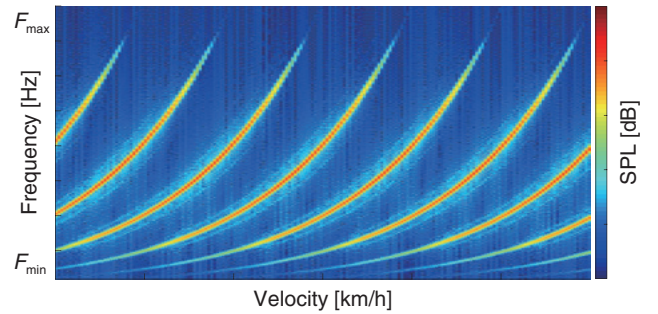


Fig. 9 Example of Shepard tones based acceleration sound

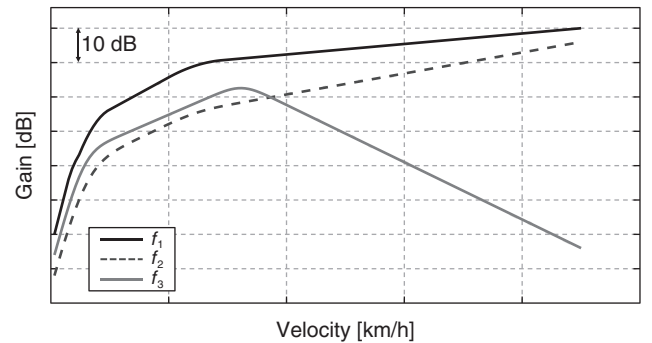


Fig. 10 Example of frequency component gain $G_N(v)$

Table 1 Typical triads and impressions of triads

Chord type	Frequency ratio	Impression
Major	1:1.25:1.5	Bright/Pleasant
Minor	1:1.2:1.5	Dark/Sad
Suspended	1:1.33:1.5	Fantastic
Diminished	1:1.2:1.42	Unstable/Transient
Augmented	1:1.25:1.6	Unstable/Transient

3.2.2. サブトーンの生成

サブトーンの生成では、 M 個目のサブトーンとメイントーンの基本周波数の比を r_M とすると、その構成周波数 $f_{M,N}$ は、式 (10) に示すように算出される。

$$f_{M,N}(n) = r_M \times f_{1,0}(n) \times a^{N-1}. \quad (10)$$

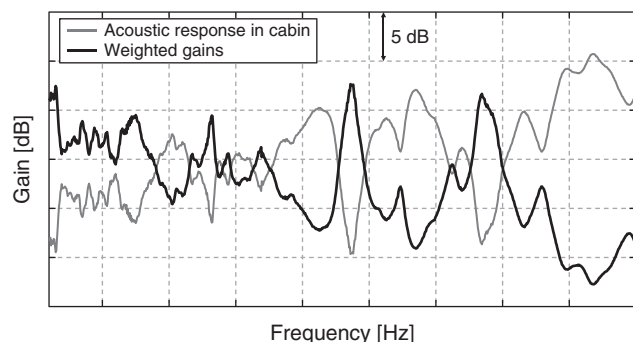
r_M は、例えば、音楽理論⁽⁷⁾に基づき設定できる。Table 1 は、基本的な和音である三つの音で構成される三和音（トライアド）とそのトライアドで表現する音の印象⁽⁸⁾を示す。メジャーとマイナートライアドは音の明暗を表現でき、サスペンデッドは神秘的な印象を与えと言われており、車両の特徴に応じてこれらの設定を利用できる。ディミニッシュは、不安定な音と言われており、注意を促す場合などでの利用が考えられる。例えば、明るい印象を与えるメジャートライアドをもとに三つのトーンでサウンドを構成する場合、メイントーンと二つのサブトーンの周波数比 $r_1:r_2:r_3$ を 1:1.25:1.5 と設定すれば良い。

音色生成モジュールの出力信号 s は、式 (11) のように各トーンの各周波数成分信号を足し合わせて算出される。このように、任意の周波数比を持った複数の音を付与できる。

$$s(n) = \sum_{M=1}^{ALL} \sum_{N=1}^{ALL} G_N(v(n)) \times G_S(f_{M,N}(n)) \times G_C(f_{M,N}(n)) \times s_{M,N}(n). \quad (11)$$

3.3. 車室内音場補正

Fig. 11 のグレー線に示すように、車室内音場の影響でスピーカから乗員頭部までの音響応答のゲイン特性に山谷が生じている。乗員に伝達した加速サウンドは、周波数によってその成分の大きさが変わり、事前に設定した音色の保証ができなくなる。そこで、乗員位置において設定通りの加速サウンドの音色を実現するために、Fig. 11 の黒線に

Fig. 11 Example of acoustic compensation gain $G_C(f)$

示す車室内音響応答のゲイン特性の逆特性 $G_C(f)$ を用いて各周波数成分の大きさを補正する。

3.4. 音量調整

クルーズ走行時の静粛性と加速時の加速感とのバランス、また、車両の挙動と乗員の操作に連動した加速サウンドを実現するために、車両の速度、加速度、AP 開度に応じて加速サウンドの全体音量を調整する手段を設ける。更に、乗員が選択するノーマルやスポーツなどの車両走行モードごとに加速サウンドの音量を設定できるようにすることで、車両走行モードによって静粛性重視、または、加速感重視の室内音設定の間で切り替えられる。

Fig. 12 から Fig. 14 はそれぞれ、車速ゲイン $G_V(v)$ 、加速度ゲイン $G_{Acc}(\Delta v)$ 、および AP 開度ゲイン $G_{AP}(p)$ の設定例を示す。車両の速度と加速度の増加、AP の踏み込みに伴

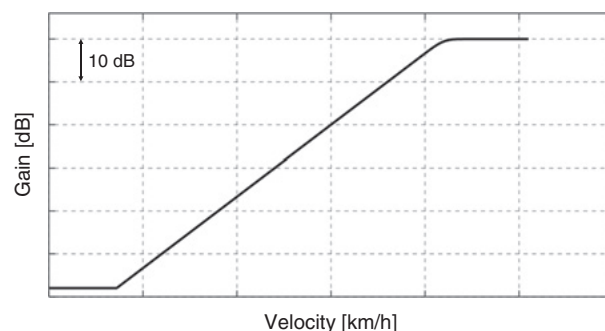
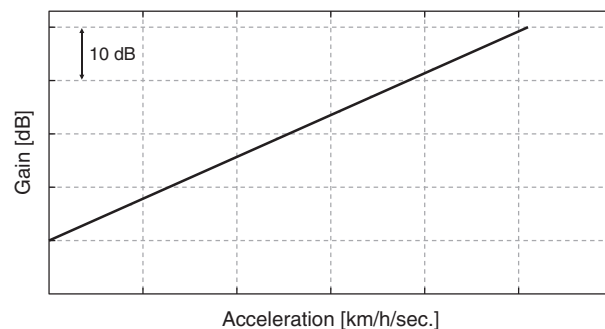
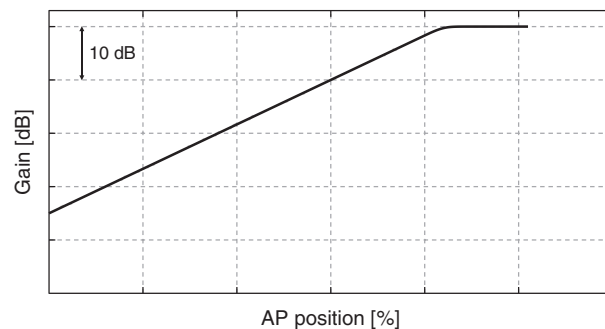
Fig. 12 Example of velocity gain $G_V(v)$ Fig. 13 Example of acceleration gain $G_{Acc}(\Delta v)$ Fig. 14 Example of accelerator pedal position gain $G_{AP}(p)$

Table 2 Example of vehicle dynamic mode gain

Vehicle dynamic mode	Dynamic mode gain $G_M(m)$
Comfort	-90 dB
Normal	0 dB
Sport	+6 dB
...	...

い、音量が大きくなるように設定できる。Table 2 は、車両走行モードゲイン $G_M(m)$ の設定例を示す。コンフォートモードで音を出力せず、スポーツモードで音量を大きく設定して加速感を強調するように設定できる。

加速サウンド信号 s'' は、音場補正した信号 s' に対して式 (12) に示すように音量調整してからスピーカから出力する。

$$s''(n) = s'(n) \times G_M(m(n)) \times [\alpha \times G_A(\Delta v(n)) + (1 - \alpha)] \times G_V(v(n)) \times G_{AP}(p(n)). \quad (12)$$

ここで、 α は加速度ゲインと AP 開度ゲインの比率を調整するパラメータであり、 $0 \leq \alpha \leq 1$ が満たされる。

4. 車両適用事例

本システムを 2021 年に発売予定の中国市場向け SUV Plug-in Hybrid EV (PHEV) 車に適用した事例を紹介する。システムは、Fig. 2 と同様な構成となっており、ASC-ECU は CAN から取得した車両情報に基づき加速サウンド信号を生成し、オーディオと共用したスピーカから車室内に発されることで、対象車両が EV 走行した時の加速感の向上を図る。

4.1. システム設定

まず、サブトーンをどのように設定するかを検討した。Table 1 にあるトライアドをもとにいくつかの設定を試したが、最終的に明るい音色を持つメジャートライアドの構成を採用した。3.2.2. 項で述べたように、 $r_1:r_2:r_3 = 1:1.25:1.5$ と設定し、明るい加速サウンドを狙った。このサウンドを前提として、音色と音量を調整するためのパラメータチューニングは、実車テストを繰り返しておこなった。

次に、周波数範囲について検討した。上限周波数は、EV 走行の軽快さを表現するために、ある程度高くすべきと考えた。従来のエンジン車における ASC チューニングの経験より、4 気筒 4 サイクルエンジンの 8 次音程度の高さが必要と考えた。その 8 次音は 6000 rpm で 800 Hz であることから、上限周波数 $F_{\max} = 800$ Hz と設定した。スピーカの再生可能な周波数下限から、下限周波数 $F_{\min} = 50$ Hz とした。この結果、パラメータ a 、 $F_{\min}$ 、 $F_{\max}$ と式 (9) より、同じ

車速で発生するメイントーンは 4 本となる。

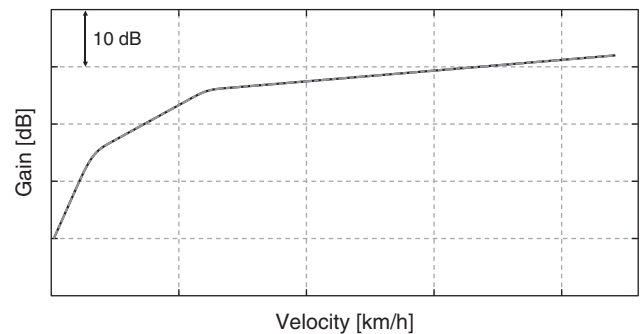
また、周波数変化率を調整するためのパラメータ k と a は、対象車両の加速性能にマッチするようにチューニングをおこない、 $k = 25$ km/h、 $a = 2$ とした。式 (6) から、一つの正弦波の周波数は $\Delta V = 100$ km/h 間隔で $F_{\min}$ と $F_{\max}$ の間に繰り返して生成されることがわかる。また、一つのトーンは四つの正弦波で構成されるため、トーンの周波数構成は、25 km/h ごとに繰り返されることになる。

それぞれの周波数成分をスムーズにフェードイン、フェードアウトさせるために、ゲイン $G_s(f)$ は、Fig. 8 に示す設定を利用した。各周波数成分のゲイン $G_N(v)$ は、Fig. 15 に示すように、加速サウンドのリニアリティを重視し、各周波数成分のゲインを同じ値にした上で、車速の増加に伴い大きくなる設定とした。

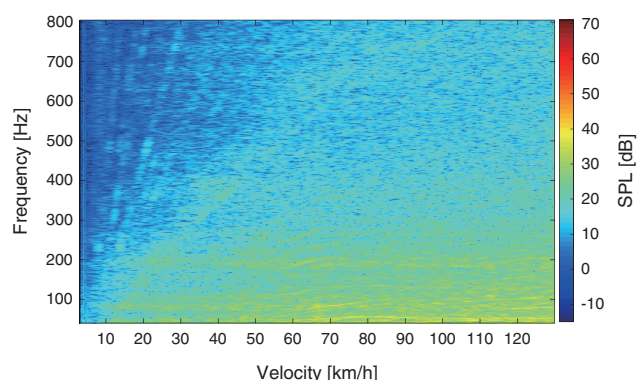
音量調整は、加速サウンドの音量を車両の加速度と乗員の AP 操作に連動させるようにした。車速ゲイン $G_V(v)$ を全車速域で 0 dB に設定し、加速度ゲイン $G_{Acc}(\Delta v)$ と AP 開度ゲイン $G_{AP}(p)$ を Fig. 13 と Fig. 14 に示すように、加速度が増大するほど、または、乗員が AP を踏みこむほど、音量が大きくなる設定にした。ノーマルモード走行時には静粛性を重視しながら、スポーツモードでは加速時に加速感を強く感じるように、車両走行モードゲイン $G_M(m)$ は、スポーツモード走行時に加速サウンドを感じられるよう設定した。

4.2. xEV-ASC の制御効果

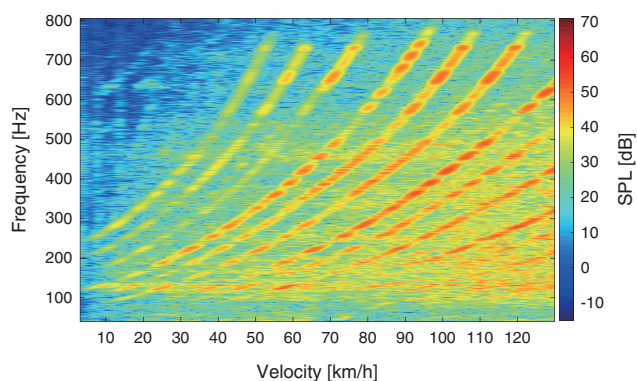
Fig. 16 は、xEV-ASC システム有り、無しの室内音のスペクトログラムを示す。xEV-ASC システム無しの時には車速の増加に伴い周波数が変化する音成分が少ないのに対し、xEV-ASC システム有りの時には、 $F_{\min}$ と $F_{\max}$ の間で 25 km/h ごとに繰り返されるという無限音階の特徴を有する加速サウンドが車速に同期して生成されている。社内で xEV-ASC システム搭載車の試乗会をおこなった。結果、車両の EV 走行による加速時に乗員が感じられる加速感を向上できることが確認できた。xEV-ASC システムは、

Fig. 15 Frequency component gain $G_N(v)$ for test car

シームレスな加速感を得られる EV 走行の特徴にマッチした音色を有する加速サウンドを生成でき、xEV に特有な加速サウンドの創出に活用できることを確認できた。



(a) Without xEV-ASC system



(b) With xEV-ASC system

Fig. 16 Interior sound spectrogram of test car

5. まとめ

本稿では、新たに開発した xEV-ASC 技術について報告した。本技術は、無限音階のコンセプトを利用した加速サウンドを車速に同期して生成することで、モータによる EV 走行時のシームレスな加速感を表現できる音色を実現した。更に、メイントーンとサブトーンを設定することによって自由度の高い音色調整を実現した。また、本技術を 2021 年に発売予定の中国市場向け SUV PHEV に適用し、その効果を確認した。

本技術は、今後の xEV に対し、車両のアイデンティティを形成するための重要な要素技術となり得ると考える。

参考文献

- (1) Gwak, D. Y., Yoon, K., Seong, Y., Lee, S.: Application of subharmonics for active sound design of electric

vehicles, The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 136, Issue 6, EL391, (2014)

- (2) Kobayashi, Y., Inoue, T., Sano, H., Takahashi, A., Sakamoto, K.: Active sound control in automobiles, Proceedings of Inter-Noise 2008, p. 390-398, (2008)
- (3) 林毅: アクティブ制御を用いたエンジンサウンドのデザイン - 車両の運動と音源知覚に基づく音色と定位の音響デザイン -, 自動車技術会論文集, Vol. 47, No. 6, p. 1355-1359, (2016)
- (4) 加茂川隆至, 有光哲彦, 木澤千城, 郡司通晴, 戸井武司: 自動車加速音の変化による加速区間毎の加速感の印象評価, 自動車技術会論文集, Vol. 47, No. 6, p. 1381-1386, (2016)
- (5) Shepard, R. N.: Circularity in judgments of relative pitch, The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 36, Issue 12, p. 2346-2353, (1964)
- (6) Shimizu, Y., Umeda, M., Mano, H., Aoki, I., Higuchi, T., Tanaka, C.: Neuronal response to Shepard's tones. An auditory fMRI study using multifractal analysis, Brain Research, Vol. 1186, p. 113-123, (2007)
- (7) 石桁真礼生, 末吉保雄, 丸田昭三, 飯田隆, 金光威和雄, 飯沼信義: 楽典 - 理論と実習, 音楽之友社, 240p., (1965)
- (8) Aiba, E., Tobitani, K., Shimotomai, T., Tani, M., Nagata, N., Fujisawa, T.: Chord Character Evaluation Model Based on Harmoniousness: Application to Music Mood Visualization Interface, Proceedings of SCIS-ISIS 2012, p. 131-135, (2012)

著者



王 循



前坂 拓摩



井上 敏郎

電磁接触器が励振する電動車騒音の予測技術

Technology for Prediction of Contactor Noise for Electric-powered Vehicle Batteries

下村 章人¹

Akito SHIMOMURA

川辺 正道¹

Masamichi KAWABE

外山 直基¹

Naoki TOYAMA

佐藤 嘉實²

Yoshimi SATO

要 旨

電動車には高電圧バッテリーユニットが車体に搭載されており、このユニット内の電磁接触器の作動音は乗員にとって不快に感じられる。この騒音を、高電圧バッテリーユニット単体の加振力と車体の構造音響伝達特性から予測する手法を構築した。コンポーネントベース伝達経路解析を採用することで、振動源と伝達系を切り離し、高電圧バッテリーユニット単体の車体側へ伝達する荷重と車体構造伝達とキャビン音響伝達を複合した伝達関数を用いることで完成車状態の騒音を予測できるようにした。さらに、サブユニットであるジャンクションボードの荷重から高電圧バッテリーユニット単体の荷重を予測する CAE モデルを構築し、高電圧バッテリーユニットの図面段階で加振力を予測できるようにした。以上の技術により、完成車状態における騒音の評価が、性能設計の段階で検討できるようになった。

ABSTRACT

Electric-powered vehicles have a high-voltage battery unit mounted in the vehicle body, and the sound made by operation of the electromagnetic contactor inside the unit can be unpleasant for vehicle occupants. A method was created for predicting this noise from the excitation force of the high-voltage battery unit on its own and from the acoustic transmission characteristics of the vehicle body structure. The adoption of component-based transfer path analysis made it possible to separate vibration sources from transfer systems and predict noise in the fully assembled vehicle state by using the load transferred from the stand-alone high-voltage battery unit to the vehicle body side and a transfer function that combines the vehicle body structure transfer and the cabin acoustic transfer. A computer-aided engineering model was also created for predicting the load from the stand-alone high-voltage battery unit based on the load from the junction board, which is a sub-unit of it. This made it possible to predict the excitation force of the high-voltage battery unit at the drawing stage. By means of the above technology, it has become possible to consider noise evaluation in the fully assembled vehicle state at the performance design stage.

1. まえがき

近年、自動車への環境負荷低減に対する要求はさらなる高まりを見せている。各自動車メーカーは、CO₂ 排出量削減のための燃費性能向上や、電動車両の開発、普及に取り組んでいる。

Honda は電動車両を普及させるために様々な電動車両を開発しており^{(1),(2)}、それらの電動車両には、バッテリーに電気エネルギーを貯蔵するための高電圧バッテリーユニット（以降ユニット）を搭載している⁽³⁾⁻⁽⁵⁾。そのユニット内には、電力供給のために電流の ON-OFF をおこなう

制御機器である電磁接触器が搭載されており、車両の始動時と停止時に作動する。始動時には、エンジンが停止していることが多く、暗騒音レベルが低いためにその作動音が不快な騒音として感じられる。この騒音は完成車の状態で評価されるために、開発後期に課題が顕在化することが多く、開発の手戻りや追加対応を余儀なくされる。そのため開発初期に騒音を予測する技術構築が求められている。

このような騒音を解析する手法として伝達経路解析 (Transfer Path Analysis: TPA) が挙げられる。振動源であるユニットからの入力と、応答系となる車体側の構造音響伝達関数を掛け合わせると、完成車状態における騒音予測

¹ 本田技研工業株式会社

² 株式会社エステック

ができる。入力系と応答系が剛結に近い場合、従来の TPA では応答系の伝達関数マトリクスと実稼働時の応答を用いて入力を同定する手法が一般的である。しかし、実際の車体とユニットを用いて計測するため、ユニットの試作物がない設計初期にこの手法が適用できない。

そこで本稿では、コンポーネントベース TPA を活用することで、ユニットと車体を切り離して評価し、完成車状態の騒音性能を予測する手法を構築した。本手法に併せて、CAE の活用をおこないユニットからの入力を、試作物を用いずに予測する手法を構築した。

2. 電磁接触器の作動騒音

2.1. 電磁接触器による励振

電磁接触器は大電流の ON-OFF をおこなう制御機器の一つである。この電磁接触器の概略図を Fig. 1 に示す。電磁力によって可動鉄心を移動させて、接点部の開閉をおこなうことで電流の ON-OFF を制御している。この時の接触が振動源となっており、ユニットから車体へと振動が伝搬して騒音を引き起こす。

2.2. 高電圧バッテリーユニットの構成

ユニットの構成例を Fig. 2 に示す。電磁接触器は、電気的な接続や電流を遮断する安全機能を備えるジャンクションボードに搭載されている。このジャンクションボードはバッテリーフレームに取り付けられ、これを含むユニットは車体フレームに取り付けられる構成をとる。

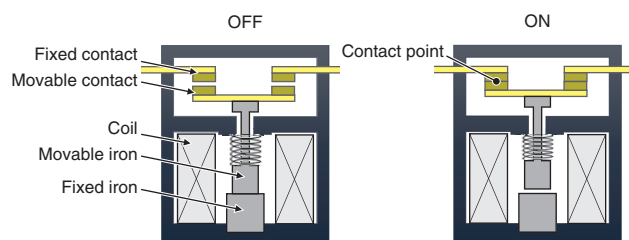


Fig. 1 Schematics of electromagnetic contactor

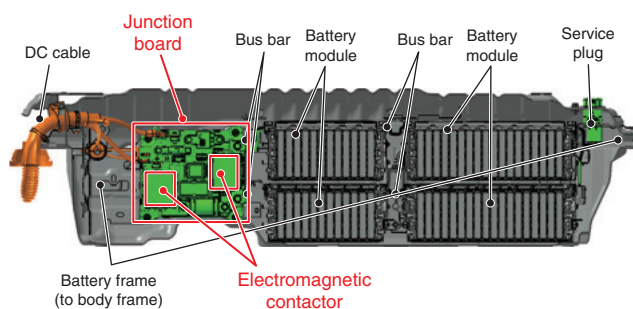


Fig. 2 High-voltage battery unit components

2.3. 完成車における作動騒音

完成車における電磁接触器の作動騒音は、継続時間が短い衝撃騒音である。この作動騒音の乗員耳位置における周波数解析結果を Fig. 3 に示す。100 Hz から 600 Hz あたりにピークを持っていることがわかる。このピーク近傍帯域と、可聴範囲下限がおおむね 20 Hz であることを考慮し、解析対象の周波数領域は 20 Hz から 1000 Hz までとした。

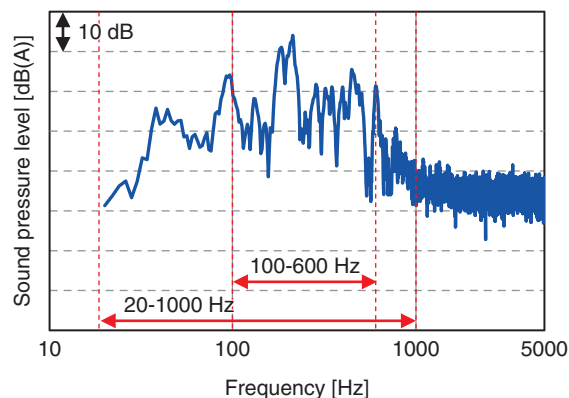


Fig. 3 Cabin noise of electromagnetic contactor

3. コンポーネントベース TPA

3.1. 従来 TPA との違い

従来から音・振動の解析に TPA がよく用いられてきた。これはエンジンやモータなどの振動源からの入力と、車体などの応答系となる構造音響伝達特性から各伝達経路や音源の寄与度を解析する手法である^{(6),(7)}。

ユニット単体を車体側の応答系から分離して入力計測できる手法として、コンポーネントベース TPA がある⁽⁸⁾。従来の TPA ではユニットの入力計測をユニットと車体が結合した状態にて計測する必要があった。コンポーネントベース TPA においては、構造音響伝達特性の計測はユニット単体と車体が結合された状態でおこない、ユニットの入力計測は車体側から分離してユニット単体で計測をおこなうことができる。従来の TPA との比較を Table 1 に示す。ユニット単体で目標荷重値を設定することができるために、モデルベース開発の加速化の流れも重なり、近年活発に活用される解析手法である。

3.2. ユニットからの伝達力

コンポーネントベース TPA の入力荷重の計測方法には主に三つの手法が知られている⁽⁹⁾。一つ目は Direct Force 手法で、ユニット単体を剛に設置して振動源から伝搬する荷重を直接計測する手法である。二つ目は Hybrid 手法で、ユニット単体を治具に設置し伝搬する荷重を計測して、そ

Table 1 Traditional TPA and component-based TPA

Method	Input force (F)	Transfer function (H)
Traditional TPA	Contact force	Unit separation
Component-based TPA	Blocked force	Unit combine

の系の伝達応答と合わせて等価な荷重を同定する手法である。三つ目はFree Velocity手法で、ユニット単体をフリーな状態で振動源から伝達したその応答を計測し、荷重に変換する手法である。図式で表したものをFig. 4にて示す。後者二つの方法はよく用いられる方法ではあるものの、別途測定系の伝達関数取得する必要性があり、計測荷重を等価外力に変換するための手順が必要になる。前者のDirect Force手法であれば、ユニット単体を剛に設置することが課題とはなるが、計測した設置反力がそのまま等価外力になるために簡易な計測手順で済む利点がある。

このDirect Force手法におけるコンポーネントベースTPAの理論を説明する。入力系と応答系によるシステムの運動方程式を動剛性表記にて考える。この動剛性は伝達の経路ごとに定まり、例えば D_{sr} の表記であれば、source側加振時のresponse側応答によって求まる動剛性を意味する。Fig. 5に示すような、結合状態、結合時実稼働状態、接地時実稼働状態を考え、各運動方程式より接地時実稼働状態での設置反力を求める。

結合状態においては下記の式になる。

$$\begin{bmatrix} D_{rr} & D_{rs} \\ D_{sr} & D_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_r \\ x_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_r \\ f_s \end{bmatrix} \quad (1)$$

D : Dynamic stiffness s : Source

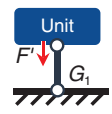
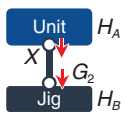
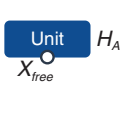
x : Displacement r : Response

結合時実稼働状態においても同様に式を立て展開する。

$$\begin{bmatrix} D_{rr} & D_{rs} \\ D_{sr} & D_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{ra} \\ x_{sa} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ f_s \end{bmatrix} \quad (2)$$

s_a : Source in operating state

r_a : Response in operating state

(1) Direct Force	(2) Hybrid	(3) Free Velocity
		
$F' = G_1$	$F'^{eq} = G_2 + H_A^{-1} \cdot X$	$F' = H_A \cdot X_{free}$

G : Response force
 X : Receiver

Fig. 4 Force measurement of component-based TPA

$$x_{sa} = D_{ss}^{-1} (f_s - D_{sr} x_{ra}) \quad (3)$$

$$D_{rs} D_{ss}^{-1} f_s = D_{rs} D_{ss}^{-1} x_{ra} - D_{rr} x_{ra}$$

接地時実稼働状態においても同様に式をたて展開する。

$$\begin{bmatrix} D_{rr} & D_{rs} \\ D_{sr} & D_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ x_{s0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{r0} \\ f_s \end{bmatrix} \quad (4)$$

s_0 : Source in rigid state

$$f_{r0} = D_{rs} D_{ss}^{-1} f_s \quad (5)$$

式(4)より式(5)が導かれる。式(5)に式(3)を代入することで、設置反力 f_{r0} が求まった。

$$f_{r0} = (D_{rs} D_{ss}^{-1} D_{sr} - D_{rr}) x_{ra} \quad (6)$$

次に、Fig. 6に示すような結合時実稼働状態の応答を再現する等価外力を考える。

動剛性表記による運動方程式を立て、等価外力に対する式(7)を導く。

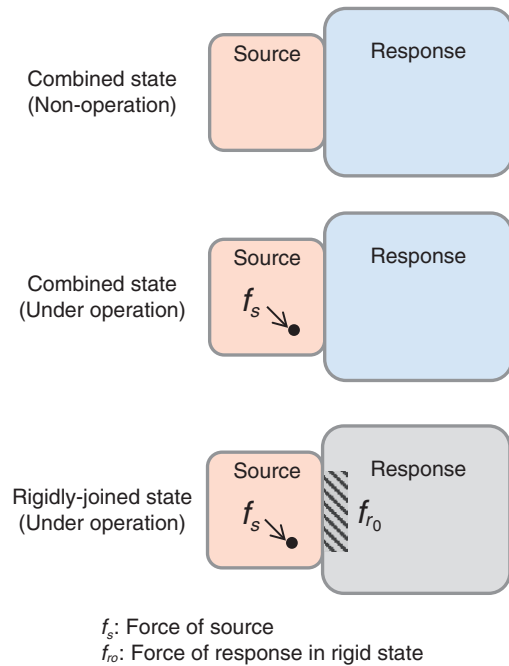


Fig. 5 Equation of motion

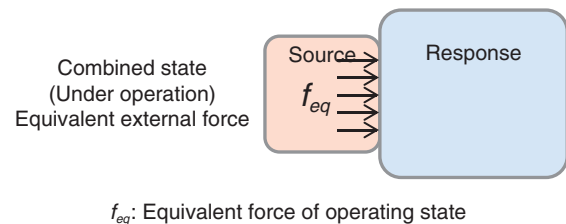


Fig. 6 Equation of motion by equivalent external force

$$\begin{bmatrix} D_{rr} & D_{rs} \\ D_{sr} & D_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{ra} \\ x_{sa} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{eq} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$f_{eq} = -(D_{rs} D_{ss}^{-1} D_{sr} - D_{rr}) x_{ra}$$

この等価外力は式(6)の設置反力と向きが逆で大きさが等しいことがわかる。したがって、結合時伝達関数マトリクスから算出した等価外力は、結合点で振動源を設置した場合の反力と等しい。

Direct Force手法を活用する場合には、ユニットを治具に剛結に固定しユニットからの入力荷重を計測することで、コンポーネントベース TPA の入力値として設定できる。

3.3. 電磁接触器の作動騒音への適用

電磁接触器の作動騒音の伝達経路から説明する。Fig. 7 に示す通り、電磁接触器の作動時の振動はサブユニットになるジャンクションボードからユニットへと伝達する。ここまでを入力側とする。ユニットは車体フレームにボルトで締結されている。この締結部から振動が車体、室内空間へと伝達する。ユニットからの入力特性と、車体および室内空間の構造音響伝達特性がわかれば、TPA によって室内音が予測できる。締結部における荷重は、前節の通り剛結された状態でのユニット荷重により代用ができる。

3.4. 試験構成

電磁接触器の作動騒音におけるユニット単体の試験構成について説明する。ユニットと車体側で分離して検証できることを確認するために、ユニットの車体への搭載位置が異なるものを試験対象とした。ユニット単体計測の様子を Fig. 8 に示す。ユニットは治具にボルトで固定されており、車体側に締結する規定トルク条件にて治具へ締結した。用いた固定治具は、剛性を大きくすることで最低次の固有周波数を 1000 Hz より 3 倍以上高くなるような設計とし、治具の振動が解析対象周波数 20 Hz から 1000 Hz に影響が出ないようにした。そして、ユニットのフレーム締結部と治具の間に荷重センサーを設置して、電磁接触器が作動した時のユニットから治具への設置反力を計測した。

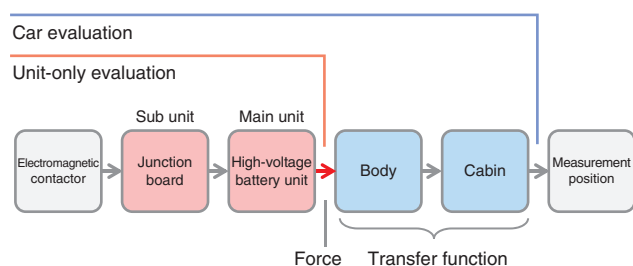


Fig. 7 Transmission path of contactor noise

3.5. 試験結果

ユニット単体評価の検証結果を説明する。Fig. 9 にユニットの車体への搭載位置別におけるユニット荷重の計測結果を示す。ユニット内の荷重伝達の違いによって異なる荷重の周波数特性が得られた。

続いて、Fig. 10 と Fig. 11 にはユニットの車両への搭載位置別において、ユニット単体計測から騒音予測をおこなった結果を完成車での騒音結果と比較している。予測騒音は搭載位置別によらず、完成車騒音における 100 Hz から 600 Hz までの音のピークを表現できていることが確認できた。また、解析対象周波数の 20 Hz から 1000 Hz で騒音レベルを確認した。

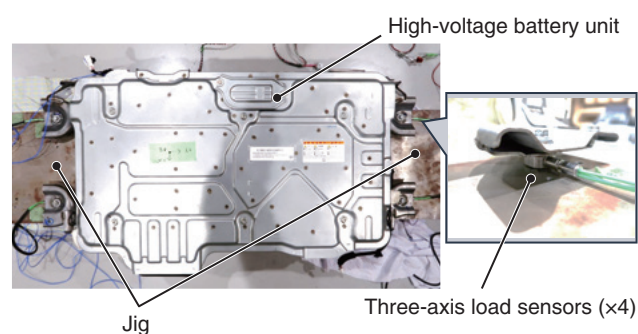


Fig. 8 Force response test of high-voltage battery unit

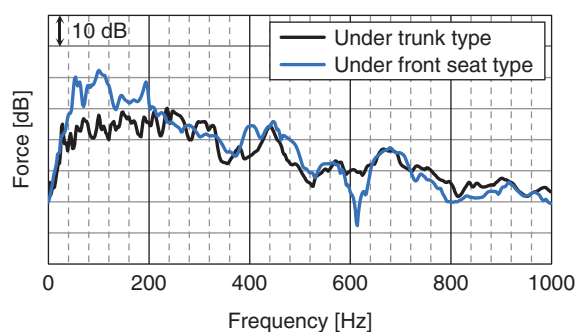


Fig. 9 Input force from unit

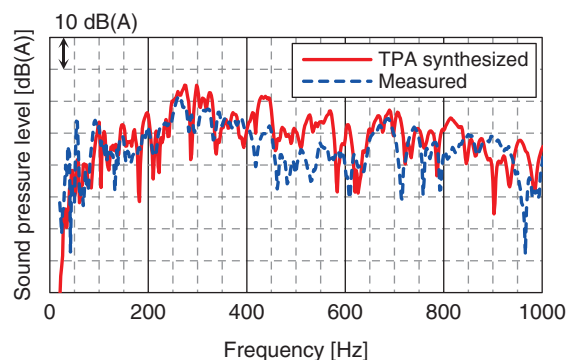


Fig. 10 Sound pressure level (Under trunk type)

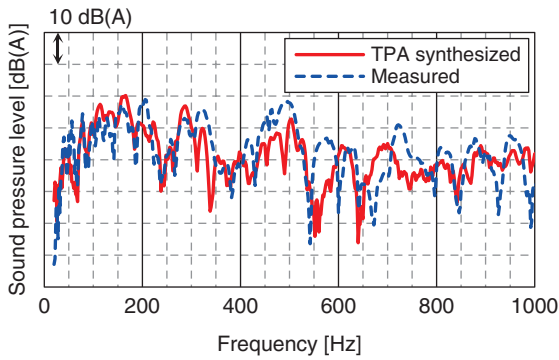


Fig. 11 Sound pressure level (Under front seat type)

4. CAE によるユニットの伝達力

4.1. CAE モデリング手法

完成車状態における電磁接触器の作動騒音においては、TPA の結果を基に室内音の目標値から逆算することで、ユニット単体の荷重を目標値にできる。このユニットの設計段階において、その荷重特性を CAE によって予測することができれば、試作レスによる効率的な開発が推進できる。そこで、ユニット単体から車体に伝達する荷重を算出する CAE モデル構築をおこなった。入力条件においては、ジャンクションボードからユニットに伝達する荷重の実測値を用いた。

有限要素法 (Finite Element Method: FEM) によるモデルを Fig. 12 に示す。複雑な形状をもつジャンクションボードは計算負荷低減のために集中質量成分によって表現し、剛に固定されたユニットの締結部分の境界条件は完全拘束とし、周波数応答解析を実施した。

ジャンクションボードからの入力に実測値を用いて、構造が異なる二つのユニット A および B の荷重伝搬の解析をおこなった。主な構造の違いは、ジャンクションボードのバッテリーフレームへの取り付け位置の違いである。概

略図を Fig. 13 に示す。ユニット A はジャンクションボードが車体締結部に近いユニット側面に取り付けられ、ユニット B はジャンクションボードがユニット後部に取り付けられる。妥当性を検証するために、CAE に対応する試験はユニット単体試験 (Fig. 8) と同等の剛体結合にて実施し、この結果を比較した。

4.2. CAE による検証結果

同一の入力条件による異なるユニットの荷重 CAE 解析結果と、実測結果とを比較したものをそれぞれ Fig. 14 と Fig. 15 で示す。ユニット A とユニット B は、ジャンクションボードの搭載位置の違いから、電磁接触器作動時におけるバッテリーフレームの振動モードが異なる。ユニット A は 200 Hz 近傍に共振によるピークを有し、ユニット B は

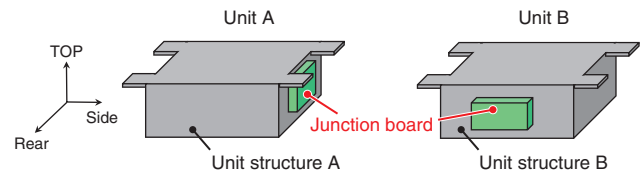


Fig. 13 Junction board mounting position

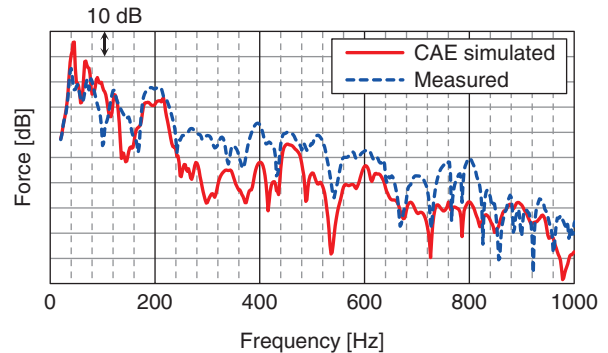


Fig. 14 Force CAE-analysis (unit A)

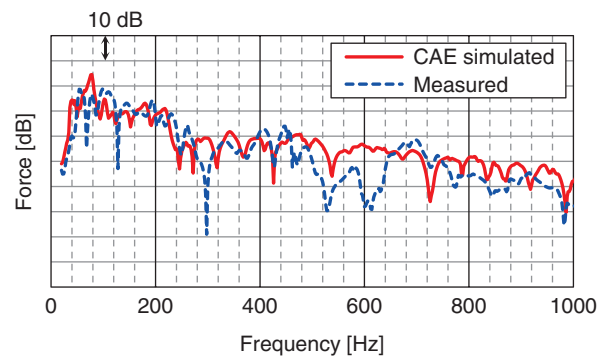


Fig. 15 Force CAE-analysis (unit B)

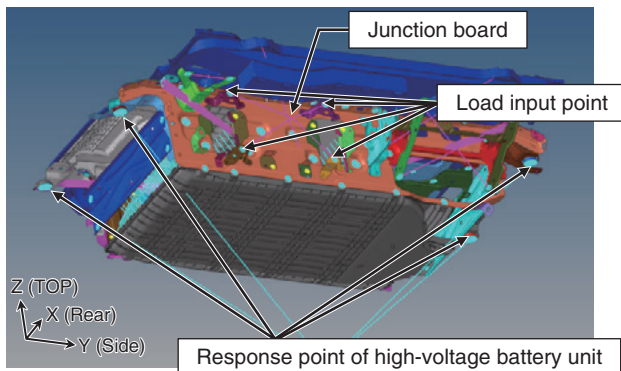


Fig. 12 CAE modeling of high-voltage battery unit

同様に 200 Hz 近傍に共振点を有するものの、全体的に広範囲に分布した振動特性を有する。この差が、ユニットの締結部荷重値の周波数特性にも現れている。CAE での結果はこの特徴をよく再現しており、本 CAE モデル化の妥当性が確認された。

さらに、CAE によって解析したユニットの荷重値を用いて、完成車状態での騒音予測をおこなった。車体の構造音響伝達関数は同クラスの車両の実測値を用いている。完成車状態での騒音と、ユニット単体試験から算出した予測騒音、加えて CAE によりユニット予測荷重値から算出した予測騒音の結果を比較する。青の破線が完成車状態で実測した騒音値を示し、緑の破線がユニット単体試験からの予測騒音値を示し、赤の実線が CAE によるユニット単体荷重からの予測騒音値を示す。Fig. 16 のユニット A での結果では 200 Hz 近傍の共振点の再現ができており、Fig. 17 のユニット B での結果では 200 Hz から 700 Hz までのブロードな分布を再現していることがわかる。各周波数帯における音圧レベルの検証ができることから、騒音に対する設計検討における CAE モデル活用の妥当性が確認できた。

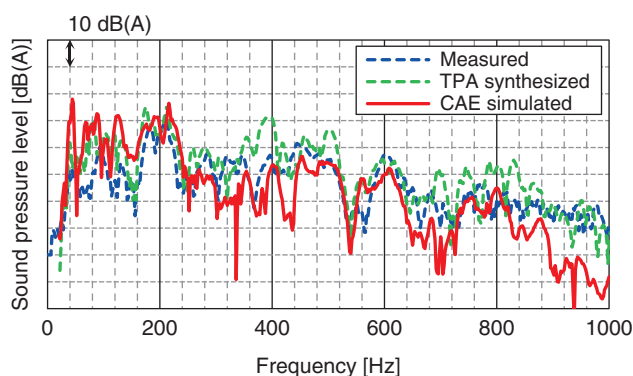


Fig. 16 CAE simulated noise (unit A)

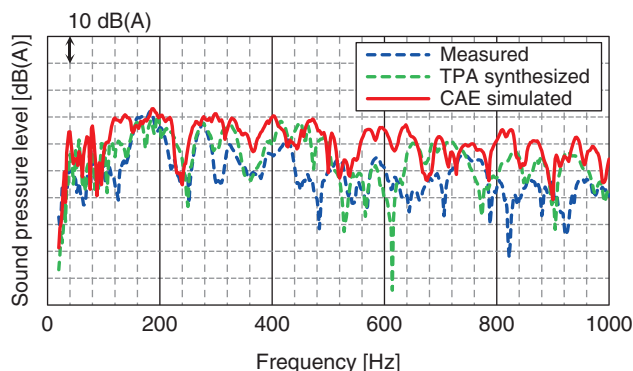


Fig. 17 CAE simulated noise (unit B)

5. まとめ

- (1) コンポーネントベース TPA の Direct Force 手法を用いて振動源のユニットを車体側から分離し、ユニット単体の荷重計測と車体の構造音響伝達特性を用いることで、完成車状態での騒音を予測することができた。
- (2) CAE を活用したユニット単体の伝達力を解析するモデル構築をおこない、ジャンクションボードの荷重計測結果から完成車状態での騒音を予測することができた。

本検討によって、完成車が存在しないユニットの開発初期段階において、完成車状態の騒音の目標値からユニット単体での荷重に目標値を置き換えて開発を進めることができるようになり、そのユニット単体の荷重を予測する CAE によるモデル構築をおこなった。ユニットの試作物がない段階で、ジャンクションボードの荷重の計測結果から完成車状態での騒音を予測できるようになり、より早期に設計検討ができるようになった。

参考文献

- (1) Yamagishi, T., Ishikura, T.: Development of Electric Powertrain for CLARITY PLUG-IN HYBRID, SAE World Congress Proceedings, SAE Int. J. Engines 7(3), 323-333, doi: 10.4271/2018-01-0415, (2018)
- (2) 木村顕一郎, 河崎輝明, 大村孝之, 渥美淑弘, 清水潔: 新型燃料電池自動車 CLARITY FUEL CELL の開発, Honda R&D Technical Review, Vol. 28, No. 1 p. 1-7
- (3) Fukazu, T., Matsuo, Y.: Development of Electric Powertrain for New Model Hybrid Sports Utility Vehicle, SAE World Congress Proceedings, SAE Technical Paper, doi: 10.4271/2017-01-1158, (2017)
- (4) 小林紀久, 金森伊織: SPORT HYBRID i-DCD 用 IPU の開発, Honda R&D Technical Review, Vol. 26, No. 1, p. 22-26
- (5) 町田淳, 圓眞義, 早瀬章吾: 2018 年モデル Accord Hybrid 用 Intelligent Power Unit, Honda R&D Technical Review, Vol. 30, No. 2, p. 72-75
- (6) LMS International, Transfer Path Analysis: The Qualification and Quantification of Vibro-Acoustic Transfer Paths, LMS International, Application Notes, (1995)
- (7) 能村幸介, 吉田準史: 主成分回帰法を用いた車内音の伝達経路解析手法, Honda R&D Technical Review, Vol. 18, No. 1, p. 136-141
- (8) Almirón, J. O., Bianciardi, F., Corbeels, P: Structure-Borne Prediction on a Tire-Suspension Assembly Using Experimental Invariant Spindle Forces, SAE

Noise and Vibration Conference & Exhibition, SAE
Technical Paper 2019-01-1541, doi: 10.4271/2019-
01-1541, (2019)

- (9) Seijs, M. V., Klerk, D., Rixen, D. J.: General
framework for transfer path analysis: History, theory
and classification of techniques, Mechanical Systems
and Signal Processing, Vol. 68-69, p. 217-244, (2016)

■ 著 者 ■



下村 章人



外山 直基



川辺 正道



佐藤 嘉實

真実接触と油膜による摩擦係数算出モデルとその検証 (ピストンリングとスリーブ)

Proposal and Verification of Friction Coefficient Calculation Model by True Contact and Oil Film
(Evaluation of Piston Ring and Sleeve)

古賀 秀 晴¹
Hideharu KOGA

松本 謙 司²
Kenji MATSUMOTO

小野 佑 樹¹
Yuki ONO

要 旨

しゅう動部品を検討する際、その摩擦係数を考慮するが、エンジンのピストンリングとスリーブのように比較的高速域となるとそのしゅう動試験自体が難しく、しゅう動特性が分かり難い。そこで、Liu らが提唱する確率論的手法に初期なじみ後の表面粗さやうねりを適用し、Gupta らの油膜厚さ減少係数を高速域に用いた。更に高速域で支配的になるすべりを考慮した新たな計算モデルを提案した。従来実施が容易でなかった高速域でのしゅう動試験を新規開発のドラムカム式試験機により実施可能とした。本モデルの妥当性を 8 m/s までのしゅう動試験結果と比較することで検証した。結果、本モデルの摩擦係数は、一般的なスリーブ材である Cast gray iron (FC250) において 8 m/s の高速域まで実験結果と高い一致性が得られていることが確認できた。また、いままで求める事ができなかった高速域での摩擦係数を得る事ができると共に検証試験速度以上の高速域摩擦係数を予測する事が可能となった。

ABSTRACT

The investigation of sliding parts takes into account the coefficient of friction of the parts. When the parts are in a relatively high-speed region, such as the piston rings and sleeves in an engine, sliding test performance itself is a challenge and the tribological properties cannot readily be determined. Therefore, surface roughness and waviness after initial familiarity were applied to a stochastic method proposed by Liu, et al., and the oil film thickness reduction coefficient of Gupta, et al., was used in high-speed regions. In addition, a new calculation model was proposed that takes into sliding, which becomes a determining factor in higher-speed regions. As conventionally performed, sliding tests could not readily be implemented in high-speed regions. However, a newly developed drum cam test apparatus has made such testing possible to implement. The validity of this model was verified by comparison and the results of sliding tests up to 8 m/s. The results verified that the coefficient of friction in this model match very closely with the results of tests using ordinary sleeve material of cast gray iron (FC250) in high-speed regions up to 8 m/s. In addition, it has become possible to obtain the coefficient of friction in high-speed regions, which had not been possible to determine up to now. It has also become possible to predict the coefficient of friction in high-speed regions where the velocities are equal to or higher than in the verification tests.

1. まえがき

昨今のエンジン開発現場において CAE 技術は必要不可欠なものとなっている。一方、摩擦や摩耗を伴うしゅう動部品の特性はいまだ実験結果を元に CAE 解析に必要な数値を入力しているが、実際に使用される速度域の特性ではなかったり、真実接触圧力が異なっていたりする。これはしゅう動特性を取得する試験が難しい事に由来する場合が

多い。Fig. 1 はピストンリングとスリーブの評価をおこなうため、実施した往復動しゅう動試験結果である。

横軸は往復運動において正弦波状に変化するすべり速度のピーク値、縦軸は矩形波状に変化する摩擦力を負荷荷重で割った摩擦係数である。スリーブに使われる Cast gray iron (FC250) の摩擦係数は 1 m/s で Nikasil coating よりも高いのに対し、2 m/s に近づくと、この関係は大きく変化する。

¹ 先進パワーユニット・エネルギー研究所

² 先進パワーユニット・エネルギー研究所, 博士 (工学)

しかしながら、エンジンの常用域である 8 m/s までの高速域でのしゅう動特性は報告がない。これは評価試験機の製作が難しいからとも言える。本研究では、往復動試験機での実測が難しい速度域でしゅう動特性を計算できる新たなモデルを構築し、独自開発した高速往復動試験機にて検証を実施したので、報告する。

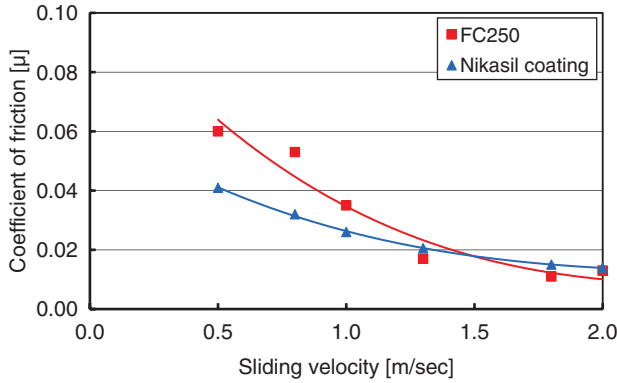


Fig. 1 Relationship between sliding velocity and coefficient of friction

2. しゅう動特性を求める計算モデル

2.1. 計算手法の概要

摩擦係数が、各種のストラクチャー⁽¹⁾や表面粗さを持つ機械加工面⁽²⁾でどう異なるかについては、様々な研究者が実験や解析をおこなっている。本研究の手法の特徴は、以下の3点である。(1)発熱を伴わない速度領域はLiu⁽³⁾らによる確率論的手法で計算する。(2)計算に用いる表面粗さやうねりは、往復しゅう動試験後の初期なじみが終わったしゅう動面の実測値を用いる。(3)高速度域において、滑りによる発熱に起因する油膜厚さ減少を考慮する独自の計算を加えた新たな計算モデルを使用する。これらの手法を用い検証をおこなった。関連する計算モデルについて、以下で述べる。

2.2. 油膜部および直接接触部の荷重分担

しゅう動部材に加えられた荷重は、Fig. 2 に示すように、油膜部と、しゅう動面で直接接触する凸部（真実接触部）の二つで分担されるものとした。ピンとプレート間にかかる総荷重を P 、表面粗さ凸部の接触荷重を P_a 、油膜部に生じる荷重を P_h としたとき、これらの関係は式 (1) で表される。

$$P = P_h + P_a \quad (1)$$

ここで P に占める P_h と P_a の比率はしゅう動条件によっ

て異なる。そのため、これらを式 (2) で定義される荷重の分担比率である二つの変数 γ_h, γ_a とし、計算により求めた。

$$\gamma_h = \frac{P_h}{P}, \gamma_a = \frac{P_a}{P} \quad (2)$$

2.3. 油膜部のしゅう動特性導出方法

油膜部の摩擦係数を得るには、油膜に生じるせん断応力が必要となる。せん断応力を求めるには、まず油膜厚さを求める必要がある。

油膜厚さは、Nijenbanning ら⁽⁴⁾による弾性流体潤滑の油膜厚さ近似式を用いて求めた。式 (2) より、油膜に加わる荷重 P_h が変数 γ_h を含む形で表されることを考慮すると、無次元油膜厚さ H_c は以下の式 (3)、式 (4) で表される。

$$H_c = \gamma_h^{\frac{1}{2}} \left\{ \left[\gamma_h^4 H_{RI}^{\frac{3}{2}} + \left(\gamma_h^{-\frac{2}{3}} H_{EI}^{-4} + H_{00}^{-4} \right)^{-\frac{3}{8}} \right]^{\frac{2}{3}} + \left(\gamma_h^4 H_{RP}^{-8} + \gamma_h^4 H_{EP}^{-8} \right)^{-\frac{s}{8}} \right\}^{\frac{1}{s}} \quad (3)$$

この式は、荷重や粘度特性が異なる条件の油膜厚さ分布から得られた、荷重の掛かる中心部の油膜厚さ近似式である。

$$s = 1.5 \left[1 + \exp \left(-1.2 \frac{H_{EI}}{H_{RI}} \gamma_h^{-\frac{7}{3}} \right) \right] \quad (4)$$

ここで H_{RI} , H_{EI} , H_{RP} , H_{EP} は等粘度と剛体領域、等粘度と弾性体領域、高圧粘度と剛体領域及び高圧粘度と弾性体領域における無次元膜厚、 H_{00} は定数である。

一般にしゅう動速度が増加すると発熱が顕著になり、油膜厚さは発熱により減少する傾向を示す。ピストンとスリーブのしゅう動速度域でも、このような発熱が油膜

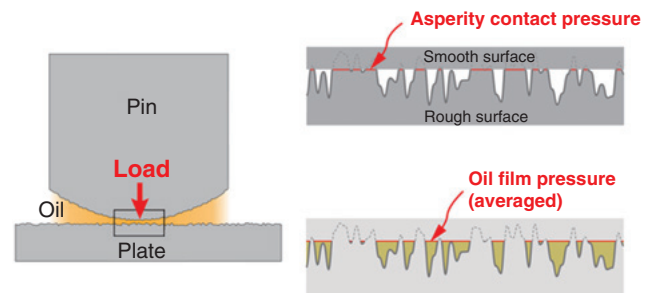


Fig. 2 Division of contact pressure by asperity and oil film

厚さに及ぼす影響が考えられる。ところが Liu⁽³⁾ら計算モデルは、低速・高荷重域を対象としており、この影響を考慮していない。そのため我々は、式(5)で表される Gupta ら⁽⁵⁾による油膜厚と減少係数を、高速域の油膜厚と計算に適用した。

$$\Phi_T = \frac{1 - 13.2 \left(\frac{P_0}{E'} \right) L^{0.42}}{1 + 0.213(1 + 2.23S^{0.83})L^{0.640}} \quad (5)$$

ここで L は速度、圧力、オイルの粘度係数などを関数とする熱負荷パラメータである。 S は滑りと転がりの比率である。純転がりでは発熱はほぼゼロであるが、滑りが発生すると発熱量がその比率に応じ増える。

油膜に生じるせん断応力は、式(6)に示す Ree and Eyring⁽⁶⁾の粘性モデルに従うものとした。

$$\tau_h = \tau_0 \operatorname{arcsinh} \left(\frac{\eta \dot{\gamma}}{\tau_0} \right) \quad (6)$$

τ_0 は温度に依存する応力の定数であり、 $\dot{\gamma}$ はしゅう動速度を油膜厚で除して得られるせん断率である。 η は潤滑油の粘度で、Roelands ら⁽⁷⁾の圧力、温度、粘度特性を用いた。

2.4. 凸部のしゅう動特性導出方法

今回のモデルでは、しゅう動による初期なじみ後に実測した表面粗さ及びうねりを用いる事で、計算精度を上げている。

Fig. 3, 4 に Fig. 1 のしゅう動速度による摩擦係数データ取得時に計測した表面粗さおよびうねりデータを示す。計測には、表面粗さ・輪郭形状測定機 (株式会社東京精密製サーフコム 5000DX) を用いた。

表面粗さを比較すると、FC250 は Ra 0.025, Nikasil coating は Ra 0.007 となっており、後者の方が滑らかな表

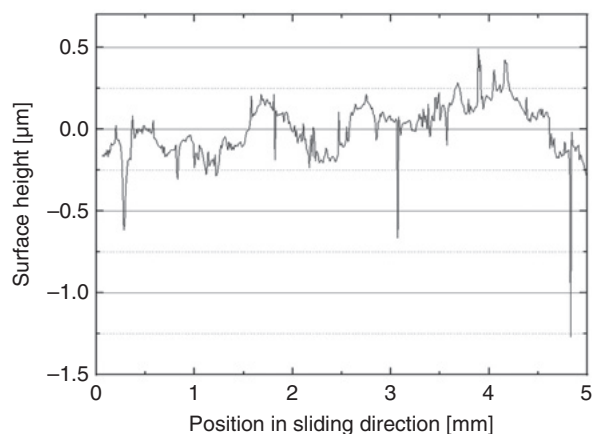


Fig. 3 Surface contour of FC250 after test

面といえる。しかし Nikasil coating の表面には Fig. 5 に表したように振幅は小さいが周期の大きなうねりが見られ、このような面性状のしゅう動特性への影響を考慮に入れた。

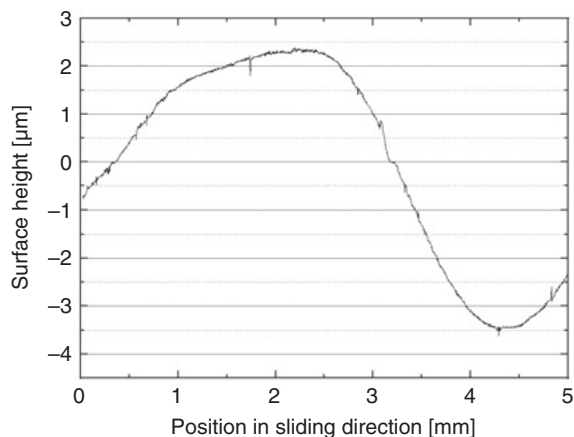


Fig. 4 Surface contour of Nikasil coating after test

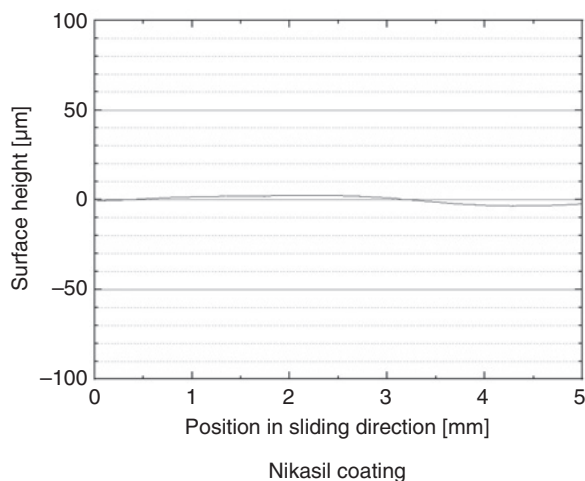
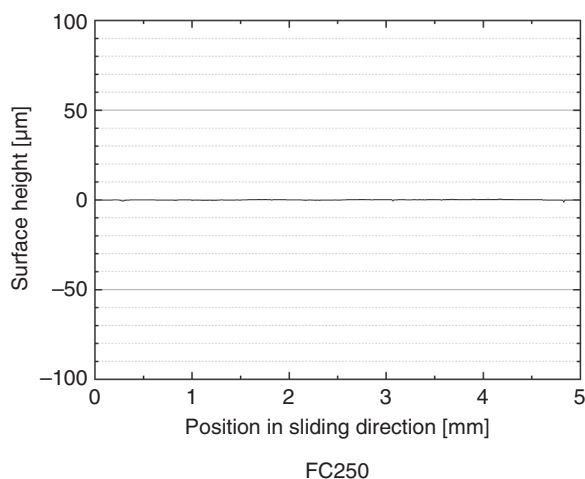


Fig. 5 Comparison of surface contours

Table 1 はしゅう動面の輪郭曲線から抽出した、しゅう動面の材料パラメータである。これらの条件を用いて、摩擦係数の算出を求め、摩擦係数の速度依存性を実験値と比較する形で、モデル計算の検証を実施した。

このしゅう動後の表面粗さ、うねりの確率密度分布を作るとほぼガウス分布だったため、式 (7) のようなガウス分布 $\phi_s(z)$ 凸部が、完全に滑らかな表面に接触すると仮定した。

$$\phi_s(z) = \frac{1}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2\sigma_s^2}} \quad (7)$$

z は、突起の平均位置からの高さで、 σ_s は突起高さの標準偏差を示す。ガウス分布であるピンとプレートの輪郭測定結果から等価的な σ_s を計算し、式に導入した。

2.5. 凸部の接触荷重算出方法

接触した凸部は、荷重 P_a の先端のみ荷重を受け、弾性変形し、高さが低くなったり、 h_{ss} より高い凸部になったりする場合があるため、凸部である真実接触面積にかかる平均接触面圧は Johnson ら⁽⁸⁾の式 (8) を用いた。

$$p_{a,av} = \frac{2}{3} n \beta \sigma_s E' \sqrt{\frac{\sigma_s}{\beta}} F_{\frac{3}{2}} \left(\frac{h_{ss}}{\sigma_s} \right) \quad (8)$$

h_{ss} は Fig. 6 で表される接触面の高さ、 n は凸部の密度、 β は突起頂部の平均曲率半径、 E' は材料の等価的なヤング率で、式 (9) のように表される。

$$\frac{2}{E'} = \left(\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right)^{-1} \quad (9)$$

ここで、 E_1 、 E_2 、 ν_1 、及び ν_2 はピンとプレートのヤング率とポアソン比である。式 (8) の関数 F は、次のように表される。

$$F_{\frac{3}{2}}(u) = (2\pi)^{-\frac{1}{2}} \int_u^\infty (t-u)^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt \quad (10)$$

通常モデル計算では初期なじみによる表面状態変化を考慮しないが、本計算モデルでは試験後の表面粗さと周期の大きなうねりも考慮した。この影響を計算に含めるため、Seabra ら⁽⁹⁾による圧力集中係数 P.C.F. (Pressure concentration factor) を用いた。これは式 (11) のように表される。

$$\text{P.C.F.} = C1 \left(\frac{\lambda}{\text{Amp}} \right)^\alpha \left(\frac{a}{R} \right)^\beta \left(\frac{\lambda}{a} \right)^\gamma \quad (11)$$

ここで、 $C1=4.3884$ 、 $\alpha=-0.4234$ 、 $\beta=-0.4204$ 、 $\gamma=-0.0155$ 。 λ と Amp はそれぞれ、表面うねりの波長と振幅、 a はヘルツ接触半径、 R はピンの等価曲率半径に相当する。この時、ヘルツ接触の面積は、うねりの影響で以下の係数

Table 1 Calculation conditions for surface irregularities of sliding parts

	σ_s [μm]	n [m^{-2}]	β [μm]	E' [GPa]
Nikasil coating	0.064	2.25×10^{10}	27.0	247
FC250	0.170	3.40×10^{10}	42.5	263

R.A. (Reduction of area) 分、減少する。つまり、この係数分面積が小さいヘルツ接触域に圧力集中係数 (P.C.F.) に平均接触面圧 ($p_{a,av}$) を乗じた分の凸部圧力が生じる事になる。

$$\text{R.A.} = \ln \left[C2 \left(\frac{\lambda}{\text{Amp}} \right)^\theta \left(\frac{a}{R} \right)^\eta \left(\frac{\lambda}{a} \right)^\psi \right] \quad (12)$$

ここで、定数 $C2=0.9404$ 、 $\theta=0.3802$ 、及び $\psi=0.0395$ 。このモデルで想定するうねりはヘルツ接触域よりやや小さく、粗さの周期より大きいものとなる。

2.6. 油膜と表面凹凸のせん断力算出方法

凹凸面の接触領域 i で発生するせん断応力 τ_{ci} は、境界潤滑領域、つまり低速域のしゅう動試験時に得られる摩擦係数 f_{ci} (Fig. 1) の値を用いて、式 (13) のように求められる。

$$\tau_{ci} = f_{ci} p_{ci} \quad (13)$$

この様に油膜のせん断応力と表面凹凸による真実接触部の摩擦力をそれぞれ分けて求める事で、正味の摩擦係数 f は、これらを加えたものを荷重 P で割ったものとし、式 (14) のように表される。

$$f = \frac{\sum_{i=1}^N \iint_{A_{ci}} \tau_{ci} dA_{ci} + \iint_{A_h} \tau_h dA_h}{P} \quad (14)$$

ここで A_c は突起接触部の、 A_h は油膜形成領域の荷重支持面積を示す。Fig. 7 は計算の流れを示す。

まず荷重の分担比率 γ_h 、 γ_a を仮定する。これにより凹凸面と平滑面の相対距離が定まり、凸部にかかる圧力が求まり、この圧力により油膜厚さが求められる。

凸部にかかる圧力は、荷重 P_a を圧力発生領域の面積 A_{nom} で割ることで求められる。二つの方法で求めた凸接触部の圧力が等しい時、 γ_h 、 γ_a の仮定値が正しいとみなし、式 (14) に基づき摩擦係数を求めた。

本研究では高速度域の計算をおこなうため、式 (5)、式 (11)、式 (12) を独自に加えた。

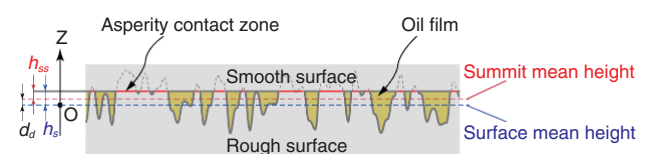


Fig. 6 Relationship of surface parameters

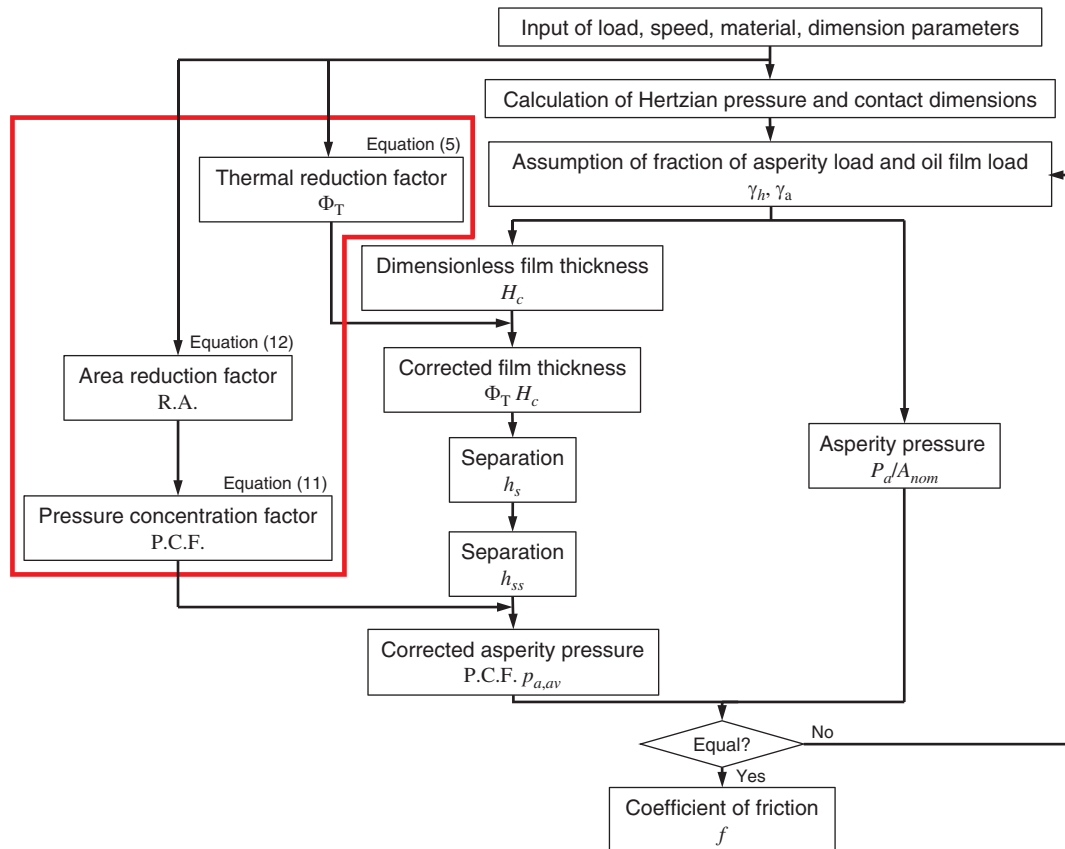


Fig. 7 Calculation flow

3. 摩擦係数の試験結果と計算結果の比較

3.1. 高速往復動試験機

今回の往復動運動では試験ストローク 50 mm の場合、端部速度 0 から始まり、25 mm 進むと最大速度となり、50 mm 先の端部へ到達すると速度 0 となる。これを 1 サイクルとし、荷重をかけながら往復動させる。

実機エンジンのピストンでは、速度ゼロの位置である上死点と下死点において、燃焼ガスや混合気のエアスプリング効果がある。また、クランクのたわみ、燃焼ガスをシールする事によるフリクションにより、振動が発生する事はない。

しかし、往復動しゅう動試験機では、これらの効果を再現する事が容易ではないため、試験片へ荷重をかけている点を中心に振動が発生し、場合によっては試験機自体が大きく揺れる。これを避けるために、スクリーニング試験は往復動しゅう動試験機が安定し且つ再現性のある平均速度 2 m/s までの速度域で実施する事がほとんど⁽¹⁰⁾⁻⁽¹³⁾である。この速度は、一般的なピストン最高平均速度(約 18 m/s)より一桁程度低い。

そこで、プレートである試験片を支えているホルダーの軽量化を図ると共に、回転ドラムにラセン溝を施し、その

溝内にボールベアリングを介して並行したスライダを駆動させるドラムカム式を採用した。これにより、高速での往復動を可能とした。Fig. 8 に試験機の構造を示す。Table 2 に試験機の仕様を示す。

3.2. しゅう動試験

しゅう動試験はエンジンのピストンリングとスリーブを仮想して実施した。試験条件を Table 3 に示す。

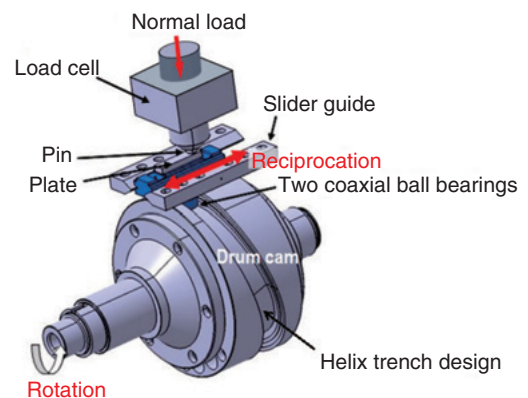


Fig. 8 Mechanism to generate reciprocating movement

Table 2 Specifications of apparatus

Sliding speed	0.1 m/s to 8.0 m/s
Reciprocation stroke	50 mm
Normal load	30 to 200 N
Pin size	$\phi 15 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$
Plate size	17 mm $\times$ 70 mm $\times$ 9 mm

Table 3 Test conditions

Sliding speed	0.5 to 8.0 m/s (Peak in reciprocating cycle)
Pin material	Nitriding Treatment on SUS440C
Plate material	FC250 (Cast gray iron) Nikasil coating on Cast aluminum
Normal load	100 N
Lubricant	Ultra Mild 10W-30

ピストンリングは一般的な材質である SUS440C に窒化処理した物を使用した。スリーブ材は遠心鋳造で製作された FC250 と近年量産車にも多用されている Nikasil coating をアルミの母材の上に施した物を使用した。

供試験油として、一般的な Honda 純正オイル (Ultra Mild) を 1 分間に 1 ml, 針先からピン横より室温のオイルを供給した。Fig. 9 に高速往復動中の試験状態を示す。

テスト時間はピンやプレートが摩耗し、初期なじみが終わった時点で且つ安定した摩擦係数が取得できるまでの時間とした。

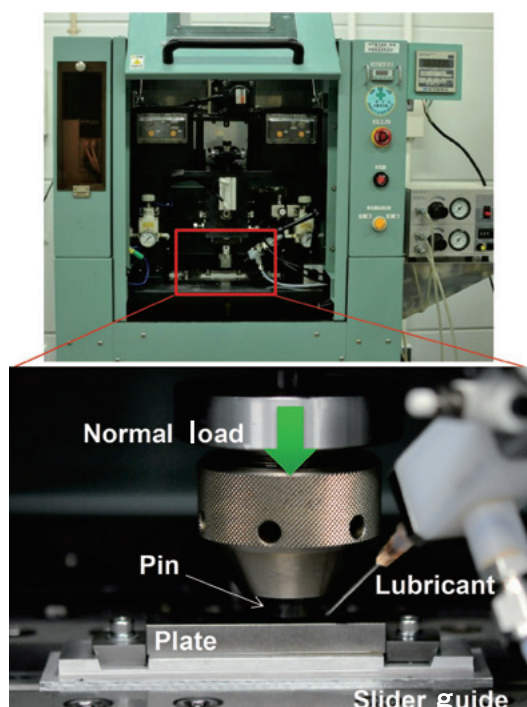


Fig. 9 Sliding part during reciprocating frictional test (4 m/s)

3.3. 試験結果と計算結果の比較

FC250 と Nikasil coating の、滑り速度に対する摩擦係数の計算結果を Fig. 10 と Fig. 11 に示す。横軸は摩擦速度を表し、縦軸は平均摩擦係数を表す。試験結果も比較のため重ねて示す。FC250 に関しては、計算された摩擦係数値は、潤滑状態全体にわたってほぼ一致している。

一方 Fig. 11 では、Nikasil Coating の計算された摩擦係数は 2 m/s までの領域で顕著な違いを示している。Nikasil Coating は下地と表面層硬度が異なるためだと考えられる。更に、式 (6) や式 (7) で示したうねりの影響を考慮した場合の違いはほとんどないことがわかる。このような確率論的摩擦解析で Coating 表面構造を解析する方法については、更に調査をおこなう必要があると思われる。

Fig. 12 に今回の試験結果と計算結果のストライバック曲線を示す。

今回、構築した計算モデルによる計算結果を線で表し、実験結果を点で示している。横軸は Fig. 10, 11 同様、速度 (m/s) を示す。

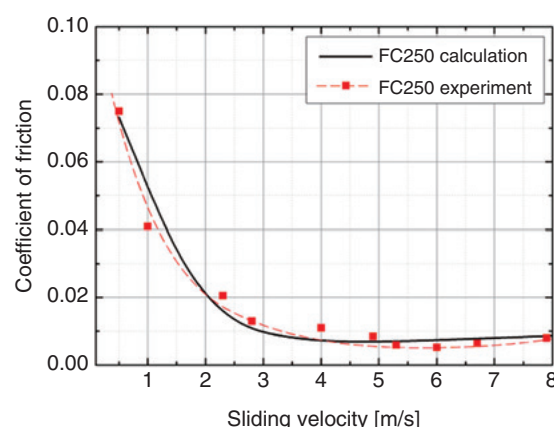


Fig. 10 Comparison of calculated and measured coefficient of friction to sliding velocity, FC250

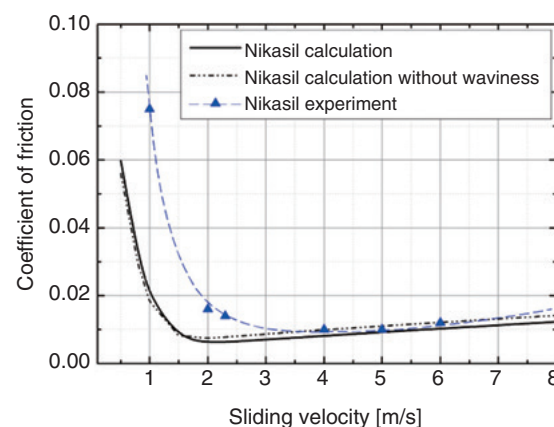


Fig. 11 Comparison of calculated and measured coefficient of friction to sliding velocity, Nikasil coating

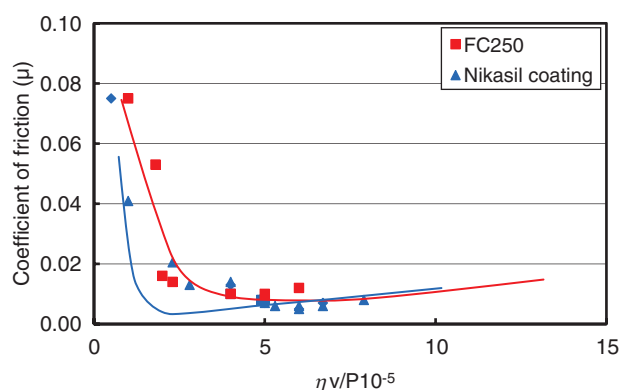


Fig. 12 Comparison of calculated and measured coefficient of friction to sliding velocity

2 m/s 以下では計算結果と実験結果が合わない領域もあるが、それ以降の速度域ではほぼ合致する事がわかる。更にこのモデルにて実験できない速度域まで求める事ができた。

4. 結論

Liu らが提唱する確率論的手法に初期なじみ後の表面粗さやうねりを適用し、更に高速域で支配的になるすべりを考慮した新たな計算モデルを構築した。

実機常用域である 8 m/s での単体しゅう動が可能な装置を開発した。

これらにより、いままで求める事のできなかった高速域での摩擦係数を得る事ができると共に検証試験速度以上の高速域摩擦係数を予測する事が可能となった。

コーティングはその下地の硬度と表面層の硬度が異なるため、今回のモデル計算で計算できたが、試験結果と合わなかった。今後、これらの物性値も考慮したモデルを再構築し、低速での摩擦係数計算の精度向上を検討する。

参考文献

- (1) Vladescu, S., Olver, A. V., Pegg, I. G., Reddyhoff, T.: The effects of surface texture in reciprocating contacts – An experimental study, *Tribol. Int.*, 82, p. 28-42, (2015)
- (2) Guegan, J., Kadiric, A., Spikes, H.: A study of the lubrication of EHL point contact in the presence of longitudinal roughness, *Tribol. Lett.*, 59, 22, p. 1-18, (2015)
- (3) Liu, Q., Napel, W. T., Tripp, J. H., Lugt, P. M., Meeuwenoord, R.: Friction in highly loaded mixed lubricated point contact, *Tribol. Trans.* 52, p. 360-369, (2009)

- (4) Nijenbanning, G., Venner, C. H., Moes, H.: Film thickness in elastohydrodynamically lubricated elliptic contacts, *Wear* 176, p. 217-229, (1994)
- (5) Gupta, P. K., Cheng, H. S., Zhu, D., Forster, N. H., Schrand, J. B.: Viscoelastic effects in MIL-L-7808-type lubricant, Part I: Analytical formulation, *Tribol. Trans.* 35, p. 269-274, (1992)
- (6) Ree, T., Eyring H.: Theory of Non-Newtonian Flow. I. Solid Plastic System, *J. Appl. Phys.* 26(7), p. 793-809, (1955)
- (7) Roelands, C. J. A., Vlugter, J. C., Waterman, H. I.: The viscosity-temperature-pressure relationship of lubricating oils and its correlation with chemical constitution, *ASME J. Basic Eng.*, p. 601-610, (1963)
- (8) Johnson, K. L., Greenwood, J. A., Poon, S. Y.: A simple theory of asperity contact in elastohydrodynamic lubrication, *Wear* 19, p. 91-108, (1972)
- (9) Seabra, J., Berthe, D.: Influence of surface waviness and roughness on the normal pressure distribution in the Hertzian contact, *ASME J. Tribol.* 109, p. 462-470, (1987)
- (10) Arcoumanis, C., Duszynski, M., Flora, H., Ostovar, P.: Development of a piston-ring lubrication test-rig and investigation of boundary conditions for modelling lubricant film properties, *SAE Technical Paper* 952468, p. 1-19, (1995)
- (11) Dearlove, J., Cheng, W. K.: Simultaneous piston ring friction and oil film thickness measurements in a reciprocating test rig, *SAE Technical Paper* 952470, p. 29-39, (1995)
- (12) Ting, L. L.: Development of a reciprocating test rig for tribological studies of piston engine moving components - Part I: Rig design and piston ring friction coefficients measuring method, *SAE Technical Paper* 930685, p. 1-17, (1993)
- (13) Ting, L. L., Yen, C. M., Turner, L. L.: Friction and scuffing resistance characteristics of piston materials as investigated by a reciprocating test rig, *SAE Technical Paper* 951042, p. 91-98, (1995)

著者



古賀秀晴



松本謙司



小野佑樹

往復動による高伝熱可能なヒートパイプ (自動車用エンジンピストン適用検討)

Heat Pipe with High Heat Transfer Rate by Reciprocating Motion
(Examination of Application to Automotive Engine Piston)

松 本 謙 司¹
Kenji MATSUMOTO

要 旨

一般にヒートパイプは振動や傾斜等によって、気液の流れが阻害され、極端に熱伝導率が低下するため、自動車やオートバイ等で使用されている事例がない。

そこで、我々は配管内部の摩擦エネルギー損失を変え、自励振動を強制的におこなう事によって気液二相の流れを制御し、熱輸送量を低下させない新たなヒートパイプを提案した。

往復動による振動を与え、熱伝達率を計測した結果、静止状態の熱伝達率に比べ 1.6 倍の熱伝達率を示す事が明らかとなった。そのメカニズムは、ヒートパイプ中に密封した液体が、初期の段階で往復により細かな液滴に分解する。その後、この液滴の状態では、ゲートとの接触しながら巨視的に一定の方向の駆動力を得て流れが一方向になる。更にループする事で気液が衝突する事がなく、凝縮領域から蒸発領域への気液の移動を可能にしたと考えている。

今回はエンジンピストンに適用した場合の熱解析を実施し、ピストンヘッド中央温度を 39 K 下げる事ができ、 ΔT も 140 K から 75 K まで低下させる事ができたため、サーマルストレス低減効果が期待される。

ABSTRACT

The flow of gas and liquid in heat pipes is generally impaired by factors such as oscillation and inclination, with the result that the heat transfer becomes excessively low. For this reason, there are no known cases of heat pipe use in cars and motorcycles, etc.

The authors, therefore, proposed a new heat pipe that controls the two-phase flow of gas and liquid without reducing the amount of heat transport, by reducing the friction energy loss inside the pipe and forcibly inducing self-oscillation.

Measurement results in the condition with oscillation applied by reciprocating motion showed an increase in the heat transfer coefficient by a factor of 1.6 compared with that at standstill. That mechanism is thought to be as follows. In the initial stage, the liquid sealed in the heat pipe is broken up into fine droplets by reciprocation. The droplets then acquire drive force in a constant direction macroscopically while contacting the gates, producing a unidirectional flow. Further, a loop flow channel enables transfer of gas and liquid from condensed areas to evaporation areas without gas-liquid collision.

This study performed thermal analysis of the case when applied to an engine piston. The results showed that the temperature at the piston head center was reduced by 39 K and ΔT was also reduced from 140 K to 75 K, and thus thermal stress reduction effects can be anticipated.

1. まえがき

近年、低燃費や環境適合性を目指した EV や HV のモーターや power control unit (PCU)、バッテリー等の冷却方法はその性能向上や変形を抑える等の理由から重要な課題の一つである⁽¹⁾⁻⁽³⁾。通常、冷却溝の工夫や冷却水の変更、モーター表面へのオイルジェット冷却等直接的や間接的にこない、温度制御するが、現在使用している冷却媒体の

熱伝達率が H_2O や NH_3 に比べ比熱が低い事もあり、冷却効果が小さい⁽⁴⁾。

一方コンピューターやエアコンで利用されているヒートパイプは上記媒体の熱伝導率に対し、十数倍の熱伝導率である事は周知の事実である⁽⁵⁾⁻⁽⁸⁾。しかし、ヒートパイプは構造上、振動等によって気液の流れが阻害され、極端に熱伝導率が低下する事が避けられない⁽⁹⁾。そのため、車載部品の冷却に使用されている報告がない。

¹ 先進パワーユニット・エネルギー研究所, 博士 (工学)

そこで、(1)配管内部の摩擦エネルギー損失を変える、(2)自励振動を強制的におこなう事によって気液二相の流れを制御し、熱輸送量を低下させず、高熱伝達率を確保する事で冷却用ヒートパイプが新たに開発できないかを検討した。検証には、与える振動として比較的制御しやすい往復動とし、往復しゅう動試験機を用いてストローク幅 50 mm で実施した。

更にそのヒートパイプを Internal Combustion Engine (ICE) 用エンジンピストン冷却に用いた場合の効果についても検証を実施したので報告する。

2. オリジナルヒートパイプの設計、試作

Fig. 1 に市販のヒートパイプとオリジナルのヒートパイプを示す。市販のヒートパイプは配管内部に金網タイプのウィックが入っているタイプとした。往復しゅう動試験機に取付けるため、同一形状の試験片にした。

当初、配管内部に金網タイプのウィックが入っている市販のヒートパイプとオリジナルのヒートパイプの熱伝導率比較を検討する予定であったが、過去の報告⁽²⁰⁾にもある様に市販のヒートパイプを振動させるとそのパイプの断面積分の熱伝導率に低下してしまうため、試験結果の比較では無垢のアルミ円柱材との比較とした。なおアルミ円柱材はアルミニウム 4000 系 NP12P を用いた。

Fig. 2 に市販のヒートパイプの原理を示す。市販のヒートパイプ⁽¹⁰⁾は容器内に少量封入された作動液体が、蒸発部で蒸発し、管中央を通り凝縮部へ到達、液体となり、容器内壁に取り付けるウィックは目の細かい金属メッシュで毛細管力によって水が蒸発部へ移動しつつ熱移動させる。

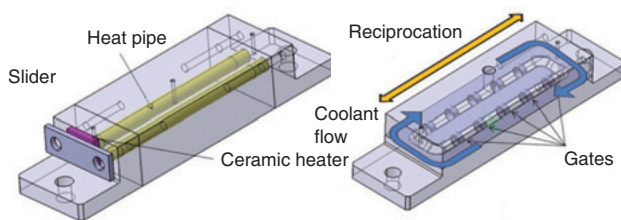


Fig. 1 Structures of specimen using commercially available heat pipe (left) and specimen using newly designed heat pipe (right)

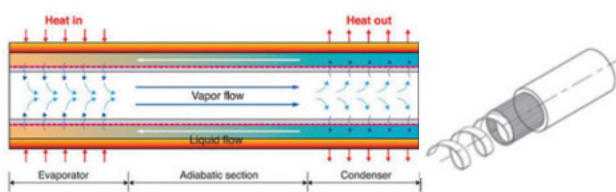
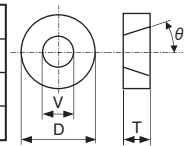


Fig. 2 Working principle of wick heat pipes

Table 1 Heat pipe specifications

Pipe length	144 mm
Pipe size	Φ8 mm
Number of gates	10
Gate size	D9 x T5 x V5.3, θ15°



オリジナルのヒートパイプは一定間隔に突起 (Gates) を用いて往復動時の液体と気体の流れを制御する配管構造とし、配管内に純水 / 空気を満たした。Fig. 3 に構造を示す⁽¹¹⁾。

Fig. 3 管断面を Fig. 4 を示す。オリジナルヒートパイプは振動をおこなう事で、液体が管内壁に沿って移動し、気体は液体とぶつかる事で細くなり、二相流になると予想し、設計をおこなった。

Table 1 にヒートパイプの仕様を示す。

また、Fig. 5 にオリジナルヒートパイプの試作工程を示す。

ヒートパイプの試作は室温でパイプ内に純水を入れ、液体注入装置で容器内を冷媒で満たした (Fig. 5 上図)。

アルミニウム試験片下部よりヒーターで大気圧にて加熱 (Fig. 5 中図) しながら圧力と温度を計測し、試験片の質量を測定しながら所定の冷媒質量になるまで排気し、所定の冷媒質量になった段階で密封をおこなう。密封は鉄球を

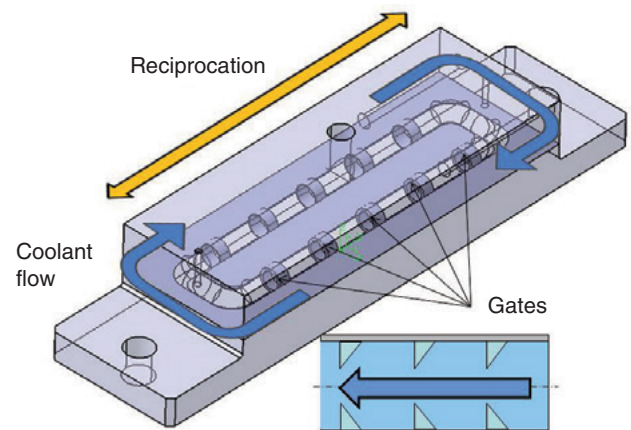


Fig. 3 Newly designed heat pipe

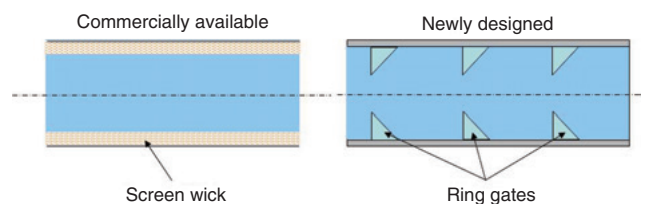


Fig. 4 Inner structures of heat pipes

穴に打ち込む事でおこなった。密封後、テストをおこなう温度までヒートパイプを覆っているアルミニウム試験片全体を加熱し、飽和蒸気圧 (Fig. 5 下図) を示す事を確認した。Fig. 6 に製作したヒートパイプを往復しゅう動試験機に取り付け、ヒートパイプ熱移送方向にヒートパイプを振る運動をさせながら、熱伝達率を計測した。

試験片には3か所 (Fig. 6 左図) の熱電対を取り付け、温度の流れを計測した。

加熱源は Fig. 6 左図の左側に設置したセラミックスヒータとし、放熱はパーソナルコンピュータ CPU 冷却用のクーリングフィンで放熱をおこなった。

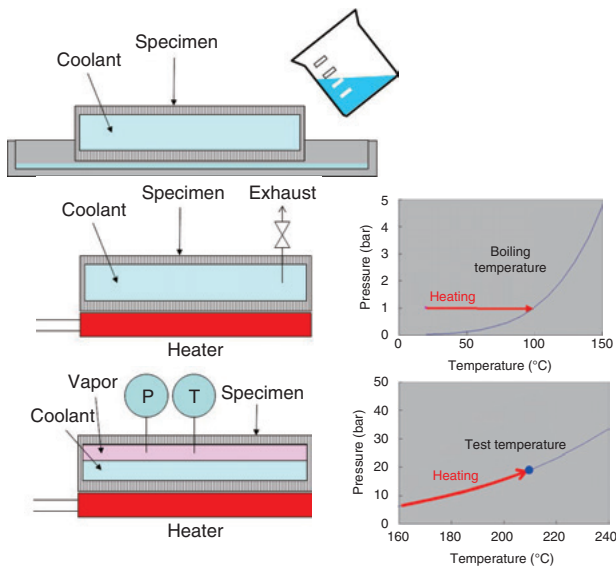


Fig. 5 Prototype process of newly designed heat pipe

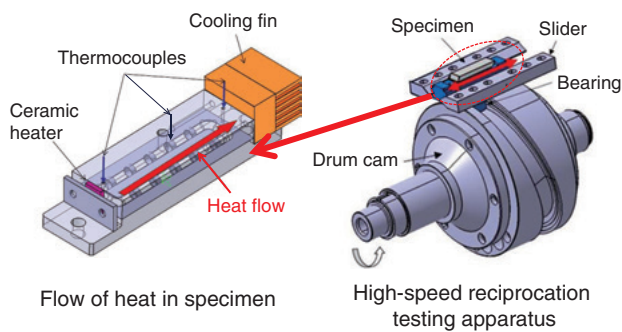


Fig. 6 Flow of heat in specimen and high-speed reciprocation testing apparatus

3. 振動試験（往復動）

Table 2 に往復動試験条件を示す。

ヒートパイプは市販品と水 / 空気の比率を 50/50, 70/30, 80/20 の3種類製作し、最適な比率を求める事にした。

Table 2 Conditions of reciprocation test

Reciprocating speed range	0.0 to 3.0 m/sec
Reciprocating stroke	50 mm

また、比較のために試験片内にヒートパイプを入れていないアルミ無垢の同形状についても同様の試験をおこなった (Fig. 7)。

テストでは安定した温度が取得できるまで速度を一定とし、温度が安定した値を一定時間示したのを確認後、設定速度へ変化させた。所定の速度に達した後、同様の温度計測を実施する形で進めていった。

熱源は軽量のセラミックスヒータをクーリングファンと反対側に試験片へ密着する様に接触させ、市販のヒーター用銀ペーストを挟む様に配置した。入熱量は 30 W とした。

振動試験には往復しゅう動試験機⁽¹²⁾を使用した。試験片は断熱材を含むアルミニウムカバーで試験片全体を覆い、試験片外部へ熱が逃げにくい構造とした。Fig. 8 に試験中の試験片と周辺部の写真を示す。

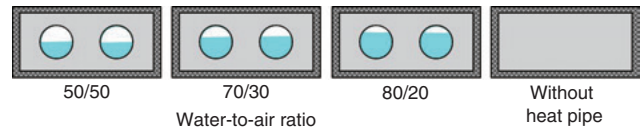


Fig. 7 Comparison of heat pipes with different water-to-air ratios

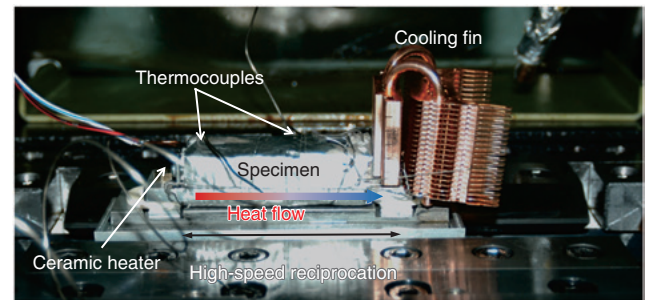


Fig. 8 Specimen during high-speed reciprocation test (3 m/sec)

4. 振動テスト結果

熱収支計算は下記の式 (1) と (2) にて実施した。

$$q = \lambda_e A_e \frac{\Delta T}{L} \quad (1)$$

q : 熱量 (W/m²)

λ_e : 熱伝導率 (W/m²K)

A_e : 断面積

L : 長さ

アルミ試験片にヒートパイプを入れていない断面状態と入れた断面状態の2種類にて計算し、放熱は均一と仮定した。また、熱収支計算は断面から割合を算出した。

$$q = (\lambda_1 A_1 + \lambda_2 A_2) \frac{\Delta T}{L} \quad (2)$$

λ_1 : アルミの熱伝導率

A_1 : アルミの断面積

λ_2 : ヒートパイプの熱伝導率

A_2 : ヒートパイプの断面積

Fig. 9 に振動時ヒートパイプのテスト結果を示す。

ヒートパイプの入っていないアルミ無垢試験片は実有効熱伝導率が 140 W/m K で往復動の速度が変化しても変わらない。

しかし、水と空気の比率 70/30 の場合、熱収支計算のバルク基準面積割合をヒートパイプ 10% とした場合、静止した状態ではアルミのみより熱伝導率は下がる。静止した状態ではアルミ無垢試験片に対し、ヒートパイプを入れたものの方が低熱伝導率であった。これはヒートパイプ内の空気が熱伝導率を下げ、断面積分を減少させているからであると思われる⁽¹³⁾⁻⁽²³⁾。

2 m/sec からアルミのみより若干熱伝導率の上昇を示し、3 m/sec では 620 W/m K に達する。この効果をヒートパイプのみで計算し直すと 3 m/sec 時で 4900 W/m K となる。

参考までにアルミバルクのみ熱伝導率が 140 W/m K、静止状態による市販ヒートパイプの熱伝導率は 3000 W/m K 程度の物が多いため、アルミバルクの 35 倍、市販ヒートパイプの 1.6 倍の熱伝導率を示した。Fig. 10 にヒートパイプの充填率の効果について示す。

水 / 空気の比率が 50/50 の場合、速度が上昇するに従い、実効熱伝達率も上昇する。更に水 / 空気の比率が

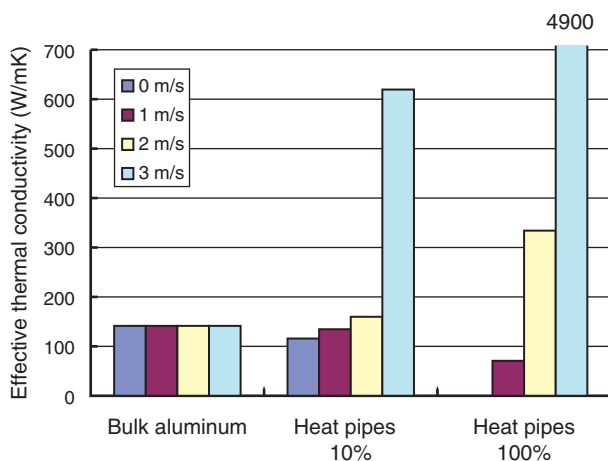


Fig. 9 Effectiveness of heat pipes during high-speed reciprocation

70/30 の場合、速度 2 m/sec までは 50/50 の熱伝達率の方が高いが 3 m/sec で急激に上昇し、620 W/m K に達する。80/20 では 1 m/sec で 235 W/m K と最大熱伝達率を示すが 3 m/sec では 180 W/m K と低下した。

Fig. 11 に今回開発したヒートパイプ内の飛沫の概念図を示す。

独自ヒートパイプが高熱伝導を示した理由について検討をおこなっている。中に密封した液体は、初期の段階で往復により細かな液滴に分解される。この液滴の状態、ゲートと接触しながら巨視的に流れが一方方向になる。その後、ループする事で気液が衝突する事がなく、凝縮領域から蒸発領域への気液の移動を可能にしたと考えている。

結果として、停止時のバルクアルミニウムの伝熱量よりも高い性能を高速往復条件の下で示す事ができた。

以上のことから振動慣性力増加は有効な熱輸送手段であることが分かったため、ICE 用エンジンピストン冷却を事例に検討をおこなった。

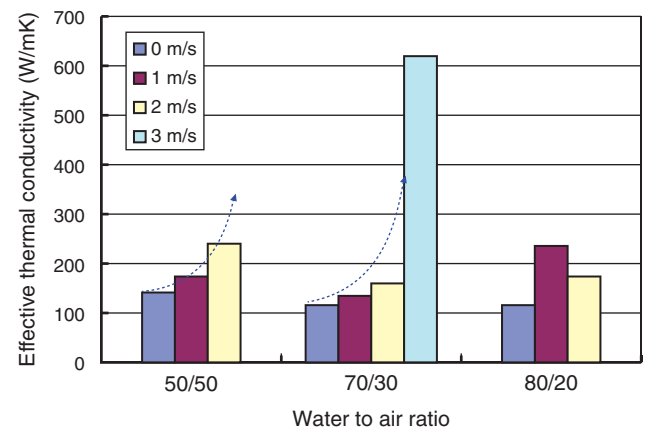


Fig. 10 Effectiveness of heat pipe filling ratio

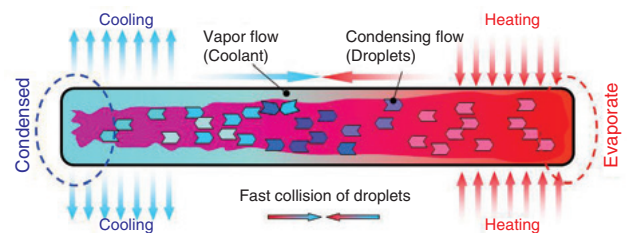


Fig. 11 Diagram of droplet movement

5. エンジンピストンへの応用

前述のデータを基にエンジン用ピストン適用を検討し、熱解析を実施した⁽²⁴⁾⁻⁽²⁷⁾。

Wang らはヒートパイプをピストンのスカート部に組み込みその効果を検証し、3980 W/m℃ と高い熱伝導率が得

られた事を既に報告している。しかし、彼らの構造ではシリンダーの傾斜角によって作動流体が一方に偏り、熱伝達効率に不均一となる可能性があるため、我々は下記のような構造とした。Fig. 12 にピストンにヒートパイプを取り付けた図、この図を元に試作したヒートパイプを配置したピストンを示す。

ピストン内には最も冷やしたいピストントップからピストンスカート部へ伝熱する様に配置をした。

ヒートパイプは Fig. 3 で示した形状とし、配管内部に逆流防止のゲートを設け、気体の流れを制御した。スカート部に設けた銅合金のピストンリングより熱をピストンからスリーブへ伝導させるようにした。

実際に試作した光造形ピストンと 3D プリンターによるアルミ合金製ピストンを Fig. 13 に示す。また、Fig. 14 に

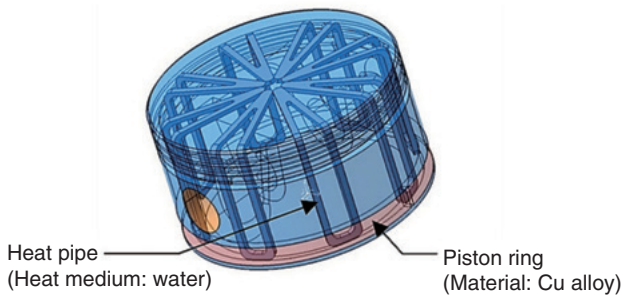


Fig. 12 Piston with built-in heat pipe



Fig. 13 Prototype produced by optical molding (left), prototype produced by metal 3D printer (right)

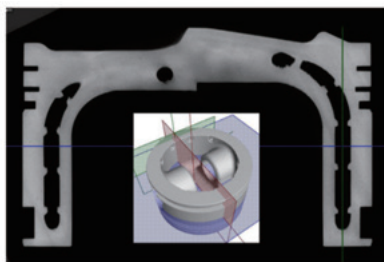


Fig. 14 Sectional image of piston with built-in heat pipes

ヒートパイプを配置したピストンの内部を CT スキャン像で示す。ピストン内部に設けたゲートが方向性を持って形成されている事がわかる。

5.1. 計算方法

下記に頂面からスカート部までヒートパイプを埋め込んだピストンの定常 3 次元熱伝導方程式を数値的に解く熱伝導計算をおこない、放熱特性を予測する事をおこなった。HP 熱伝導率はピストンリング素材の熱伝導率と稼働時の実測値から求めた熱伝導率⁽²⁸⁾を基に Fig. 9 で得られたデータから 2000 W/m K とその半分である 1000 W/m K とした。

基礎式 (3) を示す。

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0 \quad (3)$$

境界条件を下記に示す (Bulk Body = BULK)

ピストンボア径: $\phi 110$

母材熱伝導率: 150 W/m K

HP 熱伝導率: 1000 W/m K・2000 W/m K

形状: ピストン (1/4 モデル)

Fig. 15 にピストンの部位と温度解析事例を示す。

筒内熱伝達率と筒内温度は指圧データから Woschni モデルを用いてその時間平均を与えた。メタル接触部は接触熱抵抗のモデルを入れるべきだが今回は簡易的に熱伝達と同形式で与えた。

Table 3 に各部位の伝熱面境界条件を示す。

ヒートパイプ挿入部は温度が均一になることを仮定して温度を一定として計算した。

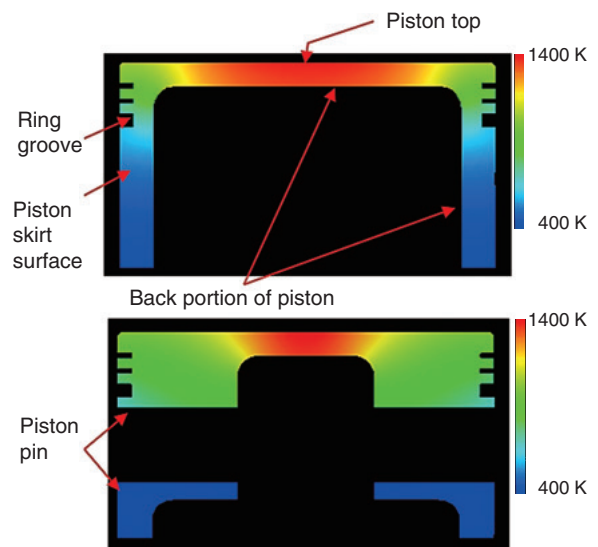


Fig. 15 Example of thermal analysis

Table 3 Heat transfer boundary condition

Area	Heat-transfer coefficient (W/m ² K)	Temperature (K)
Piston top	423	1373.15
Ring groove	2878	403.15
Piston skirt surface	300	403.15
Piston pin	1471	403.15
Back portion of piston	232	403.15

本計算では設計目標としてピストン頭頂部温度は 200 K を設定した。

Fig. 16 にピストンへのヒートパイプ設置状況を示す。

5.2. 計算結果

Fig. 17 にピストン 1 個分のヒートパイプなしピストン 伝熱計算結果を示す。

ピストントップ中央部の温度は 583 K (310℃) に達し、ピストントップ端部の温度は 523 K (250℃) であった。スカート部でも 443 K (170℃) であった。ピストンの最高温度と最低温度差 ΔT は 140 K であった。Fig. 18 にヒート

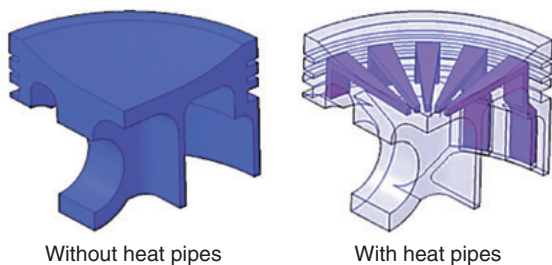


Fig. 16 Arrangement of heat pipes in piston

パイプ (1000 W/m K) 設置のピストン伝熱計算結果 (ピストン 1 個分) を示す。

ピストントップ中央部の温度は 557 K (284℃) に達し、ピストントップ端部の温度は 518 K (245℃) であった。スカート部はヒートパイプによる伝熱によって 461 K (188℃) であった。ピストンの最高温度と最低温度差 ΔT は 96 K であった。

Fig. 19 にピストン 1 個分のヒートパイプ (2000 W/m K) 設置ピストン伝熱計算結果を示す。

ピストントップ中央部の温度は 544 K (271℃) に達し、ピストントップ端部の温度は 517 K (244℃) であった。

スカート部はヒートパイプによる伝熱によって 469 K (196℃) であった。ピストンの最高温度と最低温度差 ΔT は 75 K であった。

計算結果を Fig. 20 にまとめた。

ピストントップ中央部の温度はヒートパイプによって熱が移動したため、ピストンの最大温度が低下した事が分かる。

逆にヒートパイプ有によりピストンスカート部の温度が若干上昇している。この事はピストン温度分布の均衡化によってピストンに対するサーマルストレス軽減に効果がある事が分かった。

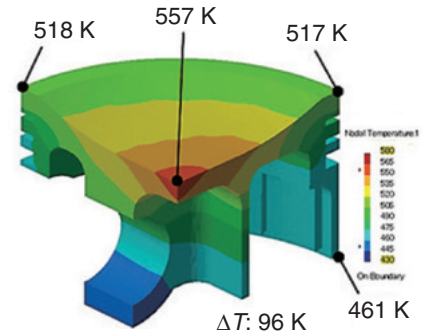


Fig. 18 Results of heat transfer calculation for piston with heat pipes (1000 W/m K)

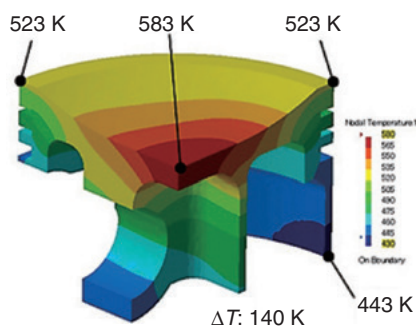


Fig. 17 Results of heat transfer calculation without heat pipes

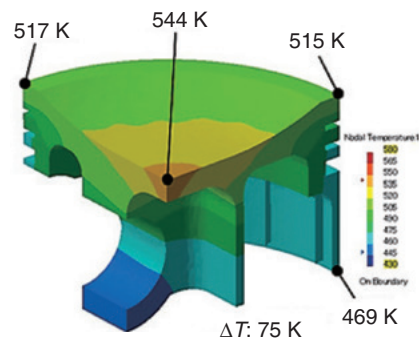


Fig. 19 Results of heat transfer calculation for piston with heat pipes (2000 W/m K)

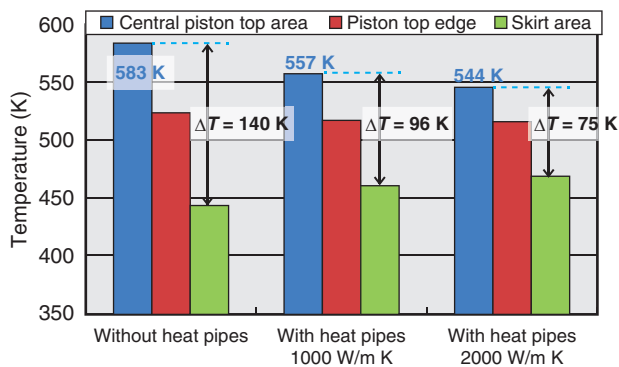


Fig. 20 Comparison of calculation results

6. まとめ

- (1) 往復しゅう動速度の増加と共に一定間隔に突起を用いて往復動時の液体と気体の流れを制御するヒートパイプの熱伝導率は急激な増加傾向を示す事が分かった。
- (2) このヒートパイプは単体換算すると静止状態による市販ヒートパイプの1.6倍の熱伝導率を示した。
- (3) ICEピストンに対し、作動流体に水を用いて計算をしたが、ピストンヘッド中央温度を39 K下げることができ、 ΔT も140 Kから75 Kまで低下させる事が分かった。

以上の結果から、ピストンのサーマルストレス低減に効果がある事が分かった。また、伝熱量を増加させる効果は構造を工夫する事であることも分かった。ただヒートパイプを設置する事による強度影響や、長期間使用に耐えられる構造、ヒートパイプを組み込んだスカート部の肉厚増による重量増など当然予想される。

しかし、原理的には決して不可能ではなく、今後の開発をする事で発想、工夫次第では非常に優れたエンジン冷却システムとなる可能性を有していると思われる⁽²⁹⁾⁻⁽⁴³⁾。

参考文献

- (1) <https://avidtp.com/what-is-the-best-cooling-system-for-electric-vehicle-battery-packs/>
- (2) Huang, J., Nain, S. S., Miller, R., Rizzo, D., Sebeck, K., Shurin, S., Wagner, J.: A Hybrid Electric Vehicle Motor Cooling System- Design, Model, and Control, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 68, Issue 5, p. 1-12, (2019)
- (3) Fujita, H., Itoh, A., Urano, T.: Newly Developed Motor Cooling Method Using Refrigerant, World Electric Vehicle Journal, 10, 38, p. 1-10, (2019)

- (4) Larminie, J., Lowry, J.: Chapter 4 Electricity Supply, Electric Vehicle Technology Explained Second Edition, John Wiley & Sons Ltd., p. 187-216, (2012)
- (5) Wang, Q., Cao, Y., Wang, R., Mignano, F. Chen, G.: Studies of a Heat-Pipe Piston Crown, Journal of Gas Turbines and Power, vol. 122, p. 99-105, (2000)
- (6) Sonoda, K., Iwasita, I., Kobayasi, K., Nakasu, H., Yao, N., Ishiyama, T.: Heat Pipe Cooling of Exhaust Valves for Improvement in Hot Corrosion Resistibility, Technical Paper MESJ, p. 61-70, (1990)
- (7) Ling, J., Cao, Y., Chang, S. W.: Analyses of Radially Rotating High-Temperature Heat Pipes for Turbomachinery Applications, Journal of Gas Turbines and Power, vol. 121, p. 306-312, (1999)
- (8) 山脇栄道, 高橋晃, 熊田雅弥, 吉田豊明, 三村富嗣雄, 瀧将展: ヒートパイプを利用したタービン冷却システムの研究, 日本機械学会論文集 (B 編), 68 巻, 675 号, p. 3107-3113, (2002)
- (9) Asias, A., Shusser, M., Leitner, A., Nabi, A., Grossman, G.: Instability of Heat Pipe Performance at Large Axial Accelerations, Journal of Heat Transfer, Vol. 129, p. 137-140, (2007)
- (10) <http://dx.doi.org/0.5772/62328>
- (11) Matsumoto, K., Harada, H., Taniguchi, H., Ito, N.: Study on the Cooling Method of Car Engine Pistons - Part 1, Basic Test for Achieving High Heat Transfer Coefficient, SAE Technical Paper 2015-01-1653, p. 5, (2015)
- (12) Ono, Y., Matsumoto, K.: Effect of Surface Irregularities of Piston Ring and Sleeve Materials in High-Speed Reciprocating Test, SAE Technical Paper 2015-01-0681, p. 7, (2015)
- (13) 大串哲朗, 野村武秀, 矢尾彰, 増本博光, 村上政明: 溝型ウィックヒートパイプの最大熱輸送特性 (片面加熱の場合の重力下と微小重力下での毛管限界), 日本機械学会論文集 (B 編), 64 巻, 618 号, p. 520-525, (1998-2)
- (14) Thomas, S. K., Klasing, K. S., Yerkes, K. L.: Acceleration-Induced Body Forces on the Capillary Limit of Helically Grooved Heat Pipes, Journal of Heat Transfer, Vol. 120, p. 441-451, (1998)
- (15) Song, F., Ewing, D., Ching, C. Y.: Experimental investigation on the heat transfer characteristics of axial rotating heat pipes, International Journal of Heat and Mass Transfer 47, p. 4721-4731, (2004)
- (16) Chen, S. W., Hsieh, J. C., Chou, C. T., Lin, H. H., Shen, S. C., Tsai, M. J.: Experimental investigation and visualization on capillary and boiling limits of

- micro-grooves made by different processes, *Sensors and Actuators A* 139, p. 78-87, (2007)
- (17) 宮崎芳郎:解説 自励振動ヒートパイプ, 日本機械学会誌, 2003.2, Vol. 106, No. 1011, p. 107-110, (2003)
- (18) 宮崎芳郎:自励振動ヒートパイプの作動限界, 福井工業大学研究紀要, 第 33 号, p. 375-380, (2003)
- (19) 大丸拓郎, 吉田周平, 永井大樹, 岡本篤, 安藤麻紀子, 杉田寛之:逆止弁付自励振動ヒートパイプの内部流動モデル構築, 熱工学コンファレンス講演論文集, 2014 巻, F224-1, (2014)
- (20) 三浦正義, 長崎孝夫, 伊藤優:加振機構を用いた自励振動ヒートパイプの熱輸送特性に関する基礎的研究, 日本機械学会論文集, 14-00651, p. 1-14, (2015)
- (21) Zhang, Y., Faghri, A.: Heat transfer in a pulsating heat pipe with open end, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 45, p. 755-764, (2002)
- (22) Qu, W., Ma, H. B.: Theoretical analysis of startup of a pulsating heat pipe, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 50, p. 2309-2316, (2007)
- (23) Es, J., Woering, A. A.: High-acceleration performance of the Flat Swinging Heat Pipe, NLR-TP 2000-01-2376, p. 9, (2000)
- (24) Liao, Q., Jen, T. C., Chen, Q., Li, L., Cui, W.: Heat transfer performance in 3D internally finned heat pipe, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, SAE Technical Papers 2000-01-2376, p. 9, (2007)
- (25) Catton, I., Stroes, G. R.: A Semi-Analytical Model to Predict the Capillary Limit of Heated Inclined Triangular Capillary Grooves, *Journal of Heat Transfer*, Vol. 124, p. 162-168, (2002)
- (26) Borujerdi, A., Layeghi, M.: A Numerical Analysis of Vapor Flow in Concentric Annular Heat Pipes, *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 126, p. 442-448, (2004)
- (27) 藤中信一, 佐伯壮一, 小河原加久治:両端密閉型ヒートパイプにおける熱流体関連振動の可視化による考察, 日本機械学会, No. 02-9, Dynamics and Design Conference 2002 CD-ROM 論文集, p. 788-791, (2002)
- (28) 伊藤吉保:ピストン温度分布に関する一考察, 日立評論, 第 43 巻, 第 2 号, p. 282-287, (1961)
- (29) Rittidech, S., Yodluk L., Songsorn K.: Effect of Internal Flow Patterns on Heat transfer Performance of a Closed-end Oscillating Heat Pipe at Vertical Position, *American Journal of Applied Sciences* 4(12), p. 1071-1074, (2007)
- (30) 高島武雄:上部が加熱された垂直管内の水・蒸気柱の熱的自励振動現象の可視化と圧力変動の測定, 小山工業高等専門学校研究紀要, 第 39 号, p. 31-36, (2007)
- (31) Xu, J. L., Li, Y. X., Wong, T. N.: High speed flow visualization of a closed loop pulsating heat pipe, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 48, p. 3338-3351, (2005)
- (32) Wilson, C. A.: Experimental Investigation of Nanofluid Oscillating Heat Pipes, Master's Thesis, University of Missouri, (2006)
- (33) Khandekar, S., Groll, M., Charoensawan, P., Terdtoon, P.: Pulsating Heat Pipes: Thermofluidic Characteristics and Comparative Study with Single Phase Thermosyphon, *Proceedings of 12th International Heat Transfer Conference*, Vol. 4, p. 459-464, (2002)
- (34) Zhang, Y., Faghri, A.: Oscillatory Flow in Pulsating Heat Pipes with Arbitrary Numbers of Turns, *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, Vol. 17, No. 3, p. 340-348, (2003)
- (35) Charoensawan, P., Khandekar, S., Groll, M., Terdtoon, P.: Closed loop pulsating heat pipes Part A: parametric experimental investigations, *Applied Thermal Engineering* 23, p. 2009-2020, (2003)
- (36) Vassilev, M., Avenas, Y., Schaeffer, C., Schanen, J. L., Schulz-Harder, J.: Experimental Study of a Pulsating Heat Pipe with Combined Circular and Square Section Channels, *Industry Applications Conference*, p. 23-27, (2007)
- (37) 高橋恭郎, 梅田洋, 李木経孝, 橋本律男, 水田桂司:アニュラー型回転ヒートパイプの水平姿勢における作動液流動と熱輸送特性(第 1 報, 作動液蒸発域の流動形態と熱輸送量), 日本機械学会論文集 (B 編), 61 巻, 589 号, (1995)
- (38) 高橋恭郎, 梅田洋, 李木経孝, 橋本律男, 水田桂司:アニュラー型回転ヒートパイプの水平姿勢における作動液流動と熱輸送特性(第 2 報, 各種伝熱条件に対する伝熱実験と理論解析), 日本機械学会論文集 (B 編), 61 巻, 592 号, p. 3321-3328, (1995)
- (39) 水田桂司, 高橋恭郎, 黄樹偉, 柳謙一, 橋本律男, 猪谷彦太郎:アニュラー型回転ヒートパイプの水平姿勢における作動液流動と熱輸送特性(第 3 報, 作動液膜の蒸発形態と蒸発熱伝達率), 日本機械学会論文集 (B 編), 61 巻, 626 号, (1998)
- (40) 藤岡和正, 中山恒:水平な自軸まわりに回転するヒートパイプの熱解析, 日本機械学会論文集 (B 編), 54 巻, 506 号, (1988)
- (41) Loh, C. K., Harris, E., Chou, D. J.: Comparative Study of Heat Pipes Performances in Different

Orientations, 21st IEEE SEMI-THERM Symposium,
(2005)

- (42) Assouad, Y., Caplot, M., Gautier, T.: Advanced Cooling Techniques Comparison for Airborne Electronic Circuits, 13th IEEE SEMI-THERMTM Symposium, (1997)
- (43) Delil, A. A. M.: Pulsating and oscillating heat transfer devices in acceleration environments from microgravity to supergravity, NLP-TP-2001-001, p. 28-43, (2001)

■ 著 者 ■



松本 謙 司

三次元網目構造電極を適用した 高容量リチウムイオン電池の内部抵抗低減

Reduction of Internal Resistance in High Capacity Lithium-ion Batteries
with 3D Lattice-structured Electrode

田名網 潔¹
Kiyoshi TANAAMI
青柳 真太郎³
Shintaro AOYAGI
奥野 一樹⁴
Kazuki OKUNO

田中 俊充¹
Toshimitsu TANAKA
細江 晃久⁴
Akihisa HOSOE
山本 琢磨⁴
Takuma YAMAMOTO

磯谷 祐二²
Yuji ISOGAI
竹林 浩⁴
Hiroshi TAKEBAYASHI

要 旨

リチウムイオン電池のエネルギー密度の向上を目的に、金属の三次元網目構造体を集電体に適用し、正極の改善検討を小型セルで、体積エネルギー密度の向上の実証を積層セルでおこなった。

小型セルでは、正極の二つの課題に対し対応策を実施し、その効果の確認と要因を整理した。一つ目の課題は、集電体と活物質の間の接触性の向上であり、集電体表面を導電性カーボンで被覆することで対応した。二つ目の課題は、活物質間の電子伝導パスの形成の向上であり、微粒導電助剤を分散液で適用することで対応した。その結果、いずれの課題対応策においても、抵抗抑制と耐久性向上の効果を確認することができた。また、その要因を把握するために、SPM 測定による活物質の導電性評価を実施した結果、電子伝導パスの断裂を抑制しているためであることを確認した。

積層セルでは、電極の厚膜化により、その積層数を削減できた結果、セルエレメントの体積エネルギー密度が集電箔電極セルの 614 Wh/L から、三次元網目構造電極セルにより 674 Wh/L と 9.8% の向上を確認した。

ABSTRACT

After applying a 3D metal lattice structure to the current collectors, enhancements to the cathode were examined in small cells, and an increase in volumetric energy density was demonstrated in laminated cells, with the goal of increasing the energy density of lithium-ion batteries.

Countermeasures were implemented to address two issues with the cathodes of small cells. The efficacy of these measures was confirmed, and the causal factors were cataloged. The first issue is enhancing the contact between the collectors and the active materials. This was addressed by coating the surface of the collectors with conductive carbon. The second issue is enhancing the creation of electron-conductive paths. This was addressed by applying a fine particle conductive agent in the form of a liquid dispersant. The results confirmed that each of these countermeasures had the effect of suppressing resistance and enhancing durability. Moreover, to ascertain the primary cause of these effects, the conductivity of the active material was evaluated using scanning probe microscopy (SPM). The results showed that it is because the countermeasures are suppressing the interruption of electron-conductive paths.

Increasing the thickness of the electrodes in laminated cells reduced the number of electrode layers, and resulted in a 9.8% increase in energy density of cell elements for a cell using 3D lattice-structured electrodes (674 Wh/L), compared with a cell using foil-coated electrodes (614 Wh/L).

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

1. まえがき

低炭素社会の実現に向け、自動車の電動化による燃費改善、電動車の本格的な普及がその重要な対策である^{(1),(2)}。その需要拡大への対応を進めるためには、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な対応となる^{(3),(4)}。

体積エネルギー密度は、電池容量×平均電圧÷体積で算出される。電池容量は、電極中の活物質の単位体積当たりの容量と、その充填量から算出される。電極を厚膜化することで、その積層数を削減することが可能となる。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し、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。

活物質の充填量を増加させ厚膜化する技術として、三次元網目構造体（以下、3D 集電体）をリチウムイオン電池の集電体に適用する検討をおこなった。3D 集電体は 90% 以上の高い空隙率を有しており、その空隙へ活物質を充填することにより、目付け量を増加させることが可能となる^{(5),(6)}。その結果、通常の集電箔電極に対し 3D 集電体を適用した電極（以下、3D 電極）では、セル内の電極の積層数を減少させることが可能となる。電極の積層数が減少するので、セパレータの積層数は減少し、集電体の使用量が減少することで、セル内部の活物質割合が増加する。したがって、3D 電極を適用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となる。

前報では、3D 集電体を適用した正極（以下、3D 正極）を試作し、電極特性評価をおこなった結果、集電箔正極に対し、セルの内部抵抗抑制と耐久性向上の効果を明らかにした⁽⁷⁾。その際、さらなる内部抵抗抑制に対し、二つの課題を把握した。一つ目は、活物質と集電体の接触性の向上に対し、集電体の表面の改善が必要であること、二つ目は、活物質間の電子伝導パスの形成の向上に対し、導電助剤の分散性の改善が必要なことである⁽⁷⁾。

そこで、3D 電極の内部抵抗抑制を目的に、上記二つの課題に対して、それぞれ改善策を検討した。活物質と集電体の接触性の向上に対しては、集電体の表面に導電性のカーボン粒子を被覆した 3D 電極を検討した。活物質間の電子伝導パスの形成の向上に対しては、分散溶液状態の微粒導電助剤の適用を検討した。

さらに、両極に 3D 集電体を適用した積層セルを作製し、体積エネルギー密度の向上についての検証をおこなった。

2. セル構成検討

2.1. 正極活物質と集電体の接触性検討

Fig. 1 に 3D 電極の断面を走査型電子顕微鏡 (SEM) で観察した結果を示す。3D 電極において、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、集電体に直接接触していない隙間がある。アルミニウムと接触している活物質には電子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供給は、他の活物質や導電助剤を介しての電子の供給となるため、抵抗が増加する要因となる。

一般的な集電箔電極では、活物質と集電体との接触性を改善するために、アルミニウムの表面を導電性のカーボン粒子で被覆する方法が提案されている⁽⁸⁾⁻⁽¹⁰⁾。カーボンコート層を設けることにより、集電体への活物質の接触性が向上することで、アルミニウム表面と活物質間の界面抵抗が低減されると同時に、抵抗バラツキを低減することが可能とされている⁽¹⁰⁾。3D 集電体においても同様にアルミニウム骨格の表面にカーボンを被覆することで、その隙間を削減し、活物質と集電体の接触性を向上させる効果が期待できる。一方で、負極活物質の黒鉛には柔軟性があるために、集電体との接触性の課題は存在しない。

2.2. 活物質間の電子伝導性検討

一般的なりチウムイオン電池の電極では、導電助剤の分散性を高めることで、細孔に導電助剤を均一に充填させて、活物質間の電子伝導性を向上させることが知られている⁽¹¹⁾。Fig. 2 に集電箔正極と 3D 正極の細孔分布計測をおこなった結果を示す。3D 正極の細孔径が、集電箔正極に対し小さいことが確認できる。また、Fig. 1 の破線の囲み線が示すように、活物質間に空間が存在し、各活物質粒子間に導電助剤が侵入していないことが分かる。活物質粒子間への導電助剤の分散性が低くなることで、電極内の電子伝導性が低下し、電子抵抗が増加する要因となる⁽¹¹⁾。これに対し、従来の粉体の導電助剤ではなく、あらかじめ溶媒に分散させた導電助剤を適用することで、その凝集を抑制し、細孔への導電助剤の充填性を向上させることが可能となる。さらに、導電助剤の粒子径を小さくすることで、活

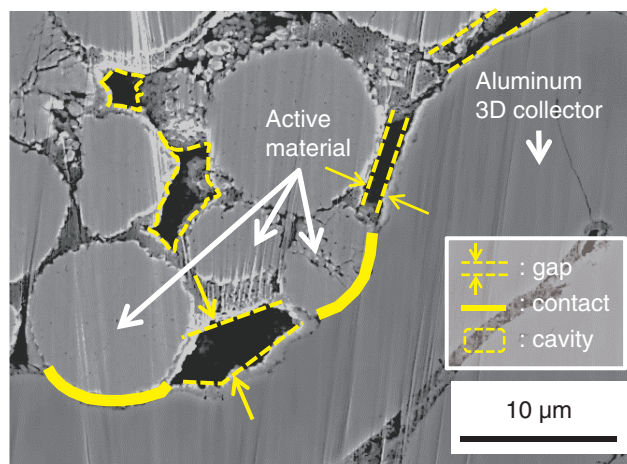


Fig. 1 Cross-section SEM image of 3D cathode

物質粒子間への侵入性を向上させ、活物質粒子間の電子伝導性を向上させる効果が期待できる。

2.3. 体積エネルギー密度検討

前報では、3D電極を適用したセルの体積エネルギー密度が向上することを計算結果で提示した。車載サイズ(体積 360 mL)のセルにおいて、集電箔電極を超える体積エネルギー密度を可能とする電極の目付け量と集電体の空隙率の関係を整理した。その結果、目付け量 90 mg/cm^2 では 97% 以上、 120 mg/cm^2 では 93% 以上、 150 mg/cm^2 では 89% 以上となった⁽⁷⁾。3D電極は、セルのサイズに関わらず、厚膜化による積層の削減による部材使用量の減少により体積エネルギー密度を向上させる。

Fig. 3 に示すように、リチウムイオン電池のセルの構成

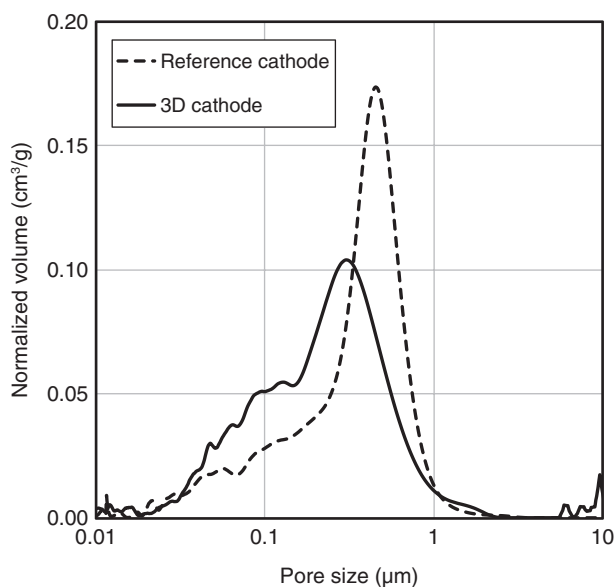


Fig. 2 Cathode pore distribution

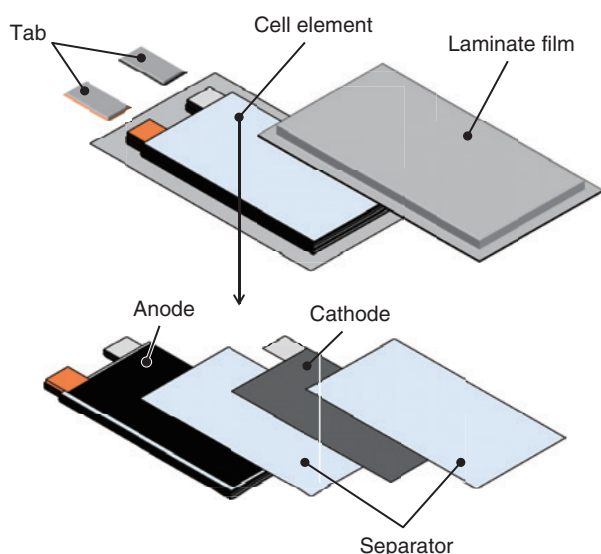


Fig. 3 Internal structure of lithium-ion battery

は、電極とセパレータを積層したエレメントと、タブとラミネートフィルムなどの外装体に分けられる。活物質が固定の場合、セルの形状に関わらず、電池の容量はエレメントの容量で決定する。したがって、エレメント当たりの容量を測定し、その体積エネルギー密度を比較することで、電極の改善効果としての体積エネルギー密度を評価することができる。

3. 実験方法

3.1. セル部材

3.1.1. 三次元網目構造体

集電体は住友電気工業株式会社のセルメットを使用した^{(5), (6)}。電池の電位の観点で、集電体として使用して安定であることから、正極にアルミニウムのセルメット、負極に銅のセルメットを使用した。代表的な物性一覧を Table 1 に示す。

3D集電体のアルミニウムの表面へのカーボンコート層の被覆は Fig. 4 に示すように作製した。まず、N-メチル-2-ピロリドン(以下、NMP)を溶媒としてカーボンブラックが 10 wt% の溶液を調整し、その中にアルミニウムの 3D 集電体を浸漬させた。次に、ブレードにより過剰カーボンブラックを絞り出し、エアブローを実施した。最後に、 120°C で真空乾燥することで、カーボン被覆の 3D 集電体を作製した。

カーボン被覆は 0.1 mg/cm^2 、 0.5 mg/cm^2 、 1.0 mg/cm^2 の三種類を作製したが、 0.1 mg/cm^2 ではアルミニウムの表面に均一に被覆されず、 1.0 mg/cm^2 では三次元網目の空隙にカーボンが目詰まりを生じていたので、均一に被覆ができた 0.5 mg/cm^2 のみを電極化した。

3.1.2. 正極

活物質として三元系層状酸化物 $\text{LiNi}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{O}_2$ (NCM)、導電助剤はアセチレンブラック(以下、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 $\text{NCM/AB/PVDF} = 94/4/2 \text{ wt\%}$ とした。合剤スラリーをアルミニウムの 3D 集電体に、目付け量が 90 mg/cm^2 となるように充填した後、電極密度が 3.2 g/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。カーボンを被覆した 3D 集電体を適用し、上記と同様に正極を作製した。導電助剤は AB 以外に、N-メチル-2-ピロリドン(以下、NMP)を溶媒に微粒導電助剤を分散させた御国色素株式会社の Conductive Slurry for Battery(以下、CSB)シリーズの CSB-2 を使用して、上記と同様に正極を作製した。各導電助剤の代表的な物性を Table 2 に示す。CSB-2 は、AB に対し粒子径が小さいので、比表面積が増加する。それに伴い、溶液の浸透性を示すフタル酸ジ-n-ブチル給油量(DBP 給油量)が増加しており、電解液の浸透性を向上させる効果も期待される。集電箔正極は $15 \mu\text{m}$ のアルミニウム箔に両面目付け量でそれぞれ 90 mg/cm^2 、 45 mg/cm^2 にな

Table 1 Physical properties of Celmet

	Aluminum Celmet	Copper Celmet
Porosity (%)	97	97
Average pore size (μm)	550	550
Specific surface area (m^2/m^3)	5500	5500
Thickness (μm)	1000	1000
Area density (g/m^2)	100	200

Table 2 Physical properties of conductive agent

	AB	CSB-2
Particle size (nm)	48	23
SSA (m^2/g)	41	133
DBP absorption ($\text{ml}/100\text{g}$)	114	220
State	Powder	Dispersion

るように塗布した後、電極密度を $3.2 \text{ g}/\text{cm}^3$ になるように作製した。

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。合剤スラリーを、銅の 3D 集電体に、目付け量が $45 \text{ mg}/\text{cm}^2$ と $22.5 \text{ mg}/\text{cm}^2$ となるようにそれぞれ充填した後、電極密度が $1.5 \text{ g}/\text{cm}^3$ になるように室温でロールプレスして電極を完成させた。

一方、集電箔負極は $10 \mu\text{m}$ の銅箔に、両面目付け量がそれぞれ $45 \text{ mg}/\text{cm}^2$ と $22.5 \text{ mg}/\text{cm}^2$ 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。

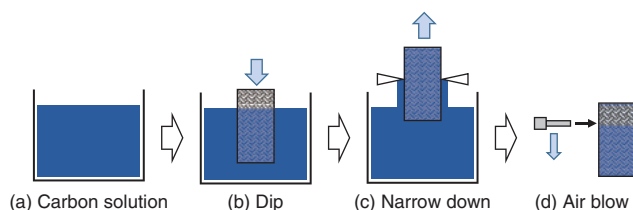


Fig. 4 Schematic view of electrode carbon coating process

3.1.6. セル外装体

厚さ $150 \mu\text{m}$ のラミネートフィルムを使用した。

3.2. セル作製方法

3.2.1. 小型セル評価

3D 正極の内部抵抗とサイクル性の評価を実施する目的で小型セル評価を実施した。小型セルは、再現性の高いセルを簡易的に試作でき、内部抵抗と初期耐久性を相対比較することが可能であり、電極仕様を検討する場合には有効である。対象となる正極は、集電箔に合剤を塗布した正極 (以下、集電箔正極)、3D 集電体に合剤を充填した正極 (以下、3D 正極 (標準))、カーボン層を被覆した 3D 正極 (以下、3D 正極 (C コート))、および、導電助剤 CSB-2 を適用した 3D 正極 (以下、3D 正極 (CSB-2)) の 4 種類となる。正極を $30 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ 、負極を $34 \text{ mm} \times 44 \text{ mm}$ 、セパレータを $40 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ に打ち抜いた。Fig. 5 に示すように電極とセパレータを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。また、各セルの構成を Table 3 に示す。

3.2.2. 積層セル評価

3D 電極を正極と負極に適用した場合の体積エネルギー密度の実証と、そのセルの抵抗値を明確化する目的で積層セルの評価を実施した。積層セルでは、セルとしての体積エネルギー密度の確認、および、タブなどの部材を含めたセルとしての抵抗値を明確化できる。正極を $71 \text{ mm} \times 81 \text{ mm}$ 、負極を $75 \text{ mm} \times 85 \text{ mm}$ 、セパレータを $80 \text{ mm} \times 90 \text{ mm}$ に打ち抜いた。リファレンス電極セル、3D 電極セ

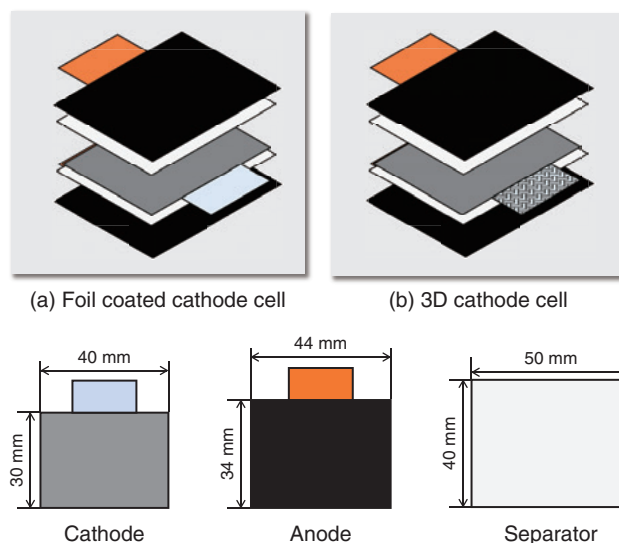


Fig. 5 Small cell element

Table 3 Small cell components

	Foil coated cathode cell	3D cathode cell
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	45 mg/cm ²	90 mg/cm ²
Cathode density	3.2 g/cm ³	
Cathode collector	Aluminum foil	Aluminum Celmet
Anode active material	Graphite	
Anode active material content	96.5 wt%	
Anode loading	22.5 mg/cm ²	
Anode density	1.5 g/cm ³	
Anode collector	Copper foil	
Electrolyte	1.2 mol LiPF ₆ EC/DMC/EMC = 30/40/30 wt%	
Separator	15 μm	
Negative/Positive ratio	1.2	

Table 4 Multilayer cell components

	Reference cell	3D cell
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	45 mg/cm ²	90 mg/cm ²
Cathode density	3.2 g/cm ³	3.2 g/cm ³
Cathode collector	Aluminum foil	Aluminum Celmet (C coating)
Anode active material	Graphite	
Anode active material content	96.5 wt%	
Anode loading	22.5 mg/cm ²	45 mg/cm ² , 22.5 mg/cm ²
Anode density	1.5 g/cm ³	1.5 g/cm ³
Anode collector	Copper foil	Copper Celmet
Number of electrodes	9	5
Electrolyte	1.2 mol LiPF ₆ EC/DMC/EMC = 30/40/30 wt%	
Separator	15 μm	
Negative/Positive ratio	1.2	

ルとして、それぞれ Fig. 6 に示すように電極とセパレータを積層してエレメントを作製した。ラミネートフィルムを 125 mm × 135 mm に打ち抜き、エレメントの上下に配置し 3 辺を封止した後、電解液を注液し、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。また、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定格放電試験を実施した。エージング処理として、セルを 25℃ 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、 $C = \text{セルの容量} \div \text{満放電時間で示される}$ 。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 10-sec DCR 測定を実施した。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 (以下、抵抗 A)、0.1 から 1 秒までの抵抗値 ((1-0.1)-sec DCR) を反応抵抗 (以下、抵抗 B)、1 から 10 秒までの抵抗値 ((10-1)-sec DCR) をイオン拡散抵抗 (以下、抵抗 C) とみなすこととした^{(12), (13)}。

3.3.3. サイクル試験

セルの耐久性を評価する目的でサイクル試験を実施した。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℃ にして定格放電試験での容量を確認した。600 サイクル終了時には 10-sec DCR を測定した。

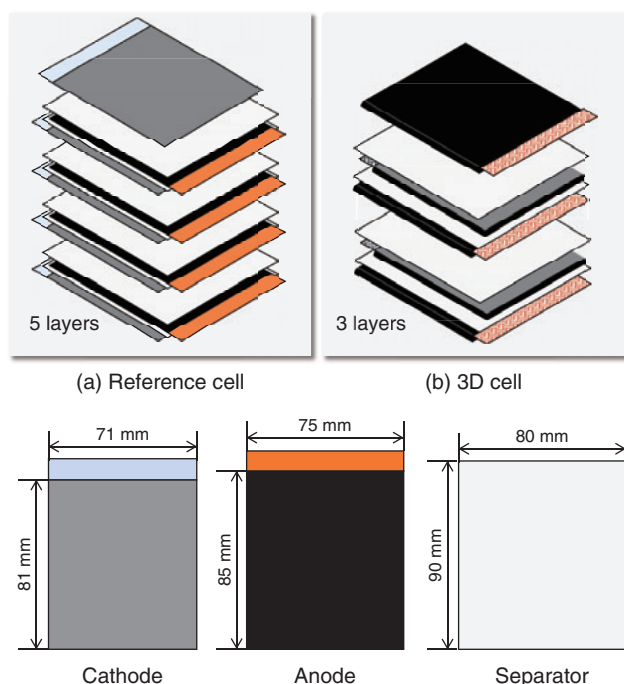


Fig. 6 Multilayer cell element

3.4. 電極の分析

3.4.1. 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リッシャで断面を制作し、Carl Zeiss 社製 ULTRA55 型 SEM を用いて観察した。

3.4.2. 電子プローブマイクロアナライザ (EPMA)

電極中の各材料の分散状態を確認する目的で、クロスセクションポリリッシャで断面を制作し JEOL 社製 JXA-8500F を用いて観察した。

3.4.3. 細孔分布測定

電極の細孔分布を定量化する目的で、Quanta Chrome 社製全自動細孔分布測定装置 POREMASTER 60-GT を用いて水銀圧入法で測定した。

3.4.4. 走査型プローブ顕微鏡 (SPM)

サイクル試験前後における正極中の活物質への電子伝導パスの変化を定量化する目的で、Ar イオンミリングにより電極断面を作製し、株式会社島津製作所製全自ナノサーチ顕微鏡 SFT-3500 を用いて、Fig. 7 の概要図に示すようにして活物質粒子ごとにそれぞれプローブを接触させ、活物質の抵抗が安定して計測できる 8 V のバイアス電圧を印可し、電流値から抵抗値を算出した。

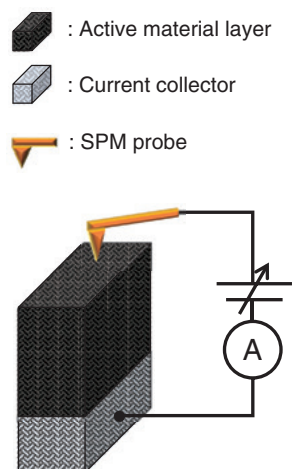


Fig. 7 Schematic diagram of SPM

4. 結果と考察

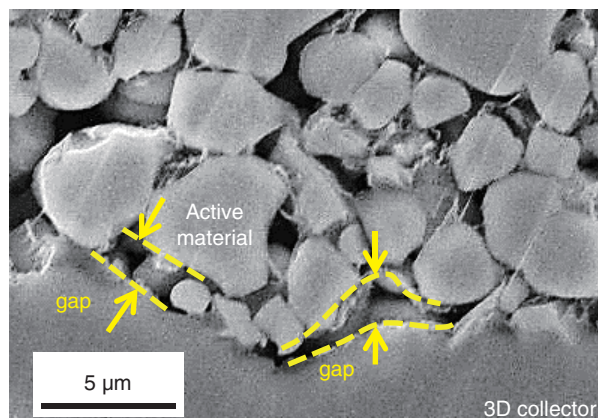
4.1. 正極の断面観察結果

Fig. 8 に (a) 3D 正極 (標準) と (b) 3D 正極 (C コート) と (c) 3D 正極 (CSB-2) の断面を SEM で観察した結果を示す。Fig. 9 に 3D 正極 (標準) と 3D 正極 (CSB-2) の EPMA で観察した炭素とフッ素の元素マッピングを示す。

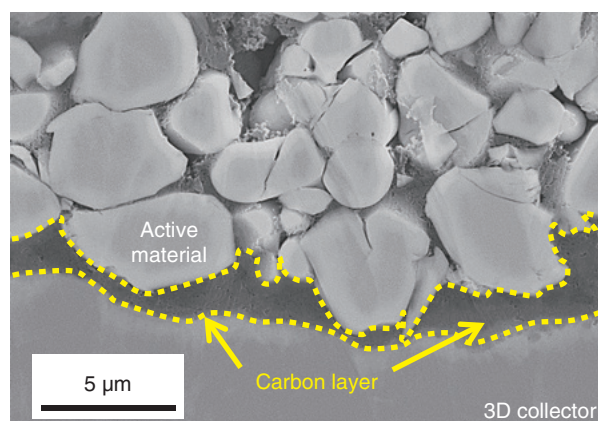
Fig. 8 より、(a) では、活物質が集電体に直接接触していない隙間が存在し、孤立している活物質が存在する。これが、電子抵抗の増加の要因になる。(b) では、図中の破線が示すように、集電体の表面にカーボン層が存在すること

で、活物質が導電性のカーボン層を介し集電体に一様に接触していることを確認した。したがって、集電体と活物質の間の電子伝導性が向上することによって、電極の電子抵抗を抑制する効果が期待できる。

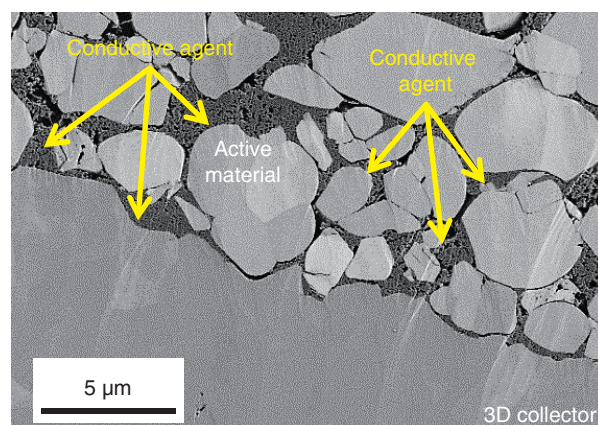
Fig. 8 の (c) では、活物質粒子の隙間に、導電助剤が侵入し、十分に分散していることを確認した。これは、通常の導電助剤 AB の一次粒子径が 48 nm であるのに対し、導電助剤 CSB-2 の一次粒子径が半分以下の 23 nm であるため隙間への充填性が向上したと考えられる。



(a) 3D cathode (standard)



(b) 3D cathode (C coating)



(c) 3D cathode (CSB-2)

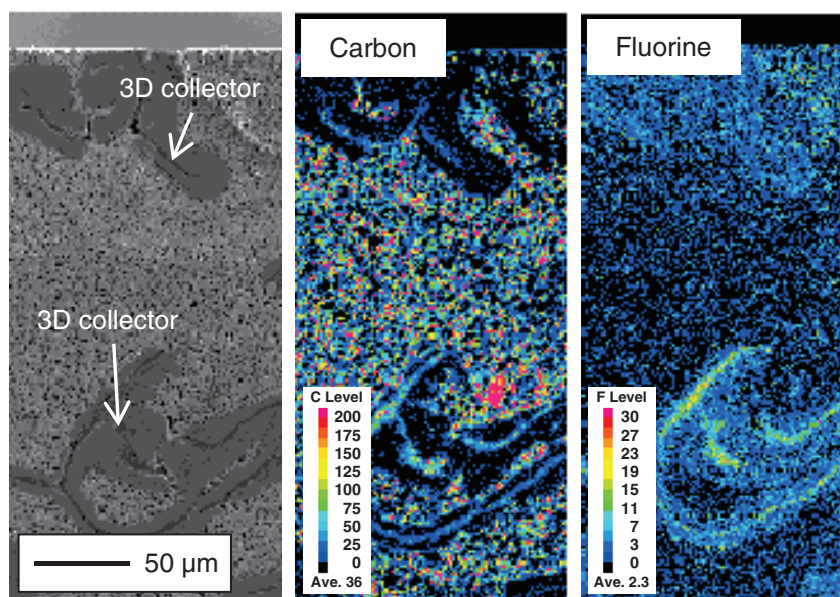
Fig. 8 Cross-sectional SEM images of 3D cathodes

Fig. 9 より、電極全体として、(a) に対し、(c) では導電助剤を示す炭素と、バインダを示すフッ素の分散性が向上していることが確認できる。これは、導電助剤を粉体ではなく溶媒に分散させた状態で適用したことにより、各材料の分散性が向上したためと考えられる。この解析結果から、電極合材内の電子伝導性が向上し、電極の抵抗を抑制する効果が期待できる。また、電極の結着性を向上させるために使用するバインダは、それ自体は電池反応には寄与しないので、分散性が低いと抵抗増加することが知られているが⁽¹¹⁾、(c) 3D 正極 (CSB-2) ではバインダの分散性が向上することで、電極中の反応抵抗を抑制する効果も期待できる。

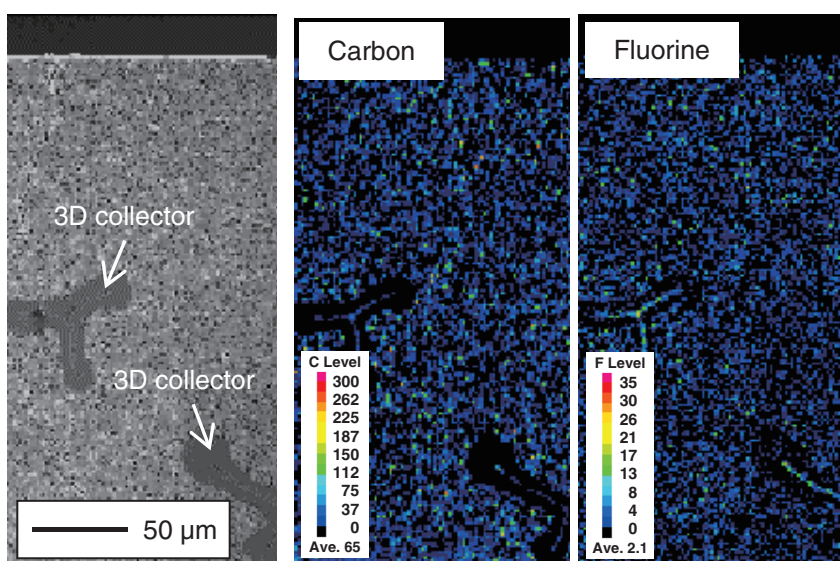
4.2. 正極の初期抵抗測定結果

Fig. 10 に各正極の 10-sec DCR の結果を示す。集電箔正極に対して、すべての 3D 正極で抵抗値を抑制していることを確認した。

抵抗 A は、主たる抵抗成分が電子抵抗であり、集電箔正極が $10.4 \Omega \cdot \text{cm}^2$ に対し、3D 正極 (標準) が $8.8 \Omega \cdot \text{cm}^2$ であるので、3D 集電体の効果により $1.6 \Omega \cdot \text{cm}^2$ の低減効果を確認した。また、3D 正極 (C コート) が $7.9 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 、3D 正極 (CSB-2) が $7.2 \Omega \cdot \text{cm}^2$ であり、3D 正極 (標準) に対して、さらに抑制していることを確認した。これは、Fig. 9 の断面 SEM 画像で確認したように、3D 正極 (C コート) は、



(a) 3D cathode (standard)



(c) 3D cathode (CSB-2)

Fig. 9 EPMA elemental mapping analysis of 3D cathode

集電体と活物質の界面の接触性が向上したことで、活物質と集電体間の電子伝導性が増加した効果と考えられる。3D正極(CSB-2)は、活物質間に導電助剤が充填されることで、活物質間の電子伝導性が向上した効果と考えられる。これらの結果から、二つの改善策の効果により、それぞれ電極の電子抵抗を抑制できたことを確認した。

抵抗Bは、主たる抵抗成分が反応抵抗であり、集電箔正極の $0.9\ \Omega\cdot\text{cm}^2$ に対し、3D正極(標準)と3D正極(Cコート)はそれぞれ $1.6\ \Omega\cdot\text{cm}^2$ 、 $1.7\ \Omega\cdot\text{cm}^2$ と増加し、3D正極(CSB-2)では $0.8\ \Omega\cdot\text{cm}^2$ と抑制していることを確認した。Fig. 10のEPMAによるフッ素の元素マッピングで、3D正極(標準)はバインダの分散性が低く偏在している箇所を確認し、これが反応抵抗を増加させていると考えられる。3D正極(Cコート)も同じスラリーを使用しているの、同様の傾向である。これに対し、3D正極(CSB-2)はバインダの偏在がなく高い分散性が確認していることから、電極の反応抵抗を抑制していると考えられる。

抵抗Cは、主たる抵抗成分がイオン拡散抵抗であり、集電箔正極の $1.7\ \Omega\cdot\text{cm}^2$ に対し、3D正極(標準)では $1.9\ \Omega\cdot\text{cm}^2$ 、3D正極(Cコート)は $1.4\ \Omega\cdot\text{cm}^2$ 、3D正極(CSB-2)は $1.3\ \Omega\cdot\text{cm}^2$ であり、導電助剤CSB-2の抵抗抑制効果が大きいことを確認した。Table 2の各助剤の物性に示すように導電助剤CSB-2は、その比表面積がABの $41\ \text{m}^2/\text{g}$ に対し $133\ \text{m}^2/\text{g}$ と増加し、溶液の浸透性を示すDBP吸収量がABの $114\ \text{ml}/100\text{g}$ に対し $220\ \text{ml}/100\text{g}$ と増加している。このことから、電極中の細孔への電解液の浸透性が向上することで、活物質へのリチウムイオンの供給が容易になり、電極のイオン拡散抵抗を抑制させたと考えられる。

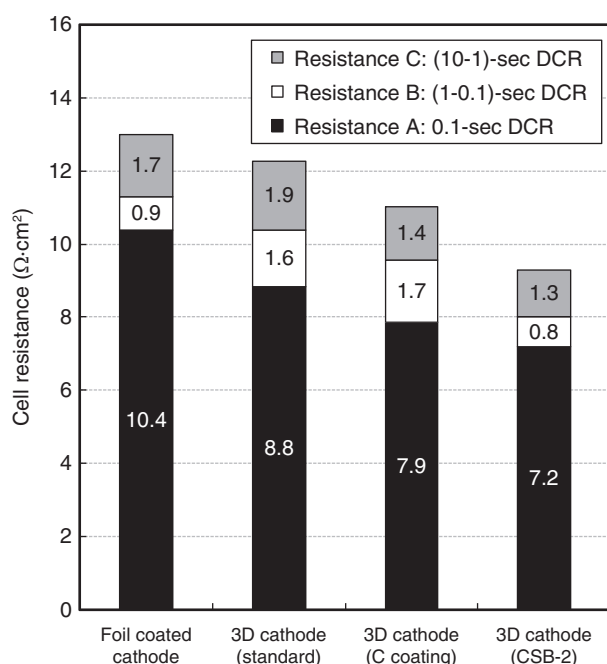


Fig. 10 Results of 10-sec DCR for cathodes

4.3. 正極の耐久性能評価結果

Fig. 11に 45°C サイクル試験における、200サイクルごとの容量変化率を示す。600サイクル後での容量維持率は集電箔正極が79%であるのに対し、3D正極(標準)で84%、3D正極(Cコート)で85%、3D正極(CSB-2)で94%であり、全ての3D正極で容量維持率が向上することを確認した。これは、三次元網目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。3D正極(Cコート)では、集電体と活物質の接触性の向上により界面における電子抵抗の抑制効果があるが、電極の骨格構造および電極合材の内容に変更がないことから、容量劣化に関しては、3D正極(標準)と同等である。一方で、3D正極(CSB-2)では三次元網目構造の劣化抑制効果に加えて、導電助剤の分散性向上による活物質間の導電パス断裂の抑制、および、イオン拡散性の向上によるイオンパス断裂の抑制により、容量劣化の抑制効果が向上していると考えられる。

Fig. 12に 45°C サイクル試験における、600サイクル前後の10-sec DCRの変化を、Table 5に各抵抗成分の数値を示す。Fig. 12, Table 5より集電箔正極に対し、全ての3D正極で10-sec DCRの抵抗増加を抑制していることを確認した。3D正極では、抵抗Aの増加を抑制することで、全体抵抗の増加が抑制されることが確認できる。耐久前後での抵抗Aの変化は、集電箔正極は $10.4\ \Omega\cdot\text{cm}^2$ から $26.5\ \Omega\cdot\text{cm}^2$ へ2倍以上に増加しているのに対し、3D正極(標準)は $8.8\ \Omega\cdot\text{cm}^2$ から $12.3\ \Omega\cdot\text{cm}^2$ となっており、抵抗増加を抑制していることを確認した。さらに、3D正極(Cコート)は $7.9\ \Omega\cdot\text{cm}^2$ から $10.4\ \Omega\cdot\text{cm}^2$ 、3D正極(CSB-

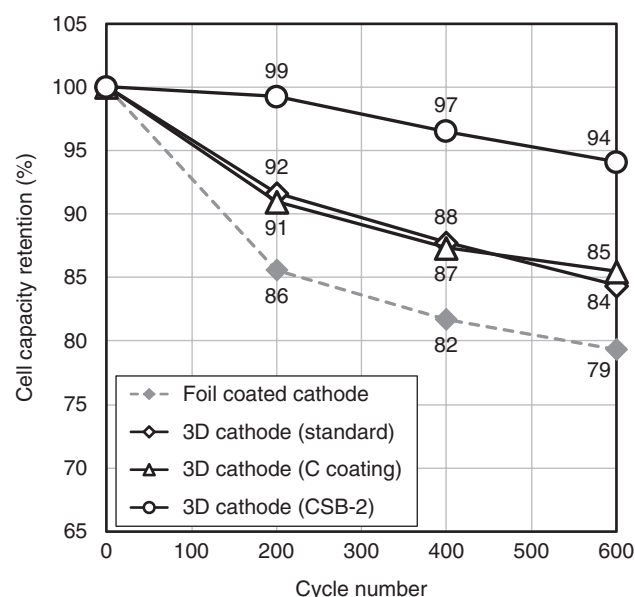


Fig. 11 Capacity retention performance of cathodes

Table 5 Change in cathode resistance

		Reference cathode	3D cathode (standard)	3D cathode (C coating)	3D cathode (CSB-2)
Resistance A ($\Omega\cdot\text{cm}^2$)	Before	10.4	8.8	7.9	7.2
	After	26.5	12.3	8.3	8.8
Resistance B ($\Omega\cdot\text{cm}^2$)	Before	0.9	1.6	1.7	0.8
	After	4.7	5.0	4.4	3.2
Resistance C ($\Omega\cdot\text{cm}^2$)	Before	1.7	1.9	1.4	1.3
	After	3.2	2.6	2.3	1.8

2)では $7.2\ \Omega\cdot\text{cm}^2$ から $8.8\ \Omega\cdot\text{cm}^2$ となっており、3D正極(標準)に対して、さらなる抵抗増加の抑制効果を確認した。抵抗Aの主たる抵抗成分が電子抵抗であることから、3D正極ではアルミニウム骨格の構造により、サイクル中の活物質の集電体からの剥離などによる電子伝導パス断裂が抑制されることで抵抗増加を抑制していると考えられる。特に、3D正極(Cコート)では、活物質と集電体間の導電性カーボン粒子による密着した接触により電子伝導パス断裂の抑制効果が高いと考えられる。

4.4. 活物質の導電性評価結果

Fig. 13に 45°C サイクル試験の600サイクル前後における、集電箔正極と3D正極(Cコート)のSPM測定による活物質の導電性評価結果をそれぞれ示す。各電極のSEM断面像の中の粒子が活物質であり、活物質粒子ごとにSPMのプロブを接触させて、8Vのバイアス電圧を印可し、電流値から抵抗値を算出した。抵抗値が、50 M Ω 未満、50 M Ω 以上、500 M Ω 以上、1000 M Ω 以上で、計測し

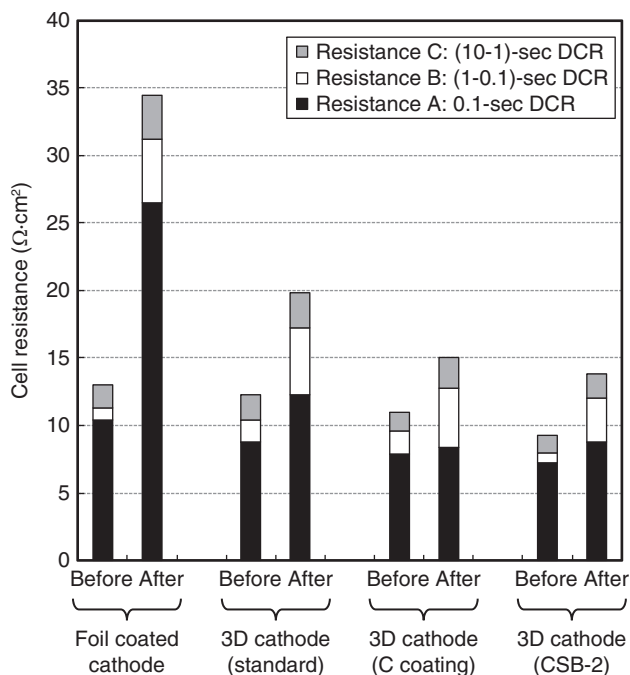
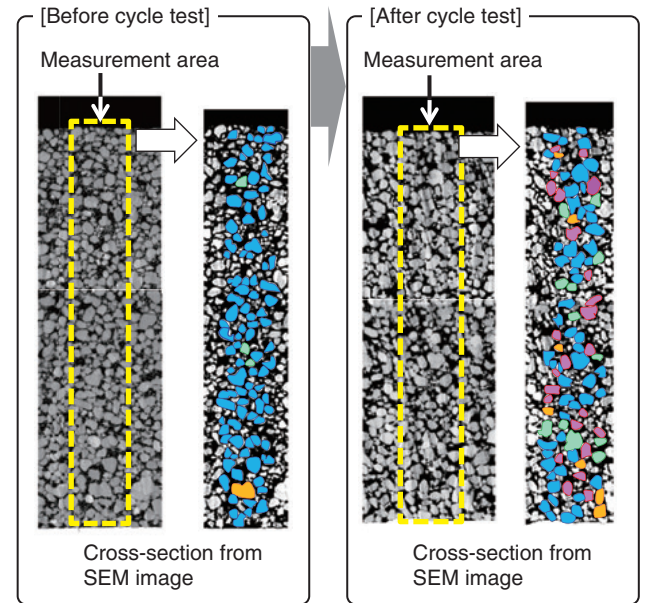
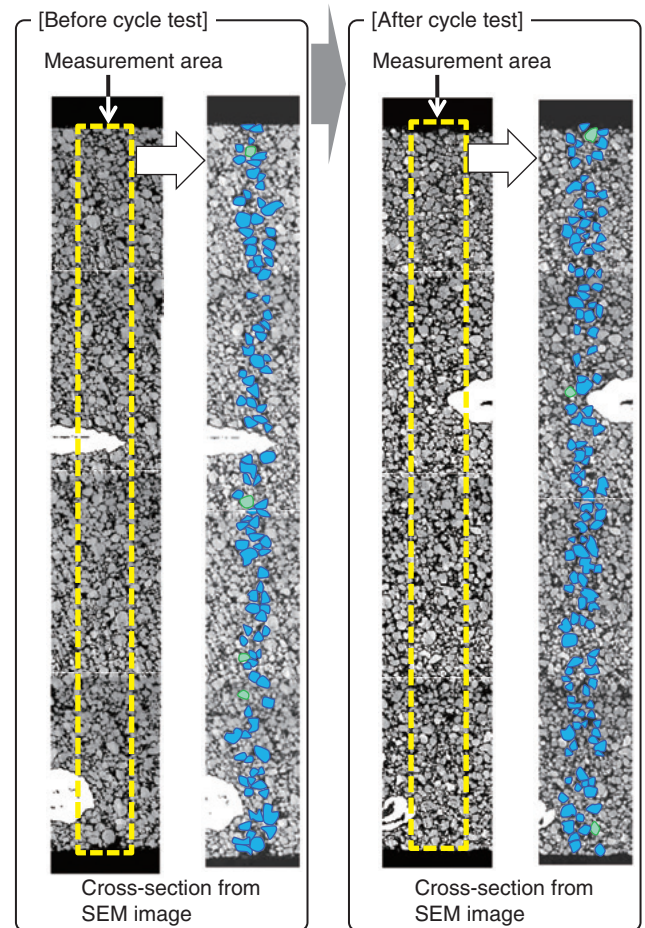


Fig. 12 Resistance performance of cathodes retention

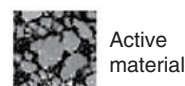


(a) Foil coated cathode

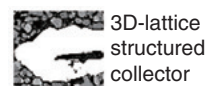


(b) 3D cathode (C coating)

● <50 M Ω , ● $\geq 50\ \text{M}\Omega$, ● $\geq 500\ \text{M}\Omega$, ● $\geq 1000\ \text{M}\Omega$



Active material



3D-lattice structured collector

Fig. 13 Results of conductivity measurements by SPM

た活物質を整理した。Fig. 14 に、各電極における活物質の抵抗値ごとの割合を整理したグラフを示す。Fig. 15 に 3D 正極 (C コート) の SPM 測定をアルミニウム集電体付近で計測した結果を示す。

Fig. 13 と Fig. 14 より (a) 集電箔正極のサイクル前後において、抵抗値の大きい活物質の割合が増加していることを確認した。つまり、厚膜化した塗工電極である (a) 集電箔正極では、サイクルを繰り返すことにより電極内の構造が変化し、活物質への電子伝導性が低下し、サイクル後の抵抗が増加すると考えられる。これは、Fig. 12 において、サイクル後に主たる抵抗成分が電子抵抗である抵抗 A が大幅に上昇していることと一致する結果である。

(b) 3D 正極 (C コート) では、サイクル前後における変化は、50 M Ω 以上の活物質は微増であった。したがって、3D

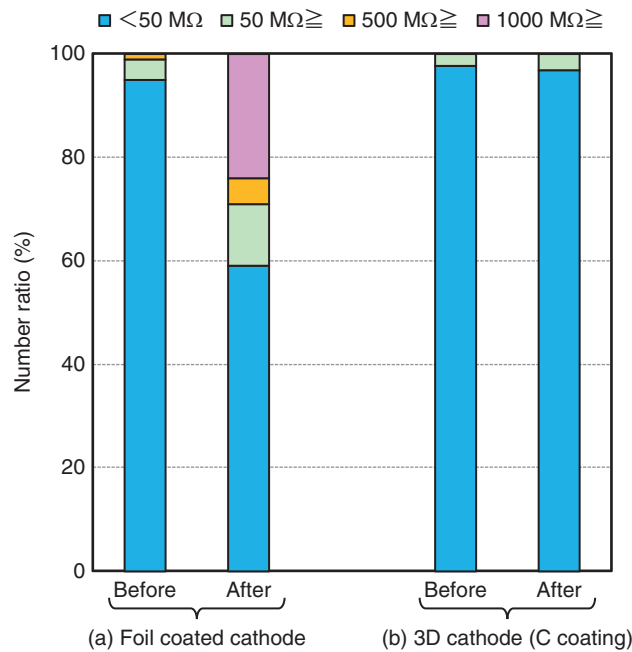


Fig. 14 Relationship between resistance and number of active materials retention

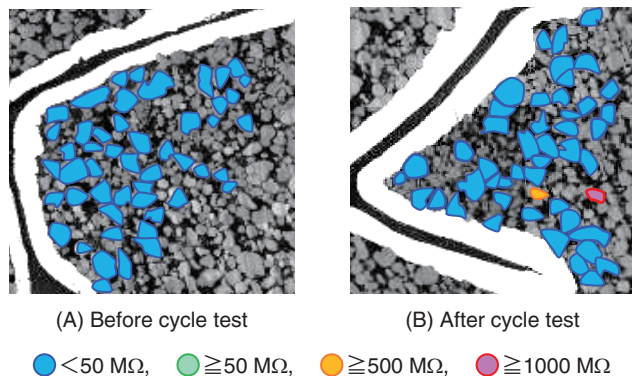


Fig. 15 Results of conductivity measurements of 3D cathode (C coating) by SPM

Table 6 Energy density of cell element

	Reference cell	3D cell
Cathode volume (mL)	4.64	4.56
Anode volume (mL)	4.38	4.52
Separator volume (mL)	1.38	0.81
Element volume (mL)	10.40	9.65
Capacity (Ah)	1.76	1.80
Cell Voltage (V)	3.62	3.61
Energy density (Wh/L)	614	674

正極では、サイクル前後において、活物質への導電性に変化がないことを確認した。3D 正極では、網目構造により集電体が電極の厚さ方向に関係なく一定の割合で存在する。また、Fig. 15 より集電体近傍の活物質の導電性が、耐久後も安定していることを確認している。つまり、3D 電極では厚膜化した場合でも、電極中に集電体が存在することで、サイクル中の構造変化を抑制し、且つ、活物質と集電体の距離が厚み方向で変化がないことで、活物質への電子伝導パスの断裂を抑制していると考えられる。特に、3D 正極 (C コート) ではカーボン被覆により活物質と集電体の接触性が向上したことで、効果がより向上したと考えられる。これは、Fig. 12 において、サイクル後の抵抗 A の上昇率が 6% 以内に抑制していることから明らかである。

4.5. 積層セル特性

Fig. 16 に、積層セルの定格放電試験における充放電曲線を示す。その放電容量からセルエレメント当たりの体積エネルギー密度を算出した結果を Table 6 に示す。リファレンスセル、三次元網目構造電極セル (以下、3D セル) の

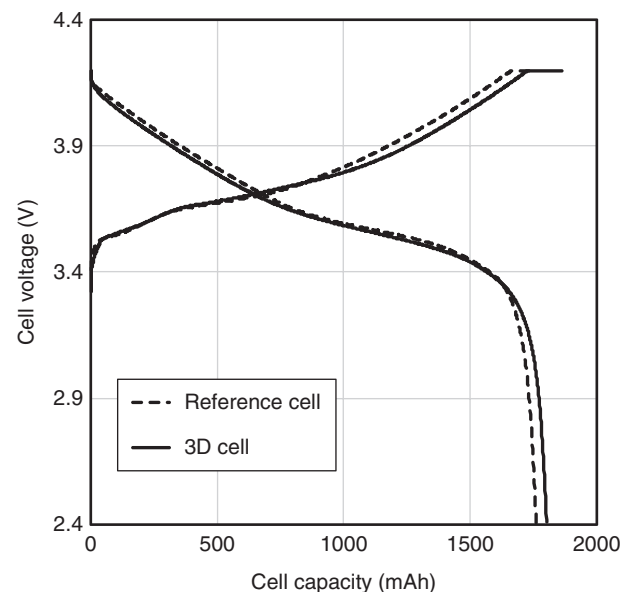


Fig. 16 Charge and discharge curves at 0.3 C

セルエレメント当たりの体積エネルギー密度はそれぞれ、614 Wh/L, 674 Wh/Lであった。したがって、3D 集電体の適用により、体積エネルギー密度が 9.8% 向上することが明らかになった。これは、3D 電極を適用することで、電極の厚膜化が可能となり、Table 4 に示したように電極の積層数が 9 枚から 5 枚に削減された結果、使用するセパレータの体積が 41.7% 削減され、セルエレメント中の活物質割合が増加することで体積エネルギー密度が向上したことを示している。

Fig. 17 に各セルの 10-sec DCR の結果を示す。リファレンスセル 100.5 mΩ に対し、3D セルで 85.1 mΩ で 15.4 mΩ の抵抗抑制を確認した。抵抗 A, 抵抗 B, 抵抗 C がリファレンスセルに対し 3D セルにおいて、それぞれ 24 mΩ の低減, 7.4 mΩ の増加, 1.3 mΩ の増加を確認した。したがって、抵抗 A を低減することで、全体抵抗値が抑制されることを確認した。小型セルによる電極の特性評価で確認したように、3D 電極は電極内に金属骨格が存在するために電子伝導性が向上することで、主たる抵抗成分が電子抵抗である抵抗 A が抑制される。一方で、主たる抵抗成分が反応抵抗である抵抗 B では、Fig. 8 で示した様にバインダの偏在等により抵抗が増加する。また、電極一枚の膜厚が、リファレンスセルの電極に対し 2 倍程度になることでイオン移動距離が増加し、主たる抵抗成分がイオン拡散抵抗である抵抗 C が増加すると考えられる。

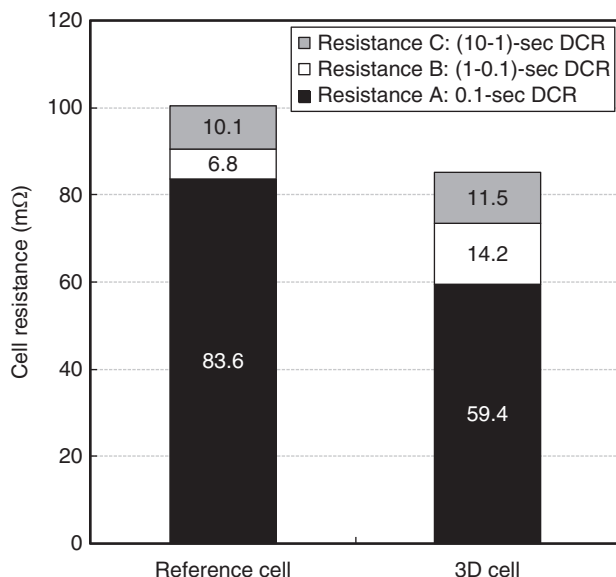


Fig. 17 Results of 10-sec DCR

5. まとめ

リチウムイオン電池への 3D 電極の適用において、課題対応策を実施し、以下の結果を得た。

(1) アルミニウム骨格の表面に導電性カーボンが被覆す

ることで、活物質が導電性のカーボン層を介し集電体に一様に接触していることを確認した。

- (2) 微粒導電助剤を溶媒分散状態で適用することで、各材料の分散性が向上していることを確認した。
- (3) 初期抵抗測定結果より、各抵抗成分の抑制効果を確認した。
- (4) 耐久性評価結果より、容量維持率向上と抵抗増加抑制の効果を確認した。
- (5) 耐久前後の導電性評価を実施し、3D 電極では耐久後においても導電パスの断裂を抑制していることを確認した。
- (6) 3D 電極による目付け量の向上に伴う電極積層数の削減の効果により、セルエレメントの体積エネルギー密度が集電箔電極セルの 614 Wh/L から、三次元網目構造電極セルにより 674 Wh/L と 9.8% の向上を確認した。

以上の結果より、3D 電極を適用することで、リチウムイオン電池のエネルギー密度の向上と、初期抵抗の抑制および耐久性の向上が可能であることを示した。

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係る検討, (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) 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)
- (6) 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)
- (7) 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: 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, Honda R&D Technical Review, Vol. 32, No. 2, p. 115-124
- (8) 加藤直貴, 小野寺伸也, 伊藤知之, 伊藤智博, 立花和宏, 仁科辰夫: 表面処理を施したアルミニウム集電体と電極合材との接触抵抗の発現要因, 化学・技術研究, 第 3 巻, 2 号, p. 157-164, (2014)

- (9) 本居徹也, 田中宏樹, 加藤治: リチウムイオン電池集電体用アルミニウム箔, UACJ technical Reports, Vol. 1, p. 125-130, (2014)
- (10) 海野裕人, 永田辰夫, 藤本直樹, 福田将大: リチウムイオン二次電池用鉄系金属箔集電体, 日本製鉄技報, 第412号, p. 173-183, (2019)
- (11) 和田徹也, 立花和宏, 木俣光正, 末広省吾, 芳尾真幸, 平井敏郎, 武内正隆, 武田真一, 内山知也, 長谷川政裕, 大澤善美, 大坪泰文, 大佐々邦久, 前野聖二, 松永昌之, 若原章博, 芝田隼次, 菰田悦之, 金村聖志, 院去貢, 井上義之, 綾部守久, 山田博俊, 藪内庸介: Li 二次電池電極材料のスラリー調整: 技術情報協会, p. 255-262, (2009)
- (12) 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)
- (13) 田尾洋平, 増田真規, 山福太郎, 森澄男, 佐々木丈, 稲益徳雄, 吉田浩明: 対称モデルセルを用いたリチウムイオン電池の直流抵抗の解析, GS Yuasa Technical Report, 第11巻, 第2号, p. 17-23, (2014)

■ 著 者 ■



田名網 潔



田中 俊 充



磯谷 祐二



青柳真太郎



細江 晃 久



竹 林 浩



奥 野 一 樹



山本 琢 磨

ケイ酸塩系無機バインダを用いた高性能 Si 負極

High Performance Si Negative Electrode Composed of Silicate Inorganic Binder

高橋 牧子¹
Makiko TAKAHASHI
青柳 真太郎²
Shintaro AOYAGI
坂本 太地³
Taichi SAKAMOTO

木下 智博¹
Tomohiro KINOSHITA
向井 孝志³
Takashi MUKAI
山下 直人³
Naoto YAMASHITA

田名網 潔¹
Kiyoshi TANAAMI
池内 勇太³
Yuta IKEUCHI

要 旨

Si 負極の充放電に伴う体積膨張を抑制する目的で、ケイ酸塩系無機バインダを用いる検討をおこなった。

導電助剤により電極の密度を下げ、電極内部まで無機バインダが浸み込んだ Si 負極を用いることで、充放電に伴う電極膨張量を制御でき、集電体からの剥離と活物質層内の導電パス切断を抑えられたことにより、大きな可逆充放電容量を持つ高性能な Si 負極が実現できた。

その要因を解明するために、XPS 解析と STEM-EDX 解析をおこなったところ、無機バインダコート電極では、シロキサン結合ネットワークが形成され強固な結合が得られていること、Si と無機バインダが融合している界面相が形成されていることがわかった。

ABSTRACT

Use of a silicate inorganic binder was investigated with the goal of suppressing volume expansion of Si negative electrodes associated with charge-discharge.

Use of a Si negative electrode with the electrode density lowered by conductive carbon and with inorganic binder permeated to the electrode interior enabled control of the amount of electrode expansion associated with charge-discharge and suppression of delamination from the current collector and conductive path breakdown within the active material layer. This realized a high-performance Si negative electrode with a large reversible charge-discharge capacity.

XPS analysis and STEM-EDX analysis were performed to elucidate these factors. The results showed that in electrodes coated with an inorganic binder, a network of siloxane bonds formed and strong bonds were obtained, and an interface phase in which the Si and inorganic binder are fused also formed.

1. まえがき

低炭素社会の実現に向けて、電気自動車や燃料電池自動車の開発、普及は解決策の一つである。リチウムイオン電池の車載適用に向けては、さらなる電池の高エネルギー密度化が望まれている^{(1),(2)}。そのアプローチの一つとして容量の大きな活物質材料を用いる方法が検討されている。Si は 4200 mAh/g と高い理論容量を有するため、次世

代のリチウム二次電池の負極用活物質として魅力的であるが、充放電反応に伴う体積変化が大きく、電極崩壊を招く。このため、電極構造を維持するための電極設計が重要である⁽³⁾⁻⁽¹⁰⁾。

Si 電極の電極構造維持のために、バインダ種や、導電助剤種、電極組成などの検討がおこなわれている⁽³⁾⁻⁽⁵⁾。Fig. 1 に示すように、バインダは「樹脂系バインダ」と「無機系バインダ」に大別することができるが⁽⁶⁾⁻⁽⁸⁾、本研究では、

¹ 先進技術研究所

² 先進パワーユニット・エネルギー研究所, 博士 (工学)

³ ATTACCATO 合同会社

電極構造を維持するための結着力が強いケイ酸塩系無機バイнда (以下無機バイндаと呼ぶ) に注目した⁽¹¹⁾。

無機バイнда $A_2O \cdot nSiO_2$ (A はアルカリ金属を示す) は加水分解によりシラノール ($-Si-OH$) 基が生成され、無機材料表面に水素結合により吸着、これを加熱することで脱水縮合反応が起こり、強固なシロキサン ($-Si-O-Si-$) 結合を形成できることが示されている^{(12), (13)}。

Si を活物質として利用した場合では、アルカリ性水溶液 ($pH \leq 11$) 下において活物質表面がエッチングされ、式 (1) に示す反応により、Si 表面に、 $-Si-OH$ 基が形成されることが予想される^{(14), (15)}。



この Si 表面のエッチング反応が起きることによって、Fig. 2 に示すように、無機バイндаの Si と活物質の Si が一体化し、特に Si 活物質を用いた場合において、強力な結着作用を示すことが期待できる。しかしながら、詳細な界面構造を示した報告は見当たらない。

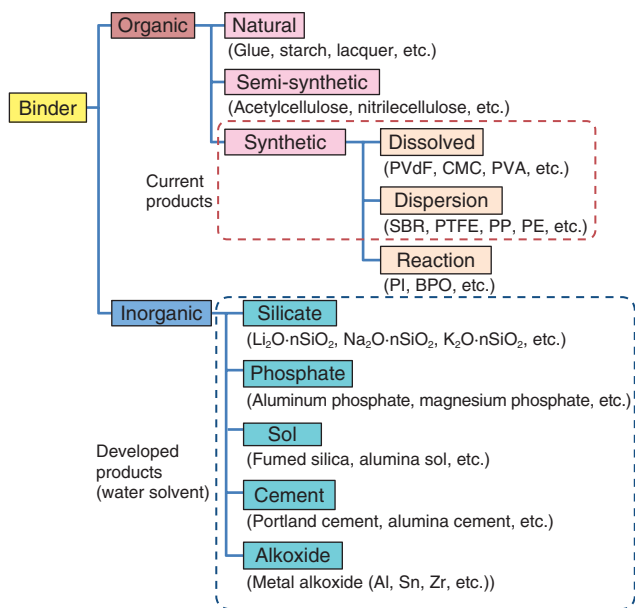


Fig. 1 Classification of binders

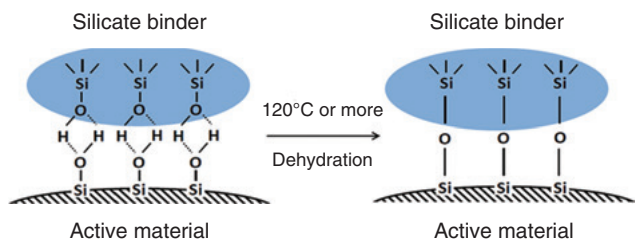


Fig. 2 Reaction mechanism of silicate inorganic binder

本検討では、無機バイндаにより、可逆充放電容量が向上した高性能 Si 負極を得ると同時に、無機バイндаの結着力の評価をし、結着力の向上要因である無機バイндаの結合様式と、Si 活物質と無機バイндаの界面構造を明らかにすることを試みた。

2. 実験方法

2.1. Si 負極サンプル試作

無機バイндаは、従来の樹脂系バイндаと比較して密度が大きいため⁽⁸⁾、スラリー塗工法で十分な結着力を得るには質量比では多めに加えなければならない。そこで、Fig. 3 に示すように無機バイнда水溶液を従来の電極に浸透後、熱処理することによって、骨格形成剤として適用する手法が検討されている⁽⁶⁾⁻⁽¹⁰⁾。このプロセスでは、無機バイндаを均一に、かつ内部まで浸透させるための電極構造が重要となり、無機バイндаを浸透させるための空隙調整が必要である。

導電助剤は導電パスの形成だけでなく、空隙に電解液を保液する役割も担っており、例えばアセチレンブラック (AB) では、鎖状構造 (ストラクチャー) が発達している程、導電性や保液性が高まることが示されている⁽¹⁶⁾。ここでは、無機バイндаの浸透性と導電性を向上させるために、ストラクチャーの異なる導電助剤 AB の検討をおこなった。

Fig. 4 に示すような物性の導電性助剤 AB1 と AB2 を用いて、Table 1 に示す水準の電極を作製した。AB2 は、AB1 と比較して小粒径でストラクチャーが発達しているため、無機バイндаの含浸性と導電パスの構築に優れると考えられる⁽¹⁶⁾。また、導電助剤量が増えることでも含浸性と導電性パスの向上が期待できる。

各々の導電助剤を用いて、バイндаとしてのスチレンブタジエンゴム (SBR) を 4 wt%，増粘剤としてカルボキシメチルセルロースナトリウム (CMC) 1 wt% を含むスラリーをそれぞれ調製した。次いで、調製した各スラリーを集電体 (銅箔) に塗布、乾燥後、各負極の前駆体を得た。前駆体の塗工量は、約 2.3 mg/cm^2 となるように調整した。このようにして得られたサンプル No. 2 から No. 4 の負極の

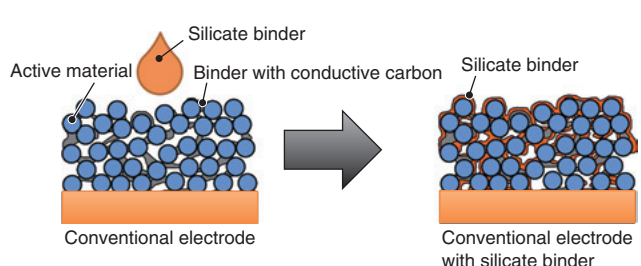


Fig. 3 Manufacturing process of Si electrode

Table 1 List of electrode samples

No.	Conductive carbon		Silicate binder
1	AB1	5 wt%	None
2			$K_2O \cdot 3SiO_2$
3		20 wt%	$K_2O \cdot 3SiO_2$
4	AB2	20 wt%	$K_2O \cdot 3SiO_2$

前駆体にスプレー法にて無機バインダ水溶液 ($K_2O \cdot 3SiO_2$ 10 wt%) を塗布し、浸透させた後、120℃ 乾燥炉にて加熱処理することによって、無機バインダを硬化させ、試験電極となる負極を得た。

2.2. サンプル評価

2.2.1. 電極直流抵抗測定

作製した各負極に対して、電極抵抗測定器システム RM2610 (日置電機株式会社製) を用いて、電極シートの合材層直流抵抗の測定をおこなった。

2.2.2. 電極断面観察及び無機バインダ分布

無機バインダをコートしたサンプル No. 2 から No. 4 の負極に対して、走査型電子顕微鏡 (SEM) による断面拡大観察を実施した。また、電子プローブマイクロアナライザ (EPMA) により無機バインダ由来成分であるカリウム (K) 元素マッピングをおこない、断面における無機バインダの浸透度の分布を調べた。観察用試料は各負極を 5 mm ϕ サイズに各負極から打ち抜き、次いで電極面積が半分になるように切断後、得られた切断面を Ar イオンミリングで断面加工することにより作製した。

2.2.3. バインダ結着力評価

No. 1 と No. 2 の負極に対して電極内部の結着力を評価するために表面・界面物性解析 (SAICAS) によるせん断強度の評価をおこなった。測定条件をボラゾン刃 (刃幅 1.0 mm)、すくい角 20°, 逃げ角 10°, 水平速度 2 $\mu\text{m/s}$ 、垂

直速度 0.2 $\mu\text{m/s}$ とし、深さ 5 μm 、10 μm 、15 μm の 3 点に対して刃を水平移動させ、式 (2) によりせん断強度を求めた。

$$\tau = \frac{F_h}{2wd \cot \phi} \quad (2)$$

τ : せん断強度

F_h : 水平荷重

w : 刃幅

d : せん断厚さ

ϕ : せん断角度

みなしせん断強度は $\phi = 45^\circ$ とする。

2.2.4. 電極中の Si-O 結合解析

無機バインダコート電極では、無機バインダによる Si-O の結合が新たに形成されているかを確認するため、X 線光電分光法 (XPS) による解析をおこなった。No. 1 と No. 2 の負極に対して、XPS 測定をおこない、Si 2p 付近のスペクトルを比較した。Si-O の結合比率は、スペクトルの面積比率により算出した。

2.2.5. 活物質と無機バインダ界面解析

無機バインダコートした No. 2 の負極に対して、走査透過型電子顕微鏡 (STEM) により無機バインダのコート状態と、活物質と無機バインダの界面組成の解析をおこなった。STEM 観察は、約 300 nm 角域について実施し、界面相の有無と界面相の厚みを調べた。また、エネルギー分散型 X 線分析 (EDX) による元素分析をおこない、EDX スペクトル強度から、活物質、界面相及び無機バインダ相のそれぞれにおけるアルカリ金属原子の構成原子全体に対する割合 (at%) を推定した。加えて、EDX による元素マッピング測定を実施した。

2.3. セル評価

2.3.1. コインセル試作

試験電極となる負極 ($\phi 14$ mm) と、対極にリチウム金属箔 ($\phi 16$ mm)、セパレータにガラス不織布 (アドバンテック製, GA100)、電解液にヘキサフルオロリン酸リチウム ($LiPF_6$) をエチレンカーボネート (EC)、エチルメチルカーボネート (EMC)、ジエチルカーボネート (DEC) に溶解させた電解液 (1.1 M $LiPF_6$ /EC:EMC:DEC = 3:4:3 vol.) を用いてコインセル (R2032) を作製した。

2.3.2. コインセル評価

試験環境温度を 25℃、電流密度を 0.025 C-rate、カットオフ電位を 0.01 V から 1.5 V (potential versus Li^+/Li) として各負極の初回充放電時における容量を確認した。

2.3.3. 充放電後の電極断面観察

初回充放電後のコインセルを解体し、No. 1 と No. 2 の負極の断面 SEM 観察をおこなった。

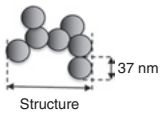
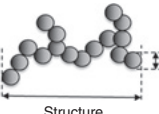
Item	AB1	AB2
Particle size (nm)	37	23
Specific surface area (m^2/g)	58	133
Quantity of iodine adsorption (mg/g)	82	180
Packing density (g/ml)	0.08	0.05
Image of AB structure		

Fig. 4 Physical property values of conductive carbons

3. 結果と考察

3.1. 導電助剤による無機バインダ浸透度

3.1.1. 電極密度と無機バインダ量

各負極サンプルの無機バインダの質量比、前駆体電極の密度、無機バインダ塗工後の密度を Table 2 に示す。AB1 では、無機バインダ塗工前の電極密度は、導電助剤量を増やすことで大きくなった。無機バインダ比率は導電助剤量によって大きな変化はなかった。小粒径で、鎖状構造が発達している AB2 を用いた電極では、導電助剤量 20 wt% で、電極密度が大幅に下がり、AB1 と比較して無機バインダ塗工量も増加した。これらの結果より、小粒径で鎖状構造が発達している導電性助剤を多く用いることで、電極密度を下げられ、電極密度が下がることにより、電極中の空隙が増えたことで、十分な無機バインダ水溶液量を含浸できたと考えられる。

3.1.2. サンプル合材層直流抵抗

Fig. 5 に各負極の電極合材層の直流抵抗値を示す。無機バインダなしの No. 1 と無機バインダありの No. 2 を比較すると、無機バインダ塗工による抵抗上昇は僅かであった。導電助剤量が 5 wt% である No. 2 と、20 wt% である No. 3 では、導電助剤量が増えることで抵抗は低下した。導電助剤量を増加させたことにより、電極内の電子伝導性が改善されたと考えられる。導電助剤量は同じであるが助剤種類が AB1 である No. 3 と AB2 である No. 4 を比較すると、AB2 を用いた No. 4 において、更に抵抗値が下がった。小粒径で鎖状構造の発達している AB2 の導電性能向上効果が大きいことがわかった。

3.1.3. サンプル断面観察と無機バインダ分布

Fig. 6 に、サンプル No. 2 から No. 4 の負極断面の SEM 画像と、無機バインダ由来成分である K 元素の EPMA マッピング図を示す。負極前駆体の密度が低かったサンプル No. 2 と No. 4 では、無機バインダ由来の K 元素が負極層全体の集電体界面まで十分に浸透していることが確認

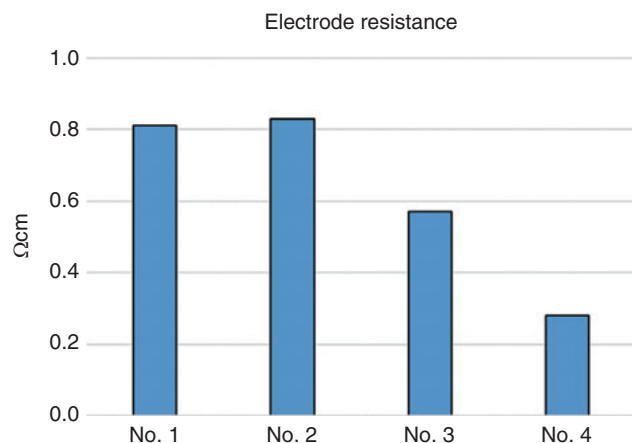


Fig. 5 Electrode DC resistance of samples

Table 2 Electrode density and silicate binder ratio

No.	Conductive carbon		Silicate binder ratio (wt%)	Electrode density (g/cm ³)	
				Precursor	With silicate binder
1	AB1	5 wt%	-	0.83	-
2			11		0.87
3		20 wt%	10.2	0.98	0.87
4	AB2	20 wt%	20	0.66	0.7

されたのに対して、負極前駆体の密度が高かったサンプル No. 3 では、K 元素が負極層の表面付近に偏在していることがわかった。

負極前駆体の電極密度が低いことで、負極前駆体中に空隙を形成でき、電極内部から集電体界面まで十分な無機バインダ水溶液を含浸できたと考えられる。一方密度が高いサンプル No. 3 では十分な空隙が得られないために、電極内部まで無機バインダを浸透できなかったと考えられる。

3.2. 無機バインダによる充放電性能改善効果

3.2.1. コインセル評価

負極サンプル No. 1 から No. 4 を用いたコインセルにおいて、容量測定をおこなった。Fig. 7 に、初回充放電カーブを、それぞれの初回充放電容量と効率を Table 3 に示す。

無機バインダコートにより、初回の可逆容量が 397 mAh/g から 2550 mAh/g に大幅に向上した。導電助剤量と無機バインダ量が多く、電極内部まで無機バインダが浸透していた No. 4 では、Si の理論容量に近い 4164 mAh/g の初回充電容量を示し、初回充放電効率は 93.3% という高い可逆性を示した。サンプル No. 4 では無機バインダの効果に加えて、電極内の電子伝導性が改善されたことにより放電特性が向上したと考えられる。一方、導電助剤量が多いが、無機バインダが表面付近のみに偏在していた No. 3 では、初回の充電はするものの、充放電効率が僅か 19% であり、無機バインダの効果は小さかった。無機バインダの効果を十分に発揮するためには、無機バインダが電極内部まで十分に浸み込んでいることが重要であることがわかった。

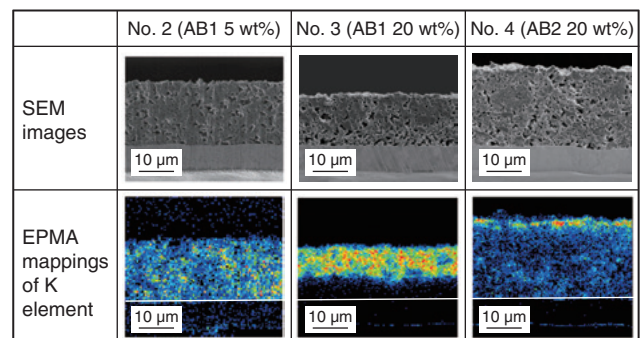


Fig. 6 Cross-section SEM images and EPMA mappings of K element

Table 3 First charge-discharge capacity and efficiency

No.	Capacity (mAh/g)		Efficiency (%)
	Charge	Discharge	
1	2346	397	16.3
2	3059	2550	83.4
3	3657	695	19.0
4	4164	3885	93.3

3.2.2. 充放電後断面 SEM 観察

コインセル評価にて初回充放電をおこなった後の No. 1 と No. 2 の電極断面 SEM 画像を Fig. 8 に示す. 無機バインダコートなしの電極では, 電極合材層の体積膨張が大きく, また集電体付近の剥離が確認された. 初回充電時に剥離が起こったことで, 導電パスが断裂されたため, 放電できなかったと考えられる. 無機バインダコート Si 電極では, 電極内のクラックは一部存在するものの, 体積膨張が抑えられ, また集電体からの剥離が確認されなかった. これらの結果から, 活物質と無機バインダの結合により電極の結着力が向上したことが, 可逆容量向上につながったと考えられる.

3.3. 無機バインダの結合作用解析

3.3.1. SAICAS による電極内部の結合力評価

Fig. 9 に No. 1 と No. 2 の電極の SAICAS において測定した電極内部のせん断強度 τ を示す. 電極内の結着力を示

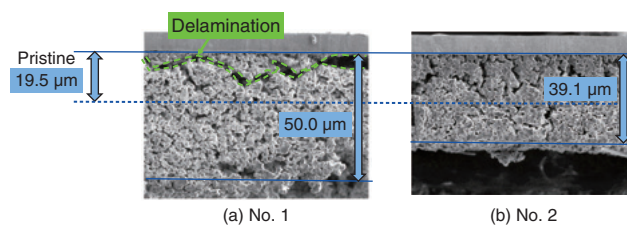


Fig. 8 Cross-section SEM images after first cycle

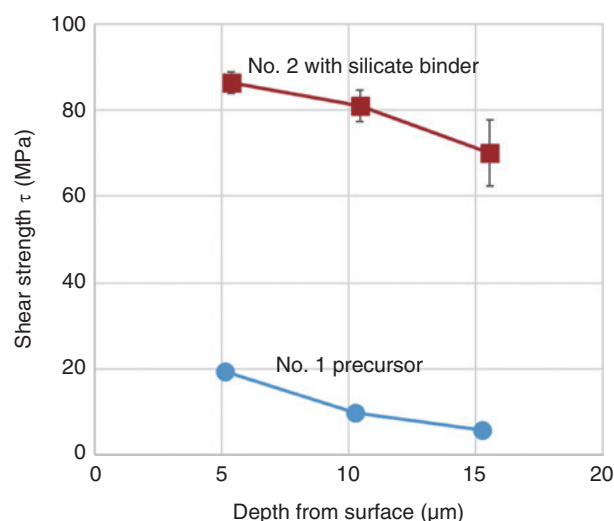


Fig. 9 Shear strength in electrode

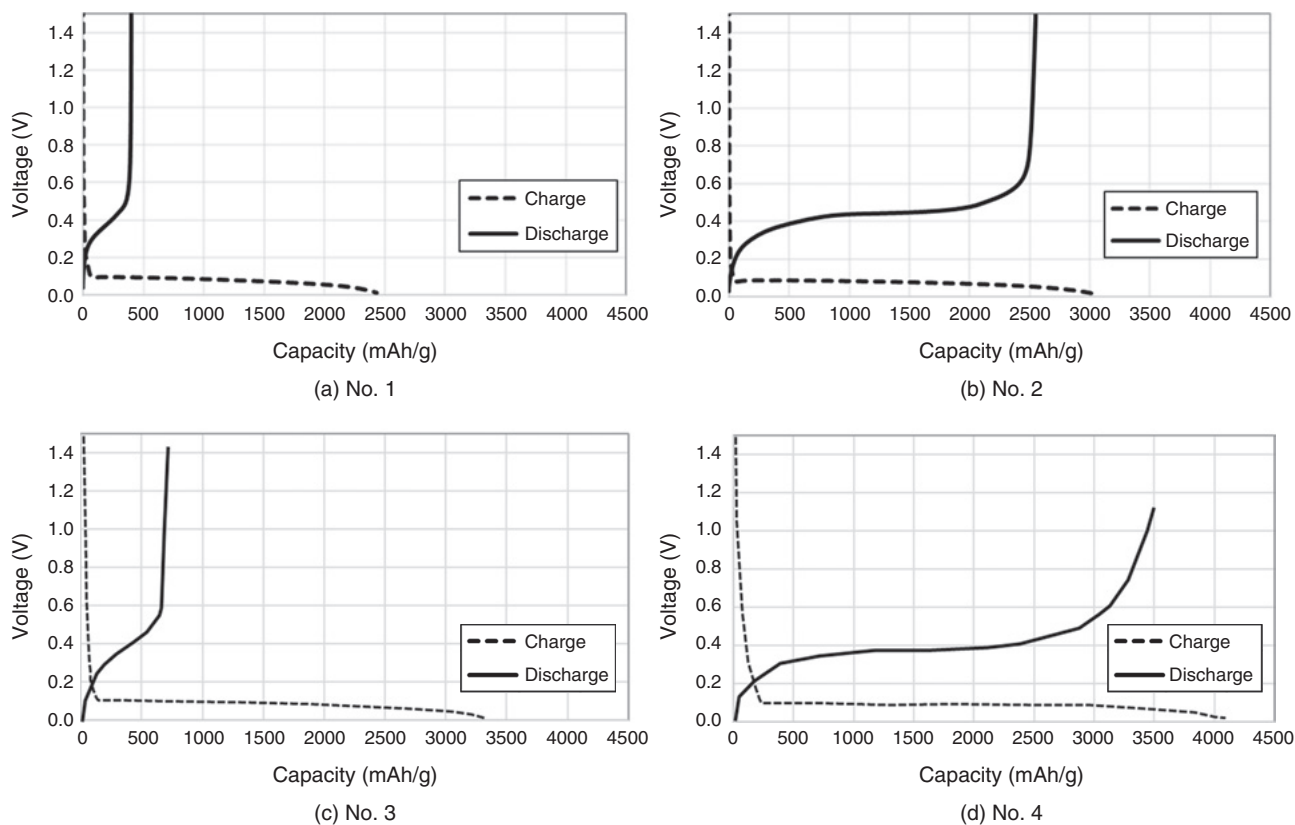


Fig. 7 First charge-discharge curves of Si/Li coin cells at 0.025 C

Table 4 Si-O bonding ratio for all Si

Sample	Si-O bonding ratio (%)
No. 1 precursor	32
No. 2 with silicate binder	48

せん断強度は、無機バインダコートにより 4 倍ほど増加した。無機バインダコートにより、電極合材内が強固に結合していることがわかった。深さ方向が増加するに従って強度が下がる傾向であった。これは無機バインダ塗工前の SBR バインダ分布が影響していると考えられる。無機バインダの有無に関わらず傾きはほぼ同じであることから、無機バインダは内部まで均一に分布し、強度を向上させていると推測される。

3.3.2. XPS による Si-O 結合解析

Fig. 10 に No. 1 と No. 2 の電極の XPS 測定した Si 2p スペクトルを示す。いずれのサンプルも、Si-Si の結合を示すピーク (99 eV 付近) と Si-O 結合を示すピーク (103 eV 付近) が確認できた。検出された全ての Si に占める Si-O 結合の割合を Table 4 に示す。無機バインダコートにより、全ての Si に対する Si-O 結合の割合が増加していることが確認できた。このため、Si 活物質表面付近に元々存在していた SiO_2 に加えて、無機バインダコートしたものでは、ケイ酸塩由来の Si-O 結合が増加したと考えられる。

また、無機バインダコートしたものでは、Si-O 結合ピークが低エネルギー側にシフトしていた。 SiO_2 の結合エネルギー 103.2 eV から 103.9 eV に対して、ケイ酸塩は 102 eV から 103 eV であったため、無機バインダ由来の Si-O 結合の増加に起因してピークシフトが起こったと推定できる。これらの結果から、無機バインダコートしたものでは、無機バインダ由来の強固な Si-O 結合のネットワークが形成されていることが示唆される。

3.3.3. 活物質 - 無機バインダ界面解析

Fig. 11 にサンプル No. 2 の 18 μm 角内における EDX

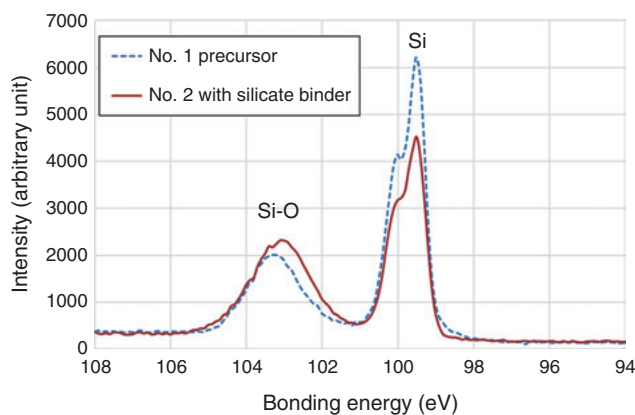
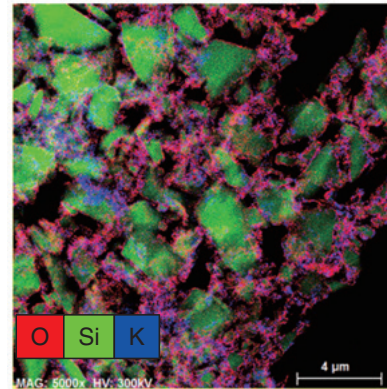
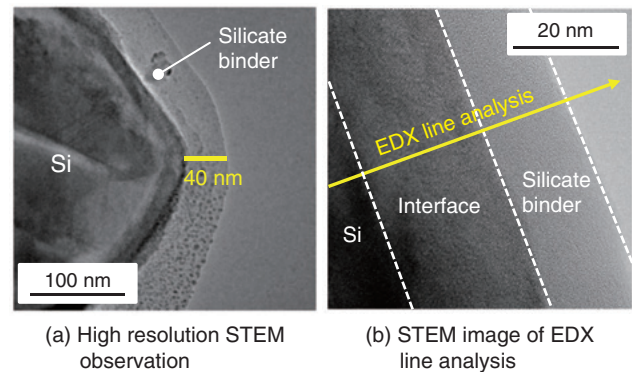


Fig. 10 XPS spectra of Si 2p peak of Si electrode

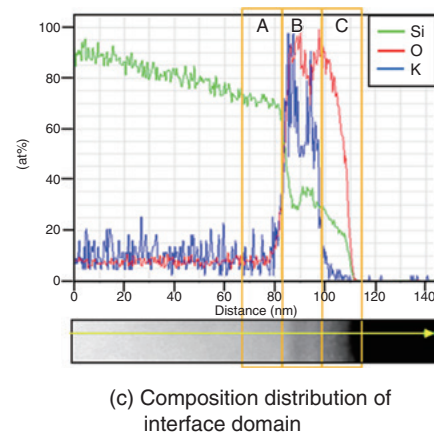
マッピング図を示す。Si 活物質周辺に無機バインダ成分である O 元素と K 元素が観察された。

Fig. 12(a) に Si 活物質表面の STEM 像を示す。Si 活物質表面上に、厚さ約 40 nm 程度の無機バインダ相が確認できた。Fig. 12(b) の Si 活物質と無機バインダの界面領域において、矢印の方向に Si 元素, O 元素, K 元素の EDX ライン分析した結果を Fig. 12(c) に示す。Fig. 12(c) に示すように、活物質相 A, 界面相 B, 無機バインダ相 C とした時


Fig. 11 EDX mapping (18 μm $\times$ 18 μm) of electrode No. 2


(a) High resolution STEM observation

(b) STEM image of EDX line analysis



(c) Composition distribution of interface domain

Fig. 12 STEM image and EDX line analysis of Si surface

Table 5 Element ratio of interface domain

	Phase A Si grain	Phase B Interface	Phase C Silicate binder
Si (at%)	93.8	43.9	37.8
O (at%)	6	54.4	62.1
K (at%)	0.2	1.7	0.1

の、各相における元素比率を Table 5 に示す。界面相の元素分布をイメージ化した図を Fig. 13 に示す。界面相 B では、無機バインダ相 C と比較して K 元素の含有量が多く存在していることがわかった。この原因としては、式 (1) によって活物質の Si と無機バインダが反応し、Si 表面がエッチングされると同時に、無機バインダの中和が進行したため、アルカリ金属が塩として活物質表面である界面相に多く析出されたと考えられる。すなわち、活物質の Si 表面がエッチングにより溶解することで、無機バインダと強い結合力を有する -Si-O-Si- 結合を形成し、無機バインダと一体化することで、より強固な界面を形成できていることが推測できる。

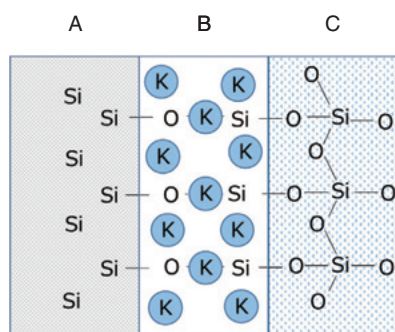


Fig. 13 Element distribution model of interface domain

4. まとめ

導電助剤の調整した Si 負極にケイ酸塩系無機バインダを適用した。電極内部まで無機バインダを浸透させることで、充放電に伴う電極膨張量を制御でき、集電体からの剥離を抑えられたことにより、大きな可逆充放電容量を持つ高性能な Si 負極が実現できた。その要因を解析したところ、以下の結論を得た。

無機バインダコートにより、電極内部の結合力が、コートなし電極の 4 倍程度向上した。XPS 解析により、電極内に無機バインダによる Si-O 結合が形成されていることがわかった。

活物質 - 無機バインダ界面の組成分析をおこなったところアルカリ金属元素が多く存在する界面相が存在している

ことがわかった。この界面相は、Si 表面がアルカリ性水溶液によってエッチングされ、Si と無機バインダが一体化しているという仮説を支持している。

Si の膨張収縮に耐え得る電極骨格を維持できる高性能 Si 負極の実現には、無機バインダ同士の -Si-O-Si- 結合に加えて、Si と無機バインダが融合している界面相の形成が重要であることを明らかにした。

参考文献

- (1) 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係る検討, (2016)
- (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:EV・PHV ロードマップ検討会報告書, (2016)
- (3) 向井孝志, 山下直人, 池内勇太, 坂本太地:『シリコン系負極』の充放電特性の向上と膨張対策 ケイ酸系無機バインダを用いた Si 負極の電極特性, Material stage, Vol. 17, No. 5, p. 29-33, (2017)
- (4) Liu, W.-R., Guo, Z.-Z., Young, W.-S., Shieh, D.-T., Wu, H.-C., Yang, M.-H., Wu, N.-L.: Effect of electrode structure on performance of Si anode in Li-ion batteries: Si particle size and conductive additive, Journal of Power Sources, Vol. 140, Issue 1, p. 139-144, (2005)
- (5) Qiao, H.-B., Tian, X.-M., Yi, T.-F.: Electrochemical Properties of Si Negative Electrodes Bonded with Partially Hydrolyzed Polyacrylamide for Li-ion Batteries, International Journal of Electrochemical Science, Vol. 8, Issue 7, p. 9414-9420, (2013)
- (6) Li, J.-T., Wu, Z.-Y., Lu, Y.-Q., Zhou, Y., Huang, Q.-S., Huang, L., Sun, S.-G.: Water Soluble Binder, an Electrochemical Performance Booster for Electrode Materials with High Energy Density, Advanced Energy Materials, Vol. 7, Issue 24, 1701185, (2017)
- (7) 向井孝志, 池内勇太, 坂本太地, 山下直人, 木下智博, 高橋牧子, 田名網潔, 青柳真太郎:第 II 編 第 2 章 シリコン負極用無機ケイ酸系バインダー, リチウムイオン二次電池用シリコン系負極材の開発動向, シーエムシー出版, p. 164-170, (2019)
- (8) 向井孝志, 池内勇太, 坂本太地, 山下直人:第 3 章 負極材料の開発, ポストリチウムに向けた革新的二次電池の材料開発, エヌ・ティー・エス, p. 145, (2018)
- (9) 向井孝志, 柳田昌宏, 坂本太地:第 4 章 第 2 節 リチウムイオン二次電池の特性向上に向けた粉体技術, リチウムイオン二次電池～高容量化・特性改善に向けた部材設計アプローチと評価手法～, 情報機構, p. 210-219, (2017)

- (10) 岩成大地, 吉田一馬, 田中一誠, 池内勇太, 坂本太地, 山下直人, 向井孝志: 第7章 第4節 シリコン粉末の製造方法とケイ酸系無機バインダを用いた DG-Si 負極の電極特性, 次世代電池用電極材料の高エネルギー密度, 高出力化, 技術情報協会, p. 145, (2017)
- (11) Fuchs, J. N.: Ueber ein neues Product aus Kieselerde und Kali; und dessen nützliche Anwendung als Schuzmittel gegen schnelle Verbreitung des Feuers in Theatern, als Bindemittel, zu firnißartigen Anstrichen u.s.w., Polytechnischen Journals, 17, CIV, p. 465-481, (1825)
- (12) Arkles, B., Steinmetz, J. R., Zazyczny, J., Mehta, P.: Factors contributing to the stability of alkoxysilanes in aqueous solution, Silanes and Other Coupling Agents, p. 91-104, (1992)
- (13) 福島敏夫: 水ガラス系無機結合材の塗膜の硬化及び劣化機構, マテリアルライフ, Vol. 6, No. 3, p. 146-157, (1994)
- (14) 外赤隆二: 高速シリコン異方性エッチング液, 表面技術, Vol. 59, No. 2, p. 104-106, (2008)
- (15) 森永均: 新材料対応洗浄技術, 応用物理, 第70巻, 第9号, p. 1067-1073, (2001)
- (16) 永井達也: 第3章 第7節 高エネルギー密度化に向けた導電剤の分散性向上技術, リチウムイオン二次電池～高容量化・特性改善に向けた部材設計アプローチと評価手法～, 情報機構, p. 166-181, (2017)

■ 著 者 ■



高橋 牧子



木下 智博



田名網 潔



青柳真太郎



向井 孝志



池内 勇太



坂本 太地



山下 直人

リチウムイオン電池用電解液の酸化電位と絶対ハードネスの関係

Oxidation Potential and Absolute Hardness Relationship in Lithium-ion Battery Electrolytes

森田 善幸¹
Yoshiyuki MORITA

前山 裕登¹
Hiroto MAEYAMA

古川 敦史¹
Atsushi FURUKAWA

要 旨

リチウムイオン二次電池の高電圧作動に対応するため、電解液の耐酸化性の向上を検討した。カーボネート溶媒の側鎖をフッ素化アルキル置換、主鎖の炭素を硫黄もしくは酸素に置換した分子モデルを作成し、DFT 計算による構造最適化をおこなった。構造最適化後のフロンティア軌道エネルギーから絶対ハードネスを算出し、線形掃引ボルタメトリーから求めた酸化電位との相関を検証した結果、比例関係が示唆された。絶対ハードネスを指標として、カーボネート溶媒以上の耐酸化性が予想されたスルホラン、フッ素化アルキルエーテルを混合して試作電解液を調製した。高電位作動正極として注目されている $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4$ を用いて、充放電サイクル試験による放電容量維持率を測定した結果、放電容量維持率 80% に到達するサイクル数がカーボネート電解液使用時の 45 サイクルから 80 サイクルに向上した。

ABSTRACT

In this paper, we investigated the increase in oxidative stability of electrolytes in order to respond to the high-voltage operation of Li-ion rechargeable batteries. DFT geometry optimization calculations were performed for those molecular models of which side chain in the carbonate solvent substituted with a fluorinated alkyl group and the carbon in the main chain substituted with sulfur or oxygen. Linear correlation was found between the absolute hardness calculated from the frontier orbital energy following structural optimization and the oxidation potential determined by linear sweep voltammetry. Taking absolute hardness as an index, a mixed solvent of fluorinated alkyl ether and sulfolane, which was predicted to have better oxidative stability than carbonate solvent, was prepared as a prototype electrolyte. We then measured discharge capacity retention by a cyclic charge-discharge test using a battery with $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4$, which is a well-known cathode material for high-potential operation. The result showed that the number of cycles taken to reach a discharge capacity retention index of 80% increased from 45 cycles, which is the figure when using carbonate electrolyte, to 80 cycles, which is the prototype.

1. まえがき

2019 年のノーベル化学賞はリチウムイオン二次電池 (LiB) の発明と普及の功績により Whittingham, Goodenough, 吉野らに授与された⁽¹⁾。彼らの提唱したインターカレーション反応、 LiCoO_2 正極およびグラファイト負極に加えて、Harris が基本概念を提唱した非水系有機電解液⁽²⁾も LiB を構成する重要な部材である。非水系有機電解液 (以下、電解液) は、含水率を ppm レベルまで低減した有機溶媒に Li 塩を溶解した液体であり、充放電反応における正極、負極間の Li イオン伝導を担う。含水率の低減による水の電気分解抑制は 3 V 以上のセル電圧を実現し、

LiB の小型軽量化、高出力化に寄与した⁽³⁾。

電解液に要求される主な特性は広い電位窓と高いイオン伝導率であり、それらは電池の作動電圧、入出力特性に影響を及ぼすことが知られている⁽⁴⁾。有機溶媒には数多くの種類があり、それらの中から広い電位窓の有機溶媒を選定するために、1970 年代から電気化学測定結果の蓄積、溶媒の選別がなされた結果⁽⁵⁾⁻⁽⁹⁾、現在の電解液にはカーボネート溶媒が主成分として使用されている。

LiB の高エネルギー密度化に対する方策は、高電圧作動と高容量化に大別される。Fig. 1 に主な正極活物質の放電曲線を示す。 $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4$ (以下 LNMO4) は放電プラトーが 4.7 V vs. Li/Li^+ 付近に存在するため、高エネルギー密度に

¹ 先進技術研究所

資する正極活物質として注目されている。しかしながら、現在実用化されている $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{0.3}\text{Co}_{0.3}\text{O}_2$ 正極よりも約 1.0 V 高い電位での充放電反応は、電解液を酸化分解し、サイクル特性を低下させるため⁽¹⁰⁾、カーボネート溶媒よりも高い酸化電位を有する有機溶媒の探索が強く望まれている。

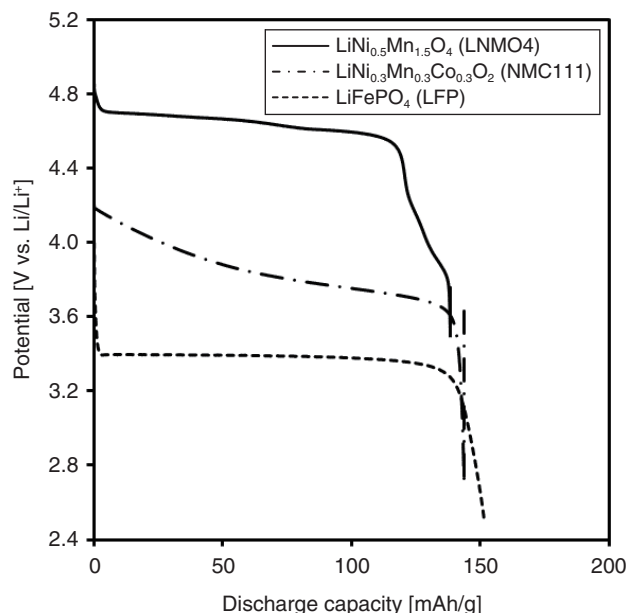


Fig. 1 Discharge curves for various cathodes

2. 計算科学による材料探索

近年の計算科学と連動した材料探索手法の精度および速度向上は目覚ましく⁽¹¹⁾⁻⁽¹³⁾、着目する材料物性値と相関のある計算指標が指定できれば、目的とする材料群の自動スクリーニングが可能である。本論文の主題である有機溶媒の酸化電位は、酸化体の全エネルギーと還元体の全エネルギーの差を標準化学ポテンシャルの差に近似して酸化還元電位を求める手法が知られているが⁽¹⁴⁾、数多くの有機分子をスクリーニングするためには、より計算負荷の少ない手法が望まれる。そこで、著者らは有機溶媒分子のフロンティア軌道に着目し、Highest Occupied Molecular Orbital (HOMO) および Lowest Unoccupied Molecular Orbital (LUMO) エネルギーから算出した絶対ハードネス (Absolute hardness: η) を材料探索の指標と定めた。

Pearson は、ある反応種が化学反応に抵抗する度合い、すなわちハードネスについてフロンティア軌道論をもとに定式化を検討し、式 (1) に示す絶対ハードネス (η) を提唱した^{(15), (16)}。

$$\begin{aligned} \eta &= (I - A) / 2 \\ &= (E_{\text{LUMO}} - E_{\text{HOMO}}) / 2 \end{aligned} \quad (1)$$

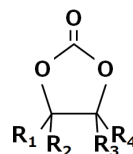
I と A はそれぞれ分子の第一イオン化エネルギーと電子親和力である。Koopmans の定理⁽¹⁷⁾によると、近似的に I は HOMO のエネルギー準位 (E_{HOMO})、 A は LUMO のエネルギー準位 (E_{LUMO}) と置き換えられるため、分子のフロンティア軌道のエネルギー差 (HOMO-LUMO Gap: ΔE) の中間が η となる。 η が大きいほど分子の熱力学的安定性が高いことが Parr らによって証明されており⁽¹⁸⁾、 η を化学反応の指標として用いた写真用カプラーの発色反応予測⁽¹⁹⁾、フェノール類の抗酸化能⁽²⁰⁾などが報告されている。本稿では、密度汎関数理論に基づく電子状態計算法 (以下、DFT 計算) から求めた有機溶媒の η と実測酸化電位の相関を検証し、耐酸化性が向上すると予想された有機溶媒のみで試作電解液を調合した。 η による耐酸化性推定の有効性は、LNMO4 の充放電サイクル特性により検証した。

3. 計算および実験方法

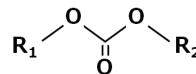
3.1. 有機溶媒の E_{HOMO} , E_{LUMO} エネルギー計算

検討対象の有機溶媒分子構造を Fig. 2 に示す。初期構造をエチレンカーボネート (Fig. 2(a), R_1 から R_4 は水素、以下 EC と記載)、およびジメチルカーボネート [Fig. 2(b), R_1 , R_2 はメチル基、以下 DMC と記載] とした。これら初期構造に対して、 R_1 から R_8 の側鎖延長 (CH_3 , C_2H_5 , C_3H_7)、フッ素化アルキル置換 ($\text{CH}_x\text{F}_{3-x}$, $\text{C}_2\text{H}_y\text{F}_{5-y}$, $\text{C}_3\text{H}_z\text{F}_{7-z}$, $x = 1$ から 3, $y = 1$ から 5, $z = 1$ から 7)、主鎖炭素の O, S 置換を実行した仮想分子モデル [Fig. 2(c-1) から (c-3)] を作成した。フッ素置換の狙いは、電子求引性の強いフッ素化アルキル置換基の導入によりカーボネートの電子密度を低下させ、正極に電子が奪われにくい、つまり酸化されにくい電子状態を構築することである。分子モデルの作製には Accelrys 社製 Pipeline Pilot を使用し、上記の置換基組み合わせによる仮想分子を自動作成し、続いて構造最適化および E_{HOMO} , E_{LUMO} , η の計算をおこなった。構造最適化

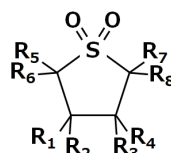
(a) Cyclic carbonate



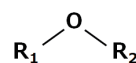
(b) Linear carbonate



(c-1) Cyclic sulfone



(c-2) Ether



(c-3) Linear sulfone

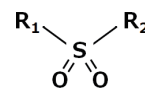


Fig. 2 Schematic illustration of organic solvent molecules

は、Accelrys 社製 DFT 計算パッケージ DMol^{3(21), (22)}を用いた。交換・相関汎関数は一般化密度勾配近似 (Generalized Gradient Approximation: GGA), 基底関数は 2 重数値基底関数 (Double numerical basis set with polarization function: DNP) を用いた。交換相互作用項は、エチレンカーボネートの E_{HOMO} について BOP⁽²³⁾, PW91⁽²⁴⁾, BLYP^{(25), (26)} による比較をおこなった結果, それらの差異は 0.2 eV 程度であったため, 多くの報告例がある BLYP を用いた。計算収束条件は 10^{-6} Hartree とした。

3.2. 線形掃引ボルタンメトリーによる酸化電位の測定

3.1. 節において計算をおこなった溶媒分子の中で, 合成および入手可能な溶媒について線形掃引ボルタンメトリー (Linear sweep voltammetry: LSV) を実施した。対象とする有機溶媒に六フッ化リン酸リチウム (LiPF_6) を 0.1 mol/L 溶解させ, Fig. 3 に示す電気化学セル中に 2.0 mL 滴下した。鎖状カーボネート (ジメチルカーボネート: DMC, エチルメチルカーボネート: EMC, ジエチルカーボネート: DEC) およびフッ素化アルキルエーテル (fluorinated alkyl ether: FAE) は LiPF_6 を完全溶解しなかったため, プロピレンカーボネート (以下 PC) を 10 vol% 混合した溶媒を調製し, LiPF_6 を完全溶解させた。作用極は白金板 (株式会社ニラコ製, 純度 99.98%, 直径 10 mm, 厚さ 0.1 mm) を研磨紙 (3M 社製, 3000 番) で研磨したものを使用した。対極および参照極は金属リチウム (本城金属株式会社製, 純度 99.9%, 厚さ 0.1 mm) を用いた。セパレータはポリオレフィン製微多孔膜 (Celgard 社製, 2500 番) を用いた。作成した電気化学セルを 25°C 恒温槽内に静置し, Solartron Analytical 社製ポテンショスタット / ガルバノスタット 1287/1255 を用いて走査速度 0.5 mV/sec., 開回路電位 (Open circuit potential: OCP) から 7.0 V vs. Li/Li^+ まで走査した。酸化電位は LSV 走査時のベースラインに対して酸化電流の傾きを直線内挿した交点と定義した。

3.3. LNMO4 正極合剤シートの作製

LNMO4 は既報の作製条件により固相法で合成した⁽²⁷⁾。正極合材層は LNMO4:導電材:バインダー = 91:4:5 の重量比で *n*-メチルピロリドン (NMP) 溶媒に分散したスラリー状態のインクをアルミ箔に塗工, シート化した。導電

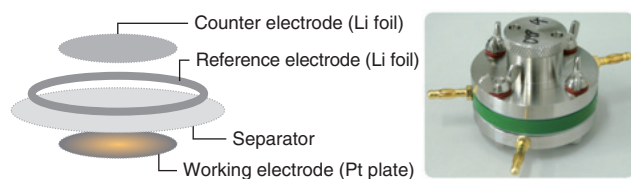


Fig. 3 Schematic illustration and cell appearance of three-electrode cell used for LSV

助材はデンカ株式会社製アセチレンブラック, バインダーは株式会社クレハ製 PVdF を NMP 溶液に溶解し使用した。正極合剤シートは電極密度が 3.0 g/mL となるようにプレスをおこなったのち, 直径 14 mm に打ち抜いた。

3.4. LNMO4 を用いた電気化学試験

LNMO4 正極の充放電可逆性は, LSV 測定構成 (Fig. 3) の作用極を白金板から正極合剤シートに変更し, サイクリックボルタンメトリー (Cyclic voltammetry: CV) により確認した。走査速度は 0.5 mV/sec., 電位範囲は 2.5 V から 5.4 V vs. Li/Li^+ の条件で実施した。充放電サイクル特性は, 2032 型コインセル内に正極合剤シート, セパレータ, Li 金属対極, 電解液を封止し, 25°C 恒温槽中にて実施した。上下限電位は 4.95 V から 2.6 V vs. Li/Li^+ , 充放電負荷は 0.1 C 定電流とした。

電解液は EC, EMC およびビニレンカーボネートを 30:69:1 の体積比で混合したカーボネート溶媒に LiPF_6 を 1.0 mol/L 溶解させた電解液 (以下, カーボネート電解液), および耐酸化性の向上が期待される有機溶媒から構成した試作電解液の 2 種類について試験を実施した。

4. 結果と考察

4.1. η と酸化電位の関係

有機溶媒の E_{HOMO} および E_{LUMO} 計算結果を Fig. 4 に示す。 η は E_{HOMO} および E_{LUMO} と式 (1) から計算されるため, Fig. 4 の斜線上が同じ値となる。カーボネート溶媒の基本

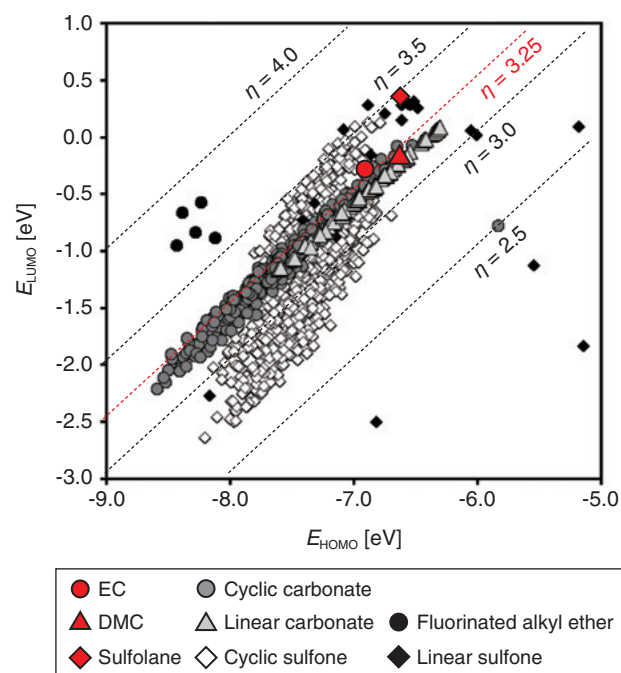


Fig. 4 HOMO and LUMO energy levels of various organic solvents

骨格である EC および DMC は、側鎖 R_1 から R_4 のフッ素化アルキル置換が E_{HOMO} を増加させ、 E_{LUMO} を減少させる傾向を示したが、 $\eta = 3.25$ から大きな増減は認められなかった。この傾向は、極性溶媒の ΔE が溶媒種によらずほぼ等しいという山木の結果⁽²⁸⁾と一致した。カーボネート溶媒およびそのフッ素化アルキル置換構造に対して、 η の増加が確認された骨格構造はフッ素化アルキルエーテルと一部の環状スルホン、鎖状スルホンのみであった。環状スルホンの基本構造であるスルホランに対して、側鎖 R_1 から R_8 のフッ素化アルキル置換をおこなった分子構造では有意な η の増加は認められず、ほぼすべての置換構造で η が低下した。

次に、DFT 計算を実施した溶媒構造のうち、入手可能な溶媒について LSV による酸化電位測定をおこなった。Fig. 5 に LSV 測定結果を示す。カーボネート有機溶媒系 [Fig. 5(a)] は、その分子構造によらず 4.8 V から酸化電流が確認された。フッ素置換溶媒系はフッ素化アルキルエーテル (FAE1 から FAE3) の酸化電流が 5.5 V 付近から確認され、カーボネート系溶媒よりも 0.7 V の耐酸化性向上が示唆された。主鎖に硫黄を含む溶媒系 [Fig. 5(c)] では、スルホランの酸化電流が 6 V 付近から確認され、カーボネート系溶媒よりも 1.2 V の耐酸化性向上が示唆された。以上

の LSV 測定結果から見積もられた有機溶媒の酸化電位と η の関係を Fig. 6 および Table 1 に示す。 η と酸化電位は、おおそ比例関係であることが示唆された。電解液の耐酸

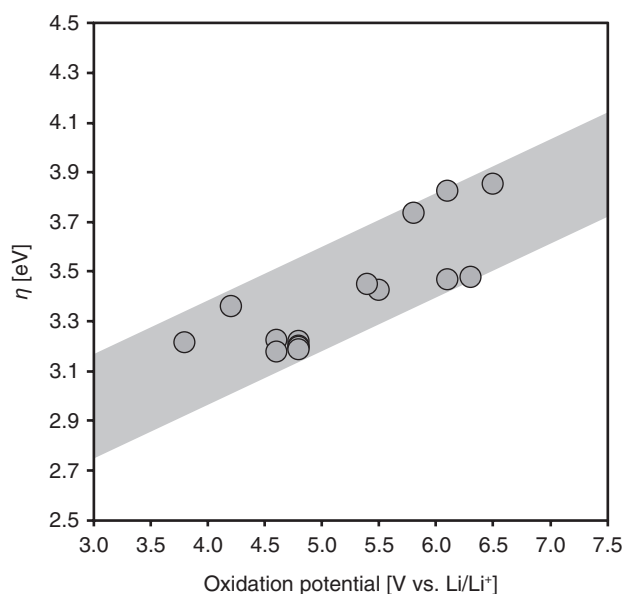


Fig. 6 Correlation between oxidation potential and η for several organic solvents

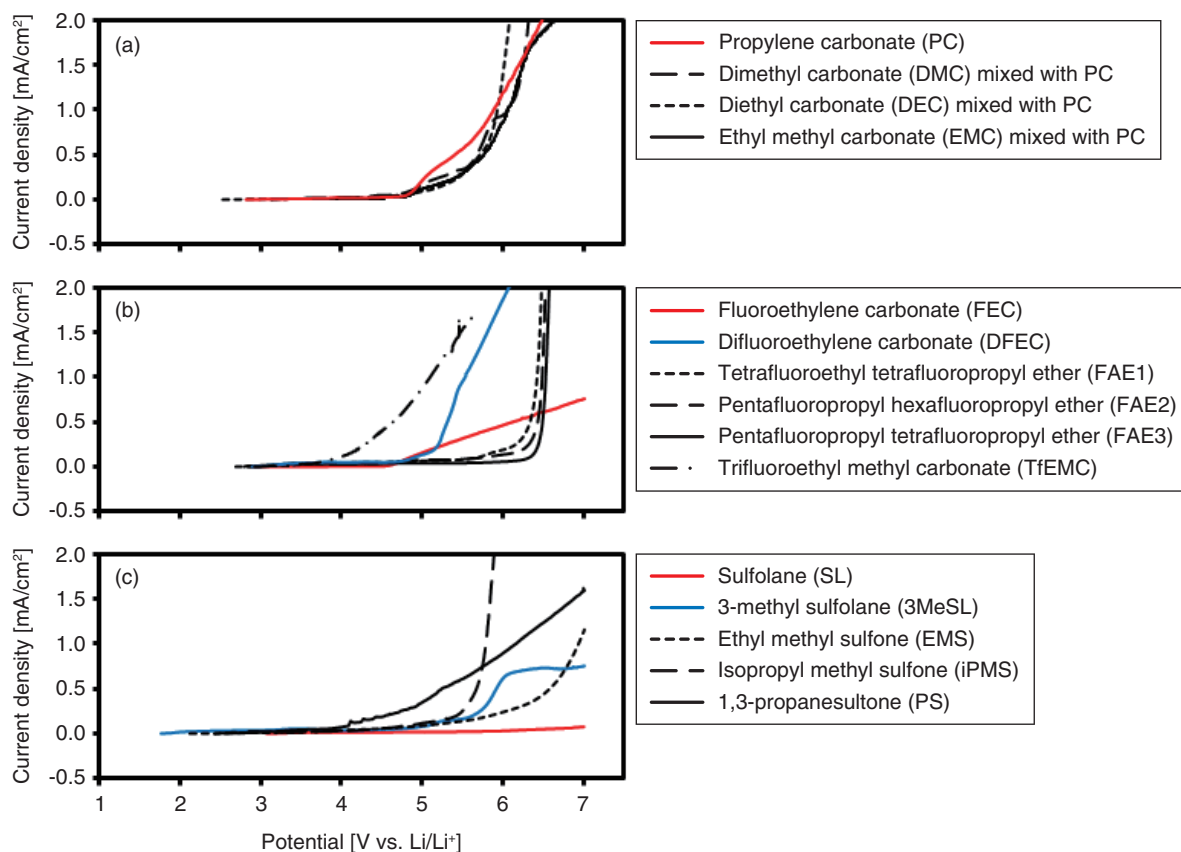


Fig. 5 LSV curves of (a) carbonate solvents, (b) fluorinate solvents, and (c) sulfonate solvents

Table 1 E_{HOMO} , E_{LUMO} , η , and oxidation potential of solvents

Solvent	E_{HOMO} [eV]	E_{LUMO} [eV]	η	Oxidation potential [V vs. Li/Li ⁺]
Propylene carbonate (PC)	-6.722	-0.279	3.222	4.8
Dimethyl carbonate (DMC)	-6.546	-0.143	3.201	4.8
Diethyl carbonate (DEC)	-6.367	0.010	3.189	4.8
Ethyl methyl carbonate (EMC)	-6.454	-0.063	3.196	4.8
Fluoroethylene carbonate (FEC)	-7.340	-0.885	3.228	4.6
Difluoroethylene carbonate (DFEC)	-7.747	-1.390	3.179	4.6
Tetrafluoroethyl tetrafluoropropyl ether (FAE1)	-8.233	-0.577	3.828	6.1
Pentafluoropropyl hexafluoropropyl ether (FAE2)	-8.426	-0.955	3.736	5.8
Pentafluoropropyl tetrafluoropropyl ether (FAE3)	-8.381	-0.672	3.855	6.5
Trifluoroethyl methyl carbonate (TFEMC)	-7.091	-0.655	3.218	3.8
Sulfolane (SL)	-6.603	0.333	3.468	6.1
3-methyl sulfolane (3MeSL)	-6.503	0.292	3.428	5.5
Ethyl methyl sulfone (EMS)	-6.750	0.210	3.480	6.3
Isopropyl methyl sulfone (iPMS)	-6.619	0.285	3.452	5.4
1,3-propanesultone (PS)	-6.867	-0.147	3.360	4.2

化性向上のためには、 η が大きな溶媒分子のみを用いて電解液を作製することが望ましいと考えられる。

4.2. 試作電解液の調合および電位窓の確認

耐酸化性の向上が期待される有機溶媒としてスルホラン (SL) とフッ素化アルキルエーテルの一種であるペンタフルオロプロピルテトラフルオロプロピルエーテル (FAE3)、およびビニレンカーボネート (VC) を 30:69:1 の体積比で混合した。この混合溶媒に LiPF_6 を溶解させたところ、0.7 mol/L 以上の濃度で不溶成分が確認されたため、 LiPF_6 を 0.6 mol/L となるように室温でかくはん溶解させたものを試作電解液とした。SL および FAE3 は、Li 金属負極上での還元被膜形成の有無について報告例が無い^{(29), (30)}ため、一般的な添加剤として VC^{(29), (30)}を用いた。

Fig. 7 に試作電解液の LSV 測定結果および LNMO4 正極のサイクリックボルタモグラムを併せて示す。酸化側掃引の結果より、試作電解液の酸化電流は 6.0 V vs. Li/Li⁺ から確認され、Fig. 5(a) で示したカーボネート系溶媒に対して約 1.2 V vs. Li/Li⁺ の耐酸化性向上を達成した。一方、還元側掃引においては、1.0 V vs. Li/Li⁺ 付近に VC の還元被膜形成によると思われる還元電流が、0 V vs. Li/Li⁺ に Li 金属析出と思われる還元電流が認められた。以上より、試作電解液の電位窓は 0 V から 6.0 V vs. Li/Li⁺ であることを確認した。次に LNMO4 の酸化還元反応が試作電解液の電位窓内で可逆的に進行するかを確認する

ために CV 測定をおこなった。Fig. 7 より、酸化ピークが 4.9 V vs. Li/Li⁺ に確認され、対応する還元ピークが 4.5 V vs. Li/Li⁺ に確認された。これらの酸化還元ピークは、試作電解液の電位窓で十分にカバーできる反応であることを確認した。

4.3. 充放電サイクル試験による耐酸化性向上効果の確認

Fig. 8 に LNMO4 正極を用いた充放電サイクル試験結果を示す。初回放電容量は、カーボネート電解液を用いたセル (以下、Cell_{conv}) では 137 mAh/g、試作電解液を用いたセル (以下、Cell_{proto}) では 134 mAh/g が得られた。LNMO4 の理論容量 (147 mAh/g) に対してそれぞれ 93%、91% の利用率であった。初回放電容量に対して 80% まで容量が低下するサイクル数を比較すると、Cell_{conv} は 45 サイクルであったのに対して、Cell_{proto} は 80 サイクルまで耐久性を増加させることができた。クーロン効率については、Cell_{proto} は 99% 前後であり、電解液の分解反応は起こっていないと考えられるが、Cell_{conv} は 32 サイクル経過後からクーロン効率の低下が確認された。54 サイクル経過後には Fig. 8 挿入写真に示すようにコインセル封止部分が開放され、充放電不可能となった。Fig. 5(a) に示した LSV 測定結果では、4.8 V vs. Li/Li⁺ 以上でカーボネート電解液の酸化が示唆されたことから、Cell_{conv} はカーボネート電解液の酸化によるガスが蓄積され、セル内圧上昇による封止部の解放を引き起こしたと推察される。

以上より、 η と酸化電位の関係をもとに溶媒選定をおこなった試作電解液は耐酸化性の向上が認められ、LNMO4 のサイクル寿命を約 1.7 倍長くすることに成功した。

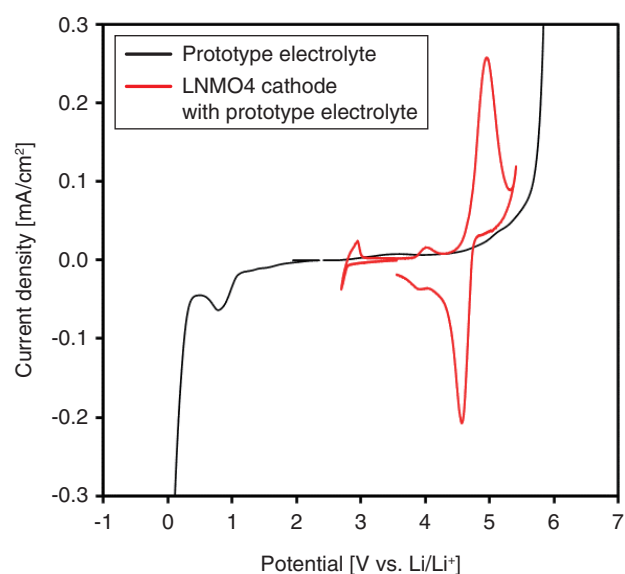


Fig. 7 LSV curve of prototype electrolyte and CV curve of LNMO4 cathode with prototype electrolyte

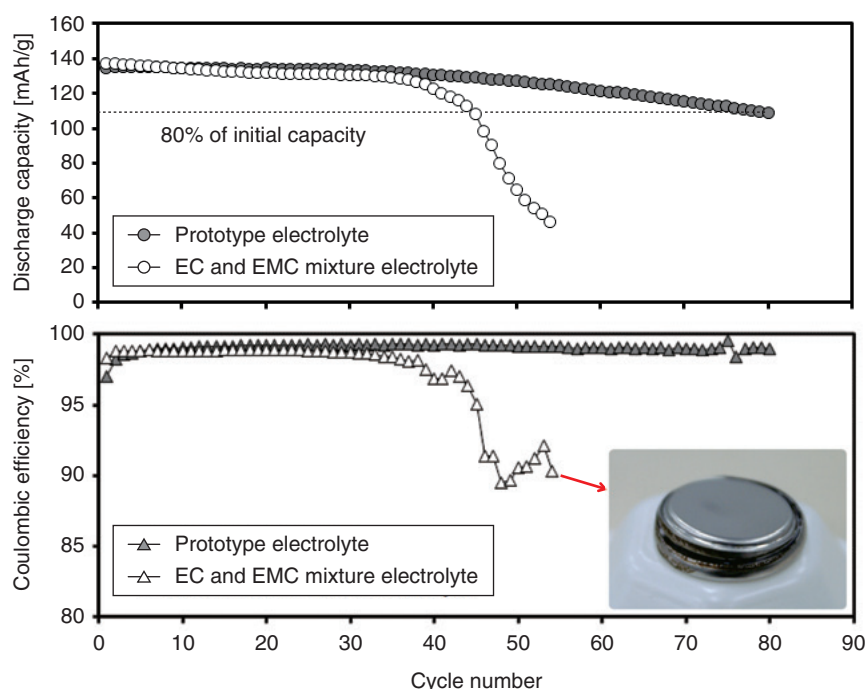


Fig. 8 Discharge capacity and coulombic efficiency vs. cycle number for LNMO4 - Li cell compared with different electrolyte composition

5. まとめ

リチウムイオン二次電池の高電圧作動化に対応するため、電解液の耐酸化性向上を検討した。検討手法として有機溶媒の酸化電位を推定する計算指標 η の適用を試みた。その結果、以下の結論を得た。

- (1) 有機溶媒の実測酸化電位と η に比例関係が示唆された。
- (2) 耐酸化性の向上が示唆されたスルホランとフッ素化アルキルエーテルを用いた試作電解液は 6.0 V vs. Li/Li⁺ までの耐酸化性を示した。
- (3) 上記の試作電解液を用いたことにより、LNMO4 の充放電サイクル寿命を約 1.7 倍長くすることができた。

参考文献

- (1) <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/2019/press-release/>
- (2) Harris, W. S.: Electrochemical Studies in Cyclic Esters, Doctoral thesis, UNIVERSITY OF CALIFORNIA, Radiation Laboratory, Contract No. W-7405-eng-48, (1958)
- (3) 吉野彰: リチウムイオン電池総論, ぶんせき, 10 号, p. 580-584, (2013)
- (4) 小久見善八 編著: リチウム二次電池, オーム社, 224p., (2008)
- (5) Koch, V. R.: Reactions of Tetrahydrofuran and

Lithium Hexafluoroarsenate with Lithium, J. Electrochem. Soc., Vol. 126, No. 2, p. 181-187, (1979)

- (6) Salomon, M.: Electrolyte solvation in aprotic solvents, J. Power Sources, Vol. 26, Issues 1-2, p. 9-21, (1989)
- (7) Tobishima, S., Arakawa, M., Hirai, T., Yamaki, J.: Ethylene carbonate-based electrolytes for rechargeable lithium batteries, J. Power Sources, Vol. 26, Issues 3-4, p. 449-454, (1989)
- (8) Yoshio, M., Nakamura, H., Dimov, N.: Chapter 7 Development of Lithium-Ion Batteries: From the Viewpoint of Importance of the Electrolytes, Lithium Ion Rechargeable Batteries - Materials, Technology, and New Applications, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, p. 163-178, (2009)
- (9) 吉田浩明, 水谷実: 4V 級リチウム二次電池用電解液, DENKI KAGAKU 62, No. 11, p. 1023-1029, (1994)
- (10) Michalak, B., Berkes, B. B., Sommer, H., Bergfeldt, T., Brezesinski, T., Janek, J.: Gas Evolution in LiNi_{0.5}Mn_{1.5}O₄/Graphite Cells Studied In Operando by a Combination of Differential Electrochemical Mass Spectrometry, Neutron Imaging, and Pressure Measurements, Analytical Chemistry, Vol. 88, Issue 5, p. 2877-2883, (2016)
- (11) Tsubaki, M., Mizoguchi, T.: Fast and Accurate Molecular Property Prediction: Learning Atomic Interactions and Potentials with Neural Networks,

- J. Phys. Chem. Lett., Vol. 9, Issue 19, p. 5733-5741, (2018)
- (12) Cheng, L., Assary, R. S., Qu, X., Jain, A., Ong, S. P., Rajput, N. N., Persson, K., Curtiss, L. A.: Accelerating Electrolyte Discovery for Energy Storage with High-Throughput Screening, J. Phys. Chem. Lett., Vol. 6, Issue 2, p. 283-291, (2015)
- (13) Okamoto, Y., Kubo, Y.: Ab Initio Calculations of the Redox Potentials of Additives for Lithium-Ion Batteries and Their Prediction through Machine Learning, ACS Omega, Vol. 3, Issue 7, p. 7868-7874, (2018)
- (14) Hausbrand, R.: Electronic energy levels at Li-ion cathode-liquid electrolyte interfaces: Concepts, experimental insights, and perspectives, J. Chem. Phys., Vol. 152, Issue 18, 180902 (2020)
- (15) Pearson, R. G.: Absolute electronegativity and hardness correlated with molecular orbital theory, Proc. Natl. Acad. Sci. USA, Vol. 83, p. 8440-8441, (1986)
- (16) Pearson, R. G.: The Principle of Maximum Hardness, Acc. Chem. Res., Vol. 26, Issue 5, p. 250-255, (1993)
- (17) Koopmans, T.: Über die Zuordnung von Wellenfunktionen und Eigenwerten zu den Einzelnen Elektronen Eines Atoms, Physica, Vol. 1, Issues 1-6, p. 104-113, (1934)
- (18) Parr, R. G., Pearson, R. G.: Absolute hardness: companion parameter to absolute electronegativity, J. Am. Chem. Soc., Vol. 105, Issue 26, p. 7512-7516, (1983)
- (19) 台場信一, 飯塚宏之, 押山智寛, 石井文雄: カプラーの反応性を予測する分子軌道パラメータの検討, 日本写真学会誌, 58 巻, 5 号, p. 466-470, (1995)
- (20) 登成健之介: フェノール及びポリフェノール類の抗酸化能について, 職業能力開発報文誌, Vol. 15, No. 2, (30), p. 65-68, (2003)
- (21) 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)
- (22) Delley, B.: From molecules to solids with the DMol³ approach, J. Chem. Phys., Vol. 113, No. 18, p. 7756-7764, (2000)
- (23) Tsuneda, T., Suzumura, T., Hirao, K.: A new one-parameter progressive Colle-Salvetti-type correlation functional, J. Chem. Phys., Vol. 110, No. 22, p. 10664-10678, (1999)
- (24) Perdew, J. P., Chevary, J. A., Vosko, S. H., Jackson, K. A., Pederson, M. R., Singh, D. J., Fiolhais, C.: Atoms, molecules, solids, and surfaces: Applications of the generalized gradient approximation for exchange and correlation, Phys. Rev. B, Vol. 46, No. 11, p. 6671-6687, (1992)
- (25) Becke, A. D.: Density-functional exchange-energy approximation with correct asymptotic behavior, Phys. Rev. A, Vol. 38, Issue 6, p. 3098-3100, (1988)
- (26) Lee, C., Yang, W., Parr, R. G.: Development of the Colle-Salvetti correlation-energy formula into a functional of the electron density, Phys. Rev. B, Vol. 37, Issue 2, p. 785-789, (1988)
- (27) Kim, J.-H., Myung, S.-T., Yoon, C. S., Kang, S. G., Sun, Y.-K.: Comparative Study of LiNi_{0.5}Mn_{1.5}O_{4-δ} and LiNi_{0.5}Mn_{1.5}O₄ Cathodes Having Two Crystallographic Structures: Fd3-m and P4₃32, Chem. Mater., Vol. 16, Issue 5, p. 906-914, (2004)
- (28) Tobishima, S., Arakawa, M., Yamaki, J.: LITHIUM CYCLING EFFICIENCY IN MIXED SOLVENTS ELECTROLYTES, Proc. Symp. Primary and Secondary Ambient Temperature Lithium Batteries, Vol. 88-6, p. 627-634, (1988)
- (29) 小久見善八, 安部武志, 稲葉稔, 鄭淳基: リチウムイオン二次電池用黒鉛負極とその表面被膜生成反応, 炭素, No. 203, p. 136-140, (2002)
- (30) Ota, H., Shima, K., Ue, M., Yamaki, J.: Effect of vinylene carbonate as additive to electrolyte for lithium metal anode, Electrochimica Acta, Vol. 49, Issue 4, p. 565-572, (2004)

■ 著 者 ■



森田 善幸



前山 裕登



古川 敦史

腸骨荷重の3軸計測によるサブマリン現象の予兆検出

Predictive Technique for Seat Belt Submarining Injury by Triaxial Iliac Load Cell

前 原 一 範¹
Kazunori MAEHARA
伊 藤 重 雄²
Shigeo ITO

伏 見 匡 洋²
Masahiro FUSHIMI
三 上 秀 則²
Hidenori MIKAMI

有 馬 哲 寛²
Tetsuhiro ARIMA

要 旨

ABSTRACT

前面衝突試験における確認項目の一つである、サブマリン現象について、現象発生の予兆を一度の衝突試験にて検出することができれば、衝突安全性能の開発効率の向上に貢献できると考えられる。そこで、衝突ダミーの腸骨荷重計を3軸化し、腸骨前端部に加わるラップベルト拘束荷重の作用点の位置変化を算出することで、サブマリン現象の予兆とする手法を考案した。結果、サブマリン現象を意図的に発生させた前面衝突スレッド試験において、現象発生よりも手前の時間帯で、腸骨へ加わる荷重の作用点が腸骨前端部から上方へ向けて移動する様子が観察され、サブマリン現象の発生までの予兆を検出できるようになった。

Submarining is one of the confirmation items in the frontal crash test, and if signs of submarining can be grasped with a single crash test, it will contribute to increasing the development efficiency of crash safety performance. This study created a prototype of a triaxial iliac load cell for an anthropomorphic test device and devised a method for calculating the position change of the acting point of the seat belt restraint load applied to the front end of the ilium, as a sign of submarining. In frontal crash sled tests that intentionally generated submarining, the acting point of the load applied to the ilium was observed to move upward from the front end of the ilium in the time zone before submarining occurred. As a result, this enabled to detect the signs prior to the occurrence of submarining.

1. はじめに

日本の交通事故死者数は、第二次交通戦争と呼ばれている時代の1992年では、全体で11,452人、自動車乗員では4,783人であった⁽¹⁾が、この年を境に減少傾向が維持されてきた^{(2), (3)}。2019年の交通死者は全体で3,215人、自動車乗員では1,083人であった⁽³⁾。特に自動車乗員では減少率が77%と著しい。

この要因として、飲酒運転の罰則強化、交通インフラの整備、エアバッグやチャイルドシート等安全デバイスの普及、車両骨格の安全性向上等が挙げられる⁽²⁾が、シートベルト着用義務化に伴う着用率の向上^{(2), (4)}も、貢献要因の

一つとして挙げることができる。

しかし、一方で、本来乗員を保護すべきシートベルトが加害部位とされる外傷の報告⁽⁵⁾も散見されるようになってきた。これらはSeat belt injury⁽⁶⁾と呼ばれており、主に胸腹部において発生する⁽⁷⁾。

さらに、2018年の交通統計⁽⁸⁾から、自動車乗員における、全損と窒息溺死等を除く、損傷主部位別の死傷者の割合を比較すると、Fig. 1に示すように、腹部傷害は死亡重傷率が最も高い。このことから、今後さらに交通事故死傷者数を低減するために、シートベルトからの荷重入力による腹部傷害の発生に関する調査研究が継続的におこなわれている^{(9), (10)}。

¹ 先進技術研究所

² 本田技研工業株式会社

Seat belt injury が発生すると考えられている現象のうち、Fig. 2 に示すように、乗員の腰部を拘束するラップベルトが、本来の拘束位置である上前腸骨棘 (Anterior superior iliac spine: ASIS) の下側のくぼみ部分から、腸骨稜 (Iliac crest) の上方に移動して腸骨 (Ilium) から外れ、乗員の腹部を直接圧迫する現象のことを、サブマリン現象と言う⁽¹¹⁾。

前面衝突試験においては、衝突ダミー (Anthropomorphic Test Device: ATD) を用いて、このサブマリン現象の発生有無の確認がおこなわれている。この確認をおこなうために、衝突ダミーの腰部は、外表面の形状だけでなく内部の腸骨も、人体の形状を模擬した構造になっている。構造の例として、Fig. 3 に、小柄女性体格用の衝突ダミーである Hybrid III 5th percentile female (H-III 5F) ダミー⁽¹²⁾の腰部構造を示す。図示にあたり Humanetics 社製の有限要素モデル⁽¹³⁾を用いた。

また、サブマリン現象の発生有無の判定は、衝突ダミーの腸骨に組み込まれている腸骨荷重計 (Iliac load cell) の

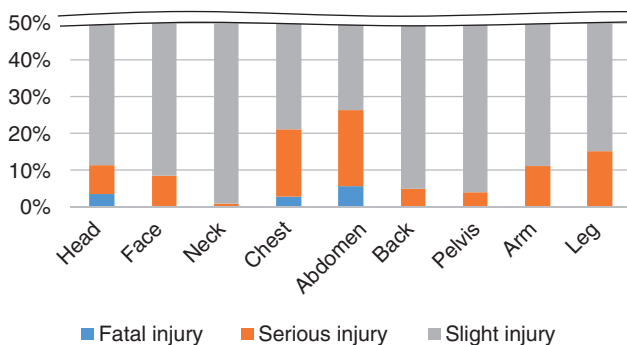


Fig. 1 Percentage of fatal, serious, and slight injuries of vehicle occupants by main injury site in Japan in 2018

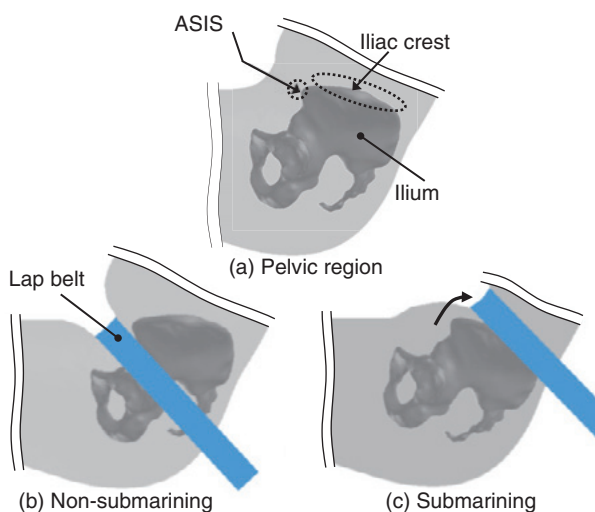


Fig. 2 Non-submarining and submarining

計測波形を用いておこなわれる。この荷重計は、Fig. 3 (a) のように、腸骨の ASIS の近傍部分に、左右合計二か所組み込まれている。ラップベルトが衝突ダミーの腸骨前方を拘束している間は、Fig. 3 (b) の荷重 F_x とモーメント M_y として相応の反力が発生する。一方、サブマリン現象が発生した場合は、ラップベルトが腸骨前方を拘束しなくなるため、これら F_x と M_y の大きさは急激に減少する。このことからサブマリン現象の発生有無が判定される。より詳細な判定方法については、欧州における衝突安全第三者評価 Euro NCAP (The European New Car Assessment Programme) の技術公示 (Technical Bulletin) TB-021⁽¹⁴⁾に定められている。

これらの計測荷重や判定方法からは、サブマリン現象の発生有無や、発生する瞬間を特定することができる。一方、サブマリン現象が発生しないケースにおいて、発生の予兆を何らかの物理量として定量的に検出することができない。そのため、サブマリン現象が発生しないことの確実性を担保するためには、衝突試験の繰り返しが必要となる。サブマリン現象の発生予兆の定量的検出を一度の衝突試験にておこなえる手法が考案できれば、衝突安全性能の開発効率を向上できる。

サブマリン現象の発生リスクを評価する目的で、2軸腸骨荷重計にて計測されるモーメント M_y を荷重 F_x で除する値を指標とすることが、Serra ら⁽¹⁵⁾により提案されている。しかしながらこの方法は、算出した値は長さの次元を表す物理量であるが、具体的に何の長さを示すのかの力学的説明が不十分である。また、Serra ら⁽¹⁵⁾は作成した指標を六例の衝突試験結果に当てはめて、サブマリン現象の発生有無の結果と合致しているかについての確認をおこなったが、サブマリン現象が発生したケースにおいて、何らかの予兆があったかどうかについては示していない。そのため、予兆を定量的に検出できる手法が求められる。

前述の通り、サブマリン現象が発生する直前には、腰部とラップベルトとの相対的な運動において、ラップベルトが ASIS の上方向へ移動する。それにともない、ラップベルトが腰部へ与える荷重の作用点の位置も、ASIS の上方

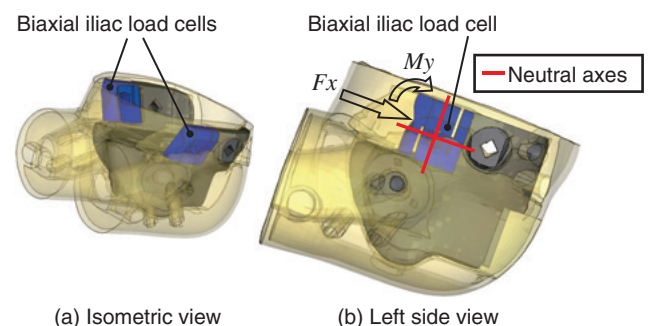


Fig. 3 Pelvis surface and pelvic bone of H-III 5F

向へ移動する様子が観察されることが、仮説として考えられる。

この作用点位置を直接計測する装置は、現在の衝突ダミーには搭載されていないため、腸骨荷重計の計測を用いて代替的に算出する方法を考案した。この算出には後述するが、Fig. 4 に示す ASIS が受けるラップベルト拘束荷重の水平成分 F_x と垂直成分 F_z 、およびモーメント M_y が必要である。しかしながら、現状の腸骨荷重計は、Fig. 3 (b) に示されるように、荷重 F_x 成分とモーメント M_y を計測する2軸の荷重計であり、 F_z 成分を計測できない。

そこで本研究では、従来の腸骨荷重計に、荷重 F_z 成分の計測を追加した3軸腸骨荷重計を試作した。また、サブマリン現象を意図的に発生させる前面衝突スレッド試験をおこない、ASIS に加わるラップベルト拘束荷重の作用点の位置変化を算出して、サブマリン現象の予兆を定量的に評価できるか検証をおこなった。

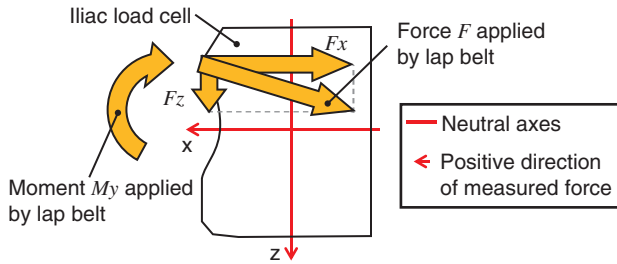


Fig. 4 Force and moment applied to iliac load cell by lap belt

2. 計測原理と検証方法

2.1. 衝突ダミーの種類の選定

本研究では、小柄な女性を模擬した衝突ダミーである H-III 5F ダミーを選定した。これは、より小柄である 5F ダミーのほうがサブマリン現象を起こしやすいことが報告⁽¹⁶⁾されており、体格が小柄であるほうが、ラップベルトの高さに対して ASIS の高さが相対的に低く位置することから、サブマリン現象が起きやすいと考えられたためである。

2.2. 3軸腸骨荷重計

H-III 5F ダミー用の3軸腸骨荷重計の試作は、日本キスラー株式会社に依頼した。Fig. 5 に、右側用の3軸腸骨荷重計の正面図と左側面図を示す。この荷重計は当該ダミーに標準で装備されている2軸腸骨荷重計と差し替えて装着できるようになっている。図中の赤線は荷重の計測軸であり、赤線の交点が荷重計測の中心である。

2.3. ラップベルト拘束荷重の作用点算出原理

Fig. 6 に、3軸腸骨荷重計が受けるラップベルト拘束荷重のベクトルと荷重作用点位置の模式図を示す。 F_x と F_z は、それぞれ荷重計の計測荷重の x 軸成分と z 軸成分であり、 F は F_x と F_z の合力である。 L_x と L_z は荷重計測中心から見た作用点の位置のそれぞれ x 軸成分と z 軸成分である。

ラップベルト拘束荷重の作用点の位置を算出するにあたり、前提として、3軸腸骨荷重計が計測する荷重は全てラップベルトによる拘束力とし、荷重計の運動に起因する慣性力の影響は無視できるものとした。このとき、3軸腸骨荷重計で計測される荷重の成分 F_x および F_z と、モーメント M_y との間は、式 (1) の関係を持つ。

$$M_y = -L_z F_x + L_x F_z \quad (1)$$

ラップベルト拘束荷重の作用点は、腸骨荷重計の前側の表面上に位置する。この表面上を作用点が移動するとき、 L_x の変化は小さいことから、Fig. 7 に示す仮想平面上に作用点があると簡略化して考え、 L_x は Fig. 5 (b) の寸法 $L1$ に固定し、式 (2) を用いて、 L_z すなわちシートベルト拘束荷重の作用点高さを求める。

$$L_z = \frac{L_x F_z - M_y}{F_x} = \frac{L1 F_z - M_y}{F_x} \quad (2)$$

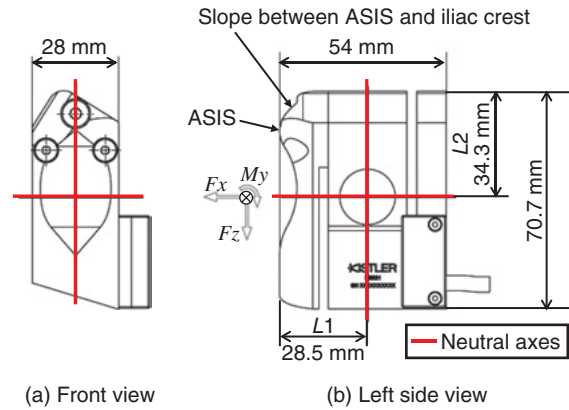


Fig. 5 Triaxial iliac load cell for right side

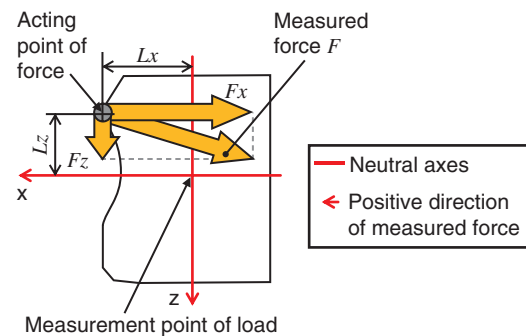


Fig. 6 Vector and acting point of measured force

ラップベルトは、腸骨荷重計の前側表面を拘束する。そのため、求めた作用点高さ L_z は、Fig. 5 (b) の寸法 L_2 を超えることはない。また、サブマリン現象が発生した場合、ラップベルトの拘束位置は上方に移動すると考えられる。そのため、 L_z が L_2 の値に近づく程、サブマリン現象発生の可能性が高まると捉えることにした。本研究では、この L_z を、サブマリン現象に対する予兆の判断材料とした。

2.4. 検証用前面衝突スレッド試験の条件

サブマリン現象の予兆の判断手法を検証するため、現象を意図的に発生させる条件を含めた三ケースの前面衝突を模擬するスレッド試験をおこなった。Fig. 8 に、実施したスレッド試験の試験前写真を示す。

試験は全て既存車両を想定した同一設定とし、右ハンドルの助手席にておこなった。衝突ダミーは試作した3軸腸骨荷重計を組み込んだ H-III 5F ダミーを使用した。Fig. 9 に、試験に用いた車両減速度のグラフを示す。初速度は、現象発生時の衝突ダミーの損傷を低減するため、50 km/h とした。減速度波形の形状は、サブマリン現象が発生しやすくさせるために、衝突の初期である 15 ms までに減速度が 20 g を超過しつつ、試験設備で再現可能となるよう調整した。サブマリン現象が発生しやすくさせるため、衝突ダミーの膝が接触し得るインストルメンタルパネル部品を取り外した。シートベルトは三点

式の物を用い、プリテンショナおよびロードリミッタが付属するシートベルトリトラクタを用いた。助手席 SRS (Supplemental restraint system) エアバッグは、想定車両と同一仕様の物を使用した。

今回の試験では、ラップベルトアンカーの高さを変更して前述の三ケースの試験条件を設定した。Fig. 10 に示すように、ラップベルトアンカーの高さがより高い方が、ラップベルトの中心線がより腸骨稜に近い位置を通ることから、ラップベルトが腸骨稜の上方に移動するサブマリン現象が、より発生しやすいと考えられたためである。

Fig. 11 に、衝突ダミーの着座時の腰基準位置 (Hip point: H.P.) から見た、ラップベルトアンカーの座標位置

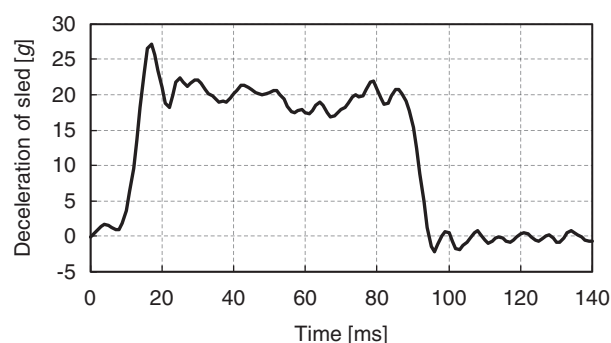


Fig. 9 Deceleration pulse of sled test

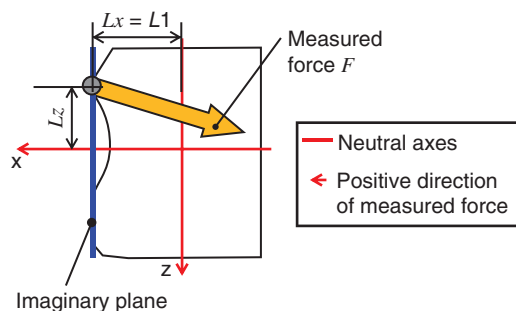


Fig. 7 Imaginary plane of acting point of load

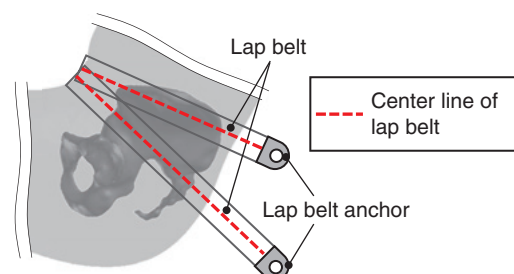


Fig. 10 Difference in lap belt position with respect to height of lap belt anchor

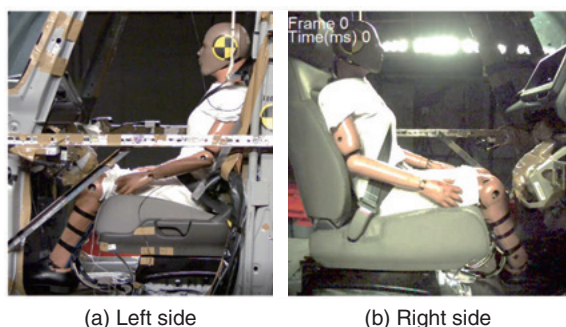


Fig. 8 Photos of sled test

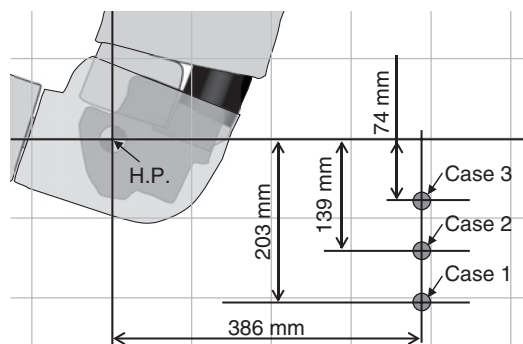


Fig. 11 Positions of lap belt anchor with respect to H.P. of ATD

を示す。Case 1 から 3 に向けて、ラップベルト外側アンカーの高さが順に高くなる設定とした。Case 1 ではサブマリン現象が発生せず、Case 3 では発生することを狙った。Case 2 では中間の高さとしているが、Case 1 よりもサブマリン現象発生の可能性が高くなることを狙った。

2.5. 検証手順

今回の試験において、サブマリン現象発生の有無に影響を与える条件差は、着座した衝突ダミーから見て左側に位置するラップベルトアンカーの高さであることから、左側の腸骨荷重とモーメントに着目した。

初めに、計測した腸骨荷重とモーメントの波形を確認し、スレッド試験三ケースそれぞれでのサブマリン現象の発生有無を確認した。

次に、ラップベルト拘束荷重の作用点高さ L_z を式 (2) により算出し、サブマリン現象発生有無との関係性を調べた。

最後に、計測荷重の大きさ、方向、作用点位置を同時に把握することを目的に、腸骨荷重計の計測ベクトルを、衝突ダミーの骨盤側面輪郭図の上に描画し、三ケースの試験それぞれでの比較確認をおこなった。

3. 検証結果

3.1. 3 軸腸骨荷重の計測波形とサブマリン現象発生状況

Fig. 12 から 14 に、スレッド試験三ケースにおける、左側腸骨荷重 (F_x , F_z) とモーメント (M_y) の時刻歴波形を示す。波形の極性は Fig. 5 の (b) に描かれている極性と同じく、 F_x は後方押し込みがマイナス、 F_z は下方向荷重がプラスとし、 M_y は腸骨荷重計を後転させる方向がプラスとした。Table 1 に、スレッド試験三ケースにおける、サブマリン現象発生の有無の一覧を示す。

サブマリン現象は、Case 3 においてのみ発生した。Case 3 では、52 ms を境に、 F_x , F_z , M_y の大きさがいずれも急激に減少したことが、Fig. 12 から 14 より読み取ることができた。

3.2. ラップベルト拘束荷重の作用点算出結果

Fig. 15 に、左側腸骨荷重計より算出したラップベルト拘束荷重の作用点高さ L_z の時刻歴波形を示す。

サブマリン現象が発生した Case 3 について、サブマリン現象発生の直前のタイミングである 52 ms にて L_z は 33 mm であり、Fig. 5 (b) の寸法 L_2 とほぼ同じ値となった。52 ms を超える時刻域については乱高下する値となったが、同時刻域での腸骨荷重は Fig. 12 から 14 を見るとほぼゼロになったことから、ラップベルトが腸骨を拘束しない時刻域では、 L_z は意味を成さないと考えられる。

同様のことが、サブマリン現象が発生しなかった Case 1

Table 1 Occurrence of submarining in each test

Test No.	Occurrence of submarining
Case 1	No
Case 2	No
Case 3	Yes

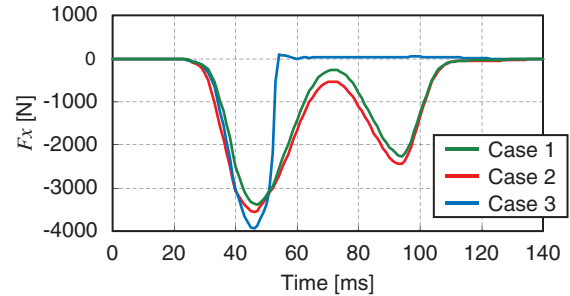


Fig. 12 Time history of longitudinal force F_x of left iliac load cell in each test

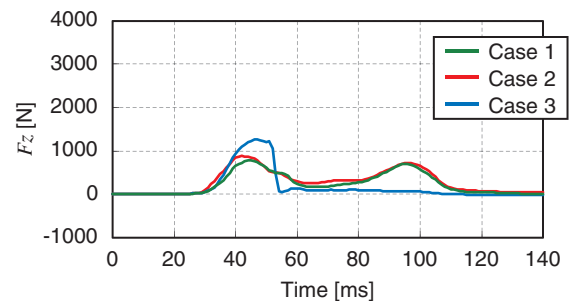


Fig. 13 Time history of vertical force F_z of left iliac load cell in each test

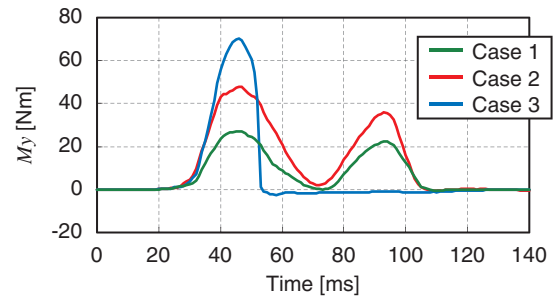


Fig. 14 Time history of moment M_y of left iliac load cell in each test

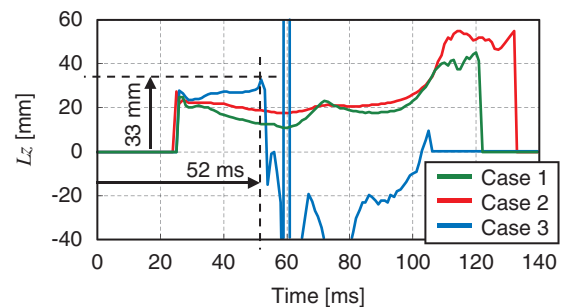


Fig. 15 Time history of height of load acting point L_z of left iliac load cell in each test

および2においても、ラップベルトが乗員を拘束する現象が終了する約100 ms以降にも当てはまる。

3.3. ラップベルト拘束荷重のベクトル可視化結果

Fig. 16 から 18 に、それぞれ 40 ms, 44 ms, 48 ms, 52 ms, 54 ms についての、スレッド試験三ケースにおける、左側腸骨荷重計によるラップベルト拘束荷重ベクトルを示す。荷重ベクトルは、衝突ダミーの骨盤輪郭の左側面図の上に重ね描く形で描画した。腸骨荷重計測中心の位置および荷重ベクトルの向きは、実物の腸骨荷重計の搭載位置を再現するように、骨盤輪郭図に対して位置合わせをおこ

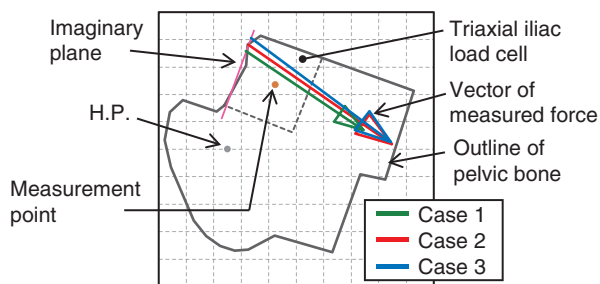


Fig. 16 Vector of restraint force acting on left iliac load cell at 40 ms

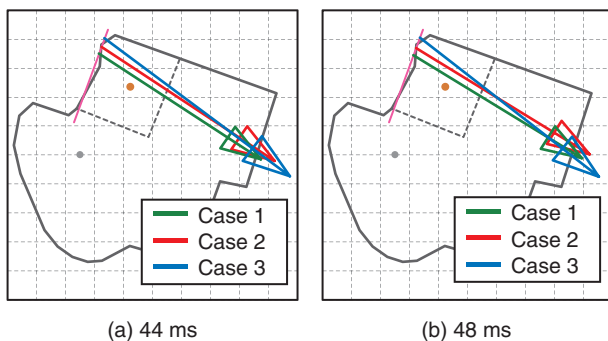


Fig. 17 Vector of restraint force acting on left iliac load cell at 44 and 48 ms

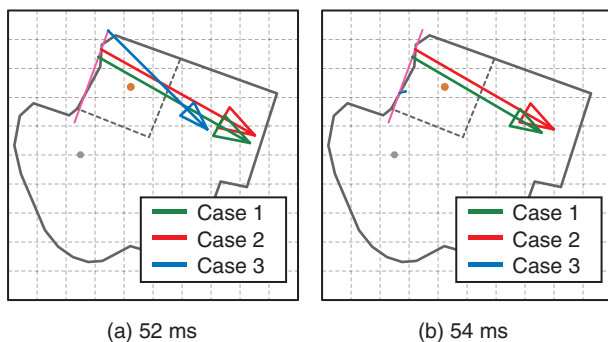


Fig. 18 Vector of restraint force acting on left iliac load cell at 52 and 54 ms

なった。なお、描画に際し、格子1目盛りあたり、寸法は20 mm、荷重ベクトルは500 Nで描画をし、骨盤輪郭図の角度は、衝突前の初期角度で固定した。

サブマリン現象が発生したCase 3において、サブマリン現象発生直前のタイミングである52 msに近づく程、ラップベルト拘束荷重の作用点が上昇し、52 msを超えると荷重ベクトルがほぼ消失する結果が得られた。また、特にサブマリン現象発生に近い48から52 msにおいて、拘束荷重ベクトルの向きが下向きに近づく様子が観察された。

サブマリン現象が発生しなかったCase 1および2においては、ラップベルト拘束荷重の作用点がASISと腸骨稜間の傾斜部の上端を超えることがなく、ASIS下方のくぼみ部分の周辺にとどまっている結果が得られた。

以上より、ラップベルト拘束荷重の作用点の上昇を観察することにより、サブマリン現象発生の予兆を検出することができた。

4. 考察

サブマリン現象が発生したCase 3において、ラップベルト拘束荷重のベクトルの向きが、前述の通り下向き寄りに変化をした。このことは、Fig. 11に示すように、Case 3はラップベルトアンカーの高さが三ケース中で最も高く、拘束荷重の方向はより水平に近くなるとされることに對して、一見反する結果のように思われる。この理由について考察する。

サブマリン現象が発生したCase 3において、Fig. 16 から 18 に示す通り、サブマリン現象発生直前の時刻域にて、ラップベルト拘束荷重の作用点位置は腸骨荷重計の上端近くへ上昇した。この時の作用点の高さ L_z をFig. 5の荷重計の形状に照らしてみると、ASISと腸骨稜間の傾斜部に位置したことがわかる。ここで、48から52 msでの、 F_x と F_z の変化に着目すると、 F_z の変化は少ない一方、 F_x は減少したことがわかる。これらのことから、この時刻域では、ラップベルトがASISと腸骨稜間の傾斜部に沿って滑ることで、 F_x 方向の拘束荷重が低下し、結果、ラップベルト拘束荷重のベクトルの向きが下向き寄りに変化をしたと推察される。

サブマリン現象の発生の予兆として捉えることができる物理量の候補として、ラップベルト拘束荷重の作用点高さ L_z のほかに、腸骨モーメント M_y を候補に挙げ、それぞれについて、予兆として捉えた際の有用性を考察する。

腸骨モーメント M_y について、Fig. 14に示す波形を見ると、46 ms近傍に存在するピークの値は、Case 1から3の順に大きくなっており、特にサブマリン現象が発生したCase 3にて大きな値となったため、一見サブマリン現象発生の予兆を測ることができるように思われる。しかしなが

ら Case 3 において、 M_y のピークの値は、サブマリン現象が発生するタイミングである 52 ms よりも手前の時刻で発生しており、サブマリン現象発生タイミングにおける M_y の値は、現象が発生しなかった Case 2 に近い値となった。そのため、腸骨モーメント M_y の波形に対し、サブマリン現象発生有無の境界線を設けることが容易ではない。

一方、ラップベルト拘束荷重の作用点高さ L_z について、まずサブマリン現象が発生した Case 3 において、前述の通り、 L_z が ASIS と腸骨稜間の傾斜部まで上昇した。このことにより、ラップベルトはこの傾斜に沿って、腸骨上側へ滑り抜けたと推察される。

続いて、サブマリン現象が発生しなかった Case 1 および 2 において、Fig. 16 から 18 より、 L_z は ASIS 下方にあるくぼみの間に位置していた。ラップベルトはこのくぼみに引っかかる形で腸骨を拘束することにより、サブマリン現象が発生しなかったと推察される。Case 2 では、 L_z がこのくぼみの上端である ASIS 近傍に位置しており、ばらつき等の何らかの理由で作用点がさらに上昇した場合、Case 3 と同様に、ラップベルトは ASIS と腸骨稜間の傾斜部に沿って腸骨上側へ滑り抜けることが予想され、サブマリン現象が発生しない L_z の上限は、ASIS の高さと同位置付近にあることが予想される。

以上より、ラップベルト拘束荷重の作用点高さ L_z を、ラップベルト拘束荷重が加わる ASIS の幾何学的形状と照らしながら時間連続的に観察することで、現象発生までの予兆をより定量的に検出できた。また、 L_z におけるサブマリン現象発生有無の境界線を、ASIS 周辺の腸骨形状と対比する形で設けることができると予想される。

ただし、本研究での試験は実施数が限られていることから、サブマリン現象が発生しない L_z の、具体的な上限値の設定は、今後の課題である。今後は、他の条件での試験を重ねていくことで、本研究での手法の信頼性と再現性を高めていきたい。

5. まとめ

本研究では、衝突ダミーにおけるサブマリン現象の発生までの予兆を検出する手法を構築することを目的に、下記内容を実施した。

- (1) 3 軸腸骨荷重計を試作し、ASIS に加わるラップベルト拘束荷重の作用点の高さ L_z を算出してこれを予兆の判断材料とする手法を考案した。
- (2) サブマリン現象を意図的に発生させる条件を含めた三ケースの前面衝突スレッド試験を実施し、 L_z の変化を、ASIS の形状に照らして比較と考察をおこなった。結果、以下の知見が得られた。
- (1) サブマリン現象が発生したケースにおいては、現象発生直前の時刻域にて、 L_z が ASIS と腸骨稜間の傾斜

部まで上昇した。また、ラップベルトはこの傾斜部に沿って滑り抜けたと推察した。

- (2) 現象が発生しなかったケースにおいては、 L_z は ASIS 下方のくぼみ部分にとどまった。また、ラップベルトがこのくぼみに引っかかる形で腸骨を拘束することで、サブマリン現象が発生しなかったと推察した。

参考文献

- (1) 交通事故総合分析センター：交通統計 平成 5 年版 (1993)
- (2) https://www8.cao.go.jp/koutu/taisaku/r01kou_haku/zenbun/genkyo/feature/feature_01.html (参照 2020.12.01)
- (3) <https://www.npa.go.jp/publications/statistics/koutsuu/toukeihyo.html> (参照 2020.08.27)
- (4) <https://jaf.or.jp/-/media/1/2590/2610/2639/2653/sb2019.pdf> (参照 2020.11.03)
- (5) 太田智之、加納宣康、草薙洋、大橋正樹、葛西猛：シートベルトによる腹腔内臓器損傷に対する治療戦略、日本腹部救急医学会雑誌, Vol. 32(7), p. 1201-1207(2012)
- (6) Williams, J. S.: The Nature of Seat Belt Injuries, SAE Technical Paper, No. 700896(1970)
- (7) 篠原一彰、佐久間宏規：自動車事故の実態調査：自動車乗員の安全性とシートベルト、日本外傷学会雑誌, 13 巻, 1 号, p. 25-33(1999)
- (8) 交通事故総合分析センター：交通統計 平成 30 年版 (2018)
- (9) 中平祐子、渡辺功、岩本正実：外傷性腹部傷害解析のための小腸・腸間膜のモデル化技術の開発、自動車技術会論文集, Vol. 51, No. 2, p. 310-315(2020)
- (10) 古川大貴、志賀祐寛、増田光利、山本武司：前突スレッド時の次世代前突ダミー THOR 5F, 50M 腹部圧力センサの動的応答特性について、自動車技術会 2020 年秋季大会学術講演会予稿集, No. 20206296 (2020)
- (11) Towne, J. B., Coe, J. D.: Seat Belt Trauma of the Colon, The American Journal of Surgery, Volume 122, p. 683-685(1971)
- (12) Rhule, D. A., Backaitis, S.: Development and Evaluation of the Hybrid III Fifth Percentile Female Crash Test Dummy, NHTSA Docket No. 1998-4283-6(1998)
- (13) <https://humanetics.humaneticsgroup.com/products/virtual-models/frontal-impact-atd-virtual-models/hybrid-iii-5th-female-fe/hybrid-iii-5th> (参照 2020.10.02)
- (14) Euro NCAP: Data format and Injury Criteria

Calculation (Version 3.1), TB 021(2020)

- (15) Serra, M., Parera, N.: Study to Detect the Probability of Suffering Submarining, 自動車技術会 2019 年春季大会学術講演会予稿集, No. 20195100(2019)
- (16) Rouhana, S. W., Horsch, J. D., Kroell, C. K.: Assessment of Lap-Shoulder Belt Restraint Performance in Laboratory Testing, SAE Technical Paper, No. 892439(1989)

■ 著 者 ■



前原 一 範



伏見 匡 洋



有馬 哲 寛



伊 藤 重 雄

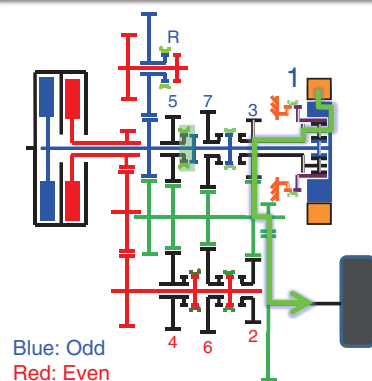


三 上 秀 則

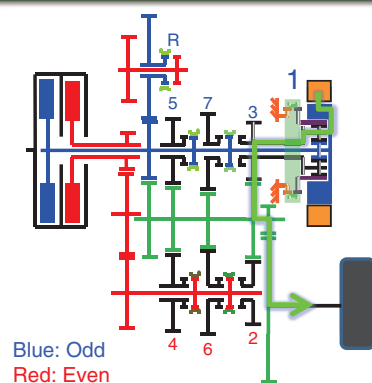
正誤表

No.	Vol. No.	ファイルNo.	論文タイトル	ページ	訂正箇所	内 容
1	Vol.26 No.1	26-1_05	SPORT HYBRID i-DCD 用 7 速デュアル クラッチトランス ミッションの開発	p. 29	Fig.3 EV Drive Mode (Low)	誤
						正

EV Drive Mode (Low)



EV Drive Mode (Low)



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
	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

これを書いている一昨日には新型コロナウイルスが日本に上陸してちょうど一年が経ちました。再度の緊急事態宣言も発令されて、世はまさに新常態。アカデミアの世界でも学会開催はオンラインがあたりまえ、中止を余儀なくされたものもありました。そんな中、弊社社員向けのイベントで、分子生物学者の福岡伸一先生によるオンライン講演を聴く機会がありました。

エントロピー増大の普遍則に抗して生物が個体を存続させるために、外部からの滋養で新たな細胞を育て交換し続けること。それが先生の唱える「動的平衡」という概念です。先生は、選手が入れ替わっても同じ名を冠するプロ野球チームの例も引きながら、想像を超えてダイナミックな生命観を、異分野の技術者にもよく解る言葉で語られて、実に興味をそそられました。

しかしそれ以上に魅せられたのは、かつて昆虫少年だった先生の語りの端々に滲み出る、「知りたいから学ぶ」、「やりたことは行動に移す」という、先生の直截な生きざまでした。我々は単に同じ外見の生命体として永らえるためだけに、日々ものを食べ代謝し続けているわけではないのだよ、と。

あまた有る活字の群れを、知性、感性、そして悟性で読み解いて、その上に自身の体験と思想とを積み重ね、再び新たな活字を綴ってゆく。個体としての技術者・研究者のそんな「動的平衡」する営みが重なり合って、人も、知も、成長し進化するのだと信じたい。たとえこのコロナ禍のもとにあっても。

この場を借りて、本号に寄稿頂いたすべての方と、編集・発行に尽力された方々に謝意を表するとともに、願わくば本誌の活字のひとつひとつが、読者のみなさまの滋養となりますことを。

(渡邊)

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.