

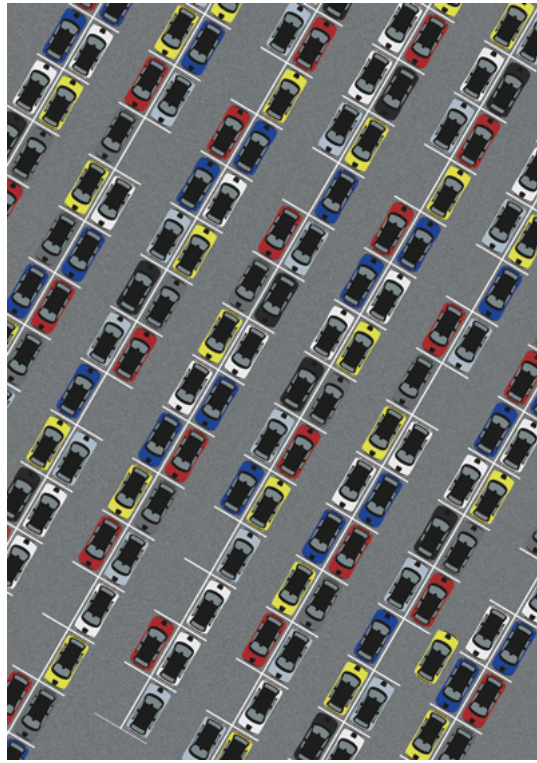


Electronics & Power

# Technical Review

## Vol.33 No.2

October 2021



---

## 表紙の言葉

---

今作は「二台一組の薄型ロボットを用いた無人車両搬送システム」よりテーマを起草し作成した表紙です。

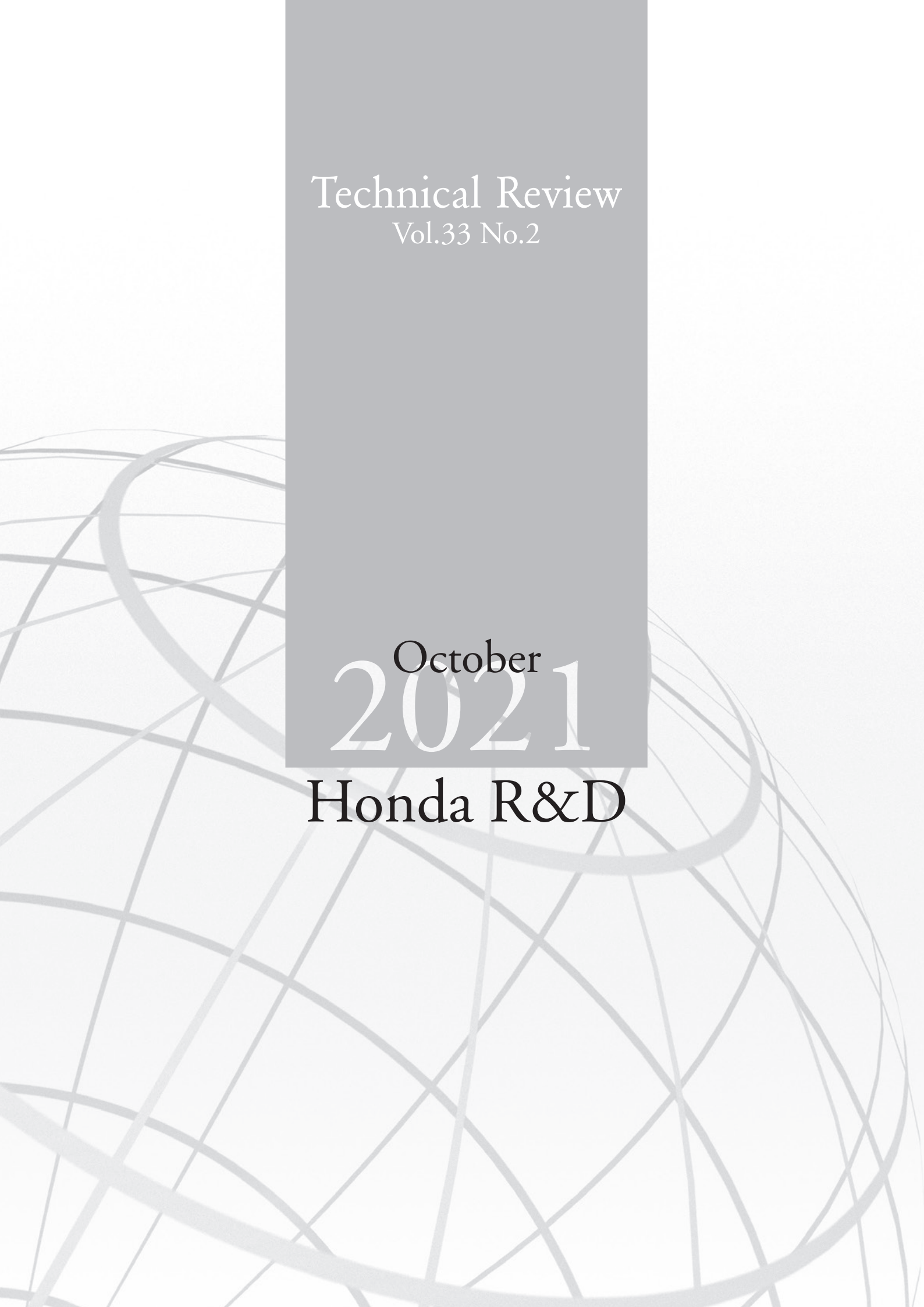
自動車の日常使用において最も苦手意識を持たれやすい、駐車というシーンをロボットが取って代わる事で創まれる幾何学的な光景を表現しました。

自動化と聞くと無機質な未来を想像しやすいですが、人との共存の仕方を模索する本テーマはより豊かな将来を創造させてくれると考えています。



本田技研工業株式会社  
大山 良平

---

The background features a light gray wireframe sphere. A solid gray vertical bar is positioned in the upper center, containing the text 'Technical Review' and 'Vol.33 No.2'. The year '2021' is printed in large white characters across the middle of the gray bar, with the word 'October' in smaller black text above it. Below the gray bar, the text 'Honda R&D' is displayed in black.

Technical Review  
Vol.33 No.2

October  
2021

Honda R&D

---

## 目次

### 技術紹介

- ◇ Honda e のデザイン開発 ―先進技術が人に寄り添うクルマ― ..... 内田 智・佐原 健  
明井亨訓・半澤小百合 ..... 1
- ◇ 交通安全アドバイスロボット Ropot の開発 ..... 菊池 紗・藤井智士・楠戸淳也  
甘利友也・若田邦治・才津 優 ..... 15
- ◇ COVID-19 感染者搬送車両の短期開発 ―迅速な車両提供による社会貢献― ..... 中尾敬一郎・田中利享 ..... 26
- ◇ 二台一組の薄型ロボットを用いた無人車両搬送システム ..... 近藤修平・益田晃次  
鹿野直人・室園智紀 ..... 33

### 論文

- ◇ 高拡散型千鳥噴射ノズルを用いた拡散燃焼の分割化による NO<sub>x</sub> とスモークの同時低減  
安藤博和・青柳 聡  
中津雅之・大矢直樹 ..... 41
- ◇ 低慣性・高剛性ダイナモによるエンジントルク変動再現 ..... 塩田啓二・佐川正記  
天野雅文・末竹和幸 ..... 50
- ◇ 硫化物全固体電池湿式プロセス用溶媒の検討 ..... 錢 朴・酒井 洋・小川 篤  
前山裕登・古田照実 ..... 58

# CONTENTS

## Introduction of new technologies

- ◇ Design Development of Honda e - Vehicle Conveying Concepts of Modern Technology and Affinity  
 ..... Satoshi UCHIDA・Ken SAHARA  
 Akinori MYOI・Sayuri HANZAWA ..... 1
- ◇ Development of Ropot, Traffic Safety Advice Robot  
 ..... Tae KIKUCHI・Satoshi FUJII・Junya KUSUDO  
 Tomoya AMARI・Kuniharu WAKATA・Yu SAITSU ..... 15
- ◇ Short Lead Time Development of Customized Vehicles with Preventive Measures for COVID-19 Infection  
 - Social Contribution through Swift Provision of Vehicles -  
 ..... Keiichiro NAKAO・Toshiyuki TANAKA ..... 26
- ◇ Unmanned Vehicle Transportation System Using Pair of Thin Robots  
 ..... Shuhei KONDO・Koji MASUDA  
 Naoto SHIKANO・Tomoki MUROZONO ..... 33

## Technical papers

- ◇ Simultaneous Reduction of NOx and Smoke by Divided Diffusion Combustion  
 Using High Dispersion Staggered Layout Nozzle  
 ..... Hirokazu ANDO・Satoshi AOYAGI  
 Masayuki NAKATSU・Naoki OHYA ..... 41
- ◇ Reproduction of Engine Torque Fluctuation with Low Inertia and High Stiffness Dynamometer  
 ..... Keiji SHIOTA・Masaki SAGAWA  
 Masafumi AMANO・Kazuyuki SUETAKE ..... 50
- ◇ Comprehensive Study of Solvents for Wet Process Applied to Sulfide-based All Solid State Battery  
 ..... Pu QIAN・Hiroshi SAKAI・Atsushi OGAWA  
 Hiroto MAEYAMA・Terumi FURUTA ..... 58

# Honda e のデザイン開発

## —先進技術が人に寄り添うクルマ—

Design Development of Honda e - Vehicle Conveying Concepts of Modern Technology and Affinity

内 田 智<sup>1</sup>  
Satoshi UCHIDA  
明 井 亨 訓<sup>1</sup>  
Akinori MYOI

佐 原 健<sup>1</sup>  
Ken SAHARA  
半 澤 小百合<sup>1</sup>  
Sayuri HANZAWA

### 要 旨

Honda e は、街なかベストのコンパクトサイズ・コンピューターとして開発された、Honda 初の量産型電気自動車である。10 年後の未来を見据え、「高度な先進技術がシームレスに人とつながった世界で、毎日の生活に寄り添うパートナーのようなクルマ」を志した。

デザインは、「Affinity & Modern」という言葉をキーワードにその具現化をおこなった。パッケージは徹底した街なかベストサイズを狙った。エクステリアはシンプルを極めながらもクルマらしい安定したスタンスと、スタイリングを際立たせるボディーカラーが特徴である。インテリアは居心地の良いリビングルームを質感高く表現した。

### ABSTRACT

The Honda e was developed to be the best compact-size commuter car for in-town mobility, and is Honda's first mass-production electric vehicle. Looking 10 years into the future, the aim was to create a car that would be like a partner that fits closely into the user's everyday life in a world where advanced modern technology seamlessly connects with people.

In giving the design its material form, the expression "Affinity & Modern" served as keywords. The aim for the package was a comprehensive effort to realize the best size for in-town mobility. For the exterior, the design plumbed the depths of simplicity to achieve a stable automotive stance together with distinctive body colors that highlight the styling. The interior expressed the comfort of a cozy living room with a feeling of high quality.

### 1. はじめに

Honda e は、欧州 CAFE (企業別平均燃費基準) 規制が強化される 2020 年の発表・発売を目標に開発された電気

自動車 (EV) である。それは開発当初から長距離移動の手段ではなく、街なかコンピューターとして、来るべき CASE 時代を想定した「Seamless life creator」を基本コンセプト (Fig. 1) として掲げた。つまり、人と住まいと街なかの移

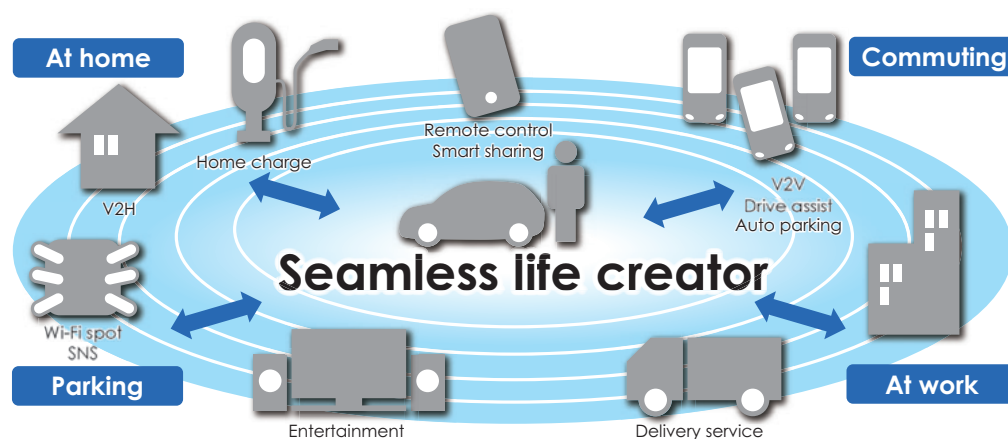


Fig. 1 Base concept

<sup>1</sup> デザインセンター

E-mail: satoshi\_uchida@jp.honda

動を隔てる必要がない世界になれば、コンパクトサイズのEVでも無限に広がる生活のクリエイターの存在になれると考えた。

一方、EVがある世界とは、ガソリン車との見た目の違いだけではなく、もっと本質的な何かが必要なはずであると考えた。

我々はそれを探るべく、EV先進国であり幸福度も高いといわれる北欧へリサーチに向かった。そこで感じたのは、EV先進国という以前に、豊かな生活と自然の中で時間がゆったりと流れているような感覚であった。そこで「新しいとか、EVだから、といった理由ではない、もっと人の生活に密着したものとしてお客様に選ばれるようにしたい。」という想いがデザイン開発のスタート地点となった。そこから、デザインの方向性を「Affinity & Modern」(Fig. 2)とし、先進技術が人に寄り添うクルマを目指して開発することにした。

## 2. 街なかベストを目指したパッケージデザイン

北欧リサーチで感じたことは、古い街並みに自然とモダンデザインが融合した魅力的な街であったが、交通環境においては街なか特有の課題が存在していた。それには、密集状態の路上駐車にはコンパクトサイズ、連続するラウンドアバウトには車両感覚とコーナー見切りがしやすい視界、そして慢性的な渋滞には快適な居住性が不可欠と感じられた。このような状況から人に街に身近な存在としての街なかベストなパッケージを導き出した。やはり、新時代のEVであっても欧州の街なかで扱いやすいのは、普遍的な2BOXコンパクトサイズという結論に至ったのである。

Fig. 3に示した通り、そのボディサイズは、街なかの移動や駐車に余裕を持つことができるようにFITよりもさらに100 mm短い全長3895 mm、全幅はCamera monitor system(CMS)によってミラーを含んでも1750 mm、全高

# Affinity & Modern

Rich life that begins  
with people's feelings



Styling to convey advanced technology  
and feelings of affection

Active choice



Fig. 2 Design direction

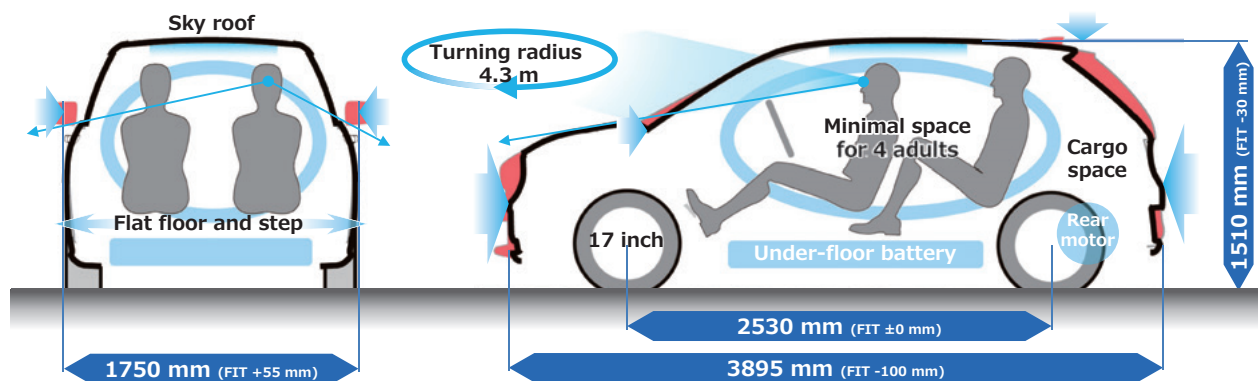


Fig. 3 Package layout (comparison with FIT)

はルーフアンテナを排して一般的な機械式立体駐車場にも余裕の 1510 mm に収めた。また、街角の見切りがしやすいようにフロントピラー下端位置をドライバー側に寄せることで、水平視野角をより向上させることができた。さらに、運転席からフードの一部が見えることによる車両感覚の確保や、CMS によってドアミラーに遮られないコーナーの視界も獲得した。

室内は、床下バッテリー配置によるフロア地上高を考慮しながら、ゆったりとしたセダンの運転姿勢を採用し、大人 4 人が乗車可能なミニマル空間とした。さらに、標準装備である大開口幅 790 mm × 奥行 433 mm のスカイルーフによって、コンパクトサイズでも快適な室内を効果的に演出できるようにした。

また、車内に一人で充電待機中などでも助手席に移動しやすいように、サイドウォークスルー可能なフロアとした。

荷室は、モーター後部配置による影響が懸念されたが、Power control unit (PCU) の薄型化などの低床化 (地上高 720 mm) により、その容量はスーパーマーケットの一般的なカート容量 170 L 以上を確保することができた。さらにその形状は、一般的な両対面式 A 型ベビーカーが積載可能である。

この専用プラットフォームとモーター後部配置によって実現したパッケージ (Fig. 3) は、CMS を始めとする各種運転支援装備、さらに最小回転半径 4.3 m などに加え、街なかベストサイズに相應しいものとなった。

### 3. 愛着のわくシンプルなエクステリアデザイン

その方向性を定めるべく、「これからの時代に、本当に必要な EV の存在とは？」を考えた。その結果、EV には環境イメージや先進感が求められがちではあるが、EV であることが当たり前となっていく今後を考えると、人の生活に違和感なくなじむような、「分かりやすく愛着のわくシンプルなデザイン」に定まった。

#### 3.1. EV ならではのプロポーションと親しみやすいシルエット

後輪駆動方式の恩恵により、フロントオーバーハングは

同クラスのガソリン FF 車では実現が容易でないほどの短さの 700 mm とすることができた。バッテリーを床下に抱えるためホイールベース 2530 mm は全長 3895 mm に対しては長く、同クラスのガソリンエンジン車に対して車重だけでなくトルクも増えるため、タイヤも少し大きめになる。それによって、コンパクトな全長の中にショートオーバーハング、ロングホイールベースに大径タイヤというプロポーションを実現できた。この恵まれたプロポーションを生かし、かつ親しみやすさを表現するためシルエットは普遍的な 2BOX とした (Fig. 4)。

#### 3.2. シンプルを極めたスタイリング

スタイリングでは、レーダーやセンサー、カメラなどにより複雑化する機能部品をいかにシンプルに見せるか、というチャレンジをおこなった。一般的な自動車の外観は、ドアミラーやドアハンドルなどの機能的に必要な部品が多く存在し、そこに個性を加えるためのスタイリングを重ねていく。結果としてできあがった製品には、スケッチの段階では存在しなかった部品が追加されたり、意図しなかったカットライン、突起などが多くなったりすることがある。そこで、Honda e のデザイン開発ではドアミラーをカメラに置き換えたり、ドアハンドルやレーダー、センサーをフラッシュサーフェイス化したりすることで、クルマ本来の機能、すなわちボディ、キャビン、タイヤ/ホイール、灯体の存在感を際立たせた。これは、複雑多機能であってもそう見えない、親しみやすくシンプルな外観を目指したのである。

キャビンは、サッシュレスドアを採用し大型ピラーガーニッシュとガラスルーフを組み合わせることで、段差の少ないブラックアウトされたガラスキャノピーのような外観とした。

ボンネットフードの見切りは、サイドから大きく開くことができるリンク式ヒンジを採用した。その見切りをドアパネルまで延長することでショルダーラインと視覚的につなげて全体のデザインに溶け込ませた。

EV のフロントグリルは、一般に冷却性能要件によるデザイン制約が少ない。そこで、昨今の自動車に不可欠な安全装備であるカメラやレーダーを目立たなく配置するた



Fig. 4 Exterior sketch

め、ブラックアウトさせてデザインした。一般的に、カメラやレーダーのカバーはそれぞれの機能に合わせて角度や表面の曲率に制限があり、通常はグリルデザインを優先した上で段差や別部品を設け配置している。しかし、Honda e のグリルではカメラやレーダーの角度、曲率に合わせた面を肯定してグリルをデザインすることで先進安全機能とフラッシュサーフェイスを両立した。それはリアデザインにも踏襲してシンプルな印象を統一させた (Fig. 5)。

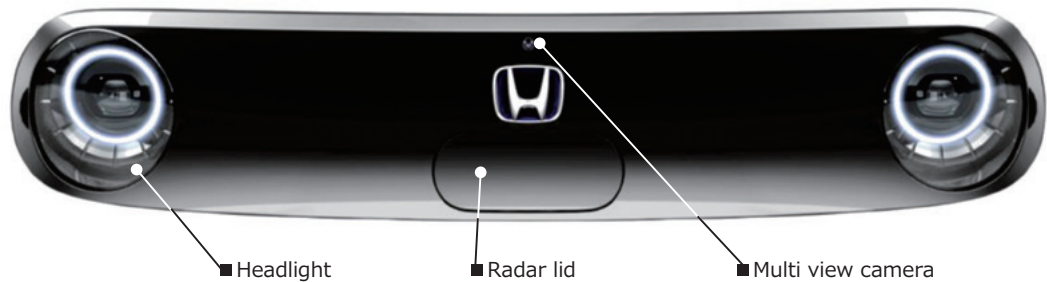
ドア下部ではサイドシルとの間の見切りを目立たせない工夫をおこなった。一般的な自動車では、ドア下端よりサイドシルが外側にありストーンチップングから守っているが、この部分が光を反射し段差を目立たせていることがある。Honda e では、ドア下端にプロテクターを追加することでサイドシル上端をドアより内側に設定し、光の反射を抑えることで見切りを目立たせないデザインを実現した (Fig. 6)。

### 3.3. 人とクルマとのコミュニケーションを表現する ヘッドライト、リアコンビネーションランプ

クルマの目として表情作りに大変重要な灯体であるが、Honda e ではまず内部を正面に向けた正円と決め、そこからハウジング、アウターレンズをデザインした。正円の採用は親しみやすい表情を作るとともに、プロダクトとしての完成度を高める演出として効果的であると考えた。また一方では、ヘッドライト外形への制限が大きく、全体のフォルムとのマッチングが容易ではないモチーフでもあった。

灯体の外観は、点灯時には豊かな表情と美しい光り方を目指したのに対し、非点灯時にはその存在を感じさせない真っ黒になるようデザインした。エンジン作動音のないEVなので、イグニッション ON/OFF はクルマの外側から灯体の光でのみ判別することができるようにした。

Front



Rear

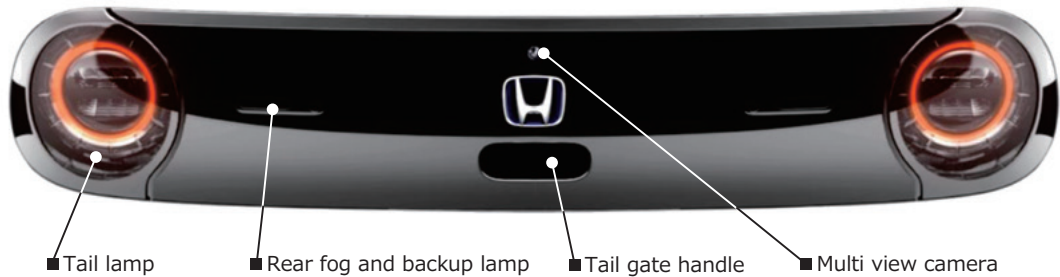


Fig. 5 Consolidation of functions

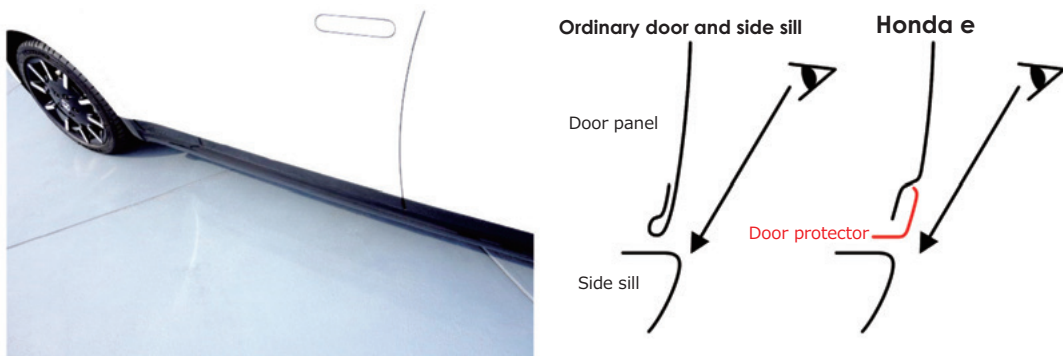


Fig. 6 Styling that highlights simplicity

具体的には、Daytime Running Light (DRL) とテールランプと前後ターンシグナルは全てに対して内側と外側別々のエッジライトを採用した。このライトは、リフレクターを使わずクリアレンズのみで配光するため、ハウジングが黒ければ非点灯時には黒く見せることができる。

リアのストップランプには唯一リフレクターが使われているが、昼間であっても明るい外界を反射しないようにリフレクターの角度を調整し、黒く塗装された LED 基板だけが映って見える工夫されたデザインとなっている。

正円のモチーフを採用したことにより、内部機構が左右同じものを使えるようになったので、部品点数の削減にも貢献している (Fig. 7)。

### 3.4. 豊かな充電体験を演出するチャージリッド

Honda e は、同じサイズのガソリン車の給油と比較する

と、エネルギーチャージ、つまり充電の頻度が多くなる。その際にもチャージリッドの高い質感と使い勝手、光や動きの演出で特別な体験をしてほしいという思いがあった。そこで、「特別な場所に特別なあしらいで」という考えのもとデザインをおこなった。

位置はボンネットフード前側の中心とし、リッドの材質は触れた時の質感を重視して、ガラスを採用した。開閉機構はスライドしながら開口部に収まる回転スライド式とし、動き方もスムーズになるようにインテリア部品であるコンソールリッドと同じ開閉機構を採用した。内部には、重い充電ガンを持っても無理なく接続できるように考慮した形状とし、さらに充電インレット上部には均一発光するインジケータがある。これは充電状態では青い光で表示するが、キーをもって近づくと閉じた状態でもリッドの中から白い光が見えるようにした。このように暗い状態でも充

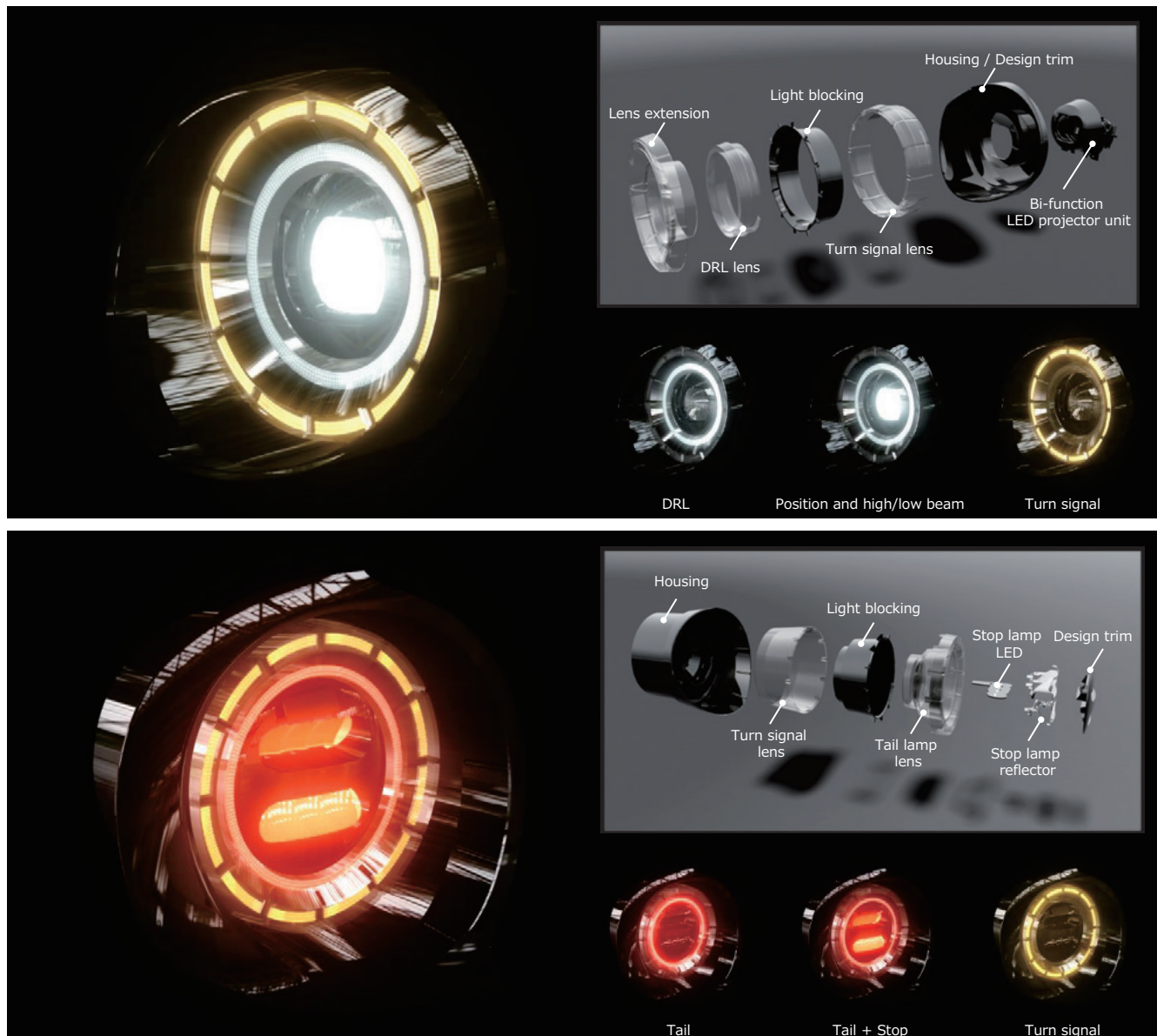


Fig. 7 Headlight and tail lamp

電リッドの位置が分かりやすいウエルカムランプとしての機能も備えている (Fig. 8).

そのリッドは、従来の車と同様に歩行者安全の法規にも配慮した衝撃エネルギー吸収構造をとっており、ガラス製のリッドには飛散を防止するフィルムも貼られている。

### 3.5. 人にやさしいサイドカメラミラー

CMSはHonda初の採用であり、内部機構や配置も含めて一からデザインをおこなった。Honda eではこれらに加え、前述のように「人にやさしい」という考え方を取り入れてデザイン開発を進めた。

まず、良好な視界の維持のために、CMSカメラのレンズに雨滴が付着しないようレンズ周りのバイザーの造形にも配慮し (Fig. 9 右図)、雨の日でもクリアに見えるようにした。さらに、運転席からの直接視界の良さも考慮し、通常のドアミラーに対し、ドアスキン上の運転席からの直接視界を妨げない高さに配置している。

次に、空力性能については、航続距離への影響を考慮して前面投影面積をできる限り小さくすることにこだわった。そのため、CMSカメラ、マルチビューカメラ、サイドターンシグナルを前後方向に並べ、ハウジングの天地寸法が薄くなるように配置した (Fig. 9 中央図)。また、簡易モデルを作成し、風洞実験をおこないながら低抵抗形状を追求した。その結果、通常のドアミラーに対し、Cd値10以上の

低減ができた。

そして最後に、デザインの特徴である、「人にやさしい」については、ハウジングを全幅内に収め、突起や角がなく丸みのある形状にすることで、人が近くを通っても安心感のあるデザインとした (Fig. 9 左図)。

### 3.6. シンプルな外観に貢献するフラッシュアウターハンドル

アウターハンドルは、人が車に乗るたびに触れるので、エクステリア部品の中でも人に近い存在である。そのためHonda eでは、車全体の考え方である、シンプルですっきりとしたデザインに加え、毎日触れたくなるような気配りの行き届いたアウターハンドルを目指した。

フロントアウターハンドルは、シンプルでノイズの少ないデザインを実現するため、キーを持って近づくと自動でポップアップする、段差のないフラッシュタイプを採用した。さらに、従来の車では外観に露出していたキーシリンダーを内部に隠すことで、よりすっきりとした印象にした。ロックセンサーは、アウターハンドルの天板に配置し、使用時は押しやすく、閉じている時は見えないようにして外観上のノイズを無くすことに貢献している。また、天板の後ろ側を切り欠いたことで、下からだけでなく後ろ側からでも指を入れやすくなるよう配慮した。さらに、暗い状況下でもセンサーの位置が分かりやすいように、ドアに内



Fig. 8 Charge lid



Fig. 9 Side camera mirror

蔵された光源がセンサーを照らすよう、LED 照明を配置した (Fig. 10 左図)。

リアアウターハンドルも、フロントアウターハンドルと同じようにシンプルでノイズの少ないデザインを目指した。黒いエリアに機能を集約しボディの見切りや段差を無くす手法を用い、リアアウターハンドルをサイドウィンドウ内に収めることでボディのノイズを無くした。また、よりすっきりと見えるように、手入れ用の凹面のないフラッシュな手動フラップタイプを採用した。その反面、見た目はすっきりとするが開け方が分かりづらいという課題があった。そこで、押して欲しい部分に凹みをあしらひ、どこを押せばフラップが開くか、直感的に分かるようにした (Fig. 10 右図)。

### 3.7. 機能美と独創性を際立たせる 16 インチと 17 インチホイール

まず 16 インチホイールは、電費志向にデザインされた。通常ガソリン車では、エンジンブレーキの効果があるためにホイールのブレーキ冷却の開口は少なくても良いが、EV は満充電になるとガソリン車ではエンジンブレーキに相当する回生ブレーキが使えない。下り坂が長く続くような状況ではガソリン車よりブレーキ冷却が必要となり、ホイールデザインにも開口面積の拡大が要求される。特にこのホイールはディスク周辺の空間が少なく、10 本スポークを効率よく配して冷却性能と剛性を確保する必要があった。

このデザイン上の特徴は、大径のセンターキャップでホ

ールナットを隠したことである。これには二つの効果がある。一つ目はホイールナット周辺のアルミを削ることで軽量化に貢献し、二つ目はホイールナットを隠すことで外観をシンプルにできた。結果として、冷却性能を満たした上で軽量、高剛性のシンプルな外観となった。

次に 17 インチホイールは、今までのホイールにはない独創的なモダンデザインを目標としてデザインした。

特徴としては、Honda e のボディ全体で繰り返し使われる長丸のモチーフを時計の目盛りのように配置し、センターの大径ディスクとつなぐことで従来のスポーク主体のホイールデザインとは一線を画す、モダンな外観とした。センターのディスク部はブレーキローターとほぼ同径で、ディスクの汚れが外から見えないという狙いがある。

この独創的デザインの実現は、二つの点で非常に苦労した。

まずは、スポークとディスクの接合点の剛性確保である。裏面形状もデザイナーが提案しながら、スポークとディスクの重なる量を調整し何度もデータの解析を重ね、デザインを守りながら剛性を確保した。

もう一つは、冷却性能の確保である。EV のホイールの冷却開口の課題は前述の通りであるが、このデザインは開口が大きくなると成立しない。これを解決するため、通常はサイドビューのみでおこなう空力シミュレーションでは、冷却面積を奥行き方向まで計算に入れ、Computational Fluid Dynamics (CFD) による空気の流れの解析をおこなって、サイドビューでは小さな面積でも効率の良い冷却性能を確保した (Fig. 11)。

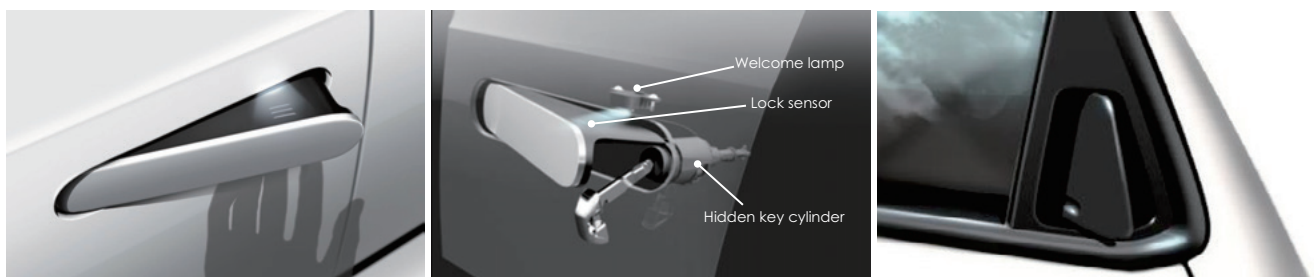


Fig. 10 Front and rear flush outer door handles

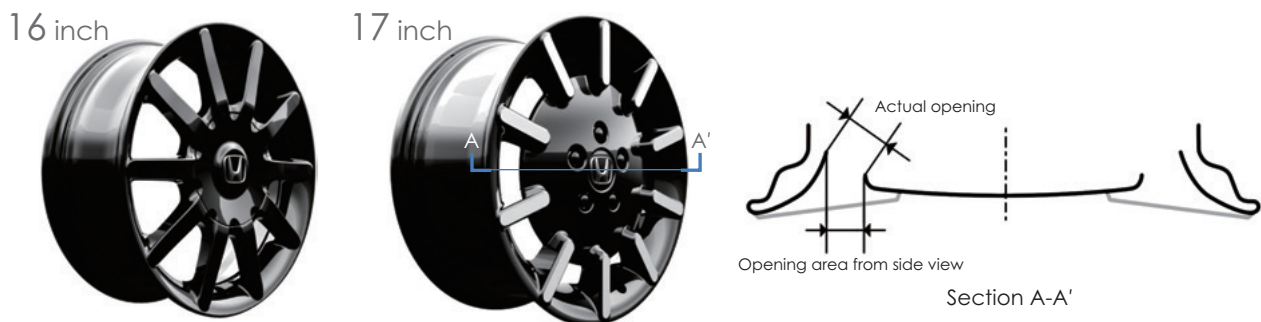


Fig. 11 Wheel design

### 3.8. スタイリングを際立たせるボディーカラー

ボディーカラーは、全7色のカラーラインナップを設定した (Fig. 12)。ホワイト、シルバー、ガンメタリック、ブラックはベーシックな美しさを、ブルーとレッドは上質な美しさを演出した。

新色のチャージイエローは、シンプルでソリッドライクの質感と高彩度のイエローで、キビキビとした走り、爽快感を際立たせるカラーとした、アイコンとなるグリルや充電リッド、ブラックアウトされたキャビンに視覚的なコントラストを付けるために、明度・彩度が高いイエローを設定した。

このハイコントラストの2トーンが、シンプルでモダンな Honda e のキャラクターを一層演出した。質感は、エクステリアのシンプルでノイズのないデザインを際立たせるため、ソリッドライクのテクスチャーに設定された。遠目ではソリッドの質感で、すっきりしたサーフェイスを表現した。近目では、少量のメタリックが硬質感を演出した (Fig. 13)。

## 4. 居心地のよいインテリアデザイン

### 4.1. 親しみやすいモビリティの姿をインテリアでも表現

Honda e のインテリアをデザインするにあたって、既存のクルマの価値に囚われることなく、一から見直すことから始めた。なぜなら、このクルマを単なる移動体の価値からさらに発展させたものにしたいと考えたからである。

そこで、デザインの考え方である「Affinity & Modern」を室内にどのように表現すればよいかを、具体的なスタイリングに入る前に十分に検討をおこなった。

まず、移動と人の暮らしがシームレスにつながり、それにより日常が豊かになる時代に、それが日常生活に根付くような生活空間としての価値に着目した。そこから、親しみやすさや安らぎ、新たな生活を感じるようなモダンさを室内に表現したいと思った。その検討の中で、リビングルームが持っている価値観がこの車にはじっくりくすることを導き出した。

それは、上質なソファやテーブル、大きなテレビモニ



Fig. 12 Exterior color lineup

Iconic color

Solid texture

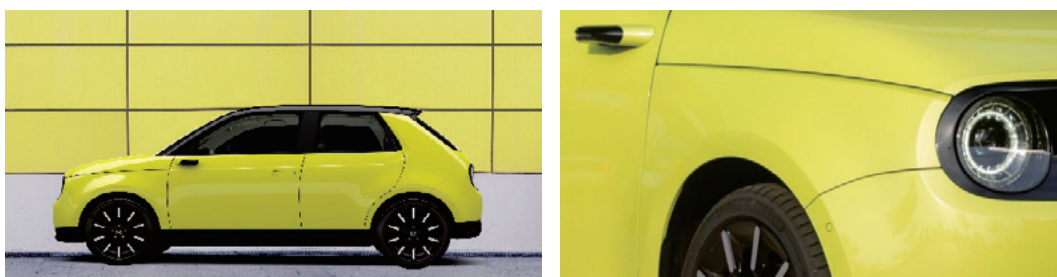


Fig. 13 New charge yellow

ターがあるようなリビング (Fig. 14) が外に広がったような、いわば「生活空間が拡張されたと感じるシームレスな体験価値を提供できるのではないか？」というものであった。リビングの価値自体はスタイリングモチーフとしてや、風合いの良い素材を使用しているという表現で使われることが多いが、このデザインでは実際の使い勝手にまで言及している。

また、自宅における EV 充電設備の普及が進んでいないこともあり、外出先で充電する機会も多いと考えた。一般的に充電は 5 分程度で済むガソリンの給油とは違い、最短でも 30 分程度の時間が掛かるため、ユーザーは充電完了まで車内で待つこともあると想定した。このことから、充電中に停車して車内で過ごす状況でも、ゆったりくつろげるような空間づくりが必要と考えた。それは近い将来に自

動運転が普及していくと、今以上に重要となってくるかもしれない。このような考え方が次世代の価値の布石になればと考える。

#### 4.2. 居心地のよいリビングを感じさせるインテリア空間

Honda e は、横長で運転席・助手席の人も見やすく操作しやすいワイドスクリーン Honda CONNECT ディスプレーや、ミラー映像を視認しやすくインストルメントパネルの両サイドに映し出すサイドカメラミラーシステムといった多くの先進装備を搭載している。それをシンプルで心安らぐリビングのような空間にすることを徹底して目指した。その結果、先進さとシンプルモダンをうまく共存させるデザインができたと考えている (Fig. 15)。

ドアは前後共に上部とアームレストをシートと同じ表皮



Fig. 14 Conceptual image sketch



Fig. 15 Interior sketch

巻きとした。この表皮は厚みのあるファブリックのため、ほとんど伸びず、角の丸さや端末処理に制約があった。しかし、検討の末にできあがった形状は曲面の雰囲気などがあって自然で、手触りのよい優しい形状となった。

シートの形状も、形状や表皮の貼り分けの工夫をおこなうことで、従来の Honda 車とは違った趣を醸し出している。特にリアシートは二人掛けのソファのようなしつらえとした。サイドボルスターやリアドア・アームレストにも同じ表皮を用いることにより、コンパクトなサイズながらも空間全体がシームレスとなり、空間が広がって見える視覚的な効果も狙った (Fig. 16)。

#### 4.3. 五つのディスプレイを水平配置したインストルメントパネル

これまでのクルマでは体験したことのない、使いやすく先進的な室内空間を目指した。それは、8.8 インチのメーターディスプレイ、12.3 インチのディスプレイを中央に2枚、また左右の6 インチ CMS ディスプレー、計五つのディスプレイを水平に配置する世界初のインストルメントパネルで構成されている。ディスプレイで新たな楽しさや快適性を提供するだけでなく、多彩なコネクティビティにより、人とクルマの新しいつながりを目指してデザインした。

このディスプレイを実現するにあたり、いかに違和感なく空間になじませられるかが課題となった。このような横長ディスプレイ配置はコンセプトカーなどではよく見られたものの、Honda 車はもとより、量産車では初めての試みだったからだ。ディスプレイを納めた横長のパネルは平面・直線だったため、むしろそれを活かし水平直線基調で全体を統一し、シンプルにまとめることにした。結果的に、これが均衡の取れたスタイリングになり、モダンリビング

空間の実現に寄与した。

副次的な効果としては、インストルメントパネル上面がスッキリとしたため、運転視界への影響を和らげていると考えられる。

リビングにあるテーブルのようにも見える、水平基調の木目調パネルも、単に演出のための特徴的な加飾というだけではなく、走行時にディスプレイのタッチパネルを操作する場合にも、手のひらを置いて操作しやすい形状とすることにより、誤操作を防ぐといった狙いもある (Fig. 17)。

このように、Honda e のインテリアデザインは、居心地の良い空間のための造形や工夫と、使い勝手や機能とを密接に関係させることにこだわった。

#### 4.4. 素材を活かした快適装備

前節で触れた、造形の工夫や使い勝手を活かした装備例を二点挙げて説明する。

まず運転席用のカップホルダーだが、このクルマの前席は左右ウォークスルー可能としている。そのためインストルメントパネルとセンターコンソールの間に脚が通れる空間を設ける必要があったので、コンソールからの引き出しカップホルダーを採用した。ただ、その取っ手を一般的な樹脂部品にすると、ウォークスルー時に脚にあたって違和感を与えてしまうことが予想された。そこで取っ手部分を柔らかい合革製のストラップとした。また色もブラウンとし、ステッチも入れることで着座時の視認性だけでなく、見た目の上質感や引き出し時の手触りも良くなった (Fig. 18)。

もう一つの例は、インストルメントパネル下のセンターロアポケットである。

こちらも同じく、極力張り出しは抑える制約の中でポ



Fig. 16 Front and rear interior designs

ケットを成立させる必要があった。そこで、シートと同じ生地を使用した布製ポケットを採用した。

これによって、スマートフォンなどの機器を接続・充電しながら収納しておくだけでなく、走行中でもガタツキや傷付きを抑えることができる。接続中のスマートフォンは Android Auto と Apple CarPlay など操作可能である

(Android Auto は Google LLC の商標です。Apple CarPlay は Apple Inc. の商標です。).

また、機器接続用のケーブル類の取り回しや収納場所について困る場合が多いものだが、機器と一緒にまとめて収納可能とし、使っていない場合もきれいに丸めて押し込んでおけるようにした (Fig. 19)。



Fig. 17 Instrument panel



Fig. 18 Cup holder



Fig. 19 Central lower pocket

この二点の装備例は、このような検討を積み重ね、細かく機能に配慮したデザインは、見栄えについてもより親しみやすさを増やすことができた。

#### 4.5. ぬくもりと自然な風合いを追求した木目調パネル

リビングテーブルのぬくもりを感じさせる上質な風合いを実現するため、木目調パネルは本物らしさを追求し開発した。

木目柄は、一般的な家具にもよく使われているウォールナットを採用し、生活空間としてのリビングルームを再現した。さらに、複数の色を重ねることで、自然な木目の複雑な色合いも再現した。本加飾は、フィルムでありながら、木目の導管からなる凹凸感を立体的に表現したことで、触感からも本物の木のぬくもりを感じることができ、パネルの角度は、ディスプレイのタッチ操作のしやすさと、画面への木目の映り込みも検証した上で設定している (Fig. 20)。

#### 4.6. モダンリビングを表現するファブリック

前述のようにインテリアは、親しみやすく飽きの来な

いデザインを追求している。そこでシートとドアの表面生地には、親近感のあるメランジ調のファブリックを使用した。また、厚みのある上質な織物を使用し、グレーの濃淡のコンビネーションで、モダンなりビング空間を演出した。

シートベルトや前席のサイドエアバッグのタグは、木目色に合わせてブラウンに設定した。通常、加飾として扱わないシートベルトや、タグの機能部品にも、色をまとうせアクセントとしての役割を加えた。グレーの内装に相性の良いブラウンアクセントは、シンプルな空間を一層華やかに演出させた。

ドアやシートの一部には、ジグザグのステッチを配し、見た目に楽しく、愛着が湧くワンポイントとした (Fig. 21)。

## 5. 市場からの反響

Honda e は、欧州・日本という二つの市場のみの販売ではあったが、世界的にも名誉ある数々の賞に輝くことができた。その中には日本車としての初受賞や、デザイン専門の受賞も含まれている (Fig. 22)。



Fig. 20 Wood grain tone panel

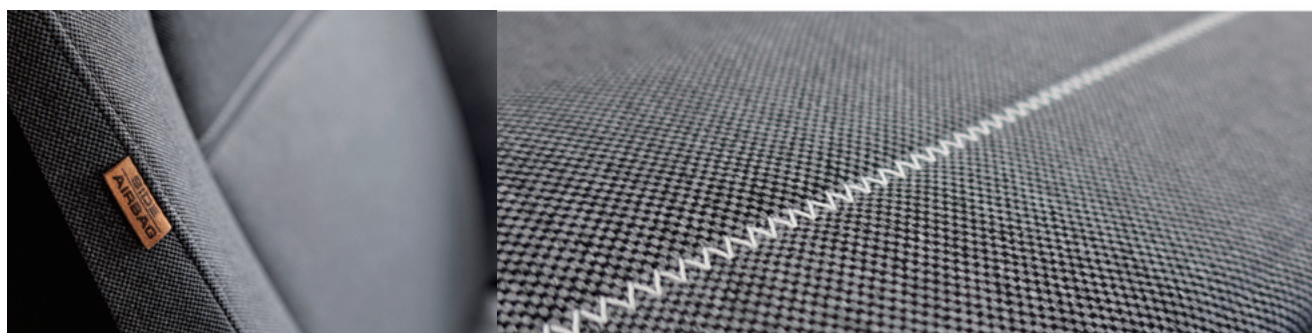


Fig. 21 Expression of living room



reddot winner 2020  
best of the best car design



reddot winner 2020  
smart product



| Prize                                                                               | Country | Awarded in |
|-------------------------------------------------------------------------------------|---------|------------|
| AUTOBEST 2021 Awards – ECOBEST title                                                | Europe  | 2020       |
| German Car of the Year 2021 – overall winner, ‘New Energy’ category *               | Germany | 2020       |
| Red Dot Design Awards – Red Dot: ‘Best of the Best Car Design’ & ‘Smart Product’ ** | Europe  | 2020       |
| News International Motor Awards 2020 – ‘City / Small Car of the Year’               | UK      | 2020       |
| Autocar Best Car Awards – ‘Best Car Tech’                                           | UK      | 2020       |
| AutoGids Best Car Awards – ‘Small Electric’                                         | Belgium | 2020       |
| EuroCarBody Awards 2020 – Winner, Volume Segment                                    | Germany | 2020       |
| The Les Numériques Digital Star 2020-2021 for ‘Connected Car’                       | France  | 2020       |
| Axel Springer Motor Awards – ‘Best Design’ **                                       | Spain   | 2020       |
| Denmark Car of the Year 2021 Awards – The Innovation Award, The Car-Joy Award       | Denmark | 2020       |
| The Best of Moto Awards – Alternative Drive, Design                                 | Poland  | 2020       |
| Automobile Awards by Motul – Design **                                              | France  | 2020       |
| 2020 TopGear.com Awards – City Car of the Year                                      | UK      | 2020       |
| ‘Most Exciting Novelty/New Car’ from Vezess.hu                                      | Hungary | 2020       |
| JIDA Design Museum Selection Vol. 22 – Gold Selection **                            | Japan   | 2020       |
| Japan Automotive Hall of Fame – 2020-2021 Car Technology of the Year                | Japan   | 2020       |
| 2021 Women’s World Car of the Year – Best EV                                        | World   | 2021       |
| UK COTY (Car of the Year) Awards 2021 – City Car of the Year                        | UK      | 2021       |
| World Car Awards – 2021 World Urban Car                                             | World   | 2021       |

\* First award to a Japanese car \*\* Design award

Fig. 22 Awards given as of April 2021

## 6. 最後に

Honda e の開発は、すでに先行する他社量産型 EV に対して後出しの位置づけでもあったので、語らずとも「他社同様のクルマは絶対に作らない」という Honda ならではの共通認識が常にメンバーの中にあった。それは 2020 年以降の欧州 CAFE 規制強化から始まる脱炭素社会の未来に対する Honda の具体的回答の一つという役割もあった。

そのような課題をチームはポジティブにとらえ、決してガソリン車の代替えではない EV として、街なかベストのコンパクトサイズに集約していった。その商品としての魅

力をさらに高めるべく、高出力モーターによる後輪駆動、床下バッテリー専用プラットフォーム、大型ディスプレイなどの Honda 初の先進技術が、コンパクトサイズにもかかわらず惜しみなく採用された。

一方、デザイン開発チームは北欧リサーチによって得られた「Affinity & Modern」という方向性から、「先進技術が人に寄り添うパートナーのようなクルマ」をカタチへと具現化していったのである。

Honda 初出展となったミラノデザインウィーク 2019 において、そのプロトタイプを中心に特別展示する機会を得たが、ファニチャーやファッションなど、非自動車デザイ

ナー及びメディアからも高い支持を受けたと聞いている。

車名に「Honda」が付いたのは、欧州における Honda のプレゼンスを向上させる意味も含まれており、多くの名誉ある賞をいただいたことで、その目的を達成できたと思う。

残念ながらコロナ禍対策の影響で、日本国内での新車発表や取材もリモート環境下で開催される中でも、お客様ご自身による EveryGo (Honda のレンタカー・カーシェアサービス) を活用した試乗レポート動画投稿なども多数あり、その反響の大きさに驚かされた。

そのような時期でも、明るい未来のクルマの姿を提供し続けることが我々の使命と考えたい。

■ 著 者 ■



内 田 智



佐 原 健



明 井 亨 訓



半澤小百合

# 交通安全アドバイスロボット Ropot の開発

Development of Ropot, Traffic Safety Advice Robot

菊 池 紗<sup>1</sup>  
Tae KIKUCHI  
甘 利 友 也<sup>1</sup>  
Tomoya AMARI

藤 井 智 士<sup>1</sup>  
Satoshi FUJII  
若 田 邦 治<sup>2</sup>  
Kuniharu WAKATA

楠 戸 淳 也<sup>1</sup>  
Junya KUSUDO  
才 津 優<sup>2</sup>  
Yu SAITSU

## 要 旨

## ABSTRACT

歩行中の交通事故は、日本では7歳児が突出して多い。そのため、小学校低学年の児童に対する交通安全教育の一助となる交通安全アドバイスロボット Ropot を開発した。

Ropot には教育機能と受容性機能を持たせた。特に、「安全確認地点リマインド」「後方確認リマインド」「振り返り機能」の三つの教育機能が今までの機器にはない特徴である。

これらの機能実現のために、高精度の位置計測が可能な全球測位衛星システムと環境ロバスト性の高いミリ波レーダを用い開発をおこなった。これを児童にとって親しみがわく相棒デザインの中に収め、受容性機能を向上させた。

教育展示会、実証実験を通じて、教育機能と受容性機能が児童、保護者、学校関係者に受け入れられ、効果が確認できた。

In Japan, seven-year-olds experience an exceptionally high number of pedestrian accidents. To address this, the authors developed a traffic safety advice robot, Ropot, to assist the teaching of traffic safety to children in the lower grades of elementary school.

Ropot has educational functions and receptive functions. In particular, three of the educational functions, known as “check point remind,” “backward check remind,” and “check point result review function,” have not been found in any other device up to now.

To develop these functions, the authors used a global navigation satellite system with high-precision positioning and millimeter wave radar with good environmental robustness. These functions are contained within a partner design that is appealing to children, which enhances the receptive functions.

At an educational trade fair and proving tests, children, their guardians, and school personnel responded positively to the educational and receptive functions, and the effectiveness of Ropot was confirmed.

## 1. はじめに

近年、予防安全技術の普及や法の整備、運転手や歩行者のルール厳守化で交通事故の数が減ってきている。しかしながら、日本では歩行中の交通事故による死傷者は7歳児が突出して多く、“魔の7歳”とも呼ばれている (Fig. 1)<sup>(1)</sup>。この年齢は、まだ心身の発達が未熟ながら親の手を離れて一人で登下校を始める時期であり、実際の事故も登下校中が一番多い (Fig. 2)<sup>(2)</sup>。

<sup>1</sup> ライフクリエーションセンター

E-mail: tae\_kikuchi@jp.honda

<sup>2</sup> デザインセンター

Honda は 2030 年ビジョンで、“交通事故ゼロ社会の実現をリードする<sup>(3)</sup>”と掲げている。具体的には、『事故に遭わない社会』…を実現するために、「人の能力」「モビリティの性能」「交通エコシステム」という三つの要素を調和させながら、安全への取り組みを追求<sup>(4)</sup>とある (Fig. 3)<sup>(5)</sup>。

交通安全の基点は人である。Honda でも「人の能力」向上のために交通安全教育を入学前後に様々なところでおこなっている。しかしながら、入学前後の子供はその行動特性上、目の前の友達の方へ駆け出したり、会話をして車に

気づかないなど交通安全以外の事に気が向きやすい。我々はその点に注目し、忘れてしまいがちな交通安全への行動をその場で思い出させることで、交通安全教育の補助をおこなうシステムとして交通安全アドバイスロボット（以下、Ropot）を開発することにした。Ropotは本体デバイス（以

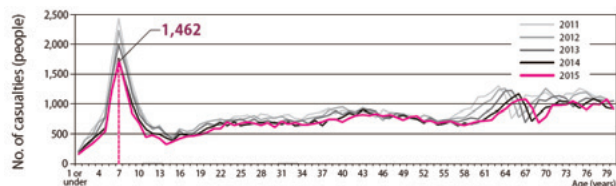


Fig. 1 No. of casualties from pedestrian traffic accidents (2011-2015)

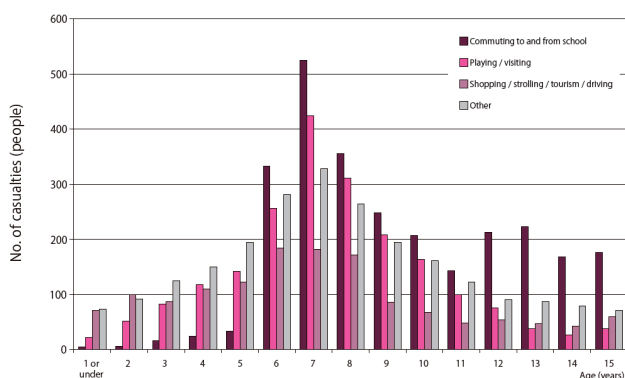


Fig. 2 No. of casualties from pedestrian traffic accidents by trip purpose (2015)

## Safety for Everyone

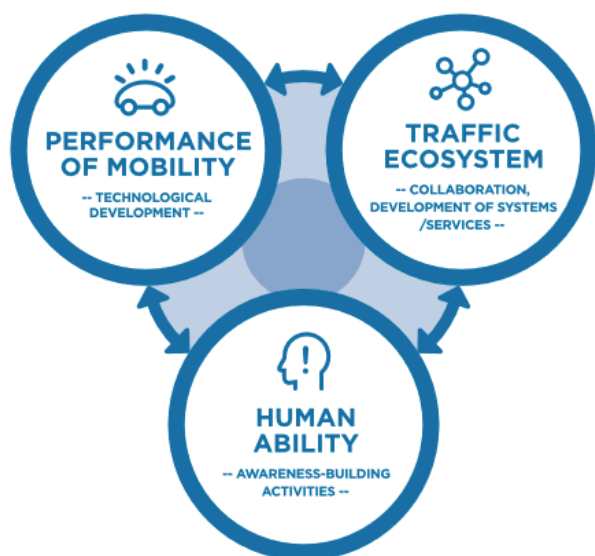


Fig. 3 Enhancing joy that comes with freedom of mobility while pursuing zero collisions

下、Ropot 端末)とクラウド、スマートフォン上で動作するアプリケーションで構成される。

事故要因の一番多い登下校シーンに絞り、その達成手段を検討し、教育機能と受容性機能を定め、デザインを含めて Ropot に実装し、実際に効果を確認するまでの内容を紹介する。

## 2. Ropot に求められる機能

### 2.1. 教育観点:安全確認の補助

7歳児をターゲットとした交通安全教育の補助をおこなうために必要な機能を検討した。

まず、児童の生物学的な認知能力について調査した。スティナ・サンデルスによると児童が物の動きを目の端で見つける（周辺視）という機能は大人に比べ低い<sup>(6)</sup>。また、同年代の6歳児の平均水平視野角は約90度、平均垂直視野角は約70度であり、大人（平均水平視野角150度、平均垂直視野角120度<sup>(7)</sup>）に比べ視野も狭い。さらに身長が低いことから目線も低い。それに加え、杉田らによると、児童は大人に比べ物音がどちらから聞こえてくるかという知覚力（音像定位）が劣っており<sup>(8)</sup>、視野外から接近する車両に気が付きにくい傾向がある。

次に、児童の交通環境における行動傾向について調査した。蓮花らによると児童は前方に走りやすい傾向があり、走ることで児童は左右確認が困難になる、車が来ても児童は止まりにくい、運転者が児童に気づいても運転者は対応が困難になるなどの問題が生じる場合がある<sup>(9)</sup>。このため、児童がしっかりと立ち止まり、視野を拡大するために頭を動かして見る事が重要である。

さらに、7歳児の交通事故の特徴を調査した。（公財）交通事故総合分析センターによると、平成27年度の7歳児である小学校一年生の死傷事故時の通行目的は登下校で38%、事故原因は飛び出しと横断歩道外の横断で約40%、事故が発生した場所は交差点と交差点付近で約58%を占めている<sup>(10)</sup>。

これらから、特に児童が通学時における交差点などの安全確認が必要な地点（以下、安全確認地点）に近づいた時、および車両が児童の視野外になりやすい後方から接近してきた時に、安全確認のための一時停止を児童に促す機能が有効であると考えた。

### 2.2. 教育観点:繰り返し教育の補助

児童に安全確認のための一時停止を定着させるためには、一時停止を促す機能だけではなく、一時停止の定着を補助する機能が有効だと考えた。そこで、児童に一時停止を定着させる方法を検討した。

蓮花らによると、日本では、警察官や交通指導員が交通安全教育を直接担当する機会が多いが、本来は身近な親や教

師が自ら教えることが重要である<sup>(11)</sup>。また、(公財)交通事故総合分析センターによると児童の行動を直していくためには、ある程度の期間をかけて児童を繰り返し指導する必要がある。さらに、実際に通学路を保護者と児童が一緒に歩き、保護者が児童の成長を確認しながら具体的に教えることが効果的である<sup>(10)</sup>。これらから、安全確認のための一時停止を児童に定着させる方法として、保護者が児童の成長に合わせて繰り返し指導することが効果的であると考えた。

しかしながら、保護者が毎日児童の通学に付いていくことは現実的には難しい。そこで、児童への初めての交通安全教育と、児童の成長に合わせた交通安全教育を保護者が担い、毎日の通学中に児童が保護者からの指導内容を思い出すための繰り返しリマインドと、安全確認のための一時停止実績の記録を機器が担うことで、児童の成長に合わせた繰り返し教育がおこなえると考えた。

このような役割を機器が担うために、機器の基本構成を装着型とし、児童に機器を毎日装着してもらうことで、リマインドと記録をおこなうことにした。安全確認地点で一時停止を繰り返し促す機能を安全確認地点リマインド、後方接近車両に対し一時停止を繰り返し促す機能を後方確認リマインドとした。また、児童の行動を記録し、保護者と児童に安全確認実績を提示する機能を振り返り機能とした。

### 2.3. 受容性観点:教育と見守りの相棒

毎日の登下校で児童に機器を身に付けてもらうためには、児童、保護者、そして学校に受け入れられるものにならなければならない。

まず、児童に身に付けてもらうためには、通学中に児童の負担にならないように、機器が小型かつ軽量であることが必要である。さらに、より児童に毎日身に付けたいと思ってもらうために、アニメの主人公の肩に乗っているキャラクタを参考にした。このようなアニメ作品は多く存在し、キャラクタは主人公と共に行動し、常にそばで見守ってくれる相棒のような位置づけである。これらを参考に、肩に乗る小さな相棒のような存在を目指した (Fig. 4)。これを相棒デザインとした。

次に、Ropot を保護者に受け入れてもらうため、小学生の児童を持つ全国の保護者に Web 調査をおこなった。保護者は通学中の児童の様子 (現在位置や到着、出発など) をリアルタイムに確認したいという要望があることがわかった。このため、スマートフォンなどの保護者が持っている端末に、児童の現在位置や出発到着を確認できる機能をもつアプリケーションが必要であると考えた。また、保護者は子供の教育を自分で担いたいという思いがあり、保護者に交通安全教育を任せることは、保護者の教育参加意欲に応えることになることがわかった。

さらに、児童が毎日の通学で Ropot 端末を使用するためには、小学校に Ropot 端末の持ち込みを受け入れてもらわなくてはならない。このため、授業中などに Ropot 端末が児童の遊び道具にならないように、学校内では Ropot 端末の機能を一部制限する機能が必須である。この機能をサイレント機能とした。



Fig. 4 Concept of Ropot device in first grade of elementary school

### 2.4. 求められる機能

以上より、基本的なユーザ体験と必要な機能を以下のよう

- (1) 保護者が実際の通学路で、児童に安全確認地点とその安全確認方法、および接近車両に対する安全確認方法を教える。
- (2) 保護者がアプリケーションを通じて、安全確認地点をクラウドに登録する。
- (3) 毎日の通学で、児童が通学の相棒である Ropot 端末を身に着け (相棒デザイン)、自宅を出発する。保護者のスマートフォンにクラウドから出発通知が届く (出発通知機能)。
- (4) 児童が安全確認地点に近づくと、Ropot 端末が児童に注意を促す (安全確認地点リマインド機能)。児童は保護者から教わった安全確認を思い出して安全確認を実施する。
- (5) 児童に車両が後方から接近すると Ropot 端末が児童に注意を促す (後方確認リマインド機能)。児童は保護者から教わった安全確認を思い出して安全確認を実施する。
- (6) 保護者が児童の現在位置などをアプリケーションで確認する (現在位置確認機能)。
- (7) 児童が学校に到着する。保護者のスマートフォンにクラウドから到着通知が届く (到着通知機能)。
- (8) 学校の中では、自動で Ropot 端末の機能を制限する (サイレント機能)。

(9) (3)-(7)と同様の手順で下校する。

(10) 帰宅後、安全確認のための一時停止実績を見ながら保護者と児童で交通安全について振り返る（振り返り機能）。

(11) (3)-(10)を繰り返し、安全確認行動を身につける。

本章の検討より得られた Ropot に求められる観点と機能の関係を Table 1 に示す。次章以降、Table 1 に示す観点と機能に基づいて、Ropot を紹介する。

Table 1 Relationship between points of view and functions of Ropot

| Point of view      | Functions                                                                                        |
|--------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Educational        | Check point remind<br>Backward check remind<br>Check point result review                         |
| Social receptivity | Partner design<br>Departure/arrival notification<br>Current location confirmation<br>Silent mode |

### 3. Ropot への実装

#### 3.1. Ropot のシステム

##### 3.1.1. Ropot のシステム構成

Ropot は Ropot 端末、クラウド、スマートフォン上で動作するアプリケーションで構成される。アプリケーションを使って自宅、学校の位置と安全確認地点をクラウドに登録する。Ropot 端末はその情報を取得し安全確認地点リマインド機能を動作させる (Fig. 5)。

##### 3.1.2. Ropot 端末

Ropot 端末は小学校低学年の児童がランドセルに装着して使用し、交通安全を促すためのリマインド機能および位置情報と安全確認地点での安全確認のための一時停止履歴をクラウドへアップロードする機能を持つ。ハードウェア構成を Fig. 6 に主要諸元を Table 2 に示す。

Ropot 端末はリチウムイオンバッテリーを電源とし、CPU、全球測位衛星システム (GNSS)、ミリ波レーダ、加速度/角速度センサ、データ通信モジュール (LTE)、振動モータで構成した。

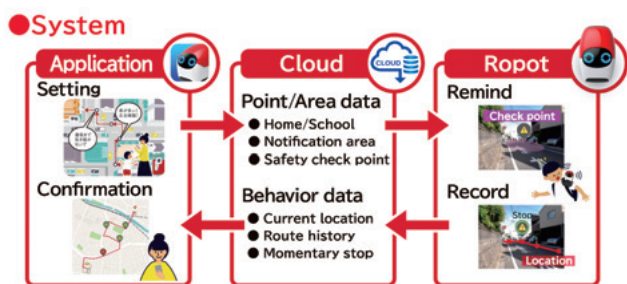


Fig. 5 System configuration

Table 2 Specification of Ropot device

| Item                                       | Specification          |
|--------------------------------------------|------------------------|
| Size (L x W x H) <sup>*1</sup> (mm)        | 81 x 53 x 59           |
| Mass <sup>*1</sup> (g)                     | 170                    |
| Continuous operation time (h)              | 3.5                    |
| GNSS receivable signals                    | GPS<br>QZSS L1C/A, L1S |
| Data communication system                  | LTE Cat-M1             |
| Millimeter wave radar frequency band (GHz) | 76-77                  |
| Charging connector                         | USB Type-C             |
| Dust-proof/drip-proof performance          | Equivalent to IP44     |

<sup>\*1</sup> Except for attachment part

Ropot 端末は小学校低学年がランドセルに装着して使用することを想定したサイズ、重量とした。バッテリー容量を検討するために、小学生の通学時間について Web で調査をおこなった。その結果、全国の小学生の通学時間はおよそ片道 50 分以内であることがわかった。従って、一日の動作時間は登下校合わせて 100 分とした。一日の充電忘れを考慮して、二日間の通学で充電切れを起こさないために、連続動作時間は 210 分と設定した。また、Ropot 端末が静止している状況では加速度/角速度センサによって静止状態を検知し、消費電力を抑えたスリープモードへ自動的に移行させる機能を実装した。

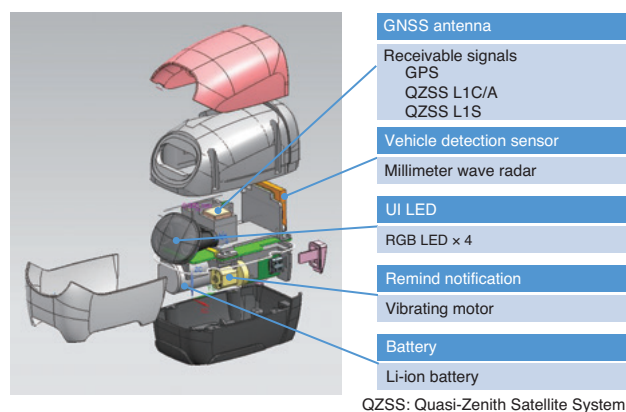
クラウドとの通信は数 kB/s と低速でも十分なため LTE Cat-M1 を採用した。

充電コネクタは、接続する際に表裏を迷わずにできるように、USB Type-C を採用した。

防滴防塵性能は、通学中の雨滴や運動場の砂や小石を考慮して、IP44 相当に定めた。

##### 3.1.3. アプリケーション

アプリケーションは、Android OS 上 (Android は Google LLC の商標です。) で動作するものを制作した。



QZSS: Quasi-Zenith Satellite System

Fig. 6 Device configuration

自宅、学校や安全確認地点の設定は保護者がおこない、親子で一緒に交通安全意識を高めることを目的に、グラフィックユーザインターフェース (GUI) の設計をおこなった。

メイン画面では Ropot 端末の現在位置や安全確認地点、学校、自宅位置を確認でき (Fig. 7)、後述する振り返り機能や通知履歴はメニューから遷移できるようにした (Fig. 8)。

### 3.2. 教育機能

Ropot には教育に関する機能を三つ備えている。安全確認地点リマインド、後方確認リマインドと振り返り機能について説明をする。



Fig. 7 Application main view



Fig. 8 Application menu view

#### 3.2.1. 安全確認地点リマインド

安全確認地点リマインド機能は、児童が横断歩道や交差点、駐車場など車の通行が多い地点において、交通安全確認のためのリマインドをおこなう機能である (Fig. 9)。保護者は、事前にアプリケーション上で安全確認地点を登録する。Ropot 端末は、登録された安全確認地点情報と、GNSS によって得られた緯度経度情報を照合しながら安全確認地点に近づくと、安全確認のリマインドのために振動モータを動作することで通知をおこなう。GNSS 取得信号は、横断歩道の手前など、指定した位置でより正確にリマインド機能が動作するように、GPS 信号に加えて準天頂衛星システム『みちびき』(QZSS) のサブメータ級測位補強信号 (L1S) も受信できる仕様とした。

児童が安全確認地点付近で一時停止したか否かは加速度 / 角速度センサによって判定する。一時停止を検知した場合、振動通知を停止し、一時停止したことをクラウドへ送信する。児童が一時停止せずに安全確認地点エリアを通過すると、振動通知を停止させ、クラウドへ一時停止しなかったことを送信する。

登校下校で横断歩道の停止位置や通学路が異なることもあることから、登校と下校でそれぞれ別の安全確認地点を登録できる仕様とした。

#### 3.2.2. 後方確認リマインド

後方確認リマインド機能は、児童が公道を歩く際に、後方からの車両にも気を配ることを思い出させるためのリマインド機能である (Fig. 10)。接近車両を検知した場合、

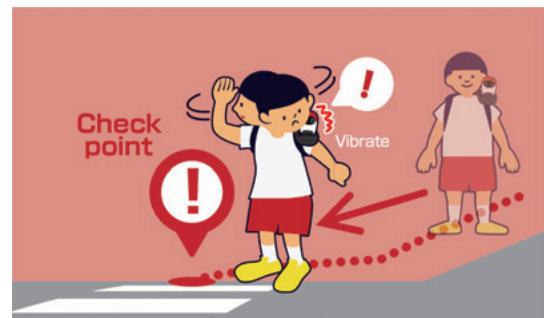


Fig. 9 Check point remind function

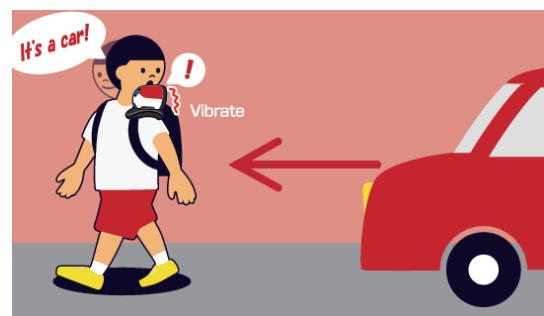


Fig. 10 Backward check remind function

Ropot 端末は後方の安全確認を促す振動通知をおこなう。振動通知をするタイミングは、振動通知から児童が安全確認をする時間を考慮して設定した。

また、車両検出センサとしてミリ波レーダを採用した。

ミリ波レーダの電波を使用することで、傘やマフラ、パークのフードなどで Ropot 端末が遮蔽された時でも、ロバストに接近車両を検知することができる。そして、ミリ波レーダは一般的に電波の周波数が高いほど、アンテナ面積は小さくなる。接近車両の検出範囲とデバイスの小型化を両立するために、Ropot 端末に搭載するミリ波レーダの周波数帯を 76 GHz とした。

### 3.2.3. 振り返り機能

振り返り機能は、保護者と児童がコミュニケーションをしながら、交通安全に対する意識を向上させることを目的とした機能である。児童の位置情報履歴と、安全確認地点で一時停止をしたか否かの行動履歴を、アプリケーション上で表示することができる。位置情報履歴は 10 秒ごとの位置情報を表示できるため、実際の通学ルートを確認できる (Fig. 11)。

過去データは、4 週間前からの履歴が表示できるため、児童の交通安全意識の長期的な変化を確認できる。

## 3.3. 受容性機能

Ropot 端末を児童、保護者、学校に親しみを持って使ってもらうことを目的とした受容性機能について説明する。

### 3.3.1. デザイン / UX コンセプト

Ropot 端末のデザインは、児童が愛着を持ち、『肩に乗る相棒』をイメージできるようなかたちを検討した。さらに、以下の点が児童と保護者に長く愛される要素だと考えた。

- ・ 肩に乗る小さなサイズ感
- ・ 親しみのある愛着のわくカタチ
- ・ 生命感のある表現

これらから、デザインコンセプトを“Minimum & Friendly”と定めた。

Ropot 端末は丸みがあり、あたたかみのある形状で 4 本脚の生き物のようにも見え、本体の黒い面積を有効に活用しコントラストを付けて端末をさらに小さく見えるようにした。

また、Ropot 端末に生命感を持たせるために前方にフルカラーLED を上下左右に四つ配置し、充電中や起動準備中、通常作動中と状況がわかるようにした (Fig. 12)。また、ぱっちり、にっこり、ねむたいの三つの表情を持たせることで、より愛着を持てるようにデザインした (Fig. 13)。

UX のコンセプトは、“親子で交通安全意識を高める”と定めた。親子でのコミュニケーションを促すために、以下のような工夫をした。

- ・ 児童が興味を持ちやすいグラフィック  
“保護者に持たされるもの”ではなく、児童自身が興味を持ちやすいようにデザインした。
- ・ 児童の安全行動やその変化がわかりやすい GUI  
保護者が児童の一時停止実績を確認し、児童にフィードバックしやすいように、安全行動やその変化をアプリ上で視覚的に表現した。
- ・ 親子で一緒に読める、絵本のようなユーザガイド (Fig. 14)  
保護者が児童に対し交通安全行動や Ropot の機能について教えやすいように、イラストを見せながら説明できるページを設けた。

Ropot 端末、アプリ、ユーザガイドで一貫した世界観をデザインした。



Fig. 11 Report view on application



Fig. 12 Status expression by LEDs



Fig. 13 Facial expression by LEDs

### 3.3.2. 出発到着通知

出発到着通知は、児童が自宅や学校に到着・出発した際に、スマートフォンのプッシュ通知で知らせる機能である。

出発到着通知以外にも、Ropot 端末のバッテリー残量が低下した場合に、プッシュ通知をおこなうことで充電を促す機能を実装した (Fig. 15)。

プッシュ通知の履歴を、アプリケーション上で閲覧できるようにすることで、具体的な出発到着の時刻を表示し、保護者が児童の位置確認する上での利便性の向上を図った。

### 3.3.3. 現在位置確認

現在位置確認は、Ropot 端末の現在位置情報がクラウド上に転送され、アプリケーション上でわかる機能である。

Ropot 端末は現在位置の検知情報を、100 秒周期でクラウドにアップロードしているため、遅くとも 100 秒前の現在位置をアプリケーション上で閲覧することができる。現在位置は Ropot のアイコンで表現し、近くに更新時刻を表示することで Ropot 端末の現在位置と更新時刻がわかる

ようにした。また、Ropot 端末の位置データが 5 分間更新がない場合、現在位置を表す Ropot のアイコンをグレー化して現在位置が更新されていないことがわかるようにした (Fig. 16)。

### 3.3.4. サイレント機能

サイレント機能は、学校などで Ropot 端末が不用意に動作することを抑制するための機能である。

学校の敷地内など、LED や振動モータが動作してほしくない場所で停止させることを、アプリケーションから設定することができる。Ropot 端末は、GNSS で取得した位置がサイレントに設定された施設であることを検知すると、起動中の LED、振動モータは非作動になる。さらに、歩行動作などの一定以上の連続した加速度をセンサが検知すると、LED が点灯、振動モータが作動し、リマインド機能も作動することで通常動作に移行するようにした。この仕様により、授業中の不意の LED 点灯を避けることができる。また歩行を開始すると、LED が点灯することで児童が Ropot 端末の動作状況を確認できる。



Fig. 14 Traffic safety guide



Fig. 15 Notification history list in application

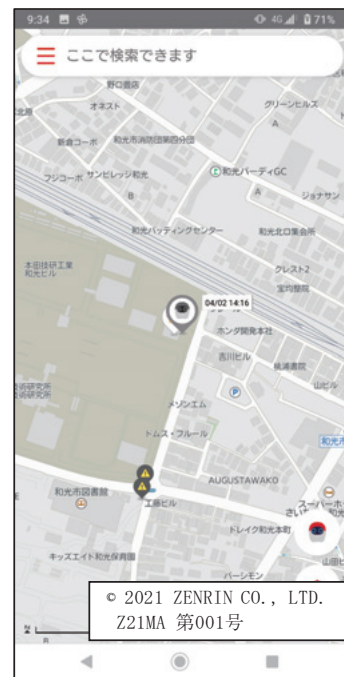


Fig. 16 Ropot current location

## 4. 教育効果と受容性の検証

### 4.1. 社会的受容性検証:教育総合展

Ropot のコンセプトやデザインに対する学校関係者の受容性を検証するため、試作した Ropot を 2020 年度教育総合展 (EDIX) に出展した。来場者に対しアンケートを実施し、Ropot のコンセプトに対する評価を調査した。

街中の交差点をイメージした展示ブースを準備し、来場した学校関係者に、Ropot が通学路における交通安全教育の補助を目的としていることや、児童向けのデザイン、保護者の要望に応える機能、授業の妨げにならないようにサイレント機能を有していることを説明した。さらに、学校関係者に Ropot への理解を深めてもらうため、安全確認地点リマインドと後方確認リマインド機能の体験をおこなった (Fig. 17)。

体験型の展示を通じて、学校関係者に Ropot が交通安全教育目的の機器であることを認知してもらい、授業の妨げになる可能性が低いことや、デザインを含め、学校への持ち込みが受容される可能性が高いことを確認できた。Ropot のコンセプトについては、97% の来場者から好意的な評価を得ることができた (Fig. 18)。

また、多くのメディアに Ropot が交通安全教育目的の機器として取り上げられた。実際に埼玉県和光市、福岡県福岡市の小学校における実証試験のユーザの中には、これらの報道が動機となって参加したユーザもあり、Ropot が社会に交通安全教育の補助機器として広く認知されつつあることを確認できた。



Fig. 17 Hands-on exhibition of Ropot

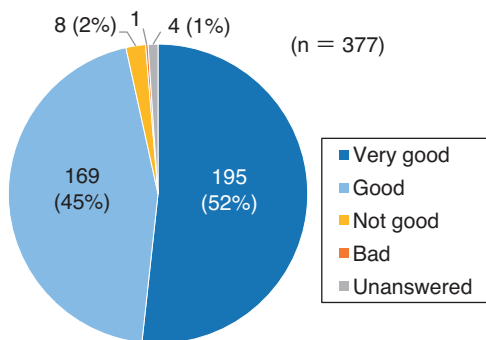


Fig. 18 Evaluation of Ropot concept

## 4.2. 教育効果およびユーザ受容性検証：実証実験

### 4.2.1. 実験概要

教育効果と日常生活でのサービス受容性を検証するため、Ropot を使った通学を実際に小学生がいる家庭において実証実験を実施した。

和光市、福岡市の小学校 2 校を対象に、小学一年生から四年生までの児童のいる家庭に参加を募り、福岡市 27 組、和光市 25 組の参加者により約 2 週間の実験期間で実施した (Fig. 19)。

### 4.2.2. 実験方法

参加した小学生に対し、登下校の際に Ropot 端末を 12 日間使用してもらい、登下校中の行動観察 (3 名)、使用前後の保護者へのアンケート、グループインタビューにより、教育効果およびユーザ受容性を確認した (Fig. 20)。学校への受容性は、本実験に起因する校内トラブルの有無を、実験先 2 校の小学校長へアンケートをおこない確認した。

行動観察の具体的な方法として、通学路上の交通安全行動が必要と考えられる地点 (信号のない横断歩道等) を観察地として、実際の登下校の様子を観察員により安全確認行動をおこなったかおこななかったかを記録した。実験条件として、「Ropot 端末装着前」「Ropot 端末を装着しリマイ



Fig. 19 Demonstration experiment by elementary school students

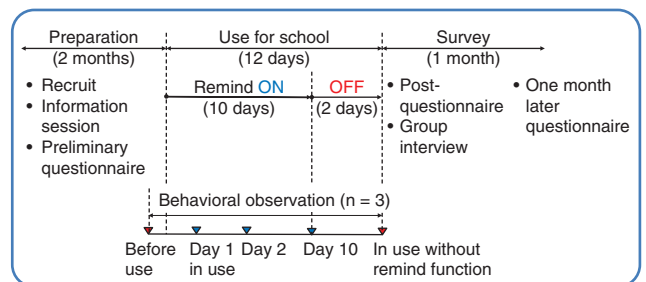


Fig. 20 Outline of experiment

ンド機能を有効にした10日間」「Ropot 端末を装着しリマインド機能を無効にした最後2日間」の三つの期間を設定した。

なお、これら実験方法に対しては、本田技術研究所内でおこなわれている生命倫理委員会の事前審査を経て実施した。実験参加は自由意志での参加であり、事前に児童および保護者に実験責任者から口頭および書面で本研究の目的、内容および参加者の権利を十分に説明し、書面にて参加の同意を得ている。

#### 4.2.3. 実験結果

最初に、教育機能に関する実験結果について述べる。行動観察の結果、Ropot 端末装着前に対し、装着中リマインド機能が有効な状態では一時停止など安全確認行動の増加が確認された (Fig. 21)。また、実験最後の2日間はリマインド機能が無効な状態にもかかわらず、装着前に対する安全確認行動の増加が維持された (Fig. 21)。

さらに実験終了一か月後におこなった保護者へのアンケート調査では、使用後一か月後も、77%の保護者より安全行動の意識が残っているとの回答を得た (Fig. 22)。

教育機能の三つの効果について、実験終了直後におこなった保護者へのアンケート調査の結果では、80-90%の

保護者が効果を感じたとの回答を得た (Fig. 23)。具体的なコメントとしては、同アンケートおよび同時期に実施のインタビュー調査の結果から「これまで止まっていなかった横断歩道で止まっている様子があった」「振動を感じることで後ろへの意識 (後方確認) が顕著に変化した」「レポートがあることで、確認手段がない中で問いただすということが不要になり、話をすることもできた」等の評価を得て、児童、保護者ともに機能の効果を確認した。

続いて、受容性機能に関する実験結果について述べる。児童への受容性については、同アンケート調査で98%が愛着を持ったとの回答を得た (Fig. 24)。具体的なコメントとして、実験終了直後のグループインタビューからは「親よりも息子の方が乗り気で、Ropot 端末を着けたいとせがんできた。相棒のように感じた様子」「とても可愛がって、なでたり声をかけたりしていました」「Ropot 端末の目が変化する点はかなり気に入っている様子だった」「着けていきなさいと言わなくても3日目くらいから自分で着けていくようになり習慣化された」等の評価を得て、相棒デザインおよび“Minimum & Friendly”コンセプトが、児童におおむね受け入れられたことを確認した。

保護者への受容性については、実験終了直後のアンケート調査の結果から、受容性機能「出発到着通知」「現在位置確認」についていずれも70-80%の保護者が効果を感じたとの回答を得て、保護者においても高い受容性を確認した (Fig. 25)。

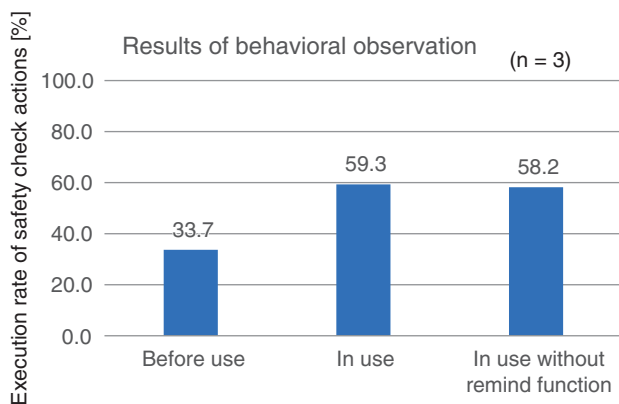


Fig. 21 Results of behavioral observation

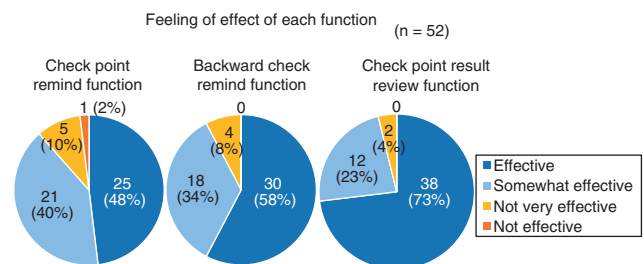


Fig. 23 Feeling of effect of each educational function

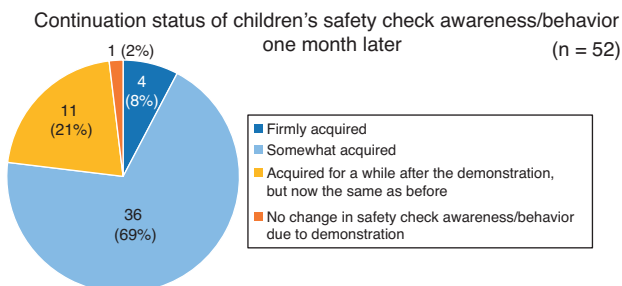


Fig. 22 Continuation of child safety confirmation awareness one month later

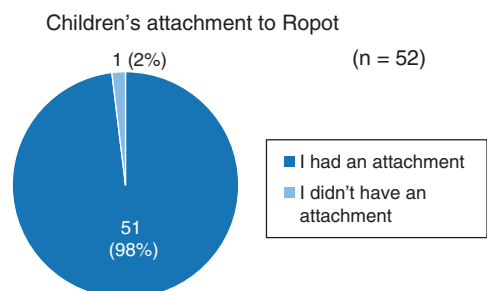


Fig. 24 Feeling of attachment

学校への受容性については、実験先の小学校長のアンケート結果から、2校のいずれもトラブルの報告無しとの回答であり、Ropot 端末の持ち込みが授業の邪魔になるような事例はなかった。

これら教育機能や受容性機能を踏まえたサービス全体に対する保護者の評価として、実験終了一カ月後におこなった利用意向のアンケート調査で92%の保護者からRopotを今後も利用させたいとの回答を得た (Fig. 26)。その一方で、利用シーンへの要望として「ランドセル以外で付けられる台座があって、リュック、肩掛けでも着けられるようになったら良い」「登下校のみではなく、休みの日、習い事でも使えると良い」等、通学以外の外出時への利用意向が多く聞かれた。

#### 4.2.4. 考察

教育機能については、実験終了後も交通安全確認の行動増加や意識づけが持続していることから、教育効果があることが示せた。また同機能が高い効果感を得られていることから、GNSSによる測位機能と、ミリ波レーダによる車両検知機能は十分な性能であった。

受容性機能については、児童と保護者いずれからも高い評価を得られたことから、Ropotが親子向け製品として受容性を持つことがわかった。一方、通学以外の利用意向が

多く聞かれたことから、将来に向けては、より幅広い生活シーンへの利用を可能にする技術開発が必要であることがわかった。

## 5. まとめ

小学校低学年の児童に対する交通安全教育の一助となる、交通安全アドバイスロボットを開発した。

Ropotに必要な機能として、子供の能力や特性、交通安全教育の観点から教育機能を定め、聞き取り調査から、受容性機能を定めた。

教育機能を実現するためには、高精度の位置計測と後方検知能力が必要である。位置精度はGNSSを用い、後方検知能力にはミリ波レーダを採用し、開発をおこなった。受容性機能を実現するために、相棒デザインやサイレント機能を入れ、サイズ、質量は子供の負担にならない大きさにした。

教育展示会、実証実験を通じて、実際に学校や児童、保護者らに受け入れられ、12日間の装着でも安全行動の向上が見られたことから、Ropotの教育機能と受容性機能の効果確認ができた。

今後は利用範囲の拡大を検討し、広く交通安全教育に貢献できることを目指していく。

## 参考文献

- (1) 公益財団法人交通事故総合分析センター: 子供の歩行中の事故, ITARDA INFORMATION, No. 116, p. 3, (2016)
- (2) 公益財団法人交通事故総合分析センター: 子供の歩行中の事故, ITARDA INFORMATION, No. 116, p. 6, (2016)
- (3) <https://www.honda.co.jp/sustainability/report/pdf/2020/Honda-SR-2020-jp-017.pdf>, (2020)
- (4) <https://www.honda.co.jp/safety/policy/index.html>, (2020)
- (5) <https://global.honda/about/sustainability/safety.html>, (2020)
- (6) スティナ・サンデルス: 交通のなかのこども, 全日本交通安全協会, p. 95-105, (1977)
- (7) <https://www.honda.co.jp/safetyinfo/kyt/partner/childvision.pdf>, (2002)
- (8) 杉田聡, 今井博之: クルマ社会と子どもたち, 岩波書店, p. 49-53, (1998)
- (9) 蓮花一己, 向井希宏: 交通心理学, 放送大学教育振興会, p. 202-208, (2017)
- (10) 公益財団法人交通事故総合分析センター: 小学一年生が登下校中に遭った死傷事故, ITARDA

Feeling of effect of each function (n = 52)

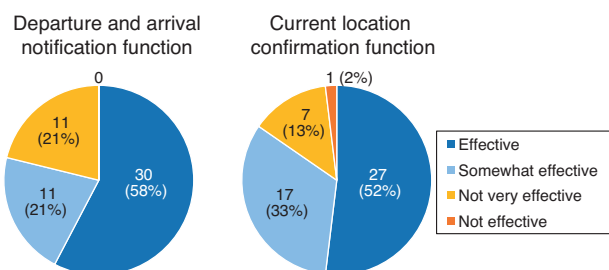


Fig. 25 Feeling of effect of each function to increase receptivity

Inclination to use one month after the end of the experiment (n = 52)

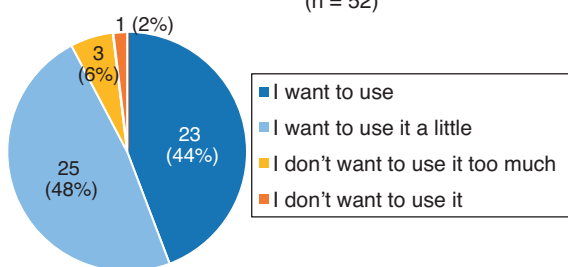
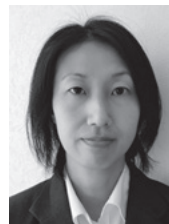


Fig. 26 Inclination to use after experiment

INFORMATION, No. 121, p. 3-4, (2017)

- (11) 蓮花一己 監修:トラフィック・パートナー(街の子どもたち), 本田技研工業株式会社 安全運転普及本部, 15p., (2002)

■著 者■



菊池 紗



藤井 智士



楠戸 淳也



甘利 友也



若田 邦治



才 津 優

# COVID-19 感染者搬送車両の短期開発

## — 迅速な車両提供による社会貢献 —

Short Lead Time Development of Customized Vehicles with Preventive Measures for COVID-19 Infection  
- Social Contribution through Swift Provision of Vehicles -

中 尾 敬一郎<sup>1</sup>  
Keiichiro NAKAO

田 中 利 享<sup>2</sup>  
Toshiyuki TANAKA

### 要 旨

COVID-19 に対応する自治体、医療機関を支援するため、感染者搬送車両を開発した。感染または感染の疑いのある市民を医療機関などへ搬送する際に、運転手への感染を防止する仕様を開発し、それを既存車両に組み込んだ感染者搬送車両を2週間で自治体へ納入した。この短期間での開発と提供のため、感染防止手法として既存の車両の運転席背面にフラットな隔壁を取り付け、車載のエアコンの送風能力を活用するというシンプルな機構を採用した。感染防止機能の指標となる隔壁前後の差圧は目標とした手術室の管理目標値 2.5 Pa 以上を、キャビンの換気能力は目標の 12 回 /h 以上を達成した。この車両を 2020 年 4 月から 12 月までに計 158 台を仕立て、25 都道府県に提供した。

### ABSTRACT

Honda has developed a vehicle for transporting infected persons in order to support local governments and medical institutions responding to COVID-19. Honda first developed specifications to protect drivers from infection while transporting infected persons or persons suspected to be infected to medical institutions and the like, then incorporated the specifications into an existing production vehicle and delivered the infected person transport vehicle to local governments within two weeks. In order to develop and provide the vehicle in a short period of time, simple infection-prevention mechanisms were adopted. These consisted of a flat partition attached to the rear of the driver's seat in the existing vehicle and the ventilation functions of the vehicle's air conditioner. Infection prevention performance indices were the differential pressure between the spaces fore and aft of the partition and the cabin ventilation capacity. The differential pressure target of over 2.5 Pa (standard for medical operating room) and the cabin ventilation capacity target value of over 12 times/h were achieved. Between April and December of 2020, 158 of these vehicles were assembled and provided to 25 municipalities and prefectures.

### 1. まえがき

近年、企業の社会貢献への要望は年々高まっている。Environment(環境)、Social(社会)、Governance(企業統治)の頭文字をとって ESG と呼ばれる観点は近年特に注目され公益性が収益性と同等に企業価値判断において重要な役割を果たしている<sup>(1)</sup>。またこの Social で示される社会貢献が環境、企業統治と同様に企業活動の成果として求められている。Honda は主体的に社会貢献に取り組んでおり、これまでも交通安全活動、災害復興支援などを通して継続的に社会貢献をおこなってきた<sup>(2)</sup>。

2019 年から世界で感染が拡大した新型コロナウイルス感染症 Coronavirus disease 2019 (COVID-19) は市民の健康の危機だけでなく、移動の制限など社会活動広範に深刻な悪影響を及ぼした。2020 年 4 月は日本における第一波の感染拡大期であり、急速かつ広範な感染症拡大で多くの問題が顕在化したが、特に医療分野での貢献が求められていた。この状況で Honda は増加する感染者の医療機関への安全な搬送、感染症対策の医療用品、医療用機器に対するニーズの高まりを支援すべき社会的課題と捉えた。

新型コロナウイルスの感染拡大に対して Honda は以下三つの社会貢献活動をおこなった。

<sup>1</sup> Honda R&D Europe (Deutschland) GmbH

E-mail: keiichiro\_nakao@de.hrdeu.com

<sup>2</sup> 本田技研工業株式会社

- ・自治体への感染者搬送車両の提供
- ・医療機関へのフェイスシールドの提供
- ・人工呼吸器の生産支援

本報ではこの内の感染者搬送車両の開発について述べる。ウイルス感染の拡大といったような事象への対応は予期できておらず、COVID-19 感染拡大に応じての開発開始であった。このため全く知見がない状態から感染者を搬送する車両が不足するより早いタイミングで車両を提供する必要があり、短期間で感染防止機能の開発と、生産準備、車両の仕立をおこなった。

## 2. 開発のねらい

COVID-19 感染者搬送車両（以下 搬送車）の開発にあたり以下をねらいとした。

- (1) シンプルな構造での感染防止機能の付与
- (2) 迅速な車両の提供

開発開始時、感染者または感染が疑われる市民は歩行可能な軽症または無症状者も多く、感染者の急増に対応するため搬送には救急車だけでなく、保健所の市販車の公用車が使われており、救急隊員、保健所職員など、医療従事者の感染拡大を招く危険性があった。そこで運転手への感染防止機能を有する車両の開発を開始した。

開発開始時点の 2020 年 4 月 1 日時点では感染拡大による感染者搬送用車両の不足は顕在化していなかったが、独自に搬送車提供のニーズを想定し、開発日程の目標は仮に 2 週間後の 2020 年 4 月 15 日での提供開始とした。

また開発開始時点では車両提供の方法、台数も未定であり、シンプルな構造を採用することで市販車をベースに簡単に感染防止機能を付与、復元できるようにして広く社会に提供することをねらった。

## 3. 感染防止機能と構造

### 3.1. 設計思想と性能目標

開発した搬送車の模式図と内部の写真を Fig. 1, 2 に示す。一般的に医療機関での空間の感染防止は、保護する空間を陽圧として差圧を設け外部から空気の流れを防ぐことによりおこなわれる。同様の考えを本搬送車においても採用し、感染防止が必要な前席側（運転席・助手席側）を陽圧の状態にして搬送者が座る後部座席の間に差圧を生み出すこととした。さらに搬送車を迅速に提供するためにはこの機能を市販車に対しシンプルな機構で実現する必要があった。そこで市販車の前席背面に隔壁を設け、車載エアコンにより前席側を陽圧とした差圧を発生させる機構を採用した。

まず前席背面の隔壁で後部座席側との空気の流れを遮った。そうすることでエアコン吹き出し口がある前席側は、

エアコンで外気取り込みをおこなうと大気圧に対し陽圧となる。また隔壁の後部座席側は車両後部の排気口から大気圧解放されるため相対的に隔壁前後で前席側「高」、後部座席側が「低」の差圧が生まれる。この差圧により後部座席から前席への空気の流入を防ぎ感染防止の機能を果たした。このアイデアは病院の手術室が感染症予防のため陽圧となっていることと、車載エアコンは短時間で車室内を快適にするため強力なファンを搭載しているという知識から得た発想である。本報では STEPWGN を事例として取り上げるが他車種においても同じ構造により感染防止機能を付与できた。

次に感染防止機能の目標値を設定した。まずは機能の柱となる隔壁前後の差圧は日本の病院設備設計ガイドラインから手術室の管理目標値 2.5 Pa 以上<sup>(3)</sup>とした。換気能力は換気回数（1 時間当たりの換気体積を室内容積で除した値）12 回 /h 以上とした。これは自治体からの要請で米国疾病予防管理センター（CDC）が空気感染の隔離区域に換気回数最低 12 回 /h 以上を推奨していることによる<sup>(4)</sup>。

構造は各部品ボルト締結で容易に取り外し可能とし、材質は不燃、難燃性部材を採用することで、市販車からの搬送車への仕立ての際の作業性と使用における安全性にも配

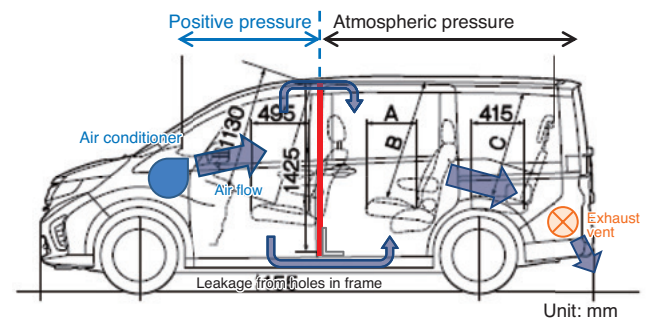


Fig. 1 Schematic diagram of vehicle



Fig. 2 Inside view of vehicle

慮した。また乗員に安心を与えるために、外観品質にも注意を払った構造とした。

### 3.2. 隔壁の構造

気流を遮るための前席背面の隔壁はパネル、シール、窓で構成され、極力シンプルな構造を実現するため、パネルは曲げ、溶接などの加工を加えない一枚板構造を採用した。重量増加を抑えるためパネル材質はアルミニウム合金とし、気密及び乗員の切創防止のため端面をゴムのシール材で保護した。隔壁の取り付け位置は前後の開口を仕切るセンターピラーの後端とした。Fig. 3 に隔壁左端の取り付け部を示す。

スライドドアの車両の場合、センターピラー後端には後部座席への乗降を補助するためのグラブレールがある。Fig. 3 に示すようにこのグラブレールで隔壁を共締めして車体に固定した。グラブレールを隔壁の固定部材として活用したことにより固定用ボルトが見えないだけでなく、後部座席への乗降時に乗員がグラブレールを使用できるようにした。また隔壁の左右端面はセンターピラー後端に位置しており、開口部の密閉に用いるウェザーストリップが取り付けられている。このウェザーストリップを活用し隔壁を車体外板と共締めする構造とした。隔壁の左右端面は後席乗車時に乗員の視線にあるが共締め構造により隔壁の左右端面は後席乗車時に乗員の視線に入らず、本来密閉のためのウェザーストリップで締結したことで隔壁の気密性確保にも寄与した。

搬送する後部座席乗員の容体急変に備えて、後部座席が視認できるように隔壁中央部にはポリカーボネート製の車室内窓を設けた。Fig. 4 に隔壁の窓を示す。

一般的に内装品の締結部分は乗員の視界に入らない位置に配置するため、通常は隔壁の窓も後部座席乗員から締結部が見えない前席側に配置する。しかし設計で連携した福祉車両の開発チームからの提案により、後部座席の乗員が

異常時に窓に寄り掛かった際に押し抜きを防止するため窓を後部座席側に取り付けた。この窓に対しては安全確認だけでなく利用者から後部座席で開放感を感じられるという評価を得た。

### 3.3. 空調システムの活用

市販車両の車室内には Heating, ventilating, and air-conditioning unit (HVAC) と呼ばれる空調ユニットが搭載され、送風、熱交換、冷暖房の切り替え、内気循環、外気導入の切り替えなどの機能を有し車室内の空調をおこなっている。また車両後部には一方向弁を備えた排気口があり車室内に取り込んだ空気はここから排気する。つまり外気取り込みモードでエアコンを使用する際には、車室内は大気圧に対し陽圧状態で空気は前から後ろに向かって流れる。また HVAC は STEPWGN の事例で  $450 \text{ m}^3/\text{h}$  と大きな送風能力を持つ。隔壁の気密をおこなえば HVAC のみで十分な差圧が確保可能だと考えて試作をおこない、目標の  $2.5 \text{ Pa}$  以上の差圧を確認した。HVAC ユニットの外観と搭載位置を Fig. 5 に示す。

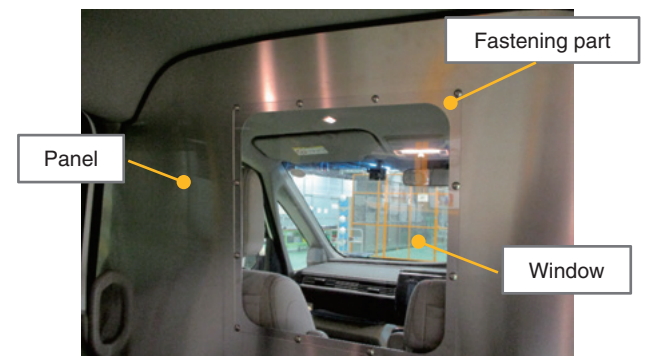


Fig. 4 Internal window of partition

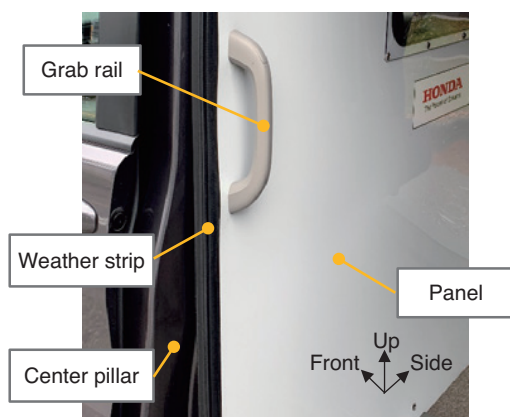


Fig. 3 Side part of panel fixed by using grab rail and weather strip

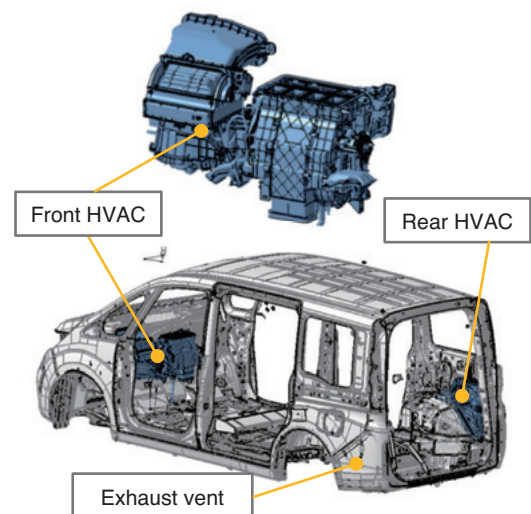


Fig. 5 HVAC unit and its layout in vehicle

搬送車では隔壁前後の差圧発生のため、エアコンは必ず「外気取り込み」で使用する必要がある。誤って「内気循環」となると隔壁前後に差圧を発生できず感染防止機能が働かない恐れがある。そのため搬送車両は組立時に「外気取り込み」状態で HVAC のフラップのアクチュエーター配線を外し、常時「外気取り込み」で作動するようにした。また感染防止機能を最大限発揮するために「前席エアコンは最大」での使用を規定した。

### 3.4. 隔壁前後差圧の検証

感染防止機能の評価のため、隔壁前後の差圧を測定した。測定条件は「外気取り込み」で前席エアコンを最大とし、隔壁の側面からエアースコップを挿入し、隔壁前後の差圧を差圧計で測定した。差圧測定の様子を Fig. 6 に示す。

2020 年 4 月に組み立てた 19 台の STEPWGN (DBA-RP1 1.5 L ターボ, CVT, FF, エアコン風量手動で最大) の事例では停車中の測定値は 11 から 20 Pa (平均 15.4 Pa) であり、目標の 2.5 Pa 以上を大きく上回った。また走行中は車体後部の排気口による走行風による負圧が発生するため相対的に隔壁前後の差圧が上昇する。上記 STEPWGN で測定した際は 20 km/h 走行時に 5 Pa 差圧の上昇を確認した。

### 3.5. 換気能力の検証

次に自治体からの要望があった換気能力の検証をおこなった。換気能力は CDC の規定に従い 1 時間当たりの換気量を換気する空間の体積で除した値を 1 時間当たりの換気回数として評価する。搬送車での測定は車体後部の車室内排気口出口での風速を測定し、排気口の断面積から 1 時間当たりの換気量を算出する。この値をキャビンの体積で除して換気回数を算出した。排気口での風速測定の様子を Fig. 7 に示す。

差圧測定と同じ STEPWGN の事例で換気能力は 73 から 111 回/h (平均 90.2 回/h) であり目標の 12 回/h 以上を達成した。

### 3.6. 気密性の確認

前席への空気漏洩を視覚的に確認するためにスモークテストを実施した。

全てのドアを閉じた状態で、運転席に着座し、エアコンを停止した後に隔壁の後部座席側に設置したスモークマシンをリモコン操作で起動する。後部側に煙を充満させた後にエアコンを起動し隔壁前後に差圧を発生させ、隔壁の隅部、隔壁の窓枠シールその他から隔壁の前席側への煙の侵入がないことを確認した。スモークテストの様子を Fig. 8 に示す。

### 3.7. 飛沫飛散防止能力の確認

COVID-19 では感染者の咳、くしゃみによる飛沫飛散、飛沫感染が問題となった。そのため勢いよく飛散する飛沫を再現し、前席の侵入の可能性について確認した。

咳、くしゃみによる飛沫飛散は 1 から 2 m とされる<sup>(5)</sup>。飛沫飛散を再現し可視化するため、紫外線ランプの照射で発光する蛍光剤水溶液を模擬飛沫として、圧縮空気で作散させる試験を採用した。0.4 MPa の圧縮空気の容量を変化させながら紫外線ランプで十分視認できる量の 5 ml の蛍光剤水溶液が 2 m 以上飛散する条件を探索した。その結果、感染者の口元に見立てた 1.6 m の高さから模擬飛沫が 2.7 m 飛散する条件を試験条件とした。この条件で隔壁後部に飛沫飛散の装置を持ち込み、隔壁前後に差圧を発生させた状態で後部座席着席時の頭部位置を想定した座面から高さ 700 mm、隔壁から 850 mm の位置から隔壁に向かって水平方向前面の溶液を飛散させる。飛散範囲を紫外線ランプで確認し、隔壁前部への飛散がないことを確認した。飛沫飛散テストの様子を Fig. 9 に示す。

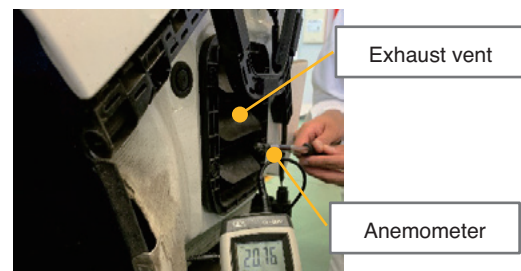


Fig. 7 Ventilation capacity measuring test



Fig. 6 Pressure differential measuring test



Fig. 8 Smoke leak test

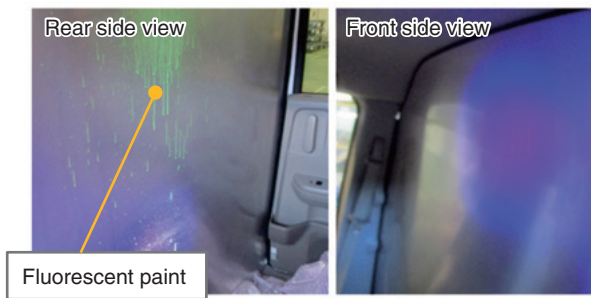


Fig. 9 Scattering test of cough droplets

#### 4. 迅速な提供のための生産技術

本開発では「2週間での納入」の目標達成のため仕様開発に並行して生産準備を進めた。生産準備期間の短縮には生産技術統括部が開発を進めてきたフレキシブルな生産プロセスが寄与した。結果として搬送車1車種を隔壁設計開始から搬送車に仕立てて検査が完了するまでに必要なリードタイムは3から4日であった。搬送車の生産プロセスと特徴を説明する。

##### 4.1. 設計・試作

隔壁の形状は車種ごとに取り付け位置、取り付け方法、端面の見切りなどを考慮して設計する必要がある。

形状はセンターピラー後端の隔壁取り付け位置での断面形状を元に設計する。上下寸法は気密性確保のためのゴムシール材のクリアランス分小さく設定した。また隔壁自重や差圧を受けるため左右に緩い円弧状で取り付ける。そのため左右に数十mm大きく設計した。取り付けに用いる後部スライドドアのグラブレール取り付け穴もパネル形状に反映した。実際の隔壁は車体への取り付けにより変形するため、隔壁は設計、試作、実車での取り付け確認を繰り返し最終的な切断形状を決定した。

##### 4.2. 隔壁パネル切断

隔壁の生産リードタイム短縮は、切断のみで製作可能な一枚板構造の隔壁パネルの採用と、フレキシブルかつ高速なレーザ切断機 Intelligent Laser Blanking System (ILBS) の活用によるものである。

Fig. 10 に ILBS の概要と適用技術を示す。

本生産に用いた ILBS は Honda オリジナルの車体鋼板用高速レーザ切断機であり、高速レーザカット技術、高加速度レーザヘッド駆動技術、高速同期コンベヤの開発により世界最高クラスの切断速度 120 m/min (Fe 板厚 0.6 mm) の性能を有する。ILBS のブランキングとはロール状の車体用鋼板コイルからプレス工程前の車体用鋼板ブランク材を生産する工程であり、通常プレス加工を用いる。プレスブランキン

グは生産速度が高いが部品ごとに金型費用と金型製作リードタイムが必要となる。ILBS は高速化技術によりこの工程を金型不要のレーザ切断に置き換えて、埼玉製作所寄居完成車工場に量産導入した。Fig. 11 に ILBS で切断中のパネルを示す。

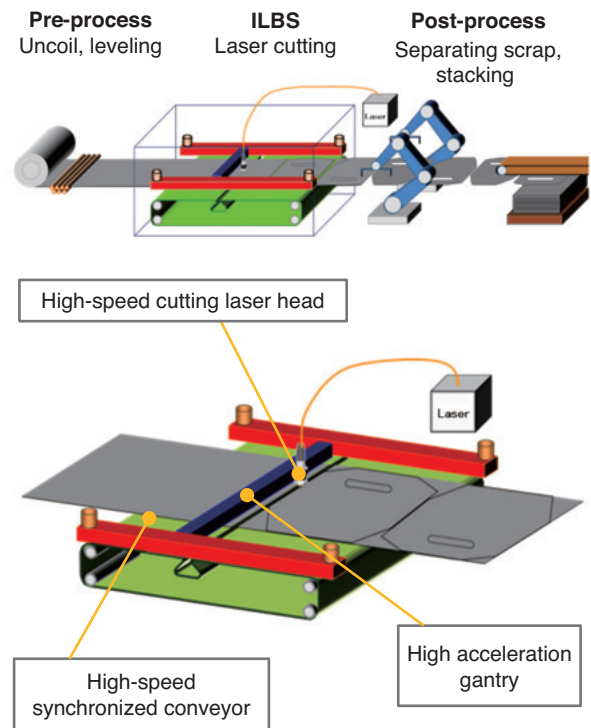


Fig. 10 ILBS and attached technology

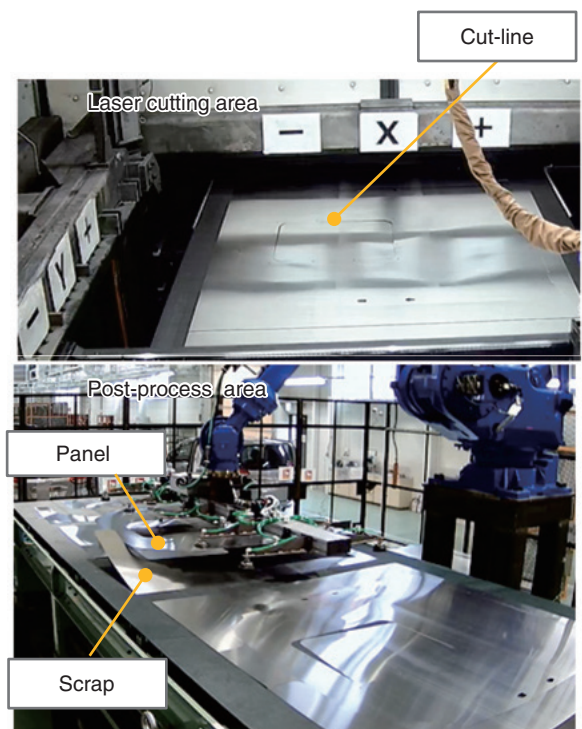


Fig. 11 Cutting panel by ILBS

ILBS は金型不要で試作に適したレーザ切断を量産に追従できる切断速度でおこなうため試作から量産移行の際に設備変更が必要ない。そのため切断形状が決まると直ちに切断プログラムを作成し、量産切断に取りかかるため生産準備リードタイムの短縮が可能である。今回の隔壁パネルでは1機種あたり1から3回の寸法調整が必要であったが、設計、試作、切断開始のリードタイムは1日であった。これはフレキシブルな生産技術開発に取り組んできた成果である。

#### 4.3. 塗装

切断された隔壁パネルは直ちに埼玉製作所狭山完成車工場または協力メーカーに輸送し塗装、外観検査をおこなった。

#### 4.4. 組立

車両に塗装したパネルを隔壁として取り付け、搬送車に仕立てた。組立は車両にパネルや窓、端面のシール材の取り付け、HVAC の常時外気取り込み化をおこなう。組立工程のタクトタイムは2名作業で20から30分/台であった。シンプルな構造により組立が簡単であり、全国の自治体への車両供給にあたっては国内の事業所だけの組立ではなく、隔壁の供給により全国の販売会社でも搬送車の組立をおこない各自治体に提供した。Fig. 12 に組立作業の様子を示す。

#### 4.5. 検査

組立が完了した全ての車両に検査を実施した。

差圧、換気能力、スモークテストの感染防止に対する3項目に加え、外観検査、場内走行による異音検査の商品性に対する検査をおこなった後に搬送車として自治体に提供した。

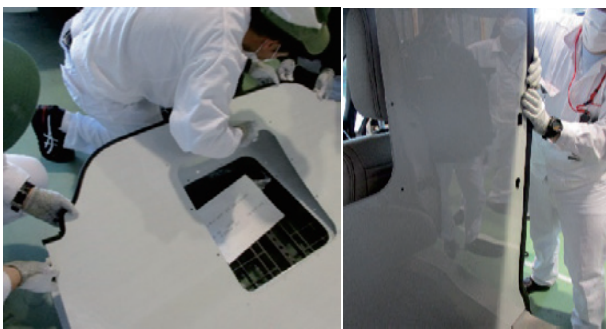


Fig. 12 Assembly process

## 5. 社会貢献の実績

シンプルな構造で感染防止機能を持つ車両を迅速に開発したことで感染拡大に先んじて全国の自治体に提供した。開発開始時に設定した提供開始目標の2020年4月15日に対し、最初の供給は2日前倒して4月13日に埼玉製作

所から渋谷区に対しておこなわれた。これは開発開始から10日後であった。Fig. 13 に搬送車の提供の台数の実績と全国の新型コロナウイルス検査の陽性者数を示す<sup>(6)</sup>。

開発のねらい通り4月の第一波の感染拡大に対応して車両を提供できた。また5月以降も自治体の要望に応じて提供を続けたため、第二波以降の大規模な感染拡大前に多くの車両を提供することができた。

Fig. 14 に車両提供時の様子を示す。2020年12月末までに25都道府県に158台の搬送車を納入した。首都圏を中心に広く全国の都道府県に提供できた。

実際に利用された自治体の担当者からは次のようなフィードバックを頂いた。

- ・金属製の隔壁に安心感がある
  - ・隔壁の窓が大きく、搬送者の様子を確認しやすい
  - ・一般の車両なので目立たずプライバシーを保護できる
- また利用者からだけでなく、一般報道、ソーシャルメディアを通して車両提供に対して反応が多数得られた。

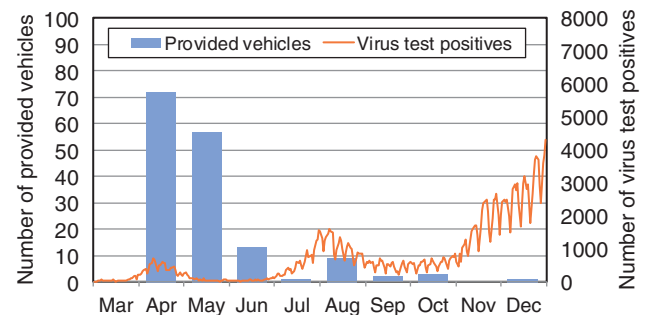


Fig. 13 Actual result of customized vehicle supplies



Fig. 14 Delivering for autonomy

## 6. まとめ

新型コロナウイルスの感染拡大に対応する自治体、医療機関を支援するため、感染者搬送車両を開発し提供した。

- (1) 市販車両の空調ユニットを活用しキャビンに隔壁を設置することで、内外の感染症予防のガイドラインに

記載されている 2.5 Pa 以上の差圧, 12 回 / 時間以上の換気能力を有する車両を仕立てることができた。

- (2) 隔壁はシンプルな一枚板構造を採用することで, 生産準備リードタイムの短縮を図り, 高速レーザー切断工程や, 既存のグラブレール, ウェザーストリップを隔壁の一部として使用することで開発開始から 10 日という短期間での提供を可能にした。

市販車両にシンプルな構造で感染防止機能を付与したため迅速に開発, 生産準備を進めることができ全国 25 都道府県に 158 台納入した。

## 参考文献

- (1) 経済産業省:SDGs 経営/ESG 投資研究会報告書, p. 13-15, (2019)
- (2) 本田技研工業株式会社: Honda サステナビリティレポート 2020, p. 150-156, (2020)
- (3) 日本医療福祉設備協会: 2 章 病院感染対策, 病院設備設計ガイドライン (空調設備編), HEAS-02-2013, p. 15, (2013)
- (4) U.S. Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention (CDC): Guidelines for Environmental Infection Control in Health-Care Facilities, p. 19, (2003)
- (5) 新型インフルエンザ及び鳥インフルエンザに関する関係省庁対策会議: 事業者・職場における新型インフルエンザ対策ガイドライン, p. 97, (2009)
- (6) 厚生労働省: 新型コロナウイルス感染症オープンデータ, <https://www.mhlw.go.jp/stf/covid-19/open-data.html>, 2021/4/21

## ■ 著 者 ■



中尾敬一郎



田中利享

# 二台一組の薄型ロボットを用いた無人車両搬送システム

Unmanned Vehicle Transportation System Using Pair of Thin Robots

近 藤 修 平<sup>1</sup>

Shuhei KONDO

鹿 野 直 人<sup>2</sup>

Naoto SHIKANO

益 田 晃 次<sup>1</sup>

Koji MASUDA

室 園 智 紀<sup>1</sup>

Tomoki MUROZONO

## 要 旨

人に代わってクルマの搬送をおこなう無人車両搬送システムを考案した。幅広い車種や、自動運転機能が搭載されていない車両にも適用できるように、車両の搬送にはクルマ本体の性能に制約を受けない車両搬送ロボットを用いることとした。また、屋内や都市部の狭小スペースでも車両を搬送するため、二台一組のロボットが車両の下を自在に移動し、対象車両のタイヤを同時に持ち上げ、協調しながら全方向へ自由自在に搬送をおこなう方式とした。システムの実現可能性を検証することを目的とし、車両搬送ロボットの試作機開発をおこなった。開発した試作機を用いて、狭小スペースにおける動作検証実験をおこない、所望の搬送動作が実現できていることを確認した。

## ABSTRACT

An unmanned vehicle system that transports cars in place of humans was devised. To enable application to a wide range of vehicle types including those without automated driving functions, vehicle transportation robots that are not constrained by car body performance are used for vehicle transportation. Additionally, in order to transport vehicles even in limited indoor and urban spaces, the system employs a pair of robots that move freely underneath the target vehicle, lift up the tires of the vehicle at the same time, and cooperate to achieve free omni-directional transportation. A prototype of the vehicle transportation robot was developed to verify system feasibility. Operation verification experiments were conducted using the developed prototype in a limited space, and confirmed realization of the desired transport operation.

## 1. はじめに

Honda は 2030 年ビジョンにおいて、「すべての人に、『生活の可能性が広がる喜び』を提供する」というステートメントを掲げている<sup>(1)</sup>。クルマは、生活の可能性を広げ、移動のニーズを簡単かつ迅速に満たす便利なツールである。しかし、クルマの利用には、駐車や給油、充電など、移動には直接関係のない様々な手間が存在する。

特に、駐車に対して苦手意識や不安を感じるドライバーは多く、その割合は全ドライバーの約 3 割に上る<sup>(2)</sup>。また、初心者ドライバーの過半数が駐車場や車庫での運転に危険を感じている<sup>(3)</sup>。このように、駐車という行為がクルマでの移動に対する心理的障壁となっている。日本における全交通事故のうち、駐車場内における事故の割合は約 3 割を占め<sup>(4)</sup>、駐車に対する苦手意識や不安は交通事故の

実態にも表れている。

駐車を肩代わりしてくれるサービスとして、欧米ではパーレーキング (VP) が広く普及している。VP は、自身が運転してきたクルマのキーを係の人 (Valet) に預けると、代わりにクルマの駐車 (Parking) をおこない、外出時には出入口までクルマを届けてくれるサービスである。VP はドライバーにとって便利なサービスである反面、人が駐車をおこなうことに変わりはなく、高級レストランやホテルなど限られた環境でしか運用されていない。

人がおこなう駐車を直接的に支援する手段としては、駐車枠付近での使用を前提としたパーキングアシスト機能搭載車両が既に製品化されており、ドライバーの心理的負担低減や駐車場内事故の削減に寄与している<sup>(5)</sup>。

近年、自動運転と VP を組み合わせた自動パーレーキング (AVP) にも注目が集まっている。AVP とは、あらか

<sup>1</sup> 本田技研工業株式会社

E-mail: shuhei\_kondo@jp.honda

<sup>2</sup> デザインセンター

じめ予約した自動バレーパーキング対応駐車場へ行き、駐車場の中でも隣接施設などへのアクセスが便利な位置で降車し、ユーザがスマートフォンなどの端末を使って自動駐車のリクエストをすると、ドライバーが立ち会うことなく、無人で自動的に駐車してくれるサービスである<sup>(6)</sup>。AVPに関しては、現在、技術開発が盛んにおこなわれているが、AVPで要求されるレベル4程度の自動運転車が世の中に普及するまでには数十年を要するという報告もある<sup>(7)</sup>。

この課題に対して、空港の駐車場など主に大規模な屋外駐車場を使用することを目的とした大型の車両搬送ロボットが実用レベルで運用され始めている<sup>(8)</sup>。ロボットを用いることで、必要な機能やインフラを全て設備側に持たせることができ、自動運転機能が搭載されていない車両でも自動駐車が可能となる。

一方、駐車が容易ではなく、駐車可能台数の少ない屋内や都市部の狭小スペースでの運用を想定したシステムはまだ実用化されていない。その要因としては、ロボットの小型化や緻密な制御が容易ではないことなどが挙げられる。そこで筆者らは、狭小スペースにおいても運用可能な無人車両搬送システムを考案した。

本稿では、システムのコンセプトに加え、システムの実現可能性を検証することを目的として、その中心的役割を担う車両搬送ロボットの試作機開発と、試作機を用いた車両モデルの搬送動作検証実験について述べる。

開発した車両搬送ロボットの試作機を Fig. 1 に示す。



Fig. 1 Prototype of robot

## 2. 開発のねらい

狭小スペースでも運用可能な AVP を想定した無人車両搬送システムの適用例を Fig. 2 に示す。

ドライバーは広い乗降スペースで車両を乗り捨てることのできる。ドライバーの降車後は、ロボットがクルマの車種やサイズ、位置を自動で認識し、二台一組で協調しながら無人の車両を駐車エリアまで搬送する。駐車エリアでは、人が乗り降りするスペースが不要なため、管理サーバからの指令によって高密度な配置をおこなうことができる。出庫の際は、ドライバーのオーダーに合わせ、車両を乗降スペースまで搬送する。この一連の動作により、駐車に関わる手間やストレスの削減、駐車効率や安全性の向上を図る。

このようなサービスを実現し、人々により快適なカーラ

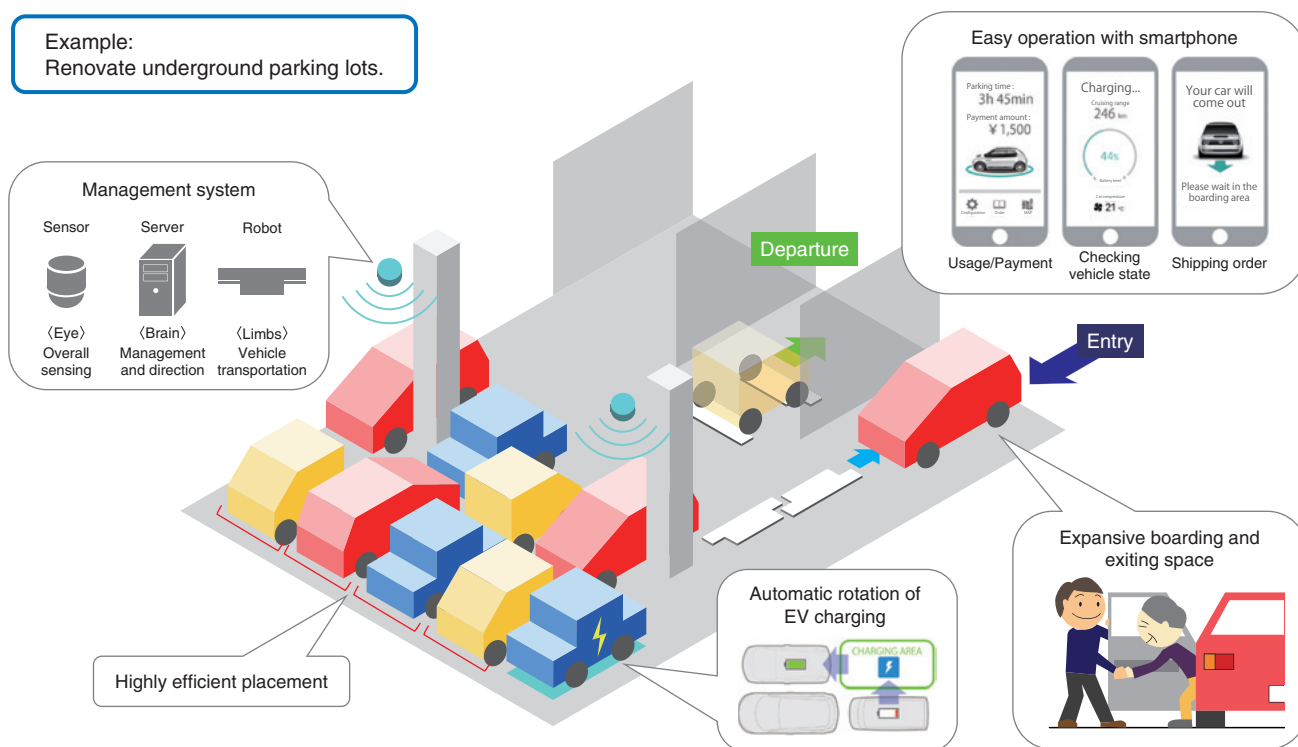


Fig. 2 Image of AVP operation using robots

イフを提供するため、考案した無人車両搬送システムにおいては、以下の二点を開発のねらいとした。

- (1) 狭小スペースで運用可能なこと
- (2) 多様な車種に適用可能なこと

### 3. 車両搬送システムのコンセプト

#### 3.1. 基本コンセプト

ロボットを用いた車両搬送動作の概念図を Fig. 3 に示す。一台のロボットで搬送をおこなう場合、ロボットそのものが大きくなってしまい、狭小スペースでの運用が容易ではない。そこで、二台一組のロボットが車両の下を自在に移動し、対象車両のタイヤを同時に持ち上げ、協調しながら全方向へ自由自在に搬送をおこなう方式とした。

#### 3.2. 狭小スペースでの運用

車両搬送時は、Fig. 3 に示すように、車両の下にロボットが収まることで元の車両のサイズを保ち、単体動作時は、Fig. 4 に示すように、車両下のスペースや、狭いデッドスペースを活用した移動や保管をおこなうことで省スペース化を図る。また、クルマは一般的に前輪を操舵することで方向転換をおこなうが、ステアリングの切り角には限界があるため、移動先によっては複数回切り返しをおこなう必要があり、狭小スペースにおける移動には不向きである。そこで、ロボット側に全方向移動機構を搭載し、真横移動やその場旋回などの動作を可能とすることで、狭小スペースにおいてクルマの移動性能に依存しない自由度の高い動作をおこなう。

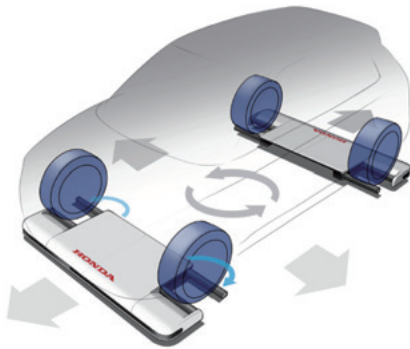


Fig. 3 Concept scheme of transportation by robots

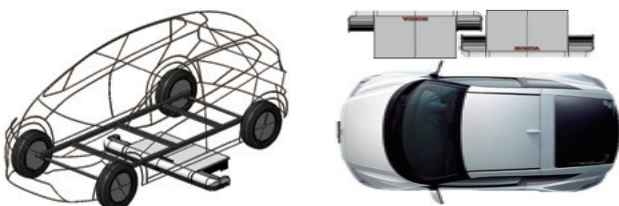


Fig. 4 Efficient use of space

#### 3.3. 多様な車種への適用

本ロボットは、一般的な軽自動車から大型車への対応を想定している。幅広い種類の車両を搬送するためには、車種やサイズの違いに柔軟に対応できるシステムが必要である。本節では、多様な車種への適用を可能とするための車両の昇降方式と各設計要件について述べる。

##### 3.3.1. 昇降方式

車両の昇降は、Fig. 5 に示すように、ロボットに搭載している二本のアームでおこなう。二台のロボットが車両の下に進入後、左右それぞれのタイヤに対し、回転アームを水平面で180度回転させ、固定アームと挟み込むことで車両を持ち上げる。この際、Fig. 6 に示すように、アームの外周部がフリーに回転し、タイヤとの接触摩擦を低減する構造としている。

また、計測や動作に誤差があった場合でも、Fig. 7 に示すように、タイヤに先当たりするアームによってロボット本体に回転力が生じ、車軸と平行な位置にアライメントされることで、安定した昇降をおこなうことができる。

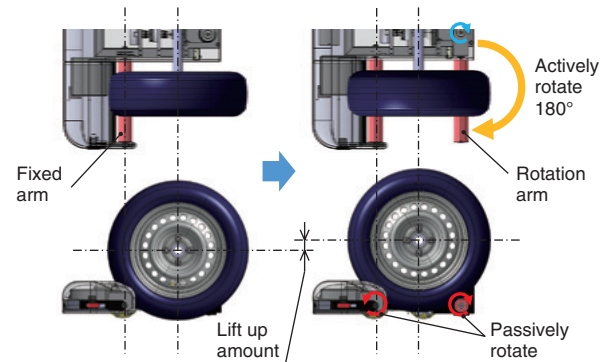


Fig. 5 Sequence of lift up motion

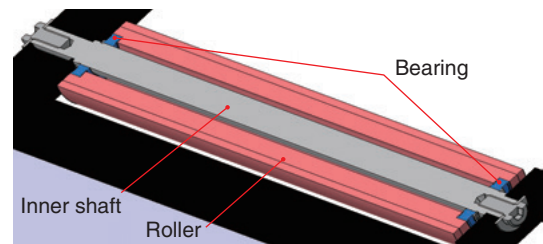


Fig. 6 Sectional view of arm



Fig. 7 Self-alignment motion

### 3.3.2. 設計要件

本項では、日本の道路運送車両法や保安基準を参考に、多様な車種へ適用するためにロボットに求められる各要件と、要件に対する考え方について述べる。

トレッド幅に関して、明確な保安基準は定められていないが、全幅に関しては、軽自動車で 1480 mm 以下、5ナンバー車で 1700 mm 以下、3ナンバー車で 2500 mm 以下と道路運送車両法により定められており、タイヤ幅を含めた外寸はこの数値以下でなければならない。本ロボットでは、Fig. 8(a) に示すように、タイヤの搭載位置に、全対象車種の最小タイヤ内寸、最大タイヤ外寸に対応できるようなマージンを持たせることで、車種ごとの違いに対応する方式とした。

最低地上高に関しては、保安基準において空車状態で 90 mm 以上と定められているが、一般的な車両の最低地上高は 140 mm 前後のことが多い。ロボットの厚みを 120 mm 以下に収めることができれば、日本車における対象車種の 9 割程度をカバーできる。

ホイールベースに関して、明確な保安基準は定められていないが、全長に関しては、軽自動車で 3400 mm 以下、5ナンバー車で 4700 mm 以下、3ナンバー車で 12000 mm 以下と道路運送車両法により規格が定められており、ホイールベースがこの値を上回ることはいない。本ロボットでは、Fig. 8(b) に示すように、二台のロボット間距離をホイールベースに合わせ、任意の位置に制御することで、どんな全長の車両であっても理論上は搬送可能である。

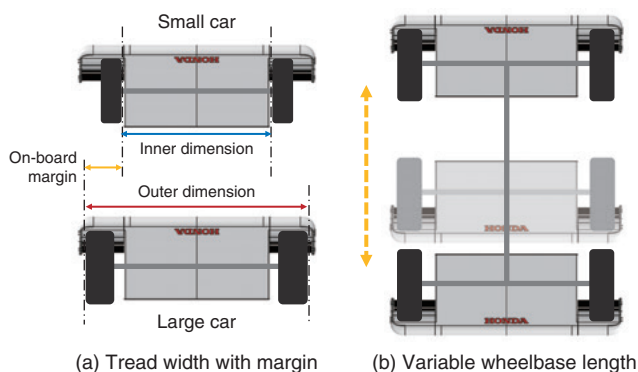


Fig. 8 Supports any size

## 4. 試作機開発

### 4.1. 検証項目

狭小スペースにおいて、車両モデルの搬送動作を検証するための試作機を開発した。検証項目を以下に示す。

- (1) アーム回転機構による、安定したタイヤの昇降動作
- (2) ロボット二台間のリアルタイム通信による、動作タイミングの同期と車両の協調搬送

- (3) その場旋回や真横移動などの全方向移動による、狭小スペースでの運用

### 4.2. 車両モデル

検証に使用する搬送用の車両モデルを Fig. 9 に示す。本モデルは、軽自動車と大型車の中間サイズに位置する普通車の中で、広く普及している FIT (2013 年モデル) をベースに製作した。アルミ製のベースフレームに、搬送中のロボットの動作が把握しやすいよう、ボディの外形をかたどった真鍮製のワイヤーフレームと実車用のタイヤを組み合わせることで構成されている。モデルの外形は全長 4000 mm × 全幅 1700 mm × 全高 1500 mm、最低地上高は 210 mm、重量は約 200 kg である。

### 4.3. 機構設計

本試作機は、3 章で定めた要件をベースとしているが、Fig. 9 の車両モデルを用いて 4.1. 節で提示した検証項目を確認する上で必要十分なスペックとした。試作機のハードウェアを Fig. 10 に、諸元を Table 1 に示す。

#### 4.3.1. 移動機構

車輪にはメカナムホイール<sup>(9)</sup>を採用した。外観を Fig. 11 に示す。メカナムホイールは、四輪をそれぞれ独立で制御することにより、全方位への自由自在な移動が可能である。車輪の回転方向による本体の移動方向を表す図を Fig. 12 に示す。近年では研究領域に留まらず、重量物搬送用の無人搬送車にも利用され始めている<sup>(10)</sup>。メカナムホイールにより、クルマでは実現が容易ではない真横移

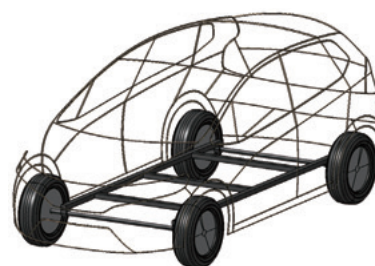


Fig. 9 Wire frame model for experiment

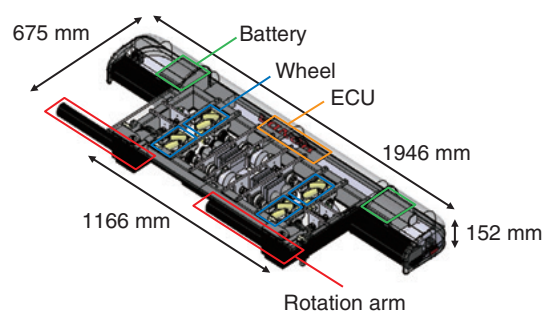


Fig. 10 Appearance of robot prototype hardware

Table 1 Specifications

|                     |                 |                    |
|---------------------|-----------------|--------------------|
| Weight [kg]         |                 | 80 / 1 unit        |
| Forward speed [m/s] |                 | Max. 1.9           |
| Withstand load [kg] |                 | 800 / 2 units      |
| Actuator            |                 | Wheel x 4, Arm x 2 |
| Motor               | Type            | Brushless DC motor |
|                     | Performance [W] | 260                |
| Battery             | Type            | Li-Fe              |
|                     | Capacity        | 24 V x 36 Ah       |
| CPU                 |                 | Renesas RX62G      |
| Control period [ms] |                 | 10                 |

動やその場旋回といった動作をおこなうことで、切り返しに必要なスペースの削減と、高密度な搬送を図る。

#### 4.3.2. アーム機構

アームの駆動機構にはベベルギアボックスを採用しており、モータトルクの増幅と、回転軸を 90 度異なる方向へ伝達する役割を担う。また、185/55R16 のタイヤサイズで、昇降量がタイヤ下端から路面までの距離で 30 mm となるよう固定アームと回転アーム間の距離を設定した。

#### 4.4. 制御設計

本節では、車両搬送動作の実現に必要な、ロボット単体

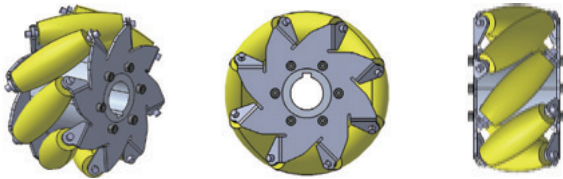


Fig. 11 Appearance of mecanum wheel hardware

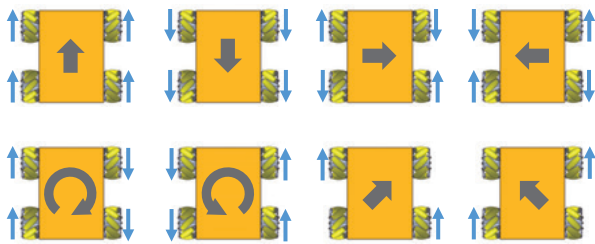


Fig. 12 Moving direction by mecanum wheel

の運動制御と、ロボット二台間の同期制御について述べる。

##### 4.4.1. 運動制御

ロボットの運動学モデルを Fig. 13 に示す。ここで、 $\phi$  は絶対座標系  $\Sigma_w$  から見たロボット本体の回転角度、 $x, y$  はロボット座標系  $\Sigma_{RB}$  の原点位置、 $v_1$  から  $v_4$  はそれぞれの車輪の接線速度である。ロボットの逆運動学を式 (1) に示す。目標とする速度  $\dot{x}, \dot{y}, \dot{\phi}$  を与え、行列演算をおこなうことにより  $v_1$  から  $v_4$  が導出される。

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 1 & W+L \\ 1 & 1 & -(W+L) \\ -1 & 1 & -(W+L) \\ 1 & 1 & W+L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} \quad (1)$$

また、式 (2) を用いて車輪の接線速度  $v$  を角速度  $\dot{\theta}$  に変換している。ここで、 $r$  は車輪の半径である。

$$\dot{\theta} = \frac{v}{r} \quad (2)$$

制御システムのブロック線図を Fig. 14 に示す。ロボットの速度  $\dot{x}, \dot{y}, \dot{\phi}$  を制御量、車輪のモータトルク  $\tau_{1...4}$  を操作量とし、位置の累積誤差低減のため PI 制御を適用した。 $\dot{x}_d, \dot{y}_d, \dot{\phi}_d$  に任意の目標速度を与えることで、その速度に追従するよう制御をおこなう。なお、車輪の回転角はエンコーダを用いて計測し、角速度は状態オブザーバを用いて推定した値を用いた。

##### 4.4.2. 同期制御

独立した二台のロボットを用いて車両を搬送するためには、ロボットが協調して動作することが求められる。本システムでは、一台のロボットを親機、もう片方を子機と

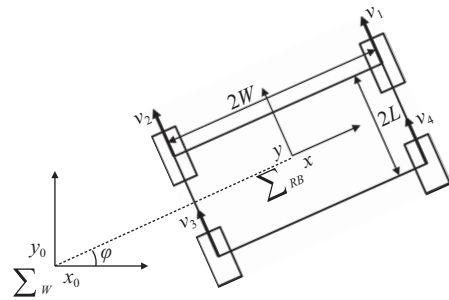


Fig. 13 Kinematic model of robot

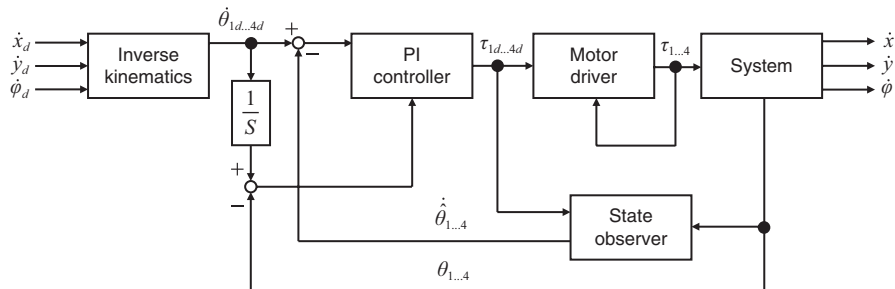


Fig. 14 Block diagram of control system

して定義し、互いの作動状況が無線通信によって確認しながら車両搬送動作をおこなう。具体的には、Fig. 15に示すように、車両搬送時の動作タスクを複数のステップに分割し、各ステップの開始前に現在のステップにおける状況や故障状態の相互確認をおこない、次のステップの開始タイミングを同期することで協調搬送をおこなう。本システムでは、有限状態機械を用いて動作のモデル化をおこなった<sup>(11)</sup>。なお、各ステップの遷移は以下の(1)から(3)の全ての条件を満たす場合に発生する。

- (1) 現在ステップにおけるタスクが完了したとき
- (2) 二台のロボットがそれぞれ同じ状態にいるとき
- (3) 一方のロボットから現在ステップのタスク完了コマンドを受信したとき

何らかの要因で作動不能または通信が途絶した場合は、フェールセーフとして互いに動作を停止する仕様とした。

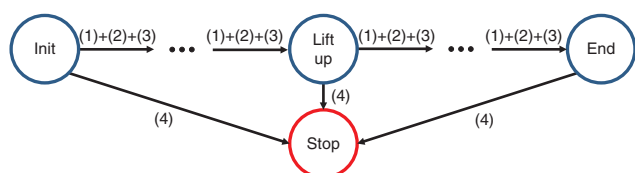


Fig. 15 Example of state flow diagram

## 5. 動作検証実験

開発した試作機を用いて、車両モデルの昇降動作と車両搬送動作の検証実験をおこなった。本章では各実験の実施内容と結果について述べる。

### 5.1. 車両昇降動作

本実験では、4.1.節(1)で示した通り、基本的な昇降動作に加え、ロボット単体移動時に制御誤差があった場合の昇降動作の検証をおこなった。昇降動作の実験の様子をFig. 16に示す。ロボットが車両の下に進入後〔図中(1)〕、2本のアームを水平面で180度回転させ〔図中(2)と(3)〕、タイヤを挟み込み、車両を持ち上げることで、ねらい通り30 mmの昇降動作が実現できた〔図中(4)〕。また、Fig. 17に示すように、進入時に片側120 mm程度誤差が生じてても、アームの回転力によってロボットの姿勢がアライメントされ、安定した昇降動作が実現できた。

### 5.2. 車両搬送動作

#### 5.2.1. 動作計画

本実験では、4.3 m × 7 mという、クルマの操舵だけでは駐車容易ではない屋内の狭小スペースにおいて、縦列駐車を想定した動作をおこなった。Fig. 18にロボットの動

作順序と経路を示す。図中(1)に示すように、車両モデルが一台分収まるターゲットグリッドに対し、車両モデルが4 m離れた位置に90度回転した状態で配置されており、ロボットは車両モデルから真横に2 m離れた位置で動作を開始する。なお、ロボットの移動軌道にはPTP制御<sup>(12)</sup>を適用した。ロボットが通る経路点をあらかじめ設定し(図中緑点)、設定した複数の各経路点間を、五次多項式<sup>(13)</sup>を用いて補間している。

#### 5.2.2. 実験結果

搬送動作の実験の様子をFig. 19に示す。

図中(2)と(3)より、二台のロボットが同期しながら真横移動と後進移動を組み合わせ、それぞれ車両の下に進入できていることがわかった。

図中(4)より、車両モデルのタイヤとロボットの固定

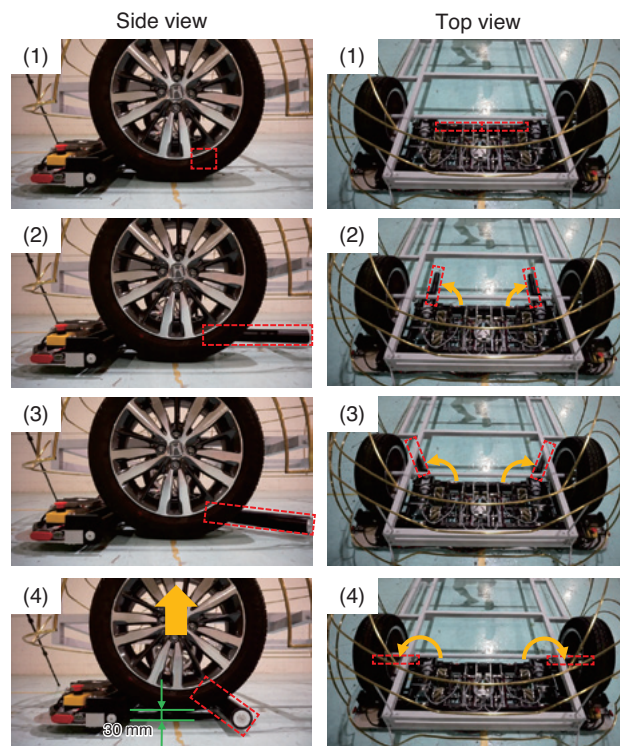


Fig. 16 Lift up motion by prototype

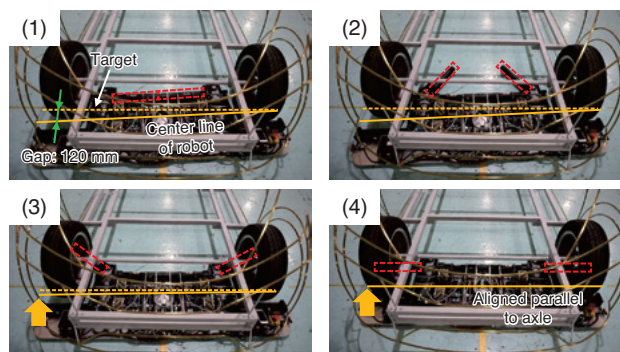


Fig. 17 Self-alignment motion by prototype

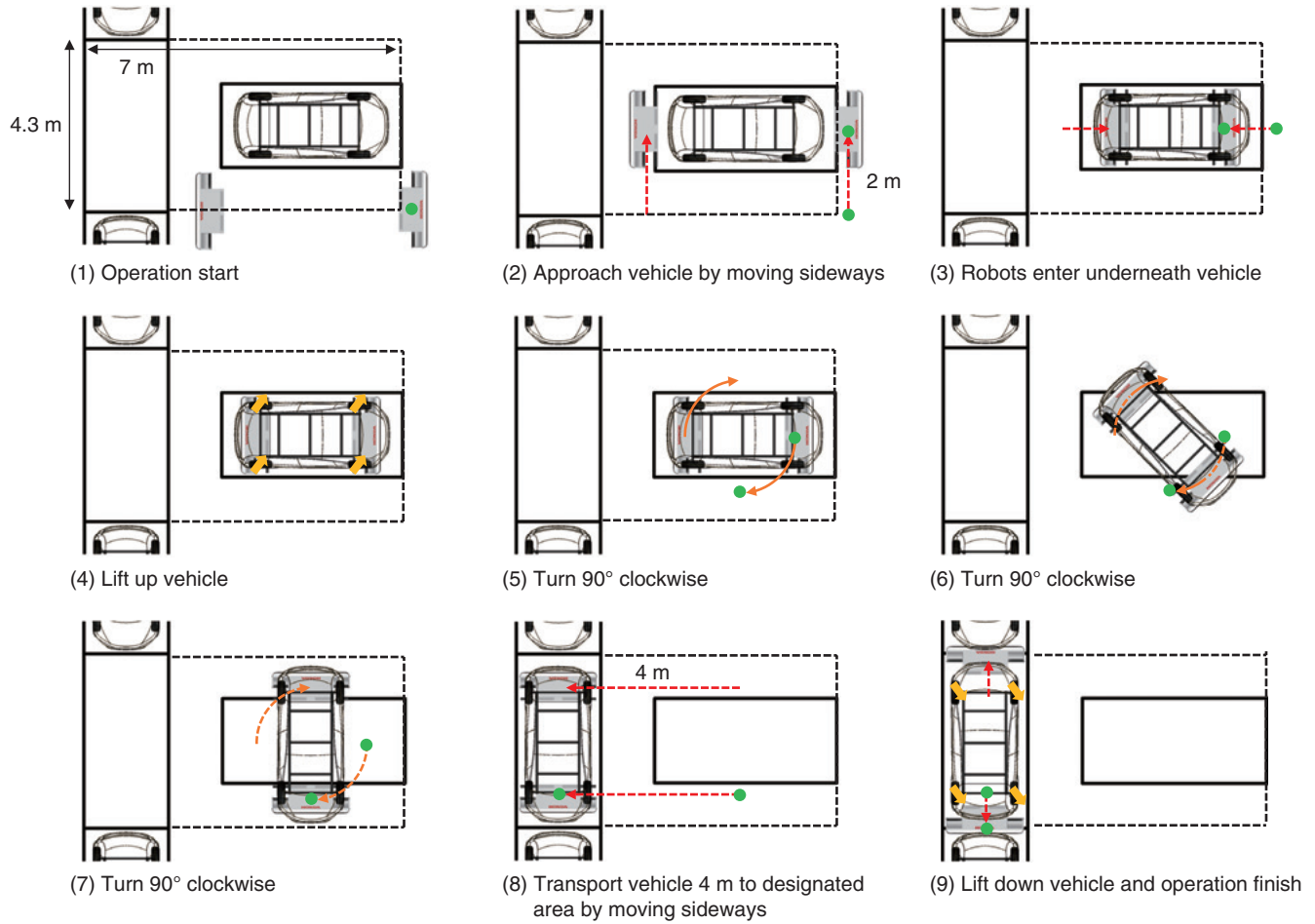


Fig. 18 Motion planning for experiments

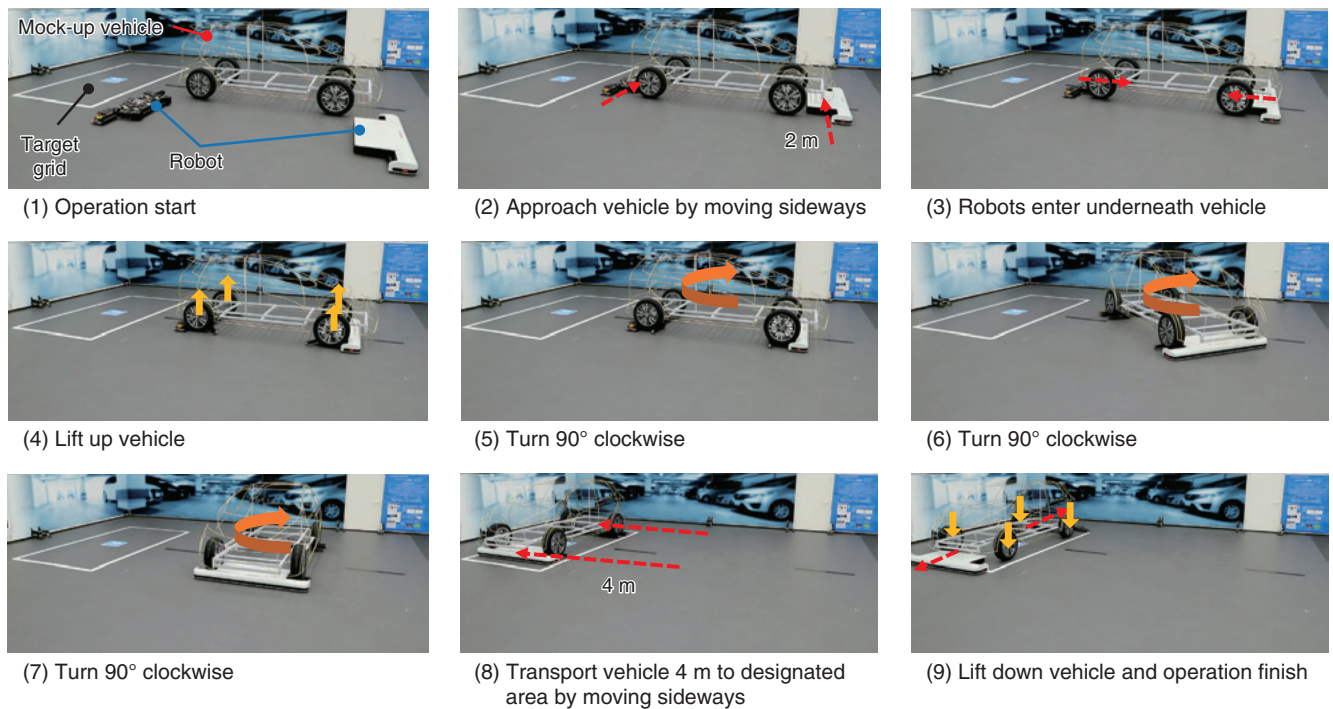


Fig. 19 Cooperative transportation by prototype

アームの接触を検知後、同期しながら回転アームを 180 度回転させることで、車両モデルの水平状態を保ちつつ昇降できていることがわかった。

図中 (5) から (7) にかけて、二台のロボットが車両を協調搬送しながら円軌道を描くことで、車両モデルの 90 度その場旋回が実現できていることがわかった。

図中 (8) より、車両の回転角度 90 度を保ちながら、真横移動で車両を協調搬送し、ターゲットグリッド内に正確に縦列駐車できていることがわかった。

以上より、ロボットを用いた車両の協調搬送動作と、全方向移動動作が実現できていることを確認した。これにより、車両の切り返しや、切り返しに必要なスペースを削減し、狭小スペースにおける車両の効率的な搬送が可能であることが検証できた。

## 6. まとめ

無人車両搬送システムのコンセプトを提示し、システムの中心的役割を担う車両搬送ロボットの考案と、動作原理検証のための試作機開発をおこなった。試作機を用いた動作検証実験によって以下の機能の有効性を確認し、「狭小スペースで運用可能なシステム」というコンセプトの妥当性を示した。

- (1) 二台一組の薄型ロボットによる、協調した車両昇降及び搬送動作
- (2) その場旋回や真横移動などの全方向移動動作による、狭小スペースでの車両搬送動作

## 参考文献

- (1) <https://www.honda.co.jp/sustainability/report/pdf/2019/Honda-SR-2019-jp-016.pdf>, 2021/2/16
- (2) <https://www.park24.co.jp/news/2021/02/20210209-1.html>, 2021/2/16
- (3) [https://from.sonysonpo.co.jp/topics/pr/2012/07/20120710\\_1.html](https://from.sonysonpo.co.jp/topics/pr/2012/07/20120710_1.html), 2021/2/16
- (4) <https://www.sonpo.or.jp/report/publish/bousai/ctuevu00000053xr-att/parking.pdf>, 2021/2/16
- (5) <https://www.honda.co.jp/tech/auto/hondasmart-parking/>, 2021/2/16
- (6) 一般財団法人日本自動車研究所:平成 28 年度スマートモビリティシステム研究開発・実証事業:自動パーキングの実証及び高度な自動走行システムの実現に必要な研究開発成果報告書, p. 5-6, (2017)
- (7) 富士キメラ総研:2020 自動運転・AI カー市場の将来展望, 300 p., (2020)
- (8) <https://stanley-robotics.com/>, 2021/2/16
- (9) DE2354404A1, A (1974)

- (10) <https://www.kuka.com/en-us/products/mobility/mobile-platforms/kuka-omnimove>, 2021/2/16
- (11) 岡留剛:第 2 章, 有限状態オートマトン, 例解図説オートマトンと形式言語入門, 森北出版株式会社, p. 19-59, (2015)
- (12) 有本卓:ロボット制御系の設計, 日本ロボット学会誌, 4 巻 4 号, p. 401-409, (1986)
- (13) 川崎晴久:第 7 章, ロボットの位置/軌道制御, ロボット工学の基礎, 森北出版株式会社, p. 110-111, (2012)

## ■ 著 者 ■



近 藤 修 平



益 田 晃 次



鹿 野 直 人



室 園 智 紀

# 高拡散型千鳥噴射ノズルを用いた 拡散燃焼の分割化による NO<sub>x</sub> とスモークの同時低減

Simultaneous Reduction of NO<sub>x</sub> and Smoke by Divided Diffusion Combustion  
Using High Dispersion Staggered Layout Nozzle

安 藤 博 和<sup>1</sup>

Hirokazu ANDO

中 津 雅 之<sup>1</sup>

Masayuki NAKATSU

青 柳 聡<sup>1</sup>

Satoshi AOYAGI

大 矢 直 樹<sup>2</sup>

Naoki OHYA

## 要 旨

拡散ディーゼル燃焼において極低エミッション化を実現するため、NO<sub>x</sub> 低減に有効な高過給高 EGR 条件下におけるスモーク抑制手法について検討をおこなった。従来燃焼におけるスモークの主な生成元となっていたメイン拡散燃焼リッチ部を低減するため、メイン燃料噴射量の減量と、早期噴射量の増量による予混合燃焼を組み合わせた分割燃焼を採用した。この分割燃焼の採用により従来燃焼音により制限されていた燃料噴射圧力を高めることができ、分割燃焼の効果と合わせてスモーク低減効果が確認された。また、予混合噴射のダイリユーション低減のため、千鳥配置噴霧を採用した。これらの手法を組み合わせることにより、従来燃焼に対し熱効率の低下と燃焼音の増大、スモークの増加をさせることなく NO<sub>x</sub> を 40% 低減、拡散ディーゼル燃焼の極低エミッション化を実現した。

## ABSTRACT

In order to realize extremely low emissions with diffusive diesel combustion, a study was made of methods for smoke suppression under the high-boost, high-EGR conditions that are effective in reducing NO<sub>x</sub>. Divided combustion that combines a reduction in the injected amount of main fuel with premixed combustion in which the amount of fuel injected early is increased was adopted in order to reduce the rich portion of the main diffusion combustion, which was the main generator of smoke in conventional combustion. The adoption of this divided combustion made it possible to raise the fuel injection pressure, which had previously been limited due to combustion noise, and a smoke reduction effect was confirmed together with the effect of divided combustion. In addition, a staggered spray layout was adopted in order to reduce dilution of the premixed injection. Combining these methods achieved diffusive diesel combustion with extremely low emissions, and reduced NO<sub>x</sub> by 40% while not causing increases in combustion noise or smoke, or reduction of thermal efficiency relative to conventional combustion.

## 1. ま え が き

内燃機関における環境規制が益々強化されていく中で、高効率が特徴のディーゼルエンジンは CO<sub>2</sub> 低減への貢献が期待されている。一方で、2030 年前後より欧州各国での内燃機関車両の販売禁止に向けた動きがある中、NO<sub>x</sub>、PM といった排ガス成分に対する今後の規制強化への対応が急務である。特に NO<sub>x</sub> 後処理能力向上のためのシステム複雑化に伴うコストが課題となっている。後処理システムの簡素化のためには、燃焼室より排出されるフィード

NO<sub>x</sub> とスモークの低減が必須である。過去に検討された PCCI 燃焼<sup>(1)</sup>に代表されるディーゼル燃焼改善技術においては、低エミッション化と引き換えに、熱効率低下、燃焼音増加、オイルダイリユーション増加の一つ以上を伴うことから、実用化は容易ではなかった。そこで燃焼形態はすべてを予混合燃焼とせず、予混合燃焼と拡散燃焼を持ち分ける部分予混合型燃焼が考案され、研究が盛んにおこなわれており、双峰型燃焼<sup>(2)</sup>、ZPCI-DI<sup>(3)</sup>等が挙げられる。ただし、これら研究は筒内燃焼挙動に課題を抱え、未だ低エミッション化には至っていない。

<sup>1</sup> 先進パワーユニット・エネルギー研究所

E-mail: hirokazu\_ando@jp.honda

<sup>2</sup> 先進パワーユニット・エネルギー研究所、博士 (工学)

Table 1 Transitions in emission regulations in Europe

|                        | Euro 6.2 (6d-TEMP) | Euro 6.3 (6d) |
|------------------------|--------------------|---------------|
| Year of enforcement    | 2017-              | 2020-         |
| Mode                   | WLTC and RDE       | WLTC and RDE  |
| NOx regulation [mg/km] | 80                 | 80            |
| NOx CF                 | 2.1                | 1.43          |

WLTC: Worldwide Light-duty Test Cycle

欧州排ガス法規規制の年次推移を Table 1 に示す。欧州排ガス規制は Euro6.2 を皮切りに Real Driving Emissions (RDE) 法規が導入された。また欧州委員会によると、排ガス規制値に対する許容倍数である Conformity factor (CF) を 1.0 へ引き下げる等の規制の厳格化が検討されている<sup>(4)</sup>。CF1.0 に向けたエミッション法規対応には、NOx 後処理システムの性能向上と共に、燃焼改善そのものによるエミッション低減技術が求められている。

本研究では、拡散ディーゼル燃焼において熱効率低下や燃焼音の増大とスモークの増加を招かずに NOx を低減することを目的とした。

## 2. 従来燃焼課題

拡散燃焼のエミッションは NOx、スモークとも燃焼火炎部の混合気濃度と燃焼温度によって決まる。混合気濃度は当量比 (Equivalence ratio:  $\Phi$ ) で表され、理論空燃比を実空燃比で除した値となっており、量論比である 1 を境に値が大きければ混合気がリッチ、小さければリーンであることを示す。また、本研究ではすすに関して、 $\Phi$ -T マップを用いる場合は炭素粒子状物質としてスートと表記し、実測結果はスモークメータでの計測結果であるためスモークと表記する。NOx に関しては  $\Phi$  1 近傍の量論高温部が生成域、スモークに関しては  $\Phi$  1.9 以上のリッチ部が生成域となっている。一般的なエミッション対応の方策としては、燃焼温度の低減による NOx の低減、噴霧の均質化に伴うリッチ部低減によるスモーク低減が挙げられる。

以降にて従来燃焼におけるその影響と課題を示す。

### 2.1. 高過給高 EGR 条件下での課題

NOx 低減のためには燃焼温度低減が有効である。燃焼温度低減は、 $\Phi$  一定となるように過給圧を上げ、空気量を維持しつつ EGR 量を増加することで実現できる。一方、雰囲気圧力増加に伴う噴霧のペネトレーション低下によって、リッチ領域が大きくなり、スモーク増大を招く。このため、従来ディーゼル燃焼に適用した場合においては NOx とスモークのトレードオフは一定の改善に留まる。また、過給圧増加による対応は、多気筒エンジンを考慮した際にターボチャージャー仕事増大によるポンピングロス増加を招くため、このことから、NOx とスモークのトレードオフの

関係の改善幅は制約される。

### 2.2. 高燃料噴射圧条件下での課題

噴霧のペネトレーション強化による均質化策としての高燃圧化はスモーク低減が実現できる。ただし、一方では NOx の増加を招き、さらに燃焼期間の短縮による熱発生率の急峻化により、燃焼音が増大する。そのため、従来ディーゼル燃焼における高燃圧化は燃焼音により制約を受ける。

### 2.3. 予混合噴射条件下での課題

リッチ領域および量論比高温部同時低減策としての早期噴射による予混合燃焼対応は NOx とスモークのトレードオフ改善に有効である。一方、過早着火による熱損失増大と燃焼音の増大、ライナ燃料付着によるオイルダイリューションの増大を招く。オイルダイリューション増大についてはオイルメンテナンス回数増加を招くため、最小限に抑える必要がある。これらのことから、従来拡散燃焼において、NOx とスモークの低減に対する熱効率低下およびユーザーメンテナンス性低下と燃焼音増加といった、背反関係からの成立解を求めることが容易ではないことがわかる。

## 3. 目標および分割燃焼コンセプトの策定

### 3.1. 目標

Table 1 に示した通り、CF2.1 である Euro6.2 に対応した 2018 年モデル i-DTEC エンジン<sup>(5)</sup>のフィード NOx を基準として目標 NOx 低減率を設定する。2018 年モデル NOx Storage Catalyst 後処理システムを踏襲した場合は、将来的な CF1.0 への規制値の厳格化に対応するためにはフィード NOx は 50% 以上の低減が必要になると推定される。よって、2018 年モデル i-DTEC エンジン比でのフィード NOx 低減率目標値を 50% とおいた。また、その際の熱効率、燃焼音、スモークは同等を保つことを目標とした。

### 3.2. NOx およびスートの同時低減

従来燃焼の課題を解決するため、エミッションを低減する新たなコンセプトについて検討した。

Fig. 1 に、メイン燃焼時の  $\Phi$ -T マップ質量分布を示す。NOx とスートの同時低減のためには、それぞれのエミッション生成域である、量論部とリッチ部を低減する必要がある。前述の通り、量論部に関しては高過給高 EGR 化による燃焼温度の低減により、NOx 生成域を避けて NOx を低減できる。一方、リッチ部に関してはスートの低減のためにメイン燃焼時に現れる当量比  $\Phi$  1.9 よりリッチな領域の低減が必要であることがわかる。しかしながら高燃圧化はリッチ部が低減するが NOx と燃焼音が増加することから、取り込むことができない。

そこで、メイン燃焼部の $\Phi$ を下げスート生成域を減少させるための方策について検討した。Fig. 2(a)に、スート生成域である $\Phi$  1.9 よりリッチな領域のクランク角に対する比率を示す。従来燃焼を点線、分割燃焼コンセプトを実線に示した。Fig. 2(c)に色分布でメイン燃焼時の $\Phi$ を示しており、圧縮上死点 (TDC) 付近にて燃焼室空間が限定されるため高拡散性が要求され、同一のメイン噴射燃料量ではリッチ領域を低減することが課題となっている。一方、Fig. 2(b)の TDC 前に目を向けると、未利用の広範な燃焼室内空間が存在することがわかる。そこで、メイン燃焼におけるメイン燃料量を減少することでリッチ領域を削減した。その分の燃料量は広範な空間が存在する TDC 前にパイロット噴射を増量することでリッチ領域を分散させることとした。ただし、増量したパイロット噴射を TDC 近傍にて実施すると、瞬時着火による拡散燃焼化によって NOx とスートの生成増加が懸念される。着火遅れ時間の確保の

目的で、合わせてパイロット噴射時期早期化が必要となると考えた。増量、早期化したパイロット噴射に関してはオイルダイリューションを招くライナ噴霧衝突を避ける観点から、定性的には多段化が有効と考えられる。これらの考え方を基にした分割燃焼コンセプトを今回立案した。

### 3.3. 予混合化への対応

分割燃焼コンセプトでは、メイン噴射量の低減を目的とした早期噴射による予混合燃焼を実施するため、ライナ燃料付着によるオイルダイリューションを抑制することが必要となる。噴霧のペネトレーションを保ちつつ予混合噴射とメイン噴射を両立するには諸元の異なる 2 本のインジェクタが必要とされるが、今回 1 本のインジェクタのみにて実現を目指した。早期噴射にて露出したライナへの燃料付着を避けるために、八つのインジェクタ噴孔のうち四つの噴孔方向を下向きとした。残り四つの噴孔に関しては従来通りの噴孔方向とし、異なる方向の噴孔を交互に配置した。分割燃焼においてはこのような噴孔方向を孔ごとに持ち分けることでライナ燃料付着を軽減し、あわせて高拡散化効果を得られるインジェクタ噴孔千鳥配置<sup>(6)</sup>と呼ぶ方策を採用する。

## 4. 諸元検討

### 4.1. 供試エンジンおよび評価負荷

量産 1.6 L 直列 4 気筒諸元を基に作成した単気筒エンジンにて検証を実施した。Table 2 に検証に使用したエンジンの主要諸元を示す。

Fig. 3 に想定する車両におけるエミッションモード負荷分布を示す。本研究の評価負荷点は WLTC モードエミッション排出重心点であるエンジン回転数 2000 rpm、エンジントルク 150 Nm、総燃料噴射量 28.3 mg/st に設定した。これ以降のすべての検証はこの評価負荷点でおこなう。

燃焼音レベルは、起振源である筒内圧力と機関の構造応答の掛け合わせで表現されると考えられる<sup>(7)</sup>。燃焼音指標 (Combustion noise index: CNI) はこれまで開発された多くの内燃機関の燃焼音と筒内指圧の相関を基に、独自の構造応答を算出し、計測した筒内圧と構造応答を掛け合わせた値であり、筒内指圧のみで燃焼音レベルを推定する指標である。これにより多気筒エンジンでの燃焼音レベルを単気筒でも評価できる。よって以降では CNI を燃焼音指標として扱う。

### 4.2. 計算手法

単気筒エンジン試験に加え、燃焼シミュレーションを用いた諸元検討を実施した。使用した CFD は CONVERGE v2.4 であり、Table 3 に計算モデルの概要を示す。燃焼化学反応計算においては Wang らによる n-dodecane

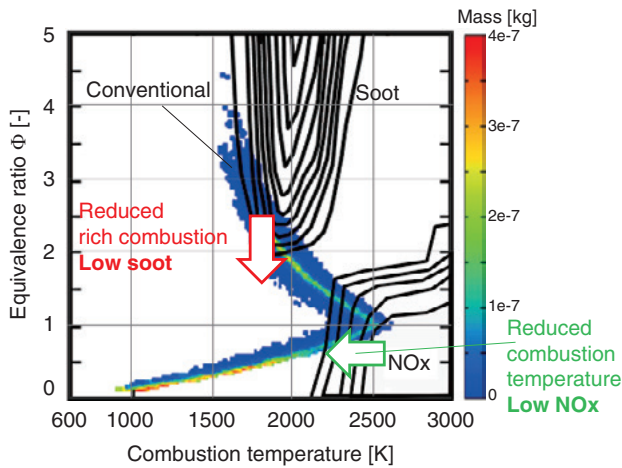
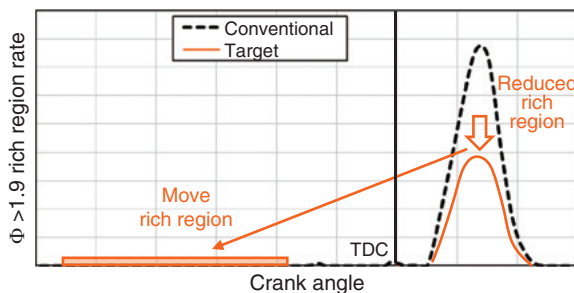
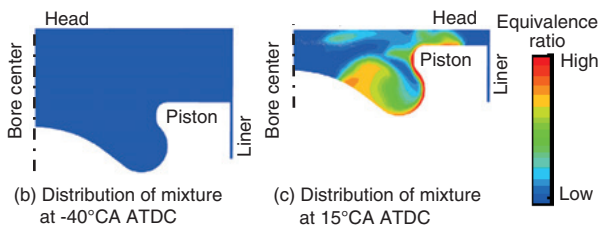


Fig. 1  $\Phi$ -T map during main combustion



(a) Transition in ratio of region with equivalence ratio of 1.9 or higher



(c) Distribution of mixture at 15°CA ATDC

Fig. 2 Concept of rich region control

Table 2 Test engine specifications

|                                        |                                  |
|----------------------------------------|----------------------------------|
| Number of cylinders                    | 1                                |
| Displacement volume [cm <sup>3</sup> ] | 400                              |
| Bore [mm]                              | 76                               |
| Stroke [mm]                            | 88                               |
| Compression ratio                      | 14.6, 16.1 (base)                |
| Fuel injection system                  | Bosch CRI 2-25 (max. 250 MPa)    |
| Injector                               | 8 holes, 0.114 mm diameter       |
| Fuel                                   | EU spec diesel (sulfur < 10 ppm) |
| Boost device                           | Super charger                    |

Table 3 Calculation method

|                   |                                                                 |
|-------------------|-----------------------------------------------------------------|
| CFD software      | CONVERGE v2.4                                                   |
| Turbulence model  | RNG k-ε                                                         |
| Spray model       | Kelvin-Helmholtz and Rayleigh-Taylor                            |
| Combustion model  | SAGE detailed chemical reaction                                 |
| Chemical reaction | 100 species and 432 reactions<br>n-dodecane (with NOx reaction) |

Mechanism<sup>(8)</sup>にNOx反応を追加した素反応モデルを使用した。エンジン諸元は供試エンジン同一とした。

#### 4.3. 分割燃焼コンセプトの実証

立案した分割燃焼コンセプトの実証をおこなった。予混合噴射量の影響について実験条件をTable 4に、評価負荷点での実機試験結果をFig. 4に示す。Fig. 4(a)に示す噴射パターンにて、ΦおよびEGR率、過給圧、燃料噴射圧は同一とする。Fig. 4(b)に示す通り、パイロット噴射量の増加に伴い、メイン拡散燃焼が主因となって生成するスモークが低減する。さらに、燃焼分割化により、クランクアングルに対する熱発生形態が1山から2山に変化、圧力振幅が低下することで、Fig. 4(c)に示す通り燃焼音が低減し、燃焼音目標に対して余裕が生まれる。よって従来燃焼音で制限されていた燃料噴射圧力の高圧化が実現できる。また、最適なパイロット噴射量は、スモーク低減、NOx低減、燃焼音低減が同時に達成できる10.5 mg/stとなる。その際は、従来パイロット噴射量設定に対し同一噴射圧にてスモークが37%低減することが確認された。

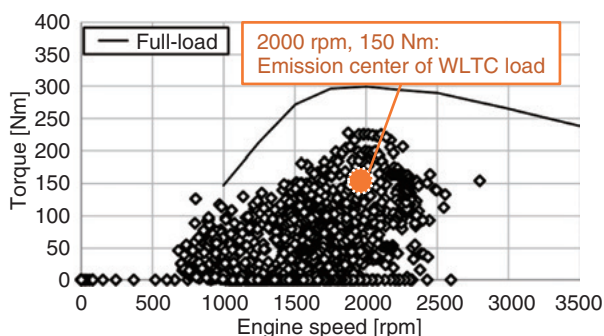
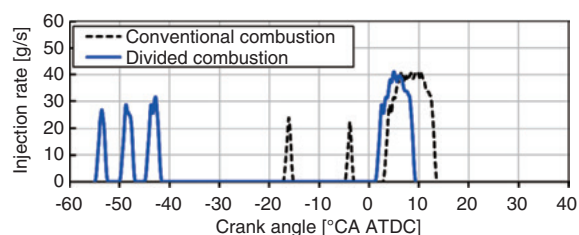


Fig. 3 Engine operation area in WLTC mode and evaluation load point

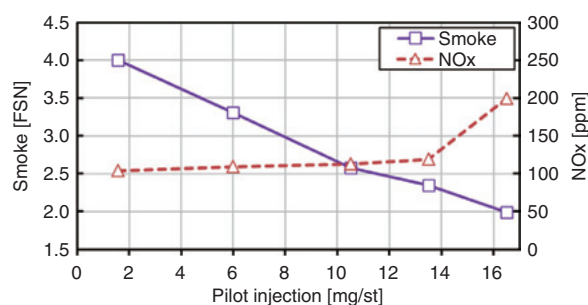
Table 4 Experimental conditions by premixed pilot injection amounts

|                                         | Conventional combustion | Divided combustion |      |      |      |
|-----------------------------------------|-------------------------|--------------------|------|------|------|
| Total injection [mg/st]                 | 28.3                    | 28.3               |      |      |      |
| Pilot injection [mg/st]                 | 1.58                    | 6.0                | 10.5 | 13.5 | 16.5 |
| Pilot injection start timing [°CA ATDC] | -17.3                   | -55.0              |      |      |      |
| Number of pilot injection shots         | 2 shots                 | 3 shots            |      |      |      |

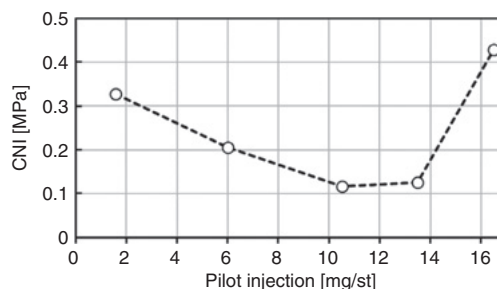
また、予混合噴射時期の影響について、実験条件をTable 5、評価負荷点での実機試験結果をFig. 5に示す。ここでは、Fig. 5(a)に示すパイロット噴射開始時期を変化させた。ΦおよびEGR率、過給圧、燃料噴射圧は同一とする。Fig. 5(b)に示す通り、予混合噴射時期早期化によりパイロット噴射の噴霧拡散時間が確保され、リッチ化が抑制されることでスモークが低減していることがわかる。この際の最適なパイロット噴射時期をスモーク低減、NOx低減、燃焼音低減が同時に達成できる-55°CA ATDCとした。これらにより、燃焼音増大を伴わない高燃圧化が実現できる。結果として高過給高EGR条件下での噴霧ペネトレー



(a) Injection rate



(b) Smoke and NOx



(c) CNI

Fig. 4 Effects of premixed pilot injection amounts

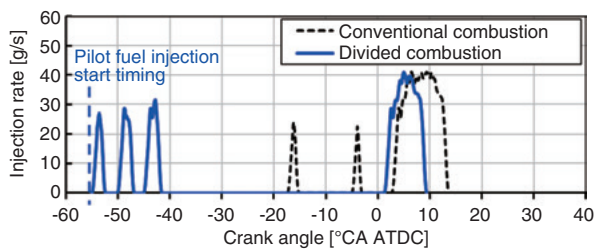
Table 5 Experimental conditions by premixed pilot injection start timings

|                                         | Divided combustion |       |       |       |       |
|-----------------------------------------|--------------------|-------|-------|-------|-------|
| Total injection [mg/st]                 | 28.3               |       |       |       |       |
| Pilot injection [mg/st]                 | 10.5               |       |       |       |       |
| Pilot injection start timing [°CA ATDC] | -60.0              | -55.0 | -50.0 | -45.0 | -40.0 |
| Number of pilot injection shots         | 3 shots            |       |       |       |       |

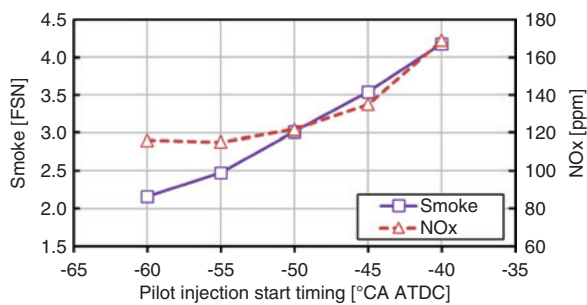
ションを増大させ、リッチ部を減少させることでスモークを低減できるようになった。

#### 4.4. 予混合噴射における対応

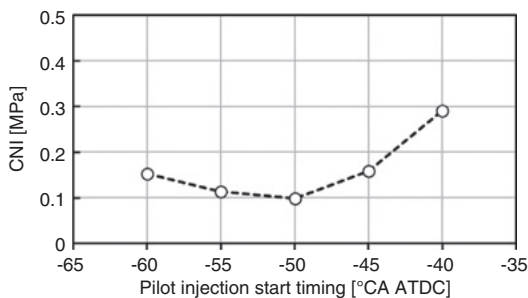
分割燃焼コンセプトでは千鳥配置噴霧を採用するため、予混合噴射におけるその噴霧配置について検討した。従来パイロット噴射と、千鳥配置噴霧における予混合パイロット噴射の筒内噴霧分布のCFDにおける比較をFig. 6に示す。Fig. 6(b)に示す千鳥配置の下向き噴孔の噴霧に関しては、ライナ衝突が抑制されていることがわかる。



(a) Injection rate



(b) Smoke and NOx



(c) CNI

Fig. 5 Effects of premixed pilot injection start timings

また、評価負荷点において、従来インジェクタでの分割燃焼、千鳥配置噴霧での分割燃焼についてダイリューションをCFDにて推定した。インジェクタ噴孔千鳥配置化によって予混合噴射適用時のオイルダイリューションを24%低減させた。

ここで、実機にてパイロット噴射の噴射時期と噴射量を変えてダイリューション量を実測した。従来噴霧での結果をFig. 7に、千鳥配置噴霧での結果をFig. 8に示す。従来噴霧に対し、同一パイロット時期と量における千鳥配置噴霧のダイリューションレベルが低減していることが確認で

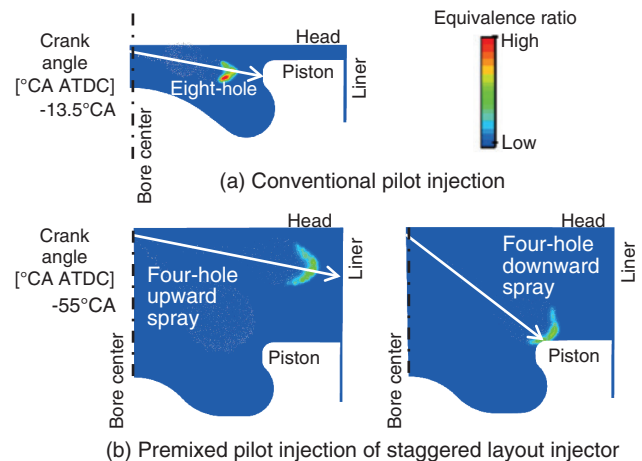


Fig. 6 Comparison of conventional pilot spray and premixed pilot spray with staggered layout injector

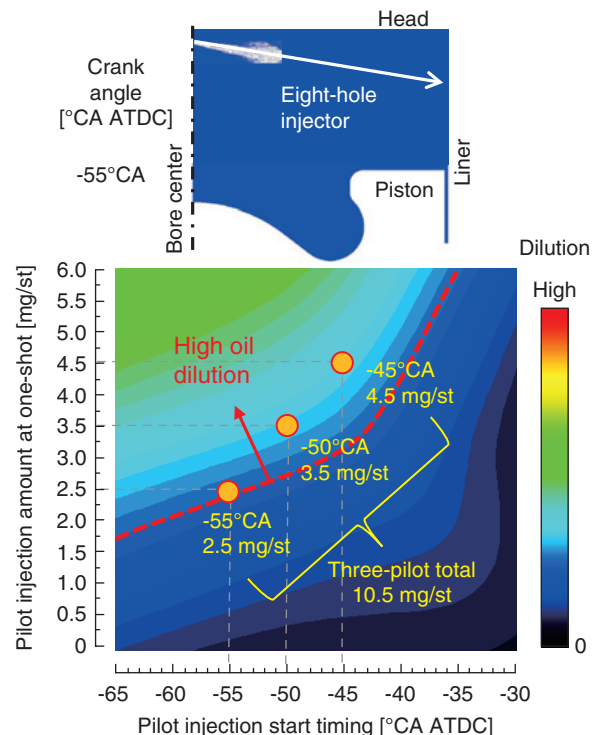


Fig. 7 Oil dilution level of one-shot pilot injection with conventional injector

きる。このため、千鳥配置噴霧に関しては早期かつ多量のパイロット噴射に対する優位性があるといえる。この結果より、千鳥配置噴霧にて噴射分割段数、噴射量、噴射時期を設定した。パイロット噴射段数は3段、パイロット噴射量と時期は2.5 mg/st -55°CA ATDC と 3.5 mg/st -50°CA ATDC と 4.5 mg/st -45°CA ATDC を設定した。

さらに、千鳥配置噴霧にてポスト噴射を実施する後処理燃焼モードの検証を合わせて実施した。後処理燃焼モードは、膨張行程でのポスト噴射によりスリーブへの付着が発生する。千鳥配置噴霧を用いることにより、ポスト噴射時のダイリューションが低減できるため、後処理燃焼モードの場合でも、ダイリューションを低減できることをCFDで確認した。これらによって、分割燃焼コンセプトでのオイルメンテナンス回数増加を防止できた。

#### 4.5. メイン拡散燃焼について

分割噴射を実施したうえで千鳥配置噴霧を採用したことにより、メイン拡散燃焼においては従来と異なる下向きの噴霧流動が加わるため影響を確認する。従来燃焼室形状  $\epsilon$  16.1 に対し、圧縮比が低下するものの千鳥流動に対して燃焼室容積を最大限確保した分割燃焼用燃焼室  $\epsilon$  14.6 を策定し、CFDにて当量比分布推移の検証をおこなった。

従来燃焼に対する、高過給化と燃焼音許容までの高燃圧化と千鳥配置噴霧を適用した分割燃焼についての比較を示す。評価負荷点におけるCFDでの検討条件をTable 6に、 $\Phi$  1.9以上の領域割合推移をFig. 9に、メイン燃焼時の $\Phi$ -TマップをFig. 10に示す。分割燃焼  $\epsilon$  14.6仕様において、

Table 6 CFD conditions of divided combustion

|                                         | Conventional combustion<br>$\epsilon$ 16.1 | Divided combustion<br>$\epsilon$ 14.6 |
|-----------------------------------------|--------------------------------------------|---------------------------------------|
| Fuel injection pressure [MPa]           | 140                                        | 200                                   |
| Boost pressure [kPa_abs]                | 172                                        | 182                                   |
| Equivalence ratio                       | 0.81                                       | 0.81                                  |
| EGR rate [%]                            | 28.0                                       | 32.0                                  |
| Pilot injection [mg/st]                 | 1.58                                       | 10.5                                  |
| Pilot injection start timing [°CA ATDC] | -17.3                                      | -55.0                                 |
| Number of pilot injection shots         | 2 shots                                    | 3 shots                               |

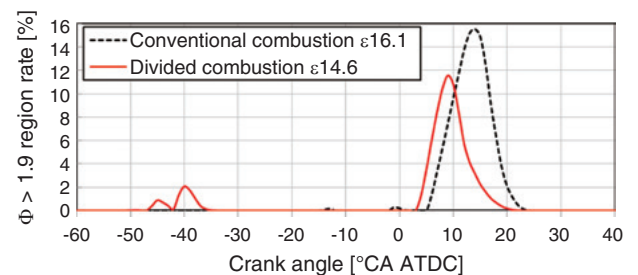


Fig. 9 Transitions in ratio in region with equivalence ratio of 1.9 or higher

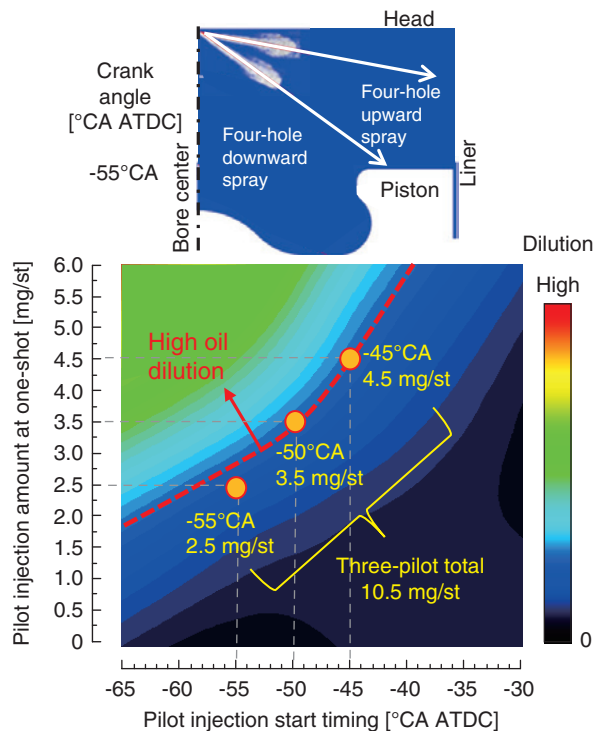
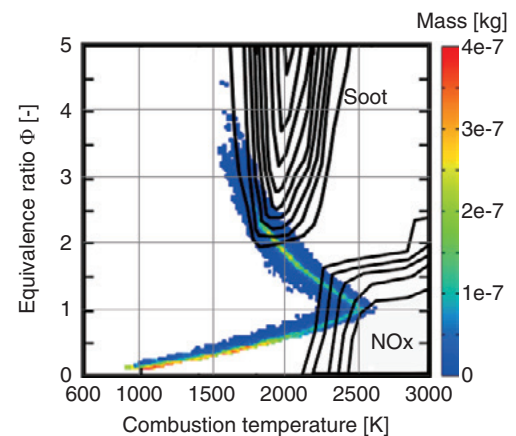
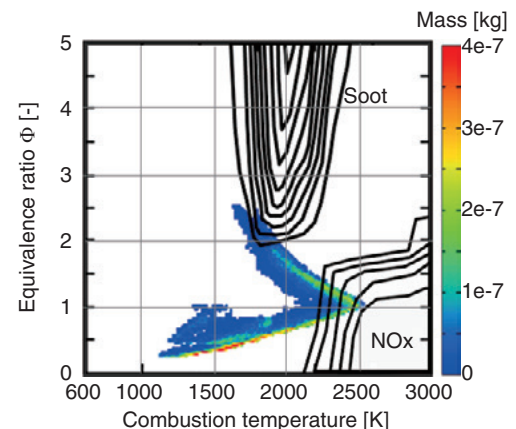


Fig. 8 Oil dilution level of one-shot pilot injection with staggered layout injector



(a) Conventional combustion  $\epsilon$ 16.1



(b) Divided combustion  $\epsilon$ 14.6

Fig. 10  $\Phi$ -T maps of conventional combustion and divided combustion during main combustion

メイン噴射量低減と高燃圧化ならびに千鳥配置噴霧の効果により、メイン燃焼リッチ部の低減が得られている。よって当初策定した分割燃焼コンセプトのねらい通りにスト生成域を回避できていることが CFD 上にて確認できる。

さらに、スモーク排出に影響が大きいメイン燃焼に着目した。Φ 1.9 以上の領域の当量比分布等値面を Fig. 11 に示す。当量比分布等値面を確認すると、従来燃焼に対し、分割燃焼 ε 14.6 仕様では、分割燃焼化によるメイン噴射量低減及び高燃圧化効果と合わせて、クランクアングル 12°CA ATDC 以降のメイン燃焼後半のリッチ部体積の減少が確認できる。特に千鳥配置噴霧の採用により、隣接する噴霧の燃焼室内における干渉が無くなったことが、リッチ部体積減少に寄与している。

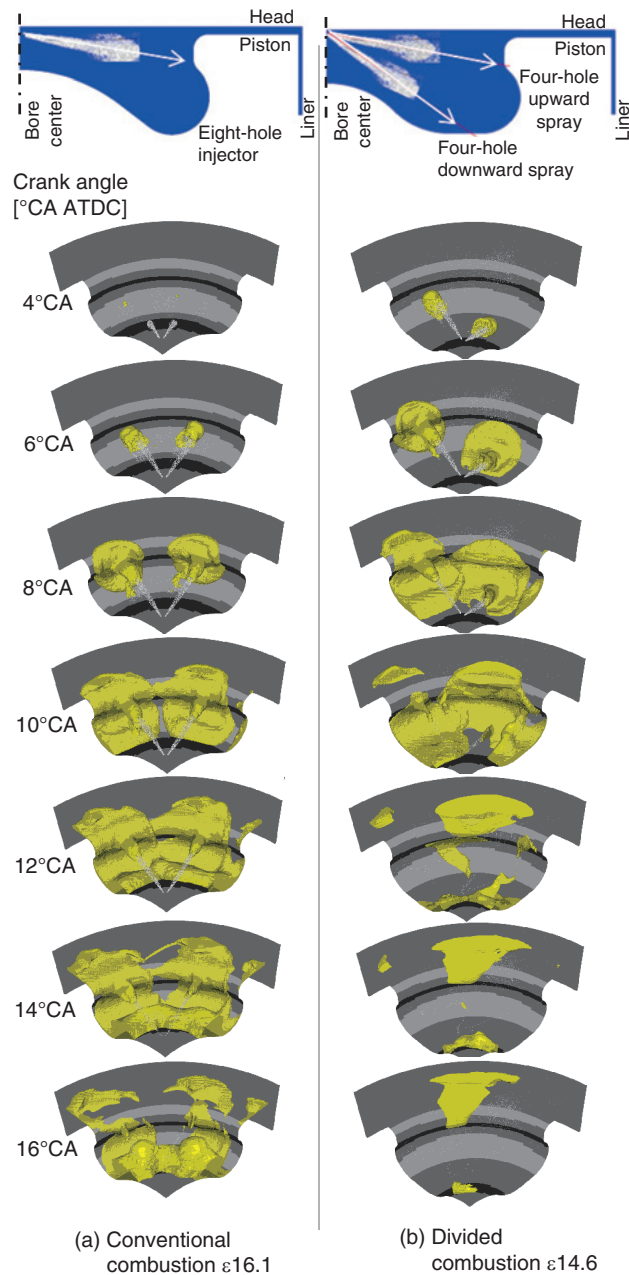


Fig. 11 Isosurfaces for region with equivalence ratio of 1.9 or higher during main combustion

## 5. 実機単気筒検証結果

実機単気筒にて、分割噴射ならびに千鳥配置噴霧を適用した分割燃焼コンセプト ε 14.6 仕様における高過給高 EGR 条件下での検証をおこなった。高過給化量に関しては、多気筒エンジンを考慮した際にターボチャージャー仕事増大によるポンピングロス増加が起きないように、過給圧 10 kPa 増加を上限とした。

評価負荷点における従来燃焼および分割燃焼 ε 14.6 仕様での試験条件を Fig. 12 に、噴射率と熱発生率を Fig. 13 に示す。Fig. 13(a) に示す噴射パターンでの分割燃焼 ε 14.6 仕様にて、Fig. 13(b) に示す熱発生率から観測される通り、予混合と拡散からなる分割燃焼を適用することで圧

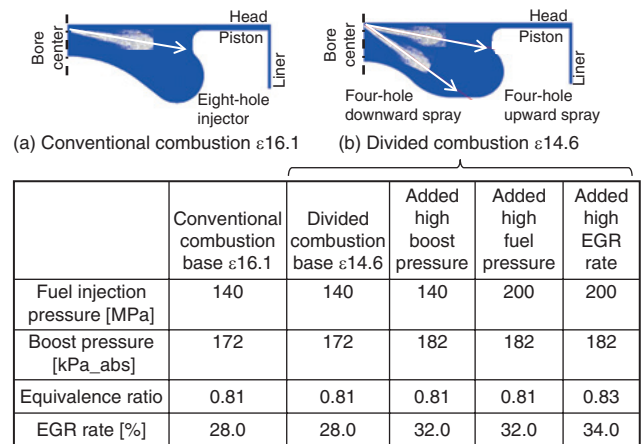


Fig. 12 Experimental conditions of conventional combustion and divided combustion

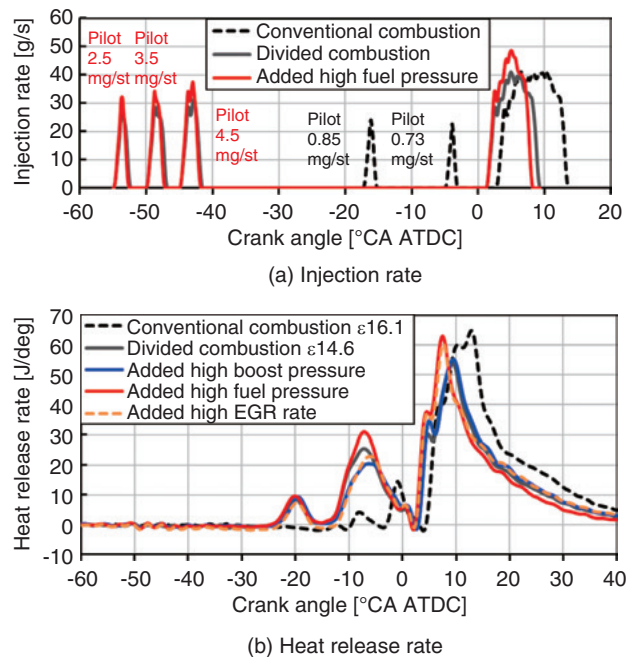


Fig. 13 Injection strategy and heat release rate of conventional combustion and divided combustion

力振幅が2分割される。

CNIをFig. 14に示す。圧力振幅の分割により、分割燃焼はCNIが0.16 MPaから0.11 MPaまで低下する。従来燃焼においては燃焼音目標に対する余裕がないが、分割燃焼においては高過給化、高燃圧化、および高EGR化をおこなっても燃焼音目標値内に抑えることができる。

従来燃焼および分割燃焼 $\epsilon$  14.6仕様でのスモークとNO<sub>x</sub>、熱効率をFig. 15に示す。Fig. 15(a)に示すスモークとNO<sub>x</sub>排出量から、従来燃焼と比較すると分割燃焼に関しては、高過給化、高燃圧化によってスモークが47%低減、さらに高EGR化を組み合わせることで、同等スモークにて目標エミッションに近接するNO<sub>x</sub>排出量40%低減ができるようになった。これは当初策定した分割燃焼コンセプトのねらい通り、メイン噴射量低減と高燃圧化ならびに千鳥配置噴霧の効果により、メイン燃焼リッチ部の低減が得られたと考えられる。熱効率に関しても、Fig. 15(b)に示す通り予混合燃焼を採用したことにより壁面熱損失が増加する一方、分割燃焼における高過給高EGR化の燃焼温度低減効果によって壁面熱損失が改善するため、図示熱効率

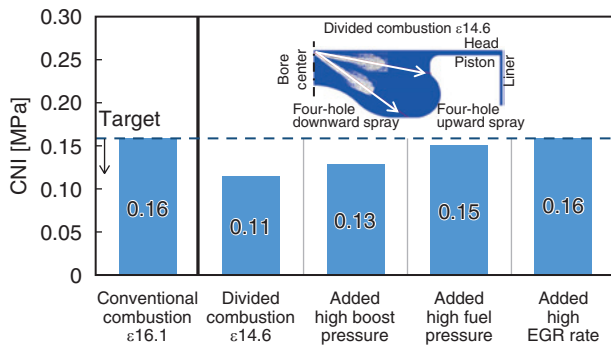
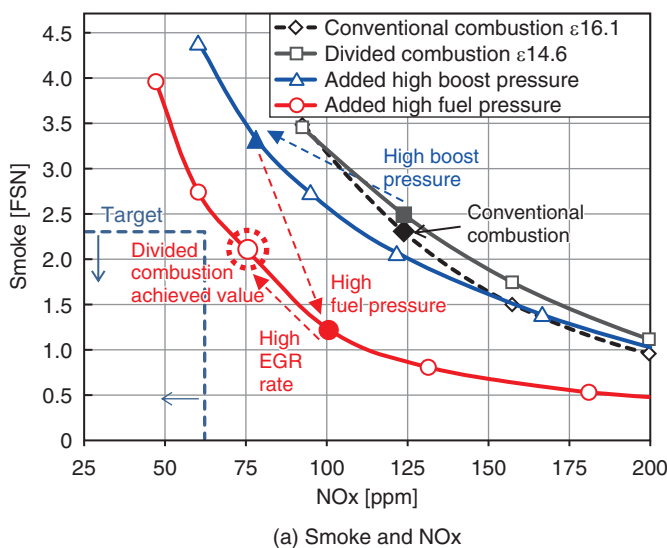
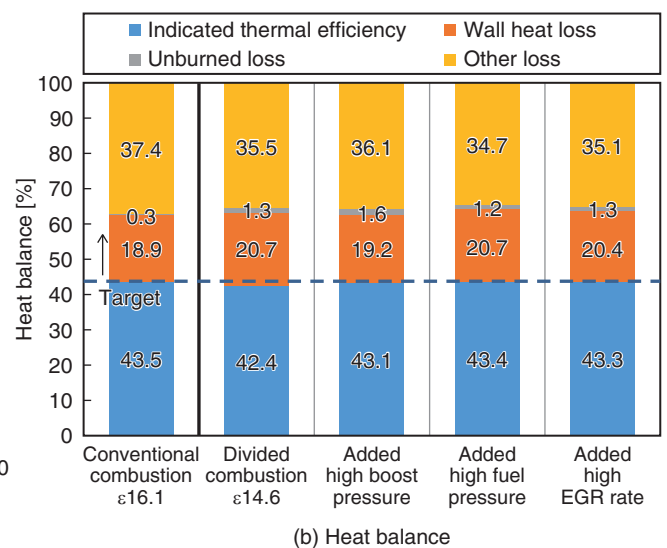


Fig. 14 CNIs of conventional combustion and divided combustion



(a) Smoke and NOx



(b) Heat balance

Fig. 15 Smoke and NO<sub>x</sub> and thermal efficiency of conventional combustion and divided combustion

目標が43.5%に対し43.3%まで回復、目標同等とすることができた。

これらの実機検証結果より、従来燃焼に対し、分割燃焼 $\epsilon$  14.6仕様にて図示熱効率、スモーク、燃焼音を同等に保ちつつ、目標エミッションに近接するNO<sub>x</sub>排出量40%の低減を実現した。

## 6. まとめ

従来諸元に対し、高拡散化効果が得られる千鳥配置噴霧を適用した分割燃焼コンセプトを導入することで、評価負荷点であるエンジン回転数2000 rpm、エンジントルク150 Nm、総燃料噴射量28.3 mg/stにて図示熱効率、スモーク、燃焼音を同等に保ちつつ、NO<sub>x</sub>排出量について40%の低減を実現した。以降に得られた知見を記す。

- (1) 高過給高EGR条件下にて、従来燃焼におけるスモークの主な生成元となっていたメイン拡散燃焼の燃料噴射量低減をねらい、早期噴射による予混合燃焼を組み合わせた分割燃焼を考案した。従来パイロット噴射設定に対し同一燃料噴射圧力にてスモークが37%低減することを確認した。
- (2) 分割燃焼採用により燃焼音を30%低減できたため、従来燃焼音により制限されていた燃料噴射圧力の60 MPa増加が実現できた。分割燃焼の効果ならびに千鳥配置噴霧の高拡散化効果と合わせて、スモークが47%低減することを確認した。さらに高EGR化を組み合わせることで、同等スモークにてNO<sub>x</sub>の40%低減を実現した。
- (3) 千鳥配置噴霧の適用により、予混合噴射におけるダイリレーションを24%低減した。これにより、オイルメンテナンス回数の増加を防止できた。

今後、分割燃焼に適した燃焼室形状変更と高 EGR 化等をおこなうことにより、さらなる NOx 排出量低減の可能性があると考えている。

## 参考文献

- (1) 畑野潤一, 原田丈也, 松井一博, 小林広樹, 松井竜太: 予混合圧縮着火ディーゼル燃焼の適用領域拡大, Honda R&D Technical Review, Vol. 22, No. 2, p. 119-125
- (2) 稲葉一輝, 張焰赫, 桑衛輝, Bianco Del Lucia, 小橋好充, 柴田元, 小川英之: 後期噴霧に対する前期予混合化燃焼の干渉抑制による双峰形部分予混合化ディーゼル燃焼の特性改善, 自動車技術会 2020 年秋季大会学術講演会講演予稿集, No. 113-20, (2020)
- (3) Pan, W., Yokoyama, T., Bao, Z., Horibe, N., Kawanabe, H., Ishiyama, T.: Effects of Fuel Properties on Combined PCCI and Conventional Diesel Combustion, 自動車技術会 2019 年春季大会学術講演会講演予稿集, No. 65-19, (2019)
- (4) European Parliament: Amendments on the proposal for a regulation of the European Parliament and of the Council amending Regulation (EC) No 715/2007 on type approval of motor vehicles with respect to emissions from light passenger and commercial vehicles (Euro 5 and Euro 6) and on access to vehicle repair and maintenance information, (2020)
- (5) 小松伸裕, 矢野洋樹, 北山由人, 山谷幸久, 首藤康裕, 高原亮策: RDE 対応 1.6L ディーゼルエンジンの開発, 自動車技術会 2018 年秋季大会学術講演会講演予稿集, No. 120-18, (2018)
- (6) 古東文哉, 森一広, 久保憲太郎, 千田二郎, 藤本元: 高拡散型燃料噴射ノズル(千鳥噴射ノズル)における噴霧特性の基礎的解明, 微粒化, Vol. 13, No. 44, p. 1-7, (2004)
- (7) 鳥居建史: 重回帰分析を用いた時系列エンジン放射音寄与分離法, 自動車技術会論文集, Vol. 44, No. 4, p. 1051-1057, (2013)
- (8) Wang, H., Ra, Y., Jia, M., Reitz, R. D.: Development of a reduced n-dodecane-PAH mechanism and its application for n-dodecane soot predictions, Fuel, Vol. 136, p. 25-36, DOI 10.1016/j.fuel.2014.07.028, (2014)

## ■著 者■



安藤 博和



青柳 聡



中津 雅之



大矢 直樹

# 低慣性・高剛性ダイナモによる エンジントルク変動再現

Reproduction of Engine Torque Fluctuation with Low Inertia and High Stiffness Dynamometer

塩田 啓二<sup>1</sup>

Keiji SHIOTA

天野 雅文<sup>1</sup>

Masafumi AMANO

佐川 正記<sup>2</sup>

Masaki SAGAWA

末竹 和幸<sup>1</sup>

Kazuyuki SUETAKE

## 要 旨

エンジンのトルク変動に起因する課題事象の解析効率を向上させるため、バーチャル・アンド・リアル・シミュレータに用いるダイナモを改良した。再現周波数領域拡大のため、ダイナモ構成部品の寄与度を1D CAEを用いて明確にし、構造変更を実施した。その結果、トルク変動の再現周波数を拡大し、4気筒及び6気筒エンジンでNVが課題となる運転領域において、バーチャル・アンド・リアル・シミュレータで解析できるようになった。このベンチシステムを用いることで、ラトルノイズなど、エンジントルク変動に起因する駆動系ねじり振動のメカニズム解析を部品の組み替えをすることなく試験できるようになった。本研究は、エンジントルク変動に起因する駆動系ねじり振動課題の解析効率向上を実現し、早期仕様決定に貢献できる。

## ABSTRACT

The dynamometer used in a Virtual and Real Simulator was enhanced to increase the analysis efficiency of issues and events arising from engine torque fluctuation. The contribution of the dynamometer components was clarified using 1D CAE and structural changes were made to expand the reproducible frequency range. As a result, the reproducible torque fluctuation frequencies were expanded, and analysis could be performed using a Virtual and Real Simulator in the operating range where noise and vibration are issues in 4-cylinder and 6-cylinder engines. This bench system can be used to test analyses of mechanisms of drivetrain torsional vibration, such as rattle noise, arising from engine torque fluctuation, without recombining parts. This research can enhance the analysis efficiency of drivetrain torsional vibration issues arising from engine torque fluctuation and contribute to early determination of specifications.

## 1. まえがき

近年、CO<sub>2</sub>排出量低減のため、自動車のパワープラントの効率向上を目的とした電動化が加速している。

動力源にはハイブリッド方式が多く採用されており、その中でも走行用と発電用に二つのモータを備えるシステムが主流となっている。このシステムにおいて、エンジンは主に走行用モータに必要な電力を発電する用途として用いられ、タイヤと切り離されることが多い。そのために、走行状態やドライバの要求に制約されることなく、エンジンの効率の良い回転数やトルク発生領域を使うことができ

る。一方で、エンジンを効率の高い作動領域で使おうとすると発生トルクやトルク変動が大きくなる状態も増え、トランスミッションに伝達されるトルク変動も大きくなる。さらに、エンジンは熱効率向上のために圧縮比を高く設定する傾向にあり、トルク変動が増加することが多い<sup>(1)</sup>。また、発進をモータでおこなうことから、クラッチやトルクコンバータといった発進機構が不要となり、エンジンとの直結構造が採用されている。緩衝機構が無くなることは負荷の低い領域でのトランスミッションへのトルク変動伝達の増加につながる。

このような変化に伴い、トルク変動に起因するギアの歯

<sup>1</sup> 本田技研工業株式会社

<sup>2</sup> 先進パワーユニット・エネルギー研究所

打ちによって生じるラトルノイズなどが課題となっている。この事象の解析には完成車にて減衰機構の交換など、部品を組み換える試験をおこなわなければならないため、繰り返し工数が多くなる。そこで、効率的な解析のためにバーチャル・アンド・リアル・シミュレータ (VRS) の適用を検討した<sup>(2)</sup>。

従来の VRS 用ダイナモでは、定常状態の事象への対応からスタートし、発進や加減速などトランジェントな事象に対応できるよう開発が進められてきた。しかし、動的な現象であるトルク変動については、発生できるトルクと周波数の領域が限定され、現状ハイブリッド車が使用する領域をカバーすることができない。

そこで本研究では、ダイナモ部品の慣性モーメント低減と高剛性化により、ダイナモで再現できるトルク変動の大きさとその周波数帯域を拡大した。その成果として、2 モータハイブリッドシステムのトルク変動により生じる振動現象の解析を効率化できたので報告する。

## 2. VRS の仕組みとダイナモの課題

Fig. 1 に VRS の概要を示す。構築したドライブユニット用 VRS は、評価対象であるトランスミッション及び Power Control Unit (PCU) に実際のハードを使用している。トランスミッションの入力側にエンジンの代わりとなる駆動ダイナモ、出力側に車両負荷を模擬する吸収ダイナモが設置されており、エンジンモデル・車両モデルによって演算されるトルクが入力される。

VRS を使用した解析手法では、タイヤトルクの変動をモデルで演算し、その演算結果を設備で再現するような検証手法が提案されている<sup>(3)</sup>。このように、VRS を活用しトランスミッションに入力されるトルク変動を変化させ、ラトルノイズの変化を捉える事で、事象のメカニズム解析が可能となる。そのためにはエンジンと同等のトルク変動が

入力できる必要がある。

Fig. 2 に、従来の VRS で使用しているダイナモが発生できるトルク変動燃焼主次数成分の領域を示す。エンジントルク変動は燃焼によって発生する圧力に起因する燃焼トルク変動と、往復部の慣性力によって発生する慣性トルク変動がある<sup>(4)</sup>。慣性トルク変動は回転数の 2 乗で増加するため、L4 エンジンでは 4000 rpm 以上の回転数領域で慣性力が主要因となり、再現が容易ではない。また、4000 rpm 以下においても爆発間隔が広いことからトルク変動が大きく、再現可能な領域が限定的である。

V6 エンジンでは回転 3 次成分の変動が主成分であり、L4 エンジンと比べてトルク変動の周波数が高くなることから、ダイナモのねじり共振が課題となり加振トルクを適切に発生できない領域がある。また、排気量が大きいためトルク変動も大きく、平均トルクが高い領域では再現ができない。

この課題の解決には、ダイナモの慣性モーメント低減と剛性向上が必要である。仕様の検討に当たっては関連する部品の 1D モデルを活用し、各部品の慣性モーメント、ねじり剛性の適切な設定をおこなった。

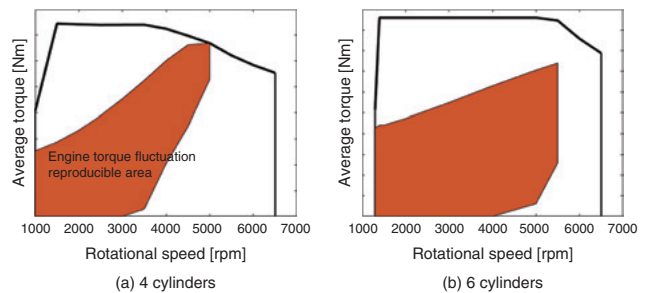


Fig. 2 Conventional specification of bench system

## 3. トルク変動再現のための低慣性・高剛性ダイナモ

Fig. 3 に入力ダイナモの外観を示す。

エンジントルク変動に起因する歯打ち音などの課題は 100 Hz 以下で発生することが多い<sup>(5), (6)</sup>。100 Hz 以下の加振トルクに関しては、慣性モーメントの影響が大きく、それ以上の周波数帯では慣性モーメントとねじり剛性で決まる共振周波数が影響する。エンジントルク変動によって生じる NV は低周波数で発生しやすいことから、慣性モーメントの検討を実施後、共振周波数の検討を実施した。

### 3.1. 慣性モーメントの目標設定

加振トルクや共振周波数の検討をおこなうため、ベンチのねじり振動モデルを簡易的に Fig. 4 のように考える。ダ

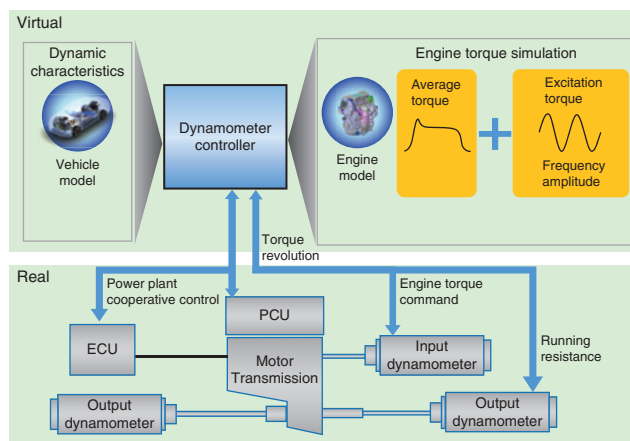


Fig. 1 Overview of VRS

イナモの慣性モーメントを  $J_1$  [kgm<sup>2</sup>], 設備全体のねじり剛性を  $k$  [Nm/rad], 粘性減衰係数を  $c$  [Nms/rad], 供試体慣性モーメントを  $J_2$  [kgm<sup>2</sup>] とする。

ここで,  $p = \sqrt{k/J_2}$ ,  $\beta = J_2/J_1$ ,  $\zeta = c/2\sqrt{J_2 k}$  としたとき, ダイナモの角変位  $\theta_1$  と供試体の角変位  $\theta_2$  はダイナモの加振トルク  $T_d$  [Nm], 加振周波数  $\omega$  [rad/s] を用いて式 (1) のように表される。

$$\begin{bmatrix} \theta_1(\omega) \\ \theta_2(\omega) \end{bmatrix} = \frac{T_d/J_1}{\omega^2(\omega^2 - p^2) - \beta p^2 \omega^2 - 2i\zeta p \omega (1 + \beta)} \begin{bmatrix} p^2 - \omega^2 + 2i\zeta p \omega \\ p^2 + 2i\zeta p \omega \end{bmatrix} \quad (1)$$

この時供試体に入力されるトルク変動  $T_c$  を  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  を用いて表すと式 (2) のようになる。

$$T_c = |\theta_1 - \theta_2| \sqrt{k^2 + c^2 \omega^2} \quad (2)$$

加振周波数  $\omega$  がねじり剛性  $k$  に対して十分小さいと仮定すると式 (2) は式 (3) のように近似できる。

$$T_c = \frac{J_2}{J_1 + J_2} \cdot T_d \quad (3)$$

同様にエンジンのトルク変動を  $T_e$ , クランクシャフト慣性モーメントを  $J_1'$  とするとその時の供試体入力トルク変動  $T_c'$  は式 (3)' のようになる。

$$T_c' = \frac{J_2}{J_1' + J_2} \cdot T_e \quad (3)'$$

ダイナモでエンジンと同様のトルク変動を実現するには  $T_c$  と  $T_c'$  が等しくなればよく, 要求される慣性モーメントは式 (4) から算出可能となる。

$$J_1 = \frac{T_d}{T_e} (J_1' + J_2) - J_2 \quad (4)$$

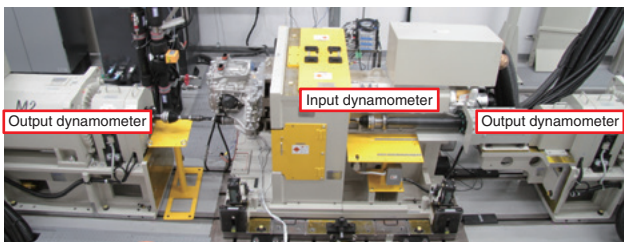


Fig. 3 Appearance of input dynamometer

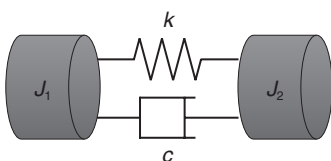


Fig. 4 Torsional vibration model of bench system

Table 1 Calculation condition for requested value of inertia

|                                                   |      |
|---------------------------------------------------|------|
| Excitation torque upper limit of dynamometer [Nm] | 1200 |
| Inertia of crankshaft [kgm <sup>2</sup> ]         | 0.04 |
| Inertia of test piece [kgm <sup>2</sup> ]         | 0.12 |
| Max torque fluctuation of engine [Nm]             | 600  |

各パラメータの値は Table 1 のようになるため, 設備の慣性モーメントは 0.2 kgm<sup>2</sup> 以下を目標とした。

### 3.2. 共振周波数の目標設定

式 (2) で定義した供試体に入力されるトルク変動がダイナモ加振トルク  $T_d$  を超える条件では共振領域に入る。そのため, エンジンの上限回転数での燃焼主次数の周波数 350 Hz において共振領域に入らないよう共振周波数の目標を定めた。粘性減衰係数  $c$  が 0 の条件で式 (2) を元にダイナモ加振トルクを超える周波数  $\omega_1$  を算出すると式 (5) のようになる。

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{k}{J_2}} \quad (5)$$

式 (5), 式 (6) より共振周波数を算出し, 共振周波数の目標を現状の 350 Hz に対して 450 Hz とした。

$$\omega_n = \sqrt{\frac{(J_1 + J_2)k}{J_1 J_2}} \quad (6)$$

### 3.3. ダイナモの仕様検討

ダイナモはねじり共振だけでなく, 曲げ共振も考慮した軸設計が必要となり, さらに曲げ振動による耐久性の観点から軸受けを増やす必要がある。また, 共振周波数を上げることを狙い高剛性の無線トルクメータの採用を検討したが, アンテナ部を遮蔽しないように金属部品を配置できない領域が設けられており, カップリングを複数取り付ける必要が生じた。このような理由から初期仕様は Fig. 5 のようになり, トータルの慣性モーメントは 0.3 kgm<sup>2</sup>, ねじり共振周波数は 270 Hz であった。

軸の共振周波数を上げるためにはねじり剛性  $k$  を大きく

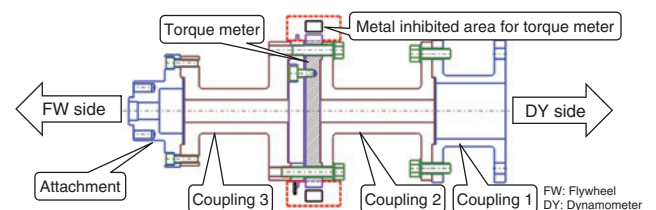


Fig. 5 Initial component of input dynamometer

する必要がある。しかしながら設備に用いられるフランジなどの部品の慣性モーメント  $J$  とねじり剛性  $k$  は、簡易的に円筒形で考えた場合、外径を  $D_1$ 、内径を  $D_2$ 、軸長を  $L$ 、材料密度を  $\rho$ 、横弾性率を  $G$  とすると、それぞれ式 (7)、(8) で表すことができ、径方向の寸法によって慣性モーメントとねじり剛性がトレードオフになることが分かる。

$$J = \frac{\pi}{32} \rho \cdot L \cdot (D_1^4 - D_2^4) \quad (7)$$

$$k = \frac{G \cdot \pi (D_1^4 - D_2^4)}{32L} \quad (8)$$

回転部品の慣性モーメントを低減するため Fig. 6 に示す 1D モデルで、各部品のねじり剛性がねじり振動 1 次の共振周波数に対してどのような寄与があるかを計算したところ、Fig. 7 のような結果となった。

トルクメータのねじり剛性は十分に高く、系全体の共振周波数に対して寄与が低いことから部品構成の見直しをおこない、Fig. 8 に示すような低慣性で共振周波数を高くできる仕様を選定した。また、曲げ振動に関しては搭載可能な重量を取り付ける供試体の上限である 20 kg に制限することで対応した。

Table 2 に従来の設備との諸元比較結果を示す。

Fig. 9 に示す通り、このような構造変更で駆動ダイナモのねじり共振周波数を 350 Hz から 500 Hz まで引き上げた。それにより、加振周波数の上限を 280 Hz から 440 Hz

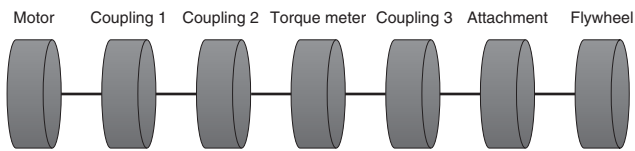


Fig. 6 1D CAE model of input dynamometer

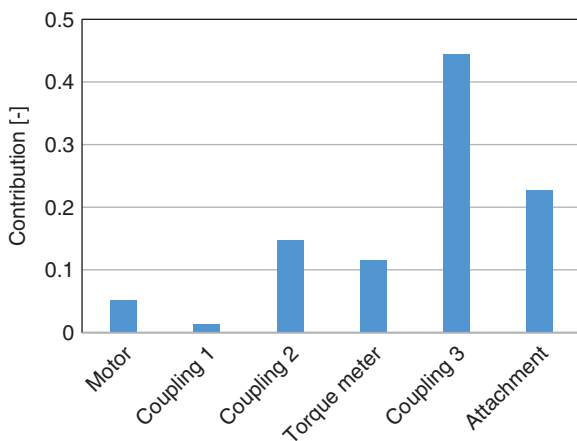


Fig. 7 Contribution of components

Table 2 Comparison of apparatus specifications

|                             | Conventional specification | Proposed specification |
|-----------------------------|----------------------------|------------------------|
| Inertia [kgm <sup>2</sup> ] | 0.15                       | 0.2                    |
| Stiffness [kNm/rad]         | 270                        | 485                    |
| Max torque [Nm]             | 500                        | 1600                   |

まで拡大した。

以上のように低慣性・高剛性のダイナモとしたことで、Fig. 10 に示す通り、4 気筒、6 気筒共にエンジンのトルク変動が再現可能な領域を大幅に拡大し、ねじり振動の課題が発生しやすい 3000 rpm 以下においてトルク変動が全域再現可能となった。

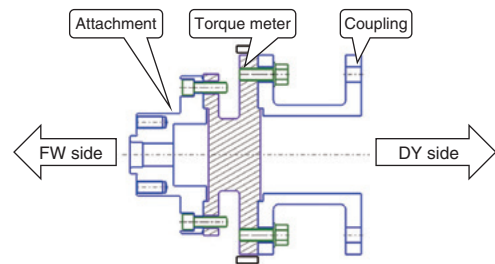


Fig. 8 Final component of input dynamometer

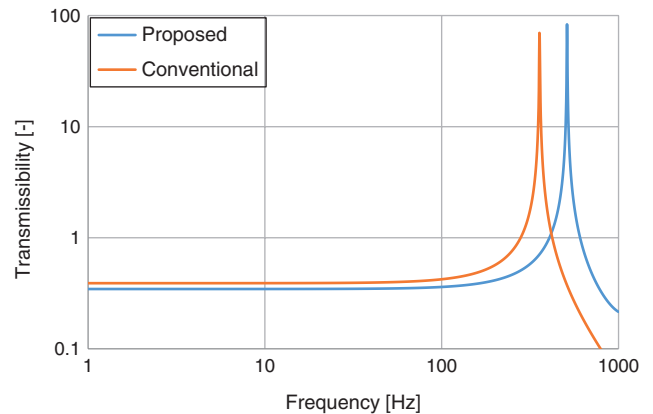


Fig. 9 Comparison for frequency response

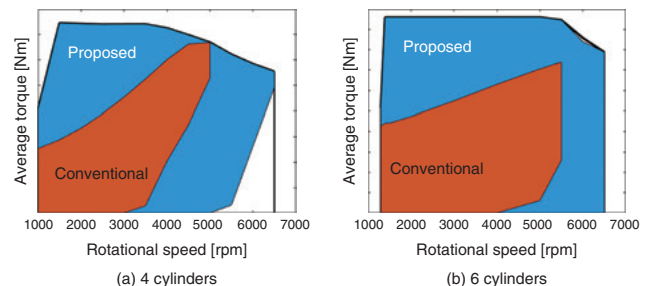


Fig. 10 Proposed specification of bench system

#### 4. 実証実験

ラトルノイズは低トルクでトルクフロー上のギアが歯面分離を起こすことで発生するものと、トルクに関わらず遊動ギアの歯打ちによって発生するものがある。低トルク域のトルク変動は従来のダイナモでも再現可能ではあったが、加振トルクが小さいことからパラメータスタディが十分にできなかった。また、高トルク域のトルク変動は再現ができなかった。

本ダイナモを用いることで全トルク領域における加振トルクのパラメータスタディが可能となり、部品交換をせずラトルノイズのメカニズム解析が可能であることを実証する。ラトルノイズはエンジンのトルク変動が Fig. 11 に示すようなフライホイール (FW) のダンパースプリング、ドライブシャフトをばねとする振動系により増幅、減衰されてトランスミッションに伝わり、クリアランスを有する内部の部品が振動し、部品同士が衝突することで発生する音である。そのため、FW 減衰特性に起因するトルク変動及び、トルク変動入力による内部部品の振動に対して解析をおこなった。

##### 4.1. フライホイールに起因するトルク変動解析

2 モータハイブリッド車におけるラトルノイズ発生時のクランクシャフト回転数の周波数解析結果を Fig. 12 に

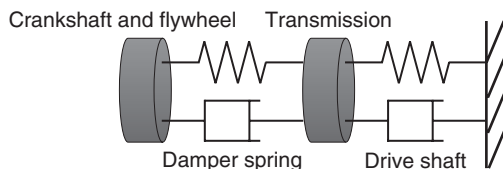


Fig. 11 Overview of torsional vibration model for vehicle

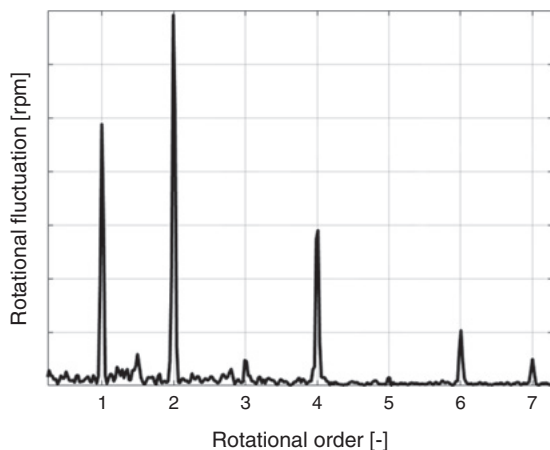


Fig. 12 Rotational fluctuation of crankshaft

示す。

4 気筒エンジンは通常回転 2 次以上の回転変動が発生するが、回転 1 次の回転変動が発生しており、分数調波振動が原因と考えられる。分数調波振動は Fig. 13 に示すようなダンパースプリングのばね剛性が  $k_1$  と  $k_2$  をまたぐように変動する際に発生する事象である。

対象となる FW は入力されるトルクが 30 Nm 以上変化する場合、ヒステリシストルクが変化するような構造となっている<sup>(7)</sup>。Fig. 14 はラトルノイズ発生時の ECU 上でのエンジントルク波形であり、トルク変化が 30 Nm 以上あるため高フリクション領域を使用する。そのため Fig. 15 に示す通り、高フリクション領域へ遷移することでダンパースプリングのねじり剛性が変化し、分数調波振動が発生していると考えられる。

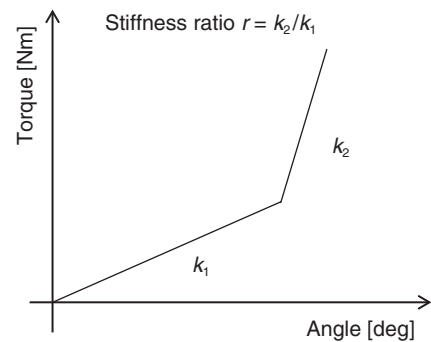


Fig. 13 Overview of damper spring stiffness

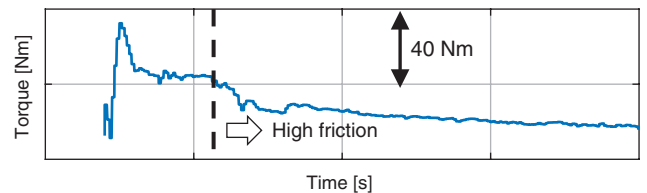


Fig. 14 Time-series data of engine torque

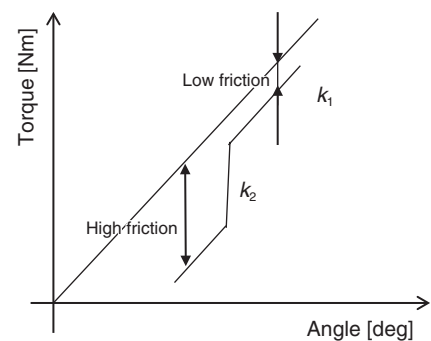


Fig. 15 Stiffness change with friction transition

次にダンパースプリングの静的なばね剛性を  $k_s$  [Nm/rad], フリクションが変化する際の動的なばね剛性を  $k_d$  [Nm/rad] とすると, FW は Fig. 16 に示すような並列ばねとしてモデル化される. このとき, 二つのばね剛性  $k_1, k_2$  は式 (9) のように表される.

$$\begin{aligned} k_1 &= k_s \\ k_2 &= k_s + k_d \end{aligned} \quad (9)$$

動的なばね剛性  $k_d$  はフリクション部の立ち上がり時におけるばね剛性を  $k_f$  [Nm/rad], フリクショントルクを  $f$  [Nm] とすると, Fig. 17 のようにモデル化される. また, ねじれ角変位振幅  $\theta$  [rad] を用いて式 (10) であらわすことができる<sup>(8)</sup>.

$$k_d = \frac{f}{\theta} \tanh \frac{\theta \cdot f}{k_f} \quad (10)$$

分数調波振動は剛性比  $r$  を小さくすることでその発生レベルが小さくなることが報告されている<sup>(9)</sup>.  $\theta$  が大きくなると式 (10) の  $\tanh$  部分は 1 に漸近するため  $k_d$  が低下し, 合成ばね  $k_2$  が低下する. このことから, 加振トルク振幅を大きくし  $\theta$  が大きくなることで, 分数調波振動の発生レベルが低下すると考えられる.

加振トルク振幅を大きくした場合の分数調波振動の発生レベルの変化を実機にて確認した結果と Fig. 16 のダンパースプリングモデルを組み込んだ CAE 解析結果の比較を Fig. 18 に示す. 加振トルク振幅を大きくすることで 1 次のトルク変動が実測, CAE 共に低下していく傾向が捉えられている.

トルク変動のパラメータスタディが可能となったことで分数調波振動の発生メカニズムがフリクションプレートに

よる非線形特性であることが, 特性の異なる FW への組み換え無しで解析することができた.

#### 4.2. トルク変動起因の内部部品挙動解析

ラトルノイズ発生時, 駆動系内部での対策はバックラッシュやクリアランスを小さくし, 部品の振動を抑えることが効果的<sup>(10)</sup>であるが, 駆動系内部は多くのクリアランスを有している. そのため効果的な対策を実施するためにはラトルノイズの原因となっているクリアランス箇所を特定することが重要である. しかしながら部品を組み替えてテストを実施する場合, その対策量が十分ではない場合にはラトルノイズレベルの変化が微小であり, 歯打ち箇所の特定制をおこなうことは容易ではない.

そこで, 加振トルクのコントロールをおこなうことでラトルノイズの発生レベルを変更し, 歯打ち発生時の駆動系部品の挙動とラトルノイズの比較をおこなうことで歯打ち箇所の特定が可能になると考えた.

部品の挙動に関連する事象はトルク変動が入力されることによって発生する回転変動, 及びギア歯面から発生する分力によるスラスト変動, ラジアル変動に限定されることが過去の知見から明確になっている. これらの挙動の計測をおこなうため Fig. 19 のように変位センサをトランスミッション内部に取り付け, 軸挙動の計測をおこなった.

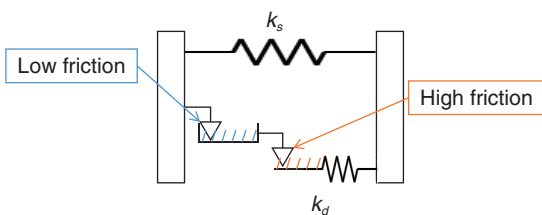


Fig. 16 FW model with parallel spring

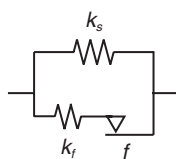


Fig. 17 Damper spring and friction model

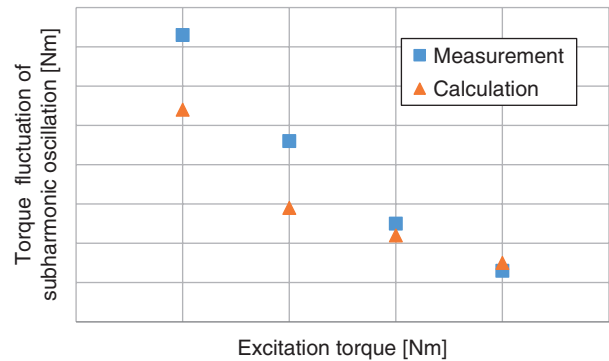


Fig. 18 Torque fluctuation of subharmonic oscillation

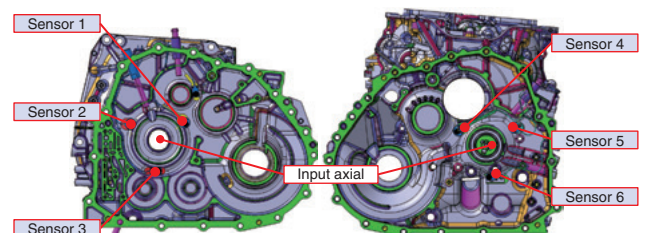


Fig. 19 Positions of displacement sensors

エンジン側に突き当たった状態を各部品の原点とし、Fig. 20 に示すように座標軸を定義した。

各部品の計測箇所 3 点 A, B, C, を通る平面の法線ベクトル  $\vec{n}$  は式 (11) で表される。法線ベクトル  $\vec{n}$  から各部品のスラスト方向変位  $S$ , 倒れ角  $\phi$  は式 (12), (13) のように算出される。

$$\vec{n} = \begin{pmatrix} x_n \\ y_n \\ z_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (y_b - y_a) \cdot (z_c - z_a) - (z_b - z_a) \cdot (y_c - y_a) \\ (z_b - z_a) \cdot (x_c - x_a) - (x_b - x_a) \cdot (z_c - z_a) \\ (x_b - x_a) \cdot (y_c - y_a) - (y_b - y_a) \cdot (x_c - x_a) \end{pmatrix} \quad (11)$$

$$S = \frac{x_n x_a + y_n y_a + z_n z_a}{z_n} \quad (12)$$

$$\phi = \tan^{-1} \sqrt{\left(\frac{x_n}{z_n}\right)^2 + \left(\frac{y_n}{z_n}\right)^2} \quad (13)$$

計測した時系列結果の一例を Fig. 21 に示す。上段は L サイドカバーの膜面方向加速度、中段は Overdrive gear のスラスト変位、下段は Input shaft のスラスト変位を示しており、ラトルノイズ発生時に各部品が大きく変位していることが分かる。

Fig. 22 は L サイドカバー加速度の周波数解析結果である。ラトルノイズのような非定常音は高い時間分解が必要であることから、ラトルノイズ解析に既に活用されている wavelet 変換を用いて解析をおこなっている<sup>(11)</sup>。周波数解

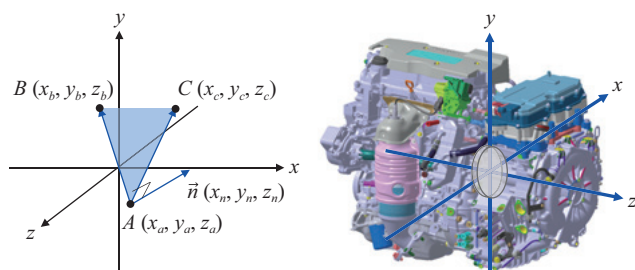


Fig. 20 Definition of coordinate axes

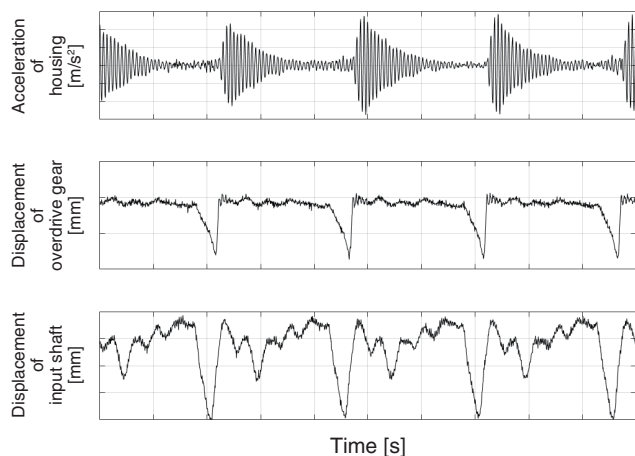


Fig. 21 Results of measurement

Table 3 Correlation coefficient to acceleration

|                                    |         |
|------------------------------------|---------|
| Overdrive gear thrust displacement | 0.8994  |
| Input shaft rotation               | -0.1645 |
| Input shaft thrust displacement    | -0.1303 |
| Input shaft radial angle           | 0.2105  |
| Overdrive gear radial angle        | 0.0864  |

析の結果よりラトルノイズは 500 Hz から 1000 Hz の間で強くピークを持っていることが分かる。

加振トルクが異なる条件でラトルノイズの発生周波数である 500 Hz から 1000 Hz における Partial Overall (POA) を各挙動に対して算出し、L サイドカバーの加速度との比較をおこなった。一例として相関の高い挙動のグラフを Fig. 23 に示す。

次に、この散布図から各挙動と加速度の相関係数を求めた結果を Table 3 に示す。

各挙動の中で Overdrive gear のスラスト方向の変位と加速度に強い相関がみられたため、ラトルノイズの原因は Overdrive gear のスラスト変位であると考えられる。

次に Overdrive gear のスラスト変位が発生しないよう

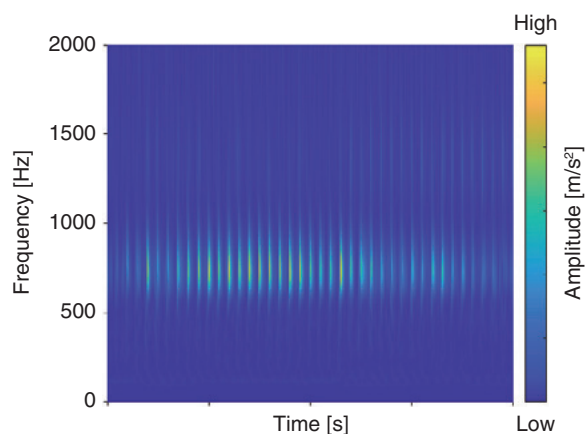


Fig. 22 Result of frequency analysis

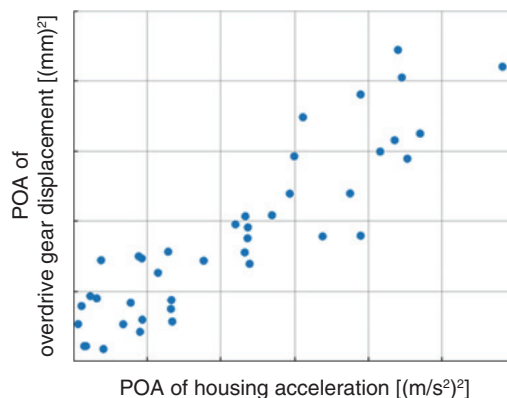


Fig. 23 Relationship of displacement and acceleration

圧入した仕様へ変更し同一条件でテストをおこなった結果を Fig. 24 に示す。

Overdrive gear のスラスト変位を抑えることでラトルノイズの発生が抑えられており、加振トルクを変化させることによって、部品の交換をせずラトルノイズ発生箇所が特定できた。

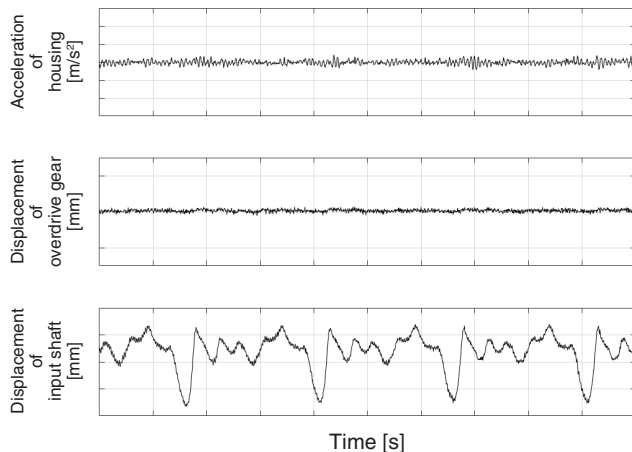


Fig. 24 Result of countermeasure

## 5. まとめ

VRS に用いるダイナモの検討に当たり、1D CAE を用いて各部のねじり剛性の寄与を明らかにしながら低慣性・高剛性となるような構造変更をおこなった。その結果慣性モーメントは  $0.2 \text{ kgm}^2$ 、共振周波数は  $500 \text{ Hz}$  となり、トルク変動に起因する事象の解析に必要な運転領域のすべてで、トルク変動を再現することができた。このようにして加振トルク領域を拡大した VRS を活用したパラメータスタディにより、FW の減衰特性メカニズム及びラトルノイズの発生部位特定を部品の組み換え無しでおこなえることを検証した。

本研究により、トランスミッション開発におけるエンジントルク変動に起因する駆動系ねじり振動課題に対し、加振トルクを変更することで部品交換をせずに解析をおこなうことができ、効率向上や早期仕様決定に大きく貢献できると考える。

## 参考文献

- (1) 佐川正記, 角田芳秋, 福島利章: 企画段階で適用可能な駆動系ねじり振動予測のためのエンジントルク変動推定技術, 自動車技術会 2020 年秋季大会学術講演会予稿集, No. 135-20, (2020)
- (2) 堺昭治, 小島靖, 城田幸司: ハイブリッド車の開発支

援設備としての VRS, デンソーテクニカルレビュー, Vol. 13, No. 1, p. 26-30, (2008)

- (3) 古賀俊行, 金子弘隆, 小松英隆: 車両モデル (Functional Digital Vehicle) と実機パワートレインベンチとの融合による多性能開発, 自動車技術会 2020 年秋季大会学術講演会予稿集, No. 153-20, (2020)
- (4) 長山勲: 自動車エンジン基本ハンドブック - 知っておきたい基礎知識のすべて -, 山海堂, p. 100-104, (2007)
- (5) 花井英二, 三谷真一, 中村博政: MT 車歯打ち音予測技術の研究, Honda R&D Technical Review, Vol. 16, No. 1, p. 139-144
- (6) 薄井友彦, 尾梶智哉, 松井亮, 村松達也, 山下義幸: 高減衰ダンパを搭載した超偏平小型トルクコンバータ, 自動車技術会 2015 年秋季大会学術講演会予稿集, No. 58-15A, p. 1405-1409, (2015)
- (7) 特開平 07-259879
- (8) 中原淳, 山崎浩二, 大滝雄介: サスペンション性能設計のためのラバーブッシュモデル, 自動車技術会論文集, Vol. 45, No. 6, p. 1049-1054, (2014)
- (9) 田辺裕樹, 伊藤貴章, 中島宏幸: 広角捻りダンパーの非線形振動分析, 自動車技術会シンポジウム, (2008)
- (10) 中渡洸導, 宮坂賢治, 遠藤弘淳, 森田善仁, 山下裕悟: 実稼働 TPA によるハイブリッドトランスアクスル内歯打ち部位の特定, 自動車技術会 2018 年秋季大会学術講演会予稿集, No. 110-18, (2018)
- (11) 石井秀明, 植村広, 章忠, 今村孝: ステアリングシステムの音源探査技術の開発, 計測自動制御学会産業論文集, Vol. 10, No. 9, p. 73-80, (2011)

## ■著 者■



塩田 啓二



佐川 正記



天野 雅文



末竹 和幸

# 硫化物全固体電池湿式プロセス用溶媒の検討

Comprehensive Study of Solvents for Wet Process Applied to Sulfide-based All Solid State Battery

銭 朴<sup>1</sup>  
Pu QIAN  
前 山 裕 登<sup>2</sup>  
Hiroto MAEYAMA

酒 井 洋<sup>2</sup>  
Hiroshi SAKAI  
古 田 照 実<sup>2</sup>  
Terumi FURUTA

小 川 篤<sup>2</sup>  
Atsushi OGAWA

## 要 旨

硫化物全固体電池の湿式プロセスを構築するにあたり、それに適した溶媒を探索する必要性から、固体電解質と溶媒の反応性を系統的に検討した。高いリチウムイオン伝導性を示すハロゲンドーピング型アルジロダイト固体電解質は、極性基を有しない炭化水素化合物とは反応しなかった。一方、エーテル類、エステル類、ケトン類、およびニトリル類はそれぞれの極性基に存在する酸素原子と窒素原子が固体電解質と強く相互作用し、電解質中のリチウムイオンと錯体を形成することが想定されたが、アルキル鎖長が炭素数4の溶媒は、錯体の形成が見られず、固体電解質のイオン伝導度を著しく低下させることはなかった。アルキル鎖が長くなることにより、溶媒分子中の配位酸素原子のアプローチ可能な表面積が減少することにより、溶媒が固体電解質の表面にアプローチすることが阻害されたためであると考えられ、溶媒の探索指針として、アルキル基の鎖長を炭素数4以上とすることで湿式プロセス実用化の方向性が得られた。

## ABSTRACT

In the process of creating a wet process for a sulfide-based all solid state battery, it was necessary to search for suitable solvents. A systematic examination was therefore made of solid electrolytes and the reactivity of solvents. A halogen-doped argyrodite solid electrolyte that shows high lithium-ionic conductivity did not react with a hydrocarbon compound containing no polar group. With ethers, esters, ketones, and nitriles, however, the oxygen atoms and nitrogen atoms in their respective polar groups interact strongly with the solid electrolyte and were expected to form complexes with the lithium ions in the electrolyte. However, solvents having an alkyl chain length with a carbon number of four were not found to form complexes and the ionic conductivity of the solid electrolyte had not been markedly diminished. This is thought to occur because the increase in length of alkyl chains decreases the surface area accessible to coordinating oxygen atoms in the solvent molecules, thereby inhibiting the approach of the solvent to the surface of the solid electrolyte. Setting the carbon number of four or greater for the alkyl group chain length as a solvent search index yielded a direction to pursue for practical application of a wet process.

## 1. まえがき

リチウムイオン電池は電気エネルギー貯蔵デバイスにおいて、高いエネルギー密度と出力密度が両立するため、携帯型電子デバイスへの応用のみならず、電動自動車への応用も広がっている<sup>(1)</sup>。同時に、さらなる高エネルギー密度、高出力密度および高い安全性をあわせもつエネルギー貯蔵デバイスの探求は常に続いており<sup>(2)</sup>、その候補の一

つとして全固体電池が注目されている。特に硫化物固体電解質はリチウムイオンの輸率が1であり<sup>(3)</sup>、しかも現行のリチウムイオン電池用電解液と同等以上のイオン伝導度を有する<sup>(3)-(6)</sup>。そのため、次世代電池材料の候補として、硫化物固体電解質とともに実用化を目指す研究がなされている<sup>(7)</sup>。

全固体電池の作製法は乾式法と湿式法に分類することができる。実験室レベルの小規模試験では溶媒を使用しない

<sup>1</sup> 先進技術研究所, 博士 (工学)

E-mail: boku\_sen@jp.honda

<sup>2</sup> 先進技術研究所

乾式法が適用され、粉体を直接プレスして電池を作製している<sup>(4), (5)</sup>。一方、工業的生産においては現在のリチウムイオン電池製造には大型ミキサーを使用した、スラリー調製、ロール・トゥ・ロールの塗工・乾燥・プレス工程を含む湿式法が採用されている。そのため全固体電池の製造にも生産性の向上とコスト低減が期待できる湿式法の適用が期待されている<sup>(8)-(11)</sup>。しかしながら、湿式法を用いた場合、硫化物固体電解質が極性の大きい溶媒と反応するという課題が残っている<sup>(8)-(17)</sup>。湿式法に使用する溶媒は高分子バインダーを溶解する役割と、構成材を分散する役割も兼ねるため、極性溶媒の使用も想定される<sup>(9), (10)</sup>。そのため、硫化物固体電解質と反応しないあるいは反応性が弱い極性溶媒が求められている<sup>(8), (17)</sup>。

極性溶媒と固体電解質の反応は一種の固液界面反応と理解することができる。このタイプの反応は溶媒分子の固体電解質表面へのアプローチ、溶媒分子と固体電解質の反応、および反応生成物の溶媒への溶解などのステップを経て進行する<sup>(18), (19)</sup>。極性基が固体電解質中のリチウムイオンと反応することがわかっているが、固体電解質表面へのアプローチを阻害すれば、反応が阻害できると予想される。この場合、溶媒分子が持つ無極性のアルキル基が、極性を示す固体電解質表面と反発しあうことが予想され<sup>(20)</sup>、立体障害として溶媒分子のアプローチを阻害すると期待される。

今まで報告された溶媒と固体電解質の相互作用の研究に溶媒のドナー数<sup>(8)</sup>あるいはSP値<sup>(10)</sup>を極性の指標とする報告がある。しかし、溶媒の極性基と硫化物固体電解質との反応メカニズムを明らかにし、反応を阻害する因子に言及したものはまだ見当たらない。

そこで本論文では、硫化物固体電解質と反応しないあるいは反応性の低い溶媒を探索することを目的とし、溶媒分子内の極性基と固体電解質の反応メカニズムを明らかにし、アルキル基が立体障害として機能することを実験および計算科学の手法で実証したことを報告する。

## 2. 実験

### 2.1. 材料

固体電解質には化学式  $\text{Li}_{7-y}\text{PS}_{6-y}\text{X}_y$  ( $\text{X} = \text{Cl or Br}$ ,  $0 < y < 2$ ) で表されるハロゲンドーピング型アルジロダイト化合物を使用した<sup>(6)</sup>。溶媒分子内の極性基と固体電解質の反応メカニズムを明らかにし、アルキル鎖の立体障害を明らかにするために、Fig. 1 に示す5 カテゴリー計14種類の化合物を溶媒として浸漬試験に使用した。カテゴリー I はエーテル類であり、酸素の数と側鎖アルキル鎖のかさ高さの効果を検討するために Fig. 1 図中の (1) から (4) の化合物を使用した。カテゴリー II のエステル類は側鎖の立体障害を検討するために、カルボン酸側の炭素数が2と4のもの、

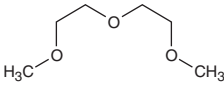
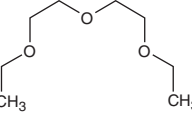
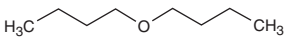
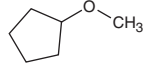
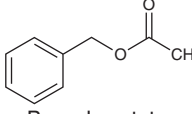
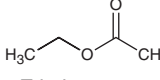
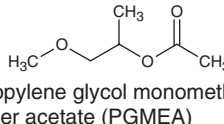
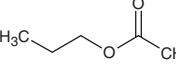
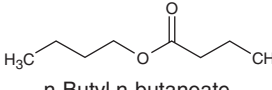
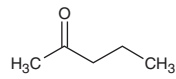
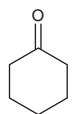
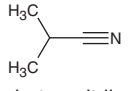
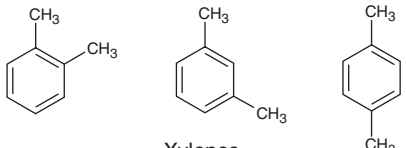
| No.  | Solvents                                                                                                                                 | Chain length of side groups |    |     |
|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|----|-----|
| (1)  | <br>Diethylene glycol dimethyl ether                   | C1                          | C1 | I   |
| (2)  | <br>Diethylene glycol diethyl ether                    | C2                          | C2 |     |
| (3)  | <br>Dibutyl ether                                      | C4                          | C4 |     |
| (4)  | <br>Cyclopentyl methyl ether                           | C5                          | C1 |     |
| (5)  | <br>Benzyl acetate                                     | -                           | C2 | II  |
| (6)  | <br>Ethyl acetate                                      | C2                          | C2 |     |
| (7)  | <br>Propylene glycol monomethyl ether acetate (PGMEA) | C1                          | C2 |     |
| (8)  | <br>n-Propyl acetate                                 | C3                          | C2 |     |
| (9)  | <br>n-Butyl n-butoate                                | C4                          | C4 |     |
| (10) | <br>2-Pentanone                                      | C1                          | C3 | III |
| (11) | <br>Cyclohexanone                                    | -                           | -  |     |
| (12) | <br>Cyclopentanone                                   | -                           | -  | IV  |
| (13) | <br>Isobutyronitrile                                 | C4                          | 0  |     |
| (14) | <br>Xylenes                                          |                             |    | V   |

Fig. 1 Solvents used for immersion tests

アルコール側のアルキル鎖の炭素数が2から4のものを検討した [Fig. 1 図中の (5) から (9)]. カテゴリーⅢのケトン類については、鎖状のものと環状のものの違いを検討した [Fig. 1 図中の (10) から (12)]. カテゴリーⅣのニトリル類 [Fig. 1 図中の (13)] についてはニトリル基と固体電解質の相互作用を検討するために用いた. カテゴリーⅤの芳香族炭化水素は低極性溶媒として検討した. 溶媒として使用された化合物はそれぞれの市販試薬をモレキュラーシーブで脱水した後に蒸留したものを使用した. すべての溶媒中の残存水分量は 30 ppm 未満であった. キシレン [Fig. 1 図中の (14)] の市販品は異性体の混合物であり, o-, m-, p- キシレンが含まれていたが, キシレンと記述する. 以下文中では溶媒を Fig. 1 図中の番号で記述する.

## 2.2. 溶媒と固体電解質の反応性評価

溶媒と固体電解質の反応性を評価するための, 溶媒浸漬試験は次のようにおこなった. アルゴンガスで常時パージされているグローブボックスの中で, 固体電解質 2 g と溶媒 4 g をガラス容器中で混合した後, 12 時間静置した. その後, 混合物をガラスチューブオープンに移し, 溶媒を減圧でとり除いた. すべての操作は大気非曝露で実施した.

溶媒浸漬試験前後の固体電解質の性能を評価するため, それらのイオン伝導度を測定した. 内径 10 mm のジルコニア製チューブ内で固体電解質の圧粉ペレットを作製し, 交流インピーダンス法でイオン伝導度を測定した. 交流インピーダンス測定時の印加電圧は 10 mV, 周波数は 1 MHz から 0.1 Hz の範囲であった. 溶媒浸漬試験後の固体電解質の伝導度値を浸漬前のものの値で割った数値を伝導度維持率とした.

## 2.3. 赤外吸収スペクトル

溶媒分子による固体電解質の分解反応は, 溶媒分子中の極性基の固体電解質への配位, それに後続する配位した中間体が溶媒へ溶解することによって生じると考えられる<sup>(15)</sup> -<sup>(17)</sup>. これらの反応過程を検証するために, 固体電解質を各溶媒にそれぞれ浸漬した後, 真空乾燥する前後の赤外吸収スペクトル (IR spectra) を測定した. 極性基が固体電解質中のリチウムイオンと配位した場合, その赤外吸収バンドのシフトが予想される<sup>(21), (22)</sup>. また, 配位した中間体が溶媒へ溶解することにより, 固体電解質の骨格構造が破壊され, 固体電解質の吸収バンドの変化も予想される. 測定は Bruker 社製 TENSOR 37 赤外分光光度計を用い, ダイヤモンド全反射アタッチメント Platinum ATR を用いて実施した. サンプルのセッティングおよび測定はオリジナルの気密サンプル室を使用し, 大気非曝露で実施した.

## 2.4. ガスクロマトグラフィ質量分析

溶媒の分解反応を評価するため, 溶媒のガスクロマトグ

Table 1 Calculation conditions of DMol<sup>3</sup>

|                       |                      |
|-----------------------|----------------------|
| Basis function        | dnp                  |
| Pseudopotential       | None (All electron)  |
| Functional            | GGA-blyp             |
| Orbital cutoff length | 3.7 Å                |
| SCF tolerance         | 1 x 10 <sup>-6</sup> |

ラフィ質量分析 (GCMS) をおこなった. 測定には株式会社島津製作所製 GCMS-QP2010 Ultra を用いた. カラムには RESTEK Rtx-5MS, 長さ 30 m, 内径 0.25 mm, 被膜厚さ 0.25 μm のガラスキャピラリーカラムを使用し, キャリアーガスには He ガスを使用した. 化合物の同定は装置付属解析ソフト GCMS solution Ver.2.70 の NIST08 ライブラリーを用いておこなった. 試験の過程で混入した不純物のピークは分析結果から除外した.

## 2.5. 計算科学による配位酸素原子の反応性の見積もり

溶媒分子が固体電解質表面へのアプローチを阻害するアルキル鎖の立体障害の影響を明確にするために, 溶媒分子中の配位酸素原子がアプローチ可能な表面積を分子モデル構造から見積もった. 分子モデルの構造決定には Materials Studio 2020 の第一原理電子状態計算プログラムである DMol<sup>3(23)-(25)</sup> を用いた. 主な計算条件は (Table 1) に示した. 決定された分子構造に対しアプローチ可能な配位酸素原子の表面積を Connolly surface<sup>(25)</sup> (Fig. 2), すなわち球体原子で表した分子モデル上をプローブとする球体を接触させながら転がした時にプローブとする球体が描いた軌跡を表面積とするもの, の考え方をもとに見積もった. この見積もりは Python 言語を用い, 自ら開発したプログラムコードを作成して計算を実施した. 立体障害の影響を検討するため, 計算対象を Fig. 1 図中カテゴリーⅡのエステル類 (6), (8), (9) とカテゴリーⅢのケトン類 (10) とした.

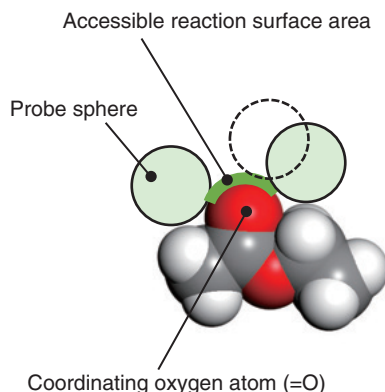


Fig. 2 Accessible reaction surface area based on Connolly surface

### 3. 結果

#### 3.1. 溶媒浸漬試験の結果

浸漬後の固体電解質のイオン伝導度測定の結果を Fig. 3 に示す。浸漬前の固体電解質のイオン伝導度に対する浸漬後のもののイオン伝導度維持率を棒グラフで示している。カテゴリー I のエーテル類の中では、ジブチルエーテル [Fig. 1 溶媒 (3)], カテゴリー II のエステル類の *n*- 酪酸 *n*- ブチル [Fig. 1 溶媒 (9)], カテゴリー IV のイソブチロニトリル [Fig. 1 溶媒 (13)], およびカテゴリー V の低極性溶媒であるキシレン [Fig. 1 溶媒 (14)] に浸漬したものが 98% 以上の維持率を示した。また、カテゴリー I のエーテル類のシクロペンチルメチルエーテル [Fig. 1 溶媒 (4)] とカテゴリー II のエステル類の酪酸 *n*- プロピル [Fig. 1 溶媒 (8)] に浸漬したものがそれぞれ 87% と 79% の維持率を示した。これらとは対照的に、カテゴリー I のエーテル類のジエチレングリコールジメチルエーテル [Fig. 1 溶媒 (1)], カテゴリー III のケトン類のシクロヘキサノン [Fig. 1 溶媒 (11)], シクロペンタノン [Fig. 1 溶媒 (12)] に浸漬したものは、イオン伝導性をほとんど示さなかった。そのほかの溶媒を用いた場合はイオン伝導度維持率が 17% から 47% の間であった。

本研究で使用した固体電解質は薄いベージュ色の粉末であった。Fig. 4 にいくつかの溶媒に浸漬した固体電解質の写真を示す。酪酸エチル [Fig. 1 溶媒 (6)] に 12 時間浸漬したものは溶媒が黄色くなり、粉末が褐色に変色した [Fig. 4 図中 (6)]。溶媒 (9), 溶媒 (13) に 12 時間浸漬した結果、溶媒がそれぞれ薄い黄色と薄い青色になったが、固体電解質の色はほぼ変化しなかった [Fig. 4 図中 (9), (13)]。溶媒 (11) に固体電解質を浸漬したものは溶媒が黄色くなり、粉末が粘性のあるペースト状に変化した [Fig. 4 図中 (11)]。写真を示さないが、ほかの溶媒に浸漬したものは、イオン伝導度維持率が低いものに变色や粘性の増加などの変化が見られる傾向があった。

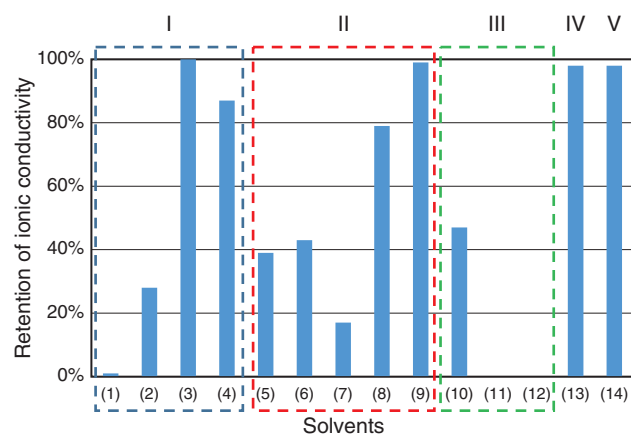


Fig. 3 Retention of ionic conductivity of solid electrolyte after immersion tests

#### 3.2. 乾燥前の固体電解質の赤外吸収スペクトル

極性基の効果とアルキル鎖の立体障害の効果を比較するために、カテゴリー I と II からそれぞれ 2 種類、カテゴリー III から 1 種類の計 5 種類の溶媒の結果を比較した。Fig. 5 に溶媒と浸漬前後の固体電解質のスペクトルを上下に並べて比較した。浸漬試験後固体電解質のイオン伝導度が大きく低下した溶媒 (1) と溶媒 (6) は、浸漬前のものと比較して大きな変化が見られた [Fig. 5(a), (c)]。溶媒 (1) の場合 [Fig. 5(a)], 溶媒の吸収ピークのほとんどが分裂し、溶媒分子が固体電解質に配位していることが示唆された<sup>(22)</sup>。また、560  $\text{cm}^{-1}$  にある固体電解質の P-S 結合に由来する吸収のシフト<sup>(26)</sup>が見られ、固体電解質骨格に変化が起きていることが示唆された。溶媒 (6) の場合 [Fig. 5(c)], 560  $\text{cm}^{-1}$  の固体電解質の P-S 結合に帰属されるピークがブロードになり (○印), また、溶媒に由来するピークの中、酪酸エチルの C=O 結合に帰属されるピーク (1736  $\text{cm}^{-1}$ ) がショルダーピーク (1707  $\text{cm}^{-1}$ , ▼印) を持つようになった。これは溶媒の一部が固体電解質成分に配位していることを示唆している<sup>(21)</sup>。また、カテゴリー III の溶媒 (12) を用いた場合 [Fig. 5(e)], 溶媒と固体電解質の吸収ピークよりも、 $\text{H}_2\text{O}$  に由来する一連のピーク (▼印) の強度が大きかった。このことから、溶媒と固体電解質の分解および  $\text{H}_2\text{O}$  の生成が推定できる。

これらとは対照的に、溶媒 (3) [Fig. 5(b)], 溶媒 (9) [Fig. 5(d)] を溶媒に使用した場合、溶媒分子の固体電解質への配位および固体電解質分子の骨格崩壊によるスペクトルの変化は見られなかった。グラフは示さないが、溶媒 (13) および溶媒 (14) を用いた場合でもスペクトルに変化は見られなかった。

#### 3.3. 乾燥状態の固体電解質の赤外吸収スペクトル

溶媒浸漬前の固体電解質および各溶媒にそれぞれ浸漬した後、真空乾燥後、すなわち揮発成分と不揮発成分を分離した後のものの赤外吸収スペクトルを Fig. 6 に示す。固体電解質 ( $\text{Li}_{7-y}\text{PS}_{6-y}\text{X}_y$ ,  $0 < y < 2$ ) 分子中の P-S 結合に帰属される吸収が 560  $\text{cm}^{-1}$  にメインピーク (▼印) として現

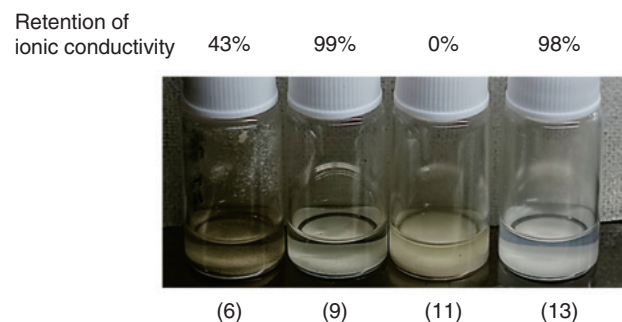


Fig. 4 Photographs of solid electrolyte immersed in solvents (6), (9), (11), and (13)

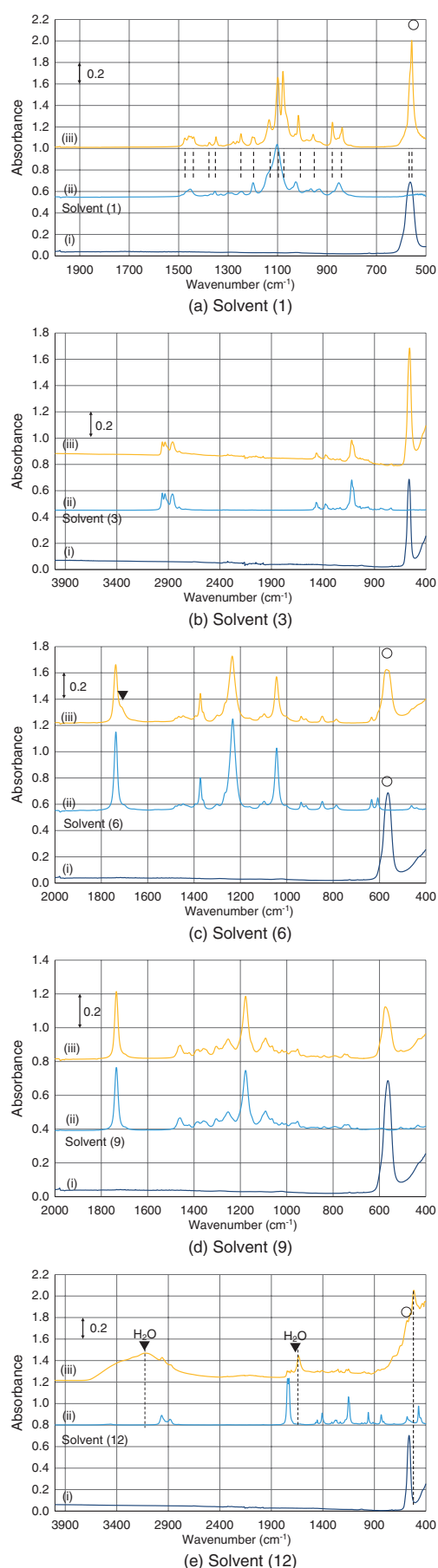


Fig. 5 Infrared absorption spectra of argyrodite solid electrolyte (i), solvents (ii), and wet electrolytes after immersion tests (iii)

れた<sup>(26)</sup>。一方、Li-S や Li-X 結合の吸収は  $250\text{ cm}^{-1}$  の遠赤外領域に現れるため、ここでは省略する。また、 $1033\text{ cm}^{-1}$  に P-O 結合に帰属される小さいピーク (●印) が確認された<sup>(27)</sup>。

Fig. 6 図中に示す溶媒 (1) に浸漬した後の固体電解質の赤外吸収スペクトルは、 $560\text{ cm}^{-1}$  のメインピークが  $563\text{ cm}^{-1}$  と  $574\text{ cm}^{-1}$  の二つに分裂し Fig. 6(a) (◆印)、アルジロダイト骨格の分解が示唆された。また、 $800$  から  $1500\text{ cm}^{-1}$  の範囲において新たなピークが多数現れ、分解生成物の存在が示唆された。同じカテゴリー I に帰属する溶媒 (3) は、浸漬・乾燥後も赤外吸収スペクトルに変化がほとんど見られず [Fig. 6 図中 (3)], 固体電解質の溶媒による分解が起きていないと考えられる。この溶媒は浸漬後も固体電解質のイオン伝導度は低下しなかった。これ以外の溶媒では、溶媒 (13) [Fig. 6 図中 (13)], および溶媒 (14) [Fig. 6 図中 (14)] に浸漬したものに顕著な変化が認められず、これらの溶媒に浸漬後も固体電解質のイオン伝導度が 98% 以上維持されていた。

次にカテゴリー II に属する 2 種類のエステル、溶媒 (6) と溶媒 (9) に浸漬後の固体電解質のスペクトルを比較する。エステル分子中、アルコール側とカルボン酸側の炭素

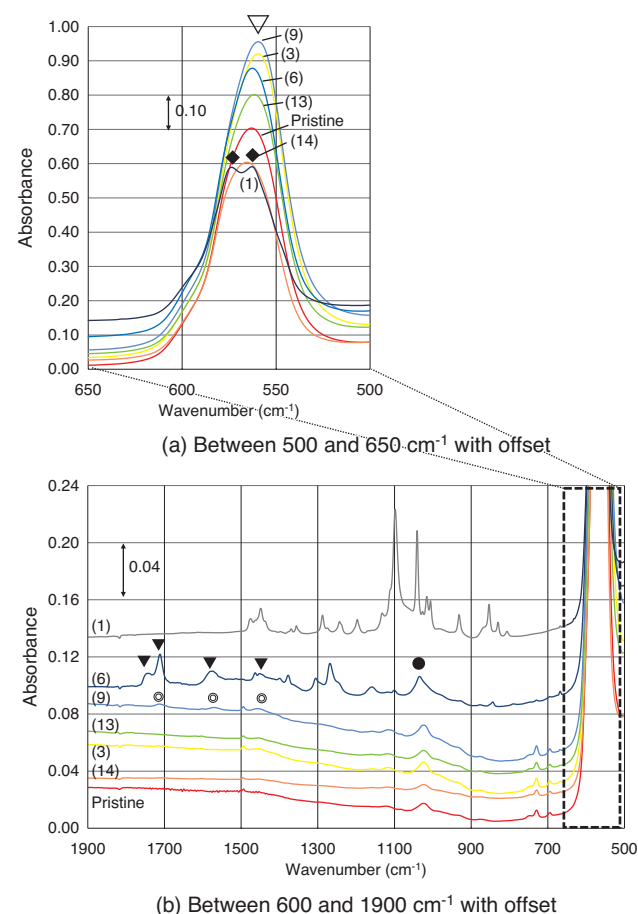


Fig. 6 Infrared absorption spectra of argyrodite solid electrolyte before and after immersion tests in solvents (1), (3), (6), (9), (13), and (14)

数がともに2である溶媒(6)のスペクトル[Fig. 6 図中(6)]には、 $560\text{ cm}^{-1}$ のメインピークに変化は見られなかった。しかし $1743$ ,  $1711$ ,  $1574$ ,  $1451\text{ cm}^{-1}$ に新しいピーク(▼印)が現れ、 $1033\text{ cm}^{-1}$ (●印)の吸収強度が増大した。 $1743\text{ cm}^{-1}$ の吸収は残留溶媒のエステル結合に帰属でき、 $1711\text{ cm}^{-1}$ の吸収は溶媒分子が固体電解質に配位している状態と帰属できる<sup>(21)</sup>。残りの $1574\text{ cm}^{-1}$ の吸収はエステルの加水分解生成物である酢酸リチウム塩に帰属できる。 $1451\text{ cm}^{-1}$ のブロードなショルダーピークと $1033\text{ cm}^{-1}$ の吸収(●印)はP=OあるいはP-O-Liに帰属できる<sup>(27)</sup>。また、 $1100$ から $1400\text{ cm}^{-1}$ の範囲内に帰属できていないピークが数本あったが、分解生成物のものと推定される。これらの結果から、溶媒(6)に固体電解質を浸漬することにより、エステル分子の一部が固体電解質と配位し、固体電解質の一部を分解したが、メインの骨格は保たれていると推定される。

アルコール側とカルボン酸側の炭素数がともに4である溶媒(9)に浸漬した固体電解質はイオン伝導度が99%維持していることは前述のとおりである。その赤外吸収スペクトルは $560\text{ cm}^{-1}$ のメインピークに変化が見られず、[Fig. 6(a) 図中(9)]。1707および1562,  $1438\text{ cm}^{-1}$ に新しい吸収が見られ[Fig. 6(b) 図中(9)(◎印)]、それぞれ硫化物固体電解質に配位した溶媒分子と加水分解生成物であるn-酢酸リチウム塩に帰属できる。しかしこれらの吸収ピークの強度は溶媒(6)のケースに比較して弱く、配位した溶媒と加水分解生成物はわずかであることがわかった。 $1748\text{ cm}^{-1}$ に吸収が見られなかったため、フリー溶媒の残存は認められないことが示された。

### 3.4. 浸漬後溶媒の質量分析

浸漬試験による溶媒の分解生成物を把握するために、浸漬後に真空乾燥により溶媒を含む揮発成分と固体電解質を含む不揮発成分を分離し、揮発成分の定性分析をGCMSでおこなった。Fig. 7に揮発成分のGCMS分析結果を示す。

カテゴリーⅠのエーテル4種類から、揮発性の溶媒分解生成物は検出されなかった。Fig. 7(a)に一例として溶媒(1)の結果を示す。一方、カテゴリーⅡのエステルからは、加水分解生成物であるアルコールが検出された。一例として溶媒(6)の結果をFig. 7(b)に示す。エタノールが検出され、浸漬試験中に加水分解の発生が推定される。この結果は赤外吸収スペクトルの結果と一致している。カテゴリーⅢのケトン類からは、それぞれのケトンのアルドール縮合生成物が検出された。溶媒(12)の例をFig. 7(c)に示す。アルドール縮合の副生成物として $\text{H}_2\text{O}$ が発生するため、この結果は赤外吸収スペクトルの結果と一致している[Fig. 7(c)]。

一方、カテゴリーⅣの溶媒(13)[Fig. 7(d)]、カテゴリーⅤの溶媒(14)[Fig. 7(e)]の浸漬後揮発成分からは、新たな反応生成物は検出されず、浸漬試験によって溶媒が分解さ

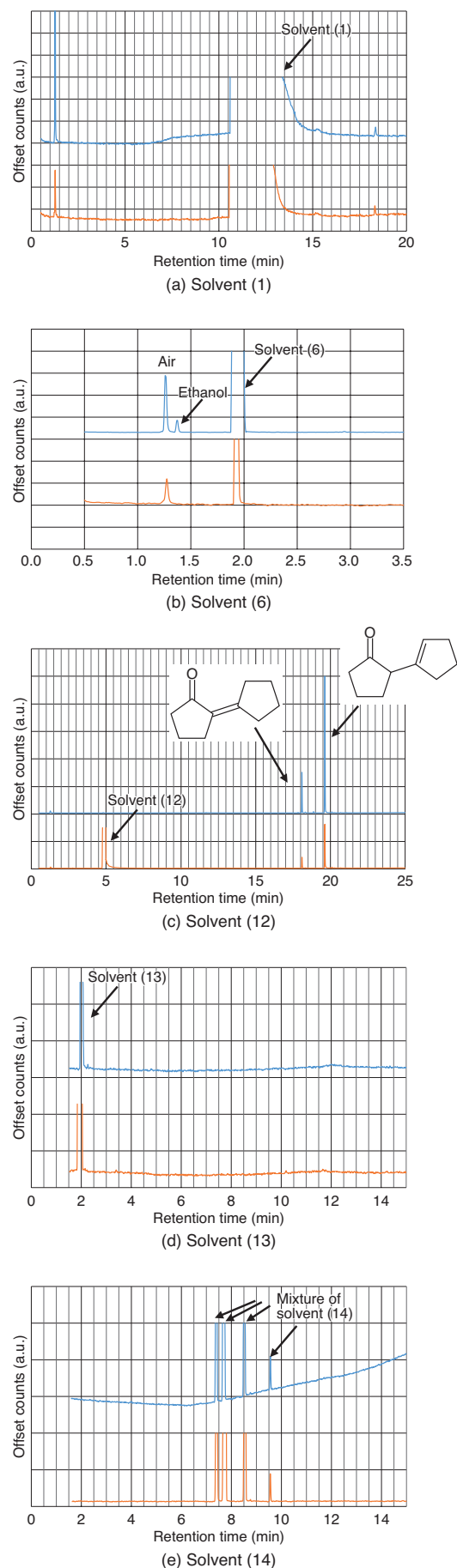


Fig. 7 GCMS chromatograms of solvents before (lower) and after (upper) immersion tests

れなかった,あるいは分解生成物が揮発性でなかったことが示された。

### 3.5. 配位酸素原子へアプローチ可能な表面積

計算対象としたカテゴリーⅡのエステル類(6), (8), (9)とカテゴリーⅢのケトン類(10)について, DMol<sup>3</sup>によって計算した分子構造モデルと, それから算出した配位酸素原子へアプローチ可能な表面積を Fig. 8 に示した。なお, アプローチする分子(プローブ)の大きさは半径 1.82 Å の Li 原子と固体電解質の表面の凹凸を想定した半径 10 Å の球体を仮定してそれぞれ算出している。溶媒(9)については

直線状ではない構造となる場合が想定されるため折り畳まれた構造を計算し, Fig. 8 図中(9)'として追加で計算をおこなった。アルキル鎖の折り畳まれた構造(9)'においては, 折り畳まれていない構造(9)とこの面積はわずかに異なるだけで大きな差はなかった。

この配位酸素原子へアプローチ可能な表面積は, アルキル鎖が長くなると小さくなることが示された。また, プローブ半径 10 Å の場合, 浸漬試験後の固体電解質のイオン伝導度が維持されている溶媒(9)の値が, イオン伝導度が低下した溶媒(6), (8), (10)の値の半分以下であることがわかった。

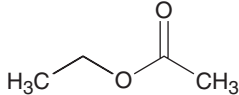
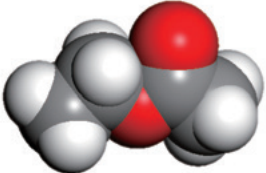
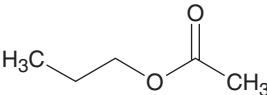
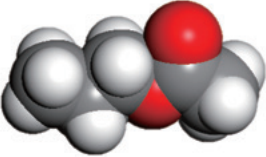
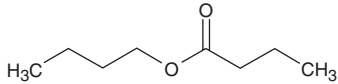
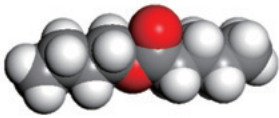
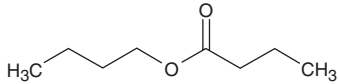
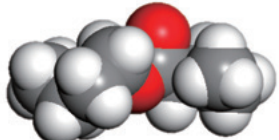
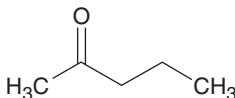
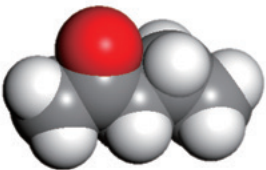
| No.  | Solvents                                                                                                                                                                                            | Molecular model                                                                     | Reaction surface area (Å <sup>2</sup> ) |                   |     |
|------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------|-----|
|      |                                                                                                                                                                                                     |                                                                                     | Probe radius 1.82 Å                     | Probe radius 10 Å |     |
| (6)  | <br>Ethyl acetate<br>CH <sub>3</sub> -C(=O)O-C <sub>2</sub> H <sub>5</sub>                                         |   | 10.55                                   | 4.94              | II  |
| (8)  | <br>n-Propyl acetate<br>CH <sub>3</sub> -C(=O)O-C <sub>3</sub> H <sub>7</sub>                                    |  | 10.41                                   | 4.94              |     |
| (9)  | <br>n-Butyl n-butoate<br>CH <sub>3</sub> -CH <sub>2</sub> -CH <sub>2</sub> -C(=O)O-C <sub>4</sub> H <sub>9</sub> |  | 6.47                                    | 1.69              |     |
| (9)' | <br>n-Butyl n-butoate<br>CH <sub>3</sub> -CH <sub>2</sub> -CH <sub>2</sub> -C(=O)O-C <sub>4</sub> H <sub>9</sub> |  | 6.31                                    | 1.53              |     |
| (10) | <br>2-Pentanone<br>CH <sub>3</sub> -C(=O)-CH <sub>2</sub> -CH <sub>2</sub> -CH <sub>3</sub>                      |  | 9.43                                    | 4.58              | III |

Fig. 8 Calculation results of molecular structure and accessible reaction surface area

#### 4. 固体電解質と溶媒の反応メカニズム考察

脂肪族、芳香族を含む炭化水素は硫化物固体電解質と反応しないことが知られている<sup>(8), (10)</sup>。本研究では、芳香族炭化水素である溶媒(14)による浸漬後、固体電解質のイオン伝導度が98%保持し、固体電解質の赤外吸収スペクトル[Fig. 6 図中(14)]と溶媒のGCMS分析[Fig. 7(e)]から反応生成物が検出されなかったなどの結果から、固体電解質と溶媒(14)は反応しなかったと考えられる。

エーテル類、エステル類、およびケトン類に含まれる酸素原子、ニトリル類に含まれる窒素原子はそれぞれの電子供与性から、リチウムイオンに配位することが知られている<sup>(21), (22), (28)</sup>。また、これらの化合物の中で、アルキル鎖長が炭素数2程度のものが硫化物固体電解質中のリチウムイオンと配位して電解質成分を溶解させるあるいは膨潤させることが知られている<sup>(29)-(31)</sup>。前述のように赤外吸収スペクトルで一部の溶媒の配位が観察されていることから、本研究の条件下でも、溶媒の配位が起きていることがわかった。しかし、これらの極性基を有する化合物の中でも、固体電解質のイオン伝導度を大きく低下させたものと、ほぼ低下させなかったものが存在した。具体的には官能基の両側に炭素数4のアルキル鎖を持つ化合物は固体電解質のイオン伝導度をほぼ低下させなかったが、アルキル鎖の炭素数が2のものはイオン伝導度を大きく低下させた。これらの結果から、アルキル鎖の炭素数が4のものが、その立体障害で溶媒分子と固体電解質の反応を阻害していると推察される。

立体障害の定量化は種々の手法を用いられおり、分子のファンデルワールス半径に基づいて求めた体積を基準とする報告がある<sup>(32), (33)</sup>が、本研究では配位原子が固体電解質へのアプローチのしやすさの指標として、アプローチ可能表面積を用いた。本章でアルキル鎖長が炭素数2から4のものを主な対象にし、アルキル鎖の炭素数と表面積の関係で議論する。

##### 4.1. 固体電解質とエーテル類との反応機構

エーテル分子中の酸素はその電子供与性から、リチウムを含むアルカリ金属イオンに配位することが知られている<sup>(22), (28)</sup>。また、エーテル酸素が $\text{Li}_2\text{S}$ のリチウムイオンに配位して $\text{Li}_2\text{S}$ を溶解させること、 $\text{Li}_3\text{PS}_4$ と錯体を形成することも報告されている<sup>(12), (13), (28)</sup>。したがって、エーテルが溶媒として硫化物固体電解質と接触した場合、固体電解質の表面のリチウムイオンに配位すると考えられる。浸漬後の固体電解質および溶媒の赤外吸収スペクトル[Fig. 5(a), および Fig. 6 図中(1)]から、ポリエーテルである溶媒(1)が固体電解質成分に配位したまま錯体として表面から脱離し、固体電解質の分解を引き起こしたと考えられる[Fig. 9(a)]。同じポリエーテル類に分類される溶媒(2)の

スペクトルをグラフに示していないが、溶媒(1)と同様な傾向を示すことが実験結果でわかった。これらの分子の中で、酸素原子に結合しているアルキル鎖長は炭素数1と2である。一方、酸素分子に結合しているアルキル鎖長が炭素数4の溶媒(3)は、赤外吸収スペクトルの結果[Fig. 5(b), および Fig. 6 図中(3)]から、エーテル酸素がリチウムイオンに配位していないことが明らかになった。配位酸素原子へのアプローチ可能な表面積の計算結果を勘案すると、アルキル鎖の立体障害によって、溶媒分子の固体電解

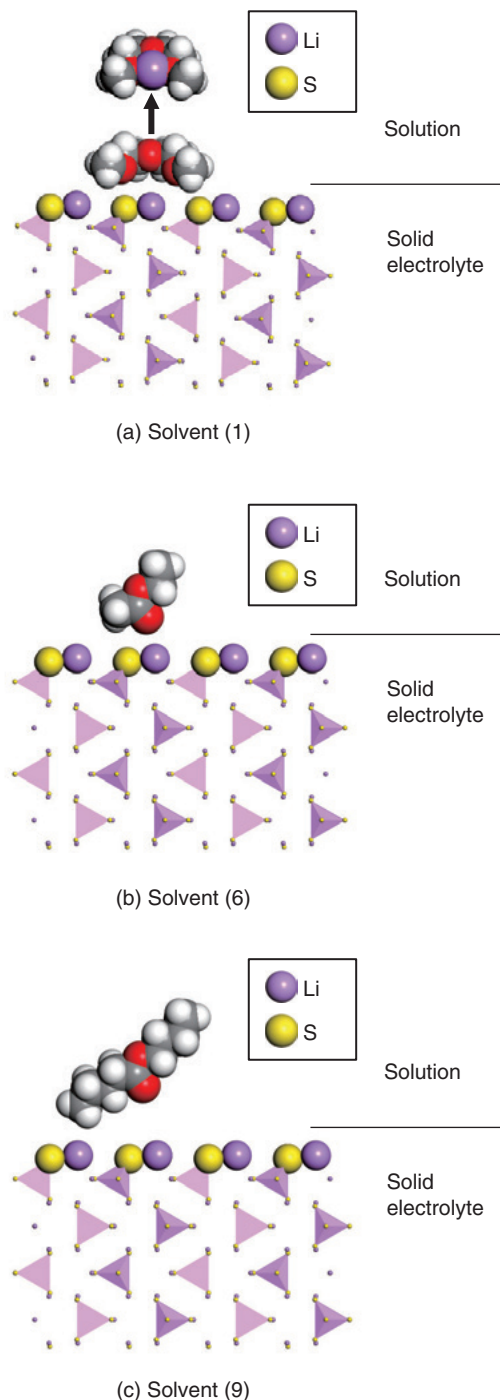


Fig. 9 Schematic chart of interaction between solid electrolyte and solutions

質表面へのアプローチが阻害され、リチウムイオンに配位する能力が弱くなっていると考えられ、硫化物固体電解質中のリチウムイオンを固体から引き離せないと考えられる。そのため、乾燥後の固体電解質表面に溶媒分子が残留していなかった [Fig. 6 図中 (3)]。その結果、固体電解質の分解が起きておらず、溶媒 (3) による浸漬ではイオン伝導度の低下が見られなかったと考えられる。

固体電解質と溶媒の反応は固液界面で起きる反応であり、反応が進行するためには常に新規な活性界面が液と接触する必要がある。溶媒 (1), (2) のポリエーテルの場合、電子供与性の酸素が分子内に複数あり、錯体形成能力が高いため、錯体が生成して溶液に溶け出しやすく [Fig. 9(a)], 新規な固体表面が常に露出すると考えられる。一方、分子内酸素原子が 1 個しかなく、アルキル鎖長が炭素数 4 のエーテル、溶媒 (3) の場合、錯体が生成されず、固体電解質成分が溶媒に溶け出しにくい。そのため、反応が進行しなかったと考えられる。

#### 4.2. 固体電解質とニトリル類との反応機構

アルキル鎖長が炭素数 2 のアセトニトリルが固体電解質を溶かすことはすでに報告されている<sup>(30), (31)</sup>。これはニトリル基の窒素原子が硫化物固体電解質中のリチウムイオンと錯体を形成し、自身が溶媒として錯体を溶解するためであると考えられる<sup>(21)</sup>。一方、本研究で使用した炭素数 4 の化合物である溶媒 (13) は、浸漬によって溶媒が一部変色したものの、揮発性成分にニトリルの分解生成物が見られず [Fig. 7(d)], 固体電解質のイオン伝導性を大きく低下させることはなかった (Fig. 3)。溶媒が青く変色したことは  $\text{Li}_2\text{S}$  が一部溶け出していることを示したが<sup>(30)</sup>、赤外吸収スペクトルでニトリルのリチウムイオンへの配位が見られなかったことと、固体電解質のイオン伝導度が低下しなかったことは、 $\text{Li}_2\text{S}$  成分の溶け出す度合いが小さかったことで説明できる。このことはアルキル鎖の立体障害の大きいものが、固体電解質の分解を妨げていると考えられ、エーテルのケースと同様であると考えられる。

#### 4.3. 固体電解質とエステルとの反応機構

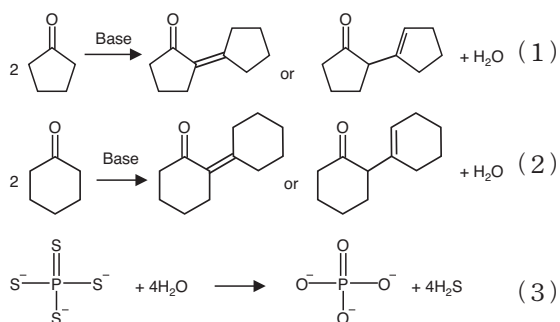
アルキル鎖長が炭素数 2 のエステルである溶媒 (6) が  $\text{Li}_2\text{S}$ ,  $\text{Li}_3\text{PS}_4$  と錯体を形成することはすでに報告されている<sup>(15)-(17)</sup>。本研究でも、溶媒 (6) が固体電解質のリチウムイオンに配位していることが確認された [Fig. 5(c)]。一方、アルキル鎖長が炭素数 4 の溶媒 (9) の配位は確認されなかった [Fig. 5(d)]。これに加えて、前章で述べたように本研究では、エステルによる固体電解質の浸漬により、エステルの加水分解生成物、すなわち不揮発成分としてカルボン酸およびカルボン酸リチウム塩 [Fig. 6 図中 (6), (9)], 揮発成分としてアルコール [Fig. 7(b)] が確認された。乾燥後の固体電解質からカルボン酸リチウム塩が検出された

ことから、エステルの加水分解生成物も固体電解質の分解に寄与していることが推定された。本研究で使用了溶媒の残存水分値は 30 ppm 未満であったが、この極微量な水分でも加水分解を引き起こす結果となった。一方、エステルを構成するアルキル鎖の種類や長さによって加水分解生成物の量が異なることも前述の赤外吸収スペクトルの結果からわかった。アルキル鎖のより長い溶媒 (9) のほうがアルキル鎖のより短い溶媒 (6) より加水分解生成物に帰属される赤外吸収のピーク強度が小さく、生成物の量が少ないことが示された [Fig. 6(b) 図中 (6), (9)]。また、ベンジル基を有する溶媒 (5) のほうが加水分解生成物の量が多かった。

以上の結果から、エステルによる固体電解質の分解反応はエステル基の固体電解質への配位と加水分解生成物の固体電解質への結合の両方が寄与していることがいえる。プローブ半径 10 Å の場合、溶媒 (6) と (9) の配位酸素原子へのアプローチ可能な表面積の計算結果から、アルキル鎖長が炭素数 4 の溶媒 (9) の値がアルキル鎖長が炭素数 2 の溶媒 (6) の値より小さいことが明らかになり [Fig. 8 図中 (6), (9)], 溶媒 (6) の分子は固体電解質へアプローチできた [Fig. 9(b)] が、溶媒 (9) の固体電解質へのアプローチはアルキル鎖によって阻害されたと推定される [Fig. 9(c)]。

#### 4.4. 固体電解質とケトン類との反応機構

固体電解質のケトン類による浸漬の結果として、固体電解質のイオン伝導度が大幅に低下した [Fig. 3 図中 (10), (11), (12)]。揮発成分の GCMS 分析では、ケトンのアルドール縮合生成物が検出された [Fig. 7(c)]。ケトンは酸触媒もしくは塩基触媒存在下、アルドール縮合反応を起こす<sup>(34)</sup>。この反応はケトンが 2 分子縮合し、副生成物として  $\text{H}_2\text{O}$  も生成される [式 (1), (2)]。本研究の場合、硫化物固体電解質は固体塩基触媒として作用すると考えられる。一方、硫化物固体電解質は  $\text{H}_2\text{O}$  と反応し、分解されることが知られている [式 (3)]。したがって、ケトンの浸漬による固体電解質のイオン伝導度の低下は、アルドール縮合で副生成した水による分解反応も寄与していると考えられる。



したがって、ケトン類は硫化物固体電解質成分と錯体を

形成するほかに、アルドール縮合反応による  $\text{H}_2\text{O}$  の生成が起り、二つの分解反応が同時に起こったと思われる。鎖状ケトン (10) と比較して、環状ケトン (11), (12) の浸漬によって固体電解質のイオン伝導度の低下度合いが大きいことは、環状ケトンの自己アルドール縮合反応速度がより大きい<sup>(35)</sup> ことから説明できる。上記の結果から、ケトン類を溶媒にする場合、アルドール縮合を抑制するため、触媒として作用する固体電解質表面へのアプローチを阻害する立体障害の大きいものが望ましいと予想される。

以上の結果を総合すると、溶媒と固体電解質との反応は官能基の違いによりメカニズムが異なり、溶媒分子の立体障害が反応を阻害したといえる。湿式プロセスに使用される溶媒を検討するためには、溶媒の官能基、立体障害を総合的に考える必要があるが、立体障害の大きい溶媒が固体電解質と反応しにくい傾向が本研究によって明らかになった。

## 5. まとめ

全固体電池の湿式プロセスに適用する溶媒を探索するため、一連の溶媒と硫化物固体電解質の反応性を系統的に検討し、溶媒と固体電解質の反応メカニズムを明らかにした。

- (1) 極性基中の酸素原子および窒素原子が固体電解質中のリチウムイオンと錯体形成し、その錯体が溶媒へ溶解することにより固体電解質の分解反応が起きる。
- (2) これらの反応と同時に、溶媒中に含まれる 30 ppm 未満の残存水分によりエステルの加水分解も起き、加水分解生成物が固体電解質と反応する。
- (3) ケトン類は固体電解質を塩基触媒とするアルドール縮合反応が起き、この反応の副生成物である  $\text{H}_2\text{O}$  が固体電解質を分解する反応も起きる。

これらの反応メカニズムから一連の反応を抑制するためには、溶媒候補として極性基を有しない炭化水素、および立体障害として働く炭素数 4 以上のアルキル基を持つエーテル類、エステル類、およびニトリル類が有効であることが明らかになった。また、溶媒中の残存水分を極小に抑える必要があることと合わせ、湿式プロセスの実用化に向けた方向性を得た。

## 参考文献

- (1) (a) Armand, M., Tarascon, J.-M.: Building better batteries, *Nature*, Vol. 451, p. 652-657, (2008);  
(b) Balali, Y., Stegen, S.: Review of energy storage systems for vehicles based on technology, environmental impacts, and costs, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 135, Article 110185, (2021)
- (2) <https://www.nedo.go.jp/content/100919683.pdf>
- (3) Kato, Y., Hori, S., Kanno, R.:  $\text{Li}_{10}\text{GeP}_2\text{S}_{12}$ -Type Superionic Conductors: Synthesis, Structure, and Ionic Transportation, *Advanced energy materials*, Vol. 10, Issue 42, p. 2002153, (2020)
- (4) Kamaya, N., Homma, K., Yamakawa, Y., Hirayama, M., Kanno, R., Yonemura, M., Kamiyama, T., Kato, Y., Hama, S., Kawamoto, K., Mitsui, A.: A lithium superionic conductor, *Nature Materials*, Vol. 10, p. 682-686, (2011)
- (5) Kato, Y., Hori, S., Saito, T., Suzuki, K., Hirayama M., Mitsui, A., Yonemura, M., Iba, H., Kanno, R.: High-power all-solid-state batteries using sulfide superionic conductors, *Nature Energy*, Vol. 1, p. 1-7, (2016)
- (6) Zhang, Q., Cao, D., Ma, Y., Natan, A., Aurora, P., Zhu, H.: Sulfide-Based Solid-State Electrolytes: Synthesis, Stability, and Potential for All-Solid-State Batteries, *Advanced Materials*, Vol. 31, Issue 44, p. 1901131, (2019)
- (7) Zheng, Y., Yao, Y., Ou, J., Li, M., Luo, D., Dou, H., Li, Z., Amine, K., Yu, A., Chen, Z.: A review of composite solid-state electrolytes for lithium batteries: fundamentals, key materials and advanced structures, *Chemical Society Reviews*, Vol. 49, Issue 23, p. 8790-8839, (2020)
- (8) Yamamoto, M., Terauchi, Y., Sakuda, A., Takahashi, M.: Binder-free sheet-type all-solid-state batteries with enhanced rate capabilities and high energy densities, *Scientific Reports*, Vol. 8, Article number 1212, (2018)
- (9) Rippa, N., Strobl, P., Stiaszny, B., Zinkevich, T., Yavuz, M., Schnell, J., Indris, S., Gasteiger, H. A., Sedlmaier, S. J.: Slurry-Based Processing of Solid Electrolytes: A Comparative Binder Study, *Journal of The Electrochemical Society*, Vol. 165, No. 16, A3993-A3999, (2018)
- (10) Lee, K., Kim, S., Park, J., Park, S. H., Coskun, A., Jung, D. S., Cho, W., Choi, J. W.: Selection of Binder and Solvent for Solution-Processed All-Solid-State Battery, *Journal of The Electrochemical Society*, Vol. 164, No. 9, A2075-A2081, (2017)
- (11) Chen, K., Shinjo, S., Sakuda, A., Yamamoto, K., Uchiyama, T., Kuratani, K., Takeuchi, T., Orikasa, Y., Hayashi, A., Tatsumisago, M., Kimura, Y., Nakamura, T., Amezawa, K., Uchimoto, Y.: Morphological Effect on Reaction Distribution Influenced by Binder Materials in Composite Electrodes for Sheet-type

- All-Solid-State Lithium-Ion Batteries with the Sulfide-based Solid Electrolyte, *The Journal of Physical Chemistry C*, Vol. 123, Issue 6, p. 3292-3298, (2019)
- (12) Oh, D. Y., Nam, Y. J., Park, K. H., Jung, S. H., Cho S.-J., Kim, Y. K., Lee, Y.-G., Lee, S.-Y., Jung, Y. S.: Excellent Compatibility of Solvate Ionic Liquids with Sulfide Solid Electrolytes: Toward Favorable Ionic Contacts in Bulk-Type All-Solid-State Lithium-Ion Batteries, *Advanced Energy Materials*, Vol. 5, Issue 22, p. 1500865, (2015)
- (13) Nam, Y. J., Cho, S.-J., Oh, D. Y., Lim, J.-M., Kim, S. Y., Song, J. H., Lee, Y.-G., Lee, S.-Y., Jung, Y. S.: Bendable and Thin Sulfide Solid Electrolyte Film: A New Electrolyte Opportunity for Free-Standing and Stackable High-Energy All-Solid-State Lithium-Ion Batteries, *Nano Letters*, Vol. 15, Issue 5, p. 3317-3323, (2015)
- (14) Rippa, N., Stiaszny, B., Beyer, H., Indris, S., Gasteiger, H. A., Sedlmaier, S. J.: Understanding Chemical Stability Issues between Different Solid Electrolytes in All-Solid-State Batteries, *Journal of The Electrochemical Society*, Vol. 166, No. 6, A975-A983, (2019)
- (15) Yubuchi, S., Uematsu, M., Hotehama, C., Sakuda, A., Hayashi, A., Tatsumisago, M.: An argyrodite sulfide-based superionic conductor synthesized by a liquid-phase technique with tetrahydrofuran and ethanol, *J. Mater. Chem. A*, Vol. 7, p. 558-566, (2019)
- (16) Yubuchi, S., Uematsu, M., Deguchi, M., Hayashi, A., Tatsumisago, M.: Lithium-Ion-Conducting Argyrodite-Type  $\text{Li}_6\text{PS}_5\text{X}$  (X = Cl, Br, I) Solid Electrolytes Prepared by a Liquid-Phase Technique Using Ethanol as a Solvent, *ACS Applied Energy materials*, Vol. 1, Issue 8, p. 3622-3629, (2018)
- (17) Phuc, N. H. H., Totani, M., Morikawa, K., Muto, H., Matsuda, A.: Preparation of  $\text{Li}_3\text{PS}_4$  solid electrolyte using ethyl acetate as synthetic medium, *Solid State Ionics*, Vol. 288, p. 240-243, (2016)
- (18) Barrow, G. M.: Physical chemistry, International student edition, 7<sup>th</sup> printing, Chapter 21, Surface and heterogeneous catalysis, p. 731-754, (1983)
- (19) 藤本光一郎: 鋇物の水溶液中への溶解の反応速度論的研究: 固液界面の反応と物質輸送, *鋇物学雑誌*, Vol. 24, No. 3, p. 159-168, (1995)
- (20) Whitesides, G. M., Laibinis, P. E.: Wet chemical approaches to the characterization of organic surfaces: self-assembled monolayers, wetting, and the physical-organic chemistry of the solid-liquid interface, *Langmuir*, Vol. 6, Issue 1, p. 87-96, (1990)
- (21) Barthel, J., Buchner, R., Wismeth, E.: FTIR Spectroscopy of Ion Solvation of  $\text{LiClO}_4$  and  $\text{LiSCN}$  in Acetonitrile, Benzonitrile, and Propylene Carbonate, *Journal of Solution Chemistry*, Vol. 29, No. 10, p. 937-954, (2000)
- (22) Seneviratne, V., Frech, R., Furneaux, J. E., Khan, M.: Characterization of Crystalline and Solution Phases of Diglyme- $\text{LiSbF}_6$ , *The Journal of Physical Chemistry B*, Vol. 108, No. 24, p. 8124-8128, (2004)
- (23) Delley, B.: An all-electron numerical method for solving the local density functional for polyatomic molecules, *The Journal of Chemical Physics*, Vol. 92, Issue 1, p. 508-517, (1990)
- (24) Delley, B.: From molecules to solids with the DMol<sup>3</sup> approach, *The Journal of Chemical Physics*, Vol. 113, Issue 18, p. 7756-7764, (2000)
- (25) Connolly, M. L.: Analytical molecular surface calculation, *Journal of Applied Crystallography*, Vol. 16, Issue 5, p. 548-558, (1983)
- (26) 中山重蔵: 有機リン化合物の赤外線吸収スペクトル, *有機合成化学*, Vol. 28, No. 2, p. 132-143, (1970)
- (27) 荒井康夫, 安江任: 実験固体化学入門 (XI), 7 赤外線吸収スペクトル (2), *石膏と石灰*, No. 188, p. 47-60, (1984)
- (28) Olsher, U., Izatt, R. M., Bradshaw, J. S., Dalley, N. K.: Coordination Chemistry of Lithium Ion: A Crystal and Molecular Structure Review, *Chemical Reviews*, Vol. 91, Issue 2, p. 137-164, (1991)
- (29) Zhou, L., Park, K.-H., Sun, X., Lalère, F., Adermann, T., Hartmann, P., Nazar, L. F.: Solvent-Engineered Design of Argyrodite  $\text{Li}_6\text{PS}_5\text{X}$  (X = Cl, Br, I) Solid Electrolytes with High Ionic Conductivity, *ACS Energy Letters*, Vol. 4, Issue 1, p. 265-270, (2019)
- (30) Wang, Z., Jiang, Y., Wu, J., Jiang, Y., Huang, S., Zhao, B., Chen, Z., Zhang, J.: Reaction mechanism of  $\text{Li}_2\text{S}$ - $\text{P}_2\text{S}_5$  system in acetonitrile based on wet chemical synthesis of  $\text{Li}_7\text{P}_3\text{S}_{11}$  solid electrolyte, *Chemical Engineering Journal*, Vol. 393, Article 124706, (2020)
- (31) Wang, Y., Lu, D., Bowden, M., El Khoury, P. Z., Han, K. S., Deng, Z. D., Xiao, J., Zhang, J.-G., Liu, J.: Mechanism of Formation of  $\text{Li}_7\text{P}_3\text{S}_{11}$  Solid Electrolytes through Liquid Phase Synthesis, *Chemistry of Materials*, Vol. 30, Issue 3, p. 990-997, (2018)
- (32) Qian, P., Matsuda, M., Miyashita, T.: Chiral molecular recognition in polymer Langmuir-Blodgett films

- containing axially chiral binaphthyl groups, *Journal of the American Chemical Society*, Vol. 115, Issue 13, p. 5624-5628, (1993)
- (33) Qian, P., Nanjo, H., Yokoyama, T., Suzuki, T. M., Akasaka, K., Ohrui, H.: Chiral molecular patterns of self-assembled ion pairs composed of (R, S), (S)-16-methyloctadecanoic acid and 4,4'-bipyridine, *Chemical Communications*, Vol. 20, p. 2021-2022, (2000)
- (34) Mahajan, Y. S., Kamath, R. S., Kumbhar, P. S., Mahajani, S. M.: Self-Condensation of Cyclohexanone over Ion Exchange Resin Catalysts: Kinetics and Selectivity Aspects, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 47, Issue 1, p. 25-33, (2008)
- (35) Iwata, M., Emoto, S.: Aldol Condensation of Aldehydes with Ketones Promoted by the Copper(II) Ion. Orientation to the Chemical Model for Metalloaldolases, *Bulletin of the Chemical Society of Japan*, Vol. 49, No. 5, p. 1369-1374, (1976)

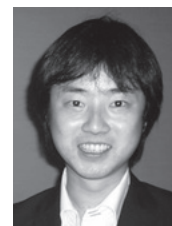
■ 著 者 ■



銭 朴



酒 井 洋



小 川 篤

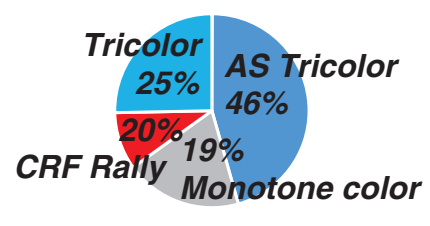
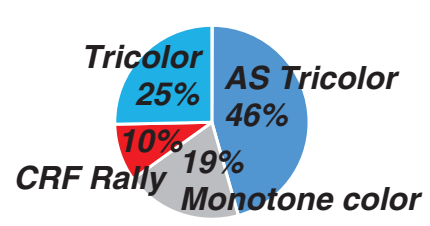


前 山 裕 登



古 田 照 実

# 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.33<br>No.1 | 33-1_04 | 2020 CRF1100L<br>Africa Twinのカラー<br>リングデザイン | p. 28 | Fig. 5<br>2019 年<br>カラーラインナップ<br>円グラフ | 誤   |  <p>Tricolor 25%<br/>AS Tricolor 46%<br/>CRF Rally 20%<br/>Monotone color 19%</p> |
|     |                |         |                                             |       |                                       | 正   |  <p>Tricolor 25%<br/>AS Tricolor 46%<br/>CRF Rally 10%<br/>Monotone color 19%</p> |

|     |       |                         |
|-----|-------|-------------------------|
| 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          |
|     | 山崎 雅和 | 先進パワーユニット・エネルギー研究所      |
|     | 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    |

テクニカルレビューが1989年に発刊して32年、Vol.33まで継続することができました。執筆者の皆さんをはじめ、関係方々の本誌へのご理解とご協力に心から感謝いたします。

私は衝突安全領域の業務経験をととして論文が及ぼす社会的影響力の大きさを知り、と同時にその大切さを強く感じています。どのような安全装置もそれを促す法規やアセスメントも、すべて論文から裏打ちされるエビデンスとその積み重ねで構築されています。ひとつひとつの論文は例えで表現すれば紙一枚の新規性ですが、石橋を叩いて渡るような慎重さでそれを積上げ、そして見えてくる世界が世の中を動かしていくことを、現実の世界で事故による死傷者数減少という成果で確信できました。

「論文」も領域によっては違う表現方法が模索され始めていますが、文章として残すことが必要な領域もあり、技術成果のプレゼンスも多様化する可能性を感じつつも、「論文」の大切さにはこだわりをもって接したいと思っています。

私は、編集に携わって約2年の「駆け出し」ですが、初稿から最終稿へのハードルを越えるごとに、若い執筆者たちの洗練されていく内容をととして成長を感じることができます。その一助になればと思っております。

(桃原)

発行所 株式会社 本田技術研究所

発行人 大 津 啓 司

編集人 Honda R&amp;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.**