

ISSN 0916-7501  
CODEN : TTEREB

# TOYOTA Technical Review

[トヨタ・テクニカル・レビュー]

2017/5 233

挑戦・  
新技術開発

VOL.63

## 【表紙のデザイン】

既成概念を打破し、新たな技術を創造する姿を、  
サイエンス・フィクションをイメージした知恵の泉と「創」の字で表現しています。



TOYOTA Technical Review

**233**

Vol. 63 May 2017

# 目次

## 巻頭言

- ・「革新」(新たな行動) 無くして「創造」(新たな物作り) 無し..... 専務役員 伊勢 清貴.....4

---

## ▷論文／解説

- ・新型プリウス PHV のシステム開発  
市川 真士／武内 博明／福田 滋／木野村 茂樹／冨田 芳樹／鈴木 陽介／平沢 崇彦.....6
- ・車載太陽電池の発電量推移.....浦部 心一／木村 和峰／工藤 由貴／佐藤 彰倫..... 15
- ・車載用軽量型太陽電池モジュールの開発  
工藤 由貴／木村 和峰／岩本 昭一／大場 浩之／佐藤 彰倫..... 20
- ・太陽電池搭載車 (Solar Hybrid Vehicle) の CO<sub>2</sub> 排出削減可能性評価  
木村 和峰／工藤 由貴／佐藤 彰倫..... 27
- ・プレミアムクラスに求められる動力, 感性に訴える性能と燃費を両立するマルチステージハイブリッドシステムの開発  
大島 康嗣／洲濱 将圭／高橋 政克／加藤 春哉／井上 重行／宮本 知彦／奥田 弘一..... 34
- ・自動車専用道路を対象とした自動運転システムの研究  
松永 昌樹／田口 康治／岩崎 正裕／青野 浩之／渡邊 義徳..... 41
- ・THUMS Version 4 子供モデルの開発.....伊藤 啓輔／宮崎 浩／林 重希／北川 裕一／安木 剛..... 47
- ・エンジン起動時振動と発進応答性の両立に向けた技術開発  
三木 武／松宮 拓也／石崎 啓祐／榎本 弘／三上 康之／大屋 啓..... 54
- ・Adjoint 法を用いた空力形状最適化の検討  
下川 真之介／久保田 正人／平野 茂／弦田 遼平／板倉 英二／中谷 浩之..... 60
- ・ニューラルネットワークを用いた機械学習による対話ロボット向け話題推定技術の研究  
高谷 智哉／山田 整..... 67
- ・非接触給電標準化への取り組み  
汲田 邦彦／上地 健介／南方 真人／野島 昭彦／イボ ティーリンク／ダニエル ミカット..... 73
- ・エンジン生産工場における高効率エネルギー供給実現のための小型分散システムの構築.....小野 裕永..... 80
- ・塗装ブース “新集塵方式の開発”  
飯田 達也／葛西 公／藤本 勝利／佐藤 守／三谷 裕也／遠藤 登喜夫..... 88
- ・鋳造アルミボディーの要求品質を確保するための寸法制御技術と CAE 技術確立  
村木 友也／中島 徹也／横田 祐介／廣川 公..... 94
- ・放射光 X 線による燃料電池の電極内液水可視化とシミュレーション開発  
林 大甫／井田 敦巳／真籠 祥太／鈴木 孝尚／山口 聡／堀 良輔.....100

- 
- ▷受賞技術概要.....107

- 
- ▷優秀特許.....117

# Contents

## Preface

- No Creation without Innovation! (Take New Actions to Create New Things)  
Kiyotaka Ise, Senior Managing Officer.....4
- 

## ▷ Technical Papers/Technical Articles

- System Development for the New Prius PHV  
Shinji Ichikawa/Hiroaki Takeuchi/Shigeru Fukuda/Shigeki Kinomura/Yoshiki Tomita/Yosuke Suzuki/Takahiko Hirasawa..... 6
  - Automotive Electric Power Generating System Using Solar Modules  
Shinichi Urabe/Kazutaka Kimura/Yuki Kudo/Akinori Sato ..... 15
  - Development of Lightweight Automotive Solar Module  
Yuki Kudo/Kazutaka Kimura/Shoichi Iwamoto/Hiroyuki Oba/Akinori Sato .....20
  - Analysis of Solar Hybrid Vehicle Potential Considering CO<sub>2</sub> Emissions  
Kazutaka Kimura/Yuki Kudo/Akinori Sato.....27
  - Development of Multi Stage Hybrid System that Balances Emotive and Powerful Performance  
Appropriate for a Premium Class Vehicle with Excellent Fuel Economy  
Koji Oshima/Masayoshi Suhama/Masakatsu Takahashi/Shunya Kato/Shigeyuki Inoue/Tomohiko Miyamoto/Koichi Okuda.....34
  - Research into Automated Driving System on Highway  
Masaki Matsunaga/Koji Taguchi/Masahiro Iwasaki/Hiroyuki Aono/Yoshinori Watanabe.....41
  - Development of THUMS Version 4 Child Models  
Keisuke Ito/Hiroshi Miyazaki/Shigeki Hayashi /Yuichi Kitagawa/Tsuyoshi Yasuki .....47
  - Development of Technology for Engine Starting Vibration and Response  
Takeru Miki/Takuya Matsumiya/Keisuke Ishizaki/Hiroshi Enomoto/Yasuyuki Mikami/Akira Oya .....54
  - Aerodynamics Design Optimization Using Adjoint Method  
Shinnosuke Shimokawa/Masato Kubota/Shigeru Hirano/Ryohei Tsuruta/Eiji Itakura/Hiroyuki Nakatani .....60
  - Topic Estimation Technique for Dialogue Robot Using Neural-Network-Based Machine Learning  
Tomoya Takatani/Hitoshi Yamada .....67
  - Toyota's Contribution to SAE TIR J2954  
Kunihiko Kumita/Kensuke Kamichi/Masato Minakata/Akihiko Nojima/Ivo Teerlinck/Daniel Mikat .....73
  - Establishment of Efficient Energy Supply Method by Compact Distributed System in Engine Plant  
Hironaga Ono .....80
  - Development of Paint Booth with New Paint Mist Collection Method  
Tatsuya Iida/Tadashi Kasai/Katsutoshi Fujimoto/Mamoru Sato/Hiroya Mitani/Tokio Endo.....88
  - Development of Dimensional Control and CAE Technologies to Ensure Required Aluminum Body Part Quality  
Tomoya Muraki/Tetsuya Nakajima/Yusuke Yokota/Ko Hirokawa .....94
  - Visualization of Liquid Water inside Electrodes of Operating Fuel Cell Using Synchrotron X-Ray  
Radiography and Development of Simulation Technique  
Daisuke Hayashi/Atsushi Ida/Shota Magome/Takahisa Suzuki/Satoshi Yamaguchi/Ryosuke Hori..... 100
- 

- ▷ Technical Award News..... 107
- 

- ▷ Award-Winning Patents..... 117

## 「革新」無くして

(新たな行動)

## 「創造」無し

(新たな物作り)

専務役員

伊勢清貴



人々を安全・安心に運び、心までも動かす。そして、世界中の生活を、社会を、豊かにしていくことがトヨタの思いです。そのためには、常に時代の一步先のイノベーションを追い求めることが必要だと考えます。エンジニアとして「エンジニア人生、新しいこと、面白いことをやろう。今を変えよう。」というマインドを持ち続けることが大切だと思います。私も、「エンジニアとして満足する仕事をやっているか」という根本のところを自ら問い、「今を変えるような新しいことをやらないと面白くない」と自問自答しています。

さて、最近の自動車産業を取り巻く環境について、3点ご紹介します。

1つ目は、「自動運転」です。この言葉が毎日のように新聞に載っています。トヨタの究極の目標である、クルマの死亡事故をゼロにするためにも、自動運転の技術を使うと、効果が大きいと考えています。この技術はIT業界の参入により競争が激化しています。昔は、「産業の米」という言葉で、鉄とか半導体のことを呼んでいましたが、今や、AI・ビッグデータが産業であり、技術の基盤をなすもの、という風に変わってきております。

2つ目は、「電動化の波」です。エンジンからモーターに変わることも、現実のものとして起こってきています。トヨタが力を入れるハイブリッド車は、累計販売900万台を突破し普及が着実に進んでいます。今後、更なる環境問題への対応が求められる中で、エンジンのみを搭載する

---

クルマの販売は大幅に減少して行くでしょう。だからこそ、FCV や EV などに力を入れて行かなければなりません。

3つ目は、「クルマを所有せずに、必要な時にだけ利用するライドシェアリング、カーシェアリングの拡大」です。クルマは走っている時より、停まっている時の方が多いですが、その停まっているクルマを使ってカーシェアをしよう、というようなことも考えられています。すなわち、個人ユーザーで無く、複数人ユーザーが利用するクルマが必要になります。

これだけ、自動車を取り巻く環境が変わって来ているのですから、これまでとは全く異なるフィールドでの技術開発が求められます。ですから、今までの技術開発の延長では無く、今後の 25 年 50 年と生き残るために、本当に変わるべきは今で、常識・ルールも疑って、新しい働き方をしないと生き残れません。エンジニアが、何十年にも渡って自分達が培ってきた成功体験があるわけですから、「絶対こっちが正しいんだ」と思い込んでいるのではないかと、思います。しかし、世の中の企業の栄枯盛衰も、歴史が物語っているように、「強いものとか、賢いものが生き残るのではなく、環境に適応したものが生き残る」という言葉通り、富士フィルムとコダックの例に見るように、環境に適応した企業が生き残っています。生き残るためにも、やはり変えなければならない、ということだと思えます。

私の想いは、「革新」無くして「創造」無し”です。先に説明したとおり、自動運転、燃料電池を始めとする次世代競争技術の開発と、IT 業界も巻き込んだ競争激化に対応していかなければなりません。これまでと同じ行動をしていては何も変わりません。ですから、今、行動を変えることからスタートしなければならないのです。新たな行動無くして、新たな物作りは無いということです。

誰もがより豊かに暮らすことが出来る社会を実現するために、「革新」と「創造」に挑戦し続け、もっといいクルマづくりを行っていきます。

# 新型プリウス PHV のシステム開発

## System Development for the New Prius PHV

市川 真士 \*1  
Shinji Ichikawa

武内 博明 \*1  
Hiroaki Takeuchi

福田 滋 \*2  
Shigeru Fukuda

木野村 茂樹 \*2  
Shigeki Kinomura

富田 芳樹 \*3  
Yoshiki Tomita

鈴木 陽介 \*4  
Yosuke Suzuki

平沢 崇彦 \*5  
Takahiko Hirasawa

### 要旨

新型プリウス PHV に搭載した新世代プラグインハイブリッドシステムについて紹介する。このシステムは、新型プリウスにて新規開発したトヨタ・ハイブリッド・システム (THS-II) を最大限活用しつつ、PHV (プラグインハイブリッド自動車) として EV (電気自動車) 性能を大幅に向上させるため、新規ユニット・システムの採用や HV (ハイブリッド自動車) ユニットの改良を実施した。これら各ユニット・システムも紹介する。

### Abstract

A next-generation plug-in hybrid system has been developed for the new Prius PHV. The objective of this development was to maximize the performance of the Toyota Hybrid System II (THS II) developed for the new fourth generation Prius hybrid vehicle (HV), while achieving even better dynamic performance in electric vehicle (EV) mode. These objectives were accomplished by the adoption of new components and systems, as well as refinements to existing HV components. This article describes the development of this new plug-in hybrid system, as well as its components and systems.

キーワード プラグインハイブリッドシステム, THS, EV 性能, 充電, デュアルモータードライブ

## 1 はじめに

自動車業界における各国の環境規制は年々厳しくなっており、PHV (プラグインハイブリッド自動車) のラインナップを拡充することで、これら規制へ対応する動きも現れている。

このような背景の中、新型プリウス PHV では世界トップレベルの環境性能 (電費・燃費) を実現しつつ、EV (電気自動車) 性能を大幅に向上させ、お客様の期待に応える商品性実現を目指し開発を推進した。本稿では、新型プラグインハイブリッドシステムとそれらを構成するユニット及びシステムを紹介する。

## 2 開発の狙い

### 2.1 EV 走行性能・環境性能

新たなプラグインハイブリッドシステムは、新

\*1 パワートレーンカンパニー パワートレーン製品企画部

\*2 パワートレーンカンパニー PHV システム開発部

\*3 パワートレーンカンパニー HV ユニット開発部

\*4 パワートレーンカンパニー ドライブトレイン先行開発部

\*5 パワートレーンカンパニー HV システム制御開発部

型プリウスの HV ユニット<sup>(1)</sup> を最大限活用し、その高い HV 性能を維持しながら、EV 性能を飛躍的に向上させる高効率なシステムを狙い開発を推進した。併せて、EV 走行時のドライブフィーリングの向上も狙いとした。これら高い EV 性能を実現するために、PCU (パワーコントロールユニット) の出力電流・耐圧 UP、トランスアクスルヘワンウェイクラッチを新規搭載したデュアルモータードライブシステムの採用、大容量電池パックシステムの採用を実施した。また、寒冷時の EV 性能向上を狙い、新たにバッテリー昇温システムを新規に採用した。

### 2.2 充電システム

PHV の要となる充電は、お客様の多様なニーズに対応することを狙い、様々な充電方式に対応した。新たに採用した DC 急速充電により、出先での短時間での充電を可能にした。また、AC100V 6A 充電を新たに採用し、インフラ導入の敷居を低減した。

また、EV 距離拡大に伴う充電時間の増加を抑制することを狙い、充電システムの効率向上及び充電器の出力アップを実施した。

その他、お客様の利便性向上を狙い、タイマー充電の週間設定の新設、エアコンやバッテリー昇温システムとの連携を実現した。

### 3 プラグインハイブリッドシステム

プラグインハイブリッドシステムの構成を図1に示す。

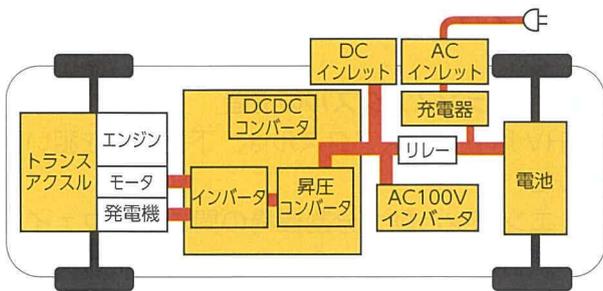


図1 プラグインハイブリッドシステムの構成

エンジンは新型プリウスと同じ2ZR-FXEを搭載しており、熱効率は40%を達成している。

プラグインハイブリッドシステムの構成は、基本的に新型プリウス<sup>(1)</sup>と同一であるが、EV性能向上のため、PCU内の昇圧コンバータの出力を向上させた。併せて、EV走行時にモータに加えて発電機を駆動用モータとして利用するために新たにデュアルモータードライブシステムを採用し、EV性能の大幅向上を実現している。

駆動用バッテリーシステムは、バッテリー容量を向上させ、EV走行距離拡大に大きく貢献した。また、バッテリー昇温システムの採用により、冬期のEV性能向上を実現した。

充電器は、高効率化によりEV距離延長に伴う充電時間延長の抑制を実現している。また、DC急速充電も可能であり、様々なニーズに対応した。ユニット・システムの詳細は、以降の章にて説明する。

### 4 駆動用バッテリーシステム

#### 4.1 バッテリーシステムの構造

バッテリーシステムの内部部品配置は図2に示すように、電池ECU等の機器類を上方に集約し、電池スタックを下方に搭載することで、バッテリーの全長を抑えることができ、バッテリー後方の収納空間を確保した。また、バッテリー昇温システムの電気ヒータを電池スタックの下に配置することで、省スペースと効率的なバッテリー昇温の両立を実現した。

これら部品配置、及びフレーム構造の最適化により、総電力量約2倍を確保しつつ、質量を約1.5倍、体積を約1.6倍に抑え(表1)、フラットなラゲッジ面を実現し、ゴルフバック2個搭載可能なラゲッジ容量を確保した。

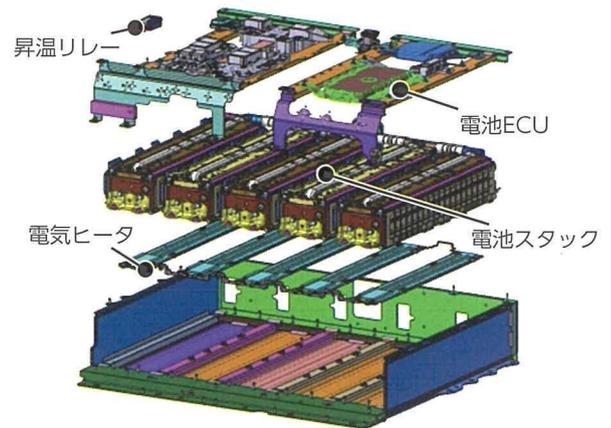


図2 バッテリーシステム内部構造

表1 バッテリーシステム主要諸元

	新型	従来型	従来比
総電力量 (kWh)	8.8	4.4	約2倍
質量 (kg)	120	80	約1.5倍
体積 (L)	145	87	約1.6倍
総電圧 (V)	351.5	207.2	—
セル数 (個)	95	56	—

バッテリー冷却は、冷却風導入口をリアシートサイドに設置することで、冷却風量確保と冷却風温度低減を実現した(図3)。また、冷却経路の最適化により、車室内の静粛性とバッテリー冷却性能の両立を実現した。これにより、バッテリー温度上昇による入出力の制限を抑制し、低燃費とEV性能向上を両立させた。

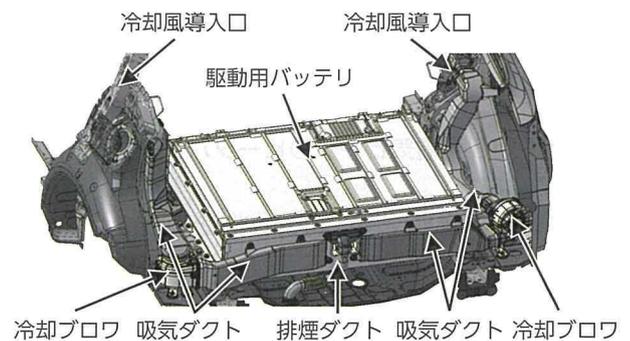


図3 バッテリー冷却構造

#### 4.2 バッテリー昇温システム

一般的にバッテリーは低温時に出力が低下する。そのため、バッテリー低温時は充電量が十分であっても、バッテリー出力不足により、エンジンを始動させてお客様の要求する出力を確保する必要がある(図4)。

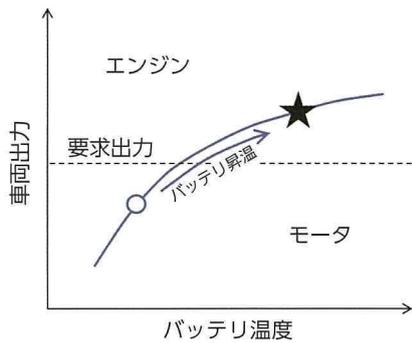


図4 バッテリー昇温システムでの出力向上イメージ

そこで、バッテリー昇温の電気ヒータを図2に示すように電池スタックの下に搭載した。この電気ヒータを充電中に適切に制御しバッテリー温度を適温に保つことで、図4に示すようにバッテリー出力を向上させ、EV走行を楽しむことを可能とした。

電気ヒータを図5に示す。ヒータパターンに疎密を付け、35エリアに分けて発熱密度を最適化することで、バッテリーパック内の電池セルを均等に暖めることを実現した。バッテリーケースからの放熱が多く、冷めやすい四隅のヒータ出力を高く、熱がこもりやすいバッテリー中央のヒータ出力を低くした。

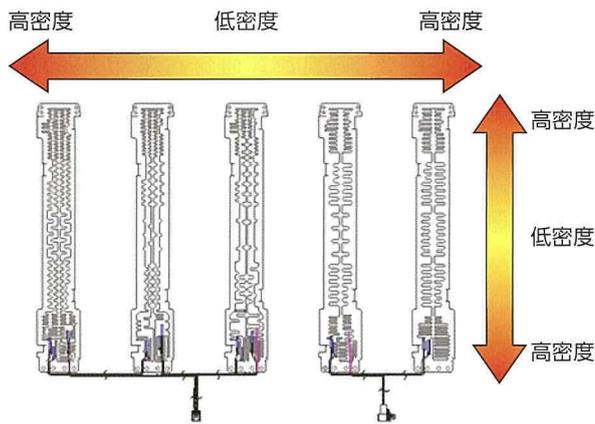


図5 電気ヒータのヒータパターン

バッテリー昇温システムの動作例を図6に示す。通常の充電では、自動でバッテリー温度を目標温度に保つように動作する。また、後述するタイマー機能の出発設定を実施した場合、出発時刻にバッテリーが目標温度になるように自動でヒータ動作開始時間を演

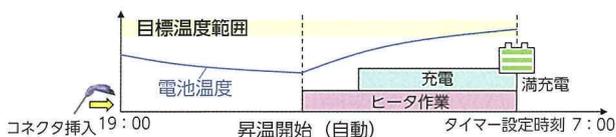


図6 タイマー充電「出発設定」作動イメージ

算し動作させるので電力の無駄なくバッテリーを昇温することが可能となる。

## 5 ハイブリッドトランスアクスル

### 5.1 トランスアクスルの構造

PHV用トランスアクスルは、下記3点を狙い開発した。

- (1) エンジンと動力分割機構の間にワンウェイクラッチを採用し、2つのモータで駆動することのできるデュアルモータードライブシステムの実現による力強いEV駆動力への貢献
- (2) 電動オイルポンプ (EOP) を採用し、EV中のプラネタリギヤ・モータの冷却強化による力強いEV駆動力、EV走行距離大幅延長への貢献
- (3) 新型プリウスに搭載したHV用トランスアクスル<sup>(2)</sup>を最大限活用し、その高いHV性能の保持とEV性能との高次元での両立

図7にPHV用トランスアクスルの断面図を示す。

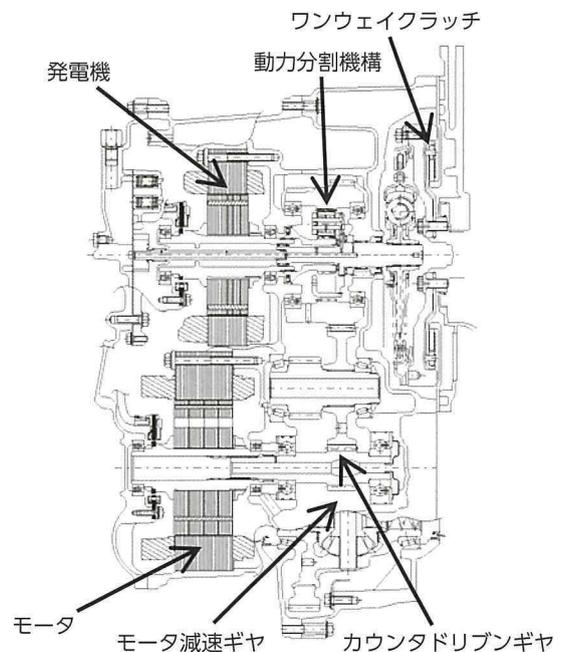


図7 PHV用トランスアクスルの断面図

PHV用トランスアクスルは、トルクリミッタ付ねじりダンパとワンウェイクラッチ、インプットシャフト、プラネタリギヤ、発電機、モータ、リダクション機構、デフ機構を備え、4軸構造で構成される。プラネタリギヤは動力分割機構として、エンジンの出力を発電機と車両駆動力に分割する。モータとモータ減速ギヤはインプット軸とは別の軸

に配置し、モータの減速機構は平行ギヤ式である。カウンタドリブンギヤは、エンジンとモータの双方から動力が入り、ディファレンシャルギヤに減速して伝達する。ワンウェイクラッチはEV走行中に、高い駆動力を求められた際に、発電機トルクの反力を受けて発電機トルクをタイヤに伝達させるために使用される。

### 5.2 デュアルモータードライブシステム

図8にデュアルモータードライブシステム作動時の動力分割プラネタリギヤの共線図を示す。ワンウェイクラッチは動力分割プラネタリギヤのキャリア軸上にエンジン正方向の回転を許容し、負方向の回転を固定するように配置する。サンギヤ軸上に配置された発電機からトルクを負方向に出力させると、キャリア軸上のワンウェイクラッチでその反力を受けることができるため、リングギヤ軸上に接続されたアウトプットへ発電機のトルクを出力可能となる。その発電機トルクに加え、走行用モータのトルクを出力することで2モータ走行を実現している。

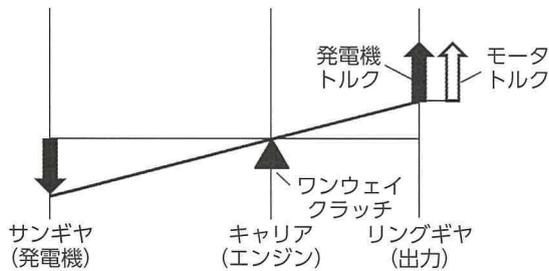


図8 共線図 (デュアルモータードライブ時)

### 5.3 ワンウェイクラッチ

図9にワンウェイクラッチ搭載部の断面を示す。

ワンウェイクラッチはクランクシャフト上にフライホイールと共に締結され、フライホイールよりエンジン側に搭載される。ワンウェイクラッチを本搭載位置とすることで、HV用エンジン及びトランスアクスルと多くの部品を共用しながら、デュアルモータードライブシステムを実現することが可能となる。

図10にワンウェイクラッチの内部構造を示す。薄型で高トルク容量のワンウェイクラッチとするため、本システムには摩擦係数に頼らない機械式ワンウェイクラッチ (ポール式ワンウェイクラッチ) を採用した。ハウジング、外輪、ポール、スプリング、内輪、プレート、リベットで構成され、ハウジング、外輪、ポール、スプリング、プレートが一体となり、共に回転する。内輪はエンジンとトランスアクスルの間に挟まれたプレートとスプライン吻合

し、回転方向に固定される。

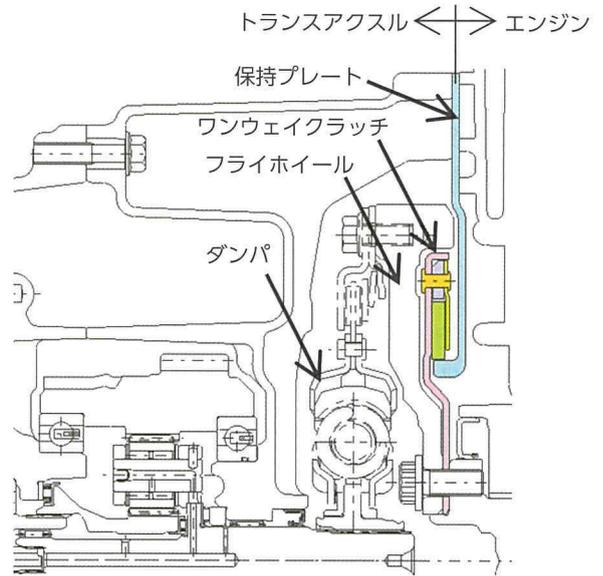


図9 ワンウェイクラッチ搭載部断面

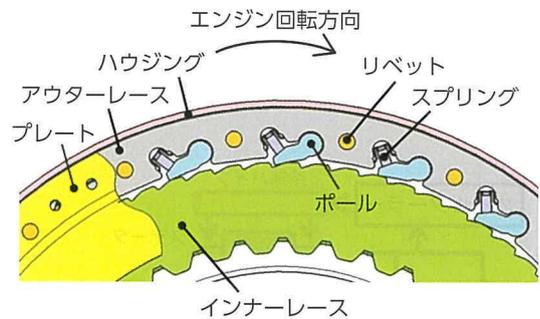


図10 ワンウェイクラッチの内部構造

エンジン正回転方向にはポールと内輪が噛合うことなく回転し、エンジン回転数が上がっていくと遠心力によりポールが浮き上がるため、ポールと内輪が接触せずに回転可能となる。またエンジン負回転方向時はポールと内輪が噛合うことで、回転方向に固定される。

ポール式ワンウェイクラッチは回転時にポールと内輪が接触することで発生するラチェット音が課題となるが、今回はポールと内輪が遠心力で離れ始める回転数を約400rpmとし、エンジンアイドリング回転数(約1,000rpm)以下に設定したため、エンジン常用域においてラチェット音が発生しない。またこれにより引摺りトルクを極めて小さくすることが可能となった。

### 5.4 プラネタリギヤ/モータ冷却構造

デュアルモータードライブシステムの採用により、エンジン停止時、発電機の出出力トルクがプラネ

タリギヤに付加される。また、PHVに採用するため、従来のHVと比較し、エンジン停止時間が長くなり、走行用モータの発熱が厳しくなる。以上のようなエンジン停止時、つまり、エンジン駆動メカオイルポンプ（MOP）によるオイル供給のない状態でのプラネタリギヤ機構の潤滑及びモータ冷却強化のため、電動オイルポンプ（EOP）を搭載した。

またエンジン停止中はプラネタリキャリアも回転を停止する。その状態でも確実にプラネタリギヤに潤滑油を到達させるため、従来の遠心力による油跳ねかけ供給ではなく、EOPからインプットシャフト・プラネタリまでの油路を閉回路とし、ポンプによる強制圧送潤滑とした。

潤滑・冷却構造を図11に示す。MOPと並列にEOPを追加し、間に逆止弁構造を設けることで、いずれかのポンプにより潤滑・冷却油を供給する。2つのポンプで吐出経路を共有することで、HV用トランスアクスルとの部品共通化を図り、またEOP追加によるトランスアクスルの大型化を抑制した。

これらの技術により、EV駆動力向上、EV距離の拡大に貢献した。

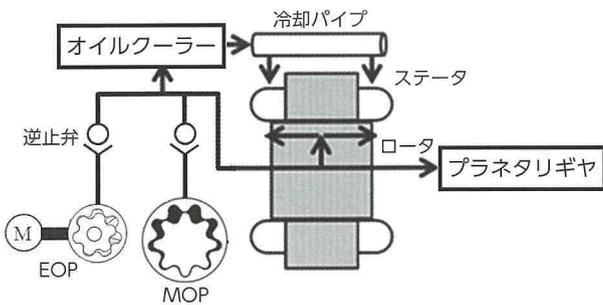


図11 プラネタリギヤ潤滑・モータ冷却構造図

## 6 PCU

### 6.1 シリーズ開発の狙い

図12に新型PHVのPCUを示す。

開発したPCUは、冷却・電気構造の基本コンセプトを他車両と統一し、シリーズ展開における部品変更を最小にする狙いで開発した。新型PHVでは、プリウスHVよりも電流を広帯域で使用できるリアクトルを新規開発し採用した。本章では幅広い仕様に対応し、従来型PHVから部品点数を低減したリアクトルについて紹介する。

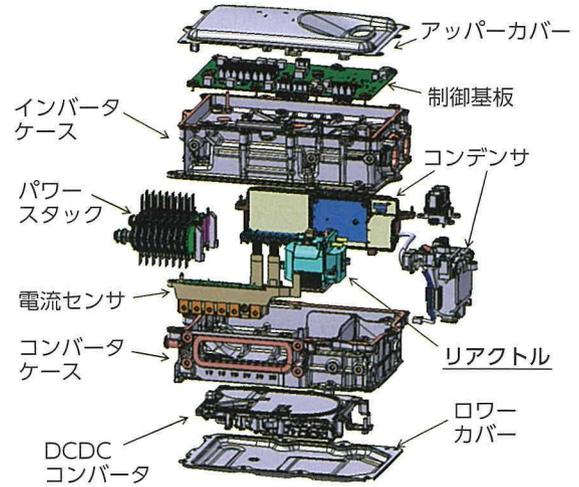


図12 新型PHV用PCU

### 6.2 リアクトルの構成

リアクトルは所望の磁気特性を得るため、コア、コイル、ギャップ用の板から構成され、これらを組み合わせしたものをケースへ取り付ける構造を取る（図13）。

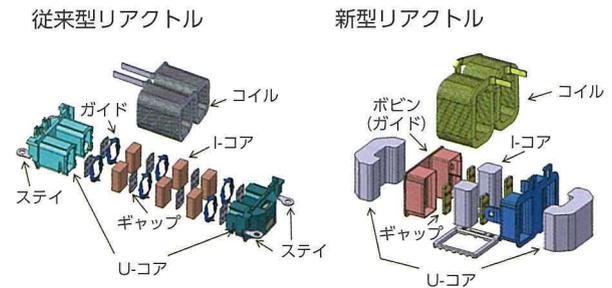


図13 リアクトルの構成

PCU搭載環境が新型PHVよりトランスアクスル直載に変更となったため、エンジン振動が入力され振動加速度が大きくなり周波数も広帯域となった。リアクトルは構成部品の保持とユニットのケースへの保持の両立が求められる。そこで今回、取り付け脚部位置や形状を最適化し剛性を高めながら、構成部品の保持が可能な一体モールド構造を開発した（図14）。

この構成にて高熱伝導率の放熱フィラーを含む冷却シートを圧縮し、熱抵抗を低減する冷却構造が可能となり冷却性能も向上した。更に従来はポッティングの注入、硬化時間が必要だったが締結のみによる組み付けが可能となり、工程削減にも貢献した。

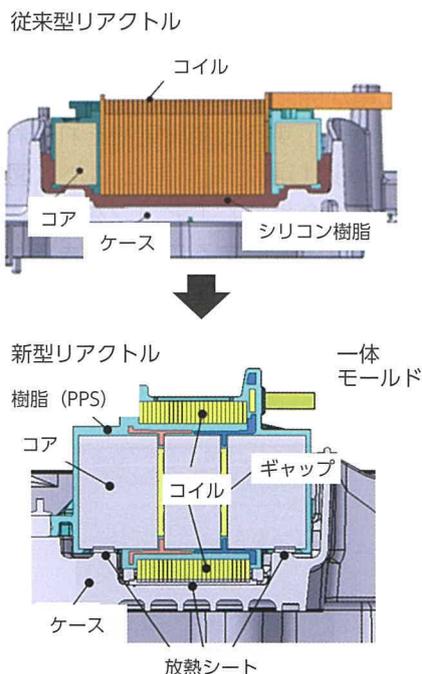


図 14 リアクトルのモールド構造

### 6.3 電気・磁気構造

リアクトルに要求される電気特性はシステム仕様、パワー素子保護の観点から決まる。新型 PCU では電流センサが追加され、リアクトル電流を直接監視できる構成となったため、昇圧制御の精度が向上した。その結果インダクタンス特性として、磁気飽和が許される仕様となりギャップ数低減が可能となった (図 15)。今回開発したリアクトルでは幅広い電流域で要求される直流重畳特性を実現するためにギャップ数を従来型 PHV リアクトルの 8 ギャップから 4 ギャップへ低減しながら、コア断面積及びコイル巻数の最適化により達成した。その結果部品点数を 27% 削減し、低コスト化を実現した。

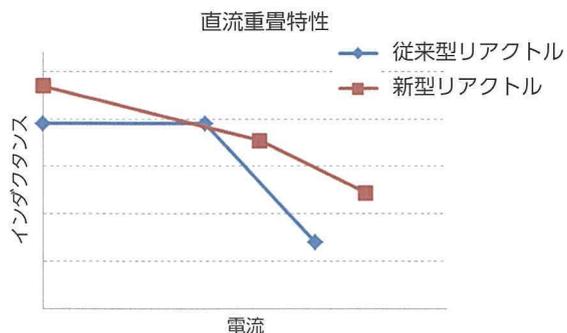


図 15 リアクトルの電流特性

## 7 充電システム

### 7.1 充電方式

新型 PHV では、3つの充電方式に対応している。ひとつは AC200V で、EV 距離の大幅延長にもかかわらず、充電器の効率改善及び出力アップにより約 2 時間 20 分で満充電にすることが可能である。

また、充電ケーブルのプラグコードを交換することで、AC100V にも対応している。AC100V 充電では、充電ケーブルによる制御信号により充電電流を 6A とするため、住宅の一般回路での充電を可能とし、専用回路工事を不要としている。

その他にも、公共の急速充電器 (CHAdeMO 規格) による急速充電にも対応しており、約 20 分でバッテリーを普通充電での満充電量の約 80% まで充電することが可能である。

充電方式と充電時間を表 2 に示す。さまざまな充電方式へ対応することで、お客様のニーズにあった充電を実現している。

表 2 充電時間

充電方式	充電時間 (充電量)
急速充電	約 20 分 (約 80%)
普通充電 200V/16A	約 2 時間 20 分 (満充電)
普通充電 100V/ 6A	約 14 時間 (満充電)

### 7.2 車載充電器

車載充電器は日米欧の普通充電インフラに適合させるため、AC100V から AC240V の入力電圧に対応可能な設計としている (表 3)。この充電器は搭載の自由度の観点から空冷システムを採用し、その結果、後席下の搭載が可能となり、車室 / 荷室空間やエンジンルームに影響を与えることなく搭載されている。

表 3 車載充電器仕様

入力電圧 (V)	86 ~ 264
出力電圧 (V)	149 ~ 396
最大入力電流 (A)	16.9
最大出力 (kW)	3.3

この充電器は、DCDC 変換部、力率改善部の作動周波数を高周波化することでコイル、変圧器の体格の低減、パワーデバイスに対しては汎用素子をモジュール化することによって体格の低減をおこない、充電器としての体格を従来品から 50% 以上低減した (図 16)。

この充電器は DCDC 変換部の変圧器巻数比の最適化、低損失パワーデバイスの採用による定常損失の低減、ZVS (Zero Volt Switching) 方式による素子のスイッチング損失低減によって、充電器としての電力変換効率を従来の 89% から 94% へと大きく向上させた。また充電中の補機電力供給用のサブ DCDC 変換器の採用によって充電システムとしても高い充電効率を確保した (図 17)。

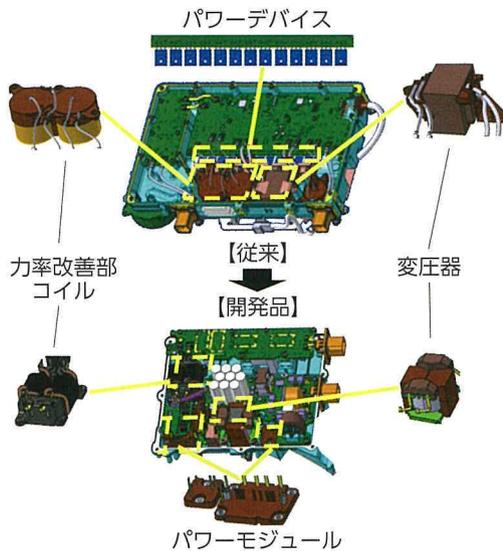


図 16 充電器の従来品と開発品のサイズ

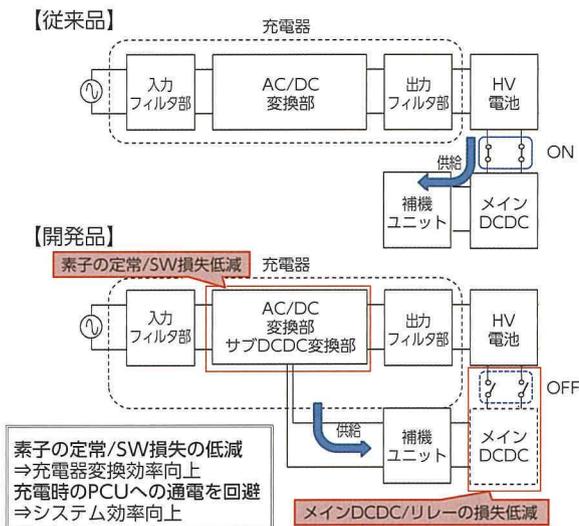


図 17 充電システム構成図

また、制御システムと合わせて、IEC61851-1 のモード 2, モード 3 充電規格及び SAE J1772 の Level 1, Level 2 充電規格に準拠している。

### 7.3 タイマー充電

最適なタイミングで充電ができるように、設定した時刻に充電が開始する開始設定と、設定した時刻までに充電が完了する出発設定をそれぞれ曜日単位での週間繰り返し設定を可能とした (図 18)。出発設定の時刻に合わせてエアコンを作動させることで車内を快適な温度にすることができる。また、それらを最大 15 個まで、任意に組合せることで、ライフスタイルに合わせてタイマー充電を設定することができる。

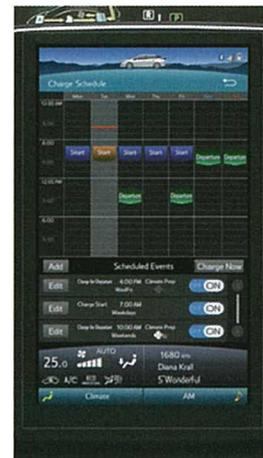


図 18 充電スケジュールの表示

これらのタイマー充電の設定と充電スケジュールを 11.6 インチ大型ディスプレイに同時表示することで、1 週間分の予約状況を見ながら予約の設定、変更が行える。また、車両に乗り込まなくても、スマートフォンからタイマー設定を変更することができる。

### 7.4 充電インレット

充電コネクタ及び充電リッドをロックする機能を有しており、これらのロック機能はスマートキーシステムと連動して、スイッチ操作のみで容易にロックを解除することが可能である。

夜間に充電ケーブルを車両に接続もしくは取り外す際の視認性確保のため、充電インレット内に充電リッド照明を配置した (図 19)。また、充電インジケータを充電インレット近傍に配置し、充電開始操作時に充電インジケータの点灯を確認することにより、正しく充電が開始されたか、もしくはタイマー充電が設定されたかがユーザーに分かるようにしている。

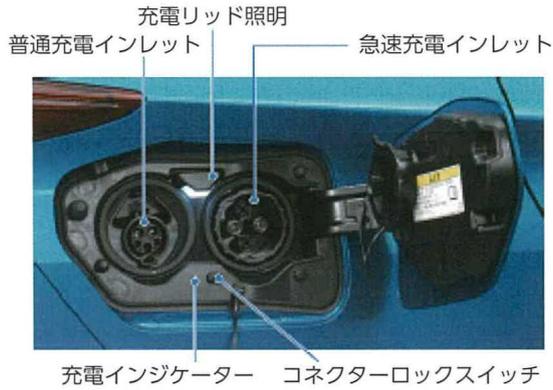


図 19 充電インレット

### 7.5 外部電源供給システム

防水カバー付コンセントを備えたヴィークルパワーコネクタ（図 20）を普通充電インレットに挿し込むことで、車外用の AC100V 電源として出力 1.5kW まで使用できる。給電時間を表 4 に示す。初めは駆動用電池のみで給電し充電容量が所定値を下回るとエンジンを作動させ給電する、停電時などを想定した HV 給電モードと、エンジンを作動させず駆動用バッテリーのみで給電する、レジャーなどでの使用を想定した EV 給電モードを選択できる。コネクタ接続中は、発進を防止し、安全面や車両の盗難防止にも配慮している。

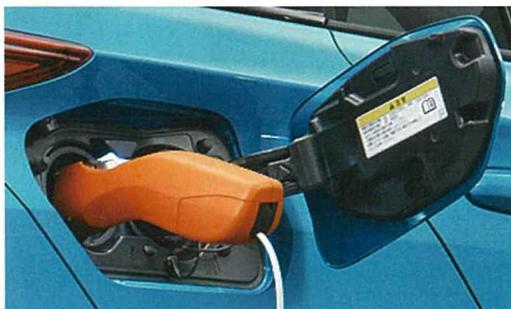


図 20 ヴィークルパワーコネクタ

表 4 給電時間

給電方式	給電時間
EV 給電モード	約 3 時間 / 1,500W 連続 約 7 時間 / 400W 連続
HV 給電モード	約 2 日間 / 1,500W 連続 約 4.5 日間 / 400W 連続

## 8 プラグインハイブリッドシステム制御

### 8.1 制御開発の狙い

新型 PHV では、ベースとなる新型プリウスをベースに、大容量駆動用バッテリーと新規採用のデュアルモータードライブシステムを活かし、EV モードの差別化を実施しダントツの加速感を実現した。

### 8.2 EV 走行領域拡大と EV モードの差別化

今回より新規で採用されたデュアルモータードライブシステムより、ジェネレータ用モータを使用すること及びトランスアクスルの高回転化により、従来型 PHV よりも広い運転領域において EV モードを継続できるようになった（図 21, 22）。具体的には低車速からの高アクセル開度操作においてもエンジン起動を不要とし、最高車速は 135km/h と従来型 PHV に比べ 35km/h の向上を実現している。また走行特性においても車両速度操作性を考慮した上で、EV モード固有となる伸びのある加速を実現した。

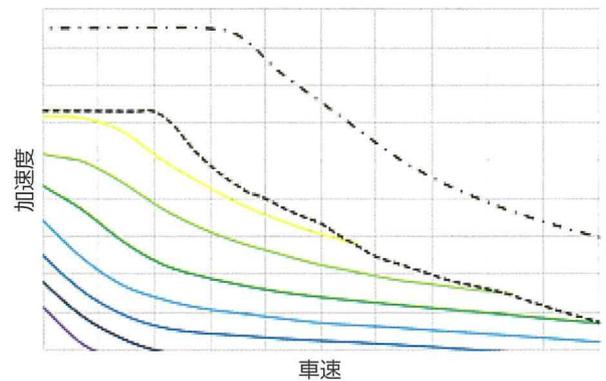


図 21 従来型 PHV 駆動力特性 @EV モード  
(一点破線：最大駆動力，点線：EV 最大駆動力，  
アクセル開度 0～60%)

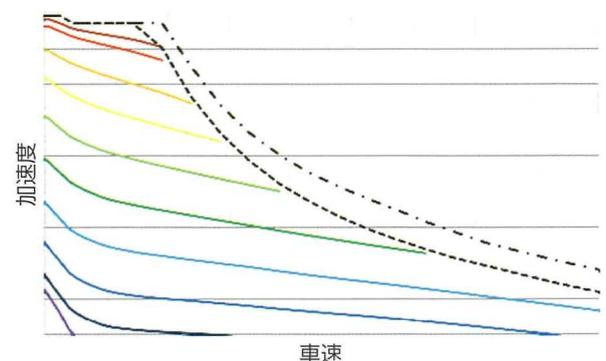


図 22 新型 PHV 駆動力特性 @EV モード  
(一点破線：最大駆動力，点線：EV 最大駆動力，  
アクセル開度 0～90%)

### 8.3 バッテリチャージモード

EVモードをより活用できるように駆動用バッテリーの充電量(SOC)が低下した後に、ACまたはDC充電をしなくても駆動用バッテリーのSOCを回復させるモードを追加した。本機能を活用することで、駆動用バッテリーを充電したい際には、バッテリーチャージモードに移行させ、駆動用バッテリーに充電をすることでEV走行後に充電インフラが利用できない状況でも駆動用バッテリーのSOCを回復させて再度EV走行を実施することが可能となる。

## 9 まとめ

本稿で紹介したシステム及びユニット・制御により実現した新型PHVの主要諸元を表5に示す。EV走行距離は、従来型PHV<sup>(3)</sup>の2倍以上となる68.2km(JC08モード)、EV最高速も従来型比35km/h向上させ135km/hを実現した。

表5 新型PHVの主要諸元

	新型PHV	従来型PHV
EV距離(km)	68.2	26.4
EV最高速(km/h)	135	100
燃費(km/L)	37.2	31.6
電費(km/kWh)	10.54	8.74

PHVは、EV走行を楽しむことができる上、燃費の良いHV走行もできるため、EVでの航続距離を気にする必要がなく、高い環境性能を実現できる。これまで、従来型PHVの環境性能を実証試験<sup>(4)</sup>などで確認してきたが、新型PHVはより高い環境性能を実現できるため、本車両が普及することにより環境負荷低減に貢献することを期待する。

#### ■参考文献

(1) 伏木俊介, 谷口, 滝澤, 菊地, 原, 他: 新型プリウスのハイブリッド技術. TOYOTA Technical Review. Vol.62, P.61 - P.70 (2016)

- (2) M. Taniguchi, T. Yashiro, K. Takizawa, S. Baba, M. Tsuchida, et al.: Development of New Hybrid Transaxle for Compact-Class Vehicles. SAE Technical Paper 2016-01-1163 (2006)
- (3) S. Matsumoto, H. Takeuchi, K. Itagaki: Development of Plug-in Hybrid System for Midsize Car. FISITA. P.387 - P.399 (2012)
- (4) 橋元慶太, 武内, 板垣: 実証実験データを基にしたプラグインハイブリッド車の環境性能の分析. 自動車技術会論文集. Vol.46, No.6, P.1079 - P.1085 (2015)

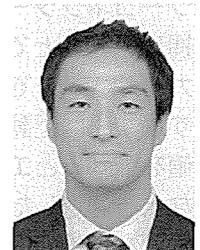
#### ■著者



市川 真士



武内 博明



福田 滋



木野村 茂樹



富田 芳樹



鈴木 陽介



平沢 崇彦

# 車載太陽電池の発電量推移

## Automotive Electric Power Generating System Using Solar Modules

浦部 心一 \*1  
Shinichi Urabe

木村 和峰 \*1  
Kazutaka Kimura

工藤 由貴 \*1  
Yuki Kudo

佐藤 彰倫 \*1  
Akinori Sato

### 要旨

地球温暖化が懸念される昨今、クリーンなエネルギー資源として太陽電池の活用が広がっている。一方の自動車業界においても、温暖化ガスの排出量を低減するためにHV（ハイブリッド自動車）やEV（電気自動車）、FCV（燃料電池自動車）など電気エネルギーを駆動力とする研究開発も進められており、これらの中で太陽電池が自動車の環境性能向上に貢献することが期待される。

しかし、車載の太陽電池で発電できる電力を計測した前例がなく、太陽電池の効果は分かっていない。本報告では計16枚の太陽電池モジュールをフードとルーフ、ハッチバック、左右側面に搭載した試験車で発電量の計測を行った。7月1日から1月31日までの計100日間で、8時から17時までの発電量は期間平均で2.09kWh/dayであった。

### Abstract

The use of solar and other clean energy technologies is spreading as part of measures to help address global warming. As part of this trend, the automotive industry is researching and developing drive systems using electrical energy in hybrid, electric, and fuel cell vehicles to help reduce greenhouse gas emissions. Solar cells are regarded as a promising way of improving the environmental performance of these types of vehicles. However, the potential effectiveness of this approach was unknown since no previous research had measured the power generation performance of automotive solar cells. This article measured the power generation performance of a test vehicle installed with sixteen solar modules on the hood, roof, rear hatchback, and both sides. Over one-hundred days from July 1 to January 31, this vehicle generated a daily average of 2.09 kWh between the hours of 08:00 and 17:00.

キーワード 太陽電池, 車載太陽電池充電システム, 南中高度, 発電量推移, EV 走行

## 1 はじめに

地球温暖化が懸念される昨今、クリーンなエネルギー資源として太陽電池が注目されており、メガソーラーだけでなく一般家庭やオフィスビルの屋上などにも設置されている。その一方、自動車業界でも温暖化ガスの排出量を低減するため、HV（ハイブリッド自動車）やEV（電気自動車）、FCV（燃料電池自動車）などの電気エネルギーを駆動力に利用する研究開発も進められており、太陽電池が自動車の環境性能を高めることに貢献できるものと期待される。

再生可能エネルギーを自動車で活用した一例とし

\*1 未来創生センター 未来研究部

て太陽電池を搭載したソーラーカーが挙げられる。しかし、レースに使用されるソーラーカーは多くの太陽光を受光できることに加えて空気抵抗を低減するために、乗員スペースを大幅に削減しているため乗用車としては利用しづらいことが課題である。

## 2 開発の狙い

### 2.1 車載太陽電池の発電量計測

乗用車のルーフ面だけだと十分な太陽電池を搭載できないが、車体の表面積を有効に活用するためフードや側面にも搭載すれば設置面積を拡大することができる。しかし、このような多方位を向いた車載太陽電池で実際に発電した電力が報告された前例はなかった。

本報告では実際の乗用車には計 16 枚の太陽電池モジュールを搭載し、7月1日から1月31日までの間で計 100 日間屋外に駐車した時の発電量を計測し、車載太陽電池の有用性を評価する。

### 3 車載太陽電池充電システム

#### 3.1 太陽電池モジュール

計 16 枚の太陽電池モジュールは図 1，図 2 のように、車体のフードおよびルーフ、バックドア、左右ドア、リアフェンダー、ダッシュボードに分散して設置した。各モジュールに搭載した太陽電池セル枚数は表 1 に示している。



図 1 太陽電池を搭載した試験車

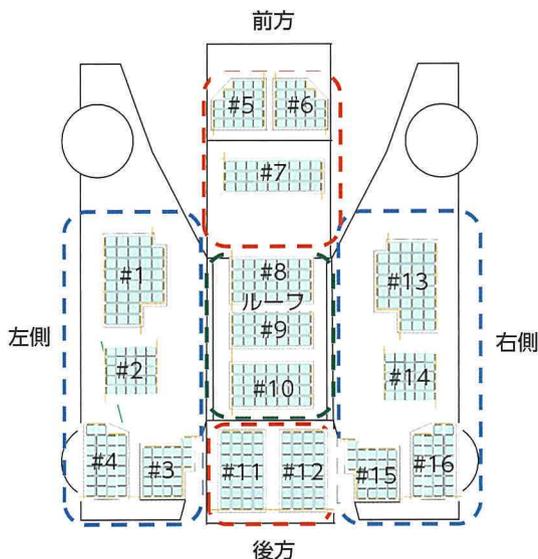


図 2 太陽電池モジュールの位置とグルーピング

表 1 各太陽電池モジュールのセル枚数

搭載場所	モジュール No.	セル枚数	小計
左側	#1	35	109
	#2	25	
	#3	26	
	#4	23	
前方	#5	22	71
	#6	22	
	#7	27	
ルーフ	#8	21	77
	#9	28	
	#10	28	
後方	#11	28	56
	#12	28	
右側	#13	35	109
	#14	25	
	#15	23	
	#16	26	
合計	-	422	422

ルーフには 3 枚の太陽電池モジュールを搭載しており、これらは曲率半径 1,000mm から 3,000mm の基板上に太陽電池セルを配置して作製したものである。その他の太陽電池モジュールは、柔軟性のある樹脂板に太陽電池セルを配置して作製し<sup>(1)</sup>、できるだけ太陽電池面が車体ボディに沿うように設置されている。

太陽電池の出力電力はその太陽電池の持つ V-I (Voltage-Current) 特性に応じて出力されるが、出力電圧は接続される負荷のインピーダンスによって決まる。よって、太陽電池からの最大出力が得られるように制御するための機器が必要となる。この制御機器は MPPT (Maximum Power Point Tracking) 充電制御回路<sup>(2)(3)</sup> と呼ばれ (以下では単に MPPT と記す)、各太陽電池モジュールに 1 個ずつ設置され各太陽電池モジュールの出力が最大になるように制御される。

今回試作した車載太陽電池充電システムでは、各位方位に設置した太陽電池モジュールの受光量差によって生じる損失を低減するために、図 3 のように MPPT を介して全て並列にしてバッテリーに接続されている。このバッテリーは、太陽電池で発電した電力を一次的に蓄電するために設けたものであり、自動車とは接続されていない。

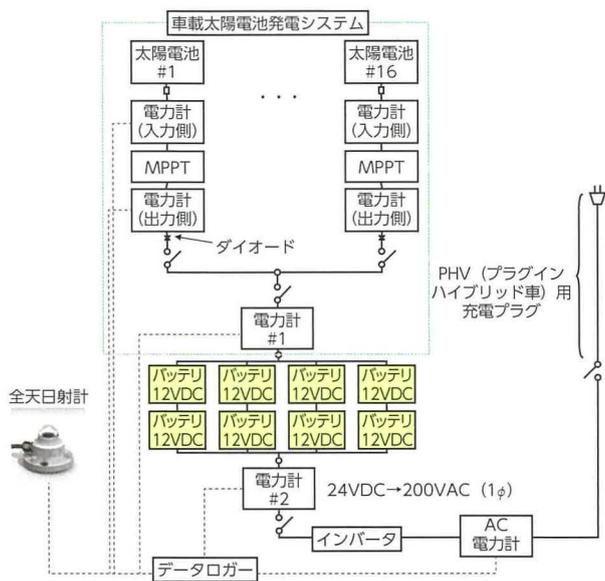


図3 車載太陽電池充電システムの構成

### 3.2 太陽電池モジュールの発電量計測の方法

当システムでは、MPPTには電圧・電流センサーが内蔵されており入力・出力電力を計測できる。また、発電量の参照データとして日射量をモニターできるように、太陽電池モジュール上に日陰を作らない車体の左後方コーナーに、全天日射計が水平設置されている。

これらの計測値は全てデータロガーに接続し、0.1Hzで記録した。

計測は2014年7月1日から2015年1月31日までの7か月間のうち、休日とメンテナンス実施日、暴風などの悪天候日を除いた計100日間で計測を行った。期間中の自動車への積雪はなかった。

発電量の計測は8:00から17:00の1日9時間で統一し、駐車場所は日陰のできない特定の場所を選び、車体は南南東（南を0度として東へ約32度）を向いた状態で駐車した。駐車位置はおおよそ東経138°53'53"、北緯35°13'15"である。

## 4 実験結果

### 4.1 発電量推移

期間中に計測した単位面積あたりの日射量(kWh/m<sup>2</sup>/day)と全太陽電池セルの発電量(kWh/m<sup>2</sup>/day)の推移を図4に示す。

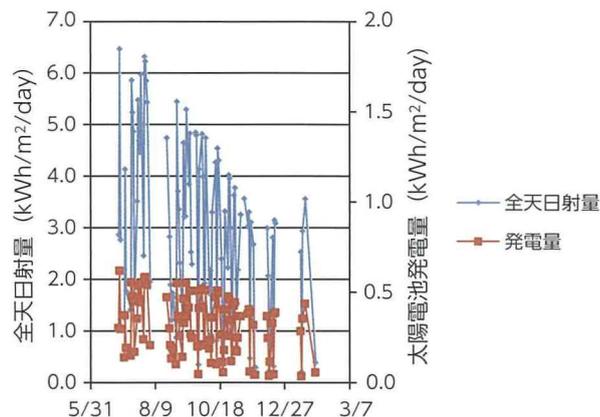


図4 日射量と発電量の推移

日射量と発電量の推移を示すが、天候による揺らぎはあるものの、7月から12月にかけて日射量と発電量が減少する傾向にある。

また、期間中の最大および最小、平均の発電量、およびEV走行電費を7.0km/kWhで換算した時のEV走行可能距離を表2に示す。7.0km/kWhの走行電費は、試験車の元々のEV走行電費8.8km/kWhから、システム重量を考慮して算出した。

表2では、期間中の最大発電量は4.23kWh/dayであり、29.6km/dayのEV走行に相当する。期間平均の発電量でも2.09kWh/dayであり、これは14.6km/dayのEV走行に相当する。

表2 試験期間中の発電量とEV走行可能距離  
\*: EV走行電費を7.0km/kWhで換算した時の推定距離

	発電量 (kWh/day)	EV走行距離* (km)
最大	4.23	29.6
最小	0.10	0.7
平均	2.09	14.6
標準偏差	1.11	7.77

また、全太陽電池モジュールの発電量を面積で除した発電量(W/m<sup>2</sup>)と、水平設置の全天日射量(W/m<sup>2</sup>)の推移を図5に示す。これによると、期間通算の太陽光受光エネルギーに対する太陽電池発電量の比率は11.0%であった。

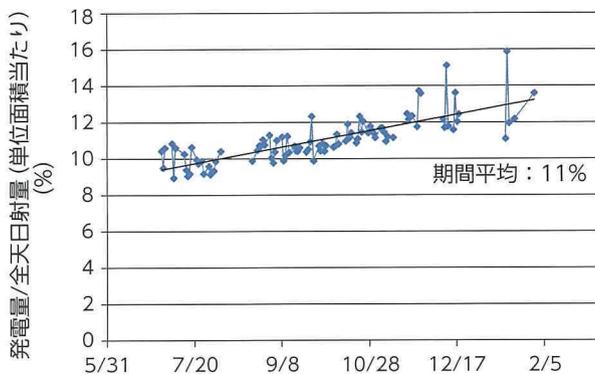


図5 単位面積あたりの日射量と発電量の相対比

太陽電池セルの発電効率が約 20% であることを考えると、側面のように垂直に設置された太陽電池モジュールも含めて 16 枚のモジュール全体で約半分の発電効率に相当する。

しかし、図 5 では 7 月から 12 月にかけて、太陽電池モジュール全体における単位セル面積あたりの発電効率は増加傾向にある。これは太陽の南中高度が下がるにつれて、面積の大きい側面モジュールの受光量が相対的に増加し、発電量が大きくなっているためである<sup>(4)</sup>。

#### 4.2 モジュール設置位置別の発電量推移

左側面、前方、ルーフ、後方、右側面の各設置グループ（図 2）での面積当たりの発電量（ $W/m^2$ ）の総和を 100% とした時の、各設置グループの単位面積あたりの発電量の割合の推移を図 6 に示す。

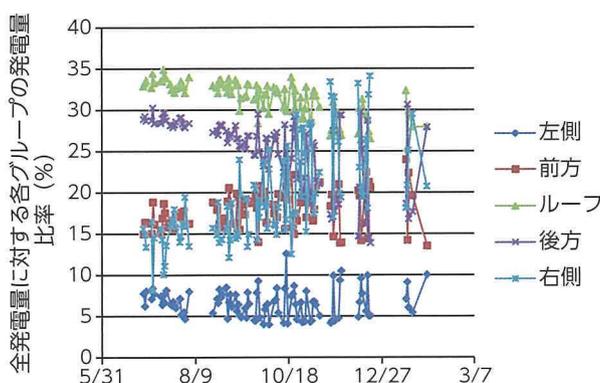


図6 各グループの単位面積あたりの発電比率の推移 (全体の発電量を 100% とする)

7 月から 12 月にかけて太陽の南中高度が低くなることで、ルーフやリアの太陽光モジュールは太陽

光の入射角度が大きくなり、徐々に発電量が低下している。一方、フロントや右側面のグループでは入射角が小さくなって発電量が増加している。

ただし、表 1 にあるように右側面のモジュールの総面積は前方、ルーフ、後方モジュールに比べて大きいので、総発電量に対する寄与率（右側面モジュールの発電量 / 総発電量）は太陽の南中高度が低くなるほど増加する傾向にある（図 7）。

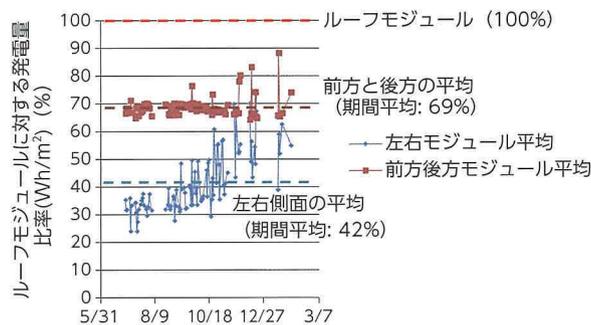


図7 単位面積当たりのルーフパネルの発電量に対する、左右側面、前後方パネルの発電量比率

#### 4.3 ルーフモジュールに対する発電実効効率

図 7 では、各モジュールの面積当たりの発電量の推移を示している。

左右側面のモジュールの発電量は日中を通して非対称になっているため、片側の太陽電池モジュールは必ず日陰になる。前後方の太陽電池モジュールも同様の理由により受光量は非対称になる。

よって、ここでは太陽電池モジュールの設置場所による影響を緩和するため、左右側面および前後方モジュールのそれぞれの発電量の平均をとり、おおよそ水平に設置されているルーフモジュールの面積あたりの発電量と比較している。

前方モジュールと後方モジュールは水平面に対する傾きはおおよそ対称になっているので、図 7 に示すように月日によらずほぼ一定となっている。

期間平均では、前後方モジュールのルーフモジュールに対する発電量が 69% で、左右側面モジュールは 42% であった。

左右側面モジュールでは、7 月初旬ではルーフに対して約 30% だった単位面積当たりの発電量が、10 月下旬になると約 45% まで向上している。これは、太陽の南中高度が低下するにつれて、左右側面への太陽光の入射角が小さくなり、相対的に発電量が増加するためである。

## 5 まとめ

16枚の太陽電池モジュールを乗用車に搭載して、7月1日から翌年1月31日までの期間、計100日の発電量を計測した結果、期間平均で2.09kWh/dayの発電量があった。

単位面積あたりの発電量を比較すると、側面パネルの発電量は太陽の南中高度が低くなる冬に向けて大きくなり、ルーフに設置されたモジュールの発電量に対して期間平均で40%に相当する。

また、左右側面は太陽電池セルの設置面積を大きく取れるため、ルーフモジュールの発電が低下する冬場においては、これを補う効果が期待できる。

### 参考文献

- (1) Yuki Kudo, Akinori Sato, et al. : Solar Module Laminated Constitution for Automobiles. SAE 2016 World Congress and Exhibition
- (2) Kobayashi, K., Takano, I., et al. : A Study of a Two Stage Maximum Power Point Tracking Control of a Photovoltaics System Under Partially Shaded Insulation Conditions. *Solar Energy Materials & Solar Cells*. Vol.90, Issues 18-19, P.2975 - 2988 (2006)  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2006.06.050>
- (3) Chowdhury, S. and Saha, H. : Maximum power point tracking of partially shaded solar photovoltaic arrays. *Solar Energy Materials & Solar Cells*. Vol.94, Issue 9, P.1441 - 1447 (2010)  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2010.04.011>
- (4) Zomer, C., Nobre, A., et al. : The balance between aesthetics and performance in building-integrated photovoltaics in the tropics. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*. Vol.22, Issue 7, P.701 - 850 (2014)  
<http://dx.doi.org/10.1002/pip.2430>

本論文は、下記発表済み論文の転載である。

浦辺心一、木村、工藤、佐藤：車載太陽電池の発電量推移。自動車技術会。2016年秋季大会学術講演会予稿集。P.674 - 677

### 著者



浦部 心一



木村 和峰



工藤 由貴



佐藤 彰倫

# 車載用軽量型太陽電池モジュールの開発

Development of Lightweight Automotive Solar Module

工藤 由貴<sup>\*1</sup>  
Yuki Kudo

木村 和峰<sup>\*1</sup>  
Kazutaka Kimura

岩本 昭一<sup>\*1</sup>  
Shoichi Iwamoto

大場 浩之<sup>\*1</sup>  
Hiroyuki Oba

佐藤 彰倫<sup>\*1</sup>  
Akinori Sato

## 要旨

自動車の動力源として太陽エネルギーを使用することは、二酸化炭素排出量低減につながる。太陽電池モジュールを自動車に搭載することにより、太陽エネルギーを使用することが可能になる。走行に十分なエネルギーを得るために大面積化するには、太陽電池モジュールの軽量化が必要である。軽量化を図るために、太陽電池モジュールの表面に使用されている重いガラスを樹脂に置換する方法が考えられるが、耐荷重、耐衝撃、熱変形、耐候性が新たな技術課題となる。本論文では、鋼板ルーフ並の重量であり、なおかつ、耐衝撃性、耐熱変形性を備える太陽電池モジュール構造を提案する。

## Abstract

Solar modules can be installed on vehicles to enable the use of solar energy as a power source to help reduce CO<sub>2</sub> emissions. However, the weight of these modules must be reduced so that the surface area can be increased to obtain sufficient energy to drive the vehicle. Although one effective measure to reduce solar module weight is to replace the heavy surface glass with plastic, this presents various technical issues related to thermal deformation, as well as load, impact, and weather resistance. This article describes the development of a solar module with excellent impact and thermal resistance, and the equivalent weight to a conventional steel roof.

キーワード エネルギー、太陽電池、軽量化、耐衝撃、熱変形

## 1 はじめに

各国でCO<sub>2</sub>排出規制が厳しくなっている中、自動車の走行に必要なエネルギーを太陽エネルギーで賄うことは、化石燃料の消費を抑制するためCO<sub>2</sub>排出の低減につながる<sup>(1)</sup>。太陽エネルギーを使用して走行するためには、住宅などの屋根に設置された太陽電池モジュールで作られた電力を自動車に供給するか、自動車に太陽電池モジュールを搭載して電力を得る方法が考えられる。比較的容量の大きいバッテリーを搭載している電気自動車 (EV) やハイブリッドカー (HV) に太陽電池パネルを搭載すれば走行距離を伸ばすことができ<sup>(2)(3)</sup>、さらに送電や電力供給のための追加のインフラを必要としないため、より多くのお客様にその恩恵を提供することが可能となる。住宅などで最もよく見られ、30年以上の市場実績をもつ太陽電池モジュール<sup>(4) - (6)</sup>

は、厚さ3mm以上のガラスと、封止材樹脂と、封止材樹脂に挟まれた太陽電池素子 (特に結晶系シリコン) とバックシート樹脂で構成されている。この構成は自動車ボデー鋼板の倍近くの重量密度であるため、そのまま車両に適用した場合、車両側に追加の補強部材が必要になってくるなど従来の自動車以上に設計制約を与えたり、燃費に影響を与えたりする。一方で、走行に十分な電力を太陽電池モジュールで得るためには、車両になるべく多くの太陽電池モジュールを搭載する必要があるため、太陽電池モジュールの軽量化が必須である。太陽電池モジュールを軽量化するためには、ガラスを樹脂に置き換える方法がある。しかし、この方法は新たに、耐荷重、耐衝撃、熱変形、耐候性など樹脂固有の課題に対して設計を行う必要がある。そこで、太陽電池モジュールの層構成が大きく寄与する重量と背反する耐衝撃性、熱変形性に着目し、軽量型太陽電池モジュールの構造設計を行った。耐荷重については車両全体の設計として、耐候性については耐候性コーティング技術開発として今後の課題とする。

\*1 未来創生センター 未来研究部

## 2 車載用軽量型太陽電池モジュールの積層構造

車載用軽量型太陽電池モジュールの積層構造を考えるためのベースデザインとしてスーパーストレート型太陽電池モジュール(図1)とサブストレート型太陽電池モジュール(図2)に着目をした。スーパーストレート型太陽電池モジュールは、最表面にガラスを備えており、耐衝撃性や熱変形性に有利な構造であるが、重量密度が高く、車重が重くなる。サブストレート構造は表面に薄い樹脂フィルムを備え、背面には硬い基材が適用される。重量を軽くすることができるが、太陽電池セルを保護する部材が少なくなるため耐衝撃性の確保が難しい<sup>(7)</sup>。また、耐候性を確保するために、表面のフィルムにコーティングを施すと、ソルヴェントクラックが発生してしまうという課題もある。そこで、車載用の太陽電池モジュールとしては、スーパーストレート型太陽電池モジュールとサブストレート型太陽電池モジュールの特長を組み合わせた太陽電池積層構造を提案、検討する。

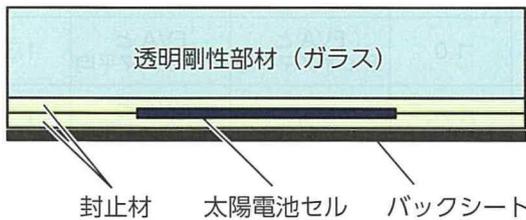


図1 スーパーストレート型太陽電池モジュール

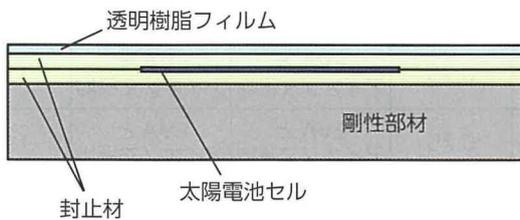


図2 サブストレート型太陽電池モジュール

提案する太陽電池モジュールの構造(図3)では、最表面に樹脂の中でも優れた耐候性を持つポリカーボネートを用いた。太陽電池セルとしては、市場実績が最もあり、高い出力が得られる単結晶系シリコン太陽電池セルを使用した。太陽電池セルを保護する封止材樹脂としては、太陽電池用のEVA(エチレンビニルアセテート)やアイオノマ樹脂を想定した。背面の基板としては軽くて剛性があり、自動車にも使用されるアルミを選択した。

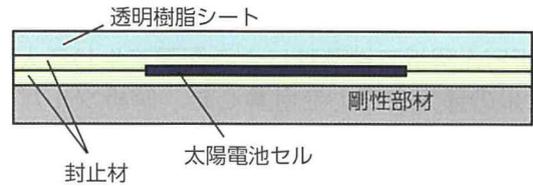


図3 提案太陽電池モジュール

この車載用軽量型太陽電池モジュールを評価するための耐衝撃性の指標としては、住宅用太陽電池モジュールの認証試験として使用されているIEC 61215<sup>(8)</sup>の降雹試験を採用した。これは、7.53g、φ25の氷球を速度23m/sで太陽電池モジュールの指定された箇所に衝突させる試験である。この試験での目標として、氷球衝突後の検査において、太陽電池セルの割れがないこととした。熱変形に対する指標としては、寒冷地をイメージした-30℃環境下でルーフ並みの曲率をもつ太陽電池モジュールにおいてバックリングが発生しないこととした。車両に対する重量の影響を無くすために、重量目標はt0.7ルーフ鋼板相当の5.5kg/m<sup>2</sup>とした。

## 3 設計方法

### 3.1 耐衝撃設計

車載用軽量型太陽電池モジュールの層構造を設計する際には、小さな試験片で試験が可能なJIS R 3212の落球試験を模擬した。試験条件は、鋼球重量2.7g、落球高さ1m、試験片サイズ300×300mmである。IEC 61215の降雹試験における衝撃エネルギーは1.99Jであり、JIS R 3212の衝撃エネルギーは2.23Jである。落球試験の方が大きい入力となっている。

検討する太陽電池モジュールの層構造の耐衝撃性は、有限要素モデル(FEM)を活用して予測した。計算時間を削減するために、モデルは1/4のカットモデル(図4)を使用した。

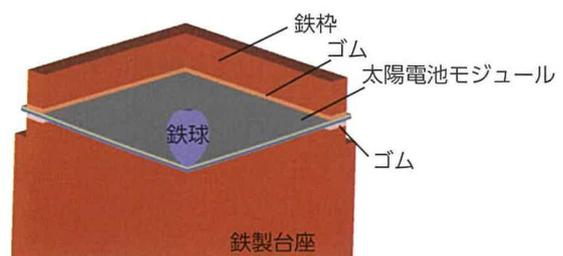


図4 落球試験モデル

使用した物性値は表 1<sup>(9)</sup> と図 5 に示す通りである。FEM 解析では落球による衝撃で生じる太陽電池セルの最大主応力を計算した。解析ソルバーには ABAQUS 6.11-2 を使用した。層構造を検討するために、パラメータ解析を行った。解析したパラメータは、表面のポリカーボネートの厚さ、太陽電池セル上側・下側双方の封止材の種類（ヤング率）、アルミの厚さである。封止材の厚さは入手しやすい 0.4mm で固定をした。応答曲面法と、実験計画手法の一つである中心複合計画<sup>(10)</sup> を用いて各パラメータと太陽電池セルに生じる最大主応力との関係を予測した。因子と水準は表 2 に示す通りである。

表 1 ヤング率

	ポリカーボネート	太陽電池セル	アルミ
ヤング率 (GPa)	2.3	130	70

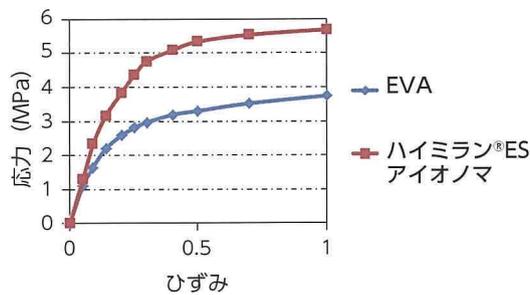


図 5 封止材の応力ひずみ線図

### 3.2 熱変形設計

熱変形についても、FEM と ABAQUS を使用して計算を行った。モデルとしては、図 6 に示すような 2D モデルを使用した。検討する層構成は、後述するように耐衝撃性を備えるものに限定した。アイオノマとしては、ハイミラン<sup>®</sup>ES（三井・デュポン ポリケミカル社製）を想定した。図 7、図 8 に示すように、線膨張係数の温度依存性が大きい物質については -30℃ から 100℃ までの 10℃ ごとの線膨張係数を測定し計算モデルに反映させた。熱による変形量  $d$  の定義は図 9 に示す通りである。100℃ から -30℃ へ冷却した場合の変形量を計算した。

表 2 実験計画

No.	表面板厚さ (mm)	セル上側封止材	セル下側封止材	アルミ厚さ (mm)
1	0.5	EVA	EVA	1.2
2	1.0	EVA	EVA	1.2
3	0.5	アイオノマ	EVA	1.2
4	1.0	アイオノマ	EVA	1.2
5	0.5	EVA	アイオノマ	1.2
6	1.0	EVA	アイオノマ	1.2
7	0.5	アイオノマ	アイオノマ	1.2
8	1.0	アイオノマ	アイオノマ	1.2
9	0.5	EVA	EVA	1.5
10	1.0	EVA	EVA	1.5
11	0.5	アイオノマ	EVA	1.5
12	1.0	アイオノマ	EVA	1.5
13	0.5	EVA	アイオノマ	1.5
14	1.0	EVA	アイオノマ	1.5
15	0.5	アイオノマ	アイオノマ	1.5
16	1.0	アイオノマ	アイオノマ	1.5
17	0.5	EVA とアイオノマ平均	EVA とアイオノマ平均	1.35
18	1.0	EVA とアイオノマ平均	EVA とアイオノマ平均	1.35
19	0.75	EVA	EVA とアイオノマ平均	1.35
20	0.75	アイオノマ	EVA とアイオノマ平均	1.35
21	0.75	EVA とアイオノマ平均	EVA	1.35
22	0.75	EVA とアイオノマ平均	アイオノマ	1.35
23	0.75	EVA とアイオノマ平均	EVA とアイオノマ平均	1.2
24	0.75	EVA とアイオノマ平均	EVA とアイオノマ平均	1.5
25	0.75	EVA とアイオノマ平均	EVA とアイオノマ平均	1.35

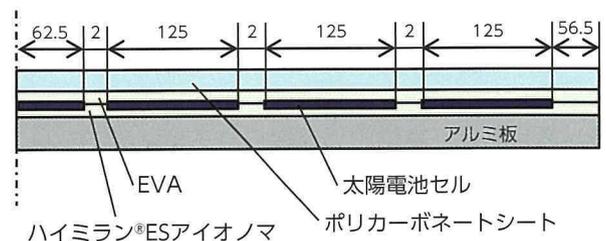


図 6 熱変形モデル

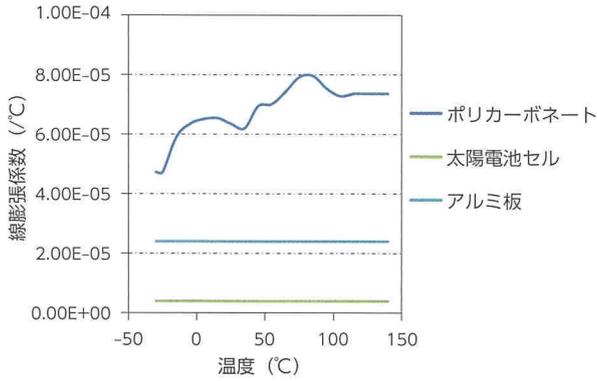


図7 線膨張係数

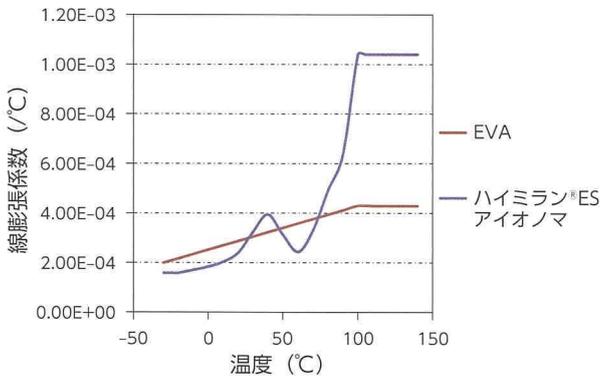


図8 線膨張係数(封止材)

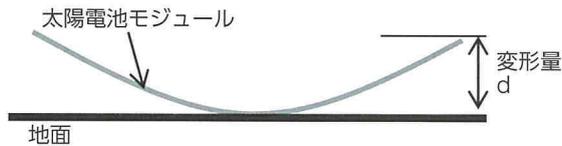


図9 変形量

### 3.3 重量

重量計算は表3に示す密度を使用して行った。太陽電池セルは結晶シリコンと金属類で構成される電極から構成されるが、計算では純粋な結晶シリコン<sup>(9)</sup>として扱った。

表3 密度

部材	密度 (g/cm <sup>3</sup> )
ポリカーボネート	1.20
EVA	0.96
太陽電池セル	2.33
ハイミラン®ES アイオノマ	0.95
アルミ板	2.70

## 4 実験結果と考察

### 4.1 耐衝撃性の計算予測結果

鋼球が太陽電池モジュールの試験片に衝突してから、鋼球が跳ね返り太陽電池モジュールを離れるまでの、太陽電池セルにかかる最大主応力の変化を示したグラフを図10に示す。図10では、二つの山が観察される。一つ目の山で発生する最大主応力が最も高くなる点では、鋼球が太陽電池モジュール内の表面部材や封止材を潰し、太陽電池セルを圧縮しきっていることが考えられる。二つ目の山で発生する最大主応力の最高値は、一つ目の山での最大主応力の最高値よりも大きい。鋼球は太陽電池モジュールを押し込み終えた後、跳ね返り、太陽電池モジュールから離れる方向へ動くが、その際太陽電池モジュール側はそのまま押し込まれた方向へ変形する。その後、太陽電池モジュールは元の形状に戻る方向へ変形を始め、その途中で鋼球と強く再接触する。この二度当たりによって、二つ目の山が描かれている。

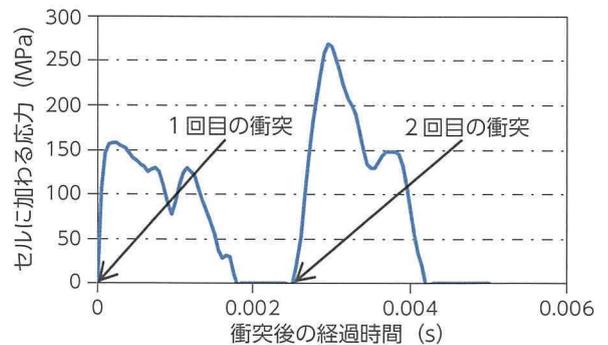


図10 落球時にセルに加わる応力

図11は封止材の種類による感度を示した図である。図12は、表面板と背面板の厚さの感度を示した図である。図11により、セル下側封止材のヤング率が高いNo.5とNo.7の水準で太陽電池セルの応力が軽減できていることから、セル下側封止材のヤング率が耐衝撃性に大きく寄与しており、その値は高い方が耐衝撃性を向上させることがわかる。また、図12から表面板が1.0mmであるNo.6、No.14の方が表面板が0.5mmであるNo.5、No.13よりもセルの応力を軽減させることができていくことがわかる。No.6とNo.14、No.5とNo.13をそれぞれ比較することにより、背面板の厚さについてはセルの応力に対する感度が小さいことがわかる。

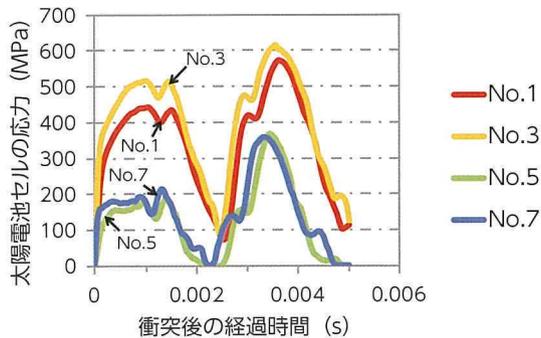


図 11 封止材種類によるセルの応力比較

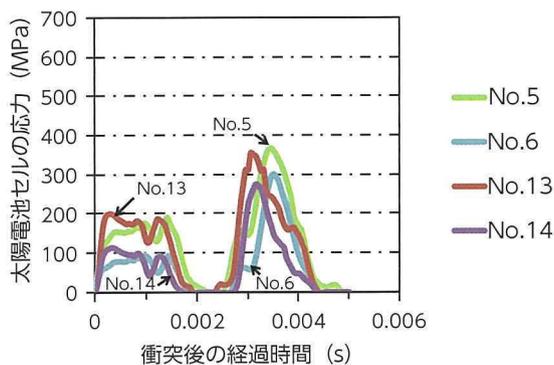


図 12 表面板と背面板厚さによるセルの応力比較

応答曲面法より、最大主応力の最高値（2山目）とポリカーボネートの厚さ、封止材のヤング率、背面アルミ板の厚さとの関係を、ソフトウェア [Statworks] (The Institute of Juse) を用いて求めた。表 4 に偏回帰係数をまとめた。

表 4 偏回帰係数

因子量	偏回帰係数
$C$	779.673
$t_{PC}$	-89.452
$E_{up}$	0.165
$E_{low}$	-1.569
$t_{Al}$	-154.76
$(t_{PC}-0.75000) * (E_{up}-78.795000)$	0.62
$(t_{PC}-0.75000) * (E_{low}-78.795000)$	-0.268
$(E_{up}-78.795000) * (E_{low}-78.795000)$	-0.003
$(E_{up}-78.795000) * (t_{Al}-1.35000)$	-0.664
$(E_{low}-78.795000) * (t_{Al}-1.35000)$	0.697
$(t_{PC}-0.75000) ^2$	-79.432
$(E_{up}-78.795000) ^2$	0.006
$(E_{low}-78.795000) ^2$	0.003

表中の  $t_{PC}$  はポリカーボネートの厚さ、 $E_{up}$  はセル上側封止材ヤング率、 $E_{low}$  はセル下側封止材のヤング率、そして、 $t_{Al}$  はアルミ板の厚さを表している。封止材のヤング率としては、EVA は 7.59MPa を想定し、アイオノマは 150MPa を想定した。太陽電池セルへ加わる応力を小さくするためには、セル下の封止材としては、アイオノマ樹脂のような高ヤング率部材を使用することが効果的である。高ヤング率部材を用いることで 2 つの作用が考えられる。一つ目は、鋼球が太陽電池モジュールにめり込むことを防ぎ、大きな応力が太陽電池セルに発生することを防ぐこと。二つ目は、太陽電池モジュールが全体でたわみ変形し、クッションのように衝撃を和らげることである。セル上の封止材のヤング率については、セルにかかる応力に対して影響が小さいことが分かった。

#### 4.2 熱変形計算結果

表 5 は熱変形の計算結果をまとめたものである。No. 5 と No.13 は凸方向に、No. 6 と No.14 は凹方向に変形している。

表 5 熱変形 計算結果

No.	ポリカーボネート厚さ (mm)	アルミ厚さ (mm)	変形量 (mm)
5	0.5	1.2	-240.0
6	1.0	1.2	159.9
13	0.5	1.5	-106.0
14	1.0	1.5	245.7

重回帰分析により、次の数式が導かれた。

$$d = -1043.350 + 751.600t_{PC} + 366.333t_{Al} \dots\dots (1)$$

$d$  は変形量、 $t_{PC}$  はポリカーボネートの厚さ、 $t_{Al}$  はアルミ板の厚さを表す。変形をしないとき、 $d$  は 0 となる。

#### 4.3 落球試験結果

落球試験用の 300mm 角サイズの太陽電池モジュールを、真空ラミネータ装置 (NPC 製 LM-50 x 50) を用いて作製した。真空ラミネータ装置の熱板温度は 140℃ に設定した。太陽電池モジュールの層構成は表 4 の結果を踏まえ、厚さ 0.8mm のポリカーボネート板、厚さ 0.4mm の EVA、シリコン結晶系太陽電池セル、厚さ 0.4mm のアイオノマ樹脂 (ハイミラン®ES)、そして厚さ 1.2mm の

アルミ板とした。セルの上側に EVA を選択した理由は、ポリカーボネート板との接着性を考慮したためである。熱変形を小さくできること、市場での入手性、およびラミネート後 PC 表面に凹凸ができてにくいことから、ポリカーボネート板とアルミ板の厚さを決定した。この構成における落球衝撃時のセルの最大主応力の変化は図 13 に示す通りであり、No. 5 の水準と近く、応力が小さくなっている。式 (1) より、熱変形量は -2.5mm である。作製された太陽電池モジュールを落球試験前後で検査した。検査内容は IV カーブ測定と EL (エレクトロルミネッセンス) 画像撮影である。IV カーブ測定では、太陽電池の出力や内部抵抗などの性能を明らかにすることができる。装置としては英弘精機製 MP-160 を使用した。EL 画像撮影では、太陽電池セルに電流を流すことで発生する太陽電池セルの発光を見ることにより太陽電池セルに入った亀裂などが検出できる。装置としては、ITES 製の PVX-300 を使用した。落球試験を行った結果、試験前後の出力はどちらも 3.2W であり、出力低下は見られなかった。また、EL 画像では、太陽電池セルの割れは確認されなかった。FEM 計算で予想されていた二度当たりの現象はスーパースローカメラによる撮影によって確認された。

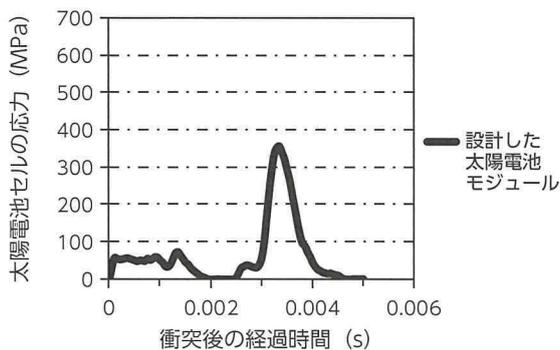


図 13 設計した層構成における落球時の太陽電池セルへの応力

#### 4.4 降電試験結果

降電試験には図 14 に示すような約 600×1,000mm サイズのルーフ形状試験片を用いた。太陽電池モジュールの層構成は、落球試験で用いたものと同じである。太陽電池モジュールは 140℃ でラミネートされ作製された<sup>(11)</sup>。落球試験と異なる点は、鋼球でなく氷球を用いていること、試験片が曲率を持っていること、衝撃位置が複数個所である

ことである。衝撃位置は、ルーフのリンフォースを想定した支持部材の上や太陽電池セルの端を含む 13 か所である。

図 15 に衝撃箇所の詳細を記載した。図 16 に示すように、降電試験後に出力低下と絶縁抵抗の低下は検出されなかった。試験後の EL 画像の確認においても、太陽電池セルの割れは確認されなかった。

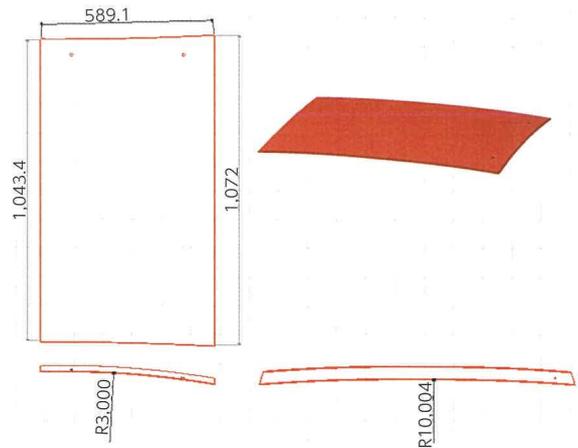


図 14 自動車ルーフ形状モジュール

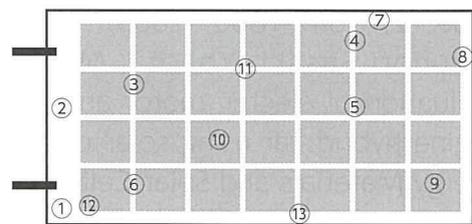


図 15 氷球衝突位置

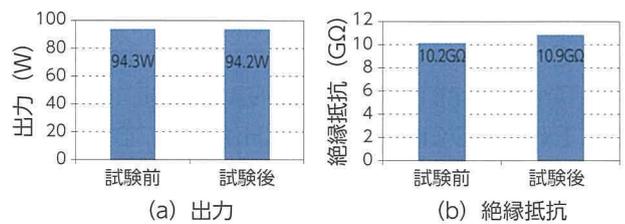


図 16 降電試験結果

#### 4.5 冷間試験

作成された図 14 に示すルーフ形状太陽電池モジュール試験片を室温から -30℃ の雰囲気に移動させた。太陽電池モジュールの層構成は落球試験と降電試験で用いたものと同じ構成とした。温度変化によるバックリングは発生しなかったことが確認された。

## 5 おわりに

鋼板並みの重量で、かつ、耐衝撃性と耐熱変形性を備える車載用太陽電池モジュールの層構成を提示した。良好な耐衝撃性、少ない熱変形性、軽量化を両立させるために応答曲面法を活用した。車両ルーフを模した試験片を作製し、実際の降雹試験や熱変形性を評価した結果、FEMを用いて設計した太陽電池モジュールの層構成が車両に適した性能を持つことが示された。

### ■参考文献

- (1) Kazutaka Kimura, Kudo, Y., Sato, A. : Techno-Economic Analysis of Solar Hybrid Vehicles Part 1: Analysis of Solar Hybrid Vehicle Potential Considering Well-to-Wheel GHG Emissions. SAE Technical Paper 2016-01-1287 (2016)
- (2) Takeo Saitoh., Yamada, N., et al. : A grand design of future electric vehicle to reduce urban warming and CO<sub>2</sub> emissions in urban area. Renewable Energy. Vol. 30, Issue 12, 1847-1860 (2005)
- (3) Kazunori Sasaki, Yokota, M., et al. : Evaluation of electric motor and gasoline engine hybrid car using solar cells. Solar Energy Materials and Solar Cells. Vol. 47, Issues 1-4, p.259 - 263 (1997)
- (4) Ewan Dunlop, Halton, D. : 20 years of life and more: where is the end of life of a PV module? Photovoltaic Specialists Conference. Conference Record of the Thirty-first IEEE. pp.1593 - 1596 (2005)
- (5) Ewan Dunlop, and Halton, D. : The performance of crystalline silicon photovoltaic solar modules after 22 years of continuous outdoor exposure. Progress in Photovoltaics. Vol.14, Issue 1, pp.53 - 64 (2006)
- (6) Pramod Rajput, Tiwari, G.N., et al. : Visual and electrical degradation of 22 years field age monocrystalline silicon PV module in composite climate of India. Photovoltaic Specialist Conference (PVSC). 2015 IEEE 42<sup>nd</sup>, 1 - 3 (2015)
- (7) Taira Kajisa, Miyauchi, H., et al. : Novel lighter weight crystalline silicon photovoltaic module using acrylic-film as a cover sheet. Japanese Journal of Applied Physics. Vol. 53, 092302(2014)
- (8) IEC 61215 : 2005, Crystalline silicon terrestrial photovoltaic (PV) modules - Design qualification and type approval. International Electrotechnical Commission (2005)
- (9) Matthew Hopcroft, Nix, W., and Kenny, T. : What is the Young's Modulus of Silicon? Journal of Microelectromechanical Systems. Vol. 19, No. 2, pp.229 - 238 (2010)
- (10) Torbjörn Lundstedt, Seifert, E., Abramo, L., et al. : Experimental design and optimization. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems. 42, 3 - 40 (1998)
- (11) Michael Kempe, Jorgensen, G., Terwillinger, K., et al. : Acetic acid production and glass transition concerns with ethylene-vinyl acetate used in photovoltaic devices. Solar Energy Materials & Solar Cells. Vol. 91, Issues 4, p.315 - 329 (2007)

本論文は、下記発表済み論文の転載である。  
工藤由貴, 木村, 岩本, 大場, 坂部ほか : 車載用軽量型太陽電池モジュール. 自動車技術会. 2016年春季大会学術講演会講演予稿集. p.290 - 295 (2016)

### ■著者



工藤 由貴



木村 和峰



岩本 昭一



大場 浩之



佐藤 彰倫

# 太陽電池搭載車 (Solar Hybrid Vehicle) の CO<sub>2</sub> 排出削減可能性評価

Analysis of Solar Hybrid Vehicle Potential Considering CO<sub>2</sub> Emissions

木村 和峰 \*1

Kazutaka Kimura

工藤 由貴 \*1

Yuki Kudo

佐藤 彰倫 \*1

Akinori Sato

## 要旨

太陽電池を自動車に搭載した場合のメリットを定量化することは、(1) 自動車移動するため常に日射環境のよい場所にあるとは限らないこと、(2) 地域により気象環境が異なることから困難であった。本検討では、(1) インターネット・モニター調査による5,000台の車両状態と(2) その車両の所在地周辺の気象データとを組み合わせた解析を行うことで、日本国内での太陽電池搭載車両 (Solar Hybrid Vehicle) を導入した場合のメリット定量化を試みた。本検討の結果、1,000W 定格出力の太陽電池搭載が可能となった場合、乗用車全体の30%の燃料 (CO<sub>2</sub> 削減) 削減効果があることが明らかとなった。

## Abstract

There are two difficulties in measuring the benefits of installing solar modules on vehicles: (1) vehicles travel under various conditions of sunlight exposure that may not be suitable for solar energy generation and (2) weather conditions and sunlight exposure conditions differ in each region. This article quantifies the merits of adopting solar hybrid vehicles in Japan through an analysis combining (1) internet polling of the daily usage conditions of 5,000 vehicles and (2) meteorological data of the locations in which those vehicles were used. The results of this analysis concluded that solar hybrid vehicles have the potential to reduce fuel consumption (i.e., CO<sub>2</sub> emissions) by 30% if all vehicles were installed with solar modules with a rated output of 1,000 W.

キーワード 太陽電池, 環境対応車, 二酸化炭素, Solar Hybrid Vehicle

## 1 はじめに

伸び続ける輸送分野でのエネルギー消費増加<sup>(1)</sup>の緩和および地球温暖化対策の観点から、自動車会社では、環境対応の様々な取り組みを進めている。近年では、ハイブリット車 (Hybrid Electric Vehicle: HV と略す)、燃料電池車 (Fuel Cell Vehicle: FCV と略す)、電気自動車 (Electric Vehicle: EV と略す)、プラグインハイブリット車 (Plug-in Hybrid Vehicle: PHV と略す) をはじめ多くの環境対応車の開発が各社で加速されている状況である。一方、輸送分野以外に目を向けると、例えば住宅、電力分野では、CO<sub>2</sub> 排出削減の取り組みの有望な対策として太陽光をはじめとする再生可能エネルギー利用が進められている状況である。しかし、輸送分野における太陽エネルギー応用 (太陽

電池車載による走行) は、いくつかの研究<sup>(2)-(4)</sup>が報告されているものの量産車のレベルでは、トヨタのPHVにおいて利用されている他は、ほとんど行われていない状況である。

太陽電池の車載が積極的に行われていない理由の一つとして、不安定電源である太陽電池を車に搭載することによるユーザーメリットおよび社会的メリットが定量化できていないことが考えられる。

特に、地域により日射環境が異なること、および、自動車移動するため常に日射環境のよい場所にあるとは限らないことが、太陽電池車載時の実発電量を定量的に見積もることを困難としており、結果として上記メリットがこれまで定量化されてこなかったものと考えられる。

そこで、本研究では、(1) インターネット・モニター調査による5,000台の車両状態 (所在地、時間毎での影 - 日なた環境および日々走行傾向デー

\*1 未来創生センター 未来研究部

タ) と (2) 前記車両の所在地地域の気象データとを組み合わせた解析を行うことで、日本国内に太陽電池搭載車両 (Solar Hybrid Vehicle) を導入した場合のメリットの定量化、および太陽光の車載利用の観点からの車両基本仕様について考察することを目的とする。

Solar Hybrid Vehicle について、車両で実質利用可能な日射エネルギー算出モデル、バッテリー容量を考慮した日々エネルギー収支計算モデル、および上記モデルを用いて求めたすべての乗用車が太陽電池搭載車に置き換わった場合の乗用車全体でのエネルギー削減率 (つまり well to wheel CO<sub>2</sub> 排出削減率)、太陽電池搭載による乗用車全体でのエネルギー削減率を指標とした車両スペック検討結果について報告する。

## 2 解析方法

### 2.1 太陽電池搭載車の前提

図 1 に示すように PHV の外部充電部を太陽光発電システムに置換した車両を Solar Hybrid Vehicle と定義し解析対象とした。太陽光発電システムの各種損失は図 2 に示すよう仮定した。充電時の電池 ECU 消費電力は、今後の技術開発の進展により大きく異なる可能性はあるが、将来の姿として 10W (実働 12h) とし 1 日 120Wh 消費されるものとした。

可変パラメータとしては、太陽電池搭載量 (定格出力)、バッテリー容量を設定した。太陽電池搭載量は、1,000W、500W、250W の定格出力の 3 種類とした。乗用車では、ルーフ全面に高効率の単結晶シリコン太陽電池を搭載できれば 250W、ルーフおよびボンネットでは 500W 程度の搭載は期待できる。また将来、フレキシブル太陽電池や透過型太陽電池の分野で技術進展があり、側面への太陽電池搭載が可能となった場合の技術進展ケースとして水平面換算で 1,000W 搭載を設定した。

PHV: Plug-in Hybrid Vehicle SHV: Solar Hybrid Vehicle

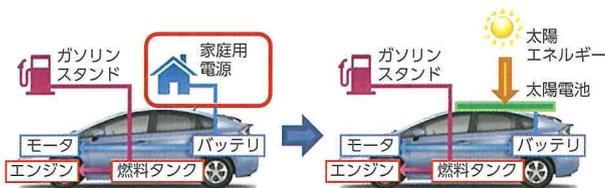


図 1 Solar Hybrid Vehicle の概念図

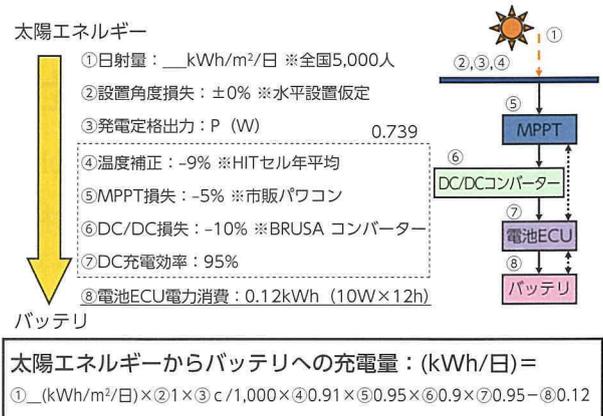


図 2 車載太陽電池充電システムフロー

### 2.2 インターネット・モニター調査

スクリーニングにより日本全国地域別の乗用車保有分布に沿った、新車・中古車主運転者を抽出し、調査対象とした。

有効回収数: 5,000 サンプル

・質問内容を以下に示す。

Q1. 平日 1 日あたりの走行距離

(~ 3km, ~ 5km, ~ 10km, ~ 15km, ~ 20km, ~ 30km, ~ 40km, ~ 50km, ~ 75km, ~ 100km, それ以上⇒\_\_ km 数値回答)

Q2. 休日 1 日あたりの走行距離

(~ 3km, ~ 5km, ~ 10km, ~ 15km, ~ 20km, ~ 30km, ~ 40km, ~ 50km, ~ 75km, ~ 100km, それ以上⇒\_\_ km 数値回答)

Q3. 過去 1 年間の遠出した回数

※ 遠出の定義 = 片道 100km 以上

(0 回, 1 回, 2 回, 3 回, 4 回, 5-10 回, 月に 1 回, 月に 2 回, 月に 3-4 回, 週 1 回, それ以上)

Q4. 過去 1 年間の遠出 1 回あたりの片道走行距離

(~ 150km, ~ 200km, ~ 250km, ~ 300km, ~ 350km, ~ 400km, ~ 450km, ~ 500km, ~ 600km, ~ 800km, ~ 1,000km, それ以上)

Q5. 気象観測拠点 (48 拠点) のうち最も近い都市  
札幌, 稚内, 旭川, 網走, 帯広, 室蘭, 函館, 青森, 秋田, 盛岡, 仙台, 山形, 福島, 館野, 宇都宮, 前橋, 東京, 父島, 銚子, 長野, 甲府, 静岡, 名古屋, 新潟, 富山, 福井, 彦根, 舞鶴, 大阪, 奈良, 広島, 松江, 高松, 松山, 高知, 下関, 福岡, 大分, 長崎, 佐賀, 熊本, 宮崎, 鹿児島, 那覇, 南大東島, 宮古島, 石垣島, 名瀬

Q6. 平日の所有車両の日射環境 (2 月に実施)

具体的質問を以下に示す。

「あなたが主に運転している車」の「平日 (直近の晴れの日)」の保管場所と、その場所で車の屋根に

直接日光が当たっているかどうか (日なたか日かげか) をお答えください。

\* 車での移動時間中は、日なたでカウントしてください (30 分以上の場合)。

\* 屋根の半分以上に日光が当たる場合は「日なた」を選択してください。カーポート (茶色のガラス屋根等) の透過光が当たる場合は「日かげ」を選択してください。

・ 場所 - 日なた - 日かげ

- 選択肢⇒ 自宅 (日なた, 日かげ)
- 会社 (日なた, 日かげ)
- その他 (日なた, 日かげ)

・ 時間帯⇒ 6 時から 19 時まで 1 時間毎で回答取得  
Q7. 休日の所有車両の日当たり環境 (平日と同様)

### 2.3 気象観測データ

下記 48 気象観測拠点 (図 3) の 2013 年 10 分毎 水平全天日射量 (気象庁) を用いた。

札幌, 稚内, 旭川, 網走, 帯広, 室蘭, 函館, 青森, 秋田, 盛岡, 仙台, 山形, 福島, 館野, 宇都宮, 前橋, 東京, 父島, 銚子, 長野, 甲府, 静岡, 名古屋, 新潟, 富山, 福井, 彦根, 舞鶴, 大阪, 奈良, 広島, 松江, 高松, 松山, 高知, 下関, 福岡, 大分, 長崎, 佐賀, 熊本, 鹿児島, 那覇, 南大東島, 宮古島, 石垣島, 名瀬

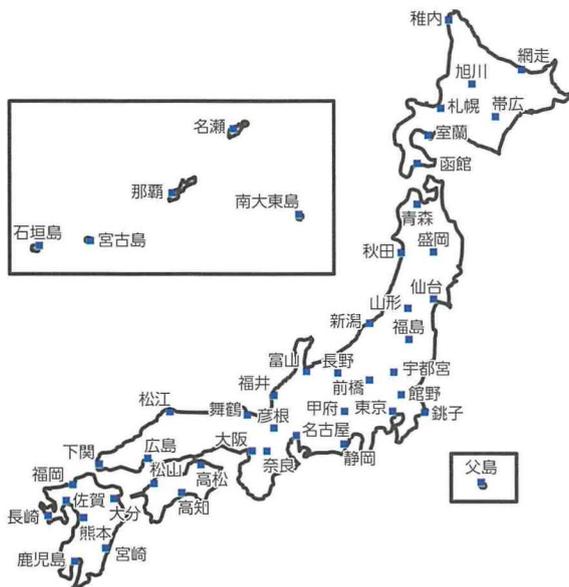


図 3 気象観測拠点の位置

## 3 データ解析方法

記号一覧を下記に示す。

- $E_{s_n}$  : n 日目の太陽光発電で得られる利用可能エネルギー (ソーラ電力量) (kWh)
- $E_{sc_n}$  : n 日目の 1m<sup>2</sup> 当たりの受光可能エネルギー (kWh/m<sup>2</sup>)
- $E_{d_n}$  : n 日目の走行に必要な電力量 (kWh)
- $E_{sd_n}$  : n 日目の走行で用いられるソーラ電力量 (kWh)
- $D_{d_n}$  : n 日目の走行距離 (km)
- $D_{f_n}$  : n 日目の化石燃料で走行した距離 (化石燃料走行距離) (km)
- $D_{s_n}$  : n 日目の太陽エネルギーで走行した距離 (ソーラ走行距離) (km)
- $C_b$  : バッテリー容量 (kWh)
- $C_{rb_n}$  : n 日目のバッテリー残量 (kWh)
- $L$  : 電力消費率, 1kWh 当たりで走行できる距離 (km)
- $P$  : 搭載太陽電池の定格出力 (W@1,000W/m<sup>2</sup>, AM1.5)

### 3.1 利用可能な太陽光エネルギー算出

5,000 人のインターネット・モニター調査データについて、個別に下記ステップにより 365 日分の車両の置かれる影環境を考慮した受光量を求めた。基本的な考え方を図 4 に示す。

- Step1 : m/5,000 モニターの近隣気象拠点 No 確認
- Step2 : 気象拠点の 10 分毎 365 日分全天日射量データ取得
- Step3 : 2013 年カレンダーに基づき平日, 休日判定 (土日のみ, 祭日含まず) を行い, m/5,000 モニターの平日, 休日それぞれの時間毎の影 - 日なたデータを適用し, 365 日分の影 - 日なたパターンを作成取得
- Step4 : Step2 で取得した全天日射データより Step3 の影時間帯の日射データを差し引く

Aさん（1人）/5,000人の8月1日の解析例：  
 Aさん居住地近隣気象拠点：静岡  
 ⇒8月1日@2013年静岡の気象データ抽出（10分毎データ）

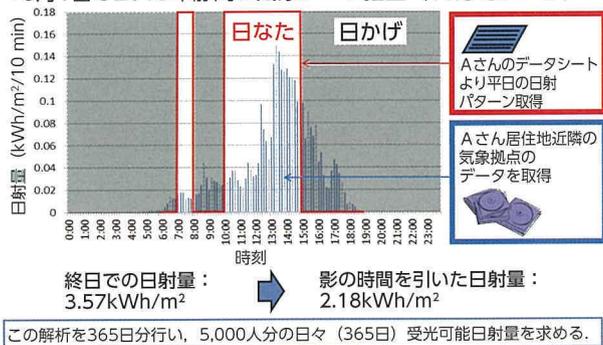


図4 影 - 日なた環境を考慮した日々受光エネルギーの計算概要

前記プロセスにより 365 日分の日々の影環境考慮の受光量： $E_{sc(n-365)}$  kWh/m<sup>2</sup>/day を得る。

### 3.2 合成走行パターンの作製

5,000 人のインターネット・モニター調査データを用いて、365 日分の仮定の合成走行パターンを下記ステップに基づき作成した。

- Step1：2013 年カレンダーに基づいた平日、休日判定（土日のみ、祭日含まず）
- Step2：m/5,000 モニター回答者の 平日 - 休日の走行距離を割り付ける
- Step3：遠出の頻度を年間で均等となるように 365 日の中に割り付ける日を求める
- Step4：遠出を割り付けた日およびその翌日に遠出片道走行距離を割り付ける ※

※ 遠出行動は 1 泊して翌日帰宅すると仮定。

365 日分の合成走行パターンにおける日々走行距離： $D_{d(n-365)}$  km/day を得る。

### 3.3 日々の太陽電池発電量および走行消費エネルギーの算出

日々太陽光発電で得られる利用可能エネルギー ( $E_{s_n}$ ) および日々の走行で消費されるエネルギー ( $E_{d_n}$ ) を以下の式により求めた。

$$E_{s_n} = E_{sc_n} (P/1,000) 0.739 - 0.12 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$E_{d_n} = D_{d_n} / L \quad \dots\dots\dots (2)$$

システム損失は以下の仮定（図 2）を用いた。

- ・ 太陽光発電からバッテリー充電までの損失：0.739

- ・ バッテリー ECU 消費電力：0.12kWh/day  
可変パラメータは以下とした。
- ・ バッテリー容量：Cb (kWh)
- ・ 電力消費率：L (km/kWh)
- ・ 搭載太陽電池の定格出力 (@ 1,000W/m<sup>2</sup>AM1.5)：  
P(W) (250, 500, 1,000 を想定)

### 3.4 ソーラ走行距離および化石燃料走行距離算出

図 5 に示す考え方に従いソーラ走行距離： $D_{s(n-365)}$  とソーラ走行できなかった走行距離すなわち化石燃料走行距離： $D_{f(n-365)}$  を求めた。日々の太陽発電由来電力は、その日の夜に消費し、残量は翌日持ち越す。またソーラ電力量が走行に必要な電力を下回る場合は、エンジン走行すなわち化石燃料による走行を行うという仮定をおいた。このプロセスのブロック図を図 6 に示す。この日々のソーラ走行距離を 365 日分積算したものを年間ソーラ走行距離とした。年間走行距離に対する年間ソーラ走行距離の割合は、全ユーザーが Solar Hybrid Vehicle を選択した場合の燃料削減率すなわち well to wheel CO<sub>2</sub> 排出削減率となる。この解析を 5,000 人分に対して実施した。なお日々走行距離を朝 - 夜に分割して解析したほうが規則的な通勤を考えた場合、適切であるとの考え方もあるが、バッテリー消費のタイミングが半日ずれだけであり、365 日の解析を行う中で時間的なずれが平準化されると考え、計算時間の少ないシンプルな本解析モデルを用いることとした。予備的に実施した朝 - 夕分割消費の解析モデルと本解析モデルとの比較で確認された差異は 2%であった。

また解析初日（1月1日）の初期のバッテリー状態は空とする。

以下の式により日々のソーラ走行距離 ( $D_{s_n}$ ) および化石燃料走行距離 ( $D_{f_n}$ ) を求めた。

$$D_{s_n} = E_{sd_n} / L \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$D_{f_n} = D_{d_n} - D_{s_n} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$E_{sd_n}$  は、n 日目の走行で用いられるソーラ電力量であるが、図 6 により求められる。 $D_{d_n}$  は、合成走行パターンにより求められる n 日目の 1 日走行距離を示す。 $D_{s_n}$  を 365 日分求め、積算したものを年間ソーラ走行距離、 $D_{f_n}$  を 365 日分求め、積算したものを年間化石燃料走行距離とする。この解析を 5,000 台分に適用する。

1人/5,000人の解析イメージ：

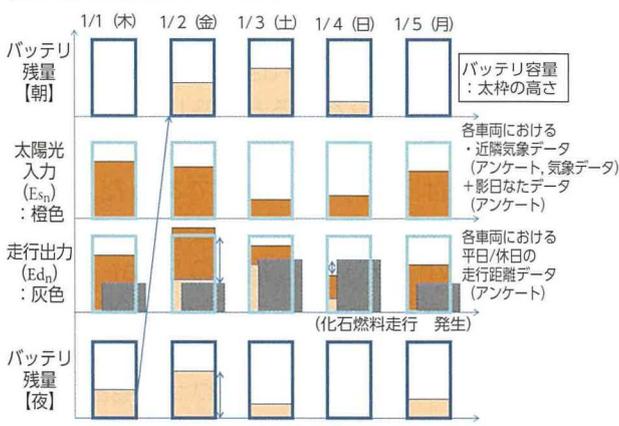


図5 バッテリー容量考慮モデル

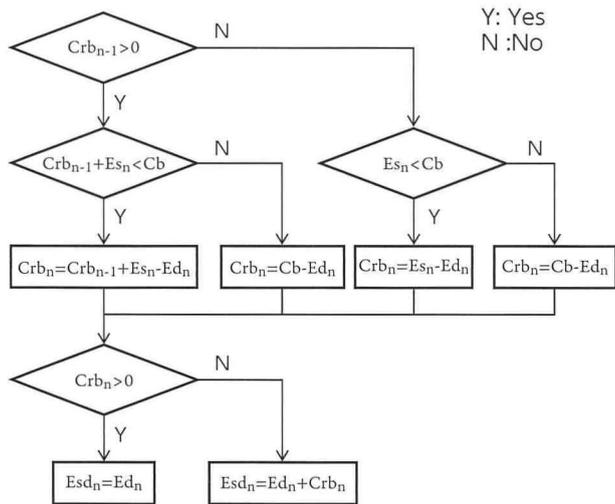


図6 バッテリー容量考慮モデルのブロックダイアグラム

## 4 結果

### 4.1 影の影響考慮の受光エネルギー

図7にインターネット・モニター調査における平日、休日の時間毎での日かげ-日なたの割合を示す。2.1のステップで求めた5,000人分の影考慮なしの日あたり平均受光エネルギーは3.68kWh/m<sup>2</sup>/dayであるのに対し、影の影響を考慮した平均受光エネルギーは2.41kWh/m<sup>2</sup>/dayとなり、38%が影の影響で車両では活用できないという解析結果が得られた。

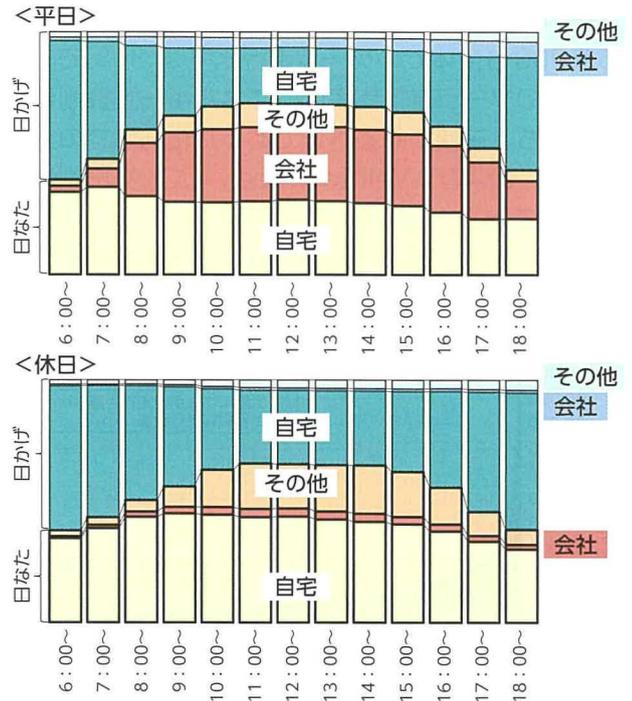


図7 インターネット・モニター調査結果 (5,000人) 平日/休日の1時間毎の駐車場所と影/日なた比率

### 4.2 合成走行パターン

図8に今回取得した5,000人の合成走行パターンから求めた年間走行距離について国土交通省センサス<sup>(5)</sup>から抽出した年間走行距離頻度分布との比較を示す。今回のインターネット・モニター調査結果より求めた頻度分布と傾向の一致が確認された。

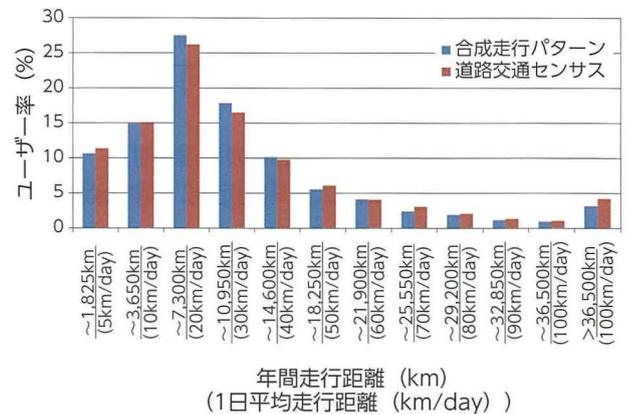


図8 5,000人の合成走行パターンから求めた年間走行距離と道路交通センサスとの比較

### 4.3 ソーラ走行距離と化石燃料走行距離

図9に太陽電池定格出力：1,000W、電力消費率：10km/kWh、バッテリー実使用可能容量：4kWhとした場合の5,000台分の車両の年間走行距離とそこに占めるソーラ走行距離を年間走行距離

が多い順に並べたグラフを示す。太陽電池搭載による5,000台全体でのソーラ走行比率は、30%であった。このソーラ走行比率は、エネルギー消費削減率すなわち本来使われるべきであった化石燃料の消費削減率、および Well to wheel CO<sub>2</sub> 排出削減率と同義である。図 10 に 5,000 台全体でのソーラ走行比率を指標とした、各車両パラメータの感度調査結果を示す。

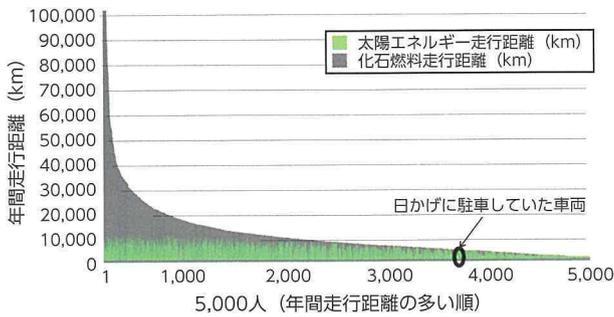


図 9 年間での太陽エネルギー走行距離と化石燃料走行距離：5,000 人を年間走行距離の多い順に並び替えを実施

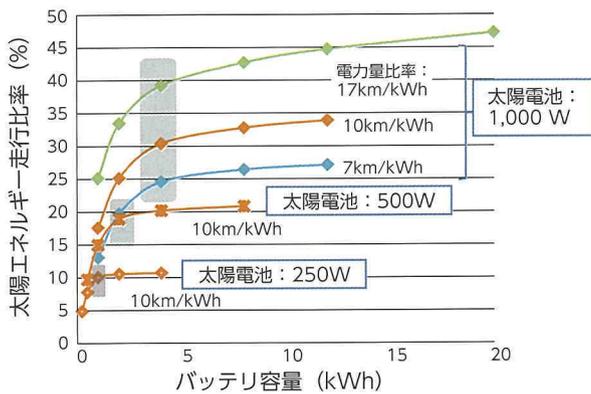


図 10 太陽エネルギー走行比率の感度解析 (バッテリー容量, 太陽電池定格, 電力消費率)

## 5 考察

本検討により、車両の影 - 日なたの環境とその車の移動パターンを考慮した実環境に近い条件での Solar Hybrid Vehicle の定量評価が可能となった。さらに車の移動パターンを 5,000 人分取得したことで、ソーラ搭載車両で必要とされるバッテリー必要容量についても評価することが可能となった。このインターネット・モニター調査で求めた合成走行パターンは、道路交通センサスの年間走行距離頻度分布とも合致しており、一定レベルの信頼性は確保されていると考えられる。

図 9 では、年間走行距離が少ないユーザー（本調査でのモニター）のなかでもソーラ走行できないユーザーが見られるが、これはほとんどの時間において車両が日かげ環境であると回答したユーザーであるためと考えられる。実際、常時日かげであると回答した人は 790 人 (16%) であった。図 10 より、すべての車両が 250W 太陽電池 + 実使用可能容量で 1kWh のバッテリー搭載の Solar Hybrid Vehicle に置き換わった場合 10%、500W 太陽電池 + 実使用可能容量で 2kWh のバッテリー搭載の Solar Hybrid Vehicle に置き換わった場合 19%、1,000W 太陽電池 + 実使用可能容量で 4kWh のバッテリー搭載の Solar Hybrid Vehicle に置き換わった場合 30% のエネルギー削減が可能となるとの試算結果が得られた。

日本の乗用車の運輸部門に占めるエネルギー消費の割合は 55%<sup>(6)</sup> であることから、乗用車において 30% エネルギー消費が削減できるということは、日本の運輸部門全消費エネルギーの 16.5% に相当する。なお、ソーラ搭載車両の必要バッテリー容量については、5,000 台におけるソーラ走行率という指標で考えた場合、一定のバッテリー容量を超えるとソーラ走行比率の増加が緩やかになる点が存在するが、それ以上バッテリー搭載量を増やしてもメリットが出にくくなることから最適バッテリー容量と呼ぶことにした。この最適バッテリー容量は、搭載する太陽電池出力に対する感度は高く、電力消費率に対する感度は低い。このことは、入力エネルギーのバラツキの影響を大きく受けていることを示しており、最適バッテリー容量は気象条件における日々の日射量変動により決まってくるものと推定される。

## 6 まとめ

Solar Hybrid Vehicle について、車両の使用環境を考慮した場合のエネルギー削減（すなわち Well to wheel CO<sub>2</sub> 排出削減）ポテンシャル解析を行い、乗用車全体が Solar Hybrid Vehicle に置き換わった場合、太陽電池 1,000W 搭載時で 30%、500W 搭載時で 19%、250W 搭載時で 10% のエネルギー消費削減が期待できることが明らかになった。さらに 250W 定格出力の太陽電池搭載時であれば 1kWh 程度、500W 定格出力の太陽電池搭載時であれば 2kWh 程度、1,000W 定格出力の太陽電池搭載時であれば 4kWh 程度のバッテリー実使用容量で十分なメリットが得られること

が分かった。このことは、Solar Hybrid Vehicle が、ハイブリット車に対しわずかなバッテリーを追加搭載するのみで太陽電池搭載のメリットを享受できるということを意味している。製造コスト、製造時 CO<sub>2</sub> 排出の観点からも Solar Hybrid Vehicle が新たな環境対応車両としてポテンシャルが高いものと考えられる。

ただし、走行距離の少ないユーザー、例えば図9では、3,000km以下のユーザーが1,000人(約20%)いるが、あまりに走行距離の短いユーザーが、Solar Hybrid Vehicle を選択した場合、そのユーザーのソーラ走行率は高まる傾向にはなるものの太陽電池搭載(および太陽電池用追加バッテリー)の初期コストおよび製造時 CO<sub>2</sub> 排出まで考慮すると逆にメリットがなくなってしまうことも考えられる。実際のところ様々な環境対応車(HV, PHV, EV)が存在することから、日射条件と走行パターンにより最適な車種が異なってくることが考えられる。この観点での解析については著者らの既往研究<sup>(7)</sup>にて報告している。

■参考文献

- (1) U.S. Energy Information Administration (EIA) : Annual Energy Outlook 2015. [http://www.eia.gov/forecasts/aeo/pdf/0383\(2015\).pdf](http://www.eia.gov/forecasts/aeo/pdf/0383(2015).pdf), Apr. 2015.
- (2) Arsie, I., Rizzo, G., and Sorrentino, M. : Analysis of a rule-based control strategy for on-board energy management of series hybrid vehicles. Control Engineering Practice Vol.19, pp.1433 - 1441 (2011)
- (3) Arsie, I., Rizzo, G., and Sorrentino, M. : Optimal Design and Dynamic Simulation of a Hybrid Solar Vehicle. SAE Technical Paper 2006-01-2997 (2006) doi:<http://dx.doi.org/10.4271/2006-01-2997>.
- (4) Spina, M.A., de la Vega, R.J., Rossi, S.R., Santillán, G., et al : Some Issues on the Design of a Solar Vehicle Based on Hybrid Energy System. International Journal of Energy Engineering. 2(1), pp.15 - 21, 2012 doi:<http://dx.doi.org/10.5923/j.ijee.20120201.03>

- (5) 国土交通省：道路交通センサス
- (6) 経済産業省資源エネルギー庁：平成25年度エネルギーに関する年次報告(エネルギー白書2014)。141
- (7) Takuya Hara, Takahiro Shiga, Kazutaka Kimura, Akinori Sato : Techno-Economic Analysis of Solar Hybrid Vehicles Part 2: Comparative Analysis of Economic, Environmental and Usability Benefits. SAE Technical Paper 2016-01-1286 (2016)

本論文は、下記発表済み論文の転載である。  
木村和峰, 工藤, 佐藤 : Solar Hybrid Vehicle の総合評価(第1報) - 太陽電池車載による CO<sub>2</sub> 排出削減可能性評価 -。自動車技術会, 2016年秋季大会学術講演会講演予稿集, P.662 - 667

■著者



木村 和峰



工藤 由貴



佐藤 彰倫

# プレミアムクラスに求められる動力、 感性に訴える性能と燃費を両立する マルチステージハイブリッドシステムの開発

Development of Multi Stage Hybrid System that Balances Emotive and Powerful Performance  
Appropriate for a Premium Class Vehicle with Excellent Fuel Economy

大島 康嗣 <sup>*1</sup> Koji Oshima	洲濱 将圭 <sup>*1</sup> Masayoshi Suhama	高橋 政克 <sup>*1</sup> Masakatsu Takahashi	加藤 春哉 <sup>*2</sup> Shunya Kato
	井上 重行 <sup>*3</sup> Shigeyuki Inoue	宮本 知彦 <sup>*4</sup> Tomohiko Miyamoto	奥田 弘一 <sup>*5</sup> Koichi Okuda

## 要旨

新型 LC500h に搭載された新開発マルチステージハイブリッドシステムについて紹介する。本システムはトヨタ・ハイブリッド・システム (THS II) の性能を飛躍的に高め、レクサスプレミアムクーペに相応しい走りや環境性能を高次元で両立すべく新規開発したシステムである。THS II に 4 レンジ切替機構を組合せることにより、エンジン出力の活用範囲を大きく広げることにより発進時から大きな駆動力を得ることが可能となり走りの魅力を大幅に向上、またシステム効率の高い領域を使用できる頻度が向上し高い燃費性能も合わせて実現した。

ここではマルチステージハイブリッドシステムの性能とそれを実現するための新規技術について紹介する。

## Abstract

This article describes the newly developed Multi Stage Hybrid System installed in the new Lexus LC500h coupe. This new system dramatically enhances the performance of the Toyota Hybrid System II (THS II) and achieves an excellent balance between fuel efficiency and powerful dynamic performance suitable for a flagship Lexus coupe. Impressive standing start acceleration was achieved by combining a multi-stage shift device with the THS II to greatly expand the utilization range of engine power, resulting in substantially enhanced fun-to-drive performance. At the same time, the developed system achieves excellent fuel economy by increasing the usage frequency of high-efficiency engine operating regions. This article outlines the performance of the Multi Stage Hybrid System and the new technologies that were developed to realize this performance.

キーワード ハイブリッドシステム, モーター, トランスミッション, バッテリー

## 1 はじめに

これまでハイブリッド車という環境や燃費を重視した車というのが全世界の一般的なイメージだと思います。しかし、我々が他社に先んじて世に出したハイブリッド車も初代プリウスから数えると既に 19 年以上の月日がたち、競合他社も様々なハイブリッド車を販売してきており、オリジナリティーが薄れてきている。

そこで、レクサスが Future Chapter へ移行す

るこの LC に合わせて、ハイブリッドシステムも生まれ変わることを目指し、走って楽しいハイブリッド車、これまでのコンベンショナルな車両では味わえないような走りを実現すべく「マルチステージハイブリッドシステム」を開発しました。

## 2 開発の狙い

### 2.1 動力性能と環境性能の高次元での両立

このクラスでは V8 エンジンもしくは V6 過給エンジン搭載が一般的である。レクサスにおいても LS600h では V8-5.0ℓ エンジンを採用している。しかし、このエンジンではこれから益々厳しくなる

\*1 パワートレーンカンパニー パワートレーン製品企画部

\*2 パワートレーンカンパニー HV システム制御開発部

\*3 パワートレーンカンパニー HV 電池ユニット開発部

\*4 パワートレーンカンパニー HV ユニット開発部

\*5 パワートレーンカンパニー HV ドライブトレイン開発部

環境性能への要求に応えることは困難と考えエンジンの低排気量化が必要であると考えた。

他社においてはエンジンを低排気量化する際には過給器を付加して出力を維持するという手法が一般的である。だが、この手法では排気量を下げたことによる燃費向上に留まり、低回転域での駆動力、加速応答性不足といった不利な点は拭えない。

一方、ハイブリッドシステムはこれまでも電池出力を活用し排気量以上の動力性能を訴求してきた。特にモーター出力による加速応答性の良さ、それを活かした中間加速の速さは定評のある所である。ただし、発進から低速領域ではモーター回転数制約によりエンジンを高回転まで使うことが不可能という特徴があった。今回マルチステージハイブリッドシステムではこの部分を改善することによりV8 → V6 にエンジンを低排気量化しているにも関わらず動力性能を向上することを可能とした。

## 2.2 大排気量ハイブリッドシステムの燃費改善

従来のレクサスハイブリッドドライブでは特に高速走行時の燃費性能が悪いという課題があった。マルチステージハイブリッドシステムではシステム使用領域を切り替えることにより高速走行時にもハイブリッドシステム効率の高いところで動作させることが出来るようになった。前述のエンジンダウンサイジング効果と相まって大排気量ハイブリッドシステム車の燃費性能を大きく向上させた。

## 2.3 走りの魅力の向上

従来レクサスハイブリッドドライブの走りは滑らかであることが重視されてきた。エンジンサウンドにおいては静粛性を重視し可能な限り低い回転数を維持するように制御を実施してきた。故に加速しようとアクセルを踏むと必要な出力を得るためにエンジン回転数を上昇させる必要がありラバーバンドフィールと呼ばれるような加速フィールとエンジンの動きが運転者の感覚に合わない面があった。

今回のマルチステージハイブリッドシステムではワイドレンジ化されたハイブリッドシステムを活用した多段AT模擬制御を採用し、車速に対してエンジン回転がリニアに上昇するようになりダイレクト感溢れる走りを実現した。また、10段のギヤ比を設定することによりリズムカルなエンジンサウンドの変化を伴う加速フィーリングを実現した。

## 3 マルチステージハイブリッドシステム

### 3.1 システム構成

図1にシステム構成を示す。

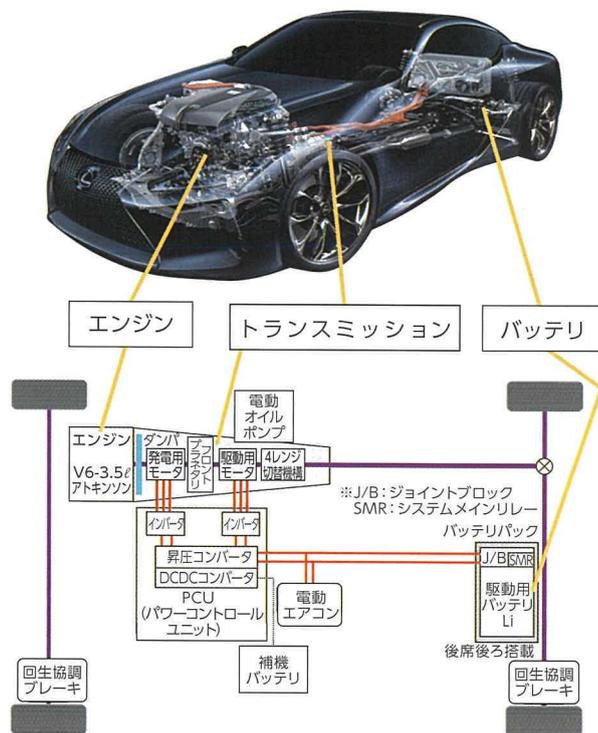


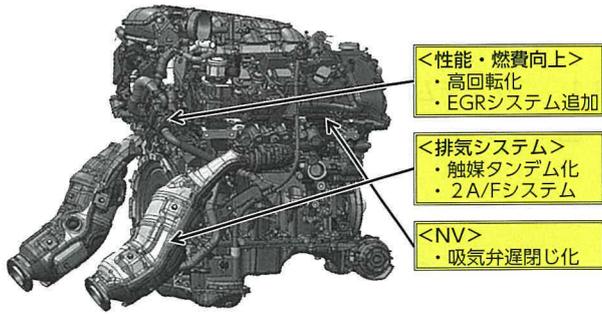
図1 システム構成

ハイブリッドシステムはシステム出力軸に4レンジ切替機構、もしくは4レンジ切替部を付加したトランスミッションを採用した新規開発のマルチステージハイブリッドとなった。

### 3.2 エンジン

エンジンはこれまで用いてきたV8からダウンサイジングしV6とした。これは環境対応への一方策であるが、マルチステージハイブリッドはエンジン・モーターの使用領域を拡大し、広範囲で使用可能となった最高出力とローギア選択による駆動力の増幅でV8 + THS (トヨタ・ハイブリッド・システム) を越える駆動力を達成し、環境性能と動力性能の高次元での両立を実現した。

エンジンは、2015年に発売したRX450hに搭載された2GR-FXSエンジンを基本に縦置き搭載対応、排気ガス規制対応(国内J-SULEV、欧州EURO6、米国LEV3 SULEV30)を満足した。出力性能面ではエンジン最高回転数を6,000 → 6,600rpmまで上昇させ出力UPを可能にした。エンジンの主な開発内容を図2に示す。



項目	性能	燃費	排気	NV
高回転化	○	○		
EGRシステム追加		○		
触媒タンデム化			○	
デコンプレッション		○		○

図2 エンジンの主な開発アイテム

### 3.3 駆動用モータ

モータは、TNGA (Toyota New Global Architecture) 開発で培った技術の織込みで小型 / 高性能化、低コスト化を目指した。ステータでは高占積率 / 高電流密度による小型化を実現し、ロータでは省磁石設計による高トルク密度化を行った。新型モータの諸元を表1に示す。燃費性能への貢献として電磁鋼板薄板化・焼鈍による鉄損低減も更に進めた(図3)。

表1 新型モータ (駆動用) の諸元

	新型モータ	1KM
最高出力 (kW)	131.9	165
最大トルク (Nm)	300	300
最高回転数 (rpm)	10,300	14,400
トルク密度 (%)	124	

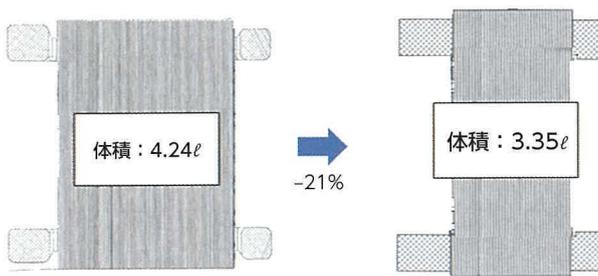


図3 駆動用モータ小型化

## 3.4 駆動用バッテリー

### 3.4.1 開発の狙い

駆動用バッテリーパックには低燃費、小型化、軽量化、操縦安定性確保、車両商品性の確保 (ラゲージ容量拡大) への貢献が求められた。電池セルにはリチウムイオン電池セルを採用し、更に内部機器レイアウトの最適化により、小型、軽量、かつ高性能なバッテリーパックを実現した。

今回新開発したリチウムイオンバッテリーパックにより、LS600hの電池パックと同じ後席後方ラゲージへ搭載しつつ95mm前方へ搭載を可能にし、質量は79kg → 45kg (-34kg) に軽量化、容量は73ℓ → 58ℓ (-15ℓ) に20%低減した(図4、5参照)。重量物の車両中心への集約による操縦安定性確保とラゲージ容量の拡大を実現した。また車格にふさわしい動力性能確保のためセル数をLS600hがリチウムイオンバッテリー換算で80セル相当に対して4セル積み増し高出力化を小型化と同時に実現した。バッテリー構成を表2に示す。

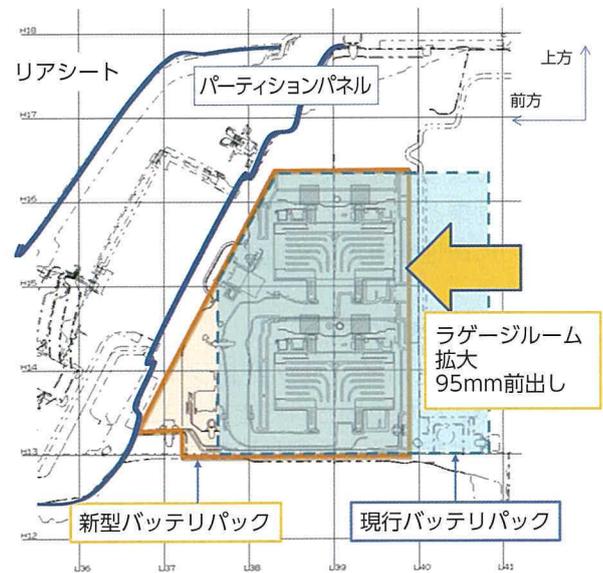


図4 駆動用バッテリー小型化

表2 バッテリー構成

電池	リチウムイオン
セル数 (セル)	84
定格電圧 (V)	310.8
電池容量 (Ah)	3.6
電池総電力量 (kWh)	1.1
パック重量 (kg)	43.5 (G9280 単位)

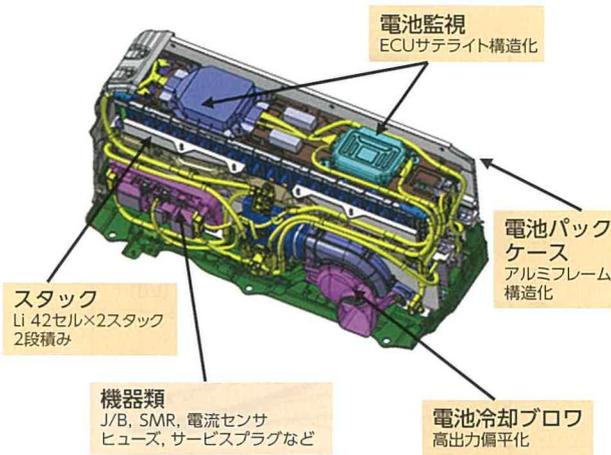


図5 駆動用バッテリー構成

### 3.4.2 バッテリーパックの小型化

電池セルを一定数束ねた物をスタックと呼ぶが今回42セルを束ねるスタックを新設し、そのスタックを縦に2段積みすることで車両前後方向のスペースを確保しトランクフロア面積拡大に貢献した。

小型（軽量）化と衝突保護を両立するためにアルミフレームを採用した。電池冷却ブロワも新設し高出力偏平化を目指した。従来のブロワより出力を向上させながら、125mm→60mmに薄型化を実現した。内部機器をパーティションパネルのトルソー角で生じる車両デッドスペースに最適配置した。さらにトヨタ初のECUのサテライト構造を採用し、パック内デッドスペースに電池ECU、サテライトバッテリーモジュールを最適配置した。

上記技術によりバッテリーパックの小型化を実現した。

### 3.4.3 バッテリーパックの冷却

冷却経路の最適化を図り、車室内の静粛性と電池冷却性能の両立を実現した。これにより電池温度上昇による入出力の制限を抑制し、低燃費と高い動力性能を確保した。

バッテリー冷却は、電池冷却ブロワにより車室内空気をリアシート下の吸気口ベゼルから、吸気ダクトを通り、ハイブリッド電池パック内へ送り込まれる。吸気ダクトによりハイブリッド電池パック内中央、下側へ導入された冷却風は電池セル間を下側から上側へ流れ、電池を冷却後、電池セルから排出し最終的にラゲージトリアム内に分散排気する構造とした（図6参照）。

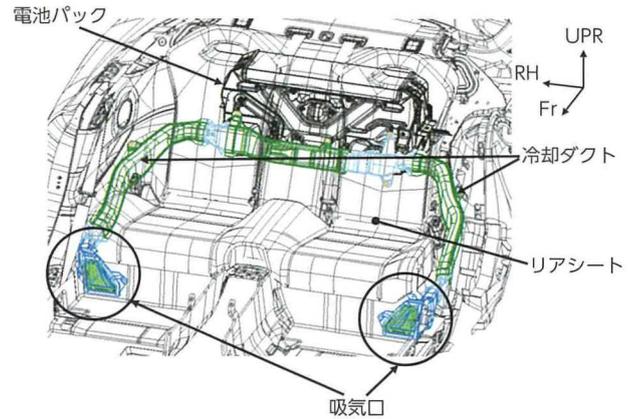


図6 車両搭載状態と冷却構造

### 3.5 新開発トランスミッションの構造

THSはエンジンからの動力を電氣的動力伝達系と機械的動力伝達系に分割する“動力分割機構”と“MG1（ジェネレータ）”及び“MG2（モータ）”により構成されている。マルチステージハイブリッドはTHS部の後に4速レンジ切替部を持つことによりシステム動作点の自由度を拡大し、エンジン出力供給の拡大、ローギヤ設定による駆動力変換の拡大により大幅な動力性能向上の実現、システム効率の高い領域の使用頻度拡大による燃費の向上を実現した（図7参照）。

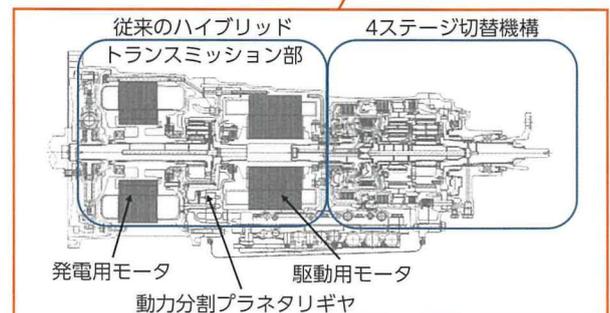


図7 新開発トランスミッション

これまでのTHSではリダクション機構によるトルクの増幅は駆動用モータのみ有効であったのに対して、マルチステージハイブリッドシステムではモータ・エンジンの合計出力を増幅することが可能となった(図8参照)。

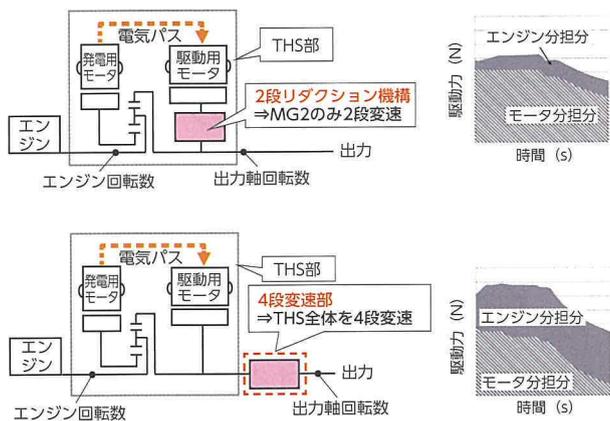


図8 従来THSからの変化点

また従来THSではエンジン最高出力を使用できる車速領域が発電機最高回転数による制限があり、およそ120km/hからでしかエンジン最高出力を使用することが出来なかった。4速レンジ切替機構を組み合わせることによりこの車速を低減することが出来、コンベンショナルな自動変速機を搭載した車両と同等の車速60km/h程度からエンジン最高出力を使用可能となった(図9参照)。

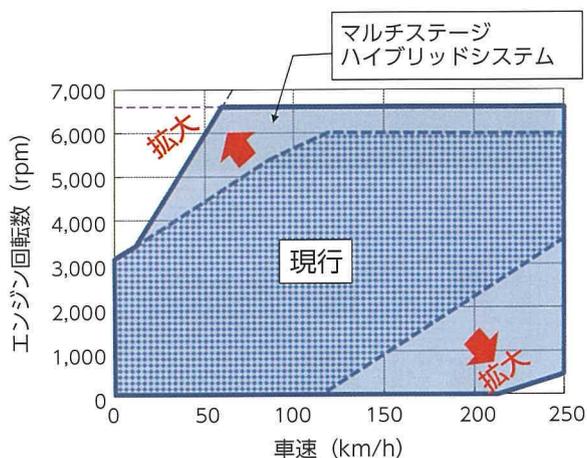


図9 エンジン動作領域の拡大

これらの効果により、マルチステージハイブリッドシステムでは発進時からの駆動力を大きく向上させることが可能となり図10のとおりV8-5.0ℓハイブリッドシステムの駆動力をV6-3.5ℓエンジンを用いながらも凌駕することが出来た。

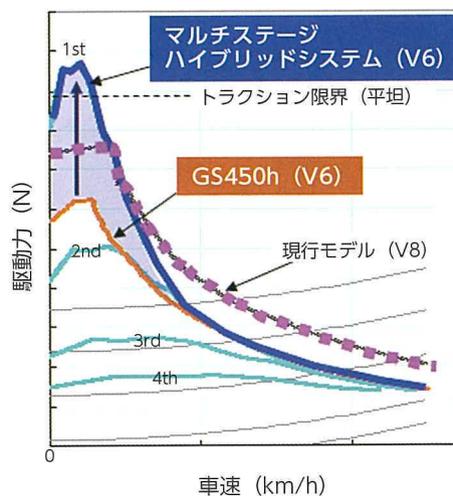


図10 発進時からの駆動力比較

### 3.6 燃費向上のポイント

従来THSと同じくエンジンの熱効率の高い所を選択して走行可能であることに加え、従来エンジントルクに余裕のある車両ではその余裕トルクを電気損として損失していたがマルチステージハイブリッドではエンジン、モータの使用領域が拡大したことにより熱効率の高い所と余裕トルクの効率的な併用活用が可能となり燃費向上に大きく寄与している。効率改善ポイントを図11に示す。これらとエンジンダウンサイジング効果と相まって燃費性能も大きく向上した。

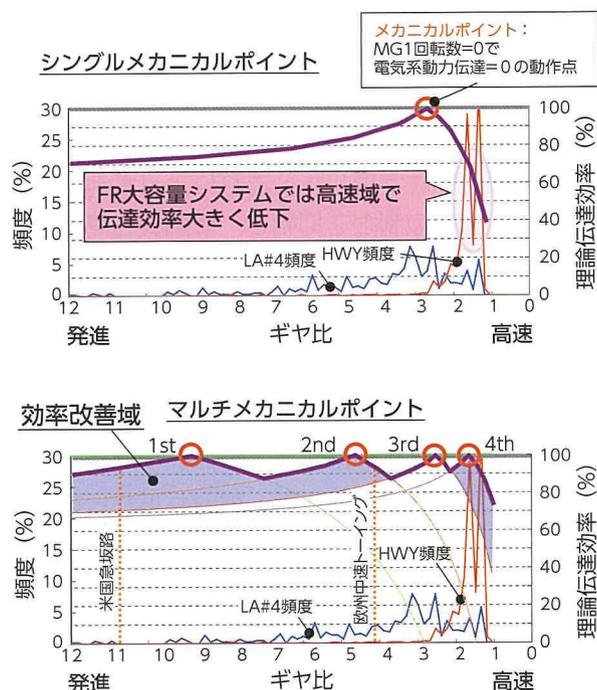


図11 マルチステージ化による効率改善

## 4 走りの魅力向上

### 4.1 開発の狙い

今回新開発した LC500h は次世代レクサス車の象徴となるフラグシップクーペ車である。この新クーペに相応しい走りが必要と考えた。ハイブリッド車のため燃費が良いのは当然のこととし、走りの性能ではこれまでのハイブリッド車と一線を画す新しい走りの魅力構築を目指して開発した。

### 4.2 多段模擬変速制御による効果

マルチステージハイブリッドシステム車の加速シーンにおいて、リニアで伸びのある加速感、リズムミカルな変速挙動を実現するため、モータを活用しエンジン回転数を変化させる多段模擬変速制御を採用した。変速イメージを図 12 に示す。

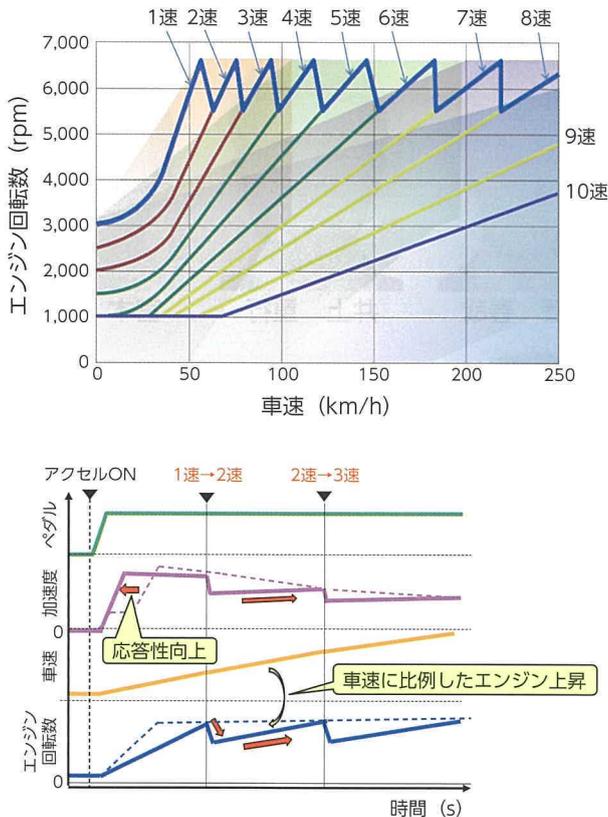


図 12 多段模擬変速イメージ

前述のエンジン使用可能領域の拡大により、通常 A/T 並みの 1 速ギヤ相当の車速に対するエンジン回転数上昇が実現可能となった。この拡大されたエンジン使用領域を活用し、A/T と同様なギヤリングを設定し合計 10 段の変速挙動とした。実変速段と模擬変速段の組合せは、世界のワインディング

路の走り込みにて最適化した。また、通常 A/T と同様の変速線を持ち、運転者の加速要求に従ったギヤリングを選択する制御を採用した。

このギヤリングに従ってエンジン回転数が車速に対してリニアに上昇可能となり、従来ハイブリッド車では加速時にエンジン回転数だけが先に上昇し加速感が後から発生するような一種トランスミッションが滑っているようなフィーリングがあったが、マルチステージハイブリッドシステム車では非常にダイレクト感に富み、加速感が継続し伸びのある加速フィーリングを実現し、これまでのハイブリッド車の走りを一新した。

### 4.3 走行シーンに合わせたギヤ段選択制御

多段変速模擬制御を開発し変速線によるギヤ段切替を採用したことにより、運転者の要求するギヤ段を何時如何なる時も忠実に選択することが必要となった。最適なギヤ段は登降坂路等の道路環境や運転者の嗜好（通常走行 or スポーツ走行等）により異なる。これに対してコンベンショナルな A/T で採用している AI シフト制御を導入した。この制御により勾配等により変化する必要な駆動力及び減速力に応じた最適なギヤ段を選択することが可能となった。

更に、運転者の運転嗜好を車両の前後・左右加速度から推測し、運転嗜好により AI シフト制御による選択ギヤ段の切替を実施した。例えば現在ワインディング路においてスポーツ走行を運転者が実施していると判断すれば通常走行時より低いギヤ段を選択するように制御し、より大きな駆動力とレスポンス向上及び減速力の確保を実現した。市街地等を通常走行していると判断した時には高めのギヤ段選択に切替えてエンジン回転数を低く制御し静かで優雅な走行を実現した。

従来ハイブリッド車でもドライブモードスイッチを切り替えることにより運転者の嗜好に合わせた駆動力特性を実現していたが、走行中のスイッチ操作が煩わしく使用頻度が上がらないことが多かった。そのため、今回このような運転嗜好を推定する制御を導入したが、合わせて従来のドライブモードスイッチも使用しこれまでよりも各々のモードでの走りの違いをより大きく設定し、スイッチを使用することにより走りが大きく変化することを明確に体感できるようにした。これによりドライブモードスイッチを使用する頻度が向上するものと考えた。

#### 4.4 静かで優雅な高速クルージングの実現

フラグシップクーペに相応しく高速クルージング時にはハイブリッド車ならではの比類のない静かで優雅な走りを実現した。

マルチステージハイブリッドシステムでは4速レンジ切替機構により、エンジン間欠運転許可車速も従来の70km/hから140km/hまで上げることが可能となった。これにより、高速道路走行時にもエンジン停止が可能となり、非常に静粛性が高くかつ効率的な走行が可能となった。加えて、エンジン運転中であっても高速走行時の静粛かつスムーズな走行を実現するために、10速に変速した後は10速ギヤ比により決まるエンジン回転数以下の領域をCVT制御にて動作させることで更に低いエンジン回転数での走行が可能となった(図13)。この制御により多段A/Tにありがちな高いギヤ段でのビジーシフトを抑制しエンジン回転数の変動も緩やかにすることが可能となりストレスの無いスムーズな走りを実現した。

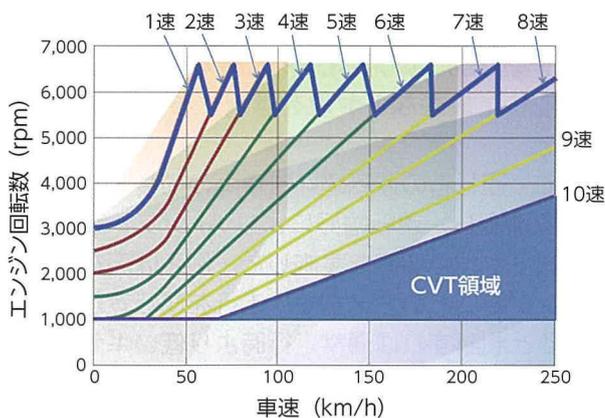


図13 CVT制御動作領域

## 5 おわりに

環境車の代表となったハイブリッド車であるが電動車にはコンベンショナルな車両では実現できない走行フィールをも実現することが出来る可能性を秘めている。今回マルチステージハイブリッドシステムの開発によりその一端を切り開くことが出来た。今後も更なる走りの向上を追求して行きたい。

### ■著者



大島 康嗣



洲濱 将圭



高橋 政克



加藤 春哉



井上 重行



宮本 知彦



奥田 弘一

# 自動車専用道路を対象とした自動運転システムの研究

Research into Automated Driving System on Highway

松永 昌樹 \*1  
Masaki Matsunaga

田口 康治 \*1  
Koji Taguchi

岩崎 正裕 \*1  
Masahiro Iwasaki

青野 浩之 \*1  
Hiroyuki Aono

渡邊 義徳 \*1  
Yoshinori Watanabe

## 要旨

近年、自動車 OEM (Original Equipment Manufacturing), サプライヤ, IT 企業による“自動運転”の研究開発活動が活発化している。トヨタは 2015 年、自動運転技術の考え方として「Mobility Teammate Concept」を提唱し、そのコンセプトの具現化の第一弾として自動車専用道路 (自専道) を対象とした自動運転システム「Highway Teammate」を一般公開した。本システムは運転行動の基本である“認知→判断→操作”プロセスを実装したものである。本稿はその技術概要について解説する。

## Abstract

Original equipment manufacturers (OEMs), suppliers, and IT companies are actively researching and developing automated driving systems. In 2015, Toyota Motor Corporation announced the Mobility Teammate Concept as its approach to automated driving technologies, and publically demonstrated the Highway Teammate system as its first result. The Highway Teammate system is capable of carrying out the fundamental cognition/decision/action aspects of the driving process. This article describes an outline of the technology used in this system.

キーワード 自動運転, LIDAR, 高精度地図

## 1 はじめに

近年、自動車 OEM (Original Equipment Manufacturing), サプライヤ, IT 企業による“自動運転”の研究開発が活発化している。概してそれらは運転支援システムとしてのアダプティブクルーズコントロール (ACC), レーンキーピングアシスト (LKA) の組み合わせや発展型であり、センサ性能の限界や、加減速・操舵の出力制限値の関係上、比較的的道路形状が単純な環境や周辺状況の変動が少ない環境において、ドライバ操作を支援することが目的のシステムである。

トヨタ自動車 (以下、トヨタ) は自動運転技術の考え方として、「Mobility Teammate Concept」を提唱した (図 1)。

### 自動運転技術に対するトヨタの考え方

- ①「すべての人」に「移動の自由」を提供する
- ②ドライバーが運転したいときに運転を楽しめない車は作らない
- ③運転したくないとき、出来ないときは安心して車に任せることができる
- ④ *Mobility Teammate Concept* のもと、人とクルマが協調する自動運転を作る



図 1 Mobility Teammate Concept

これは、人とクルマが同じ目的で、ある時は見守り、ある時は助け合う、気持ちが通った仲間 (パートナー) のような関係を築く、トヨタ独自の自動運転の考え方である。本コンセプト具現化の第 1 弾として、自動車専用道路 (自専道) を対象とした自動運転システム「Highway Teammate」を 2015 年 10 月に一般公開した。これは入口ランプウェイから出口ランプウェイまでを、クルマ自らが実際の交通状況に応じて適切に認知・判断・操作することにより、合流、レーンチェンジ、車線・車間維持、分流などを実現した自動運転システムである。本稿はその取り組みと技術概要について解説する。

\*1 先進技術開発カンパニー 先進安全先行開発部

## 2 自動運転システムの設計

### 2.1 システム構成

#### 2.1.1 ハードウェア構成

開発に用いている試験車両（LEXUS GS ベース）について、車両外観・センサ構成を図 2、ハードウェア構成を図 3、各ハードウェアの機能/役割を表 1 に示す。

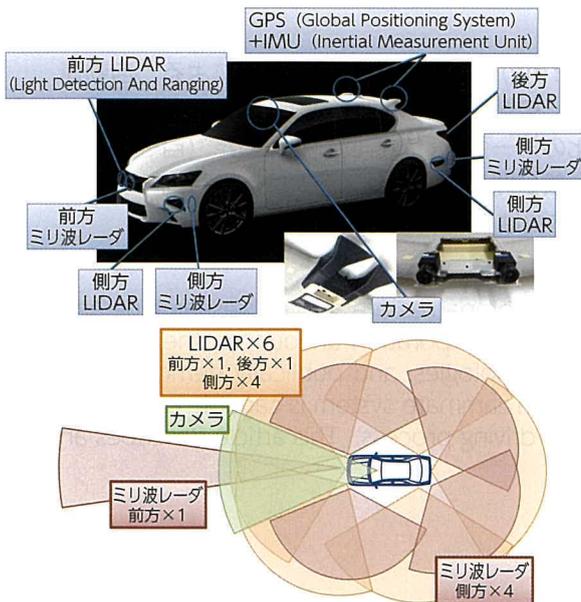


図 2 車両外観・センサ構成

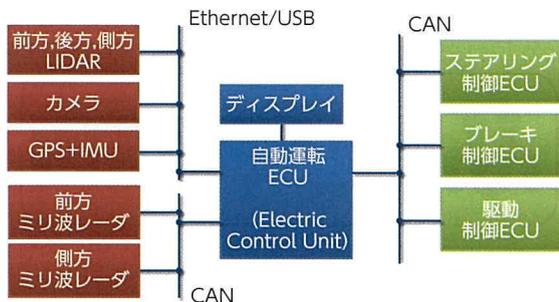


図 3 ハードウェア構成

試験車両は、車両各所に周辺を認識するためのセンサを配置した構成となっている。それらセンサのうち LIDAR は、赤外線を用いることによる分解能の高さが特徴であり、自車を中心とした他車や構造物の周辺環境認識に優れるが、雨などの外乱に弱い面を持つ。一方、ミリ波レーダ (Radar) はギガヘルツ帯の電磁波を用いることにより、霧や降雨、降雪時における認識能力に優れる。また、カメラは物体の色・形状の特徴検出などに優れる。このような各センサを組み合わせ、それぞれの長所を活かし短

所を補い合うことで、車両全体としての周辺認識能力向上を目指した構成となっている。また、車両外観は一般に販売されている状態と大きく変わらないよう配慮した設計とし、早期製品化を目指した構成としている。

表 1 各ハードウェアの機能と役割

名称	機能 / 役割
前方, 後方, 側方 LIDAR	車両を取り囲むように複数配置 周辺の障害物を検出 (高分解能)
カメラ	白線を検出 周辺の障害物の色・形状を認識・検出
前方 ミリ波レーダ	遠方の障害物を検出 (環境ロバスト性)
側方 ミリ波レーダ	車両を取り囲むように複数配置 周辺の障害物を検出 (環境ロバスト性)
GPS+IMU	地図情報と白線情報を 照合させるための位置・姿勢情報を得る
自動運転 ECU	センサの認識結果, 自己位置推定結果から 自車両が進むべき経路を演算 各アクチュエータへの指令値を演算
各アクチュエータ 制御 ECU	自動運転 ECU からの指令値を実現するため 各アクチュエータを制御, 駆動

#### 2.1.2 ソフトウェア (ロジック) 構成

図 4 に実装したソフトウェアのロジック全体構成を示す。左側の各センサの出力値を入力として、「認識部」・「自己位置推定部」が周辺障害物マッピングを行う。次に「プランナ部」が自車の行動を選択し、目標となる経路を生成する。最後に「コントローラ (制御) 部」が各アクチュエータの指令値を演算・出力する。

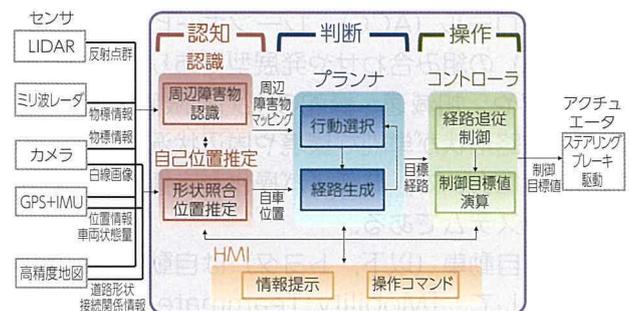


図 4 ソフトウェア構成

以上は運転行動の基本である“認識→判断→操作”プロセスを実装したものであり、これによって人のように考え動作する自動運転制御を実現している。

また、これらの流れと並列するように「HMI (ヒューマン・マシン・インターフェース) 部」を設置した。これを用いて、システムの認識・判断

結果を車両からドライバーに対して伝達すること、またドライバーからの操作（スイッチ操作）が可能な構成とし、人とクルマが協調する「Mobility Teammate Concept」を具現化している。

## 2.2 認識機能

自動運転システムに求められる認識機能は、ドライバーのように遠近問わず周辺の車両/路上障害物を検出し、その形状を認識することでフリースペースを見つけること、さらに死角のない全周囲同時監視が可能なことである。しかし、2.1.1項で述べたように、今回車両に搭載した各センサはそれぞれ長所短所を有する。そこで認識モジュールでは、それらの性質を考慮した上で各出力結果を的確に統合する技術が必要となる。図5にその概要を示す。

Step1として、LIDARの出力結果である反射点群を用いて小分割単位の認識を行う。Step2では、Step1結果を車種別に設定したモデルと照合し、統合/分割する。Step3では、さらにミリ波レーダの物標情報・高精度地図/自己位置推定結果・カメラによる認識結果を統合する。これによって認識精度とロバスト性を高いレベルで両立することが可能となり、LIDAR単体では不得意とする雨天においても安定した周辺認識を実現した。

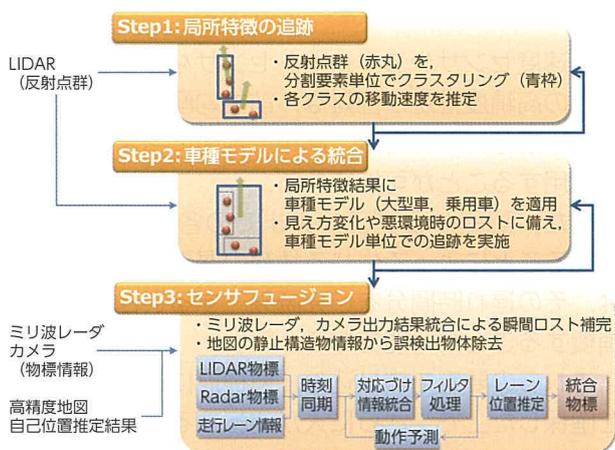


図5 センサフュージョン認識

## 2.3 自己位置推定機能

自動運転制御を行うにあたり、自己位置を正確にかつ安定的に把握することは下記の点で重要である。

- ・ 地図情報（静止構造物）を参照することによる認識精度/信頼性の向上（前項）
- ・ 地図情報（道路線形）を参照することによる先読み運転操作の実現

特に後者については、これまでの自車からの相対的な白線位置認識結果をベースとしたLKAに対し、システムの動作安定性/信頼性を向上させるための重要な要素である。

位置を推定する装置としてはGPS（全地球測位システム）が一般的に知られているが、それ単体の性能としては誤差50m単位程度、IMUを統合した高精度なシステムでも誤差10m単位にとどまるため、横幅5mを下回るレーンを走行する自動運転システムに必要な精度を確保できない。また、トンネルや高架下（ダブルデッキ下）などの遮蔽物に囲まれた環境下での位置推定も困難であり、安定性の面で課題がある。

本自動運転システムでは、フロントに配置したカメラにて写像・蓄積した路面画像と、地図から生成した疑似路面画像を照合し、GPSやIMUを用いた位置推定結果を統合することで、高精度の自己位置を推定する手法をとった。これにより横方向：0.1m、縦方向：0.5m単位の誤差、かつ遮蔽物環境などの条件区別なしに安定して推定することを実現した。そのロジック概要を図6に示す。

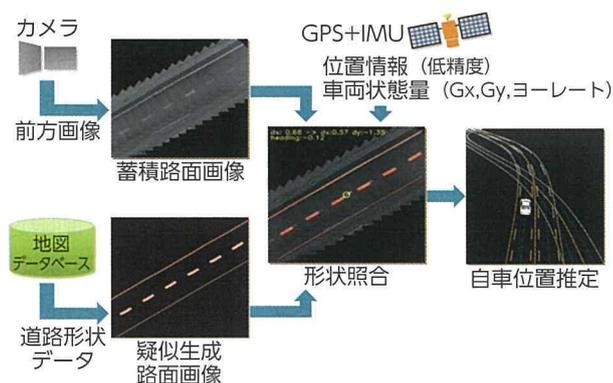


図6 高精度地図を用いた自己位置推定

## 2.4 プランナ（行動計画, 経路生成）機能

2.2, 2.3項で述べた認識機能と自己位置推定機能の結果を用いて、人間のような運転行動の選択（分合流, レーンチェンジ）と、それに準ずる経路生成を行うモジュールがプランナである。熟練ドライバーが行うような“判断”プロセスを自動運転システムで実現するにあたって、このプランナの役割が重要である。本自動運転システムにて実装したプランナの主なプロセスを図7に示す。

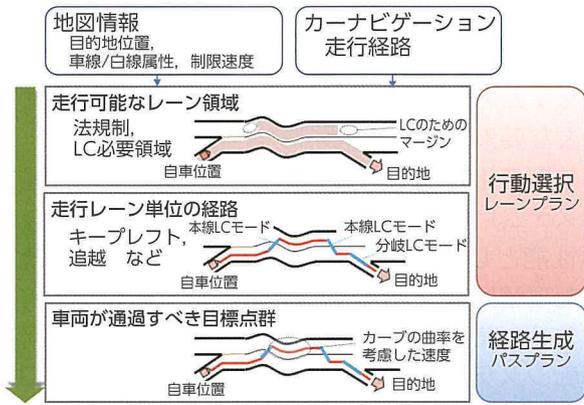


図7 プランナ ロジック

一般的なカーナビゲーションによる目的地までの走行経路と、地図から得られる車線 / 白線属性や制限速度情報を入力として、まず法規制の遵守や目的地到達のために必要な“走行可能なレーン領域”を算出する。さらに、周辺車両との関係を考慮することにより、キープレフトや追越しといった“走行レーン単位の経路”を生成する。ここまでする行動選択 / レーンプラン部とする (図8)。

走行レーン単位の経路は、レーンキープ (LK) / レーンチェンジ (LC) といった行動の集合体として解釈され、それぞれの行動毎に、実際に車両が走行するレーン上の経路 (車両が通過すべき目標点群) を生成する。この部分を経路生成 / パスプラン部とする。この目標経路点群は、先行車との車間維持や道路線形におけるカーブ曲率での速度調整、制限速度の遵守といった拘束条件を加味するだけでなく、横方向 / 前後方向加速度やヨーレートなどの車両運動状態量が滑らかにつながるよう配慮した上で算出される。

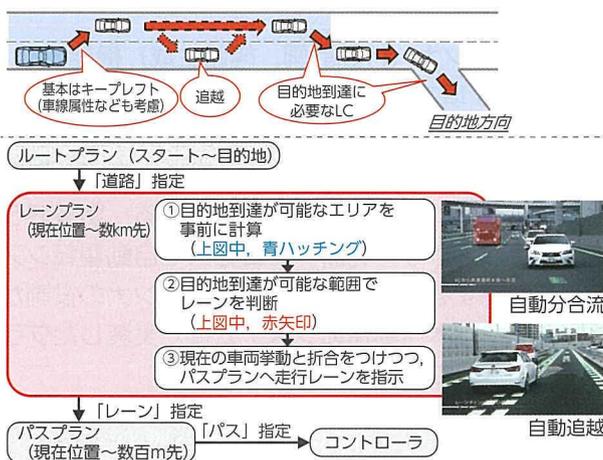


図8 レーンプラン部の動き (例)

## 2.5 コントローラ (制御) 機能

プランナにて生成された目標経路点群情報と、現在の車両位置、車両状態量 (車速, 加速度, 姿勢角度, ヨーレートなど) との差分をもとに各アクチュエータへの指令値を演算・出力するモジュールがコントローラ (制御) である。

操舵方向 / 加減速方向とともに、最終目標指令値は自車直近の目標経路点における各目標値から得られるフィードフォワード (FF) 項と、現在の車両状態 (車両状態量 他) との差分から得られるフィードバック (FB) 項から演算される。図9に操舵方向コントローラの基本構成を示す。

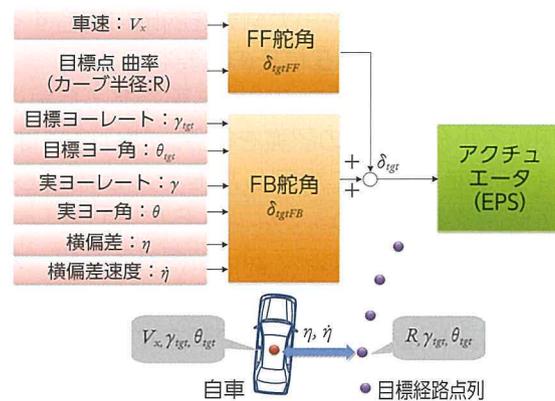


図9 操舵コントローラ

加速度センサやヨーレートセンサなどの自律センサでの高精度推定が困難な、前後勾配や横勾配 (カント) 成分については、高精度地図に含まれる情報を活用することが可能である。

また、認識からプランナまでの各処理プロセスを経ることによって生じる情報の遅延影響については、その遅れ時間分を“先読み”することによって補償することが可能である。

これらの要素を織り込み、目標点に対する追従性を確保した上で、さらに人が運転するような滑らかな運転操作が可能な自動運転システムコントローラを構築した。

## 2.6 HMI 機能

「Mobility Teammate Concept」の実現に向けては、ドライバとクルマの間でそれぞれの意図 / 意思が共有される必要がある。安全かつ安心なドライバ⇄クルマ協調系を含む自動運転システムを構築するために HMI 部が必要となる。

今回はそのなかで、クルマ側の意図 / 意思がドライバに正確に伝わることを目的とし、ディスプレイ

を用いた HMI を構築した。具体的に、以下の 4 要素を実装した。

- ・システムの動作状況
  - …On 状態 / Off 状態
- ・周辺の車両や道路の情報
  - …自車がどこを走っているのか
  - 周辺車両との位置関係
- ・ドライバへの注意喚起
  - …注意を払うべき方向
  - ドライバに行って欲しい動作、作業
- ・システムの操作情報
  - …操舵、加減速の状態

図 10 にその実装概要を示す。なお、表示内容の妥当性や、直感的なわかり易さの向上については、今後も検討を続けていく。



図 10 HMI ディスプレイ表示例

### 3 公道評価とデモンストレーション

#### 3.1 評価コース

1 章で述べたように、本自動運転システムはその走行シーンとして自動車専用道路を想定している。今回、その有効性を検証するにあたり、首都高速道路（湾岸線-9号線、有明 IC から福住 IC 間、片道約 7 km）を評価コースに選定した。その概要と特徴を図 11 に示す。

本評価コースは、自車位置推定技術に対し、GPS 受信が困難なダブルデッキ下や、レーン中心の抽出が困難な複合線区間といったシーンを有し、認識・プランナ技術に対しては、他車両で混雑する本線への合流、ジャンクションにおける分岐 / レーンチェンジといった難易度の高いシーンを有する。また、コントローラ技術に対しては、カーブ半径が約 100m 級の急カーブが連続したシーンを有しているのが特徴である。



図 11 首都高速 評価コース

#### 3.2 デモンストレーションとその反響

2015 年 10 月、東京お台場においてトヨタ安全技術説明会が開催され、国内外のメディアに対し「Mobility Teammate Concept」具現化にむけた最新の検討成果として、本自動運転システム「Highway Teammate」のデモンストレーションを行った。その概要を図 12 に示す（コースは 3.1 項で紹介した評価コースと同様）。

- ・国内メディア：2015.10/6, 7, 8
- ・海外メディア：2015.10/29, 30
- （計 5 日間）
- ・供試車両：2 台
- ・走行回数：計 68 往復
- ・試乗者数：約 260 名

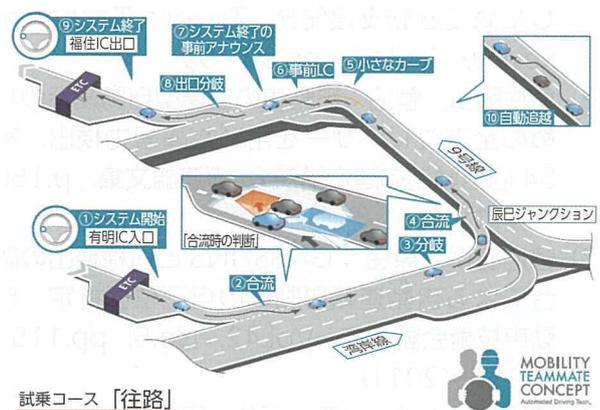


図 12 デモンストレーション概要（往路）

デモンストレーションにおいては、レーン内での安定した走行に加えて、混雑した本線への合流など、狙い通りの動作を実現した結果、試乗に参加された方々からは、主に以下のような評価をいただいた。

- ・車両挙動は全体として「驚くほどスムーズ」、[想像以上の安定感]

- 本線への合流や車線変更の判断とその実行の過程は、まるで人の運転操作のように自然に感じられた
- 万が一のシステム機能限界時を想定したドライバへのハンドオーバー機能や、ドライバの過信・依存に対するシステム側の構えがあるとより安心と感じた
- 自動走行システムの製品化はもちろん、本技術を活用したより簡便な機能の段階的な製品化も考えて欲しい

これらの評価結果を元に、システムの機能・性能向上を図るべく、開発を継続中である。

## 4 おわりに

本稿では、トヨタ「Mobility Teammate Concept」に基づいた「専道を対象とした自動運転システム：Highway Teammate」について、その取り組みと技術的概要を紹介した。

全ての人々が、安全・スムーズ・自由に移動できる社会の実現を目指し、今後も最新技術の研究開発に努めるとともに、自動運転システムの使い方／ルールなどを社会へ周知する仕組み・環境づくりについても、関係組織と継続的に取り組んでいく。

### ■参考文献

- (1) 田口康治, 船山, 金道 : 自動運転技術を活用した高度運転支援開発. Toyota Technical Review. Vol.61, pp.93 - 99
- (2) 魚住剛弘, 菅沼 : 自動車の自律型自動運転のための全方位レーザーを用いた障害物検出. 第54回自動制御連合講演会 講演論文集. p.156 (2011)
- (3) 菅沼直樹, 魚住 : GNSS/INS と白線検出の融合による自動運転自動車の自己位置推定. 自動車技術会論文集. Vol.42, No.5, pp.1151 - 1156 (2011)
- (4) 真鍋真, 上林, 大西, 福井, 田岡 : 自動車用白線認識アルゴリズムの一実現. 情報処理学会研究報告. SLDM-126, pp.63 - 68 (2006)
- (5) 植田宏寿, 山口, 土谷, 佐野, 古性 : 自車近傍の認識結果の蓄積に基づくロバストな自己位置推定技術の開発. 自動車技術会秋季大会 学術講演会 講演予稿集. pp.1252 - 1256 (2015)

- (6) J. Levinson, M. Montemerlo, S. Thrun : Map-Based Precision Vehicle Localization in Urban Environments. Science and Systems III (2008)
- (7) J. Levinson, S. Thrun : Robust Vehicle Location in Urban Environments Using Probabilistic Maps. Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation (2010)
- (8) Stefan Habenicht et al. : A Maneuver-based Lane Change Assistance System. Germany. IEEE Intelligent Vehicles Symposium (2011)
- (9) 吉本達也, 深尾, 横小路, 伊能 : 動的環境下における乗り心地を考慮可能なレーンチェンジ経路生成法. 自動車技術会 2015 年秋季大会, pp.1307 - 1312 (2015)
- (10) Michael Montemerlo et. al. : The Stanford Entry in the Urban Challenge. Journal of Field Robotics. p.569 - 597 (2008)

### ■著者



松永 昌樹



田口 康治



岩崎 正裕



青野 浩之



渡邊 義徳

## THUMS Version 4 子供モデルの開発

## Development of THUMS Version 4 Child Models

伊藤 啓輔 \*1  
Keisuke Ito宮崎 浩 \*1  
Hiroshi Miyazaki林 重希 \*1  
Shigeki Hayashi北川 裕一 \*1  
Yuichi Kitagawa安木 剛 \*1  
Tsuyoshi Yasuki

## 要旨

3歳児，6歳児，10歳児の人体構造を詳細に模擬したTHUMS (Total Human Model for Safety) Version 4 子供モデル (以下，子供モデル) を開発した。高精度CTスキャン画像データを用いて骨格や脳・内臓の形状を精密に表現した。文献に記された年齢と材料特性の関係を参考に，身体各部位の材料特性を推定した。完成した子供モデルを用いて献体やボランティアの試験を模擬，力学応答や全身挙動を比較して計算精度を検証した。6歳児モデルを用いて車両対歩行者の衝突解析を実施，衝突挙動や予測される傷害をTHUMS Version 4 平均体格男性モデル (以下，成人モデル) と比較した。6歳児では，肋骨および脳・肝臓のひずみが成人より高くなる可能性が示唆された。子供モデルを用いることで，体格差や年齢差による傷害への影響を解析できると期待される。

## Abstract

Total Human Model for Safety (THUMS) Version 4 child models have been developed that simulate the detailed anatomical structures of 3-year old (3YO), 6-year old (6YO), and 10-year old (10YO) children. In each model, the geometries of the skeleton, brain, and internal organs were precisely represented based on data from high-resolution computed tomography (CT) scans. The material properties of each part of the body were defined considering the aging effect described in the literature. Subsequently, the completed child models were validated by comparing the mechanical responses and whole-body kinematics of the models with the results of physical tests performed using post mortem human subjects (PMHS) and volunteers. Vehicle-to-pedestrian collision simulations were conducted and the impact kinematics and predicted injuries of the 6YO model were compared with those of the THUMS Version 4 average-size adult male model. The results showed that a 6YO child was at risk of greater rib, brain, and liver strain than an adult. These child models have the potential to help analyze the effects of differences in physique and age on injuries in car accidents.

キーワード THUMS, 人体有限要素モデル, 子供, 歩行者

## 1 はじめに

厚生労働省統計 (平成26年) によると，1歳から14歳までの不慮の事故による死者数のうち交通事故が占める割合は38%で最も多い。交通事故総合分析センターの統計 (平成25年) によれば，0歳から15歳の交通事故死者数のうち，歩行中の死者数が占める割合は50%と最も多く，次いで自動車乗車中が多い。子供と大人では体格だけでなく力学特性や傷害耐性も異なり，車両衝突時の挙動や傷害も異なると考えられる。一部の安全アセスメント試験では，子供乗員を模擬したダミー人形 (子供ダ

ミー) を用いて車両衝突時の負荷の大きさが計測されている。子供ダミーは年齢相応の体格をもつが，子供の解剖学的な特徴までは表現しない。また，胸腹部の力学特性は年齢相応に調整されているが，傷害耐性までは考慮されていない。胸部のたわみ量 (胸たわみ) を計測して肋骨骨折の発生リスクを予測することはできるが，内臓の受傷リスクや脳傷害の発生リスクを推定することは困難である。

トヨタ自動車 (株) と (株) 豊田中央研究所は共同で人体有限要素モデル THUMS を開発した。THUMS は人体の解剖学的構造や力学特性および傷害耐性をコンピュータモデル (有限要素モデル) として表現したものである。THUMS (Total Human Model for safety) と車両モデルを用い

\*1 先進技術開発カンパニー 車両CAE部

た衝突シミュレーションにより、乗員や歩行者の傷害を解析することが可能になる。2000年に開発したTHUMS Version 1は平均体格の成人男性を模擬したモデルで、骨折や靭帯断裂を解析することができた。2010年に開発したTHUMS Version 4では小柄女性や大柄男性を追加、脳傷害や内臓損傷の解析まで可能となった。2016年、新たに3歳児、6歳児、10歳児の子供モデルを追加した。これらのモデルを用いることで、体格差や年齢差による傷害への影響を解析することが可能となる。本稿では、新たに開発した子供モデルの概要と、子供モデルと成人モデルを用いた車両対歩行者の衝突解析例について紹介する。

## 2 モデル開発

### 2.1 身体形状

子供モデルの身体形状はCTスキャン画像データから生成した。3歳児、6歳児、10歳児（いずれも平均体格）の高精度CTスキャン画像データから皮膚、骨格、脳・内臓など組織ごとに形状データを分類、3次元ポリゴンデータに変換した。有限要素作成ソフトウェアで3次元ポリゴンデータを読み込み、ソリッド要素やシェル要素を作成した。要素の辺長は3～5mmとなるよう調整した。

図1は頭部モデルを示す。大脳、小脳、脳室、脳幹はソリッド要素で、脳を覆う膜組織（硬膜、クモ膜、軟膜）はシェル要素で表現した。大脳については、右脳と左脳が脳梁でつながる構造まで表現した。脳幹から脊髄までつながる構造も表現した。脳と頭蓋骨の間および脳室を満たす脳脊髄液はソリッド要素で表現した。

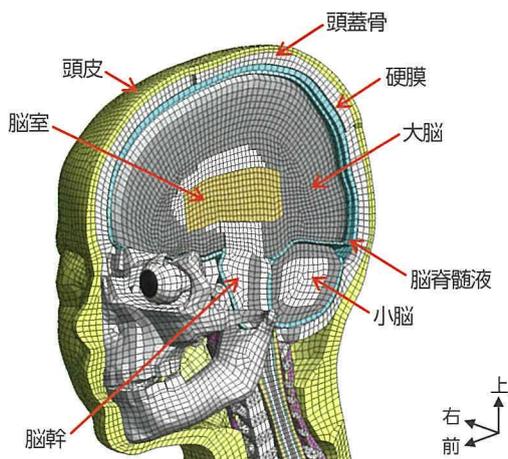


図1 頭部モデルの概要

図2は胴体モデルを示す。肋骨と骨盤（背面には脊椎）の間に内臓モデルを隙間なく収めた。心臓、肝臓、腎臓、脾臓、膵臓、胆嚢、膀胱はソリッド要素で、食道、胃、十二指腸、小腸、大腸はシェル要素で表現した。肺の表面はシェル要素で、内部はソリッド要素で表現した。心臓から肺および脊椎付近を通る大動脈と大静脈はシェル要素で表現した。また、内臓を包む膜組織（横隔膜、胸膜、腹膜）も同様にシェル要素で表現した。内臓どうしの結合や接触状態は解剖学資料を参考に定義した。

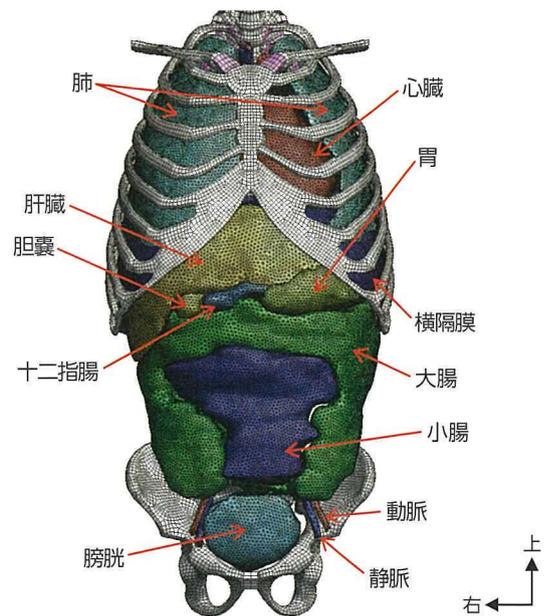


図2 胴体モデルの概要

図3は骨盤および下肢モデルを示す。骨盤は腸骨、坐骨、恥骨で構成される。それぞれ皮質骨はシェル要素で、海綿骨はソリッド要素で表現した。それらを結合するY状軟骨はソリッド要素で表現した。

下肢の長尺骨（大腿骨、脛骨、腓骨）については、皮質骨および海綿骨ともソリッド要素で表現した（上肢モデルも同様）。長尺骨以外（指骨や踵骨など）については、皮質骨はシェル要素で、海綿骨はソリッド要素で表現した。子供の解剖学的な特徴の一つに成長板と骨端軟骨がある。これらは長尺骨の端部に見られる。骨幹部から連続するように、これらをソリッド要素で表現した。

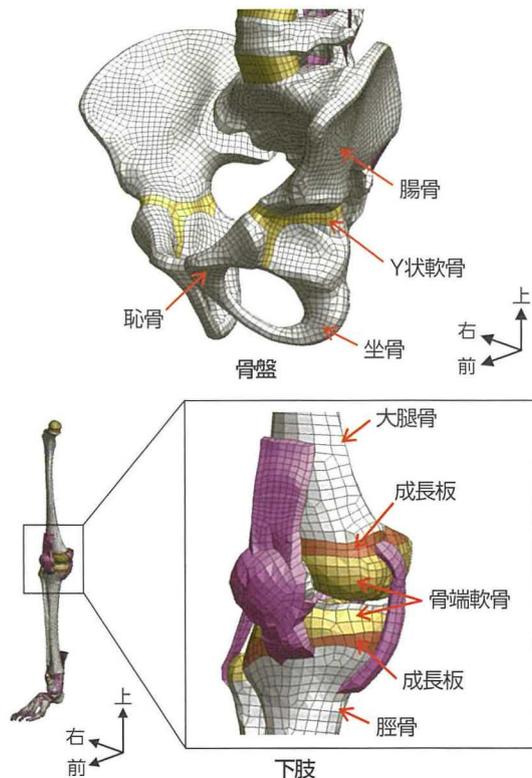


図3 骨盤および下肢モデルの概要

作成した部位ごとのモデルを組み上げ、全身モデルに統合した。図4に3歳児、6歳児、10歳児を模擬した子供モデルの概観を示す。各年齢について、直立した姿勢の立位モデルと、子供用シートに着座した姿勢の座位モデルを作成した。立位モデルは歩行者として、座位モデルは乗員として使用できる。

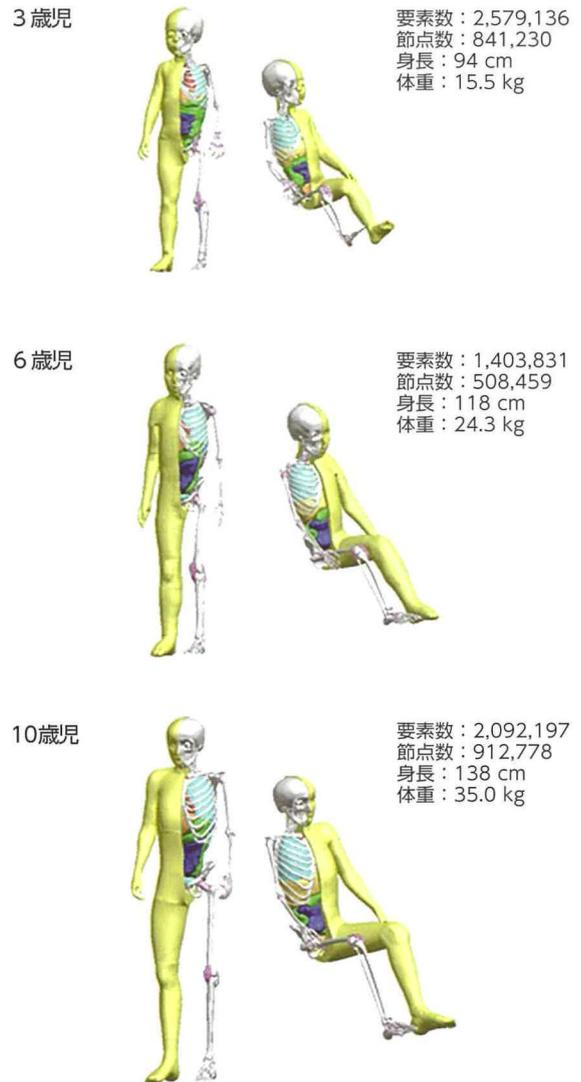


図4 子供モデルの外観

## 2.2 材料特性の推定

人体組織の材料特性は年齢とともに変化する。特性変化を組織ごとに調査した研究例は少ない。Curreyら<sup>(1)</sup>は2歳～48歳の大腿骨の皮質骨を用いた3点曲げ試験を実施、年齢と弾性係数の関係を求めた(図5)。この関係から、成人(40歳)に対する3歳、6歳、10歳の比率が求まる(3歳:0.60, 6歳:0.66, 10歳:0.72)。これらの比率を用いて成人モデルの材料特性をスケールリングし、子供モデルの材料特性を作成した。大腿骨以外の骨についても同じ比率が適用できると仮定した。骨以外の組織については年齢と材料特性の関係が明らかになっていないため、成人モデルの材料特性を使用した。

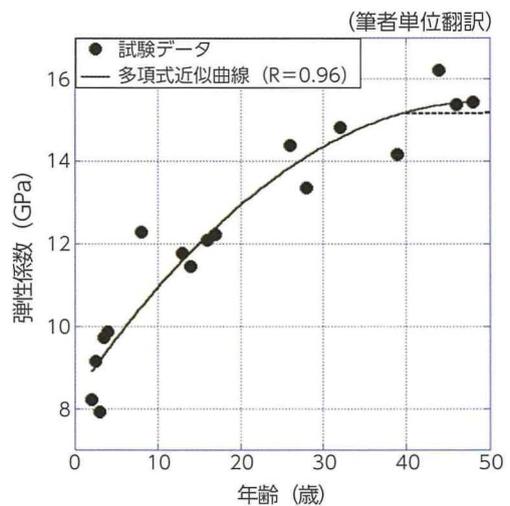


図5 年齢と弾性係数の関係<sup>(1)</sup>

### 2.3 傷害判定基準の推定

McCaldenら<sup>(2)</sup>は、20歳～102歳の大腿骨の皮質骨を用いた引張試験を実施し、年齢と骨の破断ひずみの関係を求めた(図6)。子供の骨でも同様な関係があると仮定し、3歳、6歳、10歳の骨の破断ひずみを推定した(3歳：4.1%、6歳：4.0%、10歳：3.9%)。大腿骨以外の骨についても同じ破断ひずみを仮定した。脳、肺を除く内臓、靭帯(膝)については、成人モデルと同じ破断ひずみ<sup>(3)</sup>を仮定した。これら破断ひずみを傷害判定基準として用いた。計算モデルの骨に生じたひずみが破断ひずみに達すると骨折すると仮定した。骨を構成する要素を除去することで骨折を模擬した。肺は圧力が高くなると損傷すると考えられる。成人モデルと同じ圧力値を傷害判定基準とした。表1に傷害判定基準の一覧を示す。

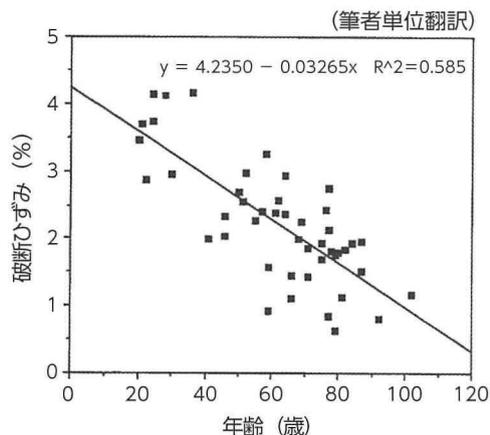


図6 年齢と破断ひずみの関係<sup>(2)</sup>

表1 傷害判定基準

部位	指標	子供モデル			成人モデル (40歳)
		3歳	6歳	10歳	
骨(皮質骨)		4.1	4.0	3.9	3.0
脳	ひずみ (%)	25			
心臓		30			
肺	圧力 (kPa)	±10			
胃		70			
肝臓		34			
脾臓	ひずみ (%)	120			
腎臓		57			
小腸		40			
大腸		120			

### 3 計算精度の検証

子供モデルの力学応答および全身挙動を文献に記された献体やボランティアの試験データと比較した。図7に示す11ケースの負荷条件を選定した。いずれも車両衝突時に乗員や歩行者に作用する負荷を想定した条件である。本稿では、胸部ベルト圧迫試験と、大腿骨の3点曲げ試験の2ケースの検証結果について記す。

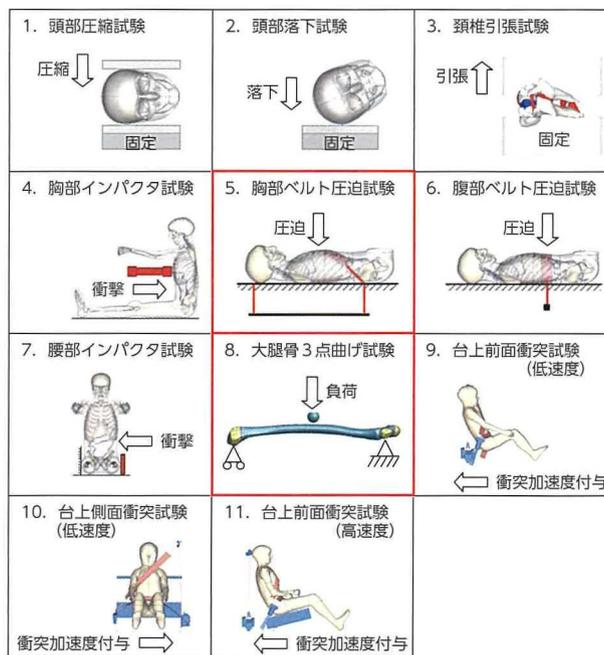


図7 検証計算の概要

#### 3.1 胸部のベルト圧迫

Kentら<sup>(4)</sup>はショルダーベルトを用いた胸部圧迫試験を実施、胸の荷重-たわみ特性を求めた。試験は6歳～15歳の計7体の献体を用いて行われた。献体は台の上に仰向けに置かれ、幅約50mmのベルトが胸部前面に対角線上に配され、ベルトの両端は初速度1.5 m/sで台裏方向に牽引された。台上の受圧板で計測された荷重と、胸骨中心で測定された厚さ方向の胸たわみ量から荷重-たわみ線図が求められた。3歳児、6歳児、10歳児モデルを用い、献体試験を模擬した計算を実施した。算出された荷重-たわみ線図を試験結果と比較した(図8)。縦軸は荷重、横軸は胸たわみ率である。3歳児モデルの荷重-たわみ線図は試験結果より低かった。6歳児モデルと10歳児モデルの荷重-たわみ線図は試験結果の範囲内であった。

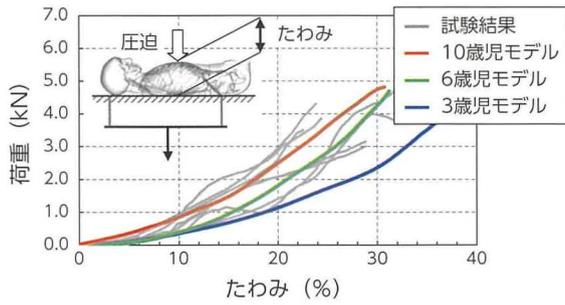


図8 胸部荷重 - たわみ線図の比較

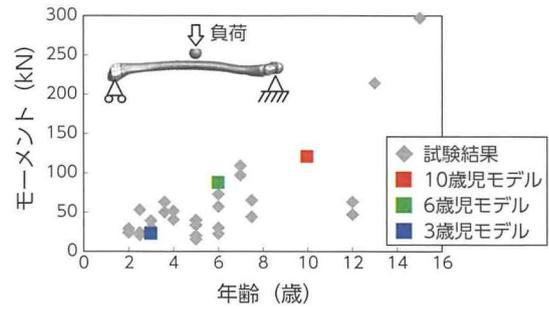


図9 骨折モーメントの比較

### 3.2 大腿骨の3点曲げ

Ouyang ら<sup>(5)</sup>は大腿骨の3点曲げ試験を実施し、骨折モーメントを計測した。試験には2歳～15歳の献体が用いられた。直径20mmの負荷子を8.3mm/sの速度で大腿骨の中央部分に衝突させた。負荷子の変位量と大腿骨との接触荷重から、骨折時の曲げモーメントが算出された。3歳児、6歳児、10歳児モデルを用い、献体試験を模擬した計算を実施した。大腿皮質骨のソリッド要素に生じるひずみが2.3節で仮定した値に達すると骨折すると判定した。図9に子供モデルを用いて計算した骨折モーメントと試験結果を比較する。3歳児、6歳児、10歳児モデルの骨折モーメントは試験結果の範囲内であった。また、試験結果は年齢とともに骨折モーメントが増加する傾向を示した。3歳児、6歳児、10歳児モデルの骨折モーメントは同じ傾向を示した。子供モデルの骨に定義した材料特性や骨折判定基準は妥当であると考えられる。

## 4 車両対歩行者の衝突解析例

成人モデルと6歳児モデルを用いて、歩行者と車両の衝突事故を模擬した。Watanabe ら<sup>(6)</sup>が作成した中型セダンタイプの車両モデルを用いて、車両が40km/hの速度で歩行者の側方から衝突する計算を実施した。車両衝突時の全身挙動と予測される傷害を比較した。

### 4.1 全身挙動の特徴

図10に車両衝突時の成人モデルと6歳児モデルの全身挙動を示す。成人モデルでは、最初に膝とバンパが接触し、約20msで大腿部がラジエータグリルおよびエンジンフード（以下、フード）前端と接触した。約40ms以降、腰より上の身体が車両に向かって傾き始め、側方に回転する挙動を示した。腕、肩の順にフード上面と接触した後、約

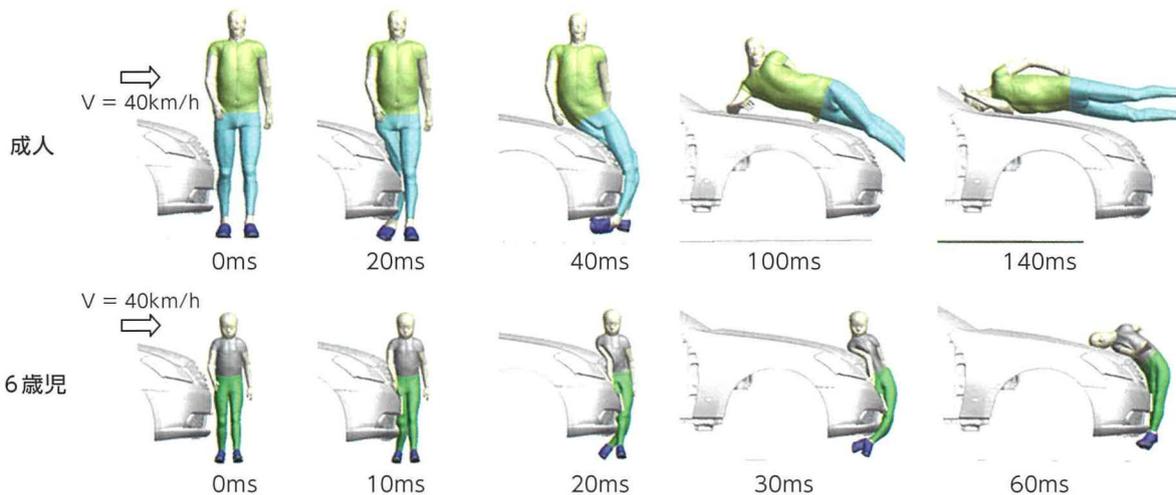


図10 車両衝突時の全身挙動

140ms で頭部はウインドシールドと接触した。6歳児モデルでは、最初に大腿部および腰部がバンパと接触し、約20msで胸腹部がラジエータグリルおよびフード前端と接触した。約30ms以降、肩より上の部分が車両に向かって傾き始め、頭部が側方に回転する挙動を示した。頭部は約60msでフード上面と接触した。

#### 4.2 骨折の発生予測

成人モデルでは全ての骨のひずみは傷害判定基準以下であり、骨折は予測されなかった。一方、6歳児モデルでは右肋骨上の11箇所のひずみが傷害判定基準を超過し、骨折が予測された。図11に骨折の予測箇所を示す。

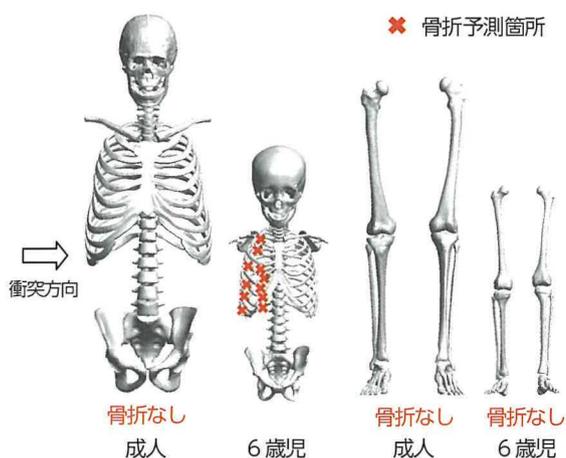


図11 骨折の予測箇所

#### 4.3 脳・内臓傷害の発生予測

成人モデルでは脳と全ての内臓のひずみは傷害基準以下であり、損傷は予測されなかった。一方、6歳児モデルは脳と肝臓のひずみが傷害基準を超過し、損傷が予測された。図12に脳と肝臓のひずみ分布を示す。6歳児モデルでは、脳の衝突側に加え反衝突側にも広範囲にわたって高いひずみが観測された。肝臓のひずみはフード前端との接触位置に集中して現れた。特に肋骨に覆われていない箇所に高いひずみが観測された。

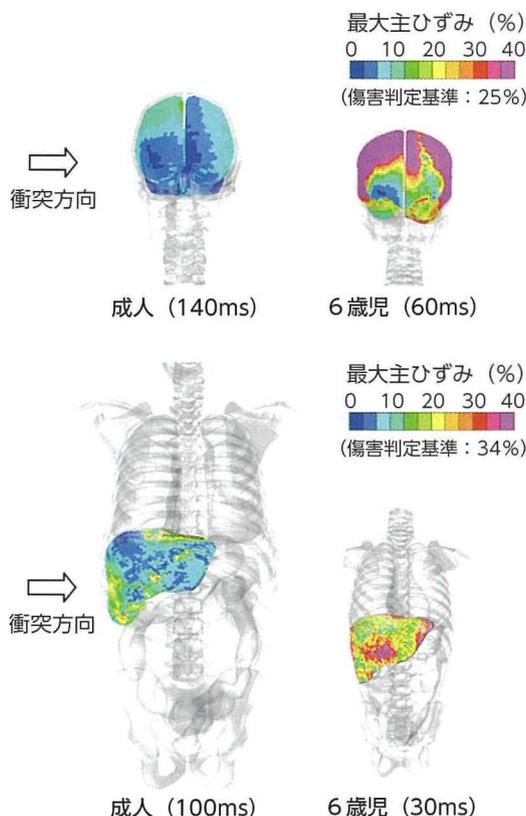


図12 脳および肝臓のひずみ分布

## 5 おわりに

3歳児、6歳児、10歳児を模擬した子供モデルを開発した。身体形状は高精度CTスキャン画像データから生成した。文献に記された年齢と材料特性の関係を参考に、成人モデルの材料特性を子供モデル用にスケーリングした。献体やボランティアの試験結果と比較して計算精度を検証した。子供モデルの力学応答（荷重-たわみ線図等）は試験結果と概ね一致した。6歳児モデルを用いて車両対歩行者衝突解析を実施、衝突挙動や予測される傷害を成人モデルと比較した。6歳児では、肋骨および脳・肝臓のひずみが成人より高くなる可能性が示唆された。開発した子供モデルを用いることで、交通事故における子供の傷害発生メカニズムを分析できると期待される。

## ■参考文献

- (1) J. Currey, G. Butler : The Mechanical Properties of Bone Tissue in Children. The Journal of Bone and Joint Surgery - American Vol. 57(6), pp.810 - 814 (1975)
- (2) R. McCalden, J. McGeough, M. Barker, C. Cort-Brown : Age-Related Changes in the Tensile Properties of Cortical Bone. The Journal of Bone and Joint Surgery. Vol.75-A, No. 8, pp.1193 - 1205 (1993)
- (3) K. Shigeta, Y. Kitagawa, T. Yasuki: Development of Next Generation Human FE Model Capable of Organ Injury Prediction. 21st ESV Paper 09-0111 (2009)
- (4) R. Kent, F. Lopez-Valdes, J. Lamp, S. Lau, D. Parent et al. : Characterization of the Pediatric Chest and Abdomen Using Three Post-Mortem Human Subjects. 22nd ESV Paper 11-0394 (2011)
- (5) J. Ouyang, Q. Zhu, W. Zhao, Y. Xu, W. Chen et al. : Biomechanical Character of Extremity Long Bones in Children and Its Significance. Chinese Journal of Clinical Anatomy. Vol.21, No.6, pp.620 - 623 (2003)
- (6) R. Watanabe, T. Katsuhara, H. Miyazaki, Y. Kitagawa, T. Yasuki : Research of the Relationship of Pedestrian Injury to Collision Speed, Car-Type, Impact Location and Pedestrian Sizes using Human FE Model (THUMS Version 4). Stapp Car Crash Journal. Vol.56, pp.269 - 321 (2012)

## ■著者



伊藤 啓輔



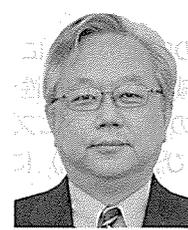
宮崎 浩



林 重希



北川 裕一



安木 剛

# エンジン起動時振動と発進応答性の両立に向けた技術開発

Development of Technology for Engine Starting Vibration and Response

三木 武<sup>\*1</sup>

Takeru Miki

松宮 拓也<sup>\*2</sup>

Takuya Matsumiya

石崎 啓祐<sup>\*2</sup>

Keisuke Ishizaki

榎本 弘<sup>\*3</sup>

Hiroshi Enomoto

三上 康之<sup>\*3</sup>

Yasuyuki Mikami

大屋 啓<sup>\*4</sup>

Akira Oya

## 要旨

近年、燃費の向上のためにS&Sシステム（Stop & Start System）が広く普及しており、エンジン起動時振動の低減と発進応答性やエンジン始動性とを両立させる技術の開発が必要である。本論文では、エンジン起動時の発生メカニズムを明らかにし、新たに開発した高回転型スタータと初爆時の燃焼最適化（実圧縮比および燃焼時期）による実車での振動低減効果について述べる。

## Abstract

Stop and start (S&S) systems are being adopted on a growing number of vehicles to help improve fuel economy. These systems require the development of technology capable of reducing engine starting vibration while also ensuring starting response and startability. This article identifies the vibration generation mechanism when the engine starts, and describes the vibration damping effectiveness of a newly developed high rotation speed engine starter and the optimization of firing at first combustion (actual compression ratio and combustion timing) under real-world conditions.

キーワード エンジン起動時振動, アイドリングストップ, スタータ, 燃焼制御, 発進応答性

## 1 はじめに

S&Sシステム（Stop & Start System）は赤信号などでブレーキを踏み停車するとエンジンを自動的に停止させ、青信号などで発進する際にブレーキを離すと自動的にエンジンを再起動させるシステムである（図1）。



図1 エンジン停止・起動シーン

S&Sシステムは停車中の消費燃料を節約することで燃費が向上する一方、エンジンを再起動する際

に振動が発生し、乗員にストレスを与えることが課題である。このエンジン起動時振動の低減と発進応答性などの他の性能とを両立させる新たな技術の開発が必要である。

## 2 エンジン起動時の振動発生メカニズム

### 2.1 エンジン起動時振動の概要

エンジン起動の際のエンジン回転数とフロア振動を図2に示す。スタータ始動から初爆までのモータリング中にはエンジンは一定速度で回転する。初爆以降のファイアリング中にはアイドル回転数まで上昇し発進可能になるが、スタータ始動から発進可能になるまでにタイムラグが発生し、S&Sシステム非搭載の時に比べ発進応答性が劣る。

エンジン起動時振動（フロア振動）はモータリング中から発生し、図2の例では5度目の爆発まで増幅を続け、その後、回転数の上昇に従って減衰していく過渡的な現象である。

\*1 Mid-size Vehicle Company MS車両実験部

\*2 先進技術開発カンパニー 車両技術開発部

\*3 パワートレインカンパニー エンジン制御システム開発部

\*4 Mid-size Vehicle Company MS電子システム設計部

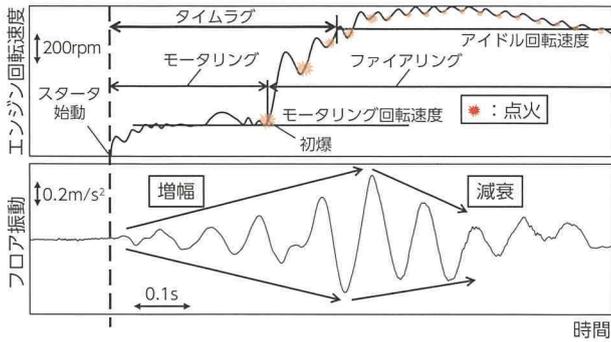


図2 エンジン回転数とフロア振動

### 2.2 エンジン起動時振動の強制力

エンジンを起動させる際のスタータ、エンジンの概念を図3に示す。スタータはピニオンギヤを突き出しながら回転し、エンジンのリングギヤと噛合うことでクランクシャフトを回転させる。圧縮行程でピストンが上昇すると、ピストンに押しつぶされた空気によって筒内圧が高まりピストン上昇を妨げる下方向に圧縮反力が発生する。その反力に打ち勝って上死点を過ぎ膨張行程になると、ピストンは下降を始め、下方向に働く圧縮反力はピストン下降を助ける方向に作用する。

4サイクルエンジンの吸気・圧縮・膨張・排気の4つの行程において、圧縮・膨張行程の気筒による反力がクランクシャフトにトルク変動を与える。

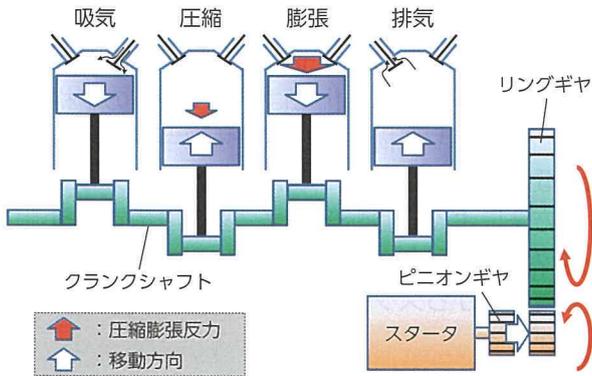


図3 エンジン起動システム (4気筒)

次に図4で圧縮・膨張行程のトルク変動を詳細に説明する。押しつぶされた空気によって下方向に加わる圧縮反力がクランクシャフトに与えるトルクは、圧縮行程では回転と逆方向の負トルク  $T_{comp}$ 、膨張行程では順方向の正トルク  $T_{exp}$  となり、1気筒分の  $T_{comp}$ 、 $T_{exp}$  は図4のように表される。この時、初爆前の (a) モータリング中は、気筒内空気の圧縮膨張による反力のみを受けるが、(b) ファイアリング中は燃焼によって筒内圧がさらに高まり  $T_{exp}$

が大きくなる。

クランクシャフトには気筒数分の  $T_{comp}$  と  $T_{exp}$  が作用し、合成したトルクの変動  $T_p$  が起動時振動の強制力となる。

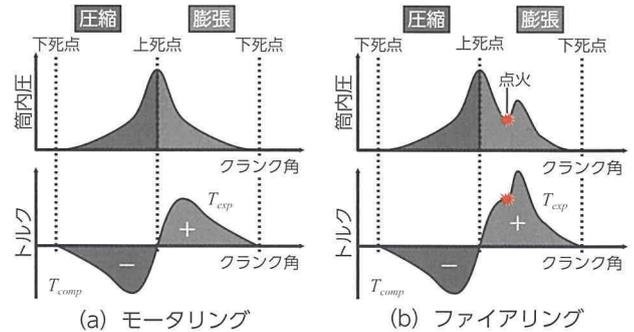


図4 クランクシャフトトルク (1気筒あたり)

### 2.3 エンジン起動時振動の伝達経路と理論応答

図5の振動伝達経路に示すように、トルク変動  $T_p$  はパワープラント、エンジン懸架系で構成された伝達特性  $h$  を介してフロアを振動させる。フロア振動を低減するために、従来はパワープラントの慣性主軸と弾性主軸を近づける“主軸合わせ<sup>(1)</sup>”を実施し伝達特性  $h$  を改善してきた。



図5 起動時振動伝達経路

ここでは、強制力であるクランクシャフトのトルク変動  $T_p$  を改善する方法について検討する。

パワープラントの伝達特性  $h$  はトルク変動  $T_p$  の入力方向からロール1自由度モデル (図6) で考え、式 (1) に示す。

$$h(t) = \frac{\sin \omega_0 t}{I_y \omega_0} \dots \dots \dots (1)$$

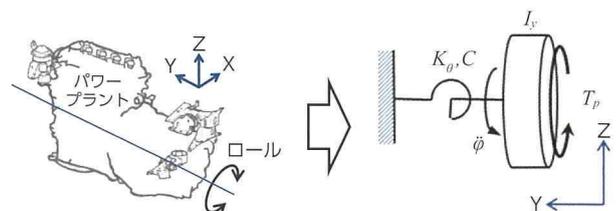


図6 振動伝達特性  $h$

ここで、各記号は以下の通りとする。

$$\left( \begin{array}{l} I_y: \text{ロール慣性モーメント, } \omega_\theta: \text{剛体ロール共振周波数} \\ t: \text{時間, } K_\theta: \text{懸架系ばね定数, } C: \text{減衰係数} \\ \ddot{\phi}: \text{パワープラント角加速度} \end{array} \right)$$

振動系の応答は、任意の時間で分離した入力に対する個々の応答の重ね合わせとして求めることが可能であることから、畳込み積分定義式 (2) を用いて応答計算が可能である。

$$\varphi(t) = \int_0^t T_p(\tau) \cdot h(t-\tau) d\tau \quad \dots\dots\dots (2)$$

### 3 理論解析と振動低減手法

モータリング中のエンジン回転角速度を  $\omega_m$ 、ファイアリング中のエンジン回転角速度を  $\omega_f$  とすると、 $\omega_m$  はスタータの駆動トルクとエンジンの摺動抵抗のつり合いによって決まるため一定と考えられる。一方、 $\omega_f$  は初爆以降の点火によってアイドル回転数まで上昇を続けるため変数と考えられる。

よって、モータリング中とファイアリング中に区別して振動低減技術を検討する。

#### 3.1 モータリング中の振動低減技術

モータリング中のトルク変動は図 4 (a) のトルク変動の形状から式 (3) の正弦波で近似し、式 (1)、(2)、(3) より、パワープラントの振動の振幅  $|\ddot{\phi}(t_m)|$  は理論応答式 (4) に整理できる。

$$T_p = A \sin \omega_m t \quad \dots\dots\dots (3)$$

(A: 変動振幅,  $\omega_m$ : エンジン回転角速度, t: 時間)

$$|\ddot{\phi}(t_m)| = \frac{At_m}{I_y \left| 1 - \frac{\omega_\theta}{\omega_m} \right|} \quad \dots\dots\dots (4)$$

(A: 変動振幅,  $\omega_m$ : エンジン回転角速度, t: 時間)

理論応答式 (4) に基づきパワープラント振動  $|\ddot{\phi}(t_m)|$  を低減するには、分母  $|1 - \omega_\theta/\omega_m|$  を拡大することおよび、分子  $At_m$  を縮小することが有効であることが分かる。

#### 3.1.1 スタータの高回転化

理論解析によって導いた式 (4) の分母  $|1 - \omega_\theta/\omega_m|$  を拡大する方法について考える。 $\omega_m < \omega_\theta$  では、モータリング回転数が低くなり発進応答性、エンジン始動性が悪化する。よって、 $\omega_m > \omega_\theta$  となるようにモータリング回転数を高め、振動低減と発進応答性向上の両立を検討した。

モータリング中のエンジン回転角速度  $\omega_m$  はスタータ諸元で決まるため、スタータ諸元を変更し  $\omega_m$  を高回転化することを考える。類似の考え方でオルタネータの代替品としてモータージェネレータ (MG) と専用バッテリーを搭載し、MG の高トルクでエンジン起動する技術 (2) があるが、今回、既存部品の仕様変更で実現可能なスタータに着目し検討を進める。図 7 にスタータの概要図を示す。

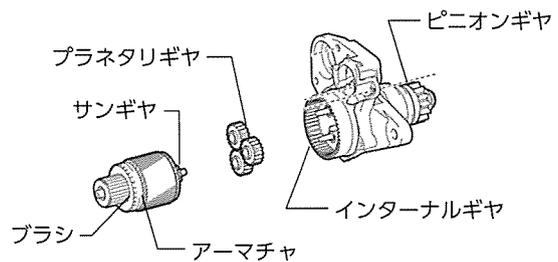


図7 スタータ内部構造

スタータはアーマチャと呼ばれる回転子を駆動させ、遊星ギヤ機構 (インターナル固定) とピニオンギヤを介してクランクシャフトに駆動トルクを伝達する。スタータ高回転化にはアーマチャの定格出力向上、遊星ギヤ機構およびピニオンギヤによる減速比の低減 (ハイギヤ化) の2つの方法がある。これらの方法による高回転化では、図 8 に示す過電流によりブラシの耐久性の課題があり、また、図 9 に示す搭載状況からスタータの大型化ができないという制約がある。

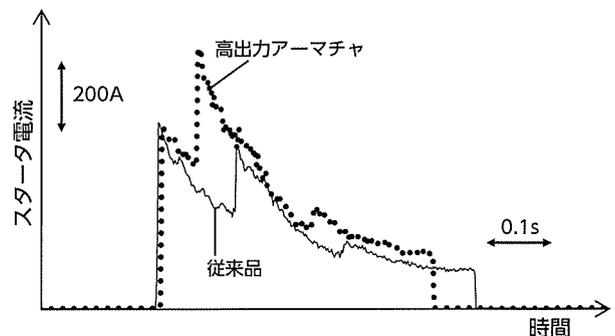


図8 電流増加

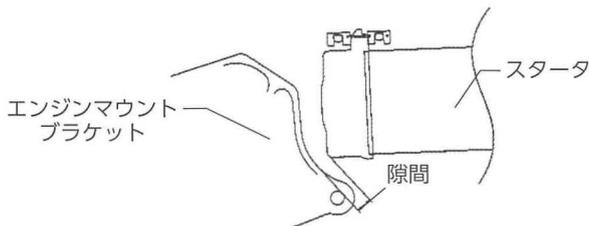


図9 スタータ搭載図

上記課題をブラシの材質変更による耐久性向上および同一寸法以下での定格出力、減速比の検討を行いスタータ諸元を決定した（定格出力：20%増、ギヤ比：24%減）。

スタータを変更して実車で検証を行った結果を図10に示す。ω<sub>m</sub>の上昇により振動増幅を抑制し、フロア振動を25%縮小できた。さらに、スタータ始動からアイドル回転数に達するまでのタイムラグを20%短縮でき、発進応答性を向上した。

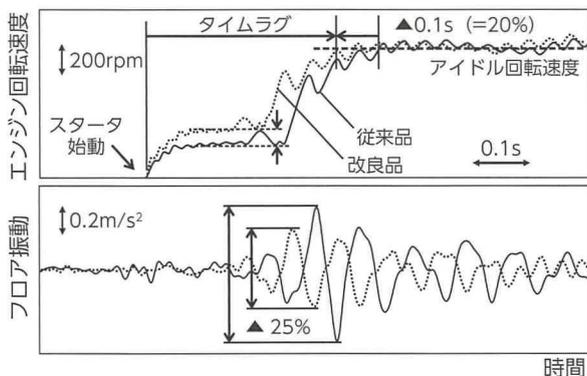


図10 スタータ高回転化による検証結果

### 3.1.2 圧縮比低減<sup>(3)</sup>

次に、式(4)の分子  $At_m$  を縮小する方法について述べる。初爆してファイアリングを始めるには、エンジン停止時に圧縮行程にいるピストンを膨張行程まで回す必要がある。つまり、スタータによるモータリングは少なくとも0.5回転必要のため、 $t_m$ を大幅に短縮することは困難である。

よって、 $A$ を小さくすることを考える。

$i$ 番気筒の圧縮・膨張行程で発生する1気筒分のトルク変動  $T_{pi}$  は式(5)に示すことができ、全気筒の合計  $T_p$  は式(6)となる。

$$T_{pi} = (p_i - p_0)r(\alpha + \beta) \dots\dots\dots (5)$$

$$T_p = \sum_i T_{pi} \dots\dots\dots (6)$$

ここで、各記号は以下の通りである。

$$\left( \begin{array}{l} \alpha = \sin\left(\theta_{crnk} + \frac{n_i\pi}{N}\right) \\ \beta = \frac{\sin\left(\theta_{crnk} + \frac{n_i\pi}{N}\right)\cos\left(\theta_{crnk} + \frac{n_i\pi}{N}\right)}{\sqrt{\lambda^2 - \left\{\sin\left(\theta_{crnk} + \frac{n_i\pi}{N}\right)\right\}^2}} \\ T_{pi} : i\text{番気筒発生トルク}, p_0 : \text{大気圧}, r : \text{クランク半径} \\ p_i : i\text{番気筒筒内圧}, N : \text{気筒数}, n_i : i\text{番気筒爆発順番} \\ \lambda : \text{連かん比}, l : \text{コンロッド長}, \theta_{crnk} : \text{クランク角} \end{array} \right)$$

式(3)で定義したように  $A$  は  $T_p$  の振幅であるため、式(5)、(6)より  $T_{pi}$  を小さくすること、つまり、筒内圧  $p_i$  を低減し大気圧  $p_0$  に近づけることで  $A$  を低減できることが分かる。筒内圧  $p_i$  を低減するため正味圧縮比の低減を検討する。

圧縮行程で吸気バルブを閉じる (IVC) タイミングを遅らせ、空気の逃げ道を確保することで正味圧縮比を低減する手段として、VVT-iE (Variable Valve Timing-intelligent by Electric motor) を利用する。VVT-iE はモータ駆動式の可変バルブタイミング機構であり、エンジンが停止している時でもIVCを遅角化し正味圧縮比を低下させることができる。それによってモータリング中の筒内圧  $p_i$  を低減させ、トルク変動振幅  $A$  を低減することが可能である (図11)。

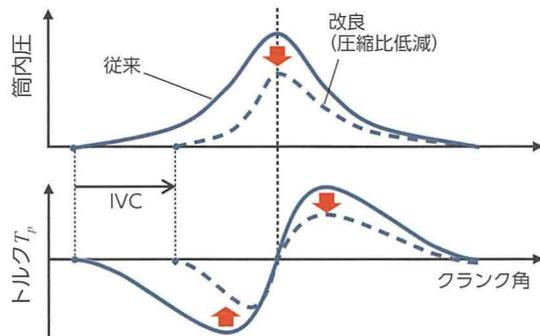


図11 実圧縮比低減時のトルク変動

実車を用いてIVCを20°遅角化した結果、フロア振動の大振幅で60%の低減効果が得られた (図12)。

ここで、基準のIVCは下死点後90°であり、変更後のIVCはVVT-iEの最大可動範囲の下死点後110°とした。

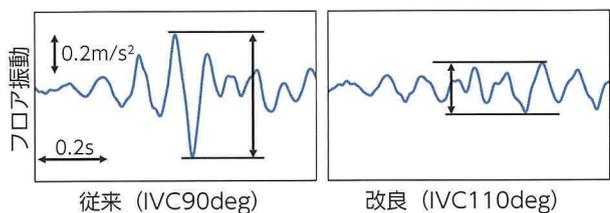


図 12 実圧縮比低減の検証結果

### 3.2 ファイアリング中の発進応答性向上技術

先に述べたように、正味圧縮比の低減により振動低減の効果があることが実証できた。正味圧縮比低減はファイアリング中の燃焼に伴う正トルク  $T_{exp}$  も小さくするため、エンジン回転角速度  $\omega_f$  を上昇させるエネルギーが減少してしまう。その結果、スタータ始動から発進までのタイムラグが延びることにより発進応答性が悪化する。

そこで、 $\omega_f$  の上昇率を上げるために、 $T_{exp}$  を拡大する手法として、点火遅角量を縮小する方法について述べる (図 13)。

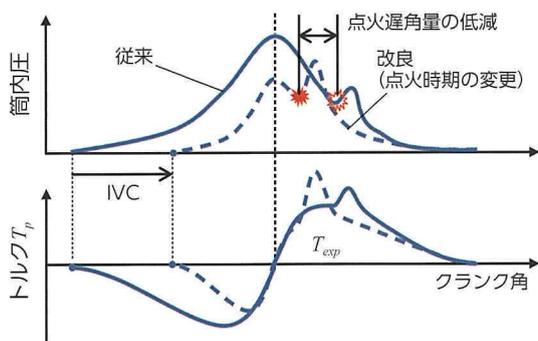


図 13 点火遅角量低減時のトルク変動

1 気筒あたりの筒内圧および体積の変化を、従来制御および IVC 遅角と点火遅角量縮小を組み合わせた制御変更後について図 14 の P-V 線図に示す。

ここで、従来制御と制御変更後の回転数上昇を同等にするため、4 サイクルでのピストンの正味の仕事を同等にすることを考えた。従来品と検討品で仕事量に差が生じている箇所を A ~ E で図中に示し、それぞれについて以下に説明する。

- A : 負の仕事 (従来制御 < 制御変更後)
- B, C, D: 正の仕事 (従来制御 < 制御変更後)
- E : 正の仕事 (従来制御 > 制御変更後)

つまり、式 (7) が成り立つように点火の遅角量を縮小することで、応答性の悪化を防ぐことができる。

$$-A+B+C+D \geq E \quad \dots\dots\dots (7)$$

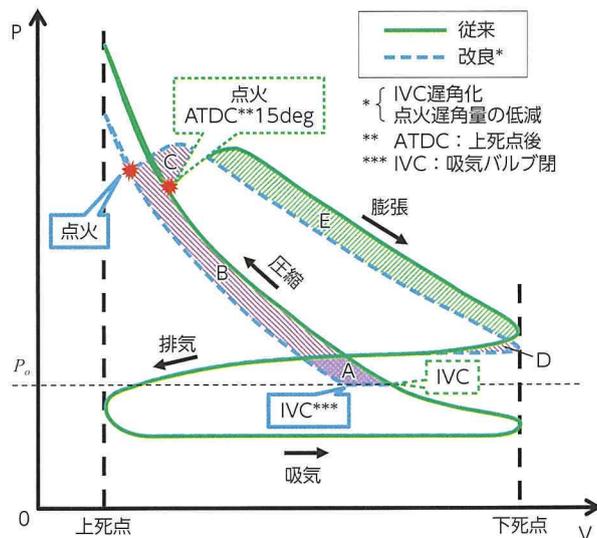


図 14 燃焼制御最適化 (P-V 線図)

## 4 実車への適用

スタータ高回転化、圧縮比低減、点火遅角量縮小を織り込んだ結果、振動低減と発進応答性向上を達成できた (図 15)。

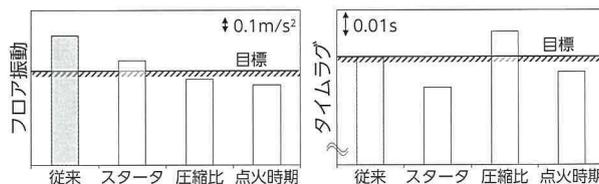


図 15 発進応答性とフロア振動の検証結果

## 5 おわりに

- (1) エンジン起動時振動における強制力と振動伝達経路の応答特性を時間軸で解析することにより、振動低減技術と発進応答性向上技術を開発した。
- (2) スタータの諸元を変更し高回転化することによって振動低減および発進応答性向上を可能にした。
- (3) 正味圧縮比と点火時期の組合せ技術によって振動低減と発進応答性の両立を可能にした。
- (4) 提案した技術は低コストで実現可能である。

■参考文献

- (1) マツダ株式会社：内燃機関の制御方法及び内燃機関システム. 特開 2011-89467 (2011.5.6)
- (2) 古性賢也 他：アイドルストップ技術の紹介. 日産技報. No.68, P.60 - 64 (2011)
- (3) 栗野誠一：内燃機関工学. 山海堂, 1958

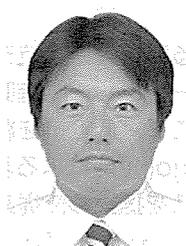
■著者



三木 武



松宮 拓也



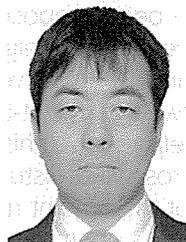
石崎 啓祐



榎本 弘



三上 康之



大屋 啓

# Adjoint 法を用いた空力形状最適化の検討

Aerodynamics Design Optimization Using Adjoint Method

下川 真之介<sup>\*1</sup>      久保田 正人<sup>\*1</sup>      平野 茂<sup>\*1</sup>  
 Shinnosuke Shimokawa    Masato Kubota      Shigeru Hirano  
 弦田 遼平<sup>\*1</sup>      板倉 英二<sup>\*1</sup>      中谷 浩之<sup>\*1</sup>  
 Ryohei Tsuruta      Eiji Itakura      Hiroyuki Nakatani

## 要旨

将来の厳しい環境・エネルギー問題に向けて求められる軽量・低抵抗モビリティにおいては車両の基本性能の一つである横風安定性の低下が予想される。その一因として直進時の空気抵抗と横風時に車両を旋回させてしまう空力ヨーモーメントの相反性がある。そこで、低抵抗を維持しながらも横風外乱影響を低減させる車両形状を検討するため、逆解析手法である Adjoint 法による表面形状感度解析および複数特性に対する感度合成を用いた車両の空力形状最適化プロセスを提案し、従来のトレンドラインよりも空力特性の背反（低抵抗 - 横風安定性）を両立させる外形形状の最適化を実証した。

## Abstract

Lightweight and low-drag forms of transportation have been proposed to help resolve difficult long-term environmental and energy-related issues. However, these weight and drag characteristics are likely to reduce crosswind stability, which is an important aspect of vehicle performance. One factor causing lower crosswind stability is the reciprocity between straight-line drag and aerodynamic yaw moment when the vehicle turns in a crosswind. To help resolve this issue, vehicle designs capable of maintaining low drag while reducing the effects of crosswind disturbances were studied using the adjoint method. This article describes the application of the adjoint method to analyze the sensitivity of surface design elements and to propose an aerodynamics optimization process based on composite sensitivity analysis of multiple characteristics. Finally, this article demonstrates the results of exterior design optimization that improves conflicting aerodynamic characteristics (i.e., low drag and crosswind stability) beyond the current trend line.

キーワード Adjoint 法, 空力形状最適化, 横風安定性, 空力ヨーモーメント, 空気抵抗, 軽量・低抵抗モビリティ

## 1 はじめに

将来の厳しい環境・エネルギー問題に向けて、既存車よりも大幅に空気抵抗を減らし、さらに軽量化を推し進めた省エネモビリティの必要性が議論されている。このようなモビリティは広く多く、段階的に普及させることが肝要であり、既存車並みの高速走行性能・居住性を持ち、また制限走行レーンのような新たなインフラを必要とせずに既存車や大型車両との混走が可能なが望まれる。

ところが、このような軽量・低抵抗モビリティの場合、車両の基本性能の一つである横風安定性の低下が予想される。一定の車両サイズを保ったまま軽量化した場合、空力外乱の大きさは変わらないが、タイヤの垂直荷重減少に伴い制動力（横力）が低下するため、車両運動への横風影響が増す。さらに車両形状を低抵

抗化させた場合、無風直進時の空力抵抗係数（CD）と横風時に車両を旋回させてしまう空力ヨーモーメント係数（CY）の相反性<sup>(1)</sup>により、横風外乱に対して車両はさらに不安定になり、特に横流され量が既存車に比べより顕著になる恐れがある<sup>(2)</sup>。

そこで、将来の軽量・低抵抗モビリティの実現に向けて、無風直進時の CD をなるべく下げながらも、横風時の車両運動に寄与する CY や、空力横力係数（CS）、空力揚力係数（CL）などを低減させる車両形状生成技術が必要である。

これに対し CFD（数値流体解析）での性能予測計算が有効であるが、従来のようなパラメータスタディによる形状適合では、複数の特性を両立させる最適形状を求めるために膨大な形状パターンによる検討が避けられず、開発に期間、コストを要することとなる。

<sup>\*1</sup> 未来創生センター 未来研究部

一方、これまで徳田<sup>(4)(5)</sup>、久保田<sup>(6)</sup>らは逆解析手法である Adjoint 法による一連の形状最適化技術を研究し、汎用流体計算ソフトと組み合わせて任意の流体性能に対して有効な形状変更の指針を感度解析から得る技術を開発し、吸気ポート内流れなどを対象に設計に対する有効性を実証してきた。

そこで今回、将来省エネモビリティのあるべき姿として無風直進時と横風時の空力特性を両立させる車両形状を検討するために、Adjoint 法による表面形状感度解析を用いた CFD による車両の外形形状最適化検討プロセスを提案し、最低限の形状変更で CD 増加を抑えた CY 低減（図 1）が可能であることを実証する。

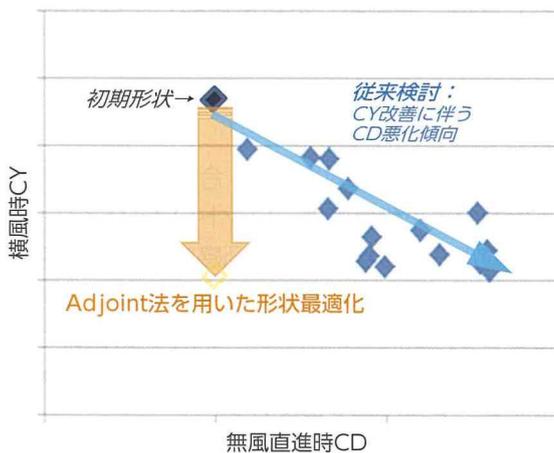


図 1 空力背反を両立させる形状最適化

## 2 Adjoint 法による表面形状感度解析

### 2.1 理論概要

設計変数である形状表面の任意の節点  $i$  の座標を  $\alpha_i (i=1, 2, \dots)$ 、速度や圧力といった流れ場の状態量を  $\mathbf{u}(\alpha_i)$ 、ナビエ-ストークスの式や連続の式といった流れ場の支配方程式を  $\mathbf{R}(\mathbf{u}(\alpha_i), \alpha_i)$  とする。そして、ラグランジェ未定乗数ベクトルを  $\lambda$  とした時、拘束条件のある関数  $f(\mathbf{u}(\alpha_i), \alpha_i)$  の極値問題は、拘束条件のないラグランジェ関数  $L$  の極値問題に変換できる、というラグランジェの未定乗数法を使うとこのラグランジェ関数  $L$  に対する設計変数  $\alpha_i$  の感度は図 2 となり、従来の計算コストの要因であった形状の変化が流れの状態量に与える影響  $\partial \mathbf{u} / \partial \alpha_i$  を消去するため、Adjoint 方程式からラグランジェ未定乗数  $\lambda$  を求めることで、全ての節点の感度を算術計算だけで求めることができるというものである。

ラグランジェ関数  $L$  に対する設計変数  $\alpha_i$  の感度

$$\begin{aligned} \frac{dL}{d\alpha_i} &= \left( \frac{\partial f}{\partial \mathbf{u}} \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \alpha_i} + \frac{\partial f}{\partial \alpha_i} \right) + \lambda' \left( \frac{\partial \mathbf{R}}{\partial \mathbf{u}} \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \alpha_i} + \frac{\partial \mathbf{R}}{\partial \alpha_i} \right) \\ &= \left( \frac{\partial f}{\partial \mathbf{u}} + \lambda' \frac{\partial \mathbf{R}}{\partial \mathbf{u}} \right) \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \alpha_i} + \left( \frac{\partial f}{\partial \alpha_i} + \lambda' \frac{\partial \mathbf{R}}{\partial \alpha_i} \right) \end{aligned}$$

$\frac{\partial f}{\partial \mathbf{u}} + \lambda' \frac{\partial \mathbf{R}}{\partial \mathbf{u}} = 0 \Rightarrow \lambda$  を求める  
 この項の算術計算だけですべての感度が求められる

図 2 Adjoint 法による感度解析

### 2.2 解析条件

解析にあたっては、市販 CFD ソフトウェアの結果を利用しながら、独自に有限体積法に基づき離散化式を構築した Adjoint 法プログラムに対して、今回、各空力六分力を目的関数  $f(\mathbf{u}(\alpha_i), \alpha_i)$  として定義する機能拡張を行ったものを用いた。そして外形形状の感度解析において、大規模モデルでの感度計算がどの程度で収束するか未知であったことと、将来的に実用的な計算時間で運用する必要があることから、今回はオリジナルの低 CD 小型車（図 3）のアップーボデーに注目し、必要最小限の計算規模として、床下形状はフラット面で模擬した総セル数 400 万の CFD モデルで感度解析を行う。

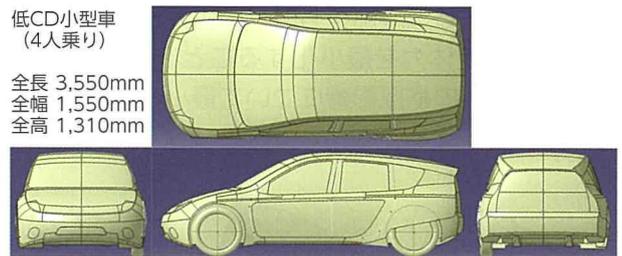


図 3 解析検討モデル

## 3 Adjoint 感度に基づく空力改善形状の検討

### 3.1 Adjoint 感度解析結果

前述のモデルに対する Adjoint 法による CD の最小化感度解析の結果を図 4 に示す。青く表示されている部分は面を凹ますことで、赤い表示は面を膨らますことで特性を改善できる部位であることを示している。また、各感度の濃淡は、濃い感度である程、単位変形量あたりの特性改善代が大きいことを意味する。

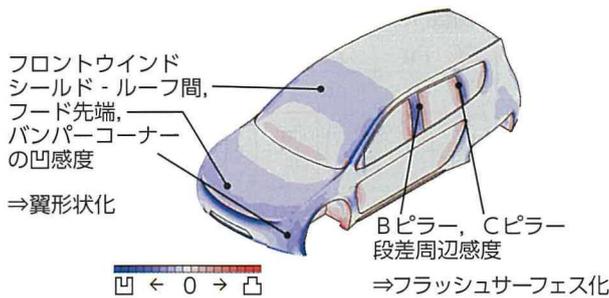


図4 感度に基づく無風直進時のCD低減形状提案

それぞれの感度部位を見てみると、フード先端や、フロントウインドシールドとルーフの間、またはバンパーコーナーへの青い感度、即ち凹ます感度が出ていることから、車両断面形状の更なる翼形状化を促しており、またはBピラー、Cピラーの段差周辺の感度から、これらの部位でのフラッシュサーフェス化をそれぞれ促していることがわかり、今回の感度分布に一定の妥当性があり、この感度分布が示す凹凸や寄与に基づいた空力改善形状の検討が可能であることがわかった。

### 3.2 横風時の感度合成

次に横風時を想定した時のCY, CS, CLについての感度解析結果を図5に示す。いずれも車両左側からの横風に対する特性の最小化感度だが、風上と風下で背反する感度部位もあり、固定形状で横風を受けた時の流体力を最小化することを考える場合、左右両方からの横風影響について最小化する感度を考える必要がある。

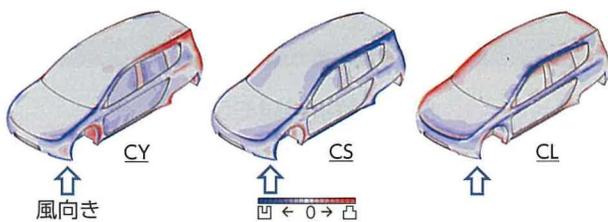


図5 車両左側からの横風時の空力特性最小化感度

そこで左側から横風を受けた場合の感度分布を左右反転させることで右側から横風を受けた場合の感度分布とし、これらの感度は左右で目的関数が同

じ、かつ単位感度に対する目的関数の寄与度が同じであるため、左右の感度値を単純加算することで左右の横風に対する合成感度として扱う(図6)。

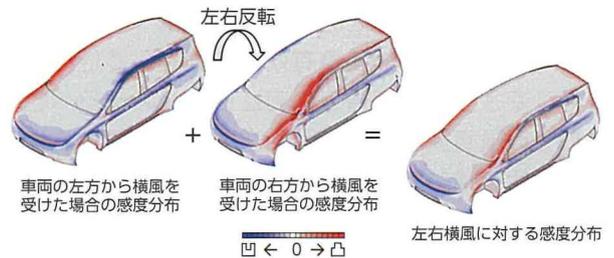


図6 左右横風に対するCL感度合成

この場合、ある部位で左側からの横風に対しては大きな凸感度、右側からの横風に対しては小さな凹ませる感度であった場合、合成感度は凸感度となるので、左右で背反が生じても、寄与度の大きい感度を反映させることができる。

今回の左右の横風に対するCL合成感度から、図7に示す揚力の最小化感度はフロントウインドシールドの左右端やルーフのリア端での凸感度から、曲率低減を示しており、これらの曲部での増速を抑え、負圧化を緩和させる、またバンパー-フード間の段差拡大を促しており、この部位での剥離によってフード部の負圧を緩和することが可能と見られる。

このように、左右の横風に対する合成感度からも車両形状にフィードバック可能な指針が得られることが分かった。

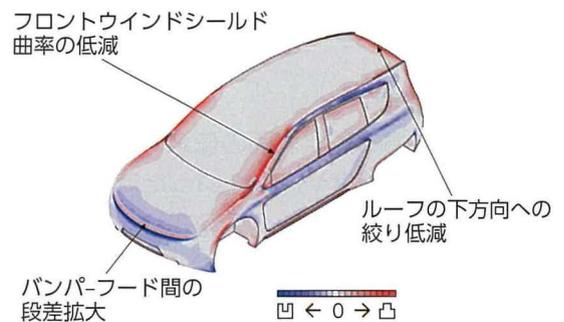


図7 左右横風に対する合成感度分布に基づくCL改善形状の提案

### 3.3 複数特性両立感度の合成

これまで示してきたような各特性の複雑な感度分布から、それらの背反を考慮して形状変更を検討するのは困難なため、次に各特性感度の合成を考える。特に今回は効率的に合成感度を求めるロジックとして、2つの目的関数の感度をそれぞれ  $S_1$ ,  $S_2$  とした場合、**図8**に示す AND 型合成感度  $S$  を考える。

この場合、ケース1と2のように各々の感度の符号が同一の場合は同一方向の感度となり、逆に、ケース3と4のようにそれぞれの感度の符号が異なる場合には、合成感度はゼロとして扱う。また、ケース5のように片方 ( $S_1$ ) の感度は大きい、もう一方 ( $S_2$ ) は小さい感度の場合、二乗平均によって低い方の感度 ( $S_2$ ) の影響を受けて合成感度 ( $S$ ) は非常に小さな感度の分布となる。

今回はこのように、一方の目的関数 (1) に対して高い感度をもつ、すなわち空力性能に直結する部位でありながら、もう一方の目的関数 (2) に対して感度が非常に小さい、ゼロに近いということは、その部位がその目的関数 (2) に対して寄与度が低い場合だけでなく、既に理想形状を構成している場合もあるため、その部位を变形することで、もう一方の特性が悪化することを避けるため、今回の検討では保守的な立場をとり、合成感度がほぼゼロとなるモデル化を採用することとした。

この AND 型合成を用いた複数特性の最小化感度を**図9**へ示す。それぞれ左右横風時の CY, CS, CL の最小化感度分布、およびこれらの AND 合成で得られた3特性すべての空力特性を最小化する感度分布である。このような AND 合成を行った感度分布から、バンパーコーナーを凹ませる变形やフロントウインドシールドの曲率低減などといった形状変更の指針が得られ、対象部位は限られるものの、複数特性を同時に改善する形状変更部位が得られた。

AND型合成感度

$$\begin{aligned}
 S_1 < 0, S_2 < 0 & : S = -\text{SQRT}(S_1 * S_2) \\
 S_1 > 0, S_2 > 0 & : S = +\text{SQRT}(S_1 * S_2) \\
 S_1 < 0, S_2 > 0 & : S = 0 \\
 S_1 > 0, S_2 < 0 & : S = 0
 \end{aligned}$$

	目的関数1の感度： $S_1$	目的関数2の感度： $S_2$	AND型合成感度： $S$
ケース1			
ケース2			
ケース3			
ケース4			
ケース5			

図8 複数特性両立感度の合成

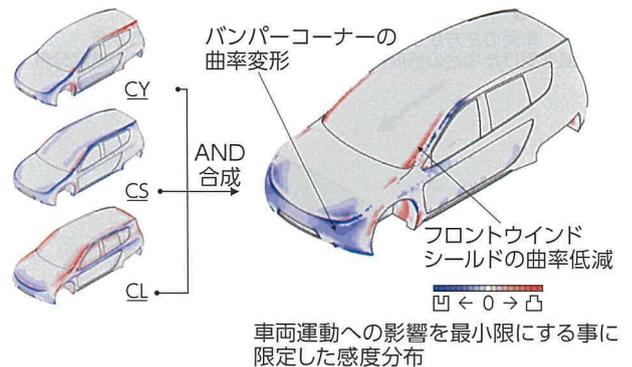


図9 AND 型合成を用いた複数特性最小化感度

## 4 風洞試験による空力改善効果の検証

### 4.1 検討内容

このような Adjoint 法による特性最小化感度分布を利用した空力形状最適化を実際に行い、風洞試験でその空力特性改善効果を次の二つの観点で検証する。

- (1) CY の左右合成感度を基にした形状変更による CY 単特性の低減効果の確認。
- (2) CD-CY の AND 型合成感度を基にした形状変更による CY と CD の低減効果の確認。

今回の実証では先程のオリジナルモデルに対し、1/4 スケールのクレイモデルを用いた風洞実験を実施し、そこでモデラーと形状追従性を考慮しながらスケールモデル上で最大変位 10mm、実車スケールで 40mm 相当、を目安とし、感度を基にしたクレイコントロールによる形状変更によって、どの程度、空力特性が最適化可能か検証を行う。

### 4.2 感度に基づく形状変更

図 10 に左右の横風に対する CY 低減の感度分布を示す。①～⑧に示すような CY 改善の可能性がある多くの形状変更部位が得られた。

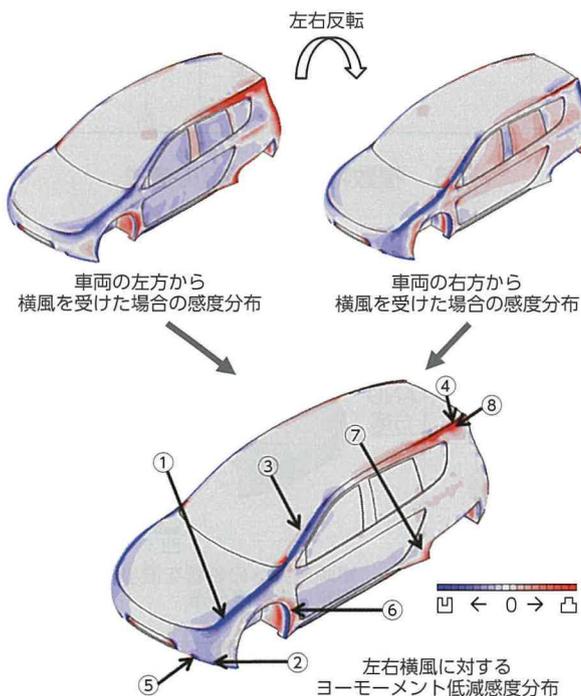


図 10 横風時 CY の左右合成感度

この CY 低減感度分布と先述の無風直進時の CD 低減の感度分布を AND 合成した感度分布 (図 11) から先述の CY 単独の感度分布の中から、①～④に示すような CD と CY の両立の可能性がある感度部位を抽出することができた。

以上のような感度分布から、CD-CY の AND 合成感度分布で抽出できた 4 箇所に対して上流側の①から下流側の④の順番にクレイモデルの修正を行い、さらに、残りの CY 低減感度部位⑤～⑧に対して同じく上流側から順番にクレイモデルの修正を行い、CY 低減を試みた。その際、CY 低減効果が得られなかった箇所は元の形状に戻し、次の下流側の感度部位の形状変更を行い、効果のあった形状変更のみを積み上げていくこととした。

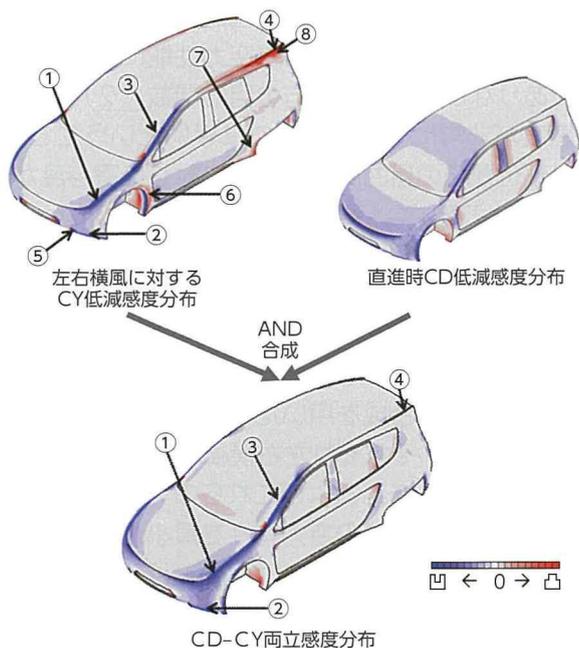


図 11 AND 型合成を用いた CD-CY 最小化感度

その結果、①、④、⑤、⑥、⑧の感度部位への形状修正 (図 12) によって CY 特性が改善し、最終的に従来車両のトレンドよりも CY-CD の背反を両立させながら CY をベース形状から 57pt 低減することができた (図 13)。今回の形状変更箇所の中には全体の流れにどう影響し改善効果が得られたかの理由が明確でない箇所もあり、従来のノウハウだけに頼るのではない感度を基にした最適化のメリットが得られたと言える。



図 12 感度を基にした形状変更

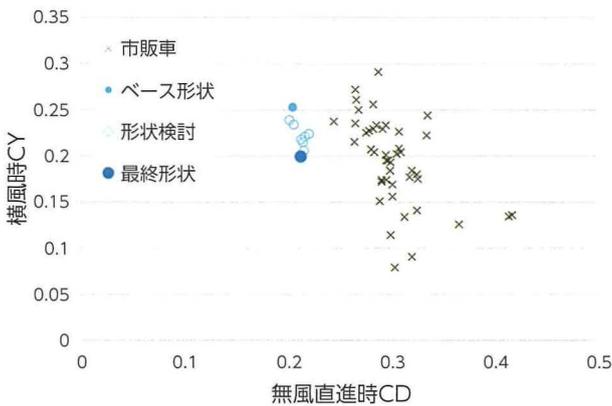


図 13 形状変更による背反特性の両立

## 5 考察

今回の検討では CY-CD 両立感度を基にした形状変更で CY は 35pt 改善, CD は 8pt 悪化した。また CY 単独感度で見た場合, CY は 57pt 改善, CD は 10pt 悪化した (図 14)。以上のような合成感度に基づいた形状変更の考察を行う。

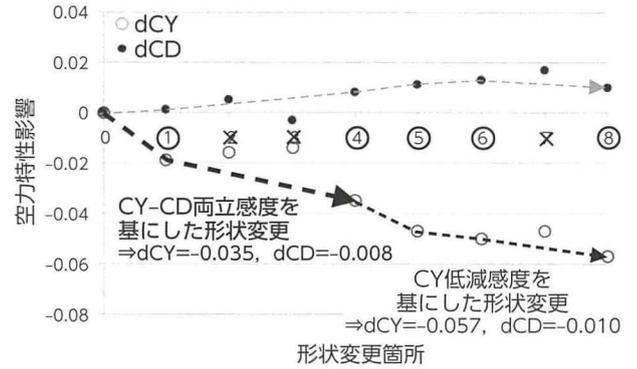


図 14 感度を基にした形状変更による CY 改善

まず, Adjoint 解析で感度が得られたにも関わらず, 今回の風洞試験で特性の両立や改善の効果が得られなかった箇所は試験誤差の可能性もあり得るが, Adjoint 解析のベースとしている CFD 計算の精度不足も要因として考えられる。そのような誤差以外にも, Adjoint 法による感度はあくまで線形領域である微小変形を仮定したものであるため, 感度解釈の誤り, 形状変更を大きく与え過ぎた, もしくは上流での形状変更によって後流側での感度が変わった, といった理由も考えられる。

さらに今回, CD-CY の AND 型合成感度において, CY 単独感度での⑧で得られたような特性を両立させる感度を抽出できなかった箇所については, 今回の AND 合成では, CD 感度の低い箇所に関して性能悪化を防ぐ目的で合成時に感度を低く評価したことになるが, 実際には CD への寄与が低い箇所であったことが予想される。

## 6 おわりに

Adjoint 法による表面形状感度解析を用いた CFD により車両形状の空力特性最適化検討を行い, 下記の結果が得られた。

- (1) 横風時の空力特性において, 一方からの風に対する感度を反転させることで逆向きから風に対する感度とし, それぞれの横風に対する感度を単純加算することで, 左右の横風に対する合成感度分布を得ることができた。
- (2) 複数特性の AND 合成を行った場合, 横風特性の向上を目指した 3 特性 (CY, CS, CL), または無風直進時 CD と横風時 CY の両立を目指した 2 特性の合成感度が十分利用可能であることがわかった。

- (3) これらによって膨大な解析コストや検討期間を必要とすることなく、従来のトレンドよりも空力特性の相反性（無風直進時 CD と横風時 CY）を両立させた車両外形形状の最適化が可能であった。

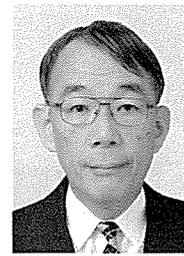
#### ■参考文献

- (1) Hucho W.-H. : Aerodynamics of Road Vehicles 4<sup>th</sup>ed. Warrendale, PA USA. Society of Automotive Engineers. pp.246 - 249 (1998)
- (2) 丸山喜久, 山崎文雄 : 横風強風時の車両走行安定性に関する基礎的検討, 生産研究, Vol.55, No.1, pp.109 - 112 (2003)
- (3) 炭谷圭二ほか : 自動車と流体力学 : 車体周り流れと空力特性. 日本流体力学学会ながれ. Vol.23, pp.445 - 454 (2004)
- (4) 徳田茂史, 久保田正人, 坂本博信, 野口泰 : Adjoint 法による吸気ポートの形状最適化. 自動車技術会論文集. Vol.43, No.4, pp.943 - 948 (2012)
- (5) Tokuda, S., Kubota, M. and Noguchi, Y. : Development of CFD Shape Optimization Technology using the Adjoint Method and its Application to Engine Intake Port Design, SAE Technical Paper 2013-01-0969 (2013)
- (6) 久保田正人, 徳田茂史, 野口泰 : 非定常 Adjoint 法による CFD 逆解析技術の開発とエンジン筒内流れへの適用. 自動車技術会論文集. Vol.46, No.2, pp.539 - 544 (2015)

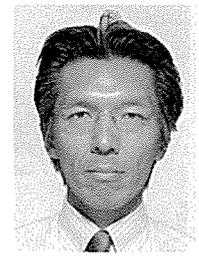
#### ■著者



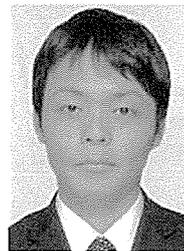
下川 真之介



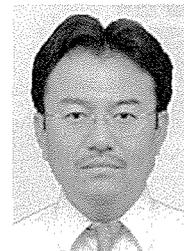
久保田 正人



平野 茂



弦田 遼平



板倉 英二



中谷 浩之

# ニューラルネットワークを用いた機械学習による 対話ロボット向け話題推定技術の研究

Topic Estimation Technique for Dialogue Robot Using Neural-Network-Based Machine Learning

高谷 智哉<sup>\*1</sup> 山田 整<sup>\*1</sup>  
Tomoya Takatani Hitoshi Yamada

## 要旨

本研究では、高齢者の認知症の未然防止を目的とした雑談対話システムにおける、ユーザ発話から話題を推定する技術について取り組んでいる。従来の話題推定技術では、あらかじめ収集した高齢者会話データから「話題と関連する形態素との繋がり度合い」を学習することができるが、学習データが少量の場合繋がり度合いを学習できず、話題推定率が劣化する問題を抱えていた。本稿では、ニューラルネットワークを用いた機械学習による新しい解決手法について論ずる。

## Abstract

This study is developing an estimation technique capable of recognizing topics from user utterances. This technique can be applied to a robot dialogue system as a measure to help prevent the onset of dementia. Conventional techniques are capable of learning network models between topics and words from real conversation training data. However, if the amount of training data is low, the topic estimation performance of the conventional method becomes degraded. To help resolve this issue, this article proposes a novel solution using machine learning based on a neural network.

キーワード 雑談対話システム, 話題推定, word embedding, ニューラルネットワーク, 線形変換

## 1 はじめに

2025年には、日本の人口の3割が65歳以上の高齢者となり、認知症を患った高齢者は2000年比で倍増すると予想されている<sup>(1)</sup>。認知症患者には、物忘れや同じ話を繰り返し話すなどの中核症状が現れるだけでなく、物を誰かが盗ったという「物盗られ妄想」、患者自身の家に幻の同居人がいるという「誤認妄想」、自分のいる場所や時間の見当識が障害を受けたことによる「徘徊」などの周辺症状が現れることが知られている<sup>(2)</sup>。周辺症状が現れた場合、介護する家族の負担は大きく、家族が精神病に罹患するなど別の問題を引き起こす事例が報告されている。パートナーロボット部では、介護者の負担軽減を目的とした、「対話ロボットによる認知症患者の話し相手代行<sup>(3)</sup>」や「高齢者の認知症の未然防止」を提案している。

図1に示すようなコミュニケーションパートナーロボットが認知症患者の話し相手になるためには、Apple社のSiriやGoogle社のVoice Searchのようなユーザの質問に対して正しい回答

を返す対話ではなく、ユーザの話に相槌・共感応答・オウム返しなどの傾聴する機能が必要となる。また、高齢者は、定年退職により社会との接点が急激に減るため、認知症に陥りやすい傾向がみられる。高齢者の会話は、認知症患者のように繰り返し同じ話を繰り返し話すような傾向はみられず、所謂井戸端会議のように、話題に対して情報を交換する雑談対話が多いことが事前調査でわかっている。筆者らは、高齢者の認知症未然防止を目的とした雑談対話システムの開発に取り組んでいる。



図1 コミュニケーションパートナーロボット

\*1 未来創成センター パートナーロボット部

## 2 雑談対話システム：サンプリング対話システム

### 2.1 概要

筆者らは、サンプリング対話システムと呼ぶ雑談対話システムを開発している<sup>(4)(5)</sup>。サンプリング対話システムは、高齢者同士の井戸端会議に着想を得、ユーザの話と同話題の文をユーザに回答する雑談対話システムである。サンプリング対話システムの処理フロー図を図2に示す。システムは大きく4モジュールで構成され、①音声認識モジュール、②話題推定モジュール、③応答文選択モジュール、④音声合成モジュールがある。話題推定モジュールは、音声認識結果を形態素解析により形態素列に分割し、形態素列から話題を推定する。応答文選択モジュールは、話題、ユーザ発話内の名詞、ユーザ嗜好を手掛かりとして、応答文データベース（以下、応答文DB）から適切な文章を選択する。本システムは、ユーザがシステムに向けて話した会話を蓄積（サンプリング）し、応答文として活用する。従って、ユーザがシステムに話す機会が増えれば増えるほど、システムは応答できるバリエーションが増加するという特性を持つ。

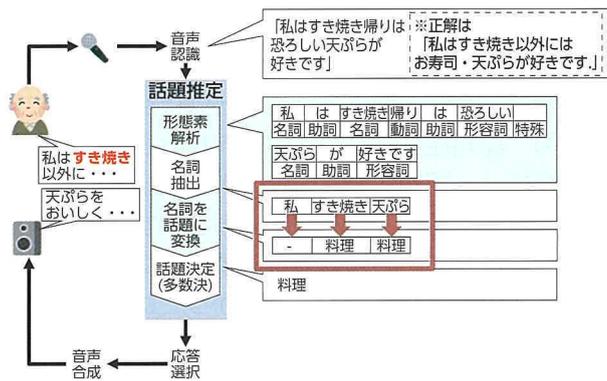


図2 サンプル対話システムの処理フロー

図3に、本特性に対するユーザのシステム利用時間を調査した予備実験の結果を示す。実験は、被験者を2クラスに分け、クラス1では1週間応答文DBを更新させた後、次の1週間では固定の応答文DBで実験を行い、クラス2では2週間連続して応答文DBを継続的に更新させた。結果より、応答文が日々変化することにより、ユーザのシステム継続時間が維持もしくは改善されることが示されている。認知症の未然防止には、継続的にシステムを利用いただくことが求められており、本対話システムの基本構想に合致しているといえる。しかしながら、アンケート調査において、システムの応答が頓珍漢

だという評価が散見され、応答の質を上げる必要がある(図4参照)。ログ解析結果より、その課題の多くが話題推定モジュールに起因していることが判明した。

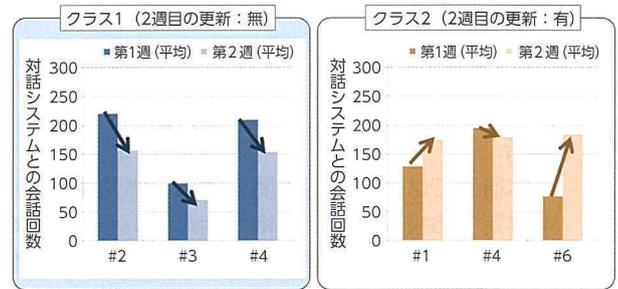


図3 応答文データベース更新有無によるユーザのシステムとの会話回数の増減

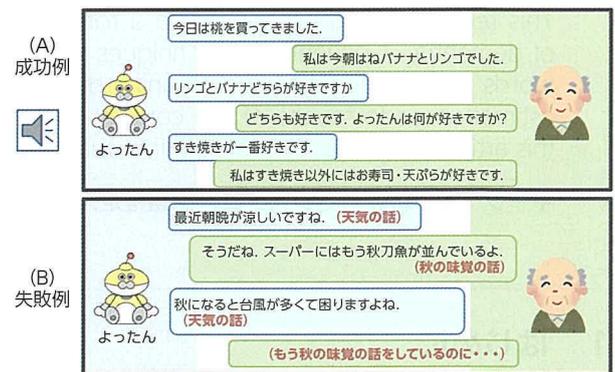


図4 予備実験におけるロボットとユーザの会話例

### 2.2 話題推定モジュールの定式化

話題推定モジュールは、ユーザの発話1文内の形態素列  $\{w\}$  を入力とし、あらかじめ用意された  $I$  個のクラスの中から最適な話題  $i^*$  を出力する。本研究では、形態素の発生事象は独立な事象と仮定し、形態素列は形態素の独立な発生事象の総和で表せられるとする。形態素を数値として扱うために、one-hot 表現を用いている。one-hot 表現とは、特定の次元だけが1、他の次元は0となるベクトル表現である。ベクトルの次元数には、システム内にあらかじめ用意した語彙数  $J$  を設定する。ある形態素  $w_j$  が出現した場合を考える。この場合、文ベクトル  $W^{[1]}$  は式(1)となる。

$$W^{[1]} = [W_1, \dots, W_j, \dots, W_J]^T = [0, \dots, 1, \dots, 0]^T \dots \dots \dots (1)$$

発生事象の独立性仮定より、形態素列  $\{w\}$  を表す文ベクトル  $W$  は其々のベクトルの重ね合わせで表現できるため、式(2)となる。

$$W = \sum_j W^{[j]} \dots\dots\dots (2)$$

話題の推定は、形態素列  $\{w\}$  を文ベクトル  $W$  で表現し、線形変換行列  $U$  を作用させ、 $I$  個の話題の中から最適な話題  $i^*$  を選択することに相当する。

$$\begin{bmatrix} Y_1 \\ \vdots \\ Y_i \\ \vdots \\ Y_I \end{bmatrix} = UW = \begin{bmatrix} U_{11} & \dots & U_{1j} & \dots & U_{1I} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ U_{i1} & \dots & U_{ij} & \dots & U_{iI} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ U_{I1} & \dots & U_{Ij} & \dots & U_{II} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_1 \\ \vdots \\ W_j \\ \vdots \\ W_I \end{bmatrix} \dots\dots\dots (3)$$

$$i^* = \operatorname{argmax}(Y_i) \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 $U_{ij}$  は線形変換行列  $U$  の  $i$  行  $j$  列の要素である。また、上記変換過程は、 $J$  個の入力ノードと  $I$  個の出力ノードを単純に結んだニューラルネットワークと捉えることができ、式 (3) で示した線形変換行列の要素  $U_{ij}$  は、ノード間のエッジ (結合) の重みとみることができる。つまり、ノード  $W_j$  の発火は、重み付け係数  $U_{ij}$  を反映して伝達され、話題空間の話題ノードの発火を促すとみなせる。本研究では、システム内に用意する語彙数  $J$  を会話に出現し得る形態素 30 万語とし、システムが同定する話題数  $I$  を高齢者同士の会話で頻出した 18 話題とした。本条件下では、求めるべき線形変換行列の要素  $U_{ij}$  の総数は 540 万個となる。

### 2.3 従来技術による線形変換行列 $U$ の学習

従来技術では、会話データ内の頻度情報から算出される条件付き確率  $P(y_i|w_j)$  で線形変換関数  $\mathcal{H}_{ij}$  を置き換えている。具体的には、形態素  $w_j$  が出現したときに話題  $Y_i$  である条件付き確率  $P(y_i|w_j)$  を算出し、それを二値化した値を  $\mathcal{H}_{ij}$  として用いる。

$$P(y_i|w_j) = P(y_i, w_j) / P(w_j) \dots\dots\dots (5)$$

$$\mathcal{H}_{ij} = \begin{cases} 1 & P(y_i|w_j) > Th \\ 0 & \text{else} \end{cases} \dots\dots\dots (6)$$

ただし、 $P(y_i, w_j)$  は形態素  $w_j$  と話題  $y_i$  の共起確率、 $P(w_j)$  は形態素  $w_j$  の出現確率を示し、 $Th$  は 0 以上 1 未満の閾値を示す。

### 2.4 従来技術の話題推定の問題点

従来技術の課題は、「低頻度で出現する」、もしくは、「一度も出現しない」形態素と話題間の条件付き確率  $P(y_i|w_j)$  が算出できない場合がある点である。図 5 にイメージ図を示す。これは、推定すべきパラメータである  $U_{ij}$  の数が、540 万個と膨大であるにも関わらず、そのパラメータ推定の過程が少量の実会話データから直接条件付き確率を求めている点による。また、実会話データでは高齢者が日常的によく使う形態素から採取されるため、システムとの対話においても頻出する形態素から採取できることになり、リーズナブルであるといえる。しかしながら、高齢者が日常的に「よく使う形態素」はユーザの話し方や個性に因るため、採取された形態素は偏る傾向にある。また、あるユーザで得られた「よく使う形態素」は必ずしも他のユーザにおいても「よく使う形態素」ではないため、出現確率  $P(X_j)$  が算出できないケースを引き起こすことになる。これにより、話題推定に必要なパラメータ  $U_{ij}$  が未学習となる。本課題を打開するために、複数ユーザによる平均化作用により未出現形態素を削減する等の方策が考えられるが、実会話の収集コストは高く、現実的な解に至らなかった。

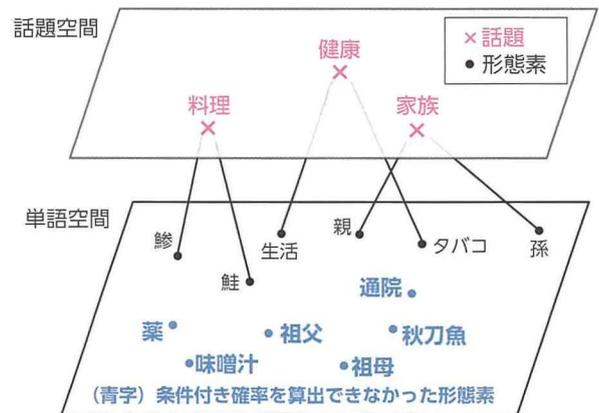


図 5 形態素と話題間の関係 (従来)

## 3 提案技術

### 3.1 研究方針

本研究では、話題の近傍に「関連する形態素」が配置される仕組みを構築し、ネットワーク重みである  $U_{ij}$  を形態素と話題間の距離で表現することを考える。図 6 に基本概念図を示す。

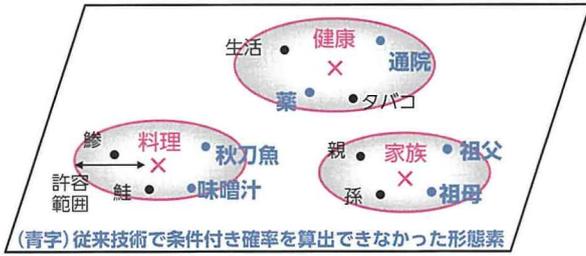


図6 提案アプローチにおける基本概念図

本仕組みを実現するためには、2つの技術的課題をクリアする必要がある。

【技術的課題①】形態素同士の意味の近さ / 遠さの数値化

【技術的課題②】話題と関連する形態素の配置法

従来の one-hot 表現では、形態素をベクトル表現しているが、先述の通り形態素の出現有無を表すだけであり、形態素の意味を表現するに至っていない。また、仮に形態素の意味をベクトル化された場合であっても、関連する形態素が話題の近くに配置される保障がなく、なんらかの処理により形態素の配置を制御する必要がある。今回の取り組みでは上記課題に対して下記実現手段を採用し、システム構築を行った。

【実現手段①】ニューラルネットワークにより形態素の意味をベクトル化する。

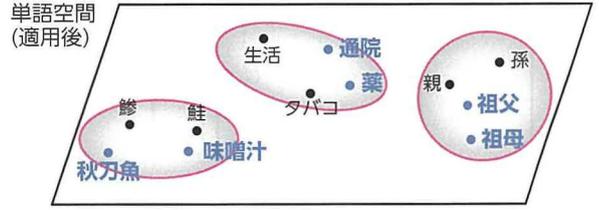
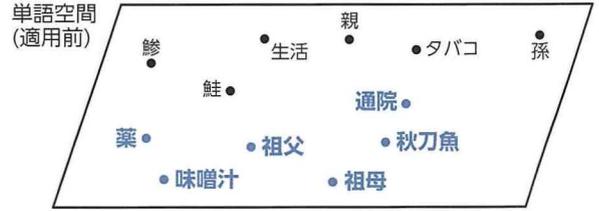
【実現手段②】機械学習を用いて教師データから形態素の配置の仕方を学習する。

実現手段①・②については、3.2・3.3節にてそれぞれ詳細を示す。

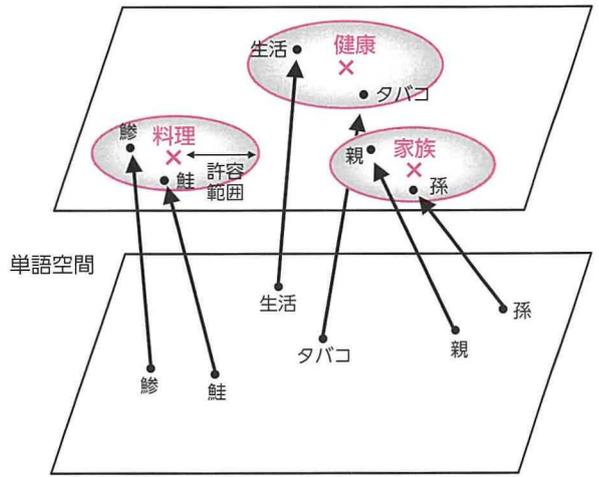
### 3.2 実現手段①：形態素の意味を数値化する

近年注目を浴びるニューラルネットワーク技術の一つである word embedding<sup>(6)(7)</sup>を用いて、形態素の意味を数値化する。word embeddingでは、同じ文脈で出現する単語は類似した意味を持つという分布仮説を仮定し、各形態素に対して  $K$  次元の意味表現ベクトルを割り当てる。形態素  $w_j$  に割り当てた意味表現ベクトルを  $X^{[j]}$  とすると、式(7)で表される。

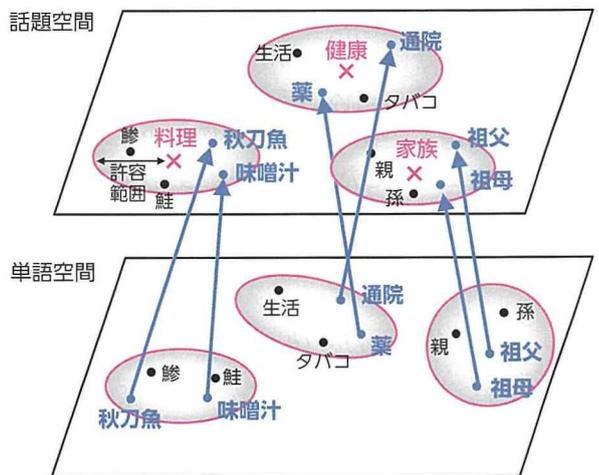
$$X^{[j]} = [X_1^{[j]}, \dots, X_k^{[j]}, \dots, X_K^{[j]}]^T \quad \dots\dots\dots (7)$$



(a) 実現手段①の適用前後における単語空間イメージ図。適用後は、似通った意味をもつ形態素が近い座標を持つことが特徴。



(b) 実現手段②では教師データ（話題  $y_i$  と形態素  $w_j$  のペアデータ）から、形態素を話題近傍に変換する行列  $V^{[i]}$  を学習する。



(c) 学習した変換行列  $V^{[i]}$  により教師データにない形態素も話題空間に変換が可能になる

図7 提案技術の各実現手段のイメージ図

意味表現ベクトル  $X^{[j]}$  の学習には Skip-gram<sup>(7)</sup> に代表される inverse vector log-bilinear language (ivLBL) モデルを用いる。

ivLBL では、形態素  $w_j$  から相対的に  $n$  語離れた形態素 (以下、文脈語)  $w_{j+n}$  のスコア関数  $s(w_j, w_{j+n})$  が大きくなるように学習することで、形態素  $w_j$  が与えられたときに、文脈語  $w_{j+n}$  を予測が可能となる。式 (8) に  $s(w_j, w_{j+n})$  の定義式を示す。

$$s(w_j, w_{j+n}) = X^{[j]} \odot X^{[j+n]} + b^{[j]} \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここで、演算子  $\odot$  は内積を表し、 $b^{[j]}$  は注目した形態素  $w_j$  におけるバイアスである。ivLBL モデルでは、式 (9) に示す目的関数  $g_{ivLBL}$  を最大化することで形態素ベクトル  $X^{[j]}$  を獲得する。

$$g_{ivLBL} = \log \left[ \sigma \left( s(w_j, w_{j+n}) \right) \right] + \sum_{w'_j \sim P_n} \log \left[ 1 - \sigma \left( s(w_j, w'_j) \right) \right] \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここで、 $\sigma(x)$  はロジスティック関数、 $l$  は形態素の頻度分布  $P_n$  から選んだ文脈外の形態素  $w'_j$  の数である。式 (9) の第 2 項は、形態素  $w_j$  と文脈外の形態素  $w'_j$  とのスコア関数が小さくなるように学習する負例サンプリング<sup>(7)</sup> である。学習データには、WEB 上に公開されている言語資源 7,300 万頁を用い、文脈のウィンドウサイズ  $n$  は前後 5 形態素、意味表現ベクトルの次元数  $K$  を 500 として学習した。図 7-(a) に各形態素の意味表現ベクトルを 2 次元にプロットしたイメージ図を示す。似通った意味を持つ形態素が近い座標を持つ。

### 3.3 実現手段②：教師データから配置の仕方を学習する

3.2 節で概説した word embedding により、形態素の意味ベクトル  $X^{[j]}$  を獲得することができたが、話題との位置関係については別途学習する必要がある。実現手段②では、あらかじめ用意した話題  $y_i$  と形態素  $w_j$  のペアデータ (以下、教師データ) から、形態素ベクトル  $X_j$  を正解話題  $i$  のベクトル  $Y_i$  へ変換する行列  $V^{[o]}$  を学習する。図 7-(b) にイメージ図を示す。この変換行列  $V^{[o]}$  の獲得により、教師データに含まれていない形態素も話題空間に配置することが可能となる (図 7-(c) 参照) 変換行列の学習には、近年著者らが提案する「線形変換とクラスタリングの同時学習法<sup>(8)</sup> (以下、JL 法)」を

用いる。JL 法の特徴は、学習データに応じて組み合わせる線形変換行列の数  $o$  を最適化し、各データがどの変換行列により変換すべきかを自動判定できる点にある。学習に必要なコスト関数について概説する。詳細は参考文献を参照いただきたい。式 (10) に、変換後のベクトル  $V^{[o]}X_j$  と正解話題  $i$  の意味表現ベクトル  $Y_i$  との類似度を示す。

$$sim_o(X_j, Y_i) = \sigma \left( (V^{[o]}X_j) \odot Y_i + d^{[o]} \right) \quad \dots\dots\dots (10)$$

ここで、 $V^{[o]}$  はクラスタ  $o$  に従属する  $K$  行  $K$  列の線形変換行列を表し、 $d^{[o]}$  はバイアス項である。変換行列の学習には、式 (11) に示す目的関数  $g_{JL}$  を最大化する  $V^{[o]}$  及び  $d^{[o]}$  を求めることで実現する。

$$g_{JL} = \sum_{(X_j, Y_i) \in C_o} \left[ \log \left( sim_o(X_j, Y_i) \right) \right] + \sum_{Y_{i'} \sim C} \left[ \log \left( 1 - sim_o(X_j, Y_{i'}) \right) \right] \quad \dots\dots\dots (11)$$

ただし、 $C$  は話題の集合、 $C_o$  はクラスタ  $o$  に従属する形態素含  $w_j$  と正解話題  $i$  の意味表現ベクトル  $Y_i$  のペアの集合、 $i'$  は推定した話題との類似度が最も高い他の話題を表し、また、式 (11) の第 2 項は、形態素  $w_j$  と正解ではない話題  $Z_{i'}$  とのスコア関数が小さくなるように学習する負例サンプリングであり、 $m$  は負例の数である。本学習によって得られた変換行列を教師データに含まれない形態素へ適用することで、全形態素を話題周辺に配置することが可能となる。

## 4 検証

### 4.1 検証実験

提案法の有効性を検証するために、高齢者とロボットとの会話データからランダムに 100 文を抽出し、話題推定率により評価した。話題推定率は、人手で付けた話題ラベルとの一致率であり、人と完全に同じ話題を全て回答した場合に、100% となる。従来技術には、2 章にて示した one-hot 表現をベースにした話題推定を用いた。また提案技術における変換行列の学習には、従来技術で得られた形態素 - 話題ペアを用いた。実験結果を図 8 に示す。

本開発手法は、従来技術と比較して 35.5% の大幅な改善を実現し、ユーザの発話に対して約 9 割話題を理解することができる。また、エラー分析を行ったところ、1 つの形態素（例：秋刀魚）であっても他の形態素（例：食べる、買う）との組み合わせにより、人は異なる解釈をしている場合（例：食事、買い物）があり、システムがそれに追従できずエラーが生じていることが判明した。これは、本取組において設定した仮説「形態素の発生確率は独立な事象である」が満たされていないケースであり、改善には本仮説を再考する必要がある。



図 8 話題推定の推定結果

#### 4.2 今後の展開について

今後、本話題推定技術を既存のサンプリング対話システムへの搭載を行い、被験者実験を通して有効性を確認する。また、今回の単体評価実験において表面化した次課題、形態素の共起情報を捉えた本話題推定技術については、句構造に着目した文ベクトル生成手法を導入し、有効性を検証する予定である。

## 5 まとめ

本研究では、高齢者の認知症の未然防止を目的とした雑談対話システムにおいて、ユーザ発話から話題を推定する技術について報告した。提案技術は、話題の近傍に「関連する形態素」が配置される仕組みを持ち、ネットワーク重みである  $\mathcal{H}_{ij}$  を形態素と話題間の距離の測定により話題を推定することができる。評価実験により、提案技術は話題推定率 88.2% を達成し、従来技術よりも 35.5% の向上を確認した。今後は、本話題推定技術をロボット搭載するとともに、評価実験にて浮き彫りとなった共起形態素による話題の揺れの不定性を解消する研究に取り組む。

本研究は、首都大学東京 山口亨教授、下川原英理助教、和田和義准教授、小町守准教授、豊田工業大学 佐々木裕教授、三輪誠准教授、山根丈亮殿に多大なご協力を頂いた。ここに感謝の意を表する。

#### ■参考文献

- (1) 内閣府：平成 27 年度高齢化の状況及び高齢社会対策の実施状況  
[http://www8.cao.go.jp/kourei/whitepaper/w-2016/gaiyou/28pdf\\_indexg.html](http://www8.cao.go.jp/kourei/whitepaper/w-2016/gaiyou/28pdf_indexg.html)
- (2) 認知症の総合アセスメント テキストブック改訂版 (2013)
- (3) 渡部生聖, 中野：認知症介護に向けた対話制御・対話知識獲得技術の開発. TOYOTA Technical Review. Vol.60, P.91 - P.95, (2014)
- (4) Eri sato-Shimokawara, Nomura, Shinoda, Lee, Takatani, et al. : A Cloud Based Chat Robot Using Dialogue Histories for Elderly People. RO-MAN2015. Tu3B.2 (2015)
- (5) Eri sato-Shimokawara, Shinoda, Takatani, Lee, Wada, et al. : Analysis of Category Estimation for Cloud Based Chat Robot. RO-MAN2016. SuD2.1 (2016)
- (6) ダヌシカボレガラ, 岡崎, 前原：ウェブデータの機械学習. 講談社, 2016
- (7) Tomas Mikolov, Sutskever, Chen, Corrado, Dean: Distributed Representations of Words and Phrases and their Compositionality, NIPS2013 (2013)
- (8) 山根丈亮, 高谷, 山田, 三輪, 佐々木：上位語・下位語の射影関係とそのクラスタの同時学習. 言語処理学会第 22 回年次大会発表論文集. P.629 - P.632 (2016)

#### ■著者



高谷 智哉



山田 整

## 非接触給電標準化への取り組み

Toyota's Contribution to SAE TIR J2954

汲田 邦彦\*<sup>1</sup>  
Kunihiko Kumita上地 健介\*<sup>2</sup>  
Kensuke Kamichi南方 真人\*<sup>3</sup>  
Masato Minakata野島 昭彦\*<sup>4</sup>  
Akihiko Nojimaイボ ティーリンク\*<sup>5</sup>  
Ivo Teerlinckダニエル ミカット\*<sup>6</sup>  
Daniel Mikat

## 要旨

電動車の普及の為に利便性の高い充電方法の実現が不可欠である。非接触給電技術はそのための有効な手段である。また、市場に広く普及させるには、安全性の確保とともに、異なった給電設備と電動車の間での相互互換性を確保することも重要である。2010年から検討されて来たSAE J2954, Wireless Power Transfer for Light Duty Plug in Electric vehicles and Alignment MethodologyのTIR (Technical Information Report)が2016年5月に成立した。特に、互換性に関しては、マスターコイルによる手法を提案し合意された。本稿は、TIR成立に至るまでの取り組み、課題とともにTIRの根底にある考え方を解説する。

## Abstract

User-friendly charging is indispensable for promoting plug-in and electric vehicles, and wireless power transfer (WPT) is regarded as an effective way of accomplishing this aim. Wider acceptance of WPT technologies depends on measures to ensure safety and interoperability between chargers and vehicles. In May 2016, a technical information report (TIR) called Wireless Power Transfer for Light-Duty Plug-in/Electric Vehicles and Alignment Methodology (SAE TIR J2954) was approved by the Society of Automotive Engineers (SAE) in the U.S., after discussions that started in 2010. A key feature of this TIR related to interoperability is an agreement regarding proposed master coil methodology. This article describes the progress leading up to the approval of the TIR and its underlying concepts.

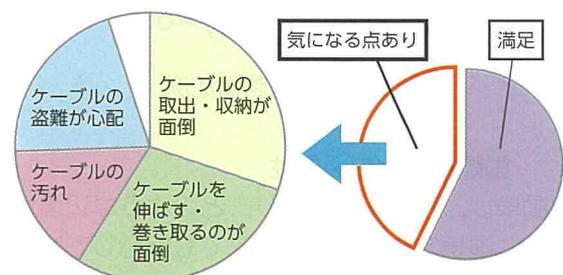
キーワード 電動車, 充電, 非接触給電, 磁界共鳴, 標準化, SAE

## 1 はじめに

電動車の普及が進んでいるが、図1に示すようにユーザにとって充電操作は気になるとの意見もある。コネクタを抜き差しするタイプでは、ケーブルの取出、収納の手間、汚れなど改良の余地がある。

これらの課題を解決する手段として非接触給電技術は有効である。とりわけ、磁界共鳴方式はコイル間のギャップ、位置ずれに対するロバスト性の高さから自動車への応用が期待される。また、給電インフラの普及には、標準化による共通基盤の整備が不可欠である。そこで、我々は、SAE (Society of

Automotive Engineers) において磁界共鳴方式による非接触給電の標準化を推進した。



▲充電操作に対する評価 (トヨタ社内調べ)

図1 充電に関するユーザアンケート結果 (1)

\*1 先進技術開発カンパニー 法規認証部

\*2 パワートレーンカンパニー PHVシステム開発部

\*3 先進技術開発カンパニー 先進技術統括部

\*4 先進技術開発カンパニー 電子制御基盤技術部

\*5 Toyota Motor Europe NV/SA

\*6 Toyota Motor, North America

## 2 非接触給電技術について

### 2.1 電磁誘導方式

通常のコネクタを接続する充電方式（コンダクティブ）に対し導電対の接触のないものが非接触給電である。これまで車載用の非接触給電方式としてはコイル間の磁束による起電力を利用する電磁誘導方式が実用化され、GMが提唱してSAE J1773として標準化された。トヨタでも1997年に発売された初代RAV4EVで採用した。しかし、コイル間距離が余りとれないためユーザが車両にパッドを挿抜しなければならず、利便性はコンダクティブ充電とさほど変わらなかった。

### 2.2 磁界共鳴方式

2006年にMIT（マサチューセッツ工科大学）が発表し注目された技術である。コイル間距離が離れて行くと磁束の漏れによる損失が大きく、結合係数は小さくなり、伝送効率が低下する。磁界共鳴方式では、図2に示すように、回路上にコンデンサを配置して高周波で共振させることによりリアクタンスを低減させ、二次側の誘導電圧を上げ高効率な電力伝送が可能となる。位置ずれに対するロバスト性も高く電動車の給電に向く<sup>(2)</sup>。

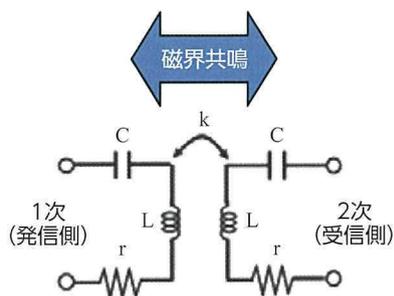


図2 共鳴回路構成例

### 2.3 国際標準化の必要性

自動車は、移動手段であり、どのような辺境地でも使え、国境をまたいだ移動先でも安心して給電できることが必要である。また、国際商品であることからグローバルに調和された規格が望ましい。一方、非接触給電のような先進技術については標準化よりも開発競争に委ねるべきとの意見もあり議論されたが、コンダクティブ充電において業界が二分された苦い経験もあり調和に向けた努力を進めることで一致した。

### 2.4 SAEでの標準化への取り組み

SAEでは、2010年にSAE J1773に代わる次世代の非接触給電の標準化をBMWのJesse Schneider議長のもとでJ2954として進めることとなった。トヨタは、当初からMITの技術をもとに企業化したWiTricityはじめドイツ、フランス、英国など米国以外の自動車メーカーを含む業界各社とも連携しながら磁界共鳴方式による標準化を進めることを提言した。SAEは米国内の活動との認識も強いが、参加資格は米国企業に限定されず、ウェブでの会議参加も可能であることから国際的な活動の一面も見せている。特に、新しい技術分野の標準化は、エキスパートによる集中的な議論でスピード感のある推進が可能である。ISOにおいてもTC22/SC21/ISO19363が始まったが議長がSAEと連携しながら進める方針を示し、SAEにも自ら参加している。ISOとSAEの事務局レベルでも組織的に連携を図るとの合意が形成され、非接触給電もその候補となっている。

### 2.5 標準化の必要な要素

ワイヤレス給電システムの標準化は、安全だけでなく、互換性を確保するために幅広い領域をカバーする必要がある。また対象とする車のカテゴリーや必要な出力などの前提条件についても自動車業界から提示する必要がある。図3に示すように、安全・互換性・支援技術などに大きく分類されるがシステム周波数・磁束形状などは重要な項目であり、回路構成、電力伝送コイルのサイズ、形状など細部まで固める必要があり開発と標準化が一体となって進める必要がある。



図3 非接触給電標準化に必要な要素

### 3 出力区分, 搭載車両

SAE で最初に決めなくてはならなかったのは出力区分と搭載車両のクラスである。特に空間の磁界を利用するため車両の高さの違いによるクラス分けは重要である。また、クラス分けは後述する互換性とも密接に関係する。まだ量産されていない中で、さまざまな希望が出され、試行錯誤しながら表 1, 2 のクラス分けが決まった。

表 1 出力区分

	WPT1	WPT2	WPT3	WPT4
出力 (kVA)	3.7	7.7	11.1	22

表 2 Z-Class (コイル地上高) 区分

Z-Class	Z1	Z2	Z3
コイル地上高 (mm)	100-150	140-210	170-250

### 4 周波数の検討

#### 4.1 日本での周波数検討

磁界共鳴方式では周波数の選択が全体設計を決める上での重要な要素である。SAE と並行して日本では YRP (横須賀リサーチパーク) 会員で構成される民間団体の BWF (ブロードバンドワイヤレスフォーラム) を中心に検討が始められた。車載用非接触給電についてはトヨタがリーダーで SG4 グループが構成された。活動は、当初より欧米も含めグローバルな統一を最終的な目標としていたので、世界中で関係しそうな周波数帯の情報を集約した。電力伝送能力を考慮すると周波数は高い方がよいが利用可能な周波数は限定されており、85kHz 近傍が比較的共存しやすいことがわかった。AM ラジオ、電波時計、アマチュア無線、鉄道との共存協議を進めた結果 2016 年 3 月に総務省が世界に先駆けて 85kHz を電動車用の非接触給電に利用可能とする省令改正を行った。

#### 4.2 国際的な周波数の検討

SAE にも BWF での検討結果をベースに 85kHz をトヨタから提唱した。ドイツメーカはコイルサイズを小型化できるメリットから当初はより高い周波数の 150kHz を主張していたが、車載されているスマートキーへの干渉、欧州におけるラジオ帯への影響がよ

り少ない 85kHz で決着した。今後、国際的に周波数の割り当てを調整する ITU-R (国際電気通信連合無線通信部門) で国際的な合意後 ITU-R の勧告となる。

### 5 コイル形状と互換性

#### 5.1 コイル形状

主なコイル形状としては、図 4 に示す①円形②ソレノイド形③複合・変形型 (例 DD と呼称される円形コイルを組み合わせたもの) などがあり磁束の違いからそれぞれ特性が異なる。

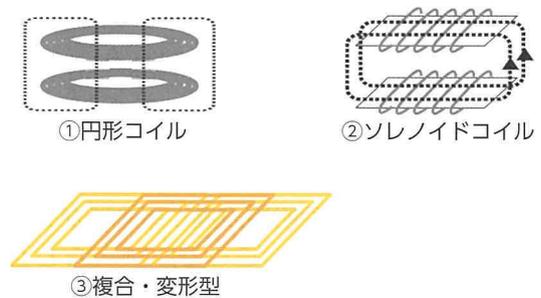


図 4 コイル形状の違い

トヨタは当初位置ずれに対するロバスト性が高いソレノイドコイルを提唱し業界の合意形成を進めていた。ドイツメーカが車載時の構成のやり易さなどから円形コイルに方針を変えたため、円形かソレノイドかの選択が業界の争点になり、図 5 のチャートに示すように双方の特長を比較して決定するプロセスをとった。

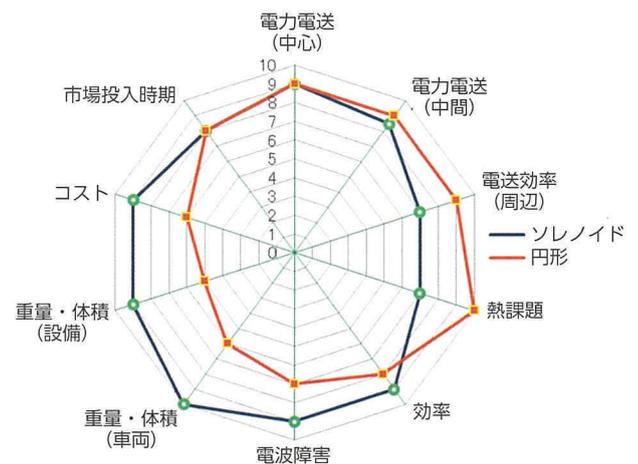


図 5 円形コイルとソレノイドコイルとの比較

ソレノイドのロバスト性の高さ、円形での電波障害対応のやり易さなど日米欧による技術ベースで

検討が続いたが、最終的に円形コイルの方向でまとまった。しかし、その後複合型の DD 方式（二つのコイルの組み合わせ）が円形とソレノイドの中間的な性能を持ち、円形コイルとの互換性をもつとして標準化の俎上にのり、再び複数のコイル形状が並立してしまう状況となっている。

## 5.2 コイル互換性確保の手法の提言

すべて諸元が同一の一对のシステムを使えば別であるが、実際に製品化される際には個々の車両搭載上の制約、各社の設計思想の違いなどにより同一にすることは難しい。そこで、異なった製品間で互換性を確保できるようなしくみを図6のようにトヨタから提案した。即ち、まず二次（車両）側に相当するマスター（原器）として M-VA, Master Vehicle Assembly の諸元を定め、次に M-VA に対となる給電側コイルの諸元を R-GA, Reference Ground Assembly として決める。それらをもとに製品を設計することで給電設備と車両側が互換性を可能とする手法である。ここで、M-VA と互換性が確保できる限りにおいて R-GA は複数あってもよい。二次（車両）側システムの製作者は M-VA と全く同一のものを設計してよいが、諸元に変更を加えることは R-GA との互換性を確保さえすれば可能である (Product VA)。同様に一次（給電設備）側も R-GA 諸元と完全に同一であれば問題なく互換性は確保できるが、M-VA との互換性があれば設計にある程度の自由度がある (Product GA)。ただし、その場合、R-GA と異なる諸元、コイル形状の Product GA については一次（車両）側では互換性を配慮した設計を行ってくれるわけではない。諸元・形式の異なるコイルを新たに R-GA として追加も可能であるが、組み合わせが増えすぎるとマスター本来の意味が失われるため新規追加については合意が必要である。以上の手法である程度設計の自由度を許容しながら互換性が確保できる。

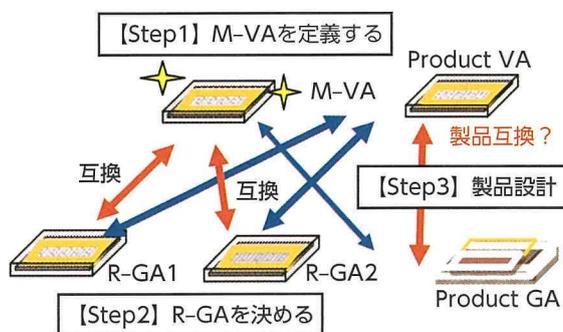


図6 互換性確保のステップ

## 5.3 M-VA, R-GA 諸元の検討

コイル間の互換性が確立されるということは一次（給電設備）側と二次（車両）側とで十分な伝達効率が達成されることである。伝達効率は結合係数 (k) とパワーファクター (Q 値) の積に依存する。k はコイル間距離、位置ずれが大きくなると低下するので位置ずれがあっても十分に伝送するためには Q 値を向上させることが必要である。Q 値は、次式のように周波数 ( $\omega$ )、インダクタンス (L) と抵抗 (R) の比で表される。

$$Q = \omega L / R \quad \dots\dots\dots (1)$$

周波数が一定のもとではコイルの形状、サイズ、巻き数で L/R が決まるので車両搭載上の限界がありむやみに高い Q 値にはできない。SAE の論議の中でも位置ずれ可能範囲を多くとると Q 値をあげる必要がありコンパクトなコイルは採用できないが、位置合わせを正確にするには駐車位置の精度をより高めなくてはならないというジレンマがあった。SAE では、コイル間距離のクラスを分けた上、運転者が駐車可能な現実的な距離を表3の通り規定し、その範囲の k 値を導きだした。

表3 位置ずれ許容レベル (mm)

X (車両縦方向)	±75
Y (車両横方向)	±100

TIR (Technical Information Report) では Q 値を確保するために必要な共振回路の L, 共振コンデンサ容量 C も諸元として図7, 8に例示している。伝送効率について、ドイツがエネルギー関連規則上 85% の目標が必要として強く主張した。もちろん全ての条件で達成することは困難であり、位置ずれ時は 80% としている。

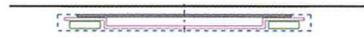
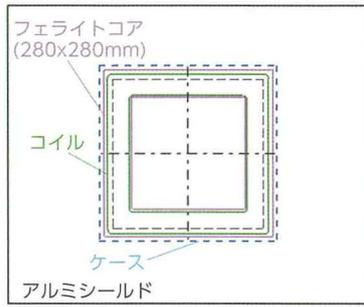


図7 M-VA 諸元 (WP1/Z1)

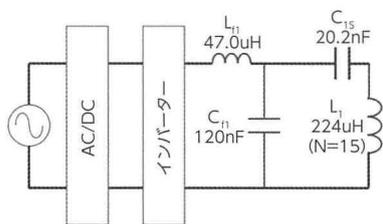
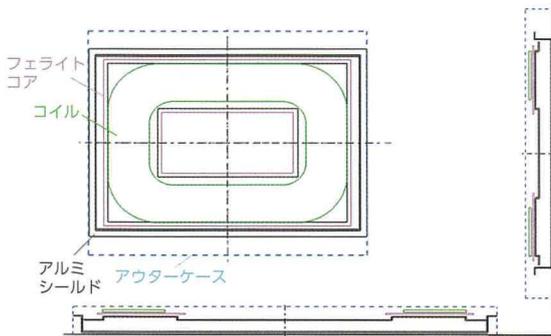


図8 R-GA 諸元 (WPT1/Z1)

## 6 電磁両立性および電磁環境保護の取り組み

非接触充電システムは、電磁的高周波利用機器として、他の電子機器及び通信機器への影響を考慮して電磁両立性（EMC）の規格、人体曝露やペースメーカー保護などの安全面の配慮から電磁強度（EMF）

の規格が必要である。EMCでは、特に放射エミッションが重要で、米国では連邦通信委員会（FCC）、日本では電波法でいずれも法規で規制されており国際的な試験法及び限度値の統一は重要な課題である。SAEではメーカーからの推奨限度値として基本波での100dB $\mu$ A/mを合意している。概要を表4に日本の法規、国際無線障害特別委員会（CISPR）での規格検討値とともに示すが、各国政府がSAEの提案そのままを許容するかは疑問である。

表4 非接触給電のエミッション限度値

周波数	SAE J2954	日本 (総務省)	CISPR/B DC 案
基本波 85kHz 帯 (dB $\mu$ A/m 10m)	100	68.4	67.8

EMFについては、ICNIRP2010のガイドラインに基づく人体曝露基準及びペースメーカー保護を目的として車両内外に対し磁界強度の限度値を既定している。規制エリアは、乗員を含む一般の方が給電設備と車両近傍でアクセスできるエリアを想定して決められた。限度値は、それぞれのエリアで人体曝露はICNIRP2010を適用し、磁界強度の参考値と参考値を越えた場合の基本制限へのアセスメント手法を提案した。ペースメーカー装着者保護については、ISO規格から導いた磁界強度の限度値が規定されている。ペースメーカーの場合、限度値を超過した場合の評価手法は特段定められていないので、磁界強度限度値に確実に適合させる必要がある。図9、表5に適用範囲とそのレベルを示す。

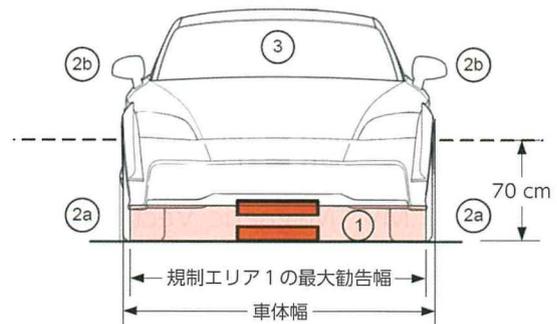


図9 EMF 規制適用エリア (正面図)

表5 各規制エリアでの適用レベル

規制エリア	人体曝露 ICNIRP2010 参考値 (RMS)	ペースメーカー /IMD 保護 (RMS)
1 車両下	適用外	適用外
2a 車両周辺 70 cm高さ以上 ( $\mu T$ )	27	15
2b 車両周辺 70 cm以下 ( $\mu T$ )	27	27.8 ~ 29.4
3 車室内 ( $\mu T$ )	27	15

## 7 その他の要素

### 7.1 通信

コイル同志の互換性だけでシステムの互換性が保証されるわけではない。給電場所への車の誘導から給電完了に至る以下①～⑥のプロセスに沿って一次（給電設備）側と二次（車両）側が通信を確立する必要がある。

- ①パーキングアシスト：給電側ユニットのある駐車スペースに自動車を誘導
- ②ペアリング：給電側ユニットと自動車が相互に給電可能な組み合わせであるかの相互認証
- ③アライメント微調整と最終確認：誘導位置から位置を微調整し、給電可能な相対位置を確認
- ④給電開始：システムが安全に給電を行える状態にあることを確認した上で給電開始
- ⑤給電状態の監視及び制御：車両からの要求に応じた給電、安全監視し、異常時には停止・再給電
- ⑥給電完了：給電完了したことを認識し停止

プロセスに使われる通信については、SAE J2947/6 で検討が進められ、通信のシーケンスは決まったが、搭載すべき通信方式は確定していない。例えば③のアライメントについては、コイルによる自己励起方式（LPE, Low Power Excitation）、MV（Magnetic Vector）方式などが提案されているが一本化には至っていない。

### 7.2 コイル搭載位置と駐車位置の検討

車両側コイルの搭載位置は前車軸下近傍の共通認識ができたが、決定には至っていない。駐車場についても米国だけでなく世界の駐車場の法的に必要なスペースを調査した上で設置位置を例示した。

### 7.3 異物検知

給電の過程でコイル間への異物の侵入等も想定されるが検知技術として未だ確立された技術はなく TIR では特定の方式を規定するのではなく試験法をまとめるにとどまっている。

## 8 課題及び今後の展望

### 8.1 M-VA 諸元

M-VA については互換性確保の上での原器として特定の出力区分、車高区分においては、単一であることが望ましい。WPT1（3.7kW クラス）についてはトヨタが提案した円形コイル諸元が M-VA とされたが WPT2（7.7kW）については、円形コイルの諸元と DD 方式に基づく諸元の両方が並立したまま TIR に記載されている。今後 TIR から TS（Technical Standard）成立に向けて一本化できるのか、円形コイルと DD 方式で M-VA が複数でも共存可能か検討が必要である。

### 8.2 互換性に関わるプロジェクト

SAE と DOE（米エネルギー省）のイニシアティブのもとで互換性を検証するためアイダホ国立研究所でプロジェクトが始動しており WPT1/WPT2、Z1/Z2/Z3 について円形コイル、DD 方式による互換性検討が進むことが期待される。

### 8.3 将来に向けて

TIR 化された WPT1、WPT2 に加え、さらに出力の高い WPT3（11.1kW）についても諸元を決める動きが既にでてきている。また、走行中給電についても実用化までのハードルはまだ高いが研究、実証実験は進んでおり長期的な標準化の課題である。

## 9 おわりに

2010 年末から 5 年以上の議論を重ね SAE J2954 の TIR（ガイドライン）が成立した。その間、特にコイル形状の決定と互換性について多くの時間をさいた。トヨタからは互換性を確保する手法として M-VA、R-GA の考え方を提唱し合意された。もちろん未だ各社で製品化されていない中での「仮決め」であり今後、SAE/DOE の互換性確認プロジェクトの結果などを反映し諸元の見直しも必要と認識している。そもそも TIR は未成熟な新技術に対す

るガイドラインであり、これを起点に標準化を完成させるためのものである。ようやく基盤ができたので、今後製品化を進める上で道標となることを期待する。

#### ■参考文献

- (1) 南方真人：EV/PHEV用ワイヤレス給電システム国際標準化の取り組みと動向。OHM. 2015年5月号, p.7 - 10 (2015)
- (2) Toru Nakamura, Takahiro Misawa, Yusuke Futakuchi, Kensuke Kamichi：Verification Test Results of Wireless Charging System. SAE Technical Paper 2016-01-1155 (2016)

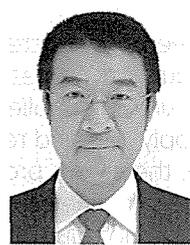
#### ■著者



汲田 邦彦



上地 健介



南方 真人



野島 昭彦



Ivo Teerlinck



Daniel Mikat

# エンジン生産工場における高効率エネルギー供給実現のための小型分散システムの構築

Establishment of Efficient Energy Supply Method by Compact Distributed System in Engine Plant

小野 裕永<sup>\*1</sup>

Hironaga Ono

## 要旨

鋳造から機械加工・組付工程があり、エンジンを一貫生産できるグローバル拠点の工場をモデルとした高効率エネルギー供給システムを構築した。従来の工場では蒸気・エアーを原動力棟から中央集中で送気をしてきたが、この方式は送気過程でロスが多く、またライン非稼働時間帯もエネルギー供給を続ける必要があり、ムダが多い。さらに、蒸気は制御追従性が悪く、エアーは電気からのエネルギー変換ロスが大きいなどの問題もある。そこで、今回は生産技術部門・工場と協業で蒸気レス・エアーレス推進を実施した。代替技術が困難な設備に関してはエアーの小型分散供給を実現することにより、2013年比でCO<sub>2</sub>を4,500t/年低減することができた。

## Abstract

A highly efficient model energy supply system has been constructed for global engine plants with the capacity to carry out all steps of the engine production process, from casting, machining, and assembly. In a conventional engine plant, steam and air are supplied from a central power facility. However, this is a wasteful method that causes high supply loss and requires the continuous supply of energy even during non-production time. Furthermore, the steam provided by this method has poor controllability and the air has high energy conversion loss from electricity. Therefore, the production engineering divisions have been working with the manufacturing divisions to promote production processes that do not require steam or air. Furthermore, compact distributed air supply systems have been introduced for equipment without a viable alternative technology, helping to reduce annual CO<sub>2</sub> emissions by 4,500 tons compared to 2013.

キーワード 蒸気レス、エアーレス、分散供給、ブロワ化、コンプレッサー、エアーカーテン

## 1 はじめに

トヨタでは、ゼロエミッション工場の実現に向けて、年率2%のCO<sub>2</sub>低減目標を掲げて、日々、省エネ改善活動が続いている(図1)。この活動の中で、エネルギーロスの多いエアー・蒸気に注目し、今回、これらのエネルギーロス低減に取り組んだ。

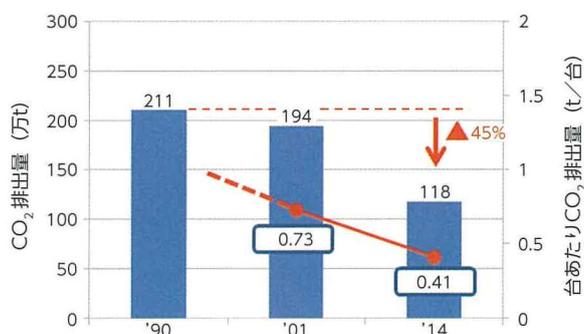


図1 ゼロエミッションに向けた取り組み

エネルギー効率の悪いエアー・蒸気ゼロ化に向け、トヨタでは2006年より活動をしてきた。この活動によりエンジンを生産している上郷工場では2009年までに蒸気使用量はピーク時の1/2程度まで減らすことができた(図2)。しかし、設備単体で蒸気レス効果が出せるものは減り、ここ数年活動は停滞していた。また、エアーについても、カム、コンロッドのような小サイズ部品の水切りをブロワ化する取組みはされてきたが、エンジンブロックなどの大サイズ部品の水切り等はそのまま残っていた(図3)。

そこで、今回はエアー・蒸気使用量の多い機械・鋳造工場(図4、5)にて、徹底的なエアーレス・蒸気レス対策と残ったエネルギーの高効率分散供給によるエネルギーの送気ロス・待機ロスの削減を実現した。

\*1 プラント・環境生技部

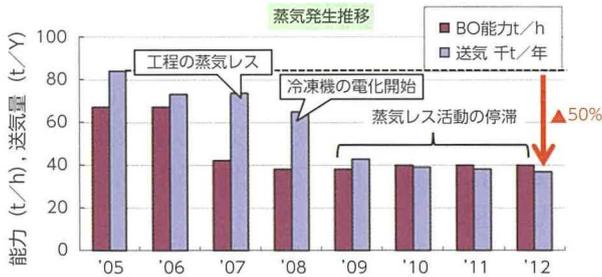


図2 上郷工場での蒸気レス活動の経緯

	ワーク形状					
	易 (軸物)			難 (箱物)		
	コンロッド	カム	クランク	カムハウジング	ヘッド	ブロック
従来ライン (過去の取組)	ブロワ化済			ブロワ化未実施 (ワークサイズが大きく、ブロワ圧が 端部まで届かないため)		

図3 従来ライン (洗浄機水切り) でのブロワ化設備導入状況

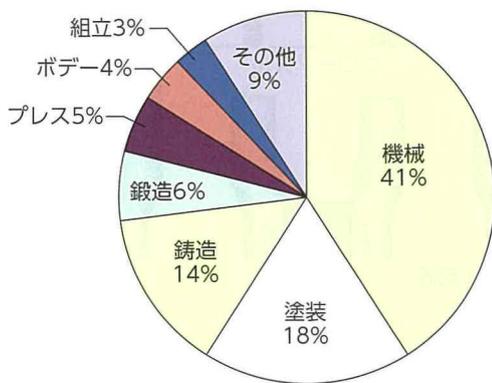


図4 工程別エア使用量

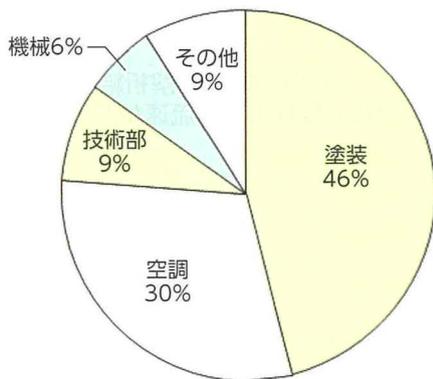


図5 工程別蒸気使用量

エアーレス・蒸気レスに対し、図6に示した体制で取り組みを行った。

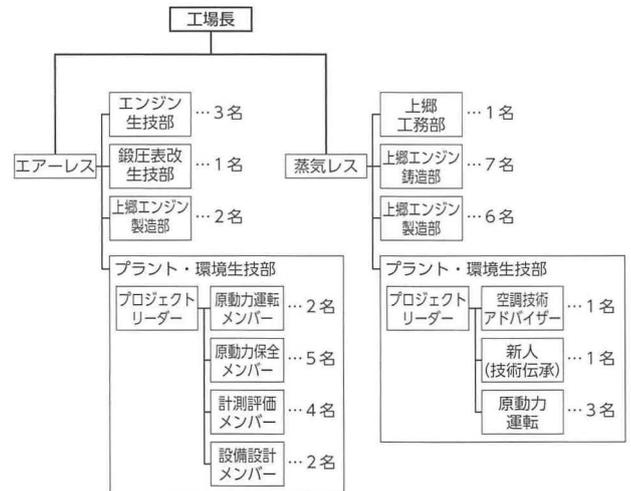


図6 工場・生産技術部門の総勢40名で取組み

上記図の中でプラント・環境生技部はCO<sub>2</sub>低減の推進部署であり、これまでエアーレス・蒸気レスなどの省エネ技術の開発を行ってきた。今後、省エネ技術を織り込んだ生産設備を展開していくためにはエンジン生技部・鍛圧表改生技部などの生産設備の設計・導入部署に手の内化した省エネ技術を人材育成を通して、移管していく必要がある。そこで、今回は各生技毎に省エネ担当を選任してもらい、技術伝承を行いながら、プロジェクトを推進した。同時に工場を巻き込みながら、省エネを進めることで、後戻りのない仕組みとした。

## 2 主な実施内容（省エネ取組み内容）と成果

### 2.1 実施内容

エアーレス・蒸気レスとして、今回、表1の対策を実施した。

表1 今回、省エネに取組んだ設備一覧

	対象設備	対策	効果
エアーレス	① ★洗浄機水切りエアーブロー	ブロー化	300t-CO <sub>2</sub> /年 (※ 2)
	② ★研削盤の増圧エアー	増圧弁→増圧コンプレッサーへ変更	
	③ インパクトレンチ	電動化	
	④ ★全設備	コンプレッサーのインライン化	
蒸気レス	⑤ 冷凍機(※1)	EHP化	4,200t-CO <sub>2</sub> /年
	⑥ ★エアーカーテン	遮風カーテン等	
	⑦ 食堂・浴室給湯	ガス給湯器	
	⑧ 熱処理工程	分散ボイラ	
	⑨ ★工程廃液の濃縮処理	電気ボイラ	
	⑩ 試験室湿度制御	電気加湿器	

※ 1) 冷凍機は老朽更新計画に基づいて推進（2015年度から順次対策予定。今回は効果未計上）

※ 2) 10万台/年のエンジン加工・組付ライン1ライン分の効果

今回は、★マークのついた項目について、具体的な対策内容を報告する。

### 2.2 具体的な対策内容【エアーレス】

今回、生技・工場と協業で徹底的なエアーレス活動を実施し、従来ラインのエアー使用量に比べ、27%の省エネを実現した。また残ったエアーを分散配置したコンプレッサーから供給することで、送気ロス・待機ロスをなくした（図7）。

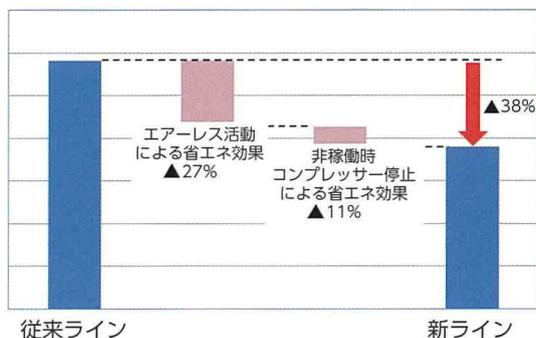


図7 エアーレス活動・コンプレッサー分散配置による省エネ対策結果

### 2.2.1 エアーレス事例①：ブロー化

機械工場で使用しているエアーの約半分が洗浄機の水切りであり、これのブロー化を実施した。これまでブロー化の課題としては以下の2点があった。

- ・ 必要最小の流量・圧力で設計するため、良品条件出しが困難。
- ・ ブロックなどの大サイズ部品に対しては、ワークの最遠端まで噴流が届かない。

これらの課題を解決するために(1)(2)の検討を行った。

(1) 水切りに必要なエアーノズル配置を検討するのに、今回はCAEを用いて、工数低減を行った。できるだけ短時間での解析を可能とするため、CAEは有限体積法を用い、気液混合の解析ではなく、噴流の圧力のみを解析することとした。あらかじめ、実験により水切りに必要なエアー流速の閾値を決めておき、この閾値以上の流速が得られる範囲を分析した（図8）。

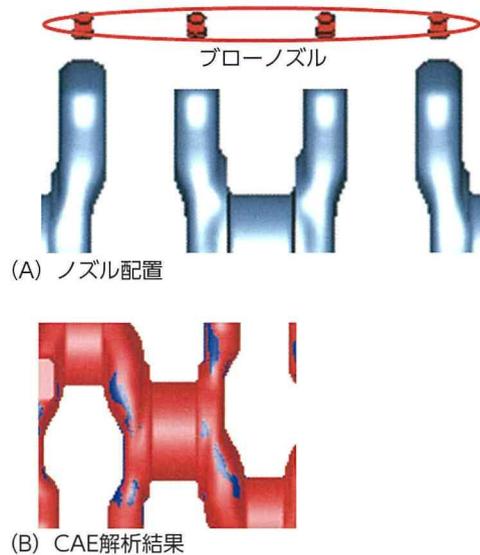
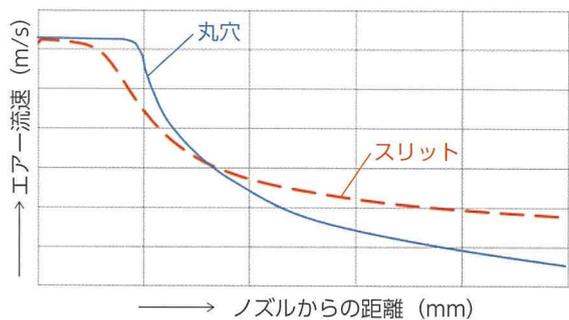


図8 水切りのCAE解析結果  
(赤色は水切りに必要なエアー流速が得られる箇所)

(2) エアーブローの減衰を小さくし、遠くまで噴流が届くノズルの検討を行った。スリットノズルの方が遠くまで圧力減衰しない、丸ノズルはノズル付近で高い圧力が得られるというそれぞれの特徴を活かし、ワーク表面はスリットノズル、穴の内部など複雑形状は丸ノズルといった形で使い分けをした（図9）<sup>(1)</sup>。



丸穴	スリット
穴の中の水残りなど複雑形状の水切りに使用	平らな部位の水切りに使用

図9 丸穴ノズル/スリットのノズルの特性比較

### 2.2.2 エアーレス事例②：研削盤

研削盤の一部で高圧エアを必要としており、これまで増圧弁にて2段増圧して使用していた。増圧弁は安価で使い勝手が良い一方で効率が悪いので、大量にエアを消費する場所には向かない。図10にあるように、従来の設備では2段増圧により、約75%のエネルギーロスがあったため、今回はこれを増圧コンプレッサーに置き換え、高圧エアのエネルギー効率を改善した。

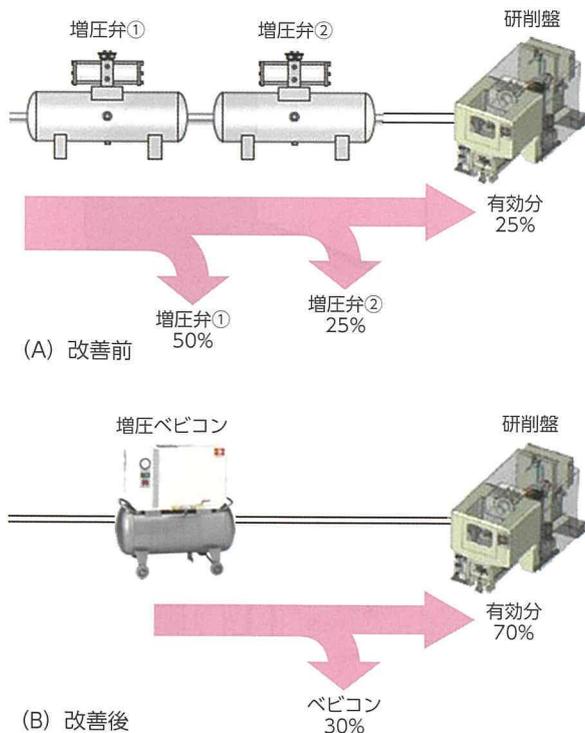


図10 増圧弁→増圧コンプレッサーの置き換えによる省エネ

### 2.2.3 コンプレッサーインライン化

残ったエア供給用として、非稼働時のエア消費削減と送気ロスミニマム化を狙い、37kWのコンプレッサーを工程内に分散設置した(図11)。エンジン加工工程ではブロック・ヘッド・カムハウジングなど数種類の部品を作っており、それぞれの部品ライン単位でコンプレッサーの運転・停止が可能のようにコンプレッサーの能力を決定し、分散化した(図12)。

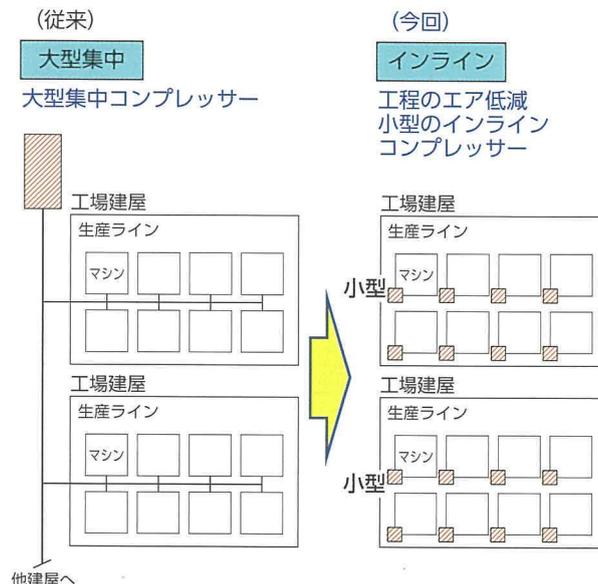


図11 小型コンプレッサーの分散配置



図12 インラインコンプレッサー

### 2.2.4 コンプレッサー小型ユニット化

コンプレッサーは故障時にすぐに予備品と交換でき、また新設時の現地工事をできるだけ短時間で簡単にできるように、本体とユニット化した付帯設備の2分割方式とした(図13)。盤内には電力量計が取り付けられており、コンプレッサー毎にエネルギーの見える化ができる仕組みとした(図14)。

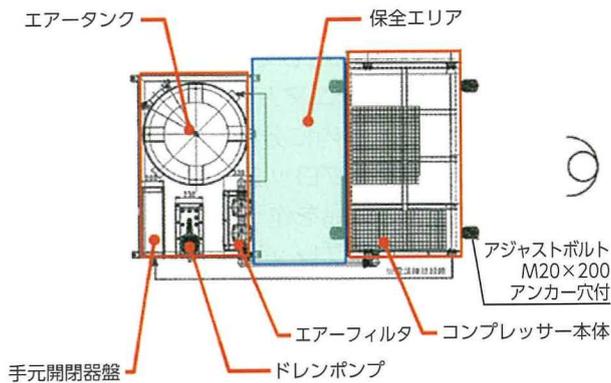


図13 インラインコンプレッサー機器構成

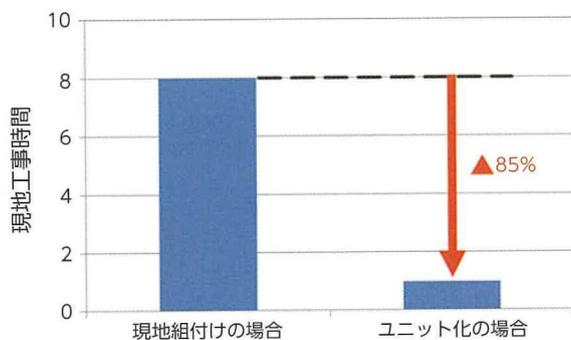


図14 ユニット化による現地工事時間短縮

### 2.2.5 インライン化による効果

コンプレッサーを工程内に分散設置することで、ライン内作業者が自分たちの責任で電源入切ができるようになり、非稼働時のエネルギーを11%削減することができた（図15）。

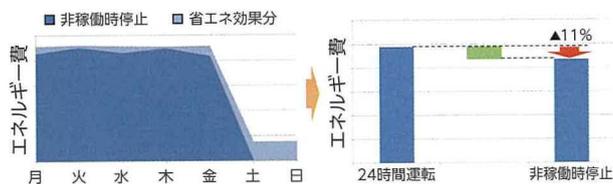


図15 非稼働時コンプレッサー停止による省エネ効果

これまでエアータンクの精度維持は難しい、コストが高いという理由から細かい単位でのエアータンクの使用量は管理ができていなかったが、インライン化によりエアータンクの使用量が見える化できるようになり、現場の省エネ意識を高めることができた。

具体的には、「①非稼働時間の確実な電源停止・現場主導でのエアータンク使用量低減による省エネ活動の推進」「②消費電力の傾向管理によるコンプレッサー異常の早期発見」が実施可能となった（図16）。

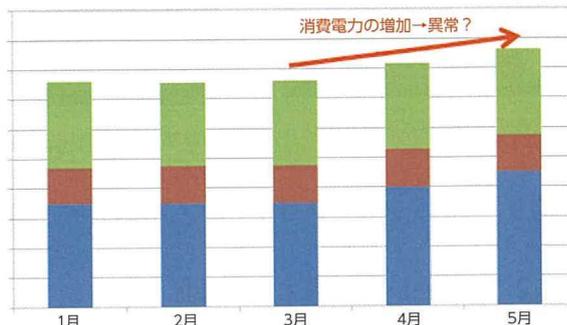
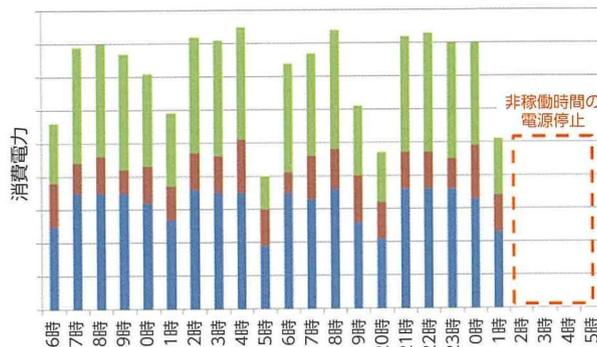


図16 エアータンク使用量の見える化

### 2.3 具体的な対策内容【蒸気レス】

上郷工場内で使用されている蒸気の内訳を整理した。蒸気使用設備は工場内に点在しており（図17）、約31%の蒸気が送気ロス・待機ロスであることが分かった。以下で紹介する対策により、蒸気の中央送気を廃止し、送気ロス・待機ロスを削減した。

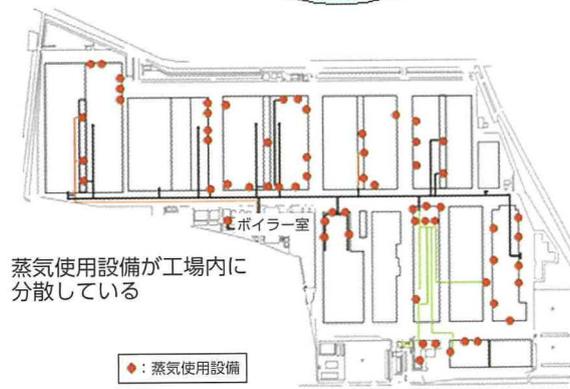
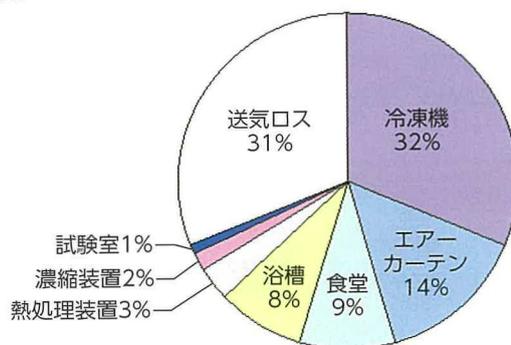
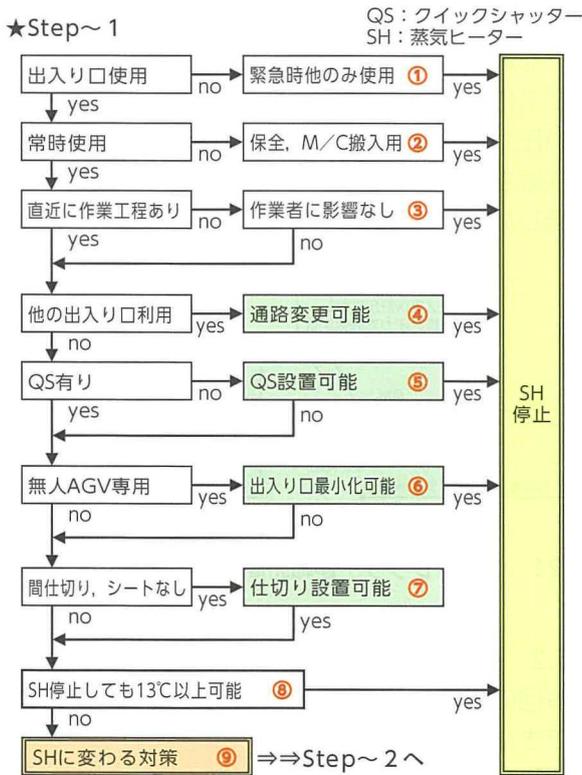


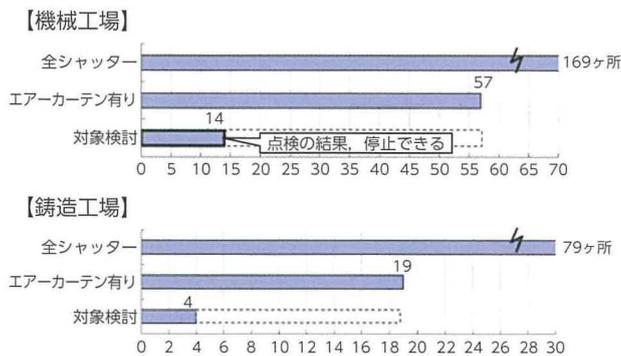
図17 上郷工場蒸気使用設備内訳

### 2.3.1 蒸気レス対策事例①：エアーカーテン

蒸気式エアーカーテンは大量の蒸気を消費する。まず第1ステップとして、図18のフローに従い、寒風の流入対策が必要なシャッターの絞込みを行った。さらに、対策が必要なシャッターに対して、寒風が入らない、作業者に直接当たらない工夫をした(図19)。



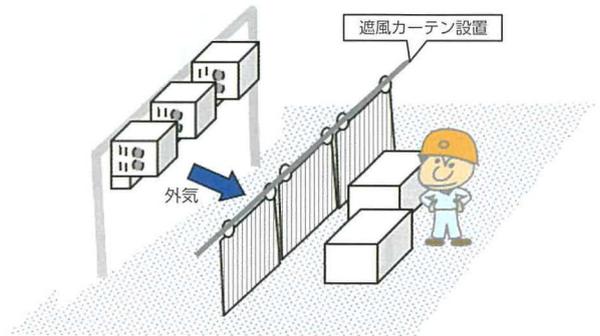
(a) エアーカーテンチェックシート



(b) チェックシートによる点検結果

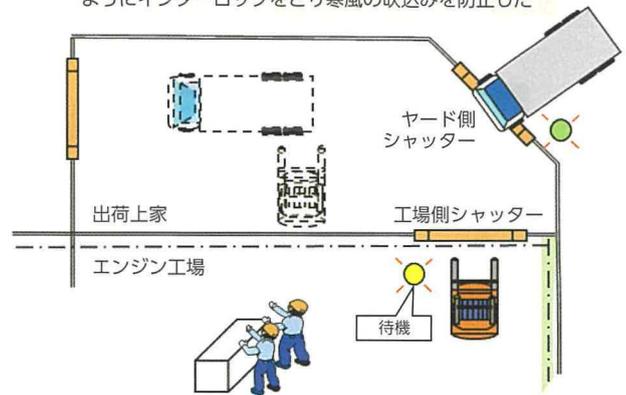
図18 エアーカーテン蒸気レス対策の必要場所絞込み結果

シャッターに近い工程に遮風カーテンを設置し作業者に寒風が当たらないようにした



(a) 遮風カーテンによる寒さ対策

外側のシャッターと内側のシャッターが同時に開かないようにインターロックをとり寒風の吹込みを防止した



(b) シャッターのインターロックによる対策

図19 エアーカーテンの蒸気レス対策事例

### 2.3.2 蒸気レス対策事例②：工程廃液の蒸発濃縮処理

トヨタではVVCC（蒸気回収）と呼ばれる排熱をヒートポンプで回収する真空蒸発濃縮装置を使用している。この方式は35 kg/hと使用蒸気量が少ないため、送気ロス・待機ロスの占める割合が大きいと考えられる。今回は蒸気レス対策として、設備近くに専用電気ボイラを設置することで、非稼働時はボイラを停止するなど運転時間をミニマム化するとともに、従来方式では捨てられていたドレンを回収し、再熱することで省エネを図った(図20)。

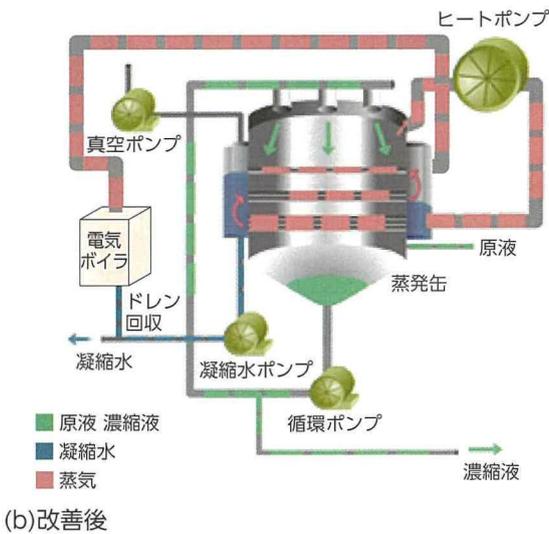
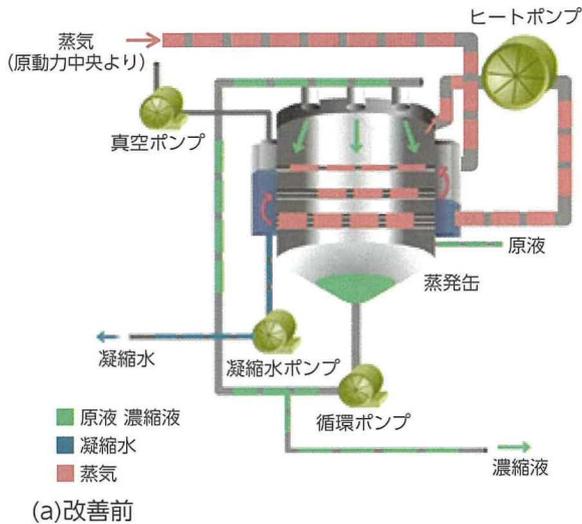


図 20 真空蒸発濃縮装置電化

## 2.4 今後の課題と取組み計画

エアレス・蒸気レスの更なる推進と他工場への横展に向け、下記について今後取り組んでいく。

### 2.4.1 エアレス

- ・ エンジン加工工程での更なるエアレスの推進（電動アクチュエータ利用，工程集約等）。
- ・ 工程毎のエア使用量見える化による現場の省エネ活動の定着化。

### 2.4.2 蒸気レス

- ・ エアーカーテン対策の対策後，効果確認→標準化（熱源減少による暖房負荷増加の有無確認）。
- ・ 設備単位でのエネルギー使用量見える化による現場の省エネ活動の定着化。

## 2.5 審査評価項目毎のまとめ

### 2.5.1 先進性・獨創性

通常，コンプレッサーは省エネスタンバイ（モーター停止状態）から放風開始まで数十秒の時間がかかる。このため，従来技術ではスタンバイ起動時に圧力が低下してしまうのを防止するため，休憩等の短い非稼働時間帯もモーターを回しておくか，常に高い圧力でタンクを保持しておく必要があった。しかし，送気圧力は低いほど，効率よくコンプレッサーを運転できるため，常時高い圧力設定とすると増エネになる。そこで，今回はスタンバイ状態のみ高い圧力を保持し，通常ライン稼働時は必要最低圧で送気できるようにコンプレッサーの制御ソフトを開発した。

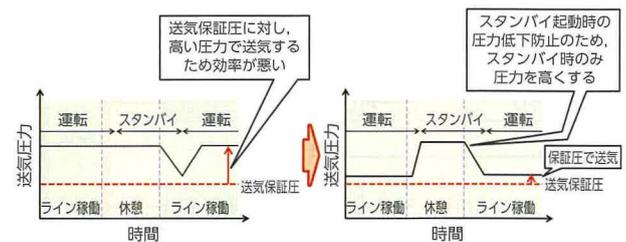


図 21 コンプレッサー運転時間・送気圧力のミニマム化

### 2.5.2 省エネルギー性

今回の対策により，以下の省エネ効果を出すことができた。

- ・ エネルギー原単位：1.1L / 台
  - ・ 省エネメリット：1,163kL / 年
  - ・ CO<sub>2</sub> 削減量：4,500t - CO<sub>2</sub> / 年
- 費用効果 単純回収年 1.8 年

### 2.5.3 汎用性・波及性

今回の対策の他工場へ展開を今後検討する。  
海外 6 工場への展開 6,900kl / 年

### 2.5.4 改善持続性

また，省エネ活動を継続するために，下記の取り組みを推進していく。

#### 【エアレス】

- ・ 工場）FEMS による各工程毎のエア使用量見える化による日々の改善推進
  - ・ 生技）車両系工場へのエアレス活動横展・推進をするため，連絡会を設置
- ユニット工場ライン切り替え時にコンプレッサーのインライン化を推進

**【蒸気レス】**

- ・工場) EHP, ガス給湯器など分散設置によるエネルギー使用量の直課→日々の省エネ活動推進
  - ・生技) ユニット／車両系にて蒸気レスのモデル工場を作り, 技術確立を推進
- ユニット：上郷工場, 車両：元町工場／田原工場

**3 おわりに**

工場・生産技術部門協業での省エネ活動により, 蒸気レス・エア使用量のミニマム化／分散供給を実現することで, 2013年比で4,500t／年のCO<sub>2</sub>を削減することができた。また, 技術的には, CAEの活用やブローノズルの形状最適化により, これまで実現困難だった対象部品に対しても, ブロワ化を実現するなど, 新たな知見を得ることができた。

今後, これらの技術をさらに国内外の他工場へ横展することで, 更なるCO<sub>2</sub>低減に向けて取り組んでいきたい。

**■参考文献**

- (1) 社河内敏彦：噴流工学 基礎と応用。  
森北出版, 2004, p.21 - 34

**■著者**

小野 裕永

# 塗装ブース “新集塵方式の開発”

Development of Paint Booth with New Paint Mist Collection Method

飯田 達也 \*1

Tatsuya Iida

葛西 公 \*2

Tadashi Kasai

藤本 勝利 \*1

Katsutoshi Fujimoto

佐藤 守 \*3

Mamoru Sato

三谷 裕也 \*1

Hiroya Mitani

遠藤 登喜夫 \*1

Tokio Endo

## 要旨

自動車のボデーやバンパー等の部品（以降、ワーク）を塗装する塗装ブースでは、ワークに塗着しなかった塗料ミストを捕集するために、上方から下方へ空気を流し塗装ブース下部にある開口部へ水と一緒に高速で通過させることでミストを集塵し品質を確保している。しかしながら従来の集塵方法では設備が大型で圧力損失が大きくエネルギー消費量が多いことが課題となっている。

今回集塵原理を根本から変え、コンパクトで低圧力損失型の遠心力を利用した新集塵方式の開発を行った。流体シミュレーションやスケールモデルで検証を行い量産ラインへ導入した。

## Abstract

Vehicle bodies, bumpers, and other parts (referred to collectively as “work”) are painted in chambers called paint booths. In a paint booth, air is blown in a downward direction to collect paint mist that is not coated onto the work at openings at the floor of the booth. This paint mist is then mixed with water and passed through to a scrubber at high-speed. This is an important process to help ensure paint quality. However, a conventional paint mist collection system requires bulky equipment and consumes large amounts of energy due to the high pressure loss. This article describes the development of an innovative paint mist collection method based on compact and low-pressure equipment using centrifugal force. After verifying its effectiveness through fluid simulations and scale models, this new method has since been adopted on production lines.

キーワード 塗装, エネルギー, 塗装工程, ブース, 集塵, 塗料ミスト

## 1 はじめに

近年、自動車製造分野において、製造工程から排出される環境負荷物質の低減として、VOC（揮発性有機物質）やCO<sub>2</sub>（二酸化炭素）排出量の低減といった環境への取り組みが重要となっている。光化学スモッグの原因となるVOCについては、塗装工程で使用する塗料が大きく関係しているため、塗料の水性化や塗装ブースの排気処理設備によって大幅に低減してきた<sup>(1)</sup>。またCO<sub>2</sub>排出量すなわちエネルギー消費量は、自動車製造工程の中で塗装工程が全体の約20%を占めており、塗装工程の省エネ対策が急務の課題となっている。今回、塗装工程の中で約50%のエネルギーを使用している塗装

ブースに着目し、画期的なCO<sub>2</sub>低減技術の開発を行った。

塗装ブースでは良好な塗装品質を保証するために、吹き付け塗装で自動車のボデーやバンパー等の部品（以降、ワーク）へ塗着した塗料の粘度制御やワークへ塗着しなかった塗料ミストの飛散を防止するために、温度と湿度を制御した空気を均一なダウンフローになるよう供給している<sup>(2)</sup>。

また塗料ミストは、ワーク下部の水パンへ供給される水流と高速接触させる集塵装置にて捕集される。この集塵装置は、大型で圧力損失が大きいため送風・送水の動力が大きかったといった課題がある<sup>(3)</sup>。このため集塵原理を根本から変えることで、従来と比較して設備サイズ40%低減、エネルギー消費量40%削減を目標にコンパクトで圧力損失の小さく省エネな新集塵方式の開発を行った。

\*1 Mid-size Vehicle Company MS 塗装生技部

\*2 Lexus International Co. 元町工場車体部

\*3 豊田汽車技術中心（中国）有限公司

## 2 塗装ブースの集塵原理

### 2.1 従来の塗装ブース集塵方式と原理

従来の塗装ブースは、ワーク下部にベンチュリースクラバーと呼ばれる集塵装置を設け、塗料ミストを捕集している（図1）。この装置は、高い捕集効率（効率 $\geq 97\%$ 、排気中のミスト濃度 $\leq 3\text{mg}/\text{Nm}^3$ ）を実現するために開口面積を急激に小さくした絞り部を有し、空気運ばれた塗料ミストは、この絞り部で水と一緒に $20\text{m}/\text{s}$ 程度の高速で通過する。絞り部を通過した水は高速の空気中で微細化され、塗料ミストはこの水滴と効率良く衝突し捕集される。また塗料ミストを含んだ水滴は、絞り部を通過後、広い空間で減速させることで大粒径の物は自重落下し、小粒径の物は水切板との衝突によって空気から分離される。従来の集塵装置は、上述の集塵原理であるために圧力損失が大きく装置が大型となることが課題であった。

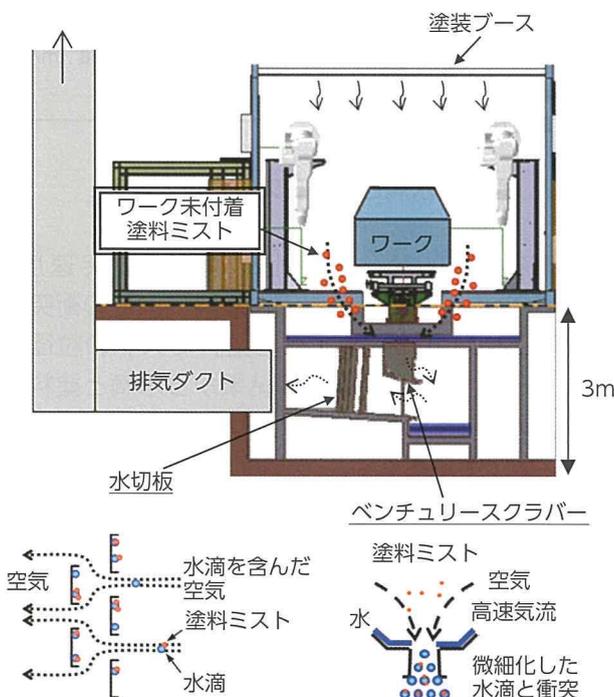


図1 従来の塗装ブースの概要

### 2.2 新集塵装置による塗料ミストの捕集

新集塵装置の開発にあたり、捕集すべき塗料ミストの粒子径をレーザー式粒度分布測定器を用いて測定した（図2）。塗料ミストの粒径は、数 $\mu\text{m}$ から $100\mu\text{m}$ 程度の範囲で分布しているため、一般的に捕集効率が悪いと言われる数 $\mu\text{m}$ から数十 $\mu\text{m}$ の小粒径のものを効率的に捕集することが重要となる。新集塵装置は、小粒径の塗料ミスト（粒

径 $20\mu\text{m}$ 以上を対象）を絞り部の無いコンパクト機構で効率良く捕集するために、円筒状の装置中心から噴霧する水滴との衝突でミスト粒径を大きくし、粒径が大きくなった塗料ミストは、円筒内の螺旋形状ガイドで発生する旋回流の遠心力で気流から分離することを考えた。また、この装置は排気ダクトの途中に設置することで塗装ブースのコンパクト化を図っている。

図3に今回開発した新集塵装置（以降、集塵塔）の概要を示す。集塵塔内には、旋回流を発生させるための螺旋ガイドと塗料ミストの粒径を大きくするためのスプレーノズルを配置している。この装置は、安定した旋回流を形成することが重要となるため、螺旋ガイド形状の最適化は流体シミュレーション（CFD）を活用し、スプレーノズルの配置や流量については、スケールモデルにてデータ検証し最適化を図っている。

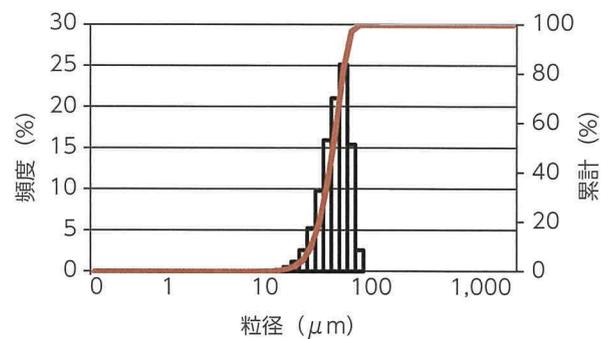


図2 塗料ミストの粒径分布

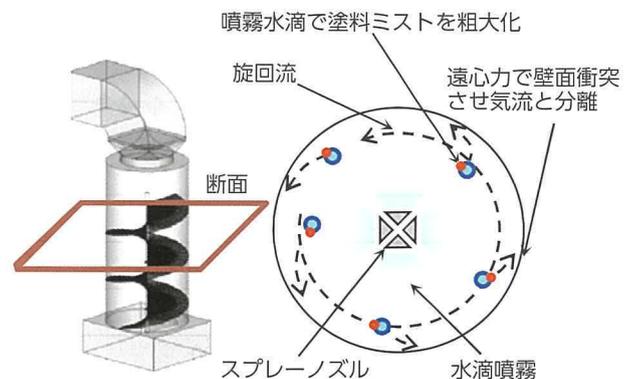


図3 新集塵装置の概要

## 3 理論計算による基礎検討

### 3.1 遠心力による壁面への衝突

図4に円筒内の旋回流による捕集効率の考え方を示す。直径 $D_p$ の粒子が長さ $L$ の間に円筒壁面に捕

集されるとし、粒子濃度がどこでも均一の状態（完全混合）で出口濃度に等しいと仮定すれば、捕集効率  $\Delta\eta$  は次式で表される<sup>(4)</sup>。

$$\Delta\eta = \frac{\rho_p D_p^2 \omega^2 L}{9\mu U_z + \rho_p D_p^2 \omega^2 L} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $\Delta\eta$  = 捕集効率  
 $\rho_p$  = 粒子密度 (kg/m<sup>3</sup>)  
 $D_p$  = 粒子径 ( $\mu$ m)  
 $\omega$  = 角速度 (rad/s)  
 $L$  = 装置長さ (m)  
 $\mu$  = 流体粘度 (Pa・s)  
 $U_z$  = 軸方向速度 (m/s) を表す。

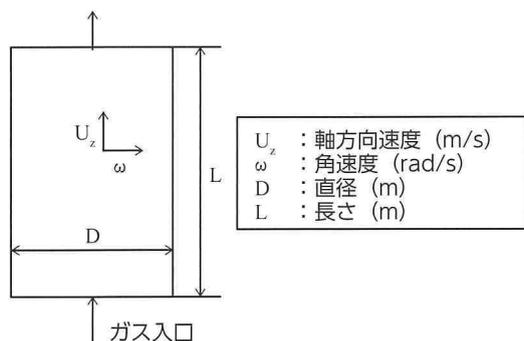


図4 円筒内の旋回流による集塵効率

図5は、円筒内の周速度を 10m/s とした時の塗料ミストの捕集効率を示す。目標の捕集効率 97% 以上を達成するためには、塗料ミストの粒子径を 200  $\mu$ m 以上に大きくする必要があることが分かる。

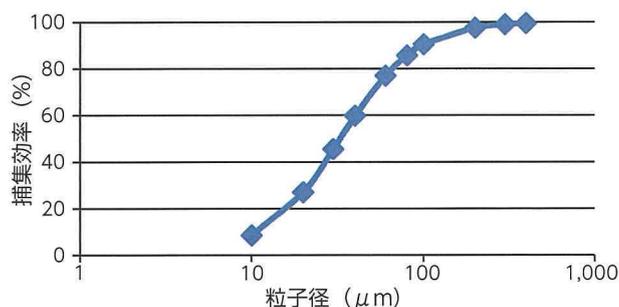


図5 粒径サイズによる粒子の捕集効率

塗料ミストは、数  $\mu$ m から 100  $\mu$ m 程度の粒径分布であるため、200  $\mu$ m 以上の水滴と衝突させることが必要になる。そこで、この粒径分布の噴霧水を生じできるスプレーノズルを選定し、スプレーノズルから噴霧される水滴径や塗料ミストと水滴の衝突効率を評価したので次項で述べる。

### 3.2 水滴と塗料ミストの衝突

図6に水滴と塗料ミストの衝突効率の考え方を示す。球形の水滴と塗料ミストが衝突する場合、衝突効率  $\varepsilon$  は次式で表される<sup>(4)</sup>。

$$K = \frac{\rho_p D_p^2 U_r}{18\mu D_{pw}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\varepsilon = \frac{K}{K + 0.65} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 $K$  = 慣性パラメーター  
 $\rho_p$  = 粒子密度 (kg/m<sup>3</sup>)  
 $D_p$  = 粒子径 ( $\mu$ m)  
 $U_r$  = 気液相対速度 (m/s)  
 $\mu$  = 流体粘度 (Pa・s)  
 $D_{pw}$  = 水滴半径 ( $\mu$ m)  
 $\varepsilon$  = 衝突効率 を表す。

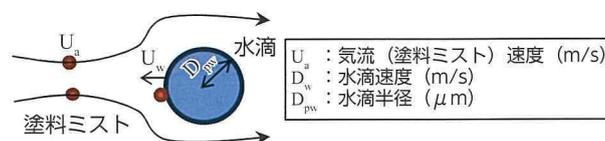


図6 水滴と塗料ミストの衝突効率

水滴径 200  $\mu$ m、気液相対速度（衝突速度）20m/s と仮定した時の水滴と塗料ミストの衝突効率を図7に示す。捕集すべき塗料ミストの粒径は 20  $\mu$ m 以上であり、図7の結果から水滴と塗料ミストは高い確率で衝突すると考えられる。次にスプレーノズルを選定するために高速度カメラにて噴霧水の粒子径と速度を測定した結果(図8)、スプレーノズルから噴霧される水滴の平均粒径は 200  $\mu$ m、速度は 10m/s という結果となった。また、気液相対速度（衝突速度）20m/s を満たすためには、スプレーノズルを気流と対向に設置する必要があることも分かった。

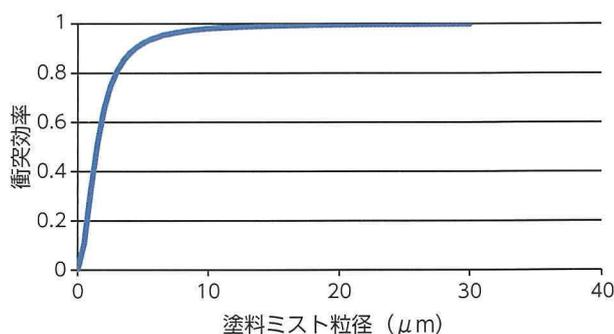


図7 水滴と塗料ミストの衝突効率



図8 高速度カメラによる噴霧水滴写真

## 4 流体シミュレーションによる検証

### 4.1 安定した旋回流の形成

3の理論計算で試算した集塵効率を実現するためには、集塵塔内を通過する空気が安定した旋回流を形成する必要がある。そこで、CFDを活用し集塵塔の構造検討を行った。図9にCFDで検討した3つのモデルを示す。それぞれのモデルに流入境界および流出境界を設定し、(a) 集塵塔内には螺旋ガイド無しで給排気ともに接線方向から空気を送るモデル、(b) 集塵塔内に螺旋ガイドを設け排気側のみ接線方向から空気を排出するモデル、(c) 集塵塔内に螺旋ガイドを設け空気は上方向から排出するモデルについて比較した。

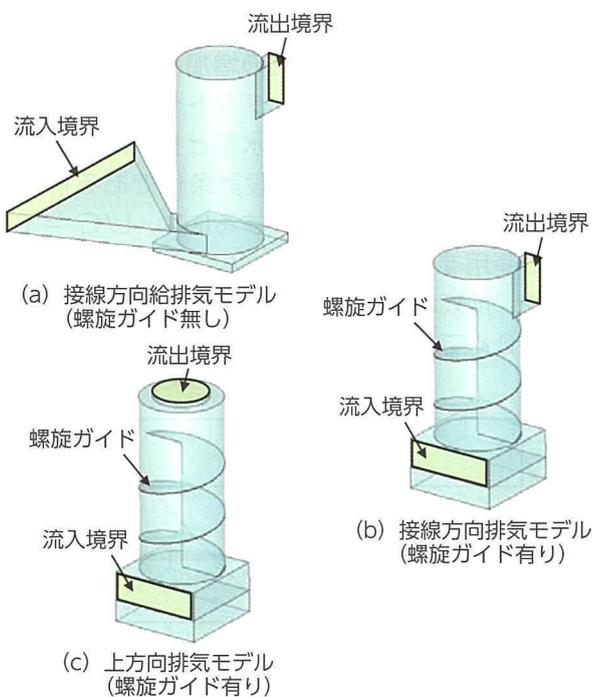


図9 気流シミュレーションモデル

CFDの結果を図10に示す。モデル(a)では集塵塔内部の中間あたりで旋回流が一部形成されたものの、接線方向から流入した空気の大部分が旋回流を形成せずに内壁を沿ってそのまま出口へ流出する。一方モデル(b)やモデル(c)のような螺旋ガイドを設けた集塵塔においては、螺旋ガイド部分で旋回流が形成されるが、モデル(b)の接線方向に排気口を設けた集塵塔では、集塵塔上部の螺旋ガイドが無くなった部分で気流が旋回せずに直線的に流出することが分かった。排気口を上方向とするモデル(c)では、螺旋ガイドで形成された旋回流をそのまま維持しながら排気することができ、最も安定した旋回流を形成できる構造であることが分かった。この結果からモデル(c)を用いて、様々な粒径サイズの粒子の旋回流中の挙動を解析した。

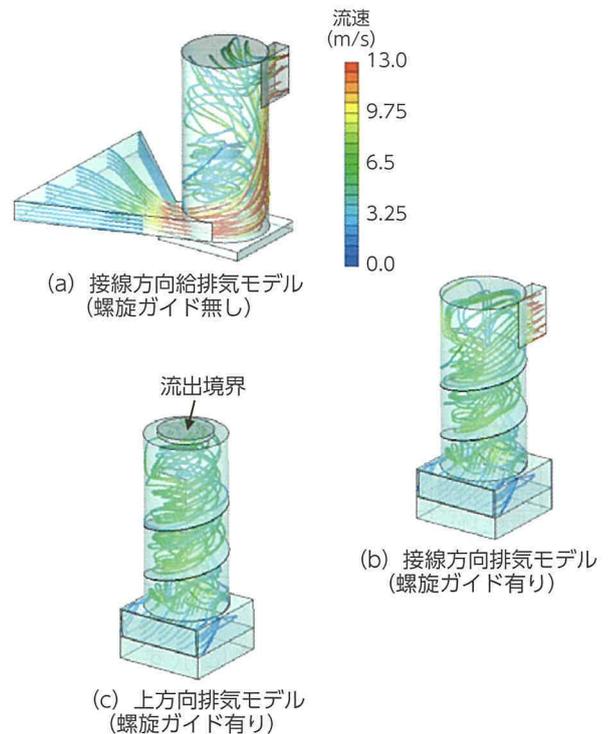


図10 気流シミュレーション結果

### 4.2 粒子飛行シミュレーション

安定した旋回流が維持できるモデルへ様々な粒径サイズ(100~500 $\mu$ m)の粒子を気流に乗せて、集塵塔内で粒子が浮遊し付着する様子を確認した。粒子飛行シミュレーションの結果を図11に示す。集塵塔内のエリアを上面、側面、螺旋ガイド、下部タンクの4つに分け、粒子がどの位置で付着したかを表示した。粒子径が100 $\mu$ mの場合、粒子が小さいため気流に運ばれて、その約半分が集塵塔の側面へ付着し、その他のエリアへも平均的に付着する

ことが分かった。また、未付着塗料として2%の粒子が排気され、つまりは捕集効率98%という結果となった。粒子径が200 $\mu\text{m}$ 以上の粒子は集塵塔内付着が100%となり、粒子径が大きくなるにつれて集塵塔の入口に近い部分で多く捕集される傾向に有ることが分かった。

これらのCFD結果より、噴霧水滴径が100 $\mu\text{m}$ 以上あれば目標の捕集効率97%以上は十分に達成可能である目処がたったため、小型モデルを製作し、機能評価を行った。

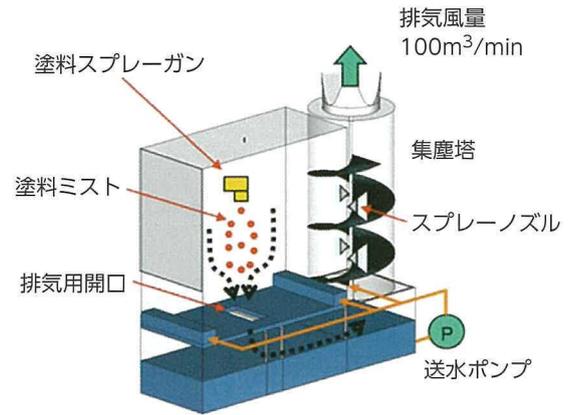


図12 小型試験機の概要

噴霧水量を変化させた時の捕集効率の結果を図13に示す。どの条件の噴霧水量(L/G=0.2~1.0)でも目標の捕集効率97%を満たす結果となり、噴霧水量が多いほど捕集効率が良い結果となった。

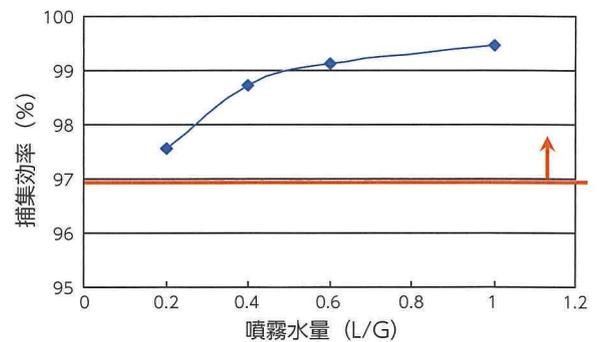


図13 噴霧水量と捕集効率

しかしながら、噴霧水量の増加によって排気中の水分量が増えることで、ダクトやファン等の腐食促進が懸念される。噴霧水量と排気水分量の関係を図14に示す。従来の設計条件である排気中水分量を20 $\text{mg}/\text{m}^3$ 以下にするには、L/G = 0.8以下で運用する必要がある。高い捕集効率を維持しつつ、排気水分量をなるべく抑える条件として、L/G = 0.4で運用することが望ましいと判断した。

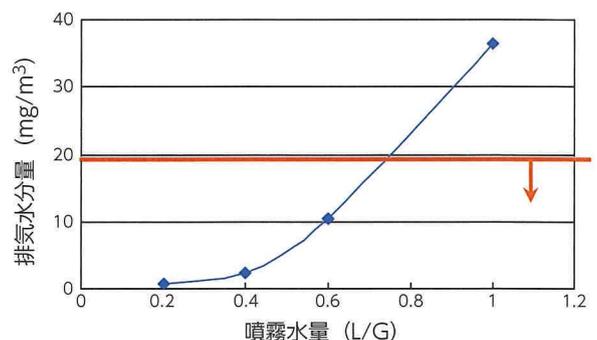


図14 噴霧水量と排気水分量

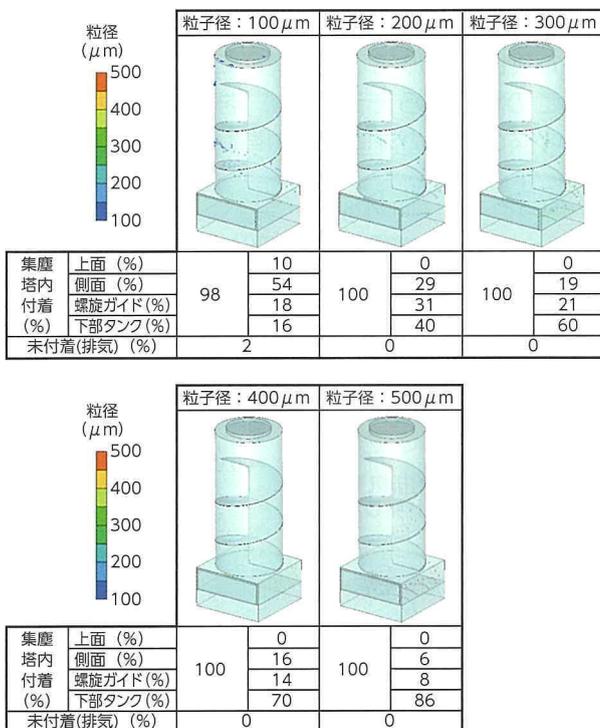


図11 粒子飛行シミュレーション結果

小型試験機の概要を図12に示す。排気風量100 $\text{m}^3/\text{min}$ とし、集塵塔内の噴霧水量を変化させた時の塗料ミスト捕集効率を測定した。噴霧水量における評価は、排気風量に対する噴霧水量の重量比(L/G)で行った。

$$L/G = \frac{\text{噴霧水量 (kg)}}{\text{排気風量 (kg)}} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、L = Liquid G = Gas を表す。

## 5 実スケールにおける性能評価

小型試験機の結果から、実スケールにおける噴霧水量を  $L/G = 0.4$  とし、排気風量  $500\text{m}^3/\text{min}$  とした時の捕集効率を測定した。結果は捕集効率 97.8% となり、目標の捕集効率 97% 以上を達成する結果となった。次に圧力損失の結果を図 15 に示す。圧力損失においては、従来の集塵方式よりも約 40% 低い結果となり、排気ファンの大幅な動力低減が可能となった。また集塵塔を排気ダクトの途中で設置することで、塗装ブースの高さを従来よりも約 40% 低減することも可能となった。

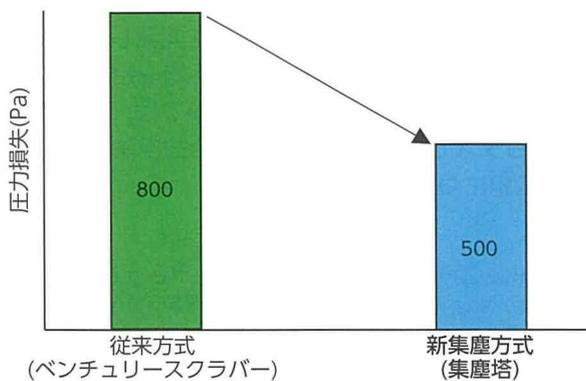


図 15 従来方式と新集塵方式の圧力損失

## 6 おわりに

新集塵方式の開発にあたり、理論計算や流体シミュレーションを用いて構造を決定してきた。塗装ブースの集塵原理を根本から変えることで、従来の集塵方式であるベンチュリースクラバーと比較すると、設備高さを約 40% 低減することに成功した。

またエネルギー消費においては従来よりも約 40% 低減することができた。これは従来のような絞り部や水切板といった圧力損失が掛かる部分を排除し、旋回流の遠心力を利用して集塵することに成功した結果である。従来よりも圧力損失が小さくなったことでファンの動力が低減しエネルギー消費が低減できた。

この新しい集塵方式の塗装ブースは、弊社の国内工場にて 1 号機が稼動しており、今後の新設塗装工程へ順次展開することで環境負荷低減に大きく貢献していく。

### 参考文献

- (1) 戸田紀三夫：自動車塗装の課題と対応. 色材協会誌. Vol.66, No.4, P.231 - 236 (1993)
- (2) 別所毅：自動車分野の環境に対応する表面処理技術. 表面技術. Vol.50, No.12, P.1085 - 1090 (1999)
- (3) 児玉敏：自動車塗装における課題とこれからの開発戦略. 色材協会誌. Vol.79, No.10, P.442 - 448 (2006)
- (4) 井伊谷鋼一：集塵装置 (新版). 日刊工業新聞社, 1963

本論文は、下記発表済み論文の転載である。

飯田達也, 葛西, 藤本, 佐藤, 三谷, 遠藤：塗装ブース “新集塵方式の開発”. 日本塗装技術協会. 塗料・塗装研究発表会講演予稿集 31 巻, P.31 - 35

### 著者



飯田 達也



葛西 公



藤本 勝利



佐藤 守



三谷 裕也



遠藤 登喜夫

# 鋳造アルミボディーの要求品質を確保するための寸法制御技術と CAE 技術確立

Development of Dimensional Control and CAE Technologies  
to Ensure Required Aluminum Body Part Quality

村木 友也 *1 Tomoya Muraki	中島 徹也 *1 Tetsuya Nakajima
横田 祐介 *2 Yusuke Yokota	廣川 公 *3 Ko Hirokawa

## 要旨

もっといいクルマづくりのため、「燃費向上」、「衝突安全性能向上」、「車体剛性向上」が必要である。これらを実現すべく、軽量・高剛性を両立するアルミダイカスト製サスペンションタワーを開発した。製品の要求特性である機械的特性を達成するためには熱処理が必要となるが、焼入れ時に不均一冷却となり収縮差が発生するため大きく歪んで所定の寸法精度が得られないという問題がある。本稿では、機械的特性と寸法精度を両立するため冷却界面の現象を解明し、トヨタオリジナルのポイント冷却手法と独自 CAE を開発することで、焼入れ時の寸法制御技術を確立した取組について紹介する。

## Abstract

Three of the key objectives of Toyota's development philosophy of building ever-better cars are to enhance fuel economy and collision safety performance, and to increase the rigidity of vehicle bodies. To help accomplish these objectives, high-pressure aluminum die cast strut towers have been developed to simultaneously reduce weight and increase rigidity. Heat treatment is a necessary part of the strut tower production process to achieve the required mechanical properties. However, non-uniform cooling during the quenching step can cause shrinkage differences that result in significant distortions and poor dimensional accuracy. This article identifies the key phenomena at the cooling interface for ensuring mechanical properties and dimensional accuracy, and describes the establishment of dimensional control technology during quenching through the development of original point-cooling and computer-aided engineering (CAE) techniques.

キーワード サスペンションタワー アルミダイカスト 熱処理 寸法制御 CAE

## 1 はじめに

### 1.1 もっといいクルマづくり

地球温暖化による劇的な気候変動を避けるため継続した CO<sub>2</sub> 排出量低減が求められており、自動車業界でも燃費向上などの環境性能向上が必須である。また、世界的に高齢化社会が急速に進展することから、車の衝突安全性能向上もまた求められている。

一方ユーザー目線で考えると、近年嗜好の多様化により、若者のクルマ離れが問題となっている。ユーザーの関心を引くもっといいクルマを提供するためには、燃費向上・衝突安全性能向上に加え、自動車を持つ本質的な魅力として「運転する楽しさ＝

意のままに操れる」ことが重要である。

車体剛性は操縦性に大きく寄与すると言われるが、これは車体のねじれが「ドライバーの意図」しない動きになるためである。このため、自動車メーカー各社は近年車体の剛性を向上させてきている。

### 1.2 開発のねらい

車体のねじれは、フレームライン+サスペンション取付け位置の局所的なねじれの合算で生じる(図1)。フレームラインのねじれ剛性向上は部材の高強度化、接合点数増など重量増を抑えながら剛性を向上させるアプローチは多い。一方、取付け部周辺の剛性アップは、ねじれに対して突張るようにリブを放射状に配置したアルミ一体成型が効果的である。これは、従来の鉄プレス品のままで剛性を上げ

\*1 パワートレーンカンパニー 鋳造生技部

\*2 パワートレーンカンパニー 生技開発部

\*3 パワートレーンカンパニー ユニット開発基盤デジタル改革部

ようとする、形状複雑化に対応する多部品構成が、大幅な肉厚アップが必要となり重量増加が避けられないためである (図2)。

そのため、形状自由度が高く複数部品の一体化が可能なアルミダイキャスト製サスペンションタワー (以下、サスタワー) を採用し、軽量化とサス取付け部の高剛性化の両立がトレンドとなっている。トヨタとしてもこれまでサスタワーに関する基礎開発を行っており、ボデー接合部の強度・電食に対してトヨタの品質・信頼性を確保する目処が整った。本稿では、軽量化と高剛性を高次元で両立することを目標において、現行の4倍以上の剛性を持つアルミサスタワーの開発について紹介する。

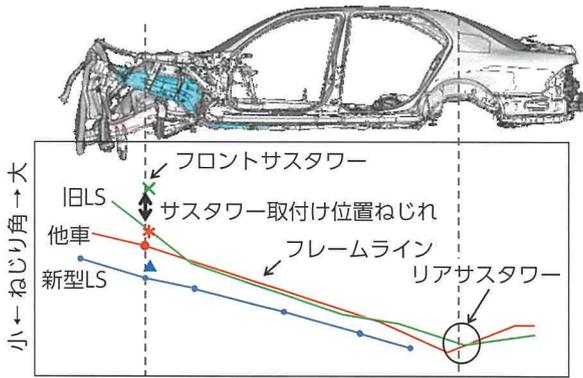


図1 リアサスタワーを基準とした車体のねじり角

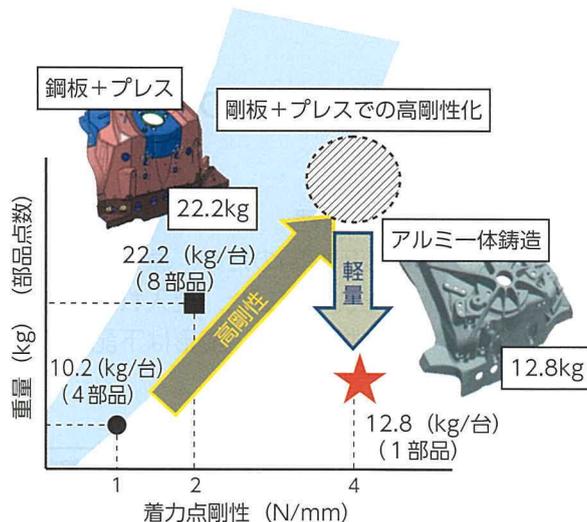


図2 アルミサスタワーによる軽量と高剛性の両立

## 2 アルミサスタワーに要求される特性と品質

### 2.1 求められる製品機能と生産技術

#### 2.1.1 衝突安全性とねじれ剛性の両立

先に述べたとおり、サスタワーは車両の操縦性能を担う重要な部品であるのに加え、衝突安全性にも影響を及ぼす部品である。車両前面からの衝突による衝撃は、フロントサイドメンバーが屈曲することで吸収するように考えられているため、サスタワーの接合する部位では自身が破断するように肉厚は3mmと薄くする必要がある。一方、サスペンション取付け部は走行時のサスペンションからの入力を受け止めるのはもちろん、衝突時にキャビンへの衝突物の侵入を防ぐため最大幅 15mm という強固なリブを有しており (図3)、部位毎の肉厚を自由に变化させられるダイキャスト製の利点を活かすことで、2つの相反する特性の両立を可能とした。

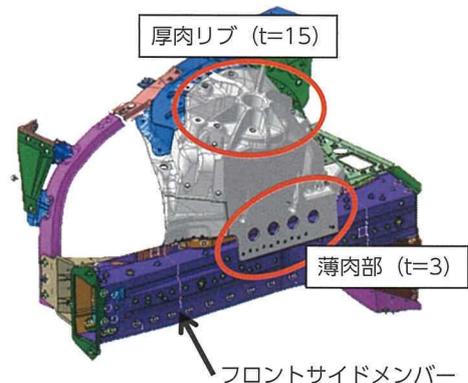


図3 アルミサスタワーの肉厚差

#### 2.1.2 ボデーとの高強度接合保証

サスタワーは周囲の鉄部品と接合される。金属同士の接合方法は溶接に代表される熔融接合と、リベットに代表される機械的接合がある。鉄とアルミの異種材接合の場合、熔融接合法では接合界面に脆弱な Al-Fe 系金属間化合物層が形成されることと、局所的とはいえ入熱による金属組織への影響がある。一方、機械的接合ではこれらの課題は発生しないため、接着剤との併用により電蝕防止効果が得られる SPR (Self Piercing Rivet) 接合を採用した。SPR 接合は、重ね合わせた板に SPR を打込み、先端部を母材内で押し広げて接合する手法のため、母材の接合部に引張応力が発生する (図4)。ここで、母材であるサスタワーが割れてしまうと接合強度を満たさない。そこで、接合部の品質を保証するため

サスタワーには下記の品質が求められる。

1. 接合部が割れないための耐力・伸び
2. 車両組付け精度を保証するための寸法精度

サスタワーはシリンダーブロックに対し7倍以上の伸び、2倍の寸法精度が求められている(図5)。この高い要求品質を達成するための手段について次節以降で述べる。

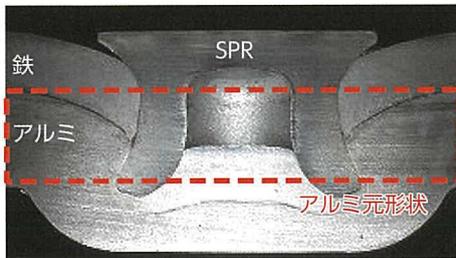


図4 SPR結合

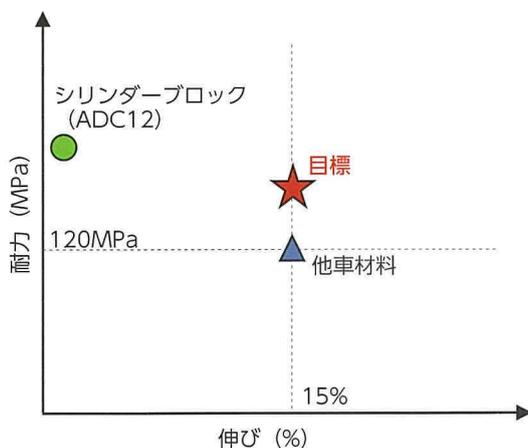


図5 サスタワー要求特性

## 2.2 要求品質達成手段とT6熱処理の必要性

ダイカストは溶けたアルミ(以下、溶湯)を高速・高圧で金型に充填し成形する工法のため、生産性が高く高精度な製品が製造できる反面、製品内部に空隙(以下、鑄巣)が発生する。鑄巣があると製品の伸びが悪化するため、サスタワーは下記の技術を採用した。

1. 高真空ダイカスト法(金型内大気巻き込み低減)
2. 無機系離型剤(離型剤の気化低減)
3. 脱ガス処理(溶湯に溶解している水素ガス低減)

一方アルミ材料においても、一般的なダイカスト材料(ADC12)では要求を満たせないため、5倍以上の伸び特性をもつ高延性ダイカスト材料を採用した。さらに、鑄造後の内部組織は溶質元素の不均一分布・化合物形成などの影響により、そのままではサスタワーに必要とされる0.2%耐力・伸びを得る

ことが出来ないため、T6熱処理を採用した。T6熱処理とは、鑄物を高温で保持することで内部組織を均質化し、その後急速冷却することにより均質組織のまま維持、さらに時効処理によって強化元素を微細に析出させ、伸びを得る方法である(図6)。この時、焼入れ時の冷却速度が遅いと、十分な強度・伸びを得ることが出来ない。

今回開発したサスタワーは、これまでに述べてきたニーズを満たすために更なる高強度・高剛性が求められる部品であるため、これまでの鑄造部品にない厚いリブが多数存在する。厚肉部を急冷するため冷却速度を上げる必要があるが、一方で部位毎の温度差が大きくなるため粗材変形が問題となる。そこで、サスタワーの焼入れには高度な冷却技術が求められる。

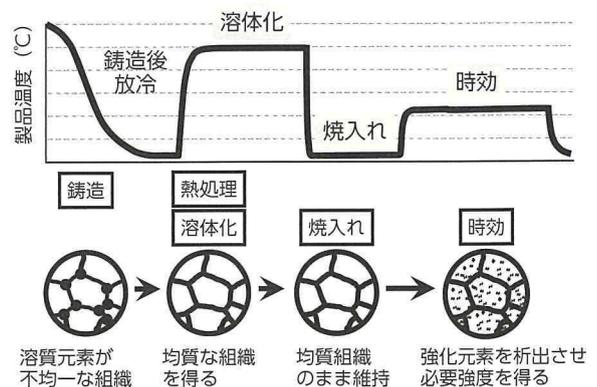


図6 T6熱処理と組織の変化

## 3 要求品質達成のための画期的生産技術の開発

### 3.1 冷却中の変形原理

焼入れ時の変形要因解明のため、原理原則から変形に寄与する因子を洗い出した。焼入れ中の変形を単純梁モデルに置き換えると、変形は下記の3つで決まる(図7)。

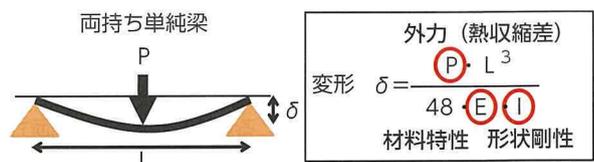


図7 変形原理

1. 冷却速度差から生じる熱収縮差
2. 材料特性 (温度依存)
3. 形状剛性

ここで、各部位の冷却速度は

$$q = h(T_w - T_c) \quad \dots\dots\dots (1)$$

q : 熱流束  
 h : 熱伝達係数  
 T<sub>w</sub>: 被冷却物温度  
 T<sub>c</sub>: 水温

で求まる熱流束に依存する。また、本材料における 0.2% 耐力の温度依存性は図 8 に示すとおりであり、常温時に対して焼入れ初期の 500℃では 0.2% 耐力が 5 分の 1 程度にまで軟化している。

以上より、高温時の材料軟化状態における熱流束のコントロールが変形に対し重要であると考えた。

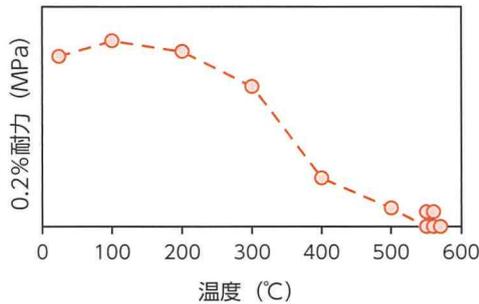


図 8 0.2% 耐力の温度依存性

### 3.2 焼入れ時の複雑な冷媒挙動

一般的な焼入れ冷却手法として、溶体化炉から一気に水槽へ入れ急速冷却を行う水没焼入れ手法がある。しかし、被冷却物周りの水温上昇や対流 (T<sub>c</sub> 変化)、蒸気膜移流・停滞 (h 変化) など様々な現象が複雑に絡み合うため、部位毎で冷却速度差が発生する (図 9)。さらに、製品肉厚が一定でない場合、厚肉部と薄肉部でも冷却速度が異なる。従来から T6 熱処理を実施しているシリンダヘッドは上記の問題を抱えながらも水没焼入れを採用しているが、形状剛性が高いため変形しにくい。一方、サスタワーに水没焼入れを適用した場合、形状剛性が低いため大きく変形する恐れがある (図 10)。

冷却速度差を減らす方法として炉内冷却・空冷などが考えられるが、サスタワーには厚肉リブがあるため冷却速度が遅くなり、必要な材料特性が厚肉部で得られない (図 11)。

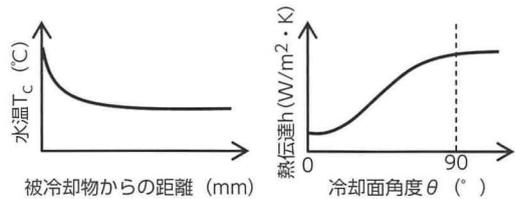
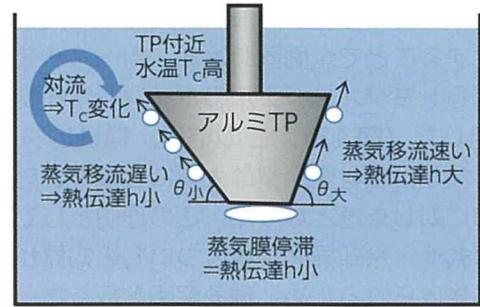


図 9 水没冷却時の挙動

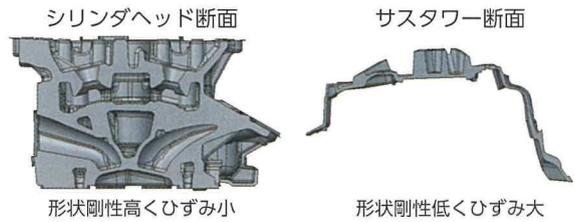


図 10 部品による形状剛性差

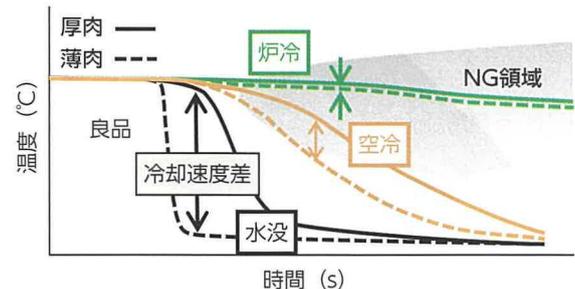


図 11 冷却速度と機械的特性

### 3.3 トヨタオリジナル冷却制御技術の開発

水没以上の冷却速度を確保しつつ、かつ冷却速度差を減らすために冷却水温・熱伝達係数を一定に保つ冷却手法を検討する上で、鉄鋼業界で冷却時に採用しているミスト冷却に着目した。ミスト冷却とは、微粒化した液滴をノズルから噴射することにより塗布する手法である。この手法を採用すると、水没で問題となった蒸気膜形成や水温上昇が、ミストによる冷却では蒸気膜形成しても崩壊し、常に一定温度の水滴により冷却可能となる (図 12)。そのため、水没同等の冷却速度が得られ、かつ部位毎の冷却速度差は低減できると考えた。さらに、薄肉部はノズル本数を少なく厚肉部は多く配置し、ペイントシ

ミュレーションを用いて液滴衝突分布を肉厚に応じ最適化することで全面同時冷却・均一冷却を同時に達成するトヨタオリジナルのポイント冷却制御技術を開発した(図13)。この結果、機械的特性は達成できたが、粗材変形量は大幅に低減できたものの目標値に対し未達となった。この理由として、ノズル配置条件・冷却界面現象についての知見が少ないことが挙げられるため、現象解明を行った。

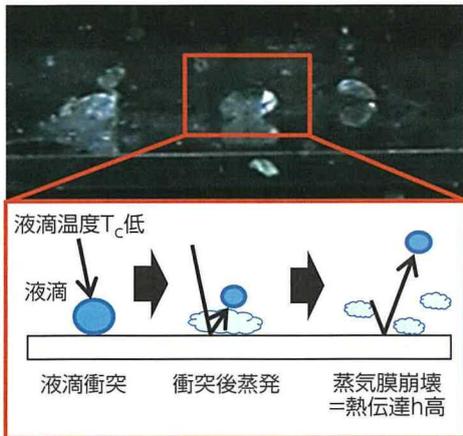


図12 ミスト冷却時の液滴挙動

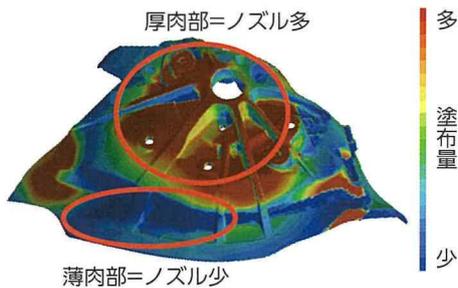


図13 ペイントシミュレーション結果

### 3.4 ミスト冷却での冷却界面現象解明

ミストノズルから噴射される液滴のエネルギーを分解し、噴射速度・噴射距離・水温を因子として板TPでの変形量を調査した(図14)。その結果、噴射速度と噴射距離が1%有意で変形に寄与することが明らかとなった。

また、TP衝突付近の液滴挙動及び変形状態を高速度カメラにより観察、TP温度変化を熱電対により計測し、TP温度と液滴挙動の関係を明らかにした。また変形については、冷却初期と遷移沸騰領域2段階で発生することが明らかとなった。一般的にTPの温度が高い状態では、液滴が衝突した瞬間蒸気膜が形成され(ライデンフロスト現象)脱熱量が

少ない(膜沸騰状態)。一方、TPがある温度以下に下がると、液滴は付着し接触面積が増えるため脱熱量が大幅に増加する(核沸騰状態)。これが2段階で変形する理由であり、冷却初期で材料強度が低下している上にライデンフロスト現象で冷却状態が安定していないため、また遷移沸騰時に液滴挙動が変化するためであると考えられる(図15)。

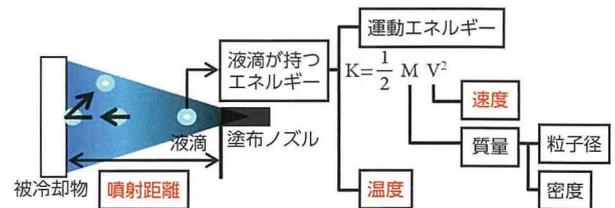


図14 液滴エネルギー

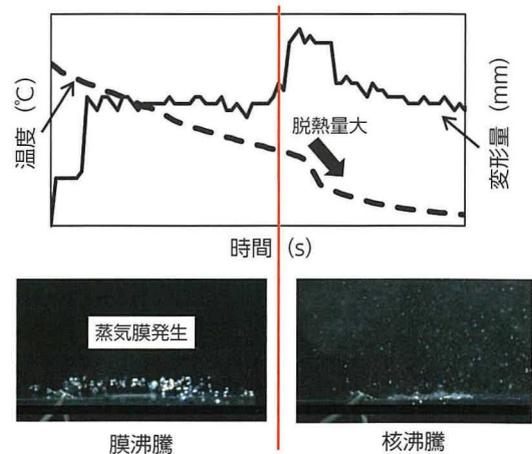


図15 温度と変形量の関係

### 3.5 ノズル配置最適化のための独自 CAE 開発

オンマシンでの実証前に十分な検討を実施するために、複雑な冷却界面の現象を予測できないか検討した。しかし、市販の流体シミュレーションを用いると計算領域が大規模すぎて計算できない。そこで前述の実験より得られた結果より、サスタワーに対する粒子の衝突分布と粗材温度から部位毎の熱伝達係数を導くオリジナルデータベースを作成した。さらに、ノズル噴射後の液滴挙動(流速・粒径・流量分布)の計測を行った(図16)。この液滴挙動を元に市販の流体シミュレーションで液滴衝突分布を計算し、図17のようなオリジナルデータベースを組み込むことで、焼入れ時の温度分布・変形量を事前予測できる独自 CAE を開発した。この CAE で確認しながら、ノズルの噴射圧力・距離・方向を最適配置することで、サスタワーに求められる機械的特性と寸法精度の両立を達成することができた。

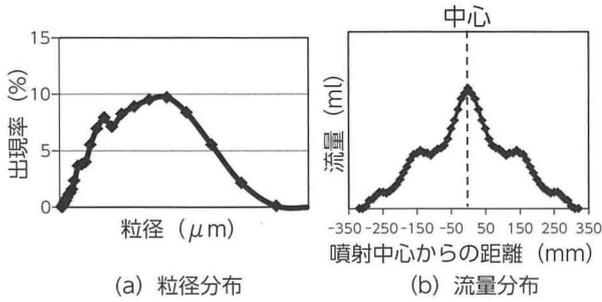


図 16 ノズル噴射後の液滴挙動

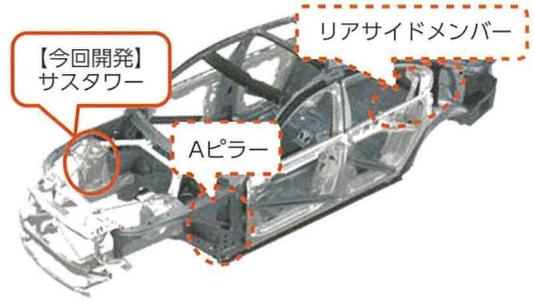


図 18 アルミ一体化による効果が大きい部品例

論文解説

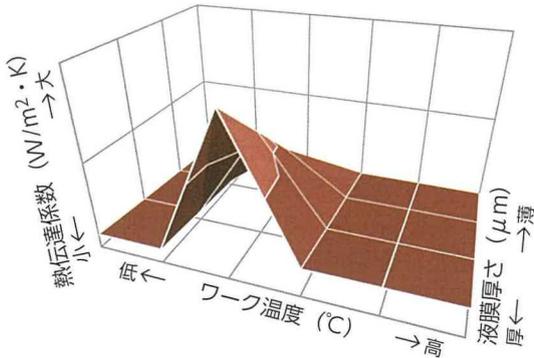


図 17 オリジナル熱伝達データベース

■ 著者



村木 友也



中島 徹也



横田 祐介



廣川 公

4 おわりに

機械的特性と寸法精度を両立するため、ポイント冷却手法と独自 CAE を開発し、焼き入れ時の寸法制御技術を確立した。その結果、これまでにない高剛性・高延性なアルミサスタワーの開発に成功し、世界トップレベルの操縦性を達成した。

日本における自動車の CO<sub>2</sub> 排出規制は今後 5 年間で 137 g/km から 113 g/km とおよそ 20% も削減する必要があり、車体の軽量化ニーズはますます大きくなっていく。それに伴いボデー・シャーシ部品のアルミ一体化も加速することが予想されるが(図 18)、今回開発した冷却技術・CAE を活用することで工程計画段階から製品完成度向上し、もっといいクルマをより早くお客様に届けていく。

# 放射光 X 線による燃料電池の 電極内液水可視化とシミュレーション開発

Visualization of Liquid Water inside Electrodes of Operating Fuel Cell Using Synchrotron X-Ray Radiography and Development of Simulation Technique

林 大甫<sup>\*1</sup>      井田 敦巳<sup>\*1</sup>      真籠 祥太<sup>\*1</sup>  
Daisuke Hayashi      Atsushi Ida      Shota Magome  
鈴木 孝尚<sup>\*2</sup>      山口 聡<sup>\*2</sup>      堀 良輔<sup>\*3</sup>  
Takahisa Suzuki      Satoshi Yamaguchi      Ryosuke Hori

## 要旨

燃料電池車の普及に向けて燃料電池セルの高出力密度化が求められている。さらなる高出力密度化の鍵は、電気化学反応および酸素供給を阻害する液水の排出である。触媒層で生成した液水は多孔質体である拡散層を通過して流路に到達し排水されるが、燃料電池内部かつミクロ構造である拡散層中の液水挙動は十分な理解が進んでいない。本研究では発電性能と液水の関係を明らかにするため、放射光 X 線 (SPring-8) を用いた高空間分解能、高時間分解能の液水可視化手法と、発電性能を予測可能な数値流体シミュレーションを開発した。両技術により発電性能と液水分布の関係を明確にし、それらに影響を及ぼす主要な拡散層物性を絞り込むことができた。

## Abstract

Designing fuel cells (FCs) with a high power density is important for encouraging the wider acceptance of fuel cell vehicles (FCVs). A key challenge is draining liquid water that inhibits electrochemical reactions and causes oxygen transport loss in the FC. However, although it is known that the gas diffusion layer (GDL) drains liquid water through the catalyst layer to the channel, the liquid water behavior inside the GDL is not fully understood due to the size of its micro pores and the sealed state of the FC. To identify the relationship between power generation performance and liquid water, this research developed a liquid water visualization technique with high space and time resolution using synchrotron X-ray (SPring-8) radiography, as well as a simulation technique capable of predicting power generation performance using computational fluid dynamics (CFD). These techniques were combined to identify the relationship between power generation performance and the distribution of liquid water, helping to narrow down the key physical properties of the gas diffusion layer that affect these characteristics.

キーワード 燃料電池, シミュレーション, X 線, 液水, 拡散層, 電極

## 1 はじめに

### 1.1 背景

近年のエネルギー枯渇問題に対し、高効率、クリーンな環境車 (EV : 電気自動車, FCV : 燃料電池自動車) に注目が集まっている。エネルギーの多様化、ゼロエミッション、航続距離の観点から HV (ハイブリット自動車), PHV (プラグインハイブリット自動車) の次の柱として、FCV が本命視さ

れており、トヨタでは世界に先駆け'14年12月より MIRAI (FCV) の生産を開始した。MIRAI に続く普及フェーズの FCV では燃料電池スタックのさらなるコストダウンと搭載性を考慮した小型化、高性能化すなわち高出力密度化が重要となる (図 1)。既に競合他社も同等の出力密度のスタックを開発しており、燃料電池の普及を狙う次期 FCV でも商品力を維持するためには、出力密度の一層の向上が必須である (図 1, 2)。

\*1 パワートレーンカンパニー 電池・FC 生技部

\*2 (株) 豊田中央研究所

\*3 (株) 日本自動車部品総合研究所

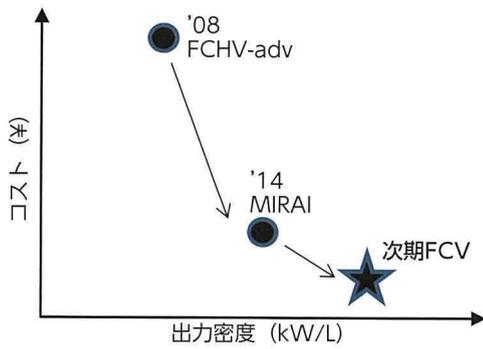


図 1 次期 FCV の目標

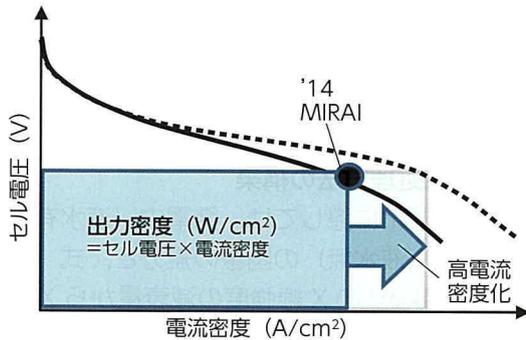


図 2 燃料電池の高出力密度化

### 1.2 燃料電池の構造

燃料電池は電解質膜を挟んで空気極と燃料極からなり、各極は、Pt (白金) / C (カーボン) を塗布した触媒層、空気 / 水素を供給するガス流路、両部材間に設置するガス拡散層 (以降 拡散層) からなる (図 3)。燃料電池では空気極触媒層にて酸素とプロトンが反応し、電気と水が生成する。電流と生成水量は比例するため高電流 (= 高出力密度) を目指すほど水が多く発生する。この生成水により酸素の輸送が阻害され、白金触媒が本来の能力を引きだせなくなる (図 4)。流路については高ガス流速による排水が可能である一方、拡散層は多孔体構造のため、液水阻害が頻発する。言い換えると高電流密度設計のためには拡散層の排水設計が重要となる。

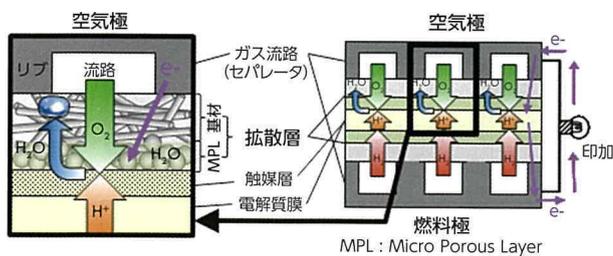


図 3 燃料電池の基本構造

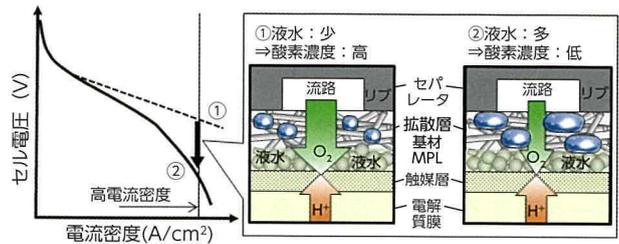


図 4 液水に酸素輸送阻害

### 1.3 拡散層の機能と課題

拡散層の基本構造を図 3 左に示す。拡散層はガス拡散、生成水の排水、熱伝導、電子伝導、荷重均一化の機能を持つ。その機能を果たすため、直径数  $\mu\text{m}$  のカーボン繊維で構成される基材層と、サブミクロンスケールのカーボンと撥水材で構成される MPL の 2 層からなるランダムな多孔体構造である。

拡散層はその材料、構造等によって高電流密度の性能が大きく変わることが分かっている。この性能差は液水分布の違いによる酸素輸送係数の差に起因すると考えられるが発電中の拡散層内液水挙動を観察しメカニズム解析をすることは、燃料電池の内部であること、 $\mu\text{m}$  オーダーのスケール ( $0.1\mu\text{m} \sim 100\mu\text{m}$ ) の現象であることから可視化難易度が高い。しかし、コストと高出力密度を両立する上では、メカニズムを明らかにし、低コストな材料でも性能を最大限引き出す拡散層設計が必要となる。

そこで本研究では拡散層の排水メカニズム解明を狙い電極内の液水可視化技術を開発し、数値シミュレーションと実験計画法を組み合わせ、

発電性能  $\leftrightarrow$  液水分布  $\leftrightarrow$  拡散層物性の関係 (図 5) を解析したのでその事例について報告する。

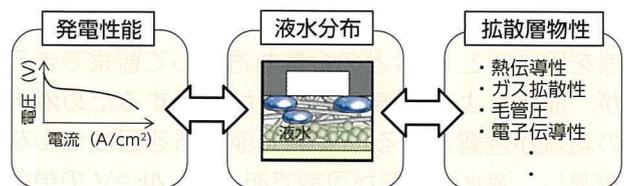


図 5 発電性能  $\leftrightarrow$  液水分布  $\leftrightarrow$  拡散層物性の関係

## 2 液水可視化技術の開発

### 2.1 光源の選定

拡散層内の液水分布をリアルタイムかつ定量的に観察するためには、高輝度かつ特定の高いエネルギーを有する透過光線源、高分解能（5 μm 以下）な検出手法、多孔体構造と水の画像分離手法、液水多寡の定量化手法が必要となる。従来の実験室の X 線 CT 装置では、光強度が弱く、セルの液水をリアルタイムで観察することが困難であった（1 枚 / 15 分）<sup>(1)(2)</sup>。また中性子線源を用いた場合、金属を透過しての液水可視化が可能であるが、検知器の解像度が低く（10～150 μm 程度）<sup>(3)(4)</sup>、数 μm スケールの液水分布を理解するには不十分であった（表 1）。

表 1 可視化技術比較

	X 線 CT	中性子線ラジオグラフィ	放射光 X 線
空間分解能	10 μm	10～150 μm	1 μm
液水可視化	流路スケール 厚み 200～400 μm	○	○
	基材スケール 厚み 100～200 μm	○	△
	MPL スケール 厚み 50～100 μm	×	×
時間分解能	15 分	5 分	1 秒 (リアルタイム)
特徴	3D	金属透過性	単色光 (液水定量化)

本研究ではリアルタイム、高解像度かつ高い定量的で水輸送現象を捉えるため、高輝度かつ高平行度を特徴とする SPring-8（兵庫県佐用町）の豊田ビームライン：BL33XU（豊田中研が設置した専用ビームライン）の放射光を用いた<sup>(5)</sup>。高エネルギー X 線を用いると Pt などの金属も透過して観察できるが、液水による X 線の吸収率が低下するため液水の認識が困難となる。入射 X 線はある程度セルを透過し、液水の認識が可能である 11.4keV の単色 X 線を用いた。11.4keV の X 線透過像を撮影し、液水の二次元分布を画像処理で定量化した。

### 2.2 可視化セルの開発

セルの断面方向の液水分布を観察するため図 6 に示すセルを製作した。X 線の透過距離が短いほど、ノイズの少ない液水定量化が可能であるため、セル内の発電現象を再現できる最少サイズ（流路 2 本リ

ブ 1 本、流れ方向 6 mm）とした。また実燃料電池条件と合わせるために、セルに荷重と温度を付与できる工夫を施し、さらにセル面内の湿度環境を模擬するために、バブラーによる加湿を行った。

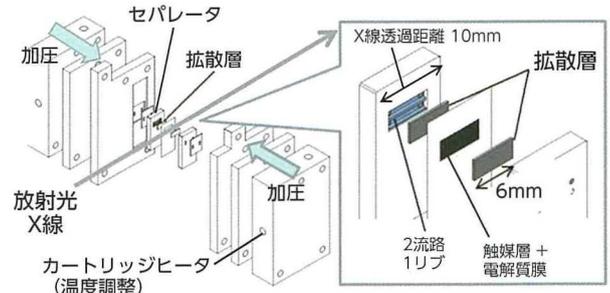


図 6 可視化セルの概略図

### 2.3 画像処理方法の構築

液水の定量化に際しては、発電中（液水有）の画像と非発電（液水無）の画像の差分と、式（1）に基づく 11.4keV の X 線強度の減衰量から X 線透過方向の液水量を算出した。しかし燃料電池の電解質膜は吸水により最大で 2 倍程度膨潤するため画像にズレが生じる。そこで、電解質膜は十分に膨潤しているが系内に液水が存在しないセル条件を見極め、非発電画像とし、さらに 2 枚の画像のズレを基材の像を基準に位置補正することで、ノイズの少ない鮮明な画像の取得に成功した（図 7）。

$$\Delta t = \frac{1}{0.344} \log \left( \frac{I_{Wer}}{I_{Dry}} \right) \quad (\text{mm}) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $t$  = 液水厚み  $I$  = X 線強度を表す。

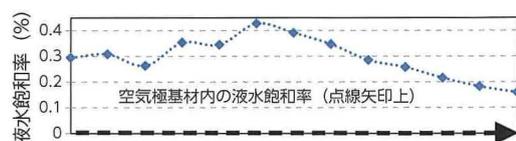
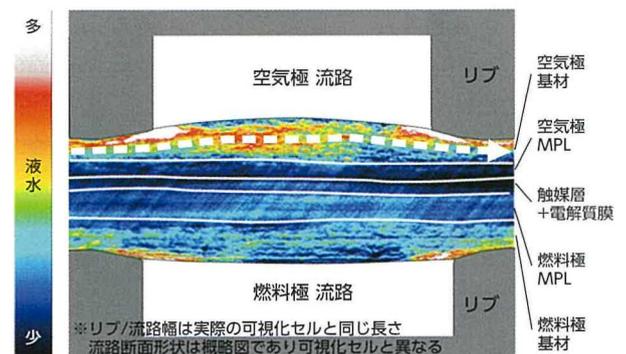


図 7 拡散層内の液水分布

### 3 数値シミュレーション

複雑に連成する液水と発電の関係を理解するためには、燃料電池内の液水を含んだ物質輸送現象と電気化学反応を再現可能なシミュレーション技術が必要となる。そこで、連続の式、ナビエ・ストークス方程式、エネルギー方程式に加えて、電位の式と各化学種の輸送方程式を支配方程式とし、電気化学反応等を該当する方程式のソース項として汎用数値流体ソフト FLUENT の外部関数上でモデリングした。特に本研究で着目する拡散層中の液水については、多孔質体中の気液 2 相流を効率よく解くことが可能な Multiphase Mixture (M2) モデル<sup>(6)(7)</sup>を用いた。また、各部材のパラメータについては部材の単体測定結果<sup>(8)</sup>、もしくは発電実験より同定した値を用いた。

### 4 メカニズム説明

#### 4.1 メカニズム説明の流れ

本研究の解析の流れを図 8 に示す。4.2 節では IV 評価試験より発電性能を、液水可視化実験より液水分布を把握し、数値シミュレーションを用いて発電性能⇔液水分布の関係を解明する。続いて 4.3 節では数値シミュレーションと実験計画法を組み合わせ液水分布に寄与する拡散層物性を算出し、液水可視化実験、物性測定結果を用いて計算結果の妥当性を確認する。一連の解析により発電性能⇔液水分布⇔拡散層物性の関係を明らかにする。

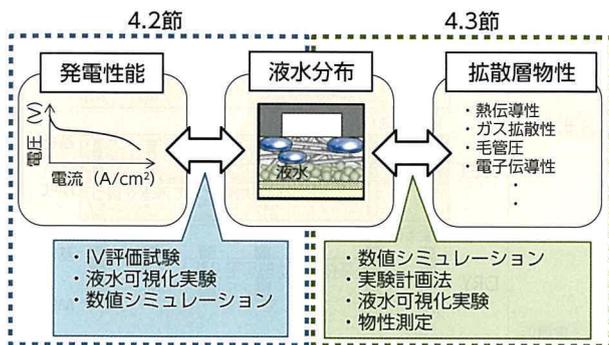


図 8 メカニズム説明の流れ

#### 4.2 発電性能⇔液水分布の関係解析

本節では、発電性能と液水分布の関係を明らかにする。液水分布の発電性能への影響を定量化するため、通常は数値シミュレーション中で連成計算される液水分布と含水時拡散係数の取り扱いを修正し、

可視化から得られた液水分布とその分布に伴う含水時 (WET) 拡散係数を直接モデルに入力することで、液水存在時の発電性能を計算した (図 9)。液水による性能低下率を計算と実機で比較するため、液水存在時 (WET) の性能を非存在時 (DRY) の性能で無次元化した WET/DRY 性能比を指標として用いた (図 10)。実機では液水が存在することで非存在時の約 43% の性能となるが、シミュレーションでは約 61% の性能となることが分かり、液水による性能低下を 70% 表現できており、本手法で性能低下の大半を説明できることが分かる。

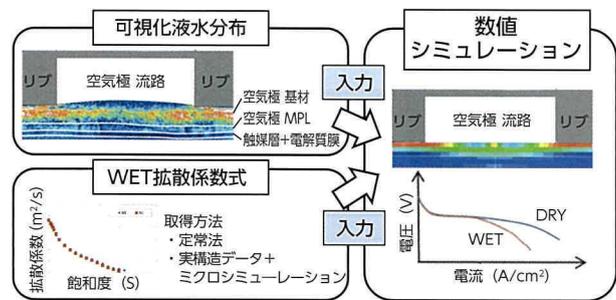


図 9 液水存在時の性能予測

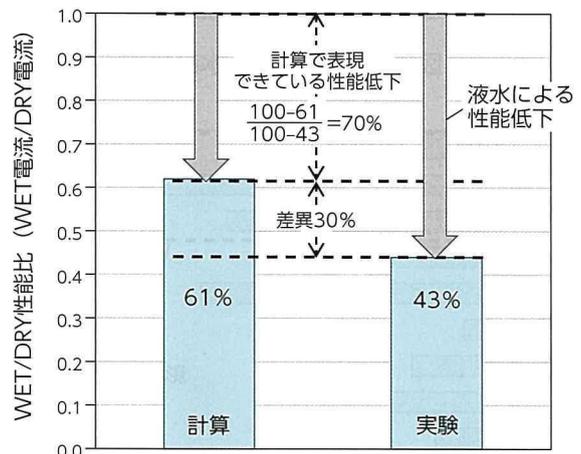
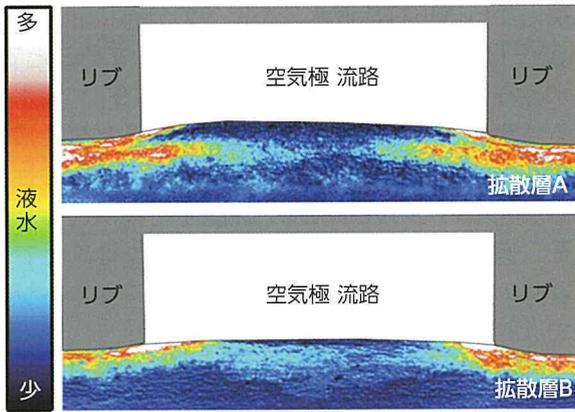


図 10 WET/DRY 性能比

この手法を用いて、発電性能に差がある 2 種類の拡散層 A/B の液水分布を比較し (図 11)、性能差が生じる要因を解析した。図 12 で示すように拡散層内の空間を 12 等分し、各空間中の液水量差を因子、電流密度を目的変数とした寄与度をシミュレーションより算出した (図 13)。この結果から、拡散層基材の流路下液水分布 (区分 1, 2, 3) が発電性能差に大きな影響を及ぼしており、この部分の液水分布を低減することが出力密度向上に重要であることが分かる。



※リブ/流路幅は実際の可視化セルと同じ長さ  
流路断面形状は概略図であり可視化セルと異なる

図 11 拡散層内液水分布 (拡散層 A/B)

リブ	流路	リブ
	1	7
基材	2	8
	3	9
	4	10
MPL	5	11
	6	12

図 12 拡散層内液水区分

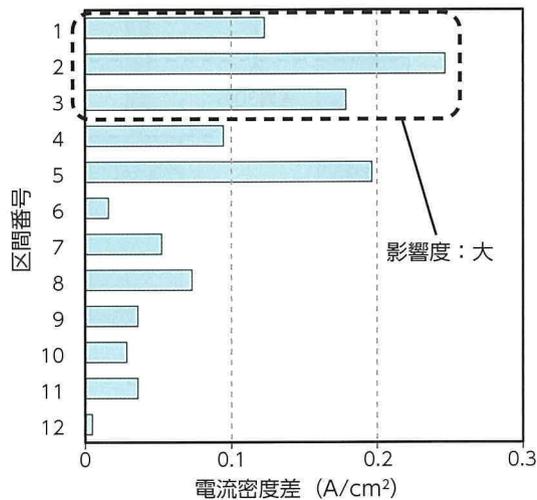


図 13 性能差に影響のある液水区分

計算と実験の差異 30% (図 10) の要因については図 14 に示すように、今回の可視化実験、モデルでは捉えきれない液水 / 現象が考えられる。例として図 14 ①について説明する (図 15)。可視化実験ではラジオグラフィーのため奥行方向の液水分

布が積層されたものとして処理され、今回の数値シミュレーションでは 3 次元的に計算しているものの計算メッシュ内の空間平均量として液水を表現している。一方、実現象では液水は基材内で数百  $\mu\text{m}$  の液滴として存在すると考えられ、その液滴によって基材内の酸素輸送パスが局所的に不均一になり、MPL 内ではその不均一さで生じる濃度差で面内に酸素輸送が生じる。それに対して、シミュレーションでは基材から比較的均一に酸素が輸送され、MPL 面内方向に濃度差が生じにくい。上記理由から MPL の面内拡散係数の変化に伴う性能差がモデル内で考慮できていないため差異が生じる。

このように、現状の可視化実験やモデルでは捉えきれないミクロ的な液水 / 現象が存在し、差異が生じていると考えられる。引き続き図 14 ①～③に対する解析手法の開発を進め、解析精度を向上していく。

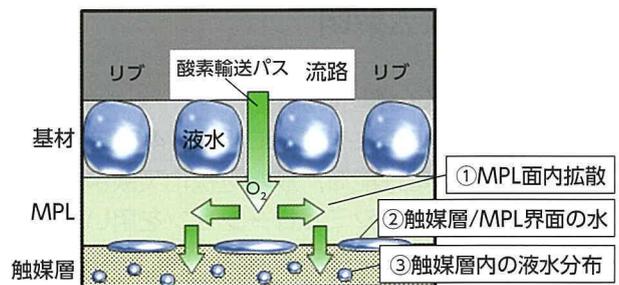


図 14 可視化実験 / モデル内で未考慮の現象

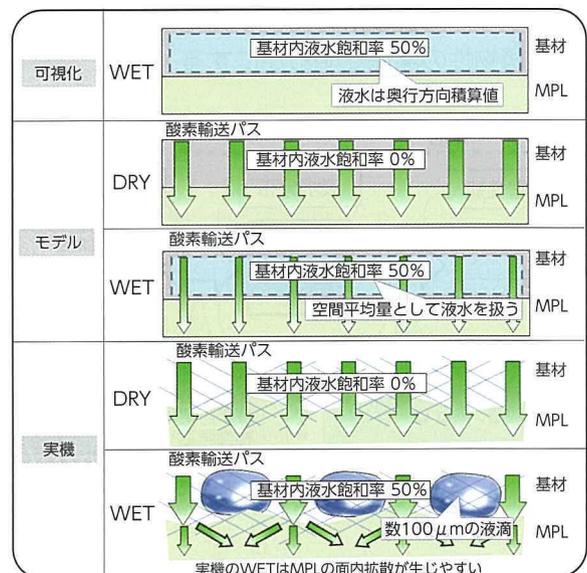


図 15 実機とモデルの酸素輸送経路の違い

### 4.3 水分布⇔拡散層物性の関係解析

本節では液水分布と拡散層物性の関係を明らかにする。液水分布と拡散層物性との関係を定量化するため、前節で修正した数値シミュレーションを液水分布と連成するように再修正し、実験計画法と組み合わせ解析を実施した。可視化動画の観察により毛管圧、熱伝導率（基材リブ下 / 基材流路下 / MPL リブ下 / MPL 流路下）、ガスの拡散係数（MPL 面内 / 面直）を液水 / 水蒸気の駆動力の主要因子と選定し、7 因子 3 水準の D 最適化計画による実験計画表を元に計算を実施、水分布に対する拡散層物性の感度解析を行った。4.2 節で性能に対して影響度の大きかった空気極基材の流路下水分布に対する感度解析結果を図 16 に示す。液水分布に対して空気極基材と空気極 MPL の熱伝導率の寄与率が大きく、空気極基材は小さい方が、空気極 MPL は大きい方が空気極基材中の液水が少なくなる。これは図 17 に示すように (I) 空気極基材の熱伝導率を小さくすることで、基材の温度が上昇し、凝縮する液水が減少、(II) 空気極 MPL の熱伝導率を大きくすることで、空気極側への熱流束が大きくなり、空気極基材の温度が上昇し、凝縮する液水が減少するためである。また膜の温度が低下することで膜水移動が促進され空気極→燃料極の水移動量が増えることで、空気極基材中の液水はさらに減少する。

計算結果の妥当性を確認するため、発電性能に差がある 2 種類の拡散層 A/B (図 11) の熱伝導率を測定した (図 18)。液水量が少ない拡散層 B では A に比べ基材の熱伝導率が低く、MPL の熱伝導率が高くなっている。計算結果と同様の相関が得られており、感度計算が妥当と考えられる。

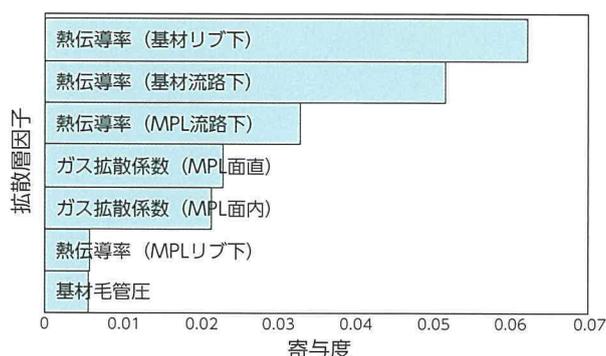


図 16 液水分布に対する感度解析結果

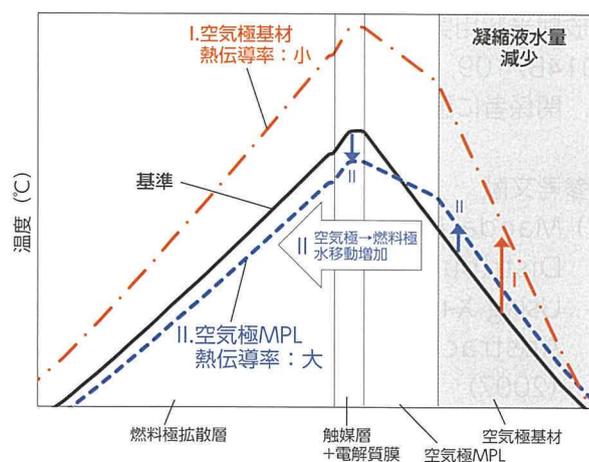


図 17 拡散層内温度分布

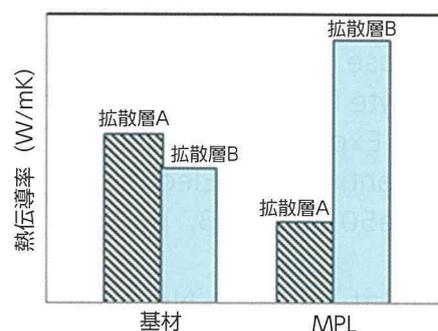


図 18 拡散層熱伝導率

## 5 おわりに

以上、拡散層の排水メカニズム解明を狙い発電性能⇔液水分布⇔拡散層物性の関係を解析する手法を確立した。

今回検討した拡散層種、条件においては以下のことが分かった。

- 空気極流路下の液水が最も発電性能に影響を及ぼす。
- 空気極流路下の液水分布へは拡散層基材 / MPL の熱伝導率が及ぼす影響が大きい。
- 空気極基材の熱伝導率が低く、空気極 MPL の熱伝導率が高いと空気極基材内の液水量が減少する。

本研究では X 線による液水可視化をシミュレーションと組み合わせることで、拡散層の熱設計が燃料電池の液水設計に重要となることの一例を示した。今後は本研究で開発した手法をさらに発展させ、固体高分子形燃料電池での液水に起因する諸問題を解決し、より低コストで信頼性の高い FCV を開発していく。

放射光利用実験は SPring-8 において、課題番号 2014B7109, 2015A7109, 2015B7109 で行った。関係者に謹んで感謝する。

■参考文献

- (1) Maeda M, et al. : Analysis of Water Distribution in a Gas Diffusion Layer Using X-ray Computed Tomography. ECS Abstract. 212nd ECS meeting, #404 (2007)
- (2) 濱田成孝, 後藤, 佐野, 塩澤, 近藤 : 多孔体流路を用いた燃料電池セルの高出力化. 自動車技術会論文集. Vol. 43, No.3, pp.703 - 708 (2012)
- (3) D. Kramer, et al : In situ diagnostic of two-phase flow phenomena in polymer electrolyte fuel cells by neutron imaging : Part A. Experimental, data treatment, and quantification. Electrochimica Acta. Volume50, Issue13, pp.2603 - 2614 (2005)
- (4) P. Boillat, et al. : Neutron Imaging Resolution Improvements Optimized for Fuel Cell Applications. Electrochemical and Solid St, Vol. 13, Issue13, pp.B25 - B27 (2010)
- (5) Hatanaka T, et al. : Analysis of Pt Oxide Formation on Working Cathode of PEFC by Operando-XAFS. ECS Abstract. Honolulu PRiME 2012, #1525 (2012)
- (6) C. Y. Wang : Fundamental Models for Fuel Cell Engineering. Chemical Reviews. Vol.104, pp.4727 - 4766 (2004)
- (7) L. Hao, et al. : Three Dimensional Computations and Experimental Comparisons for a Large-Scale Proton Exchange Membrane Fuel Cell. Journal of the Electrochemical Society. Vol. 163, 7 (2016)
- (8) Ohira H, et al. : Measurement Technique of Oxygen Diffusion Resistance through Gas Diffusion Layer. ECS Trans. Vol. 58, No.1, pp.889 - 895 (2013)

■著者



林 大甫



井田 敦巳



真籠 祥太



鈴木 孝尚



山口 聡



堀 良輔

# 新技術開発財団 第 48 回市村産業賞 本賞 トヨタフューエルセルシステム (TFCS) 開発

Development of the Toyota Fuel Cell System (TFCS)

能登 博則\*<sup>1</sup>  
Hironori Noto

高山 干城\*<sup>1</sup>  
Tateki Takayama

近藤 政彰\*<sup>1</sup>  
Masaaki Kondo

## 1 まえがき

環境問題やエネルギー問題への対応として水素を燃料とする燃料電池車 (FCV) を低炭素でサステイナブルな社会に向けた究極のエコカーと位置付け、1992 年から開発をスタートした。2002 年 12 月には世界に先駆けて限定リースを開始、以降改良を重ね、2008 年には主要技術課題 (航続距離、氷点下始動性) の目途付けを完了した。

しかし、燃料電池 (FC) システムのコストが高く、一般市販化できていなかった。

## 2 高コスト要因とアプローチ

FC システムの高コスト要因と その対応を表 1 に示す。

表 1 FC システムコスト解析

要因	対応
1. 量産効果小	量産部品 (含む一部) 流用 量産ライン流用 自動車メーカー間仕様統一による量産
2. 複雑な FCV 専用システム	部品の統廃合 部品要求仕様適正化 (市場実績 F/B・法規…等) 部品構成見直し
3. 高価な FC 固有材料	使用量低減 代替材料の使用・開発

トヨタフューエルセルシステム (TFCS) 開発では、量産車に必要な耐久・信頼性を確保しつつ、以下に示す 3 つのアプローチでシステムを低コスト化した。

### 2.1 少量生産対応

FCV 導入初期は水素ステーションも FCV 普及と同期して徐々に進展してゆくと予想され、ガソリン車のような大量普及による量産効果でのコスト低減は難しい。

そこで、TFCS では FC 昇圧コンバーターを新たに開発することで FC 電圧 (~220V) をハイブリッド車 (HV) のモーター・インバーター電圧 (650V) まで昇圧することで、量産 HV 部品の流用と FC スタックのセル数最適化を実現した (図 1)。更に、量産部品の一部流用や量産ラインの共用などにより、少量生産での低コスト化を実現した。

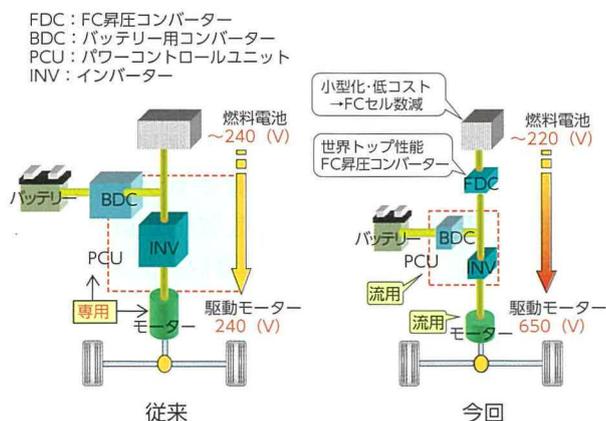


図 1 高電圧システム

### 2.2 FC システムの簡素化

TFCS では様々な部品の廃止や統合による低コスト化を実施しているが、その中でも世界で初めて外部加湿器を廃止、システムを簡素化することで軽量・コンパクト・低コストなシステムとした。

自動車用 FC には、PEFC (Polymer Electrolyte Fuel Cell) を採用しているが、この PEFC に使用している電解質 (電解質膜や、触媒層に使用) は適

\*<sup>1</sup> 先進技術開発カンパニー FC 技術・開発部

度な水分を含むことによって高いプロトン伝導性を持ち、高効率な発電ができる。このため、空気入口部の乾燥を防止するために外部加湿器による加湿が必要不可欠だった（図2）。

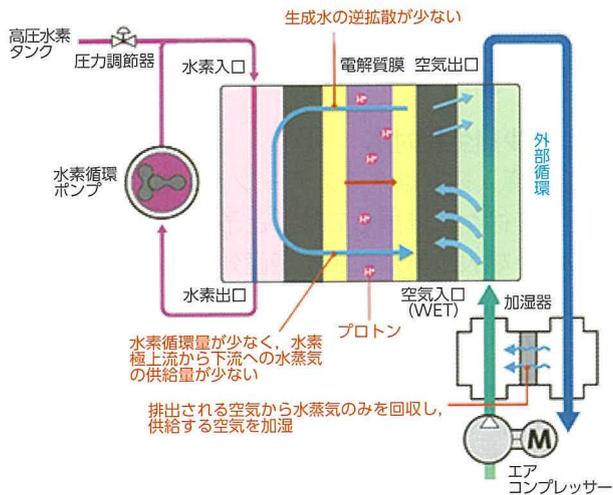


図2 外部加湿システム

TFCSでは図3に示すように、FCスタックの空気の流れと水素の流れを対向させ、電解質膜を薄膜化することで、空気下流の生成水（逆拡散水）を用いて水素を加湿、水素をキャリアとして生成水を空気入口部まで運ぶ構造に加え、水素循環ポンプを制御することで生成水を内部循環するシステムとした。また、空気入口部の冷却を強化することでも乾燥を抑制し、世界初の外部加湿レスシステムを実現した。

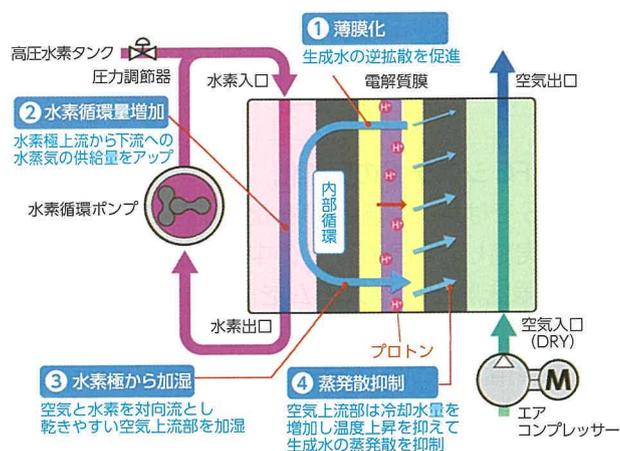


図3 外部加湿レスシステム

### 2.3 高価材料の使用量低減

世界初の3Dファインメッシュ流路によるセル流路構造の革新（図4）や、電極の革新による高

性能化（電流密度2.4倍）、FCスタック締結構造簡素化による小型・軽量化（体積42%低減、質量48%低減）により、世界トップレベルの出力密度3.1kW/Lを実現（図5）、電解質膜や触媒など高価なFC特有材料の使用量を低減し、低コスト化を図った。

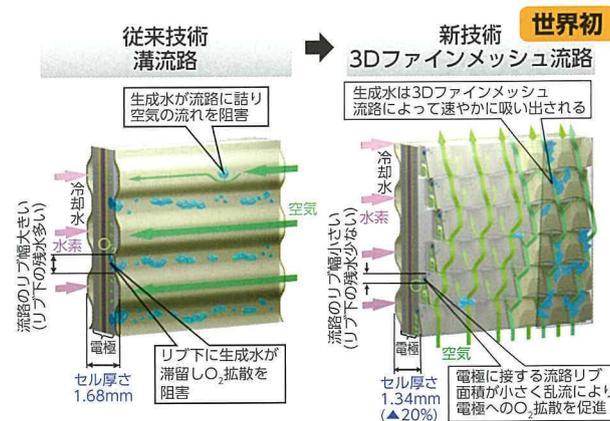


図4 セル流路構造の革新

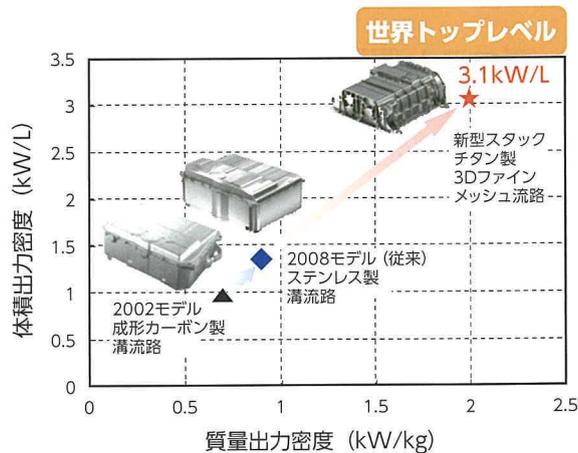


図5 スタック小型化

高圧水素タンクのCFRP層は図6に示すように3種類の巻き方を組み合わせて構成している。

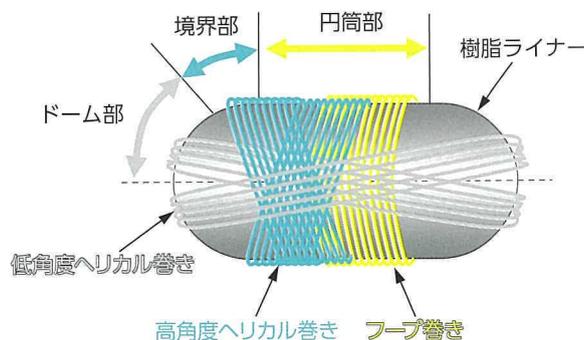


図6 高圧水素タンクのCFRP積層構成

この中で高角度ヘリカル巻きは、軸に対して約70°の角度で巻かれるため、胴体部では有効ではなく、利用効率が低いことに着目した。

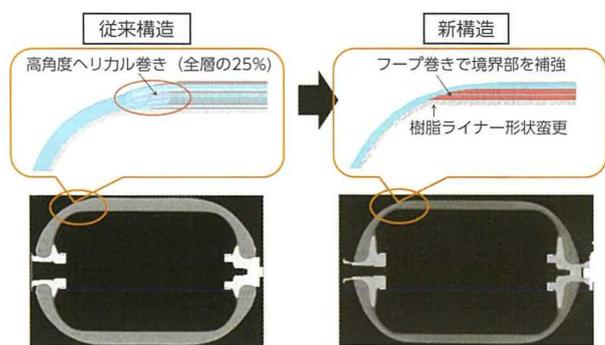


図7 フィラメントワインディングの革新

図7に示すように樹脂ライナー形状を変更することで、高角度ヘリカル巻きを廃止、口金の工夫なども含め、CFRP量を約40%削減し、低コスト化と世界トップレベルの水素貯蔵性能5.7wt%を達成した(図8)。



図8 高圧水素タンク小型化

### 3 むすび

TFCSでは本稿記載技術に加え、様々な技術開発により、システムコストと体格を飛躍的に低減し、セダン型乗用車MIRAIに搭載。走りの楽しさや外部給電などの商品性も向上させ、世界に先駆けて一般市販化した。MIRAIの一般市販化が、水素ステーションの整備など、低炭素で持続可能な社会に向けた動きの加速に繋がることが期待すると同時に、我々も更なる量産化に向けた技術開発を進めていきたい。

市村産業賞以外の受賞名、論文タイトル、執筆者は下記の通りである。

- ◆自動車技術会 技術開発賞  
世界で初めて燃料電池車の一般販売を可能とした燃料電池システムの開発  
木崎幹士, 浅井尚雄, 窪英樹, 大神敦幸, 水谷宣明
- ◆SAE Environmental Excellence in Transportation Award  
Toyota Fuel Cell System  
浜田成孝
- ◆日本機械学会 2015年度 日本機械学会賞 (技術) 量産車用燃料電池システムの開発  
近藤政彰, 木崎幹士, 水野誠司, 野々部康宏, 鈴木稔幸
- ◆機械振興協会 経済産業大臣賞  
FC (燃料電池) 駆動システム  
木崎幹士, 水野誠司, 近藤政彰, 野々部康宏, 鈴木稔幸
- ◆新エネ大賞 経済産業大臣賞  
燃料電池自動車「MIRAI」の新トヨタフューエルセルシステム (TFCS)  
水野誠司
- ◆R&D Magazine R&D 100 Awards  
Toyota Fuel Cell System  
木崎幹士, 浅井尚雄, 水野誠司, 鈴木稔幸, 滝正佳, 川原竜也 他

# 自動車技術会 技術開発賞 直列4気筒 1.2L 直噴過給ガソリンエンジン

New Inline 4-Cylinder 1.2-Liter Turbocharged Direct Injection Gasoline Engine

工藤 雅仁 \*1  
Masahito Kudo

品川 知広 \*2  
Tomohiro Shinagawa

池田 晃浩 \*3  
Akihiro Ikeda

大脇 一之 \*3  
Kazuyuki Owaki

## 1 前書き

直噴過給ダウンサイズ直列4気筒エンジンとして、1.2Lエンジン(8NR-FTS)を開発した。本エンジンは従来の1.6L~1.8Lクラス自然吸気(NA)エンジンの置き換えに相応するものである。

本エンジンは、長年ハイブリッド用エンジンにおいて培った高熱効率化技術を、コンベンショナルなエンジンにも適用するため、高速燃焼、燃焼室内掃気、燃焼室温度コントロールといった技術を磨き上げ、ポンピングロス、排気損失、冷却損失、摩擦損失を全方位で更に低減させた高熱効率・低燃費エンジン群のひとつである。

## 2 エンジン仕様と燃焼コンセプト

エンジン基本諸元を表1に示す。本エンジンは強い筒内乱れによる高速燃焼を基本コンセプトとし、強い筒内乱れを発生させ、筒内噴霧燃料を空気と積極的に混合させるため、吸気ポート形状自由度の高いポート噴射を持たない直噴エンジンを選択した。

表1 エンジン仕様

排気量 (cc)	1,196
ボア × ストローク (mm)	φ71.5 x 74.5
圧縮比	10.0
燃料噴射方式	DI
最高出力 (kW/rpm)	85/5,200-5,600
最大トルク (Nm/rpm)	185/1,500-4,000
排気規制	Euro6, J-SULEV
ターボチャージャー	シングルスクロール
トランスミッション	6speed MT, CVT

\*1 Toyota Motor Europe NV/SA

\*2 パワートレーンカンパニー パワートレーン先行統括室

\*3 パワートレーンカンパニー パワートレーン製品企画部

## 3 全負荷性能

本エンジンはシングルエンターターボを採用、また、排気カムの作用角を小さくすることで、オーバーラップ期間と脈動波のタイミングをずらし、排気干渉の影響を最小化、エンジン低回転時の吸入空気量を増加させ、低速トルクの向上を図った。

この結果、全負荷性能は、1,500rpmから4,000rpmまでの広い範囲で最大トルク185Nmを実現し、最高出力85kWを達成した。

## 4 燃費

強い筒内乱れと燃料噴射の最適化で、全域にわたる高速燃焼を実現した結果、正味熱効率率は最大36.2%、ストイキ( $\lambda=1$ )運転領域はエキゾーストマニフォールド一体型シリンダヘッドの効果もあり、最高車速の97%まで拡大でき、ほぼ全域でのストイキ燃焼が実現可能となった。

## 5 車両動力性能

本エンジンはトヨタ初のCVT(Continuously Variable Transmission)との組み合わせも特徴のひとつに挙げられる。エンジン回転の増加を抑制する変速制御により、変速ロスを最小限に抑え、加速のつながりをリニアにし、いわゆる「ラバーバンド感」を排除、マニュアルトランスミッションに匹敵するダイレクト感を実現するとともに、ドライバーの意図に合わせた加速フィーリングを実現した。

## 6 まとめ

徹底した吸気流動、筒内乱れの強化、および燃料噴射の最適化により高速過給燃焼を実現させた。またCVTの最適変速制御との組み合わせで、スポーティな走りや燃費の両立、トヨタが追求するFun to Driveを実現した。

# 重畳表示像が前方対象物の変化感受性に及ぼす影響調査

Change in Driver Sensitivity to Moving Objects in Forward Direction Caused by Head-Up-Display Images

木村 賢治 \*1  
Kenji Kimura

森田 和元 \*2  
Kazumoto Morita

関根 道昭 \*2  
Michiaki Sekine

榎本 恵 \*2  
Megumi Enomoto

## 1 まえがき

近年、自動運転技術の進展とともに、人と車のコミュニケーションの手段としてヘッドアップディスプレイ (HUD) の重要性が増している。HUDにより視線近くの情報を脇見することなく視認できるが、風景に重なる為、運転の妨げにならないよう適切な配慮が必要となる (俯角、表示量など)。

## 2 研究の内容

HUD 像がドライバの前方注意に及ぼす影響を明らかにする為、HUD 視認中に視対象物 (先行車等) 接近を発見する時間を反応時間として台上で計測する実験スキームを設定した (図 1、視対象物の接近状況を前方の赤円の視角幅拡大にて模擬)。実験結果は図 2 に示すように俯角 1.5 - 5.5° 間で反応時間は変わらないが、表示量が増えると反応時間が遅れることがわかった。前者については、HUD を注視しているときの注意の広がり (有効視野: 上 8°

下 12°) で前方の赤円が発見できること、後者については表示量による探索負荷増加により有効視野が狭くなることで検証された (図 3)。

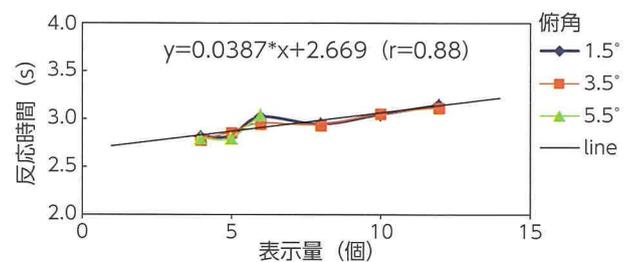


図 2 実験結果

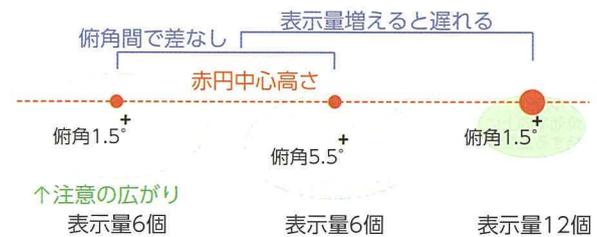


図 3 HUD 視認中の注意の広がり

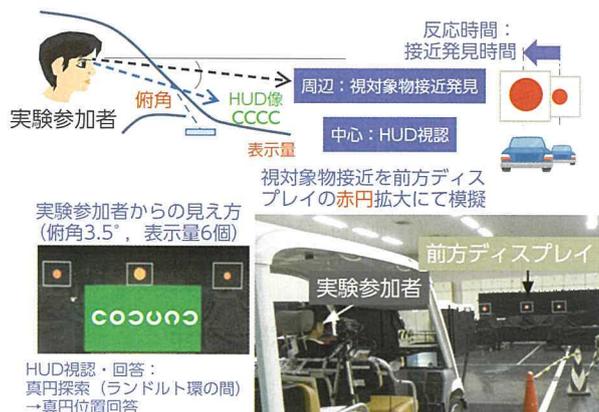


図 1 実験スキーム

## 3 むすび

HUD 視認中の視対象物の発見し易さについて、接近対象物の接近状況を視角幅拡大にて模擬した精緻な台上実験を行い、定量的データを取得し、表示量と俯角の影響に関する要因解析に初めて成功した。その解析結果の妥当性を視野特性や探索特性から検証し、適切な表示量や俯角のあり方を明らかにした。これらの評価法や知見は自動運転の表示器として安全かつ有効な HUD の普及・発展 (標準化含む) に大きく寄与できる。

\*1 先進技術開発カンパニー 車両技術開発部  
\*2 (独) 自動車技術総合機構 交通安全環境研究所

# 非定常 Adjoint 法による CFD 逆解析技術の開発とエンジン筒内流れへの適用

Development of CFD Inverse Analysis Technology Using the Transient Adjoint Method and Its Application to Engine In-Cylinder Flow

久保田 正人 <sup>\*1</sup>  
Masato Kubota

## 1 はじめに

CFD（コンピュータによる流れ解析）は様々な部品の設計に有効な技術であるが、エンジンのシリンダ内の流れ（図 1）に代表される 3次元非定常流において狙った時期の流体性能を向上させるための形状情報を効率的に得ることは不可能とされていた。本研究ではこれを可能にすることを考えた。

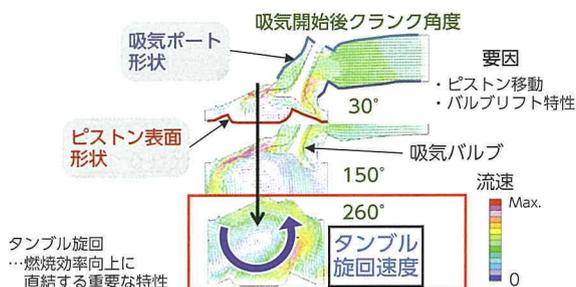


図 1 エンジン筒内流れと時期流体性能の例

## 2 開発技術の概要

ラグランジェ未定乗数法を基本原理とする数学的理論を非定常流れの離散化方程式に適用し、様々な手法開発を行うことにより、市販 CFD ソフトの結果を利用して任意の時期の任意の流体性能値を最大化するための流路表面形状変更感度の詳細分布を一回の計算で算出でき、エンジン筒内流にまで適用できる実用的な解析技術を開発した（図 2）。

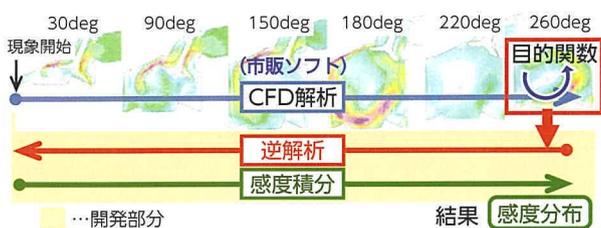


図 2 解析の全体プロセス

## 3 実機エンジン筒内流れへの適用

量産エンジンを対象に、吸気中の圧力損失の最小化、および、圧縮行程初期での筒内タンブル旋回の最大化をそれぞれ目的関数として計算を行った（図 3）。算出された感度分布（図 4）の各特徴に基づいて吸気ポート形状やピストン表面形状を小規模変更した結果、狙い通りの時期性能値の向上が確認できたことから、開発技術が実際にエンジンの設計変更に対して有効であることが実証できた。

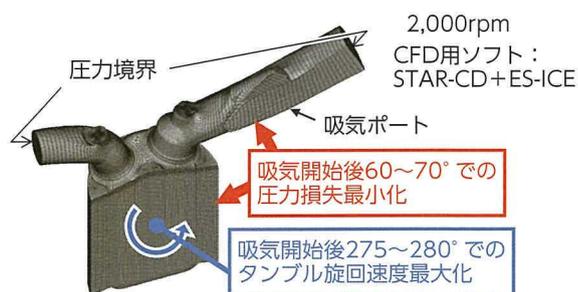


図 3 計算用メッシュと各目的関数

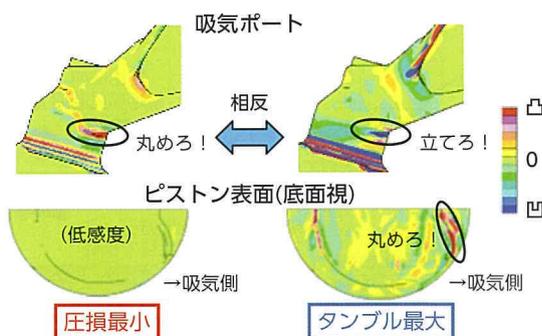


図 4 表面形状感度分布

## 4 おわりに

開発技術は車体過渡空力特性などを含む様々な過渡流動に対して有効であるだけでなく、離散化方程式を拡張することにより、熱流れや濃度問題、さらに乱れ目的などへ解析対象物理領域を拡大できる汎用性があるため、引き続き開発中である。

\*1 未来創生センター 未来研究部



# 自動車技術会 2015 年秋季大会学術講演会 優秀講演発表賞 インホイールモータによる前後振動低減

Reduction of Longitudinal Vibration Using In-Wheel Motors

福留 秀樹 \*1

Hideki Fukudome

## 1 まえがき

インホイールモータ（以下 IWM）はモータから出力軸までの高剛性化が容易であり，従来課題であったドライブシャフトの低剛性による駆動時の共振問題も存在しない．よって，従来のアクチュエータ配置では制御が困難であった高い周波数領域へも対応可能である．この特性を利用し，本研究では路面外乱に対する前後振動について IWM を用いて制振を試みた．図 1 に開発した IWM ユニットの構造を示す．

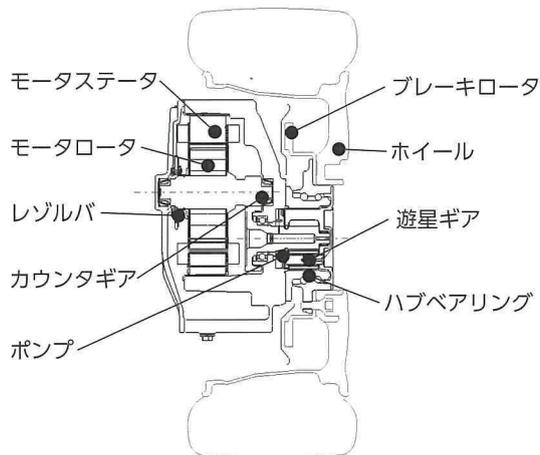


図 1 IWM ユニット

## 2 技術内容

車両の前後振動による乗り心地は，8～16Hz のばね下共振周波数帯におけるばね下振動が大きな要因であり，既存技術としてサスペンション配置による振動低減が図られ，効果が確認されている．ばね下への起振力は，図 2 に示す①タイヤに作用する力，②弾性要素による反力，③減衰要素による反力の 3

つの要素に起因すると考えられる．本研究ではばね上とばね下の相対速度フィードバックによる制駆動力④を IWM により与え，ばね下振動の抑制を図った．図 3 の結果より，狙いの周波数帯に加え，4～8Hz の中周波数帯も改善した．

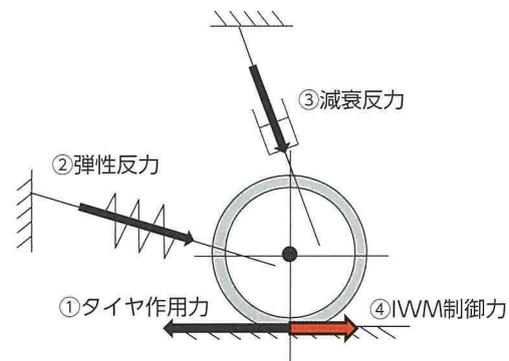


図 2 ばね下へ作用する力

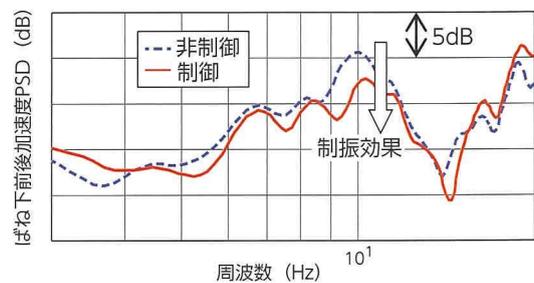


図 3 IWM による制御効果

## 3 むすび

ばね下前後振動の乗り心地への影響に着目し，IWM により制振を図った．速度フィードバックによる仮想減衰力を付与することで，ばね下共振周波数帯の前後振動を低減した．

\*1 先進技術開発カンパニー シャシー制御開発部

# 日本機械学会 2015年度 日本機械学会賞（技術） シリンダヘッド下面の小径フライスによる ターンミル加工技術

Development of New Milling Process for Bottom Surface of Cylinder Head on Rotating Table

野村 桂太郎\*1  
Keitaro Nomura

受賞技術概要

## 1 概要

シリンダヘッドの下面仕上げ加工工程において、投資削減を目的に、従来の大径フライスによるロングストローク加工に変えて、シリンダヘッド自体を回転させながら、小径フライスでのミーリングを行う“ターンミル加工”に取り組み、設備の小型化・低コスト化を図った。シリンダヘッドの回転数と送り速度を制御し、加工軌跡密度を平準化することで、高精度で均質な加工表面を得ることに成功した。

しまう。そこで、今回、ワークを回転させながら、ミーリング加工を行うことで、短ストローク・短時間でトロコイド加工と同様の効果を得る“ターンミル加工”の発想に至った。“ターンミル加工”の考え方を図1に示す。

## 2 技術の内容

シリンダヘッド下面は、ガスケットとの面圧を確保するため、面粗度・うねり、平面度に加えて、加工段差も許されず、厳しい精度が要求されている。このため、従来からヘッド短手方向よりも径の大きいフライスを、長手方向に移動させながら加工を行い、加工面に段差を発生させないよう配慮してきた。大径フライスで加工を行うためには、重量工具（30kg超）を設備側で把持せねばならず、高い工具締結剛性が必要で、同時切削刃数も多く切削負荷が高いため、主軸自体にも高剛性が要求される。また、長い加工ストロークが必要となる。このため、設備は非常に大型で高価なものとなっている。

これに対し、小型設備・小径フライスで広範囲を加工する方法として、従来からコンタリング加工が知られているが、加工軌跡の往きと帰りで切削負荷のバランスが異なるために、加工段差を生じてしまい、要求精度を満たすことが困難である。これを回避する方法として、トロコイド加工が知られているが、同一面を何回も加工するため、加工ストローク・時間が長大となり、設備台数の増加となって

ターンミル加工仕上面の加工軌跡

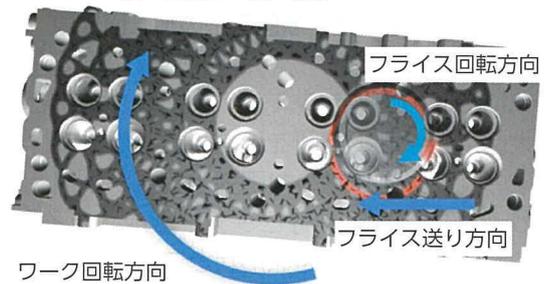


図1 ターンミル加工概要図

テーブル上で回転するシリンダヘッドに対し、その外周部から中心に向かって小径フライスによるミーリング加工を行うことで、シリンダヘッド半分のストロークで加工面全域をカバーする。また、フライス送りとテーブル回転速度を調整し、加工軌跡をラップさせることで、加工段差を無くしている。従来工法と今回工法の特徴の比較を図2に示す。

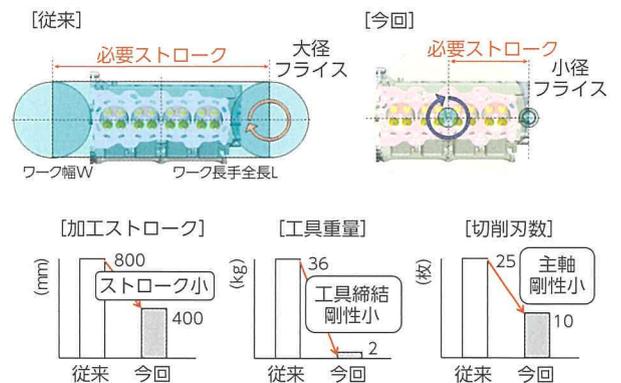


図2 従来工法と今回工法の特徴の比較

\*1 パワートレーンカンパニー エンジン生技部

ターンミル加工では、シリンダヘッドとフライスの相対運動による軌跡が何度も重なることで表面が形成されるため、きさげ加工のような一見特異な加工面となっている（図3）。特異な見た目から、表面精度が心配されるが、表面粗さを測定した結果、従来工法よりも良好であり、表面の凹凸が小さかった。この理由は以下のとおりである。

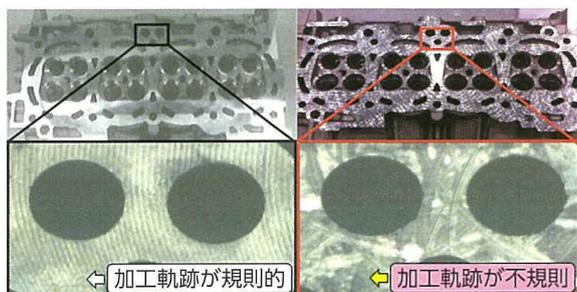


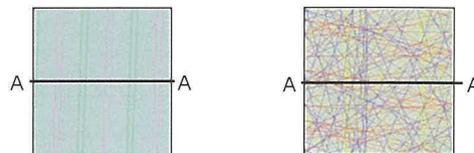
図3 従来工法と今回工法の加工面比較

図4に全ての刃先をシミュレートした結果と軌跡の拡大図及び断面模式図を示す。従来工法では、フライスの回転運動に沿った円弧上の軌跡がフライスの送り速度に合わせて等ピッチで形成されるため、表面の凹凸は、仕上の刃先形状とフライス送り速度に依存するのに対し、今回工法では、シリンダヘッド自体が回転することにより、複数枚ある刃先の軌跡どうしが重なり合い、同じところを何度も削り、削り残して凸となっていた部分を均していくため、表面粗さが良くなっており、表面粗さは、「刃先通過回数＝加工軌跡密度」に依存している。これを考慮し、ヘッド外周部から中心部にかけて、フライス送り速度を増速することで、表面粗さの差を解消し、表面粗さの平均化及び加工時間の短縮を両立する加工条件を確立した。

【軌跡シミュレーション】



【軌跡拡大図】



【軌跡断面模式図】

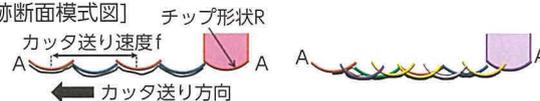


図4 表面粗さ形成のメカニズム

### 3 まとめ

今回は、工具側を回転させる“ミーリング”と、被加工物側を回転させる“旋盤”という2つの既存技術を組み合わせることで、設備のコンパクト化・低コスト化を行うことができた。今後は、この工法を応用し、エンジン加工ライン全体のシンプル・スリム化に貢献したい。

# 2015 年度優秀特許 内燃機関の可変バルブタイミング機構

特許番号 3211713 号

Variable Valve Timing Function for Internal Combustion Engine

飯田 達雄 \*1  
Tatsuo Ida

## 1 発明の背景

従来、エンジンの運転状態に応じて、吸気バルブや排気バルブのバルブタイミングを可変とする機構がある。この種の可変バルブタイミング機構として、クランクシャフトに対するカムシャフトの変位角度を変化させることにより、同カムシャフトの回転に伴って開閉されるバルブのバルブタイミングを変更するようにした機構が知られている。

しかし、吸気バルブや排気バルブの各バルブタイミングについては、いずれもエンジンを始動させるうえで好適なタイミングが存在しており、始動時における各バルブのバルブタイミングが好適なバルブタイミングと大きく異なった場合、始動性が損なわれてしまう。例えば、エンジン始動時に、吸気バルブのバルブタイミングを遅角側に変更しすぎた場合、燃焼室内の吸入混合気が吸気管内に戻り、実圧縮比が低下し、始動が困難になる。また、エンジン始動時に、吸気バルブのバルブタイミングを進角側に変更しすぎた場合、バルブオーバーラップ期間が長くなり、燃焼室の排気ガス循環量が増大するため、エンジン始動性の低下を招くことになる。

## 2 発明の概要

図1に示すエンジンは、被駆動軸としての吸気カムシャフト、排気カムシャフトと、駆動軸としてのクランクシャフトを備え、それらのシャフトはスプロケットを介してチェーンによって連結されており、クランクシャフトの回転力が吸気カムシャフト、排気カムシャフトに伝達される。

図2は、吸気カムシャフトのスプロケットを示したものであり、スプロケットは吸気カムシャフトに連結しているロータの外周に相対回動可能に支持されている。スプロケットには4つの凹部があり、この凹部がロータに形成された4つのベーンにより、

第1圧力室と第2圧力室とに区画され、各圧力室に印加される圧力により相対角度を変更することによりバルブタイミングを変更する。

エンジン始動時には、スプロケットに設けたピンが、ロータに設けた係合凹部に係合し、相対回動を規制し、エンジン始動時最適角度  $\alpha$  に保持する。

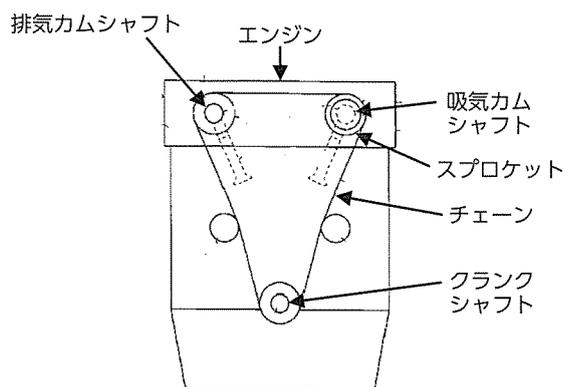


図1 エンジンの構造

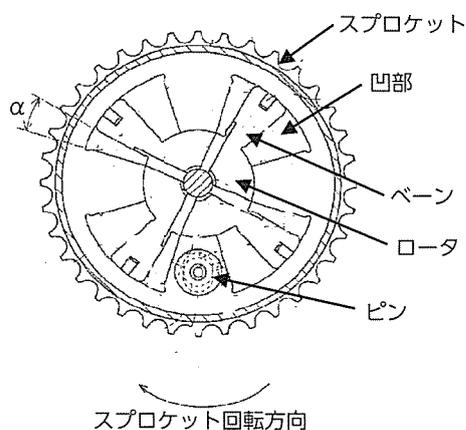


図2 スプロケットの構造

## 3 発明の効果

本発明では、エンジン始動時に、バルブタイミングが最適な角度に保持されることにより、内燃機関の好適な始動性を確保することができる。

\*1 パワートレーンカンパニー ユニット高機能部品開発室

# 2015 年度優秀特許 搬送装置

特許番号 5590515 号

Slat Conveyor

田坂 雅弘\*  
Masahiro Tasaka

## 1 発明の背景

従来、自動車の組立設備や物流設備において、一対のチェーンの間に複数枚のスラット（搬送板）を架け渡した、スラットコンベアを用いた搬送装置が知られている。搬送装置は、スラットを環状のチェーンに連結して、このチェーンを回転運動することによってスラットが移動するように構成されている。

このような搬送装置の上流側端部及び下流側端部でスラットを反転させる際に、図1に示すように、スラットの搬送方向幅よりも大きな径を有する駆動部が必要となるため、搬送装置の厚みが増大し構造が重厚となる。そのため搬送装置を敷設するためにフロアの掘削作業等が必要となり、搬送装置の施工コストが増加する原因となっていた。また、既に敷設した搬送装置については、フロアを再び掘削する必要が生じることから、容易にラインの拡幅や延長を行うことが困難であった。

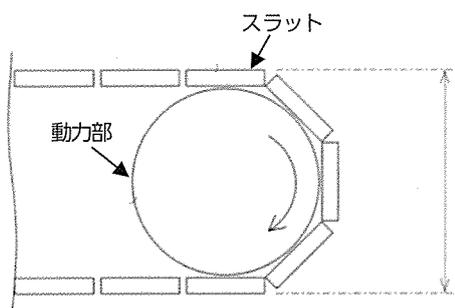


図1 従来の搬送装置

フレームの下面と床面との間は、スラットの厚さより少し大きな距離を離間して、スラットがフレームの下面と床面との間を通過できるように配置する。

このような構造をもつ搬送装置のスラットは、搬送方向前端部においては、図2に示すように、スラットはフレームの上面から外れて落下し、反転することなく、フレームの下面と床面との間を移動する。また、搬送方向後端部においては、図3に示すように、フレームの下面と床面を移動するスラットは、反転することなくフレームの上面に移動する。

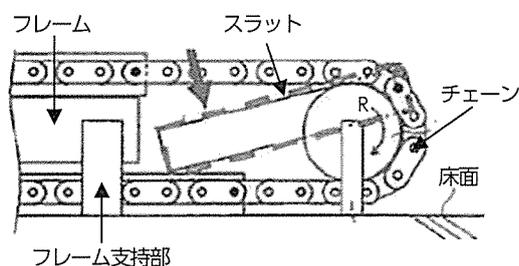


図2 搬送方向前端部

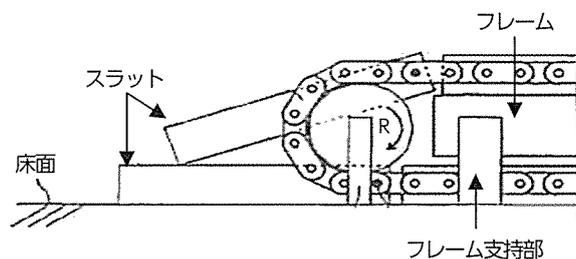


図3 搬送方向後端部

## 2 発明の概要

本発明は、搬送装置のスラットを、搬送方向側の端部である前端部のみをチェーンに連結させ板状のフレームの上面を移動させる搬送装置である。フレームは、フレーム支持部により床面に支持され、

## 3 発明の効果

本発明では、搬送装置のスラットを反転させない構造にしたので、搬送装置（駆動部）の厚みを小さくすることができる。そのため、搬送装置を敷設するための掘削作業が不要となるので施工コストを低減させることができる。また、掘削作業が不要なため、搬送装置を敷設した後でも、容易にラインの拡幅や延長を行うことができる。

\*1 Mid-Size Vehicle Company MS組立生技部

# 2015年度優秀特許 内燃機関

特許番号 5598510号

Internal Combustion Engine

小林 真一\*<sup>1</sup> 原田 高宏\*<sup>2</sup>  
Shinichi Kobayashi Takahiro Harada

## 1 発明の背景

従来、図1に示すようにシリンダヘッドの複数のオイル戻し通路が合流するオイル戻し空間が設けられたシリンダブロックを備える内燃機関が知られている。

内燃機関を高出力化する際には、高出力化に伴って、オイルの冷却性能を向上させる必要がある。そのためには、オイル戻し空間におけるオイルの流速を確保して、オイルとシリンダブロックのウォータージャケットとの熱交換を促進する必要がある。

しかしながら、シリンダヘッドから滴下するオイルがシリンダブロックのオイル戻し空間に複数合流する場合には、合流部でのオイルの流速が低下しオイルの冷却性能を確保できない恐れがある。

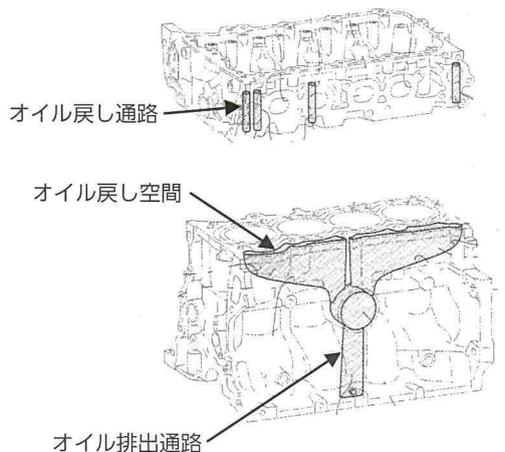


図1 シリンダヘッド、シリンダブロックの構造

## 2 発明の概要

本発明は、図2に示すように複数のシリンダボアの列方向に沿って複数のオイル戻し通路が設けられたシリンダヘッドの下方に配置されるオイル戻し空間の形状に関するものである。オイル戻し空間には、複数のオイル戻し通路からオイルが流れ込み合流する。オイル戻し空間の上流側では、オイル戻し空間の傾斜を下に凸の曲線形状（例えばサイクロイド曲線形状）とし、傾斜を平坦面形状にする場合と比べてオイルの流速を大きくするようにオイルを落下させる。オイル戻し空間の下流側では、複数のオイルが流れ込み合流するので、さらに下方へ傾斜する斜面形状とし、オイルの流速を低下させることなく、オイルの流れを整流しつつ、オイル排出通路へオイルを導く。

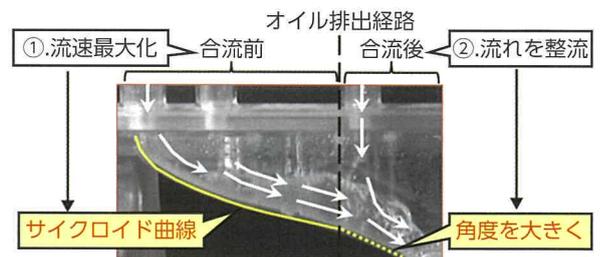


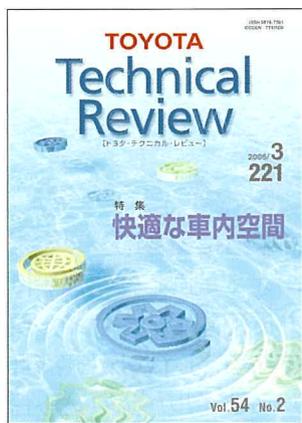
図2 オイル戻し空間

## 3 発明の効果

本発明による内燃機関では、オイル戻し空間のオイル合流部におけるオイルの流速を最大化することができ、オイルの冷却性能を向上させることができる。

\*1 パワートレーンカンパニー 生技開発部  
\*2 パワートレーンカンパニー パワートレーンユニット統括部

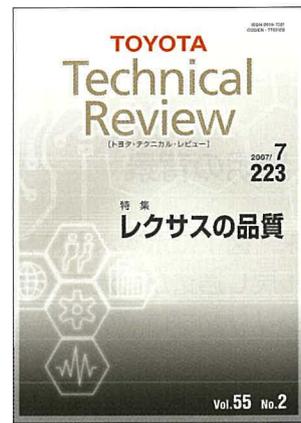
# Back Number Index



**Vol.54 No.2** (2006年)  
特集：快適な車内空間



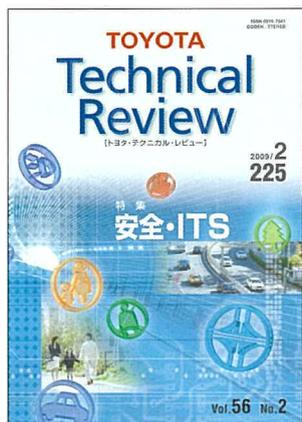
**Vol.55 No.1** (2006年)  
特集：感性に合う快適な走り



**Vol.55 No.2** (2007年)  
特集：レクサスの品質



**Vol.56 No.1** (2008年)  
特集：環境・エネルギー



**Vol.56 No.2** (2009年)  
特集：安全・ITS



**Vol.57 No.1** (2010年)  
特集：プリウス



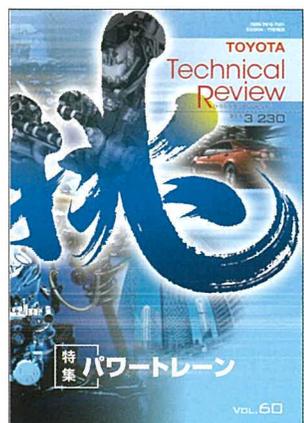
**Vol.57 No.2** (2011年)  
特集：次世代電池とその活用



**Vol.58 No.1** (2012年)  
特集：日本独創



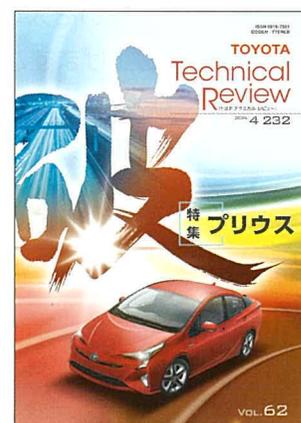
**Vol.59** (2013年)  
特集：生産技術



**Vol.60** (2014年)  
特集：パワートレイン



**Vol.61** (2015年)  
特集：MIRAI  
第2特集：ITS・高度運転支援



**Vol.62** (2016年)  
特集：プリウス

定価：1,944円 (本体：1,800円)

※ Vol.54 No.1「ハイブリッド」は販売終了となっております。

※ 英文版も販売しております。定価：3,024円 (本体：2,800円)

発売元：(株) オーム社 Tel: (03) 3233-0641

<http://www.ohmsha.co.jp/information/st/magazine/index.htm>

いつも TOYOTA Technical Review をご愛読いただき、誠にありがとうございます。  
TTR 第 63 巻 通算 233 号をお届けします。

今号のテーマは「挑戦・新技術開発」です。

最近の自動車産業を取り巻く環境は、めまぐるしく変化し、これまでに無い新たな技術が求められる時代となっています。今号では、新しい時代への挑戦をテーマに、トヨタで行われている様々な研究を紹介しています。挑戦するトヨタの姿を感じとっていただければ幸いです。発行に際し、多大なご協力をいただきました執筆者の方々には、厚くお礼申し上げます。

さて、本号より発行人となり、まず始めに、TTR の歴史について調べてみました。創刊は 1946 年、当時は、第二次世界大戦直後の大変混乱した時であり、物不足、世情不安の時代に関係者のご努力により「トヨタ技術」が発刊されました。以来、トヨタ自動車の発展を技術の面から支えてきた当社唯一の技術誌です。1991 年の 195 号より、海外も含め、より多くの自動車技術関係者に役立つ技術情報を提供したいと英語版を発行することとなり、国内外でも通用する名前として「TOYOTA Technical Review」に名称変更し、世界中の方々にご愛読いただいています。

先人たちの、新しい自動車技術を広く関係する方々に紹介し、自動車産業全体の発展に繋がりたい、との思いを大切に、紙面の充実に努めてまいります。今後ともご愛読いただきますようお願い申し上げます。

(発行人：川村)

## TOYOTA Technical Review Vol. 63

© 2017 TOYOTA MOTOR CORPORATION, Printed in Japan  
(禁無断転載)

発行所 トヨタ自動車株式会社  
技術管理部  
〒471-8572 愛知県豊田市トヨタ町1  
(0565) 28-2121 (代表)

発行人 川村 訓久  
編集 トヨタテクニカルディベロップメント株式会社  
IP サービス事業部 技術情報室 石原 広美

印刷所 笹徳印刷株式会社  
〒470-1196 愛知県豊明市栄町大脇7番地

発売元 株式会社 オーム社  
(03) 3233-0641 (代表)  
<http://www.ohmsha.co.jp>

発行 2017年5月15日



昇る ペルセウス と すばるぼし



TOYOTA  
Technical  
Review  
〔トヨタ・テクニカル・レビュー〕

2017/ **5**  
Vol. **63** 233

発売元 株式会社 オーム社  
定価 1,944円(本体1,800円)