

# TOYOTA Technical Review

[トヨタ・テクニカル・レビュー]

P R I U S



続・カーボンニュートラル達成に向けた  
フルラインアップ戦略

2023/9 Vol.69 No.1

#### 【まえがき】

今回の TOYOTA Technical Review (Vol.69-1)は、前回 (Vol.68)に続き、「カーボンニュートラル達成に向けたフルラインアップ戦略」を特集いたします。

地域によってエネルギー事情や取り巻く環境は異なります。トヨタは、どの地域においても、カーボンニュートラル (CN)達成に向けて、CO<sub>2</sub> 排出量の削減につながるよう、多様な選択肢を準備し、フルラインアップのなかからお客様に最適なクルマを選んでいただけるよう取り組んでいます。さらに、CN を達成するためには「エネルギーを『つくる、はこぶ、つかう』」、それぞれのフェーズで適切な CO<sub>2</sub> 削減方法を考えることも重要です。

前は BEV (Battery Electric Vehicle)、FCEV (Fuel Cell Electric Vehicle)などを中心に取り上げましたが、今回は BEV、FCEV 以外の選択肢の HEV (Hybrid Electric Vehicle)、PHEV (Plug-in-Hybrid Electric Vehicle)や燃料を「つくる」ことにも焦点を当てています。1997 年に世界初の HEV 量産車としてスタートしてこれからの時代も選んでいただける「愛車」を目指した 5 代目「プリウス (HEV/PHEV)」、電動車の開発で培った高度な電池技術と車載部品やユニットを活用したトヨタ初となる住宅用蓄電池「おうち給電システム」、カーボンニュートラル燃料の技術開発や各国の政策動向とトヨタの取り組み、噴流 MBD 活用による水素直噴エンジン混合気形成の改善を取り上げています。

これからのクルマは「電動化、知能化、多様化」が進んでいくことで、社会とつながった存在になっていきます。「クルマの未来を変えていこう！」をスローガンとして、未来のモビリティ社会に向けて、クルマを中心に社会全体へ価値を広げていきながら、パートナーの皆様と一緒に、幸せを量産してまいりたいと思います。

TOYOTA Technical Review は今回より弊社ホームページにてご覧いただけるようになりました。多くの皆様にご活用いただけますよう、内容の充実を図ってまいりますので、引き続きよろしくお願い申し上げます。

## 目 次

---

### ▶特集「続・カーボンニュートラル達成に向けたフルラインアップ戦略」

#### ・TOYOTA PRIUS

代表執筆者：大矢 賢樹, 藤原 裕司, 川那辺 翔, 大和 克行, 藤田 浩徳, 菊地 隆二 ……3

#### ・住宅用定置型蓄電池「おうち給電システム」の開発

田中 夏樹, 久保 和樹, 内山 敏夫, 江幡 和夫 ……24

#### ・カーボンニュートラル燃料

久野 央志, 信川 健, 福井 裕幸, 横尾 望, 中田 浩一 ……29

#### ・噴流 MBD 活用による水素直噴エンジン混合気形成の改善

宮川 淳, 宮元 敬範, 丹野 史朗, 塚本 佳久, 大村 哲生, 高橋 大志, 中田 浩一 ……39

---

### ▶論文／解説

#### ・材料分析データ解析クラウドサービス”WAVEBASE”

矢野 正雄, 山口 剛生, 青木 亮, 井手 一人, 池田 英恵,

外山 泰弘, 村井 祐介, 小野 寛太, 庄司 哲也 ……48

---

### ▶受賞技術概要

#### ・車両遠隔制御自律走行搬送システムの開発

澤野 拓朗, 狩野 岳史, 安山 翔悟, 岩堀 健人, 池田 圭吾 ……62

#### ・ピークシフト・デマンドレスポンスによる電力デマンド低減活動

大竹 可峻, 赤井田 巖, 鈴木 伸岳 ……65

---

### ▶2022 年度 社外発表論文一覧

……70

# TOYOTA PRIUS

代表執筆者: 大矢 賢樹 <sup>\*1</sup> 藤原 裕司 <sup>\*2</sup> 川那辺 翔 <sup>\*3</sup>  
大和 克行 <sup>\*4</sup> 藤田 浩徳 <sup>\*5</sup> 菊地 隆二 <sup>\*6</sup>

## 要旨

トヨタは、エネルギーの未来と、地域ごとの現実に寄り添ったマルチパスウェイを軸に、多様な選択肢を追求する。

HEV 専用車として普及の役割を担ってきたプリウスが、5 代目では Hybrid Reborn をコンセプトに、今すぐできる CO<sub>2</sub> 削減として、HEV と PHEV にこだわって開発、発表された。

本稿では 5 代目プリウスの商品としての狙いと、その実現技術について概説する。

キーワード PRIUS, HEV, PHEV, TNGA, Hybrid Reborn, 愛車, 一目惚れするデザイン, 虜にさせる走り, プリウス

## 1. まえがき

世界初の HEV 量産車としてスタートし、HEV 専用車として普及の役割を担ってきたプリウスが、5 代目では Hybrid Reborn をコンセプトに、今すぐできる CO<sub>2</sub> 削減として、HEV と PHEV にこだわって開発、発表された。

本稿では 5 代目プリウスの商品としての狙いと、セリングポイントである「一目惚れするデザイン」、「虜にさせる走り」の実現技術について概説する。

## 2. 開発の狙い

### 2.1 プリウスの歩み

トヨタ社内で 21 世紀のクルマをつくることを目的とした G21 プロジェクトが発足。当時の車社会の課題であった資源、そして環境問題への挑戦を掲げ、圧倒的な燃費性能を目指し、多くの開発課題を乗り越えて、1997 年

に“21 世紀に間に合いました”というキャッチコピーとともに世界初の HEV 量産車として初代プリウスが誕生。プリウスという名前はラテン語で先駆者を意味しており、まさしく時代に先駆けたクルマとして誕生。

2003 年には、HEV の普及を目指し、環境性能に加え、走行性能にこだわって THS II を採用し、大幅なシルエツト変更をした 2 代目を発売。

2009 年には、排気量を 1.5L から 1.8L とし、燃費はもちろん動力性能を向上、HEV の普及に向けてより多くのお客様にお届けするために、トヨタ初の全チャンネル販売を実施した 3 代目を発売。

2015 年には、燃費だけではなく、TNGA の頭出し車種として走りの質感を向上させた 4 代目を発売。

### 2.2 Hybrid Reborn

プリウスが先駆者として HEV を広げ、アクアをはじめとした多くの HEV も展開されグローバルで 2,000 万台を達成。プリウスも 500 万台を販売。世界中の多くのお客様に HEV をお乗りいただくことで、CO<sub>2</sub> の排出削減量は 1 億 6,000 万トンにもおよんだ。

HEV のアイコンとして、プリウスの HEV 普及という役割は完遂したといえる(図 1)。

<sup>\*1</sup> Toyota Compact Car Company TCZ

<sup>\*2</sup> 株式会社テクノアートリサーチ

<sup>\*3</sup> Toyota Compact Car Company TC ボデー設計部

<sup>\*4</sup> Toyota Compact Car Company TC 車両性能開発部

<sup>\*5</sup> クルマ開発センター 第 1 シャシー開発部

<sup>\*6</sup> クルマ開発センター パワートレイン製品企画部

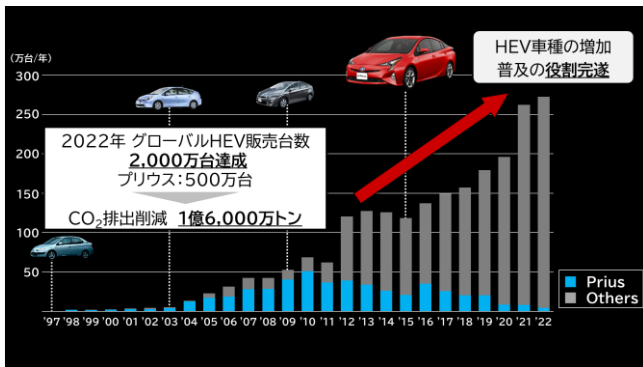


図1 グローバル電動車販売台数

そのような背景のもと、「先駆け」という意味をもつプリウスが次世代 HEV を牽引すべく、Hybrid Reborn をキーコンセプトとし、新型プリウスの企画をスタートした。

### 2.3 コモディティ or 愛車？

5代目の企画をどうするか悩んでいた時に、社長から「タクシー専用車でいいのでは？」との提案があった。その真意は、走行距離の長いクルマとして台数を増やしてこそ環境貢献につながる、新しいプリウスをコモディティ化したクルマにしてみてもいいということであった。

この質問はプリウスの真の役割を問う本質的な質問であり、当時、我々開発メンバーはその質問に対し答えることができず、困った我々は、デザイナーにかっこいいクルマを描いて欲しいと依頼。その時のデザインスケッチが図2である。



図2 デザインスケッチ

これを見た我々は、当時の社長から提案のあったタクシーのようなコモディティ化したクルマにするのではなく、一枚のデザインスケッチをきっかけにして、お客様にとっての愛車になるようなクルマにし、一人でも多くのお客様に選択いただけるようにすることを決心した。

## 2.4 セリングポイント

お客様にとっての愛車になるようなクルマを生み出すべく、これまで磨き上げてきた環境性能はもちろんのこと、エモーショナル感を付与するためにデザインと走りにとことんこだわり、お客様に長く乗っていただけるような妥協のないクルマを目指し、新しいプリウスのセリングポイントを「一目惚れするデザイン」と、「虜にさせる走り」の二つとした。

## 3. 一目惚れするデザイン

『HYBRID REBORN』をスタイリングで具現化するため、デザインコンセプトを「一目惚れするデザイン」とし、数値や理屈だけでは語れない人の感性に響くデザインを目指した。

### 3.1 エクステリア

#### 3.1.1 エクステリアデザイン

【デザインの狙い】感性に響くスタイリッシュデザインの実現に向けて、3つのキーワードを設定

- ① Sporty body silhouette (プリウス独自のスポーティシルエット)
  - 2代目以降踏襲してきたプリウス独自のモノフォルムアイコンを引き継ぎ、低重心化と大径タイヤの採用により、スムーズでよりスポーティなシルエットへと進化(図3)



図3 ボディシルエット

- ② Emotional body shape (感性に訴えるエモーショナルな造形)
 

空気の自然な流れのように、無秩序のなかにも規則

性のある自然界のエモーションをイメージした抑揚造形(図 4)



図 4 ボディ造形

③ Progressiveness(新しいデザインランゲージによる先進性表現)

シンプルでありながら力強く、クリーンでありながら見ごたえのあるデザイン表現(図 5)



図 5 先進性表現

ハンマーヘッドのテーマをベースに、機能とグラフィックを統合したシンプルでアイコンックなフロントデザイン(図 6)

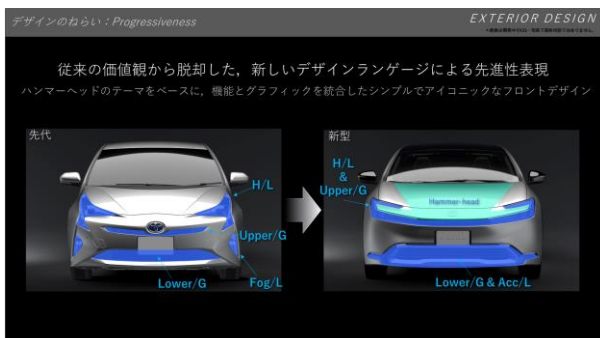


図 6 フロントデザイン

薄型一文字リヤコンビネーションランプと、センター配置の車名ロゴ(バラ文字)の組み合わせにより、プリウスブランドの持つ先進性にフォーカスしたリヤデザイン(図 7)



図 7 リヤデザイン

3.1.2 エクステリアデザインの実現

① パッケージ

モノフォルムシルエットの追及と低重心化の実現のため、パッケージでは低ルーフ化を実施. 先代と比較し 40mm 全高を下げ、ピーク位置を後方へ移動(図 8)

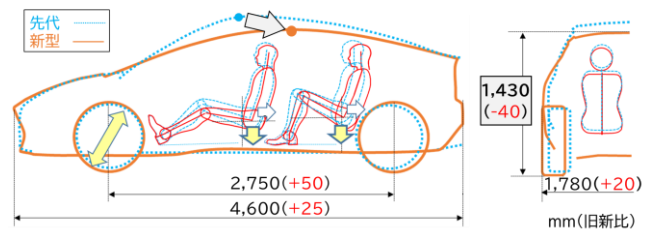


図 8 パッケージ図

② A ピラー

低ルーフ化にともない、A ピラーの傾きが大きくなる。それにより、ピラー周辺の視界確保が難しくなるが、ドアアウトミラーをミラー振向角の許容範囲内で後方に配置し、FIX ガラスから見える範囲を最大化(図 9)



図9 ミラー後方配置

## ③ リヤドアハンドル

抑揚のある外板面を実現するため、ベルトライン上方にリヤドアハンドルを配置(図10)。

背反となる「斜め後方視界」,「ハンドル操作スペース」については内部機構の小型化により両立。

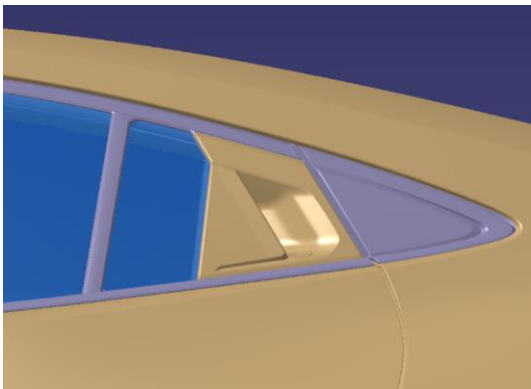


図10 リヤドアハンドル

## ④ ハンマーヘッド

今回のハンマーヘッド意匠のみせどころである、ヘッドランプより車両前方に突き出した部分に関して、剛性、歩行者保護性能、北米法規(軽衝突)の両立が課題であった。課題を解決するため、下に折りたたまれるような変形モード(図11)を狙いとし、構造を検討。実際に狙いの変形(図12)を達成することで、この意匠を具現化することができた。

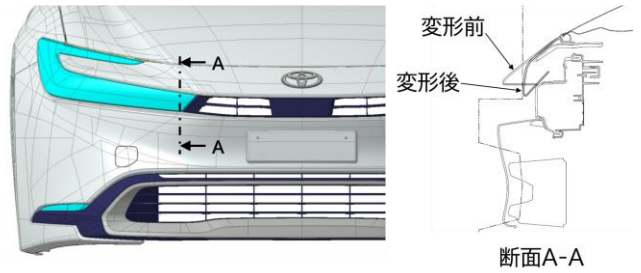


図11 狙いの変形モード



図12 実機試験の様子

## ⑤ デザインを高次元で再現するためのモノづくりのこだわり

“一目惚れするデザイン”とあるように、よりエモーショナルなスタイルの具現化にはデザイナーが想い描いた形状を一枚の鋼板から成形していくことが必要不可欠である。今回のスタイルを実現するにあたっての主要課題は、「リヤランプを覆うように板金が縁取られている部分(図13)」にあった。細く縁取られた外板の角 R の部分は、一枚の板同士が重ならないように成形しなければならない。シワの克服が課題であった(簡単なイメージを図14に記す)。プレス工程は、①大枠の意匠形状を成形する絞工程 ②余分なところをカットする外形抜工程 ③他部品とのつなぎ目となるフランジを成形する外形曲工程の構成で思い通りの形状へと成形していく(図15)。今回のケースは、③の工程でシワが発生してしまうという課題があった。この課題に対し、成形前の形状・フランジ成形する角度など複数パターンの工法を検証するために、1mm,1deg 単位で変更を加えた成形シミュレーションを実施し、狙いの形状を成立させる最適な工法を提案することができた。

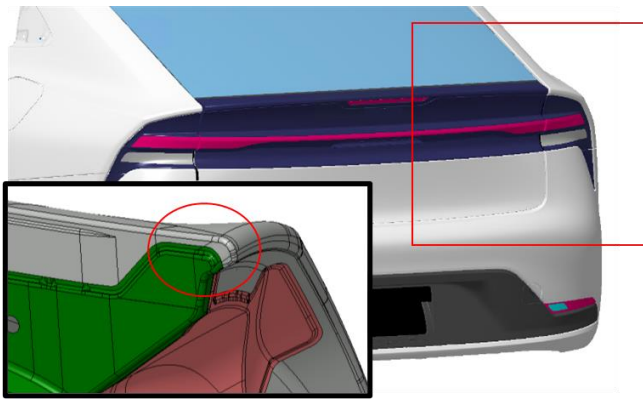


図 13 難成形課題部

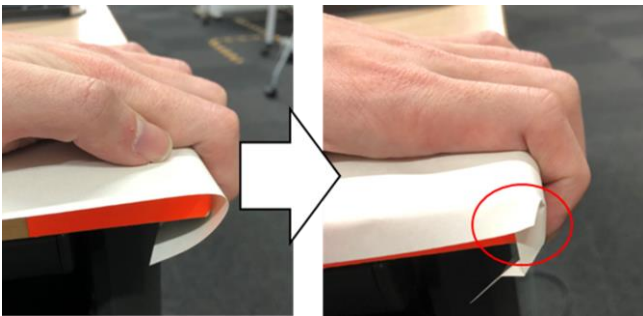


図 14 成形課題イメージ図

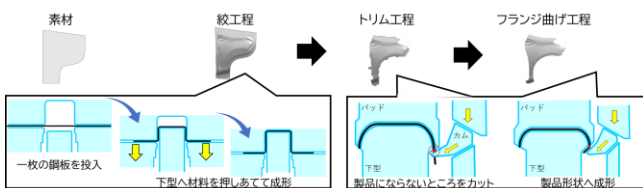


図 15 プレス工程

### 3.2 インテリア

#### 3.2.1 インテリアデザイン

【デザインの狙い】『走りのワクワク感』と『上質さ』を両立させたコックピットを目指し、3つのキーワードを設定

- ① Island architecture(アイランドアーキテクチャー)
  - 『Surrounding - tub』, 『D - module』, 『Floating - IP』の3つの構成により圧迫感のない広々とした空間と運転に集中しやすいコックピットを両立(図 16)

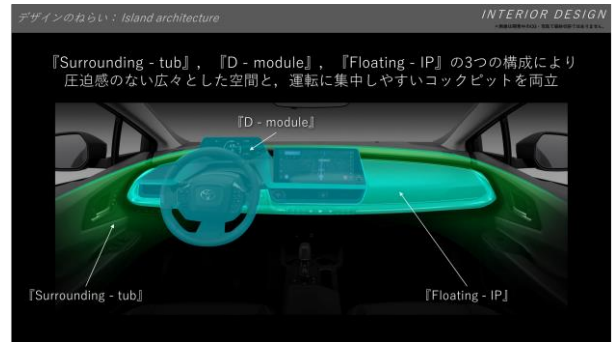


図 16 アイランドアーキテクチャー

遠視点メーターを起点とした構成(D - module)により直感的なドライビングフォーカスを導き、走りのワクワクを演出(図 17)



図 17 ドライビングモジュール

- ② Sporty and high-quality(スポーティかつ上質)
  - 黒を基調とした空間に、インパネ加飾とシート加飾を同調させ、スポーティでありながら上質な空間を表現(図 18)



図 18 室内空間



③ Progressiveness(新価値創出)  
TSS 機能と連動する新しい価値観のイルミネーション(図 19)



図 19 イルミネーション

照明色と加飾のコーディネートによる新しい質感の表現(図 20)



図 20 質感表現

### 3.2.2 内装デザインモックを量産部品でも再現

デザインを高次元で具現化するために、内装設計では以下に重点を置き開発した。

① アイランドアーキテクチャー

- コックピット周辺の圧迫感の低減  
全高が低くスポーティなパッケージでありながらも圧迫感を抑制するために、詳細な断面検討を開発初期から行い、部品の分割や構造に工夫を凝らすことでトップマウントメーターとセンターディスプレイの上端の高さを抑えることを実現。センターディスプレイに関しては乗車姿勢でインストルメントパネルより突出しないようにした(図 21)。

また、明暗色のツートーンを採用することにより、A ピラーガーニッシュの圧迫感を低減するとともに、フロントウィンドウシールドへの映り込み低減にも寄与。

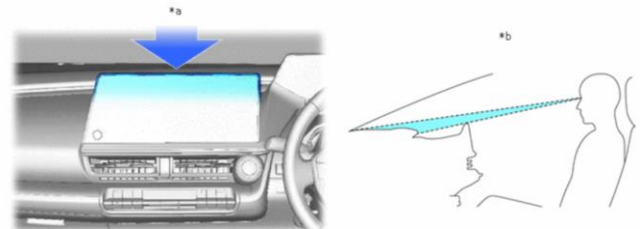


図 21 高さを抑えたセンターディスプレイ配置

- センターコンソールを含めたコックピット周りの適正なレイアウト  
運転席周辺のスイッチに関しては乗員が直感的に操作できるように、走行時に使用するもの、ディスプレイに映すもの、停車時のみ使うものとグルーピングを行い、それぞれの視認性に優先順位を付け配置。

コンソールにおいては、シフト・カップホルダー・スマートフォン収納(スリットトレイ・ワイヤレス充電器)を使用頻度と操作性を考慮し配置。ヒーターコントロールパネルやシフト操作時の妨げにならないような配慮をしながら、GA-Cプラットフォームとしては初の横並び配置のカップホルダーを実現し、各席の乗員のドリンク認識の向上に寄与。スマートフォン収納は視野角や手首の快不快度まで検討、ストレスなく自然に使い触るものはドライバの近くに配置した。

② スポーティかつ上質のなかでの新価値創出

- アンビエントイルミとフィルム加飾の融合  
室内色にあわせてアンビエントイルミのカラーを設定。加飾の一部として表現するために間接照明ではなく、敢えて直接照明とした。直接照明とすることによる光り方の分布のムラについては、光学解析、試作、官能評価を幾度となく反復し、一様な光方を実現し、ADAS (Advanced Driver-Assistance Systems) 機能と連動した注意喚起の際も、

乗員の気づきを促進することを可能とした。  
フィルム加飾パネルにおいては従来技術では再現が困難であった造形に対し、フィルムの成形解析(図 22)、フィルム成形用の試作型でのトライ、成形許容度が大きいフィルムの開発を、仕入先・デザイン・設計で共同検討することにより実現、シームレスな長尺加飾パネルの開発につなげることができた。

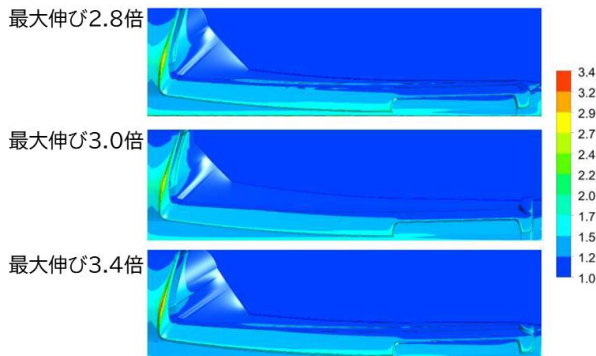


図 22 フィルムの賦形解析

### 3.2.3 メーター

ハンドル上側に配置したメーターは、遠視点・低俯角を実現し、ドライバーの視線移動を低減、表示内容の瞬間理解、直感操作に貢献。運転に集中しやすく、先進感のあるコックピットを目指した。メーター筐体を薄く見せること、ベゼルの狭額縁実現にこだわることで“スッキリとした造形美“へとつながった(図 23)。

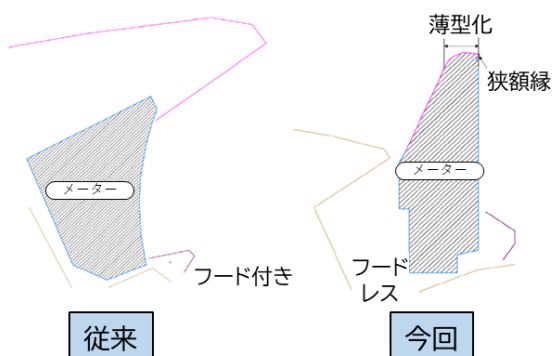


図 23 メーター形状

メーターフードレス化は日中の太陽光の影響を直接受ける形となるため、メーター表示エリアに、Anti-Reflection, Anti-Glare 等の処理を施し、視認性確

保と映り込みを抑制する工夫をしている。一方夜間については、メーター照明の窓映りを抑制する設計を追加した。今回のメーターの配置、筐体の薄型化のチャレンジは、従来メーターの締結固定思想を踏襲できず、片側に締結固定が集中。これによる耐振動性を担保するため、内部構造のレイアウトの工夫、重心 G 影響を受けにくいブラケット配置、および、角度設定を行った。また、メーター構成部品の材料選定、および、形状の工夫によりメーター全体の剛性アップを図った。

「必要な情報を、必要な時に、最適な形で提供する」をコンセプトに、運転時に必要なコンテンツに厳選したレイアウトを採用。さらに、走行状態を示す HV システムインジケータについては、ドライバーの表示量嗜好に対応するため非表示も選択可能とした、よりシンプルなレイアウトも用意。そのレイアウトにおいて、緊急時などの必要な情報は適切なタイミングで割り込むことでドライバーに伝えられるようにした。より多くの情報が必要なドライバーに向けては、ステアリング上のスイッチ 1 クリック操作で表示コンテンツが増えるレイアウトに切り替え可能。ドライバーのニーズに応えることができる(図 24)。



図 24 グラフィックレイアウト

### 3.3 カラーデザイン

【デザインの狙い】 内に秘めた高揚感と、次の時代を予感させる期待感品がありながらもちょっと遊び心のある『大人の Specialty』を目指し 3 つのキーワードを設定

- ① Modern 新価値観の訴求
- ② Sporty 軽快なスポーティさ
- ③ Intriguing 面白さ/こだわり

【カラーラインナップ】

- ① 外板色(新規開発色):ソリッドライクでシルエットを見せ、エフェクト効果でオリジナリティーを狙う

- 1M2 / ASH:派手さはないが一目引く、情熱を内に秘めた大人のこだわりを表現(図 25)



図 25 1M2/ASH

- 5C5 / MUSTARD:はっきりした色でありながらちょっと大人っぽい、新たなスポーティを表現(図 26)



図 26 5C5/MUSTARD

- ② 内装色:インパネ加飾とシートのステップライン加飾をリンクさせ、スポーティでありながら上質な空間を表現(図 27)



図 27 内装色

## 4. 虜にさせる走り

### 4.1 新型プリウスの目指したもの

新型のキーコンセプトは「Hybrid Reborn」であり、お客様に HEV/PHEV を選択肢の一つとして選んでいただくために、一目惚れするデザインにあわせて走りにおいてもプリウスが「Reborn」することは重要だと考えた。

新型の目指した走りは、「虜にさせる走り」である。プリウスというクルマの性格を考えたときに、サーキットを攻めるような走りではなく、普段使いで多くのお客様に楽しんでいただく走りの方がよい。そのために、運転が上手くなったように感じる、意のままの走りを目指した。また Hybrid Reborn を感じさせる、HEV/PHEV ならではの特徴を生かした加速感の良さも加え、「圧倒的な加速感」と「意のままの走り」とした。

「圧倒的な加速感」と「意のままの走り」を具体化するにあたり、机上検討やテストコース走行を行うだけでなく、「どこをどう走らせたか」という観点からブレイクダウンすべく、新型として重要だと考える市場のシーンで実際に走行した。その結果、以下の 3 シーン、性能について重要だと考えた。

- ① 市街地:楽に速度調整ができる
- ② 峠道:思い通りの走行ラインを走れる
- ③ 高速道路:パワフルで気持ちよく加速ができる

これらのシーンで必要な性能の根幹となる TNGA の進化と、走行シーンを支える要素技術について説明する。

### 4.2 TNGA(Toyota New Global Architecture)の進化

先代は TNGA の頭出しとして第 4 世代 HEV/PHEV システムと GA-C プラットフォームを採用した。新型では、TNGA ユニットとプラットフォームのさらなる進化を実現した。

#### 4.2.1 第 5 世代 HEV/PHEV システム

新型プリウス向けに第 5 世代となる 1.8L/2.0L HEV 及び 2.0L PHEV システムを新開発した。HEV では出力を向上しつつ損失を低減したトランスアクスルモータ、PCU の採用に加え、小型・高出力な Li イオンバッテリーを

採用した。それにより、先代同等以上の低燃費を達成しながら、2.0L HEV システムでは先代比 1.6 倍のシステム出力へ向上した。PHEV は HEV を上回る加速性能と

静粛性の実現に加え、日常生活の大部分を EV でカバーできるように EV 走行距離を先代に対し、約 50%以上向上した(表 1)。

表 1 各システムの新旧諸元比較

		ハイブリッド(HEV)			プラグインハイブリッド(PHEV)	
		新型		先代	新型	先代
エンジン	型式・排気量	M20A-FXS 直列4気筒 1,986cc	2ZR-FXE 直列4気筒 1,797cc	2ZR-FXE 直列4気筒 1,797cc	M20A-FXS 直列4気筒 1,986cc	2ZR-FXE 直列4気筒 1,797cc
	最高出力 (kW [PS]/r.p.m.)	112 [152] /6,000	72 [98] /5,200	72 [98] /5,200	111 [151] /6,000	72 [98] /5,200
	最大トルク (N·m [kgf·m]/r.p.m.)	188 [19.2] /4,400~5,200	142 [14.5] /3,600	142 [14.5] /3,600	188 [19.2] /4,400~5,200	142 [14.5] /3,600
モーター	フロント	最高出力 (kW [PS])	83 [113]	70 [95]	53 [72]	120 [163]
		最大トルク (N·m [kgf·m])	206 [21.0]	185 [18.9]	163 [16.6]	208 [21.2]
	リヤ (E-Fourのみ)	最高出力 (kW [PS])	30 [41]	←	5.3 [7.2]	—
		最大トルク (N·m [kgf·m])	84 [8.6]	←	55 [5.6]	—
駆動用主電池	容量(Ah)	4.08(リチウムイオン)		FF:3.6(リチウムイオン) E-Four:6.5(ニッケル水素)	51(リチウムイオン)	25(リチウムイオン)
システム最高出力	kW [PS] ※当社算定値	FF:144 [196] E-Four:146 [199]	103 [140]	90 [122]	164 [223]	90 [122]
EV走行距離	km	—		—	87[19in] 105[17in]	60[15in] 50[17in]

#### 4.2.1.1 HEV システムへの織り込み技術

##### ① トランスアクスルモータ

コイルエンド低減、磁石配置変更により電気損失を低減したことに加え、新潤滑構造、新低粘度油の採用により機械損失を低減し、先代に対し損失を低減し出力向上を実現した。

##### ② PCU(パワーコントロールユニット)

新開発の低損失パワー素子 RC-IGBT(Reverse Conducting Insulated Gate Bipolar Transistor)を採用するとともに、内部通電部のインダクタンス低減によるスイッチング速度アップで損失低減し、先代比で電気損失を 13%改善した(図 28, 図 29)。

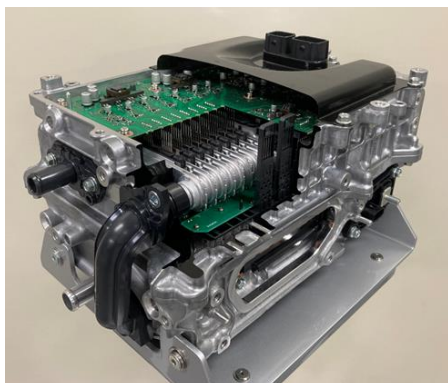


図 28 PCU 外観

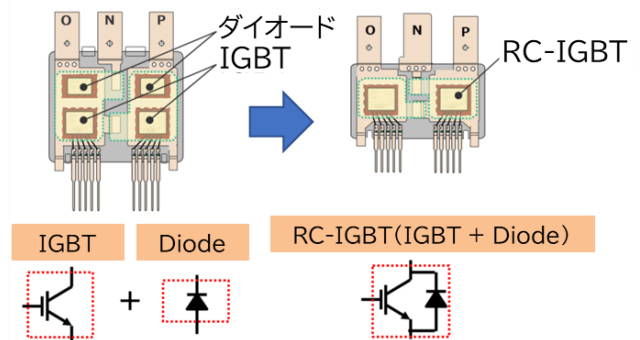


図 29 RC-IGBT 素子

##### ③ HEV バッテリ

新開発の Li イオン電池セルの採用により出力密度を 16%向上させた。組電池拘束機能と電池パック筐体機能をアルミダイカストケースへ統合し、電圧検出回路に FPC(Flexible Printed Circuits)を採用し配線スペースを削減した(図 30)。これにより、2.0L HEV 用バッテリーでは、先代比 25%の小型化、質量は同等を実現した。

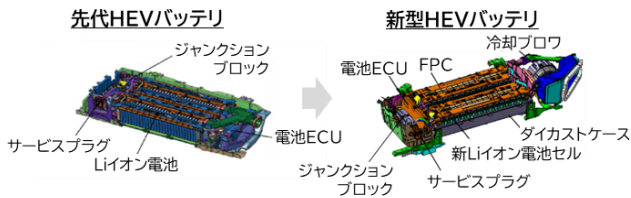


図 30 HEV バッテリーパック構造の新旧比較

4.2.1.2 PHEV システムへの織り込み技術

- ① トランスアクスルモータ  
HEV に対してモータの磁石配置を変更し、新潤滑構造を採用することで、高出力化と EV 走行時の冷却強化を実現した。
- ② PCU(パワーコントロールユニット)  
HEV の昇圧コンバーターを二並列で使用するダブル昇圧システムの採用により、HEV 同等の体格で高出力モータの駆動を実現した。
- ③ PHEV バッテリー  
RAV4 に搭載の電池を採用し、先代同等の体格で容量 1.5 倍に向上させ、冷却構造をエアコン冷媒冷却にすることで高出力化を実現した(表 2)。また、パック内のスタックと機器の配置を 2 段構造にすることで小スペース化し、リヤ席下に配置した(図 31)。

表 2 PHEV バッテリーの新旧比較

	先代	新型
セル数	95セル	72セル
容量	8.8kWh	13.6kWh
重量	129kg	129kg
セル容量	25Ah	51Ah
セル電圧	3.7V	3.7V

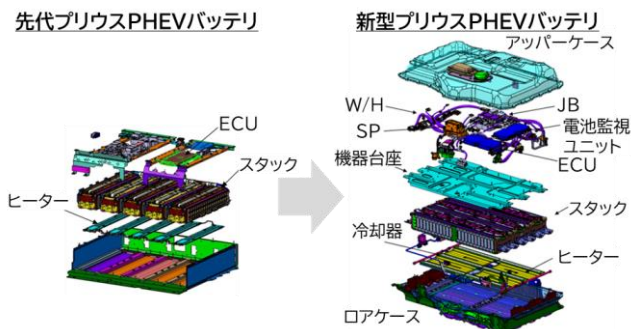


図 31 PHEV バッテリーパック構造の新旧比較

4.2.2 第 2 世代 TNGA プラットフォーム

「虜にさせる走り」はパワートレインの進化のみでは実現できない。パワートレインからの動力やドライバーの操作入力を受け止め、意図通りの車両挙動につなげるため、車体の進化も必要となる。新型では従来の GA-C プラットフォームを改良した、第 2 世代 TNGA プラットフォームを開発し、走りを支える土台を動力・車体の両面から進化させている。

4.2.2.1 ボディへの織り込み技術

従来の GA-C プラットフォームをベースに、ドライバー操作に対する車両応答改善のための軽量高剛性化、および、走りを演出するための NV 性能改善を同時に施した。フロントサブフレーム、および、フロントサイドメンバ形状の最適化や、カウル端部の構造、および、結合方法の改善により、フロントロアアームやフロントサスタワーといったサスペンション取付部の剛性向上とともに、振動入力源からの伝達特性も改善させている。また、「一目惚れするデザイン」を実現しつつボディ各所で環状構造を織り込み、振り剛性も先代同等以上を実現している(図 32)。これらに加え、新型の目指す「虜にさせる走り」の実現に欠かせないフロントボディの横曲げ剛性向上(4.3.2.②参照)のため、フロントバンパーレインフォース、および、ラジエータサポート周辺構造も改良した。さらに、ボディパネルでの NV 性能改善として、フロア、ダッシュパネルの制振材配置も見直した(図 33)(4.3.3.②参照)。

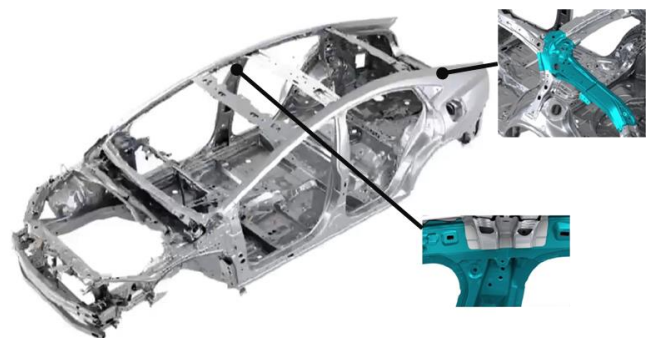


図 32 ボディ構造

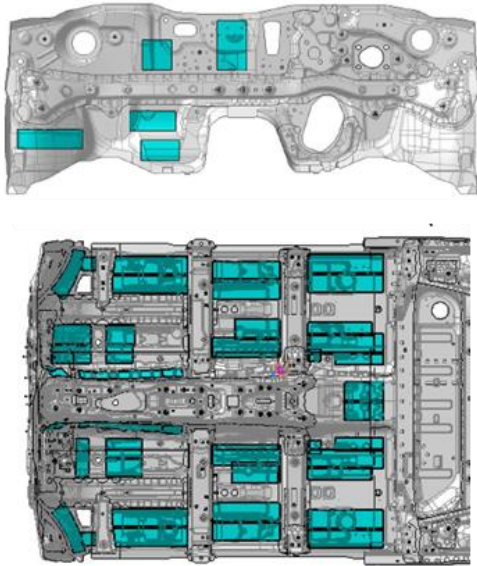


図 33 塗布型制振材

#### 4.2.2.2 サスペンションへの織り込み技術

サスペンションは走行時の安定性と応答性をさらに高次元で両立させるため、従来の GA-C プラットフォームをベースにサスペンションジオメトリと各構成品の特性最適化を実施している(図 34)。



図 34 サスペンション全体図

サスペンションアームやナックル・キャリアなどの変更により先代に対しタイヤ接地点を 30mm トレッドアウトすることで、直進時・旋回時ともに安定感のある走りを実現。サスペンションブッシュやボールジョイントなど結合部の特性を最適化することで、微小なハンドル操作に対するクルマの応答性を向上(4.3.2.③参照)。ボディのサスペンション支持部の改良と相まって、余分な振動を抑えることができ、質感の高い走りの実現に貢献している。

### 4.3 走行シーンを支える各要素技術

本節では 4.1.で説明した、新型に重要と考えたシーンごとに必要となる性能を支える技術について説明する。

#### 4.3.1 市街地

市街地のような低速で加減速を繰り返すシーンにおいては、速度調整や停止がスムーズにできることで意のままに走ることができると、運転が上手くなったように感じる。そこで以下の 2 点について改良を行った。

- 思い通りの加速ができる、低速でのアクセル応答性の良さ
- ギクシャクした動きにならない、停止時の揺り返しの少なさ

##### ① 低速でのアクセル応答性の良さ

新型ではアクセル操作に対する車両の応答性向上を目的に、加速度の時系列変化(加速ジャーク)を高めた(図 35, 図 36)。日常の一般的なアクセル操作速度は 40%/sec 以下であるため、主にその領域での向上を図っている(図 37)。

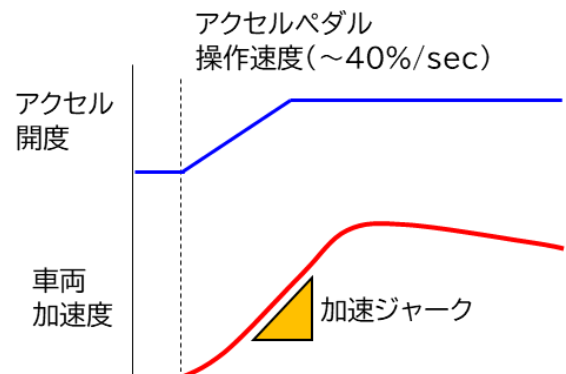


図 35 アクセル操作に対する加速度

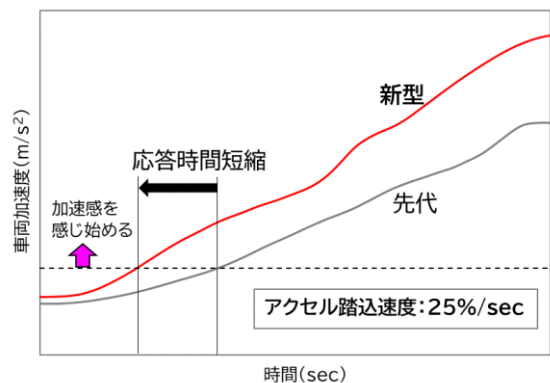


図 36 車両加速度(応答性)

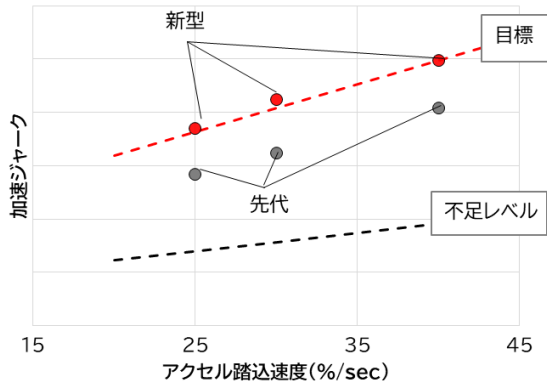


図 37 加速ジャーク

② 停止時の揺り返しの少なさ

新型では新しい電子制御ブレーキシステムを採用した。従来の高液圧を蓄圧する方式からオンデマンドに油圧を発生させる方式に変更することで、細かなブレーキ液圧のコントロール性が向上した(図 38)。それにより、車両が停止する直前に行うペダル戻し操作のような細かなペダル操作にもブレーキ液圧が追従することができ、車両の揺り返しを発生させることなくスムーズに停止させることができた(図 39)。

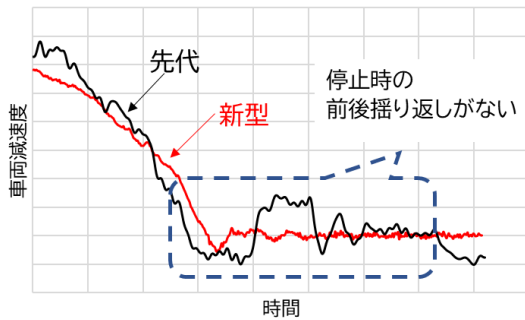


図 38 揺り返し

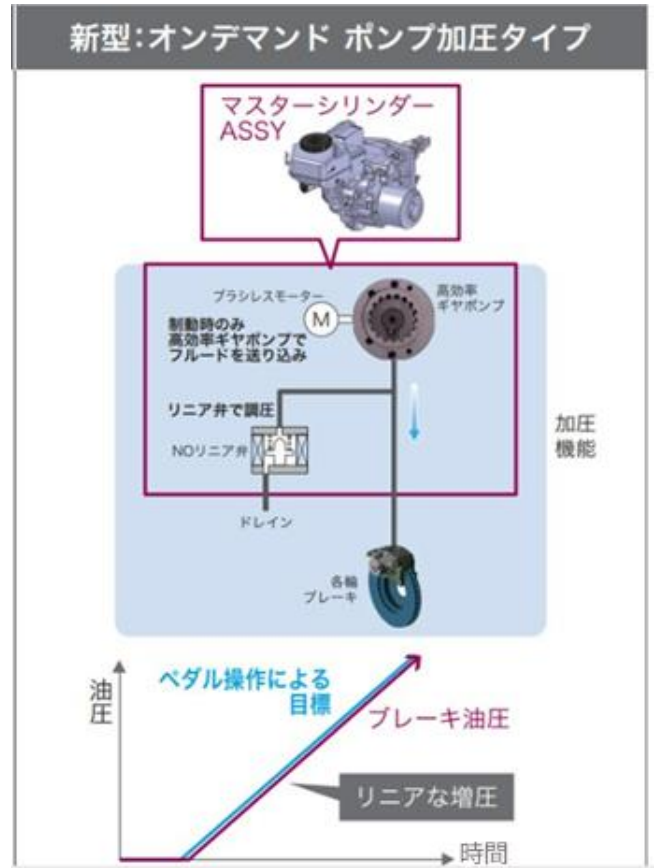


図 39 オンデマンドシステム

4.3.2 峠道

峠道のようなカーブを走行するシーンでは、以下の 3 点を実現することで思い通りの走行ラインを走らせることができ、「虜にさせる走り」を感じることができると考えた。

- カーブ進入前に意図したタイミングで遅れなく車速コントロールができる、モータ回生ブレーキの効き
- カーブ進入時のハンドル操作に車体が遅れなく追従する、高剛性ボディ
- カーブ走行中に狙った走行ラインを安定して走行できる、サスペンションセッティング

それぞれに対し、以下のような要素技術を開発することで、カーブ走行での「虜にさせる走り」を実現した。

① モータ回生ブレーキの効き

新型 HEV(2.0L)は D レンジのモータ回生による減速度を強め、アクセルによる車速コントロール性が向上している。またスポーツモードはアグレッシブな加速感との調和から、減速度をより強めた特性としている。

新型 PHEV の B レンジにおいては 3 段階のモータ回生ブレーキ(弱・中・強)の設定(図 40)とともに、ドライバ、同乗者に不快感を与えない減速度の設計を実施。具体的には、フットブレーキペダルを踏み始めてからの減速ジャーク(減速度の時系列変化)とモータ回生による減速ジャークを近づける設計を実施した(図 41, 図 42)。

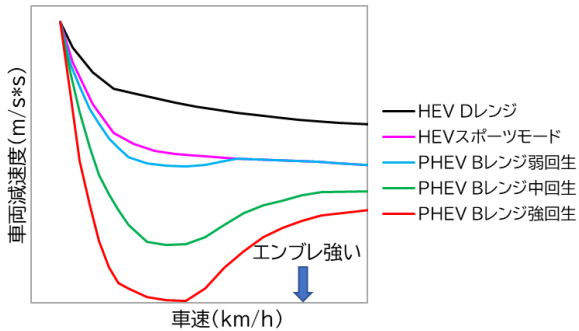


図 40 新型プリウスのモータ回生の減速度

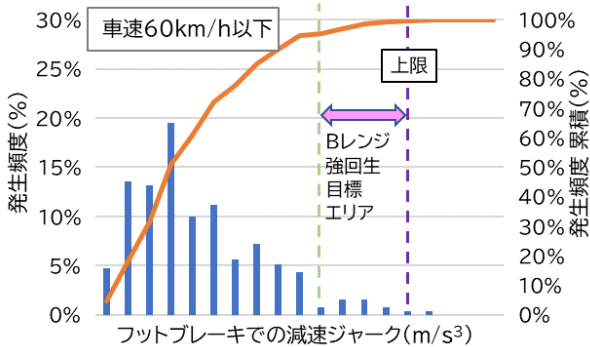


図 41 ブレーキによる減速ジャーク (減速度の時系列変化)

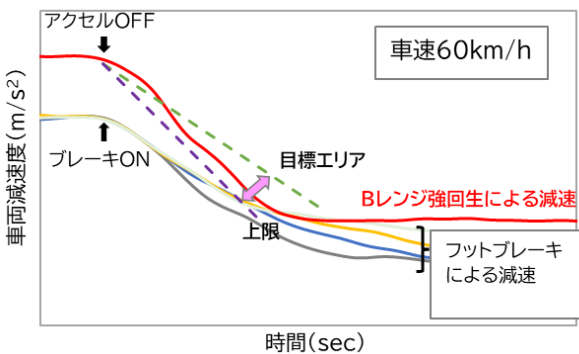


図 42 B レンジ(強回生)による減速と フットブレーキによる減速の比較

② 高剛性ボディ

カーブ進入時にドライバが狙いの走行ラインを目掛けてステアリングを操作した際、ボディ前側が左右方向に曲げ変形するフロント横曲げ変形が発生する(図 43)。ステアリング初期操作に対して遅れることなく車両を応答させるため、フロントボディの曲げ剛性を高めた。ラジエータサポートとエプロンアップパーメンバを繋ぐレインフォースの剛性向上や周辺部品との結合剛性向上が有効であることを突き止め、レインフォース本体を大きな変曲点ない稜線構造とし、周辺部品との段差や仲介部品をできるだけ減らして結合することで剛性向上を実現した(図 44)。これらにより、フロント横曲げ剛性は先代に対して最大 15%向上させている。

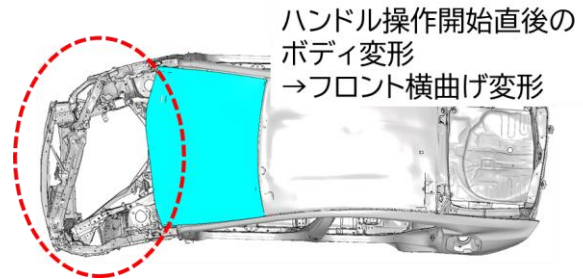


図 43 フロント横曲げ変形

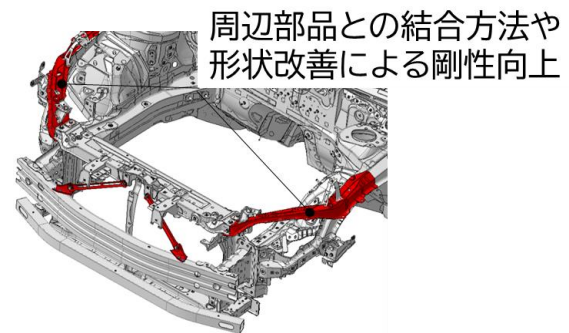


図 44 フロントボディの剛性向上構造

③ サスペンションセッティング

ドライバが狙った走行ラインを安定して走行するためには、クルマがドライバの操作に対し遅れなくリアに挙動するだけではなく、ドライバがクルマの挙動を感じ取り、自身の意図通りにクルマが走行していることを認識しながら運転することが必要となる(図 45)。





図 45 クルマとドライバー間の情報伝達

そのため、サスペンションは「ステアリング操作に対し、遅れなくリニアな応答特性を示すこと」、「微小なステアリング操舵角に対し、ドライバーが感知できる適切なステアリング反力を発生すること」を目標とし、各構成部品の特性を最適化した。具体的には、サスペンションブッシュやボールジョイントなど、結合部の部品剛性を線形化し、応答遅れにつながるヒスを低減(図 46)することで、サスペンションのリニアな応答特性(図 47)と微小操作領域でのステアリングトルク向上(図 48)を実現することができた。

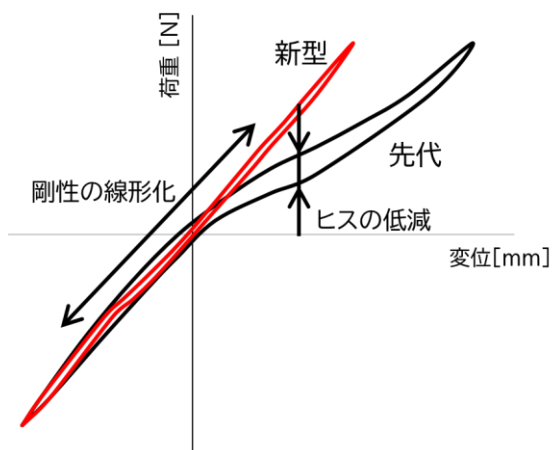


図 46 サスペンション構成部品の剛性特性

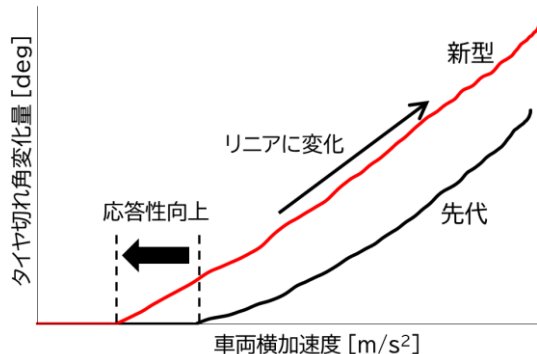


図 47 サスペンションの応答特性

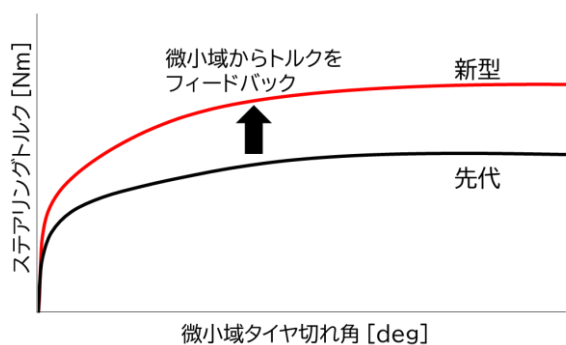


図 48 微小操作域でのステアリングトルク

また、新型では先代から 30mm トレッドアウトしたことで、ロール時の安定感を向上。旋回中の横 G に対し、乗員の目線の動き量を低減(図 49)、ドライバー、同乗者ともに安心感のある走りを実現した。

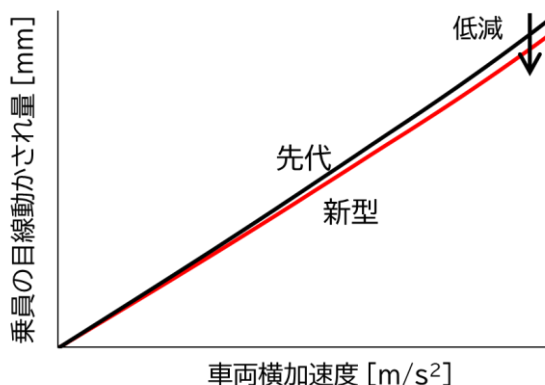


図 49 乗員の目線動かされ量

### 4.3.3 高速道路

高速道路やランプウェイのようなアクセルを強く踏み込むシーンにおいて、パワフルで気持ちの良い加速ができることは、まさに Hybrid Reborn を感じることができる瞬間である。このような性能実現のために、以下 2 点の改良を行った。

- 力強い加速を感じることができる、加速時のパワー感
- 雑味が無く気持ち良い加速を感じることができる、加速時のエンジン音

#### ① 加速時のパワー感

高速道路進入時のアクセルペダル踏み込み量と車両加速度の調査結果から、発進直後からパワーを感じ取ることができる設計を実施。先代との比較において、同じアクセルペダルの踏み込みでも明らかなパワーの違いを感じられる(図 50)。

【高速道路進入時の加速(一般的なアクセル踏み込み量)】

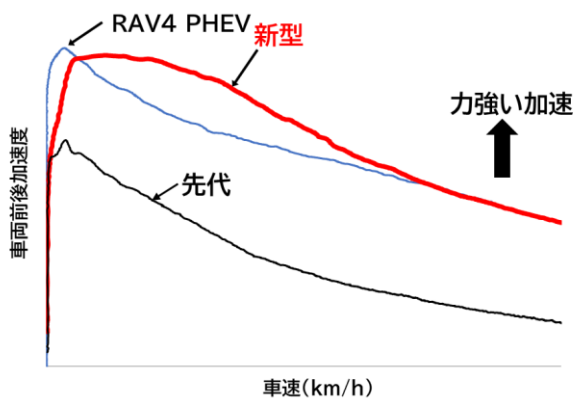


図 50 新型プリウスの加速度

#### ② 加速時エンジン音

加速時のパワー感にふさわしい車内音環境として、加速度が低い状態ではエンジン音やタイヤから発生するロードノイズが気にならない一方で、加速時にはロードノイズを抑えつつ、雑味が無く力強い加速を演出するエンジン音の演出を考えた。ロードノイズ低減は、4.2.2.1.で記載したプラットフォームやアッパーボディの高剛性化、制振材の改良に加え、サスペンションブッシュの改良で実現した。低加速度でのエンジン音は、第 5 世代 HEV/PHEV システムの搭載により動力性能が向上したことに加え、改良

したエンジンマウントにより車内音低減を実現。一方、高い加速度でのエンジン音に対しては、ダッシュパネルに新設定した制振材により、周波数が高い成分の音圧レベルを下げ、低い周波数の音圧レベルを相対的に高めることで、迫力ある雑味のないエンジン音を実現した(図 51)。さらに、PHEV ではエンジンバランスシャフトを設定し、低周波数域でエンジン音を下げ HEV 比でさらに車内静粛性を向上させた。

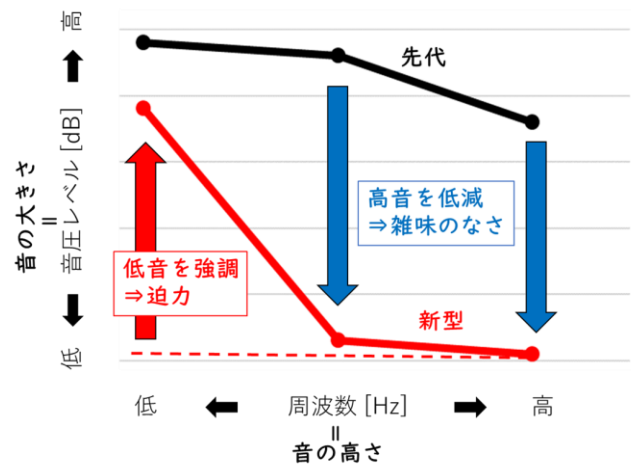


図 51 エンジン音の周波数バランス

### 4.4 動的 One Team

ここまで説明したような要素ごとのアイテムを織り込んだが、新型プリウスの目指す走りを実現するためにはそれだけでは不十分である。例えば図 52 に示すようにカーブに進入し抜けていくシーンを考えても、実際のドライバの操作や車両の挙動は個々におきるのではなくラップしながら連続して発生している。このため各要素のつながりを人が自然に感じるように直前直後の現象(操作)を意識してチューニングしていくことが必要である。そこで、従来は性能ごと個々に行っていたチューニング作業を、各適合担当者が一体となりクルマの一連の動きを意識した開発ができるようひとつのチームとして実施した(図 53)。

トヨタは動的感性性能に関して「Confident & Natural」をポリシーとしている。これは「外乱や操作に対して車両の反応が安定して安心」であり、「操作に対して車両の反応が意図通りで自然」なことの両方を兼ね備

えることである。「安心」・「自然」は物ではなく人が感じることであり、人中心のクルマづくりが必要になってくる。

その実現のためには、開発陣の一人ひとりがアイテムや諸元を決めるだけでなく、ドライバがどう感じるかを常に考えながらクルマ作りを行なう必要がある。今回の開発において、この思想を理解し自らの仕事の枠にとられずに One Team で活動してきたことで、求めている姿に一步近づくことができた。

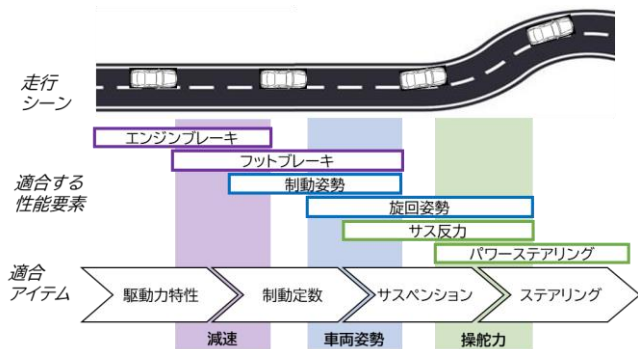


図 52 走りの適合イメージ

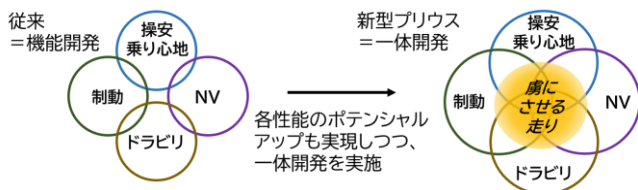


図 53 新型プリウスの一体開発

## 5. 愛車にするために

### 5.1 先進安全

愛車として長くお使いいただけるよう、さらなる安全・安心の提供を目指し、トヨタブランドとして新たに採用した機能を解説する。

#### 5.1.1 PDA SA(Proactive Driving Assist Steering Assist : 車線内走行時常時操舵支援)

幅広いお客様の愛車となるべく、経験不足などによる運転への不安や手動運転時の運転負担を低減する操舵支援技術 PDA SA を開発した。運転への不安や負担に影響する要因として、ドライバの意図せぬ不要操作や操作遅れに起因した車両挙動の乱れに対する修正操作が

挙げられる。そこで、保舵場面における不要操作や、カーブ進入時の操作遅れを抑制する手段として、ステアリングの操舵反力を場面に応じて適切に変化させることが重要と考えられる(図 54)。例えば車線が直線形状である場面では左右の操舵反力をともに強めて直進を維持しやすくする一方、カーブ入口ではカーブ内側方向への操舵反力を弱めることで操作遅れを抑制し、スムーズな車両挙動で安心感のある運転がしやすくなる。

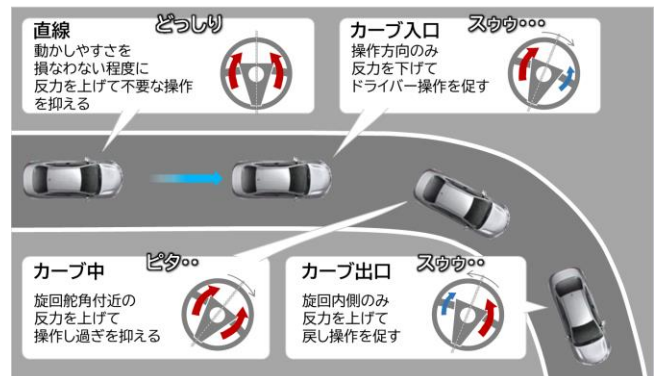


図 54 PDA SA による操舵反力変化のイメージ

図 54 のように操舵反力を場面に応じて変化させるため、単眼カメラなどを用いた走行車線の検知や、ドライバ操作を先読みした操作量の演算、それに基づいた EPS (Electric Power Steering) の出力制御を行う。幅広い走行環境(一般道を含む)で使用可能とするため、支援の違和感を抑えたドライバが扱いやすい特性が求められる。そこで PDA SA では、ステアリングの自律的な操舵はせず、操舵反力の変化のみとすることで幅広い環境での支援の違和感を抑制している。さらに、ドライバの好みや走行場面にあわせて、支援の有無や感じやすさ(支援感)を選択できる。支援感は 3 段階から選択でき、段階が上がるにつれ支援感が明確になる。

プリウスの操舵感は緻密に作り込まれており、支援特性のチューニング次第では、むしろ運転しづらくなる懸念があった。そこで動的性能評価のメンバーとともに車両評価を繰り返し、自然な支援特性となるように適合を行った。

#### 5.1.2 後方車両接近告知

後側方ミリ波レーダーで後方車両を検知し、後方車両が接近した場合には、メーターにてお知らせする機能を

開発した。インナーミラーへ視線誘導し、後方車両の回避要否の判断をアシストする(図 55)。高速道路等の不慣れな道を走行中、運転に自信のない方、疲れている方などは、後方を確認する余裕が無いことがある。ふと後方車両の接近に気づいた時に慌てて周囲の確認なしに車線変更して危険になったり、後方車両に気づかない状態が続くと所謂あおり運転の被害に遭ったりすることがある。そうなる前にお知らせすることで、慌てず安全に車線変更、運転負荷低減、また、あおり運転被害の未然防止に貢献する。

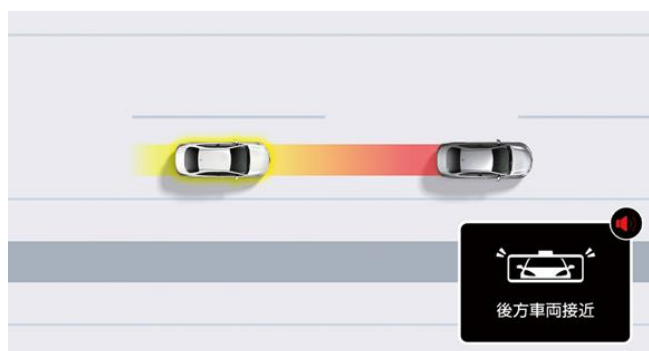


図 55 後方車両接近告知

### 5.1.3 周辺車両接近時サポート(録画機能, 通報提案機能)

昨今社会問題となっているあおり運転の被害軽減を目指し、あおり運転を自動検知し、あおり運転に遭い慌てているドライバーへ推奨される対処を提案する技術を開発した(図 56)。5.1.2.で記載した状況よりさらに後方車両が非常に接近した場合、ドライバーに警察への通報を音声やメーターで提案する。ドライバーにて通報が必要だと判断し承認操作をした場合に、自動的に通報するようにした。そうすることで、警察との通話によりあおり運転にまさに遭っている最中に遠隔で警察から対処を教えてもらうようにした。また、ドライブレコーダー(前後方)装着時には、常時記録に加えてイベント記録を実施。状況を自動録画し、専用記録領域へ保存されるので上書きされにくくなる。



図 56 周辺車両接近時サポート  
(録画機能, 通報提案機能)

### 5.1.4 セカンダリーコリジョンブレーキ(停車中後突対応)

後側方ミリ波レーダーで後方車両を検知し、自車が停車中に追突される可能性が非常に高いとシステムが判断すると、ブレーキを作動させる。その後追突された場合に自車の速度を減速し、玉突き衝突など二次衝突被害の回避・軽減に貢献する機能を開発した(図 57)。走行中に前突・側突された後にブレーキを作動させる従来のセカンダリーコリジョンブレーキに対して、後側方ミリ波レーダーを使用することで新たに後突に対応するとともに、衝突前からブレーキを作動させて、より早期での減速が可能となる。



図 57 セカンダリーコリジョンブレーキ  
(停車中後突対応)

## 5.2 ソーラーパネル

昨今の持続可能な社会の実現を目指す世界情勢のなか、トヨタは、2050年のカーボンニュートラル実現にむけて、2035年に新車走行CO<sub>2</sub>排出量50%低減を目指している<sup>(1)</sup>。この目標の実現のため、新型プリウスPHEVでは、日本、欧州、北米向けに、ソーラー充電システムを採用した。ソーラー充電システムは、太陽光エネルギーを車両のエネルギーとして利用することで、エミッション0・ランニングコスト0・ロケーションフリーの充電を

可能にし、日常利用だけでなく非常時の電源確保も可能である。本節では新型プリウス PHEV のソーラールーフ(図 58)について述べる。



図 58 新型プリウス PHEV のソーラールーフ<sup>(2)</sup>

ヘテロ接合バックコンタクト型太陽電池(以下、太陽電池セル)の採用に加えて、配線が見えにくい構成や部材の色味をそろえることで、先代とは異なり、一見すると太陽電池が内蔵されているとは思えない意匠性を持たせた。構成部材の色味をそろえたがゆえにわずかな色差が目立つため、仕入先様や社内関連部署も大勢巻き込んで外観品質基準にこだわり、結果として「一目惚れするデザイン」を実現するソーラールーフを作り上げることができた。

また、太陽電池セルをシングリング接続することで、限られた面積で効率的なセル配置を可能とした。その結果、先代 PHV と比べてルーフ面積は 10%縮小したが、単位面積あたりの出力を 15%向上させ、先代 PHV 以上の発電能力を確保することができた。名古屋での 1 年間の平均日射量データを用いた計算では、年間約 1,200km 走行分のエネルギーにあたる約 166kWh の発電が可能で、この電力を駆動用バッテリーに充電したり、補機バッテリーに給電したりすることで、走行中の CO<sub>2</sub> 排出量低減に貢献する。

### 5.3 予約設計

KINTO 専用グレードである U グレードでは、これまで新車契約時にしか選択できなかった機能・装備を、納車後でもお客様が欲しいと思ったタイミングで追加できる設計を織り込んでいる。従来ハードウェアの後付けはワイ

ヤハーネスの施工をともなうため膨大な作業時間がかかり、実現が難しいとされてきた。そこで今回は、将来的なハードウェアのアップグレードを想定し、納車後の後付けに必要な設計を予め織り込んでおく設計を開発した。電線の繋がり先の変更がともなう装備追加は、サービス性も考慮して容易に切り替えられるような構成を採用することにより、施工時間の大幅な削減を実現した。

## 6. むすび

5 代目プリウスは Hybrid Reborn をキーコンセプトとし、「一目惚れするデザイン」と、「虜にさせる走り」にこだわった愛車を目指し、One Team で作り上げた。仕入先・販売をはじめとする関係各位のご協力・ご尽力にこの場を借りて謝意を表す。

今後、一人でも多くのお客様の選択肢の一つになるように、そしてお客様にとっての愛車になれるように、この新しいプリウスを育て、CN 達成に向けて貢献していきたい。

### ■参考文献

- (1) トヨタ企業 HP ニュースルーム 新体制方針説明会 2023/04/07  
<https://global.toyota.jp/newsroom/corporate/39013179.html>
- (2) トヨタ企業 HP ニュースルーム 新型「プリウス」(PHEV)を発売 2023/3/1  
<https://global.toyota.jp/newsroom/toyota/38869540.html>

■著者

- 第1章 まえがき
- 第2章 開発の狙い
- 第6章 むすび



大矢 賢樹 仁田野 雅秀

Toyota Compact Car Company TCZ

第3章 一目惚れするデザイン



藤原 裕司

株式会社テクノアートリサーチ



廣川 学

Toyota Compact Car Company デザイン部



大場 豪

クルマ開発センター ビジョンデザイン部



谷口 弘輔

クルマ開発センター カラー&感性デザイン室



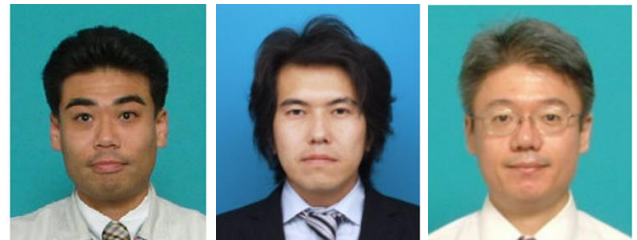
川那辺 翔

Toyota Compact Car Company TC ボデー設計部



松井 正樹

Lexus International Co. レクサスポデー設計部



天野 雅之

東 正之

伊藤 雅彦

Toyota Compact Car Company TC ボデー設計部



松村 恵典  
クルマ開発センター 製品化製造技術部



井辻 隆志  
Toyota Compact Car Company TC シャシー設計部



山本 貴広  
Mid-size Vehicle Company MS 車両設計部



藤田 浩徳  
クルマ開発センター 第1シャシー開発部

第4章 虜にさせる走り



大和 克行



高山 敏明



中原 紳



伊藤 選  
クルマ開発センター 第2シャシー開発部



真崎 浩  
Toyota Compact Car Company TC 車両性能開発部



菊地 隆二  
クルマ開発センター パワートレーン製品企画部



阿部 友昭



橋元 慶太

第5章 愛車にするために



菅本 周作  
クルマ開発センター 自動運転技術開発部



濱口 剛  
クルマ開発センター 自動運転技術開発部



中堂 敬司  
クルマ開発センター 制御電子プラットフォーム開発部



仁井 滉允  
Mid-size Vehicle Company MS 車両設計部



小原 崇弘  
クルマ開発センター 先進安全技術開発部



# 住宅用定置型蓄電池「おうち給電システム」の開発

田中 夏樹 \*1

久保 和樹 \*1

内山 敏夫 \*1

江幡 和夫 \*1

## 要旨

トヨタでは電動車開発で培った電池技術と、車載部品・ユニットを活用することで、世の中の役に立つ商品やサービスの提供を進めている。

その活動の一環として、近年頻発している自然災害による大規模かつ長時間の停電や、世界的な情勢不安を発端としたエネルギー危機に直面している状況に着目し、お客様に安心・安全かつ、カーボンニュートラルな暮らしを提供することを目指し、住宅用定置蓄電池システム「おうち給電システム」を開発した。

ここでは「おうち給電システム」の開発経緯や特徴について紹介を行う。

キーワード 住宅用定置型蓄電池, 電動車技術の活用, カーボンニュートラル, レジリエンス

## 1. はじめに

トヨタは、革新的で安心・安全かつ高品質なモノづくりやサービスの提供をつうじて「幸せの量産」に取り組んでいる。

そのようななか、電動車の開発で培った電池技術と、車載部品やユニットを活用し、トヨタ初となる住宅用蓄電池「おうち給電システム」を開発した。平時は太陽光発電による再生可能エネルギーの利用を促進し、災害停電時は家全体に電力を供給することで、安心＆スマートな暮らしを提供する。本稿ではこの「おうち給電システム」が備える、性能や特徴について解説する。

## 2. 開発のきっかけ

2019年9月、伊豆諸島や関東地方南部に猛烈な風雨をもたらした台風15号では、千葉県を中心に最大93万戸が停電した。復旧にかかった時間は280時間、日数にして12日間にも及んでいる。

非常時にトヨタにできることは何か、社会インフラとなったクルマに求められることは何か、クルマづくりで培ったノウハウで世の中に貢献できることはないかなど、こ

の年に相次いだような自然災害をきっかけに、安心できる暮らしを社会に提供できないか検討を始めた。

また、ちょうどこの頃2009年から始まった再エネによる発電電力を電力会社が一定価格で10年間買い取る「固定価格買取(FIT)制度」の契約が満了し、買取価格の低下に伴う収入減が社会の話題となった。

このような背景のもと「トヨタが培ってきた安心・安全な電池技術を活用し世の中に貢献しよう」という方針を受け、住宅用蓄電池の開発がスタートした(図1)。



図1 おうち給電システム設置イメージ

\*1 CN 先行開発センター CN 開発部

### 3. 開発コンセプト

住宅用蓄電池の開発にあたっては、蓄電池導入の目的である「経済的かつカーボンニュートラルな暮らしの実現」と「災害停電への備え」を両立すべく、3つのコンセプトを掲げた上で織り込むアイテムを具体化し、開発に取り組んだ。

- ① 太陽光発電と夜間電力の併用による蓄電池導入効果の最大化 → 1日2サイクル(6.1節)
- ② 長期停電に備えた電力の確保 → 電動車からの給電(6.2節)
- ③ 自然災害に耐えるタフネス → 防水性、頑丈性(6.3節, 6.4節)

また、達成にあたっては電動車開発で培った技術を惜しみなく投入した。

### 4. 車載部品の活用

「おうち給電システム」の蓄電池には RAV4 PHEV やプリウス PHEV に搭載している信頼性の高い大容量リチウムイオン電池を採用した(図2)。



図2 リチウムイオン電池の活用イメージ

お客様に安心して使っていただけるよう、長年にわたる電動車の開発で培った「安全・長寿命・高品質・良品廉価・高性能」のコンセプトで開発した電池をはじめとして、電力の制御を行う ECU(Electronic Control Unit)

やリレー(継電器)などの重要部品も、自動車用のものの制御を最適化して使うなど、部品の半分は車載部品を活用した(図3)。

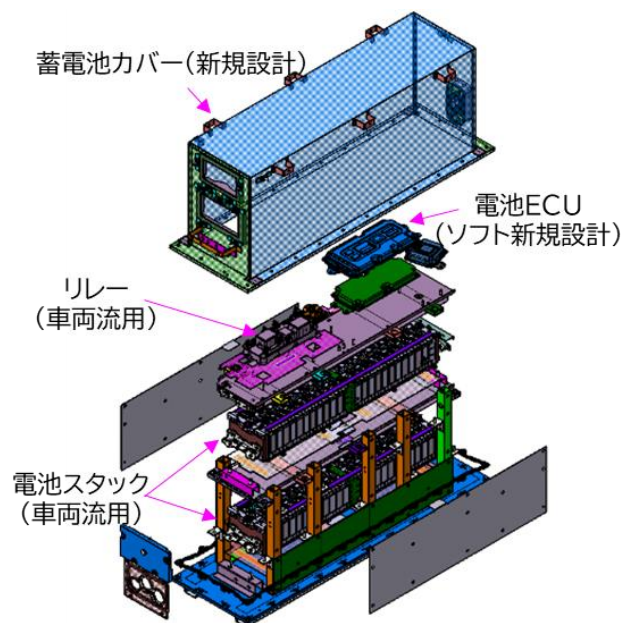


図3 車載部品の活用事例

### 5. システム概要

#### 5.1 システム構成

運搬時の重量や設置の自由度を考慮した結果、「おうち給電システム」は4つのユニット構成とした(図4)。

- ① 電気を蓄える「蓄電池ユニット」
- ② 直流で電圧を変換する「DCDC コンバータ」
- ③ 蓄電池と太陽光パネルの両方を直流で入力し住宅で使用する交流に変換する「ハイブリッドパワーコンディショナ」
- ④ 非常時に電動車(HEV, PHEV, BEV, FCEV)から住宅への給電を可能にする「車両給電アダプタ」と「車両接続ケーブル」

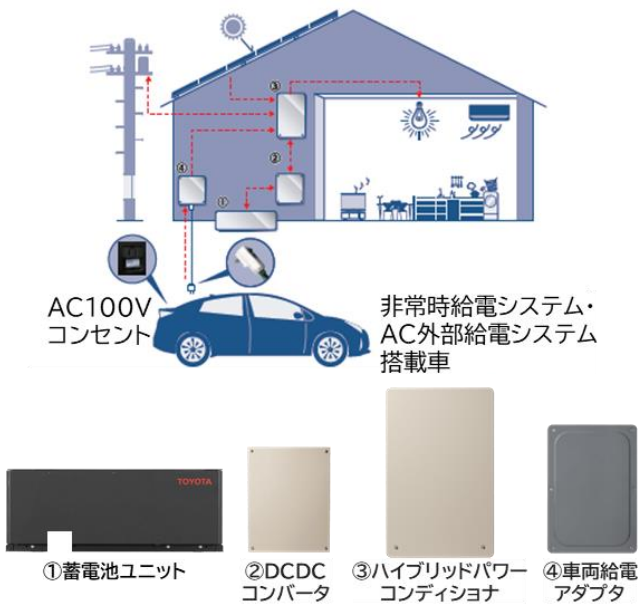


図4 おうち給電システムの構成とシステム概要

## 5.2 システム諸元

最大出力は一般家庭の契約電力が 50A(すなわち出力 5kW)以下で 90%程度をカバーしていることから、日常使用で不自由なく生活いただくために 5.5kW とした(表1)。

また、全負荷型とすることで、停電時には蓄電池でおうちのすべての電気をカバー。荷蓄電容量は停電時に最低限使用したい冷蔵庫や照明などの機器を 1 日以上作動できる容量を確保した。

表1 おうち給電システム諸元

諸元表	
定格容量	8.7kWh
最大出力	5.5kW
動作温度	-20~+45℃ ※自立運転および車両給電アダプタは-20~+40℃
車両からの給電	1.1kW
太陽光入力電力	5.5kW
蓄電池重量	142kg
全負荷型	

## 6. システムの特徴

### 6.1 1日2サイクル

一般的な蓄電池は 1 日 1 サイクルの製品が多いなかで、「おうち給電システム」は車載電池の信頼性とトヨタが培った制御技術により 1 日 2 サイクルを実現した。

これにより 1 日 2 回、割安な深夜電力と太陽光発電で充電を行なうことが可能になり、早朝と夜の発電量の少ない 2 つの時間帯をカバーできるため、電気代の節約に貢献している(スマートモード設定時)(図5)。



図5 1日2サイクル運用のイメージ

### 6.2 電動車からの給電

停電時の備えとなる蓄電池だが、大規模災害などによる長時間の停電では蓄電電力を使い果たしてしまう心配がある。

さらなる安心として「おうち給電システム」では車両給電アダプタを標準装備とした。車両接続ケーブルをトヨタの電動車(HEV, PHEV, BEV, FCEV)に装備されている 100V コンセントに接続することで、家全体に最大 1.1kW の電力を供給可能にした(図6)。

プリウス(HEV)を例に挙げた場合、車両から 5.0 日の電力供給が蓄電池に加えて使用できるため、一層の安心・安全に寄与している。



図6 「おうち給電システム」車両側接続イメージ

### 6.3 防水性

災害時に頼るべき蓄電池が、その災害によってダメージを負い、故障してはならないという想いから、高い防水性を持たせた。

車載電池パックと同じシールゴム構造を採用し蓄電池を完全な密閉構造とすることで、IP67 相当の防水性を確保している。

### 6.4 頑丈性

防水性と同様に災害時を想定し、外力に耐えられる構造とした。

台風からの飛来物の衝突、地震振動、地震倒壊物による圧力、落雪などを想定した住宅用蓄電池に対する社内基準を新たに設定した。一例として台風飛来物からの側面方向への外力に耐えられるように鋼板を追加している(図7)。

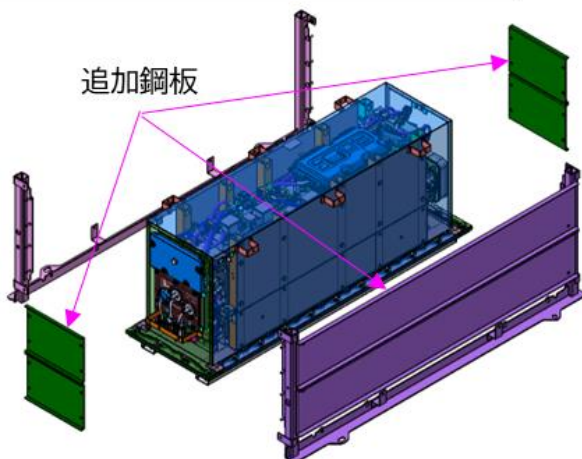


図7 台風飛来物への対応(追加鋼板)

### 6.5 安全性

車載部品に求められる安全性を確保したうえで、住宅用蓄電池として求められるさまざまな追加要件にも対応。一例として以下の JIS 規格を満足している。

JIS C 4412: 低圧蓄電システムの安全要求事項

JIS C 8715: 産業用リチウム 2 次電池の単電池及び電池システム

その結果、第三者機関である JET 一般財団法人 電気安全環境研究所の認証を取得しており、お客様には安心・安全にご使用いただける。

開発にあたっては、さらなる安全性まで追求。

電池パック内部で過剰な熱が発生した場合でも、外部の部品に影響しないよう遮熱・断熱構造を採用。ここにも電動車開発で培った電池技術と車載部品が活用されている。

### 6.6 スマホ連携操作

多くの家電がスマホのアプリで操作できる時代にあわせ、「おうち給電システム」でも専用アプリを開発した。宅内の無線 LAN ルーターを介してパワーコンディショナと通信することで、電気の流れや電力量の履歴などを確認可能とした。また、スマホからの操作により運転モードおよび各種パラメータの設定もできるようにした(図8)。

表示画面のデザインはユーザの声を聞き、他社製品も徹底的にベンチマークしながら、見やすく、直感的な使用感が得られるよう、細部にもこだわった。



設定	特徴	おすすめの方
ノーマルモード	太陽光発電の自家消費減売電量を増加	FIT中 夜間電力単価安い
省エネモード	太陽光発電の自家消費増買電量を抑える	卒FIT 従量電灯プラン
スマートモード	電力を夜間電力と太陽光で充電	卒FIT 夜間電力単価安い
蓄電モード	電池を常に満充電 停電時に給電	停電時に 電力十分使いたい

図8 専用アプリ画面イメージと運転モード

## 7. おわりに

カーボンニュートラル社会の実現と災害時の安心安全を担保するため車両技術を横展した、トヨタ初となる住宅用定置型蓄電池「おうち給電システム」を開発した。車両技術の住宅用定置型蓄電池への横展のため、車両開

発と住宅用定置型蓄電池開発の変化点に着目し、開発に取り組んだ。

今後、市場の声をフィードバックした次モデルの開発を行い、安心安全なカーボンニュートラル社会実現に貢献していきたい。

#### ■参考文献

- (1) 佐藤 健志朗. ”トヨタがつくる住宅用蓄電池!? 可能性を秘めた新事業を取材”. トヨタタイムズ. 2022-9-12.

<https://toyotatimes.jp/toyota news/1005.html>

#### ■著者



田中 夏樹



久保 和樹



内山 敏夫



江幡 和夫

# カーボンニュートラル燃料

久野 央志 \*1

信川 健 \*2

福井 裕幸 \*3

横尾 望 \*1

中田 浩一 \*1

## 要旨

カーボンニュートラルの達成には、マルチパスウェイで多様な選択肢を追求することが重要である。トヨタは HEV, PHEV, BEV, FCEV, 水素エンジンの推進とともに、エネルギー産業と連携し技術開発しながらカーボンニュートラル燃料の普及に向けて取り組んでいる。

本稿では保有車の CO<sub>2</sub> 削減にも繋がるカーボンニュートラル燃料の種類や政策、動向に触れながら、トヨタの取り組みを解説する。

キーワード e-fuel, 合成燃料, カーボンインテンシティ, バイオ燃料, バイオエタノール, バイオ軽油

## 1. はじめに

カーボンニュートラル燃料や e-fuel, バイオ燃料などの言葉を新聞やニュースなどで見聞きする頻度が増えてきている。日本においてカーボンニュートラル燃料という言葉が広く認知されたのは、2021 年 4 月 22 日に自動車技術工業会 豊田会長の記者会見と思われる。この会見のなかで、会長よりカーボンニュートラルの方針が示され、カーボンニュートラルの本質を正しく理解するために、日本の強みである「高効率エンジン+モーターの複合技術」と「カーボンニュートラル燃料」を組み合わせることで、大幅な CO<sub>2</sub> 低減という全く新しい世界が見えてくる、と説明された<sup>(1)</sup>。

カーボンニュートラル燃料の定義に関しては、欧州委員会が以下のように定義している(注:この記述は、本稿の執筆時点では欧州委員会からはドラフトとして公表されている)。

CO<sub>2</sub>-neutral fuels are defined as fuels, including biofuel, biogas, biomass fuel, Renewable liquid and gaseous transport Fuel of Non Biological Origin (RFNBO) or a Recycled Carbon Fuel (RCF), that emit only biogenic CO<sub>2</sub> or recycled CO<sub>2</sub> when burned, resulting in circular CO<sub>2</sub> emissions and a net-zero impact on the climate. This definition is already in

line with the REDII, indicating that all fuels listed in the directive should be considered as CO<sub>2</sub>-neutral fuels. <sup>(2)</sup>

要約すると、カーボンニュートラル燃料とは e-fuel と呼ばれる合成燃料やバイオ燃料であり、燃焼時にバイオ由来の CO<sub>2</sub> または回収した CO<sub>2</sub> のみを排出するため、気候への影響がネットゼロとなると明記されている。

本稿では、カーボンニュートラル燃料に関する政策、各国動向、車両への影響などを紹介する。

## 2. CN 燃料の種類と効果

### 2.1 合成燃料とは

合成燃料のなかでも、再生エネルギーにより製造された水素と、回収された CO<sub>2</sub> を反応させて炭化水素化した燃料を、一般名称として e-fuel と呼ぶことが多い。代表的なプロセスとしては、①太陽光発電や風力発電による再生可能エネルギーを用いて水を電気分解し、水素を製造する。②バイオマスの燃焼や発酵で発生する CO<sub>2</sub> や大気から直接回収(DAC: Direct Air Capture)した CO<sub>2</sub> を用いる他に、産業活動由来(例えば、化学プロセスやセメント、製鉄など)CO<sub>2</sub> を用いても良いが、LC-GHG(ライフサイクル温室効果ガス)排出量を 70% 以上削減することが求められる<sup>(3)</sup>。③回収された CO<sub>2</sub> と水素をフィッシャー・トロプシュ反応により炭化水素を合成し、ガソリンを分留する。

e-fuel はエンジンで燃焼しても排出されるのは大気

\*1 CN 先行開発センター CN 開発部

\*2 先進技術開発カンパニー 電動化・環境材料技術部

\*3 CN 先行開発センター 環境エンジニアリング部

から回収された CO<sub>2</sub> であるため、CO<sub>2</sub> は増加しない。また、燃料性状もガソリンと同様に調製することができるため、現在市場にある車両にもそのまま使用することができ、油槽所やガソリンスタンドなどの給油に必要な従来のインフラがそのまま使える利点がある。エネルギーをつくる、はこぶ、ためる、つかうことが容易で、CO<sub>2</sub> の排出も抑制できる(図 1)。

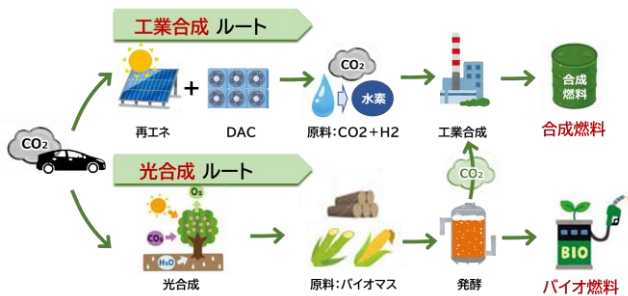


図 1 カーボンニュートラル燃料のライフサイクル

## 2.2 バイオ燃料とは

バイオ燃料は、植物から作られるエタノールや、動植物の油脂を原料に合成した燃料成分である。

その製造過程により大きく4種類に分類される(図 2)。

- ① バイオエタノール: サトウキビやトウモロコシを原料とし、発酵、蒸留を経て製造される。多くの国ではガソリンに10%程度混合(E10 燃料)して使用される。オクタン価の向上や排ガス中のPN(粒子数)減少効果がある。
- ② バイオ由来ガソリン: バイオエタノールを工業的に変換し、エタノールからガソリンの合成(EtG)や、ETBE(エチルターシャリブチルーエーテル)等がある。
- ③ FAME(脂肪酸メチルエステル): パームや菜種、大豆からとれる植物性油脂や、動物からとれる獣脂を原料として製造される。軽油に混合して使用され、パーム由来のFAMEを30%混合したB30燃料や、大豆由来のFAMEを7%混合したB7燃料として使用される。
- ④ HVO(水素化植物油): パーム油等に含まれる脂肪酸成分や廃食油を水素化することで製造され、軽油代替燃料として使用される。廃食油を原料とするものは、CO<sub>2</sub> 排出が低い燃料として注目される。

バイオ燃料は、リニューアブルなバイオ資源を利用することから、自動車の CO<sub>2</sub> 排出削減手段として有効である。ただし、食料への影響や農地開拓による森林環境への影響が指摘されており、持続的な供給可能性について配慮することが必要である。

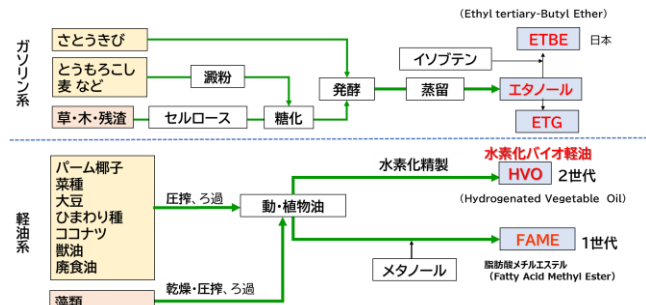


図 2 各種バイオ燃料の製造パス

## 2.3 カーボンインテンシティ(CI)

燃料燃焼における CO<sub>2</sub> 排出量や製造時に発生する GHG 排出量(ライフサイクル GHG)を、燃料の燃焼による発熱量で除した値であり、単位として g-CO<sub>2</sub>eq/MJ (メガジュール当りの CO<sub>2</sub> 発生等量)などが用いられる。バイオ燃料の燃焼時に発生する CO<sub>2</sub> 量は、植物が大気から吸収したものを由来としているためカウントされず、バイオ燃料のカーボンインテンシティは製造、輸送時に発生する CO<sub>2</sub> で評価される。

米国においては、連邦 EPA の Renewable Fuel Standard や加州 ARB の Low Carbon Fuel Standard(LCFS)で規定しており、LCFS では燃料生産者ごとに、生産するバイオ燃料の CI 値を認証している<sup>(4)</sup>。

日本においては、エネルギー供給構造高度化法に関連し、「LCGHG 排出量の規定値の考え方<sup>(5)</sup>」が 2023 年 4 月に見直されており、揮発油(ガソリン)が 88.74g-CO<sub>2</sub>eq/MJ に対し、アメリカ産トウモロコシ由来のエタノールの GHG 排出量は 36.86(ガソリン比△58%)、ブラジル産サトウキビ由来のエタノールは 28.59(同△68%)とされている。なお、今回の見直しにより、それぞれ 15%削減されている。

アメリカ産トウモロコシ由来エタノールでは LCA の専門家等へのヒヤリングや GREET2022(米国アルゴンヌ国立研究所)の最新データを踏まえ、GHG 排出量が見

直された。原料栽培時の施肥や機械エネルギー利用、原料輸送、エタノール製造時のエネルギー消費、エタノール輸送時の排出量等を見直し、電化、肥料、化学物質のGHG 排出量の減少、国際輸送時の燃費向上などが排出量低減につながったとしている。

## 2.4 バイオ燃料と合成燃料の連産プロジェクト

2022年7月にENEOS株式会社、スズキ株式会社、株式会社SUBARU、ダイハツ工業株式会社、トヨタ自動車株式会社、豊田通商株式会社の6社で、燃料を「つくる」プロセスでの効率化を研究するため、「次世代グリーンCO<sub>2</sub>燃料技術研究組合」を設立した。2023年3月にはマツダ株式会社も加わり、現時点では7社が参加している<sup>(6)(7)</sup>。

本技術組合では、①エタノールの効率的な生産システムの研究 ②副生酸素とCO<sub>2</sub>の回収・活用の研究 ③燃料活用を含めたシステム全体の効率的な運用方法の研究 ④効率的な原料作物栽培方法の研究を4つの研究領域として設定し、バイオマスの利用、生産時の水素・酸素・CO<sub>2</sub>を最適に循環させて効率的に自動車用バイオエタノール燃料を製造する技術研究を進めている。さらに、エタノール発酵時に生成するCO<sub>2</sub>を回収し、グリーンCO<sub>2</sub>として合成燃料の原料としての活用を目指している(図3)。

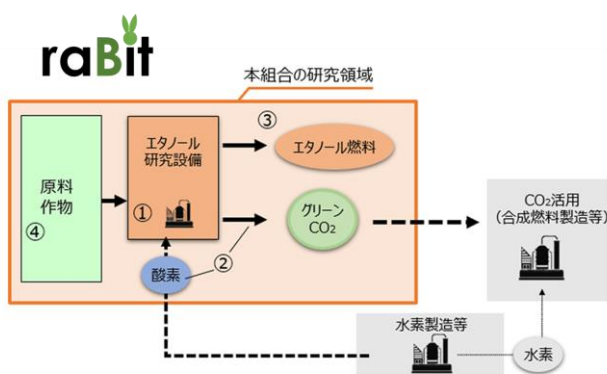


図3 raBitの研究領域

原料作物栽培では、最終的に食料との競合を避けた植物を対象としているが、2022年は試験的に福島においてさまざまな品種のソルガムを栽培した。図4は5月15日に播種し、約3か月後の8月1日に撮影したもの

であるが、4mを超える品種も見られた。10月には5m超まで成長した。今後、より効率的なバイオマス増産に向けて品種改良や耕法改良を行う予定である。



図4 福島におけるソルガム栽培

## 3. 合成燃料

### 3.1 政策

2023年5月に広島で開催されたG7のコミュニケにおいて、2050年までの道路部門のネットゼロ実現手段として、ZEVの導入拡大とともに、「持続可能なバイオ燃料や合成燃料を含むカーボンニュートラル燃料を促進する」との文言が記載され、合成燃料が保有車両の脱炭素化の手段となることが示されている。

#### 3.1.1 日本

日本では経済産業省が2023年5月に開催した「合成燃料(e-fuel)の導入促進に向けた官民協議会」において、これまでのe-fuel導入に向けたロードマップの改定案を提示した。ここでは、当初2040年までとしていたe-fuel商用化の目標時期を前倒しし、2030年代前半までの商用化を目指すとした。この実現のため、2025年にベンチプラント、2028年にパイロットプラントによる実証検討を行い、2035年以降には日量1万バレルを目指す工程表を示している。

e-fuelの実用化に向けては、ENEOSが2023年5月に車両の走行デモンストレーションを実施している。会見では「低炭素ガソリンは2027年頃からの供給開始を目標としているが、前倒しできれば」との発言があり、国内での導入が期待される<sup>(8)</sup>。



### 3.1.2 欧州

EU では 2030 年における輸送部門に供給されるエネルギーの 5.5%を先進バイオ燃料とし、うち最低 1%は非バイオ由来の再生可能燃料(RFNBO)とする目標を掲げている。RFNBO には e-fuel のほか、グリーン水素、アンモニア、e-メタンなどが含まれる。

また、2035 年以降の新車販売を ZEV に限定する規制議論の最終局面において、ドイツの反対により e-fuel のみで走行する内燃機関車に限り 2035 年以降も販売が認められることになった。ただし、どう e-fuel のみを専用車に給油するか、e-fuel は十分に供給されるのか等の問題を解決する必要がある。

### 3.1.3 米国

米国では合成燃料導入に関する政策はないものの、合成燃料の材料となる水素利用拡大に向けたプロジェクトが立ち上がっている。

トヨタは米国石油メジャーの ExxonMobil および Chevron<sup>(9)</sup>と実質的な CO<sub>2</sub> 削減量がそれぞれ最大 75%および 40%の低炭素ガソリンを用いた走行デモンストレーションを実施した(図 5)。実施にあたり、両社の低炭素ガソリンを用いた排ガスや走行性能を評価し、従来のガソリンと同等の性能を示す事を確認している。



図 5 Chevron と Toyota の  
走行デモンストレーション

## 3.2 製造方法

前述のとおり、合成燃料は再生可能エネルギーにより合成された水素と CO<sub>2</sub> から合成される燃料である。以前から開発されている天然ガスや石炭を燃料化するプロセスと互換性があることから、自動車用途としては、既

に商用化の実績があるフィッシャー・トロプシュ(FT)合成やメタノール経由でガソリンに転換させるプロセス(MTG: Methanol to Gasoline)を用いた研究開発や実証が進められている。FT 合成では幅広い分子数の炭化水素燃料が合成されるため、ガソリン留分だけではなく、航空、船舶や大型車両(軽油)の燃料が同時に作られることが特徴的である。一方で、MTGの主な生成物はガソリンであるが、経由するメタノールは化成品の原料であることが特徴的である。

### 3.2.1 FT 合成

FT 合成は、合成ガス(水素と CO の混合ガス)を原料として、軽質オレフィンから重質ワックスまでの幅広い分布を持った炭化水素を合成する反応である。生成される炭化水素は、連鎖成長確率によって変化する Schulz-Flory 分布と呼ばれる炭素分布を持つことが知られている。合成ガスは、石炭や天然ガス、バイオマスなどからも合成することができ、特に、石炭や天然ガスを原料とした FT 合成については、既に大規模な商用化が行われている<sup>(10)</sup>。また国内でも、2006 年~2012 年に日本 GTL 技術研究組合による小規模天然ガス田の活用を目的とした GTL 技術の開発を実施している。

FT 合成燃料粗油の主成分は、パラフィン、オレフィン、アルコールになるため、ガソリンや軽油として利用する場合は水素化処理や異性化処理を行いアップグレードすることが必要となるが、このプロセスは既存の石油精製設備を活用することが可能であり、得られる製品も、従来の石油由来のガソリンや軽油と同等となる。

合成燃料の普及促進には、再生可能エネルギーを効率的に利用するためにマイクロリアクターのような小型化反応器、水と CO<sub>2</sub> から直接合成ガスを生成する共電解技術、水素と CO<sub>2</sub> から合成ガスを経ずに直接 FT 合成をする触媒の開発などの技術革新が重要である。

### 3.2.2 MTG

MTG プロセスは、メタノールを DME(ジメチルエーテル)に脱水縮合した後に、C2-C4 オレフィンを経て、芳香族炭化水素(アロマ)やパラフィンを生成する反応である<sup>(11)</sup>。生成される炭化水素は、主にガソリン製品である。FT 合成と同様に石炭や天然ガスを原料としたプロセス

については、既に商用化されている。ExxonMobil は 1985 年から 1995 年の 10 年間、ニュージーランドにおいて商用生産した。現在では中国において Jincheng Anthracite Mining Group (JAMG) が 15000BPD の MTG 生産している<sup>(12)</sup>。

MTG により得られたガソリンはアロマやオレフィンを多く含み、既にレギュラーガソリン相当のオクタン価を有することから、アップグレードせずに利用することが可能である。

### 3.2.3 コスト

合成燃料の製造には、多くのグリーン水素を必要とするため、燃料価格は再生可能エネルギー価格の影響を大きく受ける。経産省の試算によると、その燃料価格は 300 円～700 円/L と試算されており、今後実証検討などをとおしてその値が精査されることが考えられる<sup>(13)</sup>。

### 3.2.4 代表的なプロジェクト

合成燃料の可能性を初めて実証したプロジェクトは、Audi の e-fuel のプロジェクトである。Audi は、風力発電や太陽光発電で合成した水素とバイオガス工場や農業廃棄物から回収した CO<sub>2</sub> に CNG(2013 年～)や軽油(2017 年～)を合成して市場導入の実証検討を行った<sup>(14)</sup>。近年では、ポルシェが再生可能エネルギーの豊富なチリにおいてガソリンを合成する実証検討を開始している。

国内では、ENEOS 社による CO<sub>2</sub> からの合成燃料製造技術開発が、NEDO のグリーンイノベーション基金事業に採択されて、実証試験に取り組んでいる<sup>(15)</sup>。

## 3.3 車両・エンジン適合

前述のとおり、合成燃料の技術である FT 合成や MTG は既に商用化が行われており、これらを原料としたガソリンや軽油は、すでに市場で利用されている。そのため、各国の燃料規格に準じた性状、品質が維持されており、特別な車両・エンジン適合を必要としない。

一例として、さまざまな再生可能燃料から調整された低炭素ガソリンについて、エンジンと車両による評価を行った。その結果、エンジン燃焼や車両エミッションに大きな影響はなく、保有車を含めた将来の CO<sub>2</sub> 低減に貢

献できる可能性を確認した<sup>(16)</sup>。

合成燃料の研究開発においては、原油と比較して比較的少ない種類の炭化水素で合成されることや、硫黄などの成分を含まないことなどを活用した、より低エミッションな燃料設計についての検討も実施されている<sup>(17)</sup>。

## 4. バイオ燃料

### 4.1 エタノール

#### 4.1.1 車両・エンジン適合

バイオエタノールは、ガソリンに一定程度混合することで使用される。現行のガソリン規格では多くの国が 10% を上限としているが、化石燃料への依存度を下げするために高濃度化が進められており、原料作物の栽培技術の向上、エタノール製造技術の効率化、セルロース系エタノール製造の低コスト化などの技術進歩が求められている。

エタノール混合による車両・エンジン適合のポイントは主に 3 つに分類され、①材料適合性 ②排気適合 ③NV などのドライバビリティ である。材料適合性では、燃料が直接接触するデリバリーパイプや燃料ホース、インジェクタ等の燃料系部品に用いる材料や表面処理の適合性を確認する必要がある。図 6 にゴム材料の膨潤特性を示す。エタノール濃度が 20～30% の領域は各種ゴム材料の体積変化が大きいいため、適切な材料選択が必要となる。また、E20 付近は燃料の酸化安定性が低く、金属部品への腐食にも注意が必要である。

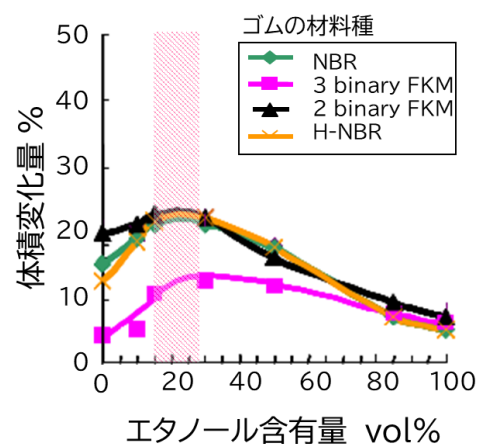


図 6 ゴムの膨潤特性

エタノールはオクタン価が高いため、ガソリンのオクタン価向上による燃費向上に寄与し、結果的に CO<sub>2</sub> 排出低減に貢献する。また、エタノールは酸素原子を含む化合物のため、炭化水素や一酸化炭素、PN を抑制する効果もある。

エタノール自給率が高い国では、国産エタノール活用による原油輸入量削減や GHG 排出量削減を目的として、E85 や E100 といった高濃度エタノール燃料が販売され、この燃料に対応する Flex Fuel Vehicle (FFV) が導入されている。FFV では通常のガソリンに比べ揮発性が低いエタノールを用いるため、エタノールを気化するためのヒーター追加や、金属系部品の腐食を抑制するための表面処理など、必要な対応が図られている(図 7)。

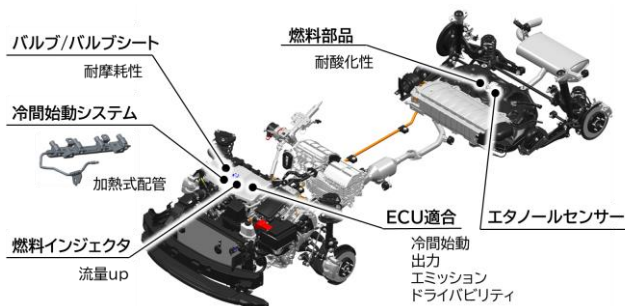


図 7 FFV の主な部品変更箇所

#### 4.1.2 米国

グローバルのエタノール生産量は約 1 億 kL であるが、約半分の 5,700 万 kL を米国が生産している。米国は 2005 年の Renewable Fuel Standard in Energy Policy Act 2005 のエネルギー政策により、エタノールを増産し、2004 年の 1,420 万 kL から 2010 年には 5,140 万 kL へ 5 年で 3 倍まで増やした。その後、徐々に増えたものの 2018 年の 6,240 万 kL をピークに 6,000 万 kL 前後で推移している。

2010 年より 50 州で E10 燃料が販売されてきたが、近年のガソリン高の影響を受け、2022 年より E15 燃料の夏季販売も許可された。米国では E85 FFV の登録モデル数が 2014 年の 90 モデルをピークに、2019 年は 40 モデル、2022 年は 17 モデルと減少している。トヨタはタンドラやセコイヤの E85-FFV を導入してきたが、2019 年以降、北米で FFV を販売していない。

#### 4.1.3 ブラジル

さとうきびを原料としたエタノールを政策的に増やしており、米国に次いで世界 2 位のバイオエタノール生産・消費国である。2009 年にはサトウキビアグロエコロジカルゾーニング政策によって、アマゾン地域やパラグアイ側周辺に環境制限地域を設けながらも、さとうきびの最適耕作地を設定して増産してきた。RenovaBio 政策により 2021 年に 2,620 万 kL のエタノール生産量を 2030 年に約 2 倍の 5,000 万 kL への増産を計画している。ブラジルは豊富なエタノールを活用し、エタノールとガソリンの両方で走れる FFV の販売を推奨しており、現在ブラジルでは E100 車がすべての自動車メーカーの標準となっている。トヨタでもエタノールを使用した Well to Wheel (WtW) での CO<sub>2</sub> 削減に取り組んでおり、2019 年から導入したカローラ HEV-FFV で、ICE-ガソリン車 E0 に比べ約 80% の CO<sub>2</sub> 排出削減を達成している(図 8)。

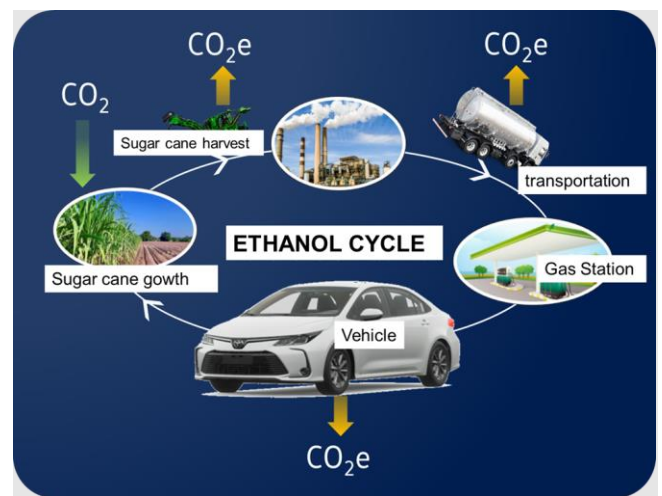


図 8. WtW での CO<sub>2</sub> 削減の仕組み

#### 4.1.4 欧州

欧州は、米国、ブラジル、中国に次いで世界第 4 位のバイオエタノール生産・消費地域である。2020 年に改定された再生可能エネルギー指令 (RED II) では Renewable Fuel が義務付けられており、2030 年までに 14% を再生可能エネルギーで供給する目標が定められている。欧州のなかではフランスにおけるエタノール生産が活発であり、E85 燃料を通常のガソリンの半額で売っていることから FFV のニーズが高まってきている。

また、CI についても欧州の約 85%の生産シェアを持つ生産者組合 ePure では、様々な CO<sub>2</sub> 削減策を講じており、2022 年には化石燃料比平均▲78.4%削減を達成した<sup>(18)</sup>(図 9)。

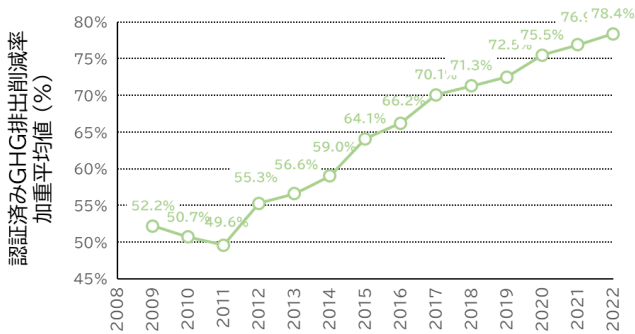


図 9. エタノールの GHG 削減推移

#### 4.1.5 タイ

タイは、原油輸入増大の解消を狙い、エタノールやバイオ軽油の導入を積極的に進めてきた。自国で生産するサトウキビやキャッサバ、パーム油を原料として、生産した燃料をほぼすべて自国で消費している。原油価格の変動に応じて、バイオ燃料の混合比率を変更するため、非常に多くの燃料種が販売されている。アジア地域では初めて E85 の FFV を導入し、税制優遇もあって FFV 車両が普及した。しかしながら、近年はバイオエタノールの価格高騰、補助金負担の拡大などの理由で E85 燃料のユーザーメリットがなくなってきたことから、E85 を廃止して E20 を主要燃料とする政策を打ち出している。

#### 4.1.6 インド

モディ首相はエネルギー安全保障と低炭素社会の両立を達成するために、「Roadmap for Ethanol Blending in India 2020-25」<sup>(19)</sup>を 2021 年 6 月に発表した。インドでは 2003 年より E5 燃料を市場導入し、地域により E5～E10 が普及。ガソリンに対する平均ブレンド濃度は 2014 年の 1.53%から 2021 年には 8.5%(約 700 万 kL)まで拡大した。2023 年 4 月から E20 を導入し、2025 年から全土 E20 供給を目指し、2021 年の約 2 倍となる 1,350 万 kL を計画している。原料はサトウキビとトウモロコシの半分を見込んでいるが、セルロースエタノールプラントも政府の支援を

受けて 12 プロジェクトが進行中である。これら政策は、新規就業機会の増加や農村部の収入増加、未利用バイオマスの利用拡大(野焼きによる大気汚染防止)などの付随効果が見込まれる。

さらなる高濃度化に向け、ガソリンステーションのタンクなどインフラ産業への導入影響などに配慮しながらも、自動車産業には E20～E100 まで対応できる FFV 車の開発・導入を促しており、トヨタは Flexi-Fuel Strong Hybrid Electric Vehicles(FFV-SHEV)のパイロットプロジェクト(図 10)を開始した<sup>(20)</sup>。



図 10 インドにおける FFV-SHEV のパイロットプロジェクト

#### 4.1.7 インドネシア

インドネシアはパーム油生産量が世界第 1 位であり、輸出の他、自国でもバイオディーゼル燃料として活用している。これに対し、バイオエタノールは E10 実施を目指していたが、エタノール価格や供給量の問題により実現していない。しかしながら、政府のカーボンニュートラル戦略<sup>(21)</sup>を受けて、2022 年に「バイオエタノール導入の戦略的ロードマップ」がエネルギー・鉱物資源省より発表され、一部地域で E5 燃料の実証実験を開始することが発表された。

#### 4.1.8 日本

日本では、バイオエタノールの混合率が 3%までの燃料は通常ガソリンとして使用が可能である。バイオエタノールは 2007 年から導入が試験的に始まり、2020 年には燃料用バイオエタノール輸入量は約 50 万 kL(原油換算)で、そのうち約 90%が ETBE へ変換されて使用

されている。ETBE は水を吸収しにくいいためガソリンの品質維持に優れる一方、製造時に化石燃料由来のイソブテンを使用するため CO<sub>2</sub> 排出削減が限定的となる。E10 までの直接混合も認められているため、バイオエタノールの利用拡大に向けて今後拡大していくと予想される。2023 年 4 月には、エネルギー供給構造高度化法第 3 次公示が施行され、2023 年から 5 年間バイオエタノールを 50 万 kL/年(原油換算)導入する目標が維持されたが、GHG 排出量の規定値が見直され、バイオエタノールの利用拡大に向けた環境整備の在り方を検討する方針が示された。

## 4.2 バイオ軽油, Renewable Diesel

### 4.2.1 車両・エンジン適合

一般に FAME(脂肪酸メチルエステル)を軽油と一定割合で混合したバイオ軽油を用いる場合、軽油に比べてエンジンから排出されるススや HC, CO 排出量は減少する傾向にある。一方、燃料中に含まれる酸素分の影響により NO<sub>x</sub> 排出は増加するため、排ガス規制への適合やデバイスの組み合わせが必要となる。現在はインドネシアの B35 が最も高濃度で使用されている。水素化処理を施した HVO(水素化植物油)は Renewable Diesel と呼ばれ、酸素分が除去されており燃焼もクリーンとなるため、100%の濃度で使用が可能である。

### 4.2.2 FAME

FAME は、原料により大きく 3 種類あり、インドネシア、マレーシアで多く生産されるパーム油由来のもの、ブラジルなど南米で多く生産される大豆油由来のもの、欧州で生産される菜種油(アブラナ科の種子の搾油)を由来としたものがあり、いずれも食料用途として 90%以上が利用されている。燃料用途は栽培面積の 8%である。また、世界自然保護基金(WWF)が中心となり、持続可能な RSPO 認証制度(持続可能なパーム油生産と利用を促進するための円卓会議)などが整備されている。

FAME には炭素二重結合を持った成分が含まれており、一般に FAME 混合軽油は酸化されやすく、蒸発しにくい重質成分を持ち、低温で固まりやすい特性がある。また酸化した燃料は、有機酸やスラッジを生成して燃料系部品の材料影響や燃料フィルター詰まりを誘発する。

したがって燃料で規定される規格に準拠するようバイオ混合燃料の性状がコントロールされている。

### 4.2.3 Renewable Diesel(RD)

RD は、パーム油や廃食油などの油脂原料を水素化処理して製造される炭化水素系燃料であり水素化植物油(HVO)とも呼ばれる。特に原料に廃食油を用いた場合、カーボンインテンシティが 0.1~0.2 など GHG 排出量の低い燃料として注目されている。その燃料性状は、化石燃料由来の軽油と同様、飽和炭化水素成分からなり、FAME と比べて高濃度で利用が可能であるが、低温では流動性が低いことやゴム部品の膨潤が小さくなることから、混合後の燃料が「軽油規格」を満たす範囲の濃度で使用される。欧州では、軽油に HVO を 26%、FAME を 7%混合した R33 Blue Diesel が販売され、従来軽油と同様に使用可能ながらも約 2 割の CO<sub>2</sub> 削減が可能としている。日本でも伊藤忠エネクス株式会社が Renewable Diesel として HVO を含むバイオ軽油を展開しており、各地で既販車両による実証利用が行われている<sup>(22)</sup>。また、北欧では低温流動性を改善した HVO を直接利用しており、トヨタも HVO 100%ディーゼル燃料対応モデルを 2023 年より追加、販売している(図 11)<sup>(23)</sup>。

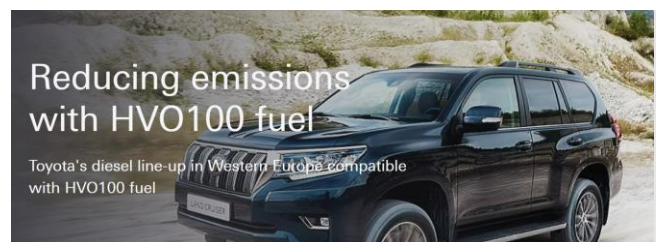


図 11 欧州の HVO100 適合車両

## 5. まとめ

モビリティのカーボンニュートラル実現には、BEV や水素社会を進めることだけでなく、再生可能エネルギーが十分でない国や地域への対応、保有車両や内燃機関を使用した中古車への対応など、モビリティを利用する全ての人々の参加が必要である。GHG 排出量を最小限に抑制しながらも従来のインフラや社会システムを活用でき、作る、運ぶ、貯める、使う、に優れたエネルギーとなり

うるカーボンニュートラル燃料を普及させ、カーボンニュートラルの実現に向け貢献していく。

#### ■参考文献

- (1) 一般社団法人日本自動車工業会 2021/4/22  
記者会見  
[https://www.jama.or.jp/release/press\\_conference/2021/199/](https://www.jama.or.jp/release/press_conference/2021/199/)
- (2) European Committee on the Environment, Public Health and Food Safety, p36  
[https://www.europarl.europa.eu/doc\\_eo/document/ENVI-PR-746876\\_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/doc_eo/document/ENVI-PR-746876_EN.pdf)
- (3) An official website of the European Union, EUR-Lex - C(2023)1086 - EN - EUR-Lex
- (4) CARB, LCFS Pathway Certified Carbon Intensities  
<https://ww2.arb.ca.gov/resources/documents/lcfs-pathway-certified-carbon-intensities>
- (5) 経産省HP,  
[https://www.meti.go.jp/shingikai/energy\\_environment/bio\\_nenryo/pdf/010\\_02\\_00.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/bio_nenryo/pdf/010_02_00.pdf)
- (6) トヨタ企業HP ニュースルーム 2022/7/20  
<https://global.toyota.jp/newsroom/corporate/37543249.html>
- (7) トヨタ企業HP ニュースルーム 2023/3/29  
<https://global.toyota.jp/newsroom/corporate/38998746.html>
- (8) ENEOS HP ニュースリリース 2023/5/29  
[https://www.eneos.co.jp/newsrelease/upload\\_pdf/20230529\\_01\\_01\\_1080\\_097.pdf](https://www.eneos.co.jp/newsrelease/upload_pdf/20230529_01_01_1080_097.pdf)
- (9) Chevron HP, 2023/6/13  
<https://www.chevron.com/newsroom/2023/q2/renewable-gasoline-blend-hits-the-road>
- (10) 大西康博ら, GTL技術の開発の変遷と将来, 新日鉄エンジニアリング技報vol.1(2010)
- (11) ExxonMobil HP 参照日:2023/7/4  
<https://www.exxonmobilchemical.com/en/catalysts-and-technology-licensing/synthetic-fuels>
- (12) A. Sanz-Martínezら, Methanol to gasoline (MTG): Parametric study and validation of the process in a two-zone fluidized bed reactor (TZFBR) Journal of Industrial and Engineering Chemistry vol. 113, pp189-195 (2022)
- (13) 経産省合成燃料研究会中間取りまとめ HP 参照日:2023/7/13  
[https://www.meti.go.jp/shingikai/energy\\_environment/gosei\\_nenryo/20210\\_422\\_report.html](https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/gosei_nenryo/20210_422_report.html)
- (14) Audi HP, 参照日:2023/7/4  
<https://www.audi-technology-portal.de/en/mobility-for-the-future/audi-future-lab-mobility-en/audi-future-energies-en/audi-e-gas-en>
- (15) ENEOS HP ニュースリリース 2022/4/19  
[https://www.eneos.co.jp/newsrelease/upload\\_pdf/20220419\\_01\\_02\\_1170\\_836.pdf](https://www.eneos.co.jp/newsrelease/upload_pdf/20220419_01_02_1170_836.pdf)
- (16) Timothy Yates, et. al., Evaluation of Fully Sustainable Low Carbon Gasoline Fuels Meeting Japanese E10 Regular and Premium Octane Specifications, JSAE20239175, in press
- (17) Andre Casal Kulzer, et. al., Sustainable Mobility Using Fuels with Pathways to Low Emissions, SAE technical paper, 2020-01-0345 (2020)

- (18) ePURE HP プレスリリース 2023/6/13  
<https://www.epure.org/press-release/eu-renewable-ethanol-hits-new-record-level-for-greenhouse-gas-reduction-as-industry-drives-toward-carbon-neutrality/>
- (19) NITI Aayog, Ministry of Petroleum and Natural Gas, Roadmap for Ethanol Blending in India 2020-25 (2021)
- (20) Toyota Kirloskar Motor プレスリリース 2022/10/11  
<https://www.toyotabharat.com/news/2022/launch-of-toyotas-first-of-its-kind-pilot-project-on-flexi-fuel-strong-hybrid-electric-vehicles-ffv-shev-in-india.html>
- (21) インドネシア, Long-Term Strategy for Low Carbon and Climate Resilience 2050 (2021)
- (22) 伊藤忠エネクス株式会社 HP  
[https://www.itcenex.com/ja/business/detail/renewable diesel/index.html](https://www.itcenex.com/ja/business/detail/renewable%20diesel/index.html)
- (23) Toyota Europe Newsroom 2022/7/20  
<https://newsroom.toyota.eu/toyotas-diesel-line-up-in-western-europe-to-be-made-compatible-with-hvo100-diesel-fuel/>

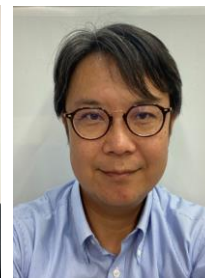
■著者



久野 央志



信川 健



福井 裕幸



横尾 望



中田 浩一

# 噴流 MBD 活用による 水素直噴エンジン混合気形成の改善

宮川 淳 \*1

宮元 敬範 \*1

丹野 史朗 \*1

塚本 佳久 \*1

大村 哲生 \*1

高橋 大志 \*1

中田 浩一 \*1

## 要旨

数値計算で予測した噴流形状をシュリーレン画像と比較し、CFD 結果の噴流角と先端到達距離が実測と合致することを確認した。加えて、確立した噴流予測手法を用いてタンブルとスワールのどちらが水素直噴エンジンに適しているかを調査した。結果はスワールよりタンブルが混合気の不均質性の低減に有効であることを示した。これは水素噴流により強められたタンブル流をピストン圧縮で崩壊させ、それにより生じる乱れによる乱流拡散の効果が得られるためである。本検討から LPDI 水素エンジンコンセプトにはタンブル流が適していることがわかった。

キーワード カーボンニュートラル, 水素直噴エンジン, 混合気形成, ガス噴流, MBD, CFD, タンブル, 乱流拡散, NOx

## 1. はじめに

近年、カーボンニュートラルの観点から再生可能エネルギーの検討が拡大しており、動力源の多様化が進んでいる。電動化や燃料電池に加え、成熟した内燃機関技術を活用できるバイオ燃料、合成燃料、水素燃料が着目されている。とりわけ水素エンジンは欧州を中心に大型商用車、農建機向けの研究が盛んである<sup>(1)(2)(3)</sup>。

水素は層流燃焼速度が速く、可燃範囲が広いいため、内燃機関に適用した場合、リーン燃焼による高効率と低 NOx の両立が期待されるが、PFI (Port Fuel Injection) では逆火やプレイグ等の異常燃焼により高負荷運転が困難であることが知られている。これらの抑制には筒内直噴での圧縮行程噴射が有効<sup>(4)(5)</sup>だが、混合時間が短くなるため、混合気が不均質となりやすく、低 NOx 化が課題である。本研究では可視化に基づいたガス噴流 MBD (Model Based Development) 手法を構築し、均質な混合気形成を実現する指針を検討した。

## 2. ガス噴流 MBD モデルの構築

3D-CFD (Computational Fluid Dynamics) はガソリン直噴エンジン開発でも広く活用されており、混合気形成を計算する際、静止場での噴霧ペネトレーションや噴霧角といった噴霧外形の再現を確認し、その上でエンジン計算に適用することが一般的である。対象が液体燃料噴霧 (spray) から気体燃料噴流 (jet) に変わっているが、同様の検証プロセスを踏襲した。本章では、ガス噴流外形の可視化試験と、それを元にしたガス噴流 MBD モデルの精度向上について述べる。

### 2.1 ガス噴流の可視化

ガス噴流の可視化にはいくつかの手法があるが、噴流の境界を鮮明に捉えられ、高速度連続撮影が可能なシュリーレン法を選定した。実験装置を図 1 に示す。凸レンズで作成した平行光の区間にガス噴射を行い、密度ムラによる屈折率変化を明暗に変換して観測を行う。ナイフエッジで主光束をカットすることで、微小な密度ムラを高感度に捉えることが可能である。

\*1 CN 先行開発センター CN 開発部



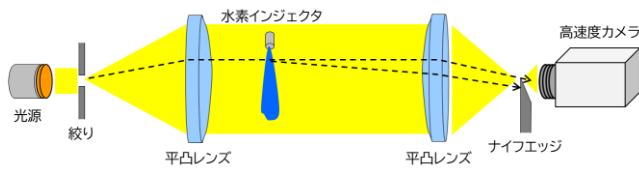


図1 高速度シュリーレン噴流撮影装置図

表1に水素、ヘリウム、窒素の物性値を示す。圧縮性流体を高圧で噴射する場合、チョーク流れとなりスロート部で速度は音速に達する。水素やヘリウムはその小さな分子量のため、窒素と比較して音速が非常に高い等の特性を持っており、特異的な挙動を示す可能性がある。本計測では、可燃性ガスである水素の代わりに、物性が近く、取り扱いが容易なヘリウムを用いた。

表1 ガス物性値

ガス種	水素 (H <sub>2</sub> )	ヘリウム (He)	窒素 (N <sub>2</sub> )
分子量 [g/mol]	2.016	4.003	28.01
燃料密度 (0.1MPa, 25℃) [kg/m <sup>3</sup> ]	0.08994	0.1785	1.251
音速 (25℃, 12.5MPa) [m/s]	1,426	1,073	374
粘度 (0.1MPa, 20℃) [mPa·s]	0.0088	0.0196	0.0176
比熱比 (0.1MPa, 25℃) [-]	1.41	1.66	1.4

雰囲気は常温の大気圧場とし、噴射圧は 11.5～13.5MPa、インジェクタへの通電時間は 3ms、撮影速度は 39,000 フレーム/秒とした。噴孔はストレートの単噴孔である。

図2に噴射圧 13.5MPaにおける噴射開始からの代表的な可視化画像を示す。ヘリウムガス噴流の噴孔付近の広がり角は 21.6degである。可視化結果を画像処理して得られたヘリウムガス噴流の先端到達距離については次節で述べる。

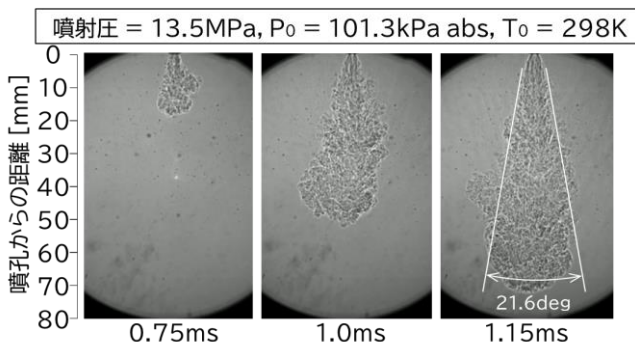


図2 ヘリウムガス噴流のシュリーレン画像

## 2.2 ガス噴流 MBD モデルの検証

CFD 計算には CSI 社の CONVERGE を使用し、乱流モデルは RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) の RNG k-ε モデルを用いた。雰囲気温度、圧力、ガス組成は可視化試験と同条件とし、噴孔形状を考慮するとともに、実測した噴射率を境界条件として与えた。

図3に噴流外形の比較を示す。噴流根元の広がり角は 20deg と、可視化結果をよく再現した。図4に先端到達距離を実測と計算で比較した結果を示す。噴射圧 11.5～13.5MPa の範囲における先端到達距離の傾きは、噴射圧によらずほぼ同等となっており、計算もその傾向を再現することを確認した。

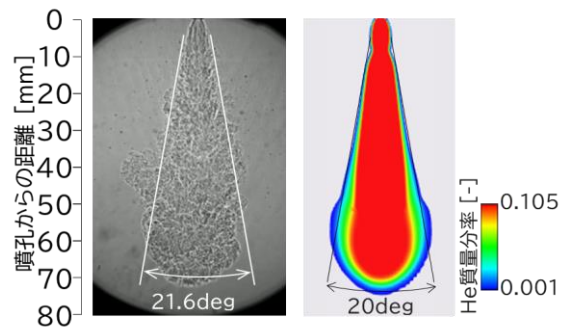


図3 実測と CFD の噴流形状の比較

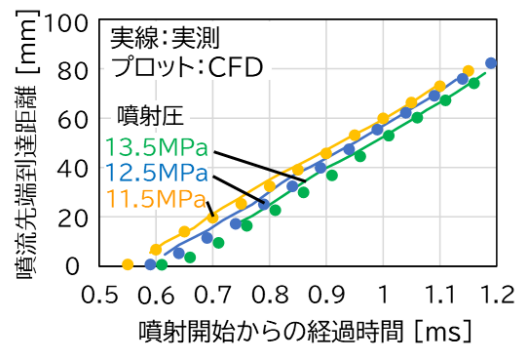


図4 異なる噴射圧における噴流先端到達距離

次に、構築した手法を用いて液体噴霧とガス噴流の挙動の違いを比較した。液体噴霧は噴射圧 30MPa、噴射率ピークはガス噴流の値に揃えた。図5上段に酸素濃度分布を示す。高酸素濃度を青、低酸素濃度を赤で表示している。液体噴霧と比較して、ガス噴流では内部に赤い領域、すなわち酸素濃度の低い領域が多く、ガス燃料は

混ぜりにくいといわれていることと整合する一方、エンブレインされる空気量は大きいとの報告<sup>(6)</sup>もあり、不整合があるようにも思われる。

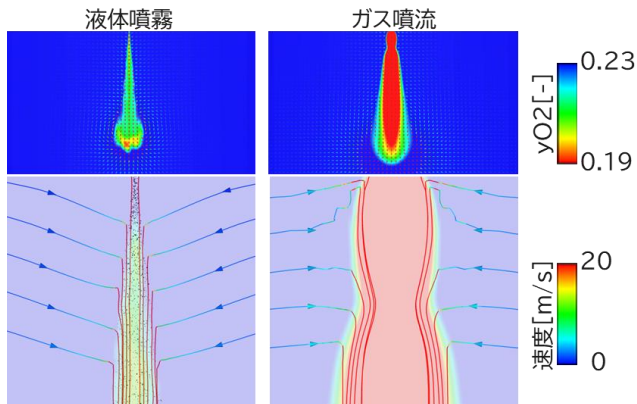


図5 液体噴霧とガス噴流の空気エンブレイン挙動

液体噴霧の場合、噴霧根本部分からのエンブレインが、噴霧内部への空気導入に対して重要であることが知られている<sup>(7)</sup>。そこで噴霧および噴流根本部分の空気の挙動を調べた。結果を図5下段に示す。周囲空気がエンブレインされる様子を流線で示している。流線の色は流速を表しており、ガス噴流の方がエンブレインされる空気の色が速く、エンブレイン量が大きい。しかしながら、ガス噴流ではエンブレインされた空気は噴流表面近傍のみに存在し、噴流中心部まで入り込めていない。一方、液体噴霧ではエンブレインされる周囲空気の速度は小さいものの、液体噴霧内部まで到達している。これは、ガス噴流が隙間の無い連続的な流れであるのに対し、液体噴霧は液滴が周囲空气中に離散的に存在する流れであるという、流れの構造の違いによる。つまり、液体噴霧と比較してガス噴流は中心部へ空気を取り込むことが難しいという本質的な難しさを持っており、この観点からもガス噴流 MBD モデルの必要性は高いといえる。

### 2.3 エンジン計算での検証

前節で構築した静止場でのガス噴流 MBD モデルをエンジン筒内計算に適用し、混合気の挙動を確認した。エンジン筒内計算に適用する際、噴射ガスの化学種とその噴射率をヘリウムから水素に変更している。試験機関は2.0L、直列4気筒の量産過給ガソリンエンジンをベースとした。吸気ポートの下側に、ストレート単噴孔の水素ガ

ス直噴インジェクタが搭載されている。エンジン諸元を表2に示す。水素直噴エンジンには高圧で上死点(TDC: Top Dead Center)近傍に噴射する HPDI(High Pressure Direct Injection)コンセプトと、筒内圧が低い吸気行程や圧縮行程前半に噴射する LPDI(Low Pressure Direct Injection)コンセプトがある。本研究では LPDI コンセプトを検討対象とした。エンジン回転数 2,800rpm, 正味平均有効圧(BMEP: Brake Mean Effective Pressure)0.95MPa, 燃料噴射開始時期(SOI: Start of Injection)95degBTDCとして、空気過剰率  $\lambda$  を 1.0~2.2 の範囲で振った実験と計算を実施した。

表2 エンジン諸元

エンジン	2.0L 列型4気筒
ボア [mm]	86
ストローク [mm]	86
圧縮比 [-]	10
噴射システム	筒内直接噴射
吸気弁開時期 [degBTDC]	29
吸気弁閉時期 [degABDC]	35
排気弁開時期 [degBBDC]	29
排気弁閉時期 [degATDC]	1

図6に  $\lambda$  1.2 と 2.0 での TDC におけるボア中心断面の当量比( $\phi$ )分布を示す。 $\lambda$  がグリーンになるのに伴い、相対的にリッチな混合気が減少している。

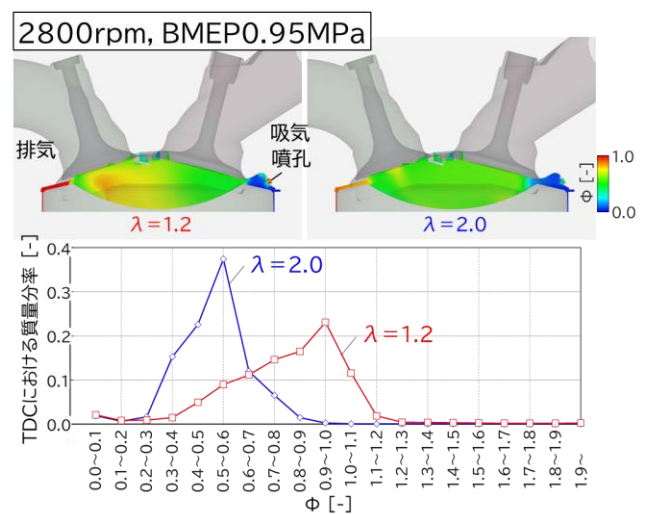


図6 TDC における当量比分布

次に、図 6 に示した当量比分布を用いて、エンジン実機における NOx 排出量を定量的、かつ、簡便に指標化する手法を考える。エンジン筒内で生成される NOx は局所の当量比に強く依存するとされ、水素エンジンの場合、サーマル NOx である NO がそのほとんどである。当量比に対する NO 生成量の特性を 1 次元層流予混合火炎の素反応計算により算出した。計算ソフトは CHEMKIN-PRO を使用し、初期条件は 300K, 0.1MPa,  $\phi$ 0.3~1.6 とした。反応メカニズムは GRI-mech3.0 を用いている。図 7 に当量比に対する NO 生成量を示す。縦軸は、NO 生成量が最大となる当量比の値で除して正規化している。

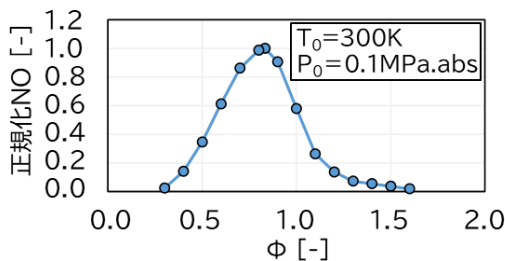


図7 当量比に対する NO 生成量

ガス噴流 MBD モデルで計算した TDC における混合気の各当量比の質量割合に、図6で示した NO 生成量特性を乗じて積算した指標を、エンジンシミュレーションにおける NOx 指標とした。横軸に NOx 指標、縦軸に実測の NOx 排出量を取ったものを図8に示す。筒内オーバーオールが入が 1.0~2.2 の広い範囲で相関が 1 本の線に乗っており、本指標と実測 NOx が定量的に結びつくことが確認できた。

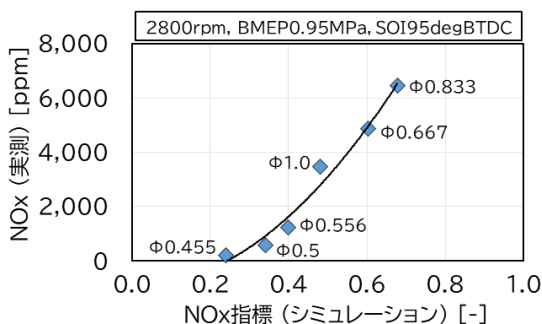


図8 NOx 排出量指標と実測 NOx の相関関係

### 3. ガス噴流 MBD モデルを活用した混合気形成手法の検討

本章では、前章までに構築したガス噴流 MBD モデル、および、混合気分布の NOx 指標を用い、高効率と低 NOx を両立する水素直噴エンジンの混合気形成の指針を検討する。

#### 3.1 高効率と低 NOx を両立する改良の方向性

まず、エンジン実機において、高効率と低 NOx を両立する改良の方向性を検討した。前述の表 2 に示すエンジンで、エンジン回転数 2,800rpm, BMEP0.95MPa, 空気過剰率  $\lambda$ 2.0 として SOI を振った試験を実施した。

図 9 に SOI に対する熱効率, NOx の特性を示す。熱効率は SOI を遅角するにしたがって改善する。図 10 は SOI95, 180degBTDC それぞれの PV 線図を示しているが、図中の斜線部のように、SOI を遅角化する程、筒内に噴射された水素に対する圧縮仕事が低減することが主因である。この効果はタンク内の水素の圧縮に要した仕事を回収することに相当し、以後圧力回収効果<sup>(8)</sup>と呼ぶ。高圧水素を燃料とする車両では航続距離に直結するため、この効果を引き出すことも大切である。

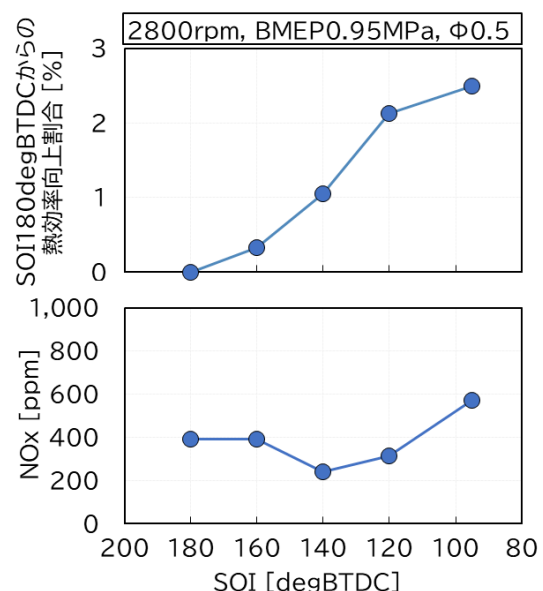


図9 SOI による熱効率と NOx の特性

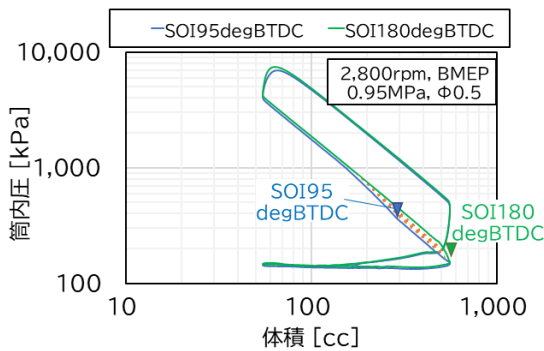


図 10 PV 線図における圧力回収効果

一方、NO<sub>x</sub> は、SOI を 140degBTDC より遅角するにともない悪化する。一般的に、局所的にリッチな混合気が存在すると NO<sub>x</sub> 排出量が増加することが知られており、SOI 遅角により混合時間が短縮し、局所的にリッチな混合気が増加したためと考えられる。

このように、高効率と低 NO<sub>x</sub> の両立には、SOI を遅角して圧力回収効果を引き出しつつ、限られた時間で混合を促進し、局所的なリッチ混合気を低減することが必要である。

### 3.2 水素の分子拡散と乱流拡散の寄与の定量化

気体燃料と空気のような異なる流体が混合し、均質になっていく過程を支配する物理現象は、物質の拡散である。また、拡散は、分子運動による物質輸送である分子拡散と、乱流渦運動による物質輸送である乱流拡散との 2 つに大別される。エンジンでは乱流拡散を活用して混合を改善したり、燃焼を促進したりする取り組みが行われている<sup>(9)</sup>。一方、水素は分子拡散係数が非常に大きいため、乱流拡散に頼らなくとも良好な混合が実現できる可能性がある。そこで水素の分子拡散係数と、エンジン計算で得られた筒内の乱流拡散係数を定量的に比較した。

分子拡散係数は Chapman-Enskog の相互分子拡散係数の算出式として、式(1)を用いて算出した<sup>(10)</sup>。M<sub>im</sub> は分子量、σ<sub>im</sub> は衝突直径、Ω(1,1)\* は拡散衝突積分を表している。分子拡散係数は温度と圧力の関数となっており、筒内の温度と圧力に応じて時々刻々と変化するため、エンジン計算で得られた温度と圧力を用い、分子拡散係数の時間履歴を求めた。また、水素に加えイソオクタンも対象とし、化学種による違いを比較した。

一方、乱流拡散係数は式(2)を用いて算出した。乱流

動粘性係数 ν<sub>t</sub> は筒内平均値とし、乱流シュミット数の値は 0.5 とした。

図 11 に分子拡散係数と乱流拡散係数を比較した結果を示す。水素の分子拡散係数はイソオクタンの約 10 倍と、桁違いに大きい。しかしながらエンジン筒内の乱流拡散係数は、エンジン回転数 1,000rpm でも水素分子拡散の 70 倍と、2 桁ほどの違いがあり、さらに高回転ではその差がさらに拡大する。

エンジン筒内での気体燃料と空気との混合は、分子拡散係数の大きい水素であっても乱流拡散の効果が支配的であり、この効果を十分に引き出すことが重要である。

$$D_{im} = \frac{2.66 \times 10^{-7} T^{3/2}}{p M_{im}^{1/2} \sigma_{im}^2 \Omega(1,1)^*} \dots\dots\dots(1)$$

$$D_t = \frac{\nu_t}{Sc} \dots\dots\dots(2)$$

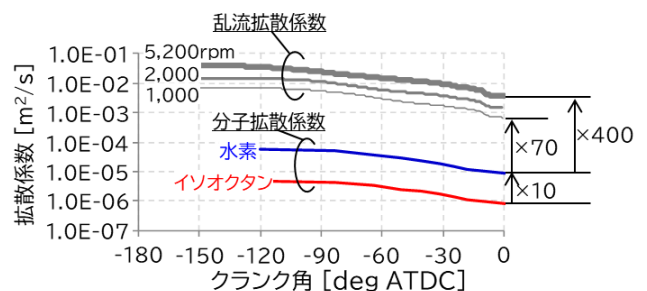


図 11 分子拡散係数と乱流拡散係数の比較

### 3.3 均質な混合気形成を実現する指針

前節で示したとおり、水素直噴エンジンで良好な混合を実現するには、乱流拡散の効果を引き出すことが重要である。水素直噴エンジンで乱流を強化するには、タンブルやスワールといった気流の活用が考えられる。タンブルはガソリンエンジンで高速燃焼のアイテムとして広く採用されており、スワールは直噴ディーゼルのミキシング改善アイテムとして広く普及している。大型商用ディーゼル、小型乗用ガソリンのいずれでも水素エンジンが検討されているため、ガス燃料の混合気形成の観点で、両者の比較と整理を試みた。

前述の表 2 に示すエンジンを題材とし、条件はエンジン回転数 2,800rpm, BMEP0.95MPa, λ 2.0 とした。吸気弁閉(IVC: Intake Valve Closure)後の

140degBTDC を計算開始時期とし、所定の強さのタンブル流、スワール流の剛体渦を初期条件として付与した。図 12 に示すように、水素ガス直噴インジェクタは吸気ポートの下側に搭載されており、ボア中心方向で水平面より下向きに約 30deg に噴射される。スワールの場合は渦中心めがけて噴射されるため、噴流でスワールが増強されることはないが、タンブルの場合は噴流によりタンブル流が強められる。

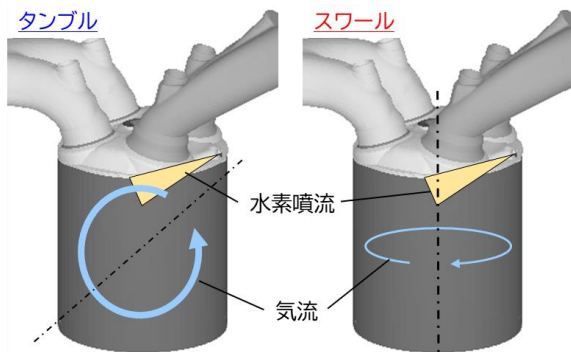


図 12 気流と水素噴流方向のレイアウト

図 13 にタンブル比、スワール比に対する混合気の NOx 指標を示す。タンブル比を強めるにつれ、NOx 指標を低減できている。一方で、スワール比を強めても NOx 指標の低減がみられないが、これはスワールを強めるほど混合は促進するものの、NO 生成量の少ない当量比に達するまでに希薄化が十分に進まないためである。

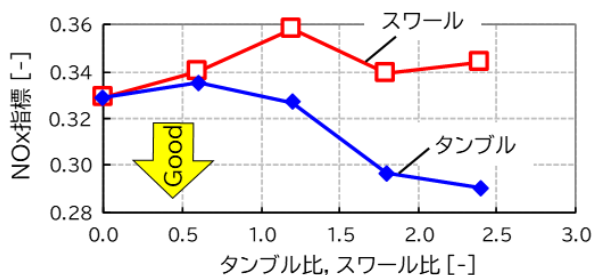


図 13 水素混合気形成に対するタンブルとスワールの影響

図 14 にタンブル比 1.8、スワール比 1.8 の筒内物理量の時間履歴を示す。タンブルでは NOx 指標がスワールと比較して急速に減少していく。図 14 左下に乱流拡

散係数の筒内平均値を示す。タンブル、スワールいずれの場合も噴射期間中に乱流拡散係数が急増する。その後スワールでは乱流拡散係数が右肩下がりに急速減衰していくのに対し、タンブルでは噴射終了直後に減衰するものの、90degBTDC から TDC にかけてはほぼ横ばいの状態を持続する。図 14 右上に筒内重心まわりの回転運動エネルギー、右下に筒内乱流エネルギーを示す。タンブル流では噴流により回転運動エネルギーが強められることに加え、ボア径ほどのスケールの大きな縦渦がピストンの圧縮によって崩壊し、小さなスケールの渦、すなわち乱流エネルギーに変換されることで、TDC 近傍まで乱流拡散の効果が継続できているためと考えられる。

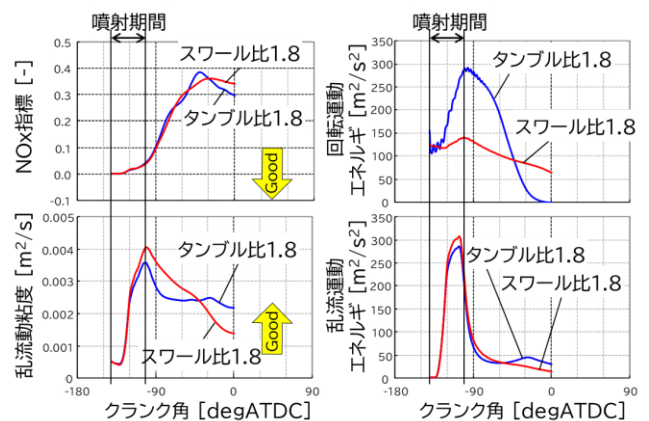


図 14 筒内物理量の時間履歴

LPDI コンセプトにおいて良好な混合を実現するには、乱流拡散の効果を引き出すことが重要であり、噴射により強められたタンブル流をピストン圧縮で崩壊させることで生じる強力な乱流を活用するのが好適である。

### 3.4 エンジン筒内流動によるミキシング作用の考察

前節までに LPDI コンセプトにはスワールよりタンブルが適していることを述べた。一方で、HPDI コンセプトにはスワール+多穴ノズルが有効であることも報告されている<sup>(8)(11)</sup>。本節では、コンセプトによりどのような気流と噴射系が適しているかを考察する。

前述のように、異なる流体が混合し、均質になっていく過程を支配する物理現象は物質の拡散である。また、エンジン筒内では分子拡散より乱流拡散が支配的である。物質の拡散には式(3)で示すフィックの法則が成立する

ことが知られている。

$$J = -D \frac{dc}{dx} \dots\dots\dots(3)$$

Jは拡散フラックス, Dは拡散係数, 分数は濃度勾配を示している. 拡散フラックス増大には, ①拡散係数を高めること, ②濃度勾配を大きくすること, の2つが有効である. この観点で流動による混合促進作用を考察する.

空气中に気体燃料が噴射され, 混合する過程において, 流動による混合促進作用には「移流による効果」と「乱流による効果」の2つがあると考えられる. その概要を図15に示す.

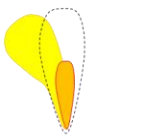
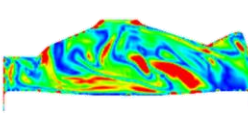
	移流による効果	乱流による効果
		
	・先行する噴流を押し流した新気に後続の噴流が突入 ・多穴の混合改善に特に有効	・タンブル崩壊や剪断流れによる小さな渦で運動量や物質を輸送
スワール	○	△
タンブル	○	◎
スキッシュ	○	◎

図15 混合に対する気流の影響

まず移流による効果について説明する. 静止場に燃料が噴射される場合, 先行する噴流の作った高濃度の混合気中に後続の噴流が突入していくことになり, 濃度勾配が付きにくい. 一方, 噴射軸に対して横風がある場では, 先行する噴流の作った混合気は横風で押し流され, 後続の噴流は低濃度の混合気中に突入することになる. つまり, 濃度勾配の大きい状態を作りだすことができ, 前述の拡散フラックスが増大することで混合が促進される. スワールとタンブル, いずれの場合でもこの効果は得られるが, ディーゼルのような多穴ノズルとスワールの相性は優れていると考えられる.

もう一方の乱流による効果は乱流拡散であり, 渦運動による物質輸送である. タンブル崩壊や剪断流れの生じる部位で活発であり, 前節で述べたとおり, エンジン筒内ではスワールよりタンブルの方がその効果が大きい.

次にエンジン筒内でタンブルやスワールといった気流

が, どのタイミングでどの効果を発現しているかの観点から, コンセプトに適した気流の整理を試みた. その概要を図16に示す.

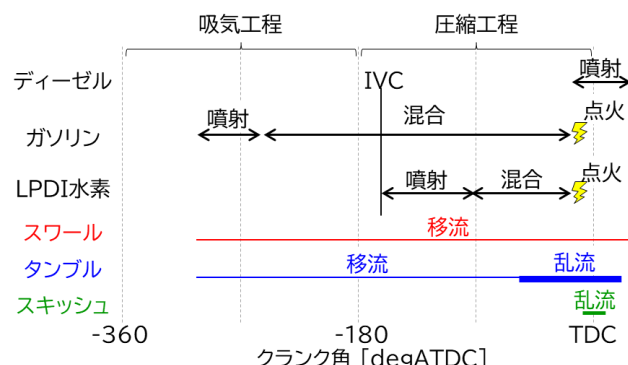


図16 混合に対する筒内気流の影響のタイムチャート

スワールは圧縮行程から膨張行程まで長い期間で移流効果が得られるのに対し, タンブルは圧縮行程前半までは移流効果が, 圧縮行程後半には乱流効果が得られる. また, スキッシュは圧縮 TDC 近傍でのみその効果が得られる.

ディーゼルエンジンは圧縮 TDC 近傍のごく短期間に噴射と混合を行う必要があり, 多穴ノズルによる高圧噴射とスワール, さらにスキッシュを活用することが一般的である. 水素エンジンにおいても TDC 近傍噴射を行う HPDI コンセプトの場合は, 多穴ノズルとスワール, さらにスキッシュの活用が有効であると考えられ, 実験でも確かめられている<sup>(8)(11)</sup>.

ガソリンエンジンはガス噴射による体積効率低下や異常燃焼の問題が無いとため, 吸気行程の早い段階から燃料を噴射し, 圧縮 TDC までの時間を使って混合を進めることができる. また, 乱流を活用した急速燃焼実現の観点からも, 気流はタンブルを用いるのが一般的である. LPDI コンセプトの水素エンジンでは, 主に体積効率確保の観点から IVC 後噴射が選択されるため, 圧縮 TDC までに与えられた混合時間がガソリンエンジンと比較して少ない. この限られた時間で良好な混合を実現するには, 噴射により強められたタンブル流をピストン圧縮で崩壊させることで生じる強力な乱流を活用するのが好適である.

## 4. まとめ

本研究では、可視化に基づいたガス噴流 MBD 手法を構築し、それを活用して均質な混合気形成を実現する指針を検討した。得られた知見を以下にまとめる。

- ① 静止場でガス噴流を可視化し、ペネトレーションや噴流角の定量値を実測し、それを再現するガス噴流 MBD 手法を構築した。この手法をエンジン計算に適用し、混合気不均質度合いを用いた NOx 指標が、エンジン実機の NOx と高い相関が得られることを確認した。
- ② 高効率と低 NOx の両立には、SOI を遅角して圧力回収効果を引き出しつつ、限られた時間で混合を促進し、局所的にリッチな混合気の低減が必要である。
- ③ 水素の分子拡散係数はイソオクタン約 10 倍と大きい。エンジン筒内の乱流拡散係数は、エンジン回転数 1,000rpm でも水素分子拡散の 70 倍と、2 桁ほど大きい。エンジン筒内では水素であっても乱流拡散の効果が支配的であり、この効果を十分に引き出すことが重要である。
- ④ LPDI コンセプトの気流はスワールよりタンブルが適している。噴射により強められたタンブル流をピストン圧縮で崩壊させ、それにより生じる乱れによる乱流拡散の効果を引き出すことが好適である。一方、HPDI コンセプトで TDC 近傍噴射の場合は、多穴ノズルとスワール、さらにスキッシュの活用が有効である。

### ■参考文献

- (1) L. Walter, et al.: The H<sub>2</sub> Combustion Engine - The Forerunner of a Zero Emissions Future, 42nd International Vienna Motor Symposium, 2021-06 (2021)
- (2) R. Dreisbach, et al.: The Heavy-Duty Hydrogen Engine and its Realization until 2025, 42nd International Vienna Motor Symposium, 2021-04 (2021)
- (3) P. Kapus, et al.: 43rd International Vienna Motor Symposium, 2022-09 (2022)
- (4) R. Scarcelli, et al.: "Mixture Formation in Direct Injection Hydrogen Engines: CFD and Optical Analysis of Single- and Multi-Hole Nozzles". : SAE paper 2011-24-0096
- (5) 松原直義ら:水素エンジンにおける異常燃焼の発生メカニズムの解析,自動車技術会2022年秋季大会学術講演会予稿集,講演番号028(2022).
- (6) 室積英征ら:時系列PIVによる液滴噴霧と高圧噴流における雰囲気導入過程の計測,微粒化シンポジウム講演論文集,Vol.27(2018)
- (7) S. Tanno, et al.: "Investigation of a novel leaner fuel spray formation for reducing soot in diffusive diesel combustion". : SAE paper 2019-01-2273
- (8) S. Tanno, et al.: "High-efficiency and Low-NOx Hydrogen Combustion by High Pressure Direct Injection". : SAE paper 2010-01-2173
- (9) H. Sakai, et al.: "Model based development for super lean burn gasoline engine using Kolmogorov microscales". : SAE paper 2023-01-0201
- (10) Reid, R.C., et al.: "The Properties of Gases and Liquids". 4th edition, McGraw-Hill, Inc., New York (1987)
- (11) 加藤亨ら:アルゴン循環型高効率水素エンジンの研究(第3報),自動車技術会2013年秋季大会学術講演会予稿集,講演番号116-13(2013)

■ 著者



宮川 淳



宮元 敬範



丹野 史朗



塚本 佳久



大村 哲生



高橋 大志



中田 浩一



# 材料分析データ解析クラウドサービス”WAVEBASE”

矢野 正雄 \*1,\*2    山口 剛生 \*1    青木 亮 \*1,\*2    井手 一人 \*1,\*2    池田 英恵 \*1,\*2  
 外山 泰弘 \*2    村井 祐介 \*2    小野 寛太 \*3,\*1    庄司 哲也 \*1,\*2

## 要旨

材料分析データ解析クラウドサービス”WAVEBASE”について、開発の背景、開発した技術と技術を実装したシステム開発、活用事例、サービスを世の中に届けるための事業化の取り組み、今後の展望を述べる。

キーワード    素材開発, DX, マテリアルズインフォマティクス(MI), 次元削減, 機械学習, 潜在空間

## 1. はじめに

自動車業界にとって 100 年に一度の大変革期といわれて既に 5 年以上の時間が経過した。そのような状況のなか、本業で利益を出せている間に少しでも社内に眠っているアセットの活用を念頭に、将来に向けての新たな事業の種まきに関する取り組みに着手している。本プロジェクトはそのような背景のもと、材料技術部内で開発されているさまざまな材料を理解するための基盤技術に着目し、これまで開発してきた基盤技術のマネタイズができないか？という観点で立ち上がったプロジェクトである。これまでさまざまな材料を解析する基盤技術を検討してきたわけであるが、そのほとんどは何らかの現象を説明できたという時点で二度と使われることなく報告書として所蔵されるだけという状況となっている。その状況を打破したいということ、また、そのようにして蓄積された技術・ノウハウを産業界に広く還元することで、日本の材料産業の産業競争力の強化に繋がるのではないか？という思いで「CaaS: Characterization as a Service」というコンセプトを大阪大学の小野寛太教授と打ち出し、取り組みに着手したのが 2019 年のことである。世界的にも材料の研究開発への AI 技術の適用、いわゆる Material Informatics(以降, MI)の活用につ

いても材料の研究開発の潮流となりつつある時分でもあった。当初はさまざまな材料の分析・計測機器から生み出されるデータ解析の RPA(Robotic Process Automation: 人がやる作業をアルゴリズム化することで作業を自動化すること)の観点での AI 技術の適用を検討していた。しかしながら、無償 PoC(Proof of Concept: お客様へサービス提供することで、サービスの価値の有無を確認するプロセスで仮説を実証するための試行実験)を重ね、さまざまな業態の方々との対話のなかで、そこには将来的なニーズは無いのではないかと、もっとデータの深いところの理解に繋がるような手法を提供することが大切なのではないか？より大きく DX も含めたサービスにするべきではないか？という考えに至った。そこで、画像やスペクトルに内在する情報を如何に抽出するか？という観点について検討を重ね、AI 技術で言うところの「潜在変数」「潜在空間」に着目するに至った。当初はさまざまなアルゴリズムを試行し、t-SNE(t-distributed Stochastic Neighbor Embedding)<sup>(1)</sup>や UMAP(Uniform Manifold Approximation and Projection)<sup>(2)</sup>等で次元削減を行い、潜在空間への構造情報の投影を行っていた。しかしながら、一般的に機械学習における潜在変数は、何かしら情報が取り出せているものの、解釈が困難という課題があることが分かった。そこで、解釈性の高い AI 技術ということをキーワードに技術開発を推進するとともに、開発した解析手法を誰でも容易に活用できるようにクラウド上に実装することを目指し開発を進めた。我々の取り組みでは、開発した技術から得られる解析結果の

\*1 先進技術開発カンパニー 先進データサイエンス統括部

\*2 先進技術開発カンパニー 先端材料技術部

\*3 大阪大学大学院工学研究科

解釈性だけでなく、通常の技術系 B to B のソフトウェアに散見されるような専門家にしか理解できない UI にならないように、できるだけ直観的に分かりやすい UI の設計、画面遷移の設計にも重点を置いている。解釈できる解析結果といえど、専門的な解析ツールであるため、そのままだと解釈が追いつかないことについても認識し、解釈を助けるという観点のアルゴリズムと UI 開発などにも取り組んでいる。DX という観点ではクラウド上に実装されている web システムという利点を活かし、お客様ごとにセキュアなワークスペースを準備し、データを埋没させることなく蓄積・解析し、それを URL でもって組織内で共有可能にすることを志向している。

我々はこの取り組みを材料の計測に用いる光の波の性質を表現するとともに、我々の解析手法の根幹となる情報の波数表現という意味から「Wave」という言葉と、データベースや基盤技術という意味を持つ「Base」という言葉を組み合わせ WAVEBASE プロジェクトと名付け、トヨタ自動車という材料そのものや計測器そのものを生業としない会社だからこそ提供できるサービスとして、広く産業界に貢献したいという思いのもとプロジェクトを推進している。

次章では我々が解決すべき課題として考えていることを述べる。次いで、開発技術、システム概要、解析事例、プロジェクトにおけるサービスの概要と、これまでの事業化の取り組みの概要を紹介する。最後に我々が考える研究開発の DX とその先の展望について言及する。

## 2. WAVEBASE の技術開発

これまで、材料開発の現場においては顕微鏡観察や X 線による構造解析、組成分析などのデータを取得するものの、そのデータに含まれる一部の情報を使って、大部分はカンコツ・経験により開発が進められてきた。筆者たちの自戒の念も込めて言及すると、過去の事例においては実験水準が不十分で、開発目標の妥当性の評価や開発している実験空間の設定の妥当性の評価などができないといった状況に陥りがちであった。そのような状況を打破するために適切なデータ空間の設定、データの有効な利活用に着目し技術開発に着手した。我々の考えるプロダクトの提供価値として、MI を誰もが簡便に活用

できる環境を提供することで、限られたリソースでも効率的に材料研究開発を進めることができようになるのではないか？ということである(図 1)。材料の開発プロセス状況を改めて分析すると、実験においてサンプルを作成し、サンプルを計測し材料のデータは取るもののデータの解析に時間がかかるため解析せずに定性的にデータを見るだけになってしまい、結果としてデータが使える状態で存在しない状況となっているのではないかとこの仮説を見出した。それがゆえに機械学習などを活用したデータ解析にたどり着くことができず、MI やデータ活用の利点分からないという状況にあるのではないかとこの仮説が得られる(図 2)。MI に使える状態でデータが存在しない原因は、決まったデータ解析の手法が存在せず解析に膨大な時間を要していること、社内にデータや解析結果が点在していて使いたいときに使えないこと、統計処理を用いた効率的な材料開発のノウハウがないことにあることが、これまでの数十社へのヒアリングを通して見えてきている(図 3)。これらの原因に対して、あらゆる材料分析データを自動解析できる機能、点在するデータを一元管理するデータベースとしての機能、データを活用した解析機能を持つシステムの開発が有効ではないか？という考えのもと、システム開発を行いクラウド上に実装した。しかしながら、MI を活用してその結果を解釈するには一定レベルの技術力と慣れが必要であり、取り組みには解析のサポートも含めてのソリューション提供という形をとっている(図 4)。本章ではデータに内在する情報を如何にして取り出すか？の技術面の解説と解析のための技術開発について、その技術を波及させるためのシステム開発とそのコンセプトについて述べる。

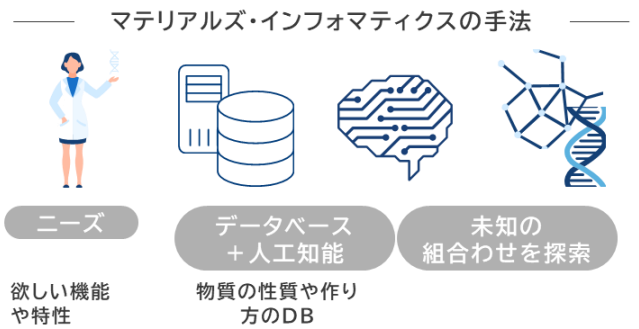
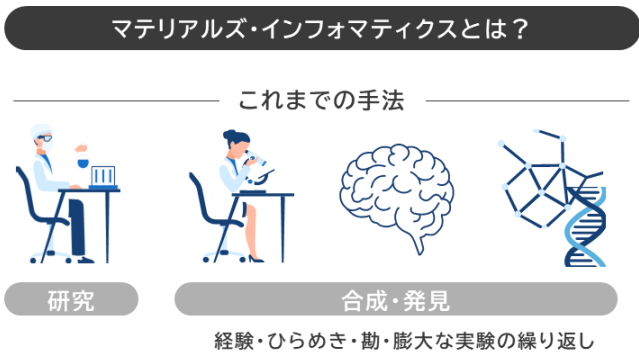


図1 材料開発のこれまでの手法とマテリアルズ・インフォマティクス(MI)を活用した手法の比較

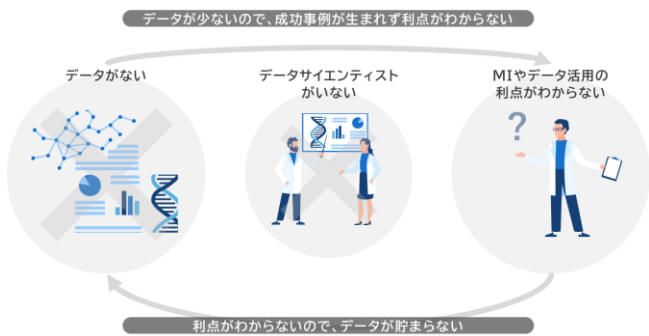


図2 素材産業へMIが浸透しない理由

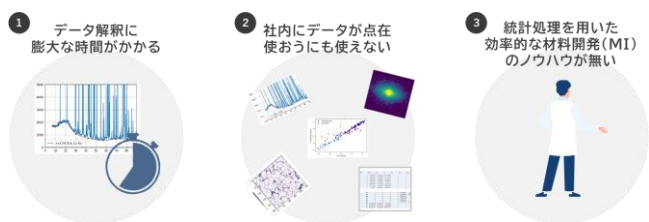


図3 材料に分析データを活用するための問題点

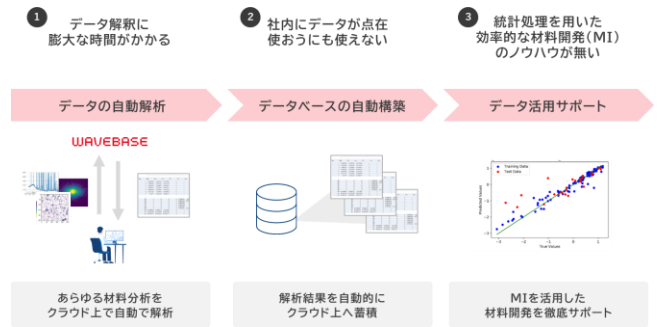


図4 WAVEBASEが提供する三つのソリューション

## 2.1 解決すべき課題

一般的な材料の研究開発の目的は、所望の材料性能を満たすためのプロセス条件や材料の内部構造を明らかにすること、あるいは、品質管理における正常/異常を決めているプロセス条件や材料の内部構造を明らかにすることなどにある(図5(a)). これらを、いわゆる機械学習を用いて実現するためには、配合やプロセスに関するデータ、顕微鏡画像やスペクトルといった材料内部構造に関するデータ、そして材料性能に関するデータが揃っていることが必要である(図5(b)). そのなかで、材料の内部構造に関するデータは、取得コストが高いものから低いものがあり、その選択については開発の効率を考えるうえで大変重要なファクターとなる。例えば、非常に微細な構造まで観察が可能なTEM(透過型電子顕微鏡)などは高コストな計測法の代表格といえる。さらにいうと、得られたデータを解析する手法やその解釈が属人的であることも十分な使いこなしができていない原因であり、解決すべき課題と考えられる。

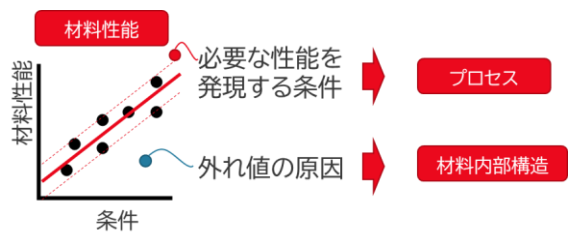


図5(a) MI活用で実現したいシーン

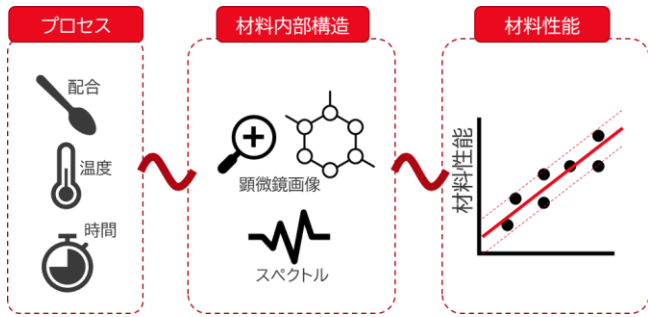


図 5(b) MI を活用するために必要なデータセット

材料の計測データ活用の実態に関して、いくつかの事例を紹介する。例えば、原子レベルの配列の情報を得る計測手法に X 線回折法(XRD: X-ray Diffraction)というものがある。XRD は、材料に X 線を照射することで、X 線が材料の原子の配列の情報をを持った波形に変化する原理を使った測定手法である。従来は図 6 に示すように、XRD の場合ピーク位置から結晶内部の原子間距離に変換をしたり、原子配列情報をデータベースと照合し、どういう構造かを同定したりすることに用いられる。また、顕微鏡画像であれば映っている材料の微細構造を観察し、例えば、その微細構造の特徴的なサイズやその分布を導出している。これらのデータ解析は人間が認知可能で解釈可能な量が取得できる一方で、もともと想定していなかった特徴や、人が認知できない情報を見落とす可能性がある。そこで我々は、人のバイアスを排除したデータからの情報抽出法として、例えば、教師無し学習を活用した特徴抽出に着目し検討を行っている。この機械学習的な特徴量の抽出法を活用すると、一つの波形が一つの点として潜在空間に表示され、俯瞰的にデータ間の変化・相関を可視化できるというメリットがある。例えば、このプロットに目的性能値などで色を付けることで、波形の特徴と性能の関係を直観的に理解することができるようになるわけである。しかしながら、ただ単純に可視化できるようになるだけでは不十分であり、どの程度の特徴が抽出され目的性能を評価可能になったか？という観点で検討を行っている。

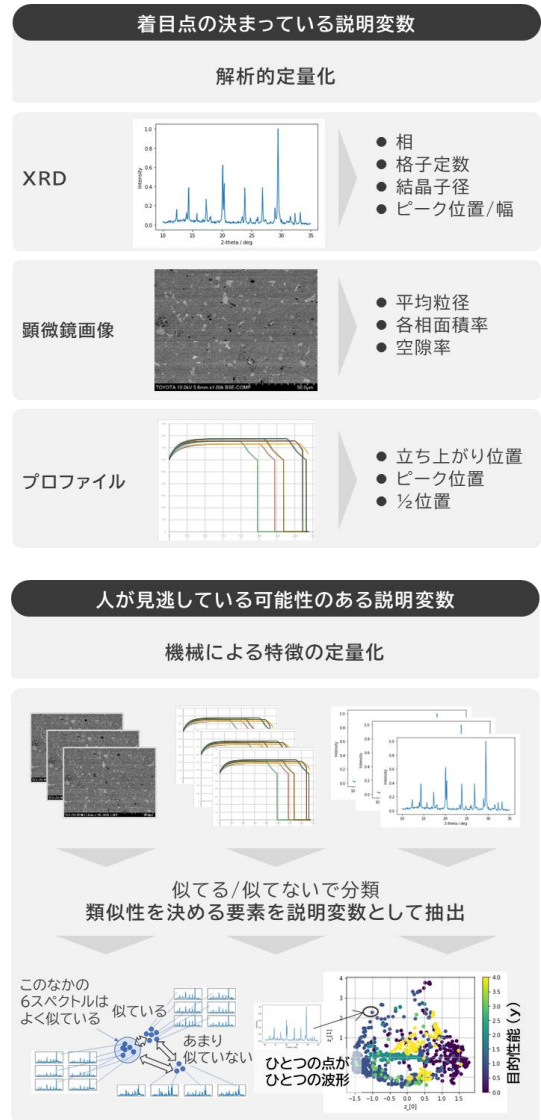


図 6 材料分析データから特徴を定量化する手法の比較

## 2.2 材料分析データの多様性と含まれる情報

同じ原料を使っても調理法によって料理の味や食感が異なるように、工業製品に用いられるような鉄鋼や樹脂などの材料は原料の配合やプロセスによって性能が異なる。例えば、ごはんのおいしさという指標が、一粒一粒の柔らかさや米内部の成分によって決まるように、材料の性能も、細かい組織の並び方や成分によって決まってくる。材料の性能に影響のある組織の並び方や成分といった材料内部の情報を取得するためには、必要な内部情報の大きさや形態にあわせた分析手法のなかから適切に選択しデータを取得する必要がある。例えば、金属の結晶中の原子が規則的に並んだ原子の配列の情報の一つである原子間距離を測定するためには、波長の短い X 線を使った XRD が用いられる(図 7)。それよりも

1,000 倍ほどの(といっても髪の毛の太さの 1/10)大きな粒子の状態を見るのであれば走査型電子顕微鏡 (SEM: Scanning Electron Microscope)が用いられる。これら XRD と SEM それぞれのデータから特徴的な量を数値として表すことで、材料性能への影響度を調べることができるようになる。材料分析は、XRD や SEM のようなマルチスケールの構造を観測するための手法だけではなく、含まれる元素の結合状態、内部の磁気状態や電気状態を観測する手法も存在しており、非常に多様であることが特徴である。これらの分析データを MI に活用できるようにするためには、それぞれの分析手法で得られた材料分析データを物理現象に根差した考え方で連続的に解釈できるデータへと変換するとともに、機械可読な状態にしつつ、人の解釈の及ぶ範囲で特徴を抽出する次元削減がキーテクノロジーとなると考えられている。

がある。そのため、次元削減により少ない次元でデータを表現することが必要となる。また、次元削減により高次元のデータを低次元空間に埋め込むことで、各サンプルの関係性を可視化することもできる。これにより、クラスタリングや分類といった、サンプル同士のまとまりに着目した解析を行うこともできる。

次元削減の手法としては、t-SNE<sup>(1)</sup>や UMAP<sup>(2)</sup>などが知られている。これらの手法はどちらも、データのもつ非線形な構造を保ったまま可視化することができるという特徴がある。高次元データでは、単純な直線や平面では表現できない、非線形な構造が現れることが多い。そのため、非線形な構造を保ったまま低次元の空間に埋め込むことが可能なこれらの手法は、データの特徴をより正確にとらえることができる利点がある。しかし、低次元の空間に埋め込まれたデータの軸の解釈は難しいとされるため、データを可視化するだけでなく、その結果を解釈し、次の一手を考える必要がある場面では、活用しにくい側面がある。

一方、次元削減後の軸の解釈が容易な手法として、主成分分析 (PCA: Principal Component Analysis) が古くからよく知られている。PCA では、各データを主成分ベクトルと主成分スコアに分けて整理することで次元削減を行う。複数の波形データからなるデータセットに対し PCA を行った場合、得られる主成分ベクトルは、各データに共通する波形で、かつ、各データの違いをよく表しているものと言い換えることができる。また、主成分スコアは、元の波形データに対する各主成分の寄与と捉えることができる。図 8 では、48 個の波形データからなるデータセットに対し PCA を行い、2 つの主成分ベクトルを抽出している。各波形データは、主成分ベクトルと主成分スコアの線形結合で表現できるため、図 8 の右側のように主成分スコアで整理すると、一つの波形データは、潜在空間上の 1 点として表現できる。PCA によって次元削減した場合も、潜在空間上でのデータの位置から、データの類似性を読み取ることができる。さらに、データ間における主成分スコアの大小には線形な関係が成り立つため、この主成分スコアを機械学習における説明変数として用いることが可能である。本手法は、材料分析データに限らずさまざまな波形データに適用可能である。

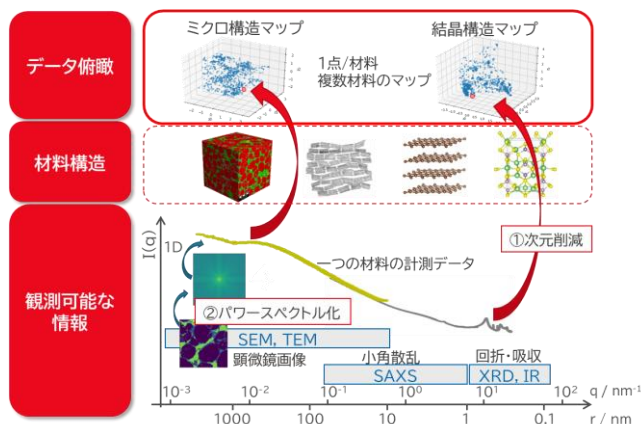


図 7 材料分析がカバーするスケールと計測データの活用イメージ

### 2.3 波形の次元削減手法の開発

材料分析で取り扱う波形データは、数百～数千点からなる数値情報である。各測定点の数値が変数とみなせることから、波形データは数百～数千次元の高次元データといえる。次元削減とは、このような高次元のデータを、なるべく情報を失わないように低次元のデータに落とし込むことである。高次元のデータは、取り扱いが煩雑になることや、解釈が困難になるという問題がある。また、機械学習においては、変数の数よりも十分に大きなサンプルサイズが必要とされる。つまり、サンプルサイズが小さい場合は、変数であるデータの次元を少なくする必要

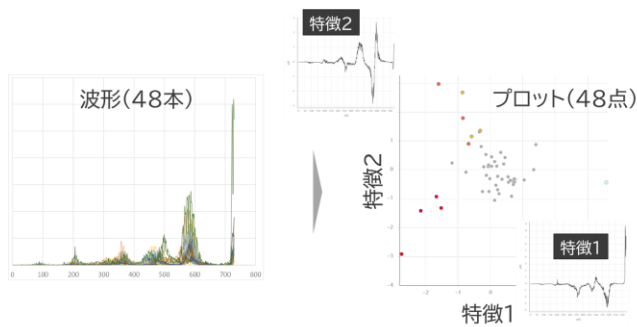


図 8 波形の主成分分析による次元削減のイメージ

## 2.4 画像データの波形データへの変換手法の開発

画像データでは、縦方向・横方向に約千点の数値が並んでいる。波形データと同様に、画像データもまた、代表的な高次元データの一つである。材料開発においては、顕微鏡観察に代表されるように、画像による試料特徴の理解がしばしばなされる。この際、注意すべき点として、顕微鏡観察によって得られるのは、あくまで試料全体のうち局所的な情報であるということである。例えば、 $1\mu\text{m}$ の粒子が $1\text{cm}^3$ の材料を構成していると考えた場合、およそ1兆個の粒子が含まれていることになる。顕微鏡画像はたかだか100個程度の粒子が映る視野で撮影されることが多く、1兆個の粒子のごく一部しか撮影することができない。そのような状況下で、観察画像からなるべく有意な情報を得るための手法として、画像における粒子の周期性を定量的に評価する方法が有用ではないかと考えた<sup>(3)</sup>。

画像データのある列を取り出してしてみると、輝度情報に関する波形データとみなすことができる。行方向についても同様のことがいえる。すなわち、画像データは二次元の波形データとみなすことができる。音の周波数

解析で知られるように、波形データを周波数成分に分解する手法として、フーリエ変換が知られている。これを二次元に拡張した二次元フーリエ変換を行うことで、画像中に存在する粒子の大きさや、粒子間の距離に起因した周波数情報を抽出することができる。フーリエ変換によって抽出された各周波数成分の振幅を2乗したものは、パワースペクトルと呼ばれる。パワースペクトルは、各周波数成分の強さを表していることから、画像データの特徴を表しているといえる。

図9に、画像データに対するフーリエ変換の例を示す。ある周期で白と黒のストライプが入っている画像データの場合、パワースペクトルは、ストライプの周期方向の軸に、ストライプの周期に対応する位置に強度のある画像となる。画像データ中に複数の周期が含まれている場合も同様に、それぞれの周期方向と周期に応じた位置に点がプロットされる。プロットされる点の強度は、周波数成分の強さが反映される。このように、画像中の周期的なあらゆる構造の統計情報は、パワースペクトルに内在する形で表現することができる。そのため、図9左側の顕微鏡写真をフーリエ変換した、中央の2D(二次元)パワースペクトル画像には、元の顕微鏡写真のあらゆる周期情報が含まれている。この2Dパワースペクトルを円周方向に積分したものが、図9右側の1D(一次元)パワースペクトル(縦軸と横軸を対数表示したもの)である。我々はこのように、画像をパワースペクトルにして波形データとして取り扱うことで、前述の次元削減を行い、画像間の構造にかかわる統計情報の差を潜在空間で可視化することができることを見出した。

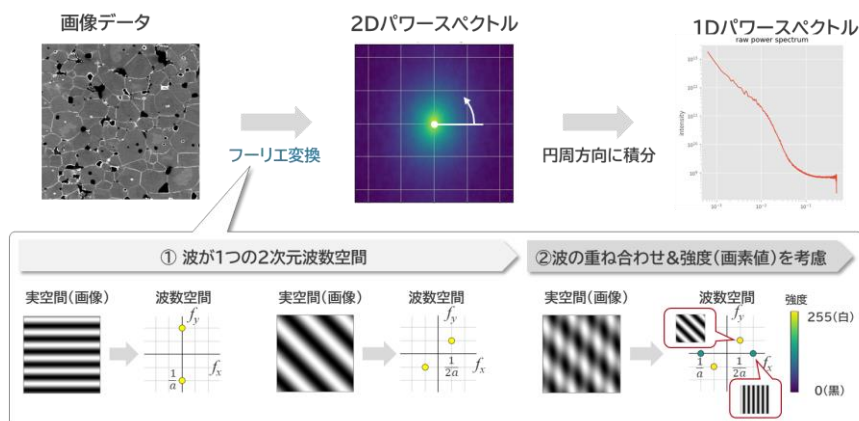


図 9 画像データ(二次元:2D)をフーリエ変換と円周方向積分により1D波形に変換する手法

## 2.5 システム開発

材料分析データ解析における上述の技術の普及を目指して、誰でも簡単にノーコードで使える Web アプリケーションとしてクラウド上のシステムとして実装している。システムコンセプトとしては、データサイエンティストでなくても手軽にデータ解析ができること、どのような形式のデータでもシステムに投入することでデータの持つ特徴の俯瞰ができ、特徴量を使った機械学習ができる形に成形されることといったデータアナリティクスの機能と、組織の内と外で必要に応じてデータが共有でき、データの状況や結果が必要な時に活用・共有できることといった DX に繋がる機能を併せ持ったシステムとすることを目指して開発を行っている。これらの機能を有するシステムを実現することで、データ取得から解析・活用・蓄積までユーザ自身でできるようになるとともに、組織としてデータ蓄積が進められるようになる。本節では開発してきたシステムの概要を以下で述べる。

### 2.5.1 コーディングフリーなシステム

本システムはクラウド上に Web アプリケーションとして構築されている。ブラウザ上でドラッグアンドドロップにより計測データを投入することでデータをシステム登録する。登録されたデータは自動で解析がなされ、そこから抽出した特徴量についても計測データとセットで蓄積を行う(図 10)。解析結果は数値・グラフデータとして Web 上で閲覧・ダウンロードすることができる。また、任意の値を目的変数として指定することで、回帰分析や、ベイズ最適化を用いた次の実験水準の提案解析を実施することができる。得られた結果から、例えば、材料性能にスペクトルから取り出された主成分が影響していることが分かった場合に、影響のある主成分の意味をユーザが気づけるような、結果の解釈ツールも実装されている。

これらの機能をデータ解析に明るくない方にも触っていただけるように、画面や画面遷移は、ユーザが迷わない、マウス操作だけでほとんどの解析が実施できることを目指して設計がなされており、シンプルな画面で幅広いユーザに継続的に使っていただけることを目指している。

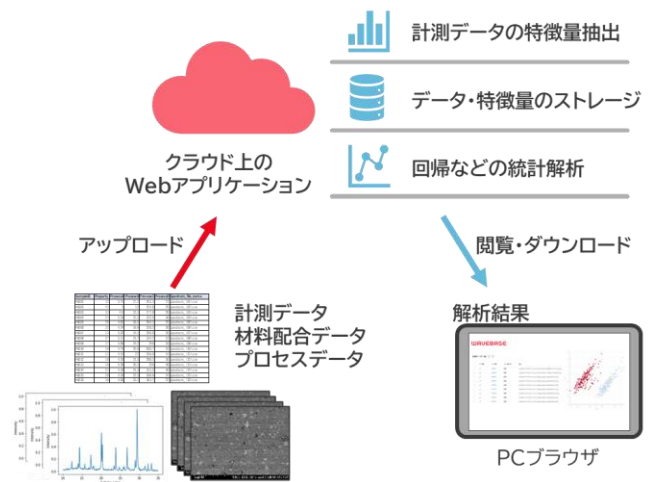


図 10 WAVEBASE システムの概要

### 2.5.2 機械学習に利用可能な形式へのデータ変換

本システムは登録された材料分析データに対し、解析的な特徴量抽出と機械による特徴量抽出を自動で実施する(図 6)。解析的な特徴抽出は X 線回折(XRD)であれば、含まれる相の同定や結晶子径の算出を行い、顕微鏡画像であれば含まれる粒形のサイズおよび数を定量値として抽出する。一方、機械による特徴量抽出では、データ同士の類似度に着目した次元削減の手法を用いている。

材料分析データは、2 章で述べたように、電子顕微鏡画像、X 線回折パターン、赤外分光(IR)スペクトルなどさまざまな種類が存在する。また、一つの分析手法のなかでも、装置メーカーが異なれば出力されるデータ形式も異なるのが一般的である。このようなデータに対して、計測条件や仕様などの付帯情報部分と、計測データ部分を自動的に判定してデータを取り出すアルゴリズムを実装しており、ユーザは、装置やファイル形式を気にすることなくデータを扱えるようになっている。このようにして読み込まれたデータは、例えば図 11(a)のような  $x$ (横軸)、 $y$ (縦軸)からなる波形データの場合、 $x$  の範囲や計測点の間隔が計測データごとに異なっていることが多いため、 $x$  の範囲と点間隔を一律にそろえる前処理が自動的に実行される(図 11(b))。この処理により  $x$  の範囲と計測点の数が揃ったデータに変換され、前述の次元削減の実行が可能となる。開発したシステムでは、XRD や IR などの波形や電子顕微鏡などの画像といった多様な材料分析データに対して一律に上位の主成分スコアを

算出する。これによって、もともと数値になっているプロセスにおける設定値や、数値として取得ができる性能などのデータと同様に、画像や波形データから成形された数値を機械学習に用いることができるようになった(図12)。

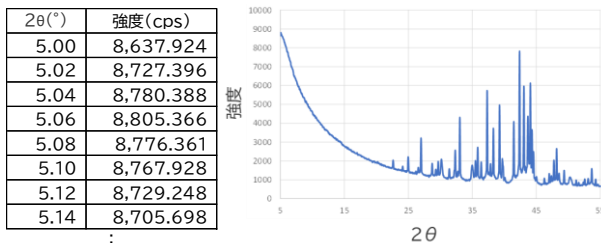


図 11(a) 波形計測データの例



図 11(b) 複数の計測データの成形前後の比較

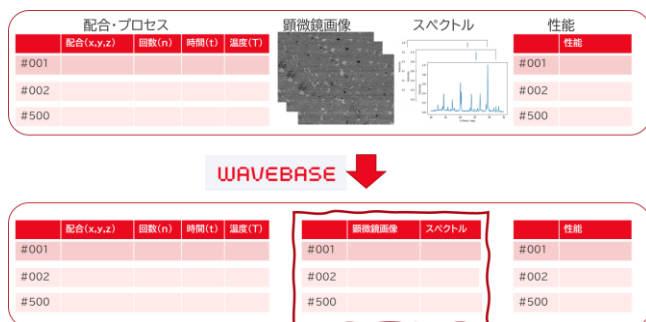


図 12 WAVEBASE を使うことで得られる機械学習可能なデータテーブルのイメージ

### 2.5.3 データや解析結果の共有

データはユーザの所属する会社・組織ごとにワークスペースを作成し、セキュアに区別した領域に格納する。そのため異なる会社・組織間でお互いのデータを閲覧・入手することはできない。会社・組織内では、解析結果をブラウザの URL で共有することができ、システム登録されている人同士で同じデータにすぐにアクセスができるようになっている。

一方で、データを他社と共有しながら開発を進めるケースも想定している。システムでは特定のデータに限定し他組織のユーザに個別にアクセス権を付与することも可能で、企業・学術機関などの組織をまたいで、プロジェクトや作業単位で柔軟にデータや解析結果の共有を行うことができる。この機能を用いて、例えば、材料の共同研究を行っている会社同士でデータや解析結果をリアルタイムで共有することができるため、データを保管したりメールで送ったりという手間が省けることでより研究に専念しやすい環境を作ることに貢献ができています。

## 3. WAVEBASE を活用した解析事例

### 3.1 希土類磁石材料開発

#### 【背景・目的】

材料開発の現場では少ないデータ数で次の開発方針を決める必要がある。また、nm オーダーの結晶構造から  $\mu\text{m}$ ~mm オーダーの組織構造までさまざまなスケール情報が目的性能に寄与しており、どのような要因で性能が決まっているのか知ることは非常に重要である。ここでは「スモールデータ解析」「マルチモーダル解析」「モデル解釈」をキーワードとして、磁石材料の解析事例を紹介する。磁石の nm オーダー以下の結晶構造を解析する X 線回折(XRD)スペクトルと、 $\mu\text{m}$  オーダーの組織構造を観察する走査型電子顕微鏡(SEM)画像から特徴量を抽出し、磁石性能にどのような因子が有効なのか、12 サンプルと非常に少ないデータ数で解析した。

#### 【スペクトル、画像の特徴量抽出】

XRD は非常に多くの粒子の平均情報が得られる測定であり、測定ごとのばらつきが小さな手法である。そのため、1 サンプルにつき 1 スペクトルのデータ取得で十分



となる。XRD の特徴量抽出は前述の手法のとおり、主成分 XRD\_PC1~XRD\_PC10 を得た。一方で、SEM 画像には異常成長した粒子や異物などが偶然写っている場合があり、倍率によっては視野ごとのばらつきが多いという課題がある。そのため、今回の解析では各サンプル 10 視野の画像を取得し、パワースペクトルの平均を取った。この平均スペクトルを主成分分析することで画像の特徴量 SEM\_PC1~SEM\_PC10 を抽出した。

#### 【性能推定モデルとその解釈】

抽出した特徴量を使い、磁石性能との相関関係を回帰した結果を図 13 に示す。簡易的な線形モデル(Lasso)ではあるが、磁石性能を説明することができている。図 14 のように性能を上げる方向(XRD\_PC1を増加, XRD\_PC3 を減少)に向かって XRD スペクトルを再現させると、結晶の特定の面方位の強度が低くなることわかる(図 14 赤矢印)。これは結晶の配向性が磁石性能に影響を及ぼしていることを示唆している。また XRD の特徴量だけでなく、SEM\_PC2 も磁石性能に寄与している。図 15 のように、位相情報で復元した画像は粒子界面が強調されており、白い析出物相の粒界が多いほど性能が高くなる傾向を表している。この事例では、磁石の専門家でなくとも、どの主成分が性能に効いているのか示すことができることも重要なポイントであり、最後の解釈の言語化のみ専門家に託すことで開発の効率化が期待できる。

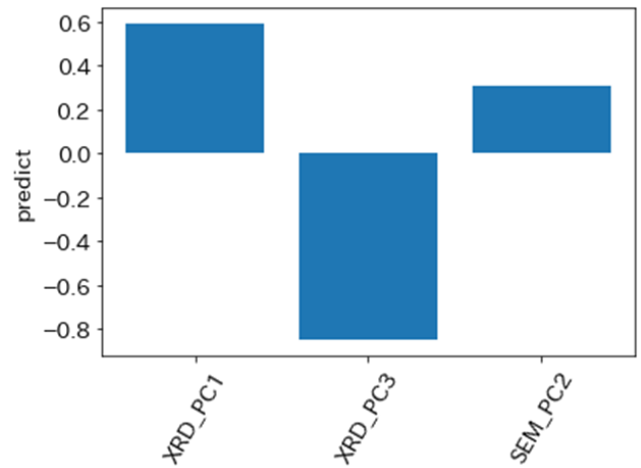


図 13(b) 説明変数の寄与度

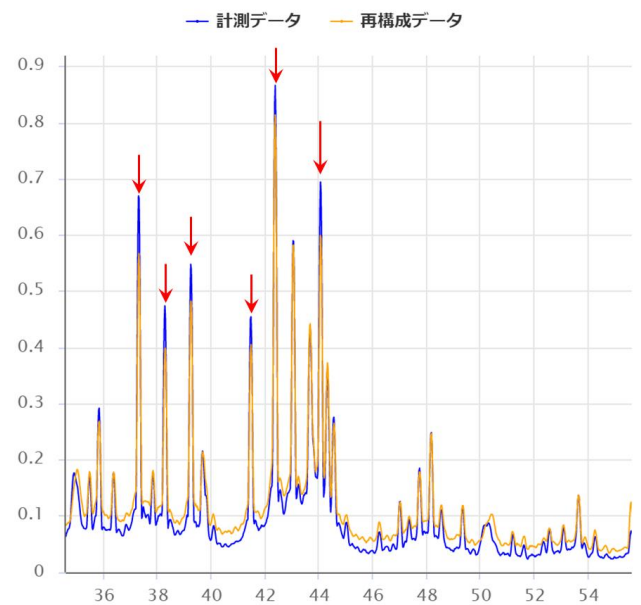


図 14 元の XRD パターン(青)と復元パターン(橙)

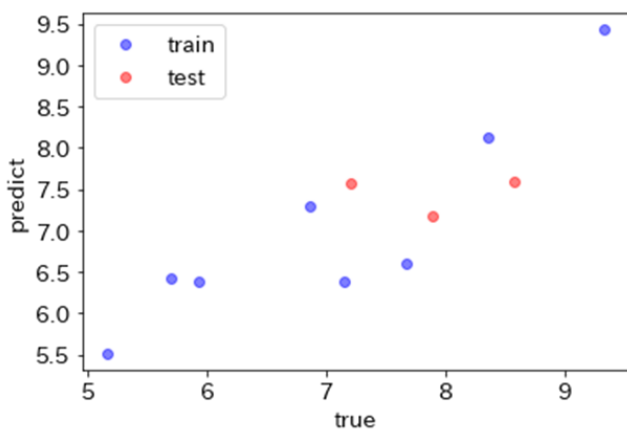


図 13(a) 性能推定モデルの推定精度

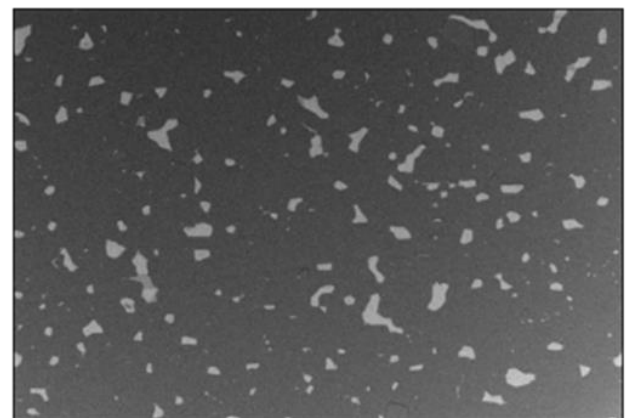


図 15(a) 磁石の SEM 画像

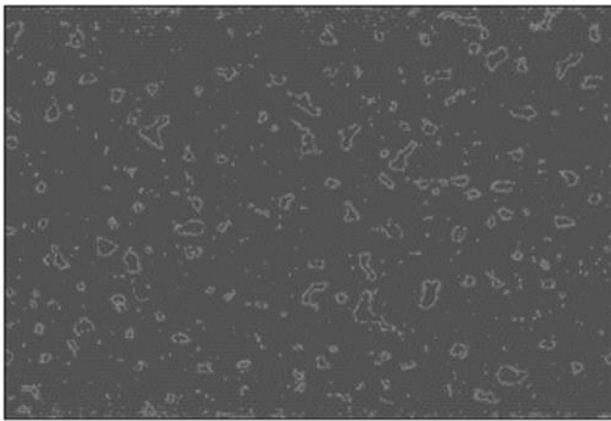


図 15(b) PC2 の位相復元像

### 【結論】

このように、わずか 12 サンプルの実験データではあるが、磁性性能向上/低下の要因を推定することができた。ばらつきを減らしたデータ取得、スケールの異なる情報を組み合わせたマルチモーダル解析、解釈可能な性能推定モデルを得ることが、スモールデータを解析する上で非常に重要である。

## 3.2 タイヤ用ゴム材料開発

### 【背景・目的】

タイヤ用のゴム材料開発のためには、材料内部の構造と性能の関係を示すこと、そして性能を発現するメカニズムを解明することが求められる。そのために、材料の種類やさまざまな環境によって変化する材料内部の構造を定量化する必要がある。

### 【課題】

タイヤ用ゴム材料の性能発現メカニズム解明のため、大型放射光施設 SPring-8 で取得されたデータを活用した、ゴムの変形にともなう材料内部の構造変化の分析が期待されている。本分析は、短時間で大量データを計測可能であるため、動的な構造情報を大量に得られるメリットがある。反面、取得されるデータ数が膨大となり、データ解析の時間がメカニズム解明や材料開発のボトルネックとなっている(図 16)。

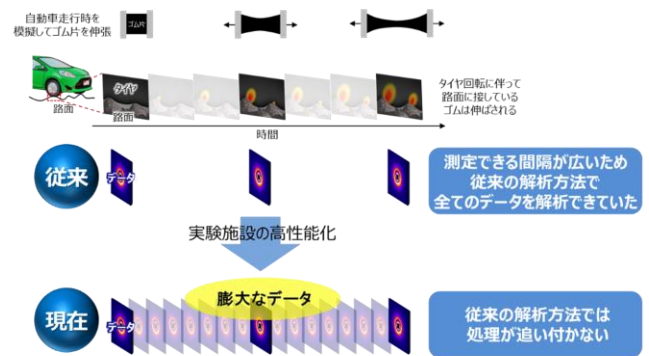


図 16 ビッグデータ化に伴う課題

(出典元:[https://www.srigroup.co.jp/newsrelease/2022/sri/2022\\_032.html](https://www.srigroup.co.jp/newsrelease/2022/sri/2022_032.html))

### 【実施事項】

ゴム材料を試験片として切り出し、試料に引っ張りを加えながら機械特性(応力ひずみ曲線)と X 線小角散乱(SAXS: Small-Angle X-ray Scattering)パターンを取得。SAXS は、物質の微細な構造を調べるための非破壊的な分析手法の一つで、X 線を試料に照射し、散乱した X 線の角度分布を測定することで、試料内部の微細な構造や形状、分子量、分子間距離などを解析することができる。データ数はおよそ 2,000(材料種 約 50×伸長過程)取得した(図 17)。

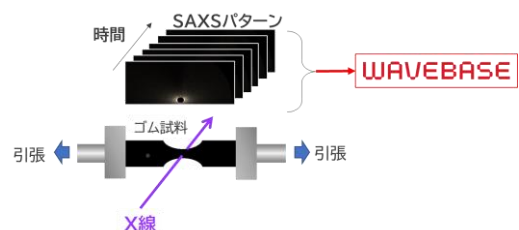


図 17 ギョム伸長時の小角散乱(SAXS)測定試験イメージ図

### 【結果】

WAVEBASE システムで全 SAXS パターンから取り出した特徴量をひとつのマップ上に描画した。これにより、およそ 2,000 データの伸長過程における構造変化を一目で俯瞰することができる。引張にともない時系列に変化する様子がみられ、機械特性の異なる材料種ごとに比較すると、異なる変化の軌跡をたどる様子がみられた(図 18)。これにより、材料の機械特性は材料内部の構造情報を含む SAXS から取り出した特徴量で記述されることが分かった。

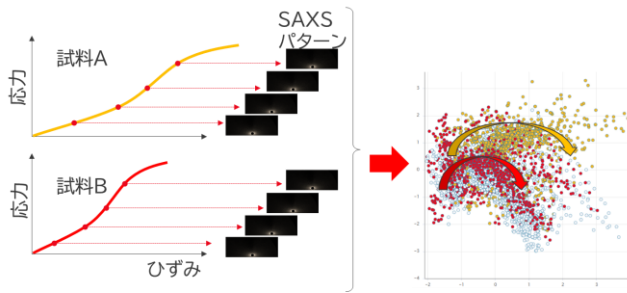


図 18 機械特性(応力ひずみ曲線)と SAXS パターンの特徴量マップ

今後、特性に影響度の高い主成分の解釈、材料作製の条件と SAXS 特徴量との相関調査を進めることで、性能を発現するゴム構造変化メカニズムに基づいた材料開発の指針が得られることが期待される。

### 3.3 カーボンニュートラル燃料開発

#### 【背景・目的】

近年、バイオエタノール等に代表される CO<sub>2</sub> 排出を低減、ゼロ化できるカーボンニュートラル燃料への期待が高まっている。しかし、長らく自動車エンジンに用いられてきたガソリンとは物性が異なるため、燃料の噴射や混合、点火、爆発といった要素に与える影響を新たに調査する必要がある。本事例では、自動車エンジンに使用される種々の燃料の噴射状態をハイスピードカメラで撮影した動画のデータを解析し、燃料の組成による噴射形成の違いと、燃焼状態の関係を明らかにすることを目的としている。

#### 【実施事項】

二種類の燃料をインジェクターから種々の圧力で噴射される様子をハイスピードカメラで撮影し、その動画から連続的に変化する画像を抽出したものを WAVEBASE システムで解析した。

#### 【結果】

取得した動画データを 1 コマずつの画像ファイルに分割する前処理を行った(図 19)。画像データはシステム内部でパワースペクトルへ変換され、主成分分析により潜在空間へプロットされた。図 20(a)のように、プロットへ噴射圧力ごとに色を付けると圧力ごとに同一の色とな

ることが確認できた。これは、同一の噴射圧力では画像特徴が類似しているが、噴射圧力を変えると画像特徴も変わることを表している。図 20(b)に示すように、二種類の燃料を比較すると、燃料ごとに分かれてプロットが分かれて見えている。プロットの各点同士の画像を図 20(c)で比較した。これらの結果から、人が気づきにくい特徴でも画像間の違いを自動的に抽出して、潜在空間上の座標値として定量化がなされたことを表している。

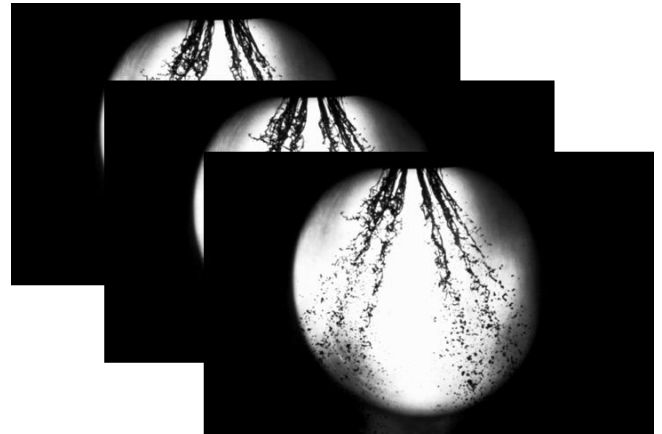


図 19(a) 試験で得られた動画

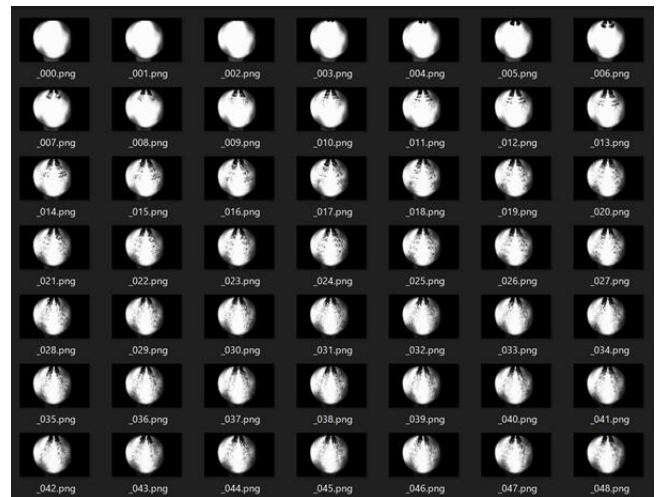


図 19(b) 動画を 1 コマごとに画像化した結果

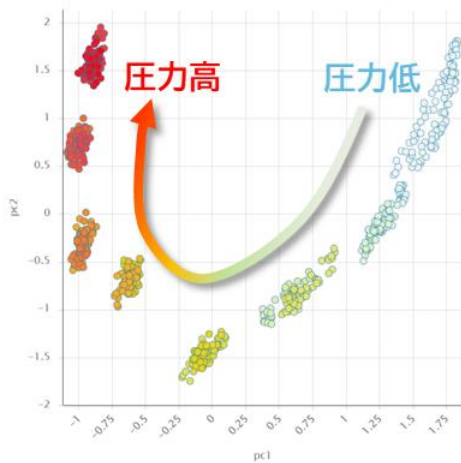


図 20(a) 9水準の噴射圧力における画像の主成分スコアプロット

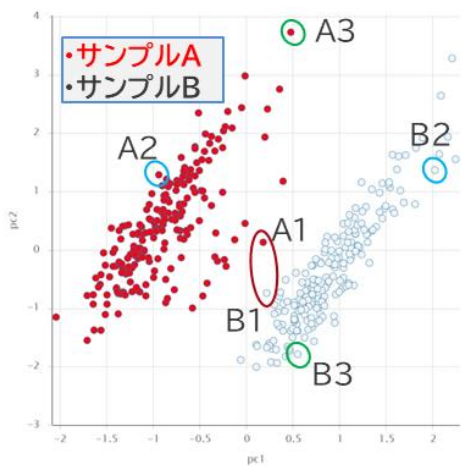


図 20(b) 二種類の燃料の同一噴射圧力における画像の主成分スコアプロット

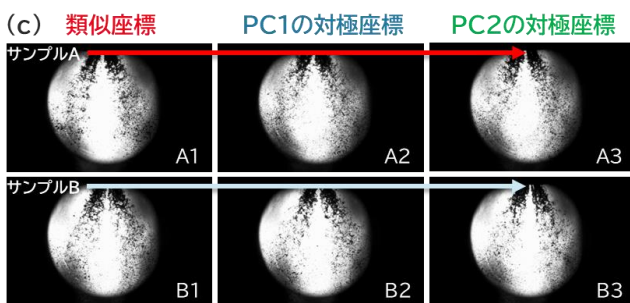


図 20(c) 図 20(b)における二点間の画像による比較

次に、この座標値が何を表しているかの解釈が必要になる。図 21 のように、得られた潜在空間上任意の点におけるパワースペクトルが再現できる特徴量の解釈ツールを使うと、PC1 軸を右から左に変化させることで、パワ

ースペクトルの高周波成分の減少が顕著であることが分かった。パワースペクトルの高周波成分は画像のなかでより細かい情報に対応するため、今回の結果では PC1 軸の意味としては、画像中に映っている燃料状態のうちサイズの小さいものが減少していると解釈することができる。

以上のように、本システムを活用することで、噴射条件や燃料によって変化する噴射燃料の状態を解釈可能な形で定量化できることが分かった。この結果を用いて、性能データなどと紐づけることで、性能を最適化する燃料の噴射条件をデータ解析によって決定することができる。本手法を活用することで、さまざまな燃料の状態を定量化したデータが蓄積・活用され、カーボンニュートラル燃料の開発加速に繋がることが期待される。

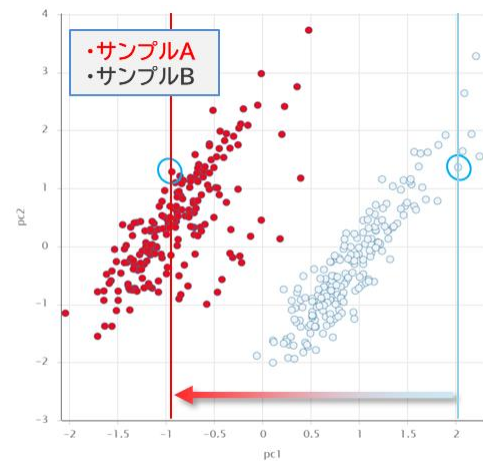


図 21(a) 二つのサンプルの PC1, PC2 空間プロット

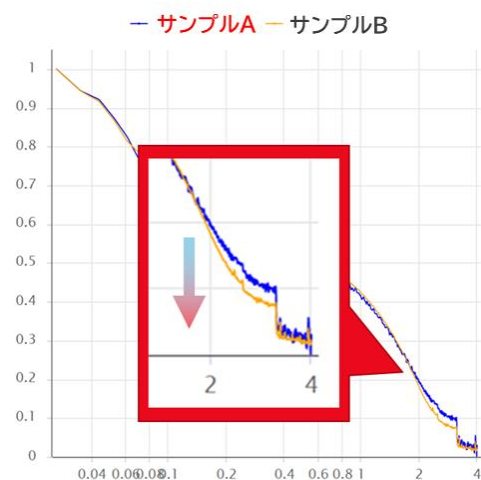


図 21(b) 二点パワースペクトルの比較

## 4. 事業化の取り組み

社内の技術開発を起点にした事業、という言葉からは、いわゆるプロダクトアウト型の事業開発を想像するかもしれないが、WAVEBASE 事業の立ち上げにあたっては、顧客起点のプロダクトづくりを実践した。本章でそうした手法でのサービス立ち上げの経緯を紹介する。

2019年、時代の変化に柔軟に対応しお客様へ価値を提供し続けるために、当社は自社のアセットを活用した事業立ち上げをサポートする枠組み、事業創生プラットフォーム(後に Be-Creation へ改称)を立ち上げた。この新たな取り組みが、同時に WAVEBASE 事業の検討を開始する契機となり、今日の活動へと繋がったのは前述のとおりである。Be-Creation における事業開発サポートは、基本的にリーンスタートアップの考え方に則している。リーンスタートアップとは、最小限の製品・サービス・機能を持った試作品を短期間で構築し、顧客ニーズの仮説検証を高速に繰り返し、真の顧客ニーズを追求するマネジメント手法である。本事業の推進においても本手法を取り入れており、技術が起点の事業であるが、初期から大きな投資によるプロダクトの開発は行わず、お客様のニーズの確認よりプロジェクトをスタートした。具体的には、初期の事業仮説に対し、資料を用いたヒアリングやシステムをとまわず、ヒトが作業する形でのサービス提供をつうじて仮説検証を繰り返した。このプロセスにより、初期の仮説である「お客様は XRD や SEM 画像など大量のデータ処理に時間がかかっているだろう」より、最終的には「少量のデータを有効活用したい」というニーズに辿り着くことができた。

一般的に、既存事業がある程度の規模となった後に、既存事業に最適化された組織をベースとした新規事業の推進は難しいケースが多いといわれ、変化の早い近年においては、企業の存亡に関わる事態にも繋がる。Be-Creation のミッションは、新たな事業を作るためにヒトを育て、文化の変革し、そして既存事業のアップデートを実現する、というものだ。本事業はその象徴的な事例である。クルマ事業のために培われた材料開発技術をベースに立ち上げた WAVEBASE 事業は、お客様の課題解決をつうじて磨かれた解析手法で、本業の仕事の仕方をも変革しうることを期待している。

## 5. おわりに

WAVEBASE では解釈性を重視した MI 技術を用いて、次元削減により特徴量抽出し、その潜在空間を低次元で可視化することにより、社内や組織内に蓄積されていた分析・計測データから、材料研究開発に不可欠な知識を抽出している。このことにより、材料研究開発を大幅に効率化することに成功しているだけでなく、使い道や解析・解釈の方法が人間には簡単に理解できなかったことで死蔵されていたデータから大きな価値を生み出している。

現状では個々の材料に特化した特徴量を抽出し潜在空間を構築している。今後の大きなステップとしては、電池材料、磁性材料などにより広範な材料群に対して最適な特徴量を見出し、その潜在空間を活用することであろう。ここでの潜在空間は、材料間の類似性、構造・機能相関などについて解釈性を担保しつつ低次元へ可視化したものであり、まさに材料の地図(マテリアルマップ)と呼ぶことができる。単に大量のデータセットを収集し、既存の MI 手法を使って新材料の発見を目指す従来の MI 技術の方向性とは異なり、「材料の地図(マテリアルマップ)」の活用という組織を跨いだ人間参加型の新しい研究開発プロセスにより、技術者・研究者のヒラメキを誘発し、従来考え付かなかったような新材料の発見に繋がると思われる。汎用性の高いマテリアルマップを作り上げ、ものづくりに携わる技術者・研究者が使いやすいものにしていくことは、個々の組織内での研究開発力の向上にとどまらず、国全体の産業競争力の底上げや、さらにはグローバルな観点から SDGs などの社会課題解決へ繋がり、重要であると考えている。また、これらの「材料の地図(マテリアルマップ)」の作成や利活用においては、個々の組織で秘匿したい情報を秘匿しながら、WAVEBASE のユーザ全員でマテリアルマップの性能を向上させる方法論も重要である。

材料開発においては、そもそもコンピュータのなかでバーチャルな材料候補を多数生成することがゴールではなく、原料・製造コスト、プロセス、環境への影響などの制約のもと、実社会で役立つ材料を生み出すことがゴールとなる。このように、MI などの AI 手法やマテリアルマップなどにより、コンピュータ上で生み出された材料候補

を实世界で実現する材料開発技術も必要となるであろう。最先端のロボット技術や AI 技術を活用して、実世界で材料開発を自律的に自動で行い、作成した材料の計測データをフィードバックすることにより、新材料の発見、材料の機能発現機構、製造プロセスの機構解明・最適化などを行うことが欧米のトレンドとなっている。材料データから知識を抽出し価値を生み出す WAVEBASE の次の一步は、抽出した知識の集大成としてのマテリアルマップを構築し、マテリアルマップと人間との協奏、および、AI・ロボットを活用した自律型材料研究開発により、新材料を実際に生み出すという、さらに大きな価値を創出し、社会貢献に繋げる技術開発であると考えている。

また、近年では Chat GPT に代表されるように、AI 技術の破壊的な進展が進んできている。AI 技術を適切に活用し、人間が気づきづらい情報へのアクセスは、これからの技術開発現場のなかで欠くことのできないモノになることは間違いない。一方で、人間でないと感じかない五感やカンコツなどの第六感もまた重要となる。非生産的な作業が R&D のなかにはまだまだ多く残されており、そこに手を打つことで、より多くの時間を研究サイクルの理解や解釈、次の一手に向けてのアイディエーションなどに充てることができるようになるであろう。そのためには、より多くの技術者・研究者が簡単にアクセスしてデータを貯め、データのなかから情報を抽出し、データ間の相関を解釈するという基本動作ができる環境が重要であると考えている。基本動作として実施した基本解析とアドバンスな解析との差を見ることで、活用する解析手法の妥当性を評価する等といったことも可能となる。その先に、人の持つ直感やアイデアをよりクリエイティブに活用する世界観が実現するのではないだろうか。

### ■謝辞

本取り組みにおいて、アルゴリズム・システム開発、事業開発において、数多くの社内外の方にサポートいただき今日に至りました。実証実験においては、住友ゴム工業株式会社様からデータやご助言をいただきました。希土類磁石材料開発においては先端材料技術部の方に、カーボンニュートラル燃料開発においては CN 開発部・第 2 電動先行開発部の方にデータ取得・提供をいただきました。この場を借りてお礼申し上げます。

### ■参考文献

- (1) L. Maaten and G. Hinton, J. Machine Learning Research 9, 2579 (2008)
- (2) L. McInnes *et al.*, arXiv:1802.03426 (2018)
- (3) S. Koizumi *et al.*, J. Appl. Cryst. (2019). 52, 783-790

### ■著者



矢野 正雄

山口 剛生

青木 亮



井手 一人

池田 英恵

外山 泰弘



村井 祐介

小野 寛太

庄司 哲也

機械振興協会 2022 年度機械振興賞 機械振興協会会長賞  
 日本機械学会 2022 年度日本機械学会賞(技術)  
 自動車技術会 第 73 回自動車技術会賞 技術開発賞

## 車両遠隔制御自律走行搬送システムの開発

澤野 拓朗 \*1 狩野 岳史 \*2 安山 翔悟 \*1 岩堀 健人 \*1 池田 圭吾 \*3

### 1. 背景

Connected (コネクティッド), Autonomous/Automated(自動化), Shared(シェアリング), Electric(電動化)といった「CASE」と呼ばれる新しい領域で技術革新が進むなか、クルマの概念は大きく変わろうとしている。また、近年足元では、国内労働人口の減少による人手不足が深刻化している。これらの背景から、生産性を飛躍的に向上できる新たなクルマづくりが求められている。

今回、車両工場において生産性の課題となっていた「車両搬送作業」の自動化に取り組んだ。CASE 領域の技術を最大限活用し、量産車を無人で走行させる、車両遠隔制御自律走行搬送システム (Remote Control auto Driving system: 以降、RCD)を開発。世界に先駆けて量産ラインに導入し、大幅な省人化を実現した(図 1)。



図 1 RCD による車両無人搬送の様子

### 2. システム概要

RCD は、運転操作における認知・判断・操作の機能を車外の制御システムが担い、車と無線通信することで自律走行搬送を行う(図 2)。制御の流れを次に示す。①車両の位置推定は、インフラカメラによるセンシングで、リアルタイムに画像処理を行うことで実施する。②車両運動制御指示値は、制御システムが位置情報・目標経路・車両状態等から総合的に算出する。③無線通信で運動制御指示値を車両に伝達する。④車両は受信した運動制御指示値のとおり、パワートレーンやステアリング、ブレーキ等のアクチュエーターを駆動することで自律走行する。以上の制御を、低遅延・高速周期で繰り返し行うことで、遠隔での自律的な車両運動制御を可能としている。

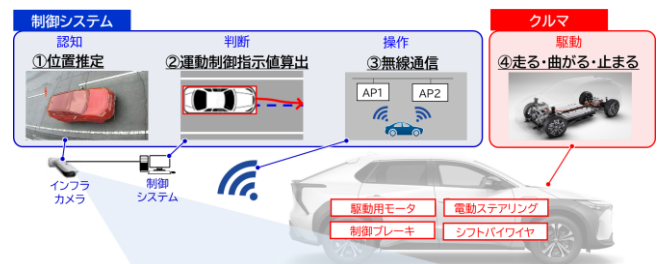


図 2 RCD システム制御概要

### 3. 主要技術

#### 3.1 インフラカメラによる高精度車両位置推定

車両測位で算出する位置座標と方位角は、運動制御指示値算出の基準となるため、高い精度が求められる。既存技術は、車載外界センサの使用や、LiDAR (Light Detection And Ranging)を使用するなどして測位を行っているが、いずれもコストが課題となり普及のハ

\*1 生産本部 元町工場車両品質部

\*2 クルマ開発センター 第2シャシー開発部

\*3 クルマ開発センター 自動運転・先進安全企画部

ードルとなっている。RCD では、インフラカメラを採用し、高速で物体検出とセグメンテーションを同時に行うことができる画像処理モデルを使用。これにより、車両の外形を高速かつ正確に推定し、座標と方位角を精度よく算出することができる。

### 3.2 目標経路を追従できる運動制御値演算法

運動制御の目的は、目標経路に追従して車両を走行させることである。制御における課題は、通信、および、演算処理遅延の無駄時間を加味した算出式とすることと、画像処理では完全には避けることができない方位角の S-N 比悪化影響の克服である。

これらに対して2つの対策を実施した。一つ目は、目標経路の曲率から舵角操作量を決めるフィードフォワード (FF) と、車両位置と目標経路との横偏差から舵角操作量を導くフィードバック (FB) の二自由度制御構成とすることである。安定性確保のため、FB 制御の依存度を抑えつつ FF 制御で経路追従させる設定とした(図 3)。

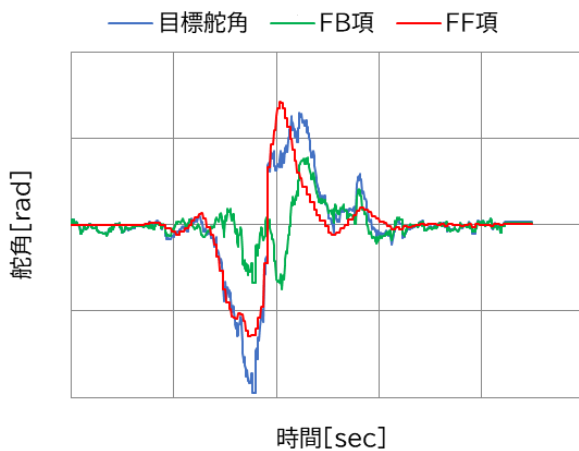


図 3 目標舵角算出

二つ目は、方位角の推定を画像処理のみに依存せず、車載センサを併用した精度向上手法である。画像処理では絶対値が取得できるメリットがあるが S-N 比悪化のデメリットもある。一方、車載センサは S-N 比が良いが、積分誤差が蓄積する課題がある。そこで、画像処理と車載センサ積分双方のメリットを活かすことで、方位角の推定精度を高めた(図 4)。以上により、目標とした制御精度を達成することができた。

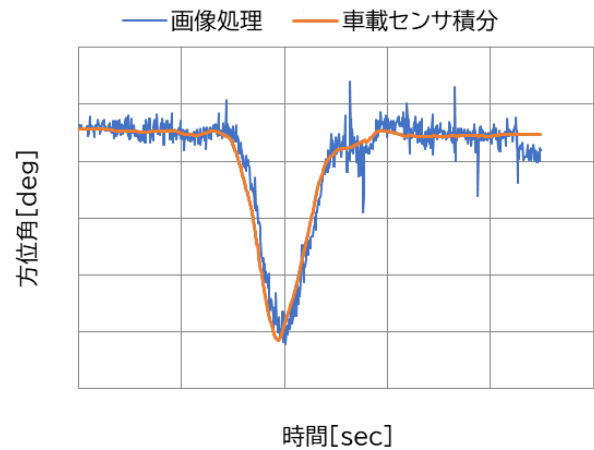


図 4 方位角推定

### 3.3 無線通信の安定化技術

車両遠隔制御においては、無線通信による高速周期での制御値送受信が必要であるため、通信品質の安定化が重要である。しかし無線通信は、電波干渉・ノイズ・フェージングにより品質が劣化するリスクがある。そこで RCD では無線通信を冗長化し、常時、電波強度等の通信品質に関わる指標を評価し続け、総合的に高品質と判断できる通信経路を採用するロジックを導入した(図 5)。これにより、通信遅延や途絶が起きる確率を大幅に低減することができた。また万が一、途絶した場合は、車両が途絶検出し自動でブレーキをかけ停車のうえ、自律走行制御を停止する仕様とすることで、安全性を確保している。

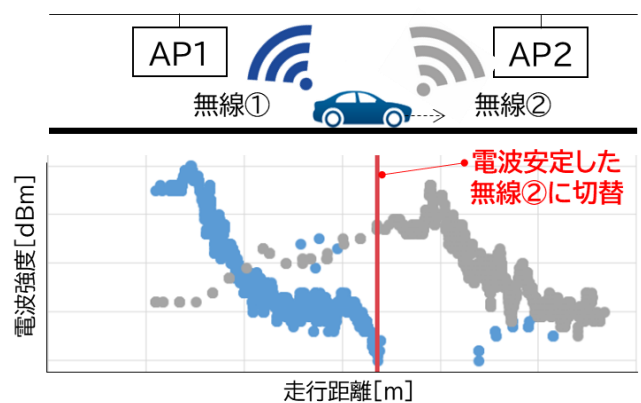


図 5 無線通信冗長化



## 4. 技術の信頼性

RCD は SAE 自動化レベル定義における Level4 に相当するため、システム全体として安全性を確保する必要がある。基本的な考え方は「単一故障による危害性の排除」である。一台一台仕様が異なる量産車が対象のため、車単独ではフェールセーフの満足は難しい。そこで、車と設備が相互に機能補完する仕組みを構築。例えば、万が一車の異常が発生した場合は、設備が車の異常を検知しブレーキをかけて完全停止させる。車と設備が一定時間通信中断する場合は、車がその状態を把握し自ら自動停止する機能を織り込んでいる。

また、実際に RCD を導入する製造現場での評価は、工場非稼働日のみしか実施できず、開発期間確保が課題であった。そこで車の動きをモデル化し、現場環境の制御システムと結合したシミュレーション環境を作成(図 6)。モデルには測位座標の標準偏差や無駄時間を織り込み、机上で仕様と定数適合の開発サイクルを回した。これにより、開発期間を短縮しつつ信頼性を向上させた。

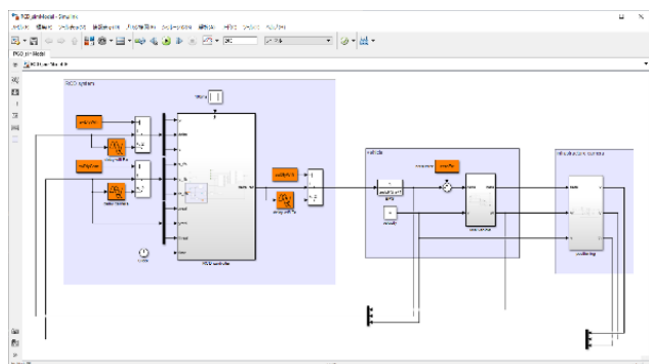


図 6 シミュレーション環境

その上で、屋外・屋内での実車検証環境を構築し、約 3 年間前提条件を変化させながら、評価と改善を繰り返し実施した(図 7)。屋外では、天候や時刻等の制御不可因子を振り、AI モデルとロジックを強化。屋内では、天井が 2.5m 程度の低い建屋も想定し、カメラ高さ等の条件を変えて評価した。これらの結果、システム導入した元町工場では、5 万台以上の無人走行において、安全かつ高い稼働率での運用を実現できた。さらなる価値提供を目指し、今もなお、量産現場でシステムを鍛え続けている。



図 7 屋外・屋内評価場

## 5. まとめ

RCD は「設備による車の運転」という汎用的な技術であり、車両の装備や機能への要件が最小限であるため、普及させやすい技術である。2023 年 6 月トヨタテクニカルワークショップにおいて、RCD を応用した自走生産ラインを発表した(図 8)。数十億円におよぶ搬送投資を削減し、ラインレイアウトを自由自在にすることで新型車の切替リードタイムを大幅に短縮することができる。また、工場の生産性向上のみならず、安全・安心で利便性を高める、さまざまなサービスに転用できる可能性を秘めている。

一方で、RCD は CASE にかかわるさまざまな技術の組み合わせから成り立っているため、より多くのユースケースで活用するためには継続的な進化が必要である。今後もリアルな製造現場で技術を鍛え、モビリティの可能性を追求していく。



図 8 自走生産ライン

省エネルギーセンター 2022 年度省エネ大賞 省エネルギーセンター会長賞

# ピークシフト・デマンドレスポンスによる 電力デマンド低減活動

大竹 可峻 \*1

赤井田 巖 \*1

鈴木 伸岳 \*1

## 1. 背景

近年、国内で太陽光発電等の再生可能エネルギーの導入が推進されてきている一方で、①太陽光発電の天候・昼夜時間帯による発電量変動、②火力発電設備の設備老朽化による休廃止という課題から、新たな需給調整機能の拡大が求められてきている(図 1)。そこで、トヨタは 2019 年から「生産工程のピーク電力の低減」、「自家発電設備の活用」をつうじて、電力需給安定化活動を開始した。

## 2. 本活動の取り組み

### 2.1 生産工程のピーク電力の低減(ピークシフト)

本報告では、従来から実施している「山の面積を減らす省エネ活動」に加えて、「山の高さをずらすピークシフト活動」を実施した(図 2)。この活動を推進するうえでの工夫点として、工場メンバー全員参加でピークシフト活動を実施することで、従業員のマインド醸成、および、社内での活動定着化を狙った(図 3)。

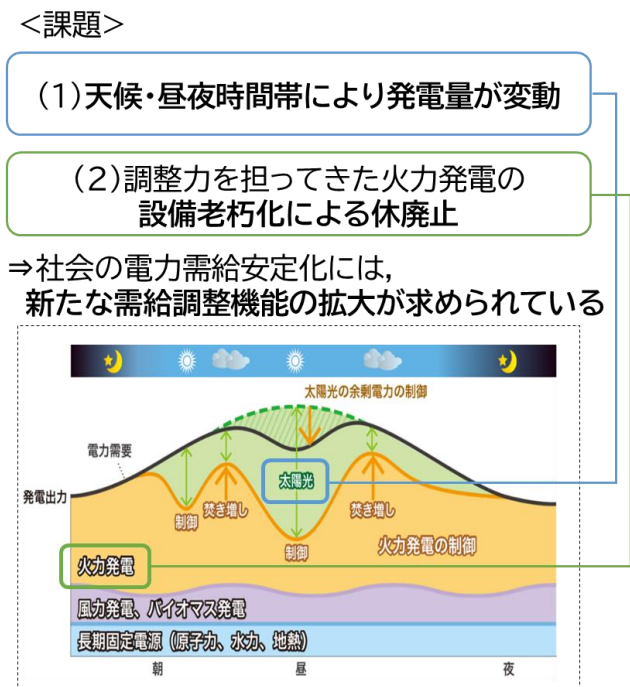
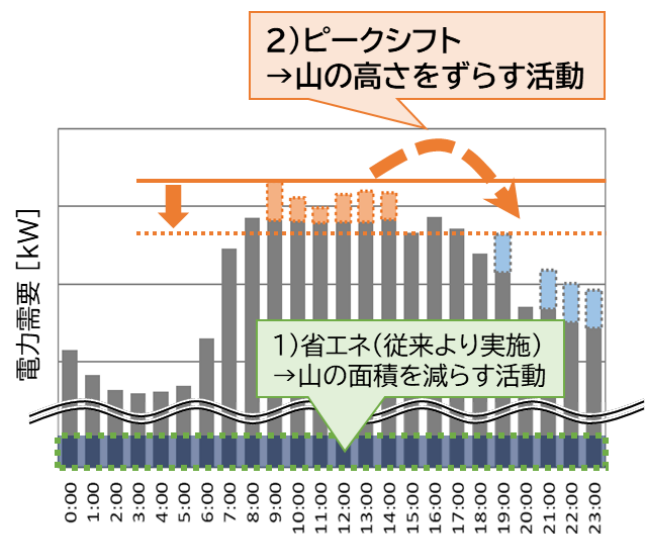


図 1 電力供給のイメージ<sup>(1)</sup>



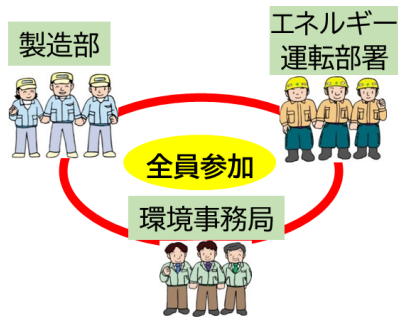
ピーク電力の低減方法  
1)省エネ活動:従来から継続  
2)ピークシフト活動:今回新たに実施

図 2 工場の時間ごとの電力需要

\*1 生産本部 プラント・環境技術部

<工夫点>

全員参加でピークシフト活動を実施



- ・従業員のマインドを醸成
- ・社内での活動定着化 を狙った

図 3 ピークシフトでの工夫点

具体的には、ピークシフト活動では生産工程において電力負荷のタイミングをずらすことができる設備を関係者と協業し、事例の洗い出し、および、シフト検討を実施した。

以下に、ピークシフトでの代表事例として 2 事例を記載する。

事例 1: 構内物流車両のバッテリー充電時間シフト

構内物流では、フォークリフトやタグノバ(図 4-1)が使用されており、それぞれバッテリーが搭載されている。改善前(従来)の運用ではバッテリーの残量が少なくなりしだい、成り行きで充電がされていた(図 4-2)。この運用方法について製造部を巻き込んで検討したところ、ピーク時間帯を避けて充電する方式へ変更しても、現場での運用、および、生産に影響が無いことが検証できた。そこで、実運用に織り込むことで、ピーク電力の低減に繋げることができた(図 5)。



図 4-1 フォークリフト・タグノバ



図 4-2 バッテリー充電場

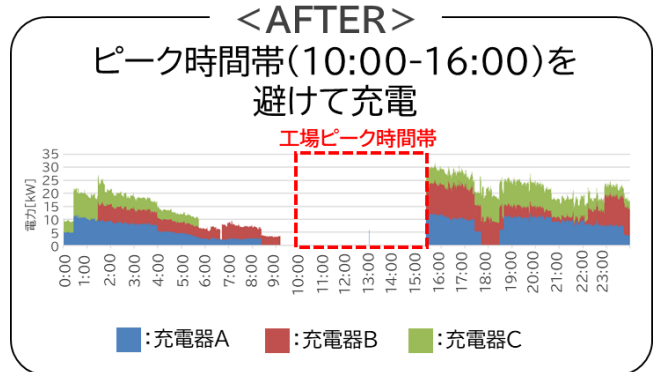
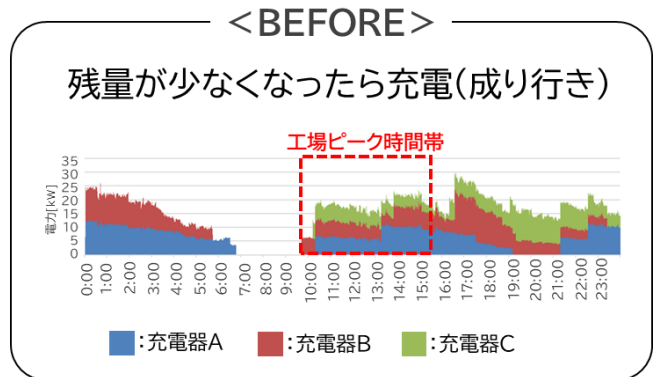


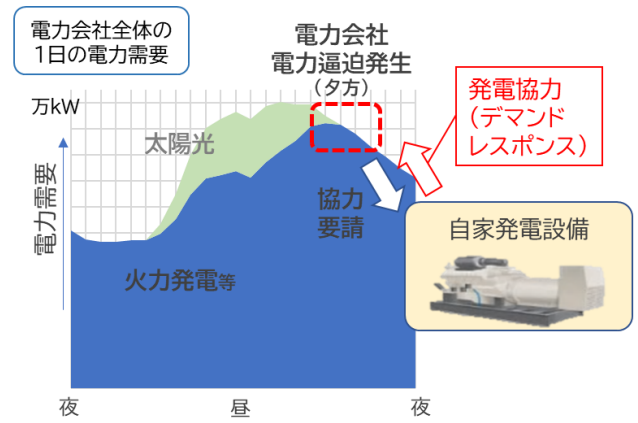
図 5 改善前後の運用

事例 2: 鋳鉄溶解炉の操業形態変更によるシフト

エンジンの部品などを作る鋳造工程にある鋳鉄溶解炉(図 6)の事例である。鋳造工程とは、金属の材料に熱を加えて溶かし、成形する工程であり、本事例の工程では 2 つの溶解炉を有している。改善前の運用では 2 炉ある溶解炉を同時に立ち上げていたが、運用方法を製造部と協議するなかで、2 つの炉の内、1 つの炉は立ち上げ時間をシフトしても生産できることが検証できたため、ピーク電力が低減した(図 7)。



図 6 溶解炉イメージ



電力会社からの要請により, 自家発電設備を稼働/停止させることで需要量を調整

図 8 電力会社全体の電力需要イメージ

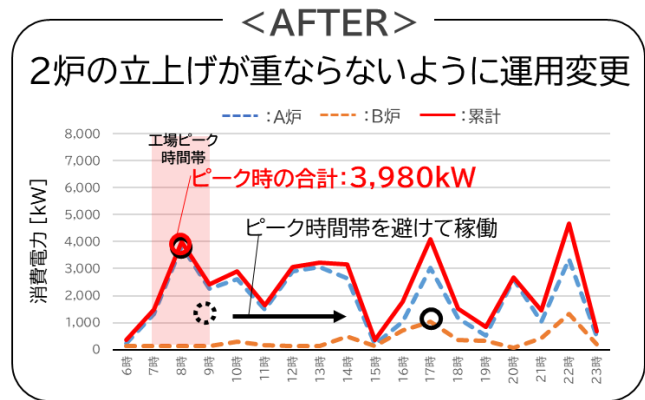
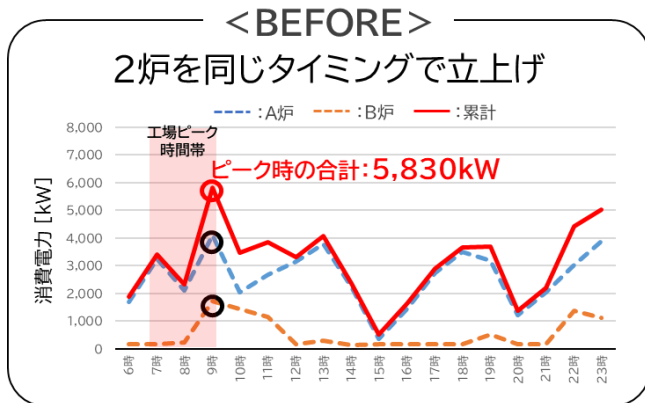


図 7 改善前後の運用

## 2.2 自家発電設備の活用(デマンドレスポンス)

デマンドレスポンス(DR: Demand Response)は, 社会の電力が逼迫した際に電力会社からの要請を受け, 社内の自家発電設備を稼働することで社会の電力需要の調整に貢献する(図 8). 工夫点としては, 自家発電設備が通常運転していない時間を有効活用し, エネルギー運転部署と一丸となってデマンドレスポンスの対応を実施した(図 9).

### <工夫点>

工場	発電機	通常運転している発電機	通常運転していない発電機
本社	ディーゼル発電機		○
	ディーゼル発電機		○
	ガスエンジン発電機	○	
元町	ディーゼル発電機		○
	ガスエンジン発電機	○	
	ガスエンジン発電機	○	
上郷	ディーゼル発電機		○
	ディーゼル発電機		○
	ディーゼル発電機		○
高岡	ディーゼル機関		○
	ガスエンジン発電機	○	

自家発電設備が通常運転していない時間を有効活用

図 9 改善前後の運用

以下に, デマンドレスポンスの事例を記載する.

事例: デマンドレスポンス

デマンドレスポンスでは, 電力会社からの要請にあわせて「自家発電設備を稼働させる下げ DR」と「自家発電設備を停止する上げ DR」の両方に取り組んだ(図 10). 発電機の運用形態にあわせて, 下げ DR では通常稼働していないディーゼル発電機を中心に 22 台, 上げ DR では常時稼働しているガスエンジン発電機を中心に 5 台を活用した. 実績として, 電力会社からの要請に対して自家発電設備を稼働したことで, 社会の電力需要調整に貢献することができた(図 11). また, 運用面として 3 時間前の電力会社からの要請に

対し、確実かつタイムリーに自家発電設備が対応できるように、運転部署を巻き込んで連絡体制を構築した(図12)。



図10 デマンドレスポンス参加自家発電設備



図11 下げDR対応効果の実績

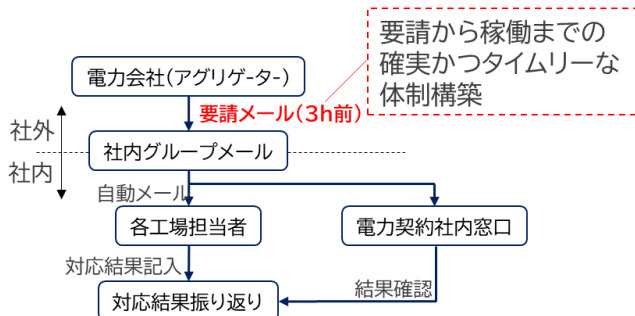


図12 デマンドレスポンス連絡対応体制

### 3. 取り組み効果

ピークシフト活動による効果として、ピーク電力低減効果が4,191kW、電力量低減効果が3,064MWhとなった(表1)。また、デマンドレスポンスの調整電力検出効果を表2に示し、特に下げDRでは、トヨタ11工場のピーク電力の約10%に相当する調整電力を検出することができた。

表1 ピークシフトによる効果

テーマ	ピーク電力低減効果(kW)	省エネ効果(MWh)
物流車両のバッテリー充電時間シフト	174	
排水処理場 砂ろ過器逆洗時間シフト	21	
鑄鉄溶解炉の操業形態変更	1,850	
鍛造仕掛け品変更	700	
空調室外機散水による空調負荷低減	480	542
脱臭装置寄せ止め	47	180
その他事例(14件)	919	2,342
合計	4,191	3,064

表2 デマンドレスポンスによる効果

	下げDR(kW)	上げDR(kW)
調整電力	38,550	14,800

### 4. 活動継続性

ピークシフト活動では、工場の電力需要が大きくなる夏季(7~9月)が主なターゲットとなるため、忘れ防止対策として、ピークシフト対応設備への張り紙(図13)と各製造部門への定期リマインド通知(図14)により、ハード面、ソフト面の両面に対策を実施した。デマンドレスポンス活動では、デマンドレスポンスの対応必須時期と保全時期が重複しないように、運転保全部署と毎年調整して保全計画を作成することで、継続して参画できる体制を構築した。



作業員が分かりやすいように掲示し  
翌年以降も継続して実施できる環境を整備

図13 ピークシフト対応設備への張り紙

<ピークシフトリマインド連絡フロー>

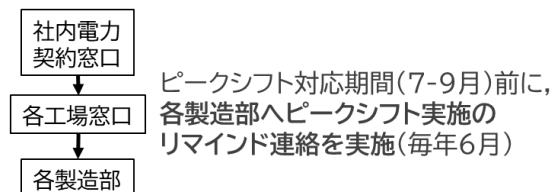


図14 各製造部門へのリマインド通知

## 5. 今後の課題と取り組み計画

ピーク電力低減活動では、社内で運用している既存のエネルギー低減提案書(図 15)へ、デマンド低減効果を成果として報告できるように仕組み化を検討する。加えて、社内優秀事例の表彰制度活用を検討し、従業員のさらなるピークシフトマインドの醸成、および、継続した新規ネタの発掘に繋げていきたい。また、デマンドレスポンス活動では、「老朽機の不具合低減等の信頼性向上活動」と「自動制御化等のデマンドレスポンスの活用機会の拡大」を検討する。

The image shows a form titled 'エネルギー低減提案書' (Energy-saving proposal form). A red-bordered callout box with the text 'ピーク電力低減効果を評価対象として追加' (Add peak electricity reduction effects as evaluation targets) points to a section of the form. The form includes fields for '提案種別' (Proposal type), '提案内容' (Proposal content), and '効果' (Effect). The '効果' section has sub-sections for '削減効果' (Reduction effect) and '削減率' (Reduction rate), with a table for '削減率' (Reduction rate) containing columns for '削減率' (Reduction rate), '削減率' (Reduction rate), and '削減率' (Reduction rate).

図 15 エネルギー提案書イメージ

以上より、世の中のエネルギー逼迫時の需給バランス向上への貢献に向けて、引き続きエネルギーマネジメント活動を推進していきたい。

### ■参考文献

- (1) 出典:資源エネルギー庁「日本のエネルギー2021年度版」  
<https://www.enecho.meti.go.jp/about/pamphlet/energy2021/007/#section1>,  
 (参照2022-05-30)

## 2022年度 社外発表論文一覧

掲載誌名	題目	発表者	所属
自動車技術会論文集	歩行支援デバイスにおける横断歩道および歩行者信号の物体認識手法に関する研究	河村 拓昌 新村 浩平 味岡 弘喜 谷口 真潮	トヨタ自動車 ↑ ↑ ↑
	制御連成パワートレインモデルによるエンジンOBD 開発 - 開発プロセスの効率化 -	鶴見 和樹 佐藤 真治 砂古 昌也 松本 卓也 辻 智之 渥美 拓也	トヨタ自動車 ↑ ↑ ↑ ↑ ↑
	CAE/ML 技術を活用した質量と性能の多機能トレードオフ検討技術の開発	藤田 預詞雄 小島 茂樹 川原 康照	トヨタ自動車 ↑ ↑
	分割計測の実稼働データを用いたロードノイズに対する高寄与ボデーモード抽出	荒井 雄理 中塚 美穂 駒田 匡史 吉田 準史	トヨタ自動車 ↑ ↑ 大阪工業大学
	各輪ブレーキを用いた重心6分力車両運動統合制御	鶴飼 壮太 長坂 学 勝山 悦生	トヨタ自動車 アドヴィックス トヨタ自動車
	2050年の日本の大気質に対する東アジア越境汚染の影響	山田谷 佳明 林 健太郎 森川 多津子 山田 裕之 田中 光太郎 岡山 紳一郎 柴田 芳昭 渡辺 宏江 木所 徹	茨城大学 東京電機大学 日本自動車研究所 東京電機大学 茨城大学 日産自動車 大気環境総合センター 日産自動車 トヨタ自動車
	ガソリンエンジンのリーン燃焼・EGR燃焼に及ぼす燃料組成の影響	金子 和樹 松原 直義 横尾 望 中田 浩一 内木 武虎 小島 健 渡邊 宇	トヨタ自動車 ↑ ↑ ↑ ENEOS ↑ ↑
	屋外型搬送機用の非接触走行中給電システムの設置と評価	清水 修 花房 一義 新崎 晃大 郡司 大輔 酒井 優人 池田 広盛 松岡 史倫	東京大学 TDK TDKラムダ 日本精工 新明工業 トヨタT&S建設 トヨタ自動車
	アクティブサスペンション データベースドプレビュー制御の提案	古田 浩貴 穂積 仁 横田 修太 高島 亨	トヨタ自動車 ↑ ↑ ↑
	リジッドサスペンションの発進時におけるばね下振動解析	香村 伸吾 松田 修明	トヨタ自動車 ↑
	側面視サスペンション配置による前後振動低減	杉山 和徹 香村 伸吾 神戸 弘樹 吉見 剛	トヨタ自動車 ↑ ↑ ↑
	運転中の風景を話題とする深層学習ベース雑談システムのための対話データ収集と対話内容の分析	古賀 光 西島 敏文 杉山 弘晃	トヨタ自動車 ↑ 日本電信電話
	リーフ式サスペンションの振動特性制御によるリヤデフうなり音低減技術	小鍛冶 純 駒田 匡史 佐藤 秀雄 玉理 順造 鈴木 浩司 杉山 平	トヨタ自動車 ↑ ↑ ↑ エステック ↑ ↑
	水素エンジンにおける異常燃焼の発生メカニズムの解析	松原 直義 宮元 敬範 丹野 史朗 宮川 淳 阿部 祐也 横尾 望 金子 和樹 高橋 大志 中田 浩一	トヨタ自動車 ↑ ↑ ↑ ↑ デンソー トヨタ自動車 ↑ ↑ ↑
	ランダム振動試験における電動車用駆動モータ耐久性性能のCAE 予測手法	那須野 喜史 西村 友孝 荒川 和哉	トヨタ自動車 ↑ ↑

掲載誌名	題目	発表者	所属
自動車技術会論文集	走行中ワイヤレス給電におけるパルス密度変調を用いた受電電力制御の性能評価	永井 栄寿 藤田 稔之 藤本 博志 池村 亮祐 津下 聖悟 橋本 俊哉	東京大学 ↑ ↑ トヨタ自動車 ↑ ↑
	走行中ワイヤレス給電における電力制御の研究 －アクティブ整流の低速実車試験－	池村 亮祐 津下 聖悟 橋本 俊哉 永井 栄寿 藤田 稔之 藤本 博志	トヨタ自動車 ↑ ↑ 東京大学 ↑ ↑
	衝突解析における教師データ数と機械学習予測精度の相関関係の調査	橋本 将太 小島 茂樹 川原 康照	トヨタ自動車 ↑ ↑
	量子コンピューティングの自動車材料デザインへの適用可能性 －水素分子系の分子動力学(MD)シミュレーションへの適用－	菅 義訓 高 翔 芝宮 徹 楊 天任	トヨタ自動車 QunaSys ↑ ↑
	モータシステムベンチにおける30MHz 以下放射ノイズ予測手法の構築	山下 あゆ美 太田 総一郎 伊澤 広敏 舟橋 大輔	トヨタ自動車 ↑ ↑ ↑
	Bayesian Active Learning を用いたリジッドアクスルサスペンションのセットベース設計法	白石 英樹 新谷 浩平 岩田 基史 高田 泰明	トヨタ自動車 ↑ ↑ ↑
	市場データに基づく運転負荷軽減システムの事故低減効果解析	大槻 賢 清水 毅 池戸 祐司	トヨタ自動車 ↑ ↑
	Isogeometric 解析における動的荷重が作用する構造部材の形状最適化	大鹿 穂積 有本 慎一 川原 康照 古橋 輝一 横山 優太 杉山 裕文 岡澤 重信	山梨大学 トヨタ自動車 ↑ 山梨大学 ↑ ↑ ↑
	コンセプトテストにおける心理的距離尺度を考慮した調査協力者の選定法に関する研究	安藤 昌也 齋藤 亨 前川 元貴 小林 英樹	千葉工業大学 トヨタ自動車 ↑ ↑
	International Journal of Automotive Engineering (IJAE)	Proposal of Risk Estimation Index from Driver Behaviour for Approaching and Overtaking Vulnerable Road User	Manh-Dung Vu Sueharu Nagiri  Hirofumi Aoki Tatsuya Suzuki Quy Hung Nguyen Van Shouji Itou Akira Hattori
The Study of Connected System Specification for Traffic Flow Control with Effective Lane Utilization		Yoshiaki Irie Daisuke Akasaka	Toyota Motor Corporation MathWorks Japan
SAE Technical Paper	Deployment of OTA-Upgradable Teammate Advanced Drive	Tomoya Kawasaki Kaiji Itabashi Derek Caveney Masaki Kitago Yuichiro Nara Takashi Oda	Toyota Motor Corporation Woven Core, Inc. Toyota Motor North America, Inc. Woven Core, Inc. ↑ Toyota Motor Corporation
	Development of Automatic Door Lock System to Help Prevent Collisions between Opened Doors and Approaching Vehicles When Exiting Vehicle	Koji Takeuchi Masaho Ishida	Toyota Motor Corporation ↑
	Road Crossing Assistance Method Using Object Detection Based on Deep Learning	Hiroaki Kawamura Kohei Shintani Hiroki Mima Mashio Taniguchi	Toyota Motor Corporation ↑ ↑ ↑
	Cabin Comfort Improvement and Heating Energy Reduction under Cold-Condition by Using Radiative Heater	Hirotsuka Sasaki Daisuke Sakamoto	Toyota Motor Corporation ↑
	Effect of Aero Covers on Underfloor Wind Noise; Conclusions from a Wind Tunnel Validated Aero-Vibro-Acoustic Model	Susumu Terakado Paul Bremner	Toyota Motor Corporation AeroHydroPLUS



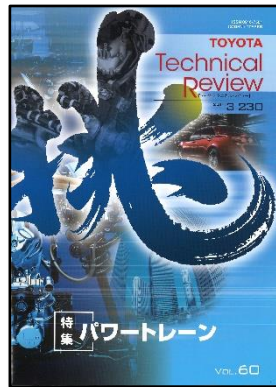
掲載誌名	題目	発表者	所属
SAE Technical Paper	Variable Axial Composite Lightweight Automotive Parts Using Anisotropic Topology Optimization and Tailored Fiber Placement	Tsuyoshi Nomura Yoshihiro Iwano Atsushi Kawamoto Katsuharu Yoshikawa  Axel Spickenheuer	Toyota Central R&D Labs., Inc. Toyota Motor Corporation Toyota Central R&D Labs., Inc. Tokai Industrial Sewing Machines Co., Ltd. Leibniz Institute of Polymer Research Dresden e.V.
	Development of In Mold Coating Clear Coat Paint for Carbon Fiber Sheet Molding Compound Roof	Katsunori Ito Keiji Ambo	Toyota Motor Corporation ↑
	Research on Ultra-High Viscosity Index Engine Oil: Part 1 - "Flat Viscosity" Concept and Contribution to Carbon Neutrality	Kazuo Yamamori Yuta Uematsu Satoshi Hirano Noriya Ishizaki Shunsuke Mori Takashi Koyama Takashi Suzuki Kotaro Wada	Toyota Motor Corporation ↑ ↑ ↑ ↑ ↑ ↑ ENEOS Corporation
	Research on Ultra-High Viscosity Index Engine Oil: Part 2 - Influence of Engine Oil Evaporation Characteristics on Oil Consumption of Internal Combustion Engines	Takashi Koyama Takashi Suzuki Kazuo Yamamori Yuta Uematsu Satoshi Hirano Noriya Ishizaki Kotaro Wada	Toyota Motor Corporation ↑ ↑ ↑ ↑ ↑ ↑ ENEOS Corporation
	Development of a Ceramic EHC	Takahiro Sadamitsu Toshinori Oki Shingo Korenaga Shigemasa Hirooka Shingo Iwasaki Tatsuo Iida	Toyota Motor Corporation ↑ ↑ ↑ ↑ NGK Insulators Ltd. Toyota Motor Corporation
	Vehicle Surge Reduction Technology during Towing in Parallel HEV Pickup Truck	Shingo Okaya Jun Kokaji Luis Quinteros Yoshio Hasegawa Seiji Masunaga	Toyota Motor Corporation ↑ Toyota Motor North America, Inc. Toyota Motor Corporation ↑
	Toyota's New Hybrid Unit "L4A0"	Guodong Tan Masashi Ikemura Yoshio Hasegawa Takao Ohki Masayuki Baba Atsuro Nakamura Craig Herring Atsushi Niinomi Makoto Hamano Yasuhiro Mizoguchi	Toyota Motor Corporation ↑ ↑ ↑ ↑ ↑ ↑ Toyota Motor North America, Inc. AISIN Corporation ↑ ↑
	Development of Safety Performance for FC Stack in the New Toyota FCEV	Kei Enomoto Atsushi Ida Takashi Harada Hiroaki Takeuchi	Toyota Motor Corporation ↑ ↑ ↑
	Data-Driven Set Based Concurrent Engineering Method for Multidisciplinary Design Optimization	Kohei Shintani Atsuji Abe Minoru Tsuchiyama	Toyota Motor Corporation ↑ ↑
	Development of Steering Control Method for Steer-by-Wire System Requiring No Changes in Steering Wheel Hand Position	Toru Takashima Yoshio Kudo Kenji Shibata Takashi Kodera Isao Namikawa	Toyota Motor Corporation ↑ ↑ ↑ JTEKT Corporation ↑
日本機械学会論文集	3次元はり構造物の固有モードの節位置制御に必要な反射・透過係数の計算法	松村 雄一 勝野 遥翔 山田 朋 駒田 匡史 森田 英憲	岐阜大学 岐阜大学大学院 ↑ トヨタ自動車 トヨタ自動車九州
	薄肉正方形断面梁のねじり座屈後の応力および変位の近似的評価	古巣 克也 尼子 龍幸 中川 稔章 浜辺 勉 青木 典久	豊田中央研究所 ↑ ↑ トヨタ自動車 ↑
	機械学習を用いた車両ドライバビリティ性能の自動評価法	田島 尚史 新谷 浩平 尾越 敦貴 北野 翔太 岩田 基史	トヨタ自動車 ↑ ↑ ↑ ↑
	旋回時の横力とセルフライニングトルクによるストラット式フロントサスペンションのコンプライアンスステアに関する研究	河田 哲明 河野 忠士 佐久間 均	ダイハツ工業(現 愛知工業大学) トヨタ自動車 ↑
	旋回横力が作用するフロントサスペンションのキングピン軸挙動に関する研究	河田 哲明 河野 忠士 佐久間 均	ダイハツ工業(現 愛知工業大学) トヨタ自動車 ↑

掲載誌名	題目	発表者	所属
Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing	Non-destructive depth analysis of acidic phosphate ester boundary layers by hard X-ray photoelectron spectroscopy	Naoko Takechi -Takahashi Kensuke Matsushima Noritake Isomura Satoru Kosaka Mamoru Tohyama Hiroshi Moritani Takayuki Aoyama Toshinari Sano Satoru Maegawa Fumihiko Itoigawa	Toyota Central R&D Labs., Inc Nagoya Institute of Technology Toyota Central R&D Labs., Inc ↑ ↑ ↑ ↑ ↑ Toyota Motor Corporation Nagoya Institute of Technology ↑
	A set-based approach to dynamic system design using physics informed neural network	Kohei Shintani Eiji Nakatsugawa Minoru Tsuchiyama	Toyota Motor Corporation ↑ ↑

# Back Number Index



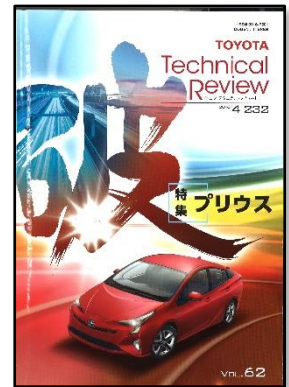
Vol.59(2013年3月)  
特集:生産技術



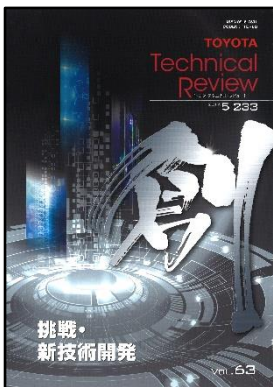
Vol.60(2014年3月)  
特集:パワートレーン



Vol.61(2015年3月)  
特集:MIRAI  
第2特集:ITS・高度運転支援



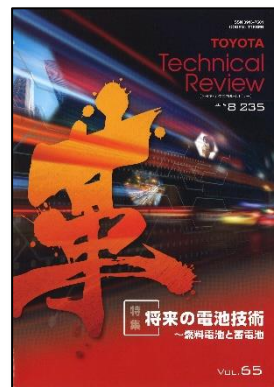
Vol.62(2016年4月)  
特集:プリウス



Vol.63(2017年5月)  
挑戦・新技術開発



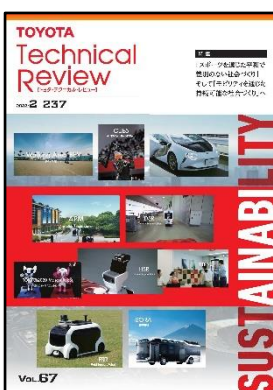
Vol.64(2018年5月)  
特集:TNGA パワートレーン



Vol.65(2019年8月)  
特集:将来の電池技術  
～燃料電池と蓄電池



Vol.66(2021年2月)  
特集:多様化する価値とクルマ創り  
～新型MIRAIとGRヤリス～



Vol.67(2022年2月)  
特集:「スポーツを通じた平和で  
差別のない社会づくり」そ  
して「モビリティを通じた持  
続可能な社会づくり」へ



Vol.68(2023年4月)  
特集:カーボンニュートラル達成  
に向けたフルラインアップ  
戦略

**TOYOTA Technical Review Vol.69 No.1**

© 2023 TOYOTA MOTOR CORPORATION

( 禁 無 断 転 載 )

発 行 所 トヨタ自動車株式会社  
先進技術統括部  
〒471-8572 愛知県豊田市トヨタ町1  
(0565)28-2121(代表)

発 行 人 小東 哲也  
企 画 森 みどり , 平原 千恵子 , 久保 舞由加  
編 集 株式会社トヨタエンタプライズ  
( 事 務 局 ) トヨタ事業所 業務サポート室 加藤 慎吾  
発 行 2023年9月25日