

TOYOTA Technical Review

[トヨタ・テクニカル・レビュー]



カーボンニュートラル達成に向けたマルチパスウェイ

2024/3 **Vol.69 No.2**

【まえがき】

今回の TOYOTA Technical Review (Vol.69-2) の特集テーマは「カーボンニュートラル達成に向けたマルチパスウェイ」となります。

トヨタは「モビリティカンパニーへの変革」というビジョン実現のために、クルマの未来を変える行動を掲げています。1 つ目に「真のマルチパスウェイ(電動化)」, 2 つ目に「ソフトウェア活用(知能化)」, 3 つ目に「Mobility for ALL(多様化)」, 4 つ目に「未来のモノづくり(工場変革)」です。

TOYOTA Technical Review では、まずマルチパスウェイを取り上げてきました。トヨタが目指すマルチパスウェイとは、市場ごとに異なるエネルギー事情やクルマの使われ方に応えることができる多様な選択肢を準備することです。BEV(Battery Electric Vehicle), PHEV(Plug-in Hybrid Electric Vehicle), HEV(Hybrid Electric Vehicle), エンジン, 水素, FCEV(Fuel Cell Electric Vehicle)といった多様な選択肢から、誰ひとり取り残すことのない豊かな社会、カーボンニュートラル(CN)達成を目指しています。

前々回(Vol.68)は BEV, FCEV を中心に、CN を達成するために必要な「エネルギーを『つくる, はこぶ, つかう』」フェーズの内、「つかう」に焦点をあてた活動を、前回(Vol.69-1)は HEV, PHEV や燃料を「つくる」活動を取り上げました。そして今回は CO₂ を「吸収する」活動にまで焦点を広げています。

- お客様の多様な価値観やライフスタイルに寄り添う 4 つのバリエーションでマルチパスウェイを具現化した「クラウン」
- 電動車にとって重要なキーデバイスである「パワー半導体」や電動車の燃費・電費向上に貢献する「潤滑技術」、安心・安全にこだわった「BEV 用低導電率クーラント開発」
- 「グリーンカーボンやブルーカーボン」といった森林や海藻を活用した CO₂ 吸収の取り組み、偏西風を利用して発電を目指す「マザーシッププロジェクト」

多種多様な面からの CN 達成に向けたアプローチを紹介しています。

トヨタは今後もマルチパスウェイを軸に、多様なニーズに応える選択肢を増やししながら電動車の普及を目指し、CN の実現に貢献していきます。そして、モビリティを通じて人々の生活を豊かにするモビリティカンパニーへの変革に挑戦してまいります。

目 次

▶特集「カーボンニュートラル達成に向けたマルチパスウェイ」

・TOYOTA CROWN

代表執筆者： 清水 竜太郎, 宮崎 満則, 佐々 長孝, 高橋 慶光 ……3

・車載用パワー半導体の進化と今後の展望

堀田 幸司, 保田 智史, 妹尾 賢 ……21

・電動化に貢献するパワートレイン潤滑技術

新吉 隆利, 山守 一雄, 床桜 大輔 ……39

・BEV 用低導電率クーラントの開発

高野 雅幸, 河野 崇, 草野 雄也, 吉井 揚一郎, 木月 一善, 佐々木 悠 ……50

・グリーンカーボン, ブルーカーボン

山下 哲也, 高橋 理, 角谷 忠義, 古川 丈真, 河田 優人, 松澤 敏広, 久野 央志 ……57

・将来の日本を救う！滞空性空中プラットフォーム“マザーシップ”プロジェクトの企画と開発

板倉 英二 ……67

▶論文／解説

・モビリティの進化とIoT化に貢献する金属ナノ粒子の開発

村井 盾哉, 久保山 大貴 ……78

▶受賞技術概要

・バイポーラ型ニッケル水素電池

奥村 素宜, 海谷 裕之, 森岡 怜史, 寺島 大樹, 奥田 元章 ……85

・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の開発

田島 尚史, 新谷 浩平, 尾越 敦貴, 北野 翔太, 岩田 基史 ……88

▶2023 年度 上期 社外発表論文一覧

……92

TOYOTA CROWN

代表執筆者： 清水 竜太郎 *1 宮崎 満則 *2
佐々 長孝 *3 高橋 慶光 *3

要旨

クラウンは、トヨタ独自の国産技術で作り上げた初の量産型乗用車として 1955 年に誕生。戦後間もない時代に、初の独自開発で苦難を重ね高級車を作り上げた「革新と挑戦」の DNA は、その後の歴代クラウンに受け継がれ、常に時代の一步先を行く新しい価値を追求し、多くのお客様にご愛用いただいていた。そして時代変化にあわせ、多様化するライフスタイル/ライフステージに寄り添う存在として変化を続けた。

16 代目クラウンは、その開発にあたり、「クラウンとは何か」を徹底的に見つめ直し、「これからの時代のクラウンらしさ」を追求した結果、全く新しいクラウンを提案。その内容と技術について概説する。

キーワード CROWN, HEV, PHEV, FCEV, TNGA, CROSSOVER, SPORT, ESTATE, SEDAN,
革新と挑戦

1. まえがき

新型クラウンでは初代より脈々と受け継がれてきた「革新と挑戦」のスピリットを基盤に、お客様一人ひとりの価値観や、多様化するニーズにお応えするモデルの開発を進めてきた。また「日本のクラウン」を「世界のクラウン」として、グローバルなブランド展開にも挑戦。新しい時代のクラウンとして誕生した個性的な 4 つのスタイルの「クラウン群」について概説する。

2. 開発の狙いと車両概要

2.1 16 代目クラウン開発の歩み

開発にあたり、我々は「クラウンとは何か？」を見つめ直すことから始めた。先達・歴代主査がどのような「想い」を持ってクラウンの開発に挑んできたのか。その想いに触れ、原点に立ち返ることでみえてきたのは、常に「お客様の幸せ」を願い、苦悩し、新しいことへの挑戦を積み重ねてきた歴史であった。

駆動方式やカタチではなく、時代に沿ってお客様のことを真剣に考え、「自分の心でいいと思ったもの、本当のお客様の心が入ったものをつくる（初代主査・中村健也）」ことであった。まさに「革新と挑戦」というスピリットそのものであり、もっといいクルマづくりの原点でもあった。そこに気づくことで私たちは素直に、新しいクラウンの開発を進めることができた。

2.2 クラウン群について

16 代目クラウンは最終的に 4 つのクラウンを提案した。この多様性の時代、クルマの使われ方、クルマに求められるものも多岐にわたっており、お客様がご使用になるシーンに想いを馳せながら、「これからの時代のクラウン」の創造に至った。

- セダンと SUV(Sport Utility Vehicle)を融合させた新しいスタイルの「クロスオーバー」
- エモーショナルな雰囲気を持ち、俊敏でスポーティーな走りをお楽しみいただける「スポーツ」
- 王道 FR(フロントエンジン・後輪駆動: Front engine Rear drive), 新たなフォーマル表現とともにショーファーニーズにも応える「セダン」
- 大人の雰囲気でも余裕のある走りを持つ機能的な SUV「エステート」

*1 Mid-size Vehicle Company MSZ

*2 Mid-size Vehicle Company MSデザイン部

*3 Mid-size Vehicle Company MS制御開発部

これらを「クラウン群」として、図 1 に示すように、さまざまなボディタイプでの拡がりをつくり、お客様の多様なニーズにお応えしていくことを目指した。こだわったのは、これら 4 つすべて「クラウン」であるということ。質感や乗り味など、長年築き上げてきた「クラウンらしさ」はシリーズの共通項として練り込みながら、各々の個性を特徴づけることで、クラウンブランドのさらなる発展を目指した。

また、カーボンニュートラルに向けたシリーズの取り組みとして電動化も拡大。群としての商品にあわせ GA-K、GA-L の 2 種類のプラットフォームを活用し、従来の HEV (Hybrid Electric Vehicle) に加え、PHEV (Plug-in Hybrid Electric Vehicle) や水素で動く FCEV (Fuel Cell Electric Vehicle) もラインアップ。Fun to Drive の要素も織り交ぜながら、シリーズとしても全方位でカーボンニュートラルに取り組んだ。



図 1 クラウン群

2.3 トヨタブランドの「FLAGSHIP」として

前述のように、4 つのタイプはどれをとっても「クラウン」であり、お客様がどのクラウンをお選びいただいても「お客様にとって最良のクラウン」、すなわち「YOUR FLAGSHIP (あなたにとってのフラッグシップ)」となれることを目指した。一方で、クルマとしては 4 つそれぞれの個性と特徴を延ばすことも大事な商品力として両立する必要があり、その実現のために関係者で時間をかけて重点的に議論したのが以下である。

2.3.1 スタイリングとパッケージング

大径タイヤによる力強いスタイルと、シンプルで上質なデザイン、ダイヤモンドメッシュグリルを共通のアイデンテ

ィティとしながら、「とにかくカッコいいクルマを」という意識のもと、それぞれの個性が際立つスタイリッシュな意匠開発を進めた。一方で、優れた乗降性と視界の良さを実現するヒップポイントの設定や、居住性を高めるしっかりとしたカップルディスタンスの確保、ユーティリティで大事な荷室容量など、どの席に座っても特等席と感じられ、上質で居心地のいい室内空間、そして使い勝手の良いクルマを実現するパッケージングとの両立にこだわった。

2.3.2 クラウンらしさを体現する車両性能

スタイリングの良さはそのまま走りの良さに直結しなければならないが、ボディタイプ違い、プラットフォーム違い、味付けの違いがあるなかで、群として大切にしているクラウンらしさを、どの車でもしっかりと実現しながら、個性を伸ばせる車両性能開発を推進した。

2.3.3 パワートレーンラインアップ

4 つのクラウンとして「スポーティーに、俊敏に」走りたいたいクラウンもあれば、「ゆったりと、どっしりと」走りたいたいクラウンもある。こうしたキャラクターを引き立て、さらに Fun to Drive とカーボンニュートラルの両立ができるパワートレーンラインアップを進めたことで、クラウンとして初めてとなる PHEV の導入や、100%電気(水素燃料電池)で走るクラウンも誕生させることができた。

3. 多様な価値観に応えるデザイン

16 代目のデザイン開発は原点に立ち返り、規定概念を取り払い、「新しい時代のクラウン」、「お客様が本当に欲しいと思ってもらえるクルマ」、「ブランドの継承と進化」を目指し、若手デザイナーを中心に自由な発想のもとでアイデア出しが進んだ。

“CROWN DESIGN CONCEPT”と銘打ち、トヨタブランドのフラッグシップとして「革新と挑戦」の具現化を目指したデザイン開発について説明する。

3.1 エクステリアデザイン

若手を中心に「自分たちが乗りたいセダン」としての 1 枚のスケッチ(図 2)。

16 代目のデザイン開発は、「革新と挑戦」を象徴するクロスオーバーから始まった。流麗なシルエットで 3 Box セダンからの脱却を図るとともに、大径タイヤを採用してリフトアップ化。ダイナミックな走りを予感させる力強いスタンスを実現した(図 3)。

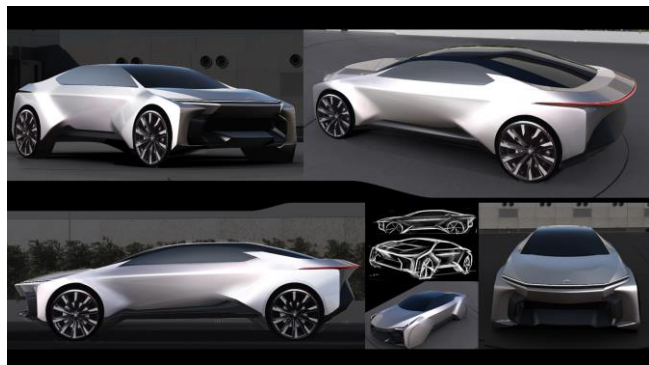


図 2 エクステリアスケッチ



図 3 エクステリア(クロスオーバー)

また、そのなかで生まれたのが「トヨタフラッグシップフェイス」。レーダーなど安全機能やヘッドランプなどを集約させたハンマーヘッドと力強いスタンスを表現したアンダープライオリティから構成し、空力性能・冷却・歩行者保護に配慮しながら、全体としてシンプルかつ精悍な表情をつくり上げた。このコンセプトは少しずつアレンジを加えながらシリーズへの展開を進めた(図 4)。



図 4 (上)フラッグシップフェイス(クロスオーバー)
(中)フラッグシップフェイス(スポーツ)
(下)フラッグシップフェイス(セダン)

また、キャビンのスタイリングについては、それぞれのボディタイプの特徴を引き立て、さらにこれまでにない新しさを表現する造形にチャレンジした。クロスオーバーについては前述のとおりであるが、スポーツはショートオーバーハングのインバランスプロポーションを狙い、後継させたルーフモーションと前傾したバックウインドウでリアタイヤへの踏ん張りを強調するシルエットとすることで、ダイナミックな走りを予感させる力強いスタンスを狙った。特にリアフェンダーの張り出し感にはトヨタ(イチ)の深さであり、モノづくりの現場の頑張りでも実現できた造形である(図 5)。詳しくは後述する。



図 5 エクステリア(スポーツ)

セダンについては、FR であることを活かし、ロングノーズと6ライトキャビンで伸びやかな FR クーペシルエツトを狙い、前後に長い水平軸を貫いた安定感のあるフォーマルな佇まいと、威厳と風格を感じさせるワイド&ローのスタンスを実現した。特に伸びやかなシルエツトの見栄えに貢献している水平ベルトラインは最もこだわった部分であり、最も苦労した部分でもある。水平ベルトラインの実現にはインレットの高さ位置を従来から大きく下げることが必要であり、設計的な課題に加え、元町工場組立ラインでの燃料タンクやリアサスペンションの組み付け作業の成立性に大きな課題があったが、スポーツのリアフェンダー同様に、モノづくりの現場の工夫と頑張りのおかげで実現できたシルエツトである(図 6)。



図 6 エクステリア(セダン)

3.2 内装デザイン

3.2.1 アイランドアーキテクチャー

室内の風景を、壁紙である「背景」と目を引く「機能アイランド」に分け、さらに素材や色に自由度を持たせることにより、同じ形状ながら全く異なる印象を感じていただくことができる。機能の存在感や空間の豊かさなど目を引くポイントを車種ごとに換え、価値観を表現した(図 7)。



図 7 アイランドアーキテクチャー

3.2.2 前席の空間の狙い

運転席は直感操作を可能とするドライビングの特等席を意識した。表示や操作機器を水平に集約し、運転中の視線移動や動作を最小化できるように配置。機能性の高さを視覚的にアピールするドライビングアイランド、ナビ・メーター・レジスターをくくった構成、欲しい情報や機能を水平軸上に集め、レイヤー的に配置した明快な機能ゾーニングとした(図 8)。

助手席は開放感と居心地の特等席を意識した。フローティング造形による圧迫感の無い水平的な見晴らしや、ひとつづきの造形とソフトな素材配置による包まれるような安心感を演出。水平に統一されたテーマによりワイド方向へ視線移動を遮らない伸びやかな構成とし、助手席からセンターまで金属加飾を延長させることで視覚的な広がりも感じるようなデザインとした(図 9)。



図 8 空間の狙い/運転席



図 9 空間の狙い/助手席

3.3 カラーデザインのチャレンジ

3.3.1 新しい時代のクラウンに相応しい新色開発

クロスオーバーのカラーデザインではこれまでの縦のヒエラルキーではなく、横の広がりを重視した世界観のコーディネーションを狙い、新しい時代のクラウンに相応しい特徴的な新色開発を進めた。

一つは「プレシャスブロンズ」。金属のなかでも無機質ではない有彩色の金属「ブロンズ」に注目。硬質なテック感と情感のあるエモーショナルさを融合させ、本金属を追求した色目であり甘くなり過ぎずジェンダーフリーに乗りこなせるカラーを目指した。もう一つは「プレシャスレイ」。華やかなエモーショナルさを体現する色として開発。グレード限定色としての特別感を狙った(図 10)。



図 10 左:プレシャスブロンズ 右:プレシャスレイ

3.3.2 質感に拘った新しい内装素材

新しい形のクラウンとなるスポーツとエステートでは、新しい表現の内装素材を採用し、上質さやスポーティーさを追求。毛穴を模したテンダーシボとクラウド柄のプリントを組み合せ、より柔らかく上質な雰囲気演出。ラスター表皮ではラスターという光輝材を入れた表皮を用いることで、強い陰影と発色を両立させ、スポーティーさを

より際立たせたコーディネーションに昇華させることができた(図 11)。

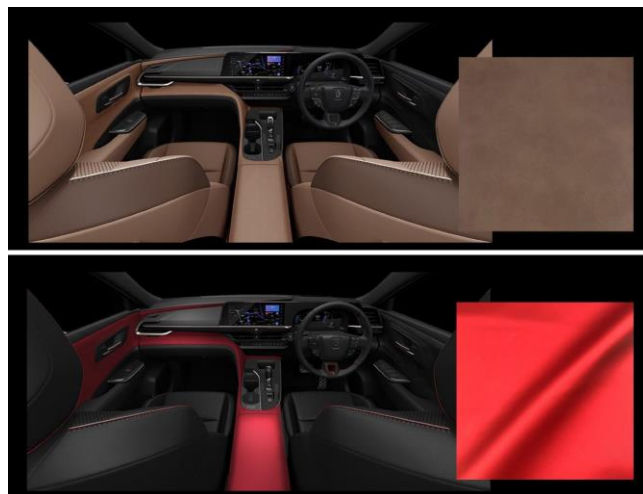


図 11 上:テンダーシボ×クラウド柄プリント
下:ラスター表皮

3.4 デザインを実現させるパネル成形技術

スポーツのリアフェンダーでは『初期デザインを見たときの感動を、お客様にもそのままお伝えしたい』というモノづくり側の熱い思いがあった。美しいデザインに共感したものの、大きく張り出したリアフェンダー(図 12)の実現には困難を極めた。



図 12 大きく張り出したリアフェンダー

ここまでの大きな張り出しを一枚の鋼板から造り出すことに加え、アーチモールのシャープな稜線をともなう形状は『線ズレ』というプレス不具合を起こす。『線ズレ』とは図 13 に示すように、プレス成形途中の接触跡がずれて製品面内に線状に残る不具合である。図 14 にプレス成形における線ズレ発生の様子を示す。



図 13 プレス課題イメージ

防ぐことは従来プレス技術では不可能であった。

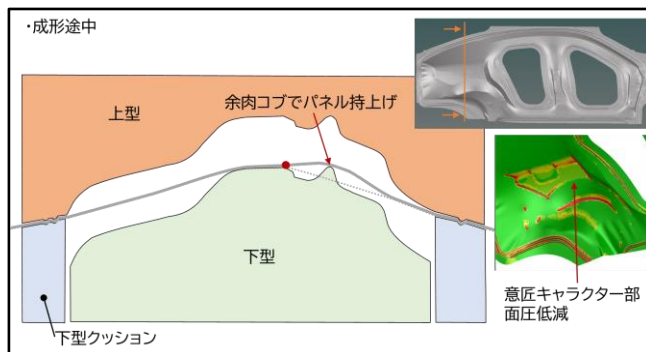


図 15 プレス型内対策イメージ

『必要な時に余肉が存在し、成形後半は余肉がなくなる、そんな型ができないか？』技術者の柔軟な発想と、初期デザインの感動を、お客様にもそのままお伝えしたいという強い意志のもと、試行錯誤を重ね、これまでにない可動型構造(図 16)とすることで、意匠の実現に成功した。

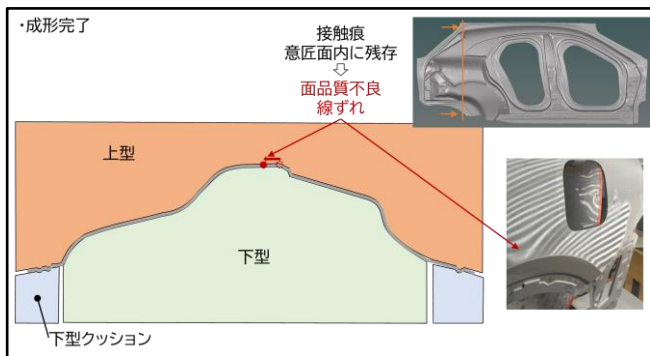
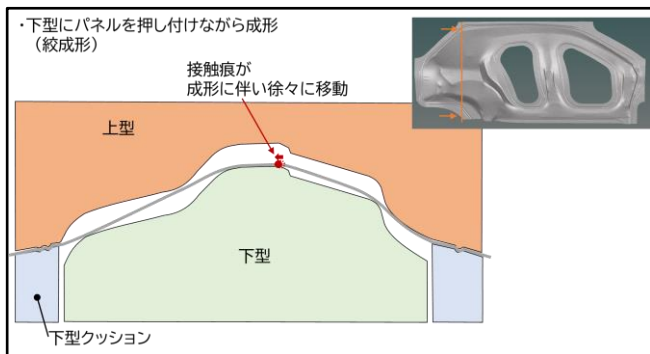
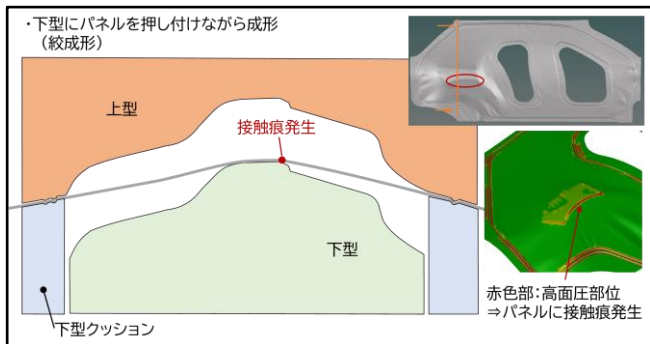


図 14 プレス型内 発生メカニズムイメージ

この線ズレの防止には、図 15 にあるように、アーチ稜線(線ズレ発生ポイント)のとなり、より背の高い余肉こぶを設け、初期接触点をアーチ稜線からずらすことが有効であるが、反面その余肉部は背が高く、深い成形となるのでパネルのワレを誘発する。線ズレとワレの二つを

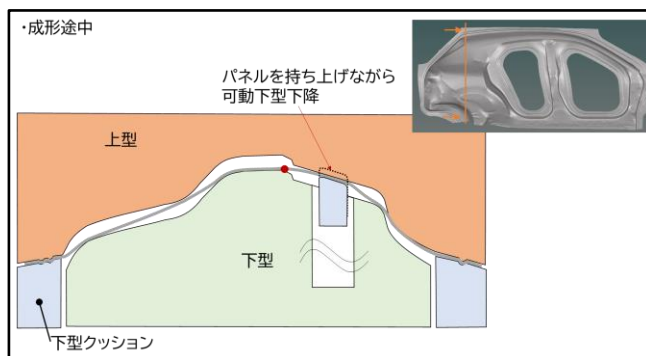
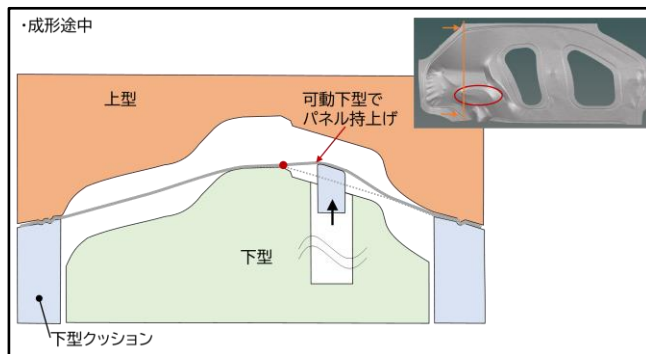


図 16 プレス型内 可動型構造イメージ

4. 思わず笑顔になる走り

初代クラウンが登場して以来、脈々と引き継がれてきたクラウンの価値は、静粛性と乗り心地、そして上質であること。それらを必要な基本性能と位置付け、シリーズ各車のコンセプトに合致する走りの味付けを行い、キャラクターの違いを表現した。クロスオーバーはセダンと SUV の中間の車高のパッケージではあるが、あたかもセダンのように低重心でフラットに走ることができる性能を追求した。そのクロスオーバーを中心として、スポーツはより操縦安定性を重視し走りの楽しさを追求、セダンはより高い静粛性と乗り心地を重視し上質さ、洗練さを追求した(図 17)。クラウンネスな性能を実現するために重要となるのが、パワートレイン、電動 4WD システム、ボディ剛性、サスペンション、後輪操舵機構(DRS: Dynamic Rear Steering system)、ボディ制振、遮音構造であり、それらの要素技術について説明する。



図 17 クラウンシリーズの運動性能イメージ

4.1 クラウncrossオーバーの開発

「革新と挑戦」を動的性能でも実践し、クラウンネスな走りを試行錯誤しながら開発に取り組んだ。高い静粛性と乗り心地の良さを追求しながら、駆動方式にとらわれない、腰高感を感じさせないフラット感、運転しやすさ、全席で疲れない乗り心地も追及し、高次元で両立を図った。

4.1.1 質感の高い乗り味開発

ボディ接合方法の工夫や構造用接着剤の塗布範囲を拡大し、軽量かつ高剛性のボディを開発した。また、これまで定量的に表現できなかった「質感」に対して、高周波の微振動に着目し、解析を行い、匠(匠の技を持つ、車両

評価のプロフェッショナル)の感覚と擦り合わせながら、その振動を低減することで高い質感を実現した。

4.1.2 サスペンションとタイヤ開発

リフトアップした外形意匠と、21 インチ大径タイヤを装着しながらも、クラウンネスにふさわしい目線のぶれないフラット感、疲れにくい直進安定性、車両との一体感を感じられる旋回性能にこだわった(図 18, 図 19)。その実現に向け、四輪駆動・後輪操舵機構(DRS)を採用し、意匠と性能の両立を図った。



図 18 フロントサスペンション



図 19 リアサスペンション

タイヤは車が唯一路面と接する場所で、NV(Noise & Vibration: 振動・騒音)、操縦安定性、乗り心地性能に対して良し悪しの大きな要素となる。

上述の要素について上質感や運転のしやすさ、乗っていて疲れない振動が少ないタイヤを開発するため、振動吸収特性や限界性能割り付けを細部にわたり定量化し、実車で有効性を確認しながら最適な特性を作り上げた。タイヤの存在感を従来以上に引き立てるため、タイヤの外形状にもこだわり、タイヤのショルダー部(トレッド面

からサイドウォール部)の角を張ったタイヤを開発。ショルダーが張った形状はタイヤの振動特性などと相反し両立が難しい部分が多く、数ミリ単位でタイヤ接地形状を確認し、NV、操縦安定性、乗り心地の全体最適を図った。

4.1.3 駆動方式にとられない、腰高を感じさせない性能開発

AVS(アダプティブ・バリアブル・サスペンション)制御開発では、走行に応じて4輪のアブソーバ減衰力を独立操作し、フラット感、左右への揺られ感、快適な乗り心地を維持した。また、進化させたアブソーバの摺動摩擦領域で減衰力をコントロールして、操舵の動き出しから運転者の意図どおりに車が動いてくれるよう繊細なチューニングを実施した(図20)。

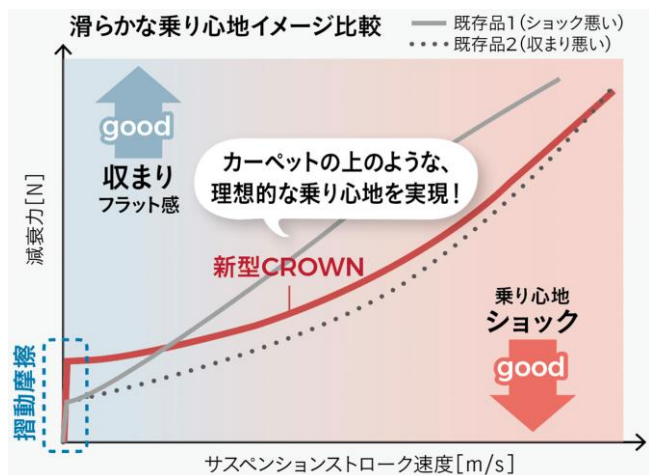


図20 摺動部特性改善イメージ

DRS 性能開発では、ステアリング操作に応じリアのタイヤ切れ角を最適化した。低速ではステアリングを切り込んだ方向とは逆方向にリアのタイヤを操舵(逆相)し、優れた小回り性能と回頭性を実現した。一方高速ではステアリングを切り込んだ方向と同じ方向にリアのタイヤを操舵(同相)し、安定した走りを実現した。さらにこの機構は、車両のロール速度を低減でき、フラットな乗り味に貢献している。運転者も同乗者も疲れないクルマを作るため、運転席、助手席、後席に乗り込み走行し、クラウンに相応しいフラットな乗り心地を作りこんだ(図21)。

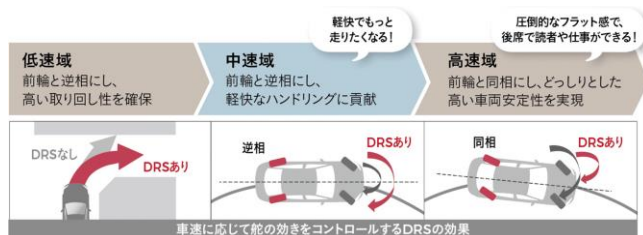
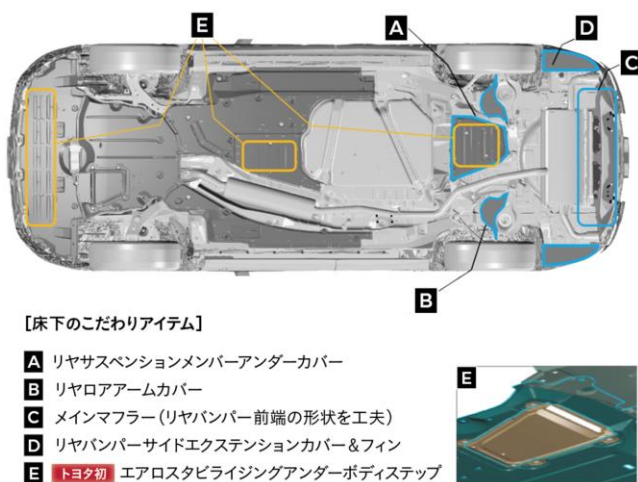


図21 DRS 制御による運動性能効果

4.1.4 空力、除電スタビライジングプラスシート開発

クラウンネスに必要などっしりとした安心感、フラットな乗り味を実現するため、床下の整流に着目した。カバーや新規開発となるエアロスタビライジングアンダーボディステップを車両先端、中央、後方に配置(図22)。床下を流れる流速を速めることで地面に張り付いたような安定感を確保した(図23)。また、除電スタビライジングプラスシートを運転席に採用。ドライバーと周辺の静電気をボディ全体に分散させて車両挙動の安定性向上に貢献。



【床下のこだわりアイテム】

- A リヤサスペンションメンバーアンダーカバー
- B リヤロアアームカバー
- C メインマフラー(リヤバンパー前端的形状を工夫)
- D リヤバンパーサイドエクステンションカバー&フィン
- E トヨタ初 エアロスタビライジングアンダーボディステップ

図22 床下空力パーツ

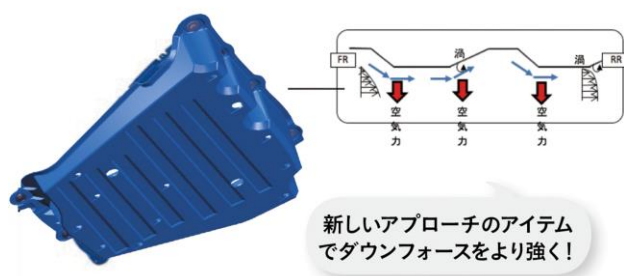


図23 エアロスタビライジングアンダーボディステップ

4.2 クラウンスポーツの開発

「硬いだけがスポーツではない」。しなやかに走る新しいスポーツの価値を提供するため、クラウンとして上質な乗り味の質感を大切にしつつ、街乗りからサーキットまで、移動の楽しさ、運転の楽しさをあらゆる方に感じていただける性能を目指した。クロスオーバーから全長を210mm短縮し、全幅を40mm拡福、ホイールベースも80mm短縮するなど、車両の素性を決める基本諸元からこだわり、サスペンション特性やタイヤ特性もさらに進化させた。

4.2.1 ボディ開発

一般的にハッチバックはセダンに対してリア開口が大きいいためボディ剛性が不利となるが、スポーツはDピラーに補強部材を適切に配置(図24)。またリアサスペンションからの入力を直接伝える環状骨格構造の採用(図25)や、HEV・PHEVそれぞれで最適化したトンネル部剛性ブレース追加により、振り剛性やサスペンション取り付け部の剛性をセダン同等とした(図26)。

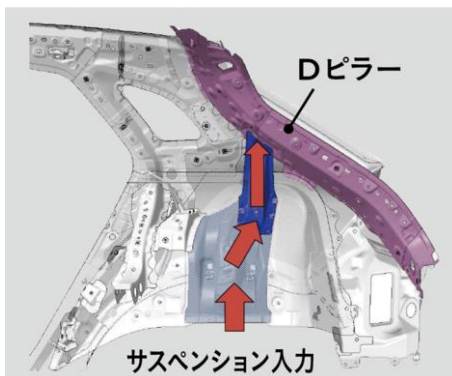


図24 リア開口部補強

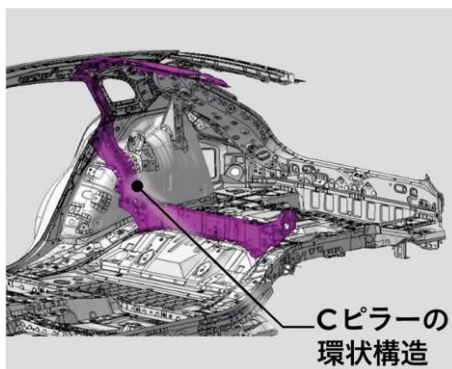


図25 環状骨格構造

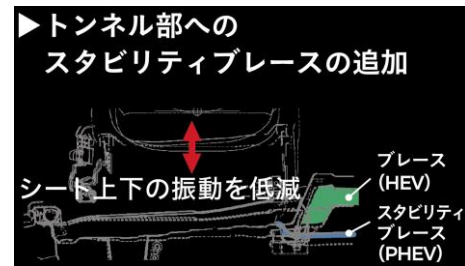


図26 トンネル部補強ブレース

4.2.2 PHEVユニット搭載車両の性能開発

高出力のPHEV搭載車には、出力を受け止めつつ、減衰の良さと乗り心地を両立させるため、車速や路面状況に応じ減衰力をコントロールするAVSを採用した。

4.2.3 タイヤ&ディスクホイール開発

クロスオーバーに対して幅広の21インチタイヤを専用設計。クラウンネスである乗り心地と、「スポーツ」としての操縦安定性を両立するため、振動減衰感と接地感にこだわり、タイヤが発生する横力を高め、操舵初期から限界域までのスポーツの走りを実現しながら、NV性能、乗り心地との高い次元で両立するタイヤを開発。また、ディスクホイールでは、ディスク面やリム剛性向上と軽量化のバランスを取り、スポーツにふさわしい性能を実現した。

4.2.4 NV開発

前席、後席の乗員間の快適な会話を演出するために、調音天井を採用(図27)。室内の音を反射する調音天井により、乗員同士の言葉がダイレクトに伝わり、会話がしやすく、空間の広がりを感ずることができる。

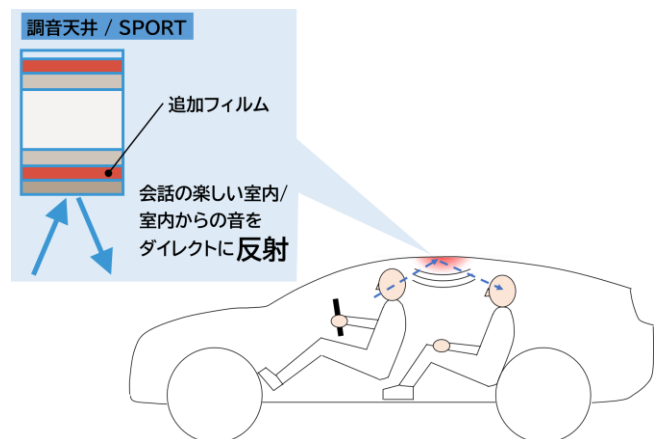


図27 調音天井

4.2.5 操縦安定性, 乗り心地性能開発

”クラウンネス”を維持しつつ”スポーツ”であるための性能を追求。「硬いだけがスポーツではない. しなやかで運転が楽しめる」というイメージを皆で共有し, 性能開発を実施した. クロスオーバーに対し, ホイールベースを80mm 短縮するパッケージで軽快さを追求. さらに安心感も確保するため, トレッドの拡幅も実施した.

DRS は, さまざまな走行シーンで運転する楽しさを体感いただけるよう, クロスオーバーと比較して旋回性能

が高まる方向にチューニングした. スポーツモードは, よりクルマと対話する楽しさを味わっていただけるように, ノーマルモードに対しさらに旋回性を高めたセッティングとした. 特に, 70km/h 近傍では DRS の同相領域を狭め, より明確に車両の動きを感じるための設定とした (図 28). なお, ノーマルモードでの逆相・同相の切り替えは, 70km/h 以上の同相領域を重視, 逆相→同相のつながりをよくするため, 60km/h~70km/h で同相・逆相双方が存在する領域を作っている.

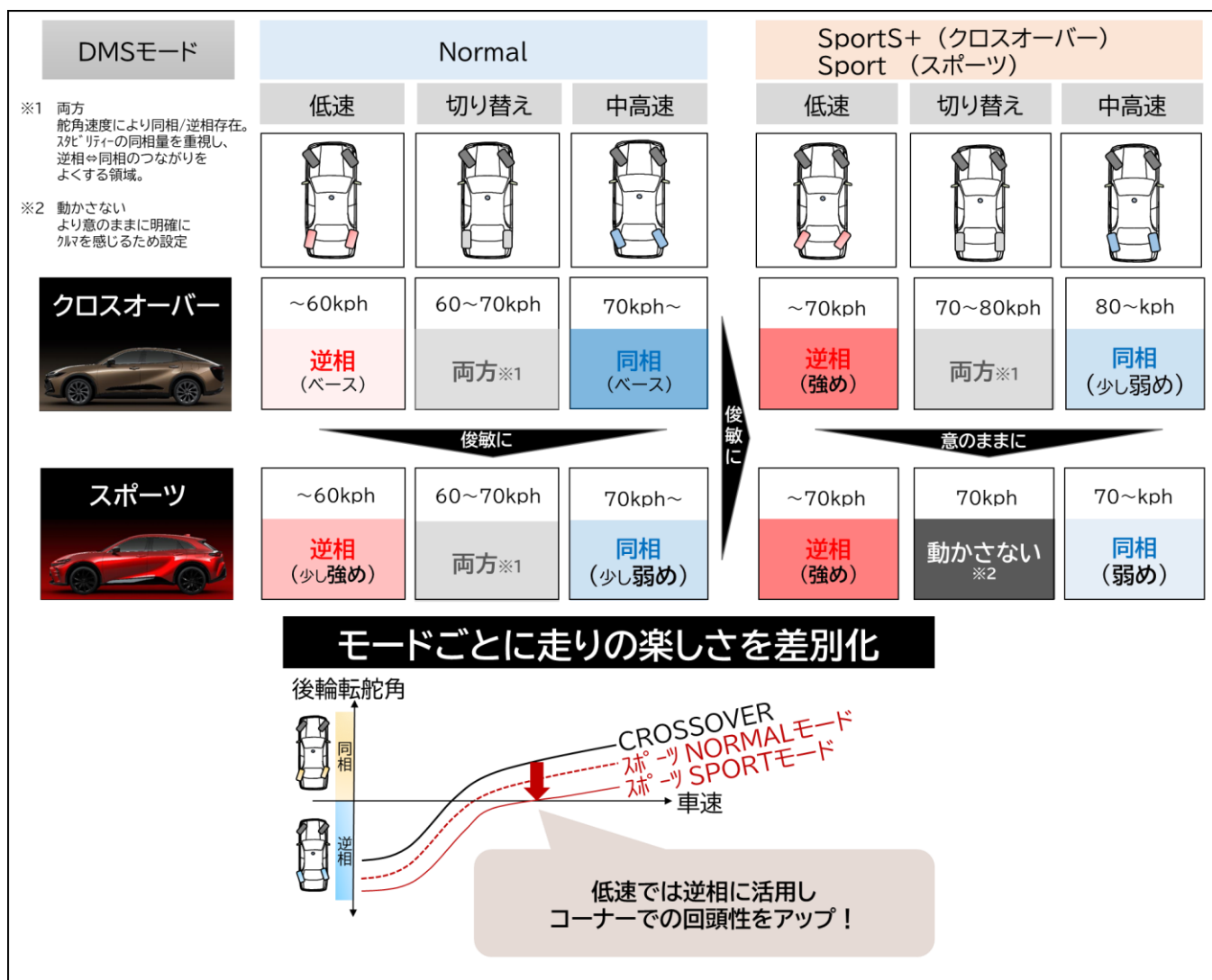


図 28 DRS 切り替えイメージ

サスペンションセッティングは, ロールなどの車両姿勢変化を抑えつつ, 硬すぎずしなやかな特性とすることで, スポーツでありつつもクラウンとしての乗り心地も両立. 路面を選ばずクルマとの一体感を感じていただけるよう, アブソーバのシール構造を見直し, 低フリクション特性を

採用した(図 29).

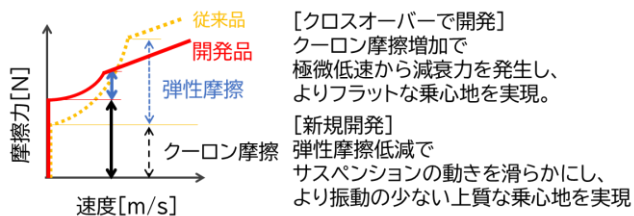


図 29 低フリクションシール特性イメージ

4.2.6 空力開発

魅力的な外観と走りの空力を両立し、高速での高い直進性も実現するため、車両下面にエアロスタビライジングステップ、エアロライジングフィンやリアバンパーコーナ一部分下端へのフィンを追加(図 30)、クロスオーバー同様に除電スタビライジングプラスシートを採用し、車両挙動の安定性向上を実現した。

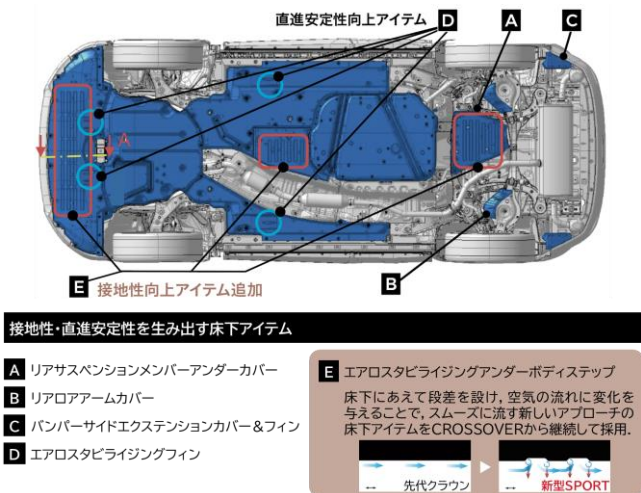


図 30 スポーツ床下空力アイテム

4.3 クラウンセダン開発

これまでクラウンブランドを牽引してきた“王道セダン”として、ショーファーユースも意識し、ニューフォーマルセダンというキーワードのもと、全席快適、全席特等席を狙い開発。圧倒的な静粛性と乗り心地性能にこだわった性能開発を実施した。

4.3.1 ボディ開発

ボディ構造はGA-Lプラットフォームを使用。高い質感と乗り味で高い評価をいただいている MIRAI をベースに、後席の快適性向上を目指し、ホイールベースを 80mm 延長。加えて FCEV(水素燃料)と HEV(ガソリ

ン燃料)で一つのアンダーボディを共用化することにチャレンジした。アッパボディは水平ベルトラインを実現するため、フューエルリッドの位置や配管取り回しが変更となるが、リアホイールハウス周りの局部剛性を確保。環状骨格構造などで車軸間振り剛性も高めた(図 31)。また、乗り心地質感に効果が高いリア振り剛性にこだわり開発。さらに、高い静粛性と乗り心地の質感向上のため、キャビン廻りに高減衰構造接着材、ボディ骨格には高剛性接着材を採用(図 32)。結果、軽量で高剛性のボディとなり、ロードノイズ、乗り心地の質感向上に貢献。さらに HEV の乗り味・質感を FCEV に近づけるため、フロントサスペンションメンバとボディを締結するシェアパネルの剛性を上げた(図 33)。

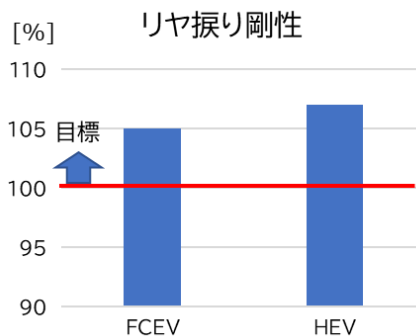


図 31 リア振り剛性

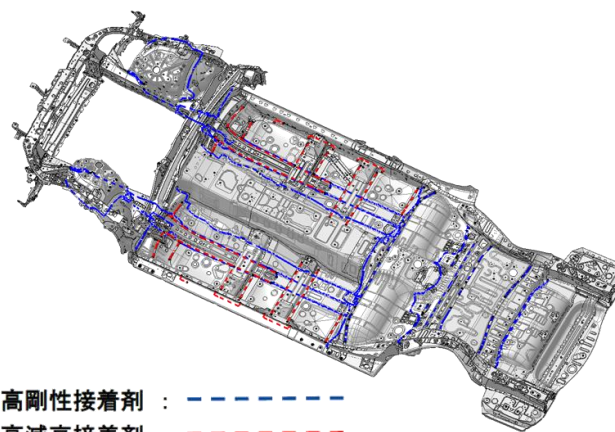


図 32 構造接着剤塗布位置

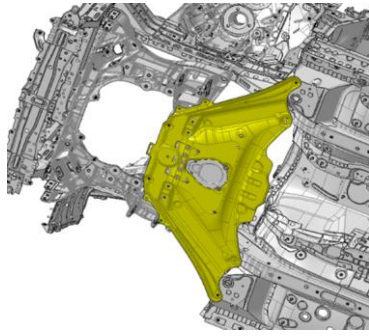


図 33 シェアパネル

4.3.2 ユニット懸架開発

MIRAI にも搭載されている FCEV ユニットは電動車であるが故、静粛性、乗り心地の質感が高い。そのため、今回新規開発の 2.5L マルチステージ HEV は、静粛性確保、振動感の低減が開発課題となった。振動感の低減にはユニットのマウント特性で減衰を高め、排気管に振動遮断機構としてフレキシブルパイプを採用(図 34)。一部排気管とボディの締結構造を見直し、振動感の大幅な低減を図った。



図 34 フレキシブルパイプ

4.3.3 サスペンション、タイヤ&ディスクホイール開発

サスペンションは、カーボンニュートラルを早期に実現するべく、FC(燃料電池:Fuel Cell)ユニット搭載可能でフォーマルな外形意匠性を両立するため GA-L プラットフォームをベースに、フロントサスペンションにはレクサス LS, LC にて採用された上下ダブルボールジョイントのハイマウントマルチリンク式を採用(仮想キングピン軸による低フード化)、リアサスペンションにはローマウントマルチリンク式を採用した(図 35, 図 36)。

タイヤは 20 インチタイヤを新規開発。通常、燃費性能の向上を実施する場合、NV 性能や乗り心地性能の背反が懸念されるが、操縦安定性を確保したうえで、NV 性能と乗り心地性能を重視し開発を実施。セダンにふさわしい NV 性能、操縦安定性と乗り心地性能の両立を実現。

ディスクホイールは、ニューフォーマルセダンとして 20 インチタイヤ装着時のデザインと高い静粛性や乗り心地

性能の両立を図るため、ディスクとリムの剛性バランスを確保した。



図 35 フロントサスペンション



図 36 リアサスペンション

4.3.4 NV 開発

エンジン周辺に取り付く配管はエンジン振動の影響を大きく受ける。クラウンセダンは車室内に伝達するエンジン起因の振動を低減するため、これまで着目されていたエンジンマウントや排気サポートから伝達する振動に加え、冷却回路の切り替えバルブ FSV(Flow Shut Valve)およびゴムホースといった冷却配管経由の振動に対しても対策を実施。エンジン起因の振動入力を低減することができた(図 37)。

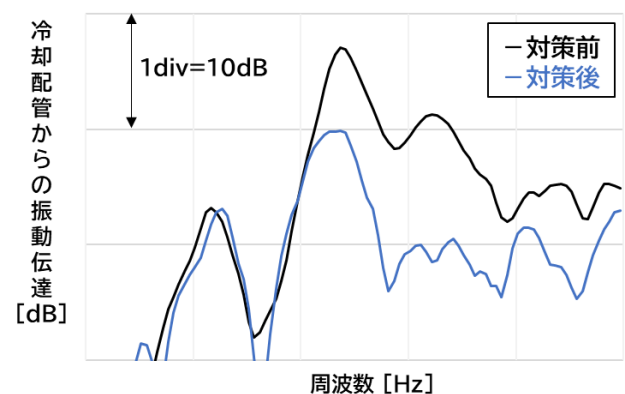


図 37 冷却配管からの振動伝達

4.3.5 こだわりの乗り心地性能開発

オーナーズカーニーズやショーファーニーズにも応えられる圧倒的な乗り心地の良さと気持ちの良いハンドリングを狙い開発。走り出しや、少しの段差などでもスムーズにサスペンションを動かせるように新開発の低フリクションシールを採用した AVS を標準設定。このシール特性は、クラウンクロスオーバーで採用したショックアブソーバ摺動部摩擦特性に対し、静摩擦成分は保持しながら弾性摩擦成分を低減した。また、乗員がシート上で揺動しにくいように、サスペンションばねとスタビライザーバーの剛性を各々バランスさせ図 38 に示すようにクロスオーバーに対しソフトに設定することで乗員が上下、前後、左右方向に揺動する速さを制御した。また、ドライブモードセレクト(DMS)でリアコンフォートモードを設定。後席のフロア振動感のさらなる低減と乗員が揺すられにくいように AVS 制御で適合した。気持ちの良いハンドリングは、AVS 制御やブレーキによる車両姿勢制御(FBC)で車両姿勢を決まりやすくし、EPS(Electric Power Steering:電動パワーステアリング)制御で意のままに運転しやすいような操舵感に設定した。DMS(Drive Mode Select)のスポーツモードでは、さらにドライバーズカーとして運転する楽しさを具現化した。

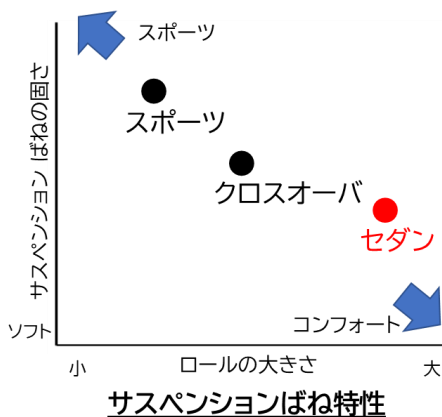


図 38 サスペンション設定の考え方

4.3.6 空力、除電開発

水平ベルトラインを強調するようにフェンダーに配置されたガーニッシュに安定性向上の工夫を入れた。フロントタイヤ周りから発生する乱れた風流れの整流を目的にガーニッシュの裏面にアルミテープを貼付け(図 39)。直進安定性などに効果がある。また、クラウンクロスオーバー同様に除電スタビライジングプラスシートを採用し、安定した車両挙動を実現した。



図 39 セダンガーニッシュ

5. パワートレイン開発

トヨタが提唱するマルチパスウェイ戦略は、クラウンシリーズにおいても、より具体的なクルマのカタチとして提案している。各車両コンセプトおよび多様化するお客様の価値観をカバーすべく、パワートレインにおいては3種類の HEV システムと PHEV システム、FCEV システムを採用。クラウンネスとして求められる基本性能を満足させつつ、持続的なモビリティの普及を目的に環境性能にも配慮したシステム開発を行った(図 40)。

システム	シリーズパラレル ハイブリッド	マルチステージ ハイブリッド	デュアルブースト ハイブリッド	FCEVシステム
構成図 ※ 主要部のみ記載				
	エンジン:TNGA25L	エンジン:TNGA25L	エンジン:TNGA2.4L-T	エンジン:なし
特徴	<ul style="list-style-type: none"> 2モーターによる電気CVT機構 エンジン直達駆動も併用でき、燃費が良い PHEVでは、よりリニアな走りも実現 	<ul style="list-style-type: none"> シリーズパラレルハイブリッドに対し、4段変速により最大伝達効率点を3点追加でき動力性能と燃費性能を高い次元で両立 効果: Hiギア側 高速燃費向上 Loギア側 余裕駆動力向上	<ul style="list-style-type: none"> 過給エンジンとモータを直結させることに加え、リアに大型モータ(eAxle)を備えたシステム どのような車速帯においても、過給エンジンとモータの組み合わせによりパワフルかつリニアな加速を実現 	<ul style="list-style-type: none"> 水素と酸素の反応によって電気を生成し、動力とするシステム 純電動車特有の静粛性を備えつつ高出力、スムーズで伸びのあるシームレスな走りを実現
クラウン群搭載車種	クロスオーバー(Gグレード) スポーツ	セダン	クロスオーバー(RSグレード)	セダン

図 40 パワートレイン

環境性能と動力性能を両立させたマルチステージハイブリッドシステムと、多様化する価値観に対する1つの提案技術として急速充電システムを例として、以下に紹介する。

5.1 マルチステージハイブリッドシステム

5.1.1 動力性能と環境性能の両立

プレミアムクラス車両に相応しい走りを維持しつつ、今後益々厳しくなる環境性能への要求に応えることを考え、今回 2.5L マルチステージハイブリッドシステムを新規設定した。高熱効率な 2.5L エンジンによる環境性能(国内燃費 18.0km/L)(図 41)と、マルチステージハイブリッドシステムによるエンジントルクの増幅・ディファレンシャルギヤ比の設定で走りの向上(0-100km/h タイム: 7.9sec)(図 42)の両立を実現した。両立に貢献する各ユニットの特徴を次項で紹介する。

■ ハイブリッドシステム燃費比較

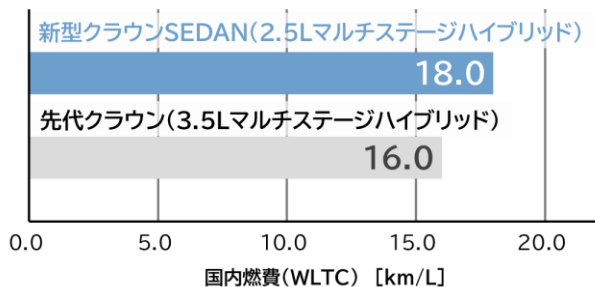


図 41 燃費比較

■ ハイブリッドシステム加速性能比較

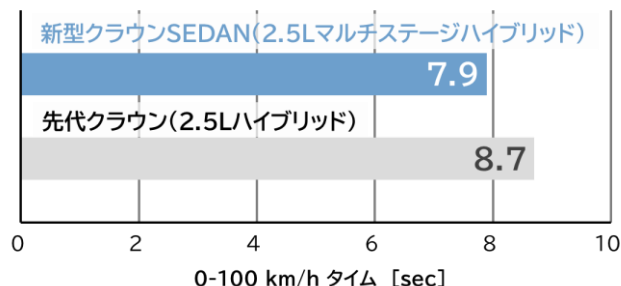


図 42 加速性能比較

5.1.2 エンジン

エンジンは先代クラウン同様、縦置き 2.5L-TNGA (Toyota New Global Architecture)エンジンを採用した。高圧縮比・高 EGR(排気再循環)燃焼により高い熱効率を実現したエンジンによって環境性能に貢献している。またフラッグシップセダンに相応しい NV レベルを目指し、エンジンカバー裏側の遮音性を向上させる変更を加えた。

5.1.3 ディファレンシャル

低速における余裕をもった駆動力を実現するため、3.615 のギヤ比を採用した。従来の THS (TOYOTA Hybrid System)では最高車速とモーター最高回転数の関係により採用可能なギヤ比に制約が存在したが、マルチステージハイブリッドでは 4 段変速機構を持つことから制約なく諸元を決定でき、同じエンジンにおいても低速における走行駆動力を THS と比べ大幅に向上させ

ている。

5.1.4 ハイブリッドシステム

ハイブリッドシステムとしては LS500h, LC500h で採用のマルチステージハイブリッドシステムを改良し使用している。従来の THS のトランスミッションは、エンジンの動力を電氣的動力伝達系と機械的動力伝達系に分割する“動力分割機構”と MG1 (ジェネレータ) および MG2 (モータ) で構成しており、MG2 トルクをリダクション機構で増幅している。マルチステージハイブリッドトランスミッションは従来のハイブリッドトランスミッションの出力軸に 4 段変速機を追加し、モータ・エンジンの合計した駆動力を増幅する。また今回ハイブリッドダンパーを 4 気筒エンジンとの組み合わせにおいて NV 性能を向上できるように最適設計している(図 43)。

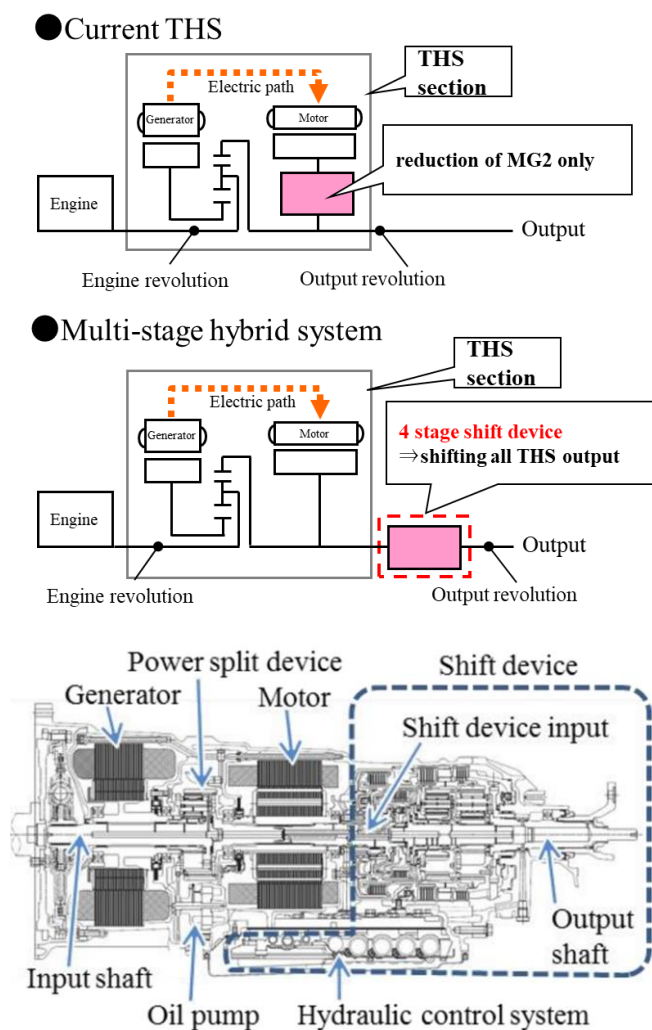


図 43 ハイブリッドシステム

5.1.5 マルチステージの走りのポイント

低速での駆動力向上だけでなく、マルチステージハイブリッドシステムを採用することで、「意図どおりの加速・減速」と「リズムカルな走り」を実現した。LC500h, LS500h で採用した AT (オートマチック・トランスミッション) と同様なギヤリングを設定した合計 10 段の変速挙動をもつ多段 AT 模擬制御 (メカ変速 4 段, 模擬変速 6 段の計 10 段) を採用し、車速に対してエンジン回転がニアに上昇することで、ダイレクト感溢れリズムカルなエンジンサウンドをとまなう加速フィーリングを実現している。またマルチステージハイブリッドシステムの特徴として動作点自由度が拡大している。THS ではエンジン動作点は車速と MG1 の最高回転数で制約され、およそ 140km/h からエンジン最高回転数を使用可能となる。マルチステージハイブリッドシステムは、マルチステージシフトデバイスで変速を行うことで同じ車速でも異なる MG2 回転数を取ることができ、エンジン最高回転数を使用できる車速を 43km/h 程度まで低速化可能となり、これにより低車速でも最高回転数まで使うことができ、駆動力向上・リズムカルな変速に貢献している(図 44)。

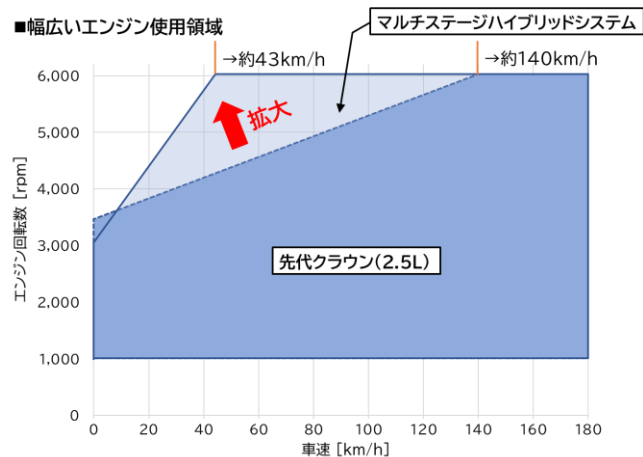


図 44 エンジン使用領域

5.2 プラグインハイブリッドシステム

RAV4 PHEV のシステムを流用しつつ、今回急速充電をスポーツとエステート PHEV に設定。プラグインならではの EV としての動力性能を確保しつつ、より EV 走行を楽しまれるお客様に向けて、出先でも急速充電できるよう利便性を向上させた。

5.2.1 急速充電システム

充電規格は CHAdeMO に対応し、駆動用バッテリーの容量を 80%まで 38 分程度で充電できる。急速充電は 2代目の Prius PHV に採用していたが、それ以降の PHEV では採用を見送っていた。これは急速充電のインフラが十分な数を確保できていないなか、PHEVが急速充電を使うことで充電待ちが発生する状況が散見されたことを受けて判断していた。ただ昨今、急速充電のインフラが徐々に増えつつあり、また 2021 年に策定されたグリーン成長戦略のなかで「公共用の急速充電器 3 万基を含む充電インフラを 15 万基設置する」という国の方針も示されたことから、急速充電インフラが今後増えていくことと、プレミアムクラスに相応しい機能として設定した(図 45)。

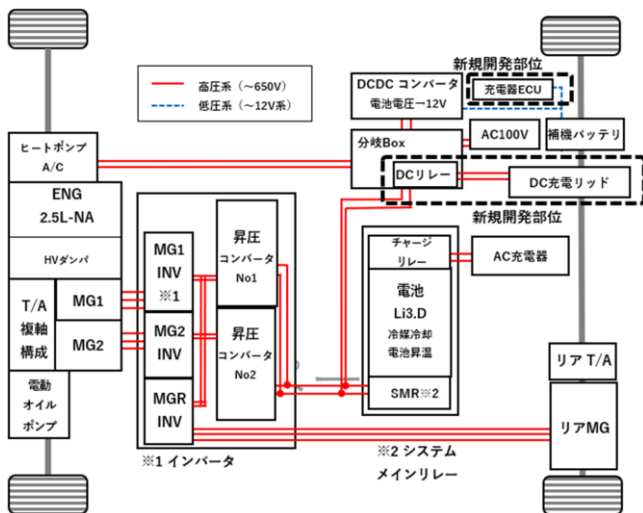


図 45 プラグインハイブリッドのパワートレイン

また急速充電インレットが設定されたことで家庭用の V2H(Vehicle to Home)機器に接続することが可能となり、災害などによる停電時に、住宅や電気製品に最大 9kW という大出力の電力を供給することが可能(図 46)。多様化するクルマへのニーズに対応した。



図 46 クラウンエステート PHEV の充電インレット

6. 最後に

クロスオーバーから始まった 16 代目の開発はおよそ 4 年前に始まった。初代の開発より脈々と受け継がれてきた「革新と挑戦」のスピリットのもと、多様性の今の時代に求められるクラウンとは何か、お客様が喜んでくれるクラウンとは何か、を真剣に考え、4 つの形に発展し、「クラウン群」として 2022 年 7 月に発表し、大きな反響を生んだ。この背景には商品としての大きな「挑戦」とともに、働き方や仕事の進め方の変革にもチャレンジしてくれた多くの仲間や関係者のご協力とご尽力があったからこそ実現できたプロジェクトであった。この場をお借りして関係者には厚く御礼を申し上げたい。

また売り方の変革にも挑戦し、販売店様の多大なるご協力のもと、クラウン専門店「THE CROWN」の開業にも漕ぎつけた。クラウンの販売に加え、お客様、販売店様、我々メーカーとともにブランドを一緒に育てる現場として新しい取り組みが動き始めている。

このように多くのチャレンジをした 16 代目クラウン。商品を軸に、開発から販売現場までが一体となり、魂を込めて開発したクラウンが一人でも多くのお客様に笑顔をお届けできる事を願っている。

■著者

第 1 章 まえがき

第 2 章 開発の狙いと車両概要

第 6 章 最後に



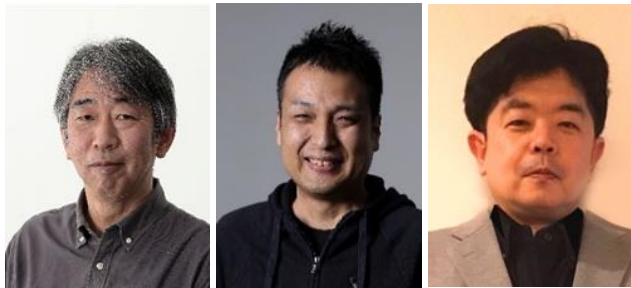
清水 竜太郎

本間 裕二

辻 賢治

Mid-size Vehicle Company MSZ

第3章 多様な価値観に応えるデザイン



宮崎 満則 小出 幸弘 串間 幸生

Mid-size Vehicle Company MSデザイン部



赤星 良多

Mid-size Vehicle Company 第2MS車両開発部



福田 幸介

クルマ開発センター 製品化製造技術部



三浦 拓耶 平岡 誠也

Lexus International Co. レクサスポデー設計部

第4章 思わず笑顔になる走り



佐々 長孝 岩田 拓也 寺尾 京真

Mid-size Vehicle Company MS制御開発部



岡部 高明 松宮 真一郎 平木 康裕

Mid-size Vehicle Company MSプラットフォーム
開発部

第5章 パワートレイン開発



多和田 貴徳

Mid-size Vehicle Company MSZ



高橋 慶光

Mid-size Vehicle Company MS制御開発部



橋田 達弘 橋元 慶太

クルマ開発センター パワートレーン製品企画部

車載用パワー半導体の進化と今後の展望

堀田 幸司 *1

保田 智史 *1

妹尾 賢 *1

要旨

トヨタではカーボンニュートラル達成に向けて世界中のお客様に選んでいただけるフルラインナップの電動車の選択肢を用意していくが、BEV、HEV、PHEV、FCEV等、全ての電動車において大電流を高速で通電、遮断するパワー(電力用)半導体が用いられており、このパワー半導体の性能が車両の電費向上や、ユニットの小型軽量化に大きな影響を及ぼす。

本誌ではパワーコントロールユニット(PCU)を参考例として、パワー半導体がこれまでどのように進化し、どのように電動車の進化や展開性向上に貢献してきたか、電動車の選択肢を増やし、普及に貢献してきたかについて紹介する。

キーワード パワー半導体、IGBT、SiC、PCU、GaN、HEMT、Ga₂O₃、ダイヤモンド、THSⅡ、RC-IGBT、MOSFET、パワーモジュール

1. まえがき

トヨタではカーボンニュートラル(CN)達成のため世界中のお客様に選んでいただける選択肢として BEV (Battery Electric Vehicle) や HEV (Hybrid Electric Vehicle), PHEV (Plug-in Hybrid Electric Vehicle), FCEV (Fuel Cell Electric Vehicle) といった電動車をフルラインナップで用意していく。図1にこれらの電動車フルラインナップを支えるユニットを示す。モータ、バッテリーと並んでパワーコントロールユニット(PCU)は全ての電動車のエネルギーマネジメントを司る重要な電力変換ユニットである。図2に示すように PCU は多くのパワー(電力用)半導体で構成されており、このパワー半導体が大電流を高速でオンオフを繰り返すことで、直流の電池からモータに交流電流を供給する。同様に BEV、PHEV で必要となる充電器や FCEV で必要となる FC DC コンバータ等のユニットにおいても多くのパワー半導体を用いられており、全ての電動車にとって車両の性能、コストに大きな影響をおよぼす最も重要なキーデバイスである。本稿では PCU を参考例として、パワー半導体がこれまでどのような進化を遂げ、電動車の進化や展開性を向上させることで、電

動車の商品魅力を高め選択肢を増やし、普及に貢献してきたかについて紹介する。また次世代パワー半導体に対する期待、研究開発状況と今後の展望について述べる。

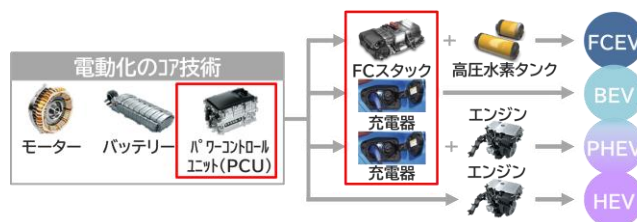


図1 電動車フルラインナップを支えるユニット

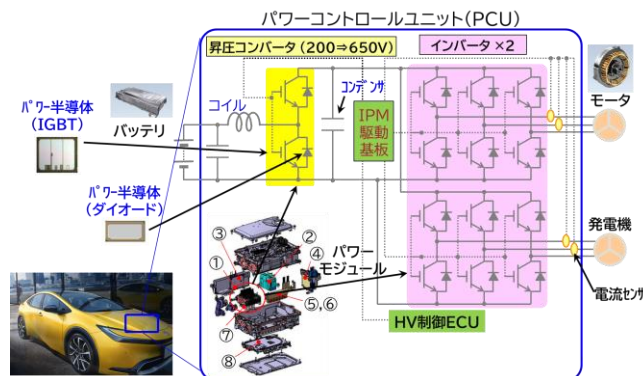


図2 パワーコントロールユニット

*1 パワートレーンカンパニー 電力変換ユニット開発部

2. パワー半導体とは

クルマに搭載される半導体は種類、数量とも年々増加しており、なくてはならない重要な部品であるが、「頭脳」にたとえられるマイクロプロセッサやメモリ、「目」にたとえられるカメラのイメージセンサに対して、大電力の制御や供給を行う「心臓」にあたるのがパワー半導体であり、車両の電動化の進展にともなって近年益々重要度が増している。小信号を扱う半導体と異なりパワー半導体には数百 A、数百 V の大電流、高電圧を低損失に通電し、数 100ns から数 μ s という高速でオンオフを安全に切り替え続けるスイッチング能力と耐久性が必要であり、電動車の開発とともに独自の進化を果たしてきた。

図 3 に代表的なパワー半導体であるパワー MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) と一般的な制御回路に用いられる小信号用の MOSFET の断面構造を示す。小信号用の MOSFET はシリコン (Si) 半導体基板表面上に入力端子 (ソース) と出力端子 (ドレイン)、制御端子 (ゲート) が形成されており、例えば N チャンネル MOSFET の場合にはゲートへの正の入力電圧を印加することにより、ゲート絶縁膜の直下の P 型半導体表面に負電荷を持った電子が誘起され、N 型半導体で形成されるソースドレイン間に電子が通過可能なチャンネルが形成されることで、ソースとドレイン間に電流が流れる。この MOSFET の動作を用いてマイクロプロセッサやメモリ等、多くの半導体回路は形成され、広く活用されているが、電流が流れる領域が半導体の最表面に限定され、数 A~数 10A の大電流を通電することは困難である。そこで考案されたのが電力用半導体であるパワー MOSFET であり、構造的には出力端子であるドレインを半導体基板の裏面側に設け、電子をソースからドレインへ縦に流すことによって、電流の通電経路を広く取ることで低損失を実現していることが特徴であり、クルマにおいても電動パワーステアリングシステム (EPS)、電動オイルポンプ (EOP) 等、12V 系や 48V 系の電源回路中心に広く用いられている。しかしながら、例えば電動車の駆動モータ制御用インバータにおいてはメインバッテリーの 200V~800V 程度の高電圧を保持し、数十 kW から数百 kW の駆動用モータを制御するために、パワー半導体には数百 A の電流を通電し、

遮断する能力が求められる。この高電圧をパワー MOSFET で対応しようとすると図 4 のように N 型不純物濃度が低く高抵抗の電圧保持層 (N-ドリフト層) をより厚く、より高抵抗にする必要があり、通電抵抗が悪化することで熱的に成立しない。電車等のアプリケーションにおいてはこのような理由から初期においてはバイポーラトランジスタやサイリスタ等のパワー半導体を用いていた時期を経て、絶縁型ゲートバイポーラトランジスタ (Insulated Gate Bipolar Transistor: IGBT) の採用に至るが、電動車においては 1995 年の RAV4 EV や 1997 年初代プリウスの時代からパワー MOSFET 同様の絶縁ゲートを有することでシンプルな回路で安全に駆動できる IGBT を採用し、最新世代に至るまでこの IGBT が性能向上を果たし続けており、電動車においては無くてはならない重要なデバイスとなっている。

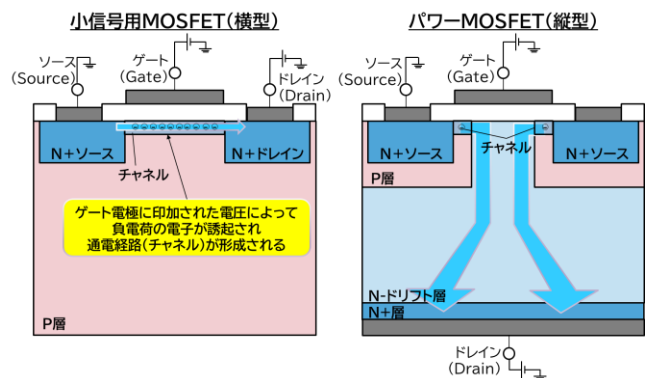


図 3 小信号用 MOSFET とパワー MOSFET 比較

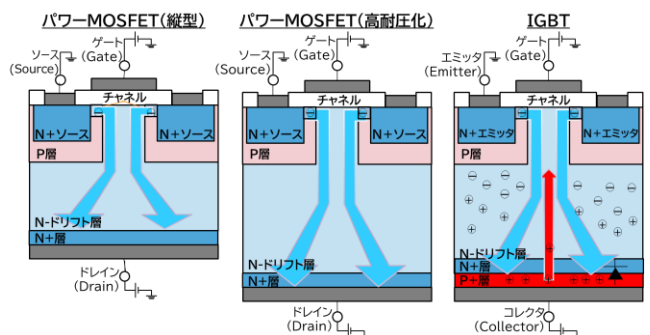


図 4 パワー MOSFET と IGBT 比較

図 4 に IGBT とパワー MOSFET の構造概略図を示す。IGBT はパワー MOSFET の裏面に P 型層を追加した構成となっているのが特徴である。この構造の違いによってパワー MOSFET がゲート信号により高濃度の N 型不純物 (N+) ソースから注入された電子がそのままド

ラインへと流れ、高抵抗の N-ドリフト層によって通電時の損失が大きくなるのに対して、IGBT ではゲート信号によって表面の N+エミッタから電子が注入されると、裏面の P+コレクタから電子の負電荷に引き付けられ、正電荷である正孔が注入され、高抵抗の N-ドリフト層に電子と正孔が大量に充満し、N-ドリフト層の抵抗値を数桁低下させる現象(伝導度変調)が起こる。図 5 にパワー MOSFET(図 5 内 青線)と IGBT の通電時の電流、電圧特性の比較を示す。IGBT では電流通電経路として裏面に PN ダイオードが形成されるので、ダイオードの閾値電圧である 0.5V~0.6V を超える電圧が印加されると電流が速やかに立ち上がり、数百 A の大電流域においてのオン電圧をパワー MOSFET に対して大幅に低減することができる。

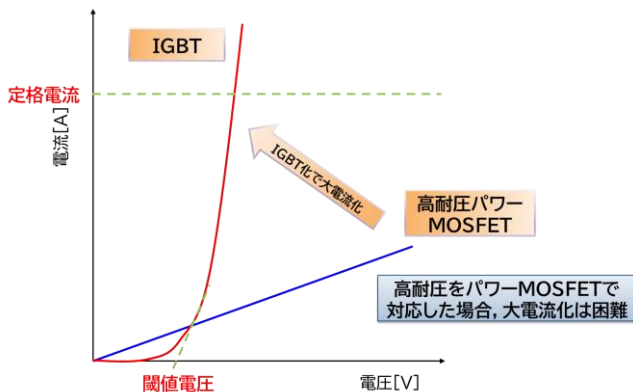


図 5 パワー MOSFET と IGBT 出力特性比較

3. IGBT 素子開発

3.1 素子の進化

トヨタでは初代プリウス用の PCU を開発するに際し、車載の要求に耐えられる性能、耐久性を備えた IGBT が世の中に存在しておらず、車両の性能、コストに大きく影響する重要なキーデバイスとして、IGBT の内製開発を実施した。その後も HEV の世代刷新のタイミングで世界初、トヨタ初の技術を織り込み、性能向上と、小型化、コスト削減を継続して実施してきた。図 6 にプリウス用の IGBT を例にして車載用 IGBT 素子進化の経緯を示す。

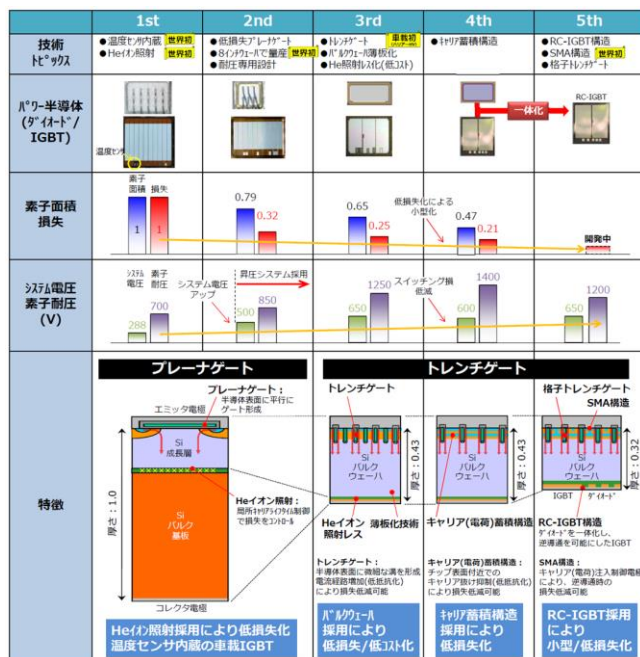


図 6 車載用 IGBT の進化(プリウスの事例)

初代プリウス用に開発したのはプレーナゲートを持つ IGBT であり、素子過熱検知用の温度センサをチップに内蔵し、またスイッチング特性改善のためにヘリウム(He)イオン照射技術をとともに世界初で導入したのが特徴である。IGBT は前章で述べたようにオン時には伝導度変調効果によってドリフト層内に電子と正孔が大量に充満することで、大電流時のオン電圧を低減することができるが、その一方で、図 7 に示すようにオンからオフに切り替わるターンオフ時にはドリフト層内の電子と正孔が再結合して消滅するまでに時間を要するため、すぐには電流が停止せず長いテール電流が発生し、高速スイッチングが困難となる背反がある。このテール電流を低減するために従来は電子線照射を施して Si の結晶に欠陥を意図して生成することで、N-ドリフト層内の電子、正孔の再結合速度を速め、スイッチング特性を改善する手法が一般的に用いられていたが、電子線照射では Si の結晶全体に結晶欠陥が生成され、オン電圧を大きく悪化させてしまうという問題があった。この課題を解決するため考案したのが電子線に代わって He イオンを照射することで、IGBT の深さ方向の所望の位置に局部的に結晶欠陥を生成する He イオン照射という世界初の技術であり、オン電圧上昇を抑制しながらスイッチング特性を改善することを可能とした。また電子線よりも質量の大きい He イオンを Si の結晶奥深くに注入するためには約

20MeVのエネルギーを印加する必要があり、サイクロトロンという加速器を導入し実現した。また大電流、高電圧のスイッチングに対する壊れにくさを指標化して低損失と高い破壊耐量を両立した世界初の車載専用設計のIGBTであった。

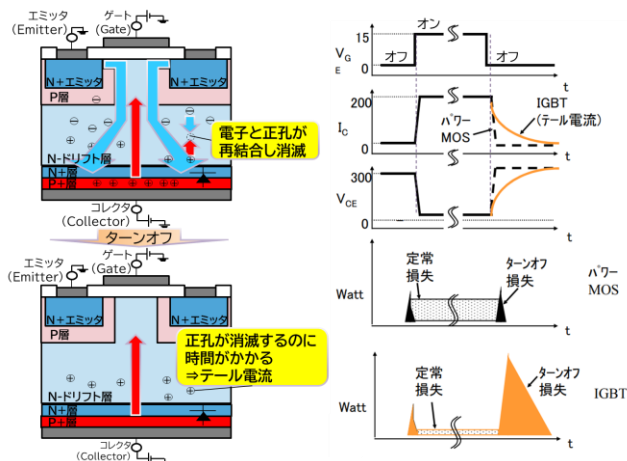


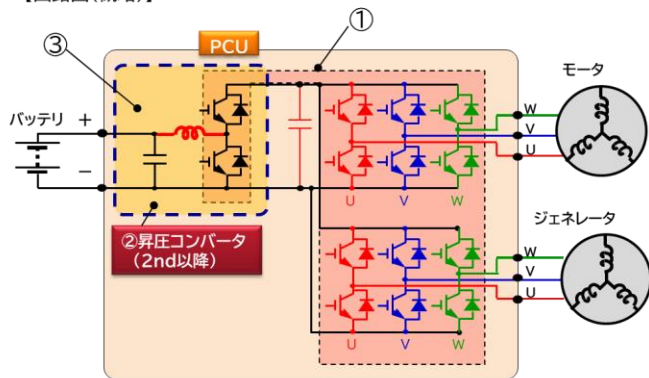
図 7 IGBT ターンオフ時のデバイス内部振る舞い

2 世代 IGBT は初代同様にプレーナ構造を採用しているが、表面セル構造の微細化により低損失化を実現し

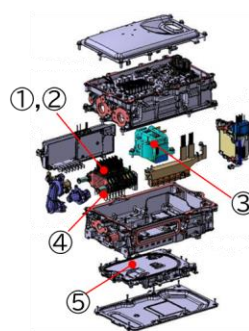
た。また初代は 5 インチウエハを採用していたが、車載用として世界初の 8 インチウエハを採用することで生産性を高め、IGBT の大口径化に先鞭をつけたのも大きなトピックスであった。また 2 世代目からはシステム構成で昇圧コンバータを用いた THS (TOYOTA Hybrid System) IIへと進化させているが、システム電圧を昇圧することでバッテリーを約 288V から 500V(3 世代では 650V)へと高電圧化した。図 8 に THS II の構成を示す。昇圧コンバータを用いることで電池セル数を削減しながら、高い電圧でのモータ駆動を可能とし、モータ、インバータの電流を低減することで大幅な低コスト、軽量化を実現した。さらにドライバーの要求に応え、全開加速時のような高トルクが必要なシーンでは昇圧コンバータでシステム電圧を上昇させる一方で、市街地走行時のような低負荷時にはシステム電圧を低く抑えることによって高出力と低燃費を両立させた。この HEV, PHEV の根幹システムである THS II を成立させるために、IGBT を内製により素子耐圧やスイッチング特性を専用設計化し、高電圧での短絡耐量を確保する設計手法を確立する等、THS II システムの最適化に大きく貢献している。

■THS II システム概要

【回路図(概略)】



【4thPCUの部品構成図】



- ①IPM(Intelligent Power Module)
直流(DC)⇒ 交流(AC)へ変換し
バッテリーからモータへ電力供給
- ②昇圧コンバータ
バッテリー電圧(約DC200V)を
約DC600Vまで無段階で昇圧する回路
- ③リアクトル
昇圧コンバータの構成部品
リアクトルにエネルギーを貯め昇圧
- ④冷却器
パワー半導体を冷却
- ⑤DCDCコンバータ
高電圧を補機用の12V電圧に変換

■昇圧コンバータ追加の狙い

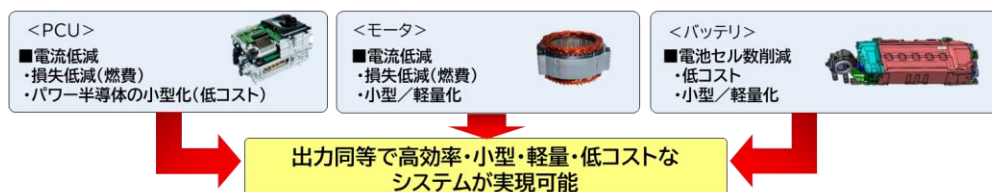


図 8 THS II システム

3 世代 IGBT のトピックスはトレンチゲート構造の採用による低損失化とバルクウエハ薄板によるエピタキシャル層の削減、さらに He イオン照射工程の削減による工程コストの大幅な削減である。図 9 にトレンチゲート構造の概要を示す。Si 基板の表面にドライエッチング技術を用いて選択的に約 1 μ m 幅の深い溝(トレンチ)を高密度に形成しているのが特徴である。このトレンチの溝は反応性イオンエッチング(Reactive Ion Etching)という技術で形成されており、F 系ガスのプラズマによって生成したイオンによる物理エッチングと、ラジカルによる化学エッチングで Si 基板を異方的(縦型に)エッチングする。この手法により、高いアスペクト比のトレンチ溝を形成する。トレンチゲート構造ではこのトレンチの側壁に 100nm 程度の薄く高品質なゲート絶縁膜を安定して形成する必要があるが、このトレンチの形状制御とゲート酸化前の前処理工程が絶縁ゲートの高品質化のために非常に重要であり、トヨタでは 2 世代のハリアーHV より世界初の車載用トレンチ IGBT を量産し、生産性や歩留まりを改善して 3 世代以降全面的に採用した。また Si ウエハに関しては 2 世代まではゲート構造を表面に品質良く作りこむために通常のバルク基板では不可能なレベルの低濃度に酸素濃度を抑制してエピタキシャル層を付加する必要があり、なおかつ高耐圧を保持するために N-ドリフト層として厚いエピタキシャル層を 100V 当たり約 10 μ m と厚く積む必要があり(例えば 800V 耐圧であれば 80 μ m 程度必要)、ウエハが高価であった。更にエピタキシャルウエハの下地にはデバイス形成工程中の機械強度保持のため、約 300 μ m の P+型 Si 基板が必要となり、導通抵抗を減らすために基板を高濃度とする必要があった。その結果、IGBT のオン時にこの高濃度の P+型基板から必要以上の大量の正孔が注入されることとなり、オフ時に長いテール電流を招くため、He イオン注入や電子線照射のような電子、正孔の再結合速度を速めるための特別な工程(ライフタイム制御工程)で特性改善が必要となっていた。この状況をブレークスルーしたのは酸素濃度が極めて低く、N-ドリフト層の高抵抗を制御良く実現できる低酸素濃度の高抵抗 Si 基板の登場であった。図 10⁽¹⁾に Si の結晶成長法を示す。通常 Si の結晶成長で用いられる Czochralski(CZ)法は石英ルツボに高純度の多結晶 Si を溶解した溶液表面に

Si の種結晶を付け、回転させながら引き上げる方法であり、抵抗率はルツボに微量の不純物を添加することで制御するが、IGBT のドリフト層の高比抵抗に必要なごく微量な N 型不純物の濃度を均一に制御すること、またトレンチゲートを品質と歩留まり良く形成するための極めて低い酸素濃度の実現が困難であった。

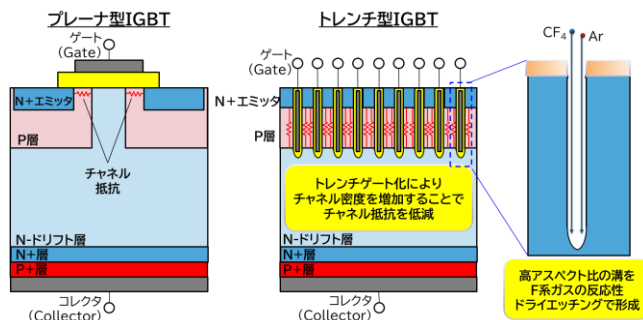


図 9 トレンチゲート IGBT

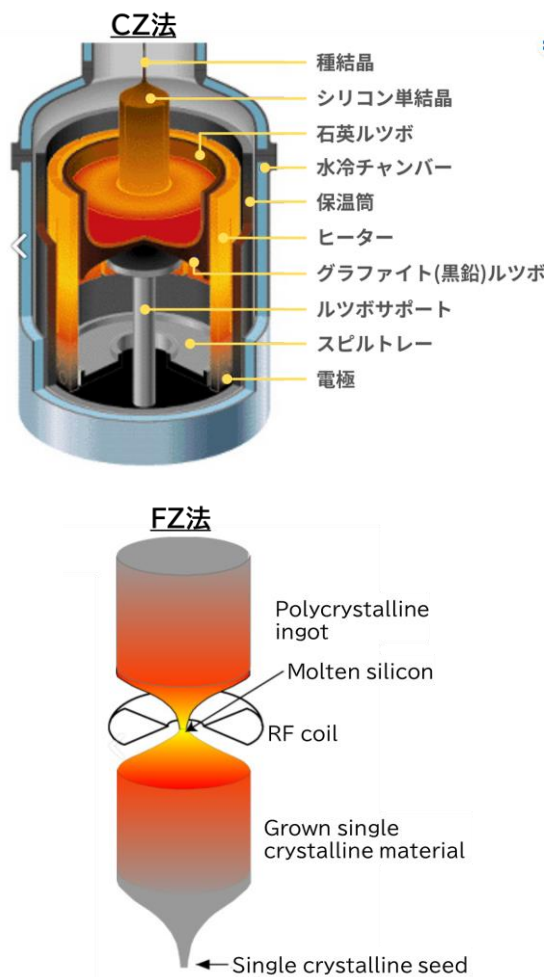


図 10 CZ 法と FZ 法

【出典元】単結晶シリコンの製造:CZ 法・FZ 法の原理, Semi ジャーナル(semi-journal.jp), <https://semi-journal.jp/basics/si-chem/cz-fz.html>

この実現には Floating Zone(FZ)法のような高品質ノドープ Si 基板の引き上げ技術と中性子照射注入 (Neutron Transmutation Doping:NTD)法のようなごく微量の不純物を高精度かつ均一に施す技術を組み合わせて実現した。FZ 法は図 10 下図のように高純度な多結晶 Si の試料棒の一部を高周波コイルにより非接触で溶解させることで CZ 法での石英ルツボ等の Si の材料以外の部材と直接接触することなく結晶成長できることから、結晶中の酸素濃度を CZ 法の $1 \times 10^{18} \text{atoms/cm}^3$ よりも 2 桁低い $1 \times 10^{16} \text{atoms/cm}^3$ 程度に低く抑えることが可能であり、さらにルツボからの重金属汚染もないことが特徴である。

NTD 法を概念図を図 11 に示す⁽²⁾。Si の単結晶中に 3.09%の割合で均一に存在する同位元素 ^{30}Si に原子炉内で熱中性子を照射することで ^{31}Si を核反応生成し、2.6 時間の半減期を経て ^{31}P (リン)に核変換する作用により、N 型半導体を高抵抗率かつきわめて均一に制御できる。後により生産性の高い Magnetic field applied CZ(MCZ)法やガスドープ法も開発され適用が進んだ。これらの N-ドリフト層の要求を満足する高比抵抗かつ低酸素濃度の Si 基板が登場したことで、エピタキシャル層を用いることなく、N-のバルク Si 基板表面に素子形成を行い、耐压確保に必要な厚さに裏面を研磨した後、裏面の P 型コレクタ層をイオン注入法で形成する薄板型 IGBT のデバイス構造が実現した。裏面の P 型コレクタは数 μm とごく薄いことから、オン電圧上昇を気にすることなく、P 型コレクタの抵抗率を制御する(P 型不純物濃度を下げる)ことにより、オン時にコレクタから注入される正孔の量を制御することが実現でき、特別なライフタイム制御工程を用いることなくテール電流を短くすることが可能となった。薄板化によって、Si ウエハは耐压保持に必要な厚さである $100 \mu\text{m} \sim 150 \mu\text{m}$ の厚さまで薄くでき、Si ウエハが自重でたわむ程となり、図 12 に示すようなデバイス形成工程内で薄板を安定して加工するための TAIKO プロセス⁽³⁾やガラス支持板プロセス等⁽⁴⁾のウエハサポート技術や、表面のデバイス形成後に裏面にイオン注入した P 型不純物を活性化、拡散させるため裏面を局所的に加熱できるレーザーアニール技術も薄板型 IGBT の実現にはなくてはならない生産

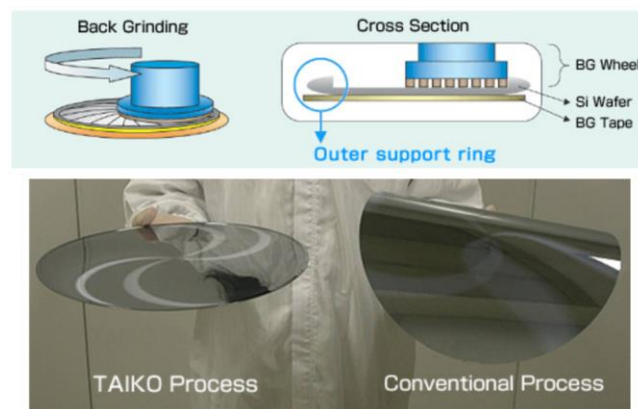
技術として開発した。



図 11 NTD 法による不純物濃度制御の原理

【出典元】成果と知的基盤技術, 国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構 原子力科学研究部門 原子力科学研究所(jaea.go.jp), https://www.jaea.go.jp/04/ntokai/technical/analysis/analysis_06.html

TAIKO プロセス



ガラス支持基板 プロセス

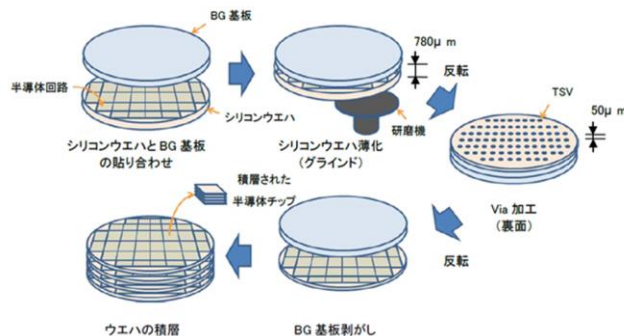


図 12 薄板ウエハサポート技術

【出典元】
https://www.disco.co.jp/jp/solution/library/grinder/taiko_process.html
 【出典元】<https://www.agc.com/news/pdf/20110818.pdf>

4 世代では 3 世代のトレンチゲート型の薄板 IGBT を更に進化させ、キャリア蓄積層を導入することでさらなる低損失化を実現した。図 13⁽⁵⁾にキャリア蓄積層の概要と効果を示す。3 世代までは裏面から注入された正孔が表面付近で減少してしまっているのに対し、キャリア蓄積層を導入することで表面付近の正孔濃度を高めること

ができていくことが分かる。この結果、4 世代ではドリフト層の抵抗分布を大幅に改善でき、オン電圧の更なる低

減を実現した。

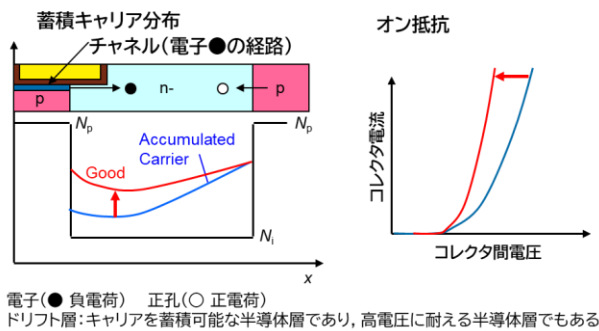


図 13 キャリア蓄積構造とその効果

【出典元】“超低損失 RC-IGBT のためのダイオード構造”, No.09-23, 自動車技術会シンポジウム, 車載用パワーエレクトロニクスの最新技術 山下侑佑, (株)豊田中央研究所

5 世代では逆導通型 IGBT (Reverse Conducting IGBT: RC-IGBT) を採用することでさらなる素子面積の小型化、インバータの小型、低コスト化を実現した。この RC-IGBT は通常 IGBT とペアで用いる還流ダイオード (Free Wheel Diode: FWD) の機能を IGBT に取り込んだもので、従来は IGBT と FWD の性能を両立することが極めて難しく、FWD の性能が劣悪でも、その影響の見えにくい共振回路で一部適用例があったが、インバータのような還流ダイオードの性能が重要となるハードスイッチング回路においては例がなく、IGBT と FWD の性能を両立できる車載用の RC-IGBT を開発し、ヤリス HV や第 2 世代のアクアに画期的な技術として導入した。図 14⁽⁵⁾ にこの RC-IGBT の概略図を示す。IGBT 形成工程にて成り行きで FWD を形成すると大幅にリカバリー特性が悪化し、高速スイッチングに適さなかった。一方で FWD のリカバリー特性を改善するためには薄板 IGBT では不要となっていたライフタイム制御工程を導入することとなり、IGBT 領域においても結晶欠陥が生成されてしまい、IGBT の特性が悪化してしまうというジレンマがあった。この課題を FWD 領域にのみ結晶欠陥を生成する部分 He イオン照射工程を導入することで IGBT と FWD の特性を両立することに成功した。

さらに 5 世代においてはこの RC-IGBT を格子トレンチ構造およびショットキーマルチアノード (Schottky and Multi-layered Anode: SMA) 構造を世界初の技術として開発、導入することで、さらに低損失、低コスト化を推し進めた⁽⁵⁾⁽⁶⁾。図 15⁽⁶⁾ に 5 世代で用いた低損失 RC-IGBT の概要を示す。トレンチを格子型に形成することにより 3 次元効果によりキャリア蓄積効果を高めることで IGBT のオン電圧を改善している。また図 15 に SMA 構造の概略を示す。従来の RC-IGBT では表面の FWD 部の PN 接合より正孔が注入されていたが、成り行きでは必要以上に注入されてしまう。そこで、この注入量を電子-正孔の再結合で抑えるために PN 接合の下に結晶欠陥を導入していたが、これを PN 接合と並列にショットキーダイオードを形成することで PN 接合に印加される電圧をクランプし、ライフタイム制御工程なしに正孔注入量を抑制できるようにした。このショットキーダイオードは特別な工程追加なしに実現できており、新しいデバイスの発明に等しい画期的な技術である。さらに最新のマイコンやメモリと同様の 12 インチウエハへの大口径化によって生産性と BCP をさらに高めているのも大きなトピックスである。

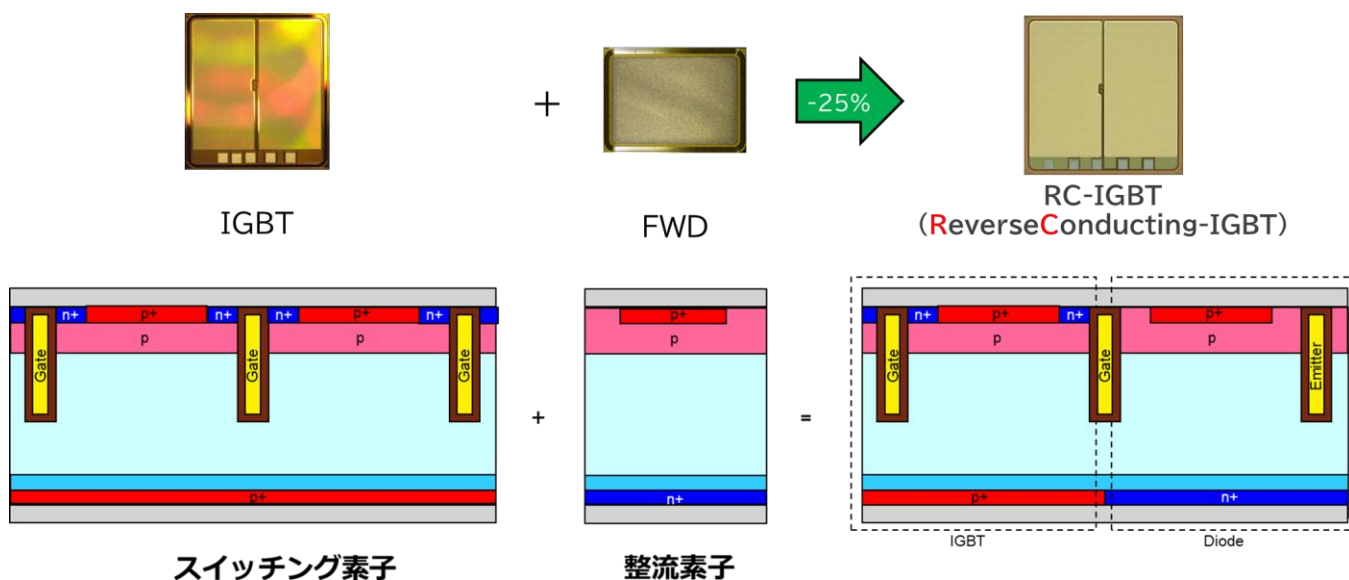


図 14 RC-IGBT

【出典元】“超低損失 RC-IGBT のためのダイオード構造”, No.09-23, 自動車技術会シンポジウム, 車載用パワーエレクトロニクスの最新技術 山下侑佑, (株)豊田中央研究所

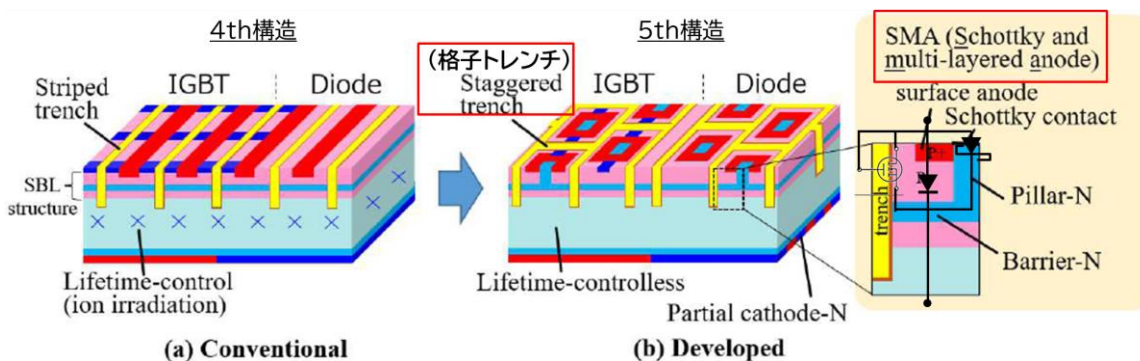


図 15 5 世代 RC-IGBT 構造

【出典元】J. Okawara, “Design of 1200-V RC-IGBT for TOYOTA’ s 5th generation HEV/PHEV systems”, ISPSD2023

このように IGBT はインバータを構成する最も重要なキーデバイスであり, 世代ごとに世界初の技術を開発, 導入することで素子の損失を低減し, 出力密度を高め, 初代に対して最新世代の 5 世代では素子の損失を約 85%低減, 素子面積を 65%削減し, 低損失化と小型化を実現し続けてきた。

3.2 パワーモジュールと冷却の進化

前節で述べたようにパワー半導体である IGBT 素子を低損失, 高出力密度とすることでインバータは小型, 低コスト化を推進してきたが, IGBT 損失が低減できた分, 素子小型化すると発熱密度が上昇するため, この素子の冷却能力を強化する必要がある, 素子進化と並行して素

子冷却進化を強力に推進してきた。また電動車の駆動用モータにおいては車両使用時に常に動き続け, 発進, 加速, 停止にともない, 半導体素子の急峻な発熱と冷却の繰り返しや振動等に対する長期耐久性がパワー半導体と電極周りの接合部において特に必要となる。また高速化するパワー半導体のスイッチング性能を引き出すためにはパッケージの寄生容量の低減(低インダクタンス化)も要求される。これらの要求を実現する専用の半導体パッケージであるパワーモジュールも素子進化とともに精力的に開発してきた。本節では IGBT の進化とともに素子冷却構造とパワーモジュールがどのように進化してきたのかについてプリウス用インバータを例に述べる。

図 16 に初代から 5 世代プリウスの素子冷却技術とパ

パワーモジュールの一覧を示す。初代プリウスでは IGBT 素子で発生した熱は絶縁基板(窒化アルミニウム:AlN)とハンダ接合した放熱板で熱を拡げて、放熱グリースを介し、Al ダイキャストで形成した冷却フィンに熱を伝える構成を取っていた。この際に放熱板は当時産業用では通常 Cu 系材料が用いられ、Si や絶縁基板に対して熱膨張係数が大きく、接合のハンダが車載の要求される冷熱の繰り返しストレスに対して耐えられないという問題があった。この問題に対して初代では特殊な低熱膨張係数の材料(AlSiC)を世界初で開発、導入することで解決した。初代ではモータ駆動用の MG2 とジェネレータ駆動用の MG1 用にそれぞれ専用のパワーモジュールを用いていたが、2 世代では IGBT の損失低減と低応力放熱板の熱伝導率向上(CuMo)、冷却フィンの熱伝達率向上等により、IGBT 素子を小型化することで、モータ&ジェネレータ駆動用のパワーモジュール統合を実現した。

続く 4 世代ではさらに冷却性能を向上するためにパワー半導体の表裏面の両面から冷却できる両面冷却方式を採用した。この両面冷却方式はパワー半導体の表裏面に Cu 放熱板をハンダ接合し、モールド樹脂で封止した両面冷却パワーカードを、絶縁基板(窒化ケイ素:Si₃N₄)を介して薄い Al でできたコルゲートフィンからなる積層冷却器で両側から挟み込むことが特徴であり、熱抵抗を大幅に低減し、出力密度を高めることにより、2 世代よりモータ出力が大きい Lexus LS 等の大型車向けで導入を進めてきた技術である。このパワーカードは IGBT と FWD がそれぞれ 1 素子ずつ入った構成(1in1)となっており、1 つのモータあたりに 3 相交流の UVW の 3 相それぞれと上アーム、下アームの計 6 個のパワーカードが最小単位で必要であり、所望の電流値に応じて並列に接続して用いてきた。例えば、必要電流の大きい駆動用モータに対しては 2 枚並列で構成し、相対的に必要電流の小さい発電機用モータに対しては、1 枚(非並列)で構成している。



図 16 パワーモジュールと冷却構造の進化

3 世代では絶縁基板と Al 冷却器をロウ付けすることで一体化し、2 世代構造までの熱抵抗の律速要因であった放熱グリースを廃した世界初の直接冷却構造を採用した。また冷却器の熱伝達率もラジエータ同様の薄い Al により微細なコルゲートフィンを用いることで大幅に向上した。素子の低損失化と冷却進化により素子を小型化し、2 世代では別体であった昇圧コンバータ用のパワーモジュールもモータ&ジェネレータ駆動用のパワーモジュールと統合することが可能となった。

この積層両面冷却構造を更に進化させ、従来の 1in1 のパワーカードではモータ 1 つ当たりの最小単位を UVW の 3 相分×上下アームの計 6 枚必要であったところを、4 世代では 1 つのパワーカードのなかに上下アームの IGBT, FWD を格納する構成(2in1)とすることで半分の計 3 枚で構成可能とした。また積層冷却器もルーバーフィンを用い乱流の効果により熱伝達率を向上することで、パワーカード枚数も低減する等により大幅な小型、低コスト化、低インダクタンス化を実現した。

また 5 世代においてはパワー半導体を IGBT と FWD の機能を統合した RC-IGBT 化により、4 世代の IGBT と FWD の 2 ペア、4 チップが実装された 2in1 のパワーカードを RC-IGBT 2 チップの構成とすることが可能となり、特に高さ方向に 12mm 小型化することが可能となった。またパワーカードの冷却必要面積が減ることに対応する冷却器の冷却断面積を狭くし、流速を向上させた。またウェーブフィンの隣り合う流路を行き来できる切れ込みを入れることで水の淀みを低減したオフセットフィンの採用により、熱伝達率を大幅に改善することで、さらなるパワーカード枚数の低減と素子小型化を実現した。図 17 に初代から 5 世代までの冷却性能向上を改めて示すが、冷却フィンの微細化、パワーモジュールの直接

冷却化, 両面冷却化等により約 10 倍の熱伝達率の向上を果たしている。以上のように世代ごとに直接冷却化, 両面冷却化, 冷却フィンの進化等によってパワー半導体の冷却性能を引き上げてきたが, この直接冷却化, 両面冷却化は近年ではトヨタのみならず車載用パワー半導体の冷却技術として大きな潮流となっている⁽⁷⁾。

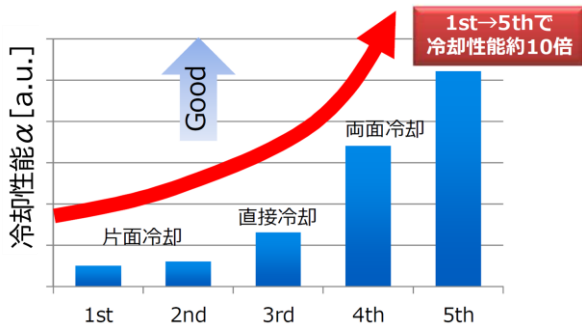


図 17 冷却性能の進化

3.3 クルマとしての嬉しさ

図 18 に HEV の世代毎の PCU の搭載位置, 搭載方法と車両としての嬉しさを示す。初代プリウスから 2 世代までは PCU はエンジンコンパートメントにボデーフレーム上にブラケットを介してエンジンの横, トランスアクスル(T/A)の上の位置に搭載することで HEV を実現していたが, PCU がエンジンコンパートメントの大きな部分を占めるプリウス用の専用プラットフォーム(以降 PF)であった。これを 3 世代ではパワー半導体と冷却の進化, パワーモジュールの統合化等により, PCU をガソリン車の補機バッテリー相当サイズにすることが可能となり, ガソリン車の補機バッテリーをラゲッジに移動し, PCU を搭載することで D セグメント以下の小型車においては, 例えばカローラやカムリ等, 多くのクルマでガソリン車と HEV を作り分けることが可能となり, HEV の普及拡大に大きく貢献した。またさらに 4 世代では 2in1 に進化して半減したパワーカードを積層両面冷却することで, PCU の床面積の縮小が可能となり, HEV/PHEV においては B セグメントから D セグメントまでの幅広いラインアップをパワーカードとパワー半導体の抜き差しで, 各セグメントに応じた出力容量違いのユニットを相似設計による開発効率化, 製造ライン共用化等, 賢くフレキシブルに対応できるようにした。また車両の商品力向上にも大きく貢献しており, 3 世代までの平置きでは投影面

積が大きくなってしまって搭載困難だった中大容量 PCU まで小型化することで T/A の直上に搭載することが可能となった。T/A 直上搭載により, ユニットの低背化, PCU ブラケットやモータとインバータを接続する長い高圧ケーブルを短縮することが可能となった。この結果, B PF, C PF 及び K PF といった TNGA PF 開発において, 低フード化による意匠自由度向上やユニット重心低減による操安性向上といったクルマの魅力向上に貢献した。また C PF においてはラゲッジに搭載していた補機バッテリーを再びエンジンコンパートメントに配置することが可能となり, ラゲッジスペースの拡大や補機バッテリーのコストおよび交換費用の低減を実現した。5 世代では 4 世代同様の T/A 直上搭載を採用しているが低損失の RC-IGBT の採用と冷却性能の向上により, 4 世代では 2 枚並列必要だったモータ駆動用のパワーカードの 1 枚化が可能となり, PCU 内に生み出したスペースを用いて, 従来車室内に搭載していたリアモータ用のインバータを PCU に内蔵することで水冷化してリアモータの高出力化に貢献した。PHEV では PCU 内に収まり切らず車室内に搭載していた DC/DC コンバータの PCU 内への搭載を可能とし, 大幅なコスト低減, 車室内ラゲッジスペースや乗員スペースの拡大, スライドシートとの組み合わせ可能化等, PHEV/BEV/FCEV や E-Four のようなさまざまな電動車の魅力向上, ラインアップの拡大に大きく貢献している。このようにパワー半導体は世代ごとに, 半導体の進化, 素子冷却構造, パワーモジュール進化, 低インダクタンス化の進化を推し進め, ユニットの小型化, 低損失化, 低コスト化を実現しながら, 電動システムと車両パッケージの革新により, 電動車の魅力向上, お客様に選んでいただける電動車のラインナップ拡充に貢献してきた。

	1st/2nd	3rd	4th/5th
概要	ボディー付け搭載		トランスアクスル直上搭載
搭載位置	エンジンルームに搭載 ※補機バッテリーはラゲージに搭載	カソリン車とプラットフォーム共通化 (補機バッテリーを除く)に搭載	PCU小型化によりトランスアクスル直上搭載を実現。補機バッテリーをエンジンルームへ搭載
搭載方法	エンジン PCU ヘッドランプ PCU PCU プラケット トランス アクスル ボディー フレーム トランス アクスル	車前部 トランス アクスル 前輪	補機バッテリーをエンジンルームに搭載しラゲージ拡大 高圧ケーブル、プラケット、トランス アクスル
車両のうれしさ	●HV用PCUをエンジンルームに別搭載 (専用設計)	●小型化によりプリウス以外の小型車への展開を可能に	●縦横心づつ電フッドを実現 (TNGAコンセプト) ●3rdピクセル=62mm ●ラゲージの拡大 ●ケーブル、プラケットの小型・軽量化 ●補機バッテリーの交換費用低減

図 18 パワーコントロールユニットの進化による車両の嬉しさ

4. SiC パワー半導体

現在、車載用パワー半導体においてはシリコンカーバイド(SiC)やガリウムナイトライド(GaN)等のワイドバンドギャップ半導体が Si(シリコン)と比較して低損失、高温動作、高周波等、優れた特性から精力的な開発が行われており(図 19)⁽⁸⁾⁽¹⁰⁾、車載での実用化も始まっている。主なワイドバンドギャップ半導体である SiC, GaN, その他材料の開発状況、適用状況について述べる。

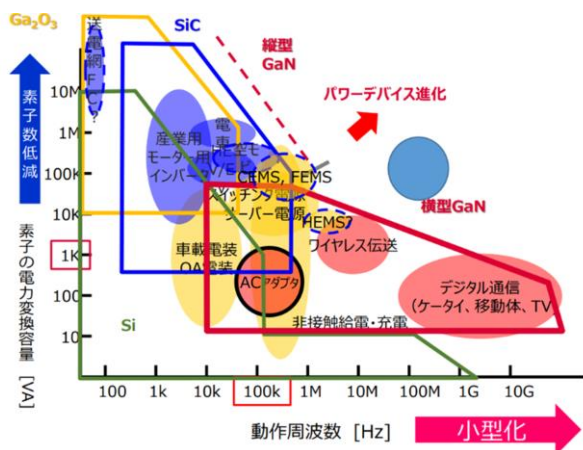


図 19 各種パワー半導体とアプリケーション

【出典元】“自動車におけるパワーエレクトロニクス”，2022 年 第 5 回 ネプコンジャパン，篠島靖，株式会社ミライズテクノロジーズ

4.1 SiC の嬉しさと課題

SiC は Si と C とで構成される化合物半導体材料で、次世代のパワー半導体材料として古くから期待され、1990 年代からの長きに渡る精力的な研究開発の結果、高品質な単結晶形成やデバイス構造、プロセス工程等、

さまざまなブレークスルーを経て、実用化が始まっている。図 20 に Si と SiC の特性比較(レーダーチャート)を示す⁽⁹⁾。高耐圧保持のために必要な絶縁破壊電界強度が Si に対して約 10 倍と極めて高く、耐熱特性や電子飽和速度等も Si に対して大変優れた特性を示すことから、さらなる電動車の魅力向上を実現するキーデバイスとして期待を集めている。その一方で SiC の結晶成長速度が Si と比較して遅く、熱的、機械的強度がゆえに加工が難しく、良品率もまだ途上にある等の理由から、コストが Si に対し大幅に高くなるという点が普及上の課題である。

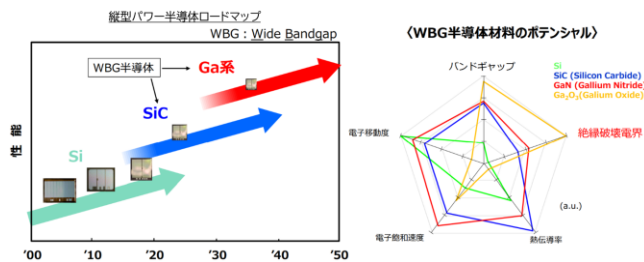


図 20 次世代パワー半導体

【出典元】“自動車におけるパワーエレクトロニクス”，2022 年 第 11 回 TIA パワーエレクトロニクス・サマースクール，原雅史，株式会社ミライズテクノロジーズ

4.2 SiC 素子の進化と適用事例

図 21 に SiC MOSFET の構造概要と特性を示す。SiC では Si に対して絶縁破壊電界が約 10 倍と高いため、主機インバータで必要な高電圧保持をごく薄く、低抵抗なドリフト層で実現することが可能となる。図 22 に SiC MOSFET の嬉しさを示す⁽¹⁰⁾。これにより Si IGBT のように裏面から正孔注入して伝導度変調効果によってドリフト層を低抵抗にする必要はなく、MOSFET の動作のまま大電流印加時にも IGBT を凌ぐ低いオン電圧を実現することができる。それに加えて低電流時には IGBT のような PN ダイオードの閾値電圧を持つことなく線形に電流が立ち上がることから、大幅にオン電圧を低減することができる。またスイッチング時にもドリフト層内に電荷が蓄積されておらず、IGBT のようなテール電流が発生しないことからスイッチング損失を大幅に低減することができる。これらの結果、SiC MOSFET を活用することにより、特にモード走行時のような低負荷時の PCU 損失を半減以下と画期的に低減することができる。この効果を例えば BEV に適用した場合、10%程度

の電費向上効果につながり、EV 走行距離の向上や高価なバッテリーのセル数を削減することが可能となる。このため電池を多数搭載する BEV においては特に車両システム全体でメリットを見出しやすいため SiC 導入に適している。また FCEV においても航続距離が増加し、搭載する水素タンクの容量を減らすことにつながることから、SiC のような次世代パワー半導体に適したアプリケーションといえ、今後の電動化の進展にともない普及が本格化するものと期待される。また SiC MOSFET は IGBT のようなテール電流が無く、より高速スイッチングが可能となるので、インバータやコンバータのスイッチング周波数を向上させることが可能となる。この効果により、電気的なバッファであるコンデンサや磁気的なバッファであるリアクトルやトランスといった受動部品を小型化することが可能となるため、インバータやコンバータの小型化にもつながる。このため SiC はモータ駆動用のインバータのみならず、オンボードチャージャ(OBC)や DC/DC コンバータ等のアプリケーションにおいても装置の小型化、効率改善のために積極的な導入が始まっている。

SiC の研究開発、導入はトヨタおよびトヨタグループにおいても古くから実施しており、1990 年代よりデンソーで SiC の結晶成長の研究がなされ、結晶欠陥の少ない高品質な SiC 基板成長法等の優れた研究成果が報告されている。また図 23 のように 2015 年に 2 世代のカムリ HV での NEDO 実証実験を皮切りに、図 24 のように FCEV バスの昇圧コンバータに SiC ダイオードを適用し、2017 年 3 月から都営バスなどで運航している。さらに図 25⁽¹¹⁾にあるように FIA 世界耐久選手権の過酷なレース環境でもリアモータ駆動用のインバータに SiC MOSFET を導入し耐久性を鍛え上げた。そして結晶欠陥の少ない高品質な SiC 結晶を用いることで歩留まりを向上し、素子サイズの大型化、デバイス構造およびプロセス工程上のいくつかのブレークスルーを果たし、世界初の SiC トレンチ MOSFET チップを開発し、2020 年に第 2 世代 MIRAI の FC システムの昇降圧コンバータに導入、量産化した⁽¹¹⁾。2 世代の MIRAI では初代に対し 30% 航続距離を向上しており、SiC MOSFET の採用も大きく寄与している。2023 年には新型 BEV Lexus RZ においても図 26 に示すような新型の電界緩和型トレンチ MOSFET をリアモータ駆動用のインバータに採用し、高耐圧の確保と高い信頼性、低オン抵抗を両立した。スイッチングを Si 比で約 3 倍に高速化することで電力損失を 70% 低減し、1 チップあたりの出力を 2.8 倍向上している。他社動向としては 2017 年にテスラは BEV モデル 3 を皮切りに、モデル S、モデル X、モデル Y へと BEV へのプレーナ型の SiC MOSFET の採用を進め、SiC の本格普及に向け先鞭をつけており(図 27)⁽¹²⁾、他 OEM 車への導入も報告され、特に電池積載量の多いハイエンドの BEV を中心に SiC の本格展開が急速に進むことが予測される。今後も SiC MOSFET の性能向上とコスト低減、冷却性能向上、低インダクタンス化等、SiC のポテンシャルを引き出すパッケージと駆動回路の進化は電動車のさらなる魅力向上のために極めて重要であり、精力的な技術開発と BEV、FCEV への本格展開拡大とともに HEV/PHEV への適用検討が進むものと考えられる。

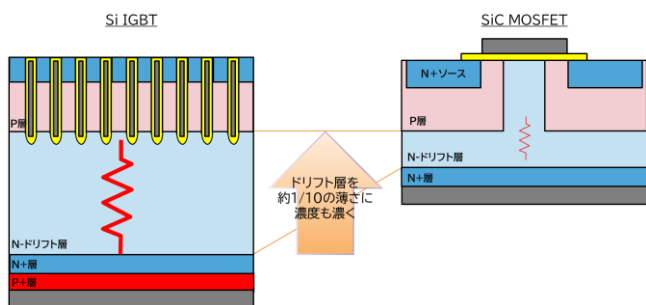


図 21 SiC MOSFET 構造概要

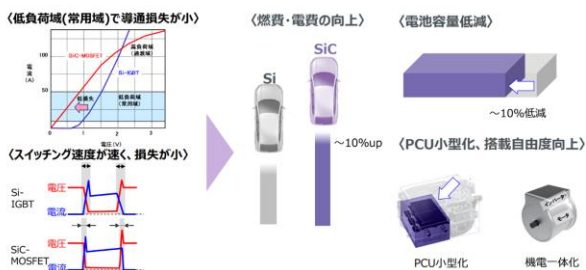


図 22 SiC MOSFET 適用の嬉しさ

【出典元】“自動車におけるパワーエレクトロニクス”，2022 年 第 5 回
ネプコンジャパン，篠島靖，株式会社ミライズテクノロジーズ

カムリハイブリッドによる実証試験(2015)



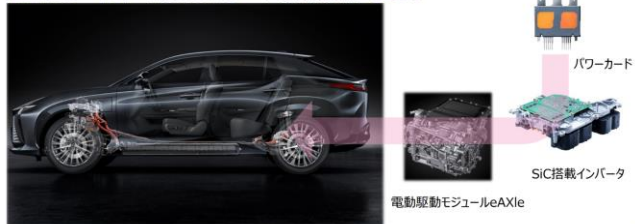
SiCデバイスはデンソー、トヨタ自動車、豊田中央研究所の共同開発品
PCUはデンソーにて試作

- ・既存システム置換えてSiCパワー半導体(MOS, ダイオード)搭載
- ・2015年2月から公道走行試験を実施

図 23 SiC MOSFET 適用実証実験

【出典元】トヨタ自動車ニュースリリース 2015年1月29日

LEXUS “RZ”へのSiCパワー半導体搭載(2023)

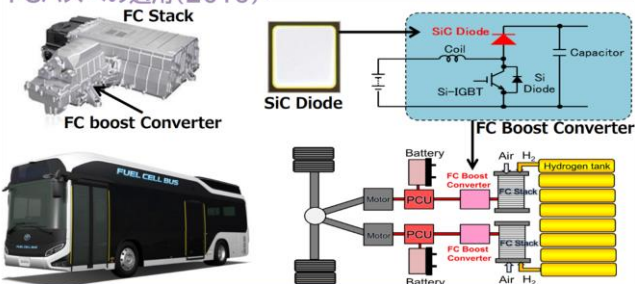


2023年3月 LEXUS初のBEV専用モデル”RZ”にSiCパワー半導体を用いたインバータを搭載

図 26 LEXUS BEV 専用モデル RZ への SiC 適用事例

【出典元】トヨタ自動車(株), (株)デンソー

FCバスへの適用(2016)



- ・FCバスの昇圧コンバータにSiCダイオードを搭載
- ・2017年3月から都営バスとして運行開始

図 24 SiC MOSFET FC バス適用事例

【出典元】トヨタ自動車ニュースリリース 2015年1月8日, 2017年2月24日

SiC-MOSFET 車載インバーター実用化事例(他社)



図 27 他社 SiC MOSFET 実用化事例

【出典元】Yole Development 社 Market & Technology report, July, 2018

F1レース車両への適用(2016~) 第2世代MIRAIへの適用(2020)



FIA世界耐久選手権の過酷なレース環境下でSiC素子を鍛え、
SiCトレンチMOS-FET素子を新型MIRAIへ適用し、航続距離UP(630⇒850km※)に貢献

図 25 SiC MOSFET レース車両への適用と FCEV への適用事例

【出典元】“カーボンニュートラル実現に向けた電動化技術とパワーエレクトロニクスの取り組み”, 2021年, 自動車技術会シンポジウム, 車載用パワーエレクトロニクスの最新技術, 堀田幸司, トヨタ自動車株式会社

5. GaN パワー半導体

GaN(ガリウムナイトライド)は SiC 同様に高い材料ポテンシャルを有するワイドバンドギャップ半導体材料であり, SiC の高耐圧領域に対して高周波領域にて急速に存在感を高めている(図 19). 横型 GaN および縦型 GaN それぞれの状況を述べる.

5.1 横型 GaN パワー半導体の状況

GaN の SiC がない特徴は, 横型半導体において高電子移動度トランジスタ(High Electron Mobility Transistor:HEMT)(図 28)⁽¹³⁾が形成可能であることがあげられる. HEMT は GaN 結晶の上にバンドギャップの広い窒化アルミニウムガリウム(AlGaN)の膜を形成して, 接合面に電子が多数集まった状態(2次元電子ガス層)で電流を流すことで, 電子移動度と電子密度を飛躍的に高めることができるトランジスタであり, 通常の MOSFET では実現できない高周波に対応することが可

能となり、民生において先行して実用化が進んでいる。近年では通信用途での活用に加え、スマートフォンやPCの充電用AC/DCアダプタに導入され、充電器の大出力化と小型化を実現し、急速な市場拡大を見せている(図29)⁽¹⁴⁾。

この横型のGa₂N HEMTはSi基板の上にGa₂N層を形成することで実現(GaN on Si)しており、安価なSi基板と、一般的なSi半導体の生産設備で流動可能な8インチでの生産が可能となるため、量産化が加速している。車載ユニットではOBCやDC/DCコンバータの小型化、効率改善への貢献の期待が高いが、普及に向けGa₂N HEMTのさらなる性能向上とコスト低減、耐圧レンジの拡大、電流コラプス等の信頼性課題解決等が必要である。

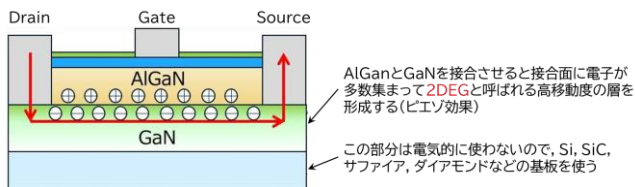


図 28 Ga₂N HEMT 構造

【出典元】Ga₂N-HEMTとは、新電元工業株式会社、<https://www.shindengen.co.jp/products/semi/column/basic/widebandgap/gan-hemt.html>



図 29 民生用とでのGa₂N活用事例(電源アダプター)

【出典元】充電器の統一へ！次世代パワー半導体素材「Ga₂N」と新テクノロジー「Anker Ga₂N II」 - Anker Japan 公式サイト、<https://www.ankerjapan.com/blogs/magazine/gan-charger-atom-anker>

5.2 縦型 Ga₂N パワー半導体の状況

一方で縦型 Ga₂N はまだ開発途上であるが、モータ駆動インバータ用途のパワー半導体としても SiC よりも高性能、低コストを実現できる可能性があり、期待されてい

る。これは Ga₂N の電子移動度や電子飽和速度が SiC よりも優れる材料ポテンシャルを有することに加え、コストの大きなウエートを占めている結晶基板の成長速度を SiC 現状の昇華法に対して桁で早いガス法への置き換えや溶液法で作製した種結晶と組み合わせることで大幅なコスト低減と高品質化が期待されるからである(図30)⁽¹⁰⁾。

基板製造法	Si現状	SiC現状	Ga ₂ N現状(2021年)		GaN(将来)
	引き上げ法(融液)	昇華法	ガス法	溶液法	溶液法+ガス法
	コスト等の課題はあるが(SiC)パワーデバイス用途の実績あり		HVPE法 OVPE法 HPVPE法	Na-Flux法 アモノサーマル法	Na-Flux法、アモノサーマル法+HVPE法などに期待 低欠陥、低コスト化の期待
成長温度	1500℃	2400℃	~1300℃	~900℃	~1300℃
結晶口径	~Φ12"	Φ6"~Φ8"	Φ4"~Φ6"	Φ2"~Φ4"	Φ2"~Φ4"
結晶欠陥	~10 ¹ cm ⁻²	10 ³ cm ⁻²	10 ⁵ ~6cm ⁻²	~10 ³ cm ⁻²	~10 ³ cm ⁻²
成長速度	60mm/hr	0.5mm/hr	0.2~2mm/hr	0.1~0.5mm/hr	0.2~2mm/hr

図 30 各種結晶成長法比較

【出典元】“自動車におけるパワーエレクトロニクス”，2022年 第5回ネブコンジャパン，篠島靖，株式会社ミライズテクノロジーズ

課題克服のためのブレークスルーの研究成果をいくつか例示すると、縦型 Ga₂N の実現には耐圧保持のために厚いGa₂Nエピタキシャル層の形成が必要であるが、そのためには格子定数の等しい Ga₂N 基板上への結晶成長(GaN on Ga₂N)が必要であること。そのために大口径の低欠陥のGa₂N基板の成長が必要となるが、ナトリウムフラックス法にポイントシード法を組み合わせた技術により実現可能となってきた⁽¹⁵⁾。またこの高品質な結晶を種結晶としてアモノサーマル法を組み合わせることで、縦型 Ga₂N の実現を可能とする高品質で量産化に向けた6インチ大口径の結晶成長が可能となる等の研究成果が報告されている⁽¹⁶⁾。また結晶成長以外にも Ga₂N ではP型拡散層形成の難しさがあげられる。イオン注入後に活性化と結晶性回復のための熱アニールの工程において結晶中の窒素(N)が大変抜けやすく Ga₂N 結晶が崩壊するという課題、1GPa の高圧雰囲気化で高温アニールすることで Ga₂N 分解を抑制できることが示され⁽¹⁷⁾ブレークスルーがあったが、さらにコスト低減のため低圧力化、低温化の研究が引き続きなされている等、精力的な研究が行われている。縦型 Ga₂N は実用化に向けたさまざまな課題があり(図31)⁽¹⁰⁾、今後、さらなる性能向上、低コストに向けた精力的な研究開発が期待される。

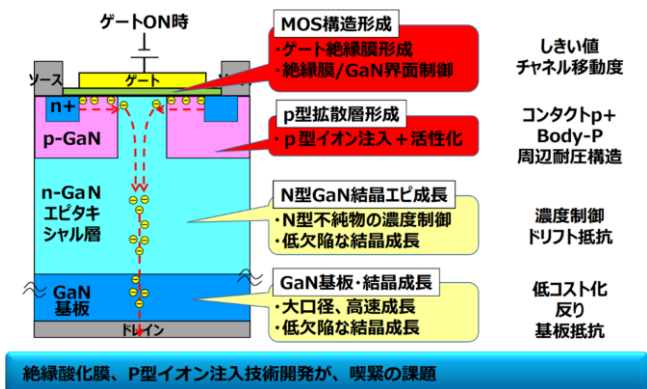


図 31 縦型 GaN の課題

【出典元】“自動車におけるパワーエレクトロニクス”，2022 年 第 5 回
ネブコンジャパン，篠島靖，株式会社ミライズテクノロジーズ

6. その他の次世代パワー半導体

ワイドバンドギャップのパワー半導体としては SiC や GaN が量産化され存在感を高めているが、さらに高いポテンシャルを持つ材料としてガリウムオキシド (Ga_2O_3) とダイヤモンドが上げられ、それぞれ研究開発が進められている。

6.1 Ga_2O_3 パワー半導体の研究動向と展望

Ga_2O_3 はその特性のなかでも特に絶縁破壊電界が高く、パワー半導体の理論的なポテンシャルを示すバリガ性能指数では Ga_2O_3 は Si の 2,000 倍以上、SiC の約 5 倍と非常に高いため、SiC よりもさらに低損失に、製造コストを Si に近いレベルまで低コスト化が期待できる次世代材料として期待されており(図 32)⁽¹⁰⁾、特に 2012 年に FET 動作が発表されたのを契機に大学、企業、公的研究機関が参画し研究が加速している。 Ga_2O_3 の結晶基板の製造方法を示すさまざまな方法が試みられているが(図 33)⁽¹⁰⁾、Si 同様の融液法での結晶成長が期待されており Si に近いレベルまで結晶成長コストを下げられる可能性が期待されている。特に EFG(Edge-defined Film-fed Growth)法を用いたウエハ上に HVPE(Halide Vapor Phase Epitaxy)法で成長したエピウエハは 100mm(4 インチ)の大口径化と低欠陥化が進められており、さらなる進展が期待される(図 34)⁽¹⁰⁾⁽¹⁸⁾。 Ga_2O_3 パワー半導体の課題を示す(図 35)⁽¹⁰⁾。ウエハの大口径化や高速成長による低コスト化、低欠陥化、ゲート絶縁膜や N 型、P 型層形成等の課題があるが、P 型層形成がイオン注入でもエピタキシャル層を用いる

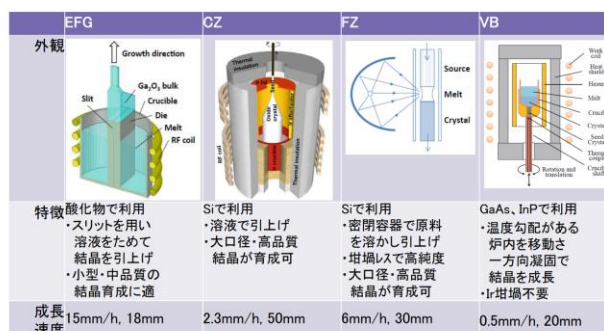
法でも難しく最重要課題である。図 36⁽¹⁰⁾に Ga_2O_3 の代表的な結晶構造である α 型と β 型を示す。 β 型が最安定な結晶構造であるが、それゆえに P 型層形成が困難であり、未だ報告例がない。一方で α 型は準安定相であり 600℃以上で β 型に相転移してしまうが、P 型層形成事例が報告されている。この P 型層形成法を確立する研究と P 型が不要なデバイス構造の研究が並行してなされている。図 37⁽¹⁰⁾に P 型層が必要ないショットキーバリアダイオードの事例⁽¹⁹⁾と図 38⁽¹⁰⁾に FET のデバイス構造研究の事例⁽²⁰⁾を示す。ウエハ β 型のいずれの研究もまだ途上ではあるが、ミスト CVD 法という低コストなエピタキシャル層の製造方法が適用できる点が魅力であり、Si 並みのコストと SiC を超える性能を備えた次世代デバイスの実現に向け、さらなる研究開発の加速が期待される。

Ga_2O_3 , Diamondの嬉しさ(物性)

	Si	SiC	GaN	Ga_2O_3	Diamond
バリガ性能指数 $\epsilon \mu E_c^3$ (対Si)	1	480	860	2,296 (推定)	57511 (推定)
バンドギャップ E_g [eV]	1.1	3.3	3.4	4.5~4.9	5.5
比誘電率 ϵ	11.8	9.7	8.9	10	5.7
電子移動度 μ [cm^2/Vs]	1,400	1,000	1,200	200	4500
絶縁破壊電界 E_c [MV/cm]	0.3	2.8	3.3	8 (推定)	>10
熱伝導率 [W/m・K]	150	60-490	210	10~30	2000

図 32 Ga_2O_3 と各種パワー半導体材料物性値比較

【出典元】“自動車におけるパワーエレクトロニクス”，2022 年 第 5 回
ネブコンジャパン，篠島靖，株式会社ミライズテクノロジーズ



・ Ga_2O_3 はSiと同様の溶液(融液)でバルク結晶成長が可能

図 33 Ga_2O_3 Wafer 製造方法

【出典元】“自動車におけるパワーエレクトロニクス”，2022 年 第 5 回
ネブコンジャパン，篠島靖，株式会社ミライズテクノロジーズ

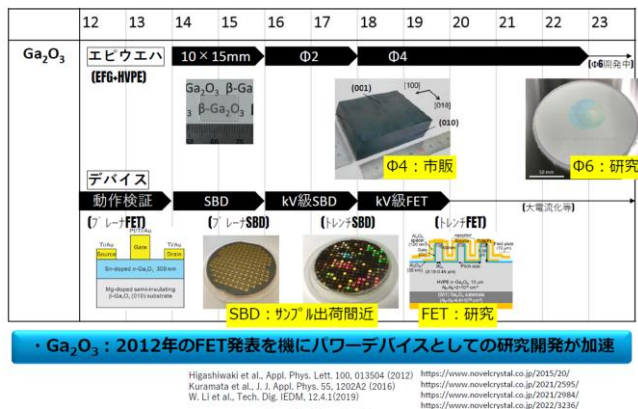
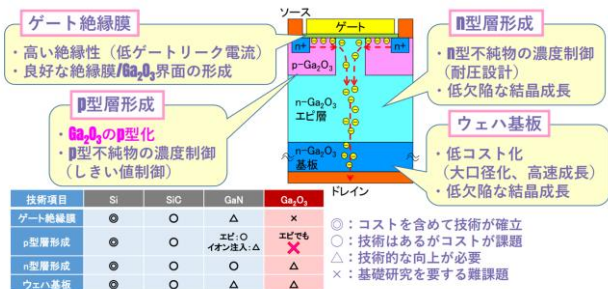


図 34 Ga₂O₃の開発動向

【出典元】“自動車におけるパワーエレクトロニクス”，2022年 第5回
 ネブコンジャパン，篠島靖，株式会社ミライズテクノロジーズ



・ p型層形成が大変。Ga2O3デバイス開発の最重要課題

図 35 Ga₂O₃ パワーデバイスの課題

【出典元】“自動車におけるパワーエレクトロニクス”，2022年 第5回
 ネブコンジャパン，篠島靖，株式会社ミライズテクノロジーズ

	α型-Ga ₂ O ₃	β型-Ga ₂ O ₃
結晶構造	コランダム構造	βガリア構造
熱力学安定性	準安定相 (600°C以上でβ型に転移)	最安定相
基板結晶成長	不可	液相成長(低コスト)
エピ層結晶成長	ミストCVD法	HVPE法、ミストCVD法
エピ層結晶成長 下地基板	異種材料 (α-Al ₂ O ₃ + α-Ga ₂ O ₃)	同一材料 (β-Ga ₂ O ₃ + β-Ga ₂ O ₃)
エピ層の品質	結晶欠陥が多い(10 ¹⁰ /cm ²)	結晶欠陥が少ない(10 ⁷ ~10 ⁹ /cm ²)
p型層の形成	α-Rh ₂ O ₃ 、α-Fe ₂ O ₃	報告例なし
オン抵抗 (Si比 1/バリガ指数)	1/(4,500~6,400)	1/(2,000~3,400)

・ α型、β型が存在。α型は結晶が不安定だが、P型形成の報告あり。
 β型は安定した結晶だが、それ故、P型層形成が困難。
 ・ ミストCVDという低コストなエピ層製造方法が魅力

図 36 Ga₂O₃ 主要な結晶の種類

【出典元】“自動車におけるパワーエレクトロニクス”，2022年 第5回
 ネブコンジャパン，篠島靖，株式会社ミライズテクノロジーズ

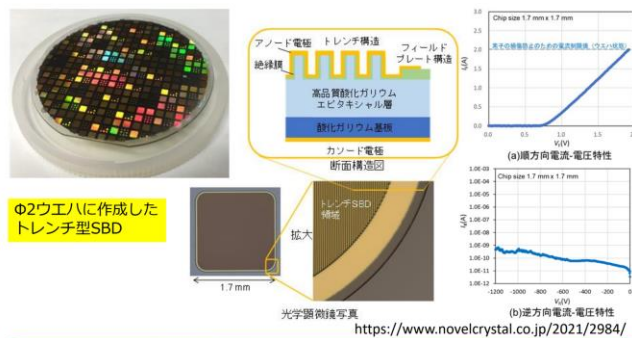
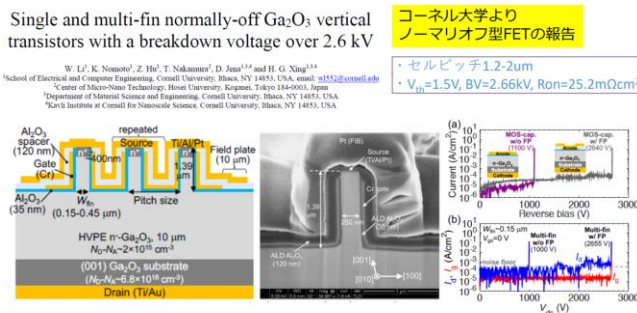


図 37 Ga₂O₃の研究動向(ショットキーダイオード)

【出典元】“自動車におけるパワーエレクトロニクス”，2022年 第5回
 ネブコンジャパン，篠島靖，株式会社ミライズテクノロジーズ



・ その後も継続的なデバイス研究が進行。現状、P型を必要としない
 FIN型FETでノーマリオフも可能に

図 38 Ga₂O₃ 主要な研究動向(FET)

【出典元】“自動車におけるパワーエレクトロニクス”，2022年 第5回
 ネブコンジャパン，篠島靖，株式会社ミライズテクノロジーズ

6.2 ダイヤモンドパワー半導体の研究動向と展望

ダイヤモンドは Si 同様のIV属半導体であり、ともに共有結合によるダイヤモンド構造の結晶構造を持つ古くから次世代半導体材料としての可能性が議論されてきた。ダイヤモンドは、Si はもちろんのこと SiC や GaN, Ga₂O₃ といった次世代材料をはるかにしのぐ絶縁破壊電界や電子移動度、放熱性等の特性を有し、パワー半導体として求められる全てのポテンシャルが高く、Si 同様の MOSFET ができたとなれば究極のパワー半導体が実現できる夢の材料である。しかしながら結晶成長の難しさ等から長らく口数 mm の合成が限界であったが、2022年に2インチのダイヤモンド結晶合成の報告があり、今後研究が加速する可能性がある。図 39⁽¹⁰⁾に2インチウエハ合成を可能とする新工法を示す⁽²¹⁾。サファイヤのステップ状に傾斜した基板にダイヤモンドを横方向に成長することにより、従来工法で問題であった結晶へ

の応力集中を緩和している。また750°Cの水素プラズマで水素終端したダイヤモンド基板表面にNO₂をドーピングすることでP型キャリアを生成して横型FET動作を確認した研究成果も出てきており(図40)⁽¹⁰⁾⁽²²⁾、さらなるブレークスルーが期待される。

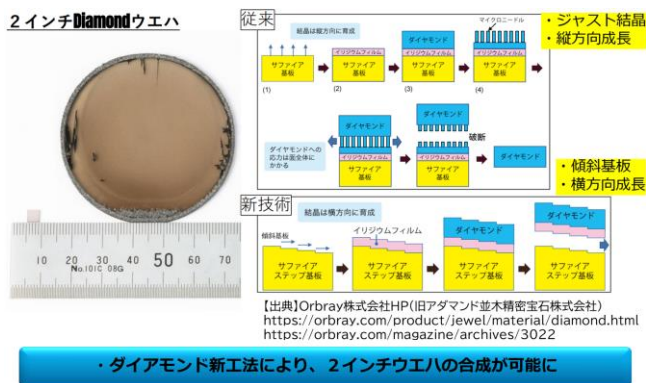


図39 ダイヤモンドの研究動向(ウエハ)

【出典元】“自動車におけるパワーエレクトロニクス”, 2022年 第5回ネプコンジャパン, 篠島靖, 株式会社ミライズテクノロジーズ

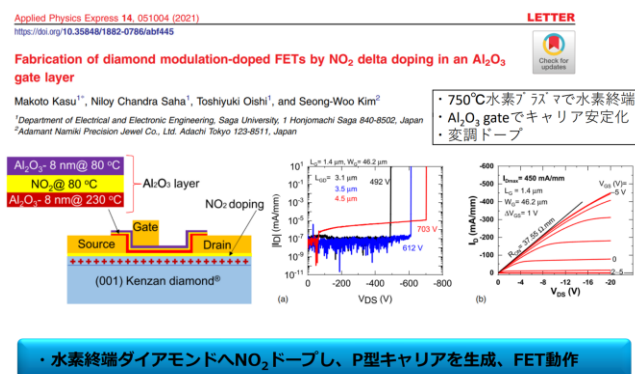


図40 ダイヤモンドの研究動向(FET)

【出典】“自動車におけるパワーエレクトロニクス”, 2022年 第5回ネプコンジャパン, 篠島靖, 株式会社ミライズテクノロジーズ

7. まとめ

パワー半導体は電動車の性能, コストに大きく影響する重要な部品であり, 世代ごとに進化することで電動車の魅力向上や選択肢の拡大に大きく貢献してきた。SiCやGaN等のワイドバンドギャップ半導体も研究開発から本格普及期に移りつつある。Ga₂O₃やダイヤモンドのような次世代材料の研究も盛んに行われており, 今後もパワー半導体は電動化の最も重要なキーデバイスとして, CNの実現に向けた, たゆまぬ研究開発によって, 電動車のさらなる性能向上と展開拡大に貢献してゆく。

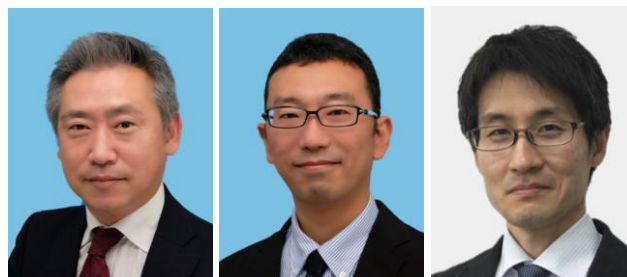
参考文献

- (1) 単結晶シリコンの製造: CZ法・FZ法の原理, Semiジャーナル, <https://semi-journal.jp/basics/si-chem/cz-fz.html>
- (2) 成果と知的基盤技術, 国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構 原子力科学研究所, https://www.jaea.go.jp/04/ntokai/technical/analysis/analysis_06.html
- (3) TAIKOプロセス, 株式会社ディスコ, https://www.disco.co.jp/jp/solution/library/grinder/taiko_process.html
- (4) AGC株式会社 ニュースリリース, <https://www.agc.com/news/pdf/20110818.pdf>
- (5) “超低損失RC-IGBTのためのダイオード構造”, No.09-23, 自動車技術会シンポジウム, 車載用パワーエレクトロニクスの最新技術, 山下侑佑, (株)豊田中央研究所
- (6) J. Okawara, “Design of 1200-V RC-IGBT for TOYOTA’s 5th generation HEV/PHEV systems”, ISPSD2023
- (7) 日立評論2013年11月号: ハイブリッド電気自動車向け高電力密度インバータ, https://www.hitachihyoron.com/jp/pdf/2013/11/2013_11_06.pdf
- (8) 定期広報誌 “Focus NEDO”, 第55号, 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構
- (9) “自動車におけるパワーエレクトロニクス”, 2022年 第11回TIAパワーエレクトロニクス・サマースクール, 原 雅史, 株式会社ミライズテクノロジーズ
- (10) “自動車におけるパワーエレクトロニクス”, 2022年 第5回ネプコンジャパン, 篠島靖, 株式会社ミライズテクノロジーズ
- (11) “カーボンニュートラル実現に向けた電動化技術とパワーエレクトロニクスの取り組み”, 2021年, 自動車技術会シンポジウム, 車載用パワーエレクトロニクスの最新技術, 堀田幸司, トヨタ自動車株式会社
- (12) Yole Development社, Market & Technology report, July, 2018

- (13) GaN-HEMTとは, 新電元工業株式会社,
<https://www.shindengen.co.jp/products/semi/column/basic/widebandgap/gan-hemt.html>
- (14) 充電器の統一へ! 次世代パワー半導体素材「GaN」と新テクノロジー「Anker GaN II」,
Anker Japan,
<https://www.ankerjapan.com/blogs/magazine/gan-charger-atom-anker>
- (15) Shogo Washida et al., "Reducing GaN crystal dislocations through lateral growth on uneven seed crystal surfaces using the Na-flux method",
Japanese Journal of Applied Physics 62, 105503, (2023)
- (16) 異分野から発想した結晶技術で、次世代イノベーションに貢献, リソウ (osaka-u.ac.jp),
https://resou.osaka-u.ac.jp/ja/story/2013-1/201306_02/
- (17) Tetsu Kachi et al. "Process engineering of GaN power devices via selective area p-type doping with ion implantation and ultra-high-pressure annealing",
Journal of Applied Physics 132, 130901, (2022)
- (18) 高品質 β 型酸化ガリウム100mmエピウエハの開発に成功, 株式会社ノベルクリスタルテクノロジー,
<https://www.novelcrystal.co.jp/2021/2595/>
- (19) 世界初, アンペア級・1200 V耐圧の「酸化ガリウムショットキーバリアダイオード」を開発, 株式会社ノベルクリスタルテクノロジー,
<https://www.novelcrystal.co.jp/2021/2984/>
- (20) W. Li et al., Tech. Dig. IEDM, 12.4.1, 2019
- (21) 直径2インチ超高純度ダイヤモンドウェハの量産に成功 量子コンピュータの実現に目途, Orbray MAGAZINE, Orbray株式会社,
<https://orbray.com/magazine/archives/3022>

- (22) Fabrication of diamond modulation-doped FETs by NO₂ delta doping in an AL₂O₃ gate layer, Makoto Kasu et al.,
Applied Physics Express 14, 051004, 2021

■著者



堀田 幸司

保田 智史

妹尾 賢

電動化に貢献するパワートレイン潤滑技術

新吉 隆利 *1

山守 一雄 *1

床桜 大輔 *1

要旨

カーボンニュートラル達成に向け、当社はマルチパスウェイの方針のもと、さまざまなパワートレインの開発を推進している。そのユニット効率向上が求められるなか、潤滑油の改良、低粘度化がもたらす効果は非常に大きい。

本報では、電動車の共通ユニットであるトランスアクスルの潤滑油について、従来よりも画期的に低粘度化した潤滑油の開発事例、および従来とは異なるアプローチで低粘度化の実現を目指す次世代エンジン油の開発状況について紹介する。

キーワード カarbonニュートラル, 潤滑油, トライボロジー, 電動化, エンジン油, トランスアクスル, パワートレイン

1. まえがき

自動車の燃費、環境に配慮した技術開発は従来からも実施されているが、近年SDGsに対する関心の高まりや、カーボンニュートラル実現に向けた取り組みがさらに活発化しており、業界における電動車の開発が過熱している。そのような状況下において、当社はマルチパスウェイの方針を掲げ、求められる地域に最適な車両を提供すべくさまざまなパワートレインの開発を推進している。

自動車の電動化に向けて、HEV(Hybrid Electric Vehicle), PHEV(Plug in Hybrid Electric Vehicle), FCEV(Fuel Cell Electric Vehicle), BEV(Battery Electric Vehicle)などの電動パワートレインが検討されているが、その効率向上技術のなかで、ユニットの血液ともいわれる潤滑油が果たす役割は大きい。特に、潤滑油を低粘度化することは燃費、電費向上のための共通ニーズとして期待されている。

本報では、まず電動車パワートレインの共通ユニットであるトランスアクスル(以下 T/A)の潤滑油について、画期的に低粘度化した開発事例について紹介する。また、電動車の主力である HEV, PHEV に搭載されるエンジンの省燃費性向上に貢献する次世代エンジン油の開発事例についても紹介する。

2. 電動車用 T/A フルードの開発

2.1 開発の狙い

T/Aに必須となるモータは冷却しながら動作させる必要があり、その冷却方式は水冷式と油冷式が存在するが、油冷式を採用するメーカーは増加傾向にある。その理由として、間接冷却となる水冷式に対し、電気絶縁性の高い油を使った油冷式ではモータの直接冷却が可能であり、冷却性能が優れていることが挙げられる。油冷式の場合、高回転部品であるモータやギヤに直接潤滑油を供給することになるため、潤滑油の粘性による攪拌、引き摺り損失の割合がT/Aの損失内訳の約50~70%を占める(車速 100km/h)。したがって、潤滑油を低粘度化することにより、電動車のT/Aの大幅な損失低減が期待できる。

現状、多くのOEMではオートマチックトランスミッション(以下AT)用の潤滑油をHEV, PHEVにも使用しているが、上述の背景から、電動車向けに新たな低粘度油の開発が期待されている。一方、低粘度化すると潤滑性能が担保できなくなるため、耐摩耗、耐焼付き特性を向上させる性能添加剤を見直す必要がある。ただし単純に添加剤を増量させるだけでは、電動車用オイルに必要な電気絶縁性が低下してしまう。そこで、トヨタハイブリッドシステム(以下THS)やBEVのT/Aに特化した潤滑油を新たに専用設計することとした。

*1 先進技術開発カンパニー 電動化・環境材料技術部

2.2 低粘度化の効果

前節でも触れたように、潤滑油は金属表面の保護や劣化防止などを目的とした添加剤を基油にブレンドして製造される。よって、潤滑油の低粘度化は基油の粘度を下げることで行うが、その際低分子量成分が相対的に増加するため、引火点の低下が背反となる。低粘度化の効果を確認するため、まず従来 T/A に使用していたオートマチックトランスミッションフルード(以下 ATF)の添加剤は変更せず、基油として比較的安価な鉱物油のなかで高精製グレードの Group III 基油を採用し、引火点が電動車用 T/A の限界温度以上になるよう低粘度化を行った。これを試作油 1 とする(表 1)。

表 1 ATF と試作油 1 の構成

	ATF	試作油1
基油	Group II	Group III (低粘度)
耐摩耗添加剤	硫黄-リン系	←
金属清浄剤	CaタイプA	←
粘度指数向上剤	ポリメタクリレート	←

試作油 1 は ATF と比較し、常温域で約 50%、低温域の 0~20℃で約 60%の低粘度化となることがわかった(図 1)。

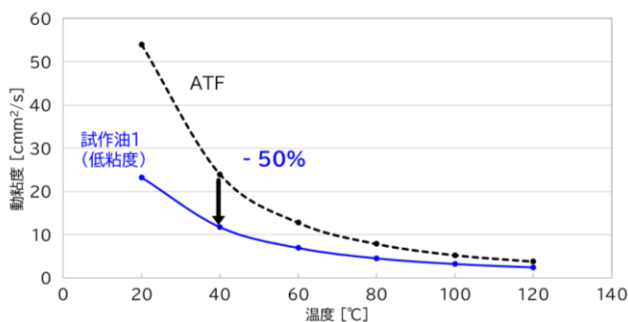


図 1 ATF と試作油の粘度特性

また、ATF よりも高精製の基油を使用していることから、温度に対する粘度変化を示す粘度指数が向上し、低温になるほど ATF との粘度差が拡大していることがわかる。

この試作油 1 を用いて THS の T/A 無負荷損失を測

定した結果、ATF と比較して油温 20℃で約 40%の損失低減効果がみられた(図 2)。

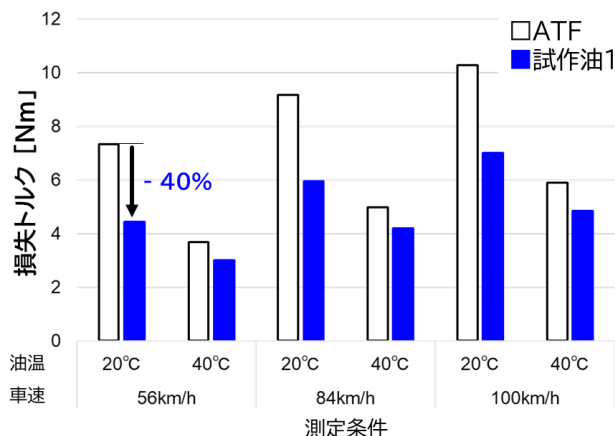


図 2 ユニットの損失トルク

図 1 で示した粘度差を反映し、低温になるほど損失低減の効果も大きくなる。図 2 の結果を用い、車両シミュレーションでモード燃費を試算した結果、欧州 Worldwide harmonized Light Vehicles Test Cycles(以下 WLTC)モードで 1.7%、日本 WLTC で 1.2%の燃費向上効果を見積もることができる(表 2)。

表 2 試作油1の燃費改善率

	WLTC (EU)	WLTC (JP)
燃費改善率[%]	+1.7%	+1.2%
外気温[°C]	14°C	23°C

次に、低粘度化によるモータ冷却性への影響について確認した。従来から強制対流におけるオイル物性や分子構造の冷却性能への影響を評価し、低粘度であればあるほど冷却速度が高くなることが知られている。また、低粘度化により熱伝達率が向上し、モータの冷却能力が高まることが報告されている⁽¹⁾。そこで、実際に T/A ユニットを用いてモータの冷却性を調査した。モータに所定の負荷を与えて発熱させ、モータの上部から一定流量の油を供給する実機と同じ潤滑状態で、熱電対を用いてステータ表面温度を計測した。

その結果、油の各供給流量において、試作油 1 は ATF と比べてモータの表面温度が低下した(図 3)。

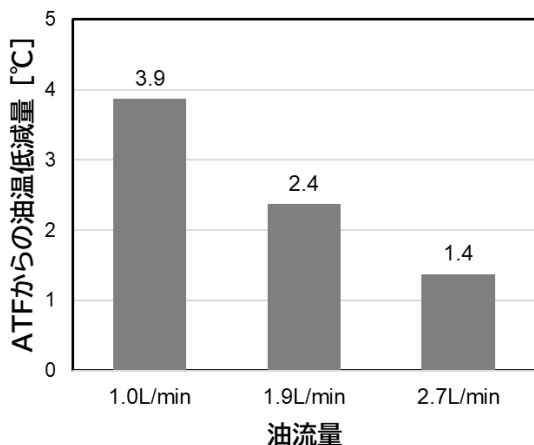


図3 試作油1の冷却効果

同時に、低粘度化により T/A 内部の流路圧力損失が低減され、T/A に備わったオイルポンプからモータに供給される油量が、同一回転数条件下において増加することが確認できた。すなわちモータへの油供給量増加より、さらにモータの冷却性が向上することが期待できる。

2.3 低粘度化の課題

ここまで低粘度化のメリットについて確認してきたが、背反となる低粘度化の機能課題として、摺動面の耐疲労性・耐焼付き性の低下、モータに求められる電気絶縁性の低下、オイルシールからの漏れなどがある。そこで、試作油1を用いて調査を行った。

まず、摺動面の保護機能について検討した。ギヤや軸受の金属表面は潤滑油の粘性由来の「油膜」と、添加剤由来の「反応被膜」により保護される。よって、低粘度化により油膜厚さが薄くなり、ギヤや軸受などの金属表面が直接接触する頻度が高まると、疲労損傷、異常摩耗、焼付きに至る懸念がある。その課題を明確にするため、試作油1を用いてTHSのT/Aで耐久試験を実施した。

試験後、高面圧・低すべり速度で摺動しているドライブピニオンギヤとテーパローラー軸受の摺動面に疲労剥離が生じ、高すべり速度、かつオイルの供給が限定されるプラネタリ部のサンギヤ、およびデフケースとドライブシャフト間の摺動面において焼付きが確認された(図4)。以上から、潤滑油の低粘度化を実現するには、疲労剥離の発生と焼付き性の悪化を補うために添加剤の改良が必要となることがわかった。

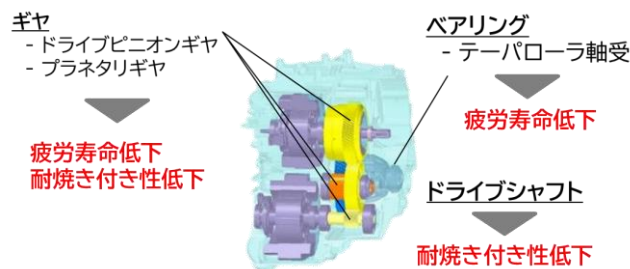


図4 T/A 耐久試験時の課題

次に、モータに求められる電気絶縁性について検討した。一般的に低粘度の基油になるほど分子量が小さくなり、イオン伝導のキャリアの移動が活発になることで電気絶縁性が低下する⁽²⁾。また、金属表面を保護するための添加剤は、電気絶縁性を低下させる傾向にある。一方、電気絶縁性の指標としては体積抵抗率があり、測定方法はJIS C2101で定められている。この評価において、低粘度である試作油1はATFに比べ、20°C~120°Cの全評価温度域で体積抵抗率の低下が確認された。代表して、120°Cにおける体積抵抗率を測定した結果を示す(図5)。

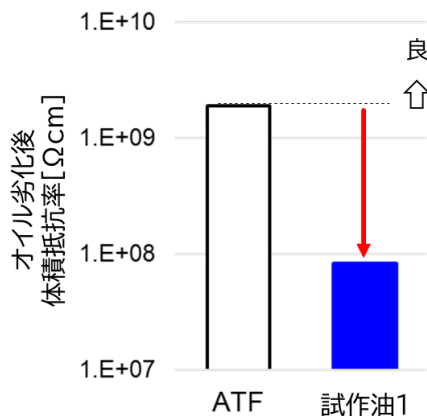


図5 ATFと試作油1の体積抵抗率の比較(120°C)

最後に、極低温(-40°C)条件において、試作油1でのシール性の確保も課題となったが、これについては、オイルシール設計見直しや、オイルシール材料の改良により対応した。

2.4 電動車用 T/A フルードへの改良

前節で述べた課題は大きく3つ「高面圧下での疲労剥離」「高速度すべり、貧潤滑下での焼付き」「電気絶縁性の

低下」である。それぞれの課題に対応するため、試作油 2 (表 3)に改良し、その効果について確認した。それぞれの具体的な方針、手法について解説する。

表 3 試作油2の構成

	ATF	試作油1	試作油2
基油	Group II	Group III (低粘度)	←
耐摩耗添加剤	硫黄-リン系	←	硫黄-リン系増量
金属清浄剤	CaタイプA	←	CaタイプB
粘度指数向上剤	ポリメタクリレート	←	←
その他添加剤	無し	無し	油膜形成ポリマー

ギヤや軸受の疲労剥離は、繰り返し摺動による金属表面へのダメージ蓄積により発生する。実際の金属表面にはミクロンオーダーの表面粗さが残っており、そうした粗さの突起部においては、油膜が介在できず非常に負荷が高くなっていることがダメージ要因として考えられる。そこで、金属表面に形成する添加剤由来の反応被膜を強化し、金属表面に対するせん断由来のダメージを緩和するという対策方針を立てた。元々ATF は硫黄-リン系の添加剤で金属表面に保護被膜を形成する設計になっており、これを強化するため、硫黄-リン系添加剤の増量および金属清浄剤の変更による被膜形成の促進を図った⁽³⁾⁽⁴⁾。具体的には、金属表面への Ca 系添加剤の吸着を増加し保護被膜の密度を向上させるため、金属清浄剤を従来添加していた Ca 系添加剤タイプ A から分子構造の異なる Ca 系添加剤タイプ B へ変更した。これにより、硫黄やリンの保護被膜に Ca を取り込み、被膜の密度向上と膜厚向上、および膜質の靱性向上を狙った。

その耐疲労性向上効果を検証するため、テーパベアリング単体試験と T/A ユニットの用いたギヤ耐久試験を実施した。テーパベアリング単体試験については、表 4 で示す条件において高負荷時間に対する疲労剥離の累積破損確率を評価し、ATF と試作油 2 は同じ負荷に対する破損確率とその傾向が同等であることを確認した。

表 4 テーパーローラー軸受試験条件

油温	105℃
回転数	5700rpm
ラジアル荷重	9.0kN
アキシャル荷重	9.0kN
試験時間	疲労発生まで

また、破損部位も ATF と同様の内輪表面で発生することを確認した(図 6)。



図 6 軸受寿命試験後の疲労剥離部位

疲労剥離の累積破損確率と破損発生個所が一致することから、試作油 2 は ATF と同等の耐疲労性を確保できているといえる。

また、ギヤの耐疲労性向上効果を確認するため、ギヤユニットを用いて油温 100℃にて高負荷で運転する歯面の疲労剥離評価を行った。その結果、試作油 2 では ATF と比較して試験サイクル数が多くなり、長時間の耐久時間となっても疲労剥離が生じず、疲労寿命が向上することを確認した(図 7)。

	ATF	試作油2
10 サイクル	疲労剥離あり 	損傷なし
15 サイクル		損傷なし

図 7 ギヤユニット試験後の表面状態比較

加えて、試験後のギヤ歯面に形成されている被膜の元素成分を確認するため、電子線マイクロアナライザー (EPMA)を用いて表面分析した結果を図 8 に示す。

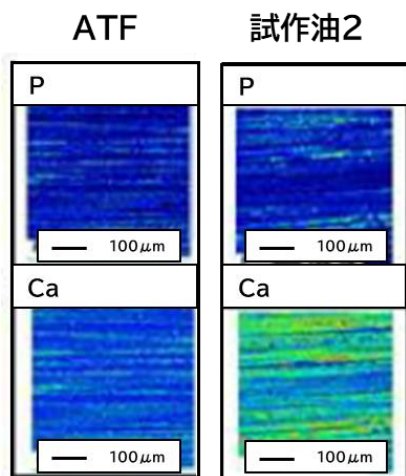


図 8 ギヤユニット試験後の EPMA 結果

試作油 2 の歯面では、ATF に対しリンとカルシウムが多く検出され、狙い通りリン系被膜が増強され、その被膜にカルシウムを取り込んだことにより疲労寿命が向上したと推定される。

次に、焼付き課題への対応について述べる。T/A ユニットを用いたディファレンシャル差動耐久試験において、試作油 1 ではデフケースボア部とドライブシャフト間では焼付きが発生した(図 9)。

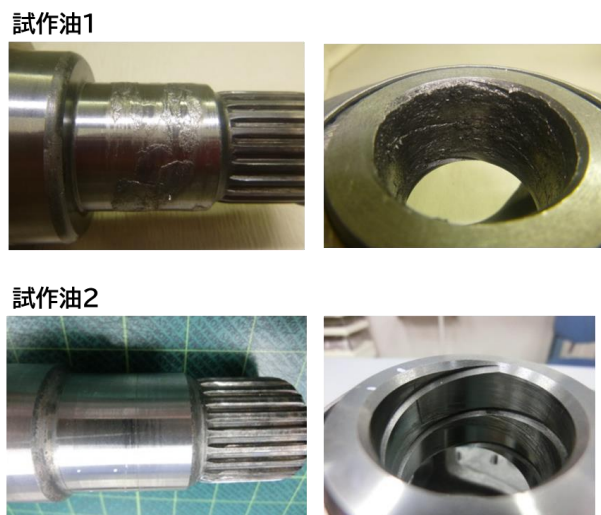


図 9 ディファレンシャル差動耐久試験後のドライブシャフトとケースボア面

ボア/シャフト間は、接触面圧は小さい一方、元々潤滑油が入りにくい構造であるため、シャフトの回転により油が導入される油溝機構が設計されている(図 10)。ただし、差動反転し、逆回転になった場合はボア/シャフト隙間の油が排出される構造でもあることから、低粘度化した影響で油排出量が増加、油切れになったことが焼付きの原因と考えられる。

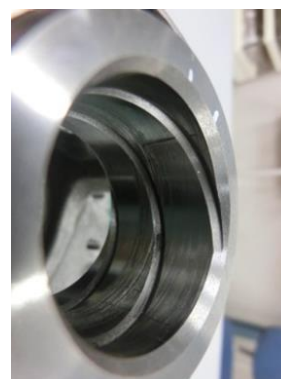


図 10 デフケースの油溝構造

また、T/A の高速耐久試験において、同様に焼付きが起点と思われる変色や摩耗がみられたプラネタリサンギヤもやはり高回転部位であり、油が排出されやすい。これら貧潤滑による焼付き課題に対しては、新たに油膜形成ポリマーを追加することで、摺動面に油膜がとどまりやすくすることを狙い対策した。その結果、試作油 2 では、先のディファレンシャル差動耐久試験において、焼付きが発生せずに耐久評価を満足した(図 9)。また、高速耐久試験でも、試作油 1 でみられたプラネタリサンギヤの歯面でのオイル焼けと摩耗が改善されている(図 11)。



図 11 高速耐久試験後のプラネタリサンギヤの状態

最後に、電気絶縁性については、不要な添加剤を除去することで対応した。THS や多くの BEV の T/A の変速機構はモータが担っており、従来 AT の変速機構では必要とされた湿式クラッチが存在しないことに着目した。こ

のクラッチの摩擦制御のために添加していた添加剤を削減することで、素の体積抵抗率を向上させ、低粘度化と電気絶縁性の両立を可能とした。

以上の検討を経て、試作油 2 は低粘度化しながらも、その背反となる課題を全て解決できる処方であることを確認し、電動車用 T/A フルードとして完成させることができた。

3. 次世代エンジン油の開発

3.1 エンジン油の規格動向

1 章でも述べたように、自動車の電動化は着実に進行していくが、各地域のニーズによってその進捗には時差が生じると考えられる。また、電動車のなかでも HEV や PHEV といったシステムでは、依然として内燃機関が搭載される。よって、エンジン油の省燃費性能を向上させることは、車両走行時の CO₂ 排出量の削減にとって有効な手段の 1 つであり続ける。

エンジン油は燃焼をともなう厳しい環境下で使用されることから、市場で交換することが前提となっている。そのため、品質を担保するための市場規格が整備されており、エンジン油を交換する際の目安となっている。その代表的な規格には、粘度の分類を示す Society of Automotive Engineers(以下 SAE)規格や品質グレードを示す American Petroleum Institute(以下 API)規格等がある。

粘度分類は SAE J300(図 12)で規定されており、

2013 年に SAE 16 が、2015 年には SAE 12, SAE 8 が追加になった。

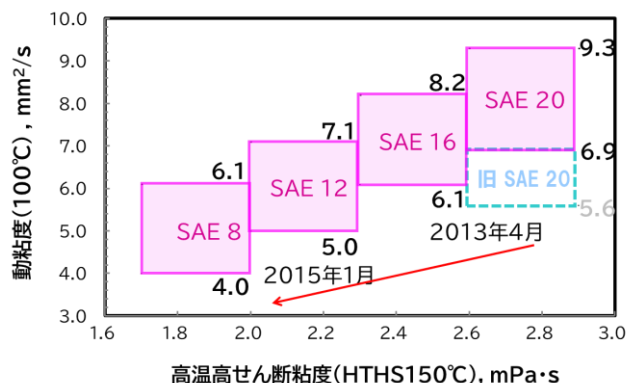


図 12 SAE 粘度グレード(SAE J300)の変遷

それに対応する品質規格として、2015 年に API SN/RC 規格に SAE 0W-16 の規定が追加され、2019 年に SAE 0W-8, 0W-12 に対応する新しい Japanese Automobile Standards Organization(以下 JASO)GLV-1 規格が発行された。これにより、JASO GLV-1 0W-8 のオイルも市販化され、省燃費性向上に貢献している⁽⁵⁾。

一方、同じ粘度分類であっても、International Lubricant Standardization and Approval Committee(以下 ILSAC)規格などは、規格がアップグレードするごとに、燃費規格値が厳しくなっている(表 5)。

表 5 0W-20 の ILSAC 燃費規格値の推移⁽⁶⁾

	GF-3	GF-4	GF-5		GF-6
試験法 (燃費向上率)	Sequence VIB (ASTM D6837)	Sequence VIB (ASTM D6837)	Sequence VID (ASTM D7589)	Sequence VIE (ASTM D8114)	Sequence VIE (ASTM D8114)
FEI1+FEI2 (%)	—	—	2.6以上	3.2以上	3.8以上
FEI1 (%)	2.0以上 ^(注1)	2.3以上 ^(注1)	—	—	—
FEI2 (%)	1.7以上 ^(注2)	2.0以上 ^(注2)	1.2以上 ^(注3)	1.5以上 ^(注3)	1.8以上 ^(注4)

Sequence VIDのハードウェアはSequence VIBから大きく異なっており、粘度グレードによるレスポンスは異なる。
^(注1)16hrエージング後 ^(注2)96hrエージング後 ^(注3)100hrエージング後 ^(注4)125hrエージング後
 FEI:燃費向上率

例えば SAE 0W-20 のオイルの場合、ILSAC GF-3 から GF-4 にアップグレードすると 0.3%, GF-5 から GF-6 でも 0.3% FEI (Fuel Economy Improvement) の規格値が厳しくなる分、燃費が向上し、CO₂ の排出量が削減されることになる。

3.2 エンジン油省燃費性能向上技術

エンジン油の省燃費向上技術は、一般的に「添加剤処方による低摩擦化」「オイルの低粘度化による粘性抵抗低減」の 2 つの手段がある。また、エンジン技術の進化や、地球環境保護のために排気規制が強化されるなどの理由により、エンジン油の耐久性向上にも対応しながら、燃費向上を目指す必要がある。

低摩擦化の手段としては、Molybdenum dialkyl dithiocarbamate (以下 MoDTC) が広く知られている。MoDTC は摺動面に Molybdenum disulfide (以下 MoS₂) の反応被膜を形成し、摩擦を低減する。また、その被膜形成には、同じくエンジン油に使用される摩耗防止剤である Zinc dialkyldithiophosphates (以下 ZnDTP)、金属清浄剤、分散剤等の添加剤が影響する。代表的なものとして、ZnDTP は摺動面に耐摩耗性に優れたリン酸被膜を形成すると同時に、MoS₂ の生成に必要な硫黄も供給することで、MoS₂ 被膜の生成を促進させることが知られている⁽⁷⁾。また、当社の過去の開発において、金属清浄剤のなかでも、Mg 系清浄剤は、Ca 系清浄剤と比較して MoDTC の低摩擦効果を阻害すること、およびホウ素系分散剤を使用することで、Mg 系清浄剤使用時でも MoDTC の低摩擦効果を維持できることを報告している⁽⁸⁾。

一方、前章で述べた電動車用 T/A フルードと同様に、潤滑油を低粘度化することでも攪拌抵抗由来の摩擦抵抗は下がっていく。しかし、低粘度化し過ぎると摺動面の油膜保持が困難になり、摩擦抵抗が増え、燃費が向上しない場合もある。そのため、GLV-1 0W-8 の開発では、高荷重でも厚い油膜を形成させる油膜向上剤を採用するなどして対策を講じている⁽⁵⁾。

3.3 次世代エンジン油に向けた超高粘度指数化による省燃費性向上検討

ここまで述べたように、エンジン油の規格、開発ともに

SAE 0W-8 まで低粘度化が進んできた。ただし、SAE 0W-8 より先の低粘度化は技術的、また普及のうえでも壁があると考えられている。何故なら、エンジン油の過度な低粘度化は、耐摩耗性の悪化による部品寿命の低下や高温域の油圧低下による油圧系デバイスの作動異常、オイル消費の増加が懸念されるためである。つまり、エンジンの信頼性低下につながり、エンジン本体の大幅な設計変更も必要となる。よって、エンジン油のさらなる省燃費性向上のためには、従来と異なる新たな着眼点が必要となる。

ここで、HEV や PHEV におけるエンジンの使われ方に着目する。

HEV や PHEV では、エンジンを間欠運転することで、車両としての省燃費性を向上させており、従来型エンジン車両と比較して、走行中の油温が上昇しづらい傾向にある。つまり、これらの車両に対しては、従来よりも低い温度域で摩擦損失を低減する必要があるため、以下のような特性を持つ省燃費エンジン油(フラット粘度オイル)を新たに検討している(図 13)。

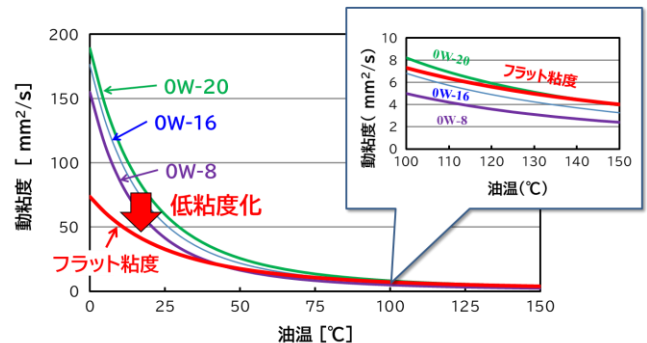


図 13 フラット粘度オイルの粘度特性⁽¹⁰⁾

- (1) 高温域の粘度は従来規格同等で、信頼性を確保。
- (2) 低～中温域の粘度をさらに低減することで、HEV/PHEV の使われ方でも効果的に省燃費性を発揮。

このように油温に対してよりフラットとなる粘度特性は、基油を低粘度化し、高性能な粘度指数向上剤: Viscosity Modifier (以下 VM) を多く添加することで実現することができる。

ただし、先に述べたように、基油の低粘度化は、一方で蒸発を促進する面があり、オイル消費量の増加につなが

ることから、オイル消費を悪化させない範囲で蒸発性を抑える必要がある。現在、エンジン油の蒸発性指標として、NOACK 試験法(ASTM D5800)が使用されているが、試験温度が高すぎるため、低粘度化が進んでいる現状では、実際のオイル消費との相関がとれなくなっている。そのため、試験法の改良を検討し、試験温度を実際のシリンダボア壁面の温度である 150℃で評価すると、相関が改善されるということがわかってきた⁽⁹⁾。この改良試験方法を Mod.NOACK 試験法とする。従来の NOACK 試験法はエンジン油を 250℃で 1 時間加熱し、その間の蒸発量の質量低減率%を算出するのに対し、Mod.NOACK 試験法は試験温度を 150℃とし、蒸発量の計測精度を向上させるために、試験時間を 12 時間まで延長し、4~12 時間の蒸発速度で比較している。この Mod.NOACK 試験法の相関性について、表 6 に示す試験油を使用し、2L の直列 4 気筒エンジンを用いたオイル消費試験と、それぞれの蒸発性試験法を比較、確認した⁽¹⁰⁾。

表 6 試験油の物性⁽¹⁰⁾

(Gr.III: Group III, Gr.II: Group II は基油のグレードを示す)

試験油		A1	B1	B2	B3	C1	C2	C3	D1
基油	基油A	Gr. III Plus + Gr. II	基油B			基油C			基油D
	Gr. III Plus + Gr. II		Gr. III Plus			Gr. III Plus + Gr. II			Gr. II Low-cut
粘度指数向上剤 (VM)		VM1	VM2						
NOACK	250℃ wt%	13	14	22	30	14	21	29	30
動粘度	40℃ mm ² /s	35.0	23.9	21.8	18.6	28.1	25.3	23.2	22.1
	100℃ mm ² /s	8.2	7.0	6.8	6.8	7.2	7.1	7.2	7.1
	130℃ mm ² /s	5.1	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0

GF-6A 0W-20 : 基準油

図 14 は、250℃での従来 NOACK 試験法と実機オイル消費試験の結果、図 15 は、Mod.NOACK 試験法と実機オイル消費試験の結果を比較している。

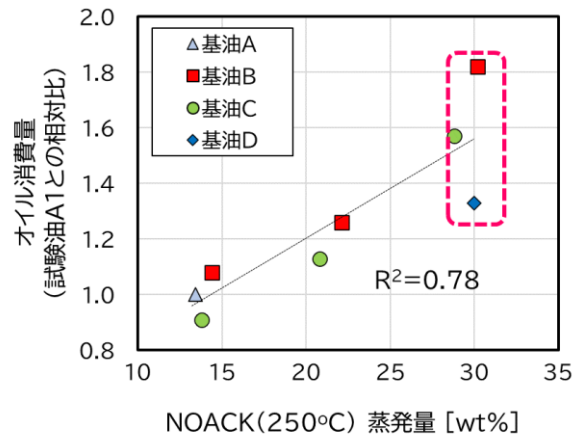


図 14 オイル消費量と NOACK 試験結果の関係⁽¹⁰⁾

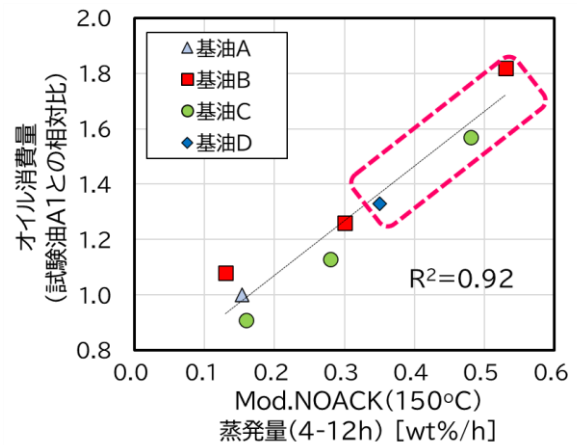


図 15 オイル消費量と Mod.NOACK 試験結果の関係⁽¹⁰⁾

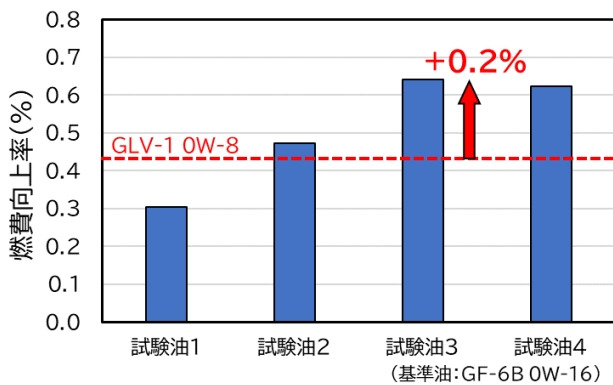
これらの図から明らかなように、Mod.NOACK 試験法は、エンジン実機におけるオイル消費と高い相関性を得られることがわかる。

この新蒸発性指標を用いた試作油について、JASO M 366 に準拠したファイアリング燃費試験で省燃費性の改善効果も確認した。フラット粘度オイルの試作油は、Mod.NOACK の値を 0.3%/hr, 0.5%/hr 狙いの 2 水準、かつ粘度グレードも SAE 0W-16 と 0W-20 の 2 水準設定している(表 7)。

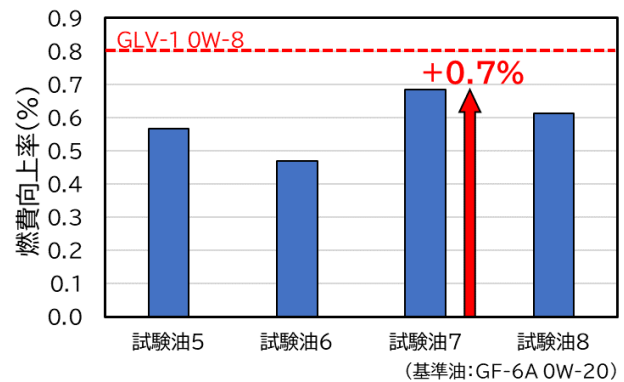
表 7 燃費評価用試験油の物性⁽¹⁰⁾

			GLV-1 0W-8	GF-6B 0W-16	GF-6A 0W-20	試験油 1	試験油 2	試験油 3	試験油 4	試験油 5	試験油 6	試験油 7	試験油 8
粘度グレード			0W-8	0W-16	0W-20	0W-16				0W-20			
動粘度	40℃	mm ² /s	23.4	30.0	35.0	24.0	23.1	21.9	21.0	26.1	24.6	24.0	22.6
	100℃		5.0	6.8	8.2	6.6	6.6	6.7	6.6	7.8	7.8	8.0	7.9
	150℃		2.4	3.3	4.0	3.4	3.5	3.6	3.6	4.3	4.2	4.4	4.5
粘度指数			146	196	221	252	265	294	310	300	318	345	364
高温高せん断粘度150℃	mPa·s		1.8	2.4	2.6	2.4	2.4	2.4	2.5	2.8	2.8	2.8	2.7
NOACK(250℃)	wt%		13.0	13.2	13.5	21.0	21.0	29.1	29.1	20.2	21.0	27.3	29.1
Mod. NOACK(150℃)	wt%/h		0.15	0.17	0.18	0.29	0.31	0.44	0.46	0.30	0.31	0.44	0.46

いずれの試作油も、汎用性の高い低粘度な Group III Plus 基油と Group II 基油を混合し、超高粘度指数の VM と組み合わせて、蒸発性と粘度特性のバランスを調整した。図 16 に、GF-6B 0W-16 を基準とした、フラット粘度 0W-16 試験オイルの燃費向上率を示す。

図 16 0W-16 フラット粘度試験油の燃費向上率⁽¹⁰⁾

試験油 3, 4 は、GF-6B 0W-16 に対し、0.6%以上省燃費性能が向上し、試験油 2, 3, 4 では、GLV-1 0W-8 を超える省燃費性能を示している。なかでも、試験油 3 は、GLV-1 0W-8 に対しても 0.2%省燃費性能が向上する結果となった。同様に図 17 に、GF-6A 0W-20 を基準とした、フラット粘度 0W-20 試験オイルの燃費向上率を示す。

図 17 0W-20 フラット粘度試験油の燃費向上率⁽¹⁰⁾

GF-6A 0W-20 に対し、いずれも 0.5%程度以上の燃費向上率を示し、試験油 7 は、省燃費性能が 0.7%向上していることがわかる。以上のことからフラット粘度オイルの次世代省燃費ガソリンエンジン油としての有用性を示すことができた。

4. カーボンニュートラルへの貢献

ここで、電動車用 T/A フルードおよびエンジン用フラット粘度オイルの燃費、電費改善に伴う CO₂ 削減効果について考える。ただし、実際には車種による燃費の違い、市場での交換油種の違いなどがあるため、正確にその削減量を算出することは難しい。よって、ある前提を置きながらその規模感を見積もることとする。

まず、電動車用 T/A フルードについて、HEV, PHEV の台当たりの走行時 CO₂ 排出量を仮に 95g-CO₂/km とする。年間走行距離を 1 万 km とすると年間 CO₂ 排出量は 950kg-CO₂/台となり、そこに当社の年 HEV, PHEV 販売台数約 270 万台と T/A フルードの燃費向

上率 1%を積算すると年間約 2.5 万トンの新車 CO₂ 削減に貢献することとなる。同様に、フラット粘度オイルについては、従来型エンジン車両も含めた台当たりの走行時 CO₂ 排出量を仮に 130g-CO₂/km とし、2022 年の販売台数 950 万台および燃費向上率 0.7%を積算すると、8.6 万トンの新車 CO₂ 削減となる。

加えて、フラット粘度オイルについては、既に販売された 0W-20, 0W-16 適合車への使用も可能であるため、そうした保有車に対しても走行時の CO₂ 削減ができる。新車が販売されてから 10 年間はその車両が市場に残ると仮定すると、当社の市場における保有車両は 2013 年～2022 年の累計販売台数約 9300 万台と考えられる。例えばそれらの車両のうち 30%がフラット粘度オイルに交換された場合、約 85 万トンの走行時 CO₂ 削減が見込まれるという試算となる。

当社のグローバル工場からの CO₂ 排出量は約 568 万トン(2019 年)であるため、上述はあくまで見積もりではあるものの、その CO₂ 削減規模はカーボンニュートラルに大きく貢献することが期待できる。

5. おわりに

自動車の電動化が進むなか、車両の燃費、電費向上に貢献する潤滑技術の開発事例について紹介した。1 つ目の電動車用 T/A フルードの開発については、低粘度化にともなう疲労、焼付き等の課題を性能添加剤の改良により解決した。この開発油はトヨタ純正 e-Trans Axle Fluid TEとして2022年から市場導入している。一方、2 つ目のフラット粘度オイルはこれまでにない発想で検討を進めていることもあり、現状開発段階ではある。ただし、本コンセプトを織込んだ次世代のエンジン油規格 JASO GLV-2 の検討も順調に進んでいる状況であり、鋭意開発を継続しながら早期の市場導入を目指す。

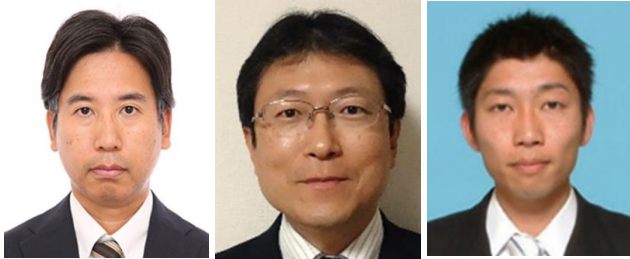
最後に、電動車用 T/A フルード開発における潤滑油の試作、摺動評価、摺動面分析、メカニズム解析にいたるまで多大なるご支援を賜った ENEOS 株式会社様、株式会社アイシン様、株式会社豊田中央研究所様に対し、ここに感謝の意を表します。

■参考文献

- (1) Beyer, M., "Lubricant Concepts for Electrified Vehicle Transmissions and Axles," Tribology Online 14, no. 5 (2019).
- (2) 宮本晃男, 三浦良和 : 電気絶縁油におけるキャリアイオンの移動度, 電気学会論文誌. A, 102, 8, p.459-464(1982)
- (3) 白濱真一・宮島誠・岡村敦夫 : 転がり疲れに及ぼすリン系添加剤の影響, トライボロジスト, 46, 7, p.564-570, (2001)
- (4) 白濱真一・中村純一: 転がり疲れに及ぼす硫黄系添加剤の影響, トライボロジスト, 46, 7, pp.571-577, (2001)
- (5) 植松・山守・宮田・楠原・三崎: 低燃費エンジンオイル 0W-8の開発 自動車技術会2019年秋季大会学術講演会講演予稿集
- (6) 山守一雄: 自動車の電動化に対応した潤滑油の技術動向, トライボロジスト, 68, 2, p86-91, (2022)
- (7) M. I. de Barros' Bouchet, J. M. Martin, T. Le Mogne & B. Vacher, "Boundary Lubrication Mechanisms of Carbon Coatings by MoDTC and ZDDP Additives", Tribol. Int., 38, 3 (2005) 257.
- (8) 金子・山守・鈴木・小野寺 : LSPI対応低粘度油の開発 自動車技術会2017年秋季大会学術講演会講演予稿集
- (9) T. Koyama, T. Suzuki, K. Yamamori, Y. Uematsu, S. Hirano & K. Wada "Research on Ultra-High Viscosity Index Engine Oil: Part 2 - Influence of Engine Oil Evaporation Characteristics on Oil Consumption of Internal Combustion Engines," SAE Technical Paper 2022-01-0524, 2022, doi:10.4271/2022-01-0524.

- (10) K. Yamamori, Y. Uematsu, S. Hirano, N. Ishizaki, S. Mori, T. Suzuki & K. Wada
“Research on Ultra-High Viscosity Index Engine Oil: Part 1 - “Flat Viscosity” Concept and Contribution to Carbon Neutrality,” SAE Technical Paper 2022-01-0525, 2022, doi:10.4271/ 2022-01-0525

■著者



新吉 隆利

山守 一雄

床桜 大輔

BEV 用低導電率クーラントの開発

高野 雅幸 *1

河野 崇 *1

草野 雄也 *1

吉井 揚一郎 *2

木月 一善 *2

佐々木 悠 *2

要旨

トヨタ自動車では、地域の事情やお客様のニーズにあわせて幅広い選択肢を用意することで地球温暖化防止のための CO₂ 削減に貢献できると考えている。近年、BEV(Battery Electric Vehicle:電気自動車)が注目されている。BEV にはリチウムイオン電池が搭載されており、万が一、クーラント(冷却液)が電池に被水し、電池が短絡した場合には、電池が異常発熱する可能性がある。そこで我々は、トヨタ自動車の安心・安全に対するこだわりとして、被水時の短絡による電池の異常発熱を回避すべく、BEV 専用の低導電率クーラントを開発し、お客様に安心・安全に BEV を使用していただけるように bZ シリーズ第一弾となる bZ4X に導入した。

キーワード 冷却液, クーラント, 不凍液, 冷却水, LLC, 導電率, BEV, 電気自動車

1. はじめに

地球温暖化防止のため、CO₂ 排出抑制は重要な課題である。そのためにトヨタ自動車では、地域の事情やお客様のニーズにあわせ、幅広い選択肢を用意することで、カーボンニュートラル実現に貢献できると考えている。特に近年、クリーンなエネルギーを使用することで CO₂ 排出をゼロにすることができるカーボンニュートラルビークルとして、BEV(Battery Electric Vehicle:電気自動車)が注目されている。

BEV にはリチウムイオン電池が搭載されており、十分な航続距離、長期にわたる電池容量保持、充電時間短縮が求められる。これらは全て電池の温度管理に依存するところが大きく、電池の冷却技術が重要となる。電池の冷却手法としては、空冷、エアコン冷媒冷却、水冷が考えられるが、冷却性能とコストの観点から水冷が優れており、水冷が広く用いられている。

しかし、万が一、クーラント(冷却液)が漏れ、リチウムイオン電池が被水し、短絡した場合には、電池が異常発熱する可能性があり、従来のクルマとは異なる BEV 特有

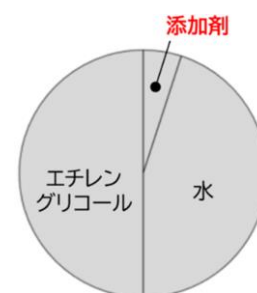
の安全面の対策が求められる。

そこで我々は、トヨタ自動車の安心・安全に対するこだわりとして、被水時の短絡による電池の異常発熱を回避すべく、BEV 専用の低導電率クーラントを開発し、お客様に安心・安全に BEV を使用していただけるように bZ シリーズ第一弾となる bZ4X に導入した。

本稿では、新たに開発した BEV 用低導電率クーラントについて紹介する。

2. クーラントの概要

クーラントに求められる機能は、冷却性能、不凍性、防錆性能である。これらを満足するためにクーラントは図 1 に示すように、エチレングリコールと水、添加剤から構成されている。



冷却液の構成割合

図1 クーラントの構成要素⁽¹⁾

*1 先進技術開発カンパニー モビリティ材料技術部

*2 日本ケミカル工業株式会社

冷却性能と不凍性をエチレングリコールと水で、防錆性能を添加剤で確保している。添加剤には、防錆剤だけでなく、pH 調整剤、誤飲防止のための苦味剤、染料など、多種多様なものが添加されている。添加剤の多くはイオン性であり、イオン性の添加剤が添加されたクーラントは非常に電気が流れやすい性質を持つ。一般的に、電気の流れやすさは導電率で表す。単位は $\mu\text{S}/\text{cm}$ で表され、値が小さいほど電気が流れにくいことを示す。一例として、海水の導電率は $7,000\mu\text{S}/\text{cm}$ 程度である。クーラントも $7,000\mu\text{S}/\text{cm}$ 程度の導電率であり、海水並みに電気を通しやすいことがわかる。

表 1 に、トヨタ自動車で使用しているクーラントのラインアップを示す。

表 1 トヨタ自動車で使用している
クーラントのラインアップ

種類	エンジン用クーラント	FCスタック用クーラント	BEV用低導電率クーラント
銘柄	トヨタ純正 スーパーロングライフクーラント	トヨタ純正 FCスタッククーラント	トヨタ純正 駆動用バッテリークーラント
色	ピンク	透明	オレンジ
製造元	日本ケミカル工業株式会社	←	←
採用時期	2001年から	2011年から	2022年から

トヨタ自動車で使用しているクーラントには、エンジン用クーラント、FC(Fuel Cell:燃料電池)スタック用クーラント、そして本稿で紹介する BEV 用低導電率クーラントの 3 種類がある。FC スタック用クーラントと BEV 用低導電率クーラントは、環境に配慮した電動車のニーズの高まりから、電動車の要求にあわせて開発された新しいクーラントである。

ここで、FCEV(Fuel Cell Electric Vehicle:燃料電池自動車)で用いられている FC スタック用クーラントについて説明する。BEVでは冷却器などを介して電池を外部から間接的に冷却することが一般的であるのに対し、FCEV では燃料電池の冷却効率の観点から発電部位を直接冷却する必要がある。燃料電池は 300V 以上の高電圧であり、クーラントの導電率が高い場合、燃料電池内部で短絡が生じてしまい発電できない。また、冷却系の部品をつうじて車体との間に電気回路が形成されると、絶縁不足となり感電の危険性が高まる。この絶縁性は保安基準で定められている数値以上を維持しなければならない。したがって、燃料電池に求められる導電率は非常

に厳しいものとなり、常時 $1\mu\text{S}/\text{cm}$ 程度という純水に近い導電率が要求される。この値を生産維持するため、FCEV では冷却経路にイオン交換器を設け、絶えずクーラント中のイオン成分を除去する手法を採用している。このためクーラント中に防錆剤を添加してもイオン交換器で吸着除去されてしまうため、添加剤による防錆性能が確保できない。これでは防錆に課題が生じることと思われるが、金属部品において腐食が生じるには電子の授受が必要である。FCEV においては、防錆剤の添加に頼るのではなく、イオン交換器によりイオン成分を吸着除去することでクーラントそのものの導電率を極限まで低減し、冷却回路内での電子の授受を抑制することで防錆性能を確保している。したがって、FCEV では冷却系に専用部品が必要となることから冷却系のコストが高くなる。

BEV 用低導電率クーラントでは、FC スタック用クーラントのようにイオン交換器に頼るのではなく、従来のエンジン車に用いられている手法と同様の、添加剤で防錆性能を確保するアプローチを採用した。これにより、エンジン車で用いられてきた部品の流用が可能となり、BEVのコスト低減につなげることが可能となる。

3. BEV 用低導電率クーラント開発のねらい

BEV に搭載されている電池の水冷には、従来の導電率が高いエンジン用クーラントが使用されていることが多い。このようなクーラントが、万が一、漏水し、電池が短絡した場合には、電池の異常発熱を発生させる可能性がある。図 2 に、エンジン用クーラント構成要素の導電率寄与率を示す。

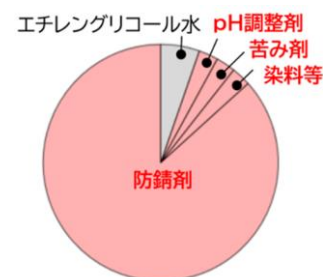


図2 エンジン用クーラント構成要素の導電率寄与率⁽¹⁾

クーラント中に数%しか添加されていない添加剤であるが、導電率寄与率は90%以上を占めており、非常に大きいことがわかる。さらに、この添加剤のなかでも冷却系を構成する各種部品の防錆を目的とした防錆剤の寄与率が一番大きい。部品の防錆はクーラントに求められる一番の要素といってもよく、多種多様な添加剤が添加されている。

BEVでも冷却系を構成する部品に大きな変更はない。したがって、防錆の重要性は変わらず、エンジン用クーラントと同等の防錆性能を維持しながら、導電率を下げるという背反の両立が開発の大きな課題となる。

また、BEV用低導電率クーラントに求められる導電率はエンジン用クーラントとは桁違いに低いため、一見寄与率が低いpH調整剤でさえもBEV用低導電率クーラントでは大きな問題となり、従来の性能を維持しつつ、導電率への影響が小さい添加剤の探索が重要になる。これまでに述べた導電率は初期の導電率(工場充填時の導電率)について述べているが、車両寿命を加味した経年的な導電率上昇への配慮も求められる。

4. BEV用低導電率クーラント開発の概要

ここでBEVに求められるクーラントの導電率について考える。万が一、クーラントが漏れ、電池が短絡した際には、電池が異常発熱しない導電率以下にする必要がある。この際の導電率は車両寿命を加味した経年時でも超えてはならない。経年での導電率上昇は使用環境や搭載される部品の素性によって変わる。図3に導電率の上昇因子を示す。

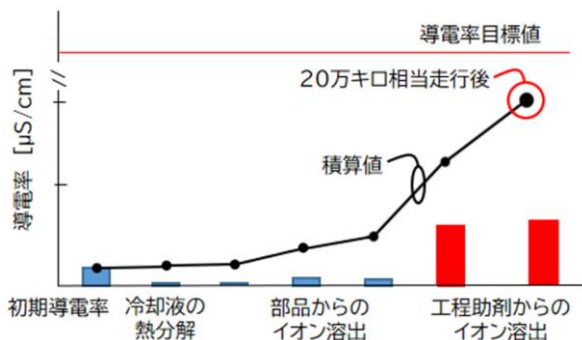


図3 導電率の上昇因子⁽¹⁾

クーラントそのものの熱分解や、冷却系構成部品からのイオン溶出により、導電率は経年的に上昇する。後述するが、部品を製造する際に用いられる工程助剤(ゴムの添加剤や、アルミろう付けに用いられるフラックス等)からのイオン溶出も大きな影響を及ぼす。クーラントの初期導電率に対して、これらが積算された経年時における導電率上昇値を考慮したうえで、被水した際にも異常発熱しない導電率目標値を越えないことが要求される。なお、BEV用低導電率クーラントの仕様として、クーラントの交換時期を従来のエンジン用クーラントと同等の20万キロと定めた。

先に述べたように、添加剤による導電率上昇を抑えながら、かつ高い防錆性能を両立することが求められる。初期の導電率のみならず、クーラントの熱分解や部品からの経年的なイオン溶出の影響を受けても、絶えず目標値以下の導電率を維持する添加剤処方が求められる。

以上より、本開発では次章のような開発目標を定めた。比較対象として従来のエンジン用クーラントを用いた。

5. BEV用低導電率クーラント開発の目標

5.1 導電率

現在、ASTM(American Society for Testing and Materials)にてBEV用低導電率クーラントの規格が審議されている。将来の規格化を見据えて、審議案のなかでも最も厳しい値である初期導電率 $50\mu\text{S}/\text{cm}$ 以下を目標とする。また、クーラントの交換時期を迎える20万キロ走行時においても、車両諸元から決まる導電率目標値以下を満足するものとする。

5.2 防錆性能

冷却系部品に使用される、以下金属材料の防錆性能をエンジン用クーラント同等とする。

- アルミニウム(A3003, ADC12, AC2A)
- 鋼(SPCC), ステンレス鋼(SUS304)
- 黄銅(C2680), 銅(C1100)

5.3 部品適合性

冷却系部品に使用されるゴム・樹脂材料において、体積変化等の物性変化をエンジン用クーラント同等とする。

5.4 冷却性能, 不凍性

エンジン用クーラント同等の冷却性能, 不凍性とする。

6. 開発目標の達成手段

開発目標を満足させるためには、クーラントの初期の導電率に加えて、以下に示す3つの導電率上昇因子の抑制が求められる。

- 1) クーラントの熱分解
- 2) 冷却系部品からのイオン溶出(金属, ゴム, 樹脂部品)
- 3) 工程助剤からのイオン溶出(ゴムの添加剤, アルミろう付けに用いられるフラックス)

図3に示したように、これらの因子の積算値が経年後の導電率になる。これらに対処すべく、クーラント基材および添加剤の検討を行った。

6.1 クーラント基材の選定

表2にクーラント基材の候補とその特性を示す。

表2 クーラント基材の候補とその特性⁽¹⁾

基材	冷却性能 [%]	凍結温度 [°C]	熱分解の影響 [μS/cm]	フラックスの影響 [μS/cm]
水	202	0	0	+785
エチレングリコール 50%水溶液	100	-37	+7	+93
プロピレングリコール 50%水溶液	85	-35	+1	+12
プロピレンカルボナート	63	<-50	0	+0.1

エンジン用クーラントの基材であるエチレングリコール50%水溶液の冷却性能を100として比較している。また、恒温槽で一定時間静置した際の導電率の変化量を別分解の影響として示す。さらに、金属イオンによる導電率への影響度を把握するため、代表部材としてフラックス粉末を添加した際の導電率の変化量を示した。

電池冷却時に想定されるクーラントの温度ではどの基材も熱分解はほぼ生じず、導電率上昇への影響は小さいことがわかった。フラックスの影響を抑制させるためには、プロピレングリコールやプロピレンカルボナートといった極性の低い基材が適しているが、背反として冷却性能が著しく低下してしまう。低下した冷却性能を補うた

めには、ラジエータといった熱交換器やポンプ類の大型化、高性能化が必要となり、従来使用されてきた部品の流用が困難になる。専用部品が必要となり車両コスト増加の要因となる。

エンジン用クーラントでは冷却性能と凍結温度、部品適合性の観点からエチレングリコール水溶液が用いられている。信頼性の観点からも変化点・変更点を極力少なくするために、BEV用低導電率クーラントでもエンジン用クーラントと同じエチレングリコール水溶液を基材として選択した。課題となる部品からのイオン溶出は添加剤にて補う設計コンセプトとした。

6.2 添加剤の選定:金属イオンの溶出抑制

導電率上昇を抑えるため、まず初めに金属部品からのイオン溶出抑制に効果のある防錆剤を選定した。防錆剤の防錆メカニズムを大別すると、金属表面を化学変化により不動態化させる方法と、金属表面に物理的もしくは化学的に防錆剤成分を吸着させ、その保護膜により腐食性物質の接触を阻害する方法がある。前者は無機系でイオン性があり、後者の大半は有機系となり、その一部に非イオン性の防錆剤が含まれている。低導電率化にはイオン成分の低減が必須であり、非イオン性防錆剤が望ましい。表3に候補となる防錆剤を示す。

表3 防錆剤の候補材と金属部品への防錆効果⁽¹⁾

分類	添加剤名	導電率寄与	防錆能力	塩化物耐性 (防錆能力)	耐久性
非イオン性	有機系 A	◎	○	×	○
	有機系 B	◎	○	×	○
	有機系 A+B	◎	◎	×	◎
	有機系 C	◎	○	×	○
	有機系 D	◎	○	×	○
イオン性	有機系 E	×	×	×	○
	無機系 A	×	×	×	○
	無機系 B	×	×	◎	◎
	無機系 C	×	×	×	◎
	無機系 D	×	×	×	◎

主軸となる防錆剤として、非イオン性防錆剤の有機系 A、さらに有機系 A と同時に使用することで相乗効果が期待できる有機系 B を選択した。

また、BEV にはアルミニウム部品が多用されているが、アルミニウムは塩化物イオンにより孔食(ピンホール状の腐食)が生じることが知られている。冷却系のゴム部品には添加成分として塩化物が用いられることもあり、クーラント中に極微量の塩化物イオンが溶出する。極微量であってもアルミニウムを腐食させる場合があるため、孔食を抑制できる非イオン性防錆剤を探索した。しかしながら、非イオン性防錆剤だけでは孔食の抑制が困難であったため、イオン性の無機系 B を配合した。無機系 B は耐久性が高く、減少による性能低下がない。防錆性能と導電率を考慮しながら、アルミニウムの孔食を抑制可能な最適な添加剤処方を見出した。

6.3 添加剤の選定:ゴム溶出抑制

表 4 に、候補となる添加剤を示す。

表 4 添加剤の候補材とゴム溶出抑制効果⁽¹⁾

分類	添加剤名	導電率寄与	ゴム溶出抑制効果
非イオン性	有機系 A	◎	○
	有機系 B	◎	○
	有機系 A+B	◎	◎
	有機系 C	◎	○
	有機系 D	◎	○
イオン性	有機系 E	×	×
	無機系 A	×	×
	無機系 B	×	×
	無機系 C	×	×
	無機系 D	×	×

金属部品からのイオン溶出抑制のために選定した防錆剤のうち、有機系 A, B, C, D はゴム溶出抑制への効果も判明した。特に効果が高い有機系 A と B に着目し、経年的に添加剤が消費されて減少した際にも、ゴム溶出が抑制できる十分な量を添加した。有機系 A と B がゴム表面に物理的もしくは化学的に吸着することで、ゴム溶出を抑制していると推定される。

6.4 添加剤の選定:フラックス溶出抑制

表 5 に、候補となる添加剤を示す。

表 5 添加剤の候補材とフラックス溶出抑制効果⁽¹⁾

分類	添加剤名	導電率寄与	フラックス溶出抑制効果
非イオン性	有機系 A	◎	×
	有機系 B	◎	×
	有機系 A+B	◎	×
	有機系 C	◎	×
	有機系 D	◎	×
イオン性	有機系 E	×	×
	無機系 A	×	◎
	無機系 B	×	×
	無機系 C	×	○
	無機系 D	×	◎

非イオン性添加剤に有効なものはなかった。検討したなかで、少量配合でも高いフラックス溶出抑制効果を示したイオン性添加剤の無機系 A, D を選択した。添加量が少量で済むため、導電率上昇を最小限に抑えながらフラックス溶出抑制性能との両立ができた。無機系 A 及び D とフラックスの反応物が不溶性のため、フラックス表面に被膜が形成し、フラックス溶出が抑制されたと推定される。

以上の結果から、防錆剤処方を最適化した結果、初期導電率は $45 \mu\text{S}/\text{cm}$ (25°C) となった。低導電率と防錆性能を高次元で両立可能な添加剤処方を見出すことができた。

7. BEV 用低導電率クーラントの評価結果

7.1 防錆性能の評価結果

表 6 に、BEV 用低導電率クーラントの金属防錆性を評価した結果を示す。

表 6 金属防錆性の評価結果⁽¹⁾

材質	Al			Fe		Cu	
	A3003	ADC12	AC2A	SPCC	SUS304	C2680	C1100
外観写真							
質量変化 [mg]	-0.2	±0.0	-0.2	+1.0	-0.3	+0.7	+0.9
ASTM規格案候補評価材料	○			○	○		○
従来冷却水評価材料		○	○	○		○	

現在、BEV 用低導電率クーラントを対象とした試験方法は ASTM で規格制定中であるため、ASTM 規格案を参考に試験を行った。試験装置等の試験条件は ASTM D 1384 を踏襲しているが、供試材には ASTM D 1384 に規定されているものに加えて BEV の冷却系部品で多用されている金属材料を以下のとおり追加した。

- アルミニウム(A3003, ADC12, AC2A)
- 鋼(SPCC), ステンレス鋼(SUS304)
- 黄銅(C2680), 銅(C1100)

どの金属においても重量変化がエンジン用クーラントと同様の±1.0mg 以内であることから、エンジン用クーラントと同等の防錆性能を満足することが確認できた。

次に、アルミニウムの孔食を引き起こす塩化物イオンへの耐性を評価するため、塩化物イオンを添加した BEV 用低導電率クーラントを用いて同様の金属防錆性評価を行った。結果を表 7 に示す。

表 7 孔食耐性評価結果⁽¹⁾

アルミ番手	A3003	ADC12	AC2A	A3003	ADC12	AC2A
防錆剤B	なし			あり		
外観写真						
孔食有無	あり	あり	あり	なし	なし	なし
質量変化 [mg]	-0.1	-0.2	+0.3	±0.0	+0.2	+0.5

表 7 に示すように、孔食発生を抑制することができた。比較として孔食抑制のために添加している無機系 B を除いた BEV 用低導電率クーラントの結果を示しているが、無機系 B が無い場合には孔食が発生した。

7.2 実部品を用いた導電率評価結果

実車と同等の冷却回路を有する循環ベンチを構築し、クーラントの交換時期である 20 万キロ相当の熱負荷を与えた際の導電率変化を評価した。熱源としては、電池の代わりに電気ヒーターを冷却回路上に設けることでクーラントを温調した。クーラントの熱分解および部品からのイオン溶出に対し最も厳しい条件と考えられるシステムの想定最高温度で評価を行った。試験結果を図 4 に示す。

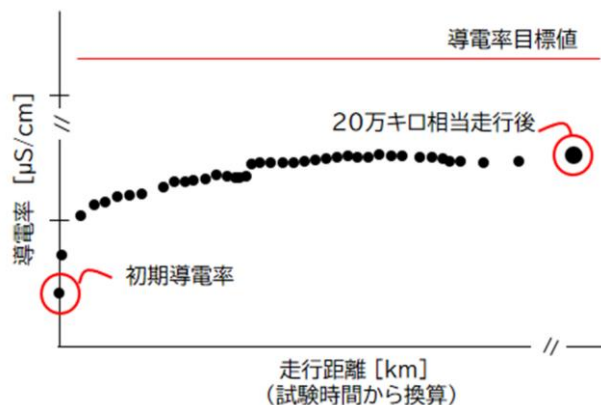


図 4 循環ベンチ試験における導電率変化⁽¹⁾

導電率の変化をリアルタイムに計測したところ、20 万キロ相当においても異常発熱を抑制できる導電率以下を満足することが確認された。したがって、万が一、クーラントが漏水し、電池の短絡が生じた場合でも、異常発熱を抑制することができる。

また、20 万キロ相当の試験後のクーラントを用いて、7.1 節の金属防錆性評価と同じ方法で評価を行った結果、すべての試験条件を満足した。したがって、20 万キロ相当の経年劣化した際も、BEV 用低導電率クーラントは、十分な防錆性能を満足することが確認できた。

8. おわりに

非イオン性防錆剤と必要最低限のイオン性防錆剤を最適配合することで、低導電率と高い防錆性能の両立に成功した。万が一のクーラント漏水時にも電池の異常発熱の抑制が可能となり、より安心・安全な BEV の普及に貢献できると考える。

■参考文献

- (1) 草野雄也ほか:安心安全な BEV 普及に向けた専用冷却水の開発, トライボロジスト, 第 68 巻, 第 6 号, 2023, p.392-397.

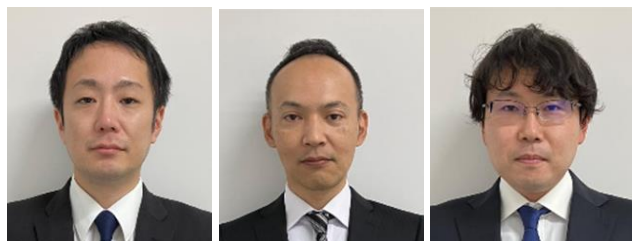
■著者



高野 雅幸

河野 崇

草野 雄也



吉井 揚一郎

木月 一善

佐々木 悠

グリーンカーボン, ブルーカーボン

山下 哲也 *1

高橋 理 *1

角谷 忠義 *1

古川 丈真 *1

河田 優人 *1

松澤 敏広 *1

久野 央志 *1

要旨

2050年のカーボンニュートラル達成に向けて、トヨタは、CO₂排出量の削減に取り組むと同時に削減し切れずに排出されたCO₂を回収する技術開発にも取り組んでいる。CO₂回収技術としては、CO₂を人工的に回収する技術開発に加え、グリーンカーボンやブルーカーボンと呼ばれる陸上生態系や海洋生態系といった自然に吸収される炭素量を増加させる技術の開発も行っている。この自然を対象とした技術開発においては、生物多様性への配慮も重要となってくる。

本稿では、グリーンカーボン、ブルーカーボン、及び生物多様性について、実態や世の中の動向に触れながら、トヨタの取り組みを紹介する。

キーワード グリーンカーボン, ブルーカーボン, 生物多様性, カーボンニュートラル, 森林

1. はじめに

2050年カーボンニュートラル達成に向けて、トヨタでは車両走行時や製造時に排出されるCO₂排出量の削減に向けた取り組みを進めている。すでに、1997年以降、2030万台以上の電動車を販売し、約1.62億トンもの温室効果ガス(GHG)の排出削減に貢献してきている(2022年3月時点)⁽¹⁾。

一方で、2050年時点でCO₂排出量をゼロまで削減しきれずに大気に排出されるCO₂が残る場合に備えて、大気中のCO₂を吸収・固定する技術開発も進めている。トヨタでは、CO₂吸収技術開発として、物理吸着や化学吸着による人工系吸収技術やグリーンカーボンやブルーカーボンといった陸上生態系、海洋生態系などによる自然系吸収技術の両方に取り組んでいる(図1)。



図1 CO₂吸収技術開発全体像

気候変動対策とともに地球規模の課題として生物多様性の保全がある。自然系吸収技術の開発にあたっては、育種、施業、カスケード利用といった一連のサイクルの開発のなかに生物多様性の観点を取り入れることが重要になってくる(図2)。

*1 CN 先行開発センター CN 開発部



図2 自然系吸収技術の開発サイクル

本稿では、グリーンカーボンやブルーカーボン、生物多様性に関して、現状や世の中の動向、トヨタの取り組みについて紹介する。

2. グリーンカーボン

2.1 グリーンカーボンとは

グリーンカーボンとは、陸上の植物が光合成をつうじて大気中の二酸化炭素を吸収して固定した炭素である。CO₂の排出を抑える役割を果たし、森林保護や植林、森林経営をつうじて大気から除去する事ができる。このような活動をつうじて人為的に増加させた炭素蓄積量を活用し、企業活動によって排出されるCO₂を相殺できる制度があり、カーボンニュートラル(以降CN)目標達成に活かすことができる。

日本は世界有数の森林国家であり、国土の7割を森林が占めているため、森林の持つCO₂吸収能力が注目されている。国家インベントリ報告書においても、日本の森林におけるCO₂除去量は約4,400万トンCO₂/年と評価されている⁽²⁾。

2.2 トヨタの取り組み

トヨタは、トヨタ三重宮川山林(三重県大台町)やトヨタの森(愛知県豊田市)、トヨタ白川郷自然学校(岐阜県大野郡)、トヨタテクニカルセンター下山(愛知県豊田市、岡崎市)、土別テストコース内等(北海道士別市)に森林を保有しており、総面積は約2,800haにも上る。これらの社有林を活用し、CO₂吸収量定量化、施業効率化、育種開

発への取り組みを開始した。以下に具体的な取り組み事項を記載する。

2.2.1 森林が吸収するCO₂量の定量化

吸収量向上に向けた技術開発推進のためには、現時点でのCO₂吸収量を把握する必要がある。社有林のなかで最も面積が大きい、トヨタ三重宮川山林(約1,700ha)のCO₂吸収量を、名古屋大学大学院生命農学研究科山本一清教授とともに、Jクレジット方法論森林経営活動(FO-001)⁽³⁾にしたがい定量化した。

CO₂吸収量の定量化には、①林齢、②樹種、③樹高、④樹高から推定した地位指数*²、⑤地位指数毎の成長量、⑥各係数(枝部分の容積を付加するための係数、樹木の地上部(幹+枝)の容積に対する根の容積の割合、容積密度、炭素含有量)が必要である。以下にCO₂吸収量の手順を示す(図3)。

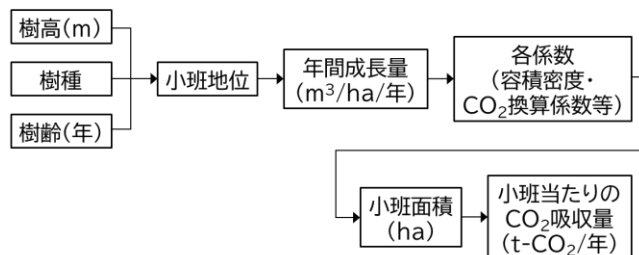


図3 CO₂吸収量算出フロー図

なお、樹種により成長速度や各係数の値が異なるため、CO₂吸収量計算は小班*³ごとに実施する。

上述の内、①林齢はトヨタ三重宮川山林を管理する(株)森林再生システム様より提供をいただいた。⑤地位指数毎の成長量は三重県林業研究所が2010年に発行したスギ・ヒノキ人工林における長伐期施業に対応した林分収穫表を使用⁽⁴⁾、⑥各係数は日本国温室効果ガスインベントリ報告書⁽²⁾に示された地上部・地下部バイオマスの吸収・排出量を算定する際の係数を使用した。

したがって計測が必要な計算因子は、樹高及び樹種である。我々は航空機およびドローンからレーザー光を照射し、反射信号を解析するLiDAR(Light Detection And Ranging:光による検知と測距)技術を活用し、以下の手順で樹高および樹種推定を実施した⁽⁵⁾⁽⁶⁾。

樹高計測:地表面に到達するレーザー光から樹冠境界

を特定し、樹冠を抽出し、さらに樹冠内の頂点を求め、頂点の反射時間から樹高を算出した。

樹種推定: 樹種によりレーザー光の反射強度等が異なるという性質を利用し、反射強度、樹冠形状、樹冠構造等の特徴量を算出し、それらの特徴量から Random Forest を用いた単木樹冠単位での教師付き分類を実施した。

なお、解析には三重県森林情報基盤整備事業で測定された航空 LiDAR データ^{*4}を使用した。解析結果から、地位指数を推定し CO₂ 吸収量を算出した。以下に結果を示す。

解析によりトヨタ三重宮川山林は、年間約 11,600 トンの CO₂ を吸収していることがわかった。また従来の森林簿^{*5}に記載された地位(昭和 30~40 年代に日本各地で一斉調査した結果から算出)に基づく CO₂ 吸収量と比較すると、今回航空 LiDAR にて決定した地位に基づく CO₂ 量の方が 20%程大きいという結果が得られた(図 4)。

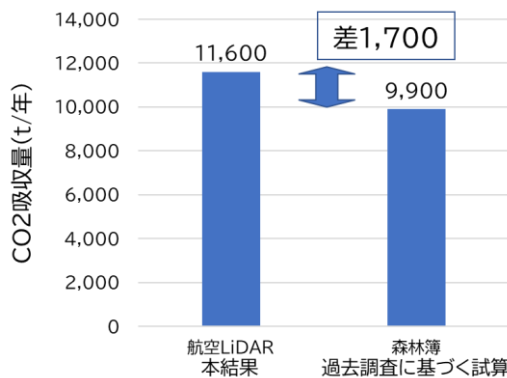


図 4 トヨタ三重宮川山林における CO₂ 吸収量

過去に推定された地位は、現地調査に基づき算出されており、樹高が適切に測定できず結果として地位も過小評価された可能性が示唆された。このように LiDAR 技術を活用することで、従来よりも正確かつ省人工で森林 CO₂ 吸収量を算出することができる。

一方で、森林の持つ CO₂ 吸収ポテンシャルを最大限活用するためには、地位が高い場所で優先的に施業を行う必要がある。過去に調査された地位は実際の森林の成長速度を反映していないとの報告もあるため⁽⁷⁾、そのような施業を行うためには、まずは正しく地位を推定することが必要である。これらの課題を解決するために、次の

取り組みを行った。

- *2 40 年生時の林分の平均樹高で指標化された林地の生産力を示す指数。気候、地勢、土壌条件等の地況因子が総合化されたもの。森林の成長量は収穫表にて地位指数ごとにまとめられている。
- *3 樹種、林齢、施業上の取扱等の差により設定した森林計画上の単位。
- *4 三重県知事の承認を受け、三重県農林水産部所管の測量結果を解析し作成した(令和 5 年 10 月 18 日付け農林水第 30-245 号承認)。
- *5 森林の所在地、面積や森林の種類(経済林・保安林等)、材積、成長量等の森林に関する情報を記載した台帳。

2.2.2 航空 LiDAR から得られる地形因子を活用した樹木の成長速度予測モデルの開発

木が生えている場所の標高や地形(尾根・谷)により成長速度に差が生じることはよく知られている。しかし、1,700ha の規模、かつ長期にわたり適切に管理された民有林において、地形因子と地位指数の関係性が明らかにされた例はほとんどない。我々は、地表から反射された航空レーザー光を解析し、地形データを作成したあと、地形因子に基づき樹木の成長速度を算出するモデルを名古屋大学大学院生命農学研究科の山本一清教授とともに作成した。

モデル作成は、0.3m² ごとに解析した地形データを、1m²、5m²、10m² に再標本化し、モデルに用いる最適なグリッドサイズの検討、およびグリッドごとの地位指数、標高、傾斜、斜面方位、斜面長位置^{*6}、集水面積^{*7}、地形湿润指数^{*8} を算出し、地位指数を目的変数とした統計解析によりモデル式を構築した。モデル式に基づき 10m² ごとの樹木の成長速度を可視化した結果の一部(約 400ha)を図 5 に示す。

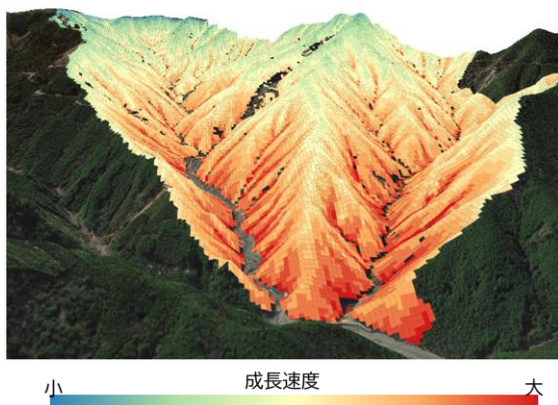


図5 樹木の成長速度

尾根部では成長速度が小さく、谷部では逆に成長速度が大きいという傾向が確認できる。従来から林業の現場では、尾根部より養水分が流出し、谷部に蓄積するため、谷部の成長速度が特に大きいということが経験的に知られていた。地形データを用いてモデルを作成することにより、林業の現場の知見を可視化できた。さらに、谷のなかでも特に集水面積が大きい場所(例:複数の尾根に囲まれた谷)の成長速度がより大きいといった点も再現できた。これらの結果を用いることで、森林のなかでもCO₂吸収ポテンシャルに優れた場所を客観的なデータを用いて定量化することが可能である。さらに、国土地理院の基盤地図情報サービスにある地形情報データを活用することで、日本各地の樹木のCO₂吸収ポテンシャルの大きな場所の検索が容易となるだろう。これらのデータを活用することで、森林を活用したカーボンニュートラルにより貢献できると考えている。

*6 森林斜面での相対的な位置

*7 任意の場所へ水が流入する面積の総和

*8 土壌の湿潤度を指標化した値

2.2.3 航空 LiDAR 技術を活用した森林の立体構造の推定

持続可能な森林を維持するためには、生物多様性への配慮も必要である。一般的に林内の階層構造が複雑である程、多様度は高いとされる⁽⁸⁾。航空 LiDAR から得られる指標のなかから、レーザーの透過率を解析することで立体構造の推定を試みた。

解析には、愛知県が豊田市(旧下山村)及び岡崎市(旧額田町)にて取得した航空レーザー計測データのトヨタテ

クニカルセンター下山のデータを用いた。対象とした小班の林相及び解析結果を図6に示す。

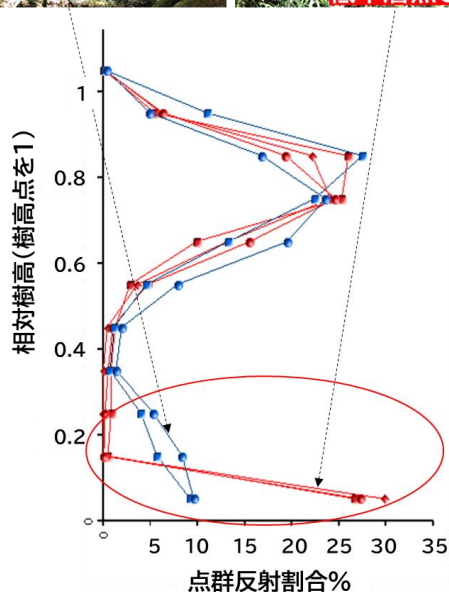


図6 森林立体構造推定結果

地表から3~4m付近の透過率に両小班で大きな差がみられた(図6赤丸部)。

実際の林相とデータを比較すると、樹高3~4m程度の低木層が存在する小班(図6左写真)では、その高さ付近の透過率が下がり、一方でそれが無い小班(図6右写真)では地表付近までレーザー光が到達することから、この差が生じると考えられる。このように、LiDARの森林内の透過度を活用することで、階層構造を推測できる可能性があることが示せた。

2.2.4 今後の取り組み事項

森林の持つCO₂吸収力を最大限活用するために、樹木の育種開発、土壌の養水分保持供給力向上・炭素蓄積

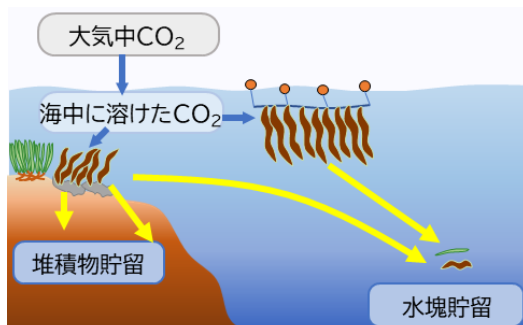
能増加に向けた土壌改良等にも取り組んでいく予定である。具体的な取り組みとして、2023年11月にトヨタ三重宮川山林の一部の小班において、特定母樹(人工交配により開発された成長が早い品種のスギ・ヒノキ)の植林を実施した。成長速度や土壌の養水分をモニタリングすることで、成長速度に与える影響を明らかにし、CO₂吸収ポテンシャルを最大限活かせる生育条件を明らかにする。

3. ブルーカーボン

3.1 ブルーカーボンとは

ブルーカーボンとは「海洋生態系により、大気や海中からCO₂が吸収され、貯留された炭素」のことであり、グリーンカーボンの対語として2009年に国連環境計画(UNEP)によって命名された⁽⁹⁾。ブルーカーボンとして炭素貯留する機能を持つ生態系をブルーカーボン生態系と呼び、マングローブ林、塩生湿地、海草藻場、海藻藻場が挙げられる。さらに近年では、国連で海藻養殖も海洋の有効なCO₂吸収源として含まれるようになり、日本の海藻養殖技術へ期待が寄せられている⁽¹⁰⁾。

ブルーカーボンの炭素貯留メカニズムは、グリーンカーボンが主に「植物の体内」であることに対し、「堆積物貯留、水塊貯留」である(図7)。



出典:水産研究・教育機構「海草・海藻藻場のCO₂貯留量算定ガイドブック(2023)」を参考に簡略化して作成

図7 ブルーカーボンのCO₂吸収と炭素貯留メカニズム

つまり海藻養殖の場合では、海底の堆積物に貯留された炭素や深海などの水塊に貯留された炭素がブルーカーボンとしての機能を果たしているため、育てて収穫した海藻を有効活用できる。例えば、本メカニズムが広く知

られる契機となった Dorte Krause-Jensen らの論文では、ホンダワラ類の海藻で光合成による純1次生産された炭素のうち、約11%が海底および深海に貯留されたと報告されている⁽¹¹⁾。

またブルーカーボンの重要な特徴の1つとして、炭素貯留の機能だけでなく、魚貝類など生き物の住み家になるなどの生態系サービス機能を有するため、生物多様性、ネイチャーポジティブへの貢献に対しても親和性の高いCO₂吸収技術であるといえる。

3.2 トヨタの取り組み

トヨタでは、以前より各国/地域におけるサステナビリティの取り組みとして、インドネシアやタイ、ブラジルを始めとした国においてマングローブ植林などに取り組んできたが、それらはCO₂吸収技術としてではなく地域とともに進めるサステナビリティ活動としての位置づけであった。そのなかで、近年カーボンニュートラル実現に向けた取り組みを広げるためCO₂吸収技術という観点でもブルーカーボンへの取り組みを開始し、海藻養殖を中心としてブルーカーボンを増やすことから、収穫した海藻バイオマスを有効利用するまでの一連のサイクルを好循環で回すための研究開発に着手をした。以下にブルーカーボンを増やすための技術およびバイオマスを有効利用する技術のそれぞれについて取り組み内容を紹介する。

3.2.1 ブルーカーボンを増やす技術(海藻養殖, モデル)

ブルーカーボンを増やす技術としては、日本の培ってきた海藻養殖の知識・技術を活かしつつ、ブルーカーボンの観点も加えた海藻養殖や海藻藻場造成につながるための海藻成長モデルの構築を進めている。さまざまな環境条件においても海藻の成長を予測可能な海藻成長モデルとするため、海藻技術の進んだ中国やノルウェーの先行文献を参考としながら⁽¹²⁾⁽¹³⁾、国立研究開発法人水産研究・教育機構(水研機構)堀正和グループ長らとともに議論を重ね、精緻なモデルの作成に取り組んでいる。海藻の成長は水温 T や光量 I 、海水中の栄養塩類の濃度である無機三態窒素濃度 $[\text{NO}_3^-]$ 、 $[\text{NO}_2^-]$ 、 $[\text{NH}_4^+]$ やリン酸濃度 $[\text{PO}_4^{3-}]$ 、海水の流速 U に影響される。そこで、これらの環境因子を入力(説明変数)とし、最終的な海藻

のバイオマス量 B_f を目的変数としたとき、それぞれに対応する海藻の生理特性を表す値、最適温度 T_{opt} 、最適光量 I_{opt} 、各栄養塩の最大/最小細胞内含有量 N_{max} 、 P_{max} 、

N_{min} 、 P_{min} 等を用いた関数 f_T 、 f_L 、 f_n 、...を用いて、光合成によるバイオマスの成長量を微分方程式の形で記述することができる(図8)。

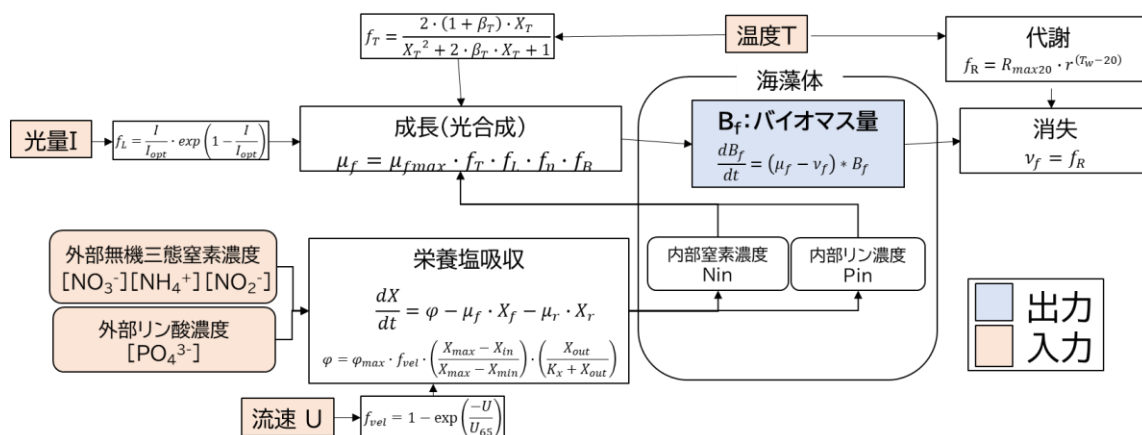


図8 海藻成長モデルのブロック図

このことから、海藻の生理特性と展開海域の環境の両方を踏まえた海藻養殖をすることが重要であるといえる。

そのためには、海藻自体の特徴を正しく把握することが必要であり、本取り組みでは実際の海での海藻養殖に加え、陸上での研究施設における海藻培養試験によって各海藻種の特徴を把握する取り組みも行っている。

次に、実際の海域での海藻養殖試験にあたっては、前述のモデルを踏まえながら実際に海での海藻成長がどのようになるか検証、改善検討をするための取り組みを進めており、事例として水研機構 長谷川夏樹主任研究員ら、釧路市東部漁業協同組合の皆様にご協力いただき北海道釧路海域で海藻成長量の差異を検証した結果を示す。はじめに釧路海域における海洋モニタリングによって得た環境データを入力し、海藻養殖を実施した時のCO₂ 吸収原単位をモデルによって予測した。次に、養殖試験として海藻種苗を培養し、種苗をロープに差して実際の海に展開(沖出し)して海藻を育成し、最終的に収穫するまでの一連のサイクルを実施した(図9)。

試験条件としては、同一の海藻種苗を用いて、環境条件の異なる閉鎖的で静穏な漁港内と、開放的で高波浪な沿岸域で成長量の比較、最大成長量の検証を行った。得られた結果を解析した結果、漁港内に比べ沿岸域の方が2倍以上高いバイオマス量に成長することが確認された。このことから、海藻に適した環境で生育することによって高い成長ポテンシャルを引き出せることが明らかとなった(図10)。

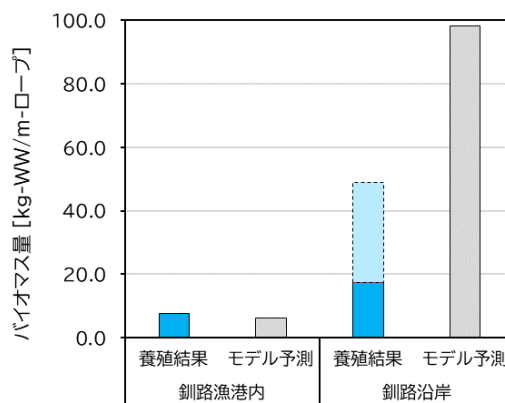


図10 成長した海藻バイオマス量の養殖結果とモデル予測の比較

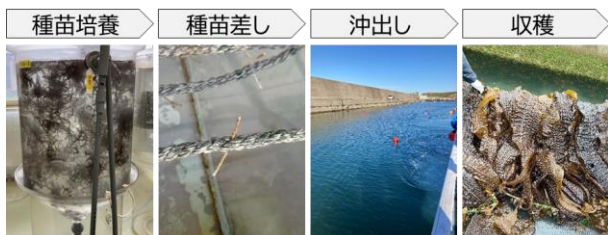


図9 海藻養殖試験のプロセス

一方で、モデルでの予測とは合致しない部分も確認でき、モデルのさらなる精度向上が必要であること、および、海藻の生理特性把握によってさらに海藻成長量を増やし得る養殖が可能であることが示唆された。モデルの

精緻化へ向けた補完データを得るためには、水温や光量といった環境因子が連動して変化する実際の海での試験だけではなく、独立して各因子を調整可能な研究施設での試験が不可欠である。そこで、現在、環境条件を任意に設定可能な培養設備を用いて海藻を早く成長させるための環境条件の検証に取り組んでいる。

3.2.2 海藻バイオマスの利用技術

3.1 節にて述べたように、海藻養殖で収穫した海藻バイオマスは海底や深海に貯留された炭素とは異なるため、有効利用すべき資源として考えることができる。日本では古くから食用などに海藻を利用してきたが、世界では珍しい事例の位置づけになっている。世界的には 1900 年代になってから海藻固有の有効成分の発見やその抽出技術の開発によって利用方法が増えて有効利用されるようになってきている⁽¹⁴⁾。そのため、トヨタとしてはさらに利用方法の選択肢を広げる余地のある領域と考えている。

トヨタでの利用技術開発では、食料との競合を避けたうえで海藻バイオマスを有効利用しきることを念頭に置き、海藻の成分ごとに適した利用をするカスケード利用技術の開発に着手している⁽¹¹⁾。



図 11 カスケード利用技術の概要

本稿での詳細記載は控えるが、例としてセルロース成分などから自動車の内装材料の成分に用いる資源化利用などの研究開発・検証を進めている。これらは非化石燃料由来の製品であるため、利用技術によってもカーボンニュートラルに貢献でき、収益源にもなるため、ブルーカーボンを広げていくために重要な技術の 1 つであるといえる。

3.2.3 今後の取り組み事項

研究開発の成果を活かしながら、ブルーカーボンを増やし、海藻バイオマスを利用する一連のサイクルを実践する好事例をつくっていくこともブルーカーボンの発展・拡大に重要なため、研究開発と漁業との連携による実践の両輪を回しながらブルーカーボンの持つ可能性・選択肢の拡大に貢献していけるよう取り組みを継続していく。

4. 生物多様性

4.1 生物多様性とは

ミレニアム生態系評価 (MA: Millennium Ecosystem Assessment) の取り組み

生物多様性として世界に注視される転換点の 1 つが 2001 年に国連の呼掛けで開始した MA の取り組みである。生態系・生物多様性の変化が人々の生活に与える影響の解明を目的に多くの専門家が参加し、生物多様性は資源の供給や貯水、防災などの生態系サービスを支える供給基盤として保全が不可欠と明示された。

ここから生物多様性は、従来の生物多様性^{*9} の概念に加え、生態系サービスとの概念としても使われ始めた。

*9 生物達の豊かな個性とつながりのこと。生物多様性条約では、生態系の多様性・種の多様性・遺伝子の多様性という 3 つのレベルで多様性があるとしている。

経済評価の取り組みへの波及

MA 取り組み以降、生物多様性・生態系サービスの価値を経済評価・可視化しようとの取り組みが開始された (国連による TEEB (The Economics of Ecosystem and Biodiversity) プロジェクト; 2007 年開始, 世界銀行による WAVES (Wealth Accounting and the Valuation of Ecosystem Services) プログラム: 2010 年開始)。持続可能な経済活動のためには、従来の社会資本 (物的資本, 人的資本) に加え、自然資本 (生態系サービスや非生物) も指標化し、評価するよう提案された。

生物多様性と気候変動の両立への動き

生物多様性・生態系サービスを科学的視点で調査し、COP (Conference of the Parties) 等に政策提言

するのが IPBES (Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services) であり、気候変動を科学的視点で調査、政策提言する組織が IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) である。この両組織が 2020 年に合同ワークショップを開催、2021 年には「生物多様性と気候変動」報告書を公表した。このなかで、気候変動と生物多様性は相互依存の関係で、気候変動のみに焦点を当てた対策は生物多様性に悪影響を及ぼす可能性が示された。

生物多様性と気候変動の両立が政治のグローバル目標へ

科学界からの提言を受け 2022 年の国連生物多様性条約締結国会議(COP15)では国際目標として「2030 年までに生物多様性の減少を止める」ことと、それに必要な 23 の行動目標が「昆明・モントリオール生物多様性枠組」として合意された。なかでも目標 3「30by30 (2030 年までに各国の陸/海域の 30%を保全)、目標 8「気候に対する行動による生物多様性への負の影響を最小化し、正の影響を向上させる」、目標 15「大企業は生物多様性に係るリスク、生物多様性への依存および影響を定期的にモニタリングし、評価し、透明性をもって開示」が、企業活動に大きく影響を与えると予想される。

生物多様性国家戦略 2023-2030 の策定

COP15 を踏まえ、日本でも「生物多様性国家戦略 2023-2030」が 2023 年に閣議決定した。本戦略では、生物多様性損失と気候危機の 2 つの危機へ総合的に対応し、ネイチャーポジティブ(生物多様性の損失を止め、反転させる)に向けた社会の根本的変革が強調、「生態系の健全性の回復」や「自然を活用した社会課題の解決:NbS(Nature-based solutions)」など、5 つの基本戦略が示された。

4.2 トヨタ及びオールドトヨタでの取り組み

4.2.1 グリーンカーボン

国際目標(生物多様性国家戦略目標)「30by30」への参画:社有緑地の「自然共生サイト(OECM)」認定の取り組み

日本国内では 30by30 達成に向けて、企業などによって自然環境が保全されている土地のなかで一定の条件を満たすものを「自然共生サイト(OECM: Other Effective area-based Conservation Measures)」として認定する制度が開始された。トヨタグループではオールドトヨタ自然共生 WG(23 社)が主体となり、本制度初年度となる 2023 年前期に、8 サイト、トヨタ自動車はその内の 4 サイト(テクニカルセンター下山、びおとーぷ堤、三重宮川山林、トヨタの森)の認定を受けた。

生物多様性および気候変動の両立への理解・訴求活動の取り組み

生物多様性と気候変動は相互依存し、一方に偏った取り組みは他方に悪影響を与える可能性もある。このため、生物多様性と気候変動の両立への正しい理解、活動が必要との考えから、2023 年にオールドトヨタ自然共生 WG のもとに NbS Sub WG を立ち上げた。当年度の活動は、本件に関する基礎知識に関して勉強会を定期開催し、これまで 4 回実施(計 5 回予定)している。

生物多様性および CN の定量化への取り組み:社有林での(植物)種多様性評価

元タスギ、ヒノキ人工林であった社有林の一部を、より生物多様性の高い針広混交林等にするために、間伐などの森林管理を実施し、植生モニタリング等を行っている。生物多様性の定量化のためにこれらのデータを活用し、林床(草本層、低木層)の植物種数および多様度の変化の数値化を試みている。間伐により、林床の植物種数が概ね増加する傾向や、多様度が一面に繁茂する種の存在有無(例えばササ類)により変化する傾向が定量化できた。

4.2.2 ブルーカーボン

海藻藻場は陸域の広葉樹林と同じく生物多様性と生態系機能が高い生態系であり、人類への生態系サービスを多く提供してくれる。そのなかで海藻は生態系の基盤を構築する基盤種であり、藻場の増減傾向およびそれにとともに、生物多様性がどのように変化するかを定量化する取り組みが必要となってくる。水域に存在する生物を定量化する技術として、環境から採水した水検体をろ過、濃縮し、DNAを増幅、検出して個体の種類や数を知ることができる環境DNA技術が知られている。2019年には全国的环境DNAを共有しあう専用データベースが提供され、全国的な海洋の生物多様性定量化へ向けた技術発展・社会実装が進んでいる。トヨタも生物多様性の重要性を強く意識し、ブルーカーボンの技術開発と並行して生物多様性の計測、定量化を進めている。

5. おわりに

本稿で述べたように、トヨタは自然系でのCO₂吸収技術開発として、樹木や海藻を対象に、育種から利用技術まで一貫通貫の取り組みを開始したところである。今後も、気候変動と生物多様性への取り組みが両立した持続可能な世界を目指し、グリーンカーボン、ブルーカーボンに関わる関係者の方々の協力を得ながら社会への貢献を進めていく。

■謝辞

グリーンカーボン、ブルーカーボン技術の開発にあたっては、愛知県庁、三重県庁、名古屋大学、国立研究開発法人水産研究・教育機構、各地域の漁業協同組合、関係各社等、皆様のご支援、ご協力により進めることができいております。ここに、感謝の意を表します。

■参考文献

- (1) Toyota's Views on Climate Public Policies 2022, 「2050年カーボンニュートラル実現に向けて地球規模でチャレンジ」, <https://global.toyota/pages/global-toyota/sustainability/esg/environmental/climate-public-policies-2022-jp.pdf>, 2023年12月1日.
- (2) 国立研究開発法人国立環境研究所:日本国温室効果ガスインベントリ報告書, 2023
- (3) Jクレジット方法論 FO-001(ver.3.0) 森林経営活動
- (4) 島田博匡:三重県のスギ・ヒノキ人工林における長伐期施業に対応した林分収穫表の作成. 三重県林業研報, Vol. 2, 2010, p.1-28
- (5) 山本一清:航空機LiDARによる森林計測手法. レーザー研究 Vol. 44, No. 5, 2016, p.326-330
- (6) 中武修一ほか:航空機LiDARによる単木樹種分類手法の開発. 日本森林学会誌, Vol. 100, No 5, 2018, p.149-157
- (7) Egusa, T., Kumagai, T. & Shiraishi, N: Carbon stock in Japanese forests has been greatly underestimated. *Sci Rep*, Vol 10, No. 7895, 2020.
- (8) 山下聡ほか:森林生態系における生物多様性と炭素蓄積, 森林総合研究所研究報告, Vol.12, No.1, 2013, p.1-21
- (9) Nellemann, C. et al. Blue Carbon: a Rapid Response Assessment. United Nations Environment Programme (2009)
- (10) 水産研究・教育機構. 海草・海藻藻場のCO₂貯留量算定ガイドブック. 水産研究・教育機構 (2023)
- (11) Krause-Jensen, D. & Duarte, C. M. Substantial role of macroalgae in marine carbon sequestration. *Nature Geoscience* Vol.9, 737-742 (2016)
- (12) Jihong Zhang et. al.:A model for the growth of mariculture kelp *Saccharina japonica* in Sanggou Bay, China, *Aquaculture Environment Interactions*, Vol.8, 273-283, (2016)
- (13) Ole Jacob Broch et. al.:Modelling seasonal growth and composition of the kelp *Saccharina latissima*, *J Appl Phycol*, Vol.24, 759-776, (2012)

(14) Maria Dolores Torres et al. Sustainable Seaweed Technologies. Elsevier (2022)

■ 著者



山下 哲也



高橋 理



角谷 忠義



古川 丈真



河田 優人



松澤 敏広



久野 央志

将来の日本を救う！滞空性空中プラットフォーム “マザーシップ”プロジェクトの企画と開発

板倉 英二 *1

要旨

将来の日本の社会課題への“解”となる気概を持ち“マザーシップ”プロジェクトを企画し開発を始めた。本稿ではまず“マザーシップ”と名付けた翼型形状の大型高性能カイトを高空滞空性空中プラットフォームとして活用するビジョンと開発戦略を紹介する。プロジェクトは 2018 年から開始、まずは小型のカイトを自前で設計、製作しながら主な構成技術は何かを熟慮し開発を進めてきた。プロジェクトの成功に不可欠な開発メンバーの熱意もあり、カイトシステムやそれら構成技術が色々な産業に活用できる潜在力を示すところまで来た。今後は“マザーシップ”ビジョンに向けより高く、長時間飛ばすための性能向上と実際の活用を考慮した開発を進める。

キーワード マザーシップ, 空中プラットフォーム, 将来社会課題, 偏西風, 膜体インフレータブル構造, スーパー繊維, スモールスタートアップ, 福島県山岳地, 突風安定性, 姿勢制御, 空力運動制御, バイオミメティクス

1. はじめに

トヨタ自動車にて 2016 年 4 月に未来創生センターなる現所属組織ができ、会社本業にとらわれず将来に向けた研究開発を企画・開発する職務を受けた。世の中いろいろな将来予測的な情報、論文、書籍など溢れているが、遠い先の正確な予測など誰にもできない。ただし、例えば日本のエネルギー問題、特にエネルギーセキュリティといえは多くの人が社会課題であり将来状況によっては大きな問題になることは予想される。すなわち日本にて将来、もしある臨界点を超えると大きな問題となるわかり易い社会課題を改めて取り上げた。その諸社会課題をも解決する“解”そのものを開発する気概を持って、長年の各種領域の研究開発者として温めてきた技術や経験、アイデアを駆使して“マザーシップ”プロジェクトを企画し⁽¹⁾(図 1)、2018 年から実際にゼロ状態から開発を進め今に至っている。本稿ではそのプロジェクトビジョンとその取り組み状況、そして次への想いを一部紹介させていただく。



図 1 “マザーシップ”イメージ

2. 将来の日本の社会課題

まず何が日本の社会課題となるかを図 2 に簡易図にまとめた。前述のように、エネルギー問題は日本のような島国にて、エネルギーの多くを海外から輸入する化石燃料に依存している現状は、明らかに安全保障上および地政学上エネルギー価格高騰リスクがある⁽²⁾。また、化石燃料主体のエネルギー構成は排出ガス由縁の地球温暖化、海水温上昇等による集中豪雨災害の増加といった課題を生み出している⁽³⁾。

エネルギー問題・自給率課題に加え、日本は少子高齢化による社会保障コストの増大⁽⁴⁾という世界の先進国内

*1 未来創生センター R-フロンティア部

でもその危機に遭遇するフロントランナーである。新たな産業を興し発展させる、より具体的なロードマップが望まれる今、これが大きな社会課題であることに多くの人には異論が無いであろう。

昨今の新型コロナウイルスの影響で関心が高まった東京等大都市への一極集中も将来社会課題⁽⁵⁾である。地方に産業雇用の一層の活性化を促す必要があり、また生活面においても移動や病院、ライフラインといったインフラ格差は大きく、大都市に人が集まる傾向は引き続き続いている。一部地方では限界集落という言葉ができるほど人が減っている。日本は地域文化の多様性を大昔から維持し、それが日本人のメンタリティを造ったといわれている⁽⁶⁾が、その多様性を失うことは大きな社会課題と考える。

以上のような社会課題は皆認識し対策すべきと考えているが、それが将来いつ変曲点を迎え危機的な状況になるかは人それぞれ予測が異なる。“いつ”という定量的な予測には幅があるが、定性的にはこれらが将来社会課題である認識は皆同じであろう。私が考える一番の社会課題はそんな将来不安を抱えた閉塞感ある現状社会である。元気な若者やイノベーターが新しい産業を起こして活躍する“土俵”的なもの(プラットフォーム)を造っておきたい。これら社会課題はいずれも“将来の日本の大問題”となり得るものである。この大問題から救う解は無いのか?という大きな志をもとに“マザーシップ”なるビジョンを創りプロジェクトを企画した。



図2 2030年から2050年頃の日本の社会課題

3. “マザーシップ”プロジェクト企画

3.1 偏西風への着目

新しいことを成すのにどんな事象であれエネルギーが必要である。当然、再生可能エネルギーに着目し、再生エネルギーのなかでも、“自然に”エネルギー密度が高くなっており、無限に“採掘”できる偏西風に着目した。図3に世界の上空約10km付近の10年間平均風速を示す。

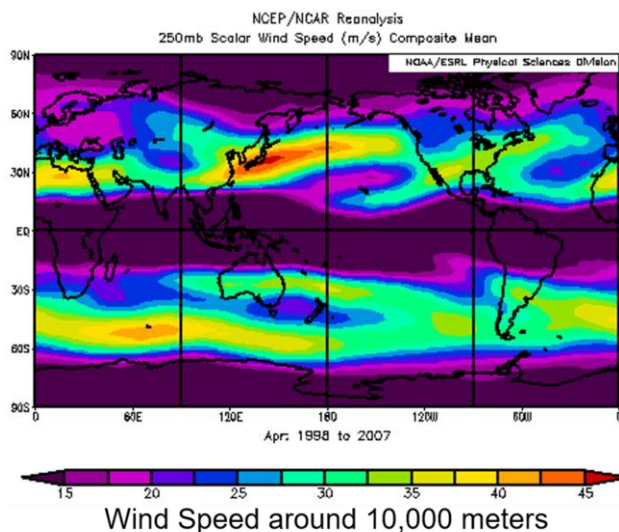


図3 上空10km付近の10年間平均風速⁽⁷⁾

日本の上空付近には平均風速が50m/s付近の領域があり、その集積度は世界一といえる。空気密度が地上の約1/3であることを考慮しても、出力密度は風速の3乗なので鉛直面の断面で約25kW/m²である。これが延々と続くのでその分エネルギー密度はその単純時間積分になる。

偏西風は太陽の日射による熱が赤道付近から極へ、空気の熱伝導性が低いゆえ、主に大気の熱対流という運動量をつうじて移動する現象をもとに発生する。地球が球体であり自転していること、および、地球の現サイズから、熱対流が上空約10kmで北半球では2つの帯域で集積している。一つは亜熱帯ジェット気流、もう一方は極ジェット気流と言われる⁽⁸⁾。

日本の上空にてエネルギー密度が高い理由は専門家の意見が色々ある。日本が2つのジェット気流を享受できる緯度にあること、大きなユーラシア大陸の東端にあること、ヒマラヤ山脈が整流しているという意見もある。

いずれにしても、エネルギー密度が世界一高いことは事実である。

自身からの距離 10km の範囲を考えて欲しい。地上にて自身からたった半径 10km の範囲にそのようなエネルギー密度が存在することはまずない。それが、上空方向ならば偏西風という高いエネルギー密度域が存在する。日本上空は特にその密度が高く、範囲(水平方向, 垂直方向)も線ではなく領域として広く存在する。この偶然に集積した自然の恵みを活かさない手はない。私は“マザーシップ”を、この上空のエネルギー“鉱脈”から採掘することと、それを活用して日本の社会課題を解決する機能を持たすことを使命として企画した。

3.2 “マザーシップ”構成

上空 10km 付近まで到達する能力があり、その付近の風力をエネルギーに変える機能を持たすには？という命題から始まり、各種飛行体を検討した。結果としてカイト(凧)にその活路を見出した⁽⁹⁾。

カイトはテザー(凧糸)で地上から係留し風力で上空に揚がる。通常高度が上がるほど風力は強まり、カイトやテザーの重量、空力抵抗に対して揚力が打ち勝てばどんどん上空に揚がる。地上付近は大気境界層のなかでも風が弱く地形や障害物による風の乱れ影響がある場合が多いが、一般に凧揚げではテザーを持って走るというアシスト方法がある。これはカイトに相対風速を与えることであり、“カイトシステム”としては電動ウィンチを構成し地上にてテザーを巻き取る機能を持たせることでアシストする。

カイトでの 10km 付近までの到達能力、安定滞空能力、システム成立を可能にする必要な空力特性(カイトおよびテザー)、重量、材料強度等に関して実現可能性のスタディを行った。詳細は割愛するが、以下にカイトシステムが成立する要件をみつけた。

- カイト構造は膜体インフレータブル構造(ビーチマットのように気密性のあるファブリックで加圧空気を密閉して成形した構造)で構成。
- テザーは近年進化が進んでいる日本の繊維系企業が得意とする“スーパー繊維”で構成。
- カイト形状(空力特性)は断面形状を航空力学における人類最大の発明である翼型で構成し、揚力を最大

化し抗力を最小化(揚抗比を最大化)する指向。カイト全体形状はできるだけ揚抗比を上げるため、高アスペクト比(縦横比)のグライダーの主翼のような一体翼で構成。

- 高アスペクト比や低抵抗の背反である姿勢自立安定不足は、形状変形等による可変空力やテザー張力の制御機能を入れ、姿勢安定化とマニューバー(意図した運動をさせる)機能を構成。

この要件での難易度を考察した。一番気にしたのはテザー張力の成立性である。もしカーボンナノチューブのような剛性・強度が必要であればこの“マザーシップ”を日本の将来大問題発生までに実現させるのはほぼ不可能であると私は判断したであろう。だが計算の結果、現在の“スーパー繊維”に若干の性能向上開発を実現すればシステムが成立する範囲内であることが判り、一気に企画を加速した。膜体インフレータブル構造を選択したのは、実はカイトは空力的には翼面積を大きくすればするほどカイトシステム全体空力抵抗に対してテザーが受ける空力抵抗分の比率が下がり、より高く、より垂直を目指して揚がる。これはカイト抵抗に対し、テザー抵抗は√がかかるからである。ただし、翼面積に応じてカイト重量は重くなる。これが通常の航空機のような剛体設計ではいわゆる“二乗三乗則”で重くなりシステムは成立しない。そこで膜体インフレータブル構造にて薄い軽量高強度膜材を使い、極力“二乗二乗”になる設計をする。また図 4 のようにつり橋を上下逆にしたようなテザー張力分散(ブライドルライン)で各部荷重を低減する。“スーパー繊維”テザーは圧縮荷重を持たないが引張は大荷重に耐える。しかも軽量で、また突風等の瞬間大荷重を柔軟構造ゆえの変形でいなし、突風が過ぎれば元の構造に戻るというカイトに適した膜体インフレータブル構造のもう一つの“潜在力”を活用する。

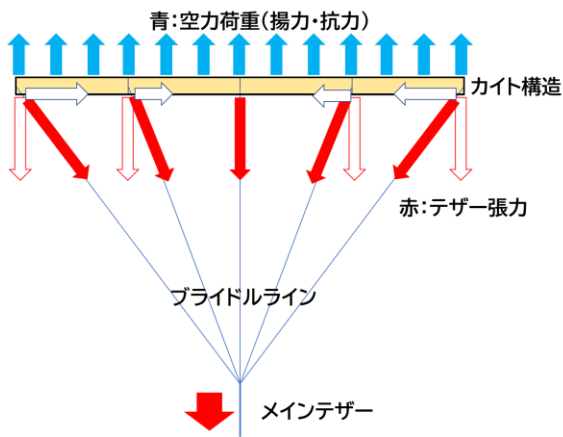


図4 テザー分散によるカイト荷重分散

3.3 “マザーシップ”機能

図5, 図6に“マザーシップ”の機能と将来活用を示したスケッチ画を紹介する。これが“マザーシップ”プロジェクトのビジョン⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾そのものである。

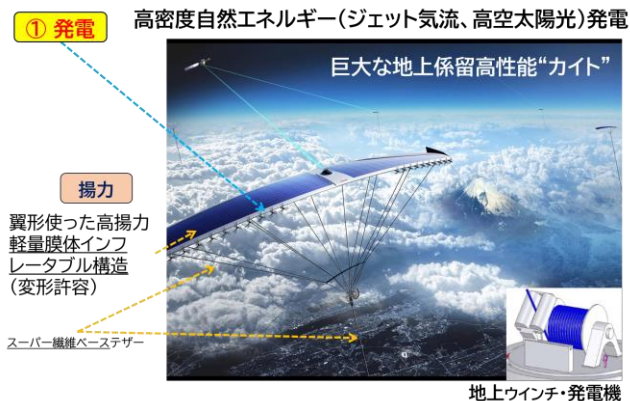


図5 “マザーシップ”ビジョンスケッチ 1



図6 “マザーシップ”ビジョンスケッチ 2

3.3.1 発電

図5のように大きなカイトに風力タービン, ソーラーパネルを搭載してある。ただこれらの発電力の規模は知れているので主にカイトの搭載物に必要な電力供給用として用いる。ただ, ソーラーパネルは上空 10km 付近での日射量(雲の上), 空気の清浄度, そして何よりも低温かつ低湿度の強い風でセルが冷却される効果は大きく, 地上に比べて同面積で約 3.4 倍の発電量が期待できる。大量発電源として一番機能するのは, 欧州で盛んなカイト空中風力発電と同じく, カイトのマニューバーで係留したテザーの張力と変位にて地上で再生する方式である。それを偏西風で。この方式では地上への送電線は要らず, テザーは運動量を伝える役目である。地上に発電所ができる。京都大学の MU レーダー⁽¹¹⁾にて直接計測した 10km 付近の風速統計から“マザーシップ”による発電量の概算見積りをすると(翼面積は地域規模等から任意に選択できるものとし, 地域分散するとして),

- 翼面積 10^6m^2 なら約 1,400 個
- 翼面積 10^5m^2 なら約 14,000 個

あれば今の日本の化石燃料を含んだ総エネルギー消費量を賄える。ただし, このようなサイズの“マザーシップ”は都会にはそぐわない。必然的に土地を確保しやすい地方が適している。日本の地方に“マザーシップ”を分散設置すればその地方に発電所ができることになる。またそこに再生可能エネルギーゆえ水素やその他エネルギーキャリア変換のプラントができる。これは地方, 特に限界集落といわれるような所に産業と雇用の受け皿ができるということである。日本の将来大問題のエネルギー問題と地方文化多様性の消滅を解決する一つの“解”となる。

3.3.2 通信・観測

“マザーシップ”は上空約 10km 付近に滞空する。これを空中プラットフォームもしくは空中インフラとして活用することも考えている。現在流行りの低軌道衛星による通信コンステレーションがあるが, もっと地上に近く, かつ雲の上にある“マザーシップ”も同様以上の通信基地潜在能力を有す。現在, 指数関数的に増大する通信のトラフィック量に対し, 海底光通信ケーブル増設には莫大な費用がかかる。日本では衛星ワイヤレス光通信⁽¹²⁾をそのカウンターメジャーとして開発しているが, 日本の上空は

雲が多く光通信に不向きである。そこで“マザーシップ”を雲上の通信中継基地として機能させ、衛星等から受けた光を電波等で地上に落とす(その逆も)ことで衛星と“マザーシップ”でコンステレーションを組むことができる。特に現在通信環境が貧弱である洋上でも“マザーシップ”を活用することにより、非常に高品質な通信環境を提供できる。図 6 はその活用例として、近海に海洋資源が豊富な日本にて無人口ボット等を使い、高品質な海底画像と正確な操縦を遠隔で行うことで、海底資源の調査・発掘が進み、レアアース・メタルを自給する将来を表現している。

3.3.3 “スカイフック”

“マザーシップ”にて翼型形状のカイトを選択したメリットはやはり莫大な揚力である。これは気球等で使われるヘリウムの浮力に対して桁が違う。また翼型形状ではカイトのピッチ角を変えることで揚力を変えることができる。つまり強力な揚力で物を持ち上げ、その力も制御することができる。この揚力を使ってまずは気球等ではありえない重量のペイロードを“マザーシップ”に持たすことができる。3.3.1 項や 3.3.2 項に記載したとおり、発電機能、通信中継基地機能を持たすことができるのもこの揚力のお陰である。勿論、搭載物に電力を供給できるのもソーラーパネルや風力タービンをペイロードとして搭載できる揚力由縁である。将来的にはこの揚力を使い、空中を使って物流や最終的には人のモビリティとして、ポイント to ポイントの安全かつ確実にエネルギー消費の少ない 3 次元移動を実現することが私の最終ビジョンである。

4. 技術開発戦略策定とプロジェクト実開発開始

2018 年 1 月より極めて少人数の開発メンバー(技術員、技能員)にて、まさに“ゼロ”からの開発を始めた。トヨタ自動車内は自動車関連技術が主であり、本開発の技術的アドバンテージは殆ど無い状態である。

まず先人に学んだ。かつて米国にてこの構造体の研究開発が盛んであったこともあり、米国の大学との共同研究にて開発メンバーの若手技術者一人を 2 年間この大

学に派遣し、技術情報を得ながら開発メンバー自ら設備導入、素材購入、加工・接合等の試行錯誤から始まった。また欧州を主にした先人である、高空風力発電の研究開発を進めている大学やベンチャー企業との交流により技術開発項目を学びながらその本質が見え始めた。

図 7 に示すようにこの技術開発を大きく“因数分解”すると、軽くて大きな面積の構造体であるカイトを実現するには“膜体インフレータブル構造”導入が必要。しかしこの構造は既存の航空機のような剛体設計構造ではないので、カイトとしては時々刻々変形することにより空力や荷重が変わるという“特異なダイナミクス”を有する⁽¹³⁾。それを色々な変化する風況のなかでも、狙った姿勢安定性やマニューバーにするには高度な“ダイナミクス制御”が必要である。これらの要素技術本質を如何に知り性能を高めるか?の課題ばらしが技術開発戦略策定に役立った。

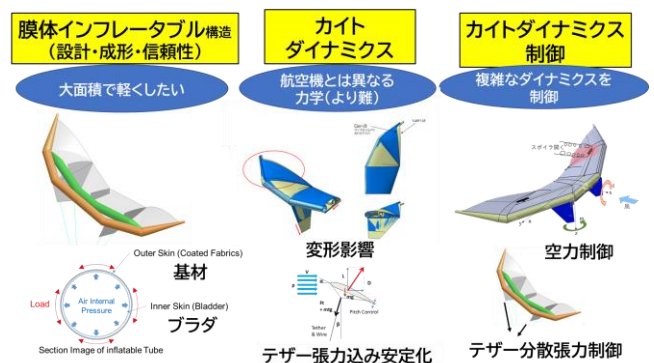


図 7 主要要素技術への課題ばらし

4.1 ロードマップ策定とスモールスタートアップ

未来創生センター内で正式プロジェクトとして承認されるため、図 8 のロードマップを策定した。前述のように最終的に目指すビジョンである“マザーシップ”は巨大なものであるが、物理としての技術開発要素はスモールスケール(翼面積 $5\text{m}^2 \sim 10\text{m}^2$ 程度)の膜体インフレータブル構造カイト(姿勢安定制御機構付)と同じであり⁽¹⁰⁾、実際に開発メンバーで設計・製作し、具体的に目標・成果・必要技術達成度がわかりやすい、例えば“2 年半で上空 1,000m にて安定飛行させる”までのマイルストーンを置くといった味見プロジェクト的な位置付けで“カイトプロジェクト”と命名した。

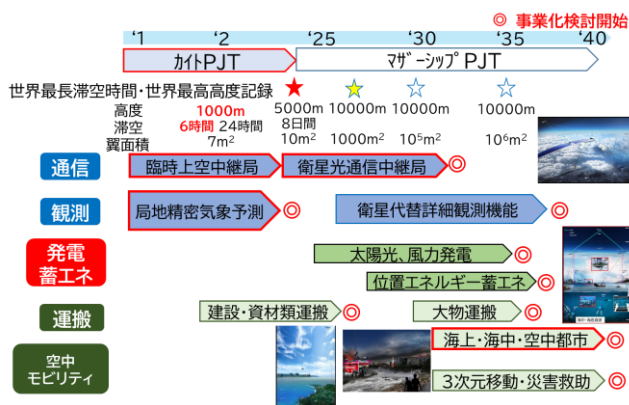


図 8 ロードマップ

この期間に膜体インフレータブル構造設計・製作，スーパー繊維テザー，張力・速度調整可能電動ウィンチ(3.2節の相対風速アシスト機能付き)を，実開発をつうじてしっかり学んだ。また図 9 に示すように設計 CAE モデル技術の精度を風洞や飛行試験での実測にて高め，のちに苦しめられた，変形するカイト特有のダイナミクスに対するモデル化も着実にステップアップさせ，以降のサイズアップ時にまずはモデルベースでサイズ効果含めて検討できるようにする技術力を獲得する戦略で進めた。

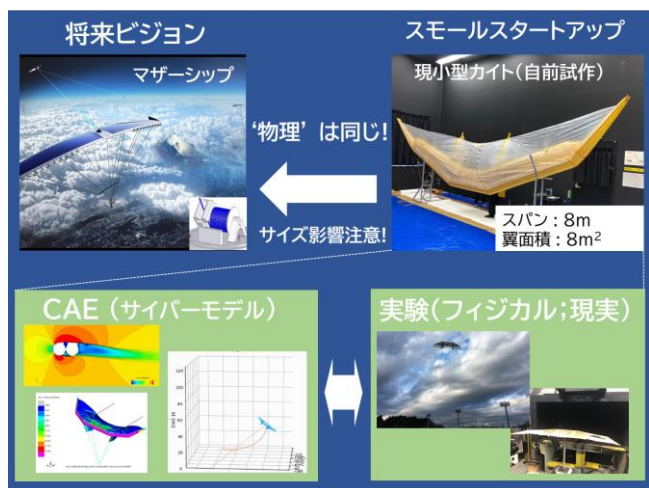


図 9 “技術開発での”スモールスタートアップ

4.2 高度 1,000m 達成(最初のマイルストーン)

約束どおり実開発開始から 2 年半で静岡県富士宮市の朝霧高原にて国土交通省航空局の高度認可のもと，膜体インフレータブル構造カイト(姿勢安定制御機構付)で無事 1,000m 以上の高度での安定飛行に成功した⁽¹⁴⁾。

図 10 にその時の GPS および気圧高度計による地上

高度データを示す。また，カイトと当時の開発メンバーの写真を図 11 に示す。この頃のカイト性能は今に比べれば未熟であり，開発中に風況により何度も落下することが多かった。膜体インフレータブル構造ゆえの壊れにくさと，開発メンバーが落下しては拾って揚げる奮闘にて，熱意で良い風況を呼び，まずの目標を達成した感がある。感謝である。

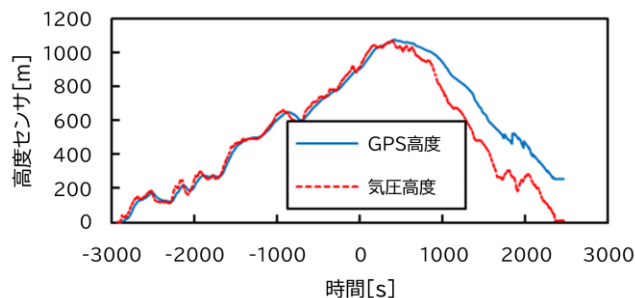


図 10 1,000m 達成高度履歴



図 11 1,000m 高度達成時カイトと当時開発メンバー

4.3 滞空性空中プラットフォームの目指す性能向上

ある程度の風況に恵まれれば 1,000m ほどは容易に揚がるカイト設計製作技術を持つという“まずのステップ”を成し遂げたところで次の舵を本来の方向に戻した。目指すは“日本中の如何なる時(地域・風況・天候など)でも空中に在り続けてその機能を発揮する”ということで，日本の国土の約 2/3 を占める山岳部にて特に冬場の荒れた強風のなかでも長時間飛び続ける性能を目指した⁽¹⁵⁾。福島県庁関係者の方々の多大なご支援を受け，飛行試験場を福島県山岳地(図 12 はその一例)および各地強風地を“評価道場”とした。今回もわかり易く具体的なマイルストーンとして，“この強風の中を 24 時間連続で飛び続ける”とした。

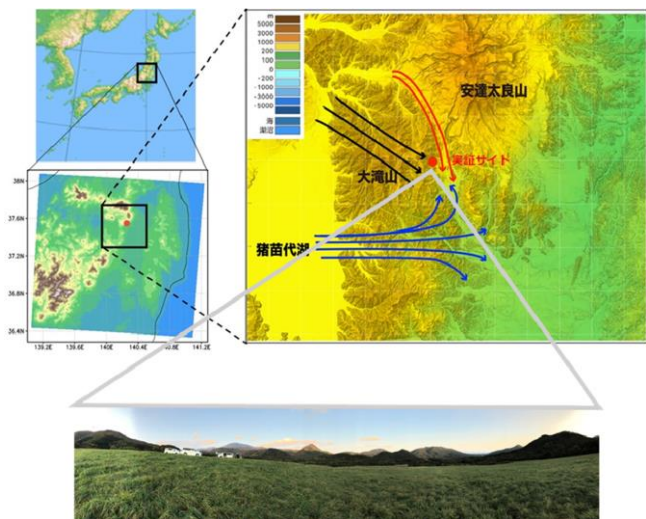


図 12 福島県郡山市熱海町石筵の牧草地

この“評価道場”の風速・風向は地形の影響もあり目まぐるしく変わるが、風速で上空 100m 以上は風状態から数分で 30m/s 以上になるような非常に厳しい環境であった。雪も降る。勿論国土交通省航空局に夜間飛行の承認を得て挑戦を始めた。図 13、図 14 に厳しい試験作業状況を示す。改めて開発メンバーの情熱に感謝である。



図 13 上空降雪時のカイト作業



図 14 夜間カイト作業

2020 年後半から 2022 年後半までは、長時間飛行の挑戦のたびに数時間経過すると一撃の突風によって安定性を崩し、スパイラルダイブで姿勢回復せず地面落下するモードにて打ち負かされてきた。時にはカイト構造自体も衝撃で破れたりした。ただ打ち負かされる度に、カイト構造強度を見直し改良しカイト剛性も上げて臨んだが、最初の頃は風速 15m/s で墜落、その後 20m/s で墜落。図 7 で示したスポイラー方式の空力舵制御を導入して、2022 年後半では 30m/s でも安定性を崩さないというところまで来た。空力舵による空力運動制御が必須なことに気づいたのは同じく図 7 で示したようにカイトが突風衝撃で変形した時、左右バランスを崩してスパイラルダイブが発生することをダイナミクスモデルにて確認できたからである(図 15-1, 図 15-2)。

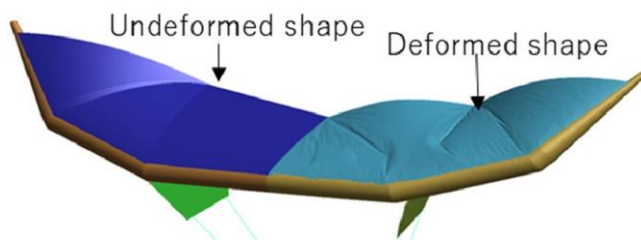


図 15-1 カイト変形模擬(CAE)

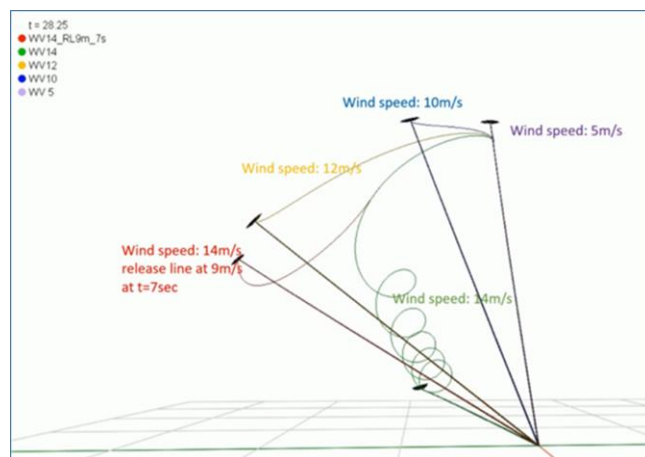


図 15-2 ダイナミクスモデルによる再現

また、カイト構造自体もより強風での変形度を小さく、かつカイト変形時に空力特性がより姿勢安定側になるよう外乱に対してロバスト側に変形する構造設計の改善を進め、図 16 に示すように現在は第 11 世代にまで至っている。

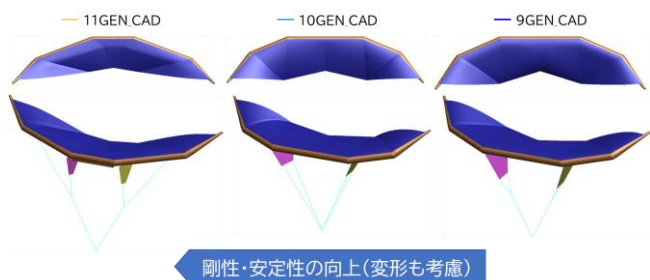


図 16 カイト構造進化

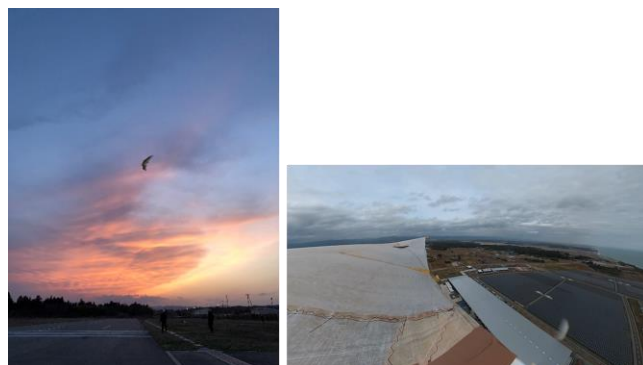


図 18 カイト飛行状態(左)と搭載カメラ映像(右)

5. 最近の開発状況

5.1 空力運動制御技術の進化と長時間連続飛行による実証

最近では滞空性空中プラットフォーム化に必要な重要開発技術である空力運動制御開発に集中している⁽¹⁵⁾。詳細は現時点では語れないが、図 17 に示すようにカイトに位置、姿勢変化(6 軸)を検出するセンサを実装し、ある閾値を超えると自律制御を指示するコンピュータも実装してスポイラー等の空力舵に制御指示を出させる仕組みである。つまり前述の突風衝撃時の変形によるアンバランスを空力舵で補償するとともに、風況等の変化に対してカイト姿勢変化を小さくすることができ、今のわかり易い性能目標である空中に“ピタっと固定”を目指して日々開発しながら進化している。勿論、地上からも通信にて実装センサや指示値をモニタリングすることもでき、制御に強制介入することもできる。



図 19 現行カイトとメンバー

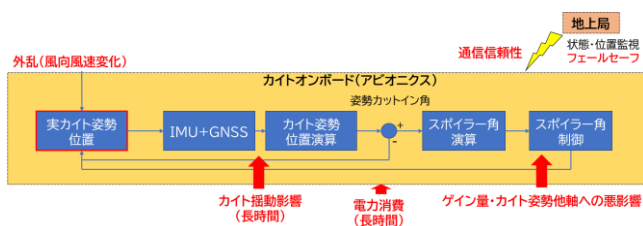


図 17 カイト姿勢制御構成簡略図

長時間連続飛行には制御や通信系の電力消費を徹底的に抑える改良を行い、まずの長時間確認はバッテリー容量から 6 時間連続とし、2023 年 3 月に福島ロボットテストフィールド浪江滑走路にて(冬型気圧配置が早く終わってしまったため、気圧配置的に強い南風が期待される試験地を選択)非常に荒れた風況のなか、無事 6 時間連続滞空飛行を達成した(図 18, 図 19)。

5.2 オンボード発電デバイスの開発とバイオメタリックス観点からの空力運動制御のさらなる進化

現在は 2024 年 2 月に 24 時間連続滞空挑戦をふくしまスカイパークにて計画している。制御系や夜間飛行での航空障害灯といった長時間の電力消費要件に対し、カイトへのオンボード小型風力発電デバイスを試作(図 20)し実際に飛行試験で電力マネージメントができることを確認した。電力マネージメント機能を得たことにより、カイト空力運動制御技術をより進化させる余地ができた。3 年ほど前からトヨタ自動車の米国の先端研究拠点 Toyota Research Institute of North America (TRINA) と Princeton 大学との共同研究で、猛禽類の飛行速度や姿勢の変化幅の大きい飛行ダイナミクス制御⁽¹⁷⁾をカイトに活かそうという研究⁽¹⁸⁾をしており、その羽の空力舵的要素をカイトに取り入れることによって(図 21)、さらに高い姿勢制御能力を得ることができた。TRINA とともにこの能力にて 8 の字旋回することでカイト高空風力発電実証にも成功している⁽¹⁹⁾(図 22)。

このように“マザーシップ”は、世の中の“尖った”研究要素や日頃目立たない小規模の企業が持っている“尖った”強い技術を取り入れ活用実践しその価値を顕在化するというように、技術研究開発のプラットフォームであることも目指している。

時折、瞬間風速 30m/s のような空中に 24 時間やり続けるという、“マザーシップ”プロジェクトのなかのキイトプロジェクトにて約 5 年が経過したが、次へのフェーズアップが臨めるもう少しのところまで技術開発が進んできた。



図 20 オンボード小型風力発電デバイス



図 21 新導入空力舵(猛禽類コバート翼模擬)⁽¹⁸⁾



図 22 カイト高空風力発電実証

6. これから

さらなる高高度化、強風下での長時間滞空に向けて、現状の外国産高性能基材に対して数倍軽くて強い膜体インフレータブル構造用基材を日本の繊維メーカーと協業で開発している。こちらも元々繊維産業大国であった日本の企業がそれぞれ持っている“尖った”強い技術を組み合わせ、その実力、価値を顕在化させた一例である⁽¹⁴⁾。

今後は勿論、“マザーシップ”ビジョンを目指してどんどん高度を上げ、カイトサイズも大きくしていく開発方向性ととも、今のカイト性能プラスアルファで世の中に貢献できる空中プラットフォームとして活用していく方向性の両にらみで検討している。前者では航空宇宙工学の研究による諸技術や、特に“マザーシップ”が活用機能を発揮するフェーズではその各々の活用機能の専門家、研究者、技術者、組織、団体、企業と協業に向けて手を組んで進めないと、物理の壁は無くても技術の壁を越えることができない。

後者ではこのカイト特有の、厳しい風況のなかでも長期に渡って狙った空中領域に滞空できる能力や、“スカイフック”にて重いペイロードを持ち上げることができる能力(それらも自然エネルギーの風力から得ている)によって、特にドローンや他の飛行体が成しえない性能・機能を活かすことで多くの活路がみえてくる。そのまずの一步として私は既に気象研究分野にて、カイト特有のある空間領域に居続ける機能を使い、地上もしくは海上からその空間領域までの気象パラメータを垂直方向に実測できることを活かして予測計算の精度向上に役立てたり、“スカイフック”を用いて水蒸気の流れを変えたり防ぐことで局所的な豪雨を減らし防災減災に繋げたり⁽²⁰⁾というような話を関係者と進めている。勿論、他にも色々な活用の潜在力があるので、多くの分野の方々とのインタラクションに大変興味を持っている。

7. まとめ

将来の社会課題に対する解として“マザーシップ”ビジョンを策定、プロジェクトを企画しスモールスタートで 5 年が経過、開発メンバーや関係者、応援していただける

仲間により良い技術ができてきて、次のフェーズアップを検討する時期にきた。引き続き開発に精進し、まずは新たなイノベーション“土俵”(プラットフォーム)として確立し、日本が元気になっていく一助になることを願う。

■参考文献

- (1) 板倉英二: 将来の日本の危機を救う!“マザーシップ”プロジェクト, 風力エネルギー, Vol.44, No.2, 2020, p.222-225.
- (2) Benjamin K. Sovacool ら: Competing Dimensions of Energy Security: An International Perspective, Annual Review of Environment and Resources, Vol.35:77-108, 2010
- (3) John Houghton: Global warming. Reports on Progress in Physics, Vol 68, No.6, 2005
- (4) 近藤誠: 少子高齢化が日本経済に与える影響, 経済科学研究所記要, 2013
- (5) 戸所隆: 東京の一極集中問題と首都機能の分散, 地学雑誌, 2014
- (6) 司馬遼太郎: この国のかたち 1, 文春文庫, 1993
- (7) NOAA/ESRL Physical Sciences Division, Boulder Colorado
- (8) 田中博: 偏西風の気象学, 成山堂, 2007, p.174
- (9) Eiji Itakura: Save from Future Japan Social Crises! ‘Mothership’ Project. 8th Airborne Wind Energy Conference (AWEC 2019), 2019
- (10) Eiji Itakura: Save Japan from a Future Social Crisis! “Mothership” Project Current Development Progress. 9th Airborne Wind Energy Conference (AWEC 2021), 2022
- (11) 加藤進: MU レーダー, 電子情報通信学会 通信ソサイエティマガジン, Vol.9, No.4, 2016, p.236-242.
- (12) 豊嶋守生: 低軌道衛星と地上局間における光通信の実施頻度に関する検討, 電子情報通信学会論文誌 B, Vol.J94-B, No.3, 2011, pp.402-408.
- (13) Qing ZHANG ら: Aerodynamic Exploration of Corrugated Airfoil Based on NACA0030 for Inflatable Wing Structure. MDPI Aerospace, 2023
- (14) TOYOTA 未来につながる研究 新エネルギー源を目指す「マザーシッププロジェクト」
https://www.toyota.co.jp/jpn/tech/partner_robot/news/202201_01.html
- (15) TOYOTA 未来につながる研究 滞空性プラットフォーム「マザーシッププロジェクト」第 2 弾
<https://global.toyota.jp/mobility/frontier-research/39934347.html>
- (16) 板倉英二: 日本の将来社会課題を救う! 滞空性空中プラットフォーム“マザーシップ”(高性能カイトシステム)プロジェクトの企画と開発, 第 61 回飛行機シンポジウム, 日本航空宇宙学会, 2023
- (17) Chengfang Duan ら: Covert-inspired flaps for lift enhancement and stall mitigation. Bioinspiration & Biomimetics, Vol.16, No.4, 2021
- (18) Diaa A Zekry ら: Covert-inspired flaps: an experimental study to understand the interactions between upperwing and underwing covert feathers. Bioinspiration & Biomimetics, Vol.18, No.4, 2023
- (19) Eiji Itakura ら: High Altitude Aerial Platform” Mothership” Project Vision and Progress, AIAA SCITECH 2024 Forum, AIAA 2024-2094, 2024
- (20) ムーンショットプログラム目標 8 公開シンポジウム 2050 年の極端風水害の低減に向けて, 科学技術振興機構, 2023
<https://www.jst.go.jp/moonshot/sympo/20231029/index.html>

■ 著者



板倉 英二

モビリティの進化とIoT化に貢献する 金属ナノ粒子の開発

村井 盾哉 *1

久保山 大貴 *1

要旨

Society5.0スマート社会の到来で、さまざまな社会課題の解決が期待されており、トヨタにおいてもさまざまな取り組みを、クルマを軸に行っている。上述社会を実現するための基盤技術に、ナノ粒子を印刷するプリンテッドエレクトロニクスがある。我々はこれまで自動車材料開発で培ったアセットを活かし、プリンテッドエレクトロニクスを実現する低温焼結可能なナノ粒子を開発したため、本稿でその概要を解説する。自動車用途のみに限らず、世の中に広く普及させることで、Society5.0の社会システムによる社会課題解決、それに付随したあらゆる産業の発展、幸せの量産に貢献することを目指す。

キーワード プリンテッドエレクトロニクス, ナノ粒子, IoT, スマート社会, 小型軽量で安価なセンサーシステム, 低温焼結, カーボンニュートラル, ネットゼロ, ライフサイクルCO₂ゼロ, Society5.0

1. はじめに

近年、IT (Information Technology) や ICT (Information and Communication Technology) の進展により、大量のデータを集め活用することが新たなサービスや産業を生み出しており、Society4.0といわれている。さらにその先には、ITだけでなくモノのデータをフィジカル空間から収集 (Internet of Things:IoT) し、サイバー空間にてビッグデータ解析することで、フィジカル空間にその価値を提供するという新たな社会「Society5.0」が到来するといわれている⁽¹⁾。

トヨタは、モビリティコンセプトのもと「カーボンニュートラル」の実現と「移動の価値」創出に取り組んでいる。

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ると考えられており、トヨタとしては社会インフラとしてのクルマの新しい価値の提供や人々の暮らしを支えるさまざまなサービスの提供等、「未来のモビリティ社会」の実現を目指しており⁽²⁾(図1)、前述のSociety5.0といわれる超スマート社会の実現には欠かせないものとしてクルマ、モビリテ

ィを軸としたさまざまな取り組みを行っている。



図1 新たな体験価値, 感動を提供する
モビリティネットワークのイメージ

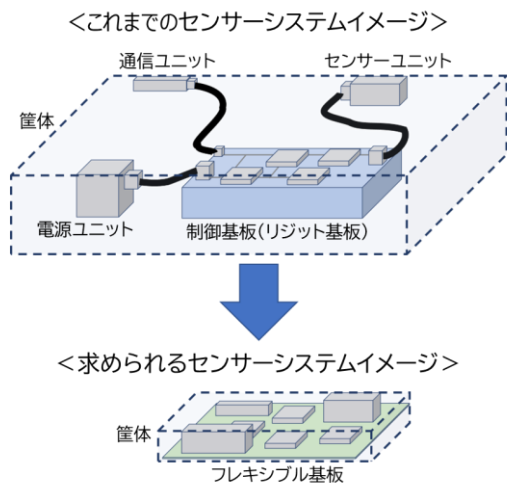
【出典元】トヨタ企業 HP トヨタのクルマづくりへのこだわりと未来への挑戦—ソフトウェアとコネクティッドの取り組み—, 2021, p11 https://global.toyota/pages/news/images/2021/08/25/1330/20210825_01_01.jp_2.pdf

Society5.0の超スマート社会を実現するためには、多くのリアルな情報を取り込む膨大なセンサーネットワークが不可欠となる。エネルギー、ヘルスケア、医療、ロボット、UI(ユーザーインターフェース)、自動運転、スマート工場、スマート農業など多岐にわたる分野で、非常に多種多様でかつ多くのセンサーシステムが必要となってくる⁽³⁾。過去に Janusz Bryzek 氏により提唱された「Trillion Sensors Universe」によると、センサーは

*1 先進技術開発カンパニー 電動化・環境材料技術部

2030 年代に 10 兆個/年以上の数量が使用されると予想されている⁽⁴⁾。

このような動向を受け、これまで取得していなかったあらゆるデータを取得するために、センサー自体の高性能化に向けた各国の取り組みが加速している⁽¹⁾⁽⁵⁾。加えて、膨大な量のデータを収集するために大量のセンサーをあらゆるモノに設置しなければならなくなると、センサー自体の高性能化だけでなく、センサーおよびセンサー間や通信デバイス、電源との間をつなぐ配線のとりまわしが煩雑になり、それによりセンサーシステム全体が大型化したり、見栄えが悪くなったりすることで、センシングしたい場所への設置が制限される等のさまざまな課題が出てくる。そのため、センサー自体が小型軽量であることはもちろん、通信や電源含めたセンサーシステムが小型軽量であることが求められる(図 2)。また、それだけの膨大な数のセンサーシステムを設置するためには、それ自体が非常に安価であることも市場に強く求められることになる。このように、膨大なセンサーネットワークを実現するためには、高性能で設置場所の自由度の高い、小型軽量かつ安価なセンサーシステムが必要となる。



小型軽量:センサー、通信、電源、制御が全て一つの薄型プラスチック基板上に集約
フレキシブル:柔軟な基材のため、非センシング物が曲面でも追従可能

図 2 求められるセンサーシステムのイメージ

2. プリントドエレクトロニクス

このような高性能かつ安価なセンサーシステムを実現する有望な技術の一つとして、プリントドエレクトロニクスがあげられる。

プリントドエレクトロニクスとは、金属ナノ粒子ペーストをプリンターで印刷することで回路形成する技術である(図 3)。従来の回路形成手法と比較すると、工程が大幅に短縮されるため、非常に低コストで回路基板の製造が可能となる。その上、エッチングなどの化学的な処理が不要なため、工程中での CO₂ 排出量低減や廃液レスなど、環境にも優しい手法といえる。この手法の他のメリットは、印刷したナノ粒子を低温で焼結するプロセスのため、基材に低耐熱かつ薄型柔軟で伸縮可能なプラスチックフィルムを選択可能な点にあり、従来の硬くて重い回路基板から脱却し、柔軟で軽い回路基板にすることもできる。つまり、プリントドエレクトロニクスで形成した回路基板をセンサーシステムに適用することで、安価かつ小型軽量でフレキシブルなセンサーシステムを実現できる。

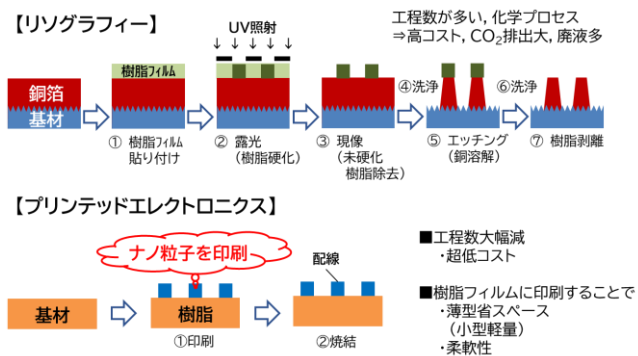


図 3 従来の回路形成手法(リソグラフィー)とプリントドエレクトロニクスの比較

プリントドエレクトロニクスは、前述のとおり非常に優位性のある技術だが、その実現のキーとなる技術がナノ粒子である(詳細は 3 章, 4 章参照)。トヨタは、これまでの歴史においてさまざまな時代の社会課題の解決を実現するべく、さまざまな技術の開発・進化を行ってきた。そのなかの代表的な技術に、自動車排気ガス浄化触媒があげられる。1970 年代、世界的な大気汚染の問題を受け、自動車排気ガス排出規制が各国で策定された。その排出許容限度目標は年々厳しくなっており⁽⁶⁾(図 4)、トヨタでは長年その目標の達成に向け全社をあげて取り組んできた⁽⁷⁾。排気ガス浄化触媒とは、エンジンから排出される炭化水素(HC)、一酸化炭素(CO)、窒素酸化物(NO_x)を触媒反応により酸化させることで無害化する

機能を有した白金, パラジウム, ロジウムなどを主成分とする貴金属ナノ粒子であり, これまでトヨタでは長年にわたりこのナノ粒子の技術について, 開発および知見の蓄積を行ってきた⁽⁷⁾(図5)。

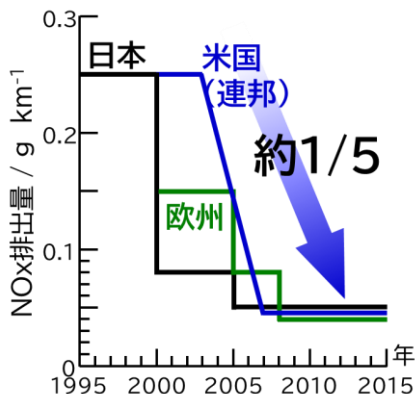


図4 ガソリン乗用車の規制

【出典元】白川翔吾ほか:排ガス浄化用 Au-Rh バイメタリッククラスター担持触媒の研究, 第116回触媒討論会 3G04, 2015, p3

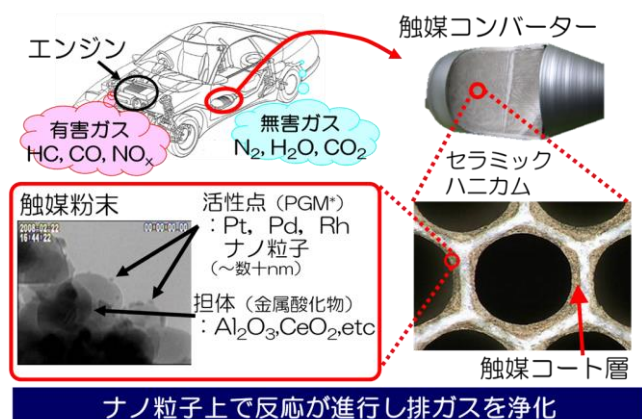


図5 自動車排気ガス浄化触媒の概要

【出典元】白川翔吾ほか:排ガス浄化用 Au-Rh バイメタリッククラスター担持触媒の研究, 第116回触媒討論会 3G04, 2015, p2 を基に作成

ナノ粒子とは, サイズが nm オーダー (1/1,000,000mm)まで小さい材料のことで, 前述の触媒機能以外にもさまざまな機能を発現することが知られている。我々はプリントドエレクトロニクスの技術に着目し, これまで自動車材料開発で培ったナノ粒子の技術で, 上記 Society5.0 の社会の実現に貢献していきたいと考えている。

3. プリントドエレクトロニクスの課題

これまで, プリントドエレクトロニクスの実現を目指し, 世の中ではさまざまな取り組みがされてきた。課題として, 従来の回路形成方法で作製したものよりも品質に劣る点がある。

ナノ粒子ペーストを印刷して焼結するプロセスで作るため, 密度があがらず電気抵抗が高くなることや, 回路の配線形状がペーストの滲みなどでばらつくことなどがあげられる(図6)。なかでも電気抵抗の面では, 抵抗を下げるために高温で焼結しなければならないケースがあり, 殆どのデバイスで周辺部材の耐熱温度を超えるために, 適用製品の幅が限定的になっている。この課題の源流は, ナノ粒子そのものの課題により発生しており 4章で解説する。

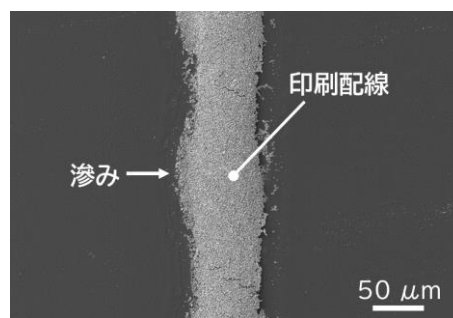


図6 低密度かつ滲みのある印刷配線のSEM(走査型電子顕微鏡)像

4. ナノ粒子の課題

印刷配線の焼結温度が高いという課題に, ナノ粒子が大きく関わっている。一般にナノ粒子の粒子径と融点には相関がある(図7)。さらに, 融点と焼結温度には密接な関係があり, ナノ粒子の粒子径が小さいほど焼結温度が低下する傾向がある。サイズが小さくなると, 比表面積が飛躍的に大きくなるためである。つまり, 低温焼結を達成するにはナノ粒子の粒子径を制御する必要がある。しかしながら, 製造上の問題で全てのナノ粒子の粒子径を均一にそろえることが難しいという課題がある。

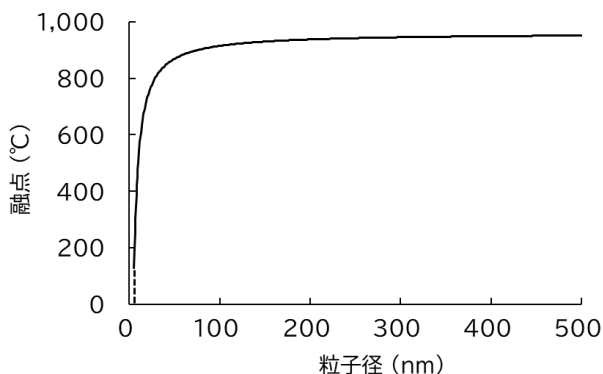


図7 金属(銀)ナノ粒子の粒子径と融点の関係

一般的にナノ粒子を作製する際、ナノ粒子の原料を還元剤で還元する化学還元法が用いられる。この化学反応を大きな容器のなかで加熱することで行うため、内部で温度ムラが発生する。その温度のムラにより、ナノ粒子の粒子径にばらつきが発生する(図8)。

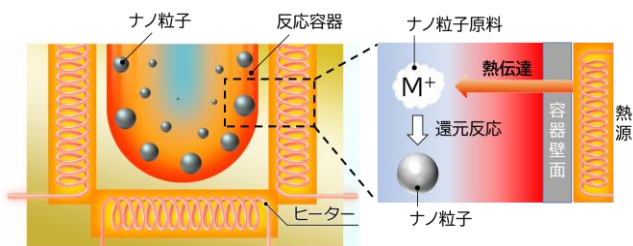


図8 一般的な化学還元法でのナノ粒子合成

前述のとおり、ナノ粒子の粒子径と焼結温度には関係があり、大きな粒子径のナノ粒子が混入すると、焼結温度が高くなってしまうことになる。そこで一般に、この課題を解決する(粒子径ばらつきを抑える)ために、多くの場合粒成長を抑制する有機系の表面保護剤が使われる。つまり、ナノ粒子の表面には多量の有機物が存在することになる(図9)。一般的にこの有機物は分子量が大きい高分子の有機化合物であり、200°C以上の高温で加熱しないと揮発しない特徴があるため、結果的にナノ粒子の低温焼結を阻害することになる(図10)。

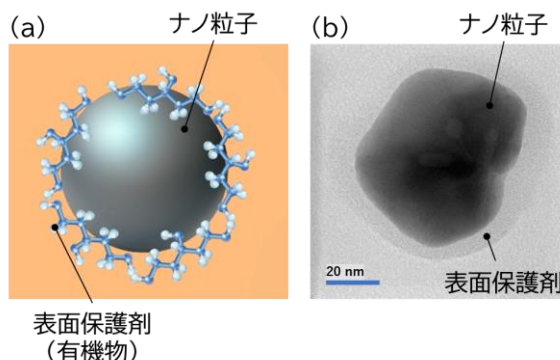


図9 表面保護剤によって成長抑制されたナノ粒子 (a)イメージ図 (b)TEM(透過型電子顕微鏡)画像

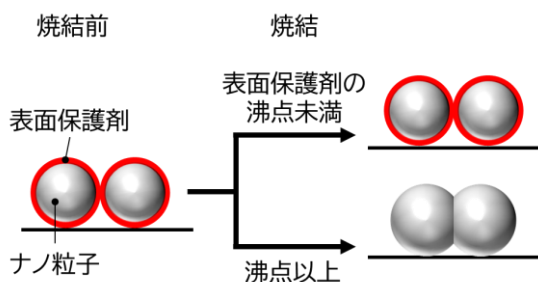


図10 表面保護剤が吸着したナノ粒子の焼結イメージ

5. 開発技術

低温焼結するナノ粒子を得るために、マイクロ波合成技術を開発した。マイクロ波合成とは、一般家庭に普及している調理用電子レンジと同じ方式で、還元剤を含むナノ粒子原料溶液を急速に加熱する技術である。マイクロ波は電荷の偏りに相互作用して、物質を直接内部から加熱する特徴を持つため、高密度のエネルギーを反応容器内の溶液に直接照射することで、極めて短時間で均一に溶液温度を上昇できる。

ナノ粒子合成プロセスは、金属イオン、還元剤、溶媒、表面保護剤を混合し反応させる。この4つの化学種と加熱条件を含めた5つのパラメータで粒子径は変化し、特に、核生成数(金属イオンの還元速度)と生成核の均一な粒成長の制御がポイントである。マイクロ波加熱では、これらの化学種が直接加熱されるため、反応容器内全体でムラなく瞬時に大量の粒子核が生成し、生成核の粒成長が同時に開始され、粒子径のそろった小粒子径のナノ粒子が合成される。一方、図11に示すような密閉反応容器を使用するバッチ式装置の場合、粒子の生産量は容器サ

イズに依存し十分に確保できない。そこで、反応管内に原料を流通させ、原料流体に均一にマイクロ波を照射ができる工業向け連続式合成装置を開発した(図 12)。反応管内を流通する原料に均一にマイクロ波を照射するため、独自の反応炉や反応管の形状および材質を採用していることに加え、マイクロ波制御機構を最適化している(図 13)。また、粒子の品質と生産性を両立するため、効率よくマイクロ波のエネルギーを利用できるナノ粒子原料の組成を設計し、単位体積あたりのマイクロ波照射量を極めて高くすることで、合成反応が極めて短時間(<1s)に完了する。さらに、瞬時に大量の粒子核が生成するため、小粒子径の粒子が合成される(図 14)。従来、連続式を採用することで発生していた反応管内壁への反応物付着による収率低下の課題については、反応管の材質と内壁の表面状態等を工夫することで解決している。これらにより、現在極めて小規模かつコンパクトな装置で、1 ラインあたり数十 kg/月のナノ粒子を製造することができるようになっている。生産量は、ライン数を増やすことで簡単に増加させることが可能で、ラインごとに仕様を変更することで少量多品種生産も可能となる。

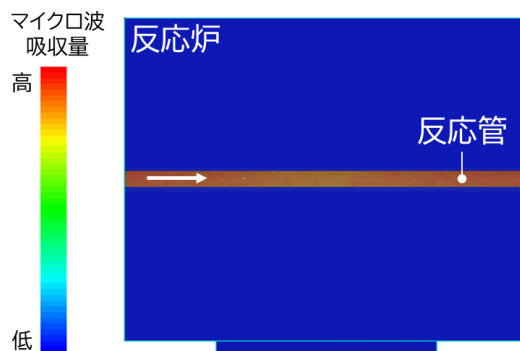


図 13 反応炉内のマイクロ波吸収量シミュレーション

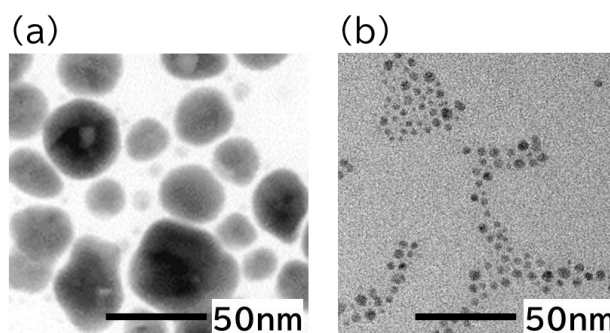


図 14 合成した銀ナノ粒子の TEM 画像
(a)一般的な化学還元法 (b)マイクロ波合成

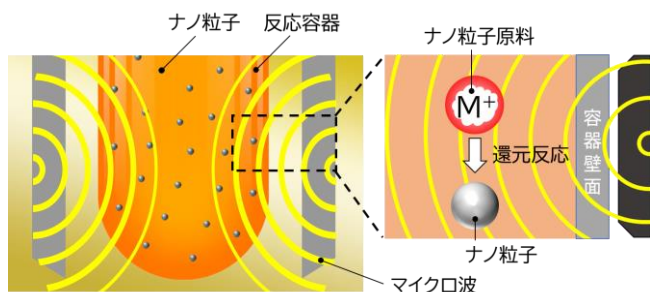


図 11 マイクロ波によるナノ粒子合成

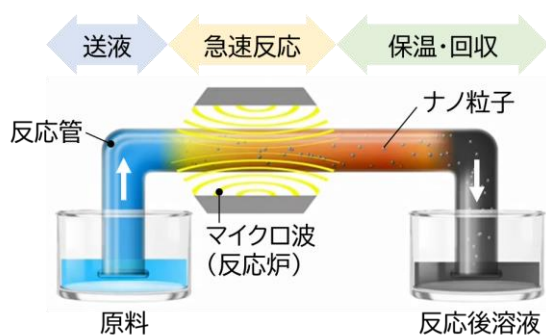


図 12 連続式マイクロ波合成装置の概念図

加えて、本装置を使用したマイクロ波合成の反応過程は、核生成反応が律速であり、表面保護剤による粒成長制御を必要としない。そのため、表面保護剤はナノ粒子の分散安定化に必要な最低量を添加すればよく、ナノ粒子に吸着する有機物量を極めて少なくすることができる(図 15)。

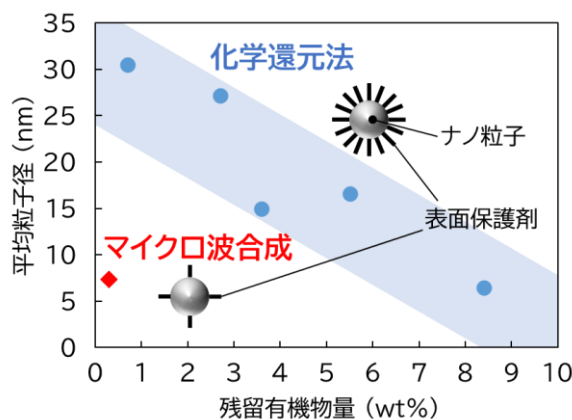


図 15 各方式にて合成した銀ナノ粒子の
残留有機物量と粒子径の関係

マイクロ波合成した銀ナノ粒子で高濃度化ペーストを試作し、樹脂基板上に薄膜を印刷したところ、優れた低温焼結特性を発現した。図 16 に各焼結温度での電気抵抗率を示す。焼結後の有機物量が多い一般的な化学還元法のナノ粒子と比較して、マイクロ波合成したナノ粒子は低い電気抵抗率を示した。大半の樹脂材料の耐熱温度以下である 80℃で焼結した場合でも、数 $\mu\Omega\text{cm}$ まで電気抵抗率が低下した。これは、小粒径粒子かつ絶縁物質である有機物を限りなく少なくした効果である。

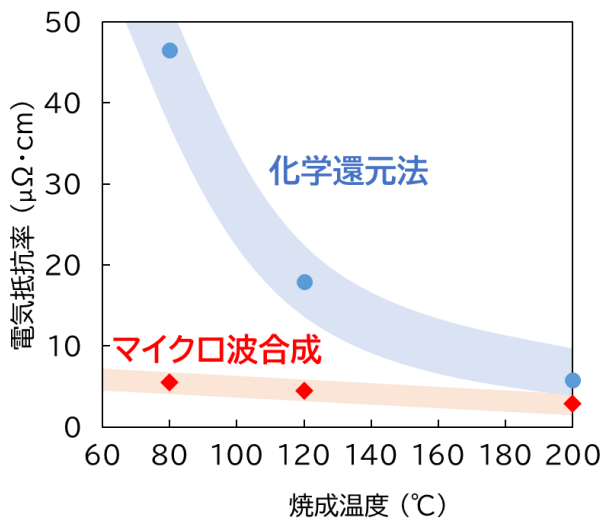


図 16 銀ナノ粒子の各焼結温度での電気抵抗率

さらに、上述ペーストを用いて耐熱温度が低いポリカーボネートのプラスチックフィルム上へ配線パターン印刷を試みた(図 17)。印刷後、配線を 80℃で焼結したところ、導電性を示し回路として動作した。この材料と印刷技術を応用して、より複雑な回路パターンを印刷した樹脂基板をセンサーシステムに適用することで、システムの低コスト化や小型軽量化に貢献できる。

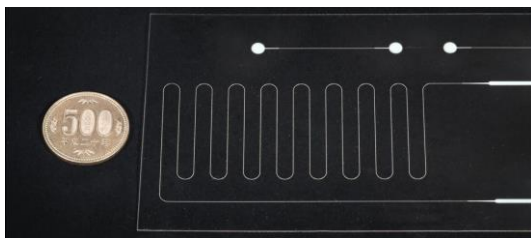


図 17 配線パターン印刷サンプル

6. おわりに

我々はこれまで自動車材料開発で培ったアセットを活かし、プリントエレクトロニクスを実現する低温焼結可能なナノ粒子を開発した。開発したナノ粒子は、自動車用途のみに限らず、世の中に広く普及させることで、Society5.0 の社会システムによる社会課題解決、それに付随したあらゆる産業の発展、幸せの量産に貢献することを目指す。

最後に、昨今の世の中の情勢からカーボンニュートラルの重要性が益々高まるなか、各国が 2030 年、2050 年のネットゼロ目標を掲げ取り組んでいる⁽⁸⁾。その流れのなかで、2030 年には各企業のライフサイクル CO₂ 排出量のうち Scope3 にあたる購入部品の CO₂ 排出量低減検討、つまりネットゼロ調達(CO₂ 排出量が少ない工法で製造された部品を調達すること)が本格化するといわれている。プリントエレクトロニクスは、従来の電子部品製造工程に比べて飛躍的に工程数が削減されることから、CO₂ 排出量も大幅に削減が可能な技術であり、期待される CO₂ 削減効果は数百万 t/年規模と試算されている⁽⁹⁾。我々は、プリントエレクトロニクスの実現普及で、トヨタが目指すライフサイクル CO₂ ゼロの実現にも貢献していきたいと考えており、今後さらなる開発による技術進化と仲間づくりを行っていく。

■参考文献

- (1) 岸本喜久雄ほか:TSC Foresight Vol.102, 2021
- (2) トヨタ企業HP, トヨタのクルマづくりへのこだわりと未来への挑戦—ソフトウェアとコネクティッドの取り組み—, 2021, https://global.toyota/pages/news/images/2021/08/25/1330/20210825_01_01_jp_2.pdf
- (3) 小林彬:一般社団法人次世代センサ協議会30周年記念 センシング技術の普及とこれからの社会, 2018
- (4) Janusz Bryzek:”TSensors for Abundance, Internet of Everything and Exponential Organizations”, Tsensors Summit Munich, 2014

- (5) 寺崎正:トリリオンセンシング～IoT時代の官能検査
に向けて～, エレクトロニクス学会誌 Vol.19
No.7, 2016 p.485-491
- (6) 白川翔吾ほか:排ガス浄化用Au-Rhバイメタリック
クラスター担持触媒の研究, 第116回触媒討論会
3G04, 2015
- (7) トヨタ企業HP, トヨタ自動車75年史 もっといい
クルマをつくろうよ 第2部自動車事業の基盤確立
第2章社会的要請への対応 第3節排出ガス規制へ
の対応,
[https://www.toyota.co.jp/jpn/company/
history/75years/text/entering the auto
motive business/chapter2/section3/ite
m1.html](https://www.toyota.co.jp/jpn/company/history/75years/text/entering_the_automotive_business/chapter2/section3/item1.html)
- (8) 外務省HP,
[https://www.mofa.go.jp/mofaj/ic/ch/pa
ge1w_000121.html](https://www.mofa.go.jp/mofaj/ic/ch/page1w_000121.html)
外務省, パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦
略, 2021,
[https://www.mofa.go.jp/mofaj/files/10
0285601.pdf](https://www.mofa.go.jp/mofaj/files/100285601.pdf)
- (9) 「次世代プリントエレクトロニクス材料・プロセス
基板技術開発」事後評価報告書, 2020,
[https://www.nedo.go.jp/content/10092
2598.pdf](https://www.nedo.go.jp/content/100922598.pdf)

■著者



村井 盾哉



久保山 大貴

第 73 回自動車技術会賞 技術開発賞

バイポーラ型ニッケル水素電池

奥村 素宜 *1 海谷 裕之 *1 森岡 怜史 *1 寺島 大樹 *2 奥田 元章 *3

1. はじめに

トヨタは、カーボンニュートラルの実現やクルマをつうじた「幸せの量産」を目指して、もっといいクルマづくりに取り組んでいる。今回、電動車らしい軽快で上質な走り、高い環境性能の両立のため、革新的な電池技術として高出力な「バイポーラ型ニッケル水素電池」を開発した(バイポーラ型ニッケル水素電池は株式会社豊田自動織機との共同開発)。

2. 技術概要

ニッケル水素電池をベースに集電体の片面に正極、もう一方の面に負極を塗った「バイポーラ電極(Bipolar: 双極)」を複数枚積層させたバイポーラ構造を採用。特徴としてはセル間を接続する端子、活物質の集電体、セルの外層ケースをバイポーラ電極の集電体に機能統合することで、集電体通電面積が広くシンプルな構造を実現した(図 1)。

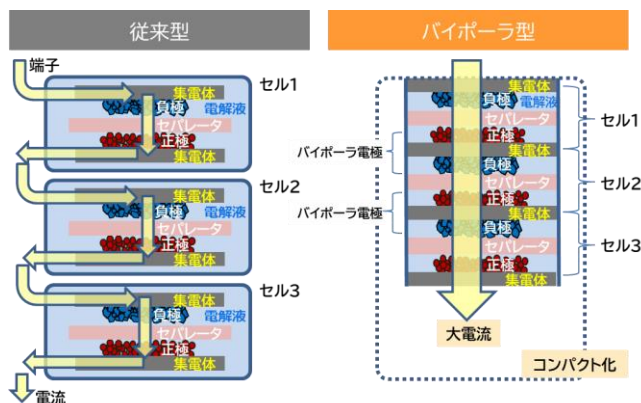


図 1 バイポーラ構造の特徴

2.1 バイポーラ型ニッケル水素電池を支える主要技術

今回、バイポーラ型ニッケル水素電池を開発するにあたり、従来型のニッケル水素電池から、構造、および電極材料を一新、新規開発を行った。バイポーラ型ニッケル水素電池を支える主要技術として、新開発した低抵抗正極と高機能性集電箔を紹介する(図 2)。

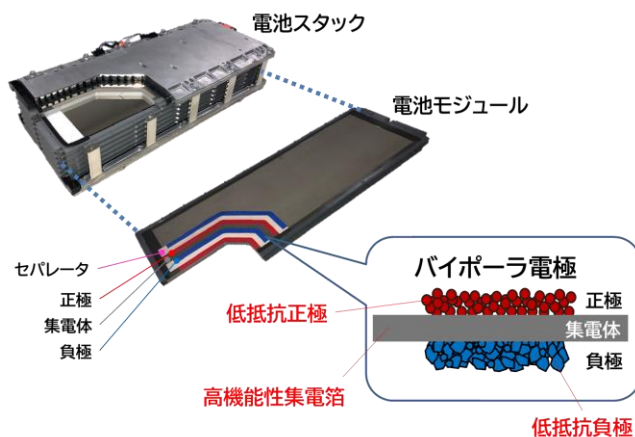


図 2 バイポーラ型ニッケル水素電池で採用した主要技術

① 低抵抗正極

正極活物質である水酸化ニッケル($\text{Ni}(\text{OH})_2$)の導電性向上技術を採用。具体的には正極の導電剤であるコバルト(Co)材を表面にコート、コートした Co 材をさらに表面処理することで導電性を高め、粉体抵抗を大幅に低減することに成功した。この正極材料の開発により、従来技術の 3 次元網目構造を持つ発泡ニッケル基板に対し、2 次元構造となる箔塗工における抵抗上昇を抑制し、低抵抗化を達成することができた(図 3)。

*1 CN開発センター 先行電池開発部

*2 パワートレーンカンパニー 電動パワトレ開発統括部

*3 株式会社 豊田自動織機

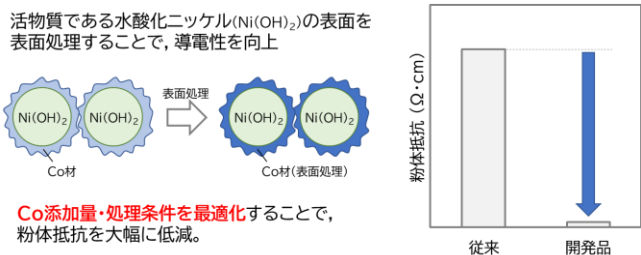


図3 正極活物質の概要

② 高性能集電体

バイポーラ構造を成立させるための集電体への機能として、従来の活物質からの電気を導く機能に加え、セル間をセパレートする、およびセルの外層の機能を持たせることが必要になった。このセルをセパレートする機能に欠陥が生じると、セル間で電気が導通してしまうといった課題が発生する。そこで新たに表面粗化処理を採用した集電体の開発に取り組んだ。基材の表面に微細な凹凸を設置、そこにシール樹脂を溶着するといったプロセスを採用することで、密着性、シール性、強度を確保することに成功した(図4)。

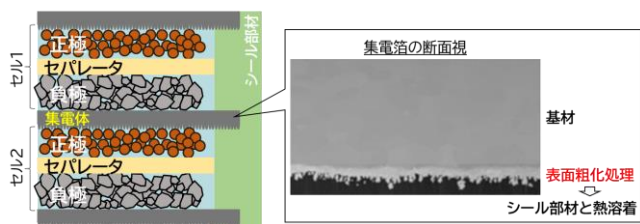


図4 新開発高性能集電体の概要

2.2 車載への適用

コンパクトカーの魅力を失わないよう、後部座席下の限られたスペースに搭載できるような電池スタック構造を新設計。積層構造を持つバイポーラ型ニッケル水素電池の特徴を活かし、通電経路と冷却経路を機能統合した導電性冷却板を開発。複数セルを一つの筐体に収めた電池モジュールと導電性冷却板を交互に積層するシンプルな構造を実現。全体の部品点数や工程数を削減できた(図5)。

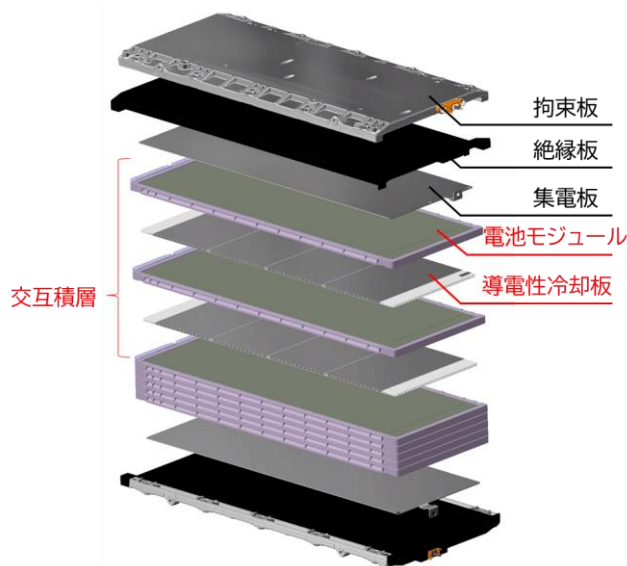


図5 スタック構造(概略図)

3. むすび

従来型ニッケル水素電池に比べ、2021年発売のアクアではバッテリー出力が約2倍^(※1)に向上したほか、アクセル操作への応答性が向上し、低速からリニアでスムーズな加速が可能になった。また、電気だけでの走行可能速度域を拡大したことで街中の多くのシーンでエンジンを使わず電気だけでの走行に寄与することができた。

※1 コンパクトカーに搭載の従来型ニッケル水素電池に比べ[セル当り出力約1.5倍]×[コンパクト化により同じスペース内に1.4倍のセルを搭載]した結果、約2倍の高出力を実現

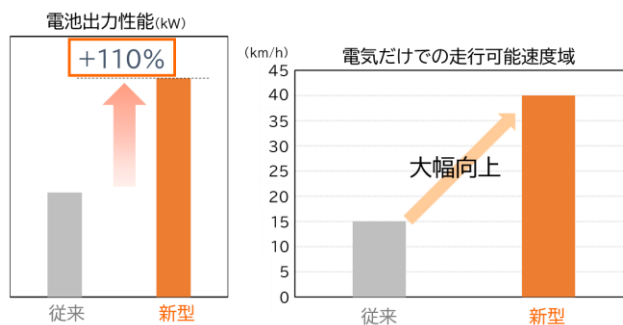


図6 車両での特徴

開発にあたり共同開発を行った株式会社豊田自動織機、また多くの関係会社をはじめとする関係各位のご協力にこの場をお借りして深く謝意を表します。今後も、世界中のお客様に寄り添い、選択肢を狭めることなく「マルチパスウェイ」でお客様の利便性を考慮しつつ、CO₂排出

量を削減する「サステイナブル&プラクティカル」な商品
を世界中のお客様にお届けしカーボンニュートラルを
目指していきます。

■参考文献

- (1) 奥村素宜ほか:バイポーラ型ニッケル水素電池, 自動車技術, Vol.77, No.6, 2023, pp.12-13.

第 73 回自動車技術会賞 技術開発賞

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の開発

田島 尚史 *1

新谷 浩平 *2

尾越 敦貴 *3

北野 翔太 *4

岩田 基史 *2

1. はじめに

車両の動的性能の 1 つに、運転者が意図したとおりに車両が動くかどうかを主観的な観点から評価する性能としてドライバビリティ(以下、ドラビリ)がある。ドラビリとは、ドライバー操作に対し、車両前後 G が意に沿わない G 変動やヘジテーションであり、乗用車、特に高級車等の商品性を左右する重要な要素である。

しかしながら、現状、その性能開発における最終的な良否判定は、開発後半の試作車を使った熟練ドライバーによる評価に頼っており、開発のやり直し工数が多く発生している。

そこで我々は、機械学習を用いて車両ドライバビリティの評価・適合を効率化するシステムが必要ではないかと考え、熟練ドライバーの評価を模擬することで開発を前出しできるのではないかと考えた。

今回、試作車ではなく、実機のパワートレーンと車両モデルを組み合わせた Power-Train Virtual and Real Simulator(以下、PT-VRS)を活用し、さらに最適化技術である Bayesian Active Learning(以下、BAL)を適応することにより、熟練ドライバーと同等の探索結果と適合効果、および車両開発への適用を行ったのでここに報告する。

2. ドラビリ性能の自動スクリーニングシステム

本研究で提案するシステムを Drivability automatic screening and exploration system (DASES)と呼ぶ(図 1)。

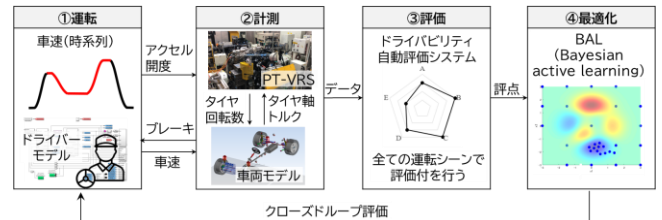


図 1 ドラビリ自動スクリーニングシステム図 (DASES)

DASES はドラビリ性能の最悪条件を探索する機能と、ドラビリ性能目標を満たす実行可能領域を探索する機能の両機能を有する。DASES はクロースドループ評価によって人の作業が不要となる自動化を実現している。以下①から④の 4 つのサブシステムで構成される。

- ① 熟練ドライバーの運転再現: 時間軸の車速指示値を示す車速プロファイルを作成し、ドライバモデルによって車両の駆動力特性を反映しアクセル・ブレーキ操作量を演算する。
- ② 操作に対する車両の反応を再現: 実物のパワートレーンと車両シミュレーションモデルを連成させた PT-VRS を用いた計測を行う。
- ③ ドラビリ現象の分類と評点付け: 操作・車両挙動のデータをリアルタイムに自動評点システムで現象の分類と評点付けを行う。
- ④ 次の運転パターンを提案: 自動評点システムの評価結果に基づいて、BAL により運転パターンの設計空間

*1 トヨタ知能電動車研究開発センター(中国)有限会社

*2 クルマ開発センター 車両デジタル開発部

*3 クルマ開発センター

*4 クルマ開発センター 計測・デジタル基盤改革部

を探索し、次ケースの車速プロファイルや路面勾配、制御定数を提案する。

$$\theta = \operatorname{argmax}_{\theta} \left[-\frac{n}{2} \log(k_0^2) - \frac{1}{2} \log(|\mathbf{R}|) \right] \dots\dots\dots (5)$$

3. Bayesian Active Learning(BAL)による自動探索

本章では、評価条件の絞り込みや制御最適化で用いる BAL について述べる。BAL では、制約 $i \in \{1, 2, \dots, K\}$ ごとに実験やシミュレーションから得られた教師データから、Gaussian Process(GP)の事後分布を用いて、制約条件 $g_i(\mathbf{x}) < 0$ の実行可能領域 $\Pr(C_i(\mathbf{x}))$ を確率分布としてモデル化する。以下ではモデル化方法の詳細について述べる。

はじめに、制約条件の回帰モデルを GP を用いて構築する。 $\mathcal{D} = \{(x_i, y_i)\}_{i=1}^n$ を初期 DOE デザインに基づいて得られた教師データとする。GP を用いると関数 $g: \mathcal{X} \rightarrow \mathbb{R}$ は式(1)のように近似することができる。

$$g \sim \mathcal{GP}(y|m(\mathbf{x}), k(\mathbf{x}, \hat{\mathbf{x}})) \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $m: \mathcal{X} \rightarrow \mathbb{R}$ は平均を表す関数である。簡単のため、教師データの平均値 $m_0 \in \mathbb{R}$ を用いる。 $k: \mathcal{X} \times \mathcal{X} \rightarrow \mathbb{R}$ は \mathcal{X} 上の正定値カーネル関数である。カーネル関数としてガウスカーネルを用いると、 k は任意の $\mathbf{x}, \hat{\mathbf{x}} \in \mathcal{X}$ に対して式(2)のようにかける。

$$k(\mathbf{x}, \hat{\mathbf{x}}) = k_0^2 \mathbf{R}(\mathbf{x}, \hat{\mathbf{x}}) = k_0^2 \exp\{-\sum_{i=1}^d \theta_i (x_i - \hat{x}_i)^2\} \dots\dots (2)$$

ここで、 k_0^2 は偏差を表す。 $\theta \in \mathbb{R}^d$ はモデルの滑らかさをコントロールする正の実ベクトルである。 θ, m_0, k_0^2 は GP のハイパーパラメータである。最尤推定を用いると、 m_0, k_0^2 は陽的に式(3)(4)(5)のように求めることができる。

$$m_0 = \frac{\mathbf{1}_n^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{y}}{\mathbf{1}_n^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{1}_n} \dots\dots\dots (3)$$

$$k_0^2 = \frac{1}{n} (\mathbf{y} - \mathbf{1}_n m_0)^T \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{y} - \mathbf{1}_n m_0) \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 $\mathbf{1}_n$ は要素が 1 の n 次元ベクトルである。平均 $\mu(\mathbf{x})$ と平均 2 乗誤差 $\sigma^2(\mathbf{x})$ は式(6)(7)のようになる。

$$\mu(\mathbf{x}) = m_0 + \mathbf{r}^T(\mathbf{x}) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{r}(\mathbf{x}) (\mathbf{y} - m_0 \mathbf{1}_n) \dots\dots\dots (6)$$

$$\sigma^2(\mathbf{x}) = \widehat{k_0^2} \left[1 - \mathbf{r}^T(\mathbf{x}) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{r}(\mathbf{x}) + \frac{(1 - \mathbf{1}_n^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{y})^2}{\mathbf{1}_n^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{1}_n} \right] \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 $\mathbf{r}(\mathbf{x}) = (\mathbf{R}(\mathbf{x}, x_1), \mathbf{R}(\mathbf{x}, x_2), \dots, \mathbf{R}(\mathbf{x}, x_n))^T$ である。GP の事後分布として $\mu(\mathbf{x})$ だけでなく予測の平均二乗誤差 $\sigma^2(\mathbf{x})$ を予測できることが GP の特徴である。GP の事後分布を用いれば獲得関数を評価することができる。獲得関数は目的に応じてさまざまな関数が提案されている。範囲 $a < g(\mathbf{x}) < b$ を探索する獲得関数としては式(8)で示す Probability of Feasibility(POF)が用いられる。

$$a_{\text{POF}}(\mathbf{x}) = \sigma^2(\mathbf{x}) \left\{ \Phi\left(\frac{b - \mu(\mathbf{x})}{\sigma(\mathbf{x})}\right) - \Phi\left(\frac{a - \mu(\mathbf{x})}{\sigma(\mathbf{x})}\right) \right\} \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 Φ は累積分布関数である。式(8)を最大化することで、次の探索点を求めることができる。

4. 提案システムの適用事例

4.1 最悪点の探索結果

DASES による最悪点探索について事例を説明する。初期 DoE デザインとして Sobol' s Quasi-random Sequence により生成した 100 パターン、および BAL による最悪点探索による 112 パターン、計 212 パターンに対して走行評価を実施。探索する目的関数の KPI (Key Performance Index) を変更しながら、走行結果の評点が低い結果を抽出したところ 32 件の課題を抽出することができた(図 2)。

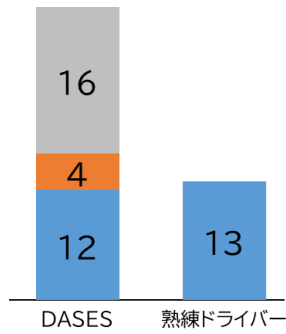


図 2 ドラビリ課題抽出数の比較

DASES で抽出された 32 件の内、12 件は熟練ドライバーによる抽出項目と一致(青色)、DASES で追加発見が 4 件(オレンジ色)、16 件は官能上の課題とは認識されなかった項目である。DASES は車両挙動の定量値に基づき評点付けを行っており、評点の目標値を決めて課題であるかどうかの判断を行っているため、熟練ドライバーの感度を超えた評価が可能である。検出されたドラビリの課題を車速と加速度のマップ上で整理をした結果を図 3 に示す。

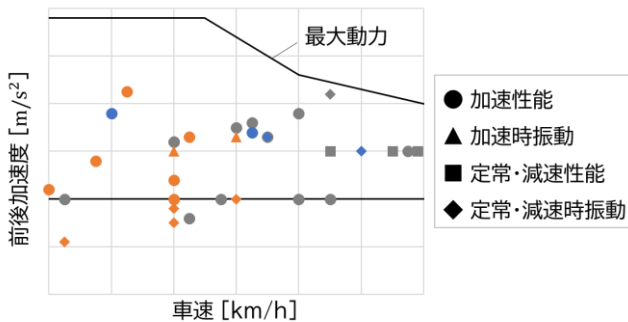


図 3 DASES によるドラビリ課題抽出結果

図中のマーカーの色は図 2 の色と対応しており、マーカーの形状はドラビリ性能課題の分類を表す。

また、DASES による評価と熟練ドライバーによる評価の時系列データを比較した結果を図 4 に示す。

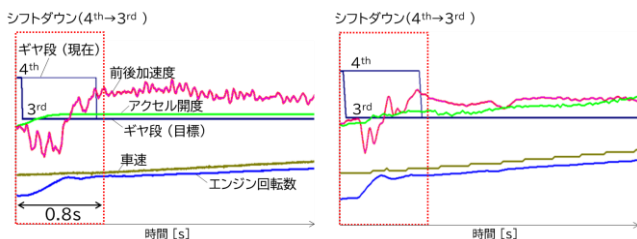


図 4 ドラビリ課題の時系列データ比較

赤点線の枠で示す時刻の応答に着目すると、両者ともに 4 速から 3 速への変速中に前後加速度が大きく変動している。これはクラッチ係合時の油圧の立ち上がり制御に起因していると考えられ、DASES が熟練ドライバーの運転操作と車両挙動を再現できていることが確認できる。以上の結果より、DASES を用いることで熟練ドライバーによるスクリーニング評価と同等の課題検出をすることが可能であると考えられる。

4.2 成立範囲の探索結果

DASES による制御定数の最適化について事例を説明する。定常走行時や緩加速走行時に、車両のフロア部がある周波数で振動する現象が起こることがある。これを抑制するために HEV の駆動モータを使って駆動系のねじり振動を低減させる制振制御がある。その制御は駆動モータのフィードバック制御であり、その制御定数を変更することで振動低減可能な手法である。今回、効果が期待できる時定数(K_x)とゲイン(K_y)の 2 つの制御定数の最適化を実施した。目的関数としては 30 個の KPI に対する最適化をかけた結果、2 つの KPI について成立範囲の制約が生じた(図 5 左上, 右上)。また、別の性能による制約(図 5 左下)を重ねた結果、図 5 右下のように成立範囲を示すことができた。

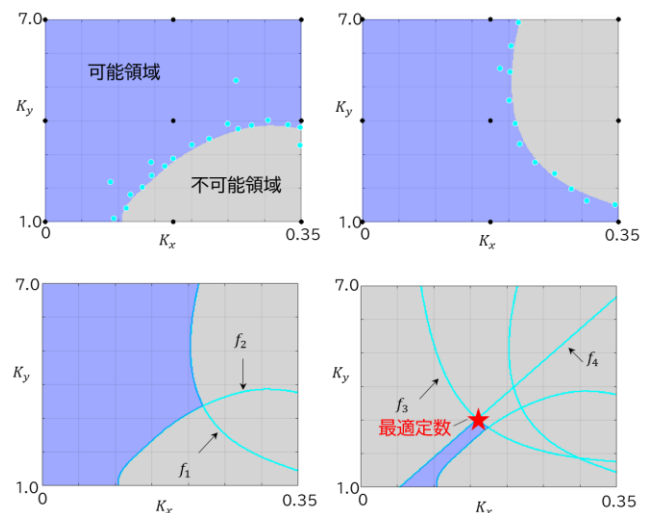


図 5 制御定数の最適化範囲(f_1, f_2, f_3, f_4)

5. まとめ

- (1) DASES はクローズドループによる連続評価システムと BAL を用いて大幅に少ない評価数で複数の課題探索を行うことができ、熟練ドライバーと同等の探索能力を有することを確認・検証した。
- (2) (1)で導出した課題の改善提案を背反も含めた制御定数の最適化が可能なことを実車において確認し、車両開発に適用した。
- (3) 本技術により開発の前出しおよびやり直し工数の大幅削減が可能であり、さまざまな性能評価やモビリティ・機械製品に対しても同様に適用が可能である。

■参考文献

- (1) 田島尚史ほか: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, 自動車技術, Vol.77, No.6, 2023, pp.6-8.

2023年度 上期 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	機械学習を用いたCFD モデル低次元化の熱害検討への適用	河合 悠奈 新谷 浩平 菅井 友駿 笹川 崇	トヨタ自動車 ↑ ↑ 豊田中央研究所
	冷却水温予測のための重回帰分析と深層学習を活用した熱境界サロゲートモデルの構築	下川 智史 奥山 学 曾川 幸助 川口 則雄 高橋 政克 嶋田 裕司	トヨタ自動車 ↑ ↑ ↑ ↑ ↑
	カーボンニュートラル実現に向けた熱効率50%スーパーリーンバーンエンジンの開発	木村 幸四郎 坂井 洋志 大村 哲生 高橋 大志	トヨタ自動車 ↑ ↑ ↑
	極低周波振動低減による車両運動性能の向上－車両ニュートラル特性確保に寄与する空力アイテム(UMVG)の開発－	堀之内 克年 林 昌尚 安念 輝之 武田 英樹 西村 敦 矢田 孝	トヨタ自動車 ↑ ↑ ↑ ↑ ↑
	サスペンション・タイヤと駆動系慣性・剛性を考慮した乗心地解析	香村 伸吾	トヨタ自動車
	多目的設計探査手法を活用した車体質量と剛性のトレードオフ検討技術の開発	森田 正興 藤田 預詞雄 小島 茂樹 大野 友也 川原 康照	トヨタ自動車 ↑ ↑ ↑ ↑
	実走行時のハブ面圧特性とホイール剛性分布の差に起因する操縦性との相関解析	安木 佑介 石川 朝幸	SOKEN トヨタ自動車
	流入風のヨー角変動を受ける車両の非定常空力特性	山下 太郎 加藤 千幸 山出 吉伸 今野 彰	トヨタ自動車 東京大学生産技術研究所 みずほリサーチ&テクノロジーズ ↑
	自動車の早期低炭素化を実現する内燃機関／燃料組成の開発	松原 直義 北野 康司 横尾 望 中田 浩一 小島 健 野村 守 藤本 尚則 三好 明	トヨタ自動車 ↑ ↑ ↑ ENEOS 出光興産 コスモ石油 広島大学
	複数性能同時成立電池セルバスの形状開発	張 徳旭 新谷 浩平 高瀬 孝平 岩田 基史 小里 和久 田原 智史 岩田 広明 安井 律子	トヨタ自動車 ↑ ↑ ↑ ↑ ↑ ↑ ↑
	前後駆動力配分の旋回特性への影響	山本 真規 樋口 明	神奈川工科大学 トヨタ自動車
	横力然として振る舞うタイヤ前後力が車両運動性能に及ぼす影響－タイヤを等方化した駆動力配分制御の提案－	勝山 悦生	トヨタ自動車
	通信型運転支援システムからの情報提示の誤報・未報と過信の影響	原田 あすか 金森 等 阿賀 正己 横井 康伸 Karatas Nihan 吉原 佑器 田中 貴紘	名古屋大学 未来社会創造機構 ↑ トヨタ自動車 ↑ 名古屋大学 未来社会創造機構 ↑ ↑
	VAEを用いた3次元形状生成技術の開発およびCAE解析への適用	谷口 真潮 新谷 浩平 小野寺 啓祥 大塚 紀子 勝原 忠典	トヨタ自動車 ↑ ↑ ↑ ↑

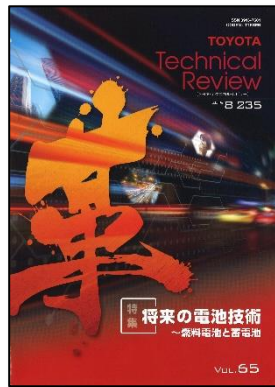
掲載誌名	題目	発表者	所属
SAE Technical Paper	Model Based Development for Super Lean Burn Gasoline Engine Using Kolmogorov Microscales	Hiroyuki Sakai Koshiro Kimura Tetsuo Omura Daishi Takahashi	Toyota Motor Corporation ↑ ↑ ↑
	Development of 50% Thermal Efficiency S.I. Engine to Contribute Realization of Carbon Neutrality	Koshiro Kimura Hiroyuki Sakai Tetsuo Omura Daishi Takahashi	Toyota Motor Corporation ↑ ↑ ↑
	CFD-Based Assessment of the Effect of End-Gas Temperature Stratification on Acoustic Knock Generation in an Ultra-Lean Burn Spark Ignition Engine	Tyler Strickland Magnus Sjöberg Naoyoshi Matsubara Koji Kitano Kazuki Kaneko	Sandia National Laboratories ↑ Toyota Motor Corporation ↑ ↑
	Development of Three-Way Catalysts with Enhanced Cold Performance	Takumi Tojo Shogo Shirakawa Seiji Nakahigashi Sho Hoshino Takashi Onozuka Takahiro Noguchi Tomomasa Aikawa	Toyota Motor Corporation ↑ ↑ Cataler Corporation ↑ ↑ ↑
	Investigation of Compressor Deposit in Turbocharger for Gasoline Engines (Part 1: Research on Deposit Formation Mechanism)	Noriya Ishizaki Satoshi Hirano Hiroshi Kuma Haruto Ura	Toyota Motor Corporation ↑ ↑ ↑
	Investigation of Compressor Deposit in Turbocharger for Gasoline Engines (Part 2: Practical Application to Turbocharger)	Haruto Ura Hiroshi Kuma Satoshi Hirano Noriya Ishizaki	Toyota Motor Corporation ↑ ↑ ↑
	Development of e-AWD Hybrid System with Turbo Engine for SUVs	Koichi Sasaki Kensuke Kamichi Manabu Ishimoto Sei Kojima Alistair Bridge Noritaka Takebayashi	Toyota Motor Corporation ↑ ↑ ↑ ↑ ↑
	Development of the New 2.0L Hybrid System for Prius	Satoshi Hirota Takaji Kikuchi Tomoya Katanoda	Toyota Motor Corporation ↑ ↑
	Development of Charging System for bZ4X	Akito Motohira Daisuke Tsutsumi	Toyota Motor Corporation ↑
	Development of Powertrain System and Battery for BEV	Hiroki Nagai Naoya Kawamoto Kotaro Horiguchi Takehito Yoda Masatoshi Hiyoshi Masaya Yamamoto	Toyota Motor Corporation ↑ ↑ Toyota Motor North America, Inc. Toyota Motor Corporation ↑
	Development of Inverter Drive Unit for Battery Electric Vehicle	Shimo Yuichi Takao Kanzaki Takashi Yanagi Yukio Goto Takashi Kurihara Masayoshi Kobayashi	Toyota Motor Corporation ↑ ↑ DENSO Corporation ↑ ↑
	Development of Control System for Parallel Hybrid System with Turbo Engine	Akira Takeichi Koshiro Kosaka Daigo Nobe Toshiaki Suzuki Shota Miyake Norihiro Tsukamoto	Toyota Motor Corporation ↑ ↑ ↑ ↑ ↑
	Development of 2nd-Generation Solar Charging System and Generating Performance in the USA	Yuma Miyamoto Takashi Nakado Yukinori Murakami Taisuke Hayashi	Toyota Motor Corporation ↑ ↑ ↑
	Effects of Fuel Components on Thermal Efficiency and Emissions in Super Lean Burn S.I. Engine	Naoyoshi Matsubara Kazuki Kaneko Koji Kitano Nozomi Yokoo Koichi Nakata Yuki Yasutake Taketora Naiki Ken Obata Manabu Watanabe	Toyota Motor Corporation ↑ ↑ ↑ ↑ ENEOS Corporation ↑ ↑ ↑
	Adapting Dimensionless Numbers Developed for Knock Prediction Under Homogeneous Conditions to Ultra-Lean Spark Ignition Conditions	Tyler Strickland Dario Lopez-Pintor Naoyoshi Matsubara Kazuki Kaneko Koji Kitano	Sandia National Laboratories ↑ Toyota Motor Corporation ↑ ↑
	Development of Oil Behavior Visualization Technology using X-Ray Computed Tomography	Daisuke Tanaka Hiroki Fujieda Junji Ute Mitsunobu Uchida Takeo Matsuo Masataka Tanase Yuki Hiura	SOKEN, Inc. ↑ ↑ ↑ Toyota Motor Corporation ↑ ↑

掲載誌名	題目	発表者	所属
SAE Technical Paper	Analysis of the effect of hydrogen combustion characteristics on engine performance	Yoshihisa Tsukamoto Shiro Tanno Yoshinori Miyamoto Hiroyuki Sakai Tetsuo Omura Daishi Takahashi	Toyota Motor Corporation ↑ ↑ ↑ ↑ ↑
	New Concept Exhaust Manifold for Next-Generation HEV and PHEV	Hirokazu Ito Kazuhiko Seguchi Shigeki Nakayama Takao Fukuma	Toyota Motor Corporation ↑ ↑ ↑
	Vehicle Simulations development to predict Electric field level distribution based on GB/T18387 measurement method	Keishi Miwa Toshio Watari Hiroyuki Nishimura Hiroki Ogawa	Toyota Motor Corporation ↑ ↑ ↑
	Improvement of PN Filtration Efficiency of Coated GPF - Study of Improvement of PN Filtration Efficiency and Reduction of Pressure Drop	Hiromasa Nishioka Hiroshi Kobayashi Takahiko Fujiwara Koji Sugiura Yasuyuki Irisawa	Toyota Motor Corporation ↑ ↑ ↑ ↑
	Structure and properties of a nano-carbon composite surface coating for roll-to-roll manufacturing of titanium fuel cell bipolar plates	Takenori Yamasaki Kotaro Ikeda Toshiki Sato	Toyota Motor Corporation ↑ Kobe Steel, Ltd.
	Evaluation of Distinctive Oil Bores in Engine Crankshaft for Friction Reduction Purpose	Hiroshi Yajima Shunichi Mayumi Motoichi Murakami	Toyota Gazoo Racing Europe GmbH Toyota Motor Corporation ↑
	Evaluation of Fully Sustainable Low Carbon Gasoline Fuels Meeting Japanese E10 Regular and Premium Octane Specifications	Timothy Yates Rana Ali Mayu Suzuki Naoyoshi Matsubara Nozomi Yokoo Takuya Morii Shota Akiyama Keita Ishizaki	BP International Ltd. ↑ Toyota Motor Corporation ↑ ↑ SUZUKI MOTOR CORPORATION ↑ BP Japan K.K.

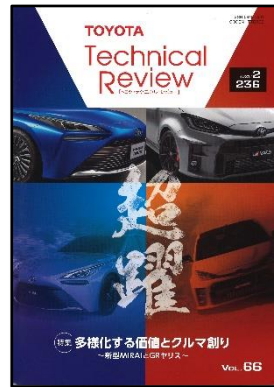
Back Number Index



Vol.64(2018年5月)
特集:TNGA パワートレân



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



Vol.69-1(2023年9月)
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 Technical Review Vol.69 No.2

© 2024 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 2024 年 3 月 25 日