

TOYOTA

# Technical Review

[トヨタ・テクニカル・レビュー]



特集

トヨタが取り組む  
サーキュラーエコノミーとは

新モデル解説 LAND CRUISER 250



## 【まえがき】

今回の TOYOTA Technical Review (Vol.70-1)の特集テーマは「トヨタが取り組むサーキュラーエコノミーとは」です。

これまで Vol.68 から Vol.69-2 の 3 号にわたり、カーボンニュートラル(CN)を特集テーマとしてきました。トヨタは誰ひとり取り残すことのない豊かな社会を目指し、CN の達成に取り組んでいます。また、クルマづくりにおいては、マルチパスウェイを軸に多様な選択肢を追求しています。本誌では、そのためのさまざまな取り組みを紹介してきました。

CN と同時に重要となるのが、サーキュラーエコノミー(CE:資源循環型の経済システム)への取り組みです。従来から行われてきた 3R(Reduce, Reuse, Recycle)の活動を拡張し、原材料や製品の価値をできる限り長期間利用できるようにすること、さらには廃棄物を最小限に抑えるよう設計に織り込むこと。これらを実現しながら CN を達成し、かつ、新たな循環型の経済システムを成立させていく必要があります。

そこで、今回から次回にわたり、CE に対するトヨタの取り組みの全体像や、これを実現するための各コンポーネントを特集していきます。今回は導入として CE の概要と世界的な動向を紹介したうえで、以下 3 つの取り組みを掲載しています。

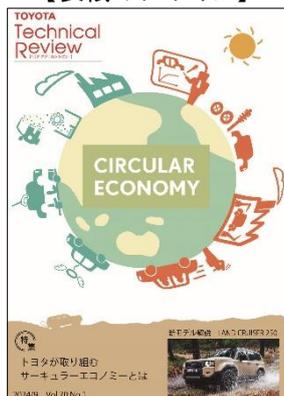
- 使用済み自動車の易解体性に配慮した設計
- 材料(アルミ・磁石・樹脂)のリサイクル
- 電動車に搭載する電池の適正処理や循環利用

また、特集の他に新モデル解説として、新たに「ランドクルーザー」のラインアップに加わった”250”シリーズを掲載しています。お楽しみいただけますと幸いです。

CN の達成や CE の実現には、ステークホルダーの皆さまとの合知合力による推進が不可欠です。これからも本誌をつうじて、読者の皆さまへトヨタの取り組み記事をお届けしてまいります。よりよい未来のモビリティ社会の実現に向け、ご意見やご指導を賜りますよう、よろしくお願い申し上げます。

TOYOTA Technical Review 企画担当

### 【表紙のデザイン】



表紙中央のイラストは、トヨタが取り組むサーキュラーエコノミーを表しています。右上から順に、オレンジ色で示す工程は「企画設計→部品製造→車両製造→使用」を、緑色で示す工程は「廃車→解体→破碎→選別加工→材料製造」を表しており、これらの工程がそれぞれ動脈・静脈として循環する様子を表現しました。まずは多くの方に興味を持ってもらいたいという思いで、シンプルかつポップなデザインとしています。私自身もトヨタ自動車の一員として、トヨタのサーキュラーエコノミーへの取り組みを知る良い機会にもなりましたし、今後は自身の仕事においてどのように貢献していけるか改めて考えたいと思いました。

MS Company MS デザイン部 豊田 航平

## 目 次

---

### ▶特集「トヨタが取り組むサーキュラーエコノミーとは」

#### ・サーキュラーエコノミーへの取り組み

永井 隆之 ..... 3

#### ・易解体の取り組み

國司 大地, 祝原 礼司, 石川 裕幸, 弦田 遼平,  
竹田 雅也, 福原 哲朗, 浜辺 勉, 永井 隆之 ..... 11

#### ・材料循環の取り組み

田代 啓, 高岸 れおな, 坂本 瑞樹, 田端 一英,  
棚橋 和浩, 古川 雄一, 永井 隆之 ..... 22

#### ・電池循環の取り組み

石川 裕幸, 磯村 圭祐, 高橋 秀典, 永井 隆之 ..... 29

---

### ▶論文／解説

#### ・TOYOTA LAND CRUISER “250” SERIES

代表執筆者: 森津 圭太, 小野 卓真, 中村 真人, 成岡 駿之介,  
北井 慎也, 渡辺 義人, 岩下 公彦 ..... 34

---

### ▶受賞技術概要

#### ・路面入力による車両運動と非定常空気力の連成解析: 定式化と走行試験での検証

前田 和宏, 椿野 大輔, 原 進, 佐宗 章弘 ..... 49

---

### ▶2023 年度 下期 社外発表論文一覧

..... 52

# サーキュラーエコノミーへの取り組み

永井 隆之 <sup>\*1</sup>

## 要旨

大量生産、大量消費、大量廃棄を前提としたリニアエコノミーから資源や製品の循環を前提としたサーキュラーエコノミー（Circular Economy:CE）への転換が世界規模で始まっている。トヨタでは過去から自動車リサイクルに対する取り組みを脈々と続けてきているが、このような昨今の動きに対応すべく、クルマや部品を「より長く使う」、「より効率的に使う」、「廃棄物を出さない」を目指してさらなる取り組みを始めている。今回の特集では現在の取り組みの概要や今後の方向性を中心に紹介する。

キーワード サークュラーエコノミー、資源循環、リサイクル、易解体設計

## 1. まえがき

現在地球には 80 億人もの人が生きており、この人数は地球の生態系の再生力の 1.75 倍の自然・資源を利用しているともいわれている<sup>(1)</sup>。今までの大量生産、大量消費、大量廃棄を前提としたリニアエコノミーから資源や製品の循環を前提としたサーキュラーエコノミー（Circular Economy:CE）への転換が世界規模で始まっている。トヨタでは過去から自動車リサイクルに対する取り組みを脈々と続けてきており、このような昨今の動きに対応するさらなる取り組みを始めている。また各国の政策も活発化してきている。特に欧州は 2020 年頃から「資源循環ビジョン」や自動車向けに ELV(End of Life Vehicle)規制強化を打ち出してきている。日本では資源消費の削減と最終処分場問題への対処として古くからいわゆる 3R(Reduce Reuse Recycle)の取り組みが行われてきた。これをサーキュラーエコノミーに拡張していくために経済産業省が 2023 年に「成長志向型の資源自律経済戦略」を策定した。この戦略に基づいて産官学のパートナーシップである「サーキュラーパートナーズ」が設立され、2024 年 3 月時点で企業・団体等があわせて 398 者参画して日本の CE のあるべき姿とその実現に向けた検討が始まっており、国としても取り組みが強化されてきている。今回、自動車を中心に取り

巻く環境を俯瞰するとともに、自動車業界が直面している課題や課題克服に向けたサーキュラーエコノミーへの取り組みの方向性を、【サーキュラーエコノミーへの取り組み】、【易解体の取り組み】、【材料循環の取り組み】、【電池循環の取り組み】の 4 記事構成でご紹介する。

## 2. 取り巻く環境

### 2.1 サークュラーエコノミーとは

サーキュラーエコノミーの概念を示すものはさまざまあるが、大量生産、大量消費、大量廃棄のリニアエコノミーからの脱却であり、その概念を示すものとしてエレンマッカーサー財団によるバタフライダイアグラム<sup>(2)</sup>が知られている。図 1 はこれに筆者の理解を加筆したものである。この図の右側が技術的サイクル、すなわち枯渇性資源の循環サイクルを示している。内側からメンテナンス／シェア⇒リユース⇒再製造⇒リサイクルとなっておりエネルギー的に内側のサイクルがより望ましい循環といわれている。また左側は生物的サイクル、すなわち植物をはじめとする再生可能資源の循環を示している。生物的サイクルは循環サイクルが技術的サイクルより長くなる。

次に CE と CN(Carbon Neutral:カーボンニュートラル)の関係を考えてみたい。CN は気候変動緩和の文脈から CO<sub>2</sub> 削減を目指すもので、主な手段として、化石燃料由来の CO<sub>2</sub> 削減、省エネなどがあげられている。一方、CE は廃棄物を生まない、長く使い続けることを目指すものである。そのなかで再生材利用は本来焼却される

<sup>\*1</sup> 先進技術開発カンパニー CE 推進室

廃棄物を資源に変えることに加え、焼却時のCO<sub>2</sub>削減も可能とすることから CE, CN のどちらにも共通する欠かせない取り組みと位置づけることができると考えられる(図2)。

私たちは上述の考え方にに基づき、「地球からの資源の取り出しを少なくし資源を有効に使う」「価値あるものを価値ある状態で長く使い、使った後は価値ある状態に再生する」という事を念頭に CE の推進に取り組んでいる。

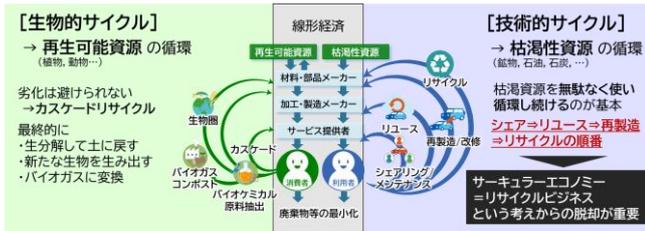


図1 バタフライダイアグラム

出典:エレンマッカーサー財団資料<sup>(2)</sup>を基に作成

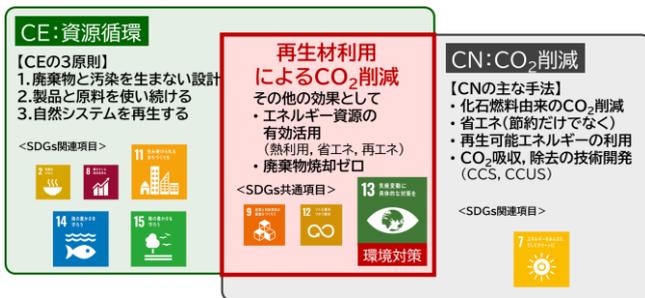


図2 CEとCNの関係

## 2.2 規制動向

### 2.2.1 欧州の動向 欧州 ELV 規則<sup>(3)</sup>

2023年7月に欧州委員会より ELV 改正規則案が出された。規則案の内容(図3, 図4)は材料面では早くて2031年以降の新型車よりプラスチックの再生材使用率(プラスチックの総重量に占める再生プラスチックの比率)が規定され、市中からのリサイクル材(Post Consumer Recycle:PCR)の全体に占める割合として25%の使用が求められた。また PCR 材料25%のうちのさらに25%すなわち全体に占める割合として6.25%は使用済み自動車由来の再生材活用とする旨の内容となっている。さらに改正規則案では今まではあまり触れられてこなかった材料にも言及がなされ、鉄、アルミ、磁石、マグネシウムなどの材料についても再生材の使用割合を開示することを義務付けるほか、プラスチッ

クと同様に再生材の使用割合を議論していくという内容が盛り込まれた。くわえて材料面だけでなく、設計・情報開示面からも規則の方向性が示され、EV バッテリー、駆動用モーター、触媒、バンパーなどの19部品を対象とした易解体設計の実現や、静脈産業における19部品の破碎前の取り外し、ELVの域外流出禁止など、資源の域内循環を促進する狙いの内容も記載されている。まさに動静脈全体としての取り組みを求める内容となったと受け止めている。いずれも最速で2025年発効を予定されており、項目ごとに施行までの準備・検討期間はあるものの、自動車の構造やモノと情報の流れなど既存のしくみを大きく変える必要があるため、早急な対応が求められる。

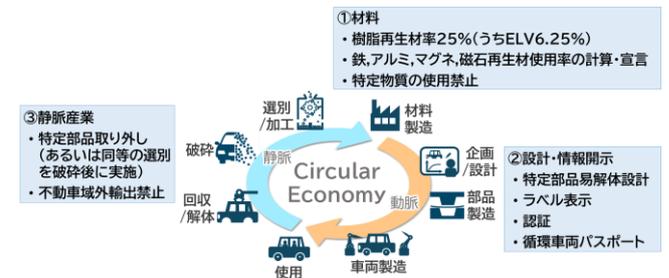


図3 欧州 ELV 規則案の概要

アイテム	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032~
材料	樹脂	検討	◆再生材含有率の計算・検証方法確立	準備期間	再生材25%(内ELV6.25%)			
	金属(鉄,アルミ,マグネシウム)	検討	◆PCR含有率の要件化	準備期間	再生材含有率, PIR-PCR割合宣言			
設計	易解体設計	準備期間	触媒, バンパーなど19品目 取り外しが容易な設計 EV/バッテリー, 駆動用モーター 取り外し・交換できる設計					
静脈	解体輸出	準備期間	触媒, バンパーなど19品目の破碎前の取り外し ELVの域外輸出禁止(路上走行に適する場合は輸出可)					

図4 欧州 ELV 規則案の適用スケジュール

### 2.2.2 欧州電池規則

電池については、欧州電池規則で電池基本情報や End of Life 情報の提供、リチウム・コバルト・ニッケル・鉛の再生材使用率などが具体的に規定されている。新型車からの適用だけでなく、継続生産車も対応項目を満たす必要がある。また電池パスポートとよばれる情報開示の仕組みも定められており、電池の材料構成やリサイクル材使用量の情報、デューデリジェンス情報、電池性能に関する情報などの開示が求められている。欧州市場への

電動車投入のためにはこのような法規に対応することが必要だと考えている。

### 2.2.3 目標設定と開示の義務化

さらに最近の動向として、投資家による ESG (Environment 環境, Society 社会, Governance 企業統治)投資の高まりがある。2022 年 11 月に成立した CSRD (Corporate Sustainability Reporting Directive: 企業サステナビリティ報告指令)では、各企業は ESG の取り組みを開示する義務を要する。環境面でサーキュラーエコノミーが含まれ、2026 年に欧州域内の企業が開示を求められ、トヨタの場合 TME (Toyota Motor Europe) が該当する。その後、欧州でビジネスを行う域外企業にも対象は拡大され、トヨタも 2029 年に 2028 年会計年度グローバル実績を開示する必要がある。ここでは、サーキュラーエコノミー

の目標やその進捗状況、取り組み内容などの情報開示を求められる。

### 2.3 自動車業界の動向

カーメーカー各社からは再生材活用として材料全体もしくは樹脂の再生材使用率の目標設定がなされている (表 1)。またバイオ材を含む場合や再生可能樹脂とする場合もありその内容は一様ではない。トヨタは「トヨタ環境チャレンジ 2050」における資源循環の取り組みとして「循環型社会・システム構築チャレンジ」を策定し 2015 年より取り組みを実施している<sup>(2)</sup>。また 2023 年 10 月にはサステナビリティデータブックを改正し、鉄、アルミ、樹脂、ゴム等の再生材を 30%以上活用していく目標を掲げた (表 2)。また各社からはサーキュラーエコノミーを目指すコンセプトカーなども発表されており各社の取り組みの方向性が提案されつつある。

表 1 各国の規制動向とカーメーカー各社の再生材活用の目標

	政府	OEM
欧米	<p><b>欧州ELV規則案(発行は最短で2025年)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>樹脂の再生材率25%(ポストコンシューマ材)</li> <li>うち25%は使用済み自動車由来…発効後72ヶ月で施行</li> <li>金属は順次規定 <ul style="list-style-type: none"> <li>鉄…発効後23ヶ月で目標値決定</li> <li>その他金属…発効後35ヶ月で目標値決定</li> </ul> </li> <li>再生材率の開示および設計・製造・回収・解体などにおける義務についても順次規定</li> </ul> <p><b>米国環境保護庁:2021年国家リサイクル戦略</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>リサイクル商品の市場改善, 製品増加, 汚染減少</li> </ul>	<p>Renault: The Future is NEUTRALの設立 再生樹脂量を2013年比+50%(2025)</p> <p>BMW: 100%再生可能なコンセプトカー「iビジョン・サーキュラー」 再生材利用率 現状30%→50%(2030)</p> <p>Mercedes: 全車種85%リサイクル可能 電動乗用車のバージン材利用▲30%(2030)</p> <p>VOLVO: サーキュラー・ループ・プロジェクト立ち上げ 樹脂部品の25%を再生材に(2025)</p> <p>GM: 新車の50%は持続可能な材料を利用(今後10年)</p> <p>Ford: 樹脂部品の20%を再生材に</p>
日本	<p><b>経済産業省:循環経済ビジョン2020</b></p> <p><b>⇒「成長志向型の資源自律経済戦略」(2023)</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>競争環境整備(規制・ルール)</li> <li>サーキュラーエコノミーツールキット(政策支援)</li> <li>サーキュラーエコノミーパートナーシップ(産官学連携)</li> </ol>	<p>日産: 台あたりの新規採掘資源の使用量を70%に低減(2022)</p> <p>ホンダ: サステナブルマテリアル使用率100%(2050)</p> <p>スバル: 新型車に使用する樹脂の25%以上を再生材に(2030)</p> <p>トヨタ: 再生材樹脂使用量3倍(2030) 再生材採用30%以上(2030)</p>
中国	<p><b>自動車製品生産者責任拡大制度(EPR)検討中</b> (2025年発表予定)</p>	<p>一汽/上海汽車/東風/吉利等中国民族系11社, 廃車回収・再製造・資源再生企業62社が実証試験に参加</p>

表 2 クルマの水平リサイクルの状況

材料	クルマへのリサイクル率 (水平リサイクル率)	部品例	
鉄	鋼板	低	
	特殊鋼	中	ギア, シャフト類など
	鋳物	低	
アルミ	板	低	
	押出	低	
	鋳物(ユニット)	高	エンジンブロックなど
	鋳物(ボデー)	低	
	鍛造	低	
樹脂, ゴム	特に低		

### 2.4 サーキュラーエコノミー観点で見た自動車リサイクルの課題

自動車は自動車リサイクル法に基づきエアバック類、フロン類、ASR (Automobile Shredder Residue: シュレッダーダスト, 残渣) を中心に使用済み自動車の適正処理およびリサイクルがなされている。解体業者、破砕業者を経るなかで一定の部品や材料はリサイクルがすでになされており、リサイクル実効率として 99%以上といわれている (図 5)。使用済み自動車の重量に占める ASR

の割合はおおよそ 17~19%である。その材料構成比はおおよそ 3/4 が樹脂やゴムをはじめとする可燃物であり(図 6), 現在はその多くがサーマルリサイクルされている。現状の自動車リサイクルをサーキュラーエコノミー視点で見たときに以下の課題があるととらえている。

① 限定された部品回収と部品リユース

解体業者では部品として主にエンジン部品等が取り外されリユース市場に回っているが限定的である。また材料として回収されているものもあるが触媒に含まれる白金やワイヤーハーネスに含まれる銅などの貴金属が主な材料であり、経済的に成り立ちにくい樹脂部品はバンパーなどに限られている。

② 電動化に関わる部品の循環技術が不十分

電動化に伴うバッテリーやモーターなどは現時点で部品としてのリユースや材料としての循環技術がともに限定的である。

③ ASR の大半はサーマルリサイクル

ASR の材料構成比を示す。ASR の活用先として現在は RPF(Refuse derived paper and plastics densified Fuel)と呼ばれる固形燃料の原料などに用いられている樹脂・ゴムの ASR からの回収拡大を図るとともに、材料としての再生技術確立が必要である。

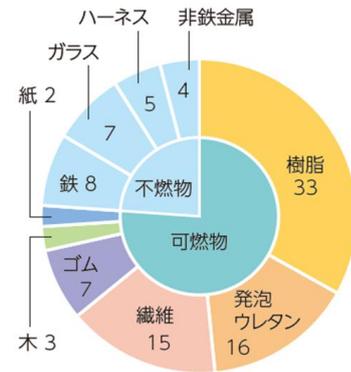


図 6 ASR の材料構成(重量%)

2.5 トヨタの取り組み

2.5.1 過去からの取り組み

トヨタでは自動車リサイクルへの対応および資源循環促進を図る目的で豊田通商と共同で 1970 年に豊田メタルを設立し適正処理および再資源化の観点で取り組んできている。豊田メタルでは図 3 中の破碎処理および ASR の再資源化を行っている。

また 2015 年に発表した「トヨタ環境チャレンジ 2050」のチャレンジ 5 に「循環型社会・システム構築チャレンジ」を掲げ、「トヨタグローバル 100 ディスマントラーズプロジェクト」および「トヨタ Car to Car プロジェクト」の主に 2 つを推進してきた。前者は世界各地にトヨタ認定の自動車解体施設を設け、使用済み自動車からより多くの資源を環境に負荷をかけずに安全に回収・処理する「適正処理」の仕組みづくりの推進であり、後者は使用済みのクルマの資源が再びクルマを製造する際の資源として活用できるよう、日本で培ってきたリサイクル技術・システムを世界に展開する取り組みである。またチャレンジ 2 として「ライフサイクル CO<sub>2</sub> ゼロチャレンジ」のなかで資源循環を目指す取り組みが掲げられており、開発や設計段階からの低 CO<sub>2</sub> 材料の使用拡大や解体性容易設計を目指した開発にも取り組んできている。

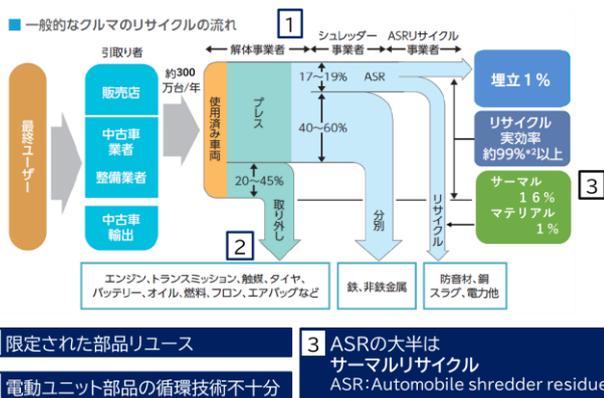


図 5 一般的なクルマのリサイクルの流れ

2.5.2 サーキュラーエコノミーの全体像

私たちは 2022 年 1 月よりサーキュラーエコノミー推進プロジェクトとして取り組みを始めた。その後 2023 年 10 月より CE 推進室として活動をしている。図 7 はサーキュラーエコノミーの全体感を示すもので、「より長く使う」「より効率的に使う」「廃棄物を出さない」を取り組みの柱にしている。各々の概念をもう少し述べると、

「より長く使う」は使える部位を使い切るための設計構造の変更や車両状態把握に基づく診断とリペア、「より効率的に使う」は KINTO 等のサブスクリプションやリースなど作った製品をより効率的に使う概念、「廃棄物を出さない」は役目を終えた自動車を部品レベル、素材レベルで徹底的に活用するという事を目指している。そのようなビジョンのもと、具体的にはクルマの構造や循環システムを構築すること、材料循環の最大化を図ること、CEを支える基盤作りを推進することを進めている。



図7 サークュラーエコノミーの全体感

### 2.5.3 クルマの循環性向上

今までも使用済み自動車の解体時の容易解体性を意図した環境配慮設計がなされてきている。さらに今後は資源としての部品や素材回収の観点や易修理性を向上させていく必要があると考えられる。バンパーを例にしてプラスチックの素材回収の現状を述べると、バンパーにはポリプロピレン系の材料が使われることが多いが、その部品には締結用のクリップに異種素材(例えばポリアセタール)が使われたり、裏側にシールなどが貼られたりしておりその除去作業が解体現場では必要で、そこに時間がかかりすぎると経済成立性が失われる。今後は例えば単一素材化など設計面での配慮が重要である。

また、よりクルマ・部品を長く使うためには、使用履歴に基づく個々のクルマ・部品の状態把握、その状態にあわせた対応の容易化など、従来にない視点がとても重要になると考えている。

また先述のとおり欧州 ELV 規則では 19 部品の易解体設計が求められる。規制の詳細や取り組みについては【易解体の取り組み】(本誌 P11~)で記述するが、そのなかには例えば 10cm<sup>2</sup>以上の電子基板の回収が求められるなど従来の設計見直しが急務である。

### 2.5.4 材料循環の最大化

図8はクルマの重量で材料構成比を示したもので、鉄、アルミ、樹脂でクルマ全体のおおよそ 3/4 に相当する。クルマからクルマへのリサイクル材適用を考えたときにこれらの材料は取り組む対象として重要である。表2には現状のクルマからクルマへの水平リサイクルの状況を示す。このように水平リサイクルは限定的な状況である。まず鉄は鋳鉄を中心に一部のギア、シャフト類ではリサイクル材が活用されている。しかし鋼板への再生材の活用は少ない。アルミも同様に鋳物のエンジンブロックなどへの循環はできている。しかし板や押し出し材への再生材の活用はなされていない。樹脂やゴムは非常に低いリサイクル率になっている。そのためクルマへのリサイクル率は決して高くなく材料のクルマへの循環最大化という点では、上述主要材料以外も含めてまだまだやる余地があり、サーキュラーエコノミー視点で取り組むべき課題である。

トヨタは先述のとおり 2030 年に再生材採用率 30% 以上(対象:日欧生産車)を目指すという目標を 2023 年 10 月にサステナビリティデータブックにて公表した。目標は全材料を母数として重量ベースで再生材の使用率 30%以上を目指すものである。今後はこの目標達成のために使用済み自動車からの各材料の回収および選別を行い、各々の材料のリサイクル材の開発強化が必要と考えている。

鉄は従来鋳物へリサイクル材が活用されてきた。今後は電炉鋼板の採用に取り組んでいく。電炉鋼板とは市中の鉄スクラップを電気溶解により再生した鋼板を指し、主にコークスを用いて、原料の鉄鉱石を溶解・還元して製造する高炉鋼板とは異なるものを指す。現時点で電炉鋼板にはまだ高強度材が存在せず、製鉄メーカー協力のもとでの開発が重要となると考えている。

アルミについては、鉄と同様に鋳物へのリサイクルはなされてきた。板や押し出し材などの展伸材へのリサイクル材の適用が課題である。トヨタでは熱交換器由来の工程端材をボデー用リサイクルアルミとする開発を行い、2020 年よりフードインナーに採用を開始している。今後は使用済み自動車からのリサイクルを推進する予定である。金属については【材料循環の取り組み】(本誌 P22~)で詳細に取り組みを紹介する。

樹脂は現状リサイクル材適用がほとんどされていない

状況である。トヨタでは販売店で修理交換で発生するバンパーの回収と再資源化に取り組んできているが限定的な活用となっている。樹脂についても【材料循環の取り組み】で詳細に取り組みを紹介する。

その他の材料では、近年クルマの電動化にともない電池やモーターなどの部品が使われてきている。これらのリサイクル技術確立も重要であり、磁石は【材料循環の取り組み】で、電池は【電池循環の取り組み】(本誌 P29～)でそれぞれ現状と取り組み状況を述べる。

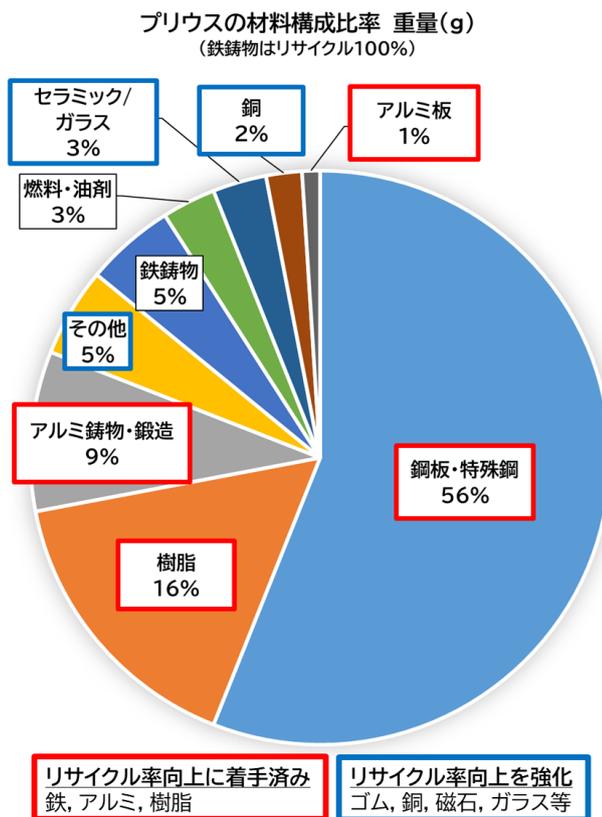


図 8 クルマの材料構成比(重量%)

### 2.5.5 基盤作り

サーキュラーエコノミーを推進するにあたっては個社では限界があり、動静脈連携、他産業連携さらには産官学の連携などの仲間づくりが非常に重要と考えている。経済産業省や環境省によりプロジェクトが動き出している。また日本自動車工業会(以下 自工会)としてもその対応を強化すべくリサイクル廃棄物部会の傘下にグローバルリサイクル対応分科会が組織されその対応を強化していくこととなった。

## 1) 国際標準化への対応

### ① ISO(国際標準化機構)

2018年よりISO/TC323というサーキュラーエコノミー専門部会の設置が決定され、2019年より毎年総会が開催され標準化に向けた動きが進んできた。TC323は5つのワーキンググループ(WG)および1つのジョイントワーキンググループ(JWG)で構成され、WG1:全体の定義、WG2:ビジネスモデル、WG3:循環性の計測、WG4:事例の共有、WG5:情報データシートの標準化、JWG14(TC207/SC5-TC323):二次材料の回収・再利用・再資源化などが具体的に議論されてきた。日本は自らが主査を務めるWG2においてビジネスモデルとバリューネットワークを線型から循環型に移行する組織のための実践的アプローチ検討を主導する一方、WG4への事例の提案も行ってきた。WG1, 2, 3については2024年5月に、それぞれISO 59004, 59010, 59020として発行された。また、WG5ではデジタル製品パスポートのように社会実装・規制化につながる可能性のある項目についても議論がなされている。トヨタはTC323の国内委員会に参画し、規格化動向の注視および意見出しを行っている。

### ② WBCSD

WBCSD(World Business Council for Sustainable Development:持続可能な開発のための世界経済人会議)では200社を超える企業が協力して持続可能な世界への移行を加速化させるための取り組みが議論されている。各社CEOが主導する組織であり、WBCSDの有名な成果としてGHG(Green House Gas:温室効果ガス)プロトコルがある。サーキュラーエコノミーについても既に2020年にCTI(Circular Transition Indicators:循環移行指標)を発行しており、毎年アップデートされている。2024年よりCEへの移行を促進するため、WBCSDでは世界的な基準の策定に向けGCP(Global Circular Protocol:資源循環プロトコル)の作成を開始した。今後作成・発行されるGCPは国際標準化に与える影響が大きいであろうと捉えてい

る。現在、この策定に向け 4 つの WS (Work stream) が構成され、それぞれ WS1: 循環移行への影響分析, WS2: 企業としてのパフォーマンスの示し方および説明責任, WS3: 必要な政策, WS4: 科学的な目標設定 について議論がなされている。そこでトヨタは GCP 作成のメンバーに加わり、自動車業界においても有意義かつ実効性のある中身になるように議論に参加していくこととしている。

## 2) 業界連携

### ① 自工会

自工会では 2024 年度よりリサイクル廃棄物部会の傘下にグローバルリサイクル対応分科会が新設された(図 9)。分科会は 3 つの取り組みを行っている。

- (i) 欧州規則対応への取り組み: 欧州の規制動向を把握したうえで自工会の意見をまとめ渉外活動を ACEA (European Automobile Manufacturers Association: 欧州自動車工業会) とともに連携して行っていく。
- (ii) ルール・規格化への取り組み: (i) の取り組みで得られた情報をもとに業界としての対応を図っていく。またリサイクル材への業界としての要求値をまとめていく活動を推進する予定であり、まずプラスチックを取り扱っていくこととなっている。その活動をとおして再生材の市場での入手性向上を図っていくことを意図している。
- (iii) 新興国等対応への取り組み: 新興国での ELV 規制動向を把握しその対応を図っていくものである。例えばインドなどで ELV 規制が議論されており、その対応を議論したり、新興国で当該規則が議論される際の対応方法についてもまとめていくこととなっている。

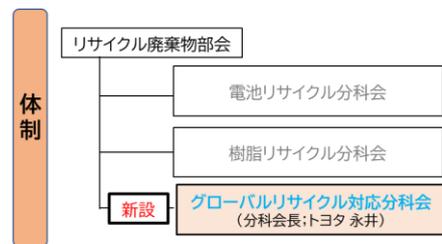


図 9 自工会 リサイクル廃棄物部会の構成

### ② 国プロ

内閣府主導による戦略的イノベーション創造プログラム (SIP: Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program) の 2023 年度より始まった第 3 期ではサーキュラーエコノミーシステムの構築が取り上げられた<sup>(4)</sup>。ここではアップグレード可能なプラスチックのサーキュラーエコノミーを世界に先駆けて構築することがミッションとして掲げられている。最終目標として再生材プラスチックの力学特性の 100% 増 (バージン材料相当) の実現をめざし、家電製品や自動車への実装を目指すとされている。2024 年度より自動車への他産業由来のプラスチックの活用に関する追加予算も組み込まれ、トヨタもアドバイザーとして参画していくこととなった。部品メーカーとも連携し産官学での取り組みに積極的に関わっていくつもりである。

## 3. あとがき

欧州はサーキュラーエコノミーという概念で近年規制化、標準化の動きを加速している。日本は元々世界に先駆けて 3R の概念を打ち出して取り組んできており、その精神や実行という観点でみると、最近の欧州の取り組みは 3R をベースにしていると捉えてもよいのではないかと考えている。日本に根差す自然との共生の文化、もったいない精神は、今後の地球環境を考えたときに必ず世界に貢献できるものと信じている。「地球からの資源の取り出しを少なくし資源を有効に使う」「価値あるものを価値ある状態で長く使い、使った後は価値ある状態で再生する」という事を念頭にサプライチェーン全体で次世代のためにさらに技術を磨き持続可能な社会を目指していきたい。

**■参考文献**

- (1) ピーター レイシー, ジェシカ ロング, ウェズレイ スピンドラー著, "サーキュラーエコノミーハンドブック", 日経BP日本経済新聞出版本部.
- (2) エレンマッカーサー財団, バタフライダイアグラム,  
<https://www.ellenmacarthurfoundation.org/circular-economy-diagram>
- (3) 欧州委員会ホームページ:ELV指令関連記事,  
[https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP\\_23\\_3819](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_23_3819)
- (4) 内閣府ホームページ,  
<https://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/index.html>

# 易解体の取り組み

國司 大地 \*1      祝原 礼司 \*2      石川 裕幸 \*2      弦田 遼平 \*3  
竹田 雅也 \*1      福原 哲朗 \*1      浜辺 勉 \*1      永井 隆之 \*2

## 要旨

トヨタは自動車の長期使用や循環性に配慮した設計を実践してきている。そのなかで、本稿では自動車の修理や使用済み自動車からの部品取りにおける易取り外し性と、使用済み自動車の易解体性に配慮した設計の取り組みについて紹介する。これらの「易解体」の取り組みは、修理工数や分解・解体工数等の削減に寄与し、製品の長期使用、部品のリユース・リファービッシュ、材料のリサイクルを促進するための素地を提供する。

キーワード ELV 規則, 易解体, DSM, サーキュラーエコノミー, 車両開発, 車両設計, 生産管理

## 1. まえがき

トヨタは循環性に配慮した自動車設計を実践してきており、その一つとして自動車の修理や使用済み自動車からの部品取りにおける易取り外し性と、使用済み自動車の易解体性に配慮した設計を行っている。本稿ではこれらの取り組みを「易解体」と総称して、トヨタの取り組みを紹介する。2章では現在までの取り組みを具体的に述べた後、今後の方向性を述べる。3章では易解体設計を行うための技術検討ツールとして、DSM (Design Structure Matrix) というマトリクススペースの設計手法の概要を述べる。4章では、この手法を易解体ドアモジュール設計に応用した事例を紹介する。

## 2. 易解体の必要性

### 2.1 既往の取り組み

トヨタでは、使用済み自動車の資源循環を推進するため、2003年発売の「ラウム」以降、さまざまな解体事業者を実際に訪問・調査し、解体作業が安全かつ短時間でできるよう、解体・分別しやすい構造を新型車両に積極

的に採用している。

また、解体作業のきっかけとなる部位にトヨタ独自の「解体性向上マーク(図1)」や重量物に対する「重心位置マーク(図2)」等を部品に設定し、解体の効率化と安全に貢献している。その具体的な構造例を以下に示す。



図1 解体性向上マーク



図2 重心位置マーク

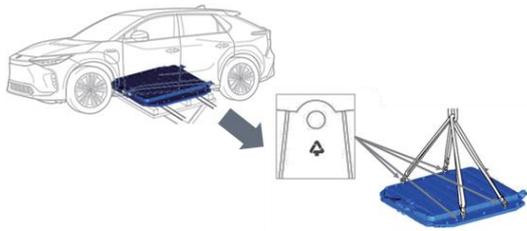
#### ① 大型部品の吊り上げ位置の指示

大型の重い BEV(電気自動車)用電池や燃料電池スタックをバランスよく運搬できるように、吊り上げポイントへ解体性向上マークと重心位置マークを設定している(図3, 図4)。

\*1 先進技術開発カンパニー 先進プロダクト開発部

\*2 先進技術開発カンパニー CE 推進室

\*3 株式会社 豊田中央研究所



BEV用大型電池の吊り上げ位置の指示  
(解体性向上マーク)

大型化した重い電池をバランスよく運搬できるように吊り上げポイントへ解体性向上マークを設定。  
(「bZ4X」, レクサス「RZ450e」)

図3 「bZ4X」, 「レクサス RZ450e」大型電池の  
解体性向上マーク

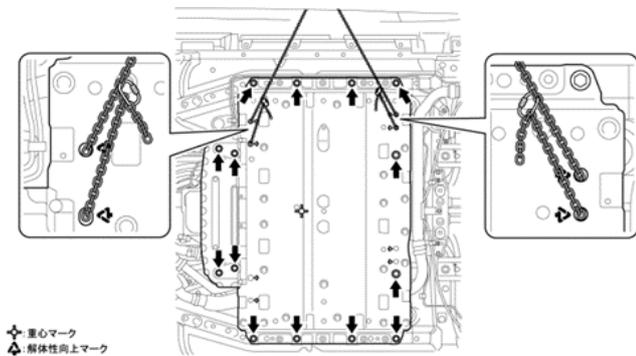


図4 「ミライ」燃料電池スタックの解体性向上マーク,  
重心位置マーク

② ドアトリムの引き剥がし位置の指示

引き剥がし荷重を従来比で 30%低減できる位置を割り出し, 解体性向上マークにて明示している(図 5).



図5 ドアトリムの解体性向上マーク

③ インストルメントパネルの取り外し位置の指示

V 字ミゾの設置によりインパネ部分を強く引っ張ると容易に取り外せるようにしている(図 6).

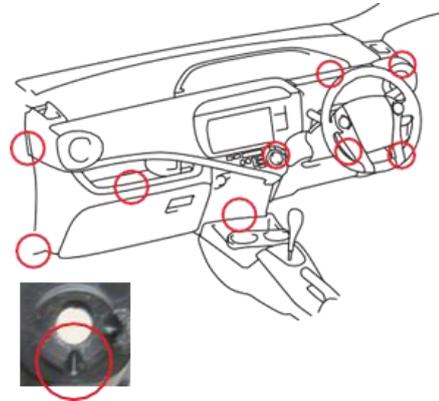


図6 インストルメントパネルの解体性向上ミゾ

④ ワイヤーハーネス プルタブ式アース端子部構造

缶詰のフタのように引っ張るだけでアース部が容易に分離/解体できる構造にしている(図 7).

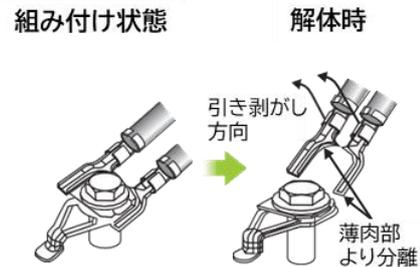


図7 ワイヤーハーネス プルタブ式アース端子部構造

⑤ ワイヤーハーネス 視認性向上テープの設定

効率よく引き剥がせる位置付近に目立つ「黄緑色」テープを巻きつけることで, 視認性を向上させている(図 8).



図8 ワイヤーハーネス 視認性向上テープ

## ⑥ ワイヤーハーネス配置の工夫

ワイヤーハーネスが極力他部品に干渉することなく引き剥がすことができる配置にしている(図9)。

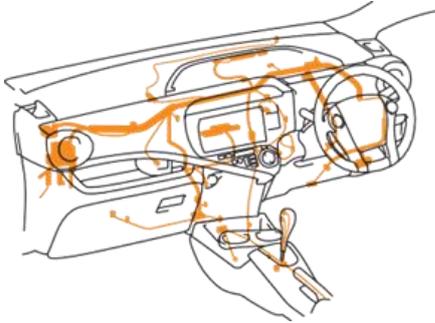


図9 ワイヤーハーネス配置の工夫

## 2.2 外部環境の変化と現在の取り組み

## 2.2.1 欧州 ELV 規則案における易解体性の要求

現在、欧州では環境問題への意識・取り組みが以前にも増して進められている。このような背景を受けて、欧州 ELV(End of Life Vehicle)規則が2025年に発効見込みである。その規則のなかにおいて、現段階は案であるが、以下に示す自動車の19部品に対し、2029年には破碎前の除去を、2031年には取り外しが容易な設計を行うことが求められている。その実現に向けて、易解体構造の必要性が高まっている(図10)。

- ① BEV用大容量電池
- ② e-Drive モーター
- ③ 補機電池
- ④ エンジン
- ⑤ 触媒コンバーター
- ⑥ ギアボックス
- ⑦ ウィンドシールド等のガラス製窓
- ⑧ ホイール
- ⑨ タイヤ
- ⑩ ダッシュボード
- ⑪ 音響、ナビ及び100cm<sup>2</sup>超のディスプレイ、マルチメディアコントローラーを含むインフォテインメントシステムのアクセス可能な部品
- ⑫ ヘッドライト
- ⑬ ワイヤーハーネス
- ⑭ バンパー
- ⑮ 流体容器

## ⑯ 熱交換器

## ⑰ 10kgより重い任意の単材料金属部品

## ⑱ 10kgより重い任意の単材料樹脂部品

## ⑲ 電気・電子部品

- (a) 電気自動車のインバーター
- (b) 表面積10cm<sup>2</sup>超のプリント基板
- (c) 表面積0.2m<sup>2</sup>超の太陽光発電パネル
- (d) AT ミッションの制御モジュールとバルブボックス

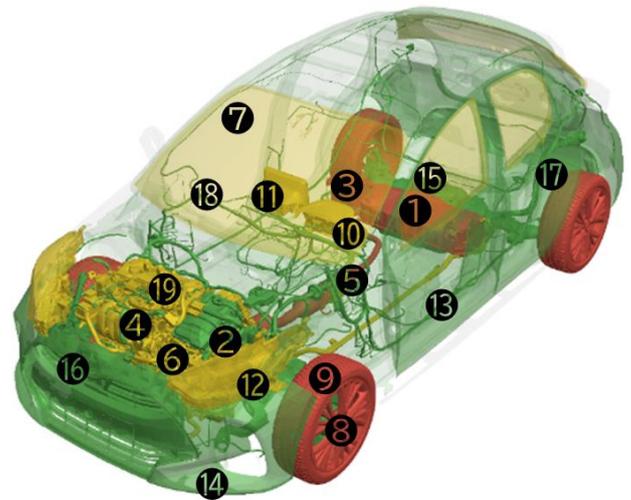


図10 欧州 ELV 規則 再利用/循環要求部品

## 2.2.2 中古部品市場の動き

現在の市場において、既に使用済み自動車から取り外され、中古品としてのニーズがある部品が存在している。例えば、故障時の補給品としてのエンジン、オルタネータ、エアコン用コンプレッサー等、事故時の補給品としてのバンパー、サイドミラー、ヘッドランプ等がある。このような使用済み自動車から取り外した部品の流通は、解体業の経済性を成立させる一つの大事なスキームになっている。

また、2.2.1項で述べた19部品を取り出す際に、対象部品に加え、その周辺の部品も取り出すことになるため、今まで、ニーズがあったが取り外されていなかった部品が中古品として流通する可能性がある。

## 2.2.3 トヨタの現在の取り組み

2.2.1項および2.2.2項の内容を受けて、改めて、トヨタグループと仕入先様とが丸となり、自動車からの部品取り外しや部品の分解を行い、取り外しや分解が難

しい部位、構造等の現状把握、課題の整理を実施している(図 11)。また、2.2.1 項⑨(b)プリント基盤、(c)太陽光パネルについても調査を開始した。



図 11 現車両構造の現状把握、課題整理

### 2.3 今後の方向性

サーキュラーエコノミーの実現という社会的潮流に加え、欧州 ELV 規則案への対応が必要となり、自動車業界として、従来の組付性だけでなく、メンテナンス、修理、リユース、リビルト、リサイクルがしやすい設計が求められるようになった。

そこでトヨタでは、DSM というデジタルツールを用いて解体作業情報(工程)や部品取り外し労力と部品価値(コスト/メリット)を視える化することで、工程ごとのコスト/メリットを定量的に評価して設計に活用することを検討している。なお、工程を逆向きにした検討では組付評価も可能である。

## 3. DSM の概要と研究の進展

DSM とは要素間の依存関係を示す行列で、複数の物事に関連性や相互作用を分析するために用いる問題解決手法の一つである。DSM はシステムの要素とその相互作用を表現するネットワークモデリングツールとして、グラフを用いる手法と比較してコンパクトで視覚的・直感的な表現が可能なのに利点がある。1970 年代に Donald V. Steward によって DSM が考案<sup>(1)</sup>され、1981 年には DSM に関する最初の論文<sup>(2)</sup>が発表された。その後、2012 年にはマサチューセッツ工科大学の Steven D. Eppinger と Tyson R. Browning が

DSM の手法と応用を体系的にまとめて発表<sup>(3)</sup>したことで製品開発研究へ応用が拡大してきた。

トヨタグループでは 2005 年に豊田中央研究所の佐藤らが DSM を用いた生産準備プロセスの解析手法を提案<sup>(4)</sup>し、設計等項目間の物理的因果関係をマトリクスに表現すること等により鍛造工程の型設計プロセスを 40%短縮できることを示した。その後 2017 年には西垣と朝賀がモジュール化手法として応用し、構造の力学特性を利用してモジュール分割することで、部品構成の前例がない新規製品のレイアウト構造の創出とその最適部品構成およびモジュール構成を可視的な形で得られることを示した<sup>(5)(6)</sup>。このモジュール化の知見を活かし、弦田、岩瀬らはプロセスと構造のつながりを融合した DSM を易解体性の評価に用いることを提案<sup>(7)</sup>した。具体的には、コーヒーメーカーの解体をケーススタディとして、“-1”のフラグを活用して解体の順序制約違反をマトリクスに明記することで、制約を解消すべきネックとなっている設計変更箇所を設計者に分かりやすく提示可能なことを示した。次章では、これらの技術をさらに発展させて自動車のフロントドアを対象に易解体ドアモジュール設計に応用した事例を示す。

## 4. サーキュラーエコノミー対応を目指したマトリクスベース設計手法

### 4.1 手法

本章では易解体設計手法として、Eppinger らの DSM<sup>(8)</sup>をもとに弦田らが提案した結合情報を表す Product architecture DSM と工程を表す Process architecture DSM の両面を持つ Hybrid DSM<sup>(7)</sup>と、Feldmann らによる解体性評価法<sup>(9)</sup>を、自動車部品に適用した。さらに 4.1.4 項や 4.1.5 項において“マトリクスの並び替え”や“順序制約条件の表記”のルールについて体系的にまとめ、透明性が高く、直観的に理解し易い DSM の有効性を示す。

#### 4.1.1 フロントドアの構成

今回、サーキュラーエコノミー対応を目指した易解体設計の対象として自動車のフロントドアを選び、その構成を図 12 に示す。実際のドア構成部品数は 50 以上とな

るが、本章の Hybrid DSM の説明用に 13 部品に単純化した。概してドアはレギュレータやフレーム等の金属部品、ドアトリム等の樹脂部品、サイドウィンドウ等のガラス部品、スピーカーやセンサー等の電子部品、そして銅線の集合であるワイヤーハーネスなど自動車全体で使用される主要な材料を用いた部品群から構成される。図 13 ではこれら 13 部品の結合情報を模式的に表す。模式図における矢印が部品間の結合を、矢印の色が部品結合の強さ(解体性の観点では分離のしにくさ)を表している。模式図は部品間の相対関係を空間的に認識しやすいが、定量的に解体性の良否を判断しにくいという課題がある。そこで Hybrid DSM の導入による定量的な解体性評価方法について次項より説明する。

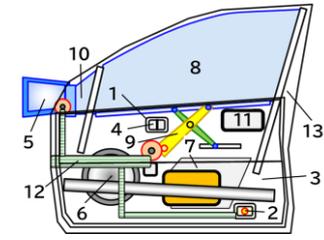


図 12 ドア構成図

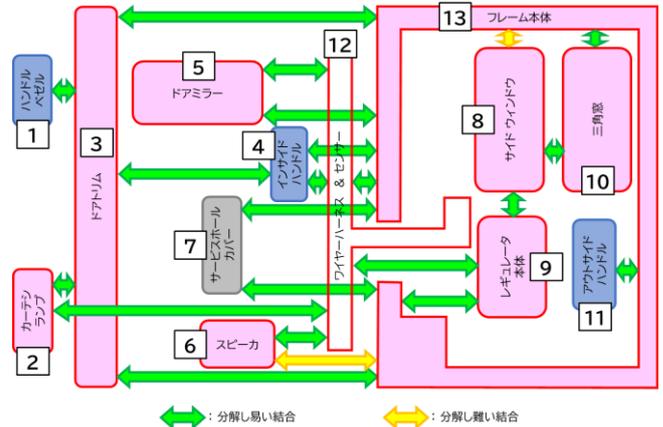


図 13 ドア部品間の結合情報

### 4.1.2 Hybrid DSM の構成

まず、解体や回収の対象となる部品群を解体順に先頭行から並べる。列についても左から同じ順序で並べる。次にこの正方マトリクスの内部を左下三角、対角、右上三角の 3 つのセクションに分け、異なる情報を付与した『マルチ情報マトリクス(Hybrid DSM)』を図 14 に示す。対角項には各部品の回収価値をベネフィットとして付与し、左下三角と右上三角には部品間の結合情報として解体に要する時間をコストとして付与したのちに解体や回収の順序制約条件を上書きする。対角項の部品価値は回収後の用途がリユースかリサイクルかによって価値が変化するため、用途を予め想定した値を入力する。解体所要時間は解体難度によって時間が変化するため、図 14 では難度の低い解体を緑、難度の高い解体を黄色とした。また順序制約は、列番号に該当する部品を解体するには負値の紫色セルで交差する行番号の部品を先に取り外す必要がある。図 14 では 5 番目(5 列目)の部品を解体する前に 1 から 3 番目(1 から 3 行目)の部品を取り外す必要があることを示している。もし、順序制約を表す負値の紫色セルが左下三角にあった場合は順序制約違反となり、列番号に該当する部品は解体できず、当該列部品で解体作業が止まることを意味する。なお、順序制約を表す負値の表記については 4.1.5 項で述べる。

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
ハンドルベゼル	1												
カーテシランプ	2	-1											
ドアトリム	3	-1	-2										
インサイドハンドル	4	-1	-2	-2									
ドアミラー	5												
スピーカー	6												
サービスポールカバー	7												
サイドウィンドウ	8												
レギュレータ本体	9												
三角窓	10												
アウトサイドハンドル	11												
ワイヤーハーネス&センサー	12												
フレーム本体	13												

図 14 マルチ情報マトリクス(Hybrid DSM)

### 4.1.3 解体性評価と損益分岐

コスト対ベネフィットのグラフ作成手順を以下に示す。

- コスト:対象部品(i)の解体所要時間は左下三角に付与された解体所要時間を縦に累積すればよく、次式で表せる。

$$\sum_{k=i+1}^{end} M_{ki} \dots\dots\dots (1)$$

- ベネフィット:対象部品(i)の回収価値は対角項 M<sub>ii</sub> である。

これらを左から列ごとに累積することで図 15 の解体

性評価グラフを得ることができる。このグラフの傾きが大きい程、短時間で効率よく高価値部品を回収できることを示しており、逆に傾きが小さければ非効率な回収となる。また、横軸の解体所要時間をアワーレート等で縦軸と同じ価値(金額等)に変換し、概算ではあるが損益分岐ラインを重ね描きすると解体ビジネスの成立範囲が時間や解体工程を通して確認できる。

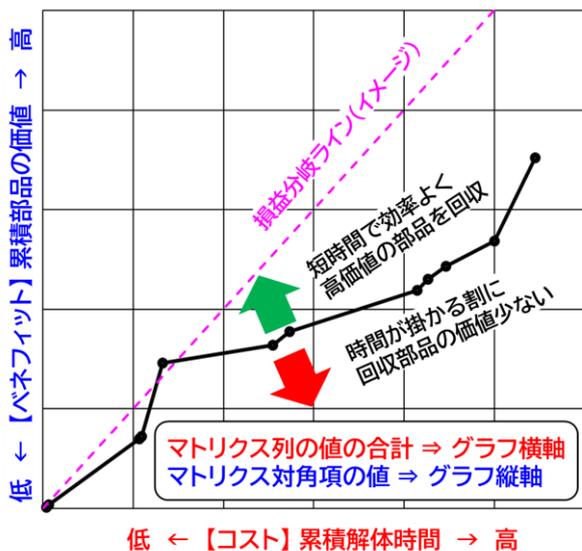


図 15 解体性評価グラフ

#### 4.1.4 並び替えのルール

ここでは解体順序を変更することで解体効率が向上するマトリクスの並び替え操作について説明する。ルールとしては順序制約条件である負値のセルが右上三角に留まる範囲でのマトリクスの並び替え、すなわちセルの許容移動量を考える。図 16 に前進移動に関するルールを示す。早期に回収したい部品を  $K$  とした場合、許容移動量は  $F_c$  と  $F_r$  の小さい方、つまり早く対角項に到達する移動量となる。図 16 中段にあるとおり、 $F_c = k - r_i$  ( $i$  は任意の部品番号) であり、常に  $F_r = k$  より小さくなるため、許容移動量は  $F_c$  で決まる。 $r_i$  が縦に複数並んでいる場合、許容移動量は  $r_i$  が最も大きく  $K$  に近い制約条件セルの  $F_c$  で決まる。まとめると図 16 下段の通り、前進移動を考える場合は  $K$  に最も近接する上方の制約条件セルに注目するだけでよく、右方に並ぶ制約条件セルについては  $K$  の前進移動でむしろ対角から離れて行くため、考慮しなくてもよい。同様に図 17 に後退移動に関するルールを示す。後退移動は早期に回収する必要のない部

品を後送りする際に活用し、最近接の右方の制約条件セルに注目するだけでよく、上方に並ぶ制約条件セルについては考慮しなくてもよい。

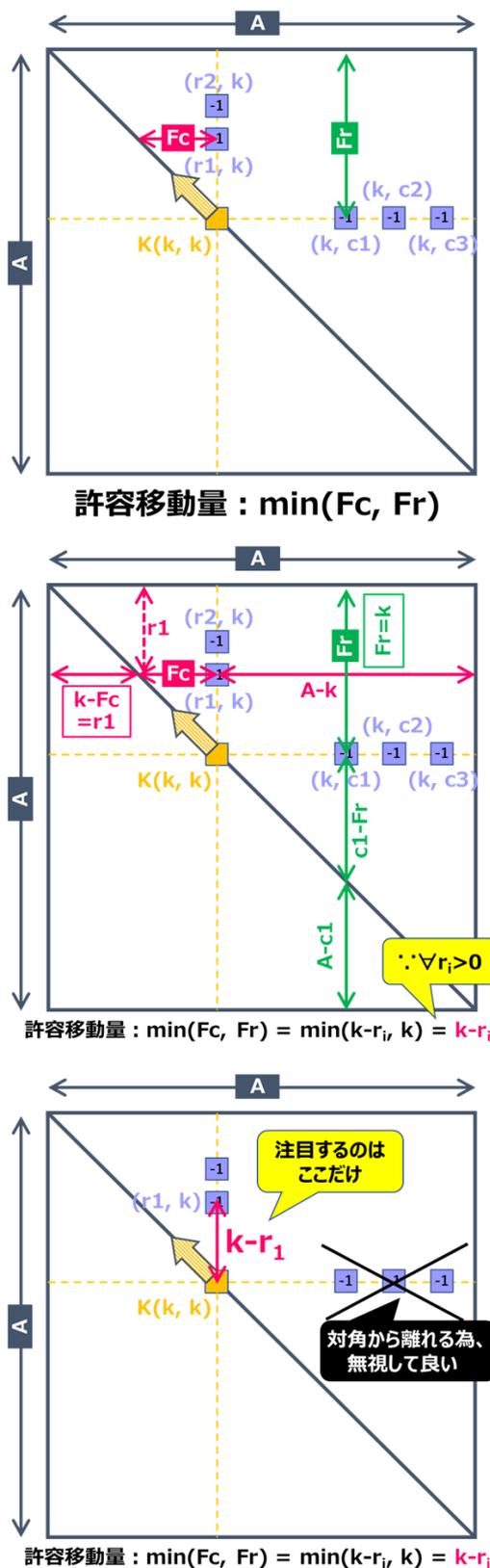


図 16 前進移動の並び替え

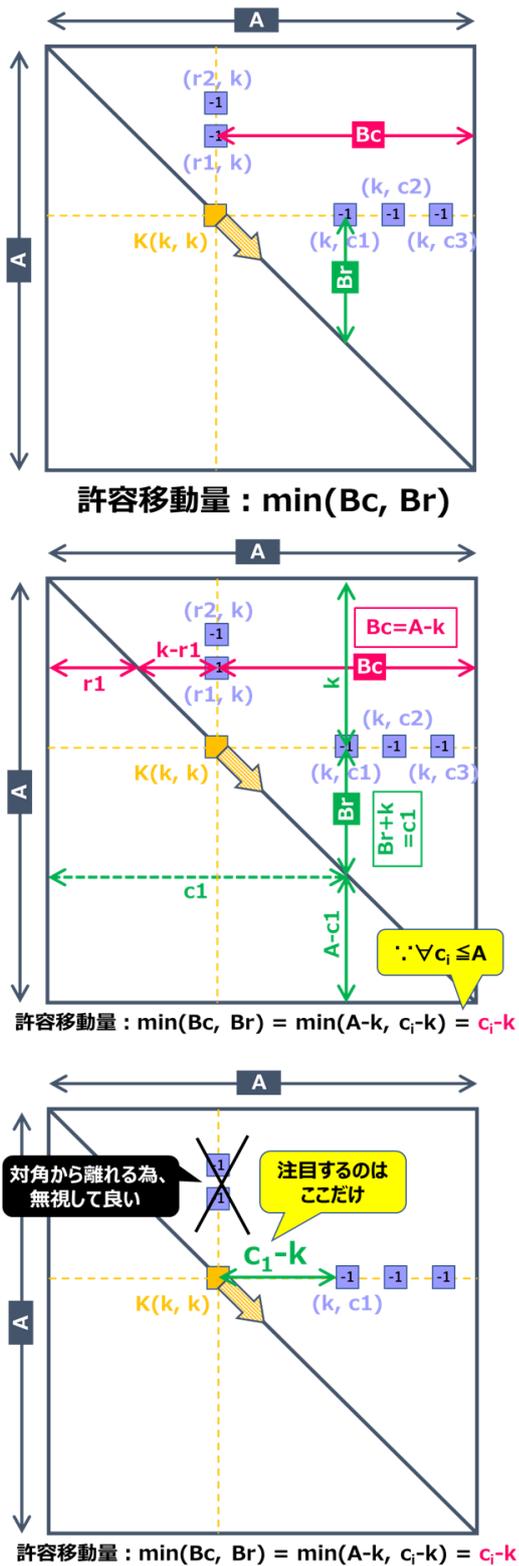


図 17 後退移動の並び替え

#### 4.1.5 順序制約条件の表記

部品間関係性により順序制約の負値が変化することを図 18 に示す。例えば、対象部品 c1, c2, c3 に対して直接的な結合関係、もしくは直接覆いかぶさる等の位置関係において、先行で部品 K を取り外す必要がある場

合、部品 c1, c2, c3 と部品 K が右上三角で交差する順序制約の負値は-1 となる。さらに部品 K が別の部品 r1, r2 の順序制約を受けている場合、間接的に部品 c1, c2, c3 は部品 r1, r2 の順序制約を受けることになるため、部品 c1, c2, c3 と部品 r1, r2 が右上三角で交差する順序制約の負値は 1 繰り下がり、-2 とする表記法を用いる。図には示していないが、もし部品 r1, r2 がさらに別部品の順序制約を受け、間接的な順序制約関係が重畳されていれば、部品 c1, c2, c3 と当該部品が右上三角で交差する順序制約の負値は-3, -4, -5...と繰り下がる形で変化する。このように間接的な順序制約を DSM 上で表すことで、部品をみただけでは分からない部品間関係性に気付くことが可能となる。また、具体事例は後述するが最上位の順序制約を解除するだけで下位の順序制約を連鎖的に解除することが可能である。なお、4.1.4 項のとおり、解体順序の並び替えに関しては、並び替え対象部品に最も近接する制約条件セルに注目するだけでよいため、最近接ではない間接的な順序制約は並び替えに影響しない。

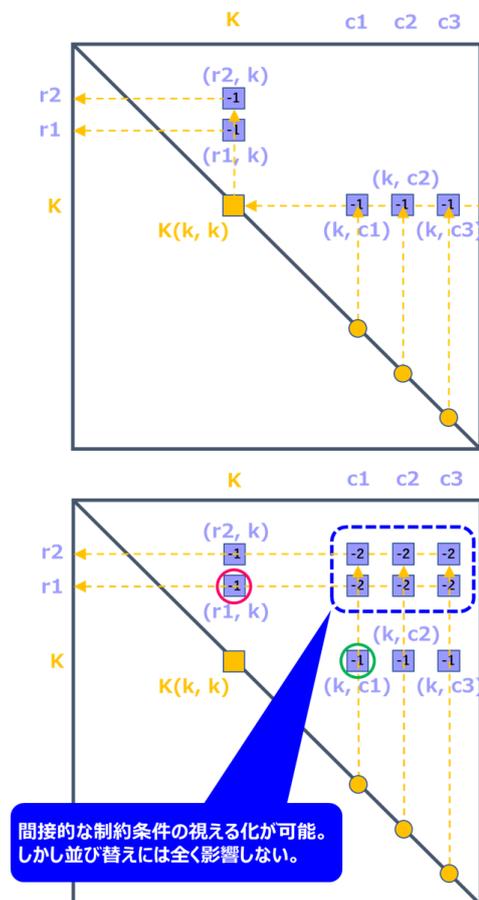


図 18 直接/間接的な順序制約

## 4.2 易解体ドアモジュールの設計事例

### 4.2.1 サーキュラーエコノミー対応の部品回収

具体的なドア部品の解体について DSM で表現した事例を図 19 に示す。先ず図 19(a) では 41 部品で構成されるドア部品を自身で手解体した順序で並べる。今回の設計検討では、リユース、リサイクルの観点から“汎用性が高い部品”であるモーター、スピーカー、センサーと、“銅を多く含有した部品”であるワイヤーハーネスを早期回収することを目標とし、当該部品をピンク色で網掛けした。この解体順序では対象部品を個々に時間をかけて回収することとなり、解体効率がよいとはいえない。

### 4.2.2 モジュールデザインによる解体性の効率化

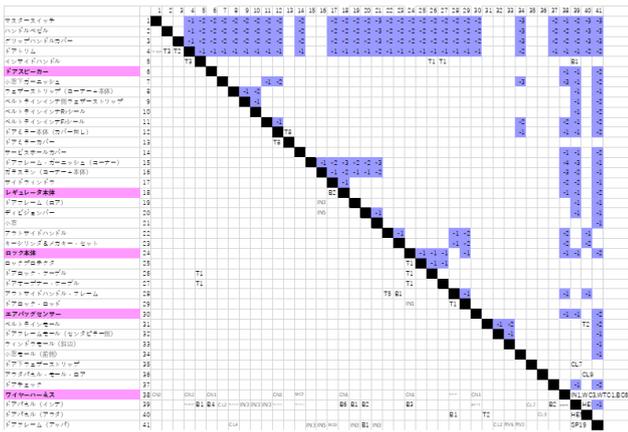
そこで図 19(b) では近接部品をまとめるモジュールデザインを検討した。まずレギュレータアッセンブリをレギュレータ本体とレギュレータモーターに分離した上で、レギュレータモーターとスピーカーを前側のサービスホールカバー、ワイヤーハーネスと一体化し、前側モジュールとした。また、エアバッグセンサーとドアロックを後側のサービスホールカバー、ワイヤーハーネスと一体化し、後側モジュールとした。さらに図 19(c) では複数の行と列を占めるモジュール構成部を一行一列に縮退化し、シンプルな DSM 表現とした。

次にリユース、リサイクルの観点で早期に回収したいモジュール部の解体順序が繰り上がるように 4.1.4 項のルールに則り、赤いセルの並び替えを行った。図 19(c) の後側モジュールの赤いセル直上には順序制約を示す紫

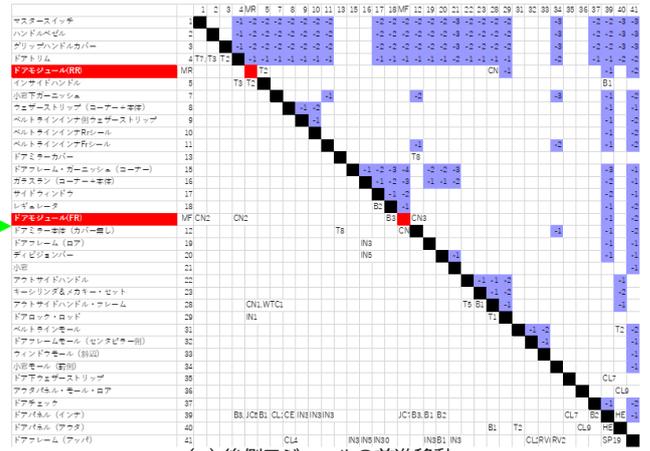
色のセルが 4 行目まで存在しないため、図 20(a) では後側モジュールを 5 番目の解体順序まで繰り上げた。一方、前側モジュールは 16 番目から 17 番目に繰り下がり、また、赤いセル直上に順序制約を示す紫色のセルが存在するため、前進移動ができない状態である。そこで前側モジュールより先に回収予定の部品群に着目すると、順序制約を示す紫色のセルが右側に存在しない範囲で後退移動が可能だと見てとれる。図 20(b) では前側モジュールより先に回収予定の部品群について解体順序を繰り下げることによって“相対的”に前側モジュールの解体順序を 10 番目まで繰り上げた。なお、繰り下げた部品群で右側近傍に順序制約のセルが存在する場合は制約対象部品とともにまとめて後退移動させる。

### 4.2.3 構成変更による更なる効率化

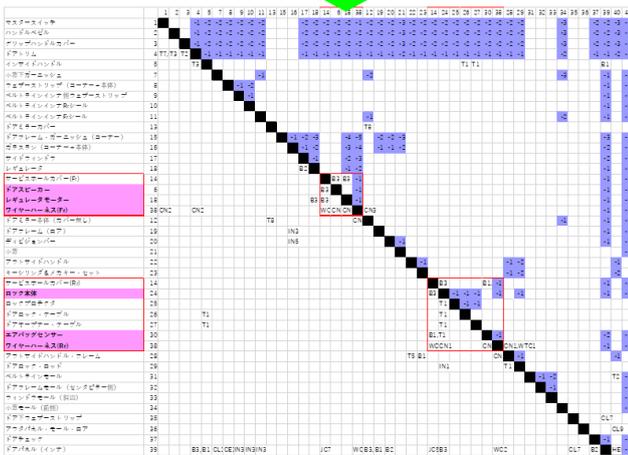
図 20(b) で前側モジュールの解体順序は繰り上がったものの直上にはレギュレータ本体や、その間接順序制約が連なっている。ここでレギュレータ本体と前側モジュール(具体的にはレギュレータモーター)の順序制約を解除するよう構成変更ができたと仮定すると、間接制約を含めて 4 つの順序制約セルを消去可能なことを図 20(c) に示す。このように連鎖的に下位の順序制約を解除できることが間接的制約条件のメリットである。以上の手順により、最終的にリユース、リサイクルの観点で早期に回収したいモジュール群を 6 手で回収できるような高効率易解体の設計を見いだせた。



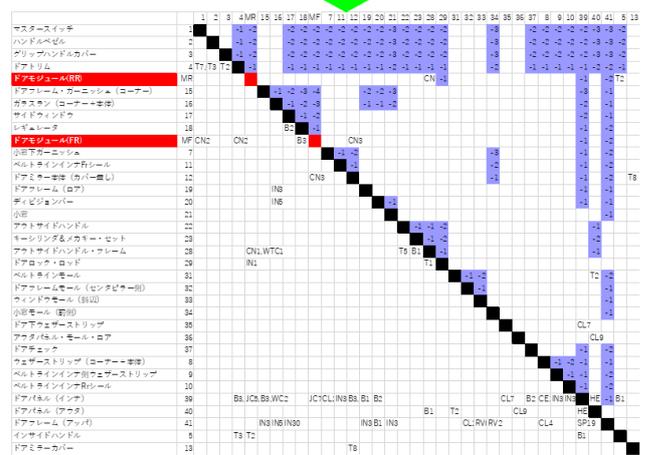
(a) 手解体による初期の解体順序



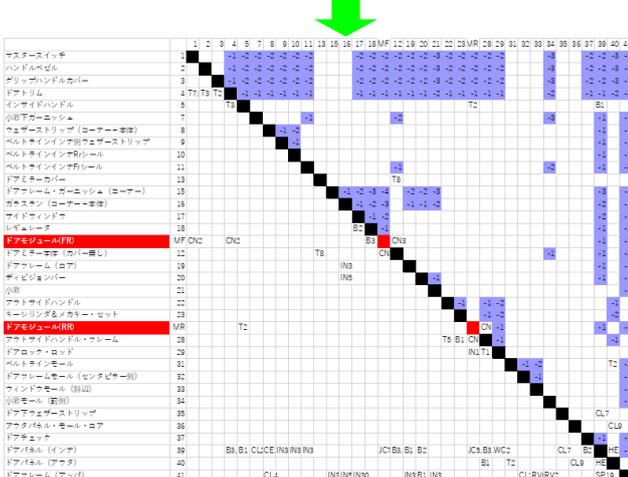
(a) 後側モジュールの前進移動



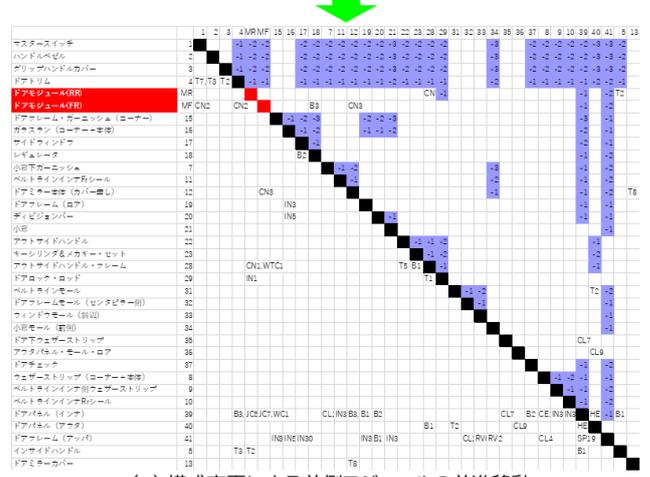
(b) 近接部品のモジュール化 (前側・後側)



(b) 前側モジュールの“相対的”な前進移動



(c) モジュールのシンプル表現



(c) 構成変更による前側モジュールの前進移動

(左)図 19 モジュール化と単純化の表現

(右)図 20 高効率な易解体を目指したマトリクスの並び替え

### 4.3 考察とまとめ

図 19～図 20 の並び替えにおける解体性評価の変遷を図 21 に示す。縦軸は図 15 と異なり、回収価値の“ベネフィット”から回収する労力・時間などの“コスト”を差し引いた“利益(プロフィット)”とした。つまり、図 15 の

縦軸から横軸を差し引く計算を図 21 の縦軸に当てはめた。縦軸には横軸の“コスト”が加味されるため、同じ部品を回収する場合でも短時間でまとめて外すような図 19(b)⇒(c)の変化では利益が増加する。図 21 は前後 2 つのモジュールが回収できた時点でグラフ作成を終え

ており、今回の易解体ドアモジュールの例では、たとえ副次的な回収部品数が減ったとしてもモジュールの回収順番が繰り上がれば利益が増加することが確認できる。つまり、易解体のビジネスモデルを考える場合、回収価値だけに注目するのではなく、回収する労力・時間などの“コスト”を加味することが重要である。

今回、4.2.2 項マトリクスベース設計手法を、4.2.3 項でモジュラーデザインによる構成変更を説明したが、現実的な部品設計にあたり、織り込みたいアイデアとして“回収価値の変化”がある。4.1.2 項で述べたように回収後の用途がリユースかリサイクルかによって部品の価値は変化する。今回のように前後 2 つのモジュールの回収に留めず、全てのドア部品を解体し、その解体性評価をする場合は、全ての対角項に回収後の用途を想定した値を入力した上で DSM の全ての列について左から累積したグラフを作成することとなる。

なお、今回の易解体ドアモジュールの例では 4.1.4 項のルールに則り、順序制約に違反しない範囲で“手動”にて並べ替えを行った。今回は 2 つのモジュールの早期回収に狙いを絞った並べ替えであり、部品点数が少ないのと、手法の特徴を理解するため、“手動”での並び替えとした。回収対象部品が増える場合は弦田らの“自動”で並び替えるプログラム<sup>(7)</sup>の改良や、並び替えルールを制約条件とした“組み合わせ最適化問題”への展開が効果的と考える。また、今回の DSM は易解体の順序でマトリクスを作ったが、逆順に並べ替えることで部品組付等の工程検討に適用可能であることは想像に難くない。

本章では DSM を用いた解体順序、モジュラーデザイン、構成変更の検討をつうじて解体効率のよいドア設計を解体ビジネス目線で視える化できた。また、DSM の並び替えルールや順序制約条件の表記についても体系的にまとめることができた。

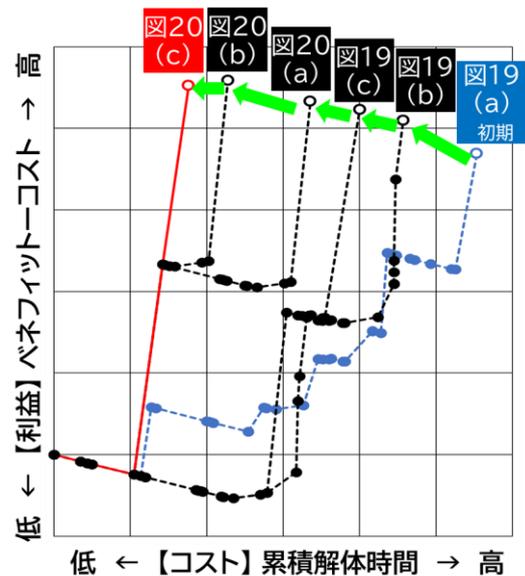


図 21 解体効率の変遷

## 5. まとめ

本稿では自動車の資源循環を推進するための手法の一つとして、トヨタのこれまでの易解体の取り組みと今後の方向性について示した。また、具体的な設計検討の手法として DSM を用いた事例を紹介した。この事例では対角項の部品の価値を“部品の価格”としたが、流通ビジネスの観点では“質量”や“サイズ”としてもよく、さらにカーボンニュートラル対応の指標としては“CO<sub>2</sub> 排出量”としてもよい。循環型社会の実現には確固たるサーキュラービジネスモデルの構築が不可欠と考えており、DSM をはじめとしたさまざまな手段を用いてその実現に向けて取り組みを進めていく。

### ■謝辞

サーキュラーエコノミーに向けた易解体設計技術の開発にあたっては、株式会社豊田中央研究所の与語様、長嶋様、西垣様、岩瀬様をはじめ、皆様のご支援、ご協力により進めることができております。ここに感謝の意を表します。

## ■参考文献

- (1) Donald V. Steward, “DSM – Where it’s been – Where it needs to go”, DSM 2007: Proceedings of the 9th International DSM Conference, Munich, Germany, 16-18.10.2007.
  - (2) Donald V. Steward, “The design structure system: A method for managing the design of complex systems.”, IEEE Transactions on Engineering Management, 28(1981), pp.71-74.
  - (3) Eppinger, S. D. and Browning, T. R., “Design structure matrix methods and applications” (2012), The MIT Press.
  - (4) 佐藤 守一, 稲森 豊, 中野 冠, 鈴木 寿之, 宮嶋 伸晃, “海外生産準備プロセス解析手法の提案”, 日本機械学会論文集C編, vol.71, No.705(2005), pp.1734-1741.
  - (5) 西垣英一, 朝賀泰男, “新規レイアウト構造の創出に基づくモジュール化手法”, 日本機械学会論文集, Vol. 83, No. 853(2017).
  - (6) Asaga, Y., Nishigaki, H., “Modularization Method Based on New Layout Design in Conceptual Design Stage - Application of Multi-material Lightweight Structures Utilizing Machine Learning -”, The 21th International DSM Conference (Monterey, California, USA), 23-25.9.2019.
  - (7) 弦田遼平, 岩瀬識, 桑野義正, 朝賀泰男, 西垣英一, “サーキュラーエコノミーを目指した易解体・分解工程の評価”, 設計工学・システム部門講演会講演論文集, 2023.33巻, p.1109- (2023).
  - (8) Eppinger, S. D. and Browning, T. R.: Design Structure Matrix Methods and Applications. The MIT Press (2016).
  - (9) Feldmann, K., Trautner, S. and Meedt, O., Innovative Disassembly Strategies Based on Flexible Partial Destructive Tools, Annual Reviews in Control, Vol. 23 (1999), pp. 159-164, ISSN 1367-7588.
- 4章は, 國司 大地:サーキュラーエコノミー対応を目指したマトリクスベース設計手法, 2024年自動車技術会春季大会 予稿集, No.310 より転載

# 材料循環の取り組み

田代 啓 <sup>\*1</sup>高岸 れおな <sup>\*1</sup>坂本 瑞樹 <sup>\*1</sup>田端 一英 <sup>\*1</sup>棚橋 和浩 <sup>\*1</sup>古川 雄一 <sup>\*2</sup>永井 隆之 <sup>\*1</sup>

## 要旨

トヨタはサーキュラーエコノミーの実現に向け、クルマの循環・材料の循環・基盤づくりを中心に実践してきている。本稿ではアルミ・磁石・樹脂のリサイクルの現状と課題に触れながら、トヨタの取り組みについて紹介する。

キーワード フードインナー, 熱処理, 永久磁石, モーター, ASR, 選別技術, マテリアルリサイクル, ケミカルリサイクル

## 1. はじめに

近年、サーキュラーエコノミーへの転換に関心が非常に高まっており、各国の政策も活発化してきている。サーキュラーエコノミーの KPI (Key Performance Indicator) としては再生材使用率が代表的であり、欧州 ELV (End of Life Vehicle) 規制強化においても再生材使用率が謳われる案が公表されている。また、自動車業界でも、カーメーカー各社より再生材活用の目標設定がなされており、トヨタも 2023 年 10 月に再生材使用率の目標を掲げ再生材活用の取り組みを強化している。本稿では、アルミ・磁石・樹脂のリサイクルの現状と課題について触れながら、トヨタの取り組みについて紹介する。

## 2. アルミのリサイクル

### 2.1 現状

「サーキュラーエコノミーへの取り組み」の 2.5.4 項「材料循環の最大化」で述べたように、鉄、アルミなどに代表される金属は、クルマの重量における材料構成比で多くを占め、特にアルミに関してはクルマの電動化・軽量化にともない使用量増加の傾向にある。そのため、今後

もクルマ製造に必要とされるアルミ量の拡大が見込まれ、再生材使用率の向上に関しても材料確保および活用技術の向上が求められる。

トヨタでもアルミ再生材活用の取り組みは以前から実施しており、2020 年には熱交換器用クラッド材を利用したアルミ板材を MIRAI のフードインナーにて採用している。

### 2.2 課題

アルミ再生材利用を拡大するにあたり大きな課題となるのは、再生材を使用する部品に求められる強度やその他各種特性を満たせるかどうかであり、その特性は基本的な強度特性はもちろん、耐腐食性、疲労強度特性、塗膜密着性など多岐にわたる。その各種特性には、一般的に材料に含まれる化学成分が大きく影響するが、PCR (Post Consumer Recycle) といわれる市中に流通するスクラップ材は、それら不純物元素である成分が多い傾向にあり、再生材を活用する際の障害となる。また、活用できたとしても不純物元素の少ないアルミ新隗を多く投入し不純物元素濃度を大きく薄める必要がある。この課題を克服し、不純物許容量が大きくなると活用できるスクラップ材の範囲が広がり、より材料確保が容易になり、より再生材使用率の向上が期待される。

### 2.3 トヨタの取り組み

上述のとおり不純物元素の課題への対策手法は複数考えられる。アルミ板のフードインナーへの適用では成

<sup>\*1</sup> 先進技術開発カンパニー CE 推進室

<sup>\*2</sup> モノづくり開発センター 素形材技術部

分・製造工程の調整で伸びの低下を最低限にし、また設計や製品加工技術の工夫により不純物が多い材料でも採用を可能にしている。このように技術的アプローチから不純物許容量を拡大する取り組みは他にもあり、2024年にトヨタ自動車の古川は、高延性材のアルミニウムダイカスト合金において熱処理簡略化の手法を提案している<sup>(1)</sup>。そのなかでは、鋳造時の温度履歴において鉄を含む析出物を活用することで熱処理を無くし、鋳造の温度履歴のみの最適パターンで熱処理を完結できるようにしており、特定の温度条件下では $\alpha$ -Al中にマグネシウムが介在しない塊状の $Al_{15}Si_2(Fe, Mn)_4$ を優先的に析出し、先にケイ素を析出させることで $Mg_2Si$ の析出を抑制し材料の伸び特性を確保している。これは不純物の鉄が伸びを低下させる課題を克服する可能性を示しており、鉄の許容量拡大につながる結果である。また、使用済み自動車からのリサイクルや市中のスクラップ活用の拡大にも繋がる技術であり、その実現に向け取り組んでいく。

### 3. 磁石のリサイクル

#### 3.1 現状

永久磁石は電動化・デジタル化の進展にともない、今後、利用量の増加が見込まれる。そのなかでも、自動車向け用途が50%以上を占めており、電動化によりさらなる増加が見込まれる(図1)。この永久磁石の原材料である希土類元素(Nd, Dy, Tbなど)が、中国を含む特定の国に依存しており、低コストで供給する中国は磁石のシェアを拡大、日本のシェアは縮小している。また、永久磁石を用いないモーターも存在するが、省エネ性能において永久磁石を使用したモーターに劣る。そのため、市中からの廃磁石のリサイクルが実施されていない現状では、サプライチェーン上供給途絶や価格高騰(図2)などの地政学リスクが想定される。

法規制においては、欧州ELV規則や欧州重要原材料法(CRMA)の対象に磁石用希土類元素が織り込まれており、近い将来サプライヤーに磁石のリサイクルの要請と数値目標の提示がされる可能性がある。

トヨタグループでは、「①市中からのユニット部品回収」、「②ユニット部品からの磁石取り出し技術」、「③回収した

磁石のリサイクル」のスキーム構築や技術開発を進めている。これらの取り組みおよび課題を紹介する。

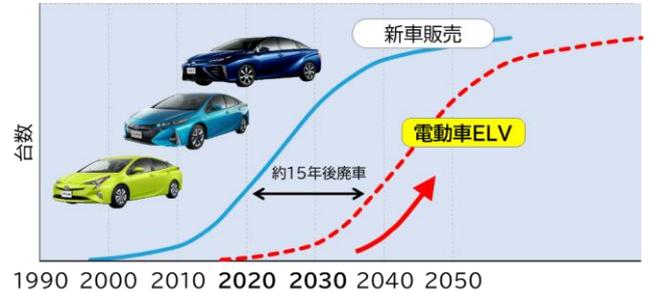


図1 今後の電動車の普及イメージ



図2 希土類元素の市況価格

出典:TRADING ECONOMICS 資料より作成<sup>(2)</sup>

#### 3.2 課題とトヨタの取り組み

「①市中からのユニット部品の回収」においては、電動化の過渡期にあり、現状ユニット部品が集まらないため(図1赤点線を参照)、市場での商流スキームが存在しない。しかしながら、将来、電動化由来の廃車が増加した場合、もしくは、欧州法規制が施行されるタイミングで、磁石リサイクルを実施できるように「②ユニット部品からの磁石取り出し技術」の開発を進めておく必要がある。

現在は、豊田メタル株式会社と協業し、工程内の廃品や試験車などで磁石回収の実証を行っている。ロータの主流な磁石固定構造の例を図3に示す。ユニット部品からの磁石取り出しにおいては、主にロータから磁石を取り出すことに課題がある。これは、電磁鋼板内の磁石が熱硬化性の樹脂で封止、接着されているためである。

ロータからの磁石の取り出し工程の概略図を図4に示す。磁石の回収は、高温槽で加熱することで樹脂の炭化により接着力を消失させ、磁石強度を低下させる

(Strength 低下). その後、急冷して積層されている電磁鋼板を変形させ、間隙のある積層状態とする(Stress 増加). 最後に、ロータに通したバーを振動させることで、磁石を取り出すことが可能になる. 回収率はほぼ 100% を達成している. この方法では、ロータの構造が変わっても対応できるという利点はあるが、課題としては、加熱工程でのエネルギー・コスト・時間がかかることや、磁石の酸化、不純物の混入により、リサイクル工程で分離・精製にコストが掛かることが挙げられる.

今後は取り出し工程の改善(工程数削減, 短時間化など)を継続し、取り出し工程のさらなる効率化を目指す. また、中長期的には、磁石を取り出し易い構造にする検討も必要である.

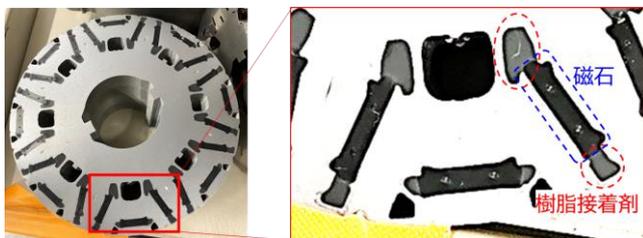


図 3 主流な磁石の固定方法

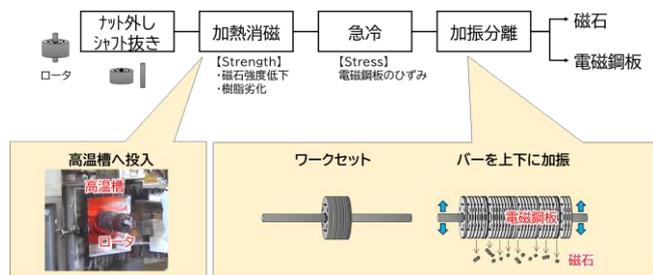


図 4 ロータからの磁石取り出し工程の概略

## 4. 樹脂のリサイクル

### 4.1 国内プラスチック循環の現状

2019 年 5 月にプラスチックの資源循環を推進するための「プラスチック資源循環戦略」が政府によって策定された. この戦略は、2018 年 6 月 19 日に閣議決定された「第四次 循環型社会形成推進基本計画」においてプラスチック資源循環戦略を策定することが定められたことを受け、同年 11 月の中間整理の公表とパブリックコメントの実施を経て、2019 年 3 月 26 日に中央環境審議会から環境大臣に答申されたものである.

ここ数年のプラスチックに関する話題には、海洋へのプラスチックごみの流出による環境汚染がある. また、各国の廃プラスチックの輸入規制などにより日本から廃プラスチックの輸出ができなくなる懸念があることもあり、日本国内でのプラスチックの資源循環の重要性が高まってきている. また、2022 年 3 月の第 5 回国連環境総会にて国際プラスチック条約(2040 年までに国際的なプラスチック汚染を解決するための条約)が採択されたことは大きな動きである. この条約は 2024 年末に発効される見込みである.

2021 年の日本国内のプラスチック廃棄量は 824 万 t である. その内訳は一般系廃棄物が 419 万 t で、産業系廃棄物が 405 万 t である. その後 177 万 t(21%) が材料リサイクルされており、29 万 t(4%) がケミカルリサイクルされている. 材料リサイクルの大半は PET ボトルが再生されている. 一方で 510 万 t(62%) が熱回収処理されており、その内訳は、発電焼却 252 万 t(31%)、セメント原・燃料化 195 万 t(24%)、熱利用焼却 50 万 t(6%)となる. 最後に 107 万 t が未利用で、その内訳は、焼却 63 万 t(9%)、埋立て 45 万 t(5%)となる(図 5).

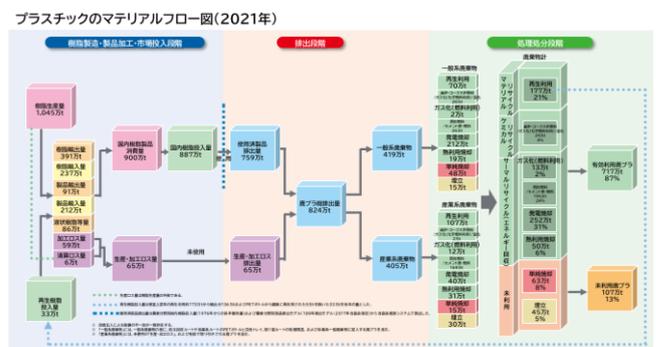


図 5 日本におけるプラスチックのマテリアルフロー  
出典:プラスチック循環利用協会<sup>(3)</sup>

### 4.2 自動車で使用しているプラスチック循環の現状

自動車においては、自動車リサイクル法が制定されており、それに基づいた使用済み自動車リサイクルの流れが確立されている. 廃車は解体事業者に渡り、地球温暖化防止のためのフロンガスの回収処理、安全作業のためのエアバッグの展開・回収処理、燃料・ラジエータ等の液抜き処理が行われる. その後、中古販売される部品・材料

リサイクルされる部品(貴金属、銅など)が取り外される。材料リサイクルされる部品は、手解体もしくはニブラ解体により取り外され回収されたのちに、エンジン解体業者、ワイヤーハーネス処理業者等の2次解体業者へ販売されている。その過程において取り外される樹脂部品もあるが、解体費や軽くてかさばることで運搬費がかかる等、経済性の観点からシュレッダー業者へ引き渡されている(図6)。また、解体業者にてどの樹脂部品の解体が求められているか分からないため、回収されていない実態もあると考えている。

(図9). 自動車からのプラスチック廃棄量は年間 33 万 t で、プラスチック廃棄物量全体に占める割合は約4%であり、ASR 発生量は年間 22 万 t である。



図7 シュレッダーへのプレスされた車体の投入



図6 使用済み自動車のリサイクルの流れ

出典:自動車リサイクル促進センター(4)

シュレッダー業者では、プレスされた車体ガラをシュレッダーし(図7), 風力選別, 磁力選別, 比重選別, 手選別などを組み合わせ、主に 40~60%の鉄, 非鉄金属を回収し, 鉄スクラップは鉄鋼メーカーへ, 非鉄金属は各非鉄金属メーカーへ販売される。軽量物として残る ASR (Automobile Shredder Residue:シュレッダーダスト, 残渣)は, 廃車重量のおおよそ 17~19%である。そのうち, 約 70%が樹脂やゴム, 繊維をはじめとする可燃物であり(図8), ほとんどがサマールリサイクルされている(図9)。すなわち, 自動車に用いられている樹脂部品やゴム部品のうち, 廃車処理の過程で部品や材料として回収されるものは一部に限られ, 大半が ASR となり金属精錬, 溶融炉, 流動床炉でサマールリサイクル利用されている。一部, セメント原料やパレット原料としてのマテリアルリサイクル利用や, 焼却・埋立て処理されている

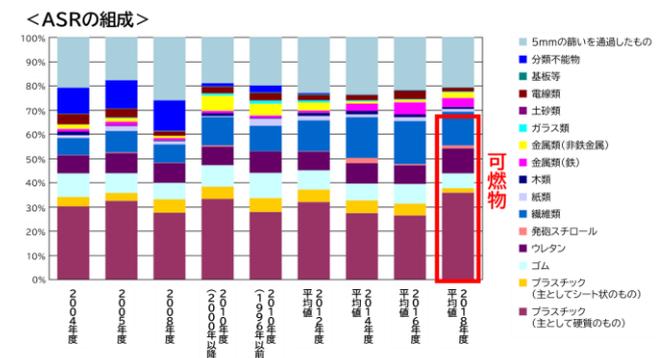


図8 ASRの組成

出典:環境省資料(5)を加工して作成



図9 ASRのマテリアルフロー

出典:環境省資料(5)を加工して作成

### 4.3 これまでのトヨタの取り組み

トヨタは, ASR からの選別回収を目指し, 1993 年から ASR のリサイクル技術を豊田メタルと共同で開発し, 1998 年 8 月から量産レベル(能力 ASR 約 2 千 t/月)で再資源化するトヨタグループオリジナルのリサイクルプラントを稼働させた。車のシュレッダーダストを余すとこ

ろ無く再利用するには、製品素材に戻す必要がある。その実現には、成分の純度を高める選別が必要となるため、ASR リサイクルプラント用に特殊な選別技術を開発し、ASR からのマテリアルリサイクル率向上を可能にした。

選別工程は ELV シュレッダープラントにおいて、プレシュレッダーからシュレッダーを行い、2 段階の風力選別(図 10)により比重の軽い ASR を選別する。その後、磁力選別および渦電流選別によりアルミ、銅等の非鉄金属を選別し、ASR リサイクルプラントにおいて、トロンメルふるい(サイズ選別)でガラス類の回収後、破碎粉碎により粒径調整し、風力選別により比重の軽い発泡ウレタン、繊維類を選別する。発泡ウレタン、繊維類は固化成形機で溶融固化物にする(図 11)。その後、自動車工場鉄スクラップと混合、成形し、電炉原燃料として活用する。風力選別後の比重の重くサイズが大きいものは、浮沈選別、粉碎、比重選別などを組み合わせて、浮いたものは樹脂、沈んだものは非鉄金属に選別する(図 12, 図 13)。これらにより、日本一の高収率(20~25%)で ASR からポリプロピレンリッチな樹脂を選別回収(図 14)する技術を確認し実装している。

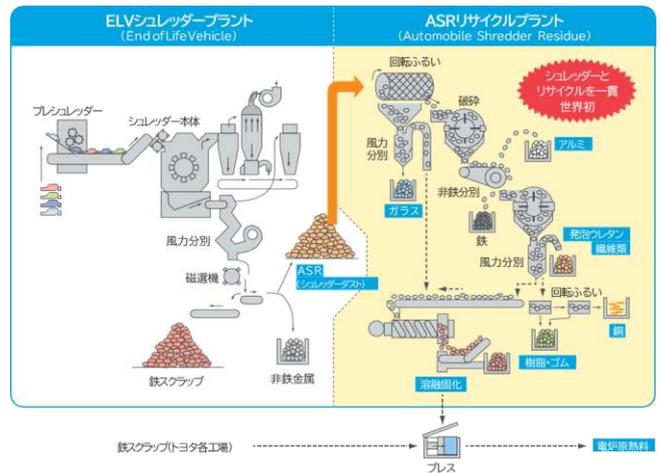


図 11 豊田メタルのシュレッダーと ASR リサイクル工程

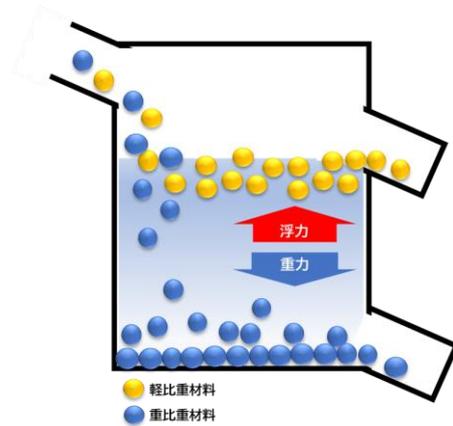


図 12 浮沈選別

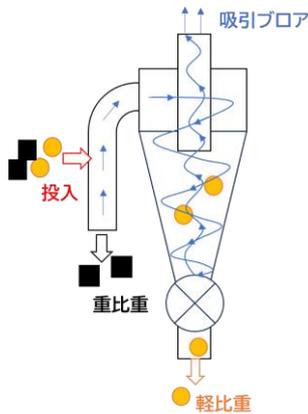


図 10 風力選別

ASRの再資源化フロー

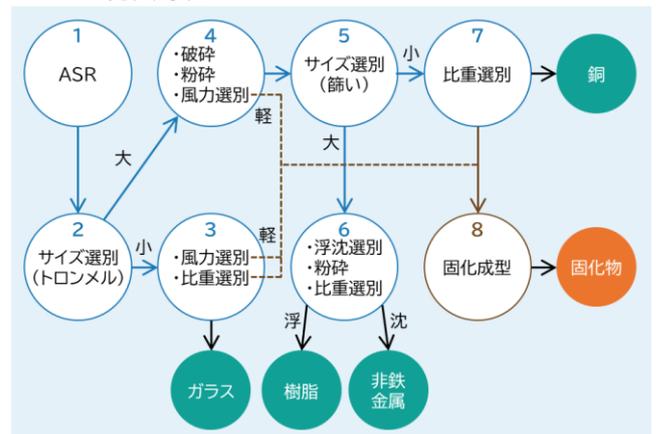


図 13 豊田メタルの再資源化フロー

出典:豊田メタル<sup>(6)</sup>



図 14 選別前後の ASR

#### 4.4 課題と今後の取り組み

##### 4.4.1 マテリアルリサイクル

廃車処理は前述のとおり、解体業者にて適性処理(フロンガス回収, エアバック処理, 液抜き処理)が行われた後に部品回収→プレス処理され、シュレッダー業者にてシュレダー処理→鉄・非鉄回収→ASR の処理となっている。樹脂再生の観点では、シュレダー前に部品回収し材料として再生する BST (Before Shredder Technology)とシュレダー後の ASR から材料リサイクルする PST(Post Shredder Technology)の 2 パターンがある。

##### ① BST(部品回収からの材料再生)

廃車から回収された樹脂部品を材料リサイクルするため、材料として比較的単一な状態であるというメリットがある。前述のとおり、解体業者では、バンパー以外にも部品回収のために床下やインパネ/ドアトリム等の樹脂部品も解体されるが、材料リサイクルされていない現状がある。その理由の 1 つに、部品汚れ、裏面のシール、制振用テープ、クリップなど異種材が付着しており、材料リサイクルにはそれらを 2 次解体にて取り外す必要があり、経済性が成り立たないことにある。今後、BST からの回収を拡大していくために、目的材料以外の異種材料を簡易な方法で効率的に除去できる手法の検討を進めていく。また、回収したい樹脂部品を解体業者に伝え、材料リサイクルを拡大していく仕組みづくりも検討する。

自動車工業会でも樹脂リサイクル高度化への取り組みとして、2026 年より資源回収インセンティブ制度の導入検討が行われる。資源回収インセンティブ制度とは、樹脂やガラス等の ASR になるものを解体/破碎工程で事前に取り外し、マテリアルリサイクルを促進することを目的に、事前取り外し等で使用されない

ASR リサイクル料金をインセンティブとして解体・破碎業者に支払う制度である<sup>(7)</sup>。より品質や純度の高い再生樹脂が得られることに繋がると考えられ、制度導入に期待するとともに再生樹脂活用拡大を率先して進めていく。

##### ② PST(ASR からの選別回収による材料再生)

4.3 節の選別回収にてポリプロピレンリッチな樹脂は回収できるが、比重選別で選別しきれない領域がある(表 1)。これらを再生しやすい材料に選別回収してマテリアルリサイクルに繋げることを考えており、選別技術がとても重要で確立すべき技術と考えている。表 2(磁気密度分離除く)より、比重選別以外の選別技術である光学選別・静電分離技術も ASR 全ての材料種を選別しきことは難しい。光学選別においては、近赤外～レーザーとさまざまな選別技術が存在、研究されているが、共通課題として、サンプルの重なり・汚れの付着により選別不可であることや、選別可能な材料種がそれぞれ限られることにある。近赤外の場合は、黒色の選別が困難であることも課題の 1 つと考えている。静電分離については、摩擦帯電が近い材料種の選別が難しいという課題がある。今後、新たな選別技術の調査・検討や選別技術の組み合わせの検討を進めていく。

##### ③ 共通

BST, PST 共通の課題として、内装部品向けの揮発成分(において VOC : Volatile Organic Compounds)の発生があり、揮発成分低減技術、例えば添加剤(キャッチャー剤)による揮発成分の低減といった効率的かつ効果的な揮発成分低減技術の確立を進めている。また、意匠部品向けには、リサイクル材は黒色が主であるため、特に淡色の着色が難しい。リサイクル原料回収時に色選別を行う対応もあるが、経済性の観点で課題がないわけではない。そのため、脱色・着色技術も重要だと考えており、検討を進めていく。リサイクル材は異物混入の影響も考慮しなければならず、機械物性の低下と外観品質の両観点での対応が必要である。物性低下を考慮した部品設計を進めることと並行して、材料面・製造面の両面での異物除去技術の開発も進めていく。最後に、化学物質規制に対する管理方法も重要であると考えている。

表1 樹脂種類別比重一覧

	PP	PE	TSOP	ABS	PA	PMMA	PC	PVC (軟)	PA-GF	PET	POM
<1.00	●	●									
1.00~1.04			●	●							
1.04~1.10			●	●	●						
1.10~1.15				(●)	●						
1.15~1.20						●	●				
1.20~1.35								●	●		
1.35~1.40									●	●	
>1.40											●

表2 選別技術比較

課題	光学選別					静電分離
	近赤外	中赤外	ラマン	テラヘルツ波	レーザー誘起 ブレイクダウン 分光法	
	サンプルの重り・汚れで選別不可。 選別可能な材料種が限定的。					湿度影響有
	-	設備費高	黒色計測の 時間長	処理能力不明	設備費高	摩擦帯電が 近い材料種の 選別不可
黒色選別	×	○	○	○	○	○
フェーズ	コマーシャル		パイロット	研究段階	研究段階	コマーシャル

4.4.2 ケミカルリサイクル

ケミカルリサイクルは、中間原料であるモノマーに戻す方法(モノマー化)と、さらに上流の原料に戻す油化・ガス化とに大別される。また、処理方法として、マイクロ波を利用した加熱方法や亜臨界水・超臨界水を活用した処理方法、溶媒を活用した処理方法が検討されている(表3)。表3のとおり、それぞれメリットと課題がある。基本、単一材料向けの処理であり、複数の材料を同時に処理することが難しいため、ASRの処理は困難である。熱分解法は混在樹脂も処理可能な方法であるが、塩化ビニルを含むと処理中に塩酸が生成され、設備の腐食が課題となるため、塩化ビニルの除去が必要となる。亜臨界水・超臨界水処理は、処理時間が短いといううれしさがあるが、亜臨界・超臨界状態を作るため高圧設備が必要、設備費が高額という課題があると考えている。今後、前述した選別技術と組み合わせる考え、ASRを処理可能なケミカルリサイクル技術の調査と検討を進めていく。

表3 ケミカルリサイクル技術比較

	マイクロ波 (モノマー化、解重合)	熱分解法 (油化)	熱分解法 (ガス化)	亜臨界水、 超臨界水	溶解法、 溶媒抽出
検討例	・三井化学 ・マイクロ波化学	・BASF ・出光興産	・レゾナック	・東レ ・三菱ケミカル ・ENEOS	・三井化学 ・PureCycle technologies
技術概要	低温熱分解 (200℃程度)	中低温熱分解 (~400℃)	高温熱分解 (600℃~)	亜臨界、超臨界水分解 (100~374℃、 374℃~)	溶媒に溶解し濾過 で分離
対象	・廃PUF	・廃プラ ・ELV由来プラ	・廃プラ	・廃PA6-GF ・廃プラ	・廃PP
フェーズ	・パイロット	・コマーシャル ・パイロット	・パイロット (’24年~)	・パイロット ・パイロット (’24年夏~稼働)	・工場建設(北米)
メリット	低エネルギー	混在プラも処理可	混在プラも処理可	処理時間短、 ハロゲン含有可	低エネルギー
課題	単一材料のみ	塩ビ除去が必要	高エネルギー	高設備費 (高圧設備必要のため)	単一材料のみ溶媒 の再利用

5. まとめ

サーキュラーエコノミーの実現には材料リサイクルが必要不可欠であり、アルミ・磁石・樹脂のリサイクルへの取り組みについて紹介したが、解決すべき課題は多く、多方面での取り組み・技術開発を進めていく必要がある。鉄、銅、ガラス、ゴムなど全ての材料リサイクルについても取り組み・技術開発を進め、限りある資源の循環利用にチャレンジしていく。

■参考文献

- (1) 名古屋大学博士論文, 学位授与番号乙第7432号, アルミニウム合金の高温での界面現象を利用した高機能材料の創製 名古屋大学 古川雄一  
<https://irdb.nii.ac.jp/01152/0006301776>
- (2) TRADING ECONOMIC, ネオジウム, 先物契約, 価格  
<https://jp.tradingeconomics.com/commodity/neodymium>
- (3) プラスチック循環利用協会 プラスチックリサイクルの基礎知識2023 p.6,7,  
<https://www.pwmi.or.jp/pdf/panf1.pdf>
- (4) 使用済自動車のリサイクル処理の流れ, 公益財団法人自動車リサイクル促進センター,  
<https://www.jarc.or.jp/automobile/mechanism/recycleflow/>
- (5) 経産省, 環境省「自動車リサイクルの現状」令和2年8月19日 p16,17,  
[https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/sangyo\\_gijutsu/haikibutsu\\_recycle/jidosha\\_wg/pdf/048\\_04\\_00.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/sangyo_gijutsu/haikibutsu_recycle/jidosha_wg/pdf/048_04_00.pdf)
- (6) 豊田メタルホームページ:ASRの再資源化フロー,  
<https://www.toyotametal.com/business/asr-recycle/>
- (7) 自動車工業会「自工会の取り組みについて」058\_06\_00.pdf,  
[https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/sangyo\\_gijutsu/resource\\_circulation/jidosha\\_wg/pdf/058\\_06\\_00.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/sangyo_gijutsu/resource_circulation/jidosha_wg/pdf/058_06_00.pdf)

# 電池循環の取り組み

石川 裕幸 <sup>\*1</sup>磯村 圭祐 <sup>\*2</sup>高橋 秀典 <sup>\*3</sup>永井 隆之 <sup>\*1</sup>

## 要旨

トヨタは世界最大の電動車メーカーであり、これまでに 2,000 万台を超える電動車を世の中に送り出してきたとともに、電池循環にも取り組んできた。本稿では欧州電池規則の概要、電池の適正処理に関する自動車業界の取り組み、電池の循環利用に関する取り組みを紹介する。

キーワード リパーパス、リビルド、電池規則、スイープ、蓄電システム、使用済み電池、リサイクル

## 1. まえがき

トヨタは世界最大の電動車メーカーであり、これまでに 2,000 万台を超える電動車を世の中に送り出してきた。電動車は HEV(ハイブリッド車)、PHEV(プラグインハイブリッド車)、BEV(電気自動車)、FCEV(燃料電池車)に大別され、トヨタは HEV を主軸に電動車を生産してきた。HEV は BEV や PHEV と比較して 1 台あたりに必要な電池容量が小さいことが特長の一つである。トヨタはカーボンニュートラルに向け取り組んでおり、今後も電動車ラインナップの拡充に取り組んでいく。またトヨタに限らず、気候変動緩和の要請などによって内燃機関車から電動車へのシフトは世界的な動きとなっているため、電池需要の急激な高まりや、将来的には使用済み電動車から従来とは桁違いの量の使用済み電池が廃棄されることが予測される。

電動車には走行用にニッケル水素電池またはリチウムイオン電池を搭載することが一般的である。生産台数の増加や搭載する電池容量の高まりに対応するためには、ニッケル・リチウム・コバルトなどの希少資源の安定調達や使用済み電池の適正処理の観点から電池の循環利用を進めていくことが必要である。加えて欧州では電池に関する法規制も発効しており、再生材利用などの対応が

求められている。本稿ではまず欧州電池規則の概要を述べたのち、電池の適正処理に関する自動車業界の取り組み、電池の循環利用に関するトヨタの取り組みを紹介する。

## 2. 欧州電池規則の概要

欧州電池規則は電池指令を改正する形で 2023 年に発効した法規である。欧州規則(EU Regulation)は EU 加盟各国に直接適用される法律である。加盟国の国内法よりも優先して適用されることで、EU 域内が統一ルールで運用される状態になる。他方、欧州指令(EU Directive)は加盟国が指令をもとに国内法を立法するもので、加盟国には立法にあたり一定の裁量権が与えられていることから、加盟国間で法令が異なる場合がある。つまり、電池に関する規制が欧州指令から欧州規則という形に格上げされたことは、欧州における電池規制の重要性の高まりを示唆している。

欧州電池規則は欧州に流通するすべてのカテゴリーの電池を対象としている。自動車用途では、始動・灯火・点火のみに使用される電池と駆動用の電池の両方が対象であり、新型車からの適用だけでなく、継続生産車も対応項目を満たす必要がある。ここでは欧州電池規則についてその詳細を述べることは避けるが、自動車に関連し、かつサーキュラーエコノミーの文脈では特に次に示す 2 点で数値目標が規定されている(図 1)。

<sup>\*1</sup> 先進技術開発カンパニー CE 推進室

<sup>\*2</sup> CN 開発センター 環境エンジニアリング部

<sup>\*3</sup> 事業開発本部 エナジーソリューション事業部

## 1) リサイクル効率の目標

この目標は電池のリサイクル時に適用される。リサイクル効率とは、使用済み電池に含まれる資源のうちリサイクルプロセスにおいて回収されるものの比率をいう。電池全体でのリサイクル効率と含有金属元素のリサイクル効率の2種類の目標設定がある。電池全体でのリサイクル効率は分母の定義が定まっておらず議論の途上であるが、リチウムイオン電池の場合2025年に65%、2030年に70%の二段階の目標が設定されている。電池の含有元素のリサイクル効率はコバルト・ニッケル・リチウム・銅・鉛について2027年と2031年の二段階で設定しており、特にリチウムは2027年に50%のところ2031年に80%と、高い値が規定されている。

## 2) 再生材使用率の規制

この規制は電池設計時に適用される。再生材使用率とは電池の特定の金属元素について、その使用量に占める再生材の比率をいう。2028年8月から報告義務が始まり、2031年8月からは電池に含まれるコバルト・ニッケル・リチウム・鉛の再生材使用率を年度別、工場別、型式別で開示しなければならない。こちらも電池のリサイクル効率と同様に二段階で設定されており、2031年と2036年で規制値が異なる。

本規則は電池をEU域内で流通させるすべての事業者者に適用される。法規未達の場合は欧州市場へ電動車を投入できない可能性があり、対応を進めていく必要がある。

	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	...	2036
欧州法規	▼ 法規発効										
電池処理時の 鉱物のリサイクル率			(1) LiB: リサイクル効率 65% (2) その他(NiMH):50%						(1) LiB: リサイクル効率 70%		
リサイクル材の 使用率			(1) リチウム電池の鉱物のリサイクル率 Co 90%, Ni 90%, Li 50%, Cu 90% (2) 鉛電池: Pb(鉛) 90%						(1) リチウム電池の鉱物のリサイクル率 Co 95%, Ni 95%, Li 80%, Cu 95% (2) 鉛電池: Pb(鉛) 95%		
						▼ 技術文書の 開示			Li 6% Ni 6% Co 16%		Li 12% Ni 16% Co 26%
						▼ 法規未達の場合、欧州市場へ 電動車を投入できない可能性有					

図1 欧州電池規則の概要

## 3. 電池の適正処理に関する自動車業界の取り組み<sup>(1)</sup>

次に電池の適正処理について述べる。自動車に使用されている電池のうち、鉛電池は有価取引により再資源化する商流ができあがっている。電動車の走行用モータ駆動用の電池は、リチウムイオン電池について2015年の自動車リサイクル法審議会にて、「安定的・持続的に回収・リサイクルが行われるような体制の整備を検討すべき」（2015年9月自動車リサイクル制度の施行状況の評価・検討に関する報告書）と言及されたことを受け、自動車業界ではリチウムイオン電池の回収・リサイクルシステム(図2)の検討を開始した。その後、2018年には解体業者からの回収・リサイクルシステムを構築・稼働開始し、翌2019年には整備事業者からの回収・リサイクルも稼働開始した。この仕組みでは、自動車メーカー等が提供した取り外し方法等の情報をもとに、解体業者や整備業者が使用済み車両や修理車両から使用済み電池を回収し、それを自動車再資源化協力機構に引き取り依頼をかける。同機構は引き取り依頼に基づき運送会社や電池リサイクル施設と連携し、電池をリサイクルする。現状では、電池の無償回収の仕組みとして機能している。

さらに、自動車業界としては使用済み電池のリビルド対応に向けた構想(図3)を進めている。この構想では、前述の回収・リサイクルシステムを拡張し、商品代金支払いシステムやリビルド可否判定工程の設置等に対応することで、市場における安心・安全なリユース・リビルドの促進に貢献していく。

今後、電動車の販売台数の増加とともに使用済み電池も増加していくことから、電池の回収・リサイクルシステムの役割はますます重要になってくると考えられるが、新車の販売から廃棄までには平均で16年の期間のギャップがある(図4)ため、使用済み電池の発生量は2035年頃までは少量となり、2040年以降に急激に増加していくことが見込まれる。したがって、まずは電池の製造工程で発生する端材をリサイクルする技術の開発が必要となってくる。使用済み電池に対してもリサイクル技術、リユース・リビルドの技術開発を引き続き進めていくことが必要である。次節では、「価値ある状態で長く使う」トヨタの取り組みを紹介する。

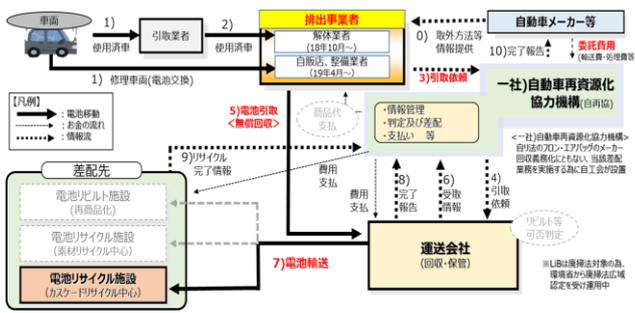


図2 リチウムイオン電池リサイクルシステム

出典:日本自動車工業会<sup>(1)</sup>

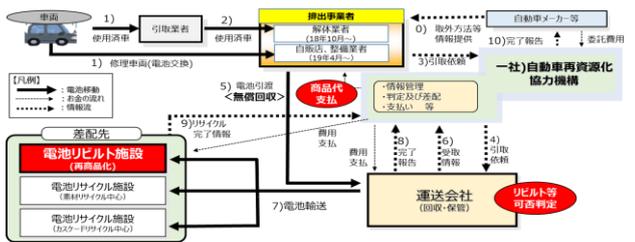


図3 電池リビルド対応構想

出典:日本自動車工業会<sup>(1)</sup>

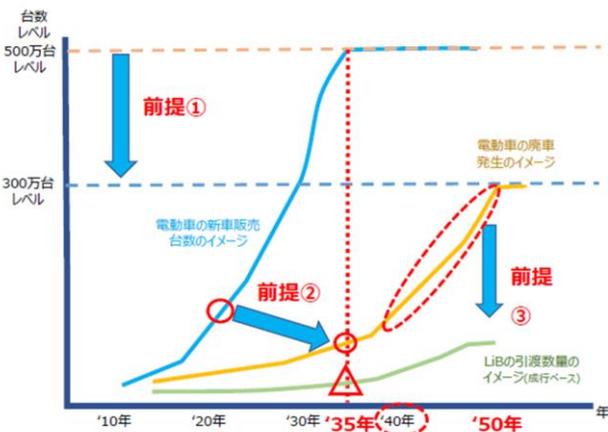


図4 使用済みリチウムイオン電池数量の見通し

出典:日本自動車工業会<sup>(1)</sup>

## 4. 使用済み電池の循環利用に関するトヨタの取り組み

### 4.1 電池 3R の取り組み

トヨタは電動車の量産のみならず、使用済み電池の循環利用に関する取り組みを以前より行ってきた。サーキュラーエコノミーの実現に向けては、電池 3R(Reduce, Rebuilt・Reuse, Recycle)による製品や材料の循環に加えて、長期間利用でき廃棄物を最小限に抑えるよう設計に織り込むなどの活動を進めている。電池 3R の推

進のためには、使用済み電池を回収することが必要である。以下に、使用済み電池の回収に向けた取り組みを 2 例示す。

#### ① 電池取り外し情報の開示

電動車からの使用済み電池回収を促進する取り組みのひとつとして、解体業者が使用済み電池を自動車から安全に取り外しできるように、トヨタは取り外し時の注意点をウェブサイトを開示している。

#### ② 使用済み電池の回収ネットワークの構築

日本においてはトヨタオリジナルの回収ネットワークを構築しており(図 5)、全国から引き取り依頼を受け付けている。この回収ネットワークはトヨタの修理用交換部品をお届けした帰便を活用することで効率的な運用を実現している。2022 年には 4 万台規模の HEV 用電池を回収した。

このようにして回収した使用済み電池は、Rebuilt・Reuse, Recycle の取り組みにより有効利用される。トヨタは HEV(2 代目プリウスから開始し、車種拡大)から取り外した使用済み電池を活用し、2014 年から車両用補給電池として販売を行ってきた(図 6)。また、次節以降に示すように、使用済み電池を自動車以外の用途に転用することで価値ある状態で長く使う取り組みにつなげ、電池としての利用が難しい場合には再資源化する取り組みを進めている。

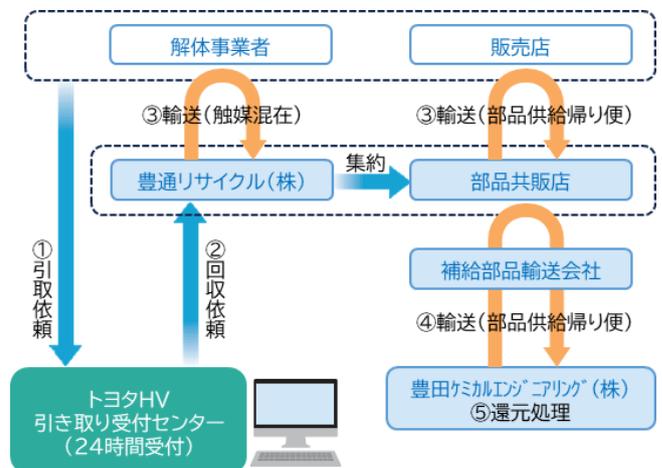


図5 使用済み電池の回収ネットワーク



図 6 ニッケル水素電池のリビルト

#### 4.2 蓄電システム事業

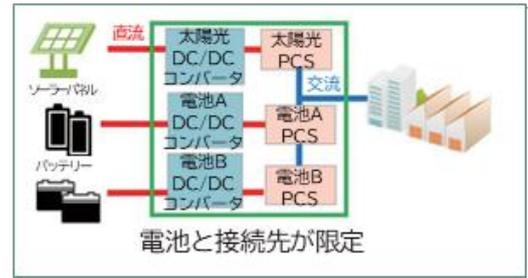
自動車から回収した使用済み電池(以下 中古電池という)を自動車以外の用途に転用することをリパーパスという。自動車用の電池は車両重量を削減し電費を向上させるため重量エネルギー密度の高い電池が求められているが、中古電池は劣化により容量が目減りして、自動車用途にリビルド・リユースすることに向かないものが含まれている。しかし定置蓄電池などの重量エネルギー密度の要求がそれほど高くない用途に対しては、引き続き利用可能なケースがある。トヨタはこれに注目し、中古電池をリパーパスして定置蓄電池として活用する技術の確立に向けて検討を重ねて大容量スweep蓄電システム(図 7)を開発し、1,260kWh の系統用蓄電システムの運用実証を JERA と共同して 2022 年から実施<sup>(2)</sup>している。

中古電池の場合、新品の電池を用いて組まれる従来の大容量定置蓄電システムのように並列接続を行うためには、中古電池の性能を揃えるための選別コストや、電池の使い切りに課題があった。この課題に対し、豊田中央研究所は劣化度合や種類の異なる中古電池を接続して利用するスweep機能(図 8)を開発<sup>(3)</sup>し、トヨタはこれを大容量スweep蓄電システムに実装した。スweep機能は直列に接続した各電池の通電と切り離しをマイクロ秒単位で切り替えることで、劣化度に応じた充放電制御を行って電池の使い切りを実現したものである。この仕組みでは故障した中古電池を切り離してシステムの機能を維持することのほか、電池から直接交流を出力することでパワーコンディショナーを省略してコストダウンに寄与するとともに、交流から直流に変換する際の電力損失を抑えることでエネルギーの利用効率の向上を実現している。

系統用蓄電システムは、近年日本国内でも増加している自然変動性の再生可能エネルギーを使いこなす技術の一つであり、CO<sub>2</sub> 排出削減に寄与することができる。中古電池を活用した系統用蓄電池システムはサーキュラーエコノミーとカーボンニュートラルを両立した取り組み

である。

#### 従来の蓄電システム



#### トヨタのスweep蓄電システム



図 7 スweep蓄電システムの特長

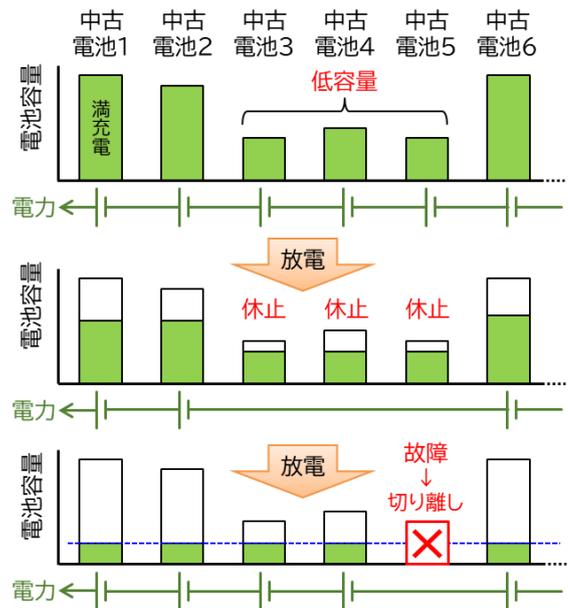


図 8 スweep機能

出典:豊田中央研究所<sup>(3)</sup>

#### 4.3 燃やさない電池リサイクル

リチウムイオン電池の従来のリサイクルの工程は、電池セルの破碎・焼却、焼却灰からアルミや銅などを含む破片やブラックマスと呼ばれるレアメタルを多く含んだ粉末の選別回収、ブラックマスから湿式プロセスを用いてレアメタルを回収、という流れである。従来工程では電池セルに含まれる可燃性の電解液をセルもしくはパックご

と焼却しその過程で CO<sub>2</sub> が排出され、同時に電池材料の一部を失う課題があった。開発工程では、使用済み電池(図 9)を分解して電池セルに含まれる可燃性の電解液を回収(図 10)し、電解液を抜き終えたセルを破碎する技術に取り組んでいる。このような処理を経て資源を分別(図 11)していく。本技術によって CO<sub>2</sub> 排出削減のみならず、従来のリサイクルの工程では回収できない資源を回収することが可能となる。



図 9 さまざまな種類の使用済み電池



図 10 抽出した電解液



図 11 破碎・分別された電池

## 5. まとめ

トヨタは電動車量産のパイオニアであるとともに、2010 年から電池循環の取り組みを進めてきている。今後は電動車の製造・販売拡大にともない、まず電池製造工程内端材の利活用が、次に使用済み自動車の電池の利活用技術が必要になってくる。トヨタではこれらに対応するべく、電池を車体から取り外しやすい車両設計、電池回収を促進するビジネス、回収した電池のリユース・リビルド・再資源化のすべてに取り組んでおり、限りある資源の循環利用にチャレンジしていく。

### ■参考文献

- (1) 日本自動車工業会, "自動車メーカー(自工会)の取り組みについて", 第58回 産業構造審議会 産業技術環境分科会 資源循環経済小委員会 自動車リサイクルワーキンググループ 提出資料, 2024/1.
- (2) トヨタ自動車, "リユースした電動商用バッテリーで大容量スイープ蓄電システムを構築し、電力系統への接続を含めた運転を開始", ニュースリリース, 2022/10/27.  
<https://global.toyota.jp/newsroom/corporate/38149017.html>
- (3) 豊田中央研究所, "中古電池を無駄なく使い切る技術を開発! ~再生可能エネルギーによる電力の蓄電・供給に活用~", ニュースリリース, 2022/10/27.  
<https://www.tytlabs.co.jp/cms/news/news-20221027-2429.html>

# TOYOTA LAND CRUISER “250” SERIES

代表執筆者: 森津 圭太 \*1      小野 卓真 \*2      中村 真人 \*3      成岡 駿之介 \*4  
北井 慎也 \*5      渡辺 義人 \*6      岩下 公彦 \*7

## 要旨

ランドクルーザーは、このクルマだからこそ行き来できる場所での人の命や暮らしを支えてきた「どこへでも行き、生きて帰ってこられるクルマ」を追求しており、70 数年にわたり、世界中のお客様に育てられ・鍛えられてきたトヨタを代表するモデルとして長くご愛顧いただいている。“250”シリーズはランドクルーザーの中核モデルとして、質実剛健を追求し、お客様の生活と実用を支えるという原点に回帰させた。本稿では“250”シリーズの商品としての狙いと、その実現技術について概説する。

キーワード LAND CRUISER, “250” SERIES, 原点回帰, TNGA, GA-F プラットフォーム,  
信頼性, 耐久性, 悪路走破性, 生きて帰ってこられる, 生活と実用

## 1. まえがき

ランドクルーザー“250”シリーズはランドクルーザーの中核モデルとして悪路走破性をベースに扱いやすさを付与し、多くの人々の生活を支える役割と使命を担うべく新たに誕生した。本稿では、本来の役割と使命に原点回帰させ、質実剛健を追求し、お客様の生活と実用を支え、お客様に信頼されるクルマを実現するための技術について概説する。

## 2. 開発の狙い

### 2.1 ランドクルーザーの歴史と役割

ランドクルーザー(以下 ランクル)は、トヨタ BJ 型として 1951 年 8 月 1 日に誕生し、シリーズとして生誕 73

周年となった。誕生直後に、自動車として初めて富士山 6 合目の登山に成功。その時から、このクルマだからこそ行き来できる場所でさまざまな人々の安全と安心を提供する使命を負ってきた。その後、世界中のお客様に育てられ・鍛えられることで、「どこへでも行き、生きて帰ってこられるクルマ」を目指し信頼性・耐久性・悪路走破性の継承と進化を続けながら、現在までに約 170 の国と地域で、累計 1,151 万台のランクルが人々の命や暮らしを支えてきている。これまでランクルは、常に最新技術を導入しフラッグシップとして進化を担うステーションワゴン(“300”シリーズ)、高い耐久性・走破性が求められるヘビーデューティーモデル(“70”シリーズ)、悪路走破性をベースに扱いやすさと快適性を付与し、人々の生活と実用を支えるライトデューティーモデル(“プラド”)の 3 シリーズで展開してきた。

### 2.2 原点回帰の意義

ライトデューティー系については、世代の進化を追うごとに高級・豪華な路線にシフトする傾向にあった。こうしたなか、“250”シリーズの開発にあたって、商品の最終責任者である豊田章男社長(当時)が「ランクルは人々の生活、地域社会を支えるためのクルマであるべきで、より多くの人の生活を支えるライトデューティーモデルはお客様が求める本来の姿に戻す必要がある」という基本的な考え方を提示。

\*1 Mid-size Vehicle Company MSZ

\*2 Mid-size Vehicle Company MS プラットフォーム開発部

\*3 Mid-size Vehicle Company 第 1MS 車両開発部

\*4 Mid-size Vehicle Company MS 制御開発部

\*5 クルマ開発センター パワートレイン製品企画部

\*6 先進技術開発カンパニー 先進デザイン開発室

\*7 生産本部 田原工場組立部



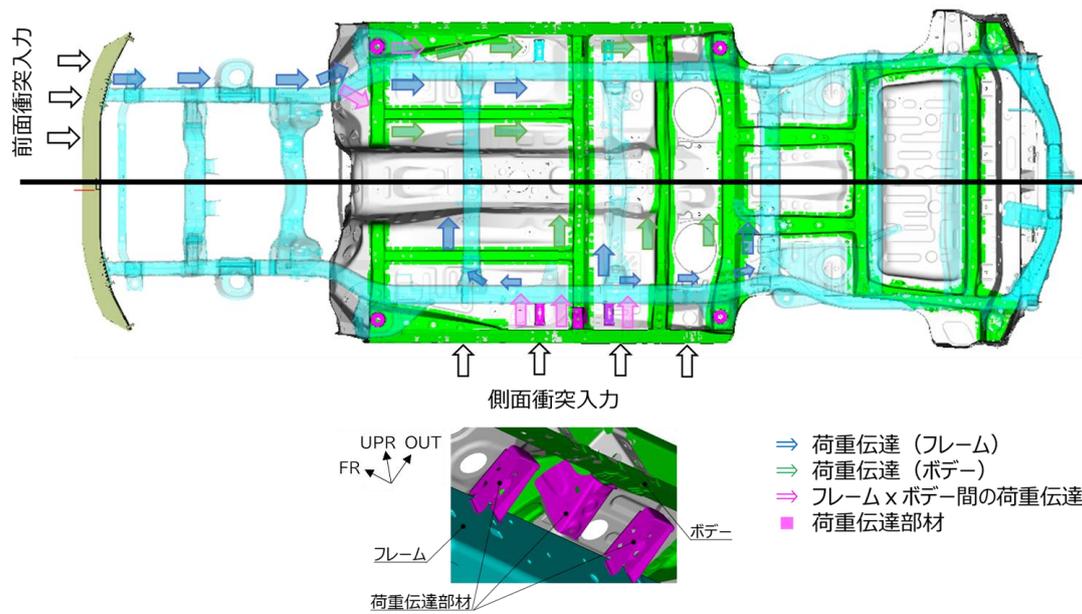


図2 骨格配置

### 3.1.1 ラダーフレーム構造

ラダーフレームには、GA-F プラットフォームの最適なクロスメンバー配置や最新の溶接技術である”非線形(曲線)テーラードウェルドブランク(以下 非線形 TWB)”と超高張力鋼板を適材適所に採用(図 3)し、プラド”150”シリーズ比 150%のねじり剛性を実現。鋼板に補強材(以下 R/F)を重ねる一般的な R/F 構造(図 4)に対し、非線形 TWB 構造(図 5)を採用することでランクが培ってきた信頼性・耐久性を維持しながら大幅な軽量化(プラド”150”シリーズ構造比)を”250”シリーズでも実現した。また、多様な車両仕様に対応する GA-F プラットフォームを採用することで、マルチパスウェイ戦略を軸とした多様な選択肢を提供するラダーフレームに仕上げた。

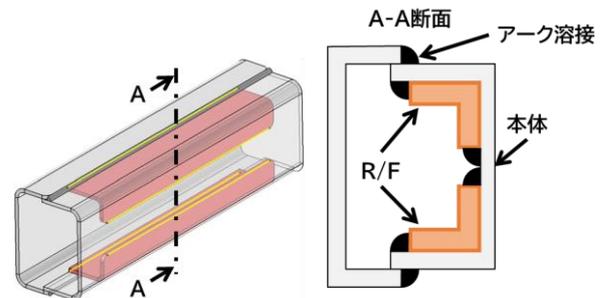


図4 プラド”150”シリーズ構造(R/F 構造)

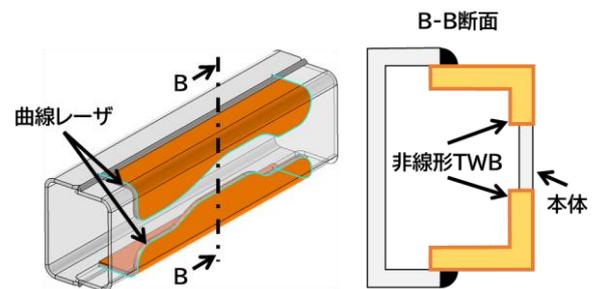


図5 非線形 TWB 構造

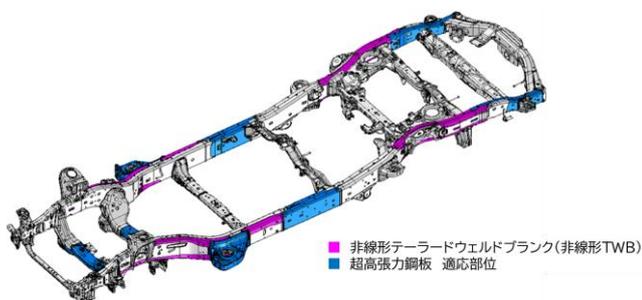
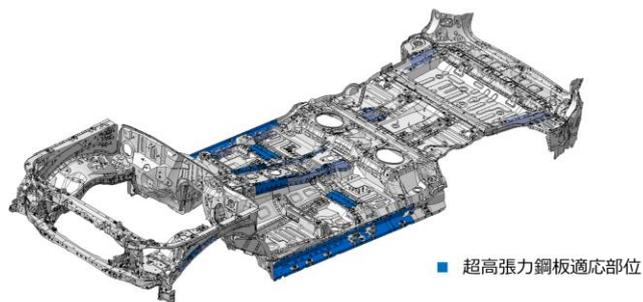


図3 ”250”シリーズ ラダーフレーム

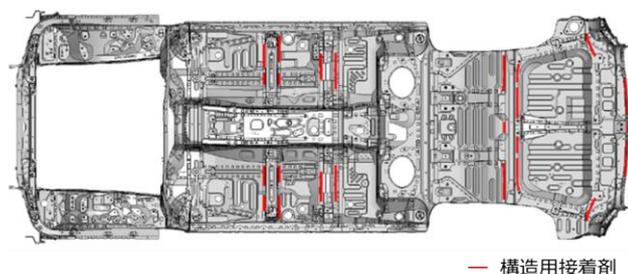
### 3.1.2 ボディ構造

ボディ骨格に超高張力鋼板を適材適所に採用し、信頼性・耐久性の確保と軽量化の両立に貢献(図 6)。また、骨格へ構造用接着剤の採用と、ボディ骨格とシートレールを直接締結構造とすることで、優れた乗り心地・操縦安定性を確保(図 7)。



■ 超高張力鋼板適応部位

図 6 超高張力鋼板の適用



— 構造用接着剤

図 7 構造用接着剤の設定範囲

### 3.2 サスペンション形式

ハイマウントダブルウィッシュボーン式(フロント)(図 8)とトレーリングリンク車軸式(リア)サスペンション(図 9)を採用。"300"シリーズと同じ GA-F プラットフォームを採用することで優れた乗り心地と操縦安定性を確保。



図 8 ハイマウントダブルウィッシュボーン式  
フロントサスペンション



図 9 トレーリングリンク車軸式リアサスペンション

さらに"250"シリーズでは「お客様の生活を支えるクルマ」としてあらゆる路面での扱いやすさを追求し多数の部品を専用設計とした。フロントスタビライザーをフロントアクスル軸の後ろ側に配置し、ジオメトリを最適化することでショートオーバーハングを実現。これにより車両の取り回し性・デザイン性が大きく向上。同時にスタビライザー取り付け点を剛性の高いクロスメンバー直下に配置、スタビライザーリンクにピロボールを採用することで効率的にロール剛性を向上し、軽快感のある走りに貢献。

また、悪路走破性の指標となるホイールアーティキュレーション(タイヤの浮きづらさ)を十分に確保できるようサスペンションストローク、スタビライザー前後バランスを最適化。オフロードとオンロード両軸の性能を向上。

### 3.3 EPS(Electric Power Steering: 電動パワーステアリング)

オフロードでもオンロードでもお客様が扱いやすく楽しい走りを実現するラック平行式電動パワーステアリングを新開発。キックバック(路面凹凸等で受ける衝撃)による「ハンドル取られ」を緩和してオフロード走行時の扱いやすさを向上。お客様の操作に応じて最適な操舵力・保舵力となるようにチューニングを重ねることで、低速で取り回しがしやすく高速道路でのロングドライブも乗用車のように快適で安心感のあるステアフィールへと進化。また EPS 締結マウント 3 点の内 2 点を剛付マウント(ゴムブッシュなしでクロスメンバーへ締結)とし、すっきりとしたステアフィールを実現。EPS 採用によりモードセレクト/マルチトレインセレクトに対応した最適なステアフィールを実現。さらに LTA(レーントレーシングアシスト)等の運転支援機能にも対応しロングドライブ時の運転負担軽減にも貢献。

### 3.4 SDM(Stabilizer with Disconnection Mechanism)

オンロード性能を確保しつつ、過酷なオフロードでの優れた走破性と乗り心地を実現するため、フロントスタビライザーに SDM を採用(図 10)。



図 10 SDM

スタビライザーは左右輪を連結しオンロードでの操縦安定性を高めるが、オフロードでは左右輪が連結されていることでサスペンションの伸縮を妨げるためタイヤの接地性が落ちる。SDM はスイッチ操作で任意にフロントスタビライザーを無効化することで、タイヤが浮きにくくなり、岩石路やモーグル路などの過酷なオフロードで走破性が向上。ホイールアーティキュレーションは、SDM を搭載しない場合と比較して約 10%増加。

また、未舗装路では乗員の頭が左右に大きく動かされるハッドトスが発生することがある。SDM を使用すると、左右のフロントサスペンションが独立して動くことで路面追従性が向上し、ハッドトスが減少。スタビライザーを無効化した状態で車速 30km/h を超えた場合、オンロードに進入したと判断して自動でスタビライザーを有効化。オンロードでの優れた操縦安定性を確保。

### 3.5 オフロード走行支援

世界各国の多くのお客様の生活を支えるために、多種多様な環境を想定して走破性を追求。”250”シリーズのオフロード走行支援機能も国内外問わずさまざまな環境で適合評価を実施。

#### 3.5.1 DAC(Downhill Assist Control:ダウンヒルアシストコントロール)/クロールコントロール

DAC/クロールコントロールは、ドライバーがブレーキやアクセルの操作に気を使うことなく車両を一定の低車速にキープして走行できる機能。ステアリング操作のみでの極低速走行が可能となり、ストレスの少ないオフロード走行に貢献。DAC はトランスファー・ハイレンジ(H4) 選択時に作動し、4 輪のブレーキを自動的に制御することでタイヤロックを回避。エンジnbrakeだけでは十分減速できないような険しい急坂路を降坂する際に、安定した降坂を実現。プラド”150”シリーズでは車速 4km/h 固定での機能であったが、より生活オフロードでの使用を想定し、車速 4~30km/h に作動範囲を拡大。

クロールコントロールはトランスファー・ローレンジ(L4) 選択時に作動し、アクセルとブレーキの統合制御により凹凸の大きいオフロードや滑りやすい路面での滑らかな走行を支援。状況に応じて 5 段階の速度設定が可能。ブレーキのリニア油圧制御と車輪速推定精度の向上により、作動音低減や作動フィーリング向上を実現。また、ホイールスピンや車輪ロックを制御で抑制し、スタックからの脱出能力向上にも貢献。

#### 3.5.2 MTS(Multi Terrain Select:マルチ Terrain Select)

MTS では、安心安全で高い走破性を実現するために、路面状況に応じたオフロード走行支援を 6 つのモードから選択できるシステムを採用。選択したモードに応じて、駆動力・ブレーキの制御を最適化し、オフロード路面での走破性を向上(図 11)。

MTS モード	H4					L4			
	AUTO	DIRT	SAND	MUD	DEEP SNOW	AUTO	SAND	MUD	ROCK
制駆動力特性									
発進ギヤ段	自動で路面状況を判定し、適切なモード特性に切り替わる	舗装路と同等の車速での走行を想定し、安定性とスポーティさを両立した特性	砂への埋没を抑え、安定した走行に必要なスリップ量を調整できる特性	タイヤのグリップを生かすため、スリップを許容した特性	発進のスリップを抑え、力強いラッセル走行を想定した特性	自動で路面状況を判定し、適切なモード特性に切り替わる	砂への埋没を抑え、安定した走行に必要なスリップ量を調整できる特性	タイヤのグリップを生かすため、よりスリップを許容した特性	タイヤ空転を抑制し、岩場のワーキングスピードをコントロールしやすい特性
変速線	H4 MTS専用 オフロード走行において必要なトルクバンドを広く活用できる特性					L4専用 オフロード走行において必要なトルクバンドを広く活用できる特性			
EPS特性	オフロード専用チューニングされたアシスト特性					オフロード専用チューニングされたアシスト特性			

図 11 MTS 概要

プラド”150”シリーズではトランスファー・ローレンジ(L4)のみであった動作範囲をトランスファー・ハイレンジ(H4)にも拡張し、未舗装路の高速走行など、より多くのオフロード走行シーンにて使用可能。駆動力制御では、アクセル開度に対するスロットル開度特性や変速特性を適切に制御することで駆動力のコントロール性を高め、ブレーキ制御では、車輪スリップ量を制御し、四輪に駆動力を適切に分配することでオフロード走行をサポート。また、AUTO モードではセンサー情報から推定された路面状況に応じて制御量を最適化し、ドライバー自らモード切り替えをすることなく、走行シーンに応じた走破性能を実現。”250”シリーズはパワートレユニットラインナップごとに最適な制御設定を実施。

### 3.5.3 MTM(Multi Terrain Monitor:マルチ Terrainモニター)

フロント・サイド左右・リアに搭載した4つのカメラでとらえた映像をあらゆる地域の道なき道を走るための最適なビューとして合成することで、ドライバーの死角になりやすい車両周辺の路面状況の確認に寄与(図12)。カメラで直接見えない自車の床下の状態は、直前で撮影された過去のカメラ映像に、現在の車両周辺の映像を合成することで可視化し、タイヤ付近の状況や障害物との距離感を把握可能。デジタルカメラの採用により鮮明で滑らかな動きに進化。前進時および後退時に後輪周辺をクローズアップするアンダーフロアビューを追加。車両の前後・左右のおおよその傾きを推定する傾斜計アイコンを表示することで走破性を向上。

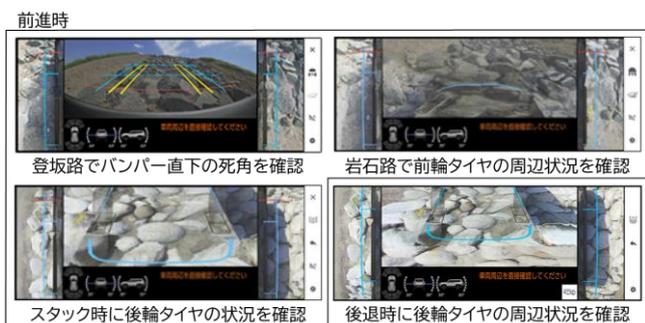


図12 MTM

## 4. ランクルに相応しい多様なパワートレ

### 4.1 ランクルに相応しい力強い走りや環境性能を両立

「人の命や暮らしを支える」というランクルの使命を受け継ぎ、ランクルのDNAである「信頼性・耐久性・悪路走破性」を追求しながら、多様なアプローチ(マルチパスウェイ)でカーボンニュートラルを目指すトヨタの取り組みに基づき、ランクルに相応しい力強い走りや環境性能を実現するランクル初のハイブリッドシステムを含めたさまざまなパワートレを設定(表1)。

表1 各パワートレの特徴

パワートレ	位置付け	仕向け地	
T24A-FTS ガソリン2.4Lターボ ハイブリッド Direct Shift-8AT	最高出力※ 243kW(330PS) 最大トルク 630Nm※ ※モータージェネレーター を含めたシステム最大値	◇上級版電動パワートレ ◇オフロードはもとより、発進から登 坂・トローリング時まで全域でフランク ク上の加速性能と環境性能を両立	北米・中国 その他
T24A-FTS ガソリン2.4Lターボ Direct Shift-8AT	最高出力 207kW(281PS) 最大トルク 430Nm	◇量販型ガソリンパワートレ ◇新開発のTNGAパワートレにより、 のびやかで力強い走り・静粛性・ 環境性能を実現	中近東・東欧 その他
1GD-FTV ディーゼル2.8Lターボ (48Vシステム) Direct Shift-8AT	最高出力 150kW(204PS) (欧州のみ151kW) 最大トルク 500Nm	◇上級型ディーゼルパワートレ ◇1GDの特徴に加え、市街地や渋滞 時の実用燃費を向上 ◇上質で静かなエンジン始動とスム ーズな走り出しも実現	豪州・西欧
1GD-FTV ディーゼル2.8Lターボ Direct Shift-8AT	最高出力 150kW(204PS) (欧州のみ151kW) 最大トルク 500Nm	◇量販型ディーゼルパワートレ ◇燃費・力強い走りでも定評のある 1GDと8ATの組み合わせにより、 オフロード/オンロードでの扱いやす さを向上 ※一部国・地域で6ATを継続設定	西欧・東欧 日本・中近東 その他
2TR-FE 2.7Lガソリン 6 Super-ECT	最高出力 120kW(163PS) 最大トルク 246Nm	◇良品廉価ベーシックパワートレ ◇日常域での扱いやすさを改善	東欧・日本 その他

### 4.1.1 フルタイム4WDシステム

悪路走破性を確保するため、全てのパワートレについてトランスファーにセンターデフロック&トルセン®※LSD(リミテッド・スリップ・デファレンシャル)機能を備えたフルタイム4WD(Four-Wheel Drive)システムを採用(グレードによってリアディファレンシャルにもデフロック or トルセン®LSDも設定可能)(図13)。プラド”150”シリーズで鍛え抜かれたユニットをベースに継承しながら、制御面でもトランスファーLOWレンジ(L4)時の加速度特性を専用設定(8AT車: Automatic Transmission)して岩石登坂路などの走破性を向上させるなど、”300”シリーズの開発知見も新たに織り込み、信頼性・耐久性・悪路走破性を向上。また、トランスファーのHi/Lo切り替えアクチュエータやリアデフロック切り替えアクチュエータを改良し、切り替え時間短縮で使い勝手も向上。

※ トルセン®は株式会社 JTEKT の登録商標

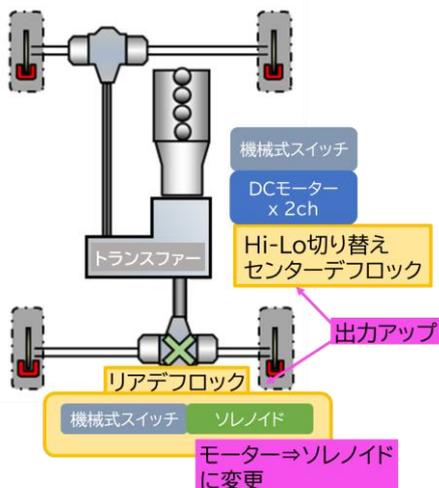


図 13 フルタイム 4WD システム

## 4.2 T24A-FTS × Direct Shift-8AT(+パラレルハイブリッドシステム)

### 4.2.1 システム概要

プラド”150”シリーズの 4.0L 自然吸気エンジンと 6 速 AT の組み合わせからダウンサイジングした低燃費かつトルクフルな新規開発 TNGA (Toyota New Global Architecture) 2.4L ガソリンターボエンジンと、新規開発の高減衰ダンパ & TNGA 8 速 AT の組み合わせに刷新(図 14)。どこまでも加速していくようなリニアで伸びやかな走りを実現し、オフロード/オンロードを問わず日常使いのあらゆるシーンで走り & 静粛性 & 環境性能をレベルアップ。また、北米・中国にランクルを復活導入させるためランクル初となるパラレルハイブリッドシステムを採用。環境性能の向上に加えて、モータージェネレーターのアシストにより電動車ならではの圧倒的な発進加速を実現(図 15)。

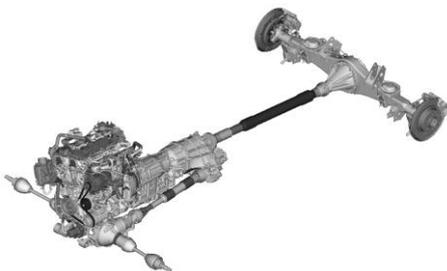


図 14 T24A-FTS × Direct Shift-8AT

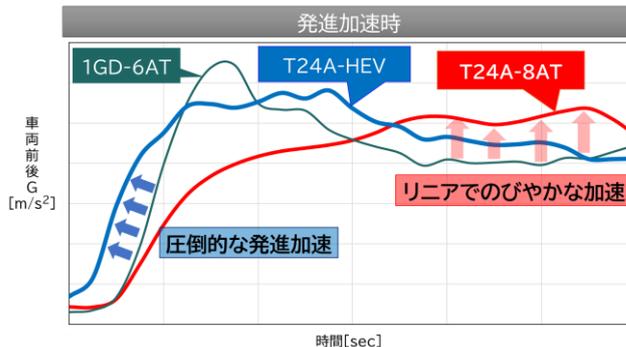


図 15 発進加速シーンでの車両前後 G

### 4.2.2 T24A-FTS ガソリン 2.4L ターボエンジン

ミッドサイズ SUV に搭載されている横置きパッケージの T24A-FTS が大切にしてきた「高効率」「クリーン」「気持ちいい走り」の 3 本柱に加えて、オフロード車に期待される「どこまでも心地よく、どこからも不安なく」を開発コンセプトとしてランクルに相応しい縦置き最適パッケージとして新たに設計(図 16)。TNGA の高速燃焼を実現する高タンプルポート、スプレーガイド燃焼などの技術に加えて、新設計のターボチャージャーや空冷インタークーラーなどによって積載やトーイングなどの幅広いエンジン運転領域での効率向上を実現。ランクルに期待される車両傾斜姿勢に対してエンジンの潤滑性能が確保できるようなオイルパンや潤滑システム的设计、長距離長期間の使用を想定した耐久信頼性設計や確認評価も実施。



図 16 T24A-FTS エンジン

### 4.2.3 Direct Shift-8AT

走り & 燃費を両立させた TNGA トランスミッションとして、ワイドギヤレンジ化 & クロスレシオ化、多板ロックアップクラッチと高減衰ダンパの採用によるロックアップ

領域の拡大, 高応答な油圧システム, 高効率化技術などの最新技術を織り込み, オフロードでの低速コントロールビリティと走破性向上や, ダイレクト感あふれる力強い走り, 最適なギヤ選択による扱いやすさやクルマを操る楽しさを実現することを狙って新たに開発(図 17). 6 速 AT に対して 1st ギヤ比をローギヤ化するとともに, ロックアップ領域拡大によりトルクコンバータ総発熱量を低減し, オフロード走破性向上にも貢献. オフロードでの急斜面や, 岩石路, 渡河, 砂漠走行などの使われ方を想定してトランスミッション内部のオイルレベル最適化, オイルパン地上高設計, 高い位置へのブリーザ配置等にも配慮.

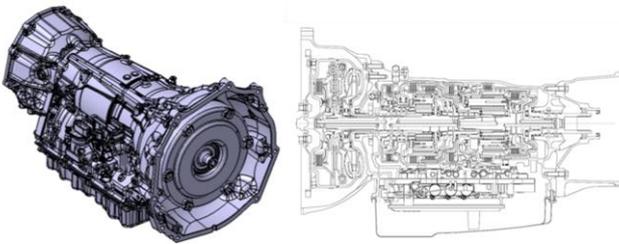


図 17 Direct Shift-8AT

#### 4.2.4 パラレルハイブリッドシステム

オフロードや積載, トーイング等の過酷な使われ方を想定し, ランクル初となるハイブリッドシステムとして機械式フルタイム 4WD とトルクコンバータを組み合わせたパラレルハイブリッドシステムを採用(図 18). エンジンとトルクコンバータ付き AT との間にエンジンと駆動系を切り離すための KO クラッチとモータージェネレーターを備えたフロントモジュールユニットを配置する構成を取ることにより, エンジントルクを直接伝達できるため, 高い信頼性とオフロード走行に必要な駆動力もトルクコンバータを介すことで確保. また, 多段 AT との組み合わせによるダイレクトでリズムカルな加速フィーリングを実現. さらに, エンジンとモーターの動作点を最適化し, 北米や中国の厳しい環境規制にも対応.

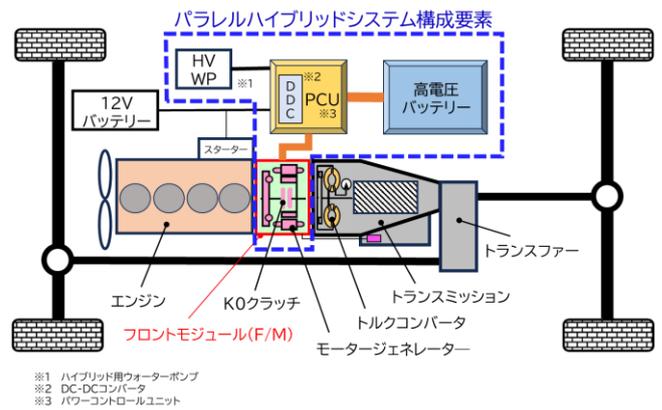


図 18 パラレルハイブリッドシステム

### 4.3 1GD-FTV × Direct Shift-8AT(+48V システム)

#### 4.3.1 システム概要

高トルクなディーゼルエンジンならではのパワフルさと新開発の TNGA 8 速 AT を組み合わせ(図 19), 高出力と高応答を両立する新開発の小型高効率ターボ(図 20)を採用, 多段 AT+多板ロックアップクラッチの組み合わせによってドラビリティ性能を向上させ, オフロードだけでなく, 市街地から高速道路までドライバーの意のままの加速度コントロールにこだわり, ダイレクト感あふれる MT(Manual Transmission) ライクで上質な走りを実現(図 21). また, 豪州・西欧の CAFE(企業別平均燃費基準)規制に対応するため, 過酷な悪路環境での走行も想定したランクル初となる 48V システムをクリーンディーゼルシステムと組み合わせ, 停止や発進の多い市街地や渋滞時の実用燃費向上による環境性能と, レスポンスよく上質で静かなエンジン始動, スムーズな走り出しを実現.

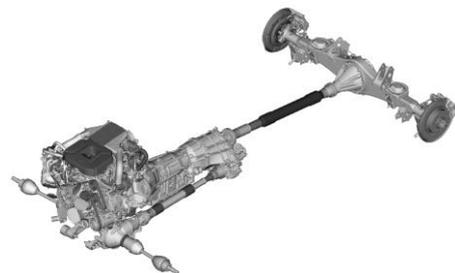


図 19 1GD-FTV × Direct Shift-8AT

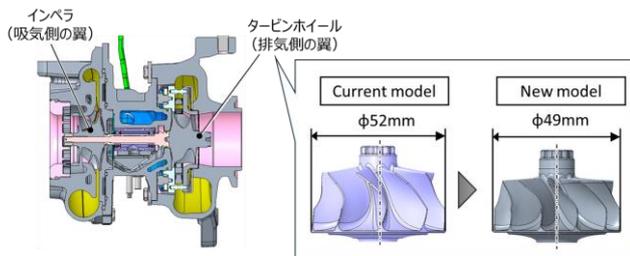


図 20 新開発の小型高効率ターボ

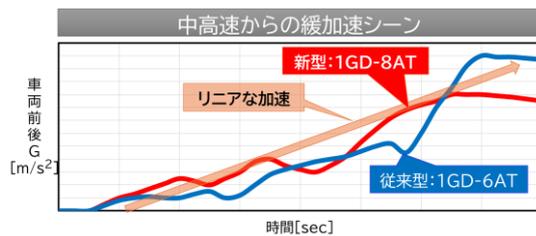


図 21 中高速からの緩加速シーンでの車両前後 G

#### 4.3.2 48V システム

豪州・西欧での CAFE 規制に対応するため、ランクル初のディーゼル電動システムである 48V システムを新開発。オルタネーターの代わりに 48V モータージェネレーター(以下 MG)を配置し、48V 電池と DC-DC コンバータを接続する構成を採用(図 22)。これにより、渋滞走行時のストップ&スタート(S&S)時には、レスポンスよくスムーズに上質で静かなエンジン始動を実現。減速時にはエネルギーを MG で回生してエンジンブレーキとあわせて運転しやすい自然な減速感を創出するとともに、回収したエネルギーでエンジン低効率領域を MG でアシストすることによりエンジンの負担を軽減し、エンジン停止とあわせて燃費向上に貢献。また、渡河等の厳しいオフロード環境での使われ方も想定し、MG 配置やベルトの耐スリップ性能にも配慮。

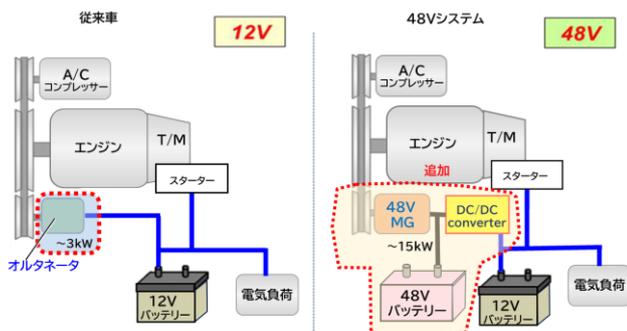


図 22 48V システム

## 4.4 2TR-FE × 6 Super-ECT

### 4.4.1 システム概要

プラド”150”シリーズで鍛え抜かれたユニットを継承し、自然吸気エンジンの軽快な吹け上がりと高いレスポンスを活かしながら、先進安全、サイバーセキュリティ対応等で ECU(Electronic Control Unit)およびパワートレイン制御を刷新するにあわせてソフト面でも”300”シリーズの知見を反映して日常使いで疲れにくくなるようにギヤ選択を走行シーンに応じて最適化し、実用ランクルとして日常でよく使われる発進～低速シーンでのスムーズさと下り坂での车速コントロールを改善。

## 5. デザイン

### 5.1 実用オフローダーとして本物を目指したデザイン

ランクルシリーズのなかで、最も幅広く世界中でご愛顧いただいているライトデューティー系の本来的使命を見つめ直し、「原点回帰」をキーワードに悪路での機能性を追求したデザインへと舵を切った。70 年を超える先人達の知恵や工夫の積み重ねを紐解きながら、現代の多様化する価値観や高度化する要求に応えることで、その役割を再定義し、ランクル群の明確化を行った。歴史あるランクルを未来あるものへと繋げていく様な存在を目指し開発。

### 5.2 エクステリアデザイン

GA-F プラットフォームの採用で”300”シリーズ譲りの高い悪路走行性能へと大幅に引き上げつつも、幅広いお客様に向けて引き締まったボディによる扱いやすさにこだわった。具体的には GA-F プラットフォームで、より長くワイドになった新しいフットプリントは”300”シリーズそのままに、前後のオーバーハングの短縮や、ボディ四隅コーナーハング部のカット、プラド”150”シリーズ並みに幅を抑えたドア全幅をはじめ、ボディの無駄を削ぎ落とした。”300”シリーズからスタビライザーの再配置をはじめ大がかりな変更をとまなうパッケージの検討を進めこだわりのシルエットを実現。

引き締まったボディとワイドスタンスという今回のパッケージの特徴を最大限に活かしつつ、ひと目でランク

ルとわかる”らしさ”とモダンな”新しさ”が融合したアイデアを採用(図 23)。そして機能性と美しさの両立を追求してきたさまざまな工夫を以下で具体的に説明する。

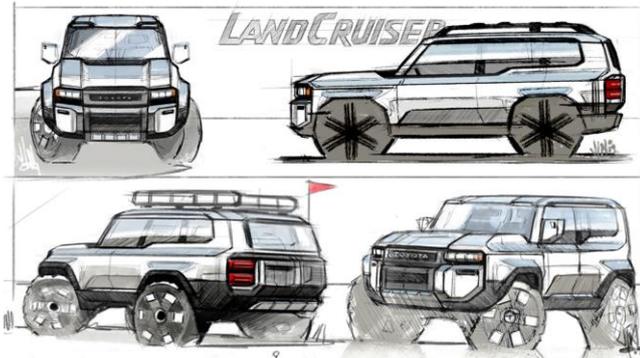


図 23 採用案スケッチ

大地と平行な水平箱型ボディを左右に大きく踏ん張った大径タイヤが支えるオーバーフェンダー的処理で、実用オフローダーとしての素性のよさを素直に視覚化し、安定感、機動性、堅牢さを表現(図 24)。



図 24 骨格の素性を活かした外形意匠

箱型ボディの各コーナー部は大きく削ぎ取った面取り構成で取りまわし性を向上。ボディ周囲の面取り面同士を大きく連続させて塊感の強いモダンな箱を表現。大らかな曲面をシャープに削ぎ取りエッジを際立たせたボディサーフェスで贅肉の無い引き締まった面構成が狙い(図 25)。



図 25 面取り構成の狙い

過酷な環境下での良好な視界はドライバーの安心感と安全に繋がる。そのために角度の立ったフロントウィンドウ、細い A ピラーで前方視界を、またサイドウィンドウの窓下はプラド™150™シリーズより約 30 ミリ低下させ側方視界を改善。これらは取り回しのよさとともに力強い実用オフローダーらしい独特のシルエットを生んだ(図 26)。

フロントは”40”シリーズ以来の思想に倣い、損傷すると荒野での夜間走行が困難になるヘッドランプを高く中央に寄せた低リスク配置とし、TOYOTA の文字エンブレムとあわせ、ランクルらしいアイコンックな顔を形成(図 27)。



図 26 安全な視界への工夫



図 27 フロントフェイス

フロントバンパーは分割構造とし、損傷した部分だけを交換できることでSDGsに配慮。さらに部分的に変更しやすいその構成を活かしヘッドランプは角型から丸型へ交換できるなど、多様化するお客様のご期待へ対応(図 28)。



図 28 分割構造の狙い

### 5.3 インテリアデザイン

長時間の悪路走行でも安心して疲れない室内空間を目指し、窓の大きなひらけた視界と乗員の保護感を両立するバスタブ構成を基本空間とし、各部位機能と上質さを追求。特にコックピットは咄嗟に認知・判断・操作が素早く行えることを意識した機能レイアウト。デザインモックアップにてラードライバーの三浦選手に評価していただくとともに、デザイナー自らが悪路走行をするなど、実体験をとともうリアリティーあるインテリアデザイン開発を徹底。

インストゥルメントパネルは水平基調とし、車両の傾きを周辺視野でも感じられるよう配慮。認知に大切なメーターおよびセンターディスプレイは高く見やすい位置に置きながらも、前方視界を阻害しないようにカウル線を上

回らない適正位置に配置。

操作系スイッチは電子化・小型化をしてリーチの近いドライバー側に寄せて配置(図 29)。またサイズの大きめな物理スイッチを採用し、手袋でも操作できるとともに、特に走行系はあえてダイヤル・トグル・プッシュとさまざまな操作方法を組み合わせることでブラインド操作に配慮(図 30)。



図 29 室内部品の適正配置



図 30 悪路操作性の向上

悪路走行体験より、縦横に揺れる車内での姿勢保持とスイッチ操作が困難とわかり、姿勢保持にはセンターコンソールとドアトリムにニーパッドやアームパッドを設置。また悪路操作でもビューモニターを探しやすい場所に移設、センターディスプレイやヒーターコントロールが空中操作にならず、手のひらが置いて保持しながら操作できるようパームレスト的に使える形状(図 31)。



図 31 走行体験のフィードバック

## 5.4 カラーデザイン

近年、多様化が進むお客様の嗜好に対し、大きく 2 つの価値観表現の外板色をラインナップ。アバンギャルドブロンズに代表される本物の質感や精度感表現にこだわったプロフェッショナルツール性の表現(図 32)。もう 1 つはサンド(新規開発色)やスモーキーブルーに代表される過去の"40"シリーズや"60"シリーズ外板色を想起させるハリテージ性の表現(図 33)。



図 32 Professional 価値観カラー表現



図 33 Heritage 価値観カラー表現

これにより往年の硬派なランクルファンから、活動的な若く新しいお客様まで、幅広い価値観に響くものとした。

内装色は落ち着きを醸し出すブラックとブラウン系のダークチェスナット、一部地域ではベージュの 3 色を設定(図 34)。



図 34 内装カラー

加飾は派手さを抑えたチタン調塗装や、铸铁製スキレット(鉄鍋)風の重みある艶消しブラック塗装、登山用ザイル(ロープ)をフィルムで模したインパネパイピングモールディングなど、本物のツール感を表現。

## 6. 「ランクル品質」の造り込み

### 6.1 フレーム製造工程

#### 6.1.1 非線形テーラードウェルドブランク技術 (以下 非線形 TWB)

3.1.1 項で紹介した、非線形 TWB を採用するため、高軌跡精度ロボットを使った、非線形対応ができるシステムを構築。

TWB とは材料同士を突き合わせて溶接する技術。フレーム強度を保証するためには、溶接部の板厚を管理する必要がある(図 35)。その阻害要因は材料を突き合せた際に発生する材料間の隙量。線形 TWB と比べ、非線形 TWB は隙の変化量が大きい(図 36)。そのため、隙をカバーできる許容量の高い溶接方法が求められ、ハイブリッドレーザーアーク溶接法を採用。先行するアーク溶接で幅広く溶融池を作ることにより隙の変化に対応し、後行のレーザーで板裏まで確実に貫通させる非線形 TWB に適した技術である(図 37)。

溶接後には品質保証を確実にするため、溶接部を表面・裏面の両方から断面測定を実施。それぞれの断面を素材基準であわせることにより、溶接部を全方位から全数検査を実施。

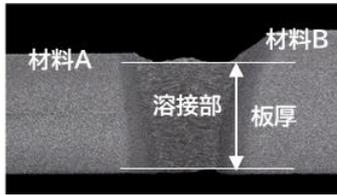


図 35 TWB 品の断面図

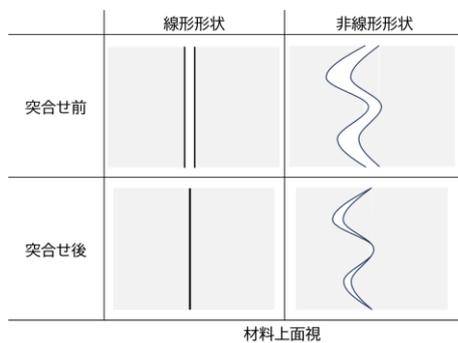


図 36 材料形状と板隙

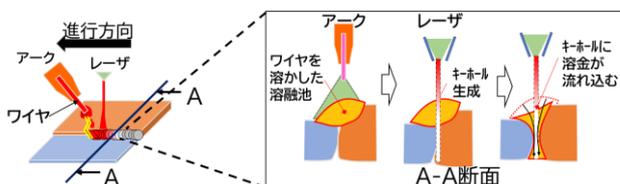


図 37 ハイブリッドレーザーアーク溶接

### 6.1.2 フレーム溶接技術

フレームは主にアーク溶接にて部品の接合を実施、アーク熱により歪が発生し品質のばらつきの要因となる。“250”シリーズ向け新ラインでは入熱をコントロールすることにより、精度の安定したフレームを生産している。精度ばらつき低減のため1つの工程でより多くを溶接し工程間の熱歪変化を減らす目的でロボットの多台配置を実施(図 38)。

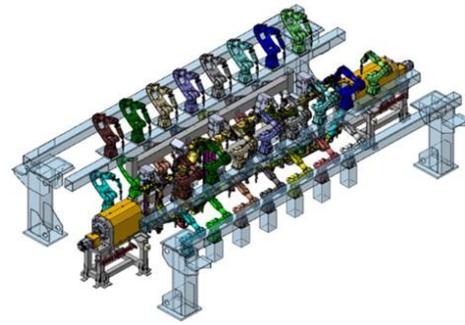


図 38 ロボット多台配置

多台配置を実現するために小型ロボットを新規開発。プラド”150”シリーズの工程に比べ3倍のロボットを1工程に配置することが可能となり、13工程必要だったフレーム溶接工程が6工程まで低減でき占有スペースを半減。生産中になんらかの原因により溶接が停止した場合、溶接による熱の入りが通常時と変わるため、精度ばらつきを生む。歪みにくい溶接順の採用、さらに工程内に投入するワークの数を制御することで、毎回同じような工程滞留時間となり、溶接歪を改善。

これまではフレームにはBOX構造のサイドレール構造が広く採用されてきた。BOX構造とは、それぞれコの字形の鋼板を重ね合わせ、重ね合わせた部分を隅肉溶接する構造である。サイドレール溶接の一部エリアに対して、この重ね合わせた部分(約5mm)を突き合わせた形状にすることで、重ね合わせた部分の鋼板を削減し、軽量化を実施(図 39)。

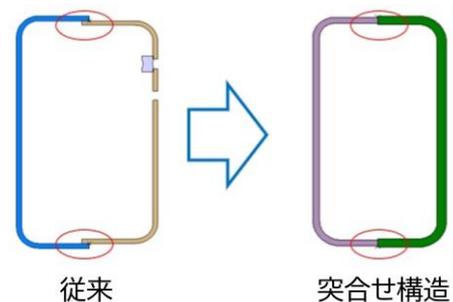
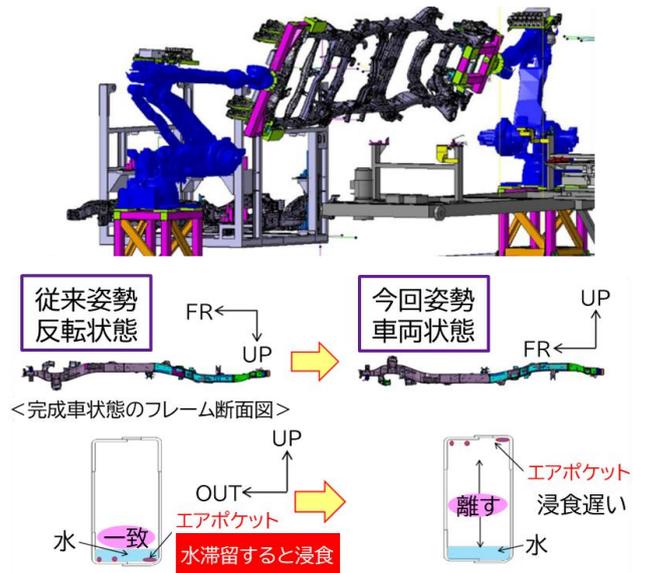
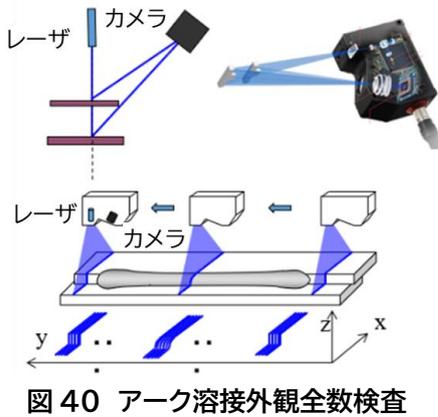


図 39 突き合わせ構造

突き合わせ構造はアーク溶接による歪み低減へ効果的。突き合わせ形状で溶接する場合、鋼板と鋼板の合わせ隙に加え、鋼板同士の段差違いの造り込みが溶接をするうえでの重要な鍵となっており、製造管理項目として、鋼板の管理、設備や溶接条件へも工夫を織り込み。また、

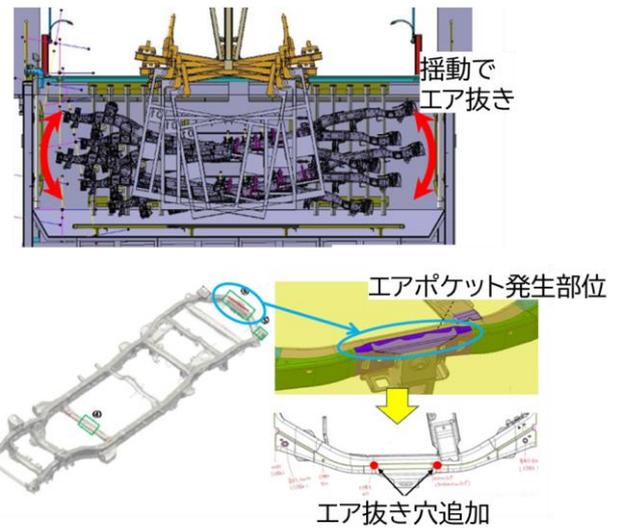
品質保証の観点から、レーザーとカメラを用いた光切断法で突き合わせ形状の溶接部のアーク溶接外観を全数自動検査し、溶接品質を保証(図 40)。



### 6.1.3 フレーム電着技術

シャシーフレームの強度、耐久性維持のため、長期間の防錆性能確保が必要。車両の防錆能力は各国での防錆品質要求、融雪塩散布量に代表される使用環境の変化、競合他社の動向、車両の長寿命化など取り巻く環境変化にあわせていくことが求められている。

今回シャシーフレームの新設計にあたり、水抜け構造の最適化、部品装着による防水保護、防錆鋼板の採用拡大、溶接方法・部材改良を行うとともに、製造面では防錆性能の主体機能を担う電着品質の向上へ取り組み。電着浸漬塗装は優れた耐食性を有しているが、浸漬時に被塗物内面の空気が抜けきらないと塗膜が形成されていないエアポケット部位が発生し、水分との反応で、発錆、腐食進行することが課題。そのため、エアポケット発生部位が車両走行時フレーム内へ進入した水が滞留しない内面上側になるよう完成車と同じ状態へ電着姿勢を変更したうえ(図 41)で、シミュレーション技術により最適浸漬姿勢、揺動角度、エア抜き穴位置を決定(図 42)し、防錆品質を確保。



### 6.2 実環境鍛え上げ評価

ランクルの名に相応しい信頼性、耐久性にこだわり、開発初期段階から中東や豪州などでラリーチームの方々とラリーコースを走行し、クルマの実環境鍛え上げ評価を実施(図 43)。最弱部位や壊れ方の把握、修理性評価が主な目的。またモデルを前にして、ブラインドでも操作できる直感的な機器配置やラリー走行でも安全な視界などにこだわり、適正な機能配置を実現。



図 43 実環境鍛え上げ評価

## 7. むすび

新型ランドクルーザーは、人の生活を支える本来の役割と使命に原点回帰させ、ランクルブランドの中心を担う意志を込め、コンセプトを「The Land Cruiser」とし、プラドのサブネームをとり、ランドクルーザー”250”として新たに生まれ変わった。

開発にあたり、「ランドクルーザーの原点回帰」すなわち、もっと多くの人々の生活を支えるためには何を実現すればよいかを考え、辿りついた方向は、無駄をそぎ落とし、質実剛健なオフローダーとしての基本性能の追求と扱いやすさに徹底的にこだわり抜くことであった。

伝統を継承しながら、圧倒的な進化を遂げたランドクルーザー”250”。

実現に向け、幾多の困難をともに乗り越えた仲間や関係者の皆様、そして 70 年以上支えてくれた世界中のお客様と販売店の皆様にこの場を借りて、厚く御礼申し上げます。

ランドクルーザー”250”が、ランクルの 100 周年に向けた、未来に繋ぐ大切な一台になることを心から願う。「道を超えて。時を超えて。」

### ■著者

第 1 章 まえがき

第 2 章 開発の狙い

第 7 章 むすび

Mid-size Vehicle Company MSZ

森津 圭太, 高山 稔, 野原 康平

第 3 章 動的性能とプラットフォーム

Mid-size Vehicle Company

MS プラットフォーム開発部

小野 卓真, 今井 朝輝, 村上 隆, 小松崎 貴也

Mid-size Vehicle Company

第 1MS 車両開発部

中村 真人

デジタルソフト開発センター UI 商品開発部

小玉 晋也

Mid-size Vehicle Company MS 制御開発部

高橋 正剛, 西川 耕史, 成岡 駿之介

第 4 章 ランクルに相応しい多様なパワートレーン

クルマ開発センター パワートレーン製品企画部

北井 慎也, 小林 寛英, 江藤 雅朗

第 5 章 デザイン

先進技術開発カンパニー 先進デザイン開発室

渡辺 義人

第 6 章 「ランクル品質」の造り込み

生産本部 田原工場組立部

岩下 公彦

生産本部 堤工場車体製造技術部

平石 剛大, 野尻 桂介, 内山 博史, 辻野 元大

生産本部 高岡工場塗装成形製造技術部

柴田 章弘

2023年度 日本機械学会賞(論文)

# 路面入力による車両運動と非定常空気力の連成解析： 定式化と走行試験での検証

前田 和宏 \*<sup>1</sup>椿野 大輔 \*<sup>2</sup>原 進 \*<sup>2</sup>佐宗 章弘 \*<sup>2</sup>

## 1. まえがき

自動車の走行安定性へ及ぼす空気力の影響は大きく、さまざまな車体形状・空力デバイスが性能向上のために取り入れられている。しかしながらその効果については、従来の定常空気力(一定の車両姿勢・風速でのリフト力やヨーモーメント)だけで説明することが難しく、非定常な空気力特性(車両運動・自然風で発生する変動)に着目した解析が必要である。その1つの取り組みとして、路面入力による車両ピッチ・上下運動で発生する空気力の応答に着目し、運動へ与える影響を明らかにし、その観点での取組みの必要性を示した(図1)。

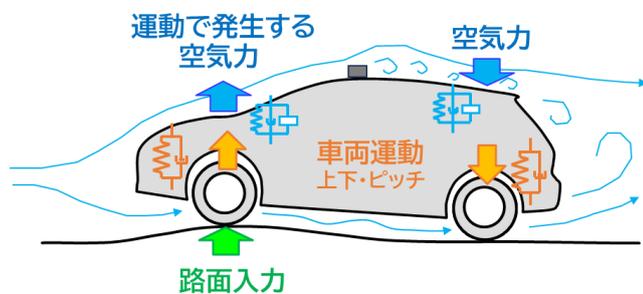


図1 路面入力による運動で発生する非定常空気力

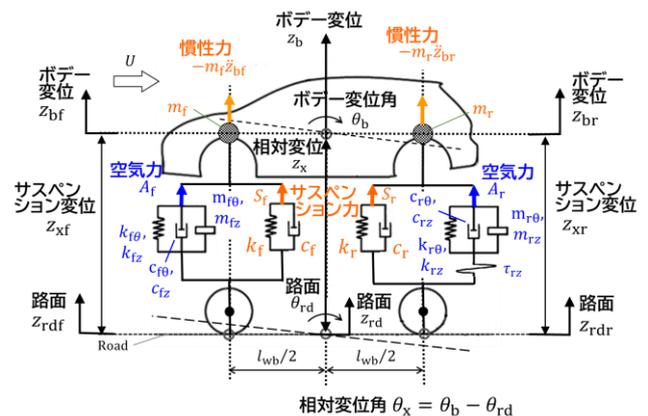
## 2. 技術概要

### 2.1 車両運動と非定常空気力の連成方程式

運動で発生する非定常空気力が車両運動へ与える影響を捉えるため、空気力と運動を連成させた運動方程式を考えた。路面入力によるピッチ・上下の2自由度の縦運動を考え、フロント/リア車軸に質量、サスペンション

としてダンパ・ばねを持ち、さらにその車軸に空気力が働くとした(図2)。

空気力はピッチ・上下運動に対しそれぞれ発生するものとし、非定常な特性として空気イナータ・ダンピング・ばね、さらに一次遅れを持つモデルとして定義した。運動方程式は式(1)のように整理され(ラプラス変換の形式にて、記号は図2参照)、路面入力( $z_{rdf}$ )による縦運動(路面とボデーの相対ピッチ角, 上下変位:  $\theta_x, z_x$ )の応答が、サスペンションと空気力の作用をあわせてあらわすことができる。サスペンションはフロント/リアそれぞれの相対変位に対して慣性力・ダンピング力・ばね力が働き、空気力は車体全体での相対ピッチ角/上下変位に対し、空気イナータカ・ダンピング力・ばね力がフロント/リアそれぞれに働く。一次遅れ( $\tau_{rz}$ )は上下変位に対するリアでのみ必要であった。



$m_f, m_r, c_f, c_r, k_f, k_r, l_{wb}$   
: 車両質量, ダンピング・ばね 係数, 車両ホイールベース  
 $m_{f\theta}, m_{r\theta}, c_{f\theta}, c_{r\theta}, k_{f\theta}, k_{r\theta}$   
: ピッチ運動に対する 空気イナータ・ダンピング・ばね 係数  
 $m_{fz}, m_{rz}, c_{fz}, c_{rz}, k_{fz}, k_{rz}, \tau_{rz}$   
: 上下運動に対する 空気イナータ・ダンピング・ばね・一次遅れ 係数  
Subscripts f, r  
: フロント, リア

図2 縦運動と非定常空気力の連成する運動モデル

\*<sup>1</sup> クルマ開発センター 車両技術開発部

\*<sup>2</sup> 名古屋大学

$$\hat{M}(s) \begin{bmatrix} \hat{\theta}_x(s) \\ \hat{z}_x(s) \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} m_f s^2 & -m_r s^2 \\ m_f s^2 & m_r s^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ e^{-s\tau_{wb}} \end{bmatrix} \hat{z}_{rdf}(s) \dots (1)$$

$$\hat{M}(s) := \begin{bmatrix} \hat{M}_{11}(s) & \hat{M}_{12}(s) \\ \hat{M}_{21}(s) & \hat{M}_{22}(s) \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} m_f s^2 + 2c_f s + 2k_f & -m_r s^2 - 2c_r s - 2k_r \\ m_f s^2 + 2c_f s + 2k_f & m_r s^2 + 2c_r s + 2k_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l_{wb}/2 & 1 \\ -l_{wb}/2 & 1 \end{bmatrix}$$

$$- \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_{f\theta} s^2 + c_{f\theta} s + k_{f\theta} & m_{fz} s^2 + c_{fz} s + k_{fz} \\ m_{r\theta} s^2 + c_{r\theta} s + k_{r\theta} & \frac{m_{rz} s^2 + c_{rz} s + k_{rz}}{\tau_{rz} s + 1} \end{bmatrix}$$

### 2.2 非定常空気力の計測とモデル化

非定常空気力を求めるために、1/4 車両模型を用いた風洞内加振実験を行った。風洞に加振機を設置し、加振部のロードセルにより加振力を計測した。風の有無でその加振力の差をとることで非定常な空気力を抽出することができる。加振はピッチ・上下で行い、ルーフ上面に流れを乱す突起の有る場合と無い場合の 2 ケースを行い比較した(図 3)。0.2~2Hz の間の 6 周波数で Sin 加振を行い、それぞれの周波数で運動( $\theta_x, z_x$ )に対する発生空気力( $A_f, A_r$ )のゲインと位相をとり、それらをあわせて周波数領域で最小二乗法による同定を行い定式化し、応答関数を求めた(図 4)。

その結果、空気力は図 2 に示した 2 次項および一次遅れを考えたモデル化が必要であることがわかり、非定常な特性を持つことが確認できた。差の大きいピッチ運動でのリア上下空気力応答をボード線図・同定式で図 4 に示す。突起無しは、空気力発生ゲインが大きく、位相のずれが小さいことがわかる。

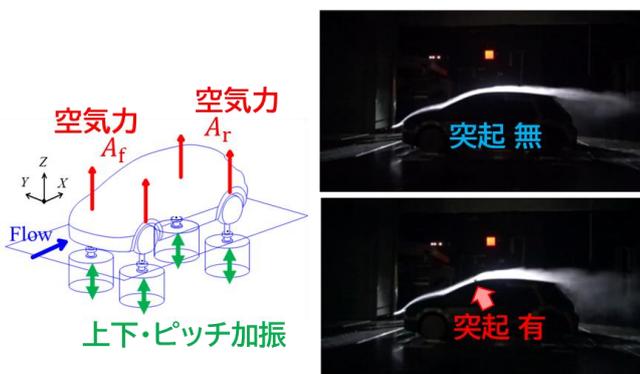


図 3 模型加振イメージと検討ケースでの流れ

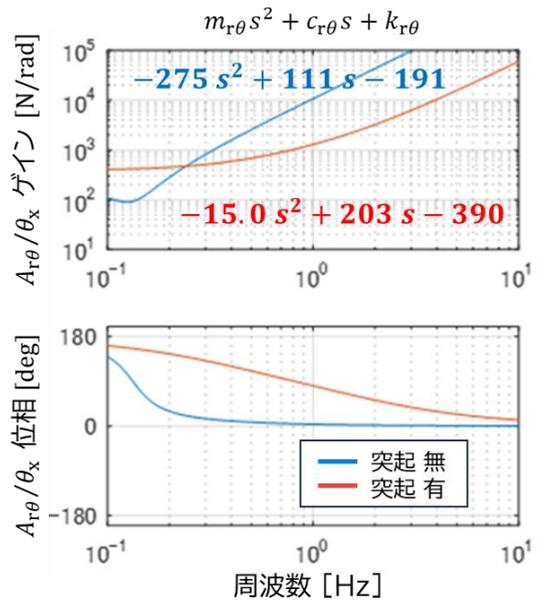


図 4 ピッチ運動でのリア空気力発生 応答関数( $A_{r\theta}/\theta_x$ )

### 2.3 非定常空気力の運動への影響解析と検証

求めた非定常空気力の応答関数の各係数を式(1)へ代入することで、路面入力に対する車両運動を応答関数として算出できる。突起の有無での差が確認でき(図 5, ピッチ運動), さらにそれをを用いた凹凸路面入力(図 6 グラフ上段)での時系列シミュレーションでも、運動応答の差を確認することができる(図 6 グラフ中段, ピッチ運動)。

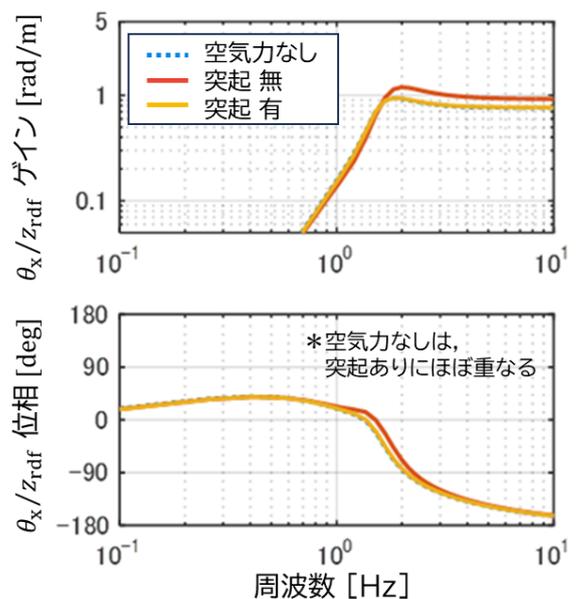


図 5 路面入力に対するピッチ運動 応答関数( $\theta_x/z_{rdf}$ )

さらにこのシミュレーション結果を実際の走行試験での計測結果(図6 グラフ下段)と比較し、検証した。突起無しは路面によく応答している(振幅が大きく、遅れが小さい)傾向が捉えられていることがわかる。“突起無しは路面追従性が良く、しっかりした感じ”とのドライバー評価と合致する結果となっている。

突起無しはピッチ運動しやすく、有りは動きにくくなる空気が発生しており、突起無しではルーフ流れが側面へ逃げるのに対し、有りではルーフ上に乱れた流れが滞留し運動の抵抗になっていると理解することができる。流れの変化しやすさの違いが、非常空空気力の違いとなっていると考えられる(図7)。

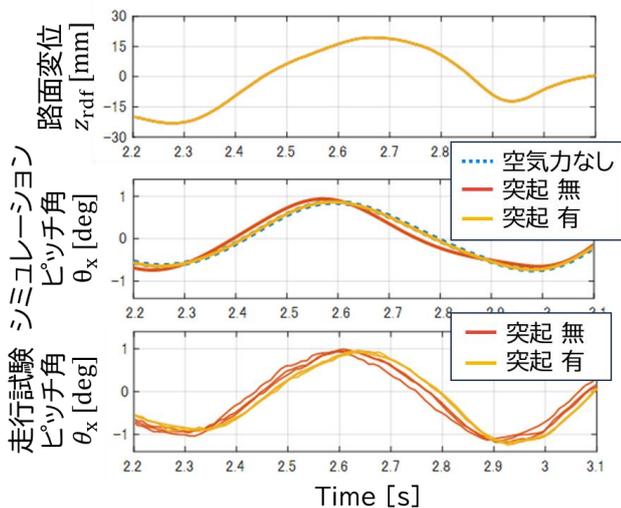


図6 路面入力に対するピッチ運動のシミュレーションと走行試験の比較

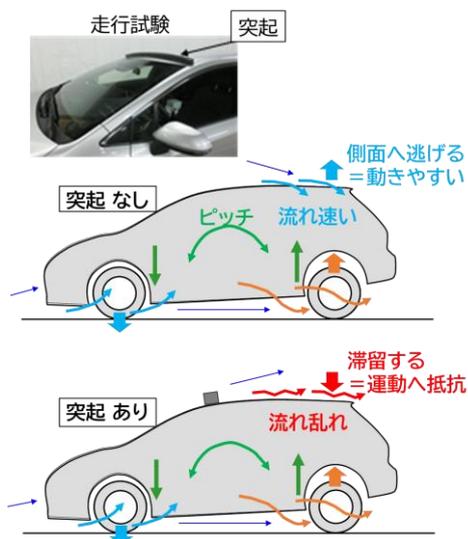


図7 ピッチ運動時の突起形状による流れ変化

### 3. まとめ

自動車の走行安定性に大きく寄与する空気力の影響を、非常空空気力(運動で発生する空気力)に着目することで、その効果メカニズムを定量的に示すことが可能となった。この技術を活用し、さらなる車両性能向上を進めていく。

#### ■参考文献

- (1) Maeda, K., Tsubakino, D., Hara, S. and Sasoh, A., Coupling Analysis of Unsteady Aerodynamics and Vehicle Behavior with Road Input: Modeling and Verification in Road Tests, Mechanical Engineering Journal, Vol.8, No.4 (2021), DOI: 10.1299/mej.21-00095.
- (2) Maeda, K., Tsubakino, D., Hara, S. and Sasoh, A., Investigations of Unsteady Aerodynamic Effects Generated by Heave and Pitch Motion in Different Vehicle Body Shapes with Model Excitation Tests, Mechanical Engineering Journal, Vol.7, No.5 (2020), DOI: 10.1299/mej.20-00276.

2023年度下期 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	差分進化に基づくセットベース設計手法とサスペンション設計への応用	西川 幸治 新谷 浩平 岩田 基史 宮木 耕太	トヨタ自動車 ↑ ↑ ↑	
	ロードノイズの開発初期に用いるタイヤ振動特性の簡易予測法	駒田 匡史 荒木 正典 橋岡 正人 村上 英樹	トヨタ自動車 ↑ ↑ ↑	
	スーパーリーンバーンエンジンにおける燃料組成が熱効率に及ぼす影響	金子 和樹 松原 直義 北野 康司 横尾 望 中田 浩一 安武 優希 内木 武虎 小畠 健 渡邊 学	トヨタ自動車 ↑ ↑ ↑ ↑ ↑ ENEOS ↑ ↑ ↑	
	実スケール車両モノコックを対象とした可変軸CFRP・アルミ複合大型三次元構造物の実証実験	岩野 吉宏 田仲 正明 大橋 功 梅本 和彦 川本 敦史 野村 壮史	トヨタ自動車 トヨタカスタマイジング& ディベロップメント TJSM 豊田中央研究所 ↑ ↑	
	超ハイテン材CMT アーク溶接の熱履歴再現による熱影響部特性の計測と溶接継手の破断予測	西村 律 麻 寧緒	トヨタ自動車 大阪大学接合科学研究所	
	2圧力/2システム法を用いたブレーキシステムの圧力脈動1Dモデル開発	矢野 真大 吉岡 信彦 小池 洋平 駒田 匡史	アドヴィックス ↑ トヨタ自動車 ↑	
	小型磁界センサを用いた電磁波防護シミュレーションの検証	鈴木 美紀子 渡 豊志夫 一之瀬 健一 三輪 圭史 石居 正典	トヨタ自動車 ↑ ↑ ↑ 産業技術総合研究所	
	市街地走行中に危険場面に遭遇した場合の人間ドライバの回避行動に関する実験的考察	児島 亨 真鍋 裕輝 北田 幸一 佐野 邦英 篠原 歩 高橋 奈々 島 忠史 池田 幸洋	自動車技術総合機構 交通安全環境研究所 ↑ ↑ ↑ ↑ 国土交通省 ↑ ↑ トヨタ自動車	
	遠隔型自動運転システムにおいて通信遅延が操作性に与える影響の評価および通信遅延要件の明確化	赤塚 康佑 須田 理央 百瀬 博文	トヨタ自動車 ↑ ↑	
	Bayesian Active Learning を用いたオフロード車両の乗り心地と路面入力荷重の両立性予測手法	河村 拓昌 春木 美鈴 豊田 浩之 新谷 浩平	トヨタ自動車 ↑ ↑ ↑	
	CFD を用いた車体形状の流れに起因する空力騒音予測手法の確立	伊藤 祐太 若松 幹生 ファン ビン ロン 安岡 志朗	トヨタ自動車 ↑ ↑ ↑	
	International Journal of Automotive Engineering (IJAE)	A Model for CAN Message Timestamp Fluctuations to Accurately Estimate Transmitter Clock Skews	Camille Gay Tsutomu Matsumoto	Yokohama National University Toyota Motor Corporation Yokohama National University
	Mechanical Engineering Journal	Basic study on transmission error for gear made from different metals laminated in width direction to provide rigidity distribution	Fumitaka Yoshizumi Takayuki Aoyama Yoshikatsu Shibata	Toyota Central R&D Labs., Inc. ↑ Toyota Motor Corporation
Journal of Fluid Science and Technology	Behaviors of charged air flow on the step surface with an electric potential	Noboru Maeda Kazuhiro Maeda	SOKEN, INC. Toyota Motor Corporation	

# Back Number Index



Vol.64(2018年5月)  
特集:TNGA パワートレân



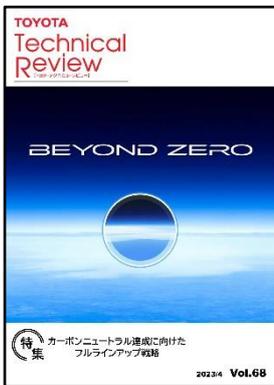
Vol.65(2019年8月)  
特集:将来の電池技術  
~燃料電池と蓄電池



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



Vol.69-2(2024年3月)  
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 Technical Review Vol.70 No.1

© 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  
〒471-8571 愛知県豊田市トヨタ町1番地  
(0565)28-2121(代表)

発 行 人 古平 嘉貴  
企 画 森 みどり，遠山 淳，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 技術地区業務サポート室 加藤 慎吾  
発 行 2024年9月20日