

TOYOTA Technical Review

[トヨタ・テクニカル・レビュー]

2021/2
236



多
様
化
す
る
価
値
と
ク
ル
マ
創
り

特集

多様化する価値とクルマ創り

～新型MIRAIとGRヤリス～

VoL. 66

【表紙のデザイン】

今回、本誌では新型MIRAIとGRヤリスを特集しています。いずれの車種も、これまでトヨタが推進してきた「いいクルマづくり」の思想のもと、それぞれのクルマが果たすべき新たな価値の創造に向けて、従来の概念を「超」えて力強く「躍」動していくことをイメージし、各車のコンセプトカラーを基調に図案化した構成となっています。



TOYOTA Technical Review

236

Vol. 66 Feb. 2021

目次

巻頭言

・幸せの量産	執行役員 前田 昌彦	4
--------------	------------------	---

▶特集「多様化する価値とクルマ創り～新型MIRAIとGRヤリス～」

・環境車の新たな形を提案する新型MIRAIの開発	田中 義和/清水 竜太郎/野正 斉/井上 真	6
・新型MIRAIの第2世代FCシステム概要 - 大量普及に向けたFC開発 - 高橋 剛/井漕 好博/今西 啓之/掛布 裕史		12
・第2世代FCシステム開発	弓田 修/加藤 裕康/川原 周也/伊藤 孝浩/難波 良一/白川 努	16
・第2世代FCスタック開発	水野 誠司/林 友和/窪 英樹/奥村 暢夫/栗原 卓也/森 一広	22
・第2世代高圧水素貯蔵システム開発	山下 顕/中道 昂太郎/稲生 隆嗣/木田 浩司/矢橋 洋樹/後藤 荘吾	28
・第2世代FCスタックの生産技術	長澤 武史/野木 淳志/池田 哲平/野納 晋平/竹下 慎也/板倉 拓哉	34
・第2世代高圧水素タンクの生産技術	馬場 陽一郎/上田 将人/近藤 秀昭	40
・新型MIRAIのプラットフォーム・ボデー構造	熊澤 靖元/寺本 大輔/小倉 登/板東 博/石川 善基	45
・新型MIRAIの“キャラ変”に込めた思い	久保田 憲	50
・新型MIRAIの振動騒音性能開発	石川 哲平/羽室 友策/加藤 智久/福原 千絵/亀井 一浩	55
・新型MIRAIの車両運動性能開発	芦川 渉/岡松 秀悟/井上 真	59
・新型MIRAIの空力性能開発	武田 英晃/細井 章仁/黒田 宙/兒玉 あおい	63
・新型MIRAIの衝突安全性能開発	藤原 敏博/田中 洋雅/平形 修二	66
・新型MIRAIの量産性と商品性を向上させる車両生産技術 横山 昌/増原 麟/那須 礼学/上月 宏登/西條 豪師/小桑 昌範/松岡 惇/浜本 洋志		68
・マイナスエミッションを実現するエアクリーナの開発 市川 哲也/春日井 邦歩/増田 浩一/圓山 裕人/後藤 潤/吉田 貴美子		73
・Toyota Safety Senseの開発	新保 祐人/田中 佑典/勝田 寛人/王 農宇/石原 正巳/山下 敬司	76
・高度運転支援 Toyota Teammate Advanced Parkの開発	松永 康孝/水瀬 雄樹/日栄 悠	80
・ビッグデータを用いた「急アクセル時加速抑制」の開発 上撫 琢也/岸本 雄飛/雲丹亀 誉史/高木 雅史/太場 裕昌/大石 将士		86
・車とつながるコネクティッドサービス	佐久間 智/矢島 哲/浅井 和/樋崎 勝哉	90
・低CO ₂ リサイクルアルミ材の開発	西川 直樹/増田 勇也/大竹 和実/蔵本 遼/山崎 裕貴/永井 健史	92
・Born from WRC ～GRヤリスについて～	齋藤 尚彦/土井 崇司	96
・走りのためのデザイン～GRヤリスの性能を追求したデザイン～ 中島 好晴/星 龍秀/谷口 弘輔/吉田 清隆/西勝 聡史		103
・GRヤリスのためのスポーツエンジン～新開発1.6Lターボエンジン～ 山成 健司/山地 一徳/萩原 健志/熊谷 厚法/小山 裕靖		108
・GR-FOUR ～GRヤリス用4WDシステム～	新井 政行/前田 直明/石川 慎一郎	114
・高次元の走りの実現～GRヤリスのシャシー・運動性能開発～ 永田 孝明/大庭 恵太/大金 昌宏/岩田 陽介/堀江 昌範/小園 浩平		120
・圧倒的な軽量化～GRヤリスのボデー軽量化技術～	金森 智久/中村 春樹/森田 一央/山路 恭平	127
・走りを音で奏でる～GRヤリスのサウンド開発～	田島 尚史/福原 千絵/笠松 秀幸	131
・走りを支える冷却性能～GRヤリスの冷却性能～	井下 圭介/松田 太/村川 淳/西尾 圭史/服部 伸一郎	137
・スポーツカー専用生産ライン～GR Factory～	町野 元康/北川 博之/荒井 優野/北折 英嗣	142

▶論文/解説

・自動運転技術を用いた高度運転支援システム「Teammate Advanced Drive」の開発 松永 昌樹/尾崎 修/木村 耕一郎/原 弘一/大川 真弥/流石 岳史		148
・太陽光を模擬した光化学反応実験によるガソリン車排出ガスの大気中二次有機粒子生成に関する研究 林 大介/山下 哲也		153
・大型ドライビングシミュレータの一般道評価実験に向けたモーション制御の最適化 グエンヴァン クイフン/小西 翔吾/伊藤 祥司		159

▶受賞技術概要		166
---------------	--	-----

Contents

Preface

· Mass Production to Create Happiness Masahiko Maeda, Operating Officer	4
--	---

▷ Special Feature: Contrasts in Value and Manufacturing –The Second-Generation Mirai and New GR Yaris–

· Development of the Second-Generation MIRAI –A Wholly New Type of Environmentally Friendly Vehicle– Yoshikazu Tanaka/Ryotaro Shimizu/Hitoshi Nomasa/Makoto Inoue	6
· Outline of the New Fuel Cell System in the Second-Generation MIRAI –Development of a Fuel Cell Suitable for Mass Production– Tsuayoshi Takahashi/Yoshihiro Ikogi/Hiroyuki Imanishi/Yuji Kakeno	12
· Development of the Fuel Cell System for the Second-Generation MIRAI Osamu Yumita/Hiroyasu Kato/Shuya Kawahara/Takahiro Ito/Ryoichi Namba/Tsutomu Shirakawa	16
· Development of the Fuel Cell Stack for the Second-Generation MIRAI Seiji Mizuno/Tomokazu Hayashi/Hideki Kubo/Masao Okumura/Takuya Kurihara/Kazuhiro Mori	22
· Development of the High-Pressure Hydrogen Storage System for Second-Generation MIRAI Akira Yamashita/Kotaro Nakamichi/Takashi Inou/Koji Kida/Hiroki Yahashi/Sogo Goto	28
· Production Engineering Technology for the Fuel Cell Stack of the Second-Generation MIRAI Takeshi Nagasawa/Atsushi Nogi/Teppey Ikeda/Shimpei Yano/Shinya Takeshita/Takuya Itakura	34
· Production Engineering Technology for the High-Pressure Hydrogen Tanks of the Second-Generation MIRAI Youichiro Baba/Masato Ueda/Hideaki Kondo	40
· The Platform and Body Structure of the Second-Generation MIRAI Yasuyuki Kumazawa/Daisuke Teramoto/Noboru Ogura/Hiroshi Bando/Yoshiki Ishikawa	45
· The New Character of the Second-Generation MIRAI Akira Kubota	50
· Development of the Noise and Vibration Performance of the Second-Generation MIRAI Tepppei Ishikawa/Yusaku Hamuro/Tomohisa Kato/Chie Fukuhara/Kazuhiro Kamei	55
· Development of the Dynamic Vehicle Performance of the Second-Generation MIRAI Wataru Ashikawa/Shuugo Okamoto/Makoto Inoue	59
· Development of the Aerodynamic Performance of the Second-Generation MIRAI Hideaki Takeda/Akihito Hosoi/Hiroshi Kuroda/Aoi Kodama	63
· Development of the Passive Safety Performance of the Second-Generation MIRAI Toshihiro Fujiwara/Hiromasa Tanaka/Shuji Hirakata	66
· Vehicle Production Engineering Technology to Enhance the Mass-Production Capabilities and Product Appeal of the Second- Generation MIRAI Masaru Yokoyama/Rin Masuhara/Yukinori Nasu/Hiroto Kozuki/Toshimitsu Saijo/Masanori Kokume/Jun Matsuoka/Yoji Hamamoto	68
· Development of Air Cleaner Realizing Minus Emissions Tetsuya Ichikawa/Kuniho Kasugai/Koichi Masuda/Hiroto Maruyama/Jun Goto/Kimiko Yoshida	73
· Development of Toyota Safety Sense Yuto Shimbo/Yusuke Tanaka/Hiroto Katsuda/Chenyu Wang/Masami Ishihara/Keiji Yamashita	76
· Development of the Toyota Teammate Advanced Park Function Yasutaka Matsunaga/Yuki Minase/Yu Hiei	80
· Development of Sudden Acceleration Suppression System Using Big Data Takuya Kaminade/Yuhi Kishimoto/Takashi Unigame/Masashi Takagi/Hiroaki Daba/Masashi Oishi	86
· Connected Vehicle Services Satoru Sakuma/Tetsu Yajima/Kano Asai/Masaya Hizaki	90
· Development of Low-CO ₂ Recycled Aluminum Alloy Naoki Nishikawa/Yuya Masuda/Kazumi Otake/Ryo Kuramoto/Yuki Yamazaki/Takeshi Nagai	92
· Born from the World Rally Championship –Introduction to the GR Yaris– Naohiko Saito/Takashi Doi	96
· Designed for Driving Performance –Styling that Emphasizes the Performance of the GR Yaris– Yoshiharu Nakajima/Tatsuhide Hoshi/Kosuke Taniguchi/Kiyotaka Yoshida/Satoshi Nishikatsu	103
· Development of a High-Performance Engine for the GR Yaris –The New 1.6-Liter Turbocharged Engine– Kenji Yamanari/Kazunori Yamaji/Takeshi Hagiwara/Atsunori Kumagai/Hiroyasu Koyama	108
· GR-Four –The 4WD System of the GR Yaris– Masayuki Arai/Naoaki Maeda/Shinichiro Ishikawa	114
· Realization of Superlative Driving Performance –Development of the Chassis and Dynamic Performance of the GR Yaris– Takaaki Nagata/Keita Oba/Masahiro Ogane/Yosuke Iwata/Masanori Horie/Kohei Kozono	120
· Weight Reduction for Exhilarating Performance –Weight Reduction Technology for the Body of the GR Yaris– Tomohisa Kanamori/Haruki Nakamura/Kazuhiro Morita/Kyohei Yamaji	127
· Expressing Driving Performance through Sound –Development of the Sound of the GR Yaris– Hisashi Tajima/Chie Fukuhara/Hideyuki Kasamatsu	131
· Cooling to Support Driving Performance –The Cooling Performance of the GR Yaris– Keisuke Ishita/Masaru Matsuda/Atsushi Murakawa/Yoshifumi Nishio/Shin-ichiro Hattori	137
· The Dedicated Sports Car Production Line –The GR Factory– Motoyasu Machino/Hiroyuki Kitagawa/Yuya Arai/Hidetsugu Kitaori	142

▷ Technical Papers/Technical Articles

· Development of Teammate Advance Drive –An Advanced Driving Assistance System Using Automated Driving Technology– Masaki Matsunaga/Osamu Ozaki/Koichiro Kimura/Koichi Hara/Shinya Okawa/Takeshi Sasuga	148
· Research into Generation of Atmospheric Secondary Organic Aerosols from Gasoline Vehicle Emissions Using Photochemical Reaction Experiments Simulating Solar Radiation Daisuke Hayashi/Tetsuya Yamashita	153
· Optimization of Motion Controls of Highly Realistic Dynamic Driving Simulator in Urban Driving Scenarios Quy Hung Nguyen Van/Shogo Konishi/Shoji Ito	159

▷ Technical Award News

幸せの量産

執行役員

前田昌彦



新型コロナウイルス感染症のまん延による生活様式や社会構造変容の大きなうねりのなかにあって、これまで経験したことのない、よりリアルな変革の必要性に直面しています。我々トヨタは、そのピンチをチャンスに変えるべく、地に足を付け着実に発展できるように、モビリティカンパニーへのフルモデルチェンジを目指しています。

また、「トヨタ環境チャレンジ 2050」と題し、2015年より車の環境負荷をゼロに近づけるとともに、地球・社会にプラスとなる取り組みを通じ、持続可能な社会実現に貢献するためのチャレンジを行っています。この活動は、国連サミットで採択されたSDGs（Sustainable Development Goals：持続可能な開発目標）にも呼応した形で推進しており、自動車開発目標の指針として、CO₂削減など6つのチャレンジ項目を目標に設定し取り組んでおります。

その様ななかで、自動車市場は今後どの様に変化していくのでしょうか？

新型コロナの影響、環境対応に加え、大変革要素の一つに、お客様の価値観変化が有ると思います。「モノからコトへ」に始まり、「デジタルネイティブ世代」「非接触型社会の到来」など、価値観変化に繋がる言葉は色々有ると思いますが、確実に認識する必要があるのは価値観、つまり、何を「幸せ」と感じるのか？は急激に多様化していて、従来の様なマスマーケティングの考え方は、通用しなくなってきているということだと思います。

言い換えると、どういう商品なのか？何が価値なのか？ということがよりわかりやすく、明確である必要が強まっていて、かつそれを伝える手段も多様化しています。

従来、〇〇「が」良いと思って購入されていたお客様から、〇〇「で」良い

と思い購入されるお客様が増えた一方で、ご自身の「愛車」として所有し自分らしくカスタマイズすることで所有する意味を重視するお客様の拘り方もより先鋭化しています。

非接触型社会の到来では、今まで以上に物流の効率化への貢献が価値になるでしょうし、「全ての人に移動の自由を」としてモビリティカンパニーを目指すトヨタにとっては、交通弱者への移動手段の確保も重要な提供すべき価値ということになります。

トヨタは、2016年から車両開発にカンパニー制を導入し多様化する価値に適応するクルマ創りを目指してきました。今回は、そのカンパニーの強みを活かして、多様化する価値の、ある意味、その両端にいるクルマを取り上げました、どちらも大衆車ではないですが、全く異なるアプローチで開発されています。

1つ目は、新型MIRAIを取り上げました。これは、燃料電池技術の性能向上で環境負荷のさらなる低減に寄与することはもとより、純粋に運転を楽しんでいただけるような工夫をしつつ、安全安心なクルマとして交通事故死傷者ゼロに向けた、最新の予防安全技術と高度運転支援技術などを取り入れることで、より最先端の技術をとという価値を強く求められるお客様のご要望にお応えすることを目指しました。あわせて新開発のユニットは商用車への展開性も強化しました。

2つ目は、GRヤリスを取り上げました。トヨタ創業者である、豊田喜一郎の「オートレースにおいてその自動車の性能のありったけを発揮してみて、その優劣を争う所に改良進歩が行われ、モーターファンの興味を沸かすのである・・・」という信念にも通ずる思想で「モリゾウ」が開発の中心になり、これまでとは全く逆の発想つまり、まずレーシングカーとして開発を開始し、その後、製品化に向けて開発・評価・製造までの企画を進めるという、これまでになかった車づくりを目指しました。結果として、S耐でST2クラスシリーズ優勝もできました。

これらの車を、お客様が乗っていただいたときに「幸せ」だと感じていただけたらと思います。

カンパニー制により、より多様化する価値観にお応えするクルマ創りがやりやすくなりました。その効果が出始めてきたと思います。そうやって様々なお客様の価値観にお応えするクルマ創りをすることで、より一層の「幸せの量産」ができる様に、これからも目指していきたいと思えます。

環境車の新たな形を提案する新型 MIRAI の開発

Development of the Second-Generation MIRAI
- A Wholly New Type of Environmentally Friendly Vehicle -

田中 義和 *1 清水 竜太郎 *1 野正 斉 *1 井上 真 *2
Yoshikazu Tanaka Ryotaro Shimizu Hitoshi Nomasa Makoto Inoue

1 はじめに

クルマはこれまで人々に移動の自由を与え、経済・社会・文化の発展に大きく貢献してきた。一方で、地球環境に対してもさまざまな影響を与えており、温室効果ガス（CO₂）が一因の異常気象が世界各地で発生するなど、我々が考えている以上に美しい地球環境が影響を受けている。

我々トヨタも、環境問題を最重要課題の1つと認識し、様々な企業活動に取り組んできており、2015年に持続可能な社会の実現に貢献するための新たなチャレンジとして「トヨタ環境チャレンジ2050」を設定、2050年に向けて6つのチャレンジを掲げた（図1）。

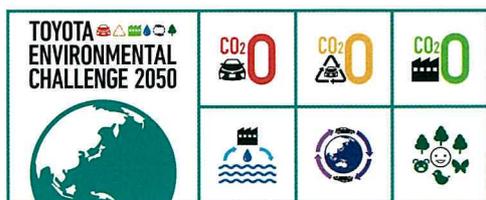


図1 トヨタ環境チャレンジ2050

そのなかで、新車については、走行時のCO₂排出量を90%削減（2010年比）するという高い目標を掲げ、そのマイルストーンとして2030年の新車販売において、電動車を550万台以上、そのうち100万台以上をEV、FCVにするという目標を公表した（図2）。

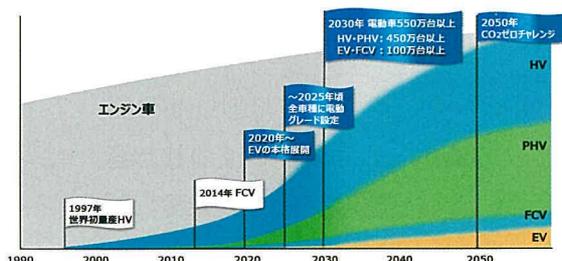


図2 2030年電動車マイルストーン

つまりグローバルに広く電動車の普及・拡大させることで、CO₂削減と環境改善に貢献していきたいと考えている。

2 水素エネルギーに取り組む意義

水素は、CO₂排出量削減の効果に加えて、エネルギー問題対応への重要なアイテムだと考えている。水素は、“水”の形をはじめとして、地球上で最も豊富に存在する元素のひとつであり、資源量の不安がなく電気に比べエネルギー密度が高く、輸送・貯蔵の観点でも有利である。風力や水力、太陽光発電などで作った電気で水を分解することにより水素を製造し、貯蔵・輸送を行うことで、自然エネルギーの非計画性を補うとともに、エネルギー地域偏在を是正することができる。

この様に水素には持続可能な社会のエネルギーとして大変大きな期待がかかっており、水素社会実現に向けた国の政策（水素・燃料電池ロードマップ）にもまとめられている。

その水素を燃料とする燃料電池自動車（FCV）は「高いエネルギー効率」「短い燃料充填時間と長い航続距離」「走行中に排出するのは水だけ」という特徴を有しており、サステナブルなモビリティを実現する“究極のエコカー”と位置づけ、水素社会実現にはFCVの普及が不可欠と考えている。

3 真の普及を目指し大きく進化した新型 MIRAI

この“究極のエコカー”MIRAIは、FCVの普及、そしてその先の水素社会の実現に向けた象徴的なクルマとして在りたいと考えている。

初代はトヨタが2014年に世界に先駆けて市販した量産型FCVであり、「自動車の次の100年のために水素エネルギー社会実現の先駆者となるクルマ」として開発、これまでに世界中で1万台以上を

*1 Mid-size Vehicle Company MS 製品企画部
*2 Mid-size Vehicle Company MS 車両性能開発部

販売し、FCV 市場の開拓に一石を投じることができた。

2 代目となる新型 MIRAI (図 3) は、初代では未熟であった点の改善は勿論のこと、クルマ本来の魅力を大きく進化させ、「FCV だから選んだのではなく、こんなクルマが欲しかった、それが FCV MIRAI だった」と言っていただけのクルマを目指した。そのためには環境性能だけではなく、デザインやスタイリング、パッケージ、動力性能、操安性能、安全性能など、あらゆる面で進化と深化を実現する必要があると考え、壮大な企画を練る所から始まった。



図 3 新型 MIRAI

我々はこの大きなチャレンジを成し遂げることで FCV の新たな魅力を創生し、可能性を広げ、より多くのお客様に FCV の「新たな魅力」をお届けする。そして FCV のさらなる普及に大いに貢献していきたいと考えている。その想いを実現すべく新型 MIRAI の開発は、プラットフォームの見直し、そして搭載を含めたユニット設計を刷新するなど、本当に欲しいと思っただけのクルマを目指して、フルスイングの開発を進めてきた。

3.1 新開発の第 2 世代トヨタフェーエルセルシステム

開発の大きなチャレンジングは多岐に渡り、そのなかでも心臓となる FC システム開発は大きなチャレンジであった。2014 年に開発したトヨタフェーエルセルシステム (TFCS) からユニットレイアウトを大幅に変更しつつ (図 4)、軽量、コンパクト、パッケージ性向上などの正常進化を実現させ、性能面でも飛躍的に向上させた (図 5)。



図 4 第 2 世代 TFCS レイアウト

項目	性能
FC システム出力	134kW
航続距離 (WLTC)	約 850km [※]
燃料充填時間	約 3 分

※ JEVZ902-2018 にもとづいた燃料電池自動車の水素有効搭載量を搭載したときの WLTC モード走行パターンによる値

図 5 第 2 世代 TFCS 主要性能

さらに本格量産を可能にする生産革新も推し進め、量産性も飛躍的に向上、普及に向けた年間約 3 万台規模の量産体制を構築した。

3.2 車両パッケージとプラットフォーム (P/F) 選択

車両パッケージは、居住性、使い勝手、デザインや性能など車両の全てを決定づける非常に重要な要素である。特に FCV においては、FC スタックや水素タンクなどのユニット配置がパッケージを決めるうえで重要なカギを握るため、今回の新型 MIRAI のパッケージを企画するにあたり、以下に示す二つの大きな着眼点から始めた。

- ①航続距離拡大に必要な十分な水素搭載量の確保
- ②初代では不十分であった居住性とデザイン性の向上

上記①②の実現に向けて、最初に P/F の検討から始めた。目指したいクルマを実現できる P/F は何か、あらゆる P/F を吟味し、日夜検討を進めた。特にお客様に安心してお乗りいただける十分な航続距離を実現するためには FC スタックの発電効率向上とともに、物理的な水素搭載量を増やすことを目指した。また、居住性やデザイン性の向上を視野に、初代ではフロントシート下に搭載していた FC スタックを、新型ではスタック本体の小型化とあわせてフード下への搭載を目指した。

これらについて繰り返し検討を行い、最終的に GA-L プラットフォームを選択。FC スタックをフロントに搭載するなど、ユニットレイアウトを見直し 3 本の高圧水素タンクを「〒の字」に配置、水素搭載量を初代の 4.6kg ⇒ 5.6kg に増加、後席の足元居住性も大幅に向上することができた (図 6)。

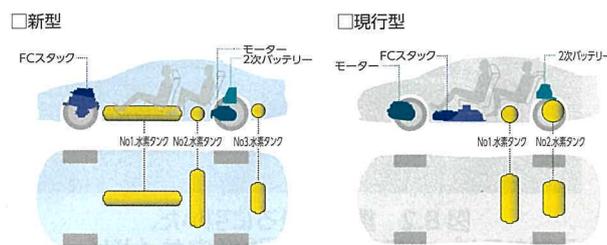


図 6 新旧 MIRAI のユニットレイアウト比較

また、車両全高を下げる事が可能となり、プロポーションの良い意匠ポテンシャルを引き出すとともに、重量物を車両中央下部に配置したことによる低重心化と前後配分の最適化が可能となり、運動性能の向上にも大きく寄与している（図7）。

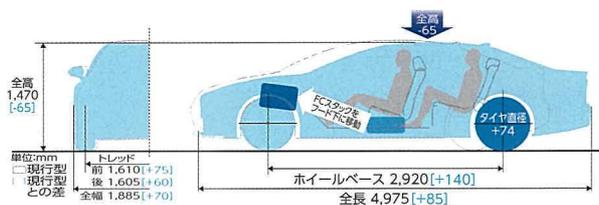


図7 新型MIRAIパッケージ概要

3.3 “直感で感じるエモーショナルなデザイン”を追求

2代目となる次期MIRAIの大きな使命としてクルマ本来の魅力を大きく進化させることがある。デザインはそのなかにおいて最重要要素の一つであり、環境車であってもカッコいいと言われたい、そんな想いから始まった。デザインの開発テーマは、「Silent Dynamism」とし、「FCVだから」「環境車だから」ではなく、スタイリングで選ばれる“エモーショナルなデザイン”を実現することを目指し、駆け抜ける姿が美しい“スピード感あふれる”プロポーションと大胆な面の変化やキャラクターラインに頼らない“ミニマルで大らかな”造形に拘って意匠開発を進めた（図8.1, 8.2, 8.3）。



図8.1 力強いワイドな踏ん張り感と低重心を追求



図8.2 重心を後ろに引いた、流麗なスピードフォルムが印象的なサイドビュー



図8.3 低重心とワイドな構えが際立つリヤビュー

インテリアデザインについては、新型MIRAIが目指す室内のエモーショナルな価値として、「運転する楽しさ」と「先進感のなかでのくつろぎ」が高次元で融合する新たなパーソナル空間を創造したいと考えた。そのためにミニマルな機能表現と乗員を包み込む素材感の新しいコーディネートで、運転する楽しさ/高揚感と、乗員のリラクゼーションを同時に叶えるインテリア意匠を目指した（図9）。



図9 インテリアデザイン

3.4 上質さと「Fun to Drive」を兼ね備えた車両性能

新型MIRAIの車両性能は、デザインのイメージにあうような「走り出した瞬間から振動・騒音のない上質さを感じられ、気持ち良く加速し、Fun to Driveを楽しめる車」を目指して企画を進めた。

3.4.1 車両運動性能

（加速感、操縦安定性、乗心地）

FCVは、モーター駆動ならではの振動・騒音が少ないことに加え、トルクフルで、アクセル操作に対しレスポンス良く、線形的な加速性能の良さが好評である。さらに、走行シーンに応じて車速や荷重移動をコントロールし易い加速度と減速度が得られるよう、駆動力特性を設計した。

さらに、加速時や高い車速でも安心して運転を楽しめるよう、「振動の少ない乗心地」「どっしりとした操縦安定性」「素直で応答性良く限界の高い旋回性能」は、本車両開発において最もこだわった点である。

そのために、前後重量配分は 50:50 になるようパワートレーン部品を配置し、さらにボデーの剛性感を得るため、リアボデーのねじり剛性向上に拘った設計を進めた (図 10)。



図 10 リア剛性向上のための環状構造

最後の味付けとして、アクセル、ブレーキ、ステアリングの操作フィーリングに統一感をもたせることにより、Confident & Natural な車両運動性能を実現させた。

3.4.2 NV (振動・騒音) 性能

NV 性能は「走り出した瞬間から上質さを感じられる」性能を目指した。

FCV はエンジンを起因とする振動・騒音はないが、その静粛性がゆえに、従来の車では気にならない僅かなノイズが目立ってしまう。そのため、「風切音」や「ロードノイズ」はもとより、「FC システム機器の作動音」や「モーターノイズ」についても、発生音の低減、マウント構造の工夫による伝達力の低減、ボデーの吸遮音などを織り込み、上質な NV 性能を実現した (図 11)。

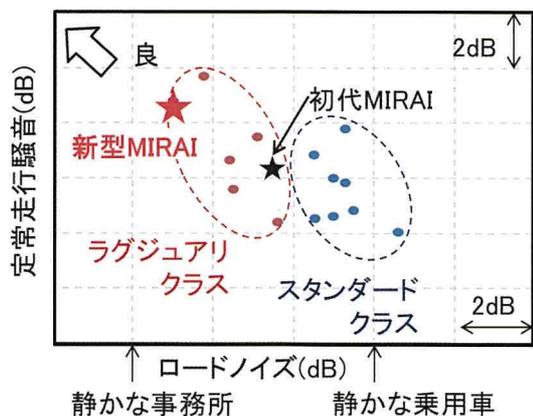


図 11 走行時静粛性

一方、振動・騒音が少ないのにトルクフルな加速感とはモーター駆動車でしか味わえない感覚であり、「静かに加速していく」のが特徴であるが、より「Fun to Drive」を高揚するために「加速サウンド」を開発した。

このサウンドは「エモーショナルな意匠」に相応しい音色を車速、加速度、FCV の吸気と発電状態などによって制御することで、車とドライバーがコミュニケーションできる「加速サウンド」にしたので、是非お試しください。

3.4.3 航続距離拡大への取り組み

「Fun to Drive」には航続距離の安心感も重要である。後続距離を延ばすには、より多くの水素を搭載し、走行抵抗 (空気抵抗とタイヤ転がり抵抗) を低減することが肝要である。そこで、フロア下に水素タンクを 3 本搭載しながらも、全高を下げる空力パッケージを採用し、フルアンダーカバーで床下を平滑化。また、フロント意匠開発、ユニット開発と綿密に連携し、意匠性を損なわずに発電と冷却に必要な空気を取り込み、効率的な風流れを可能にした (図 12)。

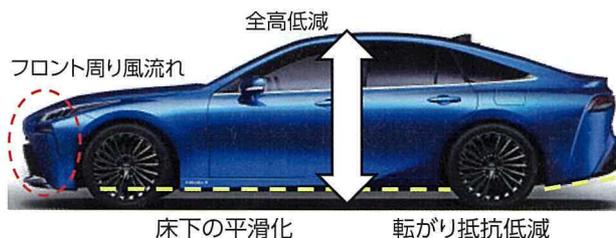


図 12 走行抵抗低減への取り組み

タイヤ開発においても、制動停止距離、ロードノイズ、操縦安定性、乗心地と高次元で両立しつつ、転がり抵抗を低減した。

また、発熱源をもたない EV 車は暖房に多くのエネルギーを消費するため、航続距離への影響が大きいのに対し、FCV は発電時の熱を暖房に有効活用することができる。さらに、ステアリングヒーター、シートヒーター、シートベンチレーションといった、人体を直接冷暖房する快適装備を設定し、これらを一括で効率的に自動制御する「ALL AUTO」機能も備え、航続距離への影響を抑えつつ空調快適性を確保した。

3.4.4 衝突安全性能

初代 MIRAI から FC ユニットのレイアウトを大幅に変更し、フロア下に高電圧のモータユニットや高圧の水素タンクを 3 本搭載するにあたり、衝突安全性能は重要な性能として開発初期から取り組んだ。各国の衝突安全性能アセスメントにおいて、クラストップレベルの衝突安全性能の確保はもちろん、「高電圧からの乗員保護」と「水素漏れ防止」についても安全性能を確保した。

3.5 安心・安全の先進装備

3.5.1 最新の先進安全機能を搭載

クルマを安心安全に楽しんでいただきたい。これはトヨタのクルマ開発のベースである。今回の新型 MIRAI においても、これまでより一歩進化した最新の予防安全パッケージ「Toyota Safety Sense」を装備し、最先端の予防安全技術を幅広く採用した。加えて、社会問題となったアクセルの踏み間違いによる事故に対しても、予防技術開発を進め、障害物がないシーンでもペダル踏み間違い時に加速を抑制できる装備を準備した。

3.5.2 トヨタの高度運転支援 「Toyota Teammate」

新型 MIRAI では人の感性に寄り添った最新の高度運転支援技術として「Toyota Teammate」を採用した。「Toyota Teammate」は人とクルマが心を通わせながらお互いを高めあう、クルマが人から運転を奪うのではなく、人とクルマが気持ちの通った仲間のように、ともに走るというトヨタ独自の考え方にもとづいて開発されている。

ドライバーとクルマが対話のなかでお互いの状態を確認し補いあうことで、安全な運転、快適な移動を可能にする技術である。

4 環境性能と社会貢献

4.1 FCV の特徴を生かした空気浄化システム

ご存知の様に FCV は水素と酸素を反応させた際の副生成物としてできる“水”が唯一の排出物であり、走行中の CO₂ 排出もゼロであることなど、FCV は元々環境性能の高い車として認知されている。そこに新たな付加価値を付与するために、発電のため走行時に空気（酸素）を取り入れるという

FCV ならではの長を活かし、吸入した空気をきれいにして排出する“空気浄化”システムを開発した。空気を取り込む際に高性能なエアクリーナを通すことで、大気浄化を可能にするという発想であり、大気中の PM2.5 除去効率向上のためにダストフィルタへエレクトレット加工を追加、化学物質除去のためケミカルフィルタの搭載を行った。

また、吸入空気量をタコメーターの様に動く「エアピュリメーター」としてナビ画面に表示し、色々な形でドライバーマインドを刺激する機能を付けた。

4.2 ボデー部品へのリサイクルアルミ材活用

走行中の CO₂ 排出ゼロに加えて、LCA（ライフサイクルアセスメント）の観点からも製造過程での CO₂ 削減も全方位で取り組んでいる。今回あらたに自動車用ボデープレス部品初の技術として、アルミメーカー内のクラッド材を含む工程内端材をリサイクルしたアルミ材のフードを採用し、LCA に貢献できる新規技術を手の内化できた。

4.3 いざという時に役立つ外部給電機能

FCV は発電をしながら走る電動車である特徴を活かし、給電車としての側面ももちあわせている。

近年日本でも自然災害による大規模停電などが散発しており、実際に避難所やご家庭の庭先でその有用性を発揮してきた（図 13）。

新型 MIRAI では航続距離の拡大にともない、給電機能も強化しさらなる利便性向上を図った。1500W までの家電製品であれば、車内に 2 か所設定した AC100V コンセントより直接給電が可能であり、また大容量の電力が必要な際は AC 変換器（別売）を用いれば最大 9kW までの電力供給が可能である。

FCV が非常時の大容量給電器として公器の様な役割を果たせられるよう本機能を標準設定とした。



図 13 ドライバーへの給電

5 おわりに

MIRAI は 2014 年に初代を発売し、世界中で 1 万台以上を販売。多くのお客様に FCV を認知、ご愛顧いただけるようになり、昨今では子供たちが MIRAI を見かけて「すげえ、MIRAI だー!」と喜んでいただけるまでになった。

社会においても ST 整備などのインフラの拡充も進み、水素社会実現に向けて着実に歩みを進めている。一方、社会情勢も変わり、自動車における環境技術も大きく進化。色々な形の電動車の展開が進んでいくなか、水素社会実現には FCV をより普及させる必要があり、そのためには誰もが欲しいと思っていただけるクルマを目指し、開発・生産に関わるみんなが一体となって渾身の開発をした。

そして完成した新型 MIRAI。環境性能がいいのは当たり前。都会の喧騒のなかを優雅に、上質に、静かに通り抜け、気分を変えて向かう先は郊外のワインディング。電動車らしい鋭い加速感と気持ちの良いハンドリングで意のままにクルマを操れば、気づけば笑顔になっている自分がある。こんなにアクセルを踏んでもいい物か?と自問自答するが、センターディスプレイに表示される「エアピュリメーター」が ZEV の先を行くマイナスエミッションカーであることを教えてくれる。「好きなだけ踏んでください、地球のために」と。

この MIRAI が支持されることで、FCV の新たな可能性を示し、水素社会実現に向けた二歩目、三歩目の足掛かりになることを願ってやまない。

■著者



田中 義和



清水 竜太郎



野正 斉



井上 真

新型 MIRAI の第 2 世代 FC システム概要 - 大量普及に向けた FC 開発 -

Outline of the New Fuel Cell System in the Second-Generation MIRAI
- Development of a Fuel Cell Suitable for Mass Production -

高橋 剛*¹ 井漕 好博*¹ 今西 啓之*¹
Tsuyoshi Takahashi Yoshihiro Ikogi Hiroyuki Imanishi

掛布 裕史*¹
Yuji Kakeno

要旨

環境問題、エネルギー問題に対するソリューションの一つとして燃料電池車の開発が取り組まれている。2014 年、普及型燃料電池システム（トヨタフューエルセルシステム TFCS）が初代 MIRAI に搭載され、水素、燃料電池の普及が推進された。本稿では、さらなる大量普及を目指し正常進化を果たした第 2 世代 TFCS のチャレンジ、生産性革新、実用性の向上などについて紹介する。

Abstract

Fuel cell vehicles (FCVs) are being developed as a potential solution for environmental and energy-related issues. In 2014, the Toyota Fuel Cell System (TFCS) was developed and installed in the first-generation MIRAI to help promote the use of hydrogen and encourage the wider adoption of FCVs. This article describes the challenges that were faced, and the productivity innovations and practicality improvements that were adopted in the second evolution of the TFCS to help further popularize FCVs.

キーワード FC システム, FC スタック, 高圧水素タンク, コスト低減, 航続距離, 生産性

1 はじめに

トヨタ自動車は地球環境との共生を図るため様々な環境技術開発に取り組んでいる。車の電動化が加速される昨今、電気とともに水素の活用が期待されている。燃料電池の開発は 1992 年にスタートし、2002 年に世界に先駆けて燃料電池車（FCHV）の限定リリースを開始し、2008 年には当時主要課題であった航続距離、氷点下始動性に一定の目途をつけた FCHV-adv をリリースした。さらに 2014 年にトヨタフューエルセルシステム（TFCS）を搭載した初代 MIRAI を開発し、世界初の“商品”と呼べる燃料電池車を世に送り出すことができた^{[1]~[5]}。今回、さらなる大量普及に向けた第 2 世代 TFCS（図 1）を開発し、軽量、パッケージ性向上などの正常進化に加え、コスト低減、システム出力 UP、航続

距離の飛躍的向上、NV 性能向上、生産革新などの多くの課題にチャレンジしたので、これらについて紹介する（図 2）。また、本稿に続く「第 2 世代 FC システム開発」、「第 2 世代 FC スタック開発」、「第 2 世代高圧水素貯蔵システム開発」、「第 2 世代 FC スタックの生産技術」、「第 2 世代高圧水素タンクの生産技術」でその詳細について記す。



図 1 第 2 世代 TFCS レイアウト

*1 トヨタ ZEV ファクトリー FC 製品開発部

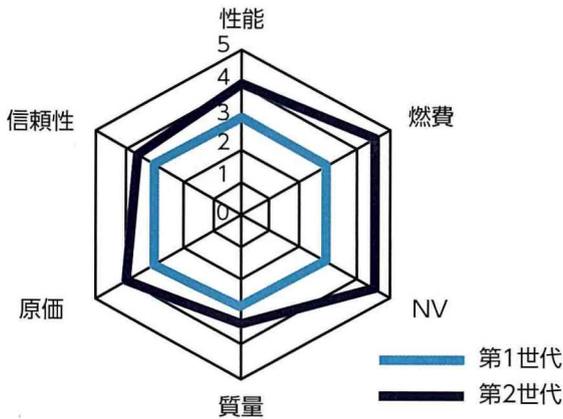


図2 第1世代と第2世代のTFCSの性能比較

2 第2世代TFCS コスト低減

第1世代と第2世代のシステムコストを図3に示す。システム全体として約70%のコスト低減を実現している。

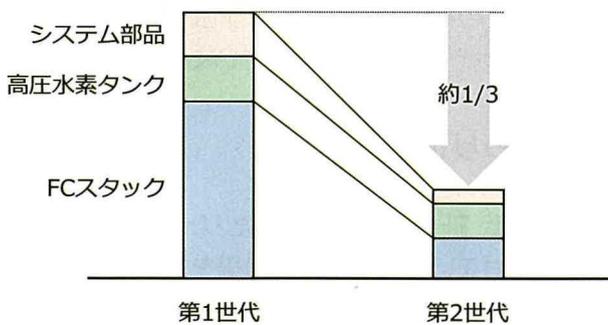


図3 第1世代と第2世代のシステムコスト

量産化による効果に加え、コストを下げる戦略として高額部材の使用量低減とFCシステム部品の小型化/統合に取り組んだ。

FCスタックでは電極の改良により高額材料であるPt触媒量を約1/2にするとともに、セル性能の向上によりスタックあたりのセル数を370→330セルに低減し構成材料の使用量を大幅に削減した。

また、エアコンプレッサでは圧縮方式をルーツ式からターボ式に変更し、小型/低コスト化を実現した。

さらに、高圧容器である水素タンクでは構成材であるCF(カーボンファイバー)の強度向上により単位体積当たりのCF量を7%削減した。

一方、生産技術では材料・製品構造・生産プロセスの同期開発に取り組むことで生産性が向上(生産

性革新)した。FCスタック、高圧水素タンクの製造コストの低減も実現している。

3 航続距離の向上

第2世代FCスタックASSYを図4に示す。燃料電池車の特徴として“航続距離の長いEV”という側面がある。今回のモデルでは搭載レイアウトを見直すことで乗員居住空間を犠牲にすることなく3本タンク搭載を実現し、水素搭載量を4.6kg→5.6kgに増やすことができた。また、トヨタ初となるSiC素子のFCPCへの採用によりシステム効率を向上させることができ、世界トップレベルの車両燃費67→74MPGeを実現した。これらの結果、航続距離は312Mile→402Mile (Mode)に大幅向上した。

4 FCシステムの性能向上

FCスタックの出力は第1世代114kWから第2世代で128kWに向上させた。また、出力向上のため電極性能を改善し単位面積当たりの発電量を15%向上させるとともに、セルレイアウトの改良、セル厚み低減などによりスタックの体積を33L→24L(エンドプレート除く)にすることができた。その結果、体格出力密度を3.5kW/L→5.4kW/L(エンドプレート除く)に向上させることができ、スタック質量は約40%低減できた。

一方、システム制御ではFCシステム全体を物理則にもとづいてモデル化(Model Based Development: MBD)し、MBDにもとづくコントローラを設計・実装し、ターボコンプレッサのサージ発生近傍領域でもサージを回避しながら高応答なコンプレッサ制御を実現した。その結果、加湿器レスでも安定したFCスタックの水マネージメントが実現でき、出力安定性が向上した。

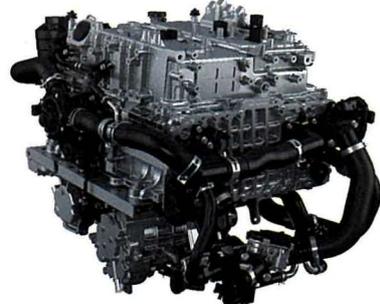


図4 第2世代 FCスタック ASSY

5 実用性の向上

第1世代 TFCS では FC スタックおよび FCPC を床下に搭載していたが、第2世代では一体化しフード下に搭載することで車両パッケージ、居住性を向上させることができ乗車定員を従来の4名から5名とした。また、可動部分が少ない作動原理に磨きをかけ、システム作動音を大きく低減させて車両静粛性が格段に向上した。燃費についてはコネクティッド機能を活用し、ナビ設定ルート在先読みを実施し、FCスタックと2次バッテリーの最適出力制御することにより向上した。

さらに、リモートスタート機能により低温始動時の実用性が向上した。

6 第2世代 TFCS 生産性革新

第2世代 TFCS では大量普及を実現させるため生産性を大きく向上した。FCスタックは330セルを積層した構成となっているため、1セルを組み付ける製造時間短縮が極めて重要である。電極自体をウェブハンドリング（ロール）とし、セル組付けはサイクルタイム数秒を達成した。従来ゴム材料の加硫に時間を要し、十数分/セルであったので格段に生産性を上げることができた（写真1）。また、積層自体を自動化することにより信頼性の高いスタッキングを実現した。

高圧水素タンクはライナー成型から内製で一貫生産している。ライナー接合工程では従来のレーザー溶着から赤外線溶着と工法革新し大幅な加工時間、不良率低減を実現した。CFのFW（フィラメントワインディング）工程では、設備動作部の徹底した軽量化と巻き品質自動測定技術導入により、高い生産性と品質保証を両立させた（写真2）。



写真1 FCスタックのセル化工程



写真2 高圧水素タンクの製造現場

7 まとめ

第1世代 TFCS に比較し第2世代では正常進化に加え、大量普及を狙った多くの課題にチャレンジし、大幅なコスト低減、航続距離UP、性能向上、生産革新等を実現した。また、このユニットを新型MIRAIに搭載することによりFCVの商品力を大幅に向上することができた。

さらに、今回開発したFCシステムモデル（MBD）を活用し、今後、定置発電システムや商用車システムに第2世代 TFCS を展開していく。

8 おわりに

第2世代 TFCS の開発にあたり、多くの関連会社のご協力をいただいた。この場をかりて深く謝意を表す。世代を新たにすることで確実な進化を刻むことができた実感しているが、広く世の中に浸透していくためにはさらなるチャレンジを継続していく必要があると考える。環境、エネルギー問題は我々のみでなく、子孫のために解決すべきことだと思う。また、燃料電池普及のためには水素インフラを含めた社会インフラ、モビリティ以外のアプリケーション拡大も必要である。水素社会実現に向けて今後も継続して開発を推進していきたい。

■参考文献

- (1) 木崎幹士, 浅井尚雄, 弓矢浩之: MIRAI につながるFCシステム. トヨタテクニカルレビュー. Vol.61 (2015)
- (2) Takahiko Hasegawa, Hiroyuki Imanishi, Mitsuhiro Nada, Yoshihiro Ikogi: Development of the Fuel Cell System in the Mirai FCV. SAE 2016 World Congress and Exhibition (2016)

- (3) Tsuyoshi Maruo, Masashi Toida, Tomohiro Ogawa, Yuji Ishikawa, Hiroyuki Imanishi, Mitsuhiro Nada, Yoshihiro Ikogi: Development of Fuel Cell System Control for Sub-Zero Ambient Conditions. WCX™ 17: SAE World Congress Experience (2017)
- (4) Norishige Konno, Seiji Mizuno, Hiroya Nakaji, Yuji Ishikawa: Development of Compact and High-Performance Fuel Cell Stack. SAE 2015 World Congress & Exhibition (2015)
- (5) Akira Yamashita, Masaaki Kondo, Sogo Goto, Nobuyuki Ogami: Development of High-Pressure Hydrogen Storage System for the Toyota "Mirai" . SAE 2015 World Congress & Exhibition (2015)

■ 著者



高橋 剛



井漕 好博



今西 啓之



掛布 裕史

第 2 世代 FC システム開発

Development of the Fuel Cell System for the Second-Generation MIRAI

弓田 修*^{*1} 加藤 裕康*^{*1} 川原 周也*^{*1}
 Osamu Yumita Hiroyasu Kato Shuya Kawahara
 伊藤 孝浩*^{*2} 難波 良一*^{*1} 白川 努*^{*1}
 Takahiro Ito Ryoichi Namba Tsutomu Shirakawa

要旨

新型 MIRAI の第 2 世代 FC システム開発では、第 1 世代で開発した外部加湿レスシステムや氷点下始動性能は確保しつつ、さらなる原価低減、生産性向上を進め、量的拡大を実現。また、FC ユニットの高性能化（高出力・高効率）、小型化を実現した。本稿では、FC システムの構成、航続距離向上に向けた取り組み、静粛性開発を中心に紹介する。

Abstract

The development of the fuel cell (FC) system for the second-generation MIRAI succeeded in expanding production capabilities through further cost reductions and productivity improvements, while maintaining the humidifier-free design and cold start capability of the system adopted in the first-generation MIRAI. At the same time, the performance (output and efficiency) of the FC system was enhanced while reducing size. This article focuses on the configuration of the FC system, the initiatives carried out to increase cruising range, and the approaches adopted to reduce noise.

キーワード FC システム, 航続距離, 静粛性, SiC, FC スタック

1 はじめに

2014 年 11 月に世界初の量産タイプの燃料電池自動車 MIRAI をトヨタ自動車は発売した。

第 1 世代 FC システムでは、氷点下始動性能、耐久信頼性の確保を実現したが、生産性、原価の観点では大きく改善の余地があった。

一般になじみの深い『自動車』という製品に水素を応用し、広く普及させていくことが水素社会実現のためには重要と考える。

第 2 世代 FC システムでは、量産性を確保し、より一層の原価低減、航続距離の向上などにより、商品性とユーザーの利便性を向上した。

以下に第 2 世代 FC システム開発での取り組みを紹介する。

2 新型 MIRAI のシステム構成

2.1 ハイブリッドシステム構成

第 2 世代システムの電気回路の基本構成は第 1

世代を踏襲している（図 1）。

また、モータ、パワーコントロールユニット（PCU）、バッテリーなどの部品はハイブリッド車と共通化し、徹底的なコスト削減を実施した。

さらに、航続距離向上のため、システム効率向上を狙い、二次電池に Li 電池、FC 昇圧コンバータ（FCDC）に SiC を採用している（4.1.1）。

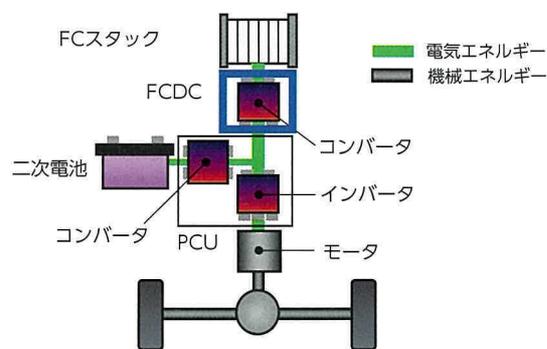


図 1 HV システム図

2.2 FC システム構成

FC システムの基本回路である、空気、水素、冷却の各回路の基本構成（図 2）は第 1 世代を踏襲しつつ、各ユニット性能を向上させた。なかでもエア

*1 トヨタ ZEV ファクトリー FC 製品開発部
 *2 株式会社デンソー

コンプレッサ (ACP) は圧縮方式をルーツ式からターボ式に変更し、高回転化により小型化を実現した。

第1世代同様、氷点下始動性能、外部加湿レス性能を確保した。さらに動力性能向上のため、燃料電池出力を約2割向上させている。

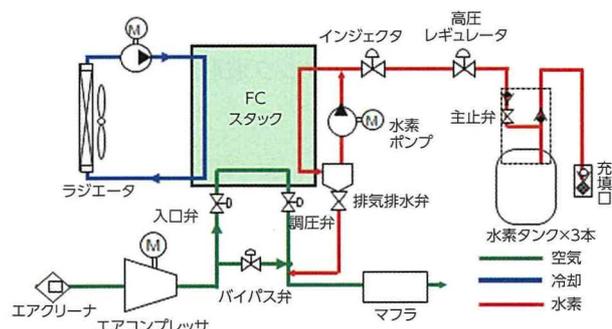


図2 FCシステム図

3 FCシステム一体化, 小型化開発

第2世代ではFCシステムの一体化, 各ユニットの小型化を進め, フード下部への搭載を可能とした。代表例を以下に示す。

3.1 FCシステム一体化

第2世代では商品性を向上させるため, ①使用セル数低減によるFCスタック小型化, ②従来は分散搭載されていた高電圧部品を一体化したFCPC (Fuel Cell Power Control unit) の新規開発, ③ターボ式エアコンプレッサ (ACP) の採用などを行い, それらを一体化することによってFCシステムの大幅な小型化を実現した。

これにより, FCシステムをフード下部に収めることに成功し, 集中搭載を実現した (図3)。コンベ車と同一の車両組立てラインでの混流生産が可能となり, 車両量産性も向上させることができた。

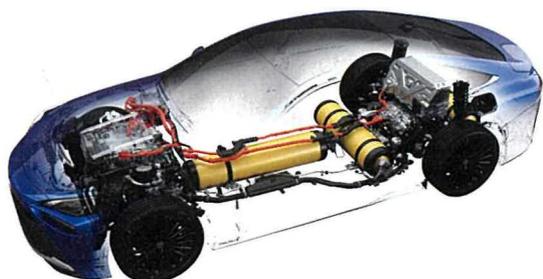


図3 FCシステム搭載図

3.2 エアコンプレッサ小型化

一般的にターボ式 ACP は低流量かつ高圧力比の領域でサージ現象が発生する。この現象は、圧縮機と配管からなる系において、気体が行く方向に振動する現象で顕著な場合は圧縮機出口から入口に向かって気体が逆流する。該当領域の動作点を回避させる制御手段として分流制御を採用した。これは、FCスタックの要求エア流量以上の流量を ACP で供給しつつ、余剰流量は FC スタックをバイパスさせた空気ラインへ流す制御である。

本制御の実現にあたっては、FCスタック含めたエア供給システム全体の圧損を把握する必要があり、システムの物理モデル化 (Model Based Development) を行った。吸気から排気までコンポーネントごとに機能ブロックに分割し (図4)、ブロックごとの流量・圧力・温度・組成の各種状態量変化をリアルタイムで演算することで圧損推定をセンサレスで可能とした。その結果、サージ現象から ACP を保護しつつ、FCスタック内部の水マネジメントを行い、FCスタックの出力安定性を向上させた。

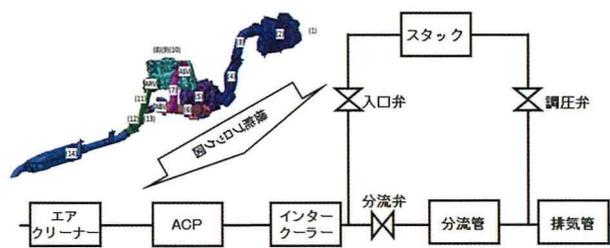


図4 エア系システムの機能ブロック図

4 燃費開発 (航続距離向上)

水素インフラが普及途上である燃料電池車両にとって航続距離の向上は重要なチャレンジである。

航続距離向上のため、燃費 (水素 1kg で走行可能な距離) の向上 (約1割) と水素搭載量を増加 (約2割) させて、合計約3割の航続距離向上を実現した。

燃費向上のため、FCDC の SiC 化 (4.1.1)、Li 電池採用などのユニット性能向上、リフレッシュ制御 (4.2) などの制御改善を実施した。

4.1 電力変換ユニット (FCDC) の効率向上

FCDC は、モータで消費される電力を燃料電池から効率よく伝達するユニットであり、第1世代から

採用されている（図 1）。第 2 世代での効率向上に関する取り組みを以下に示す。

4.1.1 SiC パワー半導体

FCDC のスイッチング素子として SiC パワー半導体（MOSFET, SBD）を新規開発し、損失低減を図った。図 5 は FCDC を構成するインテリジェントパワーモジュール（IPM）および回路構成、図 6 はパワーカードおよび SiC パワー半導体の外観を示す。FCDC は 4 相の昇圧コンバータであり、MOSFET, SBD をそれぞれ 8 素子使用している（図 5）。MOSFET には、車載用品質を確保するため、温度センサ、および電流センサを実装している。

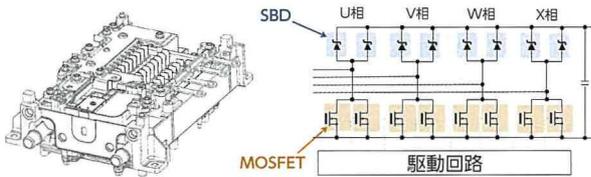
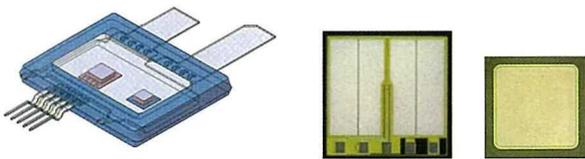


図 5 IPM の外観および回路構成



(1) パワーカード (2) MOSFET/SBD

図 6 パワーカード、SiC パワー半導体外観

電圧電流特性を図 7 に、SiC-MOSFET と Si-IGBT で比較したスイッチング波形を図 8 に示す。SiC の特性を活かして、定常損失およびスイッチング損失を低減している。

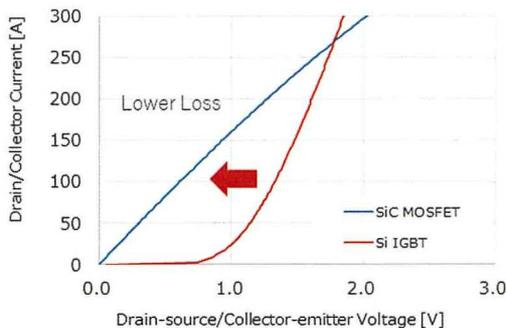
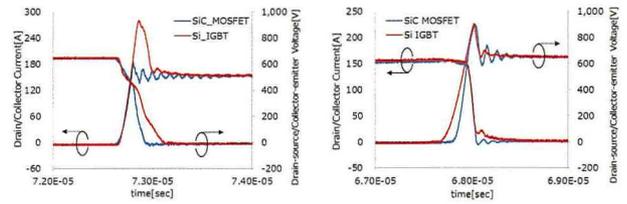


図 7 電圧電流特性比較



(1) ターンオン波形 (2) ターンオフ波形

図 8 スwitching 波形比較

図 9 に IPM 損失を示す。Si パワー半導体を採用している第 1 世代 IPM と比較して約 80% の損失低減を実現し、車両燃費の向上に貢献している。

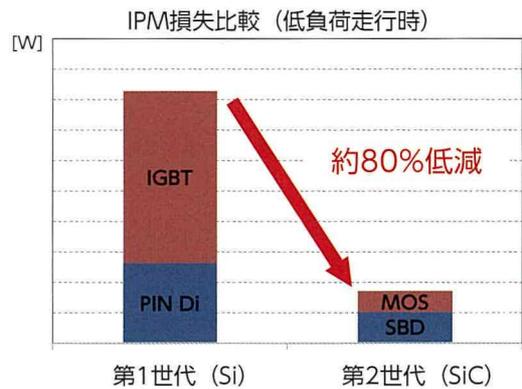


図 9 IPM 損失比較

4.2 リフレッシュ制御による燃費改善

燃費向上のためには燃料電池の発電効率を向上させることが重要である。

燃費に影響する電流負荷帯では、電極での電気化学反応における電子授受に要するエネルギー損失が支配的である。この電極反応でのエネルギー損失は、Pt 触媒の表面状態によって変化し、表面が酸化状態では触媒活性が低下し、還元状態では触媒活性が高い。そのため、常に Pt 触媒の表面状態を還元状態に維持することが燃料電池の発電効率を高めることになる。

それを実現するため、低負荷での発電が所定時間継続すると定期的に燃料電池の動作電圧を瞬間的に低下させ、Pt 触媒表面状態を還元させる「リフレッシュ制御」を実施（図 10）した。これにより燃料電池の発電効率を高く維持することができ、さらなる燃費向上に貢献できた。

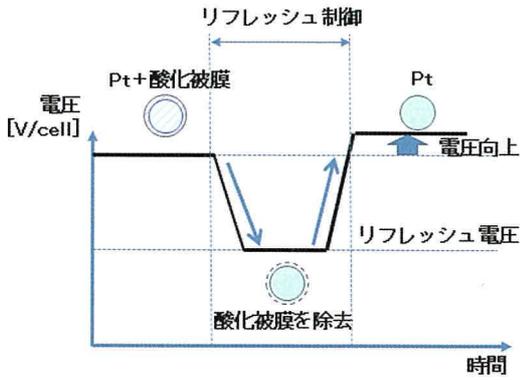


図10 リフレッシュ制御

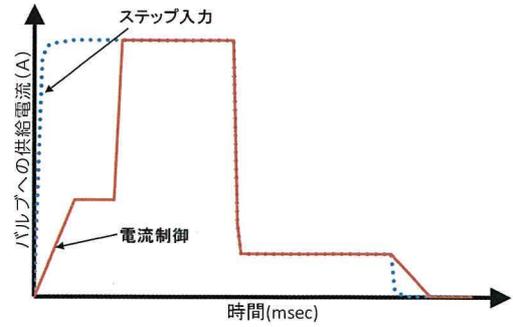


図11 供給電流タイムチャート

5 静粛性向上

FCVは内燃機関がないために高い静粛性が期待される。しかしながらFCスタックが発電するためには水素と酸素の供給が必要であり、3.2で述べた、大量の空気を送り出すACPや水素を供給する水素インジェクタ、水素を循環させるための水素ポンプ、高圧ガスを封止する主止弁など、種々の振動源、音源が存在する。新型MIRAIにおいては、ドライバーの操作に連動しない音を徹底的に低減し、一層の快適性向上を実現した。

以下、代表例での騒音低減事例を述べる。

① 主止弁作動音

主止弁とは高圧水素タンク用の電磁弁で、水素の供給・遮断を行う電磁バルブであり、MIRAIの場合、弁の前後差圧700気圧での開閉と、特に衝突検知時などの緊急遮断（閉弁）の動作を保証している。電磁弁作動時の振動がタンク、タンクフレームを介してボデーに伝わり車内音となる。作動音低減のため、構造上の信頼耐久性を確保しつつ、電磁弁への電流の与え方を工夫した（図11）。具体的には、開（閉）弁時は電流の与え方をステップ入力から、時間勾配をつけて徐々に電流を大きく（小さく）する方式を採用し、信頼性を保ちながらコストアップすることなく、作動音を低減した（図12）。

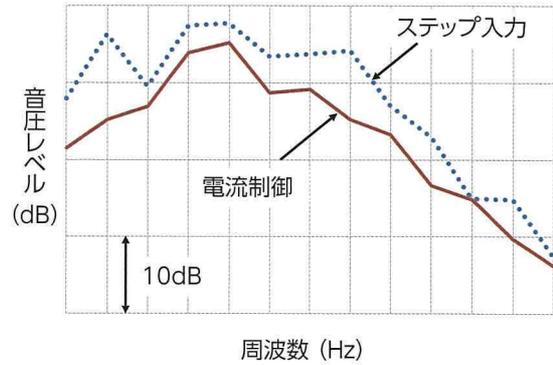


図12 電流徐変による作動音低減

② バイパスエア気流音

ACPにより取り込まれた空気は、FCスタックとバイパス経路を通過する（図2）。全開加速時など、十分に容積のあるFCスタックに空気が送られる場合は気流音の影響は小さい。一方、回生時など、ACPを高回転で作動させる必要がある場合は、バイパス経路を通過させる必要があり、その経路で気流騒音が発生する。

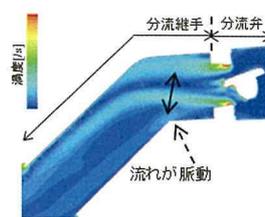


図13 流れ場（対策前）

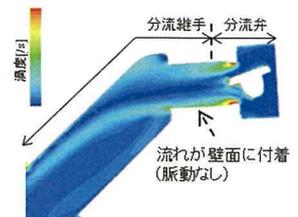


図14 流れ場（対策後）

図13に示すようにバイパス経路においては分流弁と継手の径違いによる急激な断面変化により分流弁直後の流れが剥離し、脈動が発生する。源流対策として平坦部を延長、流れを壁面に付着させることで脈動を低減（図14）。10dB以上の音圧低下を実現した（図15）。

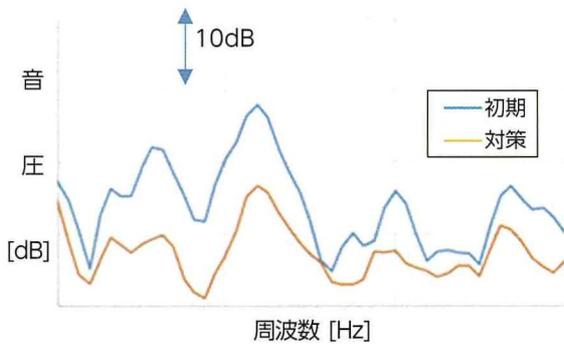


図 15 音圧低減効果

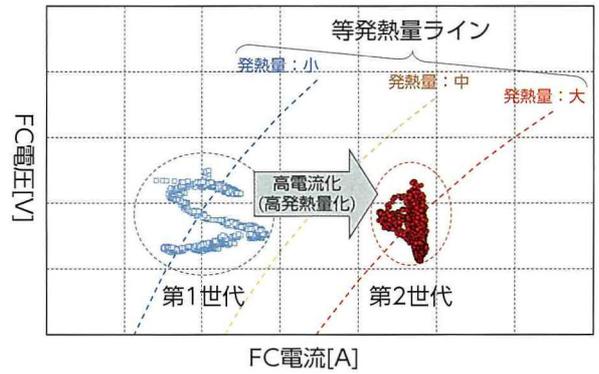


図 17 急速暖機動作点の比較

6 氷点下環境下でのシステム制御

第2世代FCシステムでは第1世代で実現した氷点下環境下での始動性をさらに改善するとともに、氷点下起動直後の出力向上および、FCスタック動作点制御性を向上した。

6.1 氷点下起動直後の出力向上

第2世代FCシステムでは第1世代で採用した急速暖機制御（図16）を踏襲した。氷点下環境における起動直後の出力をより向上させるために、FC動作点を第1世代よりも高電流側に設計し（図17）、スタック発熱量をより多く得ることで昇温速度を増加させた。その結果、 -30°C 始動における起動直後の出力は50kW以上を確保し、第1世代（約20kW）に対して約2.5倍以上に出力を向上した。

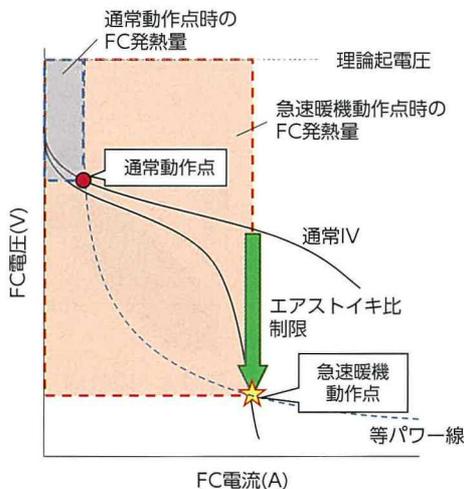


図 16 急速暖機制御のイメージ図

6.2 FCスタック動作点制御性向上

図17の動作点を実現するため、昇温過程で状態が変化するFCスタックに対し、その状態変化にあわせて適切なエア流量を指令する必要がある。

第2世代FCシステム制御ではFCスタックの状態を緻密にモデル化することで、昇温過程の出力特性や過電圧特性を考慮したエア流量を算出し制御することができた。これによりFCスタック動作点制御性が向上し、氷点下始動性を確保できた（図18）。

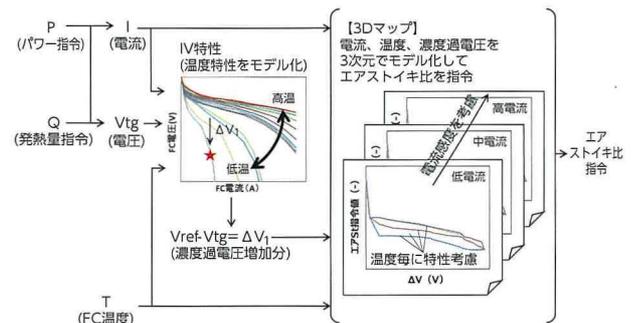


図 18 急速暖機制御のエア流量指令法

7 まとめ

新型MIRAIの第2世代FCシステムは第1世代で開発した外部加湿レスや氷点下始動性能は確保しながら、動力性能や航続距離を向上させた。また各ユニットの小型化、システムの一体化を進め、FCユニットのフード下部への搭載を可能とした。さらにFCVの利点である静粛性も向上させ、快適性を向上した。

8 おわりに

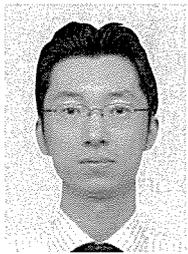
第1世代をご愛用いただいているお客様、販売店の皆様、開発協力各社、サプライヤー各社、水素インフラ各社、関係省庁、自治体などのご協力により、本開発を進めることができた。感謝の意を表す。

未来の人たちの選択肢の一つとしての水素社会実現のため、今回の知見を活かしながら、より一層のFCシステム性能の向上、低価格化を進めていきたい。

■参考文献

- (1) 野々部康宏ほか：MIRAIのFCシステム開発．TOYOTA Technical Review Vol.61 Mar.2015, p.15-19
- (2) 近藤政彰ほか：MIRAIのための高圧水素貯蔵システム開発．TOYOTA Technical Review Vol.61 Mar.2015, p.26-31
- (3) 水野誠司ほか：高性能・低コストFCスタックの開発．TOYOTA Technical Review Vol.61 Mar.2015, p.20-25

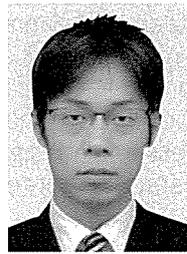
■著者



弓田 修



加藤 裕康



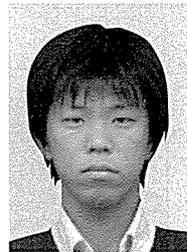
川原 周也



伊藤 孝浩



難波 良一



白川 努

第 2 世代 F C スタック開発

Development of the Fuel Cell Stack for the Second-Generation MIRAI

水野 誠司 *1 Seiji Mizuno	林 友和 *1 Tomokazu Hayashi	窪 英樹 *1 Hideki Kubo
奥村 暢夫 *1 Masao Okumura	栗原 卓也 *1 Takuya Kurihara	森 一広 *1 Kazuhiro Mori

要旨

2014年11月に世界に先駆け市販化したFCV「MIRAI」の第1世代FCスタックに対し、さらなる普及を目指して、新型の第2世代FCスタックでは、セルの流路構造および電極の構成材料の技術革新により、高性能・小型化を図り、世界トップレベルの出力密度5.4kW/L（エンドプレート除く）を実現した。また、FCスタックのフード下搭載にともない、新規フィリング外部拘束によるセルずれ防止構造の採用により、耐G性能を1.6倍に向上して衝撃信頼性を確保した。一方、低コスト・量産化に向け、電極触媒のPt量半減、チタン製セパレータ表面処理（ナノコンポジットNC）のロールtoロール連続生産化、セル接着シール構造の刷新による高速接着などにより、FCスタックのコスト1/4と大幅な生産性向上が図れた。

Abstract

The first-generation MIRAI was launched in November 2014 as the world's first commercial fuel cell vehicle (FCV). Compared to the fuel cell (FC) stack used in the first-generation MIRAI, the FC stack in the second-generation MIRAI achieved one of the highest power densities in the world (5.4 kW/L, excluding end plates) by adopting innovative material technologies for the cell flow field structure and electrodes to boost performance and reduce size. In addition to installing the FC stack under the hood of the vehicle, a new external filling constraint structure was adopted to help prevent cell deviation. These measures enhanced the gravitational acceleration (g)-resistant characteristics of the FC stack by 1.6 times, thereby helping to ensure impact performance. Furthermore, measures to help reduce costs and facilitate mass production included halving the amount of platinum (Pt) used in the electrocatalyst, adopting a continuous roll-to-roll production process for the titanium bipolar plate nano composite (NC) surface treatment, and achieving a high-speed adhesion process by redesigning the cell sealing structure. These measures helped to reduce the cost of the FC stack by three-quarters, leading to dramatic improvements in productivity.

キーワード FCスタック, セル, 出力密度, 流路構造, 表面処理, 電極, 触媒, 耐G, 低コスト, 量産化

1 はじめに

2014年11月、世界に先駆け第1世代FCスタックを搭載したFCV「MIRAI」を市販したが⁽¹⁾、さらなる普及を目指して、高性能・低コストな量産型の第2世代FCスタックを開発した。

第2世代FCスタックは、セル流路構造および電極の革新により高性能化と小型化を図り、世界トップレベルの出力密度5.4kW/L（エンドプレート除く）を達成し、FCシステムを一体化（FCスタック+昇圧コンバータFCPCやポンプ類などのBOP）した形で、フード下搭載を可能にした（図1）。

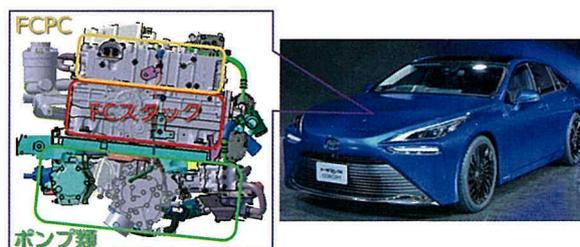


図1 第2世代FCスタックのフード下搭載

一方、低コスト・量産化に向け、高価なFC固有材料および貴金属である電極触媒Ptの使用量削減、セパレータ表面処理（ナノコンポジット）のロールtoロールでの連続生産化、セル構造刷新による接着シール高速化などにより、コスト1/4を実現した。

*1 トヨタ ZEV ファクトリー FC 製品開発部

本稿では、高性能・小型化のキー技術であるセル流路構造および電極の革新、フード下搭載におけるFCスタックの衝撃信頼性向上技術、低コスト・量産化技術について述べる。

2 FCスタックの高性能化

高性能・小型化を図るうえで、高電流密度化（電極単位面積当たり掃引できる電流量アップ）することが重要であり、セルの流路構造および電極の構成材料を革新し、高電流域で多量に発生する生成水の排水性を向上して、電極触媒層への酸素拡散を促進することで、電極単位面積当たりの出力を15%アップした。

2.1 セル流路構造の革新

セルの流路構造として、一般的なストレート溝流路は、流路や電極内に生成水が滞留し易く、酸素拡散阻害により発電安定性に課題があった⁽²⁾ (図2)。

第1世代FCスタックでは、空気流路として革新的な3Dファインメッシュ流路（3次元的な微細格子流路）を開発し、電極表面に排出される生成水を速やかに流路の構造親水効果で吸上げて、酸素拡散阻害を抑制し、高性能化を実現した (図3)。

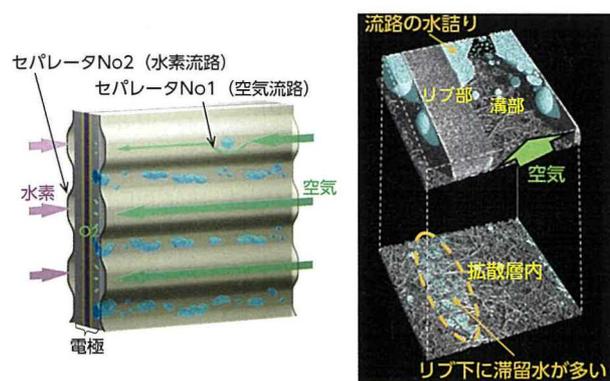


図2 ストレート溝流路の残水状態 (X線CT)

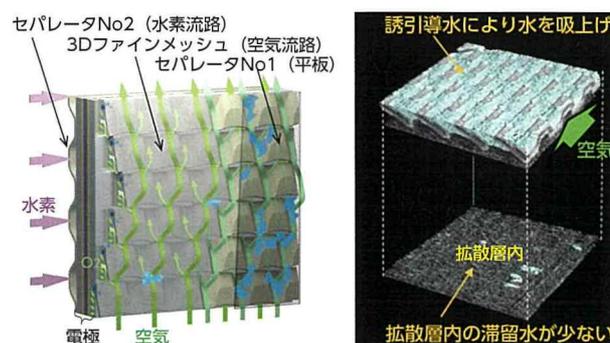


図3 3Dファインメッシュ流路の残水状態 (X線CT)

一方、第2世代FCスタックでは、セルの部品点数削減（チタン製セパレータ3⇒2枚構成）と発電面積利用率アップ（マニホールド4⇒2辺配置）を狙い、新たに絞り流路を開発した。絞り流路は、ストレート溝流路に流路断面積を絞った圧損部を設けることで、電極の拡散層内に空気を強制的に潜らせて、排水性と酸素拡散性を向上している⁽³⁾ (図4)。

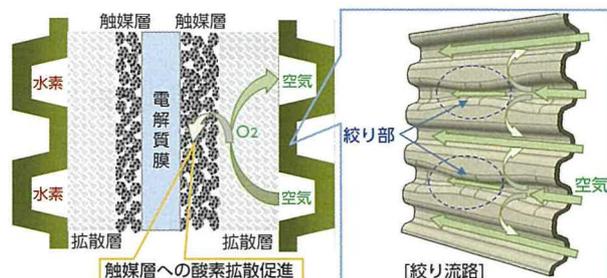


図4 絞り流路（拡散層内への空気潜り込み）

絞り流路は、電極内の生成水の残水が少なく、触媒層表面の酸素濃度がストレート溝に対して2倍程度高く、3Dファインメッシュ流路と同様に酸素拡散性を促進できることがわかった (図5)。

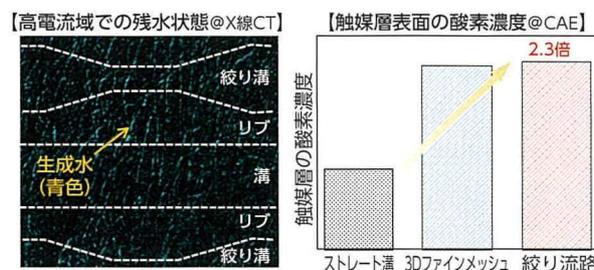


図5 絞り流路の生成水可視化と酸素拡散性

第2世代FCスタックのセル構造を図6に示すが、水素はウェーブ流路とし、第1世代の2ターン3段のカスケード流路に対し、セル面内の配流均一化と排水性を向上している。また、空気と水素を対向流で流すことで、生成水のセル内部循環による電極面内の水バランスを良くし、外部加湿レスFCシステムにおける発電安定性を確保した。

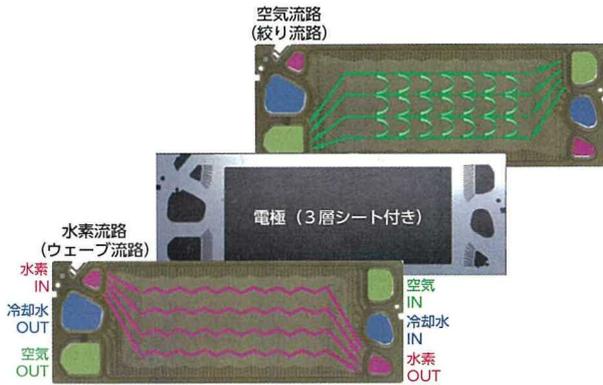


図6 第2世代FCスタックのセル構造

2.2 電極の革新

第2世代FCスタックの電極は、図7に示すように、電極材料物性を大幅に向上し、電極単位面積当たりの発電量アップ(高電流密度化)を図っている。

特に、触媒層は触媒およびアイオノマの材料革新を行った。触媒カーボン担体として、従来の中実カーボンは表面にPtを担持させることでPt利用率の向上を図っていたが、被覆しているアイオノマのスルホン酸被毒により活性が低下する課題があり、新たに多孔質カーボンMCND (Mesoporous Carbon Nano Dendrites) を採用した。MCNDは、アイオノマが入り込めない微細なメソ孔を有し、Ptの80%程度がMCNDの内部に担持されており、アイオノマがPtに直接接触するのを避け、スルホン酸被毒を抑制した。また、PtCo合金触媒の固溶度アップ(高分散化)とあわせて、触媒の活性を約50%向上した(図8)。一方、アイオノマとして、新規に高酸素透過アイオノマを採用し、酸素透過性を3倍に向上した。さらに、酸官能基の密度を高めた新たな分子構造を採用し、プロトン伝導度を1.2倍に向上した(図9)。

電解質膜は、補強層の比率をアップすることで、高強度化(耐力約10倍)と水素のクロスオーバー低減を図り、薄膜化(約29%減)によってプロトン伝導度を1.4倍に向上した。

拡散層は、カーボンペーパー基材の低密度化および細孔径アップによりガス拡散性を25%向上した。

上記、セルの流路構造および電極の革新によって、ガス拡散性向上による濃度過電圧低減、プロトン伝導度向上による抵抗過電圧低減、触媒活性向上による活性過電圧低減により、電極単位面積当たりの出力を15%向上した(図10)。

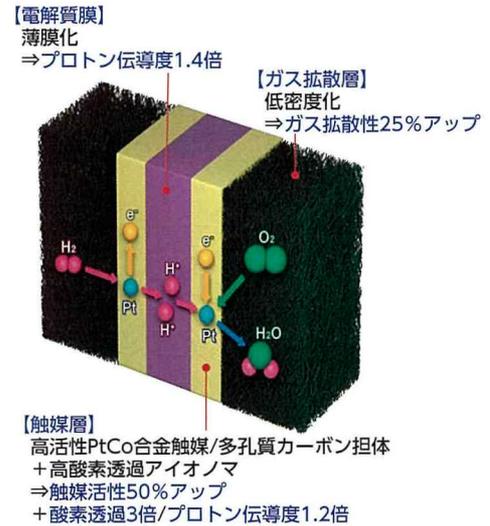


図7 第2世代FCスタックの電極仕様

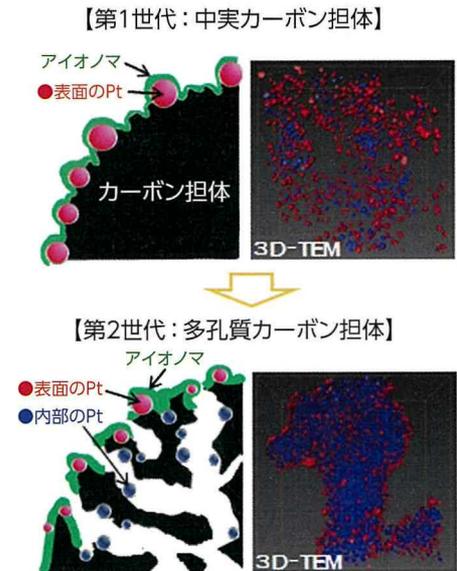


図8 多孔質カーボン担体 (MCND)

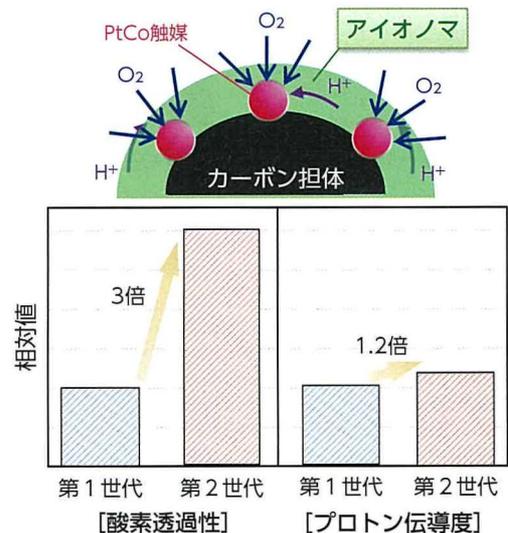


図9 高酸素透過アイオノマの物性

特集

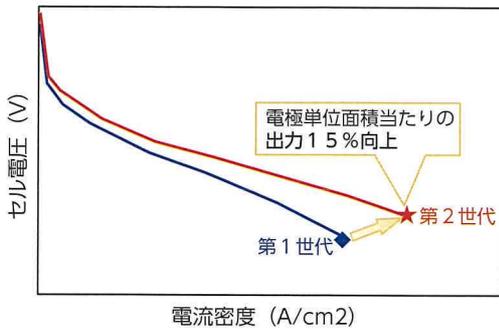


図10 第2世代FCセルの性能 (I-V特性)

3 FCスタックの小型・軽量化 (出力密度)

第2世代FCセルは、高性能化によりセル当たりの出力を26%アップし、FCスタックの最大出力を114kWから128kWにパワーアップした。一方、FCスタックの体格は、図11に示すようにセル厚さを1.34mmから1.11mmに薄くし(セパレータ薄肉化0.13⇒0.10mmとセパレータ枚数減3⇒2枚)、さらに、掃引できる最大電流を20%大電流化して、積層するセル数削減(370⇒330セル)により、小型・軽量化(33L・41kg⇒24L・24kg)を図った(図12)。

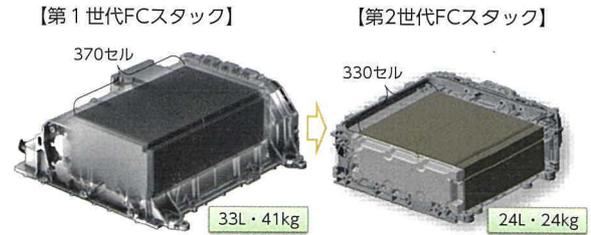


図12 FCスタックの体格 (エンドプレート除く)

以上、高性能化と小型・軽量化により、世界トップレベルの体積出力密度3.5⇒5.4kW/L、質量出力密度2.8⇒5.4kW/kgを達成した(図13)。

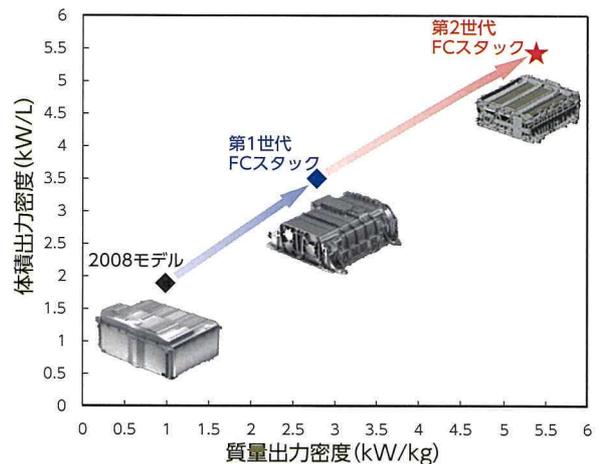


図13 FCスタックの出力密度 (エンドプレート除く)

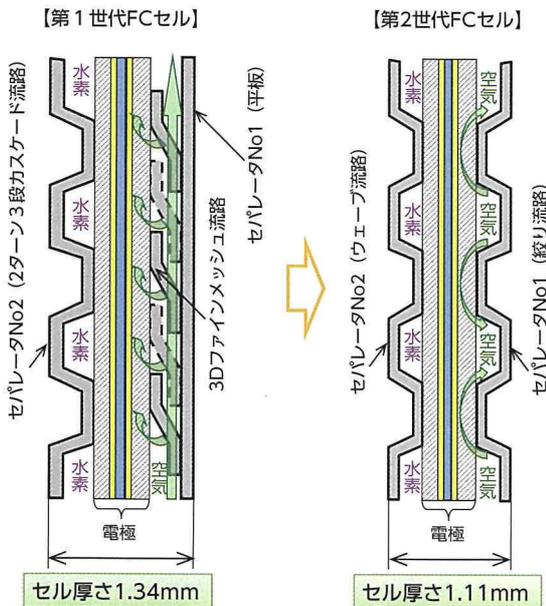


図11 FCセルの薄肉化

4 FCスタックのフード下搭載における信頼性

FCスタックのフード下搭載にともない、衝突時の耐G性能を向上する必要がある。

FCスタックは、衝撃入力に対して、高電圧安全と水素安全の観点から、セルの積層ずれによるシール不良を防止する必要がある。FCスタックの締結荷重とセル間の摩擦係数により生じる摩擦拘束力によって、セル積層体は保持されている。摩擦拘束力を超える大きな衝撃が加わった場合には、外部拘束によってセル積層ずれを規定量以下に抑えるため、第1世代FCスタックでは、衝撃による慣性力によってセル積層体が動的に撓むのを利用し、スタックケースに当てることで得られる反力により、セルずれを規定量以下に抑えて、幅広い衝撃入力に対応した(図14)。

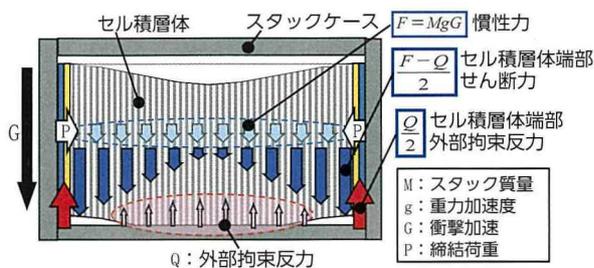


図 14 第 1 世代 FC スタックのケース外部拘束

一方、第 2 世代 FC スタックでは、新たに開発したフィリング外部拘束構造を採用している（図 15）。このフィリングは、アルミナ微粒子を高充填させたシリコンゴムのブロックであり、セル積層体とスタックケースの隙間を埋めている。フィリングは、速い衝撃荷重を受けると硬くなるダイラタンシーの特性を有しているため、衝撃によるセル積層体の撓みを支え、セルずれを抑制することができ、耐 G 性能を従来の 1.6 倍に向上し、フード下搭載における衝撃信頼性を確保した。

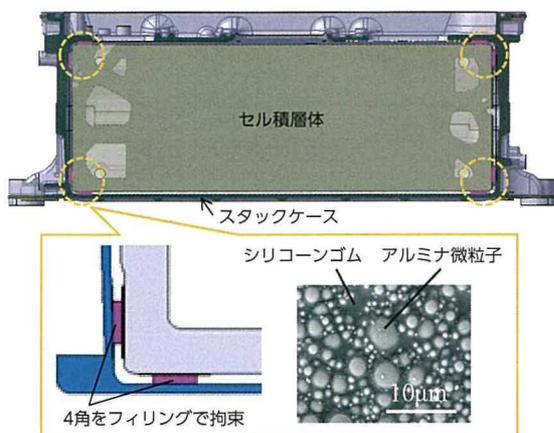


図 15 第 2 世代 FC スタックのフィリング外部拘束

5 FC スタックの低コスト化・量産化

FC スタックの低コスト化においては、高価な FC 固有材料および量産効果が得られない貴金属の Pt 触媒などの使用量を削減することが重要である。

第 2 世代 FC スタックでは、セル流路構造および電極の革新による高電流密度化と発電面積利用率アップによってセルサイズを 20% 縮小した。さらに、大電流化によるセル積層枚数削減、電解質膜の薄膜化、チタン薄肉化と枚数削減、触媒高活性化による Pt 量半減（図 16）により、コスト 1/4 を実現した。

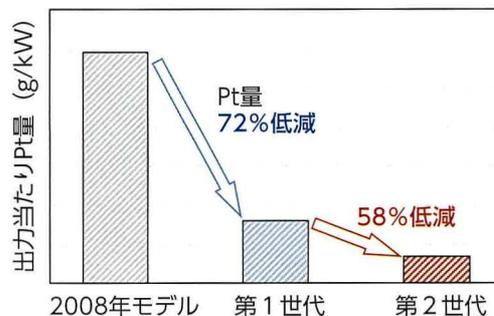


図 16 出力当たりの触媒 Pt 量低減

一方、量産化に関しては、セルの接着シール構造を刷新し、EPDM ゴムの加硫接着から 3 層シート熱可塑接着および UV 硬化接着により、分オーダーから秒オーダーに約 100 倍速で接着可能とした（図 17）。

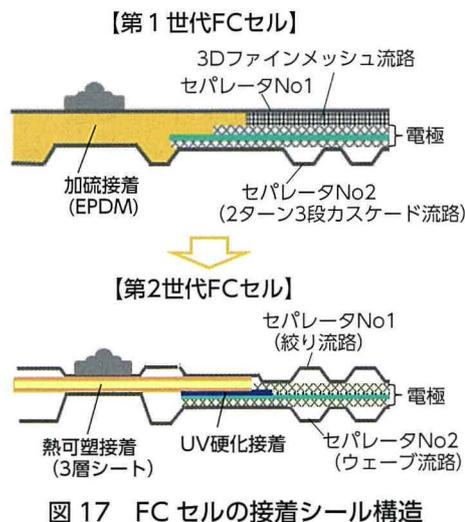


図 17 FC セルの接着シール構造

この 3 層シートは、ポリエチレンナフタレート PEN 基材の両面にホットメルト接着層をラミネート加工したもので、セル化時の寸法変化を抑えるため延伸および熱固定の最適化を図っている（図 18）。

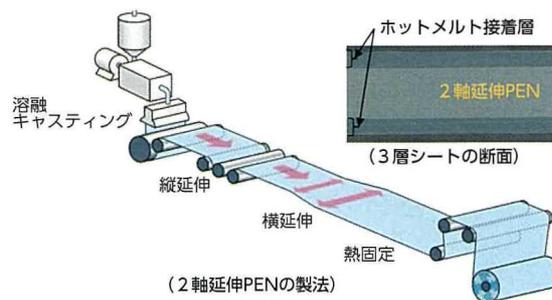


図 18 3 層シートの構造

また、チタン製セパレータの表面処理に関しては、従来、プレス成型後のセパレータにプラズマCVDを用いてカーボンナノコートPAC (π -Conjugated Amorphous Carbon) を枚葉加工していたが(図19)、新たにナノコンポジット(NC)を開発することにより、チタン箔に対してロールtoロールで連続加工を可能にした。NC表面処理層は、カーボンとTiO_xのコンポジット構造であり、導電性と耐食性を兼ね備え、密着性も優れていることから、表面処理後にプレス成型することが可能になった(図20)。

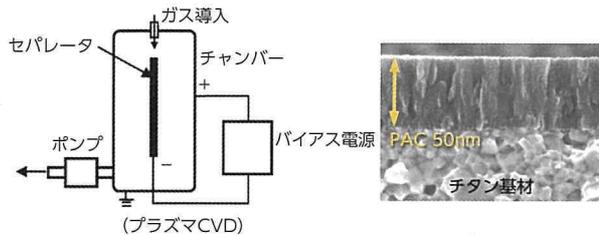


図19 第1世代の表面処理ナノカーボンコートPAC

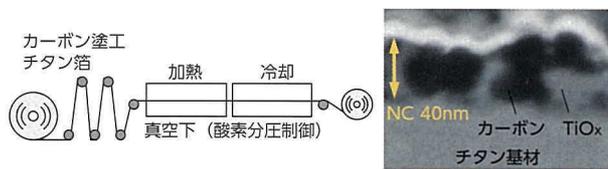


図20 第2世代の表面処理ナノコンポジットNC

6 むすび

FCVのさらなる普及を目指し、FCスタックの革新により、高出力・小型化を実現し、世界トップレベルの出力密度5.4kW/L(エンドプレート除く)を達成した。

一方、低コスト・量産化に向け、高価なFC固有材料やPt触媒の使用量削減し、コスト1/4を実現した。また、セル接着構造を刷新し、サイクルタイムを分オーダーから秒オーダーでの高速生産を可能にした。

以上、良品廉価な新型FCスタックの開発により、FCVの商品性アップが図れ、FCV普及および水素社会実現に向け、着実に進化を遂げることができた。

最後に、本開発にあたり、ご支援、ご協力いただいた関係者の皆様に深く感謝申し上げます。

参考文献

- (1) 水野誠司ほか：高性能・低コストスタックの開発. トヨタテクニカルレビュー. Vol.65, 2019, p.49-55
- (2) 前田正史ほか：X線CTを用いた燃料電池内部の水挙動解析. デンソーテクニカルレビュー. Vol.13, No.1, 2008, p.37-43
- (3) 井田敦巳ほか：新型FCVの開発におけるCFDの活用. 自動車技術会春季大会フォーラムテキスト. No.15, FORUM14, 2015, p.63-66

著者



第 2 世代高圧水素貯蔵システム開発

Development of the High-Pressure Hydrogen Storage System for Second-Generation MIRAI

山下 顕 *1 Akira Yamashita	中道 昂太郎 *2 Kotaro Nakamichi	稲生 隆嗣 *2 Takashi Inou
木田 浩司 *1 Koji Kida	矢橋 洋樹 *1 Hiroki Yahashi	後藤 荘吾 *1 Sogo Goto

要旨

大量普及を目指して開発し、正常進化を果たした新型 MIRAI 用の高圧水素貯蔵システムについて紹介する。3 種類の長さの異なる高圧水素タンクを新規開発することで、セダンの客室空間を損ねることなく、高圧水素貯蔵システムを搭載し、必要水素量を確保した。タンクは今回新たに高強度の炭素繊維を開発することで、繊維使用量を低減し、世界トップクラスの軽さ（質量効率約 6.0wt%）を実現した。またタンク CFRP の新開発エポキシ樹脂による硬化時間短縮や、高圧バルブ・減圧弁の新加工方法採用などにより量産性を高め、大幅な低コスト化を実現した。充填性能については容積の大きく異なる 3 つのタンクに対して、温度センサ配置の最適化などにより、従来同等の高い充填効率を確保した。また、タンクおよびバルブは、新規に制定された相互承認のために必要な規格などを定めた FCV に関する国連規則（UN-R134）の認証を取得した。

Abstract

This article describes the evolution of the high-pressure hydrogen storage system developed for the second-generation MIRAI with the aim of helping to further popularize fuel cell vehicles (FCVs). New high-pressure hydrogen tanks with three different lengths were developed to store the necessary amount of hydrogen in the system without sacrificing the interior space of the sedan-type vehicle. Some of the lightest tanks in the world (weight effectiveness: approximately 6.0 wt%) were developed by adopting a new high-strength carbon fiber that reduced the fiber content of the tanks. Mass-production capabilities were increased and major cost savings were achieved by adopting a newly developed fast-curing epoxy resin for the carbon fiber reinforced plastic (CFRP) used in the tanks, and by adopting new machining methods for the high-pressure valves and pressure regulator. The same high filling efficiency as the previous system was maintained despite the adoption of three tanks with significantly different volumes by measures such as optimizing the temperature sensor layout. In addition, the developed tanks and valves obtained certification under United Nations Regulation 134 (UN-R 134), which was established to allow mutual recognition of FCVs and other vehicles.

キーワード 高圧水素貯蔵システム, 高圧水素タンク, 炭素繊維, 低コスト化, 生産革新, 高圧バルブ

1 はじめに

地球環境との共生を図るため、電気とともに水素の活用が期待されており、トヨタ自動車は普及に向けてさまざまな開発に取り組んでいる。燃料電池の開発は 1992 年にスタートし、2014 年モデルの FCV [MIRAI] では、セダンパッケージの採用にあわせた 70MPa 高圧水素貯蔵システムを新規開発し、ガソリン車と同等の航続距離と低コスト化を両立させることによって、世界初の“商品”と呼べる FCV を世に送り出すことができた。今回、大量普

及に向けて新たに高圧水素貯蔵タンクシステムを開発し、軽量、パッケージ性向上などの正常進化に加え、さらなるコスト低減、商品性向上を実現したのでこれらについて概説する。

2 システム構成

2.1 タンク搭載レイアウト

FCV は“航続距離の長い EV”という特長をもつ。燃費の向上に加えて、水素有効搭載量を必要量（約 5.6kg）確保することによって、今回航続距離が大幅に向上した。図 1 に高圧水素タンクの車両搭載図を示す。乗員居住空間を犠牲にすることなくセン

*1 トヨタ ZEV ファクトリー FC 製品開発部
*2 先進技術開発カンパニー 第 1 材料技術部

タートンネルの空間も活用しながら3本のタンクを搭載した。

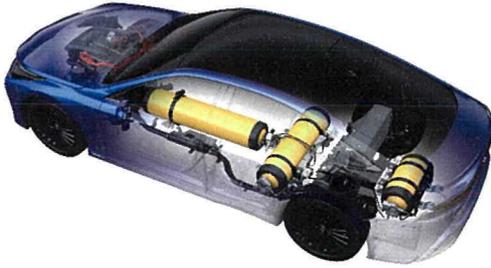


図1 高圧水素タンクの車両搭載図

車両前後Gに対する保持力を確保するため、センタートンネルに配置したタンクに対しては、ネックマウント構造(図2)を新たに採用した。

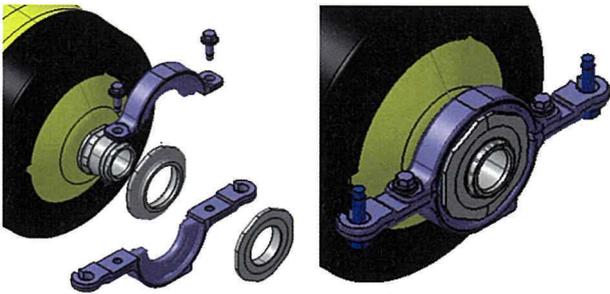


図2 ネックマウント構造

図3に高圧水素貯蔵システムの基本構成、表1に高圧水素タンクのスペックを示す。同径で異なる長さの3本のタンクから供給される高圧水素は、高圧減圧弁とインジェクタにより2段階で減圧され、FCスタックに供給される⁽²⁾。

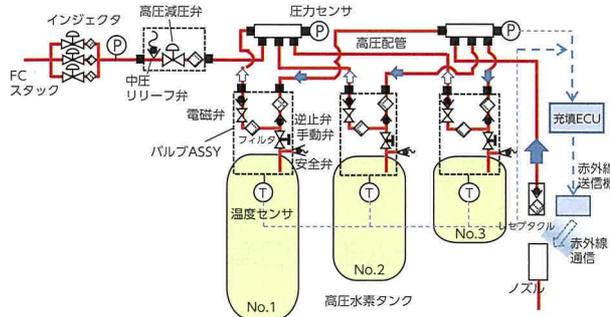


図3 高圧水素貯蔵システム基本構成

表1 高圧水素タンク主要スペック

公称使用圧力 (MPa)	70
タイプ	4 (樹脂ライナ)
体格 (mm)	No.1: φ 299・L1467
	No.2: φ 299・L1201
	No.3: φ 299・L683.5
内容積 (L)	No.1:64.9 No.2:52.0 No.3:25.3
質量 (kg)	No.1:43.0 No.2:36.7 No.3:22.5
	(水素ガスとバルブ含まず)
水素有効搭載量 (kg)	約 5.6 (JEVS 規格による)
法規 / 規格適合	UN-R134

3 開発概要

3.1 長尺タンクの量産技術開発

3.1.1 高圧水素タンクの構成

図4に高圧水素タンクの構成を示す。高圧水素タンクは、最内層に水素ガスを封入する樹脂ライナ、その外側に内圧に対する強度を受けもつCFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic) 層、さらに外側に耐衝撃性を確保するGFRP (Glass Fiber Reinforced Plastic) 層からなる。樹脂ライナの両端には、バルブとの締結のためのアルミ製口金を有している。

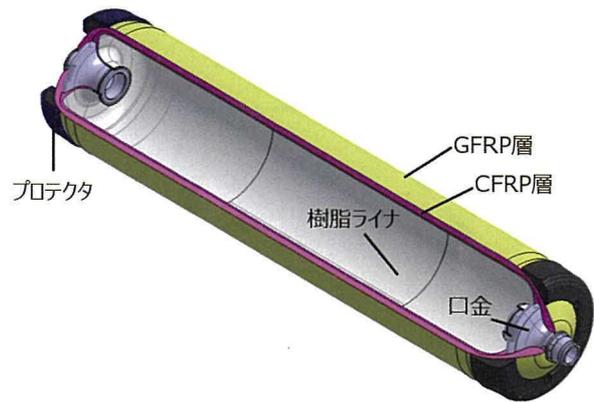


図4 高圧水素タンク構成

3.1.2 トウプリプレグ (TPP) の開発

CFRP層は、トウ(炭素繊維の束)にバインダーとなるエポキシ樹脂を予め未硬化状態で含浸させたトウプリプレグ (TPP) を用いて、フィラメントワインディング (FW) 法で高速で巻き付けることで形成した。TPPの積層パターンを図5に示す。今回新規開発したTPP用の炭素繊維およびエポキシ樹脂について記述する。

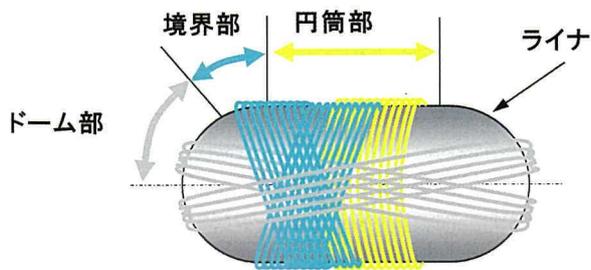


図5 高圧水素タンクの積層パターン

3.1.3 高強度高弾性炭素繊維 (CF) の開発

汎用CFをベースに高強度化を図った従来モデルの低コストCFに対し、さらなる高強度化を実現するため、今回、炭素繊維メーカーの協力により、約4%の高強度化、高弾性化を達成した。このCFの採用により、CFRP層数を約7%削減し、タンクの小型・軽量化を実現した。

3.1.4 短時間硬化エポキシ樹脂の開発

硬化時間短縮とポットライフ（可使用時間）の背反性能を両立したエポキシ樹脂を、材料メーカーの協力により新規開発した。短時間硬化エポキシ樹脂の性能を活かすため、図6に示すように、硬化条件として昇温速度の向上（約5倍）および均熱温度の上昇（15℃）にも同時に取り組んだ。

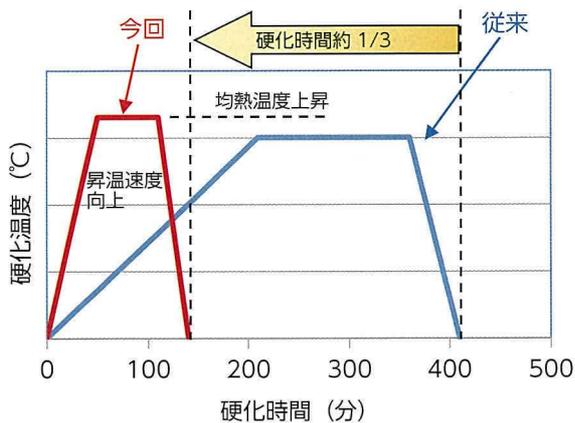


図6 高圧水素タンク硬化温度プロファイル

短時間硬化に向けた材料面の技術的アプローチとしては、従来は主剤に反応性の低い高純度ビスフェノールF型エポキシ樹脂を採用しポットライフを制御していたが、今回は、短時間硬化と低コスト化の観点から、主剤に汎用ビスフェノールA型エポキシ樹脂と末端にエポキシ基をもつ反応性希釈剤の併用系を採用した。図7に主剤となるエポキシ樹脂の化学構造の違いを示す。また、図8のように反応性希釈剤により初期粘度を低下させることで、硬化時

間短縮とポットライフを高次元で両立することに成功した。

高純度 Bis-F 型エポキシ樹脂（従来）



汎用 Bis-A 型エポキシ樹脂 + 反応性希釈剤（今回）



図7 エポキシ樹脂（主剤）の化学構造の違い

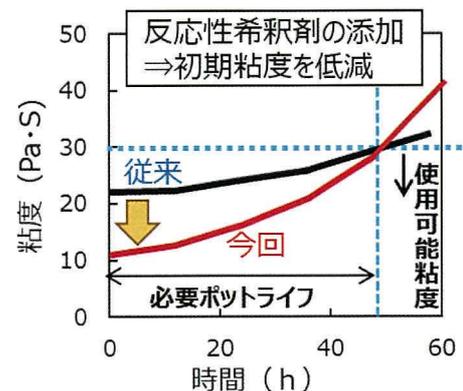


図8 ポットライフ確保の考え方

一方、図6に示した硬化条件の見直しは樹脂ライナ内面の酸化劣化（黄変）を助長する可能性があることが判明した。そこで硬化工程における加圧媒体として不活性ガスである窒素に変更し、酸素濃度を大幅に低減させることで、樹脂ライナ内表面の酸化劣化を抑制することに成功した。短時間硬化エポキシ樹脂の新規開発およびタンク硬化工程の改善により、生産性の大幅向上（硬化時間約3分の1）および低コスト化を同時に達成した。

3.2 高圧システム部品の量産技術

3.2.1 高圧バルブ

今回さらなる量産性と低コスト化の両立のために新たな工法に取り組んだ。バルブ本体のアルミボデーには、量産に適した連続鍛造材を採用し、かつ予め製品により近い形状に成形するニアネットシェイプを採用することで、材料歩留りが従来比20%向上した。さらに鍛造型形状の最適化によって鍛造回数も低減した。

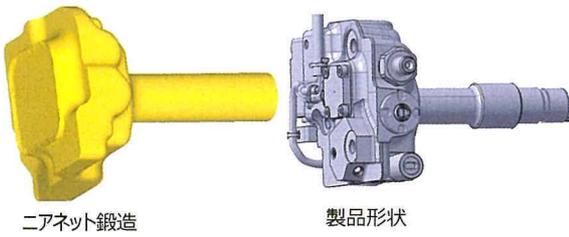


図9 ニアネット鍛造と製品形状の比較

一部のSUS部品にはMIM (Metal Injection Molding) を採用することで、複雑な形状が成形可能となり、材料歩留りが前モデル比35%向上した。IN, OUTユニオンには、耐圧強度確保のために、水素に対する耐性をもちつつ高比強度のAUS316L-H2を採用したが、加工性が良くない課題に対して、刃具を一定周期でワークに当てながら加工する低周波振動切削 (LFV:Low Frequency Vibration-cutting) を用いて切粉の巻込みやワークの温度上昇を抑制し加工時間を短縮した。上記を含め、150を超える低コスト、量産性向上アイテムを採用することでコストを前モデル比4分の1に低減した。

今後展開される多様なステーションへの対応を想定し、充填時、水素ガスに混入した水分が仮にバルブ内に流入した際の信頼性向上のため、バルブ内部の水分挙動を可視化し、電磁弁駆動部への水分の流入抑制と滞留抑制の両面でレベルアップを図った。流路は電磁弁内部に水分が流入しにくいクランク形状を採用。さらに電磁弁可動部には、摺動部へ切欠き(6か所)を追加。壁面との間に隙間を設ける(図10)ことで、水が流入しても、氷結時に壁面と可動部間に働く固着力を低減した。これらにより水分流入に対して、前モデル比約2.5倍のロバスト性を確保した(図11)。

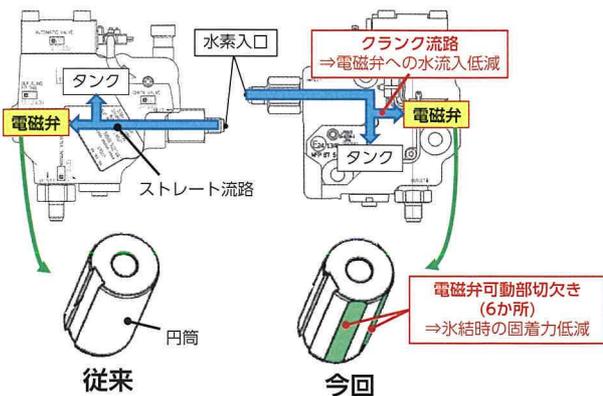


図10 バルブ水入り対策形状

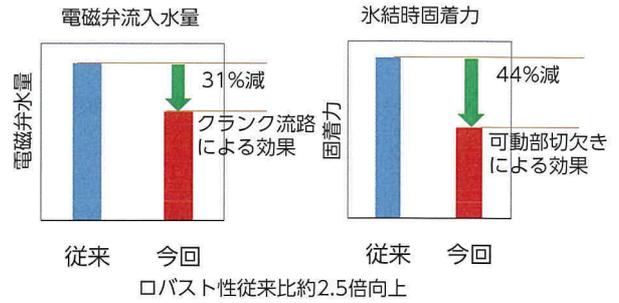


図11 バルブ水入り対策効果

3.2.2 高圧減圧弁

減圧弁においては、下流のインジェクタの数十ミリsecオーダーの開閉動作に追従して、調圧部のピストンが数~数百 μ mのストロークで摺動することが求められる。ピストン部のシールは通算数千万回におよぶピストン摺動をさせつつ外部とのシールを保ち続けなければならない。このため摺動部にはシール性と摺動性を両立させる表面性状が求められる。ミクロンオーダーの精密切削と表面処理が必要となる。今回ボデー側ピストン摺動部の切削を高剛性旋盤によって実現し、ピストンをボデーに直接摺動させることで3層 \rightarrow 2層に構造を簡素化した(図12)。これにより総コストは前モデル比3分の2、質量は15%低減した。

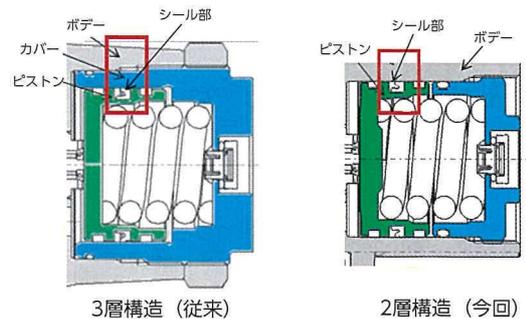


図12 減圧弁3層構造と2層構造の比較

減圧弁はガス流動時、内部部品の共振によって流動音が発生することがある。今回、内部部品(ピン)の挙動を可視化し、NV発生メカニズムの解明を試みた。高圧作動時の内部構造を可視化した結果、ピンの傾斜を起点にポペットが偏芯し、流路が不均一になったことによって水素の流れに乱れが生じることがわかり、これが加振源となることを特定した(図13)。対策としてピンを伸長し、クリアランスの最適化をはかり、ピン自体の傾きを抑制させることで流動音を3割程度改善した。

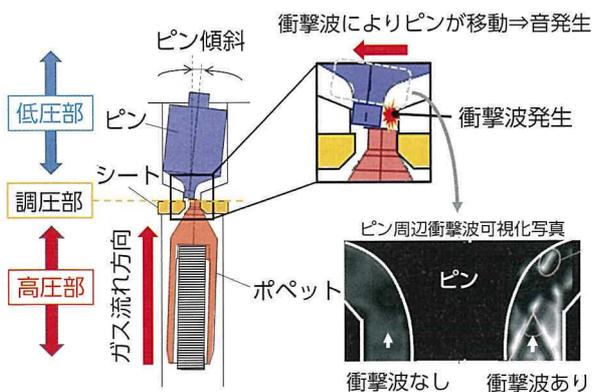


図 13 減圧弁流動音発生時におけるピン周辺の衝撃波観察写真

3.2.3 高圧温度センサ

タンク内部に配置される高圧水素温度センサは、今回構造部材を見直し簡素化を行った。前モデルではサーミスタを支える筐体に SUS 材を採用していたが、今回のモデルでは筐体をコネクター体型の樹脂材とすることで、部品点数と質量を低減 (表 2)。コストは前モデル比 4 分の 3、質量は 90% 以上低減した。

表 2 温度センサ構造比較

		従来	今回
基本構造	材質	SUS 材	ポリアミド樹脂
	搭載状態	ボルト締め	ブラケット締結
	部品点数	6 点	3 点
	質量	33g	2g

充填時には、タンクバルブのパイプを通して水素タンク内部に充填水素が流入する際、充填ガスの流速が音速を超え、衝撃波が発生することが知られている。今回タンクの内径が小さくなることに加え、温度センサも小型化したため、温度センサ強度成立性を確認し、適切な位置に配置した (図 14)。

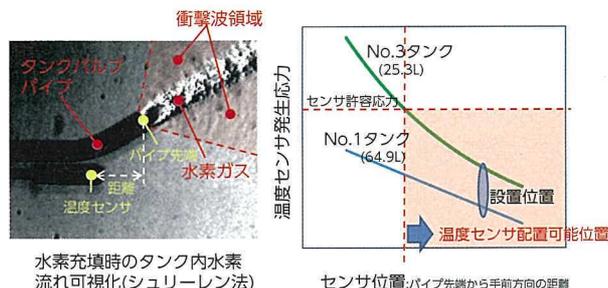


図 14 水素充填時の温度センサへの入力

4 充填性能確保

プレクールされた水素を充填する際、タンク内部に温度分布が生じ、これがタンク内部の平均ガス温度とセンシング温度との差異を生じさせ、通信充填時の満充填量が減少する要因となり得る。また、今回のシステムは容積が異なる複数のタンクで構成されており、充填時は長尺 (容積大) タンクの充填流量が大きくなる。タンク内部の温度分布に対しては、タンク内の水素噴出角度を適正化することで、流量が一番大きい長尺タンクにおいてもタンク内平均ガス温度のセンシングを可能にした (図 15)。これにより、新型 MIRAI でも従来同等の通信充填時の充填量を確保した。

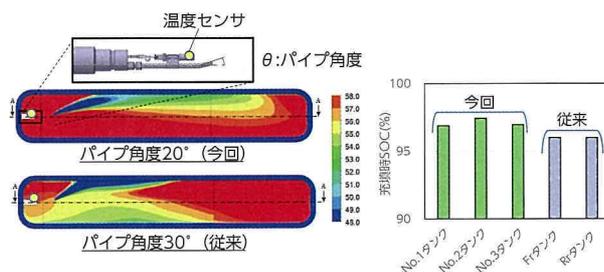


図 15 タンク内部温度分布 (充填時) 計算結果

5 認証対応

従来の高圧水素タンクは、国・地域別で各々認可を取得する必要があった。今回は、国際基準調和を目的とした 58 協定にもとづいて 2015 年に制定された国際相互承認のための国連規則 (UN-R134) の運用開始にともない、これに適合させ、認可をはじめて取得した。

6 おわりに

大量普及に対応すべく、軽量、パッケージ性向上等の正常進化に加え、さらなる航続距離の向上、コスト低減、生産革新を織り込んだ高圧水素貯蔵システムを開発した。

今後のさらなる普及を目指して、時代を先取りした、お客様のニーズに寄り添った技術開発を進めていくことで、地球にもやさしい水素社会が到来するよう、進化を継続していきたい。

最後に、高圧水素貯蔵システムの開発にご協力い

ただきました数多くの関係会社の皆様に、深謝の意を表する。

■参考文献

- (1) 日置, 近藤, 山下, 大神: 新型FCV用高圧水素タンクの開発, 自動車技術会学術講演会予稿集, No.37-15S, p905-908 (2015)
- (2) 山下, 近藤, 大神, 三石: 新型FCV用高圧水素貯蔵システムの開発, 自動車技術会学術講演会予稿集, No.37-15S, P909-913 (2015)
- (3) 齋藤, 後藤, 山下, 稲木, 近藤ほか: 新型FCV用高圧水素バルブの開発, 自動車技術会学術講演会予稿集, No.37-15S, P914-918 (2015)

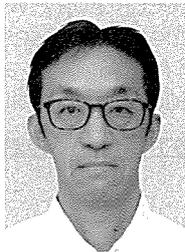
■著者



山下 顕



中道 昂太郎



稲生 隆嗣



木田 浩司



矢橋 洋樹



後藤 荘吾

第2世代FCスタックの生産技術

Production Engineering Technology for the Fuel Cell Stack of the Second-Generation MIRAI

長澤 武史*1 野木 淳志*1 池田 哲平*1
 Takeshi Nagasawa Atsushi Nogi Teppei Ikeda

野納 晋平*1 竹下 慎也*1 板倉 拓哉*1
 Shimpei Yano Shinya Takeshita Takuya Itakura

要旨

新型 MIRAI 用 FC スタックの開発は、FCV 本格普及に向けた量的拡大の位置づけになり、量産技術の確立が必要になる。そのために、初代 MIRAI 用 FC スタックよりも桁違いの高速加工、高速検査技術の開発が必要とされた。本開発で品質確保と低コスト化の両立を実現した工法のいくつかを紹介する。

Abstract

One of the objectives of the fuel cell (FC) stack developed for the second-generation MIRAI was to help achieve full-scale popularization of fuel cell vehicles (FCVs) by expanding production capabilities. New mass-production technology was required to achieve this objective, including high-speed machining and inspection processes at least ten times faster than those adopted for the FC stack of the first-generation MIRAI. This article describes several of the manufacturing processes that were developed to reduce costs while ensuring quality.

キーワード FCスタック, セル, MEA, 調合, 間欠ダイ塗工, 接合, 接着, X線検査, 画像検査, AI, エージング, 発電, 生産性

1 はじめに

FCスタック開発は、小型・軽量・高性能といった機能の追求であると同時に、これまでにない材料・構造に対する、生産技術による高品質・低コスト・高生産性の実現への挑戦でもあった。

第2世代では、機能性向上のためにスタック構成材料や構造の刷新と同時に、工法も新規開発技術を採用し、大幅な生産性向上を図っている。

特に、車両一台あたり数百枚を使用するセルは、数秒単位で作り続けることが必要であり、FCスタックの量産に当たっては大きな課題となっていた。

これらの課題を解決するとともに、新工法開発においてはシミュレーションや解析を駆使し、効率的な開発にもチャレンジしてきた。

本稿ではその代表的な事例を紹介する。



図1 FCスタック外観

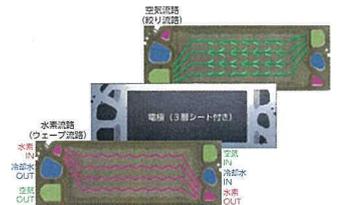


図2 セル構成[概念図]

2 FCスタックの製造工程

新型 MIRAI に搭載されている実際の FC スタックの外観を図1に示す。内部には図2に示すセル(単電池)が330枚直列に積層されており、最大で128kWを出力する。このFCスタックの製造工程フローを図3に示す。イオン伝導性の電解質膜の両面に、触媒とイオン伝導樹脂のアイオノマをインク状に調合したものを塗布し、発電の反応場である触媒層を形成する。その外側に発電に必要なガス・電子の安定供給と発電で生成される水を効率よく排出する拡散層を接合する。さらにこれをセパレータで挟み込み、シールすることでセルを形成する。セパ

*1 トヨタ ZEV ファクトリー FC 製造部

レータは導電性を確保するために表面処理を施した金属箔のプレス成形品である。このセルを全数機能検査実施後、積層・締結してFCスタックが完成する。

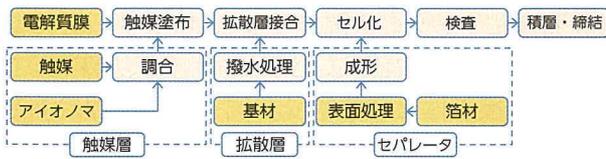


図3 FCスタック工程フロー

3 触媒層の形成技術開発

3.1 触媒層の形成方法

触媒層は、触媒インクを作製し、それを図4に示すようにロールtoロールで搬送されるシートに塗工、乾燥することで形成される。触媒層は高価なPt触媒が使用されるため、製品になる必要な部分にのみ間欠塗工する⁽¹⁾。

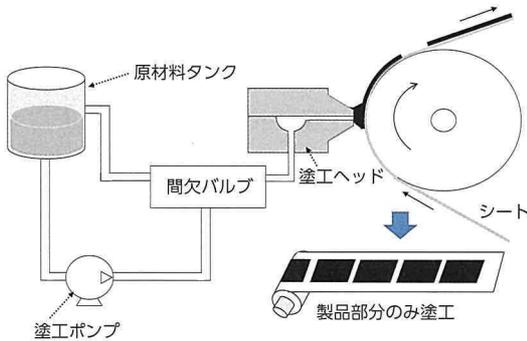


図4 間欠塗工による触媒層の形成

この間欠塗工の高速化を実現するべく、触媒インクおよび設備の開発をおこなった。高速化を実施するためには、塗工ヘッド内のインク圧力を間欠部で数十ミリ秒で上昇、下降させる必要がある。このインク圧力のコントロールをするにはインクの粘度制御および高速間欠バルブが必要になる。

3.2 触媒インク作製の高速化開発

触媒インクは触媒、プロトンを伝達する機能性樹脂（アイオノマ）と溶媒を混合しており、塗工性を左右する触媒インクの粘弾性制御は、増粘剤にもなるゲル状アイオノマの配合で実現している。

第1世代の技術（単軸の攪拌羽根（ディスパー羽根））でスケールアップした場合、図5に示すようにタンクの隅の流動が遅く、さらにゲルが軽く浮遊するために分散が遅いことがわかっている。

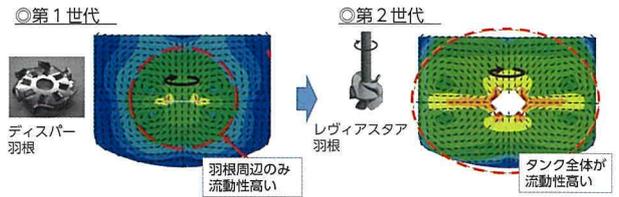


図5 ゲル状アイオノマの分散開発

一般的にタンクの隅まで流動させるには、タンク全体を攪拌させる羽根を追加した2軸分散機を選択するが、第2世代では単軸でタンク全体を攪拌できる攪拌羽根の開発をプライミクス社殿と実施し、図5に示す攪拌羽根（レヴィアスタア羽根）を得た。タンクの隅まで全体を攪拌する能力とゲルを分散するせん断力を両立し、設備コストの低減だけでなく、第1世代比で分散時間の半減も同時に実現している。

3.3 高速間欠バルブの開発

第2世代では高速応答性を実現するため、図6に示す間欠バルブ機構を自社開発した。

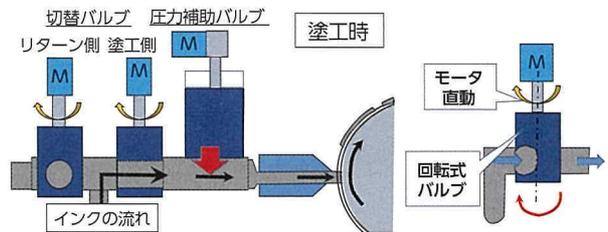


図6 第2世代の高速バルブ機構

この間欠バルブは、モータの回転軸により、直接開閉をする回転式の切替バルブと瞬間的に塗工ヘッド内のインク圧力を上昇、下降させる圧力補助バルブからなる。

切替バルブは、回転軸に貫通孔が開いた構造になっており90度ずつ回転することで開閉する。モータ直動で開閉するため、バルブの動作時間は第1世代の半分以下が実現できる。また、圧力補助バルブは、切替バルブとラップ動作が可能になり、材料特性にあわせて塗工ヘッド内のインク圧力を瞬時に上昇、下降させることができる。

4 MEGAの連続接合技術開発

4.1 MEGAの接合工程について

第1世代において、電極となる電解質膜と触媒層、拡散層の積層体（Membrane Electrode Gas

diffusion layer Assembly 以下 MEGA) は触媒層が形成されたロール状の電解質膜 (Membrane Electrode Assembly 以下 MEA) と枚葉の拡散層を熱圧プレスで接合していたが、生産性向上を図るべく、MEA と拡散層をロール to ロールで一気通貫接合する工法を開発した⁽¹⁾ (図 7)。

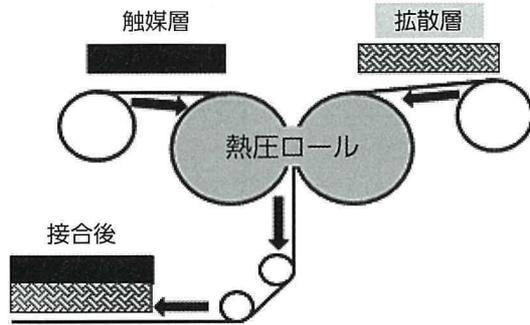


図 7 MEGA 接合工程でのワークの流れ

4.2 拡散層折れゼロ ロール搬送技術開発

発電性能向上および低コスト化を実現するため、拡散層は従来よりも密度が小さくなっており、脆く伸びにくい材料のため、搬送中の破断が発生しやすい特徴がある。図 8 に示すように、拡散層はゆるやかに曲がっており、この曲がり状態を補正できずに熱圧ロールまで搬送すると、熱圧ロール上で曲がりの周長の長い側が浮き、加圧時に潰して折れてしまう。

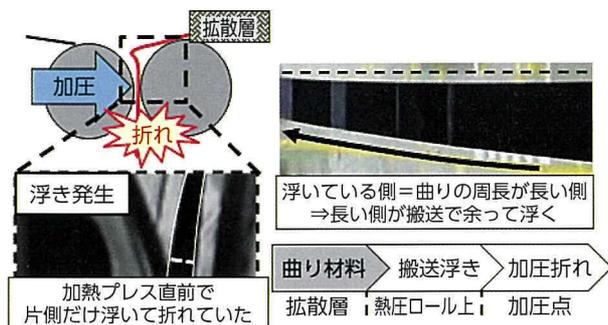


図 8 拡散層折れの発生プロセス

拡散層折れの原因である拡散層基材の曲がり抑制だけでなく、材料メーカー～内製工程までの張力コントロールを最適化することで、課題解決を試みた。工程スルーでの加工条件、種々の接合条件から寄与率が大きい項目を重回帰分析で抽出。結果、材料メーカーでの条件に対し、接合工程での搬送時に高張力化する条件を見出し、折れ不良を抑制できた。

5 高速セル化技術開発

5.1 セル化方法について

第 1 世代のセルはシールにゴム材料を使用しており、加硫に十数分の時間を要していた。数秒での量産技術を確認するために、第 2 世代では加熱冷却することで接着性を瞬間的に発現する熱可塑樹脂をシール材に選定し、熱可塑樹脂は最適な物性となるように主鎖骨格と接着性を有する官能基のバランスを調整した。また、新材料を用いたセル化工法は図 9 に示すように、まず熱可塑樹脂を電極と貼り合わせ、その後セパレータを積層し、加熱 / 冷却プレス接合する設備開発に取り組んだ。

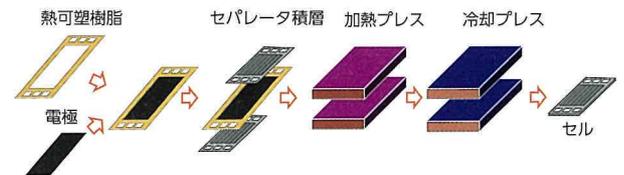


図 9 セル化工程フロー

5.2 セル化の加工条件について

熱可塑樹脂は一般的に加熱 / 冷却することで接着性を発現することが知られている。重要機能であるシール性を確保するため、そのメカニズムにもとづいて接着性を発現する加工条件を最適化した。

界面状態に着目し、接着性の良 / 悪で差を検証した結果、図 10 に示すようにセパレータに対し垂直な縞模様の結晶構造が発現すると接着性が良好であった。これは、加熱中に熱可塑樹脂中の官能基がセパレータと結合したのち、適切な冷却過程を経ることで官能基を起点に主鎖骨格が結晶化したと推察された。以上のことから、界面の縦模様の結晶構造を発現する条件を良品条件とし、加熱 / 冷却温度を適切に制御する設備構成にして 1 枚あたり数秒での生産を可能にした。

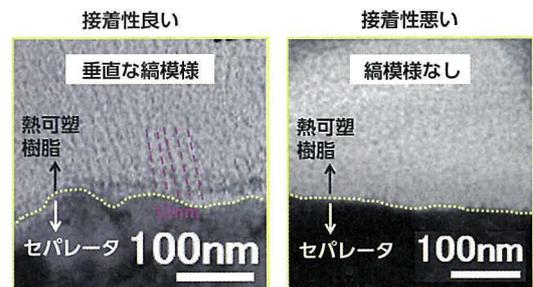


図 10 接着性の良 / 悪と界面状態の関係

6 セルの異物検査技術開発

6.1 セルの金属異物検査について

セルの内部に鉄系の金属異物が混入すると電解質膜が化学劣化を起こす(図11)。進行すると対極への水素リークが増加し、燃費の悪化、発電性能の低下を引き起こすので、すべてのセルに対して金属異物検査を実施している。

微小な金属異物は材料メーカーを含むあらゆる製造過程で混入し、製品内部に混入したものは外部からの発見が難しいため、内部を透視できるX線による透過検査を採用している。

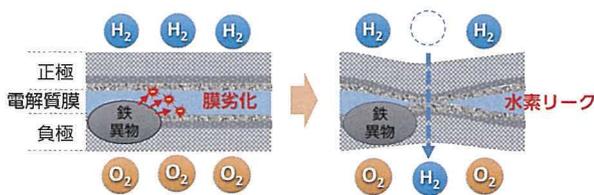


図11 電解質膜の化学劣化

6.2 透過X線検査の原理と課題

X線検査は金属異物のようなX線吸収が強い物質が、撮影画像のなかで『影』となって映ることによって、数秒という短時間で異物の有無やサイズを判別できるというものである。しかし、X線の照射方向に投影される『平面的なサイズ』は得られるが、膜の化学劣化に影響するものは、異物の『立体的なサイズ』である(図12)。立体計測には、三次元X線CT(3D-CT)のような分析手法が存在するが、一つの測定に数時間を要して量産ラインへの適応は難しいため、高速・高精度で異物の立体サイズを認識できるX線検査技術の開発が必要であった。

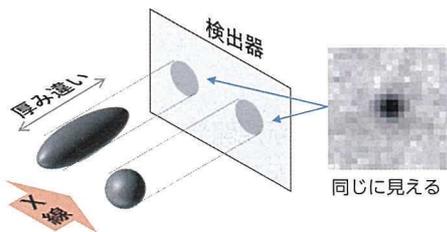


図12 検査像とサイズの乖離

6.3 高速『立体サイズ』検出技術の開発

数秒で異物の立体的なサイズを把握するために、異物にX線を照射した際に生じる『回折現象』に着目し、回折により変化する『撮像の影の濃さ』から、異物の立体的なサイズを予測できることを見出し、これをもとにした新しい検査ロジックを開発、数秒の検査時間で異物の立体的なサイズを予測・判定することを可能にした(図13)。

また、異物サイズ認識方法を『カメラ画素分解能』から『影の濃さ(=色調の分解能)』にすることにより、分解能が大幅に向上。繰り返し検査のサイズ測定精度を従来のカメラ画素数による計測に比べ、約70%向上させている。

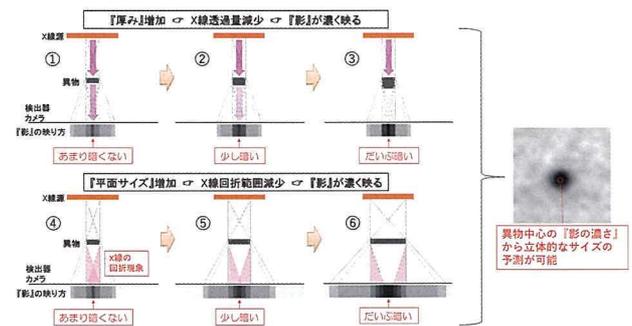


図13 X線回折現象を利用した異物サイズの予測

7 セル自動外観検査技術の開発

7.1 セル外観検査

セルの機能検査工程では、圧損・シール性などの他、最終保証として外観検査を実施している。量産モデルである第2世代では、秒単位まで検査速度を向上する必要がある、さらに検査規格は発電部の汚れ(数mm単位)、およびキズ(1/10mm単位)であることから自動化が必須の工程となる。

7.2 セル形状に適した撮像技術の開発

画像検査の検査精度を向上するためには、欠陥と良品部とのコントラスト差を確保することが重要であるが、セルには燃料ガスの流路やガスケットが成形されており、凹凸による陰影が検出精度に影響する。

そこで光源にはドーム型照明を用い、光源からの光を照明内壁で拡散させ、全方位からセルを照らすことで、凹凸の影を薄く・細くする効果を得た。さらに影の濃い流路部に対しては、水平方向からバー照明で照らすことで欠陥部との輝度差を確保した(図14)。

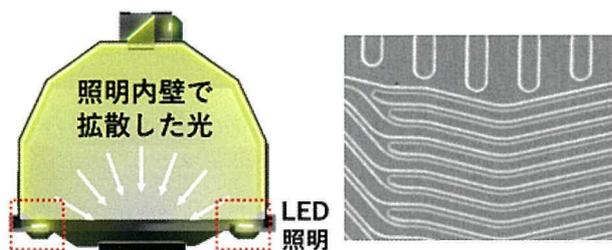


図 14 ドーム型照明による撮像画像

7.3 AI 判定モデルの開発

セル表面は導電性確保のために表面処理が施されているが、この膜厚ばらつきによる干渉色にともない色調が変化するので、安定した欠陥との識別精度を確保するため、AI（機械学習）による自動判定システムを開発した。

AI 学習にはディープラーニング（深層学習）を採用し、意図的に色調ばらつきの大きな画像を用いてモデルを作成、検知力を確保した（図 15）。

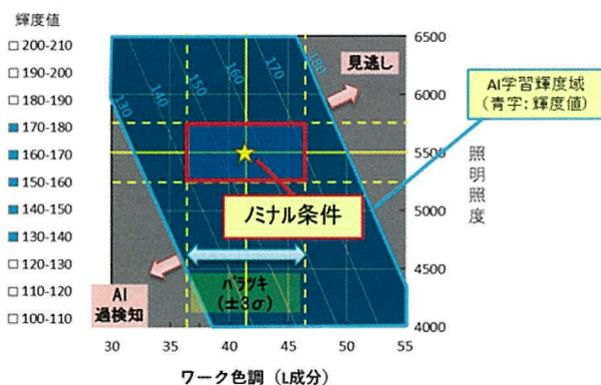


図 15 AI 学習輝度域

8 エージング時間短縮開発

8.1 エージングとは

FC スタックは、製造直後は出力が低く、発電を続けていくとプロトン導電性が改善され出力向上するという特性をもつ。電池反応（水素+酸素⇒水+電気）は触媒層内の白金の表面で起きており、生産直後の性能が低い理由に、製造過程で発生する不純物の白金付着による反応阻害がある。

この不純物を除去しなければ車両において初期から十分な機能を発揮することはできず、生産性向上には、短時間で本来の発電特性を発揮させるエージング工法が必要となる。

8.2 不純物の挙動と洗浄

各工程で付着する不純物を分析し、発電阻害となる不純物の同定、無害化を図るとともに、吸着不純物の効率的な除去法開発を進めてきた。

白金の表面状態が電位によって変化するという知見に着目し、電気化学測定と赤外線分光を組み合わせた表面増強赤外分光（SEIRAS, 名工大と共同研究, 図 16）を用いて、白金表面での不純物の状態を in-situ で観察した。その結果、「電位変動により不純物が吸脱着する」という現象を視覚的に捉えることに成功した（図 17）。

実際の発電環境では絶えず水が生成 / 排出されているため、電位変動を繰り返し、生成された水で不純物が効率よく除去されると推定。実機条件に反映させることで、エージング時間を第 1 世代比で 70% 短縮している。(1)

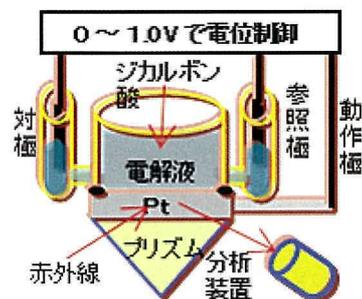


図 16 表面増強赤外分光法 (SEIRAS)

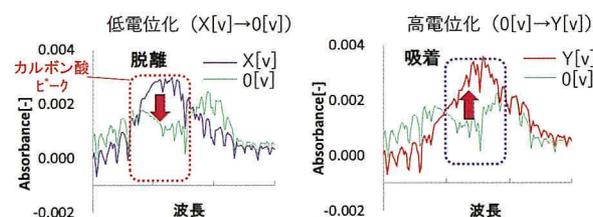


図 17 電位変動による不純物挙動の観察結果

9 おわりに

第 2 世代で進化・新規開発した生産技術について論じてきたが、本技術の構築によりスペース生産性は従来比 6 倍を達成している。(1)

本開発は量的拡大の位置づけになったが、量を行うことで新たな課題が発生し、一つずつ解決することで知見を積み重ねてきた。将来の大量普及に向けてはまだ多くの課題が残されているが、今後もさらなる高品質・低コスト・高生産性へ向けた技術開発を継続し、水素社会の実現をリードしていきたい。

また、ここに至るにあたっては社内外の多くの
方々のご協力が不可欠であった。関係各位に改めて
感謝したい。

■参考文献

- (1) 鈴木稔幸ほか：MIRAI用燃料電池の生産技術。
トヨタテクニカルレビュー。Vol.61, 2015, p.
32-38

■著者



長澤 武史



野木 淳志



池田 哲平



野納 晋平



竹下 慎也



板倉 拓哉

第2世代高压水素タンクの生産技術

Production Engineering Technology for the High-Pressure Hydrogen Tanks of the Second-Generation MIRAI

馬場 陽一郎^{*1} 上田 将人^{*2} 近藤 秀昭^{*2}
 Youichiro Baba Masato Ueda Hideaki Kondo

要旨

新型 MIRAI 用高压水素タンクは、FCV をはじめとした将来の水素社会普及に向け、安心・安全な製品をより低価格で提供する位置付けとして、初代 MIRAI 用高压水素タンクよりも桁違いの高速加工、安定した品質保証技術開発を推進してきた。本開発において、高い品質と低コスト化の両立を実現した工法のいくつかを紹介する。

Abstract

One of the objectives of the high-pressure hydrogen tanks developed for the second-generation MIRAI was to provide even more reliable and safe tanks at a lower cost to facilitate the realization of a future hydrogen energy based society centered on fuel cell vehicles (FCVs). To achieve this objective, high-speed machining processes at least ten times faster than those adopted for the high-pressure hydrogen tanks of the first-generation MIRAI and technology to ensure stable quality were developed. This article describes several of the manufacturing processes that were developed to reduce costs while ensuring high quality.

キーワード 水素貯蔵, 高生産性, 品質保証, 樹脂ライナー, 射出成型, 赤外線溶着, CFRP, 自動計測, 気密検査, 連続充填

1 はじめに

高压水素タンク開発(図1)は安全・軽量・低コストを実現するため、新たな材料・構造を開発し、生産技術により高品質かつ高生産性で低コスト化を挑戦してきた。

今回開発した量産技術は、今後拡大する水素社会に貢献できるものであり、本稿ではその代表的な事例を紹介する。



図1 タンク構造

2 タンク生産工程

タンク生産工程は、ライナー工程、FW(フィラメントワインディング)工程、検査工程から成る。

さらに細かく、ライナー工程は射出成形・赤外線溶着、FW工程は巻き線・硬化、検査工程は水圧検査・気密検査から成る(図2)。

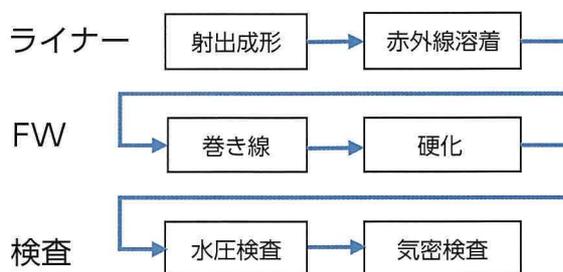


図2 高压水素タンク工程フロー

3 ライナー工程

トヨタのライナーは、射出成形した樹脂パーツを赤外線溶接して形成している(図3)。

^{*1} トヨタ生産本部(車両生技領域)塗装成形生技部

^{*2} トヨタZEVファクトリー 下山工場FC製造部

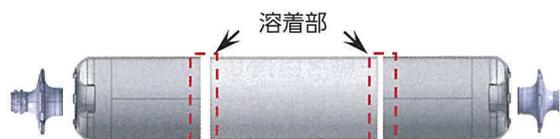


図3 ライナー構成

3.1 射出成形

3.1.1 射出成型機

樹脂パーツは長尺なので、成形機には大きな型開き量が必要である。またドームには金属リングをインサート成形しなければならない。そこで我々は射出成型機を新規に開発した。型締め機は上下に開閉し下型をプレス機から排出できる構造とすることで、金属リングを安定してセットでき、長尺製品の排出も容易となった。これにより、市販同型機よりも2/3の大きさを実現した(図4)。

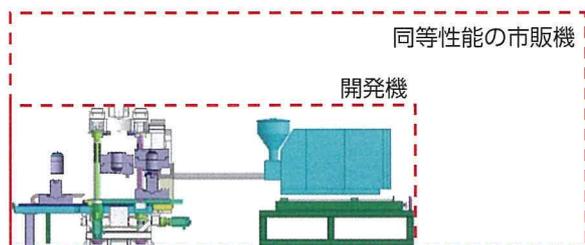


図4 射出成型機

3.1.2 成形条件

成形不具合の一つにフローマーク問題がある。フローマークの断面を見ると亀裂状となっており、低温でのライナー亀裂の原因となる(図5)。

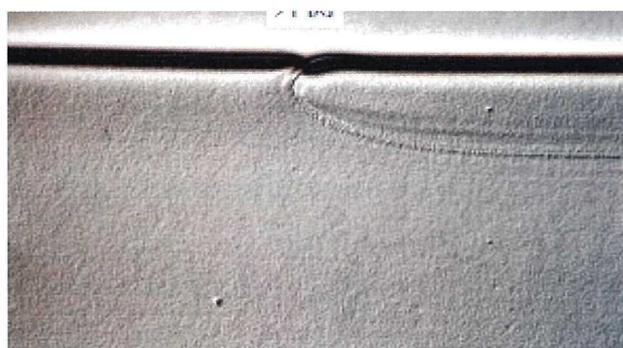


図5 フローマーク断面図

板厚変化の大きい部位を樹脂が通過する際に速度差が大きいと発生しやすいことがわかったため、流動先端が板厚差の大きい部位を通過するときは低速で、通過後は高速に戻すという制御により抑制した(図6)。

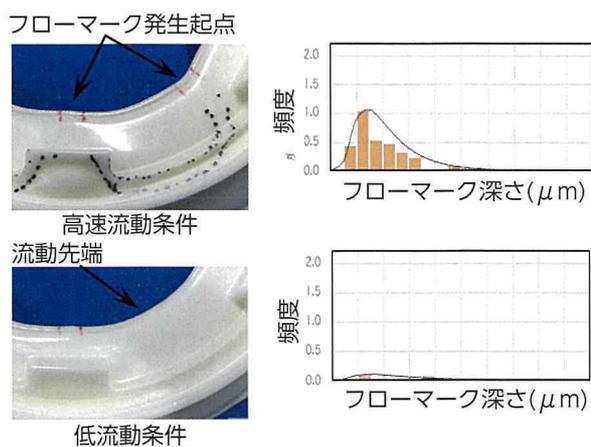


図6 フローマーク対策

3.2 赤外線溶着

3.2.1 特徴

赤外線溶着は接合部表面を赤外線で加熱溶融させ、素早く互いに密接させることで樹脂溶着を行う工法である(図7)。

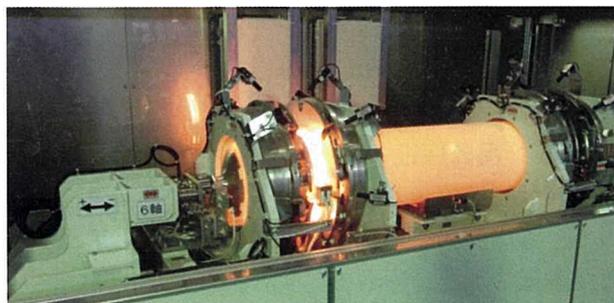


図7 赤外線溶着

この工法の利点は、接合面を直接加熱し溶融物の多くを排出し、接合部に空気に触れない新鮮な樹脂が残るため、接合面への付着異物防止に有効である(図8)。

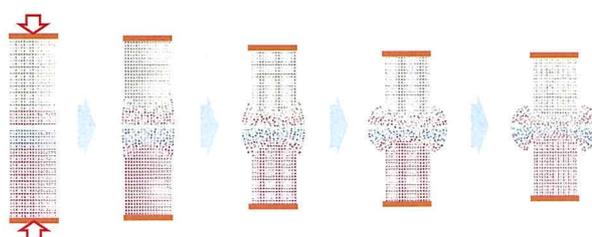


図8 溶着プロセス(粒子法によるシミュレーション)

3.2.2 接合強度の変動要因

接合強度は様々な要因で変動する。部材同士の斜め当たりによる接合厚みの偏りや段差が大きいと低下する。試験片の切出し方にも影響を受ける。

また、結晶化度の分布にも注意が必要である。赤外線分光分析により接合部近傍の結晶化度分布を可視化すると、その変化率が接合強度と相関があることがわかった(図9)。この結果が示すことは、低出力で長時間加熱する方が、表面と深部で温度差が減って結晶化度変化が小さくなるので、強度にとっては望ましいということである。

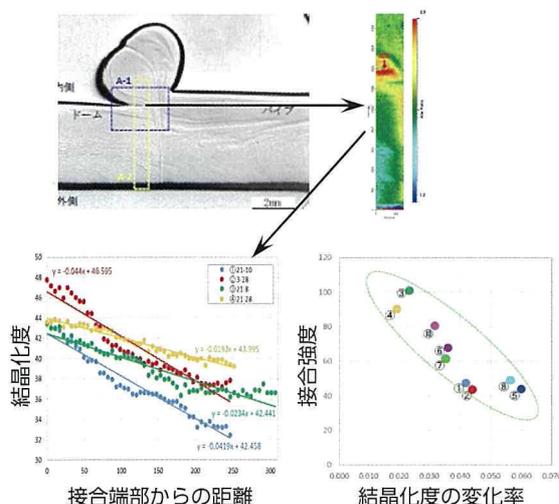


図9 結晶化度分布と接合強度

3.2.3 品質保証

品質保証は溶着で生じたビードを検査することで行う。溶着部全周について高さや幅を測定することで溶融量や加圧量の適正さを評価できる。

4 FW工程

4.1 工程概要

FW工程では、低剛性の樹脂ライナーに内圧を付加し、タンク強度を担保する炭素繊維(CF)を張力制御しながら約3500m巻付けている(図10)。設備動作の高速化による加工時間50%短縮に加え、品質測定の自動化により測定時間を90%削減することで生産時間を66%低減(生産性を3倍)することに取り組んだ(図11)。

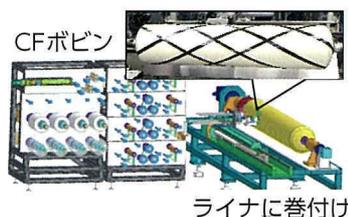


図10 FW機概略図

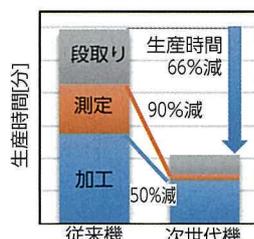


図11 FW機生産時間

4.2 設備動作の高速化

加工時間50%短縮を目指し、広範囲に動作する給糸口部を軽量化し、駆動方式を見直した。

重量増加の主要因であった、給糸口部に一体となっていた前後軸動作モーターを分離(図12)し、揺動部を給糸口先端に限定(図12赤枠部)することで揺動軸動作モーターサイズを低減した。加えて構成材料をアルミ化するなどの徹底的な軽量化により、重量を約1/5にすることができた。

駆動方式については、従来のボールねじ方式では、共振や摩擦による熱変位の影響で速度が上げられないことから、ワイヤードライブ方式を採用した(図12)。

結果、最高速度を2.1倍、加速度を1.5倍に引き上げることができ、加工時間を50%短縮した。

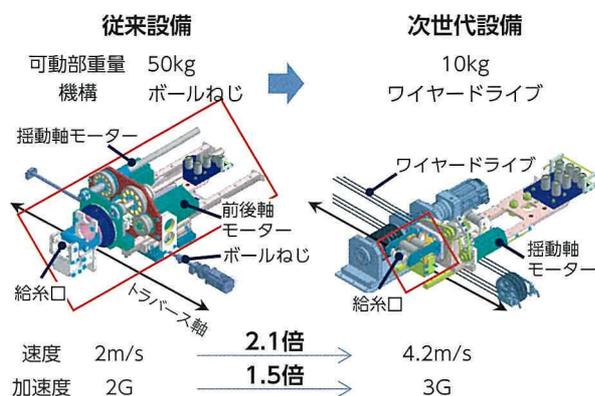


図12 給糸口付近の構造図(従来との比較)

4.3 品質測定作業の自動化

従来は全層手作業でタンクの品質を測定していたため、毎回設備を止めて機内に進入しており、生産時間を圧迫していた。

そこで、設備を止めずに自動測定できる手法の開発に取り組んだ。

自動化における課題は、既に積層済みの部分と新たに積層した部分が画像処理などでは区分困難な点である。

低ヘリカル巻きにおけるドーム部巻位置は、レーザー変位計で形状測定し、積層前後の形状の差分を取ることで割出すことができた(図13)。

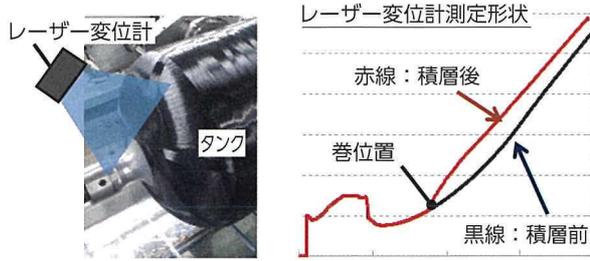


図13 低ヘリカル巻位置測定概要

フープ巻きにおける胴体部巻位置は、新たな層を巻付け中に強い光を照射し、その光の散乱を利用することで下層との区別に成功した (図14)。

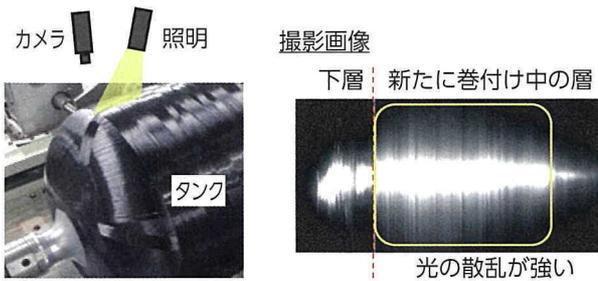


図14 フープ巻位置測定概要

上記自動測定技術の開発により、測定時間を90%削減することができた。

これと4.2節の高速化をあわせて、従来の三倍の生産性を達成した。

4.4 品質保証

お客様に安心安全なタンクをお届けするために、タンク1本1本の性能を保証するべく、巻位置、張力、内圧を常時監視する機能をもたせた。巻位置は4.3節で述べた自動計測機によって全層計測、張力は加工点に最も近い給糸口部に設置した張力計で常時監視することで品質保証を行っている。

上記に加え、加工時の設備動作も含めて製品シリアルナンバーとの紐づけを実施。量産開始後の製品品質を常に監視しながら、得られた知見を織り込んで工程改善に活用するだけでなく、次世代のモノづくりに活かしていく考えである。

5 気密工程

5.1 高圧水素タンク気密検査工程

タンクは気密性能保証のために出荷前に市場での使用圧力(70MPa)以上での気密検査を全数実施している。

気密検査設備は超高压ガスを充填する昇圧部とタンクからの漏れ量を検査する検査部から構成されている(図15)。昇圧部は超高压ガスの充填効率が高い極低温液化ガス昇圧装置を用いている。

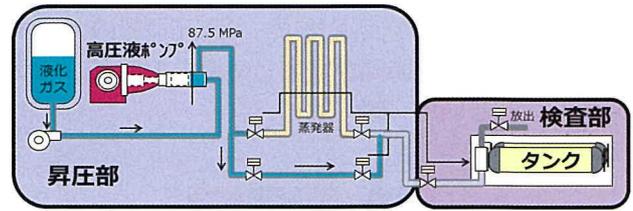


図15 気密検査設備(概念図)

極低温液化ガス昇圧装置は、超高压かつ極低温に適合する特殊材料を使用しているため設備費が高い。一方で検査部での漏れ量検査、ガス放出、タンクの入替などのガス充填以外の待機時は、昇圧部を極低温状態に保つために液化ガスを消費している、稼働率が低下することで液化ガスのロスが増加するという問題があった。

気密検査の低コスト化には昇圧部の稼働率を上げると同時に液化ガスのロス低減が必要であり、その一つの方法として昇圧部に対して検査部を複列化させる方式(図16)を採用した。

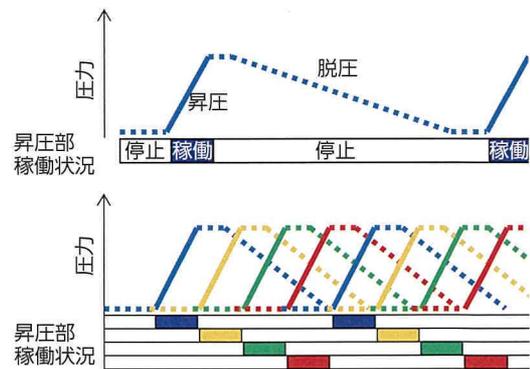


図16 検査部複列化時の昇圧部稼働状況

5.2 充填時検査部連続切替え制御の開発

複列化された各検査部へのガス充填で昇圧が完了した検査部から次の検査部への切替え時、超高压から低圧までの減圧を1分以上掛けている。これは減圧時にガス充填配管中の配管径が細い箇所でも局所的な密度低下が原因で発生するキャビテーションによる損傷を防ぐためである。

従来短時間での減圧を実現させるために排気調整弁を追加し昇圧装置との同期制御を開発した。同期制御により、キャビテーションの発生無く滑らかな

減圧を実現させることに成功し、従来の 1/10 未満の時間での切替えが可能となった

■著者



馬場 陽一郎



上田 将人



近藤 秀昭

5.3 充填時間制御技術の開発

複数ある検査部（図 17）へのガス充填は配管抵抗差ガス充填時間が安定せず、ガス充填先の切替え時に昇圧部の待機時間が発生し待機中の窒素ロスが問題となっていた（図 18）。

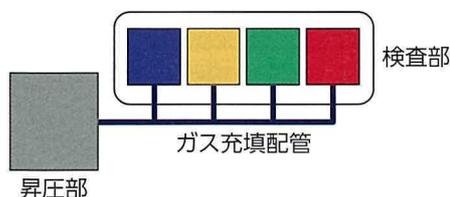


図 17 昇圧部と検査部配置（概略図）

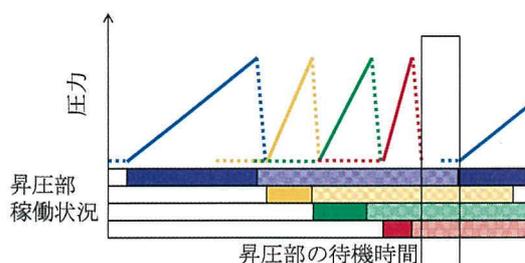


図 18 検査部切替え時の昇圧部稼働状況

従来制御では昇圧装置の出力のみでタンクへのガス充填を行っていた。70MPa 以上の超高压域では窒素の密度変化が大きく、圧力上昇速度の安定制御が難しかった。圧力上昇速度を安定させるために、各検査部での充填中の圧力に対して昇圧装置の出力と流量調整弁を同期制御させることで、超高压域での圧力上昇速度を安定させることに成功した。結果、充填時間のばらつきを 5 秒以下に抑え、検査部切替え時の昇圧装置の待機時間を 10 秒以下に抑えることが可能となった。

6 おわりに

新型 MIRAI は、単なる量的拡大だけではなく、性能・品質を向上し、桁違いのコスト低減で本格的普及を狙った真の量産車である。そのために革命的な技術進化が必要であり、多くの困難に直面した。今後もさらに FC 技術を進歩させ、地球にやさしい水素社会が到来することを心から願う。

最後に、この開発にご協力いただいた多くの関係会社の皆様に深謝の意を表す。

新型 MIRAI のプラットフォーム・ボデー構造

The Platform and Body Structure of the Second-Generation MIRAI

熊澤 靖元 *1 寺本 大輔 *2 小倉 登 *3
 Yasuyuki Kumazawa Daisuke Teramoto Noboru Ogura

板東 博 *1 石川 善基 *4
 Hiroshi Bando Yoshiki Ishikawa

特集

要旨

新型 MIRAI の魅力である「エモーショナルなデザイン」「Fun to Drive」を実現するために、プラットフォーム並びにボデー構造を見直した。GA-L ワイドプラットフォームを採用し、FC システムの搭載を工夫するとともにボデー骨格の高剛性化や足まわり部品の刷新により、室内居住性や使い勝手を確保しつつ、エモーショナルなデザイン・上質で気持ちよく走れる動的性能・航続距離拡大との両立を高い次元で実現した。ここでは、新型 MIRAI のプラットフォームおよびボデー構造について紹介する。

Abstract

To realize the emotionally powerful styling and fun-to-drive dynamic performance of the second generation MIRAI, the platform and body structure used for the original model were wholly revised. Based on Toyota's wide-body GA-L platform, an innovative fuel cell (FC) system installation layout was combined with a highly rigid body frame and redesigned chassis components. These measures helped to achieve a roomy and user-friendly interior, while also enabling emotionally powerful styling, refined and comfortable dynamic performance, and a longer cruising range. This article describes the platform and body structure of the second-generation MIRAI.

キーワード プラットフォーム, ボデー骨格, 航続距離, 操縦安定性, 大径タイヤ

1 はじめに

新型 MIRAI は、GA-L ワイドプラットフォームを採用することで、大径タイヤ装着による地上高確保を可能にし、水素タンク容量・航続距離拡大と居住性の両立（5名乗車）を実現した。あわせてFR化となることでスタイリング、走りの面でも大きく進化した。本稿では GA-L ワイドプラットフォームへの FC システムの搭載や高剛性ボデーの実現などを中心に紹介する。

とともに、リヤ席の足元スペースを大幅に改善することができた。水素タンクに関してはトンネル内への配置を含め、2本から3本に搭載量を増やし、より航続距離を拡大することを可能とした。

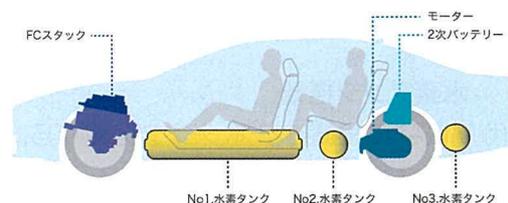


図1 新型 MIRAI ユニット配置

2 ユニット配置

新旧 MIRAI のユニットおよび水素タンク配置を図1、図2に示す。新型 MIRAI は、フロントシート下にあった FC スタックをフード下に配置することで、フロント席の着座位置を下げ、全高を下げる

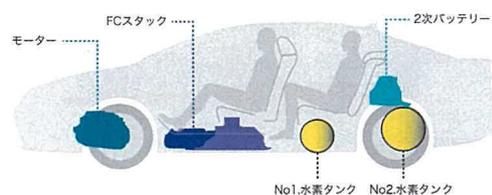


図2 初代 MIRAI ユニット配置

*1 レクサスカンパニー レクサスボデー設計部
 *2 Mid-size Vehicle Company MS ボデー設計部
 *3 Mid-size Vehicle Company MS シャシー設計部
 *4 Mid-size Vehicle Company MS 製品企画本部

3 FCシステム搭載

GA-L ワイドプラットフォームを採用するにあたり、FCV 特有のユニット関係を搭載するため、プラットフォームを一部専用設計した。FCV のメインユニットとなるFC スタック、TA モーター、水素タンク搭載のためのプラットフォーム改良部位を中心に紹介する。

3.1 FCスタック搭載

初代 MIRAI ではフロントシート下に配置していたFC スタックを、新型 MIRAI はフード下に配置(図 1)。FC スタックと一体搭載されているエア - コンプレッサ、エアコン - コンプレッサなどからの振動伝達を低減させるため、防振マウントにて保持する構造を採用した(図 3)。

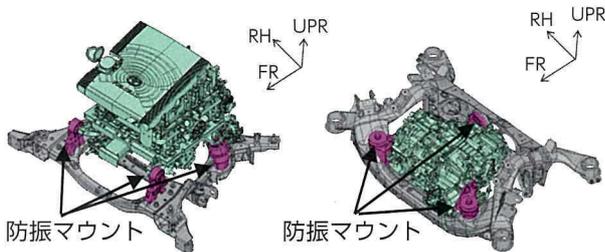


図 3 スタック懸架系 図 4 TA モーター懸架系

3.2 TA モーター搭載

初代 MIRAI はフード下に配置されていたモーターを、新型 MIRAI では後輪車軸間に配置。客室内へのギアノイズ音低減のため、FC スタック同様、防振マウントにて保持し(図 4)、モーター直上にはサイレンサを採用した。

3.3 水素タンク搭載

初代 MIRAI の横置き 2 本タンク搭載から、縦置きタンクも含めた 3 本タンク搭載に変更(図 5)。タンク容量拡大による航続距離拡大と、居住空間確保の両立を高い次元で目指した。

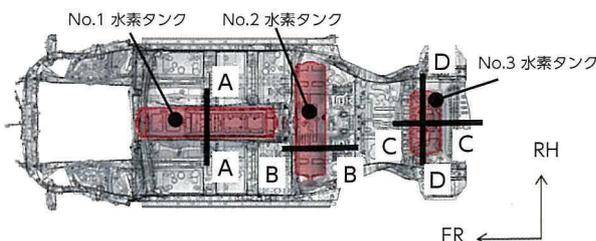


図 5 水素タンク配置

3.3.1 No.1 水素タンク搭載

居住性と航続距離拡大を両立させるため、トンネル部を活用し、大型の No.1 水素タンクを搭載。フロントシート搭載位置も見直し、居住性を確保しつつトンネル拡幅することで、タンク径を可能な限り拡大した(図 6)。同時に、肩稜線を極カストレートにとおすことにもこだわり、車両前後曲げ剛性向上にも貢献した(図 7)。

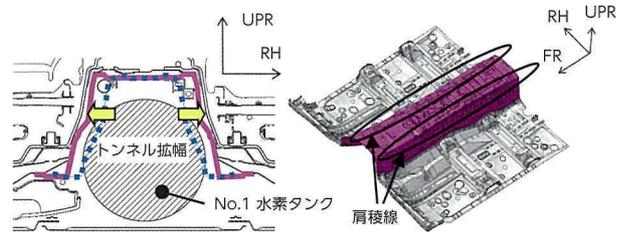


図 6 トンネル断面(A-A) 図 7 トンネル構造

3.3.2 No.2 水素タンク搭載

リヤシート下に NO.2 水素タンクを横置きで配置。水素タンクを可能な限り下方、前方に配置し、シートクッション厚を確保。全高を下げることで座り心地確保を両立した(図 8)。左右のタンク長も極力確保するために、成形シミュレーションを繰り返し行い、難成形フロア形状にチャレンジした(図 9)。

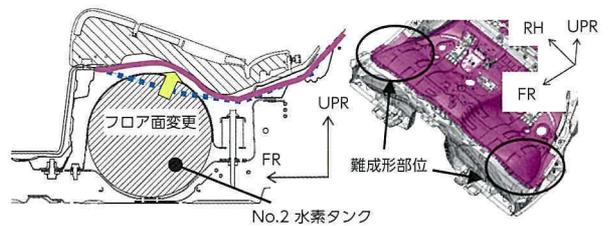


図 8 シート下断面(B-B) 図 9 フロア形状

3.3.3 No.3 水素タンク搭載

ラゲージ下に NO.3 タンクを横置きで配置。タンク搭載とデッキ下工具搭載スペースの両立を図るため、リヤフロアを 2 分割構造化(図 10)。また、さらなるタンク容量・航続距離拡大と衝突性能の両立のため、ラゲージ内に衝突荷重伝達部材であるフロアメンバを床上配置した(図 11)。

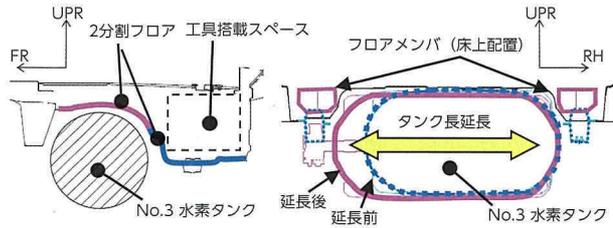


図10 ラゲージ構造 (C-C) 図11 水素タンク断面 (D-D)

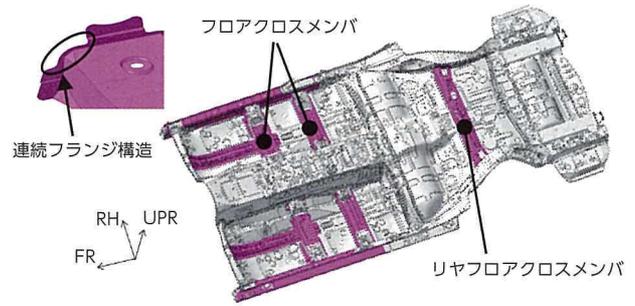


図14 フロア骨格部

4 高剛性・高強度ボデーの実現

ねじり剛性・着点剛性・接合剛性を向上させ、ボデー剛性（初代比+約25%）を徹底的に鍛え上げることによって、スムーズで力強い走りを実現した。また、主要骨格部材にアルミ材、超ハイテン材（ホットスタンプ材、590～1180MPa材）を最適配置し、高強度化と軽量化を図った。

4.1 プラットフォーム部

GA-L ワイドプラットフォームの構造を踏襲し以下の構造を織込んだ。

フード下に6本のブレースを配置し、ねじり剛性を飛躍的に向上させた（図12）。フロントサスペンションタワーはアルミダイキャスト製を採用し、板厚やリブ形状を最適化。優れた着点剛性（初代比+約70%）と軽量化を両立した（図13）。

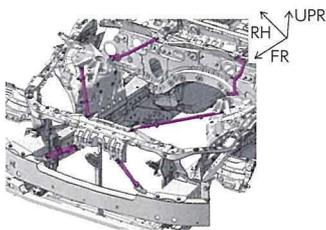


図12 フード下構造部

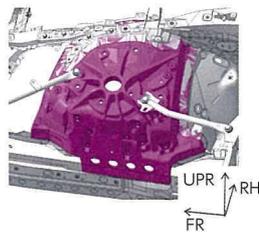


図13 フロントサスペンションタワー部

フロアクロスメンバおよびリヤフロアクロスメンバ左右端末部を連続フランジ構造にすることで骨格結合を強化し、ねじり・曲げ剛性を向上した（図14）。

サスペンションの横力によるサスペンションメンバのせん断変形に対しては、床下シェアプレートが変形抑制に有効である。FC車はオイル交換穴が不要なため、ビード形状の最適配置を行い、床下シェアプレートの剛性を最大限に生かし、軽量高剛性を実現した（図15）。

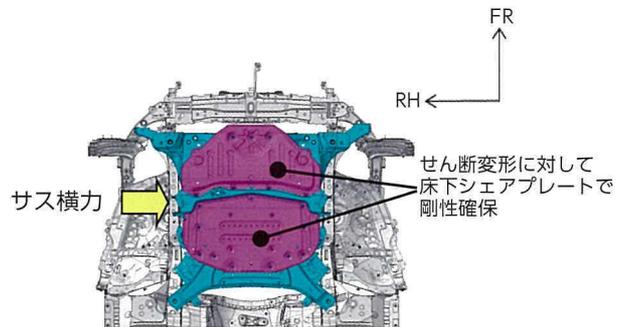


図15 床下シェアプレート構造

後面衝突においては、フルラップ衝突はもちろんのこと、オフセット衝突時にも反衝突側への荷重伝達を促し、衝突エネルギーを分散・吸収させることでキャビン変形の抑制を図った（図16）。

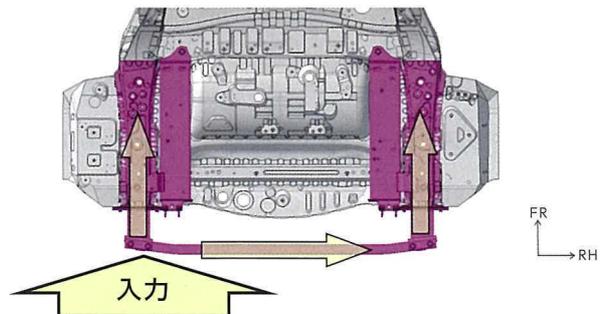


図16 後面衝突

4.2 カウル部

カウルサイド部では溶接作業穴を廃止しアーク溶接を拡大採用し、フロントサスペンション入力によ

る変形を抑制した（図 17）。また、カウルをアンダーボデー構成とすることで、カウル閉断面を A ピラー間に結合。さらに、インストルメントパネルリンフォースメントと環状構造にすることで優れたボデー剛性を確保するとともに、ステアリング支持部剛性向上（初代比 + 約 85%）も実現した（図 18）。

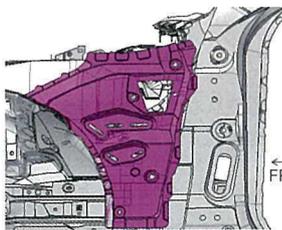


図 17 カウルサイド部

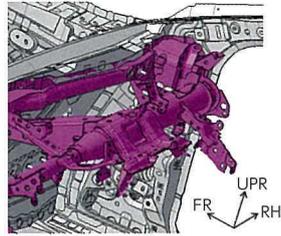


図 18 カウル閉断面

4.3 リヤボデー骨格部

リヤサスタワーを専用設計し、スタイリッシュな意匠を実現するとともに、リヤサスペンション取付面サイズの最小化とビード形状の設定によりサスタワー部の上下着点剛性を向上させた（初代比 + 約 85%）（図 19）。リヤサスタワー間にシェアパネルを設け、ビードを配することで効率的に変形を抑制した（図 20）。またラゲージ開口廻りに閉断面骨格をとすることでねじり剛性を向上させ、優れたボデー剛性を確保するとともに、サスペンションからの入力による振動を低減し、こもり音も改善した（図 21）。

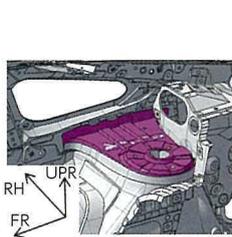


図 19 リヤサスタワー

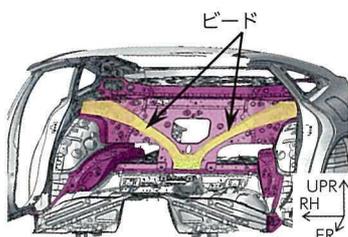


図 20 シェアパネル

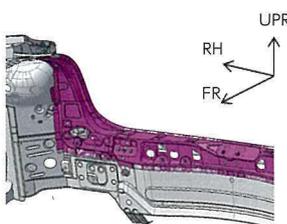


図 21 ラゲージ開口部

4.4 構造用接着剤と多様な溶接による接合

部品同士の結合剛性を向上させるため、構造用接着剤を塗布し、またレーザー溶接と LSW (Laser Screw Welding) を追加することにより、優れた剛性感と乗り心地の質感を確保した（図 22, 23, 24, 25）。

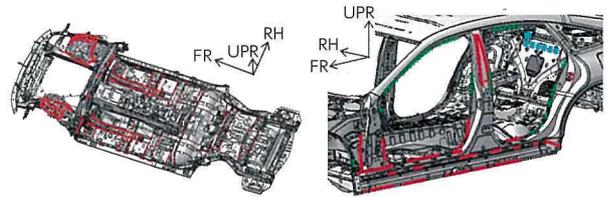


図 22 アンダーボデー 図 23 アッパーボデー（前側面）

※図 22～23 赤：接着，青：レーザー溶接，緑：LSW

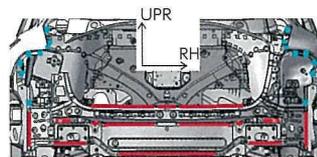


図 24 アッパーボデー（背面）

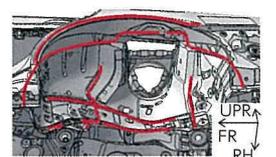


図 25 アッパーボデー（ホイールハウス部）

※図 24～25 赤：接着，青：レーザー溶接

5 フルアンダーカバー

初代 MIRAI に引き続き、高温熱源が無いメリットを生かしてアンダーカバーをフルカバー化（図 26）。床下の整流効果を高め、操縦性向上および航続距離拡大を実現。それに加えて、新型 MIRAI はカバーの大部分に不織布タイプの材料を採用することで、カバー自体に吸音効果をもたせ、ロードノイズなどの室内音低減、ユニット放射音の車外騒音低減にも効果をもたらしている。

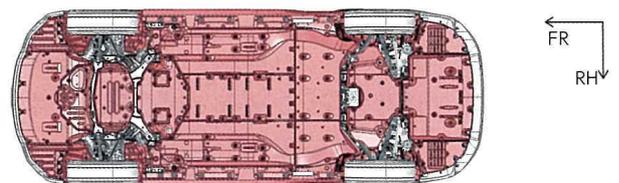


図 26 フルアンダーカバー

6 サスペンション

20 インチ大径タイヤと FC ユニット搭載を両立可能とするデザイン確保のため、フロントサスペン

ションにレクサス 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）、リヤサスペンションにローマウントマルチリンク式を採用した（図 27, 28）。

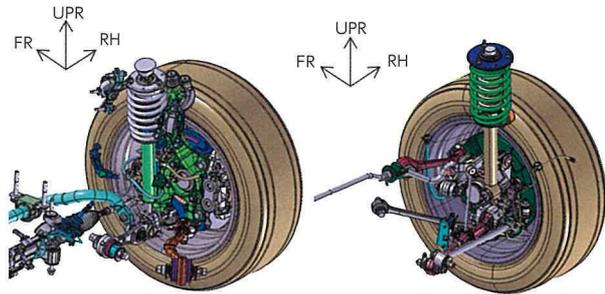


図 27 フロントサスペンション 図 28 リヤサスペンション

7 ショックアブソーバ

スタイリッシュな意匠と性能を両立するため、ツインチューブアブソーバを採用した。優れた操舵応答性と乗り心地・質感の高次元での両立を狙い、GA-L プラットフォーム初となる新摺動構造（Prosmooth™）を採用。ロッドガイド BUSH、ピストンバンド、オイルの形状・材質・配合を最適化し極微低速域でのアブソーバ軸力（摩擦力）を適正化することで、初期の動き出しから素早い応答性を実現した（図 29）。

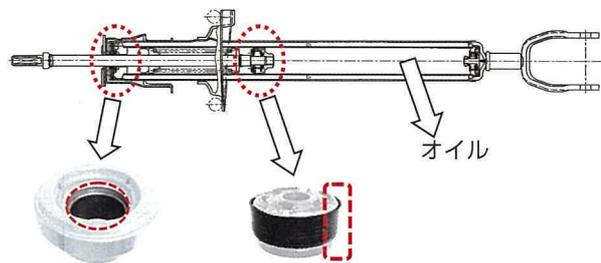


図 29 アブソーバ

8 タイヤ

航続距離拡大と高い操縦性・乗り心地および静粛性を実現可能とする大径タイヤ開発を実施（235/55R19）。トレッドゴム構造・材質およびベルト補強構造を最適化し、高次元での両立を可能とした（図 30）。上級グレード用には 20inch を設定（245/45ZR20）。

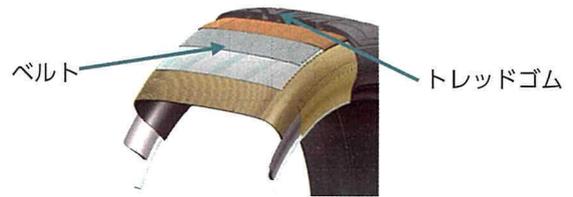


図 30 タイヤ

9 おわりに

初代 MIRAI に引き続き、魅力的な FCV を世の中に届けることができた。特にプラットフォームを刷新することで、クルマ本来の魅力を大幅に向上させることに貢献できた。新型 MIRAI の普及を足掛かりに、インフラを含めたさらなる水素社会の発展を期待してやまない。

■著者



熊澤 靖元



寺本 大輔



小倉 登



板東 博



石川 善基

新型 MIRAI の “キャラ変” に込めた思い

The New Character of the Second-Generation MIRAI

久保田 憲^{*1}
Akira Kubota

要旨

「デザインには企（わけ）があり、カタチには意味がある」この言葉は2019年までデザイン部門を指揮されてきた福市得雄氏が我々デザイナーに頻りに説いてきた考え方である。最終的に表現される全てのカタチには、その背景に目的／狙い／機能などの必然がなくてはならないという意味だ。初代MIRAIでは「知恵をカタチに」をテーマにFC（FUEL CELL）技術の新たな価値観をデザインで提案した。では、新型MIRAIはなぜこのようなデザインになったのか、なぜ初代からキャラクター（見た目を感じるクルマの性格付け）が変わったのか。この度はまたとない機会をいただいたので、新型MIRAIのいわゆる“キャラ変”に込めた思いについて紹介させていただく。

Abstract

“Design always has a reason, form always has meaning.” Tokuo Fukuichi, Toyota’s global design chief until 2019, often said this to the members of his design teams. It means that all final expressions of form must be built on the foundations of purpose, objective, function, and other elements. The design theme of the exterior styling of the first-generation MIRAI was the embodiment of ingenuity as form. This theme aimed to showcase the new type of value provided by fuel cell (FC) technology. So, why was a new design adopted for the second-generation MIRAI? Why was the decision made to change the outward visible character of the vehicle? This article addresses the thinking and intentions behind the decision to adopt a new character for the second-generation MIRAI.

キーワード FCV, 使命, 普及, キャラクター, エモーショナル, HYDROGEN SPORT, 機能 / 感性デザイン

1 はじめに

皆さんは初代MIRAIのデザインについてどう思われるだろうか？初代MIRAIのデザイン開発はその使命として、量産初のFCV（燃料電池自動車）の登場を市場に知らしめるべく“独自性のあるデザイン”が求められた。当時の開発者達は、「知恵をカタチに」をテーマに掲げ、特徴あるパッケージやFCV独自の機能をスタイリングにまとめ上げた。発表当時、各メディアに大きく取り上げられた事実は、期待された『First Impact』が十分に果たされた証だろう。

では、今回二代目となる新型MIRAIのデザインを見て、皆さんはどの様にお感じになっただろうか？もちろん賛否両論あるとは思いますが、一つ感じていただけるのは“クルマのキャラクターが変わった”ということではないだろうか。

一般的にデザイン開発の醍醐味は、数値で性能を

追求する機能分野とは違い、そのクルマの使命に沿った魅力を創造し、クルマに様々なキャラクターを与えることである。それが難しさでもある。本稿では、結果としてのカタチの説明よりも寧ろ背景にあるキャラクター変更の経緯に焦点を当てて報告する。

2 使命の違い

前述のように、初代MIRAIのデザイン使命は量産初のFCVとして「独自性のあるデザイン」を打ち出すことであった。福市氏の言葉に重ねると、一般的には全く認知されていない燃料電池という機能を「知恵をカタチに」という機能由来のアプローチでデザインに落とし込み、独自のプロポーションや三角形の大きなサイドグリルなどをFCVの新たな記号性として世に示した。

二代目となった新型MIRAIの重要な使命は“さらなる普及”である。インフラ整備がまだ道半ばの状況でデザインが普及に向けて果たすべき使命と

^{*1} Mid-size Vehicle Company MSデザイン部

は何だろうか？

- ・究極の環境車（FCV）に相応しいイメージとは？
- ・お客様にとって MIRAI への期待とは？ etc.

紆余曲折の議論の末、我々が辿り着いた答えは、『直感で感じるエモーショナルなデザイン』というものだった。

「環境車だから…」 「FCV だから…」 「MIRAI だから…」ではなく、全くそれらを意識しない人達にも感性で選んでもらえる魅力的なデザインであること。これこそが新たな需要を生み、インフラ整備の追い風となり、さらなる普及に繋がっていく。その様な新たな流れを生みだすことこそがデザインの使命ではないかと考えたのである（図 1）。

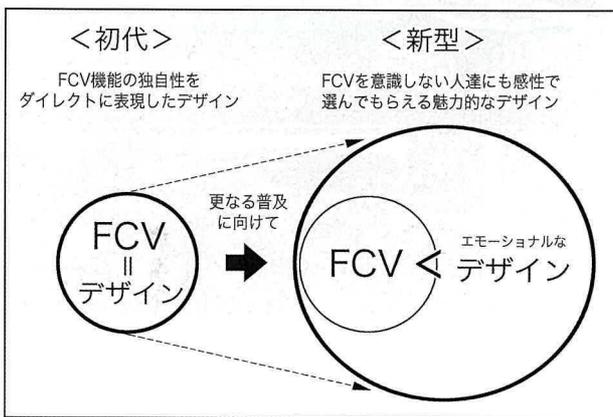


図 1 デザイン使命の変化

3 魅力の創造とは

人は想像や期待の範疇の事象を目にしてもときめかず、むしろ、意表を突かれたり想像を超えたものと出会ったときにそれが心地よい刺激となって魅力や心のたかぶりを感じる。ここで福市氏が魅力を感じる「デザインの飛びしろ」について概念的に図化したものがあるので紹介したい（図 2）。



図 2 「デザインの飛びしろ」概念図

私が言う「心地よい刺激」とは図の「意外」と同義であるが、刺激の度が過ぎると「論外」となり興味の対象から外れたり、当初は刺激的に思っても時間の経過とともに見慣れてしまうということを表している。一般論として、最初からすんなり受け入れられるデザインは鮮度を保つのが難しいということもこの図から理解できると思う。

工業デザインの難しさは、人によって千差万別な想像域を見極め、且つ時間の流れを意識しながら如何に魅力として成立する確率の高いデザインを創造できるかに懸かっている。

新型 MIRAI ではどうか。きっと世間の想像は、初代の打ちだした強いイメージの延長で「FCVとしての記号性にさらに磨きをかけた先進的デザイン」であっただろう。確かに、「FCV」を前提として考えた場合はそのように想像して当然であるし、実際に我々も企画当初はそう考えていた時期があった。しかし“普及”を考えた場合、一般のお客様で「FCV」を入り口に興味を抱く人はまだ少数派である。従って、新型のデザイン使命『直感で感じるエモーショナルなデザイン』には“環境車/FCV”を示す言葉は一つも入れていない。お客様が興味を抱く入り口を変えたかったからだ。“直感で感じる～”といった部分も“純粋にカッコいいデザインとは、走りにこだわったスポーティーさであるべき”として「ワイド＆ローなボディーで大きいタイヤが四隅に踏ん張ったスタンス」を追求するものである。

決して“環境に優しいイメージ”だけのクルマにはしたくない、FCV といっても“走りに拘ったスポーティーなクルマにしたい！”という意気込みで我々はパッケージの検討に当たった。その一例が「全高とタイヤ外径」の比率である（図 3）。全高に対してタイヤの比率が大きくなると、走りを意識させて軽快感が増し、スポーティーなプロポーションとなる。新型 MIRAI は他車と比較してもタイヤが強調されたプロポーションであることがわかりいただけるだろう。

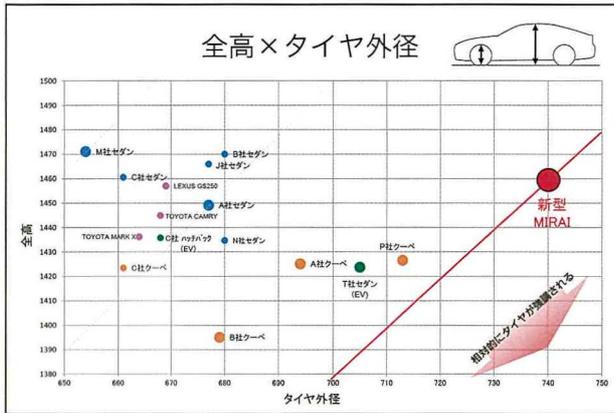


図3 全高×タイヤ外径の比率

このように、世間の想像とは“前提が異なるデザイン使命”と“それを叶えるパッケージ”を手にしたことで、見る人の心に刺激を与える下地は整った。あとは、その“スポーティーな魅力”をどう付与するかだ。次に、内外デザインで追求したエモーショナルな魅力へのチャレンジを具体的に紹介する。

3.1 外形デザイン

“走りにこだわったスポーティーな魅力”と言っても、その背景にある価値観はポルシェでもフェラーリでもない。

新型 MIRAI という新たな世界をどう表現するか、このクルマだからこそお客様に享受できるエモーショナルさ=心のたかぶりとは何だろうか？を我々は考えた。

実際にこのクルマをドライブした方なら想像できるかも知れないが、音もなく滑るような走りだしのスムーズさ、瞬間移動するような力強い加速感は新型でさらに磨きが掛かっており、その運転感覚はまさに地表を音もなく滑空するグライダーを操縦するようなワクワクの新体験である。

この何事にも代えがたい“走りの気持ち良さ”こそがこの車のエモーショナルさの象徴と捉え、それをカタチで追求にしたのが 3D イメージモデルだ (図 4)。

タイヤもなく、車の概念に捉われない初期段階から実際の車として仕上げる最終段階まで、デザイナーが表現したい意図 / 狙いを見失うことがないように意匠開発の新たなスキームとして取り組み、最終のターゲットスケッチを完成させた (図 5)。

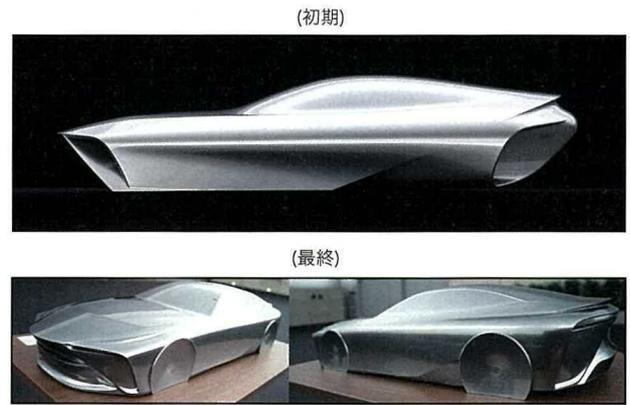


図4 3D イメージモデル



図5 外形ターゲットスケッチ

このように新型 MIRAI のデザインは、お客様が体感するであろう新しいワクドキ体験をベースに造形イメージを膨らませ、新たな造形価値としてエモーショナルな美しさを追求したのである。

3.1.1 外形デザインの見どころ

① FR ならではのリアタイヤに重心をかけたロングノーズプロポーションと抜けの良いファストバックを掛けあわせ、全身でスピード感を表現した新しい FR エアロプロポーション (図 6)。



図6 サイドビューの狙い

②地表にエッジを効かせるように、軽快さと安定感の両立を狙ったスタンス表現 (図 7)。



図7 スタンスの狙い

③従来のなキャラクター線ではなく、大胆な断面変化で魅せるミニマルな造形観で静けさのなかにも力強い躍動感を主張（図8）。



図8 大胆な断面変化

④ジェットタービンをイメージした20インチホイールはスムーズで力強い走りを象徴（図9）。

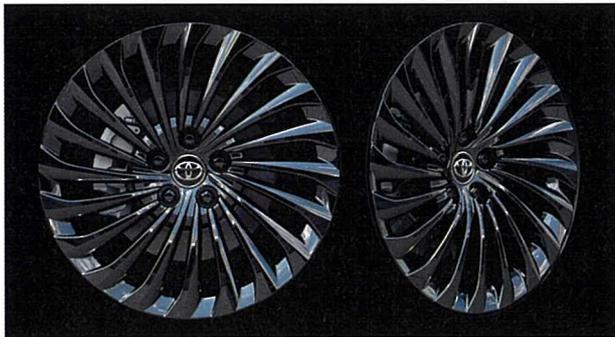


図9 20インチホイール（ブラックスパッタリング）

⑤鮮やかさのなかに力強さを秘めた大人のスポーツマインドを刺激する『FORCE BLUE MULTIPLE LAYERS』を新規開発（図10）。



図10 FORCE BLUE MULTIPLE LAYERS イメージ

3.2 室内デザイン

室内に於けるエモーショナルな気持ち良さとは何だろうか。ドライバーズシートに身を委ねステアリングを握りしめる瞬間、スタートボタンを押してクルマの起動を五感で感じる瞬間、アクセルを軽く踏み込み、静けさのなかで背中にG（加速）を感じる瞬間、上質な素材／光／音に包まれて流れる景色に心を奪われる瞬間、我々は、そんな全ての瞬間で感じる気持ち良さがこのクルマならではの特別な経験であり、その一つ一つをピュアに感じてほしいと考えた。

室内デザインでは、華やかな装飾に頼らない上質で爽快なドライビング・プレジャーをイメージし、ターゲットスケッチではそれを象徴的に表現した（図11）。

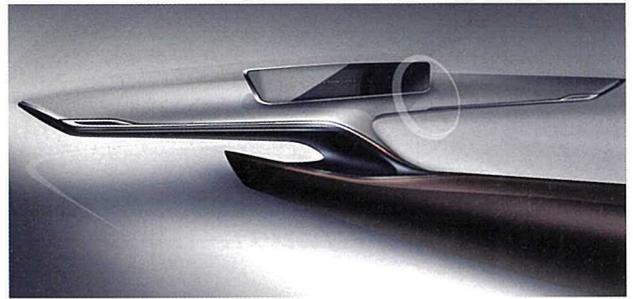


図11 室内ターゲットスケッチ

3.2.1 室内デザインの見どころ

①ドライバーには適度な包まれ感、パッセンジャーには心地よい広がり感を提供する新しいコックピット空間を表現（図12）。



図12 室内デザインの狙い（その1）

②乗員を包み込む大らかなソフトパッドの上に情報機能を集約した大型クラスターを配置。「集中」と「リラックス」のコントラストで見応え感を追求（図13）。



図 13 室内デザインの狙い (その 2)

- ③「流」をテーマにしたオープニングムービーは静寂ななかにもダイナミックな起動感を象徴 (図 14).



図 14 オープニングムービー

- ④照明色 (全 8 色) をセンターディスプレイ操作でカスタマイズが可能. 多彩な光で気分にあわせた室内空間を演出 (図 15).



図 15 室内イルミネーション

- ⑤室内全体に優しい光が差し込み, 心地よい開放感をもたらすパノラマルーフ (OPT 設定) (図 16).



図 16 パノラマルーフの開放感

4 おわりに

新型 MIRAI のデザインは去る 2019 年の東京モーターショーで『MIRAI concept』としてお披露目をした. 実際に初めてそのデザインをご覧になった方々からは「これが MIRAI!？」と驚かれることも多かった. なかには, コンセプトモデルと勘繰り, 市販する頃にはきっと大人しいデザインになるのだろう? と疑いの声もあったほどだ. 裏を返せば, それだけ“初代とは異なる魅力を持ったクルマになった”, いわゆる“キャラが変わった!”と直感的に感じてもらえた結果だと思う.

発売後には多くの人々が新型 MIRAI を見るだけでなく試乗する機会を得られるかも知れない.

是非そのときは, 新しいワクドキ体験とともに新型 MIRAI のデザインを理屈抜きに感じてもらいたい.

初代とは全く違う使命を担って開発した新型 MIRAI のデザインが, 水素社会の実現に向けた新たなトリガーになってくれることを期待してやまない.

■ 著者



久保田 憲

新型 MIRAI の振動騒音性能開発

Development of the Noise and Vibration Performance of the Second-Generation MIRAI

石川 哲平 *1 羽室 友策 *1 加藤 智久 *2
 Teppei Ishikawa Yusaku Hamuro Tomohisa Kato
 福原 千絵 *3 亀井 一浩 *4
 Chie Fukuhara Kazuhiro Kamei

特集

要旨

新型 MIRAI は、「走り出した瞬間から振動のない上質さを感じられ、気持ち良く加速し、Fun to Drive を感じられる動的性能」を目指して開発した。振動騒音性能においては、特に日常的に使用されるシーンで「上質さ」を感じられる静粛性を実現した。また「Fun to Drive」の一助として、操作に対してクルマの挙動を伝える「インフォメーション性」を向上させるため、Fuel Cell Vehicle（以下、FCV）の加速特性と新型 MIRAI のイメージにあわせた加速サウンドを開発した。本稿では開発事例を紹介する。

Abstract

The second-generation MIRAI was developed with the objective of achieving a refined and vibration-free driving experience from the moment that the vehicle moves off, comfortable acceleration, and fun-to-drive dynamic performance. Reflecting this objective, the noise and vibration performance of the vehicle was developed to realize a quiet and superior experience, particularly in everyday driving scenarios. In addition, to enhance the informational function of the vehicle, which is an important aspect of fun-to-drive performance and dictates how vehicle behavior is communicated in response to driver input, an acceleration sound was developed to fit the acceleration characteristics of a fuel cell vehicle (FCV) and the image of the second-generation MIRAI. This article describes some specific examples from the noise and vibration development of the second-generation MIRAI.

キーワード 燃料電池車両, 振動, 騒音, NV 性能, エアコンプレッサ騒音, 加速サウンド

1 はじめに

2014 年に発売した初代 MIRAI では「トルクフルな走り」と静粛性の両立を性能コンセプトとした。

新型 MIRAI では、より多くのお客様に喜んでいただけるよう、「上質さ」を感じる静粛性を目指した。さらに、加速サウンドを付加することで「Fun to Drive」を体感できる振動騒音性能（以下、NV 性能）を実現した。

2 NV 性能開発の狙い

「上質さ」を実現するためには、乗員が感じる音と振動のレベル低減はもちろん、車速や加速度変化にともなう過渡的なレベル変化にピーク性の無いこ

とが重要と考える。エンジン系騒音が無いことを最大限活かした NV 性能が体感できることを開発の狙いとした。

以降では、新型 MIRAI の開発で注力した項目について事例を示す。

3 NV 性能 開発事例

3.1 定常走行時車内音低減事例

FCV にはエンジン系騒音が無いいため、相対的にロードノイズや風切り音を含む定常走行時の騒音が気になり易い。ロードノイズは、サスペンションからボデーへの入力周波数とフロアパネル共振周波数を分散するため、個々のパネル共振を解析し、構造を工夫した。風切り音においてはフロント外形デザインとの両立を狙い、特にドアミラー周りの外形発生音を低減すべく形状を工夫した。

これらにより、「上質さ」を感じる静粛性の車内

*1 Mid-size Vehicle Company MS 車両性能開発部

*2 トヨタ ZEV ファクトリー FC 製品開発部

*3 Lexus Int. Co. レクサス車両性能開発部

*4 トヨタ自動車東日本株式会社

音レベル低減を実現した。(図1)。

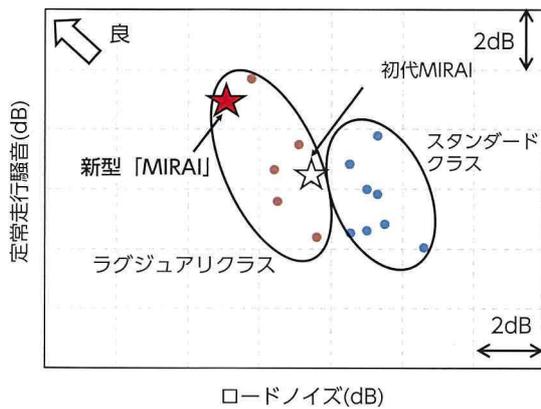


図1 定常走行時静粛性

3.2 加速走行時車内音低減事例

FCVには、水素を供給する水素ポンプとインジェクタ、酸素を供給するエアコンプレッサー（以下、ACP）など、多くの振動源が存在する。特に今回採用したACPは増速部を備えたターボポンプのため、モータ回転1次、2次、インペラ回転1次（モータ回転11次）に現象が発生する。

モータ回転1次はFCマウントを介した車内音で振動伝達現象。モータ回転2次はアンダーボデーとアンダーカバーの間を伝達する音響伝達現象。インペラ回転1次はACPとその結合部品が発生する音の音響伝達現象である。これらの対策指針は以下のとおりである。

- 1.ACP および結合する部品を全て防振し、ACP 結合部品の発音、FCマウント経由での振動伝達を低減。
- 2.FCフレームの剛性を確保し、スタックとの取り付けを剛結化することによりFCユニット全体の質量を活用し、振動感度を低減。
- 3.アンダーカバーの開孔、車室内外の吸遮音材設定でボデー感度を対策。

初代からの車内音の改善代を示す(図2)。

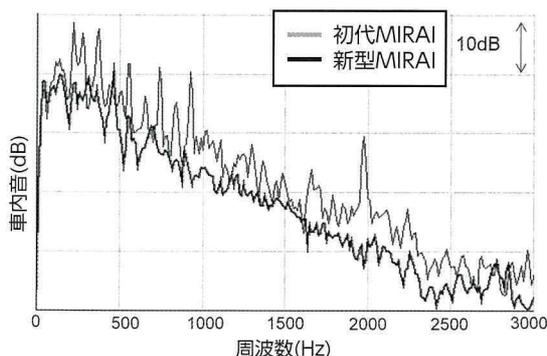


図2 全開加速走行時静粛性

同車速・加速度の車内音をハイブリッド車と比較した結果を示す(図3)。これらより、車内音のピーク性低減を実現した。

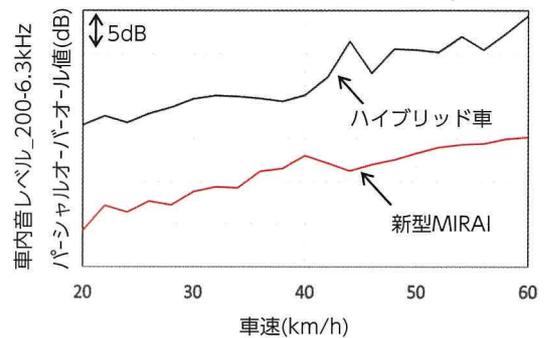


図3 加速走行時静粛性

3.3 ステアリング振動低減事例

通常、エアコンプレッサー（以下、A/C）などの補機類は大質量のエンジンなどに取り付けられるため、作動時の振動はマス効果により低減される。

新型MIRAIでは、軽量のFCフレームにFCスタックおよび補機類が懸架されているため、A/Cマウント部にゴムブッシュを採用し、FCマウント経由の振動伝達を低減した。スタック懸架系図および2自由度ばねマスモデルで算術したA/C-FCフレーム結合違いによる差を示す(図4、図5)。

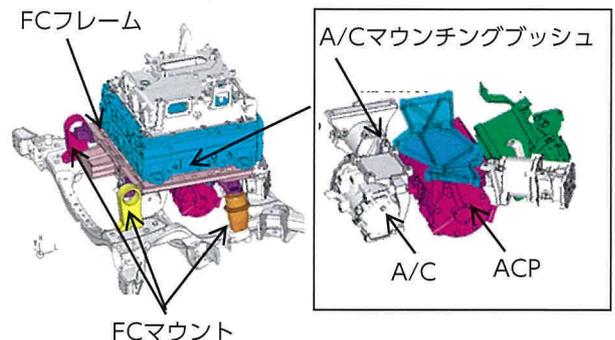


図4 スタック懸架系および補機類配置

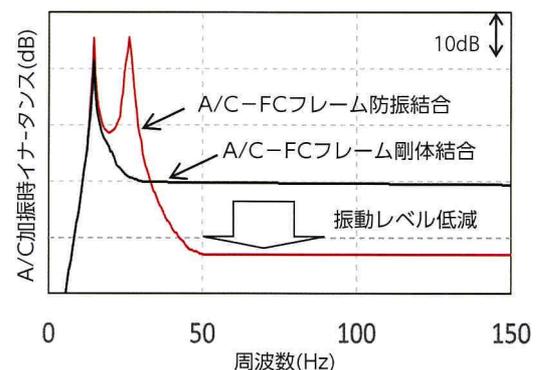


図5 A/C-FCフレーム結合方式違いによるレベル

4 加速サウンド

4.1 加速サウンド開発の背景

前述の静粛性を実現する一方で、エンジン音のようにアクセル操作と回転数に連動した「インフォメーション性」をもつサウンドが無いことで、ドライバーとクルマとの対話によって生まれる「Fun to Drive」感が低下することが考えられる。そこでFCVならではの加速サウンド開発に取り組んだ。

社内運転エキスパートとともに何度も走行し議論を重ねた結果、FCV サウンドの「インフォメーション性」とは「ドライバーの操作（アクセル）とクルマの挙動（加速度）とが調和した結果を認知できるもの」と定めた。

4.2 サウンド鳴動デバイス

サウンド開発初期において、動力源の作動にともなうモータ音、ACP 作動音、様々なユニットを用いて検討をした。しかし、速度域や加速度変化に対する音圧変化が対応していないことから、FCV サウンドとして求める「インフォメーション性」が得られにくいことがわかった。以下に加速時の車内音周波数特性および求める車内音イメージを示す（図 6）。

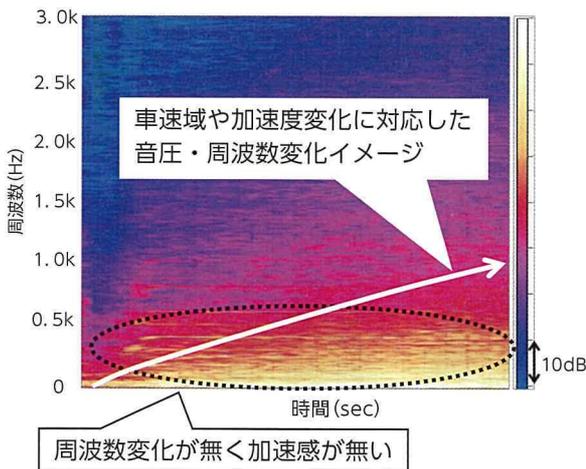


図 6 加速時車内音周波数特性と求めるイメージ

そこで新型 MIRAI ではアクティブ・サウンド・コントロール・システム（以下 ASC）を採用した。ASC は専用の ECU とスピーカーにより音源を鳴動させるシステムであり、FCV サウンドに「インフォメーション性」をもたせるために必要なロジックの構築が可能である。

4.3 加速サウンドの音色

FC サウンドにとって「インフォメーション性」と同様に重要なのは、「音色」であると考えられる。新型 MIRAI の外形意匠にも通じるキーワード「Nature-tech」「Velocity」にふさわしい音色を検討した（図 7）。

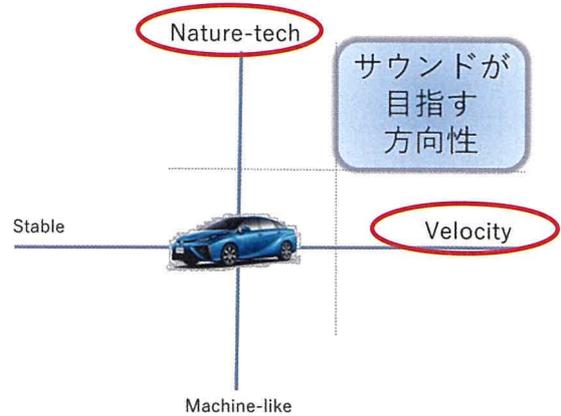


図 7 新型 MIRAI のサウンド方向性

はじめに、音色を表現する 4 組の形容詞を用いた評価軸を定めた。加えて、それぞれの軸の評価に影響を及ぼすと考えられる音の物理量の仮説を立てた（表 1）。

表 1 サウンド評価形容詞と物理量仮説

軸	評価形容詞	物理量仮説
1	パワフルな・力強い	1kHz 以下のエネルギー総和
2	エレガント・伝統的	ハーモナイズ
3	厚みのある・深みのある	速度域ごとの周波数帯変化
4	明るい・軽やかな	1-2kHz 帯域のエネルギー総和

新型 MIRAI の「Velocity」つまり速度感のキーワードから、「軸 1：パワフルな、力強い」を強調した音がふさわしいと考えた。また、ドライブモードスイッチ操作により変化する、走行マインドへの期待に沿う音色とするため、Normal-Mode は「軸 3：厚み・深みのある」、Sports-Mode は「軸 4：明るい・軽やかな」を強調させることとした。

4.4 加速サウンド作成と周波数特性

音色の具現化に際し、様々なトライを行った。

モータ回転の音を模擬した検討では、速度に沿った周波数変化により「インフォメーション性」は確保できるものの、音色に関して「軸 3：厚み・深みのある」の評価点が低くなる傾向であった。

一方、SFX 映画で用いられているアンビエントやホワイトノイズ的な加工音では、「インフォメー

ション性」を確保しにくく、音色に関しても未来的ではあるがクルマとして違和感があるという評価結果であった。

以上の結果から、「インフォメーション性」を確保するために、モータ音のような回転要素をもつ音と未来的な印象を与えるホワイトノイズ要素をもつ音の両方を含んだサウンドをオリジナルで制作することとした。

社外サウンドクリエイターを招き、社内運転エキスパートとの走行試験を繰り返しながら、狙い通りの「インフォメーション性」と「音色」をもつ新型MIRAIの加速サウンドを造り上げた。

Normal-Mode および Sports-Mode 選択時の全開加速車内音周波数特性を示す（図8、図9）。

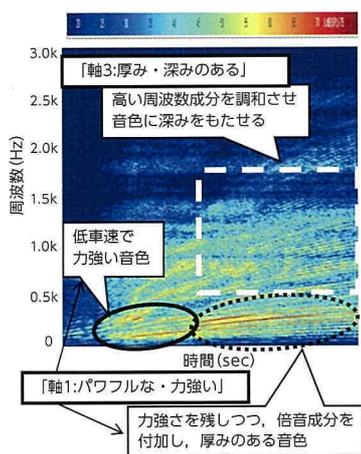


図8 加速サウンド鳴動例 (Normal-Mode)

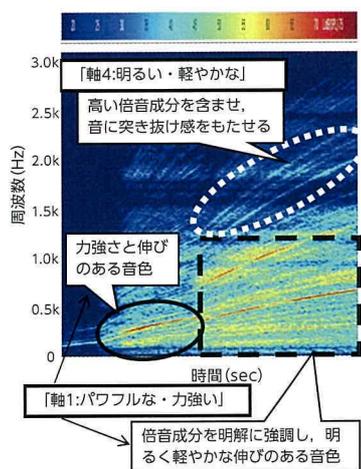


図9 加速サウンド鳴動例 (Sports-Mode)

4.5 仮説検証

社内運転エキスパートおよびターゲットユーザー層合計 22 名の評価結果を示す（図10）。

評価形容詞に対し5段階で採点するアンケート形式を採用した。運転者によって主速度域は異なって

いたが、それぞれの走行モードにおいて狙いとする傾向は得られたと考察する。

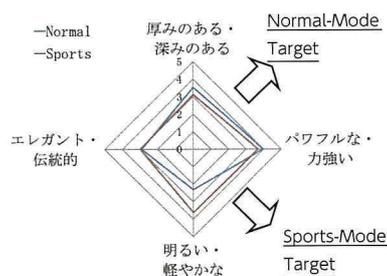


図10 社内評価結果

5 まとめ

新型MIRAIでは、高い質感を感じる静粛性と加速サウンドを両立するNV性能を目指し、これを達成した。日常的なシチュエーションで上質な静粛性を感じていただき、高速道路合流などの状況において、「ドライバー操作とクルマの挙動とが調和した結果を認知できる」今までに無い加速サウンドを楽しんでいただければ、開発メンバーとしてこのうえない喜びである。

最後に、加速サウンド開発ではASC開発関係各位とmarimoRECORDS様に多大なご支援をいただいたことに深謝の意を表する。

参考文献

- 田島尚史ほか：ホットハッチエンジンサウンドの提案，自動車技術会学術講演予稿集，20196155, No. 155 (2019)

著者



石川 哲平



羽室 友策



加藤 智久



福原 千絵



亀井 一浩

新型 MIRAI の車両運動性能開発

Development of the Dynamic Vehicle Performance of the Second-Generation MIRAI

芦川 渉^{*1} 岡松 秀悟^{*1} 井上 真^{*1}
Wataru Ashikawa Shuugo Okamoto Makoto Inoue

要旨

FCV は究極のエコカーであるが、二代目 FCV となる新型 MIRAI は単にエコだけでなく「走り出した瞬間から振動のない上質さを感じられ、気持ち良く加速し、Fun to Drive を感じられる車両運動性能」を目指して開発した。特に、加速タイムや限界性能を追求するだけでなく、モーター駆動の特性を最大活用し、運転し易い Confident & Natural (安心で自然) な車両運動性能にこだわって開発した。

Abstract

Although fuel cell vehicles (FCVs) may be regarded as the ultimate environmentally friendly vehicle, the second-generation MIRAI was not developed simply with environmental friendliness in mind. The development also aimed to achieve a refined and vibration-free driving experience from the moment that the vehicle moves off, comfortable acceleration, and fun-to-drive dynamic performance. In particular, this meant focusing on achieving easy-to-drive, confident, and natural dynamic performance by maximizing the drive motor characteristics, without fixating simply on acceleration times and critical cornering performance.

キーワード 加速感, 減速感, 前後重量配分, ボデー剛性, 運動制御, サスペンション, 共振分散

特集

1 はじめに

初代 MIRAI は、モーター駆動ならではの振動・騒音の少なさに加え、アクセル操作に対しレスポンス良くトルクフルな加速性能が好評である。

新型 MIRAI ではさらに、走行シーンに応じて車速や荷重移動をコントロールし易い加速度と減速度が得られるよう、駆動力特性を設計した。

また、加速時や高車速でも安心安全に運転を楽しめるよう、操縦安定性と乗心地は本車両開発において最もこだわった点である。

本稿では、新型 MIRAI の運動性能（加速感、減速感、操縦安定性、乗心地）について紹介する。

- ①車両の動き始めを感じるまでの時間
- ②加速度の立ち上がり勾配
- ③加速度の大きさ
- ④加速度の持続性

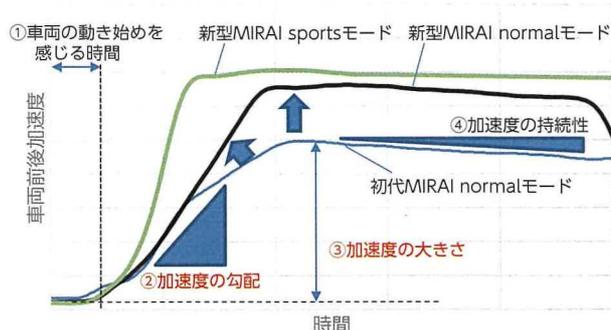


図1 新型MIRAIの加速感

新型 MIRAI は図1の②、③の特性を初代 MIRAI より高く設定し、さらに加速感を向上させた。

また、低速域ではショックレスで滑らかな加速を、中高速域ではシャープで伸びやかな加速を狙い、走行シーンに沿った加速特性を作り込んだ。

2 加速感・減速感

2.1 加速感の制御設計

電動車の長所である、ハイレスポンスで繋ぎ目の無い出力性能を活かし、自然な走りでも安心して運転できること、Fun to Drive を体感できることを開発の狙いとした。

加速感とはアクセルペダル開度に対する以下4項目の物理的要素により感じられる。

2.2 加速時の姿勢設計

新型 MIRAI では加速時の車両姿勢にもこだわって開発した。

*1 Mid-size Vehicle Company MS 車両性能開発部

加速時、駆動力はサスペンションを介し車両に伝達するが、サスペンション反力点と車両重心の距離が大きいほどピッチング量は増加する。そこで、リヤサスペンションのアーム配置を工夫することで、加速時のピッチングを抑え、シートから進行方向へ背中を押されるような気持ちの良い加速感を実現した(図2)。



図2 力の発生方向と車両重心

2.3 減速感の制御設計

減速感とは、アクセルオフ状態での減速の程度を示し、加速感と同様に減速の大きさやその立ち上がり勾配によって感じられる。減速度が適正であると、アクセルとブレーキを頻繁に踏みかえなくても車速コントロールし易くなり、車両安定性や安心感が向上する。

新型MIRAIは、初代MIRAIに比べ減速度とその立ち上がり勾配を向上させるとともに、走行シーンに応じ減速度を増す制御を採用した。

例えば、下り坂では路面の勾配に応じ減速度を増し車速上昇を抑制している。また、ワインディングロードをスポーティに運転する際には、車両の左右・前後加速度から最適な減速度を分析しアシストしている(SPORTSモード時)(図3)。

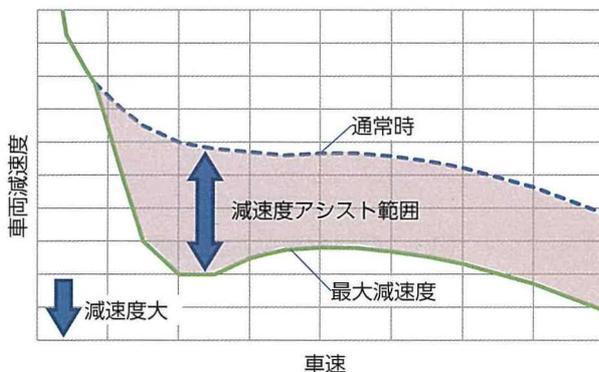


図3 シーンに応じた減速度の制御イメージ

3 操縦安定性, 乗心地

3.1 操縦安定性, 乗心地の狙い

車両運動性能の狙いである「安全・安心・自然な操縦安定性」の実現のために、前後重量配分、ボデー

剛性、運動制御に注力した。

また「質感の高い快適な乗心地」の実現のため、サスペンション入力低減、共振周波数分散、に注力した。

3.2 50:50の前後重量配分

新型MIRAIはパワートレーンユニットを最適に配置し50:50を狙った(図4)。

これにより、旋回中のスリップ角をよりニュートラルに設定することができ、自然な旋回フィーリングを実現した(図5)。

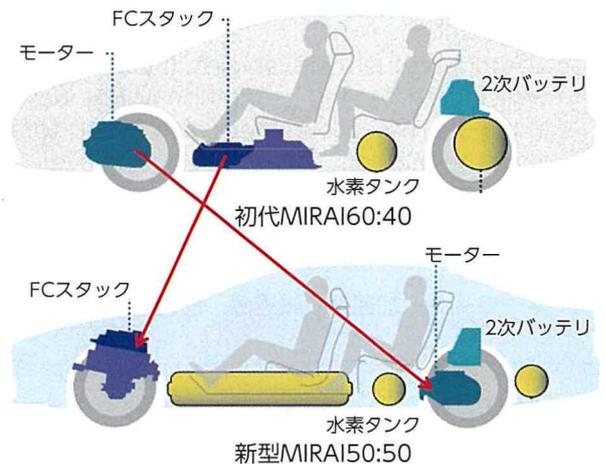


図4 重量配分比較

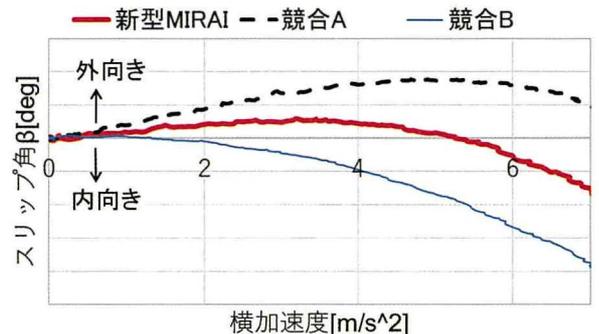


図5 横加速度に対する車体スリップ角

3.3 ボデー剛性

優れた操安性と乗心地の質感を高めるためには、剛性の高いボデーが求められる。

新型MIRAIは以下の手段でフロントボデー、キャビン、リヤボデーを補強し、ボデー捩じり剛性を初代MIRAIから25%向上させた(図6)。

※プラットフォーム部4項参照

- ・フード内補強ブレース
- ・リヤサスタワー間のシェアプレート大ビード
- ・リヤラゲージ内環状構造

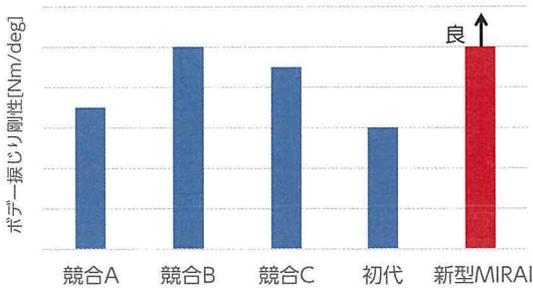


図6 ボデー振り刚性

また、サスペンションの横力によるサスペンションメンバーのせん断変形に対しては、シェアプレートが変形抑制に有効である。FC車はエンジンオイル交換穴が不要なため、シェアプレートの剛性を高め、軽量高剛性を実現した(図7)。

※プラットフォーム部4項参照

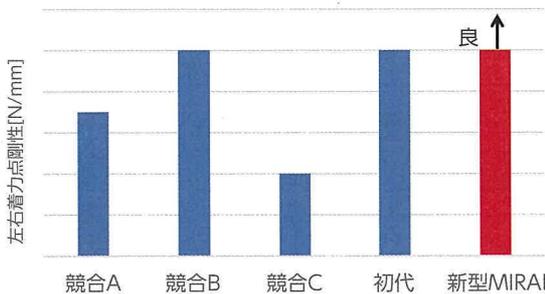


図7 着点剛性

3.4 運動制御の開発

優れた旋回性能と限界域での安定性の両立のため、安定性制御の開発にも注力した。

旋回性能を向上させると、タックイン安定性と背反する傾向にある。

新型MIRAIでは、タックインを回避するフィードフォワードの制御を採用し、旋回性能と限界域での安定性を高い次元で両立させた(図8)。

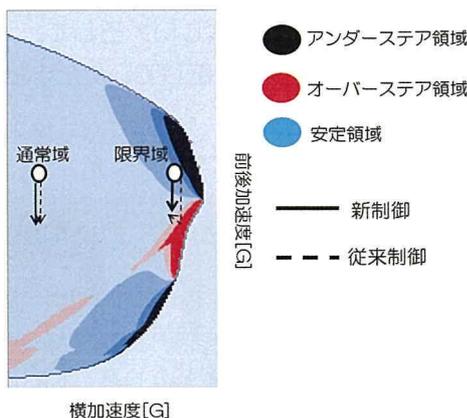


図8 G-Gダイアグラム

従来制御はタイヤのスリップ(車両のオーバーステア)を検知してから減速度を低減するのに対し、新制御では横加速度に応じて減速度を低減するフィードフォワード制御を採用した。

これにより高速で減速度を低減し、車両の安定性を確保した。

3.5 サスペンション入力低減

優れた運動性能を確保しつつ上質な乗心地も両立するために、フロントにダブルウィッシュボーン式サスペンション、リヤにマルチリンク式サスペンションを採用した(図9)。

さらに、ロアブッシュのばね定数を低く設定することで、前後コンプライアンスを確保し、突起乗り越し時のショックを低減した(図10)。

また、一般的に乗心地を滑らかにするために減衰力を低減すると、ばね上の動きが大きく収まり難い特性になるが、新型MIRAIでは、ショックアブソーバの摺動部に摩擦を付与し、ばね上の収まりを確保したうえで、減衰力を低減させ、滑らかな乗心地とばね上の収まりを両立させた。

※プラットフォーム部7項参照

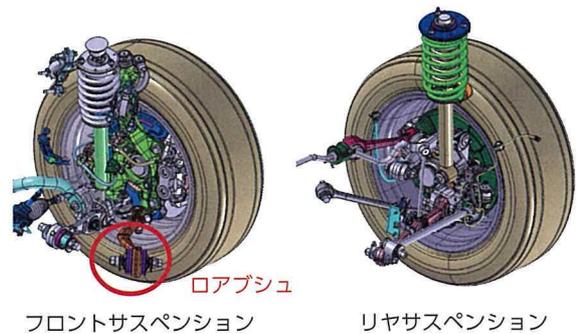


図9 新型MIRAIのサスペンション

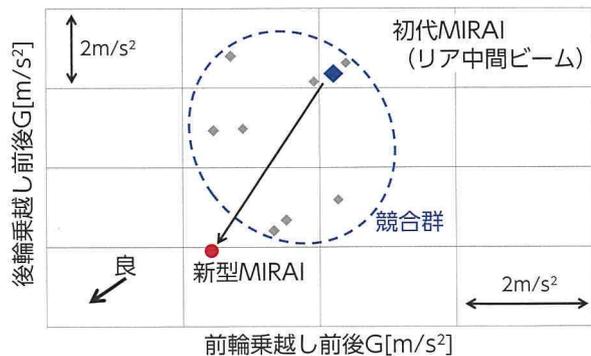


図10 突起乗り越しショック比較

3.6 サスペンション入力と各共振周波数の分散

新型 MIRAI のフード内に搭載されている FC ユニッ
トは、エンジンより軽く、ノイズや振動を発生し
ないため、懸架系のばね定数を高くし、FC ユニッ
トの共振を高く設定できる (図 11)。

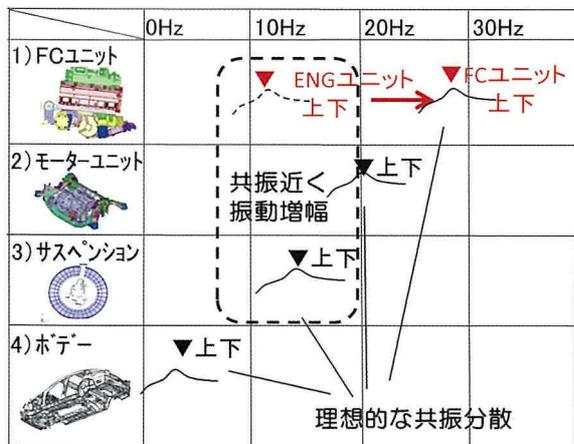


図 11 共振分散イメージ

これにより、入力の大きなばね下振動と各ユニッ
ト共振周波数を分散し、振動が少ない上質な乗心地
を実現した (図 12)。

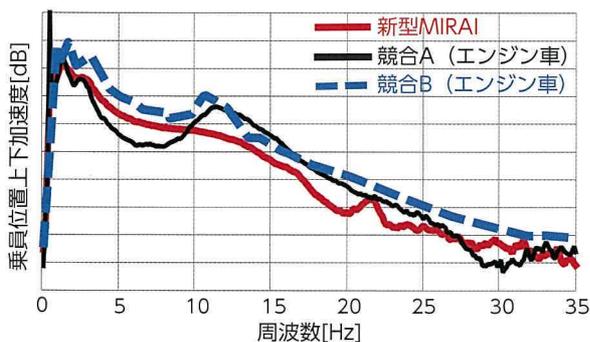


図 12 乗心地振動低減

3.7 ばね上の動き

ばね上の動きの開発では、うねりの大きな路面を
走行したときの自然な動きを表す新指標を取り入れ
た (図 13)。

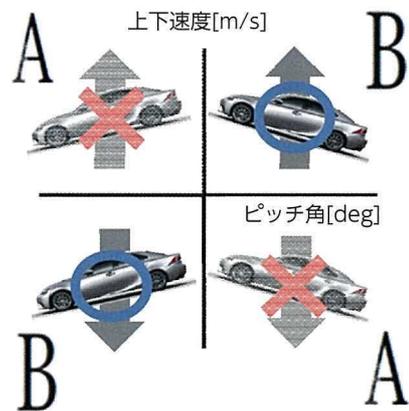


図 13 ばね上の動き新指標

新指標では A の領域が少ない状態を自然と定義
し、ピッチ角が小さい状態をフラットと定義した。新
型 MIRAI では、サスペンションの最適化を行い、フ
ラットかつ自然な乗心地を実現した (図 14)。

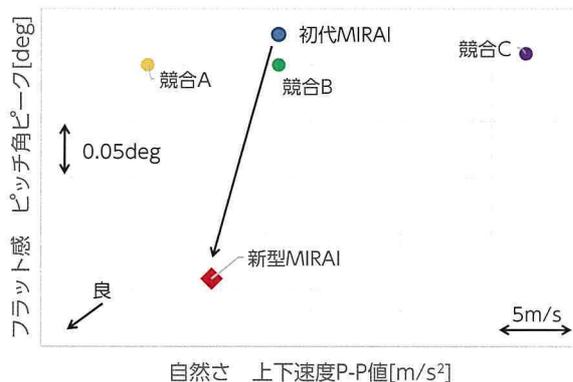


図 14 ばね上の自然さとフラット感

4 おわりに

新型 MIRAI の車両運動性能はトヨタの設計技術、
製造技術、適合技術の結集により実現することがで
きた。

ぜひ新型 MIRAI のハンドルを握り、アクセルを踏
んで、様々な道を運転して欲しい。そして、大きく
進化を遂げた車両運動性能を感じていただきたい。

■ 著者



芦川 渉



岡松 秀悟



井上 真

新型 MIRAI の空力性能開発

Development of the Aerodynamic Performance of the Second-Generation MIRAI

武田 英晃 *1 細井 章仁 *1 黒田 宙 *1 児玉 あおい *2
 Hideaki Takeda Akihito Hosoi Hiroshi Kuroda Aoi Kodama

要旨

新型 MIRAI のこだわりである、航続距離の大幅拡大とエモーショナルなスタイリングの実現のため、空力性能開発においては、(1) 水素タンク 3 本搭載における床下流れの改善、(2) エクステリアデザイン的设计最適化、(3) 後輪駆動における駆動用モーターのオイル冷却と空力の両立を行なった。その結果、航続走行距離約 850km (WLTC モード燃費にて) の達成に貢献できた。本稿では、“新型 MIRAI” の空力性能開発について報告する。

Abstract

Two of the important objectives for the second-generation MIRAI were to substantially extend the cruising range of the vehicle and to realize emotionally powerful styling. To help realize these objectives, the aerodynamic performance development aimed to: (1) enhance underbody airflows to facilitate the installation of three hydrogen tanks, (2) optimize the shape of the exterior design, and (3) achieve a balance between the oil cooling system of the drive motor in a rear-wheel drive layout and aerodynamics. As a result, the second-generation MIRAI achieved a cruising range of approximately 850km in the Worldwide-Harmonized Light Vehicles Test Cycle (WLTC) that measures fuel efficiency. This article describes the aerodynamic performance development of the second-generation MIRAI.

キーワード FCV, 空力, 冷却, 設計最適化

1 はじめに

MIRAI は量産型 FCV として世界中で 1 万台以上を販売している現行型から、環境性能の向上はもちろんのこと、クルマ本来の魅力をさらに大きく進化させることを目指して開発をスタートした。

パッケージ・スタイリングと空力性能との両立には、車両床下と外形にそれぞれ最新の知見と解析手法を用いた。

また、パッケージを FF (前輪駆動) から FR (後輪駆動) に変更することにもない、モーター冷却方法を変える必要があった。

本稿では、水素エネルギー社会をけん引する新型 MIRAI の空力性能開発について報告する。

用いたスタイリングと空力の両立、(3) 後輪駆動における駆動用モーター冷却と空力の両立、をコンセプトとして開発した (図 1)。

開発においては CFD と、1/1 スケールの空力検討車を用いた風洞試験を共に活用した。

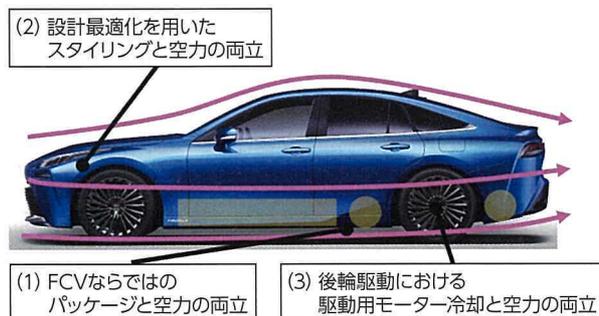


図 1 空力開発コンセプト

2 空力性能開発のコンセプト

新型 MIRAI の空力性能は、主に (1) FCV ならではのパッケージと空力の両立、(2) 設計最適化を

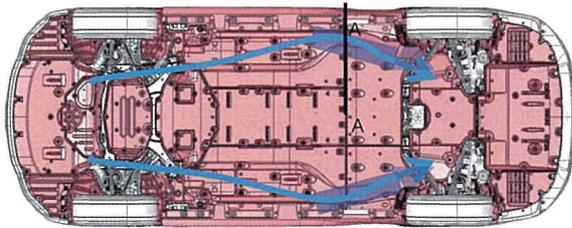
3 FCV ならではの床下流れ開発

FCV にはガソリン車のような高温になる排気管が無いので、大型の床下カバーを設定し床下を平滑化することで空気抵抗を低減できる (図 2)。しかし、

*1 Mid-size Vehicle Company MS 車両性能開発部
 *2 先進技術開発カンパニー モビリティ性能開発部

新型 MIRAI は航続距離確保のため、床下に水素タンクを3本搭載するため、アンダーカバー下面地上高を一部下げる必要があり、これは空力が理想とする床下の形状に大きな制約となった。

上記の影響で、エンジンルームからの排風も合流した床下流れは一部縮流され、側面へ流出する傾向となることが想定された。床下流れが車両側面へ流出することは、側面主流の流れを阻害するだけでなく、リアタイヤでの乱れも助長する。そのため、水素タンク搭載と両立できるリアタイヤ前方および内側の部位に着目し、フロアカバー形状を一部切り上げることで、車両後方へ導風した（図3）。



■ フロアカバー切り上げ部位
→ エンジンルームからの排風流れイメージ

図2 新型 MIRAI 床下カバー

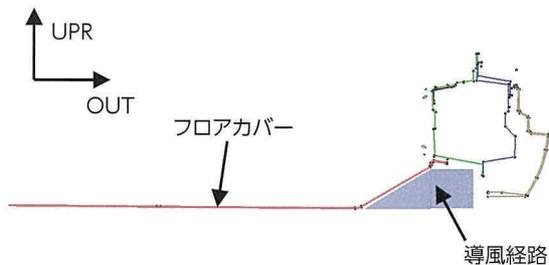


図3 フロアカバー断面 (A-A)

4 エクステリアデザインの設計最適化

新型 MIRAI の空力開発には、エモーショナルなスタイリングと空力性能を両立するために「設計最適化」を導入した。

「エクステリアデザインの設計最適化」では、対象とする部位に設計変数を定義し、メッシュモーフイングを用いた形状変更とCFDのプロセスを自動化することで、低 C_d となる多様なデザインを選択できるようになるため、エクステリアデザインの自由度を広げることができる。本開発では特徴的なFrバンパーコーナー形状に設計変数を定義し、スタイリングと空力の両立を図った。その結果、下図に示される剥離域を減らす形状を導き出し、 C_d 低減を実現した（図4）。

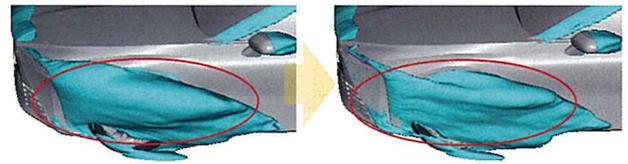


図4 エクステリアデザインの設計最適化前後比較

5 後輪駆動における駆動用モーターの冷却

新型 MIRAI は後輪駆動であり、駆動用モーターは車両後方に搭載されている。そのため、初代ではフロントバンパ左横に搭載されていた空冷式オイルクーラーをリアタイヤの後方に搭載している。（セダンでは世界初）

このオイルクーラー配置は、フロントバンパ配置に比べラム圧による導風ができない。また、送風用のファンを設定すると、ファン騒音の遮音と信頼性確保が困難である。そこで、車両背面と床下との圧力差に着目し、新しい導風構造とクーラー配置を考案した（図5）。

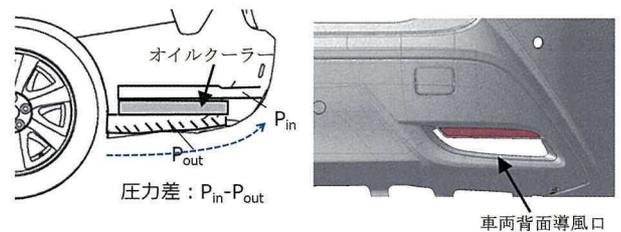


図5 新型 MIRAI の駆動用モーター冷却構造

車両背面と床下の導風口は、逆流が発生しないように配置検討し、直進時だけでなく旋回時の冷却性能確保も確認した。

また、床下の排風口は、冷却風排出が空力性能を悪化しないよう、フィンの形状も最適化した。

6 まとめ

新型 MIRAI の開発において、以下の空力技術を実現することで、航続距離約 850km (WLTC モード燃費にて) の達成と、エモーショナルなスタイリングの両立に貢献することができた。

(1) フロアカバーの形状工夫による新しい床下流れコンセプトで燃料タンク3本搭載のパッケージと空力の両立を実現。

- (2) 「エクステリアデザイン的设计最適化」を導入し、FCV ならではのスタイリングと空力の両立を実現。
- (3) セダンでは世界初オイルクーラーの車両後方配置でモーター冷却性能を満足させ、空力との両立を実現。

■ 著者



武田 英晃



細井 章仁



黒田 宙



兒玉 あおい

新型 MIRAI の衝突安全性能開発

Development of the Passive Safety Performance of the Second-Generation MIRAI

藤原 敏博*¹ 田中 洋雅*² 平形 修二*³
Toshihiro Fujiwara Hiromasa Tanaka Shuji Hirakata

要旨

二代目 MIRAI における使命は水素エネルギー社会実現のけん引である。本プロジェクトでは、初代 MIRAI から FC ユニットのレイアウトを変更し車両後方に第 3 タンクを追加している。そのなかで、衝突安全性能は重要な性能として開発初期から取り組んだ。各国衝突安全性能アセスメントにおいて、クラストップレベルの衝突安全性能の確保はもちろん、高電圧からの乗員保護と水素漏れ防止についても高い衝突安全性能を確保した。

Abstract

One of the missions of the second-generation MIRAI is to lead the way toward a hydrogen energy based society. The second-generation MIRAI features a different fuel cell (FC) system layout than the previous model, and has an additional third hydrogen tank at the rear of the vehicle. With the passive safety performance of the vehicle given priority, work began from the initial phase of the development. In addition to achieving class-leading passive safety performance in assessments around the world, the second-generation MIRAI provides high passive safety performance to protect occupants against high voltages, while also incorporating excellent hydrogen-leakage prevention performance.

キーワード 衝突安全

1 はじめに

新型 MIRAI は、航続距離拡大、エモーショナルなデザイン、居住性向上、優れた操縦安定性の確保をキーワードに開発した。そのなかで、各国レイティングにおけるクラストップレベルの衝突安全性能の確保と、高電圧からの乗員保護および水素漏れ防止性能の両立を実現した。

2 衝突時の乗員保護性能

前述のキーワードを実現するために、二代目 MIRAI は TNGA にもとづくプラットフォームに刷新。各国衝突安全アセスメントにおいて、クラストップレベルの衝突安全性能を確保。骨格に引張強度 980 以上の高張力材を採用し客室保護を図った(図 1)。

また、乗員が受ける衝撃緩和のため、前面プリテンショナ&フォースリミッター付きシートベルトと SRS エアバッグ(運転席・助手席エアバッグ+運転席・助手席ニーエアバッグ+運転席・助手席サイド

エアバッグ+カーテンシールドエアバッグエアバッグ)を設定した(図 2)。

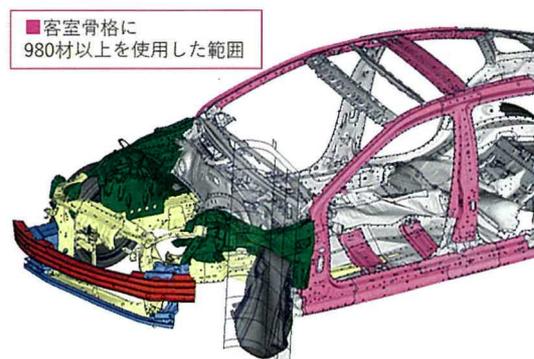


図 1 IIHS 微小ラップ変形モード (CAE)

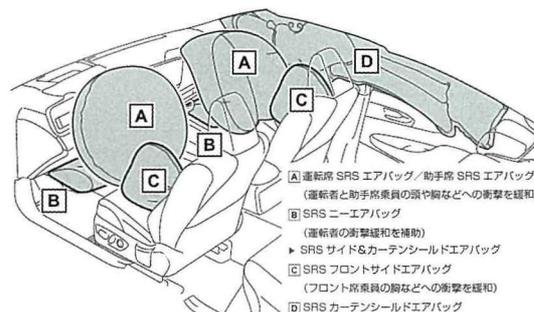


図 2 SRS エアバッグシステム

*¹ トヨタ ZEV ファクトリー B&D Lab
*² Mid-size Vehicle Company MS 車両性能開発部
*³ トヨタ ZEV ファクトリー FC 製品開発部

3 衝突時の歩行者保護性能

歩行者との万一の衝突時に、フロントバンパー前面の圧力センサーによりフード後方を瞬時にもちあげるポップアップフードシステムを採用（図3）。これにより歩行者の頭部への衝撃を緩和。

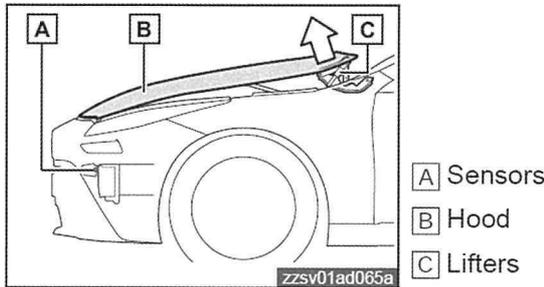


図3 ポップアップフードシステム

4 高電圧からの乗員保護と水素漏れ防止性能

号口に対しFCスタックをフロア下からフード下へ配置変更。万一の衝突事故の際、乗員および救助者を高電圧から保護するとともに、水素漏れの防止に寄与すべく、市場における多様な衝突形態を想定しFCスタックへの入力を調査。頑強なフレームでFCスタックおよび高電圧ユニットを保護する（図4）。

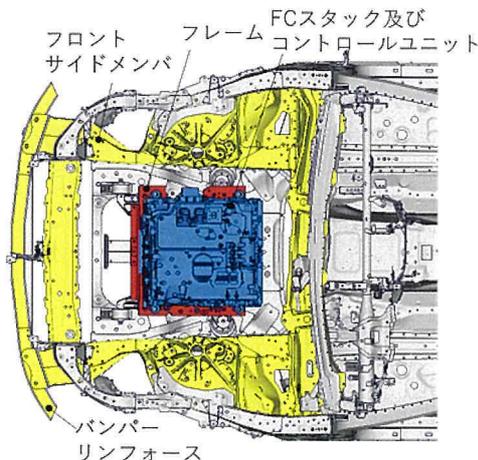


図4 前面衝突時のFCユニット保護（上面視）

市場事故実態調査によりタンク耐力>周辺構造物耐力となるように開発。衝突試験においても漏電、水素漏れ防止性能を確認した（図5）。さらに衝突時のGを利用し、駆動用バッテリーの高電圧と高圧水素タンクのバルブを遮断する制御を織り込み、ハード面とソフト面による施策を実施した。

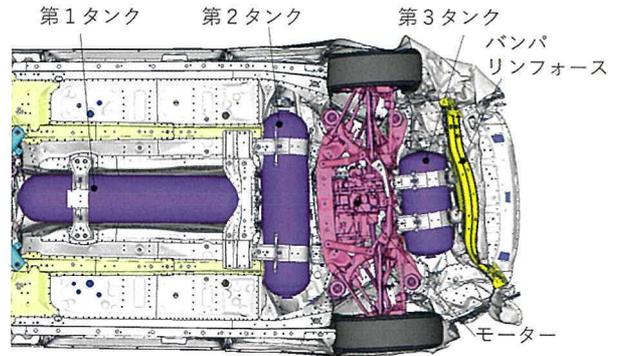


図5 後突時の高圧水素タンク保護（CAE 下面視）

5 おわりに

二代目 MIRAI の使命である、水素社会をけん引するため、環境性能のみならず衝突安全性能は不可欠である。MIRAI の開発では、航続距離拡大、居住性向上、エモーショナルなデザインと高い衝突安全性能を妥協することなく追求した。今回の開発で培った技術を今後のFCV 開発に活かすことで、サステナブルなエネルギー社会の実現に貢献していきたい。

■著者



藤原 敏博



田中 洋雅



平形 修二

新型 MIRAI の量産性と商品性を向上させる車両生産技術

Vehicle Production Engineering Technology to Enhance the Mass-Production Capabilities and Product Appeal of the Second-Generation MIRAI

横山 昌 ^{*1} Masaru Yokoyama	増原 麟 ^{*1} Rin Masuhara	那須 礼学 ^{*1} Yukinori Nasu	上月 宏登 ^{*2} Hiroto Kozuki
西條 豪師 ^{*2} Toshimitsu Saijo	小糸 昌範 ^{*2} Masanori Kokume	松岡 惇 ^{*3} Jun Matsuoka	浜本 洋志 ^{*2} Yoji Hamamoto

要旨

車両組立における生産技術開発では、新型 MIRAI のイメージカラーである“Force Blue Multiple Layers (以下フォースブルー)”の深みのある鮮やかで強い色を実現する塗装生産技術開発について、また、初代の少量生産から新型の本格量産生産の要となる FC ユニットの一体搭載への取り組みを紹介する。

Abstract

New production engineering technology was developed for the assembly line of the second-generation MIRAI, including a painting technology called Force Blue Multiple Layers that realizes the deep, vivid, and intense signature blue color of the vehicle. This article describes the development of this technology and the activities to enable integrated installation of fuel cell (FC) components, which was necessary to achieve the step up from the low-volume production of the first-generation MIRAI to full-scale mass-production.

キーワード 本格量産, 端部塗装工法技術, 塗装膜厚の均一化, FC ユニット一体搭載機

1 はじめに

新型 MIRAI の塗色開発方針は従来の環境訴求を意識したものではなく、エモーショナルなスタイリングと走りを一層際立たせることであり、新色フォースブルーは大人のスポーツマインドを刺激する“深く強いブルー”を訴求する塗色として開発を進めてきた (図 1)。



図 1 フォースブルーイメージ

また、近年、環境・エネルギー問題への対応が求められるなか、水素を燃料とする燃料電池自動車 (FCV) は、究極のエコカーとして水素社会実現に向けて欠かせない存在であり、新型では普及に向けて本格的な量産体制を目指し、初代の少量専用生産からガソリンエンジン車同様に量産混成ラインでの生産対応が急務である。

2 フォースブルー塗装技術

2.1 特徴

過去においては、レクサスのコントラストブルーレイヤリングなどの発色を実現してきたが、それよりもより彩度の高い青色を目指した。

塗膜構成の 1 ベースに、高反射率・高配向メタリック層を設け、その上層の 2 ベースに人間の目に透明感を映しだすため「高彩度の青」を重ねることで究極の力強い青を表現しようとした (図 2)。

^{*1} 生産本部 塗装成形生技部
^{*2} 生産本部 組立生技部
^{*3} 生産本部 製品化生技部

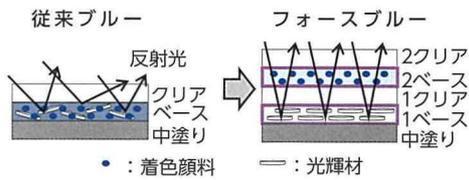


図2 塗膜構成

従来の顔料で高彩度の青を表現しようとすると、複数の顔料をつかうことで混色が発生し、発色を損なってしまう。そこで、新規青顔料を採用することで彩度、透明性の両方を表現することに成功した(図3)。

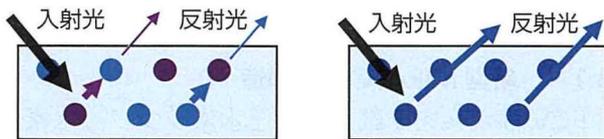


図3 2ベース顔料

2.2 塗装生産技術による主要課題と取組方針

図4に2ベース膜厚と明度のグラフを示す。従来塗色と比較して、フォースブルーは膜厚の変化による色の変動が大きく、これにより2つの主要課題が発生した。1点目は同一部位における個車ごとの膜厚のばらつきで、これはボデーとパーツとの色調のマッチング不良を引き起こす(図5)。

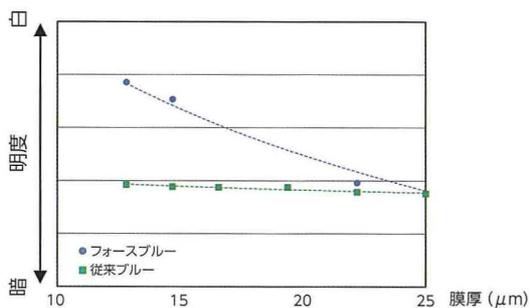


図4 2ベース膜厚と明度の関係



図5 色調マッチング不良



図6 色ムラ不良

対策として、ボデーとパーツの境界付近において各々の端部の膜厚を安定化させる必要がある。

2点目は同一面内での膜厚のばらつきであり、これは色ムラ(まだら模様のように見える不具合:図6)につながる。今回の開発では端部および一般部の膜厚ばらつきを抑える工法を確立した。

2.3 端部塗装工法技術の確立

現在、塗料ロス軽減のために塗装機で塗料を霧化する際に塗粒子を帯電させ、鋼板などの被塗物へ効率的に付着させる静電塗装を採用している。そのため塗装機によって霧化された塗粒子の付着部位は電気力線の向きに依存する傾向にある(図7)。

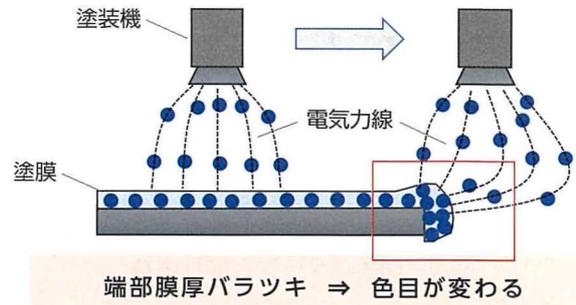
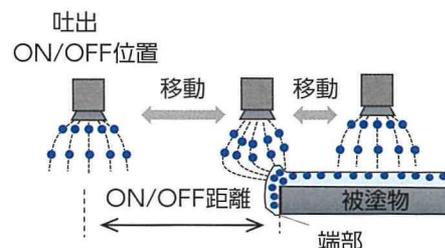


図7 静電塗装による膜厚への影響

端部を塗装する際、電気力線が端部に集中するため、端部は膜厚が厚くなる傾向にある。長時間塗料をだしながら端部を塗装すると塗膜が垂れるなどの二次不具合を誘発してしまう。そのため端部が適切な膜厚となるように端部付近で塗料の吐出開始・終了位置を切り替えている。以後、この切り替える動作を「ON/OFF」と言い、端部からON/OFFまでの距離を「ON/OFF距離」と言う。ON/OFF直後は霧化パターンの形成が不安定な状態にある。

以上の事実から図8に示すように、塗装機の色速度が遅い場合、霧化パターンの乱れは少ない一方で端部領域に塗装機が滞在する時間が長くなり、電界が集中してしまい膜厚がばらつく要因となる。塗装機の色速度が速い場合、電界が端部に集中しにくい一方でON/OFF時の影響が端部に及ぶため霧化パターンが端部塗装時に乱れて、端部の膜厚がばらついてしまう。今回、塗装機の移動速度と塗料の吐出開始・終了位置を最適化することで、膜厚変動を半減させ、個車ごとの色調のばらつき低減を実現している。



速度早い→パターン乱れ大、電界集中の影響小
速度遅い→パターン乱れ小、電界集中の影響大

図8 端部膜厚安定化

2.4 一般部塗装工法技術の確立

塗装機による塗装では回転力とエアの吹きだしにより塗料を霧状にして（微粒化させて）塗装しており、図9のように塗膜パターンを塗り重ねるように塗装することで均一な塗膜を形成している。

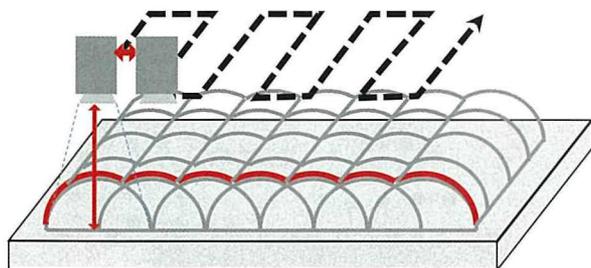


図9 塗膜パターンと塗り重ね

フォースブルーにおいては同一面内でいかに均一な膜厚で塗膜を形成させるかが重要となる。そのためには①均一なサイズの塗粒子で塗膜を形成すること（図10）、②塗粒子が被塗物に付着した際に形成される塗膜パターンの分布が均一であること（図11）が重要な要素となる。これらの条件が満たされないと同一面内で膜厚が均一でなくなり色の濃淡差が顕著に現れ色ムラという不具合につながる。

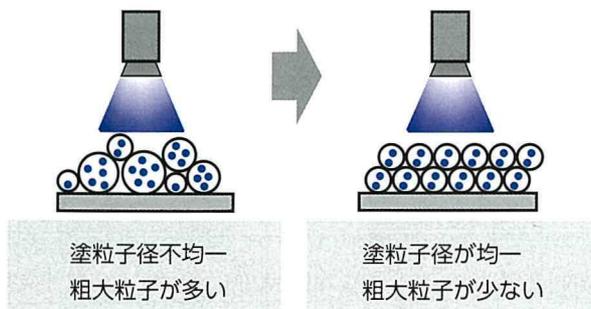


図10 塗粒子サイズの均一化

上記①に関して、従来の塗装条件では霧状になった塗粒子のサイズが図10のように不均一な状態で塗膜を形成していた。そのため同一面内で塗膜の不均一が発生し色ムラとなっていた。今回、塗装機の回転数と塗料の吐出量を最適化することにより塗粒子サイズの不均一さを最善できた。

また、②に関しては従来の塗装条件では塗装機の塗り重ね速度が速いため不均一な塗膜パターンとなっていた。そこで塗装機の速度を従来条件より遅く正常なパターンとなるように最適な速度を検討した。以上の塗装条件の改善により、より均一な塗膜パターン形成が可能となり色ムラを改善することができた。

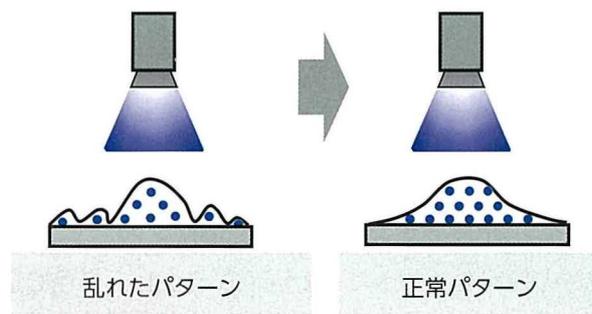


図11 塗膜パターンの均一化

3 FCユニット一体搭載 量産技術

3.1 新型MIRAIの基本構造

FCVは水素を貯蔵する高圧水素タンク、水素の圧力を調整するレギュレータ、これらを結合する高圧の専用配管、水素と空気中の酸素から電気を発生させるFCスタック本体、電気を送電する高電圧ケーブル、電気から駆動力を生み出すモータなどによって構成される（図12）。

新型MIRAIでは、3本の水素タンクが搭載されており、これによりスタックは初代のシート床下配置からフロントボンネット内に移動。モータは初代のフロント配置からリア配置に変更された。

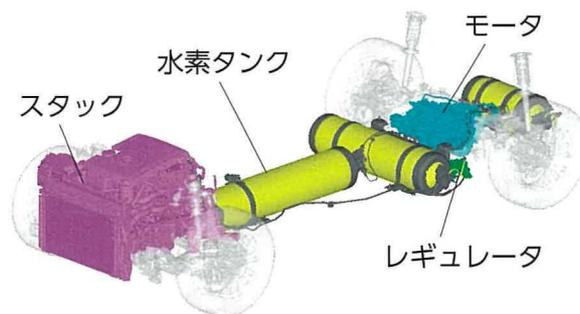


図12 新型MIRAIの基本構造概略図

3.2 ガソリン車との併産

ガソリン車との併産を考えた場合、スタックの搭載は、エンジン搭載工程にて代替することが可能である。またモータの搭載もリアサスペンションとデフのアセンブリの搭載とほぼ同等である。しかし、水素タンクの搭載はこれに類似する工程がガソリン車には無く専用工程となる。また水素タンク搭載時の締付部位が多いため、メインラインにて水素タンクを搭載した場合、専用工程を追加する必要があり、メインラインの大規模な変更が必要となる。そこで、

塗装工程と組立工程の間の搬送経路より新型 MIRAI のボデーのみをはねだし、専用工程で水素タンクを搭載し、組立工程に再投入することで、メインラインの変更規模を小さく、生産台数にフレキシブルに対応できるライン構成とした。

3.3 水素タンク搭載の量産課題

前述のとおり、FCV では水素タンクやレギュレータは専用配管で結合されるが、それぞれの相対位置精度が非常に重要となる。配管結合部からの水素漏れは既定の極微量以下に抑える必要があるため、配管先端シール部の形状は 1/100mm のオーダーで管理されており、締結トルクも専用の工具で保証されている。これらに加え初代の生産では、配管締結時に水素タンクとレギュレータ、専用配管の位置決めを行う高精度の専用治具（図 13）を用いることで、配管に発生する組付けひずみを最小限にしてきた。この専用治具は水素タンク搭載機の直上に配置されており、ここで組付けを行った後、ヘリウムを用いたリークテストを実施し、その相対位置関係のまま車両に搭載することで高品質な水素タンク搭載を実現してきた。初代は少量生産であったが故にこのような搭載方法が可能であったが、新型 MIRAI の生産台数を考えると同様の専用治具を有した搭載機を複数用意する必要があり、設備投資とスペースが課題となった。

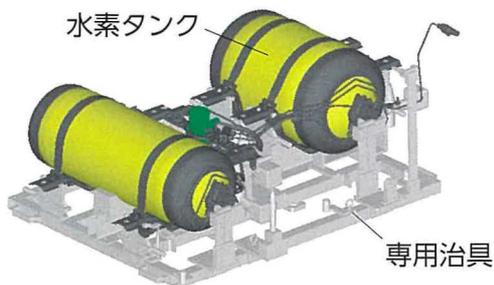


図 13 専用治具による組付け

3.4 新型 MIRAI の水素タンク搭載工程

新型 MIRAI では水素タンク専用トレー（図 14）を複数枚用意し、これらを搭載機上に移載して車両へ搭載を行う手法を選択した。これにより搭載機 1 機で量産対応が可能となり、投資とスペースの課題が解決された。この専用トレーは各々が自動搬送機（以下、AGV）に載せられ、各工程へと搬送される。専用トレー上には高精度の治具が配置されており、水素タンクと各所の相対位置が保証される。さらに

専用配管を締結する際にナットとともに配管が回転するのを抑制するアタッチメントが設定され、配管締結軸方向の精度向上も実現されている。この専用トレーは AGV によって水素タンク搭載工程へと搬送され、水素タンクを載せた状態で水素タンク搭載機へと移載される（図 15）。この際、水素タンクやレギュレータ、専用配管の相対位置が変わらないようにするため、トレーベース部の高い剛性確保が極めて重要であり、各所の相対位置が変わらないように車両に搭載することは、今回こだわったところでもある。

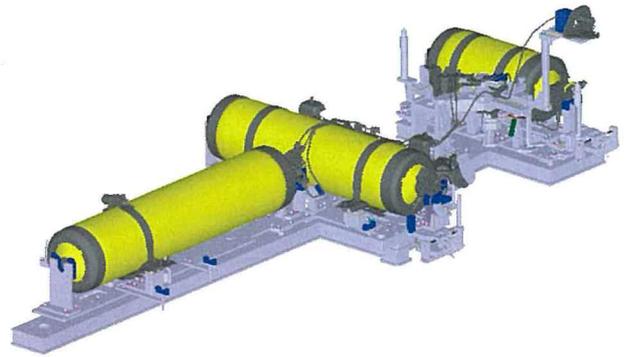


図 14 水素タンク専用トレー

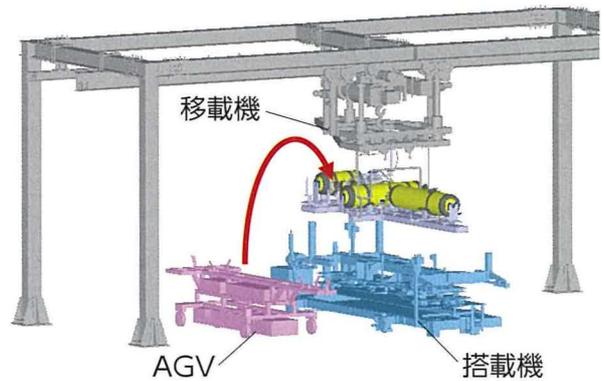


図 15 タンク移載工程概略図

搭載機に移載された水素タンク専用トレーは、リフターによってもちあげられた車両の下に搭載機とともに移動し、搭載機の昇降機構によって車両へ搭載される（図 16）。

このとき、搭載機と車両との位置決めに加え、水素タンク専用トレー自体にも位置決め用のピンを設定することで、車両と水素タンクの相対位置を高精度に実現している。これらによって高品質を確保しつつ、量産生産に対応した工程を実現できた。

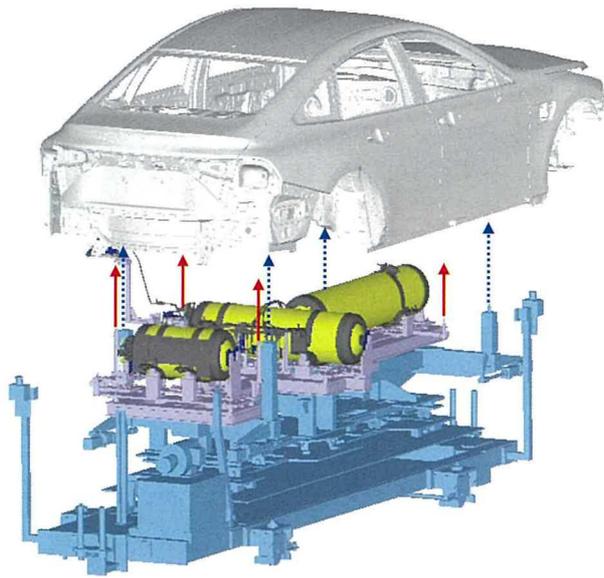


図 16 タンク搭載位置決め概略図

4 おわりに

はじめに、フォースブルーを量産可能な状態にするための生産技術確立について論じてきた。まだまだ課題は多いが、この取り組みで得られた技術的知見を今後の新規塗色の開発に活かしユーザーに色で選んでもらえるような付加価値の高い塗色を提供していきたい。

次は、おもに量産生産に向けた水素タンク搭載のライン構成と組付精度およびその取り組みについて述べてきた。他にもリークテストのサイクルタイム低減の取り組みなども行ってきた。今後もさらなる高品質、低コスト、高生産性に向けて生産技術を開発し、環境・エネルギー問題と水素社会に貢献していきたい。

最後に、ここに至るには社内外関係者の方々の協力が不可欠であった。このような貴重な機会を提供くださった方々、そして多大なる支援をくださった社内外の皆様に改めて感謝したい。

■ 著者



横山 昌



増原 麟



那須 礼学



上月 宏登



西條 豪師



小糸 昌範



松岡 惇



浜本 洋志

マイナスエミッションを実現するエアクリーナの開発

Development of Air Cleaner Realizing Minus Emissions

市川 哲也 *1 春日井 邦歩 *2 増田 浩一 *1
Tetsuya Ichikawa Kuniho Kasugai Koichi Masuda

圓山 裕人 *1 後藤 潤 *3 吉田 貴美子 *3
Hiroto Maruyama Jun Goto Kimiko Yoshida

要旨

新型 MIRAI 用に開発した、マイナスエミッション（大気浄化）を実現するエアクリーナについて紹介する。FCV は、走行中に大気汚染物質を排出しないことから、発電に使用する酸素を外気から取り込む際に異物を除去するエアクリーナの性能を向上させることで、大気浄化へ貢献可能となる。大気中の PM2.5 除去効率向上のためにダストフィルタへのエレクトレット加工追加、化学物質除去のためにケミカルフィルタの搭載を行い、大気浄化に貢献するエアクリーナを開発した。

Abstract

This article describes the air cleaner adopted in the second-generation MIRAI to help realize emissions that are cleaner than the surrounding air. Since fuel cell vehicles (FCVs) emit no atmospheric pollutants while driving, enhancing the performance of the air cleaner (the system that removes foreign objects from the external air used by the vehicle as an oxygen source for electricity generation) is an effective way of helping to clean the atmosphere around the vehicle. This new air cleaner was developed by applying electret processing to the dust filter to enhance the fine particulate matter (PM2.5) filtration efficiency, and by adding a filter that targets various chemical substances.

キーワード マイナスエミッション、大気浄化、燃料電池、ダストフィルタ、ケミカルフィルタ

1 開発の目的、背景

1.1 マイナスエミッション

近年、異常気象が世界的に多発。環境汚染も依然として問題視されている。トヨタ自動車では、「ホームプラネット」の精神で環境技術開発、エコカーの普及に取り組んでいる。

燃料電池車（FCV）は水素と大気中の酸素を化学反応させ発電を行い走行するため、吸入する大気を浄化する吸気系が必要となる。この点に着目し、吸気系の浄化機能を向上させ従来のゼロエミッションから、マイナスエミッション、つまり吸気した大気を浄化し排気することで、走れば走るほど大気がきれいになる車を目指した（図 1）。



図 1 マイナスエミッションイメージ

2 大気浄化

2.1 大気浄化について

大気汚染物質は、PM2.5 などの微粒子と有害な化学物質に二分される。PM2.5 は、微細な粒子で健康影響の懸念がある。PM2.5 は元々粒子状で存在する 1 次粒子と、大気中の化学物質から生成される 2 次粒子に分かれる。2 次粒子が全体の 60%ほどとされることから、直接 PM2.5 を除去することに加え、生成要因の化学物質を除去することも大気浄化のために必要と考えられる。

PM2.5 は、ダストフィルタの性能向上により高効率で除去。化学物質の除去には、ケミカルフィルタの追加を行った。

*1 Lexus Int.Co. レクサスポデー設計部
*2 クルマ開発センター TNGA推進部
*3 トヨタ紡織株式会社

2.2 除去対象物質と除去性能目標

除去対象物質と効率目標を、大気浄化への貢献、燃料電池の性能劣化防止、吸気系の性能の観点より決めた。

① PM2.5 除去効率は、市場の PM2.5 の濃度から、高濃度と低濃度の環境を比較し、その比率から 99.5% 以上とした。

② 化学物質の除去対象は下記を考慮した。

- ・ PM2.5 の発生要因物質：SO₂、NO₂、NH₃ など
- ・ 従来の自動車の排気物質：SO₂、NO₂、HC など
- ・ 燃料電池に影響のある物質：SO₂（触媒を被毒）

上記より SO₂、NO₂、NH₃ を主な除去対象とし、燃料電池の劣化防止を考慮し SO₂ 除去効率 90% 以上とした。その他の物質は SO₂ 除去可能な仕様で可能な限り除去することとした。

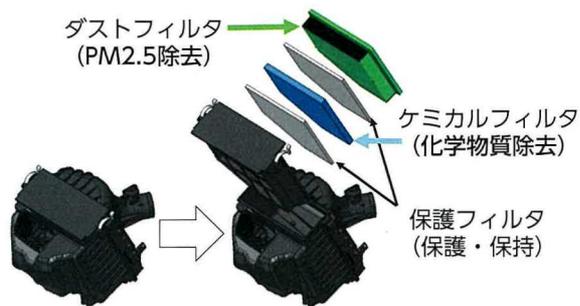


図3 エアクリーナ構造

3.3 PM2.5 除去性能向上

PM2.5 除去効率向上のため、ダストフィルタの樹脂繊維へエレクトレット加工の追加を行った(図4)。

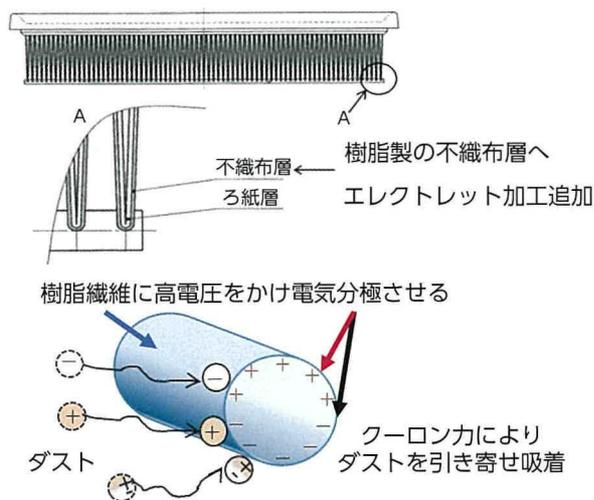


図4 エレクトレット加工追加について

3 大気浄化実現方法

3.1 FCV 吸気システム

FCV の吸排気システム概要を図2に示す。

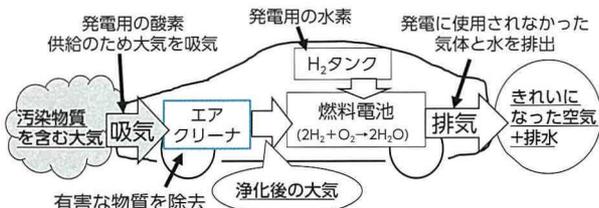


図2 燃料電池システムによる大気浄化概要

大気はエアクリーナで浄化され、発電に使用される。発電で使用されない物質はそのまま車外へ排気されるため、エアクリーナの浄化性能を強化し大気中の汚染物質を除去すれば、走れば走るほど大気がきれいになる車を実現可能。

3.2 エアクリーナ部品構成

図3に開発品の構成を示す。ケミカルフィルタは、吸着物質の脱落の可能性があるため、ダストフィルタ上流へ搭載し、脱落してもダストフィルタで捕捉可能な構造とした。上流への搭載により、異物でのケミカルフィルタ閉塞、目詰まり、ダストフィルタとの干渉による破損が考えられるため、保護フィルタで挟む構造とした。エアクリーナはカセット式とし、保持構造とメンテナンスの簡易化を実現した。

開発品と既存のフィルタの性能比較を図5に示す。エレクトレット加工を追加することで、PM2.5 除去効率は、96.0%から99.7%に向上し目標の99.5%以上を達成。エアクリーナ用ダストフィルタとしては世界TOPレベルの性能を実現した。

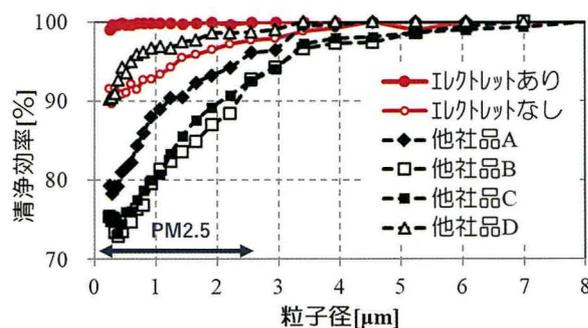


図5 ダストフィルタ性能

3.4 有害化学物質除去機能追加

ケミカルフィルタの触媒・吸着物質は、常温でSO₂を除去可能でNH₃の除去も可能な二酸化マンガンを選択。また除去効率向上のためアルカリ添着をほどこした活性炭も設定した。SO₂、NH₃はMnO₂と反応し酸になり活性炭に吸着。SO₂、NO₂はアルカリ添着剤と反応し塩になり活性炭に吸着される。

基材は、圧力損失が小さく、除去目標達成のために必要な表面積を確保可能なアルミハニカムとした(図6)。結果、市場想定の評価条件で車両寿命相当走行でのSO₂除去効率94%を達成した。ケミカルフィルタがなければそのまま排出されるNO₂、NH₃も40%以上除去する性能を確保できた。

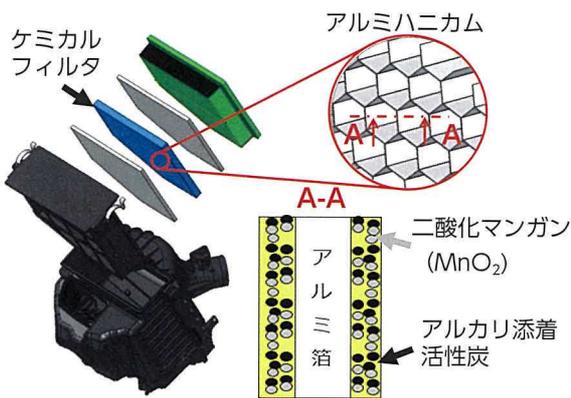


図6 ケミカルフィルタイメージ

4 まとめ

マイナスエミッションの実現を目指し、ダストフィルタへのエレクトレット加工追加と、ケミカルフィルタの搭載を行った。結果、PM2.5除去効率99.7%、SO₂除去効率94%と目標性能を達成し、大気浄化に貢献する吸気系を開発できた。また燃料電池性能へ影響のある物質を除去するため、燃料電池の性能低下の抑制にも寄与する。

大気浄化への貢献度は、吸入量や汚染状況などによるため定量的に示すことが難しいが、新型MIRAIが、一年間で1万km走行すると人間一人の年間の総吸入大気量と同等量の大气を浄化することが可能。今後、マイナスエミッションを有する車両が普及するほど、汚染されがちな幹線道路沿いの環境改善などの効果はあるものと考えられる。

開発にあたって、ご協力いただいた多くの皆様に深く感謝申し上げます。

■著者



市川 哲也



春日井 邦歩



増田 浩一



圓山 裕人



後藤 潤



吉田 貴美子

Toyota Safety Sense の開発

Development of Toyota Safety Sense

新保 祐人 *1 田中 佑典 *1 勝田 寛人 *1
 Yuto Shimbo Yusuke Tanaka Hiroto Katsuda

王 晨宇 *1 石原 正巳 *2 山下 敬司 *2
 Chenyu Wang Masami Ishihara Keiji Yamashita

要旨

モビリティ社会の究極の願い「交通事故死傷者ゼロ」の実現のため、これまでの車両開発で培われた最新の安全技術やノウハウを織り込み、先進安全システムをパッケージ化した Toyota Safety Sense (TSS) を改良。従来の TSS の「単眼カメラ+ミリ波レーダー」の構成はそのままに、機能追加や作動範囲を拡大し、交通事故や事故死傷者のさらなる低減、ドライバーの負担軽減を目指した。また、世界の予防安全アセスメントに対応した高い予防安全性能を実現した。

Abstract

The ultimate wish of a mobility society is to reduce traffic accident casualties to zero. To help realize this ambition, the Toyota Safety Sense (TSS) packages of advanced safety systems are being continually enhanced to incorporate the latest safety-related technologies and know-how nurtured through vehicle development. Based on the existing monocular camera + millimeter wave radar sensor configuration, further functions have been added and the operational scope of the packages has been expanded to help further reduce traffic accidents and casualties, while lowering driver workload. The resulting impressive active safety performance of the TSS packages successfully satisfies the requirements of active safety assessments carried out around the world.

キーワード 先進安全, プリクラッシュセーフティ, レントレーシングアシスト, ドライバー異常時対応システム

1 はじめに

従来の TSS では、追突や路外逸脱の一部の事故形態に対応してきた (図 1)。交通事故や事故死傷者のさらなる低減に向け、右直、正面衝突の対応が重要である。また近年、高齢者ドライバーや職業ドライバーの交通事故が社会問題化しており、ドライバーの負担軽減、異常状態の対応が求められている。

従来の TSS に対し、プリクラッシュセーフティ (PCS) とレントレーシングアシスト (LTA) の支援範囲の拡大、ならびにドライバー異常時対応システム (EDSS) の機能追加をした (図 2)。センサーは、従来の「単眼カメラ+ミリ波レーダー」の構成を流用 (図 3)、アルゴリズムを改良することで、著しい技術進化のある予防安全技術を迅速に取り入れることを狙いとす。

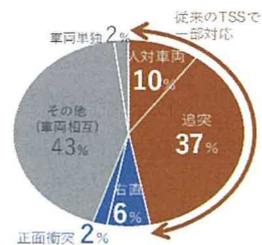


図 1 事故カバー率

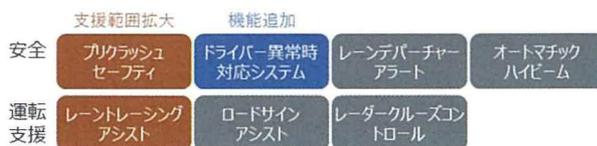


図 2 Toyota Safety Sense の機能



図 3 センサー構成

*1 先進技術開発カンパニー 自動運転・先進安全開発部
 *2 Mid-size Vehicle Company MS 自動運転・先進安全開発部

2 プリクラッシュセーフティ 交差点対応

2.1 開発の狙い

従来の PCS は、主に自車の直進を前提として、先行車や道路を横断する歩行者（自転車）を検知して警報・ブレーキを作動していたが、今回新たに交差点右折時（右側通行時は左折時）の対向車や右左折後の横断歩行者にも対応した。

交差点右左折時のように自車旋回時は、センサーから見える周囲物体の動きが自車直進時と大きく異なるため、衝突判断がより困難となる。そこで、右折時の対向車や右左折後の横断歩行者に対して PCS を作動できるように衝突判断ロジックに改良を加え、PCS の作動シーンを拡大した。

2.2 機能とアルゴリズム

図 4 に今回 PCS で新たに対応した作動対象シーンを示す。図中で白色の車両が自車を表し、黒色の車両・歩行者が PCS 作動対象を表す。自車と同一進行方向で道路を横断する歩行者は、センサーの画角外となるため作動対象外となる。

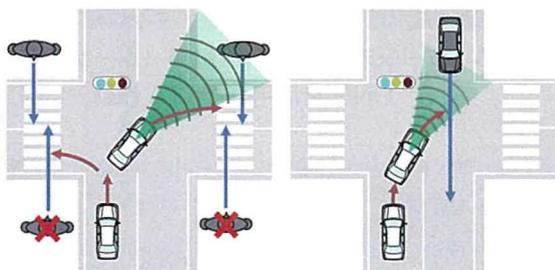


図 4 作動対象シーン

以下では右折時対向車を例に、交差点右左折時の衝突判断ロジックの概要を説明する（図 5）。

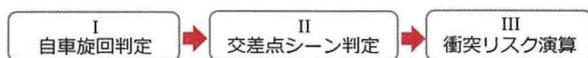


図 5 衝突判断処理の流れ

I 自車旋回判定

ドライバーの操舵角度や自車速などの情報から、自車が交差点を旋回中か否か判定する。

II 交差点シーン判定

自車右折時、自車から衝突危険性のある対向車の軌跡（相対軌跡）が大きく蛇行する（図 6）。対象

位置を追跡し、右折時対向車特有の軌跡で接近する対向車については PCS 作動対象と判定し、衝突リスクを演算する。

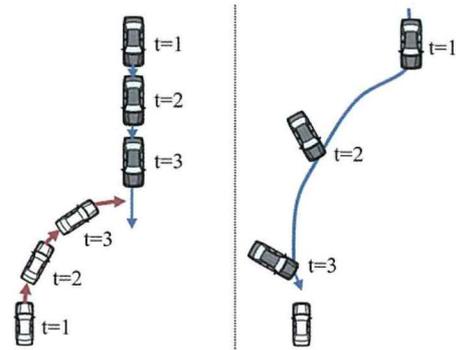


図 6 自車と対向車の位置関係（右折時）

III 衝突リスク演算

従来の PCS では、自車と対象がぶつかるまでの時間（衝突時間）から、対象との衝突リスクを演算している。しかし自車右折時は、対向車が蛇行する相対軌跡を描くため、衝突時間だけでは正確な衝突リスクを算出できない。そこで、自車が対向車の予測進路内に入るまでの時間（交差時間）を算出し、衝突時間と交差時間を組み合わせて衝突リスクを演算する（図 7）。衝突リスクが一定値を超える場合は警報およびブレーキを作動させ、対向車の予測進路内に入る前に減速・停車することで被害軽減または衝突回避をサポートする。

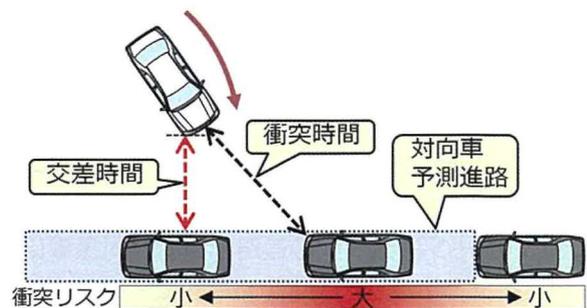


図 7 衝突リスク演算のイメージ

以上の衝突判断ロジックにより、交差点での主要な事故形態に対応した PCS を実現した。

3 ドライバー異常時対応システム

3.1 開発の狙い

トヨタでは、Lexus Safety System +A (LSS+A) においてドライバー異常時対応システム (Emergency

Driving Stop System: EDSS) を商品化している。今回の TSS 改良にて、同等の機能を他車種へ広く普及展開すべく、システム構成を見直し、LSS+A 同等の機能を実現した。例えば、TSS 設定車両に標準装備される DCM (Data Communication Module) によって、EDSS による緊急通報システムへの自動接続が車種の制約なく実施できるようになっている点などが挙げられる。

3.2 EDSS 概要

本システムは、LTA 作動中に、ハンドル手放しを含む無操作運転状態が継続していることを監視することでドライバーの状態を推定し、運転操作が困難な状態と判断された場合は、周辺報知を行いながら走行車線内で減速・停止して衝突事故の回避および被害低減に寄与するシステムである。システムは 4 つのフェーズで構成される。

① 警告 1 フェーズ

LTA 作動中にドライバーの手がハンドルから離れると表示によるドライバー注意喚起を行い、ドライバーが手放し状態を継続した場合に警告 1 フェーズが開始される。システムは表示と警告音でドライバーに注意喚起し、運転操作を促す。

② 警告 2 フェーズ

表示と警告音によるドライバーへの注意喚起に加えて速度抑制を行ない、ドライバーのアクセル操作を誘導する。また、ハザードを自動点滅させて後続車両への注意喚起も行う。さらに、マルチメディアのミュートをし、警告ブザーを乗員が聞きとりやすくする。

③ 減速停止フェーズ

ホーンの自動吹鳴を行い、車外に異常状態を報知しながら、走行車線内で車両を停車させる。ホーンの吹鳴パターンは、周囲の道路利用者が対象車に注目するよう、短い 3 発吹鳴を断続的に続ける。

④ 停止保持フェーズ

停車後はブレーキホールド機能により停車状態を保持し、緊急通報システムへの自動接続により、オペレータからもドライバーに対して問いかけを行う。問いかけに回答がなかった場合は、救急車両の要請を行い、運転者の救命救護や、交通規制に繋げる。車両の停止後は、ドアを自動開錠し、救護者が素早く救助できるようにする。

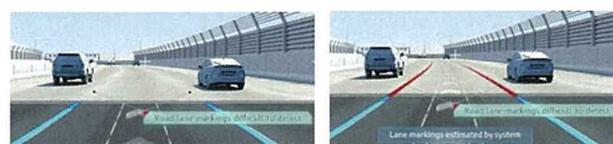
4 レントレーシングアシスト 支援範囲拡大

4.1 開発の狙い

LTA 支援範囲の拡大およびドライバーフィーリングにあったカーブ減速を実現するため、深層学習による道路認識率向上・カーブ速度抑制機能を織り込んだ。

4.2 深層学習による道路認識率向上

道路上にあるレーンマーカーは、かすれなどによる影響で目視でも確認しづらい状況がある。そのような状況において、DNN (Deep Neural Network) を活用することで道路認識率を向上させ、LTA が長時間継続的に作動することを実現した (図 8)。DNN による走行路推定は、①画像上の領域を分類 (緑：自車線の走行可能領域、青：自車線以外の走行可能領域) し、②自車線の走行可能領域の境界線を抽出 (赤) することで実現している (図 9)。



従来 TSS (レーン未検知) 改良後 (レーン検知)
図 8 DNN を活用した LTA 作動



①領域分類 ②境界線抽出
図 9 DNN による走行路推定

4.3 カーブ速度抑制機能

従来のカーブ速度抑制機能では、LSS+A にて、ナビゲーションの地図データにもとづきカーブに対して減速支援を行う。そのため比較的高価な地図データが必要になる。今回の TSS 改良にて、同等の機能を他車種へ広く普及展開すべく、単眼カメラのみによるカーブ認識に前述の DNN を活用。DNN によるカーブ認識を用いて、カーブの大きさにあわせてあらかじめ減速する。それによりカーブでの LTA 作動継続を実現している。

高い車速でカーブに進入する場合、カーブ走行中の横 G が LTA 作動を継続できる最大横 G 以下にな

るように減速させる。様々なドライバーのカーブ R 毎の減速データを解析し（図 10）、走り方に応じて減速量をドライバーがカスタマイズ設定で切り替えることでドライバーの自然な運転感覚を実現した。

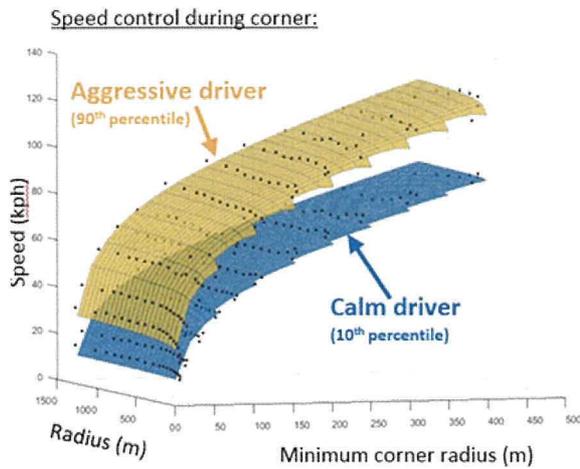


図 10 カーブ R に応じた車両速度解析

■ 著者



新保 祐人



田中 佑典



勝田 寛人



王 晨宇



石原 正巳



山下 敬司

5 おわりに

従来の TSS に対して、支援範囲の拡大、機能の追加を行い、さらなる安全性の向上とドライバー負荷軽減を狙いとしたシステムを開発した。改良した TSS は新型 MIRAI をはじめとした 2020 年の新型車から順次搭載を予定している。

最後に、TSS の開発にあたり多大なご協力をいただいた株式会社デンソー様に深謝の意を表する。

■ 参考文献

- (1) ITARDA information No. 133

高度運転支援 Toyota Teammate Advanced Park の開発

Development of the Toyota Teammate Advanced Park Function

松永 康孝 *1

Yasutaka Matsunaga

水瀬 雄樹 *1

Yuki Minase

日栄 悠 *1

Yu Hiei

要旨

「Toyota Teammate」は、クルマが人から運転を奪うのでも、単に人にとって代わるのでもなく、人とクルマが気持ちの通った仲間のようにお互いを高めあい、ともに走るというトヨタ自動車独自の自動運転の考え方『Mobility Teammate Concept』にもとづいて開発されたシステムである。

本稿では「Toyota Teammate」としてのAdvanced Park機能について紹介する。

Abstract

Toyota Teammate is an advanced driving assistance system that was developed based on the Mobility Teammate Concept, Toyota's unique approach to automated driving. This concept treats the driver and vehicle as partners and aims to enhance the mutual understanding between them, rather than simply taking over control and replacing the role of the driver. Toyota Teammate consists of two assistance functions called Advanced Drive and Advanced Park. This article describes the Advanced Park function of the Toyota Teammate driving assistance system.

キーワード Toyota Teammate, Advanced Park

1 まえがき

新型MIRAIは、人の感性に寄り添った最新の高度運転支援技術として「Toyota Teammate」を採用した。「Toyota Teammate」は、クルマが人から運転を奪うのでも、単に人にとって代わるのでもなく、人とクルマが気持ちの通った仲間のようにお互いを高めあい、ともに走るというトヨタ自動車独自の自動運転の考え方『Mobility Teammate Concept』にもとづいて開発した。

ドライバとクルマが対話のなかでお互いの状態を確認し補いあうことで、安心安全な運転、快適な移動につなげる。技術が進歩しても常にヒトが運転の中心にいる。これが「Toyota Teammate」のこだわりである。

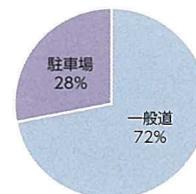
「Toyota Teammate」としてのAdvanced Parkについて、その詳細をまとめる。

2 Advanced Park

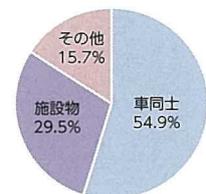
2.1 背景

世の中で発生する自動車事故の内、約3割が駐車場で発生している（図1）。駐車場内は周辺の車両や施設物などの様々な障害物が複雑に存在しているためと考えられる（図2）。

人々が苦手とする運転行動のアンケート結果を図3に示す。苦手な運転の上位である「駐車」は、周辺の安全確認とともに、ステアリング・アクセル・ブレーキ・シフト操作など同時に複数の運転操作が必要になる（図4）。以上から、運転や駐車が苦手なドライバも安心して使えるよう、安全性と利便性を両立したAdvanced Parkを開発した。



出典 「駐車場事故の実態」2012年
（一般社団法人日本損害保険協会）

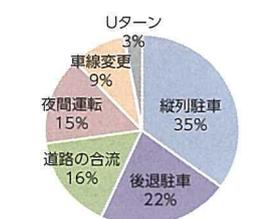


出典 「駐車場事故の実態」2012年
（一般社団法人日本損害保険協会）

図1 自動車事故発生状況

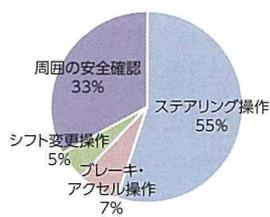
図2 駐車場内の事故内訳

*1 先進技術開発カンパニー 自動運転・先進安全開発部



出典 2013マイナビニュース調べ

図3 苦手の運転



出典 低速走行時の操作負担軽減に関する考察[2004]

図4 駐車時負担になる操作

2.2 概要

Advanced Park の支援対象を図5に示す。①並列駐車、②縦列駐車、③縦列出庫とし、並列駐車は後退駐車を優先した(図3より)。支援開始位置は、駐車スペースの真横とし、横付け停車後スイッチを初回操作するだけで、駐車が苦手なドライバーでも簡単に支援開始ができるようにした。

Advanced Park が複数駐車スペース候補を見つけた場合、マルチディスプレイの車両全周囲を俯瞰した映像(パノラミックビューモニタ)上に最適な駐車スペースを提案するとともに、支援可能な候補駐車スペースも複数表示しドライバーが選択できる仕組みとした。

Advanced Park はドライバー監視下での運転支援(自動運転レベル2)を前提とする。

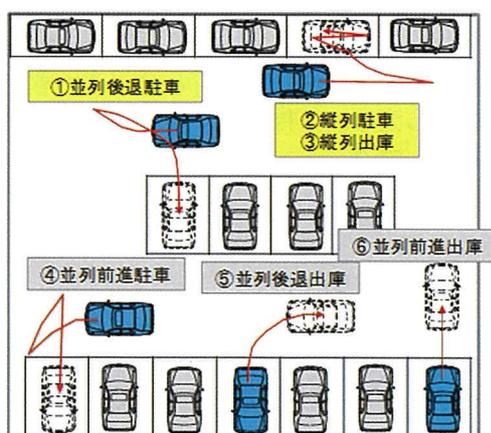


図5 支援対象

2.3 開発コンセプト

2.3.1 車両周囲認識で安全確保…「安心・安全に使える」

前述のとおり、駐車場内の車両や施設物などの障害物へ接触する事故が発生している。そこで、周辺

障害物を検知した場合は表示と報知でドライバーに注意喚起、周辺障害物への衝突が避けられないと判断した場合は、緊急ブレーキで衝突回避支援をすることで安心・安全な駐車ができると考えた。

また、ステアリング・アクセル・ブレーキ・シフト操作を支援することでドライバー負担を軽減でき、ドライバーは周辺安全確認に注力できると考えた。

2.3.2 わかりやすいHMI…「簡単に使える」

従来の駐車支援システムへの不満点(表1)を見ると、「No1 モード選択がうまくできない」、「No3 シームレスに使える」、「No4 車庫入れが開始できない」、「No5 希望駐車枠が表示されない」という結果がある。これは、駐車支援を開始するための操作方法や操作手順が複雑なためと考えられる。どんなドライバーでも簡単に使えるよう、シンプルな表示と少ない手順で使える必要があると考えた。

2.3.3 ムダのない駐車…「スムーズに駐車できる」

従来の駐車支援システムへの不満点(表1)を見ると、「No6 操作に時間がかかる」、「No7 切返しが多い」という結果がある。Advanced Park を使用した場合、ドライバー自身で駐車した場合より、スムーズに駐車できないと不満に感じてしまうと考えられる。そこで、Advanced Park は一般ドライバー並みの時間で駐車できる必要があると考えた。

2.3.4 支援範囲を拡大するメモリ機能…「白線がなくとも使える」

従来の駐車支援システムへの不満点(表1)を見ると、「No2 使いたい駐車場で使えない」という結果がある。また、地域別の駐車支援ニーズ(表2)によると、並列駐車と縦列駐車以外に、自宅の駐車スペースに駐車したいというニーズがあった。そこで、自宅の駐車スペースのような白線がない駐車スペースでも運転支援が必要であると考えた。

表1 従来駐車支援システムへの不満点

No	要因	[%]
1	モード選択がうまくできない	35
2	使いたい駐車場で使えない	30
3	シームレスに使える	24
4	車庫入れが開始できない	23
5	希望駐車枠が表示されない	23
6	操作に時間がかかる	19
7	切返しが多い	17

表 2 地域別の駐車支援ニーズ

国内		北米	
駐車シーン	%	駐車シーン	%
並列駐車	80	縦列出庫	46
縦列駐車	78	縦列駐車	37
自宅駐車	28	自宅駐車	20

(出典：2007年度 MacNET 調査結果)
(出典：2010年度調査結果 The Planning Edge 社)

2.4 技術的取り組み

2.4.1 魚眼カメラと超音波ソナーによる全方位認識

魚眼カメラによる静止物と移動物の認識を移動ステレオとオプティカルフローをベースとした手法で実現した。超音波ソナーと魚眼カメラの認識においては、それぞれの特徴を活かし、その結果を組みあわせることで、高い認識性能を確立した。この認識結果を用いることで、車両周囲において接触回避支援を実現することができた (図 6)。

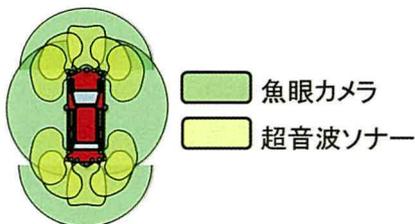


図 6 センサ構成とセンシングイメージ

駐車区画線の認識において、単線/二重線で区切られた駐車枠に加えて、十字、斜め線で描かれた駐車枠、白線以外で描かれた枠線、かすれ線、公共で存在する駐車枠候補を捉えられるよう、高いロバスト性を実現した。

夜間において、車両側面の照度が足りず、カメラの物標認識が低下することから、近赤外線の照明を左右のカメラ付近 (アウトミラー内) に搭載し (図 7)、夜間における認識性能を確保した。

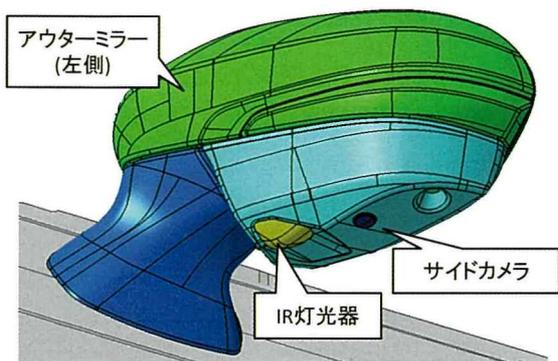


図 7 アウターミラー内 IR 灯光器

2.4.2 わかりやすい HMI

2.4.2.1 ドライバ操作とディスプレイ表示

少ない操作回数で使えるようにするために、起動スイッチとディスプレイ上の駐車開始スイッチを片手で操作、且つ、最短 2 回のスイッチ操作支援開始でできるようにした。また、Advanced Park の表示はパノラミックビュー 1 か所に集約し、駐車中の視線移動の負担を少なくした。以下、Advanced Park 中の表示をシーン毎に述べる。

【駐車開始前】

図 8 に示すように、ドライバが駐車スペースとその周辺を確認できるように、車両上方からの視点で 3D 表示、ドライバが選択した駐車スペースに応じて視点切り替えを行う。駐車スペース設定は、駐車方法 (縦列/並列) 切り替え、他の駐車スペースへの切り替えを同一画面内で行える。

【制御中】

シフトに応じた進行方向映像と車両周辺のパノラミックビューで周辺状況をわかり易く表示する (図 9)。

【駐車完了後】

車両周辺を 1 周まわる視点で 3D 表示し、駐車スペース周辺表示と駐車でき栄えを演出した (図 10)。

2.4.2.2 車両周囲の障害物表示

車両周囲の障害物は、パノラミックビュー上で車両全周囲 (28 分割 10 段階) のクリアランスソナーの表示をした。また、同時にカメラ映像上には立体的な壁をイメージしたクリアランスソナー表示を障害物に重畳し直感的に検知している障害物がわかるようにした (図 9)。

自車に移動接近する障害物は、前進・後進それぞれ 5 方向の矢印で障害物の存在と方向を直感的にわかるようにした (図 11)。



図 8 駐車開始前の表示

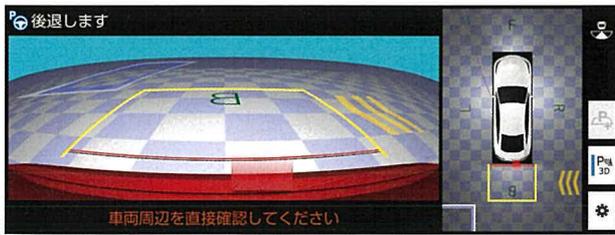


図 9 駐車中の表示



図 10 駐車完了時の表示

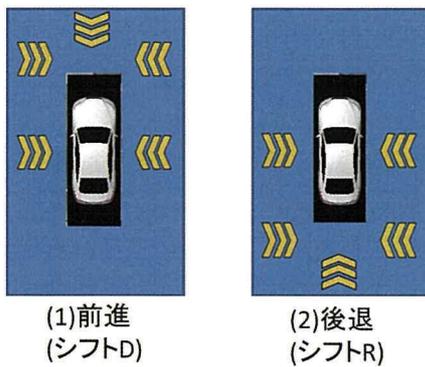


図 11 移動接近する障害物表示

2.4.3 車両制御

2.4.3.1 並列入庫の前進位置

駐車時間を短縮するには、切り返しを少なくすることが有効である。切り返しが多くなると、余分な走行距離が増え、進路変更にも時間を要するためである。図 12 は駐車が得意なドライバーと苦手なドライバーが並列入庫する際の前進停車時のイメージ図になる。(1) 得意なドライバーの場合、前進時に駐車スペースに寄せたうえで駐車場の道幅を考慮しながら、駐車スペースとは反対側に車両の頭を適度に振り、その後の後退で駐車スペースに到達しやすい適切な位置で停車する。そのため、後退時には、車両の向きを変える量が小さくなり、駐車スペースへ位置あわせしやすくなる。一方、(2) 苦手なドライバーの場合、駐車スペースに寄せられず、車両の頭も適度に振れない場合が多い。後退では外輪差で隣接車両に接触しないようにするとステアリングが十分切れずに大回りになってしまう。その結果、駐車途中

で切り返しが必要になり、大幅な時間のロスにつながる。上記を踏まえ、Advanced Park が車両周辺の障害物を検知し、駐車環境に応じて適切な前進位置へ誘導することで、切り返しを少なくする経路となり、スムーズな駐車に繋がった。

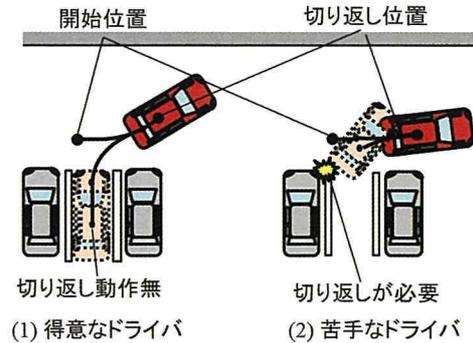


図 12 並列駐車時の駐車経路

2.4.3.2 速度制御

駐車時間を短縮するには、速度を上げることが必要だが、背反としてドライバーの安心感を損ねる恐れがある。駐車スペース外は、前進中など周辺障害物とのクリアランスが広い場合、高い速度でも安心感があるのに対して、駐車スペース内は隣接する駐車車両や障害物とのクリアランスが狭く、高い速度だとドライバーが不安を感じる。よって、駐車スペース内は駐車スペース外より速度を低くすることで、駐車時間短縮させながらドライバーの安心感に配慮した。

また、速度の感じ方にはドライバーの運転技量やシステムへの慣れによって個人差があるため、カスタマイズでドライバーが速度変更できるように使い勝手にも配慮した。

2.4.4 ドライバとの協調

Advanced Park 中にドライバーが介入操作をする場合がある。ドライバーが誤って操作したのか、意図的な操作なのかを確認するために、介入時は車両停止とともに運転支援を中断し、介入意図の確認と安全確認をしてもらうことにした。ただし、ブレーキ介入操作についてはドライバーの減速意図であると考えられるため、介入操作を受け付けることにした(表 3)。以上より、安全の範囲内でドライバー意図を反映し、安心・安全に使えると考えた。

表 3 ドライバ介入操作時の対応

ステアリング	アクセル	ブレーキ	シフト
停止	停止	継続	停止

2.4.5 メモリ機能

自宅駐車場のような白線のない駐車場では、あらかじめ駐車スペースを登録しておくことで、次回から白線のある駐車場と同様の使い方で Advanced Park を使用することができる。駐車スペースの位置は環境やドライバーによっても異なる（道路から奥に離す、運転席側を壁から離すなど）ため、ドライバーは登録開始時にディスプレイ上で駐車スペースを調整する。その際、スペースが動かされる度に駐車経路も生成し、駐車できないスペースは設定できないようにした。設定後、Advanced Park で駐車をするが、駐車スペース設定時の車両の傾き、経路上の段差、勾配、映像の解像度などの影響により、ドライバーが想定した駐車位置と異なる場合がある。登録完了する前に駐車スペース位置を微修正できるようにし、ドライバーの想定している位置に登録できるようにした（図 13）。



図 13 登録位置修正

登録後は、通常の Advanced Park 同様に駐車スペースの前で停車し、開始ボタンを押下すると登録済みの駐車スペースが自動で設定される。これにより、ドライバーは駐車する度に駐車スペースを設定する必要がなくなる（図 14）。



図 14 メモリ機能での駐車スペース表示

メモリ機能の駐車スペース認識について説明する。メモリ機能の対象となるシーンでは登録時の駐車環境に対して「周辺障害物の位置が変化」、「日照条件が変わり、カメラへの映り方が変化」などが考えられる。このため、変化の少ない路面模様を記憶・比較することで登録時と現在の自車両の相対位置を

算出し、停車した位置にあわせて自動で駐車スペースを設定できるようにした（図 15）。

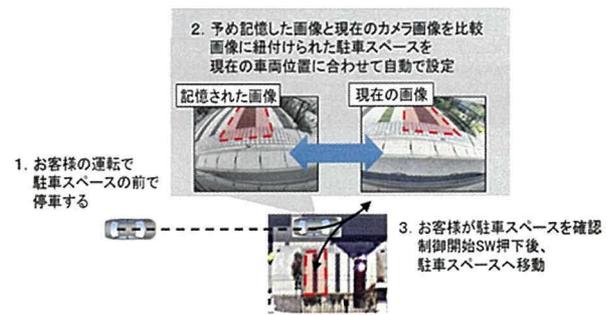


図 15 メモリ機能の認識技術

2.5 むすび

今回製品化した「Toyota Teammate Advanced Park」において、ドライバー監視下での運転支援（自動運転レベル 2）を前提とし、車両周囲認識で安全確保…「安心・安全に使える」、わかりやすい HMI…「簡単に使える」、ムダのない駐車…「スムーズに駐車できる」、支援範囲を拡大するメモリ機能…「白線がなくても使える」の 4 つのコンセプトを設定した。

本コンセプトを実現するにあたり、魚眼カメラと超音波ソナーによる車両周囲認識、車両周囲のパラノラミックビュー表示と連携したわかりやすい HMI、駐車時の切り返しを少なくする前進時の車両位置制御、駐車時間短縮とドライバーの安心を両立する速度制御、ドライバー介入操作との協調、路面模様を記憶し駐車スペースを登録するメモリ機能の開発を行い、安全性と利便性を両立した Advanced Park を開発することができた。

参考文献

- (1) 酒井裕一ほか：高度駐車支援システムの開発、2020JSAE 春季
- (2) ニュースリリース：20 代以下は自身の運転に自信がない?! 4 人に 1 人は運転が「上手ではない」と認識、パーク 24 株式会社（参照 2020.02.26）
- (3) トヨタの安全技術：バック駐車時のステアリングをサポートする、インテリジェントパーキングアシスト 2、トヨタ自動車株式会社（参照 2020.03.24）

■著者



松永 康孝



水瀬 雄樹



日栄 悠

ビッグデータを用いた「急アクセル時加速抑制」の開発

Development of Sudden Acceleration Suppression System Using Big Data

上撫 琢也 *¹ 岸本 雄飛 *¹ 雲丹亀 誉史 *¹
Takuya Kaminade Yuhi Kishimoto Takashi Unigame

高木 雅史 *¹ 太場 裕昌 *² 大石 将士 *³
Masashi Takagi Hiroaki Daba Masashi Oishi

要旨

高齢化社会の進展にともないアクセルの踏み間違いによる事故が社会問題化しており、予防安全技術への期待が高まっている。クリアランスソナーなどで障害物を検知するシステムでは、障害物が検知可能領域よりも遠方に存在する場合は踏み間違いと判断できない。本稿では、障害物検知を行わずアクセル踏み込み量とアクセル踏み込み速度から踏み間違いと判断し、加速抑制することで事故につながる暴走を抑制する技術について述べる。また、車両データを収集したビッグデータを活用し、通常運転時に加速したいシーンでは作動させないロジックの構築も行った。

Abstract

Accidents caused by pedal misapplication are becoming a serious social issue as Japan's population ages. Active safety technologies are being increasingly regarded as a promising means of addressing this issue. However, systems that use clearance sonar or other object detection technologies cannot determine whether pedal misapplication has occurred when an object is present beyond the detectable range of the system. This article describes a technology that helps to prevent unintentional driver behavior that might result in an accident by determining whether pedal misapplication has occurred based on the amount and speed of accelerator depression without carrying out object detection, and then suppressing the resulting acceleration. This technology also features logic that stops the system activating in normal driving scenarios when acceleration is required, using big data obtained from actual vehicle behavior.

キーワード 安全, 運転支援, 加速抑制, 踏み間違い

1 まえがき

高齢化社会の進展にともない踏み間違い事故が社会問題化しており予防安全技術への期待が高まっている。75歳未満と75歳以上を比較すると踏み間違い事故による死亡事故発生率は8倍以上になっており、高齢ドライバーに多い事故となっている(図1⁽¹⁾)。

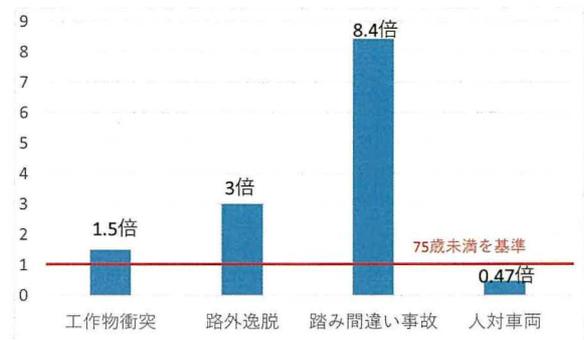


図1 75歳以上のドライバーの死亡事故発生率 (75歳未満を1とした場合)

これまでアクセルの踏み間違い操作に対応するシステムとして、壁などの障害物をクリアランスソナーで検知しブレーキ制御を行うインテリジェントクリアランスソナー [パーキングサポートブレーキ

*¹ 先進技術開発カンパニー 自動運転・先進安全開発部

*² 先進技術開発カンパニー モビリティ性能開発部

*³ Toyota Motor Europe S.A./N.V.

(静止物)] が実用化され普及が進んでいる。また、駐車場での踏み間違い事故の約 7 割を低減する効果があることがわかっており⁽²⁾、物損事故も含めて事故防止に貢献している。

一方で、踏み間違いによる人身事故は単路で最も多く発生している⁽³⁾。また、踏み間違い事故全体でみるとインテリジェントクリアランスソナーの作動車速上限(約 15km/h)より高い車速域でも多く発生している(図 2⁽⁴⁾)。この状況を鑑みて踏み間違い操作対応システムの作動範囲拡大が必要と考え、アクセルの踏み間違い操作を判定し加速抑制する「急アクセル時加速抑制」を開発した。新車向けには「プラスサポート」として導入した。

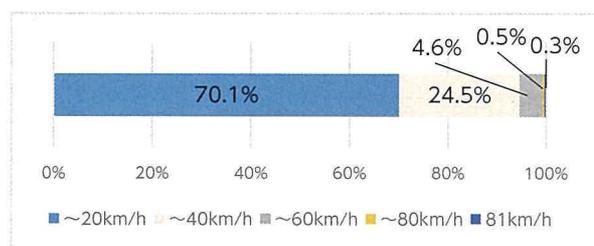


図 2 ペダル踏み間違い時の危険認知速度

本機能は障害物の検知有無にかかわらずドライバのアクセル操作から踏み間違い操作を判定する。従来からアクセル操作に着目した研究があったが、踏み間違い事故時と通常走行時の両面で十分な量の走行データを用いた傾向解析が難しいという課題があった。検討にあたっては車両から収集したデータをビッグデータとして扱い、事故時と通常走行時のドライバ行動傾向を解析しロジック開発を行った。

2 目標性能

踏み間違い事故全体の 90%以上に対して、アクセル操作から踏み間違いを事前判定することを目標にした。踏み間違い時のアクセル操作と車速の関係を抽出するため、踏み間違い事故のマイクロデータ約 100 件の解析を行った。アクセル開度 90%に到達したタイミングを踏み間違いと定義した。図 3 に示すように、全体的に図 2 の危険認知速度分布よりもやや低車速側に分布している結果となった。この結果から事故全体の 95%以上を占める 30[km/h] を作動上限車速に設定した。また、前進、後退の駆動シフトレンジで作動することとした。

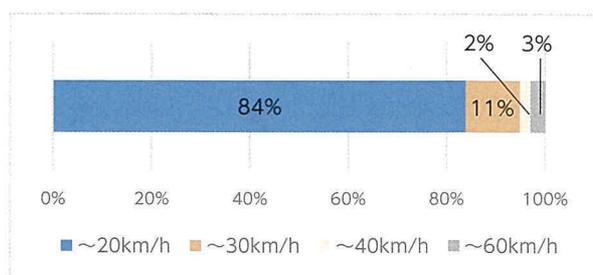


図 3 踏み間違い操作時の車速

3 急アクセル時加速抑制の構成

まず、専用の鍵を使用しているときにシステムが起動することとした。車両が専用の鍵を認識し、システムを利用するドライバを特定できる。

駐車場での踏み間違い事故ですでに低減効果が確認されているインテリジェントクリアランスソナー[パーキングサポートブレーキ(静止物)]とセットで搭載することとし、ECU を共用した。踏み間違いと判定し加速抑制を実施する際はパワートレイン ECU に加速抑制を要求する。

また、加速抑制と同時にメータ画面への表示とブザー吹鳴を行う。以下図 4 に構成を示す。

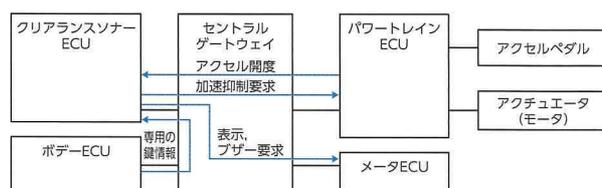


図 4 システム構成

4 踏み間違い判定ロジック

4.1 作動ロジック

踏み間違い事故のマイクロデータ約 100 件を用いて解析した。その結果、アクセル踏み込み量が開度 90%以上となる事故は全体の約 82%を占めることがわかった(図 5)。次に、最大アクセル踏み込み速度の傾向を図 6 に示す。アクセル開度を 0%から 100%まで踏み切る時間が 0.5 秒以下の速い踏み込み速度は事故全体の約 55%を占める。0.5 秒~ 1.0 秒のアクセル踏み込み速度を含めると事故全体の約 98%をカバーすることがわかった。

踏み間違い事例の多くは車両が急加速する操作であり、車速が上がる前に加速を抑制する必要があると考えた。そのため、踏み間違い判定した際は即座

に急加速を停止する加速抑制制御を行うこととした。作動ロジックを以下に示す。

- ・自車速が約 30km/h 以下
- ・アクセル踏み込み速度が規定の値以上 (約 1 秒以下で踏み切る速度)
- ・アクセルを踏み込み量が規定の値以上 (アクセル開度が約 90%以上)

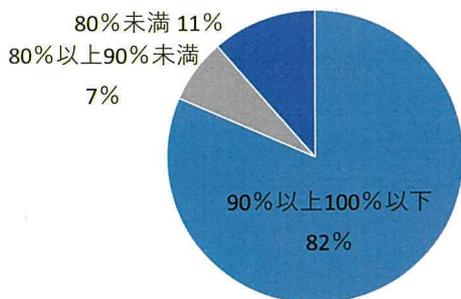


図5 アクセル踏み込み量最大値

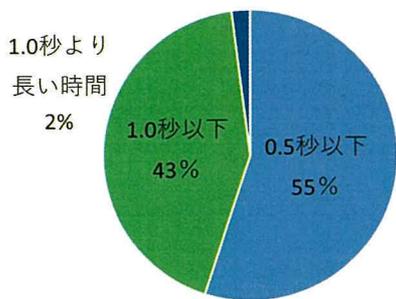


図6 踏み込み速度最大値

4.2 作動禁止ロジック

通常走行時に急加速したいシーンでは意図どおり加速できるようにするため、ビッグデータに保存されている車両データを用いた解析を行った。通常走行中に急加速するシーンを抜き出し、アクセルペダル操作以外の傾向を抽出した。その結果、以下の条件では作動させない仕様にした。

- ・方向指示器作動中と作動終了後約 2 秒間
- ・またはブレーキペダルを離れた後約 2 秒間
- ・急な上り坂に自車がいるとき

4.3 アクセルの踏み直し、踏み続けへの対応

通常走行中に急加速したいシーンで踏み間違い判定される場合を想定し、上限車速を設けて前進または後退を可能とする制御を追加した。具体的には、加速抑制後すぐに再びアクセルペダルを速く強く踏み直す場合や、加速抑制中に踏み続ける場合は加速

抑制量を少なくし、設定した上限車速まで緩やかに加速することとした。

4.4 加速抑制終了ロジック

アクセルペダルを低開度まで戻した場合は加速抑制を終了することとした。

4.5 同時に作動する他システムへの対応

急アクセル時加速抑制と同時に作動する他システムのなかで、Advanced Park, Advanced Drive については以下の対応をとることとした。

< Advanced Park (以下, AP) >

AP は作動時にドライバがアクセルを踏み込むと自動ブレーキにより車両を停止させ、ドライバがブレーキペダルを踏み込むまで停止を保持し続ける。踏み間違いの場合も安全な状態を維持されるため、本機能は作動させない仕様にした。

< Advanced Drive (以下, AD) >

AD 作動中に踏み間違いが発生した場合、本機能が同時に作動する。ドライバがアクセルを戻すと本機能が終了し、ドライバがアクセルを戻しているにもかかわらず AD により車両が加速を開始することになり、ドライバに違和感を与える可能性がある。そのため、AD 作動中に本機能が作動した際は、AD は停止プロセスに移行しドライバに運転権を渡して停止する仕様にした。

5 結果

踏み間違い事故時を想定したパターン、および通常走行時の急加速パターンを定義し、それぞれのパターンで性能確認を行った (表 1)。

表 1 性能確認結果

No	評価パターン	結果
1	踏み間違い相当のアクセル操作	OK: 作動
2	ウィンカ作動中	OK: 非作動
3	ブレーキ OFF 直後	OK: 非作動
4	急な上り坂	OK: 非作動

6 まとめ

今回開発した急アクセル時加速抑制では、ビッグデータを活用し、踏み間違い時の急な踏み方と通常走行中に急加速するときの踏み方を判別するアルゴ

リズムを開発し、専用の鍵と組みあわせて製品化を行った。作動上限車速を 30[km/h] 以下とし、踏み間違い事故の 90%以上を対象に、踏み間違い判定できるシステムを実現した。また、踏み間違い事故の分野を協調する領域にとらえ、メーカー間での本技術の共有を実施した。今後は、比較的高齢の顧客に利用いただいている車両へ幅広く展開していく。

■参考文献

- (1) 内閣府：平成 29 年版交通安全白書
特集「高齢者に係る交通事故防止」
- (2) トヨタ自動車：駐車場での安全支援技術「インテリジェントクリアランスソナー (ICS)」の事故低減効果を発表
- (3) ITALDA INFORMATION：交通事故分析レポート No.124, アクセルとブレーキペダルの踏み間違い事故 高齢ドライバーに特徴的な事故の防止に向けて
- (4) ITALDA INFORMATION：交通事故分析レポート No.107, 運転操作の誤りを防ぐ～若者, 高齢者に多い操作不適事故～

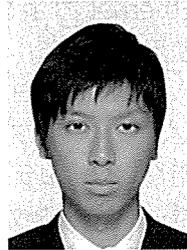
■著者



上撫 琢也



岸本 雄飛



雲丹亀 誉史



高木 雅史



太場 裕昌



大石 将士

車とつながるコネクティッドサービス

Connected Vehicle Services

佐久間 智 *1 矢島 哲 *1
Satoru Sakuma Tetsu Yajima

浅井 和 *2 樋崎 勝哉 *2
Kano Asai Masaya Hizaki

要旨

車両の通信機能の普及により、車とつながるコネクティッドサービスへの期待が高まっており、トヨタ自動車もこの期待に応えるべく、時代の進化に応じたサービスの創出に取り組んでいる。本稿では、コネクティッドサービスを提供するためのシステムの概要と MIRAI 向けに提供されるスマートフォンアプリについて紹介する。

Abstract

As automotive communication functions become more widespread, there are growing expectations about the development of connected vehicle services. Toyota is working to develop and launch new services to satisfy these expectations and respond to the evolving market environment. This article describes the outline of the system that provides these connected services and the smart phone application developed for the second-generation MIRAI.

キーワード コネクティッドサービス, MSPF, 車両情報, DCM, LTE, スマートフォンアプリ

1 はじめに

MIRAI は最新のコネクティッドサービスを提供するための機能を装備したコネクティッドカーである。車両の様々な情報を取得、活用することにより、車両と連動したお客様にとってうれしいサービスを提供する。

2 車両情報の活用とシステム構成

トヨタのコネクティッドカーは、車両に搭載されている ECU (Electronic Control Unit) の様々な情報を専用の車載通信機である DCM (Data Communication Module) から、携帯電話通信事業者の LTE 網を経由して、MSPF (Mobility Service Platform) に送信し、蓄積している。

MSPF に蓄積される情報は、走行中の車両挙動やドライバー操作、センシング情報などで、用途に応じて適切なタイミングで収集される。MIRAI においても、これらの情報を活用したサービス提供を行っている。

車内で情報を収集するための LAN (Local Area Network) として、CAN (Controller Area Network), Ethernet および、USB (Universal Serial Bus) を使用している。

MSPF はトヨタがクラウドサーバに構築したオープンプラットフォームである。蓄積された情報を活用してモビリティサービス提供や事故・故障時のサポート、機能改善活動や新企画の検討を行う。図 1 にシステム全体の概念図を示す。

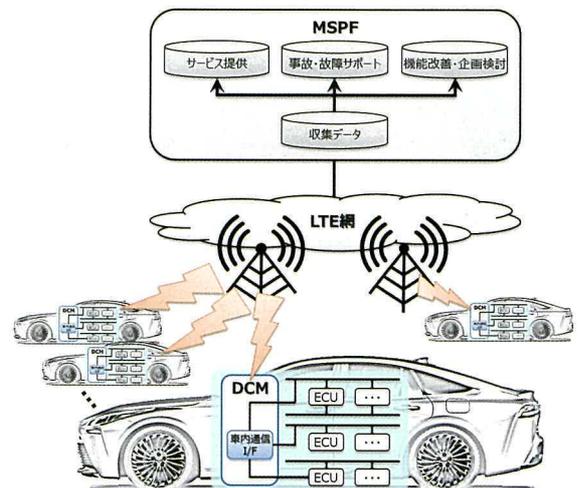


図 1 システム概念図

*1 コネクティッドカンパニー e-TOYOTA 部

*2 コネクティッドカンパニー 情報電子システム開発部

情報の収集にあたっては、お客様が安心してお車をご利用いただける様に、個人情報保護および情報セキュリティ対策を施している。

3 スマートフォンアプリを活用したサービス

コネクティッドを活用したお客様へのうれしいサービスとして、常に最新の地図やリアルタイムの交通情報から最適なルート案内を行うナビゲーションや、自然対話で行える音声認識操作（エージェント）を提供している。

今回の MIRAI では、寒冷地などで安心、快適に車をご利用いただくため、車に乗り込む前に、遠隔からスマートフォンアプリで車両のエアコン機能を作動するサービスを提供。作動できる機能には、フロントウィンドウ、リアウィンドウ、ドアミラーの霜取りも含まれる。さらに、トヨタ初となる、ステアリングヒーターとシートヒーターの作動も追加している（図 2）。



図 2 リモートエアコンアプリ画面

この機能は冬場だけでなく夏場にも、事前に車室内を冷やし熱中症対策としてご利用いただける。

遠隔からのエアコン操作にあたっては、エンジン音をだすことなく静かにエアコンを動かすことができ、車の周囲に人がいても安心してご利用いただけるのが FCV ならではの特徴である。

また、スマートフォンアプリから水素残量および、走行可能範囲を確認できるとともに、MIRAI がもつ大容量バッテリーを災害など非常時の給電装置としてご利用いただくことを想定し、電源としてご利用

いただける目安時間もスマートフォンアプリで確認することができる（図 3）。



図 3 Pocket MIRAI 画面

4 おわりに

コネクティッドカーのシステム概要と、MIRAI 向けに提供されるコネクティッドサービスの一例について紹介した。

MIRAI はお客様が車内で利用するコネクティッドサービスに加えて、車外からもスマートフォンアプリを活用した様々なサービスをご利用いただける車となっている。

より安心、より安全に車を使っていただくため、今後もコネクティッドサービスの創出と改善に取り組みたい。

■ 著者



佐久間 智



矢島 哲



浅井 和



樋崎 勝哉

低 CO₂ リサイクルアルミ材の開発

Development of Low-CO₂ Recycled Aluminum Alloy

西川 直樹 *¹ 増田 勇也 *² 大竹 和実 *¹
Naoki Nishikawa Yuya Masuda Kazumi Otake
蔵本 遼 *³ 山崎 裕貴 *³ 永井 健史 *³
Ryo Kuramoto Yuki Yamazaki Takeshi Nagai

要旨

近年、環境負荷低減の観点から車両走行時のみならず、車両製造時ひいては素材製造時を含めたライフサイクル全体での CO₂ 排出量削減が求められている。本稿では、MIRAI のボデーパネル（フードインナ）向けに開発した、車両軽量化および素材製造時の CO₂ 排出量低減に貢献するリサイクルアルミ材について紹介する。

Abstract

Efforts to reduce the environmental impact of vehicles are no longer focused solely on tailpipe emissions. There are increasing demands to lower CO₂ emissions over the whole life cycle of the vehicle, including manufacturing and material production. This article describes a recycled aluminum alloy that was developed to help lower both vehicle weight and the CO₂ emissions generated during material production.

キーワード アルミニウム, リサイクル, 低 CO₂, 車両軽量化

1 はじめに

トヨタ自動車では、低燃費・低 CO₂・運動性能向上を目的とした車両軽量化のため、自動車部品へのアルミニウム（以下 アルミ）合金の適用に取り組んできた。ボデーパネルのアルミ合金化は Supra（1993 年）から始まり、今回発表となった新型 MIRAI（図 1）のフードに適用されている。



図 1 新型 MIRAI

トヨタ自動車では SDGs (Sustainable Development Goals) に掲げられた目標・ターゲットの達成に向け、「トヨタ環境チャレンジ 2050」を通してライフサ

イクル CO₂ の低減に取り組んでいる。今回、特に環境性能を重視する MIRAI のフードインナに採用した新規リサイクルアルミ合金材（以下 リサイクル材）は、この取り組みの成果の一つである。このリサイクル材のボデーパネルへの適用は自動車用ボデープレス部品として初であり、アルミ素材製造時の CO₂ 排出量を約 50% 削減した。本稿では、リサイクル材の開発経緯やその特性について紹介する。

2 アルミ素材製造時の CO₂ 排出量

図 2 にアルミの原料であるボーキサイトから、自動車製造に使用される圧延コイルになるまでの工程を示す。なお、圧延コイルとは板材をコイル状に巻き取ったもので材料メーカーからカーメーカーにボデーパネル用素材として供給されるものである。アルミは、ボーキサイトを原料として電解製錬により新地金が製造され、その製錬に大量の電気を使用することから、電気の缶詰と呼ばれている。アルミ素材製造時の CO₂ 発生に対し実に約 9 割がこの製錬過程で発生している。例えば飲料用アルミ缶のように、アルミ缶のスクラップをそのままアルミ缶へリサイクルすることで製錬が不要となり、アルミ素材製造の CO₂ 発生量は大きく削減される。一方、自動

*¹ 先進技術開発カンパニー 第 1 材料技術部

*² 田原工場 エンジン製造部

*³ 株式会社 UACJ

車は使用期間が長いこと、さらに近年の軽量化ニーズに伴うアルミ合金板材の使用量の増加により、スクラップの回収量でボデーパネル向けアルミ合金板材の生産量を賄うまでに至っていない。

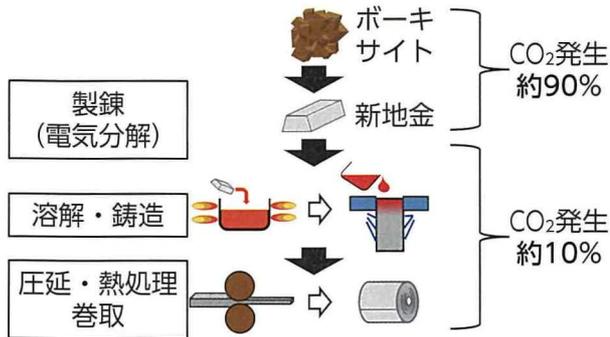


図2 アルミの製造工程の概略図とCO₂発生割合

3 リサイクル材の原材料

現在までのトヨタ自動車におけるボデーパネル用アルミ合金のリサイクルへの取り組みは、図3に示す自動車製造時のプレス端材の再利用である。まずボデーパネル製造時に発生するプレス端材を分別回収し、アルミメーカーに送付する。アルミメーカーは受け取ったプレス端材を溶解・鋳造し、同一合金種の製品とすることで使用する新地金量を削減し、数%のCO₂低減に貢献している。

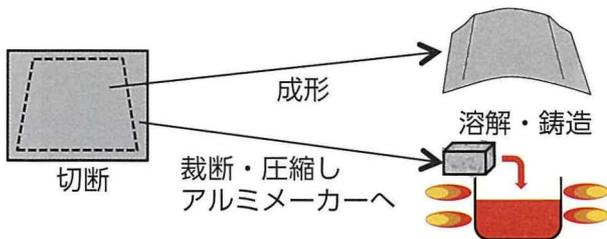


図3 自動車プレス端材のリサイクル

さらなる新地金使用量の削減、すなわちリサイクル材の配合率の向上のため、リサイクル材に使用できる原材料として、アルミメーカー内で発生する各種アルミ合金端材に着目した。この端材は図4に示すように、アルミ製造にともない日常的に発生するもので、多くはアルミメーカー内で再溶解・鋳造・圧延され製品に戻る。しかし、例えば図5に示す異種合金種を積層したクラッド材と呼ばれるアルミ合金端材は、再溶解後に各層の成分が混合するため、同じ製品に戻すことができず、アルミメーカー内では活用が困難であるため、不純物許容量の比較的大

きい、エンジンブロックなどの鋳造製品に転用される場合があった。今回、これらのクラッド材を含む各種アルミ合金端材をリサイクルして、ボデーパネル用アルミ合金材とすることに着目し、新地金使用量を低減することを検討した。

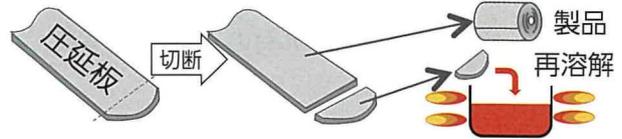


図4 アルミ端材の発生

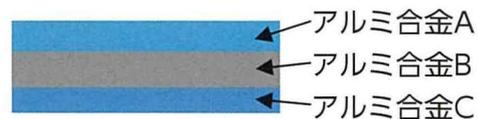


図5 クラッド材のイメージ図

4 リサイクル材の部品適用検討

4.1 リサイクル材の成分

トヨタ自動車ではボデーパネル用アルミ合金としてマグネシウム（以下 Mg）やシリコン（以下 Si）を含んだ6000系アルミ（Al-Mg-Si合金）（以下従来材）を使用している。一方、リサイクル材は図6に示す通り、各種アルミ合金端材由来のマンガン（以下 Mn）、鉄（以下 Fe）などの不純物元素が従来材よりも多く含まれる。CO₂低減の観点では、端材の配合率を増加させるほど効果が高い。しかしながら上記不純物元素を多く含むと、図7に示すとおり、これらが結びつくことで形成する金属間化合物（Al-Fe-Mn-Si系及び共晶Siなど）の量が増加する。この金属間化合物は、亀裂の起点および伝播経路となり延性を低下させるため、従来材と比較してリサイクル材は成形性が劣る懸念があった。

そこで圧延温度を高温にし、さらに圧延時の圧下率を上げることで、金属間化合物の微細化を図った。改善前後のマイクロ組織写真を図7に示す。

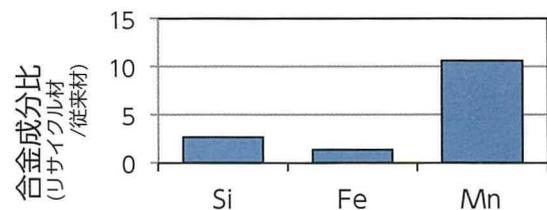


図6 従来材、リサイクル材の成分比の例

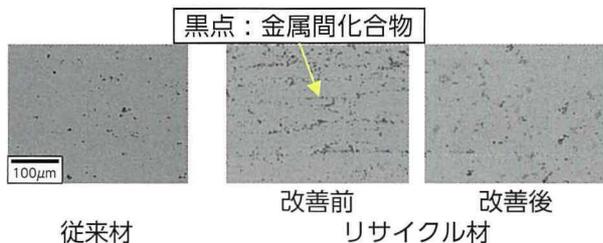


図7 従来材，リサイクル材のマイクロ組織写真

4.2 プレス成形性

4.1 節で示す様に材料製造時の工夫により改善させたものの、リサイクル材は従来材と比較して伸びが低下する傾向があるため、伸びの材料要求値の見直しを検討した。そこで成形シミュレーションを用いて、フードインナとしての部品性能を損なわないレベルで伸び低下を補う形状最適化を試みた。その結果、図8に示す様にRの拡大、成形時の高さを緩和する対策によって、伸びの必要特性を緩和することができ、図9に示す様にリサイクル材の配合率を50%まで拡大することができた。また、リサイクル材のバイクハード（塗装時の温度を利用した熱処理）後の0.2%耐力は、不純物元素を多く含みながらも、強度に寄与する成分を特定・最適添加し、従来の6000系合金と同等とすることができた。

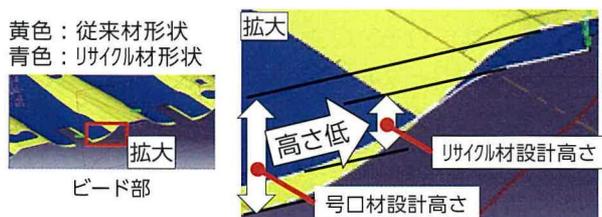


図8 フードインナの最適設計

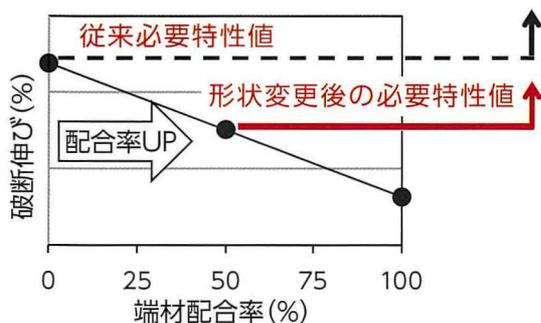


図9 アルミ端材の配合率と破断伸びの関係

4.3 塗膜密着性

リサイクル材をフードインナとして用いるための要件として耐食性および見栄えがある。その要件を満たすため、塗膜を従来材の要求値同等に密着させ耐食性を含む性能を確保することを検討した。図10に塗装下地処理である化成処理皮膜の表面状態をそれぞれ示す。その結果、化成処理の状態は基準値を満足し、表面状態も従来材と同等レベルであることを確認した。

続いて化成処理後の表面に塗装を施し、塗膜の密着性を確認した。図11に塗膜に基盤目状の亀裂を与え、所定の時間水中に全没させ、テープにより表面を剥がす力を加えた後のサンプル写真を示す。その結果、リサイクル材は剥がれが無く、従来材と同等の塗膜密着性を有していることが確認できた。さらに量産ラインでの実証を経て、耐食性を確認し市場における適合性ありと判断した。

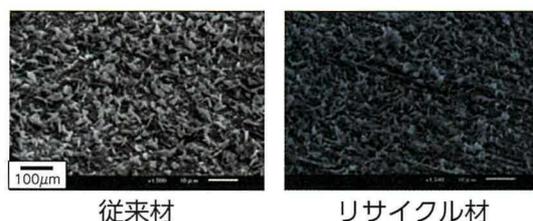


図10 従来材，リサイクル材の化成処理後の表面

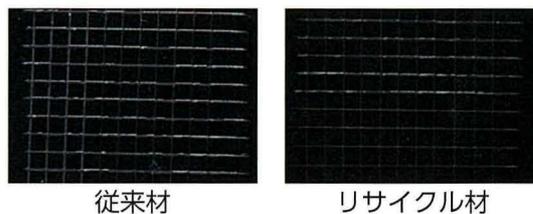


図11 従来材，リサイクル材の密着性評価後の表面

5 まとめ

今回開発したボデーパネル用リサイクルアルミ合金材は、アルミメーカー内で発生する各種アルミ合金端材を約50%使用することで、従来のアルミ材と比較して、素材製造時のCO₂排出量を約50%削減することができた。

6 おわりに

近年、ライフサイクルCO₂の削減は重要課題であり、今回のリサイクル材の採用は、課題解決の大

きな一歩となった。これらの課題解決のためには、今回のアルミメーカーの例のように、会社の枠を超えた協力体制・取り組みが不可欠である。今後も同様の取組みを継続しさらなる CO₂ 低減や環境負荷軽減につながる開発を推進していく。

■ 著者



西川 直樹



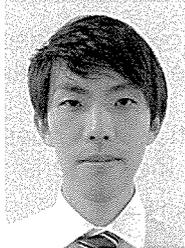
増田 勇也



大竹 和実



蔵本 遼



山崎 裕貴



永井 健史

Born from WRC ～ GR ヤリスについて～

Born from the World Rally Championship
-Introduction to the GR Yaris-

齋藤 尚彦*1 土井 崇司*1
Naohiko Saito Takashi Doi

要旨

トヨタが2018年よりWRC (World Rally Championship) に参戦して以来、様々な環境下で競争力のある車づくりを行ってきた。そういったなかで、GR ヤリスはその知見や技術がフィードバックされた市販車として2020年9月に発売を開始させていただいた。GR ヤリスを開発、製造するなかで様々なチャレンジを行ったので、本稿にてご紹介させていただく。

Abstract

Since re-entering the World Rally Championship (WRC) in 2018, Toyota has dedicated itself to building cars that are even more competitive under a wide range of driving environments. The lessons learned and the technologies developed through these efforts were incorporated into the GR Yaris, which was launched in September 2020. This article describes the various challenges that were overcome in the development and production of the GR Yaris.

キーワード GR ヤリス, WRC, スポーツカー, スポーツ4WD, GR ファクトリー

1 WRC とは

「WRC」とは、国際自動車連盟 (FIA) が主催する四輪自動車競技のうちのひとつであり、舗装された道路 (ターマック) だけでなく、激しい凹凸が続く荒れた未舗装路 (グラベル) やスノーロードなど様々な路面を量産ベースの車両をテクニカルレギュレーションに沿って改造されたラリーカーで走行する点が挙げられる (図1)。



図1 様々な道を走るラリーカー

我々は、このWRCに1973年から1999年まで参戦し (図2)、その後、休止期間を経て2017年から『Toyota Gazoo Racing-World Rally Team』として再度参戦している。その目的として、WRCで得た知識や経験を今後の市販車開発にフィードバックするという点で挙げられ、それを大きく受けて生まれたのがGR ヤリスである。



図2 過去の参戦車両

2 GR ヤリスとは

GR ヤリスは、トヨタ自動車がかほぼ20年ぶりに独自の開発、生産を行う本格4WDスポーツカーであり、WRCをはじめとするモータースポーツで培った技術を多く織り込んだ市販車である (図3)。

*1 GRカンパニー GRプロジェクト推進部



図3 GR ヤリス外観

今の時代、このような車の開発に取り組むことは並大抵のことではなかったが、そのなかで非常に大きかったのは、“モリゾウ”こと豊田章男社長の存在である。

モリゾウは開発初期から今現在に至るまで、GR ヤリスのマスタードライバーとして開発・評価に多くの時間を費やし、我々を鼓舞しながら常に陣頭指揮を執った（図4）。

また、モリゾウの4WDの運転技術は社内でも突出しており、我々が気づけなかった課題をいくつも抽出し、そういった課題に対してメンバー全員一体となり改善を進めた。

開発初期は全く会話できないと酷評されたが、発売の直前まで改善を進めながら、ようやく皆様のお手元にお届けするところまで辿りつけた。



図4 モリゾウの評価

3 GR ヤリス開発の二つのチャレンジ

我々は、この車を開発、生産するうえで大きく二つのチャレンジを行ってきた。

3.1 モータースポーツから車をつくる

過去、社内でもモータースポーツで活躍する車両は多く存在した。ただし、そのアプローチは、「市販車をまず開発し、それを各カテゴリに適用するよう改造する」といったことが一般的であった。

今回、GR ヤリスは全く逆の発想で開発を行って

きた。つまり、「モータースポーツから車をつくる」、まずレーシングカーとして開発を開始し、その後、製品化に向けて開発、評価、製造までの企画を進めた。そのため、開発初期よりレーシングドライバーによる徹底的な評価を繰り返した（図5）。



図5 プロドライバーによる評価

3.2 少量・多品種生産へのトライ

スポーツカーは非常に嗜好性が高く、SUVやミニバンのように多く販売されるモデルではない。また、スポーツカーの魅力の一つに年々性能改良や様々な仕様が追加されることも挙げられる。このように、少量・多品種に対応することはGR ヤリスだけでなく、Gazoo Racingがスポーツカーをだし続けるために大事な要件である。

そのため、元町工場内に「GR Factory」と呼ばれるスポーツカー専用ラインを新設し（図6）、少量、多品種、さらには高性能を目指した。



図6 GR Factory（組立工程）

また、少量であることは一般的にはコスト高に繋がるが、協力会社様に多大なるご協力をいただきながら現地現物による改善を徹底的に進め、一点一点の部品のコスト低減を進めた。

4 GR ヤリスの開発

前章に記述したとおり、大きな二つのチャレンジを念頭に開発メンバーは意気揚々とGR ヤリスの開発を開始したが、本格スポーツ4WDは約20年ぶりの開発であるため、全く知見や経験がないうえに当時の開発メンバーや記録は殆ど残っておらず、本当に開発には苦勞した。

そこで、我々は現在 WR カーをメインで開発している Tommi Makinen Racing (以下、TMR) から教を請うことにした (図 7)。

彼らは WRC の現場で様々な路面で車を如何にセッティングし、速く走らせるか?ということについて多くの知見と経験をもっており、我々はそこから多くのことを学び、GR ヤリスの開発に生かしていった。また、実際の WRC ドライバーによる評価も実施し、とくに 4WD のセッティングには彼らの知見も多く取り込まれている。



図 7 TMR との共同開発風景

以降で GR ヤリスに織り込まれた様々な技術の概要を紹介させていただく。なお、詳細については、本記事に続く解説記事をご覧ください。

4.1 性能を追求したスタイリング

GR ヤリスのスタイリングは性能を最優先とするという明確な方向性をもって進めた。

外形デザインにおいて、サイドシルエットはダウンフォース、空力性能、フロントデザインは冷却性能といったように一つのデザインや形状を性能優先で決定した。

結果、ルーフ後端部が大きく下がり (図 8)、また、ロー&ワイドな非常にスポーティーなスタイリングが実現できた。

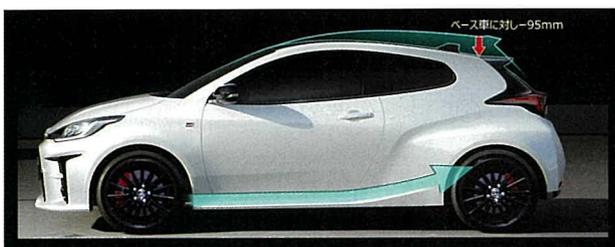


図 8 GR ヤリスのサイドシルエット

4.2 軽量ボデー

スポーツカーにとって軽いことは、何物にもかえられない武器であることは、古くから常識である。また、WRC をはじめとするラリーカーはとくにボ

デーはベース車両の素材や形状をそのまま使用することがルールであるため、我々はボデーに着目して軽量化に取り組んだ。

このクラスの車両としては異例であるが、各所に異材を活用した。ルーフにはカーボンを採用、また ENG フード、ドア (バックドア含) はアルミ材を使用している (図 9)。なお、カーボンルーフは「SMC 工法」をルーフ材としては世界ではじめて採用した。結果、従来モデルに対しボデーのみで約 30kg の軽量化を果たすことができた。

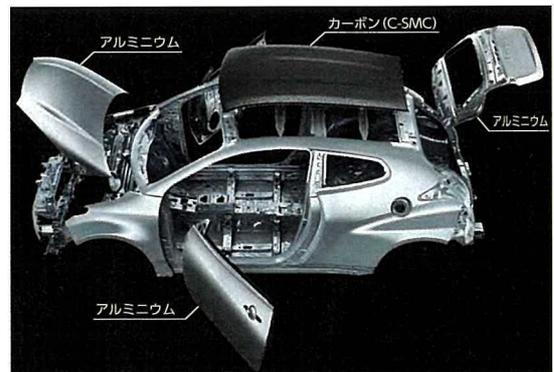


図 9 アッパーボデー異材採用部位

4.3 慣性諸元の最適化

一般に考慮される重心高の低減だけではなく、慣性モーメントの最適化、および前後、左右の重量配分の最適化にも取り組んだ。数万にも及ぶ部品の質量、重心位置を導出しながら、各部品の最適配置を進めた。例えば、補機バッテリーはリアトランク後方に配置し、前後重量配分の最適化を図っているが、それに加え、左右位置も若干左寄せとし、左右重量配分の最適化を実施している (図 10)。

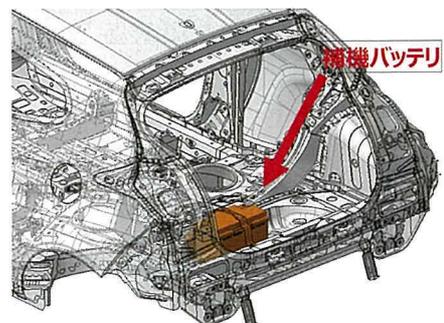
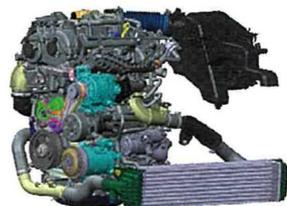


図 10 補機バッテリー配置図

4.4 新開発 1.6L ターボエンジン

今回、GR ヤリスのために新開発 1.6L 直列 3 気筒ターボエンジンである G16E-GTS を開発した。

「高出力、高レスポンス」と「軽量・コンパクト」を達成するために、ほぼ全ての部品を新規設計し、モータースポーツで用いられる様々な技術を織り込んでいる。結果、クラストップの高出力エンジンとすることができた (図 11)。



G16E-GTS 概要

気筒配列	直列 3 気筒ターボ
総排気量	1618cc
ボア×ストローク	φ 87.5 × 89.7
最大出力	200kW/6500rpm
最大トルク	370Nm/ 3000 ~ 4600rpm

図 11 G16E-GTS 概要

前述の軽量化と G16E-GTS の組合せにより、GR ヤリスは B セグメントのホットハッチよりも圧倒的に速く、さらには、C セグメント 4WD スポーツ車並みの動力性能でありながら、圧倒的に軽量であることがわかる (図 12)。

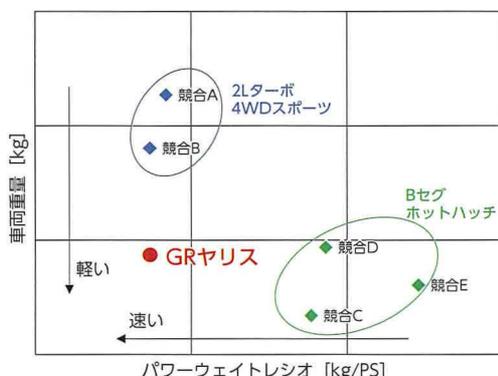


図 12 パワーウェイトレシオ - 車両重量比較

4.5 新スポーツ 4WD システム

前述の 1.6L ターボエンジンの出力を路面にしっかり伝えることで、「圧倒的な加速力を得る」ことに加え、「あらゆる路面で安定安心した走りを実現する」ために、今回、新開発のスポーツ 4WD システムを採用した。

Rr デフの前に高応答の電子制御多板クラッチを配置し、クラッチ前後の差回転 (前側回転数 > 後側回転数) を利用しており、従来にはない幅広い前後駆動力配分設定を可能としている (図 13)。



図 13 4WD システム外観図

また、室内に 3 モードのスイッチを設定しており、これにより、お客様の好みやシーンにあわせたトルク配分設定を可能とした (図 14)。

モード切替スイッチ	モード	基本前後配分比
	Normal	基本前後配分 60:40 F ██████████ R ██████████
	Sport	基本前後配分 30:70 F ██████████ R ██████████
	Track	基本前後配分 50:50 F ██████████ R ██████████

図 14 4WD モード切替概要

4.6 GR-Fourのためのシャシ

GR ヤリスの圧倒的な出力を支えながら、高いレベルの運動性能を実現するため、サスペンションは Fr にストラット式、Rr にはトレーリング式ダブルウィッシュボーンタイプを採用した (図 15)。基本構成は現行 P/F を踏襲しているが、ジオメトリの最適化、高剛性化を狙うため、ナックルやキャリアをはじめとし、多くの専用品を用いている。

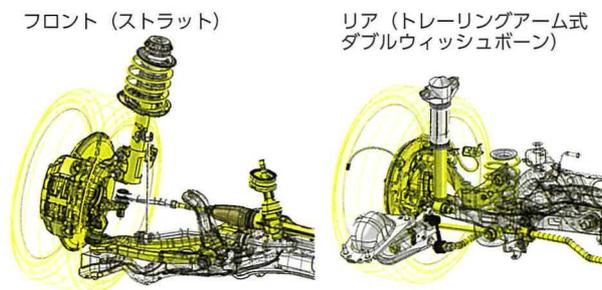


図 15 サスペンション概略図

ブレーキシステムは、ニルブルクリンクをはじめとする超高速サーキットでの耐フェード性も配慮し、新開発の Fr18 インチ、Rr16 インチ対向ブレーキを採用した (図 16)。

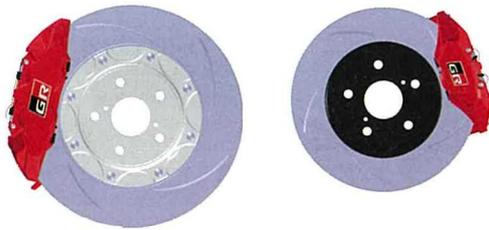


図 16 ブレーキ外観図 (Fr/Rr)

また、パーキングブレーキは単に駐車時の使用だけでなく、ジムカーナなどにおいて「車両の向きを変える」機能としても評価を行い、応答性に優れたドラムイン式を採用し、ブレーキレバーも操作しやすい位置に配置した。

4.7 「走り」の性能開発

GR ヤリスは、社内テストコースだけでなく、サーキットや雪上、グラベルなどの様々な路面での評価を社内外のドライバーとともに実施した。とくにレーシングドライバーの感性は非常に高く、求めるレベルも当初想像できない高いレベルであった。そのなかで我々は、次の三点を重視しながら開発を進めた。

a. データの活用

様々な条件下での現象解析用途としては勿論、ドライバーや関係メンバーとの共通言語としてデータを活用した。

図 17 は、今回 GR ヤリスの開発を担ったドライバー 2 名の操作データ（コーナリング時のブレーキング）の例である。いずれも国内の同一カテゴリで活躍するドライバーであるが、操作が全く異なっており、ドライバー A は初期踏力を瞬間で立ち上げて、その後、挙動コントロールをしているが、ドライバー B は挙動を探りながら立ち上げている。こういった操作の差にも配慮しながら、そのどちらも満足できるような車造りを目指した。

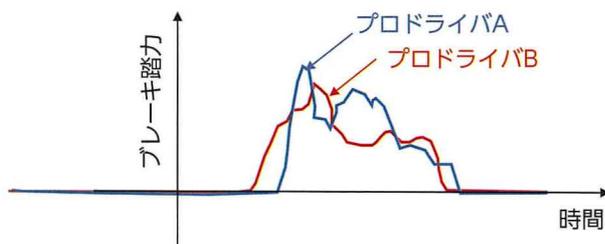


図 17 ドライバー毎の操作の違い

b. 複合操作評価

通常の運動性能開発においては、定量化のし易さから単一操作（例えば、0.8G 直進制動や 100kph 定常での sin 操舵など）を基準に評価を進めることが多くあったが、お客様が使われる際は、そのような状況は多くなく、GR ヤリスの開発においては複合操作を重視しながら開発を進めた。

図 18 は、プロドライバーが国内サーキットを走行した G-G ダイアグラムであるが、青枠で示すような高 G で、かつ、ブレーキングしながら操舵操作が入るような領域にとくに着目をし、セッティングの最適化を実施した。

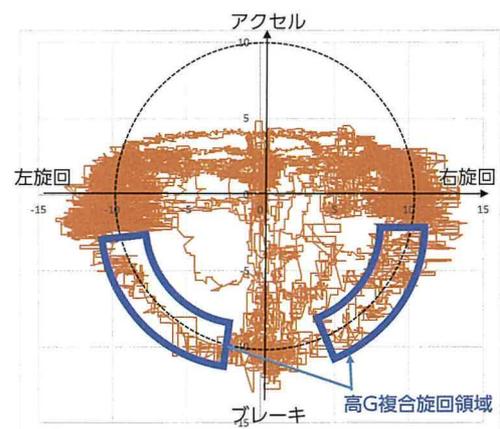


図 18 G-G ダイアグラム

c. 領域の垣根を超えた開発体制

近年、開発の効率化のため、各技術領域のなかでも分業化が進んでいるが、GR ヤリスの開発においては、領域の垣根を超えたチーム制での開発を進めた。サスペンションの担当者が 4WD を学び、4WD の担当者がエンジン制御に提案するといったことが日常的に行われた。結果、開発の観点だけではなく人材育成にも繋がった（図 19）。

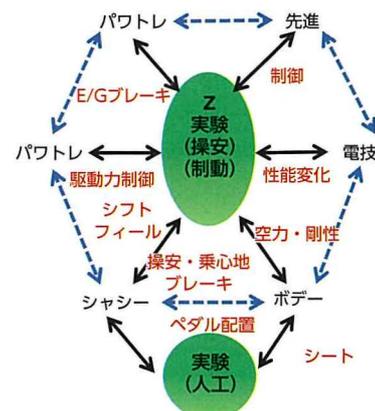


図 19 GR ヤリス開発チーム

4.8 冷却性能

GR ヤリスはコンパクトなボデーに高出力エンジンを搭載しているため、冷却性能も大変重要な要素である。とくに、スポーツ走行において冷却性能は最も大事な要素でもある。車両全体の風流れを考えながら、フロントの開口部（図 20）のようにそれぞれの部品に対して様々な機能をもたせている。

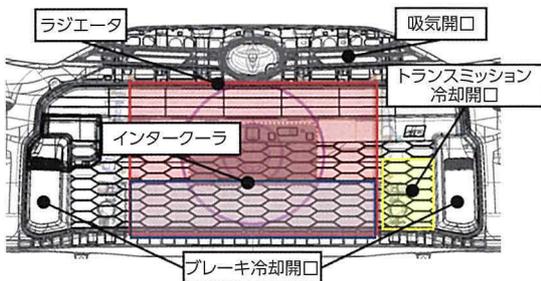


図 20 フロント開口部外観図

さらに、走行中のインタークーラの昇温を少しでも緩和し、本来のエンジン性能を発揮するために、「インタークーラスプレー（図 21）」を一部仕様では採用している。

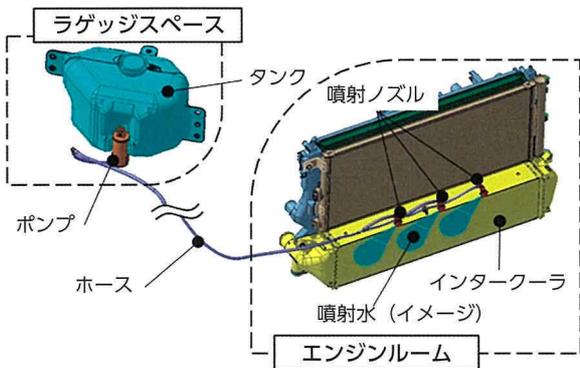


図 21 インタークーラスプレー概要

4.9 サウンド

スポーツカーである GR ヤリスのサウンドにおいて最も重要なのは、聴覚で車両情報を認知し、シフトタイミングなどの操作判断ができる「インフォメーション性」と「走りにマッチするサウンド」と考え、その実現を目指した（図 22）。お客様の使われるシーン毎で最適なサウンドを達成すべく、基本素性の最適化に加え、ANC（アクティブノイズコントロール）も一部グレードに採用した。

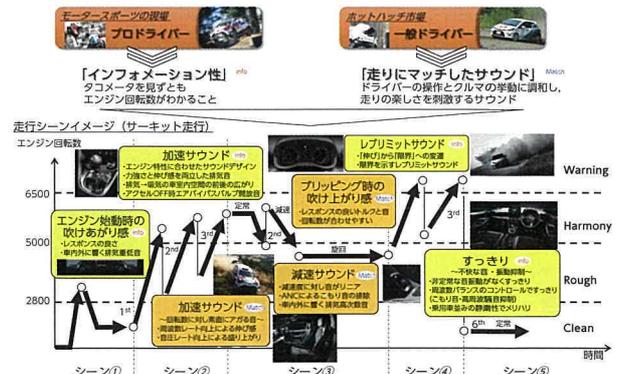


図 22 GR ヤリスのサウンド思想

4.10 GR Factory

今回、GR ヤリスをはじめとするスポーツカーのための専用ライン「GR Factory」を豊田市内の元町工場内に新設した。ボデー工程、組立工程は「セル方式」を採用し、変種変量に対応できるようなライン構成とした（図 6）。

また、GR Factory では走りの造りこみにも取り組んでおり、例えば、構造接着剤塗布範囲についても、匠の技能者によるほぼ手作業に近い作業により、従来では困難であった部位についても塗布可能となり高剛性化を可能とした（図 23）。

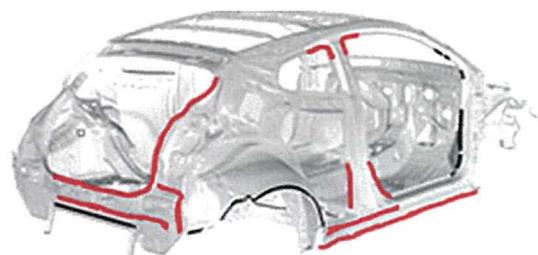


図 23 構造接着剤追加部位

また、運動性能に対して寄与の大きな部品を選定し、その部品を全数測定し、ばらつきが少なくなるような部品選択をして組付けている（図 24）。

このような取り組みは、まさにレーシングチームがレーシングカーを造るのと同様の取り組みであり、1台1台が非常にばらつきの小さく、高いレベルの車両をお客様にご提供することを実現している。

特集

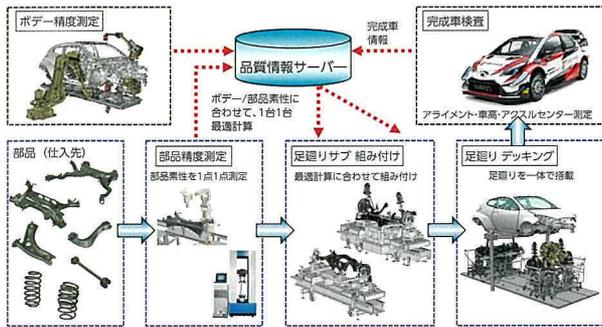


図 24 足廻り高精度組付けシステム

5 最後に

GR ヤリスは 2020 年 1 月の東京オートサロンでの発表後、多くの反響をいただきながら、幸いにも順調に受注を伸ばしている。これまでの関係会社の皆様のご協力に感謝すると同時に、お客様からの GR ヤリスに対する高いご期待に対し身の引き締まる思いを改めて感じるものである。

GR ヤリスの開発・製造メンバーは妥協することなく開発を進めてきたが、この車の最後の味付けはお客様にあると考えている。お客様が自ら使うフィールドでご自分の好みの味を付けていただければ非常にありがたい。その味付けの一助とすべく、様々なパーツ群の準備も進めている (図 25)。

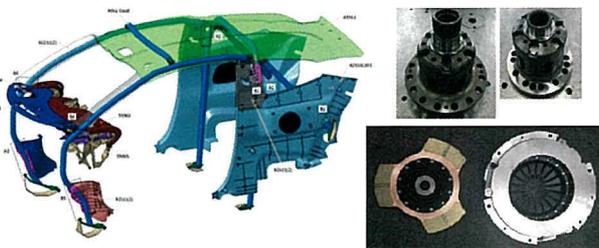


図 25 GR ヤリス競技用パーツ

最後に、GR ヤリスの「もっといい車づくり」は未だ続いており、様々なフィールドでの鍛錬を現在も進めており、ここでもモリゾウが自らハンドルを握っている。

GR ヤリスの発売日当日にスーパー耐久第 1 戦が富士スピードウェイで開催され、Rookie Racing から参戦した GR ヤリスがデビュー to WIN を獲得することができた (図 26)。

これは皆様に GR ヤリスのポテンシャルをお示し

できただけでなく、我々、開発・製造メンバーにとっては、モリゾウからのビッグプレゼントであった。



図 26 スーパー耐久第 1 戦

こういった鍛錬の結果やお客様からの声を真摯に受け止め、ご期待に応えられる魅力的な商品を引き続きご提供させていただきたい。

■ 著者



齋藤 尚彦



土井 崇司

走りのためのデザイン ~ GR ヤリスの性能を追求したデザイン~

Designed for Driving Performance
-Styling that Emphasizes the Performance of the GR Yaris-

中島 好晴 *1 星 龍秀 *2 谷口 弘輔 *3
Yoshiharu Nakajima Tatsuhide Hoshi Kosuke Taniguchi
吉田 清隆 *4 西勝 聡史 *4
Kiyotaka Yoshida Satoshi Nishikatsu

特集

要旨

トヨタは、シェアリングなど共有するモビリティが増えるからこそ、パーソナルなモビリティが求められると考え、心を通わせる個性際立つ量販車を開発している。GR ヤリスは、市販車ベースの車で一般道を中心に、あらゆる道を疾走する WRC ラリーを目指した。もっといいクルマづくりという我々の理念を実現するフィールドから開発した。

Abstract

As car sharing and other forms of shared mobility become more popular, Toyota has recognized a growing demand for vehicles with a personalized appeal and is developing mass-production models with distinctive characteristics that make an emotional connection with customers. The GR Yaris was designed to participate in the World Rally Championship (WRC), a series of races over a wide range of road surfaces contested primarily by cars based on mass-production models. The development of the GR Yaris was inspired by Toyota's philosophy of building ever-better cars.

キーワード 「BORN FROM WRC !」

1 はじめに

「BORN FROM WRC !」コンセプトは、「ラリー王国トヨタを不動のものとするウエポン」として、次期 WR カー開発のため「市販車からレーシングカーを作る」のではなく、「レーシングカーから市販車を作る」といった考えのもと開発を行った。空力性能の向上を図るボディーシルエットや 4WD のためのワイドボディーに、エンジンフード、トランクリッド、ドアパネルをアルミ素材化、CFRP 素材のルーフパネルの採用など、素材条件を開発当初より織込み、冷却性能向上のための GR 専用のフロントフェイスを付与し、勝つための戦闘力強化を目的に 3 ドアタイプのホットハッチとしてデザインした。

2 外形デザイン

2.1 外形デザインの狙い

レースで培ったダウンフォースの最大化や空力性能のノウハウをパッケージ段階からトミーマキノンレーシングと検討を重ね、デザインに織込んだ (図 1)。

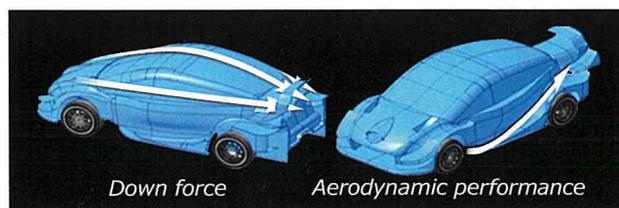


図 1 レースで培ったノウハウをフィードバック

2.1.1 サイドシルエット

ベース車に対しルーフを下げ、Rr スポイラーにあたる風量を上げるとともに、競技車両と同様の手法でフロントホイールハウスから、ボディに沿って

*1 GR レーシングカンパニー GR デザイングループ
*2 Mid-size Vehicle Company MS デザイン部
*3 クルマ開発センター カラーマネジメント室
*4 トヨタ自動車東日本株式会社

空気を抜くことでダウンフォースの最大化と空力性能の向上を図った（図2）。

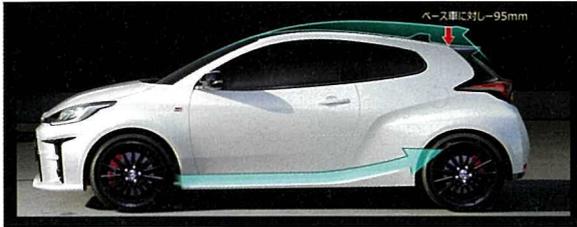


図2 ダウンフォース，空力性能を最大化

2.1.2 フロントデザイン

GR統一フロントフェイスである“Functional MATRIX”の考えに則り、走りの機能を追求した構成とブランド統一感を表現した。また、ロアスポイラー部はダウンフォース効果をもつ断面とし、上下にカナード機能をもつコーナー部と連続性をもたせて、ロー&ワイドを強調するスポーティーな印象を狙った。また、機能を重視した大開口アンダーグリルにブレーキダクトを重ねることで、よりGRらしい特徴を付与した（図3）。



図3 ブレーキダクトを強調した機能的デザイン

2.1.3 リアデザイン

キャビン後方を絞り込み、ダウンフォースと空力性能を向上させるとともに、リアフェンダーの張りだしを強調することで、よりロー&ワイドなシルエットを狙った（図4）。



図4 ロー&ワイドを強調したリアデザイン

2.2 ホイールデザイン

2.2.1 ホイールデザインの狙い

GRホイールシナリオにもとづき、世界をリードする超軽量・高剛性を追求した機能美を探求した、ホイールデザインでブランドイメージの強化に貢献。とくに、トップグレードでは、鍛造：日本刀の造形美をモチーフにしなりと剛性感を両立し、軽快でしなやか、さまざまな路面状況でもしっかりと路面を掴むホイールを目指した（図5）。



図5 機能美の追求

2.2.2 GRホイールガイドライン

本格スポーツイメージ（HI/MIDグレード）とスポーティーイメージ（LOWグレード）の2段階構成ラインナップとした（図6）。

特集



図6 GRホイールガイドライン



図8 エンケイ製18インチ鋳造ホイール (LOW)

スポーティーイメージ5本ツインスポーク構成。Gz・GR-sのコンシスタンシーの継承進化。(刻印:鍛造同様) (図9)



図9 エンケイ製17インチ切削高輝

2.2.3 ホイールラインナップ

BBS製18インチ鍛造ホイール (HI). 本格GT/オンロードイメージで機能美探求. 10本均等分割スポークでバランスを優先.

日本刀の造形美をモチーフにした超軽量ホイールとし, 圧倒的な軽快感・本物のみが纏う風格と本格ブレーキを際立たせる意匠. ユーザーの所有感を満たす意匠を狙った.

(通常:スポーク裏に示される刻印も表リムに鑄込みスポーツイメージを演出.) (図7)



図7 BBS製18インチ鋳造ホイール (MID)

ラリー/ジムカーナイメージ軽量・剛性を両立. 15本均等分割スポークで剛性感を追求. ラフな路面やクイックなハンドル操作に, 機敏に反応する本格スポーツホイールを目指した.

(刻印:鍛造同様) (図8)

3 外形カラー

3.1 外形カラーの狙い

GRカラーガイドラインにもとづき, トヨタのレーシング活動を想起させる白, 赤, 黒でラインナップを構成, ブランドイメージの強化を狙う (図10).



図10 外板色 GRカラーガイドライン

3.2 外板色ラインナップ

レーシングイメージに直結する, SUPER WHITE 2をはじめ, Platinum White Pearl MC, EMOTIONAL RED 2, PRECIOUS BLACKの4色を揃え, GRブランドを訴求する厳選したラインナップとした (図11).



図 11 外板色ラインナップ

4 室内デザイン

ベース車のインストルメントパネルのドライバー席を中心に、メーター、ステアリングハンドル、シフトレバーまわり、およびペダルを専用パーツに変更し、競技車両と同様の手法でスポーツ走行時の操作性、視認性を向上させた (図 12)。



図 12 ドライバー席を中心に操作性、視認性を向上

4.1 シート

フロント、リアシートを専用とし、フロントシートは、ホールド性に優れたスポーツシートを採用した。メッシュテクスチャーの専用表皮と合皮、アウトステッチ、および GR マークの加飾を付与してスポーティーイメージを向上した (図 13)。



図 13 ホールド性に優れたスポーツシートを採用

4.1.2 メーター

スポーツ走行時の視認性向上のため、レッドポインター、レッドゾーン帯表示を採用。また、センターマルチ TFT 液晶表示に、4WD 切替、過給圧、シフトポジション、ウォーニングなど、スポーツ走行に必要な情報を集中し、プレミアムスポーツ感を表現した (図 14)。



図 14 アナログメーター、マルチ TFT 液晶表示

4.1.3 ステアリングホイール、シフトまわり

専用ステアリングで、掌の感触に拘ったリング断面形状とし、フィット感を向上した。センタースポークを GR マーク付きの専用意匠とし、プレミアムスポーツ感を表現した。

シフトノブ位置の最適化とショートストローク化して、スポーティーな操作感を実現した (図 15)。



図 15 専用ステアリング、シフトまわり最適化

4.1.4 4WD 切替スイッチ、アルミペダル

シフトレバー前方に 4WD 切替スイッチを配置し、走行時の操作性を向上した。ペダルをアルミスポーツペダルに変更し、スポーツ走行時の操作性を向上した (図 16)。



図 16 4WD 切替スイッチ，アルミスポーツペダル

5.3 シートマテリアル

グリップ性の高いスエード調ファブリックを身体に触れる部分に配し、激しい走行に耐えうるホールド性能を実現した（図 20・21）。



図 20 シートマテリアル (High Seat)



図 21 室内表面処理

5 内装カラー

5.1 内装カラーの狙い

CORE COORDINATION, EMOTIONAL COORDINATION の 2 色設定で、GR ブランドイメージを訴求（図 17）。



図 17 内装色 GR カラーガイドライン

5.2 内装カラー

どちらのコーディネーションも運転に集中できるよう、ドライバーの視界エリアは黒基調で統一、ロアエリアとシートにのみ挿し色を施し、GR ハイパフォーマンスマシンとしてのスパルタンな世界観を体現している（図 18・19）。



図 18 CORE COORDINATION 内装



図 19 EMOTIONAL COORDINATION 内装

■ 著者



GR ヤリスのためのスポーツエンジン ～新開発 1.6L ターボエンジン～

Development of a High-Performance Engine for the GR Yaris
-The New 1.6-Liter Turbocharged Engine-

山成 健司 *1 山地 一徳 *2 萩原 健志 *3
Kenji Yamanari Kazunori Yamaji Takeshi Hagiwara
熊谷 厚法 *4 小山 裕靖 *5
Atsunori Kumagai Hiroyasu Koyama

要旨

軽量コンパクトと高出力、高レスポンスを極限まで高め、圧倒的な加速感と伸び感を実現すると同時に環境性能にも配慮した直列3気筒1.6Lターボエンジンを新型GRヤリスのために新開発した。

ラリー常用域で出力最大となるよう最適なエンジン骨格を新設計し、高速燃焼により耐ノッキング性を向上することで、目標とする高出力化を達成した。また、ターボ各部の効率向上と制御改良により、高レスポンスと加速感を実現した。本稿では、この新開発1.6Lターボエンジンの技術について紹介する。

Abstract

A new inline 3-cylinder 1.6-liter turbocharged engine was developed for the GR Yaris. Incorporating extensive measures to reduce weight and size, increase power, and improve response, this newly developed engine realizes an exhilarating and smooth sensation of acceleration, while also delivering impressive environmental performance. The new engine was designed with the optimum structure to maximize power under normal rallying conditions. High-speed combustion was adopted to enhance knocking resistance, thereby helping to achieve the targeted power increase. In addition, rapid response and the desired acceleration feeling were achieved by increasing the efficiency of each turbocharger component and enhancing the engine control. This article describes the technologies of this newly developed 1.6-liter turbocharged engine.

キーワード 高出力, 超軽量, 高レスポンス

1 はじめに

GRヤリスは、世界中のお客様に走る喜びを実現いただくために、ほぼ20年ぶりに独自の開発、生産を行う本格4WDスポーツカーを目指し開発した。これまでとは全く違う「モータースポーツから車をつくる」発想で開発し、圧倒的な運動性能を目指し開発した。この運動性能を実現するために、図1のようにBセグ競合車両に対して圧倒的な性能を確保するのみならず、Cセグ競合車に対しても競合性を確保できるようエンジン出力目標、および重量目標を決定した。

本稿では、モータースポーツ技術も投入し高出力、高レスポンス、軽量コンパクトを圧倒的な高次元で両立させた、G16E-GTSエンジンについて紹介する。

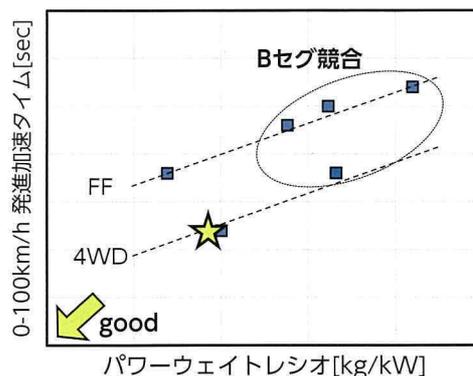


図1 GRヤリス開発目標

*1 パワートレーンカンパニー 第1パワートレーン開発部
*2 パワートレーンカンパニー 電動パワトレ性能開発部
*3 GRカンパニー GRパワートレーン推進部
*4 パワートレーンカンパニー 第2パワートレーン先行開発部
*5 フルマ開発センター パワートレーン製品企画部

2 エンジン概要

図2にG16E-GTSエンジンの外観を、表1に諸元を示す。

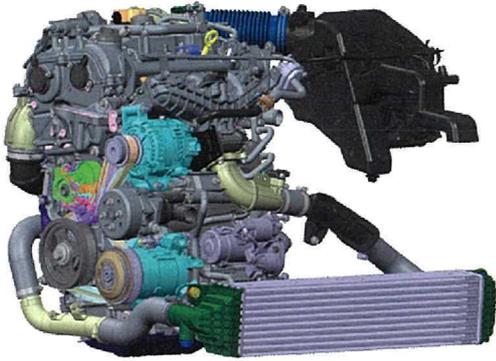


図2 G16E-GTS 外観

表1 G16E-GTS 主要諸元

気筒数&配列	直列3気筒
動弁機構	DOHC4弁 ローラロック
総排気量 (cc)	1618
ボア×ストローク (mm)	φ 87.5 × 89.7
圧縮比	10.5
燃料	ハイオク
燃料噴射方式	D-4ST
最高出力 (kW/rpm)	200/6500
最大トルク (Nm/rpm)	370/3000-4600

高出力と高レスポンスを実現するために、排気干渉のない3気筒エンジンを選択し、WRC R5競技でのエンジン使用領域を詳細に分析することで、ラリー常用域で最大の出力性能が得られるようにエンジン主要諸元を決定した。

排気量一定のもとでは、図3に示すように出力最大となるシリンダーボア径が存在する。図4のように、ボア径の増加にともないバルブ面積を広く確保できポンピングロスと摩擦損失を低減できること、排気量一定のもとではショートストロークとなり、ピストン速度が低下し摩擦損失を低減できることの2点により出力が向上する一方で、図5のように燃焼期間を短縮するためには、強い気流の乱れが必要であり、出力の向上にはボア径の縮小が必要となる。このトレードオフの結果、出力が最大となるボア径が存在する。今回の開発において予測型燃焼モデルを組み込んだ、1Dエンジンモデルと最適化ツールを図6のように組みあわせて4000以上の設計諸元のなか

から最適設計諸元を探索し、実機完成前の設計諸元の最適化を図った。

吸排気バルブ径についても、同様の手法を用いて出力最適となるバルブ径を決定すると同時に、筒内圧、排気温度のような状態量を予測し、吸気ポート設計諸元に対する要求性能を決定し、TNGA同様の高速燃焼により、耐ノック性の向上と排気温度を低減することで高い過給圧を実現し目標とする高出力化を実現した(図7)。

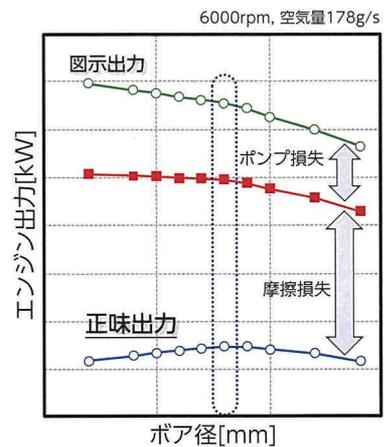


図3 ボア径に対する出力

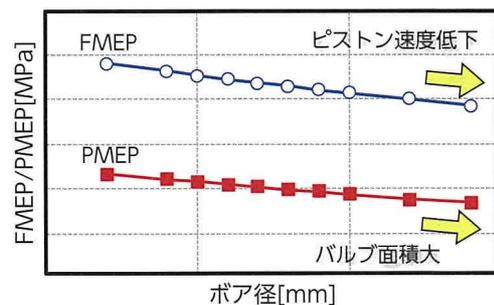


図4 ボア径に対するポンピングロスおよび摩擦損失

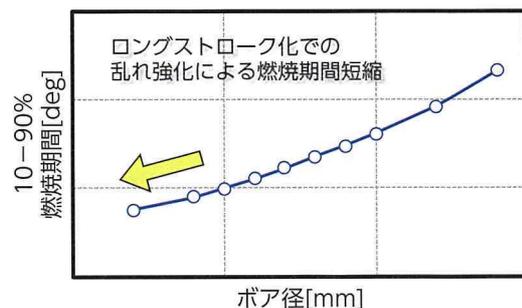


図5 ボア径に対する主燃焼期間

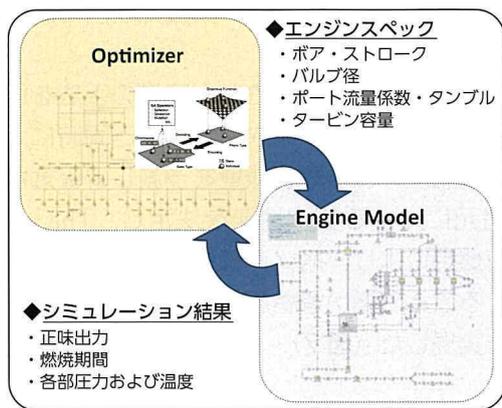


図6 設計諸元の最適化

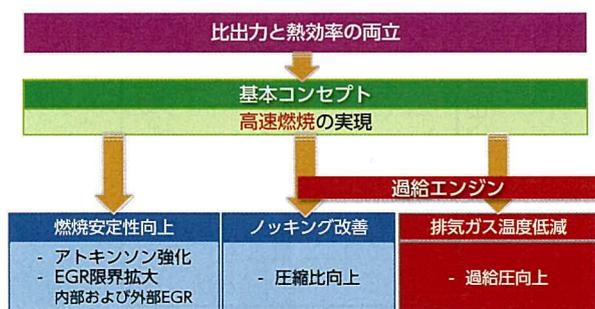


図7 過給エンジンにおける高速燃焼の効果⁽¹⁾

3 採用技術

3.1 高タンブル高効率吸気ポート

ラリー常用域での耐ノック性の向上と排気温度の低減を実現するため、目標とする燃焼速度を実現しうる強いタンブル流と吸気流量を両立する吸気ポートを新規設計した。

INバルブ-EXバルブ間の挟み角を拡大し、HLAをバルブ内側に配置し、直線的なポート形状とすることで気流の剥離を抑制し流速を維持した。前述のバルブ径については最適化するとともに、吸気バルブシートに偏心圧入バルブシートを採用した。また、マルチホール直噴インジェクタの噴孔形状や燃焼室形状の最適化をあわせて実施することで、気流制御弁などの負荷デバイスを用いることなく高タンブル高効率の吸気ポートを実現した（図8）。

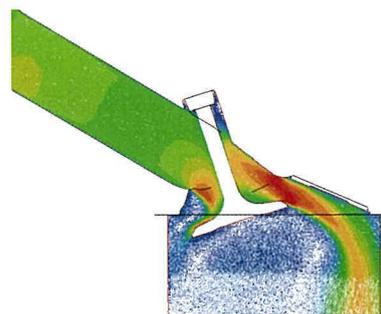


図8 吸気ポートおよびシリンダー内の流れ

3.2 ターボシステム

高出力と高レスポンスを両立するために、高過給対応翼を採用すると同時にターボ各部の効率の向上を図った。軸受にボールベアリングを採用し、フリクションを低減するとともにコンプレッサハウジング表面にアブレーダブルシールを採用し、チップクリアランスを縮小し翼端流れを改善することで、図9に示すようにトップレベルとなるターボ総合効率を達成した。

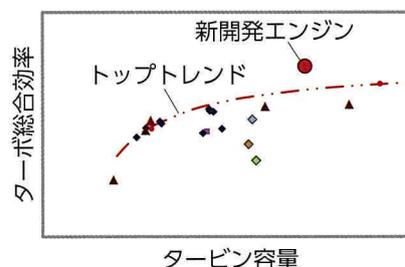


図9 タービン容量に対するターボ総合効率

また高レスポンスを実現するために、ウェストゲートバルブ（WGV）の駆動制御を改良した。一般的に高出力を得るためには大きなタービン容量が必要となるが、インペラが過給に必要な回転数に到達するまでには時間を要する。加速前からWGVを閉じてタービンを予め回転させておくことで、図10に示すように過給圧の応答速度を約15%向上させ、加速初期から充填効率を高めることでアクセルレスポンスを向上させた。

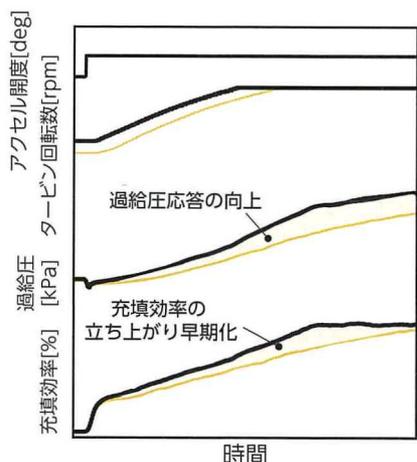


図 10 ウェストゲートバルブ制御改良による過給圧応答性の向上 (太線: 制御改良後 細線: 改良前)

上記 WGV の制御にあたっては、排気エネルギーの状態に応じてバルブに印可する圧力を適切に制御する必要があるが、排気エネルギーは運転状態に応じて変化するために膨大なマップの決定が必要になる。本開発では、エンジンモデル上で算出した排気エネルギーから適切な過給圧を実現するためのウェストゲートバルブへの印可圧力を決定した。

3.3 軽量化

アルミダイカスト製シリンダブロックに、図 11 のように浅底ウォータジャケット、細径ヘッドボルトを採用して剛性を最適化することで、外壁の薄肉化を図った。また、高強度アルミ製シリンダヘッド、中空組立カムシャフトにより軽量化を達成した。ピストン、クランクシャフトのような運動系部品についても CAE を活用し、徹底した軽量化によって、同等出力のエンジン群のなかでは世界最軽量を達成し、車両全開性能のみならず高レスポンスにも大きく貢献した。

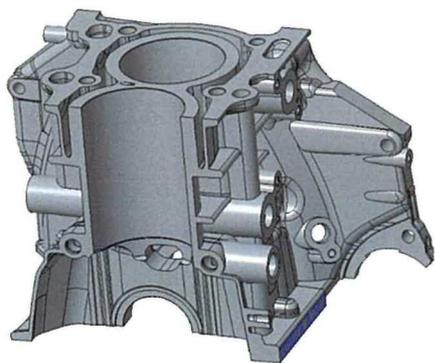


図 11 ブロック浅底ウォータジャケット構造

3.4 冷却性能

シリンダヘッド内のウォータジャケットを 2 段構造とし、下側ウォータジャケットに冷却水を集中的に流すことで低圧損化の実現と燃焼室部の冷却を強化した。また、燃焼室上部から上側ウォータジャケット壁までを繋いだ通し柱構造を採用し、燃焼室部を補強して高筒内圧、熱負荷の増加に対応した。また、鋳鉄ライナーポア間のドリルパス流量についても、従来比約 30% 向上させるとともに、浅底ウォータジャケットの採用により燃焼室部の冷却性能を確保した。このような冷却システムの低圧損・低容量化によって、ヒーター性能および暖機過程時の燃費についても向上させた。

3.5 潤滑性能

潤滑系の開発にあたっては、プロドライバーのサーキット走行時に車両にかかる前後および左右発生 G を目標とし、高 G まで耐えうる仕様とした。オイルポンプは、コンパクトなクランクシャフト同軸駆動方式のサイクロイドローターとし、構造を最適化することにより信頼性の向上を図った。また、オイルパンについてはバッフルプレート一体式を採用することで、高 G 時のオイル油面についても潤滑性能を確保した (図 12)。

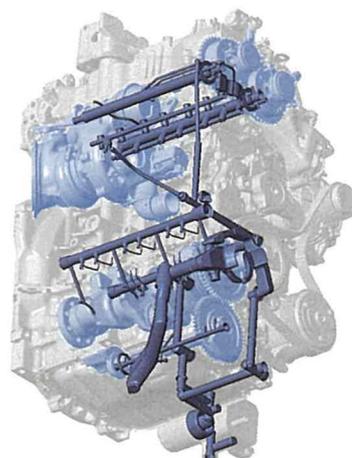


図 12 エンジン潤滑油路レイアウト

3.6 排気対応技術

本エンジンでは、高出力のみならず環境性能にも配慮し開発した。エキゾーストマニホールドとターボチャージャーを一体とすることで、軽量化と搭載性の向上を図るとともに、排気系部品の表面積を低減し排気ガスの抜熱量を低減した。また、マニホールドブランチおよびターボのウェストゲートバルブ

の排気流路の形状を最適化することで、触媒への排気ガス流れを均一にした。その結果、抜熱量の低減とあわせて、冷間始動時の触媒暖機性を確保した。また、流路形状の最適化によって排気干渉の低減とターボ効率の確保を同時に実現した。

一般的に、高出力化のためには大流量のインジェクタを必要とし、ペネトレーションの増大により燃焼室内壁面への燃料付着量が増加する傾向があるが、今回、**図 13** および **図 14** に示すように、マルチホール直噴インジェクタの噴孔形状を最適化することで、ボアへの燃料付着量を抑制し PN 排出量の低減を図った。さらに、新規開発の基材を採用した Gasoline Particulate Filter (GPF) を活用することで、低圧損と高捕集率を達成し、出力目標を達成するとともに欧州 Euro6d 規制への対応を可能とした。

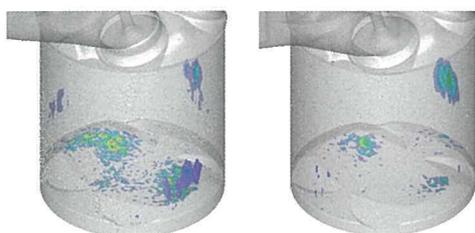


図 13 噴孔形状の最適化による壁面付着量の低減 (左図：改良前、右図：改良後)

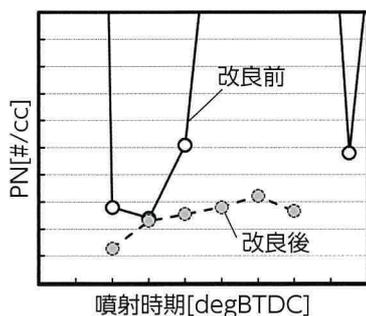


図 14 燃料噴射時期に対する PN 排出量

4 エンジン性能および車両性能

4.1 エンジン性能

前述の技術を織り込むことにより、**図 15** に示すように幅広い回転領域で圧倒的なトルクを有するエンジン特性を実現した。

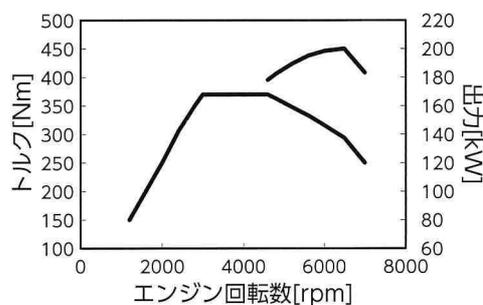


図 15 エンジン出力性能

4.2 車両性能

加速性能についても、圧倒的なエンジントルクや徹底した車両の軽量化によって、**図 16** に示すようにレスポンス同等で B セグメント競合を凌駕する圧倒的な加速感を実現し、全開性能について 0-100km/h 加速 5.2sec を達成した。

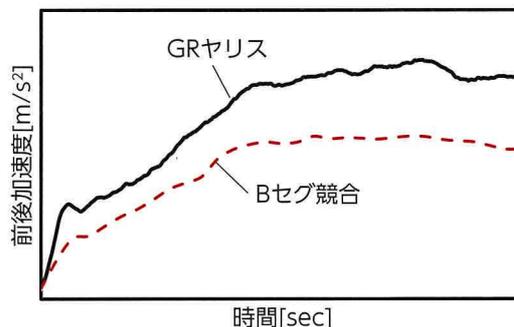


図 16 車両加速性能

5 まとめ

GR ヤリスに求められる圧倒的な運動性能を実現するために、高出力、高レスポンス、軽量化を極限まで追求した新型直列 3 気筒 1.6L ターボエンジンを新開発した。

(1) 高出力・高レスポンス

ラリー常用域で出力最大となるよう最適なエンジン骨格を新設計し、高速燃焼により耐ノッキング性を向上することで、目標とする高出力化を達成した。また、ボールベアリング、アブレダブルシールの採用によりトップレベルのターボ総合効率を実現し、ウェストゲートバルブの制御改良とあわせることで、高レスポンスと圧倒的な加速感を両立した。

(2) 軽量化

アルミダイカスト製シリンダブロック、高強度アルミ製シリンダヘッド、中空組立カムシャフトの採

用および運動系部品の徹底的な軽量化により同出力のエンジン群で最軽量を達成した。

(3) 環境性能

排気ガス流れの最適設計およびマルチホール直噴インジェクタの噴孔形状の最適化により、Euro6d規制への対応を実現した。

最後に本エンジンの開発にあたって多大なるご支援、ご協力をいただいた全ての関係者の皆様に深謝の意を表す。

■参考文献

- (1) 湯浅貴夫, 山崎, 能川, 森: 新型 V6 3.5L 過給ガソリンエンジン. 自動車技術会学術講演会講演予稿集

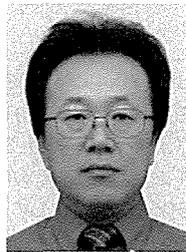
■著者



山成 健司



山地 一徳



萩原 健志



熊谷 厚法



小山 裕靖

GR-FOUR ～ GR ヤリス用 4WD システム～

GR-Four
-The 4WD System of the GR Yaris-

新井 政行 *1 前田 直明 *2 石川 慎一郎 *2
Masayuki Arai Naoaki Maeda Shinichiro Ishikawa

要旨

新型 GR ヤリスとして、あらゆる路面で圧倒的な加速性能と操縦安定性を両立するため、軽量かつ高出力エンジンに対応した高容量、高応答、高精度な 4WD システムを新開発した。電子制御多板クラッチを新たに開発し、トランスファとリヤディファレンシャルを異なるギヤ比にすることで幅広い前後配分比と高応答な駆動力伝達を実現させ、さらに四輪駆動力最大化のために前後ディファレンシャルにはトルセン®LSD (Limited Slip Differential) を採用した⁽¹⁾。また、お客様の好みや走行シーンにあわせ駆動力配分を可変できるモード切替スイッチを採用し、スポーツ 4WD としての走りの魅力向上に大きく貢献している。

本稿ではこの新 4WD システムに関し開発の狙いからユニット開発内容、4WD 制御技術について紹介する。

Abstract

A new high-capacity, responsive, and highly accurate four-wheel drive (4WD) system was developed for the lightweight high-power engine of the GR Yaris with the aim of delivering exhilarating acceleration performance and handling on any road surface. This system features a new electronically controlled multi-plate clutch that enables a wide range of front/rear torque distribution ratios and high-response driving force transmission by adopting different gear ratios for the transfer case and rear differential. In addition, front and rear Torsen® limited-slip differentials (LSDs) were adopted to maximize the driving force at the four wheels.⁽¹⁾ Furthermore, a mode control switch was adopted that allows the driver to select the optimum driving force distribution in accordance with preference and the driving scenario. This flexibility contributes greatly to the creation of exciting driving performance suitable for a sporty 4WD system. This article describes the development of this new 4WD system, including the development aims, the details of component development, and the 4WD control technology.

キーワード 4WD, 電子制御多板クラッチ, ディファレンシャル, 前後駆動力配分, 4WD 制御モード

1 はじめに

セリカ GT-FOUR 以来ほぼ 20 年ぶりのスポーツ 4WD 車両である GR ヤリスに相応しい 4WD システムを開発するにあたり、ヤリス WRC 降臨モデルとして 4WD システム構成や制御をゼロから構築し、開発を推進した。また、WRC をはじめとした様々なレースに参戦している社外プロドライバーによる徹底した走り込みとその走行データの解析結果を開発へフィードバックすることにより、完成度の高い 4WD システムの実現を目指した。

本稿において、4WD システム構成やユニット開発、制御開発を紹介する。

2 開発の狙い

GR ヤリスは、「モータスポーツからクルマをつくる」という理念を掲げ開発を実施した。4WD システムについてもこの理念に則り、モータスポーツで勝つこと「Competitive」と誰が乗っても楽しい「Fun to Drive」の両立を狙い開発を行った。

また、上記性能を実現する手段として、とくに「高容量」、「高応答」、「高精度」に拘り 4WD システムを構築した。

*1 パワートレインカンパニー 電動パワートレ制御機能開発部

*2 パワートレインカンパニー パワートレイン機能開発部

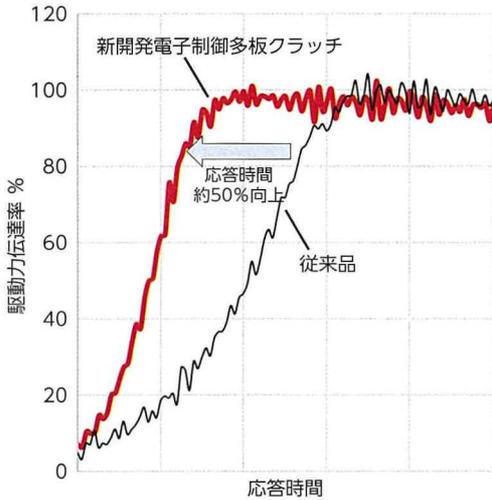


図4 電子制御多板クラッチ応答時間比較

高精度な駆動力配分を行うにあたり、電子制御多板クラッチは出力伝達特性を全数測定し、その特性を4WD ECUに記録させた。こうすることで、個々の電子制御多板クラッチの伝達特性を考慮した制御が可能となり、生産する全てのGRヤリスで緻密な駆動力配分を実現した。

モータスポーツなどの高負荷環境にも対応させるため、シャフトの中空化による油量確保、ユニット周辺の風流れの最適化を実施した。また、温度センサを搭載することで極低温からサーキット走行などでの高温まで、あらゆる環境下で高精度な駆動力制御を可能とした。

3.3 トランスファ、リヤディファレンシャル

3.3.1 ギヤ比の設定

GRヤリス用4WDシステムで採用した電子制御多板クラッチでは、後輪への駆動力伝達にクラッチ前後の差回転（前側回転数 > 後側回転数）を利用している。GRヤリスでは、トランスファとリヤディファレンシャルを異なるギヤ比にすることで、高応答な駆動力配分と幅広い駆動力配分範囲を実現した。

このギヤ比差は車両姿勢にも影響する。例えば、図5のようにギヤ比差を大きくすると前後輪の旋回軌跡差を大きくすることができ、FR車のようなリヤスライドが可能となる。しかし、一方でリヤの動き出しが速くなり、リヤスライド量がギヤ比差による旋回軌跡差以上になった瞬間、車両挙動が不安定になってしまう。そこで、様々なギヤ比差を製作し評価・検証を繰り返し、自然な車両挙動となる最適なギヤ比を決定した（表1）。

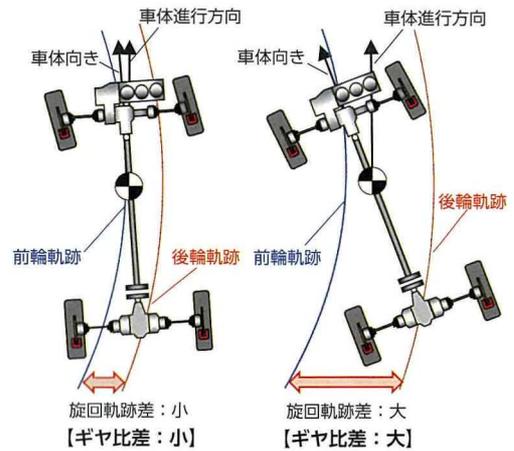


図5 ギヤ比差による旋回軌跡差イメージ図

表1 GRヤリス前後ギヤ比

		トランスファ	リヤディファレンシャル
型式		GF1A	FD15FE
減速機構	形式	ハイポイドギヤ	ハイポイドギヤ
	ギヤ比	0.436 (17/39)	2.277 (41/18)

3.3.2 ハイポイドギヤ

トランスファとリヤディファレンシャルは、ハイポイドギヤ諸元を見直すことで、駆動力伝達時の発熱量を低減させるとともに、強度と耐久性を確保することで高出力エンジンに対応した。

3.4 ドライブシャフト

高出力エンジンに対応させるため、ドライブシャフトも同様に高剛性化を実施した。高剛性化にあたり、質量増加を極力抑えたうえで前後ドライブシャフトの剛性比を最適にすることでホイールスピンを低減し、四輪駆動力を最大まで使った高い発進加速性能を確保した（図6）。

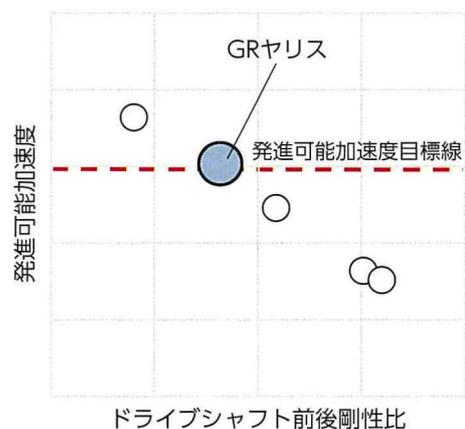


図6 前後剛性比×発進可能加速度相関

3.5 トルセン[®]LSD

GR ヤリスの RZ High Performance では、四輪のトラクションを確実に路面へ伝達するため、前後ディファレンシャルにトルセン[®]LSD を採用した。左右のトルクバイアス比を最適化することで、路面環境を問わないトラクション性能と旋回性能を両立できる性能を実現した。

3.6 軽量化効果

前述した運動性能を向上させるための各種技術だけでなく、軽量化もモータースポーツで重要な要素である。今回の GR ヤリス用の 4WD システムは、幅広い前後駆動配分比を確保しつつ、シンプルな構造とすることで、センターデフ式 4WD システムに対し、約 20%の軽量化を達成した (図 7)。

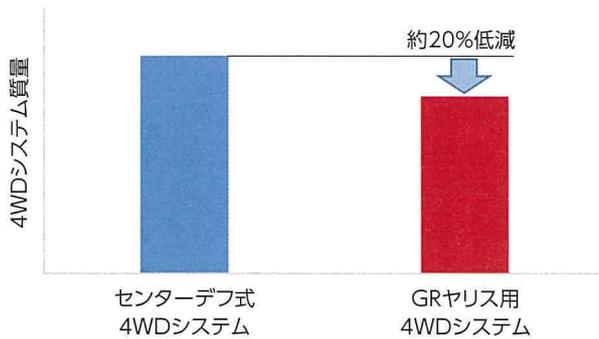


図 7 4WD システム質量比較

4 4WD 制御技術

本章では、GR ヤリス用 4WD システムの開発コンセプトである「Competitive」と「Fun to Drive」の両立を実現するために採用した制御技術について述べる。

4.1 高応答・高精度制御技術

センターデフ式と同等性能を電子制御多板クラッチ式で実現させるため、後輪へ駆動力を伝達させる電子制御多板クラッチは、従来に対し高応答かつ高精度な制御が必要だった。高精度化に関しては、前述した電子制御多板クラッチごとの出力特性情報を 4WD ECU へ書き込むことで解決した。

高応答化に関して、GR ヤリスに搭載された G16E-GTS エンジンには出力応答が非常に速い。そのため、吸入空気量と点火時期によるエンジン出力値の情報を用いた従来の 4WD 制御では、後輪への駆動力伝達に遅れが生じてしまった。そこで、今回

の 4WD 制御では本情報に加え、ドライバのアクセル開度情報から算出される要求エンジン出力値の情報を新たに追加し、両方の情報から後輪へ伝達させる駆動力指示値を生成し前出しさせた。図 8 に制御概要図を示す。コントロールカム角度などの機構的に高応答化した電子制御多板クラッチやドライブシャフトの高剛性化とあわせ、後輪への駆動力遅れを低減し、アクセル操作により四輪が同時に加速可能な高い応答性を確保した。

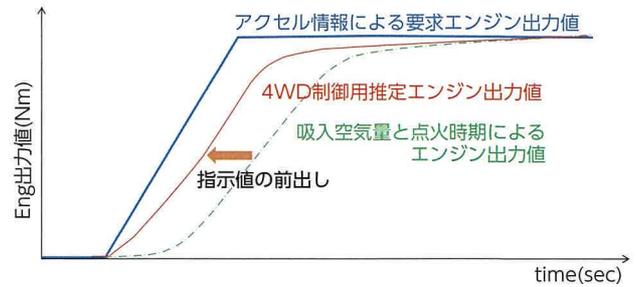


図 8 4WD 制御用エンジン出力情報推定概要図

4.2 4WD 制御モード

4WD 性能の最適化を図るうえで、ドライバが車両挙動を予見しやすくなる 4WD 制御を目指した。そのために、ドライバ操作情報に関して、従来から使用しているアクセル開度、舵角センサ、ストップランプ信号などに加え、ブレーキ圧も使用し、ドライバの操作意思の推定精度を向上させた。この操作意思情報と車輪速センサや加速度センサ、ヨーレートなど様々な車両状態情報とを組みあわせることで、ドライバの意思を尊重した最適な 4WD 制御を実現した。

GR ヤリスでは、前後の駆動力配分比をドライバの好みや、路面状況に応じて 3 種類から選択可能なモード切替スイッチを設定した (図 9)。

エンジン始動時に作動するデフォルトの NORMAL モードでは、基本前後配分を 60:40 にし、市街地から雪路まで運動性能をバランスさせたモードとした。

SPORT モードでは、基本前後配分を 30:70 とし、駆動力を後輪寄りにすることで、ワインディング路などハンドル操作によって、きびきびとした車両挙動となるように制御し、「Fun to Drive」を狙ったモードとした。

TRACK モードは基本前後配分を 50:50 にし、四輪の駆動力を余すことなく路面に伝えられるようにした。さらに、プロドライバによってサーキットを

走り込んだ結果を反映させ、緻密に制御することで「Competitive」の実現を狙ったモードとした。

それぞれのモードにおいて、基本前後配分だけでなく、前述したドライバ操作情報や車両挙動情報から、アクセルOFF時の制御量やスリップ時のフィードバック制御もモードごとに区別した。こうすることで、モードを操作した瞬間、車両挙動の違いがお客様に伝わるように最適設計をした。

モード切替スイッチ	モード	基本前後配分
	NORMAL	基本前後配分 60:40 F ██████████ R ██████████
	SPORT	基本前後配分 30:70 F ██████████ R ██████████
	TRACK	基本前後配分 50:50 F ██████████ R ██████████

図9 4WDモード切替スイッチ

図10は雪路における定常旋回から加速した際のモードごとの車両挙動の違いを示す。

制御可能な前後配分比の拡大によってモードごとに旋回軌跡や車両姿勢が異なり、SPORTモードでは後輪へ多く駆動力を流すことでスライドコントロールのし易い車両姿勢を実現した。

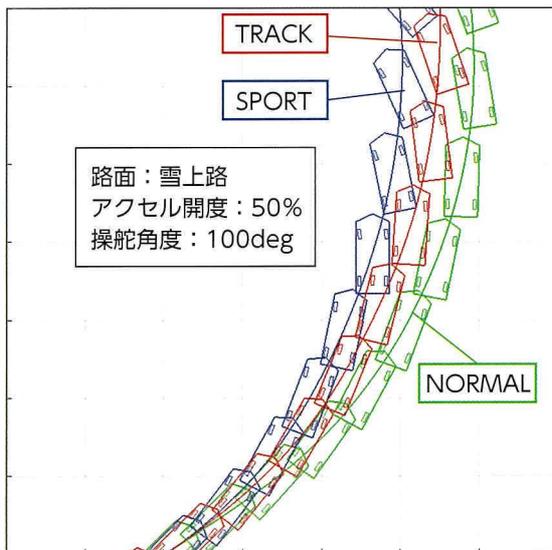


図10 4WDモードによる車両旋回軌跡差

4.3 走りへの拘り

GRヤリスは、「モータスポーツからクルマをつくる」を理念に掲げ開発を実施したが、4WD制御構築においても同様に、モータスポーツでの使われ方やドライバが求めるものをしっかり把握し開発へ織り込む必要があった。

制御構築にあたり重視したのは、限界域での予見性を如何に向上させるかであった。予見性が向上すると常にクルマと対話することができ、結果として車両挙動のコントロール性の向上とサーキットでのタイムアップへ繋がった。

この限界域での予見性を向上させるため、GRヤリスでは、あえて基本配分制御を主軸とした制御とした。開発のなかでは理想の車両挙動を狙い、ストレートやコーナーなどの走行状態によって配分比が常時可変となる仕様も検討した。しかし、通常走行域では全く問題がなかったが、サーキットなどでタイヤの限界域を使った際の挙動が、ドライバにとって読みにくいという課題が発生した。

そこで、ドライバ主体の制御とし、ドライバ操作の補助やトラクションを確保させる形でのフィードバック制御にするように制御を一から見直した。

実際の走行に応じた制御の動きをTRACKモードを例に下記に記載する(図11)。

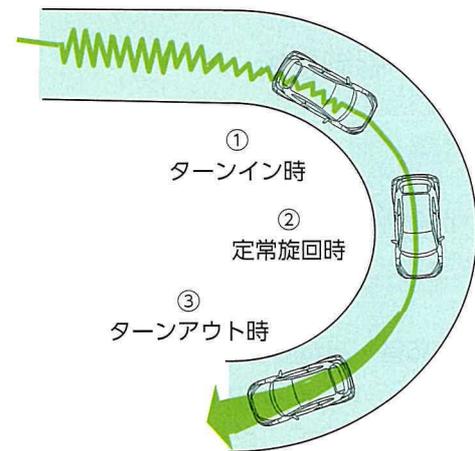


図11 旋回時シーン別図

① ターンイン時

ブレーキングしながらのコーナーへの進入では、操舵によって前輪がしっかりインに入り、後輪は接地荷重が減少するなかでも安定した挙動が求められる。このとき、後輪への駆動力を増加させると後輪の接地感が増加し安定した挙動を確保できるが、多くすぎると曲がりにくくなってしまふ。

そこで、適値を探るため、一般走行だけでなく、ドイツのニュルブルクリンク北コースなど、様々なサーキットで徹底した走り込みを実施した。

その結果、TRACK モードは制動時に後輪へ伝達する駆動力の大きさやドライバ操作に対する挙動を他モードとは異なる設定にすることで、旋回性と安定性を高次元で両立させた。また、RZ High Performance ではトルセン[®]LSD の効果も加わり、さらに高い車両安定性に貢献した。

② 定常旋回時

アクセル OFF から ON への操作において、駆動力の発生が唐突だと車両挙動が乱れてしまう。これではターンアウトに向かって思い切った加速をすることができない。そこで、プロドライバの素早いアクセルワークにも対応できるように、アクセル OFF 時の後輪駆動力を最適化し、減速から加速での駆動力の繋がりを確保した。

③ ターンアウト時

加速時の前後駆動配分は、前後等配分を基本とし、四輪トラクションの最大化とドライバの操作に対する車両挙動の予見性の確保を狙った制御を実施した。

また、タイムロスと低減すべく微小スリップ域からスリップ抑制制御を実施し、加速性能の確保に貢献した。RZ High Performance では、トルセン[®]LSD によって加速時に旋回ヨーモーメントを発生させ、さらに高い旋回性能と加速性能を実現した。

図 12 は東京オートサロンでの GR ヤリス発表後、プロドライバとさらなる性能の作りこみをした際の結果を示す。

上記②～③のアクセル OFF から ON における駆動力配分の改良後にて、前後輪の回転数差が大幅に減少しており、ドライバからも思い切って加速することができるというコメントをいただいた。

データからもアクセルの踏込速度が向上しており、結果として、コーナー脱出後の加速度をより一層向上できていることがわかった。

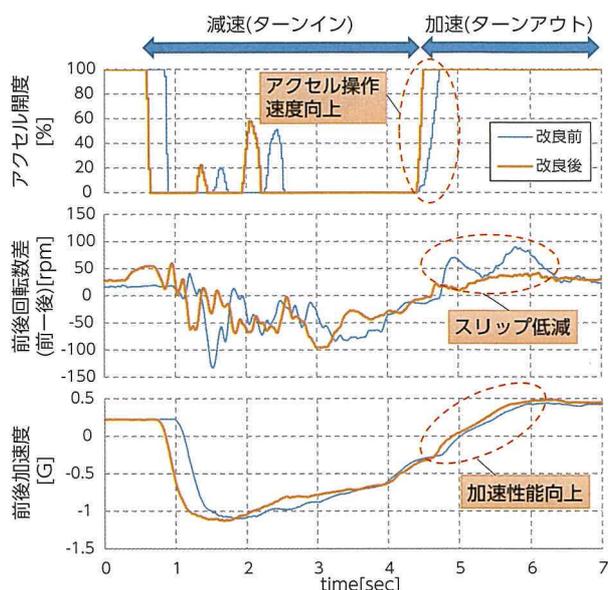


図 12 4WD 制御改良前後の旋回性能比較

5 おわりに

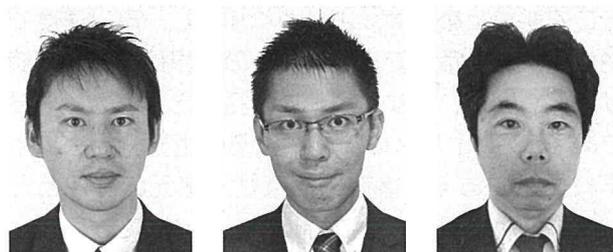
徹底した走り込みとその走行データを解析・分析し、開発へフィードバックさせることで、スポーツ 4WD 車両として相応しい 4WD システムを開発することができた。本 4WD システムの開発にあたって、多大なご協力をいただいた関係会社の皆様に深謝の意を表す。

今後も多くのお客様に安心、安全と運転する楽しさをご提供できるよう、開発を推進していく。

■参考

(1) トルセン[®] は(株)JTEKT の登録商標です。

■著者



新井 政行

前田 直明

石川 慎一郎

高次元の走りの実現 ～ GR ヤリスのシャシー・運動性能開発～

Realization of Superlative Driving Performance
-Development of the Chassis and Dynamic Performance of the GR Yaris-

永田 孝明 *1 大庭 恵太 *1 大金 昌宏 *1
Takaaki Nagata Keita Oba Masahiro Ogane
岩田 陽介 *1 堀江 昌範 *1 小園 浩平 *1
Yosuke Iwata Masanori Horie Kohei Kozono

要旨

4WD スポーツとして、限界領域まで扱いやすく、且つクラス最速を達成すべくシャシー開発を行った。走りの素性を向上させた TNGA (Toyota New Global Architecture) をベースとし、スポーツ走行に特化させるため、さらなる質量、慣性などの素性の追求、前後サスペンションの変更、ブレーキの新規開発、操作系配置の変更を行った。また、一般走行からスポーツ走行まで全域の扱いやすさを向上させるため、トップレベルのレーシングドライバによるサーキットをはじめとするさまざまな場面での適合を行い、運動性能を磨いた。

Abstract

The chassis of the sporty four-wheel drive (4WD) GR Yaris was developed to facilitate handling from normal driving conditions to the limits of performance, and to become the fastest vehicle in its class. Based on the Toyota New Global Architecture (TNGA) design philosophy that focuses on enhancing the fundamentals of driving performance, a wide range of modifications were adopted to emphasize the sporty dynamics of the GR Yaris. These included further enhancing fundamental performance aspects such as mass and inertia, changing the front and rear suspensions, developing new brakes, and adjusting the shift layout. In addition, to facilitate handling in all situations, from every-day to sporty driving scenarios, and to refine the vehicle dynamics, the chassis was tuned under various conditions, including on a racetrack by top-level racing drivers.

キーワード 操縦安定性、サスペンション、ブレーキ、シフト、ペダル、適合評価

1 開発の概要

ライバルより速く走るモータースポーツの世界。そこで勝つためには、より速く加速し、高い速度で曲がり、短い距離で止まる。その限界領域で走り続けるための扱いやすさ、車と会話できることが必要である。GR ヤリスは、まさにその世界のために生まれた車である。徹底的な素性、諸元の確保とともに、生かし切る適合を行った。それをできるだけお求めやすい価格でお届けする。本稿では、4WD RZ、RZ High Performance 仕様に絞って開発内容を紹介する。

2 質量、慣性などの素性の追求

物理の限界を超えて速く走ることはできない。ライバルより良い素性となるよう構成を検討した。

車両の低重心化、高剛性ボデー、車両左右での重量均等化にこだわっている TNGA をベースに、ボデー形状、重心から遠い部品の材料置換などのさらなる追求により実現した。

2.1 低重心

タイヤのグリップ力、車両の旋回時耐転覆性の確保には、旋回時の左右輪荷重移動量を小さくする、すなわち重心高トレッド比 (=トレッド÷重心高) を大きくすることが必要である。低ルーフ、軽量化、部品を低く配置することで、低重心を実現。4WD スポーツ競合車以上の素性を確保した (図 1)。

*1 TC カンパニー TC 第 1 車両開発部

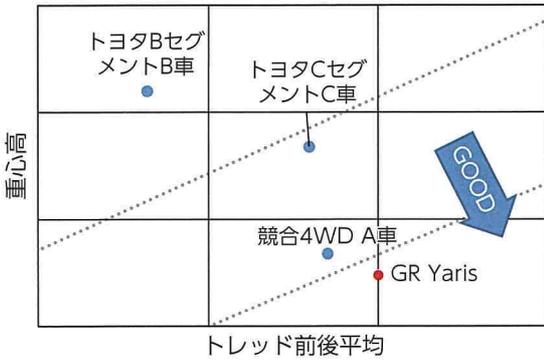


図1 重心高トレッド比 (社内測定値)

2.2 軽量, ヨー慣性, 前後重量配分

旋回の応答性を向上させるためには、正規化ヨー慣性モーメント (=ヨー慣性モーメント ÷ (質量 × ホイールベース² × Fr 軸重比 × Rr 軸重比)) を小さくすることが必要である。オーバーハング縮小、外板の材料置換を行うことで、正規化ヨー慣性モーメント 競合 4WD 車比 -5% を実現した (図 2)。また、ハッチバックタイプは不利となりやすい前後重量配分は、バッテリーの後方配置などにより Fr:Rr = 59:41 と競合 4WD 同等を実現し、旋回制動での安定性を確保した。

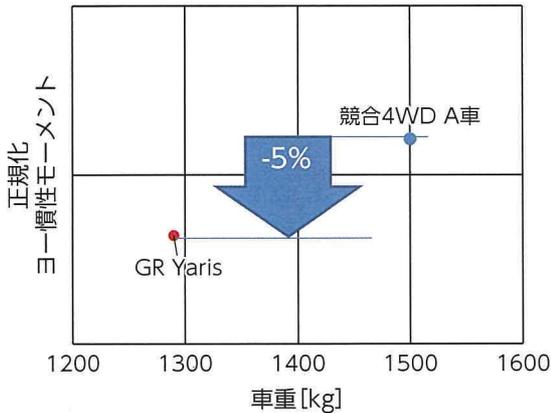


図2 正規化ヨー慣性モーメント (社内測定値)

2.3 ボデー剛性

高出力エンジン、高い旋回入力に対応させるため、ボデーの高剛性化が必要である。スポット打点増し打ち、特殊な構造用接着剤の使用箇所を延長、ウィンドシールドガラスおよびクォーターガラスの接着に高剛性ウレタン接着剤を使用。ねじり剛性はベースのヤリスに対して 23% 向上している。

2.4 空力操安

WRC で勝つためのルーフ形状最適化のほか、前

輪はホイールハウス内整流のためのフェンダライナ気流排出フィン、後輪はバンパーシールに整流フィン設定、さらに車両後部への整流のための Rr バンパー下端折り返し形状などにより、高速走行での車体安定性を向上させた。

2.5 タイヤサイズ選定

タイヤのグリップ力を確保するには、低い負荷率で使用することで有利となる。ジムカーナなどの競技規則上、タイヤサイズの変更幅に制約があるため、競合 4WD に対して、低いタイヤ負荷率 (タイヤ外径 × 呼び幅で代用) となるようタイヤサイズ 225/40R18 を選定した (図 3)。

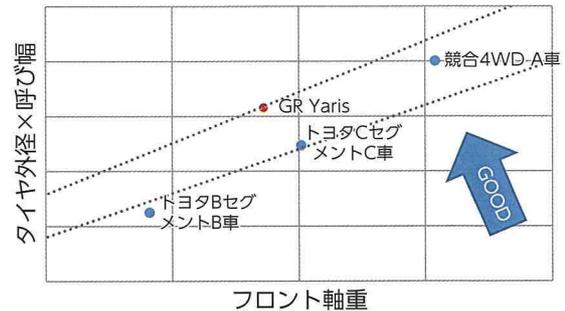


図3 タイヤサイズプロット (社内測定値)

3 サスペンション

3.1 対地キャンバ角拡大

タイヤの性能を発揮させるためには、対地キャンバ角を適切な範囲で用いることが重要である。旋回時は、車両がロールすることにより、対地キャンバがタイヤの性能が低下するポジティブとなる。それをキャンセルするため、イニシャルキャンバを拡大 (図 4)。フロントはナックル、リヤはアッパーアーム長さを変更することで実現した。

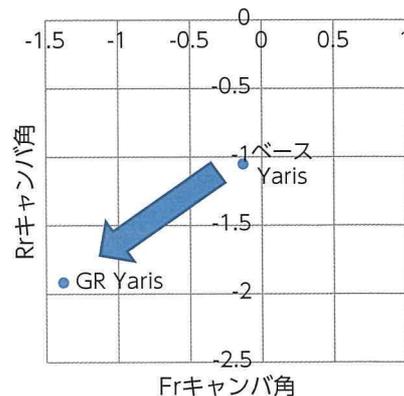


図4 イニシャルキャンバ角設定

3.2 工程特別対応

狙いのものを量産する特別な工程を用意した。詳細は、GR Factory 稿を参照。

3.3 フロントサスペンション

前後重量配分、コントロール性を考えるとフロントサスペンションには、軽量・高剛性な特性が必要である。マクファーソンストラット式の GA-B プラットフォーム (P/F) をベースとし、ジオメトリ変更し、4WD スポーツ車に最適化した。図 5 にて専用部品を黄色で示す。

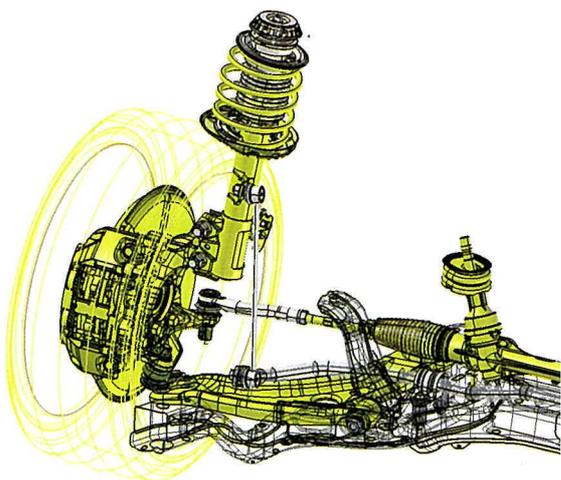


図 5 フロントサスペンション

コーナーでのハンドルもちかえ操作頻度を低減し、軽快な操舵応答を得るため、オーバーオールステアリングギヤ比 (OA ギヤ比) を 12.3 (RZ) に設定。ロールセンタ高さ最適化、OA ギヤ比縮小、イニシャルキャンバ角拡大とともにナックルを新設することで実現した。

また、応答性、コントロール性を向上させるため、ロアアームブッシュ、ハブベアリングを高剛性化し、新設した。アブソーバは、高い応答性確保のため C35 サイズのピストンとし、KYB 製 Prosmooth を採用し、高いボデーのコントロール性、ライトレース性を実現した。

なお、操舵感、空力操安の向上を狙い、フロントハブベアリングのグリースに、導電、除電性をもたせたものを世界ではじめて採用した。

3.4 リヤサスペンション

スポーツ 4WD 車に必要なとされる剛性、幾何特性を確保するため、GA-C P/F のトレーリングア

ム式ダブルウィッシュボーンサスペンションを採用 (図 6)。

ロアアームのキャリア側ジョイント 2 箇所に、ボールジョイントを採用した専用リヤキャリアを新設。Z 軸まわりのねじり剛性を増加させることで、限界領域でのコントロール性を大幅に向上させた。

アブソーバは、高い応答性確保のため、C32 サイズのピストンを採用した。

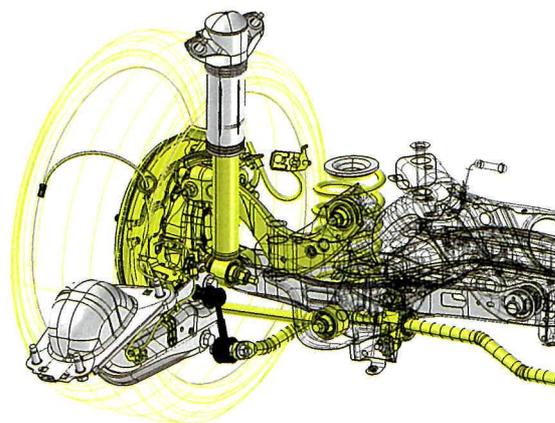


図 6 リヤサスペンション

3.5 サスペンションにおける少量生産対応

必要な性能を確保しながら、できるだけお求めやすい価格にするため、型投資の削減に取り組んだ。少量生産の場合、部品費に占める型費の割合が大きくなるためである。

フロントサスペンションは、GR ヤリスの開発と並行して、GA-B P/F を開発していたため、ロアアーム、アッパーサポート、ストラットなどに GR ヤリスの要件を織り込んで開発を行った。ロアアームブッシュは、金具はベース車と共通利用し、ゴム型の新設で対応。リヤサスペンションにおいては、各特性を最適化するにあたり、TNGA による幅広い部品の品ぞろえを駆使した。トレーリングアームのブッシュ、リヤハブベアリングが代表例である。

4 ブレーキ

4.1 キャリパ・ディスクロータ

ニュルブルクリンク北コースをはじめとするサーキット走行時の耐フェード性能とブレーキフィーリングを確保するため、ブレーキはフロント 18 インチ、リヤ 16 インチを新規に開発した (図 7)。

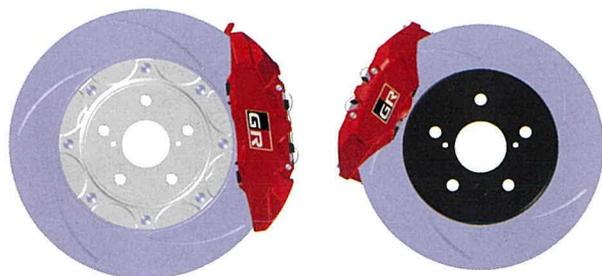


図7 フロントブレーキ (左) /リアブレーキ (右)

ディスクロータ外径はフロントφ 356mm, リヤφ 297mmで熱容量を確保 (図8)。フロントには、冷却性向上のためにスパイラルフィン, 軽量化のためにベルハウジングをアルミとした2ピース構造を採用。また, フロント・リヤともに耐フェード性能向上のために, 摺動部表面にスリットを追加した (表1)。

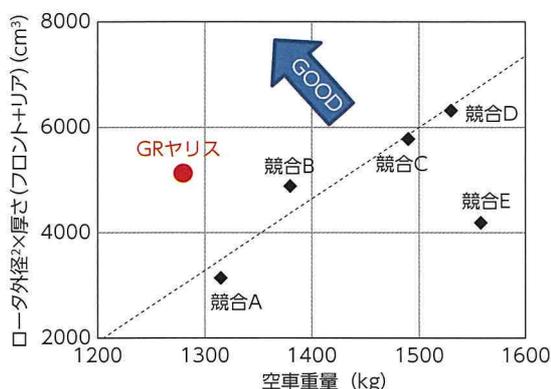


図8 ディスクロータ熱容量比較

表1 ディスクロータ諸元

	フロント	リヤ
タイプ	スリット入り スパイラルフィン式 ベンチレーテッド 2ピースディスク	スリット入り ベンチレーテッド ディスク
外径 (mm)	φ 356	φ 297
厚さ (mm)	28	18

キャリパーは, フロント・リヤともにアルミ対向モノブロックで, フロントは4ポット, リヤは2ポットとし, 軽量化とブレーキパッドの偏摩耗抑制を実現。ブレーキパッドにはロースチール材を採用し, 効きと耐フェード性能を確保した。また, RZ "High performance" には標準, RZ にはオプションで GR 専用に新色のレッドのカラードキャリパーを設定し, GR ロゴを配した。

フロントブレーキの冷却性向上を狙い, RZ "High performance" には, 標準でブレーキダクトを設定した。

4.2 ブレーキフィーリング

スポーツ車に求められるブレーキの効き・剛性感, 抜きのコントロール性, ヒール&トゥのやり易さを高次元でバランスさせるために, ブレーキペダルストロークをショートに踏力を重めにチューニング。図9のように低減速度から踏力コントロールとした。また, 耐フェード性能を確保したことで, 図10のようにサーキット走行時のフィーリング変化を少なくした。

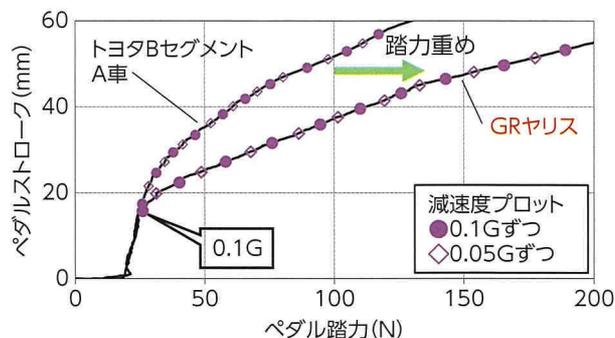


図9 ペダル踏力-ストローク+減速度プロット

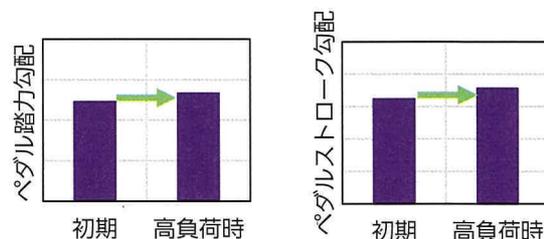


図10 減速度に対するペダル踏力とストローク勾配変化

4.3 ブレーキ制御

走ることの楽しさをより追求するため, 限界付近でのドライバーコントロール領域を残しながら, 車両挙動の乱れを緩和する EXPERT モードを設定。EXPERT モードを選択すると VSC (Vehicle Stability Control) 制御作動可能状態に比べてオーバーステア時は, ブレーキ制御介入を減らし, アンダーステア時は, トレース性重視のブレーキ制御介入によりスポーティーな走行が可能となる (図11)。

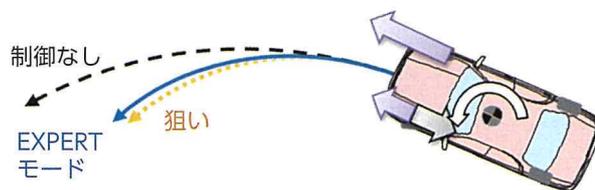


図11 アンダーステア時 制御イメージ

4.4 パーキングブレーキ

パーキングブレーキには、手引きのドラムイン式を採用し、スポーツ車に必要とされるパーキングブレーキの効きと操作性を確保した。

4.5 競技対応

ラリーのグラベルやダートラの競技へ参加する場合、ホイールのインチダウンが必要である。そこで、**図 12**のようにキャリパ本体と取り付けのブラケットを別体とすることで、ブラケットを変更できるようにした。

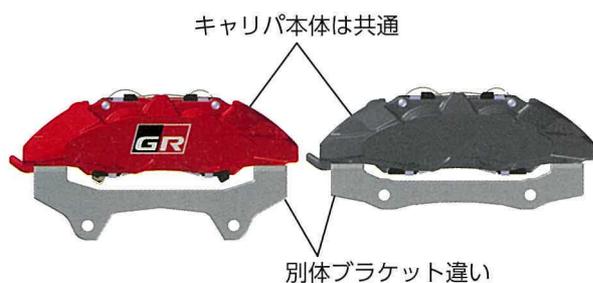


図 12 フロントキャリパ
標準設定 (左) / インチダウン (右)

5 操作系部品

5.1 シフト

スポーツドライビングに適したシフトノブ位置と正確で素早い操作を可能とする荷重・ストローク特性をトヨタ独自のシフト・クラッチシミュレータ (**図 13**) を用いて作り込み、感性重視の目標性能を決定した。専用の台座ブラケットを新たに設計し、シフトレバーのシャフト長 (回転中心～ノブ位置) を 50mm 短縮、ベースのヤリス比 30% ストローク低減とレバー比分担の最適化により剛性感を向上させ、シフトノブ位置とシフトフィーリングを両立させた (**図 14**)。シフトケーブルは、経路と特性を大幅に見直し、高効率・高剛性化を図るとともに、高温のエキゾーストマニホールドの近傍を通すため、高耐熱のケーブルを新開発した。

新設 6MT は、1st ~ 3rd トリプルシンクロ (1st & 2nd はカーボンシンクロ) ・ 4th ダブルシンクロを採用、シフトノブ質量を 250g に増やしたものを新設し、システムとして目標性能を具現化した。



図 13 シフト・クラッチシミュレータ

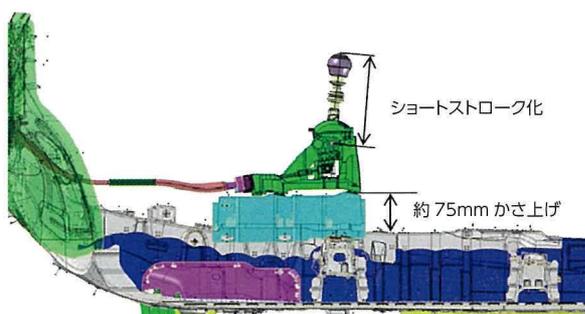


図 14 シフト配置図

5.2 ブレーキペダル

ヒール&トゥ操作性のため、アクセルペダルとブレーキペダルの間隔を狭めた。またこのため、生産工場にて組付時に部品の選別を行う特別な対応でばらつきを低減した。

5.3 クラッチ

シフト同様にシフト・クラッチシミュレータを用いて、荷重・ストロークの最適特性を作り込み、感性重視の目標性能を決定した (**図 15**)。

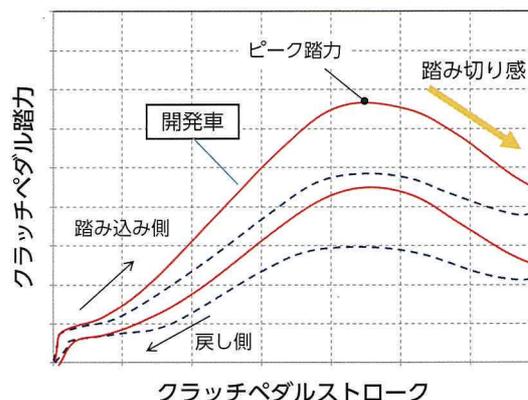


図 15 クラッチペダル踏力の狙い特性

新開発のクラッチとGR ヤリス専用のクラッチペダルアシスト特性を採用することで、スポーツドライビングに適した剛性感・踏み応えとピーク踏力以降の勾配を大きくし、踏み切り感を向上させ扱いやすい特性を実現した。また、新規エンジンの高トルクに対応するため、新開発のクラッチはクラッチディスク摩耗による踏力増加を抑える構造を採用した。また、アルミペダルパッドの踏面形状も踏みやすさのため変更した。

6 適合評価, 諸元設定

「モータースポーツから車をつくる」という今までとは逆の開発を進めていくうえで、適合評価の方法も変更した。

通常の運動性能開発は、東富士研究所を主体としたテストを実施しているが、軸を士別試験場・下山テストコースに移し、サーキットコースや高速周回路、カントリー路などより複合した車速や加速度条件のなかで走行性能を造りこんできた。また、ニュルブルクリンク、富士スピードウェイ、鈴鹿、筑波をはじめとするサーキットでも評価を実施した(図16)。



図16 サーキット評価光景

通常の車両開発では社内ドライバー主体の評価だが、GR ヤリスは開発初期段階からプロドライバー評価を行った。一般的なハイペース走行とレーシングドライバによるタイムアタック走行の違いを旋回と加減速を軸として標記したG-Gダイアグラムで示す(図17)。

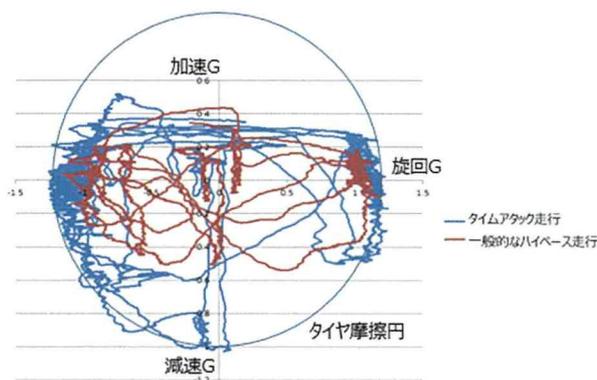


図17 G-Gダイアグラム

タイムアタック走行では、タイヤ摩擦円上を常に使い続けるように走行していることがわかる。この綱渡りを安定してできるようにするために、シャシ諸元、4WD 電子制御カップリングトルク、VSC 制御の最適化を行った。制動を追い込んだ際のRrのスタビリティを確保したセッティング、フロントタイヤグリップのインフォメーションを得るための重めの操舵力設定などに反映した。

適合においては、モータースポーツ活動を行っているTGR-Eのノウハウも活用。車速や加速度、ヨーレートのほか、サスペンションストロークも測定(図18)。ドライバコメントに対し、定量的に現象を把握。机上計算で対策を検討し、評価というサイクルをまわした。テストチームの運営も多くの部署の代表メンバーが一堂に集まり、プロドライバー評価コメント以外に、車載データロガーや各種計測器で測定した結果をもとに、すぐその場で性能改善のサイクルをまわし、実際のレース運営に近いサイクルで諸元や特性を決めた。

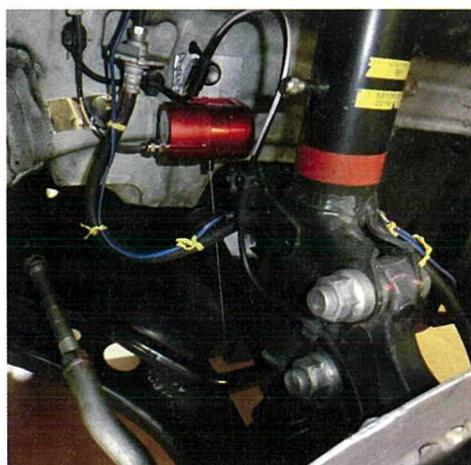


図18 サスペンションストローク測定

RZ：多くの方々に操る楽しさを楽しんでいただける設定

RZ Hi：より高い限界領域を攻め込むための設定
タイヤ、デフ、ばね、アブソーバ、スタビライザーをそれぞれ最適に設定した（表 2）。

表 2 仕様ごと代表諸元（違う部位太字）

	RZ	RZ High Performance
タイヤ	ダンロップ SP SPORT MAXX 050	ミシュラン Pilot Sport 4S
ホイール	ENKEI 製 鋳造	BBS 製 鍛造
LSD（前後）	オープン	トルセン
フロント	ばね定数 34N/mm スタビ諸元 ϕ 23.2 t3.6 アブソーバ減衰力 1550/880 伸 / 圧 @ 0.3m/s	36N/mm ϕ 24.2 t4.0 1610/890
リヤ	ばね定数 36N/mm スタビ諸元 ϕ 21 中実 アブソーバ減衰力 1130/870 伸 / 圧 @ 0.3m/s	← ← 1440/860
ロール剛性（前後合計）	2,360Nm/deg	2,540Nm/deg
ロール剛性フロント配分	61%	64%
EPS 定数	RZ 用	RZ High 用

■ 著者



永田 孝明



大庭 恵太



大金 昌宏



岩田 陽介



堀江 昌範



小園 浩平

7 結果

運動性能の一例として、18m スラロームの社内測定結果を示す。競合より速いことを確認した（図 19）。

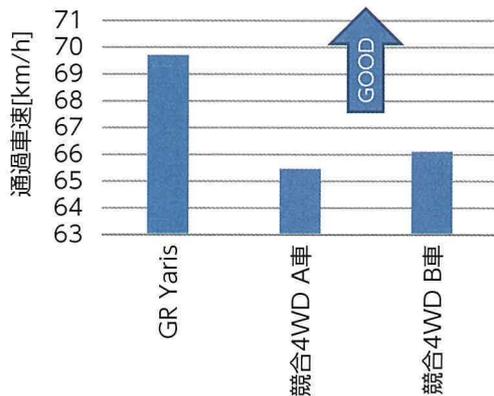


図 19 18m スラローム通過車速（社内測定値）

8 おわりに

20年ぶりにトヨタでの4WDスポーツカー開発を行った。手探りでの開発となったが、モータースポーツから学ぶことで、短期にここまで性能を確保することができた。開発にあたって多大なご協力をいただいた関係会社の皆様に深謝の意を表す。今後も、車を操ることを楽しむ方々に喜んでいただけるよう、さらなる性能・魅力を追求してまいります。

圧倒的な軽量化 ～ GR ヤリスのボデー軽量化技術～

Weight Reduction for Exhilarating Performance
-Weight Reduction Technology for the Body of the GR Yaris-

金森 智久^{*1} 中村 春樹^{*1}
Tomohisa Kanamori Haruki Nakamura
森田 一央^{*1} 山路 恭平^{*2}
Kazuhiro Morita Kyohei Yamaji

特集

要旨

GR ヤリスでは、“世界のいかなる道でも思いどおりに操れ「誰もが安心して思いのままに運転できる」クルマ”を目指し、車両の運動性能と密接な関係がある慣性諸元の素性を向上させるため、部品の最適配置や多くの軽量化技術を検討した。軽量化技術では、アルミ素材のフード、サイドドアおよびバックドアに加え、形状自由度の高い Sheet Molding Compound（以下 SMC）工法で成形された Carbon Fiber Reinforced Plastic（以下 CFRP）素材のルーフパネルを採用。さらに、ハイテン材をボデー骨格に最適配置することで車両の軽量化に貢献した。本稿では、ボデーの慣性諸元を向上させた部品配置や軽量化技術の概要について紹介する。

Abstract

One of the development aims of the GR Yaris was to realize a car that can be driven purposefully and with confidence by anyone on any road throughout the world. To enhance the fundamental specifications affecting the inertial characteristics of the vehicle, which have a close relationship with dynamic performance, the layout of components was carefully optimized and a wide range of weight reduction technologies was examined. Weight reduction technologies adopted on the GR Yaris include an aluminum hood, side doors, and rear hatch, as well as roof panels that are made from carbon fiber reinforced plastic (CFRP) and formed using sheet molding compound (SMC) processing for excellent geometrical flexibility. Further weight reduction was also achieved by incorporating high-strength steel at optimum locations throughout the body frame. This article outlines the component layout and weight reduction technologies adopted to enhance the inertial characteristics of the vehicle body.

キーワード 慣性諸元, アルミ, SMC, CFRP, ハイテン材, ヤリス

1 はじめに

GR ヤリスでは、“世界のいかなる道でも思いどおりに操れ「誰もが安心して思いのままに運転できる」クルマ”として、車両の運動性能と密接な関係がある慣性諸元の素性の向上に拘った。車両性能と慣性諸元の関係は図 1 に示す。本稿では、慣性諸元向上に貢献したバッテリーの最適配置やアルミ素材や CFRP 素材を活用し、車両の軽量化を実現した具体的な開発内容を紹介する。

2 慣性諸元の素性向上について

一般的に車両性能を向上させる際、エンジン部品や駆動部品、シャシー部品に着目することが多いが、GR ヤリスのボデー開発では、車両性能と密接に関係している慣性諸元に着目して、車両性能向上に貢献した。慣性諸元の車両質量に着目することが多いが、軽量化する際には、重心高や前後の重量配分、左右重量配分、慣性モーメントなどにも拘った。ボデー部品 1 点 1 点全ての質量、重心を見積り、モデル化を実施。そこから寄与度の高い部品を抽出することで、効率良く素性向上をさせた。部品配置に関しては、前後左右重量配分への寄与度の高いバッテリー

^{*1} Toyota Compact Car Company TC 第 2 車両開発部

^{*2} トヨタ自動車東日本 株式会社

慣性諸元／車両諸元と車両性能

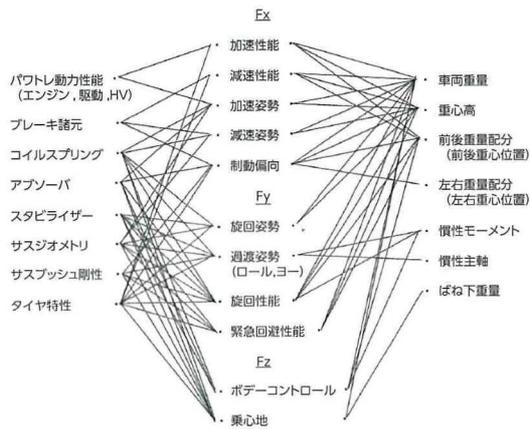


図1 慣性諸元と車両性能の関係

を一般的に配置されているエンジンルームから、ラゲージ内配置へ移動した。ラゲージ内に配置することで低重心へも貢献している (図2)。

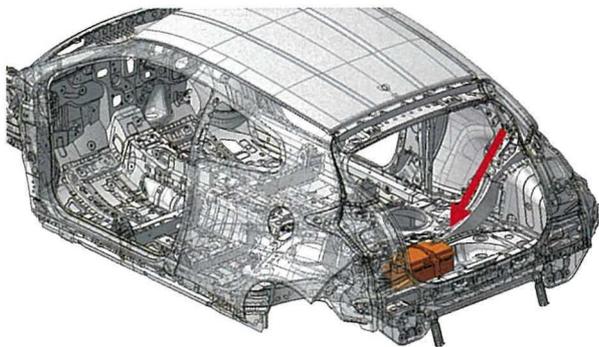


図2 バッテリー配置図

また、ボデー外板部品の軽量化に着目した。車両重心から離れている部品を軽量化することで、慣性モーメントや前後重量配分の素性が向上する。軽量化技術としては、アルミ素材やCFRP素材を積極的に活用した。

3 軽量化部位の紹介

GR ヤリスの外板やボデー骨格に対し、アルミ素材、CFRP素材、ハイテン材を積極的に活用。活用部位については、図3に示す。3ドア仕様の前モデルのヤリスに対して、約38kgの軽量化を実現した。



アンダーボデー裏面

図3 ボデー軽量化概要

4 アルミ素材の活用について

従来の小型車では採用が少ないアルミ素材をフード、バックドア、サイドドアのアウトーパーネル、インナーパネルに活用した。また、サイドドアについては、インパクトビーム以外の全部品にアルミ素材を活用した (図4)。アルミ素材の活用により3ドア仕様の前モデルのヤリスに対して、約23kgの軽量化を実現した。

また、サイドドアへはアルミ素材の活用に加えて、サッシュレス構造を採用した。前モデルのヤリスなどに採用しているフレーム構造に対して、ドアガラスまわりの段差が減少する (図5)。そのため、見た目ですっきりとした印象を与え、よりスポーツカーらしい見栄えにした。

さらに、サッシュレス構造を採用することで、高速走行時に発生するドアガラスへの負圧によるドアの吸い出されに対して、ドアのウェザーストリップによりシール性を確保。フレーム構造ドアに対して、吸い出され対策でのベルトモール部への補強が不要になり、軽量化へ貢献した。

特集



図4 サイドドアアルミ素材活用図（水色部）

6 鉄素材部の最適化について

軽量化技術としてアルミ素材やカーボン素材といった材料置換以外にも、ハイテン材をボデー骨格に最適配置することで、軽量化と性能（衝突、強度など）の両立を実現した。アッパーボデーのハイテン材活用箇所を図7にアンダーボデーのハイテン材活用箇所を図8に示す。また、フェンダーパネルやサイドアウターパネルの板厚を3ドア仕様の前モデルのヤリスに対して0.05mm低減し、さらなる軽量化を実施した。

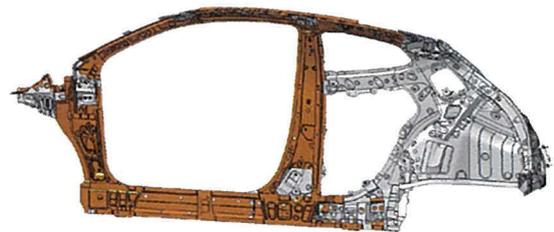


図7 アッパーボデーハイテン材活用箇所

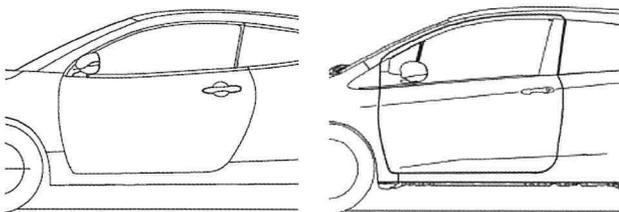


図5 サイドドア構造比較
（左：サッシュレス構造，右：フレーム構造）

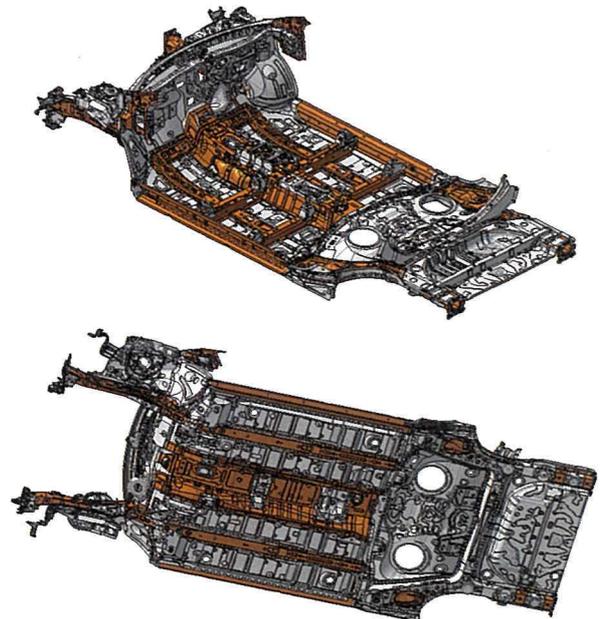


図8 アンダーボデーハイテン材活用箇所
（上：車両上面視，下：車両下面視）

5 CFRP 素材の活用について

軽量化とコストを両立させるため、Resin Transfer Molding（以降RTM）工法より安い、SMC工法で成形されたCFRP素材をルーフパネルに活用した（図6）。この工法は、プリウスのバックドアなどで採用実績はあるが、ルーフパネルとしての採用はトヨタ初である。ルーフパネルにCFRP素材を活用することで、前モデルのヤリスの鉄素材ルーフパネルに対して約5kgの軽量化を実現した。



図6 CFRP素材のルーフパネル

7 まとめ

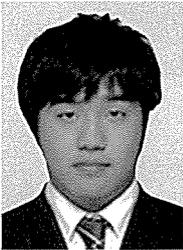
慣性諸元の素性を向上させるため、部品配置の最適化、多くの軽量化技術を織込んだ。とくに、ルーフパネルへのCFRP素材の活用やアルミ素材の積極的な活用など、ボデー部品へ軽量化チャレンジを実施し、約38kgの軽量化を実現できた。

前記を織込んだ試作車を開発メンバーで試乗し、慣性諸元の向上による車両性能の向上を再確認することができた。

8 おわりに

部品配置の最適化、軽量化技術を織込みにあたり、ご協力いただいた関係者の方々には深く感謝するとともに、製品化に携わった一技術者として本稿を寄稿させていただいた。開発を通じて、車両の運動性能向上に大きく貢献し、GR ヤリスのコンセプトを実現することができたと考えている。

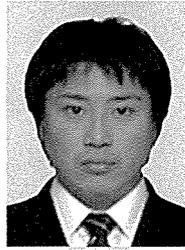
■著者



金森 智久



中村 春樹



森田 一央



山路 恭平

走りを音で奏でる ～ GR ヤリスのサウンド開発～

Expressing Driving Performance through Sound
-Development of the Sound of the GR Yaris-

田島 尚史*1 福原 千絵*2 笠松 秀幸*1
Hisashi Tajima Chie Fukuhara Hideyuki Kasamatsu

要旨

GR ヤリスは、モータースポーツの重要な機能としてサウンド開発に力を入れた。エンジン回転数を聴覚で判別できる「インフォメーション性」、ドライバーの操作・クルマの挙動に調和し、走りの楽しさを刺激する「走りにマッチしたサウンド」を目指した。エンジンの次数構成やサウンドを際立たせる周波数バランス、エンジン特性や加減速操作に対する音圧のリニア性に加えて、GR ヤリスならではのレブリミット時の音色やブリッピング時の過渡的なサウンドなどにも取り組んだので紹介する。

Abstract

Sound is a key aspect of motor sports and the creation of the appropriate sound was emphasized during the development of the GR Yaris. The development aimed to use sound as an information source to audibly communicate the engine speed to the driver, and to create a sound consistent with vehicle performance and in harmony with driver operation and vehicle behavior to intensify the enjoyment of driving. This article describes how the frequency balance was designed to emphasize the order arrangements and sound of the engine, as well as the linearity of the sound pressure with respect to the engine characteristics, acceleration, and deceleration. It also discusses the development of the particular sound characteristics that distinguish the GR Yaris, such as the tonal balance at the rev limit and the transient sound when the driver blips the throttle.

キーワード サウンド、ホットハッチ、モータースポーツ、インフォメーション性、走りにマッチ

1 はじめに

GR ヤリスは、モータースポーツから生まれたクルマである。モータースポーツにおいて最も重要なことは「勝つ」ことであり、速く走ることである。一般乗用車とは価値観が異なることから、NV（振動騒音）開発を一から考えてきた。はじめに、プロドライバーとの乗りあわせや対話を繰り返し、同セグメントであるホットハッチの競合車も参考に、GR ヤリスのサウンド思想を模索した。その結果、モータースポーツにおける音の重要な機能は、聴覚でエンジンのトルク情報を認知し、シフトタイミングも判断できる「インフォメーション性」という結論に達した。加えて、ホットハッチ市場においても、サウンドへの期待は高い（図1）。お客様のコメントを分析すると、「走りにマッチしたサウンド」が重要なキーワードであることがわかる。これらのサウンドにより、限界を超えたパフォーマンス

スを発揮させてくれるアドレナリ的な役割を担うことができる。

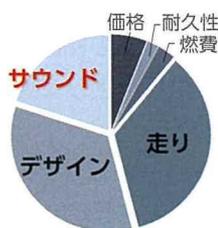


図1 ホットハッチのお客様満足点とコメント例

GR ヤリスは、レスポンスの良さから三気筒ターボエンジンを採用しているが、一般的に三気筒エンジンの振動感や音色に対するイメージは、決して良いとはいえない。また、車外への騒音規制により、エンジンや吸排気から積極的に音をだすことは年々難しくなっている。そんななか、モータースポーツから生まれたクルマとして、「走りにマッチするサウンド」、「インフォメーション性」の良いサウンドを目指し開発した。本稿では、その取り組み内容について紹介する。

*1 クルマ開発センター 車両技術開発部
*2 Lexus Int. Co. レクサス車両性能開発部



【インフォメーション性】
タコメータを見ずとも
エンジン回転数がわかること



【走りにマッチしたサウンド】
ドライバーの操作とクルマの挙動に調和し、
走りの楽しさを刺激するサウンド

走行シーンイメージ (サーキット走行)

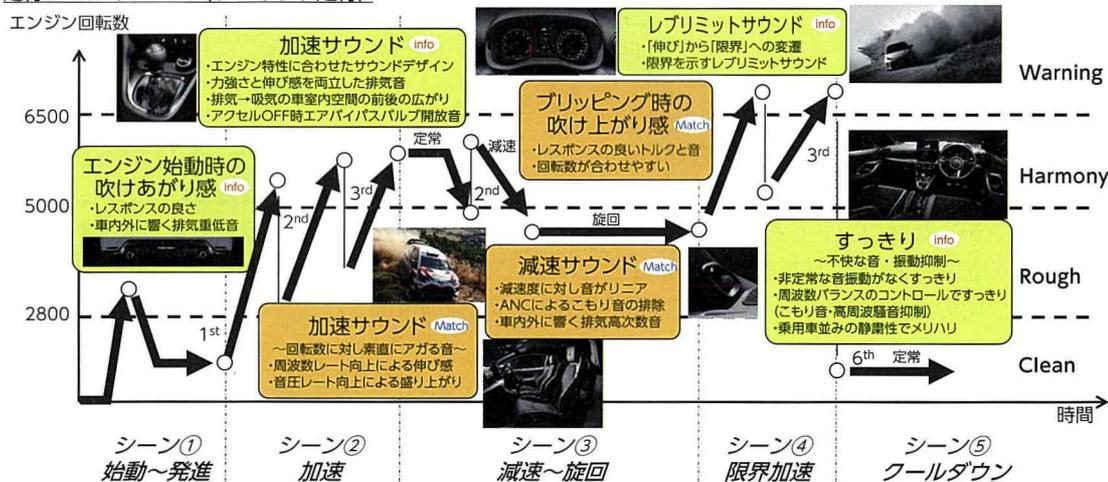


図 2 GR ヤリスのサウンド思想

2 サウンドの思想

GR ヤリスのサウンド思想について紹介する。従来の市場調査に加え、モータースポーツの現場で関係者との乗りあわせしながら思想を構築してきた。その結果、「インフォメーション性」とは「タコメータを見ずともエンジン回転数がわかること」と定義した。また、「走りにマッチしたサウンド」を「ドライバーの操作（アクセル、シフト）とクルマの挙動（エンジン回転数、加速度）に調和し、走りの楽しさを刺激するサウンド」と定義した。

このGR ヤリスのサウンド思想について、サーキットを想定した走行シーンと、各所で体感いただきたい感覚を図 2 に示す。以下は想定したシナリオの例である。

- ①始動～発進：エンジンを始動した途端、心地よく吹け上がる重低な排気音で、走行前から「走り」への期待が膨らむ。空ぶかすと、やはり排気からの重低音がキレの良いレスポンスで応える。
- ②加速：高まる期待のなか、1速に入れて静かに走りだし、一気にアクセル全開で加速する。エンジン回転数にリニアに呼応し、徐々に刺激を増すサウンド。GR ヤリスがコースインしたことに周囲も排気

音だけで気づく。シフトアップすると、高まった過給圧がはじけるように抜けたターボの開放音が聞こえる。変速するたびに得られるリズム感は、新開発のマニュアルトランスミッションのクロスレシオにあわせて、トルク感と伸び感が移り変わる音色によるものだ。しばらく運転すると、音だけで回転数を感じ取れるようになってくる。排気音と吸気音がもたらす音像の入れ代わりが、さらにダイナミックに感じさせる。

③減速～旋回：コーナー前でシフトダウンする際も、鋭いブリッピングサウンドで回転数を識別できるから余計な挙動を出さずシフトがピタッと決まる。マイナスGに応じた音圧変化で減速度を感じ、程よく耳に残るサウンドで操舵に集中する。

④限界加速：エネルギーを開放するように限界まで加速すると、ラリー仕込みの伸び感とクルマの軽さが感じられる音色が放たれ、レブリミットが近づくと自然な変動音でコーションが伝わる。サウンドに導かれながらドライバーは限界付近でクルマと対話できる。

⑤クールダウン：走行ラップを終え、スピードを落とした。アタック時と打って変わってメリハリのあ

る乗用車並みの静粛な空間のなか、すっきりとした音色を感じながら自分の走りを振り返り、次のラップに向かい走りを再構築する。

3 走行シーンごとの特徴的なサウンド

2章のシナリオのなかで走行シーンごとに取り組んできた内容を紹介する。

3.1 排気サウンド ～シーン①②～

モータースポーツでは大迫力の排気音が魅力の一つであり、その音色は各車で特徴的な「味」をもつ。しかし、年々厳しくなる騒音規制で音圧レベルを大きくすることが難しく、一般的な三気筒エンジンの場合、高回転でも濁った伸び感のない音色になりがちである。我々は、走りのレスポンスの良さをもつGR ヤリスの三気筒はむしろ特徴的な「味」であると考え、その低く力強いサウンドを活かしつつ、高回転では伸び感ある音色を作りこんだ。エキゾーストマニホールドの管長を全て同じ長さとし、各排気工程での圧力脈動レベルを揃えて爆発次数を強調することで、より力強い音へ。さらに、排気管エンドパイプの共鳴音を利用して315Hz帯域をあえてだし、高回転で高次数（3次、4.5次）の音が強調され伸び感が続く排気サウンドを実現した（図3）。

3.2 エンジン回転数ごとの音色～シーン②～

タコメータを見ずともエンジン回転数を耳で瞬時に識別するためには、各エンジン回転数で「味」の

ある音色が必要になる。回転数の増加に応じて、音量や周波数が上昇する自然な変化に加え、GR ヤリスではエンジン回転数ごとの次数構成そのものを大幅に変えることにより「味」を表現した。そのコンセプトを図4に示す。

エンジン最大トルク付近（2800rpm～5000rpm）において、トルク感ある力強い音色を表現するため、エンジンの爆発次数とハーフ次数をバランス良く折り混ぜた。そのなかで、低回転側（2800rpm～4000rpm）では回転3次±0.5次を、高回転側（4000rpm～5000rpm）では回転4.5次±0.5次を加えて音色に変化をつけた。エンジンの最高出力点までの駆け上がり（5000rpm～6500rpm）では、爆発次数のみの構成としラリーを彷彿とさせる軽快な音色でありながら、高次数（回転6次、7.5次）を追加して周波数の二次曲線的な上昇による伸び感を表現した。

3.3 ブリッピングサウンド ～シーン③～

ブリッピング時は、選択したギヤの回転数にシビアにあわせる必要がある。それができなければ、過渡の振動が発生し加速度が落ちるとともに、ドライバーの気が散るからである。3.2項で紹介した回転数ごとの音色の変遷に加え、その音圧レベルもブリッピング時だけ上げること考えた。

この現象を表現する中間特性値として、ブリッピング前後のピーク値が実効値に比べて大きいことを示すクレストファクタ（波高率：式（1））を使用した。

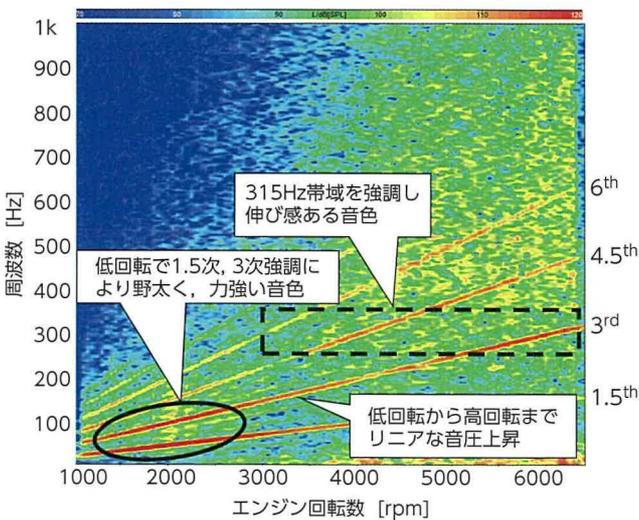


図3 排気音次数構成（加速時）

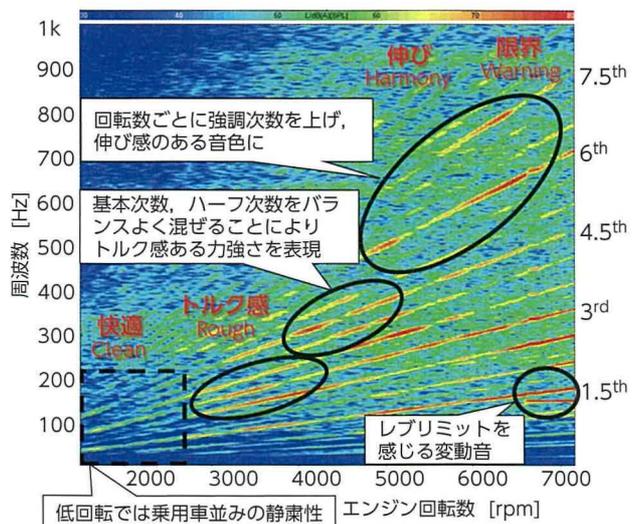


図4 車内音次数構成（加速時）

$$\text{クレストファクタ (C.F.)} = \frac{\text{ピーク音圧}}{\text{実効値}} = \frac{\text{Peak SPL}}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-1} (x_i - \bar{x})^2}} \dots \dots (1)$$

官能評価の結果、C.F. が大きいほど「鋭い」と評価されることから、GR ヤリスは C.F.=1.06 を目標値とした (図 5)。

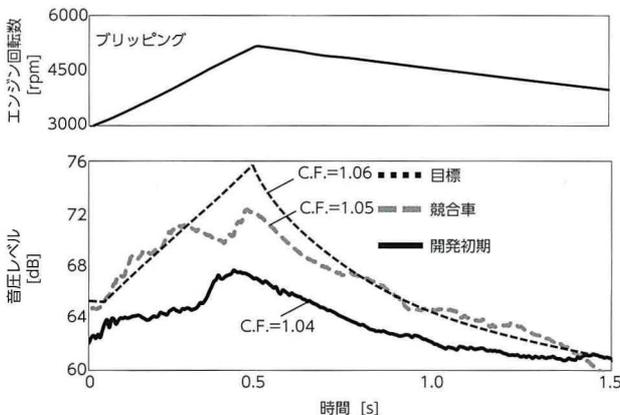


図 5 ブリッピング前後でのクレストファクタ

3.4 減速サウンド ～シーン③～

コーナー進入前の車速コントロール時、ドライバーは減速度を耳でも判断している。前後加速度に対し音圧レベルの傾きが、大きくかつリニアなクルマは、官能評価で「素直な」クルマと評価される (図 6)。GR ヤリスは、減速に対する次数コントロールを行うことで、リニアで音圧レベルの傾きの大きい「素直な」減速サウンドを実現した。

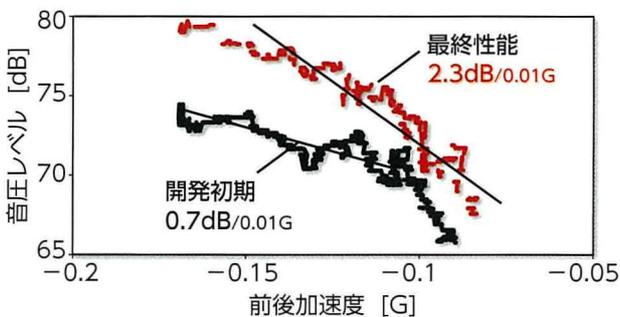


図 6 前後加速度に対する音圧レベル

さらに、減速時は程よく耳に残るサウンドにするために、爆発次数のみのシンプルな構成とした (図 7)。

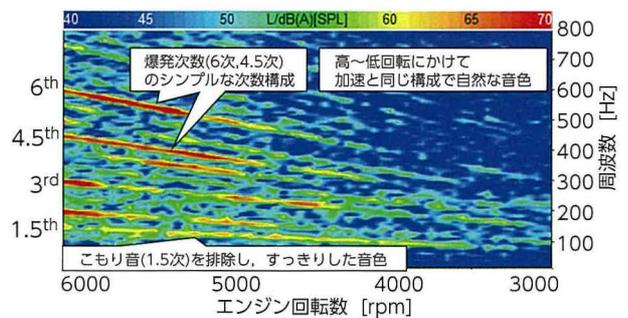


図 7 減速時の次数構成

3.5 レブリミットサウンド ～シーン④～

レブリミットとはエンジンの限界回転数であり、これを超えるとエンジン保護のため燃料供給停止を行いトルクが落ちる。ドライバーは、通常この限界回転数を加速感 (加速度)・視覚 (タコメーター)に加え、聴覚 (音) で直感的に判断している。開発初期の試作車では、レブリミットに近づく感覚がわかり難く、試乗時に多くのドライバーがリミットを超えがちであった。そこで、手前のエンジン回転数から徐々にレブリミットに近づく感覚をサウンドで与えることを目標とした。燃料供給停止時の特徴的な変動感のある音でレブリミットを伝えるため、はじめにその音の解析を行った (図 8)。レブリミット時 (赤線) とリミット直前 (7000rpm 付近: 黒線) の変動音解析した結果、レブリミットは 20Hz～30Hz、とくに 27Hz で大きく変動する音であることがわかった。そこで、6600rpm～7200rpm の帯域で、変動周波数を 27Hz に向けて上昇させることで、レブリミットが迫っているという感覚を実現した (図 8 青線)。

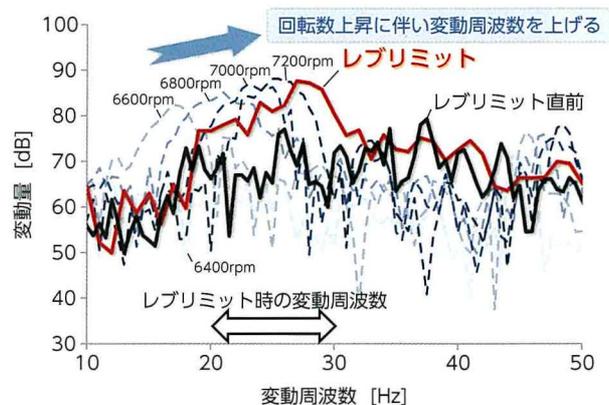


図 8 レブリミット付近の変動音解析

3.6 周波数バランス ～シーン⑤～

従来のスポーツカーにおいて、エンジンサウンド以外に発生する、駆動系やエンジンマウント起因のこもり音、タイヤからのロードノイズ、風切音などの音は、走りを優先させた軽量化などの理由から、乗用車ほどは手当てがなされないことが多い。GR ヤリスでは、エンジンの回転次数を瞬時に認知できる「インフォメーション性」を際立たせるため、回転次数以外の不要な音を徹底的に排除した。まず、エンジン筐体や駆動系の対策に加え、ANC※（アクティブノイズコントロール）を搭載してこもり音を抑えた。続いて、風切音など高周波騒音について、ボデーのリーク対策と軽量防音材の最適配置により、走りを阻害しない騒音低減を目指した。その結果、スポーツ走行時の際立つサウンドと乗用車並みの静粛性を実現し、上質感を向上させた（図9）。

※逆位相波を使って、車内の不快なこもり音などをコントロールするシステム

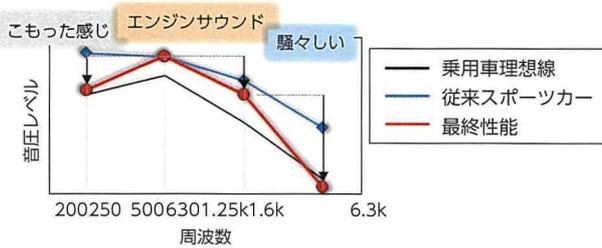


図9 走行時の周波数バランス

3.7 音量コントロール ～シーン②④⑤～

加速、限界加速、クールダウンの3シーンにおいてメリハリをだすため、周波数バランスだけでなくその音量にもこだわった。図10はGR ヤリスのエンジン回転数に対する音圧レベルを示す。各シーンで異なった音圧レベルを設定し、さらに、エンジン回転数の微小な変化も逃さず耳で識別できるように、回転数に対する音圧レベルの傾きも大きくした。

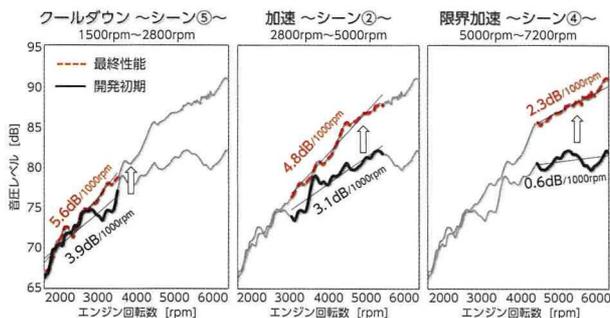


図10 シーンごとの音圧レベル

4 仮説検証

GR ヤリスのお客様に近い、スポーツカー運転歴の長い人間25名の評価結果を図11に示す。多くが「GR ヤリスの走りにサウンドがあう」と答えており、人によって使用頻度の高い回転域が異なっても、それぞれの回転域で特徴的な音色を実現したことで、高いインフォメーション性を維持できたと考察する。

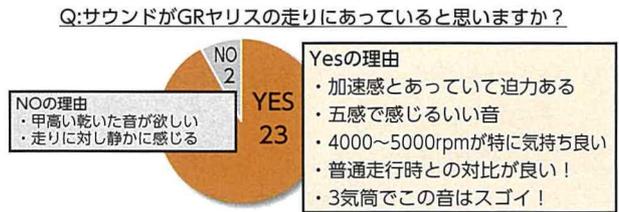


図11 ドライバー官能評価結果

社内官能評価指標を用いた、社内エキスパートによる評価点を図12に示す。GR ヤリスにとって重要な「鋭い」「伸びのある」「メリハリのある」「軽い」「素直な」の5軸が全ておおむね目標どおりとなった⁽²⁾。

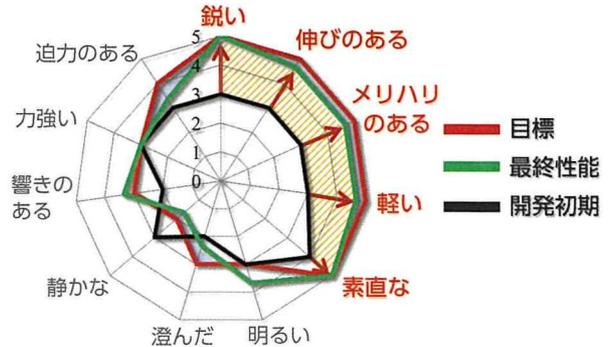


図12 社内のエキスパートによる官能評価結果

モータースポーツから生まれたクルマのサウンドとしての完成度を確認するため、社外プロドライバーの試乗コメントを一部紹介する。

- ・サウンドに盛り上がりがあり、シフト時に音がついてくるのでタイミングがあわせやすく運転しやすくなった。
- ・今まで体験したことがない気持ちの良いエンジンサウンドで、運転していてやる気がでる。

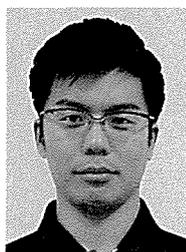
5 まとめ

モータースポーツから生まれた GR ヤリスらしく「インフォメーション性の高い」、「走りにマッチした」サウンドを実現することができた。本サウンド開発にあたって、関係会社の皆様に深謝の意を表す。読者の皆様にも是非運転いただき、GR ヤリスの味として共感していただけると、開発陣としてこのうえない喜びである。

■参考文献

- (1) 技術情報協会：ヒトの感性に訴える製品開発とその評価 (2012)
- (2) 田島尚史ほか：ホットハッチエンジンサウンドの提案, 自動車技術会学術講演予稿集, 20196155, No. 155 (2019)

■著者



田島 尚史



福原 千絵



笠松 秀幸

走りを支える冷却性能 ～ GR ヤリスの冷却性能～

Cooling to Support Driving Performance
-The Cooling Performance of the GR Yaris-

井下 圭介 *1 松田 太 *1 村川 淳 *1
Keisuke Ishita Masaru Matsuda Atsushi Murakawa
西尾 圭史 *1 服部 伸一郎 *1
Yoshifumi Nishio Shin-ichiro Hattori

要旨

GR ヤリスは、新たに開発した GA-B プラットフォームをベースとし、スポーツ走行を想定した卓越した動力性能・運動性能を実現したコンパクトスポーツ車両である。冷却性能開発においては、新開発の 1.6L 過給エンジンから発生する熱を効率的に冷却する構造と、高速走行やサーキット走行などの高負荷走行に耐える冷却性能を実現する必要がある。本稿では、GR ヤリス冷却性能開発に関する開発事例について紹介する。

Abstract

Based on the newly developed GA-B platform, the GR Yaris is a compact sports car with exhilarating driving and dynamic performance that is designed to be driven vigorously. Consequently, this vehicle required a cooling structure capable of efficiently managing the heat generated by the newly developed 1.6-liter turbocharged engine and a cooling performance capable of handling heavy loads at high speed, on racetracks, and under similar situation. This article describes case studies from the cooling performance development of the GR Yaris.

キーワード 冷却, スポーツ走行, 熱交換器, ダクト

1 はじめに

GR ヤリスは、WRC（世界ラリー選手権）の制覇を視野に開発されたコンパクトスポーツ車両である。

本車両の開発ベース車は新型ヤリスであるが、この目標を達成するために新規開発された高出力エンジン、4WD システムなど、動力・運動性能を向上させるための多くの変更が加えられている。

冷却性能開発としては、本車両のスポーツ走行に対する考え方から企画し、安心・安全、かつエンジンなどの高いポテンシャルを最大限引き出せるクルマづくりに挑戦した。

2 冷却性能開発のコンセプト

2.1 概要

GR ヤリスには、最高出力 200kW の新開発 1.6L 過給エンジンが搭載され、その高出力エンジンからの発熱を効率よく放熱する冷却システムが必要となる。

*1 TC カンパニー TC 第 2 車両開発部

図 1 にヤリスと GR ヤリスの冷却システムの比較を示す。

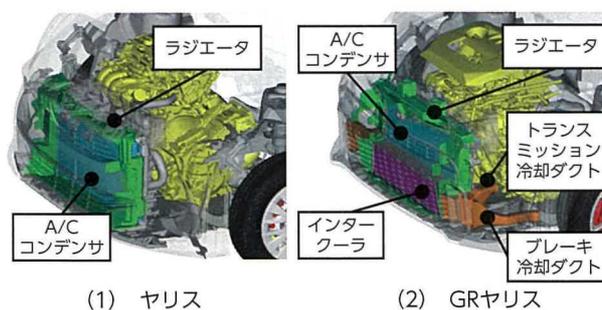


図 1 冷却システム比較

ヤリスに対してラジエータの大型化に加え、エンジンの高出力化を支えるための大型空冷インタークーラを車両前方に搭載している。また、スポーツ走行時に安定した走行性能を発揮させるため、トランスミッション、およびブレーキを効率的に冷却するための冷却ダクトが設定されている。

2.2 スポーツ走行の考え方

開発初期段階で日本各地のサーキットでのスポー

ツ走行時の熱負荷を調査した。この際、様々な条件を網羅するために、国際サーキット、ローカルサーキットを満遍なく選定し、実走行データを取得、解析した。

結果、低車速・高負荷条件が高頻度で発生するサーキットが最も厳しい条件と特定し、代表ケースとして平均車速の低いローカルサーキットを選定した(図2)。

サーキット比較			
	サーキットA	サーキットB	サーキットD
平均車速	高速	>>	低速
冷却風	多い	>>	少ない
	(国際サーキット)		(ローカルサーキット)

図2 対象サーキットの選定イメージ

3 エンジン冷却

3.1 熱負荷の見積り

前章にて選定したサーキットにおけるGRヤリス用エンジンの熱負荷を、ヤリス(TNGA 1.5Lエンジン)開発時の熱負荷と比較した結果、GRヤリスではヤリス比で放熱能力を約2倍に向上する必要があることがわかった(図3)。

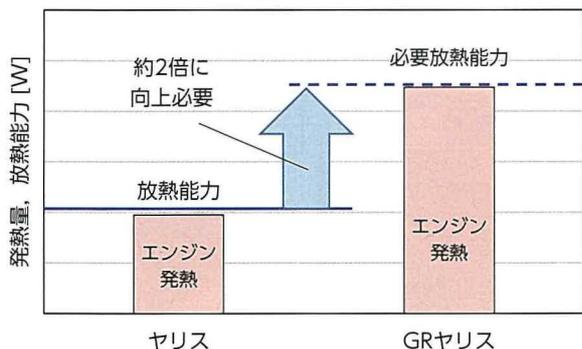


図3 エンジン発熱と必要放熱能力

3.2 各熱交換器のレイアウト検討

インタークーラ、A/Cコンデンサ排熱による温度上昇分を考慮し、前項の必要放熱能力を満足させるレイアウトを検討した。

また、放熱能力(ラジエータ)に対し、エンジン出力(インタークーラ)、冷房性能(A/Cコンデンサ)が最適なバランスとなる配置を目指した。

多くの案を検討した結果、GA-Bプラットフォームの限られたスペースのなかで、全てがバランスするレイアウトとして、図4③を選定した。

	正面視	側面視	放熱能力	エンジン出力	冷房性能	搭載
① ベース	インタークーラ	ラジエータ	×	×	○	×
② 検討案(抜粋)	インタークーラ	ラジエータ	×	○	○	×
③ 最終案	インタークーラ	ラジエータ	○	○	○	○

図4 各熱交換器のレイアウト検討(抜粋)

3.3 各部の冷却性能設計

(1) ラジエータおよびファン

ラジエータは、ベースとなるヤリスよりも大型化し、前面投影面積比で127%、フィン面積で約210%(国内仕様比)まで拡大させた。また、ヤリスではラジエータ上方に存在した吸気ダクトをGRヤリス用に再設計し、ラジエータ高さの拡大スペースを確保した。

さらに、ラジエータ厚みの拡大、インタークーラ搭載による通風抵抗増加に対応し、電動ファンのモータ出力についても大幅に向上させた。これにより、GRヤリスのエンジン発熱量増加に対して必要な放熱能力を確保した。

図5に各熱交換器およびファンの外観を示す。

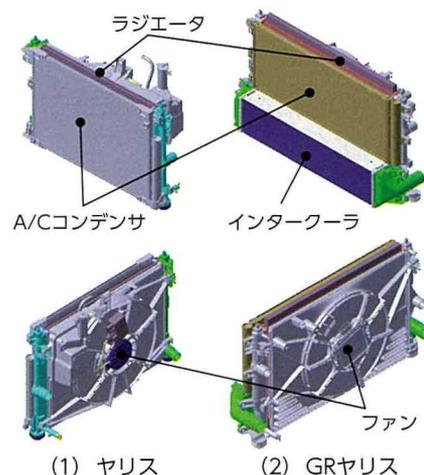


図5 各熱交換器およびファン

(2) インタークーラ

インタークーラには空冷方式を採用し、大型のクロスフロー式とした。

インタークーラ内のインナーフィンにストレートフィンを採用することで、吸気経路の圧力損失を低減した。また、最高出力の達成に必要な吸入空気の冷却能力をコア長さを最大化することで確保した (図 6)。

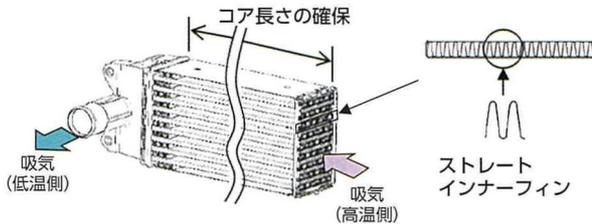


図 6 インタークーラ構造

(3) フロントグリル開口

各熱交換器の搭載位置にあわせて冷却用のグリル開口を設置し、効率の良い車速風の導風を可能とした。また、GR ブランドのデザインコンセプトであるファンクショナルグリルの機能美を両立させた (図 7)。

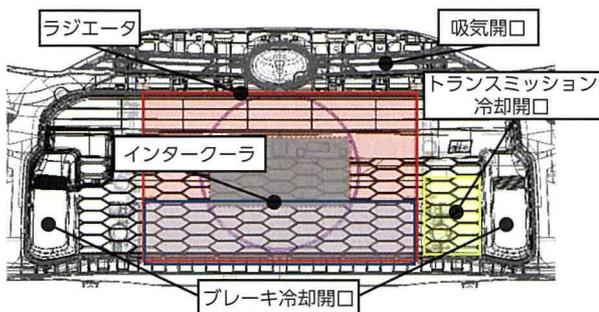


図 7 フロントグリル部正面視

4 トランスミッション冷却

4.1 検討の概要

GR ヤリスの最高速度は、230km/h (欧州仕様) に設定されている。この高速走行時のトランスミッション (6MT) 油温の上昇を抑制する必要がある。

油温の上昇を抑制する方法として、オイルクーラの設定が考えられる。しかし、配管、ポンプなどの搭載スペースや車両重量の増加を考慮すると車両の特性と相反する。したがって、オイルクーラに頼らず、空冷でのトランスミッション表面の放熱能力向上によって課題の解決を図った。

4.2 ケース本体の表面積拡大

放熱能力向上のため、まずフィンの追加設定による、ケース本体の放熱面積の向上を図った。図 8 にトランスミッションケース外観を示す。

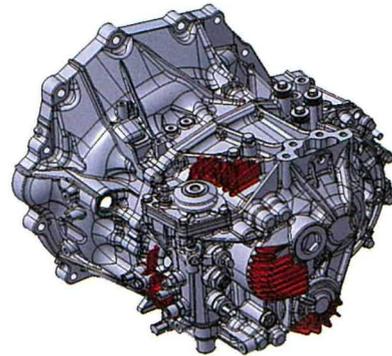


図 8 クラッチ/トランスミッションケース (赤色部分が追加放熱フィン)

放熱面積の向上にあたって、試作段階の車両評価で高速走行時のケース表面の温度分布を測定した。そのなかで、とくにケース表面の熱伝達を効果的に促進可能な高温の部位を中心に、設計部署と検討を重ね、放熱フィンを設定した。

上記取り組みの結果、ケース本体の放熱面積を約 9% 増加させることができた。

4.3 トランスミッション冷却ダクト

つぎに、ケース表面の強制熱伝達を促進して油温を低減する方策を検討した。強制熱伝達を促進するためには、ケース表面への冷却風速向上と冷却風温度の低減が必要となる。そのために最も効果的な方法として、車両前方のグリル開口からクールエアを取り込み、トランスミッションの前方まで導風する冷却ダクトを追加した。図 9 に冷却ダクトの配置図を示す。

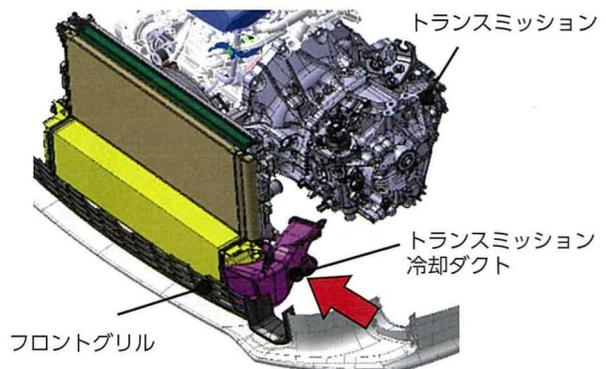


図 9 トランスミッション冷却ダクト

冷却ダクトの形状は、限られたスペースのなかで効果を最大化するため、CFD（熱流体解析）を用いて検討した。

入口部で冷却風量を確保し、出口側では断面積を絞ることで風速を増加させ、狙いの位置にクールエアを導風する必要がある。このため、トランスミッションケース表面に到達する冷却風の温度、流速、位置を調整し、効果が最大になるようにダクト形状（断面積、出口向き）を決定した。CFD 検討の結果を図 10、図 11 に示す。なお、熱伝達率は無次元化した値で比較している。

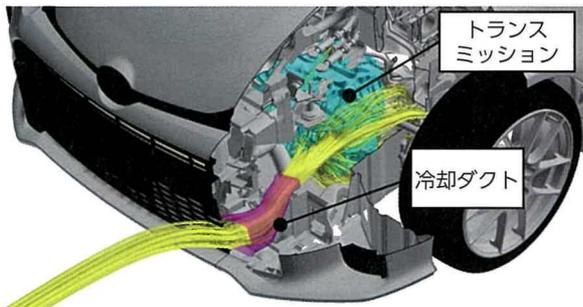
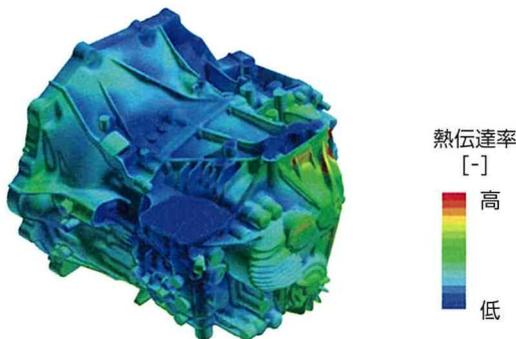
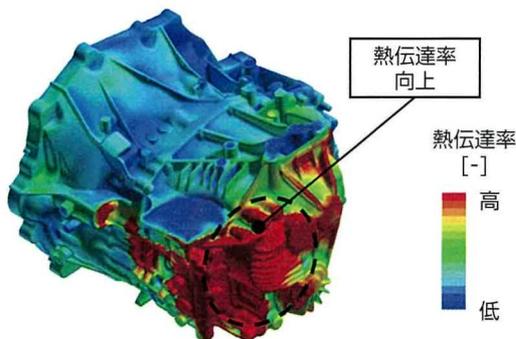


図 10 CFD 結果（流線）



(1) 冷却ダクトなし



(2) 冷却ダクトあり

図 11 CFD 結果（表面熱伝達率分布）

この冷却ダクトの採用により、ケース表面の熱伝達率を約 18%向上させることができた（図 12）。

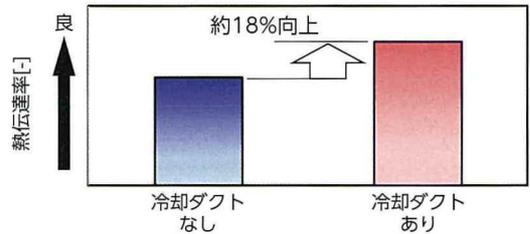


図 12 冷却ダクト効果

上記のケース表面積の拡大および冷却ダクトの設定によって、放熱能力の改善目標を達成した（図 13）。

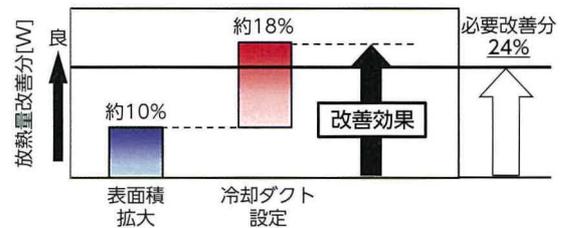


図 13 ケース表面での放熱能力改善効果

5 インタークーラスプレーの検討

5.1 取組み概要

空冷インタークーラは、エンジン出力が外気温度に左右される傾向にある。夏場などの高外気温時に出力低下を抑え、高出力維持を実現するアイテムとして採用し、効果の最大化を図った。

5.2 部品構成と搭載位置

主な部品構成は、水を貯蔵するタンクおよびポンプ、噴射装置とそれらをつなぐホースである（図 14）。タンクは前後の重量配分を考慮し、リアのラゲッジスペースに搭載した。また、タンク容量は 3.7L とした。

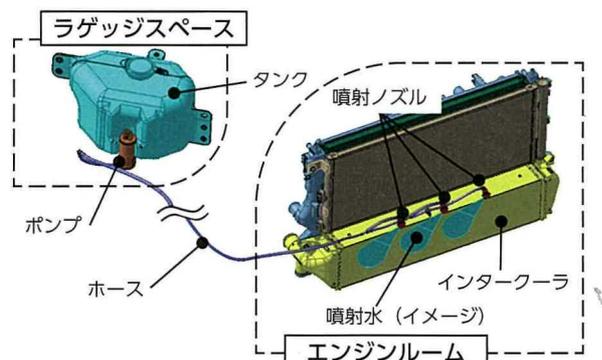


図 14 インタークーラスプレー構成

噴射装置はインタークーラの前面直上に3か所配置し、グリル開口からの冷却風の妨げにならないようライセンスプレート裏側とした(図15)。

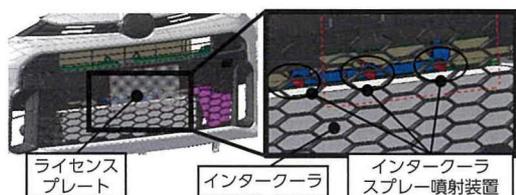


図15 噴射装置の搭載位置

5.3 噴射装置の最適化

少ない噴射量で優れた冷却効果を得るため、噴射装置の最適化を実施した。

インタークーラコア前面における濡れ面積を最大化できる搭載間隔、噴射角度とし、噴射狙い位置も吸気入口高温側に向けて配置した。さらに、噴射量および噴射タイミングについても適正化し、5秒間の噴射と5秒間のインターバルを繰り返す間欠噴射とした。

5.4 実走での効果確認

スロットル全開走行で、インタークーラスプレー噴射の有り・無し条件でのインタークーラ出口吸気温度を比較した。図16に測定結果を示す。

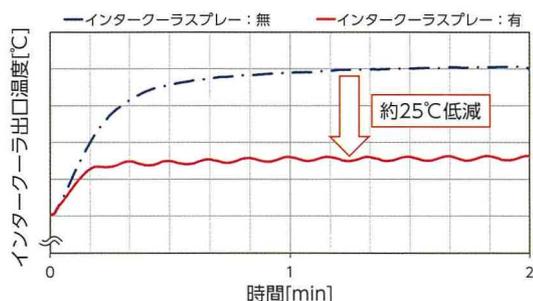


図16 インタークーラスプレー効果

比較の結果、インタークーラ出口の空気温度を約25℃低減することができ、夏場のレースなど、高外気温時におけるエンジン出力の維持に大きく寄与できることを確認できた。

6 まとめ

①エンジン冷却

限られたスペースのなかで、各熱交換器の性能を確保し、ヤリス比で約2倍の必要放熱能力に対応する冷却性能を達成した。

②トランスミッション冷却

オイルクーラに頼らない空冷での性能向上に挑戦し、質量増加を最小限に抑えつつ230km/hの高速走行可能な冷却性能を達成した。

③インタークーラスプレー

噴射システムを最適化し、夏場のエンジン出力低下の抑制に大きく寄与できた。

7 おわりに

GR ヤリスの冷却性能開発では、これまでに経験のない壁がいくつもあった。そのなかで、もっといいクルマにしたい、一人でも多くのお客様に笑顔になっていただきたい、その一心で一つひとつの壁を乗り越えてきた。

今回、GR ヤリスの走りを支える安心・安全を提供し、もっといいクルマづくりに貢献できたことを嬉しく思う。

開発中にとともに闘っていただいた仲間と、本稿の執筆にあたりご支援、ご協力いただいた方々に、この場をお借りして深く感謝の意を表する。

2020年は、多くの方々にとって記憶に残る年になると思われる。見えない敵との闘いで生活の自由を制限されるなか、GR ヤリスの出荷を迎えることとなった。この車両を通じて、「移動の自由」と「意のままにクルマを操る楽しさ」を少しでも多くの方に実感していただけることを願っている。

■著者



井下 圭介



松田 太



村川 淳



西尾 圭史



服部 伸一郎

スポーツカー専用生産ライン ～ GR Factory ～

The Dedicated Sports Car Production Line
-The GR Factory-

町野 元康 *1 北川 博之 *1
Motoyasu Machino Hiroyuki Kitagawa

荒井 優野 *1 北折 英嗣 *2
Yuya Arai Hidetsugu Kitaori

要旨

トヨタ自動車の社員の手で設計・生産する、純トヨタのスポーツカー復活にあわせて、Toyota Gazoo Racing にふさわしい「いいクルマ」を生産するための、GR 専用工場「GR Factory」を新設。「GR Factory」では、スポーツカーに要求される要素を取り込み、1台1台を高品質かつ丁寧に生産している。

Abstract

The GR Factory is a new dedicated production facility for GR models that was established to help build ever-better cars under the philosophy of Toyota Gazoo Racing, and is an important part of efforts to revitalize the legacy of pure-Toyota sports cars designed and produced first-hand by Toyota team members. The GR Factory incorporates the essential elements of a sports car, ensuring that each and every model is produced to the highest quality and finish.

キーワード いいクルマづくり、モノづくり、高剛性、高精度、短ピッチ溶接、アライメント、車高、輪重、薄肉樹脂バンパー、SMC

1 はじめに

GR ヤリスの専用工場を新設するきっかけとなった背景は、20年前に火が消えたスポーツカーの生産をトヨタ自動車の社員の手で復活し、継続できるようにすること、お客様が満足するスポーツカーをつくり、それにより社員が育成され、将来に向け「GRブランド」醸成に貢献することを目標とした(図1)。スポーツカーの生産と維持を我々の生産技術の「いいクルマづくり」と「競争力のあるモノづくり」で実現したいという強い思いが我々にはあった。

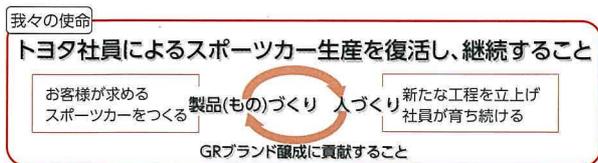


図1 GRカンパニーの使命

2 「GR Factory」コンセプト

「いいクルマづくり」に向け、レースに参加しているチームの現場では、完成車をバラして打点を追加し剛性を上げている写真1や、部品の一点一点を測定し、アライメントを微細に調整している状況を見て、我々が貢献できる「いいクルマづくり」に、このお客様のニーズをトヨタで実現して、お客様満足を得られないか?と考え、「お客様がご購入された状態で、サーキットを走れるクルマをつくる」をコンセプトに、新しい工程計画にチャレンジした工場が「GR Factory」である。

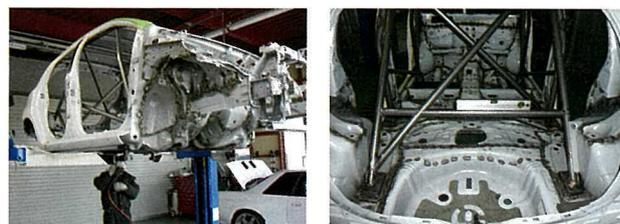


写真1 全日本ラリー参戦車両

過去、スポーツカーの生産を止めてきた経緯を紐解き、トヨタが継続してスポーツカーをつくり続け

*1 Gazoo Racing Company GRプロジェクト推進部

*2 生産本部 車両技術領域 車両品質生技部

られるために、少量でも画期的な原価低減が実現できる「競争力あるモノづくり」を「GR Factory」は兼ね備えている。

一方で、「いいクルマ」の実現には、**図2**の3本柱が必要である。1つ目は、設計図面。誰もが認める性能を有するクルマの企画は不可欠である。2つ目は、その設計図面通りにモノをつくれる設備。「いいクルマ」を制約掛けることなく実現する設備が必要。3つ目は、「いいクルマ」に対する技能と熱意をもった作業員。「いいクルマづくり」は「熱意ある人がつくる」を基本とし、高度な技能をもつ匠がGRには不可欠である。

GRらしく、「もっといいクルマ」を実現する工場が「GR Factory」である。

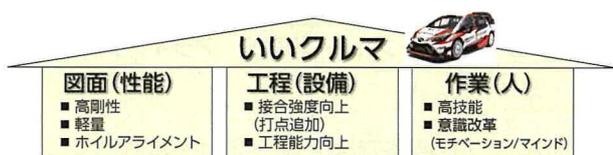


図2 「いいクルマ」の3本柱

3 高剛性、高品質

レースカーの製作現場に赴き、ボデーに追加増しアークを施している場面やアライメントを調整している場で、ボデーの取付点測定や足まわり部品を一点一点測定し選別・組付け・検査を行っていた。

「GR Factory」では、レースカーのつくり方と同じ方法を製造工程でも実現したいと考えた。

3.1 ボデー 高剛性の取り組み

高剛性、高品質なボデーを実現するため、以下の3点において、従来から構造・工法を変えて生産している。

① スポット溶接打点の追加

剛性を上げるため、**図3**に示すとおり、従来の打点ピッチより短いピッチで打点することで、ベースのヤリスよりも187点多く打点している。短ピッチ溶接により溶接強度が低下する背反に対し、新溶接条件・新制御方法を採用することにより、十分な溶接強度を確保できるようにした。**図4**の赤色部位が短ピッチ溶接を採用した部位である。

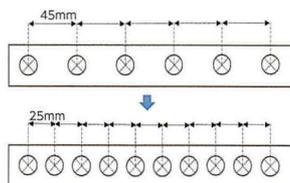


図3 短ピッチ溶接

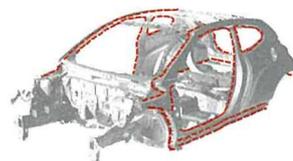


図4 追加スポット打点

② 構造用接着材の追加

剛性を上げるため、もう一つの方法として、塗装乾燥炉で200℃程度に熱すると硬化する構造用接着剤を従来よりも11m長く追加塗布している。接着剤は溶接と少し違い、線で接合でき、溶接と併用することでさらに高剛性を狙える。

「アンダー×アッパー結合部」「サスペンションメンバー取付部位周辺」などの剛性最重要部位を中心に、**図5**の赤色線に示す部位に重点的に追加した。塗布の仕方は、匠による丁寧な手塗りである（**写真2**）。

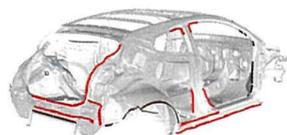


図5 追加構造用接着剤



写真2 匠の作業

③ 1 治具溶接打点打ち切り

ボデーの精度を上げるため、1 治具での組付けに拘っている。溶接が完了するまでアンクランプせずに溶接をすべて終える仕様とした。クランプしたまますべて溶接を終えることで、製品のバラつきを最小限に抑えることができる（**写真3**）。これは後述する組立工程の品質向上（特にアライメントの向上）に大きく寄与している。



写真3 1 治具溶接打ち切り（汎用セル）

3.2 足まわり 高精度組付け

クルマの基本運動性能を保証するため、4輪のアクスルのセンター（タイヤ中心）を図面どおりに組付け・保証する仕組みを新たに採用した。ボデー工程で足まわり取付点を測定し（**図6**）、組立工程で

足まわり部品（サスペンションメンバー、アーム類）を全数測定する（**図7**）、1台1台コンピュータ上で組付・計算し、その結果を全工程にフィードバック指示することで微細な組付けを行い、完成車をバラつきなく組む仕組みを導入した。

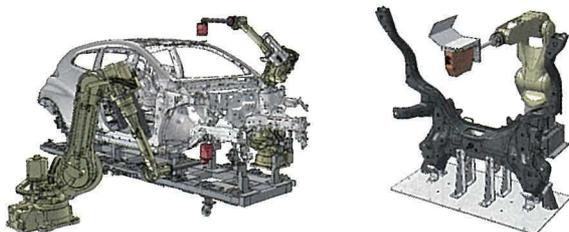


図6 足まわり取付点測定 図7 足まわり部品測定

4輪のアクスルセンターを図面通りに組み付ける考え方を**図8**に示す。

測定されたボデーと部品の精度データから、4輪のアクスルセンターが完成車状態で図面正寸になるように、組付け治具が各部品の位置や角度を自動で調整する。そのため、作業者は通常通りの組付けを行うだけで良い。調整組付けされた足まわり治具を定盤に固定し、ボデーを搭載することで、高精度足まわりの車両を得られる。

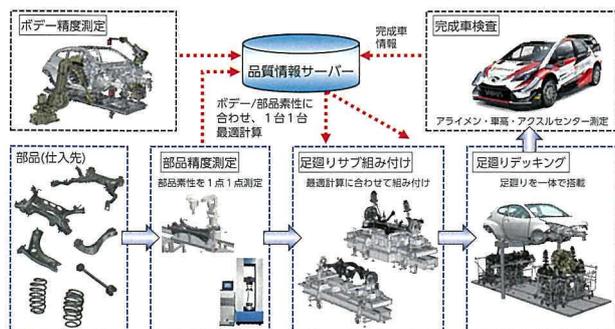


図8 足まわり高精度組付けシステム

図9にアライメントの一つであるFrのキャンバー角（車両を正面から見たときのタイヤ傾き角度）の結果を示す。バラつきが非常に抑えられ、いずれの車両においても図面正寸に限りなく近い精度を実現している。

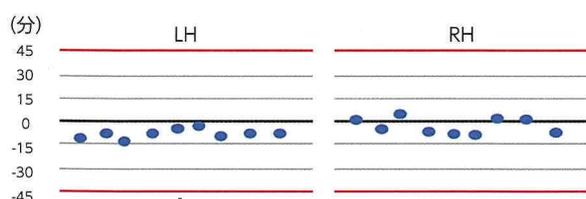


図9 Fr キャンバー角測定結果

3.3 GR Factory 車両検査工程

レースカーから学んだ調整技術を車両検査工程に採用し、そのままレースに出られる足まわり品質を「GR Factory」で実現している。

① アライメント高精度調整

調整前にクルマに余計なストレスを与えないターンテーブルと、クルマに適切な上下横加振を加えて足まわりをなじませる波状路（**写真4**）を導入し、最適な状態でアライメントテスト（**写真5**）に導いている。

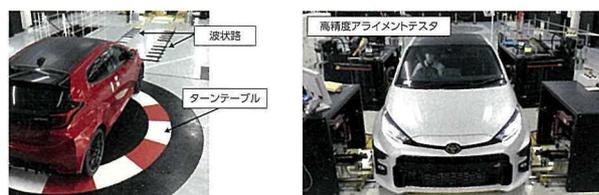


写真4 ターンテーブル+波状路 写真5 アライメントテスト

アライメント調整では、レースカーと同じく2名乗員のウェイトを搭載（**写真6**）して調整をおこなう（**写真7**）。調整後にあらためてアライメント計測を行うことで精度の高い足まわり品質を確保している。



写真6 ウェイト積み込み 写真7 アライメント調整

② 車両諸元計測

レースカーとして大切な要素である車高、輪重、ブレーキについては、部品単位での計測、微細な組付けを行い、最終工程において完成車で計測確認する。車高、輪重では前後左右輪に加え、対角輪についても計測確認する（**写真8**）。さらに、製造工場だから実現可能なアクスルセンター計測で、ボデーに対してタイヤ（ハブ）が正しい位置にあるかを計測し、アライメントに寄与する組付け精度を確認する（**写真9**）。



写真8 車高、輪重計測 写真9 アクスルセンター測定

ブレーキ性能では、ペダル入力（踏力、ストローク）に対するブレーキ油圧を計測し、ブレーキのフィーリングをクルマ間で差がないように確認している（図10）。

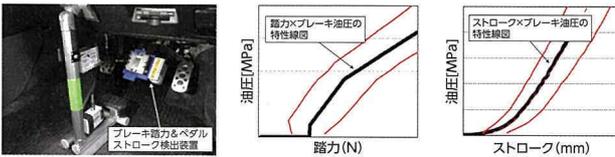


図10 ブレーキ油圧特性計測

4 軽量化

GR ヤリスは、レーシングスポーツカーを目指し、随所に軽量化を施している。

ボデー部品では、ドア・フード・バックドアにアルミ、ルーフにはCFRP（Carbon Fiber Reinforced Plastic）を採用、フロント/リアバンパーカバーは生産技術を駆使して世界最軽量を実現した（図11）。

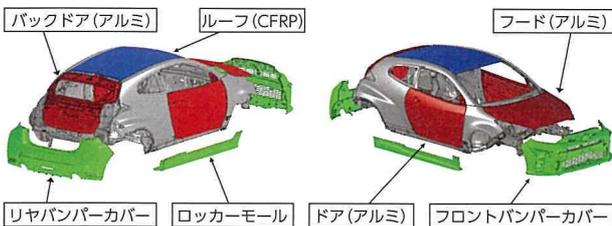


図11 軽量化部位

4.1 アルミパネル

アルミを採用したことにより、ボデー工程には、アルミの専用溶接セルを設置した。アルミ溶接の導入に際し、アルミ摩擦溶接（FSW）よりも、剪断破断荷重と剥離破断荷重に優れたアルミスポット溶接を採用した。写真10にそれぞれの溶接断面を示す。写真からもアルミスポットの溶接強度が高いことが見て取れる。

この溶接工法の採用により、ランニングコスト60%減することができ、さらに、溶接時間が短い

ことから生産性を55%上げることができている。

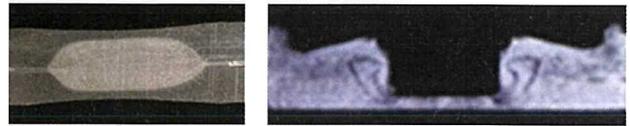


写真10 断面（左：スポット溶接>右：摩擦溶接）

4.2 薄肉樹脂バンパー

車両運動性能向上のため、前後オーバーハングの大型外装部品である前後バンパーカバーやロッカーモールを薄肉成形する生産技術を開発した。ここで開発した技術は、自動車部品の多くに応用が可能である。

開発目標は、お客様がクルマを走らせたときに判断できる質量低減、すなわち25%の軽量化の達成とした。そのためには、現状の平均板厚2.6mmを25%削減し、1.9mmとする必要がある。なお、材料変更は現状生産車種に多大な影響を及ぼし、かつ相当の開発期間が必要であることから、今回は、生産技術開発による薄肉達成を目指すこととした。

必要十分な面剛性を確保するため、キャラクターラインのない部分を厚く、それ以外の部分は徹底的に薄くすることで板厚配分を最適化した。

薄肉化の最大の懸念は成形性の悪化であったが、徹底した解析精度向上により、最適な成形条件をCAEにて完成させた。今回、初期流入での充填率を向上させることで、極短時間で充填させるような成形条件が最適となった。

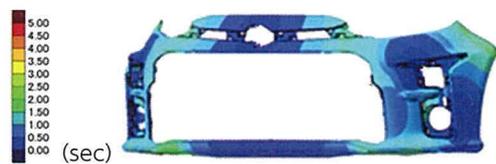


図12 フロントバンパーのCAE流動解析

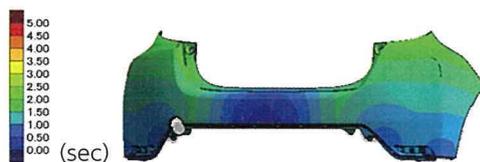


図13 リアバンパーのCAE流動解析

開発技術によるCAE流動解析結果が、図12・13である。薄肉にすると、金型に樹脂の温度を吸熱されやすくなるため、樹脂の粘度が上がり、端部まで樹脂が流れにくくなるが、今回、この現象を逆

手に取り、金型内での冷却時間を大幅に削減した。射出時間は、1.4～1.7sec、冷却時間は、4.0secとなり、成形サイクルタイムは25sec未滿を可能とした。また、使用樹脂量を25%低減したことでコスト低減も実現している。

4.3 SMC (Sheet Molding Compound) 工法によるCFRP ルーフ

車両運動性能のさらなる高みを目指し、重心から最も高い位置にあるルーフの軽量化を図った。

LFA から脈々と受け継がれてきたカーボン成形の技術を応用し、GR ヤリスでは、優れた生産性と軽量高剛性を高い次元で達成できるSMC工法によるCFRP製のルーフを開発した。

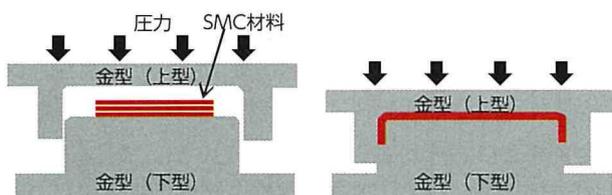


図 14 SMC 工法による CFRP の成形方法



写真 11 SMC 工法による CFRP の外観

SMC工法によるCFRPは、図14のように、シート状のカーボン材料を所定の形にカットし、金型にのせ、高圧・高温でプレスすることによって高強度の成形品を得ることができる成形方法である。成形品は、写真11のような大理石模様の成形品となる。

今回、使用した材料と板厚における成形時間と材料粘度の関係を調査した結果を図15に示す。

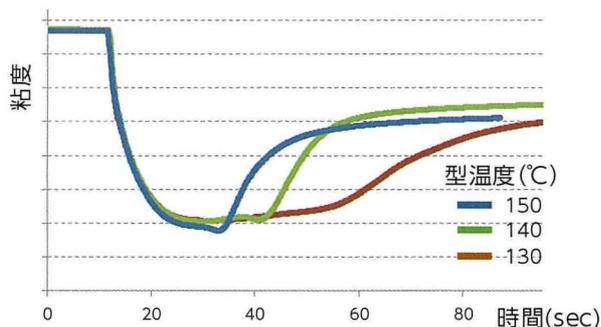


図 15 SMC 工法による CFRP の成形時粘度

この結果を織り込み、図16のようにCAEを用いて材料投入サイズを検討した。粘度が最も低くなるタイミングでプレスすることで、短サイクルタイムで性状の良い成形品を得ることに成功した。

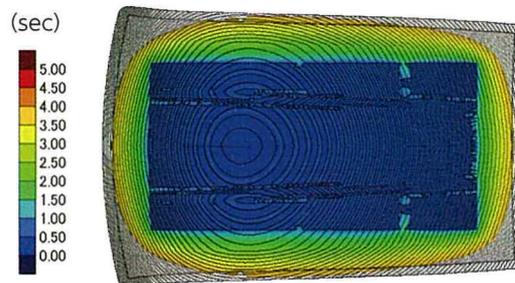


図 16 SMC 工法による CFRP の成形 CAE 結果

5 変種変量, 未来への対応

GR ヤリスは、WRC や Rally2 の参戦に向けホモロゲーションを取得するために、25,000台/年の生産が必要である。初年1年間は、このホモロゲーションのために安定的な生産が保証されているが、2年目以降スポーツカーの生産台数の予測が非常に難しく、月産数百台あるいは、それ以下になる可能性が非常に高い。また、GRブランド構築のために、次々とGRの新車種を投入していく目標もある。前述した「いいクルマづくり」を「競争力のあるモノづくり」で支えるために、TPSを堅守しつつ生産量の変動と車種の追加などの変化に素早く対応でき、かつ工場の生産性を高く維持するために、「GR Factory」はセル方式を採用した。

ボデー工程のセル方式は、汎用セルと呼ぶセル方式を採用し、セルへの搬送はAGVを採用している(写真12)。

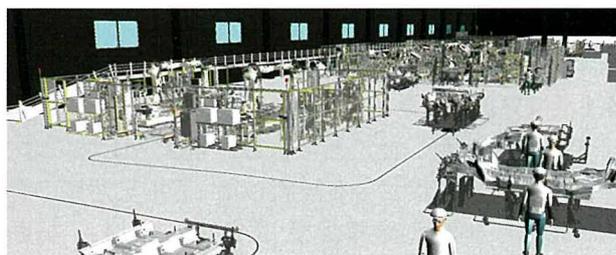


写真 12 ボデー工程

工程を汎用部と専用部にはっきりとわけ、汎用部はどのセルも共通にした。共通化をすることで、どのセルでもあらゆるサブアッシーの組付けを可能にし、車種追加をする場合は専用部のみの追加で容易

に車種追加できるようにした。また、汎用セルの増減によって、変量にもフレキシブルに対応することができる。さらに、今後、新技術が追加された場合は、新技術セルを追加することで対応できる。

組立工程は、足まわり高品質化を実現するためにエンジン・シャシーを搭載する工程はセル方式、部品組付け工程はコンベアを採用せず AGV を採用した (写真 13)。

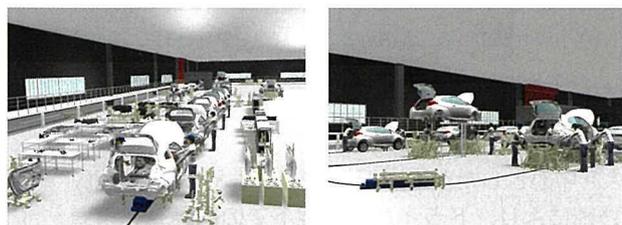


写真 13 組立工程

エンジン・シャシー搭載工程は、止めて定点作業化することにより、安定した作業から生み出す高品質をまた搬送を AGV にすることで、車種間の工数差も AGV のフレキシブル性で吸収し、高生産性を実現した。

6 おわりに

GR ヤリスの号試で生産した車両 27 台を、プロレーサーであり、GR ヤリスの評価ドライバーでもある、石浦選手と大嶋選手に、トヨタの東富士テストコース・下山テストコース・元町工場テストコースでバラつき評価をしていただいた。結果は、従来より格段にバラツキの少ない車両であると評価いただいた。

「GR Factory」は、自信をもってお客様にご満足いただける「スポーツカー」を実現できたと確信しているが、さらにレベルアップするために、生産技術を追究し、作業者の技能（匠）を磨き続ける。

■著者



町野 元康



北川 博之



荒井 優野



北折 英嗣

自動運転技術を用いた高度運転支援システム 「Teammate Advanced Drive」の開発

Development of Teammate Advance Drive
- An Advanced Driving Assistance System Using Automated Driving Technology -

松永 昌樹 *1 Masaki Matsunaga	尾崎 修 *2 Osamu Ozaki	木村 耕一郎 *2 Koichiro Kimura
原 弘一 *2 Koichi Hara	大川 真弥 *2 Shinya Okawa	流石 岳史 *1 Takeshi Sasuga

要旨

「Teammate Advanced Drive」は、トヨタ自動車独自の人を中心とした自動運転化技術の考え方「Mobility Teammate Concept」にもとづいた最新の高度運転支援技術により、ドライバー監視下での自動車専用道路（高速道路など）にて、車線・車間維持、分岐、レーンチェンジ、追い越し機能などを実現したシステムである。本稿は、本システムの概要とその技術の特徴・詳細について紹介する。

Abstract

Teammate Advanced Drive is the latest advanced driving assistance system developed based on the Mobility Teammate Concept, Toyota's unique approach to automated driving technology. This system is capable of performing the following actions on highways and other vehicle-only roads under driver supervision: maintaining lanes and vehicle-to-vehicle distances, branching off, changing lanes, and overtaking. This article describes an outline of this system, as well as the characteristics and details of the technologies involved.

キーワード 高度運転支援, 自動運転, LiDAR, 高精度地図, OTA, HMI, 冗長設計

1 はじめに

トヨタ自動車は、全ての人が安全に自由に移動できる社会の実現のために、「安全」「自由な移動」「環境」の三大目標（図 1）を掲げて、自動運転技術の開発を進めている⁽¹⁾。

高度運転支援システム「Teammate Advanced Drive」は、クルマが人から運転を奪うものでもなく、単に人にとって代わるものでもなく、人とクルマが気持ちの通った仲間のように互いを助けあいともに走るという、トヨタ自動車独自の人を中心とした自動運転化技術の考え方「Mobility Teammate Concept」（図 2）にもとづいて開発された。



図 1 自動運転技術開発の目標



図 2 Mobility Teammate Concept ロゴ

*1 先進技術開発カンパニー 自動運転・先進安全開発部

*2 トヨタ・リサーチ・インスティテュート・アドバンスド・ディベロップメント株式会社

2 Teammate Advanced Drive 概要

「Teammate Advanced Drive」は、ドライバー監視下において自動車専用道路（高速道路など）における運転操作の認知・判断・操作を適切にサポートすることで、車線・車間維持、分岐、車線変更、追越し機能を実現している（図3）。常に安全を最優先に判断することで、ドライバーに信頼される、自動車メーカーならではの人に寄り添った運転操作、乗り味を追求した。これにより、ドライバーは長時間の運転におけるアクセル、ブレーキ、そしてハンドル操作の負担軽減が可能となり、より周辺に注意を払った安全な運転が可能になった。また、最先端のハードウェアを備えることで、OTA（Over the Air）ソフトウェア更新機能による、新しい地図・機能・性能の提供が販売後でも可能となった。



図3 Advanced Drive 支援イメージ

2.1 システム概要

本システムは、SAE（Society of Automotive Engineers）の自動化レベル定義⁽²⁾で表現すると「Level2」に相当する。本システムの主な構成とシステム制御の流れを示す。

2017年に発売した「Lexus Safety System +A」（LSS+A）のシステム構成へのアドオン、さらにその他ADAS（Advanced Driving Assist System）システムの既存センサーも流用しながら、「Teammate Advanced Drive」の機能および性能実現に必要なセンサー・ECU（Electronic Control Unit）・アクチュエータを追加した。これにより、これまでの安全機能を十分に担保しながら、さらに安心安全で堅牢なシステムを構築した（図4、表1、表2）。

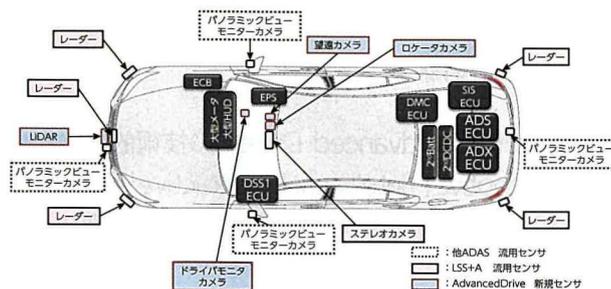


図4 Advanced Drive システム構成図

表1 主要ECUとその機能

ECU	機能
ADS-ECU	認識 / 自車位置推定 / 運動制御
ADX-ECU	AI 認識 / 将来の機能拡張
SIS-ECU	高精度地図情報の出力
DMC-ECU	ドライバー認識 / 監視
DSS1-ECU	LSS+A 機能

表2 その他主要構成部品とその機能

構成部品	機能
2 nd Batt	冗長化電源
2 nd DCDC	冗長化電源用 DC-DC インバータ
Meter/ HUD	メータ / ヘッドアップディスプレイ
ECB	制御用ブレーキ
EPS	制御用電動パワーステアリング

また、「Teammate Advanced Drive」のシステム制御（図5）は、我々が自ら運転する際に行っている「認知→判断→操作」というプロセスをそれぞれ「周辺環境認識・自車位置推定→予測技術、判断技術にもとづく運転計画→車両制御・HMI」という自動運転の各プロセスで代行する形で実現している。



図5 Advanced Drive システム制御の流れ

3 Teammate Advanced Drive の技術的特徴

「Teammate Advanced Drive」の技術的特徴として、「Perceptive」「Intelligent」「Interactive」「Reliable」「Upgradable」の5つを挙げる事ができる。

本章では、各特徴について詳細を紹介する。

3.1 Perceptive (高い認識性能)

LiDAR (Light Detection and Ranging)、カメラ、レーダーなど、特徴の異なるセンサーと高精度地図を組み合わせて周囲 360 度を高い信頼性・精度でカバーし (図 6)、周囲の交通環境の認識・識別を実現している。高精度地図は、前述のセンサーが届かない場所の先読みにも利用することで、より先までの道路認識が可能になる。また、カメラ/LiDAR 認識と高精度地図と GPS 情報を統合することで、高精度な自車位置の特定⁽³⁾ (図 7) が可能になった。これらトータルで従来の ADAS に比べて格段の認識性能向上を実現している。

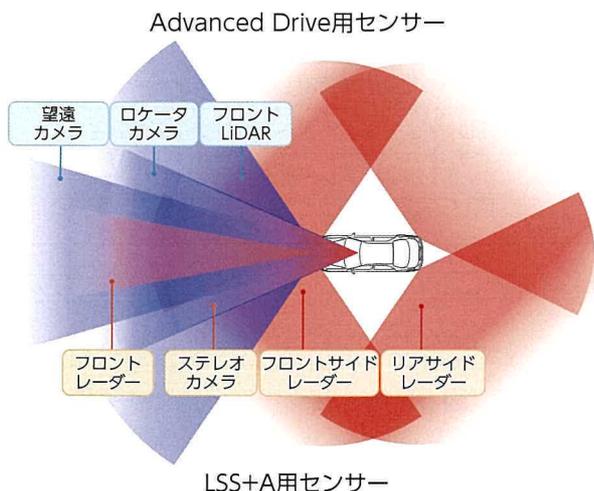


図 6 360° センシング

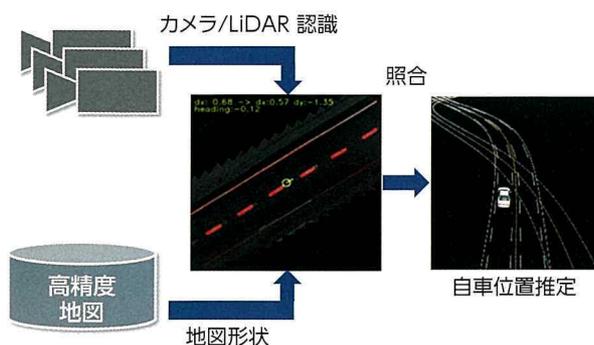


図 7 高精度地図を用いた自車位置推定

3.2 Intelligent (知能化)

時々刻々と変化する交通環境において、早めの危険を察知し、適切な運転計画を構築し、スムーズな制御につなげるため、本システムでは、ディープラーニングを中心とした AI 技術を取り入れた。これにより、運転中に遭遇しうる様々な状況に対して予測・対処可能なシーンが増え、複雑な道路状況下での安全性および走行安定性の確保を実現した。これらは、運転中に得られる膨大なデータを、複数の高性能 SoC (System-on-a-Chip) を組み合わせた高い演算能力によって可能となった。

乗っている全ての人に、安心・快適な運転支援を提供するため、「縦横加速度の繋がりがよい制御」(図 8) を組み込んだ。また、車線変更・分岐はもとより、自車線走行時にも周辺車両に配慮した位置取り制御や譲り制御など (図 9)、トータルで安心安全な制御を実現した。

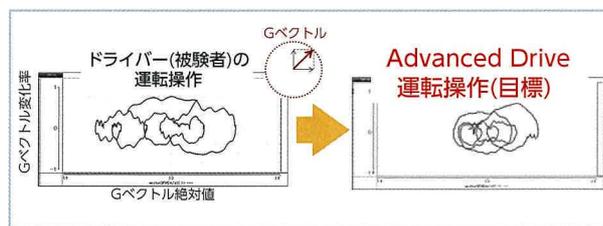


図 8 縦横加速度制御



図 9 基本機能と安心安全に向けた制御

3.3 Interactive (ドライバーとクルマとの対話)

「Teammate Advanced Drive」の人を中心とした高度運転支援 HMI (Human Machine Interface) を紹介する。本システムでは、ドライバーとクルマが対話し、常にお互いの状況を正しく把握できるような専用 HMI を取り入れた。図 10 にそのプロトタイプを表示例を示す。

基本的にクルマは、周辺車両やこの先の道路形状、将来の自車の動きなどをシンプルかつわかりやすく表示し、ドライバーに伝える。もし、クルマ側が苦

手なシーンに出くわした場合は、ドライバーが余裕をもってクルマをサポートできるようなHMI設計としている。さらに、ドライバーの状態に応じて、クルマからドライバーに音声で問いかけるなど、長距離移動を安心かつ快適に走行するための工夫も取り入れている（国内導入のみ）。

ドライバーの体調急変などで運転継続が困難になったとクルマが判断した場合は、自車を減速させながら、可能な場合は路肩に停止させ、自損・加害事故の回避や事故被害軽減を支援する（図11）。



図10 直感的にわかりやすいメータ表示

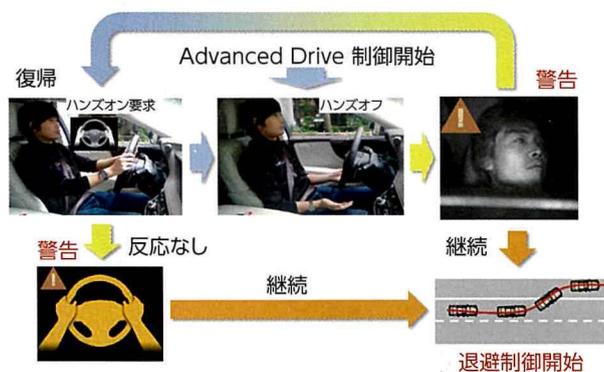


図11 ドライバーとの対話・緊急退避

3.4 Reliable (信頼性)

快適で安心安全なシステムを実現するため、様々な環境での徹底的な作りこみを、実車による走行テストやシミュレーションを活用した大規模データテストといった、リアル/バーチャル双方の観点で実施した。

また、電源系、ブレーキ、ステアリング、センサー類、車載ネットワーク、ECU、演算素子、アルゴリズムなどを冗長化（図12）させることで、不測の事態でも高い信頼性を確保できるシステム構成とした。

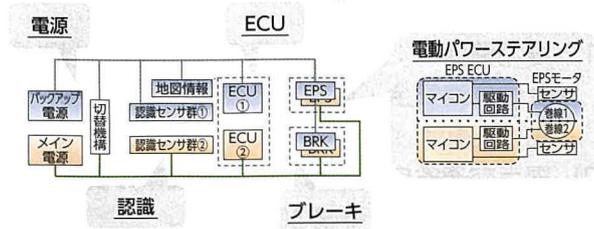


図12 冗長設計

3.5 Upgradable (ソフトウェアアップデート)

本システムは、ソフトウェアアップデートの仕組みの一つであるOTAをトヨタではじめて制御系に採用した。また、車両がお客様の手に渡った後も、市場での使われ方や車両制御結果をセンターに蓄積していく仕組みを構築した。

蓄積したデータをもとに、機能の改善/追加を継続的に進めること、また、お客様のクルマ購入後もソフトウェア（制御ソフト、高精度地図ソフト）アップデートをすることで、常に最新の運転支援技術、それにもとづいた安心・安全な走行性能を提供し、クルマを継続的に進化させていくことが可能となった。

これはトヨタ自動車、これまでのクルマ開発の概念の変革にチャレンジし、来るべきソフトウェアファーストの時代にお客様へ“嬉しさ”を迅速に提供するための重要なトライとなる技術である。

4 今後の方向性

今回紹介した「Teammate Advanced Drive」は、まだ普及システムと呼べるレベルには到達していない。

事故ゼロの社会を目指し、世の中の全ての方々のQOL（Quality of Life）を向上させるためには、センサーやECUなどをさらに賢く統合してシンプル化などを行っていく必要がある。但し、今回の開発で得た知見やシステムインフラは、今後の普及システムの礎となることを確信している。

我々の目標は、運転ができない方々にも安全な移動の自由を提供することであり、最終的には完全自動運転技術の確立も重要になってくる。そのため我々トヨタ自動車とトヨタ・リサーチ・インスティテュート・アドバンスド・ディベロップメントは、今後もチャレンジを続けていく。

■参考文献

- (1) 鯉淵健ほか：交通事故死傷者ゼロに向けた最新の先進安全／自動運転技術とその展望. 自動車技術会. Vol.74. 2020. p.10-16
- (2) 国土交通省自動車局：自動運転車の安全技術ガイドライン. 平成30年9月
- (3) 松永昌樹ほか：自動車専用道路を対象とした自動運転システムの研究. Toyota Technical Review. Vol.63. 2017. p.41-46

■著者



松永 昌樹



尾崎 修



木村 耕一郎



原 弘一



大川 真弥



流石 岳史

太陽光を模擬した光化学反応実験によるガソリン車排出ガスの大気中二次有機粒子生成に関する研究

Research into Generation of Atmospheric Secondary Organic Aerosols from Gasoline Vehicle Emissions Using Photochemical Reaction Experiments Simulating Solar Radiation

林 大介*¹ 山下 哲也*¹
Daisuke Hayashi Tetsuya Yamashita

要旨

PM_{2.5} による大気汚染は世界中で問題となっている。PM_{2.5} に含まれる二次有機粒子 (SOA, Secondary Organic Aerosol) は、ガス状の炭化水素から大気中の光化学反応により生成される。ガソリン車排出ガスから生成される SOA については、光化学反応実験により多くの研究がなされ PM 排出量の 10 倍以上との報告もある。しかし、その実験の多くは実際の太陽光とはスペクトルや強度が異なる光源を使用したものである。そこで本研究では太陽光スペクトルと強度を模擬した光源を作成し、主要な炭化水素の SOA 生成能を調べた。その結果、予想されるガソリン車排出ガスからの SOA 生成量は PM 排出量の 0.3～1.7 倍であることがわかった。

Abstract

Air pollution caused by fine particulate matter (commonly known as PM_{2.5}) has become a global issue. This particulate matter (PM) contains secondary organic aerosols (SOA) that are generated from gaseous hydrocarbons by photochemical reactions. A wide range of photochemical reaction experiments have been conducted to study SOA generated from gasoline vehicle emissions. It has been reported that the amount of SOA generated in this way is at least ten times higher than tailpipe PM emissions. However, most of these experiments have used light sources with different spectra and intensity than actual solar radiation. Therefore, this research created a light source simulating the spectra and intensity of solar irradiation and examined the SOA formation potential of the main hydrocarbons. The results found that the estimated amount of SOA generated from gasoline vehicle emissions is between 0.3 and 1.7 times the amount of tailpipe PM emissions.

キーワード 二次有機粒子, 光化学反応, スモッグチャンバー, SOA 生成能, 太陽光, ガソリン車, 排出ガス, 炭化水素

1 まえがき

PM_{2.5} の大気環境基準未達は世界中の都市部で問題になっている。国内では 2014 年、環境省に微小粒子状物質等専門委員会が発足し、PM_{2.5} 対策について有識者による継続的な議論が進められてきた。同委員会は 2015 年に、それまでの議論を総括した「微小粒子状物質の国内における排出抑制策の在り方について (中間取りまとめ)」⁽¹⁾ を発表し、中・長期的な課題の一つとして PM_{2.5} の二次生成、特に二次有機粒子 (Secondary Organic Aerosol, 以下 SOA と略す) のメカニズム解明を目指すとの方針を示した。SOA は、太陽光によるガス状の揮発性有機化合物 (Volatile Organic Compound, 以

下 VOC と略す) の光化学酸化反応によって生成される粒子であり、PM_{2.5} に含まれる主要な成分の一つとして注目されてきた。SOA の前駆物質である VOC は、塗装、燃料蒸発ガスなどの固定発生源だけでなく、自動車などの移動発生源からも排出される。特にガソリン車は、冷間始動時に炭化水素 (Hydro Carbon, 以下 HC) の排出が増加することが知られており、都市部における SOA 前駆物質の主要な排出源の一つとして注目されてきた。ガソリン車の排出ガスから生成される SOA については、これまで多くの研究がなされてきたが、それらの多くはスモッグチャンバーと呼ばれる大気中の光化学反応を再現する実験装置によって行われた。そうした研究のなかには、ガソリン車の排出ガスから生成する SOA は、テールパイプから排出される粒子

* パワートレーンカンパニー パワートレーン先行統括部

状物質 (Particulate Matter, 以下 PM と略す) の 10 倍以上との結果を示すものもある⁽²⁾。

しかし, こうした実験的研究の多くは実験条件, すなわち光源や前駆物質の濃度などが実際の大気中とは異なる条件になっている。特に光源は, 紫外線域の単一波長にピークをもついわゆるブラックライトと呼ばれるランプに類するものが多く用いられていたが⁽²⁾⁽³⁾, 光源のスペクトルは, 光化学酸化反応を引き起こすラジカル物質の生成や分解に影響を及ぼし, 実際の大气中とは異なる反応が起こっていた可能性がある。

そこで本研究は, 大気実態に近い条件でガソリン車の SOA 生成能を試算し, その影響の実態把握に資する知見を得ることを目的とした。本研究では, 実際の太陽光スペクトルを模擬した光を照射するスモッグチャンバーにより, ガソリン車の排出ガスに含まれる HC 成分の SOA 生成能を計測し, ガソリン車の排ガスの SOA 生成能を試算した。その結果, SOA の主要な前駆物質と考えられているアロマ成分の SOA 生成能は従来の知見に比べ小さく, 本研究で調査したガソリン車排ガスの SOA 生成能は, PM 排出の 0.3 ~ 1.7 倍であることがわかった。SOA の実態を把握するうえで, スモッグチャンバーの光源スペクトルなど, 実験条件が評価に与える影響について一層理解を深めることが重要である。

2 方法

2.1 スモッグチャンバー実験

スモッグチャンバーとは, UV ランプなど太陽光に代わる光源の光をチャンバー (反応容器) に入れたガスや粒子に照射し, 光化学反応によるガスや粒子の生成・消滅を調べるための実験装置である。本研究のために製作したスモッグチャンバーの構成を図 1 に示す。本研究のスモッグチャンバー装置は, コンテナ型の閉空間にチャンバー, 光源, 温度調節装置および計測器を配置した構成である。

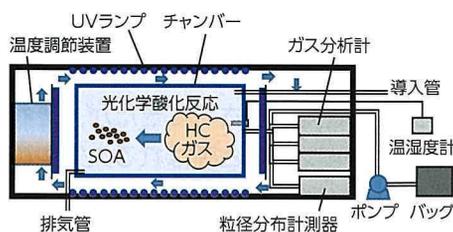


図 1 スモッグチャンバーの機器構成 (製造: (株) セリック)

チャンバーは UV 光の透過性が良く, HC が吸着し難いテフロン膜 (トヨフロン FEP フィルム, 厚さ 50 μ m) をアルミニウム製フレームで保持し, テフロン膜による密閉空間を作る構造とした。チャンバーの容積は約 2 m^3 (およそ幅 2m, 奥行き 1m, 高さ 1m) である。

スモッグチャンバーの光源は, 光化学反応に対する影響が大きい紫外線域 (波長 300 ~ 400nm) のスペクトルおよび強度を中緯度地域の平均的な日中の太陽光の基準 (AM1.5) に近似させるよう設計した。40 形 (管長 1198mm) の蛍光灯タイプの UV ランプを使用し, スペクトルの異なる Q-Lab 社製 UVA-340 12 本と三菱電機社製 FL40SB 120 本のスペクトルの合成が図 2 に示す形になるよう, チャンバーを囲む 6 面に配置した。

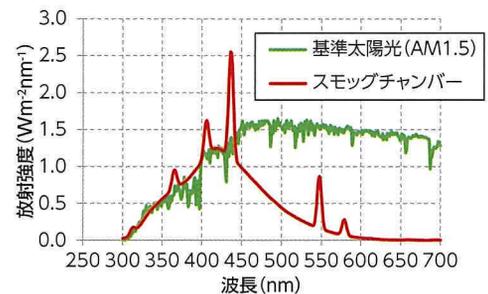


図 2 スモッグチャンバーの光源のスペクトル

チャンバーの中心点と同じ高さの 4 隅の点の計 5 点における計測値の平均値。各点の計測値は, 相馬光学製 太陽分光放射計 S-2440 による上面, 下面の計測の合計値。

温度調節装置は, UV ランプの発熱によるチャンバー内のガスの温度上昇を防ぐため, チャンバーの外側の空気を循環させながら冷却し一定温度に保つ機能をもつ。これによりチャンバー内部も一定温度に保つことができる。

チャンバー内の粒子状物質の計測は, TSI 社製 走査式ナノ粒子粒径分布計測器 SMPS モデル 3080 (以下, SMPS と略す) を用いて粒子径 15 ~ 640nm の範囲の粒子径分布を計測し, 粒子が球形と仮定したときの体積濃度に粒子計測における一般的な粒子密度 1.2g/cm³ を乗じて粒子の質量濃度を求めた。また, チャンバー壁面への付着による粒子の減少速度は粒子濃度に比例すると仮定し, UV ランプを消灯した状態でのチャンバー内の粒子の減少速度の実測データにもとづき, 粒子濃度の壁面への付着による減少分を補正した。

ガス状物質の計測は、NO_x、非メタン炭化水素 (Non-Methane Hydrocarbons, 以下 NMHC と略す)、オゾンのガス成分濃度をそれぞれ堀場製作所製 大気用ガス成分濃度分析計 APNA-370, APHA-370, APOA-370 (以下、ガス分析計と略す) により計測した。また、個々の HC 成分の計測は、チャンバー内のガスをポンプによりバッグ (GL サイエンス社製 SMART BAG PA, 容量 10L) に採取し、GL サイエンス社製 気体試料濃縮装置 HP764 を経て島津製作所製 ガスクロマトグラフィー GC-2010 (以下、GC と略す) により各 HC 成分濃度の定量分析を行った。

スモッグチャンバーによる SOA 生成実験の手順を以下に示す。

まず、前回実験の残留物などをチャンバーから除去するため、実験の前日に加湿した精製エアを封入したチャンバーを温度 40℃、相対湿度 50% の条件で 6 時間 UV 照射し、チャンバーの残留物質を揮発・酸化させた。その後、UV ランプを消灯し一晩かけて乾燥した精製エアでチャンバーをパージし洗浄した。

実験の当日は、まず UV ランプを消灯した状態で加湿した精製エアをチャンバーに導入して、温度 25℃、相対湿度 50% に調節した後、ガス分析計、SMPS、GC によりチャンバーのバックグラウンド濃度が十分に低いことを確認した。次に、実験条件にあわせてガスや粒子を導入管からチャンバーに導入し、UV ランプを点灯して光化学反応を開始させた。UV 照射中のチャンバー内の温度、相対湿度はそれぞれ 25℃、50% になるよう調整した。光化学反応による SOA の生成の計測は、SMPS を用いて UV ランプ点灯後から 5 分間隔で行い、前駆物質となるガス成分の減少をガス分析計および GC を用いて UV ランプ点灯の直後 (初期条件)、0.5 時間後、2 時間後、3 時間後、4 時間後に行った。UV ランプは 4 時間照射した後、消灯し光化学反応を終了させた。

2.2 HC 成分の SOA 生成能の計測

ガソリン車排ガスには多くの HC 成分が含まれるが、本研究では、SOA 生成能が高いと考えられている炭素数 7, 8, 9 (以下それぞれ C7, C8, C9 と表記) のアロマ成分の SOA 生成能を調査することとし、それぞれを代表する成分としてトルエン、*o*-キシレン、1,2,4-トリメチルベンゼン

(Trimethylbenzene, 以下 TMB と略す) を選定した。

それらのスモッグチャンバー実験の初期条件を表 1 に示す。実験条件を実際の大気の状態に近づけるため当該アロマ成分に加え、NO_x と硫酸アンモニウム粒子をチャンバーに導入し共存させた。これらの物質の初期濃度は、国内の大気中の濃度と同程度になるよう調整した。

表 1 C7～C9 アロマ成分のスモッグチャンバー実験の初期濃度条件

No.	種別	成分名	初期濃度		
			当該アロマ成分 (ppbC)	NO _x (ppb)	硫酸アンモニウム粒子 (μg/m ³)
1	C7	トルエン	749	38	5
2			1118	37	6
3	C8	<i>o</i> -キシレン	569	43	3
4			689	37	7
5	C9	1,2,4-TMB	728	38	5
6			809	49	4

前述のスモッグチャンバー実験の結果から得られた光化学反応による SOA 生成と前駆物質となる HC 成分の減少の一例を図 3 に示す。こうした実験結果から SOA 生成量とそれにとまなう前駆物質の減少量のデータが得られる。

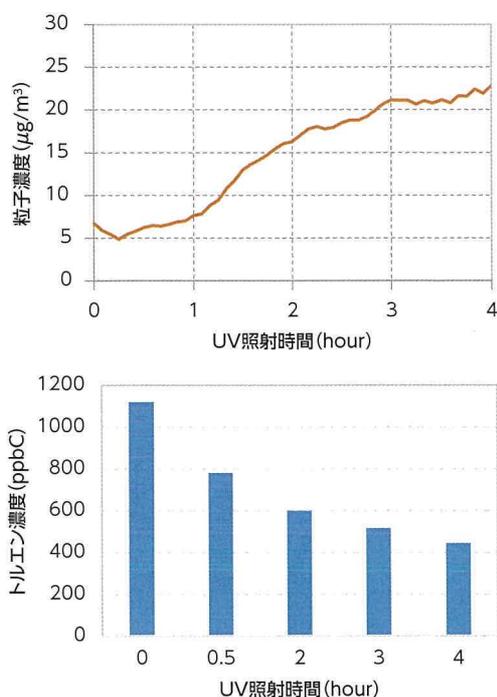


図 3 スモッグチャンバー実験 No.2 の光化学反応に伴う SOA 生成と前駆物質の減少

SOA 生成と前駆物質の減少の関係性を説明する理論として 2 生成物モデルが知られている。これは、実際は多種の生成物をとまなう SOA 生成を、揮発性と収率の異なる 2 種類の生成物を仮定することにより定量的に説明することを試みる理論である。これによれば、SOA 生成と前駆物質の減少の関係は、一定温度 (25°C) 条件において式 (1) (2) のようにあらわされる。

$$Y_i = \frac{SOA_i}{\Delta HC_i} = M_0 \left(\frac{\alpha_{1,i} \kappa_{1,i}}{1 + \kappa_{1,i} M_0} + \frac{\alpha_{2,i} \kappa_{2,i}}{1 + \kappa_{2,i} M_0} \right) \quad (1)$$

$$M_0 = POA + \sum_i SOA_i \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここで、
 i = HC 成分種, SOA_i = i から生成した SOA ($\mu\text{g}/\text{m}^3$),
 ΔHC_i = i の減少 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$),
 Y_i = i の SOA 収率, M_0 : 有機粒子 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$),
 $\alpha_{1,i}, \alpha_{2,i}$ = i から生成した半揮発性物質の収率
 $\kappa_{1,i}, \kappa_{2,i}$ = 温度 25°C における i から生成した半揮発性物質のガス / 粒子分配定数
 POA = 初期状態で共存する有機粒子 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

表 1 の各アロマについて、スモッグチャンバー実験における SOA 生成量 (SOA_i) と各アロマの減少量 (ΔHC_i) のデータを式 (1) (2) に代入し、パラメータ $\alpha_{1,i}, \alpha_{2,i}, \kappa_{1,i}, \kappa_{2,i}$ を同定すれば、各アロマ成分の SOA 生成を予測する式が得られる。

また、式 (1) (2) から、SOA の収率は有機粒子 (Organic Aerosol, 以下 OA と略す) の共存により変化することがわかる。このことから、ガソリン車の SOA 生成能を評価する際は、共存する OA の影響を考慮することとした。

2.3 ガソリン車排出ガスの SOA 生成能の試算

モード走行時のガソリン車排出ガスに含まれる HC 成分が生成し得る SOA の最大値を予測した。ガソリン排ガスに含まれる SOA 前駆物質と考えられている HC 成分、すなわち C6 以上のパラフィンとナフテン、C6 以上のアロマ⁽⁴⁾ について、ガソリン車に含まれる各成分の濃度を式 (1) (2) に代入して SOA の濃度を求めた。

このとき、ガソリン車の排ガスはモード走行時の排出が国内の大気 NMHC 濃度レベル、すなわち 100ppbC 程度まで希釈したと仮定したときの各

HC 成分濃度を使用した。また、本研究で HC 生成能を評価していない C6 以上のパラフィンとナフテン、C6 アロマ (ベンゼン) については、既存研究⁽⁵⁾ の $\alpha_{1,i}, \alpha_{2,i}, \kappa_{1,i}, \kappa_{2,i}$ の各パラメータを使用した。このようにして得られた SOA 濃度を式 (3) に代入し、モード走行時の SOA 生成量を求めた。

$$E_{SOA} = \frac{V_{mode} \sum_i SOA_i}{D_{mode}} * 1000 \quad \dots \dots \dots (3)$$

ここで、
 E_{SOA} = 自動車 SOA 生成量 (mg/km),
 V_{mode} = 排ガス中 NMHC が大気濃度レベルまで希釈されたモード走行時の排ガス量 (m^3),
 D_{mode} = モード走行距離 (km)

3 結果

3.1 HC 成分の SOA 生成能

表 1 に示す C7 ~ C9 アロマのスモッグチャンバー実験の結果から、式 (1) の 2 生成物モデルの各パラメータを同定し、既存研究⁽⁵⁾ と比較した。図 4 に示すように、OA 濃度が高くなるにしたがい SOA 収率が大きくなる傾向は同じだが、本研究の SOA の収率は既存研究より小さかった。この原因として、スモッグチャンバー実験の光源の違いの影響が考えられる。

図 2 に示したように本研究の光源は、実際の太陽の紫外域のスペクトルに近づけた結果、波長 420nm 以上の可視光域の光も多く含んでいる。このとき、ラジカル物質の一種である硝酸ラジカルは、波長 420 ~ 600nm の光を吸収し分解するため⁽⁶⁾、硝酸ラジカルは SOA 生成反応に寄与しない。これは、実際の日中の大気の状態と同じである。一方、既存研究のスモッグチャンバー実験では、波長 350nm 付近にピークをもつスペクトルの UV ランプが使用され、このようなランプの光には、420nm 以上の波長の光はほとんど含まれない。そのため SOA 生成反応に硝酸ラジカルが関与し、SOA の収率が高くなったと考えられる。

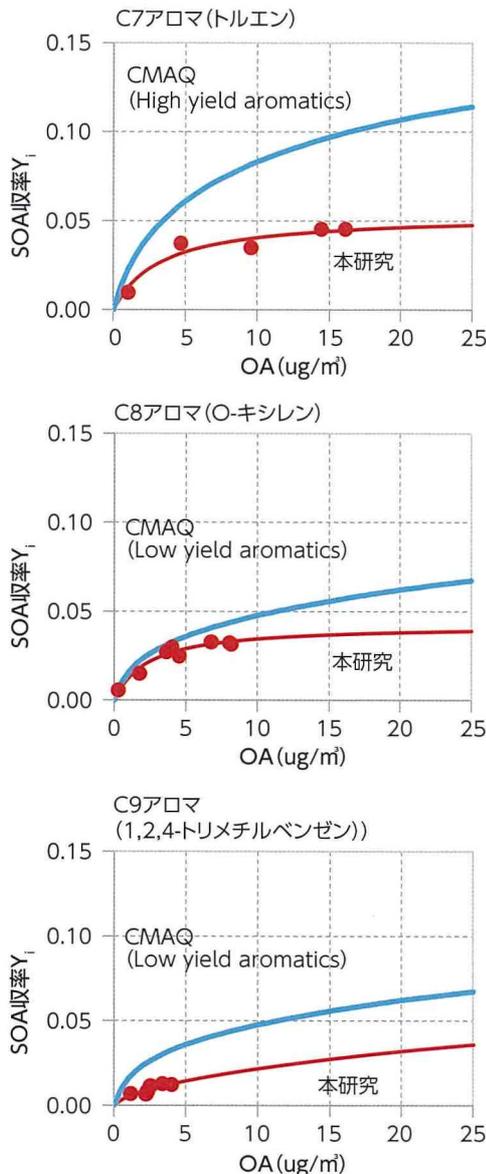


図4 本研究と既存研究 (CMAQ5.0/aero6) のアロマ成分種の SOA 生成能の比較

3.2 ガソリン車排出ガスの SOA 生成能

表2に示すガソリン車3車種のSOA生成能を1.3節にて述べた方法で試算した。対象としたSOA前駆物質の式(1)のパラメータを表3に示す。

試算に使用した排ガス中のHC成分濃度は、シャシーダイナモメーターでWLTCモード(cold start)を走行した車両の排ガスを希釈トンネルで希釈し、GCで定量分析した。ただし、トンネル希釈後の排ガスのNMHC濃度は、大気濃度レベルより1~2桁高かったため、大気中のNMHC濃度と同程度の100ppbC前後までさらに希釈したと仮定して試算した。また、1.2節で述べたように、共存する大気中のOAの影響を加味して試算した。

表2 供試車両諸元

	A	B	C
動力源	2.5L V型 6気筒 DOHC	1.2L 直列 4 気筒 DOHC IC [※] 付 ターボ	1.8L 直列 4 気筒 DOHC + 2 モーター
使用燃料	無鉛プレミアムガソリン		無鉛レギュラー ガソリン
燃料供給装置	筒内直接燃料噴射装置		電子制御式 燃料噴射装置
車両重量	1660kg	1575kg	1730kg
年式	2005	2016	2017

※ IC：インタークーラー

表3 SOA 前駆物質の2生成物モデルパラメータ

SOA 前駆物質	$\alpha_{1,i}$	$\kappa_{1,i}$	$\alpha_{2,i}$	$\kappa_{2,i}$	出所
C6以上 パラフィン, ナフテン	0.0718	50	0	0	CMAQ5.0 /aero6
C6アロマ	0.0720	3.3113	0.888	0.0090	
C7アロマ	0.0537	0.308	0	0	本研究
C8アロマ	0.0423	0.431	0	0	
C9アロマ	0.0080	0.757	0.0755	0.0239	

A車~C車のSOA生成能を試算した結果を図5~図7に示す。各車とも大気中に共存するOA濃度の増加にしながらSOA生成量は増加した。また、当初主要な前駆物質と考えられたC7~C9アロマのSOAに対する寄与度は半分以下であり、A車とC車はC6以上のパラフィンとナフテンの寄与が大きかった。C7~C9アロマは、本研究にて求めた既存研究より低い生成能のパラメータを適用したため、相対的にその他の前駆物質の寄与が大きくなったと考えられる。

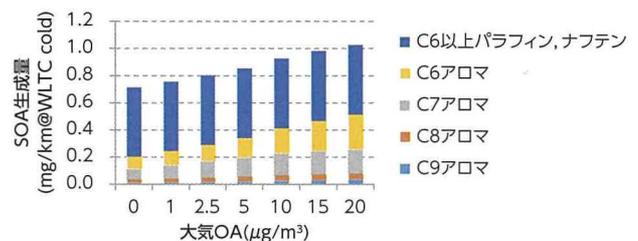


図5 A車排出ガスのSOA生成能
排出ガス希釈率 355倍
希釈後排出ガス NMHC 濃度 97ppbC

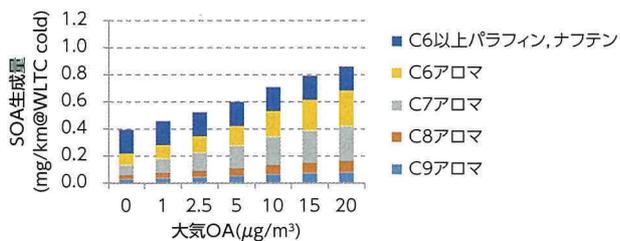


図6 B車排出ガスのSOA生成能
排出ガス希釈率 407倍
希釈後排出ガスNMHC濃度 100ppbC

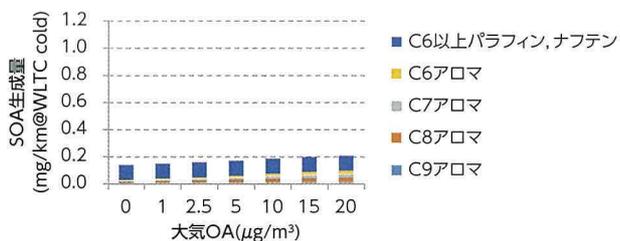


図7 C車排出ガスのSOA生成能
排出ガス希釈率 243倍
希釈後排出ガスNMHC濃度 103ppbC

次に、A車～C車のWLTCモード（cold start）走行時のPM排出量に対するSOA生成量の比を計算した結果を図8に示す。共存する大気OA濃度にともない変化し、本研究で検討した範囲ではPM排出量に対するSOA生成量の比は0.3～1.7であることがわかった。

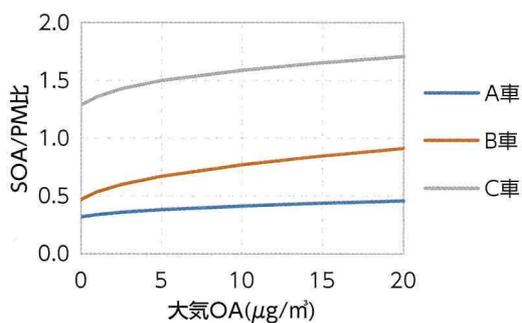


図8 ガソリン車のSOA生成/PM排出比
(WLTCモード cold start)

4 むすび

ガソリン車の排出ガスのSOA生成能をできる限り実態の大気に近い条件で評価することを目指し、太陽光スペクトルに近づけた光源を使用したスモッグチャンバー実験の結果から、C7～C9アロマのSOA生成能は既存研究に比べて低いことがわかった。その原因は、波長420nm以上の可視光により硝酸ラジカルが光分解しSOA生成に関与しないためと考えられる。これは日中の大気と同じ状態であ

り、実際の大気の光化学反応の条件を再現することができていると考えられる。

SOAの実験的な研究において、光源の波長など実験条件が評価に及ぼす影響について理解を一層深めていくことは、SOAの実態解明を進めるうえでの今後の重要な課題である。

参考文献

- (1) 環境省：微小粒子状物質の国内における排出抑制策の在り方について（中間取りまとめ）（案），微小粒子状物質等専門委員会 第6回 配布資料，2015
- (2) S. M. Platt et al.: Secondary organic aerosol formation from gasoline vehicle emissions in a new mobile environmental reaction chamber, *Atmos. Chem. Phys.*, Vol. 13, 2013, p. 9141-9158
- (3) T. D. Gordon et al.: Secondary organic aerosol formation exceeds primary particulate matter emissions for light-duty gasoline vehicles, *Atmos. Chem. Phys.*, Vol. 14, 2014, p. 4661-4678
- (4) Community Modeling and Analysis System : https://www.airqualitymodeling.org/index.php/CMAQv5.1_SOA_Update
- (5) Community Modeling and Analysis System : CMAQ version 5.0/aero6（粒子濃度予測モデル）
- (6) H. Stark et al.: Atmospheric in situ measurement of nitrate radical (NO₃) and other photolysis rates using spectroradiometry and filter radiometry, *J. Geophys. Res.*, Vol. 112, Issue D10, 2007, doi:10.1029/2006JD007578

著者



林 大介



山下 哲也

大型ドライビングシミュレータの一般道評価実験に向けた モーション制御の最適化

Optimization of Motion Controls of Highly Realistic Dynamic Driving Simulator in Urban Driving Scenarios

グエンヴァン クイフン^{*1} 小西 翔吾^{*1} 伊藤 祥司^{*1}
Quy Hung Nguyen Van Shogo Konishi Shoji Ito

要旨

2008年より、大型ドライビングシミュレータ（Toyota Dynamic Driving Simulator, TDDS）を高度運転支援・自動運転の主に高速道路での評価実験などに活用。一方、減速停止・発進などを繰り返す一般道の評価実験では、TDDSの酔いによる実験離脱者が一定割合発生している。本開発では、TDDSモーション機構（車両加減速G発生装置）の制御アルゴリズムに着目し、酔いの抑制には、DOME（実車両搭載の球型部品）の傾斜角度・角速度の抑制が効果的であることを見出した。DOMEの傾斜角度・角速度を低減させ、それによる模擬加減速Gの減少を補完するために並進量を大きくし、さらに、実車Gに対する模擬Gのゲインを小さくした。また、体感Gが小さくなることにより走行感覚を損なわないように、Z振動制御を導入し、車両走行感覚・加減速度感覚模擬の補完を行った。結果、酔いによる実験離脱者を0に低減した。

Abstract

The Toyota Dynamic Driving Simulator (TDDS), a highly realistic dynamic driving simulator, has been used to perform sophisticated simulations of driving support and automated driving systems, primarily in highway scenarios, since 2008. However, motion sickness has caused a number of test subjects to end participation in driving simulations of urban driving scenarios, which involves repeated deceleration, stopping, and restarting. Therefore, to help reduce motion sickness, this development focused on the control algorithms of the TDDS motion mechanism (the device that generates the acceleration and deceleration G of the vehicle) and the effectiveness of restricting the tilt angle and angular velocity of the dome (the spherical chamber that holds the actual vehicle set up). To compensate for the consequent reduction in simulated acceleration and deceleration G while reducing the tilt angle and angular velocity of the dome, the amount of translational movement was increased and the gain of the simulated G with respect to the actual vehicle was lowered. In addition, to ensure that any reduction in perceived G would not result in a less realistic driving experience, a Z-axis vibration control was introduced to supplement the simulated driving, acceleration, and deceleration sensations. As a result, the number of test subjects abandoning simulated driving experiments due to motion sickness was reduced to zero.

キーワード ドライビングシミュレータ, 酔いの評価, 酔いの抑制, 加減速の模擬, 走行感覚の模擬, 最適化制御

1 TDDSの概要

TDDSは、体感加速度を発生させる車両運動模擬装置（DOME）と、交通環境を模擬する映像模擬装置から構成される（図1）。TDDSの最大の特長は、DOMEを動かす大規模な並進装置（X前後方

向35m、Y横方向20mの並進距離）を装備していることである。さらに、交差点の右左折の回転感覚を再現するために、DOME内に±330°の回転角をもつターンテーブルを装備している。市街地での低速の速度感を忠実に再現するために、ターンテーブル上の運転模擬装置を4台の加振装置で支持し、乗り心地を模擬している。

^{*1} 先進技術開発カンパニー 自動運転・先進安全開発部

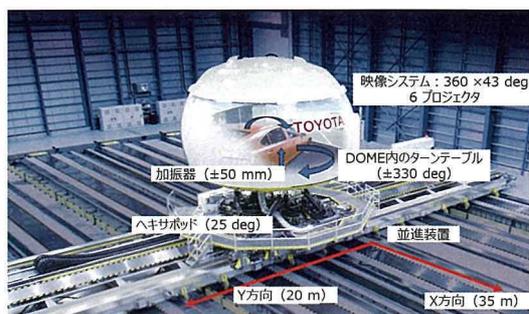


図1 TDDSの概要

映像模擬装置は、高さ4.5m、内径7.0mのDOME内面の球面スクリーンに、上側23°、下側20°、左右全周囲360°の視野を天井に固定された4Kの6台プロジェクタを用いて、24台のイメージジェネレータで作られた走行環境映像を投影して模擬している。

2 一般道評価実験における酔いの現状把握

一般道評価実験を模擬した評価コースを作成し、TDDSでの酔いの現状把握を行った。

2.1 評価コースと走行方法

片側1車線の道路(図2)を使用し、車速40km/hで約20分間走行し、交差点で発進・停止を計13回行った。

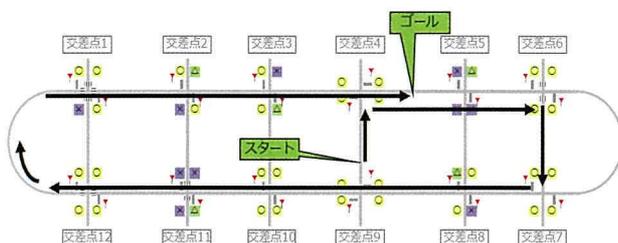


図2 酔いの評価コース

2.2 酔いの評価方法

走行中のリアルタイム評価と走行直後のアンケートによる評価指標 Simplified Simulator Sickness Questionnaire (SSSQ⁽¹⁾) を使用した。

2.3 酔いの評価結果

SSSQの評価結果(被験者数は5人)を、図3に示す。また、比較のため、過去に実施した高速道での自動運転評価実験のSSSQスコアも図3に示す。

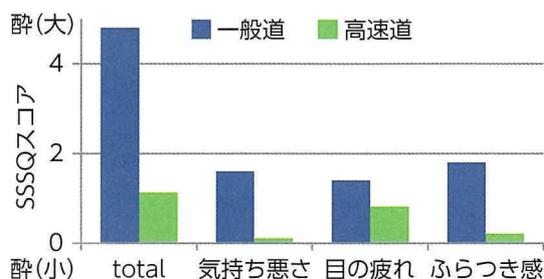


図3 一般道と高速道のSSSQの平均スコアとそれぞれの質問の平均スコア

図3から、高速道に比べて一般道では酔いが大きく発生し、「気持ち悪さ」と「ふらつき感」の評価項目のスコアでは、大きな差が生じていることがわかる。

DS酔いの発生源として、映像系による酔いと体感加速度を発生させるDOMEの動き(モーション)による酔いがあると知られている。本開発では、DOMEの動きに着目した。

3 モーション制御における酔いの要因解析

3.1 モーション制御の概要

TDDSでは、車両運動演算ソフトからの車両加減速GをStewartというモーション機構⁽²⁾で模擬し、ドライバに車両運動Gの感覚(体感G)を与える(図4)。ドライバが感じる体感Gは、下記の式1で表すことができる。

$$\text{体感 } G = \text{ゲイン} * (\text{並進 } G + \text{傾斜 } G) \dots (1)$$

ここで、

並進G: DOME並進によるG模擬の成分

傾斜G: DOME傾斜によるG模擬の成分

傾斜角度が θ の場合、

$$\text{傾斜 } G = g * \sin(\theta), g: \text{重力加速度}$$

車両実Gへのゲイン(0~1)

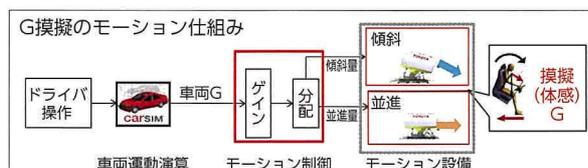


図4 TDDSモーション制御構成

3.2 一般道評価実験と高速道評価実験におけるモーション制御の比較

一般道と高速道の実験において、モーション制御(DOMEの傾斜角と傾斜角速度)を比較したものを図5に示す。傾斜角度は、一般道走行では6 [deg]以上と大きく傾く場面が5 [%]以上存在するのに対して、高速道では1 [%]未満である。傾斜角速度も一般道では、2 [deg/s]以上の角速度で動く場面が、10 [%]以上存在するのに対して、高速道では1 [%]未満である。この結果から、一般道走行の方がDOMEは大きく、そして速く傾いていることがわかる。

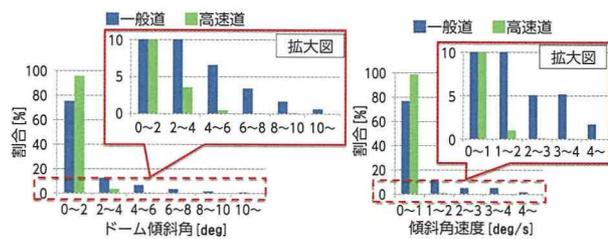


図5 一般道と高速道のモーション比較 (左) DOME 傾斜角, (右) DOME 傾斜角速度

3.3 DOMEの傾斜角度・角速度と酔い評価との関係

一般道走行中の酔いのリアルタイム評価結果とDOMEのモーション(傾斜角と傾斜角速度)の関係を示す。酔いの評価スコアが高い(4点)のシーン(図6赤丸)は、交差点付近の停止と発進における車両加減速Gの模擬により、発生しているとわかった(図7)。さらに、DOMEの傾斜角度は、10 [deg]を超えており、傾斜角速度は、設定最大の4 [deg/s]に達している(図8)。

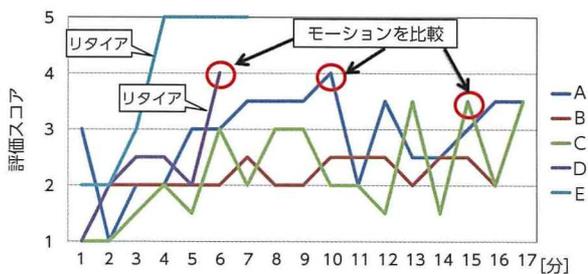


図6 酔いのリアルタイム評価スコア



図7 交差点停止・発進G模擬のDOMEモーション

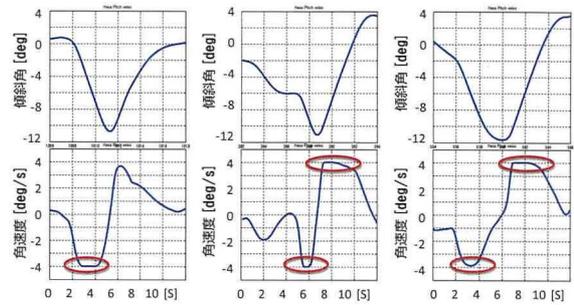


図8 酔い発生時のDOMEモーションの特徴

3.4 DOMEの傾斜による酔い発生のメカニズム

シミュレータ酔いのメカニズムの一つとして、視覚・前庭覚・体性感覚を組み合わせた感覚と過去の経験が異なることから違和感を覚え、酔いが発生するという感覚不一致・矛盾説が有力である⁽³⁾。この知見にもとづいて、TDDSの酔い発生のメカニズムを検討する。

(1) 過去の記憶と現在の運動感覚の不一致

約3 [deg/s]以上の傾斜角速度の場合、内耳の三半規管により回転運動の角加速度を感知することが一般的に知られている⁽³⁾。上記3.3で確認した結果から、酔いが発生している際、DOMEは4 [deg/s]で回転している。実車の加減速時には、存在しないにもかかわらず、TDDSではその回転を感じることで違和感を覚えると考えられる。

(2) 現在の運動感覚による感覚矛盾

モーション機構の一つの特徴として、DOMEの‘Wash-back’という特有な制御がある。‘Wash-back’とは、車両が「停止」、または「一定速走行」のときに、次の加減速度模擬動作に整えて、並進と傾斜によるドライバ体感Gが、合計で「0」となるようにDOMEがホームポジション(並進の前後X座標=0, 並進の横Y座標=0, 傾斜角度=0)に自動的に移動させる制御である(図9)。

論文解説

中では映像が止まっているが、DOME は動いていることにより感覚矛盾が発生。G 模擬時の DOME の傾斜角度が大きいほど、ホームポジションに戻すための ‘Wash-back’ の経過時間が長くなり、感覚矛盾が発生し、酔いが悪化すると思われる。また、交差点付近の減速操作・発進操作では、DOME 傾斜角度の FFT 解析の結果、最も酔いやすい周波数領域（感覚矛盾を誘導する 0.025Hz ~ 0.4Hz⁽³⁾）に入っているとわかった（図 10）。

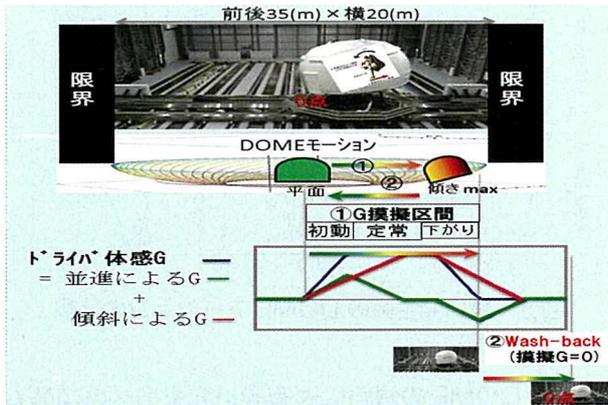


図 9 Wash-back モーション

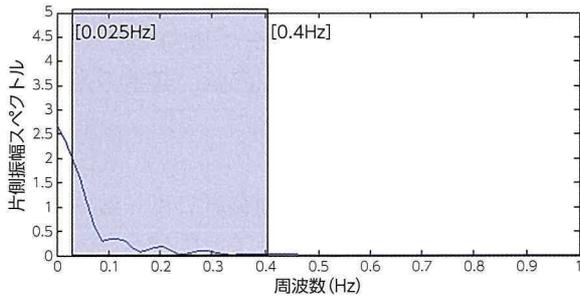


図 10 DOME の傾斜の周波数解析

4 新制御アルゴリズムの設計

前述で明らかにした、酔いの要因を抑制するためには、加減速 G を模擬するための傾斜角度・角速度を抑制する必要がある。

そこで、表 1 に示す① DOME の傾斜角度・角速度を低減させ、それによる模擬加減速 G の減少を補完するために、並進量を大きくする主に DOME の並進で加減速 G を模擬する新モーション制御アルゴリズム（並進優先のモーション制御アルゴリズム）を設計した。さらに、②実車 G に対する模擬 G のゲインを小さくし、DOME を並進装置の範囲に収めることと、③実車 G への小さいゲインに対

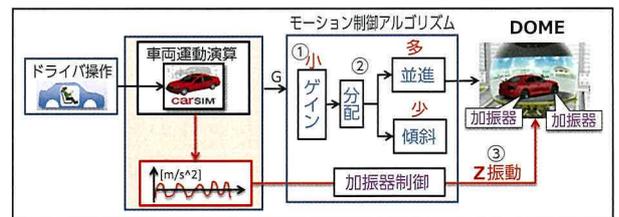
して、走行感覚を損なわないように、Z 振動制御を導入し、車両走行感覚・加減速度感覚模擬の補完を行う。

表 1 新制御アルゴリズムの設計

制御部	Before 設計	After 設計	After 設計の狙い
① 分配部	傾斜 多	傾斜 少	DOME の傾斜角度・角速度を抑制
	並進 少	並進 多	並進模擬 G を最大化し、抑制した傾斜模擬 G 分を補完
② 実車 G へのゲイン	大	小	<ul style="list-style-type: none"> 並進装置の範囲に DOME を収める DOME の Wash-back の動きの最小化
③ Z 振動	無	新規追加	実車 G への小さいゲインに対して、Z（上下方向）の振動制御（※）で、車両走行感覚・加減速度感覚模擬の補完

（※）DS 酔いが最も発生しにくいモーション運動⁽³⁾

また、上記の新モーション制御構成を図 11 に示す。



① G 「小」、②（傾斜「少」・並進「多」）、③ Z 振動（新規追加）

図 11 新モーション制御構成

4.1 並進優先のモーション制御アルゴリズムの開発

(1) モーション制御パラメータの設定方法

TDDS では、実車 G にゲインをかけたあとの模擬 G に対して、周波数フィルタ（式 2、式 3）により、DOME の並進と傾斜の配分制御を行う。

・傾斜配分制御フィルタ

$$\frac{2\zeta_{LP}\omega_{LP}s + \omega_{LP}^2}{s^2 + 2\zeta_{LP}\omega_{LP}s + \omega_{LP}^2} \frac{\omega_{LPb}}{s + \omega_{LPb}} \dots \dots \dots (2)$$

ここで、

ω_{LPb} , ω_{LP} : Cut-off 周波数の値

ζ_{LP} : 減衰定数値

・並進配分制御フィルタ

$$\frac{s^2}{s^2 + 2\zeta_{HP}\omega_{HP}s + \omega_{HP}^2} \frac{s}{s + \omega_{HPb}} \dots \dots \dots (3)$$

ここで、

ω_{HPb} , ω_{HP} : Cut-off 周波数の値

ζ_{HP} : 減衰定数値

これらの周波数フィルタにより、各モーションアクチュエータ（傾斜機構・並進機構）に加速度の周波数成分で振りわけ、モーション制御を行う⁽²⁾。

交差点での減速停止・発進を想定した加減速Gにおいて、上記の周波数フィルタの制御パラメータ（Cut-off 周波数の値、減衰値など）を様々な水準に設定し、DS 実機のモーション確認実験により、並進優先制御に効果があるパラメータの設定方法をまとめた（表 2）。

表 2 モーション制御パラメータの設定

制御パラメータ	設定方法	効果
ω_{LPb}	低い値	DOME 傾斜を抑制
ζ_{LP}	高い値	Wash-back の時に傾斜繰り返しの動きを抑制
ω_{HP}	低い値	・並進の模擬Gをできるだけ長く維持 ・Wash-back 時の並進 G 抜きを抑制
ζ_{HP}	高い値	Wash-back のときに、ホームポジションに対する並進の折り返し動きを抑制

上記の ω_{LPb} （傾斜の Cut-off 周波数値）と ω_{HP} （並進の Cut-off 周波数の値）の設定可能な最小値は、設備の並進装置の規模に制約があるため、模擬 G の大きさにも依存する。

(2) モーション制御パラメータの最適化

DOME 傾斜・並進の量とドライバの酔いとの関係を評価する関数（評価関数 E）を設計した（式 4）。

$$E(i, j) = W_1 * f_1(\text{Max 傾斜角度}_{ij}) + W_2 * f_2(\text{Max 傾斜速度}_{ij}) + W_3 * f_3(\text{傾斜角の Over-shoot}_{ij})$$

Min {E(i, j)}, E(i, j) : TDDS 酔いへの推定点数

i : ドライバ, j : 評価シーン

f_1, f_2, f_3 : 酔いのリアルタイム評価点数により推定した関数

W_1, W_2, W_3 : 酔いのリアルタイム評価点数により推定した重み

制約条件

Max| 並進範囲 | < 12 (m) TDDS の並進範囲

Max| 並進速度 | < 5m/s TDDS 並進可能な Max 速度

..... (4)

5 人のドライバの酔いリアルタイム評価結果を用いて、DOME の動きから評価関数 E による酔いの推定点数が、リアルタイム評価点数と同様になるよう、 $f_1, f_2, f_3, W_1, W_2, W_3$ を同定した（図 12）。

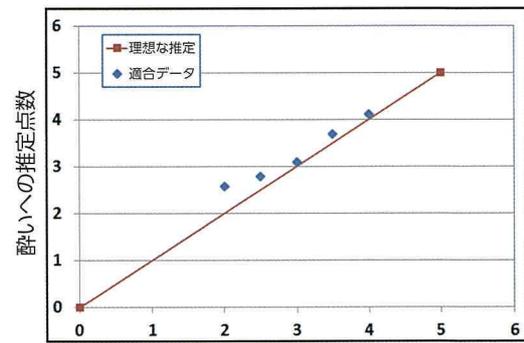


図 12 評価関数による酔いの推定点数

そして、上記の評価関数 E を用いて、TDDS で過去の一般道走行データ（交差点付近時の発進・停止加減速度、走行中加減速、右左折などのシーンの加減速度など、延べ 28 人の走行データ）において、酔い推定点数が最小となるモーション制御パラメータを求めた（表 3）。

表 3 モーション制御パラメータの最適化結果

② 実車Gへのゲイン					
	大	最適領域	小		
① 傾斜cut-off周波数 (rad/s)	1.0	>3.6点 (現)	3.6点	3.1点	(弱いG体感による違和感 (モーションと映像の感覚不一致))
	0.6	並進範囲 Out	2.6点	2.3点	
	0.4	Out	Out	1.9点	
	0.32	Out	Out	<1.9点	
	0.24	Out	Out	Out	
	0.16	Out	Out	Out	

表 3 に示したように、傾斜周波数フィルタの Cut-off 周波数の変更により、酔い評価推定点数が低い点数になることがわかる。また、実車 G へのゲインの最適化により、DOME が設備の並進装置の範囲に収まることも確認した。

最後に、表 3 で得た新モーション制御パラメータと最適化前のモーション制御パラメータによる DOME の動きを比較し、DOME の傾斜角度と角速度が小さくなったこと（図 13）、傾斜での酔いやすい周波数成分が抑制されたことを確認した（図 14）。

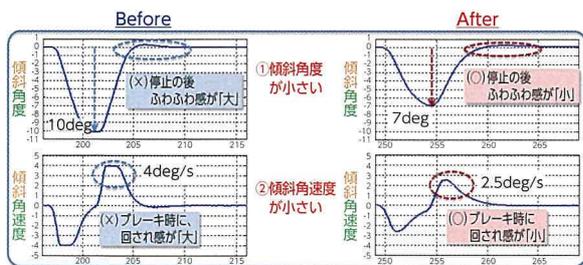


図 13 DOME の動きの比較

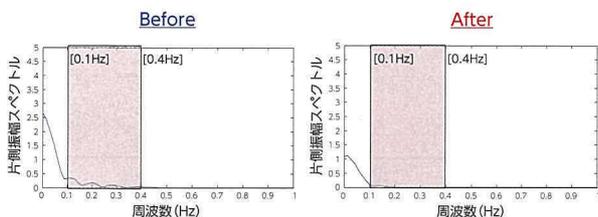


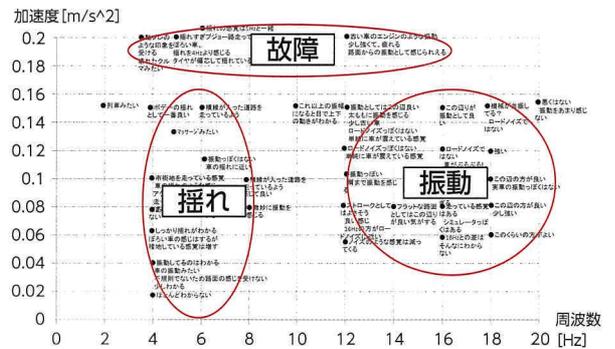
図 14 DOME 傾斜周波数の比較

4.2 上下方向の振動制御装置により車両走行感覚・加減速度感覚模擬の補完

酔い低減の対策により、体感 G が減少し、その結果車両走行感覚・加減速度感覚が減少する懸念がある。そこで、酔いに影響の少ない Z（上下方向）振動⁽³⁾によって車両走行感覚・加減速度感覚の補完を実施する。

4.2.1 Z 振動の設計

Z 振動（加速度、周波数）を設計するにあたり、DS 加振器による Z 振動に対する官能評価を実施した。図 15 に示した官能評価結果から、周波数としては 4 ~ 8 [Hz] は DOME の揺れ、12 [Hz] 以上は揺れではなく振動として感じるようになった。さらに、加速度を 0.16 [m/s²] 以上にするると壊れそうな車に乗っているように感じ、疲労に繋がることがわかった。



周波数 4 ~ 8 [Hz] : 車全体の揺れ
12 [Hz] 以上 : 揺れではなく振動
加速度 0.16 [m/s²] 以上は壊れそうな車、乗ってて疲れる

図 15 Z 振動（加速度、周波数）の官能評価結果

次に、定常的な車の振動を与えるために、車速に応じた Z 振動を検討する。定常走行時の実車 Z 振動は、4, 12, 18 [Hz] が主要である⁽⁴⁾。この実車の Z 振動データと加振器（図 11）による振動の DS 体感評価の結果を踏まえ、低速走行時に車両全体の揺れとして感じる 4 [Hz] ~ 8 [Hz] 付近の低周波と高速走行時に振動として感じる 18 [Hz] ~ 20 [Hz] 付近の高周波、二つの周波数を用いることにした。また、各振動の加速度（強度）に関しては、走行体感評価により決定した。設計した車速に応じた振動を図 16 に示す。

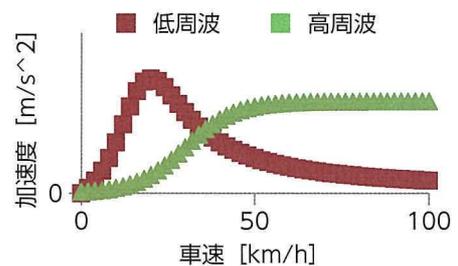


図 16 車速に応じた Z 振動

さらに、操作に対する応答として、車両加速度に応じた Z 振動を設計する。操作系に触れている手・足にのみ振動を与えるために、体の振動特性の調査を行った。胴体や腕は、比較的低い周波数の 4 ~ 10 [Hz]、手は高い周波数の 30 ~ 50 [Hz]、足は 2 [Hz] 以上と広い周波数に対して感度がある⁽⁴⁾。このことから、手・足にのみ振動を加えるためには、4 ~ 10 [Hz] を避ける必要がある。さらに、車速に応じた振動と区別を図るために、20 [Hz] 以上の振動を用いることとした。そして、車両加速度・減速度の模擬 Z 振動（周波数・加速度）を走行体

感評価により、加速時にはアクセルに対するエンジンの応答を、減速時には減速度の変化を、ドライバにフィードバックできるように設計した (図 17)。

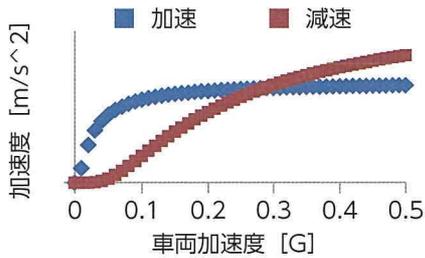


図 17 加速度に応じた Z 振動

5 新モーション設計による酔い軽減の評価

前述で実施した、SSSQ を用いた酔いの評価を対策実施後の新モーションで再度実施。

評価の結果、

現状のモーション制御 (Before)

SSSQ スコア = 4.8

新モーション制御 (After)

SSSQ スコア = 1.0 (実験離脱者率 0 割)

となり、新モーションにより酔いを低減できたことを確認した (図 18)。

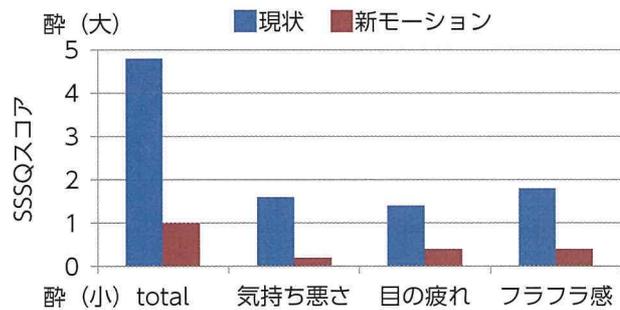


図 18 改善前後の SSSQ スコア

6 結論

本開発では、一般道評価実験の酔いに対し、モーション機構の傾斜角度・角速度を抑制する制御アルゴリズムを開発した。さらに、背反であった車両加減速 G の減少による車両走行感覚・加減速度感覚の低下を、Z 振動により補完した。これにより、一般道評価実験の酔いの低減と車両走行感覚・加減速度感覚の維持の両立を実現した。

今後、走行シーン (交差点での停止発進、右左折、

緊急回避など) にあわせて、リアルタイムに最適なパラメータに変更できる制御アルゴリズムの開発を検証することで、よりリアル (実車) に近い評価実験の実現を目指す。

参考文献

- (1) M. Okuwa, ドライビングシミュレータ酔い評価指標 (SSSQ). 豊田中央研究所業務報告書, 2007
- (2) T. Yokekawa, ドライビングシミュレータのモーション. ドライブアルゴリズム, トヨタ社内技術報告書, 2013
- (3) N. Isu, 乗車時の運動感覚と車酔い, とことんわかる自動車のモデリングと制御, JSME, 2016
- (4) J. Plouzeau, et al. Vibrations in dynamic driving simulator: Study and implementation, Science Arts & Métiers, 2013

著者



ゲンヴァンクイフン



小西 翔吾



伊藤 祥司

平成 30 年度 省エネ大賞 経済産業大臣賞 熱可塑性 CFRP の過熱水蒸気を用いた 急速加熱による省エネルギーの取り組み

Energy-Saving by Rapid Heating of Thermoplastic CFRP Using Superheated Steam

吉原 功 *1 松本 悠介 *1 作井 孝至 *1
Isao Yoshihara Yusuke Matsumoto Takashi Sakui

1 はじめに

本取り組みを実施した製造ラインがある、トヨタ自動車元町工場は、水素をエネルギーとする燃料電池車 MIRAI やクラウン、レクサスブランドなどを製造する車体工場である。トヨタは環境チャレンジ 2050 のなかで工場 CO₂ ゼロチャレンジと題し、製造ラインの改善や、利用エネルギーの変更など環境改善の活動を継続している。

2 エネルギーの管理体制

本取り組みは、自動車製造、電力、設備メーカーの業種の異なる 3 社による共同開発である。各社の強みを生かした役割分担と常に目標と問題を共有する密なコミュニケーションによって、効率の良い開発を行うことができた (図 1)。

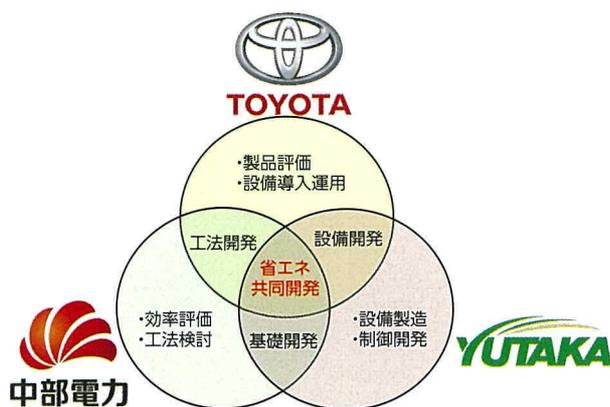


図 1 共同開発体制

3 背景と経緯

3.1 炭素繊維強化樹脂 (Carbon Fiber Reinforced Plastic) について

CFRP は高い強度と軽さをあわせもち、近年では

*1 モノづくり開発センター モノづくり技術開発部

航空機や自動車などの産業用に用途が拡大している。自動車産業においては、環境負荷低減を目的とした車両の軽量化のため、その採用を推進している。

3.2 従来の CFRP 部品生産工程について

1990 年代より航空機の部品として使われ始めた CFRP は、2010 年代に入ると燃費向上や軽量化要求の高まりによって、自動車にも採用されるようになった。自動車産業では、高い生産性が求められるため、航空機に使われた長時間を要するオートクレーブ工法をそのまま転用できない。そこで、航空機に使われた熱硬化性に加え、基材に熱可塑性樹脂を使った CFRP が開発された。熱可塑性 CFRP は、熱硬化性と比較し生産工程では加熱後の硬化時間が数分と生産性が高い特長がある。しかしながら、材料としては新しく、工法は世界的にも発展途上なのが現状である。従来の熱可塑性 CFRP 生産工程を図 2 に示す。CFRP 基材を遠赤外線を用いた加熱工程で加熱しプレス成形する。加熱時間は、390 秒 / 部品と自動車 1 台あたりに求められる生産時間 60 秒からは大きく乖離していた。これは、CFRP 特有の熱伝導率の低さに由来する加熱効率の低さが原因である。今回、トヨタ環境チャレンジ 2050 の一環として、この加熱工程の加熱効率の改善に挑戦し、また同時に生産性の向上に取り組んだ。

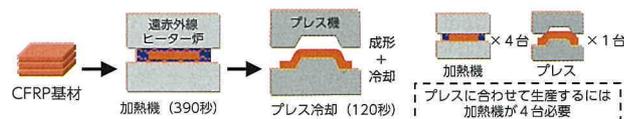


図 2 熱可塑性 CFRP 生産工程の課題

4 省エネの視点と内容

4.1 目標設定

従来の加熱方式では、上記図 2 に示すように加熱工程 4：成形工程 1 のアンバランスな工程となる。

加熱工程が多いと、設備投資の増大、排熱、放熱のムダが発生する。工程がミニマムとなり、ムダが発生しない加熱工程 1：成形工程 1 を目指し、加熱時間の短縮に取り組んだ。具体的な数値目標を表 1 のとおりに設定した。

表 1 目標設定

項目	従来	目標	
加熱時間	390 秒	120 秒	▲ 70%
エネルギー	24.2kL/年	12.2kL/年	▲ 50%
CO ₂ 排出量	72.9ton/年	36.5ton/年	▲ 50%

4.2 課題の把握

まず、熱可塑性 CFRP のシートを加熱する際の断面観察を行った。加熱前は、樹脂と炭素繊維がプレスされている状態から加熱により樹脂が溶け、拘束がなくなり板厚方向へ膨張する。その結果、空気層が内部に発生し熱伝導を阻害していることがわかった (図 3)。空気は熱伝導率が著しく低いため、断熱材として使用されることは周知のとおりである。加熱時間を短縮するために赤外線を用いて短時間で熱量を投入すると、シート内部の温度が上がる前に、表面に焼けが発生してしまうことがわかった。

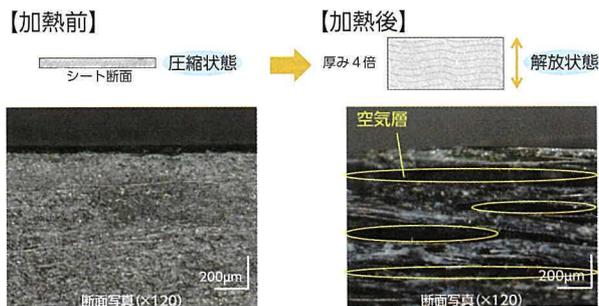


図 3 熱可塑性 CFRP シート加熱時の挙動

そこで、以下の 2 つの課題を同時に解決できる装置の開発にチャレンジした。

課題①加熱時に発生する空気層が熱伝導を阻害している。→熱効率を上げるためには空気層を考慮した加熱方式を採用する必要がある。

課題②急速加熱を行うとシート内部と表面の温度差が発生する。→シートの内部と表面をムラなく同時に加熱する必要がある。

4.3 過熱水蒸気の採用

前述の課題①②を同時に解決するには、内部の空気層にも短時間で浸透する熱源を採用するべきと考

えた。我々の生活の身近にある加熱装置のなかで、近年よく耳にする過熱水蒸気調理器に着目した。この調理器は、食材内部まで過熱水蒸気が届き、高速かつ均一に加熱ができる特長がある。過熱水蒸気は、水を沸騰させ発生した飽和水蒸気をさらに加熱した高温の蒸気で、凝縮潜熱を保有するため熱量が大きく伝熱効率に優れる (図 4)。

また、高温の過熱水蒸気中は水分子で満たされ低酸素状態となるため、物質が酸化劣化しない大きな利点がある。しかしながら、現在の使用範囲は食品業界に留まり、加熱技術としても注目されはじめたのはここ数年である。過熱水蒸気で CFRP を加熱する装置は例がなかったため、中部電力と豊電子工業に協力を依頼し、同 2 社によって開発された金属製品向けの加熱装置をベースにトヨタを加えた 3 社共同で熱可塑性 CFRP 用の加熱装置開発を進めることとなった。

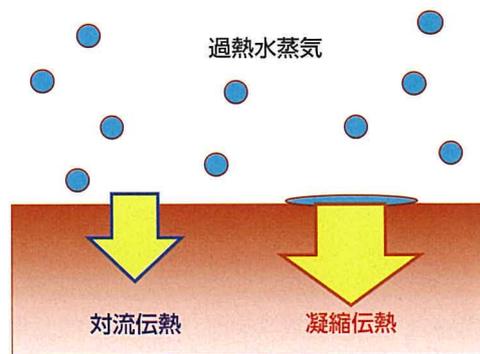


図 4 過熱水蒸気の特長

4.4 加熱装置の開発

ボイラーで 150℃まで加熱した蒸気を過熱水蒸気発生器によって 400℃まで昇温する。400℃の過熱水蒸気をノズルからシートに吹付ける。この方式で加熱予備実験を行ったところ、シート内部も同時に加熱できることが確認できた。しかし、断熱膨張によって過熱水蒸気の温度が 400℃から 300℃に低下してしまい、加熱時間は未達であった (図 5)。

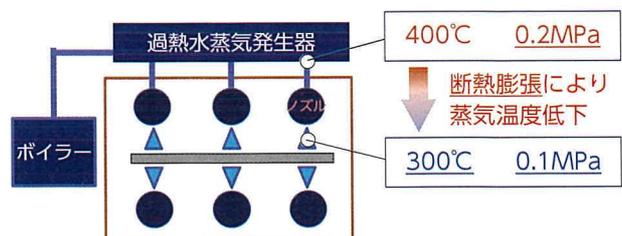


図 5 加熱実験の概要図

そこで、断熱膨張による温度低下の対策として、ノズル直下に電気ヒータを配置し（ハイブリッド熱源）、噴出蒸気をヒータ間にとおすことで、300℃から400℃に加熱を行った（図6）。

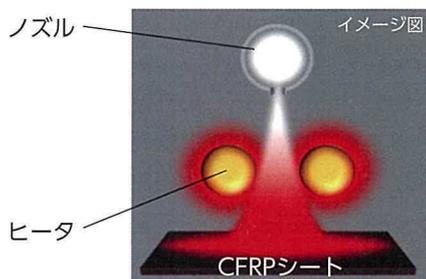


図6 ハイブリッド熱源による補助加熱

また、過熱水蒸気の流速の最適化を行った。蒸気の流速を上げると投入される熱量が増え、加熱時間を短縮できる。しかし、蒸気発生器や電気ヒータが大容量となり、二乗的に装置コストが上がってしまう。今回、装置寸法に関連付けた流速の設計パラメータを世界ではじめて発見し、装置設計に反映させた。このパラメータを最適に設定することで目標の加熱時間を達成すると同時に、消費エネルギー量を最小化した。同時に設備コストも最小化することができた（図7）。

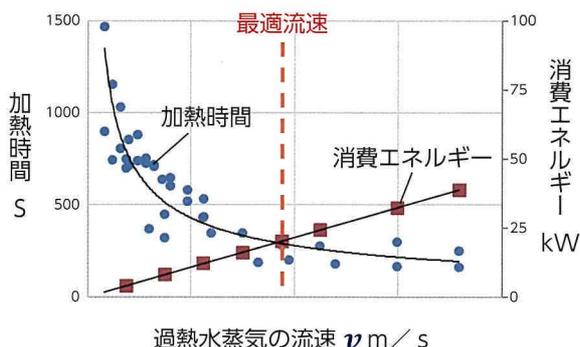


図7 過熱水蒸気 流速の最適化

以上の条件をもとに、装置内の流体 CAE 解析を行い最適なノズルの配置を検討した。初期の装置は、シートに対して垂直に蒸気を当てる構造であった。このままではシート平面方向に温度ムラが発生してしまう。そこで、ノズルの形状・角度・位置に関して流体 CAE 解析を行い、シート上下に対向流を作る最適な流動パターンを求めた（図8）。

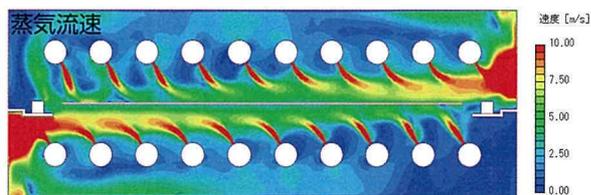


図8 過熱水蒸気の流動パターン最適化

以上の対策を織り込んだ加熱装置の外観写真と概略図を図9に示す。過熱水蒸気を受けるヘッダ部を炉内に設置し、ヘッダからの放熱分も炉内加熱に用い省エネ化の工夫を図った。また、炉内は高温時に無酸素状態となるため、酸化（錆化）が起きにくい。この性質を利用し、通常は炉内構造部に SUS 材を使うところを鉄製に置換え装置製造コストを抑えることにも成功した。

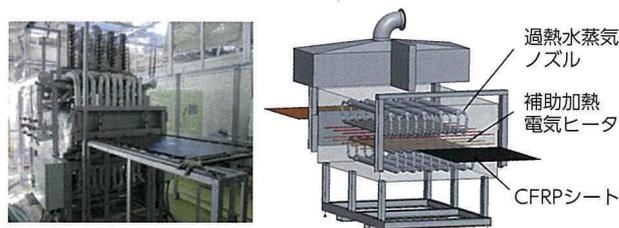


図9 流体制御式 CFRP 加熱装置

4.5 蒸気を利用した生産システムの構築

熱可塑性 CFRP 部品の生産工程は、プレス成形時に成形型を加熱する必要がある。本取り組みにて開発した装置にも、蒸気のもととなる外部ボイラーが必要となるため、これらの2工程を集約させた蒸気を利用した生産システムを構築した（図10）。このように、2工程の目的が違う加熱に同じ蒸気を使うことによって生産ラインのシンプル、スリム化を達成することができた。

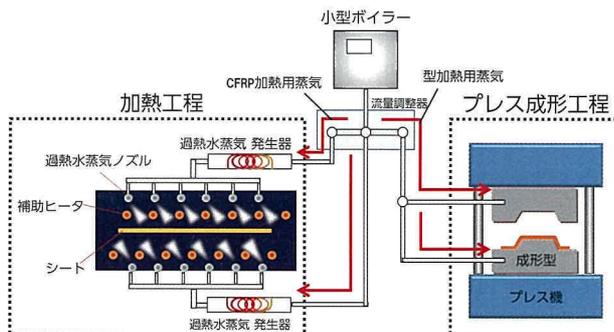


図10 蒸気を利用した熱可塑性 CFRP 生産システム

5 成果

当初目標に対し、生産性の向上と大幅な省エネ効果を得ることができた（表 2）。

表 2 成果のまとめ

項目	従来	目標		結果		評価
加熱時間	390 秒	120 秒	▲ 70%	120 秒	▲ 70%	○
エネルギー (原油換算)	24.2KL/年	12.2KL/年	▲ 50%	5.2KL/年	▲ 77%	◎
CO ₂ 排出量	72.9ton/年	36.5ton/年	▲ 50%	21.9ton/年	▲ 70%	◎

6 まとめ

将来的に自動車は EV 化が進み、軽量化技術はさらに重要性を増す。そのため、CFRP は鉄やアルミに変わり、自動車部品の骨格や内装に至るまであらゆる部品に広がる可能性がある。当社内だけでなく、トヨタグループ、部品供給メーカーにも本技術を展開していく予定である。具体的な取り組みとして以下の分野で検討を開始している。

CFRP リサイクル・各種材料の急速加熱・油分等汚れ除去など。

本技術は汎用性が高く、自動車産業以外にも使用の範囲を広げられる可能性がある。

日本機械学会 2018年度 日本機械学会賞（技術） アクティブ操舵制御による衝突回避支援システムの開発

Development of Technology for Collision Avoidance Assistance Using Active Steering Control

西村 太貴 *1 齊木 広太郎 *2 村野 隆彦 *1 八十嶋 恒和 *1 内田 尚秀 *1
Motoki Nishimura Kotaro Saiki Takahiko Murano Tsunekazu Yasoshima Naohide Uchida

1 概要

近年、衝突被害軽減ブレーキなどの予防安全技術が急速に普及し、一定の効果が報告されつつあるが、「交通事故死傷者ゼロ」に向けては普及技術の性能向上・展開と新たな先進技術の実用化が必要で、衝突回避または被害軽減のカギを握るプリクラッシュセーフティ（以下PCS）技術の進化への期待が大きい。図1に、本システムの作動イメージを示す。衝突可能性があるとシステムが判断した場合、警報によりドライバーに操作を促し、さらに、衝突の危険性が高まるとブレーキ制御により衝突回避または被害軽減を支援する。しかし、ドライバー操作との干渉の観点からブレーキ制御のみの衝突回避には限界がある。そこで、ブレーキ制御のみの従来PCSでは、回避達成が困難かつ操舵制御により衝突回避可能とシステムが判断した場合に、警報とブレーキ制御に加え操舵制御を併用し、衝突回避あるいは被害軽減を支援する「アクティブ操舵回避支援PCS」を開発した。

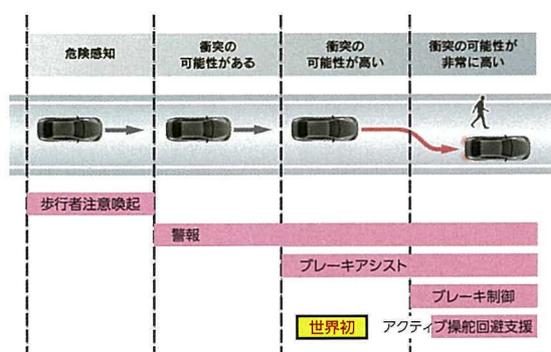


図1 アクティブ操舵回避支援PCS作動イメージ

2 技術の内容

本システムでは、制御対象に対し衝突回避可能な経路が存在することが作動条件の一つである。

さらに「操舵制御により、制御対象は回避できたが回避先の異なる対象と衝突してしまう」ことは避けなければならないため、制御対象だけでなく車両前方の路面を検出し、回避先に異なる衝突対象が存在しない領域（以下、路面領域）内で回避制御を実現する。

2.1 ステレオカメラによる路面検出

新型ステレオ画像センサは、デンスステレオマッチング技術と呼ばれる3D画像処理技術を用いることで、ステレオ画像の3次元情報などから路面と考えられる領域の推定を可能とした。

2.2 回避経路の生成

図2で歩行者を例に説明する。歩行者を回避するための「回避操舵」と、自車線内にとどめるための「切り戻し操舵」を組みあわせ、回避経路を生成する。この回避経路にもとづいた操舵制御をブレーキ制御とともに実施する。

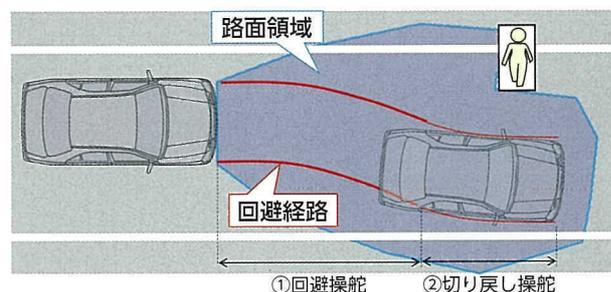


図2 回避経路の生成

3 まとめ

本開発では、従来のブレーキ制御に加え操舵制御を併用した衝突回避支援システムについて述べた。システムが衝突危険性を判断し、操舵制御を行う衝突回避支援システムの製品化は世界初であり、今後は、普及展開に向けた開発を進めていく。

*1 先進技術開発カンパニー 自動運転・先進安全開発部
*2 Toyota Motor Technical Research and Service (Shanghai) Co., Ltd. 豊田汽車技術研究（上海）有限公司

2018 年度日本機械学会奨励賞（技術） 新しい流れコンセプトに基づいたアウターミラー 空力騒音低減の開発

Reduction of Exterior Mirror Aerodynamic Noise Using New Airflow Concept

伊藤 祐太 *1 高光 二郎 *1 ファン ビン ロン *2 田中 博 *2
Yuta Ito Jiro Takamitsu Vinh Long Phan Hiroshi Tanaka

1 背景・目的

従来から、空力騒音を低減する手法として流速と渦度を小さくすることが知られている。自動車のアウターミラー設計においては、ミラー内側面をミラー前端から後端にかけ流れを剥離しない程度に流路を拡大、つまり、後ろ開き形状にすることで流速と渦度の低減を図ってきた。しかし、この手法では、軽量化・空気抵抗低減を狙ったアウターミラーの小型化と乗員からの視認性のさらなる向上の両立が困難になってきた。

そこで、Bernoulli の定理に着目し、空力騒音低減の実現に加え、小型化・視認性向上の両立を可能にする新たな流れコンセプトを創出した（自動車技術会 2017 年秋季大会にて発表）。

2 技術説明

2.1 アウターミラー周りの空力騒音発生源

空力騒音は、Powell の（式 1）から渦度と流速の値が大きい場所で発生する（図 1）。

$$\frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} - c^2 \nabla^2 \rho = \rho_0 \nabla \cdot (\omega \times v) \quad \dots \dots \dots (1)$$

ρ は空気密度、 ω は渦度ベクトル、 v は速度ベクトルである。

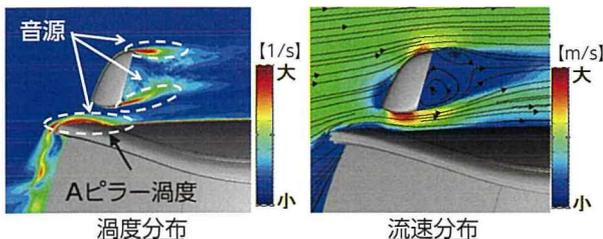


図 1 アウターミラー周りの空力騒音発生源

2.2 新しい流れコンセプト

図 1 のとおり、ミラー内側面（V 溝）で流速が増し、騒音が発生する。このため、Bernoulli の定理からわかるように、ミラー内側面の圧力を高めることで、流速低減を図り、空力騒音を低減できないかと考えた（図 2,3）。

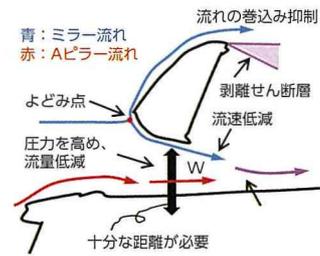


図 2 新しい流れコンセプト

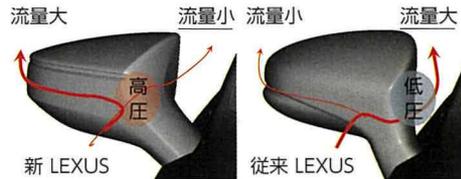


図 3 形状変更による圧力増加策

課題は、ミラー後流がサイドウィンドウ（SW）に直接ぶつからないことであり、検討の結果、ミラー×SW 間距離（図 2 の W）が 65mm 以上必要となる。

3 まとめ

今回、創出した新しい流れコンセプトにもとづくミラー（新 LEXUS）と従来品の車室内音の測定結果を図 4 に示す。本コンセプトにより、大幅に騒音を低減させることができた。

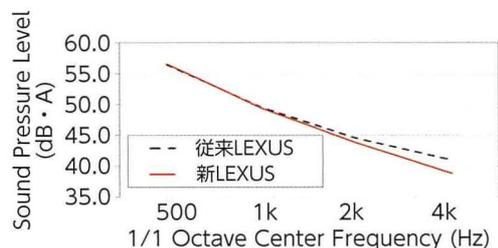


図 4 各ミラー車内音比較

*1 Lexus Int. Co. レクサス車両性能開発部
*2 先進技術開発カンパニー モビリティ性能開発部

受賞技術概要

第69回自動車技術会賞 論文賞

人体 FE モデルを用いた側面衝突事故における乗員の頭部傷害の研究

Study of Occupant Head Injuries Using Human FE Models in Side Collisions

橋本 将太*¹ 山前 康夫*¹ 北川 裕一*¹ 安木 剛*¹
 Shota Hashimoto Yasuo Yamamae Yuichi Kitagawa Tsuyoshi Yasuki

1 はじめに

米国の交通事故では、前面衝突に次ぎ側面衝突による死亡者数が多い。側面衝突の衝突側乗員はカーテンシールドエアバッグなどの頭部保護装置が開発され、法規やアセスメントで安全性がすでに評価されている。反衝突側乗員については、欧州アセスメントで新たな評価項目に導入を検討されるなど、近年関心が高まっている。

本研究では、人体 FE モデルを用い、車両対車両の側面衝突事故を想定した様々な衝突条件でシミュレーションし、乗員挙動や頭部傷害と衝突条件との関係を明らかにする。

2 計算モデル, 計算条件

被衝突車両モデルは、中型セダン、衝突車両モデルは SUV、乗員モデルは (株) 豊田中央研究所とトヨタ自動車 (株) が共同開発した人体 FE モデル THUMS (Total Human Model for Safety) Version 4 AF05 を使用した。4 体の乗員モデルを衝突側および、反衝突側の前席と後席に乗車させた。

衝突車両速度、被衝突車両速度、衝突角度、衝突位置を因子とし、被衝突車両の左側面に衝突車両を衝突させた。衝突車両速度は、50、60、70 km/h、被衝突車両速度は 0 km/h、衝突車両速度の半分、衝突車両速度と同速度とした。衝突角度は 60、90、120 deg、衝突位置は、フロントタイヤ中心から 800、1,500、2,000 mm とし、全 81 ケースを計算した。

3 結果, 考察

計算結果より、頭部同士が衝突すると重度の頭部傷害を発生することがわかった。頭部同士が衝突する条件について考察する。頭部同士が衝突するケースと衝突しないケースの境界を明らかにするため、衝突条件との関係を図 1、2 に示す。前席乗員は、

被衝突車両速度が 40 km/h 未満と低く、衝突角度が 90 deg で頭部同士が衝突する傾向にあった。後席乗員も被衝突車両速度が低く、衝突位置が 2,000 mm で頭部同士が衝突する傾向にあった。

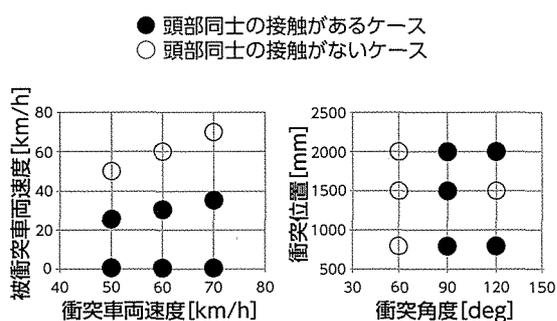


図 1 前席乗員の頭部同士が接触する衝突条件

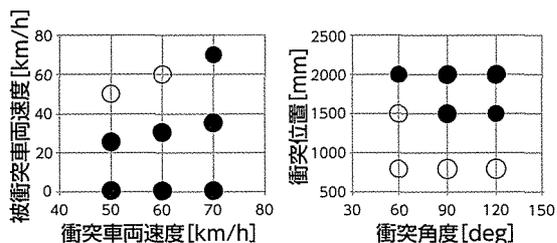


図 2 後席乗員の頭部同士が接触する衝突条件

4 むすび

同乗乗員の頭部同士が衝突する傾向の高い衝突条件を明らかにした。本研究で調査した範囲では、被衝突車両速度が低く、衝突側乗員と衝突車両の衝突位置が近いと頭部同士が衝突する傾向にあった。車両対車両の側面衝突で車体変形と乗員保護装置により乗員挙動を精緻に模擬し、最大の死亡原因である頭部同士の衝突が発生するメカニズムを詳細に解明した。多様な衝突条件のもとで、衝突側と反衝突側乗員の頭部が衝突しうる条件を抽出し、欧州アセスメントの試験方法の妥当性を理論的に示した。本研究は、一般社団法人日本自動車工業会のプロジェクトの一環として行われ、結果の一部は理科学研究所のスーパーコンピュータ「京」を利用して得られた (課題番号: hp150176)。

*1 先進技術開発カンパニー モビリティ性能開発部

第 69 回自動車技術会賞 論文賞 高流速条件での放電経路の短縮化現象のモデル化

Modeling of Spark Channel Shortening under High Velocity Flow Conditions

野口 泰^{*1} 増田 糧^{*2} 佐山 勝悟^{*2} 冬頭 孝之^{*2}
Yasushi Noguchi Ryo Masuda Shogo Sayama Takayuki Fuyuto
政所 良行^{*2} 杉浦 明光^{*3}
Yoshiyuki Mandokoro Akimitsu Sugiura

1 まえがき

SI エンジンの高効率・低エミッション化を狙った燃焼技術として、大量 EGR や希薄燃焼がある。これらの希薄燃焼技術は、燃焼ガス温を低下させ、耐ノック性改善や熱損失低減が期待できる。しかし、希釈割合の増加にともない燃焼が不安定となり、サイクル間の燃焼変動が増大するため、希釈割合には制限がある。このサイクル間の燃焼変動は、初期火炎の形状やサイズ、位置など燃焼初期の特性に大きく影響を受ける。

本研究では、放電理論をもとに放電経路の短絡と吹き消えを個別にモデル化し、SI エンジンの筒内燃焼数値解析用 3 次元火花点火モデルに組み込んだ。構築したモデルの妥当性は、点火計測用渦流室の試験結果で検証した。

電伸長、短絡、吹き消え・再放電)、および初期火炎核(着火、火炎伝播、消炎)モデルで構成される。また、気流に対する点火プラグの形状の影響は、点火プラグが埋め込まれた燃焼室の計算格子を用いることで流体ソルバー側で直接考慮される。

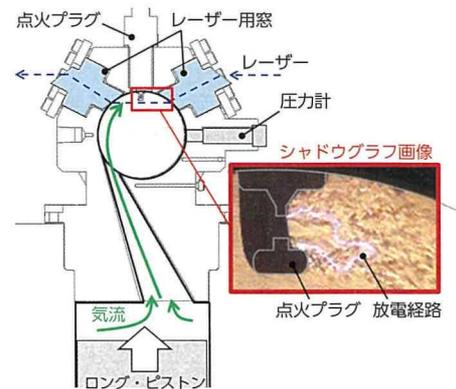


図 1 実験装置概要

2 実験装置

火花点火モデルの評価には、点火計測用渦流室(図 1)を用いた。本渦流室は、可視化エンジンのヘッド部に装着して用いるため、実機エンジン相当の高温高圧環境で放電挙動を解析できる。試験では、点火栓近傍の拡大シャドウグラフ撮影と点火回路二次側の電流電圧計測を行った。試験条件を表 1 に示す。点火エネルギー E は、全ての条件で 200mJ とし、各条件で 50 サイクル分計測を行った。

表 1 実験条件

A/F	点火時期での 圧力, p [bar]	プラグギャップ での流速, U [m/s]
20	10	65
24	10	65
30	10	65
25	10	52
26	10	78
26	15	78

3 点火モデル概要

本研究で構築した SI エンジン燃焼解析用 3 次元火花点火モデルは、電気回路モデル(放電経路の電気抵抗、二次電流・二次電圧)、放電経路モデル(放

4 検証

4.1 火花放電～初期火炎挙動

図 2 に、EGR=25% の条件における火花および、初期火炎挙動を可視化写真(平均的な挙動に近い代表的な 1 サイクル)と比較して示す。各図右上は絶縁破壊からの経過時間を示す。絶縁破壊～放電経路の伸長、短絡、吹き消え・再放電までの過程で、放

^{*1} クルマ開発センター 計測・デジタル基盤改革部
^{*2} 株式会社豊田中央研究所
^{*3} 株式会社デンソー

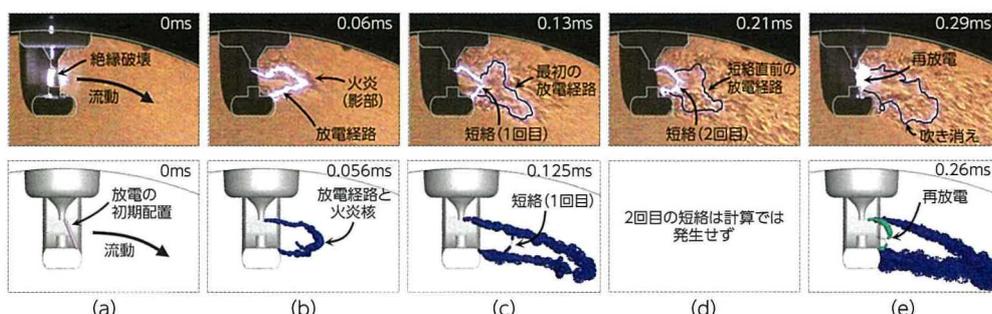


図2 放電経路と火炎核に関する実験結果と計算結果の比較：(a) 絶縁破壊，(b) 放電経路の伸長と点火，(c) 放電経路の短絡（1回目），(d) 放電経路の短絡（2回目），(e) 吹き消えと再放電

電前半に短絡が発生し、放電後半に吹き消え・再放電が発生する挙動は実測をよく再現した。

そ29%であり、本計算条件での失火限界EGR率の誤差は約2ポイントと見積もられる。

4.2 失火限界

図3に、失火限界EGR率の計算結果を実測データと比較して示す。ここで、計算結果はEGR率に対する初期燃焼期間（0-2%燃焼期間）、実測結果は、各EGR率において計測した50サイクルでの失火サイクル割合および渦流室側面に装着した指圧計により、計測した指圧波形から算出した初期燃焼期間である。実測では、10%燃焼点に至らなかったサイクルを失火と判定した。また、グラフの上にEGR率が、25%、28%、29%の条件における放電終了直後の火炎面の計算結果を示す。

実測結果では、EGR率が25%および28%の条件では失火サイクルは現れず、全サイクル燃焼し、EGR率が31%の条件では、およそ9割のサイクルで失火した。このとき、失火サイクル中のおよそ2割のサイクルで、2%燃焼点に達する前に失火したため、初期燃焼期間はプロットしていない。本条件では、全サイクルで完全に失火するEGR率は31%を超えた付近と推測される。

計算結果では、EGR率が増加するほど放電終了直後の火炎は細っていき、初期燃焼期間は増加する傾向を示す。また、初期燃焼期間および、そのEGR率に対する傾向は実測データとよく一致した。そして、EGR率が29%の条件では、放電終了直後の火炎はその後自力で火炎伝播することができず消滅した。このとき、火炎は2%燃焼点に達する前に消滅したため、初期燃焼期間はプロットできない。ここでは、EGR率の増加にともなって初期燃焼期間が増加（燃焼速度が低下）して失火に至る傾向を視覚的に表示するため、便宜的にグラフの上端に×印（EGR=29%）をプロットした。失火限界EGR率を比較すると、実測はおよそ31%、計算はおよ

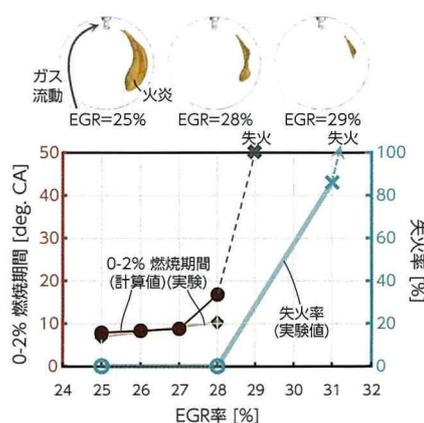


図3 EGR率の増加に伴う失火率の比較

5 まとめ

火花点火における放電経路の短絡モデル、吹き消え・再放電モデルを新規に構築し、放電経路モデル（火花粒子列モデル）および電気回路モデルと組み合わせることで、放電経路の伸長、短絡、吹き消え・再放電および、放電波形（電流・電圧の時間履歴）を連成して放電～着火過程を予測可能とした。高流速・高希釈条件での本モデルの放電挙動を、点火計測用渦流室により検証した結果、絶縁破壊～放電経路の伸長、短絡、吹き消え・再放電までの過程において、放電前半に短絡が発生し、放電後半に吹き消え・再放電が発生する挙動は実測をよく再現した。また、希薄燃焼限界予測では本報の計算条件で見積もられた失火限界EGR率の誤差は約2ポイントであった。

本技術により、放電挙動を把握・適正化することが可能となり、高効率エンジン開発における安定着火可能な点火システム設計への活用が期待される。

第 69 回自動車技術会賞 技術開発賞

操舵併用衝突回避支援と緊急停車支援を実現した 先進予防安全技術

Advanced Active Safety Technology with Steering Function for Collision Avoidance and
Emergency Stop Assistance

仁木 恵太郎 *1 森本 一広 *1 齊木 広太郎 *2 八十嶋 恒和 *1 高野 正樹 *3
Keitaro Niki Kazuhiro Morimoto Kotaro Saiki Tsunekazu Yasoshima Masaki Takano

1 背景

近年、自動ブレーキなどの予防安全技術の普及が進んでいるが、さらに交通事故による死傷者を減らすために、普及技術の性能向上・展開と新たな先進技術の開発に取り組んでいる。

今回、普及技術の安全パッケージを進化させ、2章と3章で述べる二つのシステムをはじめとした新たな予防安全技術を開発し、国内外に導入した。

2 アクティブ操舵回避支援システム

図1にシステム概要を示す。衝突可能性がある場合、システムが判断した場合、警報によりドライバーに操作を促し、さらに衝突の危険性が高まるとブレーキ制御による支援を開始する。しかし、ドライバー操作との干渉の観点から、ブレーキ制御のみの衝突回避には限界がある。そこで、ブレーキ制御のみでは回避達成が困難かつ操舵制御により衝突回避可能とシステムが判断した場合、ブレーキ制御に操舵制御を併用する「アクティブ操舵回避支援システム」を開発した（世界初）。

本技術では、車両前方の歩行者に対し、衝突回避可能な経路が存在することが作動条件の一つである。ここで、「操舵制御により、歩行者は回避できたが回避先の異なる対象と衝突してしまう」ことは避けなければならない。そこで、歩行者だけでなく車両前方の路面を検出し、回避先に異なる衝突対象が存在しない領域（以下、回避スペース）内で回避制御を実現する。

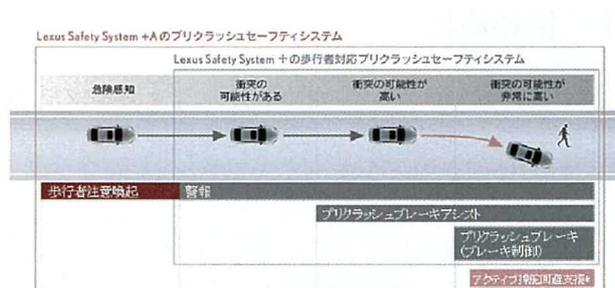


図1 アクティブ操舵回避支援システムの概要

2.1 ステレオカメラによる路面検出

車両のフロントガラス上部に搭載されたステレオカメラは、デンスステレオマッチング技術と呼ばれる画像処理技術を用いることで、ステレオ画像から得られる視差分布より、路面と考えられる領域を推定する。

2.2 回避経路の生成

図2のように、回避スペース内で歩行者を回避するための「回避操舵」に加え、自車線内に留めるための「切り戻し操舵」による回避経路を生成。ブレーキ制御を実施しながら回避経路にもとづいた操舵制御を実施する。

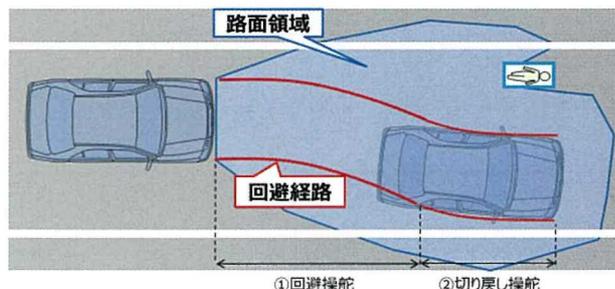


図2 回避経路の生成

*1 先進技術開発カンパニー 自動運転・先進安全開発部
*2 Toyota Motor Technical Research and Service (Shanghai) Co.,Ltd
*3 トヨタ・リサーチ・インスティテュート・アドバンスト・デベロップメント株式会社

3 ドライバー異常時停車支援システム

近年、ドライバーの体調不良が原因で発生した事故が社会問題化しており、国交省はドライバーが急病などにより運転の継続が困難になった場合に、自動車を自動で車線内に停車させる「ドライバー異常時対応システム（減速停止型）」のガイドラインを世界に先駆けて策定し、当該システムの早期導入および普及を推進している。われわれも「交通死傷者ゼロ」を目指すうえで、このような事故形態への対応が重要であると考え、国内ガイドラインに最初に準拠した「ドライバー異常時停車支援システム」を開発した。

開発システムの概要を図3に示す。本システムは、車両を車線逸脱させることなく走行車線内に停車させるため、車線維持支援機能が作動中であることを前提条件とし、三つのフェーズで構成されている。

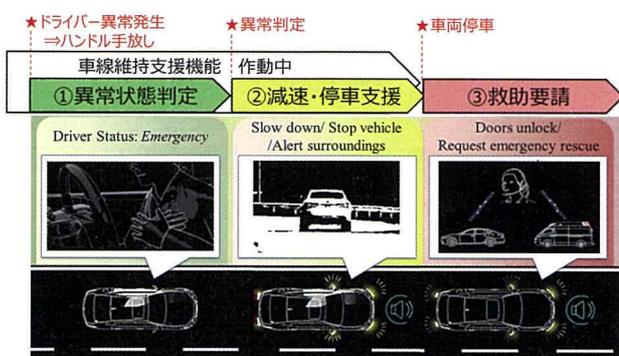


図3 ドライバー異常時停車支援システムの概要

3.1 異常状態判定

2段階の警告で運転操作を促し、何も操作がない状態が継続した場合にドライバーが異常かどうかの判断を行う。1段階目は表示と警告音で注意喚起し、ハンドル保持やアクセル・ブレーキ操作を促す。2段階目は1段階目に加えて速度抑制を行うことで、アクセル操作を促す。その際、後方からの追突を避けるため緩減速とし、ハザードも自動点滅させる。

3.2 減速停車支援

ハザード点滅に加えてホーンを自動吹鳴して車外報知しながら、走行車線内で緩減速し停車させる。また、異常状態のドライバーが意図せずアクセルを踏んで車両が暴走する可能性を考慮し、アクセル操作を無効化する。また、万が一正常なドライバーが本フェーズ遷移させた場合でも、ハンドル保持などの操作で容易にキャンセルできるようにした。

3.3 救助要請

停車後は、パーキングブレーキを自動ロックし、緊急通報システムへ自動接続して救急要請し、早期の救命救護や交通規制に繋げる。また、ドア自動解錠を行い、素早く救助できるように配慮した。

4 まとめ

本稿では、新たに開発した予防安全パッケージのキー技術である、アクティブ操舵回避支援システムとドライバー異常時停車支援システムについて述べた。

アクティブ操舵回避支援システムは、交通死亡事故対象として近年最多となる歩行者について、ブレーキ制御のみの約60%に対し、ブレーキ制御に操舵制御を併用することで、約16%のさらなる事故低減効果が期待できる（トヨタ自動車㈱調べ）。

また、ドライバー異常時停車支援システムは、対応システムを普及していくための第一歩として、まずは世の中にシステムを導入し、システムに対する世間の認知度向上と受容性判断、他社メーカー含めた普及促進に貢献。その結果として、急病による交通事故件数の削減に繋がると考えている。いずれのシステムも、今後は、本技術をベースとし、普及技術として他車両へ展開を計画している。

自動車技術会 2018年春季大会学術講演会 優秀講演発表賞 耐食性・耐凝着性を両立するエンジンバルブ用盛金材料の開発

Development of Corrosion-Resistant and Adhesion-Resistant Hard Facing Material for Engine Valves

鴨 雄貴 *1 安藤 公彦 *1 山田 貴之 *2 川田 明彦 *3
Yuki Kamo kimihiko Ando Takayuki Yamada Akihiko Kawata

1 まえがき

レーザクラッドバルブシートを採用した吸気ポート形状最適化により、熱効率、比出力を向上したTNGAエンジンのグローバル展開への課題の1つにエタノール混合燃料への適応がある。一部の地域で用いられるエタノール混合比85%、100%（以下E85、E100）の高濃度エタノール燃料による厳しい腐食・凝着環境下においても、バルブおよびバルブシートの摩耗を抑制できる耐食性・耐凝着性を両立するバルブ盛金材料を開発した。

2 バルブ盛金とは

バルブ閉時の着座衝撃および爆発圧による押込みで、バルブ・バルブシートは摺動、摩耗する。

高温、腐食、凝着環境においてはバルブフェースにそれぞれ耐熱、耐食、耐凝着性に優れる合金を肉盛溶接（盛金）（図1）することでバルブ、バルブシートの摩耗を低減することができる。

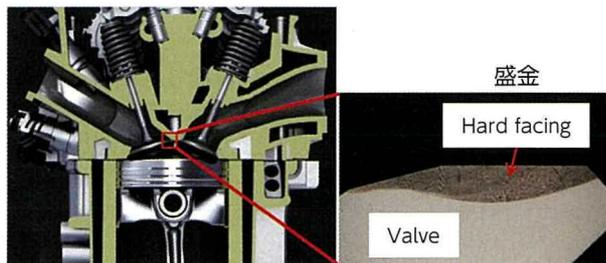


図1 バルブ盛金の断面

3 高濃度エタノール燃料の課題

高濃度エタノール燃料では、還元性を有しかつ腐食性の高い非酸化性の酸であるギ酸が多く発生し、バルブ盛金表面の酸化膜が破壊されるため、腐食荒れや金属面露出にともなう相手材との凝着でバルブシート摩耗が増加する。熱効率、比出力を向上したTNGAエンジンでは、さらに厳しい環境となる。

4 新盛金材料の開発

バルブ盛金表面に薄く強固なCr酸化膜を形成し、Cr酸化膜の再生力をMoで強化することで、ギ酸、摺動で絶えず酸化膜が破壊される厳しい腐食・凝着環境下においても常に酸化膜を維持できる、耐食性・耐凝着性を両立するCo-Cr-Mo-Ni-W-C合金を開発した。

5 効果確認

ギ酸水溶液を用いた浸漬試験および凝着摩耗試験を実施し、従来材（stellite6:Co-Cr-Ni-W-C合金）に比べ耐食性、耐凝着性に優れることを確認（図2, 3）。実機耐久試験でバルブシート摩耗低減効果を確認した（図4）。

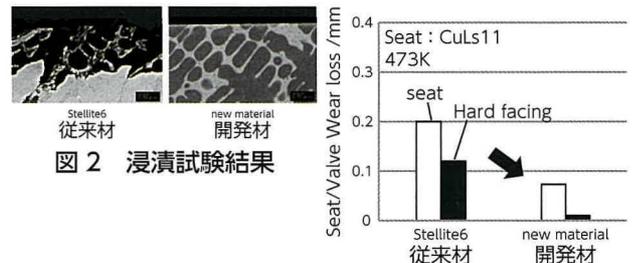


図2 浸漬試験結果

図3 凝着摩耗試験結果

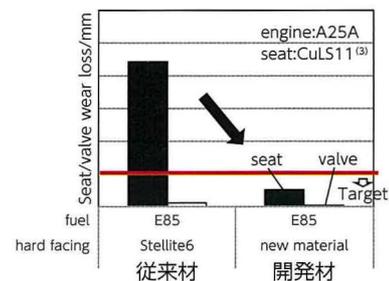


図4 実機耐久試験結果差

6 まとめ

本材料は、E85,E100に対応したTNGAエンジンFFV(Flexible Fuel Vehicle)仕様に採用。グローバル展開における課題をクリアした。

*1 先進技術開発カンパニー 第1材料技術部
*2 先進技術開発カンパニー 車両統括人事室
*3 先進技術開発カンパニー パワートレイン機能開発部

自動車技術会 2018 年春季大会学術講演会 優秀講演発表賞 新 2.0L 用 発進ギヤ付 CVT の開発

Development of New CVT with Low-Speed Gear for 2.0-Liter Class Vehicles

友松 大輔 *1 志水 政紀 *2 山口 賢一 *1 桑原 信也 *1 深尾 光博 *3
Daisuke Tomomatsu Masanori Shimizu Kenichi Yamaguchi Shinya Kuwabara Mitsuhiro Fukao

1 まえがき

燃費性能および動力性能の向上を目指し、2.0L 車両用の新しい金属ベルト式無段変速機（以後 CVT と記載）を開発、伝達効率向上とワイドレンジ化に取り組んだ。その実現手段として、金属ベルト式 CVT では、世界ではじめてギヤで発進する動力伝達機構を備え、ベルトは高効率な領域に絞ってハイギヤ側へ配置した（図 1, 2）。

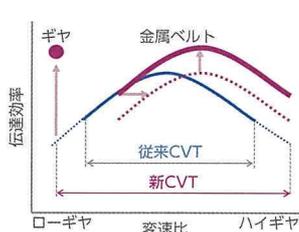


図 1 コンセプト

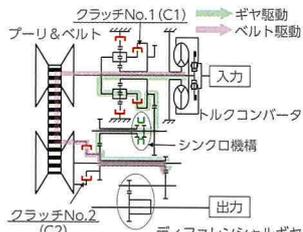


図 2 断面図

C2 の μ -V 特性を悪化させる要因として、係合時の C2 の偏当りによるものと疑われた。C2 は、プーリとギヤの間に配置され、それらの変形によって C2 姿勢は影響を受けるが、今回はギヤ、支持部の変形による寄与が大きいことが CAE や実験検証（変位計測）よりわかった（図 5）。

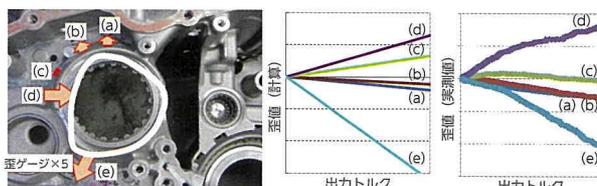


図 5 ギヤ支持部の歪調査（計算と実測比較）

寄与の大きいギヤやケース剛性に手を入れることで（図 6）、CVT アッセンブリ状態での μ -V 特性も改善され、トルク振動も解決できた（図 7, 8）。

2 新構造における課題

本 CVT は、クラッチの掴みかえ（以後 CtoC と記載）で、ギヤ駆動からベルト駆動へ変速する。ギヤ駆動用クラッチ C1 を解放し、ベルト駆動用クラッチ C2 を係合するタイミングでドライブシャフトトルク振動、および車両前後 G の変動（図 3）が課題であった。要因調査の結果、C2 単体では正勾配である μ -V 特性が、CVT アッセンブリ状態では負勾配であることがわかった（図 4）。

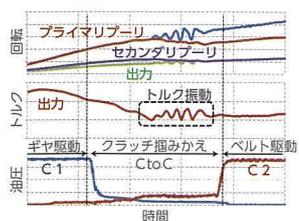


図 3 振動課題

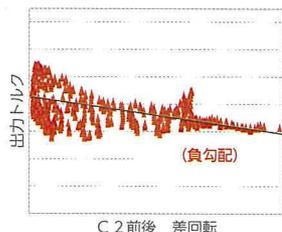


図 4 μ -V 特性 (CVT)

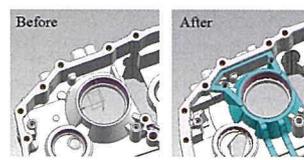


図 6 ギヤ支持部の高剛性化

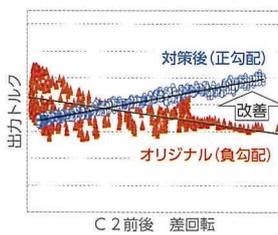


図 7 μ -V 特性 (比較)

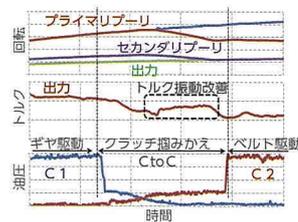


図 8 CtoC 波形 (対策後)

3 むすび

CAE 解析や実験検証をとおして、トルク振動の要因を明確にし改善することで、燃費性能および動力性能を両立した CVT の開発に貢献した。

本検証で得られた知見を、排気量違いの開発にも活かしていく。また、本事象に限らず実験検証による CAE 解析の整合性を確認していき、モデルを用いた開発を推進していく。

*1 パワートレーンカンパニー 第 1 パワートレーン開発部
*2 パワートレーンカンパニー パワートレーン機能開発部
*3 クルマ開発センター 電動パワートレシステム開発部

自動車技術会 2018 年秋季大会学術講演会 優秀講演発表賞 高排気温タービンハウジング用耐熱鋳鋼材料の開発

Development of Heat-Resistant Cast Steel for Turbine Housing with High Exhaust Temperature

石川 雄三*¹ 肘井 巧*¹ 倉本 剛*¹ 前嶋 貴士*²
Yuzo Ishikawa Takumi Hijii Go Kuramoto Takashi Maeshima

1 はじめに

近年、燃費向上のため過給機により高出力化し、エンジンを小型化する過給ダウンサイジングが採用されている。また、ターボ性能の向上のため排ガス温度が 1,273K 以上となり、過給機を構成するタービンハウジング用材料は、高耐熱化が求められている。従来から本部品に適用されるオーステナイト系耐熱鋳鋼材料は優れた耐熱性を有する一方、高価な元素 (Ni, Cr など) を多く含有するため、合金添加および機械加工性の悪化による部品コストの上昇が長年の課題であった。

従来の合金開発は、候補成分素材の作製 (鋳造) と各特性評価を幾度と繰返しながら合金組成を最適化し、成分設計する手法で行っていた。本研究では、熱力学計算ソフトウェア サーモカルク (Thermo-Calc) を用いて、多元系の熱力学計算により金属組織の予測を行い、合金組成の選定に活用した。これにより、従来実施していた候補成分素材の作製と評価を削減することが可能となり、開発プロセスの短縮が行えた。

上記の開発プロセスにより、既存のオーステナイト系耐熱鋳鋼である従来材と同等の適用温度域 (1,273K) の耐熱性を確保しながら、コスト低減が可能な最適組成を見出し、かつ金属組織中の硬質粒子および軟質介在物の分散制御によって、優れた機械加工性を有するタービンハウジング用耐熱鋳鋼材料の開発に成功した。

2 合金開発の成分設計思想

図 1 に、本開発材における成分設計の方策を示す。タービンハウジングは冷熱サイクル環境 (室温 ⇄ 1,273K) にさらされるため、熱疲労特性が重要となる。今回、従来材から Ni および Cr の低減を

図りながら、従来材と同等の熱疲労特性を確保するように成分設計を行った。具体的には亀裂発生 の起点となり得る、脆いシグマ相の析出を抑制するように Ni と Cr の添加量範囲を決定し、さらにマトリックス (基地組織) の高温強度を改善し、亀裂進展を抑制するために Nb 添加を行った。なお、従来材はシグマ相を有するが、Ni および Cr を多く含有するため、高い熱疲労特性を有している。

製造上の課題である機械加工性は、金属組織中の硬質粒子によって機械的に切削工具の摩耗を促進させる現象が知られている。今回、ネットワークを形成して塊状となった硬質粒子 (炭化物) の分散制御と被削性を改善する軟質介在物の生成によって、機械加工性の改善を図った。

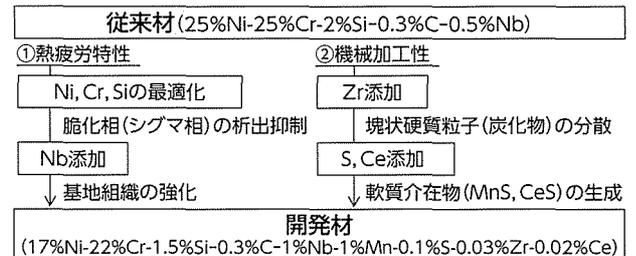


図 1 合金設計の方策

3 開発材の成分設計

3.1 主要成分とシグマ相の関係 (熱力学計算)

図 2 に、Cr, Ni 添加量とシグマ相の析出量の関係を熱力学計算によって算出し、シグマ相が析出しない領域をマップ化した図を示す。本結果より、シグマ相を析出させずに Ni, Cr 添加量を従来材 (25%Ni-25%Cr) から低減できる領域があることが明らかになった。また、材料コスト目標が達成できない領域と過去の知見から、熱疲労特性の成立性が難しい成分領域を除いた、シグマ相が析出しない成分 a) 16%Ni-21%Cr, および成分 b) 17%Ni-22%Cr を用いて熱疲労評価を実施した。

*¹ 先進技術開発カンパニー 第 1 材料技術部

*² 株式会社 豊田中央研究所

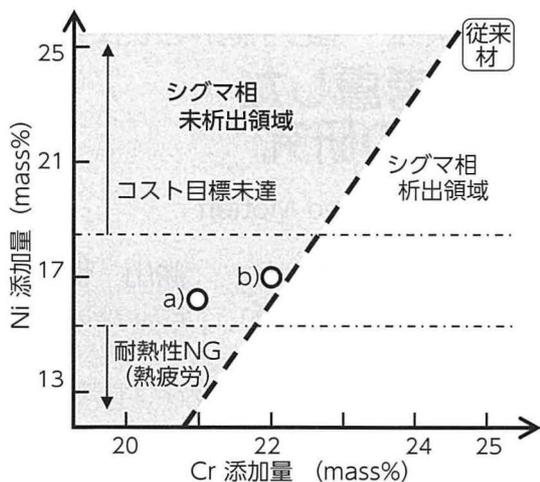


図2 シグマ相の未析出領域 (Cr-Ni マップ)

3.2 熱疲労特性の改善

図3に熱疲労試験結果を示す。成分a)の熱疲労寿命は従来材と比較して大きく低下した。一方で成分b)の熱疲労寿命は、5%程度の低下であったため成分b)をもとに、さらなる特性向上を狙い母材強度(特に高温強度)の改善を検討した。

高温強度の改善は、炭化物による析出強化が有効である。その候補元素として、Nb, W, Moなどが挙げられるが、本開発では材料コストや高温強度への効果を考慮し、Nbを強化元素として選定した。Nb添加量を振り評価を行った結果、成分b)にNbを1%添加することで高温強度が従来材以上に改善され、それにもとない熱疲労寿命も改善されることが確認できた。したがって、本開発材の基本成分を成分c) 17%Ni-22%Cr-1%Nbに決定した。

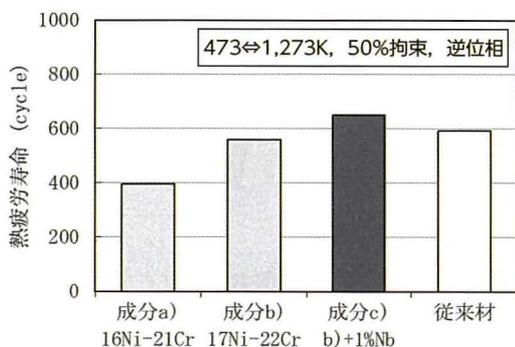


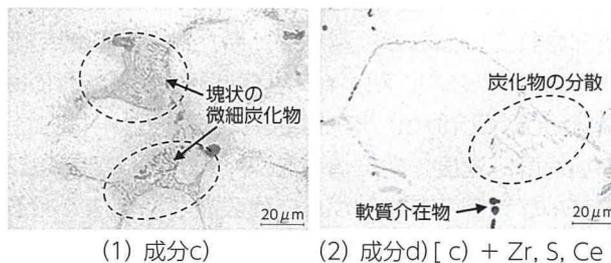
図3 各材料における熱疲労寿命の比較

3.3 機械加工性の改善

図4(1)に、3.2で選定した成分c)のマイクロ組織を示す。本組織で炭化物 $M_{23}C_6$ がネットワークを形成して塊状に観察された。この塊状に集まった炭化物は、切削抵抗を増加させ機械加工性を悪化さ

せることが考えられる。そこで切削抵抗の低減を目的に、以下の2点について検討を実施した。1点目は塊状に炭化物を形成させないように、炭化物の形態制御を検討した。2点目は軟質介在物の生成により、被削性の改善を検討した。

種々の元素添加について評価した結果、Zrが炭化物分散に効果的であることが明らかとなった。また、Zrによる分散に加えてS, Ce添加により軟質介在物(MnS, CeS)を生成させた結果、図4(2)に示すようなマイクロ組織に改質できた。その結果、図5に示すとおり機械加工性を改善することができた。



(1) 成分c) (2) 成分d) [c) + Zr, S, Ce]

図4 ミクロ組織の比較 (400倍)

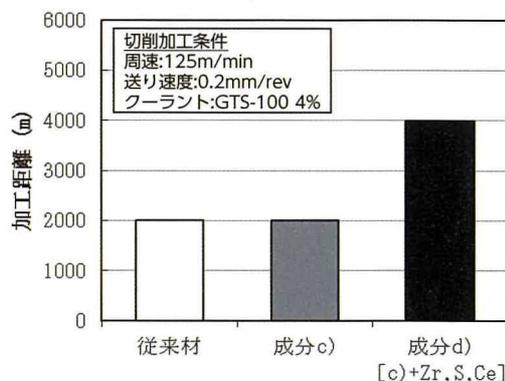


図5 機械加工性の評価結果

4 まとめ

オーステナイト系耐熱鋳鋼材料における本開発は、シグマ相を制御しながら耐熱性を確保することによって、従来材からNiを25%から17%に、Crを25%から22%に低減し、材料費を16%低減することに成功した。また、機械加工性についても炭化物の形態制御と軟質介在物の生成によって、加工費を11%低減した。

本材料は、2017年12月発売のLEXUS LS500 V35A-FTSエンジン(V6 3.5L)用のタービンハウジングに採用されている。今後は、1,273K付近の高温領域で使用される排気系材料として幅広い適用が見込まれる。

自動車技術会 2018 年秋季大会学術講演会 優秀講演発表賞 平面運動とロールの連成を考慮した トリプルスカイフック制御の研究

Triple Skyhook Control Considering Roll-Plane Coupled Motion

丹山 翔太 *1 勝山 悦生 *2
Shota Tanzan Etsuo Katsuyama

1 まえがき

車両の乗り心地向上を目的とした制御法が数多く研究されているなか、我々は、新たな乗り心地制御法であるトリプルスカイフック制御 (tSH: Triple Skyhook Control) を提案した。tSH は、ばね上の加速度、速度、変位情報をフィードバックするシンプルな制御でありながら、代表的な制御法であるスカイフックダンパ制御よりも広い周波数域における制振効果を得られる特徴をもつ。しかしながら、2次遅れ系の特性多項式で表現できるヒープ、ピッチ運動には tSH をそのまま適用可能だが、ロール運動に対しては、タイヤ横力を介して平面運動と連成する複雑な運動をするため、そのまま適用することができないという課題がある。

2 技術概要

式 1 で示す tSH の制御指令値を、平面運動との連成を無視してロール運動に適用してみたところ、狙いの特性に対し、乗員が不快に感じる 2-4Hz 付近の制御効果が低減してしまうことが確認できた。

$$M_{xc} = -\alpha D(s)(I_x s^2 + C_x s + K_x') \phi_2 \dots (1)$$

そこで本研究では、ロールと平面運動の連成を考慮した断面 1 輪モデル (図 1) を用いて、その連成運動を解析し、定式化を試みた。その結果、式 2 のように、ロール慣性モーメントを 1 次遅れで表現することで、その連成運動の影響が考慮できることを解明した。

$$M_{xc} = -\alpha D(s) \left(\left(I_x + \frac{mh_s^2}{1 + \frac{C_g}{s}} \right) s^2 + C_x s + K_x' \right) \phi_2 \dots (2)$$

効果検証のため、4 輪にアクティブサスペンションを備えた実車両に提案制御を実装した。凹凸のある路面を車速 100km/h で走行した際のロール角加速度パワースペクトル密度を図 2 に示す。提案制御は、従来制御で十分効果が得られなかった 2-4Hz 付近において、狙いどおり振動低減できており、提案法の有効性が確認できた。

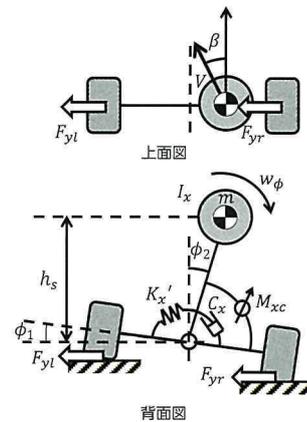


図 1 断面 1 輪モデル

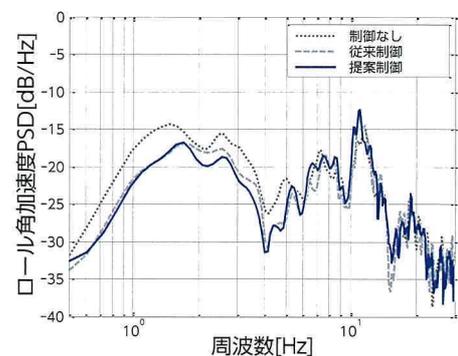


図 2 提案制御の効果 (実車, 100km/h)

3 むすび

複雑なメカニズムであるロール運動に対し、理論的に現象を解明し、適切な近似によりシンプルな式で定式化できたこと、またそれによって狙いの効果が得られるよう制御設計できたことが、本研究の成果である。

*1 フルマ開発センター シャシー開発部
*2 フルマ開発センター 車両技術開発部

Back Number Index



Vol.57 No.1 (2010年)
特集：プリウス



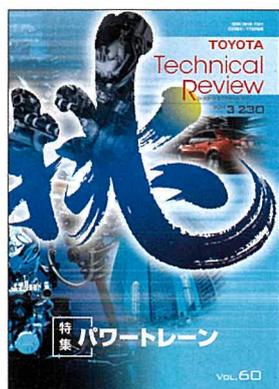
Vol.57 No.2 (2011年)
特集：次世代電池とその活用



Vol.58 No.1 (2012年)
特集：日本独創



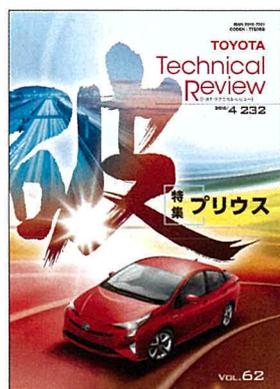
Vol.59 (2013年)
特集：生産技術



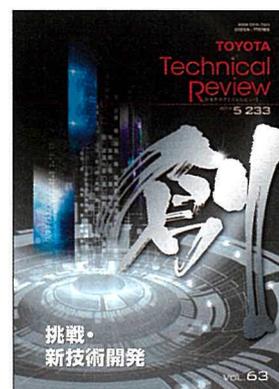
Vol.60 (2014年)
特集：パワートレイン



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



Vol.62 (2016年)
特集：プリウス



Vol.63 (2017年)
挑戦・新技術開発



Vol.64 (2018年)
特集：TNGAパワートレイン



Vol.65 (2019年)
特集：将来の電池技術
～燃料電池と蓄電池

定価：1,980円 (本体：1,800円)
※英文版も販売しております。定価：3,080円 (本体：2,800円)

発売元：(株) オーム社 Tel：(03) 3233-0641
https://www.ohmsha.co.jp/magazine/partners_magazine.htm

いつも TOYOTA Technical Review (以下、TTR) をご愛読いただき、誠にありがとうございます。
います。

今回は、TTR 第 66 巻 (通算 236 号) をお届け致します。

読者の皆様におかれましては、新型コロナウイルスの蔓延により、新生活様式なる言葉を耳にするほど日々の暮らしが様変わりし、大変なご苦勞を強いられていることとお察し致します。

さて自動車業界におきましても同様に、今回のパンデミックにより世界的な生産、販売の混乱が生じ、100 年に一度の大変革時代の先行きをさらに不透明にする事態に直面しております。

このような情勢のなか、わたくし達トヨタは、新しい時代に適応したトヨタを構築するべく新たなアライアンスの強化、モビリティカンパニー化を推進しております。

今回の TTR では、新型 MIRAI と GR ヤリスに関する特集記事を組ませていただきました。

車両開発についても新時代に適応したトヨタを構築する一環で進めており、新型 MIRAI はドライバビリティと環境性能の高次元での両立、GR ヤリスは厳しいレースでの環境下から培った技術をより良いクルマ作りを体現するための 1 つの解として開発に取り組んでまいりました。

自動車としては方向性の異なる両車ですが、これからのトヨタのクルマ作りに欠かせない要素を有する 2 台となっています。これからの車両開発の方向性を示す車両企画、要素技術を掲載させていただいておりますので、是非両車の開発の力点のかけ方の違いなどに注目してお読みいただければ幸いです。

最後に、コロナ禍の大変お忙しい時期にご協力いただいた執筆者をはじめ、編集に携わってくださった全ての方々に対し、この場をお借りして深くお礼申し上げます。

今後も読者の皆様のお役に立てるよう、紙面の充実に努めてまいります。

(発行人：米村)

TOYOTA Technical Review Vol. 66

© 2021 TOYOTA MOTOR CORPORATION, Printed in Japan

(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 米村 耕一
企画 遠山 淳
編集 株式会社トヨタエンタプライズ
トヨタ事業所 技術業務室 平野 綾子

印刷所 株式会社シンテックホズミ
〒 470-0217 愛知県みよし市根浦町五丁目 3 番地 1

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

発行 2021 年 2 月 22 日



TOYOTA
Technical
Review

[トヨタ・テクニカル・レビュー]

2021 / **2**
Vol.66 236

発売元 株式会社 オーム社
定価 1,980円(本体1,800円)