

NISSAN TECHNICAL REVIEW

日産
技報

2024
No.

90



電動化 / 自動運転・運転支援 / コネクテッドサービス

NISSAN
MOTOR CORPORATION

日産技報

NISSAN TECHNICAL REVIEW



2024 No.90

「日産技報」電子版サイト

<https://www.nissan-global.com/JP/TECHNICALREVIEW/>

目次

2024年3月発行

◆巻頭言

時代の先端を走り続ける日産の先進技術開発	浅見 孝雄	1
----------------------------	-------------	---

◆特集1：電動化

1. 日産自動車の電動化革命：「たま」から「アリア」までの75年の歴史と未来への展望 ...	寺地 淳	5
2. 新世代EV専用プラットフォームにおける高いパッケージング効率の実現	大西 将浩・曾根 来	19
3. 日産における電気自動車向けバッテリーの進化と今後の展望	大間 敦史・田崎 信一・八田 健太郎	25
	田淵 雄一郎・諸岡 正浩・枚田 典彦	
4. 電動AWD(All wheel drive)の進化 e-4ORCE	平工 良三	31
5. e-POWERのEV-nessを創り出すシステム技術	羽二生 倫之・伊藤 知広・澤田 孝信	37
	秋山 秀勝・伊藤 あずさ	
6. 持続可能なモビリティに向けたe-POWER専用エンジン熱効率50%への挑戦 ...	鶴島 理史	45

◆特集2：自動運転・運転支援

1. 自動運転・運転支援への取り組み	木村 健	57
2. プロパイロット	井上 拓哉・谷口 洋平・徳永 誠士	65
3. メモリー機能付きプロパイロットパーキング	高野 照久・渡邊 武史・竹田 椋	73
4. 事故ゼロを目指した最新の運転支援技術	餌取 成明	77

◆特集 3：コネクテッドサービス

1. コネクテッドカー & サービス概要	村松 寿郎	83
2. コネクテッドによって進化した HMI	小畑 哲・竹内 香織・片桐 大 三代 資人・笹沼 慶与・田崎 克	87
3. ソフトウェアアップデート	菊池 光彦・大橋 栄介・埋見 昌明 香西 秋彦	91
4. コネクテッドカーが提供する IoT 連携サービスの現在と未来	岡 尚弥・石井 俊充	97
5. モビリティサービス	藤田 晋・木村 健・宮下 直樹	101

◆受賞者紹介

第 73 回 自動車技術会賞 論文賞 (2023 年)

ステンレス溶射ポアに対応した厚膜 DLC ピストンリングの開発	平山 勇人・内海 貴人・柴田 大輔 野間 俊	111
---------------------------------------	---------------------------	-----



時代の先端を走り続ける 日産の先進技術開発

専務執行役員 浅見 孝雄

1. はじめに

2023年は、日産自動車にとって1933年の創業から数えて90年という節目の年となりました。日産技報にとっては今回が90号にあたります。創刊号は、日産自動車とプリンス自動車の合併を目前に控えた1965年に発刊されました。乗用車の輸入自由化を迎えた年でもあり、その後日本の自動車産業は、国際競争力が問われていくこととなります。記念すべき最初の記事は「動弁機構に関する研究」というエンジン技術の研究紹介でした。その後も数多くの技術が紹介されてきていますが、現在の電動化や自動運転につながる技術をいくつか取り上げてみます。電動化は、古くは10号(1984年)の交流モータ式マーチEVコンセプト、32号(1992年)の環境特集として電気自動車の動向紹介、69・70号(2012年)のリーフ特集、80号(2017年)のe-Power特集など。自動運転は、33号(1993)安全特集で予防安全技術、40号(1996年)のITS特集、53号(2003)テレマティクス開発、63号(2008年)安全特集のSafety Shieldコンセプトなど。こうして振り返ってみると、これまで脈々と積み重ねてきた研究開発が現在の技術の礎となっていることがわかります。

さて本90号が企画された2023年は、世界経済がコロナ禍による経済減速や半導体供給不足から回復期に移行する一方、国家間の経済デカップリング政策や複数の地域における戦争や紛争など、国際関係の緊張が続きました。自動車産業における大きな関心事は、EV市場の拡大と中国自動車メーカーの躍進でした。欧州と中国は、環境改善と経済振興の両面効果を狙ったEV普及政策を推進したため、新車販売におけるEVの比率は20%を超えています。中国では、NEV(New Energy Vehicle、EVとPHEVに相当)普及政策に上手く対応した地場資本の自動車メーカーが市場占有率を上げ、同時に海外輸出の拡大にも注力した結果、中国は日本に代わり世界最大の自動車輸出国となりました。日本では、東京モーターショーは名称をジャパンモビリティショーと改め、自動車とそれ以外の様々な交通手段から成る未来のモビリティをテーマとして開催されました。当社は5台のコンセプトカーを出展し、EV

にしか実現できない魅力的な商品像と、情報やエネルギーのインフラを含めた新たなモビリティシステムの未来像を提案し、大好評を博しました。

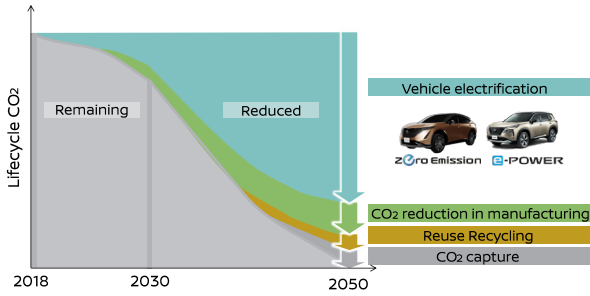


ジャパンモビリティショー2023出展コンセプトカー

このような激動の時代にあっても我々日産のエンジニアがやるべきことは、日産のDNA(「他がやらぬことをやる」)に従って、コーポレートパーパス(「人々の生活を豊かに、イノベーションをドライブし続ける」)を実現する製品とサービスを開発すること、それを支える画期的な新技術と高度な基盤技術力を構築することに他なりません。今回の特集では、当社が注力する3つの領域、すなわちカーボンニュートラルに向けての「電動化」、より安全で快適な移動を実現する「自動運転」、自動車による移動価値の最大化を目指す「コネクテッドサービス」に関する技術について紹介します。ここでは、各領域に対する基本的な考え方について触れたいと思います。

2. 電動化

自動車の製造から廃却に至るライフサイクルにおける最大のCO₂発生源は、自動車使用時に排出されるCO₂です。これを抑制するには、内燃機関車をEVに切り替えることでCO₂発生を削減すること、合わせてEVが使用する電力の発電過程で発生するCO₂を、例えば太陽光や風力あるいは原子力の利用により削減することが必要です。



2050年に向けたCO₂低減のアプローチ

EVの導入拡大にあたっては、お客様視点で価格が高い、航続距離が短い、充電に時間がかかるといった問題がありますが、多くは電池の性質に起因しています。例えば、電池のエネルギー密度は、リチウムイオン電池で約200Wh/kg、全固体電池で約400Wh/kgであるのに対し、ガソリンのエネルギー密度は約12000Wh/kgと30倍から60倍に相当します。電池の性能と原価の改善については世界的な競争が続いているなかで、当社は長年培って来た電池技術を活かし、エネルギー密度の向上、充電性の向上、原価低減を目指して、液体リチウムイオン電池、全固体電池、リチウムを使わない将来電池の3世代の電池技術の開発を行っています。

しかし、電池がガソリン並みのエネルギー密度に到達するには長い時間がかかるので、並行してエネルギーを効率よく活用するための電費改善技術にも取り組んでいます。具体的には、車両質量の低減、空気抵抗の低減、複合的エネルギーマネジメントシステム、車室断熱性の向上、電装品使用電力の低減、タイヤ転がり抵抗の低減、SiCを採用したインバータ、高回転小型モータ、モータ・インバータ・減速機等を一体化したX-in-1ユニットなどです。電池改善と電費向上を合わせて推進することで、より多くのお客様に選択していただけるEVの実現を目指しています。

一方、電気モータの効率は90%を超え、内燃機関で限界とされる効率50%を大きく上回ります。また電気モータは原理的に応答性や制御性が高いため発進や加速が力強く滑らかで、減速時には発電機としても機能させることができます。このように電気モータは理想的な動力と言えますが、いかに効率的にエネルギー源を搭載して電気を供給するかが課題です。HV、BEV、FCEVなど、様々なエネルギー源構成をもった電動化車両が世の中に登場しており、これらが用途に応じて共存する時代がしばらく続くと考えられます。

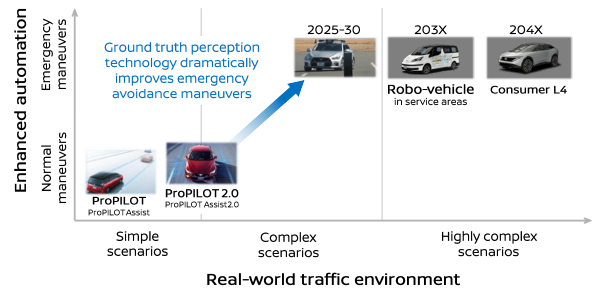
3. 自動運転

当社の安全に関する目標は、「ゼロ・フェイタリティ」、つまり日産車を巻き込んだ交通事故による死亡者をゼロにすること

です。この目標実現のためには衝突安全技術と予防安全技術の両方が必要となります。当社は、1967年に追浜衝突実験場を開設するなど長年にわたり衝突安全技術に取り組んできました。車載技術としては、1967年に3点式シートベルト、1989年にエアバッグ、1996年に衝突エネルギーを吸収する車体構造「ゾーンボディコンセプト」、2007年にポップアップエンジンフードを採用し、事故が起きた場合に乗員や歩行者が受ける傷害を低減してきました。一方、近年の世界各地域の事故統計データを分析すると、今後は事故の発生自体を回避する方策、つまり予防安全技術の貢献代がより大きくなると予想されます。

日産の自動運転技術は、予防安全技術の蓄積の上に構築されています。2004年に「セフティーシールド」コンセプトを導入し、以降20年間に投入してきた世界初の技術は10個以上にのぼります。予防安全技術は、交通事故と死傷者数の減少に貢献するものですが、同時に運転支援あるいは自動運転のシステムが安全に対応できる交通環境や交通シーンの拡大にも寄与します。プロパイロット(2016年)からプロパイロット2.0(2019年)への進化はその一例です。

現在開発中の緊急回避技術を、次世代の運転支援装置に採用することで、安全性の一層の向上と、より複雑な交通環境への適応が進む見通しです。更に、将来の完全自動運転の実現を見据え、走行中の自動車からクラウドに上げたデータをニューラルネットワークで処理してAIで自動運転アルゴリズムを開発する取り組みも開始しました。これらの技術進化によって事故ゼロの実現に近づくことにより、将来は無人車両によるモビリティサービスの提供、最終的には量産車への完全自動運転技術の搭載を目指したいと思います。



プロパイロット進化のロードマップ

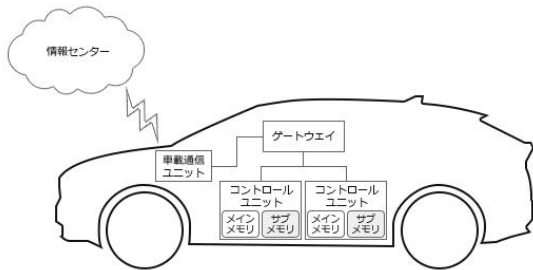
4. コネクテッドサービス

1985年のIT革命、1995年のインターネット革命、2007年のスマートフォン登場、2012/2020年の4G/5G開始、2022年の生成AI革命と、情報通信技術の進化は止まるとこ

ろを知らず、ますます加速しているようです。例えばスマートフォンの通信スピードは30年間で10万倍となる進化を遂げ、単純な通話としての機能から、動画などをリアルタイムでやりとりできる大容量のデータ通信ができるようになりました。

このような情報通信技術の発展は、自動車の機能も大きく変えつつあります。当社は1989年に最初のナビゲーションシステム「マルチAVシステム」をシーマ、セドリック、グロリアに搭載し、1998年に最初のコネクテッドサービスとして、有人オペレータによる遠隔操作支援サービスである「コンパスリンク」を開始しました。2002年には情報サービスを強化した「カーウィングス」を開始、現在はクラウドを活用した「NissanConnect」をグローバルに展開しています。通信による地図データの更新サービスに加え、リアルタイムの道路交通情報や交通信号情報を自動車に送る仕組みも一部地域で始まりました。

近年、自動車のソフトウェアとハードウェアを分離する構造であるSoftware Defined Vehicle (SDV)の導入が各社で始まっています。これにより、車両の様々な機能の追加や更新を行うソフトウェアの開発と展開の速さが各段に高まってきました。当社においても、例えばアリアでは通信を介して32個のECUのソフトウェア更新が随時可能となっています。



Over The Air (OTA)によるソフトウェア更新

通信インフラは将来5Gから6Gに移行し、更に大量のデータを扱えるようになります。車両の状態や運行状況を含む多くのデータはクラウドに集められ、AIやニューラルネットワークなどのIT技術によって、新サービスあるいはサービス改善に向けたソフトウェアの開発と提供が加速します。例えば、交通状況や充電計画を考慮した経路案内、高速道路や駐車場などの料金自動決済、自運転支援機能のバージョンアップ、初めて乗る自動車でもクラウドからドライバー情報を取得していつも同じHMIを設定するなどです。このようにして自動車は単なる移動手段でなく、車内外の情報ネットワークとつながった社会システムの一部を担うようになります。

5. まとめ

今回の特集で取り上げている3領域は、当社が他社に対して差別化を図る領域となります。自動車は既に多くの技術から構成される製品ですが、今後は従来の自動車技術に加え、ソフトウェア、AI、クラウド、半導体、電池、電力制御など他産業由来の新技术を取り込みながら、社会インフラとしてのモビリティシステムへの進化が加速します。2050年にはカーボンニュートラル、資源の完全循環、交通事故の死者数を実質ゼロを実現した上で、自動車によるモビリティが更に人々の生活を豊かにできるように、画期的な技術の開発とイノベーションの創出にチャレンジし続けたいと思います。

特集1: 電動化

1. 日産自動車の電動化革命: 「たま」から「アリア」までの
75年の歴史と未来への展望

寺地 淳*

1. はじめに

日産自動車の電動化の歴史は1947年の「たま」電気自動車(EV)の発売から始まり、その歴史は75年にも及ぶ。当初から我々は自動車社会の燃料をはじめとする環境・エネルギー問題と走る楽しさの両立に向け、クルマを電気とモーターで駆動するいわゆる電動化に可能性を感じていた。その後、1997年に世界で初めてリチウムイオンバッテリーを搭載した「プレーリージョイEV」を市販化し、2010年には世界に先駆けて量産型電気自動車である「リーフ」の販売を開始した。さらには2016年、100%モーター駆動のハイブリッド「e-POWER」を「ノート」に搭載して発表した。本システムは電気自動車とコンポーネントを可能な限り共用化することによりコストの上昇を抑制し、リーフと同様に、モーターの高い制御性により、力強くなめらかな加速、ワンペダル感覚の走行など、電動駆動の楽しさをより多くの人と分かち合うことに成功している。

現在、日産自動車は着実に電動化を推し進めており、これらの電動車には最新のテクノロジーが多く搭載されている。その成果は環境性能に限らず、「e-4ORCE」をはじめとする走る喜びの向上や「LEAF to Home」などモビリティの価値向上にも寄与しており、数多くの試行錯誤と改善の過程を経て、今日の電気自動車である「アリア」/「サクラ」、そして「e-POWER」を搭載した「ノート」/「セレナ」/「エクストレイル」等に至る。その結果、23年上期実績で、特に電動化が進む日本においては、100%電動駆動車の販売比率が5割を超えている。

将来に向けて、我々は着実に持続可能な社会を実現するために、電動化を軸とした更なる高効率化、業界を超えた製品・サービス等が連携して大きな利益構造を生み出すエコサイクル、電気自動車と電力網を統合するVehicle Grid Integration (VGI)の技術開発を推し進め、クルマだけでなく社会全体の持続的な発展に貢献していきたいと考えている。

2. 電動化の黎明期

2.1 電動化車両の始まり「たま」

「たま」(図1)は、戦前の立川飛行機から派生した「東京電気自動車」(のちのプリンス自動車工業)による電気自動車であった。発売当時の1947年の日本は、GHQの軍需物資統制で深刻な石油不足に悩まされていたが、一方で水力発電による電力は相対的に余力があり、このような背景から電気自動車に注目が集まった。電気自動車は当時の木炭車などと比較して輸送能力が同等または優れていることもあり市場に受け入れられた。取替え式鉛酸バッテリーを使用し、最高出力3.3kWの「たま」は、政府主催の第1回性能試験において航続距離96km・最高速度35km/hのトップ成績を収め、1951年ごろまでタクシー需要で重宝された。参考までに、同時期に発売されている同車格「ダットサン17型セダン」に搭載されているエンジンは排気量722cc、圧縮比5.4の7型4気筒エンジンで、出力は11.9kW(16hp)であった。諸元から推測する熱交率は25%前後で、現在40%に迫る軽自動車エンジンの6割強程度の時代であった。



図1 「たま」(1947年)

*EVシステム研究所

表1 充電所分布状況と能力(1950年)⁽¹⁾

局別	50kW 未満	100kW 未満	100kW 以上	合計
東京	37	24	7	68
名古屋	14	4	4	22
大阪	25	7	13	45
広島	3	4	0	7
四国	6	1	2	9
福岡	2	2	3	7
仙台	0	0	1	1
札幌	4	2	1	7
計	91	44	31	166

1 充電当たりの走行距離は65kmであり、1949年に発売された中型「たまセニア」では現在の小型電気自動車に近い200kmの走行が可能であった。

1945年から1952年の記録に残る電気乗用車の総生産台数は3500台を超え⁽¹⁾、その中で1947年から1951年の「たま」の生産開始から終了までの間、その生産台数は1099台であり、電気乗用車の3割強を占めた。以上のように戦後の日本では電気自動車が国の復興を支え、日本の主要都市に充電所などのインフラが整備されていたこと(表1⁽¹⁾)は今やあまり広く知られていない。1950年に勃発した朝鮮戦争により、バッテリー主要材料のひとつである鉛価格の高騰の煽りと、ガソリン供給の急改善により残念ながらその役割を終えることとなった。

2.2 市場投入へ向けて「プレーリージョイ EV」

日産では電気自動車の開発を続け、1970年に鉛バッテリー&回生ブレーキ装備のコンセプトカー「315X」、1983年「マーチEV」そして1991年「FEV」など定期的にコンセプトカーを提案し、続けて1993年には「セドリックEV」、1994年に「アベニールEV」を法人中心に販売するなど、先駆的な試みを続けた。

今では多くの電気自動車で標準となっているリチウムイオンバッテリーであるが、世界で初めてリチウムイオンバッテリーが商品化されたのは1991年であった。



図2 バッテリーモジュール&円筒セル



図3 「プレーリージョイEV」(1997年)

当時は主にノートパソコンや携帯電話など小型製品に使用されていたが、自動車用に大容量のバッテリーを開発するのは難しいと見られていた。しかし、1992年にソニーと共同で自動車用リチウムイオンバッテリーの研究開発をいち早く開始。地道な研究の結果、1996年について実用化に成功し、円筒型のリチウムイオンバッテリー(図2)を搭載した世界初の電気自動車「プレーリージョイEV」(図3)を翌1997年に、主に各企業や団体向けに30台販売した。

「プレーリージョイEV」は、最高トルク166Nmの電動モーターを具備し、最高速度は120km/hであり、一充電当たりの充電時間とその際の航続距離はそれぞれ5時間、200km以上であった。電気自動車としての実用性の高い性能を既に備えていた。また、2000年から6年間にわたり、国立極地研究所北極観測センターの支援車としても活用され、厳しい気象条件下でも6年間故障することなく、高い信頼性を誇った。騒音や排出ガスを一切出さない「プレーリージョイEV」は、音や異臭に敏感な野生動物に極限まで接近することが可能で、観測基地のシンボルの存在として大いに活躍した。(図4)結果的に30台という限られた販売台数であったが、「プレーリージョイEV」の販売以降、1999年には北米に「アルトラEV」、日本国内には「ルネッサEV」を投入し、電気自動車としての経験を積むことに成功した。



図4 北極圏で活躍する「プレーリージョイEV」

これらの電気自動車には、フラットフロア、非接触充電システム、プリアコン機能、電気自動車専用デジタルメーター、リチウムイオンバッテリー、ネオジウム磁石同期モーターなど、後の「リーフ」につながる多くの技術が開発され搭載されていた。

2.3 都市通勤用「ハイパーミニ」

1997年の東京モーターショーでお披露目され、2000年に生産型が発売された電気自動車「ハイパーミニ」(図5)は、全長2.7m以下、最小回転半径3.9mの非常にコンパクトな電気自動車で、21世紀の日常生活に相応しい2人乗りシティコミューターとして開発された。世界初のリチウムイオンバッテリーを搭載した「プレーリージョイEV」に続いてリチウムイオンバッテリーとネオジウム磁石同期モーターを搭載し、バッテリーの小型・軽量化と高出力・低コストを実現していた。また、後述する「ハイパーミニ」の電気自動車カーシェアリング等の社会実験を考慮し、さらに安全性を高め、バッテリーをコバルト系からマンガン系へ変更している。シティコミューターとしてのコンセプト電気自動車ではあったが、性能の妥協を許さず、最高トルク130Nmの電動モーターは最高速度100km/h、0-30m 4.5秒以下の加速性能を誇り、航続距離115kmを実現など、シティコミューターとして十二分な性能であった。また、ランフラットタイヤや軽量アルミフレームの採用など、電気自動車以外の技術も先進的であった。さらには、カーシェアリングを視野に入れたICカードタイプのキーレスエントリーシステムの採用も画期的であり、図6に示す横浜市と海老名市における電気自動車カーシェアリング社会実験やカリフォルニア大デービス校での利用など日米で活躍した。電気で作るとのこと以外の環境性能にも配慮して設計されており、リサイクル可能率を重量比で90%以上を目指し、リサイクル材の再利用、材料の統合化、解体しやすい構造などを採用している。



図5 「ハイパーミニ」(2000年)



図6 神奈川県横浜市における実証実験

シティコミューターらしく経済性を徹底的に意識し、当時のガソリン販売と比べると5分の1の経済性を達成しており、「いっぱい走れる1km、1円。100km走って、たったの100円」というキャッチコピーは、時代を先取りしたものになっていた。

「プレーリージョイEV」から始まった電気自動車の市場投入によって電気自動車に関する多くの技術を蓄積し、「ハイパーミニ」までに総計約2500件の特許出願を行い、その中の300件を超える案件が次の「リーフ」に活かされている。

2.4 「リーフ」の誕生

初代「リーフ」(図7)は、持続可能なゼロ・エミッション社会の実現に向けた世界初の量産型電気自動車として、2009年にコンセプトを公開後、2010年に発売された。電気自動車のこれまでの試験的販売や実証実験により、より長い航続距離が必要であり、バッテリーのエネルギー密度の向上が必須であると考えた。そのため、これまでの筒型バッテリー(図2)に代わる、新たなラミネート型リチウムイオンバッテリーをNEC(日本電気株式会社)と共に開発、この新開発のラミネート型バッテリー(図8)は同サイズで倍のエネルギーを蓄積できた。

その新型バッテリーの効果もあり、初代「リーフ」は24kWhの大容量リチウムイオンバッテリーを搭載しており、力強くなめらかな加速性能を備え、さらに発売当初の航続可能距離は200km(JC08モード)を達成した。2012年には228km、2015年には30kWhバッテリーの搭載により300kmまで向上している。



図7 初代「リーフ」(2010年)



図8 バッテリーモジュール&ラミネートセル

また、初の量産型電気自動車をグローバルで販売するため、バッテリーの安全設計および評価基準をつくりながらの開発となった。設計では、セル・モジュール・パック・車両の各段階で過電流など異常の発生に対応するための仕組みを設け、評価では、世界の様々な使用環境を想定して徹底した走行テストを行った。例えば、氷点下となる寒冷地での始動・走行テストや、図9に示す冠水した道を走行するような場合を想定したテストを実施。さらには洗車時の高圧洗浄を想定したテストも行い、確かな安全性を確保している。



図9 冠水路走行テスト

加えて日産は、走る楽しさを追求することに妥協せず、電動モーターの性能をフルに活用することに徹底的にこだわった。図10に示すように、単に電動モーターの応答性を向上させるだけでは、ドライブシャフトがねじり共振によって大きな振動を生じる。制御対象をモデル化し、フィードフォワード制御とフィードバック制御を組み合わせ、電動モーターの応答性とスムーズな加速応答性を両立させている。

この初代「リーフ」は、環境性能、走行性能、使いやすさ、価格などすべての面でお客様の期待を超えたいとの考えを込めた。アクセルを踏んだ瞬間に感じる力強い加速感や、圧倒的な静粛性、優れた重量バランスとバッテリーパックを車体中央床下に配置したことによる低重心が生み出す意のままのハンドリング、これまでのクルマとは全く違う、電気自動車ならではの走行に、世界中の多くの人々が魅了された。また、先進的なITシステムを搭載し、オーナーとクルマがつながる全く新しい価値も提供した。

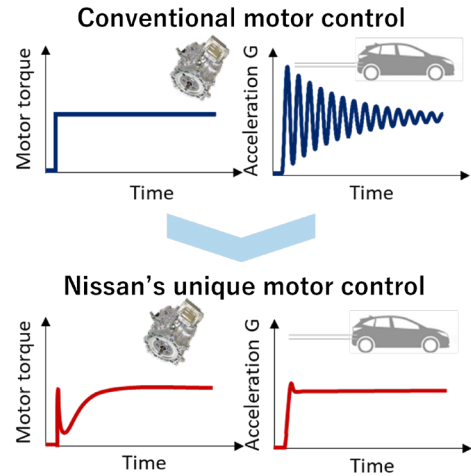


図10 制振制御によるスムーズな加速



図11 「LEAF to home」

バッテリーを走るためだけでなく、エネルギー源としても活用するという電気自動車の新たな価値を世界に先駆けて提案したのもこの「リーフ」であった。「リーフ」に搭載した駆動用バッテリーを家庭用電源の蓄電池として活用できるシステム(図11)を開発・搭載していた。これにより、夜間電力や太陽光発電といった再生可能エネルギーで発電した電力を使って電気自動車に充電し、蓄えた電気を日中の電力需要が高い時間帯に使用することで、家庭への安定した電力供給および電気料金の節約を可能とした。加えて、このシステムは災害時における停電時のバックアップ電源としても活用可能である。

3. 電動車の普及に向けて

大人5人が快適に乗車できるミドルサイズのハッチバック車として販売された初代「リーフ」の発表から十余年、初代「リーフ」からのフィードバックを受けて性能や走行距離を大きく向上させた第二世代「リーフ」、そして「アリア」および「サクラ」など、クロスオーバーから軽自動車までの電気自動車モデルも展開し、顧客に多様な選択肢を提供した。加えて、100%電動モーター駆動ならではの力強いレスポンスの良い加速と、優れた静粛性を、より多くの人に楽しんでもらうべく、電気自動車のユニットとガソリンエンジンを組み合わせた電気自動車の新しいカタチ

「e-POWER」を2016年に発表した。いずれのクルマも好評を博している。

3.1 電気自動車を当たり前前に第二世代「リーフ」

2017年に発表した第二世代「リーフ」(図12)は、最先端の技術を搭載して革新的に進化した。新しい電動モーターは、出力を先代モデルから38%増の110kW、トルクを26%増の320Nmとし、爽快でリニアなドライビングを実現した。

また、新開発リチウムイオンバッテリーに関し、初代「リーフ」では4つのセルで1つのモジュールを構成し、車両に計48モジュールを搭載していたが、第二世代「リーフ」では8セルで1モジュールを構成することで充填効率を高め、初代「リーフ」と同じサイズのままバッテリー容量を40kWhへとアップし、航続距離400km(JC08モード)を実現させた。



図12 第二世代「リーフ」(2017年)

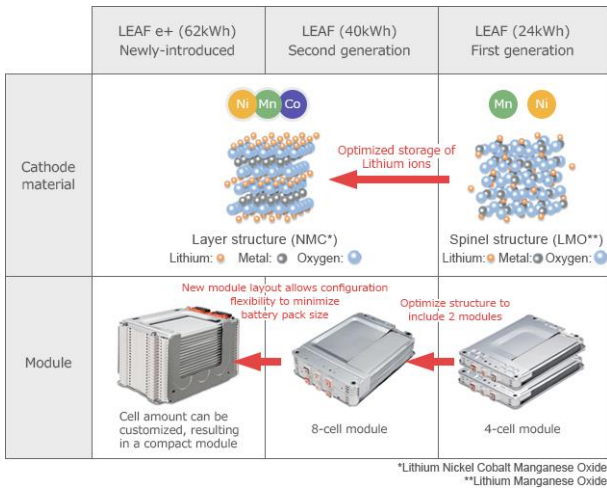


図13 「リーフ」におけるバッテリー進化

Battery	Cruising distance (WLTC/JC08 mode)
24kWh	2010 (200km@JC08)
	2012 (228km@JC08)
30kWh	2015 (280km@JC08)
40kWh	2017 322km@WLTC Mode (400km@JC08 Mode)
	2019 458km@WLTC Mode (570km@JC08 Mode)

図14 航続距離の進化

さらに、「リーフe+」では、セルの接合部に新工法の「レーザー溶接」を適用し、セルの枚数を自在に変えられる新型モジュールを採用した。その結果、モジュールの全長を短くするとともに、セルの積層枚数を変えることで車両形状に合わせた最適なモジュール高さにすることに成功し、62kWhもの大容量バッテリーを搭載し、航続距離を570km(JC08モード)に延長している。(図13、14)

日産の電気自動車の特長のひとつは、電動モーターの応答性と制御性の良さを最大限に活用したスムーズで素早い加速応答性である。これは、電気自動車のコア技術として磨かれている。第二世代「リーフ」におけるもうひとつのイノベーションは図15に示す「e-Pedal」である。「e-Pedal」は、アクセルペダルの操作だけで、発進、加速、減速、停止、停止保持が可能であり、様々な路面条件でも極めてスムーズに減速度をコントロールできる。そのため、発進と停止を繰り返す街中では、ブレーキへの踏みかえ頻度が減り、運転が楽になり、ワインディングでは意のままの加減速によってスポーティなドライビングを楽しめる。さらに、走行抵抗を電動モーターのトルクなどを用いて推定し、電動モーターをブレーキと高度に協調制御している。この協調制御により、急な勾配の坂道であっても、極めてスムーズに車両を停止させ、さらには長時間の停止保持も実現した。スムーズで素早い加速応答性は運転する楽しさだけでなく、不慣れなドライバーにも日常での運転がしやすくなる一因となっている。

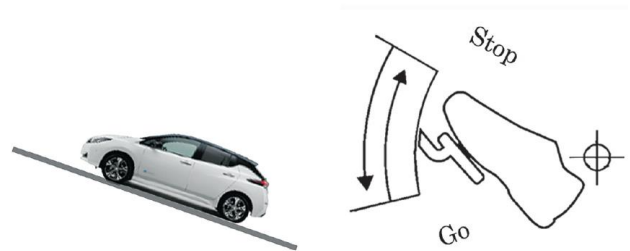


図15 e-Pedalの操作概念図

3.2 次世代フラッグシップを目指して「アリア」

2021年に販売を開始したクロスオーバー「アリア」(図16)は、新しい日産とNissan Intelligent Mobilityを体現した車であり、目指したのは、「車の未来を感じる次世代のフラッグシップEV」であった。

電気自動車の特性を十分に活かしつつ、最新の技術を取り込み、すべての面でお客様にご満足いただけることを目指した。電気自動車用パワートレインと車両搭載技術を高度に融合させた専用パッケージを新たに開発することで、これまでの内燃機関SUV車の概念を覆す室内空間の確保と完全フラットフロアを実現し、フロントオーバーハングの低減とホイールベースの拡大、最小回転半径の低減、操縦安定性や乗り心地性能の向上、航続距離の拡大、静かな室内等を高い次元で実現している。(図17)



図16 「アリア」(2021年)

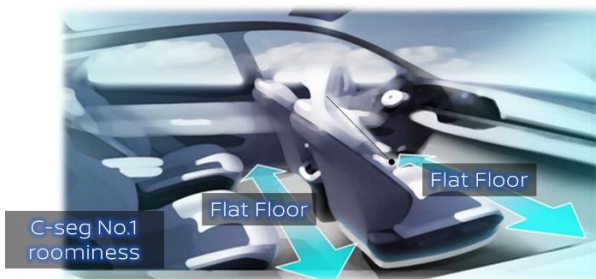


図17 高い空間効率と完全フラットフロアの狙い

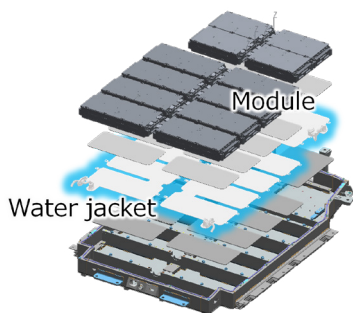


図18 底板・冷却プレート 一体型バッテリーパック

フラットフロアを実現するため、バッテリーレイアウト設計においても限定された空間における成立が求められていた。一方で、利便性向上の観点から急速充電性能に対する要望も高く、短時間でより多くの充電量を確保することも同時に求められていた。今回、新開発したバッテリーパックを図18に示す。バッテリー筐体の底板と冷却プレートを一体化させ、高体積効率と温調システムの両立に成功、「リーフ e+」に対してバッテリーパックの厚さ当たりのエネルギー密度を約2.3倍に向上させた。この結果、車室内の居住性の向上に貢献しつつ、電気自動車トップレベルの体積エネルギー密度・急速充電性能を実現した。その結果、「アリア」は最大610kmの航続距離(2WD 90kWhバッテリー搭載モデル 2WD WLTCモード 社内測定値)を達成している。

ここまで電動化の進化過程を説明するにあたり、バッテリー進化を主に着目し説明してきたが、電動化が加速している中で、電動モーターをはじめとする駆動技術も進化している。「アリア」では、従来多く使われてきた埋込磁石同期電動機IPMSM (Interior Permanent Magnet Synchronous Motor)に加えて、巻線界磁型同期電動機EESM (Electrically Excited Synchronous Motor)に着目して開発を進め、商品化を行った。EESMはその名の通り、ロータに直流電流を流し電磁石とするため、ロータも巻き線構造であることが特徴である。「アリア」では高出力化に伴い、図19に示すようにロータ体積を増大させると同時に8極化することで、必要な電磁力とトルク応答性を確保した。IPMSMでは一般的に高回転速度運転時にて効率が悪化することが知られているが、今回開発したモーターではロータの磁力を電流で可変できる点を活かし、誘起電圧を抑えつつ要求されるトルクを出せるようロータ・ステータ電流を制御した。これにより高回転速度運転においても効率低下を抑制し、航続距離の延長に貢献している。今回、新たに開発した新モーターにより、今後、EESMはお客様が求める車両性能に対応し、レアアースコスト・供給リスクにも対処する上で、有効な選択肢となった。

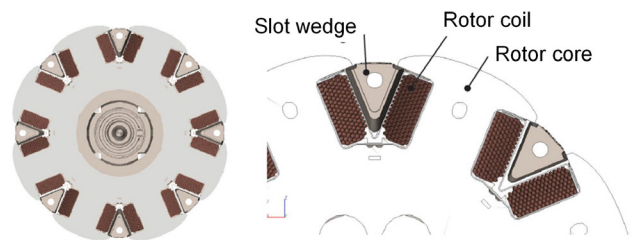


図19 8極巻線のロータ構造

これまでも述べてきたようにモーター駆動の応答性と制御性の向上を最大限に活かし、走る楽しさを追求することは、常に意識している重要なテーマのひとつである。第二世代「リーフ」に搭載された「e-Pedal」を基本とするモーター駆動制御技術は、「アリア」でさらに洗練された。「アリア AWD」では電動モーターを前後に2機搭載し、前後の駆動力を完全に独立して高応答かつ高精度で制御している。このポテンシャルを限界まで引き出し、その価値をクルマの性能で実現することを目指したのが「e-4ORCE」である。

「e-4ORCE」が提供する価値は、3つに大別できる。

- 1) ドライバーの意のままの走り
- 2) 路面を問わない安心感
- 3) 乗る人すべてに快適な乗り心地 (図20)

従来の四輪駆動車に期待される、悪路での走破性だけでなく、普通の道を普通のドライバーが普通に運転している状況下にあっても、その価値を享受できることを目指した。すなわち、「e-4ORCE」は“いつかのために”ではなく、“いつものために”、その価値を体感できる性能向上にも力を注いでいる。

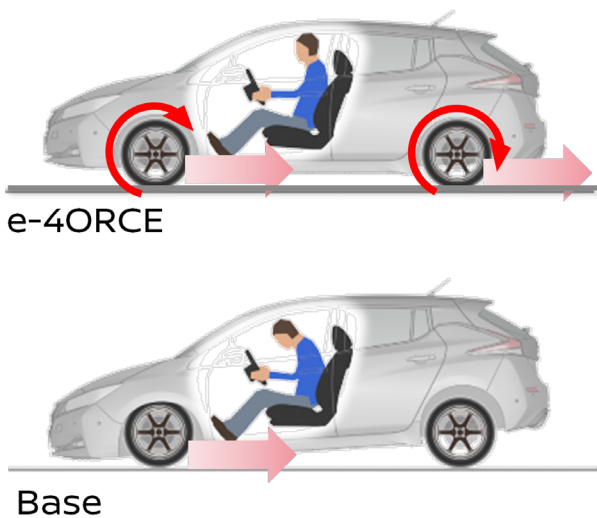


図20 減速時の姿勢制御

3.3 日本の電動自動車の時代に彩を「サクラ」

「サクラ」(図21)は、日本市場独自の軽自動車というカテゴリーで、シックで先進的なデザインを纏い、軽自動車とは思えないほどの上質で広い室内空間と、電気自動車ならではの力強い加速となめらかな走りを兼ね備えた軽自動車のフラッグシップカーの役割を担っている。



図21 「サクラ」(2022年)

最大195Nmのトルクを発揮する電動モーターと高度な制御技術によるすばやくなめらかな加速により、従来の軽自動車が悪質な高速道路の合流等も無理なく楽に行うことが可能となった。また、モーター構造の最適化により、軽自動車としてフラッグシップの名に恥じない最高水準の静粛性を実現している。

「サクラ」には「リーフ」から培い磨き続けてきたリチウムイオンバッテリーの技術を投入している。その特徴のひとつがラミネート構造セルの採用である。さらに第二世代「リーフ」から採用されているコンパクトな積層構造は積み上げるセルの枚数を自由に変更でき、搭載フレキシビリティが非常に高くなっている。図22に「サクラ」に搭載したバッテリーパックを示す。40kWhの第二世代「リーフ」ではセルを96枚直列につなげたパックを2列並べているが、「サクラ」ではその1列分を使用した20kWhを採用し、軽自動車のフロア下にある限られたスペースを最大限に活用するようにレイアウトされている。

「サクラ」の航続距離はWLTCモードで180kmであり軽自動車の使われ方である毎日の買い物や送迎、通勤用途において十分な航続距離を担保している。特に地方では給油スタンドに行くことが大変なケースがあるが、自宅充電できる「サクラ」であれば、夜に家に帰ってプラグに差し込めば、朝には満充電されているので、軽自動車顧客のカーライフが大きく変わることが期待される。

表2に本節で紹介した「サクラ」と2.1節にて紹介した比較的車格に近い「たま」との諸元、および性能の比較を示す。あらゆる点で大幅な性能向上を達成しており、75年の電気自動車の大きな進化が伺える。



図22 「サクラ」バッテリーパック

表2 「たま」と「サクラ」の諸元・性能比較

仕様	たま電気自動車 1947年	サクラ 2022年
全長×全幅×全高 (mm)	3,035×1,230×1,618	3,395×1,475×1,655
ホイールベース (mm)	2,000	2,495
車重 (kg)	1,100	1,080
モーター	直流直巻電動機	交流同期電動機
駆動バッテリー	鉛蓄バッテリー 40V 6.5kWh	リチウムイオンバッテリー 350V
バッテリー容量	6.5kWh	20kWh
定格出力	3.3kW(4.5 ps)	20kW
最高出力	-	47kW
最大トルク	-	195Nm
1充電走行距離	65km (計測方法不明)	180km (WLTC)
最高速度	35km/h	130km/h

3.4 電気自動車の新しいカタチ「e-POWER」

電気自動車では大出力電動モーターによる電動駆動を活かしたスムーズで思い通りの加速や、なめらかな減速制御、抜群の静粛性など、とても好評を博した。この電気自動車の走る楽しさと、ガソリンエンジンの利便性を高い次元で両立させたのが「e-POWER」であり、2016年「ノート」(図23)に搭載し販売開始した。



図23 「ノート e-POWER」(2016年)

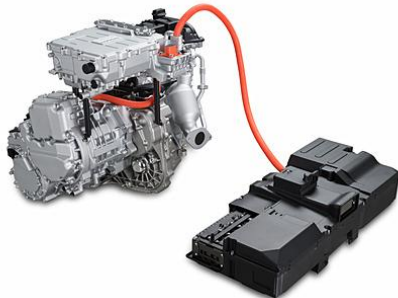


図24 初代「e-POWER」システム

図24に「e-POWER」システムを示す。「e-POWER」は、大出力電動モーター、インバータ、ガソリンエンジン、ジェネレーターから成る一体型パワートレインと高電圧バッテリーから構成されている。走行にエンジンと小型電動モーターを併用する一般的なパラレルハイブリッドシステムと異なり、「e-POWER」は電気自動車と同様に高出力な電動モーターでタイヤを駆動するガソリンエンジンと電動モーターを融合した電動パワートレインである。エンジンは発電専用として動作し、電動モーターのみで100%駆動するため、電気自動車そのものの走りを楽しむことが可能である。

「e-POWER」は、これまでの電気自動車開発で培ったモーター制御技術、電動パワートレインの一体化技術に加え、エネルギーマネジメント技術を融合することで実現した。図25に「e-POWER」システム動作を示す。エンジンとタイヤが直接つながっていないため、エンジン始動タイミングを自在にコントロールすることができる。発進から中低速まではモーターのみで走行し、ロードノイズが高まってくる高速域でエンジンを始動し発電することで、エンジンの作動時間を減らし、静粛性の高い走りを実現した。加えて、最も効率の良いエンジン回転速度域で発電することで、低燃費を実現する。

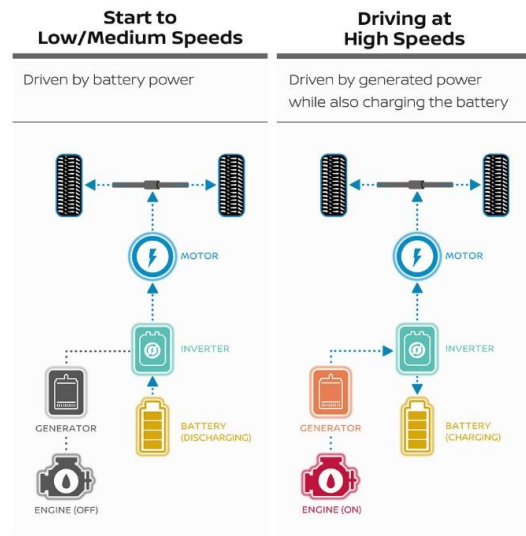


図25 e-POWERシステム動作概念図

国内専用で展開されていた「e-POWER」は、現在、第二世代となりグローバルに展開されている。第二世代「e-POWER」(図26)は初代「e-POWER」をあるべき方向に正常進化させたものであり、システム全体を改良することで、力強さ、スムーズさ、および静粛性を進化させ、より電気自動車らしいフィーリングを実現した。電動パワートレインを小型化・高出力化し、エンジンを発電に特化した「e-POWER」専用エンジンとして、これまでよりも高い熱効率を利用できるようにした。また、エネルギーマネジメント技術に関しても徹底的に見直し、エンジンの始動タイミングや電力配分などのシステム制御技術を磨き上げ、さらには新たに開発したロードノイズ推定技術(図27)やナビゲーションシステムとの協調によるエンジン始動制御など、静粛性と燃費向上に努めている。

走る楽しさの追求においても、電気自動車で培った電動モーター制御技術である「e-4ORCE」および「e-Pedal」と同様の機能を持った「e-POWER Drive」なども搭載し、従来のガソリン車およびハイブリッド車では味わえなかったクルマの扱いやすさ、快適性、安心感を顧客に提供している。



図26 「エクストレイル 第二世代e-POWER」

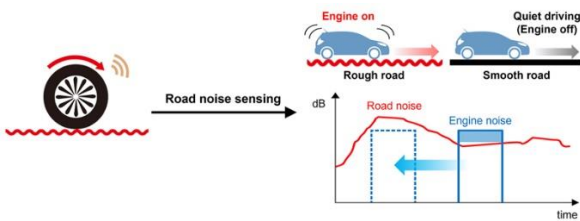


図27 ロードノイズ推定技術によるエンジン始動制御

という目標を掲げた。本章ではカーボンニュートラルを実現すると同時に、持続可能な社会に向けた電動化技術の将来の方向性について述べる。

カーボンニュートラルを実現するためには、世の中の自動車すべてが現在の電気自動車に置き換えられれば実現できるわけではない。そこには電気自動車の更なる効率化が求められるだけでなく、資源循環社会の構築や再生可能エネルギーの促進など、社会全体で取組んでいく必要がある。(図29)次節より日産の将来に向けた取り組みを紹介していく。

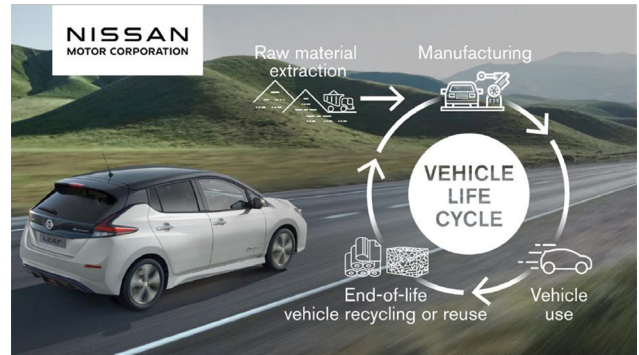
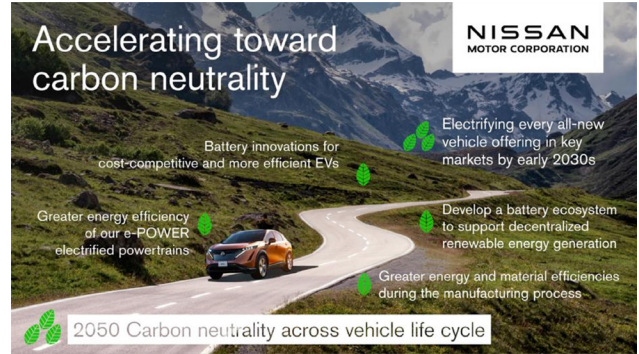


図28 日産のカーボンニュートラルに向けた取り組み

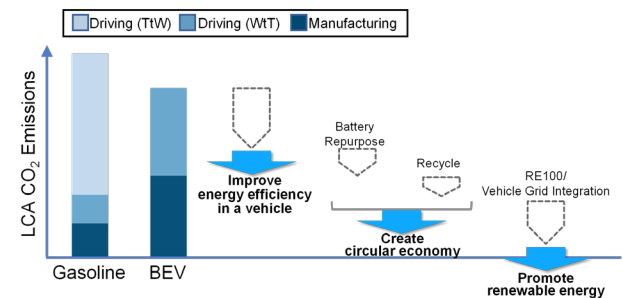


図29 カーボンニュートラルと持続可能な社会に向けて

4. 社会の発展と共に持続可能な社会に向けて

ここまで75年にも及ぶ日産の電動化の歴史について述べてきた。これからも、日産は環境・エネルギー問題と走ることの楽しさを高い次元で調和させるべく努力していく。2021年、日産は図28に示す長期ビジョン「Nissan Ambition 2030」を発表し、ライフサイクル全体でカーボンニュートラルを達成する

4.1 電気自動車の効率向上と更なるバッテリー進化

日産は今まで述べてきた通り、たゆまぬ努力により電気自動車のハードウェアとソフトウェアを同時に進化させ、走る楽しさの向上、および電費と航続距離の改善を達成してきた。一例として、図30に日産の航続距離の進化の過程を示す。

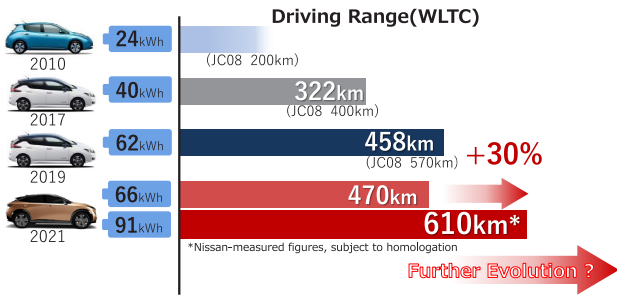


図30 量産電動自動車の航続距離進化

エンジニアの努力の結果、現在の電気自動車は、従来のガソリンエンジン車などと比較して同等または優れていることにより、市場に受け入れられ始めている。

しかしながら、更なる電費改善と、様々な市場要求に応えていくことが電気自動車の普及を後押しし、カーボンニュートラルを目指す上で重要になると考える。図31にガソリンエンジン車と電気自動車におけるクルマが走る際のエネルギーロス発生領域の比較を示す。従来、ガソリン・ディーゼル等のエンジン車ではパワートレインによるエネルギーロスが大半を占め、自動車の効率向上にはエンジンの熱効率を含むパワートレインの効率向上に主眼を置くことができた。一方、電気自動車はパワートレイン、走行抵抗、空気抵抗などが比較的等比率でロスを生じる。よって、効率改善を単にパワートレインで考えるのではなく、クルマ全体をひとつのシステムとして捉えることが不可欠となる。電動パワートレインの小型・高出力化によるクルマのデザイン性向上を介した空力改善への貢献、バッテリー出力密度向上による総重量低減がクルマシステム全体での効率向上に効果的であり、目指す方向性となる。

さらに、電気自動車の市場要求に応え、図32に示すように車種拡大を図っていくためには、リチウムイオンバッテリーのエネルギー密度の向上が必要不可欠である。しかしながら、実際には、ここに物理的な限界が存在する。よって、搭載するバッテリー容量を大きくし、航続距離を市場の期待値まで高めてゆくと、バッテリーの重量が大きくなってしまい、クルマとしての効率が悪化するという悪循環が生じる。ここで期待されるのが図33に紹介する全固体電池(以後、ASSB)である。ASSBは、従来比で約2倍となる高いエネルギー密度や、大幅な充電時間の短縮、バッテリーコストの低減等により、電気自動車の普及を促進させる技術として期待されている。従来のリチウムイオンバッテリーは電解質に液体(有機溶媒)を使用しているが、ASSBの電解質は固体であることから、熱に強く、副反応が少ないため、より多くの材料の組み合わせが可能になる。これにより、よりコストの安い正極材や、より多くのエネルギー密度を持つ負極材を選択することが可能となる。

これらクルマシステムとしての効率向上、バッテリー技術の

大幅な革新により、車種展開、地域展開を加速させ、より多くの人に電気自動車を広めていき、カーボンニュートラルを実現させていく。

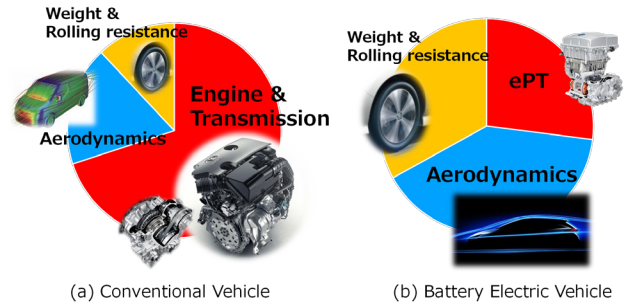


図31 自動車におけるエネルギーロス割合

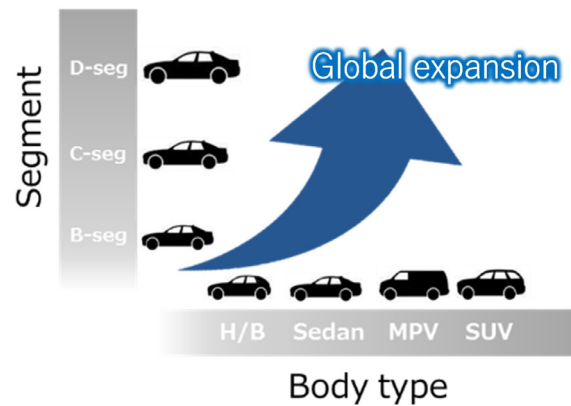


図32 将来の電気自動車における車種展開

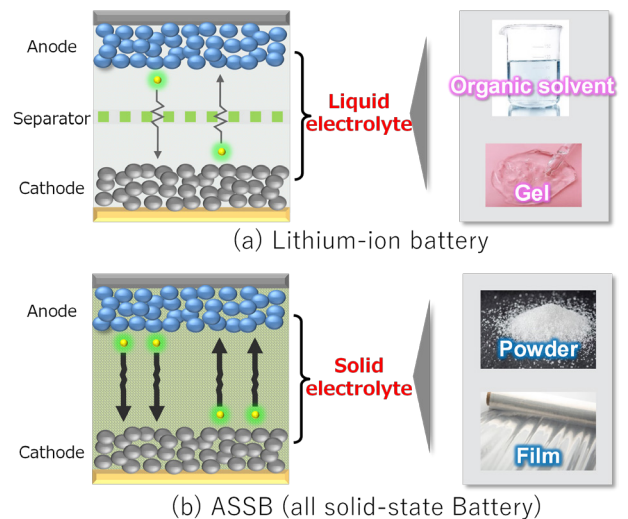


図33 リチウムイオンバッテリーとASSBの比較

4.2 持続可能な社会に向けたエコサイクル

自動車は多様な原材料と多くの部品からつくられており、その集合体として新たな価値を生み出している。日産は、資源の利用効率を向上させるとともに、再生可能な資源や再生材の採用など資源の多様化を進めてきている。ここでは、バッテリー循環社会に焦点を当て、将来の展望を紹介する。電気自動車が普及すると、多くのバッテリーが流通することになる。バッテリーには貴重な材料が多く使われており、それを資源として循環させることが重要となる。日産は、電気自動車が市場で広く普及していく中で、再利用可能なリチウムイオンバッテリーを有効に活用することを見据え、初代「リーフ」の販売開始当初から住友商事株式会社と共にフォーアールエナジー株式会社を設立した。



図34 バッテリー循環概念図



(a) Emergency power supply (b) Portable battery

図35 2nd ライフバッテリーの適用先例

図34にバッテリー循環の概念図を示す。販売された電気自動車は、単なる移動手段ではなく、動く蓄電池、つまりエネルギーソリューションとしての利用ができる。(図34②) この取り組みは次節にてより詳細に述べる。クルマとしての利用が終わったバッテリーは、もう一度電気自動車に使うリユースや、使用用途を変えて使うリパーパスができる。(図34③) 日産は前述のフォーアールエナジー株式会社を通じて、JR東日本株

式会社と共に、クルマとしての役目を終えたバッテリーを、踏切の非常用電源に再利用する取り組み、および株式会社JVCケンウッドと共にポータブル電源販売を開始した。(図35) クルマとしての役割およびリユース・リパーパスも終わったバッテリーを廃棄するのではなく、そこから材料を取り出してリサイクルする。(図34④) このリサイクルされた材料が図34①の製造工程に戻り、より安く、製造CO2を抑えたバッテリーをつくり、新しい電気自動車が生まれ出される。

今後、流通したバッテリーがそれぞれの役割を終え、戻ってくるバッテリーが増加するため、図34に示したエコサイクルの確立および貢献技術開発を加速することが重要となる。日産は「リーフ」販売当初からクルマから得られるテレマティクスデータを通じ、バッテリー劣化状態SOH (State of Health) の理解に努めてきた。図36に使用済みバッテリー劣化状態の評価に対する適正リユース方法について示す。

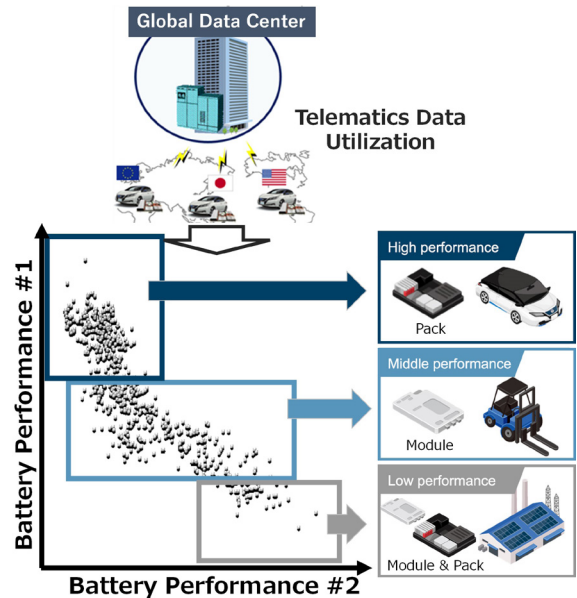


図36 バッテリー劣化状態と適用先コンセプト

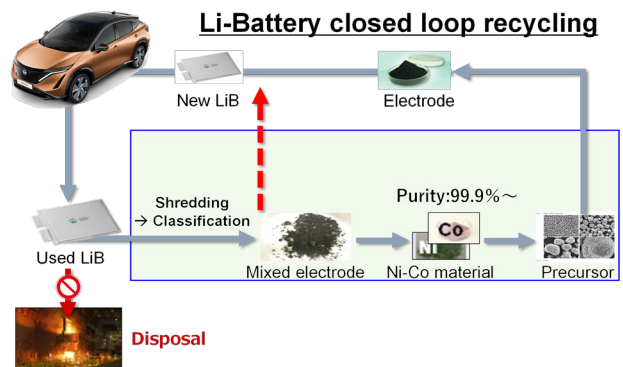


図37 リサイクル循環プロセス

日産はリユース・リサイクルを見据え、市場のバッテリーが今どのような状態で使われているか、テレマティクスデータを通じて把握することが出来るようにしている。本データを通じてバッテリー状態を把握し、その状態に応じて自動車用再生バッテリーや定置用バッテリーとして再利用するバッテリーリサイクルビジネスを進めていく。図37にリチウムイオンバッテリーのリサイクル循環プロセスを示す。現状では中古バッテリーを廃棄処理してしまう場合があるが、これでは、金属材料を再び使えるかたちで取り出すことは不可能になる。高価なニッケルやコバルトを純度の高い原材料レベルまでリサイクルする技術開発のみならず、例えば、図37内の赤線で示す電極レベルでバッテリーに戻すDCR (Direct Cathode Recycle) 技術開発も進めており、このリサイクル技術の構築とビジネスモデルを築くことが急務である。これは地球全体の資源枯渇を避けるだけでなく、リサイクルによって次につくる新品のバッテリーコストを下げるという好循環をつくることが可能となるためである。

4.3 Vehicle Grid Integration 電力平滑化へ

電気自動車は、社会に新しいエネルギーの活用方法を提供でき、電気自動車の持つ大容量のバッテリーは、街全体の電力エネルギーとつなげることを可能とする。図38に日産のV2Xの取り組みを示す。前述した家とつながる「Vehicle to Home」は市販化され、既に多くの家庭とつながっている。Vehicle to Buildingの実用化、CommunityやGridレベルでの実証実験もスタートしており、将来的にはどこに行っても社会や街のエネルギーとスマートにつながっていき、電気自動車は世の中の電力需給バランスの安定に貢献できると考えられる。加えて電気自動車は定置型再生バッテリーと組み合わせることで、再生可能エネルギーの活用を向上させることが可能である。日産は福島県浪江町にて電気自動車の充放電システムを活用したエネルギーマネジメントシステムの実用化検証を開始している。浪江町の商業施設が保有する再生可能エネルギー発電設備およびPCS(パワーコンディショニングシステム)と浪江町公用車である「リーフ」を活用、日産の充放電制御システムをPCSに搭載することで、効率的なエネルギー運用を検証し、クリーンエネルギーの地産地消を促進するエネルギーマネジメントシステムの構築を目指している。

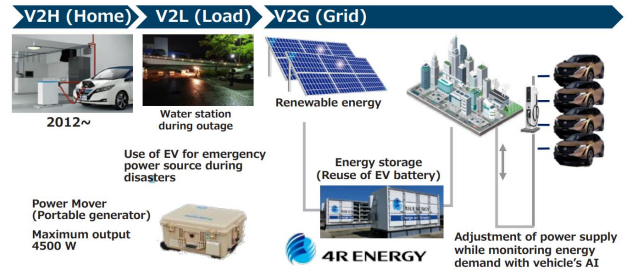


図38 日産のV2Xの取り組み



図39 福島県浪江町における実証実験

図40に日産が目指すAIを利用したエネルギーマネジメントシステムを示し、以下に特徴を紹介する。

1. 電気自動車の自律的充放電
太陽光、風力、水素燃料電池からの発電量と、商業施設の電力需要の情報を基に、PCSに搭載された日産の充放電制御システムが、電気自動車の充放電を自律的に行う。
2. 電気自動車の充放電優先度・タイミング調整
本充放電制御システムが、電気自動車のバッテリー残量や使用パターン(走行距離、出発時刻など)を考慮し、商業施設の電力使用状況に応じて、充放電を行う優先車両を決め、必要なタイミングで充放電を実施する。
3. 再生エネルギー有効活用と電力系統安定化
本システムで商業施設の使用電力のピークを下げることにより、電力コストの削減が期待できる。また、電気自動車の充電電力の再生可能エネルギー100%を目指すことで、エネルギーの有効活用と、電力系統の安定化に貢献する。



図40 日産エネルギーマネージメントシステムコンセプト

日産は、電気自動車や定置型再生バッテリーを利用したエネルギーマネージメントシステムの構築により、各種施設や域内店舗での再生可能エネルギーの利活用を向上させ、低炭素化への取り組みを加速させる。

5. さいごに

日産はクルマを単なる移動手段だけでなく、移動のその先へ、社会を前進させるモビリティ、すなわち Beyond Mobility に向けてクルマの存在意義を再定義していく。それこそが電動化をベースとした100年に一度の大変革なのではないかと考える。そのため、今号の特集である電動化・知能化・コネクテッドの更なる進化に加え、これまでの自動車業界の常識に囚われない新たな考えや、取り組みが益々大事になる。電気自動車は社会を変えていく大きな可能性を持っている。

参考文献

- (1) 石川和男, わが国における第二次世界大戦直後の電気自動車ブーム, 慶應義塾大学出版会, 三田商学研究, Vol. 63, No.4 (2020)

著者



寺地 淳

特集1: 電動化

2. 新世代EV専用プラットフォームにおける
高いパッケージング効率の実現

大西 将浩* 曾根 来*

1. はじめに

2010年に、グローバル市場に投入する量産EVとしてリーフの発売が開始された。リーフのプラットフォームは、世界初のリチウムイオン電池搭載EVであるプレーリージョイEVをはじめ、アルトラEV、ハイパーミニ等の開発で培った電動化技術を土台に、ガソリン車と遜色のない高い信頼性・安全性とEVらしい「感動の走り」を提供することを目標に開発された。その高い信頼性・安全性や走りの良さは、結果としてお客様に受け入れられ、EV普及に貢献してきた。

また、パワートレインの一体化や高出力化、ヒートポンプ空調の採用、高電圧バッテリー容量拡大などの技術を継続的に取り込み、航続距離や走りの気持ちよさに磨きをかけてきた。

今回、アリア(図1)に採用した新世代EV専用プラットフォーム(CMF-EV)を開発するにあたり、リーフで培った高度な信頼性・安全性を継承・進化させつつ、EVならではの車両パッケージの実現・航続距離・走行性能の更なる上を通じて、「さらにお客様の期待を越えること」を、取り組むべき課題に据えた。

本稿では特に広い室内と大容量バッテリーの搭載、高い走行性能を達成させたキーポイントについて解説する。



図1 日産アリア

2. EV車両パッケージの現状

お客様がEVに期待する車両パッケージとして、大きく以下2つが挙げられる。

- ① コンパクトなパワートレインによる、前後方向で広々とした室内空間
- ② 排気系、プロペラシャフトレスによる、完全にフラットな室内フロア

しかしながら、実際に双方を両立させるEVの開発はおお客様の想像以上に困難である。

図2に、市販SUV群における車両全長と有効室内長(アクセルペダルから後席乗員ヒップポイントの距離であり、居住空間の前後長の代表指標)の比較を示す。SUV EV車のベンチマークラインはSUV ICE車に対して前後方向のパッケージ効率で劣っていることが解る。また、車型が異なるとはいえ、リーフもCセグメントICE群と同等の前後スペース効率となっている。航続距離確保を目的に大容量高電圧バッテリーを搭載したEVでは、車両質量が大幅に増加する。そのため、ICE車に対して、低速衝突時の損傷性ならびに高速衝突時の乗員・高電圧安全確保に必要な衝突ストロークが増え、コンパクトな駆動系によるスペースメリットを相殺していた。

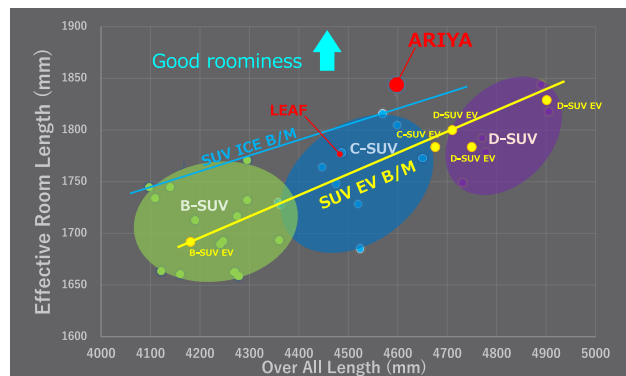


図2 SUV群における車両全長・有効室内長比較

* 第二製品開発部

また、完全フラットフロアについても、リーフではセンタートンネル内にブレーキ配管、冷却水配管、高電圧ハーネスなどを配策しており、お客様の期待に必ずしも応えられていなかった。

3. 新世代EV専用プラットフォームCMF-EVでの進化

アリアに採用したCMF-EVでは、空調ユニットをエンジンコンパートメントに搭載するブレークスルーと、機能統合によるパッケージの高密度化を図り、SUV ICE車のトップベンチマークを上回る前後方向空間効率と完全フラットフロアを実現、実際にアリアをご購入されたお客様からも高く評価されている。(図2・図3)

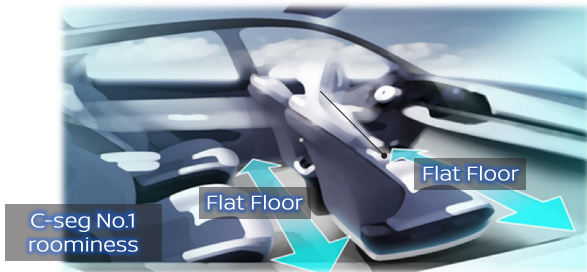


図3 高い空間効率と完全フラットフロアを実現

更に、上記の機能統合部品を計画当初から車体骨格剛性の前提に織り込むことで、お客様がEVに期待する意のままの操縦性・乗り心地と軽量化を両立させた。

4. 空調ユニットのエンジンコンパートメント内配置

本章以降は、より具体的な達成方策について解説する。従来は室内のインストゥルメントパネル内に配置されていた空調ユニットを、エンジンコンパートメント内配置に変更し、薄型インストゥルメントパネルを実現したことは、アリアのワールドプレミア等で紹介され、広く知られている。

しかしながら、単なるユニット搭載位置変更のみでは車両全長に対する有効室内長、すなわち前後方向のパッケージ効率向上に殆ど寄与しない。なぜならば、室内空間が延長される一方で、空調ユニットを搭載するエンジンコンパートメントは延長せざるを得ないからである。

アリアにおけるブレークスルーは、空調ユニットの移動に加えて衝突時に積極的に圧壊させる構造としたことである。図4に示す通り、従来の空調ユニットはダッシュパネル後方、すなわち非クラッシュゾーンに搭載されていた。単純に空調ユニットをエンジンコンパートメントに移動、かつクラッシュストロークを維持すると、空調ユニットの前後寸法分エンジンコン

パートメントの延長が必要になる。(図5)

アリアに採用したCMF-EVでは、空調ユニットを圧壊させることにより、必要なクラッシュストロークを確保しつつ、エンジンコンパートメント前後長を短縮した。(図6)

空調ユニットは主に熱交換器、冷媒配管、ブローファン、ダクト等で構成されているが、熱交換機とブローファンモーター以外の構成部品は樹脂あるいは中空形状であるため、圧壊代が存在する。そこで、アリアのフルラップ前面衝突時では200mm程度空調ユニット本体を圧壊させる前提で衝突時のFS特性を空調ユニット割り付けて開発を進めた。

なお、空調ユニット構成部品のうち、高電圧部品である空気PTCヒータは、非クラッシュゾーンである居室内に搭載し、衝突時の高電圧安全にも配慮した。

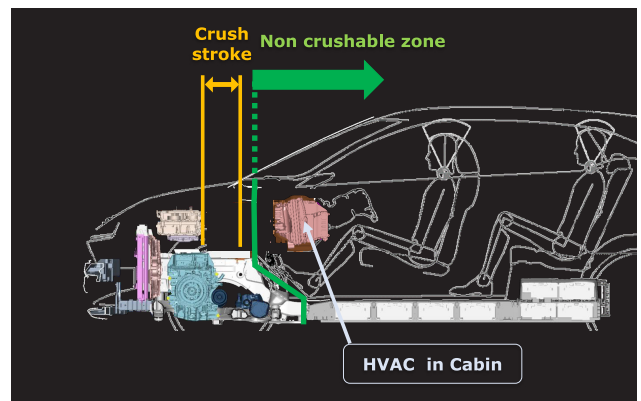


図4 従来の空調ユニットとクラッシュスペースの関係

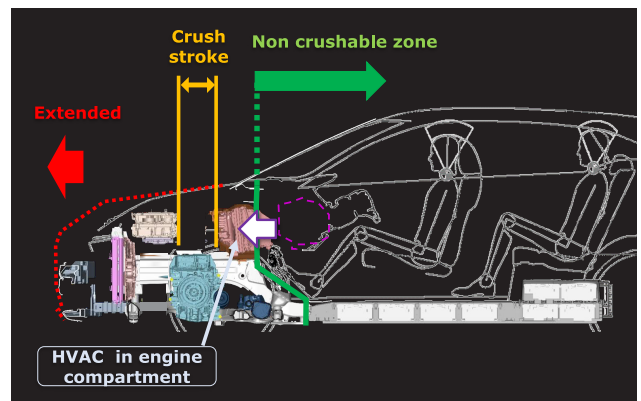


図5 空調ユニット移動とエンジンコンパートメント延長

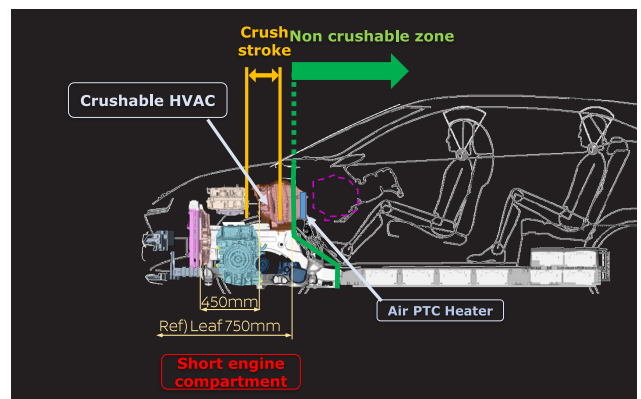


図6 空調ユニット圧壊前提のクラッシュスペース

ここでは、空調ユニットを安定して圧壊させる方策について解説する。図7にCMF-EVのエンジンコンパートメント内レイアウト図を示す。空調ユニットはエンジンコンパートメント内の最後方に搭載され、その前方には充電器、ジャンクションボックス、DCDCコンバータをアセンブリしたアッパーパワートレインユニットが搭載されている。

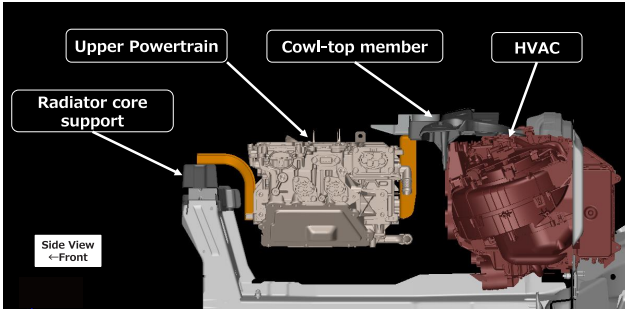


図7 エンジンコンパートメントユニット配置図

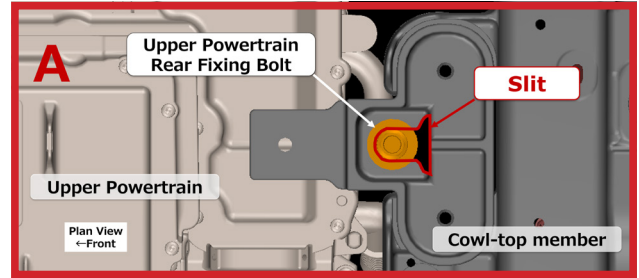
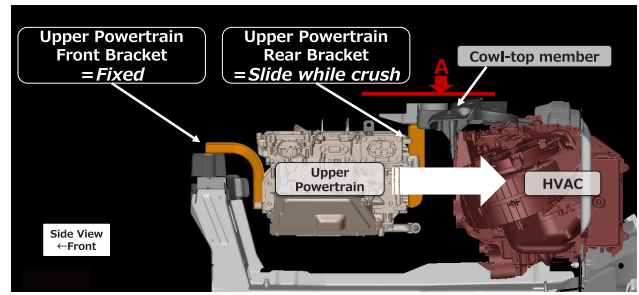


図8 前突時ユニット挙動ねらいと締結点のスリット構造

前面衝突時には、アッパーパワートレインユニットは衝突事象の中期から後退を開始し、空調ユニットの完全圧壊とはほぼ同時に最大後退量に到る。様々な衝突形態において、安定的に空調ユニットを圧壊させるには、アッパーパワートレインユニット側面視の初期搭載角度を維持したまま後退させることが望ましく、以下の考え方で挙動コントロールを達成した。

- ① アッパーパワートレインユニット前方を車体骨格と接続し、衝突時の後退挙動を安定させる
- ② アッパーパワートレインユニット後退時に後方固定点ブラケットを切り離し、アッパーパワートレインユニット後退を阻害しない

上記①の具現化構造として、フロントサイドメンバーと接続されたラジエーターコアサポートメンバーにアッパーパワートレインユニット前方を固定するとともに、ブラケット許容変形量及び変形モードを規定した。

②に対しては、後方固定点のボルト締結部にスリットを設け、衝突時の後退入力を受けた時のみブラケットがスライドして抜ける構造を設けた。(図8)

通常走行時の確実な固定と衝突時のスライドを両立させるため、ブラケット剛性や表面処理、寸法精度、締結トルク管理等を徹底している。

上記取り組みによって、新たに空調ユニットスペースをクラッシュゾーンとして活用し、十分なクラッシュストロークとお客様の期待である「コンパクトなパワートレインによる、前後方向で広々とした室内空間」の両立が可能となった。

5. 機能統合による省スペース化と車体剛性の両立

大容量バッテリーの搭載、居室空間の拡大とフラットフロア、高い走行性能の実現を目的に、機能統合によるパッケージの高密度化にも取り組んだ。ここでは主要な2事例を紹介する。

第1は、アッパーパワートレインユニット固定構造、空調ユニット固定構造、ストラットタワーを統合したカウルトップメンバーである。図8に示す通り、従来構造において、アッパーパワートレインユニットはサイドメンバー間を接続するメンバー上に、空調ユニットは車室内のステアリングメンバーにそれぞれ搭載されていた。さらに高い操縦性能が求められる車両については個別にストラットタワーが追加されていた。

CMF-EVでは、新たに設定したアルミ製のカウルトップメンバーにアッパーパワートレインユニットと空調ユニットの固定、ストラットタワーの機能を集約することで、固定構造スペース低減と軽量化を進めながら、ストラットタワー周りの骨格剛性向上を両立させた。(図9)

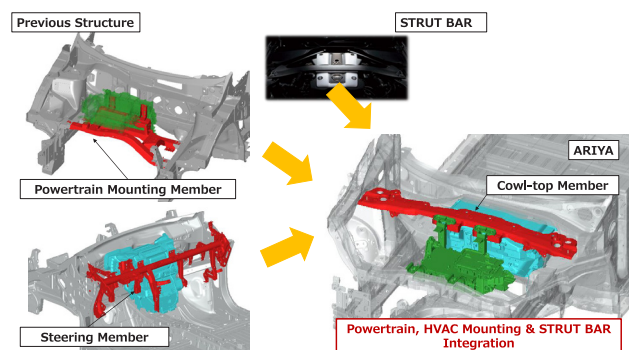


図9 カウルトップメンバーによる機能統合

第2は、高電圧バッテリーフレームの多機能化である。従来構造における高電圧バッテリーフレームの主たる機能は、バッテリー本体保持と衝突や路面干渉をはじめとする様々な入力からの保護機能である。

詳細は高電圧バッテリー開発の稿に譲るが、CMF-EVでは、バッテリーフレームにアルミ押し出し材を採用した利点を活かして、上記機能に加えて、バッテリー温調用ウォータージャケットと4WD用のリアモータ・インバータ行き冷却水配管を、新たにフレーム断面内に統合した。(図10)

さらに、リアモータ・インバータ行き高電圧ハーネスをバスバー化して高電圧バッテリーパック内に配策、ブレーキ配管を高電圧バッテリーパックとサイドシルの間隙に通すことによってトンネルを廃止し、お客様がEVに期待する「排気系、プロペラシャフトレスによる、完全にフラットな室内フロア」を実現した。

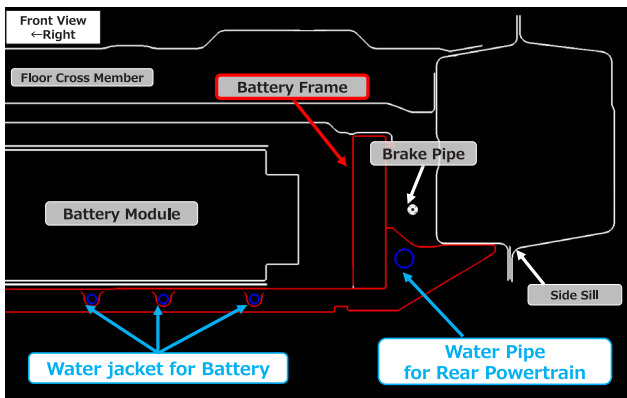


図10 高電圧バッテリーフレームへ水配管を統合

加えて、高電圧バッテリーフレームを主要な骨格部品として位置付け、車体骨格ならびにサスペンションメンバーとの結合強化を図った。

図11に示す通り、車体フロアに設定したホットスタンプ材の床クロスメンバーと高電圧バッテリー内クロスメンバーは前後位置が互い違いとなる様に設定されている。高電圧バッテリー内クロスメンバーはサイドフレーム及びサイドレールを介して車体のサイドシルと結合されており、側面衝突時の高電圧バッテリーの保護のみならず、車体骨格剛性向上にも寄与している。

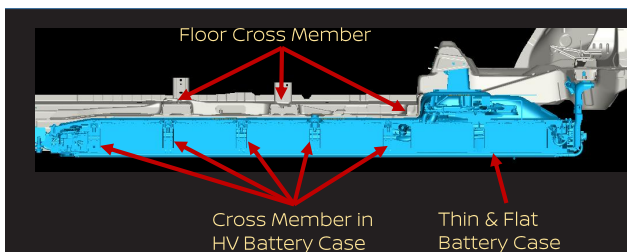


図11 車体フロアと高電圧バッテリー骨格位置関係

また、フロントサスペンションメンバーのリア側締結点、リアサスペンションメンバーのフロント側締結点と、高電圧バッテリーフレームとを、サスペンションピンステイを介して結ぶことにより、サスペンションメンバー締結点横剛性を向上させ、操舵応答性を高めた。(図12)

この様に、高電圧バッテリーフレームを主要な骨格部品として活用したこと等により、車体側クロスメンバー断面を縮小してフラットフロアを実現させつつ、従来CセグメントSUVに対して約1.9倍の車体剛性を確保し、低床フラットフロアと乗心地性能をはじめとする動性能との両立を達成した。

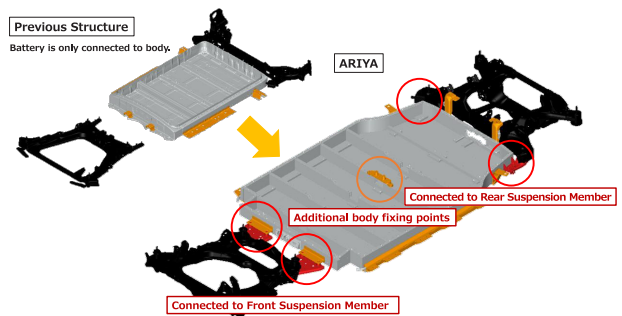


図12 サスペンションと高電圧バッテリーとの結合強化

6. おわりに

開発中にEVを取巻く環境は日々激動したが、リーフで培った高度な信頼性・安全性を継承・進化させつつ、車両パッケージ・航続距離・走行性能について「さらにお客様の期待を越える」という当初目標はぶれることがなかった。

本稿では触れられなかったが、空調使用時や様々な温度条件を含む実用シーンでの航続距離や充電性能、高電圧バッテリーの耐容量低下特性などもリーフから進歩させることができた。さらに、e-4ORCEに代表されるEVならではの走りの良さやコネクティビティによる使い勝手の更なる向上にも取り組んだ。

結果として、アリアは、EVというカテゴリーを越えて、純粋なクルマとしても積極的に選んで頂ける製品になったと自負している。

また、CMF-EVプラットフォームは、ホイールベースやトレッドの可変幅を持っており、アリアに対してコンパクトな車両サイズにも適合できるように開発されている。

CMF-EVプラットフォーム採用車種を、これまでEV購入をためらっていたお客様にもご購入頂くことで、広く持続可能なモビリティに貢献できることを願っている。

著者



大西 将浩



曾根 来

特集1: 電動化

3. 日産における電気自動車向けバッテリーの
進化と今後の展望大間 敦史* 田崎 信一** 八田 健太郎**
田淵 雄一郎** 諸岡 正浩** 枚田 典彦***

1. はじめに

日産自動車は、持続可能な社会に向けて、2050年までにクルマのライフサイクル全体におけるカーボンニュートラルを実現する新たな目標を発表した。その目標の達成に向けて、2030年代早期より、主要市場に投入する新型車をすべて電動車両とすることを目指し、より競争力の高い効率的な電気自動車 (EV) の開発とバッテリーの技術革新を進めている。

これまで日産自動車では、「ニッサン・グリーンプログラム」を進展させながらクルマや事業からのカーボンフットプリントを最小限に抑えるように継続的な取り組みを行ってきた。そして、ゼロ・エミッション車のバイオニアとして、グローバルで累積100万台以上のEVを販売するとともに、業界団体や政府自治体と連携しながらインフラ整備やEVの価値についての啓発活動も行ってきた。とりわけ、2010年に世界初の量産型EVとして販売を開始した「リーフ」は、2023年7月時点で累積65万台以上のグローバル販売台数に達している⁽¹⁾。その間、バッテリーの品質と信頼性を犠牲にすることなく、容量や入出力などの性能を向上してきた。これまでに、電気自動車に搭載したセル数は累積で1億個を超えたが、バッテリー起因の重大事故はゼロである。

本稿では、2010年から現在に至るまでに開発してきた「リーフ」を中心に、EVの開発の歴史とバッテリーの進化、並びに、全固体電池 (ASSB) を含めた今後の展望について解説する。

2. 日産自動車におけるEVの歴史と
バッテリーの進化

2.1 EV開発の歴史

図1に、日産自動車におけるEV開発の歴史を示す。1947年に、最初のEV「たま」を試作し、航続距離96.3km、最高速度35.2km/hを達成した。また、世界初のリチウムイオンバッテリーを搭載した「プレーリージョイEV」を開発し、1997年に、

各種企業・団体に向けてリース販売を実施した。その後も、ミニバン型「ルネッサEV」(1998年)、超小型2人乗りEV「ハイパーミニ」(2000年)など、現在につながるEV技術開発を重ねてきた。そして、2010年12月に、世界初の量産型EV「リーフ」を日米欧の主要マーケットに対して販売を開始した。「リーフ」には、様々な課題を乗り越えてゼロ・エミッション社会の実現を目指すといった強い決意が込められている。2017年には、第2世代の新型「リーフ」を、2019年には「リーフe+」をそれぞれ発売し、航続距離や出力を大幅に改善した。

さらに、2021年には、新型クロスオーバーSUVである「アリア」を発売した。「アリア」はグローバルに通用するSUVで、スタイリッシュなデザインやEV専用プラットフォームはもちろん、モーター、大容量バッテリー(66 kWh, 91 kWh)、搭載されるコネクテッド技術、改良版プロパイロット2.0、e-Forceに支えられた上質な乗り味と静粛性など、現在の日産の最新技術をすべて集結したモデルである。その魅力的なデザインから、「アリア」はドイツ・レッドドットデザイン賞(2022年)を始め、国内外で数々のデザイン賞を受賞した。一方で、2022年には、全く新しい軽のEV「サクラ」を国内市場に導入した。「リーフ」の開発で培った技術をフル投入するとともに、生活に寄り添いながらも運転する楽しみをもたらす、EVを身近に感じさせる商品である。「サクラ」は、2022-23年「日本カー・オブ・ザ・イヤー」を受賞した。

図2 a)に「リーフ」および「アリア」の航続距離の変遷を示す。初期型「リーフ」(24 kWh)は、当時の燃費測定基準であったJC08モードで200 km、第2世代「リーフ」(40 kWh)は同・400 kmの航続距離である。2018年10月に燃費測定基準がWLTCモードに改定され、第2世代「リーフ」(40 kWh)はWLTCモードで322 km、62 kWh仕様では同・458 kmの航続距離であり、初期型に対して2倍以上に進化した。一方、「アリア」は2種類のグレードを有し、B6グレード(66 kWhバッテリー仕様)の航続距離はWLTCモードで470 km、B9グレード(91 kWhバッテリー仕様)では610 km(社内測定値)である。

*EVシステム研究所 **パワートレイン・EVバッテリー次世代技術開発部 ***パワートレイン・EV技術開発本部

図2 b)に「リーフ」および「アリア」の充電性能の変遷を示す。ここでは、バッテリーの残量警告等が点灯してから充電量が80%に達するまでの充電エネルギー(kWh)を所定充電時間(30分間)で除した値を規格化して示す。初期型「リーフ」に比べて、第2世代「リーフ」および「リーフe+」は1.3倍の充電受け入れ性となり、より短時間での充電が可能となった。さらに「アリア」では、初期型「リーフ」と比べて2.1倍まで向上し、充電性能を大幅に進化させることができた。

このような航続距離や充電性能の変遷は、バッテリーやパワートレインを含めた車両全体の様々な技術の進化によって達成したものである。本稿では、それらの中で、主としてバッテリーに由来する技術の進化について述べる。

2.2 バッテリーの進化

上述のように、初期型「リーフ」の発売から現在に至るまで、航続距離や充電性能の改善などEVの魅力を高めるために、バッテリーの技術開発を進めてきた。図3に、航続距離と充電性能の進化に向けたバッテリーの代表的な技術課題を示す。ここでは、「リーフ」と「アリア」に搭載し、これらの課題解決に貢献してきた代表的なバッテリーのセル・材料技術、および、パック・モジュール技術を紹介する。

2.2.1 高容量化に向けたセル・材料技術の進化

航続距離を伸ばすためには、セルのエネルギー密度を向上させることが効果的である。そのためのキー技術の1つは、正極活物質材料の高容量化である。図4に、正極活物質材料の変遷を示す。初期型「リーフ」では、正極材料として、主として結晶構造がスピネル構造であるマンガン系(LiMn₂O₄)材料を適用した。これに対して、第2世代「リーフ」では、新たに、層状構造を有するNMC系材料(三元系:ニッケル/マンガン/コバルトの混成材料)を適用した。また「アリア」では、ニッケル比率を高め、更なる高容量仕様とした。このNMC系材料は結晶構造内にリチウムイオンを高密度に蓄えられ、従来のマンガン系材料に対し、第2世代「リーフ」では1.6倍の、「アリア」では1.8倍の容量比を、それぞれ実現した。

一方、高容量のNMC系材料は層状構造であるため、従来のマンガン系材料よりも過充電状態においては結晶構造が弱く、信頼性が低下する可能性がある。今回、信頼性のロバスト性向上のため、NMC材料の組成比、セパレータ層構造を代表とする構成材料および部品の最適化、そして、性能と信頼性のトータルバランスをとったセル設計を実施した。これにより、セルの信頼性を損なうことなく、セルの高エネルギー密度化を実現した。さらに、充電性能を向上させるためにはセルの抵抗を低減する必要があるが、従来のマンガン系材料に対して、NMC系材料では内部に存在するリチウムイオンが動きやすいために低抵抗化に寄与する。その他、NMC材料の組成比、負極材料、電極物性、電解液の低抵抗化、セル積層構造の最適化により、初期型「リーフ」に対して50%以上のセル抵抗の低減を実現した。



図1 日産におけるEV開発の歴史

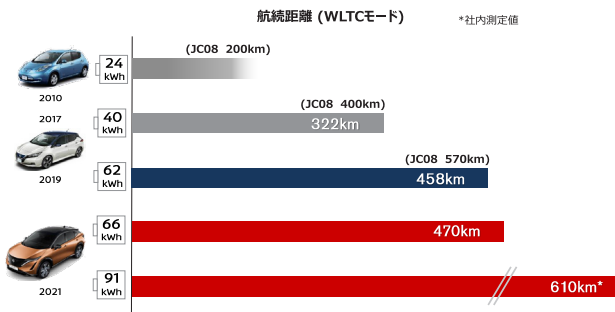


図2 a) 「リーフ」および「アリア」の航続距離

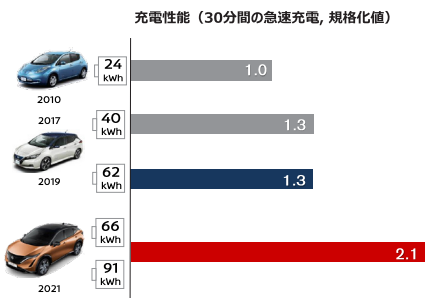


図2 b) 同 充電性能

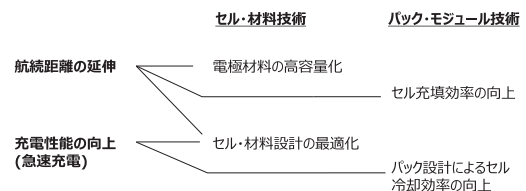


図3 航続距離と充電性能の進化に向けたEV向けバッテリーの主要な技術課題




	初期型「日産リーフ」 (24 kWh)	第2世代「日産リーフ」 (40 kWh, 62 kWh)	「アリア」 (66 kWh, 91 kWh)
Cathode material composition			
Main material structure	Spinel structure (LMO)	Layered structure (NMC)	Layered structure (NMC)
Capacity ratio	1	≥ 1.6	≥ 1.8

図4 正極活物質材料の変遷

2.2.2 搭載効率・冷却効率向上を狙った パック・モジュール技術の進化

航続距離の延伸のためには、セルの高エネルギー密度化に加えて、パックに搭載するセルをできるだけ効率的に充填することが有効である。また、急速充電性能を向上させるためには、充電中におけるセルの温度上昇を抑えることが重要であり、その方策の1つとしてセルの冷却効率を高めることが有効である。セルの冷却効率を高めるためには、空冷から水冷(LLC)に変更して熱伝達率を高めること、および、セルを取めたモジュールを効果的に冷却するパック内レイアウトを最適化することがポイントである。

セルの搭載効率を高めるために、初期型「リーフ」に対して、第2世代ではモジュール構造を改善した。初期型では、ラミネートタイプセルを4枚重ねて1つのモジュールとしパックを構成していたが、第2世代の40 kWh仕様は、8セルを重ねて1つのモジュールとした。その結果、モジュールを構成する部材を減らし、セルの搭載効率が向上した。さらに、62 kWhの「リーフe+」では、モジュール内でセルのタブを接続する際に、レーザー溶接を適用してコネクタを廃止することでスペース効率を高めた。その結果、40 kWh仕様のモジュールに対して、セルの搭載効率を10%向上させた。

一方、EV専用プラットフォームを適用した「アリア」では、フラットで広々とした室内空間を実現するために、パックは薄型でフラットな構造設計が求められる。そのため、モジュールを薄く広く配置したレイアウト設計とすることで、室内空間を維持したままセルの充填効率を向上させた(図5 a)。またその際、パック外周骨格と電池モジュールの空間が狭くなるために耐衝撃性の課題が出てくるが、複数のクロスメンバーをパック内に配置することで高い耐衝撃性を実現した。また、B6グレードに対してB9グレードでは、高いエネルギー容量を得るために後部座席下のスペースにもモジュールを配置した2階建て構造となっているが、1階部分の基本構造は共用化を図っているため(図5 b)、部品点数の削減にも貢献している。

さらに、「アリア」では、LLCを用いた冷却(温調)システムが採用されている。このシステムにはプレートがパック底面部に敷設されており、LLCをチラーで冷却し、プレートに流すことでバッテリーを冷却する。パック内に配置されたモジュール(セル)を均一に冷却するためには、底板全面に均一にLLCを流す必要があるが、パック内部空間はLLC流路と隔てられた水密空間とする必要がある。これらを効率的に配置するため、底板、LLC流路機構、その保護板の3つの構造を一体化した薄型化設計を実現した(図5 c)。その結果、「アリア」のパックでは温調システムを搭載しているにもかかわらず、「リーフ e+」に対してバッテリーパックの厚さ当たりのエネルギー密度を約2.3倍向上させたことで、EVトップレベルの体積エネルギー密度と急速充電性能を実現した。

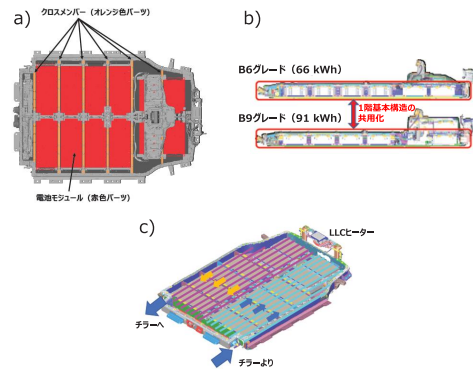


図5 a)「アリア」バッテリーパックレイアウト(B6)
b)同 バッテリーパック側面図(B6 vs. B9)
c)同 LLC流路付きバッテリー底板(B6)

3. 今後の展望 - 全固体電池への期待 -

図6に、バッテリーロードマップを示す。航続距離の革新に向けて、第2世代の「リーフ」や「アリア」から、セルのエネルギー密度と、セル/パック体積効率(セルの充填効率)を、さらに高めていく。セルのエネルギー密度の向上は、正負極の材料を進化させて実現する。具体的には、負極には従来のグラファイトに高容量のシリコンを加え、正極材料はさらにニッケル割合を増やすとともに高価なコバルト割合を減らす設計を目指す。また、セル/パック体積効率は、衝突耐性や信頼性を維持しながら、モジュールやパックを構成する部品の簡素化や統合化を進めていく。同時に、急速充電性能に代表されるバッテリーの入出力性能と、耐久性、並びに信頼性を高度にバランスさせたセル・モジュール・パックの性能・構造設計を進め、電動化を加速していく。中でも、2028年以降に車載を計画しており、昨今注目を浴びている全固体電池(ASSB)に関する取り組みについて、以下特筆する。

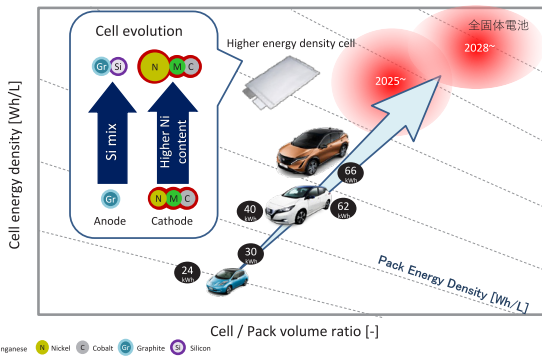


図6 バッテリーロードマップ

日産自動車は、長期ビジョン「Nissan Ambition 2030」において、2028年度までに自社開発の全固体電池を搭載したEVの市場投入を目指すことを発表した。全固体電池は、従来比で約2倍となる高いエネルギー密度や、優れた充放電性能による大幅な充電時間の短縮、さらにはより安価な材料の組み合わせによるバッテリーコストの低減等により、ピックアップトラックなども含めた幅広いセグメントへの搭載など、EVの普及を促進させるゲームチェンジャーとなる技術として期待されている。

従来のリチウムイオン電池は電解質に液体（有機溶媒）を使用しており、異常時に、可燃性のある有機溶媒が起因で発火事故に至る一因となっている。一方、全固体電池の電解質は固体であり、揮発性・可燃性がないため、一般的には信頼性が高く、温度変化による影響を受けにくい（図7 a）。また、液体電解質では正負極材との副反応が理由で選べる材料に制約があるが、固体電解質は「固体」であることから、副反応が少なく、より多くの材料の組み合わせが可能になる。これにより、よりコストの安い正極材や、より多くのエネルギー密度をもつ負極材を選択することが可能となる。

このように非常に優れた技術的特徴をもつ全固体電池であるが、実用化に向けては様々な課題がある。例えば、全固体電池は電解液の代わりに固体電解質が果たすため、正負極の材料と固体電解質は均一に分散し、かつ、固体と固体で形成される各材料間の界面を安定した状態に維持する必要があり、このような条件を満たすような材料設計が不可欠である。またセル設計においても、これを維持するような面圧の設計が必要となり、さらに生産プロセスでは均一に混ざる条件を見出すことが重要である（図7 b）。

これらの課題を解決するために、最先端の計算科学を用いた材料の特定や、理論的に導かれた理想的な材料を生産可能な材料に落とし込むための作り込み、試作した電池で起きている現象を解析して要因を特定し改善することなど、グローバルな各分野のエキスパートと共同研究・開発を行いながら原理原則からアプローチしている。今後も、原子分子レベルのバ

ッテリー材料研究から、セル、モジュール、パック、およびEV車両まで、過去のリチウムイオン電池とEVの開発経験から得られた知見を最大限に活用し、実用化に向けて開発を加速していく。

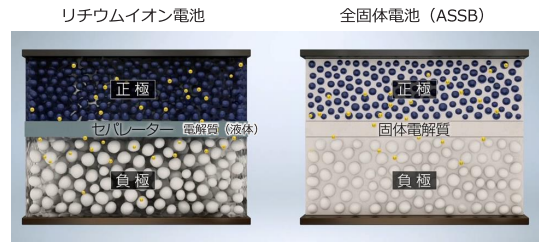


図7 a) リチウムイオン電池と全固体電池のセル構成

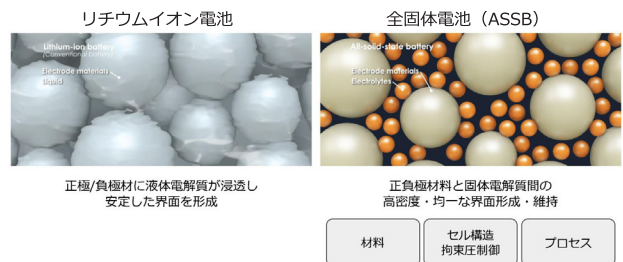


図7 b) リチウムイオン電池に対する全固体電池の課題

4. おわりに - 持続可能な社会に向けて -

2022年の経産省の調べによると、現状、国内で1年間に販売されている自動車500万台のうち、150万台が中古車として海外に輸出され、残りの350万台が国内で廃車されている。そのうち、部品として国内リユースされている台数は109万台であり、それ以外は国内外における流通先が不明である。また、販売元のディーラーに戻されて廃車に至った台数は350万台のうち42万台である⁽²⁾。

冒頭に述べたように、日産自動車は、持続可能な社会に向けて、2050年までにクルマのライフサイクル全体におけるカーボンニュートラルを目指していく。しかしながら、上述のように、車の主要部品の循環経路が十分に繋がっていないことが実体である。現状、EVを製造・販売するために、バッテリーを含めた各種部品と車両を鋭意設計しているが、特に、バッテリーはEVの基幹部品であり、EV全体のコストのうちの大きな割合を占めている。せっかく鋭意設計し製造・販売したバッテリーの多くが、上記のように流通先が不明となってしまえば、資源、コスト、CO₂排出量、そしてビジネス機会の観点で、会社として大きな損失である。

そこで、図8に示すように、持続可能なバッテリーエコサイ

クルを構築することが肝要である。製造したバッテリー・EVを販売し、ゼロ・エミッション車としての魅力ある運転や移動手段(含・中古車市場)といった従来の機能に加えて、V2Xと呼ばれるエネルギーシステムと連携し、グリッドの安定化やバックアップ電源、再エネの有効利用など新たな使い方をすることができる。EVとしての機能を果たしたバッテリーは、比較的劣化の少ないものを選びすぐり中古車向けに再生したり、フォークリフトやエネルギー貯蔵システム(ESS)向けに仕分けたり、リユース・リパーパス用途に展開される。ライフを通じて十分に役割を果たしたバッテリーは、最後、原料まで戻して新たな素材として再生するといったリサイクルを行い、再びバッテリーに使用される。

このようなバッテリーエコサイクルを構築するために、日産自動車は、初期型「リーフ」の販売に先立ち、2010年9月にフォールエネルギーを設立して、市場から戻ってきたバッテリーパックをリユース向けに販売するビジネスの検討を開始した⁽³⁾。そして、2018年には浪江事業所を立ち上げ、戻ってきた「リーフ」のバッテリーパックを再製品化し、中古車向け、フォークリフト向け、ESS向けにそれぞれ販売するビジネスを本格的に開始している。

今後は、グローバルにEVの販売台数が増大していく中で、このようなエコサイクルが持続可能に機能させることが必要である。そのためには、EVやバッテリーを循環させて日産圏に戻すための仕組みや技術・サービス、一度製造・販売したバッテリーの健康状態が正しく推定できる技術やバッテリーをできるだけ長く使えるような寿命延長技術、簡便で短時間に車からバッテリーを取り外し解体・再生できるバッテリー設計や再生技術、および、環境負荷やコストを少しでも抑えて効率的にリサイクルできる技術の開発とリサイクル網の構築が重要である。また、これら一連のエコサイクルがビジネスとして成立するような仕掛けや、顧客を惹きつける新たな価値の創造、部品のIDやカーボンフットプリントを一元管理できるような情報プラットフォームの構築、並びに仲間づくりが肝要である。

参考文献

- (1) <https://global.nissannews.com/ja-JP/releases/230725-02-j>
- (2) 「蓄電池産業の競争力強化に向けて 制度・ルール・標準/需要拡大・国際展開」15-16ページ, 経済産業省, 2022年3月28日
- (3) <https://www.4r-energy.com/>

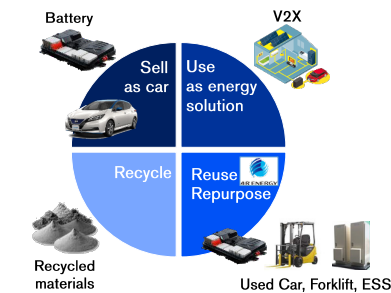


図8 持続可能なバッテリーエコサイクル

著者



大間 敦史



田崎 信一



八田 健太郎



田淵 雄一郎



諸岡 正浩



枚田 典彦

特集1:電動化

4. 電動AWD (All wheel drive) の進化e-4ORCE

平工 良三*

1. 電動化および電動AWDで目指す姿

日産は、パワーソース(動力源)の電動化とは、単に内燃機関を電動モーターに置き換えるだけとは考えていない。電動モーターは高応答、高精度で動力を制御できる高いポテンシャルを有しており、このポテンシャルを限界まで引き出し、電動モーター駆動の価値をクルマの性能で実現することを目指している。この考えは、2010年に発売したBEVのリーフから、以降のe-POWERを含むすべての100%電動駆動車に一貫して踏襲されている。さらに、従動輪側にも電動モーターを装備した電動AWDとは、単に機械的なAWDの機構を電動化した、というだけではない。パワーソースを独立して前後に2基装備した、と言う決定的な進化を含んでいる。従来の機械式AWDシステムは、内燃機関が発生する動力をトランスファーで前後に配分し、連結されたプロペラシャフトを通して機械的に従動輪へ動力を伝達することによって実現されている(図1)。

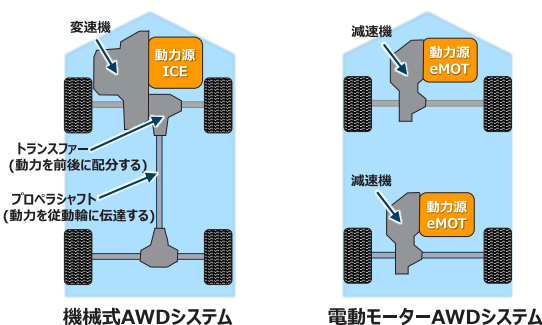


図1 AWDシステム構成比較

パワーソースが内燃機関の場合は、電動モーターのように高応答で出力を制御することが困難であることに加え、動力伝達の機械的遅れや、配分の分解能に機械的な限界がある。そのため、総駆動力のみならず、動力の配分においても0.1秒オーダーで制御することは難しい。

一方電動モーターを前後に2基装備した電動AWDシステムでは、前後の駆動力を完全に独立して高応答、高精度で制

御することが可能となる。このポテンシャルを限界まで引き出し、この特性をクルマの性能で実現することを目指したのがe-4ORCEである。

ただし、ここで言うクルマの性能とは、従来のいわゆる四輪駆動車に期待される、悪路での走破性や、滑りやすい路面での安定感など、限定的なシーンでの性能だけを示しているわけではない。e-4ORCEが目指すのは、普通の道を普通のドライバーが普通に運転している状況下にあっても、その価値を享受できることである。すなわち、e-4ORCEは“いつかのために”、ではなく、“いつものために”その価値を体感できる性能向上にも力を注いでいる。

2. 前後独立した2基のパワーソースで実現できる新たな運動制御

従来クルマは基本的に、パワーソースである内燃機関が発生する動力を、ステアリングやブレーキシステムなどが、それぞれの役割を分担して制御し、「走る」「止まる」「曲がる」といった運動性能を実現している。(図2)

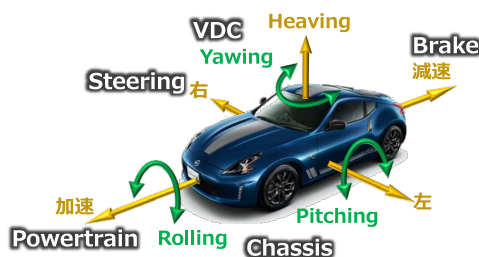


図2 クルマの動きとシステムの役割分担

しかしパワーソースが電動モーターに置き換わると、従来パワーソースが担当していなかった機能も、パワーソースが受け持つことが可能となる。例えば、モーターの回生能力を巧く制御すれば、従来ブレーキが果たしていた機能の一部をモーターが分担することができる。しかも、モーターの持つ高い制御

* パワートレイン・EV 技術開発本部

性のポテンシャルを巧く活用すれば、これまでに無い滑らかで扱いやすい特性を実現することができる。その活用例の1つがリーフで採用された“e-Pedal”である。

さらに、電動モーターを独立して前後に2基搭載する電動 AWD システムでは、パワーソースである電動モーターが制御できる動きが増える。例えば、車体のピッチングやヨーイングといった、これまで動力源が制御するとは考えられていなかった動きも、条件は限定的ではあるが制御できる対象となる。(図3)

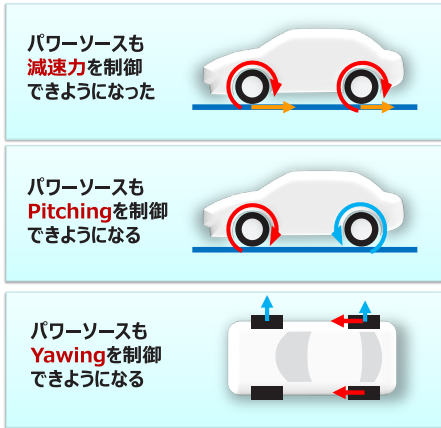


図3 電動駆動AWDが獲得した動き

e-4ORCEの技術的枠組みは、100%電動モーター駆動 AWD を前提として、車両内の各システムの役割を再定義し、電動モーターの高いポテンシャルを最大限に引き出すことで、クルマの性能を従来の内燃機関車および機械式四輪駆動車では到達できなかったレベルにまで引き上げることだ。日産は、「GT-R」の ATTESA E-TS (電子制御トルクスプリット四輪駆動システム) や「エクストレイル」のインテリジェント4×4システムなどから得た、駆動力制御とブレーキ制御、そしてシャシー制御の効果を最大化するためのノウハウを持っている。そして、電動モーター駆動とこれらの先進四輪駆動システムを開発してきた長い経験が、2つの電動モーターを使った先進的な AWD システム e-4ORCE の開発に貢献した。(図4)

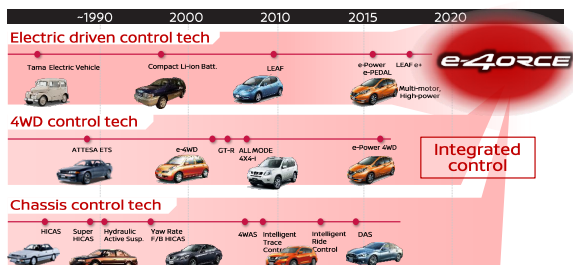


図4 e-4ORCEへ至る技術の流れ

3. e-4ORCEが提供する価値

e-4ORCEが提供する価値は、以下3つに大別できる。(図5)

- 1) ドライバーの意のままの走り
- 2) 路面を問わない安心感
- 3) 乗る人すべてに快適な乗り心地

以下、これらの価値をそれぞれ解説する。



図5 e-4ORCEが提供する価値

3.1 ドライバーの意のままの走り

クルマは4つの車輪で車体を支えているが、各車輪に掛かる荷重(輪荷重)は、路面や車両状態により、常に変化している。輪荷重に伴って各タイヤが力を路面に伝えられる能力(=タイヤグリップ力)(図6)も変化するが、これをバランスよくすべてのタイヤが限界内で余裕を持つように制御することで、安定した走行が実現できる。e-4ORCEは、路面状況や走行状況に応じて、変化する輪荷重に応じたタイヤグリップ力の変化を考慮して駆動力を前後輪に配分する。(図7)さらに状況に合わせて4輪のブレーキとの統合制御により左右の駆動力配分も制御し、減速時以外にもブレーキ力を組み合わせ、走行性能を高めている。

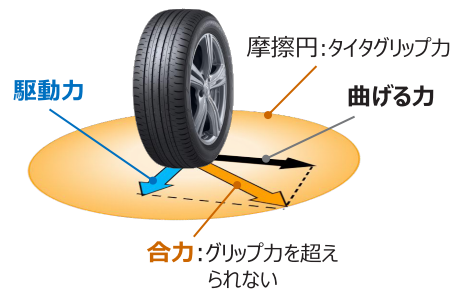


図6 タイヤグリップ力と駆動力

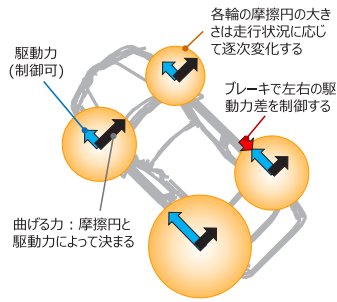


図7 駆動力で各輪の曲げる力を制御する

例えば、前輪駆動で旋回中に加速すると、クルマの走行ラインは外側にずれていく(アンダーステア)。そのため、ドライバーはステアリングを切り足す(修正操舵)か、速度を落として対処しなければならない。(図8-a) これは輪荷重で決まる摩擦円の限界値の一部を加速する駆動力で使うことによって前輪の曲げる方向の力が弱くなるために起こる。しかしこのとき、後輪のグリップ力には曲げる方向の力に対してまだ余力がある場合が多い。

この状況下においてe-4ORCEは、前輪が摩擦円の限界値を超えないように、前輪の駆動力を低下させ、低下させた駆動力を後輪に配分する。また、ブレーキとの統合制御によりクルマの挙動が安定するよう左右の駆動力配分も最適化し、ドライバーが気づかない間に自動で4輪へ最適な駆動力の配分を逐次行っている。(図8-b)

旋回終了時には、旋回中に発生したヨーを取めるために、後輪の駆動力を抜いて前輪に配分することで、後輪の横力は増加する。これにより、旋回中の慣性力でクルマが過度に内側に向く挙動(オーバーステア)を抑えられ、安定感のあるコーナーの脱出が実現できる。(図8-c)

この間、修正操舵は最小限に抑えられ、ドライバーはクルマの動きはステアリング操作に忠実で、滑らかで安定感がある、と感じると期待される。

この制御は一見すると、限界性能を試すような特殊な運転環境下でしか恩恵を感じられないではないか、と思われるかもしれない。しかし、通常の運転環境下においても、ドライバーは無意識のうちに、大なり小なり修正操舵を行いながら運転している場合が多い。これらの修正操舵をドライバーが気づかない間にクルマが制御で自動的に低減させることは、“疲れにくい”や“運転し易い”といった価値を提供すると考えている。

3.2 路面を問わない安心感

e-4ORCEは、日常生活における運転・走行シーンにおいても価値を享受できることを狙っているが、従来からAWDに期待される濡れた路面や氷結した路面、雪道など一般に走行が不安定になるような状況下においても性能を磨き上げることで、

地域や季節・天候により変化する路面状況を問わない安心感を提供する。以下、特徴的な走行シーンを例にして解説する。

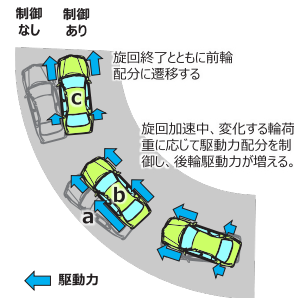


図8 旋回加速中の駆動力配分制御

滑りやすい路面での発進

滑りやすい路面で強めに発進加速を行うと、駆動輪がスリップする場合がある。それでもAWD車の場合、適切に駆動力を四輪に配分させ、圧雪路などでは発進機能には問題ない場合が多い。ただし、従来の機械式AWDの場合、滑りを検知してから、駆動力の配分を最適化、およびパワートレインのトルクダウン、必要に応じてブレーキを用いた車輪速の抑制、などを行って挙動を安定させるが、これらに手続きがクルマの挙動に反映されるまでには一定の時間を要する。結果として、ドライバーに車輪の滑りを感知させ、不安感を与える可能性が高い。



図9 滑りやすい路面(イメージ)

図10に、圧雪路にて0.3G程度の加速で発進した場合に、e-4ORCEと機械式AWDでどのような挙動の違いがあるかを表したデータを示す。機械式AWDでは、発進直後に車輪の回転数から算出される速度(車輪速)が、車体速から乖離する状況が確認できるが、これは車輪の滑りが発生していることを示している。これにより、前後G(加速度)が安定せず、車体挙動も不安定になるため、不安感を与える可能性が高い。一方e-4ORCEでは、モーターの緻密な制御により、車輪の滑りは殆ど認識できないレベルに抑えられ、Gも安定していることが分かる。

このようにe-4ORCEは滑りやすい路面での発進シーンにおいて、車輪の滑りを抑えた安心感を提供する。

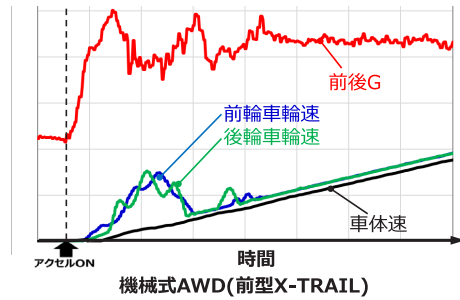
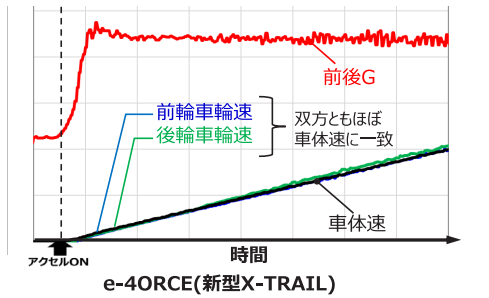


図10 圧雪路での発進

深雪路での走行

タイヤが沈み込むような深雪路では、タイヤが雪に埋まることによる走行抵抗に打ち勝つ駆動力が必要である上、タイヤと路面間の摩擦力は小さく、過大な駆動力は空転を招く。



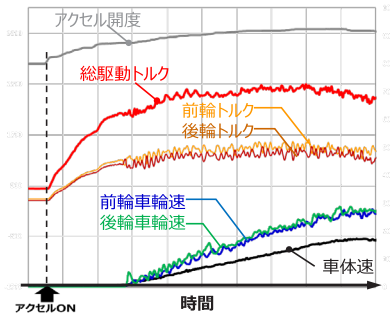
図11 深雪路での走行(イメージ)

このような条件下においては、走行抵抗に打ち勝つ駆動力を与えつつ、同時にタイヤを過度にスリップさせないための緻密なモータートルクコントロールが必要になる。e-4ORCEではタイヤの接地荷重に合わせた最適な前後のモータートルクを制御し、ブレーキ制御の協調により、安定した発進および走行を実現している。

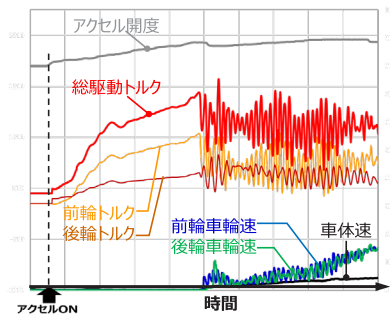
図12に、深雪路の発進においてe-4ORCEと機械式AWDでどのような挙動の違いがあるかを表したデータを示す。

このような路面では、路面との摩擦力だけでは増加する走行抵抗に打ち勝つ駆動力が得られない場合があり、積雪を後方に掻き揚げることによって、不足する駆動力を担保する。すなわち、積雪を後方に掻き揚げるための一定のスリップ率(滑

り)を維持しながら走行することになる。機械式AWDの場合、この必要なスリップ率を安定的に維持することが困難で、過度な滑りを発生させてしまう傾向にある。これを抑えるためライバーは、過度な滑りを感じるとアクセルを戻す操作を行うが、逐次変化する路面で、データからは滑りに伴うトルクハンチングが発生していることが確認でき、安定した駆動力を確保することは難しい。一方e-4ORCEでは、モーターの高いトルク応答と緻密な制御により、一定の滑りを許容しながら、滑らかに発進と加速を実現していることが分かる。



e-4ORCE(新型X-TRAIL)



機械式AWD(前型X-TRAIL)

図12 深雪路での走行

3.3 乗る人すべてに快適な乗り心地

電動モーターの持つ高い制御性のポテンシャルを巧く活用すれば、減速力に関してもこれまでに無い滑らかで扱いやすい特性を実現できることは先に言及したが、電動AWDではさらに高いレベルの快適な乗り心地の提供に貢献できる。

前輪駆動車の場合、電動車であってもフロントに搭載されたモーターで回生ブレーキをかけるため、減速力は滑らかであっても、クルマの前方がグッと沈み込む現象が発生する。e-4ORCEでは前後に搭載された2つの電動モーターの回生ブレーキを最適に制御することで、減速時のクルマの沈み込みや揺動を抑えることができる。(図13)そのため、発進と停止を繰り返すようなシーンにおいても乗員は前後の揺れを感じるものが少なくなり、車酔いが低減されるなど、快適にドライブを楽しむことができるようになりますと期待される。もちろんドライバーだけではなく助手席や後席に乗る人にもスムーズで快適な乗り心地を提供することができる。

4. まとめと今後の展望

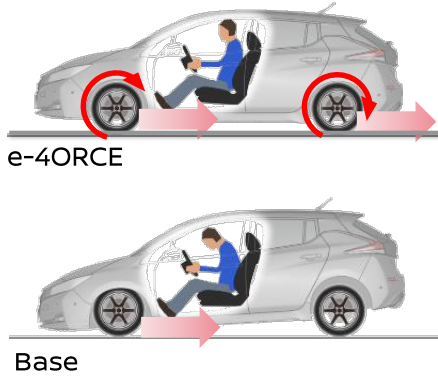


図13 減速時の姿勢制御

この制御は、前後輪のタイヤの駆動力 F_f, F_r と前後サスペンションのアンチスクッド角 θ_f, θ_r の量に応じて式 (1) に示すような車両重心回りのモーメントが発生することを利用している。(図14)

前後輪の駆動力や配分を加減速時に適切に変化させること

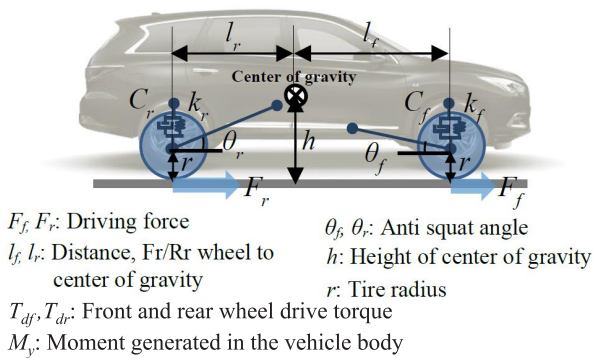


図14 前後駆動力によるピッチコントロール

で、車両に発生するピッチ角 θ を理論的には任意に制御することができ、従来の機械式AWDシステムでは不可能だった挙動を実現できる。従来技術としては、サスペンションを直接制御するエアサスペンションなどのデバイスを使った車体姿勢制御は存在しているが、本制御はサスペンションの変可機構を用いることなくピッチングの抑制を実現することができる。

$$M_y = l_f F_f \tan \theta_f + l_r F_r \tan \theta_r - (F_f + F_r)(h - r) - T_{df} - T_{dr} \quad \text{----- (1)}$$

さらに、体感的な快適性向上には、絶対的なピッチ角だけでなく、ピッチの変化率、すなわちピッチレートや、ピッチ回転中心前後位置の変化による、乗員の上下動変化も重要であることが実験的に確認されており、e-4ORCEでは、ピッチ角に加え、上記2つのパラメーターも制御し、快適性向上を図っている。

尚、この制御はe-4ORCEの正式な市場投入前に発売された、ノートのe-POWER 4WDにも先行採用された。

ここまで記述したとおり、e-4ORCEは、従来の四輪駆動車に期待されるシーンでの性能だけでなく、日常の使用で体感できる性能を磨き上げるにも力を注いできた。すなわち、四輪駆動車の進化というより、クルマそのものを進化させる技術の一つと考えている。また、繰り返しになるがこれらの卓越した性能は、日産車のラインナップにおいてはBEVおよびe-POWERとの組み合わせによる100%モーター駆動のAWD車だけが獲得できる。

電動モーターを2基装備したポテンシャルを限界まで引き出すことがe-4ORCEの狙いである、とはじめに言及したが、現時点ではまだ100%ポテンシャルを引き出せているとは考えていない。すなわちe-4ORCEはさらに進化する余地があり、日産はこの技術を進化させ、クルマの価値を向上させることを狙っていく。

電動駆動車の時代は今ほじまったばかりであり、制御技術に限らず、ハードウェアを含めた技術進化の可能性はまだまだ広がっている。従来1基であったパワーソースを、2基搭載することは決定的なハードウェアの進化であったが、将来的にはさらに3基、4基と搭載数を増やすことが既に提案されている。

これらの将来的な進化に対しても、ポテンシャルを限界まで引き出し、価値をクルマの性能で実現することによって、モビリティの進化を牽引していきたい。



図15 パワーソースの数

参考文献

- (1) 日産技報No.87 特集2: 成長するe-Power 6. 価値を高める電動AWD技術, 平工 良三 他2名
- (2) 日産技報No.88 特集2: 次世代のフラッグシップARIYA 7. 日産が考える電動AWDの進化「e-4ORCE」, 富樫寛之 他2名
- (3) 日産技報No.89 特集1: 「タフギア」×「上質」新型エクストレイル 4. 本格SUVへのe-4ORCE適用, 片倉 丈嗣 他1名
- (4) 自動車技術会2022春季大会: ドライビングシミュレータとCAEを用いた電動AWD車加減速挙動設計手法の開発, 町田 直也 他3名
- (5) 自動車技術会2022春季大会: 前後2モーター車における旋回ライントレース性向上のための制駆動力統合制御システムの開発, 平 諒介 他3名
- (6) 15th International Symposium on Advanced Vehicle Control, AVEC'22: Pitching Motion Control for Dual Motor AWD Vehicles to Provide both Acceleration Performance and Ride Comfort, Tadashi Iwamoto 他2名

著者



平工 良三

特集1: 電動化

5. e-POWERのEV-nessを創り出すシステム技術

羽二生 倫之* 伊藤 知広* 澤田 孝信** 秋山 秀勝*** 伊藤 あずさ*

1. はじめに:e-POWERのシステム制御コンセプト

e-POWERはEV¹の高出力なモーターによる気持ちよい走りより多くのお客さまに楽しんで頂けることを基本コンセプトとして、開発を進めてきた。本章では、発電のためのエンジンを積むe-POWERにおけるエンジンの始動タイミングや、電力配分などのシステム制御技術について解説する。

e-POWERの開発で目指した方向性は、他のシステムのないEVらしい走行フィーリングである。日産自動車におけるEVのKey Elementsは、以下の3つである。

- Quietness: エンジン車にない圧倒的な静粛性
- Smoothness: ショックの無い滑らかな加速、減速フィール
- High Response: ドライバー操作に遅れなく反応し、かつ、操作量に的確にリンクするトルク特性

上記の性能を達成する方策として、e-POWERでは、バッテリーとエンジンの電力供給をコントロールするエネルギーマネジメントと、モーター駆動らしいトルク特性を実現するパワーマネジメントの両システム制御を軸として開発した。

Quietnessの要素では、発電要求によるエンジンの始動-停止のタイミングとその作動音の違和感を無くすエネルギーマネジメントが重要である。また、SmoothnessとHigh Responseの要素では、ドライバー要求に忠実なモータートルク指令の演算と、そのトルク指令に応じた電力をエンジンおよびバッテリーから最適に供給するパワーマネジメントと、消費したバッテリー電力を再充電するエネルギーマネジメントが重要である。

本章では、e-POWERシステムの基本制御機能であるエネルギーマネジメントとパワーマネジメントの両輪の進化に伴う性能向上について説明する。

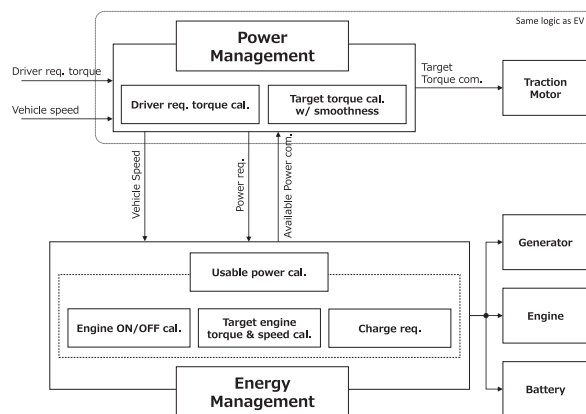


図1 e-POWERシステム制御概念図

2. e-POWERのシステム制御の概要

図1にe-POWERのシステム制御の概要を示す。e-POWERのシステム制御は同じモーター駆動車両である、BEV²をベースとしており、駆動力を演算するパワーマネジメントはBEVと同じ制御を使用している。電力量マネジメントを行うエネルギーマネジメントは、バッテリー関係の制御方式はBEVと共通であり、エンジン+発電機はe-POWER固有の追加制御ブロックである。BEVの場合は、上記のエンジン+発電機の代わりに充電システムが組み込まれている。

駆動力演算部であるパワーマネジメントを実績のあるEVのものを活用しているため、リーフの開発で培った、滑らかで高応答の駆動力特性をe-POWERでも実現している。

また、エンジン回転数を自由にコントロールできるe-POWERでは、ドライバーの加速要求に応じて、エンジン回転上昇スピードを変更し、エンジンの音を加速感の演出に活用した。電動車のレスポンスの良さ、力強さに加え、エンジン音の上昇感による加速の伸び感を具現化した。

* 車両計画・性能計画部 ** 技術企画部 *** パワートレイン・EV性能開発部

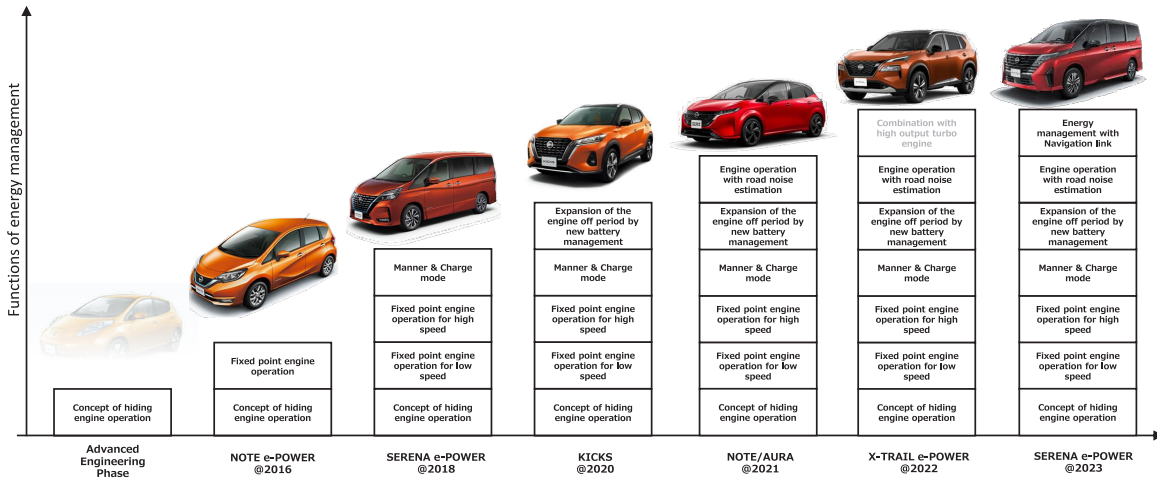


図2 エネルギーマネージメントの進化

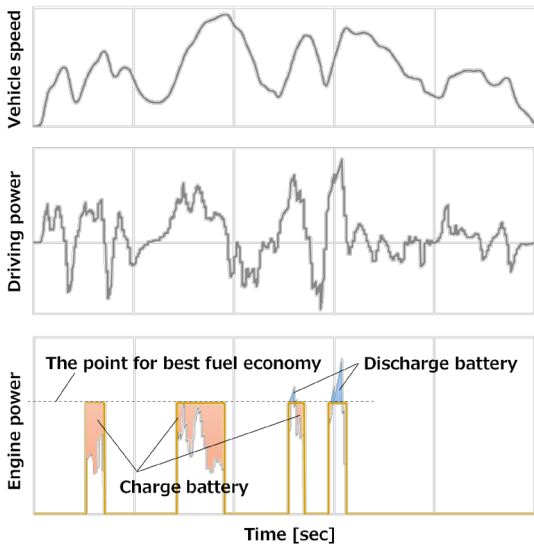


図4 エンジン動作点の決め方

以降、いかにエンジンの存在を気付かせないようにシステムを動かしてきたのかについて説明する。

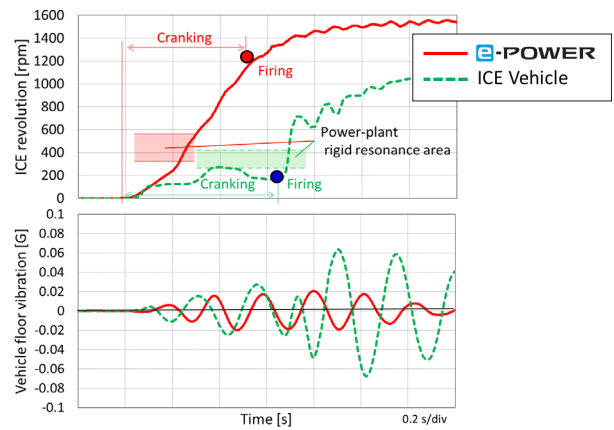


図5 エンジン点火タイミングとフロア振動の関係

3. 静粛性への挑戦:エンジンの存在を気付かせない術

e-POWERにおいて、エンジンとバッテリーの制御方法が、静粛性、燃費や動力性能、暖房冷房などの多岐に渡る機能、性能に影響する。このエンジンの動作とバッテリーの充放電量をコントロールする制御機能をエネルギーマネージメントと呼ぶ。e-POWERの技術の進化は、このエネルギーマネージメントの変遷とのつながりが強く、図2にその進化を示す。

e-POWERの静粛性は、先行車両で構築した、「エンジンの存在をなるべく隠すため、エンジンの発電は車両暗騒音以下で粛々と実施する」というコンセプトがベースである。そのため、エンジンの作動領域は可能な限り、高車速で実施する方式であるが、先も述べたように、様々な要件からエンジンの始動要求がでるため、暗騒音の高い高車速域のみでの発電ということにはならない。

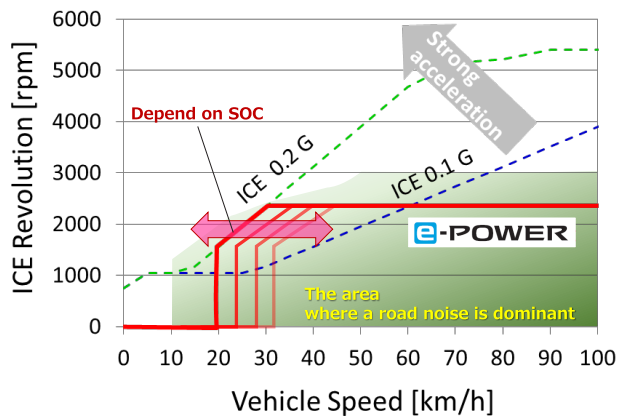


図6 ノートe-POWERにおけるロードノイズのエンジン回転数の概念図

3.1 初期のエネルギーマネージメント

2016年発売のノートe-POWERのプロジェクトを開始する時点で、コンパクトカーの車載要件、コスト要求に見合うように、先行車両に対し、バッテリーの出力および容量を大幅に小さくしたシステムとして開発を進めることとなった。先行車両で開発した、エンジンの作動音を車両の暗騒音で隠すというコンセプトをベースに、高い燃費性能を目指した。

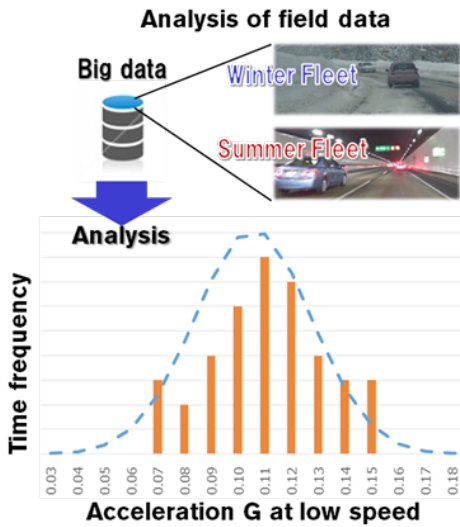


図7 日本市場における加速度分布

エネルギーマネージメントの基本的なコンセプトは、走行に必要な電力を最も高効率な発電で確保することである。その動作概要を図4に示す。e-POWERは車速に拘束されずにエンジン動作点を自由に選べるため、車両要求出力に応じて最良燃費線上の動作点で発電を行うことができる。また、車両要求出力と最良燃費点発電出力の差をバッテリー入出力電力で補填することで最良燃費点の使用頻度を高め、燃費を向上させている。

さらに、低速領域では、エンジンでの発電を停止し、バッテリーからの供給電力のみでEV走行³できるように設定し、バッテリーのSOC (State of charge)が高い状態であれば、より高速領域でもEV走行を可能とした。エンジンの作動条件が車速に拘束されないe-POWERでは、より高車速までEV走行ができる。

また、エンジン始動の振る舞いも静粛性に重要な要素である。エンジンは低回転数領域に共振帯を持っており、この領域の滞在時間が長いとフロア振動を発生させ、静粛性に大きな影響を与えてしまう。e-POWERでは、大出力の発電機をエンジンスタータとして用いることにより、図5に示すように、パワートレインの共振回転数を素早く通過させるため、エンジン始動時の振動を抑えることができる。

3.2 市場実績から見出した新たなシステム制御

ノート、セレナでのエネルギーマネージメントは、加速意図に忠実で、アクセルとのエンジン始動の連携を重視する方式であった。より、静粛性を高めるために、キックスではこのコンセプトを変更し、よりエンジンを停止している領域を拡大しながら、従来通りのSOCマネージメントを行う制御を開発した。

実走行のデータより、日本市場での交差点右折や信号待ちからの発進などの比較的加速が継続しないようなシーンでは、必要となるエネルギーが小さくて済むため、エンジンによるSOC回復の発電要求は小さいと考えられた。

それにより、SOCが低い領域まで極力EV状態を保持して、よ

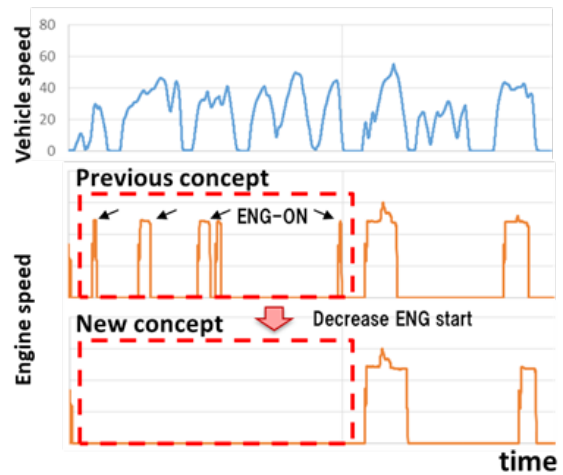


図8 新旧制御によるエンジン作動状態の比較

りドライバーにEV走行の静寂性を訴求できるエネルギーマネージメントのコンセプトとした。

上述の制御を具現化するポイントは、EV走行を維持する上限加速度と、許容SOCをどのように設定するかである。これらのバランスを最適に設定しなければ、加速時のバッテリーアシスト電力の低下や確実にエンジン停止したいシーンでの発電継続など副作用が生じてしまう。

EV許可領域の適正化のため、ノートやセレナでの実走行データを数十万km収集し、それらのデータ分析を行い、日本市場における加速度の分布を調査した。図7に日本市場における約30km/h以下の低速域での加速度分布を示す。一般的な使用の中では0.15G程度の加速度でEV走行を保持できれば概ねエンジンの始動を回避できることがわかる。また、必要な車速域ごとの1回の加速-減速当りでの消費エネルギーなどのデータを得ることができ、エンジン始動ポイントの適正化も可能となった。

市場データの分析に基づいた新コンセプトのエネルギーマネージメントの採用により、エンジンの発電によるエネルギー供給タイミングをより高車速側にシフトさせることが可能となった。

このエネルギー供給タイミングを高車速側にシフトさせることは2つの効果がある。一つ目は、暗騒音の低い低車速での始動頻度の低減（エンジンの“短時間での始動-停止”の頻度を低減し）、二つ目は、高車速でまとめて発電することで、エンジンの始動停止頻度を下げ、発電システムの効率的な使用を可能にしている。

新旧のエネルギー管理でのエンジン動作を図8に示す。低速域でのエンジン始動頻度、特にエンジンの短時間での始動-停止の頻度を削減することができ、30km/h以下の領域では、旧式のエネルギー管理に対して、約7割のエンジン始動を削減することができた。本制御による静粛性向上の影響は大きく、e-POWERの大きな進化の一つと言える。

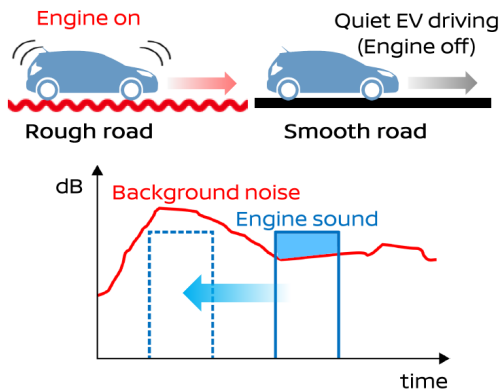


図9 ロードノイズ推定によるエネマネのコンセプト

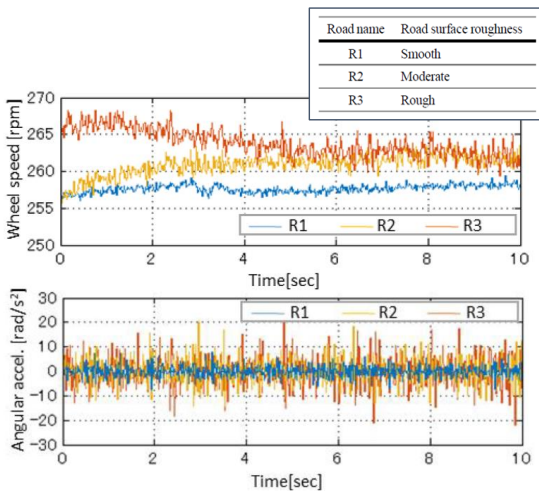


図10 路面粗さとタイヤの角加速度の関係

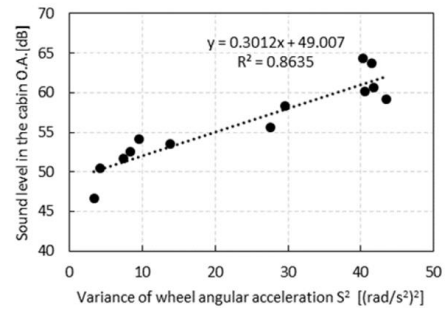


図11 タイヤ角加速度とロードノイズの関係

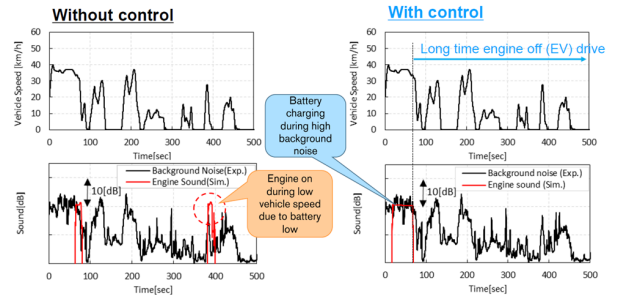


図12 路面検知制御の有無によるエンジン始動の比較

3.3 積極的にロードノイズを推定するシステム制御

これまでのエネルギー管理は、市場データの分析結果など、Off lineで設置した条件を基準に、ドライバー操作、SOCなどから、エンジンの始動タイミングを決めてきた。さらなる静粛性の向上として、実路での路面の粗さに起因するタイヤノイズに着目し、ロードノイズが発電時のエンジンノイズを超えるときに発電を行い、逆に路面が滑らかなときにEV走行を行う新たなシステム制御を考案した。図9にロードノイズ推定によるエネルギー管理のコンセプトを示す。

経験上、路面が荒いほどタイヤの発するロードノイズは大きいように感じられてきた。そこで、路面の粗さを推定する手法として、タイヤの角加速度に着目し、路面との関係性を計測した。

図10に路面粗さとタイヤの角加速度の関係を示す。路面粗さが大きいほど、タイヤの角加速度は大きく変動していることが明らかとなった。続いて、図11にタイヤの角加速度とロードノイズの関係性を示す。この図からもわかるように、タイヤの角加速度とロードノイズは強い相関があることが明らかとなった。

そこで、タイヤの角加速度をリアルタイムで計測し、所定時間以上この角加速度の大きさが連続した場合に、路面が荒く、ロードノイズが大きいと判定するロジックを開発し、2020年発売の新型ノートに採用した。図12に路面検知制御の有無によるエンジンの始動タイミングの比較を示す。本制御を用いることで、ロードノイズが高い領域でエンジンによる発電制御を行うことができ、静粛性をさらに向上させることが可能となった。

体感的には、エンジンの始動のタイミングがわからず、気が付けば、SOCが回復しているような印象を提供できたと考えている。

また、本制御は、ロードノイズが大きい領域でまとめて発電するため、エンジンの始動回数を減らす効果もあり、始動に伴う過渡的な燃料消費量を削減でき、燃費にも貢献できている。

本制御は、リアルタイムでシステムを最適化するものであり、外界情報を用いた初のエネルギーマネジメントである。このように従来のドライバー要求やシステムの状態以外の情報で、賢くシステムを動作させる方策を「知能化技術」と定義し、新型ノート以降はこのような知能化によるさらなるエネルギーマネジメントの改善を行っている。

3.4 NAVI 情報を活用したシステム制御

次に、NAVI 情報を活用し、走行エネルギーの先読みを行い、目的地近傍でのEV 走行を積極的に可能とするエネルギーマネジメントの開発に着手した。

図13に先読み充放電制御のコンセプトを示す。ナビ上で目的地を設定すると、ナビから、ルート上の約7km先までの勾配や平均車速情報をシステムコントローラに送り、そこまでの消費電力量を算出する。このデータは走行中に随時更新され、都度、エネルギー消費量を推定し、それに基づき、バッテリーのSOCをコントロールする。

これらの情報を元に主に2つの機能を開発した。1つは、下り勾配でエネルギー回収を行うために、下り勾配になるまでに、バッテリーのSOCを下げる制御。もう一つは、目的地の前後500mで積極的にEV 走行ができるように目的地周辺でSOCを上げる制御である。

図14に下り勾配でのナビ情報とバッテリーSOCの関係を示す。下り勾配に到達する前に、回生で得られるエネルギーを演算し、その分のバッテリーSOCを下り勾配を走る前に下げしておく。その結果、下り勾配走行中にエネルギーを、バッテリーを満充電とさせることなく、つまりは、無駄にすることなく回収できる。

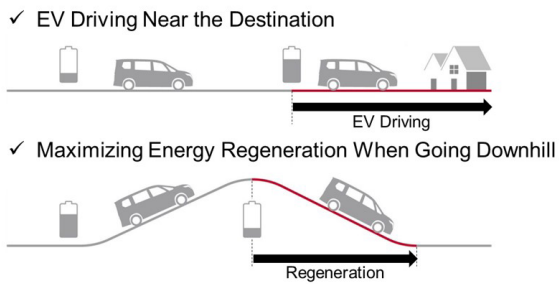


図13 先読み充放電制御のコンセプト



図14 ナビ情報とバッテリーSOCの関係図

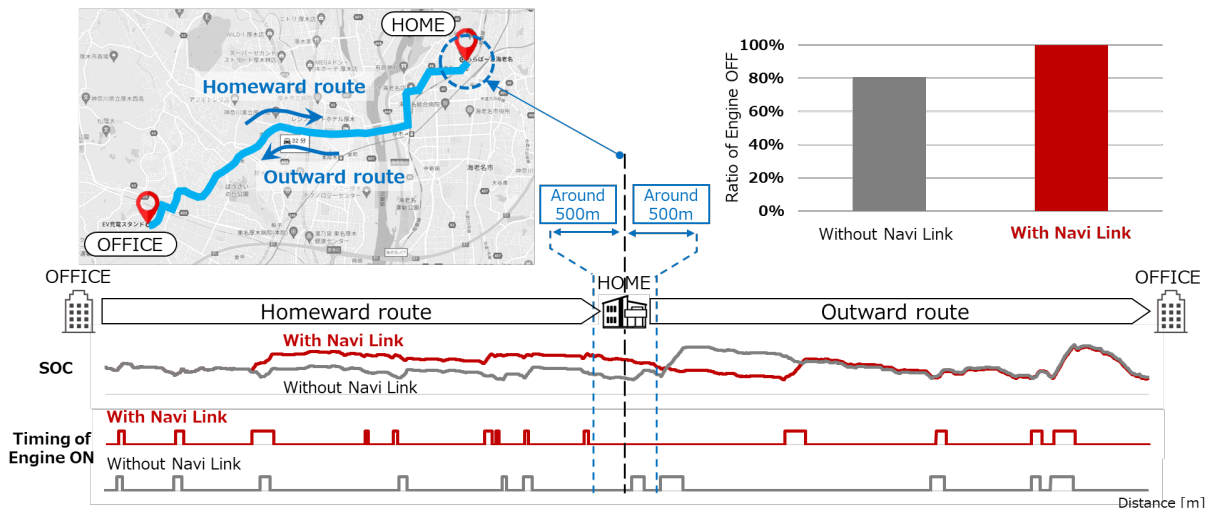


図15 先読み充放電制御の効果(目的地前EV走行制御)

図15に本制御のもう1つの機能である目的地前EV走行制御の効果を示す。今回はほぼ平坦な市街地を約10km走行するシーンで評価を行った。先読み充放電制御により、SOCは目的地に向けて従来制御よりも高めに推移し、目的地となる自宅の前後500mでEV走行を継続する結果となった。特に特徴的なのが、自宅からの会社への復路での起動直後の連続発電状況の有無である。自宅近傍ではより静かに走行させたいという狙いが具現化できている。

また、本制御により、エンジン停止時間は従来制御に対して約2割増加している。主な違いは目的地前後約500mの領域でのエンジン停止であり、経路全体での静粛性に貢献できている。本制御は新型セレナから採用されている。

これらのように外部より様々な情報を取り込み、より静粛性などを向上させる知能化技術は今後の注力領域となると考える。

4. 心地よい加速への挑戦:電力供給と加速感の両立

リーフで培った駆動力制御は、市場で好評を得ており、この流れを汲んで、e-POWERのパワーマネジメントは開発された。しかしながら、電力供給がバッテリーのみであったEVに対し、e-POWERではバッテリーとエンジンの双方から電力供給されるため、エンジンの発電電力の遅れが動力性能に影響する。

本章では、これらの課題に対する対策を説明し、e-POWERの加速感の向上につながるシステム制御技術を説明する。

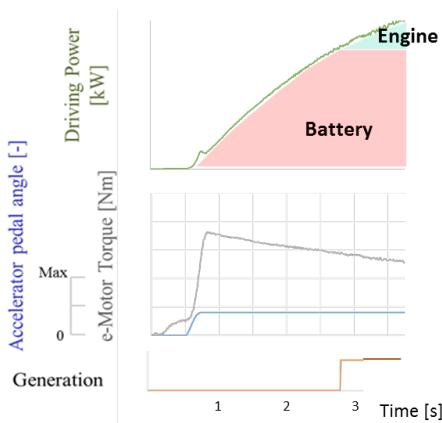


図16 高SOCでの電力配分

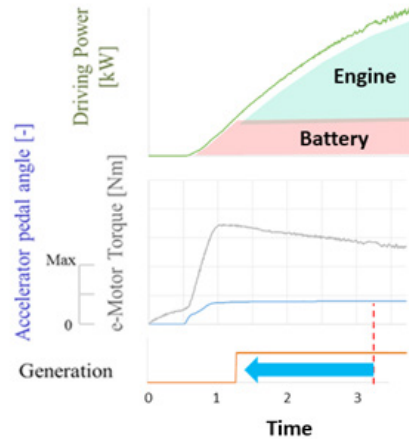


図17 低SOCでの電力配分

4.1 SOCによらない加速性能の実現

BEVに対してエンジンからの電力供給を受けて駆動するe-POWERでのパワーマネジメントの改善ポイントは、バッテリーの出力が低下したときにも、加速感の低下を感じさせない制御である。

図16はバッテリー充電量SOCが高く、出力に十分に余裕ある状態での加速時エンジン始動状態を示しており、可能な限りエンジン発電を抑制してEV走行を維持して、走行できるようにしている。一方、図17ではSOCが低く、バッテリーだけで十分な出力を確保できなくなる条件で、早めにエンジン発電を開始して加速感の低下を感じさせないようにしている。このような制御により、システム状態によらず同様の加速感を実現させている。

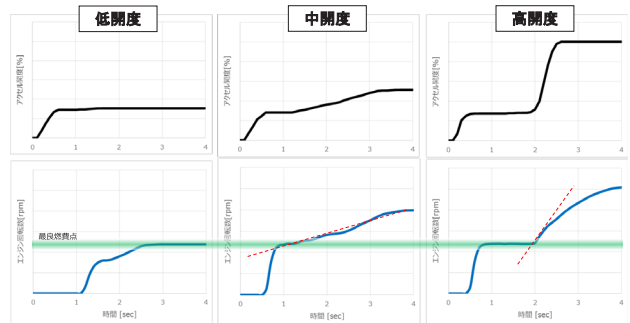


図18 加速意図に応じたエンジン回転数の振り舞い

4.2 加速感と燃費の両立

前述のようにe-POWERでは、加速意図が強いときにエンジンを併用することで車両の要求パワーを満たす。

エンジンの作動音の高まりは、EV-ness⁴の静粛性に反する部分もあるが、エンジン回転数を自由に制御できるe-POWERでは、アクセル開度などに代表させるドライバーの加速意図に応じて、加速感を演出するようにエンジンの回転数の変化を設計した。

図18にアクセル開度ごとのエンジン回転数の振る舞いを示す。燃費性能も重要であるので、開度が低い場合は、最良燃費点を維持できるように制御し、燃費と静粛性の要求をバランスさせる。加速意図の強さに応じて、回転数の上昇率および目標回転数は加速感を向上させ、駆動で要求される電力を確保しつつ、エンジン音による加速感を演出する。

これらの制御は、小排気量のNAエンジンを有するe-POWERで用いられ、よりEVに近い駆動力をどのような状況でも発揮できるように開発された。

4.3 ハイパワーシステムでの加速感の向上

新型エクストレイルでは、初のターボエンジンとの組み合わせとなった。ターボエンジンの特徴はトルクの向上であるが、過給圧が上がるまでのラグが存在する。e-POWERでは、バッテリーのアシストを積極的に活用し、スムーズで力強い加速を実現する。

図19にVCターボを組み合わせたe-POWERの加速特性を示す。バッテリーアシストによるレスポンスに優れた加速の立ち上がりを見せるが、その後続くエンジントルクが加算されるとターボラグにより、加速の棚、つまりは加速が伸びない領域が発生してしまう。そこで、過給圧の高まりに連動したバッテリーアシストを行うとともに、エンジン回転数をより加速感に連動するように上昇率を抑制することで、滑らかで力強い加速力と、気持ちの良いエンジン回転の上昇の両立を実現した。

図20に他社の従来型HEVの4WD車両との加速時のエンジン回転数の比較を示す。図中に評価者によるエンジン回転上昇と加速のシンクロ感を感じる、感じないポイントを示している。

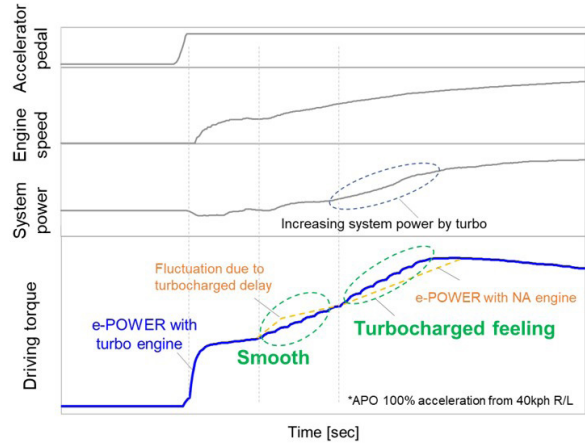


図19 VCターボとの組み合わせ特性

他社の車両はエンジンがNAということもあり、素早くエンジン回転数を上げて所望のパワーを供給するような設定が成されている。そのため、車両の加速とエンジン回転上昇の関係が悪く、エンジン回転数が上限に張り付いた状態で車両だけが加速するような違和感を生じている。そのため、シンクロ感を感じない領域のさらに上にエンジン回転数が存在している。

一方、エクストレイルでは上述の回転上昇と加速度のバランス制御（これをリニア制御と称する）により、エンジン回転数の上昇を抑え、シンクロ感を感じる領域に収めることで、加速の伸び感の演出に一役買っている。

このリニア制御により、Global Modelであるエクストレイルは、エンジン回転の振る舞いを気にされる欧州のお客さまにも好意的に受け入れられている。

5. さらなるシステム制御の進化

本章で説明してきたエネルギーマネージメント、パワーマネージメントは、今後もさらに磨かれて、次世代のe-POWERに採用される計画である。

今後のe-POWERのさらなる進化は、主に知能化による実用域での価値向上に主眼が置かれる。ますます厳しくなる排気規制や、燃費競争などに立ち向かうためにも、これまで以上に活用できるデータの範囲を広げ、例えば、リアルタイムでのクラウド情報からの渋滞対応制御や、空調などに関しても最適化が検討されると考える。

エンジンが車輪と拘束されていないe-POWERは自由度が高く、制御による性能向上が比較的容易である。一方で、自由度の高さが多変数制御による干渉問題を生む可能性も孕んでいるため、複雑化する制御をいかにうまく開発するのかという課題も取り組まなければならない。昨今、話題となっているAIなどの活用により、さらなる性能や機能の飛躍もあり得るの

で、新しい開発方針に取り組みながら、お客さまにさらなる価値提供を実行してゆきたい。

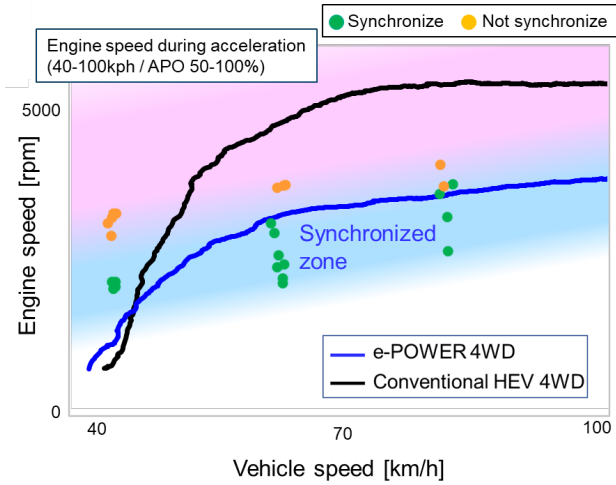


図20 リニアフィールの比較

用語解説

- *1 EV：電機モーターのみで走行する車
- *2 BEV：バッテリー出力のみで走行するEV
- *3 EV 走行：e-POWERにおいて、エンジン停止状態でバッテリーの出力のみで走行すること
- *4 EVness：電気モーター駆動らしい、静かで力強く滑らかな走りのフィーリング

参考文献

- (1) Takaoka, et al: Development of a Brand-New Hybrid Powertrain for C-segment SUV
- (2) Sawada, et. al: Improvement of Quietness in the Cabin by Engine Control based on Road Noise Estimation for 100% Electric Drive Hybrid System, JSAE Spring Annual Congress in 2021
- (3) Akiyama, et.al: Development of second-generation system for 100% Electric Drive HEV, JSAE Spring Annual Congress in 2021

著者



羽二生 倫之



伊藤 知広



澤田 孝信



秋山 秀勝



伊藤 あずさ

特集1:電動化

6. 持続可能なモビリティに向けた e-POWER 専用エンジン熱効率50%への挑戦

鶴島 理史*

1. はじめに

地球温暖化の防止と汚染物質の削減への要求は急速に高まり、持続可能な社会の実現は今や世界中で共通の目標であり緊急の課題である。日産は持続可能な社会を実現するため、2つの柱のモビリティソリューションを推進している。第一の柱は、Tank to Wheel (TtW) までCO2排出を行わない Battery Electric Vehicle (BEV) であり、第二の柱は高熱効率のエンジンを搭載した Series Hybrid Electric Vehicle 「e-POWER」である。日産は、e-POWERを現行のエンジン車両からBEVに移行するための橋渡しとして導入し、CO2の Well to Wheel (WtW) 排出量をBEVと同等の水準に削減することを目指している。

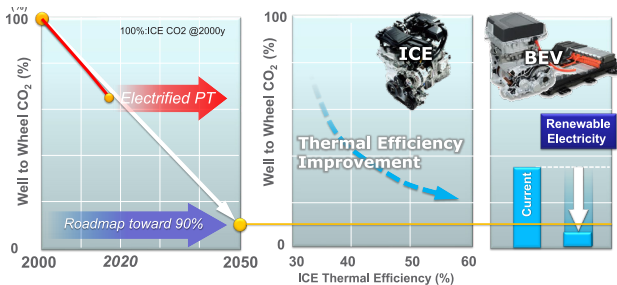


図1 NISSAN WtW CO2 reduction strategy

WtW CO2排出量をBEVと同じ水準にするため、e-POWERシステムを使用したエンジンの正味熱効率 (BTE) を50%以上に設定することを最終目標とした。これに対し、将来の持続可能なモビリティに向け、車両走行状態と独立しエンジン動作点を選択できるというe-POWERの優れた特性に合わせたエンジン技術ロードマップを策定し、開発を行っている。本稿では、先ずe-POWER専用の高熱効率エンジンコンセプトとその開発目標について説明する。次に、高希釈燃焼に対応した新しい燃焼コンセプト「STARC」(Strong Tumble and Appropriately stretched Robust ignition Channel) につ

いて詳しく紹介し、 $\lambda=1$ で45%の熱効率を実現するための技術と検証結果を説明する。新燃焼コンセプトSTARC、e-POWER専用の吸気システム、フリクション低減を備えた1.5L 3気筒エンジンでは、43%の熱効率を実機実験にて実証した。新コンセプトエンジンと熱回収システムの組み合わせにより、45%の熱効率の実現を見込んでいる。さらに、本稿では熱効率50%に向けた更なる効率改善についても論議したい。

2. e-POWER専用エンジンの熱効率向上の可能性

2.1 e-POWER専用エンジンと開発目標

e-POWERはシリーズハイブリッド運転により、エンジン出力を駆動系に直接伝達せず電気エネルギーとしてバッテリーに蓄えるため、車両走行状態と独立しエンジン動作点を選択できることが特徴である。e-POWERという新概念エンジンの概略図は図2に示されており、基本的なコンセプトは以下のアイデアで構成されている。第一に、BEVと共用化した高出力モーターにより、エンジンは低速高負荷トルクを必要としない。第二に、エンジンはシリーズハイブリッド運転に適用されるエンジン動作領域全体で最高熱効率点と最適な熱効率ラインを保つことができ、かつ触媒昇温後の低負荷領域は運転しない。また、e-POWERはアイドル運転を必要とせず、充電運転を制御することでエンジンの低回転速度化も可能となる。これらの運転動作条件により、エンジンの仕様は2つの運転ポイント、すなわち最適な熱効率ポイントと最大出力ポイントで最適化可能となる。

* パワートレイン・EV 先行技術開発部

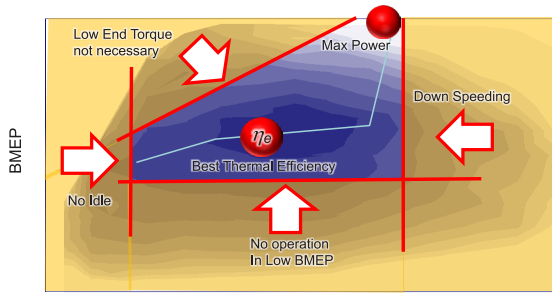


図2 Schematic of e-POWER engine operation and dedicated engine concept

従来の研究に基づき、エンジンの改良と廃熱回収も含めたシステムとしての最大熱効率の開発目標を45%に設定し、目標の $\lambda=1$ 比出力は80 kW/Lに設定した。これは熱効率と出力($\lambda=1$)のトレードオフの観点から、現行のエンジンと比較し、卓越した位置づけとなる(図3)。

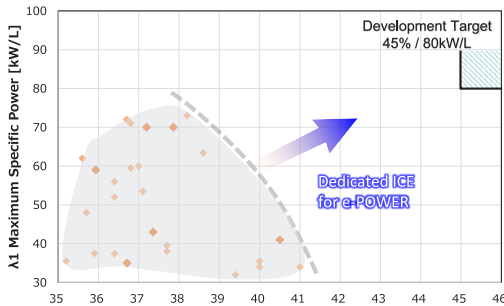


図3 Positioning of the new concept engine development target in brake thermal efficiency vs maximum specific output power ($\lambda=1$) scatter band

図4に、本専用エンジンコンセプトによる熱効率向上のロードマップを示し、図5にコンセプトエンジンの概要を示す。ロングストローク化、燃焼改善、フリクション低減などの基本的な改善技術は、従来のエンジンの改善と共通の要素である。しかし、シリーズハイブリッド運転の特性により、e-POWERでは高希薄燃焼、専用過給機、およびフリクション低減による更なる熱効率向上が可能となる。その結果、エンジンとして80 kW/Lの高い $\lambda=1$ 比出力を実現しながら、非常に高い熱効率43%の達成目標を得ることができた。

以下のセクションでは、e-POWER専用エンジンの詳細について説明する。

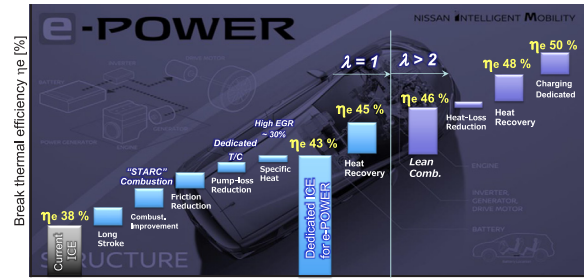


図4 Thermal efficiency roadmap toward 45% with $\lambda=1$ and 50% with $\lambda > 2$ (RON95)

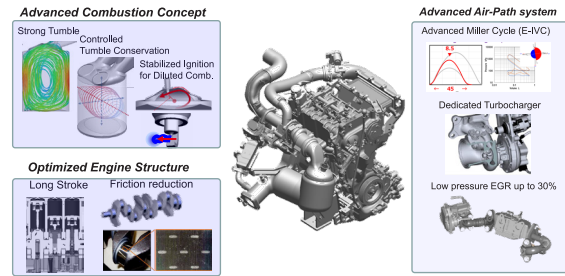


図5 New engine concept dedicated for e-POWER

3. 新燃焼コンセプト「STARC」

新しい高効率コンセプトエンジンの主要技術として、最大30%のCooled EGR、 $\lambda > 2$ での高希薄燃焼の達成に向けて新たな燃焼技術開発に取り組んだ。高希薄燃焼における安定度向上すなわちサイクル変動低減を実現するため、初期火炎核の安定形成によって着火遅れ期間のばらつきを低減するメカニズムに着目し、サイクル変動の少ない強いタンブル流による放電チャネル安定化の燃焼コンセプト“STARC”(Strong Tumble and Appropriately stretched Robust ignition Channel)を策定した。

3.1 高希薄燃焼条件下における安定燃焼を実現するためのキー技術

図6に、新しい燃焼コンセプト“STARC”の概略を示す。この新燃焼コンセプトは、Cooled EGRにより最大30%まで希釈した吸気条件下において急速燃焼を実現し、高圧縮比化、高比熱比化、冷却損失低減のいずれにも大きく貢献する技術として開発された。

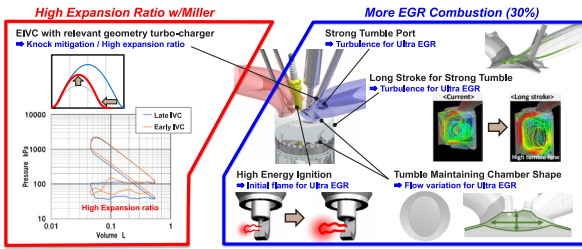


図6 New combustion concept "STARC" for highly diluted combustion

高希釈条件下で安定した燃焼を実現するためには、急速かつ安定した初期火炎伝播を実現することが重要である。そのため、点火放電チャネル挙動および初期火炎形成を観察するため、ボアスコープによる筒内の可視化を実施した。図7に可視化システムの概要を示す。高速度カメラはPhotron製FASTCAM SA-2Xを用い、点火プラグ部周辺を観測するため燃焼室側壁より筒内可視化用ボアスコープを挿入し、放電および初期火炎による発光を直接撮影した。

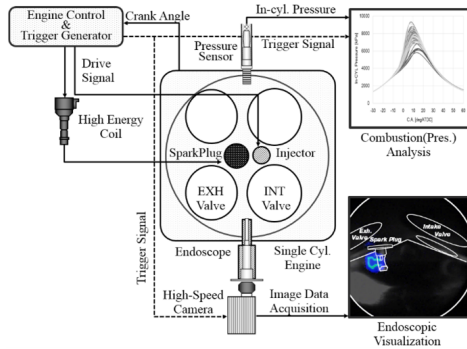


図7 Visualization system of spark channel and initial flame kernel

図8に初期火炎伝播挙動の可視化画像を、 $\lambda=1$ 希釈なし燃焼 (a) と $\lambda=2$ 燃焼 (b, c) で比較して示す。 $\lambda=2$ 燃焼においては、 $\lambda=1$ 希釈なし燃焼と比較し火炎伝播が緩慢であり初期火炎核の形成にサイクルばらつきがあることが確認された。また初期火炎核の形成が緩慢なサイクル (c) では、その後部分燃焼 (パーシャルバーン⁽⁷⁾) につながることを観察されており、初期火炎核の形成がサイクルばらつきに対し重要な因子であることが確認された。

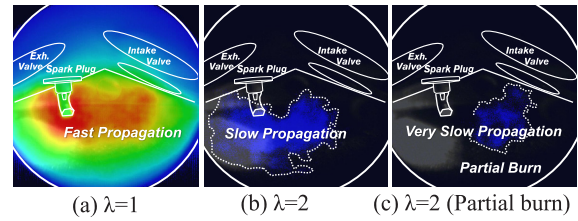


図8 Initial flame propagation with $\lambda=1$ w/o dilution (a), $\lambda=2$ slow propagation (b), $\lambda=2$ very slow propagation (c)

初期火炎核は点火プラグ部流速に伸長された放電チャネルによる空間的なエネルギー供給により形成される⁽⁸⁾。図9にプラグ部流速違いにおける放電チャネル挙動を比較して示す。流速が低い場合 (a) は、放電チャネルが伸長しないためにプラグ部周辺への熱エネルギー供給が不足となり、また流速が高い場合 (c) は、放電チャネルの吹き消えによるエネルギー供給不足となり、いずれの場合も初期火炎核形成が緩慢となりサイクルばらつき増大につながる。つまりサイクルばらつき低減には、点火プラグ部流速をサイクル毎に安定して形成することが重要であり、本開発では高希釈燃焼実現のために「サイクル変動の少ない強いタンブル流とそれによる安定した初期火炎核の形成」を目指した。

図10に高希釈燃焼を安定化させるため点火と筒内流動形成のコンセプトを示す。燃焼安定化の鍵は、初期の炎核成長のタイミングでスパークプラグ周りの適切な流れ方向と速度を提供し、サイクル変動を最小限に抑えることである。このコンセプトは、筒内流動設計と高エネルギー点火システムの組み合わせによって実現した。さらにノッキングの緩和のため、未燃領域温度を低く保つことが可能な早期吸気弁閉時 (E-IVC) を採用している。

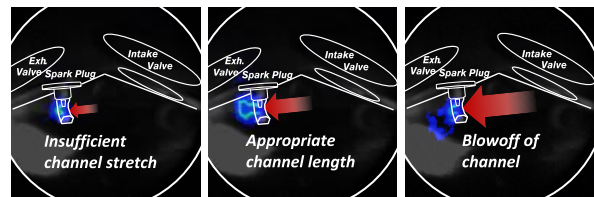


図9 Spark channel behaviour under different flow velocity at the spark gap

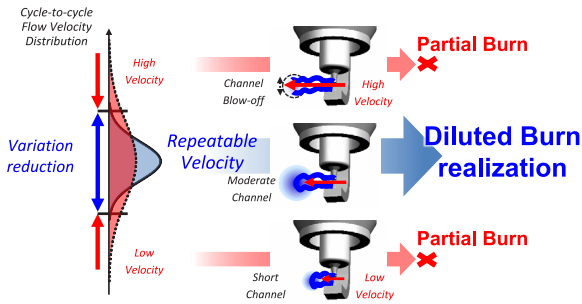


図10 Desirable flow to realize stabilized ignition for highly diluted combustion

3.2 シリンダー内流動設計

高希釈条件下で急速かつ安定した燃焼を実現するには、すでに述べたように、点火栓周りで適切な流動を提供し、サイクルバリエーションを最小限に抑える必要がある。また、希釈されることにより低下した層流炎速度を補うために高い乱流強度が必要となる。点火プラグ部流速をサイクル毎に安定形成することを目的とし、図11に示すように筒内でのタンブル流動形成過程に沿って3点の流動設計指針を仮定した。

1. タンブル流を上面に沿わせ剥離なく導入する
2. タンブル流を点火時期まで保持する
3. 点火プラグに向かう流動の方向を整える

なお筒内流動としては、膨張行程で旋回流が残存する場合冷却損失増大につながる懸念があるため、本研究では上死点後に旋回成分が減衰・崩壊しやすいタンブル流を採用した。次節より各設計指針における要求機能と具現化するための技術を説明する。

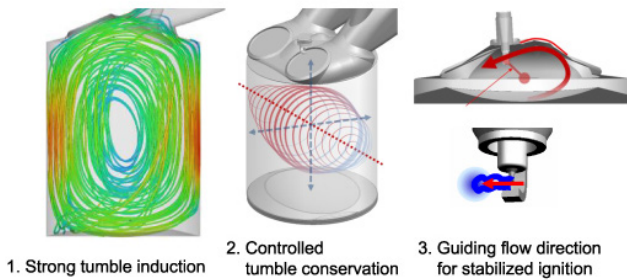


図11 In cylinder charge motion design to realize STARC combustion concept

3.2.1 強タンブル生成手段

筒内流動はピストン下降に伴い吸気ポートから筒内へガスが吸い込まれる際の運動エネルギーが発生源となるため、その部位でいかにエネルギー損失なくかつ変動なく筒内に吸入するかが重要となる。そこで「吸気ポート上面から燃焼室排気ペントルーフ面に沿い、流れが剥離せず導入されること」を設計指針とし、バルブ挟み角の拡大と合わせコールドスプレーによ

るバルブシートレス技術を採用した。

バルブシートレスにより吸気ポート形状の設計自由度が向上することで、図12に示すようにポートから燃焼室にかけて段差のない面構成が可能となる。図13に定常流解析における流速および乱流運動エネルギー (TKE) 分布を、バルブシートレスとした本研究における形状とバルブシートを用いた従来形状と比較して示す。バルブシートレス形状では従来形状と比較し排気ペントルーフ近傍で流速が高くかつTKEが低く分布できており、変動を抑えた効率の良い空気導入を実現できたことが確認された。

図14に空流試験におけるタンブル比と流量係数 Cv を従来機種相場と比較して示す。本研究における形状は、バルブシートを用いる従来機種と比較し高タンブルと高流量を両立した良好な空流性能が得られた。また流動の安定性を検証するために、空流試験において熱線流速計を用い流速変動率を評価した結果を図15に示す。従来機種に対し同等レベルのタンブル比において変動率が低下しており、ばらつきの少ない安定した流動を導入することができた。

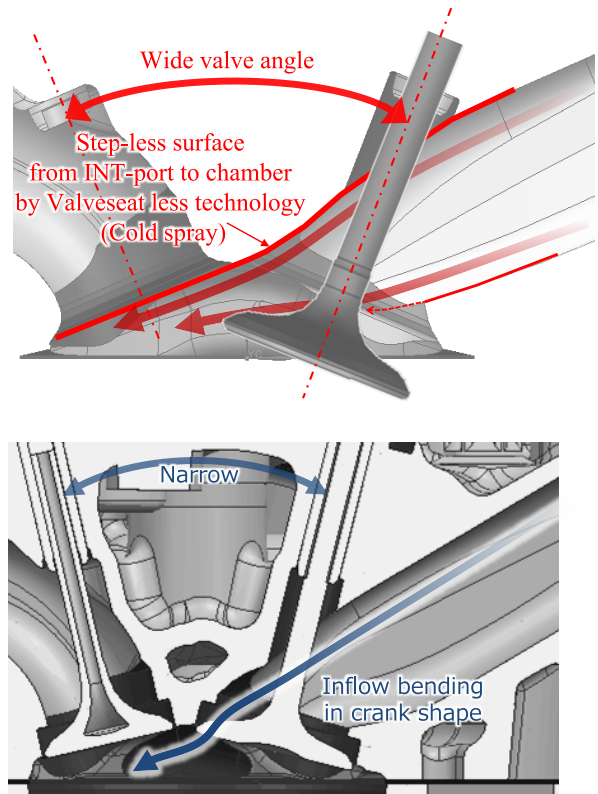


図12 Comparison of design concept of intake port and combustion chamber (New design with cold spray valve seat (left), current design (right))

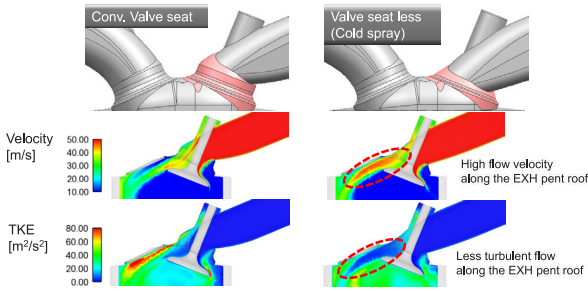


図13 Flow velocity and TKE distribution (CFD)

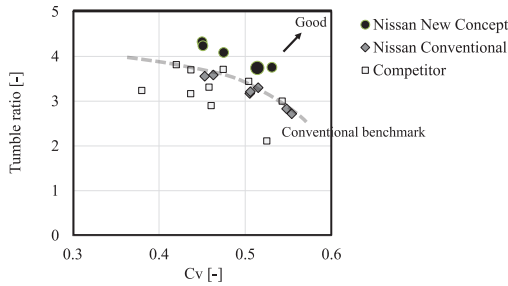


図14 Improvement of tumble ratio - flow coefficient with new intake port and combustion chamber design with cold spray valve seat

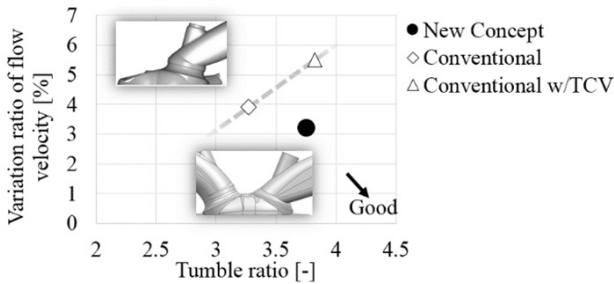


図15 Tumble ratio vs variation ratio (Airflow test result)

3.2.2 強タンブル保存手法

吸気行程で生成されたタンブル流は、ピストン下死点を経て圧縮行程中のピストン上昇に伴い旋回流速が高められるが、点火時期まで筒内流動を維持するためには、運動エネルギーの損失低減およびタンブルに直交する速度成分が生じないよう、回転方向の断面積変化を小さくすることが重要である。そこで図16に示すように「タンブル中心が筒内中央に位置するよう制御し、タンブル渦中心軸に歪みがない直線状とすること」を設計指針とし、ロングストローク化および低アスペクト比タンブル保存燃焼室により具現化した。

発電専用とすることでエンジン動作点を限定できることからバルブタイミングを限定でき、従来必要であったバルブリセスを排除した凹凸のないピストン冠面形状を採用し、またバルブ挟角拡大およびロングストローク化と合わせ、図17に示すようにラグビーボール型の冠面形状を構成した。

図18に筒内タンブル渦中心分布を従来設計と比較して

示す。以前の従来設計では回転中心が曲がり、シリンダー中央から外れていたが、新たな設計コンセプトではタンブル渦中心線を燃焼室中央に位置しかつ歪みのない直線状とすることができ、設計意図通りのタンブル流を形成できた。

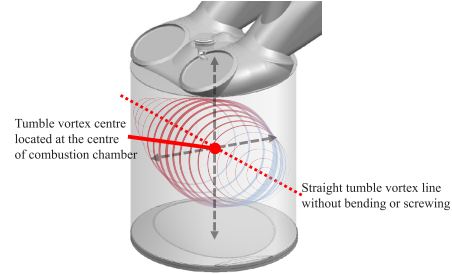


図16 In-cylinder charge motion design to maximize tumble conservation

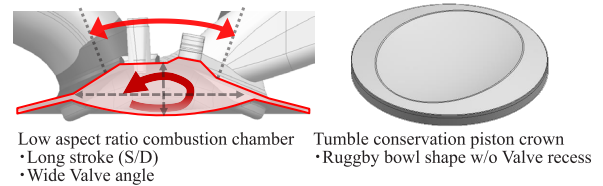


図17 Combustion chamber and piston crown design for tumble conservation

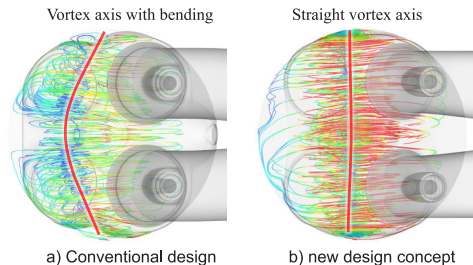


図18 CFD results of in-cylinder charge motion with conventional design (a) and new design concept (b). (2400 rpm, middle of compression stroke)

3.2.3 安定着火のための筒内整流手段

初期火炎核の安定形成のためには、点火プラグから伸長される放電チャンネルが排気ペントルーフ壁に接種しないことが重要である。そこで本研究では、放電チャンネルが燃焼室壁に指向しないよう「プラグ部流速の方向を整え一様性を高めること」を設計指針とし、図19に示すように点火プラグに対しタンブル流上流側に位置する燃焼室上部部にタンブル流を整流する機能を持たせた窪み形状を形成した。

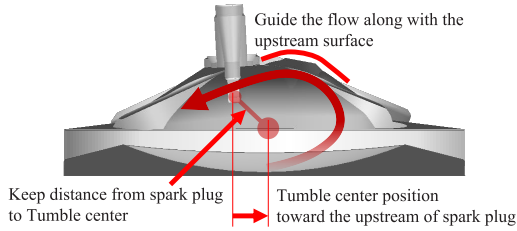


図19 Combustion chamber design to guide flow direction for appropriately stretched robust ignition channel

この燃焼室形状と燃焼室上面部によるタンブル流の整流機能を検証するために図20に示す可視化エンジンによるPIV (Particle Image Velocimetry) 法による圧縮行程の筒内流動の可視化撮影を行った。図21に点火時期近傍 40 degBTDC における筒内流速分布のPIV計測結果を示す。点火プラグに向かうタンブル流が燃焼室排気ペントルフ面に近接し初期火炎の成長を阻害しないよう、燃焼室上面部の窪みによりタンブル流を整流し燃焼室下方に指向させ、さらに窪みによりタンブル渦中心位置を吸気側に寄せることで、点火プラグからタンブル中心までの距離を拡大することができ、点火プラグ部周辺の流速分布の一様性を高めていることが確認できた。

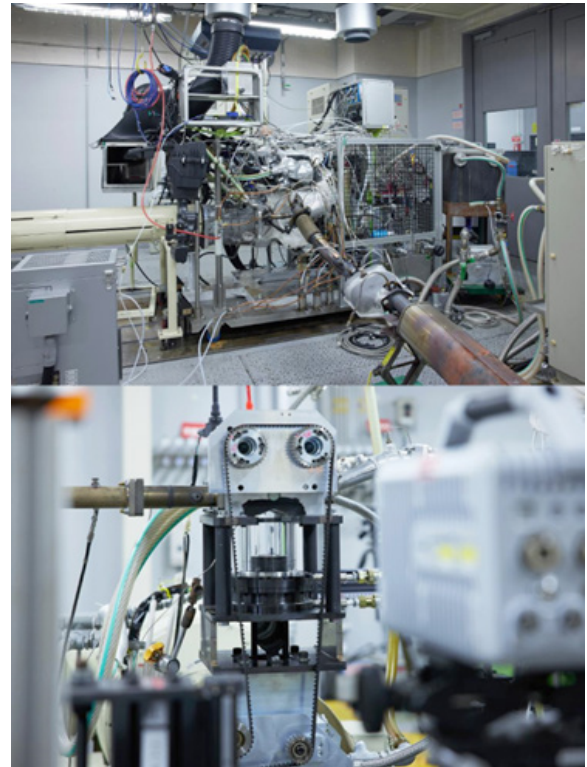


図20 Experimental equipments for new engine concept

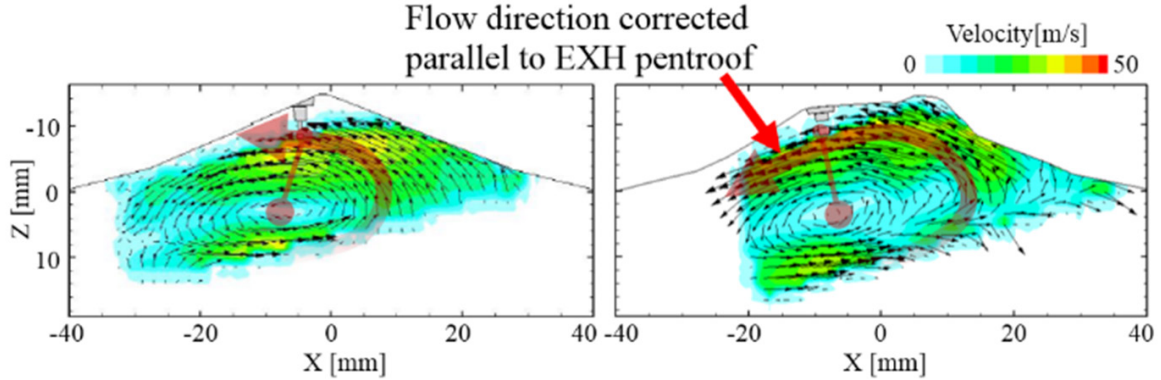


図21 Effect of the rectification pocket on the flow distribution around spark plug (PIV images, 2400 rpm, 40 deg. BTDC)t

3.3 点火システム

点火システムは、高希薄燃焼条件下における安定した初期火炎核成長のため、前述した点火栓周りのガス流速などの筒内流動と同様に、重要な機能の一つである。高流速下で安定したアークチャンネルの伸長を実現するためには、点火システムの強化が必要である。点火コイルの高放電電流は、アークチャンネルの再点火を抑制し、さらに高流速下でアークチャンネルの長さを伸ばすことに寄与する。一定期間までの平均点火電流値はEGR燃焼限界と良い相関があることが知られている⁽⁸⁾。新点火コンセプトでは高希薄条件下で安定した燃焼を実現するため、高電流かつ高エネルギーの点火システムを採用した。新点火システムを適用した結果、Cooled EGR 30%以上のEGR燃焼限界を達成することができた(図22参照)。

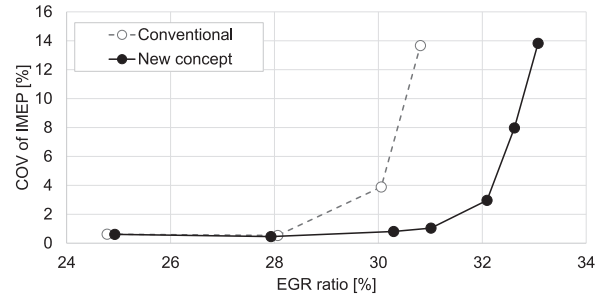


図22 Comparison of stable combustion limit against EGR between Conventional ignition system and new ignition concept with high energy ignition system

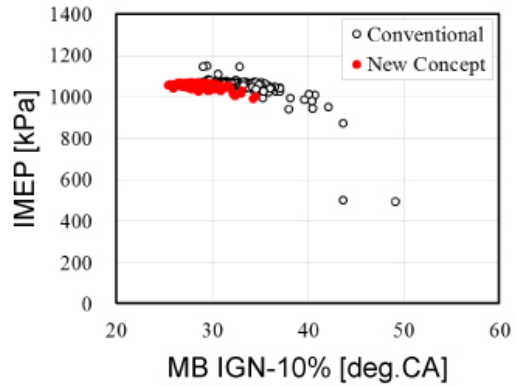
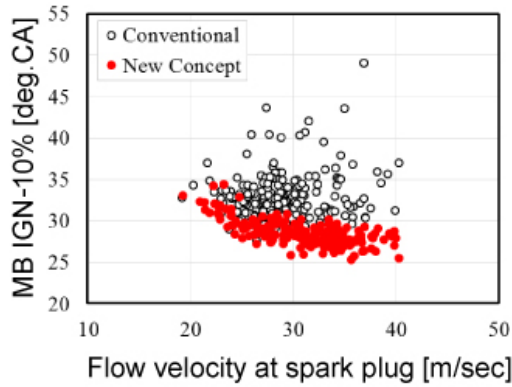


図23 Cyclic distribution of initial combustion period of CA ign-MB10% in relation to gas flow velocity at spark gap under EGR 30% conditions on same engine configuration except ignition system

図23に、EGR 30%の条件下における点火栓周りのガス流速がCA ign-MB10%の初期燃焼期間に与える影響に関する従来点火システムと新点火システムの比較を示しています。従来の点火システムの場合、CA ign-10%の大きなサイクル変動が確認され、比較的高いガス流速サイクルではCA ign-10%がより長くなっている。一方、新点火コンセプトの条件では、急速かつ安定した初期燃焼が実現され、比較的に高流速サイクルにおける初期燃焼期間の長いサイクルが抑制された(図23、左)。高速かつ安定した初期火炎伝播が実現したことにより、EGR 30%の条件下でIMEPのサイクル変動が劇的に改善された(図23、右)。

これらの技術を用いた新燃焼コンセプト“STARC”の結果、EGR 30%の条件下で安定した燃焼が実現でき、単気筒エンジン試験において2400 rpm / IMEP 10.5 barで45.6%の図示熱効率の達成を確認することができた。

4. e-POWER専用エンジンコンセプト:45%および80kW/Lを実現するために

前章では、新燃焼コンセプト“STARC”について詳しく説明した。本章では“STARC”コンセプトに加え、新たに開発した吸気システムおよびフリクション低減技術について紹介する。

4.1 エンジン仕様

表1に本研究で開発した新しいコンセプトのエンジン仕様を示す。e-POWERのコンパクトなパッケージと高出力要件から、本研究では1.5L 3気筒ターボエンジンを選定した。熱効率と出力パワーのバランスをとるため、ストローク / ボア比は1.26とし、将来排気規制に対応するため燃料システムはシリンダヘッド中央に配置する直接燃料噴射式燃料システムを採用した。

Engine Type	1.5 L / 3 Cylinder / Turbocharged
Bore x Stroke (S/D)	79.7 mm x 100.2 mm (1.26)
Connecting Rod Length	150.3 mm
Compression Ratio	13.5
Engine Speed @ Max. Power	4800 rpm
Valve train	Roller Rocker
Fuel Injection / Injector location	Direct Injection / Central Injection
Turbocharger Type	Fixed Geometry Turbocharger

Table 1. Specifications of the new concept engine

4.2 吸気システム

図3に示したエンジンコンセプトにて述べたように、e-POWER専用エンジンの吸気システムは、最高熱効率点と最大出力点に焦点を当てて設計した。非常に高い熱効率を実現するには、比較的高いBMEP (Break Mean Effective Pressure、正味平均有効圧:エンジンの1サイクルの仕事量を排気量で割った値)が必要であり、また最大30%までの高EGRが目標とされている。都市部のクルマの運転における低速条件を考慮し、通常の充電時に運転される最適なBSFC (Break Specific Fuel Consumption、正味燃料消費率)となる動作点はエンジン低回転速度領域の2000-2400 rpmで設定され、静粛性を維持することを目指した。また、最大出力エンジン速度においても、BSFC動作点と同様に低フリクションと低騒音を考慮し、一般的なエンジンの動作点と比較し、比較的低い4800 rpmに設定した。これらの要件を実現するため、早期ミラーサイクル、Cooled EGRシステム、およびe-POWER専用過給機が本エンジンコンセプトに選定された。図24は、このエンジンのバルブタイミング概念図を示している。十分な吸気流量と短いカム長でポンピング損失を維持するためローラーロッカー式の吸気バルブシステムを採用した。図25に1DシミュレーションGT-POWERによって算出された吸気バルブ閉時期が圧縮終了時の筒内温度に与える影響を示す。解析の結果、吸気バルブ閉時期の早期化による温度低下が示され、最高熱効率点と最大出力点の双方で効果的なノック抑制効果が示された。

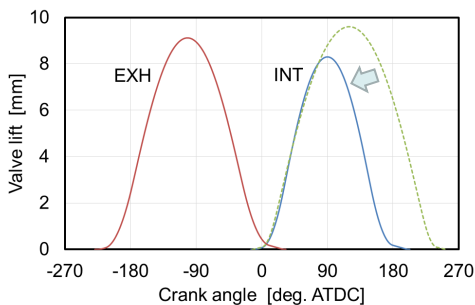


図24 Valve lift curve of conventional late IVC and E-IVC

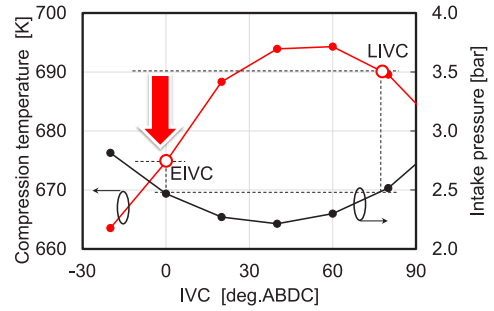


図25 Effect of IVC on the compression end temperature

高い理論熱効率と高い比熱比、またノック緩和のためCooled EGRシステムが有効である。最高熱効率点でより高いEGR率を確保するため、燃焼安定性推定フィードバックEGR制御を開発し、過給機は最高熱効率点での大量EGRと新気充填に向けて最適化され、高出力にも対応するよう設計した。図26に新たに設計した図示熱効率45%を目指したe-POWER専用の大型過給機によるポンピング損失低減の概略を示す。専用の大型タービンにより、最高熱効率点での必要な圧力比が低減し、その結果、ポンピング損失が削減された。

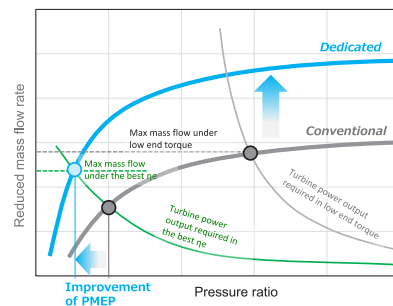


図26 Pumping loss reduction with e-POWER dedicated Turbocharger

従来の過給機と新規設計e-POWER専用過給機の最高熱効率点におけるP-Vダイアグラム比較を図27に示す。新規設計過給機はEGR 30%の条件下でPMEP -14 kPaを達成し、大幅なポンピング損失低減が達成できた。これらの技術を組み合わせた新吸気システムと新燃焼コンセプトSTARCにより、図示熱効率45.0%目処を得た。

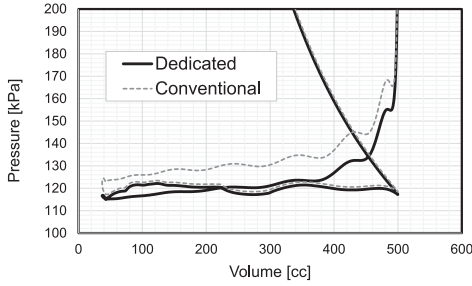


図27 Comparison of low pressure part of P-V diagram between conventional turbo-charger and dedicated Turbocharger

4.3 フリクション低減

従来、エンジンの熱効率向上の基本的な技術としてフリクション低減があるが、本コンセプトエンジンでもe-POWERの特性を活かしたフリクション低減が考慮されている。図28にフリクション低減ロードマップを示す。ダウンサイジング化、フロントエンドアクセサリドライブ (FEAD) の撤去、ダウンスピーディング化、低回転トルク削減、および新低摩擦技術により、従来の2.0L L4ターボエンジンと比較し、全体で摩擦抵抗を46%削減することに成功した。

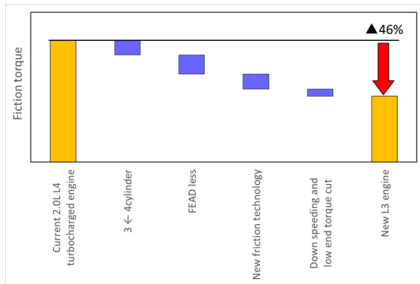


図28 Friction reduction of new e-POWER dedicated engine

シリーズハイブリッド運転に特化した燃焼と吸気システム設計のおかげで、最大出力エンジン速度は4800 rpmまで低減し、特定出力85 kW/L ($\lambda=1$)を実現した。このダウンスピーディングが、ピストンリングのテンション、バルブスプリング率、ベアリング幅の最小化を可能とした。また、図3に示す低回転速度領域のトルク削減により、過給機とピストンオイルジェットの要件が緩和され、小さなサイズのオイルポンプの設定が可能となる。低フリクション材料の採用に関し、典型的なものはテクスチャ付きクランクシャフトの平滑ベアリングであり、ベアリングの潤滑状態はまだ最高燃費点の周囲で混合潤滑となっている。したがって、ベアリング表面をより滑らかにすることは、フリクションを低減させるために効果的である。2000 rpmにおけるモータリング時のフリクションとベアリング表面の粗さの間に感度を示す実験結果を図29に示す。ベアリング表面を現状からさらに滑らかにすることにより、フリクションは約10%削減される。

一方、ベアリング表面を滑らかにすることで、保持されるべき潤滑オイルの不足により、ベアリング焼付きなどの相反が予想される。焼付き現象を抑制するため、クランクシャフトピン/ジャーナル表面にテクスチャを設けた。図30にテクスチャ付きクランクシャフトプロトタイプの外観を示す。微小なテクスチャの凹みを形成するため、加工、ロール成形、マスキングとショットブラスト、レーザーなど、幾つかの生産プロセス改善を実施した。このテクスチャリングプロセスは、クランクシャフトだけでなく、ピストンスカート、ピストンリングなどの他の潤滑部品のフリクションを減少させるのに有効な技術である。

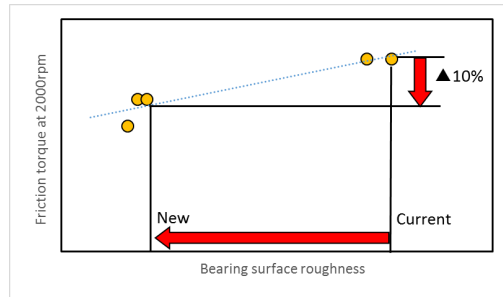


図29 Friction sensitivity by bearing surface roughness

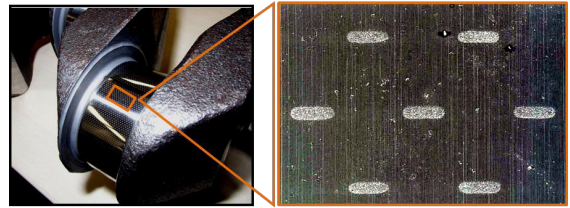


図30 Texture crankshaft surface

4.4 新燃焼制御

e-POWERによる限られたエンジンの動作点と要求が緩和された過渡運転は、バッテリー充電運転の最良熱効率点でより高いEGR率の安定運転を可能とする。一方、従来のエンジンは過渡運転中のエンジン応答を確保し、過渡運転中の失火を防ぐため、燃焼安定度の余裕を持たなければならず、大量のEGR導入を困難とする。e-POWERではe-POWERの特徴である緩やかな過渡運転特性により、EGR導入量を従来のエンジンよりも高く設定可能となる。更なる燃料消費率改善に向けて安定燃焼限界に近い高いEGR率を維持するため、燃焼安定度ターゲットEGR / 点火タイミングフィードバック制御を開発した。図31に本制御によるEGR率制御を示す。目標導入EGR率を安定した燃焼限界に対してマージンを持って設定し、EGR率を安定した燃焼限界まで増加させつつ運転させる。燃焼安定度が基準を超えると、目標EGR率を減少させ、常に燃焼限界近傍のEGR率にて運転可能としている。本新燃焼

制御により、e-POWERは環境条件と量産部品のばらつきに関係なく、最適な熱効率点にて最大の熱効率ポテンシャルを活用可能とした。

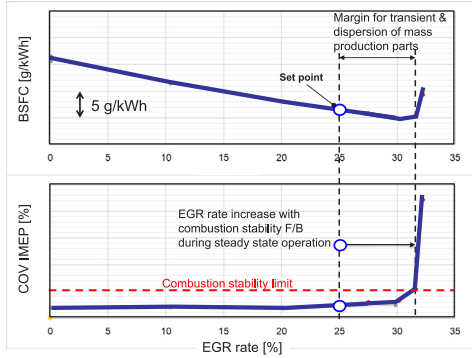


図31 Improvement of BSFC realized by e-POWER EGR set point and combustion stability feedback EGR target control

4.5 多気筒エンジンにおける正味熱効率の検証

新燃焼コンセプト、吸気システム、およびフリクション低減アイテムの総合検証として、多気筒プロトタイプエンジンを使用し、検証実験を実施した。図32に点火時期をパラメータとした際の正味熱効率の結果を示す。RON98燃料を使用したトレスノック状態で43.4%の正味熱効率を実機実験にて示すことができた。一方、RON98燃料とRON95燃料のトレスノック条件におけるMB50クランク角の差を3度と仮定すると、RON95燃料を用いた場合の正味熱効率BTEは43.0%と見積もることができる。また、RON95燃料を使用した本多気筒プロトタイプエンジンにてLambda=1の比出力85 kW/Lの達成を合わせて実機実証できた。

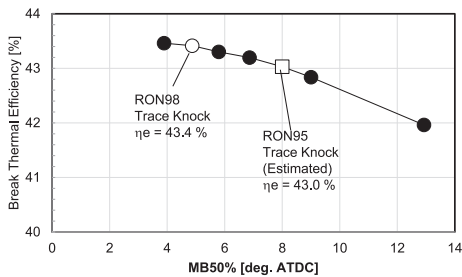


図32 Validation result of brake thermal efficiency with a multi-cylinder proto-type engine. (Engine speed 2000 rpm, BMEP 12 bar, RON98 fuel)

5. e-POWERによる50%効率の可能性

5.1 e-POWERによる熱効率向上への可能性

e-POWERのシリーズハイブリッド運転は空気過剰率の高い希薄燃焼により、更なる熱効率向上の可能性がある。従来の一般的な火花点火エンジンによる希薄燃焼は、希薄燃焼運転

モード ($\lambda > 2$) と理論混合気の定常運転モード ($\lambda = 1$) の間でのトルク制御とNOx排出制御に対する技術的な課題が存在する。e-POWERのシリーズハイブリッド運転は、バッテリーとの組み合わせにより希薄燃焼領域のエンジン運転モードに集中できるため、空燃比の切り替えが不要となる。新燃焼コンセプトにより、燃焼室や吸気ポートの設計変更なしに、空燃比Lambdaが2以上における希釈な条件においても安定した燃焼が可能となった。図33は、単筒エンジンを使用して実験した均質希薄燃焼と弱成層希薄燃焼コンセプトにおいて、IMEPおよびエンジンからのNOx排出と空燃比(A/F)の関連性を示している。弱成層希薄燃焼コンセプトでは、点火性を向上するため、点火時期前の圧縮行程中に非常に少量の燃料を噴射供給することで、点火栓周りの当量比を増加させる。均質希薄燃焼では、A/Fが26 ($\lambda = 1.8$) までの安定した燃焼限界と低NOx濃度(約100 ppm)を確認した。一方、弱成層希薄燃焼の条件では、A/Fが36 ($\lambda = 2.5$) までの安定した燃焼と希薄化に伴い、NOxは30 ppm未満で実現した。弱成層希薄燃焼により、48%を超える効率が実現し、1.5L 3気筒ターボエンジンによるガス交換時のポンピング損失と4.3にて検討したフリクションを考慮し、GT-POEWRによって解析された正味熱効率は最高46%の達成が示唆された(図34)。

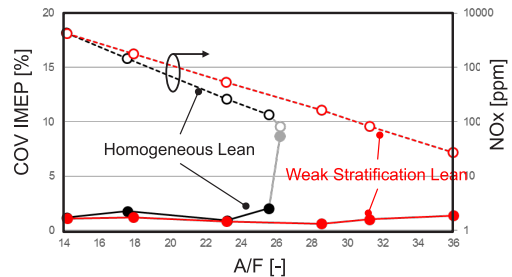


図33 COV of IMEP and engine out NOx in relation to Air fuel ratio (A/F)

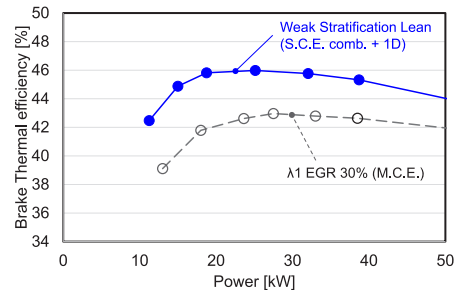


図34 Brake thermal efficiency vs Power with Lambda=1 and Lean burn. (lambda=1 : Result of M.C.E., Lean: S.C.E combustion + 1D-Code Air-path)

5.2 廃熱回収システム

熱効率の向上とともに、排気ガス温度の低下が厳しくなり、特に希薄燃焼の場合、排出後処理システム (ATS) の活性化を担保することが困難となる。したがって、燃焼室だけでなく ATS 前の排気ポートや排気部品への熱伝達を減少させ、既燃ガスからの熱伝達を高く保つことが重要となる。これは、より多くの断熱処理と排気部品および冷却材への熱伝達の低減を意味する。よって、排気後処理を考慮した燃焼部からの熱伝達と冷却材の断熱化は、廃熱回収を含む熱システムにより、更なる熱効率向上の可能性を期待できる。

e-POWER の特定のエンジン運転、特定のポイントでの定常運転は、この廃熱回収にも適している。図 35 は高速および高負荷の運転条件に適した、中温ランキンサイクル (MT) システムの一例である。

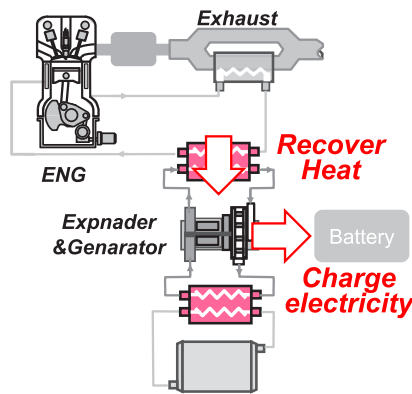


図 35 Medium Temperature Rankine Cycle Heat Recovery System

この MT ランキンサイクルシステムは、エンジン冷却用の高温 (HT) クーラント回路と、低温 (LT) e-PT クーラント回路の間で機能し、ボイラー、発電機を備えた膨張機、凝縮器、ポンプが含まれています。MT ランキンサイクルシステムは、特に高速および高負荷の条件下で約 4~5% の熱効率向上をもたらし、e-POWER 車両で WLTC Extra-High モードで 4.6% の向上を見込むことができる。この MT ランキンサイクルを排気廃熱回収システムと組み合わせることで、熱効率の +2%pt の向上が期待される (図 36)。すなわち前節における希薄燃焼で達成した 46% の熱効率は廃熱回収システムとの組み合わせにより 48% まで到達可能であることが示唆される。さらに、この 48% の熱効率は、現行のバッテリーサイズが 5kWh 未満の e-POWER システムで実現可能な最大効率であると考えられる。将来、電動化の進化により、より大きな容量のバッテリーが搭載され、エンジンの動作点を 1 つまたは 2 つの特定の充電運転に制限することができれば、50% の効率に向けた熱効率改善余地があると考えられる。現在、クルマの加速運転時にはバッテ

リーからの出力が不足するため、エンジンからの発電により出力を補っている。さらに、バッテリー容量および出力がクルマ加速時の要求出力に比べれば、エンジンは電気出力アシストに必要なトルクとパワーを放棄し、熱効率に特化した最適な圧縮比をとることが可能となる。さらに、最小限の動作点は、燃焼時の筒内最大圧力 Pmax とエンジン最高速度を制限することも同時に可能となり、フリクションを大幅に削減できる。この最適化されたエンジン設計と充電専用のエンジン運転により、最終的なエンジンの熱効率目標として 50% とし、チャレンジしていく。

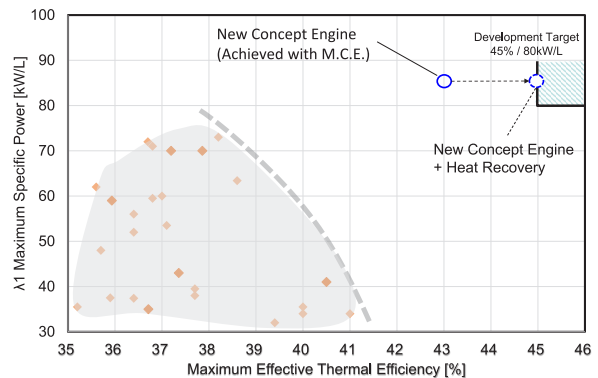


図 36 Validation Results of the new engine concept

6. 結論

将来の持続可能なモビリティに向けた WtWCO₂ 削減と排出削減のために、NISSAN e-POWER 専用の新しいコンセプトエンジンが開発され、以下の結論を得た。

- 新燃焼コンセプト STARC は、高希薄燃焼用の新シリンダー内流動設計と高エネルギー点火システムを組み合わせ、安定した点火とサイクル変動の最小化を目的として開発した。新燃焼システムにより、図示熱効率 45.6% を単筒エンジン実験にて実証した。
- e-POWER 専用の新吸気システムは、e-POWER シリーズハイブリッド運転に特化し、最高熱効率と最大比出力に焦点を当て開発した。Cooled EGR、e-POWER 専用過給機、燃焼安定度ターゲット EGR / 点火タイミングフィードバック制御により、30% 以上の EGR 導入が可能となり、最大図示熱効率 45.0% の達成につながった。
- e-POWER の限定的な運転領域と比較的緩やかな過渡運転によって大幅なフリクション削減が可能となった。幾つかのフリクション削減技術により、現行 2.0 L 過給エンジンと比較し、フリクション削減率 46% を達成した。これらのコンセプトを持つ多気筒エンジンでは、 $\lambda=1$ で最大正味熱効率 43.0% と 85 kW/L が確認された。さらに、熱回収の組み合わせで、最大

正味熱効率45%達成の目処を得た。

・新燃焼コンセプトSTARCを希薄燃焼に適用し、正味熱効率46.0%が多気筒エンジンにて実機実証された。さらに熱回収システムと組み合わせることにより、熱効率48%が期待できる。さらに将来、電動化の進化によりバッテリー容量および出力の増加ができれば、エンジンの運転を最高熱効率点のみに限定し、更なるフリクション削減および圧縮比向上等にて持続可能なモビリティのための熱効率50%が望める。

著者



鶴島 理史

References

- (1) M. Kimura, et al., "Development of New-generation e-POWER Hybrid Powertrain," Nissan technical Review No80, 2017
- (2) T. Ito, et al., "Development of New Small 3-cylinder HR12DE Gasoline Engine for e-POWER", Nissan technical Review No80, 2017
- (3) Kapus. P., et. al., "Passenger car powertrain 4.x – from vehicle level to a cost optimized powertrain system", 41. Internationales Wiener Motorensymposium 2020
- (4) Murase, E. and Shimizu, R., "Innovative Gasoline Combustion Concepts for Toyota New Global Architecture", 25th Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology, 2016.
- (5) Sakata, K., T oda, T., Sakai, M., et al., "The New Toyota Inline 4 Cylinder 2.5L Gasoline Engine", JSAE 2017 Annual Congress-Spring.
- (6) Brannys, S., Gehrke, S., Hoffmeyer, H., Hentschel, L. et al., "Maximum efficiency concept of a 1.5L TSI evo for Future Hybrid Powertrains", 28th Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology 2019
- (7) Sellers, R., Osborne, R., "Designing and Testing the Next Generation of High-Efficiency Gasoline Engine Achieving 45 % Brake Thermal Efficiency", 28th Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology 2019
- (8) Shiraiishi, T., Teraji, A., and Moriyoshi, Y., "The Effects of Ignition Environment and Discharge Waveform Characteristics on Spark Channel Formation and Relationship between the Discharge Parameters and the EGR Combustion Limit", SAE 2015-01-1895, SAE Int. J. Engines 9 (1):171-178, 2016

特集2:自動運転・運転支援

1. 自動運転・運転支援への取り組み

木村 健*

1. はじめに

昨今、車両の動きを電子制御することにより、運転を支援する技術や、運転の一部を自動化する技術が各社から実用化されている。これは、モータライゼーションの発展に伴って発生した、交通事故、環境悪化、交通渋滞などの社会課題に対して、1980年代以降急速に発展したエレクトロニクス技術によって解決していく取り組みにより成し遂げてきたことである。

日産自動車においては、日産車がかかわる交通事故の死者数を実質ゼロにする「ゼロ・フェイタリティ」を究極の目標とし、このような電子制御技術の発展初期から、車両を知能化して事故を低減し、さらにはモビリティそのものを革新させる重要な技術と捉えて取り組んできた。この結果として、駐車時の操作を自動化するプロパイロット パーキングや、高速道路でのハンズオフ走行を可能にする、プロパイロット2.0のような高度な支援を可能にするに至っているが、これらは一朝一夕で可能になったものではなく長年にわたる膨大な技術の積み上げによって成し遂げられたものである。本稿では、長年の取り組みと当社としての技術的エッセンスについて概説する。

運転の自動化、運転支援の高度化につながる当社の取り組みとして、①クルマの動きを司る足腰を構築しつつ、外界認識技術の基礎固めをした運転支援の黎明期(概ね1990年代)、②周囲状況を認識する技術を高度化し、「セーフティ・シールド」コンセプトを構築しこれに基づく数多くの予防安全技術を実用化した導入・普及期(概ね2000年代)、そして③様々な運転支援技術を高速道路走行や駐車シーンなどで統合して実現した2010年代半ば以降の発展期に大別することができる。各時期の取り組み概要と当社としての技術のポイントについて以下の章で順次述べる。

2. 運転支援の黎明期

1980年代後半以降、車両の走行機能に対する電子制御が取り入れられ、路面状況等に応じてブレーキ油圧や駆動トルクを調整し、制動時のホイールロックや加速時のホイール空転を防止することが可能になった。また、自車の動きをセンシングして、後輪を微小に操舵したり、ブレーキ油圧を各輪個別に制御することで回転方向のモーメントを発生し、操縦性を向上させ、旋回挙動を安定させること等も可能になってきた。この中で、当社においても、ABS、TCS、HICAS、VDCなど、様々な電子制御デバイスを投入してきた^{(1), (2), (3), (4)}。

さらに、この時期は、カメラ画像の処理やレーザー光を投射し反射光を捉えることによる測距(現在はLiDARと呼ばれる)や、同様にミリ波を照射し反射波を捉えることによる測距(RADAR)も実現され始めた時期である。当社においては、1980年代終わりごろから、カメラ画像の処理により路面の白線を捉える技術や、レーザー光を用いて前者との車間距離を捉える技術の基礎研究に着手していた。

これらの基礎研究、開発が結実し、最近の自動運転につながる最初の事例となったのが、旧建設省主導で行われたAHSプロジェクトにて実現した、自動で前車に追従して車線中央を走行する機能である。1996/9月には、上信越道の未供用区間を用いて他社と合同で自動走行デモンストレーションが行われ、高い性能で実現できることが示された⁽⁵⁾。

このように、早期から取り組みを開始することで、いち早く実用化につなげることができ、1997年には、前方車両との車間距離を保つよう駆動力、制動力を制御するブレーキ制御付きアダプティブクルーズコントロールを^{(6), (7)}、2001年にはCCDカメラにより路面の白線を検出し、車線に沿って走行するようステアリング操作を支援するレーンキープサポートシステム⁽⁸⁾を実用化した。

これらの技術を開発するにあたり、当時からこれらの電子制御技術が徐々にドライバーによる運転行動を支援あるいは自動化

* モビリティ & AI 研究所

していき、将来的には自動運転につながることを見据えて取り組んできた。順次機能を構築していくにあたり、人の運動制御の仕組み(図1)と対応付けて制御系の各機能を階層的に位置づけた。

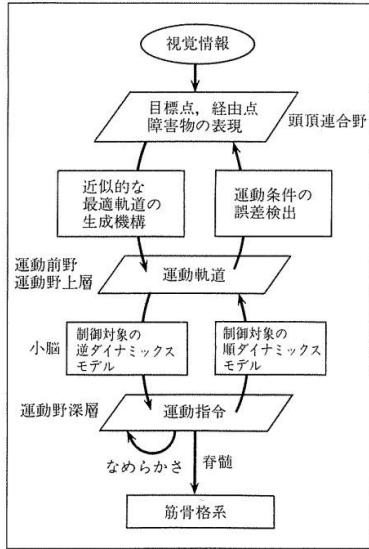


図1 人の階層的神経回路モデル⁽⁹⁾

ヒトの制御系は、脊髄反射に基づき細かい力の調整を行う手・足などの筋骨格系、制御対象のダイナミクスを考慮した小脳における運動制御系、視覚情報等に基づき目標値を定め軌道生成と誤差フィードバックを行う上層の制御系からなると考えられている。これと対応付けて、タイヤのスリップ率を調整するABS、TCS、およびタイヤの角度を正確に制御するHICASの角度サーボ⁽¹⁰⁾などは下層の筋骨格系に相当し、車両のダイナミクスを考慮して車両の剛体運動を制御するVDC、HICASは中層の運動制御系、外界情報に基づいて車間距離、車線内位置などを制御する運転支援は最上層の働きに対応すると考えられる。

この黎明期においては、下層、中層の働きを構築して目標値通りの加減速、ヨー運動を車両の安定性を損なうことなく制御し、将来の運転支援、自動化へ向けて車の動きをコントロールする土台を築いた。これにより、その後の様々な運転支援の実用化につなげることができたと考えている。

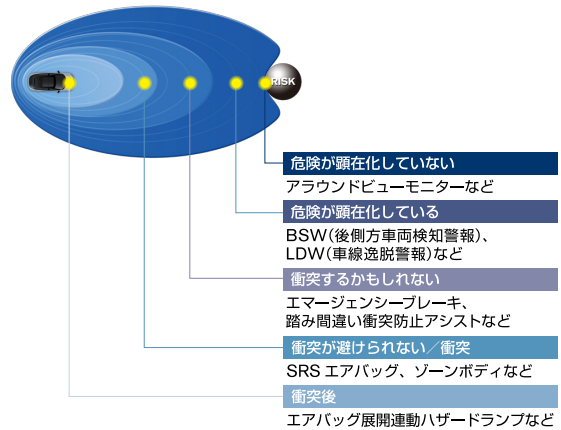
3. 予防安全技術群の導入と普及

アダプティブクルーズコントロール、レーンキープサポートシステムでは、制動力や駆動力、操舵角を制御する機能に加えて、前方車両や路面の白線を検出する外界認識機能を用いることで実現されたが、これらの外界認識技術は急速に進歩し、前方のみならず側方、後方の車両や物体を、また、前方につい

てもより遠方の車両や物体をより高い精度で検出し、全方向について自車のリスク状態を把握することを可能にした。これらの技術をベースに、当社では「セーフティ・シールド」というコンセプトを構築し、「クルマが人を守る」という考え方のもと、乗員の安全の支援を目指した⁽¹¹⁾。

これは、車両の状態を「危険が顕在化していない」「危険が顕在化している」「衝突するかも知れない」「衝突が避けられない」「衝突」「衝突後」という段階に分類し、それぞれの段階で発生する危険要因に対して最適なバリア機能を働かせ、少しでも危険に近づけないようにサポートする、というものであり、危険予防から危険回避、そして乗員保護までトータルな観点でのサポートである。

セーフティ・シールド*1



<p>危険が顕在化していない</p> <ul style="list-style-type: none"> ■プロバイロット (プロバイロット/ プロバイロット (ナビリンク機能付) / プロバイロット 2.0) ■プロバイロット パーキング (プロバイロット パーキング/ プロバイロット リモート パーキング) ■インテリジェント ベダル ■インテリジェント クルーズコントロール (全車速追従・ナビ協調機能付) ■アクティブAFS ■インテリジェント アラウンドビューモニター ■インテリジェント ルームミラー 	<p>いつでも安心して運転できるよう ドライバーをサポートする技術</p>
<p>危険が顕在化している</p> <ul style="list-style-type: none"> ■インテリジェント FCW (前方衝突予測警報) ■LDW (車線逸脱警報) ■インテリジェント LI (車線逸脱防止支援システム) ■BSW (後側方車両検知警報) ■インテリジェント BSI (後側方衝突防止支援システム) ■インテリジェント BUI (後退時衝突防止支援システム) ■インテリジェント DA (ふらつき警報) ■RCTA (後退時車両検知警報) 	<p>危険な状態を回避するよう ドライバーをサポートする技術</p>
<p>衝突するかも知れない</p> <ul style="list-style-type: none"> ■インテリジェント エマージェンシーブレーキ ■ABS (アンチロックブレーキシステム) ■VDC (ベールダイナミクスコントロール) ■踏み間違い衝突防止アシスト 	
<p>衝突が避けられない</p> <ul style="list-style-type: none"> ■前席緊急ブレーキ感応型アークラッシュシートベルト 	
<p>衝突</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ゾーンボディ ■SRSエアバッグシステム ■ポップアップエンジンフード 	<p>万が一衝突が避けられないときに 被害を最小限にとどめる技術</p>
<p>衝突後</p> <ul style="list-style-type: none"> ■エアバッグ展開運動ハザードランプ ■SOSコール (ヘルプネット) 	

図2 セーフティ・シールド

図2に示すように、このコンセプトのもとで、数多くの技術を実用化してきている。

このような運転支援技術は運転におけるリスク低減に非常に有効である一方、予期しない動作によるシステムへの不信、システムの効果を過大に期待する過信などの課題があると言われている。当社では、これらの技術の開発にあたり、いわゆるヒューマンファクタ課題にも積極的に取り組んできた。

セーフティ・シールドの中の一技術である、インテリジェントペダルは人間の特性を十分に考慮したシステムの一例である(図3)。前车接近によるリスク感を定量化し、アクセルペダル反力を通じてドライバーに知覚させ、ドライバーのアクセルペダル操作に応じて減速制御するという、ドライバーを制御ループに入れることで自然に車間距離を維持できるようにしたシステムである。これによって、加減速を頻繁に繰り返すような交通環境下にあっても容易に前车との車間を維持することが可能になり、ドライバーの負担を軽減することが可能になった⁽¹²⁾。



① 追従走行中の先行車が近づいたとき、アクセルペダルを戻すと、システムがなめらかにブレーキをかけて減速します。



② ドライバーがアクセルペダルを踏んだままの場合はアクセルペダルを押し戻す方向に力を発生させ、アクセルペダルを戻す操作を支援します。ドライバーがアクセルペダルを戻すと、なめらかにブレーキ制御を行います



③ ドライバーによるブレーキ操作が必要だとシステムが判断した場合は、表示と音で警報し、アクセルペダルを押し戻す方向に力を発生させ、アクセルペダルからブレーキペダルへの踏みかえを支援します。

図3 インテリジェントペダル

この技術は、前车との車間距離と相対速度によってドライバーが感じるリスク感、アクセルペダル反力の変化に対するドライバーの弁別特性、システムの使用によるドライバーの運転行動や車間距離の変化、システムの使用によるドライバーのワークロード変化の定量評価など、様々なヒューマンファクタを考慮することによって実現されたものである^{(13), (14)}。

4. 運転支援の発展

ここまで様々な運転支援技術を紹介してきたが、これらは前车との車間距離の維持、車線中央からのずれや逸脱、側方や後方車両への接近など、個々の運転行動やリスクに対する支援であった。これを高速道路における単一車線走行における統合的な運転支援として実現したのが2016年に実用化した「プロパイロット」である⁽¹⁵⁾。

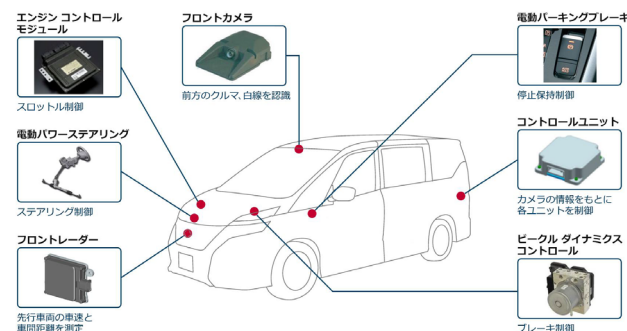


図4 プロパイロット

本システムではより高度化された外界認識技術によって道路と交通状況を把握し、アクセル、ブレーキ、ステアリングのすべてをシステムが自動で制御することで、高速道路における巡航走行時、渋滞走行時等におけるドライバーの運転負担を大幅に軽減する。

運転支援技術が高度化するにつれ、ドライバーにとってシステムがどのような状態にあり、どのような支援が行われる状態にあるかを把握するのがより重要となる。「プロパイロット」においては専用ディスプレイを設けることによりシステムの状態をわかりやすく表示している。

さらに、2019年には高速道路の複数車線をナビゲーションと連動して設定したルートに従って走行し、さらに所定の条件下で同一車線内のハンズオフ走行、車線変更時のハンドル操作支援を実現する「プロパイロット2.0」を実用化した⁽¹⁶⁾。これにより、目的地を入力すればナビのルートガイドに従い高速道路に乗ってから降りるまでの運転操作を包括的に支援することが可能になる。

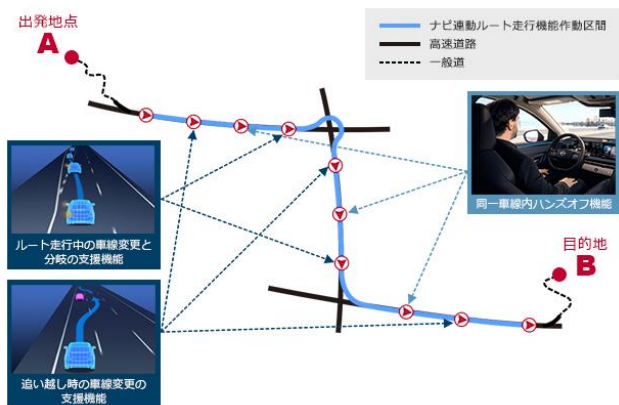


図5 プロパイロット2.0 ナビ連動ルート走行

さらに高度化した機能を実現するために、より多くの技術を統合しており、カメラ、レーダ、ソナーとGNSS、3D高精度地図を組み合わせて用いることで車両周囲360°の情報と、道路と自車両の正確な位置関係を把握し、車線数、合流・分岐・交差などの道路構造も把握する。また、ドライバーが前方注視を怠っていないか監視するドライバモニタ、より複雑になったシステム状態を明確に伝える専用HMIも開発している。

プロパイロット2.0においては、単なる機能の高度化でなく「高速道路を安全・安心・利便・快適に走行できるという新たな価値を提供すること」を目標とし、そのため、熟練ドライバーと同等以上に滑らかなステアリング制御を行うことに加え、HMIによりシステムが周囲をどのように認識しているか、どのように判断したかをクリアにドライバーへ伝えることでこれを実現した^{(17), (18), (19), (20), (21), (22)}。

プロパイロット、プロパイロット2.0は高速道路における統合的な運転支援を提供したもののだが、これに加えて、駐車シーンにおける操作を自動化することで運転支援するシステムとして、プロパイロットパーキング⁽²³⁾、およびプロパイロットリモートパーキングも実用化している⁽²⁴⁾。

プロパイロットパーキングは、スイッチ操作だけでステアリング、アクセル、ブレーキ、シフト、パーキングブレーキまですべてシステムが自動で制御し、駐車完了するまでドライバーをアシストするものであり、車両周囲状況に応じて切り返しを含む走行経路を算出し、アクセル、ブレーキ、ステアリング、シフトを連動させて高精度に車両をコントロールすることで実現している。また、プロパイロットリモートパーキングは、車外からインテリジェントキーの遠隔操作により、ドライバーが乗ってなくてもクルマを前進、後退させることで、狭いガレージへの出し入れを支援するものである。



図6 プロパイロットパーキング

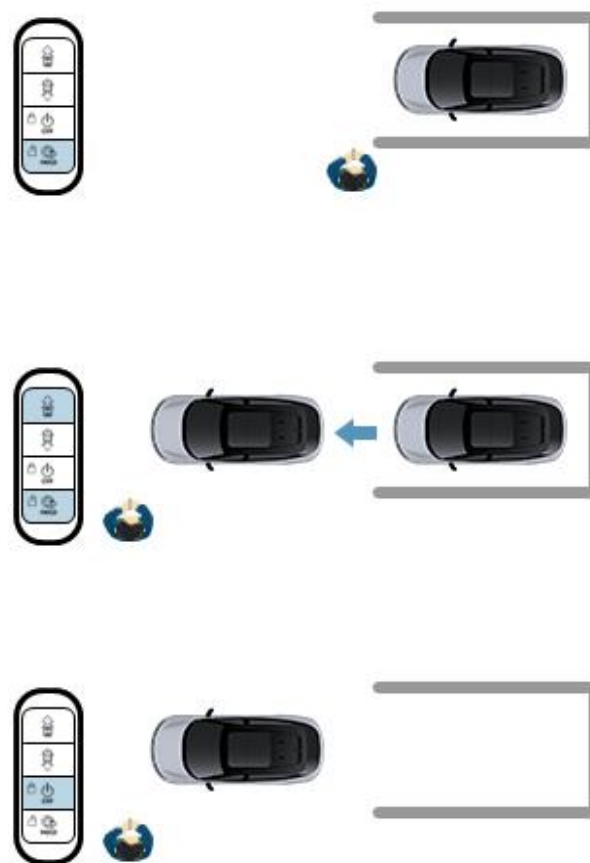


図7 プロパイロットリモートパーキング

このように、センサ技術、制御技術、ナビゲーション技術、HMI技術など多様な技術の集大成により、高速道路、駐車シーンなどの様々な場面における統合的な運転支援を実現してきた。

5. 今後の取り組み

ここまで述べてきた通り、約30年にわたる不断の取り組みによって技術を進化させ、究極の目標「ゼロ・フェイタリティ」へ向けて前進してきた。しかし、依然国内全体では年間約30万件の交通事故が発生し、多くの尊い人命が失われているのが現状である⁽²⁵⁾。

これをさらに減少させていくため、実用化済技術の拡大を進めていくとともに、世の中で起こる多次元に複雑な事故を回避するための運転支援技術として、高性能の次世代LiDARを用いて認知能力を次のレベルに高めたグラウンド・トゥルース・パーセプション (Ground truth perception) 技術に取り組んでいる⁽²⁶⁾。

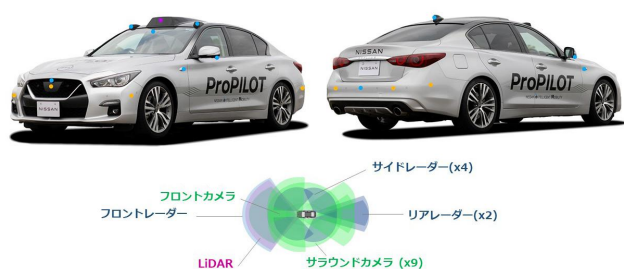


図8 グラウンド・トゥルース・パーセプション

また、このような自動運転技術の発展により、クルマは都市や地方における生活の質の向上へ向けて人々の移動を支える、社会インフラの一部にもなりつつある。

当社では、自動運転を活用したモビリティサービスEasy Ride®※に取り組み、2017年度より横浜地域での実証実験を開始している⁽²⁷⁾、⁽²⁸⁾。

(※「Easy Ride®」は株式会社ディー・エヌ・エーと日産自動車株式会社の登録商標)



図9 Easy Ride®

現在は、ドライバーが乗車して安全確保した上でのレベル2の自動運転として実証を行ってきているが、今後さらに開発を進めて実績を積みつつ、自動運転レベルを高めることで、都市と地方の移動を支える、持続可能な移動サービスの実現を目指していく。

また、自動運転によるモビリティサービスをクラウド内のAIを駆使して支える仕組みとして、シームレスオートノマスモビリティ (Seamless Autonomous Mobility : SAM) を米国NASAと共同で開発してきた⁽²⁹⁾。

これにより、自動運転車両が事故・路上の障害など不測の事態に直面した際に、人が介入し遠隔でコントロールするとともに、クラウドに情報を集めすべてのクルマをつなぐことにより、クルマを安全に誘導する。



図10 シームレスオートノマスモビリティ

6. まとめ

以上、当社では究極の目標「ゼロ・フェイタリティ」へ向けて、車両の走行機能の電子制御の黎明期から、運転支援技術に取り組み、機能の拡大・高度化を推進してきた。また、今後のさらなる事故低減へ向けて、多次元に複雑な事故を回避するための運転支援技術に取り組み、また、都市や地方における持続可能な移動手段の提供へ向けて、自動運転車両を用いたモビリティサービスへの取り組みを継続していく。

近年、深層学習技術の誕生・普及に端を発する、第3次、第4次AI革命ともいわれる技術の能力が日増しに高まってきており、外界認識による物体検出、他車両や歩行者などの行動予測など、従来にない次元で実現可能となってきた。また、無線通信の高速化やクラウドコンピューティングの普及により、大量の走行データを蓄積・学習して、日々機能向上させていくことも可能になってきている。当社としても、これらの新技術を遅れることなく導入し、さらなる運転支援・自動運転機能の高度化を実現することで、「ゼロ・フェイタリティ」へ向けた交通事故の低減と、持続可能な移動手段の提供に取り組んでいきたい。

参考文献

- (1) 松田ほか:日産型4輪アンチロック装置の開発、日産技報、No.20、pp.111-118 (1984)。
- (2) 福村ほか:TCS(トラクション・コントロール・システム)の最適化手法の検討 および車両挙動制御装置への展開、自動車技術会学術講演会前刷集(1996/10)、pp.73-76。
- (3) 井上ほか:制動力配分制御による車両運動性能の向上、自動車技術会学術講演会前刷集(1992)、No.921035。
- (4) 森ほか:後輪の位相反転制御による操縦安定性の向上-SUPER HICAS、自動車技術会学術講演会前刷集(1989)、No.891068、pp.279-282。
- (5) 瀬戸ほか:AHS実験車における群走行制御の開発、自動車技術会学術講演会前刷集(1997/10)。
- (6) 飯島ほか:ブレーキ制御付ACCの開発、自動車技術会学術講演会前刷集(1999/10)、No.114-99、pp.1-4。
- (7) 東又ほか:ブレーキ制御付ACCの車間距離制御系の設計、自動車技術会学術講演会前刷集(1999/10)、No.114-99、pp.5-8。
- (8) 定野ほか:車線維持支援装置の開発、自動車技術会学術講演会前刷集(2001/5)。
- (9) 川人:認知と運動の計算論的神経科学、神経心理学第10巻1号、pp.18-25。
- (10) 数藤ほか:電動式後輪操舵用アクチュエータのロボスト制御、自動車技術会学術講演会前刷集、9302187、pp.7-10
- (11) 日産技術ライブラリー 日産の安全への取り組み：https://www.nissan-global.com/JP/INNOVATION/TECHNOLOGY/ARCHIVE/SAFETY_TDC/ (参照日：2023年12月1日)
- (12) 高江ほか:反力制御ペダルを用いた車間維持支援システムの開発、自動車技術会論文集39巻5号(2008)、pp.7-12。
- (13) 土方ほか:アクセルペダルからの反力情報伝達における感覚閾値に関する一考察、自動車技術会学術講演会前刷集、No.100-5、pp.1-4 (2004)。
- (14) 久家ほか:制駆動力とアクセルペダル反力を制御する運転支援システムのプロトタイプの有効性検証、自動車技術会学術講演会前刷集、No.100-05、pp.9-12 (2004)。
- (15) 日産ニュースリリース:<https://global.nissannews.com/ja-JP/releases/160713-02-j?source=nng&lang=ja-JP> (参照日:2023年12月1日)

- (16) 谷口ほか: 新型日産スカイラインのプロパイロット 2.0、日産技報、No.86、pp.44-51 (2020). (参照日:2023年12月1日)
- (17) 江川ほか: 特集 1: 未来を拓く ProPILOT 2.0 1. 安心して任せられるパートナーへ、日産技報、No.87、pp.5-8 (2021).
- (18) 谷口ほか: 特集 1: 未来を拓く ProPILOT 2.0 2. 新しい機能、日産技報、No.87、pp.9-12 (2021).
- (19) 谷口ほか: 特集 1: 未来を拓く ProPILOT 2.0 3. 支える車両の制御技術、日産技報、No.87、pp.13-18 (2021).
- (20) 餌取ほか: 特集 1: 未来を拓く ProPILOT 2.0 4. インテリジェント・インターフェース、日産技報、No.87、pp.19-24 (2021).
- (21) 笹山ほか: 特集 1: 未来を拓く ProPILOT 2.0 5. 信頼できるシステムを支える技術、日産技報、No.87、pp.25-30 (2021).
- (22) 久保田ほか: 特集 1: 未来を拓く ProPILOT 2.0 6. 検証のための新しい実験技術、日産技報、No.87、pp.31-36 (2021).
- (23) 日産技術ライブラリー プロパイロット パーキング: https://www.nissan-global.com/JP/INNOVATION/TECHNOLOGY/ARCHIVE/PROPILOT_PARK/ (参照日:2023年12月1日)
- (24) 日産技術ライブラリー プロパイロット リモート パーキング: <https://www.nissan-global.com/JP/INNOVATION/TECHNOLOGY/ARCHIVE/PPRP/> (参照日:2023年12月1日)
- (25) 交通事故分析センター: https://www.itarda.or.jp/situation_accidents (参照日:2023年12月1日)
- (26) 日産ニュースリリース: <https://global.nissannews.com/ja-JP/releases/release-756825ea00d516822dfa8e5e3604317b-220425-01-j> (参照日:2023年12月1日)
- (27) 瀬戸口ほか: 無人運転車両による新しい交通サービス実現のための実証実験の実施 - サービスに必要な乗降地の選定について -、自動車技術会学術講演会前刷集、No.20196244 pp.1-6 (2019-10).
- (28) 李ほか: 無人運転車両による新しい交通サービス実現のための実証実験の実施 - モビリティサービスのための自動運転の効率的な実路走行評価手法の構築 -、自動車技術会学術講演会前刷集、No.20196245 (2019-10).
- (29) 日産技術ライブラリー シームレスオートノマスモビリティ (SAM): <https://www.nissan-global.com/JP/INNOVATION/TECHNOLOGY/ARCHIVE/SAM/>

著者



木村 健

特集2:自動運転・運転支援

2. プロパイロット

井上 拓哉* 谷口 洋平* 徳永 誠士*

1. はじめに

日産は20年以上にわたり運転支援技術のパイオニアとして技術革新をリードし、数多くの世界初の技術を開発してきた。そして、2016年には統合的に支援する高速道路単一車線の運転支援技術「プロパイロット」(図1)を実用化、さらに2019年には高速道路の複数車線をナビゲーションと連動して設定したルートに従って走行し、さらに所定の条件下で同一車線内のハンズオフ走行が可能となる世界初の運転支援システム「プロパイロット2.0」(図2)を実用化した。本章では、「プロパイロット」および「プロパイロット 2.0」のそれぞれの技術について紹介する。



図1 プロパイロット

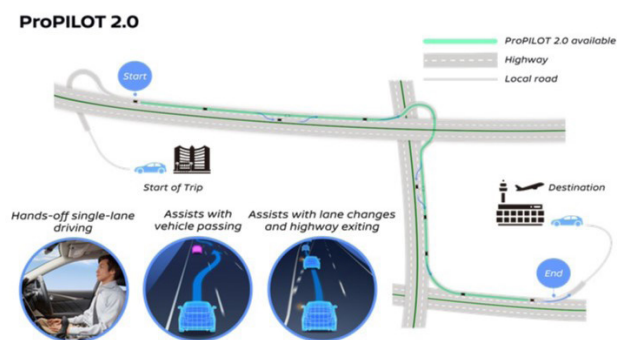


図2 プロパイロット2.0

2. プロパイロット(以下、PP 1.0)

本章では、PP 1.0の概要、機能、ドライバーとの関係、そして認識・制御技術について説明する。

2.1 システムの概要

PP 1.0は、高速道路で負担を感じる二大シーンである渋滞走行と、長時間の巡航走行において、アクセル・ブレーキ・ステアリングすべてを車両側で自動制御し、ドライバーの負担を軽減する。

PP 1.0は、外界を認識するフロントカメラとフロントレーダーに、ビークルコントロールユニット、電動パワーステアリング、ブレーキコントロールユニット、電動パーキングブレーキ、そしてセンサー情報に基づき各ユニットをコントロールするADASコントローラによって構成される(図3)。PP 1.0では、前方車両や白線を瞬時に三次元的に把握し、その情報を基に正確に車両制御、人間が運転している感覚に近い自然な走行を行うことで安心して快適な走行を実現している。

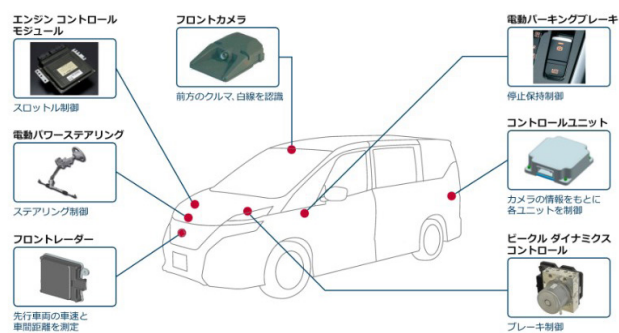


図3 PP 1.0のシステム構成

*AD/ADAS 先行技術開発部

2.2 PP 1.0の機能

PP 1.0には、車速・車間制御機能と車線維持機能の2つの機能がある。

2.2.1 車速・車間制御機能

ドライバーが設定した車速を維持するように速度制御を行う。先行車を検出すると、ドライバーが設定した車速を上限に車速に応じた車間距離を保つように車間制御を行う。先行車が停止した場合は、先行車に続いて自車も停止する。停止後、約30秒間までは先行車に対して停止・追従走行を行うことができる。

さらにナビゲーションと連携して、制限速度が変わった時の設定速度の切り替えや、カーブの大きさ・高速道路の出口などの道路形状にあわせた減速制御を行い、ドライバーの速度調整操作を支援する。

2.2.2 車線維持機能

車線中央付近を走行するようにステアリングを制御し、ドライバーのハンドル操作を支援する。

2.3 ドライバーエンゲージメント

PP 1.0で走行中にドライバーが周囲の交通状況に応じた操作を失念することがないように、ステアリングトルクセンサ、もしくはステアリングタッチセンサを用いてドライバーが操作しているかを検知している。システムがドライバーが操作していないと判断すると、警告を発しドライバーに対応を促す。警告後もドライバーの反応がない場合は、緊急警報とともに車両を減速させ、非常点滅灯で周囲に知らせながら車両を停止させる。車両停止後は、SOSコールサービスに自動で接続し、オペレーターから公共機関（警察・消防・医療機関に救援要請を行う。これらの万が一の事態に対する備えを合わせて提供することにより、高度な運転支援を安心して使ってもらえることができる。

次にPP 1.0で安心して快適な走行を実現するために行っているセンサーや車両制御技術について説明する。

2.4 認識・制御技術

先行車との車間制御において自然な走行を実現するためには正確に先行車の位置と動きを検出する必要がある。PP 1.0では、フロントカメラとフロントレーダーの両センサーの長所を組み合わせた処理を行うことにより、素早く的確に先行車を検出することを可能としている。フロントカメラは対象種別の認識と横位置や車線との位置関係を検出することに優れている一方、フロントレーダーは対象との距離と相対速をより遠距離から高い精度で検出することに優れている。これらの長所を適切に組み合わせることで、高速走行時に必要となる遠距離からの

先行車への対応を可能としながら、近距離における先行車の割り込みや車線変更に対する適切な対応を実現している。

また、車線維持機能では、車両情報に基づくフィードバックを行うことによりカントなどの状況変化に適切に対応するほか、トラックなど大きな車両を追い越すシーンでは空気流の変化により横位置制御に対する抵抗が変化するが、隣接車線のトラックを認識し、操舵制御に情報をフィードフォワードすることで横位置の乱れを抑制し、大きな車両の横を安心して通過できるように操舵制御を行っている。

さらに、ナビゲーションの地図データとGNSS情報により現在地と前方道路の道路属性、曲率、分岐点、制限速度などの情報を事前に把握し、交通環境に応じて適切な車速制御を行うことでドライバーの負荷を軽減し、運転をさらに安心かつ快適なものにしている。

3. プロパイロット 2.0 (以下、PP 2.0)

本章では、PP 2.0の概要、機能、特徴となる技術、そしてシステムとドライバーとの関係について説明する。

3.1 システムの概要

PP 2.0は、目的地を入力すればナビゲーションが設定するルートに従って、高速道路の本線に乗ってから降りるまでのドライバーの運転操作を幅広く支援をする。

PP 2.0は、車両に搭載した7個のカメラ、5個のレーダー、12個のソナーと、GNSS、3D高精度地図(以下3D HDマップ)データを組み合わせて使用することで車両の前方だけでなく、左右や後方など周囲360度の情報と、道路上の正確な位置を把握する。3D HDマップデータには、道路構造が把握できる情報と車線の数、合流・分岐・交差の位置の情報が含まれ、これらの情報を使うことでこれから走る道路を予見した制御を行い、熟練したドライバーが運転しているような滑らかな走行を実現した。また、ドライバーモニターカメラを装備しており、ドライバーが前方の状況に注意しているかを常に監視する。

PP2.0のセンサー搭載図、360度センシングのイメージ図、および3D HDマップの一例をそれぞれ、図4、図5、および図6に示す。

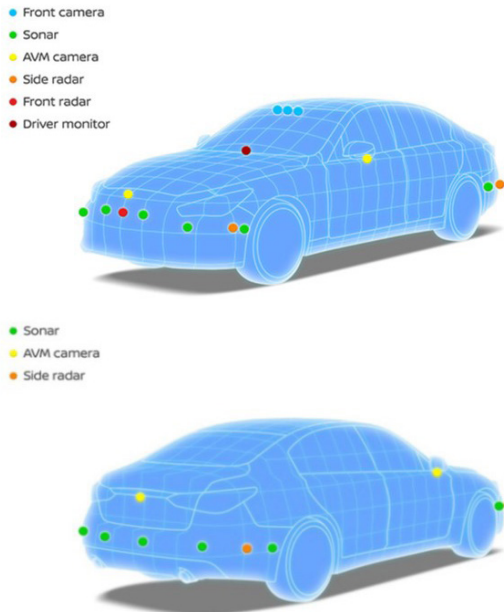


図4 プロパイロット2.0のセンサー構成

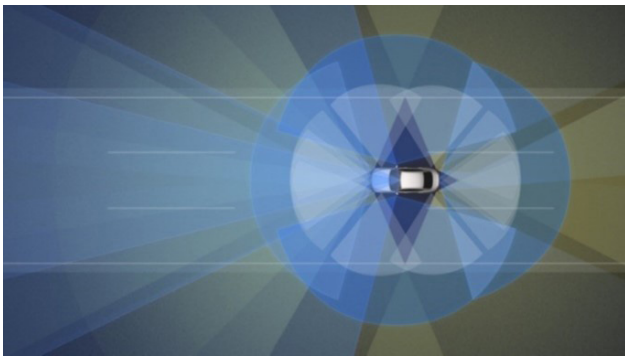


図5 360度センシング



図6 3D高精度地図(3D HDマップ)

3.2 PP 2.0の機能

PP 2.0には、PP 1.0の車速・車間制御機能と車線維持機能に加え、車線変更支援機能、ナビゲーションのルートに従って支援するルート走行支援機能、追い越し操作を支援する追い越し支援機能がある。

3.2.1 車速・車間制御機能

ドライバーが設定した車速を維持するように速度制御を行う。先行車を検出すると、ドライバーが設定した車速を上限に車速に応じた車間距離を保つように車間制御を行う。先行車が停止した場合は、先行車に続いて自車も停止する。停止後、約30秒間までは先行車に対して停止・追従走行を行うことができる。

さらに3D HDマップとナビゲーションのルート情報を用いることで、道路形状にあわせた速度制御だけでなく、分岐の先の情報を用いた車速調整まで行う。

3.2.2 車線維持機能

車線中央付近を走行するようにステアリングを制御し、ドライバーのハンドル操作を支援する。ドライバーが常に前方に注意して道路・交通・自車両の状況に応じ直ちにハンドルを操作できる状態にある限り、ハンドルから手を離すことが可能となる。

3.2.3 車線変更支援機能

ドライバーがハンドルに手を添え、目的の車線の方向へ方向指示器を作動させると、ステアリングを制御し車線変更に必要なステアリング操作を支援する。

3.2.4 ルート走行支援機能

ドライバーがナビゲーションシステムで目的地を設定している場合、出口・分岐路または車線数が減少する地点などルートに従って走行するために車線変更が必要な地点に到達すると、ドライバーに車線変更を提案する。ドライバーがハンドルに手を添え、ステアリングホイール上に設置された車線変更支援スイッチを押すと、目的の車線の方向へ方向指示器が作動、その後ステアリングを制御し車線変更操作を支援する。目的の車線まで複数回車線変更が必要な場合は、連続して車線変更の支援を行うこともできる。

3.2.5 追い越し支援機能

ドライバーが設定した車速よりも遅い車両を前方に検出すると、ドライバーに追い越しを提案する。ドライバーがハンドルに手を添え、ステアリングホイール上に設置された車線変更支援スイッチを押すと、右側の車線の方向へ方向指示器が作動、その後ステアリングを制御し車線変更操作を支援する。遅い車両を追い抜くと、ドライバーに元の車線に戻ることを提案する。ドライバーが車線変更支援スイッチを押すと、左側の車線の方向へ方向指示器が作動、その後ステアリングを制御し車線変更操作を支援する。

次節で車線変更支援機能、ルート走行支援機能、追越し

支援機能に必須な3D HD マップデータの活用について説明する。

3.3 3D HDマップデータの車線変更支援機能への適用

本節では、3D HD マップデータの車線変更支援機能への適用の一例として、車線変更可否判断、車線レベルの走行計画について説明する。

3.3.1 車線変更可否判断

車線変更支援を実現するための課題の一つに、前方の車線に関する情報を取得することが挙げられる。車線変更を開始する時点では車線変更終了地点の車線情報をカメラでは計測しきれていない場合がある。このため、カメラのみの情報では車線変更中に車線変更禁止を表す区画線が現れるなど車線変更ができなくなる可能性がある。一方で、3D HDマップデータは車線レベルで曲率や区画線などの情報を持っているため、カメラの検知範囲外の道路形状を取得することで、任意の車線の開始地点から終了地点までを考慮した車線変更可否判断が可能となる。

3.3.2 車線レベルの走行計画

車線変更支援機能は、追い越し支援やナビゲーションシステムの推奨する経路に沿って進む目的でシステムが適切なタイミングを判断し車線変更を提案する。この判断はシステム内で3D HD マップデータの持つ車線レベルのデータを用いて走行計画を作成することで可能となる。ここでいう走行計画とは、どの区間でどの車線を走行すべきかと、どのように走行すべき車線に誘導するかの計画を指す。

図7に車線レベルの走行計画を作成する過程を示す。まず、高速道路上で出口などの分岐が存在した場合に、ナビゲーションシステムの推奨する進路に移動するために必要な車線変更回数と、分岐に対して道なり距離とを計算し車線選択を行う。

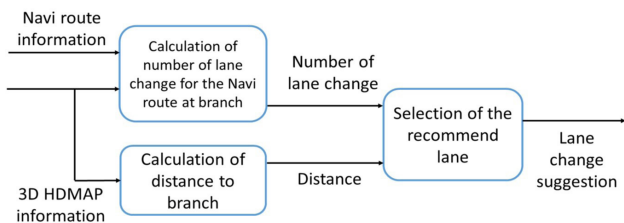


図7 車線レベル経路生成ブロック図

次に、車線レベルの走行計画について例を用いて説明する。図8は高速道路の分岐付近の道路形状を模式的に表した図である。ナビゲーションシステムの推奨する経路が、図中の「P」地点から出口に進むように設定されているとする。

本線の右側車線にいる場合は、出口が近づくと車線「A」に移動するまで左の車線に車線変更するようシステムが提案する。ここで車線「B」に移ってしまうとP地点を出るために必要な車線変更回数が却って増えてしまうため、車線「B」へ移動する提案はしない。なお、はじめから車線「B」を走行していた場合は、右への車線変更をシステムが提案し車線「A」へと誘導する。このように、いずれの車線を走行していても、最終的には車線「A」に誘導するように車線変更の提案が行われる。また、車線レベルでの走行計画を持つことで、前方車の追い越しにおいても適切なタイミングで提案することができる。例えば、進むべき進路が分岐の左方向にあり、かつその分岐までの距離が近い場合には、追い越しの提案をしないようシステムが判断している。

以上のように、3D HD マップデータを用いた車線レベルの走行計画を持つことで、どの車線に移動するのが望ましいかが分かり、その結果、適切なタイミングでの車線変更の提案が可能になる。

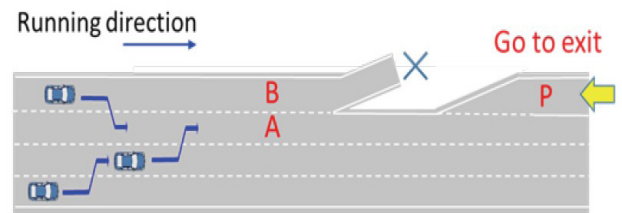


図8 分岐付近での車線レベル経路生成

3.4 オフボード連携機能

PP 2.0においては、3D HD マップのデータ更新などの機能を実現するため、テレマティクス通信によるサーバーとの常時通信によるオフボード連携機能を有している。

オフボード連携機能は、車両側の3D HD マップのストレージおよび地図データ出力を行う3D HD マップECU、テレマティクス通信を行うテレマティクスCU、最新地図データの保存および配信を行うサーバーから構成される。(図9)

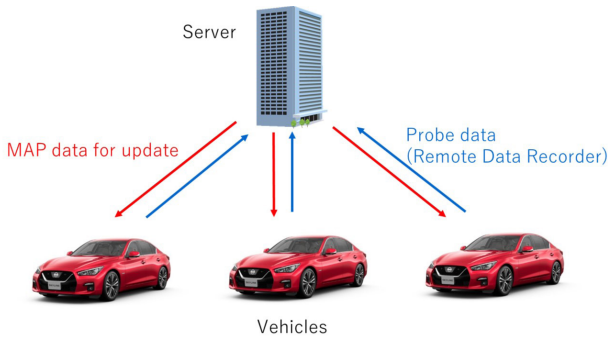


図9 オフボード連携

工事などによる道路形状の変更があった場合にもタイムリーに実際の道路形状にあった最新の地図データを活用できるようにするため、3D HD マップデータは年に数回の頻度で更新される。

3D HD マップ ECU は、サーバー上の最新地図データのバージョンと ECU 内の地図データのバージョンの差分を都度確認し、地図データの更新があった場合にはナビの目的地が設定されている場合は、ルート上の地図を優先、目的地が設定されていない場合は自車位置に近い場所から優先的に最新地図データをサーバーからダウンロードし、ECU 内の地図データを更新する。これにより、常に最新の 3D HD マップデータを運転支援に利用できるようにした。

3.5 PP 2.0 とドライバーとの関係

PP2.0 の高度な運転支援機能を、ドライバーが簡単かつ適切に使えるようにするために独自に開発した HMI が、インテリジェントインターフェースである。インテリジェントインターフェースは、HUD (Head up Display) やメーターディスプレイによる表示、ステアリング・スイッチによる操作、ドライバーモニターによる警報等から構成される。(図 10)

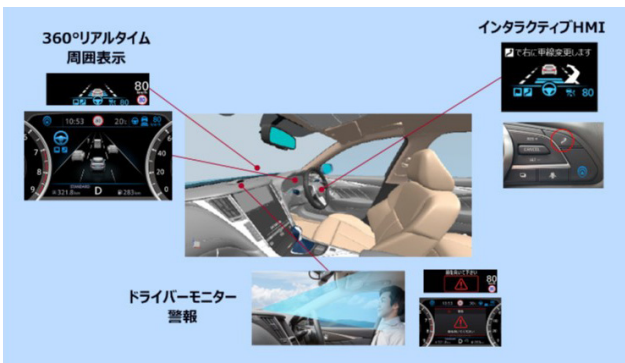


図10 インテリジェントインターフェース

PP 2.0 では同一車線内でのハンズオフ機能が追加されたことにより、システムの作動状態は PP1.0 の 2 つから 3 つとなった。

車速・車間制御のみを作動している ICC モード、車速・車間制御とステアリング制御の双方が作動しているが、ドライバーは常時ハンドルを把持する必要があるハンズオンモード、車速・車間制御とステアリング制御の双方が作動し、ドライバーが安全を確認いつでもハンドル操作を行える状態にあることを前提にハンドルから手を離すことができるハンズオフモードの 3 つである。我々は、色の違いで識別を促すカラーコーディングを、HUD とメーターディスプレイに表示されるアイコン、インジケーター等の表示要素に広く適用し、ICC モードは白、ハンズオンモードは緑、ハンズオフモードは青とすることで、3 状態が容易に識別可能となるようにした (図 11)。

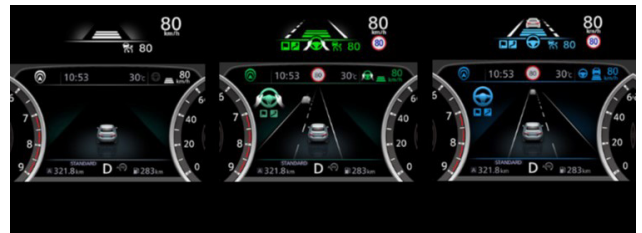


図11 作動状態を示すカラーコーディング

さらに、ハンズオフモードで走行中にドライバーが周囲の交通状況の監視を失念することがないように、ドライバーが前方の状況に注意しているかを判断し、ドライバーに前方注視を促す警報を発するドライバーモニターも備えている。(図 12)



図12 ドライバーモニターによる前方注視を促す警報

3.5.1 インタラクティブHMI

ナビ連動ルート走行機能における分岐時または追い越し時の車線変更支援では、システムがナビルート、先行車の車速、周囲の交通状況を考慮し、適切なタイミングでHUDおよびメーターディスプレイの表示を通して車線変更支援を提案する。(図13)



図13 システムから車線変更支援の提案

HUDでは、矢印形状のグラフィックスで車線変更支援の提案を示し、上部のテキストでドライバーの承認を促す。ドライバーの前方視認を阻害することなく、ドライバーがシステム提案を認識できるよう、最小限の表示要素で構成している。同時にメーターディスプレイには車線変更の理由を合わせて表示し、ドライバーが必要に応じて確認できるようになっている。ドライバーが周囲の安全確認を行った上で、ステアリング・スイッチを押すと、車線変更支援が開始される。このスイッチは、ドライバーがシステム提案を受けて比較的短時間で操作する機会が多いため、視認性と操作性の双方に慮して、ステアリングの外周に近い上部に配置した。習熟するとスイッチを視認せずに押すことが可能である。車線変更支援中は、オーバーライドに備えてハンドルを把持しなければならない。そのため、車線変更支援が開始されると、HUDとメーターディスプレイはハンズオフモード(青のコーディング)からハンズオンモード(緑のコーディング)に切り替わり、ドライバーにハンドルの把持を促す。カラーコーディングが最も効果を発揮する場面である。

ドライバーの承認を受け付けてから車線変更が開始されるまでの間、HUDの矢印形状のグラフィックが手前から奥に流れ

るようなアニメーション表現となり、安全確認を促すテキストメッセージが表示される。システムが方向指示灯を点滅させ車線変更を開始すると、HUDの矢印形状のグラフィックが緑色になり方向指示灯と同周期で点滅し、車線変更が進行中であることをドライバーに伝える。(図14)

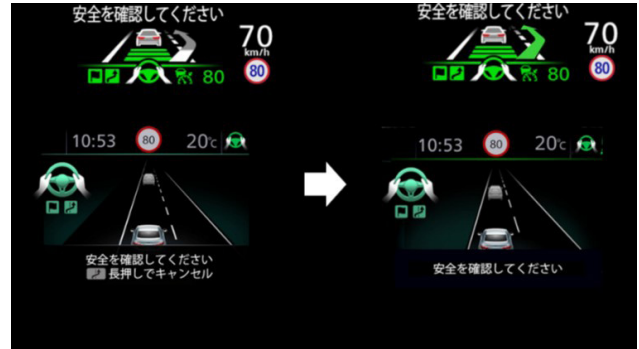


図14 車線変更支援時の表示

3.5.2 360°リアルタイム周囲表示

ドライバーにシステムの能力を正確に把握させるため、システムが検知している道路環境と交通状況を360°リアルタイムで表示する。

道路環境として、自車レーンと左右の隣接レーンの有無、路境界線の種別(白実線/白破線/黄色実線、二重線も表示可)を表示している。(図15) これにより、3D HDマップデータとフロントカメラによる、周囲の道路環境の検知能力が、ディスプレイ内の空間に反映されることになる。



図15 360°リアルタイム表示の例(境界線別)

交通状況として、自車レーンと左右の隣接レーンで検知している他車両を車型毎(乗用車/大型車/二輪車/不明)に表示する。また、ディスプレイ内の他車両の距離感が、実際の風景と概ね一致するよう表示位置のチューニングを繰り返し、最終的に非線形なスケールとなっている。これにより、フロントカメラ、フロントレーダー、サイドレーダー等のセンサー出力

をフュージョン処理した他車両の検知状況が、ディスプレイ内の空間に反映される。ドライバーは実空間とディスプレイ空間を見比べることで、システムの検知範囲と識別能力を概観することができる。

ドライバーが様々なシーンを経験するに従い、360°リアルタイム表示を通して徐々にシステムの能力を学習し、ひいてはシステムの能力の範囲で適切にシステムを使用できるようになる。同時に、システムへの信頼感が醸成される。

6. まとめ

プロパイロットは“より広いシーンで”、“より使いやすく”、“より多くのお客様に”をコンセプトに開発を行っている。今回、「プロパイロット」、「プロパイロット 2.0」を商品化したことでお客様により安心して快適、ストレスフリーな運転を提供することができ、多くの反響を頂いている。

今後、より幅広いシーンで運転操作を支援できるよう技術開発を行い、更なる安全な交通社会の実現を目指し、クルマの新しい価値を提供していきたい。

著者



井上 拓哉



谷口 洋平



徳永 誠士

特集2:自動運転・運転支援

3. メモリー機能付きプロパイロットパーキング

高野 照久* 渡邊 武史* 竹田 棕*

1. ま え が き

自動車のドライバーにとって駐車は難しいと感じる運転操作の一つである。ドライバーは駐車場の形状や隣接車の有無に応じて、繰り返し位置を適切に計画する必要がある。特に狭いスペースでの駐車ではハンドルの繰り返し、および前後退のシフト切り替え操作が何度も必要となり、ドライバーの運転操作が難しい。そのため、駐車支援のための研究開発が活発に行われている。近年になり、住宅環境のような区画線のない駐車位置を自動的に検出するために、メモリー機能の開発が進められている。メモリー機能とは駐車位置をドライバーが予め登録することで、登録後はシステムが駐車位置を自動検出し駐車支援を行う機能である。メモリー機能にはドライバーが駐車位置をナビ画面上のカーソルを操作して登録するものや、ドライバーの駐車した経路を記憶し忠実に再現するものなどがある。

2. 日産のプロパイロットパーキング

プロパイロットパーキングは2017年発売の2代目リーフに初搭載された。アラウンドビューシステム⁽¹⁾を用いた駐車区画線の検出と、ソナーを用いた車両間スペースなどの駐車可能な空間把握により、目標駐車位置の自動検出と、切返しを含めた最適な駐車経路の演算を行い、目標駐車位置まで車両を制御する駐車支援システム⁽²⁾である。ドライバーは駐車開始ボタンを押すだけで、システムが駐車操作（ハンドル・アクセル・ブレーキ・シフト切換え）を自動制御し、切返しを含めて目標駐車位置までの駐車操作を支援する（図1、2）。以降、サクラ、エクストレイル、アリアに搭載されている。

2023年には日産初のメモリー機能付きプロパイロットパーキングをセレナに搭載した（図3）。本稿では、最新のメモリー機能の駐車位置の登録、検出技術について紹介する。

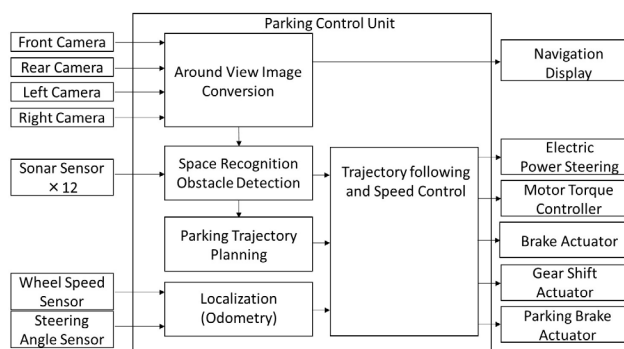


図1 プロパイロットパーキングのシステム構成図

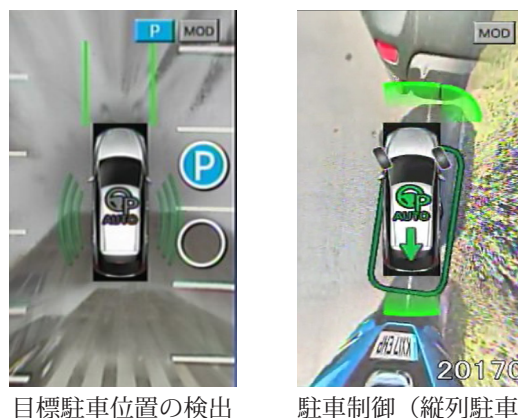


図2 駐車位置検出と駐車制御

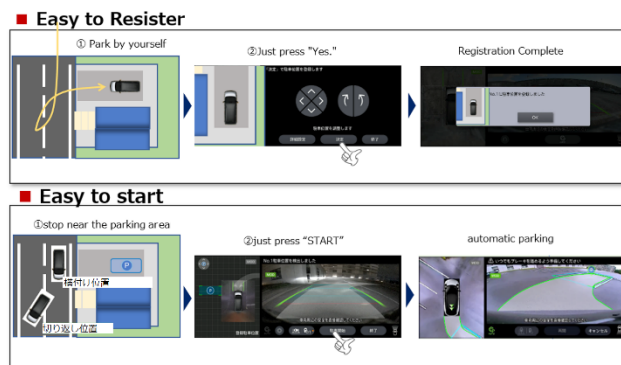


図3 メモリー機能付きプロパイロットパーキング

*AD/ADAS 先行技術開発部

3. メモリー機能付きプロパイロットパーキング

日産のメモリー機能の狙いは、ドライバーが煩雑な操作をすることなく駐車位置を登録でき、普段の運転操作から違和感なく駐車支援に移行できるシステムの実現である。開発した支援システムは、ドライバーの低速走行中の路面画像を自動的に蓄積することで、ドライバーの事前操作が不要で、駐車後のワンタッチ操作で登録できる(図3上)。また検出時は、GNSS (Global Navigation Satellite System) を用いたシステムの自動起動と、メモリーの自動選択により、ドライバーが駐車位置の付近で停車するだけで、自動的に起動し、駐車位置を検出する(図3下)。また、駐車位置の横付け位置から切返し位置までの範囲で検知可能である。

4. システム構成

メモリー機能付きプロパイロットパーキングの部品構成を図4に示す。新開発の300万画素アラウンドビューカメラを搭載し、路面を含めた車両のほぼ全周囲の映像を、詳細に撮影する。また、左右のドアミラーには夜間認識のために赤外線投光器を搭載している。さらに、ナビゲーションシステムからGNSS情報を取得し、メモリー情報と紐づけて駐車位置の自動検出のために利用している。

5. 駐車位置の登録、検出手法

メモリー機能では、アラウンドビューカメラを用いて路面を撮影し、登録時の路面模様と現在の路面模様を照合し、駐車位置を検出する。路面模様は駐車位置の手前を走行している範囲も含めて、最大約40mの範囲でマップ化し保存する。広範囲の路面マップを用いることで、横付け位置だけでなく、切返し位置からでも駐車位置を検出できる(図3下)。

5.1 路面マップ

路面マップとは走行経路に沿った路面模様を特徴量に変換し、特徴点の座標とともに記録したものであり、登録用の路面マップと検出用の路面マップの2種類がある。登録用の路面マップは、登録時に生成するものであり、駐車位置に面した通路から切返し位置を経由して駐車位置までを含むように、切返し位置を基準に前進と後退それぞれ上限20mの範囲で生成される(図5、図6(a))。検出用の路面マップは、駐車位置検出時に生成するものであり、検出時の自車両位置を基準に過去20mの範囲で生成される(図6(b))。なお、本システムは低速走行時に、アラウンドビュー画像を一定距離ごとに自動的

に蓄積するため、ドライバーが事前に記録や検出を開始するための操作は必要なく、自動的に路面マップが生成される。



図4 メモリー付きプロパイロットパーキングの部品構成

メモリー機能で登録される内容

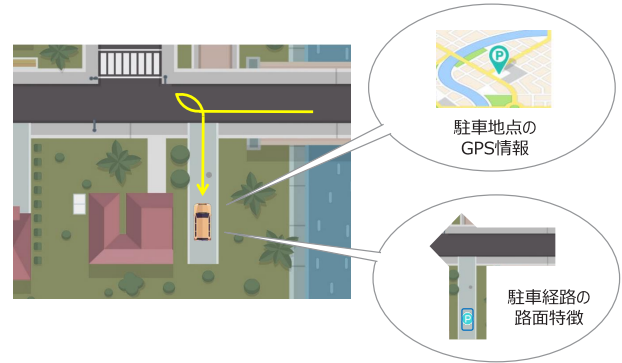


図5 メモリー機能で登録される内容

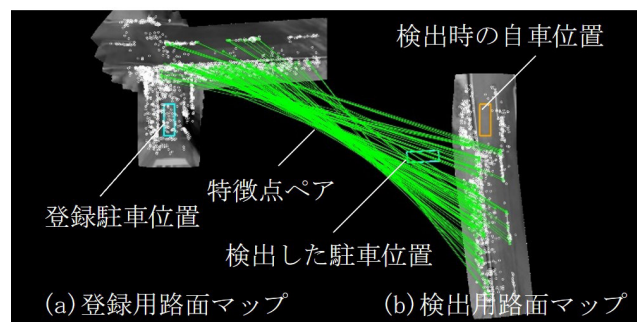


図6 路面マップの照合

5.2 駐車位置の検出

駐車位置を検出するために、検出用の路面マップと登録用の路面マップとを照合する。双方のマップを比較し、画像特徴の最も類似したペアを結び付ける。ここで画像特徴とは、路面マップから検出された角部やエッジ部などの位置を示す特徴点

と、特徴点を識別するための特徴量を示す。照合時に、駐車車両や自転車などの立体物、朝昼夜などの日照状況変化に伴う画像変化があると、照合性能が低下する。そのため、有効な特徴点を抽出する処理⁽³⁾を行っている。

5.3 登録駐車位置の自動検出

本システムでは駐車位置を登録する際に、ナビゲーションシステムから取得したGNSSの位置情報(緯度経度及び車両向き)を紐づけて保存する。登録後は、GNSSの位置情報を用いて、自車両の一定範囲内の登録駐車位置を自動的に探索し、登録駐車位置の付近で停車すると、自動的に登録用の路面マップと照合して駐車位置を検出し、ナビ画面に検出した駐車位置を表示する(図7)。複数の登録位置が自車両の一定範囲内に入った場合は、範囲内のすべての登録位置に対して路面マップの照合を行い、距離が最も近いものを優先的に表示する。またドライバー操作でメモリーを選択することもできる。

5.4 リアルタイム補正

駐車制御中に登録用の路面マップと現在の俯瞰画像を逐次照合し、駐車位置を検出する。駐車位置に近づくにつれて、駐車位置と直接照合できるようになるため、最終的な駐車位置精度が向上する。(図8)

6. まとめ

本稿では、日産プロパイロットパーキングの機能と、最新のメモリー機能の認識技術を紹介した。開発したメモリー機能ではドライバーが駐車した場所を簡単操作で登録し、登録後は駐車位置に接近すると自動的に駐車位置を検出することができ(図9、10、11)、簡単操作の駐車支援を実現した。

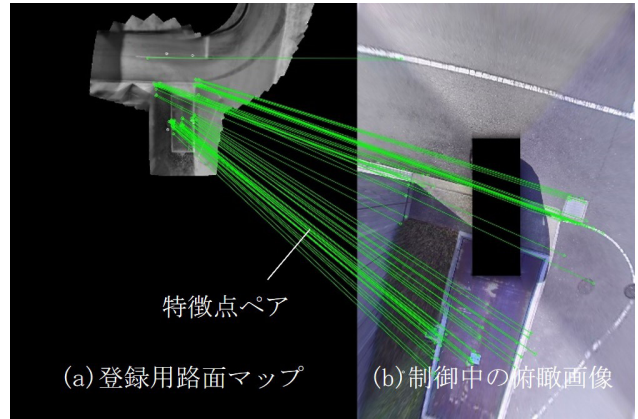


図8 リアルタイム補正時の路面マップ照合



図9 横付け位置で検知

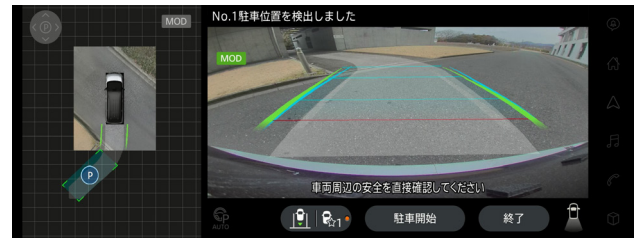


図10 切り返して検知



図11 奥まった駐車位置を検知

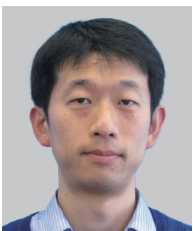


図7 自動検出時の画面

参考文献

- (1) Ken Oizumi:Development of “All-Around View” System、2003-01-0017、SAE TECHNICAL PAPER SERIES
- (2) 鈴木康啓ら:駐車位置検出から駐車操作まで自動で行う駐車支援システムの技術開発、自動車技術会大会学術講演会講演予稿集、2018、20185428
- (3) 竹田 椋ら:駐車位置周辺の路面マップ生成による簡単操作のメモリー機能付き駐車支援システムの技術開発、自動車技術会大会学術講演会講演予稿集、2023、20236254

著者



高野 照久



渡邊 武史



竹田 椋

特集2:自動運転・運転支援

4. 事故ゼロを目指した最新の運転支援技術

餌取 成明*

1. はじめに

日産は長期ビジョン「Nissan Ambition 2030」において、高性能な次世代LiDAR（ライダー）技術を活用し、事故の低減に大きく貢献する車両制御技術の開発に取り組んでいる。将来の自動運転の時代において、お客さまに安心してクルマを使っていただくためには、世の中で起こる多次元に複雑な事故を回避するための運転支援技術の更なる向上が必須であると考えており、2つの取り組みを通して“リアルワールドにおいてさらに高い安全性の提供”を目指している（表1）。

1つ目の取り組みはリアルワールドで高い安全性の提供を目指すために必要な交通シーンを明確にすることである。リアルワールドで起きている事故は、頻度が高いが単純なシーンから、頻度は低いが高度に複雑なシーンまで広く分布している。しかしながら深刻な事故に繋がる可能性のある複雑なシーンを机上で全て検討することは困難であり、統計的な手法を用いることになる。しかしこれも簡単なことではない。例えば日本の場合、交通事故統計によると1件の死亡事故に至る平均走行距離は約2億4000万mになる。これは約3万台の車の1年間の総走行距離に相当する。頻度の低いシーンをモデル化するにはこのようなデータが何セットも必要であり、我々は走行実験によるデータ収集に加え、量産車を使ったデータ収集に取り組んでいる。

もう一つの取り組みは自動化による安全性能の向上の取り組みである。日産はセーフティシールドコンセプトの下、衝突リスクの発生段階に応じた技術を開発・導入してきた。常用域については約25年にわたる技術開発を経て自動化を達成する目途が立ちつつあるが、緊急回避技術については開発を加速する必要がある状況である。

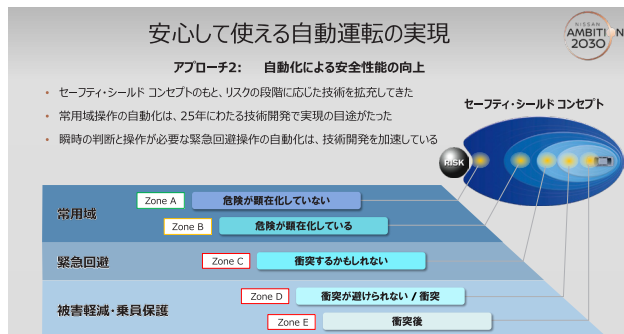
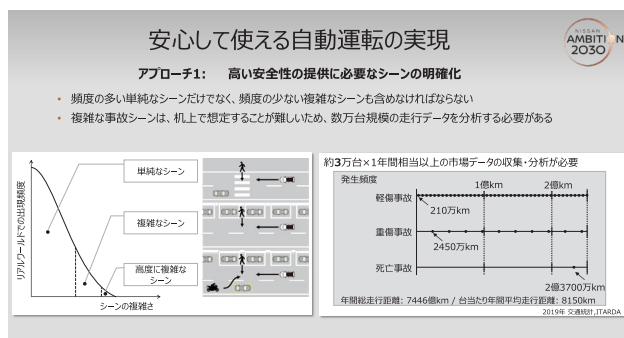


表1 安心して使える自動運転の実現に向けた取組

本章では、緊急回避操作の自動化について最新の日産での取り組み“Ground truth perception技術”を紹介する。

2. 複雑な事故の事例

頻度は少ないが実際に起こっている複雑な事故の事例を2つ示す。最初の事例は左の車線が遠方で渋滞している。その発見が遅れたトレーラーが横転、自車前方の3車線をふさいでしまうという事例である（図1）。

*AD/ADAS 先行技術開発部

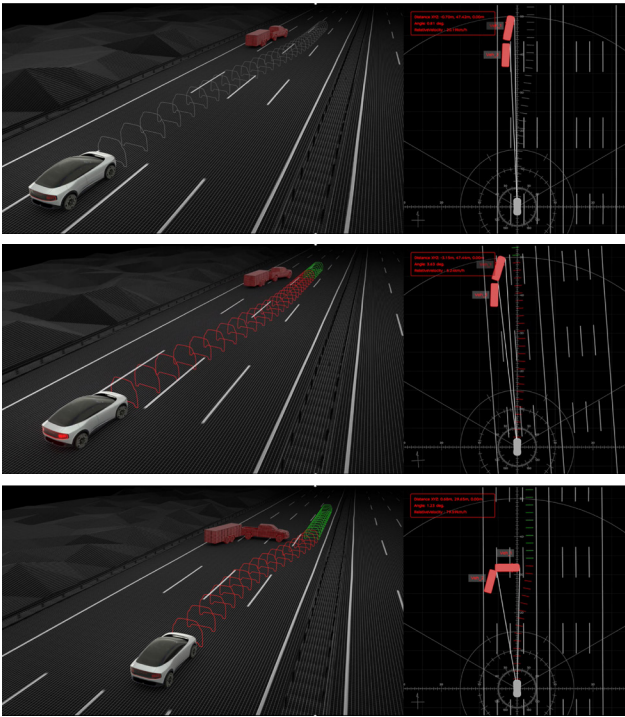


図1 複雑な事故の事例1

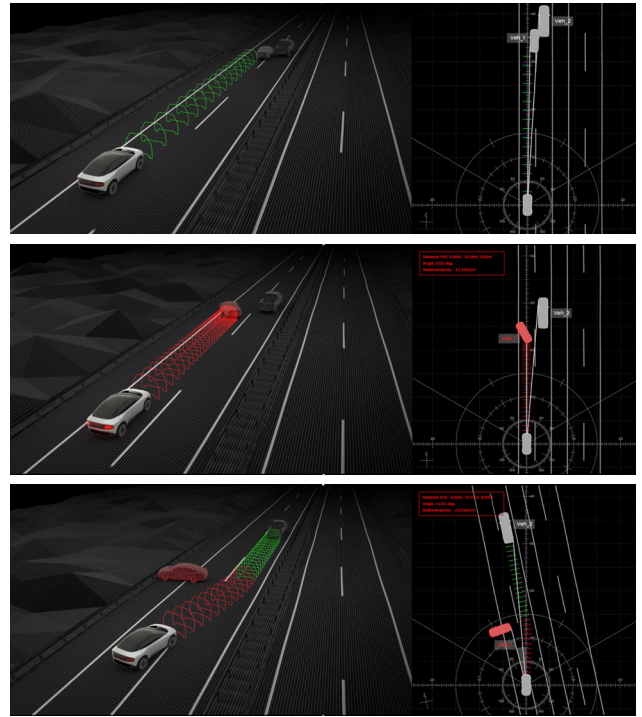


図2 複雑な事故の事例2

このようなシーンで自動運転車両はどう対処するかというと、まずトレーラーが自車線にはみ出してくるのでハンドルで避けようとする。しかしトレーラーが横転して3車線をふさぐ形となるのでさらに回避を行うことが必要になる。このように時々刻々と変化する状況を正確に遅れなく把握し、瞬時の判断で状況に即した回避行動をとることが必要になる。

2つ目の事例は前方を走っている車両が脇見をして隣車線のトラックと接触をして減速、その後ガードレールに衝突したため予想以上に急停止してしまう事例である。(図2)

このシーンでは、まず前方の車両が隣接車線のトラックと接触し減速するため、ブレーキによる回避を試みるが、その後前方の車両が急停止に至るため、緊急操舵で回避する。この場合も自車線にはみ出してくるのでハンドルで避けようとする。時々刻々と変化する状況を正確に遅れなく把握し、瞬時の判断で状況に即した回避行動をとることが必要になる。

このように自動運転車両に求められる緊急回避行動とは空間と物体を3次元で正確に遅れなく把握し、時々刻々と変化する状況のもと瞬時の判断で回避操作を連続させることである。

3. Ground truth perception 技術

自動運転車両に求められる緊急回避行動を実現するためにまず必要なことは認識性能の革新である。今回開発した Ground truth perception 技術は、従来のカメラ、レーダーに加え、次世代高性能 LiDAR を使用している。

図3にカメラ、レーダー、LiDARの特徴を示す。

	計測精度				役割
	形状	位置		応答性	
Camera	excellent	excellent	excellent	excellent	車両と道路構造の区別、車両の種類、標識の文字や数字などシーンの意味(Context)を理解
Radar	○	○	○	○	周囲の移動物の動き(距離と速度)を把握
Next-gen LiDAR	○	○	○	○	空間の構造と物体の形・位置を3Dプリンタのように正確に再現

図3 カメラ、レーダー、LiDARの特徴

カメラは多くの情報を捉えるのでシーンの意味合い(コンテキスト)を理解できる反面、二次元から三次元を創り上げるため形、位置の正確性に欠け、また三次元化するアルゴリズムが複雑なため急な変化には物体の追従できないという短所がある。レーダーは物体の動きを捉えるには非常に優れているが、電波の反射の強さを大きさに置き換えており正確な形を捉えることは難しく、複雑なアルゴリズムの特性上、カメラと同様に急な動きの追従が苦手である。LiDARは複雑な解釈を行わず直接空間の構造を計測するため、変化に素早く追従することができ、3Dプリンタのように正確に空間を自動運転の頭脳に再現することができる。この3つのセンサの長所を統合して最大化することにより人間の能力に大きく近づくことができる。

次に既に実用化されているLiDARと次世代の高性能LiDARの差を説明する。次世代LiDARはまずカメラと同じように広い角度で世の中を捉えることができる。現在のLiDARは非常に薄い角度で空間を切り取るため空間と物体を理解することが難しく、LiDARのポテンシャルを十分に使えていない。また次世代LiDARは300mという現行の2倍以上の検知距離を目指している。これは世界の高速道路の一般的な最高速度130キロで渋滞末尾の車両を検出して通常の車線変更で回避することができるようにするためである。検知距離を2倍にすると遠方ほどビームが広がるため、合わせて分解能も2倍にする必要がある。この垂直検知角で25deg以上、検知距離で300m以上、分解能で0.05deg以下という目標に対して満たしているのが次世代LiDARである。(図4)

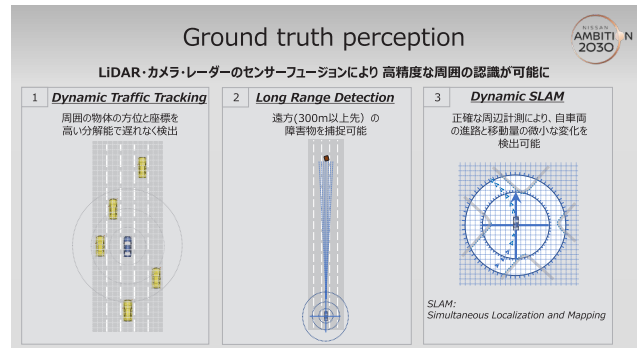


図5 Ground truth perception

カメラ、レーダー、次世代LiDARを融合したセンシング技術で実現する性能は①Dynamic Traffic Tracking、②Long Range Detection、③Dynamic SLAMである。(図5)

Dynamic Traffic Trackingとは、道路構造と周囲の車両の動きを正確に遅れなく捉える性能であり、緊急性能の向上に寄与する。Long Range Detectionは、300m以上離れた車両を捉え、高速道路で発生するほとんどの事象を対処できるようになる。最後にDynamic SLAMは周囲の空間を正確に計測することにより周囲の障害物が把握されることに加え、空間の見え方の変化から自身の動きを正確に計測することができる。自身の動きを正確に捉えることでホテルの敷地内でのアプローチなど地図の整備されていないエリアでも自動走行ができるようになり、Door to Door機能の実現が視野に入ってくることになる。

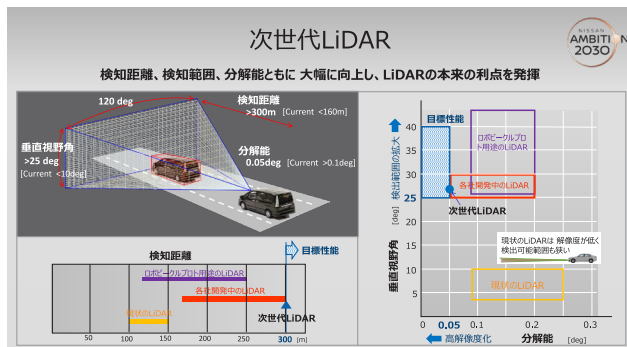


図4 次世代LiDAR

4. Ground truth perception 試作車両

Ground truth perception技術を搭載した試作車を紹介する。

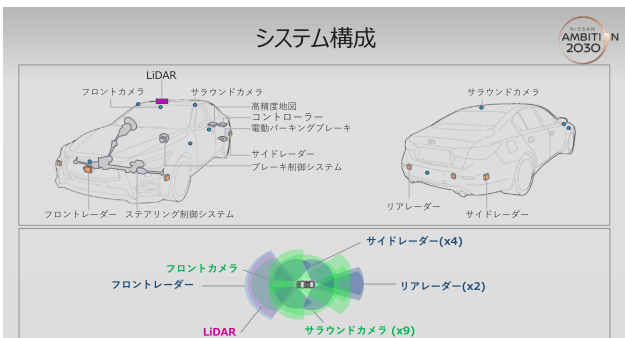


図6 試作車の外観とシステム構成

車両の周囲に7個のレーダー、10個のカメラ、ルーフ上に次世代LiDARを搭載した。ルーフ上にLiDARを搭載する理由は、ビームが周囲の車両で遮られないよう、遠くまで空間把握するために高い位置に搭載することを選択した。

5. Ground truth perception 技術を用いた最新の運転支援技術

試作車の性能を3つのシナリオで紹介する。

一つ目のシナリオは道路沿いの駐車場から不注意に後退してきた車両を回避、回避した先に歩行者が飛び出してきたため緊急停止するシナリオである。(図7)

このシナリオでは周囲の物体と形と位置を正確に遅れなく把握し、瞬時の判断で緊急操作を連続的に行うことで後退車両及び飛び出してきた歩行者に対して連続した回避操作の自動化を実現した。



図7 試作車による緊急操作の自動化

2つ目のシナリオは対向車線を走っているタイヤが外れ前方から向かってくるシナリオである。(図8)

このシナリオは向かってくるタイヤを回避した後、タイヤが外れた対向車両が中央分離帯を越えて自車線に飛び出してくる。

本シナリオでも周囲の物体と形と位置を正確に遅れなく把握し、瞬時の判断で連続した回避操作の自動化を実現を確認した。

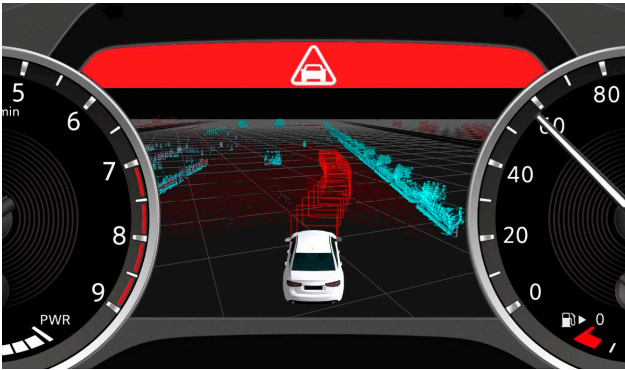


図8 向かってくるタイヤを検出し、回避するシーン

3つ目は高速走行時に渋滞末尾や路上障害物をいち早く検出し通常の車線変更で安全な車線に移動するシナリオ(図9)と地図の整備されていない道を自身で周囲の道路構造を把握し、進む道を演算し目的地であるドアの前まで自立走行するシナリオ(図10)である。Ground Truth perception技術により運転支援技術が進化し、Address to Addressに進化する姿を確認した。

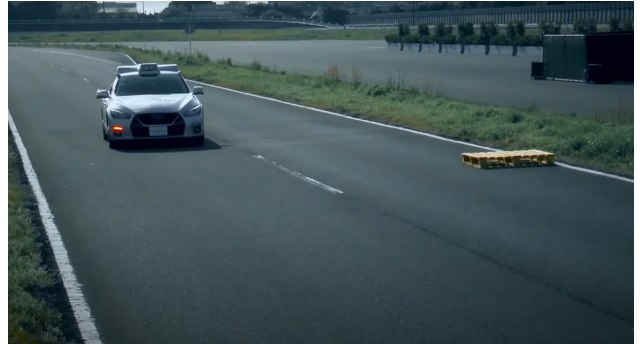


図9 渋滞末尾や路上障害物を車線変更で避ける様子

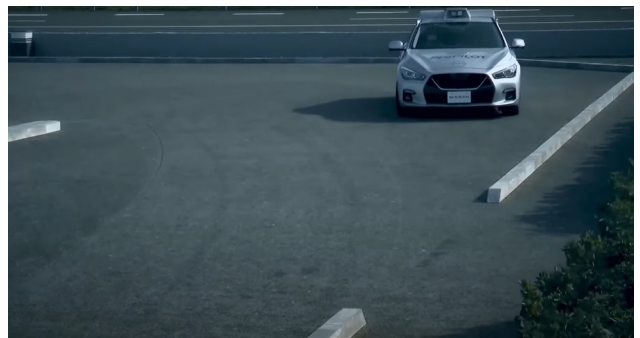


図10 試作車による緊急操作の自動化

6. おわりに

日産は安心して使える自動運転の実現に向けて、緊急回避操作の自動化をまず実現すべき課題と考えている。今回紹介した技術開発をさらに加速、進化させ、自動運転技術の次のステップを確実に高めていく。

著者



餌取 成明

特集3:コネクテッドサービス

1. コネクテッドカー&サービス概要

村松 寿郎*

1. はじめに

自動車が発明されてから260年余り、自動車技術は走る・曲がる・止まるという移動手段としての技術を中心に発展してきたが、その歴史の後半10%のところで無線通信技術の発展とともに「繋がる」が新たな機能・技術として加わった。当初はTelecommunicationとInformaticsを組み合わせた造語でTelematics(テレマティクス)と呼称されたもので、自動車に主に携帯電話網による無線通信システムを利用して各種サービスを提供するものである。最近ではこのシステムを搭載した自動車をConnected car(コネクテッドカー)、そのシステムを活用して提供するサービスをConnected service(コネクテッドサービス)と呼称し、ICT(Information and Communication Technology)の発展とともに技術やサービスの革新が続いている。本稿では、日産におけるコネクテッドカー&サービスならびにモビリティサービスの解説を行うとともに、将来の展望について述べる。

2. これまでのコネクテッドカー&サービス

日産のコネクテッドサービスは1998年のコンパスリンクから始まった。これは90年代半ばから普及し始めてきた車載ナビゲーションシステムの情報量をオペレーションセンターの大規模データベースで補完し、目的地設定の煩わしさの解消を目的としたもので、有人オペレータによる検索代行と検索結果をナビゲーションの目的地に設定される。お客様は自動車からハンズフリー音声通話でオペレータと会話して要望を伝えることで、所望の目的地を見つけられ、自動的にナビゲーションシステムの目的地が設定される世界初のサービスであった。このサービスの実現には音声通話とデータ通信の両者が必要であったが、当時はおお客様の携帯電話を無線通信機として利用させていただき、9.6kbpsの通信レートを2分割して、半分を音声通話、半分をデータ通信に利用するDV(Data and

Voice)という技術を用いた。これによりお客様とオペレータの音声通話と並行して、車両側からお客様や車両の識別情報をオペレーションセンターに送信し、オペレーションセンターから車両側に検索結果のデータを送信することが可能となった。

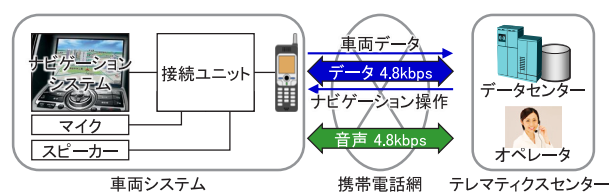


図1 コンパスリンクサービスのシステム概略

携帯電話での情報検索が普及・発展してきたことに伴い、そのカスタマーエクスペリエンスに沿ったサービスとして、2002年に上述の有人オペレータサービスに加えて、情報提供サービスを充実させたカーウイングスのサービスを開始した。このサービスでは、さまざまな情報コンテンツを提供する“情報チャンネル”、メールの受信や車両現在地をメールで送信する“ここです車メール”、交通情報をもとに目的地まで最短時間で行けるルートを検索する“最速ルート案内”等を提供した。このサービスではデータ通信の比重が大きくなったことから、前述のDV技術ではなく、音声通信とデータ通信を切り替えて利用していた。また、これらの情報サービスの操作には音声認識技術を導入し、車両にダウンロードされたコンテンツの再生には音声合成(TTS: Text to Speech)技術を採用し、ドライバーディストラクションを低減しつつサービスを享受できるようにした。以来、システムやサービスの発展とともにHMI(Human Machine Interface)も革新が続いている。

またカーウイングスのサービスでは車両から得られる情報(プローブデータ)の活用も開始している。前述の“最速ルート案内”では、VICSセンターから得られる交通情報とプローブデータを組み合わせることによって詳細なリアルタイム交通情報、推測交通情報、統計交通情報を生成して最速ルートを計算で

*コネクテッドカーオフボード開発 & オペレーション部

きるようにした。またABSの作動情報・時刻・位置を集約し匿名化したうえで“スリップ情報”として配信することでドライバーに路面の注意喚起を行うとともに、道路管理者に提供する実証実験も行った。



図2 カーウィングスのサービス事例

2010年、日産は世界初の量産型電気自動車 (EV) であるリーフをグローバル市場に販売開始した。この世界初のチャレンジに備え、市場環境でのリチウムイオン電池の品質モニターならびにEVを使っていただく上でお客様の不安解消のため、車載TCU (Telematics Control Unit: 通信ユニット) を採用し、グローバルに展開した。車両の市場環境での使われ方、リチウムイオン電池の状態のデータはグローバルデータセンター (Global Data Center: GDC) に集約して一元管理され、車両や電池の品質をモニターすることで万一の不具合に備えるとともに、その後のEV/電池開発に有益な情報を得ている。お客様がEVを使う上で不安に感じることは航続距離であり、充電ステーションの少なさであった。その不安解消のため、実際の電費情報を用いて航続可能距離を算出し、ナビゲーション地図上に航続可能エリアを表示し、近くの充電スポット情報を簡単に検索できるようにした。さらに当時EVならではの便利機能として乗車前に車両のエアコンをリモートで作動させたり、ドライブの後に走行履歴を確認できるよう携帯電話端末側のアプリケーションを充実させた。以来、お客様が車両乗車中だけでなく、乗車前や乗車後も含めたシームレスがユーザーエクスペリエンスの提供を充実させ、最近では普及してきたIoT (Internet of Things) との連携も進めている。

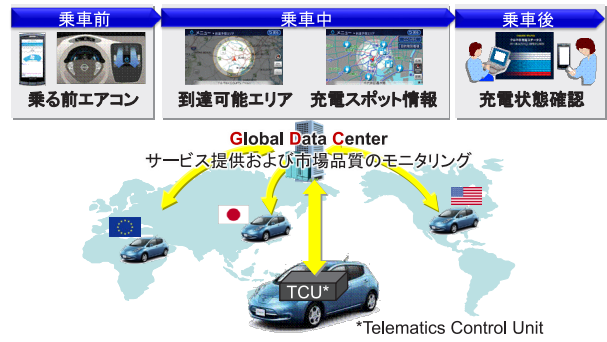


図3 GDCの概念図とEVサービス

3. 現在のコネクテッドカー & サービス

EVやADAS (Advanced Driver Assistant System) といった車両の進化、ICTの発展・普及や社会受容性の変化に合わせて開発・実用化を行ってきており、2019年にルノーとのアライアンス協業によるAlliance Intelligent Cloudというクラウドシステムにコネクテッドカーを接続し、現在のNissanConnectサービスの提供を開始した。コネクテッドカーの基幹システムがオフボードのデータセンターであることは自明ではあるが、この開発・運用コストがコネクテッドサービスビジネスの課題であったため、アライアンスによるボリューム効果と、それまでのオンプレミスサーバーからクラウドサーバーに移行させて、1台あたりのコスト削減を狙ったものである。車両側の部品もアライアンスかつグローバル共通のものとし、システム及びサービス開発のコストを抑えるとともに、グローバル市場へのスピーディな展開が可能となった。また、市場ではスマートフォンがお客様のデジタルライフの中心になってきており、スマートフォンのアプリケーションを充実し、アプリからの車両情報のリモートモニタ、ドアロック等のリモート操作などリモート機能を充実させる。さらにクラウドシステムを介してGoogleやAmazonなどの第三者サービスとの連携やB2B (Business to Business) を拡充している。

このコネクテッドカーで提供する重要なバリューのひとつが最新の情報にアクセスできることであり、車載システムのデータやソフトウェアが最新なものに更新されることが望まれる。そのため、ナビゲーション地図の更新、ナビゲーションシステムのソフトウェア更新、プロパイロット 2.0に使用する高精度地図のOTA (Over the Air) リモートアップデートを実現している。また、アリア以降の車両ではナビゲーションシステムだけでなく車両ECU (Electrical Control Unit) ソフトウェアのOTAアップデートも可能にしている。このソフトウェアOTA更新は、ソフトウェアのレベルによってSOTA (Software Over the Air) やFOTA (Firmware Over the Air) と呼称され、自動車の重要な機能となる。



図4 アリアのコネクテッドサービス

一方、車載システムに求められる機能要件は拡大しており、ナビゲーション単機能からマルチメディア機能、さらにはアプリケーションやウィジットの活用といった機能が求められるようになってきた。そのため、以前のRTOS (Real Time OS) からLinuxのような機能拡張性の高い汎用OSへの転換をしてきたが、日産ではIn-Vehicle InfotainmentシステムのOSとしてAndroidの採用を開始し、その上でGoogle Built-Inサービスを提供する。このサービスによって、ナビゲーションはGoogle Mapによるナビゲーションとなり、音声インターフェースにGoogle Assistantが活用される。また、Google Playからアプリケーションを選択し、ダウンロードすることも可能となる。

4. 今後の展望

コネクテッドカー&サービスは今後も生成AI活用によるHMIの進化や、B2C/B2B/B2B2Cサービスの拡充を進めていくことになるが、前述でも一部触れたとおり、コネクテッドカーはそのコネクテッドサービスを提供するためだけでなく、今後の車両・サービス・ビジネスのプラットフォームとなって、以下を支えていくこととなる。

・モビリティサービス

日産は1999年ハイパーミニEVを利用したカーシェアリング実証実験を皮切りに、「チョイモビ」、「e-シェアモビ」、福島県浪江町での「なみえスマートモビリティ」や、将来の自動運転によるサービスを見据えた「Easy Ride®」、中国蘇州での「ロボットタクシーサービス」など、モビリティサービスの実証実験を重ねてきている。このようなサービスにおいては、従来からあるレンタカーも含め、リモートでの車両の動態管理は必須であるが、将来の自動運転によるモビリティサービスにおいては、動態管理だけでなく車両周囲や車室内の様子も含めた遠隔監視や、万一の際には遠隔操作も必要となる。

・エネルギーマネジメント

自動車はEV化が進むにしたがって、電力を如何に上手に使うかが求められ、EVの電池は電力の一時保存場所とし

での役割が期待される。日産は既にLeaf to Homeを商品化し、リーフに貯めた電力を家庭の電力として使用できるようになっているが、今後はVehicle to Building, Vehicle to Gridのような大規模システムと連携した電力システムの一部になることが期待される。ここでもEVに貯えられている電力のリモートモニタと、充放電をリモートで制御するためにコネクテッドカーのシステムが活用される。

・SDV: Software Defined Vehicle

自動車は既に電子制御となっており、ソフトウェアとアクチュエータの組み合わせによって車両が制御されていると言っても過言ではないが、昨今SDVがクローズアップされてきている背景としては、車両の電子アーキテクチャの革新、車両データを活用したソフトウェア開発、OTAアップデートが揃ってきていることである。これまで各機能毎に設けられているECUが統合化され、統合化されたユニットのソフトウェアの重要性が増し、そのソフトウェアの開発・改善を実際の車両データを用いて学習させて実施することとなり、コネクテッドカーがこのプラットフォームとなり、車両の知能化を推進する。

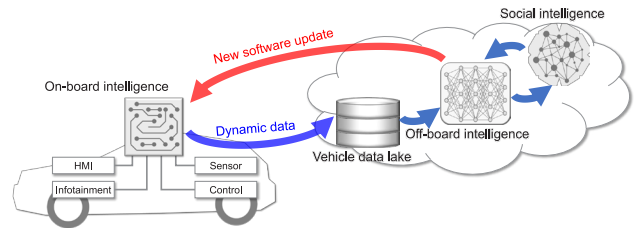


図5 SDVによる知能化概念図

ここで一点触れておかないといけないことがある。コネクテッドカーの拡大はサイバーセキュリティリスクに晒されることにもなる。既にUN-R156サイバーセキュリティ法規にも対応し、然るべき対策は講じているものの、今後も常に最新の動向を注視し、対策を講じていく必要がある。

5. おわりに

以上述べてきたように日産は1998年にコネクテッドカー&サービスを開始して以来、車両、ICT社会の進化とお客様の变化に合わせて革新を重ねてきた。近年言われている100年に1度の変革期のキーワードであるCASEの“C”ではあるが、その変革の先にはコネクテッドが走る・曲がる・止まるに加えて自動車の当たり前機能となり、さまざまなシステムやサービスと繋がるプラットフォームとなっていく。そしてクルマは社会システムに融合していくと考えており、そのような未来を創るための技術開発を続けていく。

著者



村松 寿郎

特集3:コネクテッドサービス

2. コネクテッドによって進化したHMI

小畑 哲* 竹内 香織* 片桐 大*
 三代 資人* 笹沼 慶与* 田崎 克*

1. はじめに

2020年に発表したARIAにおいて、ユースケースやUXの変化と共に増加する車内インフォテイメントの情報や、運転支援技術の進化と共に多様化する車両システムの情報に運転中でもアクセスし易いヒューマンマシンインターフェイス(以下HMI)として、統合型インターフェイスディスプレイと直感的グラフィカルユーザーインターフェース(以下GUI)を採用した。(日産技報#88に論文掲載)その後も、同HMI技術の採用車種拡大を進めて来た。

本稿では、更に多様化が進むサービスやコンテンツの提供を支えるHMI関連技術としてGUI・カメラ等の表示コンテンツ、音声認識技術の進化を中心に述べる。

2. ARIYAで採用したHMI

2.1 視認性と操作性を両立するインターフェース

インフォテイメントディスプレイとメーターディスプレイを一体感ある情報表示エリアとする方策を検討し、ステアリングホイールによる死角も考慮したディスプレイおよびコンテンツ配置を採用した。



図1 統合型インターフェイスディスプレイ

運転に必要なメーター情報は、ドライバーから見やすい前方に適切な距離を確保して表示し、インフォテイメント情報は、ドライバーの手が届く操作しやすい距離に配置した(図2)。また、人間の視野は、縦に比べ横に約1.5倍広く、横方向への視線移動がしやすいことから水平に2つの情報を配置した。(図3)

これらのディスプレイをつなぐことで一体的なHMIとすると共に、先進的なコックピットインテリアへの調和を実現した。

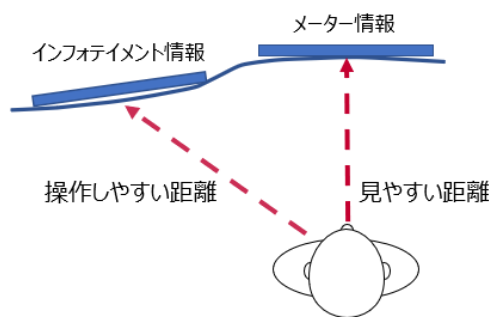


図2 情報レイアウト

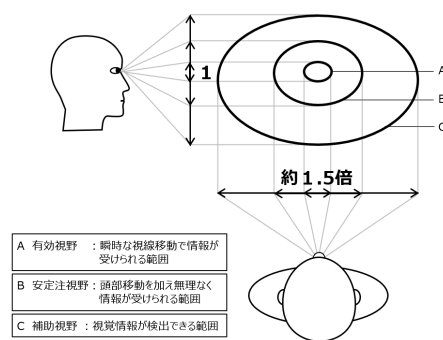


図3 人間の視野特性

配置や構造に加え、ユースケースに応じてコンテンツが表示されるディスプレイを使い分けると言った、2つのディスプレイを1つの表示エリアとして活用することも、一体感の実現において効果的である。ドライバーがより見やすい位置で地図・オー

*コネクテッドカー & サービス開発部

ディオ情報を確認可能にするため、直感的なスワイプ操作でインフォテイメントディスプレイからメーターディスプレイへ瞬時に情報を移動できる連携機能をEthernet通信により実現した(図4)。メーターでは地図を表示し、パッセンジャーは他のコンテンツを楽しむなど多様なユースケースをサポートした。

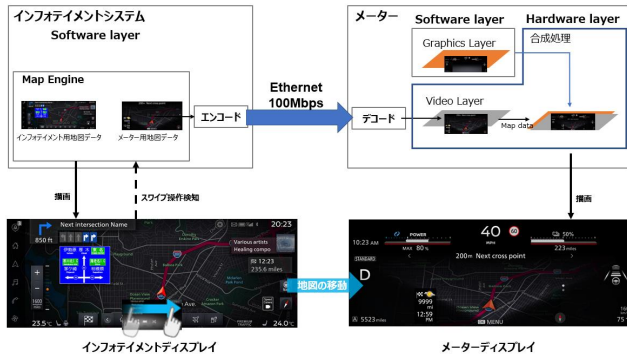


図4 Ethernetを使った2画面の情報連携

2.2 シンプルで直感的な GUI

情報量の増大に対し人間の処理能力には限界があるため、分かりやすさを考慮したメニューの数や配置を設計した。ウィジェットやタイルメニューを大きく表示し、数を最適化することで、機能の認知性と操作性を高めた(図5)。

また、メニューの数・配列によって、人間の短期記憶のしやすさ(正答率)が異なるため、9割以上の正答率が得られる4列×2行の配列をタイルメニューにおいて採用した。(図6)。

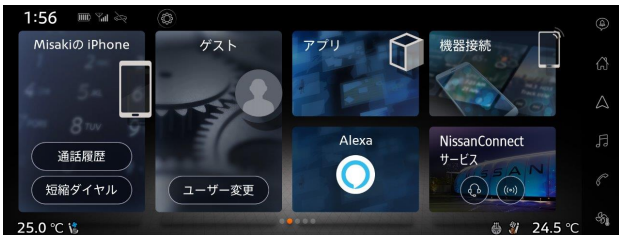


図5 ホームウィジェット



図6 4×2タイルメニュー

3. 更なるUX進化

3.1 エモーショナルな画面演出

使いやすさの基本性能に加え、エモーショナルなバリューをお客さまに提供するため、エリアではおよそ50ものインタラクション・アニメーションを開発し採用した。システム起動時の全画面オープニングアニメーション、ウィジェットブラウズ時のParallax(視差効果)アニメーション等である。

これらエモーショナルな演出は、操作の気持ちよさ、楽しさに新しいUXを加えるべく、更に進化を遂げている。最新のコネクテッドシステムで採用しているGUIにおいては、ホーム画面のウィジェットブラウズで、画面内のグラフィックに奥行き感を持たせる表現に挑戦した。あたかもウィジェットがZ軸方向(奥行き方向)に動いて行くかのように見せるため、操作に連動したウィジェットの拡大縮小、透過処理、背景に落ちる影の動き、奥行き感のある背景画像を組み合わせて表現している。(図7)



図7 奥行きを感じさせるウィジェットの動き

3.2 臨場感のあるカメラ表示と価値

自転車を真上から見下ろしているかのような映像により、駐車をサポートするアラウンドビューモニターは、これ迄多くの車種に採用されてきた。更に最新のカメラシステムにおいては、従来の俯瞰映像に加え、360°全方位を3Dでリアルタイムに映し出す3Dビューを開発し採用した。

車両の前後左右に搭載した従来からの4つのカメラ映像を車両モデルを中心に3D曲面にマッピングすることで、バーチャルに3D空間を再現している。(図8)

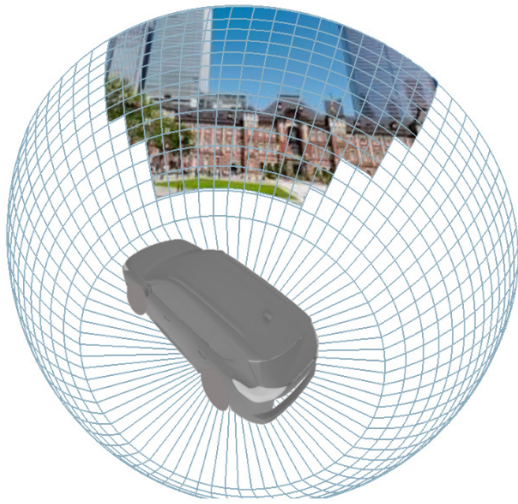


図8 3D映像マッピング

これにより、これまでのア라운드ビューモニターでは表現が難しかった周辺物体の立体的かつ直感的の把握ができるようになった。このような機能的価値に加え、車両モデルを中心に投影するパノラマ映像によって、臨場感のある新しい体験を提供している。(図9)

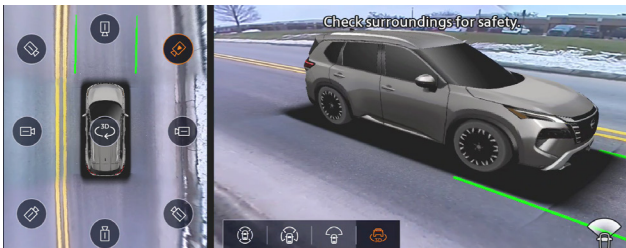


図9 3Dビュー

4. コネクテッドで進化した音声認識技術

運転中のインフォテインメント機能等の操作負荷を軽減する手段として、音声認識技術を開発してきた。従来は車載機本体に音声認識エンジンや辞書データを搭載したスタンドアロン方式を採用していた。アリアではサーバ型音声認識方式を採用することで、より日常的で自然な発話表現(以下自然言語)による音声操作を実現している。

自然言語の音声は、マイクを經由し車載機の音声信号処理を経てサーバへ送信。単語・文章認識、意図推定の順に処理される。(図10)

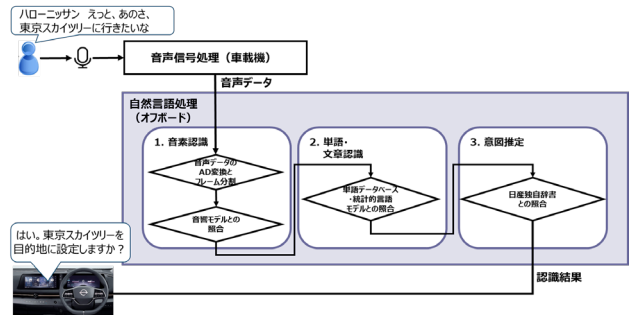


図10 自然言語認識処理の流れ

4.1 単語・文章の認識

サーバの潤沢な計算リソースを活用し、文章中の単語から単語への遷移確率を学習した統計的言語モデルを用いた。(図11)

音声の時系列の繋がりにから推定される単語の個々の候補に対し、単語から単語に遷移する確率の総和が最大となる組み合わせを最終候補として選定することができる。これにより、「とーきょうすかいつりーにいきたい」という入力に対し、遷移確率が最も高い「東京スカイツリーに行きたい」という文章として認識することができる。

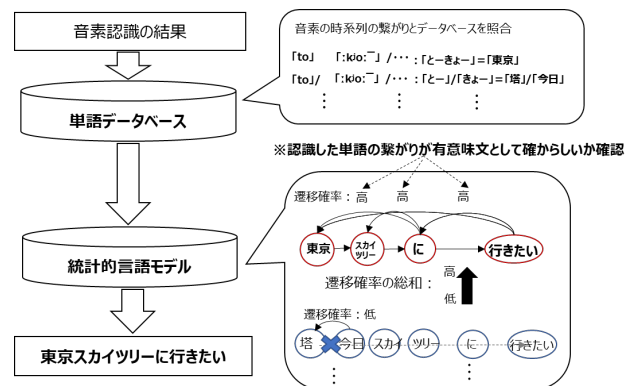


図11 統計的言語モデルによる文章認識

4.2 意図推定

運転中は、運転タスクに注力することから発話が意味を持たない不要な単語を含むことや、人によって同じ意図でも様々な言い方をすることがある。意図を正しく推定するため、発話に含まれる不要な単語(例:「えーと」、「あのさあ」)を削除し、必要な単語(例:「東京スカイツリー」、「行きたい」)を弁別するフィルタリング処理を行っている。また、同じ意図である、「-に行きたい」や「-を目的地にして」のような様々な表現に対し、実運転環境で収集した約3000パターンの発話データを学習した日産独自の辞書を構築した。これにより、他社水準70%程度に対しアリアでは約85%の認識率を達成した。(図12)

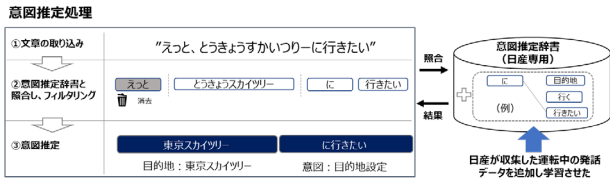


図12 意図推定

4.4 車両連携機能

前述した様々な技術により認識率を向上できたことで、ナビゲーションやオーディオなどのインフォテインメント機能だけでなく、一部の車両機能まで音声操作の対象を広げている。新型セレナでは、「窓を閉めて」や「エアコンをつけて」のような音声操作ができるようになった。

5. まとめ

アリア発表以降、「情報への容易なアクセス」を支える技術として、視認性と操作性を両立させる統合型ディスプレイのパッケージングと、増大する情報を分かりやすく・使いやすく構造化したGUIの採用拡大と共に、HMI技術を通じたUXの充実を進めて来た。

今後は更に、様々な周辺技術の進化と連携させ、ユーザー一人ひとりに寄り添うことができるドライビングコンシェルジュの役割へとコックピットHMIを進化させて行く。

著者



小畑 哲



竹内 香織



片桐 大



三代 資人



笹沼 慶与



田崎 克

特集3:コネクテッドサービス

3. ソフトウェアアップデート

菊池 光彦* 大橋 栄介* 埋見 昌明* 香西 秋彦**

1. はじめに

自動車産業は「電動化」、「自動化」、「コネクテッド化」を代表とする大きな変革期の真っただ中にある。この変革の中心には、電子部品とソフトウェアの進化があり、今日の自動車は、エンジン、トランスミッション、ブレーキといった伝統的なメカニカル部品だけでなく、高度な電子制御装置と複雑なソフトウェアによって制御されている。

車の電子部品の増加とソフトウェアの複雑化

世界で最初にマイコン制御を自動車に取り入れたのは1977年のGMのエンジン制御システム(10bitカスタムマイコン)であり、1979年の日産セドリック(8bitモトローラ6802、日立製)が日本初であった。その後の自動車に搭載される電子制御部品の数は増加し続けており、これらの部品は車両の性能向上、エネルギー効率向上、そして運転体験の向上を実現するために不可欠である。マルチメディアのインフォテインメントシステム、テレマティクスユニット、走る・曲がる・止まるといった車両制御システム、さらに近年では運転支援システムなどが自動車の核として機能し、運転者と乗客に多くの便益をもたらす。

これらのECU部品は、複雑なソフトウェアプログラムによって制御されており、相互に連携することにより安全性、性能、効率性を最大化している。新機能や性能向上はソフトウェアが大きく貢献している一方、増大するスケールや複雑性により、品質管理がさらに重要になる。

OTAの登場

2012年にテスラ社は、OTA(Over-The-Air)技術を用いて、お客様へ販売済みのモデルSに実装されている各種ECUのソフトウェアのアップデートを行った(以下、OTA技術を用いたソフトウェアアップデートを単にOTAと呼ぶこととする)。これをきっかけにOTAの導入が自動車業界で急速に普及しており、標準装備化されている。これにより、車両のソフトウェアを無

線通信によりアップデートできるようになり、お客様に迅速な便益を提供すると同時に、ディーラへの入庫が不要となった。OTAは、自動車のソフトウェアのアップデートと修正を効率化し、お客様に対するサービス品質の向上とセキュリティの向上をもたらす。

日産自動車では北米向けエクストレイル(2018年)のIVIユニットへのOTA機能の実装を皮切りに、リーフ(2019年)からテレマティクスユニットへ拡張し、アリア(2022年)やセレナ(2022年)では運転支援を含む車両制御システムへ拡張した。本論文ではアリア、セレナで搭載されているOTA機能に関する技術を詳述する。

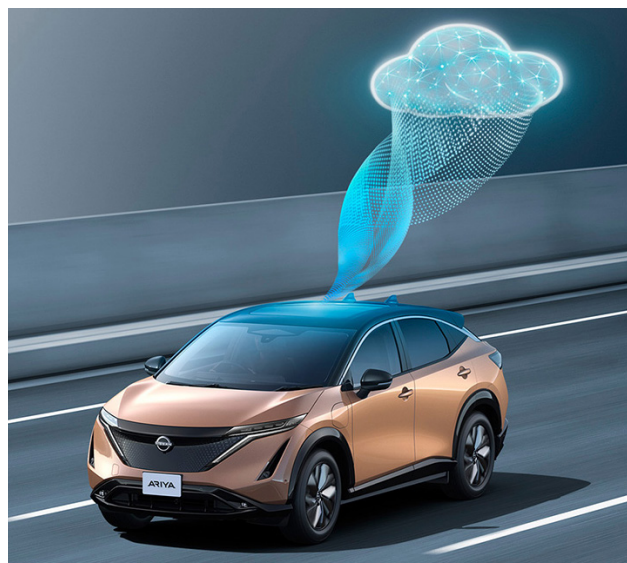


図1 OTAソフトウェアアップデート

2. 車両制御システムのOTAソフトウェアアップデートシステム

2.1 狙いと特徴

大きな3つの狙いを定義した。

・お客様が不具合対策や機能追加のために、販売会社に来

* 電子アーキテクチャ開発部 ** コネクテッドカーオフボード開発 & オペレーション部

る煩わしさを解消できること

- ・ソフトウェアアップデートに際し、お客様に不安を抱かせないこと、特別な知識や技術を要求しないこと
- ・様々な状況でもOTAソフトアップデートシステムを安定的に運用できること

上記の狙いを達成するための上位要求として3つの特徴がある。

- A. インフォテインメントシステムのみならず車両の大部分の制御系ECUのソフトアップデートに対応
- B. ソフトアップデート時の車両不動時間が非常に短い
- C. サイバーセキュリティ対応

以下にこれらの3つの特徴について解説する。

A. 制御系ECUのソフトアップデート

ソフトウェアの不具合修正のみならず、自動車の機能・性能の向上には各種制御システムのECUのソフトウェアアップデートが必要となる。このため、OTABLE ECU (OTA可能なECU) の数はアリアでは33ECU、セレナ (C28) では22ECUにおよぶ。どちらも、IVI系、AD/ADAS系、シャシ系、ボディ電装系、パワトレ系のドメインをカバーしている。ICE (ガソリンエンジン等の内燃機関), HEV (e-POWER), BEV (Battery-EV) のいずれも、パワトレ系ドメインとしてOTA対応している。

B. ソフトアップデート時の車両使用不能時間が非常に短い

たとえばスマートフォンのOSアップデート時には数十分~1時間程度、スマートフォンを使えなくなる。また、他社のOTAシステムにおいても数十分~1時間程度の不動時間がある。日産OTAシステムでは、この不動時間が非常に短いという特徴がある。これを実現するために、OTABLE ECUは、実行用メモリ領域とOTA用メモリ領域からなるデュアルバンクメモリを採用している。サーバからダウンロードしたアップデートソフトウェアは、車両走行中に使用するメインメモリ (実行用メモリ領域) ではなく、サブメモリ (未使用領域) に格納する。走行中には使用しない領域にダウンロードするというデュアルバンクメモリを採用することで、実行中の各種の車両制御に影響することなく、ソフトウェアのダウンロードが可能となる。すなわち、車両使用時にダウンロードを完了させる仕組みである。制御機能が使えない車両不動時間は、実行ソフトウェアをメインメモリからサブメモリに切り替える時のみである。アリア (FE0) で実施した場合、実際の不動時間は約1分である。

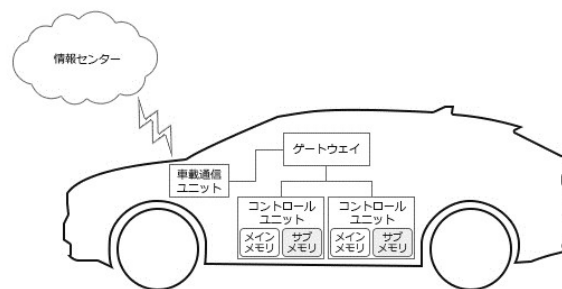


図2 デュアルバンクメモリ

C. サイバーセキュリティ対応

近年、自動車業界でもサイバーセキュリティは非常に重要な課題となっている。OTAシステムの観点では、不正なソフトウェアが車両に書き込まれないことが求められる。このため、サーバから配信されるアップデートソフトウェアとそれに付随する情報の真正性と完全性を検証する必要がある。

具体的には、

- ・アップデートソフトウェア本体と付随情報をパッケージ化し、全体を電子署名で保護する
- ・パッケージを階層化し、それぞれ異なる鍵での電子署名とする
- ・パッケージの各層の署名検証を異なるECUに分散させる多段階検証とする

という対策を施している。

また、署名検証エラーが検出された場合はそれをサーバに送信し、どのクルマのどのOTAキャンペーンで署名検証エラーを検出した、という記録をサーバに残している。

2.2 システム構成

OTAシステムはオフボード側 (図2の情報センター) とお客様の車両であるオンボード側 (図2の情報通信ユニット、ゲートウェイ、コントロールユニット) で構成されている。

2.2.1 オフボード

OTAに限らずディーラーでのソフトウェアアップデートであっても、どのクルマに、どのソフトを配信するかを管理するオフボードシステムが必要である。また、同一モデルであっても、グレードや販売時期によって、または、ソフトウェアアップデート実施/未実施などの個別の事情によって、クルマに実装されているECUと、そのソフトウェアバージョンが異なる場合があるため、これらの情報は1台1台の個車管理となる。

配信するソフトウェアそのものは各ECUサプライヤによって開発され、オフボードでECUごとにバージョン管理される。

ソフトウェアアップデートを計画する時には、どのモデルのどのECUのどのバージョンのソフトをどのような内容でアップデート

すべき、ということキャンペーン情報として定義し、オフボードシステムに登録する。

オフボード側のふるまいとしては、オンボード(お客様の車両)と通信して、車両ID (VIN)、ECU、ソフトバージョンなどを取得し、キャンペーン情報と照らし合わせて、実際の配布対象車を特定し、配信パッケージを生成する。この配信パッケージには、アップデート内容や電子署名など、アップデートソフトウェア本体以外の情報も含む。

ソフトウェアパッケージを対象車へ配信し、対象車のソフトウェアアップデート完了後には、アップデート成功/失敗を含めて、該当車両のソフトウェアアップデート履歴をオフボード側で管理する。

表1 オフボード機能

機能	内容
車両情報管理	お客様が所有する車両の VIN および搭載されている ECU、および、その ECU のソフトウェアバージョンを個車ヒストリ管理する。
ソフトウェアバージョン管理	車両に搭載されている各 ECU の各バージョンのソフトウェアを管理する。
キャンペーン管理	アップデート対象車両、配信ソフトウェア、必要に応じてリコール届出とのリンクなどのキャンペーン情報を管理する。
配信パッケージ生成機能	アップデート対象の車両に適切なアップデートソフトウェアのパッケージを生成する。
署名作成機能	配信パッケージに対し、署名を生成し付与する。
オンボードとの通信機能	ECU やソフトウェアバージョン情報の授受、パッケージの配信、ソフトウェアアップデートのステータスの授受など、オフボードとオンボード間で様々な情報交換を行う。

2.2.2 オンボード

OTAの有無にかかわらず、車両ID (VIN)、ECU、ソフトバージョンなどを車内の各ECUから集約し、オフボードへ送信することで、オフボードで管理している個車車両情報を最新化させる。

自車がキャンペーン対象の場合は、オフボードからソフトウェアパッケージを受信し、多段階署名検証を行う。ECUソフトウェアのリポートをともなうアクティベート(旧バージョンソフトから

新バージョンソフトへの切り替え)の実施タイミング判断のため、車速や各ECUの状態を監視し、車両が安全な状態であることを確認してアクティベートを実施する。アクティベート時にはお客様へアップデート内容や動作制限情報を提示し、承諾を得る。アクティベート完了後、つまり、新バージョンソフトへ切り替え後に、オフボードへ完了通知を行う。署名検証エラーなど新バージョンソフトへの切り替えに失敗した場合は、その旨オフボードへ通知するとともに、旧バージョンソフトのままとする。

表2 オンボード機能

機能	内容
オフボードとの通信機能	ECU やソフトウェアバージョン情報の授受、パッケージの受信、ソフトウェア更新のステータスの授受など、オフボードとオンボード間で様々な情報交換を行う
HMI	更新ソフトウェアの内容、更新の承諾、更新の成功 / 失敗などのステータスを表示する。
パッケージの署名検証	オフボードから配信パッケージに付与されている署名を検証する。
ECU への書き込み	更新対象の ECU (Target ECU) へ更新ソフトウェアを書き込む。
アクティベート & ロールバック	実行ソフトウェアを切り替える。
車両状態の管理	更新処理実施可否の車両状態を監視し、ダウンロードやアクティベートなどの更新処理の進捗を管理する。

2.3 OTAシステムフロー

全体の流れをTable3に示す。OTAによるソフトウェアアップデートは大きく、準備、インベントリ、オフボードから車両へのパッケージのダウンロード、更新対象ECU (Target ECU) の未使用領域への新バージョンソフトの転送(インストール)、新バージョンソフトの有効化(アクティベート)と進む。準備はサプライヤと共同でOEM自身が行う作業である。インベントリはOTAキャンペーンの有無にかかわらず定期的に行われる。

アクティベート以外の、準備、インベントリ、ダウンロード、インストールは、車両制御機能を通常通りに使用可能である。

車両制御機能が使えなくなるタイミング、すなわちアクティバートの直前にお客様の承諾を得るステップを設けている。

表3 FOTAシステムフロー

No.	フェーズ名	内容
準備	ソフトウェアの投函	・車両へ配信する更新ソフトを配信サーバに投函する
準備	FOTA キャンペーン作成	・オフボードで配信要否を判定し、対象モデル、アップデート内容などを定義したキャンペーンを作成する
S1	インベントリ	・車両情報を、車両とオフボードとで共有し、オフボードの個車情報を最新化する
S1-1	インベントリ	・車両では車両内 ECU のソフトウェアバージョンを収集する ・収集したソフトウェアバージョン情報を定期的に車両からオフボードへ送信する
S2	アップデート	・対象 ECU のソフトウェアをアップデートする
S2-1	ダウンロード	・オフボードはパッケージを車両に送信する ・車両は受信したパッケージを検証する
S2-2	インストール	・車両は Target ECU へアップデートソフトウェアを書きこむ
S2-3	お客様承諾	・車両はお客様へアップデート内容や動作制限情報等を提示する ・お客様による実行の承諾を得る
S2-4	アクティバート	・車両は新バージョンソフトウェアを有効にする
S2-5	ソフトウェアアップデート完了通知	・車両はお客様への OTA ソフトウェアアップデート結果を提示する ・車両はオフボードへ結果を通知する ・オフボードは個車ヒストリ情報を最新化する

2.4 車両およびECUに合わせたパッケージパラメータ

ICE, HEV, BEV など様々な車両、様々なユースケースで本システムを適用できるよう、いくつかのパラメータをキャンペーン作成時に定義され、配信パッケージに同梱される。パラメータの例をここでは1つ示す。

＜パラメータの例: パワースイッチOFF時のデータ転送＞

サーバからダウンロードした新バージョンソフトをTarget ECUの未使用領域へ転送する場合(インストール)には、各ECUに電源が安定供給されていなければならない。たとえば、バッテリー容量の大きいBEV車の場合は、パワースイッチOFFであってもECUへ十分な電力供給が可能のため、パワースイッチの状態によらずデータ転送処理は継続させたい。一方、バッテリー容量の小さいガソリン車ではパワースイッチON時にのみデータ転送処理を実施し、パワースイッチOFF時には一時停止するとしたい。こういった場合分けは、オフボードで管理している個車情報と配信ソフトウェアの内容によって、キャンペーン作成時に検討し、パッケージの一部としてパラメータ定義される。

表4 インストール処理の実施条件の例

パッケージ内パラメータ	お客様ユースケース
パワー -ON 時のみ	ICE 車が走行中
パワー -ON または BEV 用バッテリー充電レベルが一定以上	BEV 車を運転中または駐車中

2.5 安全対策

前述の通り、OTable ECUはデュアルバンクメモリを採用しており、アップデートソフトウェアは、実行中のソフトウェアとは別の領域のサブメモリへ書き込まれたため、Target ECUのメインメモリ上のソフトウェアは通常通り実行される。すなわち、パッケージのダウンロード、アップデートソフトウェアのインストールがクルマの走行に影響することがない。一方アクティバートとはソフトウェアを切り替える処理であり、Target ECUのソフトウェアをリブートする処理である。このため、非常に短時間ではあるが、Target ECUの機能を一時的に使用できない状態が生じる。アクティバート処理に施した安全対策について以下に述べる。

2.5.1 お客様へのアクティバート通知

アップデートソフトを有効にできる状態、すなわち、署名検証やインストールが正常終了し、かつ、車両が安全な状態である時に、車載ディスプレイにアクティバート通知が表示される。表示内容としては、

- ・更新内容
- ・アクティベート中は一部機能が利用できないこと
- ・アクティベート中は車両を運転できないこと
- ・アクティベートに要する時間

を通知し、お客様の承諾をいただく。承諾は、「今すぐ実行」、「24時間以内のタイマ設定」、「次回に延期」の3つから選択可能である。

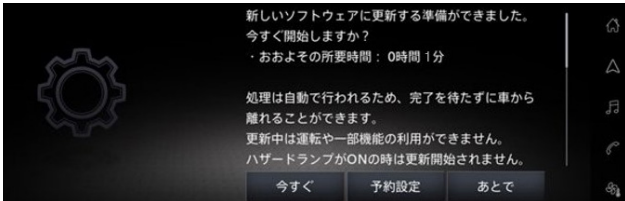


図3 ソフトウェアアップデート画面 (IVI画面)

2.5.2 エンジン始動禁止

たとえばICE車のクランキングモータのような大電力を消費する機器が動作し、それによってTarget ECUへの電力供給が不安定になることは避ける必要がある。また、アクティベート中はその機能が使えないため、そのECUが担う機能によっては正常にクルマを使えない状態となる可能性がある。このため、アクティベート中は、運転できないように、かつ、ECUリセットを生じかねない大電力消費が起きないように、走行禁止制御を行う。お客様に対しては、アクティベート処理実施中にパワースイッチを押した時点で、メーターにパワーONできないというメッセージを表示する。アクティベートが完了すると、エンジン始動禁止制御を解除し、新バージョンのソフトウェアで走行できるようになる。

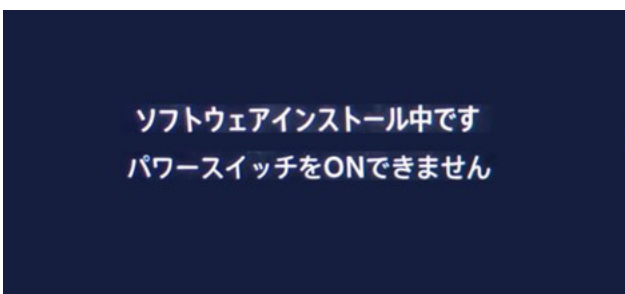


図4 エンジン始動禁止画面 (メータ画面)

2.5.3 複数ECUでの車両停車確認

アクティベート開始条件の1つに車両が停止していること、がある。この車両停止判定は複数ECUで判定すること、複数条件で判定しており、具体的には、ゲートウェイECUとTarget ECUそれぞれに車両停止判定機能を持たせている。さらに、ゲートウェイECUとTarget ECUに車両停止判定に用いる入力値を異なるものとするすることで、車両停止判定処理を

冗長化している。ゲートウェイまたはTarget ECUのどちらかで、車両停車ではないと判定された場合は、アクティベート処理は実行されない。

2.5.4 ロールバック

署名検証後に、車内ネットワーク転送中のデータのビット化けやメモリ故障など異常が発生した場合には、意図しないデータをTarget ECUのサブメモリに書き込んでしまう可能性がある。アクティベート後の新バージョン起動時には、Target ECUとゲートウェイECUとで、意図したバージョンソフトであることを確認している。異常データやメモリ故障などの場合はゲートウェイECUとTarget ECUとのバージョンチェックが成功しない。この場合は、アクティベート実行前に動作していたメインメモリ側のソフトを再有効化する。この処理をロールバックと呼称し、車両をOTAソフトウェアアップデート実行以前の状態に復元し、お客様が車両を使用できるようにする。

3. あとがき

日産自動車は長期ビジョンである「Nissan Ambition 2030」で、自信とワクワクにあふれ、より人や社会とつながる体験を提供し、移動と社会の可能性を広げていくことを推進している。このビジョンの下で、電動車の投入、運転支援技術の進化などの革新的な車両技術の開発とともに、パーソナライズされたサービスを通じて、顧客体験のさらなる向上を目指している。これらの技術およびサービスはどちらも、SDV (Software Defined Vehicle) によって実現されるものである。すなわち、ソフトウェアは、クルマの機能性能を向上させるための開発手段ではなく、継続的にお客様にワクワクを提供するための要素技術であるともいえる。車両寸法、車格をまず決め、次に搭載する技術を決め、その技術を実装するためのECUとEEアーキテクチャを決め、最後にソフトウェア仕様を検討するのではなく、継続して提供できるサービスとそのインフラを決め、サービスを継続するためのコネクテッドを含むEEアーキテクチャを決める、ということにほかならない。

本稿では、販売後にお客様の手元に引き渡されたクルマに対する継続的なソフトウェアアップデート技術としてOTA (Over-The-Air) ソフトウェアアップデートを紹介した。OTAソフトウェアアップデートそのものはインフラ機能であり、どのようなサービス・ソフトウェアを今後展開していくかという戦略を考えなければならない。これこそが、Software Definedということであり、今まさにダイナミックなタイミングにいると実感できる幸せを感じる。

著者



菊池 光彦



大橋 栄介



埋見 昌明



香西 秋彦

特集3:コネクテッドサービス

4. コネクティッドカーが提供するIoT連携サービスの現在と未来

岡 尚弥* 石井 俊充*

1. はじめに

近年、自動車業界で「CASE」という言葉が注目されている。その中でも自動車のIoT化に関する技術開発を牽引するのがコネクティッドの分野となる。コネクティッドカーでは通信機器やセンサが多数搭載され、走るIoT機器と言っても過言ではなく、オンボード側のナビゲーションシステムやオフボード側のスマートフォンなどを通して外部機器と連携したサービスを提供することも可能となる。本報告では、外部機器とのIoT連携によるサービスの事例の紹介、および将来の展望を含めて報告する。

2. Amazon Alexa連携サービス

音声で指示を出すことで対象のデバイスに対して意図した制御が可能となるAI音声認識サービスの1つにAmazon Alexa(以降、Alexa)がある。市場でのAlexa対応に関する顧客の強い要望により、ビジネスチーム側から車両開発とは別軸で開発依頼がきた。別軸の開発とは、サービスの開発・テストが完了したら車両のリリース日程には依存せず市場リリースすることであり、車両自体の開発とは完全に切り離れた開発となる。

表1 Alexa連携機能一覧

機能	説明
アカウント連携	NCアカウントとAlexaアカウントの連携
バッテリーステータス確認	バッテリーの残量確認
リモート充電	リモート充電の開始・終了
リモートエアコン	リモートエアコンの開始・終了。 タイマーエアコンの設定・キャンセル
ルート送信	ルート検索結果を車へ送信

そこでコネクティッドカーオフボード開発&オペレーション部ではAlexaとNissanConnectサービス(以降、NCサービス)が連携することにより、Alexaから音声で車を操作可能な機能を開発し市場にリリースした。実際に市場にリリースしたAlexa経由で操作可能なNCサービスの一覧は表1へ示す。このAlexa対応の開発は、アジャイル開発の手法を用いて、まず初めに必要最低限の機能、つまりMVP(Minimum Viable Product)を決めて、クイックにプロダクトリリースを行うことを目的に開発を行った。その後、ユーザフィードバックを得ながら機能アップデートを行うライフサイクルアップデートを行い、市場のニーズをタイムリーに取り込みながら常にサービスを育てている。このようにアジャイルにサービスを開発するライフサイクルアップデートはデジタルサービスの中では非常に重要な活動であり、顧客を飽きさせず満足度を高めるために必須な活動である。

3. ガレージドアオープナー連携サービス

従来のがレージドアオープナー連携サービスは図1に示すような社内のマップランプを利用したサービスとなっており、社内からガレージドアを開けることはできるが、必ず対象となるガレージドアの近くに行かないと開けることができないといった課題があった。つまり、家に着いた後にボタンを押し、ガレージドアが開くのを待った後にやっと入庫できるといったものとなっていた。これは、ガレージドア側についているユニットとマップランプとの物理的距離という制約があるためであり、「お客様がスムーズに入庫できる」といったユーザビリティの観点での目的を達成できていないものとなっていた。

*コネクティッドカーオフボード開発 & オペレーション部



図1 マップランプ連携



図2 IVI連携のユースケース

その課題解決のため、北米市場において、CCS2プラットフォームを搭載したコネクティッドカーにてテレマティクスサービスを利用しIVI (in-vehicle infotainment) と連携した新たなガレージドアオープナーサービスを市場に投入する。図2にIVI連携のガレージドアオープナーサービスのユースケースを示す。ユーザは、対象のガレージが近づいてきたときに、図3に示すIVIの画面上にてボタンを押すことでガレージドアを「閉じる → 開く」に制御することが可能となる。このサービスの特徴としては、テレマティクスサービスを利用しているため電波が届くところであればどこでも対象のガレージドアを制御することが可能になることである。加えて、対象のガレージドアを複数登録することができるため、例えば自宅や別荘はもちろん同じシステムに対応できるのであれば会社でも使えるといった特徴も兼ね備えている。これにより、今までのマップランプを利用したサービスに比べてコネクティッドカーによるIoT連携サービスはユーザビリティの観点でお客様に新たな価値を提供できることになる。

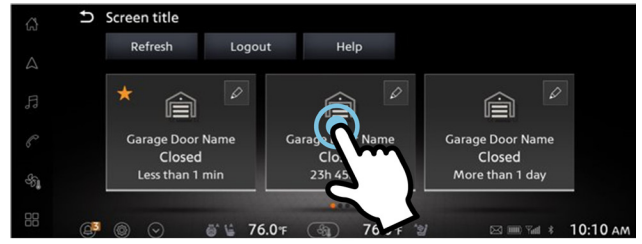


図3 IVI画面イメージ

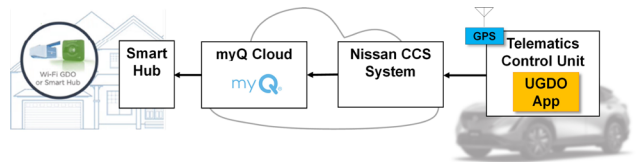


図4 システム構成図

次に、図4に、コネクティッドカーによるガレージドアオープナー連携サービスのシステム構成図を示す。ガレージドアオープナーユニットおよびソリューション販売で市場のシェアを大きく獲得している会社としてチェンバレングループがある。日産自動車としては、そのチェンバレングループが市場に提供しているmyQクラウドと連携することによるサービスを市場投入する。このIoT連携サービスによるmyQクラウドとの通信内容について以下に示す。

- 2-1) 対象のガレージドアを登録する
- 2-2) ガレージドアの状態を取得する
- 2-3) ガレージドアの開閉を行う

公開されているAPIを使いながら社内のクラウド (Nissan CCS System) と社外のクラウド (myQ) 間で通信し上記のような制御を行うことでIVIの画面上にて運転しながら対象のガレージドアの開閉を行うことができる。このように、Nissan CCS SystemとmyQクラウドをIoT連携することにより市場で普及しているデバイスやソリューションとコネクティッドカーを繋ぐことができる。これにより、多くのお客様が普段使っているモノ・コトに対して、利便性を向上させながら別のやり方で利用して頂くことが可能となる。全く新しいものをお客様に使って頂くのは非常に難しいが、普段使っているものに関してより身近に使いやすい形に改善することで受け入れて頂きやすくなる。このような連携を行うことは、日産自動車のコネクティッドカーの利便性向上および認知度向上に貢献することであり、

他社との協業による新たなビジネス創生のきっかけにもなると考える。

4. IoT家電連携サービス

車がネットワーク環境下に繋がるよりだいぶ前から、我々の生活の周りにある家電はIoT化が進んでおり、家の外からの制御できることが当たり前となっている。日産自動車ではコネクティッドカーと家電が繋がることで更なる利便性向上を図るサービスの創出も盛んに行われている。その1つの実施例を下記する。

日産自動車にて、車とスマートフォンアプリケーションのNissanConnectアプリ(以降、NCアプリ)が連携することによって実現しているNCサービスの一部機能のユースケースを図5に示す。家電メーカーのIoTデバイスと連携することで、ユーザへ新たな価値を提供する試みを行った。実際のユースケースとしては、初めにユーザはNCサービスのNissanConnect ID(以降、NCID)と家電メーカーのID(以降、家電ID)を紐づけることとなる。その後、ユーザは、NCサービスの様々な通知から何をIoTデバイスに通知するかを選択する。今回の取り組みで提供するNCサービスの通知機能は表2の通知一覧に示す通りである。例えば、防犯分類にあるカーアラーム機能については、ユーザが車から離れた家のリビングなどに居る際に、ユーザの車に異常ごと発生すると家の家電(テレビなど)へ「カーアラーム」の通知が届くといったユーザ体験を想定しており、車やスマートフォン以外のデバイスとの連携という新たな価値提供を実現している。

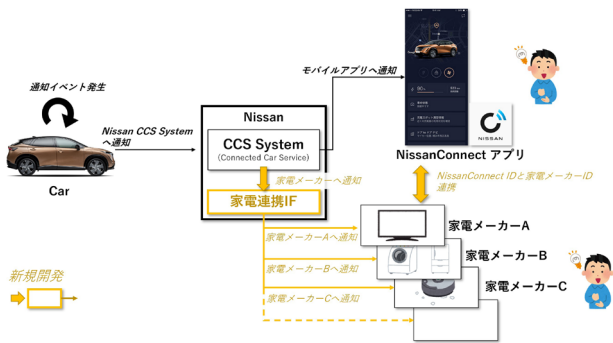


図5 ユースケース

表2 通知機能一覧

分類	種類
充電	タイマー充電開始
	充電停止
	エラー停止
ナビ	出発前
エアコン	出発前の乗る前エアコン推奨
防犯	パワースイッチオン
	カーアラーム
ゾーンアラート	帰宅通知

次に、このような機能を実際どの様に実現しているのかシステム面を掘り下げていきたい。ビジネス要件をシステム設計に落とし込んでいく際に重要となるのが、実際のユーザにこのシステムがどのように使われるかユーザエクスペリエンスに重きを置いてシステムを考えることである。今回、システムを考える上で以下の点を考慮した。

4.1 ユーザエクスペリエンス向上

今回のIoT連携は、これまでのNCアプリと日産車が繋がることで実現していたNCサービスの通知機能をIoT家電と連携することでユーザの利便性向上や価値向上を行う必要性がある。そのため、ユーザに提供する機能は直観的でストレスのない設計が必要となる。そこで、Web/IT分野で高い経験と知見を持つUI/UXデザイナー、バックエンドエンジニア、モバイルアプリエンジニア、プロダクトオーナー、プロジェクトマネージャーがワンチームでスマートフォンアプリからバックエンドまでを一気通貫でカスタマージャーニー設計、システム設計、運用設計を行った。これにより、従来の機能毎の縦割り分業方式では実現が難しかったユーザエクスペリエンスを中心においた開発手法を導入したサービス開発を実現した。

4.2 外部の家電IoTシステムとのID連携

家電メーカーのIoTデバイスと連携するに当たっては、ユーザが家電メーカー毎に発行される家電IDとNCIDの連携を行う必要がある。この連携を行うことで、日産自動車のシステムは、どのユーザがどの家電メーカーと連携を行っているかを認識することができる。日産自動車は、外部の家電メーカーとのID連携を行う技術として、OpenID Connect*などの認証・認可プロトコルを使用しており、企業間のシステム連携に置けるセキュリティの担保を行っている。(*連携する家電メーカーに応じては他の認証・認可技術も導入するものとする。)

4.3 家電IoTシステムとの密で疎な連携

これまでに記載したように OpenID Connectなどの技術を用いて、外部の家電メーカーとのID連携を密に行っているが、その一方で、日産自動車側のコネクティッドカーシステムが、家電IoT連携の何らかの影響を受けてNCサービスが使えなくなることは避けなくてはならない。この懸念点を考慮して、家電IoT連携向けの通知機能を既存のコネクティッドカーシステムから切り離す図6のようなアーキテクチャを採用している。これにより、日産自動車側の連携用システム (IoT Adaptor)

や、外部の家電システムに何かしらの問題が発生しても、既存のNCサービスには一切影響を与えることがないサービス運用上非常に安全な仕組みとなっている。

4.4 ビジネスのスケールを考慮した拡張性と汎用性

上記の密で疎な家電IoTシステムの連携もアーキテクチャを検討する際の重要な要素であるが、ビジネスのスケールを考慮したシステムの拡張性と汎用性も重要な要素である。デジタルの世界では、スモールに素早くサービスリリースを行い、マーケットのユーザフィードバックを元に、サービスを成長・拡大していく手法が一般的に取られる。今回のケースでも、他の家電メーカーとのビジネスパートナーシップの可能性があるため、一社に限定した専用の作りこみは行わず、汎用性を持たせたシステムアーキテクチャの導入を行った。その一つに、上記の一般的に利用されている認証認可の技術の導入、そして外部の家電システムと連携する機能をモジュール化して、既存のコネクティッドカーシステムに新たなMicro Serviceの一つとして作りこむことを行った。これにより、今後のビジネスのスケールを考慮した拡張性と汎用性を備えたシステムを実現している。

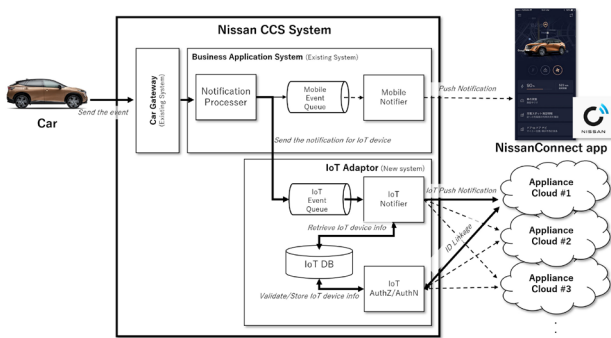


図6 システム構成図

4.5 DevOpsの導入

繰り返しになるが、マーケットからのユーザフィードバックを元にシステムを常に改善する必要がある。つまり、システム開発は一度リリースを行って終わりではなく、リリース後の事を開発段階から考慮するDevOps (Development and

Operationの略)の導入が必要である。CI/CDで可能な限り自動化をテストの自動化で品質を高め、継続的なソフトウェアリリースを迅速に行える環境を実現している。特に、システム監視とログ収集を強化し、問題の早期発見とトラブルシューティングを可能として更なる改善へ繋げユーザ体験の向上へ繋げた。

このように、ユーザエクスペリエンスを重視し、ビジネススケールを予測した汎用性と拡張性を持たせ、既存のコネクティッドカーシステムへの影響を最小化することで、家電IoT連携システムの実現を行った。

5. おわりに (IoT連携サービスの未来)

Web/IT業界やコンシューマ製品業界は日々新しい製品やサービスが誕生している。市場で普及しているデバイスやサービスと車がネットワーク環境下で繋がりIoT連携できることは、コネクティッドカーだからこそ実現可能な大きな進化のポイントであり、車の新たな可能性を大きく広げることができる。今までのカービジネスは「車を売ること」「メンテナンスを行うこと」で収益を上げていた。コネクティッドは車を販売した後に新たな利便性をお客様に届けることが可能であり、そこで新たな価値を提供することができる。この新たな価値をお客様に認めていただくことで、今までなかった車の販売後の新たなサービス提供による収益アップを見込むことができる。お客様が欲しいときに必要なサービスに課金し、それに見合ったサブスクリプションシステムを提供する。これが日産自動車の新たな収益源となると共に、お客様の車との関わり方を変えるきっかけになると考える。今回ご紹介した事例は他社のサービスと繋がるIoT連携の一部であり、これからもこのようなサービスを数多く市場に投入していく予定である。これにより、お客様の日々のカーライフを楽しいものとし飽きさせないことで、お客様に次また日産自動車の車を買いたいと思わせる新たな循環型のビジネスモデル創生にコネクティッドカーと共に挑んでいく。

著者



岡 尚弥



石井 俊充

特集3:コネクテッドサービス

5. モビリティサービス

藤田 晋* 木村 健* 宮下 直樹**

1. はじめに

日産自動車におけるモビリティサービスの研究・開発の歴史は、1999年9月から実施された電気自動車の共同利用実験に遡る。将来起こりうる人口減少や高齢化・過疎化などの社会問題に対して、単に個人の利用性向上の視点ではなく、地域課題を解消するための手段として、シェアリングエコノミーの考え方にいち早く気づき、モビリティサービスの1つであるカーシェアリングに取り組んだ。電気自動車の活用をコアにして、車両と建物間での電力の融通、車両の共有など、車両の多目的利用の可能性を検証してきた。近年は、福島県浜通り地域におけるオンデマンド配車サービスを一例として、ライドシェアに取り組んでいる。本稿では、過去から現在に渡って日産自動車に取り組んできたモビリティサービスの内容について説明する。

2. モビリティサービスの歴史

モビリティサービスは、車両を共同で所有するカーシェアリングから始まった。最初に、カーシェアリングとライドシェアとの違いについて述べ、その後、公共交通を含めた自家用車以外の全ての交通による移動をシームレスにつなぐMaaS (Mobility as a Service) について述べる。

2.1 カーシェアリング

カーシェアリングの考え方や仕組みは元々、スイスのチューリッヒが発祥と言われている。1970年代に、行政主導で大規模な車両の流入規制が実施され、トラム、バス、鉄道による高頻度かつ高品質のサービスを提供した。一方で、住民らは都心で車が持たなくなり、郊外に共同で車を所有し始め、カーシェアリングが始まった。日本では1988年に、株式会社シーズが外国車専門のカーシェアリングのサービスを開始したが、その後、カーシェアリングは長らく普及せず、近年になってか

ら日本で本格的に事業化された。現在は、移動や輸送は変革期を迎え、シェアリングサービスの多様化が進み、自転車やバイク、電動キックボードにまで広がっている。

2.2 ライドシェア

米国では、出発地・目的地が同一の人々による通勤時の自家用車の相乗りが主要な交通手段の1つになっている。モータリゼーションが進み、人々の流れが変わったことで、相乗りして移動するライドシェアが注目を浴びるようになった。ライドシェアは、同一方向に向かう人が相乗りする伝統的ライドシェアと、アプリでマッチングを図るTNC (Transportation Network Company) サービスの2つに分けられる⁽¹⁾⁽²⁾。

伝統的ライドシェアには、カープール、バンプール、カジュアルカープールがあり、いずれも運賃を徴収するタクシーは含まれない。サンフランシスコにおけるカープールは主要な交通手段の1つになっており、現在では、スマートフォンでその場で申し込むことも可能になった。ドライバーは、ガソリン代等の実費程度まで受け取れる。バンプールは、大型車両を利用して多くの人を運ぶ相乗りであり、費用は乗客が負担するが、企業や行政の補助で負担されているものもある。カジュアルカープールは、一般ドライバーが通勤途中の道路沿いの乗り場に並ぶ人を自家用車に同乗させる相乗りであり、ドライバーと乗客はお互いに面識がないことが特徴である。

TNCサービスは、2012年にサンフランシスコで始まった新たな運送サービスであり、近年、急速に発展してきている。事業主体が自ら運送せず、事業主体が運営するプラットフォームで一般ドライバーと乗客を仲介し、自家用車を用いて有償の運送サービスを提供する。スマートフォンのアプリケーションで予約、評価、支払いを行い、料金は地域や車種ごとに距離・時間によって決められ、乗車前の料金把握も可能である。代表例としては、米国勢のUberやLyft、中国勢のDiDi等が挙げられる。

日本では、道路運送法において、有償で自動車を使用した旅客運送を行うために、「旅客自動車運送事業」の許可を取

* モビリティ&AI 研究所 ** 研究企画部

得する必要がある。過疎地など交通の便が悪い地域に限っては、一般ドライバーが乗客を有償で運ぶ「自家用有償旅客運送」が特例で認められているが、適用地域の拡大やタクシーが不足する時間帯でのみ認める案を政府が議論している状況である。現時点では、法改正を視野に入れ、「mobi」や「のるーと」、「AI運行バス」等の名称で実証実験を実施している状況である。

2.3 MaaS

公共交通を含めた自家用車以外の全ての交通による移動をシームレスにつなぐMaaSと呼ばれる仕組みが台頭してきた。2016年にはフィンランドで、MaaS Global社によるMaaSアプリ「Whim」の運用が始まった。複数の交通事業者のサービスを統合し、経路検索から予約・決済までを1つのサービスとして扱うことが可能になっている。

日本国内では、2019年にトヨタ自動車株式会社によるMaaSアプリ「my route」が福岡市と北九州市で提供された。移動手段の検索・予約・決済まで、移動に関する一連の機能を1つのアプリ内で完結するとともに、街の賑わいを創出するイベントスポット・店舗情報の提供も行い、街中における円滑な移動をサポートするマルチモーダルモビリティサービスを提供している。

3. 日産自動車の取り組み

以下では、これまで日産自動車に取り組んできたカーシェアリングの事例として、「ハイパーミニを活用した共同利用システム」、「チョイモビ」、「e-シェアモビ」を紹介する。また、ライドシェアの事例として、「なみえスマートモビリティ」、「Easy Ride®」を紹介する。

3.1 カーシェアリング

3.1.1 ハイパーミニを活用した共同利用システム

日産自動車は1999年9月から、カーシェアリングに関する2つの共同実証実験プロジェクトに参加してきた。使用されたクルマは、都市通勤者として開発された専用ボディをもつ2人乗りの超小型電気自動車「ハイパーミニ」であった(図1、表1)。



図1 ハイパーミニ

表1 諸元表

寸法	全長×全幅×全高 [mm]	2665 × 1475 × 1550
	ホイールベース [mm]	1890
	トレッド [mm]	1290 / 1270
重量	車両重量 [kg]	840
定員	乗車定員 [人]	2
性能	最小回転半径 [m]	3.9
	一充電走行距離 [km]	115
電動機	種類	交流同期電動機
	最高出力 [kW]	24
	最大トルク [Nm]	130
主電池	種類	リチウムイオン電池
	容量 [Ah/3hr]	90
	個数 [個]	4
諸装置	駆動方式	後輪駆動
	タイヤサイズ	前 : 145 / 65R14
		後 : 165 / 60R14
	サスペンション形式	前 : ストラット式
		後 : ストラット式
	ブレーキ	前 : ベンチレーテッドディスク式
後 : ディスク式		
ステアリング形式	ラック & ピニオン式	

横浜みなとみらい21地区での「都心レンタカーシステム」は、(財)自動車走行電子技術協会(現在の財)日本自動車研究所)による20台のハイパーミニを活用した実証実験であり、横浜みなとみらい21地区に勤務される方々に業務用として車両を使用していただくことを想定したサービスであった。環境にやさしく、利用者の利便性を重視した新しい交通システムを構築するため、ITS技術を活用した電気自動車の利用システムの開発とその利用システムの実験を行い、電気自動車の普及を促進することが目的であった。ITS機能を利用したクルマの位置検出、状態把握を実施することに加えて、クルマに対して適切な情報を送信するために、管理センターとドライバーが相互通信を行う。車両ステーションでは、無人で車両の貸出と返却が行われ、管理センターでは、予約受付のほか、車両状態管理、利用者認証の機能を有していた。車両には、通信機能付きカーナビゲーションシステムが搭載され、情報通信によって、車両、管理センター、利用者の三者間で、効率的で利便性の高い運用が行われていた。



図2 都心レンタカーシステム

ユーザー視点では、現在地からステーションまでの経路をボタン1つで検索する「帰り道一発検索ボタン」、困った時に管理センターと連絡が取れる「コールボタン」、利用する毎にCO₂排出抑制量を計算する「環境貢献度表示」、車両が返却場所まで戻れなくなる前に警告を行う「バッテリー残量警告機能」、利用者の不満を把握する「CSボタン」などを準備し、実証実験を実施する上での使い勝手を向上した。また、実験開始後、横浜みなとみらい21地区の宿泊施設から近隣の観光スポットをまわる観光用途を組合せ、稼働率の向上と地域の環境イメージ向上を図っていくことも合わせて検討した。

同時期に実施した海老名市での「海老名プロジェクト」は、建設省、神奈川県、海老名市による15台のハイパーミニを活用したパークアンドライド実験であった。この実験では、市民モニターを募集し、ハイパーミニを朝夕の通勤に利用していただくとともに、日中、市役所の公用車として利用することにより、共有化における効果や課題の整理を行うことが目的であった。

ICカードによる車両管理システムなどの運用実験を通して、実用化に向けた課題の整理を行いながら、実施地域の拡大や民間企業への拡大を図り、このシステムが広く利用されるように検討された。

3.1.2 チョイモビ

日産自動車と横浜市は、国土交通省が推進する「超小型モビリティ導入促進」事業の支援を受け、低炭素交通の推進、都市生活・移動のクオリティアップ、観光の振興を目的として、2013年10月から2015年9月の2年間、25台の超小型電気自動車「日産ニューモビリティコンセプト(図3、表2)」を活用した日本初のワンウェイ型カーシェアリング「チョイモビ ヨコハマ」の社会実験を実施した。事業主体は、日産自動車と横浜市であり、運営主体は株式会社日産カーレンタルソリューション、カーシェアシステム開発は株式会社サーージュが担当した。2015年10月からは、レンタカー型運用での観光活用や地元企業での活用を行った。

そして、2017年3月から約2年間、新たな「チョイモビ ヨコハマ」として、これまでの知見を活かしつつ、より地域と密着した超小型モビリティの利活用の推進と持続可能な官民連携の事業モデルの構築を目指し、出発したステーションに車両を返却するラウンドトリップ型カーシェアリングを実施した。これに加え、横浜都心エリアに特化した観光ガイドツアーや地元企業への長期貸し出し等も実施してきた。

専用サイトからの会員登録により、横浜都心エリアに設置した14箇所のステーションで、登録した認証用カード(運転免許証、FeliCa対応の交通系ICカードや携帯端末)を使って、車両の貸渡および返却を行い、利用開始予定時間の30分前から予約可能であった。また、12か所(23台分)の専用無料駐車スペースが利用可能であった。同サービスの利用には、日本の運転免許証、スマートフォン、日本国内発行のクレジットカードが必要であり、利用料金は、基本料金200円に加えて15分ごとに250円課金され、一日の最大利用料金は3,000円であった。



図3 日産ニューモビリティコンセプト

表2 諸元表

寸法	全長×全幅×全高 [mm]	2340 × 1230 × 1450
	ホイールベース [mm]	1685
	トレッド [mm]	1095 / 1080
重量	車両重量 [kg]	500 (ドア付き)
定員	乗車定員 [人]	2
性能	最小回転半径 [m]	3.4
	一充電走行距離 [km]	100
	最高出力 [kW]	定格 :8 最大 :15
諸装置	タイヤサイズ	前 :125 / 80R13
		後 :145 / 80R13

3.1.3 e-シェアモビ

入会費・距離料金がかからず、15分あたり200円から車両を利用できる日産自動車のカーシェアリングサービスである。この事業を行うには貸渡免許が必要であり、日産グループの中でレンタカー事業を営んでいる株式会社日産カーレンタルソリューションと共同で事業を推進している。2018年1月にスタートし、2019年3月末時点で、ステーションは全国に514箇所となった。図4に示すステーションは、駐車スペース用の枠線、車両、サインキューブの3点セットが必要で、場所の確保が最も重要である。日産グループの販売会社や日産レンタカーの店舗も活用するが、駅に近いところにある店舗は少なく、ロケーションの良い駐車場の確保が課題となる。現在、借りられる車種は、電気自動車の「サクラ」と「リーフ」、e-POWERの「ノート」、「オーラ」、「キックス」、「セレナ」であり、電気自動車ならではのドライビングの楽しさと快適さを体験できる電動化技術と、自動運転支援技術や自動駐車機能などの知能化技術を体感できるサービスである。



図4 ステーションの一例

「e-シェアモビ」では、カーシェアリングサービスのプラットフォームとして既に多くの実績がある「smart oasis® for Car sharing」をカスタマイズして導入した。本システムでは、クラウド型でシステム機能を提供し、カーシェアリングを始めとしたモビリティサービスの事業運営に必要な会員管理・運行管理・課金決裁などを実現した。オンラインでの会員登録と車両の利用予約を行ったお客様は、予約日時にステーションに停められている車両のリアウインドウに設置されたカードリーダーに運転免許証をかざしてドアの開錠を行い、車両に乗り込んだら、ダッシュボードに収納されているスマートキーを取り出して車両を利用できるため、実店舗での手続きが不要である。

なお、「smart oasis®」は、日本ユニシス株式会社（現：BIPROGY 株式会社）の登録商標である。

3.2 ライドシェア

3.2.1 福島県浜通り地域での実証実験

2021年2月、福島県の3つの自治体（浪江町、双葉町、南相馬市）と日産自動車を含む8つの企業が、「福島県浜通り地域における新しいモビリティを活用した街づくり連携協定」を締結した。日産自動車は、「新たな移動手段となるモビリティサービス」の取り組みの1つとして、2021年2月から現在に至るまで断続的に、オンデマンド配車サービスを提供してきている。なお、オンデマンド配車サービスとは、お客様が今すぐ移動したいと意思を示した場合に、お客様を適切なタイミングで車両に乗車させて、目的地まで送り届ける配車サービスである。

3.2.1.1 サービスの変遷

1) 2021年2月から約2週間

「なみえスマートモビリティチャレンジ」として、住民や来訪者のサービス受容性を検証した。本実証実験では、道の駅なみえをモビリティハブ（接続拠点）とし、町内中心部の主要な場所を繋ぐ巡回シャトルと、道の駅なみえと郊外部の自宅、および、その他の目的地を繋ぐスポーク車両とを組み合わせ、ハブ&スポーク型の「町内公共交通」を実現した（図5上段）。また、店頭で購入、もしくは、Webで注文した商品の配達を貨客混載で行う「買い物配達サービス」などを実現した（図5下段）。使用車両は、中心部の巡回シャトルとして2台のeNV200、周辺部のスポーク車両として3台のリーフを使用し、新たな公共交通として検証した。

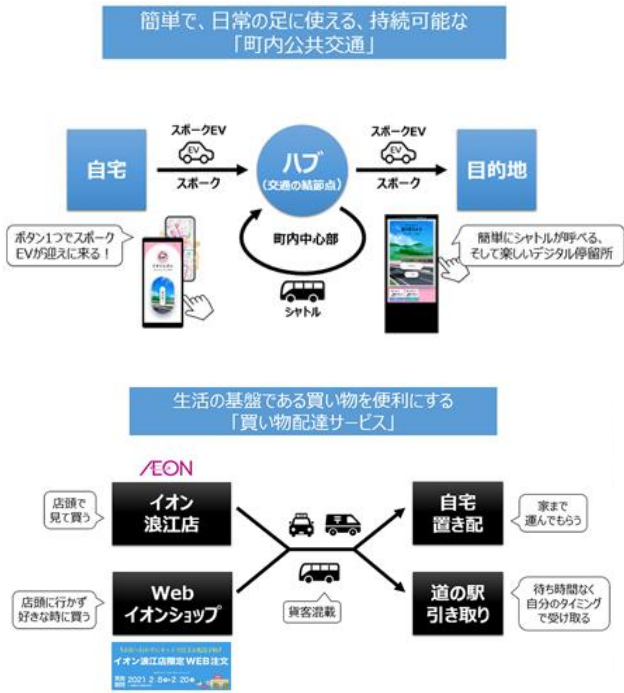


図5 実施したモビリティサービス
(上段: 町内公共交通、下段: 買い物配達サービス)

巡回シャトルは、中心部の乗降地(8か所)に設置されたデジタル停留所(図6)で顔認証による本人確認を行い、目的地を設定することで、中心部の移動が可能である。なお、デジタル停留所は、アンドロイドOS搭載のデジタルサイネージ(43インチ)を使用しており、配車アプリはネイティブアプリとして実装されている。また、顔認証については、AWS (Amazon Web Service) が提供する Amazon Rekognition を活用している。



図6 デジタル停留所

スポーク車両は、お客様のスマートフォンアプリで乗車地と目的地を指定することで、道の駅なみえと郊外部の自宅、および、その他の目的地との間の移動が可能である。

なお、お客様の移動が発生していない場合には、巡回シャトルとスポーク車両ともに、あらかじめ設定された待機場所で待機するものとする。

2) 2021年11月から約2か月間

1) の実証実験では、中心部の乗降地の数が限定的であり、また、乗車までの待ち時間も長かったため、全てのお客様の移動ニーズをカバーしきれなかったとの意見があった。そこで、さらに機能を進化させたオンデマンド配車サービス(なみえスマートモビリティ)を開始した。中心部の乗降地を120箇所に増加し、徒歩1分以内で移動可能にすることで、乗車までの待ち時間を短縮した。また、木曜と金曜のサービス時間を夜21時まで延長し、長時間・夜間運行を行うことで、利用者の幅広いニーズや浪江町の飲食店をサポートした。車両としては、1台のeNV200と2台のNV350を使用した。

また、2022年1月からは、VR (Virtual Reality) を活用して、浪江町にある実際のお店の商品棚を見ながら買い物ができる「なみえバーチャル商店街サービス」の配送を担い、地域経済の支援も行った(図7)。凸版印刷株式会社(現: TOPPANホールディングス株式会社)が提供する「VR買い物支援サービス」と日産自動車 が提供する「なみえスマートモビリティ」を組み合わせた買い物支援サービスであり、自宅にいながら、浪江町に拠点を置く3社(柴栄水産、道の駅なみえ、イオン浪江店)の売り場をリアルタイムで見ながら、商品を確認・注文することが可能であった。注文した商品は貨客混載で自宅まで配送されるものであった。本実証実験では、購入から手元に届くまでの一連の遠隔購買・宅配サービスの有用性を検証すると同時に、新たな効率的な買い物手段を提供することで、地域の暮らしやすさの向上や地域商業の活性化を図った。



図7 なみえバーチャル商店街サービス

また、中心部でもスマートフォンアプリ(図8)での配車要求を可能にするため、住民の方々へのヒヤリングを重ね、高齢化が進む浪江町で誰もが迷わず目的地を選択可能にした。



図8 スマートフォンを活用した配車アプリ

3) 2022年6月から2023年末まで

前年までは短期間の実証実験を実施していたが、住民の声を考慮して、2台のNV350を使用する通年での実証実験に変更した。2022年10月からは、地域住民の利用促進を目指し、主要な飲食店やラウンドマーク、ホテルなど計14か所に、既存のデジタル停留所と同様のユーザーインターフェイスを持つミニデジタル停留所(図9)を設置した。利用者の利便性向上と拡大を図るとともに、商業店舗へのお客様の送迎を支援すべく導入したものであり、ユーザ登録していない方でも乗車することが可能になった。



図9 ミニデジタル停留所

2022年12月からは、子供向け送迎サービスである「スマモビきつず」を開始した(図10)。浪江町では、子供の自宅から学校の往復は通学バスが基本であり、子供向け施設に立ち寄るには、保護者などによる送迎が不可欠であった。本サービスにより、保護者の負担を軽減、子供の自主的かつ活発な校外活動を促進し、多様化するライフスタイルに対応した。子供には二次元コード付きキーホルダーを配布し、専用の「きつず停留所」によって読み取ることで、スマートフォンなどを持たない子供でもサービスを利用できる。端末情報と管制センターが連動し、子供の施設への入退館や車両の乗降などを保護者に通知する仕組みになっている。保護者がスマートフォンアプリからあらかじめ子供の行先を制限する機能や、保護者不在時

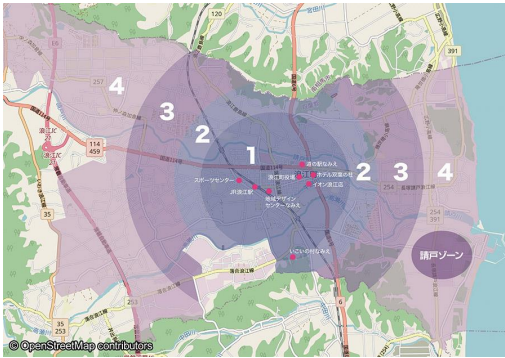
の帰宅を避けるための帰宅承認機能を備えているほか、到着してから子供が家に入るまでをドライバーが見届けるため、安心して使うことができる。



図10 スマモビきつず
(上段: 二次元コードの読み取り、下段: 車両の利用)

4) 2023年1月5日から

事業化に向けた最終段階の実証実験フェーズに移行し、運賃を伴うサービスへの利用者や地域の受容性を検証している。今後のサービス拡充も含めて、人口密度の低い地域でも持続可能なモビリティサービスの事業化スキームを構築する必要がある。図11に浪江町内のサービスエリアと基本運賃を示す。サービスエリアには、ゾーン1(浪江町中心部)からゾーン4が設定されており、基本的にはゾーン1内での移動と、ゾーン1と他ゾーンとの移動を可能にしている。ただし、ゾーン4内の請戸ゾーンについては、東日本大震災の震災遺構が存在しており、訪問者による回遊が想定されることから、利便性を考慮して、直接移動を可能にしている。なお、サービス有償化にあたっては、車両運行を行う観光タクシー、東北アクセス、常交タクシーの3社が、道路運送法第21条の許可を受けている。また、支払いについては、現金に加えて、PayPayによる運賃支払いも可能になった。



基本運賃 (大人1人あたり) 単位: 円

発着	ゾーン1	ゾーン2	ゾーン3	ゾーン4
ゾーン1	● 200	300	500	800
ゾーン2	300			
ゾーン3	500			
ゾーン4	800			★ 300

図11 サービスエリア(上段)と基本運賃(下段)

3.2.1.2 MSPF (Mobility Service Platform)

従来のタクシーの利用においては、お客様から電話で配車依頼があった場合には、タクシー会社から全ての車両に対して無線で配車可否の問い合わせを行い、お客様の場所に向かうことが可能な車両が応答する。また、走行中のタクシーに乗りたい場合には、お客様がタクシーのスーパーサイン(空車、賃走、迎車などを表示する機器)を視認し、手を挙げて乗車意思を示す。タクシー運転手はお客様を視認し、停車場所を検討した上で、お客様の近くで車両を停車させる。乗車後、お客様から口頭で目的地を指示されると、タクシー運転手は目的地に向かって運転し、周辺状況を鑑みて降車場所を決めて停車する。ドアを開ける前に支払い処理を行った後、ドアを開けてお客様を降車させることでサービスが完了する。

なみえスマートモビリティの実現に向けて、上記のオンデマンド配車に関する処理を自動化するために必要となるシステム一式(車両、配車端末、管制システム、クラウド上で動作する配車システム等)をMSPFとして開発してきた。お客様は、電話でタクシーの配車依頼をしたり、手を挙げて乗車意思を示したりする代わりに、スマホアプリを介して配車要求を行うことで、クラウド上で動作する配車システムであるFMS (Fleet Management System) が配車要求を受け付け、タクシー会社とお客様の両者にとって最も適した車両を決定し、配車指示を行う。また、自動運転車両の配車にも対応するため、自動運転車両の情報をフィルタリングする仕組みとして、AD Gatewayを設けた。図12に、MSPFの全体構成を示す。

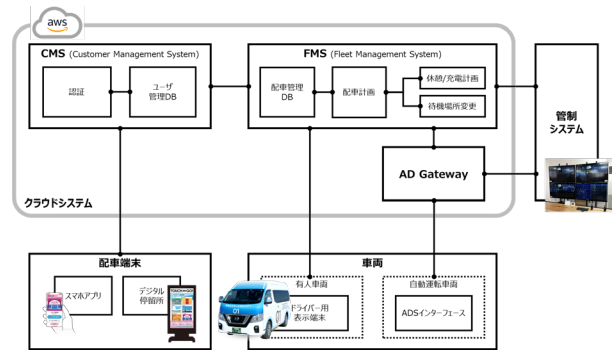


図12 MSPFの全体構成

配車は、お客様の乗車地、および、現時点における各車両の位置や配車状況、将来における配車状況の予測値などの情報に基づいて、各車両の走行ルートを計算して決定される。ここで、乗車地から目的地までの配車をトリップ、複数のトリップを時系列で並べたものをツアーと定義する。現在、全車両に対して配車要求が入っておらず、車両が待機場所に停車している状況とする。新たに配車要求があった場合には、トリップA(現在地である待機場所から乗車地までの移動)、トリップB(乗車地から降車地までの移動)、トリップC(降車地から待機場所までの移動)の走行予定ルートを算出する(図13)。この条件下で、別のお客様から配車要求(トリップD)があった場合には、そのトリップにおける乗車地と降車地の挿入位置を全通り確認し、移動時間が最短になる位置にトリップを挿入する(図14)。乗り合い乗車を許可する場合には、最初に配車要求したお客様の乗車限界時刻と降車限界時刻に制約を設けることで、不要な待ち時間や乗車時間を抑え、お客様満足度を低下させないようにしている。なお、乗り合い乗車を許可しない場合には、お客様が乗車しないトリップ(待機場所から乗車地への移動、および、降車地から待機場所への移動)に新たなトリップを挿入することで、図14の(1)や(6)のような乗車と降車を繰り返すツアーが採用される。

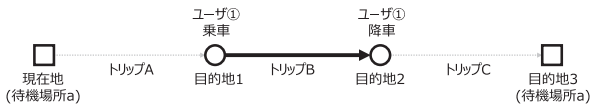


図13 トリップの生成

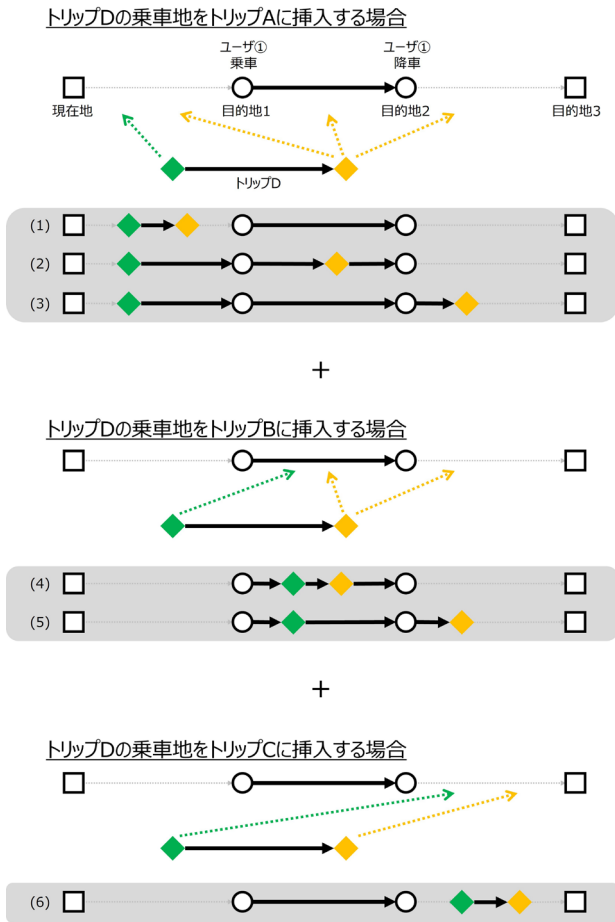


図14 トリップの挿入によるツアーの生成
(太線: お客様が車両に乗車するトリップ)

また、従来のタクシー運転手は、実務経験で培ってきた知見に基づいて、需要が発生しそうな場所を走行するように、走行予定ルートを決めている。MSPFにおいては、事前に想定した需要発生箇所付近に車両を待機させることで、お客様満足度が高く、かつ、配車効率の高いサービスを提供している。

3.2.2 Easy Ride®

日産自動車は、無人運転車両の活用を想定した新しい交通サービスであるRVRH (Robo-Vehicle and Ride Hailing) として、横浜みなとみらいエリアで実証実験を実施した。「Easy Ride®」は「もっと自由な移動を」をコンセプトに、誰でもどこからでも好きな場所へ自由に移動できる交通サービスで、移動手段の提供にとどまらず、地域の魅力に出会える体験の提供

を目指してきた。なお、「Easy Ride®」は株式会社ディー・エヌ・エーと日産自動車の登録商標である。

1) 2017年度 (2018年3月5日~)

株式会社ディー・エヌ・エー (以降、DeNA) と共同で、一般利用者の乗車体験に関する課題の発掘と、エコシステムを築く関係者への理解や巻き込みを目的とした実証実験を実施した。

リーフベースの自動運転車両を使用して、日産グローバル本社から横浜ワールドポーターズまでの約4.5kmのコースを往復運行する実証実験を実施した。公式サイトで募集した約300名の一般モニター向けに、目的地の設定や配車などの基本的なサービスに加え、移動だけにとどまらない新しい乗車体験を提供した。専用のスマホアプリに「やりたいこと」をテキストや音声で入力すると、おすすめの候補地が表示され、乗車中には走行ルート周辺の約500件のおすすめスポットや最新のイベント情報などが車載タブレット端末に表示される。また、店舗などで使える40件程度のお得なクーポンも準備した。

無人運転時でも安心して利用できるサービスの実現に向けて、遠隔管制センターを設置し、日産自動車のSAM (Seamless Autonomous Mobility) 技術とDeNAのサービス設計と運営ノウハウを融合させた遠隔管制システムのテストを実施した。車両に搭載されたカメラ等がセンシングした車両周囲の状況や車内の様子を遠隔でモニタリングし、さらには、車両配備スケジュールや運行を管理した。

2) 2018年度 (2019年2月19日~3月16日)

新たに開発したe-NV200ベースの自動運転車両を使用して、横浜みなとみらいエリアと中華街エリア (図15) で実証実験を実施した。日常利用を想定していたため、実証実験期間中の利用回数に制限はなく、配車要求時に15か所の乗降地の中から目的地を決めることが可能であった。自動運転車両は、実証実験エリア内北端に設置された待機場所で待機し、お客様からの配車要求が発生した際に移動を開始するものとした。サービスの無人化も想定し、乗降地にスタッフは配備しておらず、車体に貼り付けられたQRコードを読み込んで乗車することが可能であった。

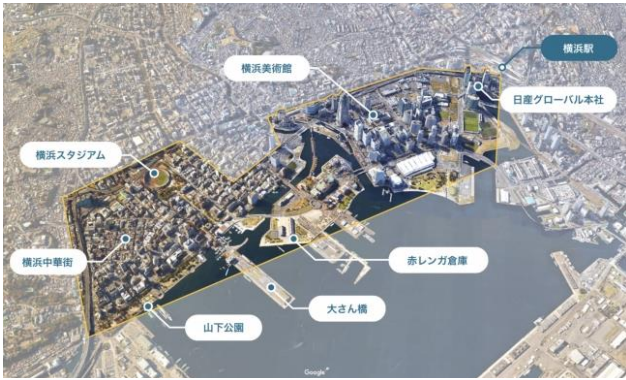


図15 実証実験エリア

実証実験期間中の配車回数は170回であり、期間中に16回も乗車する方がいるなど、日常の足として利用するお客様も見られた。しかしながら、乗降地の密度、迎車にかかる時間、メンテナンスによる車両不足などの問題から、お客様が乗車するまでにかかる時間が長くなる、キャンセルされる課題も見つかった。

3) 2021年度(2021年9月21日~10月30日)

株式会社NTTドコモと共同で、少子高齢化に伴う公共交通のドライバー不足など地域社会が抱える交通サービスの課題解決に向けて両者のもつ最新技術を活かし、図15に示すエリアで実証実験を実施した。新たに自動運転車両の配車に対応したAI(Artificial Intelligence:人工知能)を活用したオンデマンド交通システム「AI運行バス®」を組み合わせることで、みなとみらい在住者や在勤者の中から募集した約200名の一般モニター向けに、将来の完全自動運転による交通サービスをイメージさせる最新技術やサービスを提供し、その実用性を検証した(図16)。なお、「AI運行バス®」は株式会社NTTドコモの登録商標であり、株式会社未来シェアが開発したSAVS(Smart Access Vehicle Service)⁽³⁾を利用している。



Easy Ride X AI運行バス
by Nissan & DENA docomo

図16 NTTドコモの実証実験

自動運転システムのECU化、および、監視機能と診断機能を拡充することによって車内オペレータを不要とし、お客様の座席を2席から3席に増加させることが可能になった。加えて、待機場所を実証実験エリアの北側と南側に1か所ずつ設置したことで平均迎車時間を短縮し、かつ、乗降地を23か所に増加したことで利用者数が増加し、その結果、配車回数が513回(2018年度と比較して約3倍に増加)となった。無人前提の車内体験についても84%がポジティブな回答をしている。また、本移動サービスの料金に関しては、500円/回、および、サブスク利用が望ましいと回答された方が約半数となった。

4. あとがき

本稿では、日産自動車に取り組んできたモビリティサービスについて述べてきた。シェアリングエコノミーは国際的にも普及が進んでおり、特に、交通分野においては様々な事例が導入されてきている。日産自動車は、お客様にとって利便性が高く、かつ、持続可能な交通手段を目指すため、ドライバーを必要としない無人運転車両を活用したモビリティサービスの技術開発を進めていく。

参考文献

- (1) 山上俊行:ライドシェアとは何か?、国土交通政策研究所報 65号 pp.2-11 (2017年夏季)
- (2) 中村文彦:北米のライドシェアリングの未来、運輸政策研究 Vol.15 No.2 pp.046-047 (2012 Summer通巻057号)
- (3) 中島秀之、ほか:バスとタクシーを融合した新しい公共交通サービスの概念とシステムの実装、土木計画学研究・論文集 第32巻(特集) pp.1-12 (2015)

著者



藤田 晋



木村 健



宮下 直樹

第73回 自動車技術会賞 論文賞
(2023年)

ステンレス溶射ボアに対応した
厚膜DLCピストンリングの開発

受賞者紹介

平山 勇人 Hayato Hirayama

分野 : 金属材料、トライボロジー
学位 : 修士 (工学)
所属学会 : 自動車技術会



内海 貴人 Yoshito Utsumi

分野 : 機械工学
学位 : 修士 (工学)



柴田 大輔 Daisuke Shibata

分野 : エネルギー科学、機械工学
学位 : 修士 (エネルギー科学)
所属学会 : 自動車技術会



野間 俊 Takashi Noma

分野 : 表面物理学、表面化学
学位 : 修士 (理学)



受賞:第73回 自動車技術会賞 論文賞(2023年)

ステンレス溶射ボアに対応した
厚膜DLCピストンリングの開発

平山 勇人* 内海 貴人** 柴田 大輔*** 野間 俊**

1. ま え が き

可変圧縮比システムを搭載した日産のVC-TURBOエンジンは、圧縮比を切り替えることで、省燃費化と高い動力性能を同時に実現している。VC-TURBOエンジンの更なる省燃費化には、排気ガス再循環(Exhaust gas recirculation,EGR)率の向上が有効であるが、シリンダーボア内の排気凝縮水が増加し、溶射ボアに対する腐食環境が厳しくなる。そのため、耐食性を向上したステンレス溶射ボア(Cr:12 wt%)を開発したが、ピストンリング外周の窒化クロムコーティング(Chromium nitride,CrN)膜との間で凝着摩耗が発生した。本開発では、フィルタを加えた真空アーク法(Filtered vacuum arc,FVA)を用い、ピストンリング最外周の水素を含まないダイヤモンドライクカーボン(Hydrogen-free diamond-like carbon,DLC)膜をドロップレットが少ない状態で厚膜化および低硬度化することにより、CrN膜の廃止による凝着摩耗課題およびDLC膜の変形能向上によるアブレシブ摩耗課題の両方を解決した。開発した厚膜DLCピストンリングとステンレス溶射ボアの採用により、EGR率20%を成立させ、CrN膜を有する現行ピストンリングおよび鉄系溶射ボアを採用したVC-TURBOエンジン(KR20DDET)に対して、燃費4%以上の向上を実現した。

2. 開発背景

VC-TURBOエンジンは、ピストンの上/下死点位置を連続的に可変にするマルチリンク機構を有し、圧縮比を自在に切り替え、省燃費化と高い動力性能を同時に実現できる⁽¹⁾。近年、ガソリンエンジンの燃費向上技術としてEGRが注目されている⁽²⁾。エンジンの燃焼により排出されたガスを吸気に混入し、燃焼温度を下げることで、冷却損失の低減が可能になる。

EGR率を20%に向上すると、排気凝縮水と上死点位置でのピストン摺動の複合作用により、溶射ボアの腐食摩耗が加速する。そのため、溶射材料を鉄系材料からステンレス材料

に変更し、耐食性を向上したステンレス溶射ボアを開発した^(3,4)。しかしながら、外周にCrN膜、最外周にDLC膜を成膜した現行ピストンリングでは、長時間摺動によりDLC膜が摩滅しCrNが露出することにより、露出したCrNとCrを含むステンレス溶射ボアとの摺動で凝着摩耗が発生した。図1に摺動試験後のピストンリングの凝着摩耗状態を示す。本報では、ステンレス溶射ボアに対応可能なCrN膜を廃止した厚膜DLCピストンリングを開発したので報告する。

3. 厚膜DLCピストンリングのコンセプト

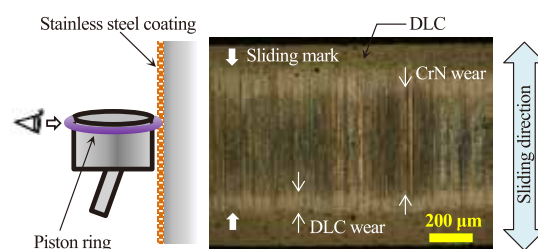


Fig.1 Adhesive wear by exposed CrN after 1 μ m thickness DLC wear out.

図2に厚膜DLCピストンリングのコンセプトを示す。従来では、ピストンリング外周に下地材露出を避けるために厚さ20 μ mのCrN膜を採用し、最外周には、低フリクション化、耐焼付き性向上、ボア/リング摩耗低減を目的に膜厚1 μ mのDLC膜を適用している⁽⁵⁾。CrN膜を廃止し、DLC膜を厚膜化する際の課題は、1) 成長したドロップレットによる摺動特性の悪化、2) 脱落ドロップレットによるアブレシブ摩耗の進行である。1)はFVA法の適用によるドロップレット低減、2)はDLC膜の低硬度化による脱落ドロップレットに対する変形能向上により解決する。詳細を以下に示す。

* 材料技術部 ** パワートレイン技術開発試作部 ***R&D 人事部

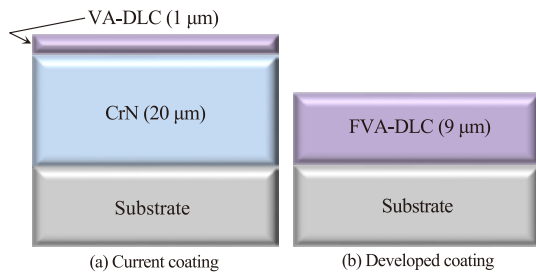


Fig.2 Configuration of thick DLC coated piston ring.

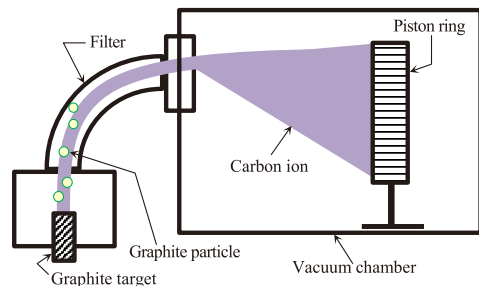


Fig.3 Schematic representation of FVA system.

3.1 FVA法の適用によるドロップレット低減

一般的なDLC膜の成膜方法は、真空アーク法 (Vacuum arc, VA) であり、真空中で原料の黒鉛をアーク放電によりイオン化し、発生した炭素イオンをバイアス電圧で加速し、成膜対象物に成膜する工法である。この場合、成膜の際に炭素イオンの他に、グラファイト粒子が飛来する場合があります、このグラファイト粒子を核に成長したドロップレットがDLC膜表面に分布し、DLC膜のエンジン油潤滑下における優れた摺動特性を低下させる要因になる⁽⁶⁾。そのため、本開発ではドロップレット低減が可能な成膜方法であるFVA法を採用した^(7,8)。図3にFVA法による成膜機構を示す。FVA法は、成膜原理はVA法と同等であるが、湾曲したフィルタに磁場を加え、ドロップレットの核となるグラファイト粒子をフィルタで除去し、炭素イオンのみを成膜対象物へ輸送することにより、ドロップレットを低減した厚膜DLCを成膜することができる。

図4にFVA法によって成膜した膜厚9 μmのDLC膜に対して、斜め上からSEM観察を実施した結果を示す。また、比較のためVA法の膜厚6 μmの結果を併記する。VA-6 μmは多量のドロップレットが存在し、表面に平滑部は認められないが、FVA-9 μmはドロップレットが少なく、表面に平滑部が多い。しかしながら、グラファイト粒子の流入を完全には排除できず、DLC膜表面に存在するドロップレットが突起部を形成している。ドロップレットは、グラファイト粒子を核に、炭素イオンが周囲を被覆し、コーン状に成長し大型化する⁽⁹⁾。FVA法を用いてドロップレットを低減した場合においても、厚膜化した場合、ドロップレットの突起部を研磨により平滑化する必要がある⁽¹⁰⁾。

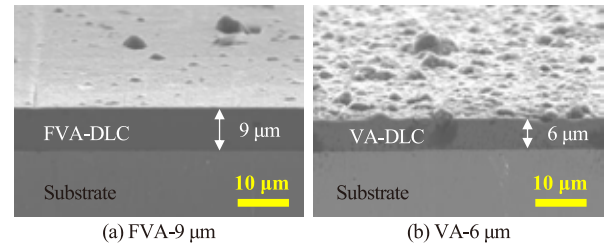


Fig.4 SEM observations of FVA-9 μm and VA-6 μm from diagonally above.

3.2 DLC膜の低硬度化による脱落ドロップレットに対する変形能向上

ドロップレットの突起部を研磨により平滑化した場合においても、DLC膜内に残留するドロップレットが摺動中に脱落し、アブレイブ摩耗が発生した場合、下地材露出による焼付きが発生する可能性がある^(11,12)。本開発では、低硬度DLC膜はDLC自身の変形能が高く、脱落したドロップレット形状に倣った弾性変形をすることでアブレイブ摩耗を抑制できることを発見した。図5に低硬度DLC膜のアブレイブ摩耗低減メカニズムを示す。一般的にDLC膜硬度は炭素原子間におけるダイヤモンド結合とグラファイト結合の比率で決まり、成膜時に成膜対象物に印加するバイアス電圧に対して極大値をとる^(13,14)。ダイヤモンド結合の比率を高めれば、ナノインデンテーション硬度で70 GPa前後の高硬度DLC膜を得ることができる⁽¹⁵⁾。本開発では、成膜時のバイアス電圧を調整し、ダイヤモンド結合比率を低減することにより、20 GPa前後の低硬度DLC膜を試作し、ステンレス溶射ボアに対する耐摩耗性を評価した^(16,17)。

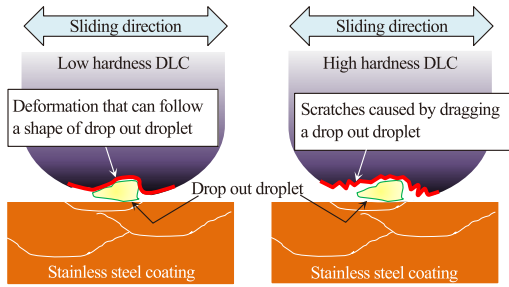


Fig.5 Mechanism of DLC abrasive wear reduction.

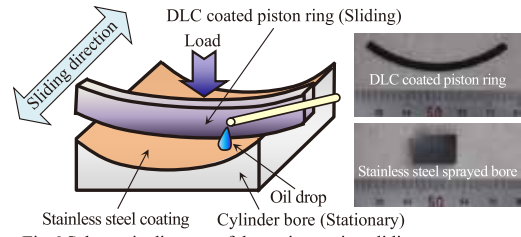


Fig.6 Schematic diagram of the reciprocating sliding wear test and test specimens appearance.

4. 実験目的および方法

表1に試験に使用したピストンリングに成膜したDLC膜の成膜方法、材料特性、膜厚および表面粗さを示す。硬度、弾性変形量を示す接触深さはナノインデンテーション法、膜厚は断面観察、表面粗さは接触式の表面粗さ測定により定量した。FVA法にて成膜したDLC膜のドロップレット突起部の平滑化を目的に、成膜方法、硬度、膜厚が異なる4仕様(FD1,FD5,FD6,VD7)のドロップレットの大きさや分布状態を表面SEM観察により確認し、3仕様(FD1,FD5,VD7)のドロップレットの研磨前後の残存状態を断面SEM観察にて調査した。更に、6仕様(FD1,FD2,FD3,FD4,FD5,VD7)の研磨前後の表面粗さを比較・評価した。また、低硬度DLC膜の硬度と摩耗量の感度取得およびDLC膜の摩耗進行メカニズムを明らかにするため、FVA法で成膜した膜厚9 μmの低硬度DLC膜(FD1,FD2,FD3,FD4)とステンレス溶射ボアの摩耗試験および試験後の摺動部調査を実施した。摩耗試験は、ピストンリングに成膜したDLC膜の最外周を研磨によりRa 0.05 μm, Rpk 0.05 μm以下に仕上げた後、必要な長さに切り出し、OPTIMOL SRV®試験装置を用いてステンレス溶射ボアとの往復摺動摩耗試験を実施した。図6に試験機の概要および試験片の外観写真を示す。試験条件は、表2に示す摩耗試験条件にて実施し、12時間試験後のピストンリングの断面プロファイル測定により、DLC膜の摩耗量を測定した。また、摩耗試験を1時間、3時間、10時間で中断し、マイクロスコープにて摺動部/非摺動部の境界を観察した。

Table 1 DLC specifications

		(GPa)	depth (nm)	(μm)	As coating / After polish
FD1	FVA	22.1	287	9	0.34 / 0.04
FD2	FVA	25.8	265	9	0.33 / 0.04
FD3	FVA	26.7	260	9	0.34 / 0.03
FD4	FVA	27.7	255	9	0.32 / 0.04
FD5	FVA	50.0	185	9	0.37 / 0.13
FD6	FVA	22.1	287	1	0.12 / 0.03
VD7	VA	58.0	46	1	0.22 / 0.04

Table 2 Wear test conditions

Load	450 N
Hertzian pressure	390 MPa
Frequency	25 Hz
Stroke	3 mm
Amount of oil	1 ml/h
Oil type	Poly-alpha-olefin (100 °C kinematic viscosity: 4 mm ² /s)
Test time	12 h (Observation of wear progress: 1 h, 3 h, 10 h)
Temperature	100 °C (Heating test table)

5. 実験結果および考察

5.1 FVA法を採用した厚膜DLCの表面性状管理

図7にFVA-9 μmのDLC膜硬度22.1 GPa (FD1) および50.0 GPa (FD5)の成膜後の表面SEM観察結果を示す。比較のためFVA-1 μm (FD6)とVA-1 μm (VD7)の結果を併記する。硬度の異なるFVA-9 μmの比較において、ドロップレットの大きさや分布状態に有意差は認められない。FVA-1 μm (FD6)およびVA-1 μm (VA7)は、1 μm前後の微小なドロップレットが存在するが、FVA-1 μm (FD6)はフィルタの効果によりドロップレット量の低減を実現した。ただし、FVA-1 μm (FD6)は9 μmまでの厚膜化の過程でドロップレットが成長し、大型化することを確認した。

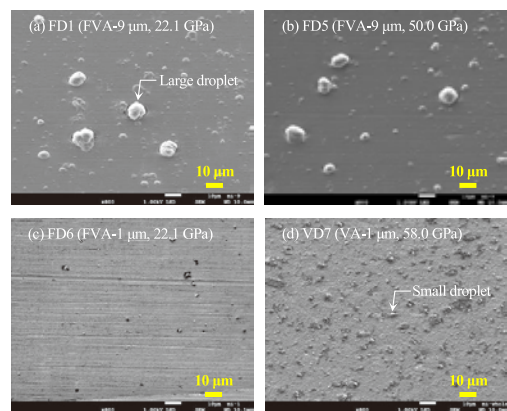


Fig.7 Surface SEM observation of as-coated DLC with different process, hardness, and thickness.

図8にFVA-9 μm (FD1)のドロップレットの断面SEM観察結果を示す。比較のため、VA-1 μm (VD7)の結果を併記す

る。FVA-9 μm (FD1) のドロップレットは、成膜初期に流入したグラファイト粒子を核に、空孔を伴いながら成長し、下地材近くまで根を張った直径約 $10\ \mu\text{m}$ のドロップレットとなり、表面に突起を形成している。図9にFVA-9 μm のDLC膜硬度22.1 GPa (FD1) と50.0 GPa (FD5) を量産想定 of 研磨時間にて研磨し、平滑化を試みた場合のドロップレット断面SEM観察結果を示す。研磨後の22.1 GPa (FD1) は、ドロップレットと周辺部の段差がなくなり平滑面を形成できるが、50.0 GPa (FD5) は頂部が一部削られただけで、平滑面を形成できない。ドロップレット/DLC膜界面は軟質なグラファイト結合の比率が高いが、ドロップレットはDLC膜と同等のダイヤモンド結合の比率であり、DLC膜硬度が高い場合、ドロップレット突起部の短時間での平滑化が困難になる。図10にDLC膜硬度とドロップレットの突起高さを示す指標であるRpkの関係を示す。FVA-9 μm は、研磨前はDLC膜硬度に関わらずRpk $0.3\ \mu\text{m}$ 以上であるが、研磨によりRpk $0.1\ \mu\text{m}$ 以下まで平滑化するには、DLC膜硬度を27.7 GPa以下に設定する必要がある。

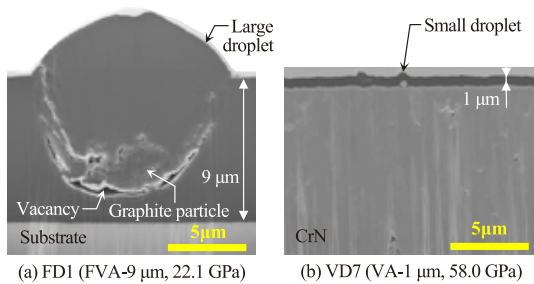


Fig.8 Cross section SEM observation of droplet as coating.

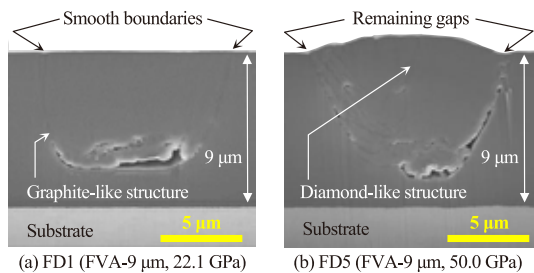


Fig. 9 Cross section SEM observation of droplet after polish.

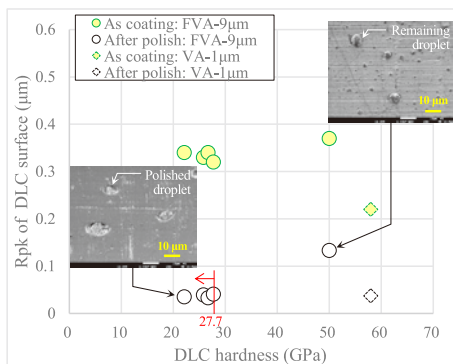


Fig.10 Relationship between Rpk of DLC surface and hardness after as coating and polish (FD1, FD2, FD3, FD4, FD5, VD7).

5.2 DLC膜とステンレス溶射ボアの往復摺動摩耗試験

図11に12時間摩耗試験におけるDLC膜硬度と摩耗量の関係を示す。また、摩耗量算出のために測定した試験前後のピストンリングの断面プロファイルを併せて示す。DLC膜硬度が26.7 GPa (FD3) で、DLC膜の摩耗が急峻な増加を示し、27.7 GPa (FD4) では最大で $4.5\ \mu\text{m}$ まで摩耗が進行した。一方、22.1 GPa (FD1) および25.8 GPa (FD2) は摩耗量は $1\ \mu\text{m}$ 以下と軽微であった。図12にDLC膜硬度22.1 GPa (FD1) と27.7 GPa (FD4) の摩耗試験後の摺動部観察結果および表面粗さ測定結果を示す。27.7 GPa (FD4) は摺動方向に平行な傷が複数存在し、表面粗さは $Ra\ 0.08\ \mu\text{m}$ まで悪化した。一方、変形能が高い22.1 GPa (FD1) は、摺動部全域が均一でマイルドな摩耗形態を示し、摺動方向に平行な傷や表面粗さの悪化は認められなかった。

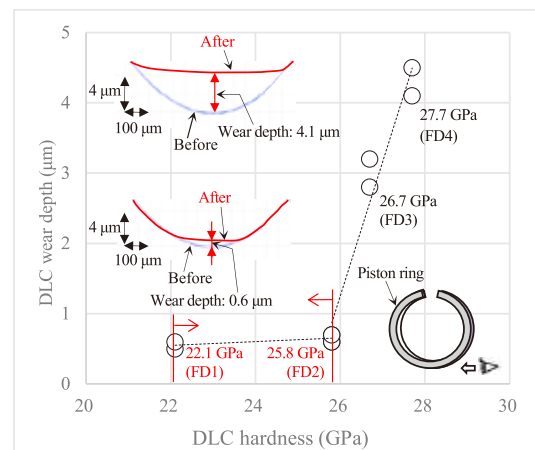


Fig. 11 Relationship between DLC wear depth and hardness after wear test (12 hours).

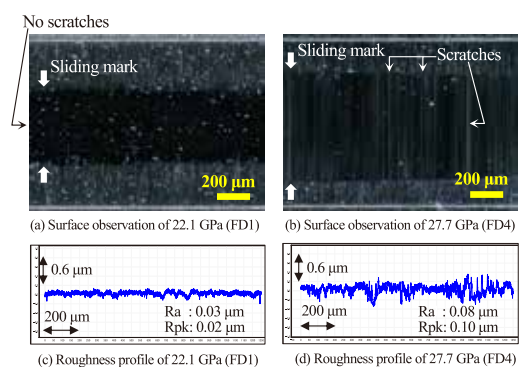


Fig. 12 Surface observation and roughness profile of DLC sliding area after wear test (12 hours).

5.3 摩耗試験後のDLC膜の摺動部調査

図13にDLC膜硬度27.7 GPa (FD4) の3時間試験後のドロップレット脱落部の表面SEM観察結果を示す。また、図14にドロップレット脱落部の断面SEM観察結果およびEDX分析結果を示す。ドロップレット脱落部を起点に摺動方向に平行な

傷が発生し、ドロップレット脱落部には、ステンレス溶射ボアの主成分であるFe、Crの移着が認められた。この結果は、ステンレス溶射ボアとの摺動によりドロップレットが脱落し、脱落したドロップレットが摺動方向に引き摺られて傷が発生したことを示唆している。また、断面SEM観察の結果、ドロップレット/DLC膜界面から発生したき裂が内部空孔に向かって進展し、ドロップレットが脱落した可能性が考えられる。き裂の起点はグラファイト結合の比率が高いドロップレット/DLC膜界面であり、ドロップレットの脱落し易さとDLC膜硬度は、強い相関を持つ可能性は低いと推定される。底部には大型のドロップレットが残存しており、DLC膜の摩耗が進めば、再脱落によりアブレイブ摩耗を引き起こす懸念がある。

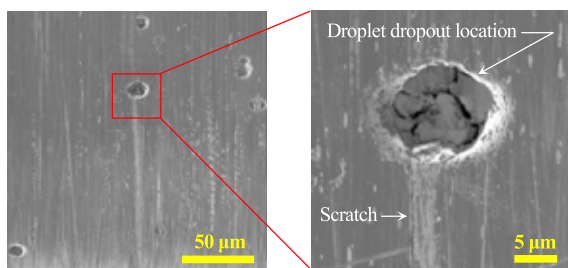


Fig.13 Surface SEM observation of droplet dropout location after wear test (3 hours: 27.7 GPa (FD4)).

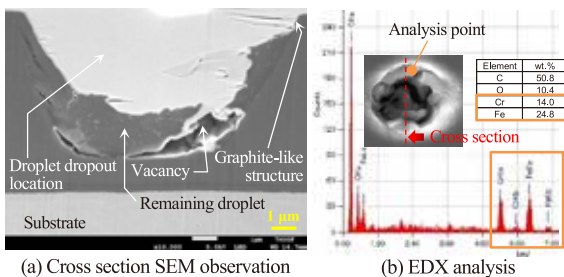


Fig.14 Cross section SEM observation and EDX analysis of droplet dropout location after wear test (3 hours: 27.7 GPa (FD4)).

5.4 DLC膜の摩耗進行のメカニズム

図15にDLC膜硬度27.7 GPa (FD4)の摩耗試験を1時間、3時間、10時間、また、DLC膜硬度22.1 GPa (FD1)の摩耗試験を1時間で中断し、摺動部/非摺動部の境界をマイクロSCOPE観察した結果を示す。27.7 GPa (FD4)の1時間経過時は、ドロップレットを起点に複数の傷が発生し、摺動部/非摺動部の境界線はうねりが認められる。3時間経過時は、1時間経過時に発生した傷は消える、または浅くなる。10時間経過時は、摩耗が進み、ドロップレット脱落による新しい傷が認められるが、傷は1時間経過時と比較して少ない。一方、22.1 GPa (FD1)の1時間経過時は、ドロップレット起点の傷は認められず、摩耗が一樣に進み、摺動部/非摺動部の境界線のうねりは小さい。また、試験前に平滑化のために実施した

研磨痕が摺動部/非摺動部の境界に残存していた。上記結果は、27.7 GPa (FD4)は、摺動初期の形状馴染みが発生する高面圧下において、ドロップレット脱落によるアブレイブ摩耗が支配的であるが、形状馴染みが進み、ドロップレット脱落の頻度が減少すると、アブレイブ摩耗により発生した傷の凸部がステンレス溶射ボアとの摺動で削られることによって、DLC膜の摩耗が進行すると考えられる。一方、22.1 GPa (FD1)は、アブレイブ摩耗は発生せず、ステンレス溶射ボアとの摺動により均一に摩耗が進む。ドロップレット脱落によるアブレイブ摩耗の抑制にはDLC膜硬度を22.1 GPaまで低硬度化することが有効であるが、22.1 GPa以下の場合、ステンレス溶射ボアとの摺動により摩耗が進行する可能性が考えられる。

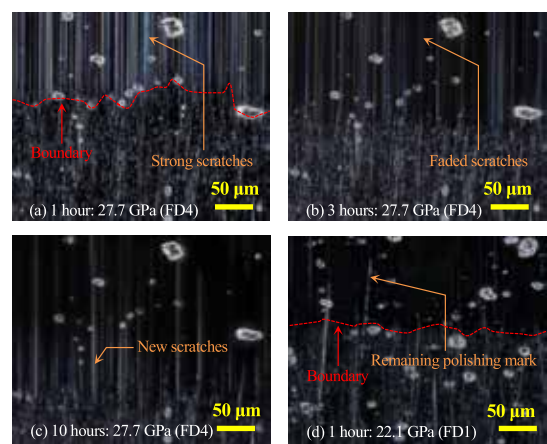


Fig.15 Mechanism of DLC wear progressing by observing the boundary between sliding part and non-sliding part.

6. エンジン耐久試験結果およびDLC膜の市場摩耗量予測

開発した硬度22.1 GPa、膜厚9 μm (FD1)を成膜した厚膜DLCピストンリングおよびボア径φ84 mmのステンレス溶射ボアを採用した4気筒エンジンにて、耐久試験を実施した。試験条件は、最高回転数を5600 rpm、最高油温を135 °C、試験時間を500時間とした。図16に耐久試験後のDLC膜の摺動部観察結果および表面粗さ測定結果を示す。摺動部に凝着摩耗およびアブレイブ摩耗の兆候は認められず、表面粗さの悪化は認められない。耐久試験後のDLC膜の摩耗量および長距離走行した市場回収車のピストンリング摩耗量の調査結果を基に、DLC膜の市場摩耗量予測を実施した。図17に22.1 GPa (FD1)のDLC膜の予測摩耗量を示す。比較のため27.7 GPa (FD4)の予測摩耗量を併記する。15万キロ以上の評価基準走行距離において、27.7 GPaの予測摩耗量は14 μmであり、下地材露出の可能性があるが、22.1 GPaは予測摩耗量が8 μmとなり、膜厚9 μm以下になることを確認した。最終的に、EGR率20%でのエンジン耐久試験を実

施し、DLC膜の摩耗に異常がないことを確認した⁽⁴⁾。

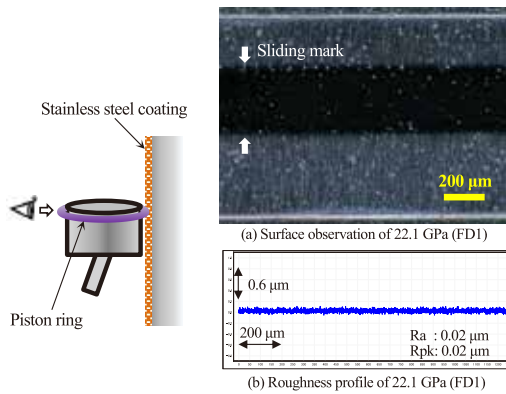


Fig.16 Surface observation and roughness profile of DLC sliding area after engine durability test (500 hours: 22.1 GPa (FD1)).

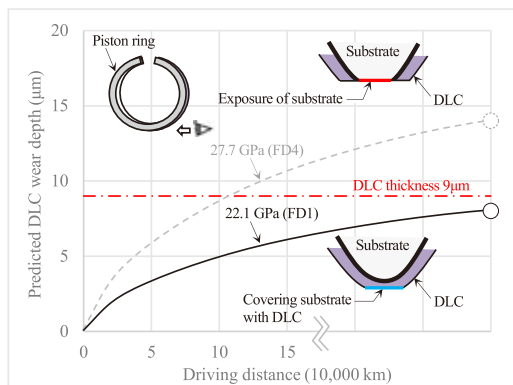


Fig.17 DLC wear depth prediction.

7. 結論

ステンレス溶射ボアに対応した厚膜 DLC ピストンリングを開発し、ドロップレットが少ない状態で厚膜化および低硬度化することにより、CrN膜の廃止による凝着摩耗課題およびDLC膜の変形能向上によるアブレシブ摩耗課題の両方を解決した。本開発により得られた知見のまとめを以下に示す。

- 1) FVA-9 μm の DLC 膜硬度が 50.0 GPa の場合、ドロップレットの突起部を研磨で平滑化することが困難であり、短時間での研磨で Rpk 0.1 μm 以下まで平滑化するには、DLC 膜硬度を 27.7 GPa 以下に設定する必要がある。
- 2) ステンレス溶射ボアとの 12 時間摩耗試験において、DLC 膜硬度 22.1 GPa では、摩耗量は 1 μm 以下と軽微であり、摺動部全域が均一でマイルドな摩耗形態を示し、摺動方向に平行な傷は認められない。
- 3) 500 時間のエンジン耐久試験の結果、DLC 膜硬度 22.1 GPa は、摺動部に凝着摩耗およびアブレシブ摩耗の兆候は認められず、表面粗さの悪化は認められな

い。また、DLC 膜の市場摩耗量予測の結果、DLC 膜厚 9 μm に対して予測摩耗量は 8 μm になることを確認した。

なお、開発した硬度 22.1 GPa、膜厚 9 μm の厚膜 DLC ピストンリングとステンレス溶射ボアの採用により、EGR 率 20 % を成立させ、CrN 膜を有する現行ピストンリングおよび鉄系溶射ボアを採用した VC-TURBO エンジン (KR20DDET) に対して、燃費 4 % 以上の向上を実現した。

参考文献

- (1) Kojima, S. et al., :Development of a New 2L Gasoline VC-Turbo Engine with the World's First Variable Compression Ratio Technology, SAE Technical Paper 2018-01-0371 (2018) .
- (2) 平谷ほか: 燃料改質ガソリンエンジン用 EGR 改質システムにおける改質用燃料供給方法に関する研究、自動車技術会論文集、Vol.51, No.3, p.398-403 (2020) .
- (3) 持田ほか: 低フリクション高熱伝達の為のミラーボアコーティング技術開発、自動車技術会秋季学術講演会前刷集、20145765 (2014) .
- (4) Hirayama, H. et al., :Stainless Steel Thermal Spray Coating of Cylinder Bores for VC-Turbo Engine, SAE Int. J. Adv. & Curr. Prac. in Mobility 3 (5), p.2236-2244 (2021) .
- (5) Higuchi, T. et al., :Development of Hydrogen-Free Diamond-Like Carbon Coating for Piston Rings, Tribology Online 12, p.117-122 (2017) .
- (6) Mabuchi, Y. et al., :The Development of Hydrogen-free DLC-coated Valve-lifter, SAE Technical Paper 2007-01-1752 (2007) .
- (7) Shi, X. et al., :Transport of vacuum arc plasma through an off-plane double bend filtering duct, Thin Solid Films 345, p.1-6 (1999) .
- (8) Lee, W. et al., :Effect of defects on wear behavior in ta-C coating prepared by filtered cathodic vacuum arc deposition, Diamond and Related Materials 105, 107789 (2020) .
- (9) Drescher, D. et al., :A model for particle growth in arc deposited amorphous carbon films, Diamond and Related Materials 7, p.1375-1380 (1998) .
- (10) 三宅ほか:自動車エンジン部品用 DLC 膜の開発、日新電機技報、Vol.62, No.3, p.45-49 (2017) .
- (11) Tas, M. et al., :Roles of mirror-like surface finish and DLC coated piston rings on increasing

- scuffing resistance of cast iron cylinder liners, *Wear* 376-377, p.1558-1569 (2017).
- (12) Mabuchi, Y. et al., :Wear analysis of hydrogen-free diamond-like carbon coatings under a lubricated condition, *Wear* 298-299, p.48-56 (2013).
- (13) Robertson, J., :Deposition mechanisms for promoting sp³ bonding in diamond-like carbon, *Diamond and Related Materials* 2, p.984-989 (1993).
- (14) Shi, X. et al., :Properties of carbon ion deposited tetrahedral amorphous carbon films as a function of ion energy, *Journal of Applied Physics* 79, p.7234-7240 (1996).
- (15) Mabuchi, Y. et al., :Effect of sp²/sp³ bonding ratio and nitrogen content on friction properties of hydrogen-free DLC coatings, *Tribology International* 62, p.130-140 (2013).
- (16) 大城ほか:軟質金属との摺動に最適な自動車エンジン部品用DLC膜「HC-DLC」、SEIテクニカルレビュー・第197号、p.63-67 (2020)。
- (17) Mustafa, M. et al., :Effect of mesh structure of tetrahedral amorphous carbon (ta-C) coating on friction and wear properties under base-oil lubrication condition, *Tribology International* 147, 105557 (2020).

編集後記

日産技報をご愛読頂きましてありがとうございます。2023年は日産の創業90周年という節目の年ですが、今回、日産技報も第90号という節目を迎えました。記念号として日産の先進技術開発を網羅する3つのトピックスを特集しました。電動化、自動運転・運転支援、コネクテッドサービスです。

電動化では、「たま」から「アリア」までの75年の歴史と未来への展望、自動運転・運転支援では、1980年代後半以降の運転支援の発展の歴史、コネクテッドサービスでは、1990年代後半からの様々なサービスの発展を論じています。それぞれの分野での象徴的な技術を深く解説しており、かなり読み応えのある特集号に仕上がったと思っております。

これらの執筆には、日産の技術開発で先頭に立つ者が携わっています。ここに、日産の技術を広く発信したいという思いで関わったすべての執筆者および編集関係者に敬意を表します。

日産技報第1号の最初の記事は「動弁機構に関する研究」というエンジン技術の研究紹介でした。時代とともに技術の内容は変わっていきませんが、“他のやらぬことを、やる”という日産のDNAは変わらずに、これからも最先端の技術を追い求め続けていきます。我々が開発している高い技術が、読者の皆さまに伝わることを切に願っております。

総合研究所 研究企画部 山村 智弘

NISSAN TECHNICAL REVIEW 2024 No.90

発行 2024年3月

発行所 日産自動車株式会社
総合研究所 研究企画部
〒243-0123 神奈川県厚木市森の里青山1番1号

発行人 総合研究所 研究企画部 部長 山村 智弘

編集所 株式会社日産クリエイティブサービス
オフィスサービス部
〒243-0126 神奈川県厚木市岡津古久560-2 日産テクニカルセンター内

