

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、ブリアエアコン機能、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。

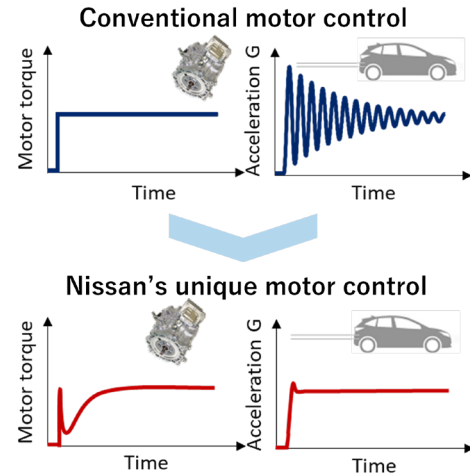


図10 制振制御によるスムーズな加速



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)

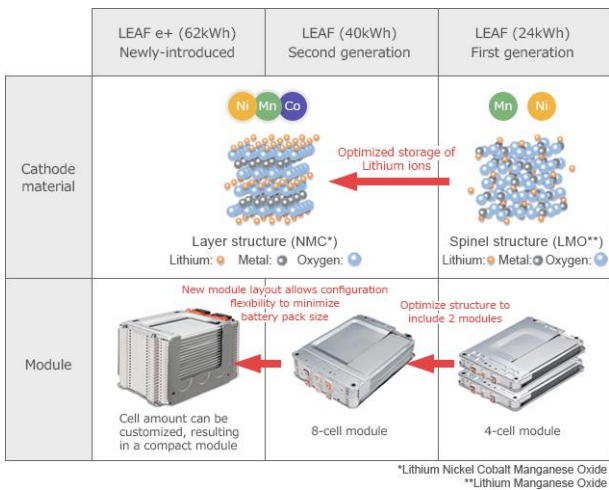


図13 「リーフ」におけるバッテリー進化

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。

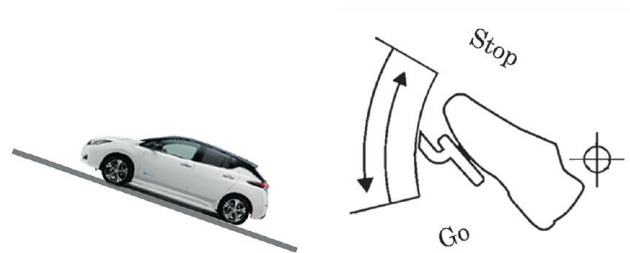


図15 e-Pedalの操作概念図

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)

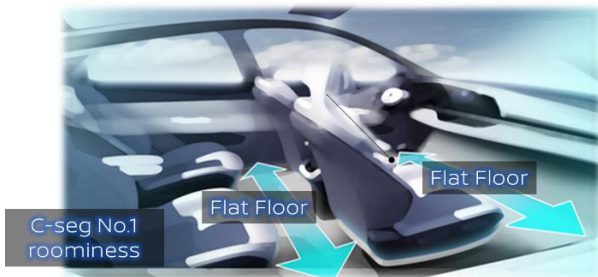


図17 高い空間効率と完全フラットフロアの狙い

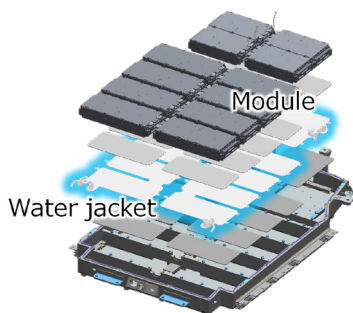


図18 底板・冷却プレート 一体型バッテリーパック

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。

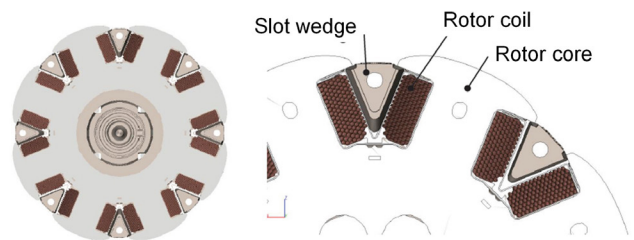


図19 8極巻線のロータ構造

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。

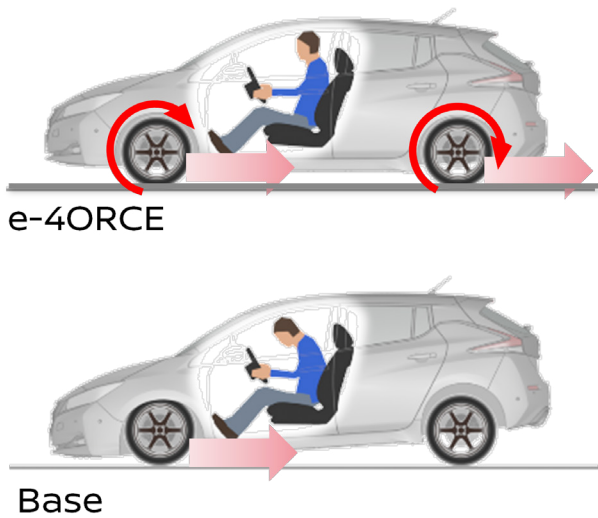


図20 減速時の姿勢制御

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、従来の軽自動車が苦手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)

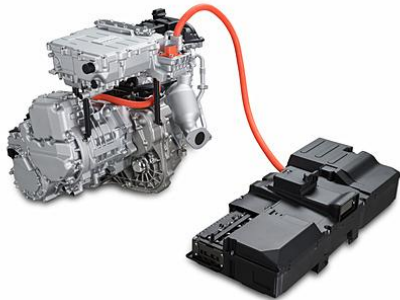


図24 初代「e-POWER」システム

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可能とした。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。

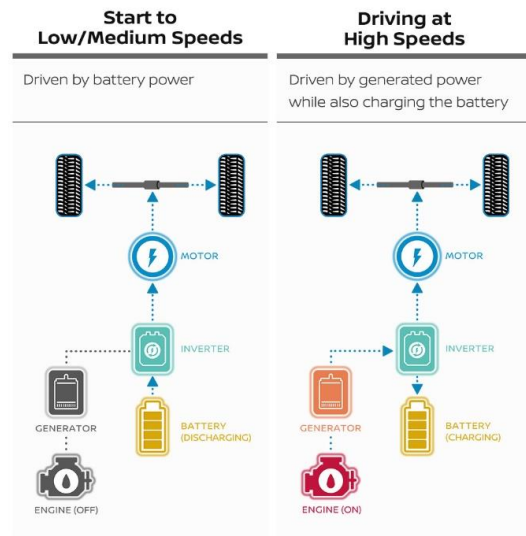


図25 e-POWERシステム動作概念図

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」

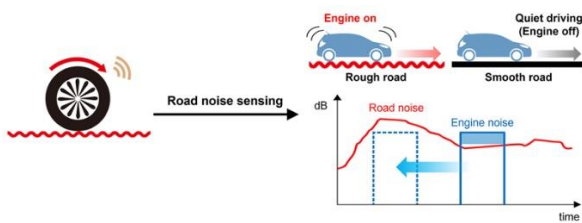


図27 ロードノイズ推定技術によるエンジン始動制御

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。

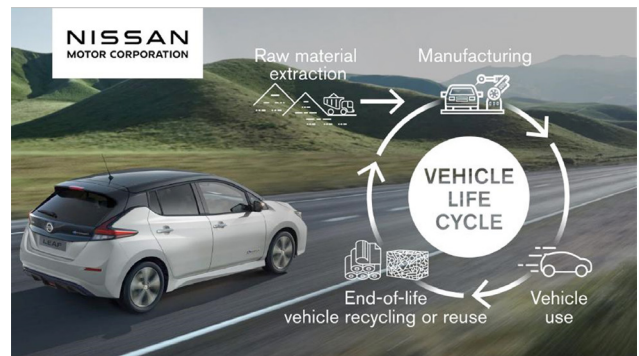
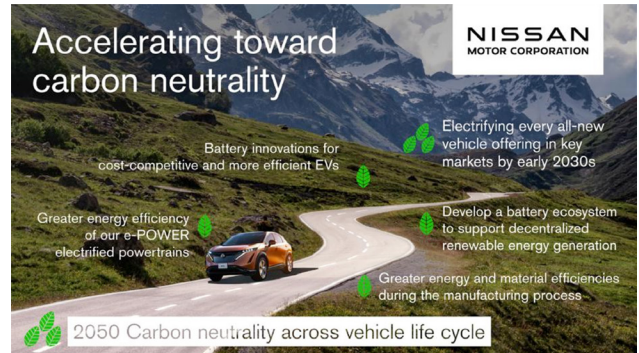


図28 日産のカーボンニュートラルに向けた取り組み

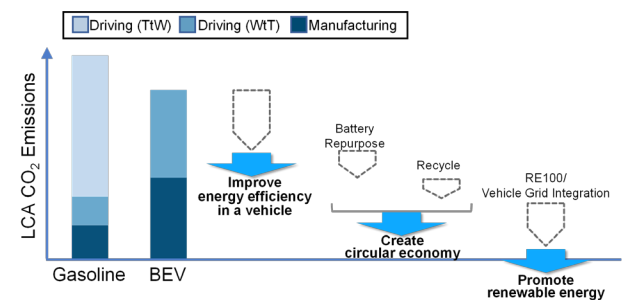


図29 カーボンニュートラルと持続可能な社会に向けて

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。

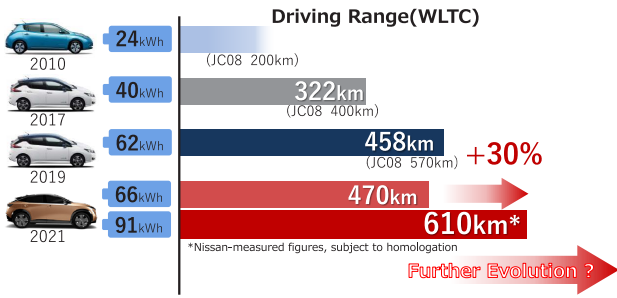


図30 量産電動自動車の航続距離進化

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。

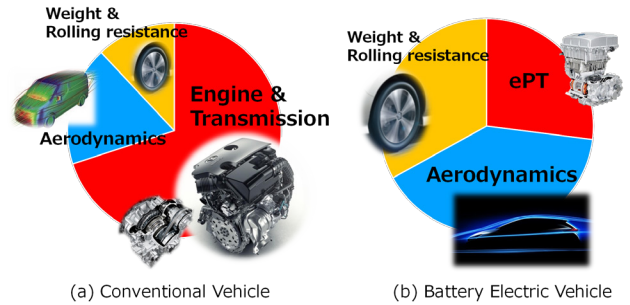


図31 自動車におけるエネルギーロス割合

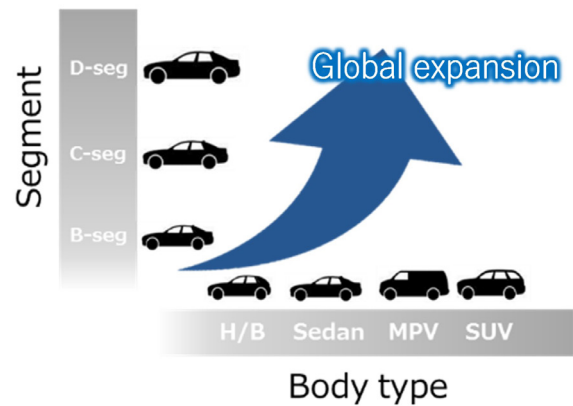


図32 将来の電気自動車における車種展開

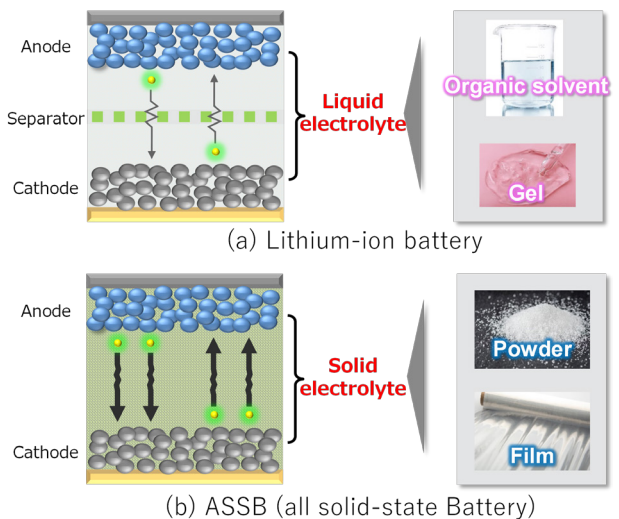


図33 リチウムイオンバッテリーとASSBの比較

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。

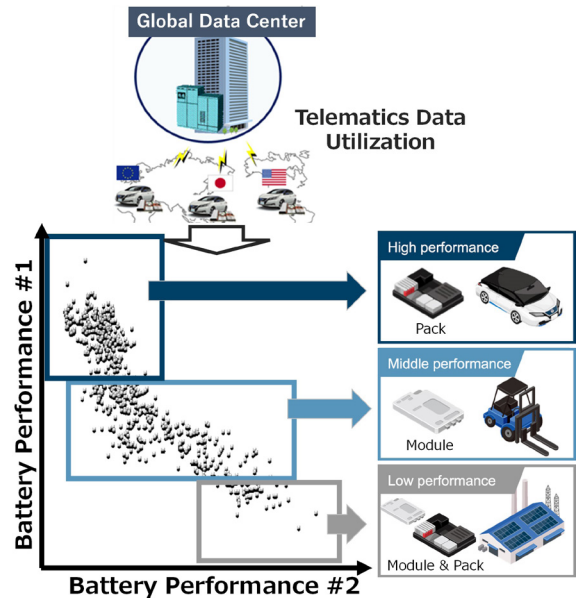


図36 バッテリー劣化状態と適用先コンセプト

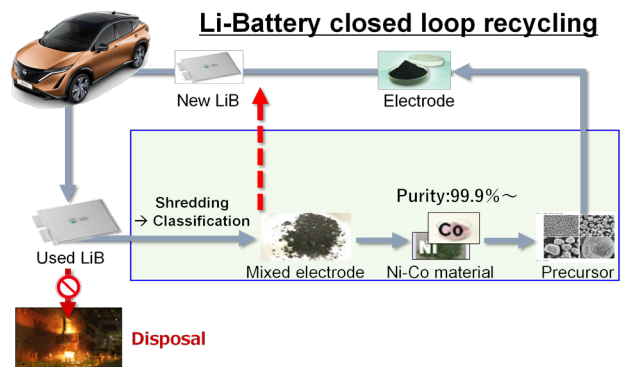


図37 リサイクル循環プロセス

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。

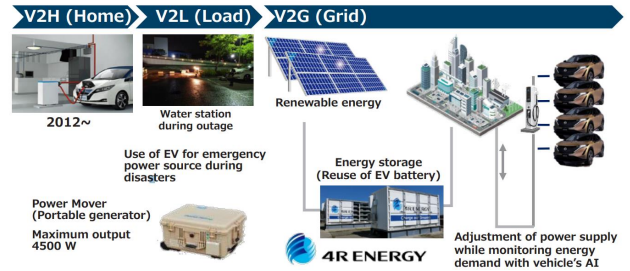


図38 日産のV2Xの取り組み



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。

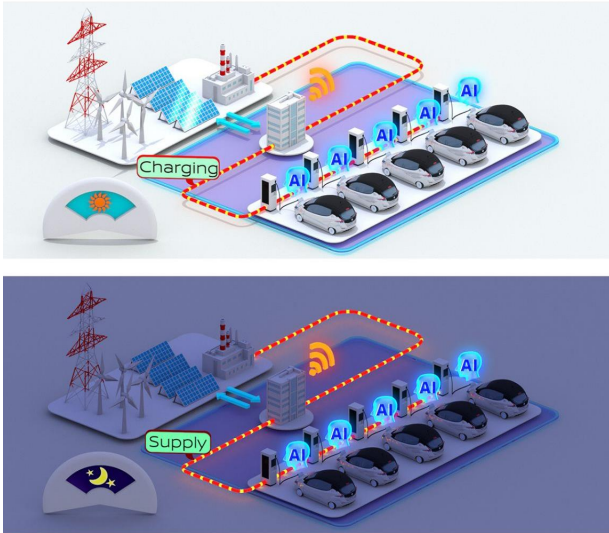


図40 日産エネルギーマネージメントシステムコンセプト

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。

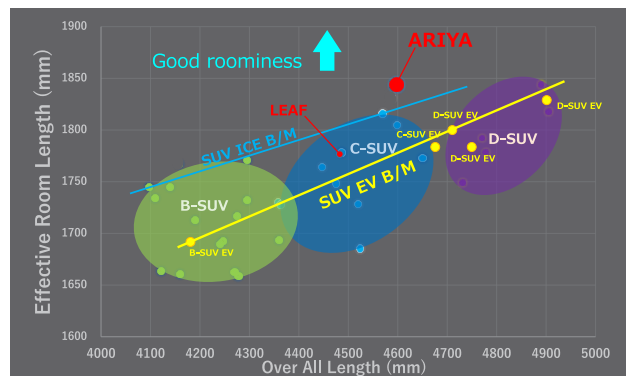


図2 SUV群における車両全長・有効室内長比較

* 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)

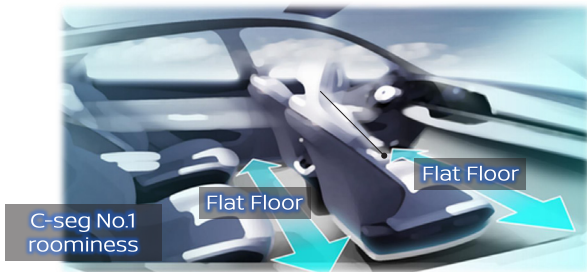


図3 高い空間効率と完全フラットフロアを実現

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の搭載されていた。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の居室内に搭載し、衝突時の高電圧安全にも配慮した。

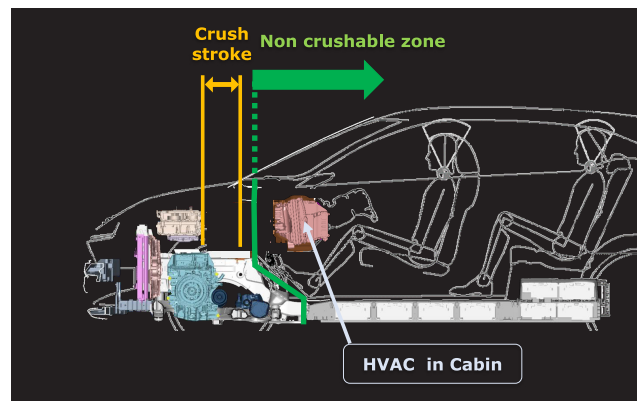


図4 従来の空調ユニットとクラッシュスペースの関係

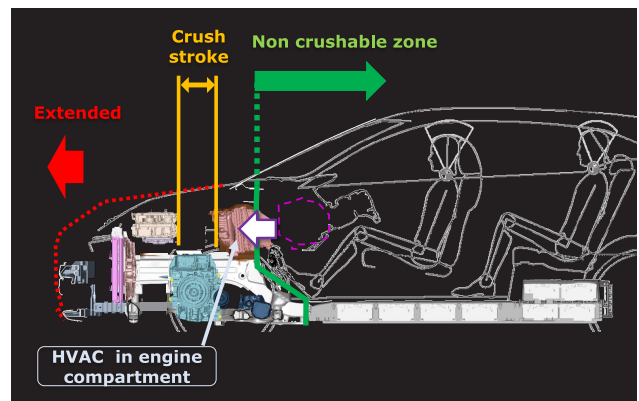


図5 空調ユニット移動とエンジンコンパートメント延長

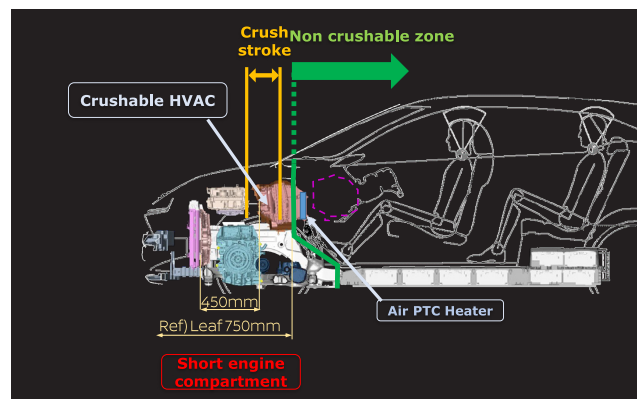


図6 空調ユニット圧壊前提のクラッシュスペース

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。

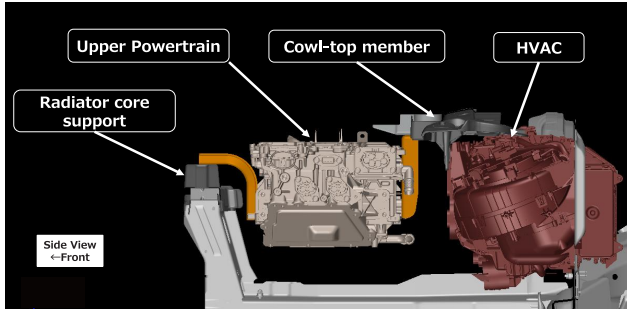


図7 エンジンコンパートメントユニット配置図

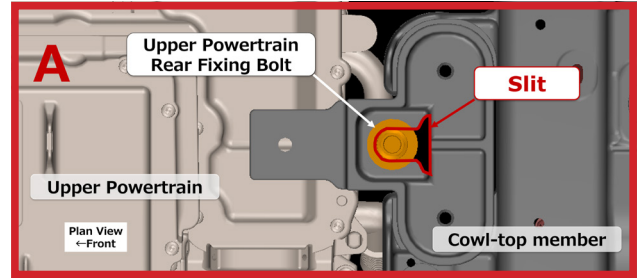
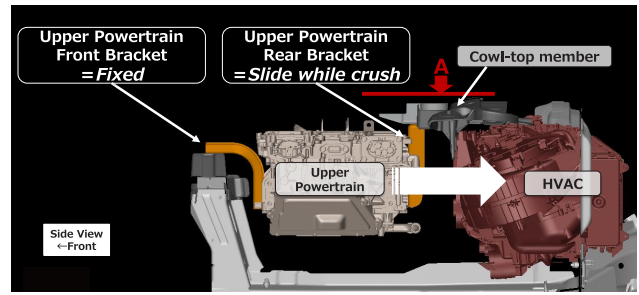


図8 前突時ユニット挙動ねらいと締結点のスリット構造

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)

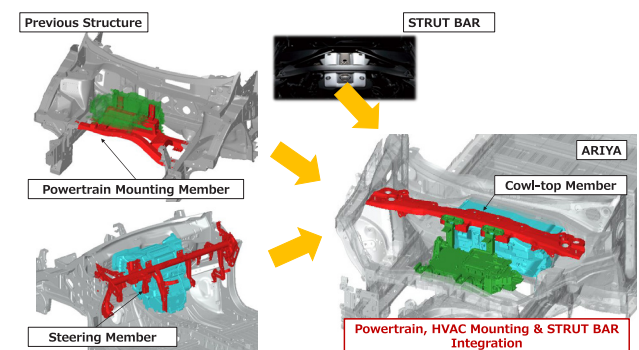


図9 カウルトップメンバーによる機能統合

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。

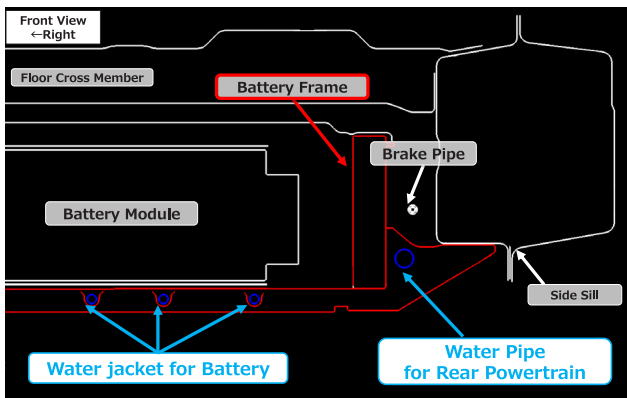


図10 高電圧バッテリーフレームへ水配管を統合

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。

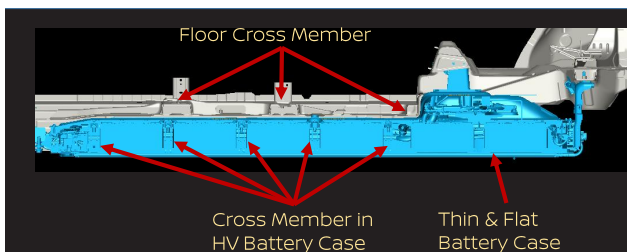


図11 車体フロアと高電圧バッテリー骨格位置関係

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。

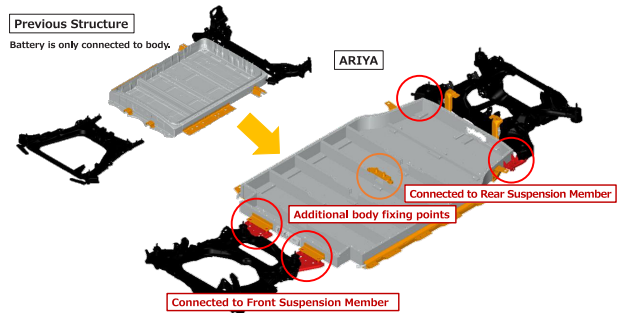


図12 サスペンションと高電圧バッテリーとの結合強化

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

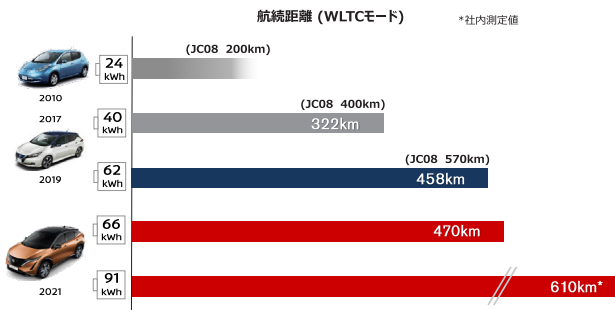


図2 a) 「リーフ」および「アリア」の航続距離

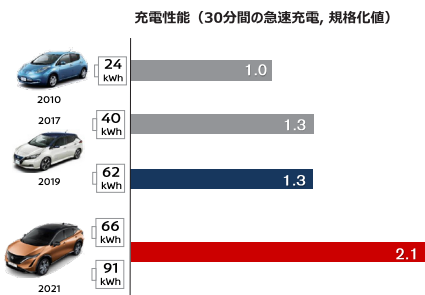


図2 b) 同 充電性能

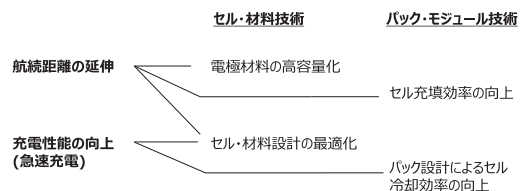


図3 航続距離と充電性能の進化に向けたEV向けバッテリーの主要な技術課題




	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。

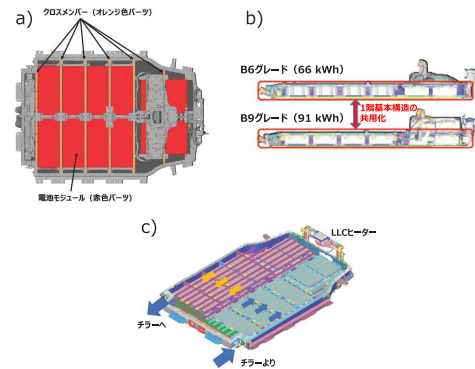


図5 a)「アリア」バッテリーパックレイアウト(B6)
b)同 バッテリーパック側面図(B6 vs. B9)
c)同 LLC流路付きバッテリー底板(B6)

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。

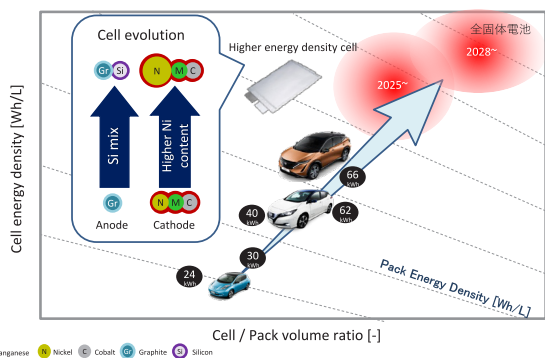


図6 バッテリーロードマップ

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。

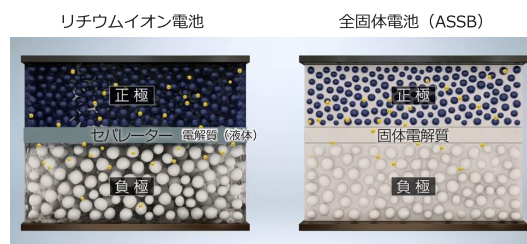


図7 a)リチウムイオン電池と全固体電池のセル構成

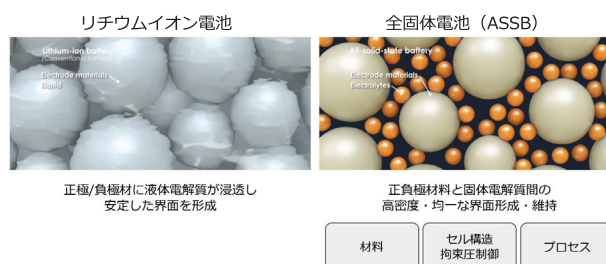


図7 b)リチウムイオン電池に対する全固体電池の課題

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/>

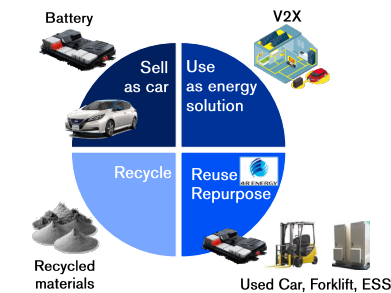


図8 持続可能なバッテリーエコサイクル

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)。

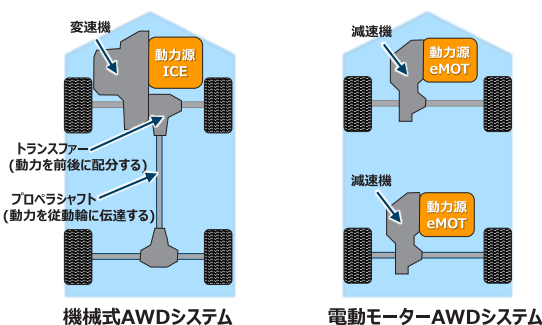


図1 AWDシステム構成比較

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)

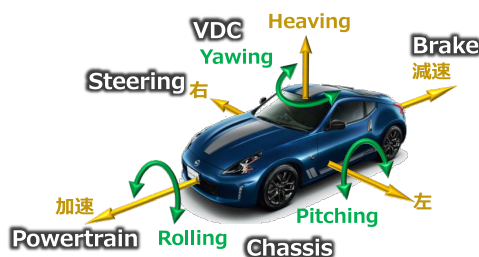


図2 クルマの動きとシステムの役割分担

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)

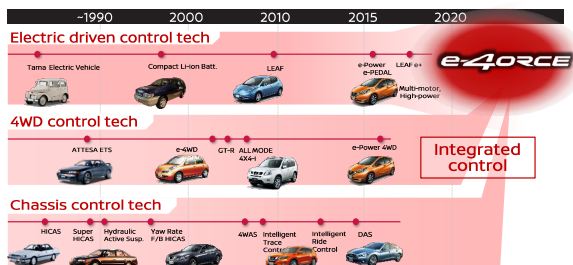


図4 e-4ORCEへ至る技術の流れ

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

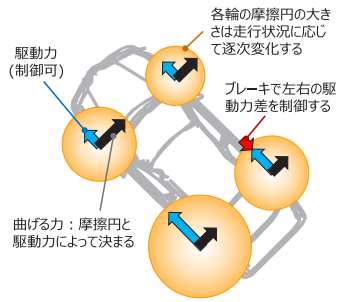


図7 駆動力で各輪の曲げる力を制御する

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。

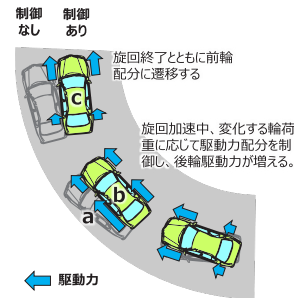


図8 旋回加速中の駆動力配分制御

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可能性がある。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。

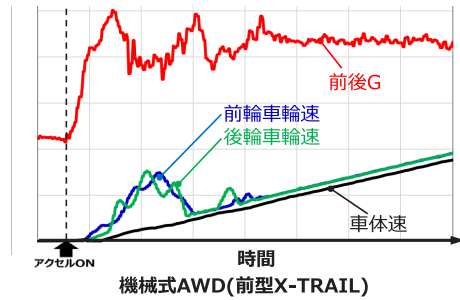
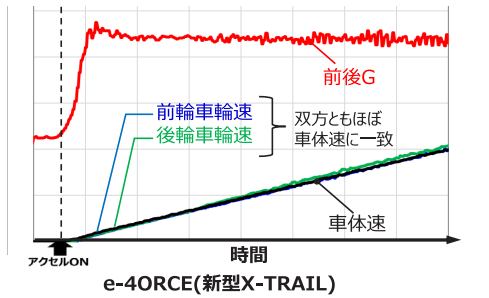


図10 圧雪路での発進

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。



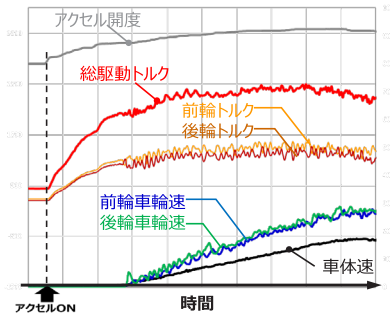
図11 深雪路での走行(イメージ)

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。

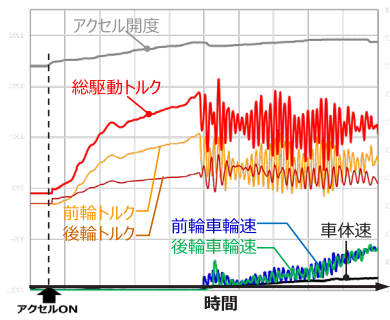
図12に、深雪路の発進においてe-4ORCEと機械式AWDでどのような挙動の違いがあるかを表したデータを示す。

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。

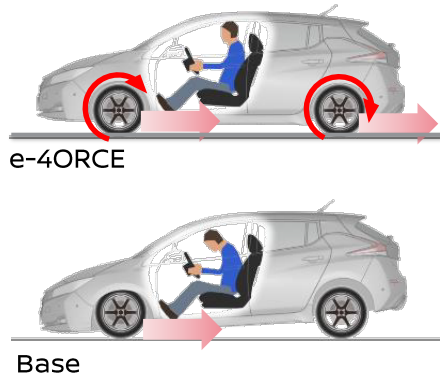


図13 減速時の姿勢制御

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

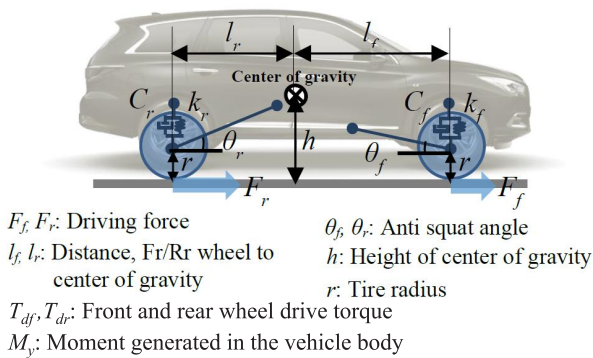


図14 前後駆動力によるピッチコントロール

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。

4. まとめと今後の展望

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ージメントと、モーター駆動らしいトルク特性を実現するパワーマネー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ー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ージメントと、消費したバッテリー電力を再充電するエネルギーマネー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ージメントとパワーマネー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。

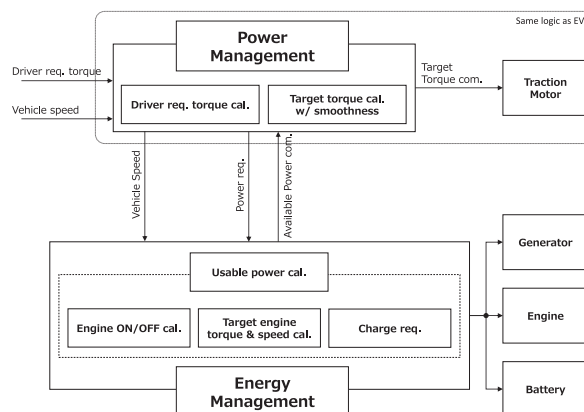


図1 e-POWERシステム制御概念図

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ージメントはBEVと同じ制御を使用している。電力量マネージメントを行うエネルギーマネージメントは、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ー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

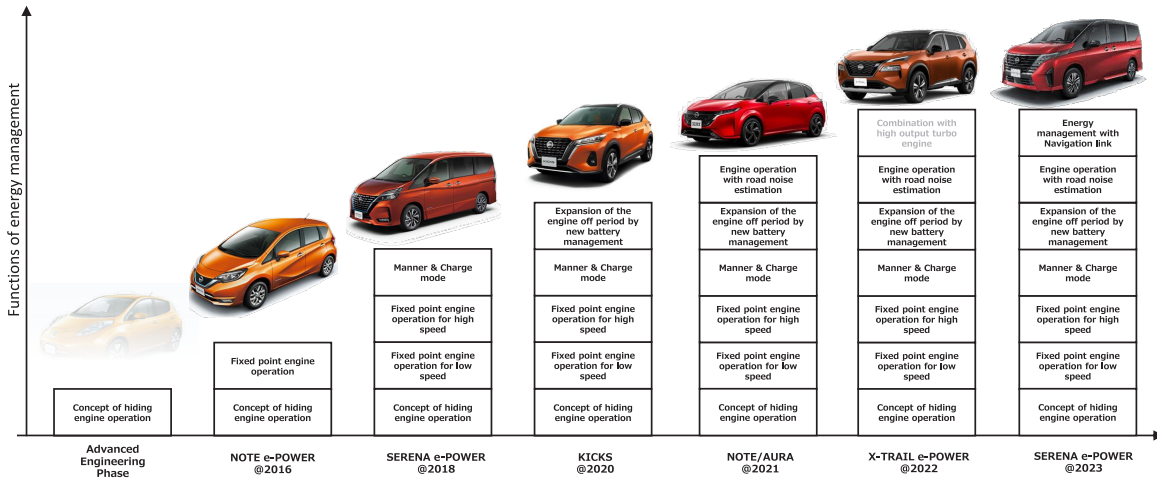


図2 エネルギーマネージメントの進化

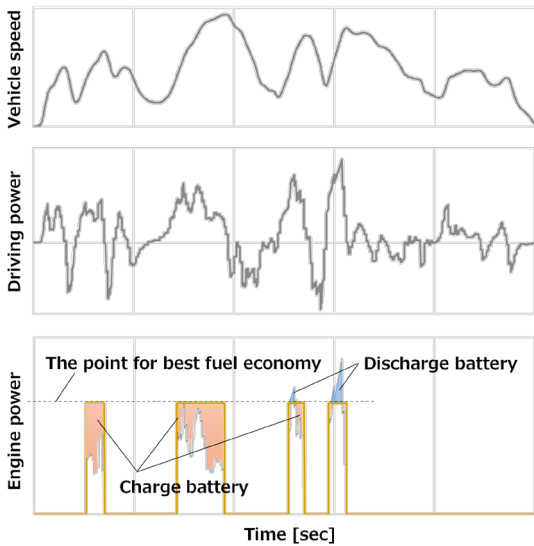


図4 エンジン動作点の決め方

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。

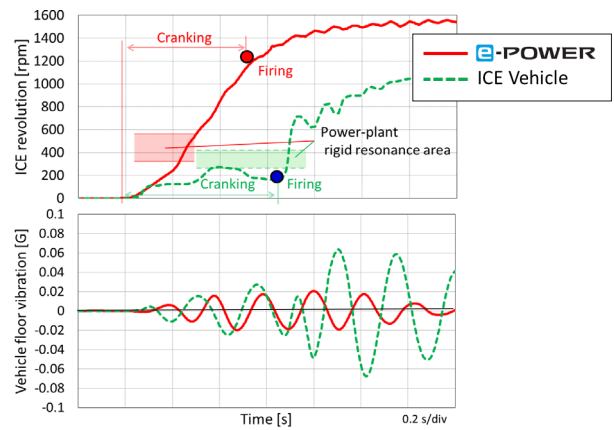


図5 エンジン点火タイミングとフロア振動の関係

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。

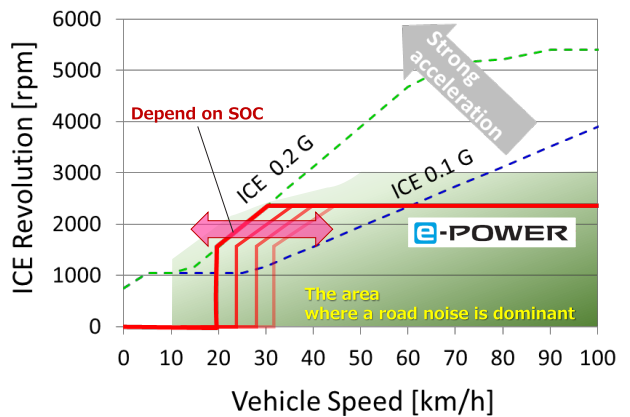


図6 ノートe-POWERにおけるロードノイズのエンジン回転数の概念図

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。

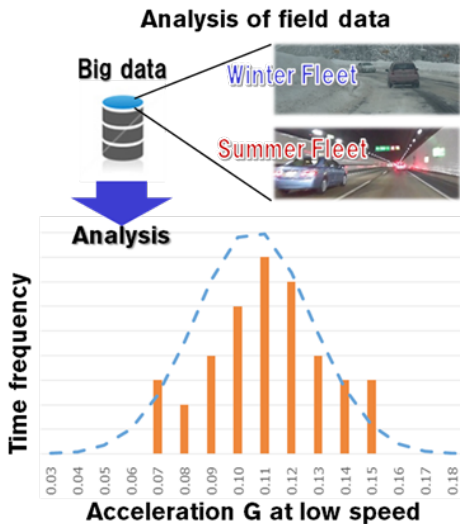


図7 日本市場における加速度分布

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

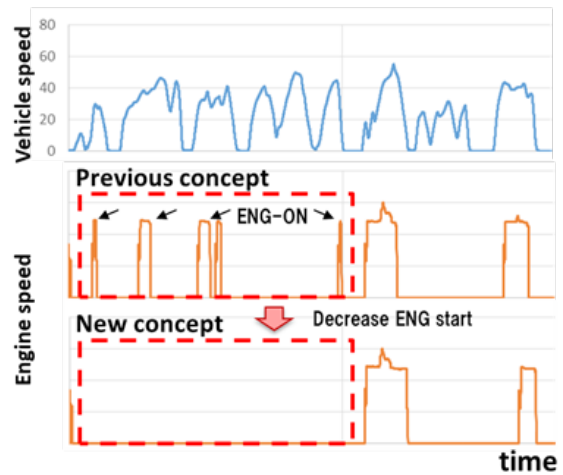


図8 新旧制御によるエンジン作動状態の比較

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。

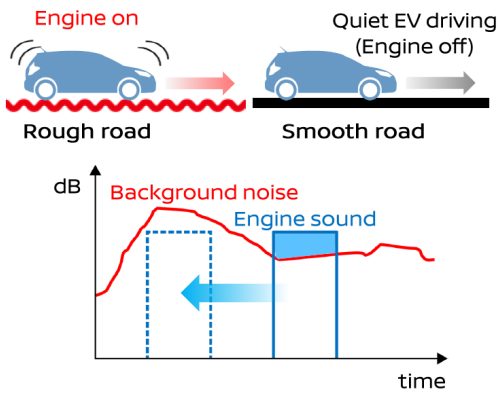


図9 ロードノイズ推定によるエネマネのコンセプト

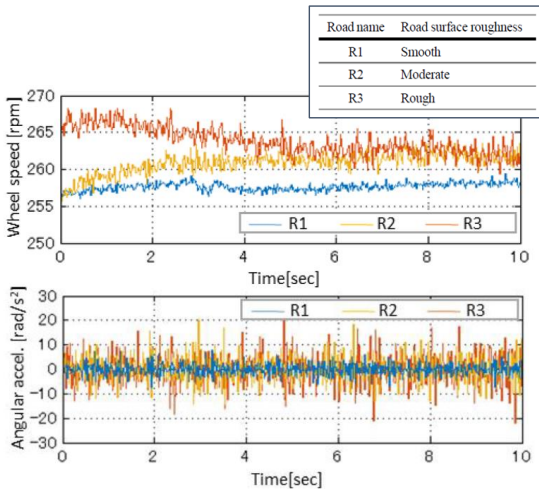


図10 路面粗さとタイヤの角加速度の関係

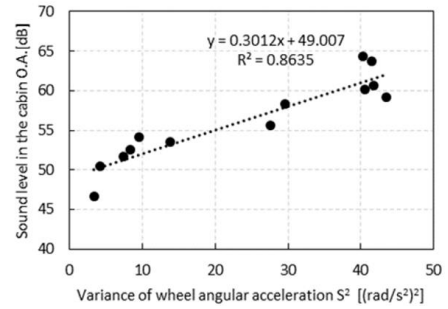


図11 タイヤ角加速度とロードノイズの関係

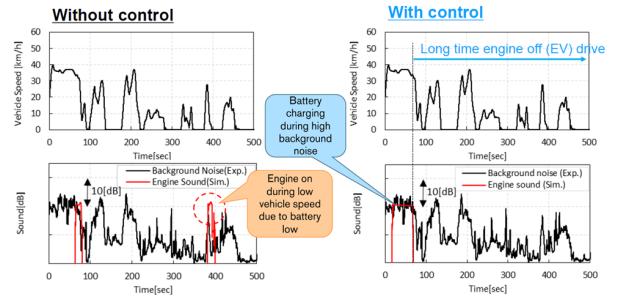


図12 路面検知制御の有無によるエンジン始動の比較

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车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。

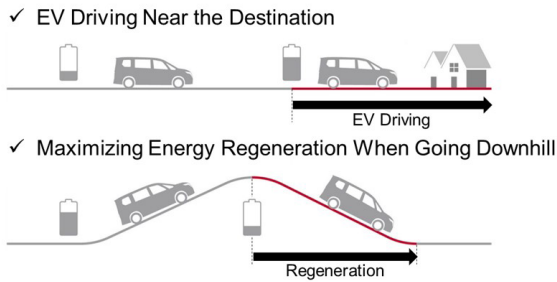


図13 先読み充放電制御のコンセプト



図14 ナビ情報とバッテリーSOCの関係図

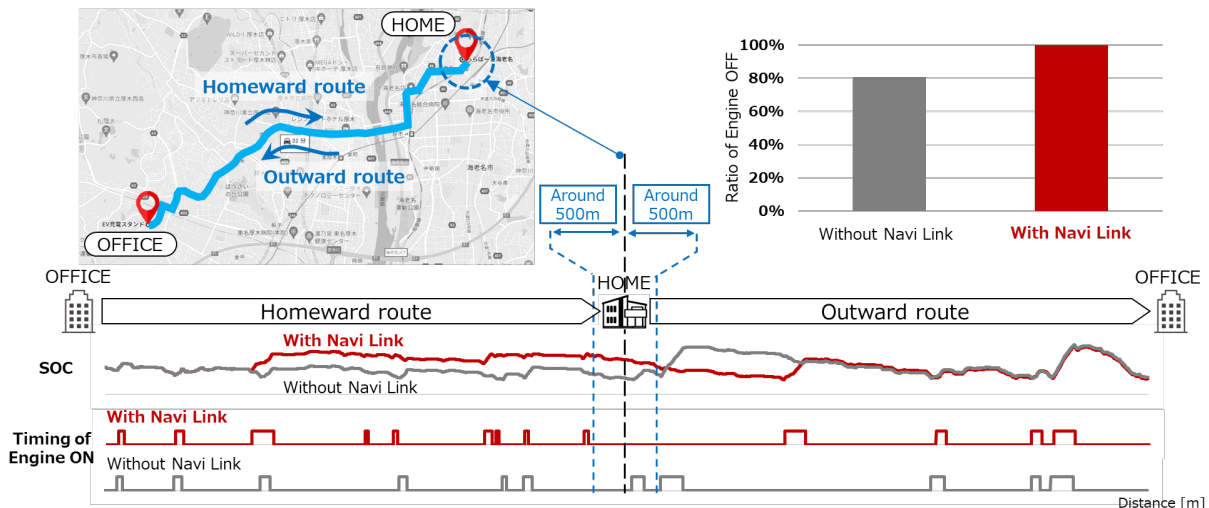


図15 先読み充放電制御の効果(目的地前EV走行制御)

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。

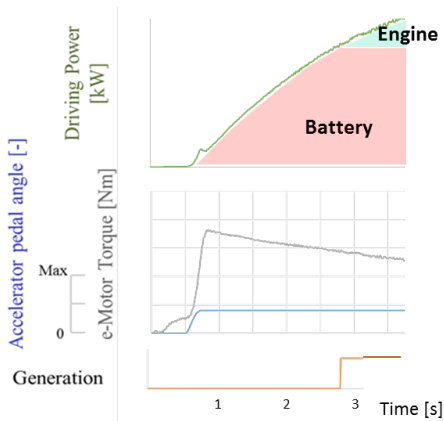


図16 高SOCでの電力配分

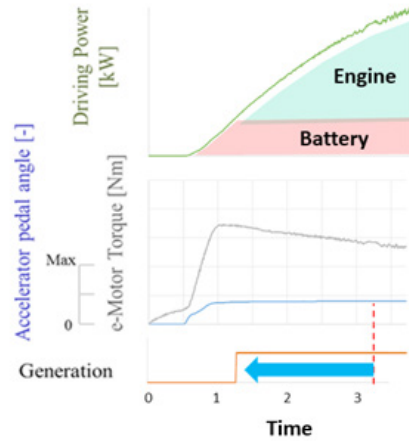


図17 低SOCでの電力配分

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。

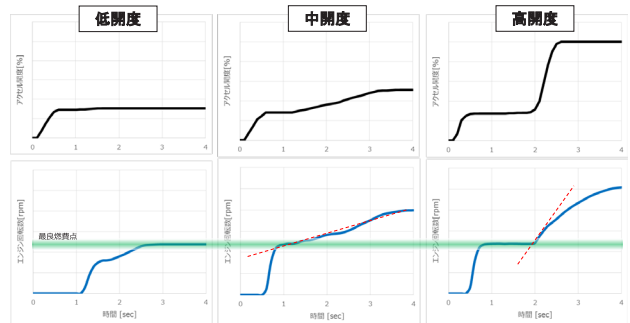


図18 加速意図に応じたエンジン回転数の振り舞い

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。

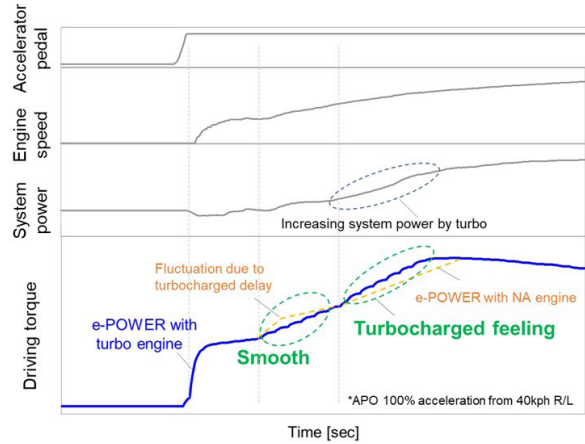


図19 VCターボとの組み合わせ特性

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。

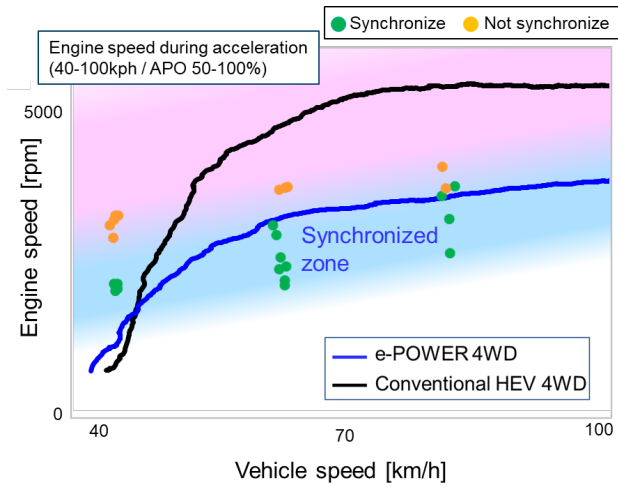


図20 リニアフィールの比較

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。

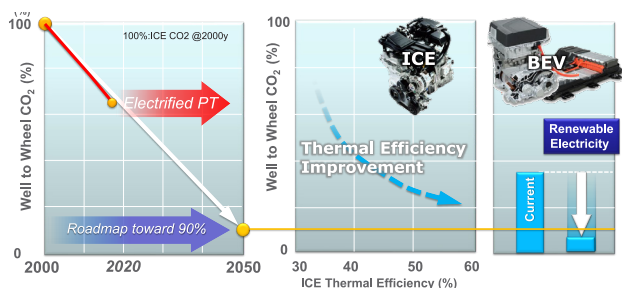


図1 NISSAN WtW CO2 reduction strategy

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

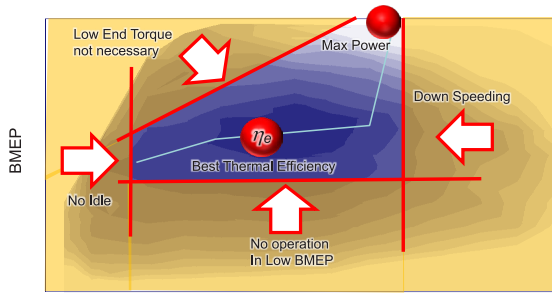


図2 Schematic of e-POWER engine operation and dedicated engine concept

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)。

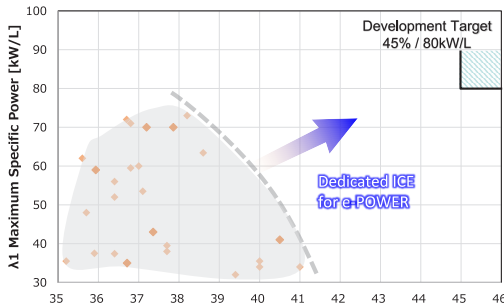


図3 Positioning of the new concept engine development target in brake thermal efficiency vs maximum specific output power ($\lambda=1$) scatter band

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。

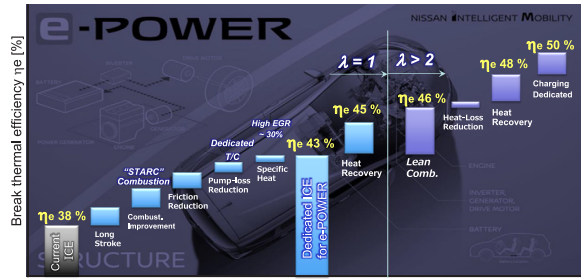


図4 Thermal efficiency roadmap toward 45% with $\lambda=1$ and 50% with $\lambda > 2$ (RON95)

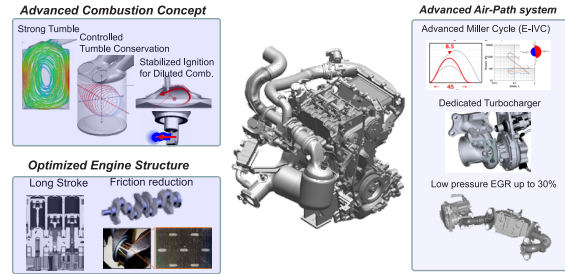


図5 New engine concept dedicated for e-POWER

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。

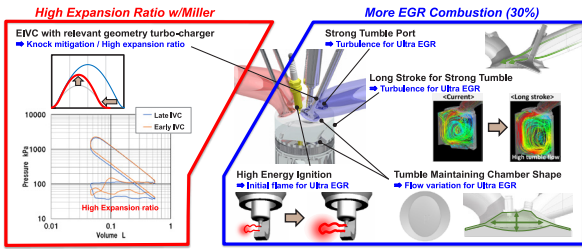


図6 New combustion concept "STARC" for highly diluted combustion

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。

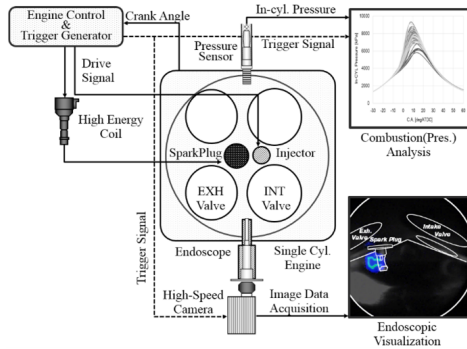


図7 Visualization system of spark channel and initial flame kernel

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⁾) につながる事が観察されており、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。

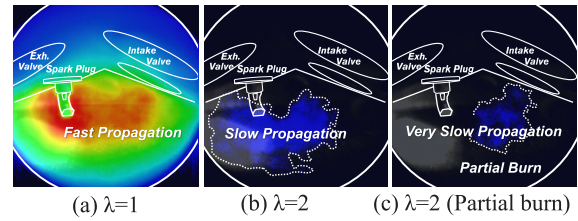


図8 Initial flame propagation with $\lambda=1$ w/o dilution (a), $\lambda=2$ slow propagation (b), $\lambda=2$ very slow propagation (c)

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。

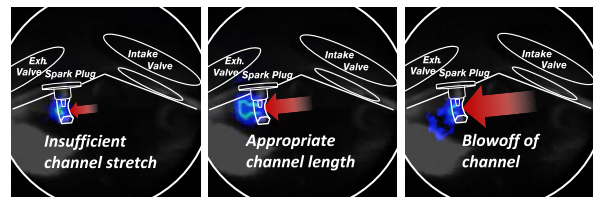


図9 Spark channel behaviour under different flow velocity at the spark gap

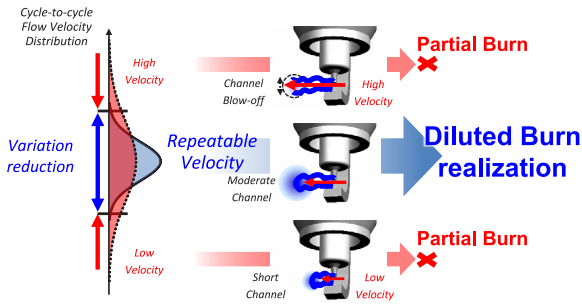


図10 Desirable flow to realize stabilized ignition for highly diluted combustion

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されるため、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。

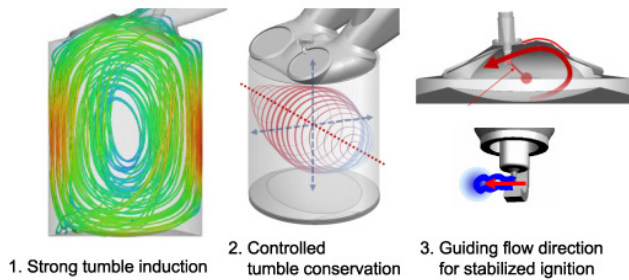


図11 In cylinder charge motion design to realize STARC combustion concept

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 C_v 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。

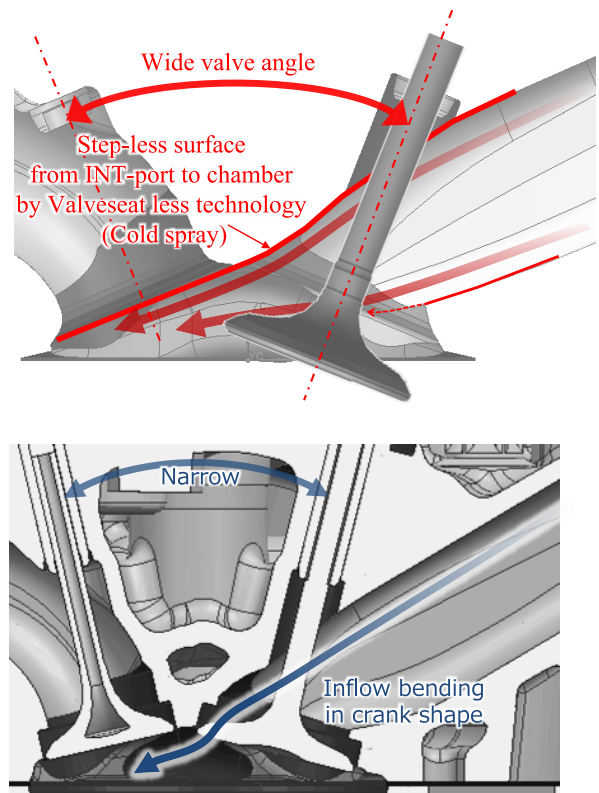


図12 Comparison of design concept of intake port and combustion chamber (New design with cold spray valve seat (left), current design (right))

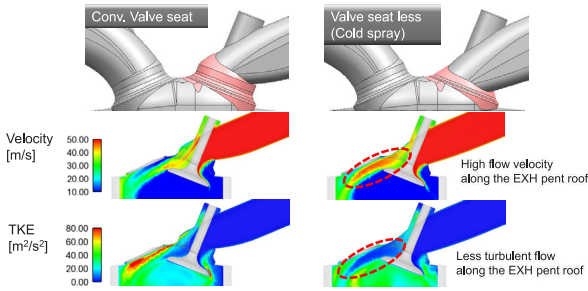


図13 Flow velocity and TKE distribution (CFD)

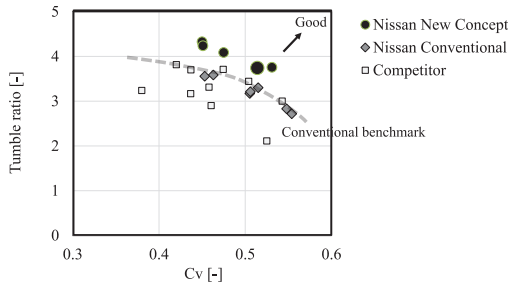


図14 Improvement of tumble ratio - flow coefficient with new intake port and combustion chamber design with cold spray valve seat

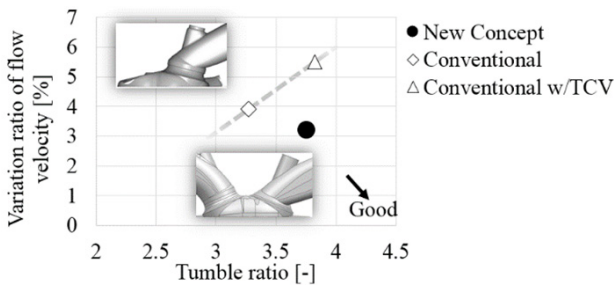


図15 Tumble ratio vs variation ratio (Airflow test result)

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。

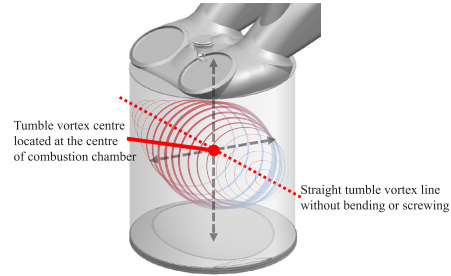


図16 In-cylinder charge motion design to maximize tumble conservation

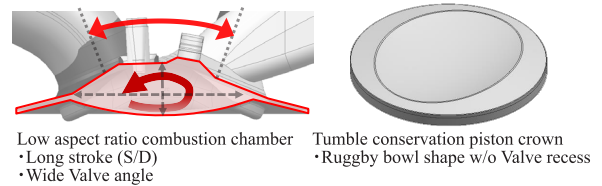


図17 Combustion chamber and piston crown design for tumble conservation

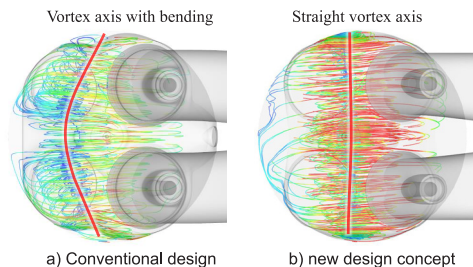


図18 CFD results of in-cylinder charge motion with conventional design (a) and new design concept (b). (2400 rpm, middle of compression stroke)

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。

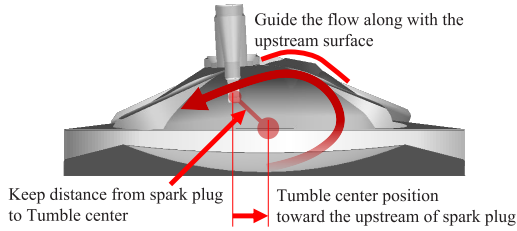


図19 Combustion chamber design to guide flow direction for appropriately stretched robust ignition channel

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渦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。

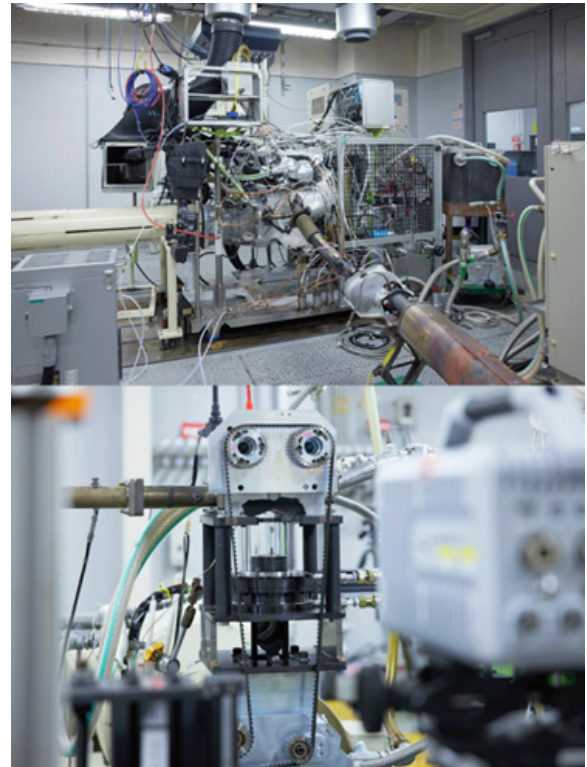


図20 Experimental equipments for new engine concept

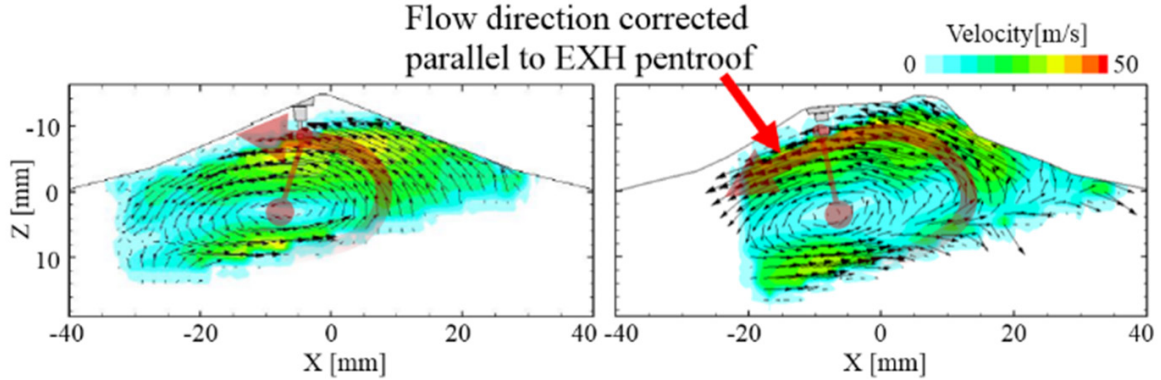


図21 Effect of the rectification pocket on the flow distribution around spark plug (PIV images, 2400 rpm, 40 deg. BTDC)t

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)。

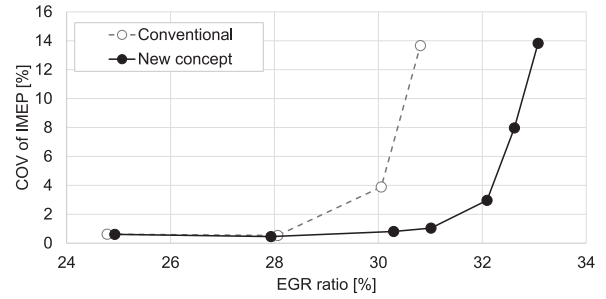


図22 Comparison of stable combustion limit against EGR between Conventional ignition system and new ignition concept with high energy ignition system

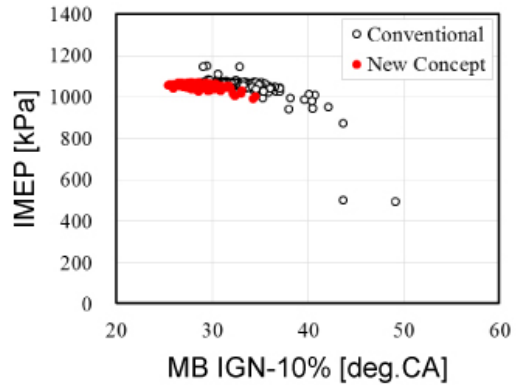
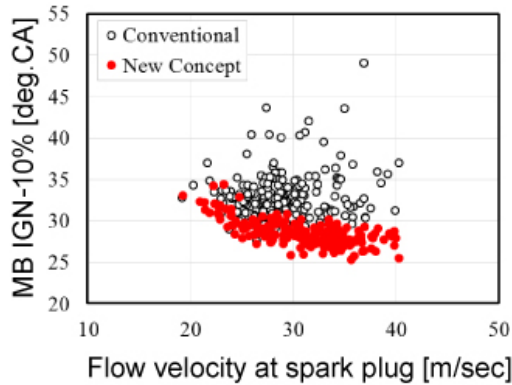


図23 Cyclic distribution of initial combustion period of CA ign-MB10% in relation to gas flow velocity at spark gap under EGR 30% conditions on same engine configuration except ignition system

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。

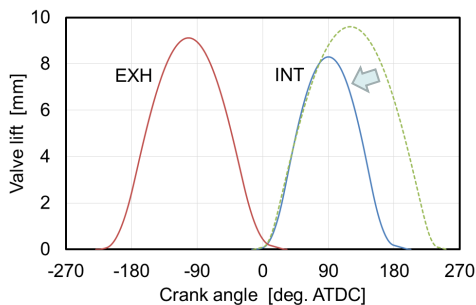


図24 Valve lift curve of conventional late IVC and E-IVC

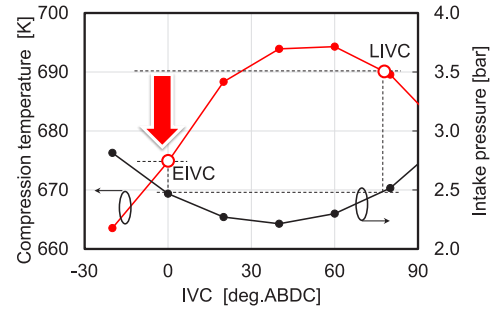


図25 Effect of IVC on the compression end temperature

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。

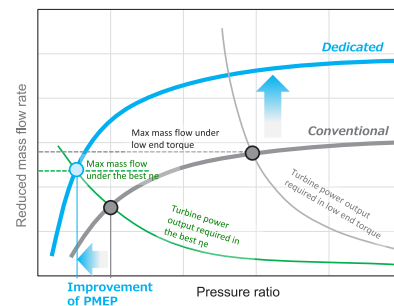


図26 Pumping loss reduction with e-POWER dedicated Turbocharger

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。

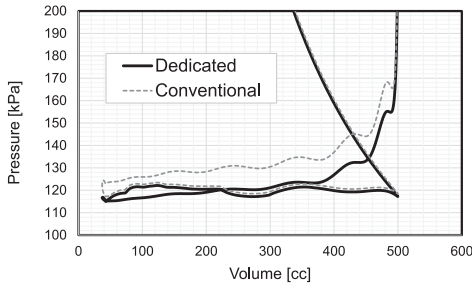


図27 Comparison of low pressure part of P-V diagram between conventional turbo-charger and dedicated Turbocharger

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。

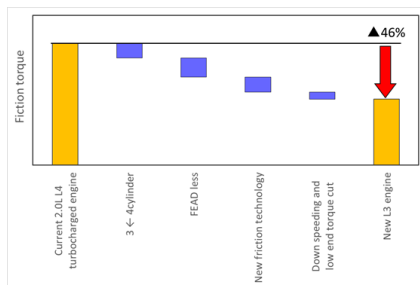


図28 Friction reduction of new e-POWER dedicated engine

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。

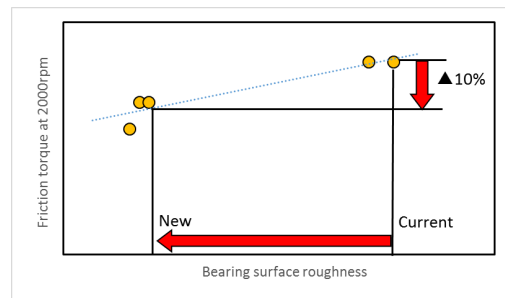


図29 Friction sensitivity by bearing surface roughness

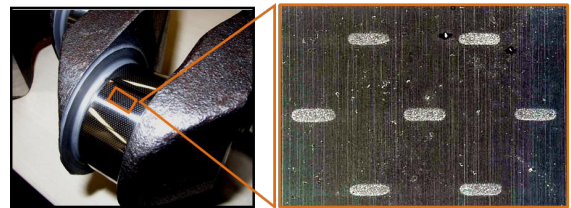


図30 Texture crankshaft surface

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。

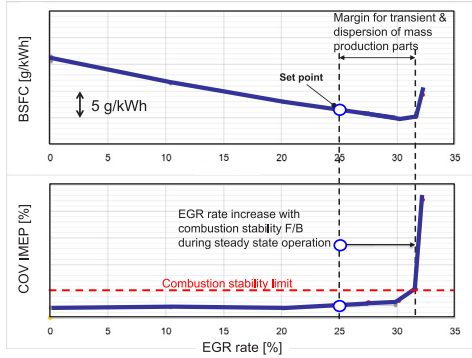


図31 Improvement of BSFC realized by e-POWER EGR set point and combustion stability feedback EGR target control

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ースノック状態で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燃料のトレー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。

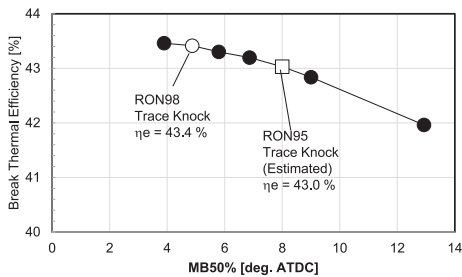


図32 Validation result of brake thermal efficiency with a multi-cylinder proto-type engine. (Engine speed 2000 rpm, BMEP 12 bar, RON98 fuel)

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)。

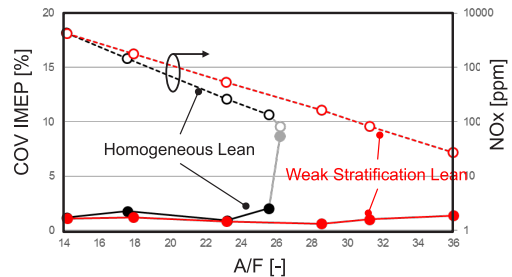


図33 COV of IMEP and engine out NOx in relation to Air fuel ratio (A/F)

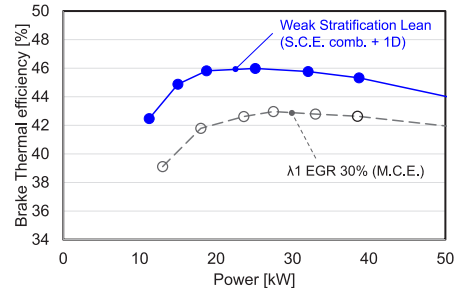


図34 Brake thermal efficiency vs Power with Lambda=1 and Lean burn. (lambda=1 : Result of M.C.E., Lean: S.C.E combustion + 1D-Code Air-path)

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。

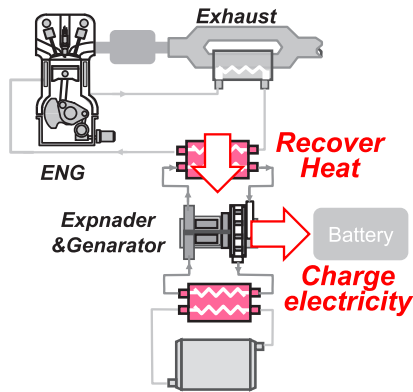


図 35 Medium Temperature Rankine Cycle Heat Recovery System

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 P_{max} 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。

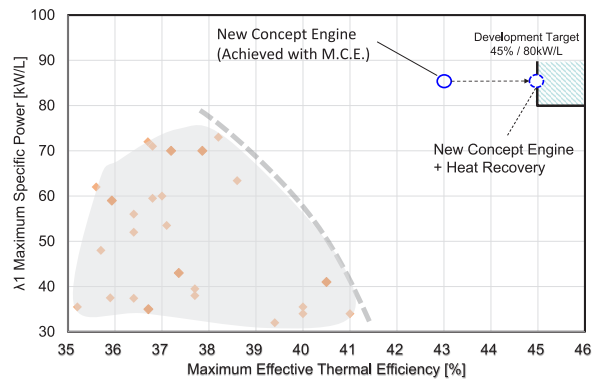


図 36 Validation Results of the new engine concept

6. 結論

将来の持続可能なモビリティに向けた $WtWC_{O2}$ 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