

特集 2 : 成長する e-POWER

1. 電気駆動の魅力の拡散

渋谷 彰弘* 中島 敏行**

1. はじめに

日産自動車は、2016 年に、100% エンジンで発電し、100% モーターで走行する電動システム“e-POWER”を日産ノートに搭載し、日本市場に投入した。その後も、継続的に e-POWER 搭載車種を追加し、日産の電動化戦略において、e-POWER は環境性能と走りを両立するサステナブルな技術として、電気自動車（以下、BEV¹）と両輪を成す位置付けにある。この特集では、e-POWER の生い立ちや価値、技術的なチャレンジ、今後の発展などを網羅的に解説する。

2. 電気駆動を普及させることへの確信

CASE に先駆けた日産の電動化・知能化戦略

日産自動車が、技術開発戦略として“電動化・知能化”の検討を始めたのは 2005 年頃であり、その後 2010 年の日産リーフ投入に先立ち、その戦略を社外に公表した。CASE といわれる今の時代では、どの自動車会社においても当たり前のことに見えるが、図 1 に示す通り、電動化・知能化の軸となる技術は、BEV と自動運転であり、当時としてはかなり挑戦的なものであった。電動化に関しては、徐々に電気駆動の比率を高め、最終的には“100% 電気駆動”とすることを意図していた。

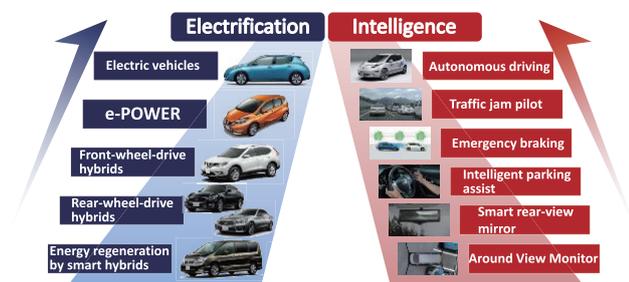


図 1 電動化・知能化戦略。

エネルギーソースを換えても共通のモーター駆動

e-POWER 誕生の背景には、BEV の普及を後押しする取り組みとして進めていた“発電機能を持つ EV¹”の研究開発がある。日産自動車では、図 2 に示す通り、電動化による究極の低炭素社会を実現していく上で、さまざまなエネルギー源を想定し、水素を燃料とする直接水素型燃料電池技術 (H2 FCEV)、Bio 燃料を改質して発電に用いる改質型燃料電池技術 (e-Bio Fuel-Cell) と、ガソリンを燃料とする内燃機関で発電するシステムの研究開発を行ってきた。いずれも、100% モーターで走るために、BEV で磨いていく技術をベースに、エネルギーソースの選択肢を広げることを狙っていた。

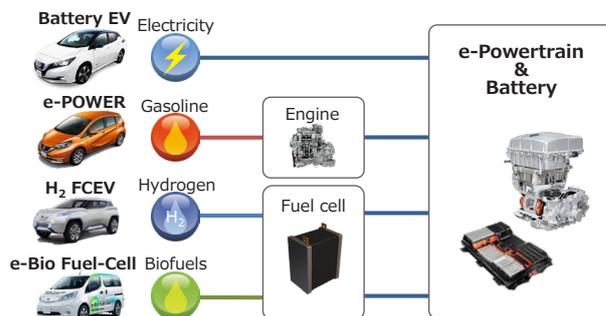


図 2 100% モーター駆動システムのエネルギー選択肢

これらの候補の中で、H2 FCEV や e-Bio Fuel-Cell は、将来に向けた大きなポテンシャルを持つものの、普及拡大させるには更なるコスト低減やインフラなどの利便性向上を進めていく必要があった。

一方で、エンジンで発電するシステムの場合、レンジエクステンダー EV のように、大容量の EV 用バッテリーを用い、エンジンで補助的に発電して航続距離を延ばす方式が考えられる。実際、図 3 に示す通り、2010 年投入のリーフの製品開発と並行して、レンジエクステンダー EV の先行開発を行っていた。

* パワートレイン・EVプロジェクトマネジメント部 ** 先行車両開発部



図3 BEVとe-POWERの開発の歴史

その後の e-POWER の実用化に向けては、リーフで開発した BEV の制御技術に加えて、ここで開発したエネルギーマネジメントや音振技術がベースになっているが、それだけではなく、後述のバッテリーの高出力密度化など新たなブレークスルーが必要であった。

リーフで磨きあげた日産 EV のレスポンスと滑らかさ

BEV を本格的に普及させる上で重要なことは、もちろん航続距離や充電の利便性であり、それを現実的な価格で提供できるかどうかである。日産では、それに加えて、モーターで走ることの力強いレスポンスや気持ち良い滑らかさを極めることで、一度乗った人をファンにしまうことを目指した先人たちがいた。とにかくクルマの形でシステムや制御の良さを表現し、乗った人を納得させる力があつた。

事実、2010 年にグローバル販売を開始したリーフは、モーター駆動による走りの気持ちよさや、1クラス上とも感じられる静粛性が非常に好評であつた。特に、当時の一般的な BEV がカートのように前後に振動しながら加速していたのに対して、非常に激しいアクセル操作をしても、クイックな加速と減速で滑らかにクルマを動かすリーフの優位性は明らかであつた。リーフを試乗して降りてくる人たちがみな笑顔であることを「リーフ スマイル」と社内と呼んでいた。

3. 日本のメインモデルでの e-POWER の実用化

EV-ness³ を目指す開発のスタート

ノート e-POWER の投入を決めた 2014 年頃、日本のコンパクトマーケットは競合のハイブリッド車が大きなシェアを持っていた。そこに、後発で電動化技術を投入するには、単に燃費を追求するだけではなく、他社とは違う何か分かりやすい特徴が必要であつた。日産の電動化戦略を担う e-POWER に、この誰にでも分かる特徴として、日産リーフの走りの良さ「EV-ness」を付与することを目指して開発をスタートした。

レンジエクステンダーとは異なるチャレンジ

e-POWER のシステムを図4に示す。基本は、BEV に発電用のエンジンを追加したシンプルなものであり、システム構成としては、前述のレンジエクステンダー EV と類似しているが、それとは大きく異なる点がある。レンジエクステンダー EV は、BEV と同様にモーターに必要な電力を基本的にバッテリーから供給するのに対して、e-POWER は、常用域では BEV と同様にバッテリー電力でカバーし、モーターの高出力が要求される高負荷の場面では、エンジン発電の電力で補うコンセプトである。よって、レンジエクステンダーに対して小さなバッテリー容量を可能としており、車両搭載に有利なバッテリーの小型化も可能となる。

一方、BEV と同等のレスポンスを実現するためには、必要な電力をできる限り素早く供給する「応答性」が求められるため、バッテリーの内部抵抗を下げ高出力化することが求められる。よって、e-POWER の特性を活かすバッテリーは、従来に比べ、高出力密度を実現するブレークスルーが必要であつた。

また、100% 発電するシステムであるため、発電するエンジンの効率が極めて重要であり、e-POWER に特化した形でそれを高めていった。最高効率点での定点動作については、以降の記事で詳細に解説するが、そのような特有の動作において、音振性能や排気性能を成立させることも新たなチャレンジであつた。

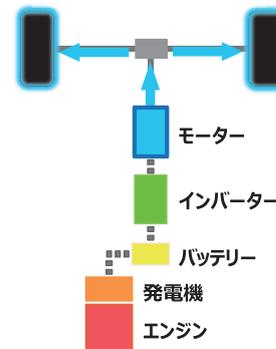


図4 e-POWER システム

e-POWER のシステム構成においては、実際に駆動するモーターと発電するエンジンは機械的に分離されている。従って、常にリーフと同じ EV-ness を実現することは容易と考えられるが、前述の通り、バッテリーとエンジン発電という二つの電力を足し合わせた状態で最大出力が得られるシステムの構成上、エンジンの発電に遅れがあればモーターの応答に遅れを感じる。逆に、常に出力できる状態にするためにエンジンを運転させ続ければ、EV-ness は損なわれ、燃費も悪化させる傾向がある。このような多くのトレードオフを解くことがレンジエクステンダー EV とは異なる大きなチャレンジであつた。詳細は、以降の記事で解説する。

1.2L のエンジンでセレナを走らせる

次なるチャレンジは、ノートに比べて大型なセレナで EV-ness を実現することであった。そのためには、当然必要なトルクと出力は高くなる。表 1 の基本仕様を示すように、搭載車種に応じてモーターの出力とトルクを最適化しているが、それを同型式のエンジンとモーターで実現するために、組み合わせるバッテリーのセル数とインバーター電流の変更を行う、いわゆるモジュラー設計を行った。

		 NOTE	 SERENA	 KICKS
モーター (EM57)	最高出力	80 kW	100 kW	95 kW
	最大トルク	254 Nm	320 Nm	260 Nm
エンジン (HR12)	最高出力	58 kW	62 kW	60 kW
バッテリー容量		1.5 kWh	1.8 kWh	1.5 kWh

表 1 第 1 世代 e-POWER の基本仕様

ノートに比べてセレナのほうがバッテリー比率の高いシステムとしているが、前述の通り、エネルギーとパワーのマネジメントにより EV-ness を実現することがチャレンジであり、この実用性を確認するには、シミュレーションのみでなく、実際の車両でのフィーリングの評価が極めて重要となる。しかし、開発途中のセレナを公道で評価することはできないので、貸切りができる深夜の箱根ターンパイクに、開発中の車両を何度も持ち込み、そのフィーリングや実用性を確認した。“1.2L のエンジンでセレナを走らせる”という構想は、プレゼンテーションの資料では理解し難いものであるが、繰り返し実施されたテスト走行を通じて、ミニバンにおける EV-ness を最適なものに磨き上げていった。最終的には、深夜のターンパイクで関係する役員も含めて試乗し、その乗り味を体感して決断した。

乗れば欲しくなる e-POWER の乗り味

これらのブレークスルーに挑戦しながら、分かりやすい EV-ness を目指して開発を進める中で、e-POWER の投入を決定する際に重要だったことは、開発しているエンジニアや社内関係者が試乗すると、すぐにその良さや違いを体感でき、前述のリーフスマイルと同様にその技術に納得し、欲しくさせる分かりやすさであった。燃費はクルマの購入を決める上で重要な要素であるが、それ以上にこのクルマの乗り味を如何にお客さまに伝え、購入動機につなげるかという議論に移っていった。お客さまに是非伝えたいベネフィットは、以下の3つであった。

- ・電気自動車のようなリニアでスムーズな加速感
- ・1 クラス上の静粛性
- ・クラストップレベルの燃費

実際、ノートとセレナの投入を決めるまでに、社内関係者を集めた試乗会は 20 回近く実施され、モノで証明する圧倒的な説得力を持って、狙い通りに社内関係者に自信を付けていった。

以上のように、EV-ness をつくり込むこと、それに適切なエネルギーマネジメントとパワーマネジメントを施すことが、e-POWER 開発の難しさであり面白さでもある。詳細は以降の記事に委ねるが、これまでに経験したことのないトレードオフ検討や判断基準など、一つ一つがチャレンジの開発であった。

4. 日産ブランド構築への貢献

電動化・知能化から発展した日産ブランド戦略

日産のブランド戦略では、Innovation for excitement (新しい発想でワクワクを) がお客さまに提供したい価値であり、Brand Promise である。



図 5 日産インテリジェントモビリティ

更に、それらをより競争力のある形で展開するためのブランドの Differentiator (差別化要因) として、Nissan Intelligent Mobility(以下、NIM)を標榜している。NIMとは、将来を感じさせるイノベーションの総称であり、図 5 に示す 3 つの要素から成る。3 つの要素は並列で表記されているが、前述の電動化 (Intelligent Power) と知能化 (Intelligent Driving) が進化した上で、それらが統合された価値を生み出す (Intelligent Integration) というコンセプトから、つまり、電動化・知能化戦略を発展させた形で NIM を構築している。

技術による日産ブランドの強化

NIMのIntelligent Powerでは、電動化技術により、もっとダイナミックな運転体験を提供し、クリーンで静か、もっとパワフルな日産ユニークな運転の楽しさを加速させたいと考えている。図6に示すように、e-POWERは、これを実現しお客さまに提供できる一つの技術である。また、前後輪モーター駆動で新しい運転体験を提供するe-4ORCEや、アクセルペダルで減速も行うe-POWER Driveやe-Pedalは、100%モーター駆動の電動化技術と極めて親和性が高く、EVやe-POWERと共に、ユニークな運転の楽しさを提供している。



図6 インテリジェントパワーのコア技術

以上のように、e-POWERは、これまで日産のブランド構築を支えるひとつのキー技術であったが、今後も技術の革新によってお客さまに新たな価値を提供し、ブランドの強化に貢献していく。

5. 世界中のお客さまへ届けたい

第1世代 e-POWER でのセグメント No.1

図7に示す、第1世代 e-POWERのラインアップにおいては、乗っていただいたお客さまに、BEVと共通する走りのフィーリングをすぐ感じていただき、購入動機や購入後の満足度につながっている。主に評価いただいたポイントは、以下の4点であり、開発の狙い以上のものであった。

- ・電気自動車のようなニアでスムーズな加速感
- ・1クラス上の静粛性
- ・クラストップレベルの燃費
- ・アクセルペダルで加減速できる新しい運転感覚

販売実績としては、ノートが2016年11月に30年ぶりの国内販売No.1となり、その後も、ノートとセレナがそれぞれセグメントでトップの販売を記録した。2021年1月時点、ノートとセレナ e-POWERの累積台数で44万台であり、その後のキックスについても順調な販売推移を示している。



図7 e-POWER 第1世代のラインアップ

第2世代 e-POWERでの更なるEV-nessへの挑戦

更に、2021年にフルモデルチェンジを迎えた新型ノートは、進化した第2世代 e-POWERシステムを搭載し、e-POWER専用モデルとして誕生した。これは、e-POWERをあるべき方向に正常進化させたものであり、力強さ、スムーズさと静かさを進化させ、よりEVらしいフィーリングを実現している。そのために、システムを構成するモーター、インバーター、バッテリー、エンジンすべてを改良し、出力とトルクの向上だけでなく、燃費の向上も図っている。エンジンの動作頻度の低減、動作タイミングの最適化や、ロードノイズに応じてエンジン動作させる新しい制御によって、より静粛性を高めている。電動AWDモデルも設定し、緻密な制御による新たな価値も提供している。

BEVとe-POWERを両輪とするパワートレイン戦略

前述の通り、e-POWERは、BEVと共に日産のパワートレイン戦略の両輪を成す。技術としては共に発展できる部分が多く、部品や制御技術を共用できるという合理性と、モジュール的な構成の自由度により、広くセグメントや地域をカバーできるポテンシャルを持つ。いずれも、100%モーター駆動のシステムとして、共通の運転感覚、静粛性、そして、高い環境性能を目指していきたい。

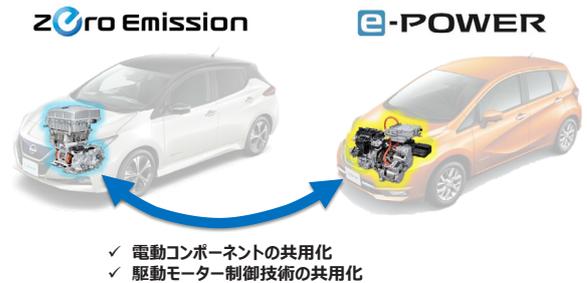


図8 パワートレイン電動化戦略の両輪

6. おわりに

地球環境問題に世界的な関心が高まる中、自動車業界は、100年に一度と言われる大きな変革の時代に直面している。このような状況下にあっても、筆者らは、地球環境にやさしい燃費性能や排気性能の実現は当たり前のこととして、シームレスにクルマを走らせる楽しさや気持ちよさを、多くのお客様に提供していきたいと考えている。その実現に向けて、ノート、セレナ、キックス、そして今回の新型ノートと、e-POWERの搭載車種拡大を進めている。今後も、電動駆動の魅力の拡散によって、世界中のお客様がリーフスマイルを体感できるよう挑戦していきたい。

用語解説

- *1 EV : 電気モーターのみで走行するクルマ
- *2 BEV : バッテリーの出力のみで走行するEV
- *3 EV-ness : 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
- *4 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

著者



渋谷 彰弘



中島 敏行

特集 2 : 成長する e-POWER

2. システムの特徴と今後の発展

仲田 直樹*

1. はじめに

日産リーフの走りの良さを備えることを目指し新規開発した 100%エンジンで発電し、100%モーターで走行する電動パワートレイン e-POWER について、システムの概要、さまざまなトレードオフを高次元で成立させて作り込んだ BEV*1 らしさと新しい価値、それを実現するシステム設計、今後の拡大について紹介する。

2. 100%モーターで走行する e-POWER のシステム

e-POWER のシステムは、駆動モーター、インバーター、リチウムイオンバッテリー、充電器で構成される BEV のシステムに対し、駆動系をそのままに、パワーソースであるバッテリーの容量を大幅に削減、エネルギー補充用の充電機能を取り去り、それらの代替として発電専用ガソリンエンジンと発電機を追加した 100%エンジンで発電し、100%モーターで走行するわかりやすいシステム構成である。e-POWER は 100% モーターで走行するクルマとして BEV と共に EV*2 と定義でき、走りの良さは BEV そのもの、発電専用エンジンはタイヤとは切り離されているため、最良燃費の領域を集中的に使うことで燃費向上が図れるなど多くの自由度と可能性を持つ電動パワートレインである。

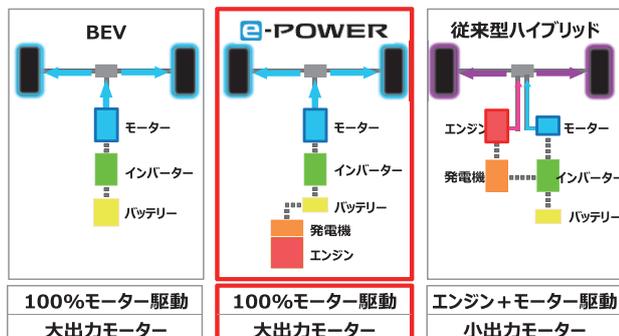


図1 e-POWER システム。

ノート e-POWER のパワートレインの外観を図2に示す。エンジンは発電専用のため、かならずしも駆動モーター近くに配置する必要はないが、コンパクトに既存のエンジンルームに収めるため、極力一体化する方法をとった。

エンジンと発電機は増速ギヤを介して、駆動モーターとドライブシャフトは減速機を介してそれぞれ連結されるが、これらの2つのギアセットを1つのギヤボックス内に収め、駆動系、発電系のコンポーネントを一体化して搭載。駆動モーター用のインバーターと発電機用インバーターは同じ筐体におさめ、車両に取り付けた。バッテリーはコンパクトに設計し、前席シート下に配置。このようにすることでコンパクトカーノートのプラットフォームに e-POWER のシステムを搭載できただけでなく、ガソリンエンジン車と変わらない居住性と積載性を実現できた。



図2 e-POWER 外観

e-POWER のシステムはメインコントローラーである VCM (Vehicle Control Module) により制御される。VCM は MC (Motor Controller)、GC (Generator Controller)、BMS(Battery Management System) および ECM(Engine Control Module) と連携し、常に最適な発電によるエネルギーマネジメントと駆動力制御を司る。

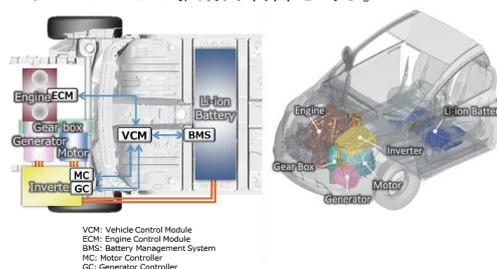


図3 システム構成とレイアウト。

*パワートレイン・EVプロジェクトマネジメント部

3. BEVらしさの実現と新価値へのチャレンジ

EV-ness^{*3} - Smooth, High Response, Quiet -
走りと両立する燃費 - Top level fuel economy -
e-POWER Drive - Easy driving -

いつでもどこでも反応のいい BEV の 走りを實現するむずかしさ

e-POWER は、低回転で最大トルクを発生し、変速機構をもたないという 100% モーター駆動ならではの特徴を活かし、リーフで培った日産独自のモーター制御技術（駆動系のねじれ共振に対応したモーター制振制御）を用いることでアクセルの踏み込みに対して遅れなく、力強くリニアかつスムーズな加速を実現している。これは従来のハイブリッドシステム車とは全く異なる非常に大きなメリットであり、e-POWER の最大の長特長となっている。

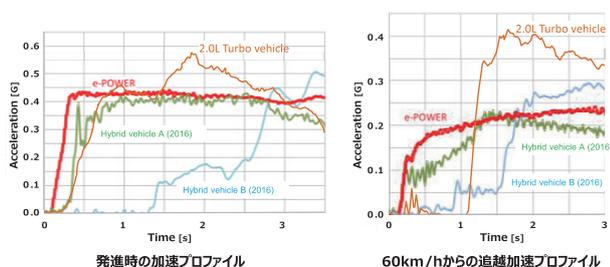


図4 100%モーター駆動のスムーズな加速。

いつでもどこでもこのような優れたパフォーマンスを得るためには、エネルギーを供給するバッテリーとエンジンの出力分担、発電制御が重要になる。さまざまな加速のシーンでバッテリーエネルギーの使い方、エンジン始動タイミング、駆動力特性を最適化することで実現した。詳細は記事3に記載する。

BEVのような静粛性の実現と定点運転

エネルギーを供給し、貯めるエンジン発電制御は駆動系とは独立して制御できるため、それを活かしてBEVのような静粛性を実現している。実際には低車速域ではエンジンを積極的に停止させ、比較的高い車速域では走行騒音によってエンジン騒音がマスクされるようなエンジン回転で極力発電することをメインコンセプトとし適合した。しかしながら低車速での走行が続くような場合、バッテリーのエネルギー量は下がり、エンジンをかけて発電する必要があるが、そこでの工夫は、発電時は最良燃費率、かつノートの走行負荷で120km/hに相当する比較的大きな出力2400rpm×76Nm、19kWという一定の回転、負荷の運転点（定点運転）で一気に発電することでエンジンの運転時間を短く、停止している時間を長

くしていることである。このようにコントロールすることで、車速25km/h以下では、エンジンを約90%停止させることができたが、この定点運転での背反と認識していたのは、今までのガソリン車ではなかった車速とエンジン回転が連動しない違和感とEV走行^{*4}と高い回転でのエンジン定点運転走行のギャップの大きさだった。前者は市場でも受け入れられ e-POWERの特徴となっている。後者はノートで市場から得たデータ、知見を活かしセレナ、キックスと進化、改良を重ねている。これについても記事3で記載している。その他の静粛性を支える技術については記事5で紹介する。

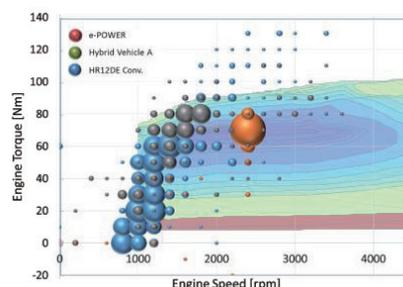


図5 エンジン動作点頻度。

定点運転で燃費をかせぐ

この定点運転を基本とした発電制御により走行に必要なエネルギーを最良燃費点で極力発電することでクラストップレベルの燃費も達成している。発電制御は動力、運転性、音振、排気、熱、暖房、ブレーキ負圧、部品保護、診断などのさまざまな要求に対し許容される範囲内で最も燃費の良い動作点を選ぶよう設定されている。燃費観点での詳細は記事4で紹介する。

減速エネルギー回収性能への追及 e-POWER Drive

e-POWER の提供した新しい価値には、運転することがラクで楽しくなるアクセルだけでクルマを操る新感覚の運転操作、e-POWER Drive がある。初代リーフ開発時、減速エネルギー回収はブレーキと協調した回生を主軸として進めていたが、更なる効率的なエネルギー回収を求めてモーターのみで強回生するワンペダルシステムに着手していた。この強回生のシステム開発のポイントはアクセル操作に対する運転性の違和感、いくらエネルギー回生量が多くても使ってもらえない扱いにくい強回生モードは意味がない、そして滑りやすい路面での安定性と制動力限界に対するマージンの設定である。初代リーフでは ECO-B レンジでモーター回生による減速 G を 0.08G までとしたが、そこで取り組んでいた減速のエネルギー回生制御をさらに進化させ、車速、アクセルペダルの戻り方、路面とタイヤのスリップ率によって回生電力を最適に制御することでガソリンエンジン車の約3倍の減速度を発生させ、アクセルペダルの踏み戻しだけで加速から減

速までを意のままに行うことが容易にできる運転性を実現した。これにより、ノート e-POWER のシステムでは電動車両では常識とされていた協調回生システムを採用しなかった。このようにして日常運転の約 7 割の減速をアクセル操作だけでカバーでき、アクセルとブレーキペダルの踏み変え頻度を大幅に低減すると共にエネルギー回生量を増やし、ドライビングプレジャーと燃費を同時に提供する e-POWER Drive が生まれた。

4. BEV らしさを実現するシステム設計

e-POWER はシンプルなシステム構成ゆえに信頼性が高く、システムを構成するコンポーネントもリーフやエンジンと CVT で構成される従来のノートのものを共用しているため、高い品質レベルを確保している。

BEV と共用しているのは、駆動用モーター、インバーター、12V 供給用 DCDC コンバーター、減速機などのコンポーネントだけでなく、高電圧安全、システム起動停止のシーケンス制御や駆動力制御など、技術の共用性も高い。このことから BEV 同様、自動運転などの智能化技術との親和性にも大きなメリットを持っている。

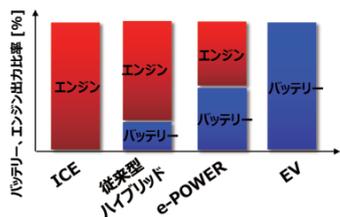


図 6 バッテリー出力とエンジンの出力分担

一方で BEV の性能がエネルギー源であるバッテリー性能への依存度が高いことと同様、e-POWER の性能はバッテリーの出力、容量などの性能に加え、もうひとつのエネルギー源であるエンジンによる発電性能に大きく依存する。図 6 に駆動パワーの分担のイメージを示す。e-POWER のバッテリー出力は BEV の略半分、残りはエンジンにより賄っている。一方、回生エネルギーを回収するだけでなく、EV 走行時間を長くするために必要なバッテリー容量は、他のハイブリッドに対して大きいものの、BEV の 1/30 程度の 1.5 ~ 1.8kWh である。e-POWER のシステム設計においては、駆動モーターのスペックだけでなく、車両のコンセプトに合わせたバッテリー、エンジンの出力およびそれらの比率を適切に選定することが大事なポイントである。

図 7 に示すように代表的な走行シーンではバッテリーからの供給電力のみで走行することができ、大きな駆動力が必要なシーンでは発電機の供給電力と合わせることで力強い加

速を実現している。また、逆にバッテリーのエネルギーがなくなってエンジンによる発電電力のみとなっても十分な走行性能が確保できるような構成になっていることがわかる。車両に求められる駆動パワーに対しバッテリーとエンジン発電のパワーバランスを最適設計することで、リーフのモーター、および従来のノートのガソリンエンジンを流用することが可能となった。

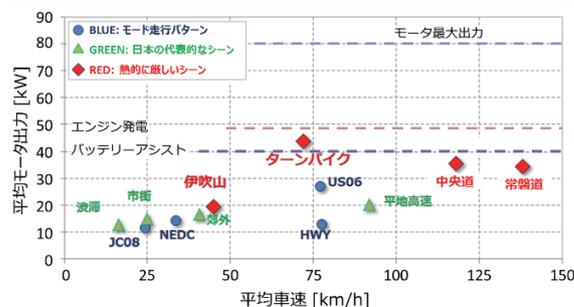


図 7 エネルギー消費と供給のバランス。

従来のエンジン依存のハイブリッドに対して大型モーターを用いること、バッテリーの出力、容量を大きくすることで性能はより BEV に近づいていくが、システムコストは高くなり、質量は増加し、レイアウトの成り立ちも厳しくなっていく。このため、電動コンポーネントのコスト低減、軽量化や一体化、連結構造のシンプル化が必要だけでなく、車両と一体となったレイアウト効率向上など各課題解決の推進が必須である。また、コンポーネントスペックにおいてはこれらの得失を勘案して、各車両コンセプトに合わせた適切な組合せ選定を行うことが重要である。

5. e-POWER の今後の拡大

コンパクトカーのノートとミニバンのセレナが同一の EM57 型モーター、HR12 型エンジンを共有しつつ、バッテリーの容量だけを変えることで必要な性能を満足できていることからわかるように e-POWER では各コンポーネントの汎用性は広く、その構成からモジュール的なシステム展開が可能で、駆動性能、発電容量、バッテリー容量の組合せでさまざまなセグメント、ボディタイプのモデルへの適用の可能性も持っている。同モーター、エンジンの組合せはさらにコンパクト SUV のキックスでも共有されている。

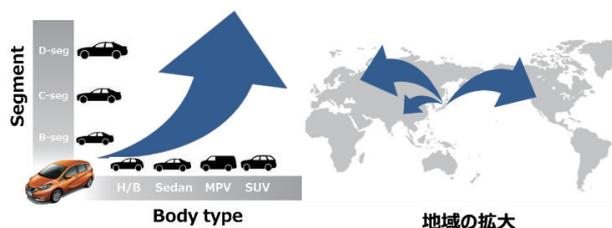


図 8 e-POWER の今後の拡大。

e-POWER の 100% モーター駆動の走りの良さは大変高い評価を頂いており、さら平均車速が低く、渋滞路の多い日本市場では e-POWER の特徴であるエンジン最良燃費点での発電+モーター走行による静かで燃費の良い走りが好評である。一方でグローバル市場に販売を拡大していくうえでは、更なる燃費の向上、排気対応に加え、海外環境を考慮した高速、高負荷運転への対応を進める必要がある。e-POWER の持つフレキシビリティはそれぞれの地域での使われ方、カスタマーニーズに合わせたシステム選定や適合が可能であり、大きな可能性を秘めている。また、今後の拡大においては 100%モーター駆動の e-POWER であることで実現でき、価値を高めることができる電動 AWD 化も欠かせない。その電動 AWD システムの技術的方向性については記事 5 で紹介する。

6. おわりに

e-POWER はシリーズハイブリッドの 1 つであり、駆動システムをリーフと共用し、発電システムのエンジンも既存のガソリンエンジンと共用していることから BEV 技術、エンジン技術の双方の進化に基づいて継続的に強化していくことができるシステムである。

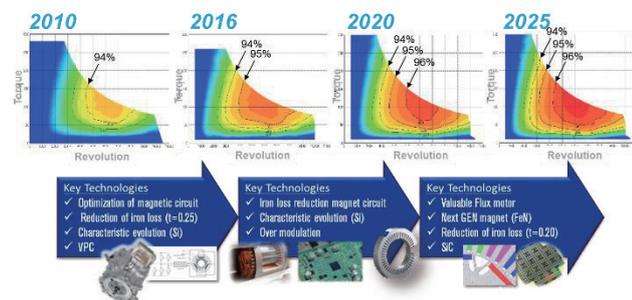


図 9 電動コンポーネントの技術進化。

今後、電動コンポーネントでは高効率領域の拡大、高速運転での効率向上が、エンジンでは更なる熱効率の向上が見込まれている。加えて、e-POWER においてエンジンは発電専用であり、運転点が絞れるため、従来エンジン以上に

著者



仲田 直樹

効率向上のポテンシャルがあると共に定点運転の効率や排気性能に特化することで、エンジンをシンプル化できるなど、e-POWER の構成だからこそ可能となる進化に今後も取り組んでいく。

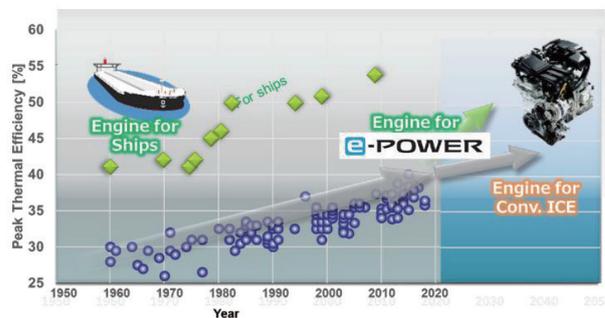


図 10 e-POWER 専用エンジンの技術進化。

用語解説

- *1 BEV : バッテリーの出力のみで走行する EV
- *2 EV : 電気モーターのみで走行するクルマ
- *3 EV-ness : 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
- *4 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

参考文献

- 1) 渋谷彰弘ほか：“Development of a brand new hybrid powertrain for compact car market “, 25th Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology (2016)
- 2) 木村誠ほか：新型ハイブリッドパワートレイン「e-POWER」、自技会、Vol.72、No.9 (2018)

特集 2 : 成長する e-POWER

3. EV-ness を創り出すシステム技術

羽二生 倫之* 坂上 永悟** 伊藤 知広** 風間 勇*** 小坂 裕紀****

1. はじめに : e-POWER の目指す EV-ness

e-POWER は EV^{*1} の高出力なモーターによる気持ちよい走りを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、EV-ness^{*3} 具現化の技術について解説する。

日産自動車における EV-ness 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について説明する。

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、BEV^{**2} をベースとしており、駆動力を演算するパワーマネー

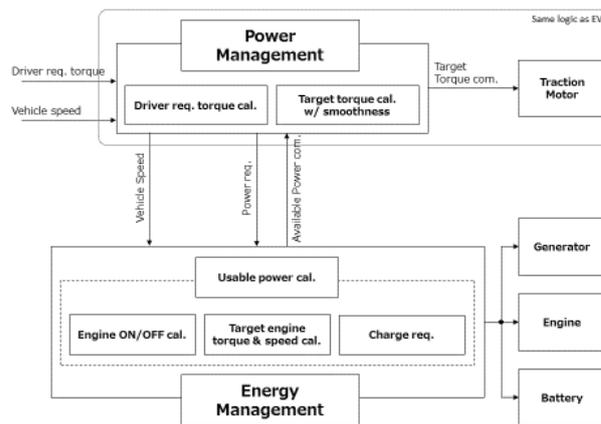


図 1 e-POWER システム制御概念図

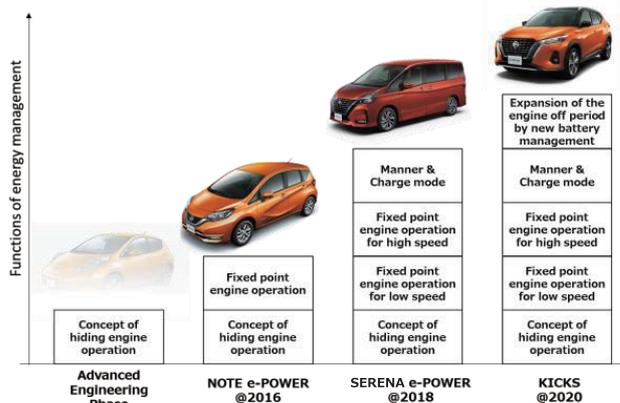


図 2 エネルギーマネージメントの進化

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。

*パワートレイン・EVプロジェクトマネージメント部 **パワートレイン・EV性能開発部 ***パワートレイン・EV制御技術開発部 **** 企カスタマーパフォーマンス&第一車両実験部

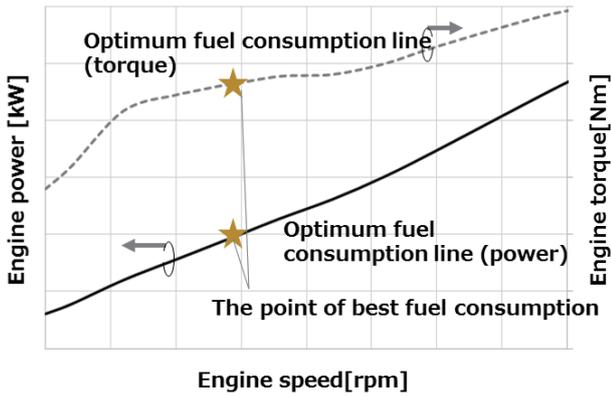


図 3 最良燃料消費線および最良燃料消費動作点

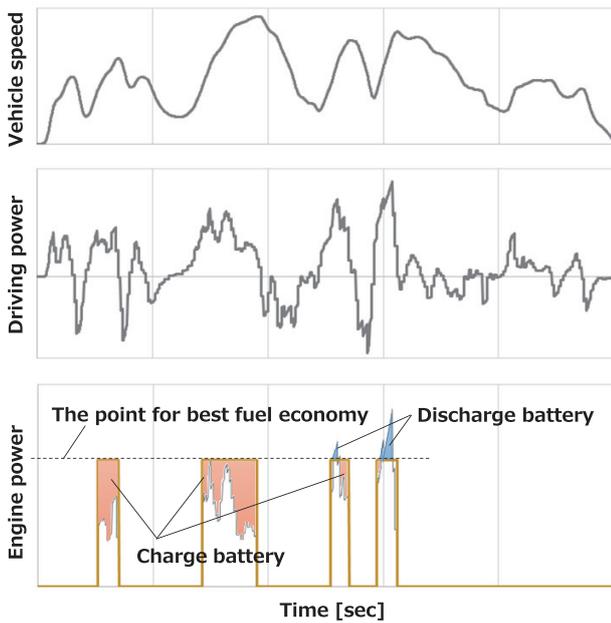


図 4 エンジン動作点の決め方

3. エネルギーマネージメントの開発： 静粛性と動力のトレードオフ

e-POWER おいて、エンジンとバッテリーの制御機能が、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。

ノート e-POWER 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、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

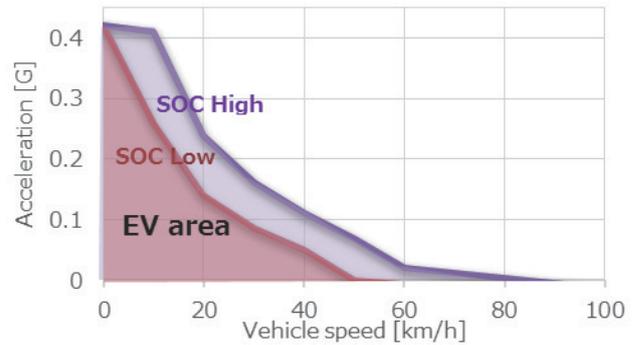


図 5 車速とバッテリー SOC に応じた EV 領域

ベースに、高い燃費性能を達成するため新たな 2 つのコンセプトを開発した。

コンセプト 1：燃費向上

- ⇒ 定点発電による最良燃費点の使用頻度向上、エンジン始動頻度低減

コンセプト 2：EV-ness の実現

- ⇒ レスポンスとスムーズなエンジン始動の両立
- 上記 2 つのコンセプトについて以下に説明する。

コンセプト 1：燃費向上

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 3、図 4 に示す。図 3 はエンジンの燃費率特性と出力の関係を示しており、エンジン出力毎に燃料消費量が最小となる動作点を繋いだ線を最良燃費線、最も燃焼効率が高い動作点を最良燃費点と呼ぶ。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。

更に、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^{*4}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、より高速まで EV 走行ができる。

本制御の採用により、前記事の図 5 に記載済みのエンジン動作点分布のように、e-POWER は、他のシステムに比べ、高い頻度で最良燃費点運転ができていくことがわかる。

コンセプト 2：EV-ness の実現

e-POWER では EV らしいレスポンスの良い加速とエンジン動作を感じない静かさをお客様に提供するため、従来の

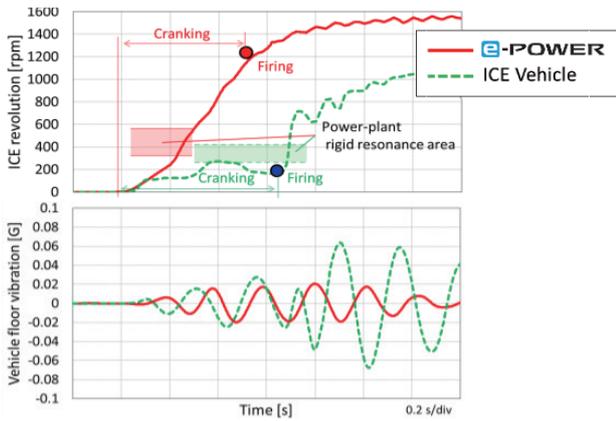


図 6 エンジン点火タイミングとフロア振動の関係

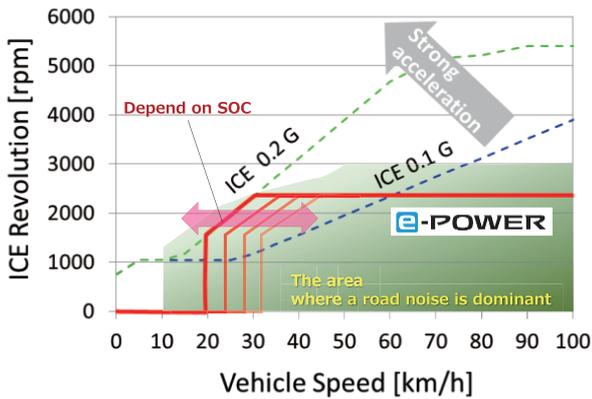


図 7 ノート e-POWER におけるロードノイズのエンジン回転数の概念図

ハイブリットよりバッテリー出力が大きい。図 5 に示すように低速走行時は EV 走行をすると共に、高車速までエンジンを停止した走行を可能としている。

さらに、大出力の発電機をエンジンスタターとして用いることにより、図 6 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。

図 7 にノート e-POWER のエンジン回転数制御の概念図を示す。エンジン動作は可能な限り暗騒音に隠れるように低速域では作動させない動かし方として Quietness を達成し、加速意図が強い場合は、エンジン回転数を上げ、駆動に必要なパワーを確実に発生する制御として Smoothness を達成した。これらの方策により、e-POWER での EV-ness を実現した。

セレナのエネルギーマネージメント

セレナにおいては、ミニバンという大きなボディに家族や友人で乗り込み、移動時間を楽しむという車両イメージを高めるため、低速域の静粛性と、高車速域での確実なエネルギー供給を両立する制御を目指した。

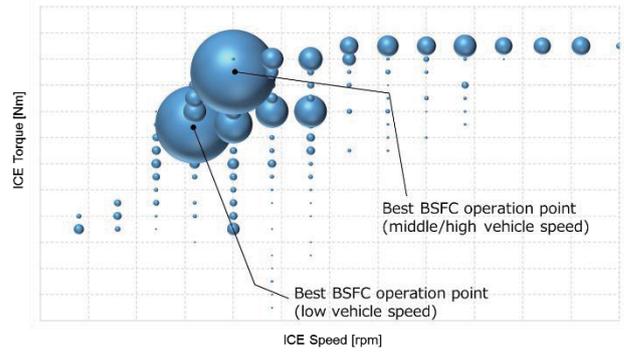


図 8 セレナのエンジン動作点の作動比率

エンジンには改良を加え、最良燃費領域を広く設計し、低車速用と中高車速用の 2 つの最良燃費率ポイントを設定した。低車速かつ低負荷な街中走行では、静粛性を優先し、低回転側の最良燃費点での発電を行う。回転数が低い分、最良燃費点の出力は下がるため、SOC を回復するための発電時間は長くなるが、車両の遮音対策と共に、エンジン作動音を違和感のないレベルに抑え込むことができた。また、郊外の幹線道路などでは、高回転側の最良燃費点で、より大きな発電電力での発電を行い、大きな加速要求にもすぐに応えられるよう、素早い SOC の復帰を可能とした。

さらに、セレナはノートに対してバッテリー容量を大容量化し、より積極的にバッテリーへの充放電を行うことで、質量の重いセレナでも、エンジンの動作点を最良燃費点に制御している。

図 8 に日本の実用燃費的な使われ方でのエンジン動作点使用頻度分布を示す。ノートで培ったエネルギーマネージメント制御を磨くことにより、エンジンの動作点を緻密に制御することで、ミニバンにおいても、静粛性と、燃費の両立を図ることができた。

セレナ e-POWER では新たな機能として、チャージモード及びマナーモードを設定している。e-POWER はエンジンと駆動系が機械的に接続されていないため、走行状態によらず自由に発電が可能である。その特徴を活かして、走行状態によらずユーザーが任意のタイミングでバッテリーを強制的に充電する(チャージモード)、エンジンを停止させてバッテリーの電力で静かに走行できる(マナーモード)を開発した。

チャージモードは、常にバッテリーの SOC を高めに維持できるため、加速力を持続的に要求する山岳路などで効果を発揮する。ドライバの加速意図が下がったときに、余剰電力を積極的にバッテリーに充電し、SOC を高めに維持し、将来の加速要求に備える。また、マナーモード選択の直前まで使用することで、より長時間の EV のような静粛性を実現することができる。

マナーモードは積極的にエンジンを止めることを主眼とし

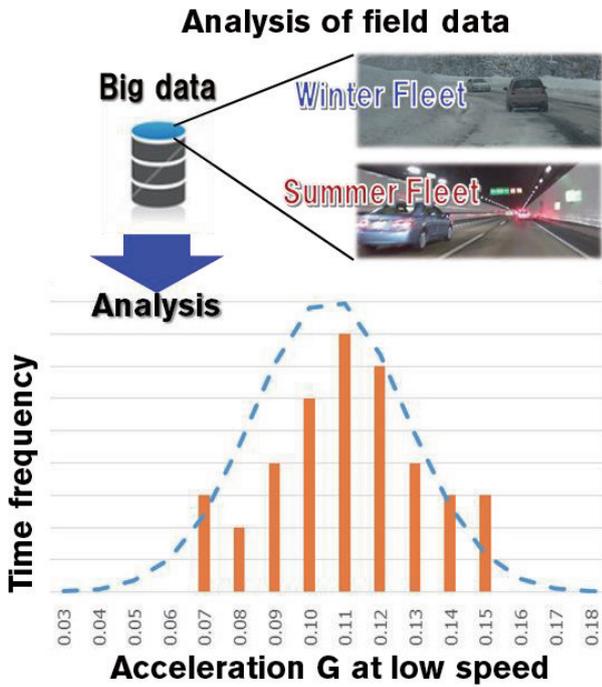


図9 日本市場における加速度分布

たモードである。他の HEV モデルでもこのようなエンジン停止モードは存在するが、e-POWER の場合、大容量のバッテリーを採用しているため、このモードによる効果は大きい。更に、前述のチャージモードとの組み合わせにより、圧倒的なエンジン停止走行が可能となる。

キックスでのエネルギー管理

ノート、セレナでのエネルギー管理は、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、EV-ness 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、よりドライバに EV 走行の静粛性を訴求できるエネルギー管理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

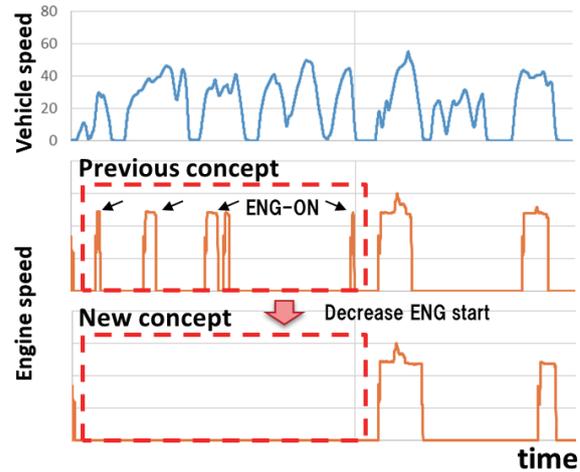


図10 新旧制御によるエンジン作動状態の比較

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9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分かる。また、必要な車速域毎の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管理の採用により、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10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。

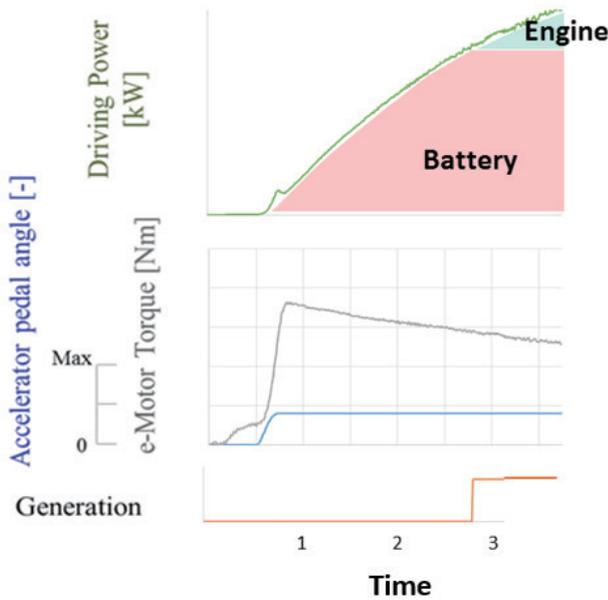


図 11 高 SOC での電力配分

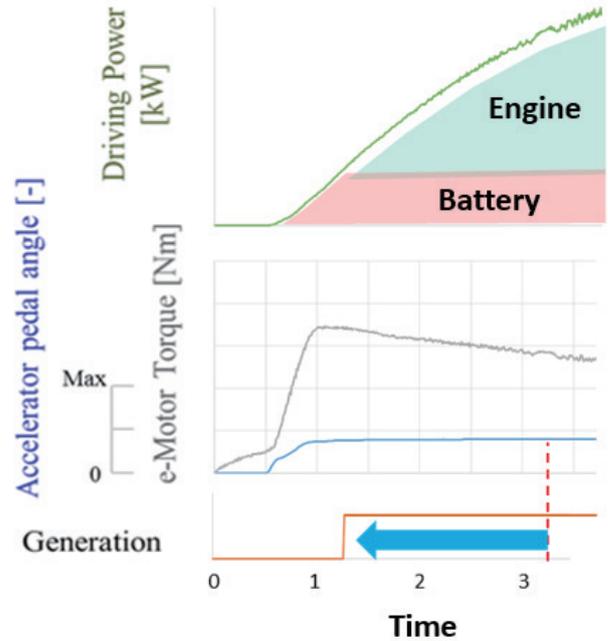


図 12 低 SOC での電力配分

4. パーマネジメントの開発： スムーズさとレスポンスの両立

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。

ここでは、これらの課題に対する対策を説明し、e-POWER の EV-ness である、High Response と Smoothness について述べる。

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でも、加速感の低下を感じさせない制御である。

図 11 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、走行出来るようにしている。一方、図 12 では SOC が低く、バッテリーだけで十分な出力を確保出来なくなる条件で、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。

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-ness 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 13 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。

5. さらなる EV-ness の追及

本章で説明してきたエネルギー管理、パーマネジメントは、さらに磨かれて、新型ノートに適用されている。

今後の e-POWER のさらなる進化は、EV-ness のさらなる深化である。

Quietness の深化に関しては、エンジン停止時間延長の可能性を探ってきたが、今後は ANC(Active Noise Canceller) のような積極的に音を消すようなシステムとの

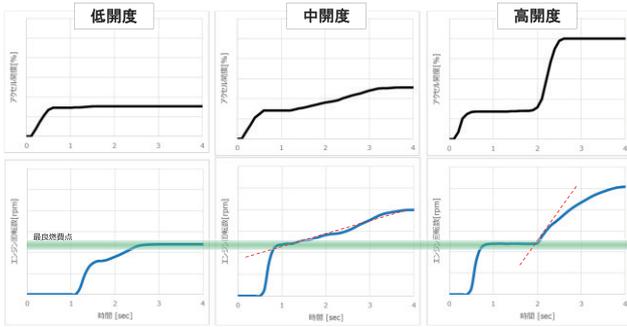


図 12 低 SOC での電力配分

組み合わせも考えられる。e-POWER 特有の最良燃費点での発電制御も、ANC の消音領域として狙いを定め易く、e-POWER との相性は良いと思われる。

Smoothness の深化に関しては、エンジンの出力特性とバッテリーの出力特性のバランスをさらに最適化させる。特に濃い出力エンジンを積む場合、エンジンからの発電電力が駆動パワーに占める割合が高くなるためエンジンの出力特性が滑らかな駆動特性に影響してくる。エンジンに対しては、燃料消費率の改善と合わせ、出力特性の改善も進めて行く。

High Response の深化に関しては、BEV と共に、ドライバの意図に即座に反応する特性に磨きをかける。ショックや振動などを発生することなく、さらには車両姿勢にも積極的にコントロールすることを目指す。

用語解説

- *1 EV : 電気モーターのみで走行するクルマ
- *2 BEV : バッテリーの出力のみで走行する EV
- *3 EV-ness : 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
- *4 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

著者



羽二生 倫之



坂上 永悟



伊藤 知広



風間 勇



小坂 裕紀

特集 2 : 成長する e-POWER

4. 走りと両立する燃費技術

栗城 洋* 折田 崇一* 野口 隆三*

1. はじめに

日産自動車は、100% モータ駆動の楽しさと燃費性能を両立した電動パワートレインシステム e-POWER を開発し、2016 年にコンパクトカーのノートに初めて搭載した。その後、2018 年にミニバンのセレナ、2020 年には SUV のキックス、2021 年の新型ノートへと、搭載車種を拡大している。

本編では、電気自動車と並んで、日産のパワートレイン戦略の両輪の一つとして位置づけられている‘e-POWER システム’の特徴を活かした低燃費技術について紹介する。

2. e-POWER システムと動作モード

図 1 に e-POWER のシステム構成を示す。発電系と駆動系が機械的に完全に分離されていることが最大の特徴で、エンジンおよび発電機の動作点を駆動系の状態によらず自由に決めることができる。また、100% モータ駆動のメリットを最大限活かした、“e-POWER Drive”という新しい走行モードを開発し、図 2 に示すように市場の 90% 以上の減速度をアクセルペダルによってカバーし、減速回生エネルギーを回収すると同時にアクセルペダルのみで車を操ることができる Fun to drive を実現している。^{* (1)}

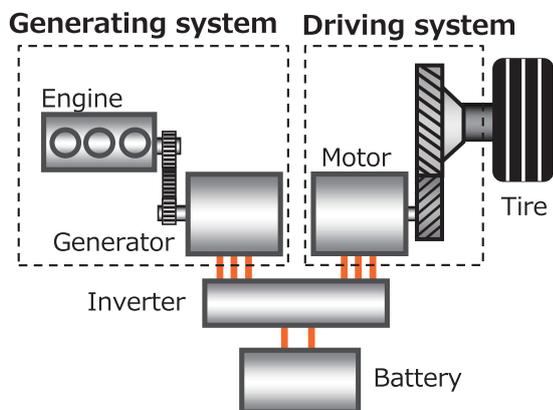


図 1 システム構成図

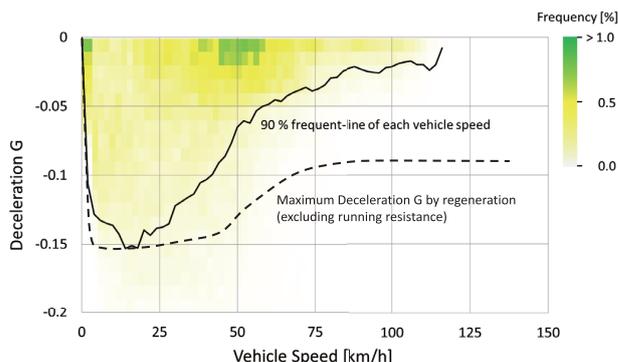


図 2 市場減速度頻度と e-POWER Drive の減速度特性

システム動作は以下の 6 つのモードがあり、図 3 にそれぞれの状態を示す。①から⑤が基本動作モードで、⑥はオプションの動作モードである。

- ① エンジンを停止し、リチウムバッテリーのみの電力で駆動力を実現するモード
- ② エンジンで発電した電力で駆動し、余剰分をリチウムバッテリーに充電するモード
- ③ エンジンで発電した電力とリチウムバッテリーの両方の電力を使って加速するモード
- ④ エンジンで発電した電力で駆動するモード
- ⑤ エンジンを停止し、コースト減速回生エネルギーをリチウムイオンバッテリーに回収するモード
- ⑥ 発電機でエンジンを空回してリチウムイオンバッテリーの電力を放電するモード (ブレーキ M/V 負圧生成、OBD やバッテリー過充電防止などで作動)

*パワートレイン・EV性能開発部

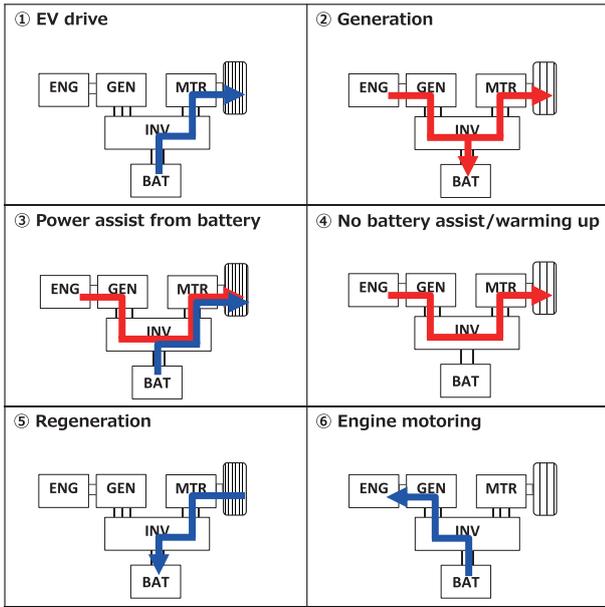


図3 システム動作モード

3. e-POWER に共通する燃費改善のための要素

e-POWER はエンジンの動力を発電機で電力に変換し、その電力を使ってモータで駆動力を発生するため、機械⇄電気の変換時に損失が発生し、燃費性能改善はいかにエンジンを高効率状態で発電してシステム全体の効率も同時に高めるかがポイントになる。

そこで、e-POWER の特徴を活かして、発電システム効率が高い動作点での運転（以降、定点運転（図3の②モード））を基本とし、エンジンによる発電効率を徹底的に高めた。

3-1. 定点運転による燃費向上

図4には各回転数で最も効率が高い動作点をつないだα線を記載している。従来のハイブリッドシステムでは車速や要求駆動力に応じてエンジン回転数が制約されるため、この線をトレースするように制御することになり、特に低回転域では効率の悪い動作点を使用することになる。

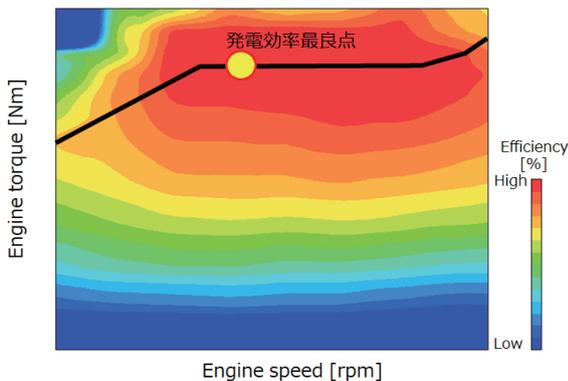


図4 発電システム効率特性

一方、e-POWER は駆動系とエンジンが完全に独立してい

ることを活用し、駆動系の状態に関わらず、各種要求（動力・運転性・音振・排気・熱・暖房・ブレーキ負圧・部品保護・診断など）の許容範囲内で最も発電効率の高い動作点で運転するように制御している。その際、図5に示すようにモータ出力に対する発電電力の過不足分はリチウムバッテリーに充放電することで補償する。（図3の②、③モード）⁽⁴⁾

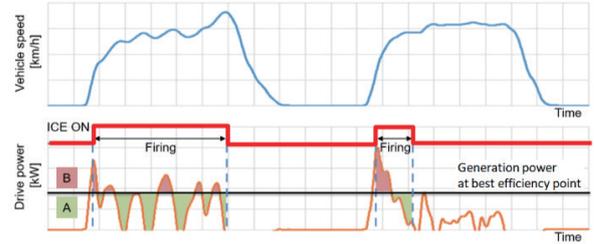


図5 エネルギーマネージメントのコンセプト

市街地走行など要求駆動力が低いシーンにおいて実際は、エンジンを定点運転し余剰発電電力をリチウムバッテリーに充電しながら走行（図3の②モード）し、蓄えられた電気エネルギーを使ってEV drive（図3の①モード）に切り替える。

図6に定点運転とEV driveの切り替えによる燃費改善効果を示す。常時エンジンを作動する動作モード（図3の④モード）に対して、最大で約2倍の燃費改善効果があることがわかる。

一方、高車速での走行や追い越し加速など要求駆動力が高いシーンでは、余剰発電電力でリチウムイオンバッテリーに蓄えられた電気エネルギーを使って加速に必要な電力を補い、極力定点運転を維持し燃料消費量を最小化している。（図3の③モード）

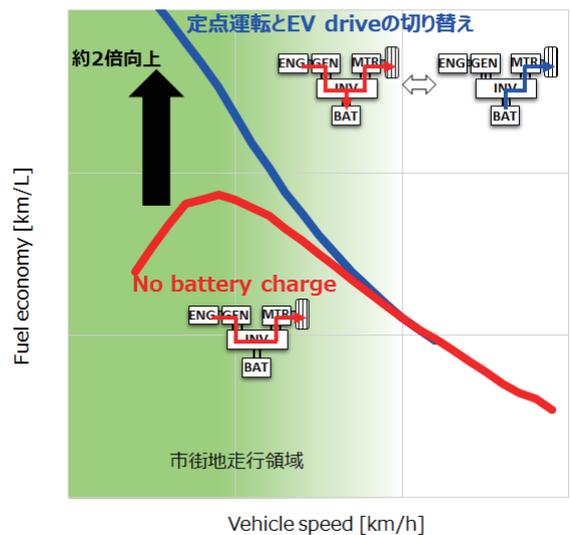


図6 一定速度で巡行した場合の燃費改善効果

3-2. 発電システム（エンジン+発電機）の改善

図7にエンジンの燃料消費率特性を示す。エンジンは、3気筒1.2LガソリンエンジンHR12DEをベースにe-POWER用に開発した。クールドEGR (Exhaust Gas Recirculation) 採用やウォーターポンプ、エアコンコンプレッサーなど補機類の電動化によるフリクション低減により最良燃費率を向上した。^{*(2)}

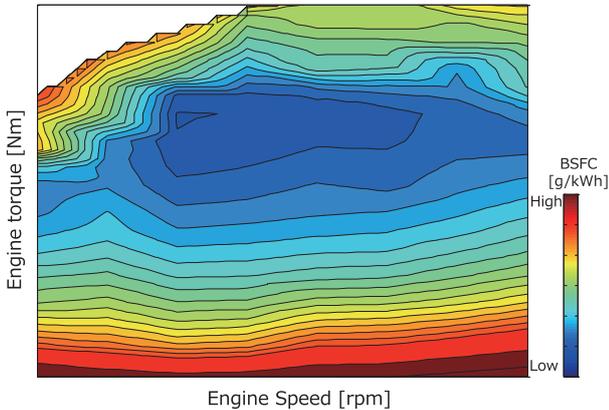


図7 エンジン燃料消費率特性

図8に発電機の効率（インバータを含む総合効率）特性を示す。発電機についても、e-POWERに合わせて開発されたもので、エンジンの最大トルク、最大出力をカバーしている。^{*(3)}

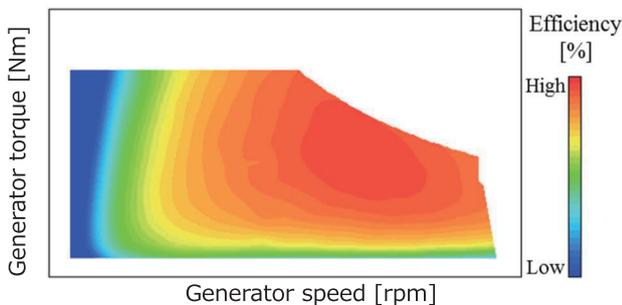


図8 発電機の効率特性（インバータ含む）

エンジンと発電機では高効率な領域が異なるため、間に配置された増速ギヤを、エンジンと発電機の最高保証回転の範囲内で最も発電効率が最大となるよう、ギヤ比0.6とした。

3-3. バッテリーシステムの改善

これらの燃費効果は搭載するリチウムバッテリーの技術の進化の貢献も大きい。

- ・リチウムイオンバッテリーの内部抵抗低減による電力の出し入れ時に発生する損失の大幅な低減
- ・小型、軽量化により大容量のリチウムバッテリーを

コンパクトカーに搭載でき、エンジン始動頻度の大幅な低減で、より長いEV driveが可能となりBEVに共通する静かさを実現

・冷却性能の強化による大電力の長時間充放電が可能以上より、クラストップレベルの燃費性能や静粛性を達成した。

4. 改良型 e-POWER のエンジン運転制御

前述のように e-POWER はエンジン稼働中、定点運転を基本として燃料消費量を低減しているが、以下3つについてエンジン運転制御を改良し、キックス及び新型ノードに採用した。

4-1. エンジン始動頻度の更なる低減

エンジン始動から発電システム効率が最大になる定点動作点に移行する期間に消費する燃料と、エンジン始動時に消費する電気エネルギーに着目した。ユーザーデータを活用して、低車速かつ加速時間が短いと予想されるケースではEV driveを維持するように、エンジンを始動する条件を見直すことでエンジン始動頻度を大幅に低減した。エンジン始動直後から定点動作点への移行時は燃費悪化を伴うが、極短時間で実施している。しかし、この定点動作点への移行は、エンジン始動毎に発生するため エンジン始動頻度の低減が燃料削減に効果がある

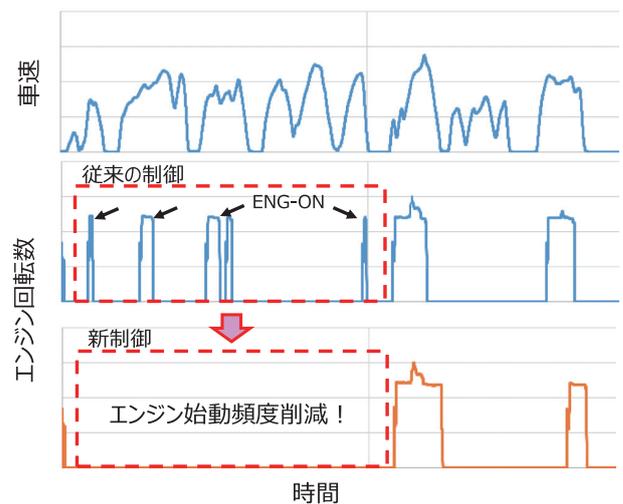


図9 エンジン始動頻度低減

4-2. エンジン暖機中の定点動作点の追加

冷間時には暖機を促進するため、あえてエンジン熱効率の悪い動作領域を使用して廃熱を発生させていたが、ヒーター熱源が不要な環境では発電効率最良点を使用するように変更した。

更に、エンジンは暖機前後で発電効率最良点に変化することに着目し、暖機専用の定点動作点を設け、暖機状態に応じて定点動作点を切替えるように改善した。その結果、短距離走行時の実用燃費を高めた。

4-3. 冬季暖房使用時のエンジン動作点変更

e-POWER は暖房用の熱源として発電用エンジンの廃熱を利用している。快適な車室内の空調環境を効率良くマネージメントすることは重要な課題である。

従来は、冬季のヒーター使用時でもエンジン暖機後では定点運転として、発電効率を優先していた。しかし、暖房時はエンジンを継続的に燃焼させる必要があり、リチウムイオンバッテリーの蓄電能力を上回るとエンジンモータリング(図3の動作モード⑥)による強制放電を実施していた。その結果、燃費最適になっていなかった。

今回、バッテリーの残容量と暖房要求に応じて発電動作点をコントロールし、必要最低限の熱量を確保することで暖房性能と燃費性能を両立した。

5. ゼロエミッションへのアプローチ

ICE と EV の技術進化を共有し、e-POWER ユニークなエネルギーマネージメントにより、トップクラスの燃費性能を実現した。さらに、新型ノートでは、エンジンの熱効率向上および EV と共通の電動コンポーネントの伝達効率向上技術を採用し、e-POWER システムのシステム効率を向上している。

今後は、発電に特化した e-POWER 専用エンジンの更なる熱効率向上、小型・軽量化、低損失化、効率的な暖房用のエネルギー創出、そしてコンポーネントの進化に合わせた制御改良を行っていくとともに、ナビゲーションシステムや IT・ITS と連携した次世代型のエネルギーマネージメントによるシステム効率の最大化に取り組む。

これらの基盤技術の革新により、CO₂ 排出量の大幅低減、排出ガスのニアゼロ化を目指し、地球環境保護に貢献してい

く。それによって、100% モータ駆動ならではの、運転して楽しい e-POWER システムをより多くのお客様に提供できるよう開発を進めていく。

参考文献

- 1) 有吉伴弘ほか：新型電動パワートレイン「e-POWER」とエンジン回転数プロフィールの設計、自動車技術会シンポジウム (2017)
- 2) e-POWER 用 新型 3 気筒 HR12DE エンジンの開発、日産技報、No.80 (2017)
- 3) 岡野洋二ほか：小型車向け新型電動パワートレイン用モータおよび発電機の開発、自動車技術会学術講演会予稿集 (2017)
- 4) 木村 誠ほか：新型ハイブリッドパワートレイン「e-POWER」、自技会、Vol.72、No.9 (2018)

著者



栗城 洋



折田 崇一



野口 隆三

特集2：成長する e-POWER

5. EV-ness を支える新型ノートの振動騒音技術

河上 哲也* 金子 弘隆** 家中 夕輔* 新井 和彦* 千葉 竜吾*
 澤田 孝信** 仲田 徹*** 後藤 昌也****

1. はじめに

e-POWER はバッテリー駆動電気自動車（以下 BEV*¹）と共通の駆動モーターを有するシステムであるため、特に車両の走り出し～中車速域でエンジン停止状態でモータのみで駆動する（以下 EV 走行*³）シーンにおいては、BEV 同様の滑らかな加速フィールと上級車並みの静粛性を実現できる。

本システムの静粛性を追求する上で、走行シーンごとに重要となる要因は以下である。

EV 走行シーンでは、モータ・減速機に起因する高周波音が支配的である。モータ自身の加振力の低減に加え、e-POWER は BEV に対し、発電機やエンジンも一体化したユニット形状を想定した放射特性の抑制が必要となる。

また、発電等のエンジン運転シーンでは、エンジン運転時の音をいかに目立たなくするかが重要である。

具体的には、以下のような運転シーンで問題になる音振課題を設定し、対策を行った。

- ① EV 走行時：モータノイズ、減速機ギヤノイズの低減
 - ② エンジン運転走行時：エンジン騒音、増速機歯打ち音、増速機ギヤノイズの低減、エンジン始動時の静粛性
- 本報では、上記重点シーンで着目すべきそれぞれの音振現象の e-POWER システムにおける設計の考え方と、新型ノートに採用した技術的な解決策について説明する。

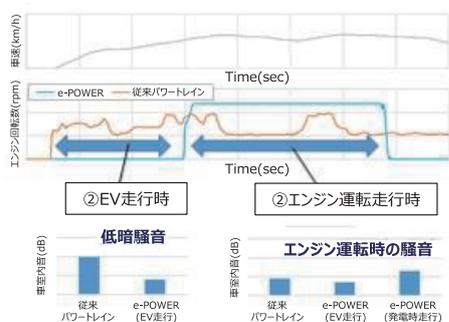


図1 e-POWER の静粛性上課題となる走行シーン

2. EV 走行時の静粛性向上

2.1 EV 走行時の課題

EV 走行時はエンジン騒音に隠れていたモータノイズやギヤノイズといった高周波現象が顕在化し耳障りな音となるため、BEV 車両同様の静粛性の高さが求められる。

2.2 モータノイズ

モータノイズはステータとロータの間の電磁加振力によって発生する現象である。前記起振力の成分は、モータ周方向と径方向に分けることができ、それぞれの寄与は周波数領域によって異なる（図2）。

この電磁加振力を広範囲の領域で低減しつつ、効率/出力を高いレベルで両立させる磁気回路を、数十万通りの設計パラメータの組み合わせでシミュレーションし最適設計した（図3）。

電磁加振力については低車速領域のレベルを低減することに重点を置き、周方向成分を効率的に低減しつつ、鉄損も同時に低減する磁気回路を新型ノート e-POWER に採用した。

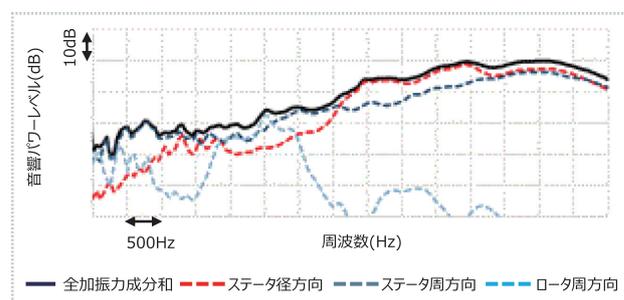


図2 モータノイズレベルに対する加振力方向別の寄与分析

* パワートレイン・EV性能開発部 ** パワートレイン・EV先進技術開発部 *** パワートレイン・EV電動技術開発部 **** バカスターパフォーマンス&第一車両実験部

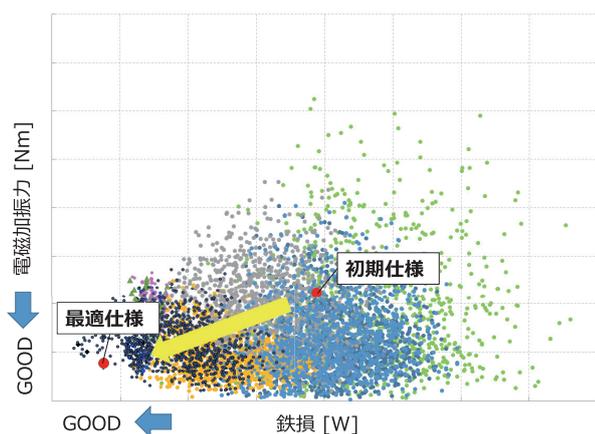


図3 電磁加振力と効率を両立する磁気回路最適設計

前記の加振力低減に加えて、モータノイズの主放射部位となるモータユニットの構造系部品については、放射音の寄与度分析シミュレーションによってインバータの寄与が大きいことが明らかになったため、インバータケースの剛性を重点的に向上させることで、効率的なモータノイズ低減を実施した(図4)。

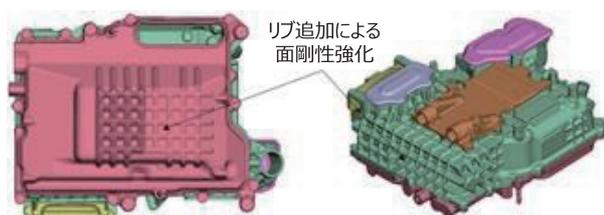


図4 インバータケース剛性向上による対策

2.3 減速機ギヤノイズ

高いレベルでギヤノイズの静粛性を実現するため、歯幅を増やすことで噛み合い率を向上し、さらにホーニング加工追加により歯精度を向上することで減速機ギヤノイズを改善した。

3. エンジン運転時の静粛性向上

3.1 エンジン運転時の騒音低減

3.1.1 エンジン運転時騒音の設計指針

e-POWER システムにおいては、エンジンによって効率的に発電するため、従来のコンベンショナル車両に対してエンジン効率に優れる高負荷低回転でエンジンが稼働する頻度が高く、下記指針に基づく設計を実施した。

- ① エンジン運転時に車室内に伝播する振動伝播経路で効率的に振動レベルを低減する
- ② タイヤ騒音などの暗騒音が大きい領域でエンジンを運転することでエンジン騒音を目立たなくする

3.1.2 振動伝播経路での対策

エンジン騒音の車室内までの伝播経路については、エンジンマウント等を介して振動伝搬する経路と、エンジンルーム内で発音した音が空気伝搬する経路の2つに大別できる。

このうち前者の振動伝搬経路について、インバータをモータユニット直上に搭載し、パッケージング効率を向上させつつ、必要最小限の追加部品でパワートレイン全体剛性を大きく向上させて振動レベル改善した。

具体的にはインバータと駆動モータをボルト締結し、インバータと発電モータ間にガセットを追加することでモータユニット全体の系としての剛性を大きく向上させた(図5)。また車両左側マウントブラケットについては、ボルト締結点をモータリアカバー上面とした上で、マウントブラケットと前記インバータを小型ステーで締結することで、ブラケット重量の増加を制御しながら、大幅な振動レベル低減を実現した(図6)。

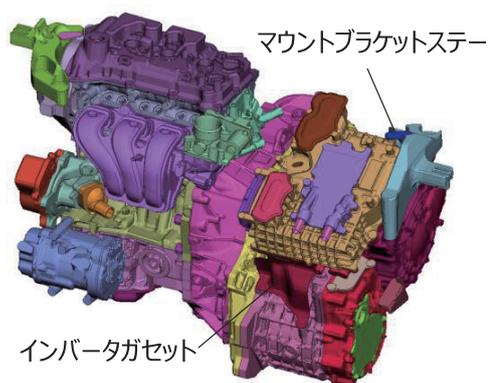


図5 新型ノート e-POWER モータユニット構造系主要変更点

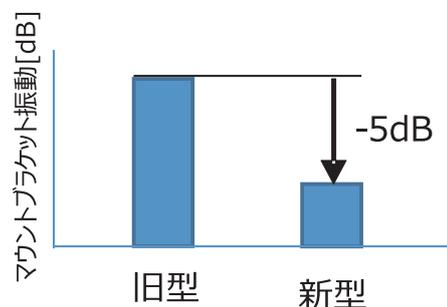


図6 インバータケース剛性向上による振動低減効果

3.1.3 エンジン始動判定制御 (路面判定)

走行中に路面が粗い場所でロードノイズが大きくなっていることを判断し、エンジンの運転を制御する機能を新開発した。本機能によりお客様がエンジンの運転が気にならないシーンで発電し、十分なバッテリー残量を確保しておくことで、発進時や路面が滑らかな道路を走行する際など、EV 走行ならではの静粛感を感じて運転できるシーンを増やすことができる。

旧型のノート e-POWER では、ロードノイズは車速に比例して大きくなることを想定し、エンジンは車速が高い時に運転するように工夫されていた。しかし、発進停止を繰り返す市街地走行においては、エンジン運転が気にならないシーンは限られてしまい、その結果、低速走行時にエンジンの動作するシーンを抑制するのが課題であった。

ロードノイズの大きさは、車速よりも路面粗さの寄与度が大きいことが知られており、日本の走行環境においてもエンジンから発生するノイズより大きなロードノイズの路面が数多くあることが分かっている。今回、新たにタイヤの回転数変動からロードノイズを推定するアルゴリズムを開発し、それに基づきエンジンの運転を抑制することで、静粛性向上に大きく貢献している。

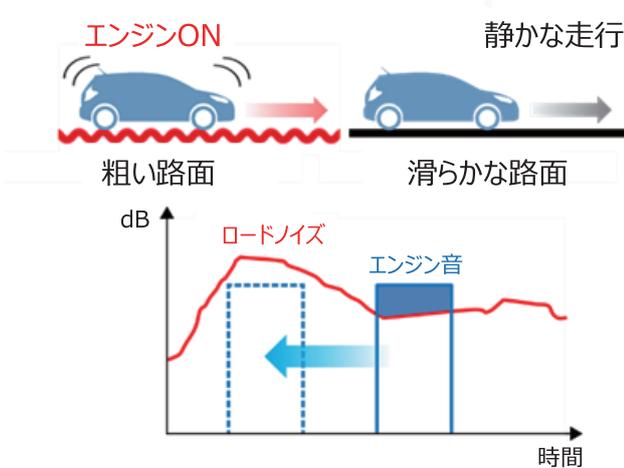


図7 ロードノイズ推定エンジン始動制御 概略

3.2 増速機歯打ち音の低減

3.2.1 新型ノートにおける増速機歯打ち音の低減

旧型ノート e-POWER に対し、新型ノート e-POWER では新型低剛性ねじりダンパの採用により歯打ち音を低減することで、静粛性を向上した (図8)。

3.2.2 増速機歯打ち音とは

e-POWER の発電システムはエンジン、ジェネレータ、および増速機で構成される。各コンポーネント間はスプラインで締結され、それぞれの締結部やギヤ噛み合い部には隙間

やバックラッシュが存在する。これらがエンジントルクの小さい領域で、エンジンのトルク変動を入力とし、スプラインとギヤ間で各歯が衝突することによるノイズが課題になる (図9)。

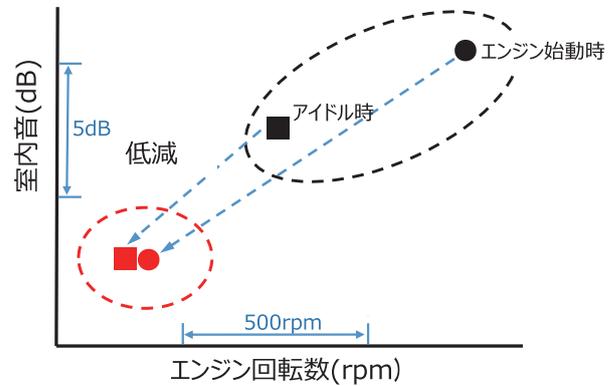


図8 低回転化による静粛性改善効果

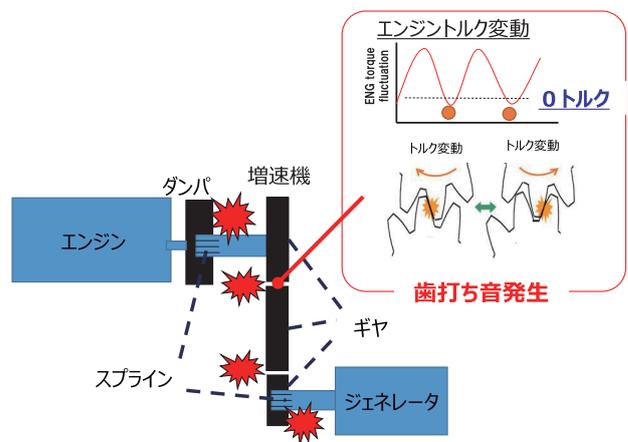


図9 増速機歯打ち音発生メカニズム

3.2.3 新型トーショナルスプリング低剛性ダンパの適用

先に述べた歯打ち音の対策として、旧型ではエンジンと減速機間に配置されているねじりダンパのねじりばね定数は1段の特性であったが、歯打ちが課題となるエンジンの低トルク領域でねじり剛性を低下した2段特性の新型ダンパを開発した(図10)。これにより締結部やギヤに入るエンジントルク変動を大幅に減衰させ、歯打ち音を抑制した(図11)。

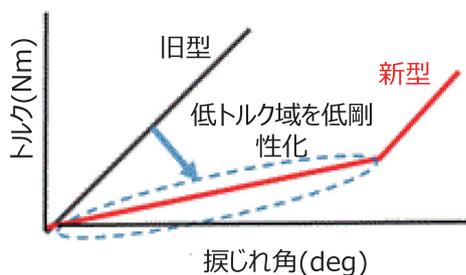
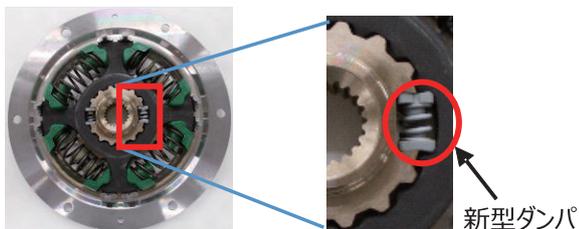


図10 新型低剛性ねじりダンパ

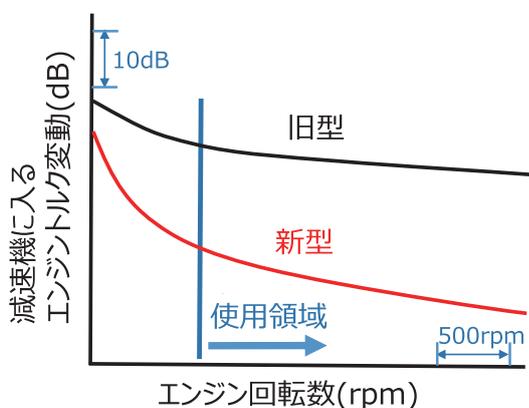


図11 エンジンから減速機までの振動特性の改善

3.3 増速機ギヤノイズ

エンジンと発電機をつなぐ増速機は、エンジン軸と発電機軸の中間軸の一つのギヤがエンジン軸と発電機の両方のギヤとかみ合っているため、定性的にはギヤノイズレベルが増加する傾向となるが、この二カ所の噛み合い点間の噛み合い位相を互いに打ち消し合うようにギヤ諸元やギヤ軸の配置を最適化することで、ギヤノイズを低減することが可能となる(図12)。

e-POWERの増速機は、旧型からこの位相差最適化設計

を取り入れており、使用頻度の多いエンジン回転領域でのレベルをより低減できるようにしている。

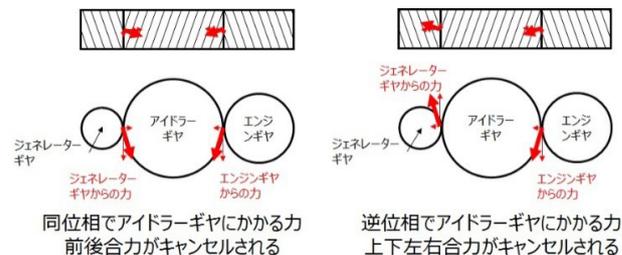


図12 ギヤ噛み合い位相差設計の概念図

4. 更なる静粛性の追求

今後、より高出力の車両に e-POWER を採用拡大することを想定すると、音振性能はエンジンやモータのトルク増大による加振力の増加、パワートレインの大型化にともなう振動伝達系の変化が課題となる。

また、EVness^{*4}を追求したさらなる静粛性を達成するため、パワートレインの主運動系、本体構造系、さらにはエンジンマウントまでをトータルに設計することで、e-POWER システムの特徴を最大限に演出しつつ、高い静粛性を目指す。

5. まとめ

e-POWER の特徴である上級車並みの静粛性を実現するため、①EV 走行時の高周波ノイズの低減、②エンジン運転時のエンジン動作に気づきにくい動かし方や、増速機の歯打ち音の抑制に重点を置き、旧型ノート e-POWER からさらなる改良を加えた。

- ・EV 走行時の高周波ノイズ：モータ磁気回路設計による電磁加振力の最適化と効率的な放射部位剛性向上および減速機ギヤのギヤ精度の改善により、騒音レベル低減を実現した。
- ・エンジン運転時の騒音：インバータケース剛性の向上や、エンジン騒音が暗騒音で気づかれにくい走行シーンを考慮したエンジン始動停止制御を新たに適用した。また、増速機の歯打ち音を新開発の低剛性ダンパを適用することで大幅に低減した。更に、増速機の二重噛み合いに起因するギヤノイズに対して、二か所の噛み合い位相差を最適化して対策を行った。

用語解説

- * 1 BEV : バッテリー出力のみで走行する EV * 2
- * 2 EV : 電機モータのみで走行する車
- * 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: 電気モータ駆動らしい、静かで力強く滑らかな走りのフイーリング

参考文献

- 1) 餌取秀一ほか：e-POWER を支える振動・騒音低減技術、日産技報、No.80, p.39-47(2017)
- 2) 濱野崇ほか：新開発 EV のギヤノイズ低減技術、自動車技術会学術講演会前刷集、Vol.56-11, p.1-4(2011)
- 3) 北條秀樹ほか：高周波モードを考慮した EV モータノイズ低減技術、自動車技術会学術講演会前刷集、No.108-12, p.31-34(2012)
- 4) 山本和志ほか：新型機電一体構造を有する新開発電動パワートレインのモーターノイズ低減技術、自動車技術会論文集、Vol.47, No.6, p.1349-1353(2016)

著者



河上 哲也



金子 弘隆



家中 夕輔



新井 和彦



千葉 竜吾



澤田 孝信



仲田 徹



後藤 昌也

特集2：成長する e-POWER

6. 価値を高める電動 AWD 技術 (All wheel drive)

平工 良三* 坂上 永悟** 片倉 丈嗣**

1. はじめに

従来のAWD(All wheel drive)のシステムは、内燃機関が発生する動力を機械的機構によって前後輪へ配分することによって実現される。一方近年のEV^{*1}では、1つの動力源からの動力を前後に配分するのではなく、モーターを前後に2機装備した電動AWDが採用されてきている。電動AWDはBEV^{*2}との組み合わせにおいて、完全に独立した前後の駆動力制御が可能、高いレイアウトの自由度がある、など、クルマ造りに関しては有利な点が多いが、しかし、内燃機関車との組み合わせにおいては、十分な出力を得るには高電圧のバッテリーシステムが必要、主動輪を内燃機関で駆動するため従動輪がモーターであっても駆動力の制御性には限界がある、などの問題もある。これに対して100%モーター駆動のe-POWERとの組み合わせでは、高電圧のバッテリーシステムが装備されているため、従来の内燃機関車との組み合わせにおける問題は解消され、BEVと同様に電動AWDの恩恵を預かることができる。

本記事では、これから登場するe-POWERと組み合わせられる100%モーター駆動によるAWDシステムの技術的方向性について解説する。

2. 日産が考える電動AWDの進化「e-4ORCE」

日産は2019 Tokyo Motor Show「アリアコンセプト」(図.1)であらたなモーターAWDの進化の方向性「e-4ORCE」を公開した。「e-4ORCE」の制御技術は、四輪駆動力制御やシャシー制御の技術、そして電動パワートレイン技術など、長年日産が培ってきた多くのノウハウを組み合わせながら、それぞれの技術を進化させている。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4x4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、日産がモーター駆動と先進四輪駆動システムを開発してきた長い経験が、2つの電気モーターを使う先進的なシステム「e-4ORCE」を開発した。



図1 2019TMS アリアコンセプト

「e-4ORCE」が狙ったのは、電動モーター駆動を前提として、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1. 扱い易さ、2. 快適性、3. 安心感を従来の内燃機関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。

これは単に電動車における従来価値の「AWD化」と言う領域を超えて、あらたなクルマ造りの方向性を目指した進化である。そしてこの性能は、100%モーター駆動であるBEVとe-POWERだけが享受できる。

3. 電動AWDで実現する新たな運動制御

クルマは基本的に動力源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」と言った運動性能を実現している。(図.2)しかし動力源が電動モーターに置き換わると、従来動力源が担当していなかった機能も、動力源が受け持つことが可能となった。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、

*パワートレイン・EV技術開発本部

**パワートレイン・EV性能開発部

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、これまでに無い滑らかで扱い易い特性を実現することができる。その活用例の1つがノート e-POWER で採用された“e-POWER Drive”である。

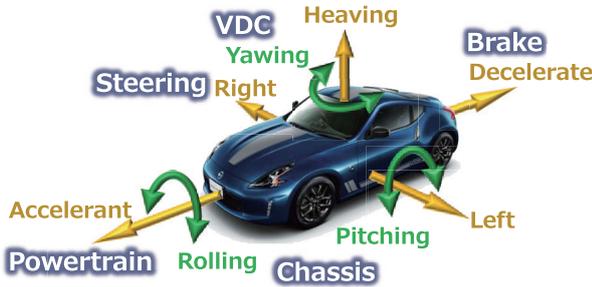


図2 クルマの動きとシステムの役割分担

モーターを前後に2機搭載する電動 AWD では、さらに動力源であるモーターが制御可能な動きが増える。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った。(図.3)

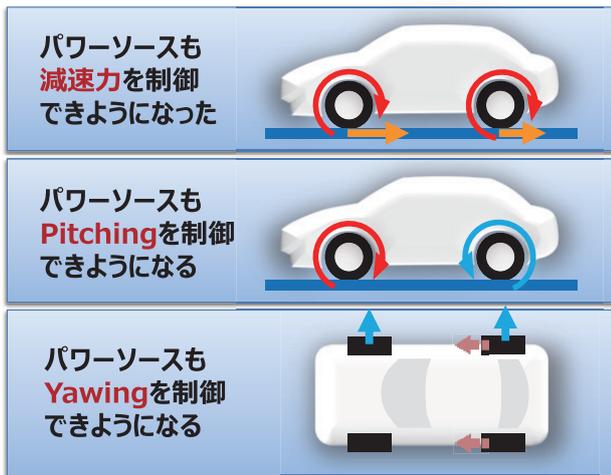


図3 電動駆動 AWD が獲得した動き

4. 100% モーター駆動による AWD が提供する価値



図4 新開発 電動 AWD 制御技術がもたらす価値

4-1. ドライバーの意のままの走り

2つのモーターが発生するトルク及び回生ブレーキと4輪の油圧ブレーキを最適な役割分担で統合制御することにより、ライン追従性、ステアリングの精確さを向上させることができ、これはドライバーの安心感につながる。こうした高度な制御は、特にコーナリング時に効果を発揮し、クルマの動きはドライバーのステアリング操作に忠実で、滑らかで心地よいドライビングを楽しむことができるようになる。

代表的なシーンの一例として、図.5 に適切な前後配分および統合制御を行った場合と、前後固定配分で雪路のスラローム走行をおこなった場合の車両挙動比較を示す。統合制御により車両挙動が安定し、終始ドライバーが意図した理想的なラインを維持することがわかる。

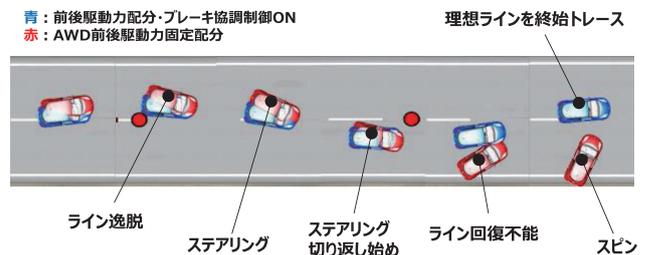


図5 雪路スラローム比較

4-2. 乗る人すべてに快適な乗り心地

モーターによる回生ブレーキの制御は、快適な乗り心地の提供にも貢献できる。

前輪駆動の e-POWER の場合、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、減速時にクルマの前方がグッと沈み込む。電動 AWD 車では前後に搭載された2つの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.6) 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事が少なくなり、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る。この制御を行うことで、ドライバーだけではなく助手席や後席に乗る人にも安定したスムーズな乗り心地を提供することができる。

制御なし 減速時に頭が振られる

5. まとめ



制御あり クルマがフラットに減速



図 6 減速時の姿勢制御

4-3. 路面を問わない安心感

濡れた路面や氷結した路面、雪道などのすべりやすい路面など、熟練したドライバーでもストレスを感じる場面でも、前後のモーターの出力とブレーキ制御を緻密に統合制御することにより、タイヤのグリップを最大化し、クルマの動きを安定させることができる。そのため、すべりやすい路面でドライバーがアクセルを踏み過ぎた場合でも、クルマが出力を適切に制御し、ドライバーはしっかりとクルマをコントロールすることができるようになる。

図.7 に滑り易い路面でアクセルから足を離し、減速するシーンにおける FF 車および AWD の統合制御有り/無しと比較グラフを示す。統合制御を行うことにより、前後のグリップを最大限に活かし、安定した減速力を確保することができる。

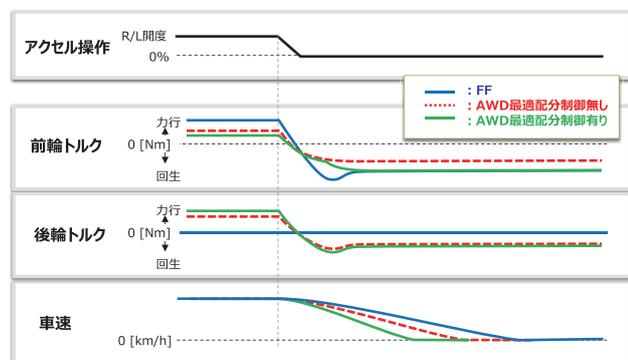


図 7 モーターによるスリップ制御

従来から AWD は安心・安全を提供する機構として認知されてきた。しかし、日産がこれから提供する新たな電動 AWD は、従来から期待される性能に加え、“いつかのため、ではなく、いつものため”の性能向上にも力を注いでいる。即ち、悪路や限界性能の向上のみならず、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でも、快適性、運転のしやすさを感じて頂けるように性能を磨いてきた。そして今後も日産が目指す究極のインテリジェントモビリティに向けてさらに磨き続けていく。

繰り返しになるがこれらの卓越した性能は 100% モーター駆動の AWD 車だけが獲得できる。e-POWER との組み合わせとしては、まもなく登場する、新型ノート e-POWER に組み合わされる電動 AWD がはじめての市場投入となる。

日産が提供する新たな電動 AWD の性能で、従来からある“伝統的な四輪駆動車の価値”を超えた上質感を、一人でも多くのお客様にご体感頂きたい。

用語解説

- ※ 1. EV : 電気モーターのみで走行するクルマ
- ※ 2. BEV : バッテリーの出力のみで走行する EV

著者



平工 良三



坂上 永悟



片倉 丈嗣