

NISSAN TECHNICAL REVIEW

日産
技報

2023
No.

89



「タフギア」×「上質」新型エクストレイル／電動化に貢献する実験技術

NISSAN
MOTOR CORPORATION

日産技報

NISSAN TECHNICAL REVIEW



2023 No.89

「日産技報」電子版サイト

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

目 次

2023 年 3 月 発行

◆巻頭言

先進技術を製品として仕上げる技術とプロセス	安徳 光郎	1
-----------------------	-------	---

◆特集 1 :「タフギア」×「上質」新型エクストレイル

1. 進化した本格 SUV 新型エクストレイル e-4ORCE	山本 哲也	5
2. 「VC ターボ」×「e-POWER」システム	吉田 直弘・長谷川 潤・高岡 正毅	11
3. e-POWER 用エンジンの進化	荻野 和宏・土屋 順久・水野 秀昭 坂井 雄紀・阿部 泰英	17
4. 本格 SUV への e-4ORCE 適用	片倉 丈嗣・鈴木 良太	21
5. EV 並みの静粛性を実現する NV 技術	李 夢沢・菅沼 真一・桑田 敏久 船津 宣成・福岡 浩彰・三谷 健文 前田 和茂・寺島 康統・五十嵐 雄一 岡田 和久	25

◆特集 2 : 電動化に貢献する実験技術

1. 電動車両の競争力を支える実験技術とは	田中 耕一郎	33
2. 電動車ならではの性能を創りこむドライビングシミュレータ実験技術	藤田 裕幹・磯野 洋一・今村 昌幸 町田 直也・林 豊	39
3. 新機構部品の品質を試作レスで評価できるバーチャルリアリティ実験技術	丸勢 修・中國 泰徳・久芳 憲治 上野 英里奈	45
4. 実車を使わずに電動パワートレイン性能を最適化するバーチャル リアル シミュレータ実験技術	中本 英伸・平谷 康治・谷合 宏之	49
5. 電費と快適性の両立を実現する熱マネジメントシステム実験技術	田尻 政義	53
6. 車体軽量化技術を支える X 線 CT 非破壊計測技術	菅田 安洋・白井 徳貴	57

◆受賞者紹介

SAE International Journal of Advances and Current Practices in Mobility 掲載

VC-TURBO エンジンに対応したステンレス溶射ボアの開発 平山 勇人・星川 裕聡・熨斗 良次 63
寺田 大輔

第 71 回 自動車技術会賞 論文賞 (2021 年)

乗員の快適性を向上させる車両運動の探求 牧田 光弘・松下 晃洋・草柳 佳紀 65
三浦 雅博

第 72 回 自動車技術会賞 論文賞 (2022 年)

機械学習を用いた自動車空力性能を予測するためのサロゲートモデル開発 赤坂 啓・陳 放歌・寺口 剛仁 75

第 72 回 自動車技術会賞 論文賞 (2022 年)

微小操舵角域のライントレースのバラツキを低減するピッチ特性に関する研究 田尾 光規・町田 直也・林 豊 83

The 28th International Display Workshops (IDW) Best Paper Award (2021 年)

Optically Switchable Transparent Liquid Crystal Display (光駆動型透明液晶ディスプレイ)

太田 最実・鍋谷 俊太・上久保 真紀 91
小原 朋也・前橋 良太・佐藤 文紀



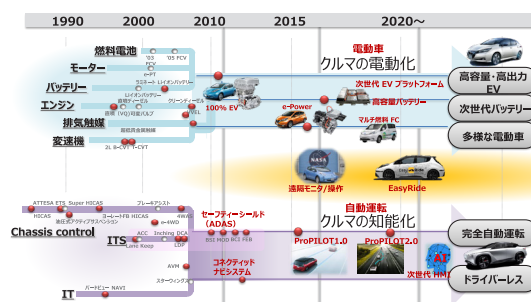
先進技術を 製品として仕上げる技術とプロセス

常務執行役員 安徳 光郎

1. はじめに

日産自動車は、そのDNAである「他のやらぬことをやる」の精神で、「技術の日産」の名のとおり技術により価値を創造してお客様に製品やサービスとして届けています。

どんな先進技術も、製品として多くのお客様に喜んで使っていただき、更には地球温暖化や交通事故といった社会の課題解決にも貢献しないと意味がありません。そうした価値を提供するために必要な先進技術は、どのようにして生まれ、育てられて製品に適用されていくのかについて解説していきます。



日産自動車の技術開発の進展

2. 技術ロードマップ

日産自動車では、将来に向けたビジョンを実現するために必要な技術ロードマップを過去から作成しそれに基づき研究、先行開発を実行しています。

技術ロードマップは、将来の魅力ある商品やサービスとして提供していくべきお客様価値を考え抜いて作成しています。また、社会の要求や動向もとらえて、それらから生まれる課題に対する解決策を実現していくために必要となる技術開発についてもこのロードマップに織り込んでいきます。

新しい技術を確認するまでには、多くの場合非常に長い期間を要します。従って、この長期的な技術戦略であるロードマップが非常に重要となります。

この技術ロードマップは、社会動向の変化やお客様の価値観や行動の変化、また技術自体の進化・革新を確認しながら、更新していくことも重要なことです。

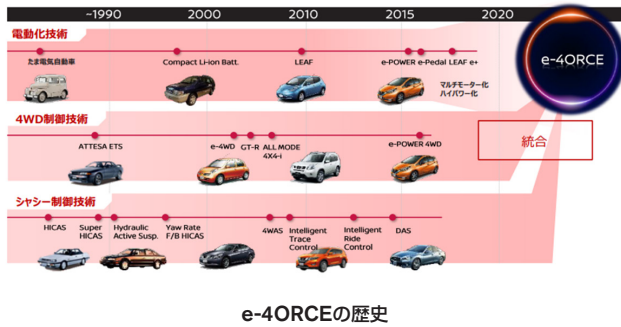
電動化・知能化技術ロードマップを例として示します。

3. 研究開発～先行開発

新しい技術を確認するには、基礎となる研究開発から実用化するための先行開発をStep by Stepで実行していきます。いくつかの技術要素の研究や先行開発を完了させた後に、それらの組み合わせることにより実現できる技術もあります。従って、一部の先行技術開発が終わってもすぐには製品への適用ができない場合も出てきます。そのような場合においても、当初描いたロードマップを実現するために粘り強く技術開発を進めていくことが重要です。

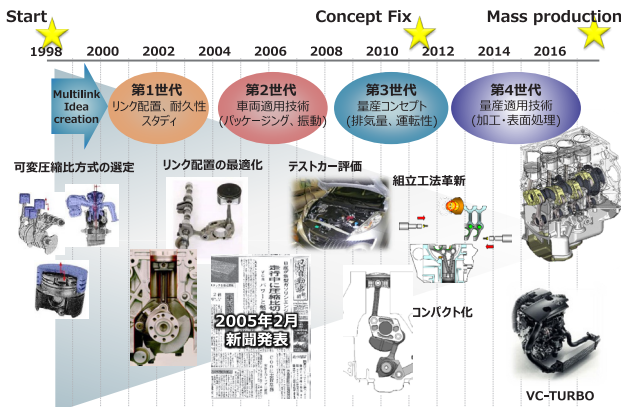
例えば、1990年以前から他社に先んじてスタートしたモーターやバッテリーの研究開発の結果は、その20年後の2010年に量産初のEV日産リーフという製品として結実し、更には、2017年にe-POWERという日産自動車独自の電動化システムとして多くのお客様に新たな価値を提供することになりました。

また、1990年代のATTESA ETSやHICASという当時最先端の4WDおよびシャシ制御技術は年々進化を続けながら、電動化との統合制御技術として生まれたのがe-4ORCEという技術です。e-4ORCEは、前後モーター駆動AWDとシャシシステムを緻密に統合制御することにより、あらゆる走行シーンにおいて運転の操作のしやすさ、快適性、安心感を高い次元で実現したものです。



e-4ORCEの歴史

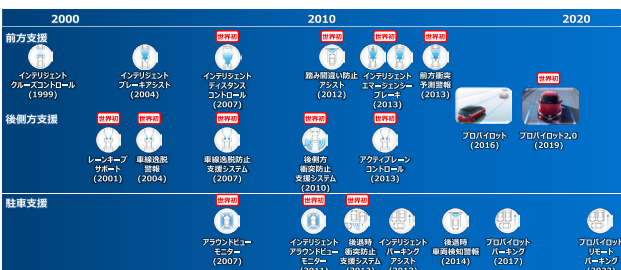
可変圧縮比による高出力、高燃費を実現した日産自動車独自のVCターボエンジンは、その着想から実現までには18年もの歳月を要しました。基礎的な構造検討から製造技術の先行開発も含めStep by Stepで技術者たちの執念と努力で実現したすばらしい成果です。



Variable Compression Ratio 開発の歴史

運転支援技術ProPILOTは、20年以上前から、その基礎となる要素技術開発と個別の技術適用により、多くの世界初となる技術を製品化しながら市場での実績と経験を積むことを経て、その集大成したものとして製品化したものであります。

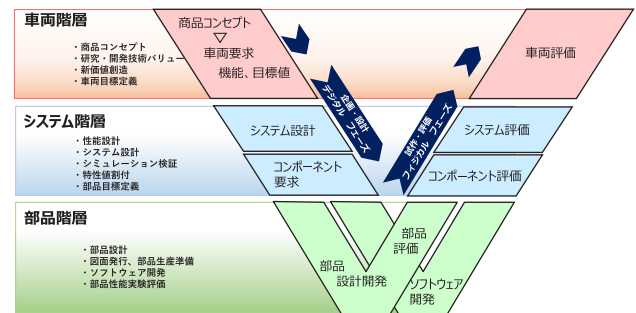
■ 90年代から技術開発に取り組み、数多くの世界初の技術を投入



運転支援技術の進化

4. 製品への適用開発

製品開発にあたっては、まずその商品をどのような特徴（コンセプト）の商品にするかを決めることからスタートします。どの地域のどのようなお客様に使っていただくのか？そのお客様は、どんな価値を求めているのか？等々、市場の調査を十分に行い商品コンセプトを固めていきます。並行して、既存の技術に加えて、長年かけて研究・先行開発してきた技術も組み合わせながら、そのお客様にとっての新たな価値を創造していく検討を行います。それらの価値を、商品として一貫性をもった特徴とすべく全体としてコーディネートすることにより、魅力的な商品コンセプトへと引き上げられます。これは開発・企画・デザイン・M&Sとのチーム活動であり、この過程で商品としての性格を決めていきます。



製品開発の流れ

次に商品コンセプトを実現するための機能・目標性能を定義し、適用する技術やその組み合わせを決定していきます。その中には、先進技術もありますが、製品に適用開発する際には、その機能・性能を新しい価値として磨き上げるだけでなく、お客様がいかなる時にも安心・快適に使用でき、わかりやすく扱いやすい商品に仕上げるために検討に検討を重ねます。色々な使われ方を想定し、達成すべき機能や性能を新たに検討することもこの段階で必要となります。

車両としての機能や目標性能が定義されるとそれを達成するための詳細なシステム・部品設計に入ります。複雑なシステムにおいて車両目標を達成するためには、システムや部品へ性能目標を割付けて、それぞれの達成度を検証する必要があります。いわゆる性能設計にあたりますが、製品適用開発の重要なプロセスであり、技術となっています。このプロセスの中で大きな役割を果たすのが、システムや部品レベルの実験とシミュレーション技術です。本技報でも特集しているように昨今の実験とシミュレーション技術向上は、設計段階での要素・システムの評価を可能として設計保証度を上げることに大きく貢献しています。また、車両レベルの実の事象を、リアルタ

イムでサイバー空間上に再現するデジタル技術を用いた解析にも注力しています。VR技術を用いて、開発設計段階で実験計測に基づく事象を事前に再現し検証しています。サイバー空間上で実寸大の評価をすることも可能です。例えば運転操作や視界評価などの運転性評価では、設計情報の再現に加え、車外環境として外部360度且つ走行距離分の遠方までサイバー再現しておく、運転等ドライバーの所作に連動した視界再現でVR体験でき、走行中の運転性評価が可能になりました。ミラーの視野や運転操作スイッチ等の使い易さ・見易さなどの評価精度が上がっています。

上記のようなステップを踏んでシステムや部品の設計が完了すると車両を試作して、実験検証に移行します。部品、システム、車両、それぞれのレベルでの機能、性能保証を実験検証するプロセスです。

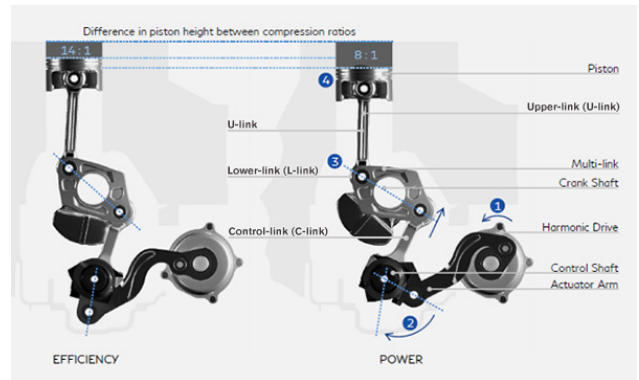
昨今の実験とシミュレーション技術の向上により、フィジカルな実験検証も効率的に行えるようになってきました。実験技術にシミュレーション技術を融合することで、短期間で的確な製品の開発評価が可能となりました。特に複雑なシステムにおいては、この技術はなくてはならないものになっています。

開発での効率的な検証と並行して、生産技術、工場、サプライヤともデータを共有しながら、量産品質、生産技術、工場製造、サプライヤの協力を得ながら、量産品質保証のための検討、確認も丁寧に実施して品質が造り込まれていきます。

本技報のもう一つの特集である新型エクストレイルにおける先進技術の適用開発の例を以下に示します。

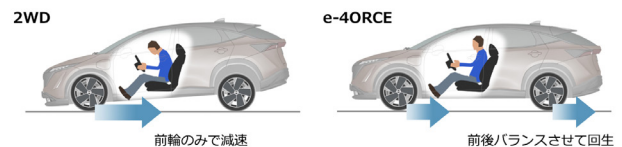
e-POWER用VCターボエンジンの採用にあたっては、低燃費と高出力の両立に加えて、高い静粛性と加速時の心地よい音(リニアフィール)を目指しました。

このVCターボエンジンは、圧縮比が自由に变化させられることから、適合すべき定数が従来エンジンに比べて2.8倍程度あります。それらは、外気温度・標高・道路の負荷などの外部環境や、車速・加速度・アクセル開度などの運転状況に応じて適合するのですが、その際には、バッテリーの充電状況・燃費・排気・熱マネジメント・更にはエンジンサウンドや静粛性も確認しながらきめ細かく実施する必要がありました。検討すべき走行条件の組合せは膨大なため、モデルベースのツール開発によるシミュレーション、台上評価、実車評価の融合によって、適合すべき多くの定数を効率よく定めることができました。



VCターボエンジン

e-4ORCEがもたらす価値の一つである「フラットライド」は、ドライビングシミュレータを広く活用しています。「フラットライド」は従来との比較では目標設定ができないため、ドライビングシミュレータを活用し、車両加減速やピッチングモーションに由来する"人の感じ方"を分析して目標設定しました。また、目標に沿った設計で狙い通りの感じ方を提供できるのかも、ドライビングシミュレータによって実車両製造前に確認しました。



e-4ORCEがもたらすフラットライド

ProPILOTの製品化においては、走行する道路環境、交通状況、走行条件など、さまざまな要件を考慮する必要があります。個々の部品評価やシステム評価、ドライビングシミュレータやテストコースでの実車評価に加え、実際の市場環境で狙い通りの性能を達成しているかについて数万km以上の公道走行評価を積み重ねて機能・性能保証し、実用化しました。また、機能限界を超えたような外部環境に遭遇した場合や、万が一部品に不具合が発生した場合においても安全にお客様に使っていただけるようなフェイルセーフ設計開発も製品化において重要な技術開発の一部です。

更に新型エクストレイルへのProPILOT適用に当たっては、お客様にとってより一層わかりやすく安心安全に使っていただくために表示や操作性向上に徹底的にこだわって開発しました。このようなHMIの最適化には、多様な体格、年代、運転経験の人にとって使いやすさを評価するためのドライビングシミュレータは、欠かせない技術です。

このように研究、先行開発した技術を、製品へと適用する開発プロセスを経て、初めてお客様に安心して喜んで使用い

ただける製品にするのです。

更に、一度製品として世に出した後にも、それで終わりではなく、お客様の満足度を更に高めていただくために、技術を進歩させ、次の世代の進化を目指して開発を続けてきています。

5. まとめ

先進技術は技術ロードマップにもとづく研究開発、先行開発の実行、そして製品への適用開発を経て、商品としてお客様へ届けられます。また確立された技術を組み合わせることや磨き上げることにより新しい価値、より高い価値を製品化して商品の競争力を高めることも同時に行われています。

本技報で特集されている新型エクストレイルで搭載された先進技術がどのようにして生まれ製品化してきたかを解説してきました。また、もう一つの特集である実験技術は、新型エクストレイルのような製品化プロセスにおいて重要な役割を果たしています。このような実験技術自体も研究開発や先行開発を経て実際に使えるようになるものもあります。

先進技術の製品化適用までの期間をより短縮するために、製品開発を想定した場合に課題となりうることをより早くアセスメントして、先行開発の中でそのソリューションを確立する活動やプロセスを実行し始めています。日産自動車は、「技術の日産」を製品として具現化するために、挑戦を続けていきます。

特集1：「タフギア」×「上質」新型エクストレイル

1. 進化した本格SUV 新型エクストレイル e-4ORCE

山本 哲也*

1. はじめに

SUVセグメントは2021年世界販売台数が3,500万台を超え、車型シェア45.9%と最も販売されている車型である(図1) 一方、各自動車メーカーから次々と新型車が投入され、より一層競争が激しくなっている。

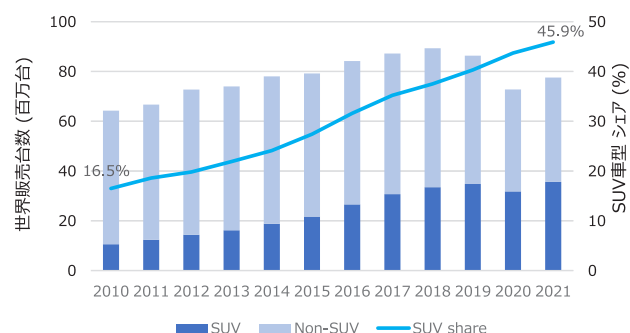


図1 SUVの世界販売台数と車型シェア

日産自動車はカーボンニュートラルを目指して電動化を推進しており、独自技術であるe-POWERを新型エクストレイルにも搭載することで、世界中のお客様に高い環境性能はもとより、100%モータードライブの楽しさ・快適さを提供する、これまでの常識を変えるSUV開発に挑んだ。



図2 新型エクストレイルe-4ORCE

2. 新型エクストレイルの進化

エクストレイルは、ミドルクラスSUVの先駆けとなった初代モデル以降、本格SUVならではの力強い走りや利便性の高い装備に加え、各モデルとも時代の先駆けとなる先進技術を搭載することで進化し、世界中のお客様に様々な環境、路面、速度域で走り続けてきた。

4代目となる新型エクストレイルは、進化した第2世代「e-POWER」×「VCターボ」、そして電動駆動4輪制御技術「e-4ORCE」を搭載することで、初代モデルから継承する「タフギア」としての悪路走破性をさらに進化させるとともに、オンロードでもこれまでのSUVにはない「上質さ」を感じるレベルの静粛性や乗心地を目指した。



図3 エクストレイルのヘリテージと進化

オフロードや雪道の走破性は、力強さとともに安心感を与える。例えば、図4に示すような20%勾配のダート登坂発進では、タイヤが空転することなく瞬時にリアに高トルクをかけることで、旧型に対し約1.7倍の車速上昇で走り切る。

*Nissan 第二製品開発部

また、各4輪のグリップ限界を算出しながら駆動力、回生制動力を1/10,000秒単位で緻密にコントロールしているため、スリップしやすい雪道の下り坂などにおいても、アクセル操作で不安なく走行することができる。

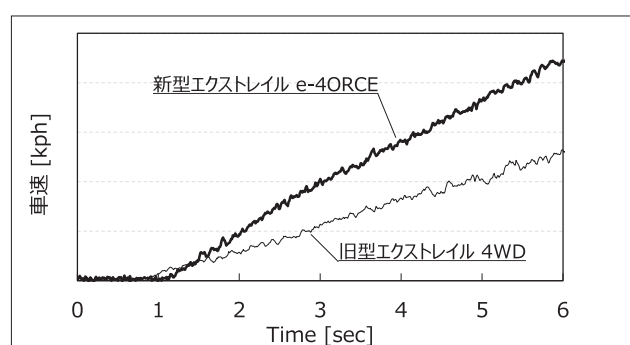
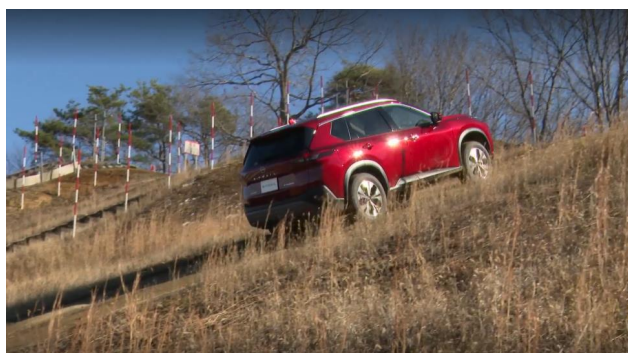
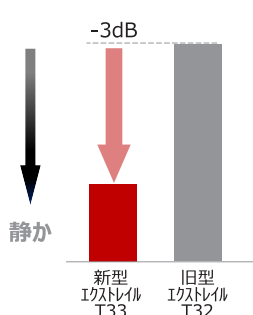


図4 ダート登坂発進性能(20%勾配)

そしてさらに、格段に向上した静粛性や乗心地によって「上質さ」も感じていただける。市街地など低速走行時はEV走行し、発電時にもエンジンがかかっていることに気づかないレベルの静粛性を実現している(図5)。

巡航走行時の室内音
(50km/h)



加速時の会話のしやすさ
(全開加速)

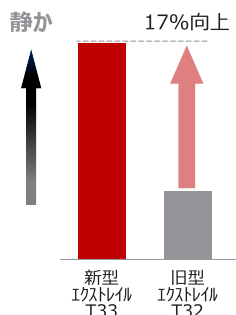


図5 静粛性

また、サスペンション形式の刷新に加え、e-4ORCEのピッチングコントロールにより、減速時のクルマの沈み込みや揺れを抑え、街中や渋滞走行時の発進と停止を繰り返すようなシーンにおいても、前後の揺れを感じる事が少なくなり、運転席

のみならず助手席や後席でも快適で上質な乗り心地を実現している。

以下、新型エクストレイルの「タフギア」×「上質」を可能にした技術革新について、次章からの詳細な説明に先立ち、概説する。

3. 力強さと高い静粛性「e-POWER」×「VCターボ」

新型エクストレイルは前後に高出力モーターを配置し、発電用エンジンには日産が世界で初めて量産化に成功した可変圧縮比エンジン「VCターボ」を採用すること(図6)で、力強い加速と低燃費、加えて驚異的に静粛性が向上している。

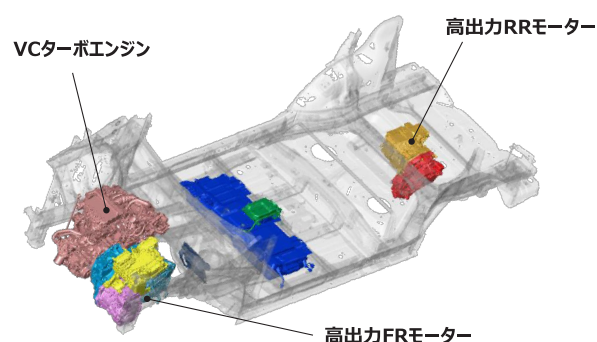


図6 第2世代e-POWER x VCターボ

3.1 第2世代e-POWER

新型エクストレイルに搭載した第2世代e-POWERは、フロントモーター：150kW/330N・m、リアモーター：100kW/195N・mと高出力/高トルクで、世界の速度域の高い道路やオフロードでも、レスポンスのよい、力強い加速を可能にする一方、通常走行ではe-POWERが頻繁に使用する領域に合わせて最良のエネルギー効率とすることで低燃費を実現している。

また、市街地など低速走行時は極力エンジンを始動せず、必要な場合にも低回転で効率よく発電する緻密なエネルギーマネジメントを行う。また、路面検知によりロードノイズが大きい時にエンジンを始動する制御技術も採用することで、通常走行時にはEV並みの静粛性を手に入れることができた。

3.2 e-POWER用VCターボエンジン

従来のe-POWERでは、エンジンで高出力を出そうとすると高回転でエンジンを回す必要があった。これに対してVCターボは、大幅なトルク/出力向上によりエンジンの低回転化を可能にした。加えて、低燃費を求めるシーンでは圧縮比を上げて高効率で発電し、エンジンの高出力を求めるシーンでは圧縮比を下げ、過給圧を上げて発電する(図7)。この結果、低燃費、高出力、静粛性を高い次元で達成し、高出力モーターに余裕ある電力を供給する。

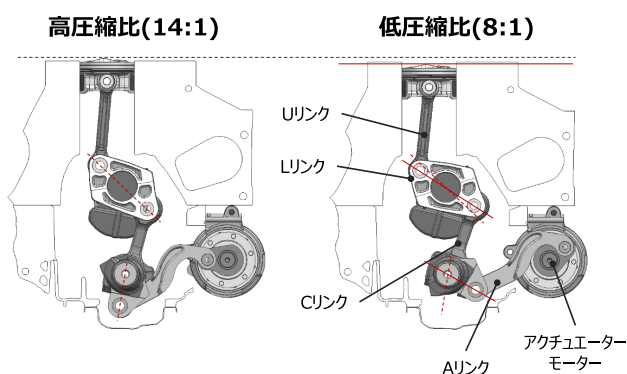


図7 e-POWER用VCターボエンジン



図8 e-4ORCE

3.3 進化したe-Pedal Step

アクセルペダルだけで車速を自在にコントロールできるe-Pedal Stepは、e-POWER車で初めてモーター回生ブレーキと油圧ブレーキの統合制御を採用し、最大0.2Gの安定した減速度を実現している。これにより状況に応じて自動的に油圧ブレーキを作動させることで、加減速を繰り返す市街地走行はもとより、長い下り坂や滑りやすい雪道など、幅広いシーンで安心、快適な運転を可能にした。

4. 4WDの概念を変える「e-4ORCE」

日産の電動化技術と4WD制御技術、シャシー制御技術を統合した、電動駆動4輪制御技術「e-4ORCE」を新たに搭載した。前後2基の高出力モーター、左右のブレーキを統合制御することで、4輪の駆動力をそれぞれ最適化し、雪道や山道の走破性に力を発揮するとともに、市街地走行などの日常使いなど、あらゆるシーンや路面状況においてワクワクした走り、そして乗る人すべてに快適な乗り心地を提供している。

〈e-4ORCEがもたらす価値〉

- ・ドライバーの意のままの走り：路面と車両状況を瞬時に判断し、タイヤの摩擦力を最大限使い切れるように前後モーターの駆動力やブレーキをきめ細かく制御することで、最小限のステアリング操作で思い通りのコーナリングを実現している。
- ・路面を問わない安心感：オフロードや雪道でも常に最適なトラクションを確保することで、タイヤのスリップやスタックを回避し、スムーズな発進・走行を可能にしている。
- ・乗る人すべてに快適な乗り心地：市街地走行における減速時において、前後のモーターそれぞれで回生量を調整し、車体の挙動を安定させることで、乗員の頭の前後の揺れを軽減する。
- ・力強く滑らかな走り：高出力モーターがアクセルの踏み込み素早く応答し、伸びのある加速を実現。高速道路での合流もスムーズに行える。

5. 高い走行性能を支える高剛性ボディ・シャシー

新型エクストレイルはプラットフォームも刷新し、高い操縦安定性、乗心地、静粛性を目指した。

ボディは高張力鋼板の使用率を42%まで高め、センタートンネルや分割のないクロスフレーム構造を採用すること（図9）で、質量増加を抑制しつつ、車体のねじり剛性を44%向上した。これにより、安全性能や、操縦安定性、乗心地、静粛性などダイナミックパフォーマンスの大幅向上に貢献している。

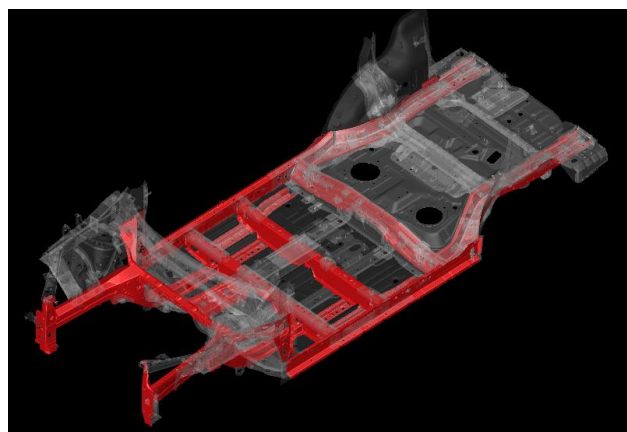


図9 プラットフォームボディ

リアサスペンションは、上位セグメントで培ってきた技術で新設計したマルチリンク式を採用することで、スタビリティを向上するとともに、それとの両立が困難なインパクトショックを30%低減するなど乗心地も向上した。これに高剛性でクイックなギア比のラック式電動パワーステアリングを組み合わせることで、応答性が高く、修正操舵の少ないハンドリングを実現している。この日産の目指すドライビングプレジャー、爽快で自信を高めるドライビングを感じていただきたい。

6. 先進的で上質な室内空間

新型エクストレイルのインテリアは、タフさと上質な心地よさを兼ね備えたデザインを目指した(図10)。コンソール部分を宙に浮かせたブリッジ構造のセンターコンソールにはラージサイズのカップホルダーを用意し、コンソール下にはティッシュボックスやひざ掛けなどが収納でき、アームレストも兼ねるコンソールリッドは後席からも収納物が取り出しやすい観音開きを採用している。



図10 コックピット

また、新開発したシート素材「TailorFit™(テーラーフィット)」(図11)は、表面に施された紋間隔を指紋に近づけることでなめらかさを向上し、トップコートに粒子を追加することで安定した摩擦力でしっとりした肌触りを実現、ソフトレザー並みの高触感を達成している。

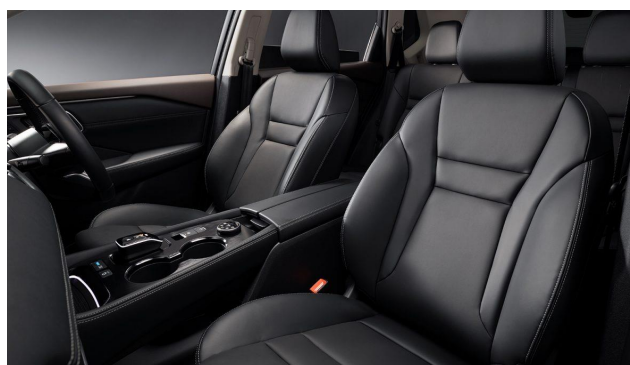


図11 新シート素材「TailorFit™」

メーターには2種類の表示モードを選択できる12.3インチのアドバンスドドライブアシストディスプレイを採用、さらに10.8インチの大型ヘッドアップディスプレイを搭載し、わかりやすく、運転中、視線移動の小さな情報表示を行う(図12)。

センターディスプレイに採用されている12.3インチのNissanConnectナビゲーションシステムは、自然な言葉で操作できるボイスアシスタントやAmazon Alexaを搭載することで、多彩なサービスを提供しつつ、安全で利便性の高いHMIを実現している。



図12 ヘッドアップディスプレイ

ラゲッジスペースは、荷室の幅、開口幅を広げることで、荷物の積み下ろしが容易となり、クラストップレベルの広さを実現している。また、アウトドアや災害時等の非常用電源として使用いただける100V AC電源(1500W)を装備している(図13)。



図13 ラゲッジ、100V AC電源

7. まとめ

新型エクストレイルは、革新的なパワートレイン、車両技術により、力強く、滑らかで、EV並みの静粛性を実現し、これまでの常識を超えるミドルクラスSUVとなった。

またe-4ORCEにより、市街地やワインディングは意のままに快適に、また雪道やオフロードなど悪路さえ悠々と、安心して走破する、卓越した走行性能を実現している。

なお、この章で触れたいくつかの技術革新の詳細について、以下の章で取り上げているのでご参照いただきたい。

ぜひ「タフギア」×「上質」を両立した新型エクストレイルに乗って、体感いただき、開発者の想いやこだわりを感じていただければ幸いである。

著者



山本 哲也

特集1：「タフギア」×「上質」新型エクストレイル

2. 「VCターボ」×「e-POWER」システム

吉田 直弘* 長谷川 潤* 高岡 正毅*

1. はじめに

新型エクストレイル開発コンセプトである「タフギア」と「上質さ」を満足するためにe-POWERシステムを新規開発し初めてエクストレイルに搭載した。本章では新規開発e-POWERシステムの開発の狙い、概要、システム設計について解説する。

2. e-POWERシステム概要とラインナップ

100%エンジンで発電し、100%モータで走行するe-POWERシステムのパワートレインシステム図1を示す。

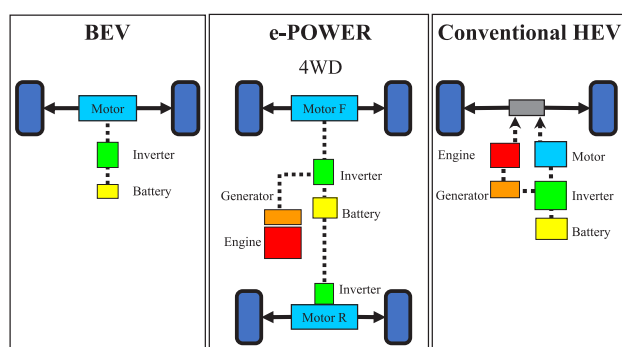


図1 e-POWER system configuration

e-POWERシステムは、100%モータ駆動ならではの低回転で最大トルクを発生し変速機構を持たない特徴を活かし、リーフで培った日産独自のモータ制御技術を用いることで、アクセルの踏み込みに対しレスポンス良くスムーズな加速を実現している。これはe-POWERシステムの最大の特長となっている。また、エンジンが車輪軸の駆動系とは独立して制御できるため、エンジン始動・停止タイミングを車両走行パターンと切り離して設定可能である。エンジン始動時にはエンジン定点運転を基本とすることでエネルギー効率を高め、高い燃費性能が実現可能となる。

2016年に日本市場にて第1世代e-POWERシステムを国内

向けコンパクトカーに初搭載した。その後2018年に国内向けミニバン、小型SUVと搭載車種を拡大した。

2020年には第2世代e-POWERシステムを新型コンパクトカーに搭載し、e-POWERの最大の特徴である力強さ、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、インバータ、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、燃費の向上も実現した。図2にe-POWERラインナップを示す。

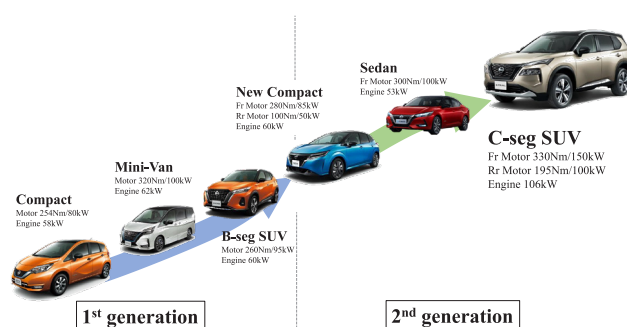


図2 Line-up of e-POWER

3. エクストレイル専用e-POWERシステムの狙い

新規開発e-POWERシステムは、システムの特徴である静粛性、スムーズな加速性能、燃費性能を向上し、今回初めてグローバルに展開するCセグメントSUV用パワートレインとして開発した。

近年の自動車市場ではCセグメントSUVの需要は急拡大し、お客様の要求値も高まっている。高い要求値を満足するため、EV-nessに関わる静粛性、加速性能をクラストップレベルで実現しながら、燃費性能を両立させる事、またグローバル展開に対し、新たに追加となるトイニング要求や高速走行要求等にも対応する事を狙いとした。

図3に新規開発e-POWERシステムの外観図を、表1に主な仕様を示す。既存の第2世代e-POWERシステムをベース

* パワートレイン・EV プロジェクトマネジメント部

に駆動モータを大型化し、発電専用エンジンも自然吸気1.2Lから過給機付き1.5Lエンジンに排気量UPし、可変圧縮比機構を備えたVC-ターボエンジンを採用した。また、ラインナップに4WDも加えた。

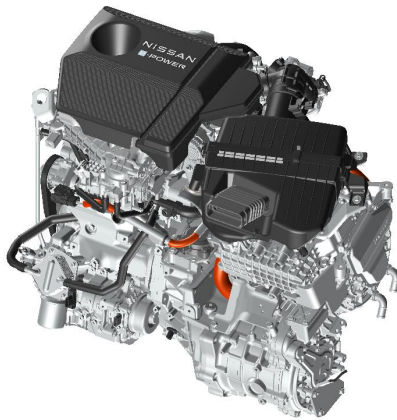


図3 New e-POWER system

表1 Specifications of the new e-POWER system

		Compact(2 nd gen.)	C-seg SUV
Drive system	Fr Motor power	100 kW	150 kW
	Rr Motor power	50 kW	100 kW
Generating system	Generator Power	60 kW	116 kW
	Engine type	Gasoline L3 NA	Gasoline L3 Turbo
	Engine displacement	1.2L	1.5 L
Battery	Type	Li-ion	Li-ion

4. エクストレイル専用e-POWERシステム概要

e-POWERシステムの場合、エンジンは定点運転を基本とする為、定点運転時の燃費率が車両燃費性能に与える影響が大きい。定点運転時の燃費効率を維持したまま高出力化するには、燃費性能と出力性能のトレードオフ関係を解消する必要がある。本システムではVC-ターボエンジンを採用する事で、定点運転時の圧縮比を高く設定して高燃費率を維持しながら、出力点では圧縮比を低く設定する事で高出力化を実現した。図4にVC-ターボエンジンの圧縮比マップおよびエンジン動作点頻度を示す。なおVC-ターボエンジンの詳細は次の章で説明する。

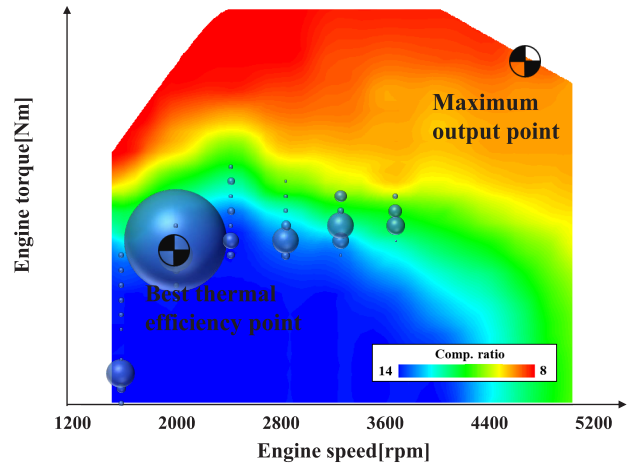


図4 VC-TURBO compression map

エキゾーストシステムは、エンジン回転1500rpm以下を使用しないe-POWERシステム固有のエンジン動作点に特化した専用開発を行い、リヤマフラー内のチューブを往復させて共鳴を低周波化しエキゾースト音を低減するとともに、最適なバイパス経路を設定しエンジン出力確保のための低排圧も同時に実現した。

ブレーキシステムは、e-POWERでは初めて電動型制御ブレーキユニットを搭載し、e-POWERシステムとの協調制御により静粛性を向上した。従来e-POWERシステムの場合、ブレーキ時に負圧生成目的でエンジン始動させる必要があったが、電動ブレーキ化によって、エンジンによる負圧生成が不要となり始動頻度を低減した。また、下り坂走行時、従来e-POWERシステムは回生により減速Gを発生させているが、満充電になった後は、エンジンを高回転で回し回生エネルギーを放電しながら減速Gを確保する必要があった。新型エクストレイルでは電動型制御ブレーキユニット搭載により、満充電後の回生を停止し、電動ブレーキにより減速Gを確保することでエンジン回転上昇を抑え静粛性を向上した。

5. 圧倒的に優れた性能

エクストレイル専用e-POWERシステムが生み出す圧倒的に優れた静粛性、加速性能・運転性、燃費・排気性能について述べる。

5.1 静粛性

5.1.1 エンジン作動頻度

CセグメントSUVはコンパクトカーに比べ車両重量が大きい。ため、発進加速時等で要求されるエネルギーはコンパクトカーに対して大きい。このため、従来のエネルギーマネジメント制御を適用すると、エンジン作動領域が拡大、エンジン始動頻度が増加し、EV-nessを損なうこととなる。

新規開発e-POWERシステムでは、ドライバーがエンジン始動時の騒音を感じ難い静かな走行フィーリングを実現するために、ドライバーがエンジン騒音を感じる領域を定義し、可能な限りこの領域ではエンジンが始動しないようにした。

図5に今回定義したエンジン作動領域を示す。車室内の騒音レベルを評価し、車外で発生するロードノイズよりエンジン騒音が大きくなる低車速域ではエンジン始動頻度を減少させ、また、エンジン騒音がロードノイズより小となる高車速域でのエンジン始動頻度を増加させた。

図6に実用走行パターンにおける車速ごとのエンジン始動回数を示す。全車速域でエンジン始動回数を低減した第2世代コンパクトカーと比べ、20-40km/h領域の始動頻度を低減し、40-60km/h領域での始動頻度を増加させた。これより発電エネルギーを増加しながら静粛性を向上する事ができた。

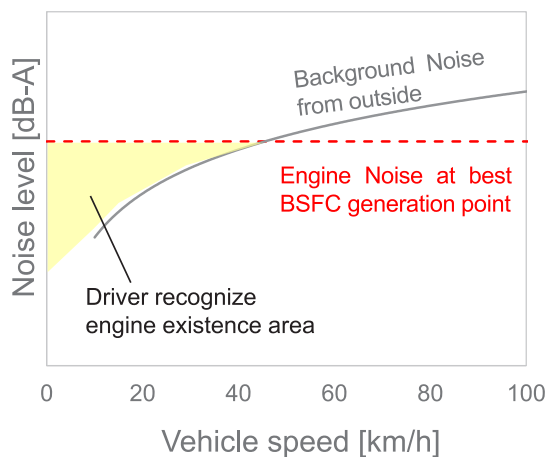


図5 Relationship between background noise and engine noise

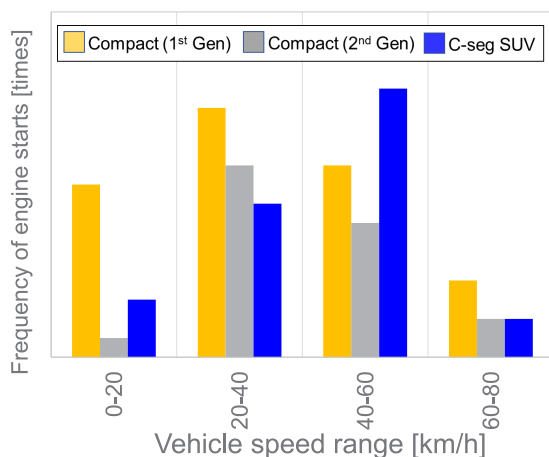


図6 Comparison of engine startup frequency

また、車速やバッテリーSOC、要求駆動力などの諸条件によりエンジン始動・停止を行うが、発電を開始した際、発電1回当たりの充電エネルギー量を増加させることで、1回の走行

におけるエンジン始動回数を大幅に低下させた。図7にWLTCモードにおけるエンジン作動時間を示す。エンジン始動回数を大幅に減少させることができ、静粛性を向上させるとともに、燃費性能向上にも貢献した。

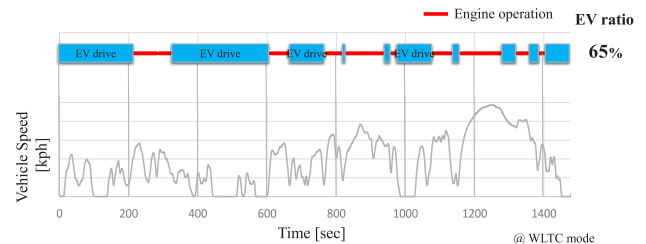


図7 Engine operation time

5.1.2 エンジン低回転化

新規開発e-POWERシステムと組み合わせるVC-ターボエンジンは従来の自然吸気エンジンに比べ低回転で高トルクを発生することが可能である。この特性により、自然吸気エンジンに対し、より低いエンジン回転数で等出力を発生させ、エンジン定点運転時の回転数を低下させることを可能にした。図8に車速ごとの定点運転時のエンジン回転数を示す。第2世代コンパクトカーと比較し、暗騒音の低い低車速領域から高車速領域まで、エンジン回転数を低下させることが可能となっている。これにより、エンジン作動時においても、エンジン騒音レベルを低下した。

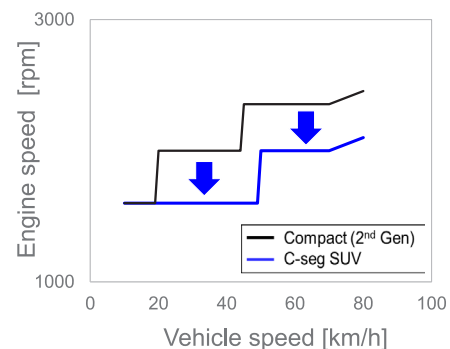


図8 Engine speed of fixed-point operation

5.2 加速性能・運転性

5.2.1 加速性能

新規開発e-POWERシステムの新型モータによる高駆動力と、VC-ターボエンジンによる高出力の発電により、クラストップレベルの加速性能を実現した。

図9に従来型HEVシステムとの発進加速時のGおよび車速のプロフィール比較を示す。100%モータ駆動特性を生かし発進加速直後に素早く加速Gを立ち上げ高レスポンスを実現した。また、加速G立ち上がり後も、加速の伸び感を演出するため高Gを持続させた。

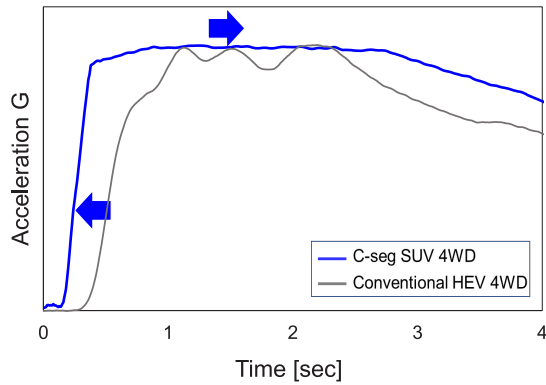


図9 Acceleration G at standing start

5.2.2 過給エンジン特性に合わせた駆動トルク制御

一般的に過給エンジンは自然吸気エンジンに対し、トルクの立ち上がり時に過給応答遅れを伴う。新規開発e-POWERシステムではこの特性を踏まえ、スムーズで過給圧の盛り上がり感を演出しながら加速するため駆動トルクを制御する技術を開発した。

図10に加速時の供給エネルギーと発生駆動トルクの関係を示す。加速直後は、バッテリーのエネルギーを用いてレスポンス良く駆動トルクを発生する。同時にエンジンを始動し、エンジン始動後はバッテリーのエネルギーにエンジンの発電エネルギーを加え駆動トルクを上昇させる。

この際、過給応答遅れによりエンジン発電エネルギーの供給が遅れるが、この遅れに伴って駆動トルクを一時的に落ち込ませず滑らかに上昇させるように駆動トルクを制御した(a)。また、エンジン過給開始後は、十分な発電エネルギーを供給する事が可能となる為、ドライバーの加速要求に応じて駆動力を変更した(b)。これにより、自然吸気エンジンとの組み合わせに対し、アクセル操作に対し違和感のないスムーズで過給圧の盛り上がり感を演出しながら、力強い加速を実現した。

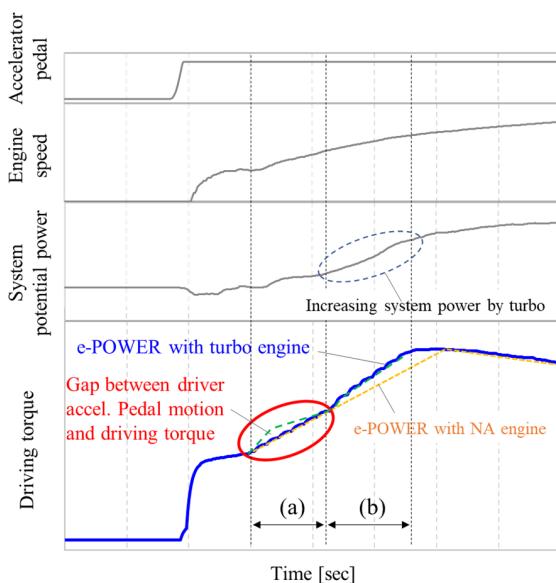


図10 Time chart of Driving torque

5.2.3 エンジン音による加速感の向上

ドライバーは、加速時に加速Gだけではなく、エンジン音からも加速感を得るため、発電中のエンジン音により気持ちの良い加速感を得る技術開発を行った。

e-POWERシステムは、エンジンと車輪軸の駆動系を独立して制御できるため、加速時のエンジン回転数を自由に設定できる。また、VC-ターボエンジンにより低回転域でも十分なエンジントルクを発生可能である。この2つの特性を活用し、ドライバーの加速要求が強い場合(アクセル踏み込み量が多い場合)でも、エンジン回転数をすぐに上昇させるのではなく、車速に連動して上昇させた。

車速と連動したエンジン回転数の設定に当たり、ドライバーの加速要求に対するエンジン音(回転数)の関係を、官能評価にて以下2つの領域に定義した。

- ①車速に対しエンジン音(回転数)が高い領域
 - ②車速とエンジン音(回転数)が同調する領域
- 上記①～②の領域を図11に示す。

①の領域では車速の上昇よりエンジン音(回転数)が先行して上昇し違和感をえるのに対し、②の領域では車速とエンジン音(回転数)が連動して上昇し、加速要求に合った加速感を得る。これよりドライバーの加速要求が強い場合、②の領域を用いる設定とした。

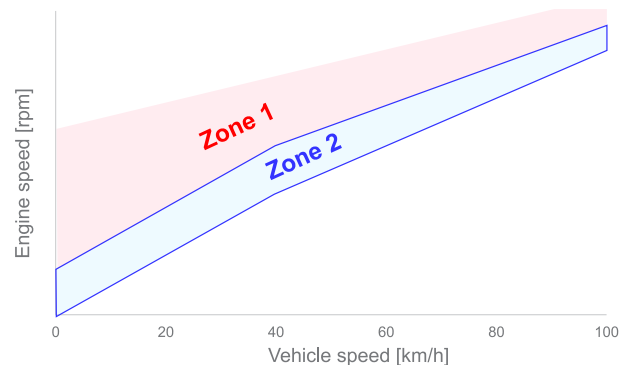


図11 Zone definition of engine sound

5.3 燃費・排気性能

e-POWERシステムではエンジンと駆動軸が機械的に連結していないため、エンジン作動タイミングと始動後の運転点を自由に選択できる。この特徴を生かすことで燃費性能および排気性能を大幅に改善させた。

5.1.1で述べたエンジン作動頻度の低減に加え、VCターボエンジンによるエンジン最良燃費点の改善(BSFC 217g/kWh@ 2000rpm)の結果、WLTCモードにおいて4WD: 18.4 km/L、2WD: 19.7km/Lのクラストップレベルの燃費性能を達成した。また、排気性能においても、平成30年基準排出ガス75%低減レベルを達成した。

6. ま と め

新型エクストレイル用e-POWERシステム開発にて、以下の技術開発を行った。

静粛性)

VC-ターボエンジンの特性を活かし、発電時のエンジン回転数を下げつつ、エンジン作動頻度やタイミングを最適に制御

加速性能)

高トルク・高出力を発生する新開発モータの採用と、それを活かすクイックなレスポンスと高Gが持続する駆動制御

加速感)

ドライバーの加速要求と車速に応じたエンジンサウンドを作り出すエンジン回転数制御

燃費、排気性能)

エンジン作動頻度の最適化と、エンジン最良燃費点での発電制御

これらにより、Cセグメント SUV トップクラスの静粛性、動力・運転性、燃費、排気性能を実現した。

参 考 文 献

- (1) Akihiro Shibuya, Naoki Nakada, Makoto Kimura :
Development of a Brand New Hybrid Powertrain
for Compact Car Market (2016)
- (2) 渋谷 彰弘 ほか：電気駆動の魅力の拡散 日産技報
No.87 (2021)
- (3) 仲田 直樹：システムの特徴と今後の発展 日産技報
No.87 (2021)

著者



吉田 直弘



長谷川 潤



高岡 正毅

特集1：「タフギア」×「上質」新型エクストレイル

3. e-POWER用エンジンの進化

荻野 和宏* 土屋 順久* 水野 秀昭** 坂井 雄紀** 阿部 泰英***

1. はじめに

新型エクストレイルe-POWER搭載に向け、e-POWERの魅力である力強い加速と静粛性、低燃費性能を高い次元で達成するため、2018年 日産自動車が世界で初めて量産エンジンに採用した可変圧縮比(VCR)機構と、新たにLow Pressure Cooled EGR(以下、LP-EGR)を組み合わせた1.5Lターボエンジンをe-POWER用に開発した。本章では新型エクストレイル搭載の新型KR15DDTエンジンの概要と主要技術について紹介する。

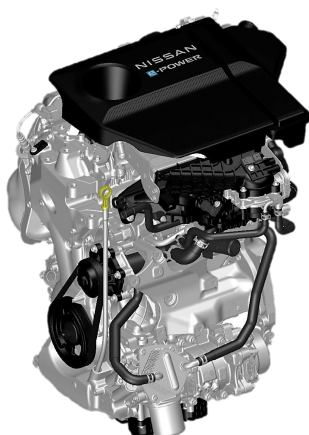


図1 新型KR15DDTエンジン

2.1 エンジン開発の狙い

新型エクストレイルの狙いの「タフギア」×「上質」を実現するため、従来のe-POWERに搭載していた1.2L 3気筒 自然吸気エンジンに対して、発電エネルギー向上のため大幅な出力アップ、高い静粛性、高効率なエンジンを目指した。100% モーター駆動は、高い静粛性とスムーズな加速性能(EV-ness)が魅力となる。これらを更に磨くために、エンジンは以下を狙って開発した。

- ① 定点発電点での高い熱効率
- ② 最大出力点での高出力

- ③ 高い静粛性
- ④ コンパクトなエンジン

図2はe-POWERにおけるエンジン運転領域と、ポイントとなる性能のコンセプトを示している。日産自動車は既にVCR機構の量産に成功しており、その機構を採用することで、①の点では高圧縮比、②の点では低圧縮比に切り替えがおこなえ、LP-EGRと組み合わせることで高効率、高出力の両立が可能となる。⁽¹⁾

また、VCR機構を構成するMulti-linkシステムの特徴の一つとして、ピストンのスラスト方向フリクションを減らすことができる。高圧縮比設定による熱効率向上と組み合わせることで、最良燃費点のエンジン低回転化ができる。加えて低圧縮比設定での最大出力点の回転数を下げることができ、③の静粛性要求を満たすことが可能となる。

④に関しては3気筒エンジン選定に加え、更なるコンパクト化を目指し可変動弁(VTC)の簡素化を狙った。従来のHEV用エンジンではエンジン始動時の振動対策として、ピストン圧縮反力の低減を実施してきたが、VCR機構を活用することで、吸気VTCなしでも圧縮反力の低減をおこなえ、当該の性能を満たすことができる。またe-POWER特有のエンジン運転領域の絞り込みに加え、可変圧縮、及びLP-EGRを性能設計することによって、VTCに頼ることなく、高効率、高出力、排気性能を高い次元で達成することができる。

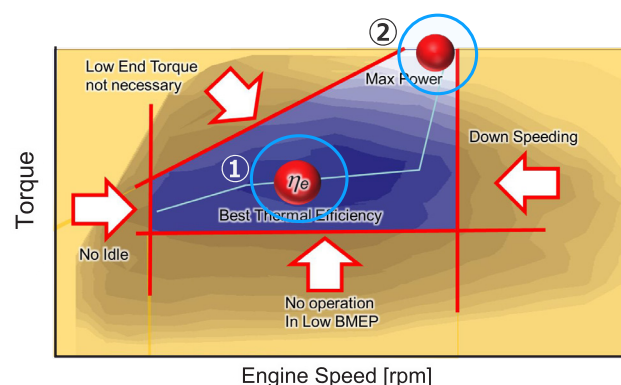


図2 e-POWERのエンジン運転領域

* パワートレイン・EV プロジェクトマネジメント部

** パワートレイン・EV 機構システム技術開発部

*** パワートレイン・EV 性能適合開発部

2.2 圧縮比可変作動原理

図3にVCR機構のMulti-linkシステムの構成を示す。コントロールシャフトの回転姿勢がエンジンブロックに対して時計回りに変化し、その偏心軸、すなわちCリンクの揺動点が下方へ移動すると、Lリンクがクランクピンを中心に時計回りに回転してUリンクとLリンクの上死点での挟角が大きくなり、Uリンクとピストンが上方へ移動して、エンジンの機械圧縮比を高めることができる⁽²⁾。その逆に、コントロールシャフトの回転姿勢を反時計回りに変化させると、機械圧縮比を低下させることができる。直列多気筒エンジンの場合、コントロールシャフトは各気筒で共用されているため、1本のコントロールシャフトのシリンダブロックに対する回転姿勢の変更により、全気筒の機械圧縮比を同時に切り換えることができる。

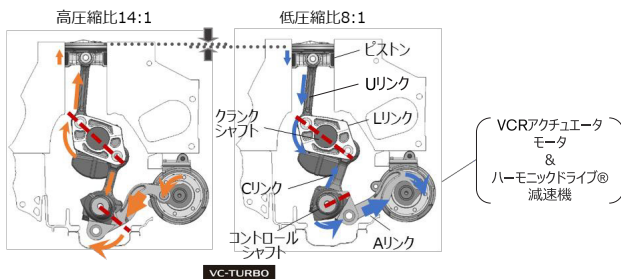


図3. Multi-link機構の構成

3. 達成性能

これまで説明してきた通りVCターボ採用により、HR12DEに対して大幅にエンジントルクを向上させた(図4)。その結果、発電エネルギーマネジメントに必要なエンジン運転点の自由度が増し、定点運転点と静粛性の両立を実現することが出来た。また、最大出力点の低回転化を実現することで、エンジン高負荷シーンでも大幅にエンジン音の発生を低減させた。以下、定点発電点、最大出力点、エンジン音に関して詳しく説明する。

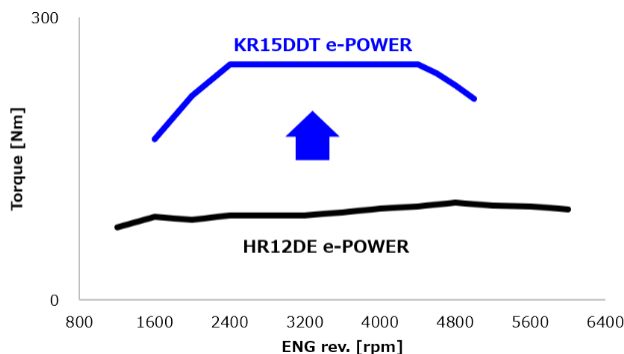


図4. 新型エンジントルクカーブ

3.1 定点運転、最良燃費と静粛性両立

従来のe-POWER HR12DEエンジンに対して、燃費と静粛性の両立を狙って、e-POWER用に低負荷燃費領域、高負荷領域のそれぞれにおけるEGR率と圧縮比(C/R)を制御している。速やかなエンジン始動から定点運転への遷移を実現し、2000rpmの最良熱効率点 (Minimum Brake Specific Fuel Consumption : 217g/kWh) を定常運転点として性能設計を行った(図5、6)。

- EGR導入口に負圧コントロール用バタフライ式バルブを追加してEGR領域を拡大、過給+高圧縮比下でのノッキングを抑制して熱効率を改善
- フラットピストンと高タンブルインテークポートにより、シリンダ内ガス流動を強化し、高EGR率領域における燃焼安定性を確保
- Multi-link機構によってピストンスラスト力が小さくでき、低フリクション化を実現

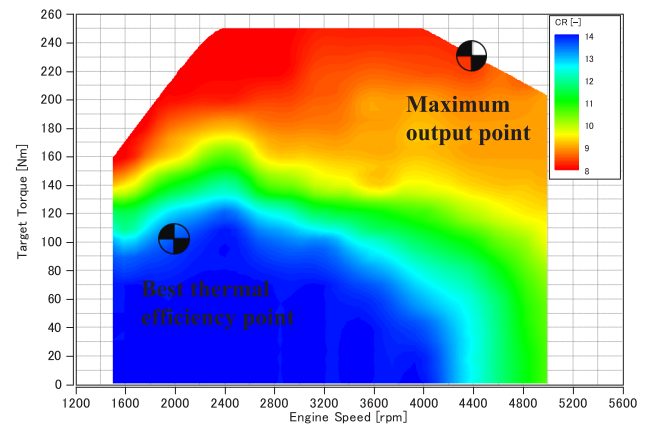


図5. 圧縮比Map

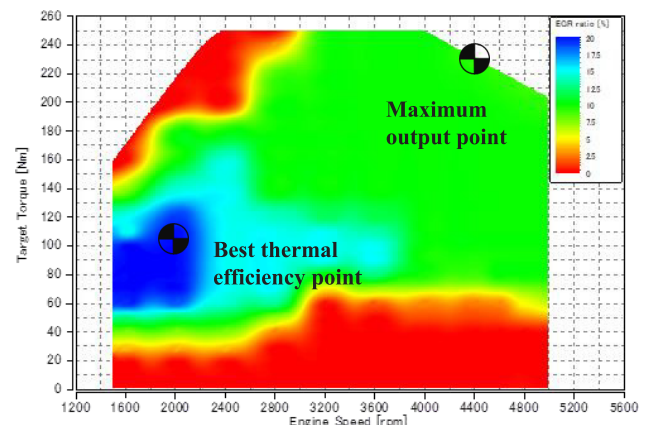


図6. EGR率Map

続いて、静粛性について説明する。これまでのe-POWERの定点発電点は、エネルギーマネジメントとのバランスから約2350rpmとしていたが、大幅なトルクアップによるエンジン運転点の選択肢を増やしたことで、エンジン最良燃費点運転でのエネルギーマネジメントを可能とした。

特に、この定点発電点の回転数変更(2350→2000rpm)は静粛性向上に大きく寄与しており、エンジン騒音を約2dBA低減することができる。結果として走行中のエンジン気配を消すことに寄与し、EV-nessをお客様へ提供することが可能となった。

以上のとおり、エネルギーマネジメント要求を満足させながら高効率と静粛性を達成したことで、WLTC+Exh Highモードの80%を超える運転時間を最良燃費点で運転することが可能となった(図7)。

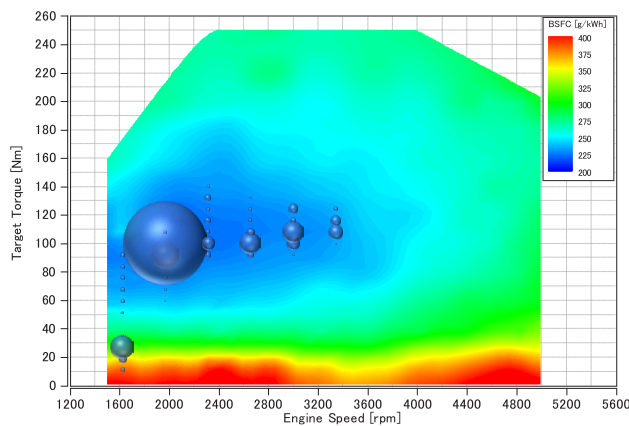


図7 エンジン燃費効率とエンジン動作頻度

3.2 最大出力点と静粛性について

一般的なエンジンのC/Rは、燃費要求と出力要求のバランスを考慮した設計が必要になる。一方でVCR機構によりC/Rを自由に選定(C/R=8.0~14.0)することが可能なVCターボエンジンは、最大出力点専用の性能設計が可能であり、C/R=8.0を選択した。結果、最大出力点は4400rpmで106kWを達成した(国内向け)。

このC/R設定とエンジン音について、一般的なエンジンと比較する。比較のためのエンジンはC/R=10.5と仮定する。C/R=10.5では、異常燃焼であるノッキングを回避するため最大出力点が5600rpmになるのに対して、前述したようにVCターボでは最大出力点を4400rpmに設定することができる。エンジン回転数を1200rpm低く設定できるため、高车速の連続走行など高負荷状態が連続するシーンにおいてエンジン騒音を約3.5dBA低減している。

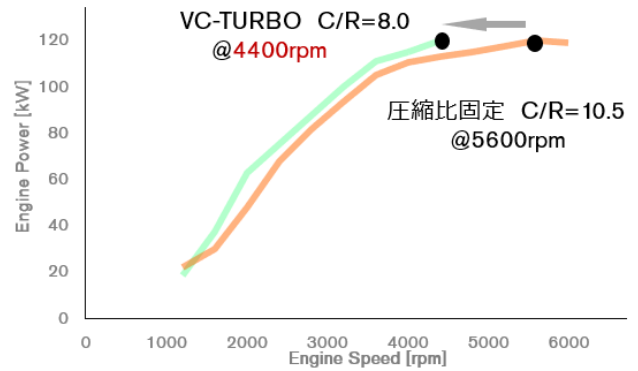


図8 圧縮比違いによる最大出力回転数

3.3 3気筒VCターボのエンジン音質

前述のとおり、最大出力点におけるエンジンの音圧レベルは大幅に低減されているが、運転者に対して完全にエンジン音の遮断はできない。そのため、聴こえてくるエンジン音についてVCターボエンジンでは通常の3気筒エンジンとは異なる気持ちの良さのサウンドの作り込みを行っている⁽³⁾。

通常の3気筒エンジンではトルク変動によるエンジン回転1.5次が主成分になるため、低周波数域のこもった音色になる。

対して、VCターボエンジンではMulti-link機構特有の上昇工程と下降行程が異なるピストンモーション(図9)によって、ピストンの上下慣性加振力に高次成分を有するといった特徴を持っている。

各気筒のピストン上下慣性力の波形と各クランクアングルにおける合力のグラフを図9に示す。

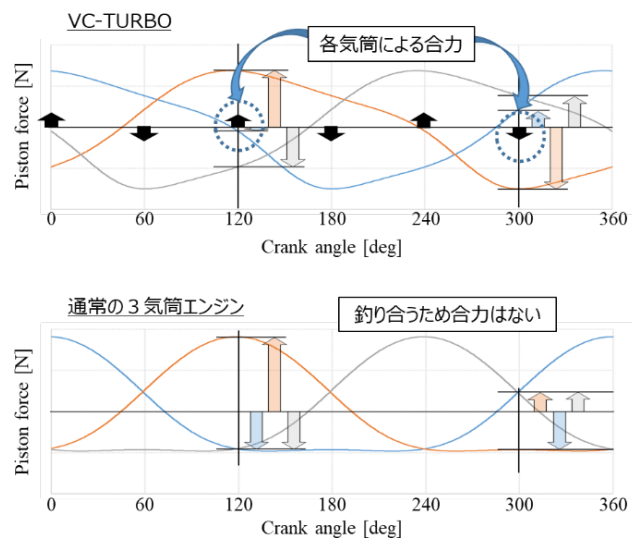


図9 上下方向ピストン系、慣性力の比較

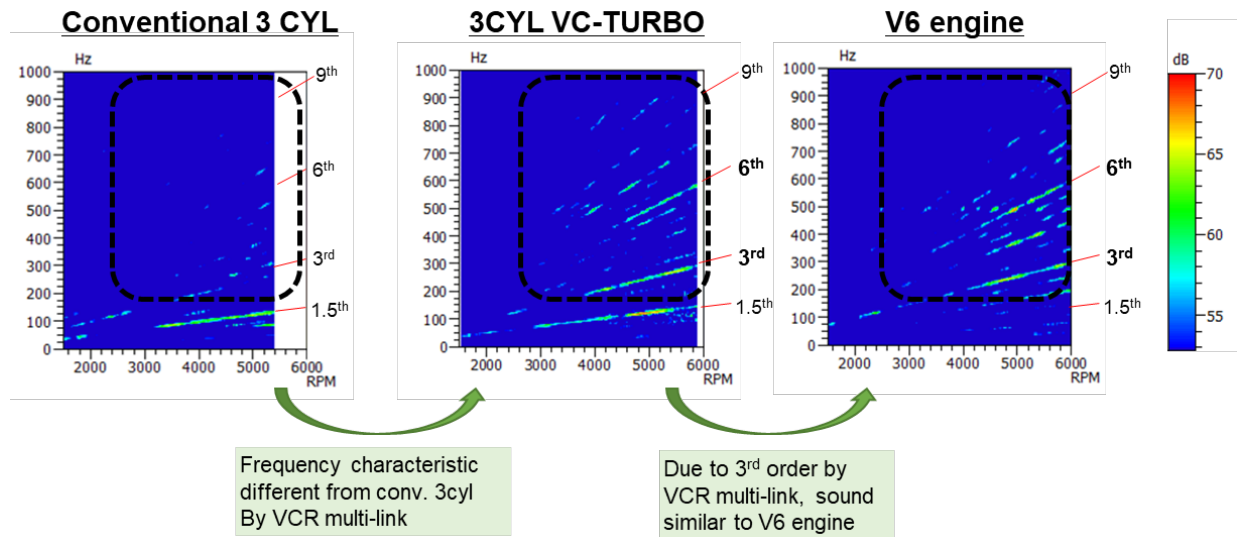


図10 車室内エンジン音、周波数分析

通常の3気筒エンジンでは各気筒間で釣り合うため合力は発生しないが、VCターボでは120deg周期（エンジン1回転あたり3回の周期）で上下慣性力を発生させることができる。結果として、車室内で聞こえる音は エンジン回転3n次を基調とした軽快なサウンド（図10）を実現している。

4. まとめ

本3気筒VCターボエンジンは、定点発電運転点の低回転化と低燃費率化を実現し、且つ最大出力106kWを4400rpmと低回転で達成した。

これらによって異次元の静粛性と、EV-nessを実現するための緻密な発電エネルギー管理を支えるキーテクノロジーとして、新型エクストレイルの性能達成に大きく貢献できたと確信している。

参考文献

- (1) Kiga shinichi et al. : The world's first Production Variable Compression Ratio engine -The new Nissan VC-T (Variable Compression-Turbo) engine, 38th International Vienna Motor Symposium, 2017
- (2) 松岡一哉 他：新型 高効率1.5L 3気筒 可変圧縮比エンジン開発 自動車技術会 2021年度 秋季自動車技術会
- (3) Tsuchiya Yoriyisa et al. : Development of the Second-Generation VC-TURBO, KR15DDT Engine, 30th Aachen Colloquium Sustainable Mobility, 2021

著者



荻野 和宏



土屋 順久



水野 秀昭



坂井 雄紀



阿部 泰英

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* 鈴木 良太*

1. はじめに

日産自動車は、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システム「e-POWER」及び前後に2機のモーターを搭載した電動AWD (All Wheel Drive) システムを、本格SUVである新型日産エクストレイル (図1) に採用する。また、2019 Tokyo Motor Show「アリアコンセプト」で公開した、新たな電動AWD制御技術である「e-4ORCE」をこれに組み合わせて適用する。



図1 新型エクストレイル

本章では、日産自動車初の電動パワートレインを搭載した本格SUVである、新型日産エクストレイルの、e-4ORCE技術、並びにAWD性能について解説する。

2. e-4ORCEの概要

前型エクストレイルに搭載していた、内燃機関パワートレイン搭載のAWDシステムは、内燃機関が発生する動力を連結されたプロペラシャフトを通して機械的に前後輪へ配分することによって実現されている (図2左)。そのため、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。また、内燃機関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ため、0.1秒オーダーで総駆動力を制御することは難しい。

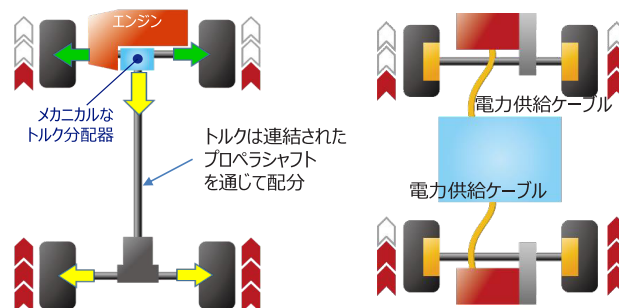


図2 パワートレインの構成比較

一方、電動パワートレインである、「e-4ORCE」の基本構成は、前後に独立した電動モーターを搭載するため (図2右) 高い応答性で正確な前後駆動力配分が可能となる。

「e-4ORCE」制御思想の一つは、4つのタイヤが受け持つ駆動力を路面に伝える能力を100%引き出し、どのような走行シーンにおいても車の動きを安定させることである。車は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駆動力を路面に伝えられる能力 (= タイヤグリップ力) (図3) の限界も変化するが、これをバランスよく全てのタイヤが限界内で余裕を持つようにコントロールすることで、安定した走行が実現できる。新型エクストレイルのe-4ORCE制御では、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のグリップ能力が最適になるよう駆動力を前後輪に配分している。さらに状況に合わせて左右ブレーキをコントロールし、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。

* パワートレイン・EV性能開発部

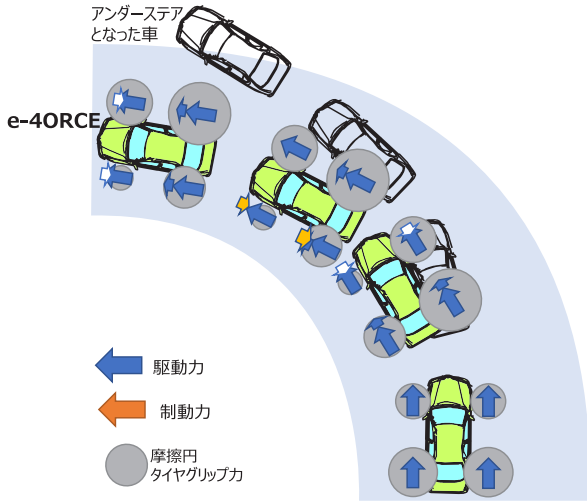


図3 旋回時のタイヤグリップ能力と駆動力配分

「e-4ORCE」制御思想のもう一つの特徴は、前後駆動力差による車両ピッチング制御である。これは図4に示すように、前後輪のタイヤの駆動力 F_f と F_r と前後サスペンションのスカット角/ダイブ角 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し、前後それぞれのサスペンションストロークが発生することを応用したものである。

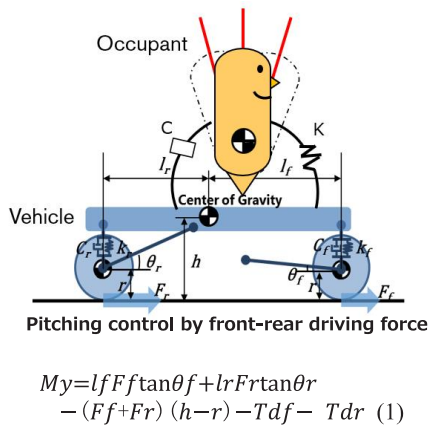


図4 前後駆動力によるピッチコントロール概要

e-4ORCE制御では、フロント、リアモーターの回生制動力差を制御することで、回生減速時の車体姿勢の変化を抑えている(図5)。これにより、車体のピッチ挙動を最適に抑え、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。(ノート e-Power 4WDから採用)

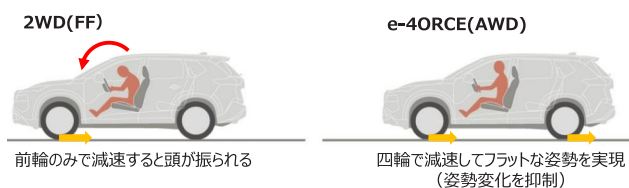


図5 ピッチコントロールによる車体姿勢の違い

3. e-4ORCEが提供する価値

For driver		For occupants
Easy following path as driver's expectation ドライバーの意のままの走り	Confidence anywhere 路面を問わない安心感	Comfortable ride for all 乗る人全てに快適な乗り心地
Powerful yet smooth 力強く滑らかな走り		

図6 e-4ORCEが提供する価値

e-4ORCEが提供する価値として、図6に示すと共に、以下3つを挙げる。

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

1) ドライバーの意のままの走り、2) 乗る人すべてに快適な乗り心地 については、2章の概要で既述のとおりである。本章では、本格SUVである新型エクストレイルにe-4ORCEを適用するのに際し、カギとなる価値である3) 路面を問わない安心感 について、以下2つの特徴的な走行シーンを例にして、ドライバーの運転操作、及び操作に対する車の動き方の側面から、解説を行う。

シーン1：深雪発進



図7 深雪発進

図7に表すような深雪発進は積雪地域では降雪後の駐車場などで日常的に遭遇する。このシーンの特徴は、タイヤが雪に埋まることで車が進行する方向に対して大きな抵抗があるため、これに打ち勝つ駆動力(トルク)が必要になること、さらに雪上ではタイヤと路面の間に存在する摩擦抵抗が一般的な乾燥アスファルト路面と比較して約3割程度と小さいためタイヤが空転しやすいことである。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、同時にタイヤスリップを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では前述のタイヤの接地荷重に合わせた最適な前

後モータートルク制御及びブレーキ制御の協調により、簡単なアクセル操作で安定した発進を実現している。

図8は前型エクストレイル(ガソリンエンジン+メカAWD)と、新型エクストレイル(e-POWER+e-4ORCE)の深雪発進データの比較をしたものである。

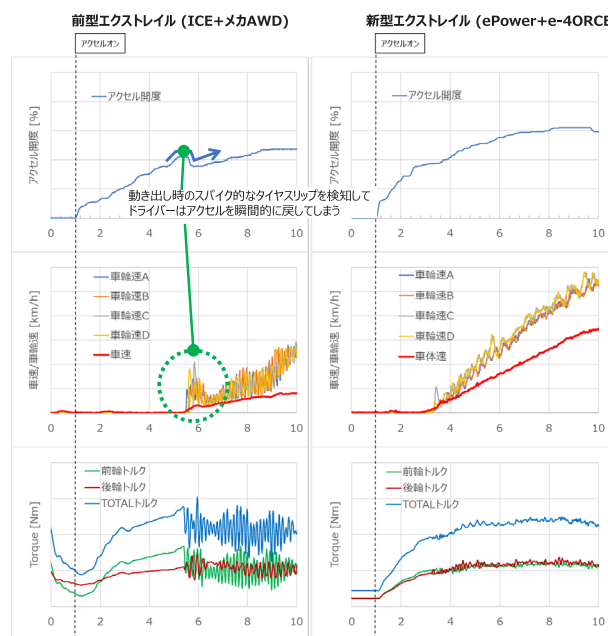


図8 深雪発進の性能比較

上段にアクセルペダルストローク、中段にタイヤスリップの比較を示す。前型車が車両の動き出しと同時に過大なタイヤスリップが発生し、これに伴いアクセルを戻す操作が行われているのに対し、新型車e-4ORCEでは車速の上昇と比例した最適なスリップ量にコントロールすることで、アクセル操作に気を遣わずに踏み増し加速することが出来ているのがわかる。また、下段に示す前後トルク比較では、FFベースメカAWDの前型車システムではフロント輪のスリップに伴うトルクハンチングが発生するのに対し、新型車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前後トルクが滑らかに上昇していることが分かる。

シーン2：モーグル路(不整地凸凹路)走行

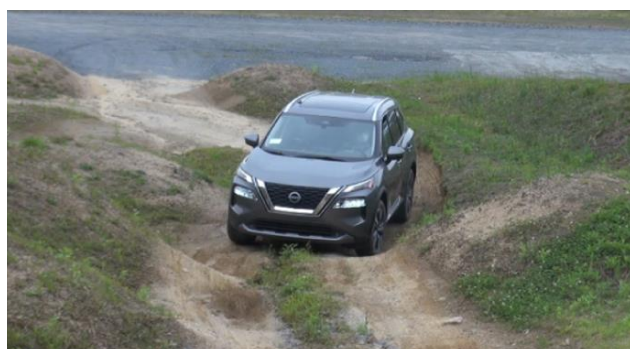


図9 モーグル走行

図9に表すような不整地(凸凹路)は非日常的ではあるものの、例えばキャンプ場やレジャー施設、悪天候の後のオフロードや災害時などにも遭遇することが想定される。このシーンの特徴は、路面の凹凸を乗り越えるための大きな駆動力が必要であること、タイヤ各輪の接地状態が路面凹凸により異なる為、それぞれの走行抵抗が変わること、更には接地を失ったタイヤが空転してしまうことである。これまでの車では、一つの起伏を乗り越えるたびにアクセルを踏み込んでトラクションをかけ、通過した後にブレーキを踏んで突っ走り进行を止める、という煩雑なペダルの踏み替え操作を必要としていた。e-4ORCE制御では、前後モーターが各々持つ回生制動の機能を活かし、前述のような走行に於いては、アクセルペダル操作のみで速度を一定に保ちつつ起伏を滑らかに乗り越えることを実現している。更にブレーキ制御とも協調し、接地を失ったタイヤの空転を瞬時に抑えることで、ペダルの踏み替え操作をより減らすことが出来ている。

図10は前型エクストレイル(ガソリンエンジン+メカAWD)と、新型エクストレイル(e-POWER+e-4ORCE)のモーグル不整路走行の比較をしたものである。

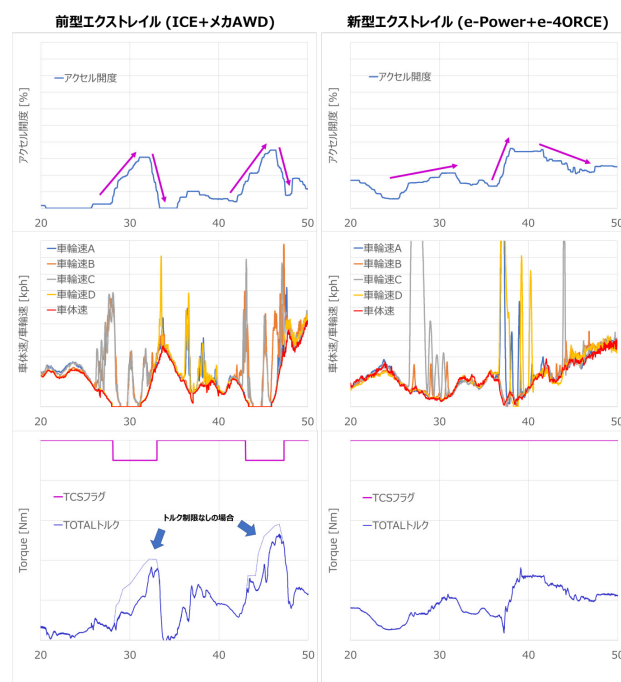


図10 モーグル走行の性能比較

上段にアクセルペダルストロークを示す。前型車では路面凹凸を乗り越えるたびに、アクセルペダルのON/OFF操作がなされている。一方新型車e-4ORCEではアクセルペダルの踏み量を変化させるだけで走行していることが分かる。下段にタイヤのスリップ状態と、トラクションコントロールの制御状態(ステート)を示す。前型ガソリンエンジン車ではタイヤ空転が発生し都度TCS(トラクションコントロール)介入しエンジントルク

制限が行われているのに対し、新型車 e-4ORCE ではタイヤ空転が適切に制御されていることで、不要なトラクションコントロールの介入が無いことも分かる。これにより、ドライバーが意図しない駆動力制限を感じることなく、連続した力強い走行を可能としている。

4. さいごに

新型エクストレイルに搭載した、100%電動駆動の e-POWER システムと、前後モーター AWD 制御技術の e-4ORCE により、SUV の用途として期待される走行シーンと、各シーンにおける運転操作のし易さ、快適性、安心感を高い次元で実現した。本章で紹介した、意のままの走り、快適な乗り心地、路面を問わない安心感は、日常使いからレジャーまで幅広く、天候や気候などの条件に関わらず体感頂けると考えている。

より多くのお客様に日産自動車が提供する新たな電動 AWD 搭載の本格 SUV を楽しんで頂きたい。

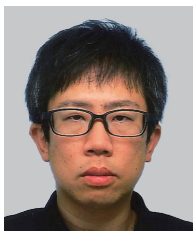
参考文献

- (1) 平工 良三、ほか：特集2-成長する e-POWER_6. 価値を高める電動 AWD 技術、日産技報 No.87 (2021)
- (2) 富樫 寛之、ほか：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」、日産技報 No.88 (2022)
- (3) 町田 直也、ほか：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、自動車技術会 2022 春季大会

著者



片倉 丈嗣



鈴木 良太

特集1：「タフギア」×「上質」新型エクストレイル

5. EV並みの静粛性を実現するNV技術

李 夢沢* 菅沼 真一* 桑田 敏久* 船津 宣成** 福岡 浩彰**
三谷 健文** 前田 和茂** 寺島 康統*** 五十嵐 雄一*** 岡田 和久*

1. ま え が き

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(BEV)と
両輪を成す位置付けにある。このシステムは、内燃機関を有し
ながらも、車を100%電動で駆動させることで(図1)、BEV
の長所である加速性能、静粛性の良さを持ちながら、充電要
らずの利便性を兼ね備えており、適用を拡大している。

一方で、e-POWERは、従来のICE搭載車両とは異なり、
ドライバーの運転操作と同期せずに、エンジンをON-OFFさ
せるため、エンジンON時とOFF時の騒音レベルの差を小さく
することが、騒音設計において重要である。

本章は、これまで小型車を中心に展開してきたe-POWER
システムを、CセグメントのSUVに適用するにあたり、進化さ
せた静粛性実現技術について記載する。

三つのコンセプトで性能開発を行った。

- ① エンジンの作動頻度を減らす。(以下3で記載)
- ② エンジン音自体を静かにする。(以下4で記載)
- ③ ドライバーの加速意図に合わせたエンジン音にする。
(以下5で記載)

CセグメントのSUVの車格に合わせ、発電用エンジンを高
出力3気筒ダウンサイジングターボエンジンに変更しており、
NV性能に対し、対応が必要な課題(低周波のこもり音、車
体振動等)も発生するため、エンジンマウント、エキゾースト、
アクティブノイズコントロール、車体なども含めて車両全体で
最適化を行っている。

さらに、お客様が車に乗った瞬間や走り出した瞬間に圧倒
的な静粛性を感じられる様、車両全体のバランス考え、遮音
性能も向上した。これら車両の静粛性技術を6に記述する。

3. エンジンの作動頻度を減らす

低速走行時等の暗騒音が低い条件ではエンジン騒音が目立
ちやすいため、そのような条件では極力エンジンをかけないこ
とがポイントとなる。このため、暗騒音が高い走行シーンで積
極的に発電させ電力を貯めるエネルギーマネジメント制御を
行った。具体的には高速走行時では風音のレベルが高く、エ
ンジンの音がマスキングされ目立ちにくいいため積極的に発電さ
せるとともに、暗騒音が低い低車速時にはバッテリー充電量
(SOC)に応じて、極力エンジンをかけないように制御している。

さらに低車速走行が続く条件に於いても、極力エンジン音が
目立たぬよう、ロードノイズレベルに応じてエンジン始動をコン
トロールする路面検知制御を採用し、エンジン音をロードノイ
ズでマスキングする設計を行っている。

一方、従来のe-POWER車では、SOCによらずに、エンジ
ンを始動させる条件が存在していたため、これらを回避する対
応も追加している。具体的には、従来ブレーキシステムへの負
圧供給のためエンジン始動するシーンがあったが(図2)、電
動型制御ブレーキユニット※と協調制御を行うことで、負圧生

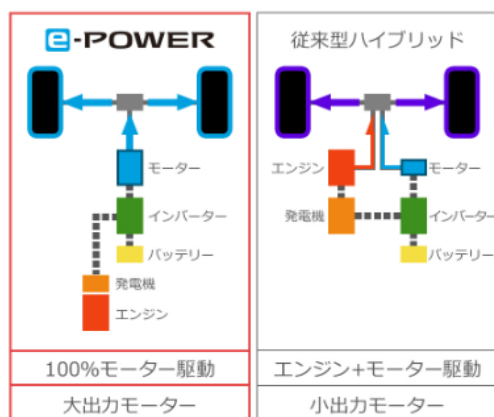


図1 e-POWERと従来HEVシステムの違い

2. 静粛性の狙い

新型エクストレイルのコンセプトは「タフギア×上質」である。
上質感の重要な構成要素である静粛性を実現するため、下記

* 車両計画・性能計画部 ** シャシー開発部 *** 車体技術開発部

成のためのエンジン始動を回避させている。

※ADAS (Advanced Driver-Assistance Systems, 先進運転支援システム)、衝突安全性能を目的として新型エクストレイルに採用した電動型制御ブレーキユニットを静粛性向上にも活用した。

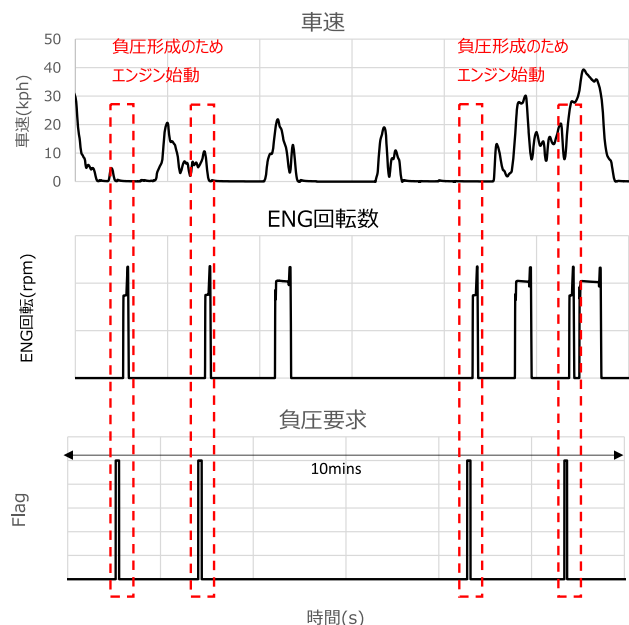


図2 従来e-POWERが市街地走行時
負圧生成のためにエンジン始動する頻度

4. エンジン音自体を静かにする

SOC低下によってエンジンがかかる場合、特に低負荷低車速のシーンに於いて、従来のe-POWERに対し、エンジン回転を下げて、静粛性を確保している。これは、ダウンサイジングターボとして発表・発売している1.5L VCターボエンジンをe-POWERに合わせて再適合し、従来小型車に搭載していた1.2LのNAエンジンと比較して、低回転・高トルク・高効率で稼働させることを可能とし、十分な発電量を確保しながら低騒音運転させ、エンジン騒音低減と燃費を両立させている。

5. ドライバーの加速意図に合わせたエンジン音にする

強い加速が必要な場合、エンジンによる電力供給が必要になるが、加速時にも違和感のない音を実現するために、ドライバーの加速意図に合わせたエンジン音レベルとなるよう、エンジンを制御している。

具体的には、エンジン音のレベルはトルク感度に対して回転数感度が高いため(図3、図4)、アクセル開度(加速G)と車速に応じて回転数をリニアに上げていく適合を行っている(図5)。

さらに、駆動に必要な電力※は可変圧縮エンジン(VC)の特性を生かし、回転を抑えてトルク優先させることで、回転上昇を可能な限り抑えて違和感のないエンジン音としている。

本章3、4、5の詳細は1-2、「VCターボ」×「e-POWER」システムの記事を参照ください。

※エンジン発電電力 = トルク × 回転数

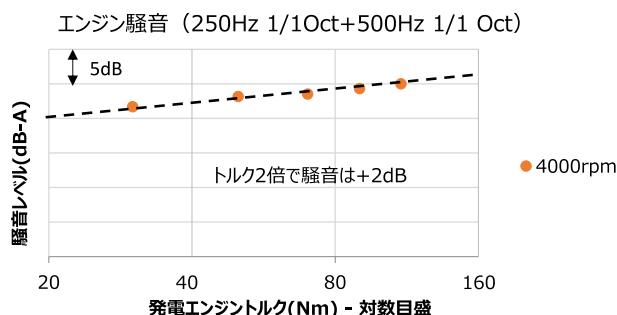


図3 エンジン騒音に対するエンジン回転の感度

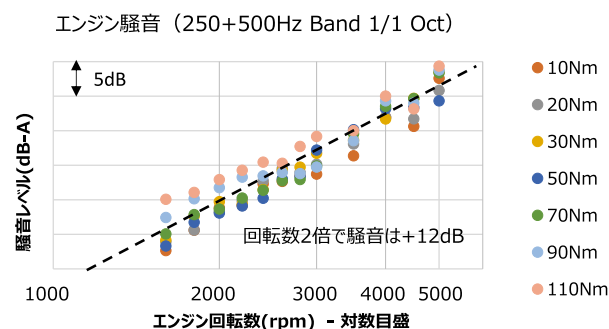


図4 エンジン騒音に対するエンジントルクの感度

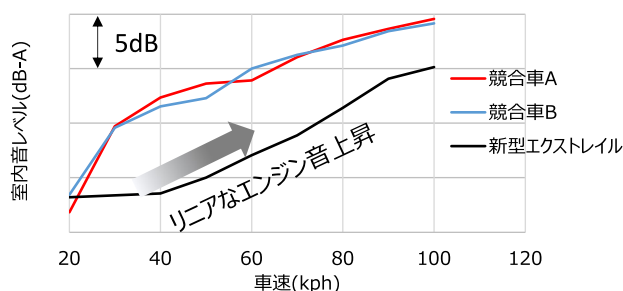


図5 新型エクストレイルのe-POWERと競合車の0.2G加速時のエンジン騒音差

6. 静粛性を支える車両技術

大トルク3気筒エンジンの採用によって低回転化によるエンジン騒音の低減には有利だが、一方、こもり音や車体振動等の低周波現象は不利である。このため、エンジンマウント、エキゾースト、アクティブノイズコントロール、車体で低周波感度を改善する対応を行った。

更に、圧倒的な静粛性を実現するため、高周波のエンジン放射音も十分遮断させるため、高効率遮音技術を投入している。

6.1 エンジンマウント

エンジンがかかっても気にならない、EV 並みの静粛性を実現するためのコンポーネント技術であるエンジンマウントについて、3気筒振動モードを考慮した最適マウント配置と、新型エクストレイルのエンジンルームレイアウトと両立させながら、全開加速まで剛性変化の小さい、3気筒高トルクe-POWER専用に開発した低剛性ペンデュラムマウントシステムについて紹介する。

6.1.1 マウントシステムの構成

従来、軽量且つ低トルクな3気筒エンジンの支持には、ペンデュラムマウントシステムが最も多く採用されている。また、ペンデュラムマウントシステムの高トルクエンジンへの対応として、駆動反力の分担と各マウントへの入力低減を目的に、右マウント上方にアッパートルクロッドを追加し、支持する手法がある。

今回、新型エクストレイル e-POWER 専用システムでは、ペンデュラムマウントシステムのロアトルクロッドをメインロッド、サポートロッドに2本化し、入力を低減することで、従来のインシュレータの大ききでレイアウトを成立させた。また、2本のトルクロッドを3気筒エンジン1次振動（車両X,Z軸周りの回転偶力）の節をまたいで配置し、上部に配置される左右マウントとの剛性バランスを適切にすることで、3気筒エンジン1次振動に対し位相キャンセルしつつ、最適な防振設計の両立を可能にした。（図6）。

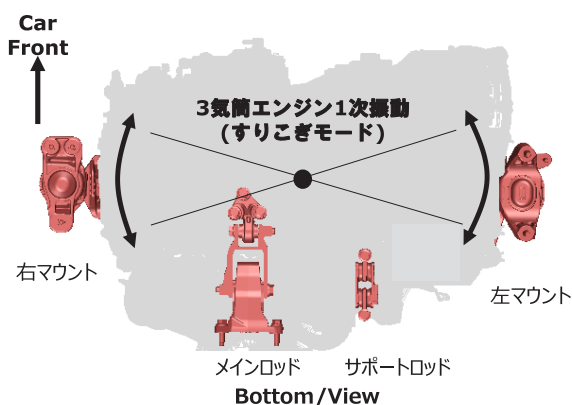


図6 エンジンマウントシステム図と配置

6.1.2 ロアトルクロッド2本化による効果

ロアトルクロッドの2本化はレイアウト及び3気筒エンジン1次振動との両立だけでなく、全開加速まで剛性変化の小さい低剛性トルクロッドとすることで静粛性に対し貢献している。

サポートロッドはストッパ構造を持たず、入力に対しせん断で受けるゴム形状とすることで、入力を受けてもバネ上昇しない構造とし、メインロッドは2本化により入力を低減させることで（図7）、ストッパ機能を持つ従来構造であっても低バネ化を可能とした。

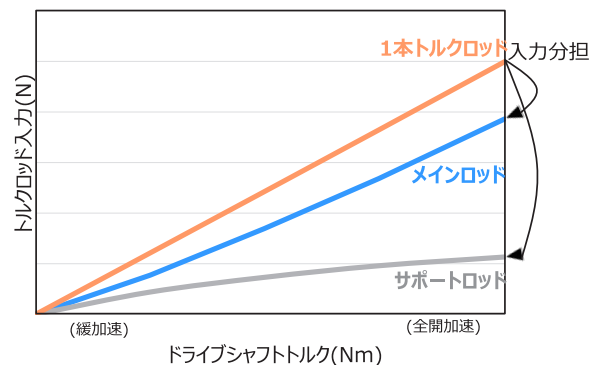


図7 トルクロッド2本化による入力分担

結果、こもり音寄与の大きいトルクロッドにおいて、2本化することで全開加速においても低バネ化を実現し、全領域に対して剛性変化の小さい低剛性トルクロッドを実現した（図8）。

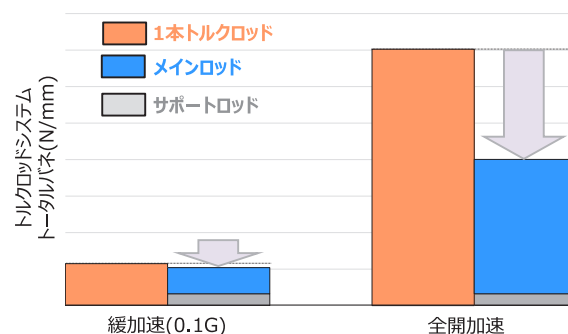


図8 トルクロッドシステムトータルバネ値の比較

6.2 エキゾースト

e-POWERを搭載する新型エクストレイルでは、市街地走行シーンでは車両の静粛性確保を実現するため、

- ・エンジンの低回転稼働
- ・発電のため高トルクでのエンジン稼働を行っている

エンジンの低回転稼働化および高トルク化はともに排気騒音を増大させる要因となる。エンジン稼働時の車両の高い静粛性を実現するために、排気騒音の低減が求められることから、エキゾースト設計では排気システムの全長共鳴を低周波化するロングフローエキゾースト技術開発を行った。

6.2.1 e-POWERの特徴を活用した

排気騒音低減コンセプト

3気筒高トルクエンジン稼働時の排気騒音を低減するには

車両中央部および車両後方に大容量マフラが必要となる。しかし、e-POWERはICEのフューエルタンク、リヤサスペンション、リヤバンパに追加して大型バッテリー、DC-DCコンバータ等を搭載しており、パッケージング上の制約から車両として高い静粛性を実現させるレベルの大容量マフラの搭載が難しい(図9)。

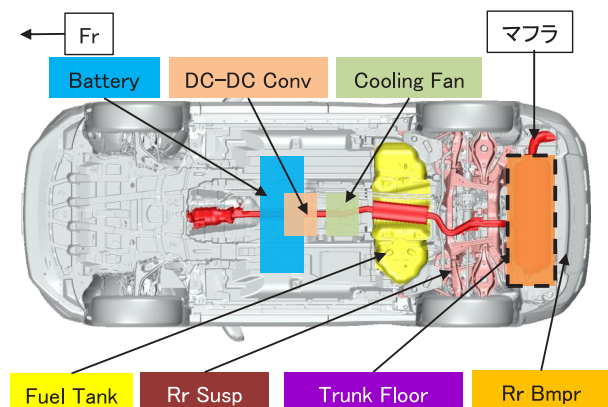


図9 周辺部品レイアウト

そこで、e-POWERが、ICEで使用しているアイドル回転域を使わない点に着目し、ICEのアイドル回転域に排気システム的全長共鳴を移動（低周波化）させることでe-POWERとして利用する回転域の排気騒音を低減するコンセプトとした(図10)。

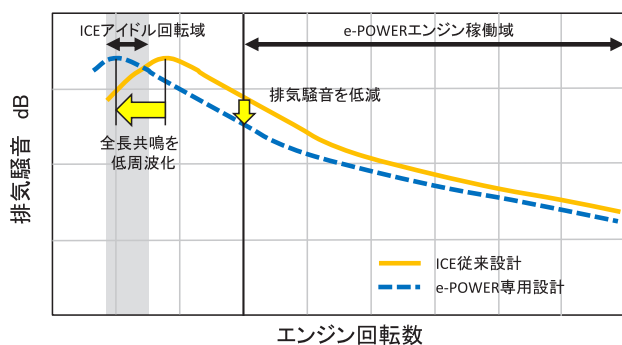


図10 e-POWER専用マフラ消音コンセプト

6.2.2 ロングフローエキゾースト化による消音

全長共鳴の低周波化の実現のため、ICEの従来設計に対して排気システムの排気ガス流路をICEに対して1.3m延長するロングフロー化を行った。流路延長により高い消音効率を確保するためには、全長共鳴の音圧の腹にリヤマフラを近づけることができるテールチューブを延長するロングテール化が最も効果的である。しかしマフラ後方での流路延長はパッケージング制約により困難である。これら消音効率およびパッケージングを両立する手法としてリヤマフラ内部でチューブを往復させることでロングフローエキゾースト化した。

一方、リヤマフラ内でのロングフローの実現にあたっては、

ロングテールチューブの新たな共鳴による排気騒音への影響を避ける必要があり、またエンジンの高トルク実現のために、低排圧であることが必要である。そこで、ロングテールチューブの共鳴コントロールおよびガス流量コントロールを目的としてe-POWERに最適なバイパス経路を設定した。

以上より、低騒音・低排圧を同時に満足するCセグメントパッケージに搭載可能なe-POWER専用のロングフローエキゾーストシステムを開発した(図11、12)。

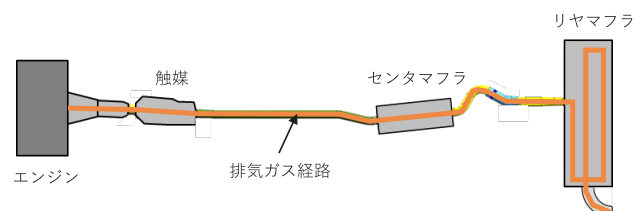


図11 ロングフローエキゾーストシステム

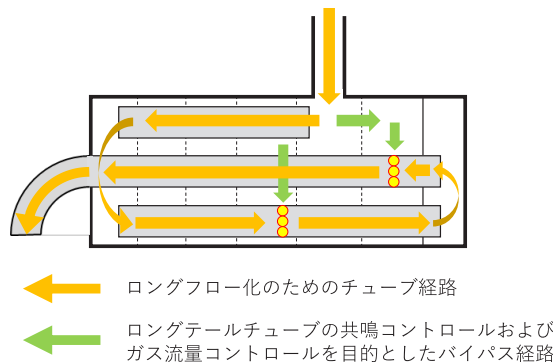


図12 ロングフロー化を具現化したマフラ内部構造

6.3 アクティブノイズコントロール

特に低負荷低车速のシーンに於いて、エンジン回転を下げ静粛性を確保するコンセプトであるが、一方で必要発電量を担保するため、高トルク運転により出力確保している。この際、3気筒エンジンによる低周波加振力に対応する必要があるため、前述した新開発のエンジンマウント、エキゾーストシステムに加え、VCターボエンジン+e-POWERへ最適に適合したアクティブノイズコントロール（ANC）も採用し、車内音の消音を行っている。

ANCによるこもり音低減効果を図13に示す。

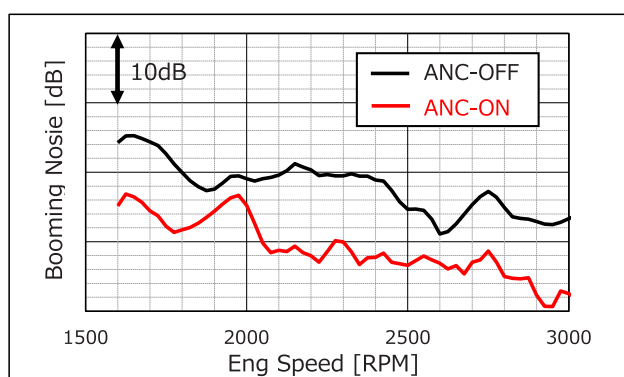


図13 0.1G加速時 エンジン回転1.5次こもり音のANCによる低減効果

6.4 低感度車体

新型エクストレイルでは、高出力3気筒エンジン化による振動レベルの増加に対し、上質なNVH性能達成のため、高剛性・低感度車体を開発した。1.低周波域での車体骨格固有値(モード)を減らす、2.音になりにくいモードにすることで、お客様に音・振動を伝えない車体を実現させた。

6.4.1 骨格固有値密度の低減

車体骨格固有値は、ねじり、曲げ等、車体骨格が持つ固有の振動モードであり、各エンジン、サスペンション等の入力によるキャビンの体積変化を増幅させるため、音感度レベルを構成する主要因となっている。骨格固有値が低周波域に多数存在する(密度が高い)と、各種入力に対してモードが励起されやすい=音になりやすい車体となる。旧型エクストレイルに対し、高出力3気筒エンジンを採用することで、エンジン振動レベルが増加する新型エクストレイルでは、車体の音感度を向上させるために固有値密度を低減させる必要がある(図14)。

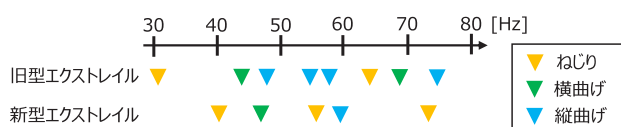


図14 車体骨格固有値配列表

6.4.2 固有値(モード)の向上

具体的な固有値(モード)向上、低感度化の方策を図15に示す。最初の固有値であるねじり共振に対しては、OTR側に断面を設けた従来のCピラー構造に対し、より効率的に剛性を向上させるため、剛性に寄与の高いINR(圧縮側)の断面を確保した環状構造(①)を採用することで、骨格固有値を30→40Hzに向上させた。第2の固有値であるエンジンコンパートメント部の横方向の曲げ共振に対しては、フードリッジ先端とフロントサイドメンバー間を繋ぐ骨格(②)を配置することで、

横方向剛性および固有値を向上させている。第3の固有値である車体縦方向の曲げ共振に対しては、前述のCピラーINR環状構造にて後部の車体上下方向の変形モードを抑制させ、更にフロアトンネル前に環状構造(③)を設けることでトンネル開きモードを抑えることで固有値を上げている。これら構造の適用により、低周波域での固有値密度を低減させることで、音感度の向上を図った。

さらに、固有モード自体を音になりにくいモードにする(振動ゲインを下げる)ために、発音部位を特定し補剛することで低音感度化をさせた。発音部位の1つであるダッシュ膜前後モードに対し、ダッシュアッパークロスをダッシュ上部に左右方向に閉断面(④)を設定した。また、7thクロスメンバー(⑤)は、リヤサスペンションメンバー取付点間を結合し、リヤサイドメンバーの上下モードおよびリヤフロア膜モードを抑制させることで、各部位での発音を抑えた。

その他の骨格においても、パッケージングを考慮して、稜線の屈曲点を極力無くしつつ図心のオフセット量を減らし、各取付部座面の最小化による局部剛性の向上等により剛性高効率化を図ることで、旧エクストレイルに対し主要骨格の板厚低減・軽量化しながらも、ねじり剛性+44%、縦曲げ剛性+40%させ、新型エクストレイルの高出力3気筒エンジンに対応した高剛性・低感度車体を実現させた。

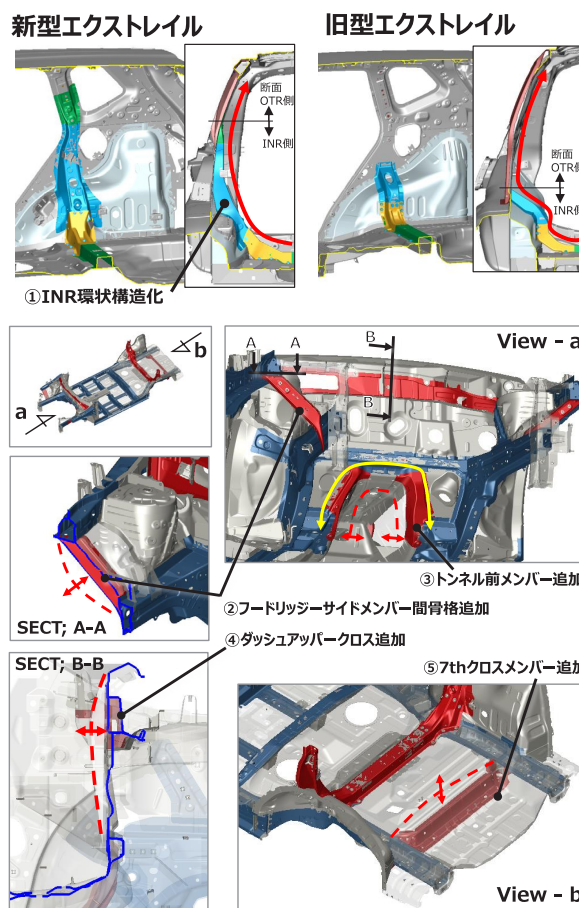


図15 車体骨格構造

また、サスペンションを刷新し(図16)、旧型エクストレイルでは防振タイプであったフロントサスペンションメンバーをリジッドタイプにすることで、上記車体の高剛性化に寄与させている。尚、上質さを阻害しないようロードノイズレベルを低く抑えるため、車体剛性向上によるサスペンション取付点の音感度改善と合わせて、フロントサスペンションブッシュの低剛性化とリヤサスペンションメンバーを防振化することで、旧型エクストレイルと比較し、ロードノイズレベルを1.5dB改善した(図17)。

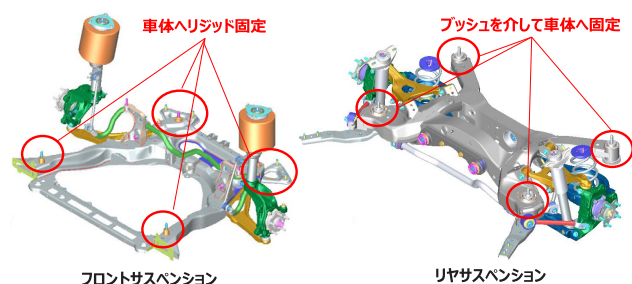


図16 サスペンション構造

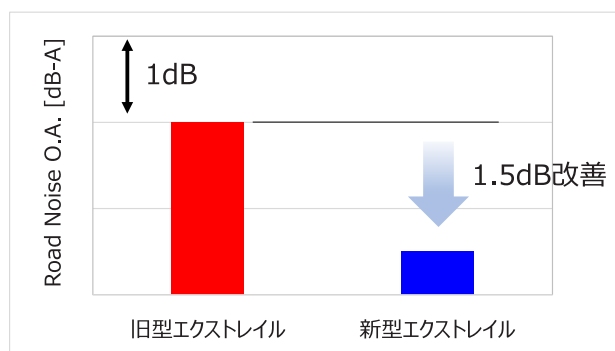


図17 粗い路面での50km/h一定速ロードノイズレベル

6.5 遮音技術

効率良く遮音性能を向上させるためには、音が伝搬する経路に局所的な弱点を作らない事、適用する遮音材は二重壁構造かつ各壁間の距離を大きく取って単品性能を上げる事、がポイントである。

そのため、パワートレインから室内までの伝達経路上の車体パネルで入力寄与が高い弱点部位を明確にし、そこに二重壁構造を効率良く採用する設計指針で開発した。

現行車を分析すると、ダッシュの貫通部と、ダッシュトールボード部で約5割の寄与がある事が分かった(図18)。貫通部は徹底的に穴・隙を縮小する事で他の部位との寄与平準化を図った。トールボード部はダッシュパネル、およびインシュレータで構成する二重壁構造を現行車から踏襲したが、インシュレータを現行比157%厚くする事で(図19)、部品追加や質量増加なく、5dB性能向上した(図20のB→A)。構造対策ではなく質量対策した場合(図20のC)と比較すると、約10Kgの

軽量化にも貢献している。

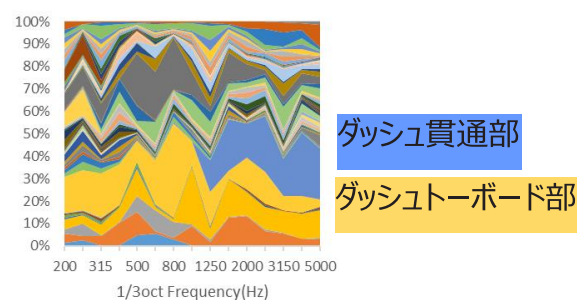


図18 現行車入力寄与

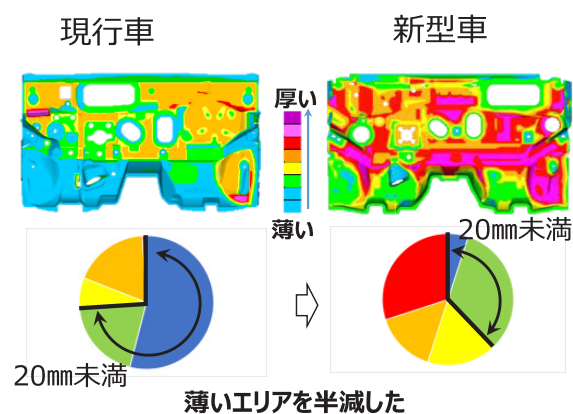


図19 ダッシュインシュレータ厚み分布

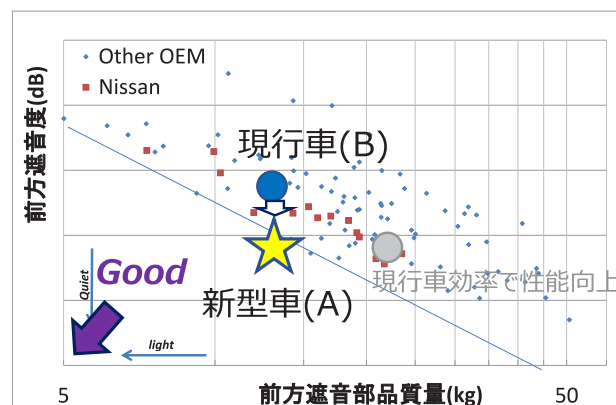


図20 前方遮音の質量効率

7. まとめ

従来、小型車中心に採用してきた日産独自のe-POWERを本校記載の技術により進化させ、CセグメントのSUVとして、力強い加速性能、優れた燃費性能および圧倒的な静粛性を高い次元で成立させた。

引き続き静粛性向上技術を進化させ魅力的な電動車両(e-POWER, EV)をお客様に提供し、社会に貢献していきたい。

著者



李 梦沢



菅沼 真一



桑田 敏久



船津 宣成



福岡 浩彰



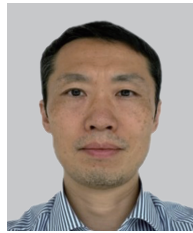
三谷 健文



前田 和茂



寺島 康統



五十嵐 雄一



岡田 和久

特集2：電動化に貢献する実験技術

1. 電動車両の競争力を支える実験技術とは

田中 耕一郎*

1. はじめに

日産自動車の研究開発部門における実験部の役割は、世界中のお客さまの期待値や市場要件を満足するための車両やシステムの性能目標を設定すること、そして設計～試作を経た後に性能目標の達成度をモノで評価することである。その役割を果たすためにどのような実験を行うのか決めるのは実験部のエンジニアであり、その実験遂行に必要な設備、計測器を導入したり、評価・計測技術を開発したりするのも実験部のエンジニアが自ら行う。

この特集では、日産自動車の実験技術について、特に昨今の地球温暖化の対応のひとつとして進めている車両の電動化に貢献する実験技術について紹介していく。

図1は自動車の開発プロセスを単純化・概念化して示したもので、上から車両階層～部品階層を表しており、新車の開発は左上からスタートして右上で開発完了・発表発売となる。

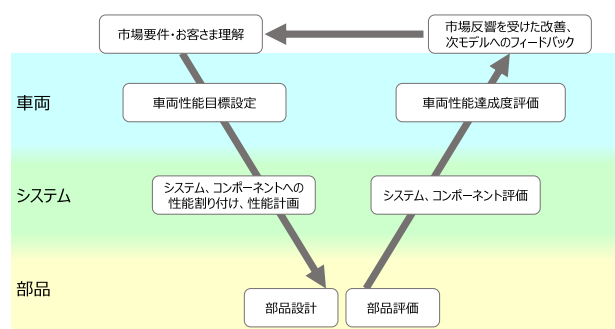


図1 自動車の開発プロセス模式図(Vプロセス)

実験部の役割は、左上の「市場要件・お客さま理解」から「車両目標設定」までと、性能領域によっては「システム、コンポーネントへの性能割り付け、性能計画」まで実験部が関わることとなる。そして設計部署や部品サプライヤによる「部品設計」、「部品評価」を経て、「システム、コンポーネント評価」と「車両評価」が再び実験部の役割となる。

2. さまざまな実験技術

2.1 市場要件・お客さま理解のための実験技術

目標設定のためには、世界中のお客さまによるクルマの使い方や走らせ方、その時の期待値、そして使用環境を把握する必要がある。国や地域によって独特の使い方があるし、お客さまの期待値も人それぞれである。使用環境には、道路状況や交通環境だけでなく、気温・湿度・日射量などの気候条件や、標高(空気密度)、電波環境など多岐にわたり、その組み合わせは膨大である。

これらの無限の組み合わせの中から、それぞれの性能や部品・システムに対して目標を設定するためには、市場モデルを作成し、リアルワールドを代表するシーンを抽出していく。

リアルワールドの市場要件を把握するための古典的手段としては市場調査を行う。お客さまを観察したりインタビューしたり、車両や周辺環境のデータを計測したり、それらのデータを分析したり、そういう技術やノウハウが必要となる。また近年ではビッグデータを統計的に解析して市場要件を把握することもできるようになっており、大量のデータを収集・分析する技術も実験技術として必要となってきた。

2.2 車両実験技術

車両を用いた実験により性能目標を設定したり、車両性能の達成度評価を行うためには、現行モデルや競合他社車と比較評価し、各性能の良し悪しを表す代用特性を計測していく。実際のお客さまと同様に一般公道で比較試乗して評価することもあるが、公道評価では周囲の交通環境を制御できないため実験の再現性を担保するのが非常に困難である。そこで Proving Ground (PG) と呼ばれるクローズドのテストコースを造って、車両を走らせる。自社のPGであれば、どのようなPGにするのか検討して構想を練り、専門の設計会社や施工会社と共同でPGを作り上げるのも実験部のエンジニアの業務といえる。

* カスタマーパフォーマンス&第二車両実験部

コースの平面形状や起伏、路面の組合せは無限にあるが、より効率的・効果的に各種性能を実験評価し計測・分析するために必要なコースを設計していく。世の中に実在する道路や路面を再現する場合も多い。乗り心地が悪くて有名な道、ロードノイズや低級音にキビシイ道、ハンドリングの良し悪しがかかる道、等々。どういう道をPGに再現すべきか見極めるのも実験技術の1つである。

例えば、日産自動車／北海道陸別試験場のPGはドイツのアウトバーンやカントリーロードを再現するよう作られている。冬季は日本一寒い寒地試験場となり、圧雪路やアイスバーンなどの路面が再現される。



図2 日産自動車／北海道陸別試験場のPG

2.3 システム/コンポーネント台上実験技術

PGで実験すれば走行条件は自在に制御して再現可能だが、気候や天候はそうはいかない。また、走行中の車両に生じる様々な現象を分離したり、詳細に計測し分析したりするのは困難である。そこで、評価対象とする性能や機能、システムに応じた台上実験に置換えた台上実験技術を構築する。そして、Vプロセスの左側で各性能ごとに現象メカニズムを分析し、各コンポーネントへの性能割り付けを行ったり、Vプロセスの右側でシステム・性能ごとの評価・達成度確認を行う。ここで重要なのは、目的に応じて何をどこまでどうやって再現するのかということであり、それを見極めるのが台上実験のエンジニアの腕の見せ所の1つである。

例えば、車体やシャシーの耐久性を評価するために、走行時の路面からの入力や、駆動力・制動力による入力を台上で再現させるのがロードシミュレータである。ここでは4輪のタイヤに加わる前後左右上下の力、およびX,Y,Z各軸周りのモーメントを再現している。実走行時の入力をそのまま再現するのではなく、入力波形を細工して実際の走行よりも短時間で耐久評価が出来るように実験を加速しつつ、疲労被害度を市場モデルと等価となるように再現した。ただし、ここで評価対象としているのは主として金属材料で作られた構造体の疲労強度

なので、温度環境や光環境の再現は省いている。

実車による走行試験あるいは車体全体を使った台上実験以



図3 台上設備の例としてロードシミュレータの写真

外にも、特定のコンポーネントやシステムだけを抜き出して、実車相当の負荷を加えることで、車両状態では観察や計測が困難な現象メカニズムの解明が可能になる。また、実験の規模を小さくできるので、より多くの仕様を比較評価できたり、サンプル数を増やしてバラツキの評価が容易になるといったメリットもある。このようなシステム台上実験の構築にあたっては、いかにして車両状態を再現するか、という点が重要である。

車両レベルから、システムレベル、さらに部品レベルへとブレイクダウンしていくことにより、車両性能目標を各構成部品の要求スペックに落とし込むことが可能になる。逆に目標達成度を確認する段階では、まずは部品単品がスペックを満たしているか（これは通常は部品サプライヤが）評価し、次いでシステムレベル、最後に車両で評価するという手順で評価していくことで、目標達成できていない場合の原因究明と対策を容易に行い、確実に開発を進めていくことができる。

2.4 デジタルフェーズにおける実験技術

上述したVプロセスの図ではVの字に沿って手戻り無く進むように描いてあるが、実際の開発においてV字の右側で評価した結果が想定通りに目標を達成できていない場合は、手戻りが発生する。すなわち、設計→試作→評価→設計やり直し→試作やり直し→評価やり直し… というフィードバックサイクルを回すことになる。しかしこのサイクルを回すということは相応の期間とコストを必要とする。そこで、実際にフィジカルな試作品を作る前に達成度の事前確認を行うというニーズが生じてくる。正規の試作車両の手配をするより前の段階をデジタルフェーズ、手配以降をフィジカルフェーズと呼んでいるが、デジタルフェーズのうちに試作車両の性能達成レベルをどう見通すかということが重要で、これによってフィジカルフェーズでの設計・試作・評価のやり直しを減らしていく取組みを行って

いる。では、実際のリアルな試作車両が無い中で、いかにしてその性能を評価するのか？ コンピュータシミュレーションを活用することもあれば、車両の一部だけを再現したモックアップを作製することもある。評価対象とする性能やシステムに応じて、何をどう再現するのがデジタルフェーズにおける技術検討課題である。

例えば、空力性能を評価するには車両の形を正確に再現しつつ、簡便に形状変更→評価のトライ＆エラーを繰り返せるようにクレイモデルを作製するというのが伝統的な手法であり、近年ではエンジンルーム内や床下の構造まで忠実に再現する。ただし再現するのは形だけで、このモデルは走らないしエンジンも回らない。何をどこまで再現するかを決めるのも実験エンジニアである。

最近は3Dプリンタによる部分試作を行うことも多くなった。特に実績のない新規構造や新機能を持った部品の事前評価には重宝している。実際の部品と比較すると強度や耐久性に劣ったり、表面の仕上がりが異なったりするが、実際に触れて使い勝手などをフィジカルに評価できるというメリットがある。

さらにコンピュータシミュレーションによるバーチャルな評価環境・供試品と、リアルなモックアップや先行試作品を組み合わせることで実験するということが増えてきている。

図4は過去に日産技報(2012年、No.71)で紹介したHILS (Hardware in the Loop Simulation) の例だが、ここではブレーキマスターシリンダ～VDCユニット (ECU、アクチュエータ一体) ～ブレーキチューブ・ホース～ブレーキユニットのブレーキ油圧回路一連をリアル (実機) で、それ以外の車両モデルをバーチャル (CAE) で再現して組合わせている。

何をバーチャルで再現し、何をリアルで再現するのか、それ

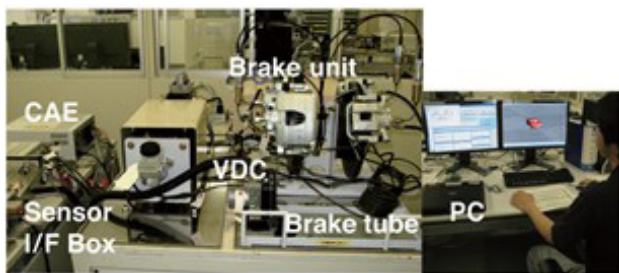


図4 VDC HILS (日産技報No.71より引用)

らをどう組み合わせるのか、見極めて実現させる。

2.5 計測技術

実験技術を語る上で、もう一つ重要な要素は計測技術である。車両性能を客観的・定量的に捉えるためには計測することが必須である。PGの路面を再現し維持するためにも、市場環境を台上設備で再現するにも、設計データを衝にして試作

品を再現するにも、必要十分な精度で計測しなければならない。現象メカニズムを解明するため、知りたいことを測れるようにするには、新たな計測技術の開発が必要である。また、実験結果の精度を担保するためには計測精度保証技術が重要であり、計測精度保証に必要な設備である計測標準センターや、その中で用いる校正機器の企画・導入・維持もまた実験部のエンジニアが担っている。

3. 電動車開発に貢献する新たな実験技術

近年、地球温暖化等の環境問題への対応として車両の電動化を進めている。

成熟した技術領域の新車適用開発であれば、標準化されたノウハウを用いてVプロセスに沿って (比較的) スムーズに開発を進めていくことができるが、新しい技術を採用する場合はVプロセス左側の目標設定から性能計画のフェーズで実験による仮説検証を行い、その新技術の価値を最大化するとともに、開発の早い段階で性能の成立性を見極めて手戻りを減らすことが必要となる。これによって、お客さまにとって価値の高い、競争力の高い商品を開発することができる。

車両の電動化における最初の、そして最大の変化点は、動力源が内燃機関 (Internal Combustion Engine, ICE) から電気モータに置き換わる点である。一般に電気モータはICEよりもレスポンスに優れており、きめ細かい制御が可能となる。これにより車両の運動性能を高めることが可能となる。

BEV (Battery Electric Vehicle) ではバッテリーに蓄えた電力で駆動用モータを回して車両を動かしている。

また、日産独自の電動化技術であるe-POWERでは発電専用のICEで発電用モータを駆動し、その電力で駆動用モータを回して車両を動かしている。

BEVでもe-POWERでも従来のICE車に比べると電子制御で性能をコントロールできる幅が広がり、自由度が増えている。自由度が増えた中で最適解を見つけるには、より多くの仕様を実験する必要が生じる。これを先行試作車両による実車実験でやり切ろうとすると、車両の試作・改造 (仕様変更) および実験評価を繰り返すのに多大な期間・工数・費用を要する。そこで、上述したバーチャル技術を活用した台上実験技術を適用する。

このあとの章で紹介するドライビングシミュレータ実験技術やe-POWERパワートレイン台上実験技術は、そのような背景から生み出したものである。



図5 ドライビングシミュレータ

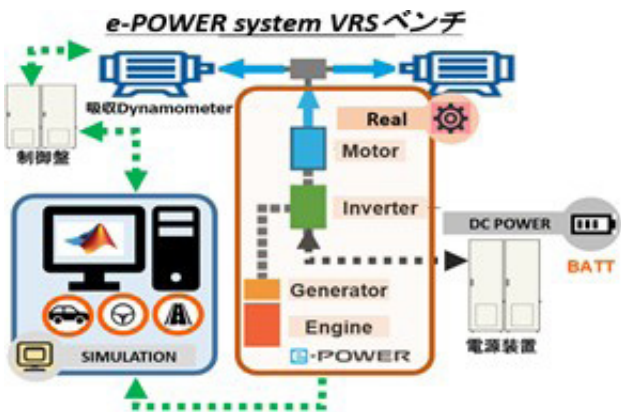


図6 e-POWERパワートレイン台上実験技術

ICE車に比べてBEVになると航続距離に対するお客さまの重視度が高くなる。BEVの航続距離はバッテリー容量と電費で決まるが、電費に最も影響の大きい因子は空気抵抗であり、その空気抵抗を低減する手段の一つとして電動格納式のドアハンドルの採用が進んでいる。このような電動部品の動き方ひとつをとっても適切な目標設定をすることで、お客さまに高級感や先進感といった情緒的価値を提供することができる。ここでも様々な仕様の先行試作品でトライ＆エラーを繰り返すよりも、バーチャル技術を活用することが効率的・効果的であり、それが第4章のバーチャルリアリティ実験技術の適用例である。

電動化に伴って熱収支に関して新たな課題が生じる。BEVはICEのような排熱エネルギーが無いため効率 k が高い一方で排熱を利用した室内暖房が出来なくなる。また、バッテリーやモータを適正温度に保つためには高負荷走行時や急速充電時に冷却が必要となるが、その冷却システムは室内冷房システムと共用している。システムが複雑化している上に、走行や充電のシーンと周囲の温度環境の組合せによって膨大なパターンの実験評価によって、効率の高い熱マネジメントシステムを実現することができる。

そのために開発したのが第5章の熱マネジメントシステム実験技術である。

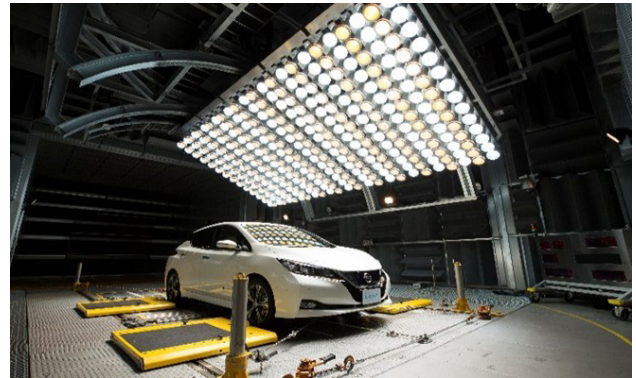


図7 熱マネジメントシステム実験

最後に紹介するのはX線CT非破壊計測技術である。バッテリーやモータなどの電動車特有の部品・システムの開発、あるいは車両軽量化のための新材料・新工法の採用など、非破壊計測のニーズは高まっている。日産自動車では社内にその技術を持つことによって、スピーディな対応が可能となっている。

これらの技術に共通するのは、どれも既製品を買ってきてそのまま使っているのではなく、社内で独自開発しているということである。もちろん、それ以外にも、一般に市販されている製品を買ってきたり、設備メーカーや計測器メーカーに作ってもらっている物も多い。しかし、どのような仕様の設備を導入するのか、どんなスペックの計測器が必要なのか、それらをどう組み合わせるとどう動かすのか、そういったことを考えるのは実験部のエンジニアが担っている。車両の評価を行っている当事者だからこそ、何が必要なのか見抜くことができるのである。

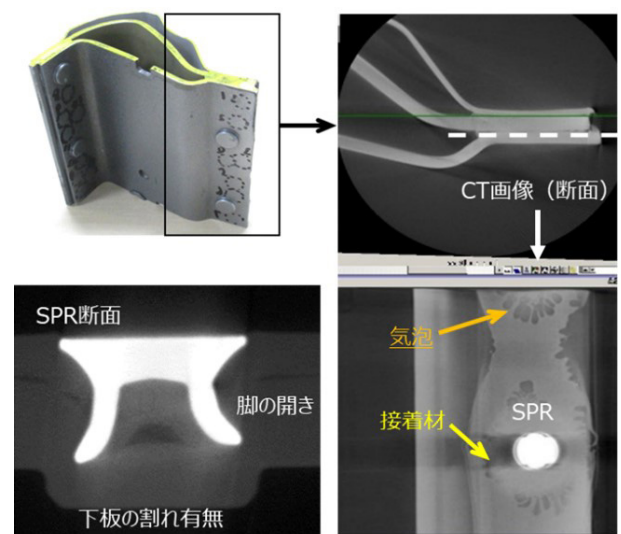


図8 X線CTの例

4. あとがき

どんなに目新しい技術を採用しても、実験に裏付けられた適切な性能目標設定や現象メカニズム分析、タイムリーな設計検証等が無ければ、その新しい技術を新たな価値に繋げることは出来ない。

新しい実験技術によって、性能を向上させ、開発効率を高め、開発期間を短くすることで、魅力的な新型車をお客様に提供することが出来る。

実験技術というのは、車両に搭載される技術と異なり、それ自体が直接お客さまに届けられることは無いが、実験技術によって生み出された性能や品質がお客さまに価値を届けることになる。そして、車両に搭載された技術は、リバースエンジニアリングによって比較的容易に競合他社の知るところとなるが、実験技術ノウハウは外から伺い知ることが難しい。

今後も日産独自の実験技術を磨き続け、商品競争力の高い魅力的なクルマづくりに貢献していく。

参考文献

- (1) 日産自動車ホームページ もうひとつの品質物語
<https://www.nissan-global.com/JP/SUSTAINABILITY/SOCIAL/QUALITY/STORY/THENEVERENDINGROAD/>
- (2) 日産技報 2015年 NO.77 実験・計測技術
- (3) 日産技報 2012年 NO.71 魅力ある新技術の創出と高い品質の実現を支える実験・計測技術

著者



田中 耕一郎

特集2：電動化に貢献する実験技術

2. 電動車ならではの性能を創りこむ
ドライビングシミュレータ実験技術

藤田 裕幹* 磯野 洋一* 今村 昌幸* 町田 直也* 林 豊*

1. はじめに

車両の電動化に伴い、応答性の良い駆動力をきめ細やかに制御することで、新しい運転感覚を作ることが出来るようになってきた。一方で、制御のパラメータの数や調整の幅が広がることで適合の自由度があがり、実車を用いた適合では多くの手間や、長い適合期間が必要になってきている。

日産自動車では、2019年にドライビングシミュレータ (DS: 図1) の本格稼働を始め、現在までProPILOT 2.0のオーバーライド時の安全性の検証、タイヤ特性や車両諸元 (重心高、重量配分等) による操安性能の検証などで活用を進めてきた。最近では、高度なスキルを持つ評価ドライバー以外に一般ドライバーの運転操作検証が行えることから、人の感じ方をベースに新しい運転感覚の目標設定や達成レベルの適合への活用を始めている。このためにはより精度の高い運転感覚の再現が不可欠であり、DSのモーションシステムの改良や、キューイング制御の開発などの技術開発を行い、より再現精度の高い挙動を追求している。そこで、本章ではDSの技術開発における内容と、その結果を活用した適用事例について紹介する。



図1 DS外観

2. DS新技術開発

2.1 モーションシステムの改良

日産自動車のDSは、リアルタイムにシミュレーションされた車両挙動をDS上で1:1の同じ動きで実現するため、長い並進レールと短い並進レール、ヘキサポット、ターンテーブルで構成されている (図2)。

Y並進レールは最大加速度 12m/s^2 を発生できる性能があるが、最大加速度から安全に停止する必要があるため、使用できるレール長さは改良前で有効ストロークが $\pm 11\text{m}$ であった。しかし、加速感や電動化による制御等の様々な評価を行うのにあたり、有効ストロークが足りず、DSシステムの急停止が起きるケースが発生した。その場合には、モーションキューイング上でゲインを落とし体感加速度を落とす、またはフィルターを通し体感時間を短くする必要があった。また、評価ドライバーによるDS評価では、実車に対して挙動の遅れを感じるコメントがあり、十分な性能になっていない事も分かってきた。

改善方策として、Y並進レールの制御方法を見直す事で、有効ストロークが $\pm 11\text{m}$ から $\pm 14\text{m}$ となり、従来と比べ6m有効距離を長くした事と、XY並進装置、ヘキサポット、ターンテーブルの応答改善を目的にサーボ特性の変更も行った。これにより、Y並進レールで従来の時定数に対して最大344%応答性を向上することができた。

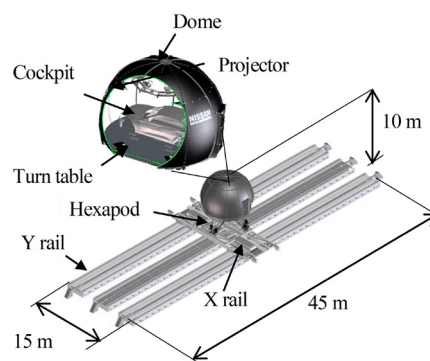


図2 DSシステム構成

* カスタマーパフォーマンス&実験技術革新部

モーションシステムの制御変更に伴い、各ステップ応答のむだ時間と時定数、周波数特性の計測を行った。図3にDS制御システムの構成を示す。リアルタイムシミュレータは1ミリ秒で信号をモーションシステムに伝達が可能である。計測はリアルタイムシミュレータ内のPCから信号を発信し、ヘキサポット内にあるコックピットフロアに加速度が伝達するまでの特性を計測した。

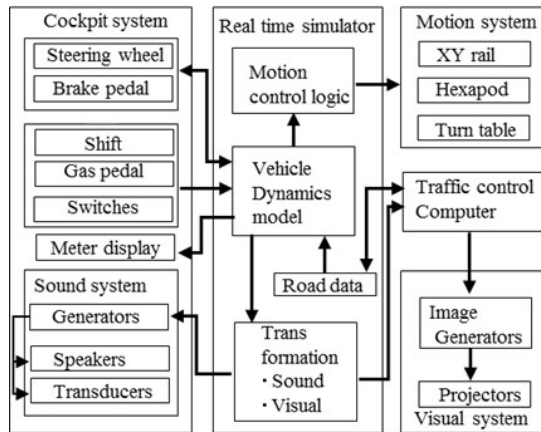


図3 制御システム構成

表1にモーションシステムが動き出してからコックピットフロア伝達までのむだ時間を示す。むだ時間はターンテーブルが最も遅く、並進レールと比較し22msの遅れがある。表2に0.3Hzの各伝達特性を示す。ヘキサポットの伝達特性が他よりも悪い事が確認できる。これは構造的に6本のシリンダーでドームを支えているため、イナーシャの負荷が他よりも不利になっているのが原因だと考えられる。以上の結果より、信号を同じタイミングで入力すると、ロールとピッチだけが遅れてしまうため、モーションシステムキューイング側で評価したい領域に合わせてパラメータを設定する必要がある。

表1 むだ時間

		Pure delay[ms]
Rail	X	33
	Y	33
Hexapod	Z	37
	Roll	45
	Pitch	48
Turn table	Yaw	55

表2 伝達特性

0.3Hz		Gain[db]	Phase[deg]
Rail	X	-0.1	-4.1
	Y	0.2	-4.5
Hexapod	Z	0.1	-4.5
	Roll	0.3	-12.5
	Pitch	0.7	-12.9
Turn table	Yaw	-0.1	-3

2.2 モーションキューイング開発

運転の感覚を重視するDSでは小さな変化でも大きな違和感になる。前項で計測した装置の伝達特性結果を用いて、人が感じる体感挙動の向上を目的にモーションキューイングの開発を行った。ここでは、特に着目した評価ドライバーのコメントから出てきた微舵域の加速度特性と上屋のロール挙動の2点についての開発内容を以下に示す。

DSの車両運動シミュレーションでは、実車両にある車両の剛性や遊びの機械的な遅れが存在しないため、本来よりも応答が良くなり、逆に違和感となるケースがある。実車両はハンドルの操作力が、力の作用と反作用を通して、操舵角が生まれる。しかし、DSは操作力ではなく、操舵角をシミュレーションに使用している。力の釣り合いに関係なく、強制的に操舵角が生まれるため、応答遅れが小さいと考えられる。操舵力と操舵角の関係をシミュレーションでできる解析であれば解決できる余地はあるが、現在の技術ではリアルタイムで計算を解くのは難しい。したがって、モーションキューイングに疑似的な立ち上がり遅れを付加し、体感挙動の改善を行った。図4は制御の一例を示す。入力に対して立ち上がりを緩やかに遅らせ、変化が一定の時は一定の出力を行う。この方法を用いて、各々の装置に送信する信号ごとに制御を変更し、人が感じる加速度のタイミングが揃うように適合を行った。

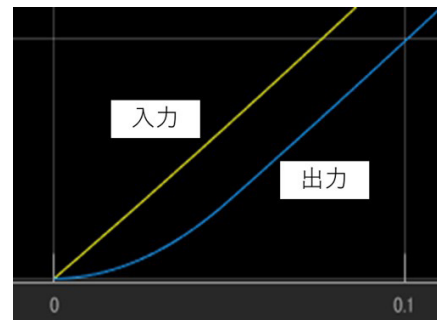


図4 信号制御

DSのドライバーシート位置はヘキサポットとヨーテーブルの中心にあるため（図5）、車の回転中心とヨーの回転中心が異なるシステムである。したがって、回転中心位置が車両の重心位置と異なる分だけ、体感加速度を座標変換している。また、一般的にレーシングシミュレーターと言われるDSはドライバーシートの座面を傾ける、または腹部付近を回転中心とするシステムが多い。当社もドライバーの腹部付近を回転中心として、ロールとピッチの制御を行っている。しかし、この方法だと対角のロールピッチ感覚や上下方向の動きを感じにくいいため、実際の上屋挙動の感覚と異なる。したがって、ロール軸上で上屋を動かす方式に変更し比較検証した。

ヘキサポットの回転中心は3次元回転行列を用いて変換している。

$$Roll' = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(Roll) & -\sin(Roll) \\ 0 & \sin(Roll) & \cos(Roll) \end{pmatrix}$$

$$Pitch' = \begin{pmatrix} \cos(Pitch) & 0 & \sin(Pitch) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(Pitch) & 0 & \cos(Pitch) \end{pmatrix}$$

$$Yaw_hex = \begin{pmatrix} \cos 0 & -\sin 0 & 0 \\ \sin 0 & \cos 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$Yaw_Tbl = \begin{pmatrix} \cos(Yaw) & -\sin(Yaw) & 0 \\ \sin(Yaw) & \cos(Yaw) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$S = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}$$

S:シート位置と回転中心ベクトル

$$A = S \times Yaw_Tbl$$

$$Ar = Roll' \times Pitch' \times Yaw_Hex$$

$$S' = \begin{pmatrix} Surge \\ Sway \\ Heave \end{pmatrix} = A - Ar$$

S':ヘキサポットの回転中心補正量

以上より回転中心を変更し、比較評価を実施した。従来と比較すると、ロールをしっかりと感じられるようになったコメントはあるが、対角方向の挙動については完全に再現出来ているレベルではない。これは、ピッチ方向の挙動が課題と考えられる。ピッチの回転中心はシチュエーションで動的に変化すると考えられる。この点については、改善の余地があると言える。

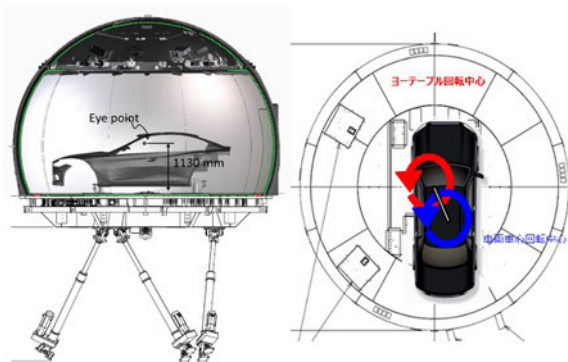


図5 ドライバー着座位置

2.3 DS新技術開発の効果の検証結果

本項で取り組んだモーションシステムの改修、モーションキューイング開発内容を織り込み、以前の仕様との比較評価を行った。評価方法は、車両挙動評価に必要な項目を設定し、評価ドライバーによる5点法で実施した。なお、3点がDSでの評価が可能な最低限のレベルとしている。

図6に評価結果を示す通り、今回開発してきたDS技術により、全体の評価が上がり、より実車に近い挙動を再現できるようになったことが確認できた。今後は、更なる評価領域拡大として、路面不整や横風による外乱のある走行環境や、雪路やサーキットという特殊な条件下においてもDSを活用する為の技術開発を取り組んでいく予定にしている。

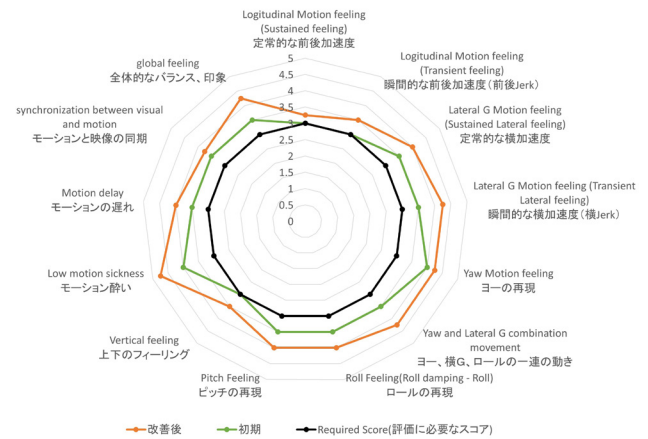


図6 DSの評価結果

3. 開発活用事例

3.1 AURA NISMOの伸びのある加速感実現

NISMOがチューニングする性能のひとつに加速感がある。アクセル操作量に対する駆動力を変更し、NISMOが考える加速感の演出を行っている。現在、NISMOの開発は車両ごとに制御パラメータを適合しており、近年は様々なモードを評価するため、テストパターンが多くなり網羅的に最適解を導くことが難しくなっている。そこで、人の感覚に着目し、加速感の要素ごとに分析を行うことで、NISMOが重視する加速感を達成するために、DSを活用した。

DSで前後G「高さ」「レスポンス」「伸び」の3つの要素(図7)に関して、アクセルストロークに対する駆動力と加速感について、パラメータスタディを実施した。本結果を用いて、実車検証を実施した結果、加速感が向上したことから、DSでもパラメータスタディ評価は可能である事を確認した。今回は、要素の「伸び」について説明する。

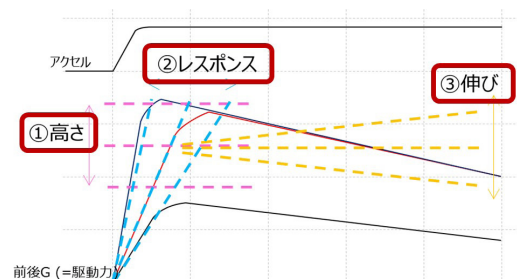


図7 加速感の要素

加速の伸び感を出すため、アクセル開度に対するピーク加速度後の加速度減少について検証を行った(図8)。ピーク加速度後に加速度の落ち代が小さいほど、伸びのある加速感を強く感じる。しかし、出力に上限があるため、ピーク加速度を継続するのは難しい。加速度の落ち代をコントロールする事で、伸びのある加速感を実現しようとした。試験はDSのY並進レールを前後加速評価に使用し、0.3G加速であれば約3秒の評価が可能である。実際は減速区間もあるため、短時間の評価となるが変化は十分体感可能である。試験は図8のように、ピーク加速度後の落とし方を変化させ、評価をつけた。発進付近の速度と中速域では、加速度の落ち代による評価点が変わる事が分かった。微低速は0.04G/以下、中速域で0.025G/s以下の加速度減少率で、伸びのある加速を感じる事ができる事を確認した(図9)。

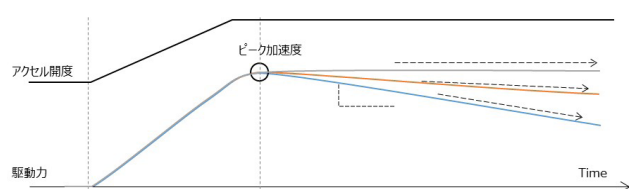


図8 伸び感の検証方法

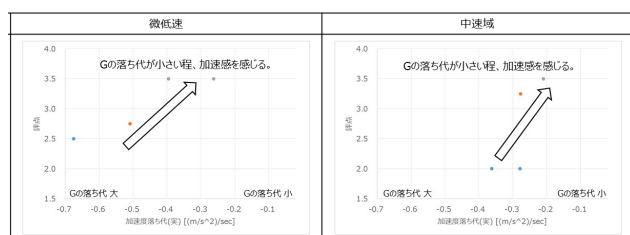


図9 官能評価結果

この結果を元に、AURA NISMOは専用チューニングを施し、NISMOらしく力強く伸びのある加速感を味わえる「NISMO」モードを設定している。DSの試験は3日間で約130仕様の評価を実施した。これは実車であれば同評価は約6週間相当のである。安定した評価が行えるDSでなければ、短期間で分析する事は不可能だったと言える結果である。



図10 AURA NISMO

3.2 e-4ORCEの加減速制御開発⁽¹⁾

当社の自動車開発では定量的な性能評価以外に、乗員の感覚までを含んだ設計手法が求められている。CAEのシミュレーションを活用した車両、システムの挙動予測に対する研究所報告は数多くあるが、人間の主観評価までを含んだ性能予測や設計に関する報告は少ない。また、人の主観評価は人間の感覚の予測が必要であり、そのモデル化は未知の部分が多くなっている。過去のデータ、経験に基づいた性能設計が行えても、全く新しい挙動や性能を検証するには実車試験以外の選択肢しかないが、膨大な試作車両を製作するのは困難である。

e-4ORCEの制御開発において、CAEによるシミュレーションを活用した設計や性能予測以外に、人間の主観評価を行う事で、従来では難しかった乗員の感覚までを含めた開発を実施した。DSを用いる事で、試作車を用いることなく、網羅的に感覚を含めた試験を効率よく開発する事ができた。人間の主観評価、乗員の影響をも考慮した性能設計手法について紹介する。

図11にDS、人体シミュレーション、車両挙動シミュレーションを用いた性能設計手法を示す。今回の電動AWDによって変更することができる車両状態量を検討し、DSを用いてそれぞれの状態量に対する主観感度分析を実施する。主観感度分析の結果から、人間の感覚に対して最も影響するパラメータを確定し、それについて人体シミュレーションを用いたメカニズム解明と定量指標値への落とし込みを実施する。落とし込んだ目標定量値から車両シミュレーションを用いて、目標性能に達するような制御ロジック及び車両諸元を確認する。最終的な車両諸元、及び制御ロジックを用いて改めてドライビングシミュレータでの実車前妥当性評価を行った後、実車実験で最終確認を行うプロセスを実施する。

以上のプロセスを踏むことで、人間の主観評価まで含んだ性能を予測し、実車で効率的な開発が可能となった。

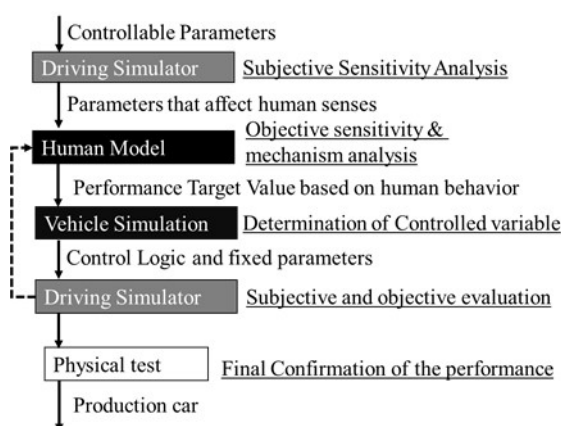


図11 Performance design process

本紹介では、DSを活用した内容について説明する。図12に示されるように、車両挙動シミュレーションで得られた前後運動に対する定常前後加速度の大きさや前後加速度の微分である前後ジャークの大きさまた同様に、ピッチ角やその微分値であるピッチレートを任意の数値で模擬し、ドライビングシミュレータに入力することで、各影響因子に対する感度分析をDSで実施した。

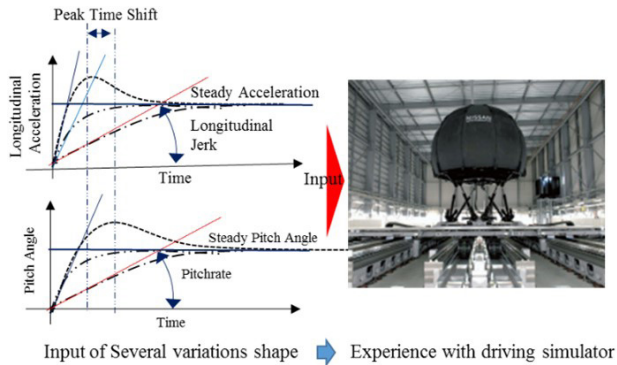
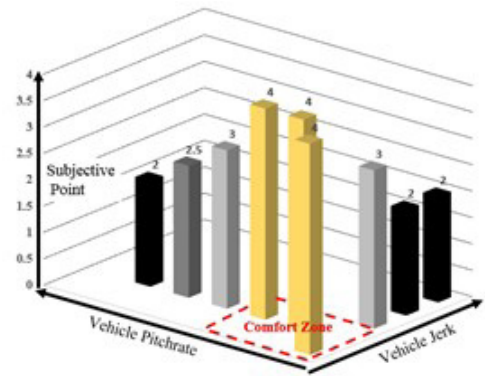
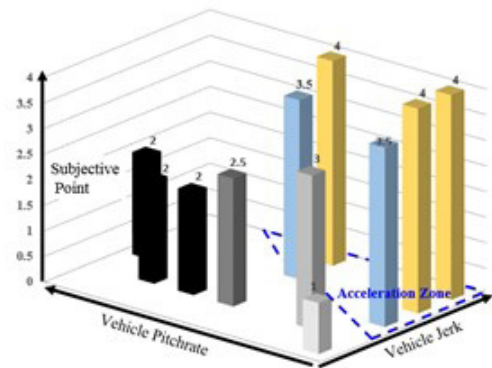


図12 Sensitivity analysis by driving simulator

結果を図13に示す。横軸それぞれに前後ジャーク、及びピッチレートを示す。また、縦軸は乗員の評点を示し、図上方向ほど主観評点が良いことを意味し、評点毎に色分けをしている。快適感に対する評点を図13a、加速感に対する評点を図13bに示す。図13aではピッチレートを抑えることで、加速感、快適性が共に増加し、前後ジャークについてはドライバーの状況に応じた適切な値に設定することで加減速挙動において高い主観評価が得られると考えられる。



(a) Feeling of comfort

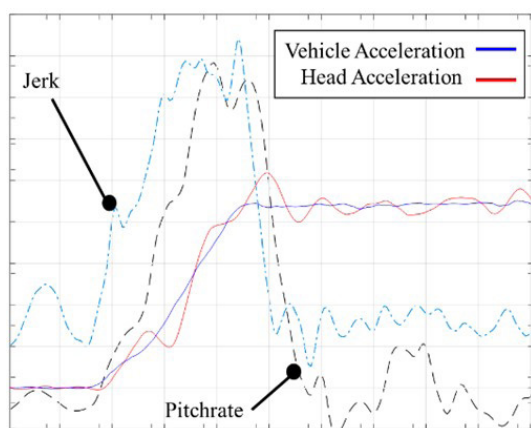


(b) Feeling of acceleration

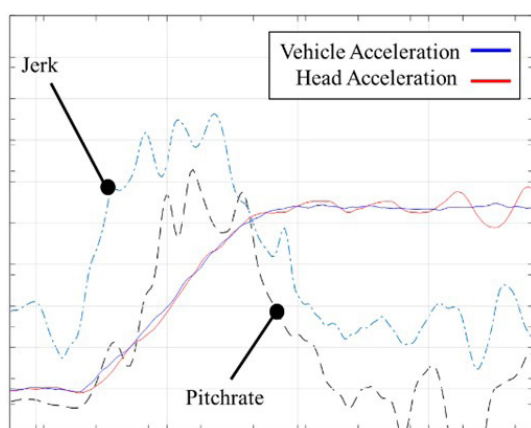
図13 Subjective evaluation of driving simulator

以上のドライビングシミュレータの実験結果及び乗員挙動予測モデルのシミュレーション結果を踏まえて、乗員の快適性を向上させるための前後ジャーク、及びピッチレートを対して目標性能を定めた。

上記の目標設定を用いて実際の試作車両で効果を確認した。車両が停止状態から特定の車速になるまで同一の加速度で加速する場合において、乗員への負荷を軽減していない結果を図14aに示し、また乗員への負荷を軽減する制御を使用した時の結果を図14bに示す。赤線は加速時に乗員頭部に取り付けられた加速度であり、青線は車両ばね上に取り付けられた加速度である。また前後ジャーク及びピッチレートを第2軸に示す。前後ジャーク及びピッチレートを抑えることで、人間の頭部加速度と車両加速度の乖離が少なくなっていることが確認できる。このことから乗員の頭部の揺れを軽減できていることが確認できる。また同様に主観評価についても乗員の快適性が向上していることが確認することができた。本ドライビングシミュレータで定めた目標値を用いることで、効果的にスムーズな加速感を実現できることが分かった。



(a) Control OFF



(b) Control ON

図14 Acceleration and pitch rate by driving force control

4. あとがき

人の感じ方を精度よく再現可能なDSの技術開発を進めることで、電動化に伴う新しい価値の目標設定や、達成レベルの高い適合が可能になってきた。今後も継続して運転感覚の再現性を高めると共に、世界の様々な路面不整や風の影響などの環境要件の再現性を上げる開発を進めることで、電動化や知能化に伴う新しい運転感覚や安全性を向上させた車両の開発に貢献していく。

参考文献

- (1) 町田 直也：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、日産自動車(2022)

著者



藤田 裕幹



磯野 洋一



今村 昌幸



町田 直也



林 豊

特集2：電動化に貢献する実験技術

3. 新機構部品の品質を試作レスで評価できる
バーチャルリアリティ実験技術

丸勢 修* 中園 泰徳* 久芳 憲治* 上野 英里奈*

1. はじめに

近年競争が激化している電動車両開発において、航続距離の確保は重要な領域のうちの1つである。走行中にドアハンドルを格納する格納式ドアハンドルを、空気抵抗改善による航続距離の改善の一方策として検討している。格納式ドアハンドルには、空気抵抗改善に加えて、格納時の見た目のすっきり感や乗車時に自動で展開するおもてなし感など情緒的な付加価値の提供も期待できる。量産車への採用事例を見ると、ドアハンドルの突出形態が平行型、片持ち型などスタイルが異なっており(図1)、例えば、ドアハンドルの突出・格納という自動的な動きに対する印象を作り込むことで、情緒的な価値を提供できる。

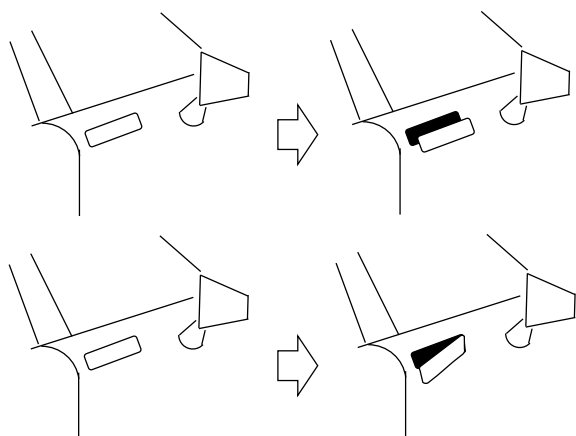


図1 格納式ドアハンドルの採用例

情緒的価値、具体的には、対象機能から受ける印象を開発する為には、対象機能の使用体験をどう感じているかを評価する必要がある。日産自動車では、Proof of Concept(概念実証)の考え方に沿って、バーチャルリアリティ(以下VR)技術を活用して機能の使用体験を再現し、印象を主観評価している。

本章では、自動車の機能開発において、機能の使用体験の

印象を評価可能なVR評価環境を自社開発し、格納式ドアハンドルの先行検討に適用した事例を紹介し、情緒的価値の開発に対する本評価手法の有効性について述べる。

2. 情緒的価値の評価手法

自動車の機能の情緒的価値を評価するには、対象機能の使用体験から受ける印象を評価することになる。印象の評価は、人がどう感じているかを測る心理的側面に対応した測定法を選択する必要がある。日産自動車の開発では、対応する物理量と関わりなく、主観的印象を測定する方法(心理学的尺度構成法)を用いることが多い。主観的印象を直接確認する評価となる為、評価対象機能の使用体験の再現精度が、評価結果に大きな影響を及ぼす。これまでの自動車開発における使用体験の再現は、車体や内装を実際の大きさと再現した物理的モックアップを使うことが多かった。しかし、近年、増加傾向にある部品の動きを伴う機能については、物理的モックアップでは、動きの再現試作に時間を要する為、開発期間内での評価が困難である。そこで、バーチャル空間で、車体や内装を設計CADデータで再現し、機能の動きをプログラムで再現することで、短期間で使用体験できるVR評価環境を開発した。

3. VR評価環境の構築

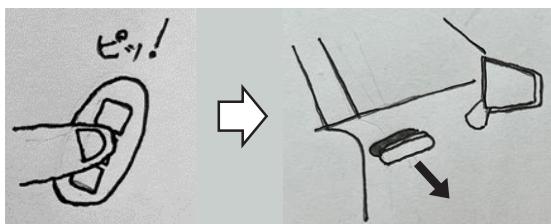
格納式ドアハンドルの先行検討への適用事例を紹介する。格納式ドアハンドルの一般的な想定機能は、乗車時にリモートキーでドアを解錠するとドアハンドルが自動で突出し、走行開始後にドアハンドルが自動で格納される、降車時にドアを開けるとドアハンドルが自動で突出し、ドアを閉めて鍵をかけるとドアハンドルが自動で格納されるものである(図2)。

* カスタマーパフォーマンス&第二車両実験部

ユーザーが、運転席のドアに近づく。



ユーザーが、リモートキーで解錠すると、ドアハンドルが、自動で格納状態から突出する。



ユーザーが、突出したドアハンドルを掴んで、ドアを開け、運転席に乗り込む。



ユーザーが、走行を開始すると、ドアハンドルが、自動で突出状態から格納状態になる。

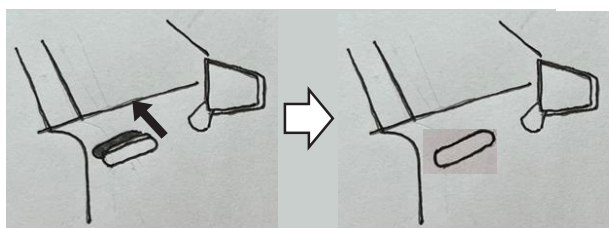
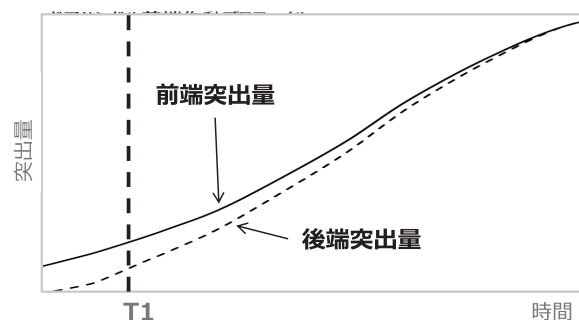


図2 格納式ドアハンドルの想定機能(例)

ドアハンドルの自動的な動きから受ける印象を活かして、お客さまにおもてなし感や上質感等の情緒的価値を提供できないか検討した。以下に、ドアハンドルの自動的な動きのばらつきが、上質感におよぼす影響を検討した事例を紹介する。

ドアハンドルを自動で突出および格納させる場合、実際の部品は構造上設計公差を持っている為、ドアハンドルの自動突出または格納タイミングが、例えば、ドアハンドルの前端と後端でズレを生じる。具体的には、図3に示す様に、自動突出・格納時の突出量の時系列変化が、部品の設計公差によってばらつく。この突出量の時系列変化のばらつきがどの程度であれば、ズレから受ける印象が、上質感を損なわないのか確認した。

自動突出・格納時の突出量の時系列変化のズレ：
ドアハンドルの前端と後端



T1の状態

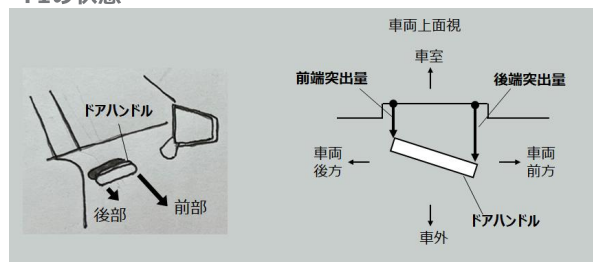


図3 ドアハンドルの自動的な動きのばらつき(例)

ドアハンドルの自動的な動きのばらつき(図3)と上質感の関係を確認する為に、ドアハンドルの自動的な動きのばらつき量異なる複数の仕様について、動きから受ける印象を評価することとした。

ドアハンドルの自動的な動きのばらつきから受ける印象を評価する環境には、①ドアハンドルの自動的な動きの微小なばらつきの再現、②使用過程におけるドアハンドルの動きを視認するタイミングと見え方(視点、視野、視認対象の大きさ)の再現、が必要となる。

① 図3に例示した設計公差によるドアハンドルの突出タイミングのズレの組合せ(ドアハンドルの前端と後端のズレ量の組み合わせ)を再現した複数の仕様を物理モックアップで評価しようとした場合、評価専用の機構を製作する必要がある、開発期間内に評価完了することが困難である。一方で、バーチャル空間を再現するVR評価環境であれば、設計パラメーター違いの動きを、立体映像で表示することが短期間で可能である。

② 使用過程における、評価者の姿勢・体格に合わせた視点からの視野範囲、評価者の行動に連動した視認対象の見え方の変化、および視認対象の大きさを、現実世界と同様に再現しなければ、部品の動きの印象を評価することはできない。

様々な評価環境の中から、上記の要件を満足するポテンシャルがあるVR評価環境を選択した(図4)。

評価環境の要件	評価環境		
	動画	モックアップ	VR
① ドアハンドルの自動的な動きの微小なばらつき再現	×	×	○
	微小な動きを実際の大さで再現できない	試作時間が長く、開発期間内での評価が困難	ドアハンドルの動きのバーチャルモデル作成が必要
② 使用過程における評価者の行動に連動したドアハンドルの見え方の変化	×	○	△～○
	評価者の動きと視点・視野が連動しない		行動に応じた視点の動きの正確な再現が必要

図4 ドアハンドルの自動的な動きの印象の評価環境

バーチャル空間で使用体験を再現するVR評価環境の構成要素は、評価者の行動を受け付ける入力部、行動の結果起こる周辺環境の変化を再現する環境再現部、周辺環境の変化から受ける感覚（視覚や聴覚）を再現する情報提示部の3要素で構成される（図5）。

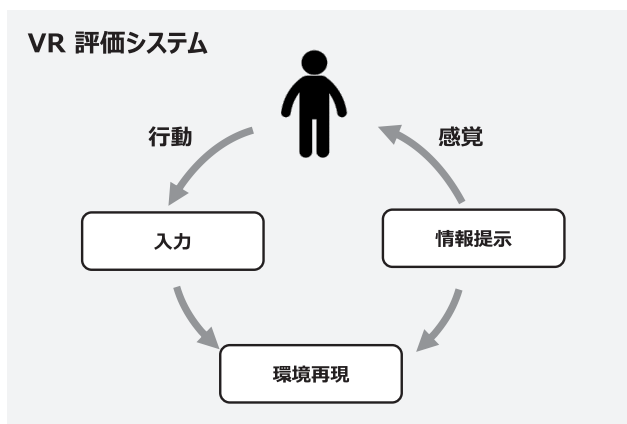


図5 VR評価環境の構成要素

格納式ドアハンドルのVR評価環境を構築した過程を説明する。

最初に、格納式ドアハンドルの使用体験を時系列で記載したユースケースと、ユースケース毎のユーザーの認知と行動を整理した（図5）。

ユースケース	ユーザーの認知・行動
ユーザーが、運転席のドアに近づく	車の外から、運転席を中心に車を見る 車の運転席に歩いて近づく
ユーザーがリモートキーで解錠すると、ドアハンドルが、自動で、格納状態から突出する	リモートキーの解錠操作をする ドアハンドルが格納状態から突出する過程を見る
ユーザーが、突出したドアハンドルを掴んで、ドアを開ける	ドアハンドルを見る ドアハンドルを掴んで、ドアを開ける

図5 ユースケースとユーザーの認知・行動(例)

次に、ユースケースに紐づいた認知・行動をバーチャル空間で体験する為に必要な再現要素を決定した（図6）。

ユーザーの認知・行動	再現要素
車の外から、運転席を中心に車を見る	省略
車の運転席に歩いて近づく	省略
リモートキーの解錠操作をする	省略
ドアハンドルが格納状態から突出する過程を見る	【入力】 ・評価者の実際の目の位置と視線の向きの検出 【環境再現】 ・評価者の実際の目の位置と視線の向きに応じた視野範囲の計算 ・ドアハンドルが格納状態から突出する動きの計算 【情報提示】 ・評価者の視野、視野内の車体とドアハンドルの動きを表示 ・評価者の目の位置と視線の向きの変化に応じた視野範囲の変化の再現
ドアハンドルを見る	省略
ドアハンドルを掴んで、ドアを開ける	省略

図6 バーチャル空間の再現要素(例)

ヘッドマウントディスプレイを用いたバーチャル空間上に、決定した再現要素を構築した。図6の再現要素のうち、「評価者の実際の目の位置と視線の向きに応じた視野範囲」については、バーチャル空間上に構築するソフトウェアを自社開発した。これにより、評価者の行動と視認対象の見え方が現実と一致して、格納式ドアハンドルの自動的な動きの印象を正確に評価可能となった。加えて、再現要素「ドアハンドルが格納状態から突出する動き」についても、図3に例示する突出量のばらつきの時系列変化の設計値を直接入力できて、バーチャル空間内で、複数のばらつき特性を簡単に切り替えられるソフトウェアを自社開発した。これにより、突出量のばらつきの大きさを変更しながら、上質感を損なう閾値を評価可能とした(図7)。

この様に、印象の評価に適するバーチャル空間は、汎用のVRシステムで実現しているものが存在しない為、評価のポイントを理解している自動車開発の実験部隊が、VR評価環境を自社開発した。

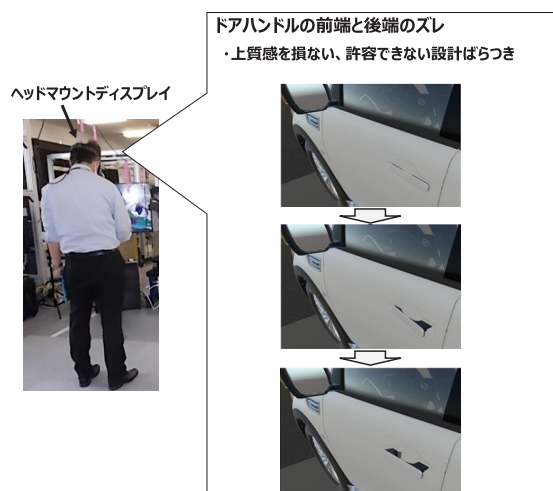


図7 VR評価環境による上質感の評価(例)

4. 技術的特徴

自社開発した「評価者の実際の目の位置と視線の向きに応じた視野範囲」の再現が、バーチャル空間での見た目の印象の

評価に大きく貢献している。実際に車を使用するシーンにおいて、目の位置、視線の向き、視野は、ドライバーの行動に応じて、時々刻々、変化する。つまり、見た目の印象に影響する視認対象の見え方は、乗車等の人の行動に紐づいて決まる為、評価者の実際の目の位置と視線の向きに応じた視野範囲と、行動に応じた変化の再現が重要である。汎用のVRシステムの視点の位置の決め方は、バーチャル空間内の一定位置を定義したものである為、現実空間の視点のある基準点に対する絶対位置を反映したものではない。そこで、汎用VRに備わっている基準点とヘッドマウントディスプレイの相対位置を検出する機能を利用して、評価者の足と地面の接地位置からヘッドマウントディスプレイまでの距離を求めて、ヘッドマウントディスプレイのセンサー位置と目の位置のズレを補正するロジックを作成して、VR評価環境に再現した。

5. あとがき

評価者の行動に連動した視野、および、設計公差によるモノの動きを実際の大ききで再現および視認できるデジタルモックアップを組み込んだVR評価環境を自社開発することにより、視覚から受ける印象を評価可能とした。その結果、情緒的価値の目標設定が可能となった。今後、様々な機能の情緒的価値に対応できるようにVR評価環境の再現要素を拡充させて、ますます増える電動化・知能化部品の価値の最大化に貢献する。

参考文献

- (1) D. Zeltzer : "Autonomy, interaction and presence". Presence, 1, 1, pp.127-132 (1992) MITPress
- (2) 舘 暲: バーチャルリアリティ, 3D映像, Vol.20, No.4, pp.91-98 (2006.11)
- (3) 廣瀬 通孝: トコトンやさしいVRの本、日刊工業新聞社 (2019/3/1)

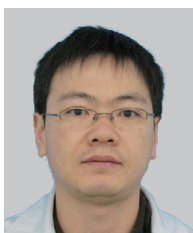
著者



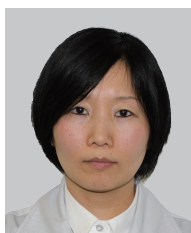
丸勢 修



中園 泰徳



久芳 憲治



上野 英里奈

特集2：電動化に貢献する実験技術

4. 実車を使わずに電動パワートレイン性能を最適化する
バーチャル リアル シミュレータ実験技術

中本 英伸* 平谷 康治* 谷合 宏之**

1. はじめに

地球環境問題、特に地球温暖化防止に対応するため、自動車から排出される二酸化炭素の削減が求められている。自動車会社各社は動力源の電動化、たとえば従来のエンジンと走行用モータを組み合わせたハイブリッド自動車、または走行用モータのみで走行するバッテリーEV (Electric Vehicle) の開発および商品化を急いでいる。従来のエンジンのみで走行する自動車と異なり、電動化されたパワートレインを搭載する自動車の開発はそのプロセスや評価項目が異なるが、開発の歴史が浅く効率的な開発を行ううえで改善の余地がある。比較的下流工程において試作車両を用いて開発される電動パワートレインの場合、その評価をパワートレインシステムを搭載した台上実験室にて、開発のより上流工程において実施する事で、短期間でフィードバックを行う事ができ、開発期間短縮に大きく貢献できる。

本章では、日産自動車ユニークな電動化パワートレインシステムであるe-POWERシステムの開発において、その上流工程における台上実験にて各種性能を適合可能とする実験技術、リアルなパワートレインシステムとバーチャルな車両システムとの組合せにより、車両走行状態を再現可能とするパワートレインVRS(Virtual Real Simulator)システム実験技術を用いた、パワートレイン開発業務のフロントローディング化による開発品質向上、開発期間短縮について述べる。

2. 開発プロセスと実験システム

2.1 開発プロセス

車両開発は沢山の工程を経て行われるが、そのプロセスをV字になぞらせて表現する事が多い。図1に、弊社パワートレイン開発プロセスの模式図を示す。左上の市場要求を元にした車両目標を基点に、システムやコンポーネントへの性能割付や部品設計・部品評価を経て、V字の右バンクにおいてシ

テム・コンポーネント評価、車用評価を行う。仮に開発の後流工程である車両評価で不具合が出た場合、開発プロセス全体として大きく後れが出る。パワートレイン開発においては、車両評価の工程での不具合を未然に防ぐ事で車両開発全体の効率化を行えるため、車両を模擬したパワートレインシステムでの台上実験が重要である。

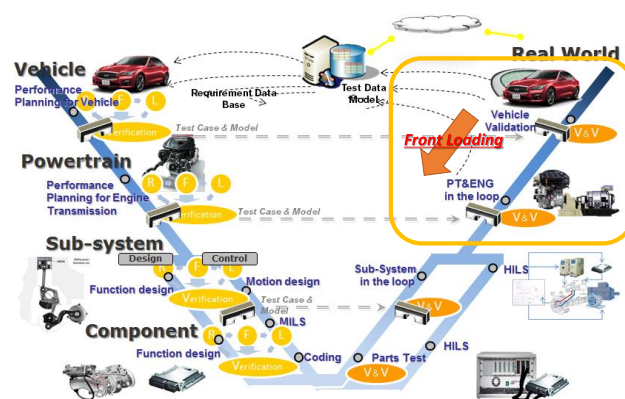


図1 パワートレイン開発プロセス模式図(Vプロセス)

2.2 VRS実験システム概要

図2に、VRS実験システムの概念図を示す。e-POWERシステムは、発電用エンジン、発電用モータ、走行用モータ、インバータ、バッテリーで構成されるが、バッテリーを除くパワートレインシステムをリアルに台上実験室へ設置する。走行用モータから出力される動力は、ダイナモメータにて吸収される。ダイナモ制御システムにおいて、車両を模擬するモデルが用いられ、自動車のドライバーや走行抵抗、道路負荷などを模擬し、決められた走行モードをトレースする。指示を受けたパワートレインのコントローラーが、要求負荷に合わせて走行モータを制御する。また、バッテリーモデルがある所定の容量を下回り、エンジンへ発電指示が出た際には、発電用モータがエンジン始動させ、別な所定の容量を上回ると、エンジンへ停止指示が出され、発電用モータがエンジンを停止させる。

* パワートレイン実験部 ** パワートレイン・EV 先進技術開発部

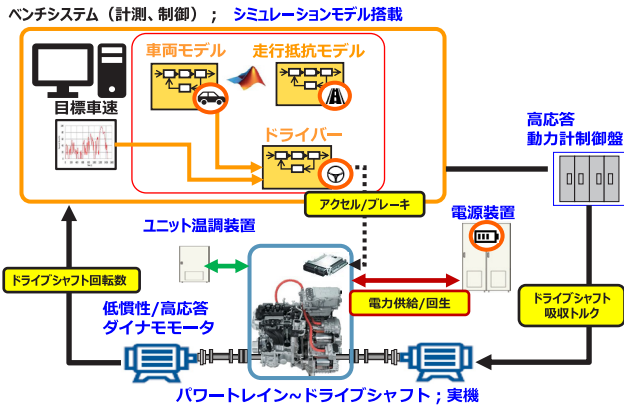


図2 VRS実験システム概要

図3に、パワートレイン（PT）システム全体を台上実験室に搭載するPT-VRS実験システムと、エンジンのみを搭載するENG-VRS実験システムの比較を示す。PT-VRSでe-POWERシステムを評価する場合は、前述した通り発電用エンジン、発電用モータ、走行用モータ、インバータ、減速機を実験室に設置するが、ENG-VRSにおいては、発電用エンジンは実験室に設置されるが、発電用モータ、走行用モータ、インバータはモデルに置き換えられる。

	ENG-VRS	PT-VRS
道路	Virtual	Virtual
運転者	Virtual	Virtual
車体	Virtual	Virtual
バッテリー	Virtual	Virtual
走行用Motor	Virtual	Real
発電用Motor	Virtual	Real
Inverter	Virtual	Real
減速機	Virtual	Real
エンジン	Real	Real
制御ユニット	Real	Real
主な用途	排気性能適合 OBD適合	電動システム評価 駆動性能 運転性/NVH評価

図3 PT-VRSとENG-VRSの比較

2.3 熱マネージメント実験概要

VRS実験において、車両走行状態を模擬するために、パワートレイン環境、特に温度環境条件を再現する事が重要である。図4に、車両走行状態での排気後処理触媒の周辺温度をENG-VRS実験室で再現させたシステムを示す。具体的には、排気後処理触媒の周囲流速を実車と同等にするために、可変風量ファンを設け、車両走行模擬実験中に、車速に合わせて

風量を変化させる。これにより、排気後処理触媒の周囲温度環境が実車と同等になる。



図4 排気触媒温度環境調整システム

車両と台上実験システムでの温度環境差をより小さくするために、エンジン内の油水温を積極的に制御し実車状態に近づける実験システムを構築した。図5に示す熱マネージメント実験システムにおいて、油水温を制御するコントローラ②や、車両走行状態における油水温を再現するためにモデル解析を行うシステム③および④を持つ。

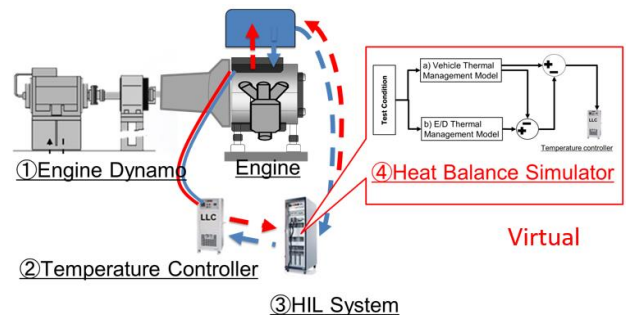


図5 熱マネージメント実験システム概要

2.4 FDV-RによるNVH評価実験概要

運転性、NVH (Noise、Vibration、Harshness) をパワートレインシステムで評価するために、PT-VRS実験システムを用い、FDV (Functional Digital Vehicle) と呼ばれる車両モデルをリアルタイム化したFRV-Rと連携させる手法を用いる。図6に、FDVの概念図を示す。実車の特性を再現するために、全ての機構要素で構成されたフルビークル挙動解析モデルである。プラントと制御モデルとを連成させることで、過渡/定常時の車両挙動予測が可能となる。ただし、FDVはシミュレーション演算に実時間以上が必要であり実機ベンチでの使用は不可である。そのため、実時間（リアルタイム）で演算可能なFDV-Rを開発することにより、PT-VRS実験システム上で運転性、NVH評価を実現した。

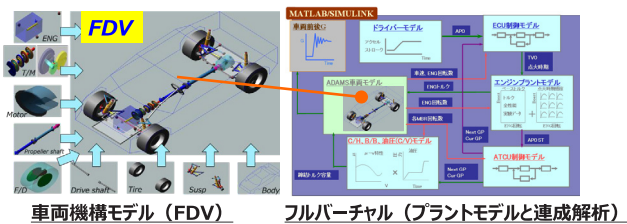


図6 FDV概念図

3. 車両走行模擬実験結果

3.1 モデルを用いたリアルタイム実験結果

VRS実験システムにおいて、車両などを模擬するモデルがリアルタイムで動作する必要がある。図7にNEDCモードを走行したシャシーダイナモ (C/D) 実験結果と、NEDCモード走行を模擬したVRS実験結果を示す。2.1で示したシステムが機能し、C/Dにて走行した実際の車両と同じ車速およびエンジン回転での運転が可能となっており、VRS実験でのモデル実験の実現性が証明された。

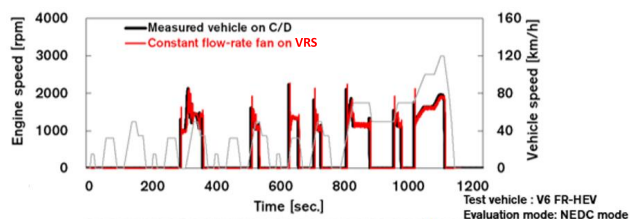


図7 モデルのリアルタイム性確認結果

3.2 温度環境の車両走行模擬実験結果

パワートレイン開発において、エンジン排気エミッションの排出量を規制値以下にするよう開発するためには、C/D実験における計測値をVRS実験において再現させる必要がある。2.3で示した実験システムを用い、エンジン内部および周辺温度のC/D実験との比較を行った。図8に、排気後処理触媒の温度を比較した結果を示す。当初VRS実験において、後処理触媒の周辺に一定速度の風をあてて計測を行っていた (赤線)。この方法では後処理触媒の温度がC/D実験の状態を再現できず、排出されるHCにずれが生じた。後処理触媒の周辺の風をC/D実験と合うように可変のファンを用いた場合 (青線)、後処理触媒の温度がC/Dに近くなり、結果排出HCの量がC/D実験と良く一致するようになった。

図2や図3で示したENG-VRS実験システムを用い、図8で示した工夫を加え、台上実験室でモード排気エミッション排出量を計測した実験におけるモード全体の未燃HC排出量を図9に示す。図8と同様、黒がC/D実験結果、赤が後処理触媒周辺の風速が一定の場合の実験結果、青が風速をC/Dの状

態に近づけた場合の実験結果である。図8のHC排出量の挙動が示すのと同様、モード全体の未燃HCの量も、C/D実験結果を再現できた。これによりVRS台上実験システムを用いて、排気エミッションの適合実験が可能となった。

図10に、車両台上実験を用いて排気エミッションに関わる制御定数の適合を行う場合に対して、VRS台上実験を用いて適合を行う場合の、工数削減効果を示す。車両の準備や実験の手間を削減し、65%もの工数を削減できた。

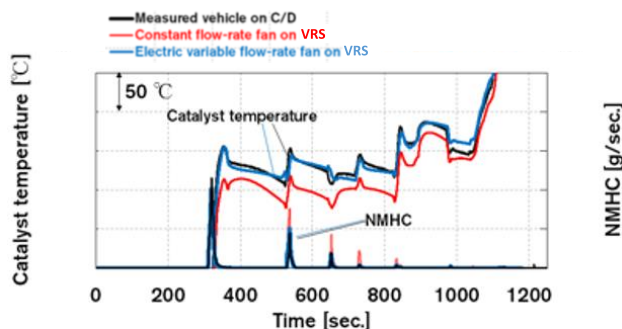


図8 車両と台上の温度比較

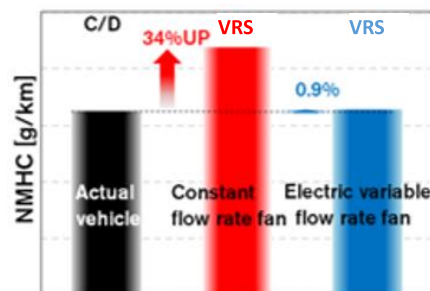


図9 車両と台上のHC比較

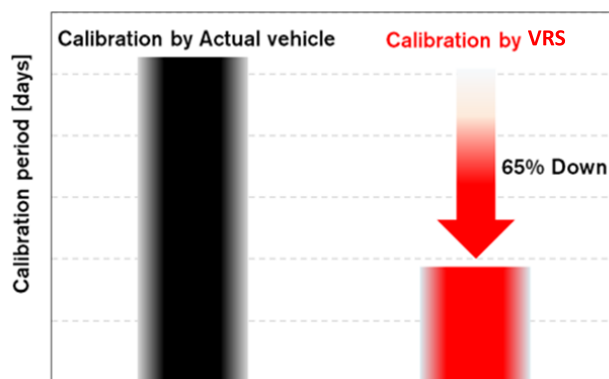


図10 VRS実験での排気適合効果

3.3 FDVによるNVH評価実験概要

PT-VRS実験システムおよびe-POWERシステムのモデルを用い、実車振動をFDVで再現できるかの確認を行った。図11に、PTシステムの重心に近いエンジンリア側のエンジンマウントにおける上下振動を測定した結果を示す。車両走行実験で測定した結果と、VRS実験システムを用いたFDVでの再

現結果の比較を示している。破線で示す生の計測結果をログフィット処理を行った実線同士を比較すると3dB以下の差異となっている。同じ実験で他の測定点、および他の方向の振動においても同様の精度が確認された。これにより、PT-VRSでの台上実験で、C/D実験で計測された車両振動を再現できる事が確認できた。これにより、新型車両のPT振動解析、試作車両が完成する前段階において評価が可能となった。

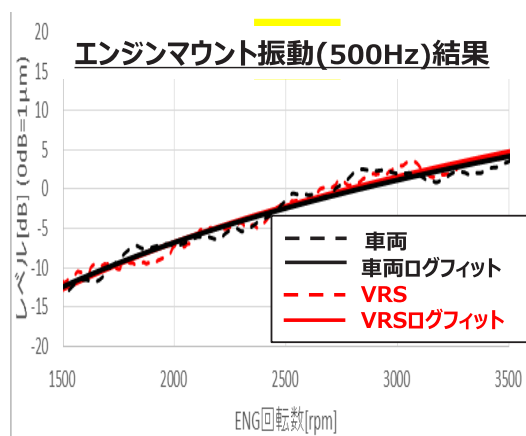


図11 FDVでの実車再現検証実験結果

4. まとめ

強化され続ける燃費・排気エミッション規制に対応するために、自動車の電動化が進む中、システムが複雑化しても開発期間を長くさせない、または後工程での不具合による手戻りを減らしたい、これら目的のためにパワートレイン開発においてVRS実験システムを用い、車両の走行状態を模擬し、モデルのリアルタイム性と精度を確保し、熱環境を実車に近づける事で、排気エミッションの評価や車両運転性の評価が台上実験で可能となった。図12に効果のイメージを示すが、従来開発手法では開発後期に大きな工数がかかっていたが、本手法を適用する事でフロントローディング化が可能となり、手戻り防止へも貢献できている。今後、さらなる開発の効率化を行うため、手法開発の継続と、手法の定着を推進していく。

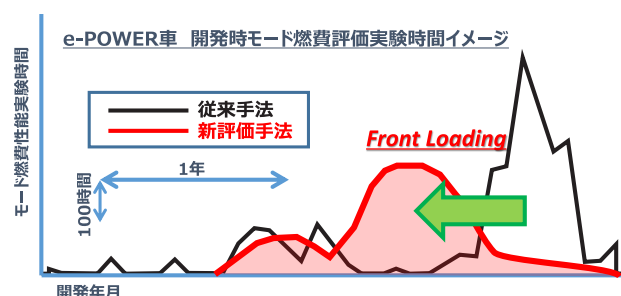


図12 手法適用による開発のフロントローディング化

著者



中本 英伸



平谷 康治



谷合 宏之

特集 2：電動化に貢献する実験技術

5. 電費と快適性の両立を実現する
熱マネジメントシステム実験技術

田尻 政義*

1. はじめに

電動化は、従来のICE車 (Internal Combustion Engine: 内燃機関) には無かった、モーター、インバータ、強電バッテリーでパワートレインが構成される。(図1、図2)

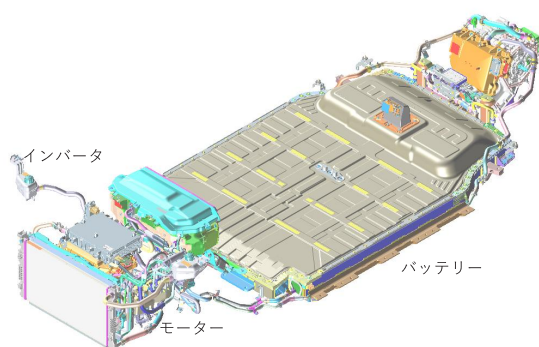


図1 EV熱マネジメント対象構成部品

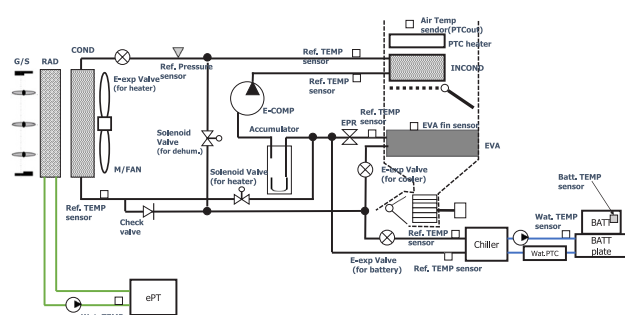


図2 冷却システム図

ICEに比較して排熱が減る一方、これらの構成部品の温度環境を適切にコントロールしなければ、効率や信頼性を確保することが出来ない。そのため、これらの熱環境を適切にコントロールする「熱マネジメント」の重要性が高まっている。

ICEにおいては、エンジンからの排熱はとても大きいので、室内を暖める熱源は主にエンジンからの排熱を使っている。一方、電動車はバッテリーの電力を使って熱を作り出す必要があ

る。そのため、うまく電力を使わないと、走行に回せる電力が減ってしまうことになる。更に、バッテリーは内部抵抗により発熱するが、熱環境によっては性能や寿命が低下するため、適切な温度に制御しなければならない。そのため、「室内快適性」「e-PT」「バッテリー」の熱環境と「電費」を両立できるよう、コントロールする必要がある。

2. EV熱マネジメント実験における課題

2.1 実験条件の増加

ICEはエアコンON-OFF、エンジン発熱時の放熱量など、作動条件を区切って個別に実験評価を行うことが出来ていた。しかしEVはモーターやバッテリー、インバータなどを温調するために、エアコンの冷却エネルギーを使う。そのため、エアコンで使用している電動コンプレッサは、エアコンON-OFFだけではなく、バッテリーからの冷却要求に応じて運転する事になる。更に、バッテリーの温度環境を保つために途中でバッテリー冷却のみ運転を止めたりする必要がある。これら組み合わせにより運転モードが増加する事に加え、これらの運転モードは過渡的に変化するため、これらの実験で得られる大量の時系列データを処理しなければならない。

2.2 EV冷却システムへの要件追加

EVの暖房はICEと違って排熱を利用することが出来ないため、バッテリーの電力を使って熱を作り出すことになる。そのため、バッテリーからの消費電力が増加し、航続距離に影響を及ぼす。この影響を最小限にするために、外気から熱を奪い、車室内の暖房として利用するヒートポンプシステムが主流となっている。高外気時の冷房に加え、低外気時も外から奪う熱を確保するために、コンプレッサを高回転で運転する必要がある。電動コンプレッサにより任意にコンプレッサ回転数を制御できる一方、EVの魅力である低騒音環境に追従するために、コンプレッサなどの冷却部品も低騒音化を行わなければならない。

* カスタマーパフォーマンス&第二車両実験部

更に、EVの冷却システムは走行中だけではなく、EVに欠かせない充電中にも作動する。バッテリーは充電出力や充電前の走行状態によりバッテリー温度が変化し、バッテリー性能へ影響を与えるため、外気温度や走行条件に加えて、関連するシステムの温度環境を再現する必要がある。

3. 解決法策

3.1 データ処理システムの開発

冷却のエネルギーとして用いている冷媒は、気体・液体・気液混合に状態変化している。この冷媒の状態が適切かどうかをモニターするために、各箇所の温度・圧力を測定し、冷媒物性に照らし合わせ状態把握を行う。更に、連成する冷却水の温度、流量も各箇所取得し、狙い通りの冷却が出来ているのか、確認を行う。

この計測箇所のデータを基本とし、各温度条件×運転モードで実験を行いデータ取得することになるため、大量のデータ処理が必要となる。そのため、従来行っていた実験後の処理によるデータ分析では大量のデータを分析できず、判定に時間を要することになるため、リアルタイム処理システムを開発した。

冷却エネルギーとなる冷媒の状態把握には、温度や圧力は直接計測によりリアルタイムにモニターできるが、これだけでは冷媒状態が分からず、適切な気液の状態となっていることを確認するために、温度と圧力を冷媒の物性に照らし合わせ、図3に示すようなp-h線図を描画し確認しなければならない。

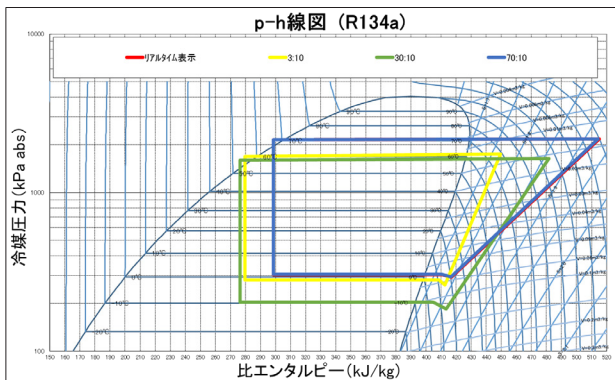


図3 p-h線図

そのため、時系列で計測されるデータをリアルタイムに物性特性を算出するシステムを開発した。計測データをリアルタイムに取り込み、時系列データとしてリスト化するとともに、視覚的に冷媒状態を把握できるように、p-h線図もリアルタイムに描画することで、データ処理時間を短縮した。(図4)

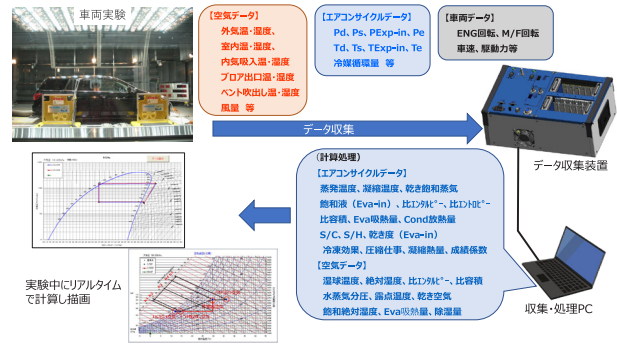


図4 リアルタイムデータ処理システム

3.2 温度環境を再現する実験設備

冷却回路や室内快適性の実験には、エアコンサイクルベンチ試験装置と、高温から低温、雨や雪などの環境を再現する全天候型環境シャシダイナモによる実車実験を行っている。

エアコンサイクルベンチ試験装置は、エアコン関連部品から冷却部品までの冷却回路に関連する部品の特性を、試作車を作る前にシステム性能を評価するために使用している。(図5)



図5 エアコンサイクルベンチ試験装置

高温から低温まで、実車で想定される温度環境を再現し、HVACやコンプレッサ、その他冷却回路との熱収支が狙い通りになっているのかを確認するとともに、必要に応じて部品特性や制御を変更しながら実験を行うことが可能である。

実車実験については、全天候型環境シャシダイナモを用いている(図6、図7)。クルマの温度環境には、外気温度や湿度、日射などの外的要因で決まるものと、パワートレインやバッテリーなどクルマを運転することで自己発熱する内的要因で決まるものがある。これらの温度環境は相互に影響を与える。例えば、クルマの自己発熱が外気へ温度影響を与え、外気温度が上昇すると一定の温度環境で実験を行うことができなくなる。そのため、クルマの自己発熱の影響を受けない実験設備が必要である。更に、HVACや冷却部品が作動した際の騒音についても評価できる設備が必要である。

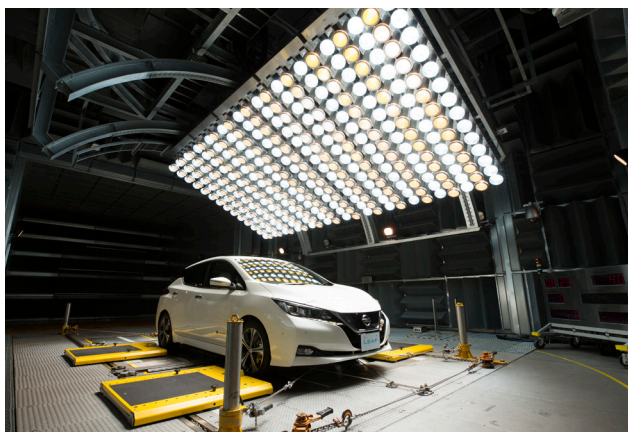


図6 全天候型環境シャシダイナモ 低温日射試験室

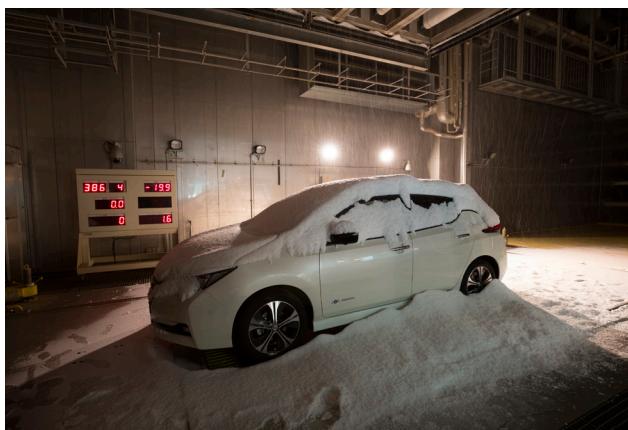


図7 全天候型環境シャシダイナモ 降雨降雪試験室

全天候型環境シャシダイナモは、4輪のシャシダイナモを備え、低温から高温の温度環境、湿度、日射を再現するとともに、降雨・降雪環境も再現することが可能である。これらの設備は、ICEのようなクルマからの熱影響を吸収できる十分な冷凍能力を備えている。更に、騒音評価を可能にするために、シャシダイナモや風洞設備を低騒音化した。(図8)



図8 全天候型環境シャシダイナモ吸音壁

更にこの環境試験室には急速充電器も備えたため、高温・低温環境下における走行直後の充電条件の振る舞いや、それに伴う室内快適性への影響、更には電費計測も可能にした。

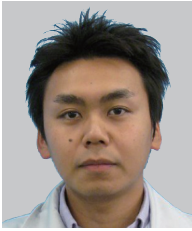
これらの環境シャシダイナモを用いて再現性高く温度環境を再現することで、高温から低温の限界性能、運転モードが複雑に遷移するEV特有の熱マネジメント実験を効率的に実施することを可能にした。

4. まとめ

電動車の普及は急速に広がっており、それに伴いマーケットも広がりつつある。そのため、EVの熱環境は、性能や信頼性、更にはバッテリーの寿命に対して、とても多くの影響を及ぼすことになる。

熱マネジメント技術とそれを支える実験技術により、電気エネルギーを無駄なく使いつつ、熱環境を整えることで快適で信頼性のあるEVを作ることで商品力向上とマーケット拡大へ貢献する。

著者



田尻 政義

特集2：電動化に貢献する実験技術

6. 車体軽量化技術を支えるX線CT非破壊計測技術

菅田 安洋* 白井 徳貴*

1. 概要

グローバル競争が加速する電動車開発において、航続距離の伸長は商品力向上になる。電動パワートレインのさらなる性能向上を図るため、モータ高効率化・バッテリー高出力密度化とともに、車体軽量化も進展しており、部品構造の合理化が追求されている。これらの研究開発段階において、X線CTによる非破壊計測技術は、分解すると元の性能・状態から変化する精密な内部構造を3次元形状データとして解析することができ、電動車の性能向上に幅広く貢献している。

本稿では、電動化の加速に伴って重要性が一層高まっている車体軽量化におけるX線CT活用に着目する。車体軽量化開発では物性が異なる材料を最適に組み合わせる構造設計技術が求められる。車体部材は、構造合理化に加えて図1に示すように従来の鋼板から高張力鋼板（ハイテン）、アルミニウム合金板、樹脂、炭素繊維強化プラスチック（CFRP）などによるマルチマテリアル化が加速している⁽¹⁾。マルチマテリアル化に不可欠な材料、および異材接合の技術開発を効率化するための適用事例を紹介するとともに、本計測技術の将来展望について述べる。

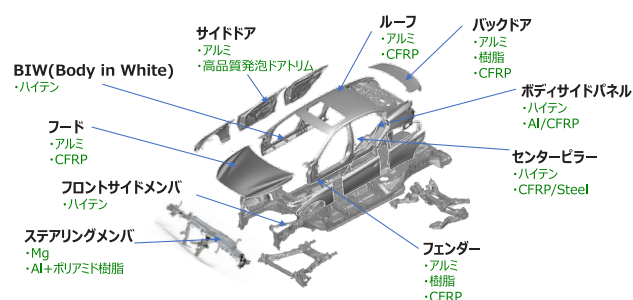


図1 軽量化材料の適用例

2. 軽量化車体開発における課題

2.1 背景

自動車産業では、材料や部品のサプライチェーンがグローバル化し、開発・製造拠点の現地化が拡大している。個別の部素材を組み合わせる軽量化車体の開発では、製造拠点の設備要件を考慮し、様々な部素材を組み合わせる性能目標を達成しなければならない。例えば、異材接合では接合継手部の内部構造、CFRPでは強度・剛性を担う材料内部の繊維配向などを評価する。その性能目標を達成するためには、多くの試作評価による材料加工プロセスの設計最適化が必要である。

2.2 材料加工プロセス開発の効率化

異種部素材の接合技術には、用途、材料特性に合わせて、機械的接合、固相接合、接着接合などがある。例を挙げると、機械的接合のSPR（Self-Piercing Rivet）とは、上板を貫通したリベットの脚先が下板を貫通せずに展開することで締結する方法である。

材料技術では、CFRPの用途が航空宇宙分野から自動車分野に拡大している。目的に応じて、樹脂注入成形、プレス成型、射出成型などの工法を用いる。例えば、樹脂注入成形は、炭素繊維を部品形状に整えて金型に設置した後に樹脂を注入し、繊維の中に含浸、硬化させる工法である。

これらの加工プロセス開発では、強度・剛性・耐久性などの結果系の性能指標とともに、加工パラメーターに紐づく要因系の内部構造を解析する。さまざまな条件下で試作した部品の内部構造を解析・評価することで現象のメカニズムを理解し、結果系に作用する要因を特定することが重要になる。しかし、従来の内部構造の解析・評価技術は、機械加工による破壊断面観察である。特定一断面の情報を得るのにも時間を要する。車体部品では、繰り返し負荷に対する疲労強度を考慮した設計が不可欠である。疲労メカニズムを理解するためには、同一サンプルを用いて内部構造の変化を時系列に把握するこ

* カスタマーパフォーマンス&実験技術革新部

とが有効な手段となる。これらのことから、非破壊で内部構造を効率的に解析する技術が、軽量化車体開発の競争力につながる。ここでは、X 線 CT を活用した自社開発による 3 次元内部構造の撮像技術について述べる。

3. X 線 CT による内部可視化技術

3.1 X 線 CT の概要

X 線の発生原理は、線源内部のフィラメントに電流を流し、加熱することで熱電子を発生させる。その熱電子を高電圧で加速し、ターゲットに衝突させることにより X 線を発生させる。

X 線 CT では、X 線を撮像対象に対して 360° の方向から照射し、その対向する位置にある検出器で X 線透過強度を透過画像として撮像する。各方向のデータを投影データと呼び、360° 方向からの全投影データを用いて再構成した 3 次元画像が CT 画像である。一連の処理の流れを図 2 に示す。

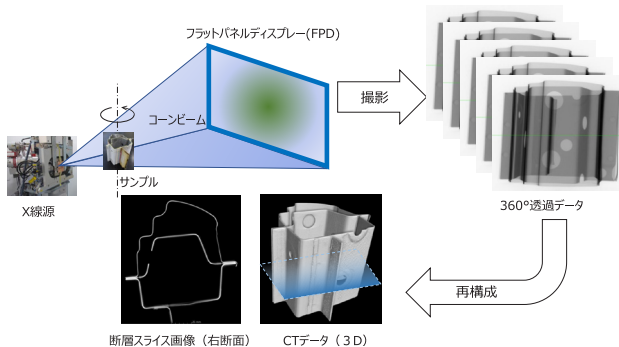


図2 Reconstruction process of X-ray CT

3.2 車体軽量化開発における X 線 CT の課題

市販の産業用 X 線 CT 装置から照射される X 線のエネルギーは低エネルギー側にピークを持ち、高エネルギー側に向かって緩やかに減少する連続的な分布である。密度の高い鉄部品は X 線が吸収されやすく、エネルギーの低い低エネルギー側の吸収が多いため、高エネルギー側のみが透過するようになる。見かけ上、エネルギー分布が高い側に移動するため、ハードニング（線質硬化）と呼ぶ。

図 3-1 に X 線エネルギーの透過イメージ、図 3-2 にハードニングのイメージを示す。

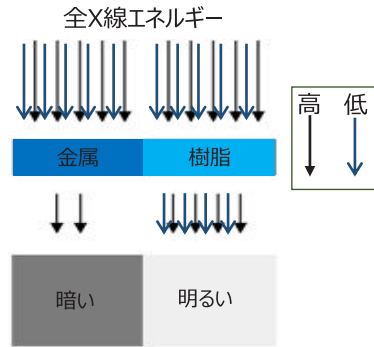


図3-1 X線エネルギーの透過イメージ

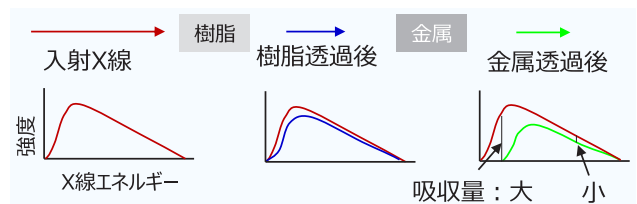


図3-2 ハードニングのイメージ図

そのハードニングが原因となり、図 4 に示すように透過長と透過率（照射量/透過量）との関係がランベルト・ベール則から崩れ、再構成時に CT 画像に実際には存在しない構造のノイズ（メタルアーチファクト）が観察される。

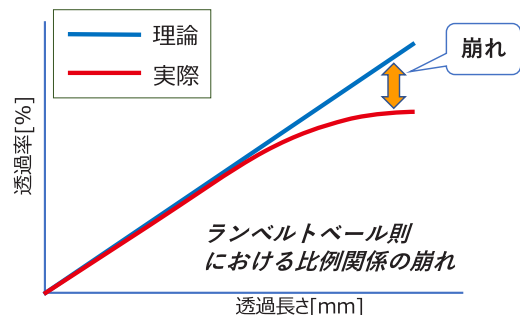


図4 透過長さに応じた透過率の崩れ

ハードニングの対策には、金属フィルタの適用などがある。金属フィルタは X 線の照射部に金属板を設置することでノイズ低減効果が得られる。ノイズを低減した CT 画像を得るには、金属フィルタの設置、トライアル撮像、ノイズ低減効果を確認する一連の作業が発生する。オペレーターの長年の経験や勘に頼っており、計測対象が変わるたびに撮像条件の決定に時間を要する。特に、鋼材や CFRP などの樹脂系材料を用いたマルチマテリアル部材の X 線 CT 撮像ではメタルアーチファクトノイズが発生しやすい。内部構造の正確な情報を得るためには、金属フィルタの仕様を効率的に決定する工学的手法を確立することが課題である。⁽²⁾

3.3 金属フィルタによるノイズ低減効果

金属フィルタ適用によるノイズ低減効果の例を図5に示す。鉄からのメタルアーチファクトノイズが低減していることが確認できる。

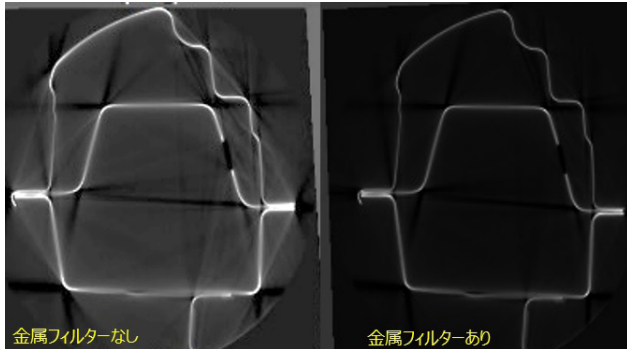


図5 鉄製車体サイドシルのX線CT像(断面)

図5から分かるように、部品形状に対してメタルアーチファクトノイズは複雑に現れる。部品形状に起因するノイズ影響を低減するために、図6に示す単純な鉄製ボルトで金属フィルタのノイズ低減効果を評価した。

金属フィルタには、1mmの銅板とアルミ板を準備した。CT画像を得るための再構成のアルゴリズムは一般的なFBP (Filtered Back Projection) を用いた。図6では、メタルアーチファクトノイズを視覚的に強調するため、明るさを補正している。

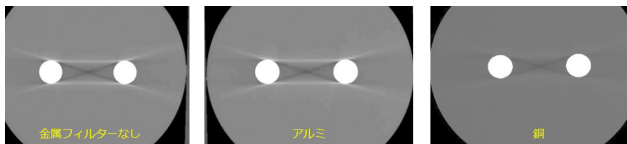


図6 鉄ボルト円筒部のメタルアーチファクト

メタルアーチファクトノイズは図6のボルトCT画像の2つのボルト接線から発生している白いスジ状の虚像である。ノイズ低減効果は、銅フィルタ > アルミフィルタ > フィルタなしの順に大きいことが確認できる。⁽⁴⁾

ノイズ低減効果を定量評価する指標を、医療分野で用いられているAIR (Relative Artifact Index) ⁽³⁾ にした。AIRが1に近いほど、ノイズが低減していることを表す。図6のボルト付近域でのAIR^(*)を算出した結果を表1に示す。フィルタなしのAIRは2.3であり、アルミフィルタでは2.0、銅フィルタでは1.3に低減している。上記の結果から、金属フィルタの材質によってノイズ低減効果に違いがあること、アルミフィルタに比べて銅フィルタのノイズ低減効果が大きいことが分かる。

表1 金属フィルタ材料によるノイズ低減効果

Material/Thickness	None	1.0mm
Aluminum	2.3	2.0
Copper		1.3

$$* \text{AIR} = \frac{\sqrt{(\sigma_A^2 - \sigma_B^2)}}{\sigma_B}$$

σ_A : ノイズがある領域の標準偏差

σ_B : バックグラウンド領域の標準偏差

3.4 ノイズ低減に関する考察と仮説立案

図5において金属フィルタを使用するとノイズの低減効果が得られていることから、その要因であるハードニングが弱まっていると考える。ハードニングが弱まる要因として、入射されるX線の低エネルギー側の分布が金属フィルタによって変化していると推察した。

例えば、物質にX線を照射することで得られる吸収スペクトルを解析するX線吸収微細構造(XAFS)では、物質固有の吸収端と呼ばれる電子軌道間を遷移するエネルギーで吸収が著しく増加する原理を応用している。遷移する電子軌道がK殻の場合はK吸収端と呼び、金属フィルタの効果として、この吸収端の影響に着目した。

高エネルギーから低エネルギーにおけるX線の吸収量の変化を確認するため、吸収に影響する物理量の1つであるX線の減弱係数を理論的に試算した。その結果を図7に示す。

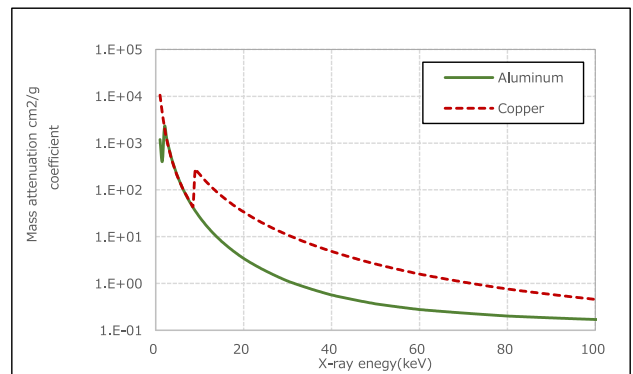


図7 Mass attenuation coefficient

グラフは横軸がX線エネルギー、縦軸が減弱係数の値を示す。減弱係数の値が大きいほど、X線の減衰が大きくなる。本グラフから、減弱係数はX線のエネルギーに応じて変化し、低エネルギーほど大きくなることが分かる。銅は8keVのK吸収端部で急激に大きくなっており、アルミに対して約8倍の値となっている。この結果から、入射されるX線のエネルギー分布変化は、低エネルギーで顕著な違いとなり、ハードニング

の低減効果に作用する仮説を得た。

3.5 仮説の検証

上記仮説を実験的に検証するために取得したアルミ、および銅フィルタ適用時のX線スペクトルを図8に示す。各フィルタの厚みは1mmである。

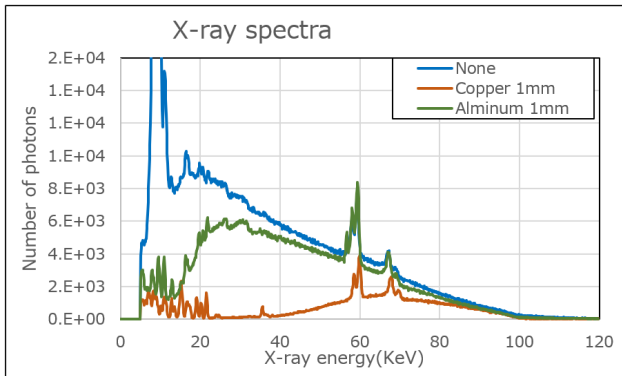


図8 X-ray spectra

グラフは横軸がX線エネルギー、縦軸が各エネルギーの光子数である。定性的に、銅フィルタ、アルミフィルタともに低エネルギー側のX線光子が減少していることが確認できる。両者のX線スペクトルを比較すると、20keV～40keVのエネルギー帯で銅フィルタの光子数がアルミフィルタに対し著しく減少している。このX線スペクトルの差異を定量的に評価するために、20keV～40keV、および80keV～100keVのエネルギー帯のPOA (Partial over all) から光子の減少数を算出した結果を図9に示す。

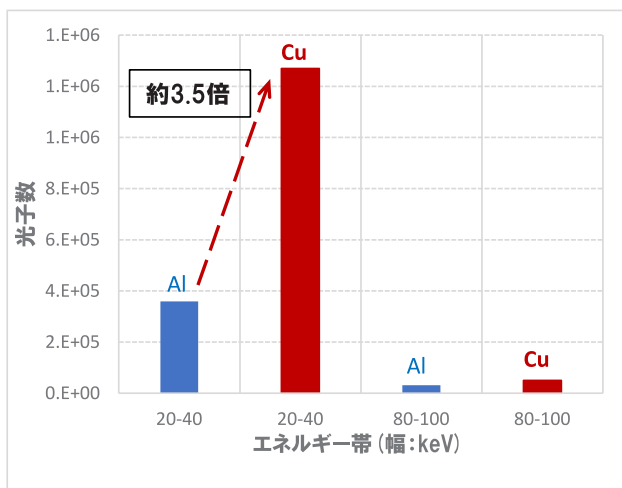


図9 The value of POA

エネルギー帯20keV-40keVにおける光子数の減少について、銅フィルタはアルミフィルタの約3.5倍である。一方、エネルギー帯80keV-100keVでは、アルミフィルタの20-40keV エネルギー

帯に対して、いずれも0.1倍以下であり、エネルギー帯20keV-40keVにおいて、銅とアルミの減衰に顕著な違いが確認できる。これにより、入射されるX線のエネルギー分布において、金属フィルタによる低エネルギー帯での分布変化が、ハードニングの低減効果に作用する仮説が正しいことを検証した。

4. 軽量化部品への適用結果

X線エネルギー分布とCT撮像結果の関係性を明らかにし、最適な金属フィルタの選定手法を開発した。これにより、撮像準備において、オペレーターの長年の経験や勘だけに頼ることなく、工学的なアプローチで確実な撮像が可能になった。過去に経験のない新規部素材において高い有効性が得られている。これまでは画像ノイズによって可視化が困難であった内部構造を鮮明に可視化した事例を以下に示す。

事例1) アルミ材の板を鉄のSPRと接着剤で接合した試験片の外観と撮像結果を図10に示す。接着剤の塗布状態(形状)、およびSPRの接合要件である、リベットによる上板の貫通、下板内でのリベット脚先の広がり、下板に割れがないことを3次元構造で評価できる。

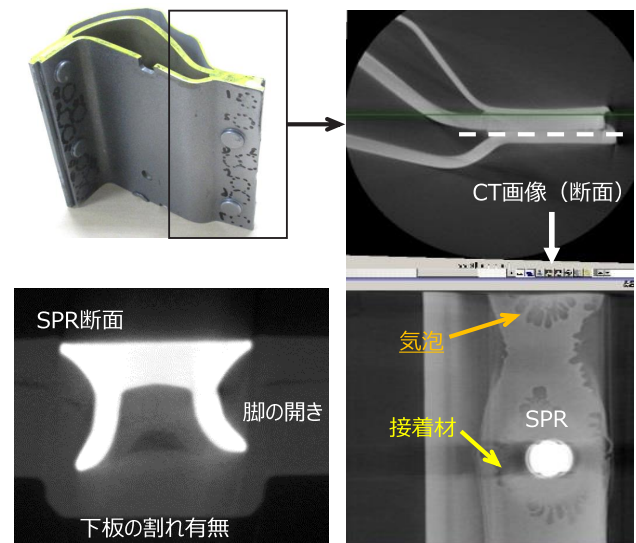


図10 アルミ板接合試験片のCT画像

事例2) 鉄とCFRPのマルチマテリアル複合材の撮像結果を図11に示す。金属フィルタを挿入することで鉄混合材でもCFRPの繊維配向が確認できている。これにより、引張強度との相関が得られ、成形条件にフィードバックできる。



図11 鉄とCFRP接着試験品のCT画像

5. まとめ

クルマづくりの変革期において新しい構造を高効率に実現するには、性能と構造を結び付けるメカニズムを理解することが一層重要となっている。X線CTにおける金属フィルタによるメタルアーチファクトノイズ低減手法の効果は軽量化車体にとどまらない。さまざまな材料から構成されるモータ、バッテリーの複雑な構造可視化においても高い効果が得られている。電動車開発における強力な計測技術として、高品質と低コストのトレードオフを技術的に解決し、魅力ある商品開発に寄与すると考える。

産業用X線CTはグローバルに利活用が進んでおり、将来、形状寸法の不確かさを保証する計測技術に発展すると考える。計量トレーサビリティ体系につながることで、CAEなどのデジタルエンジニアリングで活用するデジタルツイン開発、マテリアルズインフォマティクスなどのデータ駆動型開発など、ものづくり競争力が向上する。その延長には、労働人口減少時代において、大量の労働力とエネルギーを必要とする自動車産業の高効率開発につながる。このような計測技術の発展を通じて、持続可能なものづくり、カーボンニュートラルな社会の実現に貢献する。

参考文献

- (1) NEDO 材料・ナノテクノロジー部：革新的新構造材料等研究開発」(中間評価)(2014年度～2022年度9年間)
- (2) 公益社団法人自動車技術会2020年秋季大会学術講演会：マルチマテリアル部品における欠陥評価の高精度化に向けたX線CT画像のノイズ低減手法(濱名雅之、白井徳貴；日産自動車)
- (3) 日本放射線技術学会雑誌Vol.74 No.4 Apr2018：相対artifact indexによるノイズ特性に依存しないストリークアーチファクト定量評価法の提案(高田賢、坂野信也、乙部克彦；大垣市民病院医療技術部診療検査科、市川勝弘；金沢大学医療保険学域保険学類)
- (4) 東京都立産業技術研究センター研究報告，第7号，2012年：X線CT画像計測技術による上流技術支援システムの構築(紋川亮、中川朋恵、金城康人、桜井昇、永川栄泰、藤井恭子；バイオ応用技術グループ、横山幸雄；システムデザインセクター)

著者



菅田 安洋



白井 徳貴

SAE International Journal of Advances and Current Practices in Mobility

VCターボエンジンに対応したステンレス溶射ボアの開発

受賞者紹介

平山 勇人 Hayato Hirayama

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



星川 裕聡 Hiroaki Hoshikawa

分野 : 材料力学、設計工学・機械機能要素
学位 : 修士 (工学)
所属学会 : 自動車技術会



熨斗 良次 Yoshitsugu Noshi

分野 : 接合・加工
学位 : 修士 (工学)



寺田 大輔 Daisuke Terada

分野 : 接合・加工
学位 : 学士 (工学)



SAE International Journal of Advances and Current Practices in Mobility

VCターボエンジンに対応した
ステンレス溶射ボアの開発

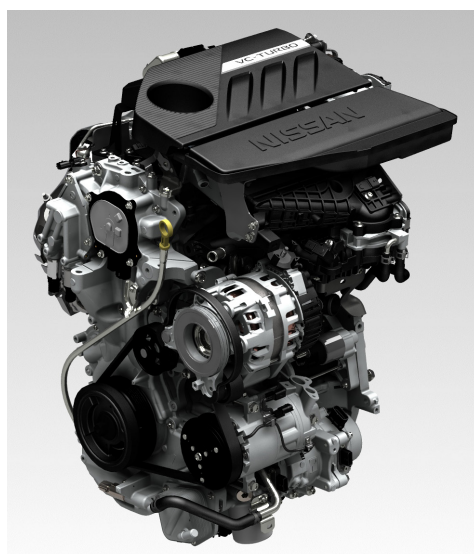
平山 勇人* 星川 裕聡** 熨斗 良次*** 寺田 大輔***

紹介 2021年4月13～15日のSAE(米国自動車技術会) WCX™ Digital Summit(World Congress Experience Digital Summit)で発表した「VCターボエンジンに対応したステンレス溶射ボアの開発」の技術論文が高い評価を受け、「SAE International Journal of Advances and Current Practices in Mobility (SAEジャーナル)」に掲載されました。

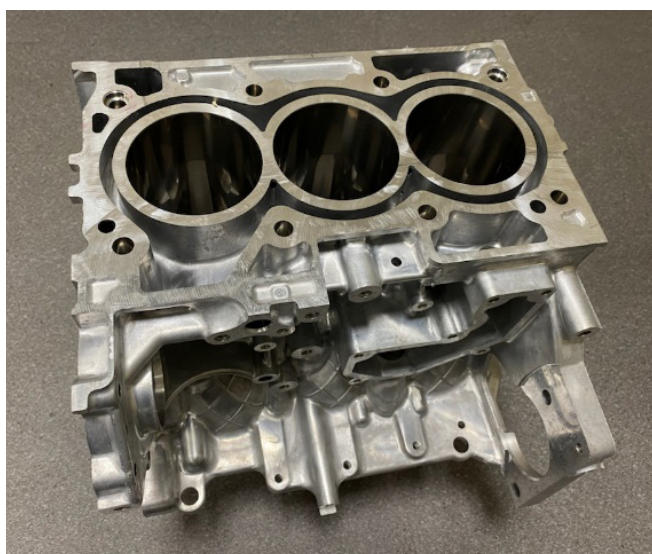
本論文はこちらからご覧いただけます。

SAE Mobilus

<https://saemobilus.sae.org/content/2021-01-0343/>



VCターボエンジン



ステンレス溶射ボアを採用した3気筒シリンダーブロック

第71回 自動車技術会賞 論文賞
(2021年)

乗員の快適性を向上させる車両運動の探求

受賞者紹介

牧田 光弘 Mitsuhiko Makita

分野 : 車両運動性能、人間工学
学位 : 博士 (工学)
所属学会 : 自動車技術会
日本機械学会



松下 晃洋 Akihiro Matsushita

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



草柳 佳紀 Yoshinori Kusayanagi

分野 : 構造強度、部品・要素設計
学位 : 学士 (工学)



三浦 雅博 Masahiro Miura

分野 : 運動力学と制御、AD/ADAS
学位 : 学士 (知能機械工学)
所属学会 : 自動車技術会



受賞：第71回 自動車技術会賞 論文賞(2021年)

乗員の快適性を向上させる車両運動の探求

— 逆車両運動解析による乗員受動運動設計の試み —

牧田 光弘* 松下 晃洋** 草柳 佳紀*** 三浦 雅博***

抄録 車両運動による乗員身体の受動運動は乗車の快適性に影響する。そこで、運転タスク実行下でより良い身体挙動はどうあるべきかを探索する手法を検討した。車両に乗員身体を組み込んだモデルで、身体挙動を評価関数設定した最適制御計算により乗員運動を設計する。レーンチェンジを題材にして、快適性に影響すると考えられる要因を最適化した車両運動波形を導き、実車およびモーションシミュレータにて評価を行なうという方法を提示した。本方法構築により、車両運動の乗員運動知覚影響を探ることが可能となった。

1. 緒 言

本論文の目的は、車両運動が非運転乗員に与える影響を、快適性の観点から解析するための手法構築である。乗車時の快適性としては、路面垂直方向の車両運動影響である乗り心地が想起される。これに加えて、自動運転普及を見据えると、操作が人から離れることから、路面平面方向の車両運動も移動する快適空間創出には重要な研究課題となる。

乗員身体は、車両運動に伴う加速度に対応する慣性力によって動かされるので、乗員は何らかの身体運動不快感を受ける。ドライバは自らの操作に対する応答として、自身の身体慣性力付加に積極的な意義を感じる場合もあるが、非運転乗員にとって通常は乗車の快適性を損なうものである。もちろん緊急回避などで高加速度運動が必要なときには、シートや拘束装置で身体の動きをホールドしなければいけない。しかしながら、通常の運転領域では、車両運動を工夫することで乗員への慣性影響を低減して、快適性向上へ振り向けたい。

では、乗員の快適性を向上させるためには、車両運動をどのようにとらえればよいのだろうか。車両加速度の主たる発生要因は<経路>と<速度>によるので、まずは適切な経路を走行させることで、乗員への慣性負荷を穏やかにできるはずである。走行経路の設定は、自動運転技術の発展に伴って車両運動制御で重要となっている。ドライバの運動知覚を考慮した経路生成の研究⁽¹⁾や、乗員では、快適性を損なう車酔いを低減できる経路設定⁽²⁾についての研究などが行われている。

乗員挙動にフォーカスした研究アプローチとしては、乗員の身体挙動のモデルを用いることが考えられる。車両運動を既知とした場合において、乗員の挙動を解析する手法⁽³⁾や、走行経路による影響評価の研究⁽⁴⁾などの提案がある。

価値創出研究として、身体への慣性力負荷の時間タイミングによる乗員の自律的姿勢制御の影響の探索⁽⁵⁾や、乗員の運動知覚を刺激して車両運動への気づきを与えることで、身構え姿勢を取りやすい車両運動加速度創出の提案⁽⁶⁾がある。車酔い低減も含めて、感覚や身体運動メカニズムを用いたアプローチは、人間理解の進展に伴い、有用性を増している。

以上のような先行研究を踏まえると、想定した走行シーンにおいて、乗員の身体挙動やそれに伴う運動知覚量を抑える車両挙動を探索する手法の構築は、期待される研究方策であろう。そこで本論文では、筆者らが研究を進めてきた——最適制御を適用して設定した評価量を最適化する車両運動を求める——を逆車両運動解析⁽⁷⁾の一つとして位置付け、乗員まで含めて拡張することでこれに応えようと考えた。

最適制御を用いると、『所望の車両運動とその実現のための操作量を、評価関数を最小化させることに置き換えて求める』ことができる。言い換えれば、『快適性に影響すると思われる諸量を評価関数に用いることで、快適性を向上できる車両運動の特徴を抽出できる』ということになる。

本論文では、次章で最適制御を用いた場合の逆車両運動解析について述べ、乗員挙動の解析に適用させる場合には解法上の制約があることを示す。続いて、その制約を超えるための技術的解決策を示す。最後に、過渡運動を題材に、計算

* モビリティ& AI 研究所

** カスタマーパフォーマンス&実験技術革新部

***AD/ADAS & シャシー制御開発部

と実車実験およびその評価を含めて述べることで、乗員の快適性を探索するための方法論を提示する。

2. 快適性解析手段としての逆車両運動解析

『操作入力を設定して、それに対する車両運動を求める』場合を順車両運動解析とすれば、『因果関係を反転させて、なんらかの車両運動を規定する設定から、それを満たす操作入力と車両運動を求める』場合は逆車両運動解析⁽⁷⁾となる。逆方向では、何を規定するかによって計算の手法が異なるが、本論文では走行シーンを規定して、その前提の下で乗員にとって快適な運動探索を目指すため、最適制御を用いた逆車両運動解析を展開する（図 1 にイメージ、表 1 に変数名）。

最適制御では、運動対象の状態変数 $\mathbf{x}(t)$ や入力変数 $\mathbf{u}(t)$ などの変数で記述する関数である Stage Cost 関数 $L(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t))$ を用いて、それが最小となる車両運動を求める。視点を変えれば、Stage Cost 関数によって車両運動を設計するといえる。実際に記述できる関数形式は、変数の 2 次形式など、計算可能な形は限定されるが、これで車両運動設計が行える。

走行シーンの規定は、車両運動タスクとして、状態量と操作量の初期値と終端値を設定することで行う。つまり、両端での車両運動状態が固定（境界値問題化）されるので、Stage Cost 関数値を最小化する操作量 $\mathbf{u}(t)$ を求めることができる。

Table.1 Variables and functions for optimal control

Notation	Description
$\mathbf{u}(t)$	Input Variables (1,..., p)
$\mathbf{x}(t)$	State Variables (1,..., m)
t_0 / t_f	Initial / Terminal Time
$\mathbf{u}_0 / \mathbf{u}_f$	Initial / Terminal value of Input Variables (1,..., p)
$\mathbf{x}_0 / \mathbf{x}_f$	Initial / Terminal value of State Variables (1,..., m)
$\mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u})$	State Equation of motion (1,..., m)
$\lambda(t)$	Adjoint Variables (Lagrangian) (1,..., m)
$L(\mathbf{x}, \mathbf{u})$	Stage Cost
$J(\mathbf{u})$	Cost Function

p: Number of Inputs
m: Number of State Variables

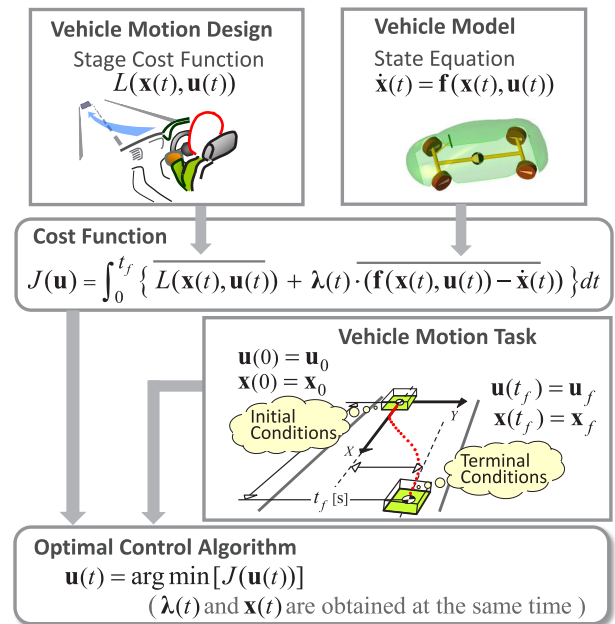


Fig.1 Schematic flow of the inverse vehicle dynamics methodology by optimal control: Ride quality is reflected to stage cost to describe motion design.

乗員の快適性評価には、車両モデルは乗員の乗る車体の 3 次元運動を再現する必要がある。それに加えて、一般的な変分原理を用いた最適制御の定式化では、車両モデル（状態方程式形式）を、随伴変数（Adjoint Variables）を使って Stage Cost 関数と加算する。ただし、加算量を時間積分させた評価関数には、モデル記述の制限がある。それは、状態方程式の記述で、式 (1) 形式ではなく式 (2) のように、状態変数 $\mathbf{x}(t)$ の微分量 $\dot{\mathbf{x}}(t)$ が、状態変数で＜陽 (Explicit)＞に記述可能なことである。

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{f}(\dot{\mathbf{x}}(t), \mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)) \quad (1)$$

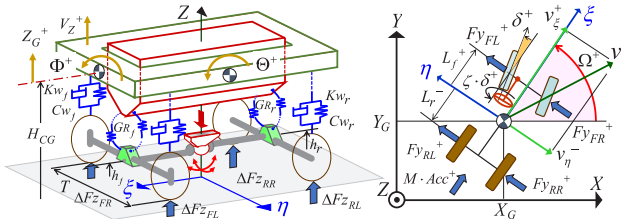
$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{f}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)) \quad (2)$$

式記述の制約に従いつつ、輪荷重移動を含む車体運動を正確に表現するために、筆者らは先行研究⁽⁷⁾にて車両モデルを開発した。表 2 と図 2 に、ばね下座標系基準で車体運動を含む車両モデルとその状態変数を示す。タイヤ特性は、簡略化した Magic Formula に、緩和長を用いた応答特性も加えている。式 (2) 形式の車両モデル詳細は先行研究⁽⁷⁾を参照されたい。

Table.2 Variables and input functions of vehicle model

Notation	Description
State Variables $\mathbf{X}(t)$	
$X_G(t), Y_G(t), Z_G(t)$	C.G. Position (Ground Coordinate)
$V_\xi(t), V_\eta(t), V_\zeta(t)$	C.G. Velocity (Vehicle Coordinate)
$\Omega(t), \omega(t)$	Yaw Angle, Yaw Rate
$\Phi(t), \phi(t)$	Roll Angle, Roll Rate
$\Theta(t), \theta(t)$	Pitch Angle, Pitch Rate
$\alpha_i(t)$	Tire Slip Angle
Inputs $\mathbf{u}(t)$	
$\delta(t)$	Front Tire Toe Angle
$Acc(t)$	Longitudinal(ξ) Acceleration

Subscript i : Wheel Position [Front $\rightarrow$ FR, FL ; Rear $\rightarrow$ RR, RL]


 Fig.2 Two track and body motion vehicle model conforms to equation (2): Refer to author's previous research⁽⁷⁾

ここまで述べた逆車両運動解析を用いて、乗員の快適性向上探索を行う。そのためには、まずは乗員の身体モデルを車両モデルの車体へ乗せなければならない。その際、乗員のモデル化でも車両モデルと同様に式 (2) の形式が要請される。

次に、快適性を運動設計で扱うには、乗員の車両運動知覚に関係する量を状態変数 $\mathbf{x}(t)$ として用意しなければならない。例えば、運動知覚を行う前庭器は、並進加速度や角速度を認識するが、式 (1) に示すように、加速度は状態変数ではなく、その微分量 $\dot{\mathbf{x}}(t)$ なので、運動設計方針として Stage Cost 関数へ組み込むことができず、状態変数に変える方策が要請される。

以上から、逆車両運動解析を乗員の快適性へ適用するための 2 つの要請課題が示された。次章でその解決を図る。

3. 乗員の快適性評価を行うための拡張

3.1 乗員身体挙動のモデル化

乗員身体運動モデルを、式 (2) のように状態変数で＜陽＞表現させるという制約の下で構築する。乗員の運動慣性力を車両に作用させると、車両と乗員の状態変数での＜陽＞記述ができなくなるため、車両運動慣性力による受動運動のみとし、頭部分離しない身体上体横方向（ロール）運動をモデル化する。

Table.3 Variables and parameters of passenger model

Notation	Unit	Description
State Variables $\Phi_B(t), (\dot{\Phi}_B(t))$	[rad], [rad/s]	Upper Body Roll Angle (Angular Velocity) (Vehicle Body-Fixed Coordinate)
Temporal Variables $X_S(t), Y_S(t), Z_S(t)$	[m]	Seating Pivot Point (Ground Coordinate)
$F_{y_B}(t), F_{z_B}(t)$	[N]	Applied Force at Upper Body C.G.
Model Parameters ξ_S, η_S, ζ_S	[m]	Seating Pivot Point (Vehicle Body-Fixed Coordinate)
h_{BCG}	[m]	Height of Upper Body C.G. from Pivot
I_B / m_B	[kg-m ²] / [m]	Upper Body Mass / Inertia
K_B / C_B	[Nm/rad] / [Nm/(rad/s)]	Upper Body Roll Stiffness / Damping

$\Phi(t), \phi(t), \theta(t), \dot{\omega}(t), V_\xi(t), V_\eta(t), V_\zeta(t)$ are the state variables of vehicle model⁽⁷⁾

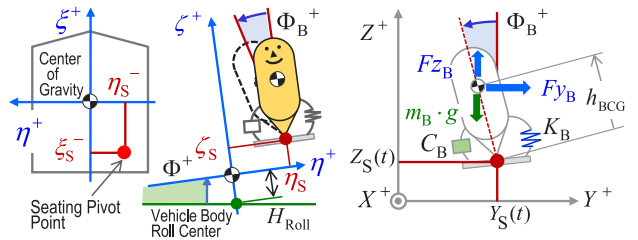


Fig.3 Passenger seating point configuration: Passenger upper body (including head) is simplified to a single inverted pendulum, then affected with vehicle motion.

最初に、乗員に加わる車両運動の慣性力を表現する。図 3 左と中央に、車体固定座標系での着座位置と、そこにピボットをもつ上体剛体モデルを示す（以下展開する乗員モデルに関わる変数や定数は表 3）。このピボットには車両運動から、式 (3) に示す 3 軸並進加速度が加わる（影響の小さい項は省略）。

$$\begin{cases} \ddot{X}_S(t) = -V_\eta(t) \cdot \omega(t) + \dot{V}_\xi(t) - \eta_S \cdot \dot{\omega}(t), \\ \ddot{Y}_S(t) = V_\xi(t) \cdot \omega(t) + \dot{V}_\eta(t) + \xi_S \cdot \dot{\omega}(t) - (\zeta_S + H_{Roll}) \cdot \dot{\phi}(t), \\ \ddot{Z}_S(t) = \dot{V}_\zeta(t) + \eta \cdot \dot{\phi}(t) - \xi \cdot \dot{\theta}(t). \end{cases} \quad (3)$$

次に、身体上体重心への作用力を求める。そのためには上体重心の加速度を導く必要があるが、これは地上座標系で記述した上体重心位置（ピボット位置＋上体のロール姿勢角影響）の 2 階微分として加速度記述できる。図 3 右に示す横と上下方向への作用力は、上体質量を掛けた式 (4) として近似する。

$$\begin{cases} F_{y_B}(t) = m_B \cdot \frac{d^2}{dt^2} \left(Y_S(t) - h_{BCG} \cdot \sin(\Phi_B(t) + \Phi(t)) \right), \\ F_{z_B}(t) = m_B \cdot \frac{d^2}{dt^2} \left(Z_S(t) + h_{BCG} \cdot \cos(\Phi_B(t) + \Phi(t)) \right) + m_B \cdot g. \end{cases} \quad (4)$$

ここで、上体重心への作用力 F_{y_B} 、 F_{z_B} によってピボットに対してロール方向上体運動の運動方程式を表すと、式 (5) となる。なお、ロール剛性および減衰には、乗員とシート面の間に作用する支持力や摩擦などの影響を近似的に含めている。

最後に、上体の運動方程式 (5) へ式 (3)、(4) を代入することで、上体ロール角加速度 $\ddot{\Phi}_B$ が式 (6) のように＜陽＞に解ける。

$$\ddot{\Phi}_B(t) = \frac{1}{I_B + h_{BCG}^2 \cdot m_B} \cdot \left(\begin{aligned} & (g \cdot \sin(\Phi_B(t) + \Phi(t)) \cdot h_{BCG} \cdot m_B \\ & - K_B \cdot \Phi_B(t) - C_B \cdot \dot{\Phi}_B(t) \\ & + \sin(\Phi_B(t) + \Phi(t)) \cdot h_{BCG} \cdot m_B \cdot \\ & (\dot{V}_\xi(t) + \eta_S \cdot \dot{\phi}(t) - \xi_S \cdot \dot{\theta}(t)) \\ & + \cos(\Phi_B(t) + \Phi(t)) \cdot h_{BCG} \cdot m_B \cdot \\ & (V_\xi(t) \cdot \omega(t) + \dot{V}_\eta(t) + \xi_S \cdot \dot{\omega}(t) - (\zeta_S + H_{Roll}) \cdot \dot{\phi}(t)) \\ & - h_{BCG}^2 \cdot m_B \cdot \dot{\phi}(t) \end{aligned} \right) \quad (6)$$

求まった乗員モデル式 (6) には、車両モデル側の状態変数の微分量である $\dot{V}_\eta, \dot{V}_\xi, \dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\omega}$ が含まれている。しかし、式 (6) を運動方程式から状態方程式に変換して車両モデルと連立させれば、状態変数で置換されて式 (2) の形に収まる。これで、逆車両運動解析で用いる最適制御の定式化要求に対応できた。

3.2 乗員運動知覚量の状態変数化

快適性で想定される物理量には、身体に加わる並進加速度や角加速度などが考えられる。ところが、前章で述べたように、状態変数と入力変数以外は評価関数に組み込めない。

加速度を状態変数化する手段としては、二階の微分方程式で表される運動方程式を、さらに微分した三階の微分方程式 (jerk まで状態変数化するには四階) とすることで実現できる。ただし、解くべき式が増えて計算負荷が大きくなり、逆車両運動計算には不向きである。そこで、状態量オブザーバを用いて、評価関数に組み込める近似状態量を求めることにする。

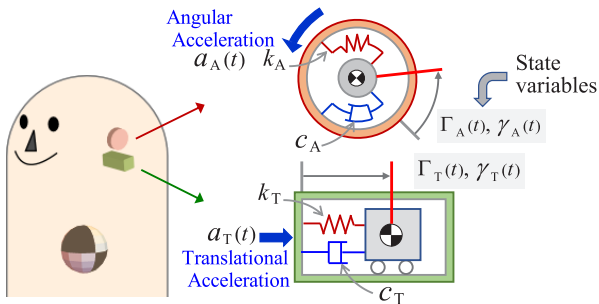


Fig.4 Acceleration and jerk detection with soft sensor (physical image of state observer) : Acceleration and jerk at the attached body are approximated to state variables.

車両及び乗員モデルと合わせて最適制御の定式化のために、図 4 に示すソフトセンサとしての状態量オブザーバを設定

した。具体的には、式 (7) に記した状態方程式を用いて、乗員身体もしくは車体の観測したい部位の加速度を、入力 $a(t)$ として与える。これから、その取付け部位の並進や回転の加速度とJerkを、状態変数 $\Gamma(t)$, $\gamma(t)$ で近似量として観測できる。

$$\begin{cases} \dot{\gamma}(t) = c \cdot \gamma(t) + k \cdot \Gamma(t) - a(t), \\ \dot{\Gamma}(t) = \gamma(t). \end{cases} \quad (7)$$

状態量近似精度は、式 (7) では c , k 設定値で決まる。図 5 にはこれらの設定値を変えた場合における、固有周波数違いでの特性を示す。近似度合いを表すゲインは 1 に近いフラットな特性になるように設定値を選んでいる。

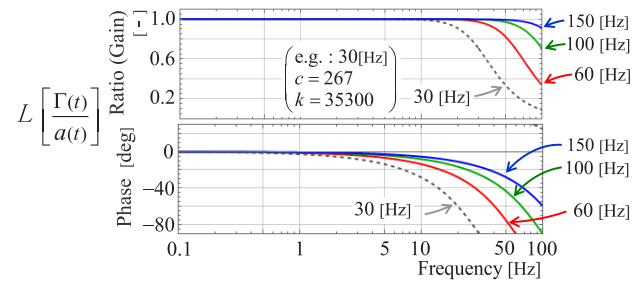


Fig.5 Frequency response characteristic of state observer: Four cases of translational and angular accelerations.

ここで、状態量オブザーバの近似精度が逆車両運動解析に与える影響を確認しておく。次章で用いているレーンチェンジ挙動において、状態量オブザーバを車両重心点位置の車体に設置して、車両重心点横加速度を最小化させた計算結果を図 6 に示す。Stage Cost 関数値を見ると、応答周波数を上げることによる、近似精度の向上には適値領域があることがわかる。つまり、応答周波数が高すぎると、状態オブザーバの微分方程式が、解くべき系全体を硬く (stiff) してしまう。数値計算では、精度と計算誤差累積のトレードオフ考慮は必要である。

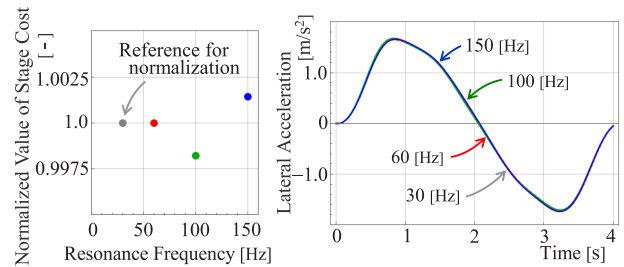


Fig.6 The degree of approximation of state observer (stage cost is quadratic value of lateral acceleration): There is an appropriate value for the resonance frequency of state observer.

以上から、状態オブザーバを用いることで、乗員の運動知覚に関係する加速度や Jerk の近似量を、状態変数として組み込み、それを用いて評価関数を設計することが可能になった。

4. 乗員の受動運動設計による快適性要因探索

4.1 快適性評価としての運動設計

快適性を向上できる車両運動探索の方法論を具体化させる。そのために、乗員の身体運動による運動知覚量を組込んだ評価関数の最小化を逆車両運動で導くことを考えていく。

既に先行研究⁽⁷⁾において論理展開している事であるが、車両評価においては、『何を同じ条件として比較を行うか』という同一性の担保が重要となる。逆車両運動解析では、図 1 の車両運動タスク部 (Vehicle Motion Task) で、運動初期と終端での状態・入力変数の値を設定して解くことで、同一性が担保される。これから、評価関数に基づく運動設計が成立する。

そこで、設計の流れとしては、以下の三段階となる；

- (i) 評価する走行シーンを設定 (車両運動タスク)
- (ii) 快適性要因を評価関数で設定して最適解を算出
- (iii) 最適解を車両運動として再現させて実験評価。

最適解として得られるのは、想定車両の操作量および運動である。そこで、最後の段階における車両運動再現は、図 7 に示すように、操作量を実車に与えるか、または加速度空間を再現できる装置を用いて、乗員に運動を付加することで行う。

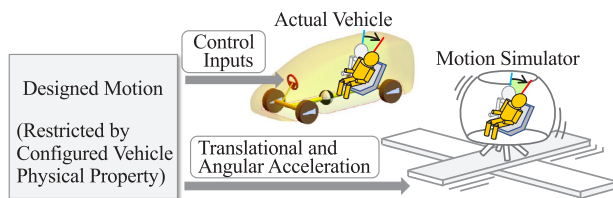


Fig.7 Methodology to construct acceleration space

まず、快適性評価の走行シーンとしては、操作入力の種類 (操舵単独か、ブレーキ・アクセルによる積極的な加減速を加えるかなど) にもよるが、定常運動では運動知覚に関係する評価関数差が顕著になり難い。そこで本論文では、運動知覚差を得やすい走行シーン例として、過渡運動を題材とした (図 8)。

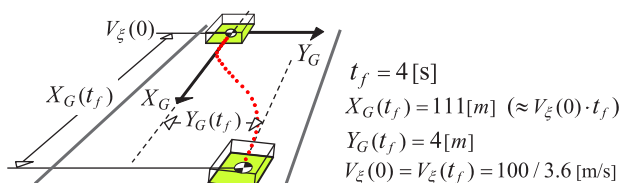


Fig.8 Example of vehicle motion task: Lane change as a typical transient vehicle motion scene.

次に、表 4 に例として用いる車両運動設計仕様を示す。車両運動タスクとして、終端における操作と、路面平面運動の状態量である方位角やヨー角速度を直進 (= 0) に戻すレーンチェンジを設定した。評価関数は、ドライバの快適性を仮定した操舵操作量最小化仕様 (V0) と、乗員の快適性向上の仮定として、身体ロール角加速度最小仕様 (R1) を設定した。比較のため、身体ロール角加速度最小仕様に、終端でのロール角加速度と角速度を 0 に戻す条件を追加した仕様 (R2) も設定している。

Table.4 Vehicle and passenger motion design specification: Three condition to exemplify design methodology.

Stage	Cost *	Terminal Condition (Motion Task)			Symbol
		Vehicle		Passenger	
Subject	Roll Angular Acceleration	Control Input	Plane Motion	Body Roll Motion	
Driver (Vehicle)	Vehicle Body	Steering Angle & Angular Velocity return to 0	Track Angle & Yaw Rate return to 0	Arbitrary State	V0
Passenger	Passenger's Body	Same Speed as initial condition	Lateral Velocity of C.G. return to 0 Set C.G. Position	Angular Acceleration & Velocity back to 0	R1 R2

* Applied quadratic form of state and/or input variables

4.2 設計に基づく乗員加速度空間の算出

運動の設計仕様に従って計算を行う。ここで、乗員身体モデルの特性を決める必要がある (車両特性の設定は、著者らの先行研究⁽⁷⁾にて用いた車両と同一)。単純な乗員モデルなので、モデル特性の厳密性追求による精度向上効果は小さい。そこで、形状や質量特性値としては、後工程 4.3 節での実車実験評価者に近い値を仮定する。横加速度 $2[\text{m/s}^2]$ 付近の身体剛性 K_B を、被験者計測結果 (15 例) の分布を参考に設定した。図 9 に計測例を箱ひげ図で示す。計算は、乗員が下向き姿勢でテキストリーディング時の値を用い、後席左位置に着座させた。

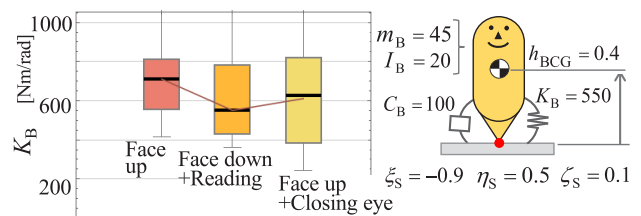


Fig.9 Passenger body roll stiffness (box-and-whisker plot) and other characteristics: Passenger model parameters were fixed from subject measurement (n=15) and estimation.

これで計算に必要な設定が完了したので、逆車両運動解析を行い、終端条件を満たしつつ評価関数を最小化する操作入力と、車両運動 (図は車両重心軌跡) を算出した (図 10)。

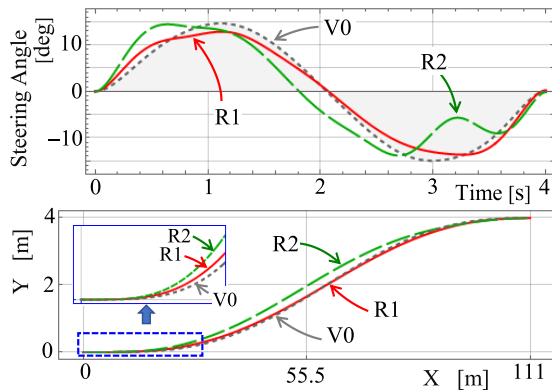


Fig.10 Steering pattern and vehicle C.G. path (with enlarged view) to satisfy design specification of vehicle and passenger motion: Inverse vehicle dynamics analysis fixes both input and state variables simultaneously.

最適化算出された車両運動として車両重心横加速度と、乗員身体のロール姿勢角 Φ_B を図11に示す。計算結果は、V0のSin関数状の変化に対して、乗員挙動を最適化した仕様R1では乗員挙動のピーク値が抑えられている。また、終端拘束を加えた仕様R2では姿勢角が計算終端で一定値収束している。

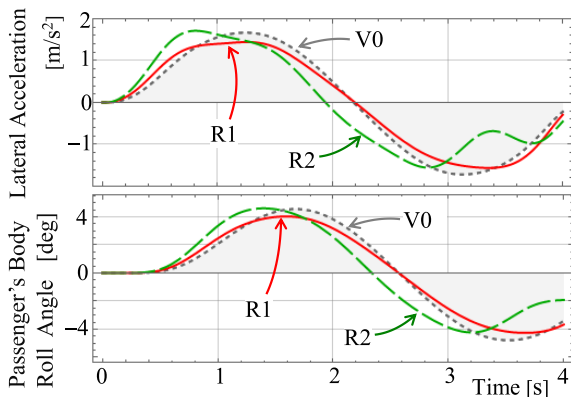


Fig.11 Vehicle and passenger motion to satisfy the design specification: Calculated results.

4.3 加速度(車両)空間を用いての評価

実験方法は、車両に操舵ロボットを取付けて算出操舵波形を再現することで、後席乗員への加速度付加を行った。実環境対応のため、車両モデルには勾配の影響項を追加して計算を行った。計算値終端の4秒に合わせて実験値を比較する。

乗員は、乗員特性計測時の平均に近い体格を持つ運動性能評価エキスパートである。乗員は、操舵ロボットでは不可避な駆動音で車両の運動開始を認識してしまう。けれども、外界視界は周辺視で捉えているだけなので、運動予測はできにくく、受動運動という設定に近いはずである。乗員姿勢変化は、後頸部に装着させた変位センサによる移動量から推定した。

実験結果は計算例(図11)に対応させて図12に示す。加

速度空間の再現性は確保できている。乗員姿勢変化量の計算値との乖離(図では係数2.0を掛けている)は、計算が図9の乗員モデル特性値(四分位範囲で約2倍の差が存在)であるため、評価者との個体差などの影響と考えている。仕様相互の相対的關係は計算による予測と対応していると判断している。

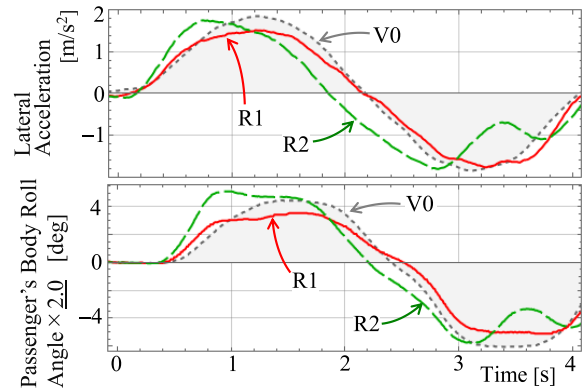


Fig.12 Vehicle and passenger motion of actual vehicle test: Every data curve was averaged (n=5).

主観評価では、仕様V0は『動きは滑らかだが、身体姿勢変化は大きい印象』なのに対して、身体ロール角加速度を抑えた仕様R1は『身体ロール姿勢変化が小さい』と感じることができている。別表現では『身体の並行移動感が高まった』という評価も得た。ただし、終端でのロール姿勢拘束を追加した仕様R2は、『運動初期の動きがV0比較で大きい』という評価であった。また、身体姿勢保持を狙った終端身体ロール抑制は、『高周波の動きは気になるが、身体抑制による負荷低減は認識できる』との評価であった。以上、乗員受動運動設計を用い、計測と主観評価双方で快適性をパラメトライズできている。

5. 快適性探求に向けての考察

乗員身体モデルとしては、頭部を別体化するなどの自由度増は可能であるが、受動運動範囲とはいえ、頸椎部の剛性などの適切なモデル特性値の確定も難しくなる。乗員の乗車中の行動や状態は多様と考えられるので、乗員モデルの複雑化とは別に、モデル特性値の設定の工夫は研究課題であろう。

一方、乗員の運動知覚に関しては、身体モデルから機械的に算出できる量ではなく、人間の内面の感覚特性のモデルも加えて、真の知覚量で評価関数を構成することが重要であるかもしれない。図13は、身体ロール角加速度を評価関数とした仕様での終端拘束の有(R2)無(R1)での身体挙動(計算値)を示している。R2仕様では中間時間での横移動量がR1仕様より大きく、終端での身体挙動を制御するためには、身体ロール運動を早期に励起させる必要があることがわかる。ロール運

動を抑える代わりに並進加速度が増加しており、並進と回転の運動知覚認識のメカニズムも検討に加えていく必要がある。

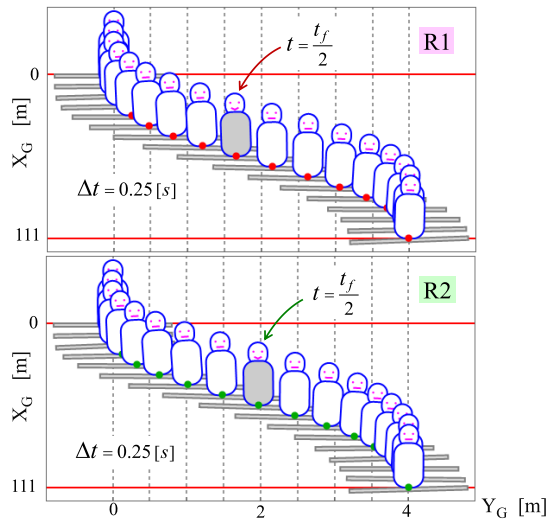


Fig.13 Passenger upper body posture transition: Earlier motion generation is required for terminal posture control, then needs quick initial motion, too.

運動設計自由度は、評価関数形の制限と関係してくる。組込める変数は一般的には2次形式の組み合わせに限定される。

また、複数操作入力へ拡張した走行シーンでは、個々の操作入力に応じた量の項を評価関数に設定しないと、同時最適化ができない(項の直交性確保)。快適性の探索を進めるには、評価関数の表現の自在性向上も図る必要がある。

6. 結 言

本論文では、車両運動による乗員への影響を、快適性の観点で捉え、それを向上させるための〈実験・評価の方法論〉を提示した。快適性は、車両運動による加速度空間内での身体受動運動の負荷や知覚に依存すると想定すれば、車両運動を工夫することで、乗員の快適性向上を図ることができる。

そこで、望ましい動きを評価関数として設定して、最適制御から車両運動を求める逆車両運動解析を用いた運動設計を試みた。負荷量推定として乗員の身体モデル、知覚量推定として加速度量などを評価関数へ取り込むためのオブザーバ構築で、乗員と車両を組み合わせた逆運動解析を可能とした。

もちろん、評価関数の形がどのようなであれば、設計された車両運動が快適性を向上させているといえるのかは、乗員の車両運動知覚特性の解明と共に、主観評価で判断していく必要がある。そのために、走行シーンを仮定して、候補となる評価関数設定で車両運動設計を行い、乗員をその加速度空間(本論文では実車)に置いて評価する流れを具体例として示した。

制御ロジックやAI などによる自動運転技術開発に、乗員に優しい車両運動という価値を加えるべく、研究を進めていく。

(追記)：本論文で実施した実験は、日産自動車(株)実験倫理委員会の審査を受け、承認を得た内容であり、実験参加者からインフォームドコンセントを得た上で実施したものである。

参 考 文 献

- (1) 吉本達也、深尾隆則、横小路泰義、伊能寛：ドライバの操作特性を考慮した動的環境下におけるレーンチェンジ経路生成法、自動車技術会論文集、Vol.47, No.2, p.633-638 (2016)
- (2) 和田隆広：自動運転車両における動揺病低減について、自動車技術会学術講演会予稿集(2016)、20165263
- (3) 山田勝徳、本島治敏、北川裕一、安木剛：レーンチェンジ時の乗員挙動とシートによる乗員支持の関係調査、自動車技術会学術講演会予稿集(2016)、20165176
- (4) 山本真、山本忠、西山修二：多連クロソイド曲線を用いた曲率変化の滑らかな走行路緩和曲線の提案、日本機械学会論文集、Vol.83, No.852 (2017)
- (5) 吉岡透、安部正人、山門誠、狩野芳郎、武田雄策、竹村和紘、塚野孝俊、加藤史律、梅津大輔：G-Vectoring制御による人が感じる車両運動性能向上効果に関する分析、自動車技術会学術講演会予稿集(2016)、20165250
- (6) Alexander Lange, Martin Albert, Karl-Heinz, Siedersberger, Klaus Bengler : Ergonomic design of the vehicle motion in an automated driving car, 6th International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics (AHFE) (2015)
- (7) 牧田光弘：輪荷重移動を含む車両モデルを最適制御問題へ定式化するための一手法、日本機械学会論文集、Vol.81, No.826 (2015)

出 典

公益社団法人自動車技術会
自動車技術会論文集
Vol.50, No.5 文献番号：20194687

第72回 自動車技術会賞 論文賞 (2022年)

機械学習を用いた自動車空力性能を予測するための サロゲートモデル開発

受賞者紹介

赤坂 啓 Kei Akasaka

分野 : CFD (数値流体力学)、機械学習
学位 : 博士 (工学)
所属学会 : 自動車技術会
データサイエンス協会
受賞歴 : 日本計算工学会 第18回計算工学講演会 (2013)
グラフィクスアワード 最優秀賞



陳 放歌 Fangge Chen

分野 : 機械学習
学位 : 修士 (工学)



寺口 剛仁 Takehito Teraguchi

分野 : 対話システム、機械学習、UX
学位 : 博士 (情報理工学)
受賞歴 : ACM SIGGRAPH 2009 Student Research Competition
Semi-Finalists (2009)



受賞：第72回 自動車技術会賞 論文賞(2022年)

機械学習を用いた自動車空力性能を予測するための
サロゲートモデル開発

赤坂 啓* 陳 放歌** 寺口 剛仁**

抄録 燃費性能の競争力向上や新たな環境規制に対応するため、より一層の空気抵抗の低減が求められている。そこで、より高い空力性能の実現に向けて、造形デザイナーや空力エンジニアが限られた期間内に多数のデザイン案の空力予測を行えるツールの開発を行った。本研究では、短時間に空力性能を予測できるように、CFD (Computational Fluid Dynamics) の代わりに機械学習を用いた予測モデルを開発した。本論文では、開発した機械学習モデルおよび学習に使用したデータセットの概要、予測精度や計算時間について報告する。

1. ま え が き

近年、自動車市場における燃費性能の競争力向上や新たな環境規制に対応するため、より一層の空気抵抗の低減が求められている。自動車の空力性能開発において空気抵抗を評価する場合、風洞実験と並んでComputational Fluid Dynamics (CFD) も多用される^(1,2)。しかし、CFDを行うためには多額の費用と時間が必要となる。特にCFDについては、実験評価前の事前計算や評価仕様数の増加、更に計算精度向上といった要求も加わりCFDの計算量、計算時間は年々増加している。そこで本研究では機械学習を用いて、自動車形状とCFDの計算結果の関係を学習することにより、CFD結果(流速、圧力および空気抵抗係数)を推定するサロゲートモデルの開発を試みた。これにより、空力解析をCFDから機械学習モデルに置換えることが可能となり、CFDの計算時間の短縮と計算量、コストの削減が期待できる。本論文では、提案手法とデータセットの概要および検証結果について報告する。

2. 機械学習モデル

2.1 既存研究

これまでも本研究と同種の研究は存在する。Umetaniら⁽³⁾は自動車の空気抵抗係数(C_D 値)および流れ場の推定を目的に、自動車形状を数値化した特徴量とCFDの計算結果(流速、圧力、 C_D 値)をGaussian processを用いて学習、推定する

機械学習モデルを構築した。Umetaniらは約800の自動車形状とCFD結果について学習を行い、 C_D 値および流れ場の推定結果はCFDの計算結果と比較して良く一致すると報告しており本研究の参考となる。しかし、より現実に近い自動車形状を学習する場合には課題がある。この手法ではPolyCubeと呼ばれる多面体を使用しており、PolyCubeの構成点をトポロジーが変わらない範囲で自動車形状にプロジェクションする。このプロジェクションされた各構成点の座標や高さの特徴量として使用しており、学習対象の自動車形状に近いトポロジーのPolyCubeを用意する必要がある。しかし、実際の自動車形状はセダン(3BOX)やハッチバック(2BOX)、ミニバン(1BOX)など、トポロジーが異なっており同一のPolyCubeを用いることは難しい。これについては、各車型に適したPolyCubeを用意し、個別に学習することも考えられるが手間を要する。また、実際の自動車にはエンジンルーム部品、タイヤ、フロアー部品、ドアミラーといった複雑な形状が存在するが、このような複雑な形状要素を表現できるトポロジーを持ったPolyCubeを用意することは簡単ではない。このため、Umetaniらの事例は比較的シンプルな自動車形状への適用にとどまっている。

一方で、Guoら⁽⁴⁾は、物体からの距離を表わす距離関数を入力データとし、2次元および3次元の流れ場(流速ベクトル、圧力)を推定する機械学習モデルをConvolutional Neural Network (CNN)⁽⁵⁾を用いて構築した。距離関数は複雑な形状に対しても適用が可能であり、かつ3次元への拡張も比較的容易なため、流れ場(流速、圧力)の推定についてはGuoらが提案するネットワーク構造を採用する。

* 統合 CAE・PLM 部 ** モビリティ & AI 研究所

しかし、Guoらのモデルは C_D 値の推定はできないため、 C_D 値の推定を行う学習モデルが別に必要になる。著者らはこれまでにボクセルデータを入力し、 C_D 値を推定する学習モデルを提案している⁽⁶⁾。 C_D 値の推定精度も良好であるため本研究でもこのモデルのネットワーク構造を採用する。

既存研究において、複雑な3次元形状を有する自動車形状まわりの流れ場と C_D 値の両方を学習できる学習モデルは提案されていない。そこで本研究では、既存研究で提案されている異なる二つの学習モデルを用いて流れ場と C_D 値の推定を行う。

2.2 流れ場を推定する学習モデルの概要

流れ場推定モデルの基本構成は、図1に示すGuoらによって提案されたネットワーク構造を採用する。このネットワークは、EncoderとDecoderを全結合層により接続した構成となっている。このネットワークを本研究のような実用問題に適用する場合、形状の複雑度合い等に応じて入力する距離関数のサイズを大きくする必要がある。これに伴い、EncoderおよびDecoderの中間層についても多層化する等の対応を行いネットワークの性能を向上させるが、中間層の多層化は学習時の勾配消失もしくは勾配爆発を招きやすく学習が進み難くなる課題がある。そこで本研究では、Guoらが提案するネットワーク構造に対し、全結合層の代わりにResidual blocks⁽⁷⁾を採用し勾配消失・爆発の抑制を図る。本研究の提案モデルを図2および図3に示す。距離関数を入力し、(a)流速ベクトルの3成分、(b)圧力を出力するモデルとなっている。また、EncoderおよびDecoderについても勾配消失の抑制のため、Batch normalization⁽⁸⁾およびInstance normalization⁽⁹⁾を用いた。

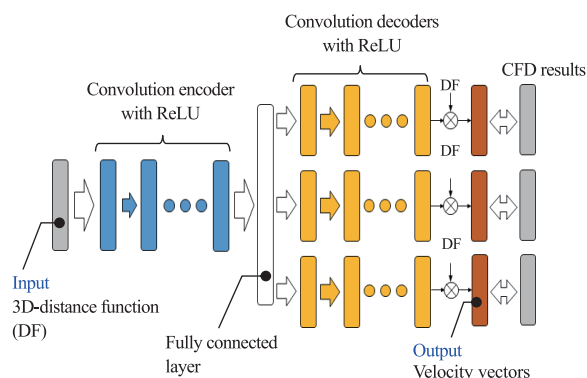


Fig.1 CNN structure of prediction model for flow field proposed by Guo⁽⁴⁾

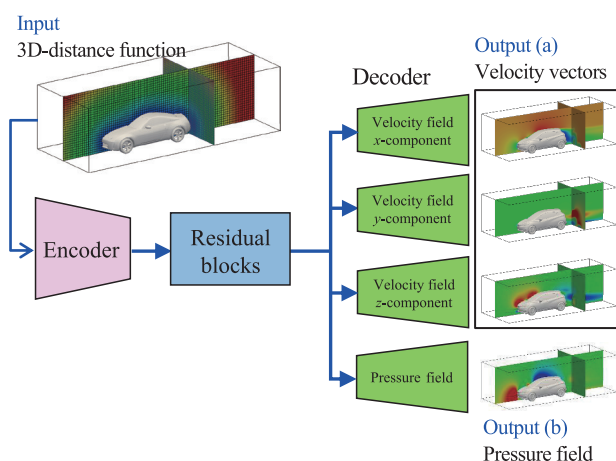
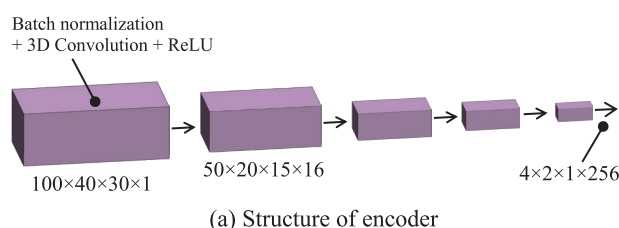
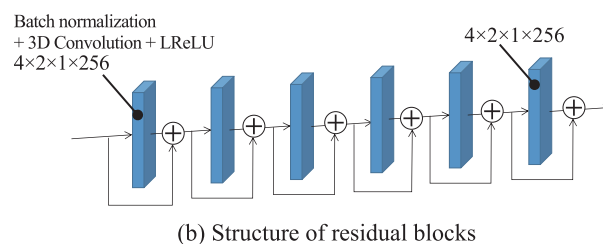


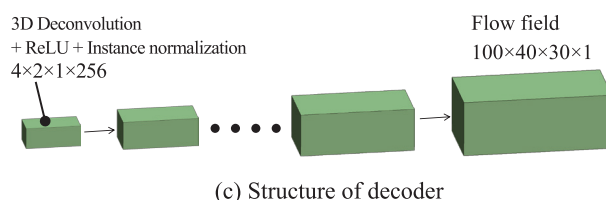
Fig.2 Structure of proposed model for flow field estimation



(a) Structure of encoder



(b) Structure of residual blocks



(c) Structure of decoder

Fig.3 Details of encoder, residual blocks and decoder of proposed model for flow field estimation

2.3 C_D 値を推定する学習モデルの概要

次に C_D 値を推定する学習モデルについて述べる。著者らはこれまでに、ボクセルデータを入力し、 C_D 値を推定する学習モデルを提案している⁽⁶⁾。このモデルはMaturana⁽¹⁰⁾によって提案されたVoxnetをベースしているが計算量を減らすため、中間層を一次元に変換する際に、Linらの研究⁽¹¹⁾を参考に全結合層を使用せず代わりにGlobal Average Poolingを採用している。 C_D 値の推定精度も良好であるため本研究でもこのネットワーク構造を採用する。

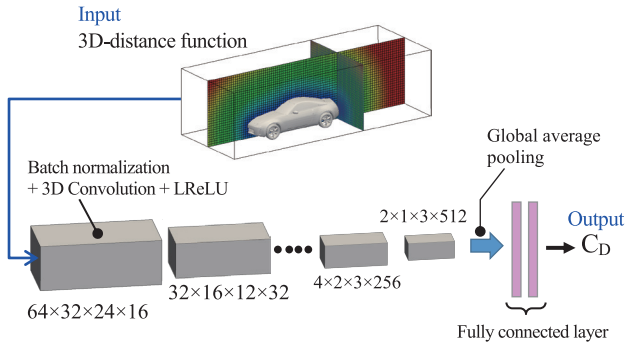


Fig.4 Structure of proposed model for coefficient of aerodynamic drag (C_D) estimation

ただし、流れ場と C_D 値の推定で入力データが異なることは利便性の観点で避けた。そこで、 C_D 値の推定モデルの入力データをボクセルから距離関数に変更し、流れ場と C_D 値の推定モデルの入力データを距離関数に統一する。入力データを距離関数に変更したネットワーク構造を図4に示す。

2.4 距離関数およびハイパーパラメータ

まず、CNNに入力する距離関数について述べる。図5に本研究で用いた3次元の距離関数の距離場を示す。色は各格子点の自動車形状からの距離を示している。次に距離関数の生成方法について述べる。自動車形状周りにBounding boxを設定し、Bounding box内に直交等間隔の格子点を配置する。これら各格子点に対して自動車形状からの最短距離を計算し距離場を生成した。表1にBounding boxの大きさ、格子間隔および格子点数を示す。 C_D 値の推定に用いる距離関数については、詳細な形状変化を捕らえられるように、より小さい格子間隔を用いた。

また、本研究で使用したOptimizer、損失関数およびハイパーパラメータは表2のとおりである。

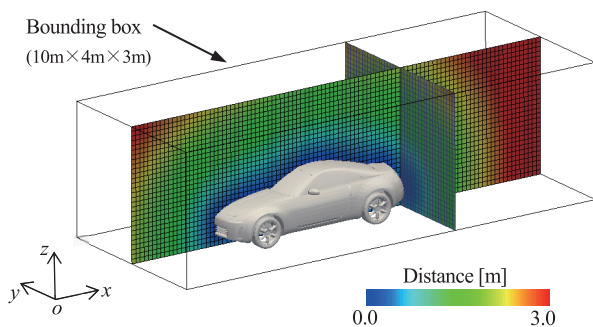


Fig.5 3-dimensional distance function around car shape

Table 1 Parameter of distance function

	Flow field prediction	C_D prediction
Bounding box	10.0m×4.0m×3.0m	6.4m×3.2m×2.4m
Grid pitch	0.10m	0.05m
Num. of grids	100×40×30	128×64×48
	120,000	393,216

Table 2 Optimizer, loss function and hyper-parameters

	Flow field prediction	C_D prediction
Optimizer	Adam	Adam
Loss function	Mean absolute error	Mean absolute error
Learning rate	10^{-3}	10^{-4}
Epoch	5,000	2,000
Batch size	16	16

3. データセットと検証結果

3.1 データセット

データセットを図6に示す。1つのケースは、距離関数、流速ベクトル3成分、圧力および C_D 値の6種類の情報を有している。CNNに入力するのは距離関数のみであり、流速、圧力および C_D 値はネットワークの出力結果である。これらの出力結果が学習ケースの流速、圧力および C_D 値と一致するように学習を行う。本研究では1,123ケース用意し10:1の割合で分割し、学習とテストに使用した。データセットにはセダンやクーペ、SUV、ハッチバック、ピックアップトラック、軽自動車の6種類の車型が含まれており、学習ケースとテストケースに含まれる車型の割合は同程度となっている。学習およびテストに使用する流速ベクトル、圧力および C_D 値は商用のCFDソフトウェアを用いて計算した。計算条件は、直進走行状態、車速33.3m/s、Reynold数 1.0×10^7 における計算結果である。また、CFDの計算は距離関数とは異なる格子で計算をしているため、CFDの計算結果を距離関数用の格子にマッピングしている。

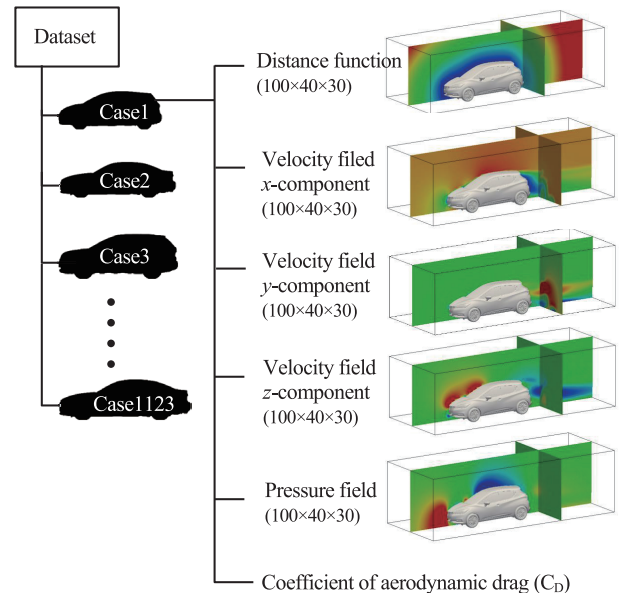


Fig.6 Distance function, flow fields and aerodynamic drag (C_D) in dataset

また、距離関数およびCFD結果は有次元の情報となるため、本研究では学習、テストに使用する前に正規化を行った。

学習に使用した計算リソースはNVIDIA社のDGX-1 (1GPU) であり、機械学習関係のライブラリはTensorflow2.0を用いた。流れ場の学習に要した時間は約4日、 C_D 値の学習に要した時間は0.5日程度であった。また、表2に示すEpoch数まで計算することで、流速ベクトル3成分、圧力および C_D 値の最終的な損失関数の値が表3に示す程度まで下がることを確認している。

Table 3 Errors of loss functions in velocity vectors, pressure and C_D at last epoch of proposed model

Velocity vectors	Pressure	C_D
0.003~0.005	0.002	0.001

3.2 流れ場の検証結果

次に、本手法で推定した流れ場について考察する。各テストケースは12万点 (100×40×30) の流速ベクトルを有する。この12万点の平均誤差を式(1)に示すMean absolute error (MAE) を用いて評価した。

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |a_i - y_i| \quad (1)$$

ここで、 a_i および y_i は、それぞれCFD結果と提案モデルの推定結果を表している。また、 n は格子点数を表しており、今回は12万点となる。

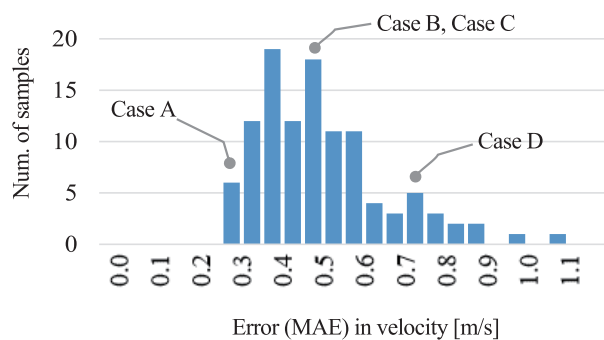


Fig.7 Histogram of mean absolute error in x-component of velocity vector on test cases

流速ベクトルの x 方向成分の平均誤差 (MAE) を図7に示す。 x 方向成分の平均誤差は0.2~1.1m/sであり、車速風の0.6%~3.3%程度の誤差に収まっている。また、 y および z 方向成分の平均誤差は x 方向成分の誤差に比べて小さいことを確認している。

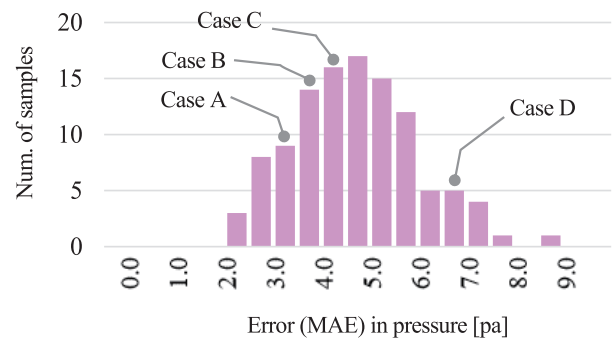


Fig.8 Histogram of mean absolute error in pressure on test cases

図8は、提案モデルで推定した圧力について、流速ベクトルと同様に12万点の平均誤差をMAEで評価し、その結果をヒストグラムで表した図である。圧力の平均誤差は2.0~9.0paであり、車速風に基づいた動圧の0.3~1.3%程度の誤差に収まっている。流速、圧力ともに車型による誤差の傾向に顕著な違いは見られなかった。

図9および図10は提案モデルを用いて推定した圧力分布および流速分布をCFD計算結果と比較した図である。ケースAからDはテストケースの代表例であり、各ケースの圧力と流速の誤差は図7、図8に示すとおりである。図9および図10は、いずれのケースも上段は比較対象となるCFDの計算結果であり、下段が提案モデルによる推定結果である。

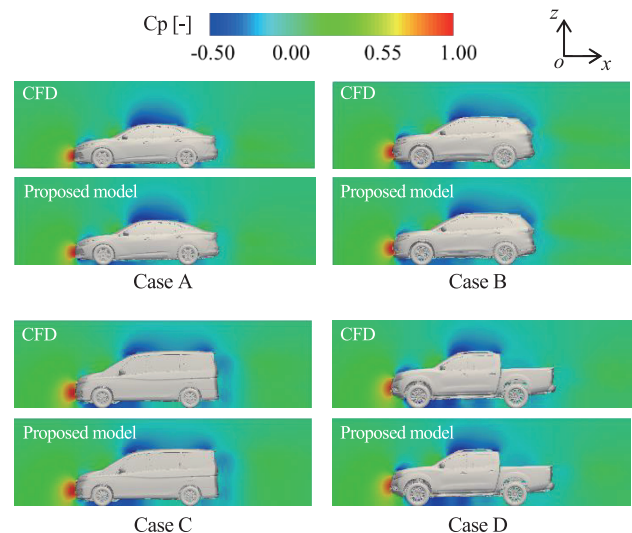


Fig.9 Comparison of pressure between CFD and proposed model in central cross-section

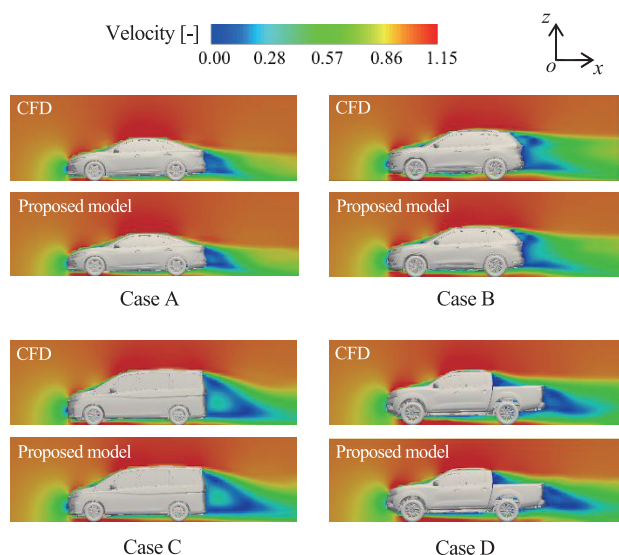


Fig.10 Comparison of velocity magnitude between CFD and proposed model in central cross-section

図9は車両中心断面における圧力分布を示しており、圧力値については動圧で無次元化している。いずれのケースにおいても提案モデルを用いて推定した圧力分布はCFD結果の傾向を再現できていることがわかる。

図10に車両中心断面における流速分布を示す。流速値は車速で無次元化している。特に空力評価において重要となる車両後方の後流領域の大きさや流速分布の傾向において、提案モデルはCFD結果を定性的に再現できていることがわかる。

図9および図10の比較結果から、圧力と速度の誤差が比較的大きいケースDであっても流れ場の定性的な傾向を再現できていること、加えて提案モデルは、異なる車型が持つ流れ場の特徴を再現できることを確認できた。

3.3 Residual blocksの効果について

EncoderとDecoderの接続に全結合層を採用したGuoらが提案するネットワーク構造と、全結合層の代わりにResidual blocksを採用した本研究で提案するネットワーク構造を適用した場合の比較を示す。図11は車両中央断面における流速分布を示している。図11(a)はCFDの計算結果であり、図11(b)はResidual blocksを用いて学習した結果である。この図からCFDの計算結果に近い結果が得られることがわかる。一方、図11(c)は全結合層を用いて学習した結果であり、CFD結果とは異なる流速分布となった。勾配爆発により学習時の重みの最適化が進まず、流速ベクトルの損失関数の値は0.1程度であった。表3に示す提案手法の損失関数の値と比べて大きく、また、Epoch数を増やしてもこれより下がることはなかった。これらの結果からResidual blocksは有用であると考えられる。

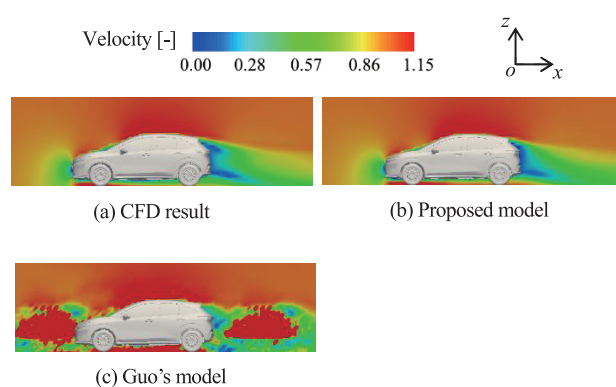


Fig.11 Comparison of velocity magnitude between Guo's model and proposed model in central cross-section

3.4 C_D 値の検証結果

図12に提案モデルを用いて推定した C_D 値の誤差を示す。図中の(a)は学習ケースを用いた場合の誤差であり、(b)はテストケースを用いた場合の誤差である。また、誤差を式(2)に示すMean Absolute Percentage Error (MAPE) および標準偏差で評価した結果を表4に示す。

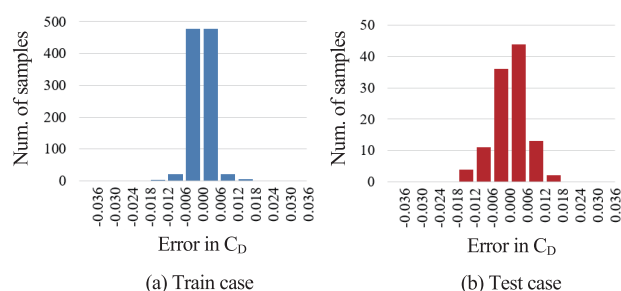


Fig.12 Histograms of error in C_D

Table 4 Error in C_D of train and test

	(a) Train case	(b) Test case
Std. deviation	0.002	0.006
MAPE	0.5%	1.4%

$$MAPE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|a_i - y_i|}{a_i} \quad (2)$$

式(2)における a_i および y_i は、それぞれCFD結果と提案モデルで推定した結果を表しており、 n は学習ケースの数またはテストケースの数を表す。

図12および表4に示す学習ケースの誤差(a)は標準偏差、MAPEともに十分に小さいことから、データセットを適切に学習できていることがわかる。一方、テストケース(b)については、(a)に比べて誤差が大きく汎化性能に課題がある。

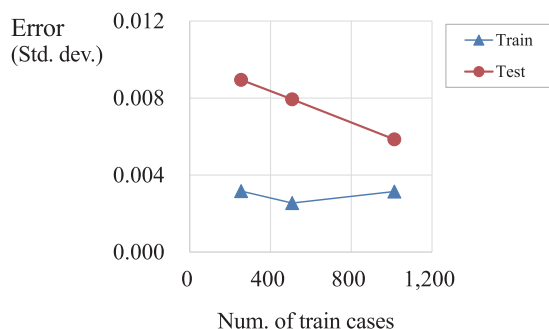

 Fig.13 Error history in C_D with increase of train cases

図 13 に学習ケース数を変えた場合の誤差の変化を示す。横軸は学習ケースの数であり縦軸は誤差（標準偏差）となっている。学習ケースの数が増えるに伴い、テストケースの誤差が小さくなることがわかる。汎化性能の向上に向けては学習ケースの増加が有効と考える。

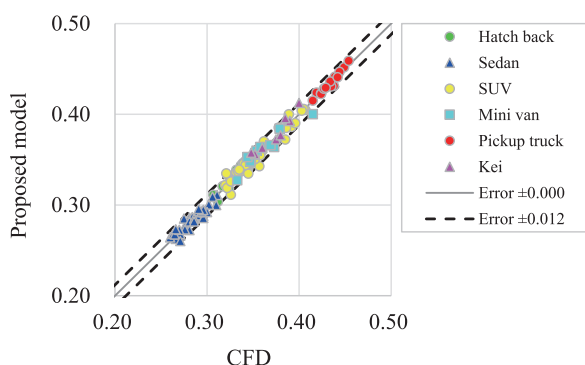

 Fig.14 Comparison of coefficient of aerodynamic drag (C_D) between CFD and proposed model

図 14 に提案モデルを用いて推定したテストケースの C_D 値と CFD 結果の比較を散布図で示す。縦軸は提案モデルで推定した C_D 値であり、横軸は CFD で計算した値である。テストケースには 6 種類の車型が含まれているが、いずれの車型についても提案モデルで推定した C_D 値は、CFD 結果に対して概ね ± 0.012 以内に収まっていることがわかる。

自動車開発の初期フェーズでは複数のデザイン案の空力評価を行うが、この段階では各デザイン案の形状差は大きく、 C_D の値も提案モデルの誤差以上に異なる。従って、初期フェーズであれば、各デザイン案に対する C_D 値の優劣関係の評価に提案モデルを利用することが可能であり、CFD の利用頻度、計算量の削減が期待できる。

3.5 機械学習モデルの推定時間

提案モデルを用いて、前述のケース A の流速分布、圧力分布および C_D 値を推定するのに要した時間を表 5 に示す。比

較として商用の CFD ソフトウェアを用いた場合に要する時間も記載した。

Table 5 Comparison of computational time between CFD and proposed model

Proposed model		CFD	
Distance function	11.4 min.	Mesh generation	4.0 H
Prediction of velocity, pressure and C_D	0.1 min.	Flow calculation	20.0 H
Sum.	11.5 min.	Sum.	24.0 H

CFD の場合、格子作成および流体計算で合わせて 24 時間程度の時間を要した⁽¹⁾。これは、メッシュ数は約 8,000 万点、256cpu コア (Intel Xeon) を用いた場合の計算時間であり、一方で提案モデルの場合は、ノート PC (cpu スペック Intel Core-i5) を用いて距離関数の計算に約 11 分を要するものの、流速分布、圧力分布および C_D 値の推定は 3 秒程度であった。提案モデルは、複数の形状案の定性的な流れ場や C_D 値を短時間に確認したい場合に有用なツールと言える。

4. まとめ

本研究では、複雑な 3 次元形状を有する自動車形状まわりの流れ場および空気抵抗係数 (C_D 値) を学習できる実用的な機械学習モデルの開発に取り組んだ。

1. 流れ場の学習モデルについては、Guo らの提案するネットワーク構造に対して、全結合層の代わりに Residual blocks を採用することで勾配爆発を抑制し、自動車形状まわりの流れ場を学習できるモデルを構築できた。
2. 提案モデルを用いて推定した流れ場は CFD の結果を定性的に再現できることを確認できた。
3. 提案モデルを用いて推定した C_D 値の誤差 (MAPE) は 1.4% であった。
4. 提案モデルは複数の形状案の流れ場や C_D 値を短時間に確認できることから、CFD を代替する有用なサロゲートモデルと言える。本提案モデルを用いることで、空力解析の計算時間短縮および計算コストの削減が期待できる。

参考文献

- (1) 赤坂啓ほか：CFD を活用した空力性能と熱性能の同時検討の取り組み、自動車技術会 学術講演会前刷集、No.96-05, pp.11-14 (2005)。
- (2) M. Arai, et al.: Development of the Aerodynamics of the New Nissan Murano, SAE Technical Paper, 2015-01-1542 (2015)。
- (3) N. Umetani, et al.: Learning Three-Dimensional

Flow for Interactive Aerodynamic Design, ACM Trans. Graph., Vol. 37, No. 4, Article 89 (2018).

- (4) A. Guo, et al: Convolutional Neural Networks for Steady Flow Approximation, Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, pp.481–490 (2016).
- (5) Y. LeCun, et al.: Gradient-based learning applied to document recognition, Proceedings of the IEEE, 86 (11), pp.2278–2324 (1998).
- (6) 赤坂啓ほか: 機械学習を用いた自動車空気抵抗係数のインタラクティブ予測ツール開発、人工知能学会 第34回全国大会、206-GS-13-02 (2020).
- (7) K. He, et al: Deep residual learning for image recognition, Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition, pp. 770-778 (2016).
- (8) Ioffe, et al.: Batch normalization: Accelerating deep network training by reducing internal covariate shift, arXiv preprint arXiv:1502.03167 (2015).
- (9) Ulyanov, et al. :Instance normalization: The missing ingredient for fast stylization, arXiv preprint arXiv:1607.08022 (2016).
- (10) D. Maturana, et al.: VoxNet: A 3D Convolutional Neural Network for real-time object recognition, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Hamburg, pp. 922-928 (2015).
- (11) M. Lin, et al.: Network in network, arXiv:1312.4400 (2013).

出 典

公益社団法人自動車技術会

自動車技術会論文集

Vol.52, No.3 文献番号：20214248

第72回 自動車技術会賞 論文賞
(2022年)

微小操舵角域のライントレースのバラツキを低減する
ピッチ特性に関する研究

受賞者紹介

田尾 光規 Mitsunori Tao

分野 : 車両運動性能 (操縦安定性、乗心地)
学位 : 博士 (情報学)
所属学会 : 自動車技術会
日本機械学会
受賞歴 : 自動車技術会賞 技術部門貢献賞 (2021)



町田 直也 Naoya Machida

分野 : 車両運動力学、シミュレーション工学
学位 : 修士 (機械工学)
所属学会 : 自動車技術会



林 豊 Yutaka Hayashi

分野 : 車両運動力学、シミュレーション工学
学位 : 学士 (電子工学)
所属学会 : 自動車技術会



受賞：第72回 自動車技術会賞 論文賞(2022年)

微小操舵角域のライントレースのバラツキを低減する
ピッチ特性に関する研究

田尾 光規* 町田 直也** 林 豊*** 長棹 謙****

抄録 直進走行でドライバが走行レーン中央を維持するために行うような、微小な操舵シーンにおいて、操舵角に比例した微小な車両下向きピッチ角を付加することによって、ドライバが行う操舵のバラツキが減少すること、その定量的な関係を解明した。既報の「微小操舵角領域のライントレース性を向上する操舵力とヨー特性に関する研究」で解明した、同シーンで正確な操舵を可能とする操舵反力と車両ヨー特性の関係を組み合わせることで、ドライバが目標とする走行ラインに対して、正確な操舵をバラツキ少なく実行できるようになることを確認した。

1. ま え が き

一般的なドライバの日常での走行シーンを考えると、微小な操舵で車両の走行軌跡を微調整するようなシーンを含めて、概ね直進走行といえるシーンがその大半を占めていることが想像できる。筆者らが欧州および日本で実施したある調査では、微小な操舵といえる操舵角5deg以下の頻度は、全車速帯で51.1%と半分以上、80kph以上の車速帯では79.6%と約8割を占め、それらを裏付ける結果が確認されている。このような微小操舵角で目標とした走行ラインに沿って車両をトレースするライントレース性は、多くのドライバにとって遭遇頻度の高い重要な性能であるが、そのメカニズムは十分に解明されておらず、実際の開発現場ではその性能開発を実車によるチューニングに頼っているケースが多い。

本課題に対し、既報の研究「微小操舵角域のライントレース性に対する操舵力とヨー特性の関係解明」¹⁾では、微小操舵角域のドライバの不感帯、車両のヨー特性の不感帯を定量的に把握し、研究で定義したライントレース性の評価量と2つの不感帯の関係を分析することによって、ライントレース性に対する操舵力とヨー特性の定量的な関係を明らかにした。しかし同時に、ドライバの試行回ごとの走行軌跡が大きくばらつくことが、新たな課題の一つとして確認された。

本研究では、走行軌跡のバラツキ要因の一つが、微小域のドライバの操舵のメカニズムの中に潜んでいることに着目し、操舵に対してある量の車両ピッチ挙動を付加することでそのバ

ラツキを低減出来るという仮説の立案とドライビングシミュレータを使った検証、そしてその定量的なバラツキ低減効果を抽出した。既報の研究で取り組んだ、ドライバが目標とした走行ラインを平均して正確に走行できる車両特性の解明に加えて、試行回ごとのバラツキが少ない、毎回正確に走行するための車両特性の解明に取り組んだ。

研究の流れとして、最初に既報の研究の概要と今回の課題である走行軌跡のバラツキについて述べる。次に、同じく既報の研究で仮説として定義した微小操舵角域のドライバの操舵のメカニズムの中からバラツキの要因になっていると考えられる現象を考察し、そのバラツキを低減するために追加する車両挙動としてピッチを選定した理由について説明する。そして、実験で得られたドライバのピッチ挙動に対する感度特性から走行軌跡のバラツキを低減できる定量的なピッチ特性の仮説を立て、最後にその実験検証結果を示す。

なお、本研究で実施した二つの実験は、日常から通勤等で車を運転している20～50代の一般男性25名を対象に、日産自動車(株)実験倫理委員会の審査を受けて承認を得た内容により、実験参加者からインフォームドコンセントを得た上で実施したものである。

2. 既報の研究の概要と課題

既報の研究では、図1のような、80kphの一定速直進走行から、概ね5deg前後の操舵入力となる、1200Rのカーブとその緩和区間で構成される評価コースを設定、それを目標ライン

* モビリティ& AI 研究所 ** パワートレイン・EV 性能開発部 *** カスタマーパフォーマンス&実験技術革新部 **** 先行車両性能開発部

として走行した時の実際の走行軌跡のずれを“ライントレース乖離量”と定義してそのメカニズム解明を行った。

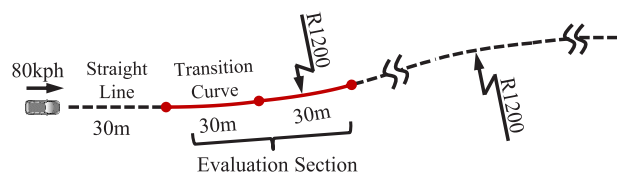


Fig.1 Evaluation Course

このライントレース乖離量は、図2で示したように、ドライバーが「車両に操舵入力をした」と認識する最小の操舵角に感度の高い操舵反力特性と、図3及び図4で示したように、ドライバーが「車両が動いた」と感知する最小のヨーレイト0.21deg/sを発生する操舵角に感度の高い“ヨーレイト不感帯(Dead Band)”の二つの特性を使って概ね精度よく設計できることを、ドライバー車両モデルによる仮説と実験評価者によるシミュレータを用いた検証により解明した。図5にその検証結果を示しており、操舵力が重くヨーレイト不感帯が大きいグラフ手前の仕様ではライントレース乖離量がマイナスと、目標ラインに対して外側に膨らむこと、逆に操舵力が軽く不感帯が小さい仕様では内側に切れ込むこと、そして操舵力と不感帯を太い破線で示したライン上に設定することで、目標ラインを正確にトレースできることを明らかにした。

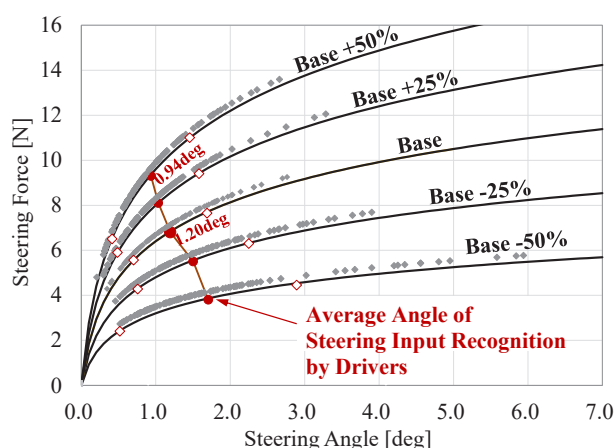


Fig.2 Steering Force & Driver's Input Recognition Angle

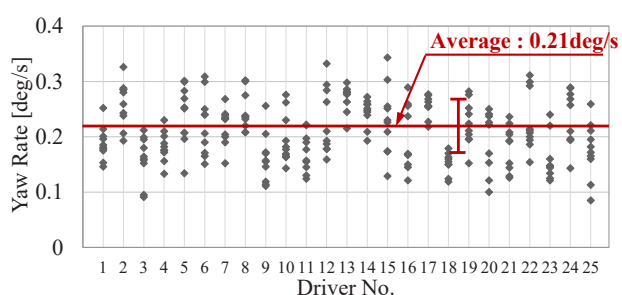


Fig.3 Driver's Yaw-Rate Sensitivity Experimental Result

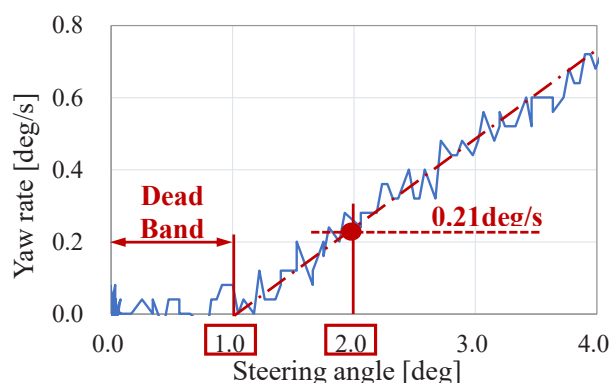


Fig.4 Yaw-Rate Characteristic in Small Steering Angle

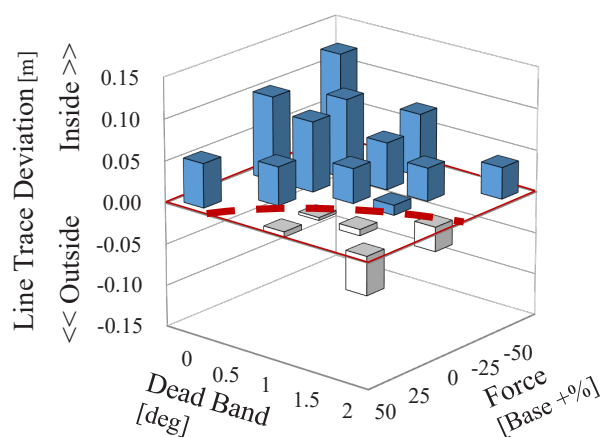


Fig.5 Experimental Result of Line Trace Deviation

一方、新たな課題として、ドライバーの試行回ごとの走行軌跡のバラツキが大きいことが確認された。図6は、25名のライントレース乖離量の平均がほぼ“ゼロ”となる、操舵反力が基準+25%、ヨーレイト不感帯が1degの仕様での、あるドライバーの6試行回の走行軌跡の示したものである。平均すると概ね太い破線の目標ラインを走行できているものの、同時にそれらにはいくらかのバラツキがあることが確認できる。

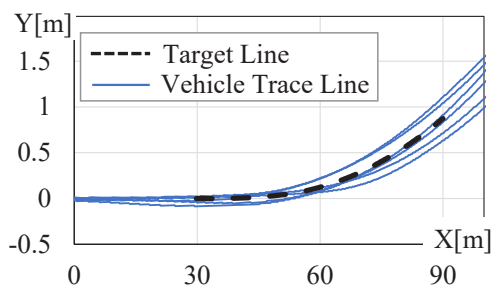


Fig.6 Line Trace Deviation by a Driver

図7は、同じ仕様の25名のドライバーの走行軌跡のバラツキを、それぞれのライントレース乖離量の標準偏差を算出して示したものであるが、それらの平均値は0.047mとなり、図5で示した全ドライバー全試行回の平均値で定義した仕様違いのライン

レース乖離量の変動と比較しても、その値は十分に小さいとは言えないことが分かる。

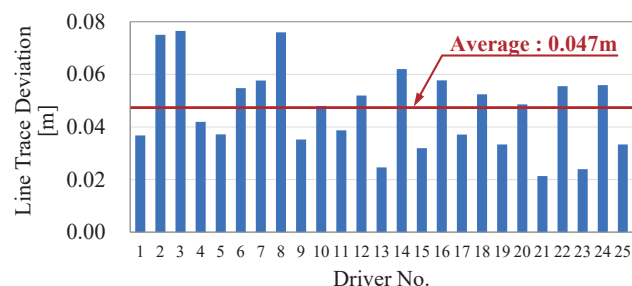


Fig.7 Average of Line Trace Deviation by 25 Drivers

本研究では、既報の研究で取り組んだ、ドライバが目標とした走行ラインを平均して正確に走行できる車両特性の解明に加えて、試行回ごとのバラツキが少ない、毎回正確に走行するための車両特性の解明に取り組む。

3. 走行軌跡のバラツキ要因と低減方策の検討

3.1 微小域の操舵メカニズムと走行軌跡バラツキの考察

ドライバの試行回ごとの走行軌跡のバラツキには、ドライバの視線の配り方やハンドルの握り方、運転に対する集中度合いのバラツキ等、様々な要因が考えられるが、本研究では既報の研究の中で仮説として定義した、微小操舵角域でのドライバの操舵のメカニズムの中に、その要因の一つがあることに着目し、詳細分析を行った。

図8に示したように、ドライバは直進走行から目標走行ラインに向けた操舵において、まず操舵反力の情報により概ね1deg前後の操舵角で車両に操舵入力を開始したことを認識する。よってこれと同じタイミングで車両がヨー運動を開始するようにヨーレイトに不感帯を設定しておくことで、ドライバの感覚に合う車両の動きが実現でき、最終的には平均的にライントレース乖離量も低減したと考えられる。しかしながら、ドライバが実際にこのヨーレイトの動きを視覚情報として感知できるのは、その値が0.21deg/sを超える、操舵角が約2degに達した時である。つまり、操舵角1～2degの区間では、ドライバは車両の動きの視覚からのフィードバック情報を得ること無く、操舵反力からの情報だけを頼りに、いわゆる“ブラインド的に”操舵を増している状態であると考えられる。

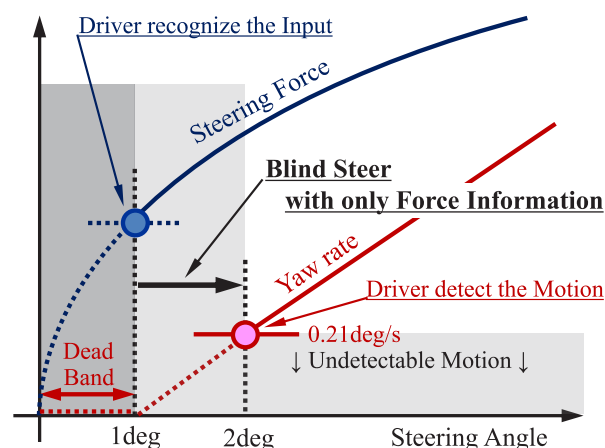


Fig.8 Driver's Steering Process in Small Steering Angle

視覚からのフィードバック情報は、安定して正確な運転をする上で最も重要な情報の一つであることは明らかであり、1～2degという微小な舵角帯といえども、その影響は小さくないと考えられる。とりわけ今回のように操舵角5deg以下の微小操舵角域でのライントレース性に着目した場合にはその影響は大きく、今回の課題である走行軌跡のバラツキの大きな要因の一つになっているものと考えた。

ドライバが操舵入力をしたと認識する操舵角1deg付近で車両がヨー方向の運動を開始し、操舵の増加とともにその動きも増加していることを、視覚からの情報としてドライバにフィードバックすることによって、ドライバはより安定した正確な操舵が出来るようになり、走行軌跡のバラツキが低減するものと考えられる。

3.2 ドライバに視覚情報を与えるための車両挙動の選定

前述の通り、今回の課題は操舵に対して車両が応答しヨー方向に運動を開始したことを、ヨー運動そのものではドライバに感知させられないことにある。ドライバがヨー方向の動きを感知するには0.21deg/sのヨーレイトが必要なためである。仮に車両が動き始めた瞬間からドライバが感知できる過大なヨーレイトを発生するような設定にすれば、車両のヨー方向の動きが機敏になりすぎて、本来目標とした走行ラインを正確に走行することすら出来なくなることは容易に想像できる。

本研究では並進・回転の6方向の車両運動の中から、ヨー運動の開始直後から車両が応答していることを、ヨーの動きに代わって視覚情報としてドライバに伝えるための動きについて検討した。まず、ヨー方向の運動と同様に平面運動で車両の走行軌跡に直接影響を与える前後・左右方向の運動を除外した、ロール、ピッチ、バウンスの3つの運動を候補として選定した。そして、人間の感度を調査した先行研究²⁾ 事例を参考に、視覚からの感度がヨー方向と同等に高い感度であることが報告されているピッチ方向の運動を最終的に選定することとした。

また、いくつかの先行研究^{3), 4)}において、操舵に対して車両前下がりのピッチ挙動とした方が、ピッチ挙動を与えない場合や前上がりとした場合と比較して、旋回時のフィーリングあるいはフィーリングと相関の高い特性が向上することが報告されており、本研究でも、操舵に対して車両前下がりのピッチ挙動を付加することとした。

4. 車両ピッチ挙動を用いた 走行軌跡バラツキ低減仮説の立案

4.1 ピッチ挙動に対するドライバの感度調査

ドライバが感知できる最小のピッチ挙動を把握するために、ドライビングシミュレータを用いた感度実験を行った。図9に実験風景を示す。ドライバには前方のスクリーンの景色を注視した状態で、車両に下向きで一定のピッチレイトを与え、ピッチの動きを感知した瞬間に手元のスイッチを押すように指示をした。ピッチレイトの値は0.0125deg/sの極めてゆっくりした速さのものから、0.3deg/sという比較的速いものまで、計8つのピッチレイト違いの実験をそれぞれ5回ずつ実施し、試行回ごとにドライバが感知したピッチ角を記録した。



Fig.9 Pitch Sensitivity Experimental Scene

図10に計測結果を示す。実験した8仕様のピッチレイトを横軸に、それぞれのピッチレイトでドライバが感知したピッチ角を縦軸として、実験評価者25名の計測データをドットで、それぞれの平均値を実線で結んだラインで示した。なお、ピッチレイトが最も速い0.3deg/sの仕様では、すべてのドライバがピッチの動きが始まった瞬間にその動きを感じ取れることが、ボタン操作の様子と評価コメントから確認されたため、図10のデータは0.3deg/sのピッチレイトを発生させた瞬間からボタンが押されるまでの時間差をドライバの操作時間と考え、すべてのドライバの操作時間の平均値0.51sを全実験生データから差し引き、補正した上で示したものである。

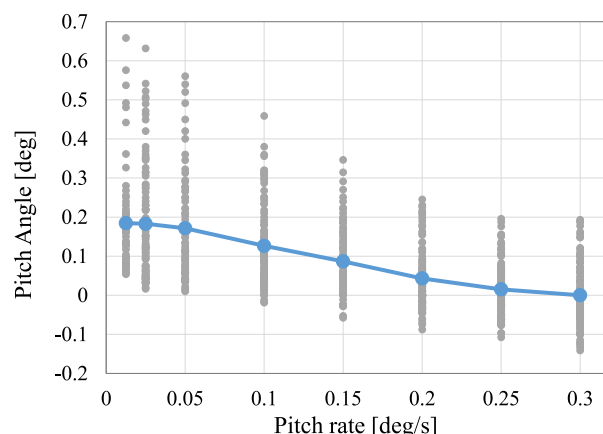


Fig.10 Driver's Sensitivity for Pitch Motion

ピッチレイトが0.05deg/s以下の遅い角速度では、ドライバはいずれも0.15～0.2degのピッチ角でその動きを感知していることが分かる（グラフ左側の領域）。これは、ドライバが0.05deg/s以下のピッチレイトを感知することが出来ず、積算されたピッチ角の大きさによって、初めてその動きを感知しているためと考えられる。一方、0.3deg/sあるいはそれに近い速いピッチレイトでは、ピッチ角がほとんど発生していない状態で、ドライバがその動きを感知していることが確認できる（グラフ右側の領域）。これは、前述の通りこの速さのピッチレイトでは、ドライバが速さそのものを感知できるためと考えられる。そしてこれら二つの領域に挟まれる中央の領域は、ドライバがピッチレイトの速さとピッチ角の大きさを総合して感じ取っている領域と考えられ、その感度は二つの領域をつなぐ右下がりのラインになったものと考えられる。以降、この感度ラインを使って、ヨーの動き始めたことをドライバに感知させるためのピッチ挙動の仮説を立てる。

4.2 走行軌跡のバラツキを低減するピッチ特性の仮説

ドライバが操舵入力をしたと認識するとともに、車両がヨー運動を開始する操舵角1deg付近で、車両が応答していること、更にそのヨーの動きが増加していることを、ピッチ挙動を使ってドライバに感知させるためのピッチ特性の仮説を立てる。ピッチ挙動の与え方として、操舵角比例、操舵角速度比例、またそれぞれに非線形性を加えたもの等、様々なパターンのものが考えられるが、本研究では、可能な限り単純化した状態でそのメカニズムを検証することを目的として、その中でも最もシンプルで、図11の示す操舵角に比例したピッチ角（下向き）を選定し、必要な比例定数の仮説を立てることとした。また、既報の研究の実験結果から、対象とするシーンでは、ドライバは概ね3deg/sの角速度で操舵を行うことが確認されているため、この操舵角速度を前提条件に加えた。

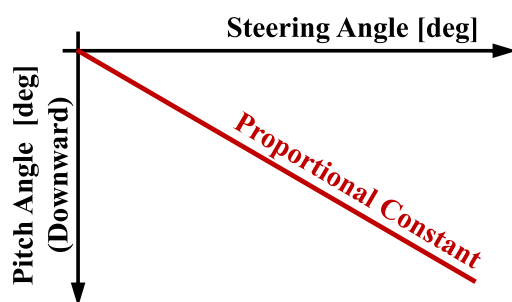


Fig.11 Pitch Characteristics for Driver's Information

$$\theta_{pitch} = K \times \theta_{steer} \quad (1)$$

$$\dot{\theta}_{pitch} = K \times \dot{\theta}_{steer} = 3K \quad (2)$$

θ_{pitch} : Pitch Angle (Downward) [deg]

θ_{steer} : Steering Wheel Angle [deg]

K : Proportional Constant

$\dot{\theta}_{pitch}$: Pitch Angle Rate (Downward) [deg/s]

$\dot{\theta}_{steer}$: Steering Wheel Angle Rate [deg/s]

実験で得られたドライバのピッチ挙動に対する感度ライン（図 10）と、式（1）（2）で定義した操舵に対するピッチ挙動の式から、ドライバが操舵角 1deg でちょうどピッチ挙動を感知できる比例定数 K の値を求める。図 12 は、ドライバのピッチ挙動に対する感度ラインに対して、比例定数 K を 0～0.08 まで 0.02 刻みで変更した時の、操舵角 1deg で発生するピッチレートとピッチ角の値をプロットしたグラフである。

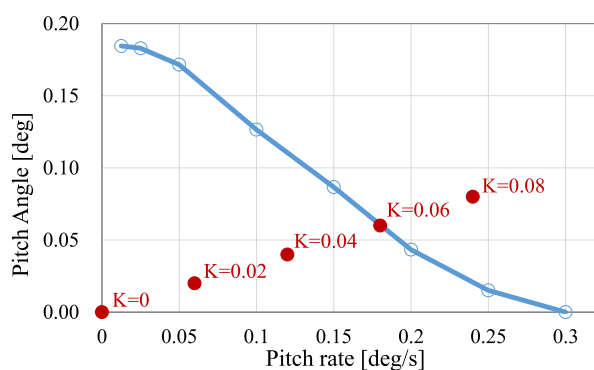


Fig.12 Pitch Motion by each "K" at Steering Angle 1deg

K の値が 0.04 以下の場合、操舵角 1deg で発生するピッチ挙動は、ドライバの感度ラインに到達しておらず、この設定ではドライバは操舵角 1deg でそのピッチの動きを感知できないことが分かる。一方、 $K=0.08$ とした場合、操舵角 1deg で既にドライバの感度ラインを大きく越えており、ドライバは操舵角が 1deg に到達する前に、その動きを感知してしまうものと思われる。そして $K=0.06$ とした時に、そのピッチ挙動が概ねドライバの感度ライン上にあることから、これが、ドライバが操舵角

1deg でちょうどピッチ挙動を感知できる K の値になると考えられる。

$$\theta_{pitch} = 0.06 \times \theta_{steer} \quad (3)$$

以上より、式（3）により、操舵角に対してピッチ角を付加することによって、ドライバが操舵入力をしたと認識するとともに、車両がヨー運動を開始する操舵角 1deg 付近で、車両が応答していること、更にそのヨーの動きが増加していることを、ピッチ挙動という視覚情報を使ってドライバに感知させられるものとする。そして、これまでドライバがブラインド的に操舵をしていたと考えられる微小操舵角域において、視覚からのインフォメーションのフィードバックを付加することによって、操舵角及び走行軌跡のバラツキが低減すると考えられる。これらを仮説として、その検証を実施した。

5. 仮説の検証

仮説の検証は、既報の研究と同じく、ある C セグメント車両のモデルを用い、図 1 で示した評価コースを再現したドライビングシミュレータを用いて実施した。以降その概要と実験方法及び結果の詳細について述べる。

5.1 実験に用いた車両モデルとシミュレータの概要

実験に用いた車両モデルの主要なパラメータを表 1 に示す。

Table 1 Vehicle Model Parameter

Parameter	unit	Value
Vehicle Mass	kg	1670
Vehicle Yaw Inertia	kgm ²	2600
Vehicle Pitch Inertia	kgm ²	2300
Height of C.G.	m	535
Front axle～C.G.	m	1.08
Rear axle～C.G.	m	1.62
Front Cornering Power	kN/rad	62.5
Rear Cornering Power	kN/rad	95.5
Steering Gear Ratio	-	15.0

また、実験に用いたシミュレータの外観図を図 13 に示す。このシミュレータは、可動域が 22×6m のスライドラールにヘキサポッドを介してマウントされたキャビン、それらを高精度に駆動する 64 個のリニアモータなどを備え、多くのシーンで高い実車再現性を実現しているものである⁵⁾。

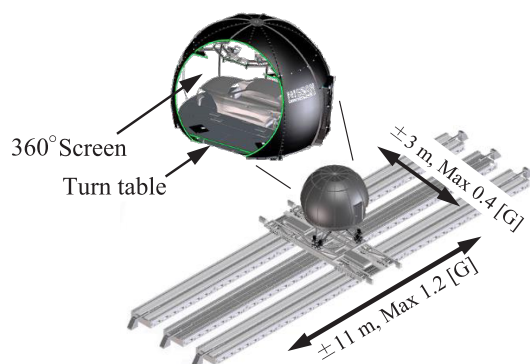


Fig.13 Driving Simulator

次に本シミュレータの精度検証結果を示す。図14は、今回対象とする現象に寄与の大きい操舵力とヨーレイトの操舵角依存性について、Cセグメント車両の実車計測データとシミュレータでの計測データを比較したものであり、いずれも高い再現精度が確認されている。

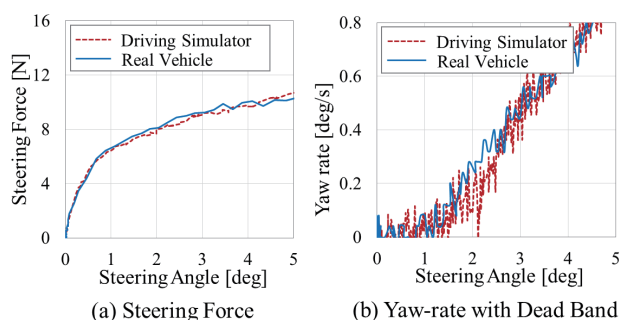


Fig.14 Driving Simulator Accuracy Confirmation

5.2 実験方法

実験はピッチレイトの感度実験と同じ25名のドライバーで実施した。車速を80kph一定に固定し、ドライバーにはハンドル操作のみを行い車線の中央を目標に走行するように指示をした。実験仕様は、既報の研究でライントレース乖離量の全試行回の平均値がほぼ“ゼロ”と、最も小さい値となったヨーレイト不感帯、操舵反力をそれぞれ 1deg、基準+25%に固定し、操舵角に対するピッチ角の比例定数Kを0～0.08まで、0.02刻みで変更した5つの仕様とした。それぞれの仕様に対し、右操舵3回、左操舵3回の全30試行回をランダムに並べた順番で実験を行い、その操舵角及び走行軌跡を計測した。

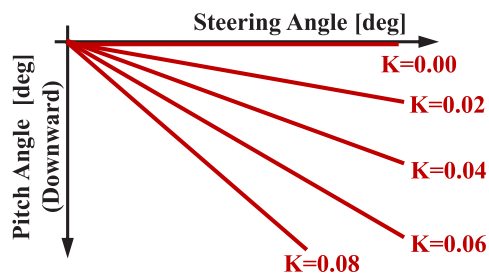


Fig.15 Pitch Characteristics

5.3 実験結果

図16に、ピッチの比例定数K違いでの、あるドライバーの走行軌跡の計測結果を示す。なお右旋回のデータは左旋回方向にミラー処理して表示した。ピッチの比例定数Kの増加にともなう、目標ラインに対する走行軌跡のバラツキが低減していく様子が確認できる。またそれぞれのグラフ内に表示した数値はライントレース乖離量のバラツキを算出したものであるが、定量的にもその傾向が確認できる。

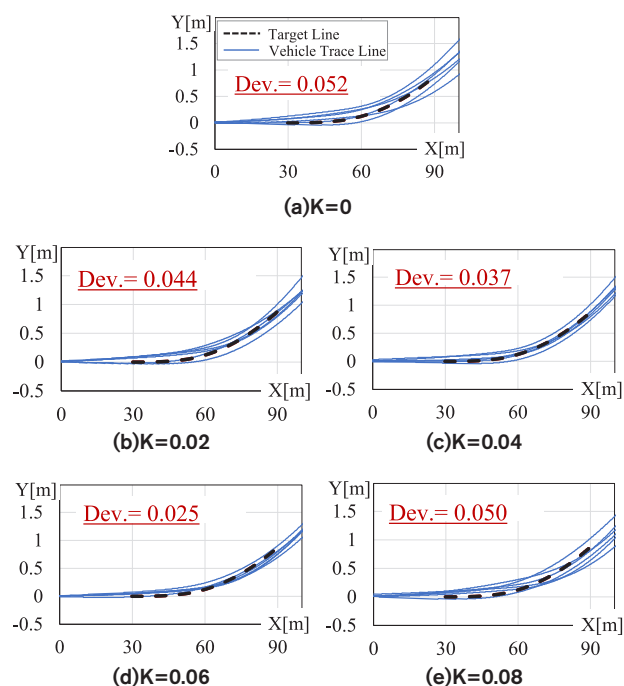


Fig.16 Line Trace Experimental Result

図17は、25名のドライバーの走行軌跡の計測結果から、ピッチ仕様違いのライントレース乖離量のバラツキを算出し、横軸をピッチの比例定数Kとしてプロットしたものであり、Kの増加に伴ってライントレース乖離量のバラツキが低減する傾向が確認できる。太い実線は各仕様の平均値を結んだものであるが、その値はK=0.06で最も小さくなり、K=0.08ではまた増加することが定量的にも確認でき、本研究で立てた仮説が検証さ

れた。そして、 $K=0.06$ のピッチ角を付加した場合、ピッチ挙動を付加しない場合に対して、ライントレース乖離量のバラツキを約 33% 低減できることが確認できた。

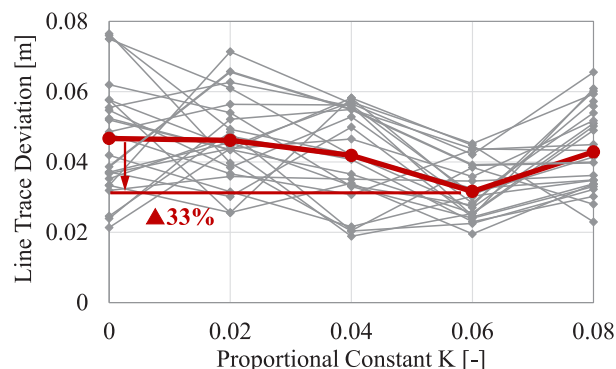


Fig.17 Line Trace Deviation Experimental Result

ここで、 K の増加に伴うライントレース乖離量の変化を考察する。 $K=0$ と $K=0.02$ では乖離量の値に大きな差は見られない。これは、ピッチ挙動をまったく与えない $K=0$ に対して、 $K=0.02$ とした場合でもドライバーがその動きを感知できるのは操舵角で約 3deg と、 2deg 付近でヨーの動きを感知した後であり、 $1\sim 2\text{deg}$ のブラインド操舵区間の視覚情報を補うことが出来なかったためと考えられる。同様に考えると、 $K=0.04$ の場合は操舵角約 1.5deg 付近でピッチの動きをドライバーに感知させられることが出来るため、 $K=0.06$ の場合のように、ブラインド区間を完全にカバーすることはできないまでも、それと比べて約半分の区間、ドライバーに視覚情報を与えることが出来るため、相応のバラツキ低減効果があったものとする。一方、 $K=0.08$ とした場合は、ドライバーが操舵入力を認識したり、車両が実際にヨー運動を開始する、操舵角が約 1deg に達する前に、ピッチの動きをドライバーに感知させてしまったと考えられ、むしろドライバーの正確な操作を阻害する余計な視覚情報を与えてしまったことで、 $K=0.06$ の場合に対してバラツキが増加したのと考えられる。

最後に、ピッチ挙動を追加することによる、ライントレース乖離量の平均値への影響について考察しておく。本研究においてピッチ挙動を追加する目的は、これまでドライバーが操舵反力の情報だけを頼りに感じ取っていた車両の動き出しを、ピッチという視覚情報を加えることで、よりばらつき少なくそれを感じ取れるようにすることであった。よって、その目的を達成するために必要な量のピッチ挙動であれば、ライントレース乖離量の平均値には影響がないと考える。図 18 は、今回計測された 25 名のドライバーのライントレース乖離量の平均値を示したものであるが、ピッチ挙動を加えることによってその値に大きな変化がないことが確認されている。

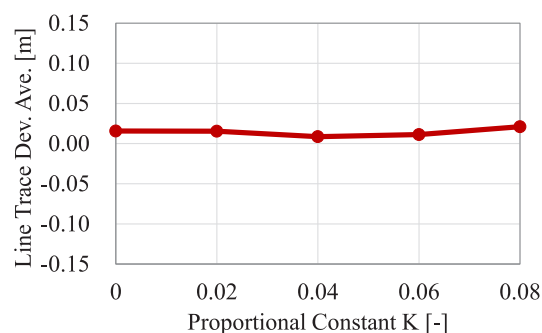


Fig.18 Line Trace Deviation Average Experimental Result

6. まとめ

微小操舵角域の走行軌跡の試行回ごとのバラツキの一要因がドライバーのブラインド操舵区間の存在にあることに着目し、その区間にピッチ挙動を付加してドライバーに視覚情報を与えることによってそのバラツキを低減できることを確認した。ドライバーのピッチ挙動に対する感度調査から付加するピッチ挙動の適正量の仮説を立て、実験によりその検証を行うとともに、定量的な走行軌跡のバラツキ低減効果を抽出した。既報の研究で解明した微小操舵角域でドライバーが平均して正確に走行できる車両特性に加えて、いつも正確に走行するために必要な車両特性の一つを解明した。

参考文献

- (1) 田尾光規、他：微小操舵角域のライントレース性に対する操舵力とヨー特性の関係解明、自動車技術会論文集 Vol.51 No.3 pp.428-433 (2020)
- (2) 福井 勝彦、ほか：視覚特性に基づくロール感向上技術、自動車技術会論文集 Vol.40 No.5 pp.1185-1190 (2009)
- (3) 酒井 英樹、ほか：過渡的な旋回感覚を強調する減衰力制御、自動車技術会論文集 Vol.43 No.3 pp.709-716 (2012)
- (4) 山門 誠：EVの精密な制駆動力制御による3次元理想車体挙動の探求、精密工学会誌 Vol.84 No.9 pp.765-768 (2018)
- (5) 今村昌幸、ほか：高性能ドライビングシミュレータの開発、日産技報 ダイナミック・パフォーマンス技術No.83 pp.60-65 (2018)

出典

公益社団法人自動車技術会
自動車技術会論文集
Vol.52, No.2 文献番号：20214137

The 28th International Display Workshops (IDW)
Best Paper Award (2021年)

Optically Switchable Transparent Liquid Crystal Display
(光駆動型透明液晶ディスプレイ)

受賞者紹介

太田 最実 Yoshimi Ohta

分野 : ディスプレイ、光工学
学位 : 修士 (工学)
所属学会 : 自動車技術会
液晶学会



鍋谷 俊太 Shunta Nabetani

分野 : ディスプレイ、光化学
学位 : 修士 (工学)
所属学会 : 液晶学会
応用物理学会



上久保 真紀 Maki Kamikubo

分野 : 光有機化学、触媒化学
学位 : 学士 (理学)
所属学会 : 光化学協会
受賞歴 : 発明協会 全国発明表彰 発明賞 (2006)



小原 朋也 Tomoya Ohara

分野 : 光有機化学、伝熱工学
学位 : 修士 (工学)
所属学会 : 自動車技術会



前橋 良太 Ryota Maehashi

分野：ディスプレイ、光工学
学位：修士（工学）



佐藤 文紀 Fuminori Sato

分野：半導体デバイス、ディスプレイ、電気化学
学位：学士（工学）
所属学会：自動車技術会
電気学会



受賞：2021年 International Display Workshops Best Paper Award Optically Switchable Transparent Liquid Crystal Display (光駆動型透明液晶ディスプレイ)

太田 最実* 鍋谷 俊太* 上久保 真紀*
小原 朋也* 前橋 良太* 佐藤 文紀*

概要

高透明・大面積の透明ガラスディスプレイの実現に向けて、光スイッチングが可能な透明液晶フィルムと光源・プロジェクタとから構成される新しい原理の光駆動型透明液晶ディスプレイの原理実証を行った。透明液晶フィルムを光駆動とするため、アゾベンゼンのシス-トランス光異性化反応により、透明状態とスクリーン状態の光学的変換を実現した。さらに、トランス状態とシス状態のヘリカルねじれ強度 (HTP) の差を大きくすることで、スクリーン反射率を向上させた。

1. はじめに

近年、透明ディスプレイは、店舗の看板や自動車のウィンドウなどに積極的に展開されている。透明ディスプレイには、大型化、優れた柔軟性、高透明性、低価格化、および高いコントラストといったことが求められている。

有機ELディスプレイ[1]は、透明ディスプレイの一種である。有機ELディスプレイは大型化が可能で、視野角が広く、色域に優れ、そして解像度が高いなど、画質の面でもメリットがある。しかし、有機ELは画素ごとに複数の薄膜トランジスタ (TFT) やキャパシタを搭載しているため、透過率が低くなってしまう。

電気によるスイッチング方式の透明液晶ディスプレイ (LCD) も同様に透明ディスプレイの一種である。TFTを用いたポリマー分散型液晶 (PDLC) ディスプレイ[2, 3]は、各画素の開口率が高いため、透明状態において80%を超える高い透過率を達成することが可能である。有機ELディスプレイやLCDなどのTFTを用いたフレキシブルディスプレイを車載用ウィンドウなどの曲面に搭載する場合は、その柔軟性が要求される。基板表面へのTFTの形成には、一般的に透明で高価なポリイミド (PI) フィルムが使用される。現在までのところ、透明PIフィルムに対する需要は最先端のオプトエレクトロニクス製品にのみ限定されており、経済的ではないというのが現状である[4]。

しかし、酸化インジウムスズ (ITO) を塗布したポリエチレンテレフタレート (PET) フィルムを用いた透明PDLCやポリマーネットワーク液晶 (PNLC) ディスプレイが安価に市販されるようになってきた。プロジェクターとPDLCやPNLCの組み合わせによる透明ディスプレイが報告されている[5, 6]。しかし、電圧印加により透明状態からスクリーン状態に制御できる領域は、ITOコーティング次第で限定されるものであった。そのため、車のフロントガラスの全域に装着すると、スクリーン状態においてドライバーの視界を遮ってしまうという問題があった。

電氣的なスイッチング方式に代わり、キラルアゾベンゼン化合物を添加した液晶 (LC) の光スイッチング方式が提案された[7, 8]。高い透明性、柔軟性、および画面領域制御が期待できる。キラルアゾベンゼンと逆キラリティーの非フォトクロミックキラル化合物をホストネマチック液晶中で混合し、両キラル化合物のヘリカルねじれ強度 (HTP) のバランス調整により、透明ネマチック相液晶を形成させた。紫外線 (UV) 照射によりキラルアゾベンゼン化合物のHTPを低下させ、シス-トランス光異性化を誘発し、補償ネマチック液晶をコレステリック相に転移させた。その結果、光駆動のスイッチング液晶膜は、透明状態から光散乱スクリーン状態へと変化した。この状態に、可視光 (Vis) 照射により、透過率を回復させ透明状態へもどることができる。しかし、反射率については調査されていない。

本論文では、光駆動方式の透明液晶フィルムを用いて、新しい原理の光駆動型透明液晶ディスプレイを提案する。また、ディスプレイの視認性を上げるため、アゾベンゼンの Δ HTPを大きくすることでスクリーン反射率を高めた結果について報告する。

2. 透明液晶における光スイッチングの原理

2.1 システムの設定

図1は、光駆動型透明液晶ディスプレイのシステムレイアウトを示したものである。光駆動型透明液晶フィルム、Visプロジェクター、UV LED、および青色LEDで構成されている。通常は透明である透明液晶フィルムにUVを照射すると、その照射

* 先端材料・プロセス研究所

領域は透明状態からスクリーン状態に変換される。Visプロジェクターは、UV照射を中断し、前方のスクリーン領域に映像を投影するものである。その後、青色光を照射すると、透明液晶フィルムは当初の透明な状態に戻る。

2.2 光駆動型透明液晶フィルムの構造

光駆動型透明液晶フィルムは、LC、ポリマーネットワーク、キラルアゾベンゼン、および非フォトクロミックキラル化合物の複合体である。ポリマーネットワークは反応性メソゲン (RM) モノマーで構成されている。LCとは位相が分離されており、LCに対して強いアライメント効果を発揮する。UVを照射しないトランス状態のキラルアゾベンゼンのHTPが、相反するキラリティを持つ非フォトクロミックキラル化合物のHTPと等しい場合、LCは補色透明ネマチック相になる。この液晶混合物は、ITOと垂直配向PI層で覆われた2枚のガラス基板で挟まれたものである。UVを照射する前は、図2(a)のようにLCとポリマーネットワークが垂直に並んでおり、透明な状態である。

UVを照射すると、キラルアゾベンゼンが光異性化によってトランス状態からシス状態に変化するため、キラリティのバランスが崩れ、LCにねじれ力が発生する。その結果、図2(b)に示すように、LCの配向が乱れ、光散乱スクリーンと化す。

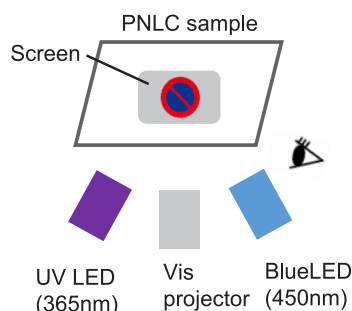


図1 光駆動型透明液晶ディスプレイのシステムレイアウト

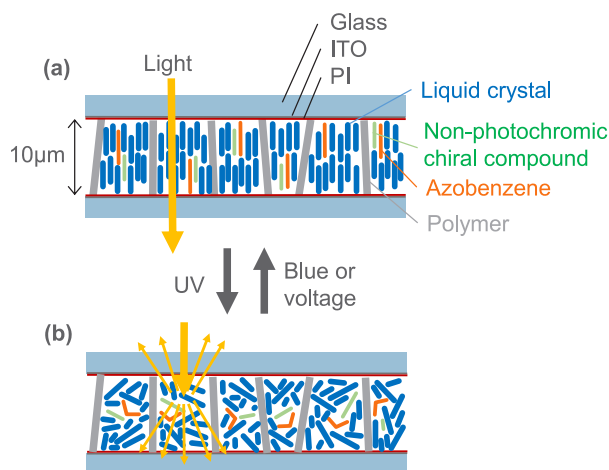
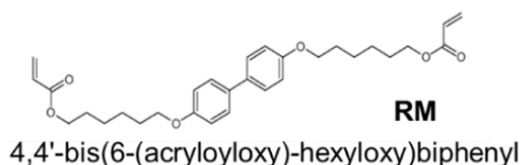
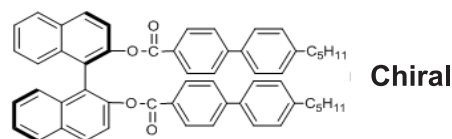
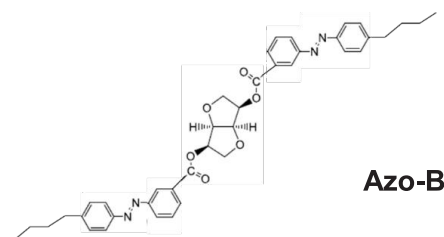
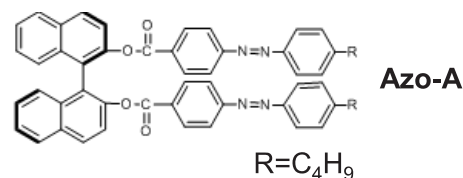


図2 光駆動型透明液晶フィルムの模式図(a)透明状態および(b)スクリーン状態

3. 実験

図3に本実験で使用した材料を示す。キラルアゾベンゼン(アゾAおよびアゾB)と非フォトクロミックキラル化合物(キラル)を合成し、そのHTPを表1に示した。ビナフチル基[9]の軸方向のキラリティを持つアゾAの Δ HTPは、ポイントキラリティを有するアゾBの Δ HTPよりも強力である。アゾAとアゾBを用いて2種類のLC混合液を調製し、それらの Δ HTPへの影響を検討した。表2に各材料の組成を示す。本研究では、ポジティブネマチックLCであるSb-826010 (Shanben社製)を使用し、その複屈折は $\Delta n = 0.26$ である。RM、4,4'-ビス(6-(アクリロイルオキシ)-ヘキシルオキシ)ビフェニル(東京化成工業株式会社製)、および光重合開始剤、Iragcure819 (チバスペシャリティケミカルズ株式会社製)を使用した。表1に示すHTPの測定値に従って、キラルアゾベンゼンとキラルを混合し、補正された透明な試料を調製した。



Sb-826010: Host positive nematic LC
Iragcure819: Photo initiator

図3 材料構造

表1 キラル材料のHTP

	HTP (μm)		ΔHTP (μm)
	trans	cis	
Azo-A	76	37	29
Azo-B	20	3	17
Chiral	60	-	-

表2 材料組成(wt.%)

No	Azobenzene	Chiral	LC	RM	Photo initiator
1	Azo-A: 5.1	2.9	83.75	7.5	0.75
2	Azo-B: 6.2	1.8	83.75	7.5	0.75

セルギャップ10 μm の基板をもつガラスセル(EHC社製)を、垂直配向PI層で処理したITOガラス基板を2枚重ねて、作製した。各LC混合液は、LCクリーニングポイントに等しい100 $^{\circ}\text{C}$ のホットプレート上で毛細管力を利用してエンプティガラスセルに注入された。このセルに対して、50V-50Hz、室温の条件下でLEDの青色光($\lambda_{\text{max}} = 450\text{nm}$)を照射して硬化させ、LCの配向を揃えた。青色光の出力は、7mW/cm 2 であった。10分間硬化させた後、電圧をかけずに透明な状態で光駆動型透明液晶フィルムを作製した。

作製したフィルムサンプルの試料の光学特性を調べるため、積分球式分光光度計(U-4000、株式会社日立製作所製)を用いて、透明状態での全透過率スペクトルとスクリーン状態での全反射率スペクトルを測定した。各ヘイズは、ヘイズメーター(HM-65 W、村上色彩技術研究所製)を使用して測定した。

4. 結果および考察

図4(a)は、光駆動型透明液晶フィルム試料の透明状態での全透過率を示したものである。透過率スペクトルは、広範な可視領域で約80%と高い数値を示した。500nm以下の領域では、アゾベンゼン自体の吸収により透過率が低下した。図4(b)は、室温で20mW/cm 2 のUVを60秒間にわたり、十分に照射した後のスクリーン状態の全反射率を表したものである。このUVエネルギーを用いて、光学特性の変動がなくなるまで、光駆動型透明液晶フィルム試料を十分にスクリーニングした。アゾAを添加したNo.1サンプルの反射率は、アゾBを添加したNo.2サンプルの反射率よりも高くなった。ヘイズ値で見た光学特性を表3にまとめた。表1、3より、アゾベンゼンの ΔHTP は、スクリーン状態のフィルムの反射率およびヘイズに影響を与えることが明らかとなった。 ΔHTP が大きくなると、LCの配向がより大きく乱れ、スクリーン状態での反射率やヘ

イズ値が大きくなる。

図5は、輝度の視野角依存性を示したものである。UV照射後のNo.1サンプルのスクリーン状態において、照度3350lxの条件でVisプロジェクター(MW612、BenQ株式会社製)を用いて白画像を投影し、視野角を変えて輝度計(LS-110、ミノルタ株式会社製)で背景光を除く輝度を測定した。光散乱効果により、視野角60 $^{\circ}$ で映像が見えることがわかった。

図6の写真は、それぞれの状態におけるNo.1サンプルを示したものである。サンプルは10 $\times$ 10cmの大きさとした。透明な状態では、ガラスと同じように透き通っていた。UVを照射すると、照射した部分にスクリーンが浮かび上がった。UV LEDを消灯した後、フロントプロジェクターから投影される映像を確認することができた。投影を停止し、青色光を照射すると、サンプルは透明な状態に戻った。

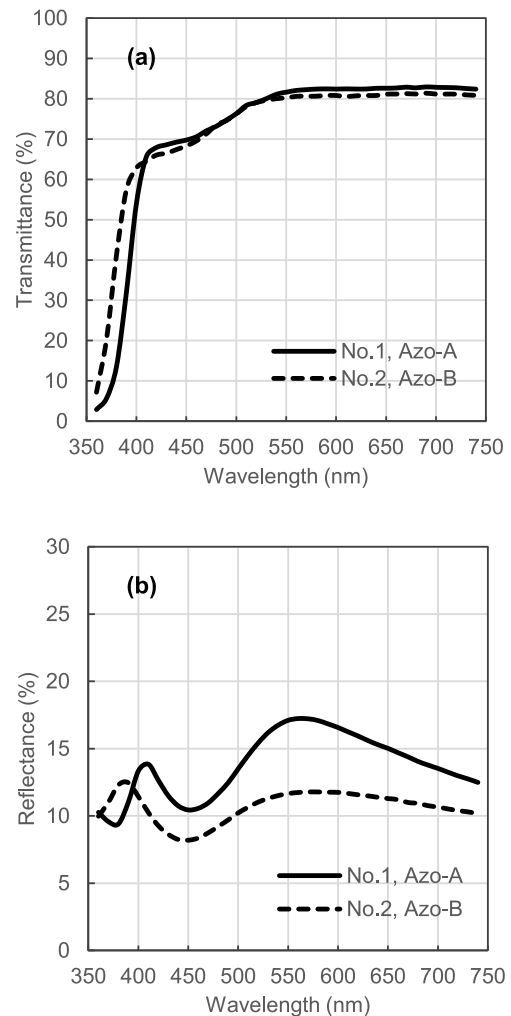


図4 光駆動型透明液晶フィルム試料の光学特性。(a) UV照射前の透明状態での全透過率スペクトル、および(b) UV照射後のスクリーン状態での全反射率スペクトル

表3 光学特性

	Transparent state	Screen state
	Transmittance @550 nm/Haze	Reflectance @550 nm/Haze
No.1	81.6% / 2.3%	17.1% / 94.9%
No.2	80.2% / 2.3%	11.7% / 39.3%

5. まとめ

光駆動型透明液晶フィルム(サイズ10cm×10cm)、Vis プロジェクター、UV LED、および青色LEDで構成された新しい透明ディスプレイの説明を行った。UVおよび青色光照射下でキラルアゾベンゼン分子を可逆的にシス-トランス光異性化することにより、光駆動型透明液晶フィルムの透明状態とスクリーン状態の間の光学的スイッチングを可能にした。キラルアゾベンゼンの ΔH_{TP} を高くすることで、光駆動型透明液晶フィルムの透明時の高透明性とスクリーン時の高反射スクリーン状態が達成された。スクリーンによる光の散乱により、視野角60°でスクリーンに投影された映像を目視できることを確認した。今後この光駆動型透明液晶フィルムは、ガラス基板の代わりにPETフィルムを利用することで、フレキシブルかつ大型化できることが期待される。このディスプレイは、看板だけでなく、自動車の曲面窓にも使用することが可能である。

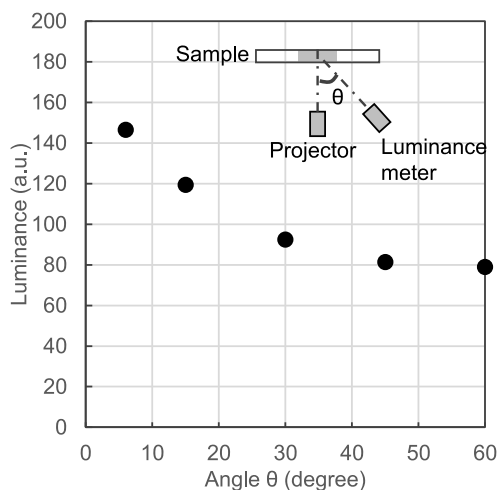


図5 照度3350lxでアゾAを使用したNo.1サンプルのスクリーン状態における視野角特性

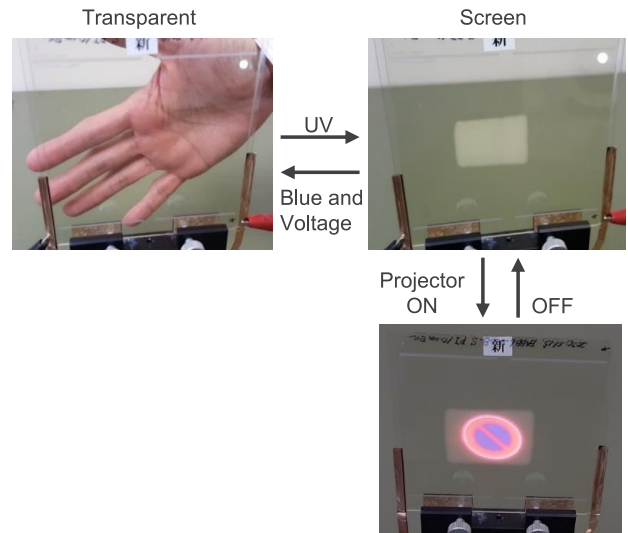


図6 10cm×10cmのNo.1サンプルの光駆動型透明液晶ディスプレイの写真映像は、UV照射後、フロントプロジェクターから投影されたもの

謝 辞

本研究の一部は、国立研究開発法人科学技術振興機構(JST)の「目標達成型研究開発による適応・シームレスな技術移転プログラム(A-STEP)」の支援を受けて実施されたものである。

参考文献

- [1] C. Park, M. Seong, M. A. Kim, D. Kim, H. Jung, M. Cho, S. H. Lee, H. Lee, S. Min, J. Kim, M. Kim, J. H. Park, S. Kwon, B. Kim, S. J. Kim, W. Park, J. Y. Yang, S. Yoon and I. Kang "54-1: Distinguished Paper: World 1st Large Size 77-inch Transparent Flexible OLED Display." SID. Vol. 49, No. 1, pp. 710-713, (2018).
- [2] K. Okuyama, Y. Omori, M. Miyao, K. Kitamura, M. Zako, Y. Maruoka, K. Akutsu, H. Sugiyama, Y. Oue, T. Nakamura, K. Ichihara, H. Irie, S. Ito, K. Hiram, N. Asano, T. Imai, D. Takano and S. Ishida, "12.3-in Highly Transparent LCD by Scattering Mode with Direct Edge Light and Field-Sequential Color-Driving Method" SID 2021 DIGEST, pp. 519-522 (2021).
- [3] M. Honda, K. Murata, K. Nakamura, T. Hasegawa, Y. Haseba, K. Hanaoka, S. Shimada, "Transparent Display with High-Contrast-Ratio Reverse-Mode PDLC," SID 2021 DIGEST, pp. 535-538 (2021).
- [4] H. Ni, J. Liu, Z. Wang, S. Yang, "A review on colorless and optically transparent polyimide films: Chemistry, process and engineering applications,"

- Journal of Industrial and Engineering Chemistry,
28, pp16–27, (2015).
- [5] T. Higuchi, T. Yoshikawa, K. Hashikawa, M. Akagi,
T. Yoshizawa, K. Iwawaki, Y. Ito, H. Kogoma, N.
Saegusa, "See-Through Projection System" Proc.
IDW '15, pp. 820-821 (2015).
- [6] S. Ho, N. Oh, and S. Kwon, "Electro-optical
properties of vertically aligned polymer network
liquid crystals for normally transparent light
shutters." Molecular Crystals and Liquid Crystals
644.1, pp. 130-136 (2017).
- [7] S. Kurihara, S. Nomiya, T. Nonaka, "Photochemical
switching between a compensated nematic phase
and a twisted nematic phase by photoisomerization
of chiral azobenzene molecules," Proc. SPIE Vol.
4107, pp. 69-76 (2000).
- [8] M. Z. Alam, T. Yoshioka, T. Ogata, T. Nonaka, and S.
Kurihara, "Influence of Helical Twisting Power on
the Photoswitching Behavior of Chiral Azobenzene
Compounds: Applications to High-Performance
Switching Devices," Chem. Eur. J. 13, pp. 2641-
2647 (2007).
- [9] X. Chen, L. Wang, Y. Chen, C. Li, G. Hou, X. Liu, X.
Zhang, W. He and H. Yang, "Broadband reflection
of polymer-stabilized chiral nematic liquid crystals
induced by a chiral azobenzene compound," Chem.
Commun., 50, pp. 691 (2014).

編集後記

日産技報をご愛読頂きましてありがとうございます。本第 89 号では、2つのトピックスを特集しました。4代目となる新型エクストレイルと、エクストレイルをはじめとする日産の様々な電動車両の競争力を支える実験技術です。

まず、新型エクストレイルは、2022 年 7 月に発売を開始した日産の最新型の本格 SUV です。新開発のパワートレインとして、VC ターボエンジンとモーターを融合した第 2 世代 e-POWER、4 輪電動駆動制御技術 e-4ORCE といった様々な先進技術を搭載し、「タフギア」×「上質」を両立した自信作を解説しました。次に、魅力的な新型車の開発を支える実験技術を解説し、特にドライビングシミュレータ、バーチャルリアリティなどの新しい実験技術を取り上げました。現在の、さらにこれからの、電動車開発の中核となる重要な領域です。

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

最後に、我々日産が 2021 年 11 月に発表した長期ビジョン「Nissan Ambition 2030」に基づき開発している高い技術が、読者の皆さまに伝わることを切に願っております。

総合研究所 研究企画部 山村 智弘

NISSAN TECHNICAL REVIEW 2023 No.89

発 行	2023年3月
発行所	日産自動車株式会社 総合研究所 研究企画部 〒243-0123 神奈川県厚木市森の里青山1番1号
発行人	総合研究所 研究企画部 部長 山村 智弘
編集所	株式会社日産クリエイティブサービス 企画・開発部 〒243-0126 神奈川県厚木市岡津古久560-2 日産テクニカルセンター内

