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。

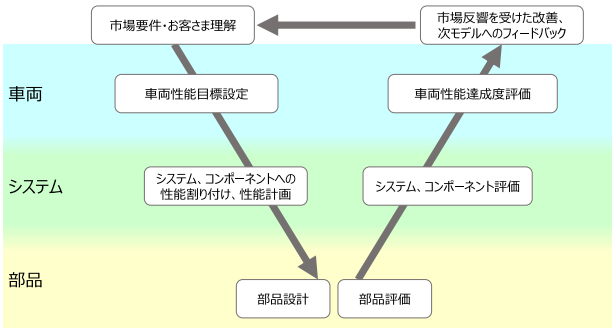


図1　自動車の開発プロセス模式図（Vプロセス）

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ている。

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分かる道、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期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。

図3　台上設備の例としてロードシミュレータの写真

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ー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か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て実験するということも増えてきている。

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、それらをどう組み合わせて評価するのか、見極めて実現させる。

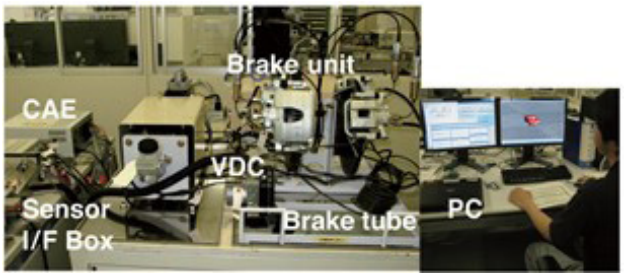


図4　VDC HILS（日産技報No.71より引用）

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

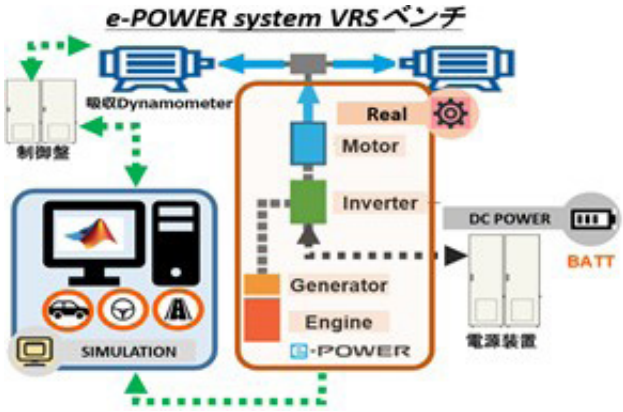


図6　e-POWERパワートレイン台上実験技術

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。

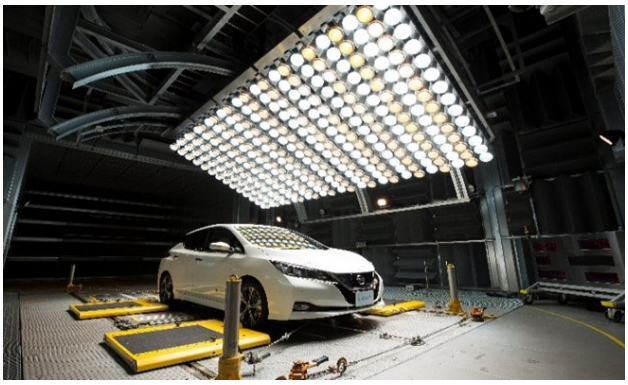


図7　熱マネジメントシステム実験

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てどう動かすのか、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。

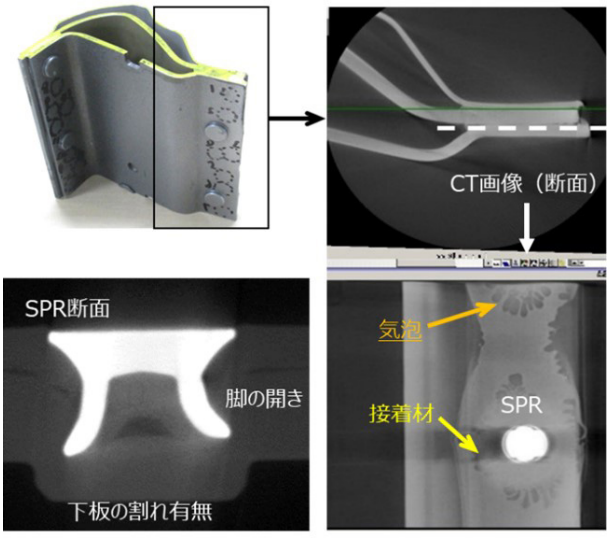


図8　X線CTの例

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±11m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±11mから±14m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。

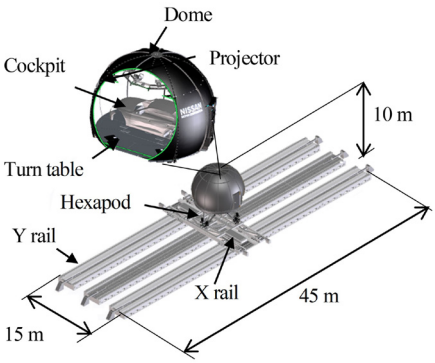


図2　DSシステム構成

* 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。

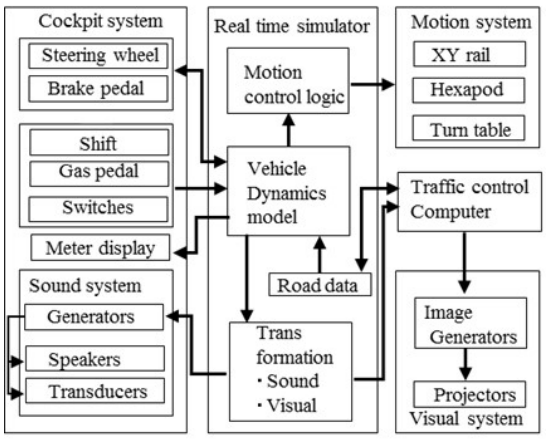


図3　制御システム構成

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。

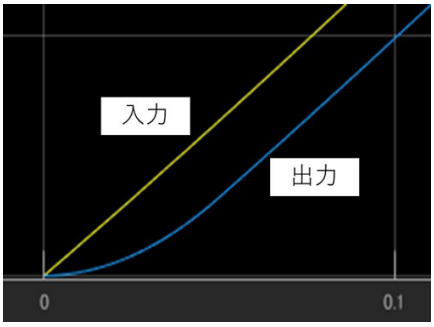


図4　信号制御

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。

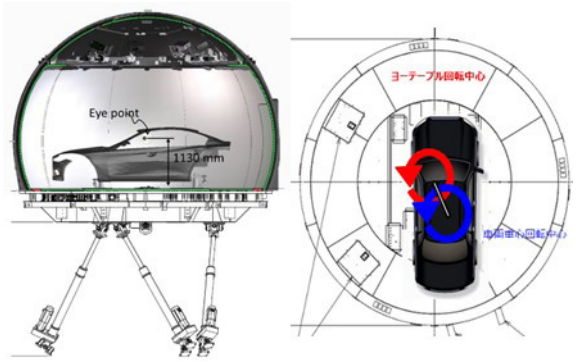


図5　ドライバー着座位置

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。

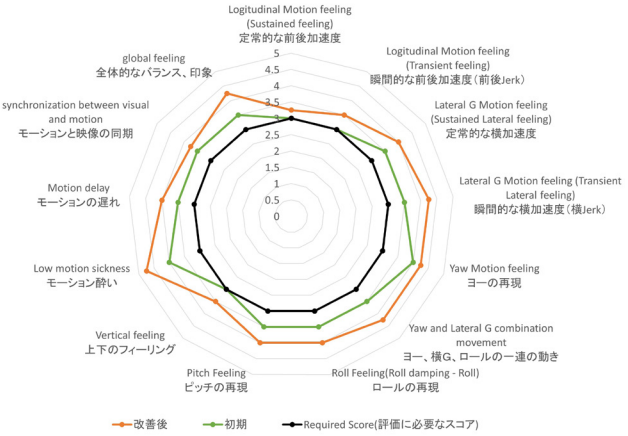


図6　DSの評価結果

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きている。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。

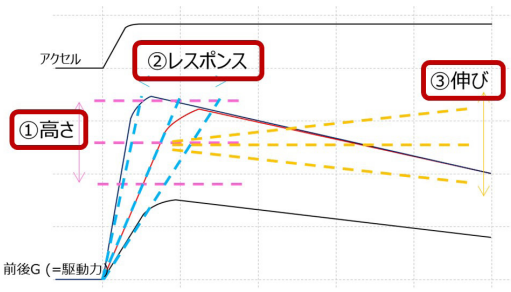


図7　加速感の要素

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、評点をつけた。発進付近の速度と中速域では、加速度の落ち代による評点が異なる事が分かった。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）。

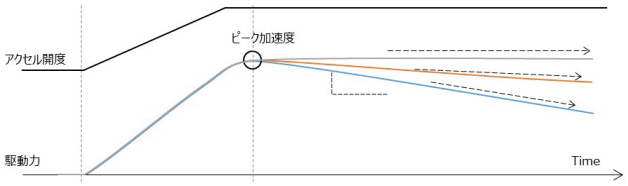


図8　伸び感の検証方法

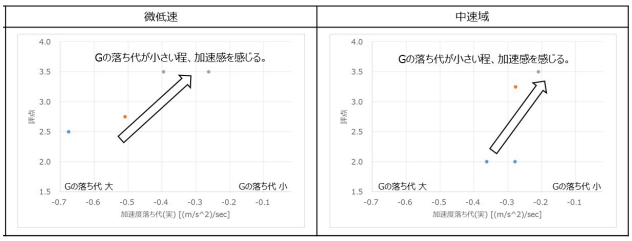


図9　官能評価結果

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、実車での効率的な開発が可能となった。

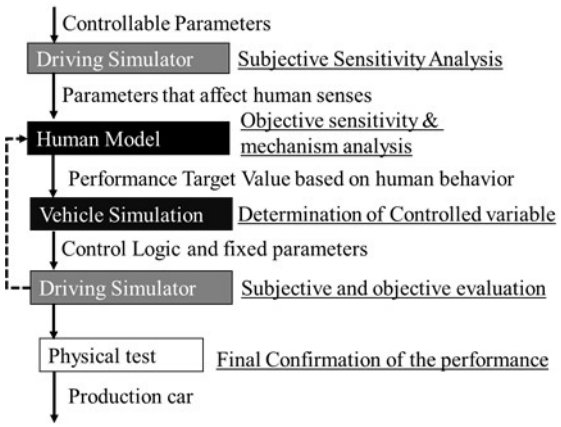


図11　Performance design process

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。

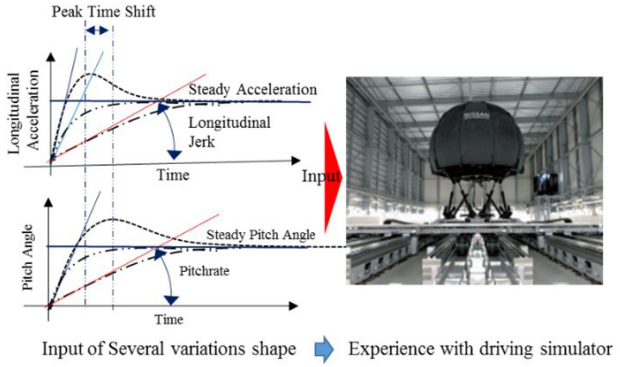
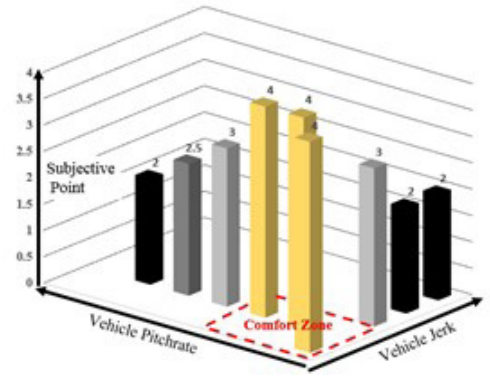
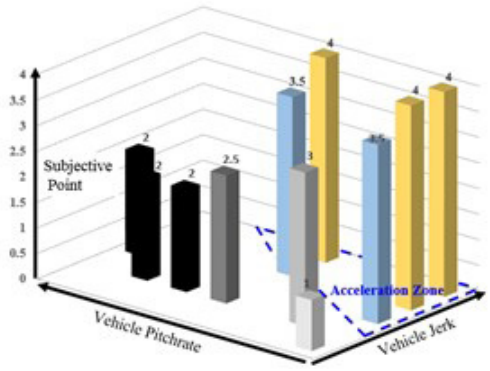


図12　Sensitivity analysis by driving simulator

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ではピッチレート及び前後ジャークが小さいほど乗員は高い快適性を感じていることがわかる。一方加速感の評点については前後ジャークが高いほど評点は高いものの、ピッチレートについては高すぎると評点が下がる傾向がみられる。そのため、ピッチレートについては抑えることで、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

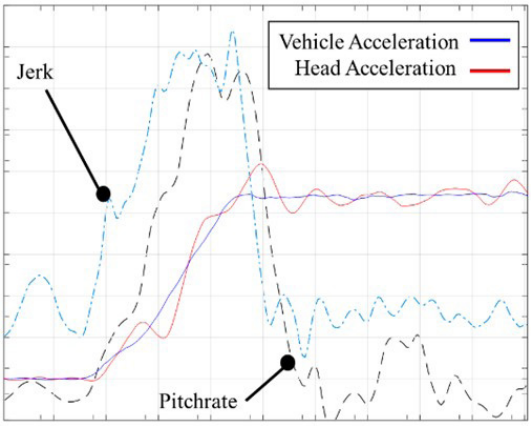


(b) Feeling of acceleration

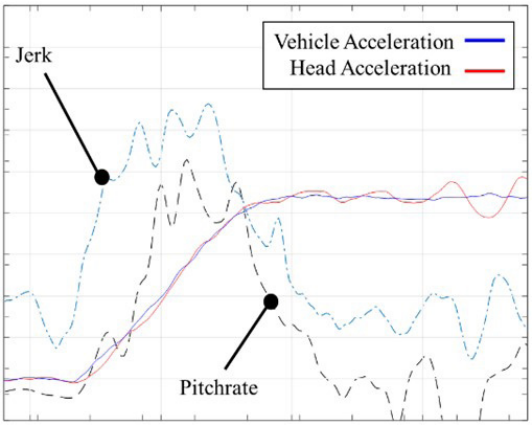
図13　Subjective evaluation of driving simulator

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、及びピッチレートに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。

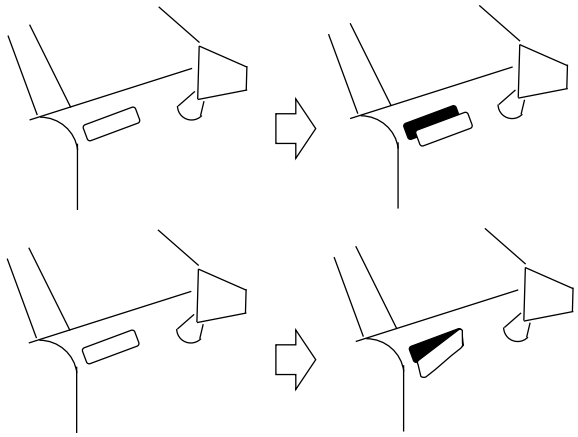


図1　格納式ドアハンドルの採用例

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

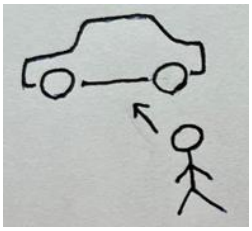
自動車の機能の情緒的価値を評価するには、対象機能の使用体験から受ける印象を評価することになる。印象の評価は、人がどう感じているかを測る心理的側面に対応した測定法を選択する必要があり、日産自動車の開発では、対応する物理量と関わりなく、主観的印象を測定する方法（心理学的尺度構成法）を用いることが多い。主観的印象を直接確認する評価となる為、評価対象機能の使用体験の再現精度が、評価結果に大きな影響を及ぼす。これまでの自動車開発における使用体験の再現は、車体や内装を実際の大きさで再現した物理的モックアップを使うことが多かった。しかし、近年、増加傾向にある部品の動きを伴う機能については、物理的モックアップでは、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）。

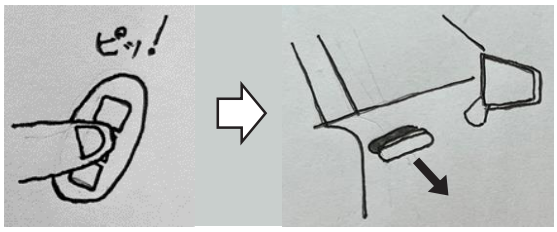
* カスタマーパフォーマンス＆第二車両実験部

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。

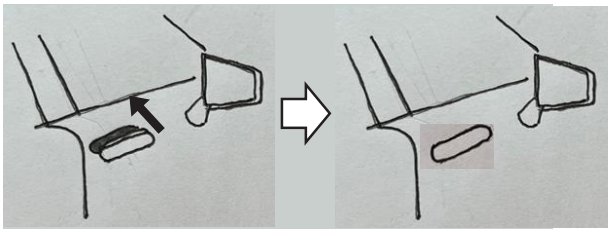
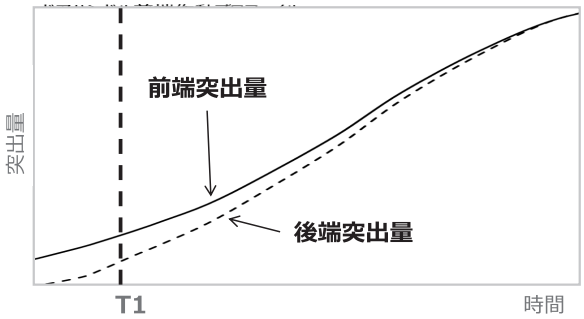


図2　格納式ドアハンドルの想定機能（例）

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

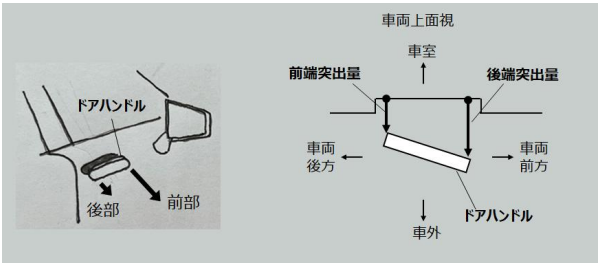


図3　ドアハンドルの自動的な動きのばらつき（例）

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が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り、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の再現	× 微小な動きを実際の大きさで再現できない	× 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）。

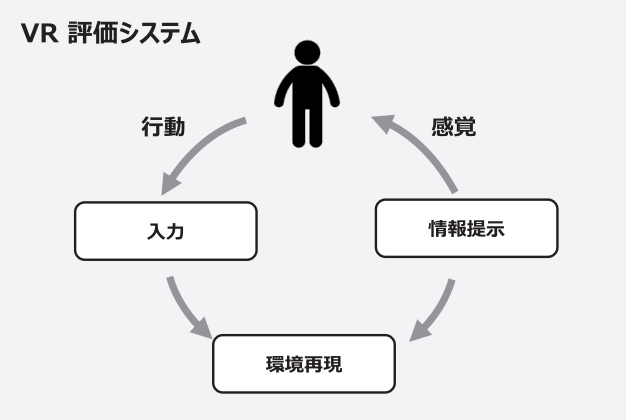


図5　VR評価環境の構成要素

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エアを自社開発した。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エアを自社開発した。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さ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。

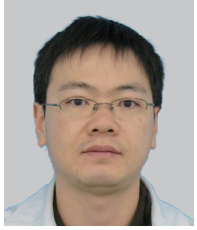
参考文献

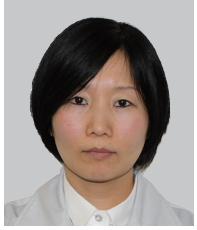
(1) D. Zeltzer : "Autonomy, interaction and presence". Presence, 1, 1, pp.127-132 (1992) MITPress
(2) 舘 暲: バーチャルリアリティ, 3D映像, Vol.20, No.4, pp.91-98 (2006.11)
(3) 廣瀬　通孝：トコトンやさしいVRの本、日刊工業新聞社 (2019/3/1)

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、短期間での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ステム・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。

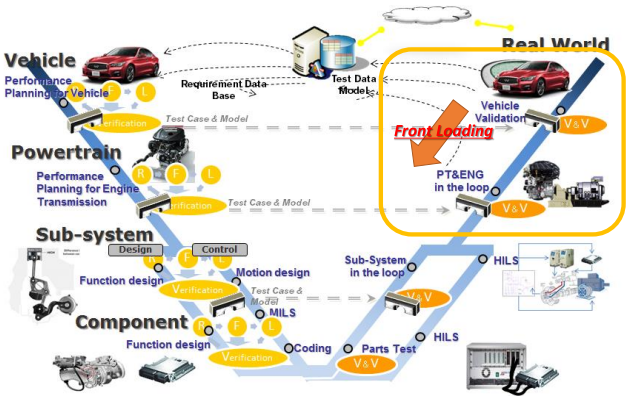


図1　パワートレイン開発プロセス模式図（Vプロセス）

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、バッテリで構成されるが、バッテリ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

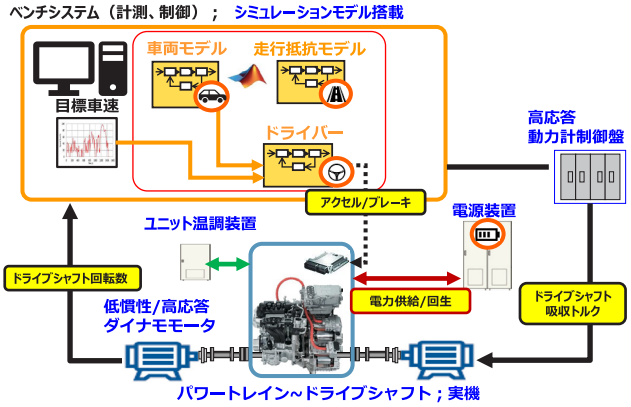


図2　VRS実験システム概要

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。

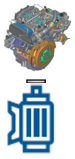
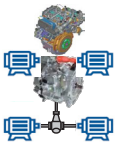
	ENG-VRS	PT-VRS
		
道路	Virtual	Virtual
運転者	Virtual	Virtual
車体	Virtual	Virtual
バッテリ	Virtual	Virtual
走行用Motor	Virtual	Real
発電用Motor	Virtual	Real
Inverter	Virtual	Real
減速機	Virtual	Real
エンジン	Real	Real
制御ユニット	Real	Real
主な用途	排気性能適合 OBD適合	電動システム評価 駆動性能 運転性/NVH評価

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。

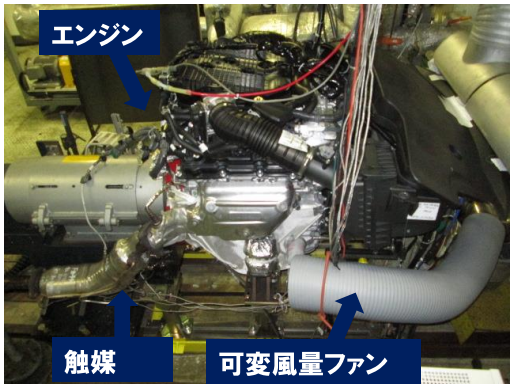


図4　排気触媒温度環境調整システム

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。

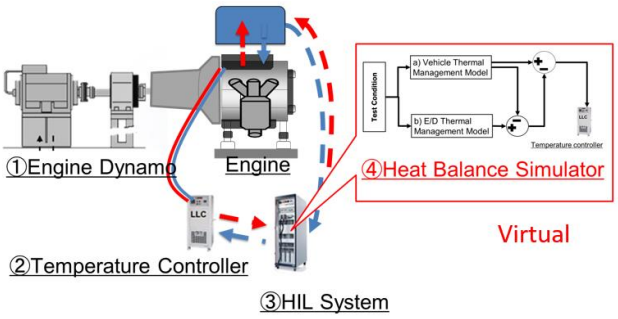


図5　熱マネージメント実験システム概要

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。

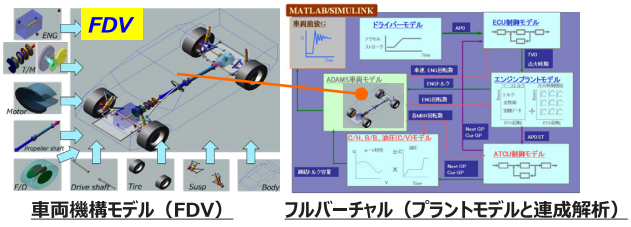


図6　FDV概念図

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。

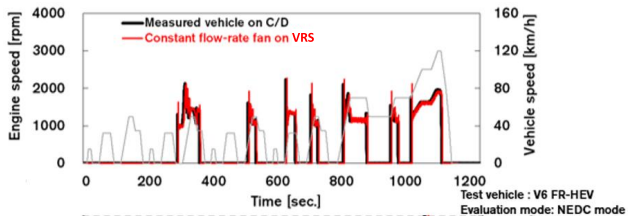


図7　モデルのリアルタイム性確認結果

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。

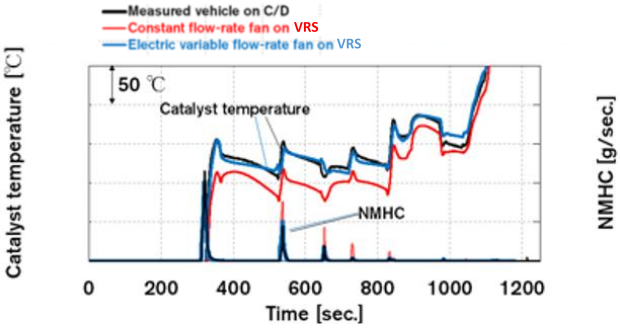


図8　車両と台上の温度比較

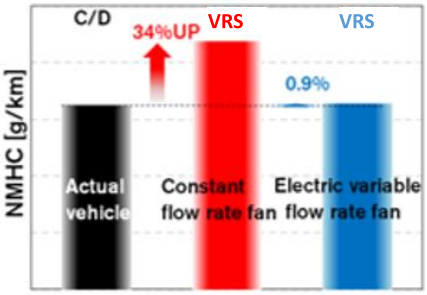


図9　車両と台上のHC比較

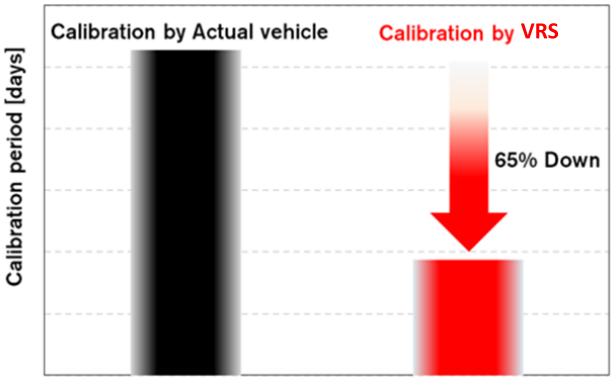


図10　VRS実験での排気適合効果

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振動解析を、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。

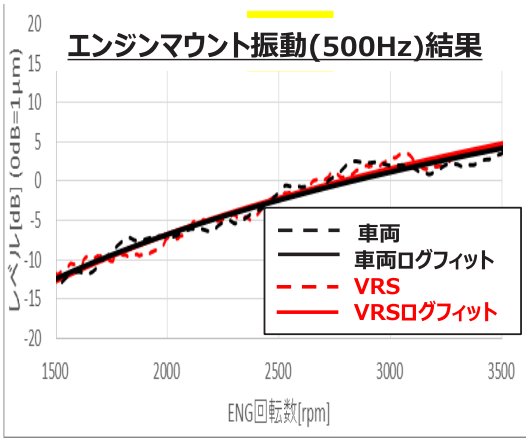


図11　FDVでの実車再現検証実験結果

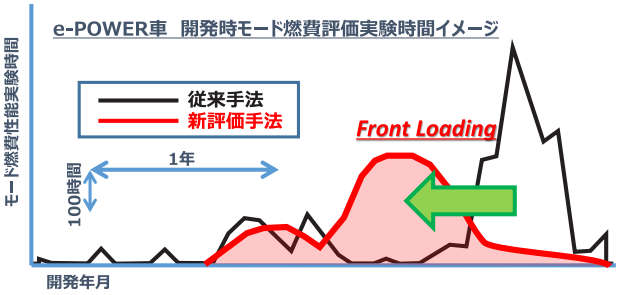


図12　手法適用による開発のフロントローディング化

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。

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）

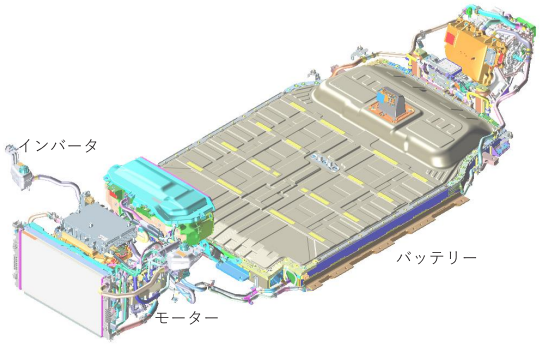


図1　EV熱マネジメント対象構成部品

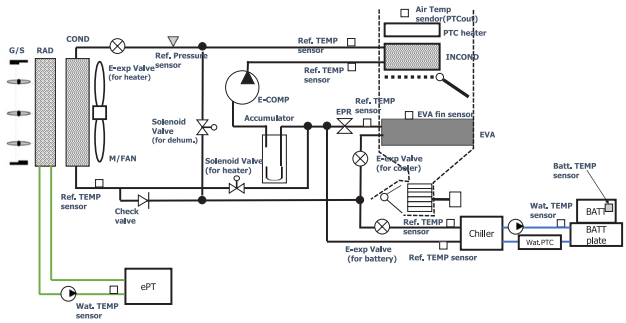


図2　冷却システム図

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ため、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。

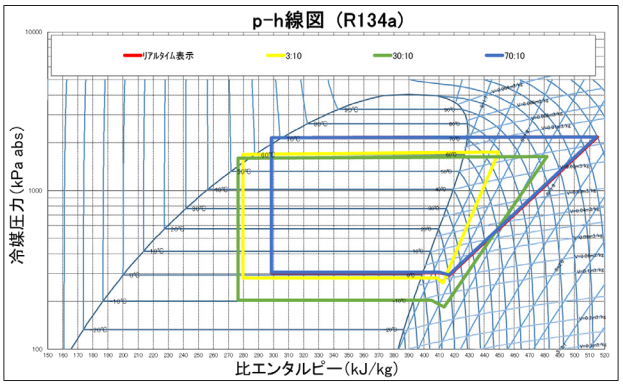


図3　p-h線図

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）

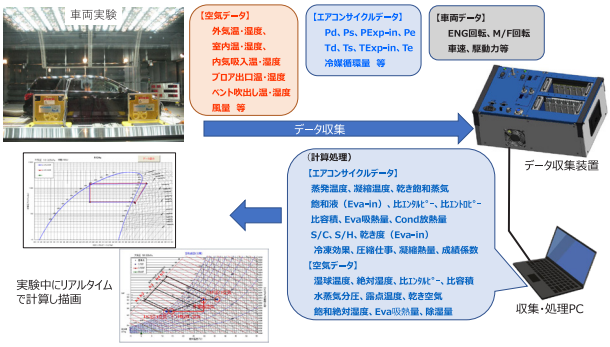


図4　リアルタイムデータ処理システム

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。

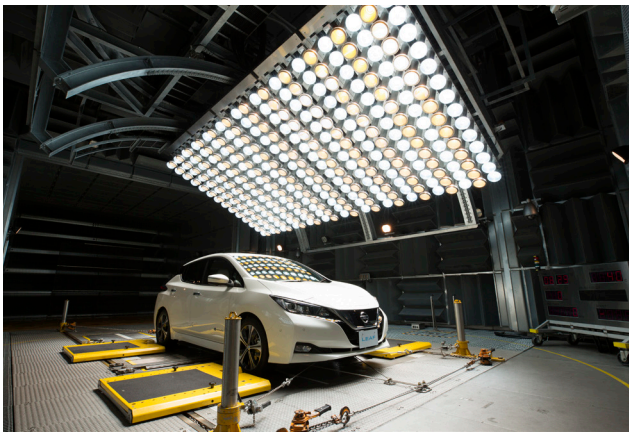


図6　全天候型環境シャシダイナモ　低温日射試験室

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。

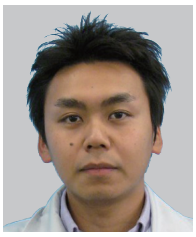
これらの環境シャシダイナモを用いて再現性高く温度環境を再現することで、高温から低温の限界性能、運転モードが複雑に遷移するEV特有の熱マネジメント実験を効率的に実施することを可能にした。

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*　　臼井　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。

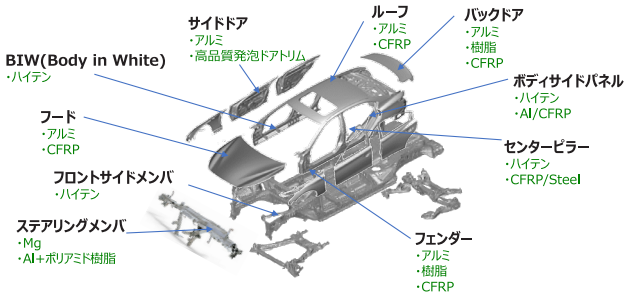


図1　軽量化材料の適用例

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て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。

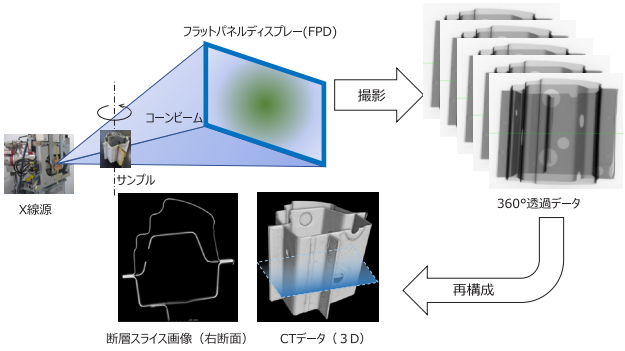


図2　Reconstruction process of X-ray CT

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。

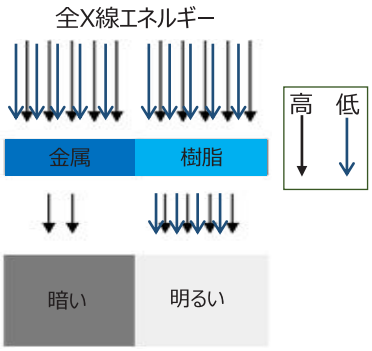


図3-1　X線エネルギーの透過イメージ

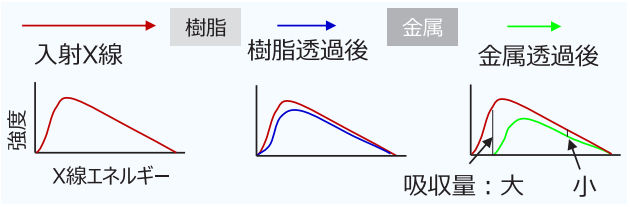


図3-2　ハードニングのイメージ図

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。

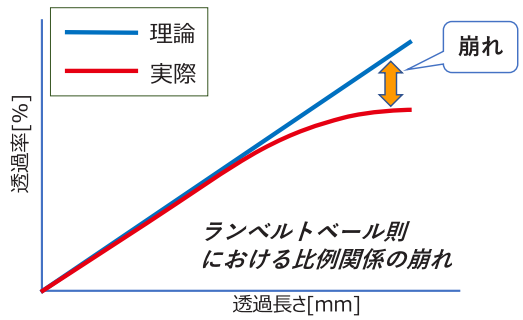


図4　透過長さに応じた透過率の崩れ

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。

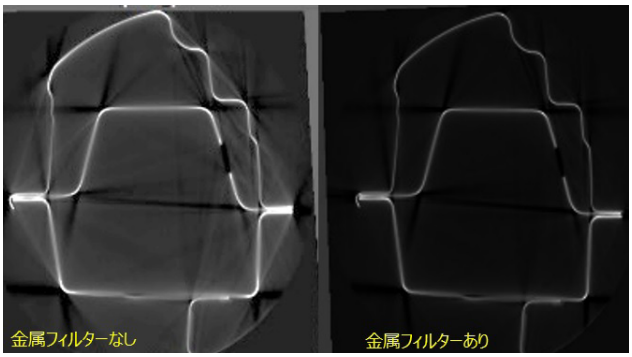


図5　鉄製車体サイドシルのX線CT像（断面）

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、1mmt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。

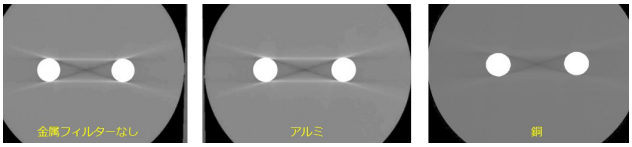


図6　鉄ボルト円筒部のメタルアーチファクト

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

$$* \quad AIr = \frac{\sqrt{(\sigma^2_A - \sigma^2_B)}}{\sigma_B}$$

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。

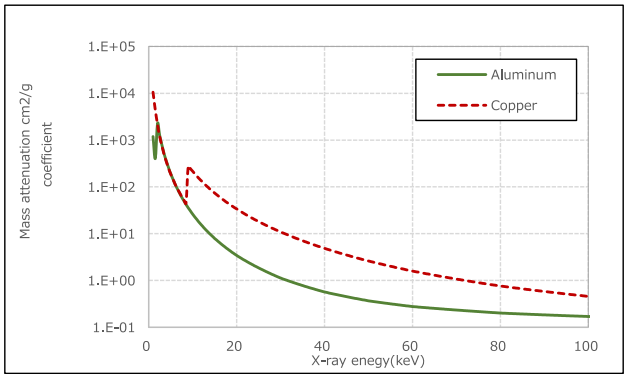


図7　Mass attenuation coefficient

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線の減衰も大きくなる。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。

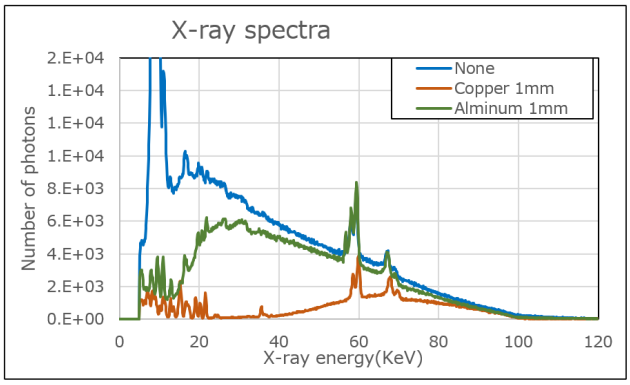


図8　X-ray spectra

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。

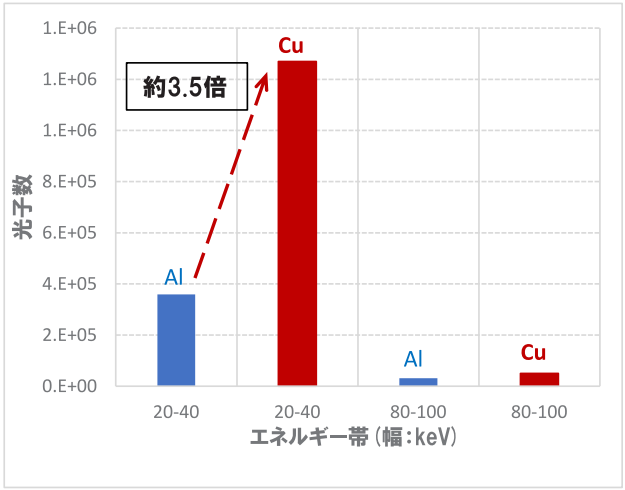


図9　The value of POA

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。

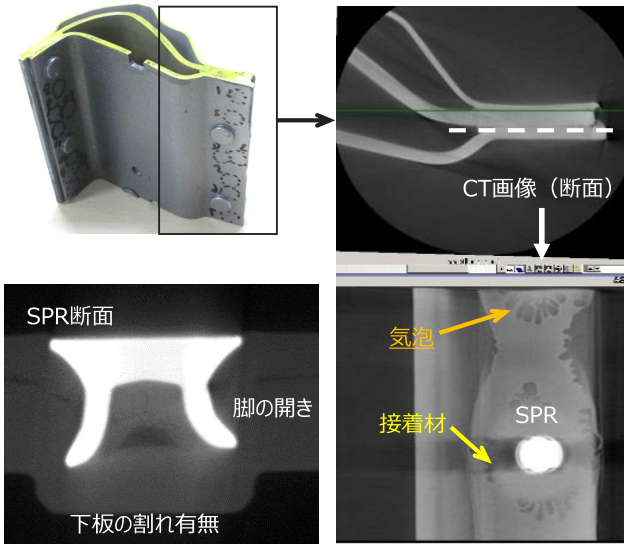


図10　アルミ板接合試験片のCT画像

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。

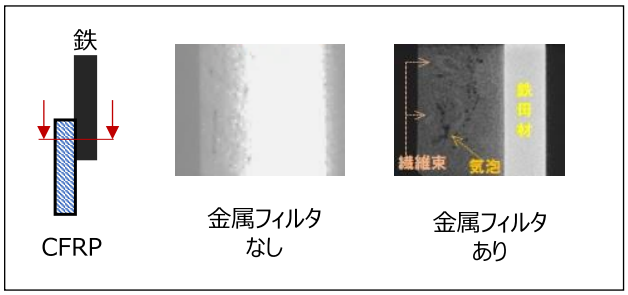


図11　鉄とCFRP接着試験片のCT画像

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、臼井徳貴；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

臼井　徳貴