

Real Driving Emission排出ガス規制対応に向けた Empirical Digital Twinの構築と適用

Powertrain Digital Twinning for Real-World Emissions Compliance

田畑 邦夫

TABATA Kunio

Dr. Phil ROBERTS

Dr. Luke BATES

Steve WHELAN

デジタルツイン(Digital Twin)とは、現実世界の物理的な対象(リアル)である製品やシステム、あるいはプロセスを、デジタル空間上で高精度に再現したデジタルなコピーである。これにより各種実験、性能評価、状態監視、保守・整備といった作業において、対象の物理実体と機能的に同等の役割を果たすデジタルモデル(カウンターパート)として機能する。本技術の導入により、現実の開発対象を模擬した「デジタル製品」あるいは「デジタルシステム」に対して、実時間を凌駕する速度でのシミュレーションおよび解析が可能となることから、開発プロセス全体の効率化ならびに開発期間の短縮などが期待されている。実際、排ガス規制に適合するために、自動車OEMではエンジンベンチやシャシベンチで膨大な作業を行っており、これが開発コストの増大と開発期間の長期化につながっている。HORIBAでは、この課題を解決するために、表題の研究において、バーチャルエンジニアリングツールセットを活用し、複数の最新エンジンシステムを対象とする経験的デジタルツイン(Empirical Digital Twin, EDT)の構築を実施してきた。本研究で構築したEDTは、自動車のパワートレインおよび車両の設計開発、性能適合、最適化、さらには認証プロセスにおいて、従来の実環境下での試験手法を補完あるいは部分的に代替し得る技術基盤として機能する可能性を有している。本稿ではHORIBAが構築したEDTの有効性と応用可能性について述べる。

A digital twin is a digital representation of a planned or real physical system, product, or process that functions as its practically identical digital counterpart for tasks such as testing, integration, monitoring, and maintenance. Creating digital twins allows the 'digital system' or 'digital product' to be tested faster-than-real-time improving the overall efficiency and reducing programme's timescales. The HORIBA Intelligent Lab virtual engineering toolset has been used produce Empirical Digital Twins (EDT) of several contemporary Internal Combustion Engine (ICE) propulsion systems. Digital twinning in its current format can supplement real-world testing methods for the development, calibration, optimisation, and certification of powertrains and vehicles. Given the move to ever more stringent pollutant criteria over wider test conditions, which is expected to put additional strain on Original Equipment Manufacturers (OEMs), the HORIBA EDT approach is expected to increase efficiency and reduce time when taking a vehicle or powertrain to market.

キーワード

Digital Twin, Dynamic DoE, DoE, Empirical modelling, Data driven model

本研究では、プラグインハイブリッド車両(PHEV)を対象に、3種類の異なる交通状況、3つの運転スタイル、3つの異なるバッテリー充電状態(SOC)、および4つの環境条件を組み合わせた単一のルートにおいて、同一のパワートレインを複数の車両プラットフォームに搭載する場合のRDE試験を想定した。その結果、必要な物理試験の総数は100を超えることが判明し、これらすべてを満足のいく基準で実施することは、現実的には非常に困難であると考えられる。このため、シミュレーションによる補足的なデータの活用は不可欠となる。

EDT原理一概要

こうした背景を踏まえ、HORIBAは、自動車OEMによる将来の排出ガス規制適合を支援する目的で、デジタルツインを活用したシミュレーションツールを開発した^[5]。ここでいうデジタルツインとは、物理的ユニットを高精度に再現する経験的なモデルに基づくデジタルモデルを指す。HORIBAのツールセットは、社内で独自開発された過渡実験設計、モデリング、予測、最適化の各モジュールから構成されており、過渡実験計画法(Dynamic Design of Experiments, Dynamic DoE)^[6]に類似したアプローチを採用している。

これらのスタンドアロン型モジュールは、次のプロセスに基づいて運用される。

1. 統計的手法を用いて過渡実験計画を作成する。
2. パワートレインまたは車両を用いて、設計された計画に従って過渡実験を実施し、トレーニングデータを取得する。
3. 得られたトレーニングデータを基に、性能および排出ガス特性を予測するモデルを生成する。
4. 生成されたモデルの精度を検証する。
5. 現実世界または合成的に構築された走行条件において、性能および排出挙動を予測する。
6. シミュレーションまたは実環境下での運転条件・車両動作条件を活用し、排出過多・燃費悪化・エネルギー消費増大などの原因となる好ましくないパワートレイン特性(ホットスポット)を特定する。
7. 特定された課題に対し、再適合(リキャリブレーション)を実施する。

これらの7つのプロセスをFigure 2(Figure2-1~2-4)およびFigure 3(Figure3-5~3-7)に示す。

ここでのEDTは、プロセス3で作成された経験的なモデルを、IPG CarMakerTM*1などの仮想車両シミュレーションツールで作成された現実世界のRDE走行サイクルに組み合わせて構築される(プロセス5)。HORIBAのEDTアプローチ

*1 IPG Automotive GmbHの登録商標または商標

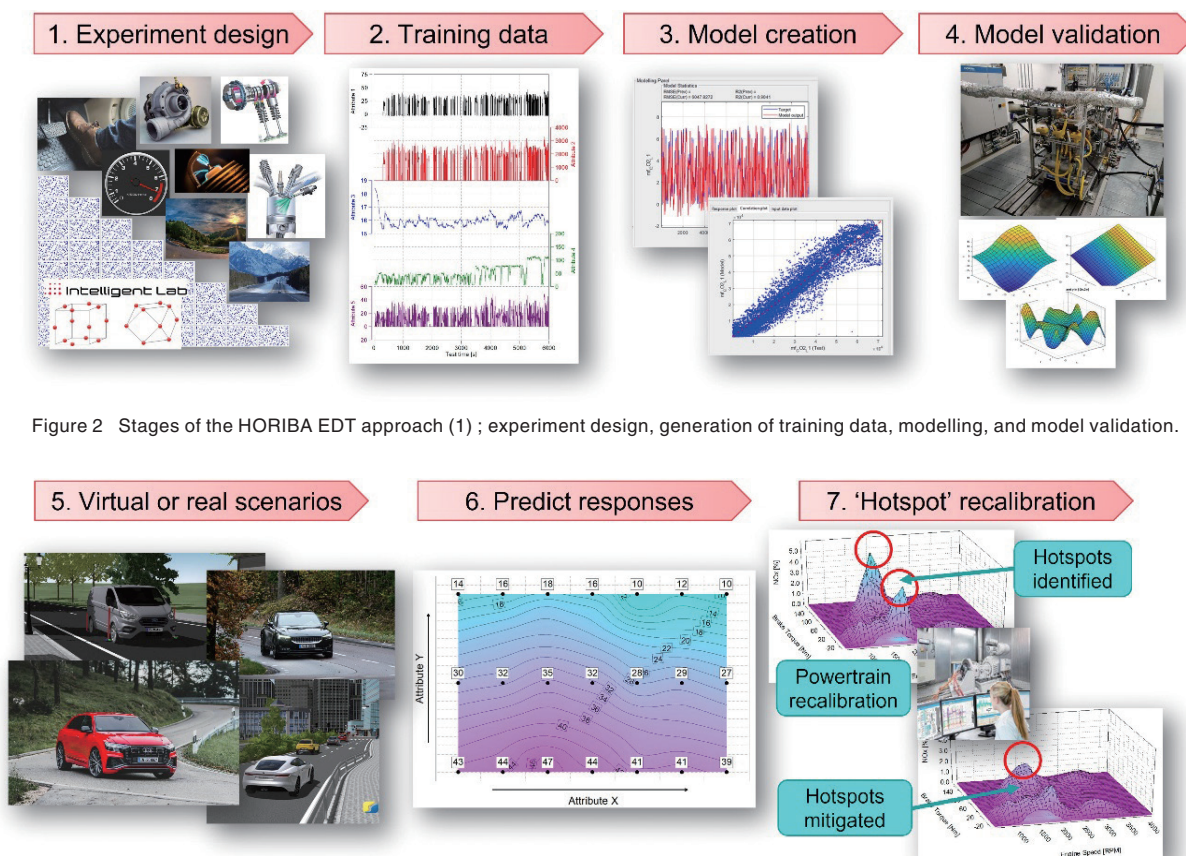


Figure 2 Stages of the HORIBA EDT approach (1) ; experiment design, generation of training data, modelling, and model validation.

Figure 3 Stages of the EDT approach (2) ; establishing real or virtual scenarios to couple with empirical models, prediction of responses, and 'hotspot' determination.

は過去の類似研究^{[7]-[12]}で行われた準動的テスト手法のいくつかを発展させたもので、経験モデルとシミュレーションと組み合わせた新しいモデリング技術を用いて、より没入感を持たせ、より広範な分野へ拡張できる柔軟性を持たせた。

EDT原理—動的実験(トレーニングデータ取得)

プロセス3の経験的モデルを作成するために、過渡実験設計ツールを用いて、PHEVパワートレインと商用車用パワートレインの双方に対し、それぞれの全動作範囲を網羅するトレーニングサイクルを生成した。

これにより、各種運転条件下での性能および排出挙動を高精度に再現可能なモデルの構築が可能となった。

Figure 4にはパワートレインベンチ上での実験事例を、Figure 5にはシャシベンチ上での実験事例を示す。

モデルの学習に用いるトレーニングデータを取得するために使用した試験サイクルの所要時間は、パワートレインベンチおよびシャシベンチのいずれにおいても約1.5時間であった。パワートレインテストベンチにおけるトレーニングサイクルの入力パラメータとしては、アクセルペダル位置、ブレーキペダル位置、ならびにドライブシャフトの回転速度が用いられた。一方、シャシベンチにおいては、商用車のアクセルペダル操作量と車両速度が入力として使用された。なお、後者の試験では、HORIBA製の自動運転シ

ステム(ADS EVO)を用いてアクセルペダル操作を自動化し、シャシダイナモメータが車速の制御を担っている。

動的実験計画は、定常状態における従来の実験計画法^[13]と同様に、対象物理システム(今回の場合はエンジン)の動作制約内における複数のターゲットポイントで構成される(Figure 2-1)。ただし、動的計画においては、これらのポイントが特定の順序で通過される点が特徴であり、時には短時間の停止を伴いながら、さまざまな順序で複数回再訪されることもある。

定常的な実験計画とは異なり、動的システムにおいては、同一の定常点であっても、その到達経路(すなわちエンジン回転数や負荷の変化パターン)によって挙動が異なる場合がある。このため、測定結果に至るまでの経路情報が重要となり、モデル構築においてもこの点を考慮する必要がある。

システムの動作空間全体を効果的にカバーすることで得られたデータは、実際の運用環境で想定されるあらゆるシナリオに対応した高精度なモデルの構築を可能にする。

今回、必要なトレーニングデータ量を削減し、物理試験の負荷を軽減する目的で、対象となるシステムに固有の動的実験計画を策定した(Figure 2-2)。この実験計画は、対象システムの動的な挙動を正確に捉えると同時に、情報密度の高いデータを生成しながら、システムの動作空間全体を網羅することできる。

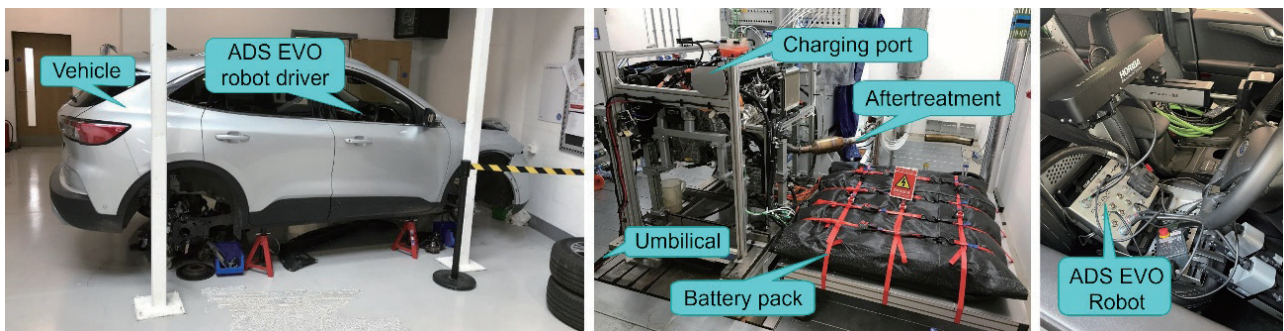


Figure 4 PHEV powertrain tested at HORIBA MIRA in the UK



Figure 5 Vehicle and corresponding diesel engine tested at an OEM in the UK.

これらの実験により取得されたトレーニングデータをもとに、複数の性能および排出ガス特性に関する過渡的な経験モデルを構築した(Figure 2-3)。

EDT原理—モデル作成, 検証, 予測

今回のモデリングには、機械学習手法の一つであるリカレントニューラルネットワーク(Recurrent Neural Network, RNN)^[14]に、長短期記憶(Long Short-Term Memory, LSTM)^[15]構造を組み込んだアプローチを採用している。

RNNを選択した理由は、複数の時間スケールで変化する動的システムに対応可能な柔軟性を備えているためである。一方で、標準的なRNNは長いシーケンスデータを扱う際に、長期依存関係の保持が困難であり、勾配消失の問題が生じやすいという課題がある^[15]。これに対してLSTMは、長期記憶の維持能力を強化し、勾配消失が起きにくい構造を有することでこれらの問題を効果的に緩和する。

LSTMは、セル状態と複数のゲート機構(入力ゲート, 出力ゲート, 忘却ゲート)を持ち、過去の情報を一時的に保存しながら、現在の入力と組み合わせる適切な出力を生成する。これにより、現在のシーケンス内で同様の値が再出現しない場合でも、重要な過去の情報を再利用することが可能となる。保存された値は、あらかじめ学習された条件が満たされた場合に限り、セルから削除される設計となっている。

モデルの学習には、計画された試験中に収集されたトレーニングデータが用いられる。このデータには、モデルの入力変数と、予測対象となる出力変数の両方が含まれており、時系列データとしてアルゴリズムに提供される。トレーニング時には、移動ウィンドウ形式で1ステップずつ進められる形でシーケンスが処理される。

RNNのトレーニングは計算負荷が高く、時間を要する可能性があるが、情報密度の高いトレーニングデータと汎用グラフィックスプロセッサ(General-Purpose computing on Graphics Processing Units, GPGPU)の活用により、大幅な処理時間の短縮が実現されている。例えば、90分間の運転シナリオに対し、10Hzで複数の変数が入力された場合でも、予測処理は数秒で完了し、モデルのトレーニング時間も数分程度に抑えられる。

加えて、すべての生成モデルは、予測結果と実測値を比較することで検証が行われる(Figure 2-4)。HORIBAのEDTツールセットで作成されたモデルの品質例をFigure 6に示しており、ここではいくつかの性能および排出ガス特性において、測定結果と予測結果の差異が視覚的に示されている。

現実世界の運転シナリオを仮想空間上に再現するために、仮想車両シミュレーションソフトウェアであるIPG CarMakerを使用した。また過去の論文^[16]で示した一連の工程に基づき、仮想ドライバーがIPG CarMaker内でプログラムされた複数の仮想RDEサイクルを走行するよう設定した。

この仮想シナリオの大きな利点は、現実時間よりもはるかに高速にシミュレーションを実行できる点にある。これにより、1台の車両に対して数百回のRDEテストを極めて短時間で実施することが可能となる。こうしたシミュレーションにより生成された車両またはパワートレインのデータの一部は、対応するEDTモデルと結合され、現実の試験を大幅に削減しながら、性能および排出特性の大規模な予測が可能となる。IPG CarMakerを活用して生成可能なシナリオの種類については、Figure 7に例を示す。これらの仮想試験により、運転スタイル、交通密度、ルート特性といった要因が、エンジン、パワートレイン、あるいは車両

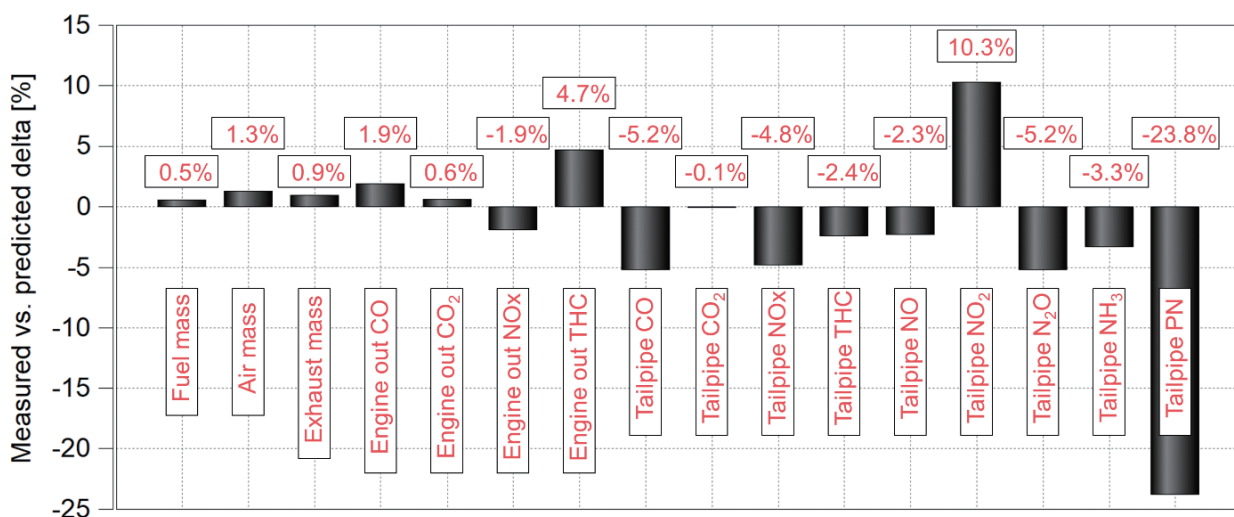


Figure 6 Measured vs. predicted deltas for performance and emissions attributes for a PHEV SUV tested on a powertrain dynamometer.

全体の性能にどのような影響を及ぼすかについて、詳細なデータ分析が可能となる。

さらに、EDTモデルに標高や極端な外気温といった環境因子の影響を組み込むことで、仮想環境における海拔0メートルや非常に高温・低温な地域での走行性能および排出挙動の予測も実現できる。このようなアプローチの一例として、文献^[17]で述べられている研究では、HORIBAの標高シミュレータ (Modular Emission and Driveline Analysis System, MEDAS) を用いて、高度および気温がエンジン性能や排出ガス特性に及ぼす影響をEDTモデルに取り入れている。

EDT原理—Hotspotの特定

Figure 8には、EDTアプローチを用いて、パワートレインや車両の問題となる動作条件、いわゆる「ホットスポット」を特定する手法の一例が示されている。この図は、同一の仮想ルートおよび交通密度を用いた4つのRDEサイクルに

おける排気管からのNO_x排出量の累積予測値を表している。対象車両はSUV型PHEVで、いずれのサイクルでもバッテリーのSOCはゼロに設定されていた。黒線は、海拔0メートル・吸気温度35℃という条件下での穏やかな(実線)およびダイナミックな(破線)運転スタイルを、赤線は、標高1,800メートル・吸気温度35℃という条件下での同様の運転スタイルにおける予測を示している。

Figure中の黒いボックスは、試験開始から10 km以内に累積NO_x排出量が600 mgを超えないことを求めるEU7の質量制限要件を表している。(2021年Euro7議論時の提案であり、2025年時点では排除された。)すべての予測は、暖機後エンジンを用いて収集されたトレーニングデータに基づいて実施された。海拔0メートルでの運転(黒線)では、累積NO_x排出量は約400 mgであり、黒いボックス内に収まっている。また、距離あたりの排出量も60 mg/km未満であり、ガソリンおよびディーゼル両方の議論当時の基準値を満たしている。

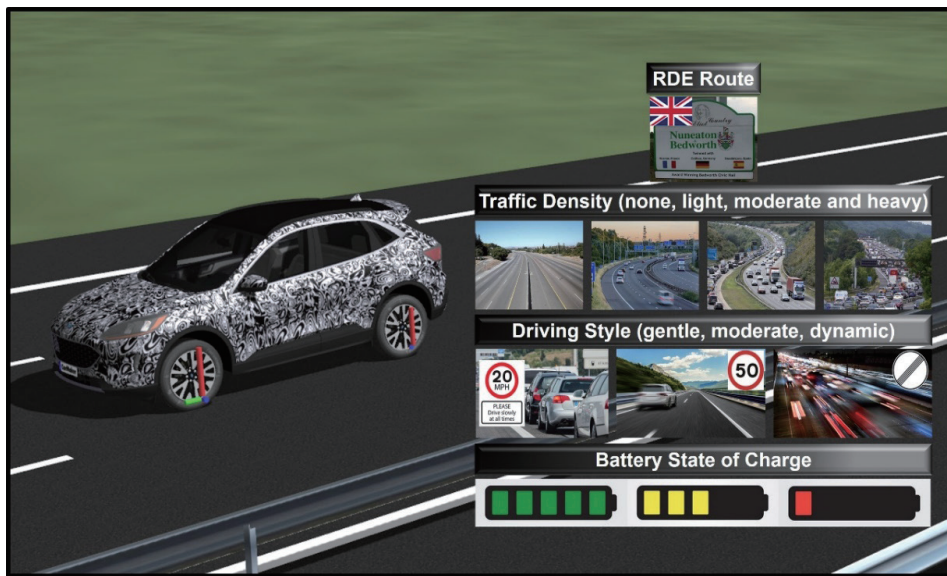


Figure 7 IPG CarMaker scenario definition for the light-duty PHEV SUV.

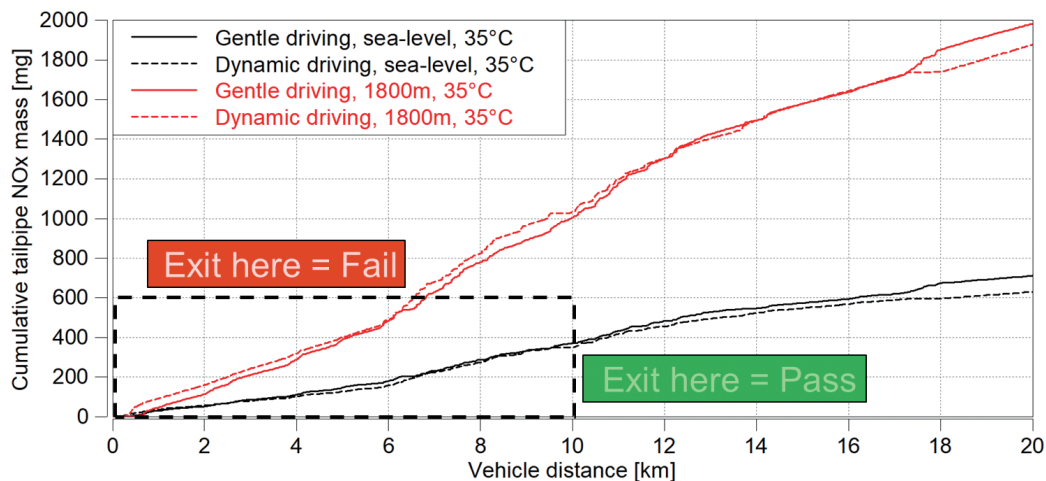


Figure 8 Predicted tailpipe NO_x emissions for the PHEV SUV at sea-level and 1,800m.

一方、標高1,800メートルでの走行予測(赤線)は、試験距離6~7 kmの範囲でNOx排出量が600 mgを超え、質量制限に違反する結果となった。興味深い点として、これらの高地条件における排出結果は、60 mg/km未満にとどまっており、EU6規制に基づけば依然として適合していると解釈される。

Figure 8が示すように、HORIBAのEDT手法により、車両量産前の段階においても問題のあるパワートレイン動作条件を特定することが可能となる。また、これらの予測はすべて暖機後エンジンのデータに基づいているため、コールドスタート条件を考慮すると、海拔0メートルであっても10 km以内に600 mgを超える可能性が高くなる。したがって、コールドスタート条件は、EU6の枠組みでは許容される場合があったとしても、EU7における試験開始後10 km質量制限が導入されると、排出適合の達成において重要な判断要素となる。

より厳格な排出ガス規制の導入を背景に、自動車OEMは製品の適合性をより広範な動作条件で保証するため、シミュレーション活動の強化が求められている。

HORIBAが提案する過渡EDT手法は、さまざまなパワートレイン、エンジン、車両に対して性能および排出特性の予測を行う上で有効に活用可能である。

おわりに

このEDTアプローチを採用することで、自動車OEMは、現実の路上試験では再現が困難または不可能な「ワーストケース」やRDE法規に定められた温度や標高条件の上下限付近や運転特性(RPA, V.a[95]^[4])境界付近の「エッジケース」における製品の信頼性や規制適合性を、実車テストに先駆けて確認することが可能となる。

さらに、今日の自動車開発においてパワートレインの共有が一般化していることから、ひとつのパワートレインを、それが搭載される複数の車両において適切に機能させるためには、意図的な動的サイクル試験が求められる。このような場合、本研究で作成されたEDTモデルは、異なる車両モデルから収集されたデータと統合することで、高い汎用性を発揮する。

初期の検証結果によれば、EDTアプローチを単一の車両に適用することで、認証および検証プロセスに要する期間を少なくとも70%短縮可能であると示唆されている複数車両に共通のパワートレインが導入されるほど、この効果はさらに顕著となる。

本稿で紹介したEDTアプローチは、すでに量産中の確立さ

れたパワートレインにも適用されているが、ハードウェアおよびキャリブレーションの最適化が必要な開発初期の段階においても有効である。たとえば、空気供給システムや排気後処理の選定段階において、EDTを導入することで、必要な試作車の台数を削減できる可能性がある。

現在の研究は、液体化石燃料を用いた従来型および電動パワートレインに焦点を当てているが、本手法は、異なる運転特性や環境条件、積載状態によってエネルギー消費量や航続距離がどのように変動するかを理解するために、カーボンニュートラル代替燃料、燃料電池やバッテリーを動力源とするバッテリー電気自動車(Battery Electric Vehicle, BEV)にも適用可能である。

従来、シャシダイナモメータによるエネルギー消費量および航続距離の評価は複雑で時間のかかる作業であったが、EDTアプローチはその負担を大きく軽減することができる。さらに、この手法の柔軟性は、ツールセットの開発が複数の工学・科学分野にまたがる機能横断的なものであることを意味し、自動車以外のシステムにも幅広く応用可能である。

*編集局注：本内容は特段の記載がない限り、本誌発行年時点での自社調査に基づいて記載しています。

参考文献

- [1] Nicole Egerstrom他, Emission reductions and public health benefits from timely Euro 7 standards
- [2] 森川多津子, 2030年における自動車からの大気汚染物質排出量推計 JRJ20241001
- [3] Phil Roberts他, Powertrain Digital Twinning for Real-World Emissions Compliance 2024-01-2602, SAE
- [4] COMMISSION REGULATION (EU) 2016/646 of 20 April 2016 amending Regulation (EC) No 692/2008 as regards emissions from light passenger and commercial vehicles (Euro6)
- [5] Phil Roberts他, The Prediction of Performance and Emissions for Synthetic Machine Handling Cycles Utilising a Powertrain Empirical Digital Twin 2024-01-4271, SAE
- [6] Karsten ROEPKE, Design of Experiments for Engine Calibration
- [7] Gutjahr, T他, "Advanced Modelling and Optimization for Virtual Calibration of Internal Combustion Engines," NDIA Ground Vehicles Systems Engineering and Technology Symposium, 2017.
- [8] Shishido, T他, "Dynamic Modelling for Gasoline Direct Injection Engines," *Keihin Technical Review*, Volume 6, 2017.
- [9] Le Corre, S.D.他, "Application of Multi-Objective Optimization Techniques for Improved Emission and Fuel Economy over Transient Manoeuvres," *SAE Technical Paper* 2019-01-1177, 2019, DOI:10.4271/2019-01-1177.
- [10] Tulpule, P他, "Model Based Design (MBD) and Hardware In The Loop (HIL) Validation: Curriculum Development," *American Control Conference*, 2017, DOI:10.23919/ACC.2017.7963788.
- [11] Xiaohang 他, "On the application of artificial neural networks for the prediction of NOx emissions from a high-speed direct injection diesel engine," *International Journal of Engine Research*, Volume 22, Issue 6, Pages 1808-1824, 2021, DOI:10.1177/1468087420929768.
- [12] Katreddi, S他, "Trip based modelling of fuel consumption in modern heavy-duty vehicles using artificial intelligence," *Energies* 2021, 14, 85-92, DOI: 10.3390/EN14248592.
- [13] Mohammed Reza Kianifar他, Sequential DoE Framework for Steady State Model Based Calibration 2013-01-0972, SAE
- [14] Ronald J他, A Learning Algorithm for Continually Running Fully Recurrent Neural Networks, *Neural Computation* (Volume: 1, Issue: 2, June 1989)
- [15] Sepp Hochreiter他, Long Short-Term Memory, *Neural Computation* 9(8):1735-1780, 1997
- [16] Phil Roberts他, RDE Plus - A Road to Rig Development Methodology for Whole Vehicle RDE Compliance: Overview 2020-01-0376, SAE
- [17] Phil Roberts他, RDE Plus - Rapid Characterisation of Vehicle and Powertrain Performance and Emissions using Dynamic Design of Experiments, Digital Twin and Virtual Driving Methodologies 2022-01-0580, SAE



田畑 邦夫

TABATA Kunio

株式会社堀場製作所
エネルギー・環境本部
電動モビリティ部 部長
Department Manager
E-Mobility Dept.

Energy & Environment Division, HORIBA, Ltd.



Dr. Phil ROBERTS

Technical Specialist,
Propulsion R&D.
HORIBA MIRA Ltd.



Dr. Luke BATES

Senior Engineer,
Data Driven Innovations,
HORIBA MIRA Ltd.



Steve WHELAN

Global Application Centre Leader,
HORIBA MIRA Ltd.