

特集：車両技術

車両技術に関する最近の研究開発

山本 貴光*

Recent Activities for Research and Development of Railway Vehicle Technology

Takamitsu YAMAMOTO

As for the recent situation surrounding railways, the efficiency of operations and labor saving are rapidly progressing due to the influence of the decrease in passengers due to the covid-19. Then, the DX (digital transformation) technology which has been applied to an automatic train operation and so on, is attracting attention. Another topic is a turning point toward the realization of global decarbonization, such as the demand for reduction of greenhouse gas emissions by “2050 Carbon Neutral” declared by the Suga Cabinet and “COP26”. This paper introduces the outlines of three technologies related to these topics, “Evaluation method for gliding control performance by hybrid simulator”, “Abnormal noise detection method during train running using neural network”, and “High efficiency of diesel electric railcars”.

キーワード：滑走制御，電気式ディーゼル車，ニューラルネットワーク，異音検知

1. はじめに

鉄道総研では中期の経営計画である5か年の基本計画—鉄道の未来を創る研究開発—RESEARCH 2025に2020年度より取り組んでおり、研究開発については(1)安全性の向上、特に自然災害に対する強靱化、(2)デジタル技術による鉄道システムの革新、(3)総合力を発揮した高い品質の成果の創出、を基本方針としている。また、研究開発の目標として、安全性の向上、低コスト化、環境との調和、利便性の向上、を設定している。これらの基本方針、目標に向けて実施した研究開発の成果として本号は5件の特集論文と、最近、急速に普及・開発が進められている技術動向2件の調査報告より構成される。

最近の鉄道を取り巻く情勢としてはコロナ禍による乗客減少の影響により業務の効率化、省人化、省力化が急速に進められており、列車の自動運転化技術などが話題となっているが、そこに使われているDX(デジタルトランスフォーメーション)を応用した技術が目玉されている。もう一つの話題として、菅内閣により宣言された「2050カーボン・ニュートラル」や「COP26」に対応して温室効果ガス排出削減が求められるなど世界的な脱炭素化の実現に向けた転換期を迎えている。

上述した特集論文と調査報告の中にも関連する内容が含まれるものが一部あるが、さらに本報告ではこれらに関連する技術として3件、「ハイブリッドシミュレータによる滑走制御性能の評価手法」、「ニューラルネットワークを用いた電車走行時の異音検知手法」、「電気式ディーゼル車の高効率化」について概要を紹介する。

2. ハイブリッドシミュレータによる滑走制御性能の評価手法

2.1 滑走制御性能確認における課題

一般に滑走制御の性能確認は、現車試験において車上から車輪・レール間の接触面をめがけて散水することで意図的に低粘着条件をつくり滑走を発生させるが、すべりやすさに関わる影響因子(例えば、散水の量・位置・温度、車輪およびレールの表面状態)が非常に多く、全く同じ条件で試験状況を再現することは極めて困難である。さらに、現車試験による性能確認は安全を担保するために不可欠であるものの、膨大な時間と労力を要するため、現実的には限られた試験回数の中で性能の判断などが求められる。

2.2 滑走制御用ハイブリッドシミュレータの概要

これらの影響因子に係る部分を計算機で模擬し、空制ブレーキの応答性を実機で効率よく再現する台上試験環境として滑走制御用ハイブリッドシミュレータ(図1)を開発した¹⁾。実機部と計算機部の機能を図2に示す。実機部は現車の圧縮空気の流れを再現する部分であり、空気タンクからブレーキシリンダ(BC)を模擬した定容積容器まで現車と同じ空制ブレーキ機器で構成している。機器間を接続する空気配管の長さを可変とすることで応答性を変化させることができる。空制ブレーキ機器は独立した4軸分(車両1両分)を備える。計算機部は実機部以外の要素を模擬する部分であり、リアルタイム計算機、操作用PC、BC圧力センサで構成している。リアルタイム計算機の内部では、車両モデル・滑走制御アルゴリズム・車輪・レール間の粘着条件(すべりやすさ)を試験者が

* 車両制御技術研究部長

それぞれ任意に設定できる。実測したBC圧力センサの値に基づいて基礎ブレーキ装置の諸元を考慮したブレーキ力を計算し、その値を車両モデルに入力する。車両モデルでは、入力されたブレーキ力と想定する車両諸元に基づいて減速運動を計算する。減速運動の計算には、予め設定した粘着条件と滑走制御アルゴリズムが反映される。例えば、計算機内部で減速中の軸が滑走制御アルゴリズムで設定した滑走検知条件を満たしたとき、即座にその軸に対応する実機部の滑走制御弁へ動作指令が出力されてBC圧力が排気される。BC圧力の変化を次の計算ステップに反映して再び減速運動を計算する。この処理を車両停止まで繰り返す。開発したシミュレータは、低粘着条件を試験者が任意に設定でき、かつ容易に多数の試験実施が可能であることに特長があり、条件を固定して特定の試験要素のみの影響を確認することや、多数の試験結果を得やすいことから統計的な分析を利用した評価を実施できる。

新たな滑走制御アルゴリズム開発のツールとして、また、現車試験の前に滑走制御アルゴリズムの比較検証を行うことで、現車試験の試番数を削減する方法としての活用を見込んでいる。

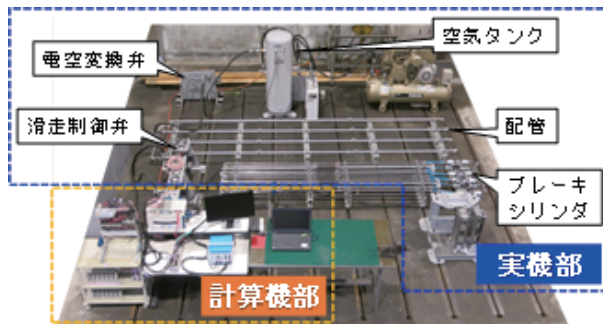


図1 滑走制御用ハイブリッドシミュレータ

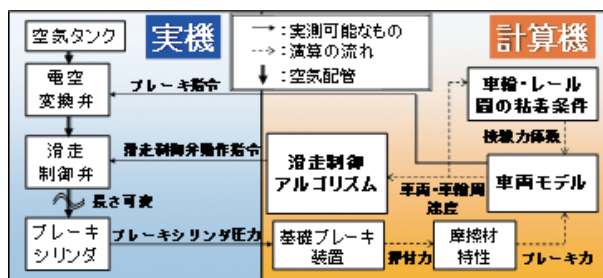


図2 実機部と計算機部の機能

3. ニューラルネットワークを用いた電車走行時の異音検知手法

3.1 異音検知手法の概要

電車には走行時の異音検出を目的とするセンサー類は搭載されておらず、異音検知は乗務員の耳に頼っているのが現状である。しかし今後、無人運転が普及すれば乗

務員の聴覚の代替手段として、マイクロフォンによる異音検知が必要になると考えられる。電車内外の集音結果から異音を検知する手法は様々なアプローチが考えられ、どれが適切かは知覚すべき異音の定義も踏まえて検討すべき問題である。知覚対象として想定する異音が、普段の走行音と明らかに異質であれば、音情報のみを高度に分析することで正常/異常を識別できる可能性がある。しかし、対象音が一聴だけではレール継目や分岐器通過時の走行音と区別し難い場合は、これらの通過に起因する正常音か、別の原因による注意すべき音なのかを判断する必要がある。この場合、分析には音以外に最低でも走行位置情報が必要となる。同様に、集音結果の正常/異常の判断が電車の走行位置だけでなく速度やノッチ、その他機器の動作状況（以下、これらをまとめて車両状態量と呼ぶ）で左右される場合が考えられ、これらの情報も加味した分析が求められる。車両状態量を加味した異音検知手法を構築するには、車両状態量に応じて平時にどのような音がするものなのか、すなわち正常音の予測手法を構築することが有効である。そこで本研究では、将来の電車の異音検知手法に資することを目的に、ニューラルネットワークに基づく、車両状態量に応じた走行音の予測手法を考案した²⁾。

3.2 ニューラルネットワークによる予測手法

本手法で用いたニューラルネットワークの構造を図3に示す。ある時刻の走行位置 $x(t)$ 、速度 $v(t)$ 、力行ノッチ $P_n(t)$ 、ブレーキノッチ $N_n(t)$ 、コンプレッサーON-OFF情報 $CP(t)$ を入力とし、各周波数の音圧成分 $P_{(f_c)}(t)$ を予測する構造である。入力層と出力層の間に2つの隠れ層を用意し、各隠れ層内にそれぞれ20,200のノードを配置した。ニューラルネットワークは前層の情報に重みを乗じて集約し、それをユーザーが決めた何らかの活性化関数に入力として与え、その出力結果を次層へ渡す構造となっている。隠れ層1の各ノードが活性化関数を出力する様子を図4に示す。図中、 X_i^1, Y_i^1 は隠れ層1のノード i における入力と出力値、 $h(\cdot)$ は活性化関数を表す。 $h(\cdot)$ は、ニューラルネットワークで多用されるシグモイド関数(式(1))を用いた。また、本稿では隠れ層2のノード i における出力を式(2)で定義した。式(2)による隠れ層2の活性化関数を図5に示す。

$$h(X_i^1) = \frac{1}{1 + e^{-X_i^1}} \quad (1)$$

$$Y_i^2 = \begin{cases} X_i^2 \sin \left\{ \left(\frac{i-1}{2} \right) \frac{\pi}{L} x(t) \right\} & i \text{は奇数} \\ X_i^2 \cos \left\{ \left(\frac{i-2}{2} \right) \frac{\pi}{L} x(t) \right\} & i \text{は偶数} \end{cases} \quad (2)$$

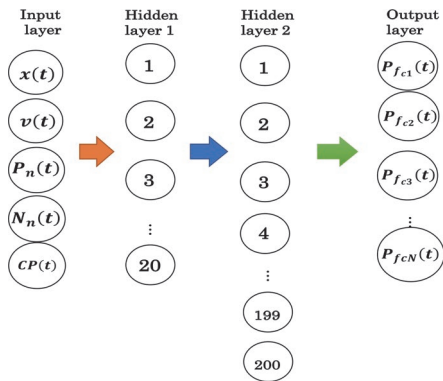


図3 ニューラルネットワークの構造

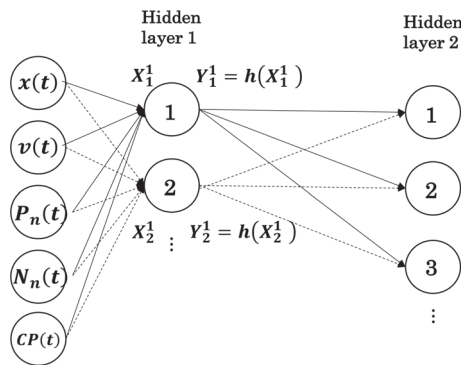


図4 隠れ層1の活性化関数

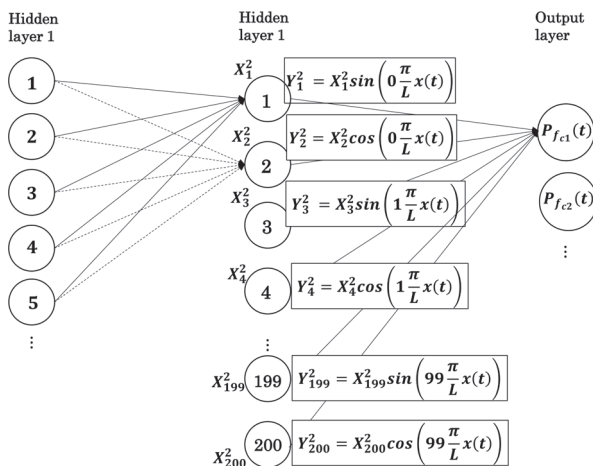


図5 隠れ層2の活性化関数

3.3 走行音学習結果例

学習データを取得したのち前節で述べたニューラルネットワークを用いて入出力関係を学習させた。これに走行中のノッチ，速度，走行位置，コンプレッサー動作状況をニューラルネットワークに入力として与え，各周波数成分の予測値を出力として得た。この予測値と測定値の比較結果を図6に示す。予測波形は測定波形の傾向をよく表現している。ただし，誤差が比較的大きい箇所もわずかに散見される。本研究では平時の走行音を予測

可能な手法を用い，この予測結果と測定結果の乖離が著しい場合に異音と定義するようなシステムを想定している。そのための基礎研究として，本報告では列車のノッチ，速度，走行位置，その他必要な機器の動作状況に応じた平時の走行音を予測可能なニューラルネットワークを考案した。

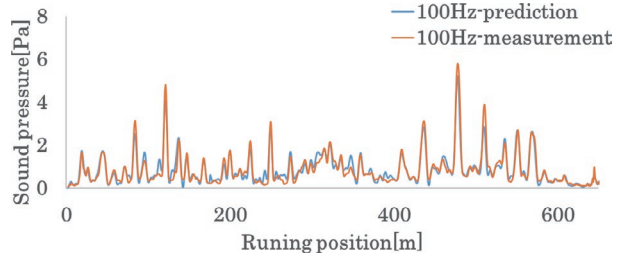


図6 予測値と実測値の比較

4. 電気式ディーゼル車の高効率化

4.1 電気式ディーゼル車の発電システムの現状

非電化区間を走行する気動車では液体式変速機を用いた液体式気動車が多く用いられてきたが，近年では，電気式ディーゼル機関車と同じように，主発電機で発電した電力で走行する電気式気動車や，それにバッテリーを付加して電力回生を可能としたハイブリッド車両が採用される事例が増えている。その背景として，電気式は液体式と比べて推進軸や変速機のような機械部品が少なく，以下のような利点があることが考えられる。

- ・回転部品が少なく，安全性が高い
- ・省保守であり，電車と保守方法の共通部分が多い
- ・ハイブリッド化により電力回生が可能となる

その一方で，電気式は電気機器を直列につなげたシステムであるため，以下のような課題がある。

- ・動力伝達効率が低い
- ・初期コストが高い
- ・重量が重い

近年，エネルギー消費量の低減は重要性を増しており，動力伝達効率を高めて燃料使用量を削減することは今まで以上に重要となっており，上記の課題を改善していくことは重要である。

現在の発電システムとしては，(a) ブラシレス同期機と全波整流器を組み合わせたシステムと (b) 交流発電機（誘導機（IG）または永久磁石同期機（PMSG））とPWMコンバータを組み合わせたシステムの2種類がある（図7）。これらのシステムはいずれも発電機と整流器の組み合わせで構成されている。

4.2 PMSGと全波整流器を用いた発電システム

これらのシステムで用いられる発電機のうち，PMSG

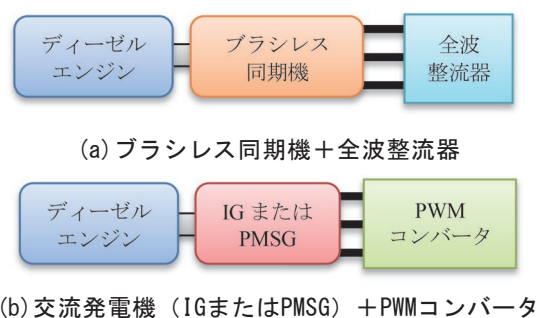


図7 現状の電気式ディーゼル車の発電システム

は回転子に通電部分がないため比較的効率がよくてシンプルな構造であり、永久磁石の磁束により発電可能であるため外部から励磁する必要が無い。また、全波整流器はPWMコンバータと異なりスイッチングが可能なパワーデバイスや制御装置が不要であるため、低コストで小形軽量である。よって、PMSGと全波整流器を組み合わせることで高効率・低コスト・小形軽量の発電システムを実現できる可能性がある。しかし、単純にPMSGと全波整流器を組み合わせても、永久磁石による磁束では十分な電圧・電流で運転することが困難であり、鉄道車両で使用するような小形大出力の発電システムを構成することが困難である。そこで、回路にコンデンサを付加することで出力特性を改善したシステムを考案し、その特性をシミュレーションにより確認した。コンデンサを挿入する方法として、図8(a)のように並列接続する方法と図8(b)のように直列接続する方法が考えられる。

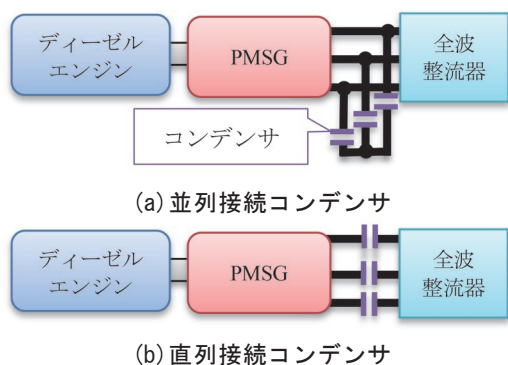


図8 PMSGと全波整流器を用いた発電システム

4.2.1 並列接続コンデンサを用いた発電システム³⁾

並列接続した場合にPMSGのインダクタンスとコンデンサが動作回転速度において共振するようにコンデンサ容量を設計すると、発電システムは直流側の電圧に関わらず一定電流を供給する直流電流源として動作するようになる。また、永久磁石による電圧を大幅に超える電

圧で動作し、大出力化が可能である。本システムは、一定電圧の直流電源と組み合わせた場合には発電出力が固定されてしまうため、発電電力と負荷電力の差を吸収できるハイブリッドシステムでの使用が適している。

4.2.2 直列接続コンデンサを用いた発電システム⁴⁾

直列接続した場合に共振が起きるようにコンデンサ容量を設計することで、発電システムは直流側の負荷電流に関わらず一定電流を保つ直流電圧源として動作するようになる。この回路でも永久磁石による電圧を大幅に超える電圧で動作し、大出力化が可能である。

本システムは架線と同じような直流電圧源として動作するため、電気式ディーゼル車の発電システムとして使用可能である。なお、ハイブリッド化する場合には、例えばバッテリーと発電システムの間電力変換器を配置する等して、電圧源同士を直接接続しないようにする必要がある。

これらの発電システムはシミュレーションにより基本的な動作の確認ができており、いずれも鉄道車両として有望であると考えられる。今後は、試作試験等を行い実用化に向けた取り組みを進めていきたい。

5. まとめ

本報告では車両技術に関する最近の研究開発の中からDXを応用した省力化に関する技術としてハイブリッドシミュレータによる滑走制御性能の評価手法、ニューラルネットワークを用いた電車走行時の異音検知手法を、また、脱炭素化に関する技術として、電気式ディーゼル車の高効率化について概要を紹介した。これらの技術は将来に向けた鉄道の持続的発展に必要なものであり、最重要課題の一つとして取り組んでいきたい。

文献

- 1) 土方大輔, 木崎裕太, 中澤伸一: 実物の空制ブレーキ機器とリアルタイム計算機を組み合わせた滑走制御用ハイブリッドシミュレータ, 第28回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集 (J-RAIL2021), 2021
- 2) 吉川岳, 横内俊秀: ニューラルネットワークを用いた電車走行音予測手法の検討, 電気学会研究会資料, TER-21-049, pp.33-38, 2021
- 3) 近藤稔: 共振回路を利用した永久磁石同期機と全波整流器からなる直流発電システム, 電気学会論文誌D, Vol.141, No.5, pp.416-422, 2021
- 4) 近藤稔: 永久磁石同期機と直列共振回路を用いた直流発電システム, 電気学会研究会資料, RM-21-045, 2021