

車両・電気分野における研究開発のコア技術の高度化

車両技術研究部長
瀧上 唯夫



1. はじめに

少子高齢化等による生産年齢人口の減少は、輸送需要の減少に加え、労働力不足などの形で鉄道事業に影響を及ぼすと想定され、車両・電気分野では、近い将来、特に保守作業に従事する技術員や運転士の不足、熟練技術の継承などの課題が顕在化することが懸念される。また、近年は社会や乗客からの安全性、利便性への期待が高まっていることに加え、自動運転や脱炭素化の実現をめざした取り組みも強く求められている。

本講演では、上記のような背景のもとで、持続可能な鉄道システムを実現するために必要不可欠となる研究開発のコア技術について、車両・電気分野に着目してその概要や事例を紹介するとともに、高度化による諸課題の解決に向けての取り組みについて述べる。

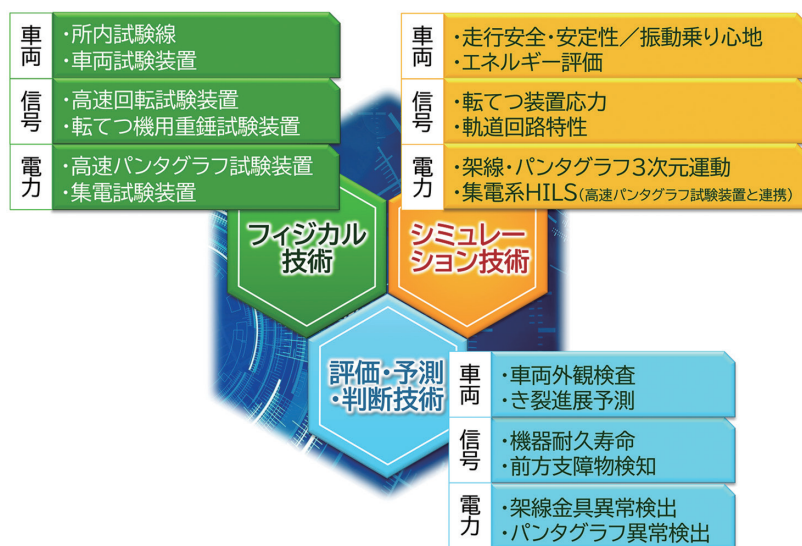


図1 コア技術の分類と例

2. 研究開発におけるコア技術と課題

2.1 コア技術の実例

車両・電気分野（本講演では、信号、電力分野を総称して電気分野と呼ぶ）におけるコア技術は多岐にわたるため、紙面の都合上ごく一部となるが、その実例を基調講演で示された「フィジカル技術」「シミュレーション技術」「評価・予測・判断技術」に該当するものに分類して図1に示す。

2.2 コア技術高度化の方向性と課題設定

先述の諸課題の解決に向けて種々の技術開発が進められている中で、鉄道総研は様々な立場で研究開発に携わることが考えられるが、外部機関と役割分担あるいは連携しつつ、持続可能な鉄道システムの創造に貢献していくことが重要である。

基調講演では、そのためのコア技術の高度化の方向性として図2の3項目が示されているが、本講演では車両・電気分野で鉄道総研が果たすべき役割として、より具体的に以下のような課題を設定して議論することとする。



図2 コア技術高度化の方向性

- ①鉄道固有問題では実証が重視されるため、試験装置等における事前検証にあたって、実現象の再現性確保が重要となる。
- ②経験・実績に基づく業務や基準等について、論理的な根拠の提示や、定量的な評価に基づく一般化が求められる。
- ③車輪／レール、パンタグラフ／架線など連成問題が多く、異なる分野間が連携した対応が必要となる。
- ④実験、シミュレーション手法それぞれの高度化による課題解決には限界があり、両手法の組み合わせによるブレイクスルーが必要となる。
- ⑤これまで蓄積した各種経験や知見とコア技術を組み合わせ、自動運転や脱炭素化の実現をはじめとした喫緊の社会的要請に応える必要がある。

これらの課題認識は従来からあり、既に解決に向けて取り組んできたところであるが、リソースが限られている中で、以前にも増して研究開発成果の創出にスピードが求められていることを踏まえ、ここであらためてこれらの課題の解決に資するコア技術の高度化について検討することとした。

次章ではその取り組みについて述べるが、その際、基調講演で示された高度化の方向性(図2)との対応を、節のタイトルの末尾に、それぞれの先頭文字【L】、【F】、【K】を付すことで表す。

3. コア技術の高度化

3.1 事前検証における実現象の再現性向上【L】

前述の課題①に対応し、コア技術の分類として挙げた「フィジカル技術」の高度化に該当する事例として、2025年度にしゅん功した「車輪・レール接触試験装置」の活用について紹介する。

車輪がレール上を転動して走行するという基本的な

構造は、鉄道が実用化されて以来不変であり、車輪・レールの接触特性は、脱線、空転・滑走、摩耗、きしり音など、鉄道固有の多くの現象と密接に関係している。

鉄道総研は、図1に取り上げた以外にも特色ある試験装置を多く保有しており、車輪・レールの接触に関連するものに着目しても、図3(a)に示す通り多岐にわたる¹⁾。これらは、スケールや対象とする現象が発生する走行速度等に応じ、相互に補完して活用されているが、試験片または実部品を軌条輪に接触させて回転を発生し、そのときの特性を取得するものが一般的である。

これに対し、車輪・レール接触試験装置(図3(b))は、実物の車輪・レールを接触させ、荷重・変位制御、アタック角を設定した試験を実施できることが特徴である。実走行状態の「再現性」が向上したことにより、摩擦係数、接触位置、圧力分布を測定することで、以下のような検討に活用することが可能となる。

- ・摩耗形状を考慮した接触現象解明(脱線に対する安全性向上)
- ・車輪、レールの初期摩耗・変形進展の模擬(メンテナンスの省人・省力化)
- ・増粘剤／潤滑剤・摩擦調整剤の性能評価(空転・滑走防止による安定輸送／きしり音抑制による環境調和)

今回は車輪・レール接触試験装置を紹介したが、その他の特色ある試験装置も活用し、事前検証における再現性確保を図り、妥当性確認を経て、新技術等の社会実装推進に貢献していきたいと考えている。

3.2 論理的根拠・一般化された対策の提示【L】

続いて、前述の課題②に対応し、コア技術の分類として挙げた「シミュレーション技術」の高度化の事例として、転てつ装置のフロントロッド部の応力解析について紹介する。

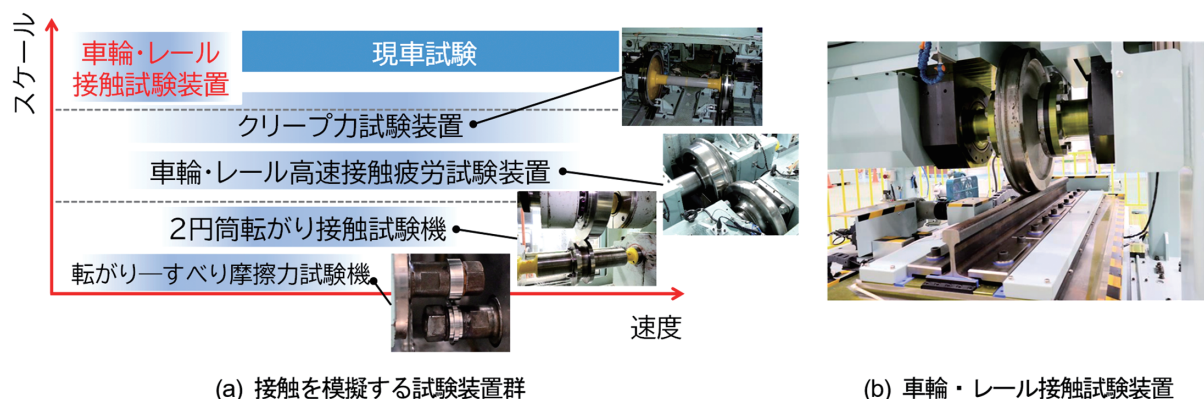


図3 車輪・レールの接触を模擬する試験装置群と車輪・レール接触試験装置

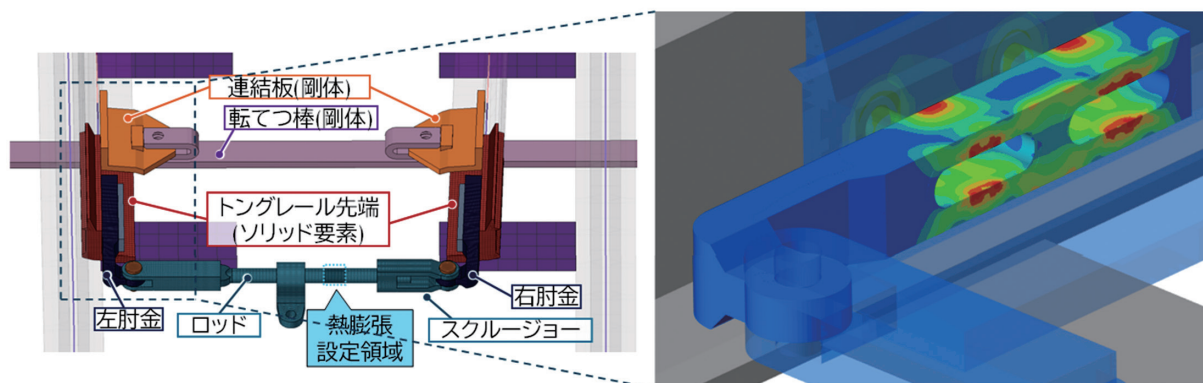


図4 転てつ装置のモデルと応力解析結果例

フロントロッドの折損は転換不良を引き起こす場合があります、これまで形状や使用材料の見直しなどの改良が進められてきたが、近年でも一定数の発生がみられる。現地調査等により、折損は主にフロントロッドの一部である肘金部分で発生すること、特に関節分岐器内のうち、高速で列車が通過する箇所が発生しやすいなどの傾向が明らかになっていったものの、原因特定や対策は個別に行われており、一般化には至っていなかった。

これに対して、折損部位である肘金に発生する応力に着目した解析結果に基づいて一般的な折損原因を解明するとともに、それを踏まえた折損防止対策の提案に取り組んだ。作成した応力解析モデルと、その結果例を図4に示す。

解析により、肘金表面の長穴周辺に応力が集中する部位が存在することがわかった。また、接着不良の解消のために左右間隔を伸ばした条件では、当該部位の応力が増大する場合があります、左右間隔を適切に調整することが応力集中の解消、折損防止に有効であることなども明らかにし、これをもとに、一般化された保守方法や交換周期の提案などが可能となった²⁾。

本結果は、シミュレーション技術を活用することで、メカニズムの考察から、一般化された対策立案につながったものである。その他の設備等に関しても、経験・実績に加え、論理的根拠の提示とそれに基づく基準や対策の提案により、鉄道事業者における生産性向上につながる業務に貢献していきたい。

3.3 自動運転普及に向けた取り組み【L】

次に、「評価・予測・判断技術」のうち、安全性評価・運行状況判断等に関するコア技術に着目し、前述の課題⑤に対応して、自動運転の普及に向けた高度化の取り組みを紹介する。

これまで鉄道は、安全確保のコアとなるフェイル

セーフ技術を培い、その技術をベースに運行制御の自動化を進めてきた。1977年には、安全確保を担うATCの防護のもとで駅間の操縦を自動で行うGOA2の自動運転が、近年では車上データベースを活用した速度照査式のATSによるGOA2.5の自動運転システムがそれぞれ実用化されている。今後、踏切等がある一般的な線区への自動運転の導入を促進するためには、線路上の安全を確保して列車を制御する技術の高度化と、低コスト化の双方が必要となる。この双方の課題を解決するためには、様々なセンシング技術や、最新の画像処理技術、5Gなどの無線通信技術の活用が有効なアプローチとなるが、これらの技術自体は一般にフェイルセーフ性を持たないことから、安全に関わる判断や制御に適用するためには、安全を確保する仕組みが不可欠である。これに対し、カメラ等のセンサーの故障や画像処理結果の異常を検知、あるいは地上～車上間での通信が途絶した際に、列車を停止させるなど、安全側に制御する技術は既に確立されている。一方、既存の技術では、例えば通信品質の変動が列車運行の安定性を阻害する要因となりうるなど、安定性の維持には解決すべき課題がある。

そこで、これまで培ってきた従来のフェイルセーフ技術をベースに、「列車の安全かつ安定した運行制御に必要な機能・情報とは何か」を追究し、「安全確認型」の制御方式を提案している³⁾。この制御方式は、安全が確認できている停止限界まで列車を走行させることを可能とするもので、全線での連続通信を前提としない点が従来技術との大きな違いである。このような安全確認型の列車制御技術により、公衆網など圏外や情報欠落が発生する可能性のある通信手段を活用することができ(図5(a))、専用の通信設備を削減しつつ、安全性と安定性の双方を確保することが可能となる⁴⁾。

さらに、この安全確認型の制御方式と「鉄道ダイナ

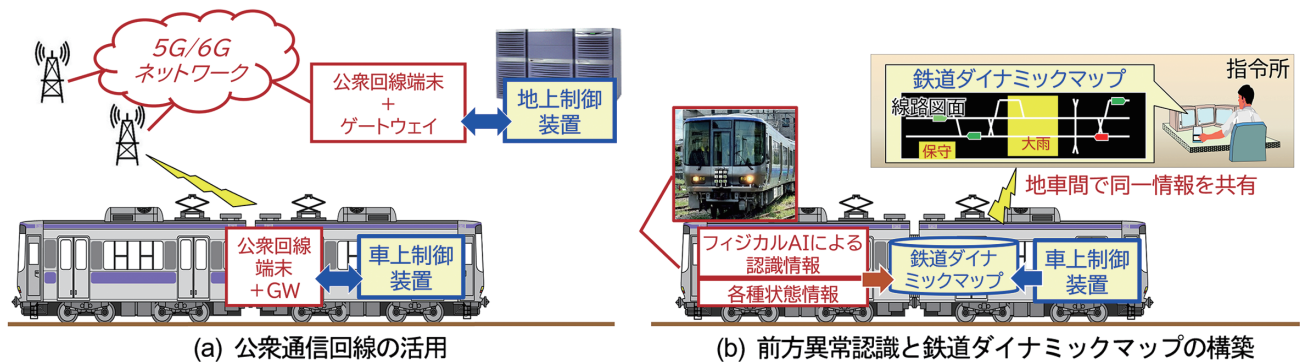


図5 自動運転の実現に向けた取り組み

ミックマップ」⁵⁾を連携させることで(図5 (b))、列車の位置や転てつ装置・踏切の状態情報や、前方障害物検知といったフィジカルAIの認識結果などを統合、列車・指令間で共有することが可能となる。これにより、自動運転時に指令員が行う状況判断や車上係員への指示等の負担が軽減されるほか、早期回復力と安定性のさらなる向上も期待できることから、引き続き少ない設備と要員でも安全性と安定性を両立できる自動運転システムの実現をめざした取り組みを進める。

今回は自動運転に関する取り組みを紹介したが、他の分野においても、安全性の本質追究といったコア技術に基づく要素技術の開発に加え、フィジカルAIや最新の情報通信技術等を“サポートツール”として活用し、鉄道事業者やメーカー等とも連携して鉄道業務に貢献する高度なシステムの実現に向けた取り組みを進めていきたい。

3.4 車輪・レール連成問題への対応【F】

前述の課題③④に対応して、「フィジカル技術」と「シミュレーション技術」の融合の例として、車両試験装置と解析モデルを組み合わせた走行安全性評価について紹介する。

車両試験装置は車両(車輪)を載せた軌条輪を回転させることで走行を模擬するもので、鉄道総研が保有する装置を持つ主な機能、およびこれを活用して実施する試験における評価対象を表1に示す⁶⁾。本装置で実施する走行安定性確認試験では、軌条輪を高速で回

転させた場合の蛇行動限界速度を評価するのが一般的であり、これまでも、高速車両用ボルスタレス台車の実現などに貢献してきた。

一方、車両運動および車輪・軌条輪間の接触モデルを連携させた「数値車両試験台」の構築に取り組んでいる。具体的には、有限要素モデル(FEM)等を活用した高精度な車輪・軌条輪接触力計算シミュレーションと、車両全体の運動を模擬するマルチボディダイナミクスモデルといったスケールが全く異なる複数のモデルを連携させ、実試験と同等の時間で蛇行動限界速度の評価を可能とする手法の開発を進めている(図6)。

フィジカル技術としての車両試験装置は、構築したシミュレーション結果と精度を比較するなど、妥当性検証のための用途に活用するほか、実際の装置で容易には実現できない条件や、パラメータスタディなどの検討を数値車両試験台での仮想試験で代替するなど、双方を組み合わせることで、検証試験の補完や効率化をめざす。

さらに、将来的には数値車両試験台で得られた知見や成果を反映して、車両がレール上を走行する精緻なシミュレータを構築することができれば、たとえば、これまで検討事例が少ない車輪やレールの摩耗を考慮した条件における走行安定性の評価も可能となるほか、

表1 車両試験装置の概要

使用機能	評価対象	備考
高速回転(軌条輪)	走行安定性	最高速500km/h
加振(アクチュエータ)	乗り心地	各軸左右・上下・ロール
負荷(フライホイール)	駆動性能	車両側(輪軸)を駆動

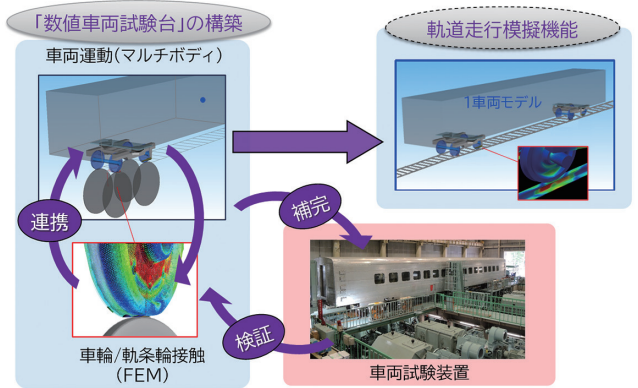


図6 車両試験装置とシミュレーションの融合イメージ

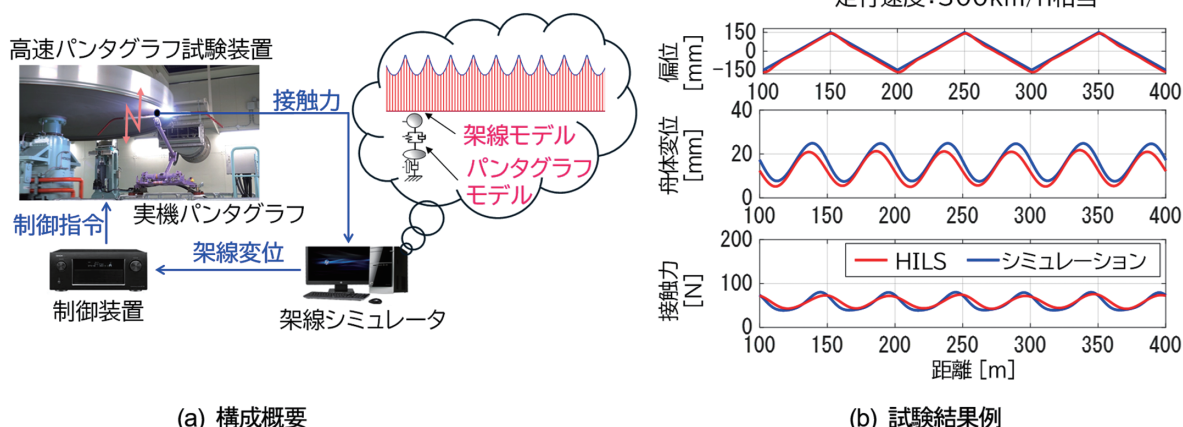


図7 集電系HILS

振動乗り心地など、快適性評価への活用も期待される。

今回取り上げた数値車両試験台を含め、高度な試験装置・シミュレーション技術の連携により、評価の精緻化や境界領域を含む課題解決を加速していきたい。

3.5 架線・パンタグラフ連成問題への対応【F】

前述の課題③④に対応し、「フィジカル技術」と「シミュレーション技術」の相互補完により高度化をめざす点では前節と同様であるが、ここではさらに両者を「リアルタイム」で連成させる集電系HILSについて紹介する。

HILSとはHardware in the Loop Simulationの略で、集電系HILSは、図7(a)に示す通り、実機パンタグラフと架線の運動を模擬する高速パンタグラフ試験装置とその制御装置、および試験装置の模擬架線部分の目標変位を計算する架線シミュレータにより構成される。

高速パンタグラフ試験装置は、模擬架線を最高速度500km/hで回転させながら、上下方向、左右(円周直角)方向に任意波形で加振する機能を備える。一方、架線シミュレータは、架線(トロリ線、ちょう架線、ハンガー等)を物理モデルで表現したもので、集電系HILSでは実測した架線・パンタグラフの接触力を入力し、試験装置の模擬架線の目標変位を出力する。この処理をリアルタイムで行うことで、実際に走行することなく、架線・パンタグラフの動的挙動を実態に即して検討することが可能となる。ここで、試験装置に与える目標変位に対して、実際に発生する変位には遅れの発生が避けられないため、加振器の制御には、ブリストル大学との共同研究の成果として、DSS(dynamically substructured system)制御と呼ばれる手法に基づく技術を導入し、解決をはかった⁷⁾。

図7(b)は試験結果の一例を示したもので、現時点で、

パンタグラフと架線の連成については、上下方向のみを考慮した試験が実施可能であるが、今後は、左右方向偏位や、編成内の複数パンタグラフの挙動を評価できるシミュレーションモデルを組み込む予定である。集電系HILSの実現により、シミュレーション単独では表現困難な現象の再現や、実車走行試験によらず効率的に試験の実施が可能となるという利点を活かし、集電システムの性能向上に寄与できるものと期待している。

今回紹介した集電系HILSを含め、高度な試験装置・シミュレーション技術の連携をさらに高度化し、評価の対象範囲拡大や、単独技術では困難な課題の解決を加速していきたい。

3.6 水素燃料電池車両の社会実装支援の取り組み【K】

鉄道分野における脱炭素化は喫緊の課題であり、鉄道総研でも、蓄電池車両の開発、バイオ燃料の適用検討、水素燃料電池車両の開発など、種々の取り組みを進めている。ここでは、前述の課題⑤に対応し、コア技術の高度化の方向性「ナレッジ活用」の事例として、水素燃料電池車両の社会実装支援への取り組みについて紹介する(図8)。

水素燃料電池車両に関しては、技術開発に加え、鉄道での使用環境に対応した技術基準等の整備が望まれていた。鉄道総研では、2000年代前半から燃料電池車両に関する開発を進めており、これまでに蓄積した試験車両における知見等に基づき、水素燃料電池車両の安全性評価としてリスクアセスメント、水素放出のシミュレーション等を実施し、これらを踏まえて、車両が備えるべき安全対策の提案を行った⁸⁾。

これらの提案は、2025年4月に施行された水素燃

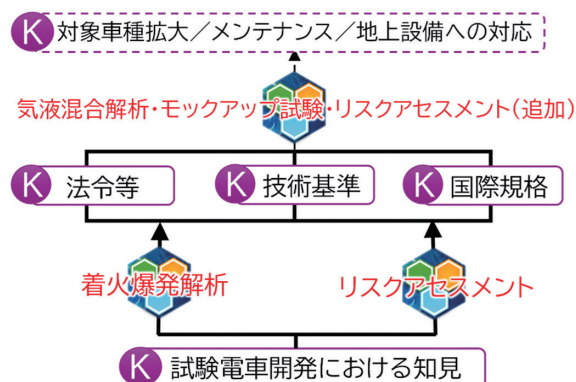


図8 水素燃料電池ハイブリッド試験電車と社会実装に向けたナレッジ活用

料電池鉄道車両に関する省令・告示の改正等に反映されたほか、容器や附属品に関する技術指針についても、高压ガス保安協会より2025年8月に容器保安規則に規定する機能性基準に適合するものと認定された。

水素燃料車両に関しては、今後も水素容器位置の多様化、水素エンジンや複数の動力源をもつマルチモード車両への適用、メンテナンス基準、地上側の水素ステーションの設置などに関する検討が求められるものと想定している。

脱炭素化は社会からの要請が高い喫緊の課題であり、引き続き技術開発や技術基準の策定支援を進めるとともに、他の分野においても、技術基準等といった既存のナレッジの活用によるコア技術の高度化、新たに生み出されたナレッジの再活用によるスパイラルを実現し、社会実装に貢献していきたい。

4. コア技術の高度化による持続的な鉄道システムの創造に向けて

少子高齢化等による生産年齢人口の減少を背景とした技術員や運転士の不足や、安全性、利便性の向上、自動運転や脱炭素化の実現といった社会的要請が高い課題の解決に向け、本講演では、車両・電気分野の研究開発のコア技術に着目し、その概要や高度化による諸課題の解決に向けて鉄道総研が取り組むべき課題について整理するとともに、取り組み事例について述べた。

紙面の都合上、今回紹介できたコア技術とそれに対応したその高度化の方向性は一例であるが、鉄道総研では、持続可能な鉄道システムの創造に向けて、今後も関係省庁、鉄道事業者、研究機関・大学やメーカー等と連携し、保有するコア技術の高度化による課題解決、新技術の社会実装を通して、鉄道事業に貢献する

取り組みを推進する所存であり、引き続きご支援とご協力をお願いしたい。

※水素燃料電池試験電車の開発の一部は、国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて実施しました。

参考文献

- 1) 石田誠, 石田弘明, 伴巧, 車輪／レールに関する大型実験設備, RRR, Vol.61, No.6, pp.8-13, 2004
- 2) 潮見俊輔, 重盛壮平: 転てつ装置におけるフロントロッド肘金の折損防止に向けた取り組み, JREA, Vol.68, No.8, pp.69001-69004, 2025
- 3) 関山瞬太郎, 久保田淳司, 西本翔, 太田佑貴, 北野隆康, 藤田浩由, 中村英夫: 安全確認型列車制御システムの検討, 電気学会 自動車／交通・電気鉄道合同研究会資料, TER-24-071, 2024
- 4) 関山瞬太郎, 久保田淳司, 西本翔, 北野隆康, 藤田浩由: 安全確認型列車制御システムでの停車場構内における安全確保の考え方, 電気学会 リニアドライブ／交通・電気鉄道合同研究会資料, TER-25-007, 2025
- 5) 太田佑貴, 祇園昭宏, 西本翔, 櫻井勇輝: 状態情報をつないで迅速な運行判断を支援する, RRR, Vol.82, No.1, pp.34-39, 2025
- 6) 石栗航太郎: リニューアルした車両試験台, RRR, Vol.72, No.11, pp.8-11, 2015
- 7) 小林樹幸, 小山達弥, 原田智: 高速パンタグラフ試験装置を用いた集電系ハイブリッドシミュレーション手法, 鉄道総研報告, Vol.35, No.12, pp.47-52, 2021
- 8) 水素燃料電池車両の安全性評価, 2025年度鉄道総研技術フォーラム, <https://www.rtri.or.jp/events/forum/2025/echr2f000000096c-att/forum2025>