特集：車両技術

車両技術に関する研究開発の動向

石毛 真*

Research and Development Trends Related to Vehicle Technology at RTRI

Makoto ISHIGE

In the organizational reform of RTRI on April 1, 2022, Vehicle Structure Technology Division and Vehicle Control Technology Division were merged to restart as Vehicle Technology Division. The aim is to respond efficiently and promptly to the increasing sophistication and diversification of needs, such as the application of digital technology in vehicle technology, response to decarbonization, and overseas expansion including international standards. Accordingly, to attain the aim of the organization reform, the new division, Vehicle Technology Division, is working on research and development by integrating mechanical and electrical systems. This paper gives an overview of the status of recent activities related to vehicle technology at RTRI.

キーワード：車両技術，走行安全性，脱炭素，異常検知，乗り心地

1. はじめに

鉄道総研は2022年4月1日に組織改正を行い、従来車両関係の研究開発を担当していた車両構造技術研究部と車両制御技術研究部を統合し、車両技術研究部を新設した。車両技術におけるデジタル技術の適用、脱炭素化への対応、国際規格をはじめとする海外への展開等、ニーズの高度化・多様化に効率的かつ迅速に対応するため、従来二つの研究部に分かれていた機械系と電機系が今後は一体となって研究開発を実施していく。

本稿では、基本計画RESEARCH 2025の研究開発の4つの目標である、安全性の向上、低コスト化、環境との調和、利便性の向上それぞれについて、車両技術に関する取り組み状況を概観する。

2. 安全性の向上

2.1 走行安全性評価

新線あるいは新形式車両の脱線に対する走行安全性の評価は、専用の車輪にひずみゲージを貼付し、輪重および横圧を測定して脱線係数（横圧÷輪重）を用いて行われるが、輪軸の準備や台車への装架など、費用や労力を要することから簡易な走行安全性評価手法の実現が望まれる。一手法として、慣性測定装置や変位計により測定可能な台車挙動データを用いて輪重と横圧を推定する手法の検討を進めている¹⁾。

従来の輪重、横圧測定法においては、輪重作用位置が左右方向にシフトした場合に、横圧測定精度が低下し得るという課題がある。そこで、車輪板部側面の曲げひず

みを用いて横圧を測定する従来手法に代えて、輪重測定用の孔内部のせん断ひずみを横圧の尺度とすることで、輪重の影響が小さくなる手法を提案している²⁾。

走行安全性の評価に際しては、脱線係数が目安値を超過する場合があるが、直ちに脱線に結びつくとは限らない。そこで、脱線係数の時系列履歴を考慮した「脱線係数の距離累積値」を新たな走行安全性の評価指標として提案している。これにより、乗り上がり脱線に対する安全余裕度をより精度よく評価できる可能性がある³⁾。また、脱線係数と車輪上昇量を併せて評価する乗り上がり脱線評価手法も提案している⁴⁾。

さらに、ひずみゲージ出力に演算処理を施し連続的な測定を行う新連続輪重横圧測定法の装置の老朽化、陳腐化が著しいため、新しい処理装置およびスリップリング装置の開発を進めている⁵⁾。

2.2 走行安定性評価⁶⁾⁷⁾

車両の高速走行安定性を評価する際、車両試験装置を用いてだ行動限界速度を求めるいわゆるだ行動試験が実施される。試験において外乱として与える加振条件が異なると、だ行動限界速度も変わることが経験的に知られており、加振方法の差異がだ行動限界速度に与える影響の評価を行った結果、加振後の輪軸初期振幅とだ行動発生速度の関係を表すだ行動限界曲線が存在することを明らかにした。解析により効率的にだ行動限界曲線を求める手法の開発を進めている。

2.3 編成前後振動⁸⁾

編成車両間の連結器に作用する力（自連力）は、列車座屈に関する主要なパラメータである。一方で、連結器を介した車体前後振動の伝達が乗り心地にも影響するこ

* 車両技術研究部長

とから、自連力の数値解析手法を拡張し、空転制御などにより変動する駆動力を与えた場合の車体前後振動加速度の解析モデルを作成した。この解析モデルは、トルク変動に起因する車体前後振動を考慮した主電動機制御系の設計などへの活用が考えられる。

2.4 非破壊検査

超音波探傷に関して、探傷結果を可視化した断面画像として得られるフェーズドアレイ法の適用を検討した。フェーズドアレイ法を鋼板に適用した場合のきず検出性能について検証し、従来の探傷法に比べて、傾斜したきずの検出について優位性があることを示した⁹⁾。

2.5 衝突安全性

国内では衝突条件や車両の衝突安全性を評価するための指標が明示されていない。そこで、過去の踏切衝突事故事例に基づいて衝突条件を設定し、衝突解析および乗客の傷害度解析を行って車体減速度と乗客傷害度の相関を検証し、車両の衝突安全性に関する評価指標とその目安値を提案している¹⁰⁾。

2.6 火災

鉄道車両火災発生時の乗客の安全な避難誘導や車両構造面での対策を検討するためには、車両における火災性状の把握が重要である。その基礎検討として、車両客室内の火災を想定し、可燃物の燃焼性状と火源の規模の把握を目的とした燃焼試験および汎用火災解析コードFDSを用いた燃焼試験の再現解析を実施している¹¹⁾。

2.7 ブレーキ制御

ブレーキ距離の安定化を目的として、現状のブレーキシステムに列車の減速度をフィードバックして一定の目標値に追従させる「減速度制御」をさらに改良し、ブレーキ距離に基づいて減速度の目標値を逐次更新する機能を追加した「距離基準減速度制御」を提案した。走行試験の結果、意図的にブレーキ力を低下させる条件においても高いブレーキ距離の精度を確認した。今後、速度の精度が制御性能に及ぼす営業を把握するとともに制御の安定化を図り、実用に向けた検討を進めていく¹²⁾。

3. 環境との調和

3.1 脱炭素化

持続可能なエネルギー社会に寄与するため、鉄道車両のエネルギー源の多様化が求められており、燃料電池ハイブリッド電車の研究開発を行っている。電車相当の加速性能に向上させ、客室空間を確保するため、燃料電池および蓄電池の出力向上と主回路系装置の小型化を行っ

た。今後、パワーフロー制御の高度化や、車両試験台を用いた模擬路線走行による燃費や効率などのエネルギー評価などを行っていく¹³⁾。

3.2 EMC

信号装置とインバータ装置の組み合わせは多数に及び、鉄道車両の完成検査の一つである直達ノイズ試験の結果を予測しにくくしている。そこで、直達ノイズが信号装置へ与える影響について定量的なモデル化を行い、車両完成前のインバータとモータの組み合わせ試験において漏れ電流上限値を測定、比較することで、直達ノイズ試験の事前確認を可能とする手法を構築した¹⁴⁾。

3.3 騒音

駆動装置の歯車騒音の主たる加振源と考えられる歯車のかみ合いによる変動力の低減策として歯接触面形状の適正化があるが、加工コストが増加する欠点がある。そこで、減衰性能が高く歯面のなじみ性も良好な高強度球状黒鉛鋳鉄を用い、製作コストの多くを占める最終歯研工程を省略可能とする歯車の開発を進めており、実機歯車により大幅な騒音低下を確認した¹⁵⁾。

4. 低コスト化

4.1 蓄電池劣化予測手法¹⁶⁾

鉄道車両の駆動用あるいは制御回路用として採用されるリチウムイオン電池の信頼性を確保するためには、劣化を的確に予測し、適切なタイミングで交換を行う必要がある。高精度な劣化予測のために実使用条件での電池温度変動を考慮した容量予測式を提案し、実際の電池を用いた加速劣化試験により、電池容量と内部抵抗を長期間高精度に予測可能であることを確認した。今後は、駆動用途において無視できないサイクル劣化に関する予測手法について検討していく。

4.2 異常検知手法

車両搭載機器の異常検知に関する取り組みが盛んに行われている。異常検知のためには何らかの物理量を捉える必要があり、機器の動作、制御のための既設センサがある場合はそのデータを活用できる。取り組みの一例として、ディープラーニング手法を用いて、車両機器のモニタデータから異常を自動的に判断する手法を提案している。気動車の機関停止事象および機関オーバーヒート事象に適用を試みた結果、いずれも事象発生以前に異常を把握することが可能であった¹⁷⁾。

物理量を取得するためのセンサを追設あるいは仮設して異常検知を行う取り組みとして、振動のオクターブバンド分析と機械学習を組み合わせた状態監視手法の開発

を行っている。一つは気動車変速機中に異物が混入し内部の異常摩耗による異常振動の発生を検知するものである。異常模擬試験の結果、異物の濃度に関わらず高周波数帯で異常が検知されること、振動の測定箇所に関わらず異常検知が可能であることを確認した¹⁸⁾。もう一つは主電動機軸受の異常診断であり、一般的な軸受振動ではなく、主電動機の漏洩電流に適用し、定置試験により無負荷の特定条件下で軸受の異常を検知できることを確認した¹⁹⁾。

4.3 摩擦材特性評価

ブレーキ摩擦材の最終的な性能評価においては、実物大台上試験の実施が必要不可欠であるが、高温時の摩擦材の評価に着目すると、膨大な時間と労力を費やす試験となる。そこで、簡易に摩擦材を評価する手法として、摩擦材に含まれる固体潤滑剤の熱的変化と摩擦係数の関係を実験的に調査・分析し、基材耐熱性の評価手法を提案した²⁰⁾。今後、ブレーキ摩擦材の開発プロセスにおいて、摩擦材選択の基礎試験として活用していく。

5. 利便性の向上

5.1 乗り心地向上

5.1.1 車体傾斜制御

制御付き自然振子車両の乗り物酔い低減のため、従来のステップ状の指令に代わり実際の曲線の形状に合わせた傾斜制御指令と、それを実現可能な振子制御アクチュエータの開発を行ってきた²¹⁾。さらに、従来のATS地上子と速発累積距離による位置補正に代わり、線路曲率照合による自車位置検出検知システムを開発²²⁾し、これらを組み合わせて振子制御システムを構築した。今後実車への搭載が予定されており、振子車両の乗り心地向上が期待される。

また、新たな車体傾斜方式として、アクティブトーションバー式車体傾斜システムを開発した。振子台車並みの傾斜性能を、一般の台車とほぼ同等の台車構成で実現するもので、良好な傾斜制御性能と、アクチュエータフェール時の安全性について、ベンチ試験にて検証を実施済である。現車での性能確認の実施が期待される²³⁾。

5.1.2 上下制振制御システム

新幹線は、以前と比べて左右方向の乗り心地が大幅に向上し、乗客は左右よりも上下方向の振動を感じやすい傾向にある。現状以上に乗り心地を向上するためには、車体上下振動の低減が効果的であると考えられる。そこで、可変減衰軸ダンパおよび可変減衰上下動ダンパを組み合わせた上下制振制御システムを開発している。1車両の試験台試験により、車体上下剛体モード、上下1次曲げモードおよびロールモードの振動を同時に減減させ

る効果が高く乗り心地を向上できることを確認した²⁴⁾。

5.1.3 車体振動低減

鉄道車両のさらなる乗り心地向上のため、車体弾性振動の低減が求められている。振動低減手法を効率的に検討するために、車体の三次元的な変形状を伴う弾性振動を扱うことができる拡張箱形モデルと、そのパラメータを粒子群最適化を用いて機械的に効率よく決定する方法を提案している²⁵⁾。

具体的な振動低減手法としては、前述の上下制振制御システムの他に、アクティブマスダンパを用いた手法²⁶⁾や、床下機器を弾性支持することによって動吸振器として用いる手法²⁷⁾の検討を進めている。

5.1.4 車内騒音低減

鉄道車両の車内騒音は固体伝搬音や透過音によって発生する。固体伝搬音については、床板振動を低減させるため浮き床構造が実用化されているが、低周波域については課題がある。そこで、床板を振動の少ない側構体から吊り下げる構造（吊り床構造）を開発し、定置加振試験により、数百 Hz 以下の周波数域における床板の振動低減効果を確認した²⁸⁾。

5.2 高速化

5.2.1 ボギー角操舵システム

高速走行安定性と曲線通過性能を両立させるため、高速走行時はヨーダンパとして機能し、急曲線走行時はアクチュエータとして車体台車間に操舵モーメントを発生させるボギー角操舵システムの開発を行った。所内試験線において横圧低減効果と、試験台試験において高速走行安定性に影響しないことを確認した²⁹⁾。

5.2.2 ブレーキディスク

鍛鋼製ブレーキディスクの耐熱性向上のため、強固な肉盛層形成が可能なレーザ粉体肉盛溶接法を摩擦面に適用した。実物大ディスクの台上試験により、現用ディスク材に比べて高温強度が高いこと、耐摩耗性が向上することを確認した³⁰⁾。

6. まとめ

本稿では鉄道総研における最近の車両関係の研究開発の取り組み状況を紹介した。今後は機械系と電機系の研究開発を融合させ、より安全でより快適な鉄道車両の実現、さらに効率的な鉄道システムによる脱炭素化の実現、デジタル技術の適用による保守省力化の実現を目指していく。

文献

1) 飯田忠史：台車挙動測定による走行安全性評価手法，鉄道

- 総研報告, Vol.34, No.5, pp.23-28,2020
- 2) 本堂貴敏, 國行翔哉, 田中隆之, 鈴木貢: 輪重測定用孔内部のせん断ひずみを活用したPQ輪軸による横圧測定法, 鉄道総研報告, Vol.35, No.9, pp.11-16,2021
 - 3) 土井久代, 石田弘明, 宮本岳史: 脱線係数と車輪上昇量に基づく低速走行時の乗り上がり脱線の走行安全性評価, 鉄道総研報告, Vol.34, No.8, pp.29-34, 2020
 - 4) 中橋順一, 三宮大輝, 福村将彦: 車輪上昇量を勘案した乗り上がり脱線評価手法, 鉄道総研報告, Vol.33, No.3, pp.5-10, 2019
 - 5) 鈴木貢, 遠竹隆行, 本堂貴敏, 國行翔哉: 汎用計測機器を用いた省力化連続PQ測定システムの開発, 鉄道総研報告, Vol.33, No.8, pp.17-22, 2019
 - 6) 山長雄亮, 木戸和哉: 蛇行動限界速度評価における加振条件の影響, 鉄道総研報告, Vol.32, No.8, pp.35-40, 2018
 - 7) 山長雄亮: 周期解計算手法を用いた蛇行動安定性解析, 鉄道総研報告, Vol.36, No.2, pp.5-10, 2022
 - 8) 坂本裕一郎, 山下道寛: 編成電車の駆動力変動試験に基づく車体前後振動解析, 日本機械学会論文集, Vol.87, No.895, 2021
 - 9) 牧野一成: 鋼材表面に対して傾斜したきずに応用する超音波探傷について-従来UTとPAUTとの比較-, 溶接技術, Vol.41, No.10, 2021
 - 10) 沖野友洋, 永田恵輔, 中井一馬, 小林秀敏: 乗客傷害度と相関が高い車体減速度積分値を用いた衝突安全性評価法, 鉄道総研報告, Vol.34, No.12, pp.29-34, 2020
 - 11) 高野純一, 石突光隆, 山内雄記, 山中翔, 豊原匡志: 鉄道用腰掛燃焼試験とFDSによる再現解析の実施, 第26回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, S6-4-4, 2019
 - 12) 中澤伸一: 減速度フィードバックの機能追加によるブレーキ距離精度の向上, 鉄道総研報告, Vol.34, No.12, pp.11-16, 2020
 - 13) 小川賢一, 米山崇, 須藤貴幸, 柏木隆行, 山本貴光: 燃料電池ハイブリッド試験電車の高性能化, 鉄道総研報告, Vol.34, No.5, pp.5-10, 2020
 - 14) 廿日出悟: 鉄道車両の直達ノイズ事前確認試験の開発, 鉄道総研報告, Vol.35, No.8, pp.41-46, 2021
 - 15) 笹倉実: 高強度球状黒鉛鋳鉄を適用した低騒音型歯車の性能評価, 鉄道総研報告, Vol.34, No.5, pp.17-22, 2020
 - 16) 田口義晃, 門脇悟志, 吉川岳: 温度変動に対応した鉄道車両用リチウムイオン電池の劣化予測手法, 鉄道総研報告, Vol.36, No.2, pp.29-34, 2022
 - 17) 横内俊秀, 高重達郎, 近藤稔: 鉄道車両におけるモニタータを用いた機器の異常検知, 鉄道総研報告, Vol.36, No.2, pp.23-28, 2022
 - 18) 高重達郎, 堺谷洋, 山本真, 横内俊秀: 変速機の振動を用いた異常摩耗状態監視手法の検証, 鉄道総研報告, Vol.34, No.12, pp.17-22, 2020
 - 19) 堺谷洋, 近藤稔, 高橋研: 主電動機軸受の漏洩電流を用いた異常検知手法, 鉄道総研報告, Vol.33, No.3, pp.29-34, 2019
 - 20) 西森久宜, 狩野泰, 阪井章悟, 辻貴史: 銅系焼結合金摩擦材の基材耐熱性が摩擦係数に与える影響評価手法, 鉄道総研報告, Vol.35, No.8, pp.5-10, 2021
 - 21) 石栗航太郎, 風戸昭人, 下条智洋, 味岡将広, 久保秀夫: 応答性と安定性を両立する振り車両制御用空気圧アクチュエータ, 2022年春季フルードパワーシステム講演会, 2022
 - 22) 原田康平, 真木康隆, 風戸昭人, 石栗航太郎: 空間フィルタを用いた線路曲率照合による自車位置検出システムの開発, 鉄道総研報告, Vol.33, No.10, pp.5-10, 2019
 - 23) 風戸昭人, 小島崇, 石栗航太郎, 井出知良: フェールセーフ性を向上したアクティブトーションバー式車体傾斜システム, 鉄道総研報告, Vol.35, No.8, pp.23-28, 2021
 - 24) 菅原能生, 三宮大輝, 宮原宏平, 天野歩: 1次および2次ばねの変減衰ダンパを用いた鉄道車両の上下振動低減, 第28回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, SS1-3-3, No.21-72, 2021
 - 25) 秋山裕喜, 瀧上唯夫, 相田健一郎: 車体の三次元弾性振動解析モデルのパラメータ決定手法, 鉄道総研報告, Vol.34, No.5, pp.29-34, 2020
 - 26) 秋山裕喜, 瀧上唯夫, 横田耕伸: アクティブマスダンパを用いた鉄道車体の回転機振動低減手法の提案, 鉄道総研報告, Vol.35, No.8, pp.29-34, 2021
 - 27) 相田健一郎, 瀧上唯夫, 秋山裕喜: 床下機器弾性支持質量の違いによる車体弾性振動低減効果の検証, 鉄道総研報告, Vol.36, No.2, pp.11-16, 2022
 - 28) 後藤友伯, 山本克也, 朝比奈峰之: 車内騒音の固体伝搬音低減のための吊り床構造の開発, 鉄道総研報告, Vol.31, No.6, pp.41-46, 2017
 - 29) 小島崇, 梅原康宏, 鴨下庄吾, 本堂貴敏: 曲線通過性能を向上するボギー角操舵システムの開発, 鉄道総研報告, Vol.35, No.8, pp.17-22, 2021
 - 30) 嵯峨信一, 高見創, 坂本泰明: 新幹線速度向上対応ブレーキシステムの開発, 鉄道総研報告, Vol.35, No.8, pp.11-16, 2021