

特集：車両技術

# 車両技術に関する最近の研究開発

石毛 真\*

Recent Activities for Research and Development of Vehicle Technology

Makoto ISHIGE

RTRI is engaged in R&D focusing on enhancing safety based on the Master Plan RESEARCH 2025. In the vehicle field, about 40 themes are implemented annually, targeted at safety improvements and cost reduction. This paper introduces four topics from the recent achievements related to vehicle technology: running stability evaluation, brake control method, battery degradation evaluation method, and development of train positioning system.

キーワード：車両，蛇行動，ブレーキ制御，電池劣化評価，車体傾斜，自車位置検出

## 1. はじめに

鉄道総研では、中期の経営計画である5か年の基本計画を定め、事業運営を行っている。2021年度は基本計画—鉄道の未来を創る研究開発—RESEARCH2025の2年目であり、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)総合力を發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、利便性の向上の4つを設定している。

車両分野の研究開発は、車両構造技術、車両制御技術、鉄道力学の3研究部に属する9研究室が主に担っており、毎年度40件程度の研究開発テーマを実施している。2020年度、2021年度の研究開発の目標別のテーマ件数を図1に示す。安全性の向上が4割程度を占め、最重要実施項目となっている。続いて低コスト化が2割から3割弱、環境との調和、利便性の向上が2割弱となっている。2020年初からの新型コロナウイルス感染症拡大の影響を受けて、鉄道事業は過去に類を見ない大変厳しい状況にあり、今後の動向が不透明な中、鉄道を維持・発展させるために、業務の無人化、省人化、省力化などによる鉄道システムの革新が喫緊の課題となっており、研究開発の成果を通じた貢献が求められている。このような状況のもと、車両系の研究開発テーマにおいても、低コスト化を目標とするものが増えており、今後安全性の向上との二本柱になっていくものと思われる。

本号は、8件の特集論文で構成されるが、それ以外の最近の研究開発の成果として、本稿では「蛇行動安定性解析手法」「ブレーキ力の低下を補償するブレーキ制御手法」「制御回路用リチウムイオン電池の劣化評価手法」

「車体傾斜車両向け高精度自車位置検出システム」について概略を紹介する。

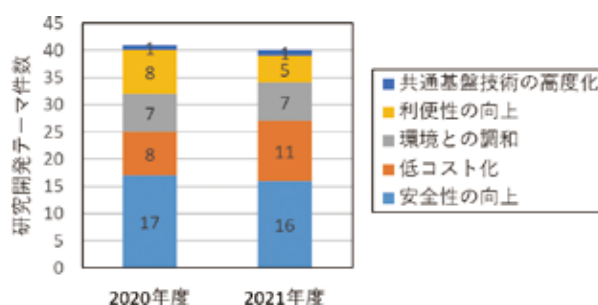


図1 研究開発の目標別のテーマ件数

## 2. 蛇行動安定性解析手法<sup>1)</sup>

鉄道車両に固有の振動現象である蛇行動について、その発生速度を確認するいわゆる蛇行動試験が車両試験装置において行われる。この試験では加振条件によって蛇行動発生速度が異なることが明らかになっている。この理由として加振によって生じる輪軸左右変位の振幅の大きさが一定の閾値を超えた場合に蛇行動が発生することが実験的に示された<sup>2)</sup>。この蛇行動の発生と収束を分ける境界線を蛇行動限界曲線(図2)と呼んでいるが、この曲線を解析的に求める手法について検討を行った。

輪軸の振幅が蛇行動限界曲線の上側では振動が発散して蛇行動に至り、下側では収束するが、蛇行動限界曲線直上においては、理論的には発散も収束もせず一定の周期と振幅を有する定常振動が存在することがわかった(図3)。そこで、多自由度非線形系の周期解を求める方法の一つであるシューティング法を適用し、蛇行動限界曲線上の1点について、定常振動の振幅を解析的に算出する手法を構築した。この1点の解に基づいて、走行速度や周波数をパラメータとして次の1点を効率的に

\* 車両構造技術研究部長

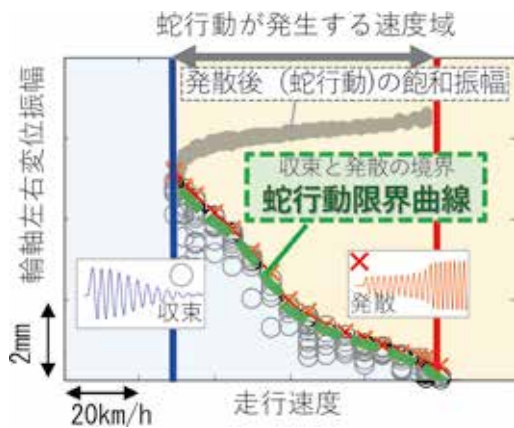


図2 蛇行動限界曲線

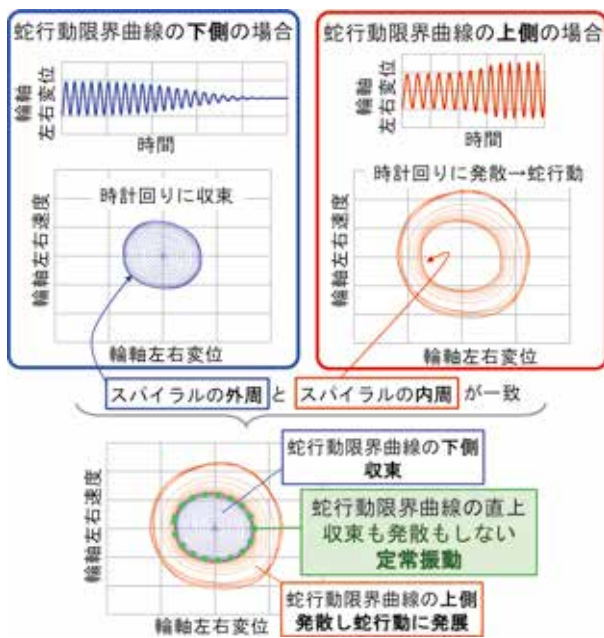


図3 蛇行動限界曲線上の定常振動

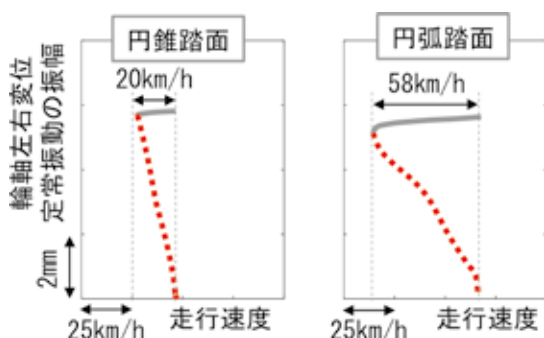


図4 蛇行動限界曲線計算例

求め、その繰り返しにより蛇行動限界曲線全体を求める手法を考案した。この手法を用いて、円錐踏面および円弧踏面の台車について、蛇行動限界曲線を解析的に求めた結果を図4に示す。踏面形状の違いにより、蛇行動が

発生する速度域に差があり、車輪レール接触において円錐踏面より非線形性が強い円弧踏面の方が蛇行動が発生する速度域が広がることわかった。

今後は、本手法の更なる精度向上を図るとともに、本手法を用いて、発散には至らないが小振幅の振動が継続するいわゆる小振幅蛇行動の発生要因の究明を行っていく予定である。

### 3. ブレーキ力の低下を補償するブレーキ制御手法<sup>3)</sup>

一般的な鉄道車両のブレーキシステムにおいては、ブレーキノッチごとに設定減速度が規定されている。車両重量の変動を補償する応荷重機能はあるものの、ブレーキ力の変動や車輪滑走、車両とは無関係な走行線路の勾配変化などの変動要素の影響は自動的に補償されない。これに対して、選択したブレーキノッチに対応する減速度を常に得ることを目的として、車両から減速度をフィードバックする制御系である「減速度制御」手法を提案してきたが、ブレーキ中にブレーキ力が急激に低下するような場合には、ブレーキ距離の延伸を防ぐことが難しく、これを補償するためには、ブレーキノッチの再選択が必要であった。

そこで、ブレーキ中に減速度が低下してもブレーキ距離を延伸させないシステムの構築を目的として、ブレーキ距離に応じて減速度の目標値を逐次・自動的に更新して実減速度をこれに追従させる「距離基準減速度制御」を新たに提案した。提案手法では、ブレーキ制御系に追加された新たな制御装置がブレーキ指令または停止位置までの距離を受信すると、列車からフィードバックした速度に基づいて制御ブレーキ指令を更新しシステムに与える(図5)。これにより、列車の減速度を停止位置までの残距離から計算される目標値に追従させ、ブレーキ力が不足する場合には制御ブレーキ指令を逐次更新する(図6)。

所内試験線において、距離基準減速度制御を試験電車に適用し、ブレーキ距離の精度の比較を行った。初速度30km/hからブレーキを掛け、20km/hを下回ったときにブレーキ力を意図的に25%低下させる条件を設定し、健全な条件に対するブレーキ距離の延伸量を比較した。一般的なブレーキシステムでは延伸量が8.4mであったのに対して、距離基準減速度制御では延伸量を0.16mに抑制することができた。

本手法では、フィードバックされた列車速度から算出した減速度およびブレーキ距離を利用しているため、速度の精度が制御性能に大きく影響すると推定される。今後、速度の制御が制御性能に及ぼす影響を把握するとともに、制御の安定性向上を図っていく。

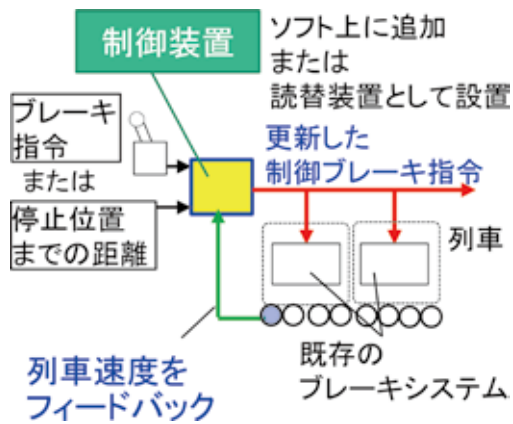


図5 距離基準減速度制御手法のシステム構成

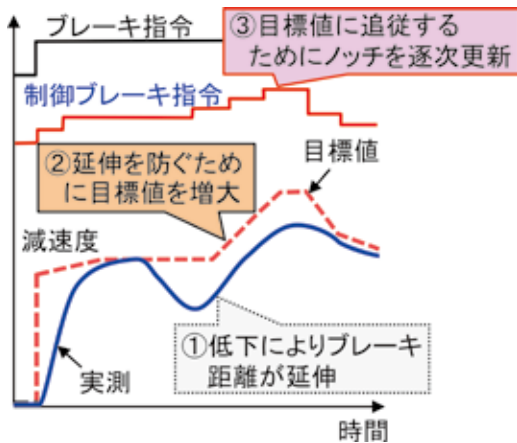


図6 距離基準減速度制御手法の制御動作

#### 4. 制御回路用リチウムイオン電池の劣化評価手法

非電化線走行や架線停電時の非常走行用として、電車に駆動用のリチウムイオン電池を搭載する例がある。一方で、新幹線車両の制御回路用の電池にも、従来の鉛蓄電池等に代わってリチウムイオン電池が採用される例がある。リチウムイオン電池は従来の電池に比べて高価である反面、長寿命化による保守の低減や、高エネルギー密度による小型軽量化が期待できる。

制御回路用リチウムイオン電池の信頼性確保と省保守化を目的として、基礎実験により電池の劣化傾向を把握し、その結果に基づいて電池の寿命予測や運用開始後の劣化診断を実現する劣化評価手法を開発した。

劣化傾向を把握する基礎実験については、電池周囲温度として実車両想定温度に10℃および20℃加算することで、劣化進展を等価的に3倍、9倍に早める加速試験を行った。実験結果に基づき、電池容量および内部抵抗の経年変化を予測する手法を構築した。電池容量について、予測手法に基づく予測値と実測値の比較を図7に示

す。実測値のプロットに対して、予測値の実線は高い精度で一致することを確認した。

制御回路用電池の交換時期を決定する際には、運用開始後の実際の劣化度が重要な判断材料となるため、運用中の電池の充放電データから劣化度を診断する手法<sup>4)</sup>をあわせて提案した。制御回路用電池の充放電波形はほとんどが単調な充電とセクション通過時の極短時間の放電の繰り返しであり、逐次最小二乗法やカルマンフィルタ等を用いる従来技術の適用が難しいため、車両加圧後のパンタグラフ上昇前後の放電と充電の波形を切り出して劣化診断に用いた。提案手法の有効性を確認するため、実験データとの比較を行った。提案手法による電池容量指標算定値と実測値との比較結果を図8に示す。縦軸の診断値は測定値の一次式でよく近似できた。これより、予めこの関係式を得ておくことにより、運用中のデータから得た劣化指標算定値を換算して劣化度を求めることが可能となる。

提案した電池劣化評価手法は車両制御回路の設計段階において同型蓄電池の寿命を試算する場合や、車両運用開始後の定期検査時等において蓄電池の余寿命を試算する際に活用可能である。

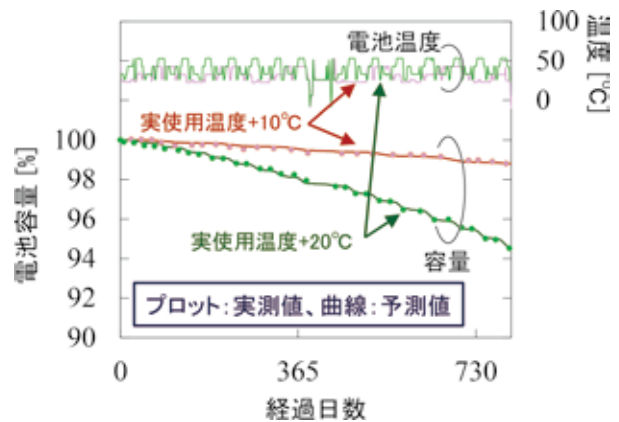


図7 容量予測値と実測値の比較

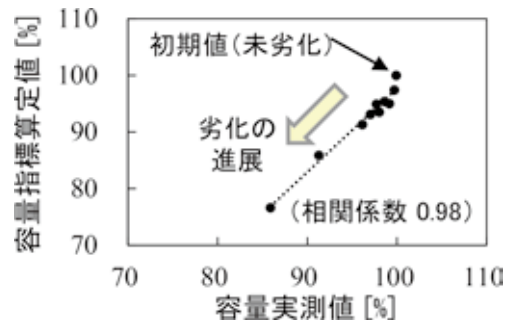


図8 容量指標算定値と実測値の比較

## 5. 車体傾斜車両向け高精度自車位置検出システム<sup>5)6)</sup>

振り式車両の車体傾斜動作に起因する乗り物酔いを抑制し、乗り心地を向上するために振り制御システムの改良に取り組んでいる。その基本となる要素技術は、車両の走行位置の正確な把握、曲線の形状と人間の感じ方を考慮した傾斜角度の計算、理想的な車体傾斜制御を実現する振りアクチュエータである。

車両の位置を正確に把握するための技術として、従来のATS地上子の位置を基準に走行位置を特定する手法に対して、線路曲率照合を用いる自車位置検出システム(図9)の開発を進めてきた。このシステムでは、車上で観測する走行速度と車体ヨーイング角速度から線路曲率を算出し、事前の走行で取得した線路曲率と比較することで自車位置を特定して位置補正を行う。車上で観測する線路曲率は、車体の振動特性や軌道変位による影響を受けるため、距離ベースのフィルタである空間フィルタを線路曲率データに適用することでこれらの影響を除去し自車認識位置精度の向上と車上データベースのメンテナンス頻度の低減を実現している。また、駅等において車上データベースの線路と異なる線路に進入した場合や、長距離の直線走行時等における精度低下の防止に加え、大規模な車輪滑走が生じた場合についても線路曲率照合による自車位置の認識を継続させる手法を開発した。このシステムを用いて、本線走行における位置検出精度の検証を行った結果、検出誤差 $\pm 2\text{m}$ 以内の精度で自車位置を特定できることを確認した(図10)。

今後は、振り制御システムの実車搭載に向けて、車体傾斜異常検出機能の検証試験を進めていく。なお、自車位置検出システムについては、空気ばね車体傾斜車両への適用も可能である。

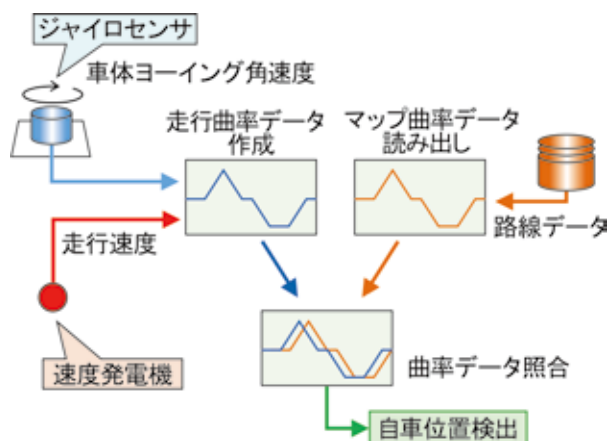


図9 自車位置検出システム

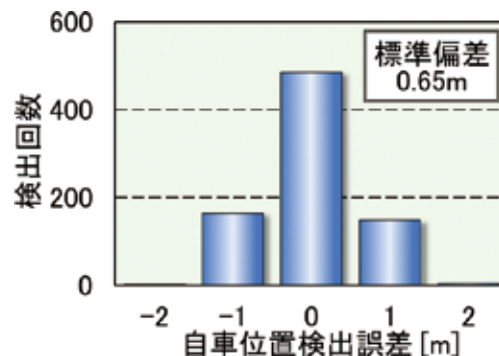


図10 自車位置検出誤差の分布

## 6. まとめ

本稿では、車両技術に関する最近の研究開発成果の中から、蛇行動安定性解析手法、ブレーキ制御手法、リチウムイオン電池の劣化評価手法、車体傾斜車両向け位置検出システムについて紹介した。将来的な少子化、労働人口減少の想定のもと、車両分野においても保守の省力化に資する研究開発が求められている。さらに、昨今のコロナ禍により、それらを強力かつ迅速に推進することが求められる状況となっている。そのような要請に応えるべく、安全性の向上と並ぶ研究開発の重要課題として省人化・省力化に資する研究開発に重点的に取り組んでいきたい。

## 文献

- 1) 山長雄亮：非線形性を考慮した蛇行動安定性解析，日本機械学会第29回交通・物流部門大会，1202，2020
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 田口義見，門脇悟志，吉川岳，加藤宏和，佐藤賢司，関野正宏，月原達也：鉄道車両制御回路用リチウムイオン電池の劣化診断手法基礎検討，令和3年電気学会全国大会，5-158，2021
- 5) 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
- 6) 石栗航太郎：線路曲率照合による自車位置検出システムの開発，第345回鉄道総研月例発表会，2021  
<https://www.rtri.or.jp/events/getsurei/2020/mr345.html>  
 (参照日：2021年6月10日)