

鉄道力学に関する最近の研究開発

曾我部 正道*

Recent Research and Development in Railway Dynamics

Masamichi SOGABE

This perspective introduces the latest research and development results of the numerical analyses and experimental tests of Railway Dynamics Division regarding overhead contact lines, railway vehicles, tracks and structures. These analyses and experiments include interaction analysis of the overhead lines and the pantographs, rolling contact analysis between the wheels and the rails, development of the wheel load decrement control bogie and development of the low cost ladder sleeper based on wheel load measurement. Furthermore this perspective introduces the development status of “Railway Simulator” using advanced HPC (High performance Computing), with the goal of clarifying dynamic phenomenon to optimize the railway system.

キーワード：鉄道力学，ダイナミクス，シミュレーション，相互作用，接触現象

1. はじめに

鉄道力学研究部は、平成12年7月の組織改正において、基礎研究部の車両、集電、軌道関係の研究者、技術開発本部の構造物、防災関係の技術者により、車両力学、集電力学、軌道力学、構造力学の4研究室を構成して発足した。基礎研究部での活動を踏まえて、鉄道固有の現象、境界領域問題、相互作用問題の解明を柱としつつも、新しい技術の提案や研究成果の技術基準への反映など、研究の出口を意識した応用、開発研究にも取り組むことを目標とした。平成24年4月からは、高性能計算（High-Performance Computing: 以下HPCという）への取り組みを強化するため、計算力学研究室を加えて5研究室体制で研究開発を推進している。

鉄道力学研究部は、車両、電力、軌道、構造物の各分野を主導する研究部と比較して、より基礎的、本質的な研究にリソースを割ける環境にあり、また分野横断的組織であるため、分野に跨る複雑な連成問題への取り組みも期待されている。

このような設立の経緯から鉄道力学研究部では、鉄道固有問題の動力学分野に関して、①鉄道事業者の課題解決に有用な独自の解析・測定技術を構築すること、②具体的な性能向上方策を提案すること、③HPCを用いた鉄道シミュレータを開発し鉄道総研全体の研究開発を促進すること、を活動の軸に研究を推進している。

本稿では、上記事項に関する最近の研究開発の状況を紹介する。

2. 独自の解析技術の開発

2.1 架線・パンタグラフシミュレータの開発

架線・パンタグラフシミュレータは、離線を抑制し、かつ接触力変動を低減できる新たなパンタグラフや架線構造の効率的な開発や、わたり線における割り込み事故等の原因究明に資することを目的に開発を進めている。ここでは、架線とパンタグラフの任意形状を三次元の有限要素で詳細にモデル化し、三次元の接触計算を行う手法が用いられている（図1）。

架線モデルは、架線の振動を表現するのに必要な構成要素をハンガ等の電車線金具に至るまで詳細に表現できること、幾何学的非線形性を考慮できること、架線張力や波動伝搬の影響を考慮できること、温度変化の影響を考慮できること、曲線を含む極めて複雑な実際の架線形状を主要諸元に基づき自動生成する機能を有すること等を開発目標としている。

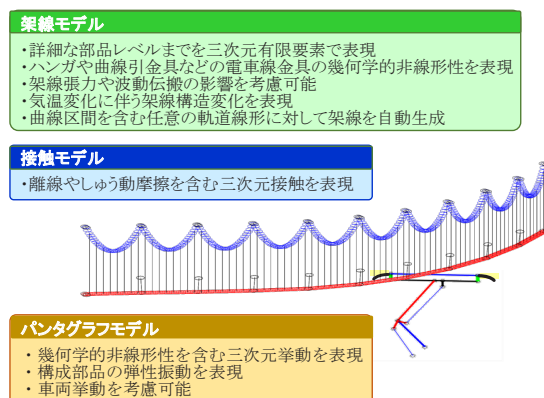


図1 架線・パンタグラフシミュレータ

* 鉄道力学研究部長

特集：鉄道力学

架線とパンタグラフの接触モデルは、高速走行時の離線やしゅう動摩擦を含む三次元接触を表現できることを開発目標としている。

パンタグラフモデルは、主要なパンタグラフ形式を対象として、部品単位での機構解析に加え、三次元のオイラー梁要素を用いて部品レベルでの弾性変形を再現できること、大変形時の幾何学的非線形を再現できること、パンタグラフを搭載する車両の挙動を考慮できること等を開発目標としている。

現在、架線モデル、パンタグラフモデルの構築が完了しており、これらを組み合わせた解析に向けて作業を進めている。具体的な開発状況については、特集論文を参照されたい¹⁾。

2.2 車輪とレールの転がり接触シミュレータの開発

車輪とレールの接触面には、法線力、接線力が生じるが、これは曲線においては増大し、またレール継目部等では衝撃的なものとなる。この接触力は、車輪やレールに微細な損傷や摩耗を発生させ、その蓄積が車輪の不整(偏摩耗やフラット)やレールのシェリング、き裂の発生や進展に寄与すると考えられている。

従来のMBDやFEMによる車輪とレールの接触評価では、接触面を理論的に表現したり、疑似的な食い込み量を仮定したりする手法が用いられてきたが、本シミュレータでは、前述の現象を、よりミクロな視点で本質的に解明するため、車輪とレールの接触領域(コンタクトパッチ)をmm単位のメッシュで分割したモデルとしている。車輪の回転を考慮しながら、動的な弾塑性解析を行うものであり、従来の手法では表現できなかった、劣化・損傷のトリガーとなる微細な領域における局所的な塑性化や摩耗を表現することを目指している。

本シミュレータは、東京大学奥田教授との共同研究により、大規模並列有限要素法構造解析ソフトウェアFrontISTRをベースに開発を進めている^{2) 3)}。

車両モデルは、1軸1輪、2軸2輪(片側)と段階的にモデル拡張を行い、平成29年度までに、劣化・損傷の要因の解明に必要な1台車(2軸4輪)の精密なFEMモデルを構築した(図2)。また1車両全体の挙動を表現するのに必要な車体及び対になる台車は、MBDで表して連成計算を行うことができる。

軌道モデルは、メッシュ間隔が小さいと同時に、緩和曲線やカントを有するため、モデル構築が複雑かつ膨大な作業となる。そこで必要な曲線諸元(曲線長、曲線半径、カント、緩和方法:3次放物線 or サイン半波長通減曲線)を入力すれば、複雑な曲線モデルを自動生成する手法を開発した。

数値計算法については、これまで安定性の高い直接法を用いてきたが、HPCによる大規模並列計算に適した、

自由度消去アルゴリズムを導入した反復法を新たに提案し、実モデル計算レベルで2倍の高速化を実現した。

本シミュレータの基本的な機能構築は平成29年度までに完了したため、平成30年度からは、本シミュレータを実研究テーマに供しながら成果を活用する。具体的には、接触位置、速度、乾湿、水分等の様々な条件に対する車輪とレール間の基礎的な接触メカニズムについて、模型試験を併用しながら検討を行う。また車輪フラットによる衝撃的な荷重の発生が、PCまくらぎや台車に及ぼす影響の観点から検討を行う。

本シミュレータの機能拡張としては、熱構造連成解析機能を付加し、車輪とレールや制輪子との摩擦熱についても表現できるように改良を進める予定である。

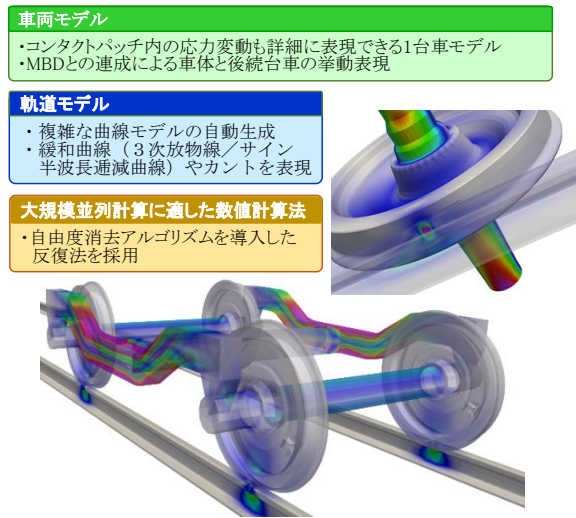


図2 車輪とレールの転がり接触シミュレータ

3. 具体的な性能向上方策の提案

3.1 輪重減少抑制台車の開発

急曲線の緩和曲線出口部のように軌道の平面性変位が大きい箇所では、台車内での車輪支持が、通常の4点支持から3点支持に近い状態に変化するが、この時、輪重が減少している車輪に横圧が作用すると、脱線に至るリスクが増加する。鉄道総研では、平面性の変化に対する台車の追従性向上による3点支持状態の改善を目的として、台車枠の側ばりと横ばりの接合部に回転機構を設けた輪重減少抑制台車の開発を行ってきた(図3)。

これまで、所内試験線において同台車の性能評価を実施してきたが⁴⁾、平成28年度には、外部の試験線において累計走行距離5,300kmの走行試験を実施し、通常の台車に比べて輪重減少率の最大値が3~4割小さくなる効果を確認した。詳細については特集論文を参照されたい⁵⁾。

輪重減少抑制台車の最も重要な構成要素は、その回転機構にあるが、今後、回転機構単体での摩耗試験、在姿

状態での摩耗試験を進め、実用化に向けて耐久性を検証する予定である。

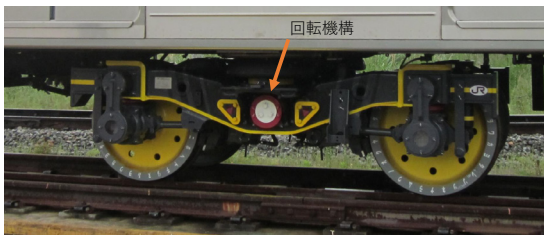


図3 輪重減少抑制台車

3.2 低廉な縦まくらぎの開発

縦まくらぎは、保守の省力化や環境性能向上を目的に開発されたもので、レールと平行に配置された2つのプレストレスコンクリート製の梁と、それらを結合する継材で構成されている。現在、JR3社、民鉄28社（総延長55.6km）で導入されているが、近年の車両の軽量化、ロングレール化、軌道整備及び車両整備技術の向上を踏まえ、更にリーズナブルな縦まくらぎが求められている。

そこで、近年の計測システムの飛躍的な向上を活かした多点計測システムを用いて、長期間の輪重測定を行うとともに⁶⁾、数値解析によりパラメータ感度を分析して、従来よりも小断面で低廉な縦まくらぎを提案した。この縦まくらぎについて試験体の強度試験や所内試験線での性能確認を実施した（図4）。詳細については、本誌の特集論文⁷⁾に示したが、低廉な縦まくらぎについては、今後、営業線に敷設しての長期耐久試験を予定している。



図4 低廉な縦まくらぎと所内試験状況

4. 鉄道シミュレータの開発

4.1 個別シミュレータの開発

鉄道総研では、鉄道に関わる研究開発の質の向上と効率化を図ることを目的として、列車の運行に伴って生じる様々な事象をコンピュータ上に再現可能な鉄道シミュレータの開発を進めている⁸⁾。鉄道シミュレータは、理論解析や実験・測定・観察が困難な鉄道固有問題について、HPC技術を活用して取り組むもので、より本質的な現象解明を目指している。

これを実現するための個別シミュレータとしては、前

述の架線・パンタグラフシミュレータ、車輪・レール転がり接触シミュレータを始めとして、車両運動シミュレータ、弾性軌道シミュレータ、駆動制御シミュレータ、バラスト軌道シミュレータ、空気流シミュレータ、地震災害シミュレータ、列車運行・旅客行動シミュレータ等、17種類の開発を進めている。

4.2 連成シミュレータの開発

連成シミュレータとは、異なる分野のシミュレーション技術を組み合わせて、分野横断的な問題の解明を行っていく手法である。メリットとしては、各分野で実績のある効率的な解析法を用いて、高速に実用的な解析が行えること、事象に含まれる相互作用の影響が評価できることが挙げられる。

前述の架線・パンタグラフシミュレータと車両運動シミュレータの連成、車輪・レール転がり接触シミュレータと車両運動シミュレータとの連成を始めとして、車輪・レール転がり接触シミュレータとバラスト軌道シミュレータの連成、地震災害シミュレータと車両運動シミュレータの連成等、10種類の開発を進めている。

4.3 共通プラットフォームの構築

これまで鉄道固有の研究用プログラムの多くは、開発者とその周辺のみでの利用に留まってきたが、鉄道シミュレータでは、実行環境やユーザーインターフェースを統合的に整備し、開発者以外の研究者にもシミュレータを提供することにより、研究開発業務の促進を目指している。具体的には、鉄道シミュレータの基盤となる高性能計算機及びネットワーク等の環境を整備するとともに、各研究室のユーザーが利用するためのインターフェースとなる共通プラットフォームを構築中である。

共通プラットフォームでは、各シミュレータを所定の手順で実行したり、解析処理状況をモニタしたりできる他、解析結果を統合可視化ツールにより表示可能である。

共通プラットフォーム上での個別シミュレータの実行については、現在、弾性軌道シミュレータ、架線・パンタグラフシミュレータ、電磁誘導シミュレータ等の7種が実装を終了しており、また、連成シミュレータの実行については、車輪・レール転がり接触シミュレータと車両運動シミュレータ、及び空気流シミュレータと空力音

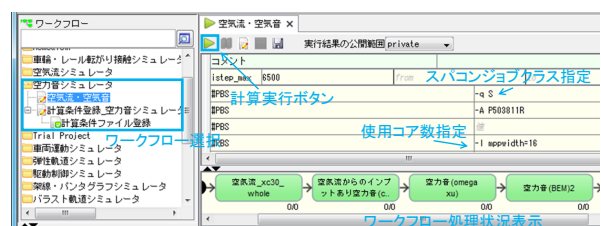


図5 共通プラットフォームにおける連成解析実行画面

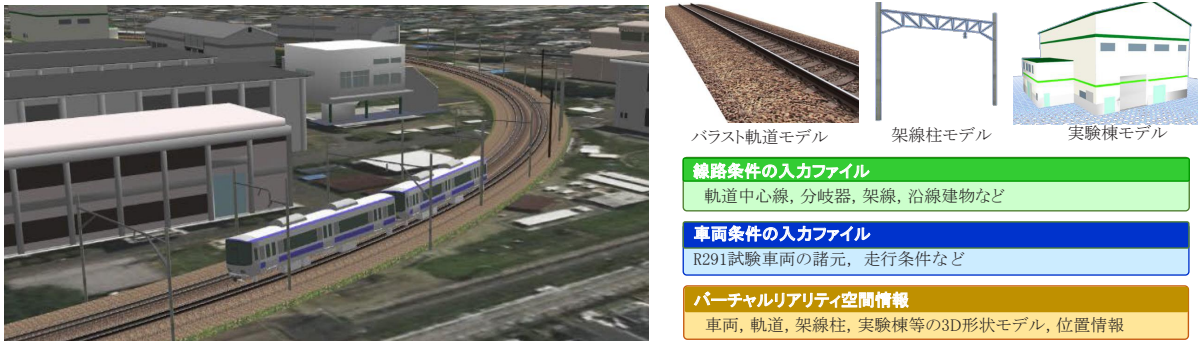


図6 バーチャル・リアリティ空間における所内試験線用ファイルセットの構築状況

シミュレータについて、シミュレータの連動を制御する連成マネージャーを構築して、正常に解析できることを確認している（図5）。

統合可視化ツールについては、様々な解析結果のグラフ化や、その挙動のバーチャル・リアリティ空間での動画表示が可能であり、6種類の結果を同期表示できる。

4.4 バーチャル所内試験線の構築

鉄道総研の所内試験線は、様々な分野における実証的アプローチの研究に欠かせない試験設備であるが、各種走行試験に対する解析的な検証がスムーズに行えるようになれば、研究開発の高品質化に貢献することができる。また所内試験線のスケジュールは過密傾向にあり、その一部をデジタル試験に置き換えられれば研究開発業務の効率化に繋がる。このような背景から現在、鉄道シミュレータ適用のモデルケースとして、バーチャル所内試験線の構築を進めている。

バーチャル所内試験線とは、様々なシミュレータを容易に、かつシミュレータ間の整合性を確保して実行するための所内試験線用の計算条件ファイルセットを指し、各シミュレータに必要な入力データの仕様に基づき統一的に作成される。具体的には、①軌道中心線、分岐器、架線、沿線建物などの線路条件入力ファイル、②R291試験車両諸元、走行条件などの車両条件入力ファイル、③これらを動画として表示するための3Dモデルやバーチャル空間情報ファイル等を、所内試験線用の計算条件ファイルセットとして構築中であり、平成30年度中のデジタル走行試験の開始を目指している（図6）。

5. おわりに

本稿では、鉄道力学に関する最近の研究開発と鉄道シミュレータの開発状況について紹介した。これらの研究

開発を推進し、鉄道事業者の課題解決に有用な解析・測定技術を構築するとともに、具体的な対策提案に繋がりたいと考えている。

なお、本稿の内容の一部は、国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて実施した。

文献

- 1) 小山達弥, 長尾恭平, 池田充: 任意の線形に対応した架線およびパンタグラフモデルの開発, 鉄道総研報告, Vol.32, No.6, pp.5-10, 2018
- 2) 林雅江, 坂井宏隆, 高垣昌和, 相川明, 奥田洋司, 殷峻: 車輪・レール間の動的接触挙動評価, 鉄道総研報告, Vol.28, NO.12, 2014
- 3) 林雅江, 高垣昌和, 相川明, 奥田洋司, 殷峻: 車輪・レール間の動的転がり接触解析による車輪フラットの接触挙動評価, 第22回計算工学講演会講演論文集, 日本計算工学会, 2017
- 4) 鈴木貢, 児玉真一, 田中隆之, 梅原康宏, 鴨下庄吾, 宮本岳史: 鉄道総研試験線による輪重減少抑制台車の性能評価, 鉄道総研報告, Vol.30, No.2, pp.17-22, 2016
- 5) 鈴木貢, 土井久代, 中嶋大智, 田中隆之, 本堂貴敏, 遠山隆行: 輪重減少抑制台車の実用速度域での性能確認, 鉄道総研報告, Vol.32, No.6, pp.17-22, 2018
- 6) 渡辺勉, 箕浦慎太郎, 後藤恵一, 松岡弘大: 各種不整を考慮したPCまくらぎの動的応答特性に関する研究, 鉄道工学シンポジウム論文集, Vol.21, pp.205-212, 2017
- 7) 渡辺勉, 箕浦慎太郎, 面高陽紀, 神津大輔: 荷重環境の実態調査に基づく低廉な縦まくらぎの開発, 鉄道総研報告, Vol.32, No.6, pp.35-40, 2018
- 8) 高垣昌和: 現象解明に向けたシミュレーションの活用～鉄道技術の発展を目指して～, 計算工学, 日本計算工学会, Vol.19, No.4, 2014