

# 鉄道力学に係わるシミュレーション技術

上半 文昭\*

Recent Research and Development on Numerical Simulation Techniques in Railway Dynamics

Fumiaki UEHAN

The railway is composed of the overhead contact lines, vehicles, tracks and structures, and shows a complex dynamic behavior by interactions between them. Railway Dynamics Division of RTRI covers all areas related to dynamical subjects involved in those railway components, and is executing R&D to improve the safety and maintainability of the railway. Our high-priority mission is to develop a railway simulator by means of advanced numerical simulation techniques and high performance computing. This paper introduces the latest R&D on numerical simulation techniques in railway dynamics.

キーワード：鉄道力学，シミュレーション，相互作用，連成解析，接触現象

## 1. はじめに

鉄道は、構造物、軌道、車両、電車線などからなる力学的に複雑なシステムであり、移動体である車両と地上設備との相互作用を無視できないダイナミクス（鉄道力学）的現象が生じる。パンタグラフと架線，レールと車輪，構造物・軌道と車両，加えて車両を取り巻く空気や水（雨・雪）などの間で生じる動的な現象が，鉄道の安全性，保守性，環境調和性などに影響を与える（図1）。筆者らが所属する鉄道力学研究部は，これらの境界領域での動的現象をサイバー空間上で再現することができる「鉄道シミュレータ」の開発に取り組んでいる。様々な数値解析手法の開発・応用，並びにそれらの連成によって動的相互作用を無視できない複雑な現象の解明に挑戦している。本報告では，鉄道力学分野の数値シミュレーション技術に関する最近の研究事例を概説する。

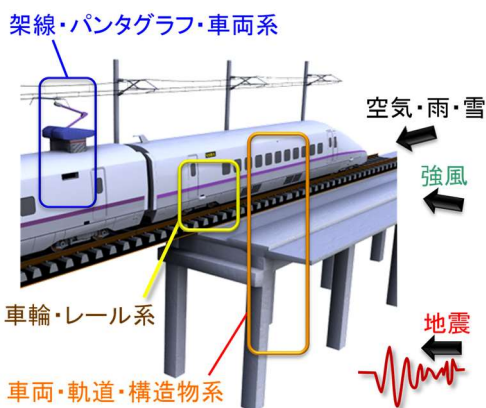


図1 分野横断の連成問題

## 2. 架線・パンタグラフのシミュレーション

パンタグラフや電車線の開発・設計支援，および架線・パンタグラフ系事故の原因究明に活用するツールとして，架線・パンタグラフシミュレータの開発を進めている。本シミュレータでは，三次元有限要素モデルにより架線とパンタグラフを表現して接触計算を行うことで，これまでには詳細な検討が困難であった，わたり線区間や曲線区間での架線・パンタグラフの挙動の再現を目標としている。また，車両振動や，トンネル内の空気流動（パンタグラフ周りの平均流速）を計算するシミュレータとの連成計算の実現を目指している。

架線モデルは，線条や金具を梁によりモデル化し，その節点の自由度を6自由度とすることで，曲線区間の再現や，温度変化等による線条の伸縮に伴う架線の構造変化を再現可能としている。パンタグラフについては，現在は比較的小さい振幅の振動範囲内で運動を再現可能な三次元力学モデルの構築が完了している（図2）<sup>1)</sup>。

現在，三次元の架線モデルとパンタグラフモデルを組み合わせた接触解析手法を開発中である。本号特集論文

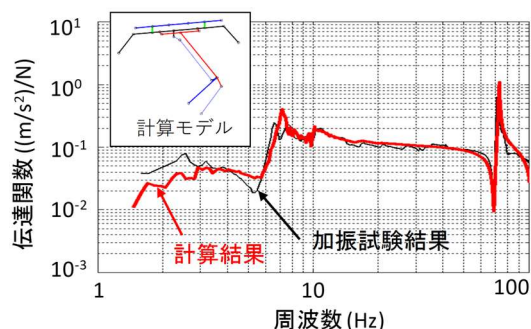


図2 パンタグラフの力学モデル

\* 鉄道力学研究部長

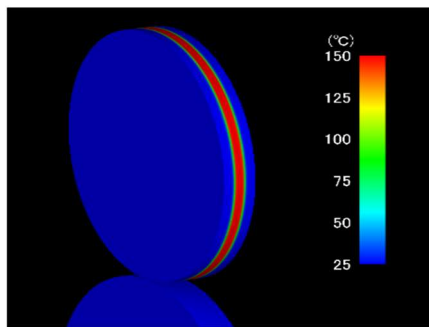
特集：鉄道力学

「温度変化に伴う静的構造変化を考慮した架線・パンタグラフシミュレーション」では、三次元架線モデルと、二次元パンタグラフモデルにより構成された架線・パンタグラフシミュレーションについて解説を行う。

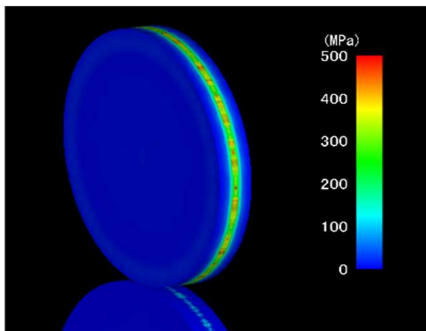
### 3. 車両・軌道・構造物の連成

#### 3.1 車輪・レールの転がり接触シミュレーション

車輪・レール転がり接触シミュレータは、三次元有限要素法を用いた弾性／弾塑性解析により、車輪とレール間の接触部に生じる非定常な衝撃挙動（力や応力、加速度など）の発生と伝播を、時々刻々と計算することが可能な構造解析プログラムである。現在は、制動による車輪の温度上昇によって生じる材料非線形（降伏応力の低下など）を取り扱うため、熱伝導／熱伝達／輻射および摩擦による発熱を考慮可能な熱伝導解析機能と構造解析機能の連成アルゴリズムを開発し、実験装置を簡易的に模擬した、車輪および軌条輪からなる解析モデルを用いて検証を進めている。弾塑性解析においては、制動による温度上昇（図3(a)）に伴う熱応力の発生（図3(b)の緑の部分）や、車輪・レール間の高い接触力によって発生した塑性変形（図3(b)の赤の部分）を同時に考慮できることを確認した。現在は実験装置の車輪・軌条輪の形状を再現した詳細形状のモデルを用い、制動時間や温度上昇量など、実験結果との定量的な比較・検証を進めている。



(a) 制動に伴う温度上昇



(b) 相当応力分布

図3 制動による車輪踏面の発生応力と温度上昇

#### 3.2 バラスト軌道の動的挙動シミュレーション

バラスト軌道は、列車の動荷重によるバラスト砕石の摩耗、回転、移動等による劣化が避けられず、恒常的な保守作業が必要である。鉄道総研では、衝撃荷重による劣化現象、および、長期的な沈下現象のメカニズム解明と有効な対策工の提案に関わる研究開発を継続的に実施している。バラスト層内部におけるバラスト砕石個々の動的挙動を把握するには、バラスト砕石を粒状体としてモデル化する個別要素法解析が適している。しかし、従来の個別要素法モデルでは、バラスト砕石を剛体でモデル化するため、劣化現象の原因となる衝撃荷重波動の伝播や軌道構造の固有振動現象を扱えないという問題点があった。そこで、鉄道総研では、海洋研究開発機構との共同研究により、粒状体解析が可能で、しかも各粒状体要素のもつ粘弾性を考慮できる弾性体個別要素法(QDEM)をバラスト軌道に適用したバラスト軌道シミュレータを開発した<sup>2)</sup>。

図4は、車輪・レール間の弾塑性動的転がり接触解析シミュレータにより列車通過時の動的荷重を計算し、その動的荷重をバラスト軌道 QDEM モデルに入力するという一方向連成解析による、バラスト軌道の変位挙動を示したものである。従来の個別要素法解析では、バラストは側方に移動するものと考えられてきたが、本解析では、列車の駆動トルクにより、バラストは後方に押し下げられるとともに、軸重通過時のまくらぎの1次曲げ変形により、まくらぎ中央のバラストに変形が集中することがわかった。この解析結果は、軌道保守作業において、まくらぎ直下のバラストを除去する「道床中透かし」とよばれる工法が経験的に用られることと符合している。

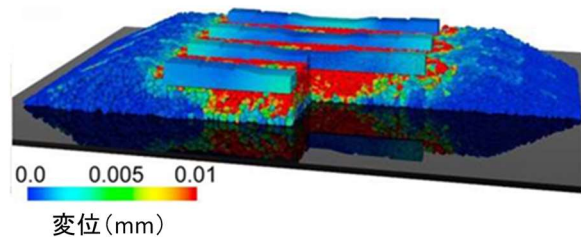


図4 車輪・レール転がり接触解析との連成によるバラスト軌道の変位挙動

#### 3.3 脱線後の車両挙動のシミュレーション

地震の発生により車両が脱線した以降の挙動を解析できるようにするため、鉄道総研が開発した車両と構造物の動的相互作用解析プログラム DIASTARS III<sup>3)</sup>を改良し、脱線後の車両部材（車体、台車、輪軸）と任意の地上設備（軌道部材、構造物）との接触を考慮した脱線後の車両挙動の効率的な解析手法を構築した<sup>4)</sup>。図5に、

脱線後の車両挙動解析手法の概念図を示す。本手法では、多数考えられる接触位置を、車両側の接触点Cと地上設備側の接触面Γの組み合わせを限定して接触判定を行うことにより、汎用FEMソフトウェアの1/100程度まで計算時間の短縮を実現した。車両側の接触位置は、車体、台車、輪軸いずれにも設定可能となるよう改良を図った。

図6に、車両脱線後の台車部材と軌道設備の接触を考慮した車両挙動の解析結果例を示す。本解析例は、車両1両が剛軌道上を300km/hで走行中に、最大加速度 $3.8m/s^2$ 、加振振動数1Hzの5周期分の正弦波を入力した時に脱線が発生し、レール横に設置した軌道部材と前台車に設置した突起が衝突する例である。図から、4秒程度で脱線が発生する一方、台車上のC点と軌道面に設置した接触面Γが衝突して逸脱が防止されており、本手法により、輪軸や台車に取り付ける逸脱防止対策工の効果を検証できることが分かる。また、C点と接触面Γ間の接触力が評価できるため、本解析手法を逸脱防止対策工の設計荷重の設定に用いることも可能であると考

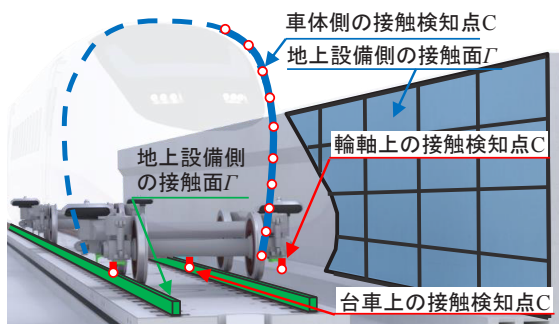


図5 脱線後の車両挙動解析手法の概念図

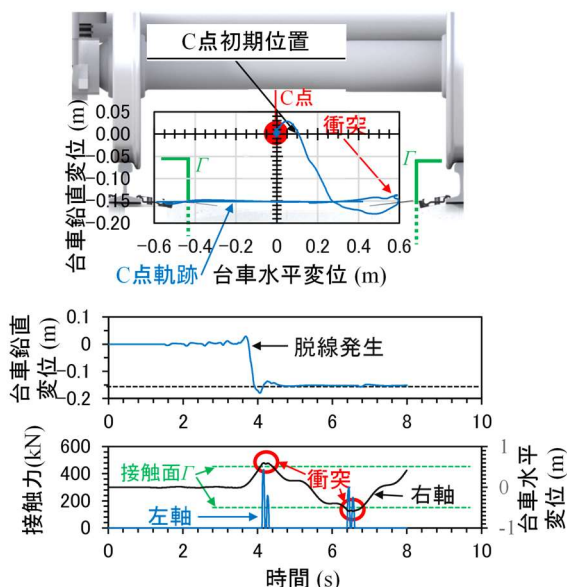


図6 シミュレーション結果例

えられる。

#### 4. 車両周りの空気や雪のシミュレーション

##### 4.1 空気流シミュレーション

鉄道総研が開発した直交格子法に基づく流体解析ソフトウェアである空気流シミュレータ<sup>5)</sup>について、列車走行におけるレール移動・輪軸回転を模擬できるように機能を拡張した。従来の移動地面のみを考慮した列車走行の模擬と比較して、より実際の状況を再現できるようになり、台車周辺流れ場の予測の高精度化が期待できる。開発した解析手法を走行する台車モデルに適用し(図7)、輪軸回転の影響を評価したところ、車輪の回転によって車両近傍の流れが誘起される状況が観察された(図8)。

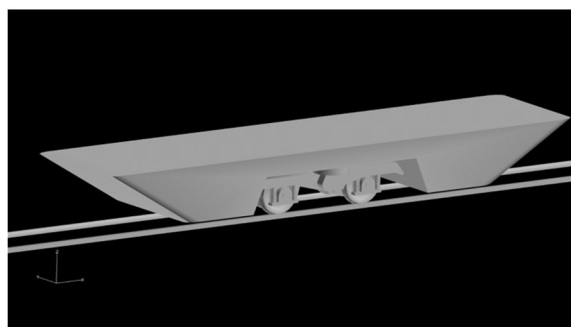


図7 台車モデル (1/8.4 スケール、走行速度 10m/s)

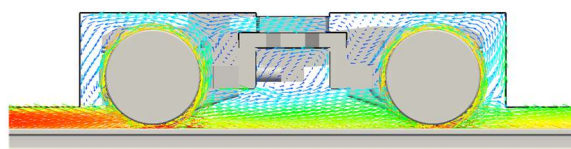


図8 レール移動・輪軸回転を考慮した台車付近の流れの数値シミュレーション (台車付近 (車輪断面上) の速度ベクトル (赤：高速、青：低速))

##### 4.2 着雪シミュレーション

鉄道車両が降雪地帯を走行すると、線路上の雪が無い上がり、鉄道車両の床下や台車に雪が付着・成長する。成長した着雪は氷に近い硬さとなることがあり、走行時の振動や分岐器を通過するときの衝撃で落下すると、線路のバラストが飛び散り、鉄道車両や鉄道設備、沿線家屋への被害が発生する可能性がある。また、分岐器のレールの隙間に挟まると、進路の転換を行うことができなくなることもある。

この様な着雪問題を解決するために、着雪しにくい鉄道車両形状の開発を目標に、図9のような着雪成長プロセスを再現できる着雪解析手法の開発を進めている。着

特集：鉄道力学

雪解析では、まず、空気流シミュレータによる気流計算を行う。次に、雪を球形にモデル化して、空気流の速度分布を用いて、飛雪粒子の軌跡を計算する。その後、粒子シミュレータにより着雪計算を行う。着雪によって変化した形状は、空気流シミュレータの境界形状へ反映する。このようにして、気流計算は飛雪粒子の軌道により着雪計算に影響を与え、着雪計算は境界形状を変化させることにより気流計算に影響を与える双方向連成計算により解析を行う。

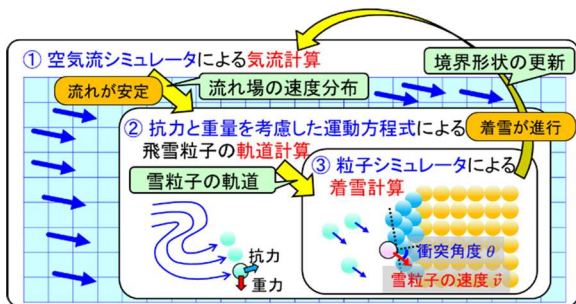
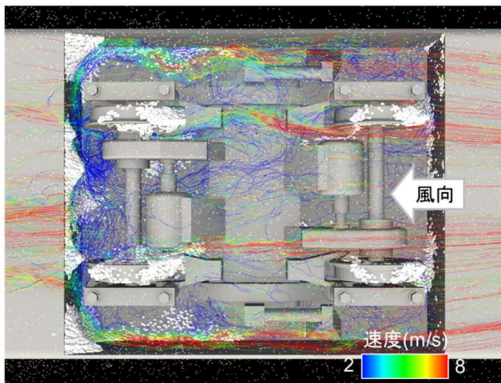
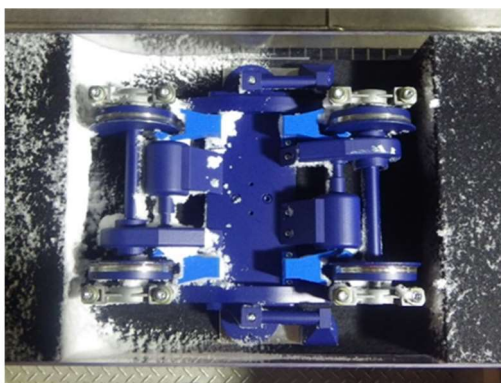


図9 台車モデル (1/8.4 スケール、走行速度 10m/s)



(a) 着雪シミュレーション結果



(b) 着雪実験結果

図10 着雪シミュレーションと着雪実験の結果

図10(a)は、降雪風洞実験を模擬した鉄道車両モデルの着雪解析の結果である。不透明な白は着雪粒子、半透明な白は飛雪粒子、線は流線、色は速度の大きさである。図10(b)は降雪風洞での台車模型の着雪実験の着雪状況を真下からみた結果である。着雪実験と着雪解析の結果と比較すると、風下フサギ板付近などの着雪状況が類似していることが確認できる。また、図10(a)の着雪解析の結果から、風上フサギ板付近から入ってきた流線が、風下フサギ板付近で淀んでいることが分かる。このように、着雪解析により、雪の流れと着雪状況との関係を確認できれば、車両形状を変更することで、着雪を抑制する対策の検討が可能となる。

5. まとめ

本報告では、鉄道システムの構成要素が相互に影響し合っ様々な動的現象を引き起こす鉄道力学分野のシミュレーション技術の概要と解析事例を紹介した。鉄道力学研究部は、今後も新たなシミュレーション技術の応用、開発に取り組むとともに、それらを効果的に連成して解析を行うための統合環境を構築し、鉄道の安全性向上、保守コスト低減、環境への調和などの現象解明に資する鉄道シミュレータの開発を継続する。

文献

- 1) 長尾恭平, 小山達弥, 池田充: 実機パンタグラフ加振試験による3次元パンタグラフシミュレーションモデルのパラメータ同定, 第25回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集 (J-RAIL2018), 一般社団法人日本機械学会, 2018
- 2) Daisuke Nishiura, Hirotaka Sakai, Akira Aikawa, Satori Tsuzuki, Hide Sakaguchi, Novel discrete element modeling coupled with finite element method for investigating ballasted railway track dynamics, Computers and Geotechnics, Elsevier, 2017.
- 3) 涌井一, 松本信之, 松浦章夫, 田辺誠: 鉄道車両と線路構造物との連成応答解析法に関する研究, 土木学会論文集, No.513/I-31, pp.129-138, 1995
- 4) 後藤恵一, 曾我部正道, 田辺誠, 渡辺勉, 徳永宗正: MBDを用いた輪軸部材と軌道部材の簡易な接触解析手法, 鉄道総研報告, Vol.31, No.4, pp.41-46, 2017
- 5) 中出孝次, 光用剛: 複雑形状に対応した空気流・空力音シミュレーション, RRR, Vol.72, No.12, 2015