

# 鉄道シミュレータの構築

上半 文昭\*

## Research and Development on Railway Simulators

Fumiaki UEHAN

Railway Technical Research Institute (RTRI) has been developing the “railway simulators” as a common platform for developing advanced railway simulation technology, and has successively implemented research projects every five years since 2010. In the last five years (2015-2019), we have mainly developed a “virtual railway test line” and a “coupling environment for individual simulators”. The virtual railway test line, which reproduces the dynamic behavior of the railway system during train operation under various conditions, is used to perform a virtual running test. The railway simulator coupling environment, which uses coupled calculations by linking multiple simulators, is used to achieve the comprehensive analysis. This report introduces the outline of those achievements and presents the future prospects.

キーワード：鉄道シミュレータ，バーチャル鉄道試験線，連成解析，車両運動，架線・パンタグラフ

### 1. はじめに

近年，コンピュータの計算能力が格段に向上し，それを前提とした大規模並列計算プログラムの開発や新たな計算力学解析手法の提案が行われている。鉄道分野においても，実験や現車試験による現象の再現や調査が困難な事象に対して，数値シミュレーションによる問題解決への期待が高まっている。このような流れの中で，鉄道総研は，研究開発用ツールとして研究開発の質の向上と効率化を図るとともに，これにより鉄道システムの最適化と複雑現象の解明に資することを目的として「鉄道シミュレータ」の開発に取り組んできた。

図1に，鉄道シミュレータの全体構成を示す。鉄道総研では，列車走行系，空力・環境系，事故・災害系の主に動力的なシミュレーション手法のほか，エネルギー系，電磁環境系，輸送系などの各種シミュレーション手法を開発し，研究開発に活用している。鉄道シミュレータは，これらを連携した研究開発用ツールとして，特に大規模並列計算などの高度な計算手法とシミュレーション間の連成計算機能を強化したものである。

本稿では，鉄道シミュレータのうち，列車走行系のシミュレーション群で構成される「バーチャル鉄道試験線」を中心として，鉄道シミュレータの概要を紹介する。

### 2. 鉄道シミュレータのシステム構成

鉄道シミュレータに実装される様々なシミュレーション手法の計算を実施する環境を検討し，実行環境や開発

環境などを考慮して図2に示すシステム構成とした。管理サーバ上に構築した共通プラットフォームは，シミュレーションの実行環境であり，自動的に選択されるスパコンやWindowsサーバ上でシミュレーションが実行される。これらのサーバ間はネットワークで接続され，入出力データの送受信やプログラム実行制御などが行われる。また，シミュレーション結果を表示するための可視

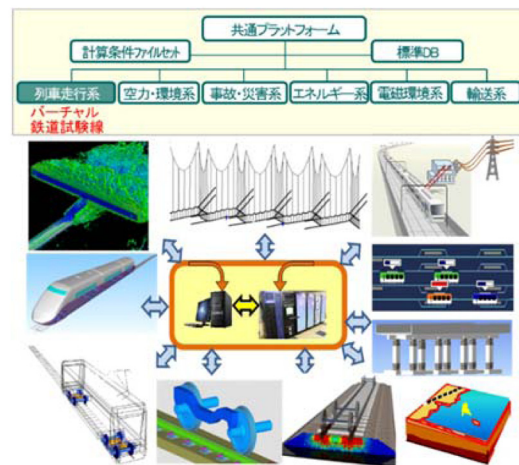


図1 鉄道シミュレータの全体構成

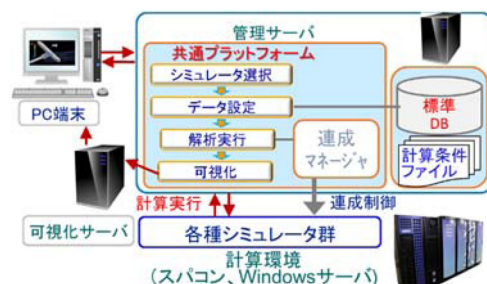


図2 鉄道シミュレータのシステム構成

\* 鉄道力学研究部長

化用のサーバを設けている。このような機能を分担することにより、シミュレーション手法の実行から可視化までを一つの環境で実施できるシステムとした。

### 3. バーチャル鉄道試験線

バーチャル鉄道試験線は、列車走行系（車両、軌道、集電などのダイナミクス系）のシミュレーション手法の連成により、コンピュータ空間上に仮想の鉄道試験線を構築するものである（図3）。具体的には、列車走行系シミュレーションの機能向上とそれらの連成計算手法を検討し、弾性軌道・弾性車体に対応した車両・軌道のシミュレーション手法、3次元の詳細構造に対応した架線・パンタグラフシミュレーション手法、1台車モデルに対応した車輪・レールの転がり接触シミュレーション手法、大規模解析や長期劣化解析を行えるバラスト軌道シミュレーション手法を開発し、それらの連成計算を可能とした。以下、個々のシミュレーション技術の概要、およびバーチャル鉄道試験線における仮想走行試験の一例として実施した、鉄道総研の所内試験線の走行シミュレーション例を紹介する。

#### 3.1 車両・軌道のシミュレーション

複雑な力学的挙動を示す車両と軌道の運動を詳しく調べるため、車両運動、弾性車体、弾性軌道、駆動制御などの解析モデルを開発し、それらの連成シミュレーションを行っている（図4）。

車両、列車のモデルは汎用のマルチボディダイナミクス解析ソフト SIMPACK<sup>1)</sup> に適用可能な車体、台車、車輪およびそれらを結合するばねやダンパ要素等からなるモデルを用いている。剛体の車両モデルだけでなく、車両を構成する六面体の部材を3次元弾性体でモデル化した弾性車体モデルも用いることができ、剛体モデルでは考慮できなかった高い周波数の車体振動などを解析できる。

駆動制御のシミュレーション<sup>2)</sup> は、電気車の主回路を構成するインバータやモータ、さらに空気ブレーキ系をモデル化しており、車両の力行と制動を模擬できる。

軌道は、レール・まくらぎ・地盤を、移動する輪軸直下の質点としてその間をばねとダンパで結合した移動支持ばねモデルと、レール・まくらぎ・まくらぎ支持ばねをソリッド要素、レール締結装置と軌道パッドをばね要素でモデル化した FEM 軌道モデルを構築した。

これらのモデルを用いた連成計算を行うことで、弾性支持された軌道上を走行可能な車両・軌道のダイナミクス系のシミュレーションを実行できる。

#### 3.2 架線・パンタグラフシミュレーション

パンタグラフや電車線の開発・設計支援、および架線・

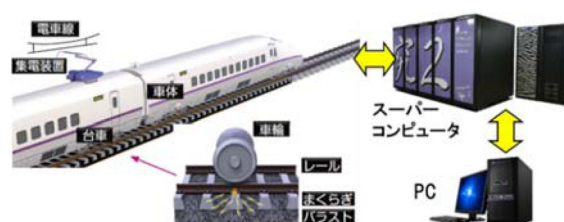


図3 バーチャル空間上の鉄道試験線

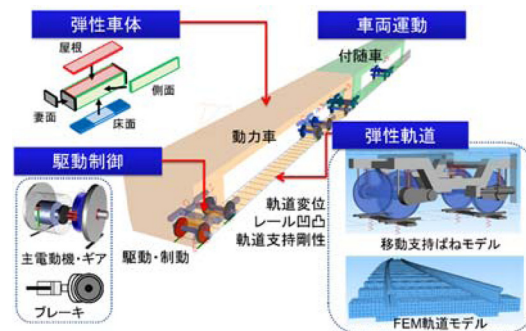


図4 車両運動のシミュレーション手法

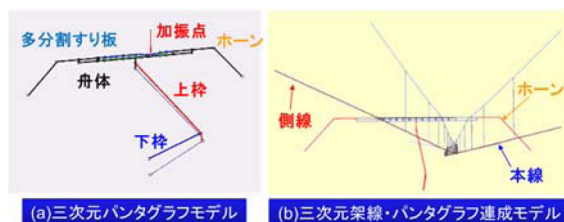


図5 架線・パンタグラフのシミュレーション

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ション手法を開発している。従来、この用途では、理論解析や2次元モデルの動的挙動解析が行われてきたが、バーチャル鉄道試験線では、3次元構造の架線・パンタグラフシミュレーションを実現した<sup>3)</sup>。

図5(a)に3次元のパンタグラフモデルを示す。本パンタグラフモデルは、舟体、すり板、ホーン、枠組みなどの構成部材を3次元FEMでモデル化した。架線の追従性を高める多分割すり板などの複雑な構造をモデル化できる。架線も3次元でモデル化でき、任意線形、複数架線、ならびに温度変化に伴う静構造の変化を取り扱える。図5(b)は、列車が側線から本線へのわたり線を通過する際の解析例で、側線から本線に移るときのパンタグラフの接触状況が、側線→側線にすり板・本線にホーンでの2点接触→本線と移行していく間のパンタグラフと各トロリー線の距離や接触力を解析することができる。また、車両運動シミュレーションとの連成により、車両の傾きや加減速度を反映した、架線・パンタグラフの挙動を解析できる。

#### 3.3 車両・レール転がり接触シミュレーション

車輪がレール上を転動すると、コンタクトパッチとよ

ばれる数十～100mm<sup>2</sup>程度の極微小な領域で数トンの荷重を伝達する。そのため接触部には複雑な力が作用し、車輪やレールの摩耗や亀裂などの損傷・劣化現象が発生する。このため、車輪・レールの損傷・劣化による乗り心地・走行安全性の低下や、保守作業の増大を防ぐための現象解明ツールとして、車輪・レール転がり接触シミュレーション手法を開発した<sup>4)</sup>。

本手法は、3次元FEM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、4輪からなる1台車が曲線部を通過する際の各車輪の接触位置における車輪・レール間の応力分布やすべり率を計算できる。

また、制動による車輪の温度上昇によって生じる材料の非線形特性を取り扱うため、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、熱膨張や熱影響による降伏応力の低下などを考慮した構造解析を可能にした。

### 3.4 バラスト軌道シミュレーション

バラスト軌道は、列車の荷重によるバラスト碎石の摩耗、回転、移動等による劣化がさげられず、恒常的な保守作業が必要である。そこで、粒状体の解析手法であり、個々の粒状体の弾性変形や発生応力を考慮できる弾性体個別要素法を用いて個々のバラストをモデル化し、バラスト軌道の挙動を解析できるバラスト軌道シミュレーション手法を開発した<sup>5)</sup>。

同手法では、図6に示すように、個々のバラスト碎石の形状をモデル化することができ、さらにバラストの接触点に作用する荷重が限界値を超えた際に角部の尖りをわずかに凹ませることでバラストの摩耗も再現できる。これにより、これまで解析が難しかった列車通過に伴うバラスト軌道の沈下傾向や沈下量が追跡可能となった<sup>5)</sup>。

### 3.5 バーチャル鉄道試験線での走行シミュレーション

図7に、走行シミュレーションの流れを示す。車両運動と駆動制御のシミュレーションは双方向連成計算を行い、パンタグラフの位置は車両運動シミュレーションによる屋根上変位を入力とする一方向連成計算とした。

バーチャル鉄道試験線のシミュレーション結果は、各種のグラフで表示でき、3次元アニメーションを用いて様々

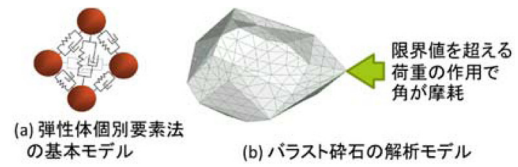


図6 弾性体個別要素法によるバラストのモデル化

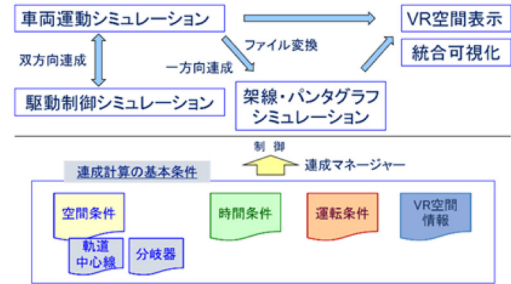


図7 走行シミュレーションの流れ

な視点から可視化することもできる。図8は、鉄道総研の所内試験線と試験車両をモデル化したバーチャル鉄道試験線の解析結果表示例である。(a) 車体・台車・軌道、(b) 架線・パンタグラフ、(c) 軌道線形なども含めた俯瞰の視点での可視化例と、(a) 車体ロール角、(b) パンタグラフ高低変位、(c) 車両速度をグラフ表示したものである。あたかも実在する試験線のように、詳細に見たい場所を見たい角度から観測し、車両、架線、軌道などの挙動の時々刻々の変化を動画で確認することができる。

## 4. 列車走行系以外のシミュレーション

鉄道シミュレータでは、列車走行系以外にも、空気流、列車運行・旅客流動、鉄道通信環境、地震災害などのシミュレーション手法の開発・改良を実施したので、その概要を紹介する。

### 4.1 空気流シミュレーション

鉄道車両のような細長い物体が地面近くを移動する状況は、鉄道分野の特徴的なものであり、それに付随する

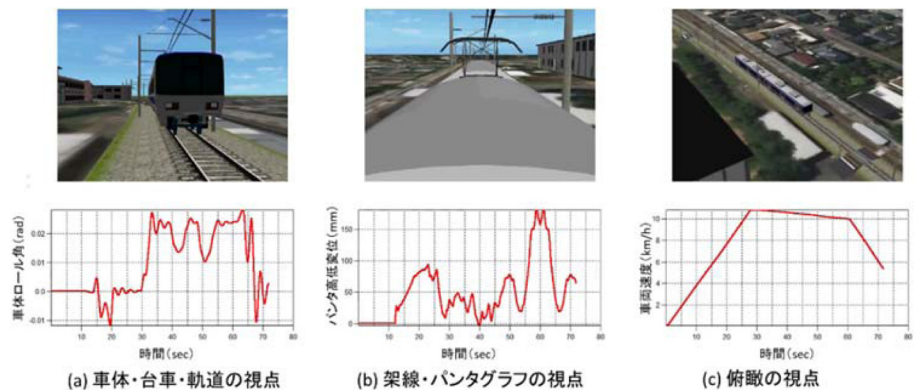


図8 バーチャル鉄道試験線の解析結果の表示例

流体力学的な理解が重要である。一方、編成車両の解析などは必然的に大規模解析となり、解析モデルの作成工数の低減やプログラムの並列化が不可欠である。そこで、鉄道総研では、実用的な解析が実施できる直交格子法を用いた空気流シミュレーション手法を開発してきた<sup>6)</sup>。

この5年間は、空気流シミュレーション手法の計算精度の検証と精度向上を目的として開発を進め、大規模流体シミュレーションを実施した。高レイノルズ数の円柱流れの直交格子法での再現や、輪軸回転を考慮した台車付近の流れのシミュレーションを実現し、編成車両の床下蛇行流れの現象解明などに応用した<sup>6)</sup>。

#### 4.2 列車運行・旅客流動シミュレーション

鉄道総研が取り組んでいる高度な列車制御手法について、旅客流動を含めた総合的な評価を行うために、移動閉そく、固定閉そく下の予測制御、及び移動閉そく下の予測制御に対応した列車運行シミュレーション手法を開発した。

また、旅客の列車内における乗車位置の嗜好のアンケート結果に基づき、車内の旅客流動シミュレーション手法を開発した。旅客の乗車位置の嗜好と周辺他旅客の位置に応じて歩行速度が変化する挙動モデルを適用することで、従来の乗降時間推定精度を損なわずに旅客挙動を再現できる列車内旅客行動モデルを構築した。

さらに、列車内旅客行動モデルを組み込んだ列車運行・旅客行動シミュレータを構築し、列車遅延や旅客の快適性の推定を可能にした。

#### 4.3 鉄道通信環境シミュレーション

鉄道システム内で用いられる通信の伝送品質並びに電波雑音や電磁誘導などを統合的に解析する通信環境シミュレーション手法の構築に向けて、無線データ伝送回線、電波雑音放射、電磁誘導、サージ解析の各シミュレーション手法等について他分野のシミュレータとの連成方法を検討し、列車制御や運転関連のシミュレータとの連成を可能にした。

#### 4.4 地震災害シミュレーション

鉄道路線は非常に長い区間に様々な構造物が存在しており、大規模地震時の被災リスクを事前に把握して対策することが重要である。そこで、地震を発生させる断層から構造物までのモデル化を自動で行い、地震応答解析を実施可能な鉄道地震災害シミュレータ<sup>7)</sup>を開発した。モデル化においては、断層、地盤及び構造物の情報アーカイブスを構築し、そのアーカイブスから取得したデータにより自動的に解析モデルを構築する。地震応答解析では、スーパーコンピュータによる並列計算を行う。また、対策の意思決定を支援するため、得られた解析結果をGIS上で表示する機能や損傷状況をイメージ化する

機能を有している。

## 5. おわりに

本報告では、鉄道総研が開発した「鉄道シミュレータ」の概要を紹介した。鉄道シミュレータは、これまで10年をかけて開発してきたものであり、最初の5年間でコアシステムの設計・開発を、この5年間で改良、機能追加を行った。

次の5年間は、バーチャル鉄道試験線の実用化に向けた実現象への適用性の検証、実線区モデルの構築手法の検討、及び、新たな解析手法の開発に取り組む。

バーチャル鉄道試験線の実現象への適用性の検証では、様々な実現象を対象として整合性を確認・向上する。実線区モデルの構築手法の検討では、車両やフィールドの様々なパラメータを、既存データベースやセンシング技術を応用して、効率的に取得する手法を研究する。

また、バーチャル鉄道試験線の解析機能の拡張として、積雪軌道面上の走行安全性の評価に用いる排雪走行シミュレーション手法を開発する。さらに、解析対象をより精密にモデル化して、計算時間はかかるものの高い精度で計算を行うことで、実験の一部代替・補完を目指すシミュレーションを「数値実験室」と位置づけ、離線・アークや材料の微視的構造のシミュレーション手法、並びに数値風洞の開発に取り組む計画である。

## 文 献

- 1) ダツソー・システムズ：SIMPACK, <https://www.3ds.com/ja/products-services/simulia/products/simpack/> (参照日：2020年4月20日)
- 2) 門脇悟志：主電動機制御系とマルチボディダイナミクスの連成シミュレータの構築とその検証，電気学会交通・電位鉄道/フィジカルセンサ合同研究会資料，TER-15-7, pp.37-40, 2015
- 3) 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
- 4) 坂井宏隆，唐津卓哉：大規模並列有限要素法による一台車モデルの曲線走行シミュレーション，鉄道総研報告，Vol.34, No.8, pp.23-28, 2020
- 5) 相川明，西浦泰介，坂井宏隆：バラスト動的応答と摩耗進展評価のための不連続体解析法，鉄道総研報告，Vol.34, No.8, pp.41-46, 2020
- 6) 中出孝次：鉄道車両床下流れのLES，第30回数値流体力学シンポジウム，E08-3, 2016
- 7) 本山紘希，坂井公俊，井澤淳，室野剛隆：鉄道地震災害シミュレータの開発，鉄道総研報告，Vol.30, No.5, pp.5-10, 2016