

鉄道一般
車両
施設
電気
運転・輸送
防災
環境
人間科学
浮上式鉄道

# バーチャル鉄道試験線の構築



上半 文昭  
Fumiaki Uehan

鉄道力学研究部 部長  
【専門分野】 構造力学、維持管理工学、計測工学、破壊解析

鉄道総研が開発した列車走行系のシミュレーション手法を統合し、「バーチャル鉄道試験線」を構築しました。各手法の機能向上とそれらの連成によって、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、三次元の詳細構造に対応した架線・パンタグラフの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、バラストの移動や摩耗を考慮できるバラスト軌道のシミュレーション手法を開発しました。さらに、バーチャル鉄道試験線の一例として、鉄道総研の所内試験線と試験車両をモデル化し、走行シミュレーションが可能であることを確認しました。

## はじめに

鉄道総研では、さまざまな条件下における列車走行時の力学的挙動をコンピューター空間上に再現し、仮想的な走行試験を行うための「バーチャル鉄道試験線」(図1)の開発を行っています。

車両が走行すると、加減速に加えて、つねに前後・左右・上下に揺れ、それとともなって架線、軌道、構造物も振動します。また、車両が繰り返し走行することで、車両の車輪、トロリー線、パンタグラフのすり板に摩耗が発生し、軌道のレールの摩耗・損傷やバラスト軌道の沈下などが発生します。

これらの現象をコンピューター上で再現して模擬実験を行い、現象解明や

鉄道システムの最適化を目指すためのツールがバーチャル鉄道試験線です。

バーチャル鉄道試験線は、これまでに鉄道総研が開発・改良してきたさまざまなシミュレーション技術を連成(複数の異なる現象に相互の影響を考慮)して解析することで成立します。大規模な計算を行うために、スーパーコンピューターを用いた大規模並列計算(参照)の技術も応用しています。

以下では、まず、バーチャル鉄道試験線を構成するシミュレーション技術について紹介します。次に、バーチャル鉄道試験線の一例として構築した、鉄道総研所内試験線と試験車両の可視化例を紹介し、最後に今後の展開について述べます。

## 車両・軌道のシミュレーション

列車走行時の車両の複雑な挙動を解明するために、車両運動・車体・軌道・駆動制御などの解析モデルを開発し、それらを組み合わせた車両・軌道のシミュレーションを行っています(図2)。車両、列車は、車体、台車、車輪およびそれらを結合するばねやダンパーを、汎用のMBD(参照)解析ソフトSIMPACK<sup>1)</sup>を用いてモデル化しました。

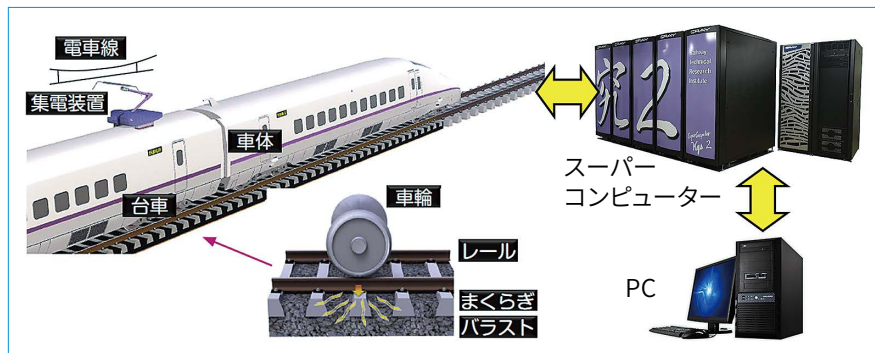


図1 コンピューター空間上の鉄道試験線

### 大規模並列計算

コンピューターにおいて一つの仕事を複数のプロセッサで分担して計算させる手法です。大規模データを高速処理する場合に使われています。

### MBD

マルチボディーダイナミクス(多体動力学)。連結され互いに作用しあう複数の剛体が全体としてどのような運動をするのか、その時にどのような力が発生するのかを解析する手法です。

### FEM

有限要素法。解析対象物を要素に分割し、要素を単位として支配方程式を解くことで全体のふるまいを解析する手法です。

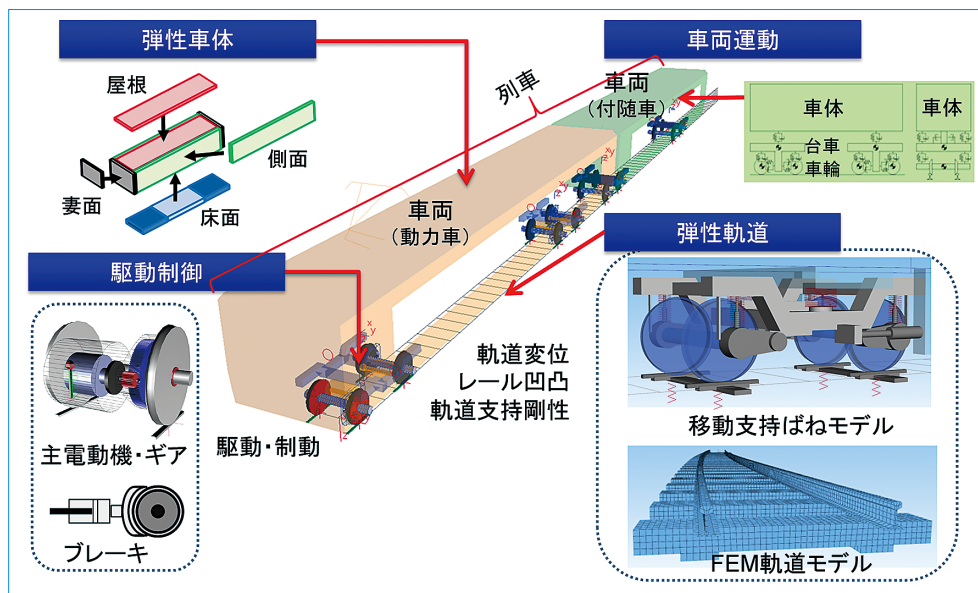


図2 車両・軌道のシミュレーション

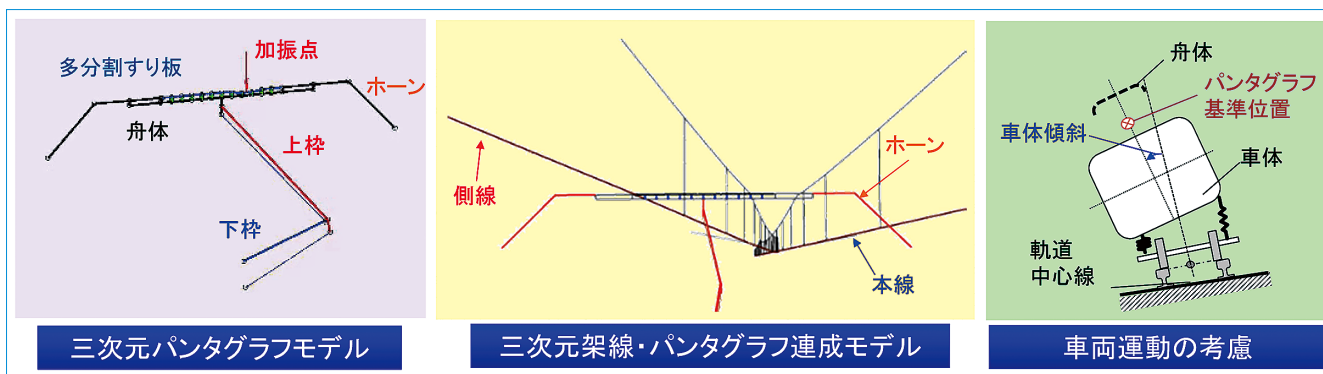


図3 架線・パンタグラフのシミュレーション

車体については、従来は剛体（力が加わっても変形しない物体）として模擬されていました（剛体モデル）が、計算機能力が向上し、3次元の弾性体（力を加えると変形し、力を除くと元に戻る物体）として模擬できるようになりました（弾性車体モデル）。これにより、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再現できるようになりました。

軌道については、列車走行時の挙動を考慮して、移動支持ばねモデルとFEM（※参照）軌道モデルの2種類のモデルを開発しました。移動支持ばねモデルは、レール・まくらぎ・地盤を輪軸直下にはばねで結合された点として模擬した簡易なモデルです。FEM軌道モデルは、レール・まくらぎなどを立体的に模擬した詳細なモデルです。

FEM軌道モデルの方が、高い精度で解析できますが、計算時間が長いという課題があります。そこで、今のところ主に移動支持ばねモデルを用いており、まくらぎで間欠的に支持された軌道の高い振動数の揺れを扱う必要がある現象を解く場合にはFEM軌道モデルを用いています。

駆動制御のシミュレーション<sup>2)</sup>は、電気車の主電動機やギア、ブレーキ系をモデル化したもので、車両の力行と制動を模擬できます。

これらのモデルを用いて相互に連携して解析（連成解析）することにより、列車走行時の車両、軌道の挙動を、より忠実に再現することができ、さまざまな現象の解明に用いることができます。

### 架線・パンタグラフのシミュレーション

架線やパンタグラフの新規開発や架線・パンタグラフに関わる事故の原因究明のために、架線・パンタグラフの動的挙動の把握は重要な課題です。これまで、理論解析や2次元の数値解析モデルによる動的挙動解析が行われてきましたが、バーチャル鉄道試験線では、3次元構造に対応した架線・パンタグラフシミュレーションを実現しました<sup>3)</sup>。

図3に、開発した架線・パンタグラフモデルの概要を示します。図3左の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でモデル化しました。架線の追従性を高める多分割すり板などの複雑な構造もモデル化できます。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ともなう静構造の変化を取り扱えます。図3中央は、列車が側線から本線へのわたり線を通る際の解析例で、「側線→側線にすり板・本線にホーンで2点接触→本線」と状態が変化する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ます。また、図3右に示すように、車両・軌道の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考慮して、架線・パンタグラフの挙動を解析できます。

### 車輪・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がると、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えます。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・劣化現象が発生します。そこで、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・レールの転がり接触シミュレーション手法を開発しました<sup>4)</sup>。

本シミュレーションでは、FEMを用いて車輪とレールを細かく分割して各要素の運動を計算することで、接触表面の応力やすべりなどを計算することができます。図4は、4輪からなる1台車の車輪・レール接触モデルと、同モデルが曲線部を通過する際の各車輪の接触位置におけるレール表面の応力分布を示したものです。これにより、曲線通過時の各車輪とレールのコンタクトパッチの応力分布をはじめて目に見える形にすることができました。

さらに、車輪・レールの転がり接触シミュレーションには熱伝導解析機能もあり、ブレーキパッドを車輪に押し

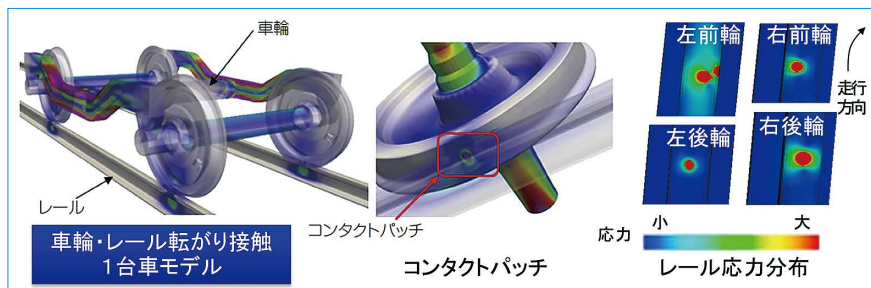


図4 車輪・レールの転がり接触シミュレーション

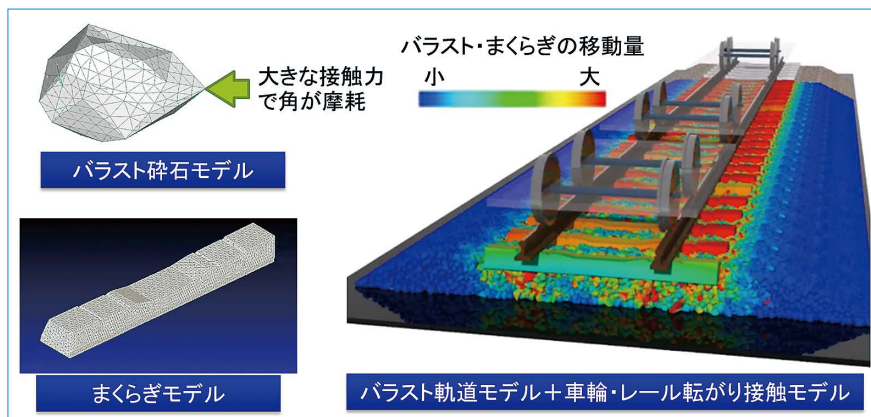


図5 バラスト軌道シミュレーション

付けて制動する際などに生じる熱を考慮して、損傷・摩耗を解析することができます。

### バラスト軌道のシミュレーション

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、移動などによる劣化がさげられず、恒常的な保守作業が必要です。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も考慮できる「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ました<sup>5)</sup>。

図5に、バラスト碎石、まくらぎ、およびバラスト軌道のモデルを示します。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ると角部のとが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ます。

図5の右図は、バラスト軌道モデル上を車両が走行する際の個々のバラストやまくらぎの変位のシミュレーション結果例です。バラスト軌道シミュレーションによって、これまで解析が難しかった列車通過にともなうバラスト軌道の沈下傾向や沈下量を追跡できるようになりました。

### バーチャル空間での可視化

バーチャル鉄道試験線のシミュレーション結果は、各種のグラフなどで表示できるほか、バーチャルリアリティを用いてさまざまな視点から可視化することができます。図6は鉄道総研の所内試験線をモデルにしたバーチャル鉄道試験線の可視化例です。左から、(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表示したものです。このようにあたかも実在する試験線のように、見たい場所を見たい角度から見ながら、車両、架線、軌道などの挙動を確認することができます。

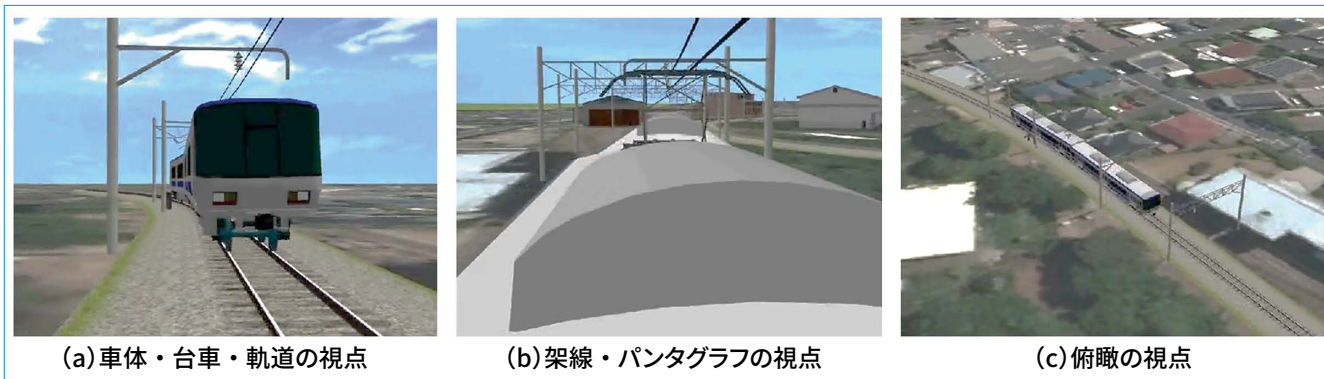


図6 バーチャルリアリティーによる可視化例

### これからの取り組み

バーチャル鉄道試験線は、これまで10年をかけて開発しており、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、機能追加を行って現在に至っています。次の5年間は、主に実用化に向けた実現象への適用性の検証と実線区モデルの構築手法の検討を行います。

実現象への適用性の検証では、車輪・レール間に生じる摩耗、亀裂などの劣化・損傷の再現、トンネル内走行時の空気力による乗り心地への影響評価、軌道・車両・パンタグラフ・架線の相互作用と全体挙動などの整合性を調べます。実線区モデルの構築手法の検討では、図7に示すようなさまざまな車両やフィールドのパラメータを、既存データベースから効率的に取得する方法を検討するとともに、センシングによる取得手法やセンシングデータからの推定技術を向上して、シミュレーションモデルに取り込む研究を行います。

また、解析機能の追加として、積雪軌道面上の走行安全性の評価に用いることができる、排雪走行シミュレーション手法を開発する予定です。

### 未来のバーチャル鉄道試験線

バーチャル鉄道試験線は、鉄道の動的現象の解明、実験が不可能な事故・災害の再現、長期的な劣化・損傷の把

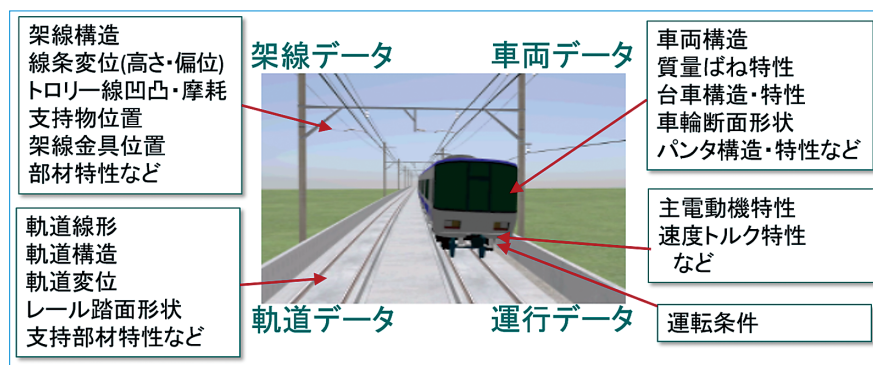


図7 試験線に取り込むパラメーター

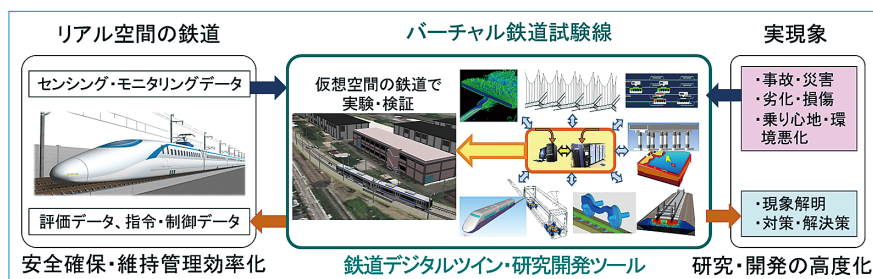


図8 これからのバーチャル鉄道試験線の役割

握などを行うためのツールとして活用していきます。さらに、主要な線区をモデル化し、実線区でのセンシング・モニタリングデータをほぼリアルタイムで取り入れることによって、バーチャル空間上の実線区の子（デジタルツイン）として運用し、鉄道の安全な運行や維持管理の効率化に有用なデータを提供するツールへと発展させていきたいと考えています(図8)。

RRR

### 文献

- 1) ダッソー・システムズ: SIMPACK, <https://www.3ds.com/ja/products-services/simulia/products/simpack/> (入手日:2020年4月20日)
- 2) 門脇悟志, 鴨下庄吾: モーター制御系と連成した車両運動シミュレーション, RRR, Vol. 72, No. 12, pp.10-13, 2015
- 3) 長尾恭平, 小山達弥, 池田充: 架線・パンタグラフの動的挙動を再現する, RRR, Vol. 77, No. 4, pp.16-19, 2020
- 4) 坂井宏隆: 車輪・レール間の接触挙動を再現する, RRR, Vol. 77, No. 4, pp.24-27, 2020
- 5) 林雅江, 相川明: 大規模並列計算による車輪・レール・バラスト挙動シミュレーション, RRR, Vol. 72, No. 12, pp.26-29, 2015