

鉄道シミュレータの開発状況

鉄道力学研究部

主管研究員 石田 弘明

1. 鉄道シミュレータ開発の背景と目的

鉄道総研では、基本計画 RESEARCH2010 に則り、鉄道の将来に向けた研究開発として五つの大課題を進めている(図1)。このうち「鉄道シミュレータの構築」は、安全性の向上、環境との調和、低コスト化、利便性の向上という四つの研究開発目標すべてに関わるシミュレーション技術の高度化を目指して取り組んでいる課題である。

この取り組みの背景には、スーパーコンピュータの進化と HPC (High Performance Computing : 高性能計算) を活用した研究開発のパラダイムシフトという世の中の流れがある。スーパーコンピュータは、10 年間で約 1000 倍という勢いで性能が向上しており¹⁾、現在すでに、理論解析、実験に続く「第三の科学手法」²⁾としてコンピュータシミュレーションが活用されている。これは、従来の簡素なモデルとは一線を画し、仮定をなるべく排除してコンピュータの中に構造・現象を忠実に再現した数値実験であり、その実行により、強い連成を考慮した全体系の挙動を理解したり、これまで観測が困難であった現象を見出して新たな知見・発想を得ることなどができるようになる。“京”に代表される最近のスーパーコンピュータは、CPU とメモリを搭載した計算ノードをネットワークで結合させたものになっており、一つの計算プログラムで実行するタスクを分割して並列処理を行う。コンピュータのハードウェアだけでなく、並列化によって高速に大規模なモデルを解析するソフトウェアも着々と開発が進められ、HPC によるシミュレーションは企業のものづくりにも活用され始めている³⁾。

以上のような背景を踏まえ、2010 年度よりまず、個別課題「鉄道シミュレータのコアシステムの設計・開発」を立ち上げて、鉄道のダイナミクスに関する現象をコンピュータ上で再現する各シミュレータの開発を開始した。その目的は以下の三つである。

(1) コンピュータを利用して鉄道線区の安全性、信頼性、利便性、経済性等を評価すること

(2) 鉄道システムに関わる技術開発の効率化を図るとともに、その質を向上すること

(3) 新しい解析技術を導入し、鉄道システムの改善に向けた現象解明を更に進めること

本発表では、具体的に開発を進めている個々のシミュレータとこれら相互の関係、鉄道シミュレータの将来構想について報告する。



図1 鉄道の将来に向けた研究開発

2. 鉄道シミュレータの第1フェーズ

「鉄道シミュレータの構築」では、第1フェーズとして「バーチャル鉄道試験線」と「地震災害シミュレータ」の二つを実現するために、それぞれのプロトタイプの開発を進めている（図2）。

バーチャル鉄道試験線は、常時の列車走行を扱うコンピュータ上の試験線であり、その開発のためにまず、「①車両・軌道モデル、列車モデル」と「②車輪～構造物間のシミュレータ」により「③バーチャル鉄道試験線プロトタイプ」を構築する。また、それと並行して「④架線・パンタグラフシミュレータ」と「⑤空気流・空力音シミュレータ」を開発し、次の第2フェーズでこれらを統合し、「バーチャル鉄道試験線」とする計画である。

一方、地震災害シミュレータは、大規模地震の発生という異常時を想定したものである。

まず、「⑥地盤・構造物群モデル」を構築し、解析結果の検証を行いながら、地震災害シミュレータを作り上げていく。

バーチャル鉄道試験線は、コンピュータ上での列車走行の模擬に加え、長期繰り返し走行による摩耗・損傷といった劣化現象の再現を、地震災害シミュレータは、自然災害による広域での被害予測に活用することを念頭に置いている。

（1）バーチャル鉄道試験線

営業線では、列車は加減速をするだけでなく、常に前後・左右・上下に揺れており、列車の走行に伴って架線、軌道、構造物も振動する。また、様々な車両が繰り返し走行し、レールやトロリ線が摩耗したり、軌道が徐々に劣化していく。車両の側でも車輪やパンタグラフのすり板が摩耗する。さらに高速列車の場合には、車両周りの空気の流れが走行抵抗や騒音の発生源となる。

これらの現象をコンピュータ上で再現し、模擬実験を行って、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ある。実際の軌道上で列車を1万回走らせてその影響を調べるには、膨大な日数と労力を必要とする。しかし、バーチャル鉄道試験線が完成すれば、車両を100万回通過させることも容易で、その後の軌道状態等の変化を短時間で予測することができるようになる」と期待される。

バーチャル鉄道試験線を構成するシミュレータ①～⑤（図2）の概要は以下の通りである。

①車両・軌道モデル、列車モデル

車両・軌道モデルでは、マルチボディダイナミクスの手法をベースに従来の車両運動シミュレーションで解析してきた直線・曲線軌道上の車両走行機能をさらに拡張する。まず、営業線での車両走行をコンピュータ上で再現するために、標準的な車両のモデル、振子等の運動制御を含む車両モデル、トングレールの断面形状変化などを含む分岐器の詳細モデルを作成している。さらに、列車の加減速も考慮できる、複数の車両を連結した列車モデルを構築していく。

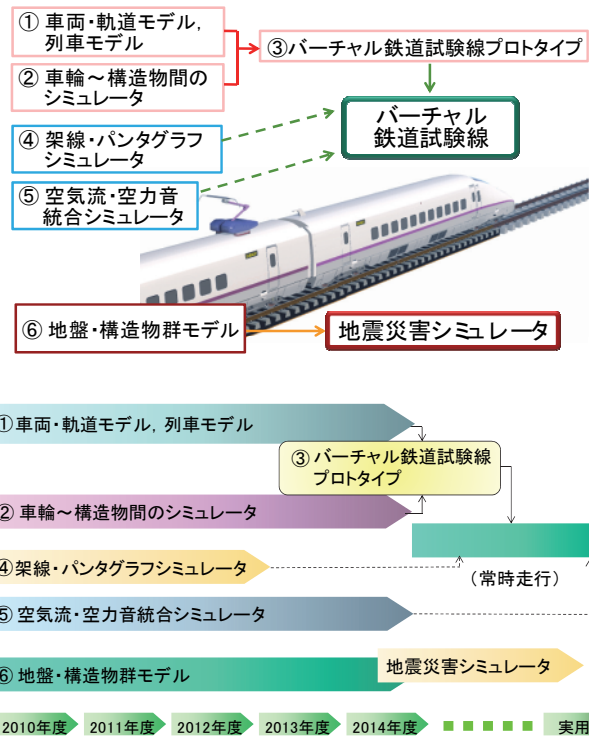


図2 鉄道シミュレータのフレームと開発スケジュール

②車輪～構造物間のシミュレータ

車輪～構造物間のシミュレータでは、レール上を転走する車輪、軌道（レール、まくらぎ、バラスト、路盤）、構造物の動的な相互作用を扱う。特に、長期繰り返し走行による軌道の劣化現象解明を大きな目標としている。列車の走行に伴う軌道劣化のメカニズムを明らかにするには、車輪とレールの接触面内に発生するすべりや高周波輪重変動、荷重の伝播と軌道各部の動的挙動を再現する必要がある。そこでまず、HPCを活用した「車輪～路盤間の大規模並列計算モデル」の構築に取り組み、車輪／レールと転がり接触による相互作用を有限要素モデル、道床バラストを粒状体（個別要素）モデルで表現した車輪～路盤間の動的相互作用解析プログラムを開発している（図3）。このモデルでは、実用的な計算時間でkHzオーダーの高周波振動及び波動と荷重伝播を再現する。

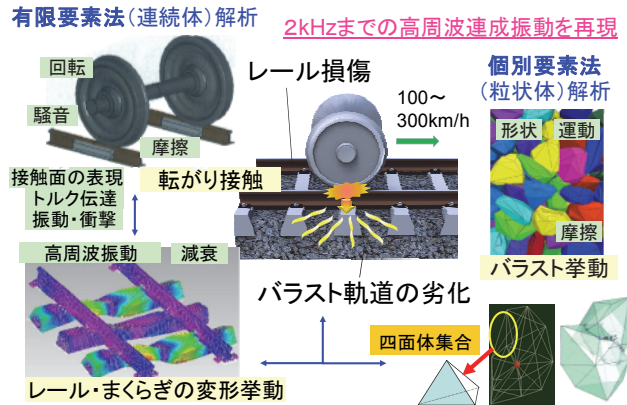


図3 車輪～路盤間のシミュレータ

③バーチャル鉄道試験線プロトタイプ

上述の①に、②から導いた劣化モデルを組み込んで、車両の走行安全性や振動乗り心地の評価とともに、長期繰り返し走行による車輪とレールの摩耗、軌道変位進みなどの予測にも活用できるバーチャル鉄道試験線プロトタイプを開発する（図4）。

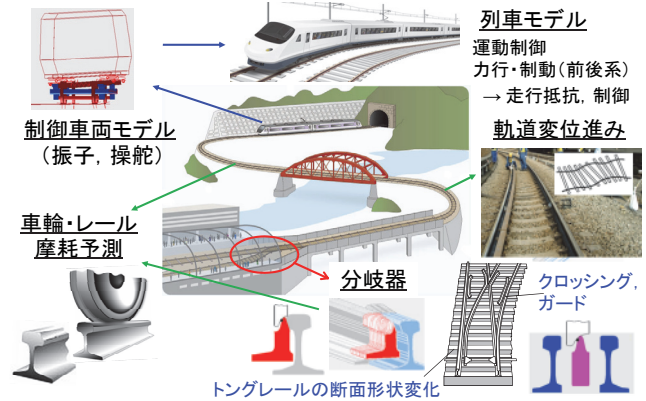


図4 バーチャル鉄道試験線プロトタイプ

④架線・パンタグラフシミュレータ

架線設備やパンタグラフを、動的挙動を含めて最適化するためには、曲線区間を含む架線偏位、走行する車両の傾斜や動揺を考慮した架線とパンタグラフ間の相互作用を解析する必要がある。そこで架線を有限要素モデル、パンタグラフを枠組みモデルとし、架線構造を精密に再現するとともに、車両動揺による屋根変位も入力可能で、従来から解析してきた上下系の挙動に加えて前後・左右を含む3次元の動的相互作用を扱うことができるシミュレータを開発している。

⑤空気流・空力音統合シミュレータ

より実車の条件に近い流れ場と空力音の解析を実現するため、まず、空気流シミュレータと空力音シミュレータを個々に開発している。さらに次年度から、両者のインターフェースを統一し、空気流・空力音統合シミュレータとする計画である。

空気流シミュレータは、風洞試験での計測が難しい複雑形状周りの流れ場の把握、車両や構造物に働く空気力の推定精度向上を図ることを目指している。そこで、従来解析が困難であった車両の屋根上集電装置や床下台車周りなどの複雑形状周りの流れ場を解析するため、HPCを活用した直交格子法による大規模並列計算プログラムの開発を進めている。また、乱流入流のモデルを構築し、より実車の走行状態に近い流れ場の解析を可能にする。

空力音シミュレータでは、空力音を精度良く推定するために、解析プログラムを並列計算できるように改良し、空気流シミュレータで得られる大量データの高速処理を実現する。

(2) 地震災害シミュレータ

地震被害を軽減するためには、効果的な対策工の開発とともに、対策を施す箇所や適切な手法を選定し、施工の優先順位を決定することが重要である。そこで、その支援を目的に、様々なシナリオに基づく地震動を入力して地震被害の予測を行い、危険箇所の把握と対策工の評価に活用できる地震災害シミュレータを開発すべく、⑥地盤・構造物群モデルの構築を進めている。

地盤・構造物群モデルでは、鉄道沿線の地盤のボーリングデータや構造物図面を電子化したアーカイブスを構築し、その中の必要なパーツ（特性データ等）を指定することで、延長数百 km の鉄道線区モデルを自動作成できるプログラムを開発している（図 5）。現在、1 自由度モデルにより延長約 100km の線区モデルを作成して地震被害を解析する簡易版シミュレータが完成し、高密度地震観測システムで計測したデータをもとに解析結果の検証を進めているところである。今後さらに、地盤・構造物の詳細モデルを用いたシミュレーションが可能なシミュレータへと拡張していく。

次のフェーズで完成を目指している地震災害シミュレータは、延長数百 km にわたる鉄道線区を対象に、任意の位置に断層を想定して発生し得る被害シナリオを模擬したり、地盤や構造物の条件を任意に入れ替え、開発した対策技術を線区に導入したときの効果を評価できるシミュレータである。また、将来的には、計算をさらに高速化して早期警報システムと連携させることで、地震発生から数十分以内に被害想定を行い、早期復旧やダウンタイム短縮にも活用できるものにしていきたいと考えている。

3. 鉄道シミュレータの将来像

本発表では、2010 年度より 5 年から 10 年先の当面の目標として開発を始めた、鉄道のダイナミクスに関わる現象を扱うシミュレータについて、その開発状況と今後の計画を紹介した。この取り組みは、従来技術の拡張だけでなく、HPC の鉄道への導入という新たなチャレンジとパラダイムシフトをも意図している。HPC により、車輪とレールの摩耗・損傷、バラスト軌道の劣化等の現象解明、車両周りの空気流と空力音の予測精度向上を図るのが大きな目標の一つである。

今回紹介した以外にも、鉄道総研では、車両や乗務員運用のダイヤ作成、旅客流動、車両走行に伴うエネルギー消費量、電磁環境等の予測、強風、降雨や斜面災害の予測など、個々の研究開発テーマの中で、シミュレーション技術の高度化を進めている。バーチャル鉄道試験線と地震災害シミュレータの先には、これらのデータを互いに共有し、鉄道の運営全般を支援するツールとして、鉄道シミュレータがさらに発展していく姿をイメージしている。

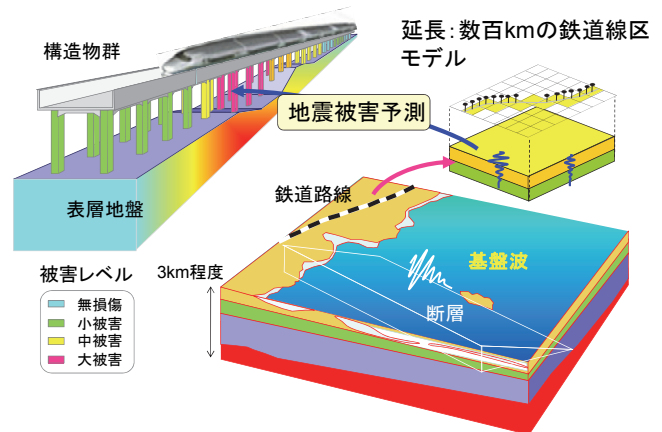


図 5 地震災害シミュレータ

文 献

- 1) 渡辺貞：世界最速コンピュータ「京」，理化学研究所，http://www.nsc.riken.jp/shirutsudoii/images/p_watanabe.pdf
- 2) 高橋亮一：第三の科学としての数値シミュレーション，日本機械学会誌，Vol.96，No.891，pp.6-9，1993
- 3) 東京大学生産技術研究所，革新的シミュレーション研究センター，<http://www.ciiss.iis.u-tokyo.ac.jp/index.php>