

鉄道シミュレータの コアシステムの設計・開発



池田 充
Mitsuru Ikeda

鉄道力学研究部 部長
[専門分野] 架線/パンタグラフ系の動的相互作用, パンタグラフの低騒音化

鉄道総研では、鉄道分野においてこれまで実験や現車試験では再現・観察が困難であった複雑な現象、あるいは大規模な現象をコンピューター上に再現するツールとして、「鉄道シミュレータ」の開発を進めています。その第1フェーズとして、鉄道地震災害シミュレーター、空気流・空力音統合シミュレーター、バーチャル鉄道試験線プロトタイプ、の3つのシミュレーター群の開発を行いました。

「鉄道シミュレータ」とは

シミュレーションとは、現実に行っている現象を何らかの方法でモデル化し、このモデルを用いて人為的に現象を再現することをいいます。これを実現する具体的なツールがシミュレーターです。

シミュレーションには様々な種類がありますが、最近では、実現象を数理モデルにより表現し、これをコンピューターにより数値的に解くことにより現象を再現する、いわゆる数値シ

ミュレーションのことを指す場合が多くなっています。この場合、シミュレーターとはプログラムそのもの、あるいはそれがインストールされたコンピューターを指すことになります。

ここで紹介する「鉄道シミュレータ」も数値シミュレーションを具現化するツールのひとつです。ただし、図1に示す通り、一つの完結したプログラムではなく、複数のシミュレーターから構成されており、これらを有機的に連携させることにより鉄道システムの

様々な現象を包括的に再現するツールとして開発を進めているものです。本稿ではその概要と現在の開発状況についてご紹介します。

「鉄道シミュレータ」の目指すもの

これまで鉄道総研では、車両、施設、電力、運輸など様々な分野において多くのシミュレーターを開発し、研究開発に活用してきました。その多くは、解析範囲をできるだけ絞ったうえで、必要最小限の物理モデルにより現象を再現する方法が採られています。

しかし、コンピューターの処理能力向上とHPC (High Performance Computing: 高性能計算技術) の発展により、数値シミュレーションの世界にパラダイムシフトが進行しつつあります。スーパーコンピューターは、10年間で約1000倍という勢いで性能が向上しています。これと大規模並列計算などのHPCの普及とが相まって、シミュレーションの方法論自体が変わりつつあるのです。最近注目を集めているマルチスケール・マルチフィジックスシミュレーションはその代表

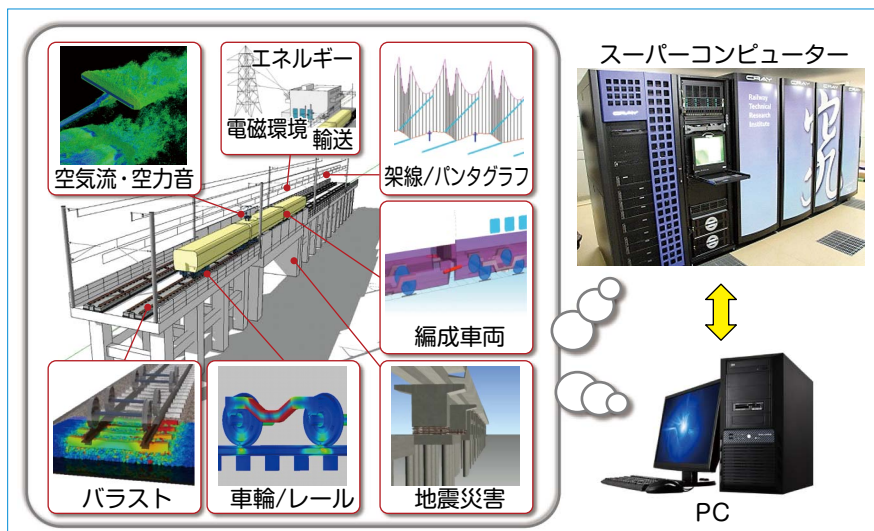


図1 「鉄道シミュレータ」のイメージ

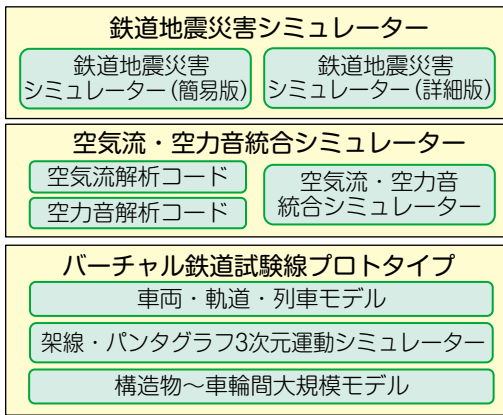


図2 「鉄道シミュレータ」の構成 (2015年3月時点)

的なものです。これは、大小様々なスケールで生じる様々な物理現象を統合的に再現するシミュレーションのことで、モデル化における仮定をできるだけ排除し、複雑な現象をそのままコンピュータ上に再現します。

「鉄道シミュレータ」は、こうした新しい方法論に立ち、鉄道分野において実験や現車試験では再現・観察が困難な複雑な現象を再現したり、大規模な現象を俯瞰的に再現したりすることが可能なシミュレーターならびにその実行環境の構築を目指したものです。なお、「鉄道シミュレータ」は理論解析や実験と並ぶ研究開発用ツールとして開発を進めているのであって、理論解析や実験の重要性には変わりはありません。誤解のないように付け加えておきます。

「鉄道シミュレータ」の構成

鉄道総研では、「鉄道シミュレータ」の開発を長期スパンのプロジェクトと位置付けています。その第1フェーズでは、以下に示す3つのシミュレーター群の構築を行いました(図2)。

- ・鉄道地震災害シミュレーター
 - ・空気流・空力音統合シミュレーター
 - ・バーチャル鉄道試験線プロトタイプ
- 以下、具体的にご紹介します。

鉄道地震災害シミュレーター

近年、想定以上の地震が頻発する傾向にあります。こうした大規模地震により生じる鉄道構造物の被害を、過去の経験だけに基づいて事前に予測評価することは容易ではありません。そこで、大規模地震の仮想的演習を行い、様々な災害シナリオの事前探査を行うとともに、各シナリオに対するリスク評価を行うことを目的として、鉄道地震災害シミュレーターを開発しました。

本シミュレーターは、震源域を含む深層地盤における地震動の伝播を計算する地震動シミュレーター、構造物の基礎部を含む表層地盤の挙動を計算する表層地盤の挙動シミュレーター、ならびに鉄道構造物の地震時挙動を計算する構造物の挙動シミュレーターの3つの個別シミュレーターを基軸として、計算に必要となるパラメーターを決定するための3つのデータベース(深層地盤情報アーカイブス、表層地盤情報アーカイブス、構造物情報アーカイブス)、ならびにこれらデータベースから解析モデルを自動的に構築するモデル自動作成アルゴリズムから構成されています。本シミュレーターはまた、構造物の解析モデルとして等価1自由度モデルを用いるのか、あるいは3次元非線形モデルを用いるのかによ

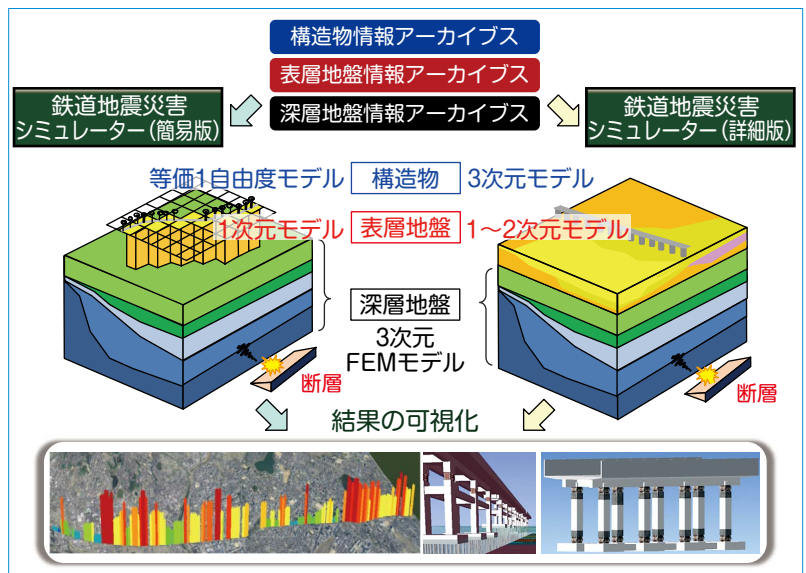


図3 鉄道地震災害シミュレーター

り、簡易版と詳細版の2種類があります(図3)。

過去に発生した大規模地震で被災した鉄道路線を対象として、鉄道地震災害シミュレーションによる被害評価結果を実際の地震被害と対照することにより、シミュレーターの精度検証を行いました。その結果、シミュレーションでは当該区間にある全69基の鉄道構造物のうち18基(26%)において補修を要する被害が発生すると予測されました。一方、実際の地震において補修の必要がある被害が発生した鉄道構造物は10基(14%)でした。このように、地震による構造物の被害を実用的な精度で、なおかつ安全側に評価できることを確認しました。

空気流・空力音統合シミュレーター

列車の高速化が進むにつれ、空気力学的問題への対応がますます重要となっています。鉄道総研では大型低騒音風洞を所有しており、こうした課題の解決に活用しています。しかし、風洞試験は空気力や空力音の測定には極めて有効な手段ですが、こういったメカニズムにより空気力や空力音が発生しているのか、といったことを実験的に捉えることは容易ではありません。

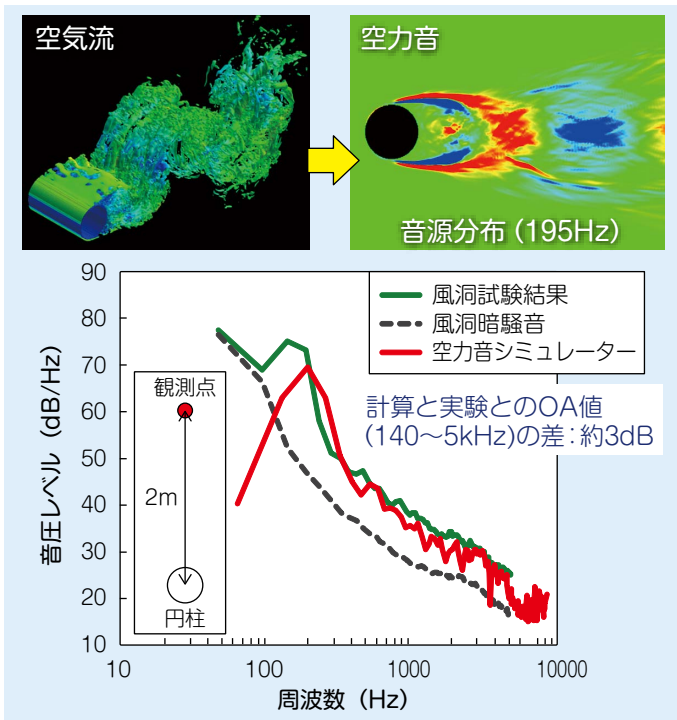


図4 空気流・空力音統合シミュレーターによる円柱から放射される空力音の評価

数値シミュレーションは、こうした空気力学的現象のメカニズム解明に非常に有効な手段です。そこで、空気流・空力音統合シミュレーターを開発しました。

本シミュレーターは、空気流シミュレーターと空力音シミュレーターの二つから構成されます。空気流シミュレーターは、物体まわりの流れ場を計算します。その大きな特徴は、直交格子と呼ばれる計算格子の採用により、3次元CADデータから計算格子を自動的に生成可能としたことです。現在、流れ場の計算に多用されている非構造格子の場合、格子生成作業に多くの時間と労力を要しています。格子生成の自動化により、シミュレーションの実行に要する人的リソースの大幅な節約を実現しています。

空力音シミュレーターは、流れ場の計算結果をもとに、渦音理論に基づいて遠方に放射される空力音の大きさを計算します。この方法は、物体近傍における音源分布を定量的に評価できる

ことが特徴であり、空力音の発生メカニズムを解明するうえで有益な情報を提供することができます。

この二つのシミュレーターは統合的に運用することが可能です。円柱まわりの流れ場を空気流シミュレーターにより計算し、これをもとに空力音シミュレーターにより空力音を評価した結果を図4に示します。風洞試験結果と比較したところ、円柱の空力音を3dB程度の誤差で評価可能であることを確認しています。また、複雑物体に関する計算例として、パンタグラフまわりの流れ場の計算例を図5に示します。直交格子法は並列計算効率が高いことも特徴の一つであり、計算規模の大きい場合にこの特徴が活きてきます。図5の例は、計算格子数100億点規模の大規模計算を、理化学研究所の京コンピューターを用いて実施したのですが、舟体のまわりに発生する渦を1mm以下のスケールで再現することに成功しています。

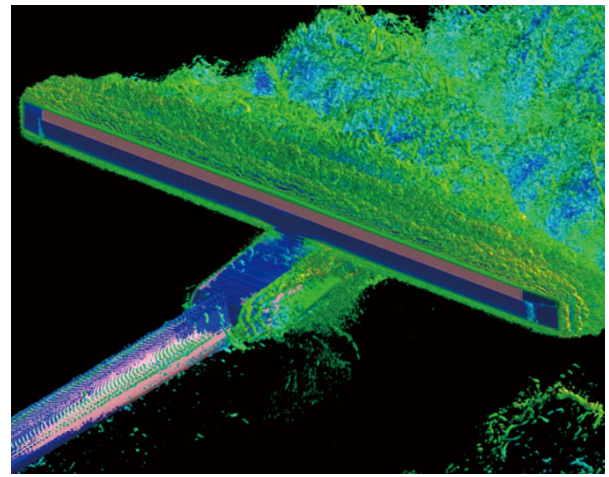


図5 パンタグラフの舟体まわりの渦構造 (格子数100億点：京コンピューターを使用)

バーチャル鉄道試験線プロトタイプ

列車を安全・確実に運行するには、列車走行時の鉄道システムの力学的挙動を十分把握することが重要です。しかし、鉄道システムが大規模・複雑化するにつれ、起こり得る挙動も多様化しており、その全てを実際の走行において把握することは困難です。

そこで鉄道総研では、様々な状況下における列車走行時の力学的挙動をコンピューター上に再現し、仮想的な走行試験を行うためのシミュレーター群をバーチャル鉄道試験線と名付け、その構築を進めています。今回、そのプロトタイプとして以下の3つのサブシミュレーター群を開発しました(図6)。

- ・車両・軌道・列車モデル
- ・架線・パンタグラフ3次元運動シミュレーター
- ・構造物～車輪間 大規模モデル

車両・軌道・列車モデルは、汎用マルチボディーダイナミクス解析ソフトSIMPACT¹⁾に適用可能な、車体、台車、インバーター/モーター、車体間結合要素、車輪・レール形状、軌道などのデータベースからなる解析モデルです。想定する走行条件に合わせて必要なモデルを組み合わせることにより、SIMPACT上で仮想的な走行試験を実

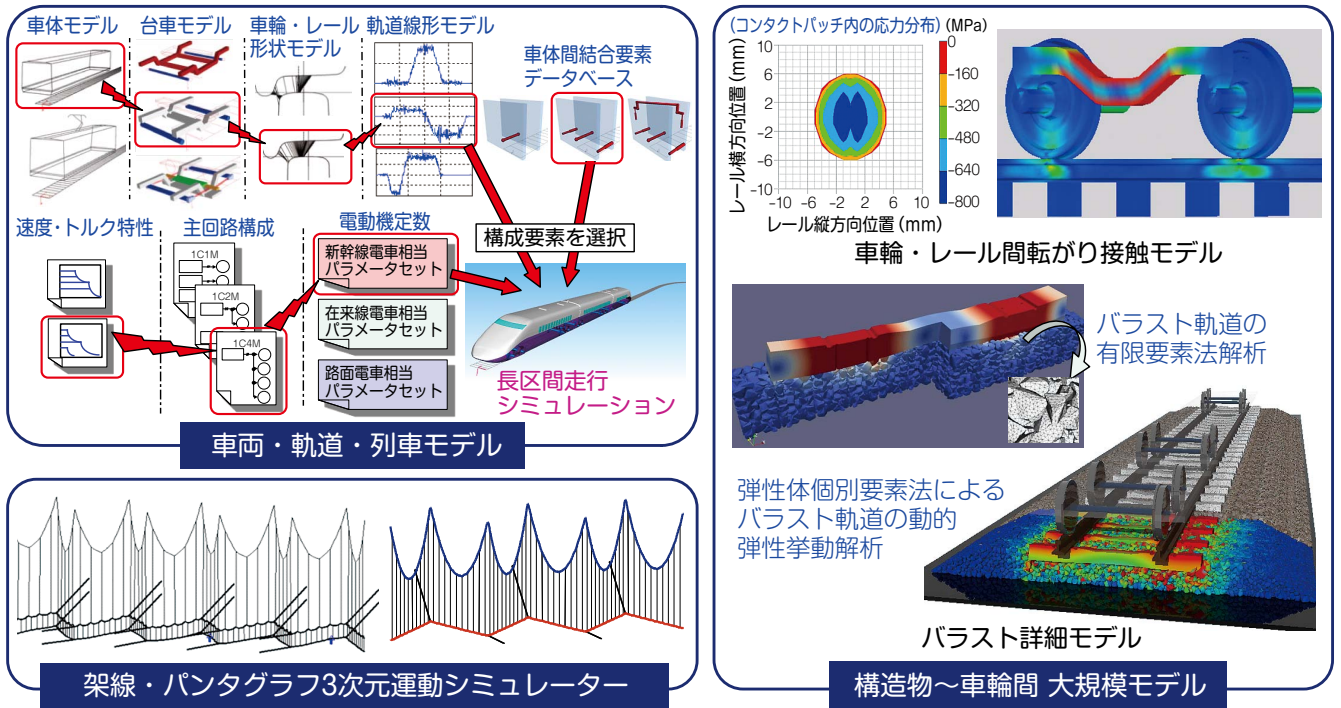


図6 バーチャル鉄道試験線プロトタイプ

施することができます。例えば、ノッチ操作を入力として車両走行性能を再現させたり、操舵台車や車体傾斜装置を組み込んだときの走行安全性を調べることができるなど、様々な条件下における仮想的な走行試験が可能です。

架線・パンタグラフ3次元運動シミュレーターは、架線の複雑な3次元構造を再現したうえで、架線とパンタグラフの間の動的相互作用解析を行うものです。曲線引金具によるトロリー線引き上げや、風による架線のはらみなどを正確に考慮したうえで、架線とパンタグラフの動的挙動を計算することができます。

構造物～車輪間大規模モデルは、車輪・レール間転がり接触解析モデルと、バラスト詳細モデルの2つに大別できます。車輪・レール間転がり接触解析モデルは、車輪とレールとの間の転がり接触挙動を精度よく再現するため、東京大学奥田教授が開発したFrontISTR²⁾をベースとして構築した大規模FEM解析モデルです。列車走行に伴う軌道劣化メカニズムを解明するためには、車輪とレールとの接触面

内に発生する接触力変動を正確に評価する必要がありますが、こうした挙動を高い周波数領域まで正確に再現することは困難でした。そこで、カルカーのクリープ理論などの接触モデルを用いることなく、接触現象を計算により直接再現していることが、本解析モデルの特徴です。一方、バラスト詳細モデルは、バラスト層を連続体として取り扱うのではなく、バラスト一つ一つの運動を、その弾性変形まで含めて個別に計算することが特徴で、海洋研究開発機構との共同研究により開発したものです。このモデルにより、バラスト軌道全体の動的挙動を詳細に再現することができます。これら二つの解析モデルを連成して運用することにより、列車通過時の車輪、レール、まくらぎ、バラストの運動を高周波領域まで含めて再現可能となりました。

成果の活用

今回紹介した成果のうち、鉄道地震災害シミュレーターは単体ツールとしてはすでに活用事例がありますが、さらにリアルタイム性を向上させて早期

地震警報と連携して運用したり、実際の地震被害を参照することにより解析モデルの自己修正機能を実現するなどの研究を引き続き実施します。

その他のシミュレーターについては、開発の第2フェーズとして、各シミュレーターの機能向上を図るとともに、各シミュレーターを相互に連成させるための実行環境、ならびに各シミュレーター間で共通利用可能な計算条件データベースの構築を進める予定です。さらに、列車運行や鉄道通信環境などに関するシミュレーター群も開発に加えます。

これらシミュレーター群を連携して運用し、その計算結果を共有することにより、複雑で大規模な鉄道システムに関わる様々な現象を再現することができるツールとして発展させる予定です。**RRR**

文献

- 1) SIMPACK Webサイト, <http://www.simpack.jp/>
- 2) 奥田洋司：並列有限要素解析[II]並列構造解析ソフトウェアFrontSTRを使いこなす, 培風館, 2008