

# 鉄道シミュレータの構築

涌井 一

研究開発推進室  
(主管研究員 将来指向課題リーダー)

石田 弘明

鉄道力学研究部  
(部長)



わくい はじめ いしだ ひろあき

## はじめに

理論解析・実験に続く「第三の科学手法」としてコンピュータシミュレーションが脚光を浴びつつあります。10年で1,000倍もの拡大を続けている計算機パワーを利用して、従来の簡素なモデルによるシミュレーションとは一線を画し、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ようとするところに「第三の科学手法」と呼ばれるゆえんがあります。実験の役割は、仮定の検証や基本パラメータの同定などに益々重点が置かれていくことになるでしょう。

今年度からスタートした将来指向課題の一つである「鉄道シミュレータの構築」は、この研究手法のパラダイムシフトに積極的にチャレンジしようとするものです。複雑かつ大規模な全体系に対し、数値実験により新たな発想・概念・知見を得てイノベーションを図ることが、鉄道シミュレータ構想の狙いです。ここでは、これから構築していく鉄道シミュレータのフレームと、具体的に開発を進めている個々のシミュレーションモデルを紹介します。

## コンピュータの目覚ましい進化

鉄道シミュレータを紹介する前に、現在のコンピュータをめぐる状況に少し触れておきます。現代のコンピュータは、中枢の演算処理部分としてALU(算術論理演算装置)と制御ユニットを一つの集積回路にまとめたCPU(プロセッサ：中央処理装置)ならびにメモリ(記憶装置)で構成され、通常はクロック(複数の回路のタイミングを取るために使用される周期的な信号)に基づいて動作します。近年は個々の装置が高速化し、コンピュータの処理速度が以前より格段に向上していることは、すでにご存じの通りです。ところで最近のスーパーコンピュータは、小さなコンピュータとも言える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います。例えば、地球シミュレータでは、8個のCPUと共有メモリが

らなる計算ノード160台(合計1280個のCPU)が非常に高速なデータ転送能力を持つネットワークで結合されています。この意味するところは、一つの計算プログラムで実行するタスクを分割して、1280個のCPUで同時に並列処理させることも可能だということです。つまり粗っぽいい方をすれば、これまで1CPUのコンピュータで約3年半かかっていた計算が1日のできるようになるのです。計算科学の分野では、並列化によって大規模なモデルを高速計算するソフトウェアの開発が着々と進められ、現象解明の道具としてすでに活用され始めています。このようなスーパーコンピュータの利用による高性能計算をHPC(High Performance Computing)と言います。HPCは、その工学的な利用の促進により、産業界に革新をもたらす可能性を秘めているとも言われています。

鉄道総研では、2009年5月にスーパーコンピュータCray製XT4を導入し、すでに様々な研究開発に利用しています。XT4は、地球シミュレータよりも規模の小さい、分散メモリ方式(1個のCPUとメモリからなる計算ノードを高速ネットワークで結合した方式)でCPUが合計268個のコンピュータですが、並列化プログラミングの技術を用いることによって、大規模のデータを扱いつつ、高速な計算を実現することができます。

鉄道シミュレータでも、これらのスーパーコンピュータを利用し、HPCの技術を活用して開発していく計画です。

## 鉄道シミュレータの目指すもの

鉄道には、設備などの物理的なものから経営に係る抽象的なものまで様々なシステムがあります。このうち、まずは列車の運行に伴い発生する力学的な現象を取り上げ、鉄道シミュレータのコア(核)となるシステムを開発します。今年度からスタートした将来指向課題では、「バーチャル鉄道試験線」と「地震災害シミュレータ」からなるコアシステムの開発を5ヶ年計画で進めています(図1)。

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す。その開発のためにまず、「車輪～構造物間のシミュレータ」と「車両・軌道モデル、列車モデル」により「バーチャル鉄道試験線プロトタイプ」を構築します。また、それと並行して「架線・パンタグラフシミュレータ」と「空気流・空力音統合シミュレータ」を開発します。そして、これらを統合して「バーチャル鉄道試験線」とします。

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す。まず、「地盤・構造物群モデルデータベース」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」を作り上げていきます。

以上に述べた ～ のコアシステムの開発スケジュールを図2に示します。

これらのコアシステムは、コンピュータ上での列車走行の模擬に加え、実測が困難な現象の再現や長期繰り返し走行による摩耗・損傷といった劣化現象の予測、自然災害による広域での被害予測に活用することができます。

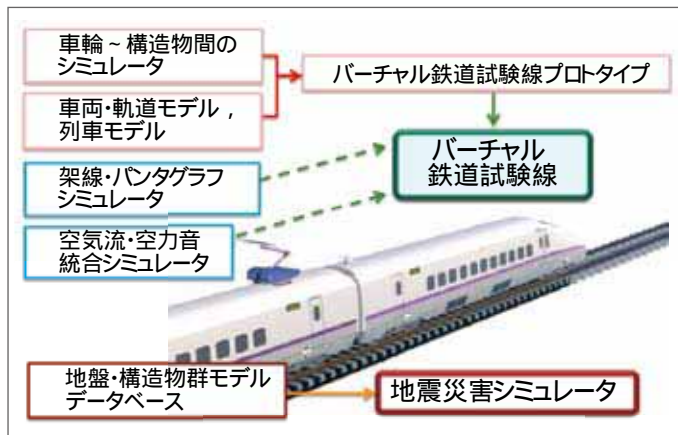


図1 鉄道シミュレータのフレーム

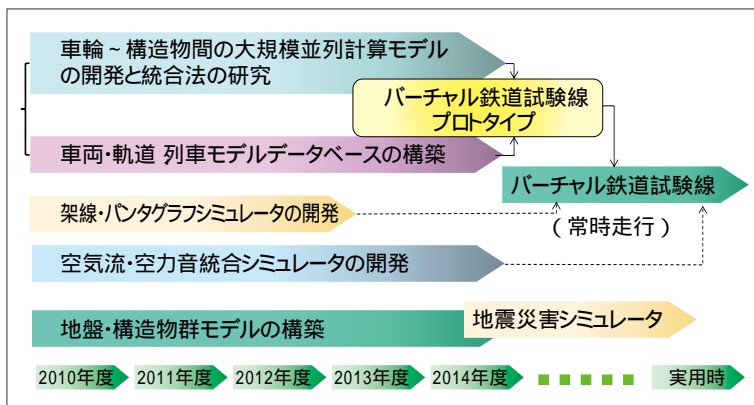


図2 コアシステムの開発スケジュール

## バーチャル鉄道試験線とは？

列車が営業線を走行する場合を考えると、次のようになります。まず、A駅を出発して分岐器を通過します。列車はさらに加速して惰行運転に入ります。曲線の手前では制限速度まで減速し、曲線区間を通過していきます。再び加速した後、B駅に近づくと減速し、やがて駅構内の分岐器を通過してB駅に停車します。走行中の列車は加減速をするだけでなく、常に上下・左右・前後に揺れています。もちろん、列車の走行に伴って、架線、軌道、構造物も振動します。また、A駅からB駅までの区間を走行する列車は1本だけではありません。通勤電車や特急電車などの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きます。車両の側でも車輪やパンタグラフのすり板が摩耗していきます。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になったり、騒音の発生源になったりします。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す。

実際の軌道上で車両を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します。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可能で、その後の軌道状態などの変化を短時間で予測することができるようになりますと期待されます。

バーチャル鉄道試験線を構成する具体的なコアシステム ～ (図1)について、以下にその概要を説明します。

### 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、レール上を転動する車輪、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います。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ます。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に発生するすべりや接触力変動、高周波輪重変動の伝播と軌道各部の動的挙動を再現する必要があります。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/レールの転がり接触による相互作用を有限要素モデル、道

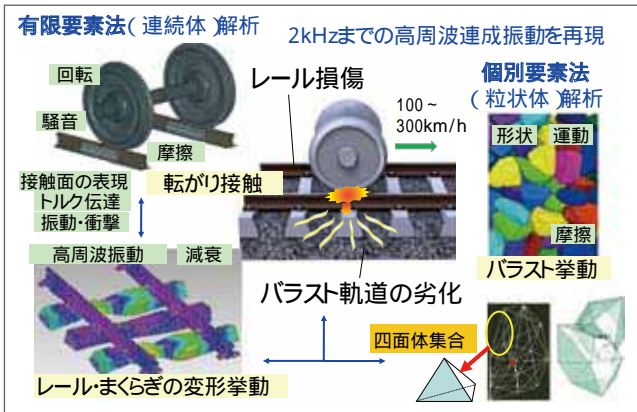


図3 車輪～路盤間の大規模並列計算モデル

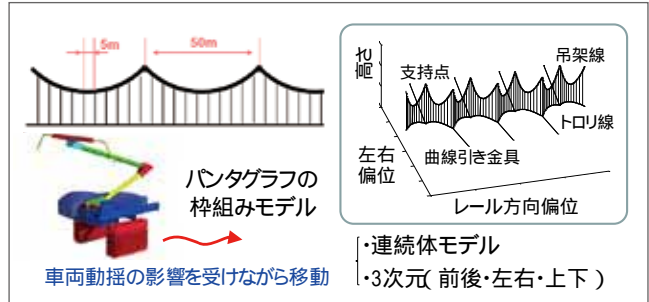


図5 架線・パンタグラフシミュレータ

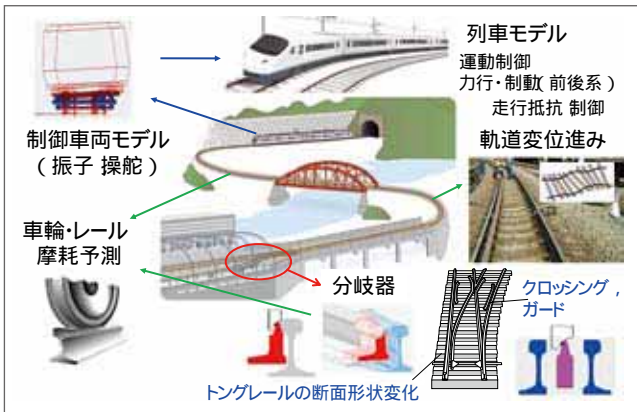


図4 パーチャル鉄道試験線プロトタイプ

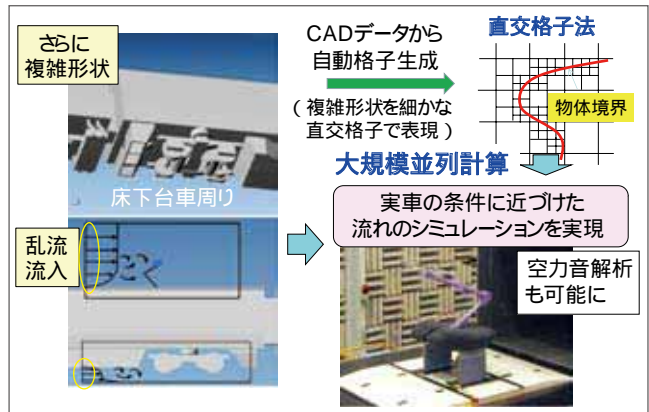


図6 空気流・空力音統合シミュレータ

床バラストを粒状体モデルで表現した、車輪～路盤間の動的相互作用解析プログラムを開発します(図3)。

#### 車両・軌道モデル、列車モデル

車両・軌道モデルでは、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します。振りや操舵など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り、車両の加減速もコンピュータ上で再現します。さらに、複数の車両を連結した列車モデルを構築し、例えば、制御振り車両が曲線を通る際の列車としての挙動などを扱うことができますようにします。

#### バーチャル鉄道試験線プロトタイプ

上述のとを統合して、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」を開発します(図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ります。そこで、架線を連続体モデル、パ

ンタグラフを枠組みモデルとし、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「架線・パンタグラフシミュレータ」を開発します(図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、各々の個別シミュレータを開発します。

空気流シミュレータでは、実車走行に極めて近い状況をコンピュータ上で再現し、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力力の推定精度向上を図ることを目指しています。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(図6)による大規模並列計算プログラムの開発を進めます。また、乱流流入のモデルを構築し、より実車の走行状態に近い流れ場の解析を可能にします。

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て、空気流シミュレータで得られる大量データの高速度処理を実現します。

5年後には、各要素のインターフェースの統一化を図り、

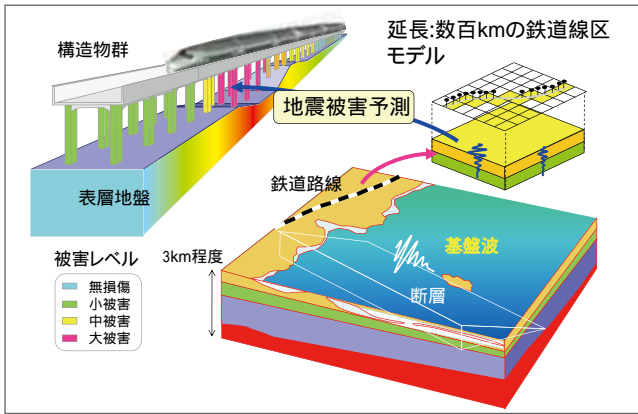


図7 地震災害シミュレータ

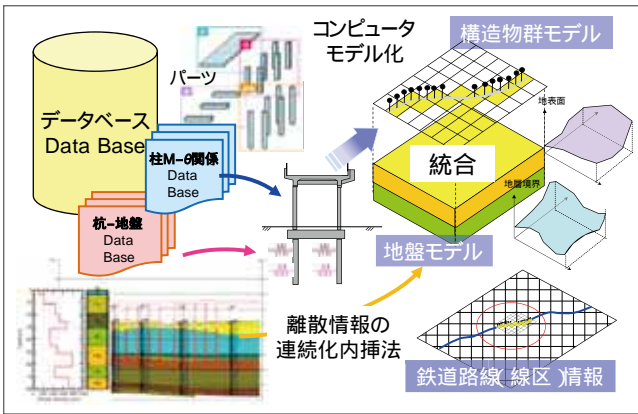


図8 地盤・構造物群モデルデータベース

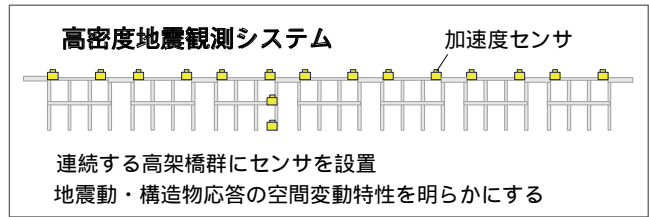


図9 シミュレータ検証用の高密度地震観測システム

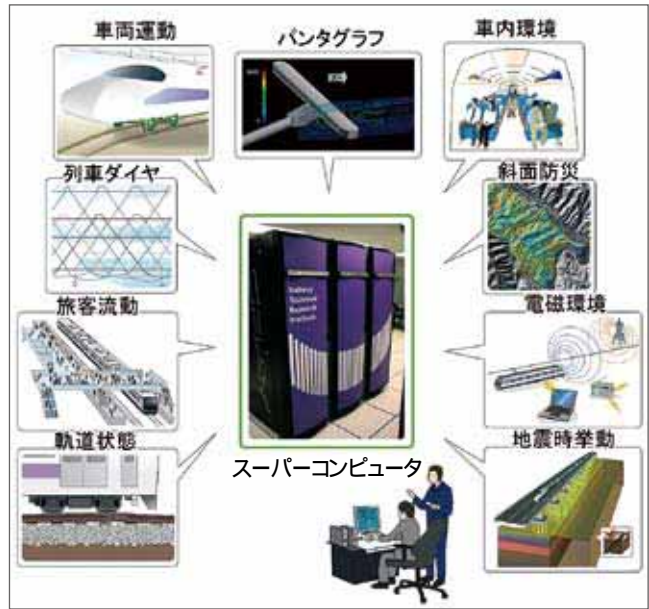


図10 鉄道シミュレータの将来像(イメージ)

「空気流・空力音統合シミュレータ」とする計画です。

### 地震災害シミュレータとは？

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、適切な施策を選定し、その優先順位を決定することが重要です。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」を開発します(図7)。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す。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ます。

地震災害シミュレータを構成するコアシステムである(図1)について、以下にその概要を紹介します。

#### 地盤・構造物群モデルデータベース

地震災害シミュレータを実現するため、まず、鉄道沿線

の地盤や構造物の特性のデータベースを構築します。そして、「地盤・構造物群モデルデータベース」の中から必要なパーツを指定することで、鉄道線区モデルを自動的に作成できるプログラムを開発します(図8)。

現在、地盤のボーリングデータや構造物図面の電子化、自動モデリング手法の検討を進めています。また、解析結果の検証を目的とした高密度地震観測システムの構築についても検討を行っています(図9)。

#### おわりに(鉄道シミュレータの将来像)

今年度からスタートした将来指向課題「鉄道シミュレータの構築」について、その概要を紹介しました。これらは、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です。鉄道総研では、ほかにも列車ダイヤの作成、車両走行に伴うエネルギー消費量、電磁環境、旅客流動、強風、降雨による斜面災害など、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ます。将来的には、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思い描いています(図10)。 RRR