

鉄道一般

車両

軌道

構造物

防災

電力

信号通信
情報

材料

環境

人間科学

浮上式鉄道

鉄道における 数値シミュレーション

近年、コンピューターを用いた数値シミュレーションが、研究開発をはじめさまざまな分野で活用されています。今月号で「数値シミュレーション」を特集するにあたり、鉄道における数値シミュレーション技術の進展やその役割を振り返るとともに、現在、鉄道総研が取り組んでいる鉄道シミュレーターの開発状況や将来構想などについて紹介します。



網干 光雄
Mitsuo Aboshi
研究開発推進室
主管研究員

はじめに

数値シミュレーションは、現象を表す方程式をコンピューターを用いて解くことにより自然現象や社会現象などを模擬することであり、理論と実験につぐ第三の科学として、今や必要不可欠な道具となっています。その背景には、スーパーコンピューター(☞参照)の進化とHPC(☞参照)を活用した研究開発のパラダイムシフトという流れがあります。

鉄道においても、比較的早くから数値シミュレーションが用いられてきており、現在では、鉄道事業者やメーカーなどでも広く活用されています。

鉄道における数値シミュレーションのはじまり

今でいう「コンピューター」が一般的になる前は、手回しの機械式計算機や、電気回路の積分や微分機能を利用したアナログ式計算機が用いられていました。鉄道分野においても、運転曲線を求める機械式計算機の開発や、アナログ計算機による運動シミュレーションなども行われています。

鉄道総研の前身である旧国鉄の鉄道技術研究所に、米国製のデジタル式電子計算機が導入されたのは1957年のことです。一般の科学技術計算を主目的にしたものとしては、当時の日本で

☞ スーパーコンピューター

一般的には、その時代の最新技術が投入された科学技術計算を重視した最高速の計算機を指します。日本では、「地球シミュレータ」(2002年)や「京」(2012年)が知られています。「京」の処理速度は10PFLOPS(1秒間に1京回の浮動小数点演算を実行)に達しており、10年前の水準に比べると約1000倍もの高速化となっています。

☞ HPC (High Performance Computing : 高性能計算)

最近のスーパーコンピューターは、CPUとメモリー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います。コンピューター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研究開発のみならず企業のものづくりにも活用され始めています。

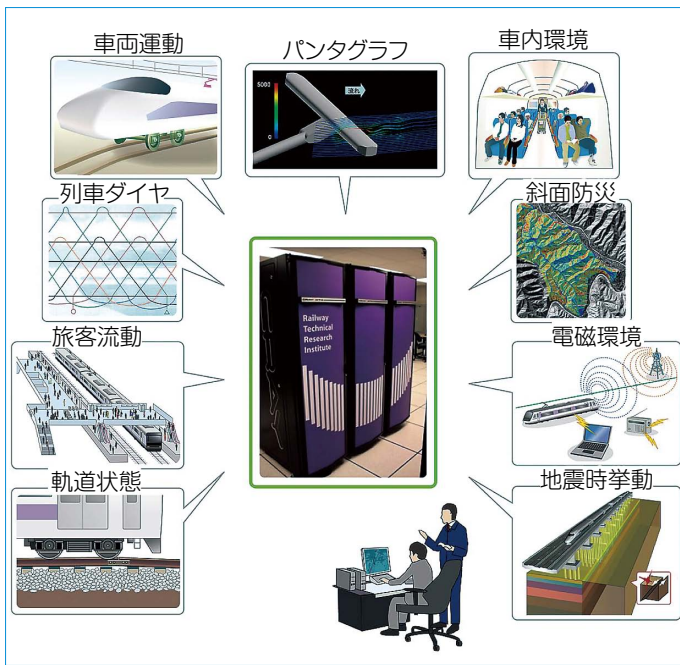


図1 鉄道におけるシミュレーション技術

表1 数値シミュレーションの一例

分野	数値シミュレーションの例
車両	車両運動、転がり接触疲労、脱線・衝突時挙動、車輪摩耗・亀裂進展、エネルギー消費など ²⁾
軌道	分岐器通過、レール損傷、バラスト挙動 ³⁾ など
構造物	構造物の地震時応答評価、車両と構造物の相互作用、地盤と構造物の相互作用、広域地震動評価など
防災	雨水流動、局地気象、斜面災害危険性など
電力	架線・パンタグラフ運動、き電回路・運転電力(図2)など
信号通信	連動、踏切制御、電波雑音放射、雷サージなど
輸送情報	列車運行、旅客行動(図3)、駅構内旅客流動、センサーネットワークなど ⁴⁾
空力・音響	空気流、空力音 ⁵⁾ 、構造物音、トンネル内の温熱・火災・煙、駅の温熱環境など
人間科学	衝突時の人体挙動など

唯一のものだったそうです。さっそく車体強度や輪重・横圧、土木構造物などの各種の技術計算や座席予約装置の研究に用いられるとともに、列車運転曲線¹⁾や連動装置、変電所負荷のシミュレーションなどが行われています。

計算機の性能も向上し、1970年代頃になると、架線・パンタグラフの運動や脱線現象、車端衝撃解析などの動力学に関するシミュレーションのほか、

車両運用、旅客流動などのシミュレーション手法の開発が行われています。

1980年代頃になると、パーソナルコンピューターが一般にも普及しはじめ、シミュレーションも比較的手軽に行えるようになります。また、1988年には、鉄道総研にいわゆるスーパーコンピューターが導入され、実用の車両やパンタグラフなどを対象とした流体計算などの大規模計算が行われるよ

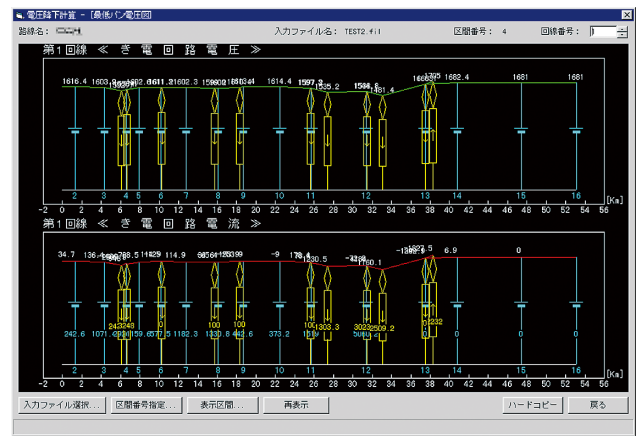


図2 運転電力用シミュレーション

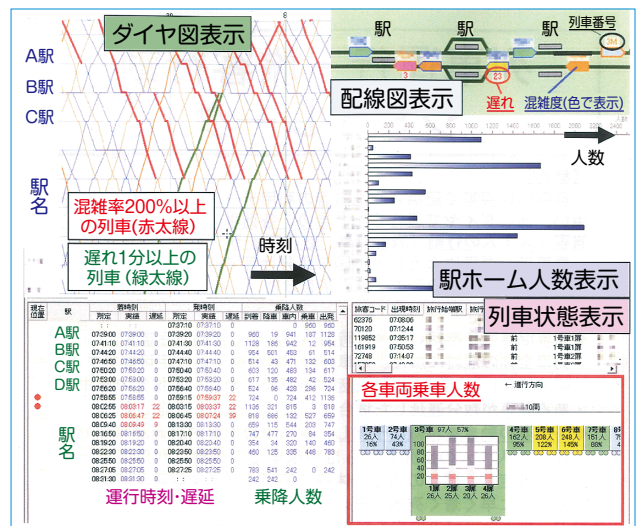


図3 列車運行・旅客行動シミュレーション

うになります。

理論や実験に加えて、数値シミュレーションを用いることで新たな知見がより詳細に得られるようになり、鉄道の安全性向上や高速化、低コスト化などに大きな役割を果たしてきました。

さまざまな鉄道分野で活用される数値シミュレーション

現在、鉄道における数値シミュレーションの対象も、車両、軌道、構造物、防災、電力、信号通信、輸送情報、空力・音響、人間科学など多岐にわたります(図1)。鉄道総研が開発して、現在使用しているシミュレーション手法としては、表1に示すものが一例として挙げられます(図2, 図3)^{2)~5)}。

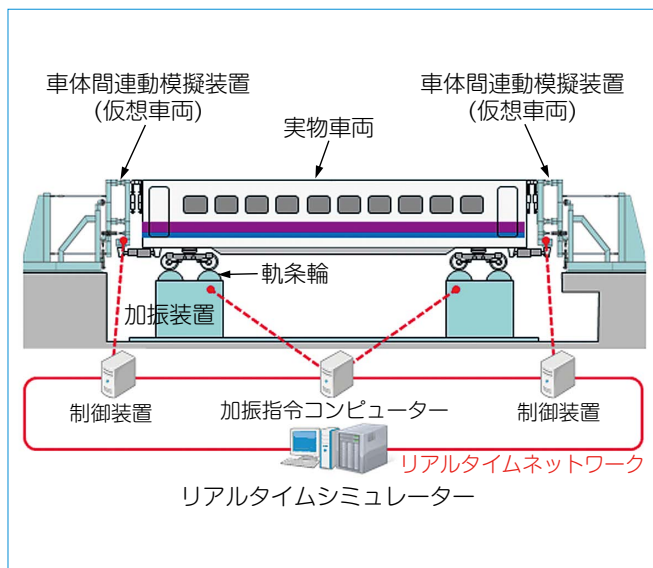


図4 HILSシステム

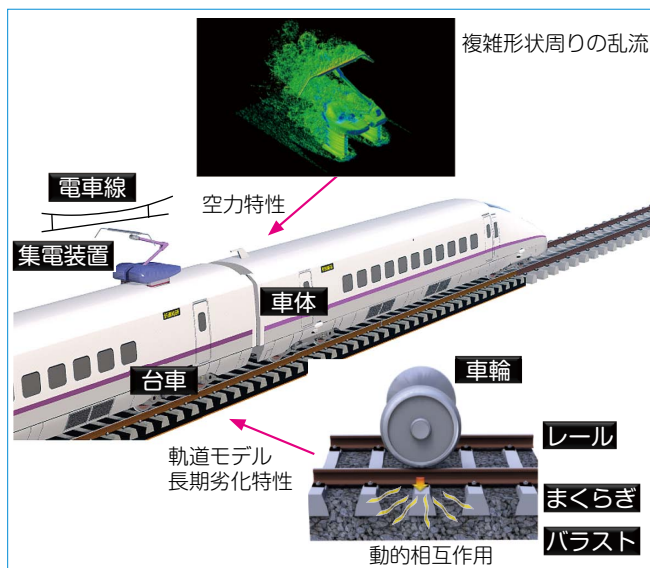


図5 バーチャル鉄道試験線

また、図4に示すような、ソフトウェアのシミュレーターと実物車両を組み合わせて実時間の編成走行シミュレーションを可能とするHILSシステム(Hardware-in-the-loop-simulation)⁶⁾を開発しています。

バーチャル鉄道試験線

鉄道総研では、コンピューター上で列車走行を模擬することに加えて、長期間の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念頭に、現在研究を進めています。

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、構造物も振動します。また、さまざまな車両が繰り返し走行し、レールやトロリー線が摩耗したり、軌道もバラストの角部が破壊して徐々に劣化します。車両も車輪やパンタグラフのすり板が摩耗し、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発生の要因となります。

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、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(図5)。現

在、バーチャル試験線を構成するシミュレーターとしては、

- ①車両・軌道モデル、列車モデル
- ②車輪～構造物間のシミュレーター(図6; 図はバラストの挙動を示す)
- ③架線・パンタグラフシミュレーター(図7)⁷⁾
- ④空気流・空力音統合シミュレーター

を想定しており、将来これらを連成することを念頭にコアとなるシミュレーターの開発を進めています。上記の①②については、本特集で紹介しますので、あわせてご参照ください。

なお、これらの一部は、東京大学、株式会社先端力学シミュレーション研究所、独立行政法人海洋研究開発機構と共同研究を行っています。

地震災害シミュレーター

高架橋などの土木構造物の地震被害を軽減するためには、効果的な対策方法を開発するとともに、対策を施す箇所の適切な選定と、施工の優先順位を決めることが重要です。そこで、その支援を目的に、さまざま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方法

の評価に活用できる地震災害シミュレーターの開発を目指しています。

現在、簡易版を構築したところですが(図8)、将来的には、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て、開発した対策技術を線区に導入したときの効果を評価することを考えています。

将来の鉄道シミュレーター

上記のバーチャル鉄道試験線と地震災害シミュレーターは、いずれも鉄道の動力学に関わる現象を扱うものです。前に述べたように、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、さまざまな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発展していく姿をイメージしています。

おわりに

構造解析や流体解析、電磁界解析な

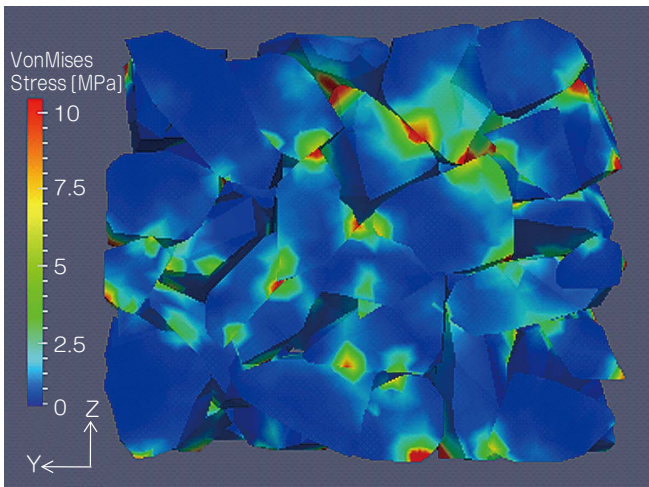


図6 バラストの挙動シミュレーション
(列車通過時のバラスト各部の応力分布を色表示したもの)

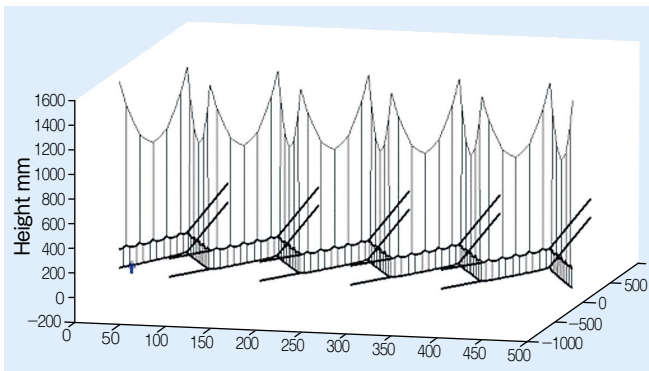


図7 架線・パンタグラフの3次元運動シミュレーション

どの汎用のシミュレーションソフトは、さまざまな分野で使われていますが、一方で、企業などで開発した内製コードと言われる独自のシミュレーション手法も多く使われています。後者はプログラミング技術が必要な半面、作成可能なモデルに制約がなく、機能の拡張が容易という利点があります。現象解明などの基礎研究や開発案件向けとして、これからも重要な役割を果たすものと考えられます。

数値シミュレーションは、定量的精度が高いこと、長時間の現象や実験不可能な現象を再現できることなどの長所があり、今後も、その役割はますます大きくなるものと思われます。その一方で、これらを扱う人は、計算精度や計算モデル、入力するパラメーターは適切か、などを常に検証する姿勢を

忘れないことが必要です。シミュレーション手法の開発は、単にプログラムを書くだけでなく、理論との整合性を考えるとともに、「現場」で起きている現象を詳細に観察し、そのために実験や計測技術を高度化して、これらを検証しながらシミュレーションの精度を上げていくプロセスが重要です。

数値シミュレーションは、単に目前の課題を解決するためだけではなく、予期しない現象への備えや技術探索として、また将来に新たな価値を生み出すツールとしても期待されています。

鉄道総研では、今夏より新たなスーパーコンピュータを導入し、シミュレーション技術の高度化をさらに図りながら、鉄道の発展に向けた研究開発を進めてまいります。**RRR**

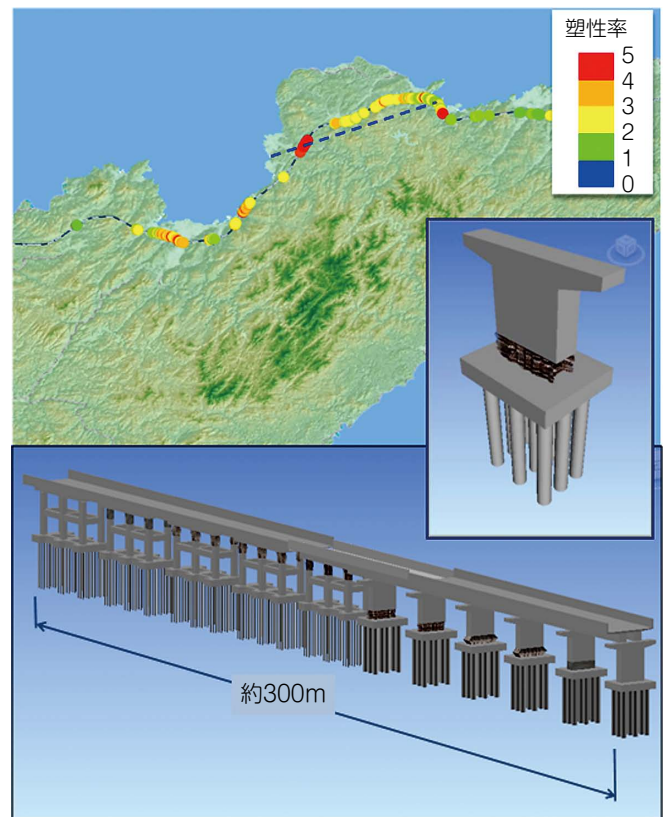


図8 地震災害シミュレーター(簡易版)

文献

- 1) 稲田伸一, 古河寿之: デジタル計算機による列車運転のシミュレーション, 鉄道技術研究報告, No.159, 1960
- 2) 小笠正道: 環境を考慮した車両関連シミュレーション, 鉄道総研報告, Vol.27, No.5, pp.1-4, 2013
- 3) 相川明, 浦川文寛: 三次元個別要素法によるバラスト軌道の動的応答解析, 鉄道総研報告, Vol.23, No.2, pp.11-16, 2009
- 4) 土屋隆司: 鉄道における情報通信技術の活用とシミュレーション技術, 鉄道総研報告, Vol.27, No.2, pp.1-4, 2013
- 5) 高石武久, 佐川明朗: 高周波数域まで予測可能な空力音数値解析手法, 鉄道総研報告, Vol.23, No.7, pp.11-16, 2009
- 6) 真木康隆, 他: 編成走行を模擬するHILSシステムの開発, 鉄道総研報告, Vol.24, No.6, pp.11-16, 2010
- 7) 池田充: 有限要素法に基づく架線・パンタグラフ系の3次元運動シミュレーション, 鉄道総研報告, Vol.26, No.8, pp.11-16, 2012