

# 鉄道のシミュレーション技術

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



上半 文昭  
Fumiaki Uehan

鉄道力学研究部 部長  
【専門分野】破壊解析, 振動計測,  
非破壊検査

鉄道におけるコンピューター技術の活用については、黎明期のアナログ計算機の代替から始まり近年の大規模なシミュレーションに至るまで、車両、軌道、構造物、防災、電力、信号、通信、輸送情報、環境、人間科学など、さまざまな分野で展開されてきました。今月号で「鉄道のシミュレーション技術」を特集するにあたり、鉄道におけるシミュレーション技術の役割について概観するとともに、将来の展開について展望します。

## はじめに

シミュレーションとは、自然現象、物理現象、社会現象に含まれる特定のシステムを切り出し、実験装置、机上計算、コンピューター計算などを用いてその動きを表し模擬することをいいます。何かの現象のメカニズムを解明したいときや、対策の効果を事前に検討しておきたいときなどに広く活用されています。とくに近年では、スーパーコンピューターの高性能計算(※参照)

をベースとした、大規模な数値シミュレーションによる研究開発の効率化が期待されています<sup>1)</sup>。その役割は、さまざまですが、鉄道分野ではたとえば、①超高速での車両走行、脱線後の車両挙動といった、安全上の問題や機器や装置の能力から再現が困難な現象の解明、②風洞実験や振動台実験のように時間や費用を要する実験の補完、③車輪とレールの接触問題に代表されるような、実験、測定、観察が困難な問題

の微視的なメカニズムの追究、④地震、津波、強風、降雨といったスケールの大きな自然災害の分析などでの活用が期待されています。

一方で数値シミュレーションは近年、異なる姿でも展開をみせようとしています。異なるシステムのシミュレーションを組み合わせた「連成シミュレーション」、情報・統計学や先端的なセンサー技術とシミュレーションとを組み合わせた「フィールドイン

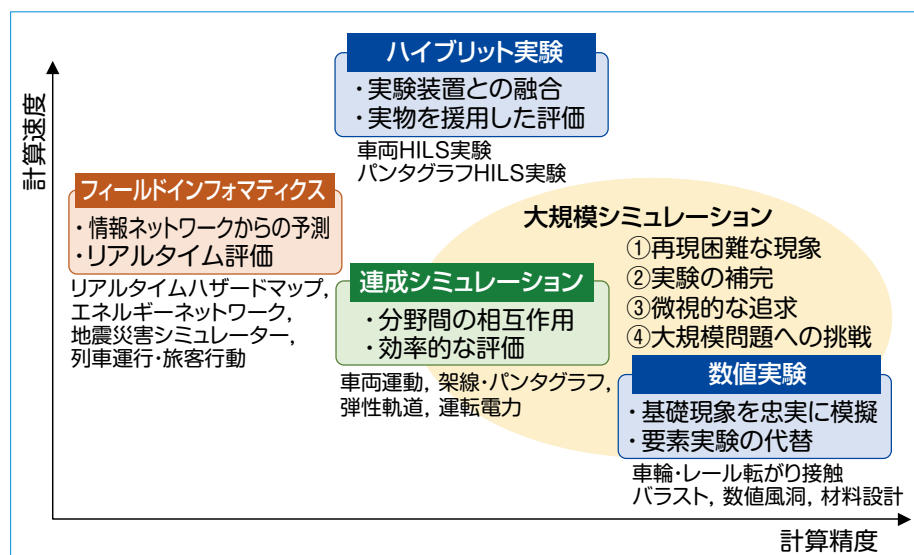


図1 シミュレーションの展開

## ※ スーパーコンピューターの高性能計算

スーパーコンピューターは、主として科学技術計算に用いられる大規模高速コンピューターを指し、1秒間に実行可能な浮動小数点演算の計算速度などで性能が評価されます。最近のスーパーコンピューターは、ネットワーク化された大量のCPUコアと大容量のメモリーを搭載し、1つの計算問題を複数のCPUコアで並列処理することで、一般的なPCでは実行不可能な超大規模な高性能計算を行えます。高性能計算には、ハードウェアだけでなく、並列処理に適したソフトウェアも必要です。

フォーマティクス」, 高度な実験装置とシミュレーションとを組み合わせた「ハイブリッド実験」, 追及するシステムをより微視化・高精度化した「数値実験」などがその例としてあげられます(図1)。ここでは, 鉄道総研が開発を進めている鉄道のシミュレーション技術について, 現状と将来像を紹介したいと思います。

## 大規模シミュレーション

自然現象, 物理現象, 社会現象について, 理論的に解を求めていくことはきわめて困難です。そこでコンピューター計算によるシミュレーションでは, 解明したい特定システムを抜き出して微小な領域に分割し, この微小領域に支配方程式(☞参照)を適用して, 近似的に解を求めていく方法が用いられます。この手法は, 求解可能である一方で, 特定システムに含まれるすべての微小領域の方程式を連立(ばく)させて解く必要があり, 計算の規模が莫大となります。

これを可能にしたのが, 前述のスーパーコンピューターを用いた高性能計算です。大量のプロセッサを制御した超並列計算により, 実験では困難な条件設定や素早い条件変更が可能です。あるいは, 模型実験では困難なディテールの表現が可能となります。空間的・時間的に広範囲なモデル化を行うため, 測定点に限定されない現象解明や理論構築, あるいは可視化による直感的な現象理解が可能となります。

たとえば, 車輪とレールの接触評価では, 従来は接触面を理論的に定式化したり, 疑似的な食い込み量を仮定したりする近似的あるいは簡便な手法が用いられてきました。ここに示す大規模シミュレーションでは, よりミクロな視点で本質的に現象を解明するため, 車輪とレールのコンタクトパッチとよばれる接触領域を, 有限要素法(☞参

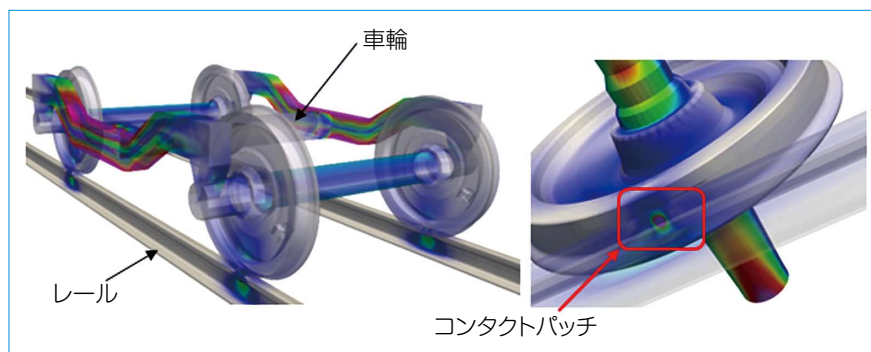


図2 車輪とレールの接触評価

照)により, ミリ単位の微小領域に分割したモデルを用いています(図2)<sup>2)</sup>。この手法は東京大学奥田教授との共同研究で進めており, 従来の手法では表せなかった, 車輪が転がりながらレール上を進んだり, 滑ったりする現象を解くことができます。本手法では, 車輪やレールの劣化・損傷のトリガーとなる微細な領域における局所的な傷や摩耗現象の解明を目指しています。

大規模シミュレーションでは, 連立方程式の効率的な解法だけでなく, 計算機の能力に合わせた実用的なモデルの構築技術も重要となります。

## 連成シミュレーション

連成シミュレーションとは, ある問題を解くために車両, 軌道, 構造物, 防災, 電力, 環境, 人間科学などの分野のさまざまな理論や解析をうまく組み合わせて, 現象解明に必要な要素と法則性を用いて効率的な解析を行うものです。各分野のモデルを利用することにより, 信頼性の高い, 効率的な解析が可能です。また, 事象に含まれる分野間の相互作用を解明することができます。

具体的な課題として, 地震時の構造物上での車両走行, 横風を受けながらの車両走行, 降雪の舞い上がりによる車両への着雪, 車両が走行する際の構造物音や地盤振動, 地震発生後の津波発生と浸水(特集記事参照)などに取り組んでいます。実際には, 車両, 電

車線, 軌道, 構造物のさまざまな運動シミュレーションを組み合わせ, あるいは音響や流体といった分野の異なるシミュレーションを組み合わせ問題解いていくことになります。

たとえば, 車両の高速走行に対して, いわゆる「構造物音」を評価する場合には, 車両走行にともなう軌道, 構造物の振動の発生と, その振動による音の発生を解いていく必要があります(図3)。この問題では車両は, マルチボディダイナミクス(☞参照)とよばれる質点, ばね, ダンパーの結合モデ

### ☞ 支配方程式

物理現象を数字で記述されたモデルにするために, その現象を表す物理学の法則を数学的な方程式で表したものです。

### ☞ 有限要素法

(FEM: Finite Element Method)

実際の車両, 電車線, 軌道, 構造物などは, 複雑な形状で, 不均質です。このため, 動きや力の分布を理論的に定式化して解くことは困難です。有限要素法では, 対象を微小な領域に分割して, 求解可能な単純な形状, 具体的には, ばり, ばね, シェル(面), 板, ソリッド(立体)といった有限要素の組み合わせで表し, 近似的に解を求めます。

### ☞ マルチボディダイナミクス

(MBD: Multi Body Dynamics)

対象を支配的な動きをする構成要素や部品に分割して, 剛体(rigid body)とその結合で表す方法です。たとえば鉄道車両の場合は, 車体, 台車, 輪軸を剛体の質点とし, それをばねやダンパーで結合して表します。

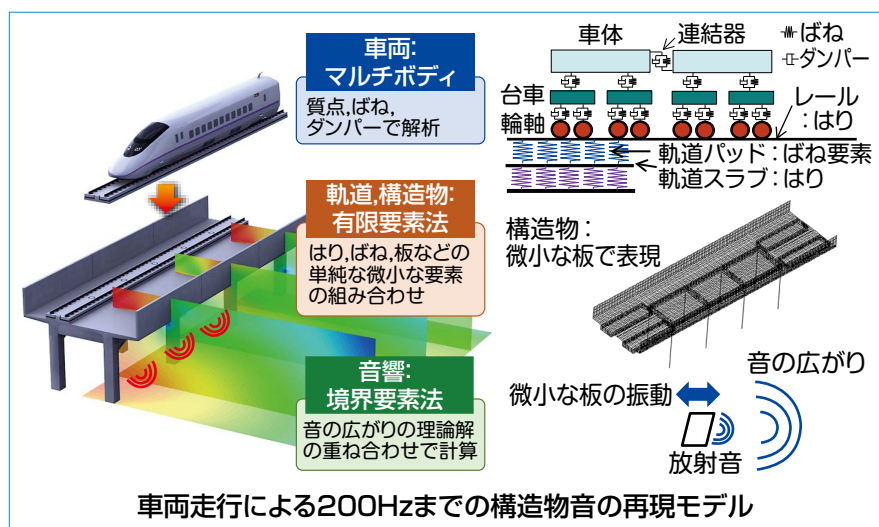


図3 連成シミュレーションの例

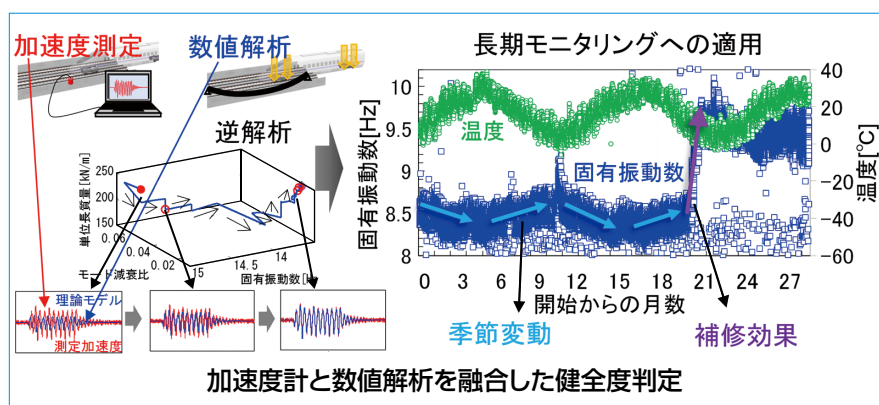


図4 フィールドインフォマティクスの例

ルのシミュレーションで表わされます。また軌道や構造物の振動は、前述の有限要素でモデル化して、移動・振動する車両の影響を考慮しながらシミュレーションを行います。また計算された構造物の個々の微小な有限要素の振動を、音響解析に入力してその表面からの放射音に変換し、音の空間的な広がりを理論式により計算します<sup>3)</sup>。

連成シミュレーションでは、現象をどのように分割してシミュレーションしていくか、シミュレーション間で相互にどのような物理量を受け渡していくのかを、計算機能力を最大限に発揮するように組み立てていくことが重要となります。

## フィールドインフォマティクス

フィールドインフォマティクスは、

営業線の車両や施設などで得られたさまざまなデータの、数学的な性質を解明したり、統計的な分析を行ったりしていく技術です。近年では、ICT技術を用いたさまざまなセンサーによるデータ収集、得られたビッグデータの傾向や法則性をコンピュータが学習して最適な分析や対策を選択していく機械学習や人工知能AI (artificial intelligence) といった、技術の活用も進んでいます。

防災の分野では、降雨、風に関するリアルタイムハザードマップ、エネルギーネットワーク、地震災害シミュレーター、列車運行、旅客行動などの研究に取り組んできました<sup>1)</sup>。

また近年ではたとえば、測定データと数値シミュレーションとの融合についても、取り組んでいます(図4)<sup>4)</sup>。構造

物に設置した加速度計の測定波形から当該構造物の健全度を評価する場合には、測定波形からだけでは、誤差が大きくなり正確な診断が難しくなる場合があります。そこでシミュレーションを併用しながら測定と波形が一致するように、複数の重要なパラメーターの組み合わせを推定する、逆解析とよばれる手法を用いて高い精度で健全度を判定します。図4の事例では、健全度の指標となる橋りょうの固有振動数(※参照)の季節変動や補修による向上を加速度測定結果から高精度に検出できました。

測定したビッグデータを、数値シミュレーションを用いて分析していくためには、膨大な計算の組み合わせが発生します。このため、高性能のコンピュータに加え、どのようにパラメーターを推定していくのがもっとも効率的かを、自動的に判断してパラメーター入力を切り替えていく、いわゆる機械学習とよばれる分析手法の活用が重要となります。

## ハイブリッド実験

ハイブリッド実験は、高度な実験装置とシミュレーションを組み合わせた手法です。大規模あるいは複雑な実験の一部を数値シミュレーションで補完していくものと、シミュレーションでは理論モデルの構築が困難な複雑な部分のみを実験で置き換えるという手法があります。

車両や集電の分野では、車両挙動や車両部品の性能評価のためにリアルタイムで実験装置とシミュレーションを制御するHILS (Hardware-In-the-Loop Simulation) システムの構築に取り組んできました<sup>1)</sup>。

### ※固有振動数

振動体を自由に振動させたときにその振動体を示す固有の振動数。

最近では例えば、パンタグラフHILSシステムの開発に取り組んでいます(図5, 特集記事参照)。同システムは、パンタグラフの実機と架線を模擬した加振装置を用いてパンタグラフの性能評価を行うものです。加振装置は、実際の車両が走行する際のトロリー線の運動を架線振動シミュレーターで計算した計算結果に基づきリアルタイムで再現し、営業線の走行に近い条件でパンタグラフの性能評価を行います。

ハイブリッド実験では、加振装置のアクチュエーターの性能を踏まえて、どのように誤差なく制御するのか、リアルタイム処理のためシミュレーターでどのように高速計算を行うのが重要となります。

## 数値実験

鉄道の技術開発や研究に関する実務では、まだまだ現車や模型を用いた実験の役割が大きいと考えていますが、一方で、近年の計算機技術の進歩は著しく、航空機や自動車などの産業分野では「デジタルプロトタイプ」や「デジタルベンチテスト」を用いた研究開発が盛んです。鉄道においても、高度な数値シミュレーションを活用した走行実験や要素実験のさらなる効率化が期待されています。

たとえば、風洞実験の例では、1/40縮尺模型により実際に行われる実験を、最小格子間隔1mm、格子数10億点といった解像度の高い数値計算モデルで再現します(図6)<sup>5)</sup>。風洞

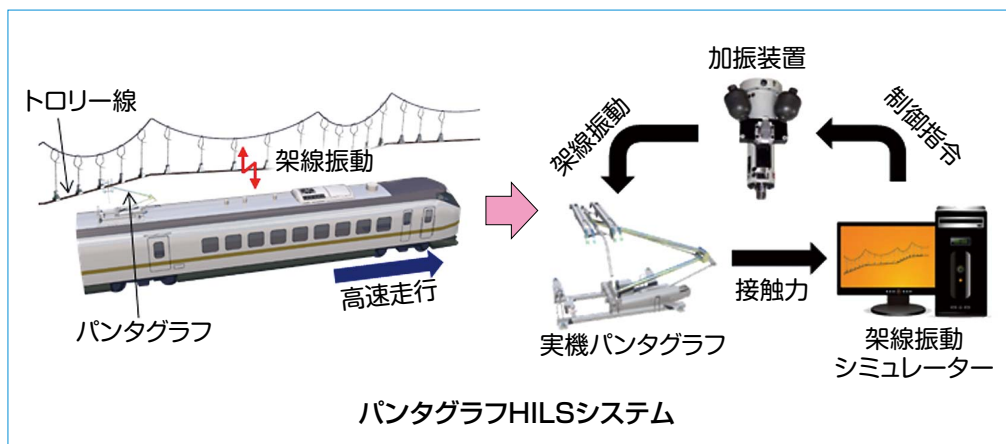


図5 ハイブリッド実験の例

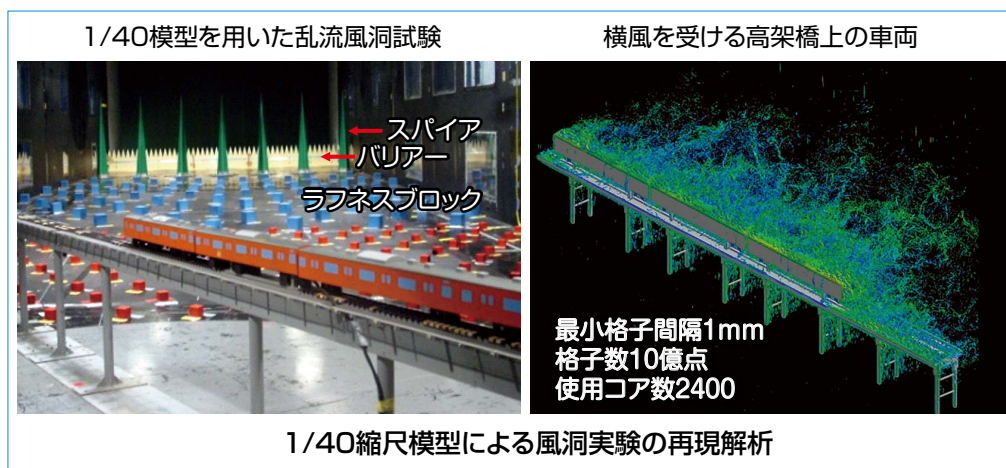


図6 数値実験の例

実験では、スパイア、バリアー、ラフネスブロックなどを用いて自然に近い風を生成しますが、シミュレーションではこの過程も含めて再現を行います。

現状では、風洞実験の完全な置き換えまでには至りませんが、実験条件の絞り込みや補間に活用しています。

## おわりに

鉄道の安全性・信頼性の向上、保守の省力化、環境との調和に貢献する革新的な技術を創出するためには、車両から電車線、軌道、構造物に至るまでの、鉄道システムで生じているさまざまな現象の本質をきちんと理解することが重要です。高度なシミュレーション技術を活用して、「本質に迫る」さまざまな課題にチャレンジしていきたいと考えています。[RRR]

## 文 献

- 1) 網干光雄：鉄道における数値シミュレーション, RRR, Vol.70, No.9, pp.4-7, 2013
- 2) 林雅江, 高垣昌和, 相川明, 殷峻, 橋本学, 奥田洋司：車輪・レール間の動的転がり接触解析による車輪フラットの接触挙動評価, 第22回計算工学講演会講演論文集, G-02-1, 2017
- 3) 渡辺勉, 曾我部正道, 徳永宗正, 川口二俊：RCラーメン高架橋の部材振動特性に関する解析的検討, 鉄道総研報告, Vol.27, No.10, pp.47-52, 2013
- 4) 松岡弘大, 上半文昭, 曾我部正道：測定波形と数値解析を合わせて鉄道橋の振動を評価する, RRR, Vol.74, No.10, pp.20-23, 2017
- 5) 佐久間豊, 野口雄平, 中出孝次：車両まわりの空気の流れをみる, RRR, Vol.75, No.2, pp.28-31, 2018