

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

シミュレーション技術で 鉄道を支える

研究開発において、計算機環境の発達とともに数値シミュレーションの役割が重要となっています。さらに、スーパーコンピューターの普及が進み、産学における大規模問題への活用により、多種多様な分野でスーパーコンピューターによるシミュレーションの実績が増えています。鉄道総研では、シミュレーション技術の高度化を目的として、2012年4月に計算力学研究室が発足し、2年が経ちました。そこで、最近のスーパーコンピューターやシミュレーション技術の動向とあわせて、大規模解析の成果やこれからの研究活動について紹介します。



高垣 昌和
Masakazu Takagaki
鉄道力学研究部
計算力学研究室
室長
[専門分野] 構造解析,
損傷評価, 車両の強度
評価

シミュレーション技術について

物理現象を解き明かすシミュレーションは、理論、実験と並ぶ、第3の科学技術の方法といわれています。実験が困難であったり、実験に要する時間が膨大な場合、仮想的な数値実験を行うことによって情報を得て現象の解明を行う方法です。

最近では、スーパーコンピューター（以下スパコン）は、企業への普及によりなじみのある計算機になりつつあります。スパコンを用いたシミュレーションは、その速さだけでなく計算規模を拡大できるメリットもあり、先端科学分野で活用されるだけでなく、産業分野においても製品規模で解析が実施されています。

シミュレーション手法の動向

工学における数値シミュレーションは、現象を表現する支配方程式を定式化し、有限要素法などのさまざまな数値解法を用いて解を得るものです。

力学系では、構造、流体、熱、電磁気、分子運動などの物理現象のシミュレーションがありますが、計算コストの低減や精度向上のため、日々、新た

な手法が開発されています。さらに計算機の発達により計算モデルの複雑化や大規模化が進むとともにより忠実に実現象を再現することが求められています。そこで、熱-構造、構造-流体など相互依存のある物理現象を同時に解くマルチフィジクス解析の関心が高まっています。また、マクロレベルとミクロレベルの解析を組み合わせたマルチスケール解析も実用的になってきました。これらの解析は、以前であれば独自に開発する必要がありましたが、汎用の解析ソフトにも実装されるようになり身近なツールとなっています。

一方、シミュレーションの活用が進むにつれて、最近ではシミュレーションの品質保証として、計算結果の検証 (Verification) と妥当性確認 (Validation) の、いわゆるV&Vの重要性が高まっています。

スーパーコンピューターの動向

日本の“地球シミュレータ”や“京”といった代表的なスパコンの性能は、運用開始時に演算性能で世界1位を獲得しています。“京”の演算性能は、10ペタフロップス（1秒間におよそ1

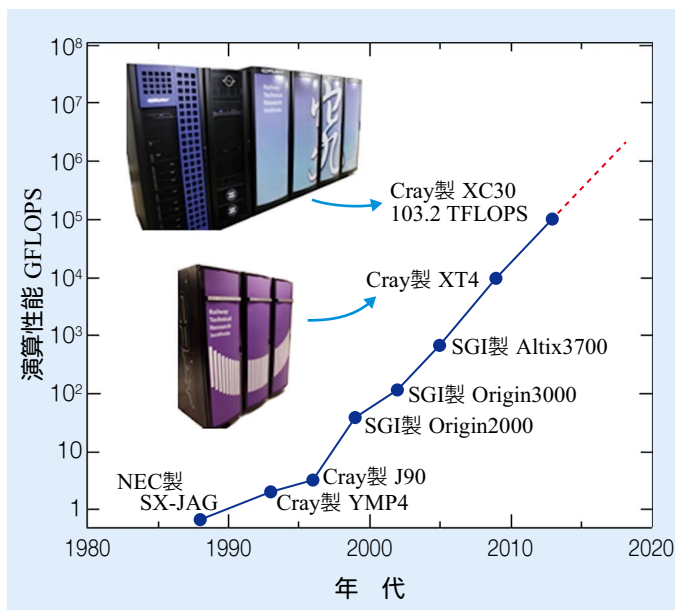


図1 鉄道総研の歴代スパコン性能

表1 数値シミュレーションの事例¹⁾

分野	数値シミュレーション例
車両	車両運動、転がり接触解析、脱線・衝突時挙動、車輪摩耗・き裂進展、エネルギー消費など
軌道	分岐器通過、レール損傷、バラスト挙動など
構造物	構造物の地震時応答、車両と構造物の相互作用、地盤と構造物の相互作用、広域地震動など
防災	雨水流動、局所気象、斜面災害など
電力	架線・パンタグラフ運動、き電回路、運転電力など
信号通信	連動、踏切制御、電波雑音、雷サージなど
輸送情報	列車運行、旅客流動、センサーネットワークなど
空力・音響	空気流・空力音、構造物音、トンネル内の温熱・火災・煙、駅の温熱など
人間科学	衝突時の人体挙動など

京回の浮動小数点演算が可能)を誇ります。スパコンはこれら以外にも大学や企業に多数あり、先端科学、学術研究、産業、医薬分野などで活用されています。現在、科学分野の広範囲において世界をリードするため、“京”を中核として大学などのスパコン環境の利用促進を目的に革新的ハイパフォーマンスコンピューティング・インフラ(HPCI)と呼ばれている基盤構築が国策として進められています。また、スパコンの能力を最大限発揮できるアプリケーション開発にも重点が置かれています。さらに、日本を含め米国、欧州、中国などでは2020年を目途にエクサスケールのスパコン開発が行われています。

1980年代後半に鉄道総研にスパコンが導入されて以来、鉄道総研独自の大規模計算が可能となりました(図1)。これにより、流れの計算などは、実車両を対象に実施できるようになりました。現在では、さらに計算速度が上がり、“京”にはおよびませんが世界的に見ても非常に高性能なスパコンが利用できます。これを活用して、鉄道システムの発展に向けて各分野におけるシ

ミュレーターの高度化を図り、問題解決を目指して研究開発を進めています。

シミュレーションの高度化

2012年度に鉄道総研の鉄道力学研究部に計算力学研究室が発足して、はや2年が経ちました。研究室の役割としては、鉄道総研におけるシミュレーション技術の高度化を目指し、スパコンの活用や新たな解析手法の提案などの研究開発を行うことにあります。

これまで、多数の研究室とともに、鉄道システムの最適化と複雑な現象の解明を進めるためのツールである鉄道シミュレーターの構築に取り組んでいます。また、関連研究室と連携して数値シミュレーションに関する研究テーマの一端を担い、開発業務を行っています。

鉄道シミュレーターの開発

鉄道総研では、車両、軌道、構造物、防災、電力、信号、輸送、環境、材料、人間科学など、さまざまな分野で個別にシミュレーターの開発が行われています(表1)。しかし、実際の物理現象は相互依存を考えなければならない場

合があります。例えば、レールの摩耗を評価するためには、本来、車両、車輪、まくらぎ、バラスト、構造物の挙動を再現しなくてはなりません。現状では近似できるところを簡便な数値モデルとして計算しています。しかし、現象解明を目的とするような場合、緻密な解析が必要となり、なるべく近似を避けなければなりません。そこで、必要に応じて、複数のシミュレーターを組み合わせ、現象をより精緻に評価できるように相互依存を考慮した連成解析を可能にする統合システムの構築を目指しています。このシステムを鉄道シミュレーターと称しています。

現在、ダイナミクス系のバーチャル鉄道試験線と、防災に関する地震災害シミュレーターのコアシステムの開発が行われています。バーチャル鉄道試験線とは、列車走行を模擬して、レールの摩耗やき裂などの長期劣化現象の解明や乗り心地といった物理現象の再現を行います。構成としては車両運動のシミュレーターを中心に軌道や架線・パンタグラフ、および、後述しますスパコンを活用した車輪/レール/構造物間の転がり接触や空気流・空力音に

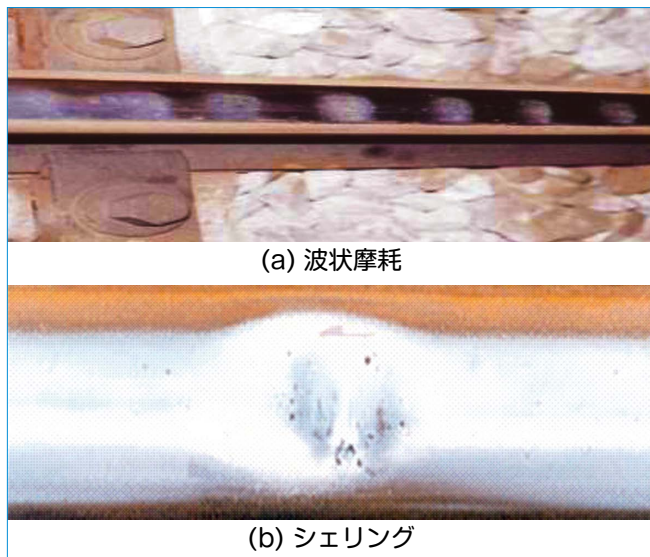


図2 レールの劣化現象

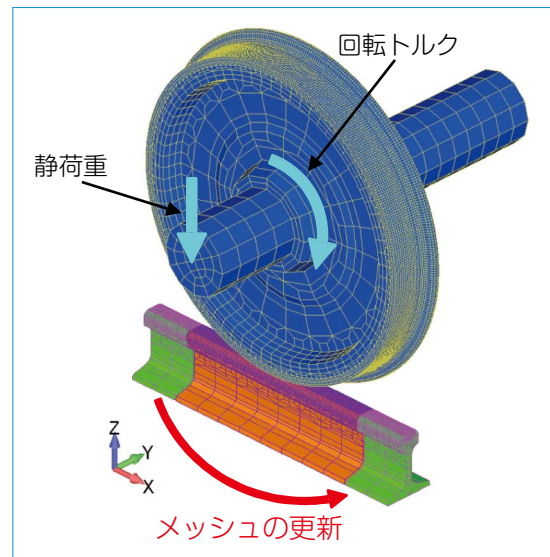


図3 転がり接触の解析モデル

関するシミュレーターなどがあります。

これらを用いて、さまざまな走行条件での列車走行を解析的に評価して、鉄道システムの最適化を目指すためのツールとなるよう開発に取り組んでいます。

次に、地震災害シミュレーターは、これまでに発生したさまざまな地震を基に地盤の地震動や構造物の地震被害の予測を行い、高架橋などの構造物の地震対策法の検討や危険箇所の把握に活用できるツールです。また、将来はバーチャル鉄道試験線との連成により、地震時における列車走行を再現し、安全性の評価など地震対策のためのツールとしても適用できると考えています。

さらなるステップとしては、電力、信号通信、旅客流動、輸送情報、気象防災などさまざまなシミュレーションの高度化を行うとともに、ダイナミクス系と同様に相互関係を考慮してより複雑な事象への適用も可能にするシミュレーターの開発が行われる予定です。最終的には、これまで未解明であった物理現象や鉄道の運営にかかわるシステムの最適化などに活用できるツールを目指しています。

スパコンによる大規模解析

スパコンを活用した大規模解析の例として、はじめに車輪／レール間の転がり接触解析手法の開発について紹介します。車輪やレールには、走行時に衝撃力や振動荷重が加わり、両者の接触面は厳しい負荷を受けます。これらの負荷が長期的に繰り返し作用すると、波状摩耗やシェリング(図2)といった特異な摩耗やき裂などが生じる場合があります。レールに摩耗やき裂があると列車走行時に異常振動が生じて、騒音や乗り心地が悪化し、時には安全性に影響を与えます。

これらの発生原因には未解明な点がまだ多くありますが、接触面内の挙動を実験的に明らかにすることは困難であるため、シミュレーションにより精緻な評価をすることが、重要な課題のひとつとなっています。

そこで、車輪／レール間の動的転がり接触挙動を再現するため、大規模並列計算を適用した有限要素解析手法を開発しています²⁾。

構築したプログラムにより、車輪とレールを精緻に模擬したモデル(図3)を用いて動的転がり接触解析を実施しました。ここで、接触面を精度よく評

価するためには、空間的にも時間的にも非常に細かな解像度にしなければならず、計算負荷が高くなるため、スパコンが必要不可欠となります。車輪とレールの接触面の力学的挙動、特に劣化要因と考えられている高周波レベルの衝撃力、振動、あるいはすべり／固着の状態をさまざまなケースで解析することにより、劣化現象の解明につなげたいと考えています(図4、5)。

なお、バラストや高架橋などの構造物も車輪とレールの動的な接触挙動評価に影響を与えると考えられるため、これらを考慮した解析の実施も検討中です。

次に、車両周りの空気流シミュレーション³⁾について紹介します。鉄道車両の空力特性を把握することは、鉄道の安全・安定輸送の実現や騒音など環境対策を行う上で重要となります。空力特性の評価は、通常、車両模型を用いた風洞実験により行われています。ただし、空気流の計測そのものが容易ではないことから、風洞実験だけで流体现象を詳細に把握することが難しいことが多々あります。そこで風洞実験を補完し、空力特性評価をより精緻に行うため、走行する車両が受ける風

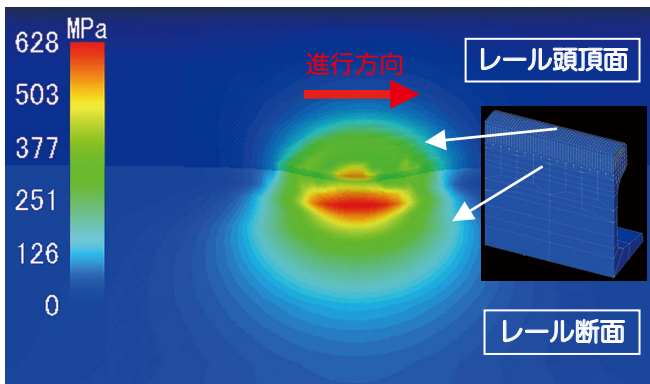


図4 接触面の応力分布

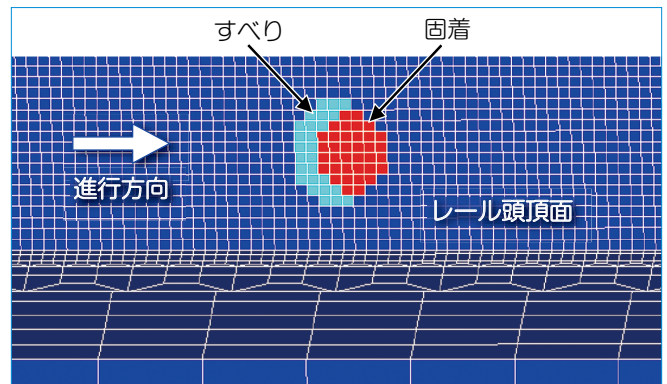


図5 すべり／固着状態

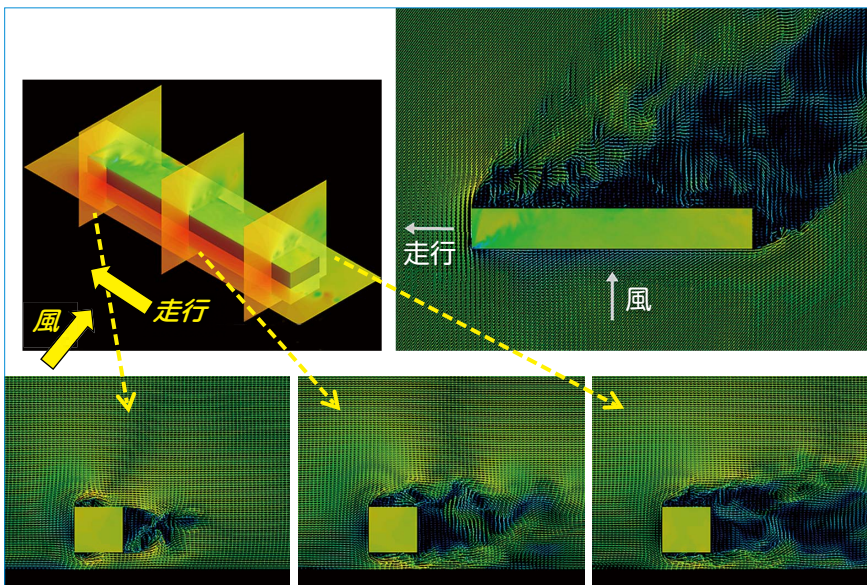


図6 横風を受ける車両の空気流(速度ベクトル)

図6に示す流れの時系列データをもとに非定常流れの様子を詳細に観察することにより、流れの物理現象に対する知見の深度化が進められます。

計算力学研究室の展望

鉄道を支えるべく、鉄道シミュレーターの統合プラットフォームの開発やスパコンによるシミュレーターの高度化といった研究に携わるとともに、目先の課題に捕らわれずに解析手法や物理現象の評価則などの提案、さらには解析により得られた膨大なデータの可視化といった基礎研究にも取り組んでいきたいと考えています。また、シミュレーション技術に関して鉄道総研内だけでなく、鉄道事業者をはじめ外部への情報発信を積極的に行う予定です。**RRR**

を計算機上で再現し、それが空力特性に与える影響を調べることも重要です。そこで、現在、風洞実験による研究開発と数値シミュレーションによる研究開発を並行して進めています。

車両周りの流れは時間・空間的に変動する流れである乱流になります。乱流では大小さまざまなスケールの渦が存在することにより計算負荷が高くなるため、数値計算で再現が困難な小さな渦については、流れ場に及ぼす影響を乱流モデルによりモデル化して計算を行います。

本シミュレーターの特徴は、大規模数値計算を実現し、非定常三次元空間の詳細な流れの情報を得るところにあ

ります。この結果により、実験では観察が困難な物理現象の解明が進むことが期待されます。

ここでは、走行する車両周りの風の流れについて数値的に再現した例を示します(図6)。条件としては、線路に対して真横の風(平均風速10m/s)が吹く中を車両が列車速度 $V = 5.8\text{m/s}$ で走行するケースになります。図6には車体中心高さの水平断面上、車体の先頭付近・中央・後尾付近の垂直断面上における空気の流れの速度ベクトルを示しています。車両の斜め前方から風が吹く様子や車両から流れが剥離する様子、車両の風下側は乱れた流れとなる様子などが観察されます。

文献

- 1) 網干光雄：鉄道における数値シミュレーション, RRR, 70巻, 9号, pp4-7, 2013
- 2) 坂井宏隆：大規模並列計算による車輪/レール間の転がり接触挙動の解析, 鉄道総研報告, 27巻, 10号, pp29-34, 2013
- 3) 中出孝次：平地上の乱流境界層を走行する鉄道車両周りの流れの数値シミュレーション, 鉄道総研報告, 28巻, 3号, pp41-46, 2014