

シミュレーション技術の高度化



上半 文昭
Fumiaki Uehan

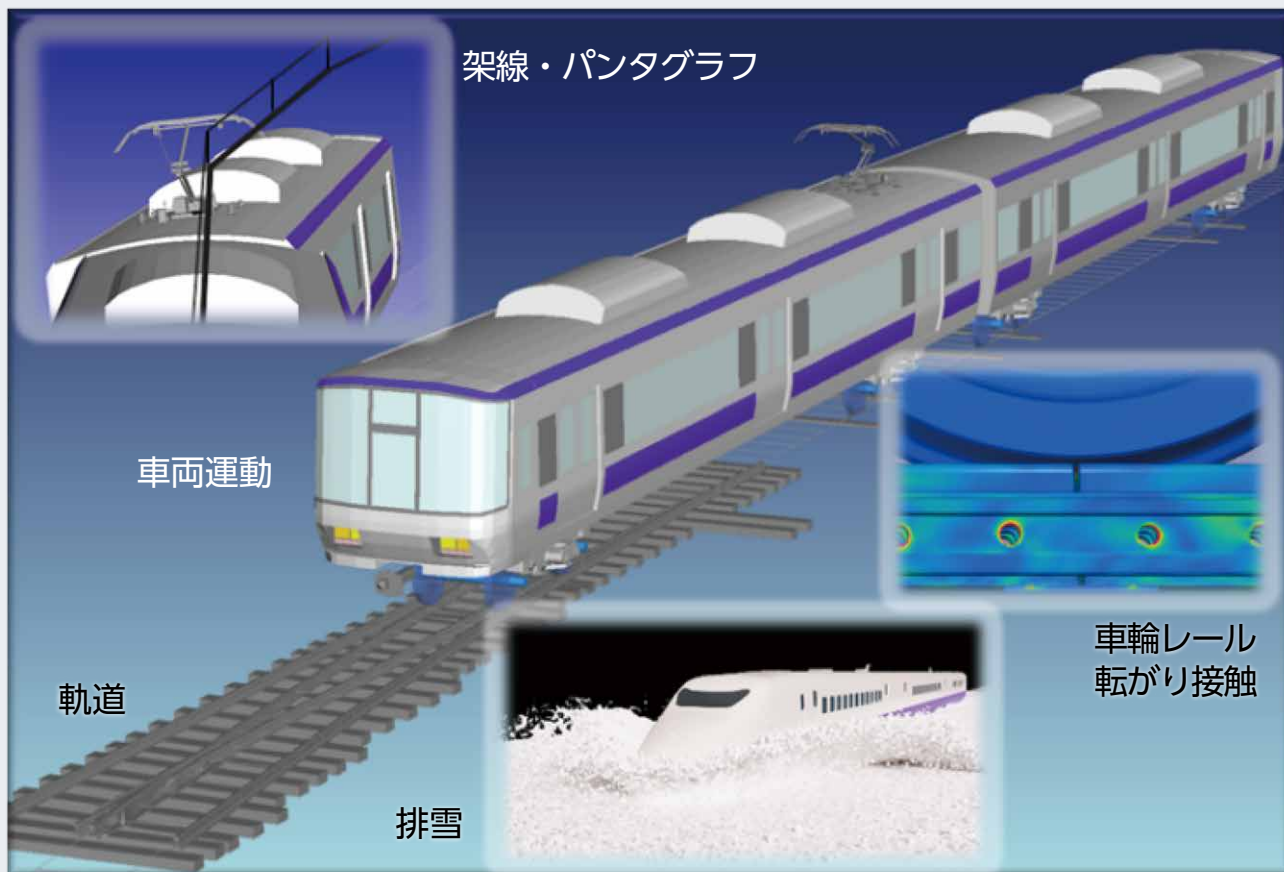
前 鉄道力学研究部長
(現 研究開発推進部 主管研究員)

はじめに

鉄道の研究開発は、理論解析で方向付けした後に、実験装置での実証、現車試験での確認により行うのが一般的でしたが、近年の計算機性能の向上に伴い、数値シミュレーションが重要な役割を果たすようになりました。数値シミュ

レーションは、危険が伴う安全検証や測定が困難なレール／車輪間現象など実験が難しい現象を再現可能であり、多大なコストを要する実験の代行・補完によって研究開発を効率化することもできます。そこで、大課題「シミュレーション技術の高度化」では、鉄道固有現象の解明ツ

図1 バーチャル鉄道試験線



ルとして実用に供するために、鉄道総研がこれまでに蓄積してきたシミュレーション技術の高度化に取り組みました。

バーチャル鉄道試験線

バーチャル鉄道試験線¹⁾は、鉄道総研が開発した列車走行系のシミュレーション手法を統合して、鉄道試験線をデジタル空間上に再現したもので、走行試験では測定や実施が困難な現象、複雑な現象、危険を伴う現象などを評価することができます。また、スーパーコンピュータの高い演算能力を活用して、車輪・レール間の転がり接触挙動や排雪抵抗など走行試験や模型試験では把握できない現象も解明可能にしました。

実現象を再現できる試験線モデル

実線区で車両が走行することにより生じる様々な現象を再現するために、既開発の車両運動シミュレーターに対して、車両や軌道構造、

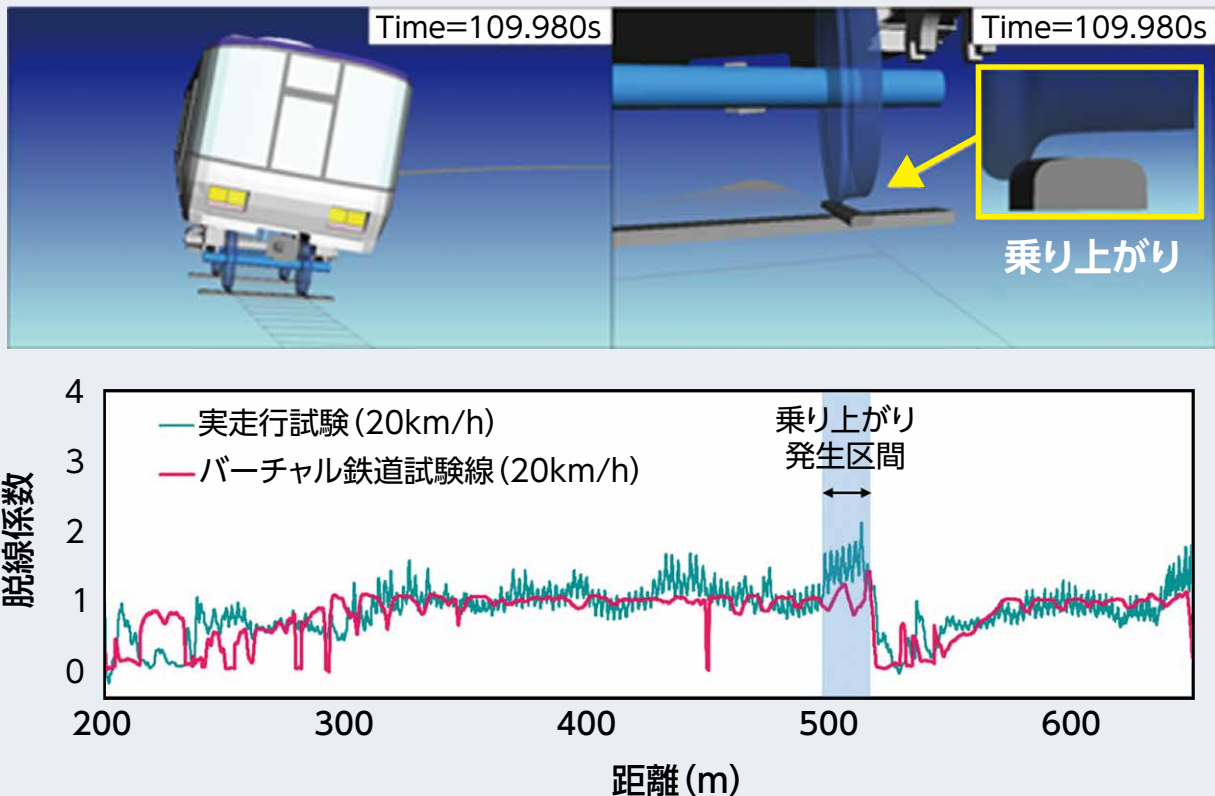
軌道線形、車輪とレールの接触状態のモデルを追加するとともにモデルの高精度化を行いました。また、車両運動シミュレーターを核として、車輪レール転がり接触、架線・パンタグラフ、排雪の各シミュレーターやアーク放電データベースとの連成環境を構築しました(図1)。

バーチャル鉄道試験線による車両運動シミュレーションで、走行試験での乗り上がり脱線を再現した例を図2に示します。輪重アンバランスを有する車両モデルを継目や軌道変位を再現した急曲線の軌道モデル上で走行させたところ、乗り上がり脱線を再現でき、走行中の脱線係数²⁾の変動も再現することができました。

脱線係数

車両の走行安全性を評価する指標のひとつで、車輪/レール間に作用する水平方向の力(横圧)を鉛直方向の力(輪重)で割った値。この値が大きいと脱線に対する危険性が高いと判断します。

図2 乗り上がり脱線の再現



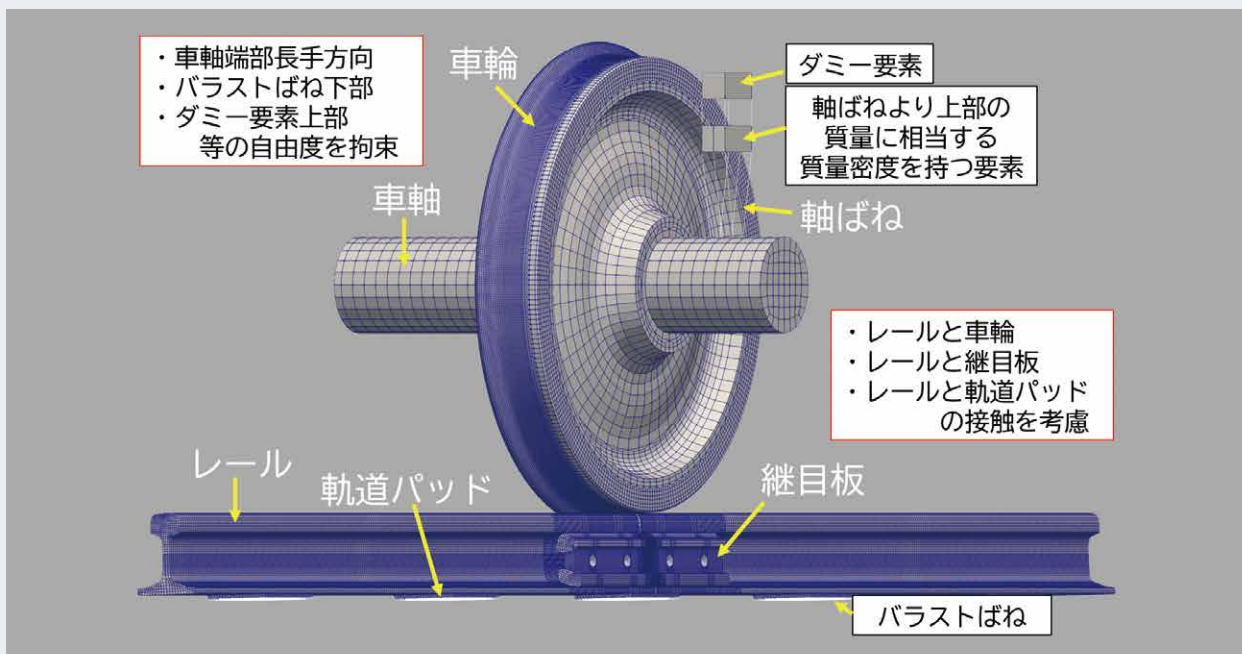


図3 車輪・レールの解析モデル

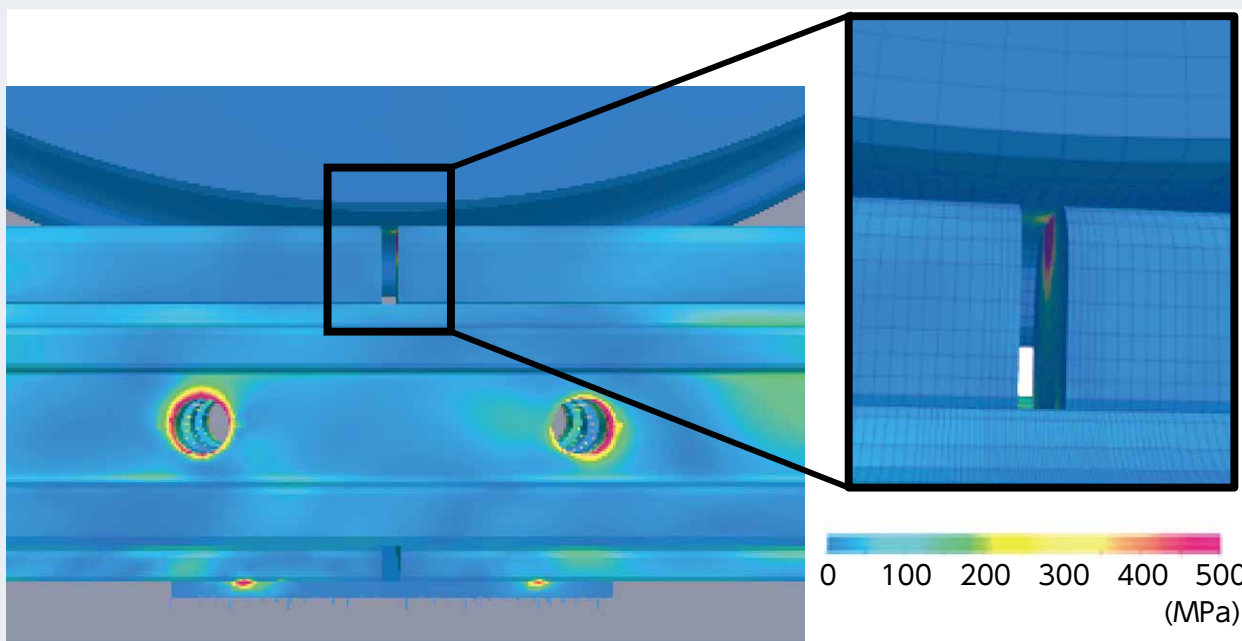


図4 車輪がレール継目を通過する際の応力分布

車両走行時の車輪とレールの接触状態を精緻に評価することを目的として開発した車輪・レール転がり接触シミュレーターは、大規模並列有限要素解析手法を用いて、測定が困難な車輪・レール間の接触領域で生じる現象を再現することができ、車輪や軌道に生じる応力の詳細な評価に活用できます。図3は車輪・レールの解析モデルの一例です。図4はレール継目を車両が通過する際の応力分布の解析例で、レール、

継ぎ目板、軌道パッドに生じる応力、拡大図では車輪表面やレール断面に生じる応力が確認できます。

架線・パンタグラフシミュレーター

三次元有限要素法でモデル化した架線・パンタグラフシミュレーターは、架線とパンタグラフの三次元配置や三次元的な運動による現象を再現することができます。図5に示すトロリー線、ちょう架線、ハンガー、曲線引金具、可動

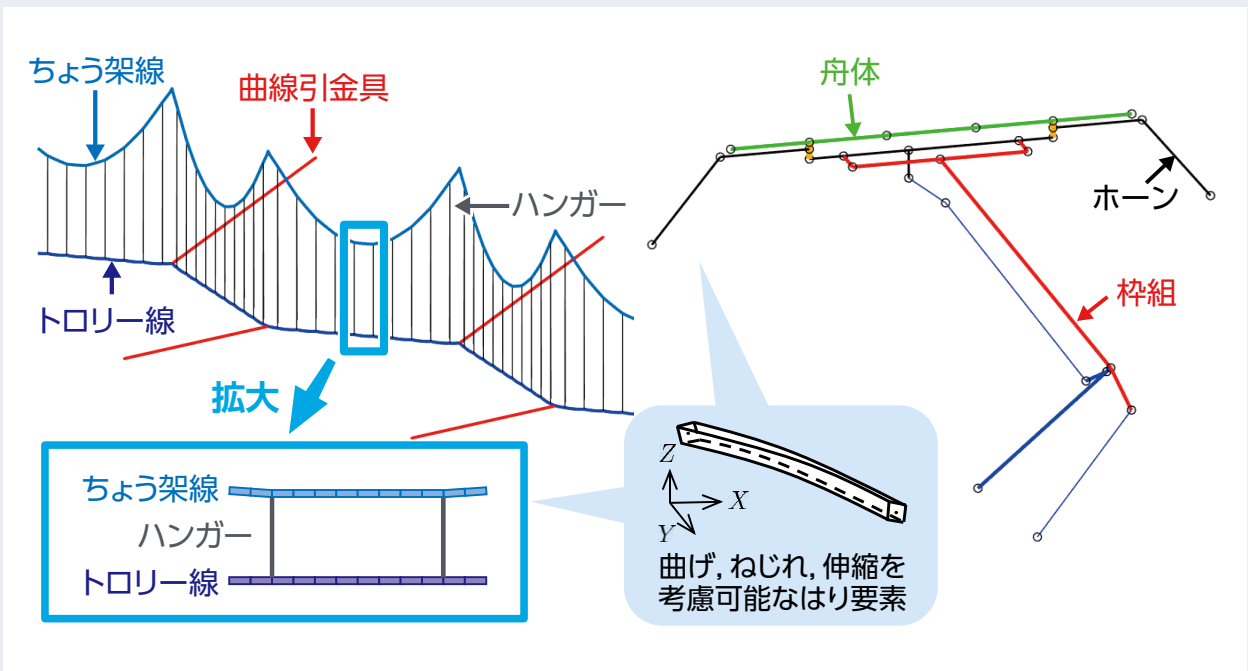


図5 架線とパンタグラフの三次元モデル



図6 割り込み事故の再現

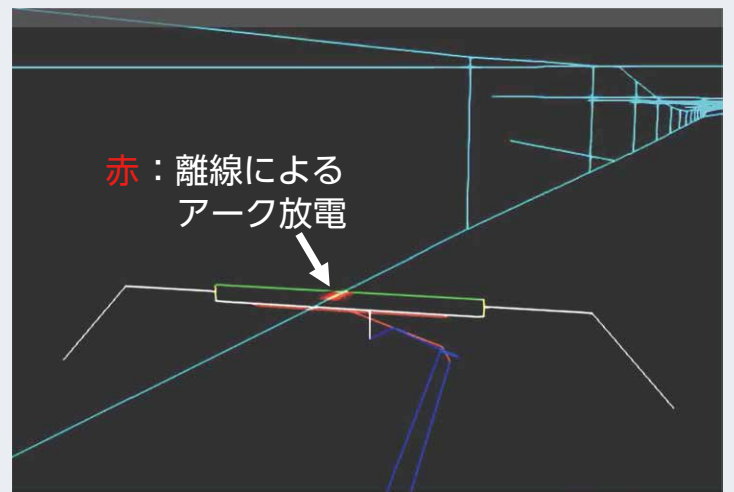


図7 アーク放電の可視化

ブラケットなどで構成された架線モデル，枠組，舟体，ホーンなどで構成されたパンタグラフモデルを用いて，直線区間だけでなく曲線区間や勾配区間を走行する際の解析や，気温変化時の線条の伸縮を考慮した解析を実施できます。図6は過大な車両動揺でパンタグラフと電車線との相対位置が大きく変わり，パンタグラフが架線に割り込む事故を再現した事例です。

図7は，車両走行時の離線によるアーク放電

を可視化したものです。架線・パンタグラフシミュレーターで計算されたトロリー線とすり板の位置関係から離線を検出し，その際のトロリー線とすり板の位置関係で生じるアークの形状を，後述する「離線アークシミュレーター」で事前に作成したアーク放電データベースから選び出して表示しています。

排雪シミュレーター

鉄道車両が，積雪した線路上をスノープラウ

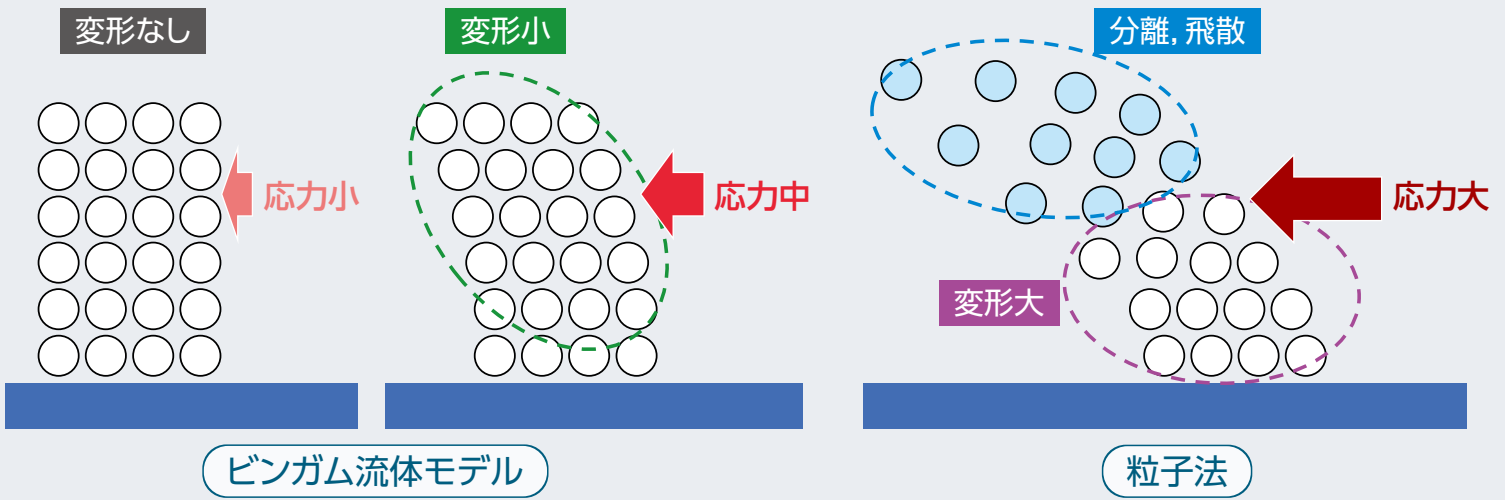


図8 雪の変形のモデル化

で排雪しながら走行する場合には、排雪によって車両に働く抵抗力が車体を動揺・振動させることがあります。このような状況を再現可能な排雪シミュレーター²⁾を開発しました。

雪は、かかる力が小さいと変形しません、ある一定の力がかかると変形し始め、さらに大きな力がかかると大きく変形し、形状を維持できなくなると、雪粒子に分離して飛散します。このような雪の特徴をモデル化し、雪をスノープラウで排雪する現象を再現可能にしました(図8)。さらに、排雪シミュレーターで計算されたスノープラウに生じる排雪力を車両運動シミュレーションに渡す排雪走行シミュレーター

を開発しました(図9)。排雪走行シミュレーターは、縮尺1/10模型実験で精度検証済みで、現車スケールでの妥当性検証を進めています。

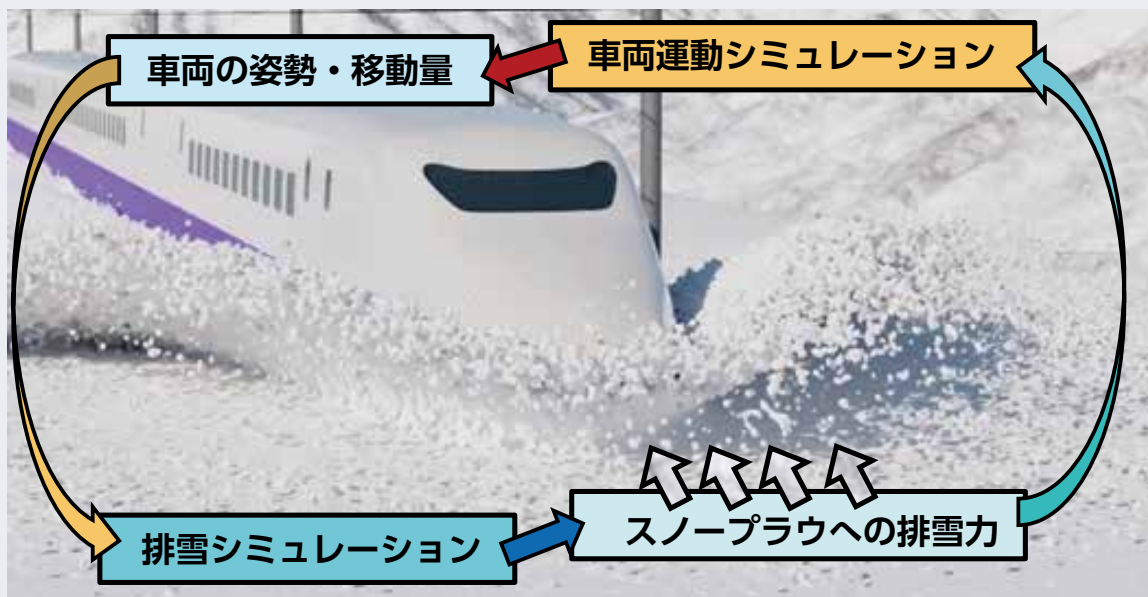
数値実験室

数値実験室は、鉄道総研の実験設備などを数値シミュレーションでデジタル空間上に構築したもので、実験条件の補完や実施が難しいケースの再現によって実験を効率化・高度化することができるツールです。

大型低騒音風洞を模擬する数値風洞

鉄道総研の大型低騒音風洞は、鉄道の空力現象解明の重要な研究開発ツールです。この大型

図9 車両運動と排雪の連成による排雪走行シミュレーション



低騒音風洞の気流を数値シミュレーションで再現した数値風洞(図10)を開発しました。開発した数値風洞は供試体のモデル化から流れの計算までを実行できます。空気流の計算には、供試体の形状が複雑でも効率よく計算可能な直交格子法による空気流シミュレーター³⁾を使用します。また、3Dスキャナーによる供試体の形状モデル化手法を導入しており、供試体の形状だけでなく、設置状況および測定用センサーや治具を含めて忠実にモデル化できます。計算と実験の比較によって計算の信頼性が評価可能となり、センサーや治具が流れ場に及ぼす影響の推定にも活用できます。

実験中の空気の流れは目に見えませんが、数値風洞の計算結果は可視化できるため、実験結果の表現や解釈に役立ちます。数値風洞の機能拡張として、データ解析機能と形状最適化計算機能を実装しました。複雑な流れ場から現象解明に重要な成分のみを抽出するモード解析機能を車両の後流に適用することで、編成車両の後尾車両の左右動揺を引き起こす変動空気力に車両床下の蛇行流れ⁴⁾が関係していることを解明することができました⁴⁾(図11)。このように、数値風洞は、風洞実験を補完

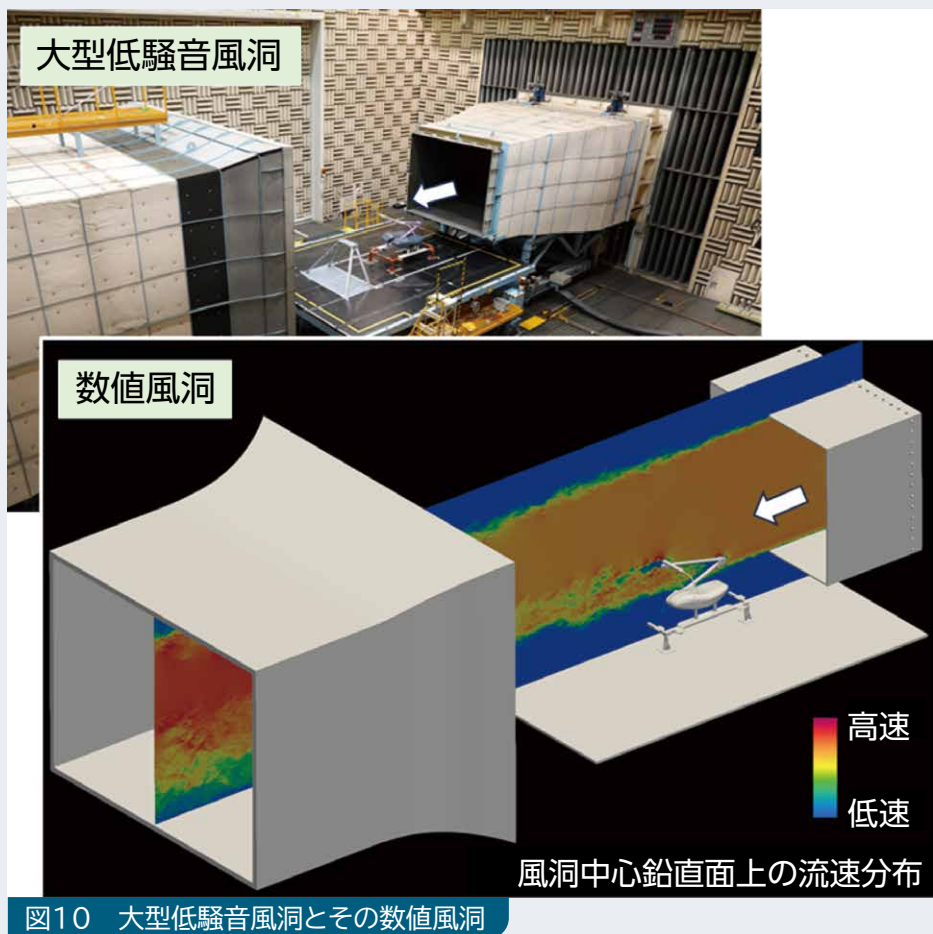


図10 大型低騒音風洞とその数値風洞

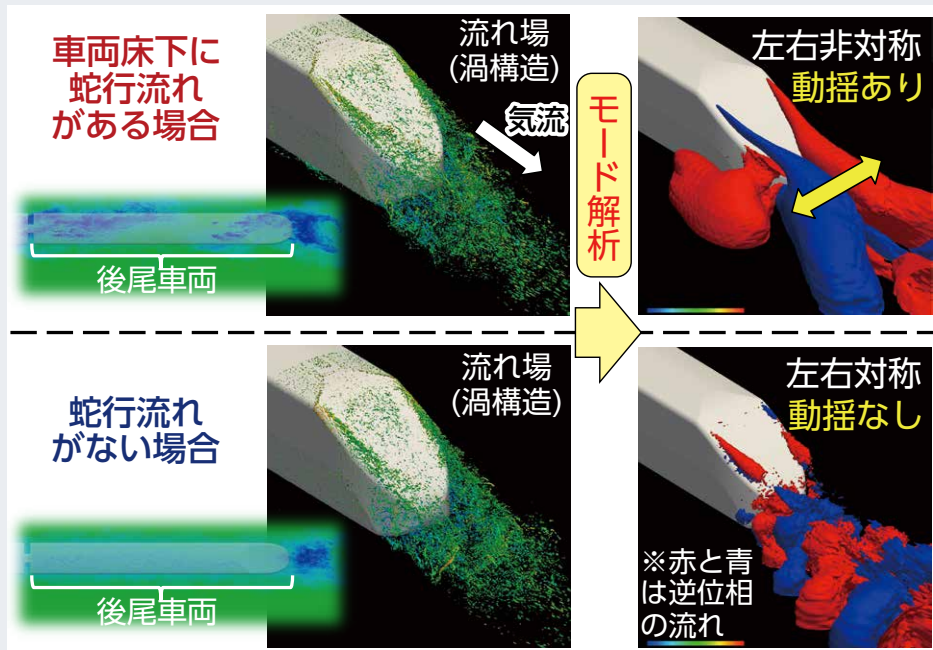


図11 データ解析機能による後尾車両の左右動揺現象の解明事例

4) 蛇行流れ

編成車両の床下において、床下機器などで空気の流れが乱され、進行方向に対して左右に蛇行するような流れが生じる現象。

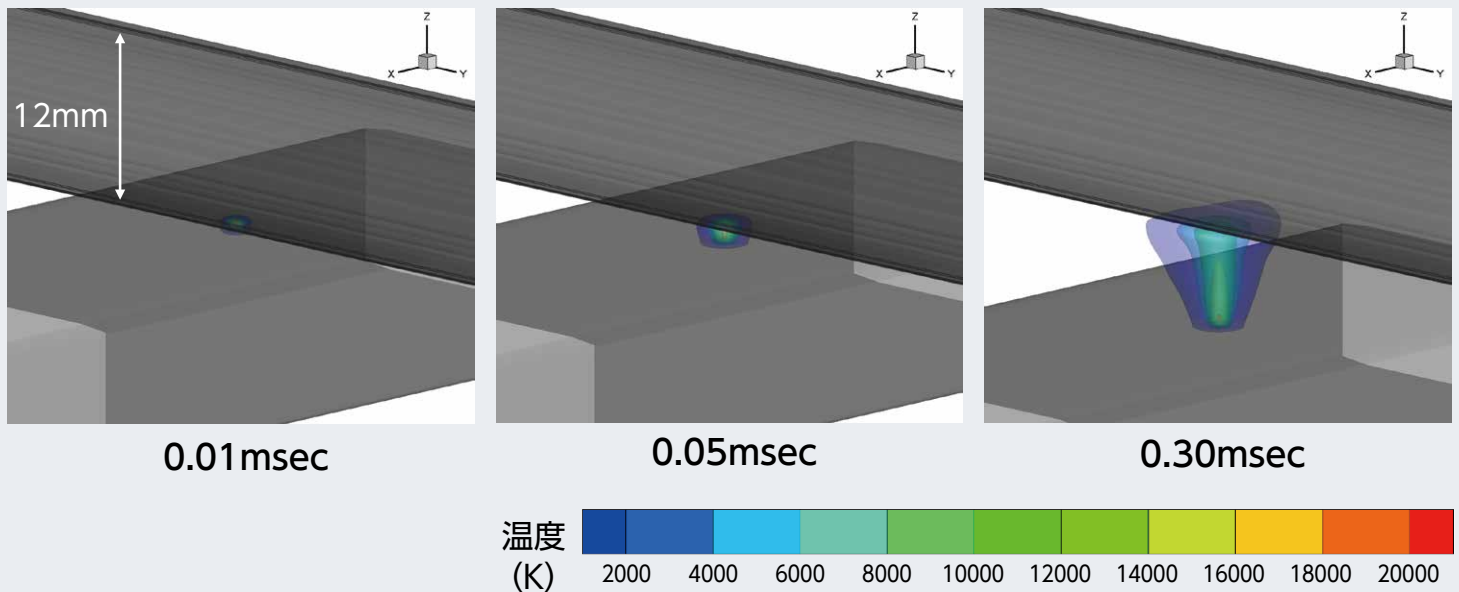


図12 すり板降下時のアーク柱拡大のシミュレーション (電流100A)

するだけでなく、現象解明や対策形状の提案などの空力問題の研究開発にも有用になります。

離線アークシミュレーター

電気鉄道では、車両の屋根上にあるパンタグラフすり板をトロリー線に接触させて車両に電力を供給していますが、接触が困難になるとアーク放電が発生します。トロリー線とすり板の接点が離れ始めるとそこに電流が集中し、金属が溶融して接点間を繋ぎ、溶融金属が蒸発・気化するとアーク放電に至ります。短いアーク放電でもトロリー線やすり板を損耗させ、長いアーク放電はトロリー線の断線や地絡事故を発生させる場合もあります。このようなアーク放電現象の実験による再現は危険を伴うため、三次元電磁熱流体シミュレーションによる離線アークシミュレーターを開発しました。

シミュレーターでは、まず、溶融金属が気化した金属蒸気を、アーク放電を構成するアーク柱に加えるモデル化を行い、次に、シミュレーター

内の電極を、移動させた際に生じる空間に、既存のアーク柱と金属蒸気を混入させてアーク密度を計算してアーク柱を伸長させるモデル化を行いました。離線アークシミュレーターを用いれば図12に示すように、架線からすり板が離れる際のアーク柱の拡大を解析することができます。

材料の微視的構造シミュレーション

パンタグラフすり板や車輪踏面制輪子などの摩擦部材は、複数の材料で構成された複合材料でできています。複合材料の特性は構成材料の物性や割合、配置などによって変わりますが、これらと最終的な物性の間の関係は必ずしも明らかになっておらず、新規材料を開発する際には、所望の特性を得るまでに多くの試作と物性測定が行われます。そこで、材料開発の迅速化に寄与することを目指して、複合材料の微視的な構造を反映したモデルを作成し、物性を算出する手法を構築しました(図13)。この手法で

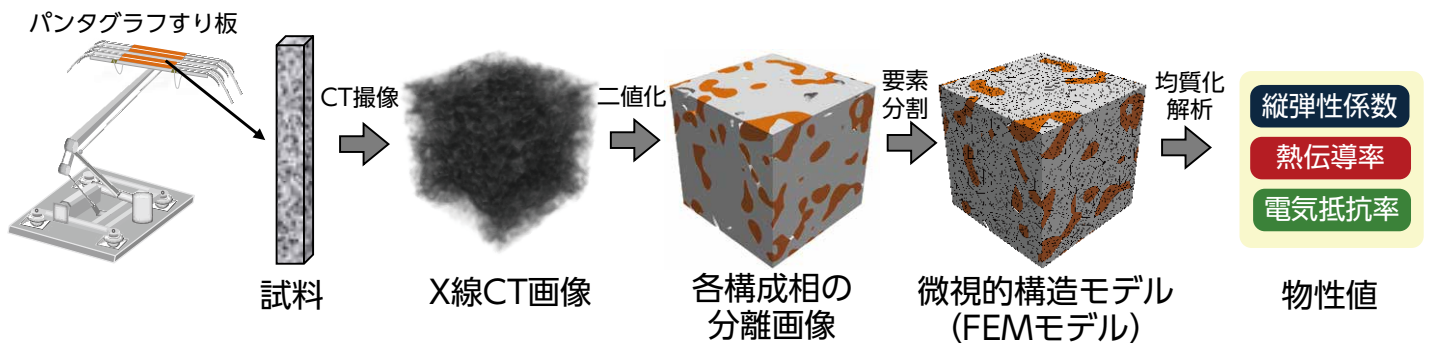


図13 X線CT画像を用いた材料のモデル化と物性の算出



図14 各種すり板とすり板材の微視的構造モデルの例

は、材料のX線CT[®]の画像を用いて、実材料の複雑な構造を反映した微視的構造モデルを作成します。

本手法をパンタグラフすり板材に適用し、各種すり板材のモデルを作成し(図14)、これらのモデルで解析した物性値が実測値を概ね再現でき、材料の構造変更時の物性予測にも応用できることを確認しました。また、材料の構造を反映した温度分布推定により、実測が難しい摩擦面近傍温度の推定が可能であり、摩耗現象の解明にも活かせると考えています。

X線CT

対象物に多方向からX線を照射して得られる透過画像群をコンピューター処理することで内部の断層画像を得る技術。軽元素ほどX線透過率が小さいことから画像に輝度差が生じ、内部構造を非破壊で観察することができます。

おわりに

今後は、シミュレーション技術の更なる高度化と妥当性検証を進めるとともに、高度数値シミュレーション技術を用いて、レールや集電材料の摩耗現象などの鉄道固有現象のメカニズム解明に取り組みます。また、新たに鉄道総研の大型試験線装置である高速車両試験台や低騒音列車模型走行試験装置の数値実験室を開発し、実験を効率化・高度化します。これらの取り組みによって、シミュレーション技術で、鉄道の安全性向上や保守コスト低減に寄与していきます。

なお、本記事で紹介した成果の一部は、東京都市大学との共同研究により得られたものです。

RRR

文献

- 1) 上半文昭：バーチャル鉄道試験線の構築, RRR, Vol.77, No.7, pp.40-43, 2020
- 2) 室谷浩平, 齋藤理沙：高速車両の排雪力を予測する, RRR, Vol.80, No.6, pp.14-19, 2023
- 3) 中出孝次：空気流シミュレーター：RRR, Vol.79, No.1, p.32, 2022
- 4) 阿部巧, 中出孝次：鉄道車両の床下の蛇行流れと最後尾車両の変動空気力に関するDMD解析, 日本流体力学会年会2023講演論文集, pp.1-8, 2023