

シミュレーション技術の高度化

鉄道力学研究部長
上半 文昭



1.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、コンピュータ計算等を用いてその動きを表し模擬することである。何かの現象のメカニズムを解明したい時や、対策の効果を事前に検討しておきたい時などに広く活用される。特に近年では、スーパーコンピュータによる高性能計算 (HPC: High Performance Computing) 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る。その役割は、様々であるが、鉄道分野では例えば、①超高速での車両走行や脱線後の車両挙動等の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風洞や振動台のように大きな時間や費用を要する実験の代替、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、等での活用が期待されている。

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見せようとしている¹⁾。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「フィールドインフォマティクス」、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」、追究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挙げられる。

鉄道総研での技術開発においては、連成シミュレーションでは鉄道シミュレータの開発、フィールドインフォマティクスでは地震災害シミュレータ等の開発、ハイブリッド実験では車両などのHILS²⁾実験室、数値実験では風洞などの数値実験室の構築を目指して研究開発を実施している(図1)。

本稿では、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する。

2. シミュレーション技術の動向と鉄道総研の技術開発

(1) 大規模シミュレーション

連続体や流体など、質点として扱うことが不適当な対象では、任意の形状に対して理論的に方程式を立てて、解を求めていくことが極めて困難である。そこでコンピュータ計算によるシミュレーションでは、対象を微小な領域に分割し、この微小領域に着目する現象

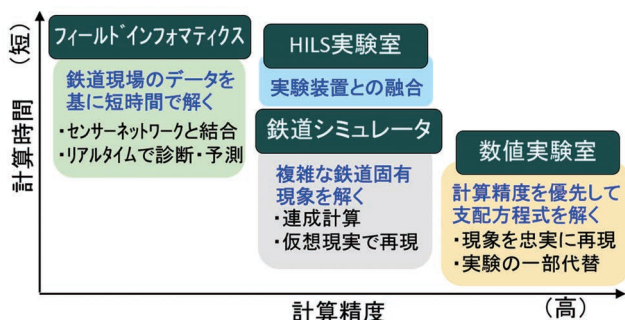


図1 シミュレーションの展開

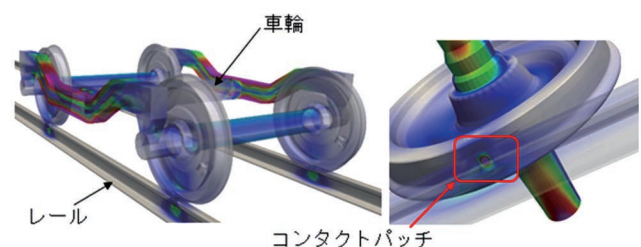


図2 車輪とレールの接触評価

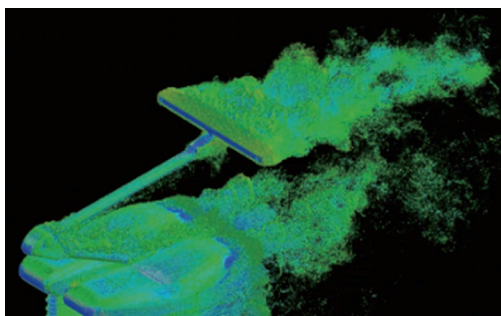
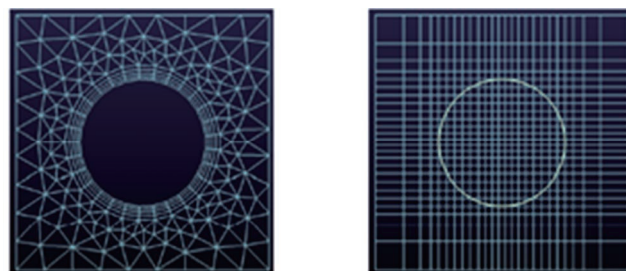


図3 パンタグラフ周りの流れのシミュレーション



(a)境界適合格子 (b)直交格子
図4 流れの数値シミュレーションの計算格子 (例：円柱周りの流れ)

に関する求解可能な基礎方程式を適用して、近似的に解を求めていく方法が用いられる。この手法は、求解可能である一方で、解析対象に含まれる全ての微小領域の方程式を連立させて解く必要があり、計算の規模が莫大となる。

これを可能にしたのが、スーパーコンピュータを用いた高性能計算である。大量のプロセッサを用いた超並列計算で大量の計算を超高速で行うことにより、高分解能かつ高精度なシミュレーションを実現する。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る。空間的・時間的に広範囲なモデル化が可能であり、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る。

例えば、車輪とレールの接触評価では、従来は理想的な車輪・レール形状を仮定して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た。これに対して大規模シミュレーションでは、よりマイ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呼ばれる接触領域を、有限要素法により、ミリ単位の微小領域に分割したモデルを用いている³⁾(図2)。この手法は東京大学との共同研究で開発を進めており、従来の手法では表せなかった任意の形状に対して、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る。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生成や摩耗現象の解明を目指している。

車両周りの空気流のシミュレーションでは、複雑な



図5 鉄道シミュレータ

形状の流れを容易に表現できる直交格子法に基づく空気流シミュレータの開発に取り組んでいる。複雑形状流れの空気流シミュレーションの例として、パンタグラフ周りの流れのシミュレーション結果(渦構造の可視化)の例⁴⁾を図3に示す。

流れの数値シミュレーションでは、流れの基礎方程式を空間上の微小領域に変更し、得られた代数方程式を数値計算することで流れ場を求める。離散的な点の分布は計算格子と呼ばれ、通常シミュレーションでは物体近傍の流れを高精度に再現するために、物体形状に合わせた計算格子(境界適合格子)が用いられるが、複雑形状の場合、境界適合格子の生成は大きな時間とコストを要する(図4)。これに対して、直交格子法は、自動的に格子を生成できることに加えて、並列計算効率が高いという特徴があるため、将来の超大規模並列計算環境において有力な流体解析手法になると

考えられている。

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る。

(2) 連成シミュレーション(鉄道シミュレータ)

連成シミュレーションは、ある問題を解くために車両、軌道、構造物、防災、電力、環境、人間科学等それぞれの分野の成熟した様々な理論や解析を巧く組み合わせ、効率的な解析を行うものである。それぞれの分野で信頼性が確認された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となる。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る。

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る。

鉄道総研では、これまでに開発した様々なシミュレーション手法を連成することで、コンピュータ空間上に仮想の鉄道を再現する鉄道シミュレータの開発に取り組んでいる²⁾(図5)。ここでは、そのうち列車走行系を対象としたシミュレータであるバーチャル鉄道試験線を紹介する。

バーチャル鉄道試験線は、コンピュータ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・損傷などの劣化現象の再現を念頭に開発を進めている。

営業線では、列車は加減速するだけでなく、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、構造物も振動する。また、様々な車両が繰り返し走行し、レールや架線

が摩耗したり、軌道もバラストの角部が摩滅して徐々に劣化する。車両も車輪やパンタグラフのすり板が摩耗する。また、高速列車の場合には、車両周りの空気が流れて走行抵抗や騒音発生要因となる。

これらの相互に関連する諸現象をコンピュータ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試験線である。バーチャル試験線では、車両、軌道、架線、パンタグラフのダイナミクス系の連成計算を行っており、解析結果を様々なグラフやバーチャルリアリティー(VR)空間で可視化することができる(図6)。

(3) フィールドインフォマティクス

ここでは、鉄道の営業線の車両や施設などで得られた様々なデータを利用して、先端的なセンサ技術や情報統計学とシミュレーションを融合して、短時間のシミュレーションで鉄道に生じる様々な現象をリアルタイムで診断・予測する手法をフィールドインフォマティクスと呼ぶこととする。近年では、ICT技術を用いた様々なセンサによるデータ収集、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る。

鉄道総研においては、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、列車運行、旅客行動等の研究に取り組んできた²⁾。

地震災害シミュレーション技術(図7)は、地震直後に鉄道沿線の地震動分布や構造物被害ランクを推定するもので、鉄道の運転再開判断や早期復旧支援にも活



図6 バーチャル鉄道試験線(鉄道総研所内試験線の走行シミュレーションのVR表示)

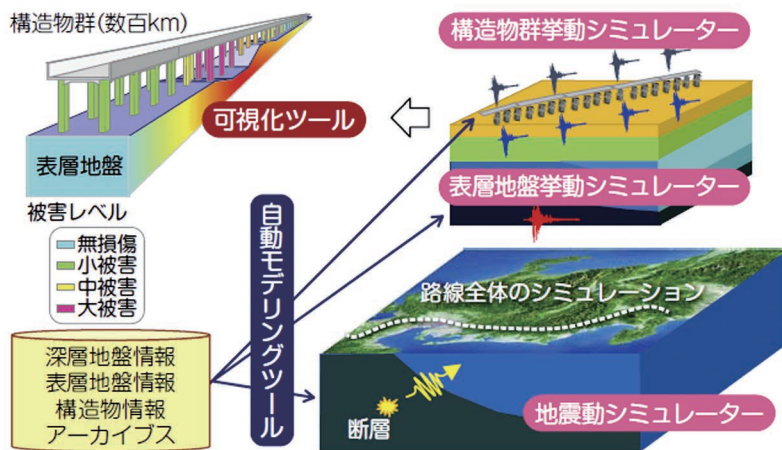


図7 鉄道地震災害シミュレータの概念図

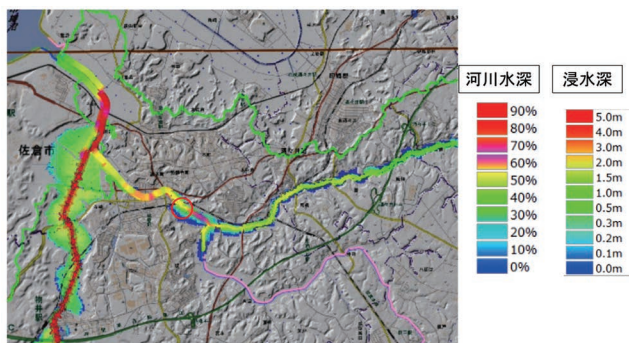


図8 浸水シミュレーションの解析結果例

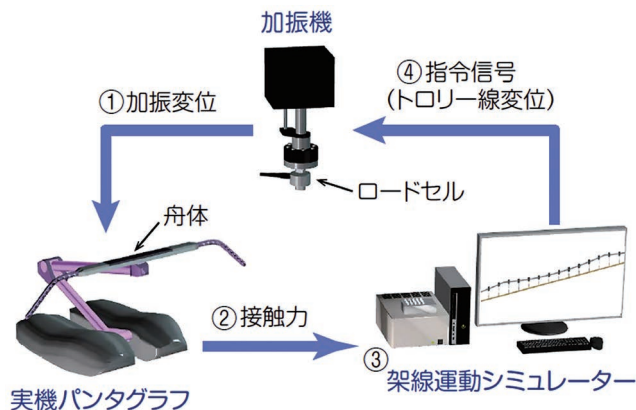


図10 パンタグラフHILSの構成

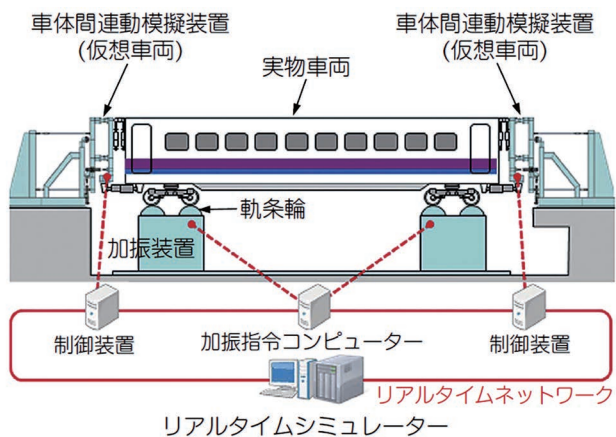
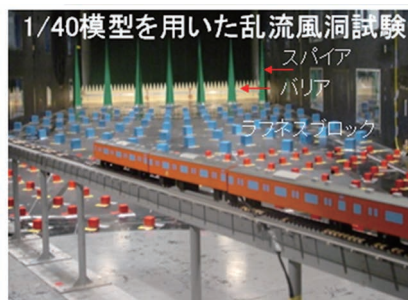
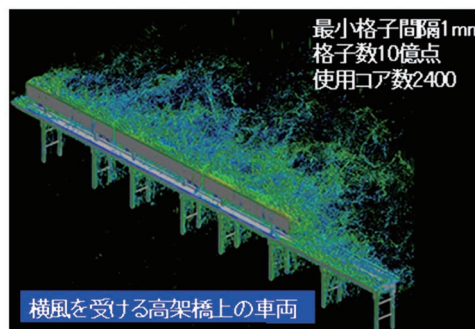


図9 車両HILSの構成



(a)風洞試験



(b)シミュレーション結果

図11 風洞試験の数値シミュレーション例

用できる⁵⁾。また、浸水シミュレーション技術(図8)は、局地的な短時間強雨による河川氾濫による浸水被害の予測に活用できる⁶⁾。

(4) ハイブリッド実験(HILS実験室)

ハイブリッド実験は、高度な実験装置とリアルタイムシミュレーションを組み合わせた手法である。リアルタイムシミュレーションの一部を実験装置で置き換え、連成して動作することにより、シミュレーションの一部を現実空間で動作させる手法である。

鉄道総研では、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連成するHILS (Hardware In the Loop Simulation) システムの構築に取り組んできた(図9)²⁾。

最近では、パンタグラフHILSシステムの開発に取り組んでいる(図10)。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ある。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う。

ハイブリッド実験では、加振装置のアクチュエータの性能を踏まえて、どのように誤差なく制御するか、リアルタイム処理のためシミュレータをどのように高速化するのが重要となる。

(5) 数値実験室

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、航空機や自動車等の産業分野では「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ある。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更なる効率化が期待されている。

例えば、風洞実験の例では、1/40縮尺模型により行われる実験を、先に述べた空気流シミュレーション手法を用いて、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ている(図11)⁷⁾。風洞実験では、スパイヤ、バリア、ラフネスブロック等を用いて意図的に気流を乱し、自然に近い風を生成するが、この過程も含めてシミュレーションで再現を行っている。

現状では、風洞実験の完全な置き換えまでには至らないが、実験条件の絞り込みや補完に活用している。

3. RESEARCH 2025でのシミュレーション技術の高度化

(1) RESEARCH 2025での取り組み

現行の基本計画(RESEARCH 2020)において、大規模シミュレーション技術や高度連成シミュレーション技術が検討され、様々なシミュレータおよびその連成環境が開発された。

RESEARCH 2025では、シミュレーション技術の更なる高度化に向けて、主な目標として、現状では鉄道総研構内試験線のモデル化に留まっているバーチャル鉄道試験線の実線区への適用に向けた高度化、並びに数値実験室の開発に取り組む計画である。

(2) バーチャル鉄道試験線の高度化

バーチャル鉄道試験線の高度化では、実線区への適用を目的として、実現象との整合性の確認と精度向上を行うとともに、新たな機能として積雪区間の車両走行安全性を検討するための排雪シミュレーション手法を開発する。

①実現象との整合性確認

現状のバーチャル鉄道試験線は、一例として鉄道総研の構内試験線を忠実にモデル化したものである。また、バーチャル試験線を構成する個々のシミュレーション手法は当初目的の精度を確保していることを確認したが、複雑な連成挙動については実現象との精度確認に至っていない。そこで、バーチャル鉄道試験線による解析結果の実現象との整合性の確認・精度向上のための検討を実施する。

実現象の解析対象として、電車線構造を考慮した架線・パンタグラフの挙動の再現、トンネル内での空気力による乗り心地の影響評価、車両運動を考慮した車輪・レール間に生じる波状摩耗や凹摩耗の劣化要因の再現などを選定し、シミュレーションの整合性を検証するとともに整合性向上のための改良を施す(図12)。

また、バーチャル鉄道試験線で実線区を再現するためには、シミュレーションモデルの構築に必要なパラメータを取得する必要がある。このため、実軌道や地上構造物のフィールドパラメータを車上・地上からの検測データや、設計図面等既存データベースから効率的に取得してモデルを作成する手法も検討する。

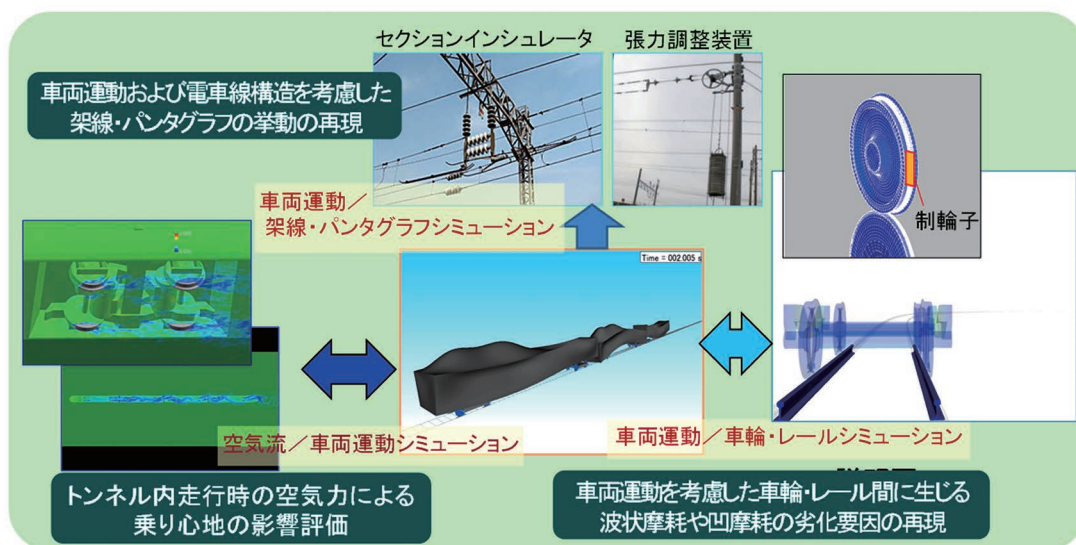


図12 バーチャル鉄道試験線の実現象との整合性確認

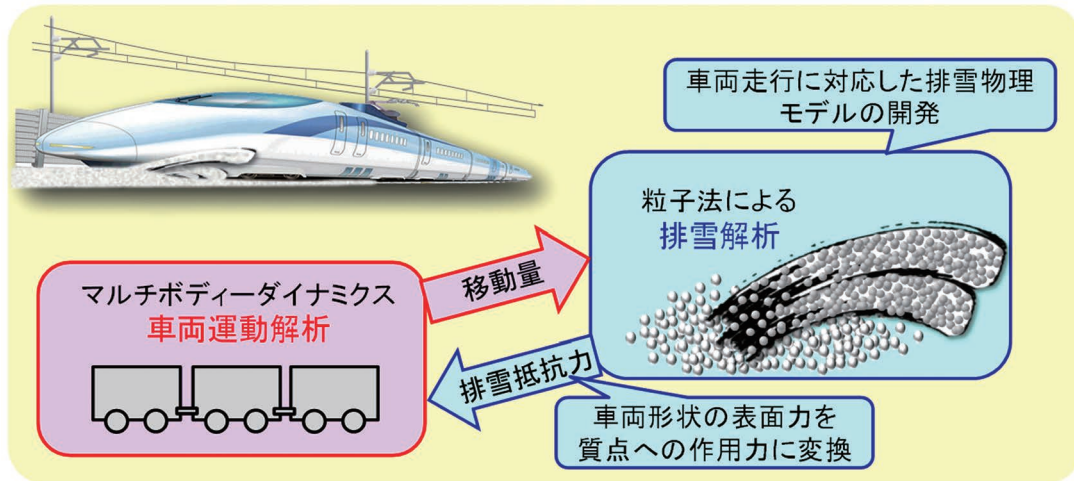


図13 積雪区間の走行安全性評価に用いる排雪シミュレーション手法

②積雪区間の走行安全性シミュレーション

バーチャル鉄道試験線の新たな機能として、積雪した軌道面への車両進入時の走行安全性の評価手法を追加する。

マルチボディーダイナミクスによる車両運動解析と粒子法による排雪解析の連成解析によるマルチフィジックス解析で、車両が雪をかき分けて走行する際の雪の挙動と車両に作用する排雪抵抗を計算し、車両の走行安全性を評価する(図13)。開発する排雪シミュレーション手法は、寒冷地での車両走行安全性評価に活用する。

(3) 数値実験室の開発

数値実験室の開発では、数値風洞、アークシミュレーション手法、材料の微視的構造シミュレーション手法の開発を実施する。

①数値風洞

前章で述べた、米原風洞固有の気流特性のモデル化と効率的なシミュレーション手法の開発により、精度向上を図る。測定部以外のノズル、コレクターを含めたすべての形状モデルを作成するとともに、米原風洞固有の気流を表現するための境界条件を明らかにする(図14)。作成した米原数値風洞は、実風洞試験の効率化やデータの補完に活用する。開発にあたっては、効率的な計算格子の作成などに積極的にAIを活用する計画である。

さらに、米原数値風洞の機能を拡張し、米原風洞では試験できない大きなスケールの試験、降雪試験などを実施できる数値風洞を開発する。開発した数値風洞は、効率的な車体形状の検討、車両の横風・着雪・外部騒音などの対策検討やパンタグラフの開発などに活用する。

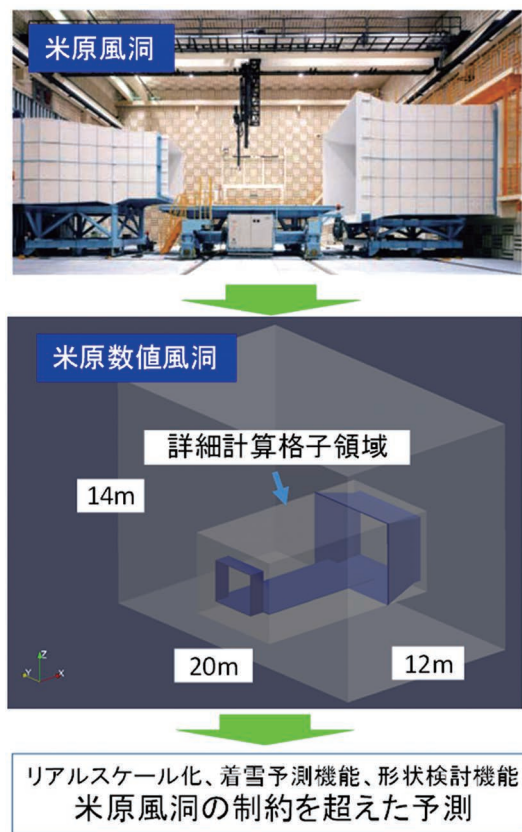


図14 数値風洞の開発

②アークシミュレーション

高電圧が作用する材料の摩耗・溶損メカニズムを明らかにするために、アークシミュレーション手法を開発する。アークシミュレーションを数値実験室化することで、危険な高電圧下での実験を省略し、安全かつ効率的にアーク発生や材料の溶損メカニズムを解明できる。

図15は、すり板がトロリ線から離線した際のアークの発生から飛散までを示している。溶けだした金属が熔融ブリッジを生成し、それが成長して最終的に蒸発することで材料に溶損が発生する。このような複雑な現象を解明するために、マルチフィジックス、マルチスケールの熱流体解析手法を用いてアークシミュレータを開発する。アークシミュレータの開発は、東京都市大学との共同研究で実施する計画である。

③材料の微視的構造シミュレーション

耐摩耗性に優れた鉄道用しゅう動材料の材料開発では、様々な素材とその配合を変化させた試験材料の製作と試験が必要である。このような材料開発における検討過程を数値シミュレーションで代替できれば、新材料開発の速度を向上するとともにコストを低減できると考えられる。

そこで、微視的な構造を考慮した材料の評価シミュレーションで行う手法を構築する。微視的構造シミュレーションには、マルチスケール解析手法の一つで、微視的に周期構造を持つ材料の平均的な物性を評価する均質化法を用いる。微視的構造シミュレーションの手順は次の通りである(図16)。まず、材料のマクロ物性(弾性率、熱伝導率、導電率等)に影響する微視的構造を反映したモデルをX線CT撮像結果などを基に作成する。次に、モデル内を素材別に分離した小領域に分割する。この小領域毎に均質化を行ってFEMモデルを構築し、材料のマクロ物性を計算する。

この微視的構造シミュレーション手法を、まず、すり板に用いるカーボン系の材料を対象として開発し、次に焼結材料に応用する計画である。開発したシミュレーション手法は、耐摩耗材料開発における設計指針の提案に活用する。

(4) その他の取り組み

HILS 試験室の検討では、2020年に完成する大型試験装置である高速パンタグラフ試験装置にHILSを適用し(図17)、高速走行においてしゅう動摩擦と上下運動が作用するパンタグラフの安定性評価手法を検討する。

フィールドインフォマティクスの分野においても、ICT技術を用いた先端的なセンサで取得した実車や実線区の情報を入力として車両や構造物の維持管理に関わる評価を行う新たなリアルタイムシミュレーション技術の開発を検討したい。

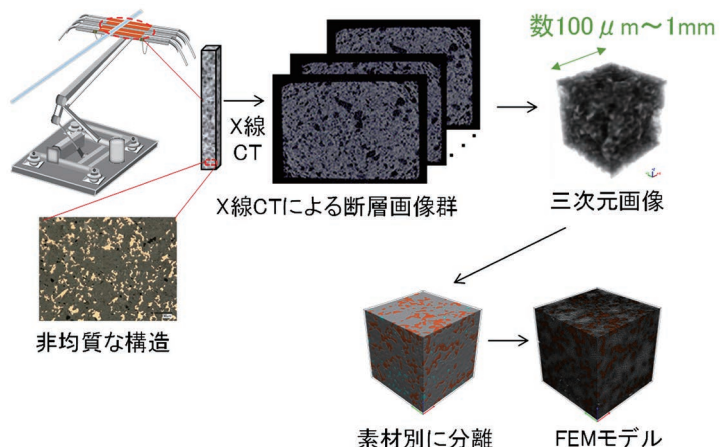


図16 微視的構造シミュレーションの流れ

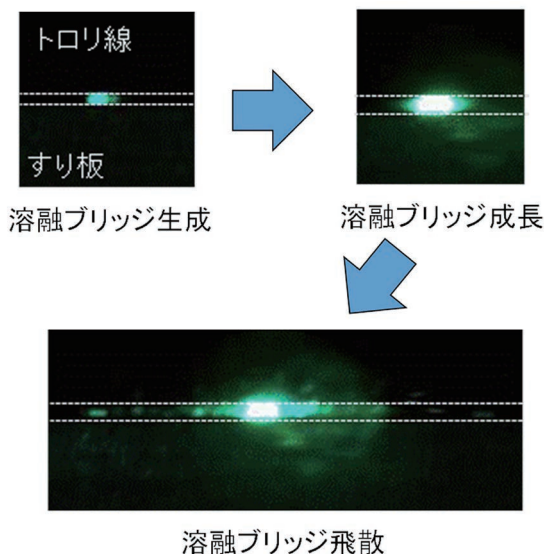


図15 アーク発生による材料の溶損過程

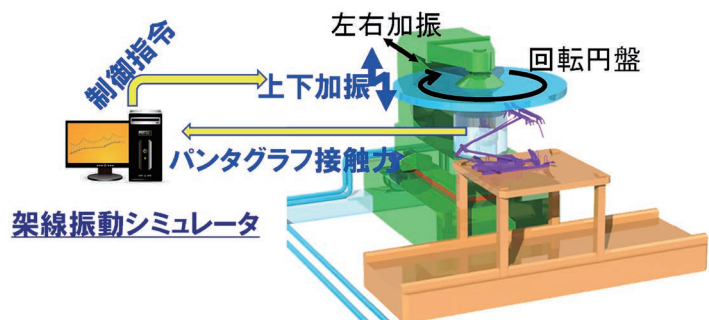


図17 高速パンタグラフ試験装置へのHILS適用

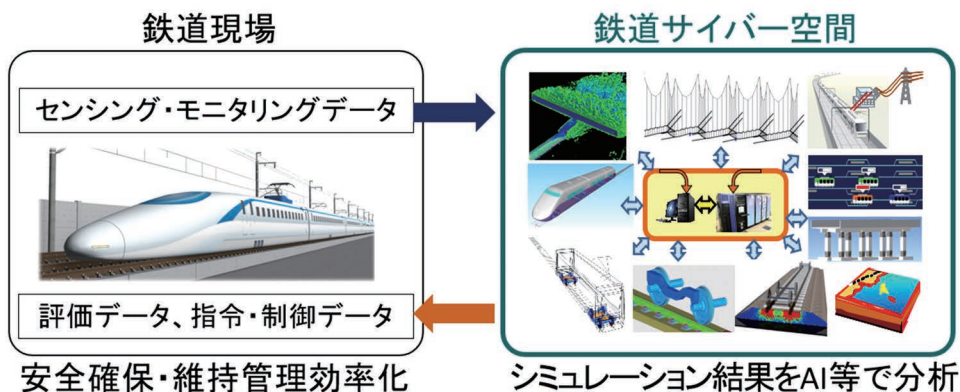


図18 鉄道のデジタル化におけるシミュレーション技術の位置付け

4. シミュレーション技術開発の方向性

これからの5年間、鉄道総研では、先に述べたように、数値実験室の開発、バーチャル鉄道試験線の整合性確認と機能向上を中心として、HILS 試験室やリアルタイムシミュレーションの技術向上にも取り組み、それらのシミュレーション技術の総合力を発揮して、鉄道の安全性、経済性、環境親和性などの向上に寄与していく。

一方、さらなる将来へのビジョンとして、シミュレーション技術は、サイバー空間におけるデジタルな鉄道構築の役割を果たさなければならないと考えている。

現在、AIやIoTなどを用いた「デジタル化」が新たな産業革命をもたらすと考えられている。鉄道においても、既存設備の老朽化、少子高齢化の進行、自然災害の激甚化により安全確保や運営・維持の効率化が急務であり、デジタル技術による革新が不可欠である。

我々が取り扱うシミュレーション技術は、サイバー空間上で鉄道デジタルツインを構築し、車両や構造物の安全性・健全性を評価する重要な基幹技術の一つになると考えている。実線区で生じた現象を、センシング・モニタリングにより「鉄道サイバー空間」に送信し、そのデータをシミュレーションやAIで分析し、評価結果を実線区に戻すことで、鉄道の安全確保や維持管理の効率化を図る仕組みを将来的に実現させる必要があり、そのような未来を指向した技術開発に取り組んでいきたい(図18)。

参考文献

1) 上半文昭：鉄道のシミュレーション技術, RRR, Vol.75, No.11, pp.4-7, 2018

2) 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.7-10, 2013
 3) 林雅江, 高垣昌和, 相川明, 奥田洋司, 殷峻: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, 日本計算工学会, 2017
 4) 中出孝次, 光用剛：複雑形状に対応した空気流・空力音シミュレーション, RRR, Vol.72, No.12, pp.22-25, 2015
 5) 井澤淳, 坂井公俊, 本山紘希, 室野剛隆：鉄道地震災害シミュレーターで構造物被害を予測する, RRR, Vol.73, No.3, pp.8-11, 2016
 6) 浦越拓野, 川越健, 渡邊諭, 尾崎尚也：降水量予測値を用いた豪雨時鉄道減災システム, 鉄道総研報告, Vol.32, No.7, 2018
 7) 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, 2018