

シミュレーションによる 気象災害の解明と予測精度の向上

鉄道力学研究部長
上半 文昭



1. はじめに

近年の気象災害激甚化を受けて、気象災害による鉄道被害の現象解明と予測精度の向上が、鉄道分野においても極めて重要な課題となっている。現象解明のための基礎試験の実施には、高度な試験技術・設備の開発が不可欠である。また、被害予測や運転規制のための外力、耐力の評価では、気象災害の激甚化に伴い過去の被害統計情報のみによる評価では不十分となるケースがあり、実物大試験による情報補完には多大な費用を要する。

一方、鉄道分野の研究開発では、理論解析や実験による検証に加えて、数値シミュレーションによる定量的な予測・評価が重要な役割を果たしている。特に、災害や事故など実験が困難または非効率な課題には、数値シミュレーションによる検討が有効であり、鉄道総研では、気象災害に関わるシミュレーションにも取り組んでいる。

以下では、気象災害のメカニズム解明や予測精度向上を目的として、鉄道総研が開発するシミュレーション技術例を紹介する。また、気象災害によるハザードを評価して初動対応や復旧に反映するツールとして開発を構想している「鉄道防災プラットフォーム」¹⁾を、現象解明、外力や耐力の評価、強靱化対策効果の評価、リアルタイム被害予測などの様々なフェーズで支援するツールとしての高度シミュレーション技術の今後の役割について展望する。

2. 気象防災に関するシミュレーションの役割

実車両・実構造物に対して、実規模の雨、風、雪を与えるような試験の実施は困難であり、模型試験や要

素試験も可能ではあるが、技術や費用面の課題がある。そのため、数値シミュレーションを用いて気象現象やそれに伴う鉄道被害を再現することが、気象災害の現象解明や鉄道に対するハザードの予測精度向上に不可欠であると考えられる。

数値シミュレーションは、これまでも気象防災を目的として活用されてきた。例えば、公的気象情報からの鉄道沿線の気象情報の推定、橋脚や盛土の耐荷力の把握や補強効果の確認、強風による車両の転覆限界風速の算出や防風柵などの対策効果の推定などにシミュレーションが用いられてきた。一方、雪に関しては、雪の物性を考慮したシミュレーション手法の開発に着手し、これから体系的な研究に取り組む段階である。

2.1 多様・未経験の被害形態に対する現象解明

甚大かつ広域の気象災害に対応するためには、多様な被害形態の解明、未経験または未検討の被害形態の解明が必要である。

激甚化、広域化する現象を解明するには、スケールの異なる手法を組み合わせたマルチスケール解析技術の向上が不可欠である。マルチスケール解析は、規模や時間についてマクロからミクロに至る現象を連成して効率的に解析する手法である。

また、未経験または未検討の複雑な現象の解明にあたっては、異なる分野の理論を組み合わせたマルチフィジックス解析技術の向上が不可欠である。マルチフィジックス解析は、例えば流体力学と動力学などの異なる分野の成熟した解析技術を組み合わせて効率的に解析する手法である。

今後の気象防災においては、このようなマクロからミクロに至る規模や時間または異なる物理現象の相互作用の影響を考慮した高度数値シミュレーションを用いて気象災害の解明に取り組むことが重要な課題である。

2.2 より実状に近い条件での広域・リアルタイムハザード評価

災害発生中や初動の対応を迅速化するためには、鉄道線区全体での実状に近い条件での詳細な評価、および耐力や対策効果の線区レベルでの評価が課題である。

線区全体のリアルタイムハザード評価へのシミュレーションの適用にあたっては、公的気象情報から鉄道沿線情報を、計算負荷を抑えて迅速に推定するシミュレーションを鉄道防災プラットフォームに組み込んで用いている。また、高度なシミュレーションを用いて、災害時の車両走行性など耐力に相当する指標を事前に解析して被害予測や運転規制の閾値を算定し、鉄道防災プラットフォームに適用する手法も考えられる。

線区の弱点箇所の抽出や対策効果の確認をより詳細に行う手段として、実状を忠実に再現するデジタルツインの整備を検討している。デジタルツインは、実空間に実在しているものを、デジタル技術を利用してコンピュータ上の仮想空間に再現したモデルである。鉄道防災プラットフォーム上で線区全体の特徴を整理して、外力や地形情報などの公的データ、車両・構造物の諸元などの事業者データを用いて、デジタル空間に現実と同じ条件・状況の鉄道を再現し、外力、耐力、ハザードなどを解析可能にする。デジタルツインで事前に計算された詳細なハザードの評価結果を反映するとともに、対策や更新に伴う条件変更も柔軟かつ迅速に反映することによって、鉄道防災プラットフォームにおける外力、耐力、ハザードの予測精度向上を図る仕組みを構築したいと考えている。

3. 高度数値シミュレーションによる気象災害の現象解明

気象災害の詳細な現象解明にあたっては、マクロな領域を対象とした外力推定とミクロな領域で流体や粒

子が相互に作用しながら生じる複雑な現象を一括して取り扱うための高度なシミュレーション技術が必要になる。ここでは、鉄道総研が開発するマルチスケール解析とマルチフィジックス解析を用いた高度数値シミュレーション技術の例として、河川橋脚の洗掘シミュレーションと積雪軌道上の排雪走行シミュレーションを紹介する。

3.1 河川橋脚の洗掘シミュレーション

近年、大規模な洪水により河川橋梁の橋脚周辺が洗掘され、橋脚が沈下・傾斜し列車運行を阻害する事例が頻発している。そこで、洗掘対策検討用のツールとして、河川橋脚周りの洗掘を再現するシミュレーション手法を開発した²⁾。

本手法は、流れの計算と河床の砂礫の移動による地形変動計算を組み合わせることで洗掘の進行を再現している(図1)。流体計算および砂礫粒子の移動計算の両方に3次元的な手法を用いているため、複雑な条件への適用が可能である。また、計算の一部に確率的な手法を採用することで、計算コストを抑え、長時間にわたる現象の計算を実現している。

また、河川の流れについては、広範囲流体解析による流速分布を橋脚周辺の詳細な洗掘解析に接続して解析を行う。それによって、広範囲全体を詳細にモデル化して解析した場合とほぼ同等の洗掘解析結果を、短時間の解析で取得可能にしている(図2)。

大規模水路を用いた円柱橋脚周りの洗掘実験を対象に再現計算を実施し、本手法によって洗掘孔の形状・洗掘深の時間変化を精度よく再現できることを確認した(図3)。本シミュレーション手法は、洗掘模型実験と併用して、洗掘時における河川の流れや砂礫の移動・堆積などの現象解明、洗掘孔の形状や深さなどの予測、防護工の対策効果の検討などに使用できる。今後、実規模での解析モデルの構築や実被害との相関について

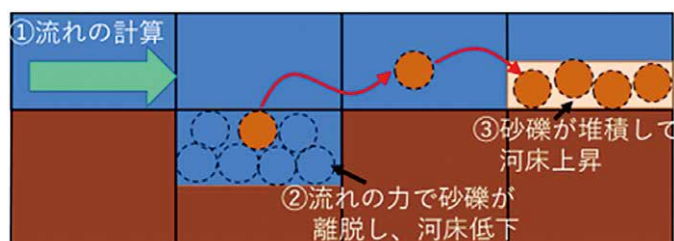


図1 洗掘シミュレーション手法

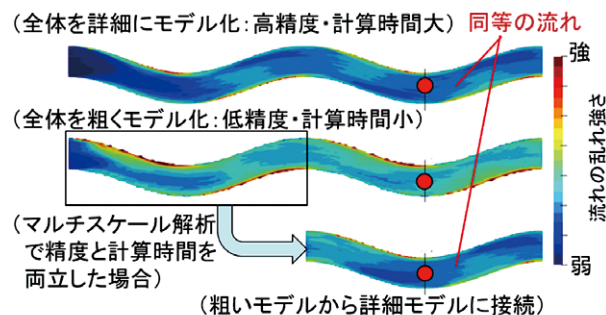


図2 流れのマルチスケール解析

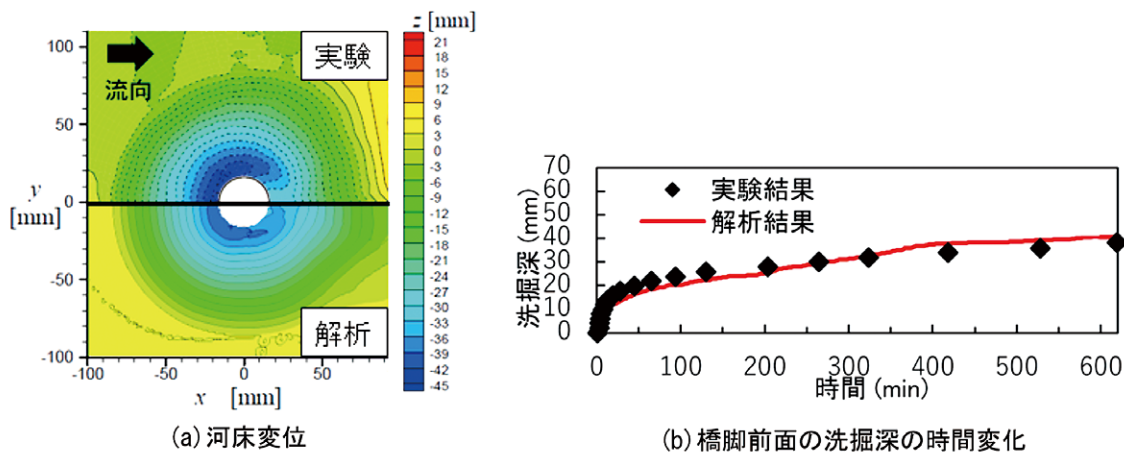


図3 洗掘実験と洗掘シミュレーションの結果の比較

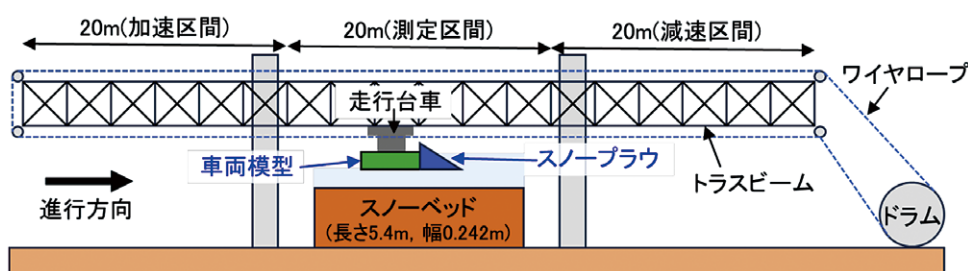
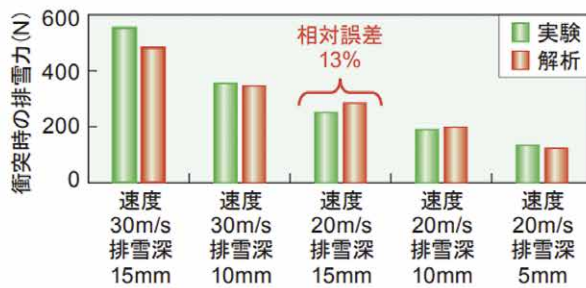


図4 排雪力測定試験装置の概要



(a) 排雪シミュレーション



(b) 実験とシミュレーションでの排雪力の比較

図5 排雪シミュレーション結果

検討を深度化し、河川の流況や河床の材料および橋脚の形状の違いなどを考慮した洗掘評価に応用し、過去の被災事例の統計的分析に基づいて設定された現状の洗掘深予測式の改良などに活用する計画である。

3.2 排雪走行シミュレーション

新幹線では現車による排雪試験などの結果に基づき、軌道上の積雪深に応じた走行速度規制がなされている。しかしながら、現車試験はコストと期間を要するとともに、車両が損傷や脱線に至るような条件での試験実

施は困難であるため、実施できる試験数には限りがある。そこで、現車試験を補完できる解析手法として、粒子シミュレータ³⁾を用いた排雪シミュレータの開発に取り組んだ⁴⁾。

排雪シミュレータの開発は、縮尺模型を用いた排雪実験と並行して実施した。実験では、全長60mのガイドレール内を走行する台車にスノープラウを搭載した1/10車両模型を取り付け、スノーベッドを通過させて排雪状況を再現した(図4)。

図5は、1/10車両模型による排雪実験を再現した

排雪シミュレーションの結果である。スノーベッド衝突時の排雪力の解析結果は、実験結果と十分に一致しており、車両模型の速度と排雪深による変化を適切に捉えている。この結果より、排雪シミュレータで排雪実験を十分に再現できることが確認できた。

また、排雪シミュレータで計算したスノープラウに作用する排雪力をマルチボディで構成された車両運動シミュレータに渡し、排雪力による車両およびスノープラウの姿勢・移動量の変化の解析結果を排雪シミュレータに返すという解析を繰り返すことによって、排雪しながら走行する車両の挙動を解析する連成手法を開発した(図6)。

この排雪走行シミュレーションは、現状は、縮尺模型実験の再現に成功した段階であるが、今後、実規模のスノープラウと車両の連成解析モデルを構築し、実車走行試験結果を用いて検証を実施する計画である。そして、実車による排雪試験条件の事前検討や補完、実車では再現困難な排雪深や車両速度などの影響評価に用いるとともに、運転規制や除雪頻度の検討やスノープラウの設計などに活用していきたいと考えている。

4. シミュレーションを用いた鉄道防災プラットフォームの予測精度向上

鉄道防災プラットフォームを用いた線区全体のリアルタイムハザード評価の精度を向上するためには、外力と耐力の適切な評価が不可欠である。外力の評価にあたっては、公的気象情報から鉄道沿線情報を迅速に推定するシミュレーションを用いている。その例としてここでは、氾濫・浸水と気流のシミュレーション事例を紹介する。また、高度シミュレーションを用いた耐力推定によって、運転規制や再開の評価の閾値設定を検討した例として、洗掘被災橋梁上の列車走行性評価のシミュレーションを紹介する。さらに、線区の弱点箇所抽出や対策効果の反映をより柔軟かつ迅速に行うための手段として期待するデジタルツインの開発事例として、鉄道総研の大型低騒音風洞を数値シミュレーションで再現した「数値風洞」の開発事例とその鉄道防災プラットフォームの予測精度向上への活用方法を説明する。

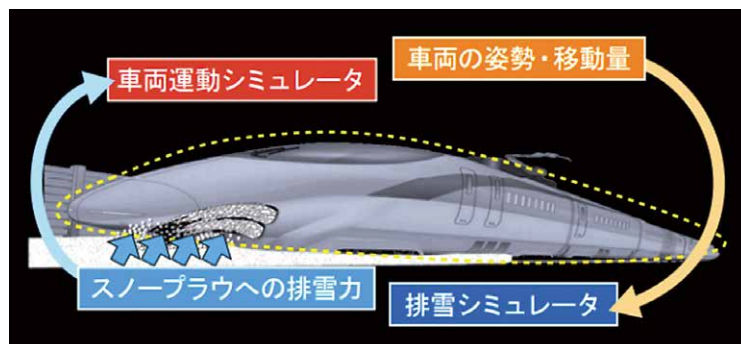


図6 車両運動解析と排雪解析の連成による排雪走行シミュレーション手法

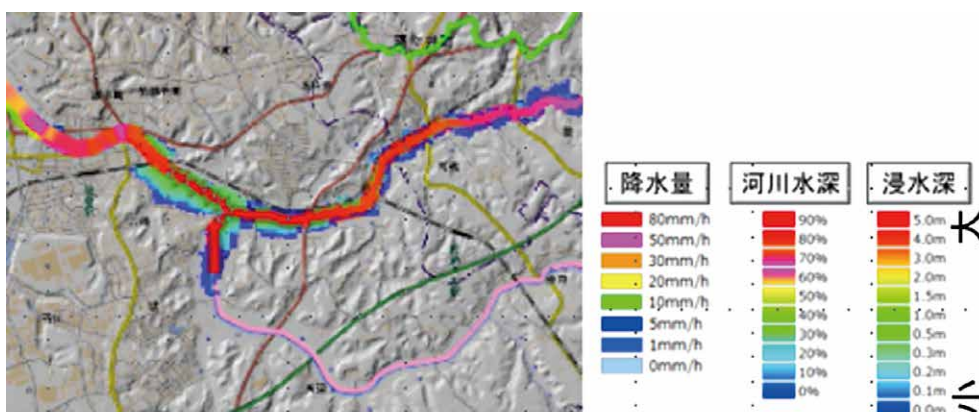


図7 氾濫・浸水シミュレーション

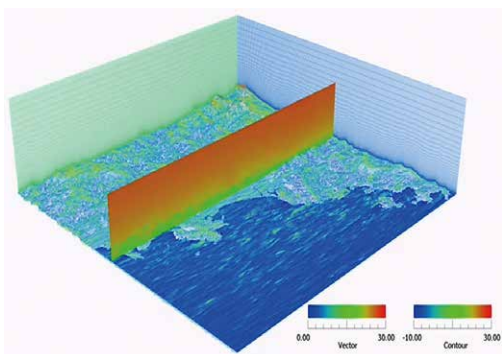


図8 気流解析シミュレーション

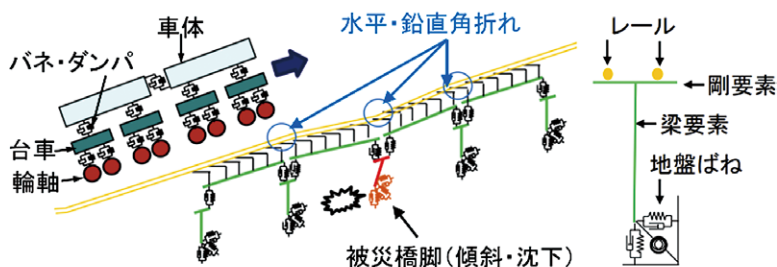


図9 DIASTARS IIIによる車両・橋梁のモデル化

4.1 外力評価のためのシミュレーション

災害の発生中に、外力をリアルタイムで推定するためには、計算負荷を抑えつつ迅速に計算を実行できるシミュレーションモデルが用いられる。図7に示す氾濫・浸水シミュレーション⁵⁾は、ナウキャストなどの雨量の将来予測データや国土地理院の地形データを用いて鉄道沿線の浸水箇所を推定し、徐行や運転抑止の判断や、利用者の避難誘導を支援するものである。図8に示す気流解析シミュレーション⁶⁾は、アメダスの実況風速から鉄道沿線の風向、風速を推定可能にするために用いたものである。気流解析モデルでアメダス地点を1としたときのその周辺の風速の増減率を表すデータテーブルを事前に準備することによって、沿線気流の計算を迅速化している。これらのシミュレーションの活用により、公的な気象情報などをリアルタイムで参照し、数分から10分程度で鉄道沿線の気象情報を提供できる。

4.2 洗掘被災橋梁上の列車走行性評価

河川橋脚の洗掘によって被災した橋梁では、橋脚の傾斜や沈下によって軌道に鉛直および水平方向の角折れ(曲がり)が発生する場合がある。このような場合の運転規制や再開の判断基準の検討を目的として数値シミュレーションで被災橋梁上の車両走行性を調査した。

鉄道総研が開発した鉄道車両と構造物の動的相互作用解析プログラムDIASTARS III⁷⁾を用いて車両と構造物をモデル化し(図9)、水平・鉛直の種々の角折れ量と安全に走行できる車両速度の関係を整理した。その結果を、ある車両速度で安全に走行できる角折れ量の限界値として図10に整理した。例えば、30km/hの黒線のグラフ内の領域に収まる組合せで水平角折れと鉛直角折れが生じている場合には、30km/hでの徐行が可能であると判断できる。

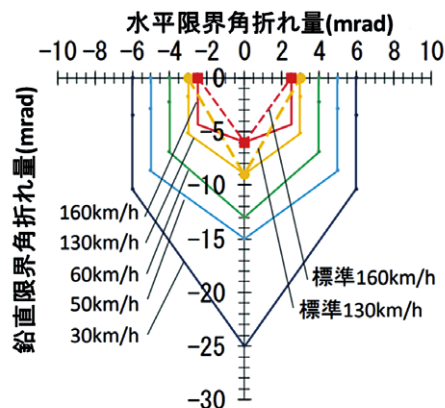


図10 低速走行時の限界複合角折れ量

提案した限界値は、水平方向と鉛直方向の複合した角折れの影響を考慮した上で、新たに低速領域に対して走行安全性、乗り心地を満足する限界値を示したものであり、災害発生直後の運転規制や、徐行試験実施や運転再開の判断の閾値として活用できる。

4.3 デジタルツインによる弱点箇所、対策効果の把握

鉄道防災プラットフォームの予測精度を向上するためには、外力、耐力を精度よく把握して、被害予測や運転規制のための評価指標の閾値を適切に設定する必要がある。また、気象災害の激甚化による外力の見直しや、車両・構造物への強靱化対策などによる耐力変化など、鉄道を取り巻く環境の変化に応じた評価の見直しも必要である。そこで、環境変化に伴う条件変更柔軟かつ迅速に対応するために、現実と同じ条件や状況を忠実に再現可能なシミュレーション実行環境としてデジタルツインの整備を検討している(図11)。

デジタルツイン構築に向けては、まず、デジタル空間でのモデル構築の効率化の課題がある。外力データについては、公的データとの連携による鉄道沿線データの推定が必要である。耐力を求めめるための車両や構

造物の数値モデル構築にあたっては、事業者データから効率的に形状や特性をモデル化する技術が必要である。また、事業者独自のセンシング・モニタリングによる外力や車両・構造物の特性データの取得もデジタルツインのモデル構築に有効である(図12)。

また、実規模の現象を再現するための大規模数値シミュレーションの高度化も重要な課題である。大規模な計算を高速化するための大規模並列計算手法などの解析アルゴリズムの向上、並びに、入力と結果を学習したAIでシミュレーションの一部を代理するAIサロゲートモデルの効果的な活用などを検討していく。

4.4 大型低騒音風洞のデジタルツインの構築

まだ実規模の鉄道のデジタルツイン構築には至っていないが、デジタルツイン開発の第一段階として、実現象の再現に実績のある鉄道総研の大型試験装置のデジタルツインの開発を実施した。

鉄道総研の空気力学に関する研究開発では、米原にある大型低騒音風洞(米原風洞)が重要な研究開発ツールとなっており、毎年200日以上、さまざまな試験が実施されている。この米原風洞のデジタルツインとして、「数値風洞」⁸⁾を開発した(図13)。数値風洞の構築においては、まず、米原風洞の様々な設定条件における各部の気流を詳細に把握し、鉄道総研が開発した空気流シミュレータ⁹⁾を用いてその気流を高精度に再現した。

強風下での車両に作用する空気力の推定において、米原風洞での縮尺模型試験で実物大試験を高精度に再現でき¹⁰⁾、同実験の空気流シミュレータによる再現も可能¹¹⁾であったことから(図14)、今後は、数値風洞を用いた実現象の再現にも取り組みたい。この数値風洞を用いれば、様々な沿線気流、車両や構造物の形状、防風柵等対策効果を考慮したシミュレーションが可能であるため、環境変化に伴う条件変更柔軟かつ迅速

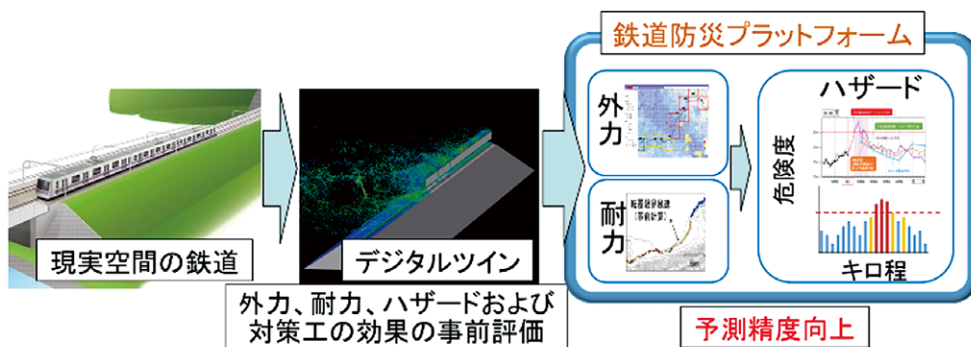


図11 デジタルツインによるハザード予測精度向上

外力データの効率的な取得 公的データ・広域情報との連携



車両・構造物データの効率的な取得 事業者データ・総研開発技術の活用

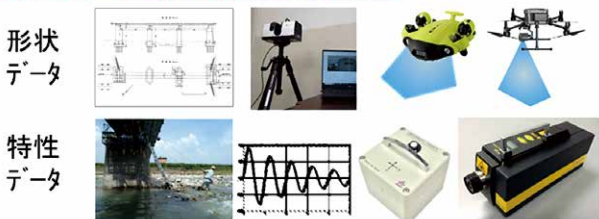


図12 デジタル空間でのモデル構築の効率化

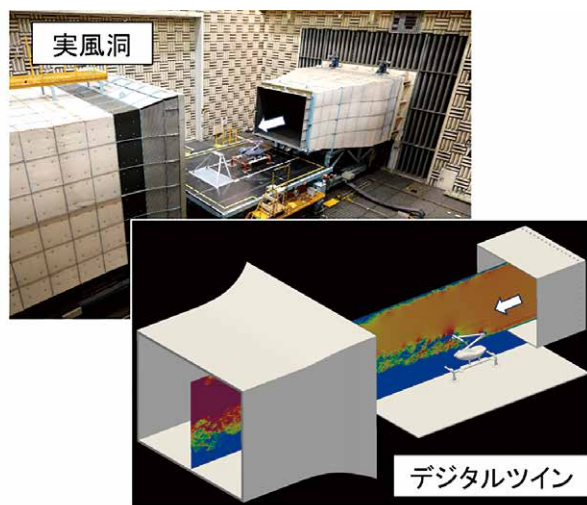


図13 大型低騒音風洞のデジタルツイン

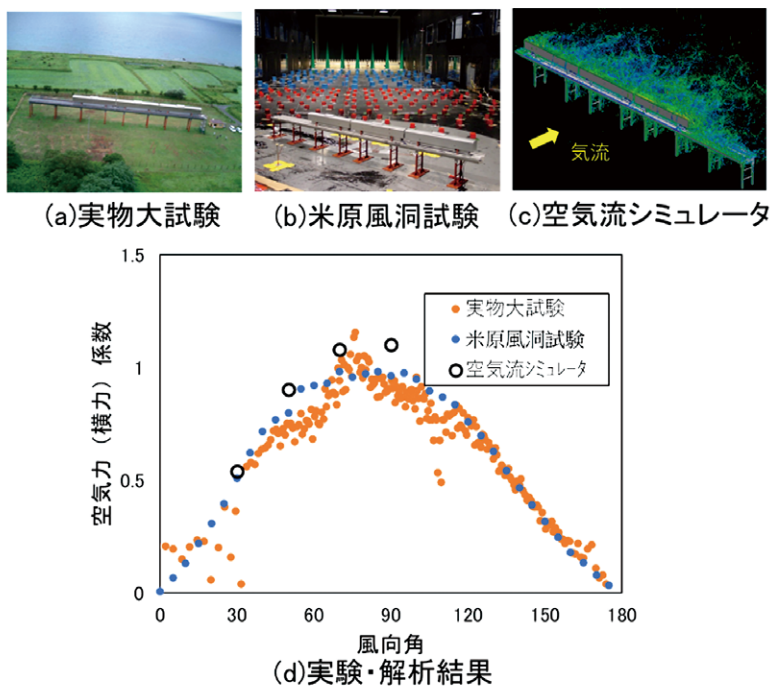


図 14 実物大試験，風洞試験，空気流シミュレータによる空気力係数の比較

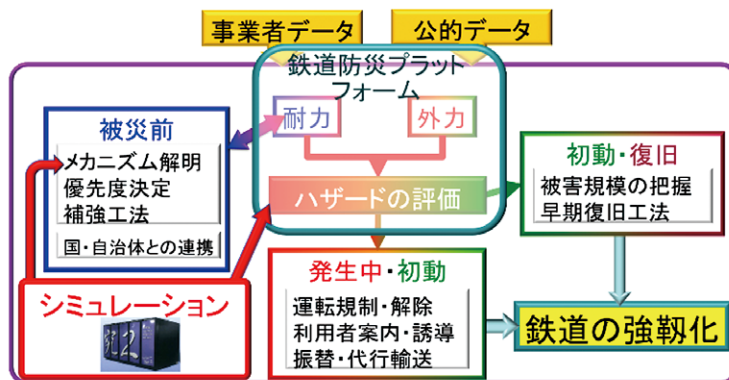


図 15 鉄道気象防災におけるシミュレーションの寄与

に対応でき、鉄道防災プラットフォームの予測精度向上に寄与できるものと考えている。

5. 数値シミュレーションによる鉄道システム強靱化への寄与

気象災害に対する鉄道システムの強靱化に向けた今後の数値シミュレーションの役割は、高度数値シミュレーションによる気象災害の現象解明と、シミュレーションを活用した鉄道防災プラットフォームの予測精度向上への寄与であると考え（図15）。

気象災害の現象解明では、激甚化・広域化し、水や空気の流れ、土砂や雪、車両や地上構造物などが連成して生じる複雑な現象を再現するために、マルチスケール解析、マルチフィジックス解析を用いた高度数値シミュレーション技術の開発に取り組み、多様な被害形態に対する現象解明を進めていきたい。そして、さらには単なる現象解明に留まらず、防災モニタリングの効率化やコストダウンにつながる対策工の提案など、防災実務へ有用な知見を提供していきたい。

鉄道防災プラットフォームの予測精度向上に向けては、様々なシミュレーション技術とその解析結果のり

アルタイム被害予測への効果的な反映方法を検討したい。また、被害予測や運転規制の評価のための外力、耐力、ハザードの算定・更新を高精度かつ効率的に行うための解析環境として、気象災害を再現可能なデジタルツインの開発とその効果的な運用策の検討に取り組むたい。

気象災害の現象解明と予測精度向上を実現するツールとしての数値シミュレーションへの期待は、今後ますます高まるものと予想される。引き続きシミュレーション技術の高度化と効果的な活用策の検討に取り組み、数値シミュレーションを用いなければ不可能な現象解明や対策提案を行っていききたい。

参考文献

- 1) 布川修：気象データを活用した鉄道防災技術，第36回鉄道総研講演会要旨集，2023
- 2) 石井秀憲，室谷浩平，中出孝次：水流中の3次元的な土砂の移動に基づいた河川橋脚周りの局所洗掘解析手法，鉄道総研報告，vol.37，No.4，pp.9-16，2023
- 3) 室谷浩平，大地雅俊，藤澤智光，越塚誠一，吉村忍：ParMETISを用いたMPS陽解法の分散メモリ型並列アルゴリズムの開発，日本計算工学会論文集，Paper No.20120012，2012
- 4) 室谷浩平，石井秀憲，鎌田慈，辻滉樹，坂本裕一郎：排雪模型実験によるスノープラウの排雪シミュレーションの開発，雪氷研究大会，2023
- 5) 浦越拓野，河村祥一，馬目凌，深野雄三：中小河川での浸水・氾濫に対するリアルタイムハザードマップ，JREA，vol.66，No.1，pp.27-30，2023
- 6) 荒木啓司：数値計算を用いて強風箇所を抽出する，JREA，vol.65，No.1，pp.21-24，2022
- 7) 松本信之，田辺誠，涌井一，曾我部正道：非線形応答を考慮した鉄道車両と構造物との連成応答解析法に関する研究，土木学会論文集（A編），Vol.63，No.3，pp.533-551，2007
- 8) 中出孝次，井門敦志，阿部巧，井上達哉：大型低騒音風洞を模擬する数値風洞の開発，第31回交通・物流部門大会（TRANSLOG2022），2022
- 9) 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.12，2015
- 10) 鈴木実，種本勝二：横風に対する車両の空力特性に関する実物大試験と風洞試験，第14回鉄道技術連合シンポジウム（J-RAIL2007）講演論文集，pp.231-234，2007
- 11) 野口雄平，中出孝次：横風空力特性に関する風洞試験を模擬した数値シミュレーション，鉄道総研報告，vol.31，No.9，pp.11-16，2017