

気象災害に備える鉄道技術

理事
古川 敦



1. 近年の気象の変化と鉄道の被害

1.1 近年の気象の変化

近年、激甚化する気象災害により鉄道が大きな被害を受ける事例が増えている。この原因の一つである地球温暖化には、人間の活動による温室効果ガス排出量

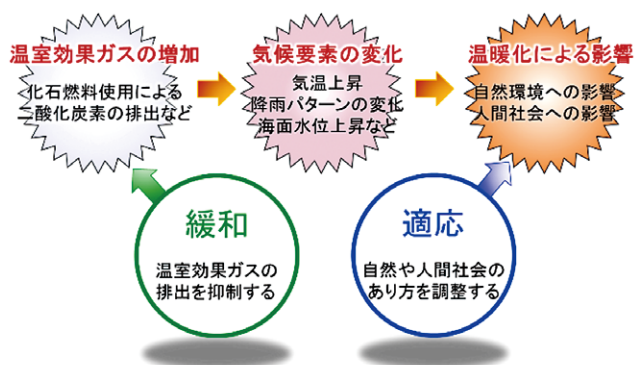


図1 2つの温暖化対策 緩和と適応²⁾

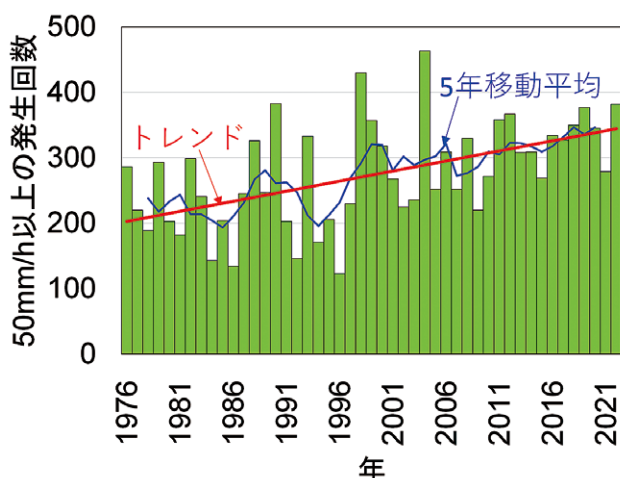


図2 50mm/h以上の雨の年間発生回数³⁾
(気象庁調べ：アメダス観測点1300点換算)

の増加が関与していることは「気候変動に関する政府間パネル (IPCC)」の第6次報告書でも「疑う余地がない」と指摘されている¹⁾。この地球温暖化への対策には、温室効果ガスの排出量を削減する「緩和」と、温暖化による影響に対して自然や人間社会のあり方を調整する「適応」がある(図1²⁾)。第34回鉄道総研講演会では「脱炭素化に求められる鉄道技術」と題し、鉄道におけるCO₂排出量削減策など「緩和」に対する鉄道総研の取組を紹介した。今回は、雨災害への対応を中心に「適応」への取組を概観する。

日本の気候変動に目を向けると、図2に示すように、強度の強い雨の発生頻度はこの50年間確実に増加しており³⁾、また、図3に示すように今後も増加すると予測されている⁴⁾。

気象庁によると、近年の日本の降水及び大雨に関し、

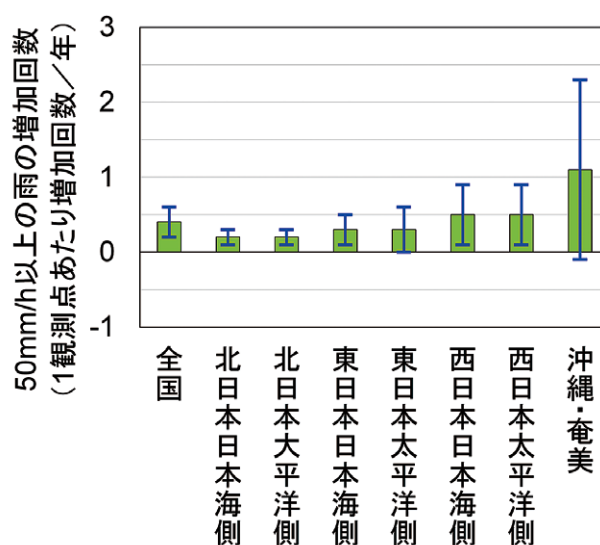


図3 50mm/h以上の雨の年間発生回数の変化⁴⁾
(1980～1999年の平均と、2076～2095年の平均の比較。IPCC第5次評価報告書における、温室効果ガスの排出量が最も多いシナリオに基づく予測値。青いバーは標準偏差。)

表1 2017年以降に発生した主な気象災害による鉄道の被災事例

名称	災害発生日	主な被害
平成29年7月九州北部豪雨	2017/7/5~7/6	久大線花月川橋梁流出
平成30年7月豪雨	2018/6/28~7/8	中国地方を中心に広範な被害
平成30年台風第21号	2018/9/4~9/5	関空連絡橋に船舶が衝突
令和元年東日本台風(第19号)	2019/10/12	長野新幹線車両センターが冠水
令和2年7月豪雨	2020/7/3~7/31	肥薩線・久大線で橋梁が流出
令和3年8月の大雨	2021/8/11~8/19	中央線、飯田線、山陰線、久大線などで土砂災害・橋脚洗掘
令和4年8月の大雨	2022/8/3~8/26	米坂線、奥羽線、五能線などで路盤流出・橋脚洗掘
令和5年梅雨前線による大雨	2023/6/30~7/3	山陰線、美祢線等で洗掘、土砂災害

以下の特徴が挙げられている⁵⁾。

- 年降水量には統計的に有意な長期変化傾向は見られない。一方で、降水の観測される日は有意に減少している。
- 大雨の年間発生回数は有意に増加しており、より強度の強い雨ほど頻度の増加率が高い。
- 1時間降水量80ミリ以上、3時間降水量150mm以上、日降水量300mm以上といった強度の強い雨については、1980年頃と比較しておおむね2倍程度に頻度が増加している。

したがって、鉄道においてもこれらの気候の変化、特に強度の強い雨への適応が求められている。

1.2 気象災害による鉄道の被害

表1に、2017年以降に発生した主な気象災害による、鉄道の被災事例を示す。毎年のように大規模な災害による甚大な被害が発生している。特に平成30年7月豪

雨では、中国地方を中心に北海道から九州までの広い範囲で鉄道が甚大な被害を受けた。また、令和2年7月豪雨では、球磨川の氾濫によって肥薩線の複数の橋りょうが流出するなど、1908年の開業以来、類を見ない被害を受けた⁶⁾。2021年7月には、線路から遠く離れた造成盛土の崩壊に伴う熱海市逢初川沿いの土石流により、東海道新幹線、東海道本線が影響を受けるなど、鉄道用地外を起点として被災する事例もある。

このように、近年の気象災害による鉄道の被害は以下のような特徴がある。

①災害の激甚化

- これまで経験の無い、甚大な被害
- 被災範囲が広い被害
- 鉄道用地外を起点とする被害

②災害の高頻度化

- 再現期間が長い気象現象が毎年のように発生

図4に、近年の気象災害により鉄道が受けた被害額

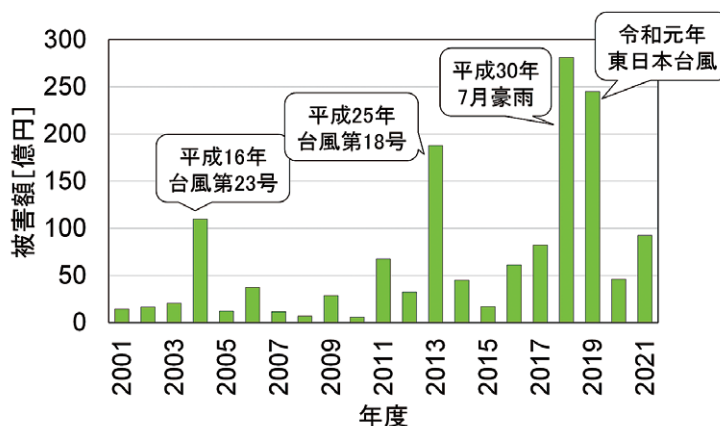


図4 気象災害による鉄道の被害額

鉄道技術推進センター安全データベースより、自然災害から地震災害を除いたものの和。復旧途中で、被害額が確定していないものは加算していない。

表2 気象災害による鉄道の主な被害の形態

気象の種類	主な被害の形態
雨	<ul style="list-style-type: none"> 斜面、盛土の崩壊、崩壊した土砂へ乗り上げ脱線 橋脚の洗掘 軌道の冠水 列車徐行、抑止
風	<ul style="list-style-type: none"> 車両の転覆 飛来物による設備損傷 列車徐行、抑止
雪	<ul style="list-style-type: none"> 車両の走行不能、ブレーキ性能低下 車両からの落雪による設備損傷 フランジウェイ圧雪による脱線、分岐器の不転換 雪崩 融雪による土砂災害 列車徐行、抑止

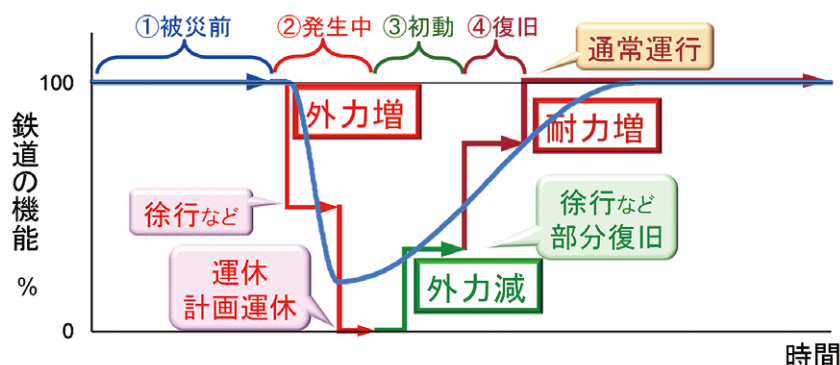


図5 気象災害による鉄道の機能の経時変化

を示す。2016年度以降は、ほぼ毎年被害額が50億円を超過しており、対応が急務であることがうかがえる。

表2に、気象災害による主な鉄道の被害の形態を示す。気象の種類別の形態としては、雨による被害には橋脚の洗掘や土砂災害、風では車両の転覆や飛来物による設備損傷、雪では雪崩、ブレーキ性能低下による衝突、あるいはフランジウェイ圧雪による脱線等が挙げられる。また共通する被害形態としては、列車の徐行や抑止などのダイヤの乱れがある。これらのうち、特に雨による被害には、洗掘や土砂災害など影響が長期化するものが多く、対策が望まれている。

2. 気象災害に対する鉄道の備え

2.1 気象災害への対応の4つの段階

本章では、気象災害に対し鉄道側で採られる措置を紹介し、被害を軽減するための今後の研究開発の方向性について論ずる。

図5は、気象災害に伴う鉄道の機能の経時変化を①

被災前、②発生中、③初動、④復旧の4つの段階に分けて模式的に示したものである。それぞれの段階における鉄道側の措置は以下のとおりである。

(1) 被災前

気象災害の発生前の平常時においては、設備の補強や維持管理が行われる。前述したように、近年では被災範囲が広がっているため、補強の対象となる設備が増える傾向にある。このため、設備ごとに現在の耐力を評価し、補強の優先度を決定することも重要である。また、BCPの観点から、被災した際の振替輸送（他路線による輸送）、あるいは代行輸送（他交通機関による輸送）に関する事前検討なども被災前に行われる。

なお、研究機関等による被災メカニズムの解明なども、広い意味で被災前の対応に位置づけられる。

(2) 発生中

雨や風が強まり、鉄道の機能が失われつつある段階である。予想される気象外力と設備の耐力に応じて監視、徐行、運休などの措置が行われる。台風のように数日前から災害の発生時期と規模がある程度予想され

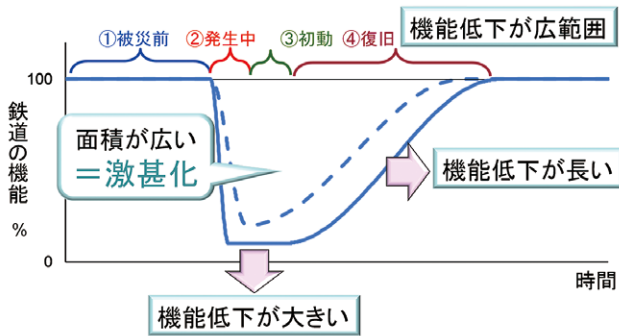


図6 気象災害の激甚化による鉄道の機能の低下

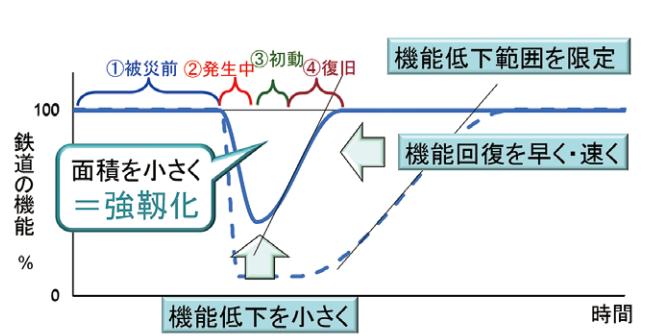


図7 気象災害の激甚化に対する鉄道の強靱化策

ている場合、近年では計画運休が行われるようになった。

被害が予想される場合は、係員を現地に派遣して設備を監視することがある。近年では被災範囲が広がっているため、リモートモニタリングシステムの開発・導入も進められている。

(3) 初動

雨や風がピークを過ぎ、鉄道の機能の復旧に向けた措置が行われる段階である。列車が運休している場合は、引き続き気象外力と設備の残存耐力を把握し、ハザードに応じて徐行等で運行が再開される。被害が大きく、復旧に長期間かかる場合は、区間を限定して運行を再開する。必要により、振替輸送や代行輸送も行われる。

(4) 復旧

失われた機能を回復する段階である。構造物が損傷を受けた場合は、再構築する。鉄道総研では、ダウンタイム短縮のため、各種の早期復旧工法を開発している。

以下、このような機能の経時変化を、図5中の青色の曲線(レジリエンス曲線)で模式的に表す。

なお、図5に示す外力とは、本稿では気象外力であり、雨であれば連続雨量、時間雨量、実効雨量などが指標として用いられる。しかし、実際に設備が機能を失うか否かは、雨の降り方と個々の設備の耐力によって異なるため、ここでは一般化して、外力を「過去から将来にかけての気象」、耐力を「設備が機能を失う際の外力」と定義する。また、本稿では外力と耐力の比をハザードと呼び、これが1を上回ると被害が発生するものとする。

2.2 気象災害の激甚化への対応

気象災害の激甚化による鉄道の機能の低下を図5のレジリエンス曲線に倣って模式的に描くと図6のようになる。激甚化によって機能の低下が早く、大きくなり、かつ機能が復旧するまで時間がかかるようになる。またこのような災害の発生頻度が高まっている。このような激甚化に対する鉄道の強靱化策を図7に、これらの強靱化策を実現するための、各段階での対応策を図8に示す。

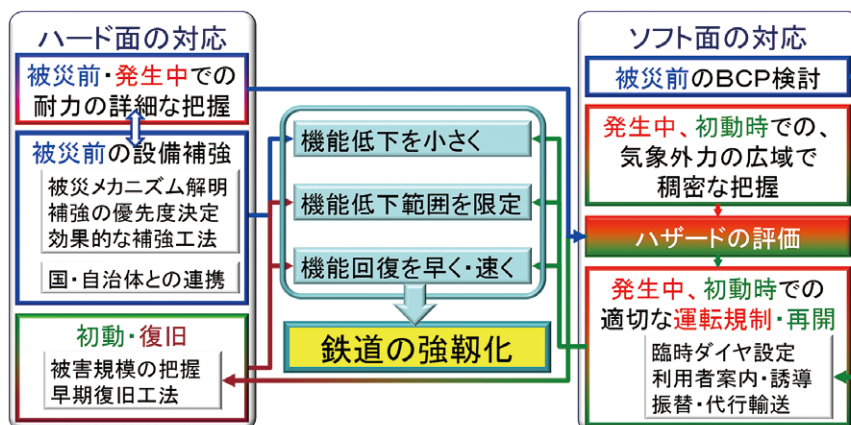


図8 気象災害の激甚化への対応策

表3 気象災害の激甚化に対する鉄道総研の研究開発テーマの例

	ハード面の研究開発	ソフト面の研究開発
被災前	<ul style="list-style-type: none"> 河川橋脚におけるマルチスケール洗掘解析手法 強雨時安定性評価箇所を選定手法 土石流のハザードマッピング技術 割れ目を含む岩石の強度低下予測手法 沿線環境に適合した空力による着雪対策 排雪時の抵抗力と車両運動の連成解析手法 	<ul style="list-style-type: none"> 災害等における長期間普通発生時の鉄道貨物輸送力の定量的評価
発生中	<ul style="list-style-type: none"> 河川橋脚の効率的な健全度判定システムの開発 衛星データを活用した斜面安定度モニタリング手法 	<ul style="list-style-type: none"> リアルタイムハザードマップの精度確認 強風リアルタイムハザードマップ 偏波レーダー情報を用いた降雪密度の評価手法 雪崩警備の要否判断支援手法の開発
初動	<ul style="list-style-type: none"> 強雨後の斜面安定性回復傾向の評価手法 洗掘被災橋梁の緊急診断法 大規模降雨で土砂が混入したバラスト軌道の早期復旧方法 	<ul style="list-style-type: none"> 広域大規模災害時の段階的復旧に向けた列車運用計画作成手法
復旧	<ul style="list-style-type: none"> 強雨災害時の土構造物の状態評価法 崩壊土砂活用のための新しい施工管理指標の提案 	

ハード面では、まず被災前に気象災害に対する設備の耐力を把握する。その際、列車を運休する場合の区間を限定したり、初動における点検の優先度を適切に定めたりするため、設備ごとにきめ細かく詳細に把握することが肝要である。また、現有耐力と想定される気象外力に応じて設備を補強する。気象災害の激甚化に伴って被害が想定される範囲も広がることから、適切な優先度の設定も重要である。

雨災害への対応には治水との連携も重要である。国土交通省は、河川流域全体のあらゆる関係者が協力して水害を軽減する「流域治水プロジェクト」を進めている⁷⁾。治水の一環として堤防のかさ上げが行われる場合は、鉄道でも橋梁のこう上や上路桁の下路桁への掛け替えなどの対応が求められることがあり、低コストでかつ期間を要しない施工技術が望まれている。

一方ソフト面では、BCPの観点から被災前に災害時の対応を定め、必要な措置をあらかじめ行っておく必要がある。また発生中、初動においては、鉄道事業者が自ら観測する気象データ及び外部の気象データ等を用い、広域で稠密な気象外力を把握することが重要となる。そして、外力と耐力の比によりハザードを評価する。これをもとに、ハード面では設備の早期復旧、ソフト面では運転規制・再開の判断、あるいは乗客の避難誘導などを行う。

気象災害は激甚化しており、鉄道の被害をゼロにすることは困難であるが、これらの対応によって、ダウンタイムの短縮が図られるものと考えられる。

3. 気象災害の激甚化に備える鉄道総研の研究開発

図8を実現するために、鉄道総研が各段階において実施している研究開発テーマの例を表3に示す。具体的には以下のようなものがある。

(1) 被災前の対応に関する研究開発

被災前の対応に関わる研究開発は、様々な気象災害による設備の被災メカニズムの解明、及び土木構造物の耐力の把握と向上法に関する研究開発が多い。また、BCPの観点からの被災時の輸送力確保策の事前検討・準備に関わる研究開発も行っている⁸⁾。

「強雨時安定性評価箇所を選定手法」では、土砂災害の危険性が高い箇所の補強や初動時の設備点検を効率的に行うため、国土地理院の数値標高モデル（以下、DEM）を用いて、補強や点検の優先度決定を支援する手法を開発した。具体的には、過去の被災事例をもとに、土砂災害発生時の実効雨量の再現期間を目的変数、集水地形の有無など被害が発生しやすい地形上の特徴を説明変数とした数量化I類解析を実施し⁹⁾、対象とする箇所での災害の発生しやすさを数値的に評価する手法を提案した¹⁰⁾。本手法で得られる再現期間が短い箇所ほど、補強や点検の優先度が高い箇所と評価される。

(2) 発生中の対応に関する研究開発

発生中の対応に関しては、広域かつ稠密な気象データを用いて各種気象外力をリアルタイムに把握する技

術、外力を受けて徐々に耐力を失う構造物のモニタリング技術、及びこれらの耐力と外力からハザードを評価し、徐行や運休などの運転規制を適切かつ速やかに行うための研究開発を行っている。合わせて、人工衛星データを用いて土砂災害の予兆を把握するための研究開発にも取り組んでいる。

「リアルタイムハザードマップの精度確認」では、局所的な降雨に対し鉄道沿線の河川の水位や氾濫エリアの水深を10分以内で計算する浸水・氾濫解析モデルについて、計算に用いる河川断面形状や雨水の表層土への浸透率などのパラメータとして、公開データのみを用いる場合(図9の赤線)と、測量データや観測データから推定した値を用いる場合(同青線)の計算精度を、実際に河川氾濫が起きた事例を用いて比較した。その結果、河川の最大水位およびその発生時刻とも、推定値を用いた方が実測値(同黒線)とよく一致した¹¹⁾。これにより、モデルの妥当性を確認するとともに、降雨の予報データを用いて気象外力をより精度良く評価し、氾濫の発生前における列車の運行可否判断、乗客案内、あるいは避難誘導での活用を可能とした。

(3) 初動対応に関する研究開発

初動対応に関する研究開発は、被災後に設備の状態を緊急診断し、被災した設備の復旧方針の決定や運行再開の判断に資する研究開発が主である。

「大規模降雨で土砂が混入したバラスト軌道の早期復旧方法」では、大雨により冠水し、土砂が流入した道床バラストの健全性を速やかに判断するとともに、低コストな復旧策を開発した。

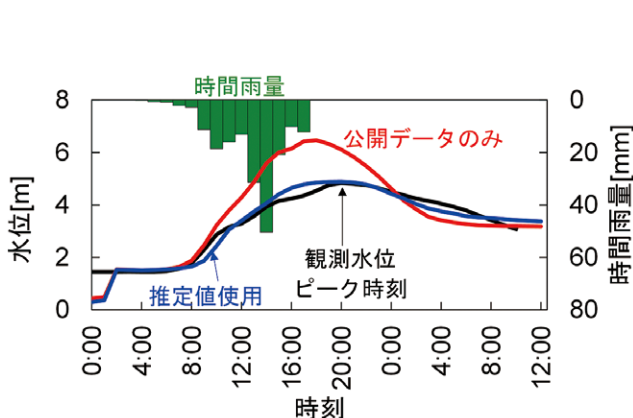


図9 河川水位の経時変化の観測値と解析値の比較¹¹⁾

土砂が流入した場合のように細粒分の質量比が高い道床バラストでは、軌道沈下が大きくなる。このため、健全性の評価では細粒分の質量比の把握が重要となる。これに対し、道床内に音を透過させ、その音圧レベルから細粒分の割合を推定する手法を考案した(図10)¹²⁾。これにより、従来のふるい分けと比較して約30%の労力で、道床バラストの状態を評価可能とした。

さらに道床交換をせずに道床の状態を回復するため、道床バラストに超速硬セメントと高分子材料を混入してつき固める方法を考案した。これにより、道床交換の約1/10のコストで道床の状態を維持できるようになる。年間通トン520万トンの営業線における実施工の結果、施工後8ヶ月経過しても高低変位に大きな変化がないことを確認している¹³⁾。

(4) 復旧に関する研究開発

復旧については、気象災害により被災した構造物等を早期に復旧し、ダウンタイムを短縮するための研究開発を行っている。

「強雨で被災した盛土の状態評価法」では、強雨で一部が被災した盛土の安定性をのり面の崩壊広さと崩壊角で評価するためのノモグラムを提案した。両パラメータが図11のノモグラムで緑色のエリアにある場合は、崩壊部から内部に水が浸入しないよう、ブルーシートで覆ったのみで運行を再開できる。赤色のエリアにある場合は土のうで盛土を再構築する必要があるが、現地での計測により盛土内の地下水水位等が把握できる場合は、その結果に応じて土のうの数を減らせる

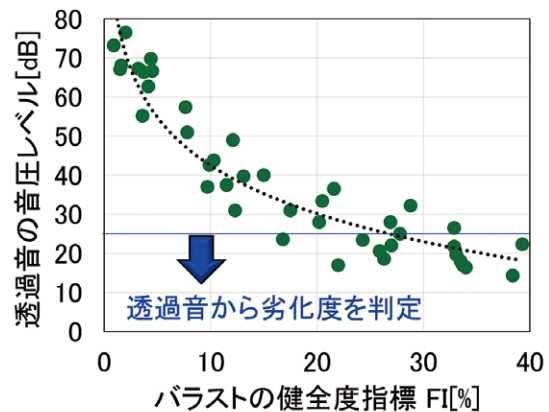


図10 透過音の音圧レベルとバラストの健全度指標FIの関係¹²⁾

FI: 粒径0.075mm以下と4.75mm以下の粒子の質量比[%]の和

ものとした¹⁴⁾。本ノモグラムにより、応急復旧の要否やその規模の迅速な判断が可能となる。

4. ハザード評価のための鉄道防災プラットフォーム

4.1 鉄道防災プラットフォームの役割

図8に示す気象災害の激甚化への対応策を、図5の4段階に沿って並び替えると図12のようになる。発生中以降の段階では、耐力と外力を詳細に把握し、そこからハザードを適切に評価することが重要となる。

これに対し、各種のデータから耐力と外力を推定し、ハザードを評価して初動対応や復旧に反映する一連の処理を「鉄道防災プラットフォーム」として、一元的に実施するのが有効である。ここで用いるデータには、鉄道事業者が取得する気象データや、線形や構造物種類などの路線データ、橋脚の固有振動数などの各種設備データに加えて、気象庁などが公開している気象データ、人工衛星データ、国土地理院の地形データなどの公的データなどがある。これらを取り込み、数値

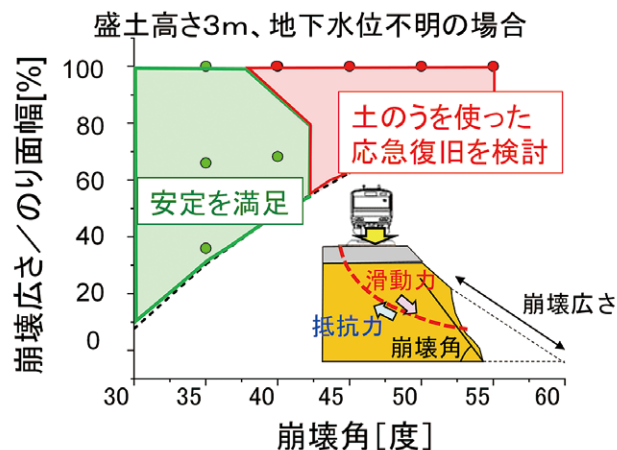


図11 盛土の安定評価ノモグラム¹⁴⁾

シミュレーションにより耐力と外力を推定し、災害時の初動対応や復旧計画策定で使い易いように加工してハザードマップの形で出力するのが鉄道防災プラットフォームの役割である(図13)。

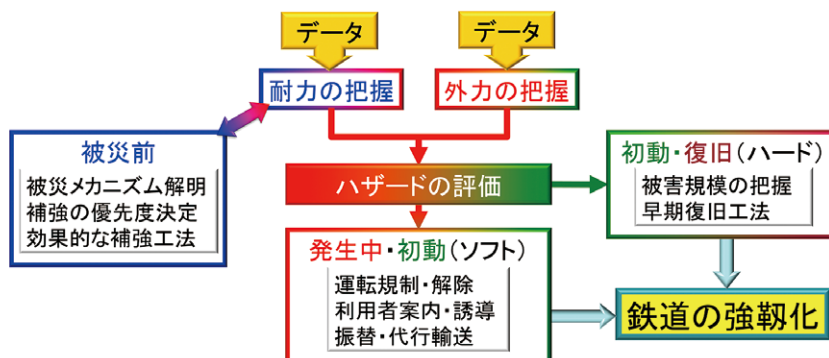


図12 ハザードの評価の位置づけ

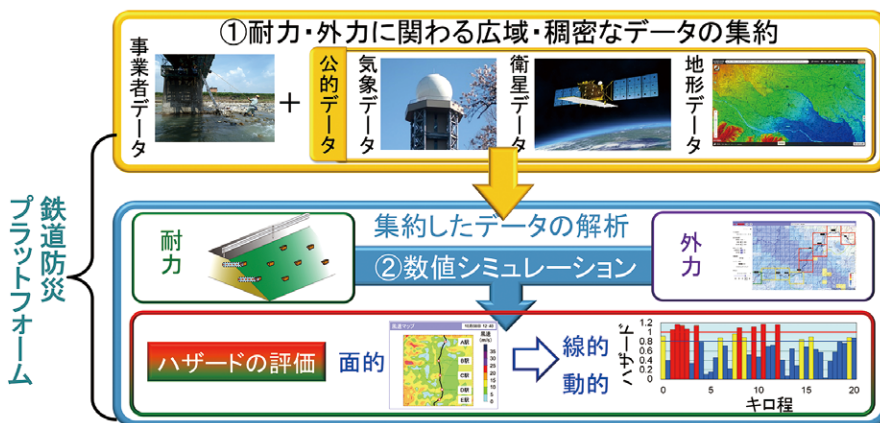


図13 鉄道防災プラットフォーム

4.2 鉄道防災プラットフォームで用いる公的データ

鉄道防災プラットフォームにおいて特に重要となるのは、入力されるデータ、及び解析に用いられるシミュレーション技術である。

入力されるデータは前述のとおりであるが、公的データのうち主なものは、以下のとおりである。

(1) 気象データ

実況値については、気象庁のアメダスのほか国土交通省のXRRAINや(国研)防災科学技術研究所(以下、防災科研)のソラチェック¹⁵⁾が、将来の予報については気象庁の高解像度ナウキャストや日本気象協会による超短時間降水予測などが利用可能である。

高解像度ナウキャストでは、国土交通省や気象庁が所有する各種観測データを用いて、30分後までの降雨予測を250mメッシュで、35分後から60分後までは1kmメッシュで5分ごとに提供する。これらのデータは、発生中や初動時における列車の運行管理などへの活用が可能である。

(2) 人工衛星データ

ここでいう人工衛星とは、気象衛星ではなくリモートセンシングに用いられるものをいい、災害の観測には、2014年に(国研)宇宙航空研究開発機構(以下、JAXA)が打ち上げた陸域観測技術衛星2号「だいち2号」が活用されている¹⁶⁾。だいち2号には、同一地点を複数回観測する際に、衛星が発した電波が地表に反射して往復する時間の差から地表面の変位を面的に観測する「干渉合成開口レーダ」が搭載されており、火山活動や地盤沈下による広域的な地殻の変動を求めることができる。2023年3月より、だいち2号により観測された全国の地殻変動が国土地理院より公開されて

いる¹⁷⁾。

現時点では、だいち2号が同一地点を観測するのは14日ごとであるので、災害発生後、時間を経過してからの地殻変動しか観測できないが、将来的には、干渉合成開口レーダを搭載した36基の小型衛星により、同一地点を10分間隔で観測する計画があり¹⁸⁾、リアルタイムに近い形で、地殻変動を観測できる可能性がある。

鉄道総研はJAXAからの観測データ提供を受け、干渉合成開口レーダから土砂災害の予兆を把握するための研究を進めている。

(3) 地形データ

地形データについては、国土地理院が公開しているDEMが利用できる¹⁹⁾。DEMの種類と概要を表4に示す。

4.3 数値シミュレーション

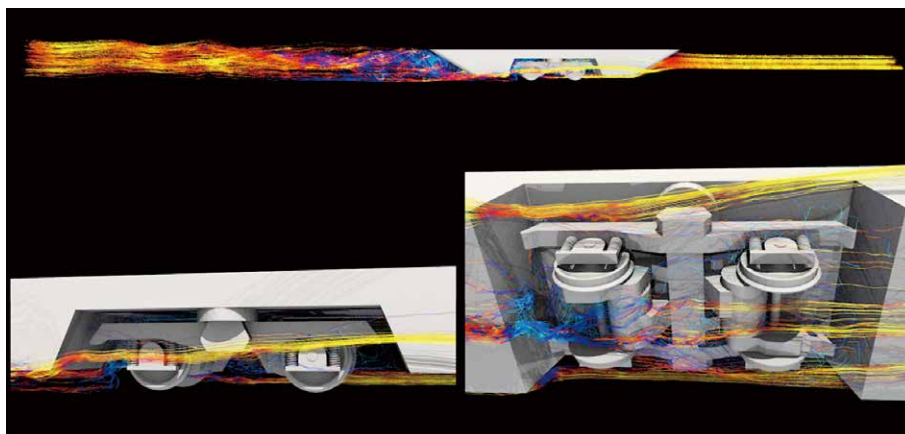
1章で述べたように、気象災害の激甚化にともなって、これまで経験したことが無い気象現象や被災形態が発生している。気象災害への対応は、これまでは過去の経験に基づいて帰納的に行われてきた面が多いが、経験の無い現象やデータの取得が困難な現象の把握には、数値シミュレーションの活用が有効である。

繰り返し述べているように、ハザードの評価には外力と耐力の推定が必要となる。気象外力推定の根幹である天気予報で数値予報(数値シミュレーション)が本格的に用いられるようになったのは、海外では1955年のアメリカ気象局によるものが嚆矢とされている。日本の気象庁は1959年から数値予報を開始し、現在では、予報業務に欠かせないものとなっている²⁰⁾。

鉄道総研では、気象災害による被害発生メカニズムの解明、構造物をはじめとする設備の耐力評価・向上策の検討、及び公的な気象データから鉄道設備に作用

表4 国土地理院による数値標高モデル(DEM)の種類と概要¹⁹⁾

名称	作成方法	主な整備範囲	標高点格子の間隔
5mメッシュ (標高)	航空レーザ 測量	都市域等	0.2" × 0.2" (約5m四方)
		河川流域等	
5mメッシュ (数値地形)	写真測量	都市域周辺等	0.2" × 0.2" (約5m四方)
		一部の島嶼部等	
10mメッシュ (火山標高)	火山基本図 の等高線	26火山のみ	0.4" × 0.4" (約10m四方)
10mメッシュ (標高)	地形図の 等高線	全国	0.4" × 0.4" (約10m四方)

図14 着雪シミュレータ²¹⁾

する外力を推定するための各種シミュレーションモデルの開発を進めている。

被害発生メカニズムの解明については、例えば高速走行する車両への着雪シミュレータの開発(図14)²¹⁾を、耐力評価・向上策については、洗掘解析手法の開発²²⁾などを進めている。いずれも粒子法を用いて飛雪や土砂の運動を解析し、これに列車走行に伴う気流計算や、河川の水 flow の計算等を連成させたもので、車両の台車周囲への着雪や、橋脚周りの土砂の流出の様子を実用的な時間で解析できる。

また、横風による車両の転覆に対しては、車両周りの空気流シミュレータを開発している²³⁾。本モデルは、直交格子法を用いて盛土や橋梁上の車両に作用する空気流を三次元的に模擬できるものであり(図15)、鉄道総研の大型低騒音風洞による実験を補間し、転覆限界風速を求めるための空気力係数の算出や防風壁の効果の評価などに用いられている。

ここで紹介した台車部への着雪や横風による車両の転覆は、メカニズムの解明にあたって車両との相互作用を考慮する必要がある鉄道固有の現象であり、数値シミュレーションの有用性が高いといえる。

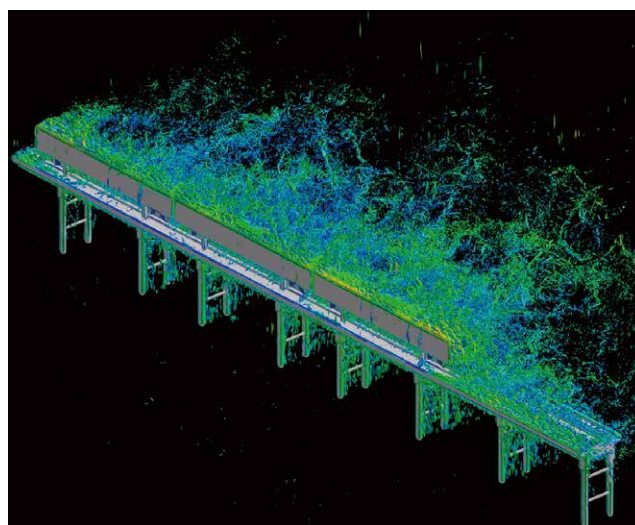
気象外力を求めるためのシミュレーションにはリアルタイム性が求められ、気象データ等を入力してから数分～10分程度で解が得られる必要がある。前述した浸水・氾濫解析モデル¹¹⁾では、2時間先までの雨量予報データを入力後、概ね10分以内で河川、氾濫水位を求められる。また、表3にある「強風リアルタイムハザードマップの解析」では、時間を要する気流計算をあらかじめ行い、風観測点と鉄道沿線各点との風速の比を風向毎にテーブルの形で求めておく。これに

より、観測点における風速・風向の実況値が得られる都度、速やかに鉄道沿線の風速・風向を求められるようにしている²⁴⁾。

5. 激甚化する気象災害に備えるために

以上、激甚化する気象災害に備えるために鉄道に求められる技術を概説した。本稿の内容をまとめると以下のとおりとなる。

- 地球温暖化に伴い、気象災害、特に雨災害は今後ますます激甚化する。
- これに対応するためには、以下の技術が求められる。

図15 空気流シミュレータ²³⁾

- ①鉄道設備の耐力の詳細な把握と適切な補強
- ②公的气象データ等を活用した、気象外力の広域で稠密な把握
- ③①、②の結果を元にした、ハザードの評価
- ④ハザード評価結果に基づく、ハード・ソフト両面からの適切な措置の実施
- ⑤上記①～④を実現するための、数値シミュレーション技術の開発

以上を実現するためには、流域治水を進める国、自治体や、各種データを発信している関係機関との連携がますます重要になる。鉄道総研はこれら諸機関・及び鉄道事業者との協働により、激甚化する気象災害に対する鉄道の強靱化に向けた研究開発を加速していきたいと考えている。関係各位の忌憚のないご意見を賜れば、幸甚である。

なお、本稿で紹介した研究の一部は、国土交通省の補助金を受けて実施した。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) IPCC : IPCC AR6 WG1 報告書 政策決定者向け要約暫定訳 (2022年12月22日版)
- 2) 環境省 : 温暖化から日本を守る 適応への挑戦, p.8, 2009
- 3) https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/extreme/extreme_p.html (2023年9月25日閲覧)
- 4) 気象庁 : 地球温暖化予測情報第9巻, p.31, 2017
- 5) 気象庁 : 気象業務はいま 2023, p.41, 2023
- 6) 九州旅客鉄道株式会社 : 「令和2年7月豪雨」による当社の被災状況について, JR九州プレスリリース, 2020
- 7) https://www.mlit.go.jp/river/kasen/suisin/pdf/01_kangaekata.pdf (2023年9月25日閲覧)
- 8) 奥田大樹, 渡邊拓也, 中川伸吾, 鈴木崇正, 深澤紀子 : 貨物鉄道ネットワークに対する災害対策の実施効果の評価手法, 鉄道総研報告, vol.36, No.12, pp.41-46, 2022
- 9) 大谷礼央, 長谷川淳, 布川修, 中瀨遥平, 佐藤大輔 : 鉄道盛土の不安定要因が災害発生時の再現期間に与える影響の統計分析, 土木学会全国大会第77回年次学術講演会, VI-399, 2022
- 10) 中瀨遥平, 佐藤大輔, 大谷礼央, 長谷川淳, 布川修 : 鉄道盛土を対象とした定量的斜面危険度評価手法の検討, 土木学会全国大会第77回年次学術講演会, VI-400, 2022
- 11) 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
- 12) 高浦真行, 中村貴久, 景山隆弘 : 土砂が混入したバラストの健全度評価方法, 土木学会全国大会第77回年次学術講演会, VI-435, 2022
- 13) 中村貴久, 景山隆弘 : 劣化した道床バラストの性能を回復する, RRR, vol.79, No.7, pp.20-25, 2022
- 14) 松丸貴樹, 佐藤武斗, 尾崎匠, 伊藤壱記 : 降雨で被災した盛土の応急復旧判断手法の提案, JREA, vol.66, No.6, pp.46-49, 2023
- 15) 防災科研 : 首都圏の局地的な激しい気象の発生状況をいつでも、誰でもチェックできるシステム「ソラチェック」を公開します!, 防災科研プレスリリース, 2020
- 16) https://www.jaxa.jp/projects/sat/alos2/index_j.html (2023年9月25日閲覧)
- 17) JAXA : 「だいち2号」による全国地殻変動分布図の初公開について, JAXA プレスリリース, 2023
- 18) (株) QPS 研究所, JAXA : 36機の小型SAR衛星による準リアルタイムデータ提供サービス事業の創出に向けたJ-SPARC事業コンセプト共創の開始について, JAXA プレスリリース, 2020
- 19) https://www.gsi.go.jp/kankyochiri/Laser_demimage.html (2023年9月25日閲覧)
- 20) 古川武彦, 大木勇人 : 図解天気予報入門, 講談社ブルーバックス, p.183, 2021
- 21) 室谷浩平, 中出孝次, 鎌田慈 : 降雪地帯を走行する鉄道車両への着雪を再現する着雪シミュレータの開発, 鉄道総研報告, vol.36, No.7, pp.59-68, 2022
- 22) 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
- 23) 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
- 24) 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