

激甚化する気象災害に対する鉄道の強靱化

防災技術研究部長
太田 直之



1. はじめに

2017年7月に発生した九州北部豪雨では線状降水帯による集中的な大雨、その翌年に発生した平成30年7月豪雨では梅雨前線による西日本を中心とする広い範囲に降った大雨、そして昨年10月に大型で強い勢力を維持したまま上陸した台風19号による広範囲に及ぶ大雨など、近年、大雨による激甚災害が毎年発生している。この様な極端な大雨は日本全国で発生しており、毎年多くの観測点で観測史上1位の大雨の記録が更新されている。鉄道のみならず、各社会インフラはこれまでの経験を基にして災害に対する補強対策を実施してきており、過去に被害をもたらしたものと同レベルの気象に対しては被災するケースは減少している。その一方で、上記のように経験のない気象に対しては被害を免れることができず、またその被害規模も拡大している。

2018年10月に発表されたIPCC（気候変動に関する政府間パネル）の特別報告書¹⁾では、温室効果ガスの現状の排出ペースが今後も維持されれば、2030年～2052年までに気温が1.5度上昇する可能性が高く、ま

た、これにより豪雨や干ばつなどの異常気象のリスクが高まることが言及されている。我が国にとっても気象災害が激甚化することは想像に難しくなく、自然災害のリスクの増大に対してどのように対応していくか、その技術開発は喫緊の課題であるといえる。

本発表では、この課題に対応する技術開発の現状と、RESEARCH 2025で注力する「激甚化する気象災害に対する鉄道の強靱化」の取り組みについて概説する。

2. 気候変動を背景とした防災上の課題

2.1 2019年台風19号による災害

ここでは最近の極端な気象の事例として、今年の台風19号の災害についてふれる。

2019年10月6日に南鳥島近海で発生した台風19号は、大型で猛烈な台風が発達した後に日本の南を北上し、勢力を大きく弱めることなく12日には伊豆半島に上陸し、その後日本列島付近を北上した。この台風により東日本を中心に広い範囲で記録的な大雨が降り（図1）、1都12県で大雨特別警報が発表された。特

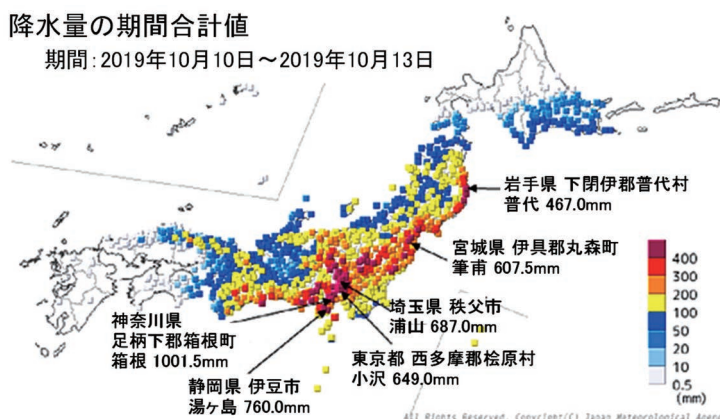


図1 2019年台風19号による降雨の状況²⁾



図2 2019年台風19号で被災した箱根登山鉄道

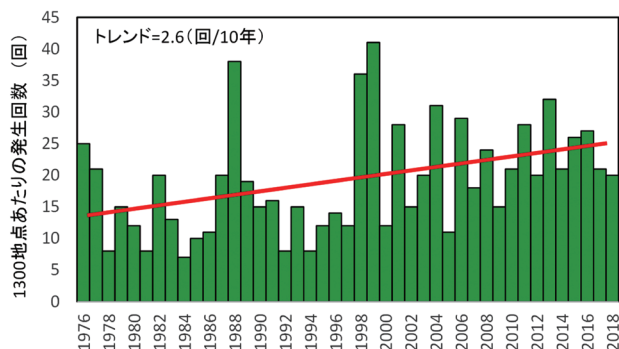


図3 全国の1時間降水量80mm以上の年間発生回数の経年変化(1978~2018年)⁴⁾

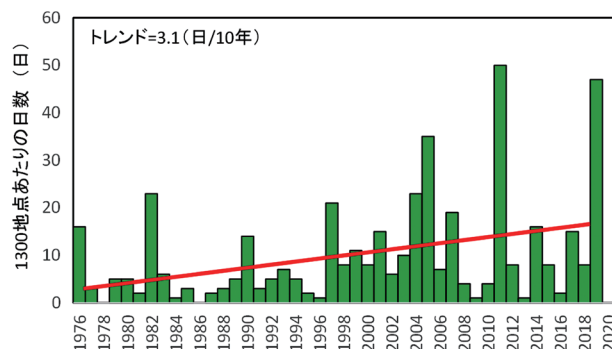


図4 全国の日降水量400mm以上の年間発生回数の経年変化(1978~2018年)⁴⁾

に、神奈川県箱根町では総降雨量が1000mmを超えたほか、全国の17箇所の気象観測地点で総降雨量が500mmを超えた。また、東日本を中心とした120地点で12時間降雨量の記録が観測史上1位を更新した²⁾。

この台風により東日本の広い範囲で河川の氾濫や土砂災害が発生した。東北、関東、信越の各地方を流れる71河川の140箇所で堤防の決壊が発生した。中でも長野市豊野町で発生した千曲川の氾濫では、北陸新幹線の車両基地が浸水し、車両及び施設に重大な被害が生じた。また、12時間の累積降雨量が729.5mm、総降雨量が1001.5mmを記録した神奈川県箱根町では、箱根登山鉄道が、大規模な斜面崩壊による橋りょうの流失などの甚大な被害を受け(図2)、今もなお復旧工事が続けられている。

このような台風19号がもたらした大雨について、気象庁は、①台風接近に伴い大量の水蒸気長時間流れ込み、②台風接近前に形成されていた前線が強化されて台風上陸前に雨量が増加し、③これに加えて台風中心付近の雨雲により雨量が増加した³⁾との見解を示している。また、台風19号が急発達し、その後勢力を長期間維持したことについては、海水温の影響に言及している。台風の進路に沿った海域の海面水温は30℃を超え(平年差+1℃以上)、また北よりに進路を変えてからも海面水温27℃以上(平年差+1~2℃)の温かい海域を進み日本に接近した。このような気象庁の見解を踏まえれば、台風19号は「大量の水蒸気」と「高い海面水温」の二つが鍵となり、広範囲に甚大な被害を及ぼす強雨をもたらしたと捉えることができる。

2.2 気候変動の傾向

一般に、上空の水蒸気量と地上の降雨量とは密接に関係していると考えられ、海面水温が上昇すること

で水蒸気が大量に発生し、ひいては降雨量が増加することが考えられる。気象庁が昨年発行した「気候変動監視レポート2018」⁴⁾によれば、世界の年平均気温は0.73℃/100年の割合で、また日本の年平均気温は1.21℃/100年の割合でそれぞれ上昇している。このような温暖化の傾向を考慮すれば、陸域と海域の接点に位置する日本列島付近では、海洋で生じる大量の水蒸気をもとにして降雨量が今後増加することは想像に難くない。図3は、1時間降雨量80mmを超える強雨の発生回数の変化を示している。この図では、長期的には2.6回/10年の割合で増加する傾向が示されており、温暖化の傾向と整合している。また、図4は日降雨量400mm以上の降雨の発生回数の変化を示しているが、図3と同様に長期的に増加する傾向が示されており、短時間雨量だけでなく、ひと雨当たりの総降雨量も増加していることがわかる。また、このような降雨をもたらす低気圧の増加はそれに伴って強風の出現回数増加にもつながると考えられ、温暖化の状況と考え合わせれば、さらに規模の大きな強雨・強風災害が発生する可能性は否定できない。

2.3 気候変動を背景とした取り組むべき課題

上述のように、日本における気候変動の影響は、過去に例を見ない強雨や強風といった極端な気象の常態化をもたらしている可能性が危惧される。このような状況において鉄道に求められる役割のひとつは、気候変動に対応した鉄道システムの強靱化にあると考えられる。ここで、鉄道防災の観点から強靱化を考えると、主に以下の3点に集約される。

- ①自然外力に対して損傷しないための設備補強
- ②正確な安全度評価に基づく運行管理
- ③被災後の早期運転再開のための応急復旧

①については、輸送量をはじめとする線区の特質に合わせて補強が進められており、今後もその取り組みは継続されるものと考えられる。一方で、平成30年7月豪雨災害のように、広域に同時多発的に土砂災害が発生した場合を想定すると、特に鉄道ネットワークとしての強靱化の重要性がクローズアップされる。ここで、膨大な線区延長の中から補強すべき箇所を如何に選定するかが重要になる。

②については、現在実施している雨量や強速などのハザードと災害リスクとが関連付けられリスクに応じた運行管理を行うことで、列車を安全に運行させることができる状態をより正確に評価できると考えられる。例えば、経時的に変化する降雨量というハザードに対して、雨水が斜面上を流れて地盤に浸透することで斜面の安定性は低下し斜面崩壊のリスクは上昇する。この斜面崩壊のリスクの評価精度を上げることで現実の安全度に即した運行管理を行うことができ、また、評価精度の向上は過度な余裕度の削減に繋がり、運転中止時間の短縮に貢献すると考えられる。

③については、施設に被害が発生した場合でも、その状態によってはある程度の措置を施した上で応急的に運転を再開することが可能であり、早期運転再開による強靱化のために必要な事項と捉えられる。損傷した場所、規模、状態に応じた措置を明らかにしておくことで、災害発生時の円滑な対応が可能となり、応急復旧までの時間の短縮が可能になると考えられる。

上記の①は自然外力を想定した上での強靱化のための取り組みであり、②および③は想定以上の自然外力が発生した場合の強靱化、すなわち安全を確保した上でのダウンタイムの短縮を主とする取り組みといえる。

3. RESEARCH 2020での取り組み

3.1 顕著気象を対象としたリアルタイムハザードマップの概要

RESEARCH 2020では、これまで想定されてこなかった局所的短時間強雨、突風などの顕著気象や巨大地震を対象として、将来的な展開を目指した研究開発を実施してきた。このうち局所的短時間強雨および突風は、上述した気候変動の傾向を考慮すれば、今後増加する可能性が高い現象と考えられる。そこでこれらを対象とし、運行管理に資するシステムとしリアルタイムハザードマップの開発に取り組んだ(図5)。ここでは、中でもニーズが高いと思われる局所的短時間強雨による浸水ハザードを対象としたシステムについて、その概要を述べる。

図6は、局所的短時間強雨に対応するためのシステムとして開発したリアルタイムハザードマップの概要を示している。大きな特徴としては、部外の気象予測情報を利用する点にある。局所的短時間強雨は数kmの範囲に短時間で急激に発達する積乱雲がもたらす強い雨であり、その典型的な被災パターンとして、水路などの急激な増水・氾濫とこれによる施設の突発的浸水被害が挙げられる。このため、実際の降雨を観測してから列車の運転中止措置を実施した場合、浸水範囲の拡大速度に措置が追い付かず、列車を浸水箇所に抑止してしまう可能性が考えられる。そこで気象予測値を使用して浸水範囲を解析し、この解析結果に基づいて浸水範囲を回避した列車の停止位置を表示するシステムを作成した。すなわち、このシステムは、気象予測情報を用いて想定される浸水リスクを踏まえた運転

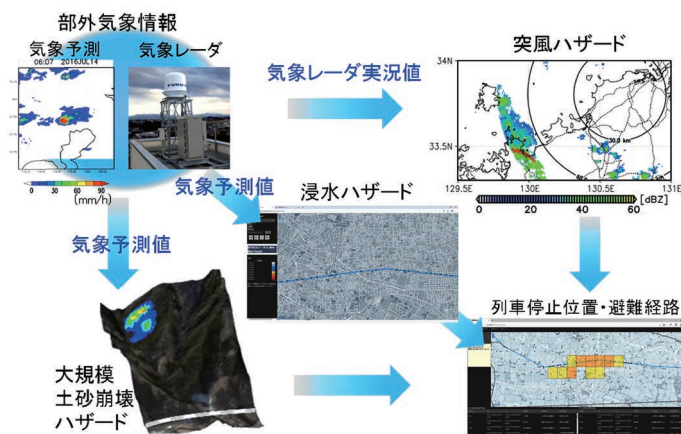


図5 RESEARCH 2020で開発に取り組んだリアルタイムハザードマップの概要

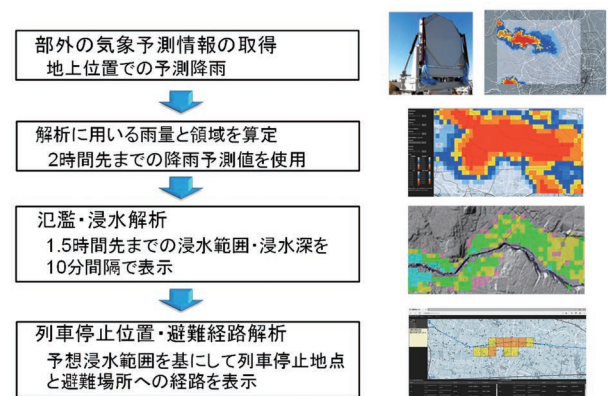


図6 短時間強雨対応リアルタイムハザードマップ



図7 列車停止位置・避難経路表示画面

停止位置を表示することで、車輛が浸水した場合に復旧までに必要となる時間を削減することに役立つと考えられ、局所的短時間豪雨に対するダウンタイム短縮に貢献すると考えられる。

開発したシステムは、図6に示す様に、大きく4つのステップを経て、最終的に列車の運行に資する情報として図7に示す情報を表示する

始めに、部外の気象予測情報を取り込む。ここで、当システムの開発にあたっては、共同研究機関である防災科学研究所が開発した気象予測情報を使用した。この予測情報は約700m間隔の格子点ごとの雨量の2時間先まで予測値であり、これが10分間隔で配信される。

次に、配信された予測雨量を、列車運行への適用を考慮した雨量情報へ変換する。配信される予測雨量は上空の雨量であり、上空と地上とは雨量が異なる。そこで、実測値と予測値との比較から地上の雨量への補正方法を作成し、この方法を用いて変換した予測雨量を以降の解析に用いる。

次に、氾濫・浸水解析を行う。このステップでは、対象箇所にある河川の流域の地形を、25m格子点間隔の数値標高データを用いて予め作成しておき、面的な予測雨量を与えて地形の傾斜に沿って河川等に流れ込む流量を計算する。得られた流量をもとに個々の河川等の水位を計算し、その高さが堤防高さを超えた場合に越流と判定する。さらに、越流後に地盤面を地形の傾斜に沿って氾濫水が拡散する過程を計算する。

次に、最終的なアウトプットとして、予想される浸水範囲を回避する列車停止位置と、その位置から最寄りの避難場所までの避難経路を算出する。列車停止位置の決定方法は最小費用流問題としてモデル化している。10分毎に変化する浸水範囲を基に総コストが最



図8 浸水解析精度の検証を実施した高崎川

小となる最適解を求める。個々のコストは、手前の駅から詰めて止めるパターンや浸水範囲に近い駅から詰めて列車を停止させるパターンなど、列車停止の考え方に応じて設定することができる。また、列車位置の計算と同時に、避難経路の計算を行う。予め作成した沿線の避難場所リストを用い、列車停止位置から予想浸水範囲を迂回して最短時間で避難場所へ到達する経路を算定する。予想浸水域が更新されるごとに、その浸水が発生するまでの時間内に到達できる最短の避難場所と避難経路示すことができる。

3.2 リアルタイムハザードマップで得られる浸水解析結果の精度検証

開発したシステムによる氾濫・浸水解析結果の妥当性を検証するために、実河川の降雨による増水時の水位計測と解析結果の比較検討を実施している。検証には、JR東日本総武本線佐倉駅近くを流れる高崎川(図8)を選定し、この河川を横断する鉄道橋りょうに

水位計およびカメラを設置し、観測した増水時の河川水位と増水をもたらした降雨（レーダーアメダス解析雨量）を入力した場合の解析結果との比較検討を継続的に実施している。また、河川水位の比較だけでなく、氾濫が発生した場合に実際の浸水状況と解析結果を比較できるよう高崎川流域をモデル化している。

現地観測は2019年10月より開始したが、観測開始からまだ間もない10月下旬に、検証対象を含む地域で氾濫が発生した。これは、東シナ海で発生した低気圧が10月24日から26日にかけて日本の太平洋沿岸にそって北へ進んだ際、その低気圧に対して、同じ頃に日本の東海上を北上した台風21号により湿った空気が流れ込み、関東地方から東北地方太平洋側を中心に広い範囲で大気の状態が非常に不安定になり大雨が降ったことによる。このため、検証対象としている高崎川流域にあるアメダス佐倉では総降雨量246.5mmに達する大雨が観測された。また、この大雨では、千葉県や福島県の河川の複数箇所でも河川の氾濫が発生し、観測対象としている高崎川でも氾濫が発生した。

図9は、解析により求めた最大の浸水域（左）と国土地理院が災害後に発表した推定浸水域⁵⁾（右）を示している。解析で得られた浸水域の外周を結ぶ線を国土地理院の推定結果に重ねて示したが、解析結果は実際の浸水域をよく再現していることがわかる。一方で、赤い円で示した箇所では、解析結果が国土地理院の推定結果よりも浸水域が広い範囲に及んでいる。このような傾向は、河川に隣接してある程度の広さで水田が広がっている場合にみられており、水田が本来有する涵養や湛水機能を解析モデル上では反映できていないために生じている誤差であると考えられる。そこで、河川周辺の土地利用状況を加味した解析方法への改良に現在取り組んでいる。

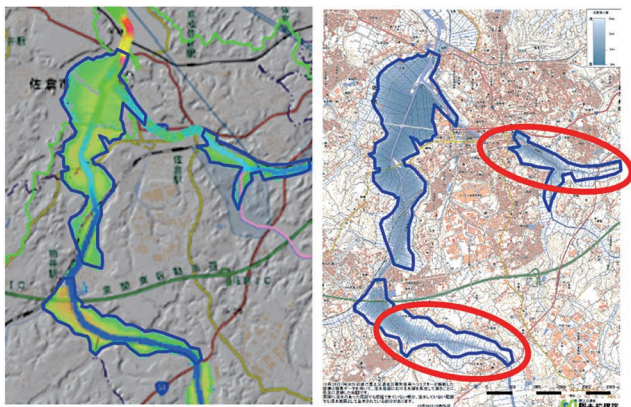


図9 最大浸水域の解析結果と実際の氾濫域⁵⁾との比較

上述の試験フィールドを利用した検証のほかに、図7に示した試作システムの連続稼働試験も実施している。これらの検証試験を今後も継続的に実施し、データを収集・蓄積して精度を明らかにする計画である。一定の検証期間を経た後に、明らかにした精度に応じたシステムの利用方法を提案することを予定している。

3.3 顕著気象を対象としたリアルタイムハザードマップの展開

RESEARCH 2020で開発に取り組んだリアルタイムハザードマップについては、実用レベルの技術として以下に挙げる成果が得られた。

- 1) 上空の突風検知
- 2) 小河川・水路による浸水ハザードマップの作成
- 3) 土石流の到達域評価
- 4) ハザードの予測結果に基づく列車の停車位置決定

その一方で、突風評価システムについては、実用化のために、レーダによる上空の突風検知結果から地上の突風を推定する方法を開発する必要があると考えている。また、浸水評価システムについてはその評価精度を、さらに、大規模土砂災害については対象箇所抽出手法などについて、検討・開発が必要と考えている。

実用に供することができる技術の展開を図りつつ、さらなる開発を進め、全体システムとしての完成を目指したいと考えている。

4. RESEARCH 2025で取り組む強靱化技術

4.1 開発技術による強靱化のコンセプト

RESEARCH 2020では、局所的短時間強雨の特性を考慮して、気象予測情報の利用を導入した。ここで、気象予測情報はあくまで予測であることから、解析への入力値そのものの精度が実際の観測による実況値よりも少なからず劣ることになる。精度が劣る予測値の利用は、急激な強雨から列車を安全に退避させるために必要な時間的マージンを得るために選択した。これは、RESEARCH 2020では、緊急的な措置に対応する防災技術を開発のコンセプトとしたためである。すなわちこの開発は、上述した日本での特徴的な気候変動のうち、図3に示した短時間強雨の増加を見据えた技術開発を意図している。

一方、気候変動のもうひとつの課題として、図4に示した様なひと雨の雨量の増加による激甚災害への対応がある。想定される被災形態の例としては、平

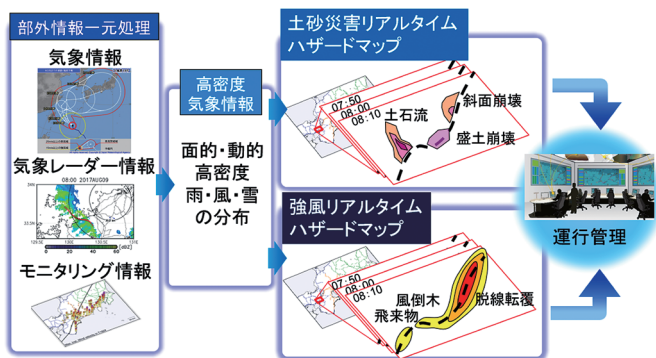


図10 運転規制の精緻化技術の取り組み

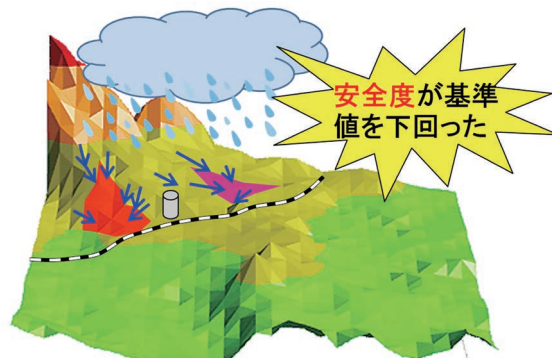


図11 二次元降雨情報を用いた強雨時運転規制方法の作成

成30年7月豪雨や昨年の台風19号による災害がある。両者とも広い範囲で同時に土砂災害や浸水被害が発生した。これらの災害は台風や前線によるものであり、降雨の累積状況や風速の変化を観測し、その実況値を列車の運行管理に用いることで安全性を確保することができる。すなわち、RESEARCH 2025で取り組む開発は、実況値を使用して激甚災害に対応した鉄道の強靱化を実現することをコンセプトとしている。実況値を基にした安全性評価の精度を高めることで、早期運転再開を基本としたダウンタイムの短縮が可能となり、安全性と安定性を両立した強靱な鉄道の実現に繋げることを意図している。

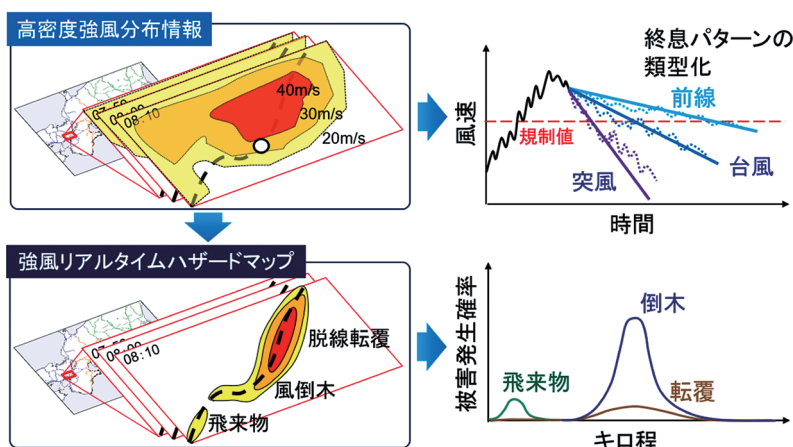


図12 強風リアルタイムハザードマップの作成

4.2 運転規制の精緻化に関するテーマ

RESEARCH 2025で取り組むテーマは、運転規制の精緻化に関するテーマと、土工設備の強雨による被災後の措置に関するテーマの大きく二つに分けられる。構成する個々のテーマを以下に概説する。

図10に運転規制の精緻化に関するテーマの全体構成を示す。運転規制のための入力情報には、時々刻々と変化する気象の実況値を用いる。アメダスなどの地上気象観測情報やレーダ情報など様々な気象実況値を入手して一元処理する手法を作成する。この手法を用いて得られる降雨の情報を用いて、強雨による斜面災害のリアルタイムハザードマップを作成する。このリスクマップの開発過程で、沿線の斜面災害の発生危険度の高い箇所を抽出する手法を作成する。地形情報や災害時のデータなどを基にした推計統計学的手法を適用して評価対象とすべき箇所の選定手法を作成する。

また、このテーマでは、広範囲な二次元の降雨情報や地形情報を用いた場合の降雨時の運転規制値（列車の運転中止雨量値）の設定方法を作成する。図11は二次元降雨情報を用いた運転規制方法のイメージを示している。従来は沿線の雨量計の観測値を用い、その雨量計に充てられた受け持ち区間の運転中止・再開が決められてきた。これに対して広範囲な雨量情報を用いて線路位置から離れているものの線路へ影響を及ぼす可能性のある個所の安定度を安全運行にどのように反映させるかを検討する。これにより、単純な雨量ではなく沿線の安全度の評価に基づくよりきめ細かい運行管理が可能になると考えられる。

強風については、レーダーアメダス解析雨量のような面的なハザード情報が現状では整備されていない。そこで、部外情報を利用した図12のような時々刻々と変化する高密度強風分布情報を作成する。また、このハザードマップを用いて、強風によって発生する

様々な被災形態について、その発生箇所を示す強風リアルタイムハザードマップを作成する。このマップを利用することで同一時刻に沿線のどこでどのような被災形態の強風災害が発生するかを予測し、その結果に応じた措置をとることが可能になると考えられる。また、台風や前線の通過による強風など、さまざまな気象条件での強風事例を分析し、その終息時の風速低下傾向をパターン化し、強風終息時の様子見時間を風速の変化に応じて逐次評価する手法を検討する。

4.3 被災後の措置に関するテーマ

広範囲に同時多発的に災害が発生した場合には、様々な災害規模に応じて過不足のない復旧措置を施すことが復旧の迅速化に繋がると考えられる。特に、被災規模が小さい場合にはそれよりも規模の大きい被災箇所へ復旧リソースを回すことが可能となり、全体的な復旧作業の効率化が図れる。このような判断の迅速

化のためには、被災規模を指標とした運行可否判断が必要と考えられる。そこで、図13に示すような実験をとおして被災規模と盛土の安定性との関係を明らかにするとともに、被災規模に応じた応急復旧のための措置を明らかにする。この成果を利用することで、災害時の点検の際に重点的に確認する箇所が明確になり、またその規模に応じた措置の判断が迅速に行えるようになる。さらに、この成果は将来的な点検作業の機械化の際の判断ポイントとしても利用が可能となり、災害時の点検作業やメンテナンスの自動化への貢献が期待される。

5. おわりに

本発表では、気候変動を背景とし激甚化する気象災害に対して、RESEARCH 2020および2025での取り組みについて概説した。

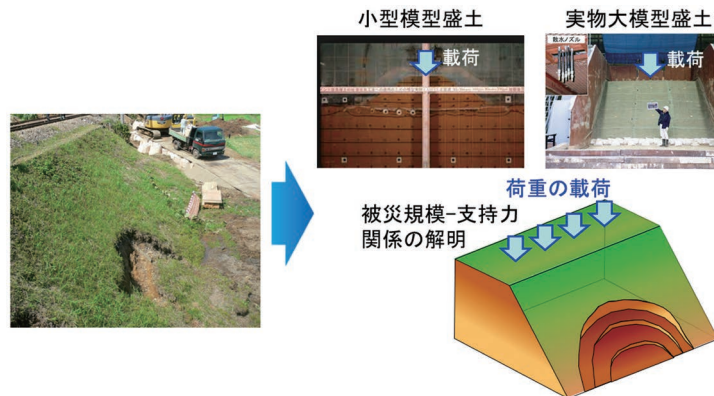


図13 被災規模に応じた措置決定のための実験



図14 激甚化する気象災害に対する鉄道の強靭化に向けた包括的な取り組みの概念

上述の通り、RESEARCH 2025では、強雨による土砂災害や強風による車両の転覆や倒木、飛来物などの災害発生リスクの評価手法に関する研究開発に取り組む。また、これと並行して、爆弾低気圧による豪雪など雪氷を対象とした研究や、発生頻度の増加が予想される河川の増水による橋梁の洗堀に関する研究など、様々な気象災害に関する研究開発を進める。図14に、防災に関するこれからの研究開発の取り組みの全体像を示した。気象災害については、その要因である気象のデータを広く集約し、現実に即した安全度を精度よく評価し、その評価結果を迅速に示すことが強靱化の鍵となると考えている。この「広く」、「精度よく」、「速く」のためには、部内外の情報の集約と解析にデジタル技術が欠かせないものになると考え、そのため、デジタル技術の積極的な導入を念頭に置いた研究開発を進めるとともに、そのための外部機関との連携を模索する必要があると考えている。

本稿に記載した内容の一部には、内閣府戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) の「レジリエントな防災・減災技術の強化」による研究が含まれている。

参考文献

- 1) INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE : Global Warming of 1.5°C, <http://www.ipcc.ch/report/sr15/>, (参照日2018年10月13日)
- 2) 気象庁：台風第19号 による大雨、暴風等, http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/report/2019/20191012/jyun_sokuji20191010-1013.pdf, (参照日2020年1月12日)
- 3) 気象庁：令和元年台風19号に伴う大雨の要因について, <https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/yohokaisetu/T1919/mechanism.pdf>, (参照日2020年1月12日)
- 4) 気象庁：気候変動監視レポート2018, https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/monitor/2018/pdf/ccmr2018_all.pdf, (参照日2020年1月12日)
- 5) 国土地理院：令和元年(2019年)10月の低気圧に伴う大雨に関する情報, https://www.gsi.go.jp/BOUSAI/R1_10gatsuheavyrain.html