

# 気象データを活用した鉄道防災技術

防災技術研究部長  
布川 修



## 1. はじめに

鉄道沿線には気象災害の発生しやすい箇所が数多く存在する。これは、日本の国土の約7割が山地（丘陵地含む）であることなどの地形・地質条件、台風や豪雨・豪雪が生じるという気象条件による。さらに、100年前には在来線の鉄道網はほぼ完成しており、当時の土木工事技術の制約（長大橋梁やトンネルの施工技術が未発達）により、気象災害の発生しやすい箇所を回避できなかったことも一つの要因として挙げられる。このため、気象災害の発生しやすい箇所を特定して鉄道設備を補修・補強するハード対策により耐力を徐々に向上させるとともに、気象災害の危険性が高まっていると考えられる外力を観測した時に運転を規制するなどのソフト対策を併用することで、鉄道の安全を確保している。

近年の気象災害の激甚化に対する鉄道の強靱化の方策のうち、本稿では、上記で述べたソフト対策の方向性について論じる。具体的には、現状と課題について述べた後、これらの課題を解決する、気象データを活用した外力・耐力・ハザードの評価・予測技術および、鉄道防災プラットフォーム構想について述べる。

## 2. 現状と課題

### 2.1 広域・リアルタイム評価の必要性と方向性

運転規制などのソフト対策により、気象災害の激甚化に対する鉄道の強靱化を図っていくためには、災害の危険性が高まる場所と時間を現状よりも精度よく特定し、安全性をこれまでと同等あるいは向上させながら、これまでよりも運転規制の規制範囲・時間・規制解除判断の確認箇所などの削減、すなわちダウンタイ

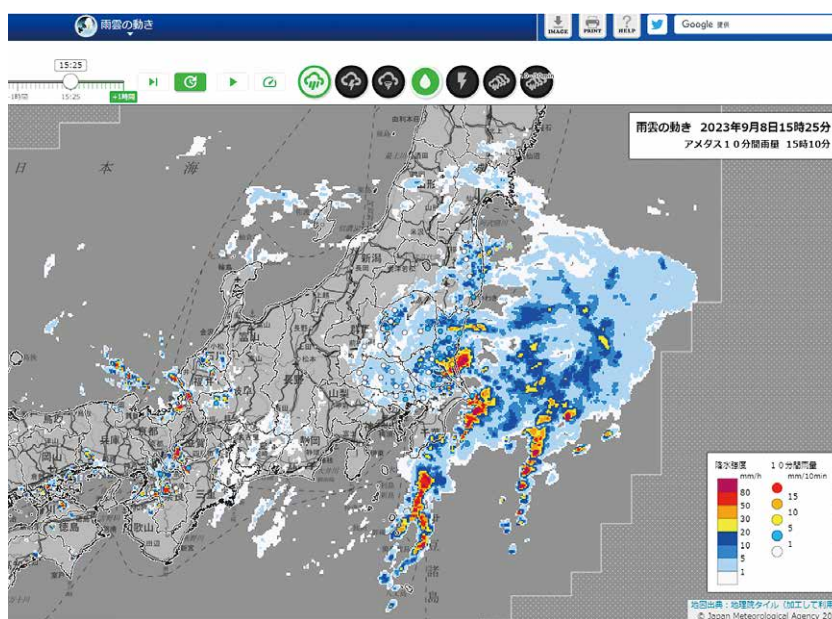


図1 面的な降雨情報の例<sup>1)</sup>

ムを削減することで効率性を高めることが求められていくものとする。これを可能とするためには、広域にわたる鉄道沿線・周辺における災害の危険性を稠密かつリアルタイムに評価する技術（以下、広域・リアルタイム評価と称す）が必要となる。

一方、図1<sup>1)</sup>に示す面的な降雨情報など、公的な機関から配信される広域情報は、充実化・精度向上が図られ、これらの技術は今後ますます発展していくものと想定される。したがって、こうした広域情報を積極的に活用することで、鉄道沿線で発生する気象災害を対象とした広域・リアルタイム評価技術の精度向上が図られ、前述したダウンタイムの削減に貢献できると考える。

## 2.2 JRでの広域情報の活用例

ここでは、JRですでに導入されている広域情報の活用事例を2つ紹介する。

局地的短時間強雨による災害から列車の安全を確保することを目的として、レーダー雨量を活用した運転規制がJR東日本<sup>2)3)</sup>、JR東海<sup>4)</sup>、JR西日本<sup>5)</sup>において導入されている。具体的には、気象庁や国土交通省が配信している1kmの面的雨量を活用することで、図2<sup>5)</sup>に示すように、雨量計が設置されていない箇所の降雨を把握することで、局地的短時間強雨に対応するものである。

また、JR東海では土石流発生危険度評価システムを用いた運転規制も導入している<sup>6)</sup>。このシステムでは広域情報として、渓流域のレーダー雨量を活用するとともに、数値標高モデルも活用することで土石流の発生危険性を評価している<sup>7)</sup>。

## 2.3 気象データを活用した鉄道防災技術の課題

本節では、雨、風、雪それぞれの気象ごとに、広域・リアルタイム評価の現状と、この現状を解決する方法を整理し、これらをまとめることで、気象データを活用した鉄道防災技術の課題を明らかにする。

雨の場合、対象とする主な災害は土砂崩壊である。

広域・リアルタイム評価の現状として、耐力評価に関しては統計的な経験に基づく方法のみであるが、一方で、公的な降雨データは充実している。したがって、解決方法としては、物理モデルに基づくハザード評価手法を構築すること、および公的な降雨データの運転規制への活用方法を明確にすることが挙げられる。

風の場合、対象とする主な災害は列車の脱線転覆である。現状において、耐力評価手法については鉄道総研が提案済み<sup>8)</sup>であるが、公的な風速データをそのまま鉄道に適用することは難しい。したがって、解決方法としては、公的データを補間、変換することによる風速評価手法を構築すること、およびこの結果の運転規制への活用方法を明確にすることが挙げられる。

雪の場合、対象とする災害は、列車の立ち往生、雪崩、融雪による土砂災害、車両からの着落雪など、様々である。このため、雨と風とは異なり、統一的な運転規制の考え方がないのが現状である。また、公的な積雪データをそのまま鉄道に適用することは難しい。したがって、解決方法としては、まずは、公的データを補間、変換することによる積雪深評価手法を構築すること、およびこの結果の運転規制への活用方法を明確にすることが挙げられる。

以上、気象ごとに、広域・リアルタイム評価の現状と、この現状を解決する方法を述べた。これらから共通事項を整理すると、気象データを含む広域情報を利用して広域・リアルタイム評価の精度向上を図っていくには、まずは、現状では構築されていない、気象データを活用した外力・耐力・ハザードの評価・予測技術を構築することが必要である点が、課題として挙げられる。そこで、現在取り組んでいる評価技術を3章で説明する。

また、運転規制への気象データや評価技術の活用を考えた場合には、これらを一元的に管理する技術が必要になる点が、課題として挙げられる。そこで、これを解決する方法として考えている鉄道防災プラットフォーム構想について、4章で説明する。

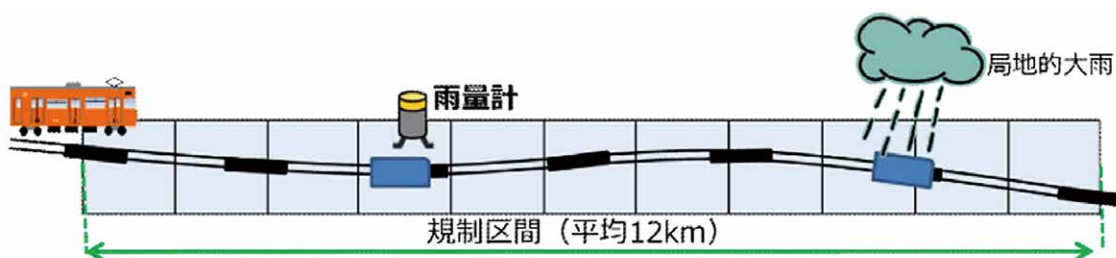


図2 レーダー雨量の活用による局地的短時間強雨の補足イメージ<sup>5)</sup>

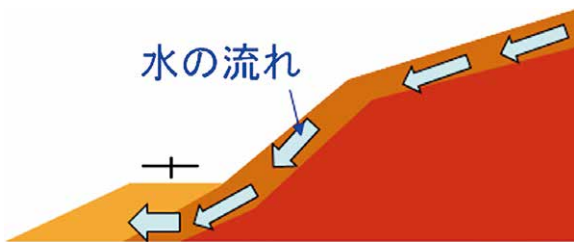


図3 斜面に隣接する盛土への水の流入イメージ

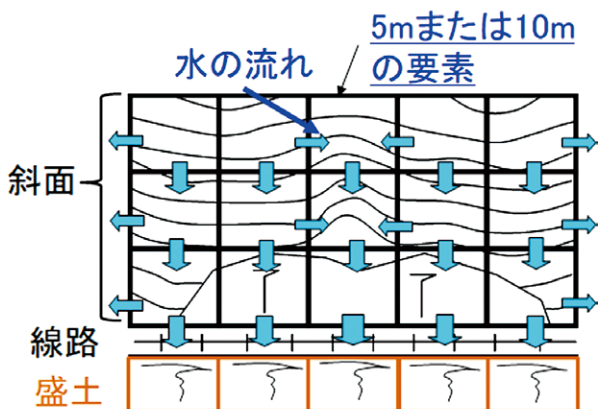


図4 降雨時の斜面・盛土のリアルタイム安定性評価方法における水の流れのイメージ

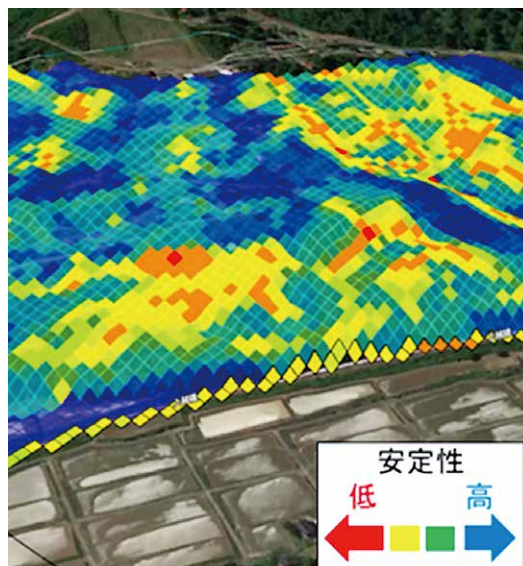


図5 降雨時の斜面・盛土のリアルタイム安定性評価結果を面的に表示した時のイメージ

の斜面を5mまたは10mの要素に分割し、これらの要素ごとに斜面表層部分(1~2m)を設定する。これにより、地形的な勾配から水の流れる方向とその要素への流入・流出量およびこれらの差分から得られる表層部分に留まる水の量を計算している<sup>9)</sup>。線路より下方の盛土については、上記で計算される斜面から盛土方向に流出する水の量を盛土への流入量とし、盛土内の平均的な飽和度(土の中の水分の割合)と盛土からの流出量との関係を定式化することで、盛土内に留まる水の量を計算する。

本方法による斜面・盛土の安定性評価結果を面的に表示したときのイメージを図5に示す。なお、この図の解析結果の下側に当たる部分に線路があり、この部分はすべて盛土であると仮定して計算している。安定性評価結果は、公的な数値地形情報に付与する形のデータフォーマットとしているため、図に示すとおり、鉄道沿線の斜面の安定性の降雨時における変化を分かりやすく面的に表現することができる。なお、本方法における斜面の地下水位の再現性は検証済みであるが<sup>9)</sup>、盛土の地下水位等の再現性に関して、現在、実際の盛土での計測とこの計測結果に基づいた検証を実施中である。

### 3. 気象データを活用した評価技術

#### 3.1 雨に関する評価技術の検討事例

2.3節で述べた雨に関する課題の解決方法は、物理モデルに基づくハザード評価手法の構築であり、この取り組み事例を紹介する。

降雨による斜面・盛土崩壊には、地形的な水の集まりやすさが影響する。例えば、図3に示す斜面に隣接する盛土の場合、斜面から盛土への水の流入の多寡が安定性に大きな影響を及ぼす。そこで、広域情報としてレーダー雨量と数値標高モデル等を活用し、水の流れを考慮した広域的な斜面・盛土のリアルタイム安定性評価方法について、研究を実施している。この研究においては、三次元有限要素法(FEM)等の詳細な解析では計算負荷が高く、リアルタイムに評価すること、あるいは様々な降雨・地形条件での検証が困難となるため、計算負荷の低いアルゴリズムを実装した評価プログラムを検討している。

評価方法における水の流れの計算方法のイメージを図4に示す。図に示すとおり、斜面(線路より上方の斜面)については数値標高モデルを活用して線路周辺

#### 3.2 風に関する評価技術の検討事例

2.3節で述べた風に関する課題の解決方法は、公的データを補間、変換することによる風速評価手法を構築することであり、この取り組み事例を紹介する。

強風による災害のうち、最も重大なものは列車の脱

線転覆であることから、強風が吹きやすい箇所には防風柵等のハード対策を施工するとともに、風速計を鉄道沿線に設置して風観測を行い、ある風速以上の風が観測された時に列車の運行を規制（徐行や停止）する措置が実施されている。ただし、過去の経験から強風が吹きにくい箇所は運転規制区間外として風速計が設置されていない場合もある。

近年、台風が巨大化・強化化していると言われることから、強風が吹きにくい箇所でも強風が観測されることが懸念される。鉄道沿線すべての箇所において強風を捉えるためには風速計を増設する必要があるが、コスト増となる。このため、公的機関から配される風速データを活用することで、低コストに鉄道沿線の風速を把握する手法の開発が望まれている。

公的情報を活用した風速マップの例としては、日本気象協会の有料配信データなどがある。なお、このマップは、気象庁から配信される2.5km格子の平均風速データを、日本気象協会が1km格子に加工して作成

している。鉄道での運転規制にこうした風速マップの活用を考えた場合には、より詳細な格子にすること、平均風速から鉄道の運転規制で利用している瞬間風速への変換が必要となる。

上述の背景のもと、鉄道の運転規制での活用を踏まえた風速マップの作成方法について、研究を行っている。本方法の概要を図6に示す。本方法では、部外情報としてアメダスの実況風速（平均風速と平均風向）を活用する。また、事前に気流解析を実施し、アメダス地点を1としたときにその周辺の風速の増減率を表すデータテーブルを作成する。このデータテーブルは細密で100m格子とし、平均風速から瞬間風速への変換も考慮している。この風向別に作成したデータテーブルを用いることで、アメダスの実況風速から、図に示すような風速マップがアメダスの更新に合わせた10分ごとに作成される。

図7に本方法の精度を検証した例を示す。この図は、鉄道沿線に風観測点を6箇所設置し、20m/s以上の日

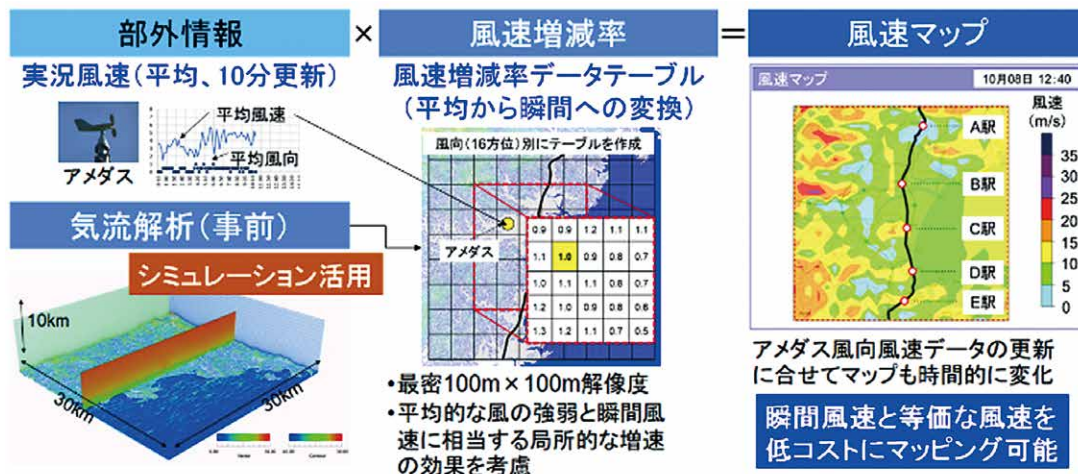


図6 風速マップの作成方法の概要

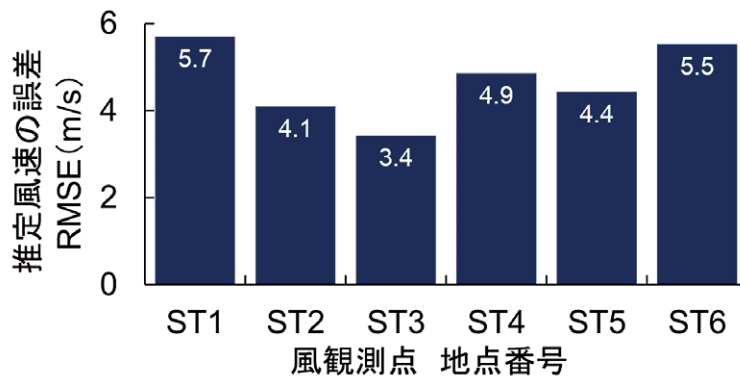


図7 風速マップ作成方法の精度検証の例

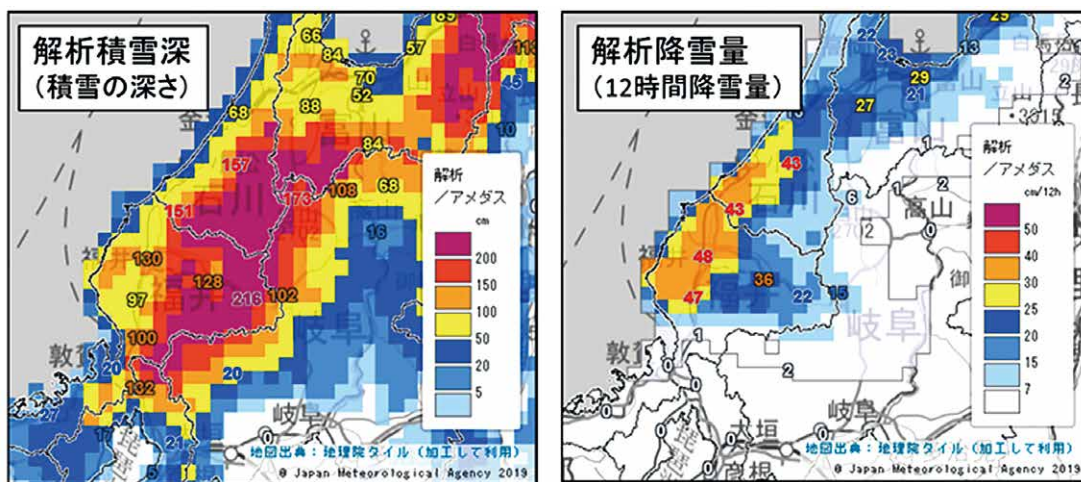


図8 積雪深や降雪量の面的分布の例<sup>10)</sup>

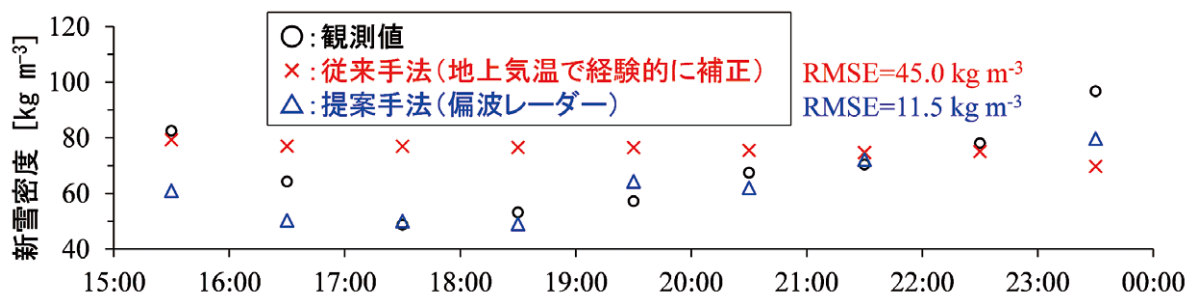


図9 経時的に変化する新雪密度の推定結果例<sup>11)</sup>

最大瞬間風速を観測した14例に対して、風観測点で得た10分毎の最大瞬間風速と本風速マップ作成方法で求められる瞬間風速と等価な風速との誤差を二乗平均平方根誤差 (RMSE) で評価したものである。この図から本方法では、概ね5m/s以下の誤差で風速を推定していることがわかる。現在、鉄道事業者へのヒアリングにより鉄道での運用を考慮した場合の許容誤差等を把握するとともに、本検証箇所とは別の箇所での適用性や誤差の低減方法を検討中である。

### 3.3 雪に関する評価技術の検討事例

2.3節で述べた雪に関する課題の解決方法は、公的データを補間、変換することによる積雪深評価手法を構築することであり、この取り組み事例を紹介する。

気象庁から配信される積雪深や降雪量の面的分布 (マップ) の例を図8<sup>10)</sup>に示す。このマップは気象レーダーやアメダス観測値を用いた解析結果から作成されたものである。なお、約5m四方の平均的な値であるため局地的な降雪の多寡は表現できないこと、降雪量

は少なめに予測する傾向があることが利用上の留意点として説明されている<sup>10)</sup>。このため、鉄道での豪雪による列車の立ち往生の防止や新幹線台車床下への着雪対策などに活用するためには、さらなる精度向上が必要となる。一方、降雪深は降水量と新雪密度により求められること、このうち降水量は気象レーダーにより高精度に求められることから、降雪深の推定精度向上のためには、新雪密度を精度よく推定することが必要となる。

こうした背景のもと、新雪密度の精度向上を目的として、偏波レーダーを用いた新雪密度の推定方法について、研究を行っている。本研究においては、偏波レーダーで計測されるデータから雪の結晶に関する指標 (平べったい結晶の多寡) とこの指標を検知する高度 (-15℃の高度) を検討し、この高度で得られる指標が大きいほど地上では空隙の大きい雪片など軽い粒子となり新雪密度が小さく、指標が小さいほど地上では空隙が詰まった雪片や霰あられなど重い粒子となり新雪密度が大きくなることを明らかにした。この結果に基づいて、経時的に変化する新雪密度を推定した結果を図9<sup>11)</sup>に

示す。この図には、観測値と従来の地上気温から経験的に推定する方法で求めた値も示しているが、従来手法と提案手法とを比較すると、提案手法の方が観測値に近く、誤差 (RMSE) も小さいことがわかる。今後は、本推定方法を用いた降雪マップの作成方法について検討を進めていく予定である。

## 4. 鉄道防災プラットフォーム構想

### 4.1 鉄道防災プラットフォームの概要

本章では、2.3節で述べたとおり、部外・部内データや各種評価結果を一元的に管理する技術が必要となる課題の解決方法として考えている、鉄道防災プラットフォーム構想について説明する。

ここで、改めて広域・リアルタイム評価を運転規制に活用するための課題について考える。現状の運転規制は、点で観測された気象データにより実施されている。一方、広域・リアルタイム評価を活用した運転規制では、面または線の外力やハザードのデータを利用することになる。すなわち、利用するデータの稠密さが異なるこ

とになるため、運転規制の発令の判断基準や解除判断基準に関しても変更する必要があることが想定される。こうした変更を効果的・効率的に行うためには、部外・部内データや各種評価結果を一元的に管理し、既存の方法との比較を行うことができるように、安全レベルの考え方の明確化を図ることが重要であると考えられる。

鉄道防災プラットフォームの全体イメージを図10に示す。図に示すとおり、鉄道防災プラットフォームとは、気象データ等の部内外データを集約し、外力評価、耐力評価、ハザード評価のそれぞれの結果を一元的に管理するものである。これにより、前述した安全レベルの考え方の明確化やデータ処理の共通化を図ることができると考えている。すなわち、鉄道防災プラットフォームとは、精度の高い部外情報の積極的な鉄道への活用を可能にするツールになるものと言い換えることができる。なお、現状の取り組みとしては、全体システムだけではなく、要素技術のみでも提供できるように開発を進めている。

以下、鉄道防災プラットフォーム内の、外力やハザード評価のイメージを説明する。

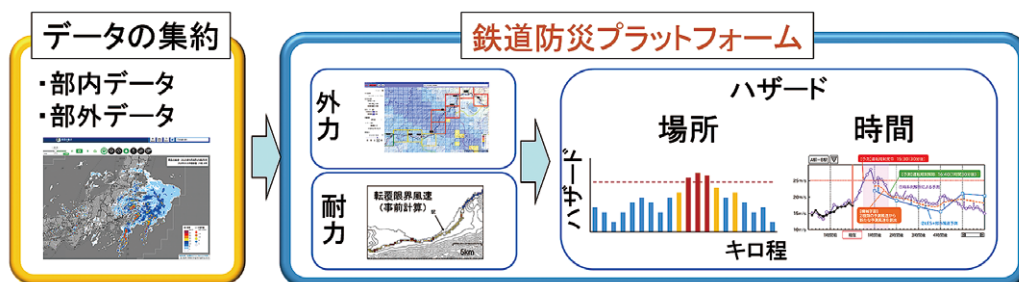
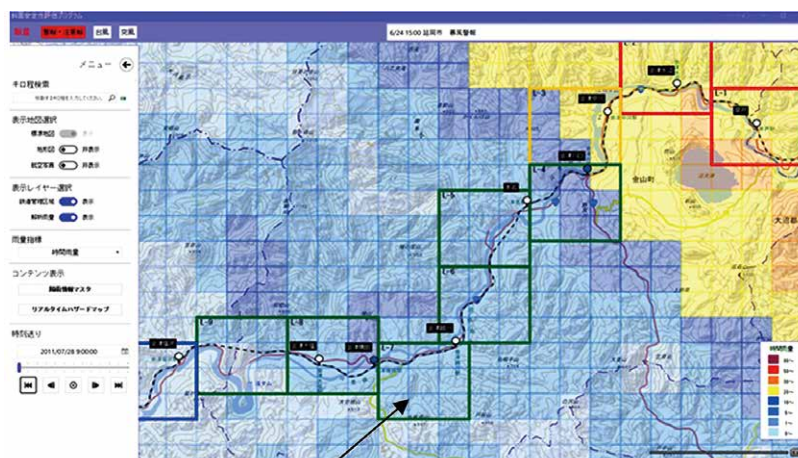


図10 鉄道防災プラットフォームの全体イメージ



広域メッシュ

図11 雨を対象とした外力評価のイメージ

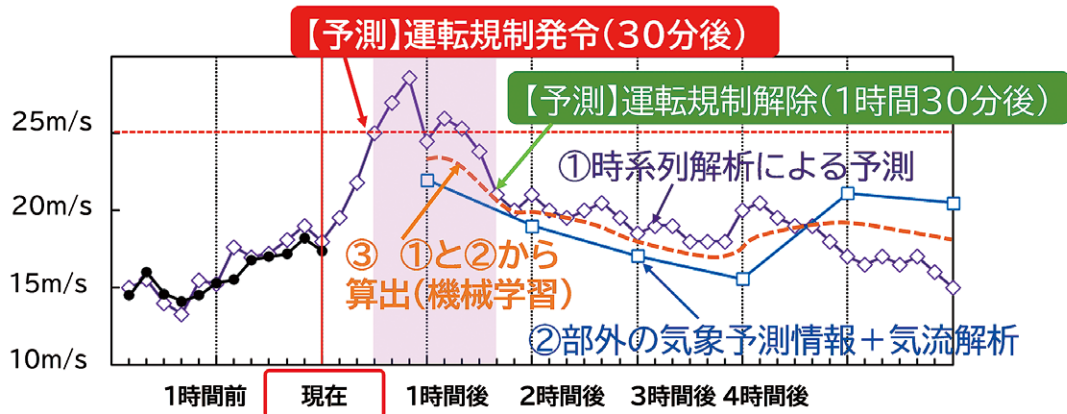


図 12 瞬間風速の時間変化予測手法での出力結果のイメージ

#### 4.2 外力評価のイメージ(場所)

雨を対象とした外力評価のイメージ図11に示す。なお、風の場合は、3.2節で説明したとおりである。図11は気象庁等から配信される面的な時間雨量の分布表示をイメージしたものであるが、鉄道事業者が運転規制に使用している雨量指標に合わせた表示とする必要がある。また、気象警報などの情報も表示することも想定する。図11では、広域メッシュとして最小メッシュ(雨の場合は配信データと同様の1kmメッシュを想定)を線路方向に複数合わせたメッシュを設定し、この広域メッシュの平均値や最大値を色で表示させることを想定している。これは、長時間の雨の指標(連続雨量など)は、ある範囲の代表値として評価する可能性があること、短期的な雨量指標と長期的な雨量指標の組み合わせにより運転規制を行っていることから、両方を表示させる工夫が必要であることなどの理由による。

こうした外力評価をキロ程で表すことにより、災害の危険性が高まっている場所がわかるため、規制発令や規制解除前確認の場所を稠密に表すことができる。

#### 4.3 外力予測のイメージ(時間)

雨の場合は、気象庁から配信されるデータを活用することを想定している。例えば、降水ナウキャストは1時間先まで5分間隔、降水短時間予報は、1~6時間先までは10分間隔(ともに1km格子)で雨量の予測値を配信している<sup>12)</sup>。

風の場合、上記で述べた雨のような稠密さでの公的機関からの配信はないため、現在、10分間隔で瞬間風速を予測する手法についての研究を進めている。こ

の手法での出力結果のイメージを図12に示す。本研究では、①時系列解析による10分間隔の予測、②部外の気象予測情報と気流解析を組み合わせた方法による1時間間隔の予測、③上記①と②を機械学習等により組み合わせた予測、について検討を行っている。この手法を用いると、図12のイメージ図では、現在から30分後には運転規制が発令される風速、1時間30分後には運転規制を解除することができる風速、となることが現在の時点で判断できる。このように、規制発令や規制解除前確認の時間が明確となり、これらの早めの準備などに活用できるものと考えられる。

#### 4.4 ハザード評価のイメージ(場所)

雨のハザード評価の方法は、3.1節で説明したとおりである。風のハザード評価は、3.2節で説明した外力評価の方法と鉄道総研が提案している耐力評価方法<sup>8)</sup>とを組み合わせることによって可能であると考えられる。外力評価の結果も同様であるが、ハザード評価結果をキロ程で線形に表示することにより災害の危険性が高まっている場所がわかるため、規制発令や規制解除前確認の場所を稠密に表すことができる。なお、ハザード評価結果を用いたほうが外力評価結果のみよりも合理的に危険性を評価できるため、よりダウンタイムを削減できる可能性がある。

### 5. おわりに

本稿では、近年の気象災害の激甚化に対する鉄道の強靱化の方策のうち、ソフト対策の方向性について述べた。具体的には、気象データを活用した外力・耐力・

ハザードの評価・予測技術が必要であることが課題として挙げられ、解決方法として、鉄道での適用を踏まえた評価技術の確立するために、現在実施している取組みについて紹介した。この技術は、気象災害の危険性が高まる「場所」、「時間」を精緻に特定することに活用できる。また、部外・部内データ、各種評価結果を一元的に管理する技術が必要であることが課題として挙げられ、解決方法として、データ処理の共通化や安全レベルの考え方の明確化を図るツールとして、鉄道防災プラットフォーム構想について説明した。この技術により、様々な部外情報を鉄道に適した形で効果的・効率的に活用できると考える。

以上より、鉄道防災プラットフォームにより、部外情報を活用したきめ細やかな運転規制の実施を支援することで、激甚化する気象災害に対してダウンタイムを削減することを目指していきたいと考えている。

## 参考文献

- 1) 気象庁HP：雨雲の動き, [https://www.jma.go.jp/bosai/nowc/#lat:34.551811/lon:137.406006/zoom:7/colordepth:deep/elements:amds\\_rain10m&hrpns](https://www.jma.go.jp/bosai/nowc/#lat:34.551811/lon:137.406006/zoom:7/colordepth:deep/elements:amds_rain10m&hrpns), 2023/9/8閲覧
- 2) JR東日本ニュースリリース：異常気象に備えた新幹線に対する降雨防災の取り組みについて, 2021
- 3) JR東日本ニュースリリース：在来線におけるレーダ雨量を活用した新たな運転規制の導入について, 2023
- 4) JR東海ニュースリリース：在来線全線区へのレーダ雨量を活用した運転規制の導入について, 2018
- 5) JR西日本ニュースリリース：局地的な大雨に対するさらなる安全性向上, 2020
- 6) JR東海ニュースリリース：在来線の新しい降雨運転規制の導入について, 2020
- 7) 林宏樹, 大木基裕：土石流発生危険度評価システムの開発, 第57回鉄道サイバネ・シンポジウム論文集, 論文番号417, 2020
- 8) 日比野有, 石田弘明：車両の転覆限界風速に関する静的解析法, 鉄道総研報告, Vol.17, No.4, 2003
- 9) 浅野嘉文, 川尻峻三, 布川修, 太田直之, 杉山友康, 渡邊諭：降雨時における斜面表層崩壊を再現する簡易解析モデルの提案, 地盤工学ジャーナル, Vol.8, No.4, pp.579-595, 2013
- 10) 気象庁HP：解析積雪深・解析降雪量・降雪短時間予報, <https://www.jma.go.jp/jma/kishou/now/kurashi/snow.html>, 2023/9/12閲覧
- 11) 高見和弥: Xバンド偏波レーダーを用いた新雪密度の推定手法の開発に関する研究, 京都大学学位論文, 2023
- 12) 気象庁HP：降水ノウキャスト、降水短時間予報, [https://www.jma.go.jp/jma/kishou/now/kurashi/kotan\\_nowcast.html](https://www.jma.go.jp/jma/kishou/now/kurashi/kotan_nowcast.html), 2023/9/25閲覧