

# 防災技術に関する最近の研究開発

太田 直之\*

## Recent Research and Development about Disaster Prevention Technology

Naoyuki OTA

This paper shows some of recent research and development about the disaster prevention technology of RTRI. We developed some prevention technique for the special storm such as tornado and local heavy rainfall in the long-term research plan of RTRI “RESEARCH2020”. For instance, as a countermeasure against such the particular weathers, we developed the real time hazard map system applying predictive meteorological information. In addition to that, we constructed the evaluation method for the resilience and the strategy making system of restoration. “RESEARCH2025” has been newly formulated as a long-term research plan. In line with the new plan, we are working on developing two researches : the high precision operation control system applying observation data, and the evaluation method for the stability of slope after heavy rain.

キーワード：激甚災害，リアルタイムハザードマップ，レジリエンス，復旧戦略，運転規制

### 1. はじめに

近年、猛烈な台風による過去に例を見ないほどの暴風雨や、巨大地震による広い地域におよぶ激しい揺れなどにより、我が国にもたらされる自然災害が激甚化している。これら激甚災害への対応のため、鉄道をはじめとするインフラストラクチャーにはレジリエンス（強靱性）の強化が求められ、防災対策への注力がこれまで以上に必要とされている。これらの日本を取り巻く自然災害の状況を踏まえて、本報告では、鉄道総研で近年取り組んできた技術開発について解説するとともに、今後の取り組みを展望する。

### 2. RESEARCH2020 における研究開発成果

2011年に発生した東北地方太平洋沖地震の後、想定外の自然外力への対応として、被害軽減を目的とした技術の必要性がクローズアップされた。そこで鉄道総研では、2015年に開始した5か年の基本計画RESEARCH2020の中で、被害軽減に資する技術の実現を目指して「鉄道の防災・減災技術の高度化」に取り組んだ。

このテーマでは、①局所的短時間強雨や突風などの顕著気象を対象としたリアルタイムハザードマップの開発、②広域に甚大な被害をもたらす巨大地震を対象としたレジリエンス向上に資する技術の開発、③大規模災害を対象とした事前補強および復旧戦略に資する技術の開発、に取り組んだ。以下に各成果の概要を述べる。

### 2.1 顕著気象に対応する減災技術

#### 2.1.1 XRAIN を利用した突風検知

国土交通省が全国に設置している X-band MP レーダー（XRAIN）のデータを利用して、上空の空気の特徴的な流れを検知し、地上での突風発生を評価する手法の開発に取り組んだ。

レーダーデータを用いた各種突風の検出方法については、既往の手法<sup>1)</sup>を参考に、XRAIN から得られるドップラー速度分布が視線方向、あるいは方位角方向に大きく変化する領域（シアセグメント）を抽出し、周囲の同種のシアセグメントを統合して2次元の突風領域として検出する（図1）。検出された突風領域を構成する各シアセグメントの風速差の最大値に対して閾値を設けて、それ以上の値となった場合を突風として検出することとした。上空の突風領域をレーダーの観測時刻ごとに求め、直近の2観測時刻の突風領域の位置から相互相関法を用いて突風領域の移動方向および速度を求め、突

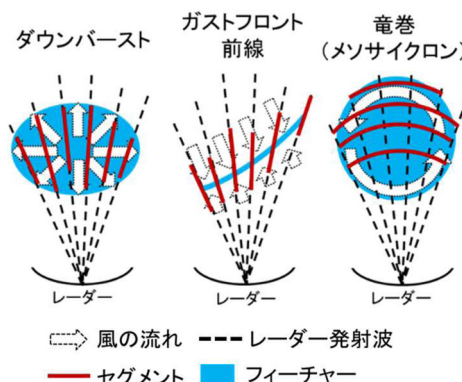


図1 レーダーによるフィーチャー検出のイメージ

\* 防災技術研究部長

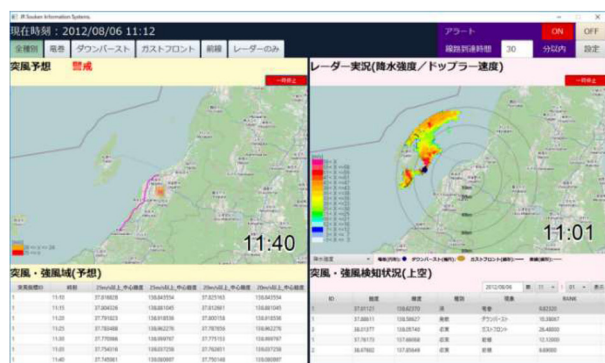


図2 試作した突風等検知システムの画面

風領域の10分後の位置を推定する。

また、気象モデルWRF（Weather Research and Forecasting）を用いた数値計算により、上空と地上の差を補正することとした。

上述の突風領域の検知と地上での突風領域への補正方法を用い、図2に示す突風検知・移動予測システムを試作した。このシステムは5分間隔にデータを更新・表示し、10分後の突風の移動位置を地図上に示す。

### 2.1.2 局所的短時間強雨に対応するリアルタイムハザードマップ

ゲリラ豪雨などの局所的短時間強雨による災害に対しては、実況値を基にした列車等の待避では間に合わないケースが想定される。このような急激かつ顕著な豪雨に対して降雨の予測値からハザードを予測し、これに基づいた緊急的な措置をとることが被害の軽減や早期の運転再開に繋がると考えられる。そこで、外部機関から配信される面的な降雨予測値を利用して、主に小流域における浸水・氾濫と線路から離れた箇所で見生じる大規模土砂崩壊による土砂流入のハザードをリアルタイムに予測し、その結果に応じた列車の停止位置と旅客の避難経路を表示するシステムを開発した。図3にシステム全体の構成イメージを示す。

浸水計算は、河川に流れ込む水量の計算、その水の量を基にした河川水位の計算、河川堤防越流の判定計算、河川水の越流による浸水範囲の計算からなる。解析は10分以内で終了することを目標として、計算に用いる地形モデルの格子点間隔や計算に導入する排水設備のモデルの仕様を決定した。

大規模土砂崩壊については、災害の発生事例を基にして地形分析を行い、地形条件から大規模な土砂崩壊が発生する可能性が高いと推定される箇所を抽出する手法を作成した。また、過去に大規模な土砂崩壊が発生した際の雨量を分析し、同規模の斜面崩壊が発生する可能性が考えられる雨量閾値を設定した。これらの成果を基に、大規模土砂崩壊危険箇所を予め抽出しておき、そこに閾値を超える雨量が作用した場合に警報を発するシステムとして作成した。

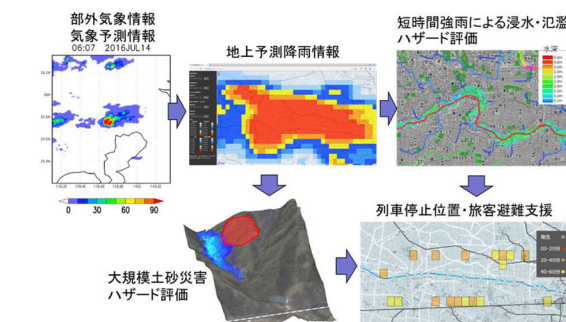


図3 浸水・大規模土砂崩壊リアルタイムハザードマップのイメージ



図4 列車停止・旅客避難支援システム

### 2.1.3 列車停止・旅客避難支援システム

上記の各ハザードの計算結果を踏まえて、列車を停止させるべき位置を示すシステムを作成した。図4にシステムの表示例を示す。このシステムでは、各種のハザードの発生が予測された場合に、走行中の列車がその被害を回避するための列車の停止位置を、最小費用流問題として計算する。この計算では、ハザードの発生予測箇所を基にして線路上を、ハザード区間、ハザードへ向かう区間、ハザードから遠ざかる区間の三区間に分け、それぞれの区間内を走行する列車を計算し、各列車の運転停止の要否と停車が必要な場合の停止位置を算出する。予測時間ごとにハザードの位置や範囲が変化するため、それに応じた列車の運行を逐次表示する。また、このシステムは、停止した列車が浸水などの被害を受けることが予想される場合に、列車停止位置から最寄りの避難場所へ旅客が避難する経路を示す機能も有している。その際にも逐次計算される予想浸水範囲を回避する安全な避難場所と避難経路を表示することができる。

RESEARCH2020で開発したリアルタイムハザードマップを利用することで、部外の気象予測情報を用い、突風、局所的短時間豪雨による浸水および大規模土砂崩壊の各ハザードを予測し、その結果を基に列車の運行管理と避難誘導に利用する情報を得ることができる。

## 2.2 巨大地震に対する減災技術

### 2.2.1 危機耐性の評価手法

想定以上の規模の揺れを伴う巨大地震に対しては、被災の程度を早期の復旧が可能なレベルに抑えることが求

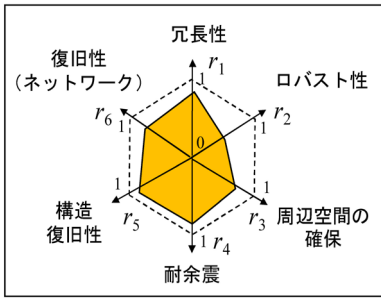


図5 危機耐性評価のための性能指標

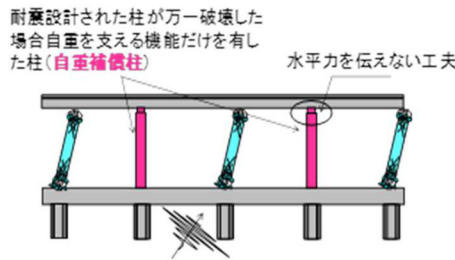


図6 自重補償機構

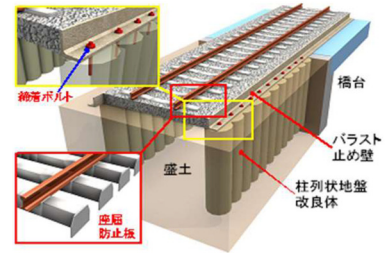


図7 柱列地盤改良とバラスト止めによる座屈防災対策

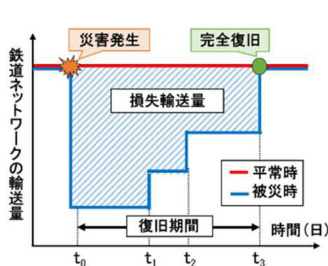


図8 損失輸送量の概念

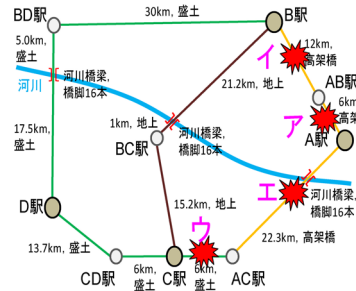
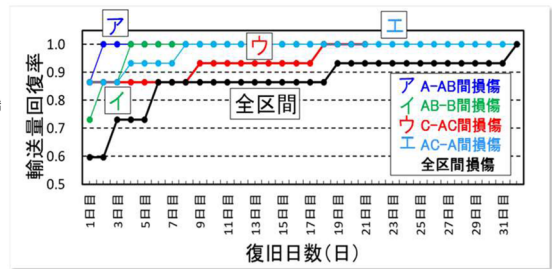


図9 広域災害を想定した復旧計画の検討



められる。このために「鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計」には危機耐性の考え方が導入されており、その評価方法を作成した。

危機耐性評価に用いる指標として、構造物の有する冗長性、ロバスト性、周辺空間の確保、耐余震性、構造の復旧性、ネットワークとしての復旧性の6指標を用いることとした(図5)。ネットワークとしての復旧性については、後述する被災時の損失輸送量の算定手法を用いて評価する。また、冗長性の評価には、たとえば図6に示す自重補償柱<sup>2)</sup>の有無などがある。自重補償柱は、地震によって通常の柱が損傷して通常の列車荷重に耐えられない状況に陥ったとしても、自重補償柱によってその上部にある桁などの構造物を支えることができる柱部材である。これにより桁の落下を防止しすることができ、早期復旧につながると考えられる。また、ロバスト性については、たとえば図7のようなレール座屈防止対策の有無があげられる<sup>3)</sup>。この対策は、地震時に弱点となる橋台と盛土との接合部に地盤改良体を施工することでレールの座屈を防ぐ対策である。このような対策が施工されていることでロバスト性が向上し、巨大地震時にも鉄道の機能を維持することに貢献する。

## 2.3 大規模災害に対する復旧戦略

### 2.3.1 迂回・復旧計画作成支援システム

想定を超える強大な自然外力によって広域に被災した鉄道ネットワークの復旧戦略や、被災を想定した事業継続計画(BCP)の作成支援を目的とし、迂回・復旧計画

作成支援システムを開発した。このシステムでは、鉄道ネットワークの被災状況と投入可能な復旧リソース量を入力して、被災路線の最適な復旧計画と復旧期間中の迂回輸送計画を計算する機能や、被災路線の復旧シナリオに基づく輸送量の回復状況を計算する機能を有している。

復旧計画の算出では、図8に示す被災してから完全復旧するまでの損失輸送量の総和が最小となるように、鉄道ネットワーク内の被災個所の復旧手順や投入する復旧リソース量を算出する。また、迂回輸送計画の算出では、ネットワーク内で走行可能な線区を活用して、迂回コストが最小となる日ごとの迂回輸送計画を算出する。さらに、迂回コストは、迂回による輸送量の増分や貨物保管費等の総和として算定する。

### 2.3.2 広域災害を想定した対策の効果の評価手法

巨大地震への対策技術としては、前述した被災後の復旧計画への利用を想定した技術の他に、事前対策の計画策定に資する技術開発にも取り組んだ。この技術開発では、巨大地震による強い揺れが広域に及ぶことを想定し、鉄道のネットワークとしての機能を維持するために効果的な対策箇所や工法を選定する手法の作成を目標とした。

この手法では、迂回・復旧計画支援システムで作成した損失輸送量を利用する。被災時の損失輸送量を求めるためには、被災施設の復旧状況の評価が必要となる。その計算には被災規模に応じた工法の選定やその工法を選定した際に工事に必要となる期間など、災害復旧工事に関わる様々な専門的知識が必要となる。作成した手法は鉄道事業者による対策計画の検討に用いることを想定

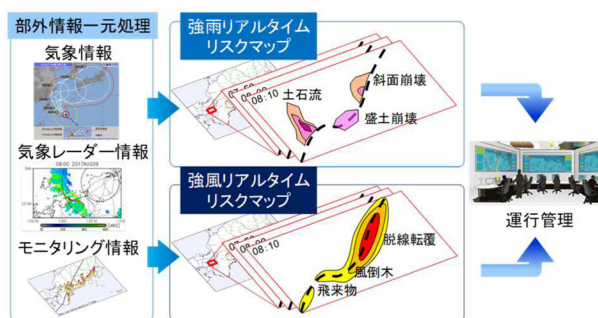


図10 運転規制の精緻化技術

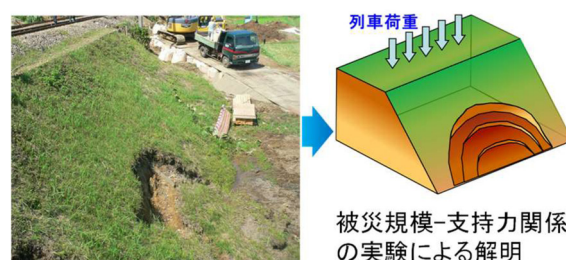


図11 早期応急復旧のための状態評価技術

し、工法に関する情報をデータベース化して使用性の向上を図った。このデータベースは、構造物の種類別に、被災程度と選定する工法に合わせて必要となるリソースを整理している。このデータベースを使用することで、工法を選定するだけで復旧速度が自動的に計算される。

作成した手法により輸送量回復率を計算した例を図9に示す。図9の左側に示すような鉄道ネットワーク上のア～エの4箇所が被災した場合の評価結果を右側のグラフで示している。例えば、全区間が被災した場合は輸送回復率が平時に戻るまでに32日かかることを示している。また、各区間が単独で被災した場合を比較するとウ区間が被災した場合が完全復旧までに最も時間がかかることが分かる。したがって、ウ区間の施設を事前に補強しておくことがネットワークの機能維持のために最も有効であるという評価結果を得ることができる。

### 3. RESEARCH2025 での防災技術の取り組み

上述のように、RESEARCH2020 では急激な豪雨や突風などの顕著気象と巨大地震を対象としてその被害軽減に資する技術の開発を目標として取り組んだ。新しく今年度よりスタートした新基本計画 RESEARCH2025 では、激甚化する気象災害に対応する鉄道システムの強靱化を目標として、研究開発に取り組んでいる。その内容は、実況値を用いた運転規制の精緻化技術と早期応急復旧のための状態評価技術の大きくふたつに分けられる。

運転規制の精緻化では、図10に示す様に部外の気象情報を利用し、部内の気象観測データと合わせて一元的に処理し、高密度の面的な気象情報を作成する。そのデータを豪雨時および強風時の運転規制に用いる。ここで、豪雨時の運転規制では、沿線の豪雨時の弱点箇所に着目し、その箇所の時々刻々と変化する安全度を評価し、運転規制に利用する手法を作成する。また、強風時の運転規制では、強風によって生じる様々なリスクの変化を予想しこれに基づく運転規制方法を作成する。これらの研究開発をとおして、運転規制によるダウンタイムを過不足なく運転計画に反映できる手法の作成を目指している。

また、状態評価技術では、雨量データと変状の程度を基に豪雨後の盛土の耐力を評価して、列車荷重との関係から応急的な運転再開を決定するための指標の作成を目指している。模型盛土を用いた散水実験を実施し、豪雨後の盛土が保有する支持力特性を明らかにする（図11）また、数値解析によるケーススタディを実施し、降雨量と盛土条件に基づく安定性指標の一般化を行う。

得られた成果を用いることで、大雨後の応急的な運転再開の判断を迅速に行うことが可能になる。また、優先的に復旧工事を実施すべき箇所が選定でき、効果的な復旧工事を行うことが可能になると考えている。

## 4. まとめ

本稿では、RESEARCH2020 および RESEARCH2025 の内容を中心に紹介した。ここで挙げた以外にも、融雪や雪氷を対象とした研究、洗堀に関する研究、斜面对策の老朽化に関する研究、倒木に関する研究、岩盤の風化による強度低下に関する研究など、災害関連のさまざまな研究開発に取り組んでいる。あらゆる自然災害を対象とした技術開発を進め、安全で安心な鉄道システムの実現へ繋げたいと考えている。

## 文献

- 1) Stumpf, G. J., A. Witt, E. D. Mitchell, P. L. Spencer, J. T. Johnson, M. D., Eilts, K. W. Thomas, and D. W. Burgess : The National Severe Storms Laboratory Mesocyclone Detection Algorithm for the WSR-88D. Wea. Forecasting, 13, pp.304 ~ 326, 1998.
- 2) 室野剛隆, 田中浩平, 斎藤正人, 坂井公俊, 豊岡亮洋 : 鉄道構造物の耐震設計における危機耐性の定量評価法の提案, 土木学会論文集 A1, 第75巻, 3号, pp.336-349, 2019
- 3) 池本宏文, 高崎秀明, 藤原寅士良, 佐名川太亮, 西岡英俊 : 柱列状改良体の連結による橋台耐震補強工法に関する実験的検討, 土木学会論文集 A1, Vol.73, No.4, pp.I\_679-I\_693