

# 自然外力の急変を捉え備える防災技術

公益財団法人鉄道総合技術研究所 理事

芦谷 公稔



## 1. はじめに

日本は地理学、地質学的に見ても気象災害や地震・火山災害が多発する自然災害大国である。このような自然環境の中で、鉄道は災害を経験しながら施設の耐力を向上させ、運転規制の適正化を図ること等で災害事故を低減させてきた。しかし、近年、記録的な局所的短時間強雨、竜巻などの突風および大地震が頻発する傾向にある。これらの自然外力は時間的・空間的に急激に変化するものであるが、こうした急変する外力に対しても的確に捉え、迅速に対応して鉄道の安全性をさらに高める防災技術が求められている。

自然外力の急変を捉える技術として、気象レーダーや海底地震計などの最先端の観測技術が公的機関により構築されつつある<sup>1),2)</sup>。また、鉄道総研では、気象外力に備える技術として、気象レーダーの観測情報を用いて、約10分から数時間先の気象外力およびそれによる危険度(ハザード)を数分から10分程度で即時(リアルタイム)に予測して、列車の運転規制や乗客の避難誘導に活用する技術や、海底地震計を活用した早期地震警報システムの研究開発に取り組んでいる。

本講演では、鉄道の安全性をさらに高める防災技術として、自然外力の急変を捉え、備える防災技術についての考え方、方向性を述べる。

## 2. 鉄道における防災技術の現状と課題

東北地方太平洋沖地震による東日本大震災を踏まえ、国は国土強靱化基本計画を策定し、①人命確保、②致命的障害の回避、③被害最小化、④迅速な復旧復興を目標に定めた。鉄道総研では、基本計画RESEARCH 2020で、研究開発の方向として、大規模災害に対する強靱化や脱線対策をはじめとする「安全性の向上」を第1に定め、将来に向けた研究開発においても、「鉄

道の防災・減災技術の高度化」を最重要課題として取り組んでいる。

鉄道の防災技術は大別すると、①事前対策(予防安全)、②発生時対応、③初動対応および④復旧の4つに分けられる。これまでの自然災害対策の取り組みは主に、巨大化する傾向にある自然外力に備えるために、鉄道施設の強靱化や被災後の迅速な復旧のための①事前対策(予防安全)および④復旧に関する技術開発であった。

自然外力はこのように巨大化する一方で、2012年、2017年九州北部豪雨、2015年関東・東北豪雨、2016年北海道・東北豪雨などの局所的短時間強雨が鉄道に甚大な被害をもたらし、また、鉄道近傍での突風発生事例も頻繁に報告<sup>3)</sup>されるなど、強雨、強風、大地震などの自然外力は巨大化に加え、急激に変化する極端な顕著事象となっている。こうした急変する自然外力を捉えて、迅速・的確に対応する技術は、②発生時対応と③初動対応に関するものとなる。

鉄道における発生時および初動対応の現状は、早期地震警報システムを除くと、鉄道沿線の約10kmから数10km間隔に設置された雨量計、風速計、地震計などの観測値(点の値)が規制値を超えた場合に対象区間で徐行・停止等の運転規制を実施している。運転停止後の設備の点検等の初動対応も沿線の観測値を目安に実施している。しかし、近年頻発する局所的短時間強雨は範囲が数kmから10km程度、突風は100mから数100m程度であり<sup>4)</sup>、鉄道沿線観測点では捉えられないことが多いという課題がある。また、南海トラフの巨大地震の発生が切迫しているが、陸上の観測点では海溝型の巨大地震に対して運転規制までの猶予時間に限界があるという課題がある。

こうした課題に対応する技術として、現在、公的機関によって、気象レーダーや海底地震計の整備が進みつつある。本講演では、外力の急変を捉える技術とし

て、気象レーダーを用いた局所的短時間強雨および突風の観測・予測技術および海底地震計を用いた早期地震警報・津波警報技術を紹介します。また、外力の急変に備える技術として、ハザードのリアルタイム予測技術（リアルタイムハザードマップ）およびリアルタイムハザードマップを活用した運転規制・避難誘導方法について述べる。

### 3. 自然外力の急変を捉える技術

鉄道に強雨や強風災害をもたらす気象現象は空間的に広がりがあり、その影響を迅速・的確に判断するには、高密度な面としての観測が必要となる。そのために、ここでは、鉄道での活用が期待できる気象レーダーやドップラーレーダーについて紹介する。また、海溝型の巨大地震を早期に捉えるために整備が進む海底地震計について紹介する。

#### 3.1 気象レーダーを活用した強雨予測

気象レーダーは、アンテナから上空の全方位に渡って電磁波を放射し、上空の雨粒などの降水粒子から反射してくる波の方位と時間から雨雲の位置を、強度から降水強度を観測するものである<sup>5)</sup>。国土交通省は、全国に整備している高性能レーダー雨量計ネットワーク（XRAIN）を用いて、250mメッシュでの降雨分布情報を、リアルタイム（観測から1分程度の遅れで1分間隔）で配信している。

現在鉄道総研は、内閣府の戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）の一環として、防災科学技術研究所（以下、防災科研）と局所的短時間強雨に関する共同研究を実施しているが、その中で防災科研はXRAINのデータを用いて約2時間先までの降雨予測の方法を開発している（図1）。

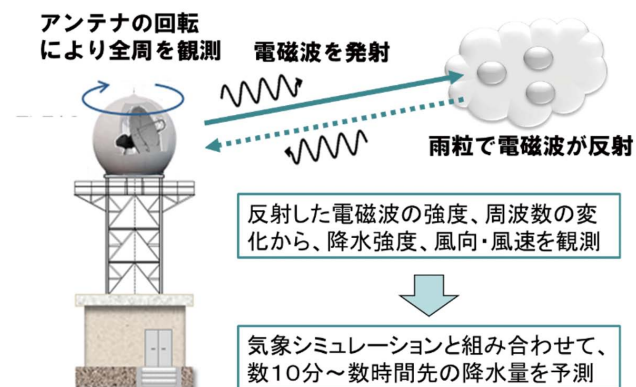


図1 気象レーダーを活用した広域降水量予測手法

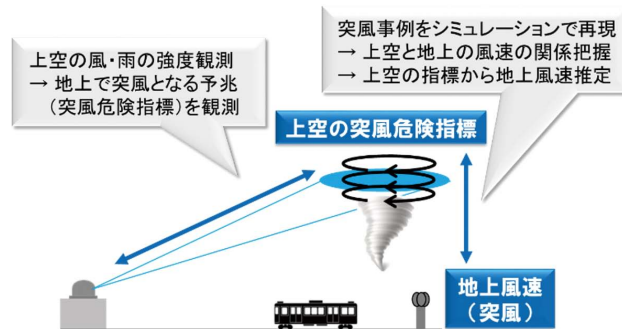


図2 ドップラーレーダーを活用した突風予測手法

#### 3.2 ドップラーレーダーを活用した突風予測

ドップラーレーダーは、アンテナから発射した電磁波と上空の降雨粒子からの反射波の周波数の違いから、ドップラー効果を利用して降雨粒子の移動速度を観測するものである<sup>5)</sup>。降雨粒子は風に流されて移動しているため、降雨粒子の移動速度を風速として検出している。

鉄道総研では、ドップラーレーダーを用いて、上空での突風危険指標の観測方法を開発している。さらに、過去の突風事例をシミュレーションし、上空の突風危険指標を再現し、再現した指標と実際の地上での突風観測情報から、上空の指標と地上の突風（風速）との関係を把握することに取り組んでいる。この関係が明らかになれば、上空の突風危険指標をドップラーレーダーで観測することで、地上の突風の発生を予測できることになる。これら一連の突風予測手法の開発を進めている（図2）。

#### 3.3 海底地震計の活用

地震の早期警報は、震源に近い観測点でP波を捉えて影響を判断し、鉄道にS波が伝播する前に警報を発するものである。P波警報発信時から鉄道へのS波到達までの猶予時間を増加させ、列車をより早く減速させるには、より震源に近い所に地震計を設置するに限る。東北地方太平洋沖地震を契機に、防災科研が日本海溝海底地震津波観測網（S-net）の整備を進めている<sup>2)</sup>。また、海洋研究開発機構が整備した南海トラフの地震・津波観測監視システム（DONET）を含め、これら海底地震計のデータを防災科研が一括管理・配信を行うこととなっている<sup>6)</sup>。鉄道総研では、防災科研との共同研究により、鉄道での活用を前提とした海底地震計のデータ通信やデータの信頼性確保、警報判断の手法を開発・提案した。警報判断手法としては、海底地震計

のデータの蓄積がまだ少ないため、複雑な処理を必要とするP波警報ではなく、シンプルなS波規定値超過による判断手法を提案している。S波警報ではあるが海底地震計はほぼ震源直上に位置するため、陸の地震計による現行の早期地震警報システムよりも早い警報が発信できる。今年度より防災科研から鉄道事業者への一部データの配信・検証試験が開始されている(図3)。また、鉄道総研では、海底地震計で得られる地震時の津波の観測データを用いた早期津波浸水域予測手法

を開発している(図4)。この手法は、予め津波遡上シミュレーションにより沿岸近傍の津波波形から津波浸水域を計算した結果を津波遡上データベース(①)に蓄積しておき、地震発生時に震源近傍の海底地震計による津波観測データから沿岸近傍の津波波形をリアルタイムで推定(②)し、①の津波遡上データベースを参照して、②から津波の浸水域(③)を推定し、列車の運転規制や乗客の避難誘導に活用するものである。

### 4. 急変する自然外力に備える技術

ここでは、急変する外力に即応して発生時および初動対応をより安全・迅速にするための技術と、被害形態を想定して施設の強靱化を図るなどの事前対策技術に分けて述べる。

#### 4.1 発生時および初動対応をより安全・迅速にする技術

##### (1) 気象災害リアルタイムハザードマップ

気象レーダーを用いた局所的短時間強雨や突風の10分程度から数時間先の予測情報に基づき、河川の氾濫・浸水や斜面崩壊、突風による車両転覆の危険度を数分から10分程度の間隔で逐次評価して2次元の地図上に表示する、リアルタイムハザードマップの作成手法を開発している。現在対象としている気象災害は以下の3つである。

##### ① 河川氾濫・浸水

防災科研が開発中の降雨予測情報(約2時間先までを約10分間隔で予測)を活用して、鉄道沿線の河川の氾濫・浸水域と水深を面的に25mメッシュで、10分

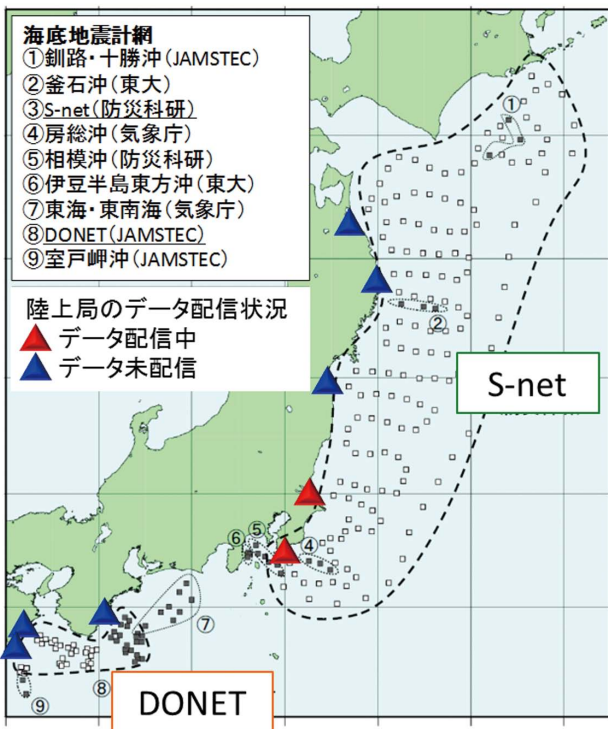


図3 海底地震計の整備状況

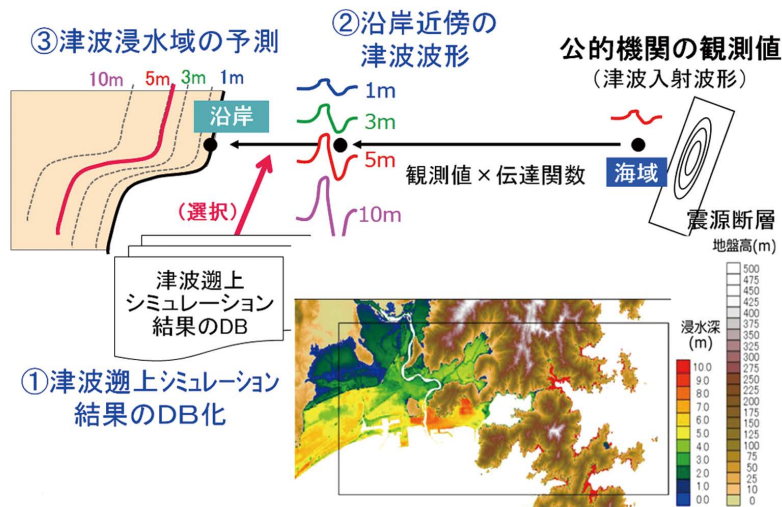


図4 海底地震計の津波観測データによる早期津波浸水域予測手法

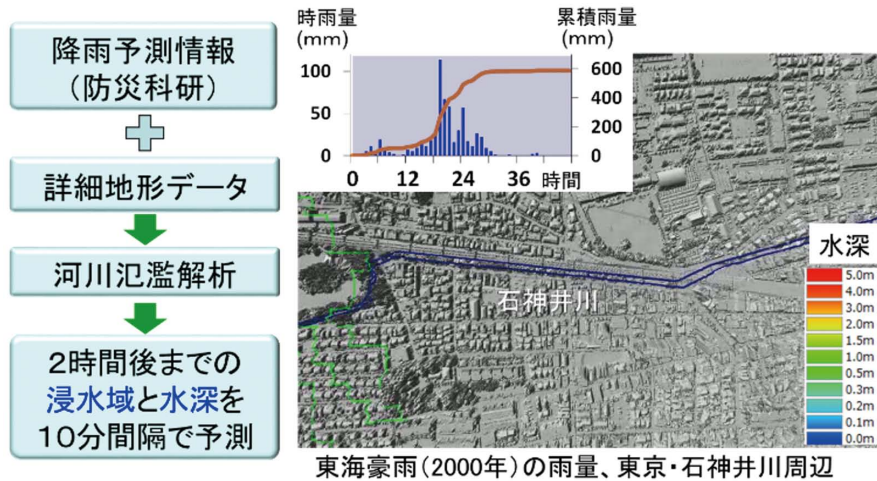


図5 河川氾濫・浸水リアルタイムハザードマップ

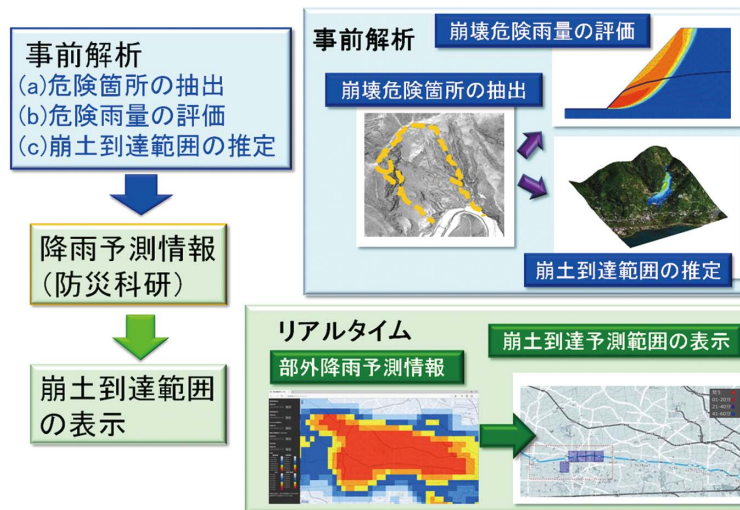


図6 大規模土砂災害リアルタイムハザードマップ

間隔で逐次予測する手法を開発している。図5は、東京都の石神井川周辺に2000年に発生した東海豪雨の降水データを降らせた場合のリアルタイム氾濫・浸水予測手法の概要を示している。東京都は図5と同様な条件で氾濫・浸水のハザードマップを詳細なシミュレーションによって作成しているが、その結果と鉄道総研のリアルタイム予測結果を比較すると、浸水域の予測は概ね25から50m程度の精度で一致していることを確認している。

②斜面崩壊による土砂災害

局地的短時間強雨などの豪雨による斜面の土砂災害の危険度評価では、(a)地形・地質条件や過去の崩壊履歴等から斜面崩壊危険箇所の抽出、(b)斜面崩壊を惹起する危険雨量の評価、(c)崩壊した際の崩土到達範囲(鉄道への影響度)の推定を行う。ここで、(c)の

崩土到達範囲の推定はシミュレーションによるが、現状では計算に時間がかかり、数分から10分程度での即時計算は困難なので、予め抽出した危険箇所ごとに(b)の危険雨量と(c)の崩土到達範囲を推定してデータベース化しておく。降雨予測情報により、(b)の危険雨量を超えると予想された場合に、崩土到達範囲のデータベース(c)を参照して、鉄道の影響度を表示する(図6)。

③突風の発生

ドップラーレーダーにより上空の突風危険指標を捉え、数分程度の即時的なシミュレーションにより地上の突風(強風)の発生場所、時刻、風速を推定し、地図上に示す方法を開発している。約10分先までの突風による強風範囲を約3分間隔で表示することを目標に取り組んでいる。



図7 リアルタイムハザードマップによる運転規制・避難誘導支援システム例

(2) 気象災害リアルタイムハザードマップを活用した  
運転規制・避難誘導

数分から10分程度で逐次更新される鉄道沿線の気象災害のリアルタイムハザードマップを活用し、鉄道における気象災害の危険度の増減を逐次把握し、列車運行情報と組み合わせて、列車を危険から回避するために最適な停止位置を求めて表示し、運転規制および乗客の避難誘導を支援するためのシステムを開発している。一般には駅に停止して乗客を避難誘導するが、駅が被災すると予測した場合や駅への退避が間に合わない場合、先行列車が前方の駅に停車している場合などは、沿線の地形、構造物、踏切等の線路状況、道路状況、避難場所の位置などのデータを踏まえ、乗客が安全に迅速に避難できる駅間での列車の停車位置や避難経路の選択を支援する情報の提供を考えている。

図7は、河川氾濫・浸水リアルタイムハザードマップによる運転規制・避難誘導を支援するシステムの試作例である。線区の浸水予測箇所へ列車を進入させない各列車の最適な停車駅を示し、停車させるとともに、先行列車が前方の駅で停車しており、駅間で停車せざるを得ない列車については、乗客が避難しやすい場所（この場合は踏切近傍）を選定して停止させている例である。

(3) リアルタイム地震情報の活用

① 早期地震警報の高度化

地震は事象発生の検知から鉄道へ影響が及ぶまでの猶予時間が極端に短い。まさに時間・空間的に外力が急変する事象の最たるものである。よって、気象災害のように鉄道周辺の外力（この場合、地震動）を予測し

てハザードをリアルタイムに評価する猶予はない。そこで、地震に関しては、従来の地震動（S波）の規定値超過による運転規制に加え、早期地震警報システムとして、地震動（P波）検知後1秒程度で震源の位置と規模（マグニチュード）を推定し、推定した規模に応じて影響範囲を経験則により判断して運転規制を行っている。現在も引き続き、P波による震源位置の推定方法やノイズ識別方法の高度化により、早期地震警報の迅速化と信頼性向上に取り組んでいる<sup>7)</sup>。

② 部外情報の活用

2007年から気象庁は緊急地震速報を配信している。この緊急地震速報を活用した鉄道の早期地震警報システムは、当初は新幹線のような自前の早期地震警報システムがないJR在来線や公民鉄等で導入が進んだが、最近では新幹線でも自前システムを補完するものとして導入が進んでいる。

また、前章で紹介した海底地震計のデータは、再配信するための第三者機関を通さずに、観測データを直接鉄道事業者が活用できるように、現在関係箇所を検討が進められている。

さらに、鉄道総研では、地震後に防災科研が公表している強震計ネットワーク（K-NET）のデータを活用して、地盤の塑性化を考慮した地震動の増幅特性など鉄道総研のノウハウを加味して、鉄道事業者が利用している地震動指標（警報用最大加速度、SI値など）を250mメッシュの面的分布図にして公開するシステム（地震情報公開システム）を開発している。地震後の早期運転再開や復旧等の支援に活用していただくことを期待して信頼性向上に努めている。

## 4. 2 事前に施設の強靱化を図る技術

### (1) 未経験な被害形態のシミュレーション

地球温暖化は確実に進行しており、今後もこれまで想定していなかった局所的短時間強雨や突風、またそれらに伴う未経験の被害形態が発生する危険性がある。また、南海トラフでのマグニチュード9の巨大地震や超高層ビルが立ち並び近代都市化した首都直下での地震が切迫している中で、未経験の地震被害の発生が危惧される。こうした未経験の被害形態は過去の経験の蓄積では想定できない。近年シミュレーション技術が高度化し、気象災害や地震災害を詳細に再現できるようになってきた。こうしたシミュレーション技術を活用して、未経験な外力に対する被害を想定し、弱点箇所を抽出し、さらに事前対策の効果を定量的に評価することが必要となる。

現在鉄道総研では、①強雨による斜面の地下水位の上昇およびそれに伴う斜面の安定性の低下(斜面崩壊の危険度)を、また、②活断層からの地震動、表層地盤での挙動および構造物の挙動や被害<sup>8)</sup>を、さらに、③地震時の列車走行状態、脱線後の車両挙動や地上設備との接触状況および軌道・車両での脱線対策の効果などを、それぞれシミュレーションする技術を開発している。

### (2) 施設の強靱化を図る技術

施設の強靱化は外力の巨大化に対応するための技術としてこれまでも研究開発に取り組んできたが、ここでは最新の技術について紹介する。

#### ①鋼桁・橋台・盛土一体化工法

橋台と盛土を一体化することで耐震性能の向上を図るとともに、鋼桁と橋台を一体化し地震時の弱点箇所となる支承部を除去することで、地震に対する強靱化を図る工法である。河川洪水の際の橋梁の桁の流出に対する抵抗を増加する効果もある。

#### ②耐地震・津波・強雨盛土構造

盛土底部をセメント改良スラブ盤で補強することで支持地盤の安定化を図り、盛土本体は面状補強材で保護し、盛土表面はコンクリート壁もしくはのり面工を施した構造を開発した<sup>9)</sup>。地震動に対する耐震性向上、長時間の津波の越流に対する強靱化および河川洪水への抵抗性も増加する構造である(図8)。

#### ③高架橋の自重補償機構

2012年の耐震標準では「危機耐性」の考え方が導入され、構造物が「想定以上の地震に対しても破滅的な被害に繋がらないような危機耐性を有することが望ましい」と記載されている。自重補償機構は、その危機耐性を実現する技術として、従来通り的高架橋の耐震

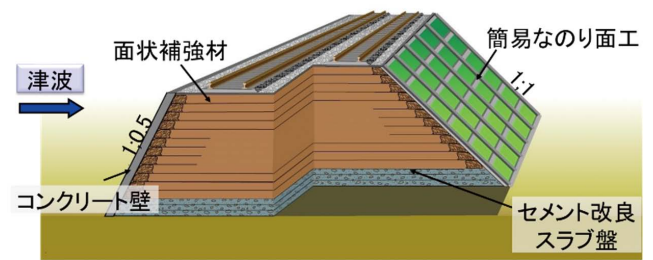


図8 耐地震・津波・強雨盛土構造

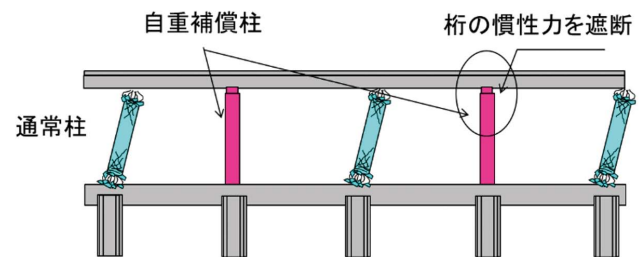


図9 高架橋の自重補償機構

設計に対して想定を超える地震動が作用し柱が破壊してしまっても落橋だけは回避するために、自重を補償する部材(柱)を予め導入するものである<sup>10)</sup>(図9)。

## 5. 防災技術のさらなる向上にむけて

### (1) 自然外力の急変を捉える技術の課題

広域にわたって高密度な気象や地震の観測を鉄道事業者が行うことは困難である。よって、引き続き、自前の観測システムの高度化は図るものの、公的機関が配信する最先端の観測情報を活用することは今後必須となると考える。この場合、必要な情報の選択、情報の信頼性の判断、信頼性向上のための処置、鉄道での利用のための情報の加工などが必要になる。鉄道での利用を前提としたこれらの技術的課題は鉄道総研が中心になり取り組んでいく。また、実際に公的機関の情報を活用する上では、観測元が個別にカスタマイズに依拠するのか、情報を加工・再配信する第三者機関を設置するのか、ユーザーが自前で個別にカスタマイズするのかなどが課題となる。これらは鉄道事業者のみではなく、活用を希望する様々な業界に共通の課題である。この課題についても鉄道事業者と連携して取り組んでいきたい。

### (2) 急変する自然外力に備える技術の課題

今後、災害発生時は、気象災害リアルタイムハザードマップや早期地震警報システムを活用した運転規制

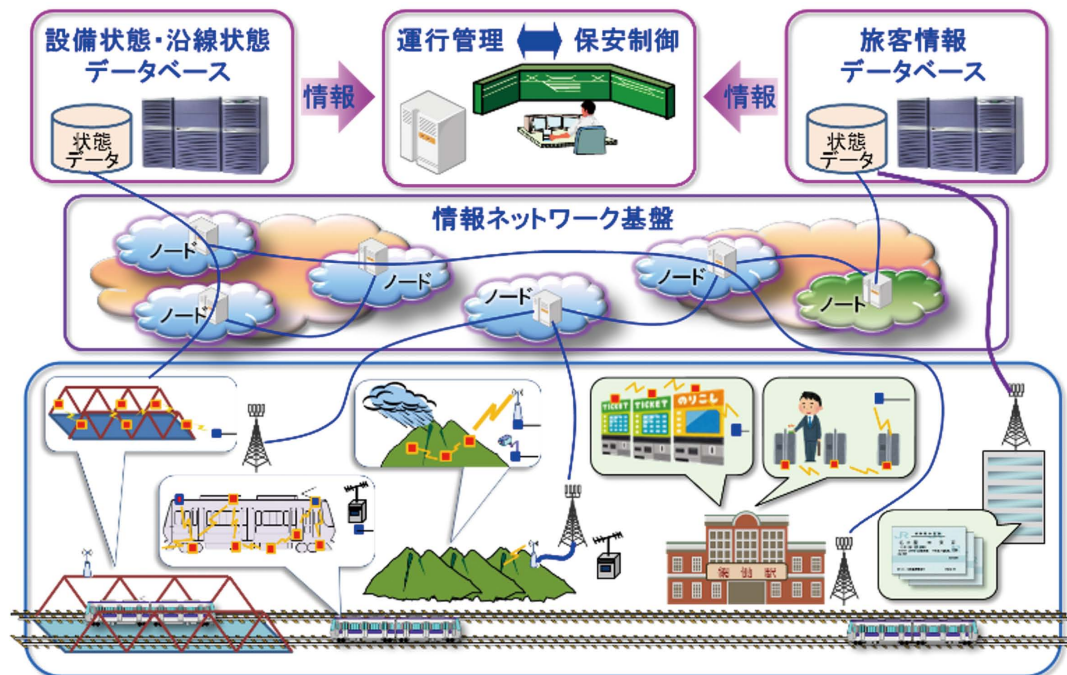


図10 情報共有による鉄道防災ネットワーク

や避難誘導が基本となると考えるが、ここでの避難誘導をさらに安全に迅速に行うための方法やそのための訓練方法も検討課題である。例えば、災害時の車両や駅での旅客の流動をシミュレーションし、避難誘導の阻害要因の抽出や避難誘導に要する時間の算定など事前の避難誘導計画の策定を支援する技術の開発が考えられる。また、異常時の避難誘導をより迅速に安全に実施するにあたり、乗務員のみではなく、乗客等に協力を要請することが効果的な場合もあると想定される。この場合、常時から乗客に対して異常時に協力要請があることを啓蒙することがどの程度効果があるのかなども検討課題である。

### (3) 鉄道防災ネットワーク

リアルタイムハザードマップを適切に活用するには、気象・地震の自前の観測情報や外部の観測情報の収集、危険度のリアルタイムシミュレーション、被災危険箇所の抽出、線路・駅・設備等の状態把握、列車運行状況、列車停車箇所での避難誘導経路の確保など、様々な系統の情報を収集して迅速かつ適切に判断することが求められる。この全ての情報を中央指令等で一元的に集約して関係箇所に指示を出すのか、もしくは全ての関係箇所でも同一の情報を共有し、各箇所が必要不可欠な対応を判断して迅速に行うのかは鉄道事業者によって異なると考えるが、いずれにしても関係箇所での同一の情報の共有が必須となる。

また、大きな被害が発生せず、強雨や強風がおさまれば運行再開となるが、この場合、運転再開可能時期が事前に予測できれば、駅での待機乗客数や列車の停車位置などの情報により最適な運転再開ダイヤをシミュレーションすることで、再開見込み時間や乗り換え案内などきめ細やかな旅客案内を行うことも可能となる。このためにも関係箇所での情報の共有が必要となる。

情報共有のための具体的なネットワークの設計は個別の鉄道事業者の運用に依存するので、一律ではないと考えられるが、鉄道事業者と連携して基本的考え方を整理していきたい(図10)。

### (4) 地域防災ネットワークとの連携

大規模な自然災害が発生すると、乗客の避難誘導は鉄道事業者の線路・設備等のみでは困難となることもある。この場合、迅速で安全な避難誘導のために周辺地域の避難経路や避難設備などの地域防災との連携が必要になる。地域に協力を求める一方で、災害時には駅設備を地域防災の拠点の一つとして協力するなど、鉄道も日頃から地域防災への連携・協力を図っておく必要がある。こうした連携強化の基盤は、防災情報の共有化であると考えられる。どのような情報の共有が有効か、情報共有のためのネットワークはどうあるべきかなど検討する課題は多いが、鉄道が地域に密着し信頼され、連携して災害に強い地域と鉄道を構築していくためにも重要な課題であると考えられる。

## 6. おわりに

近年の自然災害の外力は巨大化に加え、時間・空間的に急激に変化する傾向にあり、それらを的確に捉え、備える取り組みについて概観した。そこでキーとなる技術は、自然外力を広範囲にわたり高密度で面的に捉える最先端の観測網のデータの有効活用、その観測データに基づくりアルタイムでのハザード予測、そのリアルタイムハザードマップを用いた迅速・安全な運転規制と避難誘導のための技術である。また、これらの技術を有機的に結合して効果を最大限に発揮させるためには、多岐にわたる関係箇所における情報の共有が重要であることを示した。この情報共有は鉄道事業者内に止まらず、地域防災との連携が重要となる。これらの情報共有を実現するには検討する課題は多いが、災害に強い地域と鉄道を構築していくためにも、関係各位の忌憚の無いご意見を賜れば幸いである。

## 参考文献

- 1) 国土交通省ホームページ：川の防災情報, <http://www.river.go.jp/>
- 2) 防災科学技術研究所ホームページ：日本海溝地震津波観測網 (S-net) 整備事業, <http://www.bosai.go.jp/>
- 3) 気象庁ホームページ：竜巻等の突風データベース, <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/tomado/>
- 4) 福原隆彰, 荒木啓司, 谷本早紀：風・雨・雪の分布を把握する, RRR, Vol.73, No.7, pp.8-11, 2016.7
- 5) 中北英一：気象災害の防止に向けた気象レーダーの活用, RRR, Vol.73, No.7, pp.4-7, 2016.7
- 6) 防災科学技術研究所ホームページ：地震・津波観測システム (DONET) の移管について, [http://www.bosai.go.jp/press/2016/pdf/20160401\\_01\\_press.pdf](http://www.bosai.go.jp/press/2016/pdf/20160401_01_press.pdf)
- 7) 岩田直泰, 山本俊六, 是永将宏, 野田俊太：早期地震防災システムで迅速かつ確実に列車を止める, RRR, Vol.73, No.3, pp.12-15, 2016.3
- 8) 井澤淳, 坂井公俊, 本山紘希, 室野剛隆：鉄道地震災害シミュレータで構造物被害を予測する, RRR, Vol.73, No.3, pp.8-11, 2016.3
- 9) 渡辺健治, 中島進, 藤井公博, 工藤敦弘, 松浦光佑：粘り強い鉄道盛土構造で大地震と長時間の津波越流に耐える, RRR, Vol.73, No.3, pp.24-

27, 2016.3

- 10) 西村隆義, 室野剛隆, 本山紘希, 五十嵐晃：危機耐性を高める自重補償構造の提案と成立性, 第18回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.299-304, 2015