

# 鉄道防災技術の進化と課題

島村 誠\*

## 1. はじめに

地震、台風、大雪をはじめとする自然災害が多発する我が国の鉄道にとって、防災は古くから安全・安心な列車運行を実現するうえで重要な課題であった。自然災害から列車の安全を守るには、大きく分けて、『設備や装置の耐災害性能の強化』と、耐災害性能を超える災害営力\*が作用すると予想される場合に列車の運転を中止したり運転速度を制限したりする『災害時列車運転規制』のふたつの方法がある。すべての自然災害による危害を完全に排除できるよう、設備強化による防災対策が講じられるのが理想であるが、鉄道事業が経費を投じて解決しなければならない課題は防災以外にも数多くあるため、それはたとえ技術的に可能であっても、多くの場合、経済的には実現困難である。したがって、限られたリソースを最も効率的に活用しながら自然災害の危害を低減させるうえで、気象・地象の観測情報にもとづく災害時列車運転規制は重要な方策となっている。以下、これらハード、ソフトの両面にわたる鉄道防災技術

の進化を概観するとともに、現状の課題及びそれらに対する私ども JR 東日本における研究開発の取り組みについて紹介する。

※地震、台風などのような、自然災害を発生させる自然の力。

## 2. 命を救ったルール

災害時列車運転規制の決定手続きは、近年における社会一般の安全に対する要求の高まりと自然災害に関連する観測技術、監視体制の進歩に呼応して、かつての担当者個人の主観的判断に頼る方法から、計測データにもとづく客観的な『災害時列車運転規制基準』へと進化するとともに、運転取り扱い上きわめて厳正に遵守すべき規範とみなされるに至っている。

災害時列車運転規制の重要性を語るうえで、1968年8月18日に発生した飛騨川バス転落事故を忘れることはできない。この事故は、岐阜県加茂郡白川町の国道41号において乗鞍岳へ向かう観光バス15台中2台が、記録的な集中豪雨に伴う土石流に巻き込まれ飛騨川に転落、乗客乗員107名中104名が死亡したという、我が国バス交通史

\*しまむら まこと / JR 東日本研究開発センター防災研究所 所長

史上最悪の事故である。家族向けに企画されたツアーだったため、4家族もが一家全滅し、自分以外の家族をすべて失った遺族もいた。乗客で唯一生還した当時14歳の少年も両親と姉を失い、一周忌に事故現場近くに慰霊のため『天心白菊の塔』が建立された際、以下のような追悼文を朗読している。「お母さん、私はゆうべも夢の中でお母さんに会いました。お星様の中からお母さんの優しい顔が私を見つめていたのです。いくら呼んでもお母さんは返事をしてくれません。悲しくなって目を覚ますと私の頬は涙に濡れていました。でも今日、亡くなった人たちのおうちができました。皆さん仲良く暮らしてください。二度とこのようなことがないように、塔の中からしっかり見守ってください。」

同じ川の対岸には、当時国鉄高山本線が走っており、国道同様、集中豪雨で壊滅的な被害を受けたが難を免れた。なぜか。事故現場に近い白川口駅の駅長は、豪雨の中やってきた列車を自駅で抑止し、遅れにいら立つ乗客に詰め寄られても頑として出発を拒んだのであった。もし進行現示を出していれば、路盤崩壊か所に列車が突っ込み、こちらも大事故になったことは想像に難くない。しかしこれは、単に駅長個人の判断と実行力のみによってなされたことではなかった。当時の関係者の証言によれば、列車は名古屋鉄道管理局の定めた降雨に対する運転規制基準にもとづいて、しかるべく抑止されていたのである。

この事故をひとつの契機として、それまで高度経済成長のもと建設一辺倒だった道路行政に供用後の道路防災体制が整備され、一定量以上の雨量が記録された場合にはゲートを閉じて国道を通行止めにする事前通行規制が制度化された。また、すでにそのようなルールが地方機関ごとに定められていた国鉄でも、従来の運転規制ルールを全体的に統一された、より有効なものに改良する取り組みが行われた。

### 3. 防災情報システム

災害時列車運転規制は、雨、風、地震等の観測情報にもとづいて行われる。したがって、鉄道には昔から気象・地象の観測業務が存在したが、当初はすべて人力で行われていた。1960年頃から、自記式の観測機器が導入されるが、観測装置は新幹線をのぞいていわゆるスタンドアロンであったため、それぞれの計器が設置された駅や保線区でしか観測情報を見ることができなかった。したがって、関係者間の情報伝達は電話やファックスで行わなければならなかった。そこでJR東日本では、1990年に雨量計、風速計、地震計、橋りょう水位計等の防災観測機器をオンライン化した『防災情報システム(図1)』を開発・導入した。

このシステムにより、各観測機器の観測データは、専用回線を介して列車運行を集中管理する指令室及び関係か所の端末にリアルタイムに伝送され、観測値があらかじめ定めた、しきい値を超えると、ブザーが鳴動するとともに運転規制を発令すべき線区が表示される。現在このシステムはJR東日本の全線に導入され、当初は800か所程度であった観測機器がこれまでに約2,400か所に増加し、さらに近い将来に7,000か所にまで増設する予定である。また、同様のシステムは、JR東日本以外の多くの鉄道会社にも導入され、自然災害に対するモニタリングシステムとしてきわめて重要な役割を担っている。

### 4. 運転規制の判断指標の改良

上に述べたように、災害時列車運転規制は、そのルールや観測方法が高度なものに進化してきたが、観測情報にもとづいて災害営力の危険度を評価し、必要な運転規制を決定するための『危険指標』については、近年まで、昔からのものがそのまま使われてきた。従来の運転規制基準では、降

雨について直前1時間の雨量と降り始めからの連続雨量、地震について地表最大加速度、また、風について3杯式風速計で測定した瞬間風速が、それぞれ危険指標として用いられてきたが、いずれも慣用的な理由で使い続けられてきたものであり、災害営力の危険度を正しく表現するうえでは改良の余地のあるものであった。そこで、JR東日本では、これらの危険指標をより適切なものに改良するための研究開発を行い、その成果にもとづく新しい運転規制基準を導入した。

### (1) 雨

地盤内に蓄積されている水の量を表す『実効雨量』が、従来の時間雨量・連続雨量に比べて、降雨に起因する線路災害の発生を予測する指標として優れていることは、古くから指摘されていたが、地盤への浸み込みやすさを表現するパラメータ（半減期）の決め方などに課題があり、実用化に至っていなかった。そこで、過去25年間のJR東日本管内の降雨データ、降雨災害記録を詳細に

調査分析し、1.5、6、24時間の3種類の半減期の実効雨量を用いる新しい運転規制基準を提案した（図2）。この方法によって、場所や降雨パターンによらず妥当な運転規制決定が可能となり、安全水準を従来と同等としつつ運転規制時間を平均で約3割程度削減することができることが明らかになった。実効雨量による降雨時運転規制基準は、2007年度からJR東日本の在来線全線に導入されている。

### (2) 風

従来は、瞬間風速が規制しきい値を超過すると運転規制を発令し、規制しきい値を下回った状態が30分間連続した場合に解除するというルールであったが、規制しきい値を超過するのがほんの一瞬であっても、長時間の運転規制が発生してしまうという問題があった。そこで、統計学的な予測手法である時系列解析を用いて、過去数時間の観測風速データにもとづいて、数十分間先までの将来風速を推定する予測モデルを開発した。こ

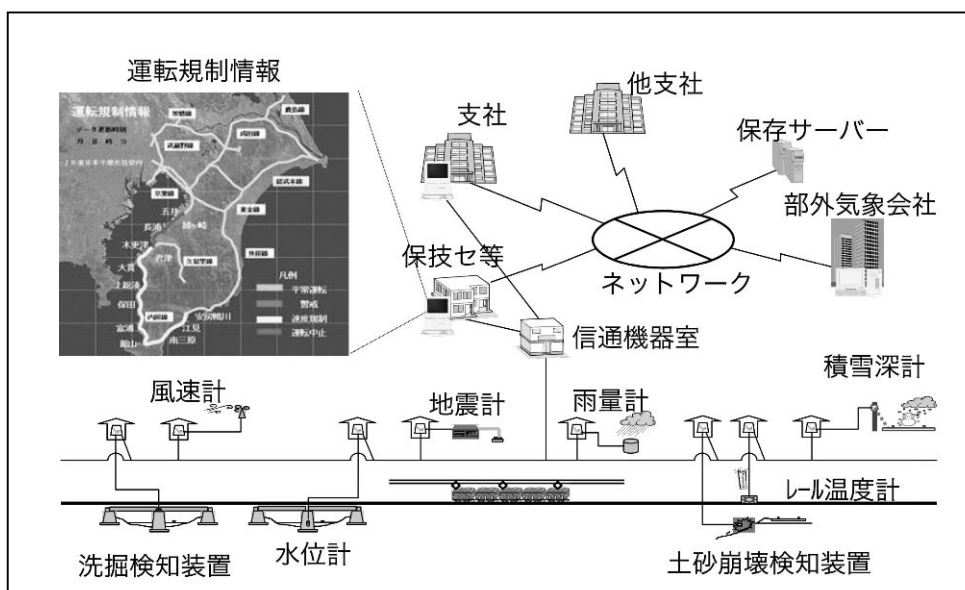


図1 防災情報システム

のモデルを用いて、現在時刻から列車が運転規制区間の通過を完了するまでの時間内に、一定の確率で観測される可能性のある風速の上限値を計算し、この上限風速にもとづいて運転規制の発令・解除を行う新しい運転規制ルールを構築した。さらに、多数の風速観測記録にもとづいて、従来の瞬間風速のみによる運転規制基準との比較を行い、新しい運転規制ルールを用いることで、安全水準を従来と同等としつつ、運転規制時間を平均で2～4割削減することができることを検証した。JR 東日本では、2005 年度からこの予測モデルによる運転規制ルールを実装した『強風警報システム』を強風発生頻度の高い線区を対象として順次導入している。

### (3) 地震

従来の地表最大加速度に比べて、スペクトル強度 (SI 値) が構造物に対する地震の加害性をより正確に表現することは既往研究により知られており、東京ガス等での先行導入事例もあったため、過去 10 年間の鉄道の地震動観測データと被害事例記録等を詳細に調査分析し、列車運転規制に用いる具体的な SI 値の規制しきい値体系を定めた。また、SI 値を用いることで安全水準を従来と同等としつつ、運転規制の発令頻度を従来の半分以下にすることができることを示した。SI 値による地震時運転規制基準は、2003 年度から JR 東日本の在来線全線、また 2005 年からは同新幹線全線にも導入されている。

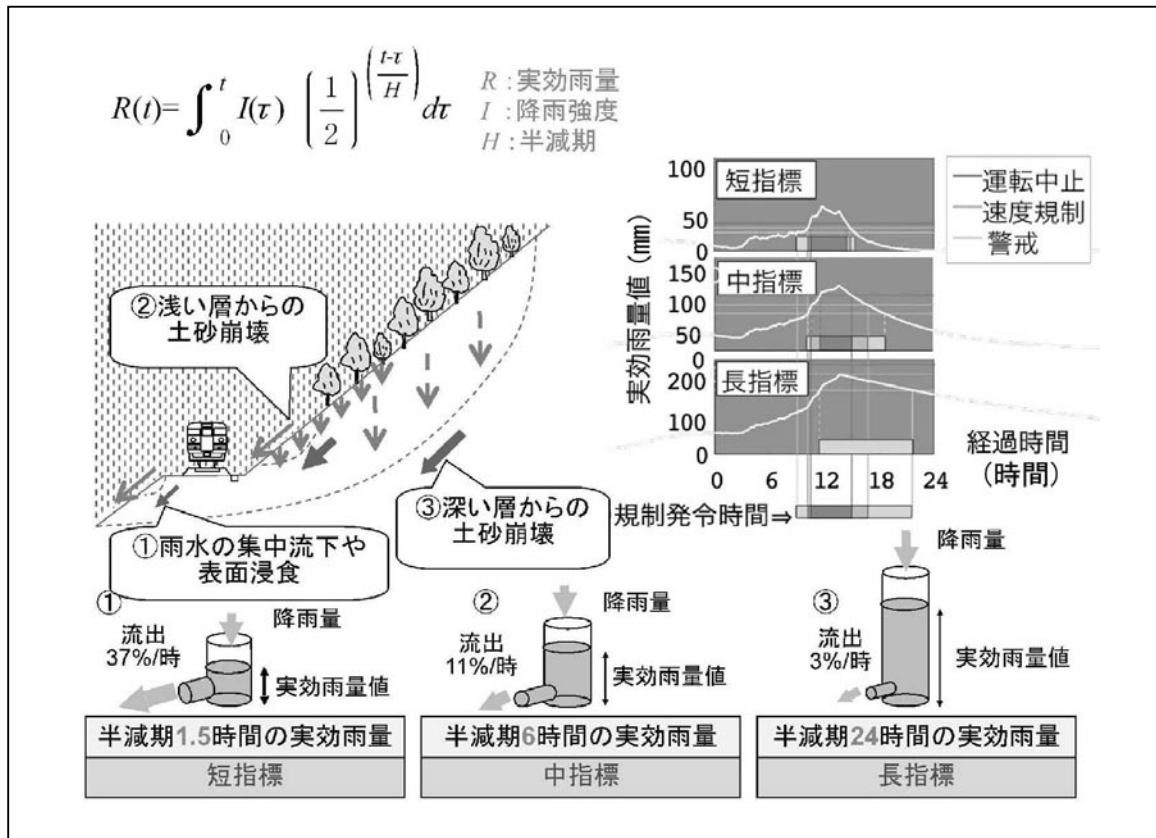


図2 実効雨量の概念図



図3 脱線した『とき325号』

## 5. 新幹線の地震対策

2004年10月23日の新潟県中越地震により、新幹線40余年の歴史上で初の高速走行中の営業列車（『とき325号』）の脱線事故（図3）が発生した。従来から、新幹線については、早期地震検知システムの導入や高架橋の耐震補強等の対策を進めてきたが、この脱線事故を受け、これらの継続的地震対策をさらに高度化ないし前倒しで実施するほか、脱線時の被害軽減策についても、国土交通省と新幹線関係JR各社、（財）鉄道総合技術研究所が参加した『新幹線脱線対策協議会』と連携をとりながら具体的な検討を進めており、引き続き対策を実施している。

### （1）土木構造物の耐震補強

1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震は、鉄道の土木構造物にこれまでにない甚大な被害をもたらした。特に、新幹線のラーメン高架橋柱には、

設計の想定を上回るせん断力（部材内部にずれを引き起こす力）による大きな破壊を生じた。この被害を踏まえ運輸省（現・国土交通省）内に設置された『鉄道施設耐震構造検討委員会』の提言を受け、JR東日本においても緊急耐震補強対策を実施してきた。緊急耐震補強対策は、南関東・仙台地域の新幹線及び在来線の高架橋のうち、兵庫県南部地震と同じ破壊形態が想定される『せん断破壊先行型』の構造物を対象とし、新幹線については活断層に近接する区間も対象とした。

その後、新幹線については緊急耐震補強対策エリア外の『せん断破壊先行型』のラーメン高架橋柱についても2008年度までの対策完了を目標として実施してきたが、新潟県中越地震で『とき325号』が脱線したか所の高架橋が、耐震補強されていたため被害が少なかったと推定できることから、あらためて耐震補強の重要性が認識された。これを受けて、耐震補強工事の計画を一年前倒して2007年度末までに完了し、さらに現在は、対象を『せん断破壊先行型』以外の高架橋に拡大して工事を実施している。また、新潟県中越地震では、従来は地震に強いと言われていた山岳トンネルが損傷したことを踏まえ、そのメカニズムの解明に取り組み、活断層と交差または近接するトンネルの耐震補強対策に着手している。

### （2）早期地震検知システムの改良

新幹線には、沿線及び太平洋岸、日本海岸に設

置された地震計が初期微動（P波）を検知し、それが大地震であると判断した場合は、送電を直ちに停止し、新幹線を緊急停止させる早期地震検知システムを導入している（新幹線は送電がストップすると自動的に緊急ブレーキが動作する）。新潟県中越地震発生時には、揺れの大きかったエリアに8本の列車が走行していたが、いずれもこのシステムの動作により地震発生直後に送電が止まり緊急停止した。これにより、脱線した『とき325号』以外の列車は、被害を受けたトンネルや高架橋に進入することなく緊急停止することができた。

そこで新潟県中越地震後、沿線地震計を増設するほか、地震計ごとに地震の規模を推定する方式から、地震の震源と規模を推定する方式に機能を向上させ、影響範囲の送電を一斉に停止する機能を追加するとともに、海岸地震計の推定時間を3秒から2秒に短縮するシステムの機能向上を図った。

### （3）停電検知装置（車両側）の設置

新幹線早期地震検知システムにより地震を検知し送電が停止されると、従来は車上のATC装置（自動列車停止装置）が停電を検知し非常ブレーキの指令を出す方式であったが、より早く列車を止める対策として、新たに新幹線各編成に『停電検知装置』を新設した。これにより、非常ブレーキの



図4 L型車両ガイド

指令を出すまでの時間を、1秒程度短縮することが可能となった。

### （4）脱線被害軽減策（L型車両ガイド）

『とき325号』の脱線では、脱線車輪と車両部品が挟み込んだレールにガイドされることにより、列車は、脱線してから停止まで約1,600mにわたって、転覆することも隣接線を支障することもなく軌道スラブ面上を走行することができた。これを受けて、脱線後の車両がレールから大きく逸脱するのを防止することを目的として、台車軸箱下に逆L字型の車両ガイド装置を設置した（図4）。この装置には、地震動による脱線そのものを防止する機能はないが、万一脱線した場合に一定以上の範囲を超えて車両が横方向に移動することを阻止する効果が期待できる。この装置はすでにJR東日本の全新幹線車両に設置を完了している。また、これとあわせ、脱線した車輪によって軌道が破壊されることなく、安全に列車をガイドするための地上側の対策についても、研究開発を行っている。

## 6. 観測システムの改良

羽越本線脱線転覆事故（5人死亡）から4年半が経過しようとしているが、この間、日豊本線の竜巻による脱線事故、北海道佐呂間町の竜巻災害（9人死亡）、東京雑司ヶ谷のゲリラ豪雨災害（5人死亡）などが立て続けに発生した。これらの苛烈気象に共通する問題として、風速計や雨量計といった従来の観測機器で捕捉することが困難であるという点があげられる。このため、それらに対応するための研究開発を行っている。

### （1）ドップラーレーダによる低層気象観測

苛烈気象に対する防災技術として、鉄道への応用について現在最も期待されているのが、レーダによる気象・大気のリモートセンシングとリアル

タイム情報処理、警報アルゴリズムを結合させたモニタリングシステムである。JR東日本では、羽越本線沿いの庄内平野一円を観測範囲とする X バンド・ドップラーレーダを設置し（図5の矢印部分）、2007年2月から試験観測を開始するとともに、（独）鉄道建設・運輸施設整備支援機構の『運輸分野における基礎的研究推進制度』により、気象庁気象研究所、（財）鉄道総合技術研究所、京都大学防災研究所と共同で、線路近傍に発生する竜巻やダウンバーストを検知する手法の開発に向けた研究を行っている。

## （2）3次元雨量計

ゲリラ豪雨の観測が難しい理由として、雨域が小さいことのほかに、横殴りの強雨になると通常の雨量計では捕捉率が低下するため、着地水量を過小評価してしまうことがあげられる。この問題を解決するため、図6のような『3次元雨量計』の開発を進めている。現在の降雨時運転規制の規制しきい値は、通常の雨量計で測定された雨量記録を根拠として定められており、3次元雨量計の観測値とは互換性がないため、今すぐこの雨量計を運転規制用雨量計として使うことはできない。将来、観測データを蓄積して、適切な規制しきい値の設定が可能になれば、降雨に対する斜面災害の発生危険度のより正確な評価を反映した、合理的な運転規制が可能になると考えられる。



図6 3次元雨量計（富士山測候所での観測）

## 7. おわりに

鉄道は、今日一般に最も安全な交通機関のひとつだと考えられているが、歴史を振り返ると、大規模な事故がまれに発生しており、類似の事故を二度と発生させないように対策を講じることにより、安全性を維持向上させてきた。防災の分野についても、阪神淡路大震災、新潟県中越地震での新幹線の脱線、羽越線事故を経験してつくづく思うのは、起こる可能性のあることは、いつかは起こるということであり、かつ、それらに対して事前に対策を打つことの難しさである。つまり、これまでの鉄道防災技術の進歩は、あらかじめ立てた計画に沿ったものというより、ランダムな外的事象に対する応答としてのケースバイケースの意思決定の累積によって達成されてきたという側面が強い。そのような意味を込めて、本稿の表題に『進化』という言葉を用いた。今後、温暖化の進行に伴う苛烈気象の頻発や首都圏直下地震が想定される中で求められているのは、これまでのリアクティブ（受け身の）な鉄道防災技術を少しでもプロアクティブ（先取りの）なものに変えていくための取り組みだと考えている。



図5 余目駅ドップラーレーダ