

鉄道の安全・安定を脅かす自然災害とそれらへの対応

島村 誠 (JR 東日本 防災研究所)

1 はじめに

自然災害に対する安全の確保の方法に関する鉄道の大きな特徴のひとつは、運行の可否決定における地上サイドの役割のウェイトが乗務員やドライバーの判断に比較して大きいことである。そして、その決定手続きは、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、雨量計、風速計、地震計などの計測データとあらかじめ定めた客観的ルールにもとづく方法(『災害時列車運転規制基準』)へ進化するとともに、運転取り扱い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。一方、従来の方法は、ルールの規定内容そのものには科学的根拠が乏しく、またその決定のまずさのために、運転規制が往々にして必要以上に大きな輸送障害を招く原因ともなっていた。本稿では、これらの運転規制基準の国鉄末期までの成立経緯およびそれらの抱える問題点に対する JR 東日本における近年の技術的改良事例について紹介する。

2 災害時列車運転規制ルールの成立経緯

2.1 雨

2.1.1 観測体制の整備

1965 年前後から、雨量観測計器の導入、警報の自動化および降雨災害の予防措置としての運転規制基準の整備が全国的規模で進んだ。たとえば、首都圏の在来線については、『関東支社運転取扱基準規程(昭和 40 年 3 月)』が、時雨量警報器の設置、整備および運転規制を必要とする降雨量の基準値について定めている。

2.1.2 『降雨に対する運転規制基準作成要領』の制定

1968 年 8 月 18 日、局地的豪雨のため飛騨川沿いの国道に発生した土石流により観光バス 2 台が転落し、乗客、乗員 104 名が死亡するという大事故が発生したが、この時、並行する国鉄高山線では、名古屋鉄道管理局の運転規制基準にもとづいてあらかじめ列車の運転が中止されていたため事なきを得た。また、同年 9 月 30 日には、富良野線第一富良野川橋りょうが、折からの増水による橋脚洗掘のため貨物列車の通過中に倒壊し、機関車乗務員 3 名が死亡、車掌 3 名が負傷するという事故が発生した。

これらの事故を契機として、降雨時における適切な列車運行管理の重要性が改めて認識され、国鉄では、自然災害に対する運転規制および災害警備の規則ならびに体制の全般について全社的な見直しが行われ、その成果をもとに、1972 年 9 月には、運転規制に用いる雨量観測方法、雨量指標、雨量の規制しきい値等について規定した『降雨に対する運転規制基準作成要領』が制定された。ここで示された運転規制および災害警備に関する統一的な実施ルールの骨子は以下のとおりである。

- 規制発令は沿線雨量計による観測雨量にもとづいて行うこととし、その判断基準となる雨量値(規制しきい値)は、区間毎に斜面・のり面等の過去の耐降雨実績データ等にもとづいて定めておく。
- 警報種別は、警備と運転規制とし、運転規制に速度規制および運転中止の二段階を設ける。
- 雨量の軽量は時雨量および連続雨量とし、これらの組み合わせによって運転規制等の発令ルールを定める。ただし連続雨量は、雨の降り

方が断続的な場合、ひと雨の切れ目をどこにとるかによって数値に大きな違いが生じるため、およそ半日以内の中断はひと雨の範囲内とみなすこととする。

- 運転規制区間は駅間または数駅間を単位として設ける。

これにもとづいて1973年には各管理局において、線区の防災特性、降雨特性、災害歴等を勘案した運転規制基準の一斉見直しによる適正化が行われた。また、この要領の制定とほぼ同じ時期に自記雨量計の導入が進められ、これにともなって連続雨量は、上述の一雨の始まりをその前の雨と区別するための基準となる降雨中断時間を正確に12時間として算出し、運用されるようになった。これらの施策の導入の結果、それまで年平均約9件であった降雨災害による列車脱線事故発生件数は、1974年以降1986年までの期間では、約3件へと大幅に減少した[1]。

2.1.3 長雨に対する運転規制の見直し

1985年7月21日、能登線古君・鶴川間において築堤崩壊により旅客列車が脱線し、乗客7名が死亡するという重大事故が発生した。崩壊の発生前の12日間の雨量は累計で537mmという記録的な数値(再現期間33年相当雨量)に達していたことから、この築堤崩壊は、断続的な降雨によるものと推定されたが、崩壊発生時刻には観測雨量は運転規制発令基準値に達していなかった。調査の結果、その期間の途中に12時間を超える降雨中断があったため、連続雨量としてはその降雨中断後の雨量のみがカウントされていたことが判明した。

この災害を契機として、従来の要領に定めた連続雨量および時雨量によって適切に危険性を評価することができない長雨に対する防災対策と運転規制のあり方について、部外の学識経験者を交えた『降雨時の災害防止に関する研究委員会』を設けて審議が行われた。その結果、能登線災害と同様な長雨による崩壊が発生すると考えられる軟弱地盤上の粘性土築堤等を『長雨重点警備箇所』として指定し、これらの対象区間に対しては、暫定的に、従来の運転規制に加えて、一雨の降り始めを定義する中断時間

の長さを48時間とする『累積雨量』を危険指標とする運転規制基準(『長雨の影響が考えられる重点警備箇所の運転規制基準の作成方及び取扱方(案)(昭和61年5月施設局土木課・保線課)』)を定めるとともに、この規制規則に対応した降雨量算出、警報機能を備えた雨量測定警報装置の配備が行われた[2][3]。

JR各社においては、以上に述べた国鉄時代の基本的な考え方を踏襲しつつ、さらに地域や線区の特徴をよりきめ細かく加味した独自の運転規制基準が採用されている。



図1 能登線事故

2.2 風

2.2.1 余部橋りょう事故の発生

1986年12月28日、山陰本線・余部駅間の余部橋りょう(1912年完成、長さ310m、高さ41m)上において、風速30m/secをこえる強風により、速度約55km/hrで運転中の臨回客第6535列車(ディーゼル機関車1両、客車7両編成)の全客車7両が脱線、橋りょう下の水産加工場および民家上に転落し、同工場の従業員5名および車掌1名の計6名が死亡、同工場の従業員3名および列車乗務中の日本食堂(株)社員3名の計6名が負傷するという事故が発生した。この橋りょう上における事故当時の風速記録は第7号橋脚上に設置されていた風速計で約33m/secであった。この事故の原因を技術的に

解明し、適切な対策を樹立することを目的として、学識経験者を含めた『余部事故技術調査委員会』が1987年2月9日に設置され、調査、検討が進められることとなった。

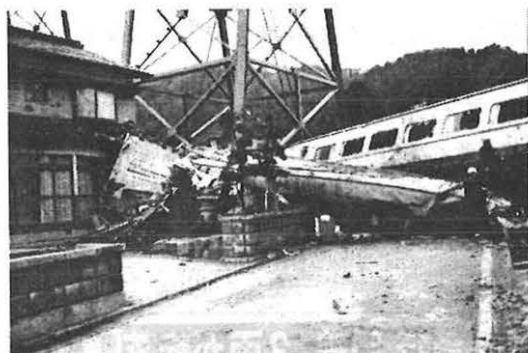


図2 余部橋りょう事故

国鉄の民営分割にともなう新会社のひとつとして発足したJR東日本では、日本国有鉄道運転取扱基準規程に代わるものとして『運転取扱心得（昭和62年4月社達第43号）』を制定し、豪雨、雪、強風、地震など災害時における細部の取扱いを『災害時運転規制等手続（昭和62年4月安達第4号）』として別に制定したが、強風時の運転規制等の取扱いについては従前の内容を変更していない。また、東北・上越新幹線の運転取扱いについて『新幹線運転取扱心得（昭和62年4月社達第44号）』を制定し、災害時における細部の取扱いを『新幹線災害時運転規制等手続（昭和62年4月安達第10号）』として別に制定したが、在来線と同様、強風時の運転規制等の取扱いについては、従前の内容を変更していない。

前述の余部事故技術調査委員会の検討の過程および最終報告書[5]を踏まえ、JR東日本においては強風時の運転取扱いおよび関係設備の整備について、次のように決定されて現在に至っている。

2.2.2 平均風速から瞬間風速への移行

従来、風速計の設置されていない停車場においては、気象庁風力階級表を使用して目測により風速（平均風速に相当）を求めていたため、規程に定めてある風速は平均風速であるものとして運用され、風速計で計測した瞬間風速も10分間の平均風速に換

算して使用していた。これに対して、余部事故技術調査委員会の検討の過程において、風速が列車または車両の転覆に大きな影響を与えるのは瞬間風速であり、運転規制は平均風速ではなく瞬間風速によって行うべきであるとの決定がなされた。このため、JR東日本では、管内の風速計がすべて瞬時値発信式となっていることを確認した上で、1987年10月から風速計で計測した瞬間風速をそのまま運転規制に用いることとし、また、風力階級表を使用して目測により風速を求める場合には、風力階級表が平均風速に相当するものであることを考慮し、一段高い風速階級へ読み替えて使用することとした。

2.2.3 運転規制解除に関する『30分間ルール』の導入

従前の10分間平均風速の場合には、風速が規制値に達したら運転規制を発令し、規制値を下回ったら解除するという運転規制ルールが採用されていたが、これをそのまま瞬間風速に適用すると、短時間の風速変動によって運転規制の発令、解除が頻繁に交替するため、運転取り扱い手続がこれに追従できなくなる恐れがある。そこで、JR東日本における新たな社内ルールとして、運転規制の発令は、従来どおり規制風速に達した時点で行うが、解除は、風速が規制値未満となり、かつ一定の待機時間が経過した後に行うこととした。

この待機時間を長くすると、風速が規制値を超過した際にすでに運転規制が発令されている確率が高まり安全性が向上する一方、運転規制の継続時間が増大する。逆に待機時間を短くすると、運転規制の継続時間は減少するが、安全性が低下する。そこで、これらのトレードオフの関係を多くの風速観測データについて調査し、その結果にもとづく妥当な値として、待機時間は30分間に決定された。そのため上記社内ルールは、通称『30分間ルール』と呼ばれるようになった。

2.2.4 『早目運転規制区間』の導入

従来、前述の國枝式によって算出された車両の転覆限界風速が、列車の停止基準風速の主たる根拠とされてきたが、余部事故後に車両模型風洞試験の結果を用いて余部橋りょう上の14系中間車両の転覆

限界風速を計算したところ、約 32m/sec という数値が得られ、従来の標準的な停止基準風速である 30m/sec に対し、極めてわずかな余裕しかないことが明らかになった。また、國枝式では、転覆限界風速は車両の属性と走行状態（速度とカント）にのみによって決まると仮定されているが、風洞試験の結果、線路構造物や周辺地形にも影響を受けること、特に車両が桁高の大きい上路鉸桁の橋りょうや高築堤上にあるときには、横風によって車両により大きな抗力が働くため、平坦地上のときと比較して転覆限界風速が小さくなることが明らかになった。さらに、転覆限界風速に対する停止基準風速の余裕については、風速の時間的な変動を考慮する必要がある、余部事故の時のように風速が急激に増大する恐れのある場合には、普通の場合より『早め』に（つまり低い風速で）運転中止を行う必要があることが指摘された。

そこで、橋りょうの構造、地形等環境条件および過去の風速記録等から、一般の箇所より早めに運転規制を行うことが望ましい箇所（『早目運転規制区間』と呼称）については風速 25m/sec 以上で、その他の区間（『一般規制区間』と呼称）については風速 30m/sec 以上で列車の運転を中止、また、運転中止の風速値よりも 5m/sec 低い風速値（早目規制区間では 20m/sec、一般規制区間では 25m/sec）で、列車の運転速度を 25km/hr 以下に規制することとした。

なお、2005 年 12 月 25 日に発生した羽越線事故に対する当面の対策として、在来線の一般規制区間については、それぞれの規制区分の発令風速を 5m/sec ずつ引き下げ、早め規制区間と同じ値とした。

2.3 地震

2.3.1 地震計の導入

従来の人手による情報伝達方法では、震度の確認までに時間がかかるので、措置が遅れるきらいがあった。また、昭和 40 年代に入ると、CTC 化等によって長い区間わたって無人駅が続く場合が生じるようになり、それらの箇所に対して、駅長の代わりに地震動の大きさを観測する手段が必要となった。

そこで、1971 年 9 月の大規模な組織改正（土木第二次近代化）を契機に、それ以前から東海道新幹線に導入されていた早期地震検知システムの考え方に倣って、地震指示警報器が在来各線に設置されるようになった。これは、揺れの加速度を検知する簡易地震計を運転取扱い駅に設置し、20、40、80Gal の 3 段階の加速度レベルを色灯で区分し、かつ警報音を発する警報器を地震計を設置した駅の事務室に置いて、点灯した色の別に応じて運転規制を発令するものである。

これらの簡易地震計は、当初、機械式の感震部、記録器をもつものが使われていたが、逐次、サーボ式加速度計を感震部とする電気式のものに更新され、観測データを指令室等へオンラインで伝達することが可能となった。また地震時に被害が予想される橋りょう、トンネル、長大斜面等には、地震計と連動した特殊信号発光器を設置し、その構造物の強度に応じた加速度の規制しきい値により地震時に列車を現地で停止させるシステムが導入された。

2.3.2 最大加速度の規制しきい値

地震計で観測した最大加速度に対する運転中止の規制しきい値は、前述の旧気象庁震度階級解説表に示された震度の加速度範囲 80~250Gal の下限値にもとづき 80Gal と決められたものと考えられる。この加速度範囲の算定根拠は次の河角式である。

$$\text{震度} = \log_{10} \text{最大加速度} + 0.7 \quad (1)$$

2.3.3 地震動の観測仕様

地震計は、機械式から電気式地震計に更新されるのにもなって短周期成分に対する感度が向上し、設置台数も増加したために、同じ地震動に対して昔に比べて大きな加速度値を表示するようになった。これにもなって、河角式は現在の地震計による地表最大加速度と乖離するようになった。そこで 1975 年には、連続した運転規制区間を受け持つ地震計の設置間隔を約 40km とする基本方針が示された。また、従来、計測対象周波数範囲が明確にされていないため、地震計の感度の向上にもなって構造物の被害と無関係な高周波成分の揺れによりむや

みに大きな最大加速度が記録される事象が頻発したことを受けて、1984年には、運転規制に用いる観測加速度が構造物の震害の程度を適切に判断する指標となるよう、計測対象周波数範囲を0.1～5Hzに制限した新しい地震警報記録装置(NEWS)の仕様を日本国有鉄道規格に定めた。

2.4 東海道新幹線の早期地震検知システム

一定以上の地震動を検知した場合に電車線への送電を停止する機能を備えた制御用地震計により地震発生を検知と列車の緊急制動を瞬時にかつ自動的に行うことを目的とした早期地震検知システムは、構想としては東海道新幹線の計画時点にすでに存在したが、1964年10月の開業時点においては実際の導入に至らず、当初は簡易警報地震計を各保線所12箇所に設置し、地震発生時に地震動の大きさを係員が確認して必要な運転取扱いを行っていた。東海道新幹線への早期地震検知システム導入のための検討が具体的に始まったのは1964年6月23日の新潟地震の発生以降であり、1965年に至って具体的な仕様が決定された。

このシステムは、一定加速度以上の地震動を検知すると瞬時に送電を停止して列車に緊急制動をかける制御用地震計と、総合指令所(CTC)に地震発生を表示させる情報伝達系からなり、1966年12月9日から使用開始された。制御用地震計は40Galおよび80Galの2つの加速度レベルのものが、東海道新幹線の全25箇所の変電所に設置されており、1箇所の変電所においてそのどちらかが作動した場合に当該変電所と両端の隣接変電所の遮断器が開放され、上下線とも平均約40kmにわたる区間内の列車を停止させる仕組みとされた。また、列車停止後の取扱いは、検知地震動レベルが40Gal以上80Gal未満(40Gal警報のみ作動)の場合には、5分間の自動停電の後、CTCの指示により30km/hrの速度で運転再開、このとき前頭車に添乗した保線および電気係員が線路と架線状態を点検するとともに車上の動揺測定を行い、異常が無ければその後列車は70,160,210km/hrと順次速度を向上することとされた。

また検知地震動レベルが80Gal以上(40Gal,

80Gal警報ともに作動)の場合には、列車停止区間の線路、架線および橋りょう等を地上から一斉点検した後、異常が無ければ上記40Galの場合と同様に順次速度を向上しながら運転再開することと定められた。

2.5 東北新幹線の早期地震検知システム

東海道新幹線より約18年遅れて開業(大宮～盛岡間)した東北新幹線には、沿線に設置された地震地震計で列車を制御する沿線検知システムと海岸線に設置された地震地震計で列車を制御する海岸線検知システムの二つのシステムの組み合わせで構成される早期地震検知システムが導入された。沿線検知システムは沿線にある変電所、き電区分所(SP)、補助き電区分所(SSP)に制御用地震計を各一台設置(約20km間隔)し、40Gal以上の地震動を検知すると、き電を停止し列車を自動的に止めるとともに中央の総合指令所および各地区指令所に地震の最大加速度を表示するシステムである。

また海岸線検知システムは、東北新幹線の線路が主として内陸部に位置していることに着目し、太平洋岸に置いた地震計で沖合いに震源をもつ地震を検知し地震の伝播と電気的な情報伝達の時間差を利用して沿線検知のみの場合と比較してより早期に列車を停止させることを目的として導入されたものである。海岸線検知システムの検知点は、東北地方の沖合いに発生した過去の被害地震群の位置にできるだけ近く、また新幹線沿線からできるだけ離れ、かつなるべく等間隔に配置されるよう配慮して、八戸、宮古、大船渡、金華山、相馬、いわき、銚子、三浦半島の8地点が選定された。

沿線検知、海岸検知ともに各検知点には制御用地震計と表示用地震計を各1台設置し、それぞれの検知点は隣接検知点までの区間の中間付近までの数箇所の変電所を受け持ち範囲として制御するように定められた。これらの地震計の危険指標、規制しきい値、列車制御方法、および列車停止後の取扱いについては、東海道新幹線と同様である。

3 運転規制決定方法の定式化

以下の各節において従来の災害時運転規制方法の課題およびそれらの改良方法について論じるうえで次のような定式化を行っておくことが有益である。

われわれは、列車運行に対して危害を与える外力の観測を行い、そのデータを変換して求めた危険指標の値 v にもとづいてあらかじめ定めたいいくつかの選択肢（たとえば、運転中止、速度規制、平常運転）の集合 A の中から確率 P でいずれかの行動 a をとるものものとし、 $P(a|v)$ を『決定関数』と呼ぶ。外力の作用の結果として生じる（運行可否の）状態 θ を、生じうる状態全体を定義域とする確率変数 Θ の実現値とする。

$\Theta = \theta$ のときに行動 $a \in A$ をとれば、 $L(a, \theta)$ という非負の『損失』が生じるものとし、この L を損失関数という。 L の構成要素として運転規制を発令することによって生じる『費用』と解除することによって生じる『危害』を考える。費用と危害はそれぞれ適宜の数値的尺度で計量されるが、一般に相互には共通の尺度で比較できない。

費用の期待値を増加させることなく危害の期待値を減少させる、あるいは危害の期待値を増加させることなく費用の期待値を減少させる、もしくはこれら両方の条件を満たすような決定関数を定めることを『運転規制基準を改良する』という。

4 決定関数の冗長化に関する考察

上の各節に述べた雨、風および地震に対する列車運転規制基準の成立と変遷の経緯は、次のような共通の特徴によって要約することができる。すなわち、まず非常に古い時代には、体感にもとづく災害営力評価量（旧震度階や風力階級など）が危険指標として用いられ、決定関数は人間の主観的判断に依存した。次いで、これらを計測にかかわる技術的、経済的制約に配慮しつつ数値に置き換えた計測量を危険指標とし、これに既往の災害事例の経験にもとづく規制しきい値を定めた決定関数によって運転規制選択肢を一意に決定するより客観的な運転規制基準が成立した。さらに、これらの基準は、主として

大きな被害をともなう重大事故の発生を契機として、時間の経過とともに漸次安全性の高いものに更新されて現在に至っている。

その際、類似事故の再発防止の観点から、安全性改善の期待効果に対する理解が得られやすいこと、および従来の基準からの迅速、容易な移行が可能であることを最優先とする実務上の要請によって、基準の規定内容の更新は、『決定関数の冗長化』すなわち、危険指標そのものには変更を加えず規制しきい値のみを安全側へ変更すること、あるいは新たな観測仕様や危険指標およびその規制しきい値を追加し、従来のものと重複して適用することによって行われるのが通例であった。以下はそれらの事例の一部である。

- 長雨に対する運転規制基準の導入
- 平均風速から瞬間風速への移行、『早め運転規制区間』の導入
- 東海道、東北・上越各新幹線の早期地震検知システムの導入と機能強化

これに対し、危険指標そのものを変更することによる運転規制基準の更新は、NEWS 地震計の導入などごくわずかな例があるのみである。

決定関数の冗長化の結果、運転規制基準が更新される度に、災害の『見逃し』（運転規制が発令されていない状態で発生する災害）は減少するが運転規制の『空振り』（災害が発生しない状態で発令される、結果的に不必要な運転規制）が増大するという新たな問題が顕在化するようになった。従来、これを解消あるいは緩和するためには、設備強化による耐災性能向上策を施したうえで、従来の危険指標の規制しきい値を緩和することが通例であったが、多額の経費が伴うため、大々的に採用することは困難であった。

決定関数の性能として、運転規制に伴う災害の見逃し、すなわち、危険側の過誤が少ないこと（捕捉性）および運転規制の空振り、すなわち、安全側の過誤が少ないこと（濾過性）は、ともにいわば車の両輪というべき重要な要件である。これらのふたつの要件（これらふたつを総称して『警報性能』とよ

ぶ。)は、同一の危険指標のもとでは相互にトレードオフの関係にあるため、両者を適切な水準で均衡させるために妥協的な意思決定が求められる。かつての線路設備の耐災性能が低く災害の発生頻度が高かった時代においては、捕捉性が高いことが最優先に求められた。また、捕捉性を向上させることは、濾過性を犠牲にすることが許容されるのであれば決定関数の冗長化によって容易に実現できる。一方、捕捉性を悪化させずに濾過性を改善するには、危険指標そのものを変更する必要がある。加えて、その効果を検証するには、災害発生時の危険指標値のみならず災害非発生時を含めた長期間にわたる危険指標値のデータを参照する必要がある。また、特に運転規制基準の変更が重大事故の発生を契機として、類似事故の発生に対する社会の危機感が大きく増幅している時期に行われる場合、決定関数の冗長化によって発生することが当然予想される運転規制頻度および時間の増大は、それが差し迫った現在のコストではなく将来のコストであるために、正当に評価されないか、あるいはまったく無視されることがしばしばであった。このような理由により、運転規制の濾過性の向上という課題はこれまで往々にして等閑視されてきた。しかし、設備の耐災性能の向上によって災害そのものの発生頻度が大幅に減少したために、運転規制の捕捉性をさらに向上させることの対する必要性は相対的に低下し、加えて輸送の安定性、定時性に対するニーズの高まりと相まって、運転規制の濾過性の改善が、近年とくに重要な課題として認識されるに至った。

5 雨に対する運転規制基準の改良

5.1 従来の基準の課題

従来の降雨時の運転規制で用いられてきた時雨量と連続雨量のふたつの雨量指標の組み合わせは、古い時代から慣習的に用いられていた経験的方法を継承したものであり、危険指標としての妥当性に関する科学的な根拠は薄弱であり、その数値についても、かつての線路班時代の精度の低い人力測定を前提とした概略的なものであると解釈されていたので、当初は、規制しきい値は必ずしも絶対的な基準

とは見なされず、運転規制の発令・解除は運行責任者の臨機応変の判断によって行われていた。しかしながら、近年におけるルールの厳正化にともない、運行責任者個人の判断を排除した機械的な操作にもとづいて運転規制の発令・解除を実施するように義務付けられた結果、危険指標そのものに内在する問題点が顕在化することとなった。特に連続雨量は、12 時間以上の降雨中断時間の有無によってひと雨を定義することに起因して、雨の降り止み時刻の僅かな違いによって指標値に大きな差が生じ、そのために運転規制の解除が不必要に遅延するなどの事例がしばしば生じるようになった。

5.2 実効雨量の導入

JR 東日本では、このような問題を解決するため、国鉄時代を含め過去 25 年間の降雨災害事例および雨量データにもとづいて降雨災害の発生と降雨との関係について研究し、時雨量・連続雨量のかわりに一定の半減期（時間の経過に対する降雨の貯留量の減少率）に対応する雨量積算値である『実効雨量』を用いることで従来法の問題点を改善できることを明らかにした。

降雨を入力信号、ある領域の物理系を伝達回路とする線形システムを想定すると、出力信号は、

$$O(t) = c \int_0^t I(\tau) \psi(t - \tau) d\tau \quad (2)$$

で表現できる。ここで、 $O(t)$ は時刻 t における出力信号、 $I(\tau)$ は時刻 τ における降雨強度、 ψ は、インパルス応答、 c はスケーリング定数である。この式において $\psi(t - \tau)$ に時間あたり一定の減少率を表現する指数関数を用いた危険指標が実効雨量である。これは、現在時刻に対して直前の降雨ほど影響が大きく、時間を遡るほど影響が小さくなるということを表すために考案されたもので、感覚的に理解しやすく、雨の降り始めをどこにとるかという厄介な問題も避けられるため、国土交通省の土砂災害警戒避難基準に取り入れるなど多用されている [6]。実効雨量の一般式は次のとおりである。

$$R(t) = \int_0^t \exp(-\lambda(t - \tau)) I(\tau) d\tau, \quad (\lambda > 0) \quad (3)$$

ここで $\exp(-\lambda(t-\tau))$ は、降雨作用の影響が降ってからの経過時間に対して一定の割合で減少することを表現する係数である、また、降雨データが等間隔 Δt 時間ごとの降雨量の時系列 $\{y_0, y_1, \dots, y_i, \dots\}$ として得られている場合、(3) 式は計算に便利な次の漸化式の形に書くことができる。

$$R(i) = y(i) + \exp(-\lambda\Delta t)R(i-1) \quad (4)$$

底の変換および $\lambda = \frac{\ln 2}{H}$ なる置換を用いると、(4) 式は次のように変形される。

$$R(t) = \int_0^t I(\tau) \left(\frac{1}{2}\right)^{\left(\frac{t-\tau}{H}\right)} d\tau \quad (5)$$

この式から明らかなように、 H は降雨作用が半分の値に減少するまでの時間（半減期）をあらわす。

実効雨量を用いた新しい運転規制基準では、半減期として 1.5 時間、6 時間、24 時間の 3 つの組み合わせを用いることとし、3 種類の半減期の実効雨量のいずれかが規制値を上回ったら運転規制を発令し、それらすべてが規制値を下回った場合に運転規制解除のための手続きに着手することとしている [7]。

JR 東日本では、2008 年の実効雨量による新しい運転規制の在来線全線への導入以降、災害発生事例との関連において、新しい運転規制基準の効果の検証事例が蓄積されつつあるが、今後とも災害捕捉性や運転規制による輸送影響の状況を確認しながら、個々の運転規制区間における規制しきい値の妥当性のトレースおよび見直しを継続して行っていくこととしている。

6 風に対する運転規制基準の改良

6.1 従来の基準の課題

余部事故技術調査委員会の調査結果を踏まえた 3 つの決定関数の冗長化による安全対策、すなわち

- 平均風速から瞬間風速への移行
- 運転規制解除に関する『30 分間ルール』の導入
- 『早目運転規制区間』の導入

の実施によって、それ以前に比べて強風時における運転規制の発生頻度および時間が増大すること

になった。まず、平均風速から瞬間風速への移行によって従来の警報しきいを超過する風速が観測される頻度と継続時間が増大し、これに加えて『30 分間ルール』の導入によって規制しきい値を超える風速が観測されるとその継続時間がたとえ一瞬であつても、一律に少なくとも 30 分間は運転規制を継続することとしたため、1 回あたりの規制時間が最低 30 分間増大した。さらに『早目運転規制区間』の導入にともない、これらに指定された一部の運転規制区間では、運転規制風速の規制しきい値が 5m/sec 引き下げられたことにより、運転規制の発生頻度および時間が従来の数倍に達するようになった。

6.2 風速の時系列予測を用いた強風警報システムの導入

これらの不都合を解消するとともに風に対する運転規制基準の全般的な警報性能を向上させることを目的として、JR 東日本では、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。

一般に、時系列モデルによる予測は、 i から l 期間先の風速 y_{i+l} の予測値 $\hat{y}_{i+l|i}$ が、データ $\{y_0, y_1, \dots, y_i\}$ に対する演算規則を定める次式のような汎関数 f によって得られることを前提とするものである。

$$\hat{y}_{i+l|i} = f(y_0, y_1, \dots, y_i) \quad (6)$$

現実の風速変動をうまく表現でき、かつ時間の経過とともに次々と得られるデータを即座にオンライン処理して次の測定値を得るまでの一周期時間内に 1 点先の予測値を計算することが求められる運転規制の用途上の制約条件を考慮して、具体的な風速予測モデルとして次の『トレンドモデル』[8] を採用した。

$$x_i = x_{i-1} + v_i \quad (7)$$

$$y_i = x_i + w_i \quad (8)$$

ここで、 y_i は実際に観測する時系列データ、 x_i は直接には観測できない『トレンド風速』である。 v_i

は外乱に対応するシステム雑音、 w_i は観測雑音で、ともに平均 0 の正規白色雑音とする。このモデルでは、時刻 $i-1$ 以前のデータは x_{i-1} がすべて参照しており、時刻 i が進むごとに漸化的に計算できる形式になっているので、 x_i を表現するのに過去の測定データを全部記憶することは必要ない。また、1 期間先の予測値が得られれば、それをあたかも既に得られた観測値であるものとみなして予測のステップを繰り返すことにより長期の予測が可能になる。

このモデルを用いて、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基準を構築した。また、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、新しい運転規制基準を用いることで、運転規制の捕捉性を従来と同等としつつ運転規制時間を平均で 2 ないし 4 割削減することができることを検証した [9]。さらに、この新しい運転規制基準にもとづく警報の発令・解除の計算と表示を自動で行う『強風警報システム』を開発し、2005 年より強風多発箇所を含む運転規制区間を中心に順次導入している。

7 地震に対する運転規制基準の改良

7.1 従来の基準の課題

従来から、最大加速度は地震動の振動周期や継続時間と無関係な量であるため、地震による被害の大きさを必ずしも適切に表現しないことが指摘されていた。そこで、1989 年以降に上述の地震警報記録装置 (NEWS) で測定した全 299 地震および (独) 防災科学技術研究所の地震観測網 K-NET および KIK-NET により観測された平成 12 年鳥取県西部地震 (2000 年) と平成 13 年芸予地震 (2001 年) の地震動 245 の波形データを調査した結果、当初の運転中止基準の根拠である震度 4.5 に対応する加速度は、(1) 式では 80Gal であるのに対し、NEWS で観測した最大加速度 (以下、『最大加速度 (JR 警報用)』という。) では平均で 148Gal と大きく乖離しており、NEWS で観測した最大加速度 80Gal を運

転中止の規制しきい値とする従来の基準が、当初の趣旨に照らすと必要以上に安全な基準となっていることが明らかになった。

7.2 SI 値の導入

この結果にもとづき、JR 東日本では、最大加速度に代わる新しい地震動指標の候補として、ともに最大加速度よりも被害との関連性が高いと考えられる計測震度および SI 値を選んで比較検討を行うとともに、東京ガス等における先行実施事例を調査した結果にもとづいて、新しい地震動指標として数値の定義が単純でリアルタイム警報に適すると考えられる SI 値の採用を採用した [10] [11]。

SI 値は、地震によって一般的な建物に生じる被害の程度を推定するために G.W.Housner(1961) が提案した地震動指標であり、次式のように、減衰定数 $h = 0.2$ における周期 $t = 0.1 \sim 2.5$ の区間の最大速度応答 $S_v(t)$ の平均値として定義される。

$$SI = \frac{1}{2.4} \int_{0.1}^{2.5} S_v(t) dt, \quad h = 0.2 \quad (9)$$

SI 値を用いた運転規制基準は、まず、最大加速度 (JR 警報用) と計測震度の回帰式

$$\text{計測震度} = 1.85 \log(\text{最大加速度 (JR 警報用)}) + 0.48 \quad (10)$$

および、SI 値と計測震度の回帰式

$$\text{計測震度} = 1.80 \log(SI \text{ 値}) + 2.56 \quad (11)$$

を導き、当初の運転中止発令規制しきい値の根拠とした震度 4.5 に対する SI 値の相当値 12 カイン (カイン = cm/sec) を一般区間の運転中止発令の規制しきい値とし、耐震設計がなされた区間に対する現行の地表最大加速度による運転中止発令の規制しきい値 120Gal に対する SI 値の相当値 18 カインを耐震設計区間に対する運転中止発令の規制しきい値とした。また、平成 12 年鳥取県西部地震 (2000 年) と平成 13 年芸予地震 (2001 年) において鉄道被害の発生させた地震動の下限値にもとづいて、従来、一般区間として扱われていた区間のうち、落石や土砂崩壊などの発生の恐れがある区間 (『山間区間』) について新たに定め、その運転中止発令の規制しきい

値を6カインとした。さらに、上記の各区間区分の速度規制の規制しきい値をそれぞれ運転中止の規制しきい値の半分の数値とした。

上述のNEWSによる全299地震の波形データを用いて、新旧の運転規制基準の規制しきい値を超過するデータ数を集計し、旧基準に対する新基準のカウント数の比を計算したところ、耐震設計がなされた区間および一般区間では、現行規則と安全性を同等に保ちつつ運転規制の発令頻度を少なくとも半分以下に減らせること、また従来一般区間として扱われていた区間のうち落石や土砂崩壊などの発生の恐れがある区間については、別途現行規則と運転規制の発生頻度が同等になるようなSI値を規制しきい値として設定することにより安全性が大幅に向上することが明らかになった。これらの検討結果にもとづき、JR東日本では在来線全線においては2003年4月から、また新幹線全線においても2005年10月からSI値による運転規制基準が導入されている[12]。

8 まとめ

雨、風、地震に代表される自然外力に対して列車運行の安全を確保するための手段として、防災設備の整備や強化に代表される『能動的防災対策』と列車運転規制による『受動的防災対策』は互いに補完的な車の両輪の関係にある。本稿では、もっぱら後者について述べた。その要点は以下のとおりである。

1. 雨、風、地震に対する災害時列車運転規制方法のそれぞれについて、既存の運転規制基準の成立経緯および問題点を明らかにした。
2. 従来の運転規制基準を改良するための評価基準を定式化した。
3. 雨、風、地震の3つの災害営力のそれぞれについて、運転規制の決定関数を構成する危険指標とその規制しきい値の選択に関して、既往の方法にともなう困難の一部を回避できる合理的で使いやすいモデルを提案するとともに、これらにもとづいて従来の基準を改良する新しい運転

規制基準を提案し、それらの有効性を利用可能な統計データにもとづいて検証したうえで実務に導入した。

参考文献

- [1] 仁杉 巖(編)『鉄道施設技術発達史』(社)日本鉄道施設協会, pp.505-508, 1994
- [2] 『降雨時の災害防止に関する研究報告書』日本鉄道施設協会, 1986
- [3] 新川正則『長雨重点警備箇所の運転規制と災害警備』鉄道土木 Vol.28, No.6, 1986
- [4] 國枝正春『鉄道車両の転ぶくに関する力学的理論解析』鉄道技術研究報告, No.793, 1962
- [5] 財団法人鉄道総合技術研究所 余部事故技術調査委員会『余部事故技術調査委員会報告書』, 1988
- [6] 寺田秀樹, 中谷弘明『土砂災害警戒避難基準雨量の設定方法』国土技術政策総合研究所資料 No.5, 2001
- [7] 鈴木 修, 島村 誠『実効雨量による降雨時列車運転規制基準の開発と導入』鉄道力学論文集第13号, pp.200-203, 2009
- [8] 北川源四郎『FORTRAN77時系列解析プログラミング』岩波書店, pp.255-258, 1993
- [9] 島村 誠『風速の統計的短時間予測を用いた強風時列車運転規制手法の開発』鉄道力学論文集第12号, pp.121-130, 2008
- [10] 島村 誠, 鈴木博人『地震観測にもとづく列車運転規制基準の検討』第11回日本地震工学シンポジウム講演論文集, pp.2289-2292, 2002
- [11] 島村 誠, 鈴木博人『新しい地震動指標に基づく列車運転規制基準の検討』JREA, Vol.45 No.6, pp.19-22, 2002
- [12] 島村 誠, 石黒進也『SI値による新しい地震時運転規制基準とその導入効果』JREA, Vol.47 No.6, pp.22-24, 2004