

# 自然災害から列車運行の安全を確保する

藤井 俊茂  
防災技術研究部(主管研究員)



ふじい とししげ

## はじめに

自然災害から列車運行の安全を確保するために、鉄道総研では様々な研究開発に取り組んできました。ここでは、2005年12月にJR羽越線で、翌2006年9月にJR日豊線で発生した特急列車の脱線事故原因といわれる風の話を中心として、最近の研究開発の状況を紹介します。

## 自然災害から列車運行の安全を確保するための研究開発

鉄道総研発足から今日まで、列車運行の安全を確保するために取り組んできた研究開発の内容を、災害の種別と研究開発の種別に分けたマトリックスで整理しました(表1)。表1において、列車運行の安全を確保するための一方策である運転規制に関する研究開発では現象の解明・外力の

検知・外力の評価・耐力の評価が主たるものとなっており、他方、運転規制と直接関係ないものは対策工の開発が主体となっていることが分かります。

## 強風災害

風は鉄道にとって脅威です。そこで鉄道事業者は、車両を転覆させる風の吹くところには防風柵を設置したり、あるいは風速計を設置しておいて強風を検知したときに列車の運転を一時見合わせたり速度を落したりして(これらを運転規制と言います)、列車運行の安全を確保しています。

しかし近年の列車の高速化、あるいは車両重量の軽量化という動向に伴い、強風に対する安全性という点で厳しい状況になっているものと考えられます。このため、現在、転覆限界風速の推定精度の向上、強風に対する列車の安全性評価手法等の研究が求められている状況にあります。

鉄道総研における強風災害(特に列車の転覆事故)防止のための研究開発は、強風を受けた車両の力学特性(転覆モデルなど)の分野、強風によって車両に働く空気力特性の分野、外力となる強風特性や強風の監視の3分野に分かれております。各分野の研究者が各担当テーマを推進するとともに、研究成果を共有して抜けないようにしています。

各研究分野の相互関係を表すマップを次ページの図1に示します。

表1 鉄道総研の自然災害防止に関する研究開発(大略)

	災害事例	現象の解明	外力の検知	外力の評価	耐力の評価	対策
風災害	余部事故、根室線事故など	転覆現象モデル	風速計の特性	風速分布の評価 空気力の評価	転覆限界風速の評価方法	運転規制方法の評価・開発 防風柵の評価
雨災害	能登線災害や通年の斜面災害など	降雨時における盛土内の土中水分の変動特性		不安定斜面の抽出手法 実効雨量 崩壊土砂の衝撃力	斜面の危険度評価方法 斜面の崩壊限界雨量のり面防護工の定量的な耐降雨効果 斜面崩壊規模の推定	防災投資意思決定モデル
洗掘災害	東海道線富士川災害、花輪線長木川災害など				洗掘要注意橋梁抽出方法 増水時橋脚基礎健全度判定システム	
落石災害	上越線落石災害、豊浜トンネル崩壊、高山線落石災害など			落石対策技術マニュアル		柔構造の落石防護柵
雪害	56豪雪や平成18豪雪など		雪崩発生検知システム	融雪量推定手法		整備新幹線雪害対策(少水量散水消雪、側方開床式高架橋、寒冷地消雪用の散水温度制御方式)
	列車高速走行時の落雪による被害	車両への着雪条件 バラスト飛散現象 架線着霜の成長条件	車両着雪量計測システム			車両着雪量軽減方法 スノーブラウ
災害地震	多くの地震災害		早期地震検知・警報システム	地震諸元推定方法		
		石積壁の崩壊メカニズム				石積壁の耐震補強工
その他(劣化など)	張コン・吹付工の落下、切土のり面工崩壊			地山風化による土圧の評価	切土のり面工の健全度評価	

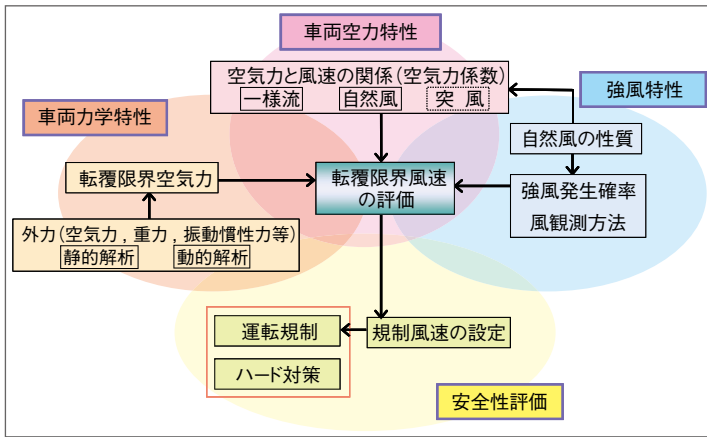


図1 強風に対する研究マップ

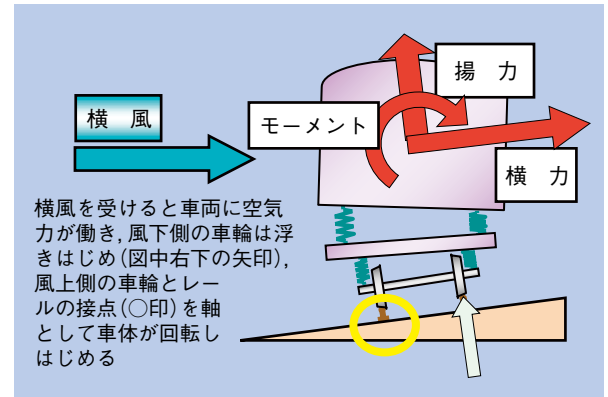


図2 風と空気力の関係 (概念図)

### (1) 風による車両の転覆モデル

転覆限界風速の推定精度を向上させるために、精密な静的解析モデルを提案してきました<sup>1)</sup>。このモデルは、①車両のばねなどの影響を考慮して車体重心の変位量を求め、②車体が左右に振動するときの加速度の値には最近の車両・軌道の条件に適合した値を用いるというものです。

このモデルを用いて求まる転覆限界風速の精度は、実用上満足されるものであることが確認されつつあります。

今後、①車両の運動を再現した動的解析モデルを構築する、②その動的解析モデルや走行試験データを用いて静的解析モデルによる転覆評価式を再検証し、その適用範囲を明確にする、などのことを行っていきます。

### (2) 車両に働く空気力評価

風が車両に当たると力が働きます。この力を空気力(横力、揚力、モーメント)と言います(図2)。この空気力を評価するために、1986年の余部事故以降、縮尺模型を用いて、乱れのほとんどない風(一様流)で風洞試験を行ってきました<sup>2)</sup>。風洞試験で得られた空気力と、車体の風圧中心高さ・重量等の車両の諸元とから、転覆限界風速が走行条件別に求まります。その結果、車両形状や線路条件、あるいは走行速度に応じた転覆限界風速が明らかになりつつあります。

風による空気力の評価精度をより一層良くするため、国土交通省の補助金を一部得て、実物大の車両・高架橋の模型を作り、これらを空間的・時間的に変動する自然風下に置いて、車両に作用する空気力を測定してきました<sup>3)</sup>。

現在は、自然を模擬した風で風洞試験を行い(乱流境界層風洞試験と言います)、空気力を調べています(図3)。

将来的な課題として、車両が竜巻などの突風を受けた場合や風洞内で模型列車を走行させた場合の空気力評価、あるいは数値計算での空気力評価が考えられます。

### (3) 強風監視と強風の特徴

強風時に運転規制をする区間と、運転規制のための風速

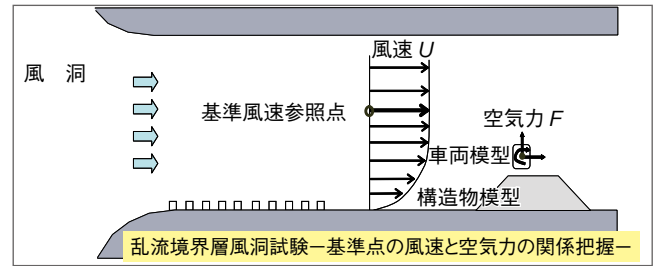


図3 自然を模擬した風での風洞試験 (概念図)

計設置地点とを適切に特定するために、鉄道沿線上で吹き得る最大瞬間風速を評価して、沿線の強風分布図(強風マップ)を作成する手法を開発しました(本誌参照)。

とはいえ、線路のごく近傍の構造物周り、特に盛土周りでは、風速計の位置(線路中心からの離れと、レールからの高さ)が多少でも変われば、あるいは風向が変われば、観測される風速にも違いがでます。そのため、観測風速を運転規制に用いるには換算(修正係数を乗じること)が必要となります。現在、風洞試験と現地観測とによって、風速計の位置と観測風速との関係を調べており、風向を考慮した運転規制あるいは風速計の観測位置の選定にその成果が反映することができるように研究を進めています(図4)。

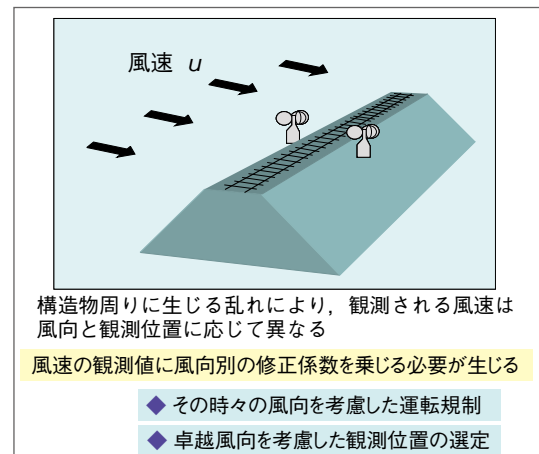


図4 線路のごく近傍の構造物周りの風観測 (概念図)

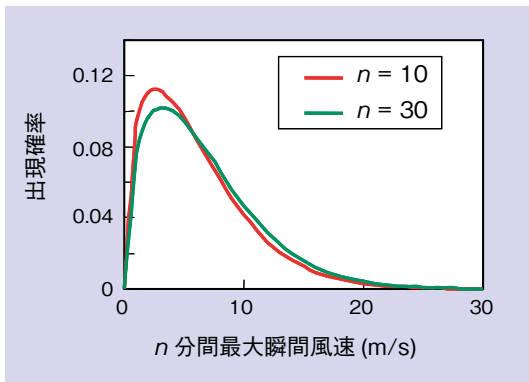


図5 最大瞬間風速の出現確率

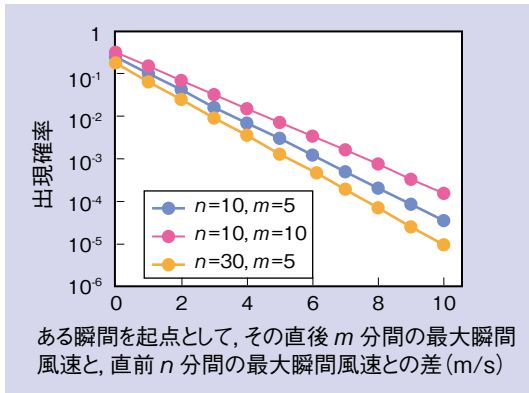


図6 風速増加量の出現確率

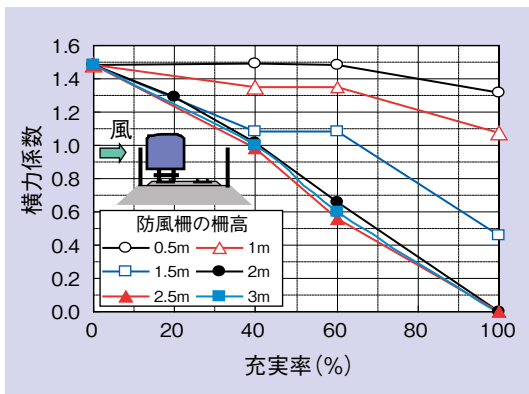


図7 防風柵の空気力低減効果  
(中間車両、盛土高さ8m、風向角90度の場合)

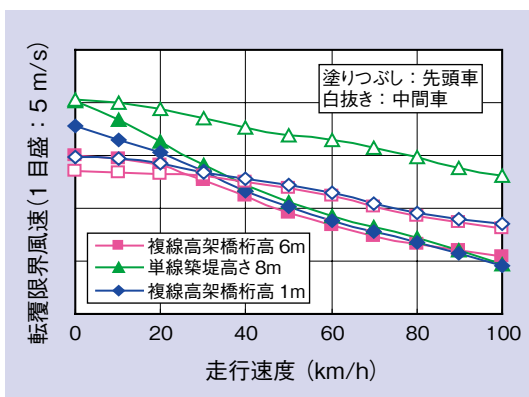


図8 徐行による転覆限界風速の向上効果

さて、観測風速は風速計からどの程度まで離れた位置の風を代表しているのでしょうか。風速計の設置間隔が長い場合には、安全上、余裕幅をもたせて規制風速を低く設定することなどがが必要です。風速計の設置間隔が短いほど風速余裕幅は小さくてよいことは明らかですが、両者の関係の定量的なモデル化は今後の課題です。

ところで、規制風速よりも観測風速が低い状態から（運転規制は未発令）、短時間で風速が急増することがあります。その実態を調べるため、複数の地点で長期間の風観測を行いそのデータを解析しました。その結果、ある瞬間の時刻を区切りの起点として、その直前の風速が規制風速に達していないときに、その直後の数分間で、列車にとって危険な風速へと急増する事象の発生状態を明らかにしました<sup>4)</sup>(図5、図6)。

短時間で風速が急増するものには上に示した一般的な強風のほかに竜巻などがあります。JR羽越線、日豊線の事故原因が竜巻と断定あるいはその可能性が高いことを受けて、現在、竜巻などの突風探知と探知情報の運転規制への反映方法に関する研究を、気象研究所、京都大学、JR東日本と共同で進めています(本誌参照)。

#### (4) 強風対策

防風柵の空気力低減効果を、防風柵の仕様(充実率と柵高)を変えて、風洞試験で調べました。その結果、①特殊な場合を除いて、充実率60%、柵高2m以上ならば、横力(車両を横方向に押す力)は、柵のないときの半分以下に低減されること、②低減効果は充実率、柵高の各増加につれて大きくなること(図7)、③低減効果は先頭車が中間車よりも大きくなること、などを明らかにしました<sup>5)</sup>。

今後、防風柵の線路からの離れと低減効果との関係を詳しく調べていきます。

鉄道では列車運行の安全性に加えて輸送の安定性も大事です。ここでは、強風時に列車速度を落とすこと(徐行と言います)を考えます。徐行すると、一般的に転覆限界風速は高まります(転覆しにくくなります)(図8)。

その一方で、徐行すると危険区間を通過するのに要する時間は長くなり、その分だけ強風との遭遇確率は高まります。徐行による転覆限界風速の向上効果(安全性の向上)と、危険区間を走行中の数分間における強風との遭遇確率の増大(この確率の増大による安全性の低下)というトレードオフの命題を定量的に評価するために、数分間の強風発生確率を指標とした評価手法を開発し、これを用いて徐行の効果を検討しました。その結果、適切な速度で徐行すれば

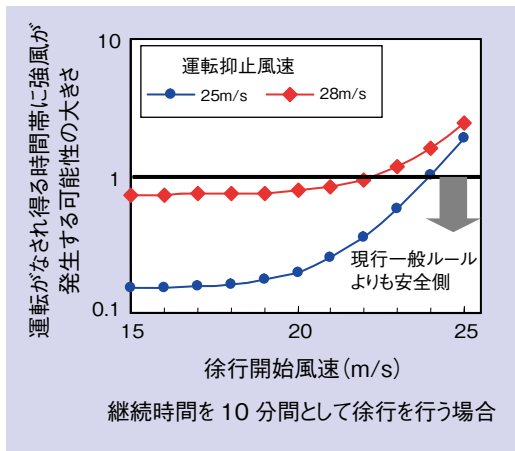


図9 運転時間帯に強風が発生する可能性の検討例

(徐行速度を適切に選択すれば), 現行の運転規制ルールにおける列車の強風遭遇確率を小さくすることができる(現行以上の安全性は確保できる)場合のあることが分かりました。

以下には最大瞬間風速の出現確率と風速増加量の出現確率が図5, 図6に従い, 運転規制区間の通過所要時分は徐行時に10分間, 最高速走行時に5分間として検討した例を示します<sup>6)</sup>。

運転規制の抑止風速を28m/sとすると, 継続時間10分間でも, 風速22m/sで徐行すれば安全性はほぼ同等となります(図9の赤色の曲線)。また, 風速25m/sで列車を抑止し, 30分間抑止を継続する場合と比較すると, 継続時間が10分間のときには危険側となりますが, 風速24m/sに達したなら40km/hの速度にて徐行するならば, 安全性は現状のものと同様となります(図9の青色の曲線)。

### (5) 安全性の評価

自然界の風の向きや速度は, 時間的にも空間的にも変化, 変動しています。したがって強風時の列車運行の安全性を評価するにあたっては, 確率論の導入が必要と思います。

確率論を導入した新しい手法による研究を進め, 強風時運転規制方法の再評価・再検討や, 強風対策に対する投資の順位付けなどに役立つ成果を提供していきたいと考えています。

## 降雨・洗掘災害

### (1) 降雨による斜面の崩壊危険度評価

雨によって斜面が崩れるか否かを評価するために, 降雨が斜面上や斜面内を流下する状況をモデル化した斜面崩壊危険度の評価手法を開発中です<sup>7)</sup>(図10)。

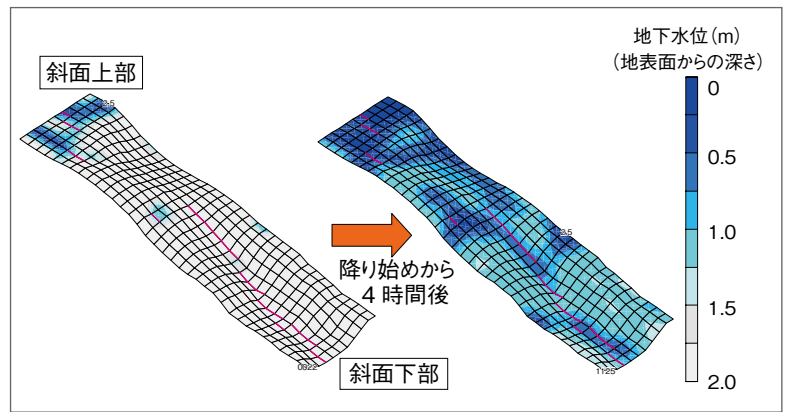


図10 降雨中の斜面における地下水位変動の例

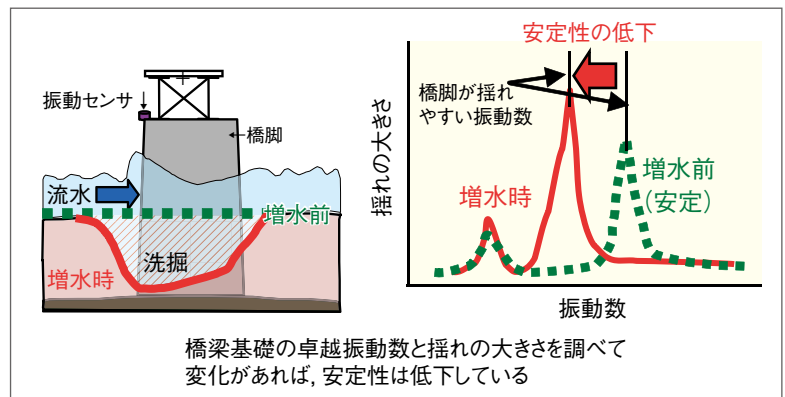


図11 橋梁基礎の安定度評価の考え方

### (2) 斜面防災対策の意思決定モデル

多数の沿線斜面への防災対策を検討する際に有効な, 投資の優先順位決定のためのモデルを構築し, その活用手法を提示しました(本誌参照)。

### (3) 河川増水時の橋梁基礎安定度評価

橋梁は橋桁とそれを支える橋脚, 橋台とで構成されています。雨などで川の水かさが増すと, 橋脚や橋台の基礎部周辺の河床が流水で掘れて(洗掘と言います)基礎の安定度が低下し, 橋が倒壊する場合があります。基礎の安定度を増水中に的確に評価する技術が望まれていましたが, 今回, これを開発しました<sup>8)</sup>(図11)。

また, 数多くの鉄道橋の中から, 洗掘による被害が懸念される橋梁を, 確実かつ効率的に抽出するための手法も開発しました(本誌参照)。

## 地震の検知・警報

### (1) 早期地震検知・警報システム

新幹線には地震を検知すると震源位置と規模とを推定し, 列車にとって危険な地震と判断された場合には警報を発し即座に列車を止めるシステム(ユレダス)がありました

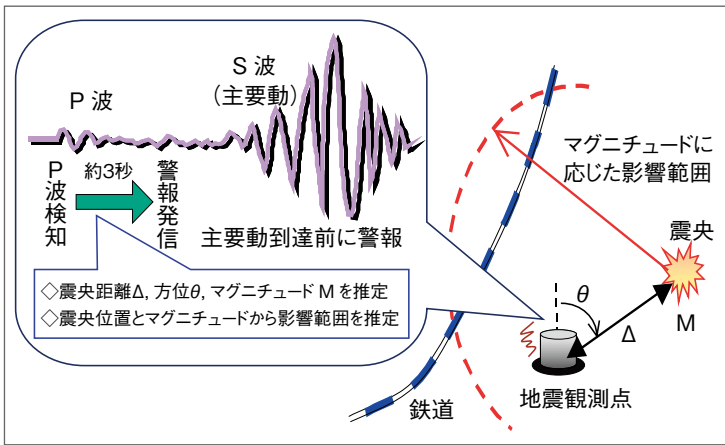


図12 早期地震検知・警報システムのイメージ



図13 新幹線で実用化の早期警報用地震計

が、これに替わる新しいシステム（早期地震警報システム、図12）を開発して、新幹線（図13）、在来線に導入してきました<sup>9)</sup>。

また、地震時の列車運行の可否を判断するための地震動の指標についてその値の評価を行ってきました<sup>10)</sup>。

現在は、地震被害の推定・警報発令基準の信頼性向上のほか、気象庁の緊急地震速報を利用した警報システム<sup>11)</sup>、面的推計震度情報等を活用した地震後の安全確認・運転再開

を支援するシステム等の実用化を目指した研究を、一部国土交通省の補助金を得て進めています。

(2) 地震災害のリスク評価

地震による鉄道沿線の危険度と被害とを定量的に評価する手法の研究も進めています（本誌参照）。

(3) 耐震補強工

地震の検知・警報とは別に、構造物の耐震補強工に関する研究も進めています。

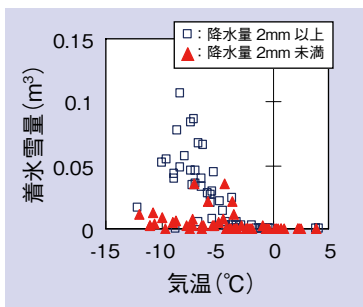


図14 気温と着氷雪量との関係

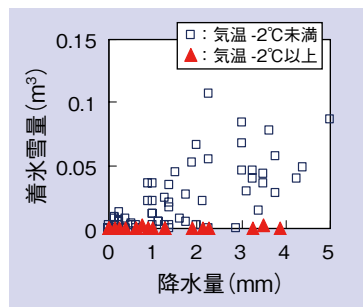


図15 降水量と着氷雪量との関係

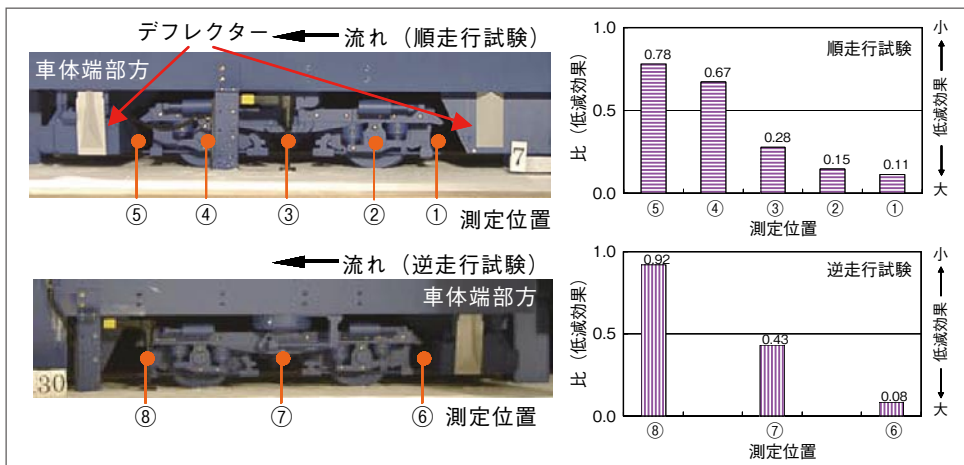


図16 デフレクターによる台車部周辺における雪粒子空間密度の低減効果(低温室内試験)

雪氷害

(1) 列車の着落雪対策

新幹線の雪の運転規制では、天候、降雪・積雪の状態が発令基準になっているところもあります。これに散水後の雪質も考慮することができるか否かを検討するため、散水後に雪の密度、含水率等の雪質の変化状態と、雪質ごとの雪の舞い上がり発生状態とを明らかにしました。

在来線でも列車の高速化に伴って、車体への着氷雪が発生し、走行中にこの着氷雪が落下して被害を発生させます。雪落とし作業などのソフト対策の効率的な実施を支援することを目的として、着氷雪の成長と沿線の気象状況との関係を明らかにしました（図14、15）<sup>12)</sup>。

また、台車部の着氷雪防止対策として、台車周辺部の局所的な形状変更（デフレクターやカバー、フィン

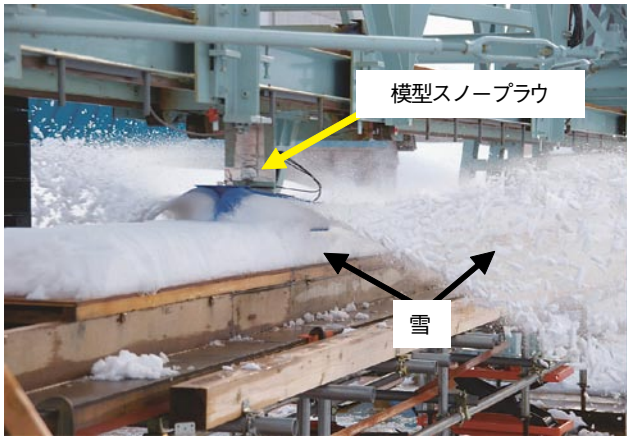


図17 スノープラウ開発試験の状況

の取付け)を試み、現車試験はしていませんが、低温室内試験でこれが効果的であることを確認しました(図16)<sup>13)</sup>。

## (2) 多雪地域用新幹線スノープラウ形状

雪国の新幹線は先頭車の下部に装着されたスノープラウで線路上の雪を掻きつつ走行します。雪がスノープラウに及ぼす力(排雪抵抗と言います)を評価して、多雪地域でも走行可能なスノープラウ形状を開発する研究を行っています(図17)。

## 地山の風化に起因する災害

### (1) 岩盤斜面の災害発生危険度評価

鉄道沿線で発生した落石と岩盤崩落の事例を分析し、落石発生源となりうる露岩、安定度の小さい斜面、土石流の発生が懸念される溪流の抽出手法を開発しました(本誌参照)。

また、落石形態の一つに、割れ目の発達した岩盤斜面からの岩塊の剥落があります(図18)。このタイプの落石については、斜面から岩塊が剥離する面の、風化程度と強度

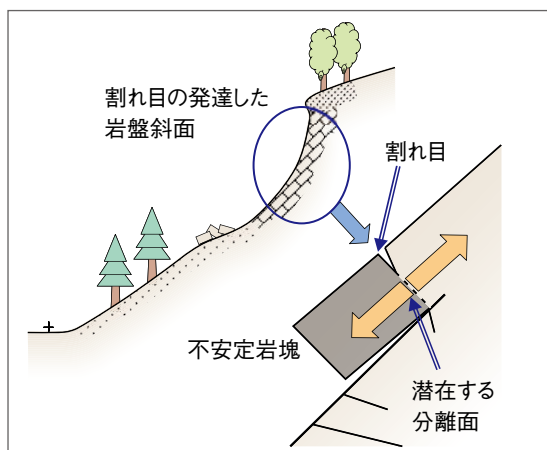


図18 割れ目から剥離する落石(概念図)

とを把握することが重要です。そのため、剥離面の風化程度と強度とに着目した落石危険度評価手法の研究を進めています。

## (2) 切土のり面工の健全度評価

切土のり面の崩壊には、のり面に張られたのり面工自体の崩落と、その背面(裏側)の地山の風化が原因で大規模な崩壊に到る場合があります。そこで、切土のり面工の健全度評価手法の開発を進めています。

## むすび

自然災害から列車運行の安全性を確保するために鉄道総研で取り組んできた研究開発の一端を紹介しました。今後も自然災害に強い鉄道を目指して研究開発を進めます。

## RRR

## 文献

- 1) 日比野有：風に対する車両の安全性，RRR，Vol.65，No.9，pp.2-7，2008
- 2) 種本勝二，鈴木実，斎藤寛之：横風に対する車両の空力特性風洞試験，RRR，Vol.63，No.8，pp.28-31，2006
- 3) 日比野有，今井俊昭，種本勝二：自然風下の実物大車両模型に働く空気力の観測，鉄道総研報告，Vol.18，No.9，pp.11-16，2004
- 4) 今井俊昭，島村泰介，福原隆彰：風速の空間的な変動特性を考慮した強風発生確率モデル，鉄道総研報告，Vol.21，No.1，pp.2007
- 5) 種本勝二，鈴木実，斎藤寛之，今井俊昭：風洞試験による防風対策の評価，RRR，Vol.62，No.2，pp.10-13，2005
- 6) 福原隆彰，島村泰介，今井俊昭：風速の時間変動を考慮した強風時運転規制の評価法，鉄道総研報告，Vol.21，No.1，pp.13-18，2007
- 7) 布川修，杉山友康，太田直之：地形を考慮した斜面表層部の地下水変動予測モデル，鉄道総研報告，Vol.22，No.1，pp.23-28，2008
- 8) 渡邊諭，佐溝昌彦，淵脇晃，杉山友康：微動から得られる固有振動数を用いた増水時の橋脚健全度評価，鉄道総研報告，Vol.21，No.1，pp.31-36，2007
- 9) 岩橋寛臣，岩田直泰，佐藤新二，芦谷公稔：早期地震警報システムの実用化，鉄道総研報告，Vol.18，No.9，pp.23-28，2004
- 10) 中村洋光，岩田直泰，芦谷公稔：地震時運転規制に用いる指標と鉄道被害の統計的な関係，鉄道総研報告，Vol.19，No.10，pp.11-16，2005
- 11) 芦谷公稔：緊急地震速報を活用した地震警報システムの実用化，RRR，Vol.64，No.1，pp.12-15，2007
- 12) 飯倉茂弘，河島克久，遠藤徹，藤井俊茂：落氷雪によるバラスト飛散が起こりやすい日の気象条件，RRR，Vol.60，No.8，pp.22-25，2003
- 13) 井門敦志：車両床下の空気の流れを探る，RRR，Vol.65，No.1，pp.10-13，2008