

鉄道における雨，風，雪対策

鈴木博人（東日本旅客鉄道株式会社 JR 東日本研究開発センター 防災研究所）

1. はじめに

鉄道では，雲に起因した気象現象である雨，風，雪などから列車の安全を確保するために，さまざまな対策を実施してきました．これらの対策を大別すると，構造物などの耐災性能を向上するハード対策と，耐災性能を上回る自然外力が発生した場合に列車の運行を規制するソフト対策があります．ハード対策は，構造物などの補強や防護設備の設置などを施すことで，耐災性能を向上するものです．しかし，どのような自然外力に対しても耐え得るハード対策を施すことは困難です．そこで，自然災害が発生しても列車事故に発展させないために，耐災性能を上回る自然外力が発生した場合に列車の運行停止や徐行を実施する列車運転規制といったソフト対策を実施しています．このように，鉄道ではハード対策とソフト対策を組合せることで，列車の安全を確保してきました．

本講義では，鉄道における雨，風，雪に対するソフト対策を中心に現在の方法や近年開発した方法の概要について，防災対策の効果を検証した事例を交えながら紹介します．また，鉄道における気象観測記録を用いた研究成果についても紹介します．

2. 雨対策

2.1 現在の降雨時の列車運転規制方法

鉄道では，降雨に起因した土砂災害などから列車の安全を確保するために，災害を発生させる恐れのある大雨が雨量計で観測された場合に，運行停止や徐行を行う列車運転規制を実施しています．東日本旅客鉄道株式会社（以下，JR 東日本とします）では，積乱雲の水平方向の広がりや 10km 程度という定性的な理由から列車運転規制に用いる雨量計を約 10km 間隔で設置しています¹⁾．また，雨量指標には，半減期 1.5, 6, 24 時間実効雨量（図 1）を用いています²⁾．実効雨量は，指数関数を用いて降雨の浸透・貯留過程を表現しようとする雨量指標です．降雨時の列車運転規制は，半減期 1.5, 6, 24 時間実効雨量のいずれかの値が運転規制基準値以上になった場合に発令されます．また，全ての実効雨量値が運転規制基準値を下回った後に，線路や構造物に異常

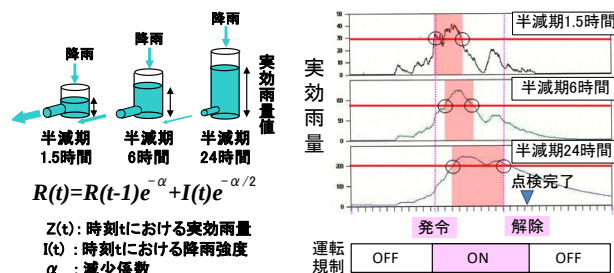


図 1 実効雨量と降雨時の列車運転規制の概要

のないことが確認できた場合に解除されます¹⁾．このような鉄道の列車運転規制の特徴は，その方法や基準値といった規則を決めるのが鉄道事業者であるのはもちろんのこと，最終的にその規則を実行するのも指令室から指示を受けた列車の運転士であり，決めた規則は必ず実行されることです．

2.2 列車運転規制の成果

このような列車運転規制の効果を検証した事例について紹介します．日本国有鉄道（以下，国鉄とします）では，1968 年 8 月 8 日に岐阜県白川町の飛騨川沿いの国道 41 号線で発生した飛騨川バス転落事故を教訓に，1973 年に降雨時の列車運転規制方法の見直しを行いました．この事故では，集中豪雨による土石流によって観光バス 2 台が飛騨川に転落し，乗客乗員 107 名中 104 人が死亡しています．このとき，国道 41 号線に並行する国鉄高山本線も大きな被害を受けましたが，列車運転規制が発令されて列車の運行が停止されていたために，鉄道はことなきを得ています．しかし，この当時の降雨時の列車運転規制に用いられていた雨量指標は鉄道管理局（国鉄の地方機関）や保線区（線路や構造物などのメンテナンスを実施する部署）ごとにまちまちで，1 時間雨量，24 時間雨量，連続雨量，累計雨量の単独またはそれらの組合せが各部署の判断で使われていました．また，運転規制基準値と構造物の耐災性能との関連が必ずしも明確ではないといった問題がありました．そこで，1972 年に降雨時の列車運転規制に用いる雨量指標は，1 時間雨量と連続雨量の組み合わせに国鉄全社で統一するとともに，運転規制基準値はその規制区間内の過去の災害事例から統計的に決めるなどの規定が定められました．この規定に基づいて，1973 年に各鉄道管理局において，線区の耐災

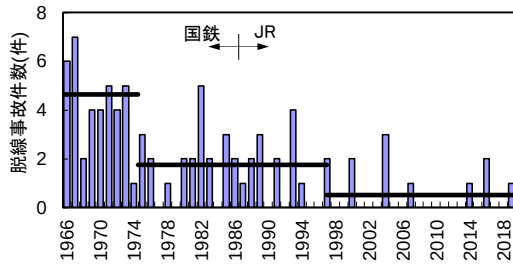


図2 国鉄およびJR全社における降雨に起因した列車脱線事故の発生件数（鈴木³⁾に追記）

性能、降雨特性、災害履歴等を勘案した列車運転規制の見直しが行われました。

図2は、国鉄とJR全社で発生した降雨災害に起因した脱線事故の発生件数の推移です。脱線事故の発生件数は、1966年度から1973年度の4.6件/年から、1992年度から2016年度の0.5件/年と、約半世紀の間に約1/10に減少しています。この時系列データに対して、トレンドの検定を行うと減少傾向が有意水準5%で有意です。また、不連続変化の有無を統計的に検定するジャンプの検定を行うと、1973年度と1974年度を境にした減少側への不連続変化に有意性が最も高く、次いで1994年度と1995年度を境にした場合でした。1973年度と1974年度を境にしたジャンプに着目すると、その前後で脱線事故の発生件数は4.6件/年から1.8件/年に減少しました。この時期は、飛騨川バス転落事故を教訓に国鉄が降雨時の列車運転規制方法の見直しを行った1973年度に一致します。これから、この脱線事故の減少側へのジャンプは列車運転規制方法の見直しの成果と考えられます。鉄道におけるこの事例は、ソフト対策の規則を決めて、それを確実に実行することの重要性を示す例と考えられます。

2.3 レーダー雨量を用いた列車運転規制

鉄道では、降雨時の列車運転規制は前述したように約10km間隔に設置された雨量計の観測値に基づいて行われています。図3は、鉄道における降雨災害事例について、国土交通省（以下、国交省とします）解析雨量を用いて災害発生時の雨量計地点と災害発生地点における半減期1.5時間実効雨量値をプロットしたものです⁴⁾。半減期6時間および24時間の実効雨量値の図示は省略しますが、これらの場合を含めて多くの災害事例において、雨量計地点と災害発生地点の実効雨量値に大きな差がありません。これから、約10km間隔で設置された鉄道の雨量計は線路沿線の任意の地点における災害を発生させる

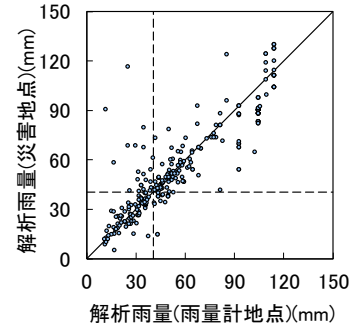


図3 降雨災害発生時の雨量計地点と災害発生地点における半減期1.5時間実効雨量値の関係⁴⁾

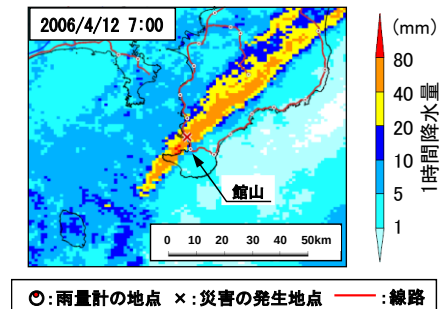


図4 線状の大雨による災害発生時の1時間雨量(解析雨量)⁴⁾。

ような大雨を概ね検知できていると考えられます。一方で、事例数は少ないものの、災害発生地点の実効雨量値が雨量計地点に比べて数倍大きい場合があります。このような事例は、図4のように隣接する雨量計と雨量計の間に線状の大雨域や局地的な大雨域が収まるような場合であることが分かりました。このような場合には、雨量計と大雨域の位置関係によっては、雨量計では災害を発生させるような大雨を検知できない場合があります⁴⁾。

そこで、鉄道の雨量計では検知できない場合がある局地的大雨にも対応可能な降雨時の列車運転規制方法として、レーダー雨量を活用する方法を京都大学および東京都立大学と共同で開発しました⁵⁾。この方法では、災害を発生させるような大雨を概ね捉えている現行の雨量計による列車運転規制は今まで通り継続します。その上で、局地的大雨を捉えるために、解析雨量とXRAINの線路を含むメッシュの1時間雨量を用いて、1時間雨量が基準値を超過した場合に列車運転規制を実施します。この方法は、JR東日本の気象観測・警報システムの改修を行った上で実用化される予定です。

2.4 降水量の空間代表性に関する研究

JR東日本では、前述の降雨時の列車運転規制を実

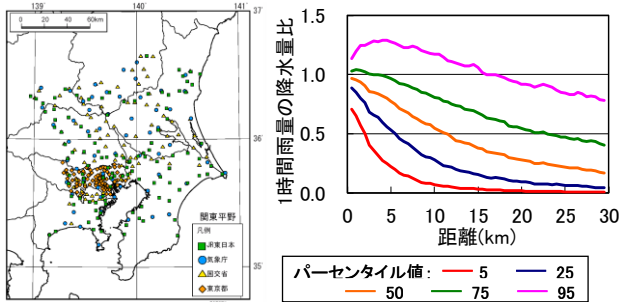


図 5 関東平野においてある地点で 30-39 mm/h の 1 時間雨量が観測された場合に、その地点とある距離離れた地点の降水量の比に関する 5,25,50,75,95 パーセンタイル値⁶⁾

施するために、在来線で 529 地点、新幹線で 33 地点に雨量計を設置しています。鈴木ほか⁶⁾などでは、鉄道のほか気象庁、国交省、および東京都の雨量計の観測データを用いて、例えば関東平野では図 5 左のような稠密な雨量計の観測網を形成することで、降水量の空間代表性に関する解析を行っています。解析の例として、図 5 右は関東平野においてある地点で 30-39 mm/h の 1 時間雨量が観測された場合に、その地点とある距離離れた地点の降水量の比を求めて、その比に関する 5,25,50,75,95 パーセンタイル値を統計的に示したものです。2 地点の降水量比に関する 5 から 95 パーセンタイル値の範囲は、2 地点間の距離の増加とともに一度拡大し、その後減少します。このような解析を鉄道の雨量計の観測記録を用いて行うことで、気象学的な知見を得るとともに、この知見はより適切な降雨時の列車運転規制方法の開発に活用しています。

3. 強風・突風に対する対策

3.1 強風時の列車運転規制方法

鉄道では、強風時の列車の安全を確保するために、強風が風速計で観測された場合に、運行停止や徐行を実施する列車運転規制を行っています。強風は台風や冬の気圧配置などに起因して空間的に広い範囲で強い風が吹くことから、風速計は橋りょうや盛土上などの強風が発生しやすい場所に設置されています。JR 東日本では、強風時の列車運転規制に風速の予測値と実況値を用いており、どちらかが運転規制基準値を超過した場合に列車運転規制が発令され、両方が基準値を下回った場合に解除されます。風速の予測は、過去の風速計の観測値に基づいて、数分から数 10 分先の瞬間風速を予測しています⁷⁾。この

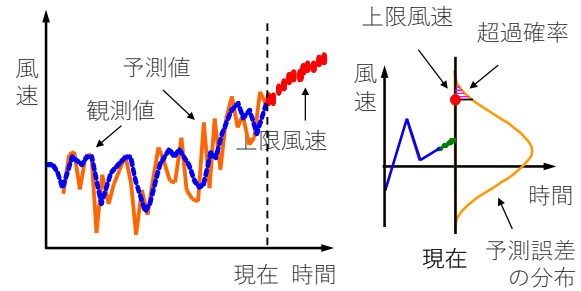


図 6 風速の予測方法の概要

方法では、過去の最大瞬間風速から時系列解析であるトレンドモデルを用いて将来のトレンド値を推定し、このトレンド値に安全率として過去の最大瞬間風速とトレンド値の差の標準偏差に応じた予測誤差を加えることで予測風速を算出します (図 6)。

3.2 突風に対する列車運転規制方法

突風は、空間的に狭い範囲で発生するので、線路沿線に離散的に配置された風速計で捉えることが難しく、仮に風速計で捉えたとしてもそれから列車運転規制を発令しても間に合いません。このような突風に対して列車運転規制を行うためには、広範囲で連続的な観測が可能な気象レーダーを用いるのが有効と考えられます。

JR 東日本では、2005 年に羽越本線で発生した脱線事故の対策として、気象レーダーを用いた突風に対する列車運転規制方法の開発を進めてきました。この開発にあたっては、気象庁が配信するレーダーエコーデータを用いて強い積乱雲を捉えることで竜巻などを間接的に捉える方法と、ドップラーレーダーを用いて竜巻に伴う渦を直接捉える方法の 2 つのアプローチで行ってきました。

3.2.1 レーダーエコーデータを用いる方法

前者の竜巻などを間接的に捉える方法は、竜巻などの突風を発生させる恐れのある強い積乱雲を抽出することで、突風の発生を予測する方法です⁸⁾。この方法では、気象庁が配信するレーダーエコーデータから降水強度が強く、その範囲が広くなおかつ雲頂高度が高い場合を突風を発生させる恐れのある強い積乱雲として抽出します。そして、その積乱雲が線路を通過すると予測される場合に、列車の運行を停止します。この方法による列車運転規制は、2008 年 1 月から日本海側の線区において冬季に実施されています。

3.2.2 ドップラーレーダーを用いる方法

後者のドップラーレーダーを用いて竜巻に伴う渦

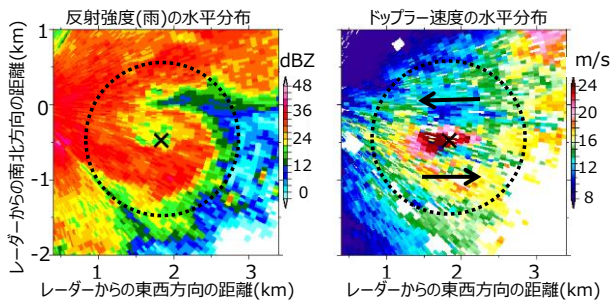


図7 2007年12月2日に山形県酒田市で発生したF0スケールの突風事例における反射強度（降水量の強度、左）とドップラー速度（風速、右）

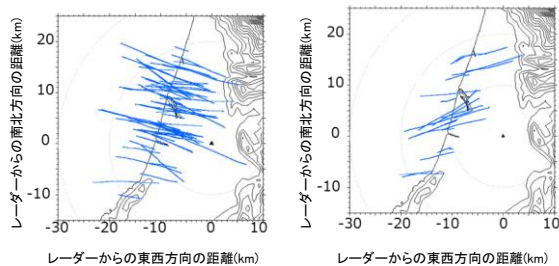


図8 上空の渦の移動. 左は主に冬型の気圧配置の場合、右は主に寒冷前線の場合.

を直接捉える方法は、気象庁気象研究所と共同で開発しました⁹⁾. この方法の開発にあたっては、冬季の日本海側の突風には未解明の部分が多かったことから、突風の実態を把握するための気象観測から開始しました. 気象観測は、山形県庄内平野にドップラーレーダー2台（羽越本線余目駅と庄内空港）、風速計などの気象観測点26箇所、風速計12台・気圧計25台からなる延長1.1kmの風速・観測アレイなどを設置しました.

その結果、冬季の日本海側の突風に関して以下の知見などを得ることができました. ① 地上で突風が観測されたときには、ほとんどの場合で図7のように上空に渦が存在することが分かりました¹⁰⁾. これから、地上の突風を捉えるためには、上空の渦をドップラーレーダーで探知する方法が有効です. ② 上空の渦は、図8のように日本海上で発生して、直線的に東進し、上陸して消滅することが分かりました¹¹⁾. これから、上空の渦の移動速度と方向は過去の渦の軌跡から求めることができます. ③ 風速計で観測された地上の突風とドップラーレーダーで観測された上空の渦の最大風速は、ほぼ一致することが分かりました¹²⁾. これから、地上の突風の最大風速は上空の渦の最大風速とすることで、地上の突風の風速を推定可能です. ④ 上空の渦の直径の多くは、

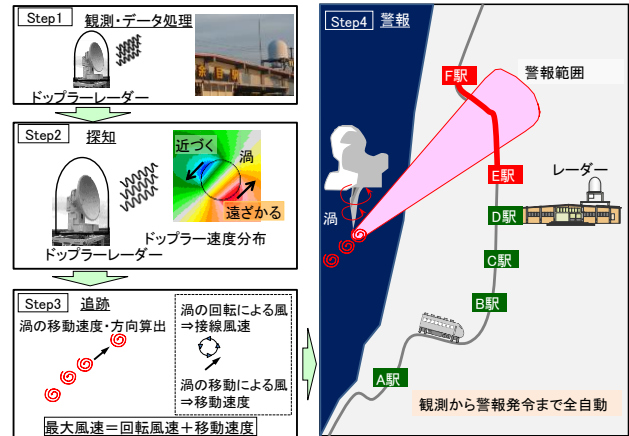


図9 ドップラーレーダーを用いた突風に対する列車運転規制のフロー

0.5kmから2km程度であることが分かりました¹³⁾. これから、上空の渦の探知には、直径が4km程度のメソサイクロンを探知する目的で気象庁が開発したメソサイクロン検出アルゴリズム¹³⁾をこの渦の大きさに合わせて改良したアルゴリズムを用いることにしました.

ドップラーレーダーを用いた突風に対する列車運転規制方法は、上述の知見に基づいて、図9のように以下の手順で実施することにした⁹⁾. ① ドップラーレーダーで、上空の風を観測します. ② 風の観測から突風に伴う上空の渦を、レーダーに近づく風と遠ざかる風の成分のペアを抽出することで検出します. 渦が検出されると、渦の回転速度（回転風速）を得ることができます. なお、ドップラーレーダーではレーダーに近づく風と遠ざかる風の成分（ドップラー速度）のみを観測することができます. ③ 渦が連続的に探知されると、その軌跡から上空の渦の移動速度（移動風速）と移動方向を得ることができます. また、上空の渦の回転風速と移動風速の和から渦の最大風速を得ることができます. ④ 上空の渦の最大風速が基準値を超えて、その渦が進行すると予測される範囲に線路が含まれる場合に、その区間の外側にある駅と駅の区間に運転中止を発令します. ⑤ 運転中止が発令されると、列車指令員はその区間を位置する列車の運転士に停止を指示し、列車は速やかに停止します. この方法では、①から④のドップラーレーダーによる観測から列車運転規制の発令まで自動で行われます.

この方法を実用化するにあたって、山形県庄内平野に新たにドップラーレーダーを建設しました（図10左）. 新設したドップラーレーダーは、国交省が

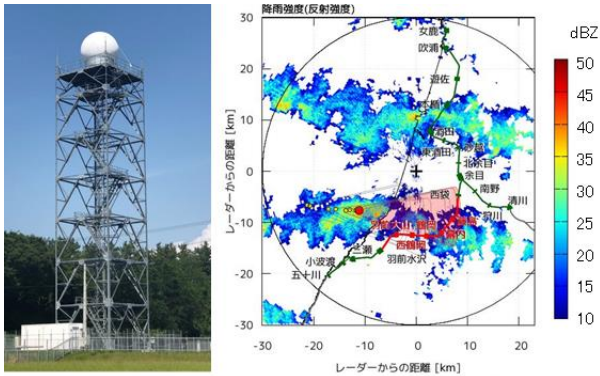


図 10 山形県庄内平野に新設したドップラーレーダー（左）と突風に対する列車運転規制の発令事例（右）⁹⁾.

展開する XRAIN で実用化の実績のあるレーダーを、突風探知用に分解能を向上させたものとした。また、冬季の日本海側の突風は図 8 のように日本海から東進して上陸することから、海岸に近い庄内砂丘（標高 50m）に高さ 30m の鉄塔を建設して、その上に据え付けました。

この方法は、冬季に日本海側で発生する突風に対する列車運転規制方法として、2017 年 12 月 19 日よりドップラーレーダーから 30km の範囲に位置する羽越本線五十川・女鹿間と陸羽西線余目・清川間で実用化されました⁹⁾。また、2019 年 11 月 1 日に羽越本線では同 60km の範囲に位置する今川・西目間に拡大されました¹⁴⁾。このようなドップラーレーダーを用いた突風に対する列車運転規制は、世界の鉄道で最初です。なお、図 10 右には、ドップラーレーダーを用いた突風に対する列車運転規制が発令されたときのドップラーレーダーで観測された降水強度、上空の渦の位置（赤丸）、突風が進行すると予測される範囲（薄い赤の範囲）、および運転中止の発令区間（赤線）が示されています。

4. 雪対策

4.1 鉄道林とその効果

鉄道では、吹雪や雪崩から列車運行の安全や安定性を確保するために、鉄道林という防災設備を設置しています。主な鉄道林には、吹雪による線路上への吹き溜まりを防止するふぶき防止林と、雪崩の発生を防止するなだれ防止林があります。

最初の鉄道林は、1893 年に日本鉄道株式会社（当時）の東北本線水沢・青森間の約 40 箇所(52ha)に設置されたふぶき防止林です。ふぶき防止林は、吹き

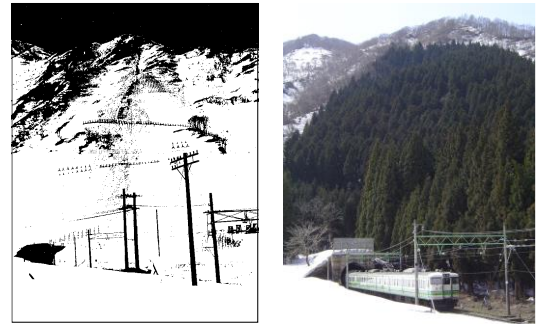


図 11 上越線土樽・越後中里間のなだれ防止林。左は植栽前の 1935 年、右は 2004 年¹⁶⁾

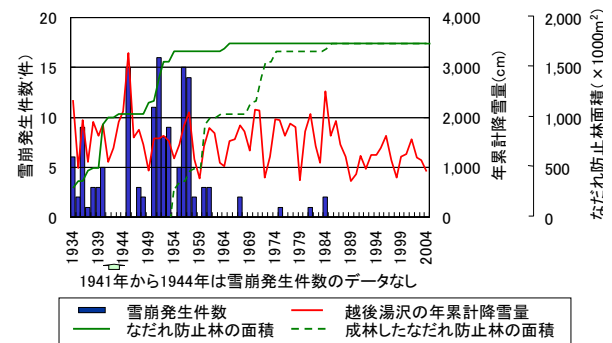


図 12 上越線の雪崩発生件数，越後湯沢における年降雪深，なだれ防止林の面積，および成林したなだれ防止林の面積の推移¹⁶⁾。

溜まりの防止に著しい効果を発揮したことから、その後他の各線区に急速に普及していきました¹⁵⁾。なだれ防止林は、1912 年に磐越西線（当時の東京・新潟間の最短ルート）と奥羽本線に初めて設置されました。当時の線路沿線の斜面は、産業の急速な近代化による木材需要の増大によって山林が伐採されたため、図 11 左のような木のない荒廃した斜面になっていました。そのため、多くの雪崩が発生して、多数の犠牲者を伴う大惨事が幾度となく発生しました。この対策としてなだれ防止林が設置され、ふぶき防止林と同様に著しい効果を発揮して、その他の山岳多雪地域の各線区に普及していきました¹⁵⁾。

図 11 は、1935 年と 2004 年に上越線土樽・越後中里間の同一地点からの写真です¹⁶⁾。1935 年には雪崩が発生していますが、2004 年にはなだれ防止林がみごとに成長して雪崩が発生する気配は感じられません。図 12 は、1934 年から 2004 年の上越線における雪崩の発生件数、越後湯沢駅における年降雪深、およびなだれ防止林の面積を示したものです¹⁶⁾。雪崩の発生件数は、1960 年代初めを境にして明瞭に減少し、1960 年代以降雪崩はほとんど発生していま

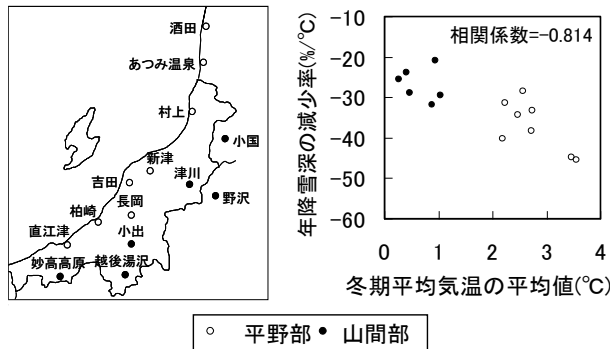


図 13 新潟県と周辺地域における年降雪深の減少率と冬期平均気温（12 月から 2 月）の関係¹⁷⁾

ん。なだれ防止林は、所期の防災機能を有する状態に達するまでに植栽後約 20 年を要するとされています（成林といいます）。雪崩の発生が急激に減少した 1960 年代初めは、なだれ防止林の過半数が所期の防災機能を有する状態に達した時期に当たります。これから、なだれ防止林は雪崩の発生防止に大きな効果を発揮していることが分かります。

4.2 降積雪深の経年変化に関する研究

鉄道では、前述のように鉄道林によって列車運行の安全や安定性の確保を行っています。しかし、線路上に積もった雪の除雪は必要です。除雪の実施の判断をするために、鉄道では鉄道駅構内の露場で降積雪深の観測を行ってきました。この観測記録は、1926/1927 年の冬期から残っています。例えば鈴木¹⁷⁾では、新潟県とその周辺地域における降積雪深の観測記録を用いて、年降雪深および年最大積雪深と冬期平均気温(12 月から 2 月)は負の相関が深いことや、図 13 のように年降雪深と年最大積雪深は冬期平均気温が高い地点ほど冬期平均気温が 1℃上昇した場合のそれらの減少率が大きいと解析しています。鉄道における長期の気象観測記録を用いて、このような気象学・気候学的な知見も得られています。

5. おわりに

鉄道では、雨、風、雪対策をはじめとしたさまざまな自然災害対策を実施してきました。これによって、自然外力による鉄道の事故はひと昔前に比べると大きく減少しました。今後、地球温暖化にともなう気象現象がより苛烈化するともいわれています。このような中で、鉄道の安全と安定性を向上するために、構造物などの耐災性能の一層の向上を進めるとともに、より適切な列車運転規制方法などの開発に努めて行きたいと考えています。また、鉄道には

気象観測記録もたくさん残っており、これらを用いた解析を行うことで気象学の発展にも寄与していきたいと考えています。

参考文献

- 1) 島村誠：降雨・河川増水に対する運転規制方法等の改正，日本鉄道施設協会誌，Vol.35，pp.437-440，1989.
- 2) 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，Vol.13，pp.200-203，2009.
- 3) 鈴木博人：降雨時の列車運行の安全性向上に向けた考察—降雨に起因した列車脱線事故の分析—，鉄道工学シンポジウム，Vol.18，pp.141-147，2014.
- 4) 鈴木博人，大島竜二：雨量計で観測される降雨量と災害の発生地点の降雨量の差異に関する考察，自然災害科学，Vol.33，pp.101-113，2014.
- 5) 鈴木博人，中北英一，高橋日出男：レーダー雨量の列車運転規制への活用に関する研究，土木学会論文集 B1(水工学) Vol.73，pp.54-70，2017.
- 6) 鈴木博人，中北英一，高橋日出男：離散的に配置された雨量計の大雨の捕捉性能に関する解析，土木学会論文集 B1(水工学)，Vol.57，pp.L296-L300，2013.
- 7) 島村誠，松沼政明：強風警報システムの開発と実用化，JR East Technical Review，No.13，pp.36-43，2005.
- 8) 鈴木博人ほか：列車運転規制のためのレーダーエコーデータを用いた冬期寒冷前線に伴う突風に対する警戒基準の開発，天気，Vol.56，pp.353-365，2009.
- 9) 鈴木博人ほか：ドップラーレーダーを用いた突風に対する列車運転規制方法の開発と導入，JREA，Vol.61，pp.42281-42284，2018.
- 10) 楠研一ほか：庄内平野で観測された冬季突風と気象じょう乱について—概要—，気象学会講演予講集，Vol.94，pp.139，2008.
- 11) 石津尚喜ほか：ドップラーレーダーで観測された冬季庄内平野に上陸する渦の統計的研究，気象学会講演予講集，Vol.108，pp.373，2015.
- 12) 猪上華子ほか：庄内平野で観測された突風と気象じょう乱—渦および渦内部の地上風について II—，気象学会講演予稿集，Vol.104，pp.70，2013.
- 13) Suzuki, O. et al. : A new multi-scale meso-vortex / divergence detection algorithm with modified Rankine combined vortex, Preprints, 33rd Conf. on Radar Meteorology, 2007.
- 14) 藤原忠誠ほか：ドップラーレーダーを用いた突風に対する列車運転規制の範囲拡大，JREA，Vol. 63，pp.44150-44154，2020.
- 15) 島村誠，鈴木博人：鉄道林：成立経緯と施業の変遷，土木史研究，Vol.16，pp.565-572，1996.
- 16) 鈴木博人：上越線沿線における降雪量の経年変化となだれ防止林の機能評価，第 23 回日本自然災害学会学術講演会講演概要集，2004.
- 17) 鈴木博人：新潟県とその周辺における降積雪量の 1927～2005 年の経年変化—鉄道駅構内の露場で観測された降積雪量データを用いた解析—，天気，Vol.53，pp.185-196，2006.