

リアルタイムハザードマップの構築

公益財団法人鉄道総合技術研究所 研究開発推進部 主管研究員
鈴木 浩明



1. はじめに

豪雨や突風などに起因する鉄道の被害を最小限に抑えるには、急変する気象現象を高頻度・高精度で観測し、鉄道への影響を即座に推定できるシステムの開発が必要である。本発表では、河川の氾濫や浸水、突風の発生を予測し、鉄道に及ぼす影響をリアルタイムで判断できるハザードマップの構築に向けた研究開発について概説する。さらに、列車の運転規制、旅客の避難・誘導、教育・訓練の支援研究を含め、総合的な防災対策に資するための取り組みを紹介する。

2. ハザードマップのリアルタイム化

2.1 気象災害ハザードマップとは

豪雨や突風などの顕著気象によって、鉄道の沿線や施設・設備に損害を生じる可能性がある場合、リスクの高い区域や被災規模を予め把握することができれば、事前に有効な対策を打ち、損害を回避・低減することができる。このような観点から、鉄道総研ではハザードマップ（気象災害ハザードマッピングシステム）の開発を進めてきた。過去の災害事例や、航空レーザ測量により得られた数値標高モデルなどから得られる数値地形情報、局地的な気象シミュレーション技術などを用いて、鉄道沿線への影響を分析し、危険度を地図上に表示したものがハザードマップである。

図1は短時間の豪雨で河川が氾濫した際の浸水予測範囲（図中の青および黄色部分）を示した例であり、B駅は浸水しないのに対し、A駅やC駅は浸水する可能性があることが読み取れる。鉄道総研では、豪雨、強風、雪崩、落石などの気象災害ハザードを、地理情報システム（GIS）上で一元的に表示できるハザードマップを開発し、防災対策を計画する際に根拠となる情報を得るためのツールとして整備してきた^{1)~3)}。マップ

作成に必要な情報処理の流れを図2に示す²⁾。

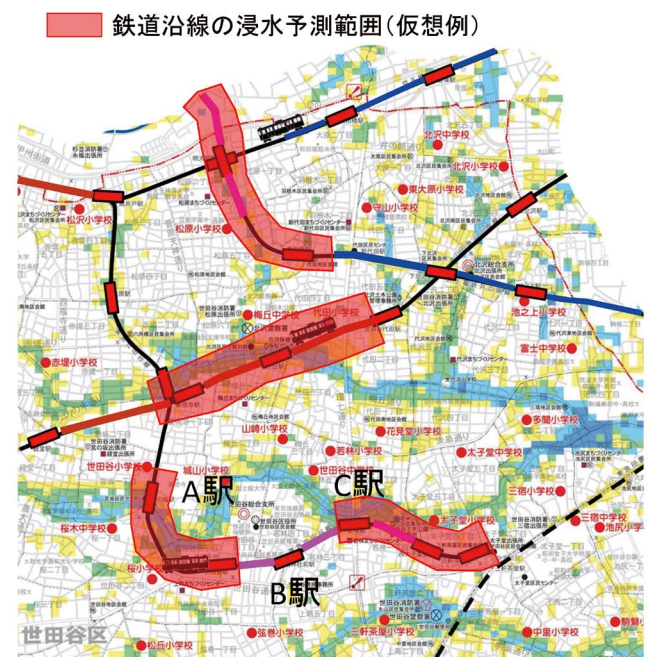


図1 浸水域（青と黄色のメッシュ）と鉄道への影響を示すハザードマップの例（青の方が深い浸水域を示す）

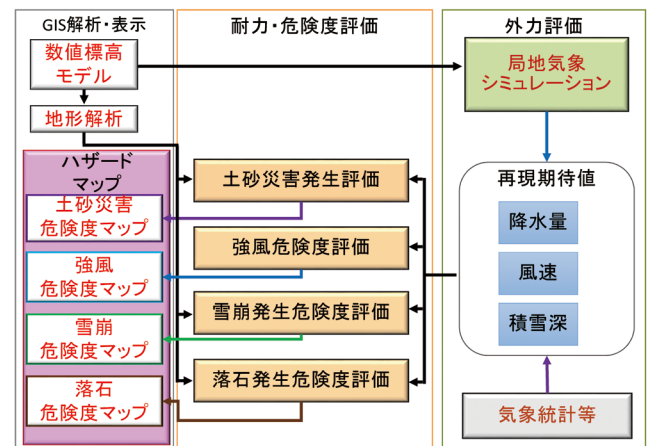


図2 気象災害ハザードマッピング技術における情報処理の流れ²⁾

2.2 リアルタイム化の必要性

一方、近年では顕著気象による災害が増加しており、きわめて短時間の豪雨や突風の発生・盛衰を予測して、対策をとる必要性が高まっている。いわゆる「ゲリラ豪雨」や竜巻などの気象現象は非常に局所的で、100m～数kmの範囲で生じるため、現在、鉄道沿線に展開されている気象観測網では十分にとらえられない。この種の気象現象の検知に対しては、現行の観測機器による「点」的な観測ではなく、技術的な発展が著しい気象レーダーによる「面」的な観測が有効である。また、短時間に急変した気象現象が収まった後の早期の運転再開も含めて即時的にハザードを評価する必要がある。

鉄道総研では、気象レーダーの観測情報を用いて、気象災害に関するハザードをリアルタイムで処理し、活用することで、列車の運転規制と運転再開の判断、旅客の避難を適切に行える技術の開発に注力している。

3. 「より早くより正確に」を目指す研究開発

リアルタイムハザードマップを構築するには、急変する気象状況を検知し、その盛衰を予測する技術、鉄道の被災状況の有無や程度を判断する技術、列車の運転規制や旅客の避難を支援する技術が必要になる。鉄道総研では、対象となる気象現象の検知、分析、対応策の判断、関係部署への伝達、列車や旅客の避難の各プロセスを早く正確に行い、豪雨や突風が鉄道を襲う前に対処することで、人的・物的損失を可能な限り抑えるための取り組みを進めている。

以下、河川の氾濫・浸水、突風、大規模土砂崩壊を対象に、ハザードマップのリアルタイム化を目指した研究開発の概要を紹介する³⁾。

3.1 氾濫・浸水ハザード

災害の発生が予想される雨量が観測された場合には、列車の運転を一時的に中止する降雨時運転規制がとられている。長時間の降雨や台風の接近時に、この種の対策は有効であるが、過去に例を見ないような短時間かつ局所的な豪雨を対象とした場合には、列車の運転を止めるにしても、どこに停車させれば、リスクがより少ないかの判断が求められる。駅の冠水などに伴う旅客の緊急的な避難の可能性を考慮して、適切な場所に列車を誘導しなくてはならない。

しかしながら、過去の知見から豪雨時の浸水域や浸

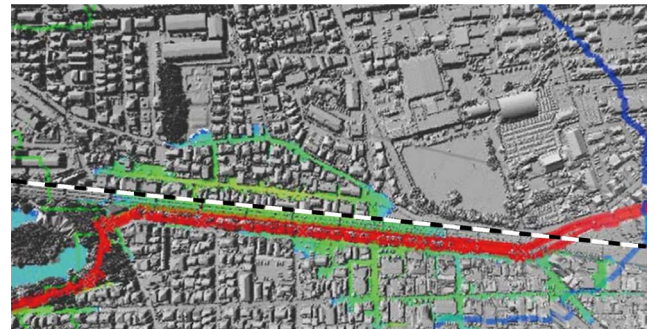


図3 逐次評価手法による浸水解析の例

水深を推察する従来型のハザードマップでは、ゲリラ豪雨のように急変する局所的豪雨に十分対応できない。鉄道施設の排水能力や、高架、開削、地下などの鉄道構造物の条件が考慮されていないため、実際に車両が水没するか否かが判断できないためである。そこで、鉄道総研では、地形情報を用いた流出解析に線路側溝や横断排水溝などの排水設備のモデルを導入し、さらに、高架橋や盛土といった構造物の情報を付加することで実際の氾濫状況を再現できる解析手法の開発を進めている⁴⁾。

また、雨量計やレーダーで観測した実況値を活用して、ゲリラ豪雨などにより突然発生する線路の浸水に予め対処することは難しい。そこで、防災科学技術研究所（防災科研）などと共同研究を行い、気象予測情報を用いて線路沿線の氾濫・浸水状況を予測するシステムの開発を進めている。

このような逐次解析手法による浸水解析の一例を図3に示す。図中、左右に横断する赤い直線は水路で、鉄道の線路はそれにほぼ並行して敷設されている。水路が氾濫し線路や道路が冠水する状況が示されている。現時点では、約2時間先までの予測降雨を用いて算出した予測結果を10分間隔で表示できる解析ツールを試作しており、今後は評価精度の検証とユーザビリティの評価、機能上の課題抽出を行う計画である。

3.2 突風ハザード

(1) 突風が鉄道に及ぼす影響

突風が列車を直撃し、脱線するのを防ぐため、突風の発生を検知して列車の停止位置を適切に制御するための研究にも取り組んでいる^{5) 6)}。1978年の東西線、2005年の羽越線、2006年の日豊線など、突風による列車の転覆事故が生じており（図4）、近年では、竜巻など極めて短時間（数分～数十分）の突風への備えが極めて重要となっている。



図4 突風による列車の転覆例(2006年, 日豊本線: JR九州提供)

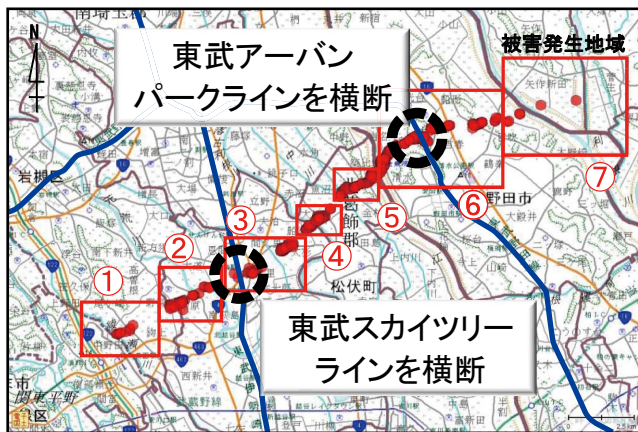


図5 2013年9月2日に発生した突風と鉄道影響(文献8の図に鉄道への影響を示す黒破線円と説明を加筆)

気象庁の「竜巻等の突風データベース」⁷⁾に基づき情報を整理した結果によると、2012年1月～2014年4月に発生した突風39事例のうち、21事例(54%)は鉄道線路の500m以内で被害が発生している。このうち、9事例は被害痕が鉄道線路を横断していた。図5は2013年9月2日に埼玉県から茨城県・千葉県にかけて発生した竜巻による被害発生位置を赤い点で示したものである。図中の青い実線が鉄道線路で、黒破線の円で示した部分で被害域が鉄道線路を横断している⁸⁾。

鉄道の強風監視は、沿線に設置された規制用風速計による風観測が主体である。規制用風速計の配置間隔は数km～数10km(平均で20km程度)であるため、それよりも小さな空間スケールで発生する突風(竜巻で110m程度、ダウンバーストで4km～10km)を、現行風速計の「点」的な測定で的確に検知するのは難しい。

(2) レーダーの活用による突風検知

一方、気象レーダーなど、上空の雨や風の状況を「面的に捉えられる気象測器の開発が進んでいる。気象レーダーは、地上から上空に電波を放射し、帰ってくる波を測定して雨粒の位置や強さ、動きを観測している。

雨粒の動きから雨粒周辺の風の状態を推定できるが、雨が降らなくても突風が発生する場合がある。雨を伴わない突風そのものをレーダーで検出することはできないが、突風は急速に発達する積乱雲に付随して発生しやすい傾向があるので、レーダーで積乱雲を検知することで、突風を検知する研究を進めている。

レーダーの情報から地上付近で発生する突風を検知するには、2つの課題がある(図6)。1つ目は、レーダーで得られる上空のデータの中から、地上で突風が発生しやすい箇所を抽出することである。現在は上空での風速差が大きく、強い降水強度を持つ雨雲がある箇所を特定して、突風の種類(竜巻、ダウンバースト、ガストフロントなど)、位置、強度などの突風指標情報の抽出を進めている。

2つ目は、前述の突風指標から地上での風速を推定する課題である。過去に発生した突風事例の数値シミュレーションデータなどを用い、突風発生時の上空と地上との関係性を明らかにして、地上での風速値を推定している。推定の結果、ある閾値を超えた場合に、「地上で風が強くなる範囲」と判断する。

豪雨に比べ、突風検出を目的とした取り組み事例は少ないため、十分なサンプル数での分析が必要など、研究開発はまだ途上であるが、竜巻の例でいえば、約10分先までの竜巻位置を約3分間隔で表示できることを目標に精度向上に努めている。

3.3 大規模土砂崩壊ハザード

短時間豪雨により大規模土砂崩壊の発生が懸念される区域を抽出し、崩壊の閾値となる雨量と閾値を超え

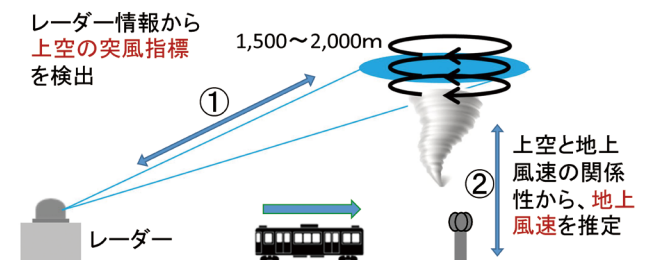


図6 上空のレーダー情報から地上付近の突風を検出するための2つの課題

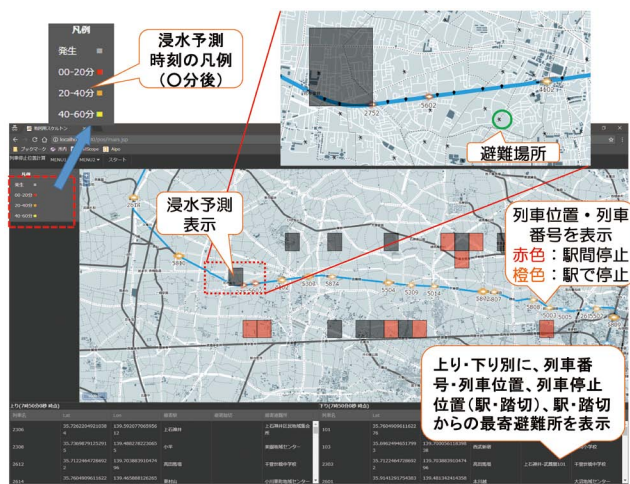


図7 浸水対応時の列車停止位置・旅客避難支援システムの画面例⁴⁾

た場合に想定される被災範囲を示すハザードマップの開発にも取り組んでいる⁴⁾。先行する発表⁹⁾で詳述したため、ここでは省略する。

3.4 ハザード評価に基づく列車停止及び避難手法

浸水や突風によるハザード評価結果を活用し、これらに遭遇する前にどの列車をどこに停車すればよいか、場合によっては旅客をどこに避難させればよいかを決定する手法の開発にも取り組んでいる¹⁰⁾。

開発中のシステムの画面イメージ例(浸水時)を図7に示す。このシステムではハザードの時系列データ、近傍の避難所や経路などの道路情報を含む地理情報データ、列車の停車可能な場所を含む配線情報、貨物や回送列車を含む列車ダイヤなどを入力データとして、列車の停車位置や避難経路を決定し、図のような解析結果を出力する。時刻ごとの列車の位置と進行方向、および災害箇所の関係から想定される複数の制約条件の下、列車はできるだけ駅に停車させるのが望ましく、自動車・歩行者交通の妨げとなる踏切での停車は極力

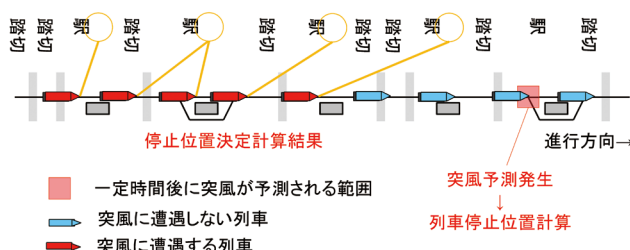


図8 突風予測時の列車停止位置決定アルゴリズムによる結果¹⁰⁾

避けるといったルールを加味して、列車を停止させるアルゴリズムによる結果を例示したのが図8である¹⁰⁾。すでに、システムのプロトタイプを作成し、引き続き改良を進めている。

3.5 さらに早く正確に

鉄道総研のリアルタイムハザードマップ開発の全体イメージを図9に示す。外部の気象予測情報などを元に、河川の氾濫・浸水、大規模土砂崩壊、突風の発生と鉄道沿線への影響を分析する。それに基づき、列車の運行や旅客の安全への影響が懸念される場合には、列車位置の制御、旅客の避難を実施する総合的なシステムである。

今後は引き続き、外部機関との緊密な連携を図ることで、気象情報をリアルタイムで活用する際の情報受信間隔の高頻度化や精度の向上を推進するとともに、突風多発域をケーススタディとしてデータを蓄積するなどして、突風の検知精度向上にも取り組みたい。また、事業者の協力を得て、試験的に導入した際のユーザビリティ評価や問題点の洗い出しを行い、実際に利用しやすいシステムへと改良する計画である。

実用化に際し、当初はシステム全体の導入より、部分的な活用という選択肢が現実的と考えている。例えば、いったん浸水したエリアを図示することができるため、雨が引いた後の鉄道施設・設備の点検作業に活かしたり、運転規制の有無や運転再開時の判断支援に用いたりなど、部分的な機能の活用実績を高めたい。また、将来的には、外部機関からの情報受信間隔の高頻度化のためのICT活用、運転規制対象となる列車群管理へのAI技術の適用など、処理速度、精度、有効性の一層の向上に取り組んでいきたい。

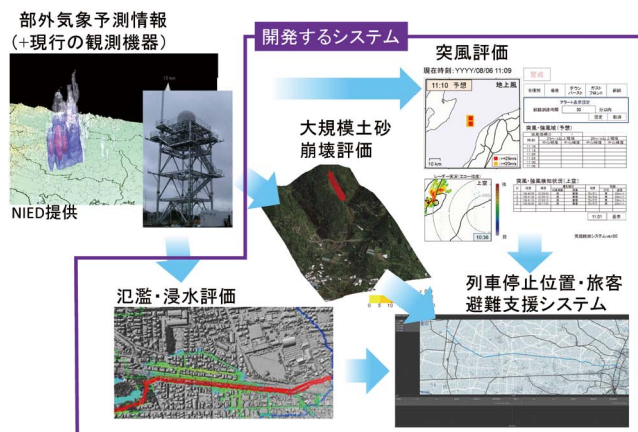


図9 リアルタイムハザードマップの全体イメージ(文献4の図を一部修正)

4. 安全な避難・誘導の実現に向けて

自然外力の急変を捉え、鉄道の安全性を高めるには、技術的・設備的な対策に加えて、避難・誘導、教育・訓練といったソフト的な対策が必要である。リアルタイムハザードマップが運用された際には、急激な気象変化によって緊急的な運転規制が実施されて駅や駅間に列車が停止し、その結果、避難所などへの誘導が必要なケースが生じると想定される。このため、旅客をどのようにして安全に避難させるかが現実的な課題となる。

4.1 避難シミュレーションの開発

鉄道総研では、列車の乗降時や駅構内の旅客の動きを模擬できる旅客流動シミュレーションを1970年代に開発し、改良を重ねてきた。このシミュレーションでは、対象とする駅の旅客流動エリアをメッシュに割り付け、メッシュ内の旅客密度の時間的推移をもとに旅客の移動を総合的に把握することができる。あたかも駅の屋根を切り取ったかのように、旅客の状況を真上から俯瞰し、刻一刻と変化する旅客の移動状況を動的にとらえ、各地点の流動レベルを把握することで、駅計画上の問題点の解明や改良効果の判断が可能になる。

この基本技術のノウハウを活用したのが避難シミュレーションである。シミュレーションには、避難時の基本的な行動特性データが不可欠なため、模擬駅舎を用いて一連の実験を実施した。例えば、停電を模した暗闇状態での旅客の避難行動に及ぼす要因を検討し、わずかでも光のある方向への移動や、他の人にとりあえず着いていく（多数派同調性バイアス）などの行動を確認した¹¹⁾。これらの結果を旅客流動シミュレーションに組み込み、避難シミュレーションの開発を進めてきた。

また、列車が駅間で停車した際の避難行動に関しても、模擬トンネルを用いた避難実験から、避難梯子を利用する際の降下時間やトンネル内歩行時間などのデータを収集し、梯子の設置数や位置を変えた際の避難時間を予測可能なシミュレーションの開発に取り組んでいる（図10）¹²⁾。

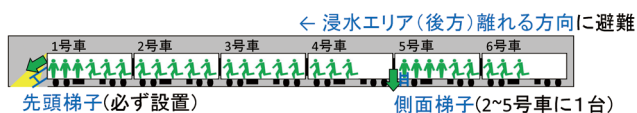


図10 優等列車からの避難シミュレーションの例

4.2 正常性バイアスと異常時のリソース不足

これまでに起きたトンネル火災事故の報告書によると、異常時における乗務員のリソース不足と乗客への協力要請の重要性などが指摘されている。しかしながら、具体的な測定・評価手法が確立されていないため、どのような協力要請法が効果的なのかは明らかになっていない。列車からの有効な避難方法の検討は、火災に固有の課題ではなく、地震、津波、豪雨などにも共通する。このため、鉄道総研では以下の二点に着目して、人間工学的な観点から、有効な避難法と訓練教材の開発を目指す研究開発を進めている。

(1) 正常性バイアスによる検知阻害

火災事故の報告書の中には「警報機は鳴ったが火災など起こるはずがないと思い、室内にいて避難が遅れた」といった反応が少なくない。人は予期しない事態に遭遇した際、「ありえない」「間違いだろう」といったバイアス（先入観）が働いて、「誤動作に違いない」「すぐに訂正の放送が入るだろう」と思い込みがちである。直面している事象に対し、まだ「正常な範囲内」と思い込みがちな習性を、心理学では正常性バイアスと呼んでいる。

「ある程度までの異常は正常な範囲」とみなすことで、脳は頻繁に混乱せずに済むため、ある意味では合理的な対処法である。しかし、実際の災害時に乗務員や指令がバイアスのため、「大丈夫だろう」と判断してしまうと、初動が遅れ、大事故につながりかねない。正常性バイアスの理解を促進して、訓練の効果を上げるための技術方策に関わる研究開発を進めている。

(2) リソースの限界と他のリソースの活用

異常時に運転士、車掌、指令がどのように対処すべきかを取り決めたマニュアルは各社に備えられているが、実際の場面では、「パニックになって、どれから手を付ければよいかわからなかった」「とても自分一人ではこなせなかった」といった感想が少なくない。人の処理能力（リソース）には限界があり、輸送混乱などの異常時には、高いストレス状態に置かれることで、リソースが一層低減しがちなことが知られている。しかしながら、異常時に一人の人間が処理できる作業量はどの程度であるかについての指針は示されていない。

リソース不足を補う有効な手段は、乗り合わせた非番社員や乗客のリソース活用である。しかし、やみくもに協力を求めても、効果は期待できない。予め自分のリソースを知り、他者への協力要請法を学習できる訓練が必要との観点からの研究開発にも取り組んでいる。

本章で述べたような研究成果を加味することで、リアルタイムハザードマップの実効性をさらに高めたい。

5. おわりに

本発表では、リアルタイムハザードマップの構築と題して、対象となる気象現象の検知から、鉄道システムへの影響の判断、旅客と列車の安全確保に関わる研究開発の現状と今後の取り組みの概要を紹介した。

リアルタイムハザードマップは単独で活用するだけでなく、地域防災と連携した鉄道防災ネットワークとして機能することで、即応性や有用性がより高まる¹⁾。連携により、①公的災害情報の鉄道防災への活用が容易となり、②列車が被災した際に旅客を迅速かつ安全に避難させることや、③地域社会と災害情報を共有化して共通した防災意識を持つことができる。これにより、より効率的なリスクマネジメントが実現し、鉄道にとっては地域社会と密着することで、災害発生時により大きな社会貢献が可能となる。

鉄道総研では、気象、地質、地震、構造物など、防災に関わる基本的な技術に加え、建築、人間工学、情報など、幅広い技術分野を統合して防災・減災プロジェクトに取り組んでおり、さらに安全な鉄道システムの実現に向けて引き続き貢献していきたい。

なお、本稿に記載した内容の一部には、内閣府戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) の「レジリエントな防災・減災技術の強化」による研究が含まれている。また、利用したXRAINデータは、国土交通省より提供されたものである。

引用文献

- 1) 太田岳洋：気象災害ハザードマップのリアルタイム化による鉄道防災ネットワークの構築，第28回鉄道総研講演会要旨集，pp.16-21，2015
- 2) 浦越拓野，福原隆彰，布川修，長谷川淳：気象災害ハザードマッピング技術の開発，鉄道総研報告，Vol.30，No.3，pp.5-10，2016
- 3) 太田直之：自然災害対策の課題と取り組み，鉄道総研報告，Vol.31，No.5，pp.1-4，2017
- 4) 川越健，尾崎尚也，太田直之：降雨予測値を活用した「局地強雨対応の鉄道減災システム」，SIP防災シンポジウム2017 予稿集，p.23，http://www.jst.go.jp/sip/dl/k08/sympo2017/poster_06.pdf，(2017年10月1日閲覧)，2017
- 5) 福原隆彰，高見和弥：新潟平野で発生した突風事象の空間構造，日本気象学会2017年度秋季大会，印刷中，2017
- 6) 高見和弥，福原隆彰：地上風速の急激な増加時における上空のウインドシアアの検出，日本気象学会2017年度秋季大会，印刷中，2017
- 7) 気象庁：竜巻等の突風データベース，<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/tornado/>，(2017年10月1日閲覧)
- 8) 熊谷地方气象台，銚子地方气象台，東京管区气象台：現地災害調査速報 平成25年9月2日に埼玉県さいたま市、越谷市、北葛飾郡松伏町、千葉県野田市、茨城県坂東市で発生した突風について，2013
- 9) 太田直之：第30回鉄道総研講演会要旨集，pp.39-44，2017
- 10) 尾崎尚也，渡邊拓也，深澤紀子：突風・浸水予測を用いた列車停止及び避難誘導アルゴリズム，鉄道総研報告，Vol.31，No.10，pp.5-10，2017
- 11) 石突光隆，山本昌和，青木俊幸：駅シミュレータを用いた避難行動特性に関する基礎研究，鉄道総研報告，Vol.22，No.7，pp.17-20，2008
- 12) 石突光隆，山本昌和：山岳トンネル内における鉄道車両からの避難に関する基礎検討，日本建築学会大会学術講演梗概集，A-2，pp.255-256，2016