

短時間に強く降る雨による土砂災害を防ぐ

公益財団法人鉄道総合技術研究所 防災技術研究部長
太田 直之



1. はじめに

国土の約7割が山間地であり、かつ、中緯度地域に位置する日本は、明瞭な四季を有する気候条件と自然豊かな地理条件とから、美しい自然環境に恵まれた国土を有しているといえる。このような自然環境にある山間地を走るローカル線沿線の風景の美しさが、最近の鉄道ブームの高まりに大きくひと役買っていると思われる。その一方で、我が国の気候は、梅雨時期の前線の停滞による長雨や夏から秋にかけての台風の襲来による豪雨など、災害を引き起こす豪雨が度々もたらされるという特徴も有している。特に山間地を走る線区では、豪雨による多くの土砂災害を経験してきた。このような風土にあって、鉄道防災は地道にその技術を磨き、災害から鉄道を守る取り組みを綿々と続けてきた。このような中、線状降水帯による豪雨や、ゲリラ豪雨と呼ばれるような局所的に急激に成長した積乱雲による豪雨など、これまでにないタイプの雨による災害が、近年徐々に増加している。これらの豪雨は、被災規模が大きくなる傾向があるため、我が国の防

災対策の中でも「短時間に強く降る雨」（以下、短時間強雨と呼ぶ）への対応が喫緊の課題としてクローズアップされている。

本稿では、近年の短時間強雨災害の事例を紹介した上で、将来の発生し得る豪雨の予測結果を示すとともに、その際に予想される被災形態を明らかにする。また、予想される被災形態を防ぐための課題を挙げ、それらを解決するための技術開発について述べる。さらに、急激な気象の変化に対応するために必要な技術について提言する。

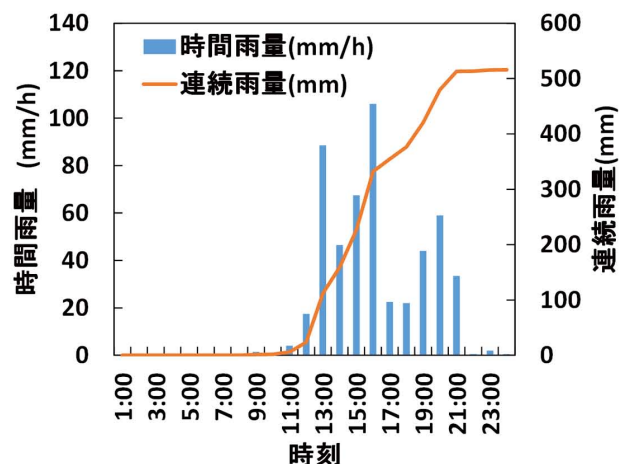
2. 降雨の変化と想定される被災形態

(1) 降雨の変化

図1 (a) は、今年7月に発生した平成29年九州北部豪雨によるJR九州久大本線花月川橋りょうの被災状況を示している。増水した河川水により4本の橋脚が下流側へ倒壊し橋桁が流失した。この豪雨では、大分県および福岡県南部で甚大な災害がもたらされ、現在も復旧活動が継続されている。図1 (b) には被災箇所



(a) 橋りょうの被災状況



(b) 災害当日の雨の状況

図1 平成29年7月九州北部豪雨の被災状況と降雨観測値

に近い朝倉市に設置されているアメダスで観測された災害当日の降雨データを示した。線状降水帯が発生し、その後同一箇所在一定時間維持されたため、50mm/hを超す雨が数時間継続した。また、最大の時間雨量が106mm/hに達する猛烈な雨が記録された。このような短時間強雨が近年増加傾向にあるといわれている。

国連関係機関であるIPCC（気候変動に関する政府間パネル^{*}）は、2013年から2014年にかけて、気候変動に関する最新の知見を盛り込んだ第5次評価報告書¹⁾を公表している。この報告では、「気候システムの温暖化には疑う余地がなく、また、1950年代以降、観測された変化の多くは、数十年から数千年間にわたり、前例がない」とされ、地球の温暖化が確実に進んでいることが明らかにされた。また、気象庁では、「気候変動監視レポート」²⁾を毎年作成し、気候変動に影響を与える温室効果ガスやオゾン層等の状況をはじめ、世界と日本の様々な気象の傾向を、気象観測データを基に示している。その中で、1898年から2016年までの年平均気温の偏差（1981年から2010年までの気温の平均値との差）が示されており、日本の平均気温は変動を繰り返しながら100年当たり1.19℃上昇していることが明らかにされた。また、同レポートでは、豪雨の発生頻度の傾向も示されており、時間降水量80mm/h以上の猛烈な雨は確実に増加していると捉えられる。

このように、平均気温の上昇と短時間強雨の発生回数増加とは整合する傾向を示している。そこで、既往の解析結果を利用して21世紀末の降雨量の予測を試みた。予測には地球環境情報統合プログラム³⁾のデータ統合解析システム（DIAS）³⁾に保存されている地域気候モデル（MRI-NHRCM20）の解析結果のうち、温

室効果ガスの代表濃度経路シナリオRCP8.5の結果を利用した。ここで、RCP8.5は、IPCCの第5次評価報告書に示されたシナリオのうち、2100年における温室効果ガス排出量の最大排出量に相当するシナリオである。すなわち、このシナリオは現在想定されているなかで最も温暖化が進む、いわば最悪のシナリオと捉えることができる。これらの解析結果を用い、1984年から2004年までの20年間の実観測データによる補正を加え、さらにバイアス補正を加えた上で2080年から2100年までの20年間の降雨量予測値を1km間隔の格子点ごとに求めた。このような処理を行い、首都圏で最も1時間雨量が大きい雨を抽出した結果が図2である。降り始めから5時間程度は1mm/h程度の降雨であるが、その2時間後には134mm/h、さらに1時間後には180mm/hと、降雨が急激に強くなるのがわかる。現在の国内の1時間雨量の最大値153mm/hを大きく上回る雨量が予想された。また同図には、類似した降雨パターンの事例として平成24年九州北部豪雨の際にアメダス（阿蘇乙姫）で観測された降雨を併記した。両者は非常に似た降雨パターンを示しているが、今世紀末に予想される1時間雨量の最大値は平成24年九州北部豪雨を80mm/hほど上回っている。

(2) 予想される被災形態

上述のように、今世紀末に予想された短時間強雨は、最大時間雨量は異なるものの平成24年九州北部豪雨と非常に似た降雨パターンを示している。そこで、同豪雨による災害事例を顧みることで、将来発生し得る未経験の短時間強雨による被災形態がある程度予想できると考えられる。図3は同豪雨によって被災したJR

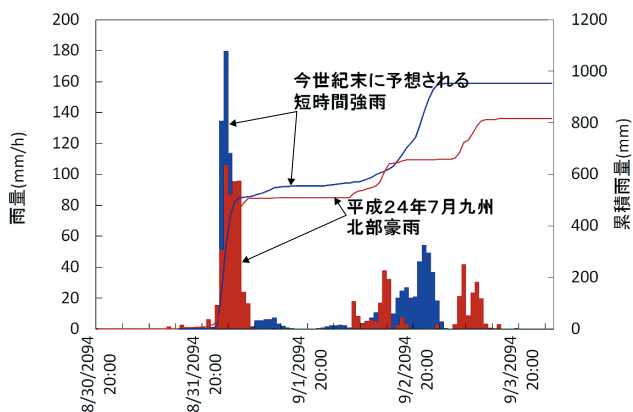


図2 今世紀末に予想される短時間強雨と平成24年九州北部豪雨



図3 平成24年九州北部豪雨による鉄道の被災事例

^{*}気候の変化、影響、適応および緩和策について、科学的、技術的、社会経済学的な知見から評価を行う国連関係機関。その報告書は温暖化ガス排出量に関連した国際交渉に強い影響力を有する。

九州豊肥線の被災状況の一例である⁴⁾。写真は、阿蘇の外輪山を貫く坂の上トンネルの熊本側の坑口の状況である。反対側坑口付近の河川が氾濫してその河水がトンネル内に流入し、トンネル内のレール約2km分をトンネル外へ流出させるという、これまでにない特殊な被災形態が発生した。

また、この災害では、JR九州豊肥線の阿蘇の外輪山の山裾や山腹を走る線区の多くの箇所が被災したが、一箇所あたりの崩壊面積が大きいという特徴が見られた。崩壊の規模が大きくなると、その崩土の到達距離も遠方まで及ぶ。また、山腹を走る線区で多くの盛土が流失した。これは、雨によって鉄道よりも上方の斜面で崩壊が発生し、その崩土が盛土の山側に大量に堆積して横断する排水設備を閉塞させたため、盛土上を崩土ともに大量の水が越流したことにより盛土が崩壊して流失したためと推定される。このような鉄道から離れた箇所で発生した斜面崩壊の崩土による土石流や土砂流入は、短時間強雨による被災事例の典型といえる。

この他に、自然斜面が短時間強雨によって大規模に崩壊した事例は、2011年7月の新潟・福島豪雨、2013年7月の島根・山口豪雨、2014年8月の前線による大雨で被災した広島の実例など近年特に多くみられている。

また、図4は短時間強雨時に発生した盛土の特殊な崩壊事例を示している。写真のような平坦な水田地の中にある盛土が、最大時間雨量90mm/hの強雨によって崩壊した⁵⁾。盛土の崩壊は、一般に、雨水や地下水が盛土に浸透して盛土内の水位が上昇して盛土が安定性を失うことで発生する。したがって、通常は山間地の集水地形にある盛土などが崩壊し易く、本事例のような集水要因のない平坦地に築堤された盛土の降雨による崩壊はこれまで見られなかった。すなわち図4は、降雨時の弱点箇所と認識されていない箇所であっても短時間強雨時には被災する可能性があることを示している。

3. 短時間強雨への対応技術

前章で述べたように、短時間強雨の発生回数は増加する傾向にあり、また将来、その最大時間雨量は現在の値を遥かに凌ぐ降雨となる可能性が否定できない。したがって、このような短時間強雨により発生すると考えられる被災形態を対象として防災業務に注力する必要がある。ここでは短時間強雨に対する防災上の課題



図4 平坦地の盛土の崩壊

と、その課題解決を目的とした鉄道総研の取り組みについて紹介する。

(1) 技術的課題

短時間強雨に対する取り組みの課題として、以下の項目が考えられる

1) 短時間強雨特有の被災形態への対応

図4に示した事象は短時間強雨特有の崩壊メカニズムにより被災したと推定される。このため、これまで明らかにされていなかった崩壊メカニズムを解明した上で、そのメカニズムに対応した機能を有する対策工を施工する必要がある。

2) 大規模化する土砂崩壊への対応

自然斜面が大規模に崩壊する恐れのある箇所を抽出する手法が確立されていない。また、危険な箇所が選定されたとしても、どの程度の雨量で危険な状態に達するかが明らかにされていない。このため、大規模崩壊の危険箇所抽出方法と崩壊メカニズムに基づく危険度評価法を作成する必要がある。

3) 土石流・土砂流入への対応

発生源となる斜面を抽出する手法が確立されていない。また、土石流は線路から離れた斜面が崩壊して沢伝いに流された崩土が線路に到達するケースがあるため、広範囲の斜面を対象とした調査が必要になる。この調査の省力化を図る必要がある。

(2) 短時間強雨に特有の被災形態

図4に示した短時間強雨に特有の崩壊現象を模型実験で再現した。図5のような高さ1m、勾配1:1.5の模型盛土を作成した。実際の盛土の状態に合わせて、盛土天端へのバラストのめり込みを再現した碎石層

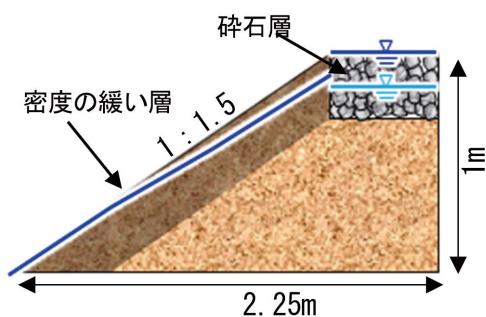


図5 実験に用いた盛土の概要

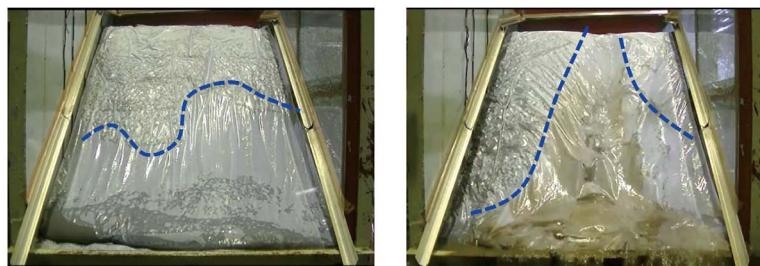


図6 実験結果(破線より下方が崩壊)



(網掛けが崩壊部を示す)

図7 短時間強雨に対する格子枠工の効果

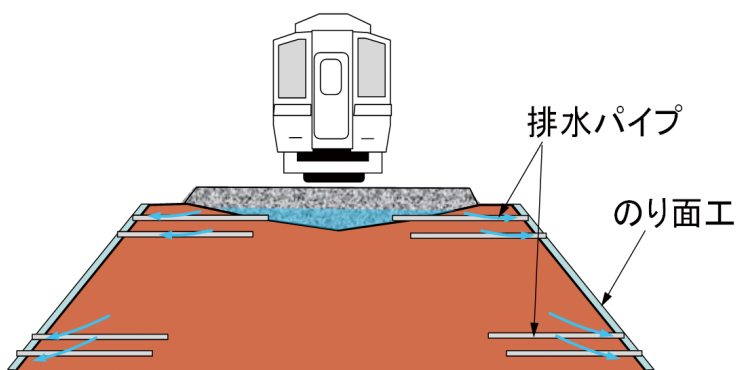


図8 盛土の短時間強雨対策

と、盛土内部に比べて緩い密度の表層部分とを再現した。このような模型盛土に、時間雨量100mm/hの一定降雨を与えて盛土の崩壊プロセスを確認した。

実験の結果、100mm/hという強い雨の場合、盛土に降った雨は盛土深部へ浸透せずに盛土天端に水位を形成することが明らかになった。これは盛土材の透水性が砕石層に比べて小さく、短時間強雨の場合、表面水が盛土へ浸透する速度よりも降雨によって供給される量の方が多いために生じる。そして、砕石層内に溜まった水が湛水可能容量を超えてのり面方向へ溢れ出る際に、のり肩が崩壊することが明らかになった。

このように、盛土天端の湛水が短時間強雨による崩壊の主な原因であると推定されたことから、湛水の有無が崩壊に及ぼす影響を同様の模型実験で確認した。図6に実験結果を示したが、湛水無しの場合であっても、表層部分に浸透した表面水がのり尻部分に侵食崩壊を生じさせることが明らかになった。湛水ありの場合は湛水がのり面方向へ流出することによるのり肩部の崩壊と土羽部の浸透によるのり尻の侵食崩壊が並行して発生し、湛水がない場合よりも短時間で崩壊することが明らかになった。

これらのことから、盛土の短時間強雨対策として、盛土のり肩およびのり尻の両方へ排水対策を施工することが重要であること、また、主にのり面の侵食により崩壊に至ることが明らかになった。そこで、侵食防止を目的としたのり面工の短時間強雨に対する効果確認を実験で確認した。盛土の降雨対策には、格子枠工や張ブロック工が用いられることが多い。このうち被覆により雨水の浸透を妨げる張ブロック工の効果は高いと予想されたため、実験では遮水効果のない格子枠工を用いた。実験結果の一例を図7に示す。格子枠工がない場合(図の右側)には盛土の上端部まで崩壊が達しているが、格子枠が施工された箇所では、枠内に侵食が抑えられてのり肩に崩壊が伸展しないことが明らかになった。実際には格子枠内には植生工や張ブロックが施工されることが多いため、枠内の侵食はさらに抑えられると推察される。

このように、通常の雨では弱点とならない盛土であっても短時間強雨時には崩壊が発生する可能性があるが、図8のように、のり肩およびのり尻の排水工とのり面工を併用することで盛土の短時間強雨対策となることを提案した。

(3) 大規模化する土砂崩壊への取り組み

強雨によって大規模斜面崩壊が発生する箇所を事前に抽出する手法の開発に取り組んでいる。過去に大規模崩壊が発生した箇所のうち、その崩壊発生前の数値地形情報を取得できる箇所を対象として、崩壊前に判読できる地形的な特徴を検討している。図9(a)は、2011年8月の台風12号により大規模な斜面崩壊が発生した箇所の崩壊発生前の地形図を示している。この台風では、和歌山県新宮市で観測史上1位となる132.5mm/hの時間雨量を記録するなど、紀伊半島で特に強い雨が降った。この雨により和歌山県や奈良県で多くの大規模斜面崩壊が発生し、河川を堰き止める「自然ダム」が複数形成された。そのうちのひとつが図9に示した崩壊例であり、斜面延長約800m、幅約400mにわたり崩壊が発生した。崩壊発生箇所の周辺には、馬蹄形を為した遷急線(斜面下方に向かって緩い勾配から急勾配へと変化する地点を結んだ地形図上の線)、小規模な崖地形、線状に連なる窪地、山頂部に緩斜面が見られるなど、複数の地形的な特徴がみられる。これらの地形的特徴と実際の崩壊箇所との位置関係を明らかにし、強雨による大規模斜面崩壊発生危険箇所の抽出方法に繋げるよう検討を進めている。

また、斜面の深さ約10mの範囲が断続的な滑動がみられた箇所をモデルケースとして、その挙動を再現する解析モデルの作成に取り組んでいる。このケースでは、従来の地すべり滑動のような地下水位の上昇による滑動の活発化とは異なり、地盤内の飽和度の変化にともなう緩慢な滑動が継続している。このモデル化の取り組みを通して、飽和度の上昇による滑動部分の重量増加や地盤の強度低下を加味した解析手法を構築することで、崩壊の発生が高まる降雨の閾値の設定に繋がると考えている。

また、斜面崩壊が発生した後に崩土が線路に到達するか否か、到達する場合に線路上のどの程度の範囲に

崩土が広がるかを推定する解析手法の開発にも取り組んでいる。図9(b)は崩土が斜面上を移動して線路に到達する状況を再現した解析結果の例である。このような解析手法を用い、土石流堰堤などの対策工を考慮した上で線路への到達状況を事前に予測することが可能となる。

上述のような方法により、大規模崩壊の危険箇所を抽出し、崩壊の危険性が高まる降雨量を把握し、さらに崩壊した場合に崩土が到達する範囲を推定することで、大規模土砂崩壊を対象とした対策の施工計画に寄与する情報を提供するシステムの構築を目指し、開発に取り組んでいる。

(4) 土石流および土砂流入対策技術への取り組み

上述のように、土石流や土砂流入は線路から離れた箇所で発生した斜面崩壊が溪流を流れ下って線路に到達することで鉄道に被害を及ぼす。したがって、これらの発生源となる箇所を特定する必要がある。そのためには広範囲な斜面に対する崩壊危険度を把握する必要がある。これに対しては、国や自治体が整備しつつある土石流や斜面崩壊を対象としたハザードマップを利用することで危険箇所を効果的に特定することが可能となる。ただし、これらのハザードマップについては、民家の存在など土石流が発生した場合に重篤な被害が生じる箇所を中心に整備されており、山間の鉄道で被害が及ぶと予想される箇所について必ずしも網羅されてはいない。また、ハザードマップが整備されていない地域に対して新たにこれを作成するためには、専門家による調査や検討が必要であり、これらに掛かる時間とコストは相応な規模になる。そこで、任意の地域に対して専門家の調査や検討を行わずにハザードマップを作成するシステムを開発した。

開発したシステムでは、10mメッシュサイズの数値地形情報を用いて作成した図10に示すような地形の三次元モデルを使用する。システムでは、斜面に降った雨が地盤表面を流れる表面水、表層に浸透して表層

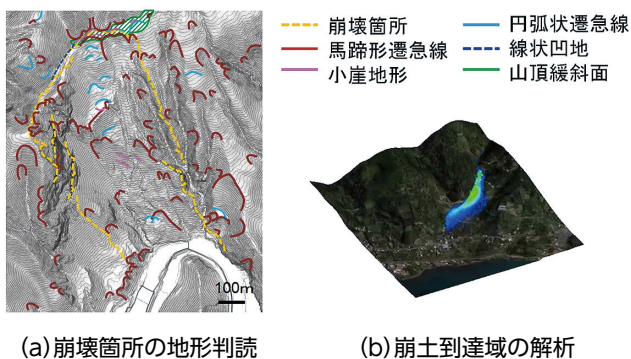


図9 大規模土砂崩壊危険箇所の抽出と崩土到達範囲の推定

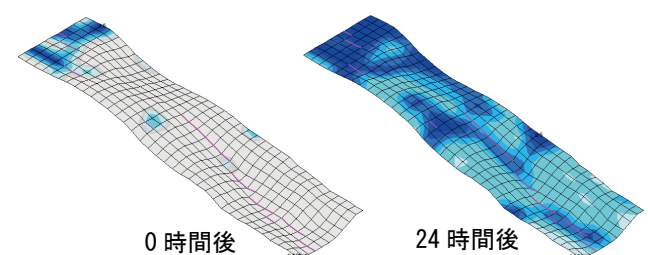


図10 地盤内水位の変化の解析

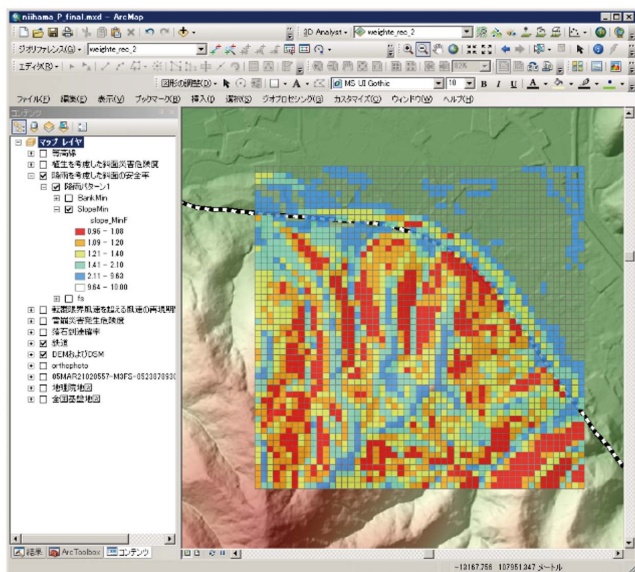


図11 土砂災害ハザードマッピングシステムの表示例

中を下方へ浸透する表層浸透水および表層より深い層へ浸透する浸透水に分けられる。これらの水の要素間の収支を計算して求めた要素毎の飽和度を基に、斜面表層内に形成される水位を求める。また、システムでは、求めた水位を用いて各要素の安定度を計算する。この計算を時間とともに変化する降雨を入力値として繰り返し行い、要素毎の安全率の変化を図11のように表示する。このシステムにより、斜面の傾斜や形状に応じて斜面表面および表層中を移動する水による崩壊の危険度を、降雨の変化に応じて評価することができる。

このように、開発したシステムは任意の降雨の入力が可能であるため、将来発生し得る未経験豪雨に対して危険となる箇所を評価することもできる。また、同システムは降雨による表層崩壊だけでなく、強風、落石、雪崩の各ハザードを分析評価する機能を有している。

4. 気象の急激な変化への対応

上述の取り組みを検査に取り入れて、検査をさらに充実することが短時間強雨対策に有効と考えられる。その一方で、事前防災として対策を施工する場合、ある程度発生し得る雨を想定する必要があるが、図2のような極端な強雨を全ての線区に想定することは事実上困難であり、この点において事前防災には限界があるといえる。そこで気象状況に応じた運転規制が重要となるが、急激な積乱雲の発達による局所的豪雨については、現在の観測値による運転規制では対応が遅れ

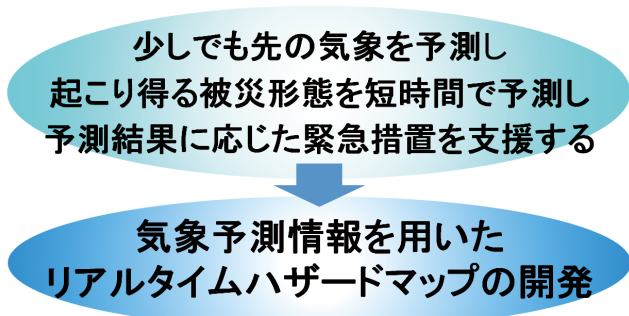


図12 リアルタイムハザードマップの概念

ることとなる。そこで鉄道総研では、雨量が急激に増加し、しかもその雨量が未曾有の短時間強雨となるようなケースを想定し、図12に示した概念のリアルタイムハザードマップの開発に取り組んでいる。

5. おわりに

降雨災害全般については、危険な箇所を事前に捉えることができるか否かが防災上極めて重要となる。そのためには従来実践されている検査を中心とした防災の取り組みが必要であり、これは強雨の場合でも同じである。また、気象災害に対するより一層の対策として、リアルタイムハザードマップシステムの構築を目指していることに触れた。この技術に近年進歩の著しいICTを導入することで、列車の自動運転技術に繋がる防災システムとすることが可能と考えられ、未来の安全で安定した鉄道の実現に寄与できると考えている。

参考文献

- 1) 環境省：気候変動2014：気候変動に関する政府間パネル第5次評価報告書統合報告書政策決定者向け要約：http://www.env.go.jp/earth/ipcc/5th/pdf/ar5_syr_spmj.pdf (参照日：2017年9月21日)
- 2) 気象庁：気候変動監視レポート2016：<http://www.data.jma.go.jp/cpinfo/monitor/> (参照日：2017年9月21日)
- 3) 文部科学省：<http://www.diasjp.net/> (参照日：2017年9月21日)
- 4) 九州旅客鉄道株式会社：平成24年7月九州北部豪雨災害復旧工事誌
- 5) 小浦貴明：平成24年度災害の概要 JR西日本、日本鉄道施設協会誌、Vol.51, No.6, 2013