

第36回
鉄道総研講演会

気象災害に備える鉄道技術

2023年10月20日(金)

有楽町朝日ホール

公益財団法人鉄道総合技術研究所

目 次

特別講演

1 超高齢・情報社会における気象災害の防止軽減

国立研究開発法人防災科学技術研究所

理事長 寶 馨

基調講演

9 気象災害に備える鉄道技術

理事 古川 敦

講 演

19 激甚化する降雨災害に対する鉄道インフラのレジリエンス向上

構造物技術研究部長 神田 政幸

29 シミュレーションによる気象災害の解明と予測精度の向上

鉄道力学研究部長 上半 文昭

37 気象データを活用した鉄道防災技術

防災技術研究部長 布川 修

講演者プロフィール

たから かおる

寶 馨 工学博士 国立研究開発法人防災科学技術研究所 理事長

<プロフィール>

1990年 岐阜大学工学部助教授
1994年 京都大学防災研究所助教授
1998年 同 防災研究所教授
2015年 同 防災研究所長
2017年 同 大学院総合生存学館長
2018年 同 大学院全学教員部(大学院総合生存学館)教授
2022年 京都大学名誉教授
2023年 国立研究開発法人防災科学技術研究所理事長(現職)

ふるかわ あつし

古川 敦 博士(工学)

<プロフィール>

1990年 東京大学大学院工学系研究科土木工学専攻修士課程修了
2011年 軌道技術研究部長
2016年 研究開発推進部長
2019年 総務部長
2020年 理事(現職)

こうだ まさゆき

神田 政幸 博士(工学)

<プロフィール>

1993年 東京工業大学大学院理工学研究科土木工学専攻 修士課程修了
2016年 構造物技術研究部 上席研究員(兼)事業推進部 担当部長
2017年 構造物技術研究部長(現職)

うえはん ふみあき

上半 文昭 博士(工学)

<プロフィール>

1994年 早稲田大学大学院理工学研究科建設工学専攻 修士課程修了
2014年 鉄道力学研究部 構造力学研究室長
2018年 鉄道力学研究部長(現職)

ぬのかわ おさむ

布川 修 博士(工学)

<プロフィール>

1997年 東京工業大学大学院理工学研究科土木工学専攻 修士課程修了
2016年 防災技術研究部 地盤防災研究室長
2022年 防災技術研究部長(現職)

超高齢・情報社会における気象災害の防止軽減

国立研究開発法人防災科学技術研究所 理事長
寶 馨



1. はじめに

毎年のように極端な気象現象が頻発し、日本各地を襲っている。計画規模を超過するような現象に対しては、大規模な氾濫・浸水が発生し甚大な被害をもたらされる。社会現象としては、高齢化が進む一方、情報通信システムはますます高度化している。こうした状況を踏まえながら、いかに災害に備えるかについて講述する。さらに、防災科学技術研究所（防災科研）が提供する様々な防災情報を紹介するとともに、社会と研究の関係を考察する。

2. 国難級の巨大災害

2.1 被害の推定

土木学会レジリエンスの確保に関する技術検討委員会は、「国難」をもたらす巨大災害対策についての技術検討報告書（2018）において、南海トラフ地震等の巨大災害が発生した場合の被害額を表1のように推定した。ここに、経済被害とは、国内総生産（GDP）がどのくらい落ち込むかという被害、資産被害とは、建

表1 巨大災害による被害の試算（単位：兆円）

巨大災害		経済被害	資産被害	財政的被害
地震・津波 (20年累計)	南海トラフ	1,240	170	131.0
	首都直下	731	47	77.0
高潮 (14月累計)	東京湾	46	64	5.0
	大阪湾	65	56	7.0
	伊勢湾	9	10	1.0
洪水 (14月累計)	東京荒川	26	36	2.8
	大阪淀川	7	6	0.7
	名古屋域	12	13	1.3

物や住宅が受ける被害である。財政的被害とは、災害が発生すると税収減になるので、どの程度の税収減になるかを意味する。

極大な被害をもたらす南海トラフ地震の場合、冬の深夜に発生したとすると、死者数は約32.3万人、避難者は950万人と見積もられている。インフラ整備（ハード対策）として海岸堤防対策、道路、建物耐震対策、港湾・漁港耐震強化など、38兆円以上投入すると、1,240兆円の被害総額は41%縮小でき731兆円に収まる。死者数も18.2万人となり43%減らせるという。さらに、徹底的なリスク・コミュニケーションによる「ソフト対策」で合計死者数を23.7万人減らせるが、それでもなお死者数は8.6万人にもものぼる。

2.2 防災投資

今後30年間に発生する確率が70%と言われる南海トラフ地震に対し、これから15年間で上記の38兆円を投入するとすれば、年間2～3兆円の投資額となり、これは20世紀終盤の我が国の公共事業投資に相当する。ちなみに、新型コロナウイルス感染症のために増えた歳出は2020～21年度だけでも100兆円を超える。なお、2023年度国家予算の歳出総額は114兆円余り、そのうち公共事業費は6.1兆円である。ちなみに、文教及び科学振興に5.4兆円、防衛関係費は6.8兆円である。

3. 頻発・増大する気象災害

国土交通省によると、2019年の全国の水害（洪水、内水、高潮、土石流、地すべりなど）による年間水害被害総額は2兆1,500億円で、1961年の統計開始以来最大（津波を除く）となった。被害の内訳は、住宅や生活用品などの一般資産が1兆5,939億円（74.2%）、河川や道路など公共土木施設が5,233億円（24.4%）、

鉄道や水道などの公益事業が304億円(1.4%)であった。このうち1兆8,600億円は10月中旬の令和元年東日本台風(台風19号)による被害で、単一の水害被害としては、2018年7月豪雨(台風7号と梅雨前線)の1兆2,150億円を上回り、過去最大となった。千曲川近くの車両基地で新幹線車両が水没した際の被害は150億円、運行休止による10月の売り上げ減は120億円とも言われる。ちなみに、博多発の東海道新幹線列車が豪雨洪水でストップし、東京着が22時間以上も遅れた2000年9月の東海豪雨の際の水害被害額は、8,500億円であった。

3.1 脆弱な高齢者

2018年7月の西日本豪雨では、広域の豪雨・洪水災害となり、死者数が216人となった。死者数が200人超となったのは、10個の台風が上陸した2004年以来のことだった。ただし、これは、単独事象で200人超なので、

表2 2018年西日本豪雨時の年齢層別死者数

年齢層	人口(万人)	比率	死者(人)	比率
0～4	483	3.82%	2	0.9%
5～9	517	4.09%	5	2.3%
10～14	539	4.27%	5	2.3%
15～19	590	4.67%	3	1.4%
20～24	634	5.02%	0	0.0%
25～29	617	4.88%	5	2.3%
30～34	689	5.45%	3	1.4%
35～39	764	6.05%	6	2.8%
40～44	900	7.12%	13	6.0%
45～49	971	7.69%	10	4.6%
50～54	843	6.67%	6	2.8%
55～59	765	6.06%	15	6.9%
60～64	759	6.01%	14	6.5%
65～69	922	7.30%	22	10.2%
70～74	832	6.59%	28	13.0%
75～79	702	5.56%	28	13.0%
80～84	532	4.21%	24	11.1%
85～89	353	2.79%	16	7.4%
90～94	170	1.35%	8	3.7%
95～99	45	0.36%	3	1.4%
100～	7	0.06%	0	0.0%
合計	12,634	100.00%	216	100.0%

その意味では史上最悪の豪雨・洪水災害となった。その時、倉敷市ではハザードマップに示された浸水区域とほぼ一致する面積が浸水した。インタビューに答える西日本豪雨の被災者の声としては、「ハザードマップの存在を知らなかった」、「知っていたけど、まさか自宅が・・・」などが多かった。ハザードマップを確認することの大切さを住民たちは切実に感じたはずである。

2018年7月31日付朝日新聞DIGITALに、平成30年(2018年)7月に発生した豪雨(西日本豪雨)で亡くなった方の氏名と年齢が書いてあった。亡くなった216人を5歳ごとに分類し、その年齢層の人口と死者数を対比させたのが表2である。右から2つ目のコラムが亡くなった216人を年齢別に分類したもの。左から2つ目のコラムはその年齢層の全国の人口である。西日本豪雨での年齢層別の死者数を全死者数216人で割った比率が右端の数字である。例えば、西日本豪雨で亡くなった65歳～69歳の死者数22人の全死者数における割合が10.2%である。65歳～99歳までを黄色でハイライトしているが、高齢者の比率が高いことが分かる。65歳～69歳の人口の全体における比率が7.3%であるのに対して、死者の比率は10.2%と高いことが分かる。高齢者の脆弱性が高いことが示されている。

3.2 防災と福祉の連携

2004年7月に新潟で洪水が発生した。表3はその時に何が起こったかを示したものである。中ノ島町は浸水深3m以上で、洪水流で家屋が倒壊した。75歳の女性、76歳の男性、78歳の女性が倒壊した家屋の内部で亡くなった。三条市の信越本線東側は浸水深1.5m程度、流速は速かったが、家屋は倒壊しなかった。し

表3 2004年新潟洪水時の被災状況

地域	中ノ島町	三条市 信越本線東側	三条市 信越本線西側
浸水深	3m以上	1.5m程度	1.5m程度
被災状況	洪水流で家屋は倒壊。	流速は速いが家屋は倒壊しない。	流速は遅い。破堤から1.5時間後急速に浸水。
死亡場所	倒壊した家屋の内部。	屋外。2人は避難所への移動中。	自室。全員が歩行障害。その場に介助者無し。
死亡年齢(下段女性)	76 75, 78	37, 63, 72 42, 78	78 76, 85, 88

かし、屋外で死者が発生した。37歳の男性と42歳の女性の2人は避難所への移動中であった。避難のタイミングが悪かったということになる。情報伝達・避難勧告の的確性・適時性が問われる事例となった。三条市の信越本線西側も浸水深1.5m程度で流速は遅かったが、破堤から1.5時間後急速に浸水した。全員が自室で亡くなっており、全員が歩行障害であった。その場に介助者も家族もいなかった。いわゆる「寝たきり老人」が自室でおぼれ死ぬという悲惨な事例であった。防災と福祉の連携の必要性が見いだされた。防災と医療、公衆衛生の連携も重要であることが教訓となった。

これに関連して、福祉施設の被災事例を紹介したい。1998年8月の福島県西郷村土石流、2004年の台風23号による兵庫県豊岡市洪水、2010年の豪雨災害による鹿児島県奄美大島洪水、2011年3月は東日本大震災の津波により岩手・宮城・福島で17施設が被災した。2016年台風10号による岩手県岩泉町洪水、2018年の西日本豪雨災害による18高齢施設の入所者470人が死亡した。

国土交通省が要配慮者利用施設における自衛水防の必要性ということで対策を打ち出した。要配慮者利用施設は空いた土地、すなわち川沿いの土地、山裾の土地に建てられることが多い。つまり、災害に対して脆弱な土地に建てられていることが多いと言ってよい。要配慮者利用施設の管理者には災害に対して脆弱な土地に建てられていることを知らせ、また様々な災害発生事例を示して注意を促している。

3.3 「超超高齢社会」日本

国連の報告書では、1956年から65歳以上人口に着目するようになった。65歳以上人口が7%以上で高齢化社会、14%以上で高齢社会、21%以上で超高齢社会と呼ばれる。日本は、1970年に65歳以上の人口が7%を超えて高齢化社会になり、1993年に14%を超えて高齢社会になった。さらに、2007年に21%を超えて超高齢社会になり、2018年には28%を超えたので、「超超高齢社会」になったと言える。少子高齢化の人口動態からして、我が国においては、今後ますます超高齢社会が進むことが予想されている。

4. 防災情報について

4.1 データ・情報・知識・知恵

豪雨災害対応に50mmという雨量がよく用いられる。50mmの雨というのは、コップ1杯の水より少ない。子どもたちに聞いてみると、「何や、たいしたことな

いやん」ということになるわけだが、この50mmの雨が面的に集積して、大変な都市水害をもたらす。

50mmはデータである。1時間に50mmの雨と聞いて、「それはすごい雨ですね」と言う人は、1時間に50mmの雨を意味ある情報として把握している人である。もし、タクシーの運転手が1時間に50mmの雨と聞いて、道路が冠水しないかなと考えられたら、その運転手は50mmというデータを意味ある情報として把握し、都市水害の知識があると言える。さらに、あの道路は冠水しそうだから、きょうはこちらの道を通って帰ろうということになれば、災害を未然に防ぐ知恵もあるということになる。同じ50mmの雨でも、1日に50mmの雨であれば、都市水害が心配になる雨量だが、1か月に50mmの雨だと、水不足が心配な雨量になる。日本の年間降水量は1,700~1,800mmなので、1か月に乾季ならば100mmほど、雨季ならば300mmほど降る計算になる。

データを得たら、それを意味ある情報として捉え、それを知識として整理して、その知識を使って知恵を働かせることが大事である。データ、情報、知識、知恵という階層構造になる。

なお、近年、強雨が頻発するとの認識から、50mm対応から70mm対応に強化しているところもある。

4.2 防災情報のあり方

防災情報は、正確であるとともに不安をあおらない情報でなければならない。また、正確に、分かりやすく、動機づけとなるように伝えることが重要である。例えば、一般市民は行政から「河川の水位が〇〇メートルになりました。」と言われても、避難したらよいのか、避難しなくてもよいのかかわからないので、一般市民に分かる情報を伝える必要がある。

情報が伝わりやすいはずの都市でも、見逃されがちな盲点がある。夜間は就寝中で、災害が発生していても気付かないことが多い。災害時には停電が発生することが多く、停電が発生すれば視界が制限される。地下鉄や地下街といった地下空間にいれば、外の様子が分からない事態となる。さらに、地域コミュニティの崩壊が障害になることが考えられる。つまり、地域に災害が近づいているのに、普段から近所付き合いをせず地域で孤立していれば、災害に関する情報を得られないケースも考えられる。

次に、行政側に起こりうる盲点について述べたい。水害時に情報システムがダウンすることが考えられる。情報システムのダウンを未然に防ぐためにシステムの

冗長化が必要である。一般的に「冗長」は悪い意味で使われることが多いが、特に防災に関する情報システムは、バックアップ機能を整えるなど、冗長な構成であることが求められる。また、地域防災計画の画一性という問題がある。地域防災計画は地震を基に策定されているので、避難所が川の近くの低地にあたりする。地震災害と水害とでは対応が違うはずなので、水害に対する防災計画をきちんと立てる必要がある。

さらに、地域防災計画の不整合性という問題もある。これは、ある町で流れる防災情報が隣の町の防災情報と全く異なるものであったり、災害に対する対応も違ったりすることが起こりうる。防災計画を広域的に考えていくことが必要である。

4.3 情報社会は自己責任社会

近年の法制度とこれからの災害情報のとらえ方について述べたい。平成9年(1997)に河川法が改正された。それ以前は、治水と利水が中心だったが、環境も考えるようになり、また住民の意思を反映した河川管理を行うようになった。さらに、平成11年(1999)に情報公開法が制定されて、行政の情報を住民が取得できるようになった。また、平成13年(2001)には土砂災害防止法が制定され、平成13年(2001)には水防法が改正され、被災しやすい場所をハザードマップで知らせることが義務づけられた。このことは情報公開法にも関係する。

行政情報を住民が知ることができる。このことは、現代社会が自己責任の社会であることを意味する。小さな政府となり、少ない予算で行政サービスは低下し、自助努力の必要性が求められる。すなわち、「お上任せ」の時代ではなく、自分の命は自分で守らなければならない時代になってきた。

高齢社会においてはデジタルデバイド(情報格差)が「安全格差」になりかねない。自助・共助・公助については後述するが、防災情報の観点から共助(助け合い)が必要で、住民が得た情報を伝達し合うような、つまり防災情報が公平に行き渡る社会(情報バリアフリー社会)を築くことが望ましい。住民一人一人は災害に対する「知恵」を培う必要がある。

5. 自助・互助・共助・公助

5.1 津波てんでんこ

「津波てんでんこ」は、津波が来たら、てんでんばらばらに逃げろという教えである。これは、自分の命は自分で守るという自助の教えである。これは、自分

が逃げると他人も追随するということで、他者の誘導の意味もある。家族や友人も自助をするから、他人をかえりみず自分だけが逃げても、自分勝手な避難ではないのだということがお互いに了解できる。不幸にして自分だけが生き残った場合でも自責の念から解放され、生存者の納得も得られる。しかし、要介護者をどうするか、という問題は残っている。

5.2 稲むらの火

稲むらの火とは、濱口梧陵(1820-1885)という醤油商人のエピソードである。濱口梧陵は紀伊国有田郡広村(和歌山県広川町)に住んでいたが、安政元年(嘉永7年)11月5日(1854年12月24日)に安政南海地震の津波が襲った。その時、濱口は自分の田の藁に火をつけて避難誘導した。機転を利かして村民に災害情報の提供をしたのである。

その後も、防潮堤の構築に私財を投じ、住民の雇用・定着を図り、同時に大規模防災工事を完成した。彼の造った防潮堤や防災設備のおかげで、88年後の1946年に昭和南海地震で起きた津波の被害を軽減することができた。濱口の功績を記念して、11月5日は「世界津波の日」に制定された(2015年国連総会)。日本の事例が世界の防災においても知られている。

5.3 防災の変遷と現代

稲むらの火は、篤志家が自ら行った互助または共助の事例である。明治維新以後の富国強兵の近代化の過程で、防災問題には多くの関心が払われなかった時代、村落においては自分たちの生活を守り維持してきた。村民たちが、互助・共助を自発的に行わざるを得なかったとも言える。

太平洋戦争後は、荒廃した国土の復興と、自然災害の脅威への対応が、高度経済成長とも歩調を合わせ、国が防災に大きく貢献してきた。20世紀後半は、いわゆるインフラ施設による公助がかなり進んだのである。

自分の命は自分で守るというのが人生の基本である。加えて、居住する地域においては地域コミュニティーの再構築が必要になる。そして、相互扶助の精神の涵養が重要である。というのは、公助が進む一方で、市民側はそれに安住してしまい、都市化によって、新住民の防災意識が希薄になり、また、住民間の連帯感も薄れてしまったのである。

21世紀に入って、公共事業の縮小、民間でできることは民間へ、という流れで、上述のように自己責任の社会となった。自助・共助の重要性が強調された。

共助とは、地域コミュニティー（町内会・自主防災組織など）による制度的な相互扶助である。また、自分自身がかかる災害保険も保険会社による制度的な補償という意味で共助に含まれる。なお、互助は、組織的ではないが、隣近所や親戚・知人などとの関係による自発的な相互扶助をいう。

自助・互助・共助はもちろん必要であるが、超高齢社会では、公助が重要であるということに留意しなければならない。老人に敏速・適確な行動を期待するのは無理だからである。また、複雑社会では、公助が重要である。個人では分からない、対応（自助）できない複雑・複合事象が、特に大都市では頻発しているからである。公助としてすべきことは何なのか、再考が急務である。

6. 災害リスクマネジメントと安全・安心

2015年3月に国連防災世界会議が仙台で開催され、仙台防災枠組（SFDRR）2015-2030という国際合意が策定された。地方、国、地域およびグローバルレベルで、国家によるセクターごと、およびセクター横断的に、焦点を絞った行動が必要であるとして、以下の4つを優先分野と定めた。

1. 災害リスクの理解
2. 災害リスクを管理する災害リスク・ガバナンスの強化
3. 強靱性のための災害リスク削減への投資
4. 効果的な災害対応への備えの向上と、復旧・復興過程における「より良い復興（Build Back Better）」

仙台防災枠組以前は、被災した場合、以前の状態への復旧しかできなかったが、仙台防災枠組以降は、以前の状態への復旧だけでなく、さらに以前よりも良い状態への復興をしてもよいということになった。以前は、全国の納税者の税金を使用してできるのは以前の状態への復旧まで（「焼け太り」を許さない）という考え方が主流であったが、同じような災害が発生した場合に、再び被災しないように、被災しても減災できるように、以前の状態への復旧だけでなく、さらに以前よりも良い状態への復旧をしようという Build Back Better という考え方が定着しつつある。

6.1 災害リスク

災害リスクを概念式に表すと、下記のようになる。

$$DR = [H] \times [E] \times [V] / [C]$$

DRは、災害リスクである。Hはハザード（hazard、災害原因事象）のことで、具体的には、地震、台風、豪雨、洪水、地すべり、火山噴火等があげられる。Eは暴露（exposure）で、被災可能者・被災可能物、すなわち、住民、資産などである。Vは、脆弱性（vulnerability）で、人間および社会の弱いところである。Cは対策（countermeasure）、つまり様々な対策をしてハザードを抑えたり、住民を移動させたり、脆弱性を低めたりすることである。

ハザードマップを住民に広めて住民の災害に対する知識を高めておくと脆弱性が低くなる。予測、警戒システム、ハザードマップ、保険などがこの対策Cに含まれる。例えば、甚大な被害をもたらす津波が無人島に来て、Hのハザードとしては津波という事象があるが、人も資産もなくEの暴露がゼロなので、この場合、災害リスクはゼロということになる。

災害リスクを軽減する対策としては次のものが考えられる。公共投資によるリスクの予防・軽減、都市計画・土地利用計画によるリスクの回避、保険や補償によるリスクの移転、地域防災計画によるリスクの予防・軽減、緊急対応である。

6.2 無謬主義とリスクマネジメント

安全な○○○だから安心して○○○できる。例えば、安全な水だから安心して飲める、安全な場所（国）だから安心して住める。しかしながら、確実な証拠や裏付けがないにもかかわらず、絶対に安全だと信じられていることが多いのではない。いわゆる「安全神話」だが、「安全神話」は迷信や錯覚とも言える。安全が保たれている時はこの言葉は使用されず、崩れた時に使用される。省庁によっては人々をまず安心させたいということで「安心安全」と言うことがあるが、防災の専門家としては、「安心安全」ではなく「安全安心」と言わなければならない。最近の教訓では、備えていてもやられることがある。「安全神話」に基づいた備えでは困る。

日本は大日本帝国時代から中央集権体制であり、無謬主義の考え方でやってきた。筆者は、無謬主義を「はずであるマネジメント」と呼んでいる。「先生」は間違いを冒さないはずである。防災施設はちゃんと稼働するはずである。操作員は完璧に働くはずである。つまり人為災害はない。事故は起こらないはずである。起こってもそれは想定外である。つまり、無謬主義は責任逃れの考え方である。無謬主義は「リスク」を考えないで済むようにしてきた考え方だとも言える。

それに対して、リスクマネジメントは、あらかじめどのようなリスクがあるかを想定し、対策を立てておく考え方である。つまり、先生だって間違ふ。防災施設が稼働しないこともある。誤操作もあり得るし、想定を超える災害が発生する場合もある。人為災害は起こりうる。事故を受容しなければならない場合もある。しかし、受容できない理不尽な事故は起こしてはならない。あらゆる状況と確率を想定して、責任の分担、合理化をして「リスク」に向き合う必要がある。実際にはリスクの評価やマネジメントは難しいものであり、行政、地域、業種によって様々な工夫がなされている現状である。

6.3 安全・安心の人員は足りているのか

ここで、我が国の安全・安心に携わる人員を確認しておく(表4)。医療・国防・防災・防犯・福祉などに関わる職種・資格を列举した。

これらの職種の人員が災害時に、それぞれの職掌のもとに応急対応や復旧に貢献する。消防団員も自らの仕事がある傍ら非常時には各地方で活躍が期待されている。ここで注目したいのは、防災士である。防災の知識や防災のマインドを持つ人々が26万人もいて、自衛官・警察官・消防士に匹敵するほどの人数となっている。普段は、別の仕事を持っている(あるいは現役を退いた)人たちである。全国47都道府県にいるこれらの方々が、災害時に活躍してもらえる社会的な仕組みを考えていきたい。気象予報士も1万人以上であり、防災士と同様に活躍が期待できる。200万人を超える各福祉士の方々も、防災にさらに関心を持っていただくことにより、要支援者の防災に貢献してもらえ

表4 安全・安心に携わる人員(単位:万人)

職種・資格	人数	調査年	備考
医師	34.0	2020年	歯科医
自衛官	22.7	2020年	在日米軍 4.5万人
警察官	25.5	2020年	
消防士	16.8	2022年	非常備消防(消防団) 78.4万人
気象予報士	1.2	2023年	
防災士	26.4	2023年	国家資格ではない
社会福祉士	28.7	2023年	
介護福祉士	194.0	2023年	
精神保健福祉士	10.4	2023年	

るものとする。こうした方々の活躍により、地域の防災力がさらに高まっていくことになる。

7. フェーズフリーな防災

7.1 医学と防災学のアナロジー

予防医学の重要性については従来から言われ続けてきた。「1オンスの予防薬は1ポンドの治療薬(prevention)に値する」と言われる。つまり備えあれば憂いなしということである。ちなみに、1オンスは1/16ポンドである。自然災害に対しても予防することが重要であると言われるようになった。

医学において病気の原因を解明する基礎医学に対応するのが災害科学である。災害科学には地震学、火山学、地質学、気象学、水文学などが含まれる。すなわち現象の科学的解明に基づく「予測」の分野と言える。

病気や怪我をしないように日常から生活習慣を改善する予防医学に対応するのが防災学においては災害予防である。災害予防は災害事象を極力防ぐため普段から対策を講じておくものである。災害に強い構造物や様々な情報システムを整備することやハザードマップを提供することも災害予防に含まれる。すなわち「予防」である。

医学において、病気や怪我をしても致命傷にならないようにするのが臨床医学である。臨床医学に対応するのが防災学における減災である。減災は、被災しても被害を最小にすることである。すなわち「対応」である。医者は人のお医者さんであるのに対して、防災に携わる者は地球または地域のお医者さんと言える。

病人・怪我人は、社会復帰を目指してリハビリを行い、罹患前の状態に身体・精神状態も戻し、以前の生活に戻る。リハビリテーション医学という領域がある。自然災害に襲われた地域は、復旧・復興を行い、従前の生産活動・日常生活に戻る。

7.2 フェーズフリーとレジリエンス

上で見たように、防災には、予測、予防、応急対応、復旧・復興というそれぞれの局面(フェーズ)がある。防災科研では、あらゆる自然災害(オールハザード)、あらゆる局面(オールフェーズ)に対応するように研究開発を進めている。

普段使っていないシステムが、何年に1度来るかどうか分からない災害が発生した時に役立つか、ということがよく指摘される。担当者がシステムの使い方を忘れてしまっていたり、担当者が配置転換されてい



図1 基盤的防災情報流通ネットワーク(SIP4D)
<https://www.sip4d.jp/outline/>

たり、システムそのものが何年も使っていないと陳腐化したり錆びついたりしてしまいます。当該システムを平時から使っていれば、必要な更新が適宜なされているはずであるし、担当者が交代してもちゃんと業務が引き継がれて稼働している。平時と緊急時のどちらのフェーズでも使えるシステムにしておくことが重要である。これを「フェーズフリー」と言う。

フェーズフリーの考え方は、防災のすべてのフェーズにおいても、災害レジリエンスの向上にも有用である。被災した時のショックを軽減し、回復するためのアクションを素早くできることにつながる。

8. 防災科研の取り組み

防災科研で行っている研究開発は、以下の4つに大別できる。

- ①災害の観測・予測、リスク低減に向けた研究開発
 地震・津波の分野では、即時的振動予測、津波ハザード評価など、火山では噴火につながる変動観測など、極端気象に関しては、ゲリラ豪雨予測、強風予測、豪雪予測などを行なっている。
- ②社会インフラを担う基盤的観測網の運用

海底を含む全国土をカバーする約2,100の観測点からなる地震津波火山観測網(MOWLAS)を安定的に運用するとともに、気象庁・大学・研究機関等の研究活動・防災活動に資する観測データを提供している。緊急地震速報は、このデータを用いている。現在、南海トラフ地震の想定震源域の西側(高知沖から宮崎沖)が観測網の空白域になっているので、新観測網(N-net)を整備中である。

③先端的研究施設を活用した研究開発

兵庫県三木市に設置しているE-ディフェンスを用いて実大建物の耐震性能や対策技術の評価を行っている。つくば本所に設置されている大型降雨実験施設では、ドローンや自動車センサーなどの先端技術や山腹斜面・堤防などが豪雨から受ける影響の評価ができる。新潟県長岡市と山形県新庄市には、雪氷防災実験棟があり、降雪の観測・実験や各種のインフラにおける着雪による影響評価を行っている。

④研究開発成果を活用した防災行政への貢献

基盤的防災情報流通ネットワーク(SIP4D=Shared Information Platform for Disaster Management)は、災害対応に必要な情報を多様な情報源から収集し、迅速に共有する機能を備えた、防災情報の流通を担うシステムで、研究プロジェクトとして2014年から防災科研が民間会社と共同して構築してきたものである。図1にSIP4Dの概念図を示す。これまでは、官公庁の各種データの共有を行ってきたが、今後は、大学機関、民間企業などとの連携をさらに促進していく予定である。また、発災時に被災自治体での災害対応も行なっている。内閣府の災害時情報集約支援チーム(ISUT)の一員として、SIP4Dを介して災害情報を収集・集約・一元化し、現地対策本部、災害対応機関へ共有して、応急対応や復旧に貢献している。

これらの研究開発成果を、理解しやすく使いやすい「情報プロダクト」として配信しユーザーや一般市民

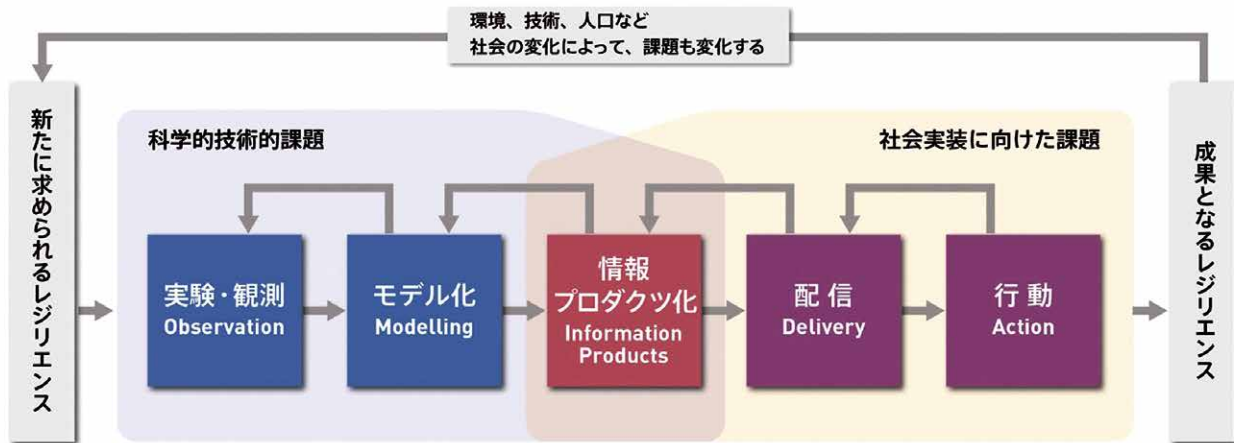


図2 社会のレジリエンス向上に向けた研究成果の情報プロダクツ化とその社会実装

に提供して、社会のレジリエンス向上に貢献するように努めている(図2)。

防災科研のホームページで、防災Xview(クロスビュー)のような一般向けの情報公開を行なっている。気象災害については、ソラチェック、24時間降水量分布、大雨の稀さ情報、雪おろシグナルなどを参照されたい。

<https://www.bosai.go.jp>

2019年に国内の17組織が連携して防災・減災連携研究ハブ(JHoP)を設立した(図3)。防災科研は、JHoPの事務局を務めている。JHoPは、ネットワーク型研究推進組織であり、国際学術会議(ISC)と国連防災機関(UNDRR)が支援する国際的な防災研究プロジェクトIRDR(Integrated Research on Disaster Risk)にも貢献している。

<https://www.bosai.go.jp/jhop/>

防災減災連携研究ハブ(JHoP)を核とする産官学民連携による研究推進・人材育成

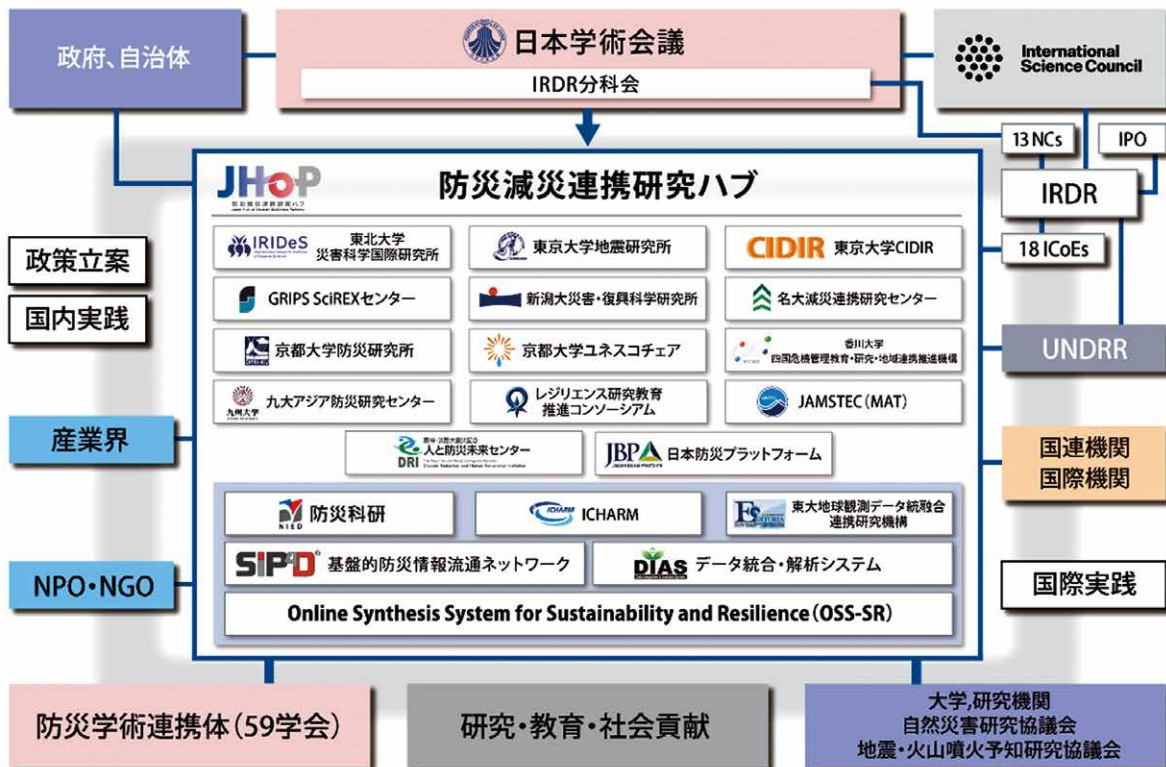


図3 防災減災連携研究ハブ(JHoP)

気象災害に備える鉄道技術

理事
古川 敦



1. 近年の気象の変化と鉄道の被害

1.1 近年の気象の変化

近年、激甚化する気象災害により鉄道が大きな被害を受ける事例が増えている。この原因の一つである地球温暖化には、人間の活動による温室効果ガス排出量

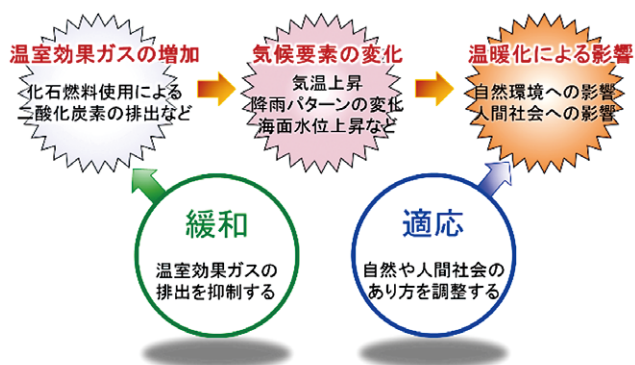


図1 2つの温暖化対策 緩和と適応²⁾

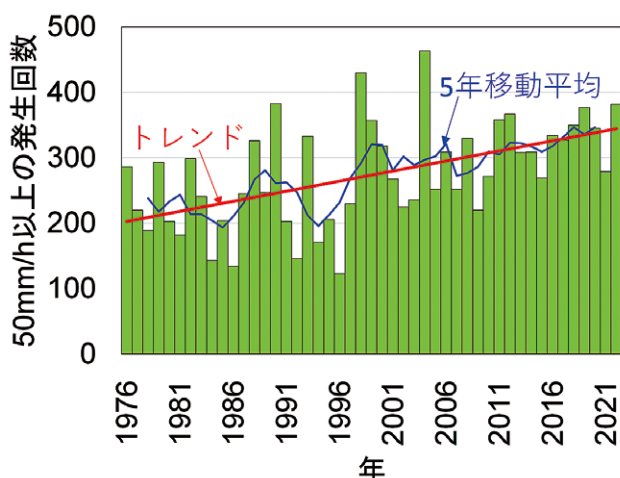


図2 50mm/h以上の雨の年間発生回数³⁾
(気象庁調べ：アメダス観測点1300点換算)

の増加が関与していることは「気候変動に関する政府間パネル (IPCC)」の第6次報告書でも「疑う余地がない」と指摘されている¹⁾。この地球温暖化への対策には、温室効果ガスの排出量を削減する「緩和」と、温暖化による影響に対して自然や人間社会のあり方を調整する「適応」がある(図1²⁾)。第34回鉄道総研講演会では「脱炭素化に求められる鉄道技術」と題し、鉄道におけるCO₂排出量削減策など「緩和」に対する鉄道総研の取組を紹介した。今回は、雨災害への対応を中心に「適応」への取組を概観する。

日本の気候変動に目を向けると、図2に示すように、強度の強い雨の発生頻度はこの50年間確実に増加しており³⁾、また、図3に示すように今後も増加すると予測されている⁴⁾。

気象庁によると、近年の日本の降水及び大雨に関し、

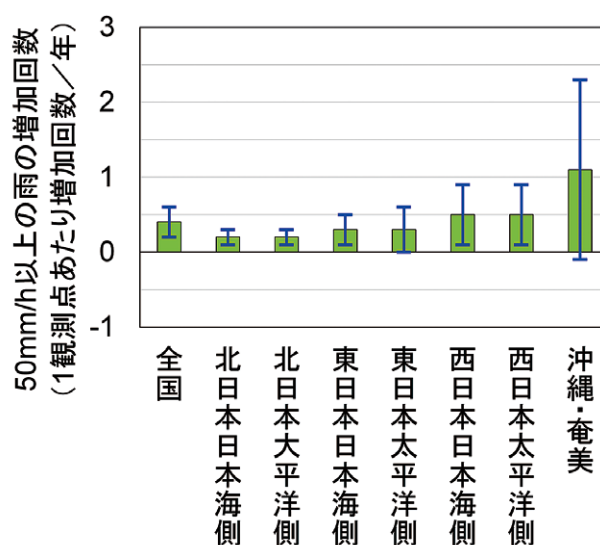


図3 50mm/h以上の雨の年間発生回数の変化⁴⁾
(1980～1999年の平均と、2076～2095年の平均の比較。IPCC第5次評価報告書における、温室効果ガスの排出量が最も多いシナリオに基づく予測値。青いバーは標準偏差。)

表1 2017年以降に発生した主な気象災害による鉄道の被災事例

名称	災害発生日	主な被害
平成29年7月九州北部豪雨	2017/7/5~7/6	久大線花月川橋梁流出
平成30年7月豪雨	2018/6/28~7/8	中国地方を中心に広範な被害
平成30年台風第21号	2018/9/4~9/5	関空連絡橋に船舶が衝突
令和元年東日本台風(第19号)	2019/10/12	長野新幹線車両センターが冠水
令和2年7月豪雨	2020/7/3~7/31	肥薩線・久大線で橋梁が流出
令和3年8月の大雨	2021/8/11~8/19	中央線、飯田線、山陰線、久大線などで土砂災害・橋脚洗掘
令和4年8月の大雨	2022/8/3~8/26	米坂線、奥羽線、五能線などで路盤流出・橋脚洗掘
令和5年梅雨前線による大雨	2023/6/30~7/3	山陰線、美祢線等で洗掘、土砂災害

以下の特徴が挙げられている⁵⁾。

- 年降水量には統計的に有意な長期変化傾向は見られない。一方で、降水の観測される日は有意に減少している。
- 大雨の年間発生回数は有意に増加しており、より強度の強い雨ほど頻度の増加率が高い。
- 1時間降水量80ミリ以上、3時間降水量150mm以上、日降水量300mm以上といった強度の強い雨については、1980年頃と比較しておおむね2倍程度に頻度が増加している。

したがって、鉄道においてもこれらの気候の変化、特に強度の強い雨への適応が求められている。

1.2 気象災害による鉄道の被害

表1に、2017年以降に発生した主な気象災害による、鉄道の被災事例を示す。毎年のように大規模な災害による甚大な被害が発生している。特に平成30年7月豪

雨では、中国地方を中心に北海道から九州までの広い範囲で鉄道が甚大な被害を受けた。また、令和2年7月豪雨では、球磨川の氾濫によって肥薩線の複数の橋りょうが流出するなど、1908年の開業以来、類を見ない被害を受けた⁶⁾。2021年7月には、線路から遠く離れた造成盛土の崩壊に伴う熱海市逢初川沿いの土石流により、東海道新幹線、東海道本線が影響を受けるなど、鉄道用地外を起点として被災する事例もある。

このように、近年の気象災害による鉄道の被害は以下のような特徴がある。

①災害の激甚化

- これまで経験の無い、甚大な被害
- 被災範囲が広い被害
- 鉄道用地外を起点とする被害

②災害の高頻度化

- 再現期間が長い気象現象が毎年のように発生

図4に、近年の気象災害により鉄道が受けた被害額

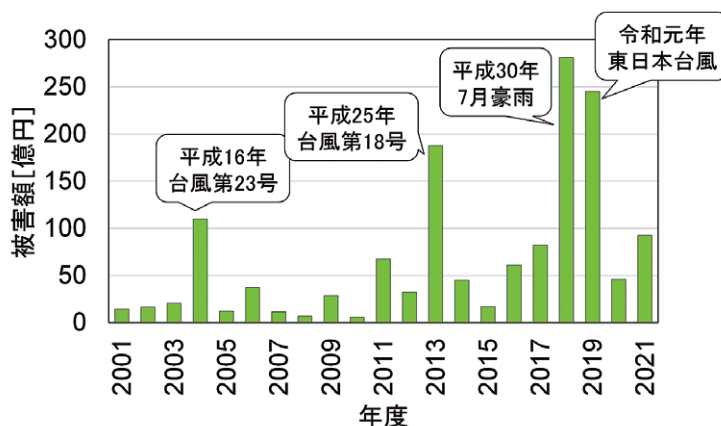


図4 気象災害による鉄道の被害額

鉄道技術推進センター安全データベースより、自然災害から地震災害を除いたものの和。復旧途中で、被害額が確定していないものは加算していない。

表2 気象災害による鉄道の主な被害の形態

気象の種類	主な被害の形態
雨	<ul style="list-style-type: none"> 斜面、盛土の崩壊、崩壊した土砂へ乗り上げ脱線 橋脚の洗掘 軌道の冠水 列車徐行、抑止
風	<ul style="list-style-type: none"> 車両の転覆 飛来物による設備損傷 列車徐行、抑止
雪	<ul style="list-style-type: none"> 車両の走行不能、ブレーキ性能低下 車両からの落雪による設備損傷 フランジウェイ圧雪による脱線、分岐器の不転換 雪崩 融雪による土砂災害 列車徐行、抑止

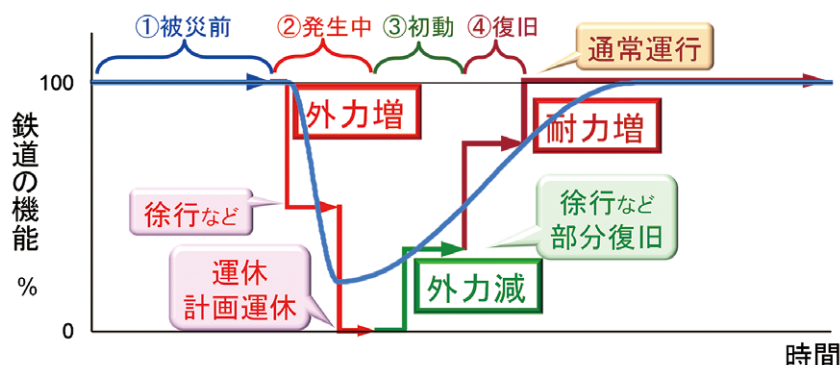


図5 気象災害による鉄道の機能の経時変化

を示す。2016年度以降は、ほぼ毎年被害額が50億円を超過しており、対応が急務であることがうかがえる。

表2に、気象災害による主な鉄道の被害の形態を示す。気象の種類別の形態としては、雨による被害には橋脚の洗掘や土砂災害、風では車両の転覆や飛来物による設備損傷、雪では雪崩、ブレーキ性能低下による衝突、あるいはフランジウェイ圧雪による脱線等が挙げられる。また共通する被害形態としては、列車の徐行や抑止などのダイヤの乱れがある。これらのうち、特に雨による被害には、洗掘や土砂災害など影響が長期化するものが多く、対策が望まれている。

2. 気象災害に対する鉄道の備え

2.1 気象災害への対応の4つの段階

本章では、気象災害に対し鉄道側で採られる措置を紹介し、被害を軽減するための今後の研究開発の方向性について論ずる。

図5は、気象災害に伴う鉄道の機能の経時変化を①

被災前、②発生中、③初動、④復旧の4つの段階に分けて模式的に示したものである。それぞれの段階における鉄道側の措置は以下のとおりである。

(1) 被災前

気象災害の発生前の平常時においては、設備の補強や維持管理が行われる。前述したように、近年では被災範囲が広がっているため、補強の対象となる設備が増える傾向にある。このため、設備ごとに現在の耐力を評価し、補強の優先度を決定することも重要である。また、BCPの観点から、被災した際の振替輸送（他路線による輸送）、あるいは代行輸送（他交通機関による輸送）に関する事前検討なども被災前に行われる。

なお、研究機関等による被災メカニズムの解明なども、広い意味で被災前の対応に位置づけられる。

(2) 発生中

雨や風が強まり、鉄道の機能が失われつつある段階である。予想される気象外力と設備の耐力に応じて監視、徐行、運休などの措置が行われる。台風のように数日前から災害の発生時期と規模がある程度予想され

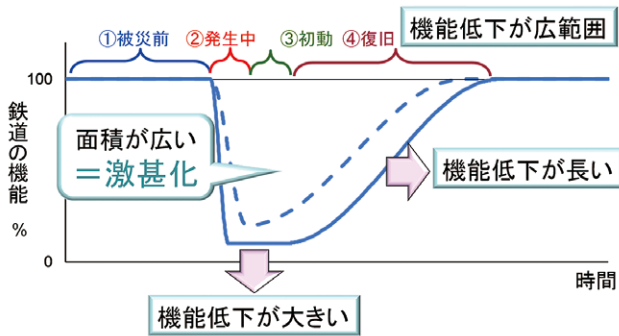


図6 気象災害の激甚化による鉄道の機能の低下

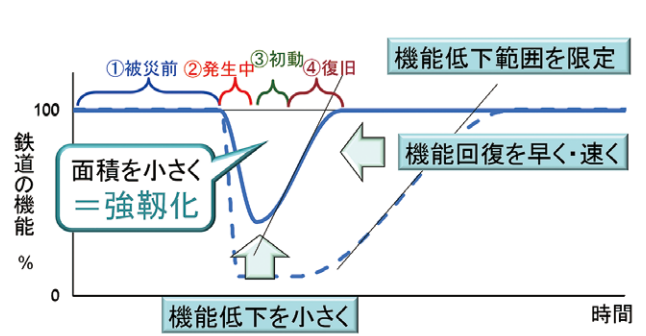


図7 気象災害の激甚化に対する鉄道の強靱化策

ている場合、近年では計画運休が行われるようになった。

被害が予想される場合は、係員を現地に派遣して設備を監視することがある。近年では被災範囲が広がっているため、リモートモニタリングシステムの開発・導入も進められている。

(3) 初動

雨や風がピークを過ぎ、鉄道の機能の復旧に向けた措置が行われる段階である。列車が運休している場合は、引き続き気象外力と設備の残存耐力を把握し、ハザードに応じて徐行等で運行が再開される。被害が大きく、復旧に長期間かかる場合は、区間を限定して運行を再開する。必要により、振替輸送や代行輸送も行われる。

(4) 復旧

失われた機能を回復する段階である。構造物が損傷を受けた場合は、再構築する。鉄道総研では、ダウンタイム短縮のため、各種の早期復旧工法を開発している。

以下、このような機能の経時変化を、図5中の青色の曲線(レジリエンス曲線)で模式的に表す。

なお、図5に示す外力とは、本稿では気象外力であり、雨であれば連続雨量、時間雨量、実効雨量などが指標として用いられる。しかし、実際に設備が機能を失うか否かは、雨の降り方と個々の設備の耐力によって異なるため、ここでは一般化して、外力を「過去から将来にかけての気象」、耐力を「設備が機能を失う際の外力」と定義する。また、本稿では外力と耐力の比をハザードと呼び、これが1を上回ると被害が発生するものとする。

2.2 気象災害の激甚化への対応

気象災害の激甚化による鉄道の機能の低下を図5のレジリエンス曲線に倣って模式的に描くと図6のようになる。激甚化によって機能の低下が早く、大きくなり、かつ機能が復旧するまで時間がかかるようになる。またこのような災害の発生頻度が高まっている。このような激甚化に対する鉄道の強靱化策を図7に、これらの強靱化策を実現するための、各段階での対応策を図8に示す。

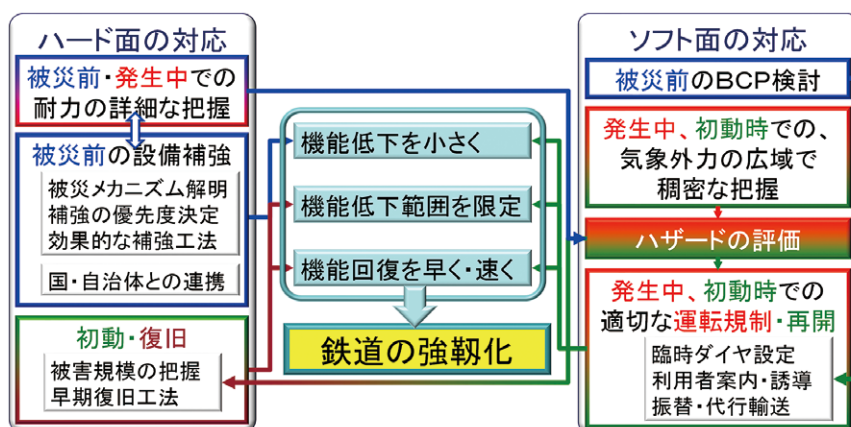


図8 気象災害の激甚化への対応策

表3 気象災害の激甚化に対する鉄道総研の研究開発テーマの例

	ハード面の研究開発	ソフト面の研究開発
被災前	<ul style="list-style-type: none"> 河川橋脚におけるマルチスケール洗掘解析手法 強雨時安定性評価箇所を選定手法 土石流のハザードマッピング技術 割れ目を含む岩石の強度低下予測手法 沿線環境に適合した空力による着雪対策 排雪時の抵抗力と車両運動の連成解析手法 	<ul style="list-style-type: none"> 災害等における長期間普通発生時の鉄道貨物輸送力の定量的評価
発生中	<ul style="list-style-type: none"> 河川橋脚の効率的な健全度判定システムの開発 衛星データを活用した斜面安定度モニタリング手法 	<ul style="list-style-type: none"> リアルタイムハザードマップの精度確認 強風リアルタイムハザードマップ 偏波レーダー情報を用いた降雪密度の評価手法 雪崩警備の要否判断支援手法の開発
初動	<ul style="list-style-type: none"> 強雨後の斜面安定性回復傾向の評価手法 洗掘被災橋梁の緊急診断法 大規模降雨で土砂が混入したバラスト軌道の早期復旧方法 	<ul style="list-style-type: none"> 広域大規模災害時の段階的復旧に向けた列車運用計画作成手法
復旧	<ul style="list-style-type: none"> 強雨災害時の土構造物の状態評価法 崩壊土砂活用のための新しい施工管理指標の提案 	

ハード面では、まず被災前に気象災害に対する設備の耐力を把握する。その際、列車を運休する場合の区間を限定したり、初動における点検の優先度を適切に定めたりするため、設備ごとにきめ細かく詳細に把握することが肝要である。また、現有耐力と想定される気象外力に応じて設備を補強する。気象災害の激甚化に伴って被害が想定される範囲も広がることから、適切な優先度の設定も重要である。

雨災害への対応には治水との連携も重要である。国土交通省は、河川流域全体のあらゆる関係者が協力して水害を軽減する「流域治水プロジェクト」を進めている⁷⁾。治水の一環として堤防のかさ上げが行われる場合は、鉄道でも橋梁のこう上や上路桁の下路桁への掛け替えなどの対応が求められることがあり、低コストでかつ期間を要しない施工技術が望まれている。

一方ソフト面では、BCPの観点から被災前に災害時の対応を定め、必要な措置をあらかじめ行っておく必要がある。また発生中、初動においては、鉄道事業者が自ら観測する気象データ及び外部の気象データ等を用い、広域で稠密な気象外力を把握することが重要となる。そして、外力と耐力の比によりハザードを評価する。これをもとに、ハード面では設備の早期復旧、ソフト面では運転規制・再開の判断、あるいは乗客の避難誘導などを行う。

気象災害は激甚化しており、鉄道の被害をゼロにすることは困難であるが、これらの対応によって、ダウンタイムの短縮が図られるものと考えられる。

3. 気象災害の激甚化に備える鉄道総研の研究開発

図8を実現するために、鉄道総研が各段階において実施している研究開発テーマの例を表3に示す。具体的には以下のようなものがある。

(1) 被災前の対応に関する研究開発

被災前の対応に関わる研究開発は、様々な気象災害による設備の被災メカニズムの解明、及び土木構造物の耐力の把握と向上法に関する研究開発が多い。また、BCPの観点からの被災時の輸送力確保策の事前検討・準備に関わる研究開発も行っている⁸⁾。

「強雨時安定性評価箇所を選定手法」では、土砂災害の危険性が高い箇所の補強や初動時の設備点検を効率的に行うため、国土地理院の数値標高モデル（以下、DEM）を用いて、補強や点検の優先度決定を支援する手法を開発した。具体的には、過去の被災事例をもとに、土砂災害発生時の実効雨量の再現期間を目的変数、集水地形の有無など被害が発生しやすい地形上の特徴を説明変数とした数量化I類解析を実施し⁹⁾、対象とする箇所での災害の発生しやすさを数値的に評価する手法を提案した¹⁰⁾。本手法で得られる再現期間が短い箇所ほど、補強や点検の優先度が高い箇所と評価される。

(2) 発生中の対応に関する研究開発

発生中の対応に関しては、広域かつ稠密な気象データを用いて各種気象外力をリアルタイムに把握する技

術、外力を受けて徐々に耐力を失う構造物のモニタリング技術、及びこれらの耐力と外力からハザードを評価し、徐行や運休などの運転規制を適切かつ速やかに行うための研究開発を行っている。合わせて、人工衛星データを用いて土砂災害の予兆を把握するための研究開発にも取り組んでいる。

「リアルタイムハザードマップの精度確認」では、局所的な降雨に対し鉄道沿線の河川の水位や氾濫エリアの水深を10分以内で計算する浸水・氾濫解析モデルについて、計算に用いる河川断面形状や雨水の表層土への浸透率などのパラメータとして、公開データのみを用いる場合(図9の赤線)と、測量データや観測データから推定した値を用いる場合(同青線)の計算精度を、実際に河川氾濫が起きた事例を用いて比較した。その結果、河川の最大水位およびその発生時刻とも、推定値を用いた方が実測値(同黒線)とよく一致した¹¹⁾。これにより、モデルの妥当性を確認するとともに、降雨の予報データを用いて気象外力をより精度良く評価し、氾濫の発生前における列車の運行可否判断、乗客案内、あるいは避難誘導での活用を可能とした。

(3) 初動対応に関する研究開発

初動対応に関する研究開発は、被災後に設備の状態を緊急診断し、被災した設備の復旧方針の決定や運行再開の判断に資する研究開発が主である。

「大規模降雨で土砂が混入したバラスト軌道の早期復旧方法」では、大雨により冠水し、土砂が流入した道床バラストの健全性を速やかに判断するとともに、低コストな復旧策を開発した。

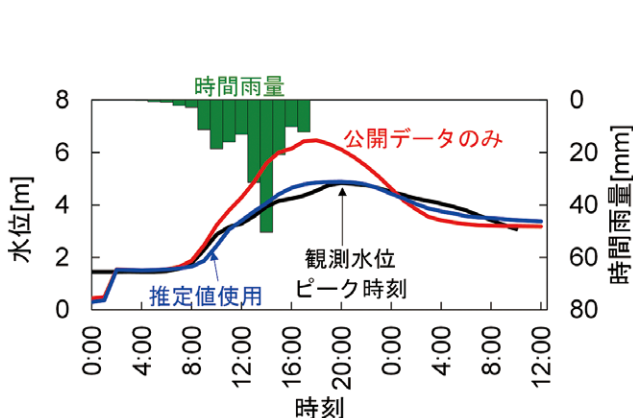


図9 河川水位の経時変化の観測値と解析値の比較¹¹⁾

土砂が流入した場合のように細粒分の質量比が高い道床バラストでは、軌道沈下が大きくなる。このため、健全性の評価では細粒分の質量比の把握が重要となる。これに対し、道床内に音を透過させ、その音圧レベルから細粒分の割合を推定する手法を考案した(図10)¹²⁾。これにより、従来のふるい分けと比較して約30%の労力で、道床バラストの状態を評価可能とした。

さらに道床交換をせずに道床の状態を回復するため、道床バラストに超速硬セメントと高分子材料を混入してつき固める方法を考案した。これにより、道床交換の約1/10のコストで道床の状態を維持できるようになる。年間通トン520万トンの営業線における実施工の結果、施工後8ヶ月経過しても高低変位に大きな変化がないことを確認している¹³⁾。

(4) 復旧に関する研究開発

復旧については、気象災害により被災した構造物等を早期に復旧し、ダウンタイムを短縮するための研究開発を行っている。

「強雨で被災した盛土の状態評価法」では、強雨で一部が被災した盛土の安定性をのり面の崩壊広さと崩壊角で評価するためのノモグラムを提案した。両パラメータが図11のノモグラムで緑色のエリアにある場合は、崩壊部から内部に水が浸入しないよう、ブルーシートで覆ったのみで運行を再開できる。赤色のエリアにある場合は土のうで盛土を再構築する必要があるが、現地での計測により盛土内の地下水水位等が把握できる場合は、その結果に応じて土のうの数を減らせる

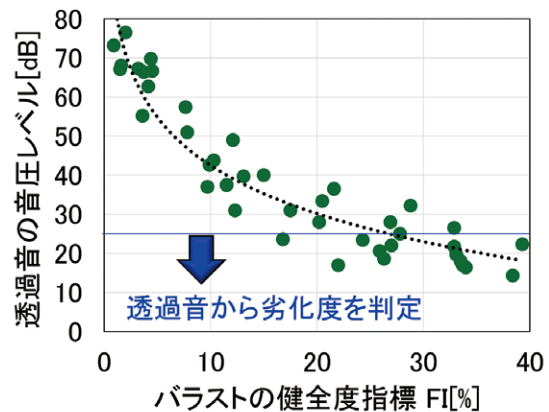


図10 透過音の音圧レベルとバラストの健全度指標FIの関係¹²⁾

FI: 粒径0.075mm以下と4.75mm以下の粒子の質量比[%]の和

ものとした¹⁴⁾。本ノモグラムにより、応急復旧の要否やその規模の迅速な判断が可能となる。

4. ハザード評価のための鉄道防災プラットフォーム

4.1 鉄道防災プラットフォームの役割

図8に示す気象災害の激甚化への対応策を、図5の4段階に沿って並び替えると図12のようになる。発生中以降の段階では、耐力と外力を詳細に把握し、そこからハザードを適切に評価することが重要となる。

これに対し、各種のデータから耐力と外力を推定し、ハザードを評価して初動対応や復旧に反映する一連の処理を「鉄道防災プラットフォーム」として、一元的に実施するのが有効である。ここで用いるデータには、鉄道事業者が取得する気象データや、線形や構造物種類などの路線データ、橋脚の固有振動数などの各種設備データに加えて、気象庁などが公開している気象データ、人工衛星データ、国土地理院の地形データなどの公的データなどがある。これらを取り込み、数値

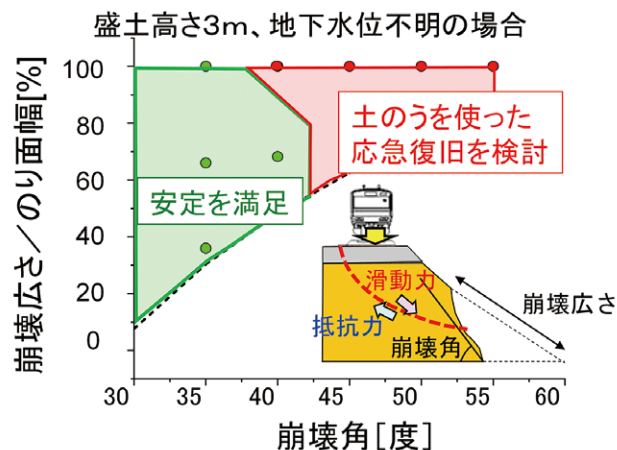


図11 盛土の安定評価ノモグラム¹⁴⁾

シミュレーションにより耐力と外力を推定し、災害時の初動対応や復旧計画策定で使い易いように加工してハザードマップの形で出力するのが鉄道防災プラットフォームの役割である(図13)。

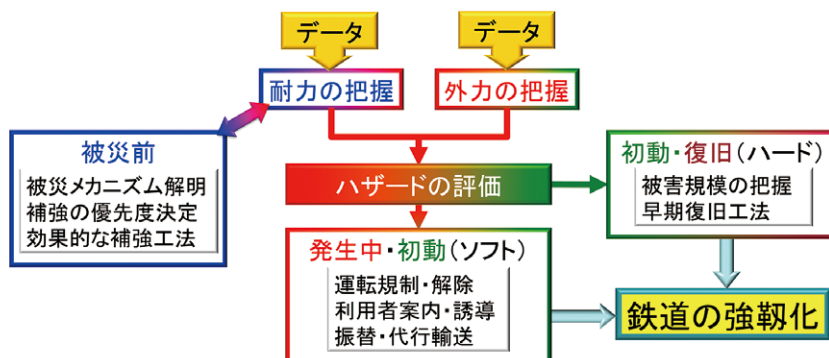


図12 ハザードの評価の位置づけ

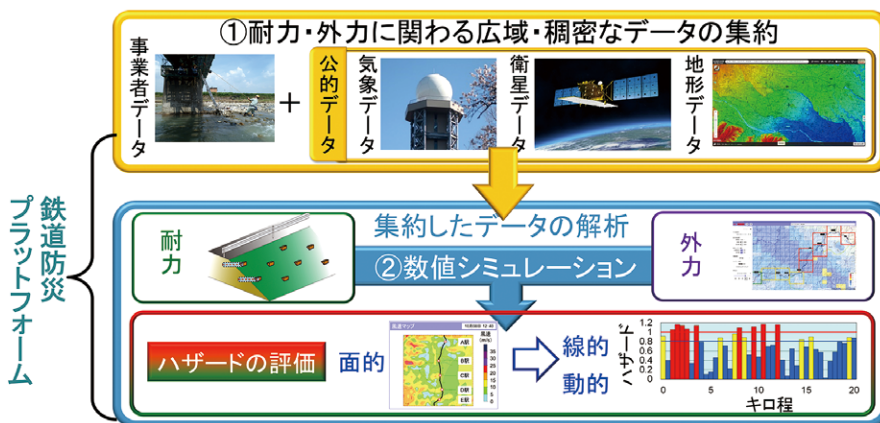


図13 鉄道防災プラットフォーム

4.2 鉄道防災プラットフォームで用いる公的データ

鉄道防災プラットフォームにおいて特に重要となるのは、入力されるデータ、及び解析に用いられるシミュレーション技術である。

入力されるデータは前述のとおりであるが、公的データのうち主なものは、以下のとおりである。

(1) 気象データ

実況値については、気象庁のアメダスのほか国土交通省のXRAINや(国研)防災科学技術研究所(以下、防災科研)のソラチェック¹⁵⁾が、将来の予報については気象庁の高解像度ナウキャストや日本気象協会による超短時間降水予測などが利用可能である。

高解像度ナウキャストでは、国土交通省や気象庁が所有する各種観測データを用いて、30分後までの降雨予測を250mメッシュで、35分後から60分後までは1kmメッシュで5分ごとに提供する。これらのデータは、発生中や初動時における列車の運行管理などへの活用が可能である。

(2) 人工衛星データ

ここでいう人工衛星とは、気象衛星ではなくリモートセンシングに用いられるものをいい、災害の観測には、2014年に(国研)宇宙航空研究開発機構(以下、JAXA)が打ち上げた陸域観測技術衛星2号「だいち2号」が活用されている¹⁶⁾。だいち2号には、同一地点を複数回観測する際に、衛星が発した電波が地表に反射して往復する時間の差から地表面の変位を面的に観測する「干渉合成開口レーダ」が搭載されており、火山活動や地盤沈下による広域的な地殻の変動を求めることができる。2023年3月より、だいち2号により観測された全国の地殻変動が国土地理院より公開されて

いる¹⁷⁾。

現時点では、だいち2号が同一地点を観測するのは14日ごとであるので、災害発生後、時間を経過してからの地殻変動しか観測できないが、将来的には、干渉合成開口レーダを搭載した36基の小型衛星により、同一地点を10分間隔で観測する計画があり¹⁸⁾、リアルタイムに近い形で、地殻変動を観測できる可能性がある。

鉄道総研はJAXAからの観測データ提供を受け、干渉合成開口レーダから土砂災害の予兆を把握するための研究を進めている。

(3) 地形データ

地形データについては、国土地理院が公開しているDEMが利用できる¹⁹⁾。DEMの種類と概要を表4に示す。

4.3 数値シミュレーション

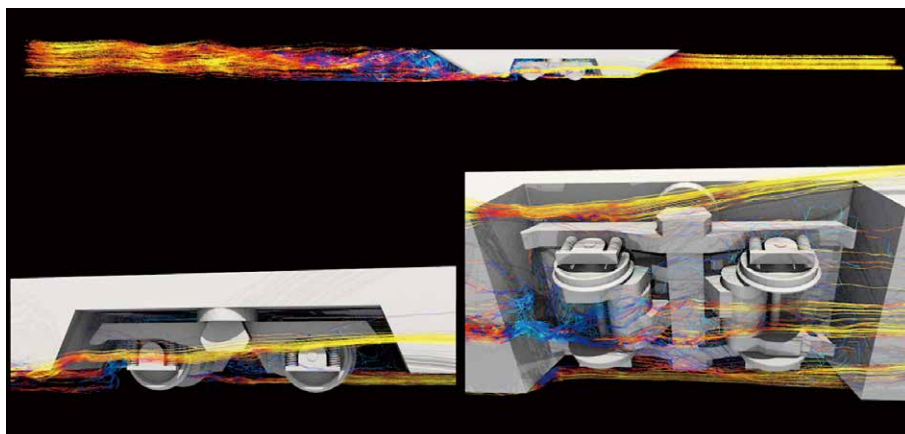
1章で述べたように、気象災害の激甚化にともなって、これまで経験したことが無い気象現象や被災形態が発生している。気象災害への対応は、これまでは過去の経験に基づいて帰納的に行われてきた面が多いが、経験の無い現象やデータの取得が困難な現象の把握には、数値シミュレーションの活用が有効である。

繰り返し述べているように、ハザードの評価には外力と耐力の推定が必要となる。気象外力推定の根幹である天気予報で数値予報(数値シミュレーション)が本格的に用いられるようになったのは、海外では1955年のアメリカ気象局によるものが嚆矢とされている。日本の気象庁は1959年から数値予報を開始し、現在では、予報業務に欠かせないものとなっている²⁰⁾。

鉄道総研では、気象災害による被害発生メカニズムの解明、構造物をはじめとする設備の耐力評価・向上策の検討、及び公的な気象データから鉄道設備に作用

表4 国土地理院による数値標高モデル(DEM)の種類と概要¹⁹⁾

名称	作成方法	主な整備範囲	標高点格子の間隔
5mメッシュ (標高)	航空レーザ 測量	都市域等	0.2" × 0.2" (約5m四方)
		河川流域等	
5mメッシュ (数値地形)	写真測量	都市域周辺等	0.2" × 0.2" (約5m四方)
		一部の島嶼部等	
10mメッシュ (火山標高)	火山基本図 の等高線	26火山のみ	0.4" × 0.4" (約10m四方)
10mメッシュ (標高)	地形図の 等高線	全国	0.4" × 0.4" (約10m四方)

図14 着雪シミュレータ²¹⁾

する外力を推定するための各種シミュレーションモデルの開発を進めている。

被害発生メカニズムの解明については、例えば高速走行する車両への着雪シミュレータの開発(図14)²¹⁾を、耐力評価・向上策については、洗掘解析手法の開発²²⁾などを進めている。いずれも粒子法を用いて飛雪や土砂の運動を解析し、これに列車走行に伴う気流計算や、河川の水 flow の計算等を連成させたもので、車両の台車周囲への着雪や、橋脚周りの土砂の流出の様子を実用的な時間で解析できる。

また、横風による車両の転覆に対しては、車両周りの空気流シミュレータを開発している²³⁾。本モデルは、直交格子法を用いて盛土や橋梁上の車両に作用する空気流を三次元的に模擬できるものであり(図15)、鉄道総研の大型低騒音風洞による実験を補間し、転覆限界風速を求めるための空気力係数の算出や防風壁の効果の評価などに用いられている。

ここで紹介した台車部への着雪や横風による車両の転覆は、メカニズムの解明にあたって車両との相互作用を考慮する必要がある鉄道固有の現象であり、数値シミュレーションの有用性が高いといえる。

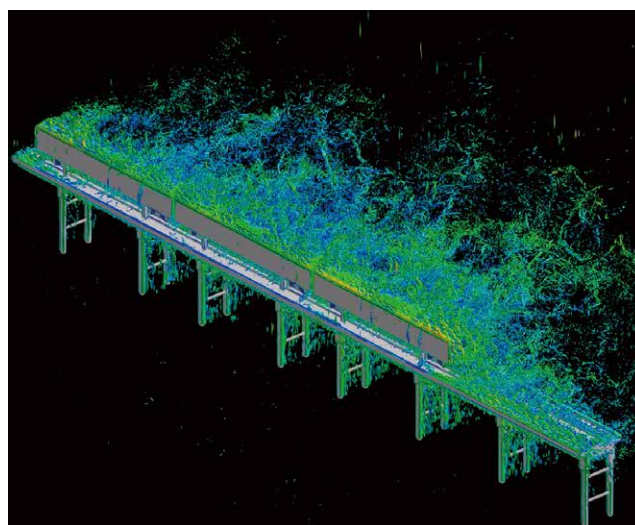
気象外力を求めるためのシミュレーションにはリアルタイム性が求められ、気象データ等を入力してから数分～10分程度で解が得られる必要がある。前述した浸水・氾濫解析モデル¹¹⁾では、2時間先までの雨量予報データを入力後、概ね10分以内で河川、氾濫水位を求められる。また、表3にある「強風リアルタイムハザードマップの解析」では、時間を要する気流計算をあらかじめ行い、風観測点と鉄道沿線各点との風速の比を風向毎にテーブルの形で求めておく。これに

より、観測点における風速・風向の実況値が得られる都度、速やかに鉄道沿線の風速・風向を求められるようにしている²⁴⁾。

5. 激甚化する気象災害に備えるために

以上、激甚化する気象災害に備えるために鉄道に求められる技術を概説した。本稿の内容をまとめると以下のとおりとなる。

- 地球温暖化に伴い、気象災害、特に雨災害は今後ますます激甚化する。
- これに対応するためには、以下の技術が求められる。

図15 空気流シミュレータ²³⁾

- ①鉄道設備の耐力の詳細な把握と適切な補強
- ②公的气象データ等を活用した、気象外力の広域で稠密な把握
- ③①、②の結果を元にした、ハザードの評価
- ④ハザード評価結果に基づく、ハード・ソフト両面からの適切な措置の実施
- ⑤上記①～④を実現するための、数値シミュレーション技術の開発

以上を実現するためには、流域治水を進める国、自治体や、各種データを発信している関係機関との連携がますます重要になる。鉄道総研はこれら諸機関・及び鉄道事業者との協働により、激甚化する気象災害に対する鉄道の強靱化に向けた研究開発を加速していきたいと考えている。関係各位の忌憚のないご意見を賜れば、幸甚である。

なお、本稿で紹介した研究の一部は、国土交通省の補助金を受けて実施した。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) IPCC : IPCC AR6 WG1 報告書 政策決定者向け要約暫定訳 (2022年12月22日版)
- 2) 環境省 : 温暖化から日本を守る 適応への挑戦, p.8, 2009
- 3) https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/extreme/extreme_p.html (2023年9月25日閲覧)
- 4) 気象庁 : 地球温暖化予測情報第9巻, p.31, 2017
- 5) 気象庁 : 気象業務はいま 2023, p.41, 2023
- 6) 九州旅客鉄道株式会社 : 「令和2年7月豪雨」による当社の被災状況について, JR九州プレスリリース, 2020
- 7) https://www.mlit.go.jp/river/kasen/suisin/pdf/01_kangaekata.pdf (2023年9月25日閲覧)
- 8) 奥田大樹, 渡邊拓也, 中川伸吾, 鈴木崇正, 深澤紀子 : 貨物鉄道ネットワークに対する災害対策の実施効果の評価手法, 鉄道総研報告, vol.36, No.12, pp.41-46, 2022
- 9) 大谷礼央, 長谷川淳, 布川修, 中瀨遥平, 佐藤大輔 : 鉄道盛土の不安定要因が災害発生時の再現期間に与える影響の統計分析, 土木学会全国大会第77回年次学術講演会, VI-399, 2022
- 10) 中瀨遥平, 佐藤大輔, 大谷礼央, 長谷川淳, 布川修 : 鉄道盛土を対象とした定量的斜面危険度評価手法の検討, 土木学会全国大会第77回年次学術講演会, VI-400, 2022
- 11) 浦越拓野, 河村祥一, 馬目凌, 深野雄三 : 中小河川での浸水・氾濫に対するリアルタイムハザードマップ, JREA, vol.66, No.1, pp.27-30, 2023
- 12) 高浦真行, 中村貴久, 景山隆弘 : 土砂が混入したバラストの健全度評価方法, 土木学会全国大会第77回年次学術講演会, VI-435, 2022
- 13) 中村貴久, 景山隆弘 : 劣化した道床バラストの性能を回復する, RRR, vol.79, No.7, pp.20-25, 2022
- 14) 松丸貴樹, 佐藤武斗, 尾崎匠, 伊藤壱記 : 降雨で被災した盛土の応急復旧判断手法の提案, JREA, vol.66, No.6, pp.46-49, 2023
- 15) 防災科研 : 首都圏の局地的な激しい気象の発生状況をいつでも、誰でもチェックできるシステム「ソラチェック」を公開します!, 防災科研プレスリリース, 2020
- 16) https://www.jaxa.jp/projects/sat/alos2/index_j.html (2023年9月25日閲覧)
- 17) JAXA : 「だいち2号」による全国地殻変動分布図の初公開について, JAXA プレスリリース, 2023
- 18) (株) QPS 研究所, JAXA : 36機の小型SAR衛星による準リアルタイムデータ提供サービス事業の創出に向けたJ-SPARC事業コンセプト共創の開始について, JAXA プレスリリース, 2020
- 19) https://www.gsi.go.jp/kankyochiri/Laser_demimage.html (2023年9月25日閲覧)
- 20) 古川武彦, 大木勇人 : 図解天気予報入門, 講談社ブルーバックス, p.183, 2021
- 21) 室谷浩平, 中出孝次, 鎌田慈 : 降雪地帯を走行する鉄道車両への着雪を再現する着雪シミュレータの開発, 鉄道総研報告, vol.36, No.7, pp.59-68, 2022
- 22) 石井秀憲, 室谷浩平, 中出孝次 : 水流中の3次元的な土砂の移動に基づいた河川橋脚周りの局所洗掘解析手法, 鉄道総研報告, vol.37, No.4, pp.9-16, 2023
- 23) 野口雄平, 中出孝次 : 横風空力特性に関する風洞試験を模擬した数値シミュレーション, 鉄道総研報告, vol.31, No.9, pp.11-16, 2017
- 24) 荒木啓司 : 数値計算を用いて強風箇所を抽出する, JREA, vol.65, No.1, pp.21-24, 2022

激甚化する降雨災害に対する鉄道インフラのレジリエンス向上

構造物技術研究部長
神田 政幸



1. はじめに

近年発生した局所的強雨や広域連続強雨において、鉄道インフラが被害を受け、鉄道運行に支障を及ぼす事例が見受けられる。そこで、過去の降雨による鉄道インフラの被害から得られた降雨災害の特徴を総括するとともに、鉄道総研が取り組んできた鉄道インフラのレジリエンス向上策を紹介する。さらに、最近の線状降水帯を伴う災害に対する課題を挙げ、さらなるレジリエンスの向上のための今後の取組みとして、診断・補強技術、早期復旧技術の取組みのほか、国が進める「流域治水」に対応した取組みについて述べる。

による災害（2019年）は、記録的な大雨、暴風、高波、高潮が特徴であった。総降水量は神奈川県箱根で1000mmに達し、甲信から東日本を中心に多くの場所で500mmを超過した。この大雨の影響で広い範囲で河川の氾濫が相次いだほか、土砂災害や浸水被害が発生した。鉄道インフラでは、JR東日本をはじめ多くの鉄道の河川橋梁や山間部の谷埋め盛土に被害が生じた（図1（a））。令和2年7月豪雨（2020年）は、西日本から東日本の広い範囲に大雨をもたらした。特に7月3日から8日にかけて発達した線状降水帯が九州地方で多数発生し、記録的な大雨により球磨川などの大河川で氾濫が相次いだ。鉄道インフラでは球磨川流域や筑後川流域のJR九州の河川橋梁や河川沿いの盛土等で甚大な被害が発生した（図1（b））。

2. 過去の降雨災害の特徴

最初に鉄道インフラに被害を与えた最近の降雨災害を概観する。令和元年東日本台風（台風19号）

鉄道インフラのうち、降雨災害が発生する箇所として、河川橋梁、河川沿いの盛土や集水地に位置する谷埋め盛土が挙げられる。これらは増水による被災リス




図1 最近の降雨災害による鉄道インフラの被害例

クを有する弱点箇所となりうるとともに、一旦被害が発生すると復旧に時間を要することが知られている。これらは、復旧にあたり河川協議や出水期の工事制限、あるいは工所用進入路の確保のため、復旧に数か月から数年を要することになる(表1)。

このように最近の降雨による自然外力は巨大化し、局所的強雨や広域連続強雨により増水が発生し、河川近傍あるいは集水地形に存在する鉄道インフラが損傷し、その損傷が進行し、被害拡大に繋がっている。被災前後の鉄道インフラの機能は、被災直後に急激に低下し、復旧とともに回復する曲線を描く(図2)。同図において、鉄道事業者は「被災前の対応」のほか、「発生中・初動の対応」、そして「復旧時の対応」を行うことで、鉄道インフラの機能低下を小さく、また機能回復を早めることを目指す(青の曲線から赤の破線へ)。本講演では、これらの対応策のうち、ハード対策に着目しこれをレジリエンス向上策と定義し、「被災前の対応」と「復旧時の対応」の研究開発について論ずる。

鉄道インフラのレジリエンスを高めるには、被災前の検査・診断技術、補強技術のほか、被災後の復旧時の早期復旧に寄与する技術が必要となる(図3)。ここでいう「検査・診断技術」とは、多数の鉄道インフラ群から降雨災害に対して耐力の小さい弱点箇所を予め抽出する技術である。抽出された弱点箇所に対して、「補強技術」により粘り強い構造に変更する。これにより鉄道インフラの路線ごとの降雨による被災リスクを低減させることに繋がる。一旦、鉄道インフラに被害が発生すると「早期復旧技術」が必要となる。これは損傷を受けた鉄道インフラのうち無被害から軽微な被害を判断し、運行再開に繋げる診断技術のほかに、中程度から大被害の鉄道インフラのうち、中程度の被害を判断し、被災構造物を再利用あるいは一部再利用し、かつ補強し運行再開に繋げる技術である。以上は、鉄道インフラの被害が重篤ではなく、取替え等の大規模な工事が不要であり、損傷した既設鉄道インフラを再利用に至る早期、かつ適切な診断と補強により、鉄

表1 河川橋梁、河川沿いの盛土/谷埋め盛土と復旧

	河川橋梁	河川沿いの盛土/谷埋め盛土
被害例		
復旧	数か月～数年	
決定要因	<ul style="list-style-type: none"> ■ 河川協議/出水期の工事制限 ■ 工所用進入路の確保 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 沿線地権者との協議/出水期の工事制限 ■ 工所用進入路の確保

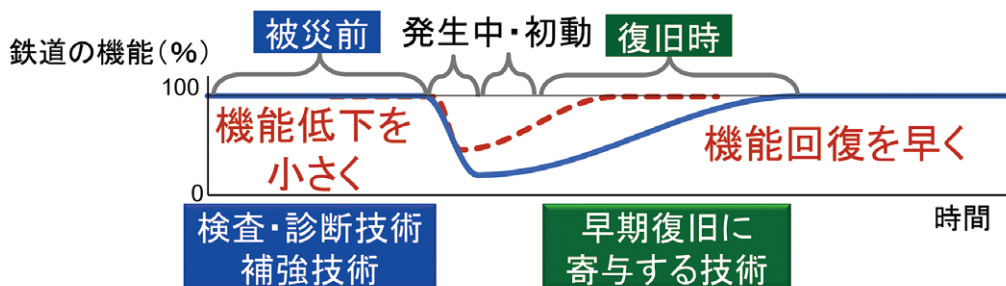


図2 被災前後の鉄道の機能とレジリエンス向上

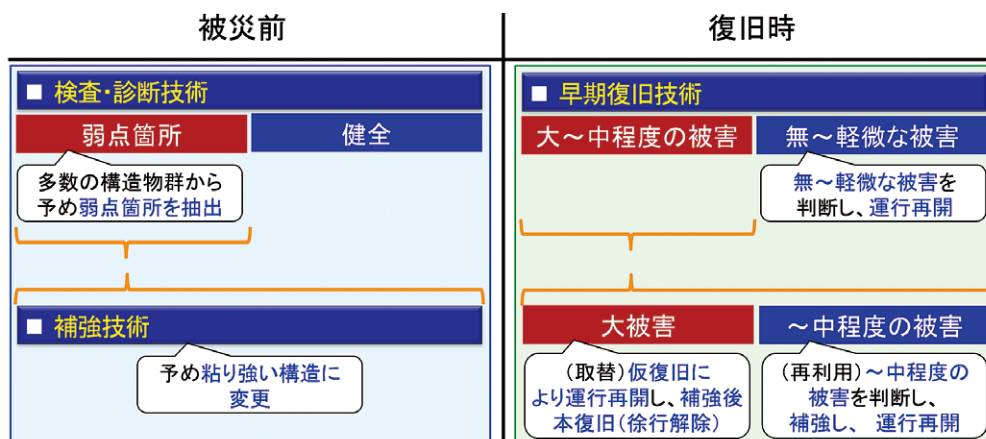
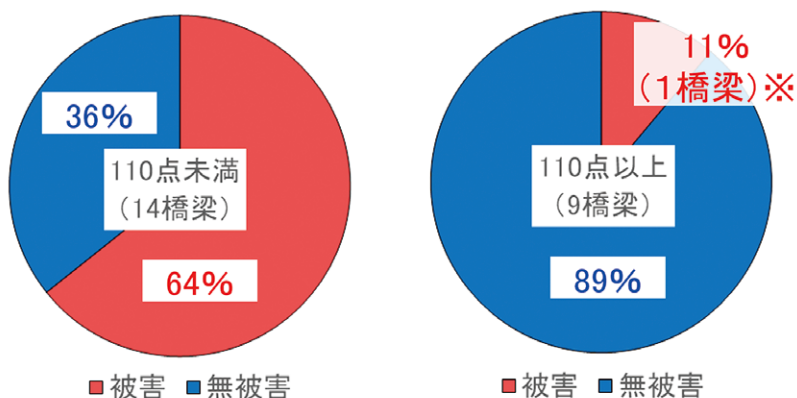


図3 レジリエンス向上のための研究開発



※根入れが大きい橋梁であったが、河口部に位置する緩い堆積層のため流出した例

図4 洗掘被害リスクを有する河川橋梁の抽出例(2019年以降)

道インフラの早期復旧に寄与する技術となる。一方、大被害を受けた鉄道インフラは再利用ができないため、再構築による取替えが必要となる。したがって、運行再開や復旧に時間を要することとなるが、この場合についても仮復旧により早期の運行再開に繋がる段階的復旧法が求められる。

3. 鉄道インフラのレジリエンス向上策

次にこれまで鉄道総研が取り組んできた鉄道インフラのレジリエンス向上策を紹介する。

3.1 被災前の検査・診断技術

被災前の検査・診断技術として、河川橋梁を例に示す。鉄道では、増水による洗掘被害を受けやすい河川橋梁の抽出に「洗掘採点表」が用いられてきた。これは河川橋梁の構造条件や河川環境条件のいくつかの

項目を採点形式で足し合わせ、110点未満の場合、洗掘被害を受けやすい河川橋梁として抽出するものである¹⁾。2019年以降、鉄道総研が調査を行った洗掘被災橋梁(10橋梁)、及び路線キロ程で10km以内の同一の増水外力を受けたと考えられる無被害橋梁(13橋梁)の合計23橋梁について、洗掘採点表を適用した。その結果、110点未満の場合(14橋梁)、洗掘被災橋梁を60%以上の確率で捉えることができた。一方、110点以上の場合(9橋梁)、河口部で深い根入れを有するため点数は高いものの、緩い堆積層の根入れが増水時に流出した洗掘被災橋梁が1件含まれたが、これ以外は無被害であった(図4)。

洗掘採点表により洗掘被害を受けやすい橋梁を抽出した後、橋梁下部工の固有振動数から健全度診断を行う「衝撃振動試験」により、河川橋梁の健全度の追跡調査が可能となる²⁾(図5)。



図5 衝撃振動試験

3.2 被災前の補強技術

抽出された増水による被災リスクの高い河川橋梁は、必要により粘り強い構造に変更する補強を行う。鉄道総研では、既設基礎の耐震補強工法として、既設基礎を鋼矢板（シートパイル）で囲み、これを既設フーチングと結合する「シートパイル補強工法」を開発した³⁾（図6 (a)）。シートパイル補強工法は、既設基礎の耐震補強工法として開発したものであるが、河川橋梁の洗掘被災リスク低減策としての利用も可能である。既に橋梁・高架橋100基以上の補強事例を有する（例えば、図6 (b)⁴⁾）。なお、本工法は（株）大林組、日本製鉄（株）との共同研究成果である。

このほか、河川橋梁、河川沿いの盛土/谷埋め盛土に対して、各種の降雨対策を提供し、導入支援を図ってきた（図7）。

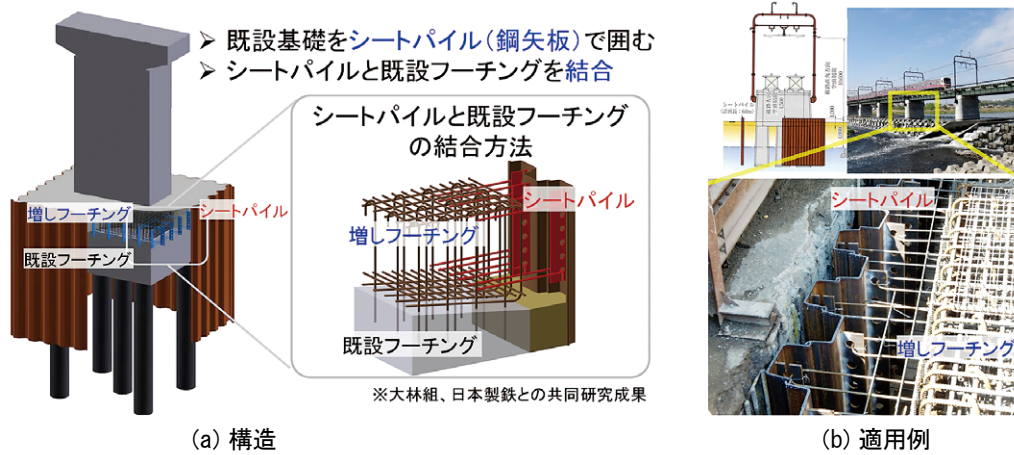


図6 シートパイル補強工法

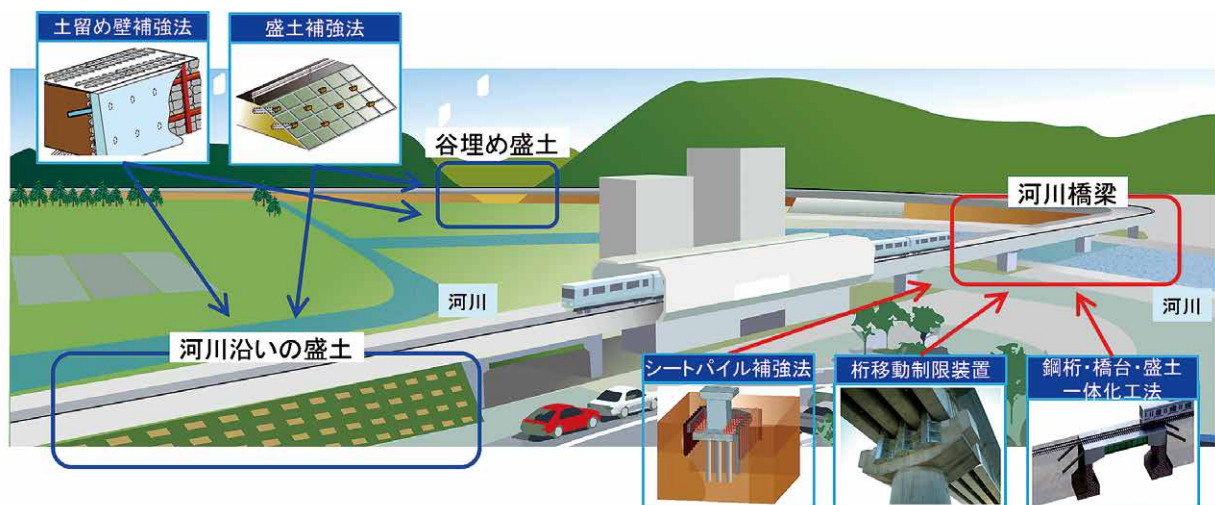
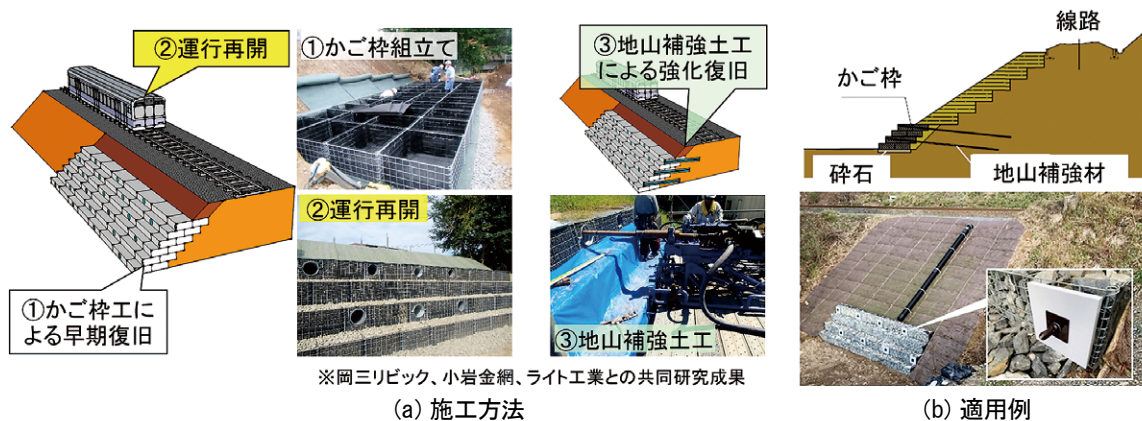


図7 河川橋梁、河川沿いの盛土/谷埋め盛土に対する降雨対策



※岡三リビック、小岩金網、ライト工業との共同研究成果

(a) 施工方法

(b) 適用例

図8 かご枠工による早期・強化復旧法



図9 線状降水帯の発生に伴う降雨災害の課題

3.3 早期復旧技術

以下では、被災後の早期復旧技術として、盛土を例に示す。鉄道総研では被災した盛土を、碎石を詰めた鋼製のかご枠を使用して復旧する早期・強化復旧法を開発した⁵⁾(図8(a))。本復旧法には、従来の復旧法より工期を短縮しつつ耐降雨性を向上させた「かご枠工による被災盛土の早期復旧法」と、かご枠の施工後に地山補強材を追加施工し、耐降雨性ととも、耐震性も向上させた「かご枠工による被災盛土の強化復旧法」がある。従来、被災盛土を復旧する際、大型土のうを被災箇所に積み上げ仮復旧として早期の運行再開を図り、その後の本復旧で被災前の盛土構造に原状復旧するのが通常であった。しかしながら、仮土留め施工後に大型土のうを撤去したり、盛土構造を再構築したりするのに長い施工期間や多額の工事費を要していた。これに対し、上記の早期復旧法は、大型土のうの代わ

りに碎石を詰めたかご枠を使用するため、耐降雨性を向上させた本復旧構造である。仮土留めの施工や大型土のうの撤去が不要となるため、施工期間と工事費の削減が可能となる。さらに、運行再開後に地山補強材を追加施工する上記の強化復旧法は、段階的に強化し盛土の耐震性が向上する。強化復旧法は、令和元年東日本台風(台風19号)で被災した盛土の復旧工事に採用された(図8(b))。なお、本工法は、岡三リビック(株)、小岩金網(株)、ライト工業(株)との共同研究成果である。

3.4 線状降水帯の発生に伴う降雨災害の課題

最近の激甚化する降雨災害として、線状降水帯の発生に伴う災害がある。線状降水帯は、次々と発生し発達した雨雲(積乱雲)が列をなし、積乱雲群によって、数時間にわたってほぼ同じ場所を通過、または停滞することで作り出される。線状降水帯は、長さ50

～300km程度、幅20～50km程度の局地的な強雨をもたらす⁶⁾。代表的な線状降水帯の発生による降雨災害として、平成24年7月九州北部豪雨(2012年)、平成29年7月九州北部豪雨(2017年)、平成30年7月豪雨(2018年)や令和2年7月豪雨(2020年)などがある。

これらの災害では、構造物の高さを超える高出水が発生した。これは、河川橋梁においては流木等の流出物が橋脚だけでなく、鋼桁に衝突することによって外力の増加をもたらし、河川沿いの盛土/谷埋め盛土においては土砂流出や浸透による強度低下をもたらし、被害規模の拡大に繋がる可能性がある(図9)。これらに対応するため、外力の増加や強度低下に対しては、被災前の鉄道インフラの検査・診断技術や補強技術への取り組みが必要であり、被害規模の拡大に対しては、復旧時の早期復旧技術への取り組みが必要である。また、これらの鉄道独自の取り組みでは十分でないことが想定され、従前以上に河川管理者との連携が求められる。

4. さらなるレジリエンス向上を目指して

前章において、線状降水帯の発生に伴う災害に対する課題を示した。本章では鉄道インフラのさらなるレジリエンス向上を目指した今後の取り組みとして、「流出物を考慮した河川橋梁の診断・補強技術」や、「土砂流出や浸透による強度低下を考慮した河川沿いの盛土/谷埋め盛土の診断・補強技術」のほか、「甚大な被害規模の河川橋梁、河川沿いの盛土/谷埋め盛土の早期復旧技術」の必要性を示す。また、従前以上に河川管理者との連携が必要と考え、国が進める「流域治水」に対応した取り組みを示す(図10)。

4.1 流出物を考慮した河川橋梁、土砂流出や浸透による強度低下を考慮した河川沿いの盛土/谷埋め盛土の診断・補強技術の取り組み

増水時の河川橋梁には、流水圧が作用し増水とともに

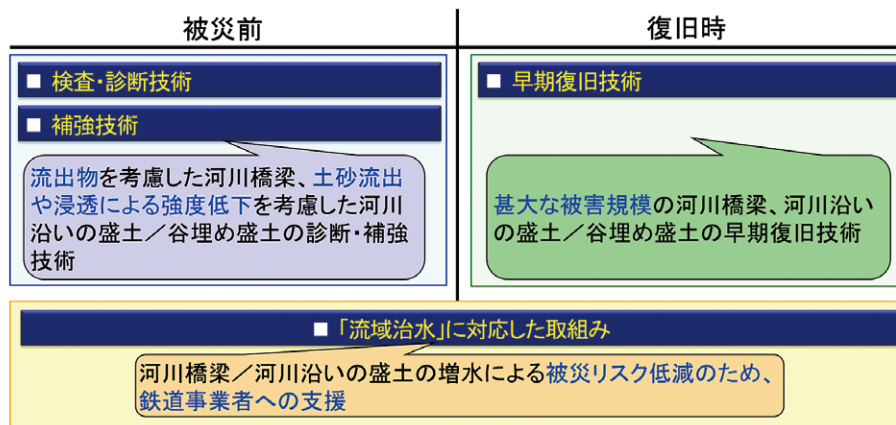


図10 さらなるレジリエンス向上のための取り組み

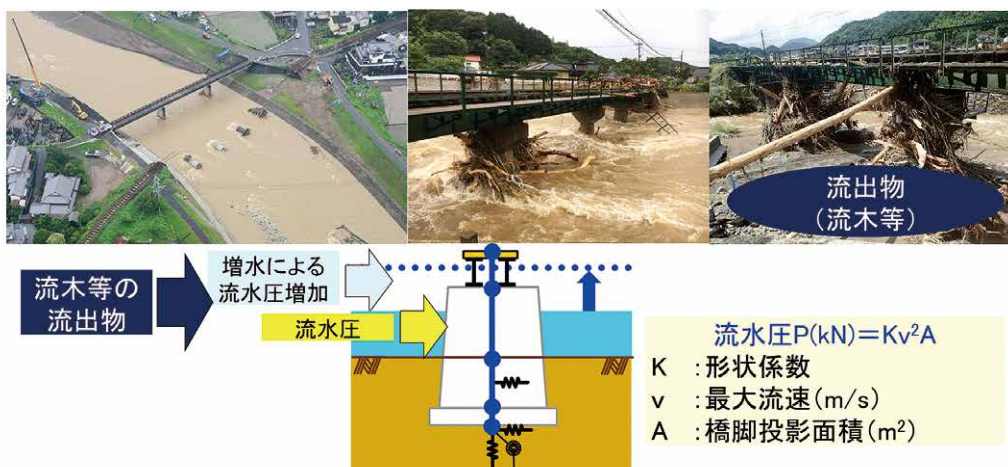


図11 流木等の流出物を考慮した河川橋梁の診断・補強技術



図 12 土砂流出、浸透による強度低下を考慮した河川沿いの盛土/谷埋め盛土の診断・補強技術



図 13 最近の被災鉄道インフラの復旧事例

に流水圧は増加する。流水圧は形状係数のほか、流下方向断面積に比例するが、流出物が橋梁橋脚に留まることで、上述の抵抗面積が増加し急激に流水圧を増加させる。平成29年7月九州北部豪雨(2017年)では、過去最大級の流木等が流出し⁷⁾、その結果河川橋梁の被害拡大に繋がったとも考えられている⁸⁾。このように流木等の流出物が河川橋梁の被害を顕在化、拡大させる現象は、その流出物の定量化や流水圧の推定など未解明な点が多い。今後これらを考慮した河川橋梁の診断技術や、補強技術の構築のための研究開発が必要と考えられる(図11)。

構造物の高さを超える高出水は、盛土に対して土砂流出や浸透による強度低下をもたらす。強度低下はさらに土砂流出を顕在化させ、被害拡大に繋がる。鉄道総研では、LES乱流モデルを用いた流体計算と土砂の3次元的な移動に基づく流体土砂境界の変動計算を連成し、流体/地盤境界の変動解析手法を構築し、河川

内橋脚周りの洗掘量の評価を可能とした⁹⁾。しかしながら、浸透による地盤材料の強度低下は考慮されていない。そこで、土砂流出や浸透による強度低下を同時に考慮した数値解析法の確立と、これを活用した河川沿いの盛土/谷埋め盛土の診断技術や補強技術の構築のための研究開発が必要と考えられる(図12)。

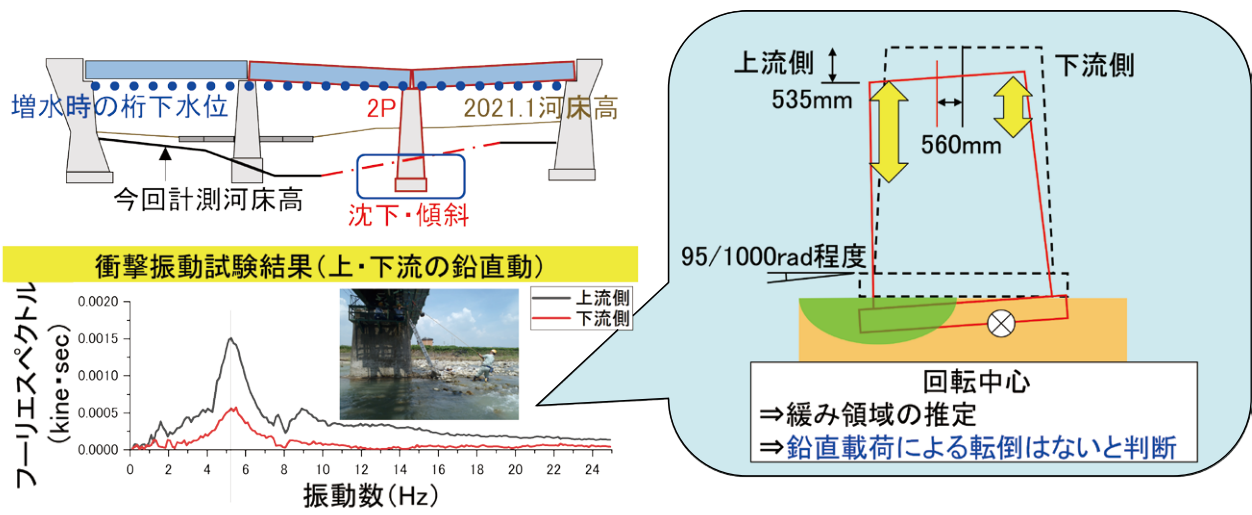
4.2 甚大な被害規模の河川橋梁、河川沿いの盛土/谷埋め盛土の早期復旧技術の取組み

これまで鉄道インフラが甚大な被害を受けた場合、定量的な診断ができないため、被災鉄道インフラを再利用することは難しかった。最近の被災鉄道インフラの復旧事例では、被災した河川橋梁を診断し、被災鉄道インフラを再利用、あるいは一部を再利用したことがある(図13)。甚大な被害規模の被災鉄道インフラを再利用し復旧した例は少なく、今後も継続して甚大な被害規模の河川橋梁、河川沿いの盛土/谷埋め盛土

の早期復旧の診断・復旧技術の構築のための研究開発が必要と考えられる。

以下では、甚大な被害規模の河川橋梁を再利用し、早期に復旧した例を紹介する¹⁰⁾。当該橋梁は橋脚天端で上流側に500mm以上、沈下で500mm以上、傾斜で95/1000傾く重篤な被害を受けた。復旧に向け被害調査が重要となるが、増水時の洗掘によって発生した橋脚基礎の支持地盤の緩み領域の推定が必要であった。ここでは、橋梁下部工の診断に用いる衝撃振動試験により、上流側・下流側の鉛直振動の大きさの違いから、回転中心を求めることで緩み領域の推定を行った。上流側の基礎地盤の緩み領域の発生に伴い回転中心は下流側に移動するが、鉛直载荷の位置とこの回転中心のずれ量の大小で鋼桁や列車荷重の再载荷の可否

が分かる。ここでは、両者のずれ量が小さいことから緩み除去のための鉛直プレロード载荷によって上流側に転倒しないことが明らかになり、したがって被災橋脚の再利用が可能と判断した(図14(a))。水タンク12tf(営業車の32%荷重)の鉛直プレロード载荷によって緩み領域を締め固めた後、保守用車17.5tf、40tf(それぞれ営業車の46%、113%荷重)による走行試験、及びブレーキ試験を行い、走行安全性の確認を行った。これらの結果から徐行による運転再開に繋げることができ、運行再開後、基礎を補強し徐行解除に至った(図14(b))。2022年8月9日に当該河川橋梁が被災したが、診断の結果、鋼桁及び橋脚の再利用が可能と判断し、約4か月後の12月23日の早期に運転再開した。



(a) 被災河川橋梁と緩み領域の推定



(b) 被災河川橋梁の復旧方法

図14 甚大な被害規模の河川橋梁の早期復旧

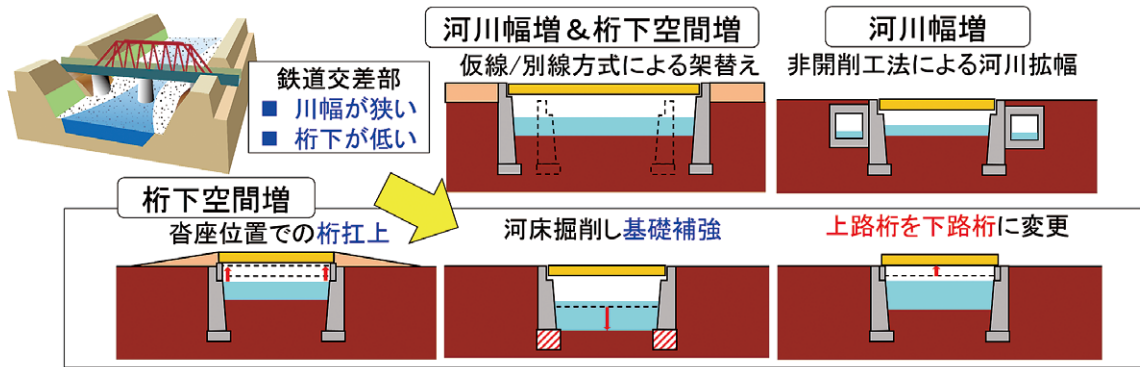


図 15 河川と鉄道交差部の河川改修方法

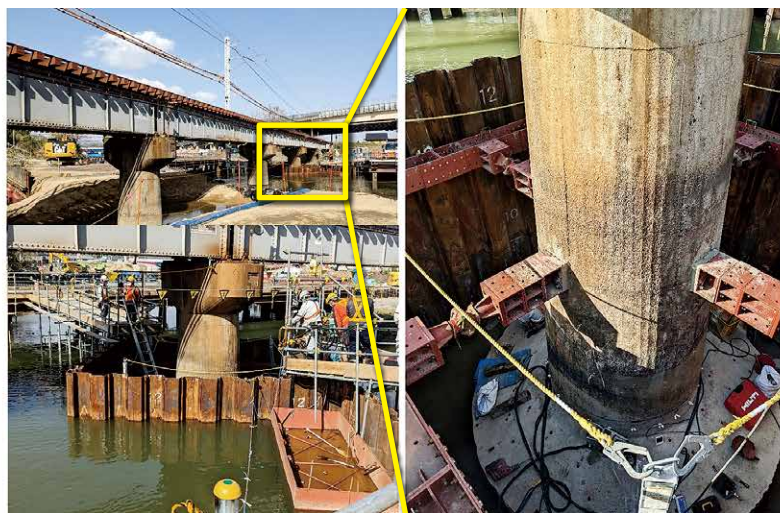


図 16 河床掘削と河川橋梁の基礎補強

4.3 流域治水に対応した取組み

「流域治水」とは、国土交通省が進める、気候変動による降雨量の増加に対応した治水施策である。都市部の河川のみならず全国の河川を対象とし、河川改修等の整備を加速化すること、並びにステークホルダー間の協働によって、被害対象を減じることに加え、被害軽減や早期復旧を図るものである¹¹⁾。このうち、河川改修等の整備事業は、河川管理者と鉄道事業者の協議により事業が進められる。河川と鉄道の交差部は、川幅が狭い、あるいは河川橋梁の桁下が低いなど、増水による被災リスクが存在する場合がある。河川管理者や鉄道事業者が連携し、このような箇所の河川改修事業を進捗させることが求められている。そこで、鉄道事業者のための支援ツールとして、河川改修事例集や選定表を整備する必要があるものと考えられる。

河川と鉄道交差部の河川幅の増加や桁下空間を広げ

る方策として、「仮線や別線方式による河川橋梁の掛け替え策」のほか、レールレベルは変えずに川幅を増加させる方策として、「非開削工法による河川拡幅策」が考えられる。このほか、桁下空間を増加させる方策として、「沓座位置での河川橋梁の桁扛上策」、「河床掘削し河川橋梁の基礎補強を行う方策」や、河川橋梁の桁種について「上路桁を下路桁に変更する方策」が考えられる(図15)。先に示した、鉄道事業者のための河川改修選定表を幅広く整備するには、ここで示した、新しい河川空間確保の改修工法(例えば、桁扛上策、河床掘削し基礎補強を行う方策や、桁種変更策)の研究開発が必要と考えられる。

河川改修事業の一環として、河床掘削と河川橋梁の基礎補強を行った例を紹介する¹²⁾。これは、河床掘削し河川橋梁の基礎の支持力が低下した分を、シートパイル補強工法により基礎補強した例である(図16)。

5. おわりに

本講演では、過去の降雨による鉄道インフラの被害から得られた降雨災害の特徴を総括するとともに、鉄道総研が取り組んできた鉄道インフラのレジリエンス向上策を紹介した。さらに、最近の線状降水帯を伴う災害に対する課題を挙げ、さらなるレジリエンスの向上のための鉄道独自の取組みとして、診断・補強技術、早期復旧技術の取組みのほか、河川管理者と鉄道事業者の連携として、国が進める「流域治水」に対応した取組みについて示した。

具体的には、線状降水帯の発生に伴う構造物の高さを超える高出水が要因となって、河川橋梁及び河川近傍の盛土の被害を拡大させる可能性が高いとし、「流木等の流出物と河川橋梁」、「土砂流出や浸透による強度低下と盛土」の関係を明らかにする診断・補強技術の構築のための研究開発の必要性を示した。また、「流域治水」に対応した河川改修事業を進捗させるための鉄道事業者の支援ツールとして、河川改修事例集や選定表を整備する必要があるとした。このうち、河川と鉄道交差部の新しい河川空間確保の改修工法（例えば、桁上策、河床掘削し基礎補強を行う方策や、桁種変更策）の研究開発の必要性も示した。これらの取組みを進捗させることで、鉄道インフラのさらなるレジリエンス向上策に繋がるものと考えられる。

参考文献

- 1) 中村貴史, 佐溝昌彦, 村石尚, 小林徹, 渡辺諭, 中島大輔: 鉄道橋梁における洗掘を受けやすい橋梁を抽出するための採点表(案)の作成, 土木学会第60回年次学術講演会, IV-154, pp.307-308, 2005.
- 2) 西村昭彦, 羽矢洋: 衝撃振動試験による橋脚の健全度判定法, 土木学会誌, Vol.78, No.9, pp.26-28, 1993.
- 3) 西岡英俊, 樋口俊一, 西村昌宏, 神田政幸, 山本忠久, 平尾淳一: シートパイルによる既設杭基礎の耐震補強効果に関する模型実験, 地盤工学ジャーナル, Vol.5, No.2, pp.251-262, 2010.
- 4) 光森章, 対馬俊治, 西平宣嗣, 清水竜也, 今村年成: 京王電鉄多摩川橋梁の耐震補強工事-現地状況に合わせた補強工法選定例-, 基礎工, Vol.44, No.5, pp.38-41, 2016.

- 5) 中島進, 佐藤武斗: 被災盛土の早期・強化復旧工法, 鉄道総研報告, Vol.35, No.1, pp.47-52, 2021.
- 6) 加藤輝之: 集中豪雨をもたらす線状降水帯~基礎研究が生み出した防災用語~, 第21回都市水害に関するシンポジウム, pp.1-7, 2011.
- 7) 国土交通省水管理・国土保全局砂防部: 平成29年7月九州北部豪雨は過去最大級の流木災害~今回の災害と流木の記録がある土砂災害との比較を行いました~, プレスリリース資料, 2017.
- 8) 矢野真一郎, 土橋将太, 堂蘭俊多, 笠間清伸, 北隆範: 流木発生ポテンシャルの概念に基づく花月川の橋梁における流木災害リスク評価, 土木学会論文集, B1(水工学), Vol.72, No.4, pp.289-294, 2016.
- 9) 石井秀憲, 室谷浩平, 中出孝次: 流水中の3次元的な土砂の移動に基づいた河川橋梁周りの局所洗掘解析手法, 鉄道総研報告, Vol.37, No.4, pp.9-15, 2023.
- 10) 齋藤祐樹: 豪雨により橋脚が傾斜した鉄道橋りよの復旧, 日本鉄道施設協会誌, Vol.61, No.11, pp.74-78, 2023.
- 11) 降旗涼介: 流域治水関連法の概要, 基礎工, Vol.50, No.6, pp.26-32, 2022.
- 12) 濱田吉貞, 大野光紀, 船谷恵: 河川改修に伴う既存橋脚保全対策としてのシートパイル基礎補強工法の適用, 基礎工, Vol.51, No.10, pp.56-59, 2023.

シミュレーションによる 気象災害の解明と予測精度の向上

鉄道力学研究部長
上半 文昭



1. はじめに

近年の気象災害激甚化を受けて、気象災害による鉄道被害の現象解明と予測精度の向上が、鉄道分野においても極めて重要な課題となっている。現象解明のための基礎試験の実施には、高度な試験技術・設備の開発が不可欠である。また、被害予測や運転規制のための外力、耐力の評価では、気象災害の激甚化に伴い過去の被害統計情報のみによる評価では不十分となるケースがあり、実物大試験による情報補完には多大な費用を要する。

一方、鉄道分野の研究開発では、理論解析や実験による検証に加えて、数値シミュレーションによる定量的な予測・評価が重要な役割を果たしている。特に、災害や事故など実験が困難または非効率な課題には、数値シミュレーションによる検討が有効であり、鉄道総研では、気象災害に関わるシミュレーションにも取り組んでいる。

以下では、気象災害のメカニズム解明や予測精度向上を目的として、鉄道総研が開発するシミュレーション技術例を紹介する。また、気象災害によるハザードを評価して初動対応や復旧に反映するツールとして開発を構想している「鉄道防災プラットフォーム」¹⁾を、現象解明、外力や耐力の評価、強靱化対策効果の評価、リアルタイム被害予測などの様々なフェーズで支援するツールとしての高度シミュレーション技術の今後の役割について展望する。

2. 気象防災に関するシミュレーションの役割

実車両・実構造物に対して、実規模の雨、風、雪を与えるような試験の実施は困難であり、模型試験や要

素試験も可能ではあるが、技術や費用面の課題がある。そのため、数値シミュレーションを用いて気象現象やそれに伴う鉄道被害を再現することが、気象災害の現象解明や鉄道に対するハザードの予測精度向上に不可欠であると考えられる。

数値シミュレーションは、これまでも気象防災を目的として活用されてきた。例えば、公的気象情報からの鉄道沿線の気象情報の推定、橋脚や盛土の耐荷力の把握や補強効果の確認、強風による車両の転覆限界風速の算出や防風柵などの対策効果の推定などにシミュレーションが用いられてきた。一方、雪に関しては、雪の物性を考慮したシミュレーション手法の開発に着手し、これから体系的な研究に取り組む段階である。

2.1 多様・未経験の被害形態に対する現象解明

甚大かつ広域の気象災害に対応するためには、多様な被害形態の解明、未経験または未検討の被害形態の解明が必要である。

激甚化、広域化する現象を解明するには、スケールの異なる手法を組み合わせたマルチスケール解析技術の向上が不可欠である。マルチスケール解析は、規模や時間についてマクロからミクロに至る現象を連成して効率的に解析する手法である。

また、未経験または未検討の複雑な現象の解明にあたっては、異なる分野の理論を組み合わせたマルチフィジックス解析技術の向上が不可欠である。マルチフィジックス解析は、例えば流体力学と動力学などの異なる分野の成熟した解析技術を組み合わせて効率的に解析する手法である。

今後の気象防災においては、このようなマクロからミクロに至る規模や時間または異なる物理現象の相互作用の影響を考慮した高度数値シミュレーションを用いて気象災害の解明に取り組むことが重要な課題である。

2.2 より実状に近い条件での広域・リアルタイムハザード評価

災害発生中や初動の対応を迅速化するためには、鉄道線区全体での実状に近い条件での詳細な評価、および耐力や対策効果の線区レベルでの評価が課題である。

線区全体のリアルタイムハザード評価へのシミュレーションの適用にあたっては、公的気象情報から鉄道沿線情報を、計算負荷を抑えて迅速に推定するシミュレーションを鉄道防災プラットフォームに組み込んで用いている。また、高度なシミュレーションを用いて、災害時の車両走行性など耐力に相当する指標を事前に解析して被害予測や運転規制の閾値を算定し、鉄道防災プラットフォームに適用する手法も考えられる。

線区の弱点箇所の抽出や対策効果の確認をより詳細に行う手段として、実状を忠実に再現するデジタルツインの整備を検討している。デジタルツインは、実空間に実在しているものを、デジタル技術を利用してコンピュータ上の仮想空間に再現したモデルである。鉄道防災プラットフォーム上で線区全体の特徴を整理して、外力や地形情報などの公的データ、車両・構造物の諸元などの事業者データを用いて、デジタル空間に現実と同じ条件・状況の鉄道を再現し、外力、耐力、ハザードなどを解析可能にする。デジタルツインで事前に計算された詳細なハザードの評価結果を反映するとともに、対策や更新に伴う条件変更も柔軟かつ迅速に反映することによって、鉄道防災プラットフォームにおける外力、耐力、ハザードの予測精度向上を図る仕組みを構築したいと考えている。

3. 高度数値シミュレーションによる気象災害の現象解明

気象災害の詳細な現象解明にあたっては、マクロな領域を対象とした外力推定とミクロな領域で流体や粒

子が相互に作用しながら生じる複雑な現象を一括して取り扱うための高度なシミュレーション技術が必要になる。ここでは、鉄道総研が開発するマルチスケール解析とマルチフィジックス解析を用いた高度数値シミュレーション技術の例として、河川橋脚の洗掘シミュレーションと積雪軌道上の排雪走行シミュレーションを紹介する。

3.1 河川橋脚の洗掘シミュレーション

近年、大規模な洪水により河川橋梁の橋脚周辺が洗掘され、橋脚が沈下・傾斜し列車運行を阻害する事例が頻発している。そこで、洗掘対策検討用のツールとして、河川橋脚周りの洗掘を再現するシミュレーション手法を開発した²⁾。

本手法は、流れの計算と河床の砂礫の移動による地形変動計算を組み合わせることで洗掘の進行を再現している(図1)。流体計算および砂礫粒子の移動計算の両方に3次元的な手法を用いているため、複雑な条件への適用が可能である。また、計算の一部に確率的な手法を採用することで、計算コストを抑え、長時間にわたる現象の計算を実現している。

また、河川の流れについては、広範囲流体解析による流速分布を橋脚周辺の詳細な洗掘解析に接続して解析を行う。それによって、広範囲全体を詳細にモデル化して解析した場合とほぼ同等の洗掘解析結果を、短時間の解析で取得可能にしている(図2)。

大規模水路を用いた円柱橋脚周りの洗掘実験を対象に再現計算を実施し、本手法によって洗掘孔の形状・洗掘深の時間変化を精度よく再現できることを確認した(図3)。本シミュレーション手法は、洗掘模型実験と併用して、洗掘時における河川の流れや砂礫の移動・堆積などの現象解明、洗掘孔の形状や深さなどの予測、防護工の対策効果の検討などに使用できる。今後、実規模での解析モデルの構築や実被害との相関について

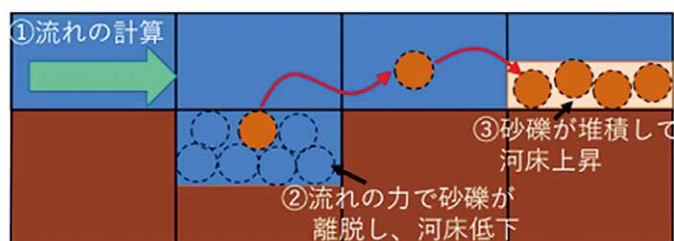


図1 洗掘シミュレーション手法

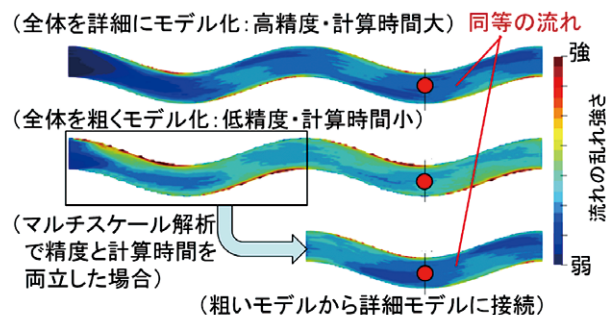


図2 流れのマルチスケール解析

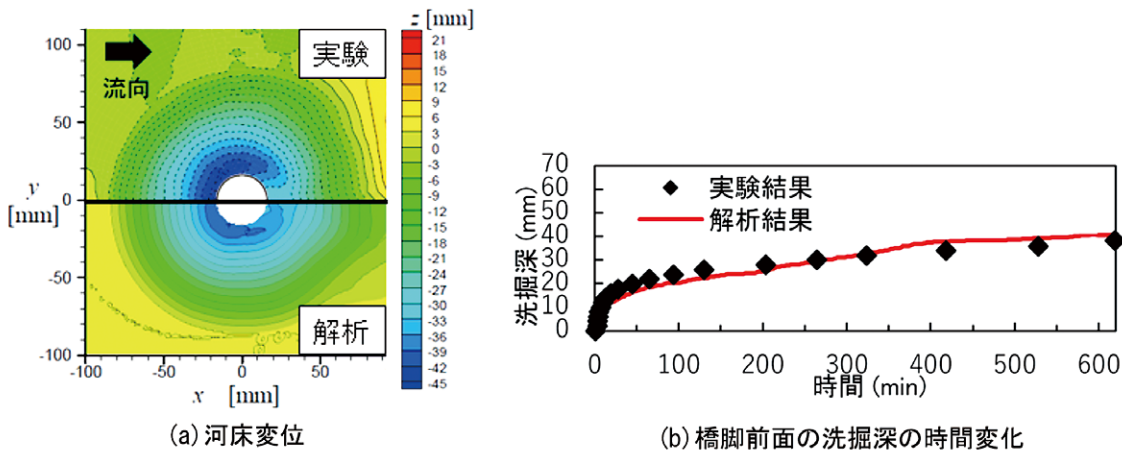


図3 洗掘実験と洗掘シミュレーションの結果の比較

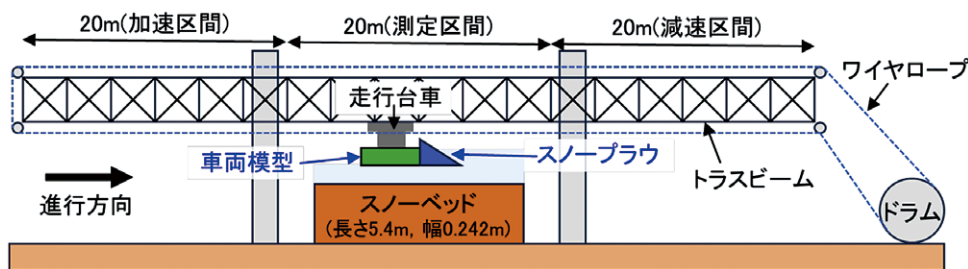
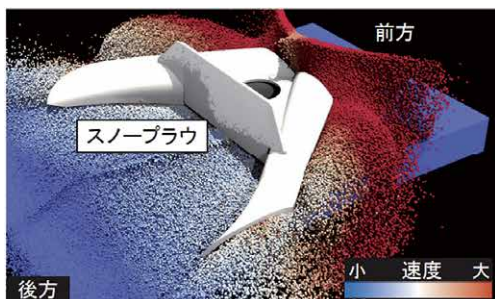
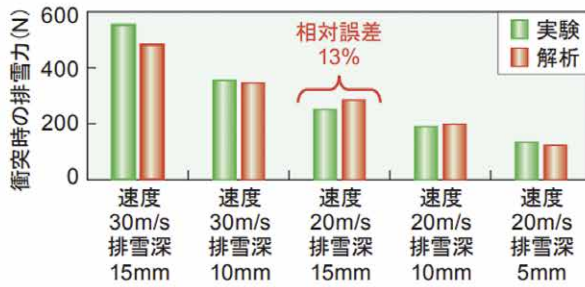


図4 排雪力測定試験装置の概要



(a) 排雪シミュレーション



(b) 実験とシミュレーションでの排雪力の比較

図5 排雪シミュレーション結果

検討を深度化し、河川の流況や河床の材料および橋脚の形状の違いなどを考慮した洗掘評価に応用し、過去の被災事例の統計的分析に基づいて設定された現状の洗掘深予測式の改良などに活用する計画である。

3.2 排雪走行シミュレーション

新幹線では現車による排雪試験などの結果に基づき、軌道上の積雪深に応じた走行速度規制がなされている。しかしながら、現車試験はコストと期間を要するとともに、車両が損傷や脱線に至るような条件での試験実

施は困難であるため、実施できる試験数には限りがある。そこで、現車試験を補完できる解析手法として、粒子シミュレータ³⁾を用いた排雪シミュレータの開発に取り組んだ⁴⁾。

排雪シミュレータの開発は、縮尺模型を用いた排雪実験と並行して実施した。実験では、全長60mのガイドレール内を走行する台車にスノープラウを搭載した1/10車両模型を取り付け、スノーベッドを通過させて排雪状況を再現した(図4)。

図5は、1/10車両模型による排雪実験を再現した

排雪シミュレーションの結果である。スノーベッド衝突時の排雪力の解析結果は、実験結果と十分に一致しており、車両模型の速度と排雪深による変化を適切に捉えている。この結果より、排雪シミュレータで排雪実験を十分に再現できることが確認できた。

また、排雪シミュレータで計算したスノープラウに作用する排雪力をマルチボディで構成された車両運動シミュレータに渡し、排雪力による車両およびスノープラウの姿勢・移動量の変化の解析結果を排雪シミュレータに返すという解析を繰り返すことによって、排雪しながら走行する車両の挙動を解析する連成手法を開発した(図6)。

この排雪走行シミュレーションは、現状は、縮尺模型実験の再現に成功した段階であるが、今後、実規模のスノープラウと車両の連成解析モデルを構築し、実車走行試験結果を用いて検証を実施する計画である。そして、実車による排雪試験条件の事前検討や補完、実車では再現困難な排雪深や車両速度などの影響評価に用いるとともに、運転規制や除雪頻度の検討やスノープラウの設計などに活用していきたいと考えている。

4. シミュレーションを用いた鉄道防災プラットフォームの予測精度向上

鉄道防災プラットフォームを用いた線区全体のリアルタイムハザード評価の精度を向上するためには、外力と耐力の適切な評価が不可欠である。外力の評価にあたっては、公的気象情報から鉄道沿線情報を迅速に推定するシミュレーションを用いている。その例としてここでは、氾濫・浸水と気流のシミュレーション事例を紹介する。また、高度シミュレーションを用いた耐力推定によって、運転規制や再開の評価の閾値設定を検討した例として、洗掘被災橋梁上の列車走行性評価のシミュレーションを紹介する。さらに、線区の弱点箇所抽出や対策効果の反映をより柔軟かつ迅速に行うための手段として期待するデジタルツインの開発事例として、鉄道総研の大型低騒音風洞を数値シミュレーションで再現した「数値風洞」の開発事例とその鉄道防災プラットフォームの予測精度向上への活用方法を説明する。

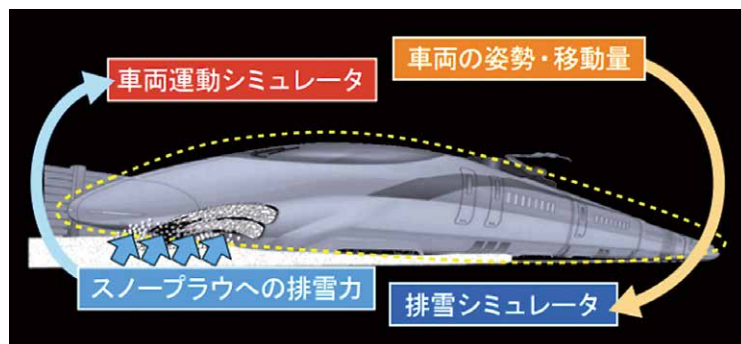


図6 車両運動解析と排雪解析の連成による排雪走行シミュレーション手法

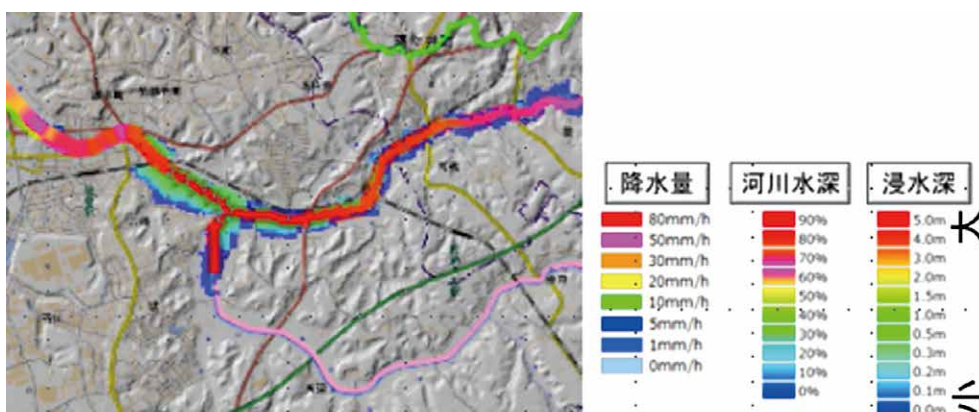


図7 氾濫・浸水シミュレーション

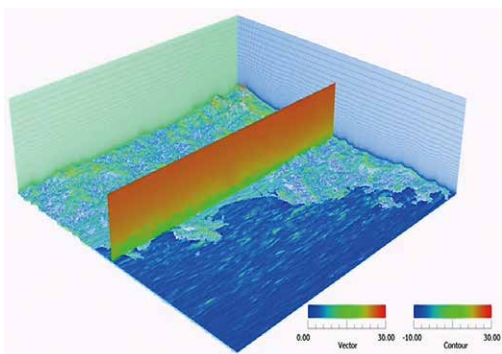


図8 気流解析シミュレーション

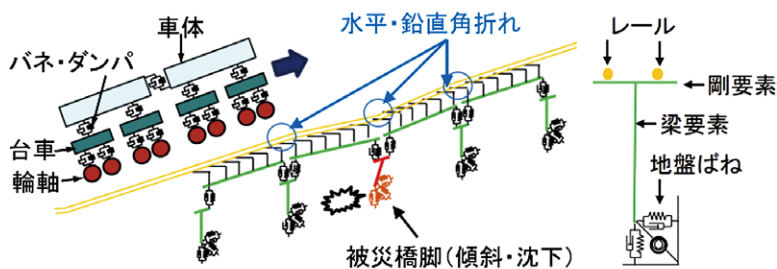


図9 DIASTARS IIIによる車両・橋梁のモデル化

4.1 外力評価のためのシミュレーション

災害の発生中に、外力をリアルタイムで推定するためには、計算負荷を抑えつつ迅速に計算を実行できるシミュレーションモデルが用いられる。図7に示す氾濫・浸水シミュレーション⁵⁾は、ナウキャストなどの雨量の将来予測データや国土地理院の地形データを用いて鉄道沿線の浸水箇所を推定し、徐行や運転抑止の判断や、利用者の避難誘導を支援するものである。図8に示す気流解析シミュレーション⁶⁾は、アメダスの実況風速から鉄道沿線の風向、風速を推定可能にするために用いたものである。気流解析モデルでアメダス地点を1としたときのその周辺の風速の増減率を表すデータテーブルを事前に準備することによって、沿線気流の計算を迅速化している。これらのシミュレーションの活用により、公的な気象情報などをリアルタイムで参照し、数分から10分程度で鉄道沿線の気象情報を提供できる。

4.2 洗掘被災橋梁上の列車走行性評価

河川橋脚の洗掘によって被災した橋梁では、橋脚の傾斜や沈下によって軌道に鉛直および水平方向の角折れ(曲がり)が発生する場合がある。このような場合の運転規制や再開の判断基準の検討を目的として数値シミュレーションで被災橋梁上の車両走行性を調査した。

鉄道総研が開発した鉄道車両と構造物の動的相互作用解析プログラムDIASTARS III⁷⁾を用いて車両と構造物をモデル化し(図9)、水平・鉛直の種々の角折れ量と安全に走行できる車両速度の関係を整理した。その結果を、ある車両速度で安全に走行できる角折れ量の限界値として図10に整理した。例えば、30km/hの黒線のグラフ内の領域に収まる組合せで水平角折れと鉛直角折れが生じている場合には、30km/hでの徐行が可能であると判断できる。

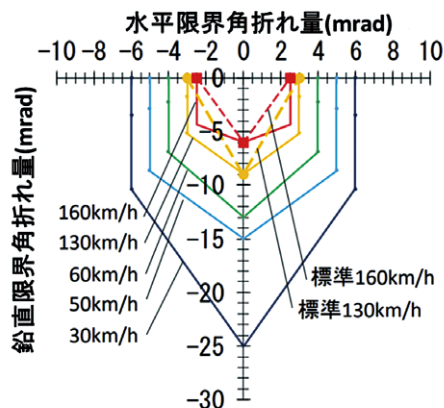


図10 低速走行時の限界複合角折れ量

提案した限界値は、水平方向と鉛直方向の複合した角折れの影響を考慮した上で、新たに低速領域に対して走行安全性、乗り心地を満足する限界値を示したものであり、災害発生直後の運転規制や、徐行試験実施や運転再開の判断の閾値として活用できる。

4.3 デジタルツインによる弱点箇所、対策効果の把握

鉄道防災プラットフォームの予測精度を向上するためには、外力、耐力を精度よく把握して、被害予測や運転規制のための評価指標の閾値を適切に設定する必要がある。また、気象災害の激甚化による外力の見直しや、車両・構造物への強靱化対策などによる耐力変化など、鉄道を取り巻く環境の変化に応じた評価の見直しも必要である。そこで、環境変化に伴う条件変更にも柔軟かつ迅速に対応するために、現実と同じ条件や状況を忠実に再現可能なシミュレーション実行環境としてデジタルツインの整備を検討している(図11)。

デジタルツイン構築に向けては、まず、デジタル空間でのモデル構築の効率化の課題がある。外力データについては、公的データとの連携による鉄道沿線データの推定が必要である。耐力を求めめるための車両や構

造物の数値モデル構築にあたっては、事業者データから効率的に形状や特性をモデル化する技術が必要である。また、事業者独自のセンシング・モニタリングによる外力や車両・構造物の特性データの取得もデジタルツインのモデル構築に有効である(図12)。

また、実規模の現象を再現するための大規模数値シミュレーションの高度化も重要な課題である。大規模な計算を高速化するための大規模並列計算手法などの解析アルゴリズムの向上、並びに、入力と結果を学習したAIでシミュレーションの一部を代理するAIサロゲートモデルの効果的な活用などを検討していく。

4.4 大型低騒音風洞のデジタルツインの構築

まだ実規模の鉄道のデジタルツイン構築には至っていないが、デジタルツイン開発の第一段階として、実現象の再現に実績のある鉄道総研の大型試験装置のデジタルツインの開発を実施した。

鉄道総研の空気力学に関する研究開発では、米原にある大型低騒音風洞(米原風洞)が重要な研究開発ツールとなっており、毎年200日以上、さまざまな試験が実施されている。この米原風洞のデジタルツインとして、「数値風洞」⁸⁾を開発した(図13)。数値風洞の構築においては、まず、米原風洞の様々な設定条件における各部の気流を詳細に把握し、鉄道総研が開発した空気流シミュレータ⁹⁾を用いてその気流を高精度に再現した。

強風下での車両に作用する空気力の推定において、米原風洞での縮尺模型試験で実物大試験を高精度に再現でき¹⁰⁾、同実験の空気流シミュレータによる再現も可能¹¹⁾であったことから(図14)、今後は、数値風洞を用いた実現象の再現にも取り組みたい。この数値風洞を用いれば、様々な沿線気流、車両や構造物の形状、防風柵等対策効果を考慮したシミュレーションが可能であるため、環境変化に伴う条件変更柔軟かつ迅速

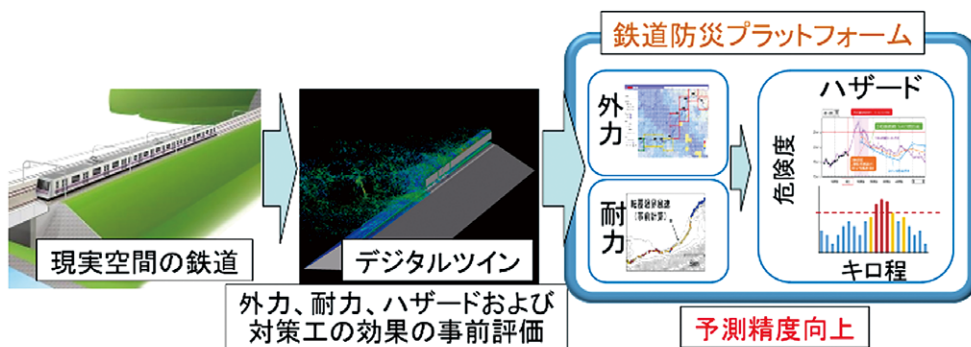


図11 デジタルツインによるハザード予測精度向上

外力データの効率的な取得 公的データ・広域情報との連携



車両・構造物データの効率的な取得 事業者データ・総研開発技術の活用

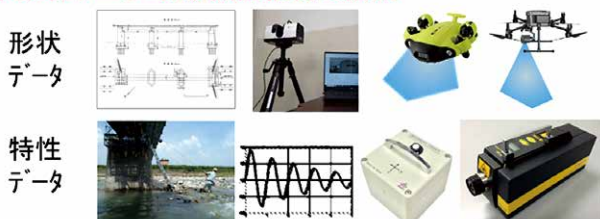


図12 デジタル空間でのモデル構築の効率化

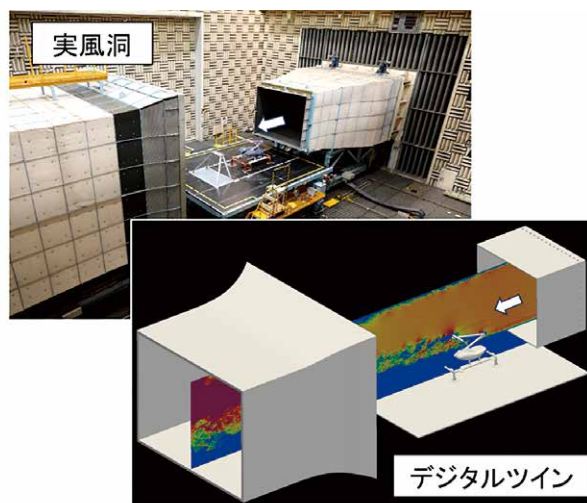


図13 大型低騒音風洞のデジタルツイン

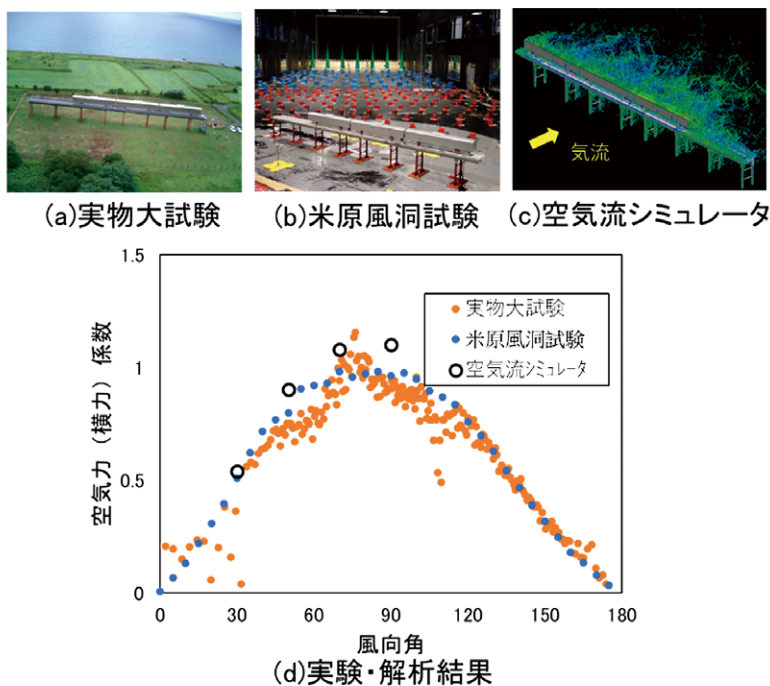


図 14 実物大試験，風洞試験，空気流シミュレータによる空気力係数の比較

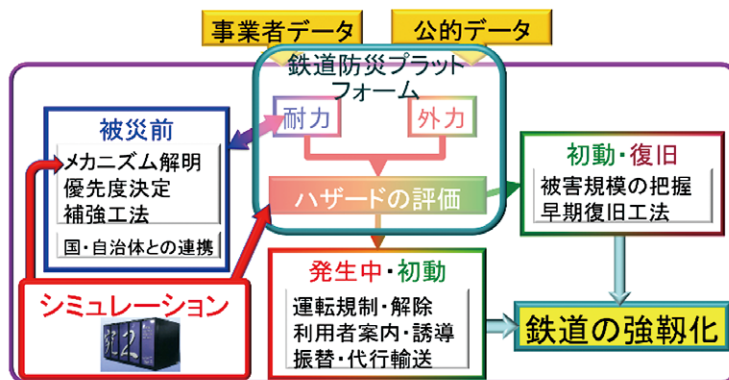


図 15 鉄道気象防災におけるシミュレーションの寄与

に対応でき、鉄道防災プラットフォームの予測精度向上に寄与できるものと考えている。

5. 数値シミュレーションによる鉄道システム強靱化への寄与

気象災害に対する鉄道システムの強靱化に向けた今後の数値シミュレーションの役割は、高度数値シミュレーションによる気象災害の現象解明と、シミュレーションを活用した鉄道防災プラットフォームの予測精度向上への寄与であると考え（図15）。

気象災害の現象解明では、激甚化・広域化し、水や空気の流れ、土砂や雪、車両や地上構造物などが連成して生じる複雑な現象を再現するために、マルチスケール解析、マルチフィジックス解析を用いた高度数値シミュレーション技術の開発に取り組み、多様な被害形態に対する現象解明を進めていきたい。そして、さらには単なる現象解明に留まらず、防災モニタリングの効率化やコストダウンにつながる対策工の提案など、防災実務へ有用な知見を提供していきたい。

鉄道防災プラットフォームの予測精度向上に向けては、様々なシミュレーション技術とその解析結果のり

アルタイム被害予測への効果的な反映方法を検討したい。また、被害予測や運転規制の評価のための外力、耐力、ハザードの算定・更新を高精度かつ効率的に行うための解析環境として、気象災害を再現可能なデジタルツインの開発とその効果的な運用策の検討に取り組みたい。

気象災害の現象解明と予測精度向上を実現するツールとしての数値シミュレーションへの期待は、今後ますます高まるものと予想される。引き続きシミュレーション技術の高度化と効果的な活用策の検討に取り組み、数値シミュレーションを用いなければ不可能な現象解明や対策提案を行っていききたい。

参考文献

- 1) 布川修：気象データを活用した鉄道防災技術，第36回鉄道総研講演会要旨集，2023
- 2) 石井秀憲，室谷浩平，中出孝次：水流中の3次元的な土砂の移動に基づいた河川橋脚周りの局所洗掘解析手法，鉄道総研報告，vol.37，No.4，pp.9-16，2023
- 3) 室谷浩平，大地雅俊，藤澤智光，越塚誠一，吉村忍：ParMETISを用いたMPS陽解法の分散メモリ型並列アルゴリズムの開発，日本計算工学会論文集，Paper No.20120012，2012
- 4) 室谷浩平，石井秀憲，鎌田慈，辻滉樹，坂本裕一郎：排雪模型実験によるスノープラウの排雪シミュレーションの開発，雪氷研究大会，2023
- 5) 浦越拓野，河村祥一，馬目凌，深野雄三：中小河川での浸水・氾濫に対するリアルタイムハザードマップ，JREA，vol.66，No.1，pp.27-30，2023
- 6) 荒木啓司：数値計算を用いて強風箇所を抽出する，JREA，vol.65，No.1，pp.21-24，2022
- 7) 松本信之，田辺誠，涌井一，曾我部正道：非線形応答を考慮した鉄道車両と構造物との連成応答解析法に関する研究，土木学会論文集（A編），Vol.63，No.3，pp.533-551，2007
- 8) 中出孝次，井門敦志，阿部巧，井上達哉：大型低騒音風洞を模擬する数値風洞の開発，第31回交通・物流部門大会（TRANSLOG2022），2022
- 9) 中出孝次，光用剛：複雑形状に対応した空気流・空力音シミュレーション，RRR，Vol.72，No.12，2015
- 10) 鈴木実，種本勝二：横風に対する車両の空力特性に関する実物大試験と風洞試験，第14回鉄道技術連合シンポジウム（J-RAIL2007）講演論文集，pp.231-234，2007
- 11) 野口雄平，中出孝次：横風空力特性に関する風洞試験を模擬した数値シミュレーション，鉄道総研報告，vol.31，No.9，pp.11-16，2017

気象データを活用した鉄道防災技術

防災技術研究部長
布川 修



1. はじめに

鉄道沿線には気象災害の発生しやすい箇所が数多く存在する。これは、日本の国土の約7割が山地（丘陵地含む）であることなどの地形・地質条件、台風や豪雨・豪雪が生じるという気象条件による。さらに、100年前には在来線の鉄道網はほぼ完成しており、当時の土木工事技術の制約（長大橋梁やトンネルの施工技術が未発達）により、気象災害の発生しやすい箇所を回避できなかったことも一つの要因として挙げられる。このため、気象災害の発生しやすい箇所を特定して鉄道設備を補修・補強するハード対策により耐力を徐々に向上させるとともに、気象災害の危険性が高まっていると考えられる外力を観測した時に運転を規制するなどのソフト対策を併用することで、鉄道の安全を確保している。

近年の気象災害の激甚化に対する鉄道の強靱化の方策のうち、本稿では、上記で述べたソフト対策の方向性について論じる。具体的には、現状と課題について述べた後、これらの課題を解決する、気象データを活用した外力・耐力・ハザードの評価・予測技術および、鉄道防災プラットフォーム構想について述べる。

2. 現状と課題

2.1 広域・リアルタイム評価の必要性と方向性

運転規制などのソフト対策により、気象災害の激甚化に対する鉄道の強靱化を図っていくためには、災害の危険性が高まる場所と時間を現状よりも精度よく特定し、安全性をこれまでと同等あるいは向上させながら、これまでよりも運転規制の規制範囲・時間・規制解除判断の確認箇所などの削減、すなわちダウンタイ

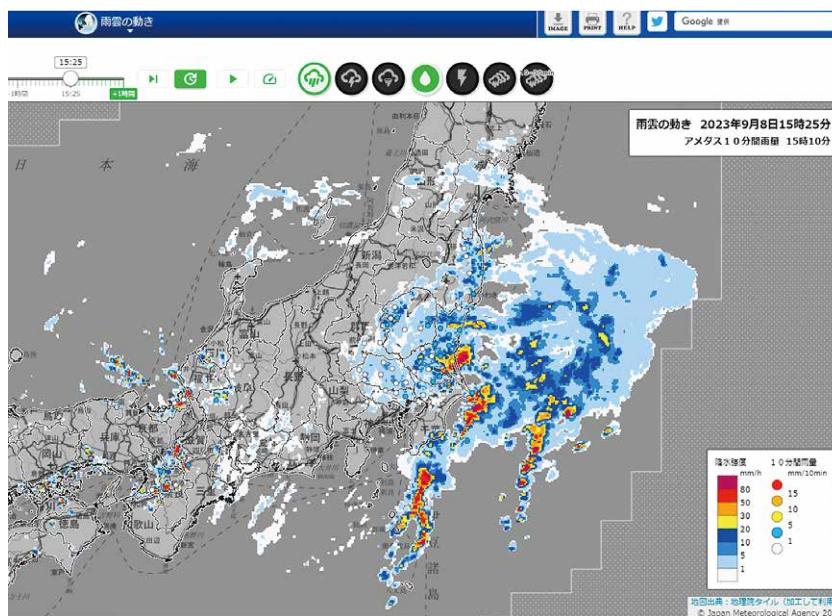


図1 面的な降雨情報の例¹⁾

ムを削減することで効率性を高めることが求められていくものとする。これを可能とするためには、広域にわたる鉄道沿線・周辺における災害の危険性を稠密かつリアルタイムに評価する技術（以下、広域・リアルタイム評価と称す）が必要となる。

一方、図1¹⁾に示す面的な降雨情報など、公的な機関から配信される広域情報は、充実化・精度向上が図られ、これらの技術は今後ますます発展していくものと想定される。したがって、こうした広域情報を積極的に活用することで、鉄道沿線で発生する気象災害を対象とした広域・リアルタイム評価技術の精度向上が図られ、前述したダウンタイムの削減に貢献できると考える。

2.2 JRでの広域情報の活用例

ここでは、JRですでに導入されている広域情報の活用事例を2つ紹介する。

局地的短時間強雨による災害から列車の安全を確保することを目的として、レーダー雨量を活用した運転規制がJR東日本²⁾³⁾、JR東海⁴⁾、JR西日本⁵⁾において導入されている。具体的には、気象庁や国土交通省が配信している1kmの面的雨量を活用することで、図2⁵⁾に示すように、雨量計が設置されていない箇所の降雨を把握することで、局地的短時間強雨に対応するものである。

また、JR東海では土石流発生危険度評価システムを用いた運転規制も導入している⁶⁾。このシステムでは広域情報として、渓流域のレーダー雨量を活用するとともに、数値標高モデルも活用することで土石流の発生危険性を評価している⁷⁾。

2.3 気象データを活用した鉄道防災技術の課題

本節では、雨、風、雪それぞれの気象ごとに、広域・リアルタイム評価の現状と、この現状を解決する方法を整理し、これらをまとめることで、気象データを活用した鉄道防災技術の課題を明らかにする。

雨の場合、対象とする主な災害は土砂崩壊である。

広域・リアルタイム評価の現状として、耐力評価に関しては統計的な経験に基づく方法のみであるが、一方で、公的な降雨データは充実している。したがって、解決方法としては、物理モデルに基づくハザード評価手法を構築すること、および公的な降雨データの運転規制への活用方法を明確にすることが挙げられる。

風の場合、対象とする主な災害は列車の脱線転覆である。現状において、耐力評価手法については鉄道総研が提案済み⁸⁾であるが、公的な風速データをそのまま鉄道に適用することは難しい。したがって、解決方法としては、公的データを補間、変換することによる風速評価手法を構築すること、およびこの結果の運転規制への活用方法を明確にすることが挙げられる。

雪の場合、対象とする災害は、列車の立ち往生、雪崩、融雪による土砂災害、車両からの着落雪など、様々である。このため、雨と風とは異なり、統一的な運転規制の考え方がないのが現状である。また、公的な積雪データをそのまま鉄道に適用することは難しい。したがって、解決方法としては、まずは、公的データを補間、変換することによる積雪深評価手法を構築すること、およびこの結果の運転規制への活用方法を明確にすることが挙げられる。

以上、気象ごとに、広域・リアルタイム評価の現状と、この現状を解決する方法を述べた。これらから共通事項を整理すると、気象データを含む広域情報を利用して広域・リアルタイム評価の精度向上を図っていくには、まずは、現状では構築されていない、気象データを活用した外力・耐力・ハザードの評価・予測技術を構築することが必要である点が、課題として挙げられる。そこで、現在取り組んでいる評価技術を3章で説明する。

また、運転規制への気象データや評価技術の活用を考えた場合には、これらを一元的に管理する技術が必要になる点が、課題として挙げられる。そこで、これを解決する方法として考えている鉄道防災プラットフォーム構想について、4章で説明する。

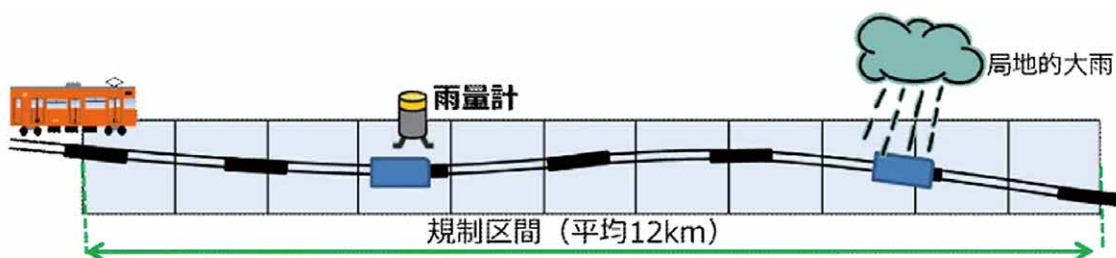


図2 レーダー雨量の活用による局地的短時間強雨の補足イメージ⁵⁾

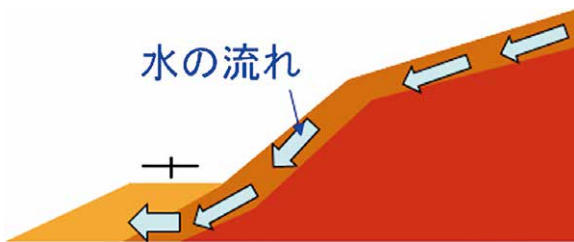


図3 斜面に隣接する盛土への水の流入イメージ

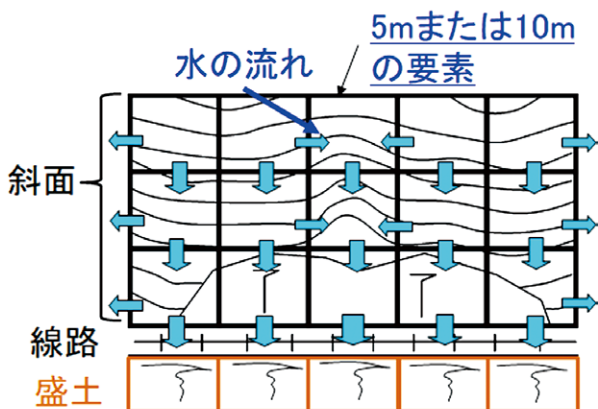


図4 降雨時の斜面・盛土のリアルタイム安定性評価方法における水の流れのイメージ

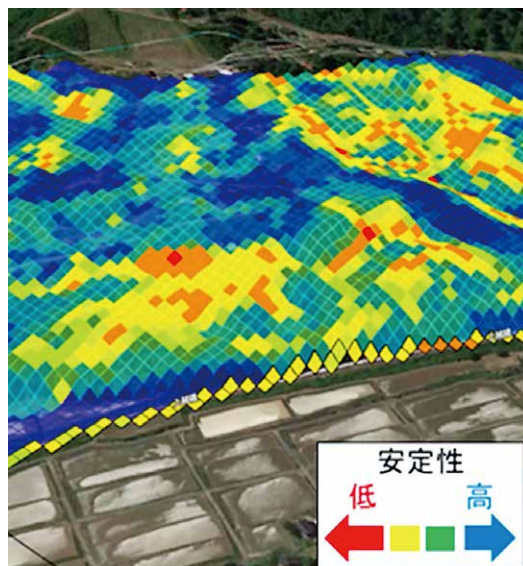


図5 降雨時の斜面・盛土のリアルタイム安定性評価結果を面的に表示した時のイメージ

の斜面を5mまたは10mの要素に分割し、これらの要素ごとに斜面表層部分(1~2m)を設定する。これにより、地形的な勾配から水の流れる方向とその要素への流入・流出量およびこれらの差分から得られる表層部分に留まる水の量を計算している⁹⁾。線路より下方の盛土については、上記で計算される斜面から盛土方向に流出する水の量を盛土への流入量とし、盛土内の平均的な飽和度(土の中の水分の割合)と盛土からの流出量との関係を定式化することで、盛土内に留まる水の量を計算する。

本方法による斜面・盛土の安定性評価結果を面的に表示したときのイメージを図5に示す。なお、この図の解析結果の下側に当たる部分に線路があり、この部分はすべて盛土であると仮定して計算している。安定性評価結果は、公的な数値地形情報に付与する形のデータフォーマットとしているため、図に示すとおり、鉄道沿線の斜面の安定性の降雨時における変化を分かりやすく面的に表現することができる。なお、本方法における斜面の地下水位の再現性は検証済みであるが⁹⁾、盛土の地下水位等の再現性に関して、現在、実際の盛土での計測とこの計測結果に基づいた検証を実施中である。

3. 気象データを活用した評価技術

3.1 雨に関する評価技術の検討事例

2.3節で述べた雨に関する課題の解決方法は、物理モデルに基づくハザード評価手法の構築であり、この取り組み事例を紹介する。

降雨による斜面・盛土崩壊には、地形的な水の集まりやすさが影響する。例えば、図3に示す斜面に隣接する盛土の場合、斜面から盛土への水の流入の多寡が安定性に大きな影響を及ぼす。そこで、広域情報としてレーダー雨量と数値標高モデル等を活用し、水の流れを考慮した広域的な斜面・盛土のリアルタイム安定性評価方法について、研究を実施している。この研究においては、三次元有限要素法(FEM)等の詳細な解析では計算負荷が高く、リアルタイムに評価すること、あるいは様々な降雨・地形条件での検証が困難となるため、計算負荷の低いアルゴリズムを実装した評価プログラムを検討している。

評価方法における水の流れの計算方法のイメージを図4に示す。図に示すとおり、斜面(線路より上方の斜面)については数値標高モデルを活用して線路周辺

3.2 風に関する評価技術の検討事例

2.3節で述べた風に関する課題の解決方法は、公的データを補間、変換することによる風速評価手法を構築することであり、この取り組み事例を紹介する。

強風による災害のうち、最も重大なものは列車の脱

線転覆であることから、強風が吹きやすい箇所には防風柵等のハード対策を施工するとともに、風速計を鉄道沿線に設置して風観測を行い、ある風速以上の風が観測された時に列車の運行を規制（徐行や停止）する措置が実施されている。ただし、過去の経験から強風が吹きにくい箇所は運転規制区間外として風速計が設置されていない場合もある。

近年、台風が巨大化・強化化していると言われることから、強風が吹きにくい箇所でも強風が観測されることが懸念される。鉄道沿線すべての箇所において強風を捉えるためには風速計を増設する必要があるが、コスト増となる。このため、公的機関から配される風速データを活用することで、低コストに鉄道沿線の風速を把握する手法の開発が望まれている。

公的情報を活用した風速マップの例としては、日本気象協会の有料配信データなどがある。なお、このマップは、気象庁から配信される2.5km格子の平均風速データを、日本気象協会が1km格子に加工して作成

している。鉄道での運転規制にこうした風速マップの活用を考えた場合には、より詳細な格子にすることと、平均風速から鉄道の運転規制で利用している瞬間風速への変換が必要となる。

上述の背景のもと、鉄道の運転規制での活用を踏まえた風速マップの作成方法について、研究を行っている。本方法の概要を図6に示す。本方法では、部外情報としてアメダスの実況風速（平均風速と平均風向）を活用する。また、事前に気流解析を実施し、アメダス地点を1としたときにその周辺の風速の増減率を表すデータテーブルを作成する。このデータテーブルは細密で100m格子とし、平均風速から瞬間風速への変換も考慮している。この風向別に作成したデータテーブルを用いることで、アメダスの実況風速から、図に示すような風速マップがアメダスの更新に合わせた10分ごとに作成される。

図7に本方法の精度を検証した例を示す。この図は、鉄道沿線に風観測点を6箇所設置し、20m/s以上の日

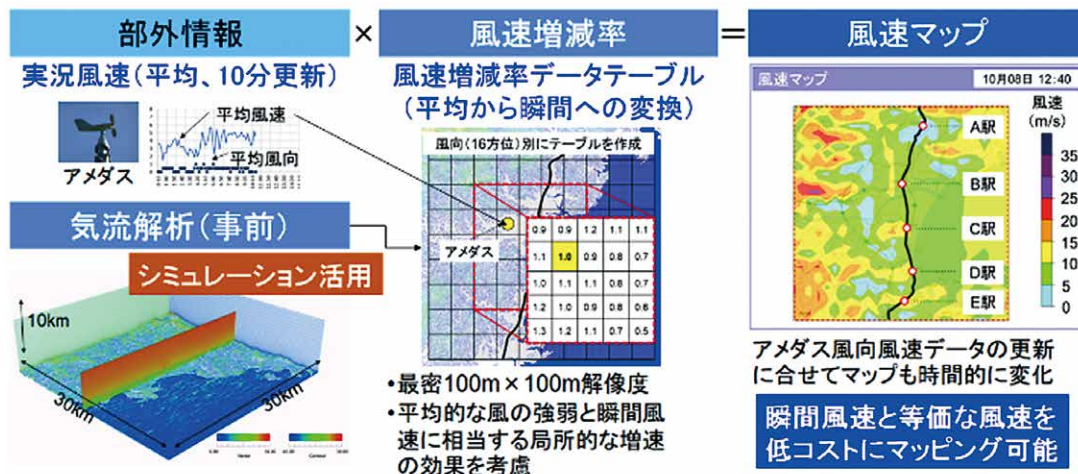


図6 風速マップの作成方法の概要

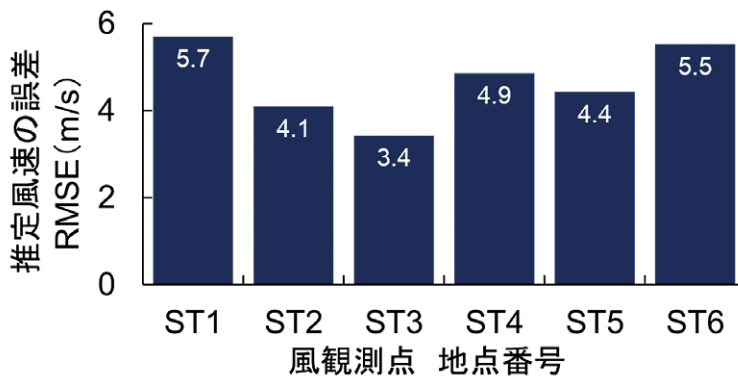


図7 風速マップ作成方法の精度検証の例

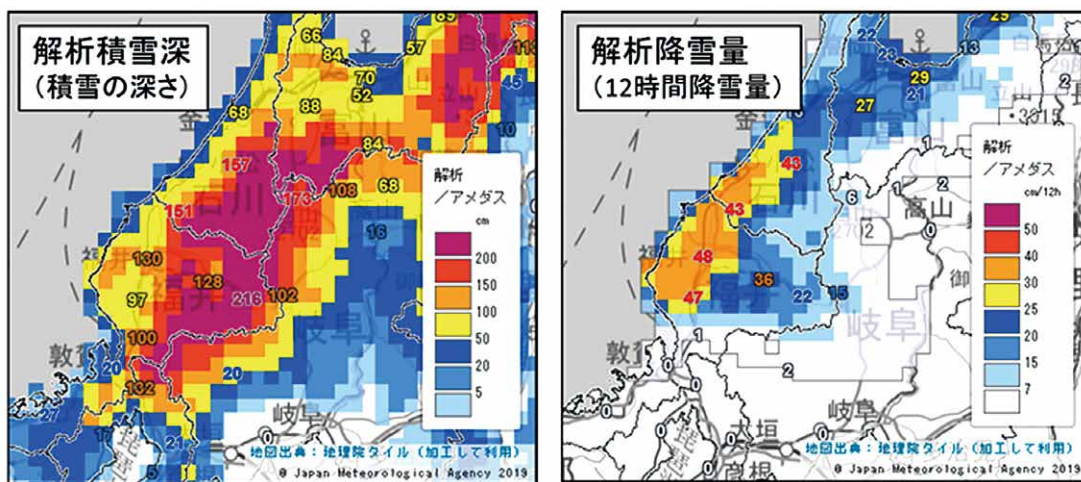


図8 積雪深や降雪量の面的分布の例¹⁰⁾

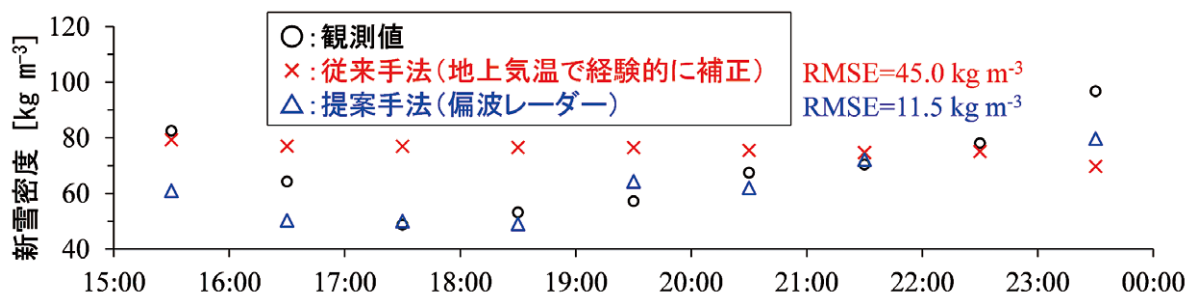


図9 経時的に変化する新雪密度の推定結果例¹¹⁾

最大瞬間風速を観測した14例に対して、風観測点で得た10分毎の最大瞬間風速と本風速マップ作成方法で求められる瞬間風速と等価な風速との誤差を二乗平均平方根誤差 (RMSE) で評価したものである。この図から本方法では、概ね5m/s以下の誤差で風速を推定していることがわかる。現在、鉄道事業者へのヒアリングにより鉄道での運用を考慮した場合の許容誤差等を把握するとともに、本検証箇所とは別の箇所での適用性や誤差の低減方法を検討中である。

3.3 雪に関する評価技術の検討事例

2.3節で述べた雪に関する課題の解決方法は、公的データを補間、変換することによる積雪深評価手法を構築することであり、この取り組み事例を紹介する。

気象庁から配信される積雪深や降雪量の面的分布 (マップ) の例を図8¹⁰⁾に示す。このマップは気象レーダーやアメダス観測値を用いた解析結果から作成されたものである。なお、約5m四方の平均的な値であるため局地的な降雪の多寡は表現できないこと、降雪量

は少なめに予測する傾向があることが利用上の留意点として説明されている¹⁰⁾。このため、鉄道での豪雪による列車の立ち往生の防止や新幹線台車床下への着雪対策などに活用するためには、さらなる精度向上が必要となる。一方、降雪深は降水量と新雪密度により求められること、このうち降水量は気象レーダーにより高精度に求められることから、降雪深の推定精度向上のためには、新雪密度を精度よく推定することが必要となる。

こうした背景のもと、新雪密度の精度向上を目的として、偏波レーダーを用いた新雪密度の推定方法について、研究を行っている。本研究においては、偏波レーダーで計測されるデータから雪の結晶に関する指標 (平べったい結晶の多寡) とこの指標を検知する高度 (-15℃の高度) を検討し、この高度で得られる指標が大きいほど地上では空隙の大きい雪片など軽い粒子となり新雪密度が小さく、指標が小さいほど地上では空隙が詰まった雪片や霰^{あられ}など重い粒子となり新雪密度が大きくなることを明らかにした。この結果に基づいて、経時的に変化する新雪密度を推定した結果を図9¹¹⁾に

示す。この図には、観測値と従来の地上気温から経験的に推定する方法で求めた値も示しているが、従来手法と提案手法とを比較すると、提案手法の方が観測値に近く、誤差 (RMSE) も小さいことがわかる。今後は、本推定方法を用いた降雪マップの作成方法について検討を進めていく予定である。

4. 鉄道防災プラットフォーム構想

4.1 鉄道防災プラットフォームの概要

本章では、2.3節で述べたとおり、部外・部内データや各種評価結果を一元的に管理する技術が必要となる課題の解決方法として考えている、鉄道防災プラットフォーム構想について説明する。

ここで、改めて広域・リアルタイム評価を運転規制に活用するための課題について考える。現状の運転規制は、点で観測された気象データにより実施されている。一方、広域・リアルタイム評価を活用した運転規制では、面または線の外力やハザードのデータを利用することになる。すなわち、利用するデータの稠密さが異なるこ

とになるため、運転規制の発令の判断基準や解除判断基準に関しても変更する必要があることが想定される。こうした変更を効果的・効率的に行うためには、部外・部内データや各種評価結果を一元的に管理し、既存の方法との比較を行うことができるように、安全レベルの考え方の明確化を図ることが重要であると考えられる。

鉄道防災プラットフォームの全体イメージを図10に示す。図に示すとおり、鉄道防災プラットフォームとは、気象データ等の部内外データを集約し、外力評価、耐力評価、ハザード評価のそれぞれの結果を一元的に管理するものである。これにより、前述した安全レベルの考え方の明確化やデータ処理の共通化を図ることができると考えている。すなわち、鉄道防災プラットフォームとは、精度の高い部外情報の積極的な鉄道への活用を可能にするツールになるものと言い換えることができる。なお、現状の取り組みとしては、全体システムだけではなく、要素技術のみでも提供できるように開発を進めている。

以下、鉄道防災プラットフォーム内の、外力やハザード評価のイメージを説明する。

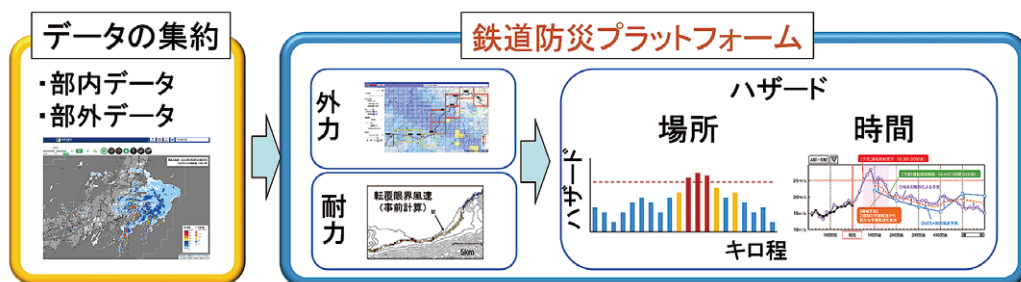
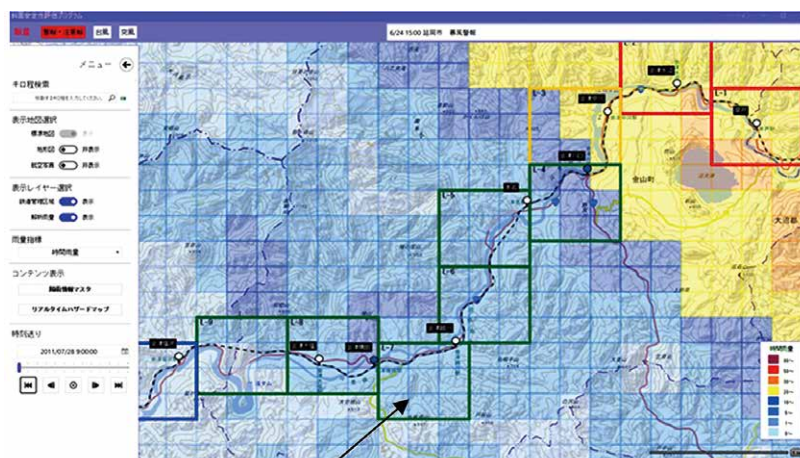


図10 鉄道防災プラットフォームの全体イメージ



広域メッシュ

図11 雨を対象とした外力評価のイメージ

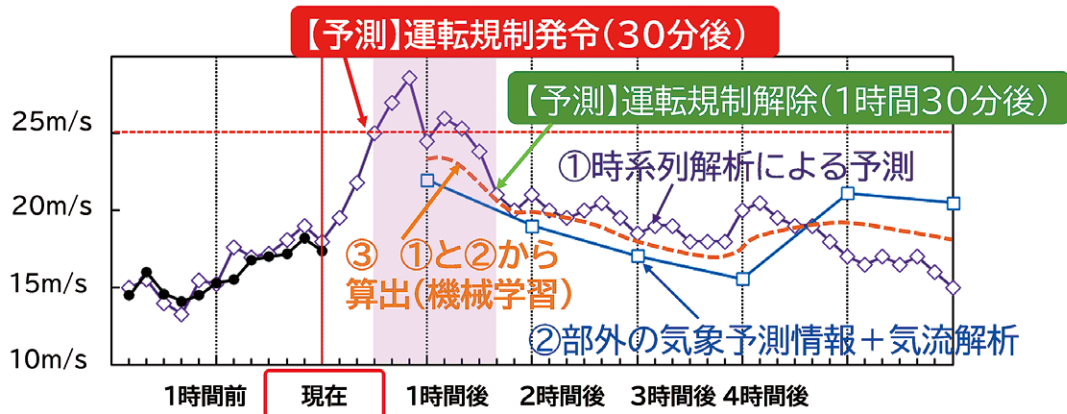


図 12 瞬間風速の時間変化予測手法での出力結果のイメージ

4.2 外力評価のイメージ(場所)

雨を対象とした外力評価のイメージ図11に示す。なお、風の場合は、3.2節で説明したとおりである。図11は気象庁等から配信される面的な時間雨量の分布表示をイメージしたものであるが、鉄道事業者が運転規制に使用している雨量指標に合わせた表示とする必要がある。また、気象警報などの情報も表示することも想定する。図11では、広域メッシュとして最小メッシュ(雨の場合は配信データと同様の1kmメッシュを想定)を線路方向に複数合わせたメッシュを設定し、この広域メッシュの平均値や最大値を色で表示させることを想定している。これは、長時間の雨の指標(連続雨量など)は、ある範囲の代表値として評価する可能性があること、短期的な雨量指標と長期的な雨量指標の組み合わせにより運転規制を行っていることから、両方を表示させる工夫が必要であることなどの理由による。

こうした外力評価をキロ程で表すことにより、災害の危険性が高まっている場所がわかるため、規制発令や規制解除前確認の場所を稠密に表すことができる。

4.3 外力予測のイメージ(時間)

雨の場合は、気象庁から配信されるデータを活用することを想定している。例えば、降水ナウキャストは1時間先まで5分間隔、降水短時間予報は、1~6時間先までは10分間隔(ともに1km格子)で雨量の予測値を配信している¹²⁾。

風の場合、上記で述べた雨のような稠密さでの公的機関からの配信はないため、現在、10分間隔で瞬間風速を予測する手法についての研究を進めている。こ

の手法での出力結果のイメージを図12に示す。本研究では、①時系列解析による10分間隔の予測、②部外の気象予測情報と気流解析を組み合わせた方法による1時間間隔の予測、③上記①と②を機械学習等により組み合わせた予測、について検討を行っている。この手法を用いると、図12のイメージ図では、現在から30分後には運転規制が発令される風速、1時間30分後には運転規制を解除することができる風速、となることが現在の時点で判断できる。このように、規制発令や規制解除前確認の時間が明確となり、これらの早めの準備などに活用できるものと考えられる。

4.4 ハザード評価のイメージ(場所)

雨のハザード評価の方法は、3.1節で説明したとおりである。風のハザード評価は、3.2節で説明した外力評価の方法と鉄道総研が提案している耐力評価方法⁸⁾とを組み合わせることによって可能であると考えられる。外力評価の結果も同様であるが、ハザード評価結果をキロ程で線形に表示することにより災害の危険性が高まっている場所がわかるため、規制発令や規制解除前確認の場所を稠密に表すことができる。なお、ハザード評価結果を用いたほうが外力評価結果のみよりも合理的に危険性を評価できるため、よりダウンタイムを削減できる可能性がある。

5. おわりに

本稿では、近年の気象災害の激甚化に対する鉄道の強靱化の方策のうち、ソフト対策の方向性について述べた。具体的には、気象データを活用した外力・耐力・

ハザードの評価・予測技術が必要であることが課題として挙げられ、解決方法として、鉄道での適用を踏まえた評価技術の確立するために、現在実施している取組みについて紹介した。この技術は、気象災害の危険性が高まる「場所」、「時間」を精緻に特定することに活用できる。また、部外・部内データ、各種評価結果を一元的に管理する技術が必要であることが課題として挙げられ、解決方法として、データ処理の共通化や安全レベルの考え方の明確化を図るツールとして、鉄道防災プラットフォーム構想について説明した。この技術により、様々な部外情報を鉄道に適した形で効果的・効率的に活用できると考える。

以上より、鉄道防災プラットフォームにより、部外情報を活用したきめ細やかな運転規制の実施を支援することで、激甚化する気象災害に対してダウンタイムを削減することを目指していきたいと考えている。

参考文献

- 1) 気象庁HP：雨雲の動き, https://www.jma.go.jp/bosai/nowc/#lat:34.551811/lon:137.406006/zoom:7/colordepth:deep/elements:amds_rain10m&hrpns, 2023/9/8閲覧
- 2) JR東日本ニュースリリース：異常気象に備えた新幹線に対する降雨防災の取り組みについて, 2021
- 3) JR東日本ニュースリリース：在来線におけるレーダ雨量を活用した新たな運転規制の導入について, 2023
- 4) JR東海ニュースリリース：在来線全線区へのレーダ雨量を活用した運転規制の導入について, 2018
- 5) JR西日本ニュースリリース：局地的な大雨に対するさらなる安全性向上, 2020
- 6) JR東海ニュースリリース：在来線の新しい降雨運転規制の導入について, 2020
- 7) 林宏樹, 大木基裕：土石流発生危険度評価システムの開発, 第57回鉄道サイバネ・シンポジウム論文集, 論文番号417, 2020
- 8) 日比野有, 石田弘明：車両の転覆限界風速に関する静的解析法, 鉄道総研報告, Vol.17, No.4, 2003
- 9) 浅野嘉文, 川尻峻三, 布川修, 太田直之, 杉山友康, 渡邊諭：降雨時における斜面表層崩壊を再現する簡易解析モデルの提案, 地盤工学ジャーナル, Vol.8, No.4, pp.579-595, 2013
- 10) 気象庁HP：解析積雪深・解析降雪量・降雪短時間予報, <https://www.jma.go.jp/jma/kishou/now/kurashi/snow.html>, 2023/9/12閲覧
- 11) 高見和弥: Xバンド偏波レーダーを用いた新雪密度の推定手法の開発に関する研究, 京都大学学位論文, 2023
- 12) 気象庁HP：降水ノウキャスト、降水短時間予報, https://www.jma.go.jp/jma/kishou/now/kurashi/kotan_nowcast.html, 2023/9/25閲覧

本要旨集の著作権は当研究所に帰属します。

—お問い合わせ先—

公益財団法人鉄道総合技術研究所 総務部 広報

電話：042-573-7219

第36回鉄道総研講演会 要旨集

2023年11月29日 発行

発行人 芦谷 公稔

発行 公益財団法人鉄道総合技術研究所
鉄道総研講演会事務局

〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38

URL <https://www.rtri.or.jp/>

