

浸水からの鉄道車両事前避難に関する決定木分析

2019（令和元）年台風19号時に、東北新幹線那須電車留置線では車両の事前避難が実施されたが、北陸新幹線長野車両基地では120両が浸水し廃車された。全国の鉄道事業者はその後、車両避難手順を検討しているが、避難実施の合理的な判断基準は確立されているわけではない。本研究は、早期の運休開始・再開遅れがもたらす費用をも考慮して、社会として合理的な避難実施判断を決定木により表現し、時間経過に伴う決定の推移を分析した。その結果、社会的には被災確率のかなり小さい洪水でも事前避難を実施すべきこと、鉄道事業者、利用者の利得によれば避難行動はとられにくいこと、判断の遅れが選択の幅を狭めることが判明した。

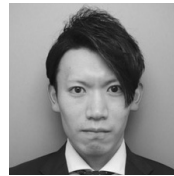
キーワード 鉄道車両、浸水リスク、事前避難、決定木分析

奥村 誠 OKUMURA, Makoto



博士（工学）
東北大学災害科学国際研究所教授

森合一輝 MORIAI, Kazuki



豊田通商株式会社

1 はじめに

2019（令和元）年10月12日の未明、台風19号による千曲川左支川浅川の洪水氾濫によって北陸新幹線長野車両基地が浸水し、E7系96両、W7系24両の営業車両が被災し廃車処分を余儀なくされ、帳簿価額に基づきJR東日本が118億円、JR西日本が30億円の特別損失額を計上した。また、車両数が確保できず列車の運行本数を減少させたことによるJR東日本の収入減少額は160億円とされている¹⁾。

この台風19号は、1958（昭和33）年の狩野川台風の再来として、早い段階から関東、東北地方南部での水害の危険性が予想されており、東北新幹線（那須電車留置線）や長野市、仙台市のバス事業者は事前に車両避難を実施した。航空会社も通常成田空港や羽田空港に駐機している旅客機を、新千歳空港やハワイの空港まで退避させた。このような他の場所での事前避難事例が明らかになるにつれ、鉄道車両の事前避難に向けた体制強化が課題として認識され、国土交通省は全国の鉄軌道事業者に浸水により運行に影響を与える可能性のある施設の緊急点検を指示するとともに、2019（令和元）年12月24日付で新幹線鉄道の事業者に対して、計画規模降雨による運行への影響軽減策（長野車両基地と東海道新幹線鳥飼車両基地の2箇所）、及び想定規模降雨による車両の浸水などの社会経済的被害軽減策（6箇所）を取りまとめるよう、指示を

発出した。

JR3社は2020（令和2）年5月に、施設ごとに避難計画を策定し、気象情報や河川水位情報に基づく車両避難の判断ツールの導入を行うことなどを報告した²⁾。その後、9月の台風10号の強風飛来物による車両損傷防止のためにJR西日本福岡総合車両所から広島・岡山に6編成を移動させたほか、長野車両基地では9月に2編成の車両を避難させる訓練を実施し、鳥飼車両基地でも9月に指令訓練、11月に実車訓練を実施したことが報道されている。

このような車両の事前避難作業は、移動作業の費用を必要とし、移動中に強風による被害を受ける危険性もある。危険な状況に至る前に作業を終えるために早めに運休を開始することや、台風などの通過後に避難させた車両を戻すために運行の再開が遅れることが利用者の移動を制限し、社会的な費用を生む危険性もある。このような多様な影響を考慮して事前避難の実施を判断する必要がある。利用者等の理解が得られるような客観的・合理的な判断基準を設定し、広報に努めることが重要になると考える。

本研究は、早期の運休開始・再開遅れがもたらす費用をも考慮した避難実施判断を、リスク分析で広く用いられている決定木を用いて表現し、社会として合理的な判断と、鉄道事業者の利得に基づく判断、利用者の利得に基づく判断の乖離の可能性を考察する。また、時間経過に伴う決定の推移を分析する。

その結果、1) 社会的な利得を基準にすれば被災確率の小さい洪水でも事前避難を実施すべきであること、2) 判断の遅れが選択の幅を狭めることから、早い時点での決断が重要であること、3) 鉄道事業者、利用者の利得によれば避難行動はとられにくいこと、などが判明した。

なお筆者らは、本分析のアイデアに基づいて定性的な分析を行った結果を、既に防災関係者向けの調査報告として発表しているが³⁾、⁴⁾、避難作業の実施割合によらず全車両が一括して被災するという不自然な想定をしており、結果を定量的に解釈することに無理があった。本論文は、運輸関係者に定量的な議論を行うためのスタート点を提供することを目指し、避難作業の実施率を明示的に取り込んで再分析した内容に基づき作成したものである。

2——自然災害による鉄道の被害

2.1 鉄道施設の特徴と自然災害リスク

自然空間の中の定められた交通路において、車両を運行する交通事業者は、様々な自然災害の影響を直接受けやすい状況にある。特に、鉄道線路という連続する交通路の所有と運営を一緒に行っている鉄道事業者は、水害や土砂災害の影響を受けやすい。

勾配や曲線の技術的な制約もあり、河川の流路に近接して急斜面の余裕のない場所に路線が設定されることも多いため、一旦線路路盤や斜面の災害が発生すると復旧のための調査すら容易に行えないケースも少なくない。さらに橋梁が流失すると莫大な再建費用が必要になるだけでなく、当該河川の治水対策のために堤防高の嵩上げが必要となり、前後の区間の線形の変更などに長期の調整期間が必要になるということも起きる。

もともと輸送密度が大きいローカル線において災害が発生した場合、莫大な復旧費用を負担できずに廃止に至る事例も多く見られる。大堀⁵⁾は戦後の自然災害により少なくとも30の路線が廃線されたとしている。東日本大震災の津波を受けたJRの2路線は、鉄道としての復旧を諦め一部区間がBRTに転換された。

また、現時点(2021(令和3)年6月)でも、JR東日本只見線、JR北海道日高本線、JR九州日田彦山線、久大本線及び肥薩線において一部区間の運休が続き、くま川急行鉄道湯前線は全区間で運休している。

2.2 鉄道車両の被災とその影響

鉄道の運行中に列車が自然災害に遭遇した場合、その被害が乗客・乗員に及ぶ可能性がある。表一1は、1970(昭和45)年以降、豪雨・土砂災害・津波⁶⁾を原因とするわが国の鉄道車両の被害を列挙したものである。これより、営業

列車が土砂災害に遭遇した場合、車両の物理的損傷や急停車によって乗客等に負傷が発生するケースが多いことがわかる。このような人的な被害を避けるため、鉄道の災害対応において、列車の運行規制が重要視され、技術的な検討も進められてきた^{7)~9)}。

これに比べると、運行時間外における留置中の鉄道車両の浸水は、多くの事例で車両の廃車につながっていることが読み取れる。近年の鉄道車両は、高速化や省エネ化のためにアルミやFRPなどの軽量素材の採用が進み、重心を低くして走行安定性を確保するため、電子機器等を床下空間に配置している。そのため床下浸水であっても、電子機器などの復旧が難しく、廃車せざるをえなくなるケースが多いと考えられる。

鉄道車両が廃車に追い込まれた場合、直接被害としての資産の減失に加えて、代替車両の再調達ができるまでの間、営業運行が制約されることによる間接被害を考慮する必要がある。社会全体の間接被害額は、代替交通手段への変更が困難で、諦めざるを得なくなった移動に対する総支払意思額の総額で評価できる。この値を正確に知することは難しいが、再調達までの間の営業収入の減少額という鉄道事業者の間接被害額を下回ることではなく、価格弾力性が小さければそれらの差異は大きくないと考えられる。

鉄道事業者における災害リスク・ファイナンスとしては、資産構成上大きな部分を占める構造物や線路などのインフラを対象とする保険が先行して導入された。近年では、車両も保険の対象とする「企業財産包括保険」が利用できるようになっている。ただし、上記の保険は直接被害額の一部を補填するものであり、営業収入の減少という間接被害を対象とするものではない。

冒頭に示した北陸新幹線長野車両基地の事例では、特定路線に合わせた性能を持つ車両が廃車となり、他路線で使用中の車両を振り替えて充当することが困難で、営業運行ができなくなったことによる間接被害額はJR東日本だけで160億円にのぼり、帳簿価額ベースの直接被害額(118億円)を上回ったとされている。

2.3 水害からの鉄道車両の事前避難事例

北陸新幹線の事例以降、鉄道車両の事前避難事例の発掘が行われ、いくつかの事例が存在することが明らかとなった¹⁰⁾。

東海道新幹線鳥飼車両基地は、1967(昭和42)年7月の北摂水害時に、安威川堤防が決壊し浸水被害を受けた。7月8日21時すぎに安威川が警戒水位を突破した報を受け、基地に収容済みの13本の12両編成の0系電車を順次営業列車走行終了後の上り本線上に避難させ、7月9日の午前1時

■表一1 豪雨・土砂災害・津波を原因とする鉄道車両の被害

日付	路線	区間	被災列車	災害要因	死者	負傷者	車両被災	廃車	備考
1970年 7月1日	房総西線	保田－浜金谷	上り急行 「うち房2号」	集中豪雨 土砂災害	0名	4名	3両脱線	1両	
1972年 7月5日	土讃線	繁藤	普通列車 (運行停止中)	集中豪雨 土石流	59名	8名	機関車1両 客車2両脱線	3両	復旧まで 23日
1974年 7月7日	横須賀線	久里浜駅構内留置線		台風8号 七夕豪雨			電車32両 浸水	32両	留置中
1982年 6月27日	外房線	太東－東浪見	普通列車 (運行停止中)	土砂崩れ	0名	3名	電車2両 脱線	2両	
1982年 8月3日	関西本線	王寺駅電車留置線		洪水による 浸水			電車100両 浸水	60両	留置中
1985年 7月11日	能登線	古君－鷗川	下り急行 「能登路5号」	連続降雨 盛土崩壊	7名	32名	気動車4両 脱線横転	4両	
1993年 8月6日	JR九州日豊本線	竜ヶ水	普通列車 (停車中2列車)	豪雨 崖崩れ	3名	不明	気動車3両	3両	約300名 避難
1996年 6月25日	JR東海高山本線	禅昌寺－下呂	下り特急 「ひだ15号」	落石	0名	16名	気動車2両 脱線	1両	
1997年 4月7日	京浜急行電鉄本線	京急田浦－安針塚	上り普通列車	崖崩れ	0名	19名	電車1両 脱線	1両	
2003年 7月18日	JR九州長崎本線	肥前長田－小江	上り特急 「かもめ46号」	落石(130kg 直径80cm)	0名	37名	電車3両 脱線	3両	
2004年 10月20日	JR東海飯田線	羽場－伊那新町	下り普通列車	台風23号 盛土流出	0名	4名	電車2両 脱線転覆	2両	
2006年 11月19日	JR西日本津山線	玉柏－牧山	上り普通列車	落石(100t) 線路変形	0名	26名	気動車2両 転覆	1両	
2008年 8月28日	京王高尾線	高尾山口－高尾	高幡不動行 上り各駅停車	降雨 土砂流入	0名	0名	電車1両 脱線	1両	
2010年 7月31日	JR東日本岩泉線	押角－岩手大川	下り普通列車	土砂崩れ	0名	4名	気動車1両 脱線		2014年 4月廃線
2011年 3月11日	JR東日本常磐線	新地	上り普通列車	津波	0名	0名	電車4両 脱線	4両	乗客約40名 乗員3名避難
2011年 3月11日	JR東日本仙石線	東名－野蒜	上り普通列車	津波	0名	0名	電車4両 脱線	4両	乗客50名 乗員2名避難
2011年 3月11日	JR東日本石巻線	女川	上り普通列車 (出発前)	津波	0名	0名	気動車2両 脱線	2両	乗客20名 運転士避難
2011年 3月11日	JR東日本気仙沼線	松岩－最知	上り普通列車	津波	0名	0名	気動車2両 脱線横転	2両	乗客運転士 避難
2011年 3月11日	JR東日本大船渡線	大船渡－下船渡	上り普通列車	津波	0名	0名	気動車2両 台車浸水	2両	乗客約20名 運転士避難
2011年 3月11日	JR東日本大船渡線	盛	下り普通列車 (終着後)	津波			気動車2両 50cm浸水		乗客運転士 降車後地震
2011年 3月11日	JR東日本山田線	津軽石	下り普通列車	津波	0名	0名	気動車2両 脱線	2両	乗客20名駅員 乗員2名避難
2011年 3月11日	三陸鉄道南リアス線	盛駅隣接車両基地		津波			気動車3両 1m冠水	3両	留置中
2011年 3月11日	JR貨物	浜吉田－山下	上り普通列車	津波			貨車20両	20両	地震による 停止中
2011年 3月11日	JR貨物	石巻港等		津波			機関車4両 貨車185両	80両	留置中
2011年 3月11日	岩手開発鉄道			津波			貨車40両 工事車4両	44両	運休日であり 留置中
2011年 3月11日	仙台臨港鉄道	仙台港	1列車 (出発待機中)	津波			機関車1両 貨車12両	機関車1両 貨車12両	
2011年 3月11日	仙台臨港鉄道	各駅構内		津波			機関車2両 貨車85両	機関車1両 貨車不明	留置中
2011年 3月11日	福島臨港鉄道			津波			機関車2両 浸水		
2012年 9月24日	京浜急行電鉄本線	追浜－京急田浦	下り特急列車	防護柵 土台崩落	0名	11名	電車3両 脱線		2日間運休
2013年 8月17日	JR北海道函館本線	八雲－山越	上り貨物列車 21両編成	倒木 土砂流失			機関車1両 貨車3両脱線		
2014年 6月21日	JR九州指宿枕崎線	生見－薩摩今和泉	上り特急 「指宿のたまて箱」	豪雨 土砂崩れ	0名	15名			6日間運休
2015年 12月11日	JR東日本山田線	松草－平津戸	上り普通列車	土砂災害	0名	16名	気動車1両 脱線	1両	23ヶ月運休
2016年 8月22日	西武多摩湖線	西武遊園地－武蔵大和	上り普通電車	土砂崩れ	0名	0名	電車1両 脱線		14日間運休
2019年 10月13日	JR東日本北陸新幹線	長野車両基地		台風19号 洪水			電車120両 浸水		留置中
2020年 7月4日	くま川鉄道線	人吉温泉		豪雨洪水			気動車5両 浸水		留置中

出典：インターネットおよび報告資料⁶⁾ から筆者作成

に完了した。また午前3時過ぎから、これらの列車を京都まで進めて折り返し、新大阪に戻すことで、始発列車までに本線をクリアにしつつ、営業に必要な車両を確保することに成功した。さらに基地に留置中の保守作業車も続いて本線に避難させた。これらの作業においては、毎年6月に実施していた合計5回の図上訓練が役立ったことが紹介されている^{11), 12)}。なお、2つの文献の記述内容に若干の齟齬が見られ、当日の詳細な状況の進展は不明な部分がある。また、この豪雨以降の同基地での避難体制や図上訓練の実施状況に関する記録は公開されていない。

在来鉄道においては、関東鉄道常総線の水海道車両基地からの避難事例がある¹³⁾。2015（平成27）年9月に発生した関東・東北豪雨により鬼怒川の堤防が決壊し、常総市の広い範囲が浸水した。同線は9月10日14時ごろには全線の運行を停止し、14時30分ごろから16時ごろまで、車両基地に留置中の53両のうち移動可能だった46両を標高の高い守谷駅や取手駅に避難させた。同社では、1986（昭和61）年8月の小貝川氾濫時に車両の避難を検討したことがあり、その伝承が現場で共有されていたと言われている。また、JR東日本では、2019（令和元）年台風19号接近時に強風対策を含め、在来線の11箇所の車両基地から計20編成の車両を避難させていた。

なお、2019（令和元）年台風19号接近時の東北新幹線那須電車留置線からの避難事例は、車両の水没を想定したものではなかった¹⁴⁾。同留置線では1998（昭和63）年8月の那須水害で線路設備が冠水して故障を起こし、留置中の電車が出庫できなくなるという経験があった。下野新聞（2019年11月14日付）によれば、これまでも、2013年10月や2017年10月の台風接近に伴って避難を実施していた。同留置線は浸水想定区域には入っていないが、台風19号の予想進路に合わせ10月11日の段階で車両避難計画を決定、10月12日の計画運休が始まるのに合わせ、計8編成を郡山駅と仙台総合車両基地に移動させたという。

このような事前避難の事例を見ると、過去の被災経験を踏まえてそれぞれの場所の災害リスクを意識化し、避難の手順を整理することの重要性が理解できる。しかし、気候変動の影響を受けた災害の高頻度化や激化の危険性を考えると、これまでの被災経験がない場所も含めて、事前車両避難の必要性を確認し、体制を整えていくことが求められる。

本研究は、意思決定の本質的部分を、決定木¹⁵⁾を用いてモデル化することで、社会的な利得を最大化するような車両避難の判断を分析することを可能とする。また、評価基準として、鉄道事業者の利得、個別の利用者の利得を使用する場合を検討し、これらの判断が社会的に合理的な判断からどのように乖離するかを確認する。これによっ

て、条件が異なる場所での判断基準やタイミングのあり方を比較しながら、適切な避難体制を整備していくスタート点が提供できると考えている。

3——鉄道車両の事前避難行動のモデル化

3.1 意思決定構造の想定

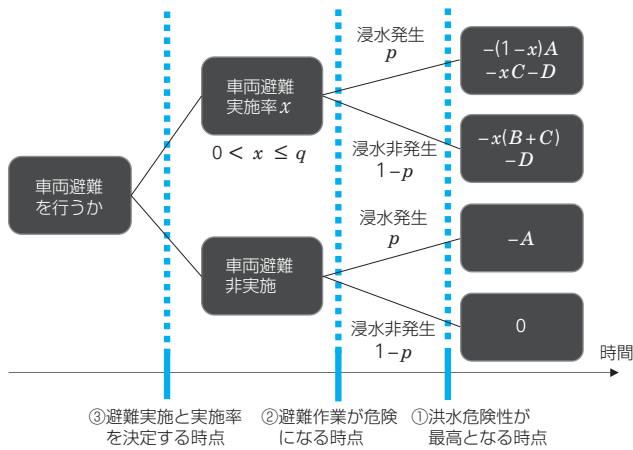
洪水による車両被災の可能性がある状況において、時間の推移に遡り、①洪水の危険性が最高となる時点（洪水発生予想時刻）、②災害が激化し車両避難の作業が危険になる時点（避難作業終了（中断）時刻）、③車両避難作業の実施とその規模を意思決定者が決定する時点（意思決定時刻）の3時点を考える。なお③の意思決定は1回とは限らず、時間において複数回行われる可能性がある。

意思決定時点において意思決定者が認識する浸水被害発生の主観確率を p とする。対象車両のうち移動を行う車両の割合を移動率 x と定義する。意思決定が遅くなり避難作業時間が短くなれば、移動が完了しない可能性が大きくなる。意思決定時点から避難作業を開始した場合に作業終了（中断）時刻までに避難が完了する車両の割合を期待完了率 q とし、移動率は、 $0 < x \leq q$ の範囲で設定しなければならないと仮定する。これら p, q はいずれも、0から1の範囲の実数値を、意思決定者が主観に基づいて外生的に設定すると考える。

次に発生した状況に応じた損失額を想定する。まず、洪水被災による資産損失額を A で表す。先述したように、社会的には当該車両の帳簿価格などの直接被害額 Ad だけでなく、代替車両の再調達までに営業が制約されることの間接的被害額 Ai を加えたものとなる。すなわち、 $A = Ad + Ai$ である。

一方、避難作業を実施するための費用として、移動車両割合 x に比例する労力や電力などの移動費用 Cx 、および避難準備費用 D が必要である。この準備費用として、避難作業時間を確保するために営業を早く終了することの損失を考える。社会的には諦めざるを得なくなった移動の支払い意思額であり、元々代替交通機関ではなく鉄道を選んでいたことから、利用者の鉄道への支払額を下回ることではなく、スケジュールの再調整に伴う宿泊等の追加費用があればさらに大きくなる。一方、災害により移動自体が不要となり小さくなる可能性もあるため、ここでは利用者の支払額、すなわち鉄道事業者の収入額と同程度であると考えた。

さらに、避難作業を行うと車両が通常時と異なる場所に移動され、その車両を用いた営業運行をすぐに再開できない状況が起こる。実際に洪水が発生すれば、運行不能区間が発生したり、地域社会も通常の活動が停止して需要が減少し、当該車両の有無が影響を持たない可能性がある。そのため、洪水非発生時のみ、移動した車両の割合



■図一1 決定木と利得

に比例する機会損失が発生すると仮定し、空振り損失と呼んで Bx で表す。

避難作業の実施率、被災の組み合わせにより、図一1の決定木の右端に示す4通りの状況が発生し、それぞれの状況における利得が以上の4つの費用 A, B, C, D を用いて計算できる。

3.2 期待利得に基づく合理的な意思決定

3.2.1 社会的利得に関する仮定

4つの費用の社会的な評価値について、 $A > (B, C, D) \geq 0$ が成立すると仮定する。これは、対象となる車両資産が高価で浸水による想定損失が大きく、より少ない費用を用いてそれを回避できる可能性があることを意味し、車両避難行動が意味を持つための必要条件である。

3.2.2 期待利得に基づく意思決定

社会的な期待利得に基づく意思決定を考える。浸水被害の主観確率 p と期待完了率 q に対して、 x の割合の車両の事前避難を実施した時の期待利得 E_1 および、避難を実施しない時の期待利得 E_2 は、以下のように表される。

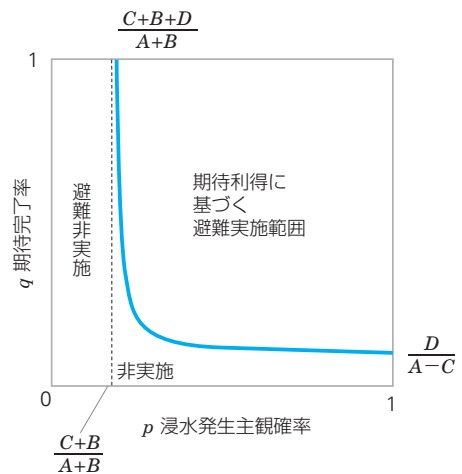
$$E_1 = -p(1-x)A - px C - pD - (1-p)x(B+C) - (1-p)D \quad (1)$$

$$= -p(1-x)A - (1-p)x B - x C - D$$

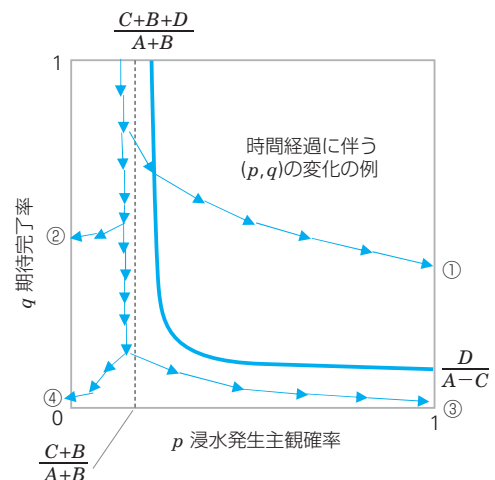
$$E_2 = -pA \quad (2)$$

$E_1 > E_2$ ならば避難を実施し、 $E_1 \leq E_2$ ならば実施しない。 $E_1 > E_2$ となるためには、少なくとも $p > \frac{C+B}{A+B}$ である必要があり、この時 E_1 の最大値は $x=q$ だとする。図二に示すように、 $E_1 - E_2 = 0$ の境界線は式 (3) で与えられる $p-q$ 平面上の双曲線で、その右上側が避難実施、左下側が非実施の領域となる。

$$p = \frac{C+B}{A+B} + \frac{D}{A+B} \frac{1}{q} \quad (3)$$



■図二 期待利得に基づく意思決定



■図三 時間の経過に伴う意思決定の変化

式 (3) の右辺第一項は垂直漸近線の位置を表し A の減少関数、 B, C の増加関数である。従って A が小さく、 B, C が大きいほど、避難行動の実施が有利になる主観確率 p の範囲は小さくなる。また D が大きいほど q の制約の影響が大きく、避難行動の実施が有利になる主観確率 p の範囲は小さくなる。

3.3 時間の計画に伴う意思決定の変化

時間の経過とともに意思決定者が複数回意思決定を繰り返す状況を分析する。なお、一旦避難の実施を決定して実行すれば、その後は新たに判断することはなくなる。一方、期待利得に従う決定を繰り返す場合、避難行動を取らないまま時間が経過すると活動終了時刻までの時間が減少し、期待完了率 q が低下していくことになり、問題が生じる場合がある。

いくつかの状況変化の例を図二に書き加えたものを図三に示す。早めに高精度の情報が得られ主観確率 p が更新できる場合、①主観確率 p の上昇に合わせて避難を決定するか、②主観確率 p の下落に応じて避難しないことに最終決定すればよい。一方、情報を待つうちに時間が経

過すると期待完了率 q が低下する。その後の情報に基づき③主観確率 p が上昇し、被災が確実になった段階には、もはや避難をするのに必要な時間がなく、為すすべがないという状態が起こる。もちろん、④台風の進路が逸れるなどで災害発生の危険性がなくなれば、損失を受けずに済むという結果になる可能性はあるが、それはたまたま災害が起きなかったという結果論に過ぎない。

③のような手遅れの状況の発生を防ぐには、期待完了率 q が減少して $\frac{D}{A-C}$ に近づく前の早い時点で、災害予測情報を得て決断する必要がある。

なお、意思決定時点で既に営業運転が終了している場合、避難準備費用 D を要しないため、式(3)の第2項が消失する。そのため、期待完了率 q に関わらず、主観確率 p と垂直漸近線の値の大小によって避難の実施が判断できる。

3.4 異なる主体の評価値に基づく意思決定

意思決定する主体が異なれば、4つの費用の評価は、社会的評価値とは異なると考えられる。

3.4.1 鉄道事業者の評価と意思決定

鉄道事業者の評価は、以下の点で社会的評価値とのずれが生じる可能性がある。

まず、車両も保険の対象とする「企業財産包括保険」を利用して、直接被害額の一部を補填できる可能性がある。そのため、資産損失額 A は保険カバー率 a を用いて、 $A = aAd + Ai$ により与えられ、社会的評価値に比べてより小さくなる。一方、その他の費用は、社会的評価値よりも大きい評価になる可能性がある。まず移動費用 C については、強風等の被害を受ける危険性を勘案して注意深い作業を要求する必要がある、平常時の運行費用よりも大きくなると考えられる。避難準備費用 D と空振り損失 B は運賃収入の減少に加えて、払い戻しのための事務費用、利用者への情報提供や対応方針の説明などの手間が発生するため、社会的評価額を上回る可能性が大きい。

以上のように、鉄道事業者の評価値を社会的な評価値と比較すると、 A が小さく、 B, C, D は大きいため、式(3)から避難行動の実施が有利になる主観確率 p の範囲は小さくなるのがわかる。

3.4.2 個々の利用者の評価と意思決定

ついで、個々の利用者の立場からの評価を考える。まず資産損失額 A の認識はほとんどないと考えられる。利用者は、事業者の資産価値に対する直接的被害に対する関心を持たない。間接的被害についても、代替車両が調達されるまでの期間に特定の利用者が再び当該路線を利用する可能性は小さい。一方、 B, D の費用は、利用者がまさに

行おうとしている移動や、災害収束後の帰りの移動が難しくなることに対応しており、大きく評価すると考えられる。さらに車両の移動費用 C は鉄道事業者の内部の費用に過ぎず、利用者は認識をしていない。

以上をまとめると、利用者の評価では、 $(B, D) > A > C \approx 0$ であると仮定できる。この利用者の評価構造を前提に式(1)、(2)を用いて期待利得 E_1 および E_2 を比較すると、 (p, q) の全域において $E_1 < E_2$ が成立し避難行動は有利にならない。図一2における $q=1$ に対する境界線の切片 $\frac{C+B+D}{A+B}$ が1を超えてしまうため、避難が有利な領域が消失してしまうことになる。

このことは、個々の利用者が、自らが被るサービス停止の影響のみを認識する限り、車両避難行動の社会的な意義は理解されないことを意味している。

4——避難実施条件の定量的な考察

4.1 定量的考察の精度

本章では、前章の決定木の分析で得られた、避難の実施判断の閾値を定量的に計算して、実際のイメージを持たせることとする。この時、車両の実際の価値や避難作業の費用、さらには準備作業や復旧作業の費用は公開されているわけではない。

本章の分析の目的は、車両避難実施の判断基準となる被災確率や避難完了率のオーダー感を議論することであり、精度の高さは求めていない。以下では一般に公開されている情報に基づく閾値の概略値によって、この目的にかなう知見を得ることができると考えている。

4.2 費用項目の設定

冒頭に示した、東北新幹線那須電車留置線と北陸新幹線長野車両基地の2つに事例に合わせて、決定木分析における A, B, C, D の概略値を設定する。表一2に、2つの事例における費用項目の設定根拠と設定値を示す。

設定の準備段階として、JR東日本およびJR西日本の新幹線の主要区間別の2019（令和元）年度利用状況等の統計資料^{(16), (17)}から旅客運輸収入額を旅客輸送人キロにより按分し、さらに1日あたり、列車1運行あたりの運輸収入額を算定した。さらにこれに、梅原⁽¹⁸⁾による新幹線の主要区間別営業係数の推計値を乗じることで、列車1運行あたりの運行経費を推定した。

表一2の設定値に基づき、社会的評価と鉄道事業者の評価の費用の設定を行い、避難実施に関する限界値を計算した結果を表一3、図一4、及び図一5に示す。両事例とも、社会的評価、鉄道事業者評価の間に大きな差異はなく、避難が有利になる右上の領域が大部分を占める。表一3

■表一 費用項目の設定根拠と設定値

費用項目	計算事例	東北新幹線 那須電車留置線	北陸新幹線 長野車両基地
	対象車両	8編成、諸元不明	E7系W7系10編成
Ad： 浸水の直 接損失	車両の帳簿 価格	E2系E5系10両に一部併 結E6系を加え、E7系12 両編成と同額評価 11,800	2020年3月 期 決 算 に おける特別損失計上額 (日経新聞11/6付) 11,800+3,000=14,800
Ai： 浸水の 間接損失	再調達期間 中の車両の 運賃収入額	東京－仙台間の日運賃 収入×6ヶ月間の運用 見込み回数 748.2×(8/46)×180 =23,416	東京－金沢間の日運賃 収入×6ヶ月間の運用 見込み回数 440.6×(10/30)×180 =26,436
B： 空振り 損失	車 両 の3時 間運用から の運賃収入 額	東京－那須塩原間の列 車運賃収入額（1往復× 8編成） 2.158×2×8=34.5	東京－長野間の列車運 賃収入額（1往復×10 編成） 5.742×2×10=114.8
C： 避難移動 費用	避難回送区 間の車両の 往復運行費 用	那須塩原－仙台車両所 間の列車運行費用（1往 復×8編成） 1.016×2×8=16.3	長野－白山車両所間の 列車運行費用（1往復 ×10編成） 1.730×2×10=34.6
D： 避難準備 費用	回送区間の 3時間分の 運賃収入額	那須塩原－仙台間の総 運賃収入額（片道3時間 分） 224.1/2×(3/18)=18.7	長野－金沢間の総運賃 収入額（片道3時間分） 150.9/2×(3/18)=12.6

(単位：百万円)

■表一 社会的評価値・鉄道事業者評価値と計算結果

計算事例	東北新幹線 那須電車留置線		北陸新幹線 長野車両基地	
	社会的評価	鉄道事業者評価	社会的評価	鉄道事業者評価
A： 車両資産損失	Ad+Ai 35216	0.5Ad+Ai 29316	Ad+Ai 41236	0.5Ad+Ai 33836
B： 空振り損失	表一2 の値 34.5	表一2 の1.5倍 51.8	表一2 の値 114.8	表一2 の1.5倍 172.3
C： 避難移動費用	表一2 の値 16.3	表一2 の1.5倍 24.4	表一2 の値 34.6	表一2 の1.5倍 24.4
D： 避難準備費用	表一2 の値 18.7	表一2 の1.5倍 28.1	表一2 の値 12.6	表一2 の1.5倍 18.9
垂直漸近線p	0.00144	0.00259	0.00361	0.00578
p (q=1)	0.00197	0.00355	0.00392	0.00634
q (p=1)	0.00053	0.00096	0.00031	0.00056

保険力バー率を $\alpha=0.5$ と設定した

(単位：百万円)

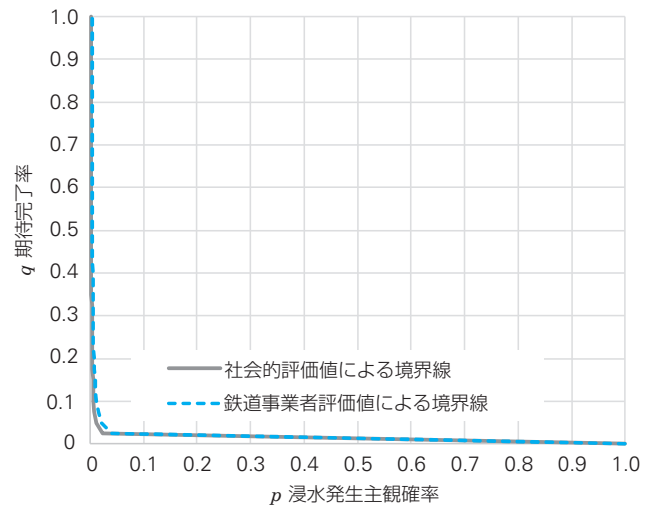
には垂直漸近線及び境界線の端の値を示しているが、鉄道事業者の評価による避難領域は社会的評価による場合よりも若干小さい。また、那須の事例の避難領域は、長野の事例に比べて若干大きいことが確認できる。

4.3 長野車両基地の事例の考察

長野車両基地の事例における時間経緯を、NHKの報道発表等から推定すると、以下のようであった。

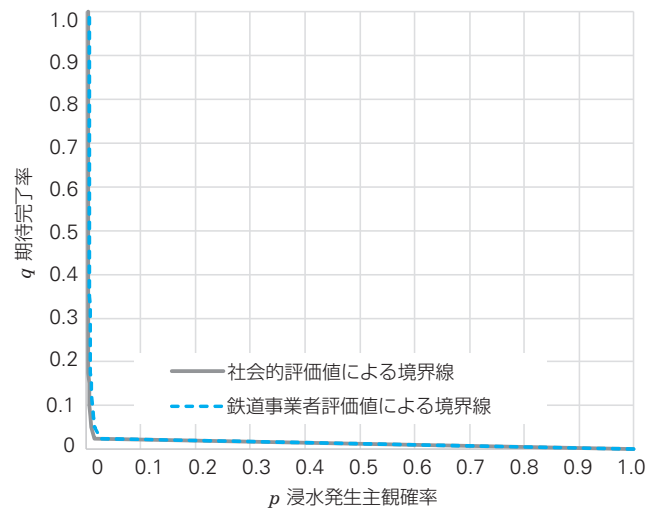
気象庁による台風19号の情報は10月9日水曜日に西日本から東日本へ上陸の注意喚起が広く発信され、10日木曜日には「狩野川台風の再来」という広報がなされるようになった。JR東日本は11日金曜日の正午ごろ、計画運休の情報をHP及び報道機関に出した。すなわち「東北・山形・秋田・北陸・上越の各新幹線は、上り線下り線とも、12日土曜日午前11時以降に出発する列車から本数を減らして運転し、その後運休する。計画運休は、少なくとも13日日曜日の

東北新幹線那須電車留置線



■図一 東北新幹線那須電車留置線事例の計算結果

北陸新幹線長野車両基地



■図一 北陸新幹線長野車両基地事例の計算結果

昼ごろまで予定しており、台風の被害があれば長期化するおそれもある」という広報を行った。12日土曜日の17時には、「東北・山形・秋田・北陸・上越の各新幹線は、東京駅を出発する列車では、13時24分発の金沢駅行きの「はくたか565号」を最後に運転を取りやめている」という報道がなされている。

長野市を含む地域に大雨特別警報が発表された16時30分の時点では既に北陸新幹線全線で営業運転が終了して避難準備費用Dを要しない状況になっていた。それ以降に被災の可能性が意識され、主観確率が垂直漸近線の $p=0.0036$ を超えていると認識されていれば、社会的に避難行動を取る価値があったことになる。

日経新聞電子版（2019年11月29日）では、JR東日本新幹線総合指令所長の三村亮介氏の談話として、車両センターの浸水の危険性は、10月13日日曜日午前0時45分に避難勧告が出されるまで認識されておらず、現場では直前まで「車両の点検を行うなど運行開始に向けた準備をしてい

た」と伝えている。0時57分に避難指示が発令され、現場にいた36人が建物の上層階に避難した。川の堤防が約70メートルにわたって決壊、車両基地に濁流が流れ込んだのは午前3時～5時半とされている。

このように、当時は被災の可能性が全く認識されないまま時間が経過し、避難勧告を受けた時点では既に車両避難の期待完了率 $q=0$ の状況にあり、なすすべがなかったことが確認できる。

4.4 今後の事前避難対応への示唆

長野車両基地の浸水事故を受けて、それぞれの現場では浸水の危険性が認識され、今後同様の「不意打ち」は避けられることが期待できる。しかし、避難訓練時の事業者のコメントなどから判断する限り、事業者はまだ、「めったに起こらない事」と捉えているように感じられる。本章の鉄道事業者の利得に基づく計算値では、 $p=0.006$ というかなり小さな発生確率であっても、事前避難を実施する事が合理的となる。一方、現時点で事業者が持っている主観的な事前避難実施の頻度は、本モデルの計算に基づく頻度とは、オーダーが異なるほど大きくかけ離れているように見える。

もとより、本分析は避難実施判断を極端に単純化しており、設定値の精度も低いため、事業者の当時の主観的判断の方が実際の状況に近い可能性がある。その場合にも、本分析結果と事業者の判断の違いを生み出した理由を精査しておくことが、今後の浸水被害額や避難の費用を抑える方法、利用者への影響を抑える方法などの発見、検討に役立つと考える。

5 おわりに

本研究では、浸水被害が予想される場合の事前車両避難行動の重要性を確認し、その意思決定プロセスを決定木を用いて分析した。2019年台風19号時の新幹線車両基地の事例に合わせて定量的な考察を行った結果、1) 社会的には被災確率のかなり小さい洪水でも事前避難を実施すべきこと、2) 判断の遅れが選択の幅を狭めることから、早い時点での決断が重要であること、3) 鉄道事業者、利用者の利得によれば避難行動はとられにくいこと、が確認できた。

鉄道には、天候に左右されない輸送の安定性、定時性が期待されていることを踏まえ、今後は、運休の社会的費用の設定方法をさらに議論するとともに、早期の運休や運行再開の遅れに対する利用者の理解の促進を図ることも必要であろう。また、車齢や運用条件の異なる事例に対しての適用を進め、鉄道事業者との意見交換を進めながら、

追加的に考慮する要素を明らかにしていくことも必要である。

なお、このモデルの基本的な構造は、鉄道以外の交通事業者にも共通して適用できる¹⁹⁾と考えている。まずはバス事業者にも適用し、事例の検証を行いたい。さらにバスの場合、早めに営業運行を停止することがタクシーや自家用車の利用に影響を及ぼし、それが道路混雑を通してフィードバックしてくる可能性もある。このような複雑な状況に対応できるように、モデルの拡張を検討することも今後の課題である。

参考文献

- 1) 細沢礼輝 [2019], “浸水した北陸新幹線、10編成すべて廃車へ 台風19号”, 「朝日新聞デジタル」, 2019年11月6日, <https://www.asahi.com/articles/ASMC654G8MC6UTIL034.html>.
- 2) 国土交通省 [2020], “新幹線における車両及び重要施設に関する浸水対策について”, 「報道発表資料」, 2020年5月27日, https://www.mlit.go.jp/report/press/tetsudo07_hh_000180.html.
- 3) 奥村誠・森合一樹 [2020], “緊急時資産退避作業の意思決定過程の分析”, 「東北地域災害科学研究」, 56巻, pp. 215-218.
- 4) 奥村誠 [2020], “交通機関の被災と対応”, 2019年台風第19号災害に関する東北学術合同調査団編, 『2019年台風第19号災害に関する東北学術合同調査団報告書』, 土木学会東北支部より限定頒布.
- 5) 大堀勝正 [2016], “鉄道事業の自然災害リスク・ファイナンスに関する研究－歴史的経緯と基礎的分析－”, 「運輸政策研究」, Vol.19, No.2, pp. 33-37.
- 6) 東北の鉄道震災復興誌編集委員会 [2012], 『よみがえれ! みちのくの鉄道－東日本大震災からの復興の軌跡－』, 東北の鉄道震災復興誌編集委員会.
- 7) 奥村文直 [2014], “鉄道における予防安全と被害最小化への取り組み”, 「第27回鉄道総研講演会」, pp. 9-16.
- 8) 武内陽子・渡辺健治・羽山和紀・深川修・福村直登・早勢祥子 [2014], “重要インフラの災害対策に関する調査－大規模災害時における鉄道のレジリエンスを向上させるために－”, 「オペレーションズ・リサーチ」, 2014年8月号, pp. 453-459.
- 9) 国土交通省 [2019], 『鉄道の防災・減災対策』, 平成30年度政策レビュー結果(評価書), 国土交通省, <https://www.mlit.go.jp/common/001281980.pdf>.
- 10) 杉山淳一 [2019], “新幹線を水没から救え－1967年7月豪雨「伝説の戦い」が伝える教訓」, ITmediaビジネスオンライン, <https://www.itmedia.co.jp/business/articles/1911/01/news034.html>, 2019/11/1.
- 11) 齋藤雅男 [2006], 『新幹線安全神話はこうしてつくられた』, 日刊工業新聞社, pp. 191-196.
- 12) 齋藤雅男 [2014], 『東海道新幹線安全への道程』, 鉄道ジャーナル社, pp. 512-518.
- 13) 桐原正道 [2015], “【東日本豪雨】生かされた教訓 車両避難を即決断 常総線、早期復旧のワケ「被災者と一緒に復興を」”, 「産経ニュース」, 2015年9月24日, <https://www.sankei.com/photo/story/news/150924/sty1509240004-n1.html>.
- 14) 細沢礼輝 [2019], “避難計画、新幹線に明暗 東北新幹線は冠水の経験生かす”, 「朝日新聞デジタル」, 2019年10月18日, <https://www.asahi.com/articles/ASMBL61BZMBLUTIL064.html>.
- 15) 寺野寿朗 [1985], 『システム工学入門－あいまい問題への挑戦－』, 共立出版株式会社.
- 16) JR東日本 [2020], “路線別ご利用状況”, JR東日本HP, 企業・IR・Sustainability, https://www.jreast.co.jp/rosen_avr/.
- 17) JR西日本 [2020], “区間別平均通過人員および旅客運輸収入(2019年度)”, 「データで見るJR西日本2020」, pp. 56-59, https://www.westjr.co.jp/company/info/issue/data/pdf/data2020_08.pdf.
- 18) 梅原淳 [2017], “JR東日本の新幹線「一番稼げる」のはどこか 独自試算! JR北海道・東日本の営業係数”, 「東洋経済オンライン」, 2017年10月18日, <https://toyokeizai.net/articles/-/193269>.
- 19) 佐藤良太・谷口綾子 [2016], “東日本大震災における路線バス運行現場の災害応急対応”, 「実践政策学」, Vol.2, No.1, pp. 37-44.

(原稿受付2021年7月15日, 受理2023年5月11日)

Decision Tree Analysis on Railway Vehicle Pre-evacuation from Flood Risk

By Makoto OKUMURA and Kazuki MORIAI

Due to Typhoon No. 19 in 2019, 120 cars were flooded and scrapped in the Nagano Train Depot of the Hokuriku Shinkansen. Railroad operators have since been studying vehicle pre-evacuation procedures. In this study, we used a decision tree to analyze the transition of the decision of operator over time. It was found that pre-evacuation should be carried out even for floods with small probability of damage either based on the social outcome or the profit of operators, and that pre-evacuation may not be approved when based on the users' payoff for early suspension and delay in resumption of service.

Key Words : railway vehicle, flood risk, pre-evacuation, decision tree analysis
