

(62) 日時の変動を考慮した避難所要時間予測手法の提案とそれによる避難判断支援

川野 浩平¹・孟 楽²・韓 子双²・Ibrahim Djamaluddin³・菅原 巧²・
本田 博之³・谷口 寿俊³・三谷 泰浩³

¹正会員 九州大学大学院 工学研究院 附属アジア防災研究センター
E-mail: kawano@doc.kyushu-u.ac.jp

²学生会員 九州大学大学院 工学府 土木工学専攻

³正会員 九州大学大学院 工学研究院 附属アジア防災研究センター

豪雨災害は雨の降り始めから被害発生までに時間的猶予があるため、各自治体は内閣府が策定した「避難情報に関するガイドライン」を参考に人的被害の軽減に努めている。近年では、災害の危険性を自然の加害現象と人や資産の脆弱性を組み合わせて定量的に評価する取り組みがあるが、避難に着目した脆弱性の評価事例は、ほとんどない。これまで著者らは、住民の避難所要時間に着目し、これを予測・活用して避難判断の意思決定支援に用いる方法を検討してきた。本研究では、既存研究の課題である時々刻々と変化する時間帯別の経路状況を考慮できていない点を解決する避難所要時間の予測手法を提案した。その結果、提案手法を用いて避難困難者が発生し始める時刻を予測でき、避難判断支援に有効であることが明らかとなった。

Key Words: heavy rain disasters, evacuation time, vulnerability, decision making support

1. はじめに

豪雨災害は雨の降り始めから被害発生までに時間的猶予（リードタイム）がある進行型の災害であり、災害や被害の規模を事前にある程度予測することができるため、被害発生までの猶予時間内に住民の避難を完了することで人的被害の発生を防ぐことができる。そのため、各自治体は、内閣府が策定した「避難情報に関するガイドライン（令和3年5月）」（以下、ガイドライン）を参考にして高齢者等避難、避難指示、緊急安全確保等（以下、避難指示等）の発令基準や伝達方法、防災体制等を検討し、人的被害の軽減に努めている。ガイドラインでは、対象とする災害の特定、避難指示等の対象とする区域の設定、避難指示等の発令基準の設定の3つの作業の流れに従い、避難指示等の発令対象区域や発令基準の例が示されている。特に避難指示等の発令基準については大雨警報や河川の水位、土砂災害警戒情報等の情報、およびそれらから予想される被害状況をもとに避難指示等の発令に係る意思決定（以下、避難判断）を行うこととされている。しかし、ガイドラインには、必ずしも明確な基準が示されている訳ではなく、「危険が及ぶおそれがある

場合」等の定性的で曖昧な表現も含まれているため、防災責任者など意思決定者の経験に基づいた主観的な判断を必要とする場面がある。そのため、意思決定者ごとに避難情報の発令内容やタイミングなどの判断結果が異なり、発令が早すぎたり、対象地域が広すぎる場合には、住民が危険を自覚できずに逃げ遅れに繋がる懸念される。こうした理由で発生する人的被害を防ぐためには、いわゆる「災害の危険性」という定性的で曖昧な尺度を何らかの定量的な指標に基づいて把握し、避難判断が行われるべきである。

近年は、自然災害の直接的な加害現象（以下、ハザード）だけを災害の危険性として捉えるのではなく、ハザードに対する脆弱性という観点を重視したアプローチ¹⁾で災害の危険性を把握する先行研究が数多く進められている。これらの研究においては、災害による人や資産等への危険性を「災害リスク」と称し、ハザードと脆弱性を組み合わせて評価する方法が用いられている。各自治体はこれまで、防災気象情報などから豪雨災害におけるハザードを定量的に把握してきた。一方、脆弱性を定量的に把握する一般的な先行事例^{2) 3)}は想定災害を受けて最終的にどのような被害が生じるかを評価するものであ

る。そのため、被害が生じる前に行うべきある避難判断に活用できる脆弱性（以下、「避難に着目した脆弱性」）の評価には適していない。こうした背景の中、著者ら⁴⁾は、先行事例にない避難に着目した脆弱性の考え方を新たに導入する必要があるとして、人的被害の発生を防ぐために自治体が把握すべき要素のひとつである住民の避難所要時間に着目し、これを予測・活用して避難判断の意思決定を支援できるか検討してきた。しかし、これまで開発した避難所要時間の予測手法（以下、従来手法）は、時々刻々と変化する時間帯別の経路状況を考慮できていない課題がある。具体的には、昼夜の違いや、朝夕の通勤時間帯などで発生する交通量増加の影響などを考慮していない。そのため、本研究では、日時の変動を考慮した避難所要時間予測手法を提案（以下、提案手法）する。また、提案手法を用いたケーススタディを実施し、時々刻々と変化するハザードとの組み合わせから避難困難者が発生するタイミングを予測することで、避難判断の意思決定を支援できるかについて検討する。

2. 避難所要時間予測手法の改良

(1) 従来手法の概要

従来手法⁴⁾では、避難者の属性や避難経路の特徴など、多くの要素を説明変数とすることができ、さらに各要素の重要度（以下、寄与率）がわかるという理由から、機械学習アルゴリズムの1つである Random Forest を用いて避難所要時間を予測している。Random Forest を用いて予測モデルを構築するには教師データが必要となる。教師データは自動車避難を想定して、避難所と各区域の代表点をつなぐ経路をそれぞれ実車走行し所要時間（以下、実測データ）を収集した。

(2) 日時の変動を考慮した予測手法の提案

従来手法では、全国で普遍的に入手可能なデータのうち、避難所要時間に影響を与えると考えられる項目を表-1 に示す区分でさらに細分化し、経路上に占める距離の割合や箇所数を算出して用いた。しかし、表-1 の説明変数は道路構造や地域の特性等の特徴を考慮しただけで、これにより予測した避難所要時間は日時の違いによる所要時間の変動を反映できていない。そこで、本研究では、新たに日時を表す項目、すなわち「曜日」と「時間帯」を説明変数として追加する。

a) 曜日

曜日の違いを表すために、ダミー変数を用いる。ダミー変数とは数値化されていないデータを重回帰分析などの多変量解析の説明変数として用いるために0と1の値を持つ指標変数に変換したものである。また、ダミー変

表-1 避難経路の特徴を表す項目とその区分

項目	項目ごとの区分
道路幅員	19.5m以上(W1), 13m~19.5m(W2), 5.5m~13m(W3), 3m~5.5m(W4), 3m未満(W5), その他(W6)
縦断勾配	-9%以下(S1), -9%~-7%(S2), -7%~-5%(S3), -5%~-5%(S4), 5%~7%(S5), 7%~9%(S6), 9%以上(S7)
曲率半径	15m未満(B1), 15m~60m(B2), 60m~150m(B3), 150m以上(B4)
土地利用	農業地域(Zone Agri), 森林地域(Zone Fore)
交差点	箇所数(Inter), 直進回数(Straight), 右折回数(Right), 左折回数(Left), 信号交差点箇所数(Signal)

数内の多重共線性を回避して正確な寄与率を確認できるようにするため、データ内の区分数から1つ削減した数、6つに区分（以下、Day1~Day6）する。

b) 時間帯

時間帯の違いを表すために、曜日と同じく、ダミー変数を用いる。ダミー変数内の多重共線性を回避するため区分数は23（以下、T1~T23）とする。

c) 距離

後述する理由で教師データの「経路ごとの距離」を一定にできないため、経路の始点から終点までの距離（Length）を算出する。

(3) 教師データの収集および予測モデルの構築

従来手法では、実車走行して収集した所要時間を実測して教師データを収集したが、新たに追加した説明変数である曜日と時間帯（計168パターン）に対応した実測データを自治体ごとに収集することは、費用や労力の制約から困難である。そこで、本研究では実測データの代わりに、既存の経路探索サービスやナビゲーションサービス等が提供する到着予想時刻と出発時刻の差から得られる所要時間を目的変数、出発時刻の曜日と時間帯を説明変数として教師データを収集する。また、従来手法では、一定の距離で分割した実測データを教師データとして予測モデルを構築していた。しかし、既存サービスでは指定距離ごとに所要時間を収集することは困難である。そのため、提案手法では説明変数に「距離」を追加し、目的変数の単位を時間（秒）とする回帰予測モデルを構築する。なお、実測データの代用となる所要時間を収集可能な既存サービスは複数あるが、本研究ではデータの収集が容易である Google Maps で収集した所要時間（以下、Google データ）を用いる。

(4) 精度検証と考察

精度検証では、豪雨災害により甚大な被害が生じた経験のある茨城県常総市および福岡県東峰村を対象とする。教師データは、対象地域において一週間、毎正時に Google データを収集し、収集結果の3分の2から予測モデルを構築し、残りの3分の1をテストデータとして避難所要時間の予測精度を検証する。対象地域の予測値と

正解値の差を図-1 に示す。常総市では全体の約 85%，東峰村では約 87%の経路が予測値と正解値の差が2分未満となった。また、図-2 に示すとおり、従来手法の予測結果と提案手法の予測結果を比較した結果、提案手法では、時間帯別の経路状況の違いを考慮して予測できることがわかる。自治体が避難判断時に参考とする防災気象情報の多くは 5 分または 10 分ごとに発表されているため、5 分未満の予測所要時間の誤差は実用上問題のない誤差であり、十分な予測精度が確保できている。また、図-2 の結果から、常総市は東峰村に比べて日時の違いによる移動所要時間の変動が大きいことがわかる。2 地域の地域性の違いについて検討するために、表-2 に説明変数の寄与率を示す。常総市および東峰村どちらの予測モデルでも、距離の寄与率が最も高く約 9 割となる。残りの約 1 割の内、常総市においては、日時を表す説明変数 (T17, T8, T18) が上位となる。東峰村では、道路幅員の寄与率が距離の次に大きくなる。この寄与率の違いが、時間帯別の平均交通量の違いとなったと考えられる。さらに、図-3 に示す時間帯別の交通量⁹⁾によると、常総市では、6時頃と17時頃で交通量がピークを迎えるのに対して、東峰村では時間帯別の交通量に大きな差が見られなかった。このことから、日時の違いによる移動時間の変動が大きく、交通渋滞が発生する可能性がある地域では、渋滞などの交通量が避難所要時間に与える影響を考慮する必要があると考える。

3. 避難所要時間を活用した避難判断支援のケーススタディ

(1) ケーススタディの概要

常総市を対象として、避難所要時間とハザードとを組み合わせたケーススタディを行い、避難所要時間を活用することで、避難判断を支援できるか検討する。想定する豪雨災害は平成 27 年 9 月関東・東北豪雨とし、対象とする期間は浸水被害が発生し始める 9 月 10 日の午前 6 時の 10 分前から午前 8 時までの約 2 時間、世帯ごとに住居から 1 台の乗用車による自動車避難を想定する。

ケーススタディの手順は、まず、各住居から市内すべての指定避難所までの最短避難経路をそれぞれ作成し、避難所要時間を予測する。次に、浸水が発生し始める午前 5 時 50 分から午前 8 時まで 10 分ごとに 14 のタイミングで浸水範囲と各避難経路が交差していないかそれぞれ確認し、浸水箇所と交差している場合はその避難経路を通行困難と判定する。そして、各住居の避難経路の中から最短の避難所要時間を世帯ごとの避難所要時間として記録する。なお、全ての避難経路が通行困難となった場合には、避難困難な状況が生じたと判定する。

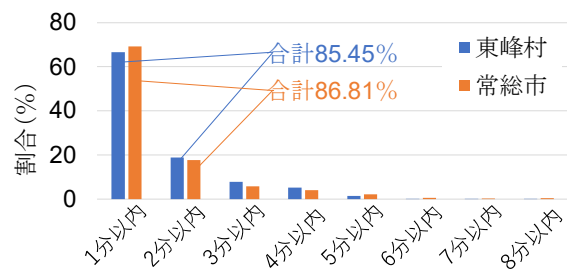


図-1 予測値と正解値の差

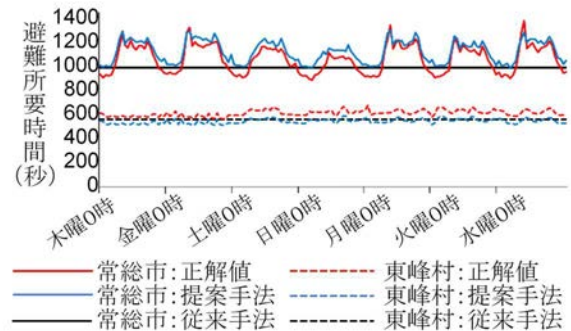


図-2 日時変動の予測精度

表-2 説明変数の寄与率(上位 10 項目)

東峰村		常総市	
説明変数	寄与率	説明変数	寄与率
LENGTH	91.58%	LENGTH	94.31%
W3	3.81%	T17	0.35%
STRAIGHT4	0.80%	T8	0.29%
S4	0.51%	T18	0.26%
B3	0.41%	S5	0.17%
S6	0.41%	T16	0.15%
S1	0.39%	T7	0.15%
W5	0.37%	ST1	0.15%
STRAIGHT2	0.28%	T15	0.14%
B4	0.26%	Day4	0.13%

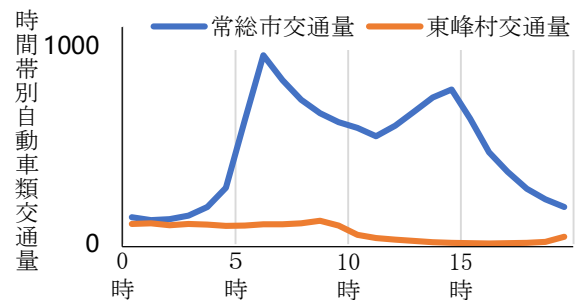


図-3 平成 27 年度 全国道路・街路交通情勢調査(抜粋)

(2) ケーススタディの結果と避難判断支援の検討

午前 5 時 50 分における各小学校区内の避難所要時間の割合を表-3 に示す。5 時 50 分は浸水箇所が存在しないため、避難開始時は平常時と同様の状態である。常総市内の平常時の避難所要時間において、最長時間は 7 分 30 秒であった。そのため、5 時 50 分に避難を行う場合、災害が発生する 6 時までにはすべての住民が避難できる。水海道小学校区と玉小学校区では避難所要時間が 4 分未

満のルート数が90%以上であった。一方、三妻小学校区では避難所要時間が4分未満のルート数は約45%、飯沼小学校区では約43%となり、本校区では相対的に避難所要時間が長くなることがわかった。三妻小学校区は鬼怒川に接する地域であり、他の小学校区に比べ避難所要時間が長いから、洪水災害時には特に注意すべきと考えられる。

玉小学校区内における6時20分と6時30分の避難所要時間の分布を図-4に示す。赤丸で囲む範囲は、浸水エリアと重なっていないが、避難困難者が発生していることがわかる。これは、避難経路が浸水エリアの影響により利用できなくなったためである。この結果から、赤丸で囲む範囲の世帯は、6時20分までに避難を完了させるべきということがわかる。また、時間帯の違いによる避難困難者の違いを確認するため、同一の浸水状況で異なる時間帯における避難所要時間の分布を図-5に示す。赤丸で囲まれている地域を比較すると6時に発災した場合は10分程度で避難可能だが、17時に発災した場合は避難が困難となることが明らかとなった。この結果から、時間帯の違いによって避難所要時間が異なり、避難困難者の発生地域も異なる場合があることがわかる。

以上の結果から、時間帯を考慮した提案手法を用いることでいつ避難を開始すべきかを定量的に把握できるようになるため、自治体の避難判断を支援できると考えられる。

4. まとめ

本研究では、時々刻々と変化する時間帯別の経路状況を考慮した避難所要時間の予測手法を提案し、避難困難者が発生するタイミングを予測することで、自治体の避難判断を支援できるかを検討した。具体的には、提案手法により時間帯の違いによる避難所要時間の変動を十分な精度で予測し、災害時にはいつ避難を開始すべきかを把握できた。このことから、提案した手法は、発災の時間帯に合わせた高精度な避難所要時間と、避難困難者の発生を予測することが可能であり、避難判断の意思決定支援として有効な手法であると考えられる。

謝辞：本研究は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）「国家レジリエンス（防災・減災）の強化」の一部として実施されました。

参考文献：

- 1) Benjamin Wisner: *At Risk Natural Hazards, People's Vulnerability and Disasters*, Routledge, pp.10-16, 2003.

表-3 平常時における避難所要時間の割合(%)

小学校区	2分未満	4分未満	6分未満	8分未満
三妻小学校	0.1	45.6	54.2	0.1
五箇小学校	2.5	56.2	41.2	0.0
大生小学校	0.5	64.3	35.2	0.0
大花羽小学校	1.0	63.6	35.3	0.0
岡田小学校	0.3	84.3	15.4	0.0
水海道小学校	0.5	96.4	3.1	0.0
玉小学校	0.8	98.9	0.3	0.0
石下小学校	1.1	84.3	14.6	0.0
絹西小学校	0.2	52.1	47.4	0.4
菅原小学校	0.5	57.4	42.1	0.0
豊岡小学校	0.2	78.2	21.6	0.0
豊田小学校	0.0	71.4	28.5	0.0
飯沼小学校	0.7	42.6	55.7	1.1

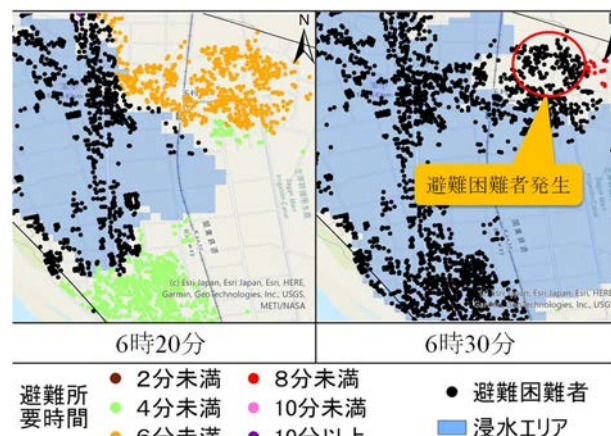


図-4 玉小学校区内における避難所要時間の分布

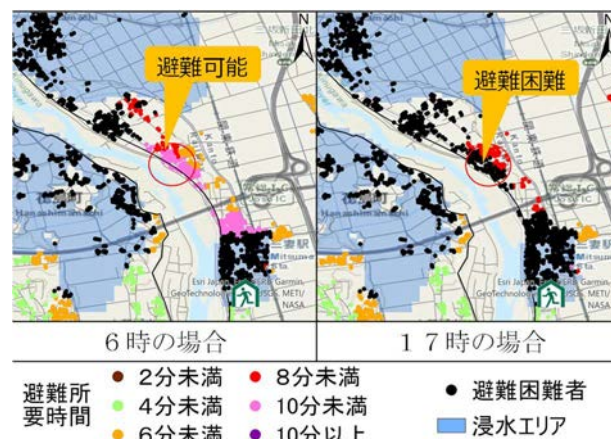


図-5 同じ浸水状況で異なる時間帯における避難所要時間の分布

- 2) 伊藤和也ほか：自然災害安全指標（GNS）構築のための脆弱性評価の確立と防災戦略への反映，文部省科学研究費補助金研究成果報告書：<https://kaken.nii.ac.jp/file/KAKENHI-PROJECT-16H03156/16H03156seika.pdf>（2022.6.13 取得）。
- 3) 菊本統ほか：我が国の自然災害に対する統合的リスク指標，土木学会論文集F6（安全問題），Vol.73(1)，pp.43-57，2017。
- 4) 川野浩平ほか：新たな避難所要時間予測手法を用いたリードタイムを有する災害の避難判断支援の検討，地域安全学会論文集，Vol.39，pp.401-409，2021。
- 5) 平成27年度 全国道路・街路交通情勢調査 一般交通量調査 集計表：<https://www.mlit.go.jp/road/census/h27/>（2022.6.13 取得）。