

防災訓練における避難行動の分析および避難に関する脆弱性評価手法の開発

池崎 大智*・三谷 泰浩**・川野 浩平***・吉田 祐子***・谷口 寿俊**・本田 博之***・菅原 巧****

A Value-Added GIS Model of Evacuation Vulnerability Assessment Method Based on an Analysis of Evacuation Behaviors During a Disaster Prevention Training

Daichi IKEZAKI*, Yasuhiro MITANI**, Kohei KAWANO***, Yuko YOSHIDA***,
Hisatoshi TANIGUCHI**, Hiroyuki HONDA***, Takumi SUGAHARA****

Abstract: Due to its wide range of interpretative possibilities, the official guideline for evacuation order issued by the Japanese government confuses local municipalities on occasions when they need to make decision accurately and objectively for evacuation order during heavy rainfall disasters. Different local administrators' subjective, empirical knowledge of calculating disaster risk and hazard remains the actual criteria before issuing evacuation order. This paper presents a value-added GIS model to assess accurate evacuation time for disaster preparedness by a case study of Toho Village, Fukuoka Prefecture. The model identifies highly vulnerable areas in this region that aides in visualization for each resident's evacuation time using GIS.

Keywords: 豪雨災害 (heavy rain disaster), 避難行動 (evacuation behavior), 脆弱性 (vulnerability), 災害リスク (disaster risk), 避難所要時間 (required evacuation time)

1. はじめに

1.1. 研究背景および課題

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）がある進行型災害であり、被害発生までの猶予時間内に住民を避難させ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（2021）が策定した「避難情報に関するガイドライン」（以下、ガイドライン）を参考にして避難指示等の発令基準や伝達方法、防災体制等を検討している。ガイドラインには、避難指示等の発令対象区域や発令基準の例が示されており、特に避難指示等の発令基準については大雨警報や河川水位、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、「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、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。これは災害による人的被害発生の危険性を定性的にしか把握できていないことが原因であると考えられる。そのため、いわゆる「災害の危険性」という定性的で曖昧な尺度を定量的な指標に則り判断する手法が必要である。

1.2. 「災害の危険性」に関する考え方

災害は自然の加害現象（以下、ハザード）を誘因として発生するものであり、社会科学的な要素が人々をハザードに対してより脆弱にすると考える脆弱性アプローチにより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（Davidson *et al.*, 2000; Hill and Cutter 2001; UNDP, 2003; Gheorghe, A. 2003）。これらの研究において、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。

豪雨災害におけるハザードには、河川の氾濫や土砂崩れなどがあり、各自治体は気象庁から発表される大雨警報や洪水警報、土砂災害警戒情報および土砂災害危険度情報などから、ハザードに関する情報

* 学生会員 九州大学大学院工学府建設システム工学専攻 (Kyushu University)
〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744 Tel : 092-802-3396

** 正会員 九州大学大学院工学府建設システム工学専攻 (Kyushu University)

*** 非会員 九州大学大学院工学府建設システム工学専攻 (Kyushu University)

**** 非会員 九州大学大学院工学府建設システム工学専攻 (Kyushu University)

を定量的に把握している。一方で、脆弱性の考え方については様々な考え方があり、Ben Wisner *et al.* (2004) は「脆弱性を左右する代表的な要素に、性差・年齢格差・健康状態と身体的な障害・民族あるいは人種もしくは国籍・カーストや宗教・社会経済的な地位がある」としている。

しかしながら、先行事例（国土交通省, 2018; 藤原ほか, 2020; 内閣官房, 2013, 2018; Benedikt Behlert *et al.*, 2020; 菊本ほか, 2017; 伊藤ほか, 2019; Asian Development Bank, 2020）における一般的な脆弱性評価は、いずれも静的な評価であり、時々刻々と変化する避難の脆弱性を定量的に表現できるものではなく、避難判断の意思決定に活用できる避難に着目した定量的な脆弱性の評価には適さないと考えられる。そのため、避難判断に活用可能な災害リスクを評価するために必要な脆弱性の評価に際して、新しい「避難に着目した新たな脆弱性」の考え方を導入する必要があると考えられる。

1. 3. 避難に着目した脆弱性の新たな考え方

「避難に着目した新たな脆弱性」について検討する前に、まず、避難の構成要素について整理する。

消防庁（2021）では、避難指示等を発令する自治体側の視点から、避難の要素を「把握した被害状況や危険性などに基づく、避難などの意思決定」「避難対象者への周知・伝達」「避難対象者を安全に避難させるための避難誘導」の3つに大別している。自治体は、時々刻々と変化する状況と、3つの要素を踏まえて住民が安全に避難を完了するまでに要する時間から逆算して避難指示等の発令タイミングを決定する。そのためには、情報を受け取った住民が安全に避難を完了するまでに必要な時間を自治体が把握しておくことが重要である。1つ目の要素と2つ目の要素はタイムラインの作成やリスクコミュニケーション等の自助努力によって改善・短縮が期待できる（片田ほか, 2011）。しかし、3つ目の要素に含まれる「住民が避難を完了するまでに要する時間（以下、避難所要時間）」は一定以上の短縮が期待できないため、3つの要素の中で最も支配的であると考えられる。そこで、この「避難所要時間」に着目し、避難の脆弱性を定量的に評価することで、どの地域

に対してどのようなタイミングで避難指示等を発令すべきか相対的に提示できる可能性がある。

1. 4. 研究の目的

以上の観点から、本研究では、人的被害の発生を防ぐために自治体が把握すべき各住民の避難所要時間に着目し、これを適切に予測する新たな手法の開発を行う。また、開発した新たな手法を対象地域に適用することで、地域内のどこが脆弱性が高く、災害時により早期の避難が必要になるのかについて考察する。

2. 防災訓練における住民の避難行動の調査

避難に着目した脆弱性を、避難所要時間を指標として評価するには実際に住民がとる避難行動を想定して評価することが必要である。そのため、避難者の属性や避難経路の距離、避難所要時間との関係性について調査を行い、脆弱性評価に取り込むことを目的とし、福岡県東峰村において行われた防災訓練の際に調査を実施した。

2. 1. 東峰村および防災訓練の概要

東峰村は福岡県中央部の東端に位置し、大分県に隣接している村である。村の総面積 51.9 km²のうち山林原野が約 86%と多くを占める（東峰村, 2016）。本研究では東峰村を4地域（小石原, 小石原鼓, 宝珠山, 福井）に分け「大字」と称し、大字をさらに細かく分けた場合には「行政区」と称する。さらに行政区はいくつかの「組」から構成される。

防災訓練は令和3年6月27日東峰村役場からの避難放送後に住民が避難を開始するという設定で実施された。訓練の流れは図1に示す通りである。ここで、訓練で想定する災害は地震であるが、住居から避難所まで移動するという行動の中で地震時特有の条件（例えば、家屋倒壊による道路閉塞など）を

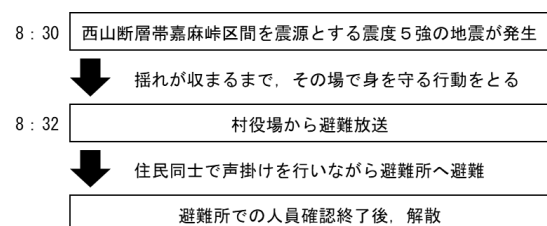


図1 防災訓練の流れ

想定して実施されておらず、災害の種類による避難行動の変化はないと考えられる。

2.2. 調査項目の設定および調査手順

調査項目の設定に先立ち、避難に関わる要素の中で防災訓練の中で調査可能なものとして、①個人またはグループの属性、②避難速度、③避難距離、④避難手段を挙げた。これは、年齢と歩行速度の関係性、また単独歩行・グループ歩行と歩行速度の関係性について多くの既往研究（紙野, 1980; 佐藤, 1992; ジョン, 1974; 岡田, 1997）があり、様々な歩行速度が提案されているが、それらと調査結果を比較考察するためである。また、避難手段として徒歩が原則とされる一方で、避難距離が長い場合や家族と避難する場合などには自動車避難が行われる事例があり、移動手段を決定する要素について調査するためである。

調査項目は、これらの要素について住民が回答しやすい質問となるように、表1のとおり設定する。ここで調査項目のうち、住所からは住民の避難距離を推定できると考える。これは、地形的特徴により、東峰村内の主な道路は谷部に沿って走っている国道、県道のみであり、1つの避難所に対して複数の異なる避難経路を選定することはほとんどないと想定されるため、住居から避難所を結ぶ最短経路が避難経路であると考えられるためである。

また、出発時刻および到着時刻から避難所要時間を算出し、避難距離を除すことで避難速度を算出する。

調査は東峰村内の計 31 箇所の避難所において、避難した住民が調査用紙に記入する方式で実施した。

2.3. 調査結果

まず、単独で徒歩避難した人の年齢と避難速度について表2に示す。歩行速度について、既往研究では多くの場合、単独歩行のうち、老人（65歳以上）は1m/sec未満、それ以外（65歳未満）は1.2~1.3m/sec、グループ歩行は0.8~1.3 m/secとされている（熊谷, 2013）が、それらと整合する結果が得られたのは単独歩行の40代、50代のみであった。70代では40代、50代と近い値となった。グループ歩行での歩行速度はグループ内で最も遅い歩行者に合わせた歩行速度になるとされているが、20代、90代を除いて最

表1 設定した調査項目

避難に関わる要素	設定した調査項目
①個人またはグループの属性	年齢、性別、避難グループの構成（人数、年齢、性別）
②避難速度	自宅の出発時刻、避難所の到着時刻
③避難距離	住所
④避難手段	移動手段

表2 徒歩避難した人の内訳と平均避難速度

	年代	人数 [グループ数]	平均避難速度 (m/sec)
単独歩行	20	1	0.28
	40	4	1.11
	50	9	1.16
	60	32	0.81
	70	28	1.11
	80	8	0.78
	90	2	0.39
グループ歩行	-	[100]	0.68

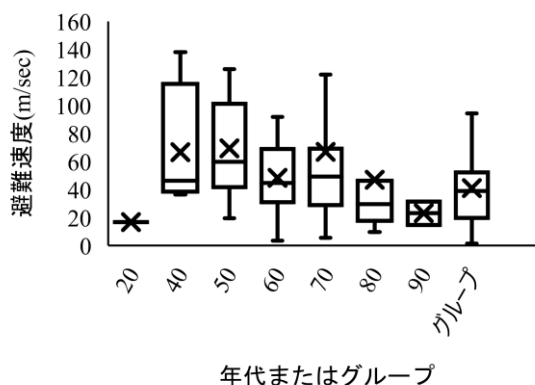


図2 徒歩避難した人の年代と避難速度

も遅い歩行速度となった。また、単独で徒歩避難した人の各年代およびグループで徒歩避難した人の避難速度について箱ひげ図を図2に示す。既往研究では65歳未満と65歳以上で異なる歩行速度が提案されていたが、表2および図2からは歩行速度の傾向が異なるということが十分には言えない結果となった。また同様に、自動車避難した人の年齢と避難速度についても分析を行ったが、一貫した関係性は確認できなかった。

次に、避難距離について、避難手段ごとのヒストグラムおよび累積比率を図3、図4に示す。これより徒歩避難を行った人の避難距離は300m以下が約80%と非常に多く、500m以上になると徒歩避難を行う人はほとんどいないことが分かる。また、避難距

離 300m 以下では自動車避難を行った人は約 10% であり、自動車避難はほとんど行われていないことが分かる。これより、避難距離が 300m 以下であれば徒歩避難、300m から 500m 以下であれば徒歩避難または自動車避難、500m 以上であれば自動車避難を行うと考えられる。

3. 避難所要時間の予測手法の開発

自動車や徒歩での経路の所要時間を算出する既存の手法として Google Map 等の経路探索システムがある。しかし、これらシステムの災害時への適用を考えると、そもそも地図に反映されていない道路が存在する点や災害時に通行止め箇所が発生した場合に、それを経路探索に継続的かつ自動的に反映することが難しい点などが課題として考えられる。そのため、災害時に適用可能な新たな避難所要時間の予測手法を、自動車・徒歩の2つの場合に分けて検討する。

3.1. 自動車での避難所要時間評価手法の開発

避難所要時間は避難経路の距離と移動速度のみによって予測できるものではなく、移動手段や避難経路の特徴、地域の特性など様々な要素によって変化する。本研究では、以下の前提条件の下で検討を行う。第1に、平常時の条件下での検討を行うものとし、天候や時間帯による避難所要時間の変化は考慮しないものとする。これは現時点での評価が難しいためであり、本研究では考慮しないこととする。第2に、性別や年齢などの属性による避難所要時間の影響は、調査結果からないものとする。

避難所要時間の予測は避難経路の特徴や地域の特性等、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）が分かるという理由から、機械学習の1つである Random Forest を用いて分類によって行う。機械学習ではモデル構築に学習データが必要となるため、対象とする地域内を実際に自動車で行き、所要時間を計測する。分類を行う際には学習データに存在しないクラスは予測結果として出力できないため、学習するクラスをいくつかに設定する必要がある。避難経路を一定の距離で分割した区間（以下、分割区間）における避

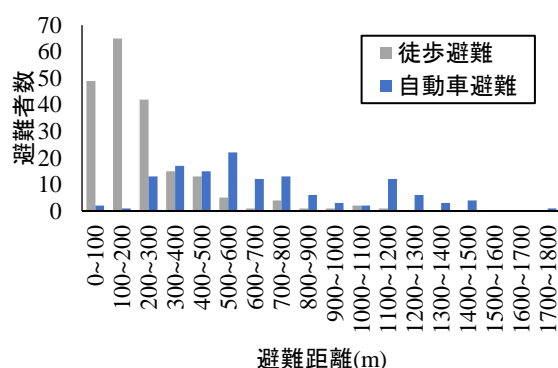


図3 避難手段ごとの避難距離のヒストグラム

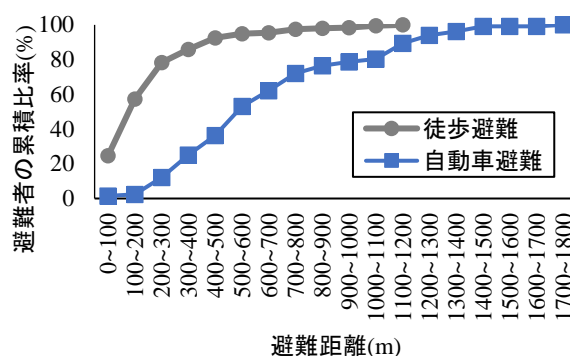


図4 避難手段ごとの避難距離の累積比率

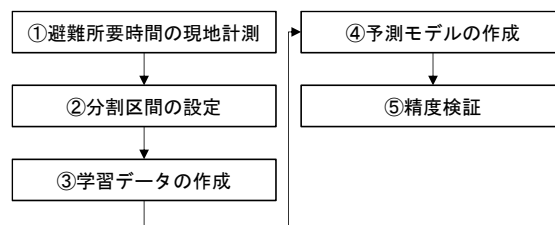


図5 予測モデル作成・精度検証までの流れ

難所要時間を予測対象とする。所要時間の計測後、分割区間における所要時間および説明変数を整理した学習データを作成し、Random Forest に学習させることによってモデルを構築し、その後予測モデルの精度検証を行う。この一連の流れを図5に示し、各実施事項の詳細について以下に説明する。

①避難所要時間の現地計測は走行する経路をあらかじめ設定し、その経路を普通乗用車で走行して行う。走行する経路は対象地域の指定避難所までの避難経路を可能な限り網羅できるように設定する。計測には GPS ロガーを利用し、1秒ごとに位置情報と

時刻を記録する。記録した位置情報の中には測位誤差が大きい位置情報が含まれる場合があるため、道路中心線からの距離や加速度、位置情報が記録された順番等をもとにクレンジングを行う。

②分割区間の設定は計測によって得られた速度の傾向をもとに行う。これは分割する距離が短すぎて分割区間の所要時間のクラスが、最も所要時間の短いクラスである「1分未満」に偏ってしまうことがないようにするためである。具体的には走行した経路を1kmで分割した際の速度を算出し、その速度分布の95%信頼区間における上限値の速度で1分間走行した場合の距離を分割する距離とする。

③学習データの作成は分割区間の通過に要する所要時間および説明変数を整理し行う。説明変数には全国の様々な地域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避難経路の特徴として道路幅員、縦断勾配、曲率半径、土地利用、交差点の5項目を選択した。これらのうち、交差点以外の特徴については表3に示す区分を設定し、分割区間に含まれる各区分の距離を算出する。縦断勾配および曲率半径は分割区間をさらに10m間隔で区切った区間（以下、算出区間）ごとに算出する。また、交差点については分割区間に含まれる箇所数、さらにそこで直進または右左折をしたか、信号交差点であるかどうかを考慮した箇所数を算出する。

作成した学習データを3：1の割合で分割し、前者をRandom Forestに学習させて④予測モデルの作成、後者は学習には用いず、⑤精度検証の際のテストデータとする。ここで学習データ選択の仕方によって作成されるモデルやその予測精度が変化するため、これら一連の流れを複数回繰り返すことにより、平均的な正解率を算出する。ここで正解率とは、予測全体に対する正解数（予測値と正解値が一致している数）の割合である。なお、予測精度は各分割区間の予測精度を示すものである。避難経路全体の避難所要時間を算出する場合には、分割区間ごとに予測した避難所要時間を合計する。また、分割によって一定の距離以下となった区間は予測対象外とし、最も避難所要時間が短い分類として考える。

表3 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)

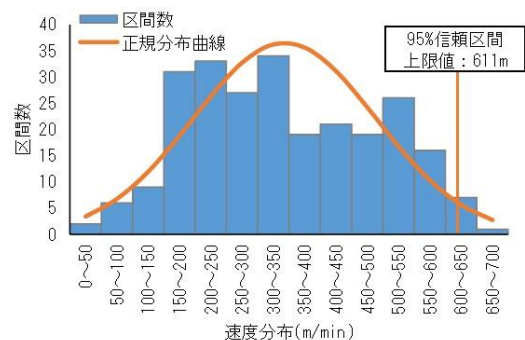


図6 各区間の速度分布とその正規分布曲線

以上の流れに沿って予測手法を東峰村に対し適用する。①避難所要時間の現地計測は、あらかじめGISのネットワーク解析により村内の全住居から最寄りの指定避難所への最短経路を作成し、それらのうち、各「組」から1つの経路を計測対象とした。計測により収集したデータに対してクレンジングを行い、全体の4.2%のデータを除外する。②分割区間の設定では1km間隔で分割した各区間における速度の分布および95%信頼区間の上限値を求め、図6に示す値となった。分割区間と縦断勾配や曲率半径の算出区間の区切りが一致するように、分割する距離は620mと設定する。これにより、分割区間における所要時間のデータは1分未満、2分未満、3分未満の3クラスに分割される。その後、③学習データの作成、④予測モデルの作成、⑤精度検証を行う。

精度検証の結果、正解率は88.7%と非常に高くなった。これより、避難所要時間を高精度に予測できることが分かる。計測した所要時間のクラスと予測結果のクラスの分布を表4に示す。ここで、適合率とは「予測値がAのデータのうち、正解値もAのデータの割合」であり、再現率とは「正解値がAのデ

ータのうち、予測値も A のデータの割合」である。前述の通り、正解率は約 9 割と高い一方で、「3 分未満」のクラスの予測に着目すると、再現率は 55%と、他のクラスより低い予測精度となっている。これはクラスに 11 個のデータしか存在せず、学習量が少なくなったためであると考えられる。

予測における説明変数の寄与率を図 7 に示す。W3（道路幅員、5.5m 以上 13m 未満）の寄与率が 23.0%と最大となり、2 番目に寄与率が大きくなった B4（曲率半径、150m 以上）の寄与率は 8.9%であるため、W3 が他の説明変数の寄与率と比較し非常に大きいことが分かる。5.5m 以上 13m 未満という道路幅員の区分は、東峰村では最も幅員の大きい区分であり、速度が上昇し所要時間を短くする要因として作用したと考えられる。

3. 2. 徒歩での避難所要時間評価手法の開発

徒歩での避難所要時間も自動車同様に Random Forest を用いて予測することも考えられるが、防災訓練における調査結果から、徒歩避難を行う場合の避難距離はほとんどの場合 500m 以下と短いため、個人の属性や避難経路の特徴による避難所要時間への影響は小さいと考えられる。そのため徒歩での避難所要時間は、ある一定の歩行速度を設定し、その速度で距離を除すことによって算出する。歩行速度には調査で得られた歩行速度の中で非常に低い速度となった 20 代、90 代を除いて、最も歩行速度の低いグループ歩行での速度 (0.68m/sec) を採用することとする。

3. 3. 東峰村内の各住居の避難所要時間の算出

防災訓練の調査結果から、避難距離が 500m より大きい住民は自動車避難、500m 未満の住民は徒歩避難を行うと仮定して、東峰村内の各住居の避難所要時間を算出し、可視化する。その結果を図 8 に示す。

避難所要時間は宝珠山地域の A の地点で、自動車避難をする住居の中では最長の 12 分以内となった。この周辺のエリアは避難所要時間が長いことに加え、近くに避難所がなく、災害時には福井地域にある村民センターなどの避難所まで避難する必要があるが、避難経路として利用できる道路が少ないため、土砂崩れによって道路閉塞が発生し孤立する可能性も考

表 4 予測と実測の所要時間クラスの分布

		予測クラスのデータ数			再現率 (%)
		1分未満	2分未満	3分未満	
実測クラスのデータ数	1分未満	173	14	0	92.5
	2分未満	25	196	2	87.9
	3分未満	1	4	6	54.6
適合率(%)		86.9	91.6	75.0	

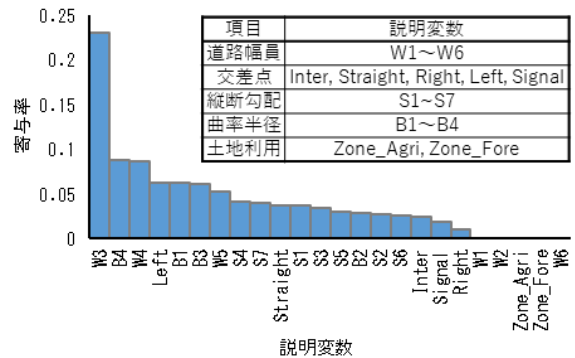


図 7 説明変数の寄与率

えられる。そのため、東峰村内では最も早期の避難が必要になると考えられる。

図 8 の B と C で示す地点はどちらも福井地域にある東峰学園、村民センターの避難所にそれぞれ避難すると考えられる。この 2 地点から避難所までの距離と避難所要時間について確認すると、C から村民センターまでの距離は約 3.4km に対して避難所要時間は 6 分以内である一方、B から東峰学園までの距離は約 3.6km に対して予測結果は 4 分以内と、避難経路の短い方が避難所要時間は長くなっている。このように提案した予測手法では距離によらず、経路状況を考慮した適切な避難所要時間を予測できている。

避難所が多く存在する黒点線で囲った地域を拡大したものを図 9 に示す。この地域の住居は徒歩避難をしたために、より避難所から遠い自動車避難をする住居より避難所要時間が長くなっていることが分かる。これは徒歩避難よりも自動車避難の方が避難速度が速いためであるが、実際の自動車避難時には自動車での移動時間以外にも駐車場までの移動時間等も考慮する必要がある。今後、より実際の避難時と近い避難所要時間の評価を行うためには、そのような時間も考慮して避難所要時間を算出することが必要であると考えられる。

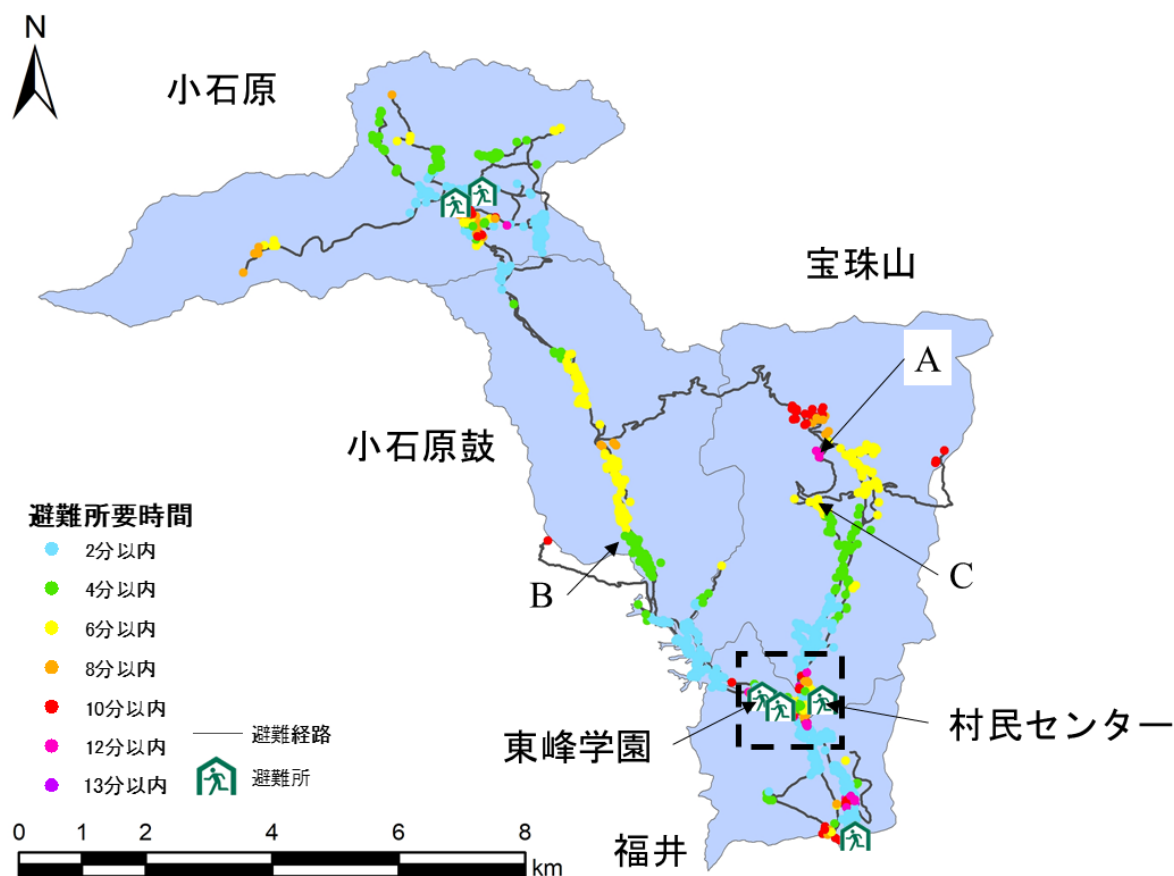


図8 各住居からの避難所要時間

また、要支援者など歩行速度が遅い避難者は、避難所に近くても避難所要時間の短い自動車避難を行うということを避難時の一手段として検討すべきである。さらに災害時には、避難所要時間の長い徒歩避難であっても、ハザードが発生するタイミングまでに避難を完了できれば被害は発生しないことから、脆弱性に加え、ハザード情報と組み合わせて災害リスクを評価し、地域内の危険な地域を把握することが必要であると考えられる。

4. まとめ

本研究では、人的被害の発生を防ぐために自治体が把握すべき各住民の避難所要時間を新たな脆弱性の指標として提案し、まず訓練における調査を実施し、避難者の属性や避難距離、避難手段、避難速度について分析した。次に、分析によって得られた知見を踏まえ、避難所要時間を Random Forest によ

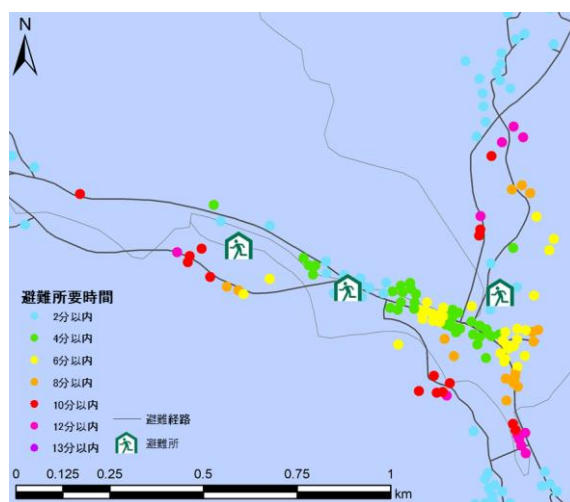


図9 避難所付近の避難所要時間

り予測する手法を開発した。その結果、避難距離に応じて実際の避難時に選択すると考えられる避難手段での避難所要時間を算出でき、それを GIS で可視化することにより、東峰村内のどの地域が避難に対

して脆弱であるかを空間的に把握することができた。また、避難所要時間を単に距離だけで算出するのではなく、地域の経路の特徴を考慮して予測することができた。

今後は、評価した脆弱性とハザードの情報を組み合わせ、災害リスクを定量的に評価する手法について検討を進めていく予定である。

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たものである。

参考文献

伊藤和也ほか（2019）文部省科学研究費補助金研究成果報告書「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」（代表：伊藤和也，課題番号：16H03156）。

岡田光正・吉田勝行・柏原士郎・辻正矩（1997）建築と都市の人間工学，鹿島出版会，16-28。

片田敏孝ほか（2011）洪水リスク統括マップ（気づくりマップ）の提案とその作成手法に関する研究，土木学会論文集 F5（土木技術者実践），67（2），130-141。

片田敏孝ほか（2011）行動指南型ハザードマップの開発，土木学会論文集 D3（土木計画学），67（4），528-541。

紙野桂人（1980）人のうごきと街のデザイン，彰国社，128-132。

菊本統ほか（2017）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），73（1），43-57。

熊谷兼太郎（2013）2011年東北地方太平洋沖地震津波の避難行動への津波避難シミュレーションの適用性，国土技術政策総合研究所資料，742。

国土交通省水管理・国土保全局，国土政策総合研究所（2018）水害リスク評価の手引き（試行版）。

Ben Wisner, Piers Blaikie, Terry Cannon and Ian Davis（2004）At Risk: Natural hazards, people's vulnerability

and disasters (2nd ed.), London: Routledge, 11.

藤原広行ほか（2020）南海トラフで発生する地震・津波を対象とした広域リスク評価手法の検討，防災科学技術研究資料，444。

佐藤方彦（1992）人間工学基準数値数式便覧，技報堂出版株式会社，285-288。

ジョン・J・フルーイン（1974）歩行者の空間，鹿島研究所出版会，47-50。

総務省消防庁，避難勧告・指示と警戒区域設定，防災・危機管理 e カレッジ，
<<https://www.fdma.go.jp/relocation/college/senmon/cat2/cat3/cat7/post-583.html>>。

内閣官房国土強靱化推進本部（2018）脆弱性評価の結果。

内閣府（防災担当）（2021）避難情報に関するガイドライン。

Asian Development Bank（2020）ASIAN WATER DEVELOPMENT OUTLOOK 2020，
<<https://www.adb.org/sites/default/files/publication/663931/awdo-2020.pdf>>。

Benedikt Behlert, Rouven Diekjost, Carsten Felgentreff, Timeela Manandhar, Peter Mucke, Ludger Pries, Katrin Radtke and Daniel Weller（2020）WorldRiskReport 2020，
<<https://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/WorldRiskReport-2020.pdf>>。

Davidson, R., Villacis, C., Cardona, C., and Tucker, B.（2000）A Project to Study Urban Earthquake Risk Worldwide, *Proc. of the 12th World Conference on Earthquake Engineering*, Paper No.791, Auckland, New Zealand.

Gheorghe, A.（2003）Complexity Induced Vulnerability, Paper Presented at the DPRI-IASA Third Symposium on INtegrated Disaster Risk Management (IDRM-03), Kyoto: Kyoto University.

Hill, A. and Cutter, S.（2001）American Hazardscapes: The Regionalization of hazards and Disasters, Washington, DC, Joseph Henry Press.

UNDP（2003）World Vulnerability Report, New York UNDP.