

富士山噴火に伴う溶岩流からの徒歩避難に関する基礎的検討

佐藤史弥¹・孫鵬飛²・秦康範³

Basic Study on Evacuation on Foot from Lava Flow during Eruption of Mt. Fuji

Fumiya SATO¹, Pengfei SUN² and Yasunori HADA¹

Abstract

This study conducted three basic studies on evacuation on foot from lava flows during the eruption of Mt. Fuji: 1) estimation of the population exposed to lava flows over time after the eruption, 2) development of a safety assessment method for evacuation on foot from lava flows, and 3) evacuation simulation based on the developed assessment method. Based on the results of these analyses, measures for safe evacuation on foot from the lava flow were discussed. The study showed that the maximum number of people exposed to the lava flow was about 2,000 3 hours after the eruption. The maximum number of people who had difficulty evacuating was about 800 when the evacuation start time was 75 minutes. On the other hand, the number of people who had trouble evacuating was smaller when evacuation was 45 minutes than when the start time was 75 minutes. This indicates that shortening the evacuation start time is essential for safe evacuation on foot from the lava flow.

キーワード：富士山, 溶岩流, 避難, 曝露人口, シミュレーション

Key words: Mt. Fuji, Lava Flow, Evacuation, Exposed population, Simulation

1. 序論

令和5年(2023年)3月に富士山火山避難基本計画¹⁾が公表された。富士山火山避難基本計画で

は, 『いのちを守る』避難を最優先し, 『くらしを守る』避難についても最大限考慮」を避難の基本的な考え方として, 富士山で発生する多様な火

¹ 山梨大学地域防災・マネジメント研究センター
Disaster and Environmentally Sustainable Administration
Research Center, University of Yamanashi

² 山梨大学大学院医工農学総合教育部修士課程工学専攻土木環境工学コース(現 東日本高速道路株式会社)
Faculty of Engineering, Integrated Graduate School of
Medicine, Engineering, and Agricultural Sciences,
University of Yamanashi

³ 日本大学危機管理学部
College of Risk Management, Nihon University

山現象に対する避難方法がまとめられている。

また、富士山火山避難基本計画は、令和3年(2021年)3月に改定された富士山火山ハザードマップ²⁾を受け、富士山火山広域避難計画³⁾の内容を見直し作成された計画となっている。変更された点の1つとして、溶岩流からの避難方法が挙げられる。富士山火山広域避難計画では、溶岩流からは、自動車等を使用して市町村外へ避難する広域避難が計画されていた。一方で、富士山火山避難基本計画では、溶岩流から徒歩で避難する原則が明記された。今後は、富士山火山避難基本計画に基づいて、地域の実情を反映した避難体制を構築し、富士山噴火時の被害を最小限に抑えることが求められる。

本稿では、富士山火山避難基本計画において避難の方針が大きく転換した溶岩流からの避難に着目する。溶岩流からの安全な避難計画を検討するためには、溶岩流に対する曝露人口や、溶岩流からの徒歩避難により、居住地に溶岩流が到達するまでに安全な場所へ避難できるのかといった基礎的な知見を整理する必要がある。しかし、溶岩流からの徒歩避難を想定した安全性の評価方法は確立されておらず、溶岩流からの避難対策を検討するための基礎的な知見は明らかになっていない。

そこで本稿では、富士山噴火時の溶岩流からの徒歩避難に関する基礎的検討として以下の分析を実施する。1. 噴火後の時間経過毎の溶岩流の曝露人口の試算、2. 溶岩流からの徒歩避難の安全性評価手法の構築、3. 構築した評価手法に基づく避難シミュレーションの実施。以上の分析結果に基づき溶岩流から徒歩で安全に避難するための方策について考察する。なお、本稿では「避難」を「いのちを守るための避難(=Evacuation)」と定義して取り扱う。

2. 既往研究に比した本研究の位置づけ

災害からの避難に関する研究は、これまでに数多くの蓄積がある。特に溶岩流のような進行型災害については、洪水災害や津波災害で数多くの研究が実施されてきた。

例えば洪水災害を対象とした研究では、桑沢

ら⁴⁾や、柿本ら⁵⁾、畑山ら⁶⁾、大上ら⁷⁾、蒲倉・梅本⁸⁾などが挙げられる。桑沢ら⁴⁾は、洪水を対象とした災害総合シナリオ・シミュレータを開発し、避難情報の伝達や住民の避難の遅延等による人的被害の変化を確認した。さらに、地域住民を対象とした防災講演会から開発したシミュレータの防災教育ツールとしての有効性を確認した。柿本ら⁵⁾は、水害避難訓練のデータに基づき避難行動シミュレータを構築し、避難場所の数を増やすことによる避難完了時間の短縮効果と避難完了率の増加効果を実証した。畑山ら⁶⁾は、マルチエージェントシミュレーション手法を用いた水害避難評価ツールを構築し、滋賀県湖北地区における水害からの広域避難計画の評価に適用した。その結果、避難の意思決定を計画よりも早く実施しなければならない地域があることを明らかにした。大上ら⁷⁾は、水害からの避難に係るマルチエージェントシミュレーションを実施し、避難場所とは別に一時的に避難できる避難建物の有無が避難に大きく影響することを明らかにし、あらかじめ避難する建物を指定することの有効性を示した。蒲倉・梅本⁸⁾は、GISを用いた静的な避難行動分析手法を構築し、茨城県内の市町村を対象に洪水浸水域の脱出を優先した避難方法の有効性を分析した。

津波災害を対象とした研究としては、例えば今村ら⁹⁾、鈴木・今村¹⁰⁾、桑沢・片田¹¹⁾、佐藤ら¹²⁾等が存在する。今村ら⁹⁾は、津波避難数値シミュレーションを開発し、北海道奥尻島での津波避難行動に適用し、その再現性を検証している。鈴木・今村¹⁰⁾は、住民の意思決定を考慮した津波避難の経路選択モデルを構築し、奥尻島青苗地区へ適用した。その結果、多数の住民の避難が集中し過剰な交通渋滞が発生する箇所を明らかにした。桑沢・片田¹¹⁾は、地震発生から津波襲来までの地域状況を総合的に表現するシナリオ・シミュレータを構築し、津波避難における家屋倒壊や道路閉塞の影響や家屋の耐震化による人的被害の低減効果について分析した。佐藤ら¹²⁾は、避難開始地点の周囲にある避難場所の収容人数の合計値である累積収容人数を考慮した避難方法を考案し、岩手

県宮古市中心市街地に適用し、その有効性を検証した。

火山災害に関する研究としては、例えば全国35の活火山の火山噴火ハザードに対する曝露評価をした河野ら¹³⁾や、融雪型火山泥流からの自動車避難を検討した藤井¹⁴⁾や、溶岩流からの自動車避難を分析した藤田¹⁵⁾が存在する。しかし、火山災害からの避難に関する研究は洪水災害や津波災害に比べて研究の蓄積が少ない状況にある。さらに、溶岩流からの徒歩による避難について分析した研究の事例は見当たらない。本研究の新規性は溶岩流の避難の時間経過を模式化すると共に、溶岩流からの徒歩避難に関して、避難経路の探索手法を開発し、溶岩流からの徒歩避難の安全性評価手法を構築する点にある。

3. 研究の方法

3.1 分析対象地域の概要

(1) 分析対象溶岩流の選定

本稿では、山梨県富士吉田市を研究の対象地域とする。図1に分析対象とする3つのケースの溶岩流の流下範囲と、それぞれの流下範囲から求めた解析範囲を示す。本稿では、図1に示す解析範

囲内で曝露人口を算出すると共に、避難シミュレーションを実施する。なお、解析範囲の設定方法は後述する。

図1に示す溶岩流の流下範囲は、富士山火山ハザードマップの基礎データである溶岩流ドリルマップ^[1]の作成に使用された溶岩流の流下シミュレーション結果を用いた。富士山火山ハザードマップでは、小規模、中規模、大規模それぞれの噴火規模に応じて火口が設定され、計252ケースの溶岩流の流下シミュレーションが実施された。252ケースの内、富士吉田市内を溶岩流が流下するのは53ケースである。

本稿では、この53ケースの内、富士吉田市市街地を流下する3ケースを選定し分析対象とした。選定した溶岩流の噴火規模の内訳は、小規模噴火に伴う溶岩流を2ケース、中規模噴火に伴う溶岩流を1ケースとした。本稿ではそれぞれのケースを小規模噴火溶岩流①・②、中規模噴火溶岩流と呼ぶこととする。

小規模噴火溶岩流①は、53ケースの溶岩流の流下シミュレーションの内、富士吉田市に最も早く溶岩流が到達するケースである。本稿では、小規模噴火溶岩流①の比較対象として、溶岩流の流下

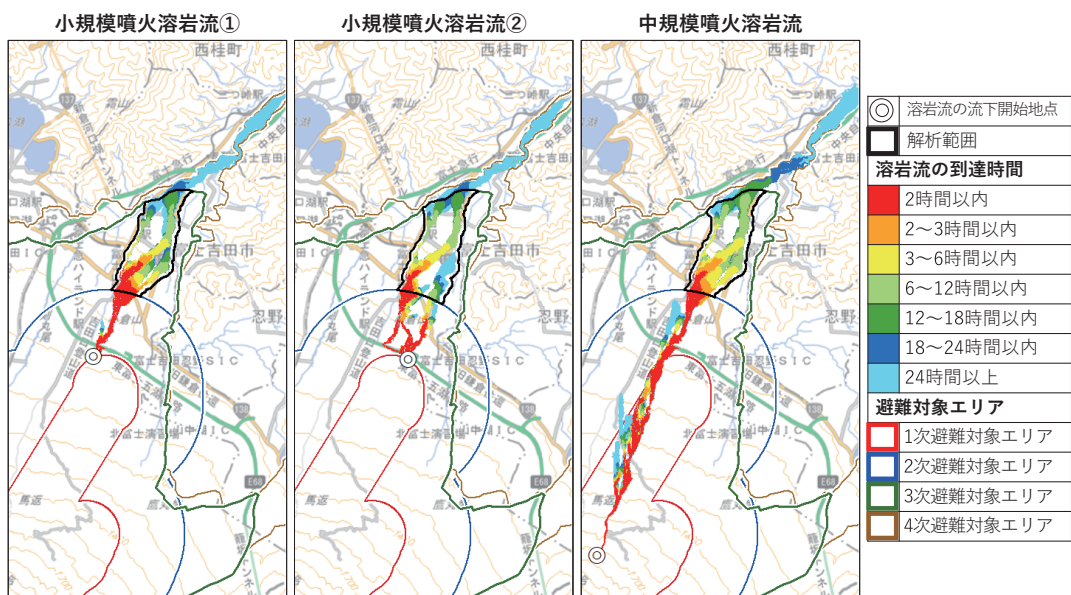


図1 分析対象とする溶岩流の流下範囲と解析対象範囲

範囲や市街地への到達時間が異なる2つの溶岩流の流下シミュレーションを選定した。小規模噴火溶岩流②は、溶岩流の流下シミュレーションの計算開始地点が、小規模噴火溶岩流①の計算開始地点と近い場所に位置するケースであるが、溶岩流の流下範囲が小規模噴火溶岩流①とは異なるケースである。中規模噴火溶岩流は、市街地内における溶岩流の流下範囲が、小規模噴火溶岩流①と概ね一致するが、市街地への到達時間が小規模噴火溶岩流①とは異なるケースである。

(2) 分析対象範囲の設定

富士山火山避難基本計画¹⁾では、避難対象者の個人属性と、避難対象者が位置する避難対象エリアによって避難開始のタイミングが異なる。したがって、分析対象とする避難対象者の個人属性と、分析で焦点を当てる避難対象エリアを整理する必要がある。先に結論を述べると、本稿では第3次避難対象エリアに居住する一般住民を分析の対象とする。その理由を以下に論じる。

前述の通り、富士山火山避難基本計画¹⁾では、避難対象者の個人属性と、避難対象者が位置する避難対象エリアによって避難開始のタイミングが規定される。まず個人属性は、「一般住民」「避難行動要支援者」「観光客・登山者・来域者（通勤・通学者等）（以下、観光客等）」の3種類の属性を設定している。

次に、避難対象エリアとは、富士山噴火により生じる火山現象からの避難が必要な範囲であり、第1次から第6次避難対象エリアまで設定されている。第1次避難対象エリアは想定火口範囲、第2次避難対象エリアは火砕流・火砕サージ、大きな噴石が到達する可能性のある範囲である。第1、2次避難対象エリアでは、すべての避難対象者が、富士山の噴火前に当該エリアから離れることが求められる。

第3～6次避難対象エリアは、溶岩流の到達時間により設定される。第3次避難対象エリアは、溶岩流が3時間以内、第4次避難対象エリアは、溶岩流が3～24時間以内、第5次避難対象エリアは、溶岩流が7日以内、第6次避難対象エリアは、溶岩流が最終的に到達する可能性のある範囲で定

義される。

第3～6次避難対象エリアは、避難対象者の個人属性によって避難開始のタイミングが異なる。観光客等及び避難行動要支援者の場合、第3、4次避難対象エリアでは噴火前、第5、6次避難対象エリアでは、溶岩流や降灰の可能性が生じた時点で避難開始となる。避難に時間を要する避難行動要支援者は噴火が発生する前の事前避難が求められる。また観光客等についても、一般住民や避難行動要支援者と移動のタイミングが重ならないように噴火前（噴火警戒レベル1～3）の段階で帰宅を呼び掛けることとしている。ただし、溶岩流の到達までに時間のある第5、6次避難対象エリアは、火口の位置や溶岩流の流下速度等の噴火の状況が判明してからの避難となる。

一般住民の避難の場合、第4～6次避難対象エリアでは溶岩流や降灰の可能性が生じた時点で避難開始となる。しかし、溶岩流が3時間以内に到達する可能性のある第3次避難対象エリアでは、噴火直後に徒歩による避難が求められる。つまり、第3次避難エリアに居住する一般住民の一部は、溶岩流の到達時間が早い地域でありながら、噴火後の避難が求められる地域であるため、他の避難対象エリアや他の避難対象者と比べて避難が切迫する可能性が高い。そのため、本稿では第3次避難対象エリアに居住する一般住民に焦点を当てて解析を行う。

3.2 溶岩流の曝露人口の算出

本稿では、図1に示す溶岩流の流下範囲から外側に100mのバッファーをかけた範囲を解析範囲と定義し、域内の人口を溶岩流の曝露人口として算出した。溶岩流は輻射熱により溶岩流の到達範囲だけではなく、その周囲にも影響を及ぼす。また、溶岩流の流下範囲には不確実性が伴う。これらの点を考慮しバッファーの範囲を100m^[2]と設定した。また、溶岩流が到達しなくても周囲を溶岩流に囲まれた場合、その地点は孤立する地域となり、避難が必要になる。そのため、周囲を溶岩流の流下範囲に囲まれ孤立する地域を解析範囲に含めた。

人口データの諸元は、2015年の国勢調査の250 m 人口メッシュである。本稿では、250 m 人口メッシュを25 m メッシュに分割し、分割した25 m メッシュに250 m メッシュの人口を均等配分し、25 m 人口メッシュを作成し、曝露人口の算出に用いた。本稿で用いた溶岩流の流下シミュレーションデータの空間解像度は20 m メッシュである。人口データと溶岩流の流下シミュレーションデータの空間解像度をできる限り近づけるために人口データの空間解像度を25 m メッシュとした。

また本稿では、25 m メッシュ人口データの重心点から最近傍の溶岩流の到達時間を25 m メッシュ人口データに付与し、噴火後の経過時間毎の溶岩流の曝露人口の変化を分析した^[3]。なお、富士山火山避難基本計画¹⁾では、住民に対して富士山が噴火する前に分散避難することが記載されているが、本稿では分散避難は考慮せず居住者全員が避難エリア内に残留しているものとして曝露人口を算出した。また、曝露人口の算出には ArcMap 10.8.1 を使用した。

3.3 溶岩流からの徒歩避難に対する安全性評価手法の構築

(1) 溶岩流からの徒歩避難の時間経過の模式化

本稿では、溶岩流からの徒歩避難の時間経過を模式化するために、室崎¹⁶⁾が提案する避難行動と

危険波及との時間的關係の模式図を応用した。図2に富士山噴火時の溶岩流からの避難の時間の流れを模式化した結果を示す。

まず富士山のような観測が充実した火山では、噴火の前兆的な活動を観測できる可能性が高い¹⁾。そのため、何かしらの噴火の前兆を観測することが想定される。噴火の前兆が観測されると、気象庁が噴火警戒レベルを4に引き上げる。そして、富士山火山避難基本計画に基づき、住民や観光客等に対して自主的な分散避難が呼びかけられ、必要に応じて避難が行われることが想定される。

そして、噴火の発生に伴い溶岩流が流下し始める。本稿では、避難対象者の居住地点に溶岩流が到達するまでの時間を危険波及時間と定義した。また噴火の発生後、住民が噴火を覚知するまでには一定の時間がかかることが想定される。本稿では、噴火を覚知するまでの時間を覚知時間と定義した。また噴火を覚知後、避難を開始するまでの時間を初期対応行動時間と定義した。覚知時間と初期対応行動時間の和が避難開始時間となる。

避難開始から避難完了するまでの時間が避難行動時間として定義される。溶岩流が居住地域まで流下すると、その速度は低下するとともに、流下範囲から離脱することで安全が確保可能であるため、本稿では溶岩流の到達範囲の外に脱出するまでを避難行動時間として定義した。

避難開始時間と避難行動時間の和を総避難時間

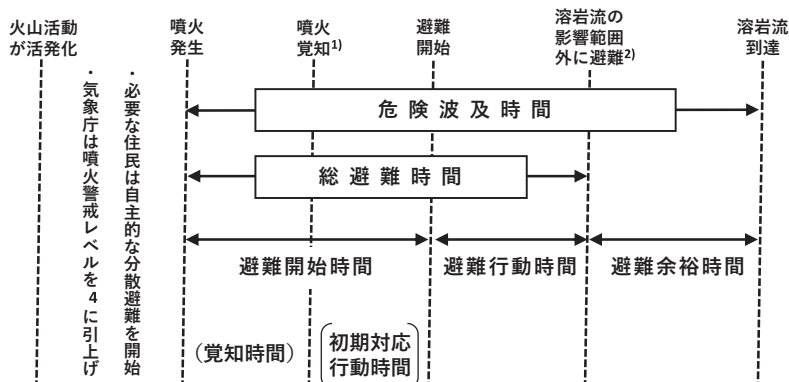


図2 富士山噴火時の溶岩流からの避難の時間の流れ

として定義し、総避難時間が危険波及時間内であれば安全と評価することができる。つまり、危険波及時間と総避難時間の差分である避難余裕時間が大きいほど避難の安全性が高いといえる。一方で、避難余裕時間が負の値である場合は、溶岩流が到達するまでに避難が間に合わない可能性がある。次項からは、提案した模式図に基づく避難シミュレーションを実施するために本稿で用いた条件を整理する。

なお、本稿で構築した溶岩流からの避難の時間経過は、富士山のような観測網が充実した火山を前提としている。したがって、本稿で提案する溶岩流からの避難の時間経過の考え方を他火山へ展開する場合は、対象火山の火山特性、観測網等から予想される噴火のシナリオを検討し、特に噴火警戒レベルの発表の流れの時間経過を見直す必要がある。

(2) 富士山の噴火シナリオ

本稿では、富士山が噴火に至るまでの経過について、富士山火山避難基本計画¹⁾で示される「噴火警戒レベルが順次引き上げられ噴火に至る基本的なパターン」を前提に分析を実施した。もちろん富士山が噴火に至るまでの経過は、本研究で前提としたもの以外にも、火山活動が急激に高まり噴火に至る場合や、噴火警戒レベルが順次引き上げられるものの噴火に至らない場合など多様なパターンが考えられる。それぞれのパターンに応じた分析が必要となるが、その分析は今後の課題としたい。

(3) 避難開始時間の設定

本稿では、避難対象者は自治体からの避難指示によって初めて富士山の噴火を覚知すると仮定した。そして、自治体からの避難指示の発令をきっかけに、避難準備をおこない、その後避難を開始するものとした。つまり、自治体が避難指示を発令するまでの時間が覚知時間、住民が避難準備をおこなう時間が初期対応行動時間に相当する。

避難シミュレーションでは、自治体が避難指示を発令するまでの時間が30分と60分の2つの場合で計算を実施した。また、住民が避難準備をおこなう時間は、東日本大震災の事例¹⁷⁾を参考に15分

と設定した。つまり、本稿では図2の避難開始時間を45分と75分の2つの場合で設定した。

なお、富士山では噴火口の発生が想定される範囲が広く、噴火が起こったとしても火口の位置の特定に時間を要することが想定される。噴火口の発生位置があらかじめ特定できる火山では、避難指示発令後の避難開始を前提とせず、噴火直後に住民が噴火を覚知し、初期対応行動を始めるということが考えられる。

(4) 避難行動時間の設定

避難行動時間の算出では、解析範囲を避難者が脱出するまでの時間として算出した。なお、避難者は徒歩で溶岩流から避難することとした。徒歩による移動速度は、東日本大震災の津波避難における「歩行困難な同行者がいた」場合や、「乳幼児や高齢者など歩行速度が遅い同行者がいた」場合を参考¹⁷⁾に、分速30mと設定した。なお設定した徒歩の移動速度は、噴火前の避難が求められる避難行動要支援者の避難が完了しておらず、一般住民と同行避難することで一般住民の避難速度も低下することを想定している。

図3に避難経路の算出方法の概要を示す。解析範囲を脱出するまでの経路長は、25mメッシュの重心点から解析範囲の外縁と道路網の交点への最短経路の経路長から求めた。なお、経路長は道路ネットワークを通過する距離として算出している。道路ネットワークデータは、ESRI ジャパンが発行するArcGIS Geo Suite 道路網2021を用いた。また、経路の算出にはArcGIS Network Analystを使用した。また避難経路の算出には、当該道路ネットワークデータ中の自動車専用道以外の道路網を使用した。

富士山火山避難基本計画¹⁾では、溶岩流からの避難は溶岩流の流下方向から法線方向に避難することを推奨している。そこで本稿では、25mメッシュの重心点から、解析範囲の外縁と道路網のすべての交点への最短経路を求め、求めた経路の中から溶岩流の流下方向から法線方向に避難しかつ経路長が最も短い経路を抽出し、避難行動時間を算出した。なお、経路の算出に使用した25mメッシュの重心点は、曝露人口の算出で用いた25m

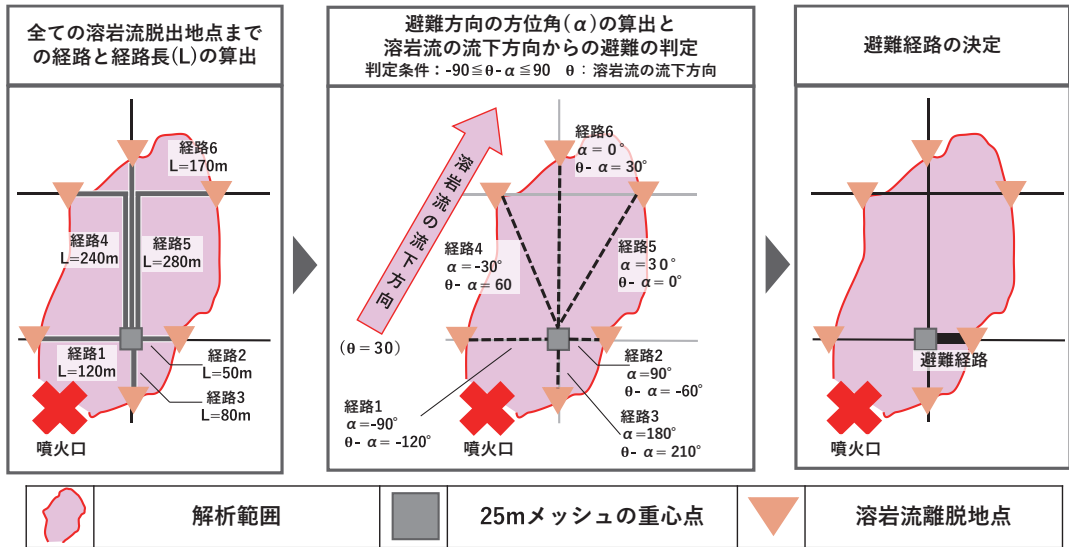


図3 避難経路の算出方法の概要

表1 方位角の定義

方位	角度
北	337.5度以上360度以下 または 0度以上22.5度未満
北東	22.5度以上67.5度未満
東	67.5度以上112.5度未満
南東	112.5度以上157.5度未満
南	157.5度以上202.5度未満
南西	202.5度以上247.5度未満
西	247.5度以上292.5度未満
北西	292.5度以上337.5度未満

人口メッシュと同じデータを使用した。

溶岩流の流下方向から法線方向へ避難しているか否かの判定は、溶岩流の流下方向の方位角(表1)と、25 mメッシュの重心と溶岩流のバッファーエリアと道路網の交点を結んだ線分の方位角の差分が、-90度から90度の範囲にあるか否かで判定した。溶岩流の流下方向は、分析対象とした溶岩流の流下範囲の100 mバッファーエリアの中心線の方位角として求めた。

なお他火山で、本稿の提案する避難経路算出手法を実施する場合、経路算出のための諸条件を対象火山に適した条件へと変更する必要がある。バッファーエリアの決定方法の例として、津波避

難に係る既往研究¹⁸⁾では、標高や河川、湖沼の境界などの地域の地理条件から設定する方法や、道路、町丁目境界などの人工物や過去の記録等から設定する方法が挙げられている。また、避難方向について、本稿では溶岩流からの流下方向から法線方向へ避難する条件を用いたが、周囲の地形や道路、人口集積等の諸条件を勘案して、避難方向を決定する必要がある。例えば周囲を山に囲まれた谷地形の場所においては避難方向が限定される場合があり、必ずしも溶岩流から法線方向へ逃げるのが最適とは限らない場合もあると考えられる。

(5) 溶岩流からの徒歩避難の安全性の評価指標

本稿では、溶岩流からの徒歩避難の時間経過の模式図と諸条件に基づき、溶岩流からの避難シミュレーションをおこない、避難完了者と避難困難者を算出した。

避難完了者は、溶岩流が居住地に到達する前に溶岩流の到達範囲外に脱出できる者として定義した。本稿では、居住地の避難余裕時間が正の住民が避難完了者となる。一方で、避難困難者は、溶岩流が居住地に到達する前に溶岩流の到達範囲外に脱出できない者、つまり居住地の避難余裕時間が負の値の住民を避難困難者として定義した。

避難完了者、避難困難者の算出には曝露人口の算出で使用した25 m 人口メッシュを使用した。25 m 人口メッシュには、当該メッシュの人口と溶岩流の到達時間が格納されている。そのため、前項で設定した避難行動時間と避難開始時間からメッシュ毎の総避難時間を算出すれば、溶岩流の到達時間と総避難時間の差分から避難余裕時間が算出できる。求めた避難余裕時間から、25 m メッシュ単位で避難完了者と避難困難者を求め、噴火後の時間経過毎の累積避難完了者と累積避難困難者を求めると共に避難余裕時間の空間分布を確認した。また、法線方向への避難経路探索の妥当性を確認するために、避難方向を可視化した。

4. 分析結果

4.1 溶岩流の曝露人口の算出

図4に溶岩流に対する累積曝露人口の時間変化を示す。すべてのケースで、噴火から72時間経過した時点での第3次避難対象エリア内の溶岩流曝露人口が約11,000人となる結果であった。噴火から24時間経過した時点での曝露人口は、中規模噴火溶岩流のケースが最も多く、約9,800人であった。一方で、噴火から3時間経過した時点での曝露人口は、小規模噴火溶岩流①のケースが最も多く、約2,000人であった。

以上の結果から、噴火のケースによって溶岩流に対する曝露人口が多くなる時間が異なることが示された。特に富士吉田市街地への溶岩流の到達時間が最も早い小規模噴火溶岩流①のケースでは、

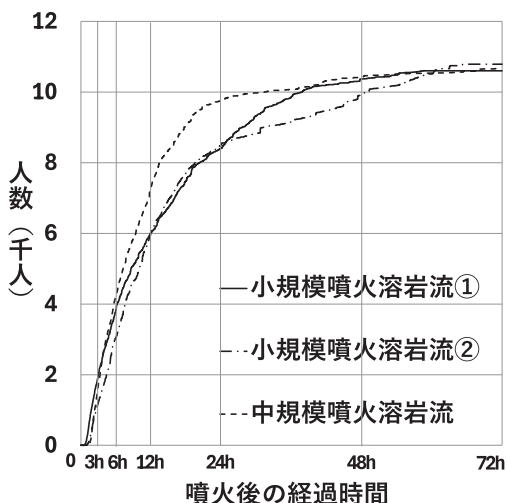


図4 溶岩流に対する累積曝露人口の時間変化

噴火直後に曝露人口が多くなることが示された。

4.2 溶岩流からの徒歩避難の安全性の評価

(1) 避難方向の可視化

図5に溶岩流からの避難方向を可視化した結果を示す。すべてのケースで、北東方向に流下する溶岩流に対して直交方向の北西もしくは、東方向に避難する経路が選択された。ただし、溶岩流の外縁部では流下方向と同じ方角の経路が選択されている箇所も存在した。これらの結果から、本稿で設定した避難方向の制約により、富士山火山避難基本計画で推奨する溶岩流からの避難方法を概ね再現できたといえる。

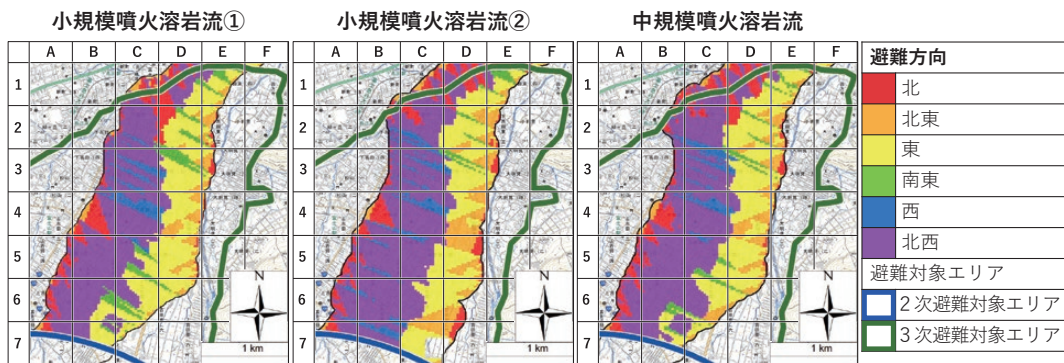


図5 溶岩流からの避難方向を可視化

また、図5のB6の地域を見ると、小規模噴火溶岩流①と中規模噴火溶岩流では、東もしくは南東方向に避難する必要のある地域が一部存在するが、小規模噴火溶岩流②では北西方向の避難先が選択されている。この結果から、溶岩流の流下状況によっては、最短の避難方向が真逆になる地域があることが示された。

(2) 累積避難完了者と累積避難困難者の時間推移

図6に累積避難完了者数と累積避難困難者数の噴火後の時間経過毎の推移を示す。小規模噴火溶岩流①の避難開始時間45分のグラフに着目すると、避難開始時間である45分より前に累積避難困難者数が上昇した。この結果から、小規模噴火溶岩流①のケースの場合、避難開始時間が噴火後45分では、避難開始よりも前に溶岩流が居住地に到達し避難が間に合わない住民がいることが示された。また、累積避難困難者数は、噴火後約80分経過するまで上昇する結果であった。他方で、避難開始時間以降は避難完了者も上昇する結果であった。

これらの結果から、避難開始時間が噴火後45分の場合、溶岩流が噴火後80分で到達する範囲の一部の住民の避難が間に合わない可能性があることが示された。そして、累積避難困難者数は、噴火後80分以降約200人の値で水平に推移していることから、このケースでの避難困難人口は約200人であることが示された。一方で、小規模噴火溶岩流②や中規模噴火溶岩流のケースでは、避難開始時間が45分の場合避難困難者が0人となる結果であった。

避難開始時間が75分の場合に着目すると、すべてのケースで避難困難者が発生する結果であった。特に、小規模噴火溶岩流①で避難困難者数が約800人となり、分析対象とした溶岩流の流下ケースの中で最も多い結果であった。また、避難開始時間が45分の場合、小規模噴火溶岩流①のケースでは避難困難者数が約200人であったことから、避難開始時間が30分延びると、避難困難者数が4倍に増えることが示された。

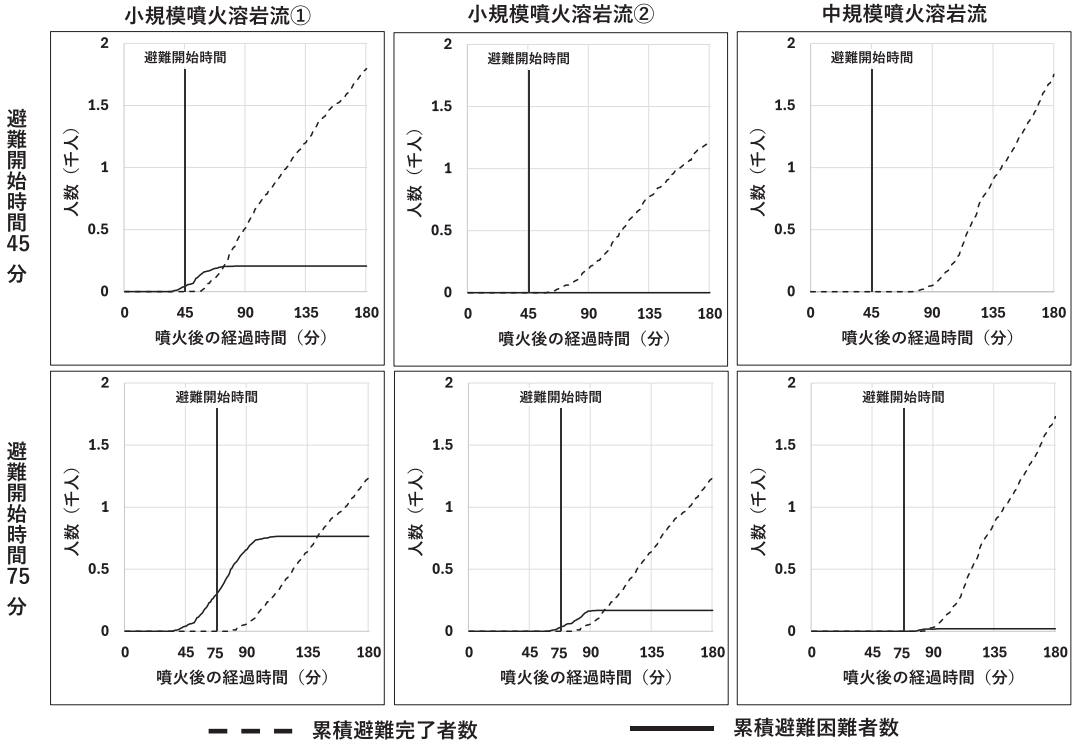


図6 避難困難人口の時間推移

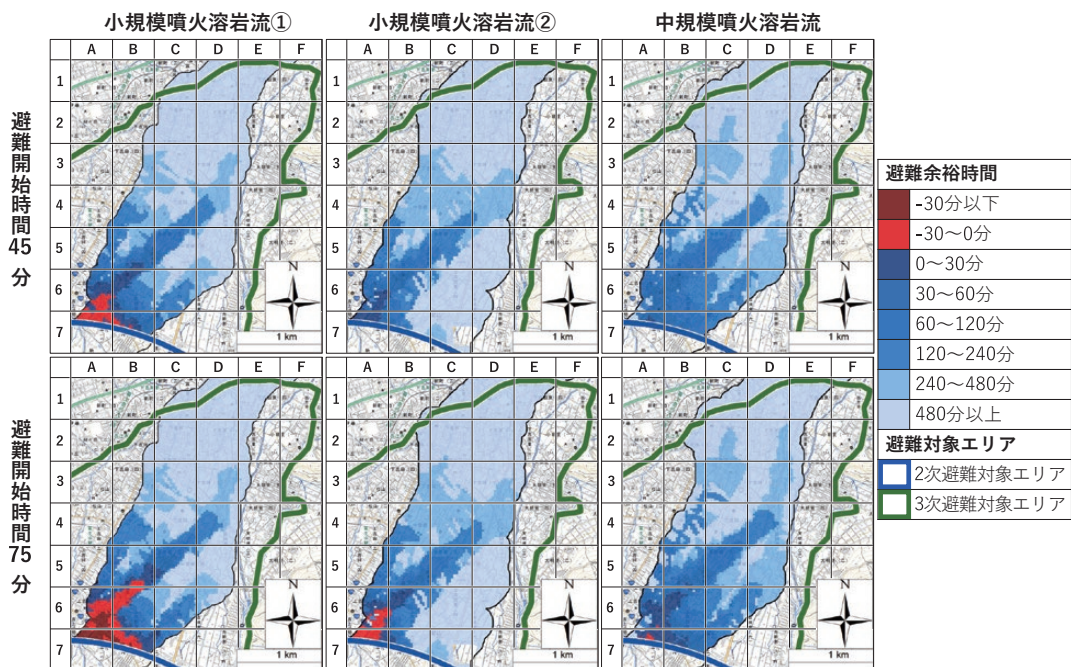


図7 避難困難者の空間分布

図7に各ケースの避難困難者が発生した地点の空間分布を示す。避難困難者が発生したすべてのケースで、第2次避難対象エリアの近傍、特にA6、A7に避難困難者が共通して分布する結果であった。

5. 考察

5.1 溶岩流からの避難の特徴

溶岩流からの避難の特徴として、溶岩流の流下方向から法線方向への避難が推奨されることが挙げられる。図5では、溶岩流のケースによっては避難の方向が真逆の方角へ避難しなければならない場所があることが確認できた。このような地域の住民は、溶岩流のケースによって避難する方向を変えることが必要になると考えられる。しかし、溶岩流のケースごとに避難先を変更することは、避難計画が複雑になる可能性がある。そのため、1つの方向の避難ですべての溶岩流に対して余裕をもって避難できると判断できた場合は、1つの方向に避難を絞ることも有効であると考えられる。そのためには、避難先での最短経路だけではなく、

2番目、3番目に短い経路も避難経路として検討する必要がある。なお、本稿では最短経路のみを解析対象としているため、2番目、3番目に短い経路の安全性評価と避難方向の検討については今後の課題としたい。

5.2 溶岩流から安全に避難するために

富士山火山避難基本計画¹⁾では、大きな噴石や火砕流のような、移動速度が時速数十km～数百kmと高速である火山現象に対しては、噴火が発生する前の避難を求めている。一方、溶岩流については、緩斜面での溶岩流の移動速度が時速数kmであるため、噴火後の徒歩避難の方針が示されており、噴火前の避難の必要性は定められていない。しかし、今回の分析の結果、住民の避難開始時間が噴火から75分後である場合、本研究で選定したすべての溶岩流のケースで避難困難者が発生することが示された。特に小規模噴火溶岩流①のケースで避難困難者数が最も多く約800人となる結果であった。

小規模噴火溶岩流①のケースで、多くの避難困

難者が発生した要因として、小規模噴火溶岩流①のケースの溶岩流の計算開始地点が富士吉田市街地に近いことが挙げられる。小規模噴火溶岩流①のケースの溶岩流の計算開始地点は、令和3年(2021年)3月に改定された富士山火山ハザードマップで、新規に追加された「雁ノ穴噴出物の火口」¹⁹⁾に基づき設定されている。溶岩流の計算開始地点が富士吉田市街地に近いことで、市街地への溶岩流の到達時間が早くなるため、避難困難者が発生したと考えられる。

一方で、避難開始時間が45分の場合は、75分のケースに比べて避難困難者が少なくなり、ケースによっては避難困難者が発生しない場合もあった。このことから、溶岩流から徒歩による安全な避難を実施するためには、避難開始時間を短縮することが重要であることが示された。

住民の避難開始時間を短縮するためには、噴火発生後に必要なエリアに、迅速に避難指示を発令することが必要となる。そのためには、噴火口の位置をいち早く特定する必要がある、そのための技術開発が求められる。また、避難指示を迅速に発令したとしても、住民が素早く避難を開始しなければ意味がない。住民に対する非常時持出し品の用意等の普及啓発や避難訓練の実施が重要となると考えられる。

一方で、避難開始時間を短縮するだけでなく、地域特性に応じた避難計画を立案することで対策を実施する方法も考えられる。例えば、富士山火山避難基本計画では噴火前の避難は、第1、2次避難対象エリアのみに求められているが、地域独自の避難計画として、第3次避難対象エリアの一部で噴火前の避難を実施する等の対策が考えられる。第3次避難対象エリアの事前避難の検討に際しては、本研究の成果を活用することができるだろう。なお富士北麓地域では現在、避難エリアの細分化の議論がはじまっており、モデル地区を選定し溶岩流の特性や人口規模、地形条件を考慮した避難エリアの検討が進められている²⁰⁾。

5.3 溶岩流からの徒歩避難の安全性評価手法の改良に向けて

(1) 避難対象者の個人属性の考慮

まず、本稿では富士山火山避難基本計画で規定する個人属性のうち、一般住民のみを対象に分析を実施した。

しかし、避難対象者の個人属性によって避難行動には差異が生じる。したがって、本稿で提案した溶岩流からの徒歩避難の安全評価手法を発展させるには、個人属性を考慮することが必要になる。例えば、年代別、集団歩行等の移動形態別に徒歩避難速度を変化させることや、個人属性毎に避難経路算出手法を変えるといった改良が必要となる。また、個人属性を考慮するための人口データの改良も必要となる。

(2) 溶岩流の流下範囲のバッファの設定

本稿では、輻射熱による影響と流下範囲の不確実性を理由として、溶岩流の流下範囲から外側に100mのバッファを設けて解析範囲を設定した。本稿では火山の専門家の助言に基づき100mという値を設定したが、溶岩流のバッファの設定量次第で、溶岩流の曝露人口の分析結果は大きく変動する。したがって、バッファを設けない場合や、バッファの値を変動させた場合の曝露人口の変動の検討が必要であると考えられる。

(3) 避難方向の設定

本稿では、富士山火山避難基本計画において推奨される「溶岩流の流下方向から法線方向への避難」を再現するために、方位角に着目した制約条件を設けた。ただし、本稿は厳密に「溶岩流の流下方向から法線方向への避難」を再現するのではなく、溶岩流の流下方向から水平方向への避難も許容する設定となっている。その理由として、避難方向を制限するあまり、距離の長い経路を選択する可能性があるためである。

溶岩流の流下方向から法線方向への避難が推奨される背景には、最も早く安全な場所へ避難することが望ましいという主張があると考えられる。それを踏まえると、例えば流下する溶岩流に向かって避難するが、短距離で溶岩流の影響範囲を脱出できる経路が存在する可能性も否定できない。

したがって、避難方向を制限する場合だけではなく、全方位に避難可能とした場合についても検討の余地が残されていると考えられる。

(4) 避難経路の評価方法

本稿では、最短経路に着目し避難経路を算出した。しかし、噴火の際の火山灰等の影響によって、想定していた最短経路が通行できない可能性も考えられる。したがって、2番目、3番目に短い経路も分析対象として追加で分析を実施する必要があると考えられる。

また2番目、3番目に短い経路を分析対象に含めることで、溶岩流のケースごとに異なる方向へ避難する必要のあった地点の避難方向が一致する可能性があり、避難計画の検討がより容易になる可能性が考えられる。

6. 結論

本稿では、富士山噴火時の溶岩流からの徒歩避難に関する基礎的検討として、1. 噴火後の時間経過毎の溶岩流の曝露人口の試算、2. 溶岩流からの徒歩避難の安全性評価手法の構築、3. 構築した評価手法に基づく避難シミュレーションの実施、以上3点の分析を実施した。これらの分析結果に基づき溶岩流から徒歩で安全に避難するための方策について考察した。

研究対象地域は山梨県富士吉田市である。本稿では富士吉田市を流下する溶岩流の中でも、特に市街地を流下する噴火の規模や計算開始地点の異なる3ケースの溶岩流を分析対象とした。

曝露人口の試算の結果、すべてのケースで噴火から3日経過した時点での曝露人口は、約11,000人となった。しかし、噴火から3時間経過した時点での曝露人口はケースによりばらつきがあり、特に富士吉田市街地に最も早く溶岩流が到達するケースで曝露人口が最も多く約2,000人となった。

溶岩流からの徒歩避難の安全性評価手法の構築では、既往研究と富士山火山避難基本計画を参考に、溶岩流からの徒歩避難に係る時間経過の模式図と避難経路探索手法を開発した。作成した模式図と避難経路探索手法に基づき、避難シミュレーションを行い、溶岩流からの徒歩避難の安全性を

評価した。なお、避難シミュレーションでは、3つの溶岩流のケースについて、住民の避難開始時間が45分と75分の2つの場合の計6パターン実施した。

避難シミュレーションの結果、避難開始時間が75分の場合、すべてのケースで避難困難者が発生した。特に、溶岩流が富士吉田市街地に最も早く到達するケースにおいて避難困難人口が約800人と最も多くなる結果であった。一方で、避難開始時間が45分の場合は、75分のケースに比べて避難困難者が少なくなり、ケースによっては避難困難者が発生しない場合もあった。このことから、溶岩流から徒歩による安全な避難を実施するためには、避難開始時間を短縮することが重要であることが示された。

本稿では富士山で想定される数ある溶岩流流下シミュレーションの中でも富士吉田市街地を流下する3ケースのみを取り扱っている。他の溶岩流シナリオについても同様に徒歩避難の安全評価性評価を行う必要がある。また、富士山では溶岩流の他にも降灰、融雪型火山泥流など多様な火山現象が想定され、その火山現象が複合的に発生することが想定される。複数の火山現象を考慮した避難の安全性評価についても今後の課題としたい。

謝辞

本稿を査読いただき、有益な助言をいただいた匿名の査読者に対して深謝申し上げます。

補注

- [1] 溶岩流ドリルマップとは、富士山の噴火の規模毎に発生位置や流下方向、溶岩の噴出量等様々な条件下での数値計算により求めた溶岩流の到達範囲をシミュレーションしたものである。
- [2] 火山防災の専門家である、山梨県富士山科学研究所の吉本充宏研究管理幹から助言を得てバッファ範囲の値を設定した。
- [3] 人口データと溶岩流の流下シミュレーションデータの空間解像度が概ね一致していることから、本稿では、人口データの重心点の最近傍の溶岩流の到達時間を当該メッシュの溶岩

流到達時間として採用した。もちろん、人口データ内に複数の溶岩流の流下シミュレーションデータのメッシュが内包されており、それらの最小値や平均値から溶岩流の到達時間を求める手法も考えられる。しかし、データ同士の空間解像度が概ね一致しており、人口データに内包される溶岩流の流下シミュレーションデータの数も限られることから、本稿では本手法を用いた。

参考文献

- 1) 富士山火山防災対策協議会：富士山火山避難基本計画，2023年3月。
- 2) 山梨県 HP：富士山ハザードマップ(令和3年3月改定)，<https://www.pref.yamanashi.jp/kazan/hazardmap.html>，2023年3月14日閲覧。
- 3) 富士山火山防災対策協議会：富士山火山広域避難基本計画，2014年2月。
- 4) 桑沢敬行・片田敏孝・及川康・児玉真：洪水を対象とした災害総合シナリオ・シミュレータの開発とその防災教育への適用，土木学会論文集 D，64巻，3号，pp. 354-366，2008。
- 5) 柿本竜治・山田文彦・田尻亮司・原田翔太：リスクコミュニケーションを通じた実践的水害避難訓練に基づく避難行動シミュレータの構築，土木計画学研究・論文集，26巻，pp. 113-122，2009。
- 6) 畑山満則・湯川誠太郎・枝廣篤・多々納裕一：エージェントベース広域避難シミュレーションシステムの開発-滋賀県姉川・高時川下流域を対象とした事例研究-，土木計画学研究・論文集，27巻，pp. 323-330，2010。
- 7) 大上俊之・山本祐輔・豊田政史・小山茂：マルチエージェントモデルを用いた河川氾濫時の避難行動シミュレーション，土木学会論文集 F6(安全問題)，70巻，2号，pp. I_123-I_128，2014。
- 8) 蒲倉光・梅本通孝：大規模河川氾濫による浸水想定区域からの脱出を一義的目標とした避難計画の効果に関する基礎的研究，地域安全学会論文集，2020，37巻，pp. 249-258。
- 9) 今村文彦・鈴木介・谷口将彦：津波避難数値シミュレーション法の開発と北海道奥尻島青苗地区への適用，自然災害科学，Vol. 20，No. 2，pp. 183-195，2001。
- 10) 鈴木介・今村文彦：住民意識・行動を考慮した津波避難シミュレーションモデル，自然災害科学，Vol. 23，No. 4，pp. 521-538，2005。
- 11) 桑沢敬行・片田敏孝：震災状況下における津波被害の発生構造に関するシミュレーション分析，土木学会論文集 D，64巻，3号，pp. 380-390，2008。
- 12) 佐藤史弥・谷本真佑・南正昭：避難場所の累積収容人数を考慮した津波避難計画に関する研究，土木学会論文集 D3(土木計画学)，74巻，5号，pp. I_315-I_325，2018。
- 13) 河野裕希・宮城洋介・岩井一朗：火山ハザードマップを用いた全国35火山における火山噴火ハザード曝露評価，防災科学技術研究所研究資料(483)，pp. 1-16，2022。
- 14) 藤井涼・下村光弘・中辻隆：樽前山噴火時における自家用車による避難シミュレーションについて，土木計画学研究・講演集，Vol. 38(CD-ROM)，2008。
- 15) 藤田英輔：溶岩流からの避難シミュレーション，防災科研令和4年度成果発表会，2023年2月。
- 16) 室崎益輝：現代建築学 建築防災・安全，p. 128，鹿島出版会，1993.4.30。
- 17) 国土交通省：津波避難を想定した避難路，避難施設の配置 及び避難誘導について(第3版)，2013年4月。
- 18) 福谷陽・倉橋和也・志田一樹・鳥袋宗和：津波ハザードマップに記載されるバッファゾーンの現状と課題，地域安全学会論文集，35巻，pp. 173-179，2019。
- 19) 富士山火山防災対策協議会：富士山ハザードマップ(改定版) 検討委員会報告書，2021年3月。
- 20) 山梨日日新聞：富士噴火 避難エリア最小化探る，さんち Eye 山梨日日新聞電子版，2024年5月27日。

(投稿受理：2024年4月5日
訂正稿受理：2024年6月28日)

要 旨

本稿では、富士山噴火に伴う溶岩流からの徒歩避難に関する基礎的検討として、1. 噴火後の時間経過毎の溶岩流の曝露人口の試算、2. 溶岩流からの徒歩避難の安全性評価手法の構築、3. 構築した評価手法に基づく避難シミュレーションを行った。これらの分析結果に基づき溶岩流から徒歩で安全に避難するための方策について考察した。分析の結果、噴火から3時間経過した時点での曝露人口は、最大で約2,000人となった。また、避難困難人口は避難開始時間が75分の場合に、最大で約800人発生する結果となった。一方で、避難開始時間が45分の場合は、75分のケースに比べて避難困難者が少なくなった。このことから、溶岩流から徒歩による安全な避難を実施するためには、避難開始時間を短縮することが重要であることが示された。