九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

避難所要時間に基づく災害リスク評価と避難経路探索システムの開発

孟, 楽

https://hdl.handle.net/2324/7443438

出版情報：Kyushu University, 2025, 博士（工学）, 課程博士
バージョン：
権利関係：

KYUSHU UNIVERSITY

避難所要時間に基づく災害リスク評価と避難経路探索システムの開発

2026 年 1 月

孟　楽

避難所要時間に基づく災害リスク評価と避難経路探索システムの開発

2026 年 1 月



九州大学大学院

工学府土木工学専攻

孟　楽

MENG LE

論文調査

論文提出者　　孟　楽

論文題名　　避難所要時間に基づく災害リスク評価

と避難経路探索システムの開発

論文調査委員

主査　九州大学　　教授　三谷　泰浩

＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿印

副査　九州大学　　教授　浅井　光輝

＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿印

副査　九州大学　准教授　杉山　高志

＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿印

避難所要時間に基づく災害リスク評価と避難経路探索システムの開発

目次

第１章　緒言 1
１.１　背景 1
１.１.１ 豪雨による被害....1
１.１.２ 豪雨災害に対する対策....2
１.２　避難対策の現状とその課題....3
１.３　研究の目的....4
１.４　論文の構成....5
参考文献 6
第２章　過去の災害事例と先行研究の課題整理....9
２.１　はじめに....9
２.２　避難行動および避難情報発令に関する基礎的枠組み....9
２.２.１ 住民がとるべき避難行動とその分類....10
２.２.２ 自治体が発令する避難情報とその種類....11
２.２.３ ガイドラインに基づく避難情報の発令基準....12
２.２.４ 避難情報の発令判断に資する情報....16
２.２.５ 近年における避難情報の発令状況と避難の現状....19
２.３　避難に関連する既往研究....21
２.３.１ 所要時間の推定に関する研究....21
２.３.２ 災害リスク評価に関する研究....23
２.３.３ 既存の経路探索手法とその課題....26
２.４　まとめ 27
参考文献 28
第３章　避難所要時間予測手法の開発....33
３.１　はじめに....33
３.２　研究の対象地域....35

３.２.１ 対象地域の概要.....35
３.３　異なる機械学習手法に基づくベースモデルの構築および比較.....43
３.３.１ 機械学習手法の概要.....43
３.３.２ ベースモデルの作成手順.....45
３.３.３ 対象地域における予測結果.....54
３.３.４ LightGBM によるモデル構築と性能比較.....55
３.４　地域内の特性を考慮した予測手法の提案.....56
３.４.１ 提案手法の概要.....56
３.４.２ 対象地域におけるエリアモデルの構築結果.....58
３.４.３ ベースモデルとの比較による提案手法の妥当性評価.....62
３.５　エリア手法に基づく汎化予測モデルの構築.....63
３.５.１ 対象地域に対するクラスタ分析.....64
３.５.２ クラスタ別汎化モデルの構築と学習地域における評価.....66
３.５.３ 汎化モデルの未学習地域への適用と評価.....68
３.６　まとめ.....70
参考文献.....72
第４章　避難所要時間に基づく災害リスク評価と避難判断への適用.....79
４.１　はじめに.....79
４.２　浸水時における避難所要時間の算出方法.....79
４.２.１ 自動車避難時の所要時間計算.....79
４.２.２ 徒歩避難時の所要時間計算.....81
４.３　避難リスク評価手法の提案.....82
４.３.１ 避難リスク評価式の構築.....82
４.３.２ 自治体向け避難情報発令タイムリミットの設定.....85
４.４　ケーススタディによるリスク評価手法の適用性検証.....86
４.４.１ 対象地域の概要.....86
４.４.２ 洪水予測データの設定.....88
４.４.３ 浸水の影響を考慮した避難経路の作成.....89
４.４.４ 避難所要時間および災害リスクの評価結果.....91

４.４.５ 避難情報発令タイムリミットの算出.....98
４.５　まとめ.....100
参考文献.....103
第５章　災害時避難経路探索システムの開発.....107
５.１　はじめに.....107
５.２　システムの開発方針.....108
５.３　システムの設計.....109
５.３.１ システムの全体像.....109
５.３.２ 使用するデータセット.....110
５.３.３ 避難経路探索機能の実装.....112
５.３.４ 避難所要時間算出機能の実装.....114
５.３.５ ユーザーインターフェースの設計.....115
５.４　システムの実装と検証.....118
５.４.１ 平常時における動作検証.....118
５.４.２ 浸水時における動作検証.....124
５.５　まとめ.....127
参考文献.....130
第６章　結言.....133
謝辞.....137

第１章 緒言

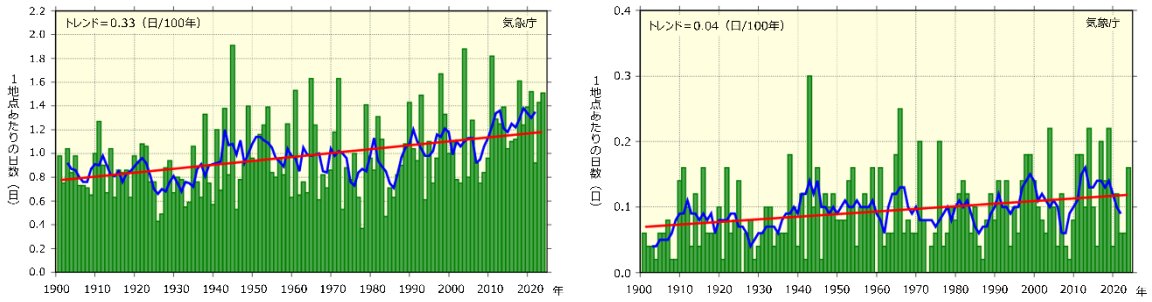
１．１ 背景

１．１．１ 豪雨による被害

近年，世界各地で極端な気象現象が頻発し，人的・経済的被害の増加が報告されている[1,2]。こうした極端現象の発生頻度や強度の増加は，地球温暖化に伴う世界的な気温上昇と関連しているとされ，中でも大雨の発生が顕著になっていることが観測されている[3-5]。日本においても同様の変化が確認されており，気象庁が全国の主要観測地点で得た 1901 年から 2024 年までの降水量データを分析した結果，**図 1-1** に示すように，日降水量 100mm 以上および 200mm 以上の大雨の日数がいずれも増加していることが明らかとなっている[6]。また，令和 6 年の統計によると，7 月から 9 月にかけて，1 時間降水量および 24 時間降水量で観測史上 1 位の記録を更新した地点が数十箇所に上っている[7]。

こうした変化により，災害発生リスクも高まっている。近年，日本では大雨に起因する河川の氾濫や土砂災害などの発生頻度が増加し，それに伴い被害の規模も拡大している。令和 4 年の水害統計によると，過去 10 年間で全国の約 97% の市町村において水害や土砂災害が確認されている。また，46.3% の市町村では，同期間に 10 回以上の災害が発生している。さらに，平成 30 年から令和 4 年までの 5 年間の水害被害額の平均は 1 兆 440 億円に達し，前の 5 年間と比べて約 2 倍に増加している[8]。

これらの災害の中でも，日本では河川の氾濫による洪水被害が特に注目される。日本は国土の約 7 割が山地や丘陵地で構成されており，一方で，全国土のわずか約 1 割を占める沖積平野部に人口や資産が高度に集中している[9]。そのため，河川が氾濫した場合，被害が広範囲かつ甚大となる傾向がある。**図 1-2** から，過去 20 年間における水害による資産被害額の構成比をみると，河川の氾濫に起因する被害の割合が高い水準にあり，多くの年で全体の半数を超えていることが分かる[10]。特に，平成 27 年および令和 2 年には，被害額の割合が 70%を上回っており，これら年の上昇は，平成 27 年 9 月関東・東北豪雨および令和 2 年 7 月豪雨の影響によるものと考えられる[11,12]。経済的損失は甚大であるものの，災害後の復旧・復興により時間の経過とともに回復が進む場合も多い[13]。



(a) 日降水量 100mm 以上　　(b) 日降水量 200mm 以上

図 1-1 日降水量 100mm 以上及び 200mm 以上の年間日数の経年変化（1901~2024 年）[6]

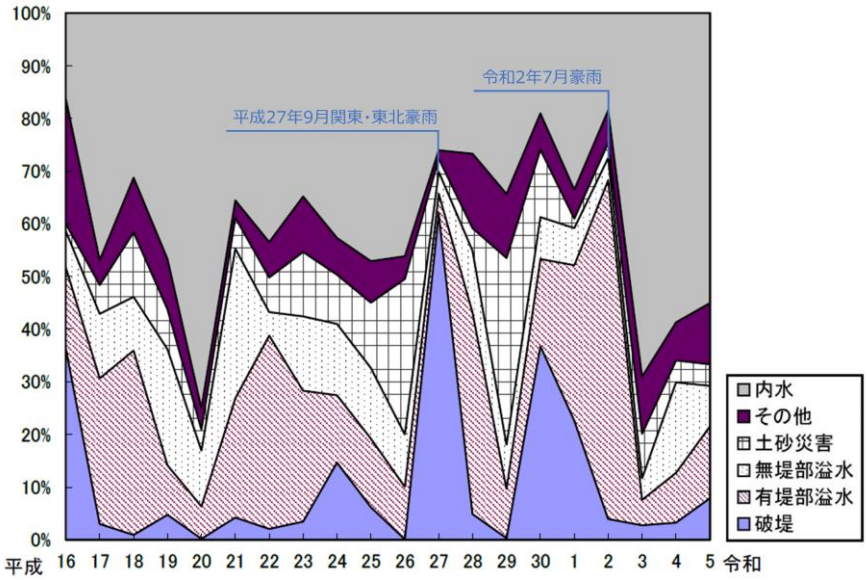


図 1-2 過去 20 年間水害原因別被害構成比の推移[10]

一方で，人的被害は失われた命が戻らないという点でより深刻な課題と位置づけられている。豪雨災害による死者・行方不明者は，平成 30 年 7 月豪雨で 245 名，令和元年東日本台風で 107 名，令和 2 年 7 月豪雨で 84 名が確認されている[14,15]。これらの事例を踏まえ，豪雨時における河川氾濫に伴う人的被害の軽減に向けた取り組みが求められている。

１．１．２ 豪雨災害に対する対策

豪雨などの極端気象は避けがたいものであるが，河川整備をはじめとする各種の防災対策をあらかじめ講じておくことで，洪水の発生をある程度抑えることができる[16]。さらに，洪水の発生を完全に防ぐことが困難な場合においても，危険性の高い地域から一時的に退避することで，人的被害を最小限にとどめることが可能となる。

その中で，前者で述べたように，物理的な構造物によって災害を防止・軽減する手法は，「ハード対策」と呼ばれている[17]。日本ではこれまでに，大雨による洪水を防ぐため，全国各地で大規模なダムや堤防などの整備が進められてきた。その効果として，平成 30 年 7 月豪雨をはじめとする近年の豪雨災害においては，インフラが整備され，かつ適切に維持管理されていた地域では被害が比較的小さく抑えられていた一方で，整備が不十分であった地域では甚大な被害が多数報告されている[18]。

しかし，施設の能力を超えるような規模のハザードに対しては，被害の発生を完全に防ぐことは難しい。過去には，平成 27 年 9 月の関東・東北豪雨において，鬼怒川の堤防が決壊し，茨城県常総市では広範囲にわたる浸水被害が発生した。これにより，浸水の解消や原状回復に多額の費用を要したほか，直接死者 2 名，災害関連死 12 名，負傷者 40 名以上の人的被害も生じた[19]。

したがって，ハード対策のみならず，気象警報の発令や河川水位の観測，住民の事前避難の促進といった「ソフト対策」との組み合わせにより，災害発生時における被害を最小限にとどめる取り組みが重要となる。

前述のとおり，洪水の発生が予測される場合には，その場にいる人々を事前に危険区域から避難させることが，人的被害の軽減に有効である。実際に洪水が発生したとしても，氾濫区域内に人がいなければ，人的被害は生じない。平成 30 年 7 月豪雨では，愛媛県大洲市の三善地区において浸水が発生したが，負傷者を含む人的被害は報告されなかった[20]。これは，発災当日に自治会長が迅速に避難情報を発令し，住民が速やかに浸水区域から避難したことによるものである。このように，適切な避難行動の実現は人的被害の軽減の鍵を握っており，その実効性を高めるために現在各地で多様なソフト対策が講じられている。

具体的には，発災前の平常時においては，ハザードマップの作成・配布や避難訓練などを通じて，住民の防災意識を高めるための取り組みが実施されている。災害の発生が切迫している段階では，河川水位のリアルタイム観測や大雨の進行予測，気象警報の発令などにより，自治体の防災担当者が災害の進行を把握し，いつ・どのエリアの住民に対して避難を促すべきかを判断できるよう支援が行われる。また，災害予測情報の共有や避難情報の発令により，住民自身が置かれている危険性を認識し，適切なタイミングで避難行動を開始できるよう支援が行われる。さらに，避難誘導や要配慮者への避難支援といった現場における対応も実施され，人的被害の防止を図るための重要な役割を果たしている。

１．２ 避難対策の現状とその課題

避難行動を支援する各種のソフト対策は一定の成果を上げている一方で，その実効性や運用面には依然として多くの課題が残されている。三善地区における成功事例が円滑に実現した背景には，避難情報を発令した自治会長が災害対応に豊富な経験を有していたことや，防災マップが整備されていたこと，さらに住民が避難マップの作成に主体的に関わっていたことなどがあり，防災意識の高さが地域全体に浸透していたことがうかがえる。しかしながら，このような条件がすべての地域で揃っているわけではなく，避難の実効性が十分に確保されていないケースも少なくない。とりわけ，自治体の避難判断の遅れや住民の避難率の低さが，人的被害の発生に繋がった事例が各地で報告されている。

災害発生時に，各自治体は内閣府が策定・改定した「避難情報に関するガイドライン」（以下，ガイドライン）に基づき，高齢者等避難および避難指示といった避難情報を発令している[21]。ガイドラインでは，防災気象情報や河川の水位，ダムの状況などの多様な情報をもとに災害の危険性を総合的に判断し，避難情報の発令に係る意思決定を行うことが求められている。しかし現状では，自治体の防災担当者がこれらの複雑かつ多様な情報から，どのタイミングでどのエリアに避難情報を発令すべきかを的確に判断することは難しく，定量的な指標が存在しないことから，最終的な判断は過去の災害対応経験に依存せ

ざるを得ないのが実情である。三善地区のように，豊富な経験を持つ自治会長が適切な判断を行った事例もあるが，多くの地域では経験の浅い担当者による的確な判断が困難であり，結果として人的被害が拡大した例も確認されている[22-24]。たとえば，平成 30 年 7 月豪雨時に愛媛県で発生した肱川の氾濫では，避難指示の発令が遅れ，多くの住民が逃げ遅れて犠牲となったことが指摘されている。

一方で，平成 29 年 7 月九州北部豪雨において，福岡県筑前町では事前に避難指示が発令されたにもかかわらず，住民の避難率は非常に低かったことが報告されている[25]。また，他の多くの災害事例においても，避難行動を実際に取る住民の割合が低いことや，避難の途中で危険に巻き込まれる事態が課題として指摘されている[26,27]。これは，住民が自らの災害リスクを正確に認識できていないことに加え，「どのルートで避難するか」や「どこに避難するか」などのような具体的な避難行動への備えが不十分であることが，円滑な避難を妨げる一因となると考えられる。

こうした課題を解決するためには，避難情報を発令する自治体と，実際に避難を行う住民の両方を支援する仕組みが求められている。まず，災害時において自治体が的確な避難判断を行うためには，危険区域にいるすべての住民が洪水ハザードに襲われる前に安全に避難できるよう，住民一人一人の避難所までの所要時間を正確に推定することが不可欠である。そのうえで，発令区域内の全員の安全を確保できる適切なタイミングで避難情報を発令することが求められる。一方で，住民の避難行動における課題に目を向けると，災害リスクを的確に認識し，危険区域をどのように回避して安全に避難を完了させるかを自ら判断できるよう支援することも重要である。

１．３ 研究の目的

前述の課題を踏まえ，本研究では，自治体の避難判断および住民の避難行動をそれぞれ支援する手法を提案する。

まず，自治体に対する避難判断支援として，住民一人一人の避難所要時間に着目し，それを予測する手法を開発する。さらに，予測された避難所要時間に基づき，避難リスクを評価する手法を構築し，自治体が避難情報の発令タイミングや対象範囲を的確に判断できるよう支援する。

一方で，住民の避難行動を支援するにあたっては，災害リスクの認識を高めることと，安全な避難行動の遂行を促す仕組みの構築という二つの側面から取り組みを進める。まず，前述の避難リスク評価手法を用いて，刻々と変化する洪水ハザードのもとで各住民が直面するリスクを定量的に算出し，その結果を可視化して提示することで，危険への認識を高め，避難行動の意思決定を促す。次に，住民が現在地から安全な避難所への最短経路を迅速に把握できるよう，避難経路探索システムを開発する。そのうえで，リアルタイムの浸

水状況と組み合わせることで，浸水により通行が困難となる経路を的確に回避し，避難途中で被災することなく，安全に避難を完了できるよう支援する。

１．４ 論文の構成

本論文は，以下のように構成される。

本章では，研究の背景および目的について述べた。

第二章では，まず住民の避難行動および自治体が発令する避難情報に関する基礎的内容を整理する。その後，近年の災害事例の分析を通じて，自治体における発令判断の難しさや住民の避難率の低さといった課題を検討し，自治体の避難判断および住民の避難行動を支援する仕組みの必要性を示す。続いて，既往研究を検討することで，本研究で取り組むべき課題として，新たな避難所要時間予測手法および災害リスク評価手法の開発の必要性を整理する。併せて，既存の経路探索システムに見られる運用上の課題を踏まえ，本研究において災害時に適用可能な避難経路探索システムを構築する必要性を明らかにする。

第三章では，これまでに開発されてきた避難所要時間の予測手法を踏まえ，予測精度および計算効率の向上を図るために，より適切な機械学習手法を検討する。また，市街地エリアと農村部エリアそれぞれに対して個別にモデルを構築するエリア単位の避難所要時間予測手法を提案し，従来手法との比較検証によって提案手法の妥当性を確認する。さらに，あらかじめ選定した対象地域に対してクラスタ分析を行い，クラスタごとに構築した汎化モデルが，学習に用いていない新たな地域に対してどの程度適用可能かを検討する。

第四章では，災害時における住民の避難困難度の変化を定量的に把握するために，避難所要時間に基づく災害リスク評価手法を検討する。まず，各住民の浸水時における避難所要時間の増加量および地域内における相対的な時間差に着目し，これらを踏まえた災害リスクの算出式を提案する。また，得られたリスク評価結果に基づき，災害リスクを抱える区域に対して，適切な避難指示発令のタイミングを定量的に判断する手法を検討する。さらに，提案手法の有効性を確認するために，浸水の発生を想定したケーススタディを実施する。

第五章では，既往の経路探索システムや関連研究にみられる課題を踏まえ，これらを解決するための新たな避難経路探索システムを開発する。まず，既存手法で生じている具体的な問題点を整理し，本研究が目指すシステムの設計方針を明らかにする。次に，避難者の位置情報取得やリアルタイム浸水予測の組み込み，経路探索機能，避難所要時間予測機能など，本システムを構成する主要機能について検討する。さらに，システムを実際に構築し，試行的な検証を通じて，提案システムの有効性と実用性を確認する。

第六章では，本研究で得られた成果を総括し，結論を示す。

参考文献

1. Y. Duan, J. Xiong, W. Cheng, Y. Li, N. Wang, G. Shen, and J. Yang, “Increasing global flood risk in 2005-2020 from a multi-scale perspective,” Remote Sensing, vol. 14, no. 21, p. 5551, 2022. https://doi.org/10.3390/rs14215551
2. J. Liu, T. W. Hertel, N. S. Diffenbaugh, M. S. Delgado, and M. Ashfaq, “Future property damage from flooding: sensitivities to economy and climate change,” Climatic Change, vol. 132, pp. 741-749, 2015. https://doi.org/10.1007/s10584-015-1478-z
3. IPCC, “Climate change 2023: Synthesis report,” Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Core Writing Team, H. Lee and J. Romero, Eds., IPCC, Geneva, Switzerland, 2023, pp. 35-115. https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647
4. G. Myhre, K. Alterskjær, C. Stjern, Ø. Hodnebrog, L. Marelle, B. H. Samset, J. Sillmann, N. Schaller, E. Fischer, M. Schulz, and A. Stohl, “Frequency of extreme precipitation increases extensively with event rareness under global warming,” Scientific Reports, vol. 9, 2019. https://doi.org/10.1038/s41598-019-52277-4
5. J. Ciarlo and F. Giorgi, “An increase in global daily precipitation records in response to global warming based on reanalysis and observations,” Open Research Europe, vol. 4, p. 114, 2025. https://doi.org/10.12688/openreseurope.17674.3
6. 文部科学省及び気象庁，「日本の気候変動 2025―大気と陸・海洋に関する観測・予測評価報告書―」，2025 年 3 月．https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ccj/2025/pdf/cc2025_shousai.pdf，（参照日：2025 年 11 月 13 日）．
7. 国土交通省，「河川事業概要 2024 I 我が国の水害リスクの現状」，2025 年 1 月．https://www.mlit.go.jp/river/pamphlet_jirei/kasen/gaiyou/panf/pdf/2025/kasengaiyou2025_1.pdf，（参照日：2025 年 11 月 13 日）．
8. 政府統計の総合窓口 e-Stat，「水害統計調査 令和 4 年水害統計調査 令和 4 年の水害被害」，2024 年 7 月．https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?stat_infid=000040135287，（参照日：2025 年 11 月 13 日）．
9. 国土交通省，「河川事業概要 2007 I 河川の現状と課題」，2007 年．https://www.mlit.go.jp/river/pamphlet_jirei/kasen/gaiyou/panf/gaiyou2007/pdf/c1.pdf，（参照日：2025 年 11 月 13 日）．
10. 政府統計の総合窓口 e-Stat，「水害統計調査 令和 5 年水害統計調査 経年諸表 過去 20 年間水害原因別被害構成比の推移」，2025 年 7 月．https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?stat_infid=000040302505，（参照日：2025 年 11 月 13 日）．
11. 内閣府，「平成 27 年 9 月関東・東北豪雨による被害状況等について」，2016 年 2 月．https://www.bousai.go.jp/updates/h27typhoon18/pdf/h27typhoon18_28.pdf，（参照日：2025 年 11 月 13 日）．

12. 内閣府，「令和 2 年 7 月豪雨による被害状況等について」，2021 年 1 月．https://www.bousai.go.jp/updates/r2_07ooame/pdf/r20703_ooame_40.pdf，（参照日：2025 年 11 月 13 日）．
13. T. Ashizawa, N. Sudo, and H. Yamamoto, “How do floods affect the economy? An empirical analysis using Japanese flood data,” Bank of Japan Working Paper Series, No. 22-E-06, Bank of Japan, 2022. https://www.boj.or.jp/en/research/wps_rev/wps_2022/wp22e06.htm
14. 内閣府，「平成 30 年 7 月豪雨による被害状況等について」，2019 年 1 月．https://www.bousai.go.jp/updates/h30typhoon7/pdf/310109_1700_h30typhoon7_01.pdf，（参照日：2025 年 11 月 13 日）．
15. 内閣府，「令和元年台風第 19 号等に係る被害状況等について」，2020 年 4 月．https://www.bousai.go.jp/updates/r1typhoon19/pdf/r1typhoon19_45.pdf，（参照日：2025 年 11 月 13 日）．
16. 国土交通省，「令和 5 年版国土交通白書」，2023 年．https://www.mlit.go.jp/hakusyo/mlit/r04/hakusho/r05/html/n1114000.html，（参照日：2025 年 11 月 14 日）．
17. 国土技術研究センター，「JICE REPORT 第 30」，2017 年．https://www.jice.or.jp/cms/kokudo/pdf/tech/reports/30/jice_rpt30_05.pdf，（参照日：2025 年 11 月 14 日）．
18. 国土交通省，「第Ⅱ部 ソフト×ハードで加速する防災・減災ソリューション」，2020 年．https://www.mlit.go.jp/common/001273284.pdf，（参照日：2025 年 11 月 14 日）．
19. 内閣府，「平成 27 年台風第 18 号による大雨等に係る被害状況等について」，2017 年 10 月．https://www.fdma.go.jp/disaster/info/assets/post793.pdf，（参照日：2025 年 11 月 14 日）．
20. 障害保健福祉研究情報システム，「障害インクルーシブな防災について考える～誰もとりのこされない防災への実践～」，2018 年 12 月．https://www.dinf.ne.jp/doc/japanese/resource/bf/201812/201812_23-33.html，（参照日：2025 年 11 月 14 日）．
21. 内閣府，「避難情報に関するガイドライン（令和 4 年 9 月更新）」，2022 年 9 月．https://www.bousai.go.jp/oukyu/hinanjouhou/r3_hinanjouhou_guideline/pdf/hinan_guideline.pdf，（参照日：2025 年 11 月 14 日）．
22. 平成 30 年 7 月豪雨を教訓とした安全・避難対策のあり方研究会，「平成 30 年 7 月豪雨を教訓とした安全・避難対策のあり方」，2018 年 12 月．https://www.pref.tottori.lg.jp/secure/1153500/H30arikata.pdf，（参照日：2025 年 11 月 14 日）．
23. 岐阜県防災課，「静岡県熱海市における土石流災害の検証について」，2022 年 3 月．https://www.pref.gifu.lg.jp/page/176184.html，（参照日：2025 年 11 月 14 日）．
24. 国土交通省，「平成 27 年 9 月 鬼怒川決壊の概要」，2016 年．https://www.pref.mie.lg.jp/common/content/000736388.pdf，（参照日：2025 年 11 月 14 日）．
25. 日本災害情報学会平成 29 年 7 月九州北部豪雨調査団，「平成 29 年 7 月九州北部豪雨に関する調査報告」，災害情報，No. 16-2，pp. 322‐345，2018.
26. 令和元年台風第 19 号等による災害からの避難に関するワーキンググループ，「令和元年台風第 19 号等を踏まえた水害・土砂災害からの避難のあり方について」，2020 年 3

月．https://www.bousai.go.jp/fusuigai/typhoonworking/pdf/houkoku/honbun.pdf, （参照日：2025 年 11 月 14 日）.

27. M. Thomas and T. Tsujimoto, “Vulnerability to flood risks in Japanese urban areas: Crisis management and emergency response for efficient evacuation management,” in WIT Transactions on Ecology and the Environment, vol. 184, pp. 283-295, 2014. https://doi.org/10.2495/FRIAR140061

第２章 過去の災害事例と先行研究の課題整理

２．１ はじめに

第１章では，洪水による人的被害を軽減する手段としての避難の重要性を示し，その円滑な実施に資する情報や対策を概観した。また，過去の災害事例を通じて明らかになった避難過程における主な課題を整理した。それを踏まえた上で，本章では，避難に関する基礎的枠組みを整理し，既往研究を検討することで，本研究の位置づけを明確にする。

まず，日本の実情に焦点を当て，避難行動および避難情報発令に関する基礎的知見を体系的に整理する。具体的には，洪水発生時に住民がとるべき避難行動，自治体が発令する避難情報の種類，その発令判断に関する現行の基準，さらに判断を支援するための災害関連情報や指標について示す。最後に，過去の災害事例を取り上げ，避難情報がどのように発令されたのか，またその際に住民がどのように避難したのかを記述する。

また，学術的な観点から本研究の必要性を検討する。既往研究の整理を通じて，既存手法における適用上の課題を明らかにし，第１章で述べた本研究目的の新規性を示す。具体的には，避難時間予測手法の開発，避難に着目した災害リスク評価，住民の避難行動を支援する避難経路探索システムの開発という三つの側面から，関連する既存研究を整理する。

２．２ 避難行動および避難情報発令に関する基礎的枠組み

激甚化する豪雨から人命を守るためには，国・自治体・住民がそれぞれの役割を明確に理解しておくことが重要である。日本では 1961 年に災害対策基本法（以下，災対法）が制定され，防災に関する基本理念や各主体の責務が定められている[1]。災対法では，災害が発生し，又はそのおそれがある場合に，人の命を災害から守り，災害の拡大を防ぐため特に必要と認められるときには，市町村長が地域の居住者等に対して立ち退き避難を指示することができると定められている。また，平成 26 年に内閣府が改定した「避難勧告等の判断・伝達マニュアル作成ガイドライン」では，市町村から避難勧告等が発令された場合には，各人が速やかに事前に決めておいた避難行動をとる必要があるという，住民の避難行動の原則が示されている[2]。

これらの規定に基づき，河川氾濫などが発生する危険性が高い場合には，自治体が判断して避難情報を発令し，住民がそれを受けて避難行動をとることで，人的被害の軽減が図られている。

本節では，まず災害時に住民がとるべき避難行動について，その定義と分類を整理する。続いて，自治体が避難を促すために発令する避難情報の種類や避難判断に用いられる防災情報を紹介し，さらに近年の豪雨災害における避難情報の発令現状や実際の避難状況について検討する。

２．２．１ 住民がとるべき避難行動とその分類

ガイドラインにより，「避難行動」とは，数分から数時間後に発生し得る自然災害から生命又は身体を保護するための行動であるとされている[3]。

避難情報が発令された場合，住民が取るべき避難行動はその時点の状況によって異なる。具体的には，平成 25 年の改正以前の災対法では，市町村長が避難勧告等を発令した場合に住民に求められる行動は，小中学校や公民館などの公的施設への立ち退き避難が一般的であった。また，平成 25 年の災対法改正では，指定緊急避難場所等への立退き避難がかえって危険となる場合には，市町村長が屋内での待避など，屋内における安全確保のための措置を指示できる行動形態が追加された。これらの規定を踏まえ，現行の避難行動は３つに分類されており，以下ではそれぞれについて述べる。

２．２．１．１ 立退き避難

立ち退き避難とは，自宅に留まることが危険と判断される場合に，居住者がその場を離れて安全な場所へ移動する行動を指す。対象となる地域には，洪水浸水想定区域などハザードマップに示された区域に加え，中小河川沿いの区域や局所的な低地など，地形的に危険性が高い場所も含まれる。また，避難先としては，指定緊急避難場所のほか，安全と考えられる知人宅や宿泊施設などが利用される。

なお，立ち退き避難は災対法で定められている基本的な避難形態であるため，本研究では，避難所要時間を予測する際の対象とする。

２．２．１．２ 屋内安全確保

屋内安全確保とは，浸水のおそれがある区域に居住する者が，自宅の浸水想定（浸水深や浸水継続時間など）を踏まえて，上階への移動や高層階に留まること等により，計画的に身の安全を確保する行動を指す。

ただし，自宅や施設が浸水のおそれのある区域に位置している場合に屋内安全確保を選択するためには，少なくとも，その居場所が家屋倒壊等の危険区域に該当しないこと，浸水しない居室があること，一定期間の浸水に伴う支障を許容できることの三点を満たしている必要がある。

２．２．１．３ 緊急安全確保

緊急安全確保とは，本来は立ち退き避難を行う必要があるにもかかわらず，避難行動が適切な時点で行われず，あるいは災害が急激に切迫したことで安全な場所への移動が困難となった場合に，現在地より相対的に安全な場所へ直ちに移動して身を守る行動を指す。

ただし，緊急安全確保は災害が既に発生または切迫している状況での次善の行動であり，必ずしも安全が確保されるわけではない。また，市区町村が緊急時の行動例を示す場合が

あるものの，住居の構造や立地，周囲の環境が個々に異なるため，最終的な判断は居住者自身が行う必要がある。具体例としては，洪水のおそれがある区域では，自宅内でより高い場所へ緊急的に移動する，または近隣の相対的に高く堅牢な建物へ向かうといった行動が挙げられる。

２．２．２ 自治体が発令する避難情報とその種類

避難情報とは，災害が発生し，又は発生するおそれがある場合に，その危険から命を守るために自治体が発令する，住民に避難を促すための情報である[4]。災対法に基づき，自治体によって発令される避難情報は，以下に示した高齢者等避難，避難指示，緊急安全確保の３種類に分類される。

２．２．２．１ 高齢者等避難

高齢者等避難とは，災対法（第 56 条）が市町村長に対して要配慮者への情報提供や必要な配慮を求めていることを踏まえ，避難に時間を要する高齢者等が安全に行動できるよう早期に発令される避難情報である。

なお，令和３年の災対法改正においても，高齢者等の避難に関する規定に変更はなく，改正前後を通じて要配慮者向けの避難情報は「高齢者等避難」のみであり，「高齢者等避難指示」といったより拘束力の強い項目は設けられていない。これは，避難行動そのものが負担となり得る高齢者等に対し，発令頻度が高く空振りも多い「高齢者等避難」を強制力のある指示として位置付けることが必ずしも適切ではないと考えられているためである。

２．２．２．２ 避難指示

避難指示とは，災対法（第 60 条）に基づき，災害が発生している場合，または発生するおそれがある場合に，市町村長が住民の安全確保のために，必要と認めた地域および住民に対して立ち退き避難を指示する情報である。

図 2-1 に示すように，避難指示は，平屋や低層階に居住し，自宅内の全ての居室が浸水すると見込まれ，屋内安全確保をとることができず，立ち退き避難を行う必要がある居住者等を主な対象としている。一方で，上階への移動により屋内で身の安全を確保できる場合には，必ずしも立ち退き避難を求めるものではない。

しかし，居住地の地形や住宅構造，家族構成，浸水継続時間に対する許容度などは住民によって大きく異なるため，市町村長が「立ち退き避難が必要な者のみ」を厳密に選別して発令することは実務上困難である。このため，実際には発令対象区域に居住する住民に対して区域単位でまとめて避難指示が出されることが一般的である。

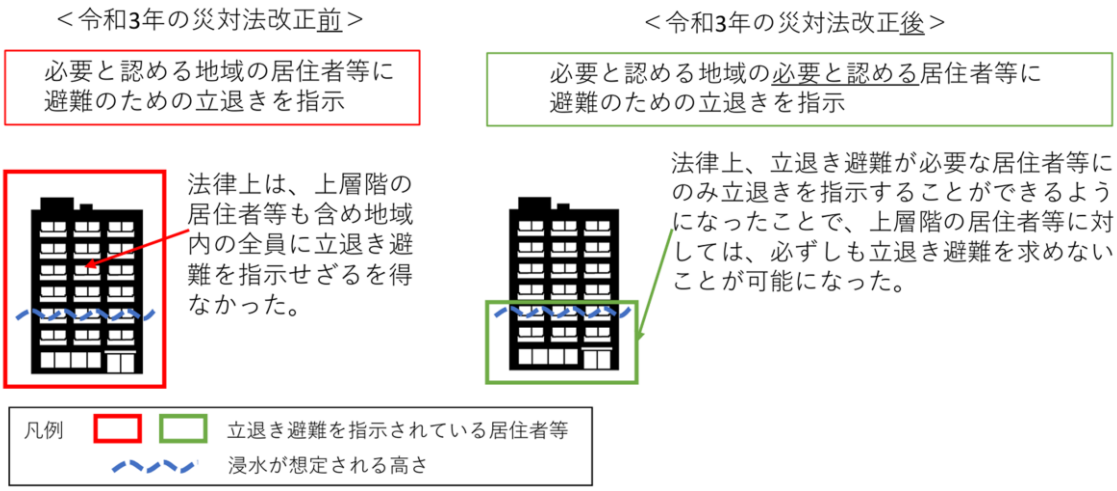


図 2-1 自治体が必要と認める地域の必要と認める居住者等への避難指示のイメージ[3]

２．２．２．３ 緊急安全確保

緊急安全確保とは，災対法（第 60 条）を根拠とし，災害が既に発生している場合，又は発生が切迫している状況において，立ち退き避難がかえって危険となるおそれがあると判断される際に，市町村長が必要と認める地域の居住者等に対して発令する，緊急に身の安全を確保する行動を促すための情報である。

２．２．３ ガイドラインに基づく避難情報の発令基準

ここでは，ガイドラインにおいて示されている避難情報の発令基準の設定方法を整理し，洪水を対象とした避難指示の発令基準の例を示す。

２．２．３．１ 避難情報の発令基準等の設定手順

ガイドラインにおいては，避難情報の発令基準等の設定手順として，「避難情報を発令する対象災害の確認」，「避難情報の発令対象区域の設定（絞り込み）」，「避難情報の発令基準の設定（発令タイミングの設定）」の 3 段階が示されている。ここでは，これら各手順における基本的な考え方について述べる。

(1)　避難情報を発令する対象災害の確認

過去の災害事例や，今後発生が想定される災害を踏まえ，避難情報の発令対象となる災害を特定する。災対法（第 60 条）では，居住者等の生命又は身体を災害から保護する必要があると認められる場合に発令が行われるとされていることから，原則として人の命を脅かす危険がある災害を対象とする。

(2)　避難情報の発令対象区域の設定（絞り込み）

避難情報は，災害により命が脅かされる可能性のある区域において，河川の氾濫等の発生の切迫度が高まった場合に発令される。このため市町村は，基本的に，気象庁が提供す

る防災気象情報に基づき災害の切迫度が高いと判断される区域と，ハザードマップに示された浸水想定区域などの災害リスク区域が重なる範囲を絞り込み，これを発令対象区域として設定している。

また，地域の災害リスクを把握する際には，過去の災害における局所的な浸水箇所や，旧河道など土地の成り立ちに起因する潜在的リスク箇所といった情報が参考とされる。

(3) 避難情報の発令基準の設定（発令タイミングの設定）

避難情報の発令基準は，自治体が緊急時に避難情報の発令タイミングや対象区域を可能な限り迷わず判断できるよう，また「空振り」をおそれず発令できるようにするため，事前に設定しておく必要があるとされている。さらに，避難判断を行う意思決定者によって判断が大きく異ならないよう，発令基準は可能な限り簡潔かつ明瞭であることが望ましい。

発令タイミングの設定については，主に以下の点に基づいて行う。

1) 発令対象者が避難情報を受けてから災害発生前に安全な場所へ移動できるよう，市町村長は，立ち退き避難に必要なリードタイムを踏まえて，高齢者等避難や避難指示を発令する必要がある。
2) 事前に設定した基準に加え，現地の状況や防災気象情報などの災害関連情報を活用し，避難行動の困難さをリアルタイムに把握したうえで，状況に応じて早めに発令するなど，柔軟な対応が求められる。
3) 発令頻度が高すぎると発令対象者が情報を軽視するおそれがあるため，専門機関の知見を踏まえ，過去の災害事例における発令状況を参考として，適切な発令基準を設定することが重要である。

２．２．３．２ 避難情報の発令基準の例

以下に，２．２．３．１で示した手順に基づいて設定される，洪水を対象とした避難情報の発令基準の例を示す。

まず，洪水災害を対象とする場合には，洪水予報河川や水位周知河川を中心に，増水や氾濫が住民の命に危険を及ぼす可能性があるかを把握する必要がある [5] 。

次に，発令対象区域は，氾濫の切迫度が高まっている河川の洪水ハザードマップや浸水想定区域を基本に設定し，実際の水位上昇状況や現地の観測情報などを踏まえて適宜調整される。

これらの手順を踏まえ，**図 2-2**，**図 2-3**，**図 2-4** には，洪水予報河川，水位周知河川，その他河川における避難情報の発令基準の設定例が示されている[6]。このうち，洪水予報河川については，河川水位が氾濫危険水位に到達した場合，急激な水位上昇が予測される場合，堤防の異常が確認された場合などを，早期の立ち退き避難が必要となる目安として発令基準が設定されている。

<table>
<tr><th colspan="4">避難指示等</th><th>気象警報等</th></tr>
<tr><th>対象区域の考え方</th><th>警戒レベル</th><th>種類</th><th>判断基準の設定例</th><th>種類</th></tr>
<tr><td rowspan="3">○避難情報の発令対象区域
・氾濫する切迫度が高まっている各河川等の洪水ハザードマップやその基となる各河川等の浸水想定区域を基本として設定する。

○立退き避難が必要な場合
・河川が氾濫した場合に、氾濫流が家屋流失をもたらすおそれがある場合や、山間部等の流速が速いところで、河岸侵食や氾濫流が家屋流失をもたらすおそれがある場合
・浸水深が深く、居室が浸水するおそれがある場合や、地下施設・空間のうち、その利用形態と浸水想定から、居住者・利用者に命の危険が及ぶおそれがある場合
・ゼロメートル地帯のように浸水が長期間継続するおそれがある場合</td><td>5</td><td>緊急安全確保</td><td>（災害が切迫）
・A川のB水位観測所の水位が、氾濫開始相当水位である○○mに到達した場合（計算上、個別に定める危険箇所における水位が堤防天端高（又は背後地盤高）に到達している蓋然性が高い場合）
・国管理河川の洪水の危険度分布（水害リスクライン）で「氾濫している可能性（黒）」になった場合
・堤防に異常な漏水・侵食の進行や亀裂・すべり等により決壊のおそれが高まった場合
・樋門・水門等の施設の機能支障が発見された場合や排水機場の運転を停止せざるをえない場合（支川合流部の氾濫のため発令対象区域を限定する）

（災害発生を確認）
・堤防の決壊や越水・溢水が発生した場合（指定河川洪水予報の氾濫発生情報（警戒レベル５相当情報[洪水]）、水防団からの報告等により把握できた場合）</td><td>氾濫発生情報</td></tr>
<tr><td>4</td><td>避難指示</td><td>・指定河川洪水予報により、A川のB水位観測所の水位が氾濫危険水位（レベル４水位）である○○mに到達した、あるいは、水位予測に基づき急激な水位上昇によりまもなく氾濫危険水位を超え、さらに水位の上昇が見込まれると発表された場合（又は当該市町村・区域で個別に定める危険水位に相当する○○mに到達したと確認された場合）
・A川のB水位観測所の水位が氾濫危険水位（レベル４水位）である○○mに到達していないものの、A川のB水位観測所の水位が氾濫開始相当水位である○○mに到達することが予想される場合（計算上、個別に定める危険箇所における水位が堤防天端高（又は背後地盤高）に到達することが予想される場合）
・国管理河川の洪水の危険度分布（水害リスクライン）で「氾濫危険水位の超過に相当（紫）」になった場合
・堤防に異常な漏水・侵食等が発見された場合
・○○ダムの管理者から、異常洪水時防災操作開始予定の通知があった場合
・警戒レベル４避難指示の発令が必要となるような強い降雨を伴う前線や台風等が、夜間から明け方に接近・通過することが予想される場合（夕刻時点で発令）
・警戒レベル４避難指示の発令が必要となるような強い降雨を伴う台風等が、立退き避難が困難となる暴風を伴い接近・通過することが予想される場合（立退き避難中に暴風が吹き始めることがないよう暴風警報の発表後速やかに発令）</td><td>氾濫危険情報</td></tr>
<tr><td>3</td><td>高齢者等避難</td><td>・指定河川洪水予報により、A川のB水位観測所の水位が避難判断水位（レベル３水位）である○○mに到達し、かつ、水位予測において引き続きの水位が上昇する予測が発表されている場合
・指定河川洪水予報により、A川のB水位観測所の水位が氾濫危険水位（レベル４水位）に到達する予測が発表されている場合（急激な水位上昇による氾濫のおそれのある場合）
・国管理河川の洪水の危険度分布（水害リスクライン）で「避難判断水位の超過に相当（赤）」になった場合
・堤防に軽微な漏水・侵食等が発見された場合
・警戒レベル３高齢者等避難の発令が必要となるような強い降雨を伴う台風等が、夜間から明け方に接近・通過することが予想される場合（夕刻時点で発令）</td><td>氾濫警戒情報</td></tr>
<tr><td colspan="4">・洪水注意報が発表された場合は、防災気象情報を入手し、気象状況の進展を見守る。
・連絡要員を配置し、防災気象情報の把握に努める。</td><td>氾濫注意情報</td></tr>
<tr><td colspan="4"></td><td>－</td></tr>
</table>

図 2-2 洪水予報河川に対する各避難情報において発令基準の設定例[6]

<table>
<tr><th colspan="4">避難指示等</th><th colspan="2">気象警報等</th></tr>
<tr><th>対象区域の考え方</th><th>警戒レベル</th><th>種類</th><th>判断基準の設定例</th><th colspan="2">種類</th></tr>
<tr><td rowspan="3">○避難情報の発令対象区域
・氾濫する切迫度が高まっている各河川等の洪水ハザードマップやその基となる各河川等の浸水想定区域を基本として設定する。

○立退き避難が必要な場合
・河川が氾濫した場合に、氾濫流が家屋流失をもたらすおそれがある場合や、山間部等の流速が速いところで、河岸侵食や氾濫流が家屋流失をもたらすおそれがある場合
・浸水深が深く、居室が浸水するおそれがある場合や、地下施設・空間のうち、その利用形態と浸水想定から、居住者・利用者に命の危険が及ぶおそれがある場合
・ゼロメートル地帯のように浸水が長期間継続するおそれがある場合</td><td>5</td><td>緊急安全確保</td><td>（災害が切迫）
・A川のB水位観測所の水位が、氾濫開始相当水位である○○mに到達した場合（計算上、個別に定める危険箇所における水位が堤防天端高（又は背後地盤高）に到達している蓋然性が高い場合）
・A川の洪水警報の危険度分布で「災害切迫（黒）」が出現した場合（流域雨量指数の実況値が大雨特別警報（浸水害）の基準に到達した場合）
・堤防に異常な漏水・侵食の進行や亀裂・すべりの発生等により決壊のおそれが高まった場合
・樋門・水門等の施設の機能支障が発見された場合や排水機場の運転を停止せざるをえない場合（支川合流部の氾濫のため発令対象区域を限定する）

（災害発生を確認）
・堤防の決壊や越水・溢水が発生した場合（水防団等からの報告により把握できた場合）</td><td>氾濫発生情報</td><td>大雨特別警報（浸水害）
洪水キキクル（洪水警報の危険度分布）</td></tr>
<tr><td>4</td><td>避難指示</td><td>・A川のB水位観測所の水位が氾濫危険水位（洪水特別警戒水位）（レベル４水位）である○○mに到達した場合（又は当該市町村・区域の個別に定める危険水位に相当する○○mに到達したと確認された場合）
・A川のB水位観測所の水位が一定の水位（○○m）を超えた状態で、次の①～③のいずれかにより、急激な水位上昇のおそれがある場合
①B地点上流の水位観測所の水位が急激に上昇している場合
②A川の洪水警報の危険度分布で「危険（紫）」が出現した場合（流域雨量指数の実況値又は３時間先までの予測値が洪水警報基準を大きく超過する場合）
③B地点上流で大雨又は強い降雨が見込まれる場合（実況雨量や予測雨量において、累加雨量が○○mm以上、又は時間雨量が○○mm以上となる場合）
・堤防に異常な漏水・侵食等が発見された場合
・○○ダムの管理者から、異常洪水時防災操作開始予定の通知があった場合
・警戒レベル４避難指示の発令が必要となるような強い降雨を伴う前線や台風等が、夜間から明け方に接近・通過することが予想される場合（夕刻時点で発令）
・警戒レベル４避難指示の発令が必要となるような強い降雨を伴う台風等が、立退き避難が困難となる暴風を伴い接近・通過することが予想される場合（立退き避難中に暴風が吹き始めることがないよう暴風警報の発表後速やかに発令）</td><td>氾濫危険情報</td><td>洪水キキクル（洪水警報の危険度分布）
流域雨量指数の予測値</td></tr>
<tr><td>3</td><td>高齢者等避難</td><td>・A川のB水位観測所の水位が避難判断水位（レベル３水位）である○○mに到達した場合
・A川のB水位観測所の水位が一定の水位（○○m）を超えた状態で、次の①～③のいずれかにより、急激な水位上昇のおそれがある場合
①B地点上流の水位観測所の水位が急激に上昇している場合
②A川の洪水警報の危険度分布で「警戒（赤）」が出現した場合（流域雨量指数の実況値又は３時間先までの予測値が洪水警報基準に到達する場合）
③B地点上流で大雨又は強い降雨が見込まれる場合（実況雨量や予測雨量において、累加雨量が○○mm以上、又は時間雨量が○○mm以上となる場合）
・堤防に軽微な漏水・侵食等が発見された場合
・警戒レベル３高齢者等避難の発令が必要となるような強い降雨を伴う前線や台風等が、夜間から明け方に接近・通過することが予想される場合（夕刻時点で発令）</td><td>氾濫警戒情報</td><td>洪水警報
洪水キキクル（洪水警報の危険度分布）
流域雨量指数の予測値</td></tr>
<tr><td colspan="4">・洪水注意報が発表された場合は、防災気象情報を入手し、気象状況の進展を見守る。
・連絡要員を配置し、防災気象情報の把握に努める。</td><td>氾濫注意情報</td><td>洪水注意報</td></tr>
<tr><td colspan="4">（注）洪水警報の危険度分布（流域雨量指数の予測値）は、水位上昇の見込みを判断するための情報です。</td><td>－</td><td>早期注意情報（警報級の可能性）</td></tr>
</table>

図 2-3 水位周知河川に対する各避難情報において発令基準の設定例[6]



避難指示等				気象警報等
対象区域の考え方	警戒レベル	種類	判断基準の設定例	種類
○避難情報の発令対象区域 ・河川事務所・気象台等からの助言も踏まえ、それぞれの河川特性等に応じて区域を設定する。	5	緊急安全確保	（災害が切迫） ・A川のB水位観測所の水位が堤防高（又は背後地盤高）である○○mに到達した場合 ・A川の洪水警報の危険度分布で「災害切迫（黒）」（警戒レベル５相当情報[洪水]）が出現した場合（流域雨量指数の実況値が大雨特別警報（浸水害）基準に到達した場合） ・堤防に異常な漏水・侵食の進行や亀裂・すべりの発生等により決壊のおそれが高まった場合 ・樋門・水門等の施設の機能支障が発見された場合や排水機場の運転を停止せざるをえない場合（支川合流部の氾濫のため発令対象区域を限定する） ・大雨特別警報（浸水害）が発表された場合（※大雨特別警報（浸水害）は市町村単位を基本として発表されるが、警戒レベル５緊急安全確保の発令対象区域は適切に絞り込むこと） （災害発生を確認） ・堤防の決壊や越水・溢水が発生した場合（水防団等からの報告により把握できた場合）	大雨特別警報（浸水害） 洪水キキクル（洪水警報の危険度分布）
○立退き避難が必要な場合 ・河川が氾濫した場合に、氾濫流が家屋流失をもたらすおそれがある場合や、山間部等の流速が速いところで、河岸侵食や氾濫流が家屋流失をもたらすおそれがある場合 ・浸水深が深く、居室が浸水するおそれがある場合や、地下施設・空間のうち、その利用形態と浸水想定から、居住者・利用者に命の危険が及ぶおそれがある場合 ・ゼロメートル地帯のように浸水が長期間継続するおそれがある場合	4	避難指示	・A川のB水位観測所の水位が一定の水位（○○m）に到達し、次の①～③のいずれかにより、引き続き水位上昇のおそれがある場合 ①B地点上流の水位観測所の水位が上昇している場合 ②A川の洪水警報の危険度分布で「危険（紫）」（警戒レベル４相当情報[洪水]）が出現した場合（流域雨量指数の実況値又は予測値が洪水警報基準を大きく超過する場合） ③B地点上流で大量又は強い降雨が見込まれる場合（実況雨量や予測雨量において、累加雨量が○○mm以上、又は時間雨量が○○mm以上となる場合） ・堤防に異常な漏水・侵食等が発見された場合 ・○○ダムの管理者から、異常洪水時防災操作開始予定の通知があった場合 ・警戒レベル４避難指示の発令が必要となるような強い降雨を伴う前線や台風等が、夜間から明け方に接近・通過することが予想される場合（夕刻時点で発令） ・警戒レベル４避難指示の発令が必要となるような強い降雨を伴う台風等が、立退き避難が困難となる暴風を伴い接近・通過することが予想される場合（立退き避難中に暴風が吹き始めることがないよう暴風警報の発表後速やかに発令）	洪水キキクル（洪水警報の危険度分布） 流域雨量指数の予測値
	3	高齢者等避難	・A川のB水位観測所の水位が一定の水位（○○m）に到達し、次の①～③のいずれかにより、引き続き水位上昇のおそれがある場合 ①B地点上流の水位観測所の水位が上昇している場合 ②A川の洪水警報の危険度分布で「警戒（赤）」（警戒レベル３相当情報[洪水]）が出現した場合（流域雨量指数の実況値又は予測値が洪水警報基準に到達する場合） ③B地点上流で大量又は強い降雨が見込まれる場合（実況雨量や予測雨量において、累加雨量が○○mm以上、又は時間雨量が○○mm以上となる場合） ・堤防に軽微な漏水・侵食等が発見された場合 ・警戒レベル３高齢者等避難の発令が必要となるような強い降雨を伴う前線や台風等が、夜間から明け方に接近・通過することが予想される場合（夕刻時点で発令）	洪水警報 洪水キキクル（洪水警報の危険度分布） 流域雨量指数の予測値
・洪水注意報が発表された場合は、防災気象情報を入手し、気象状況の進展を見守る。 ・連絡要員を配置し、防災気象情報の把握に努める。				洪水注意報
（注）洪水警報の危険度分布（流域雨量指数の予測値）は、水位上昇の見込みを判断するための情報です。				早期注意情報（警報級の可能性）

図 2-4 その他河川に対する各避難情報において発令基準の設定例[6]

なお，令和 8 年には防災気象情報の更新が予定されており，これに伴って，河川氾濫等に関する情報の体系や，それを踏まえた避難情報の発令基準についても見直しが行われる[7,8]。

具体的には，河川氾濫等に関する情報のうち，洪水予報河川については，従来と同様に河川ごとに情報が発表される一方で，情報の内容および警戒レベルとの対応関係が見直される。その概要を**表 2-1** に示す。見直し後は，これまで気象台が行ってきた市町村単位の洪水警報・注意報に代わり，洪水予報河川に関する情報が一般向けの警報として用いられる。

一方，水位周知河川の氾濫危険情報等におけるレベル別の水位情報については，警戒レベルとの関係を含め，これまでどおりの運用が継続される。また，洪水予報河川への移行が段階的に進められる。加えて，その他の河川については，大雨に関する情報の中で一体的に整理される。新たな大雨に関する情報の整理内容を**表 2-2** に示す。

表 2-1 洪水予報河川における河川氾濫情報の整理[9]

分類		洪水予報河川
河川数		約 400 河川
発表主体		河川事務所または都道府県と気象台
発表単位		河川ごと
対象とする主な現象		外水氾濫
発表指標		水位（実測・予測）
情報名称	5	レベル 5　氾濫特別警報
	4	レベル 4　氾濫危険警報
	3	レベル 3　氾濫警報
	2	レベル 2　氾濫注意報
	1	早期注意情報

表 2-2 大雨に関する情報の整理[9]

発表主体		気象台
発表単位		市町村ごと
対象とする主な現象		内水氾濫および 外水氾濫（洪水予報河川以外）
発表指標		表面雨量指数・流域雨量指数 （解析・予測）
情報名称	5	レベル 5　大雨特別警報
	4	レベル 4　大雨危険警報
	3	レベル 3　大雨警報
	2	レベル 2　大雨注意報
	1	早期注意情報

２．２．４ 避難情報の発令判断に資する情報

本節では，自治体が洪水時の避難情報を発令する際に参考とする主な防災関連情報について整理する。

２．２．４．１ 警戒レベル

警戒レベルは，自治体や気象庁等が発表する避難情報や防災気象情報を，住民がとるべき行動を直感的に理解できるよう 5 段階に整理したものである。それぞれの警戒レベルが示す住民のとるべき行動，行動を促す情報，および対応する防災気象情報は**図 2-5** に示すとおりである[10]。とりわけ，レベル 3 では高齢者等の避難，レベル 4 では全ての住民の立ち退き避難が求められ，レベル 5 はすでに災害が発生している可能性が極めて高い状況を示し，緊急安全確保が必要となる段階である。

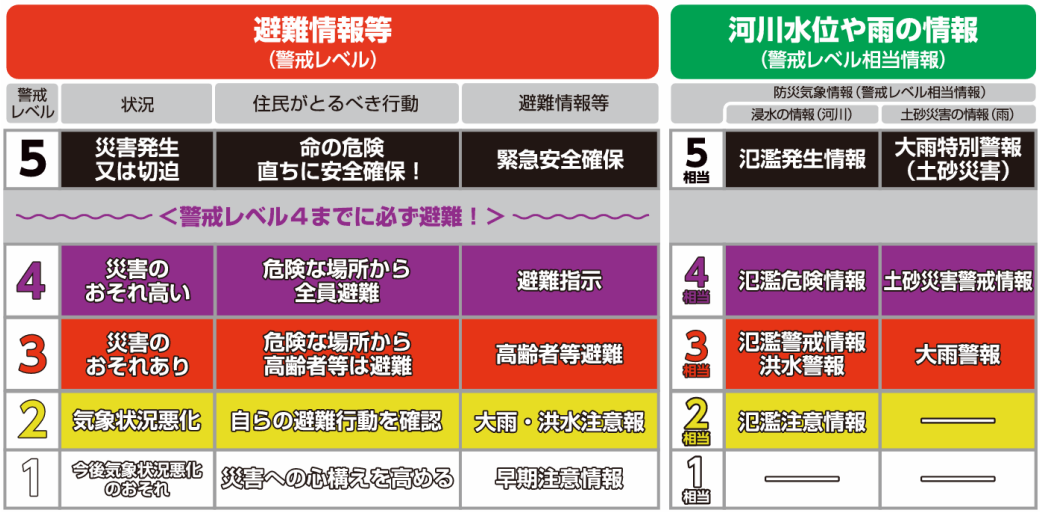


図 2-5 警戒レベルとその対応一覧[10]

一方，前節で述べたとおり，防災気象情報は令和 8 年に更新が予定されている。これに伴い，図 2-5 に示した各警戒レベルに対応する防災気象情報についても内容の見直しが行われる予定である。更新後に想定されている各警戒レベルに対応する河川氾濫および大雨に関する情報と，それに基づく住民のとるべき行動の整理を図 2-6 に示す。

	河川氾濫 1級河川などの大河川の氾濫	大雨 低地の浸水や大河川以外の氾濫	（警戒レベルごとの）住民がとるべき行動
警戒レベル 5相当	レベル5 氾濫特別警報	レベル5 大雨特別警報	命の危険 直ちに安全確保！
＜警戒レベル４までに危険な場所から かならず避難！＞			
警戒レベル 4相当	レベル4 氾濫危険警報	レベル4 大雨危険警報	危険な場所から全員避難
警戒レベル 3相当	レベル3 氾濫警報	レベル3 大雨警報	避難に時間を要する人は早めに避難、避難の準備など
警戒レベル 2	レベル2 氾濫注意報	レベル2 大雨注意報	避難行動を確認（避難場所や避難ルート、避難のタイミングなど）
警戒レベル 1	早期注意情報		災害への心構えを高める

図 2-6 令和 8 年改定予定の防災気象情報等に基づく警戒レベルの対応関係[9]

2．2．4．2 水位の実況および上昇見込み

洪水予報河川および水位周知河川では，河川の水位が氾濫危険水位（レベル 4 水位）や避難判断水位（レベル 3 水位）に到達した場合，または到達が見込まれる場合に，国・都道府県から氾濫危険情報（警戒レベル 4 相当）や氾濫警戒情報（警戒レベル 3 相当）が提供される。さらに，氾濫が実際に発生した際には，氾濫発生情報（警戒レベル 5 相当）が

発表される。なお，水位周知河川については，氾濫危険情報のみが提供される場合もある。一方，その他河川等では，氾濫危険水位や避難判断水位が設定されていない場合が多いため，危機管理型水位計，河川カメラ画像，水防団からの報告などの現地情報を用いて水位状況を把握する必要がある。

また，水位の実況値に加えて，急激な水位上昇を捉えて早期に対応し，氾濫発生前に必要な猶予時間を確保するためには，今後の水位上昇の見込みに関する情報を併用することが重要である。水位上昇の見込みは，**表 2-3** に示される各種情報を活用して把握され，避難情報発令の判断材料として用いられる。そのうち洪水予報河川では，雨量の実況値・予測値，流域形態や地質に応じて異なる流出・流下過程，さらにダム等の貯留施設の運用を考慮した水位予測が提供されており，これらを用いて今後の水位上昇の見込みを把握し，発令判断に活用することができる。一方，水位周知河川やその他河川等では，地点雨量やレーダ雨量などの実況値・予測値に加え，流域平均雨量，洪水警報の危険度分布など，**表 2-3** に示される雨量関連情報を用いて，上流域の降雨状況を踏まえた水位上昇のおそれの把握が行われる。

２．２．４．３ 洪水警報等の防災気象情報

本論文執筆時点において，洪水警報や大雨警報などの防災気象情報は，防災体制・水防体制の確保が求められる場合や，夜間・未明に避難行動が想定される場合に，夕刻時点で避難情報を発令する際の判断材料として活用されている。

また，大雨特別警報（浸水害）は，警戒レベル 4 に相当する気象状況をはるかに超える危険な大雨に対して発表されるものであり，発表時点では既に避難情報が発令されていることが想定される。その際には，既に災害が発生している可能性が非常に高く，避難情報が出されているにもかかわらず浸水想定区域など危険な場所に留まっている住民は，直ちに命を守る行動をとる必要がある。さらに，想定し得る最大規模の災害を踏まえ，通常は災害が起きにくいとされる地域であっても，危険度が急激に高まることに留意する必要がある。

しかし， 令和 8 年に予定されている防災気象情報の更新により，河川氾濫等に関する情報については，洪水予報河川を対象として，警戒レベル各段階に対応した氾濫に関する情報を用いる運用へと改められる（**図 2-6**）。これに伴い，従来の洪水警報・注意報の発表は行われなくなる。また，大雨に関する情報についても，警戒レベル各段階に対応した 5 種類の大雨警報・注意報等の情報が整理される（**図 2-6**）。

表 2-3 水位上昇の見込みを判断するための情報[3]

		洪水予報河川	水位周知河川	その他河川
確からしさ	①	水位予測（指定河川洪水予報）	－	
	②	上流の水位（上流地点に水位観測所がある場合）		
	③	－	洪水警報の危険度分布 流域雨量指数の予測値	
		実況雨量や予測雨量（流域平均雨量，代表地点の雨量等）		

２．２．４．４ 堤防等の施設に係る情報

堤防などの施設に異常が確認された場合には，水位や雨量の状況にかかわらず，直ちに警戒レベル 4 の避難指示を発令する必要がある。

また，合流先の河川水位が上昇する河川では，水門による逆流防止と排水ポンプ場による排水が行われているものの，排水先河川の水位が氾濫危険水位（レベル 4 水位）に達するおそれがある場合には，堤防決壊を防ぐために排水機場の運転を停止せざるを得ない。排水停止に伴い当該河川の氾濫リスクが急激に高まる場合には，状況に応じて警戒レベル 5 の緊急安全確保を発令することが求められる。

さらに，ダムが洪水調節容量を使い切り，流入量と同程度の放流量となる異常洪水時防災操作へ移行する見込みとなった場合には，ダム管理者から提供される放流情報等を踏まえ，速やかに避難情報を発令する必要がある。

２．２．５ 近年における避難情報の発令状況と避難の現状

ここでは，１．２節で取り上げた災害事例を対象として，当時の自治体による避難情報の発令状況と，住民側の行動実態について検討する。

２．２．５．１ 平成 27 年 9 月関東・東北豪雨

平成 27 年 9 月関東・東北豪雨では，9 月 9 日から 11 日にかけて関東地方および東北地方の広域で豪雨が発生し，鬼怒川を含む多数の河川で氾濫等の被害が生じた[11,12]。特に茨城県常総市では広範囲が浸水し，直接死者 2 名，災害関連死 12 名，負傷者 40 名以上に加え，全半壊家屋 5,000 棟以上という甚大な被害が確認された。消防庁による 2017 年 10 月 18 日時点の被害統計では，茨城県・栃木県・宮城県で計 20 名の死者，全国で 82 名の負傷者が報告されている[13]。

また，茨城県内における避難情報の発令状況を見ると，9 月 24 日 9 時時点で 31,465 人に避難指示，2,932 人に避難勧告が発表されていたものの，実際に自治体が指定避難場所等で避難を確認できた住民は 1,247 人にとどまり，避難率の著しい低さが課題として指摘されている[14]。さらに，鬼怒川の堤防決壊までに一部地域で避難指示が発令されなかったこ

とや，避難の遅れによって多くの住民が孤立したことも，避難情報の発令に関する課題として報告されている[15]。

２．２．５．２ 平成 29 年 7 月九州北部豪雨

平成 29 年 7 月九州北部豪雨は，7 月 5 日から 6 日にかけて福岡県および大分県を中心に発生した集中豪雨であり，九州北部各地で 300 件を超える土砂災害が発生したほか，河川の氾濫や浸水害が相次いだ[16,17]。人的被害としては，福岡県朝倉市・東峰村および大分県日田市で計 40 名の死者と 2 名の行方不明者が確認された。死者の発生要因を調査した結果，洪水による死者が 18 名であったことが報告されている[18]。また，洪水により多数の家屋が流失しただけでなく，約 30 名が屋内で被災し，さらに避難行動中に被害に遭った住民も少なくなかったことが指摘されている。

発災時の避難情報の発令状況を見ると，福岡県うきは市では，5 年前の九州北部豪雨で山間部に大きな被害が生じた経験を踏まえ，今回の豪雨時にも山間部を中心に避難情報が発令された[19]。しかし，実際には市街地の降雨量がより多かったことから，避難情報の対象区域の判断において，自治体が過去の災害経験を重視する傾向があったことが示唆されている。

一方，筑前町においては，避難情報は河川水位と土砂災害警戒情報に基づいて発令され，河川の水位が氾濫危険水位に到達した後に，川沿い 4 地区の 18,235 人に避難指示，町内全域の 10,939 人に避難勧告が出された。しかし，実際に避難した住民は 40 から 50 人程度にとどまっており，多くの住民が災害の危険性や避難の必要性を十分に認識していなかったと考えられる。

２．２．５．３ 平成 30 年 7 月豪雨

平成 30 年 7 月豪雨は，6 月 28 日から 7 月 8 日にかけて西日本を中心に，北海道や中部地方を含む全国的な広域で発生した集中豪雨である[20]。この豪雨により，多くの河川で氾濫や浸水被害が発生し，土砂災害も各地で相次いだ。結果として，全国で死者 263 名，負傷者 484 名に及ぶ甚大な人的被害が生じた[21]。さらに，**図 2-7** に示す水害・土砂災害による死者・行方不明者数の統計を見ると，この豪雨は過去 30 年間で最も大きな人的被害をもたらしたことが示されている[22]。

発災時の避難情報をめぐっては，愛媛県の肱川流域において，自治体がダム管理者から異常洪水時防災操作の予告通知を受けていたにもかかわらず，住民が避難を完了するために十分な時間を確保できる段階で避難指示を発令できなかったことが指摘されている。その結果，肱川の氾濫により多くの住民が避難できず，被災する事態となった。この事例から，自治体と関係機関との連携不足や，避難情報発令の遅れといった課題が明らかとなった[23]。

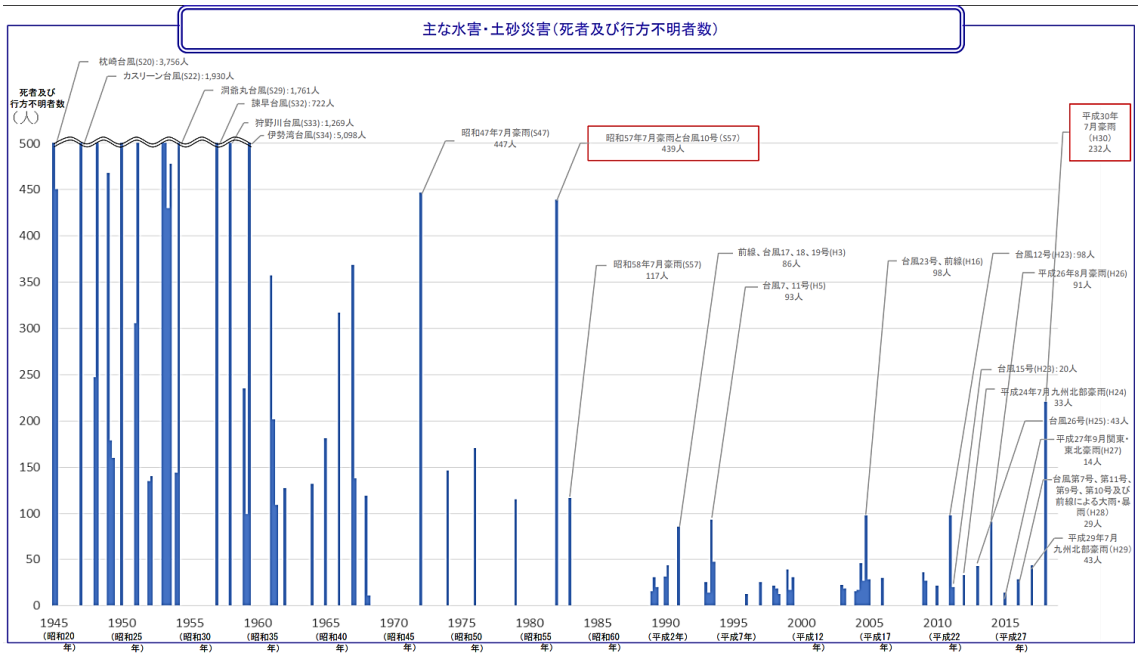


図 2-7 近年発生した主な水害・土砂災害による死者及び行方不明者数の集計[23]

さらに，鳥取県における避難情報の発令状況を見ると，県内で避難指示・避難勧告が発表された対象者 291,068 人のうち，実際に避難したのは 2,100 人にとどまり，避難率は約 0.7%と極めて低かった。この結果は，前述の災害事例でも示されたように，多くの住民が避難行動を判断する際に課題を抱えていることを改めて示している。

２．３ 避難に関連する既往研究

以下では，既往研究で用いられてきた所要時間を推定する手法，災害リスクを評価する手法，および経路を探索するシステムをそれぞれ紹介し，それらを本研究の目的に適用する際に生じる課題について述べる。

２．３．１ 所要時間の推定に関する研究

２．２．３では，市町村長が避難情報を発令するにあたっては，立ち退き避難に必要なリードタイムを踏まえ，適切な発令タイミングを判断する必要があることを指摘した。また，２．２．５では，過去の災害において，自治体の防災担当者がこのリードタイムを的確に把握できず，避難情報の発令が遅れたことで人的被害が生じた事例が報告されていることを示した。したがって，災害発生のおそれがある地域に対しては，地域内の住民それぞれが立ち退き避難に要する時間を正確に推定し，全員が避難を完了するための十分な時間的猶予を確保した上で，適切な発令判断を行うことが求められる。

そこで，以下に，既往研究で用いられてきた避難所要時間の推定手法および一般的な時間予測手法を取り上げ，その特徴と適用上の課題について整理する。

Gehlot らは，ハリケーン「サンディ」発生時に避難した 196 世帯を対象にアンケート調査を実施し，1 時間単位で集計された避難所要時間の統計データに基づいて，区域ごとの避難所要時間分布を大まかに定量化した[24]。しかし，この手法は単一の災害を対象としており，住宅の立地や人口分布などの重要な要因を考慮していないため，将来発生する災害への適用可能性が限定的である。

避難所要時間をより高精度に推定するため，シミュレーションを用いた予測モデルが数多く提案されている[25–28]。例えば，Deng らは，建物内部における経路選択や出口混雑度の動的変化が徒歩避難所要時間に及ぼす影響をシミュレートし，Kunwar らは待ち行列ネットワークを用いて，道路ネットワーク上の異なる起点から避難場所までの徒歩所要時間を推定した。これらの研究は，経路選択や混雑度の違いが避難効率に与える影響を定量的に示し，屋内における避難計画の検討に資する知見を提供している。しかし，既往研究や災害事例によれば，とくに広域的な避難が必要となる場合に，住民は自動車で避難する傾向が強いことが指摘されている[29-31]。

そのため，自動車による避難を対象とした所要時間の推定手法に注目が集まり，多様な研究が進められている[32,33]。Liu らは，自動車避難時の車両追従挙動を Gipps モデルで再現することにより， 避難に関わる意思決定を支援するシステム（IEM-DSS）を開発した。IEM-DSS では，先行車と後続車の相互作用をモデル化し，運転者の加速・減速行動が避難所要時間に及ぼす影響を評価している[34]。そのほか，KW モデルや DTA などの交通流モデルを用いた研究でも，道路容量や車両の待ち行列，交通流のボトルネックが避難効率に及ぼす影響が検討されている[35]。しかし，これらのモデルは，道路の構造的特徴や周辺の環境条件を十分に考慮していない。実際には，地域ごとに地形や人口密度，都市規模が大きく異なるため，避難に要する時間も地域間で大きく異なる。このことから，これらのモデルの実用性には限界があると言える。

また，災害時の避難所要時間の推定に加えて，平常時における自動車の移動所要時間予測に関する研究も幅広く行われている[36–41]。これらの研究の多くは，機械学習あるいは深層学習を用いて予測モデルを構築し，道路の構造的特徴，時間帯や曜日，気象条件，交通流量など，所要時間に影響する多様な要因を総合的に考慮している。しかし，これらの手法を避難時の所要時間推定に適用するには依然として課題が残されている。一部のモデルは，高精度の GPS データや高い空間解像度を持つ気象情報，あるいは交通流センサーデータを前提としており，必要なデータが整備されていない地域では適用が困難である。また，深層学習手法はモデル構築に時間を要するため，迅速な判断が求められる災害時の利用には，処理時間の制約という観点から運用上の限界がある。

以上のことから，既存の自動車を対象とした所要時間推定手法を，災害時の避難所要時間推定にそのまま適用することは困難である。このため，災害時の避難所要時間を推定するための新たな手法を開発する必要がある。

２．３．２ 災害リスク評価に関する研究

前節では，適切な避難判断を行うためには，避難所要時間を正確に把握することの重要性について述べた。一方で，この定量化された避難所要時間を用いて，個人レベルから発令区域全体に至るまでの避難リスクをどのように評価し，それを最終的な意思決定へと反映させていくかという点は，もう一つの重要な課題である。

以上を踏まえ，本節では，まず災害の定義および災害リスク評価の基本的な構成といった基礎的内容について整理する。そのうえで，既往の災害リスク評価手法の特徴を分析し，それらの手法が避難判断にどの程度適用可能であるかについて検討する。

２．３．２．１ 災害リスク評価の基本的な考え方

災対法（第 2 条）では，災害を「暴風，豪雨，地震，津波，噴火などの異常な自然現象，またはそれらに類する原因により生ずる被害」と定義している。この異常な自然現象とは，UNESCO の定義によれば，「大気・地質・水文学的な要因に起因し，太陽系から地域・国家・地方に至るまでの範囲で発生する自然の物理的現象」を指す[42]。さらに，同文では，自然災害は，自然ハザードそのものに加えて，社会の脆弱性や，ハザードによって生じる影響への対応能力や対策の不足などが重なり合って生じる現象であるとされている。ここでいう脆弱性については，UNDRR により，人やシステムをハザードに対してより危険な状態にする社会的，経済的，物理的および環境的要因として示されている[43]。

これまでの研究では，ハザードのみに着目して災害を捉えるものも多かったが，ハザードが発生しても，そこに人や社会経済活動が存在しなければ被害は生じず，災害とはならない[44,45]。一方で，脆弱性がどれほど高くても，ハザードが作用しなければ災害は発生しない。この観点から，Ben らは，災害リスクは，自然の加害要因であるハザードと，被害を受ける側の脆弱性が相互に作用することで形成されると指摘している[46]。また，彼らは災害リスク（R）とハザード（H），脆弱性（V）の相互関係を定量化するための計算式として，式（2-1）を提案した。

$$R = H \times V \tag{2-1}$$

２．３．２．２ 既存の災害リスク評価手法と避難への適用可能性

ここでは，Ben らが提示した災害リスク評価の考え方をもとに行われている既往研究について検討する。リスク評価の構成要素や計算式は，その評価の目的や着目点によって異なるため，目的に応じて区分して整理する必要がある。

(1)　防災に活用する災害リスクの評価事例

災害リスクを定量的に評価する既往の一般的な事例としては，防災・減災対策の意思決定者への活用を目的とし，将来の防災対策においてどのような点に重点を置くべきかを明確化するために，国あるいは都道府県レベルで自然災害時の災害リスクを統合的に評価する研究が挙げられる[47,48]。その具体例の一つが WorldRiskIndex (WRI) である[49]。WRI

は世界 193 カ国を対象に潜在的な災害リスクを算出する指標であり，ハザードの発生頻度や規模に関わる曝露（Exposure）と，社会・経済・環境面における脆弱性（Vulnerability）を総合的に評価することで，各国の防災上のホットスポットや優先的に改善すべき要因を把握することを目的としている。算出式は式（2-2）に示すとおりであり，各側面については**図 2-8** に示すように複数の評価項目が設定されている。これにより，各国の総合的な WRI スコアと各指標のスコアが得られ，それらを比較することで，自国が世界平均と比較してどの側面に相対的な弱点を抱えているのかを把握し，今後の防災・減災対策において強化すべき分野を明確にすることが可能となる。

また，日本国内を対象とした災害リスク評価の指標としては，Gross National Safety for natural disasters (GNS) が挙げられる。GNS は，地震・津波・洪水・土砂災害などの各種ハザードに対する曝露と脆弱性を，重み付けした線形和によって統合的に評価するものであり，その算出式は式（2-3）に示されている。曝露は，ハザードにより被害を受ける可能性のある住民を対象とし，居住人口比率によって評価される。脆弱性については，被害を受けやすくする社会・経済・物理的要因を定量化したもので，ハード対策とソフト対策の両面から評価される。前者は建造物の耐震化や老朽化インフラの更新などの物理的対策を指し，後者はハザードマップの整備や災害対応マニュアルの策定，物資の備蓄といった非構造的対策を含む。これらの評価結果を比較することで，各自治体は自地域における相対的な脆弱性の特徴を把握し，将来の防災・減災施策において優先的に取り組むべき分野を明確化することが可能となる。

$$WorldRiskIndex = \sqrt{Exporsure \times Vulnerability} \tag{2-2}$$

$$R = H \times E \times V \quad [\%] \tag{2-3}$$

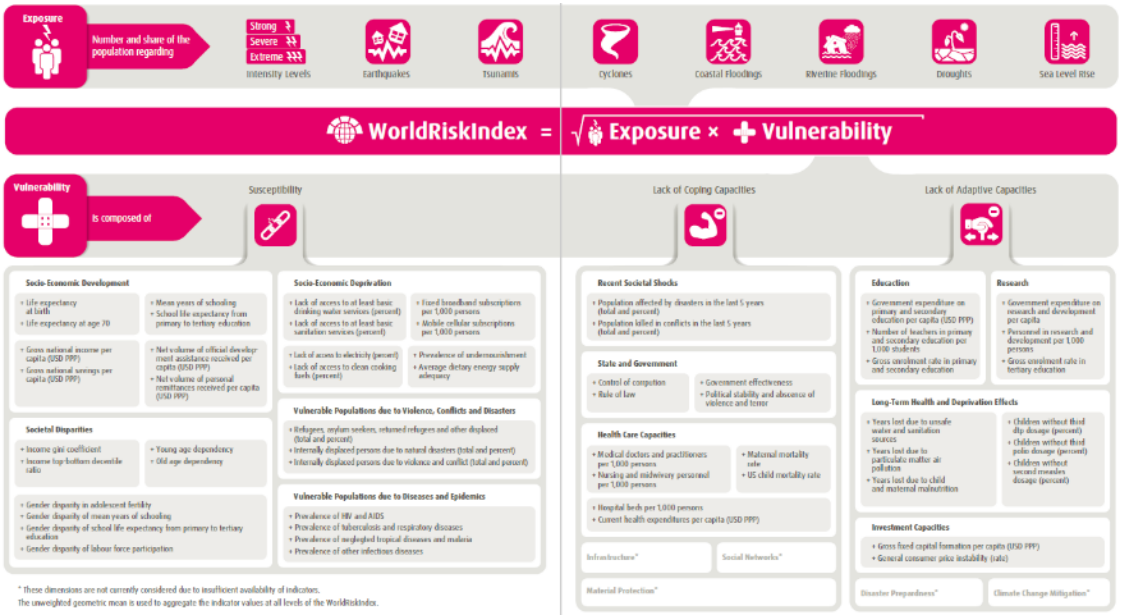


図 2-8 WorldRiskIndex の構成[47]

しかし，WRI や GNS を含むこれらの評価手法は，将来の防災・減災対策を見据えて，平常時に潜在的な脆弱性要因，過去の災害発生頻度，地域の居住人口などを統計的に整理して評価するものである。いずれも静的な計算に基づく手法であるため，災害時に刻々と変化する浸水状況が避難に及ぼす影響を反映することは困難である。

(2) 整備計画に活用する災害リスクの評価事例

治水整備などの具体的な防災施策の実施を検討する場合は，限られた物的・人的資源を最大限に活用し，将来の治水対策を効率的に進めるために，自然災害によって生じる被害額を統計的に評価する事例も多くみられる[50,51]。例えば，「水害の被害指標分析の手引」では，河川氾濫や内水氾濫に伴う水害について，発生確率と被害規模の組合せによってリスクを算定する枠組みが示されている[52]。被害規模は，災害外力（Hazard），被害対象（Exposure），脆弱性（Vulnerability）によって決定される。また，評価にあたっては，人的被害の回避と社会経済被害の軽減という二つの観点から整備効果が算定される。人的被害については，想定死者数を指標として用い，式（2-4）に基づいて算出する。算出時には，年齢，建物階数，浸水深に応じてケースを区分し，各年齢層における垂直避難の想定や浸水深別の死亡率を適用して評価が行われる。一方，経済被害については，一般資産，農作物，公共土木施設等の被害額をもとに，直接的な経済損失を算出する。

$$\begin{aligned}\text{想定死者数} = {} & \text{浸水区域内 65 歳未満人口} \times (1 - \text{避難率}) \times \text{死亡率(65 歳未満の場合)} \\ & + \text{浸水区域内 65 歳以上人口} \times (1 - \text{避難率}) \times \text{死亡率(65 歳以上の場合)}\end{aligned} \tag{2-4}$$

これらの評価により，整備によって期待される人的・経済的損失の低減効果を把握することで，限られた予算の中で効率的に治水施策を進めることが可能となる。しかし，人的被害の算定では，事前に設定された一定の避難率を用い，浸水時の建物上階への垂直避難を前提としている。そのため，災害時の立ち退き避難において時々刻々と変化するリスクを捉えることは難しく，避難リスク評価への適用には限界がある。

(3) 避難に着目した災害リスク評価

既存の災害リスク評価手法は，避難時に求められるリスク評価や避難判断には向いていない。また，避難に関連する評価手法も提案されているものの，実務的な適用には課題が残されている[53,54]。例えば，山野井らは，降雨・斜面崩壊・洪水について時系列で発生リスクを算出し，その推移から自治体が避難情報を発令すべきタイミングを判断する手法を示している。しかし，この手法はハザードの変化のみを対象としており，住民の避難に要する時間など，脆弱性に関わる要因が考慮されていない。そのため，避難判断に用いる場合の精度には限界がある。

そのため，避難判断を支援し得る災害リスク評価手法を新たに提案する必要がある。本研究では，住民一人ひとりの避難所要時間を脆弱性の指標とし，それが刻々と変化する洪

水ハザードの影響を受けてどのように変化するかを定量的に評価することで，リスクを把握する。さらに，算出したリスクを避難判断にどのように活用できるかを検討する。

２．３．３ 既存の経路探索手法とその課題

２．２．５で述べた災害事例は，住民の避難行動において，避難率の低さや，避難途中で被災に至る恐れがあることを示している。前者については，住民の危険性認知が不足していることに加え，日常的な防災情報の蓄積が十分でない場合，「判断を誤ると，かえって避難中に被災するのではないか」という不安が生じ，避難行動をためらわせる一因とみられる。また，後者については，住民が避難所へ向かう経路が日常の通勤・通学で利用する経路と一致しない場合が多く，避難時には不慣れな経路を確認する時間が十分に確保できず，どの経路が既に浸水しているのかを事前に把握しづらい点も，被災につながる要因として考えられる。このため，住民の避難行動を支援するために，災害時に利用可能な避難経路探索システムを提供することが求められる。

既存の経路探索システムの代表例としては，Google Maps や NAVITIME が広く利用されている。特に Google Maps は，自動車・徒歩・公共交通といった多様な移動手段に対応しており，リアルタイムの交通情報や渋滞予測も提供している。また，NAVITIME は日本国内での利用率が高く，日本特有の細街路や私道まで反映した地図データを備えており，一部の地域では避難所の情報も提供されている。しかし，災害時の利用を考えると，これらの一般的な経路探索システムは，道路の冠水や土砂災害による通行止めなど，災害時に発生する状況を経路探索に継続的かつ自動的に反映することが困難であるという課題を抱えている。

避難時の経路探索システムは，大きく行政向けに整備される非公開型のシステム，研究段階にとどまるモデル群，一般住民を対象とした実用的なアプリケーションに大別される。しかし，これら既存の手法はいずれも運用面で課題を残している[55-58]。

行政向けの一例として，米国では FEMA によって避難ルートの選定を支援するツールが開発されている。同システムは，洪水シミュレーションに基づいて作成された浸水予測データを取り込み，浸水区域を回避した避難経路を自動的に算出できる点に特徴がある。ただし，使用されるデータはあくまで事前に作成された予測値であり，リアルタイムの浸水状況を反映することはできない。また，市民向けには公開されておらず，行政内部での利用に限定されている。さらに，研究段階のモデルとしては，An らが提案した浸水予測データと道路ネットワークを統合した経路探索モデル（coupled flood–road network model）がある。このモデルは，洪水の時間的変化を踏まえて経路を算定できる一方，実装には UAV による高解像度 DEM の取得や大規模な三次元洪水解析が必要となるため，適用可能な地域は限定的である。さらに，現状では研究段階にとどまっており，実運用を見据えた検討は行われていない。

一方，市民向けのアプリケーションとしては，日本では MSI Emergency Navigation や全国避難所ガイドが代表的である。MSI は最寄りの避難所への案内や徒歩避難時のナビゲーションに対応し，AR による方向表示やオフライン環境での利用などの実用的な機能を備える。しかし，災害時の浸水や通行止めといった状況変化をリアルタイムに取得・反映する仕組みはなく，動的な経路探索には対応していない。また，全国避難所ガイドは，現在地周辺の避難所検索や経路案内に加え，洪水浸水想定区域などのハザードマップを提示することができる。ただし，利用されている情報はすべて事前に作成された静的データであり，実際の浸水状況や道路の通行可否を踏まえた経路探索を行うことはできない。

以上の課題を踏まえると，全国的に利用可能で，リアルタイムの浸水情報を取り込んだ住民向け避難経路探索システムの開発が求められる。

２．４ まとめ

本章では，まず避難情報の種類やそれぞれの発令基準，避難判断に資する情報など，避難に関する基礎的内容を体系的に整理した。続いて，近年の災害事例における被害統計や避難状況を踏まえ，自治体が避難情報の発令タイミングや対象区域の判断において抱える課題を明らかにした。また，これらの災害で示された避難率の低さから，住民自身が災害リスクを十分に認識できていない点を課題として整理した。こうした状況を踏まえ，自治体の避難判断を支援する仕組みと住民の避難行動を支援する仕組みの構築が重要であることを明らかにした。

さらに，所要時間の推定や災害リスク評価に関する既往研究を分析した結果，既存手法では災害時の避難所要時間の推算や避難リスクの評価に十分対応できていないことが分かり，本研究における新たな避難所要時間予測手法および災害リスク評価手法の開発の必要性を確認した。また，既存の経路探索システムを整理した結果，災害時の避難経路探索には多くの制約が存在することが明らかとなり，本研究において新たな避難経路探索システムを構築する必要性を明確にした。

参考文献

1. 災害対策基本法（昭和三十六年法律第二百二十三号）．https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=336AC0000000223，（参照日：2025 年 11 月 15 日）．
2. 内閣府，「避難勧告等の判断・伝達マニュアル作成ガイドライン」，2015 年 8 月．https://www.bousai.go.jp/oukyu/hinankankoku/guideline/pdf/150819_honbun.pdf，（参照日：2025 年 11 月 15 日）．
3. 内閣府，「避難情報に関するガイドライン（令和 4 年 9 月更新）」，2022 年 9 月．https://www.bousai.go.jp/oukyu/hinanjouhou/r3_hinanjouhou_guideline/pdf/hinan_guideline.pdf，（参照日：2025 年 11 月 15 日）．
4. 秋田市，「避難情報と警戒レベル」，2021 年 9 月 28 日（更新）．https://www.city.akita.lg.jp/bosai-kinkyu/bosai/1002170/1001629.html，（参照日：2025 年 11 月 17 日）．
5. 水防法（昭和二十四年法律第百九十三号）．https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=324AC0000000193，（参照日：2025 年 11 月 17 日）．
6. 気象庁，「洪水に関する防災気象情報の活用」．https://www.jma.go.jp/jma/kishou/know/ame_chuui/ame_chuui_p8-2.html，（参照日：2025 年 11 月 17 日）．
7. 気象庁，「新たな防災気象情報について（令和８年～）」．https://www.jma.go.jp/jma/kishou/know/bosai/keiho-update2026/index.html，（参照日：2026 年 1 月 9 日）．
8. 水管理・国土保全局および気象庁，「河川氾濫・大雨に関する情報の改善」．https://www.jma.go.jp/jma/kishou/know/bosai/keiho-update2026/pdf/heavyrain_flood_info2026.pdf，（参照日：2026 年 1 月 9 日）．
9. 気象庁，「体系整理を踏まえた気象警報・解説情報 XML 電文（概要）」．https://www.jma.go.jp/jma/kishou/know/bosai/keiho-update2026/tech-info/pdf/techinfo_outline.pdf，（参照日：2026 年 1 月 9 日）．
10. 内閣府，「防災情報：5 段階の警戒レベルについて」．https://www.bousai.go.jp/pdf/5keikailevel.pdf，（参照日：2025 年 11 月 17 日）．
11. 気象庁，「平成 27 年 9 月関東・東北豪雨及び平成 27 年台風第 18 号による大雨等」，2015 年 12 月．https://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/saigaiji/saigaiji_2015/saigaiji_201501.pdf，（参照日：2025 年 11 月 17 日）．
12. 国土地理院企画部防災推進室，「平成 27 年 9 月関東・東北豪雨災害に関する国土地理院の対応」，国土地理院時報，No. 128，pp. 31-33，2016．https://www.gsi.go.jp/common/000139086.pdf，（参照日：2025 年 11 月 17 日）．
13. 内閣府，「平成 27 年台風第 18 号による大雨等に係る被害状況等について」，2017 年 10 月 18 日．https://www.fdma.go.jp/disaster/info/assets/post793.pdf，（参照日：2025 年 11 月 17 日）．
14. 内閣府，「平成 27 年 9 月関東・東北豪雨による被害状況等について」，2015 年 9 月 24 日．https://www.bousai.go.jp/updates/h27typhoon18/pdf/h27typhoon18_20.pdf，（参照日：2

025 年 11 月 17 日）.
15. 国土交通省，「平成 27 年 9 月 鬼怒川決壊の概要」，2016 年．https://www.pref.mie.lg.jp/common/content/000736388.pdf，（参照日：2025 年 11 月 17 日）.
16. 内閣府，「平成 29 年 6 月 30 日からの梅雨前線に伴う大雨及び台風第 3 号の被害状況及び消防機関等の対応状況について」，2018 年 10 月 31 日．https://www.fdma.go.jp/disaster/info/items/b415db68eb0850414c74aca2f164cf3dbda5c43a.pdf，（参照日：2025 年 11 月 17 日）.
17. 国土交通省，「平成 29 年 7 月九州北部豪雨による土砂災害の概要＜速報版＞Vol. 6」，2017 年 9 月 4 日．http://www.mlit.go.jp/river/sabo/h29_kyushu_gouu/gaiyou.pdf，（参照日：2025 年 11 月 17 日）.
18. 牛山 素行，横幕 早季，「2017 年の豪雨災害による人的被害の特徴」，東北地域災害科学研究，Vol. 54，pp. 131-136，2018 年 3 月.
19. 日本災害情報学会平成 29 年 7 月九州北部豪雨調査団，「平成 29 年 7 月九州北部豪雨に関する調査報告」，災害情報，No. 16-2，pp. 322-345，2018.
20. 気象庁，「平成 30 年 7 月豪雨及び 5 月 20 日から 7 月 10 日までの梅雨前線等による大雨等」，2019 年 3 月 5 日．https://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/saigaiji/saigaiji_2018/saigaiji_201902.pdf，（参照日：2025 年 11 月 17 日）.
21. 内閣府，「平成 30 年 7 月豪雨及び台風第 12 号による被害状況及び消防機関等の対応状況」，2019 年 8 月 20 日．https://www.fdma.go.jp/disaster/info/items/190820nanagatugouu60h.pdf，（参照日：2025 年 11 月 17 日）.
22. 平成 30 年 7 月豪雨による水害・土砂災害からの避難に関するワーキンググループ，「平成 30 年 7 月豪雨の概要」，2018 年 12 月．https://www.bousai.go.jp/fusuigai/suigai_dosyaworking/pdf/sankosiryo1.pdf，（参照日：2025 年 11 月 17 日）.
23. 平成 30 年 7 月豪雨を教訓とした安全・避難対策のあり方研究会，「平成 30 年 7 月豪雨を教訓とした安全・避難対策のあり方」，2018 年 12 月．https://www.pref.tottori.lg.jp/secure/1153500/H30arikata.pdf，（参照日：2025 年 11 月 17 日）.
24. H. Gehlot, A. M. Sadri, and S. V. Ukkusuri, “Joint modeling of evacuation departure and travel times in hurricanes,” Transportation, vol. 46, pp. 299-322, 2018. https://doi.org/10.1007/s11116-018-9958-4
25. Q. Deng, B. Zhang, Z. Zhou, H. Deng, L. Zhou, Z. Zhou, and H. Jiang, “Evacuation time estimation model in large buildings based on individual characteristics and real-time congestion situation of evacuation exit,” Fire, vol. 5, no. 6, p. 204, 2022. https://doi.org/10.3390/fire5060204
26. H. Qiu, X. Liang, Q. Chen, and E. W. M. Lee, “Effect of different time step sizes on pedestrian evacuation time under emergencies such as fires using an extended cellular automata model,” Fire, vol. 7, no. 3, p. 100, 2024. https://doi.org/10.3390/fire7030100
27. B. Kunwar, F. Simini, and A. Johansson, “Evacuation time estimate for total pedestrian evacuat

ion using a queuing network model and volunteered geographic information," Physical Review E, vol. 93, no. 3, p. 032311, 2016. https://doi.org/10.1103/PhysRevE.93.032311

28. A. Cuesta, O. Abreu, A. Balboa, and D. Alvear, "Real-time evacuation route selection methodology for complex buildings," Fire Safety Journal, vol. 91, pp. 947-954, 2017. https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.04.011
29. T. Suzuki, T. Watanabe, and S. Okuyama, "Facilitating community risk communication for wide-area evacuation during large-scale floods," International Journal of Environmental Research and Public Health, vol. 16, no. 14, p. 2466, 2019. https://doi.org/10.3390/ijerph16142466
30. Y. Liu and J. Yu, "Emergency evacuation planning for highly populated urban zones: A transit-based solution and optimal operational strategies," in Emergency Management, IntechOpen, pp. 59-74, 2012. https://doi.org/10.5772/33653
31. 帯広市,「平成 28 年台風 10 号による災害対応の検証結果」, 2017 年 5 月. https://www.city.obihiro.hokkaido.jp/_res/projects/default_project/_page_/001/002/382/zenbun.pdf, (参照日：2025 年 11 月 18 日).
32. Y. Liu, G. Wang, Z. Jiang, J. Qian, and Y. Chen, "An integrated decision support system for emergency evacuation management," in Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC 2016), Budapest, Hungary, Oct. 9-12, 2016. https://doi.org/10.1109/SMC.2016.7844362
33. K. F. Qiu and W. L. Jin, "Studies of emergency evacuation strategies based on kinematic wave models of network vehicular traffic," in Proceedings of the 11th IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2008), Beijing, China, Oct. 12-15, 2008. https://doi.org/10.1109/ITSC.2008.4732595
34. P. G. Gipps, "A behavioural car-following model for computer simulation," Transportation Research Part B: Methodological, vol. 15, no. 2, pp. 105-111, 1981. https://doi.org/10.1016/0191-2615(81)90037-0
35. A. J. Pel, M. C. J. Bliemer, and S. P. Hoogendoorn, "A review on travel behaviour modelling in dynamic traffic simulation models for evacuations," Transportation, vol. 39, pp. 97-123, 2012. https://doi.org/10.1007/s11116-011-9320-6
36. M. Abdollahi, T. Khaleghi, and K. Yang, "An integrated feature learning approach using deep learning for travel time prediction," Expert Systems with Applications, vol. 139, p. 112864, 2020. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2019.112864
37. D. D. Li, D. X. Yu, Z. J. Qu, and S. H. Yu, "Feature selection and model fusion approach for predicting urban macro travel time," Mathematical Problems in Engineering, vol. 2020, Article ID 6897965, 2020. https://doi.org/10.1155/2020/6897965
38. A. Rasaizadi, S. Seyedabrishami, and M. S. Abadeh, "Short-term prediction of traffic state for a rural road applying ensemble learning process," Journal of Advanced Transportation, vol. 2021,

Article ID 3334810, 2021. https://doi.org/10.1155/2021/3334810
39. L. Kang, G. Hu, H. Huang, W. Lu, and L. Liu, “Urban traffic travel time short-term prediction model based on spatio-temporal feature extraction,” Journal of Advanced Transportation, vol. 2020, Article ID 3247847, 2020. https://doi.org/10.1155/2020/3247847
40. W. Song and Y. Zhou, “Road travel time prediction method based on random forest model,” in Smart Trends in Computing and Communications, vol. 165, pp. 155-163, 2020. https://doi.org/10.1007/978-981-15-0077-0_17
41. N. Chiabaut and R. Faitout, “Traffic congestion and travel time prediction based on historical congestion maps and identification of consensual days,” Transportation Research Part C: Emerging Technologies, vol. 124, p. 102920, 2021. https://doi.org/10.1016/j.trc.2020.102920
42. UNESCO, “Disaster risk reduction,” https://zh.unesco.org/node/314865,（参照日：2025 年 11 月 19 日）.
43. UNDRR, “Vulnerability,” https://www.undrr.org/terminology/vulnerability,（参照日：2025 年 11 月 19 日）.
44. 和田 一範，村瀬 勝彦，冨澤 洋介,「地球温暖化に伴う降雨特性の変化と洪水・渇水リスクの評価に関する研究」，土木学会論文集，No. 796，Ⅱ-72，pp. 23-37，2005 年 8 月.
45. 佐藤 丈晴,「深層学習による近傍の地形的特性を考慮した土砂災害リスク評価」，砂防学会誌，Vol. 74，No. 2，pp. 3-12，2021.
46. B. Wisner, At risk: Natural hazards, people’s vulnerability and disasters, Routledge, 2003.
47. Bündnis Entwicklung Hilft, WorldRiskReport 2024, https://securesustain.org/wp-content/uploads/2024/10/WorldRiskReport_2024.pdf,（参照日：2025 年 11 月 19 日）.
48. 菊本 統，下野 勘智，伊藤 和也，大里 重人，稲垣 秀輝，日下部 治,「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)，pp. 43-57，2017.
49. Bündnis Entwicklung Hilft, WorldRiskReport 2011, https://weltrisikobericht.de/wp-content/uploads/2016/08/WorldRiskReport_2011.pdf,（参照日：2025 年 11 月 19 日）.
50. 国土交通省 水管理・国土保全局,「水害リスク評価の手引き（試行版）」，2018 年.（参照日：2025 年 11 月 19 日）.
51. 大津 宏康 ほか,「地震に伴う災害リスク評価に基づく斜面補強の戦略的立案方法に関する一提案」，土木学会論文集，No. 679，pp. 123-133，2001 年 6 月.
52. 国土交通省 水管理・国土保全局,「水害の被害指標分析の手引（H25 試行版）」，2013 年 7 月.（参照日：2025 年 11 月 19 日）.
53. 山野井 一輝，藤田 正治,「豪雨時の水・土砂災害に関わるハザード群の発生リスク評価」，土木学会論文集 B1（水工学），Vol. 72，No. 4，pp. I_1291-I_1296，2016.
54. K. P. Georgakakos, “Determinants of evacuation timing in response to probabilistic forecasts,” Natural Hazards, vol. 121, pp. 18849-18878, 2025. https://doi.org/10.1007/s11069-025-07540-

5
55. FEMA, “Hurricane preparedness and evacuation planning,” https://www.fema.gov/emergency-managers/risk-management/hurricanes, （参照日：2025 年 11 月 19 日）.
56. G. An, Z. Wang, M. Qu, and S. Hu, “Integrated optimization of emergency evacuation routing for dam failure-induced flooding: A coupled flood–road network modeling approach,” Applied Sciences, vol. 15, p. 4518, 2025. https://doi.org/10.3390/app15084518
57. 三井住友海上,「iPhone・Android 専用アプリ三井住友海上「スマ保」アプリのご紹介」, https://www.ms-ins.com/sumaho, （参照日：2025 年 11 月 19 日）.
58. 防災情報［全国避難所ガイド］, https://www.hinanjyo.jp, （参照日：2025 年 11 月 19 日）.

第３章 避難所要時間予測手法の開発

３．１ はじめに

危険区域に居住する住民が自宅から離れ，安全な避難場所へ移動する立ち退き避難は，洪水による人的被害を軽減するうえで有効な対策とされている[1-3]。このため，各自治体は災害発生時に避難情報を発令し，住民に避難行動を促している[4]。しかし，過去の災害事例では，住民が避難を完了するまでに要する時間を自治体が正確に把握することが困難であると指摘されている[5]。したがって，避難所要時間を高精度に推定することは，自治体が災害発生前に適切な避難情報の発令タイミングを判断するうえで極めて重要であると考えられている[6-9]。

これまで，国内外で避難所要時間の推定に関する研究が数多く行われてきた[10-12]。しかし，２．３．１で述べたとおり，既往研究の多くは徒歩を対象とした避難所要時間の推定である。徒歩避難は災害時の基本的な避難手段とされている一方で，過去の東日本大震災をはじめとする災害事例では，自動車による避難が多かったことが報告されている[13]。このため，徒歩避難に加えて，自動車を用いた場合の避難所要時間の推定も重要となる。

しかし，既存の自動車避難に関する所要時間の推定手法では，避難時の交通渋滞が所要時間に与える影響に着目した研究が多く，道路構造や土地利用といった地域の特性が車両走行速度に及ぼす影響は考慮されていない[14,15]。内閣府が公表する避難の基本方針では，自動車による避難所要時間を検討する際には，走行速度や渋滞だけでなく，避難経路沿いの道路幅員，交差点数，主要道路と細街路の構成といった地域の交通事情に加え，対象地域の人口規模，地形条件といった社会環境条件も考慮すべきであるとされている[16]。

また，既往の所要時間推定に関する研究の中には，高精度 GPS や交通流センサーなど，取得可能な地域が限定されるデータを用いた手法も多く，そのため広域的な適用には限界がある。日本では，過去 10 年間で全国の約 97%の市町村において水害や土砂災害が確認されており，防災対策は全国的な視点から検討する必要がある[17]。このため，避難所要時間の推定手法には，地域を問わず適用可能であることが強く求められている。

以上の課題を踏まえ，著者らは，自治体による避難判断に資する定量的な情報を提供することを目的として，機械学習を用いた自動車避難時の移動所要時間予測手法（以下，ベースモデル）を開発してきた[18]。本手法は，機械学習アルゴリズムとして Random Forest を採用し，道路の構造的属性や交通条件，周辺環境に加え，移動時間帯や曜日といった多様な要因を考慮して構築したものである。また，本手法で用いる入力データはいずれも日本全国で一般に入手可能な情報であり，特定の地域に依存せず，全国の市区町村に適用可能である点を特徴としている。これまでに，茨城県常総市を対象としてベースモデルを構築し，精度検証を行った結果，テストデータの約 98%において，予測移動所要時間の誤差が 2 分以内に収まることが確認されている。一方で，災害時における実運用を想定した場合，本ベースモデルには 3 つの課題が残されており，以下ではそれらについて整理する。

(1) Random Forest によるモデル性能の制約

避難所要時間の予測手法には，日本全国における都市規模や交通条件の異なる多様な地域に対して，安定して適用可能であることが求められる。しかし，Random Forest に基づくベースモデルでは，交通網が高度に発達した大都市等を対象とする場合，計算効率の面で課題が生じる可能性がある。Random Forest は，多数の決定木を個別に構築し，各決定木においてノード単位で分割処理を逐次的に行う手法であるため，学習データ量の増加に伴い，学習および予測に要する計算負荷が大きくなる傾向がある。また，本研究では後述する区域特性を表す説明変数を追加した分析を行うことを想定しており，説明変数の増加に伴って，モデルにはより複雑な関係性の表現が求められる。しかし，Random Forest は，各ノードの分割において単一の特徴量のみを基準として木構造を形成する仕組みであるため，特徴量間の相互作用を十分に捉えることが難しい。その結果，区域特性を踏まえた分析においては，予測性能に限界が生じる可能性がある。

(2) 地域内の特性を十分に反映できていない

自動車の走行速度は，住宅地・商業地・工業地といった沿道の用途地域や公共交通の状況によって変動することが指摘されている[19-21]。しかし，ベースモデルでは避難経路周辺の土地利用・土地被覆といった要素は考慮しているものの，地域の用途に伴う社会・経済的活動の違いが走行速度に及ぼす影響までは十分に反映されていない。そのため，地域内で経済活動や交通条件に明確な差異が存在する場合には，予測精度にばらつきが生じる可能性がある。さらに，同一地域内であっても，市街地と農村部では避難行動の特性そのものが大きく異なることも指摘されている[22,23]。市街地では，避難施設や医療資源が集中していることから，避難時に人口が中心部へ集まりやすく，渋滞が発生しやすい[24]。一方で，農村部は市街地に比べて相対的に広く，避難施設も互いに離れて配置されているため，渋滞リスクは低いものの，地形や道路条件の影響を受けやすく，避難効率が左右されやすい[25]。したがって，こうした地域特性の差異を適切に取り込むことは，多様な地域に適用可能な避難所要時間予測モデルの構築に向けて不可欠である。

(3) 全国展開を想定した地域間の汎化性能の限界

ベースモデルでは，市区町村単位で構築した予測モデルに基づき，避難所要時間の算定を行っている。また，既にモデルを構築した市区町村のテスト経路に対する適用においても，一定の予測精度が得られていることが確認されている。しかし，全国 1,741 の市区町村で個別に予測モデルを作成することは，費用や労力の制約から現実的ではない。さらに，既往研究では，特定地域で学習したモデルを他地域へ適用した場合，予測精度が十分に確保されないことが指摘されている[26]。以上より，ベースモデルを高度化し，複数地域に対しても安定して適用し得る汎化性能を備えたモデルの構築が求められる。

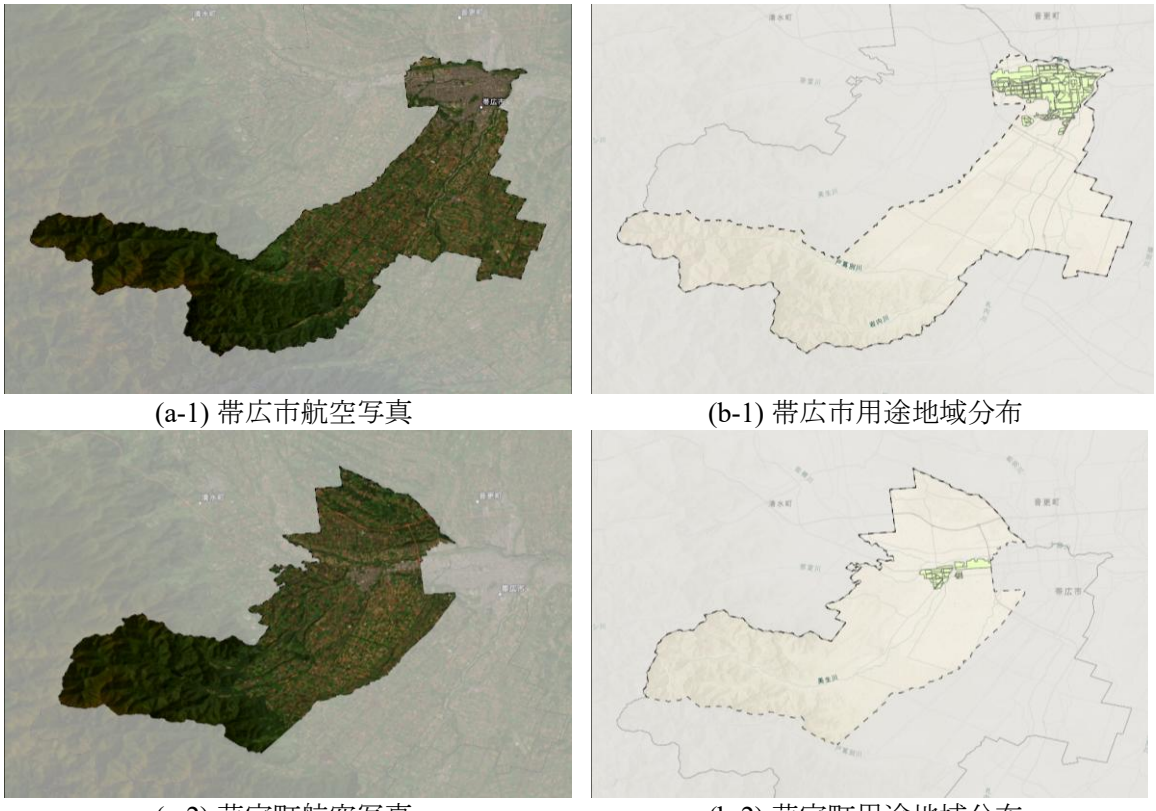
したがって，本章では，これら三つの側面における課題を解決するため，避難所要時間予測手法の高度化について検討する。まず，日本全国を対象として複数の地域を選定し，

Random Forest を含む異なる機械学習アルゴリズムに基づいてそれぞれベースモデルを構築する。その上で，各モデルの予測性能を比較し，本研究におけるモデル構築に適した機械学習手法を選定する。次に，市街地と農村部における区域特性の違いを反映した新たな避難所要時間予測手法を開発し，ベースモデルとの比較を通じて，提案手法の妥当性を検討する。最後に，予測精度の高い手法を用いて，対象地域間における汎化性能を検証し，地域をまたいで適用可能な避難所要時間予測モデルの構築を行う。

３．２ 研究の対象地域

３．２．１ 対象地域の概要

本研究では，日本全国の中から，都市規模や地形条件が多様であり，河川氾濫等の災害リスクが想定される 13 地域を研究対象として選定した。対象地域には，北海道の帯広市・芽室町，茨城県の常総市，千葉県の香取市，京都府の舞鶴市，岡山県の高梁市，兵庫県の加古川市・小野市，福岡県の博多区・糸島市・東峰村，熊本県の人吉市，および東京都 23 区の一つである足立区が含まれる。**図 3-1** には，対象地域の衛星画像と地域内部の市街地分布を示す。なお，市街地の正確な分布データは公表されていないが，都市計画法により市街化区域には用途地域の指定が義務付けられていることから，本研究では用途地域の分布を市街地分布として扱う[27]。



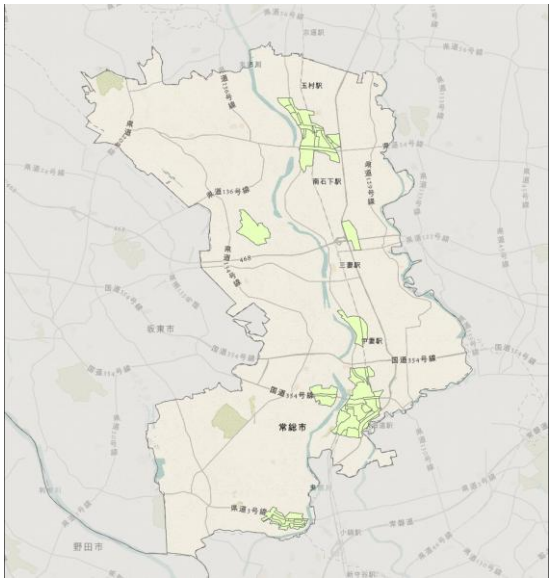
(a-1) 帯広市航空写真　(b-1) 帯広市用途地域分布

(a-2) 芽室町航空写真　(b-2) 芽室町用途地域分布

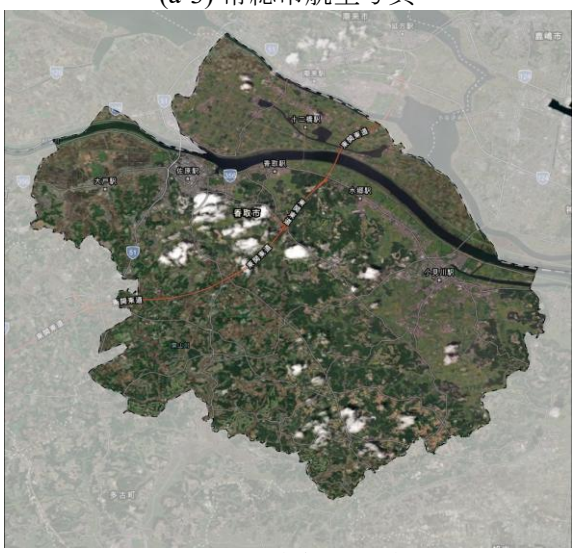
図 3-1 対象地域における (a) 航空写真 および (b) 用途地域図



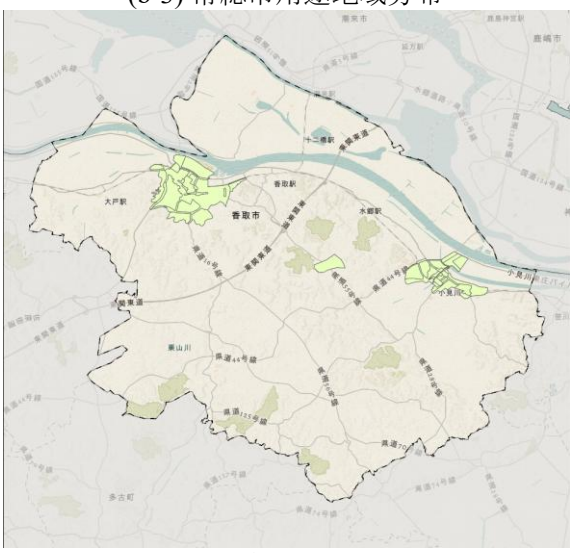
(a-3) 常総市航空写真



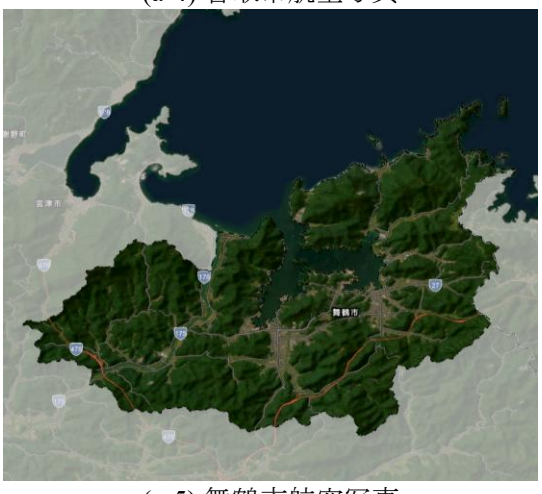
(b-3) 常総市用途地域分布



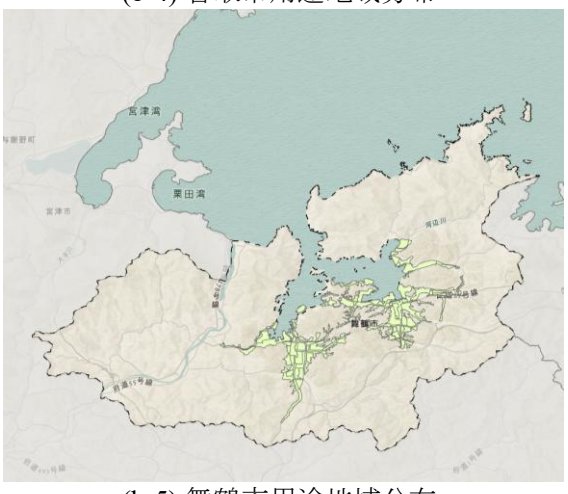
(a-4) 香取市航空写真



(b-4) 香取市用途地域分布

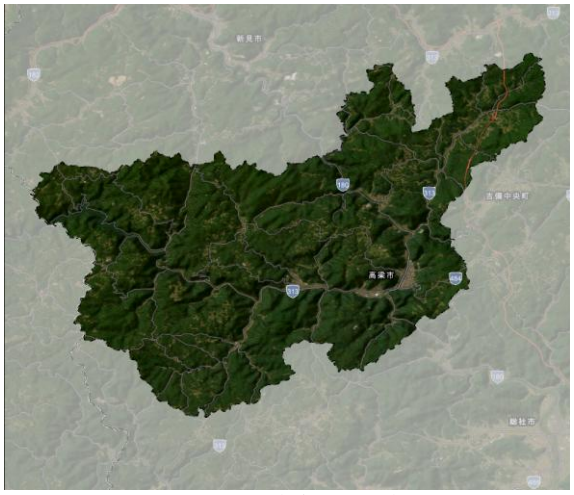


(a-5) 舞鶴市航空写真

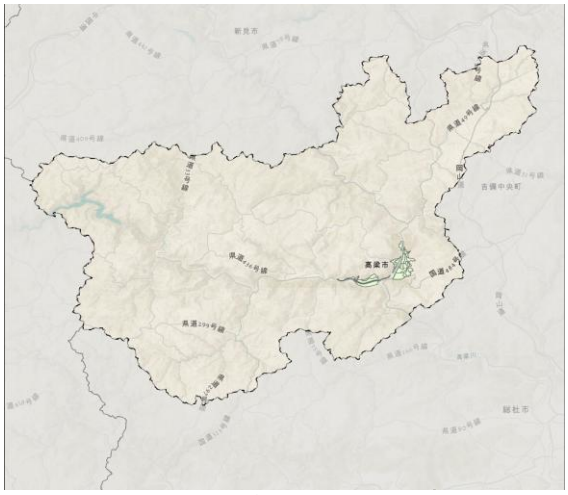


(b-5) 舞鶴市用途地域分布

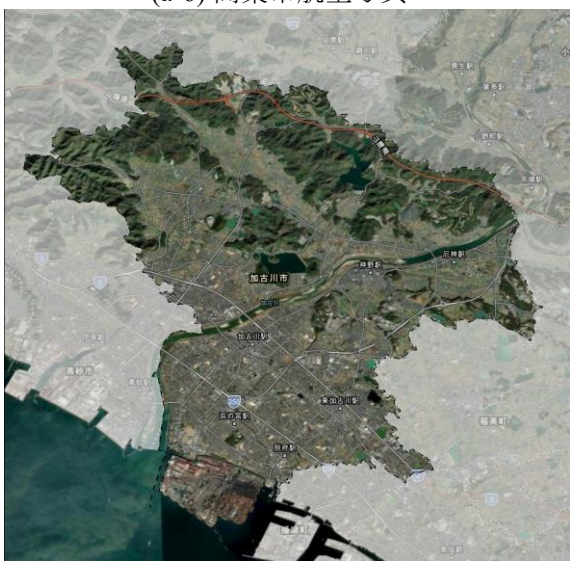
図 3-1 対象地域における (a) 航空写真 および (b) 用途地域図



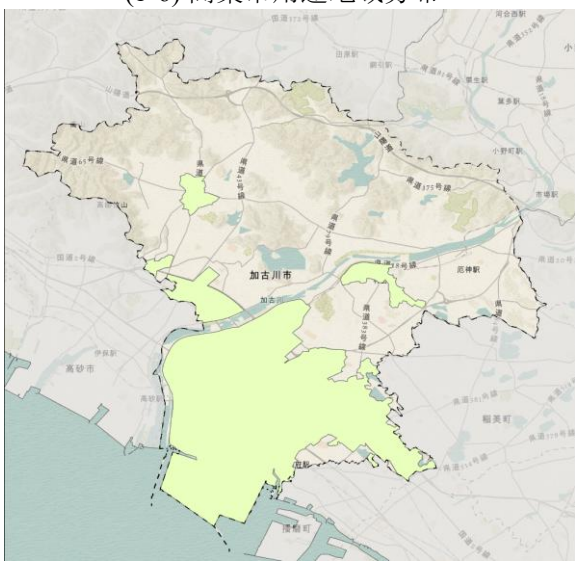
(a-6) 高梁市航空写真



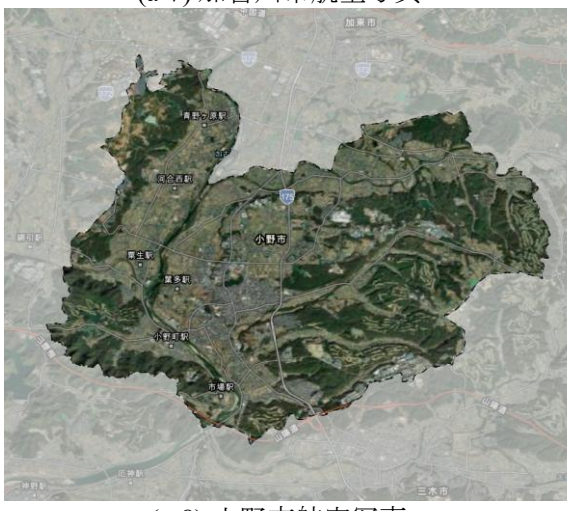
(b-6) 高梁市用途地域分布



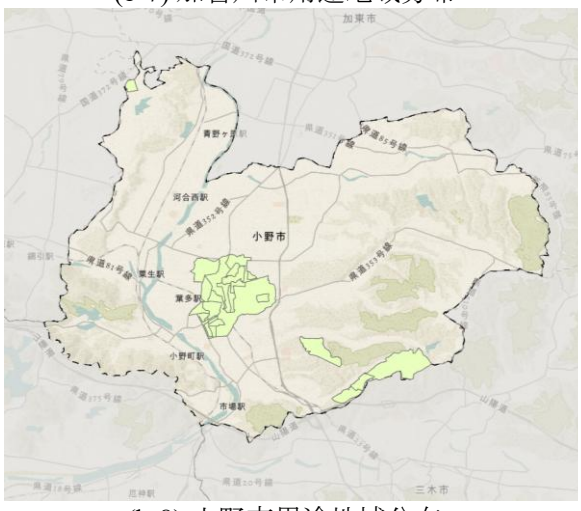
(a-7) 加古川市航空写真



(b-7) 加古川市用途地域分布



(a-8) 小野市航空写真

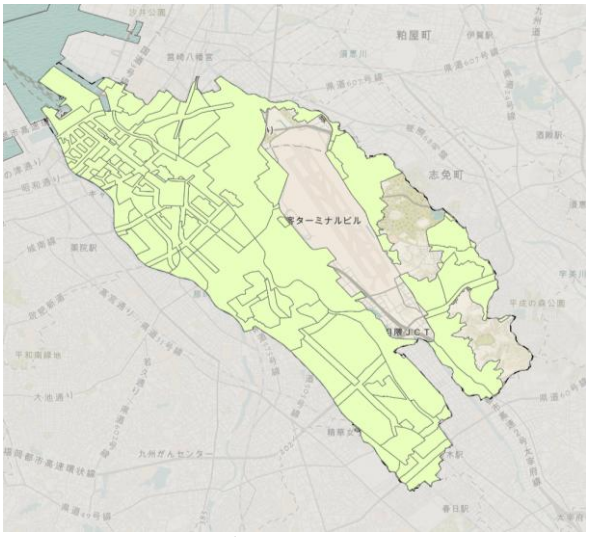


(b-8) 小野市用途地域分布

図 3-1 対象地域における (a) 航空写真 および (b) 用途地域図



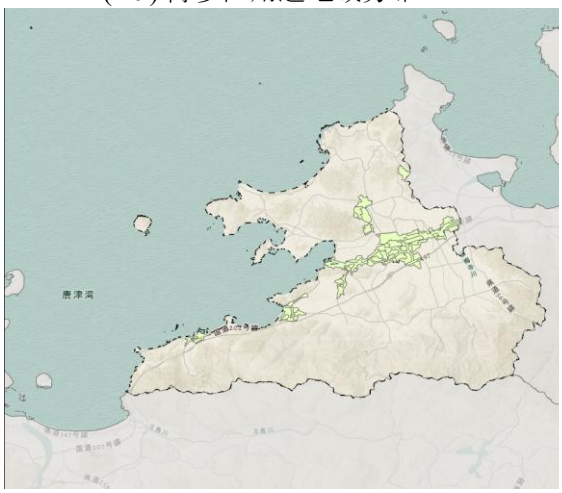
(a-9) 博多区航空写真



(b-9) 博多区用途地域分布



(a-10) 糸島市航空写真



(b-10) 糸島市用途地域分布

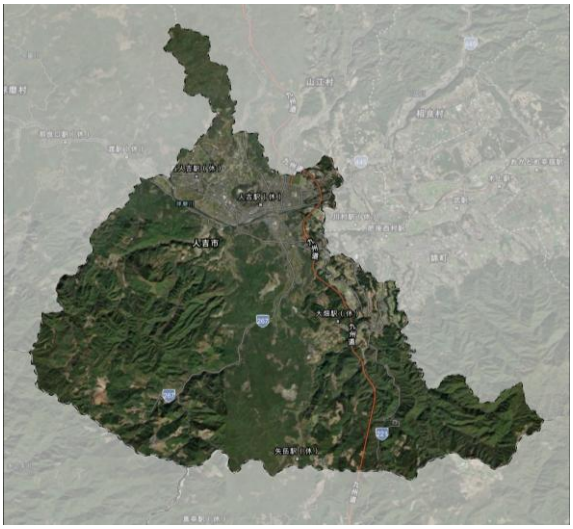


(a-11) 東峰村航空写真

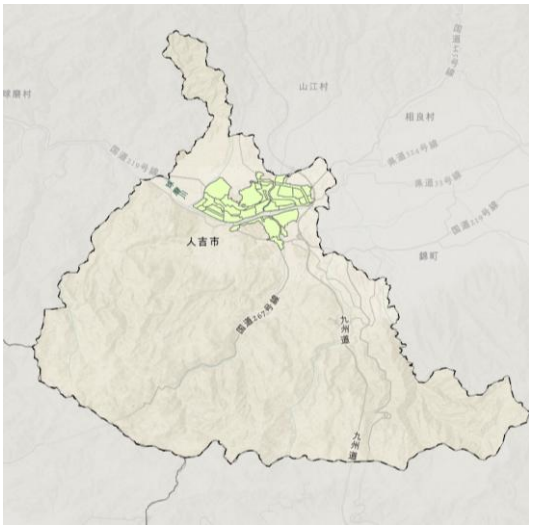


(b-11) 東峰村用途地域分布

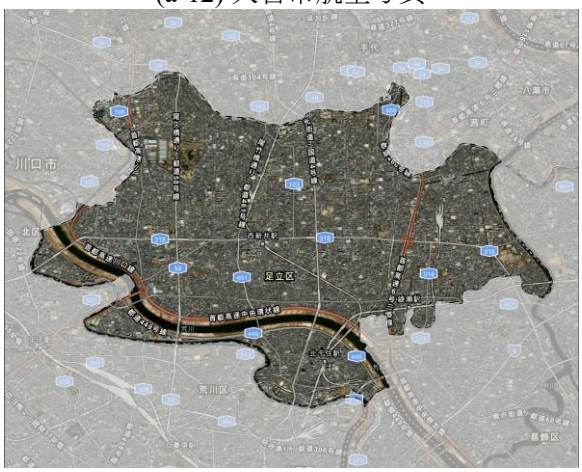
図 3-1 対象地域における (a) 航空写真 および (b) 用途地域図



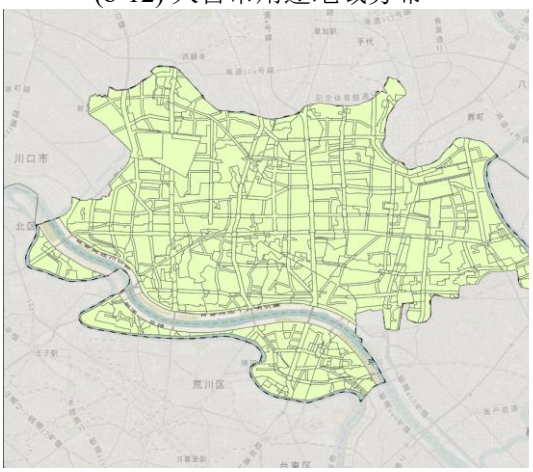
(a-12) 人吉市航空写真



(b-12) 人吉市用途地域分布



(a-13) 足立区航空写真



(b-13) 足立区用途地域分布

図 3-1 対象地域における (a) 航空写真 および (b) 用途地域図

図 3-1 に示したとおり，これら 13 地域は日本各地に分布しており，沿岸部，主要河川流域，または山間部など，災害に対して脆弱な地理的条件を有する地域である。そのため，豪雨時にはこれらの地域で洪水や土砂災害が発生する危険性が高く，特に自治体の避難判断および住民の避難行動を支援する体制の充実が求められる。以下では，各地域の特徴について述べる。

(1)　北海道帯広市

帯広市は北海道中東部に位置し，面積は 619.34km^2 と広く，総人口 159,568 人のうち，多くが北部の市街化区域に集中している[28]。一方，南部は農村地域が中心で，人口密度は低い。地域内には帯広川や途別川など，十勝川水系の支流が流れている。平成 28 年台風 10 号の際には，帯広市北部で内水氾濫が発生し，南部では戸蔦別川の堤防決壊により大規模な浸水被害が出たほか，道路が損壊して交通が寸断され，一部地域が孤立するなど，甚大な被害が生じた[29]。

(2) 北海道芽室町

芽室町は十勝平野西部の河西郡に位置しており，東南部で帯広市，西北部で清水町などと接している[30]。面積は 513.76km^2 で帯広市とほぼ同規模であるが，総人口は 17,606 人と少なく，人口密度も低い。地域内には十勝川およびその支流である芽室川，帯広川などの一級河川が流れている。帯広市に隣接していることから，芽室町も平成 28 年の台風 10 号の際に大きな影響を受けた[31]。芽室川の破堤をはじめ，周辺の家屋・工場・農地が浸水し，国道 38 号の冠水など，甚大な被害が発生した。

(3) 茨城県常総市

常総市は茨城県南西部の県西地域にあり，東京都心から約 50km に位置することから，前述の 2 地域と比べて人口密度が高い[32]。面積 123.64km^2 の範囲に 58,236 人が居住している。市の中央部には一級河川である鬼怒川が流れ，東部は低地で水田地帯が広がっている。一方，西部は丘陵地となっており，集落や畑地，平地林が分布している。

平成 27 年 9 月の関東・東北豪雨では鬼怒川が氾濫し，全市域で大規模な避難が実施されたものの，道路の冠水により一部の避難経路が寸断され，多くの住民が避難に遅れる事態となった[33]。この水害後には避難や転出により 1 年間で市の人口は 800 人以上減少し，約 50 の商工業者が廃業した[34]。さらに，近年も人口減少の傾向が続いていることから，河川氾濫に対する防災対策を特に強化する必要がある。

(4) 千葉県香取市

香取市は千葉県北東部にあり，面積は 262.35km^2，総人口は 66,646 人である。利根川下流域の水郷地帯に位置し，低地や沖積平野が広がっていることから，浸水，氾濫，液状化などの影響を受けやすい地域である[35]。過去には東日本大震災，令和元年台風 15 号，令和 5 年 9 月の台風 13 号などにより複数の被害が発生しており，地震，洪水害，浸水害に対して特に注意が求められる[36-38]。

(5) 京都府舞鶴市

舞鶴市は京都府北部に位置し，日本海の若狭湾に面している[39]。市域面積は 342.12km^2，総人口は 73,693 人であるが，総面積のうち 70%以上を山地が占めており，可住地面積は 73.08km^{2}にとどまる。そのため，可住地の人口密度は 1,099 人/km^2 と高く，災害時には避難における混雑の発生が懸念される[40]。

また，舞鶴市は臨海地域であることに加え，市内の平野部には伊佐津川が流れていることから，土砂災害，津波，河川氾濫の発生危険性が高い。平成 25 年から令和 5 年までの統計によれば，大雨により大きな災害をもたらした事例は 17 件に上っている[41]。したがって，舞鶴市においては，マルチハザードを考慮した総合的な減災方策の検討が求められる。

(6) 岡山県高梁市

高梁市は岡山県の中西部に位置し，市の中心部の東側には一級水系である高梁川が南北に貫流し，その両側には吉備高原が東西に広がっている[42]。市域面積は 546.99km^2 で，岡山県内の市町村の中では 4 番目に広い。一方，市域の約 60%を山林が占め，宅地はわずか 1.7%にとどまっており，可住地が非常に限られている[43]。平成 30 年 7 月豪雨では，高梁川および成羽川沿川で大規模な浸水被害が発生し，さらに土砂災害により家屋が全壊するなど，甚大な被害を受けた[44]。

(7) 兵庫県加古川市

加古川市は兵庫県南部で播磨灘に面し，市内を一級河川である加古川が貫流している[45]。市全体は神戸市の 10%都市圏に含まれ，都市化の進展が比較的著しい。総人口は 253,487 人，人口密度は 1,830 人/km^2 であり，前述の地域と比べても高い。市街化区域は主に加古川の左岸側および右岸側の平坦地に分布しており，地勢が低平であることから洪水の影響を受けやすい。2018 年の西日本豪雨では，加古川の水位が急上昇し，市街地の各所で浸水が発生したほか，交通網が損壊し，住民の避難が大きく妨げられるなどの被害が生じた[46,47]。

(8) 兵庫県小野市

小野市は兵庫県中南部のほぼ中央に位置し，面積は 92.94km^2，総人口は 45,956 人である[48]。市の東部には山地が広がり，南部は加古川市と接している。また，市域中央部を加古川が南流していることから，大雨時には河川氾濫や浸水，土砂災害などのリスクに注意が必要である。過去には，平成 16 年 10 月の台風 23 号，平成 23 年 9 月の台風 12 号および台風 15 号の際に加古川が氾濫し，市内各所で水害が発生した。これにより道路冠水や死傷者の発生など，甚大な被害が生じた[49]。

(9) 福岡県博多区

博多区は，福岡市を構成する 7 区の 1 つであり，福岡県庁所在地を含む行政区である[50]。地理的には福岡市の東部に位置し，北西端は博多湾に面した港湾地区となっている。また，区の中央部から南東部にかけては福岡空港の敷地が広がり，南東端には九州最大のターミナル駅である博多駅が立地している。博多駅周辺には大規模なビジネス街が集積し，人口密度も高い地域となっている。面積 31.62km^2 の区域に 265,795 人が居住している。**図 3-1** からも分かるように，博多区は福岡空港周辺を除き，ほぼ全域が用途地域として指定されており，経済活動が高度に発展した都市区域である。

このため，内水氾濫が発生した場合には経済的被害が大きくなる可能性が高い。実際に，平成 11 年，平成 15 年，平成 21 年の豪雨時には深刻な浸水被害が報告されており，とくに地下空間の浸水が顕著であった[51]。したがって，浸水害に対する防災対策を強化し，都市排水システムの整備を進める必要がある。

(10) 福岡県糸島市

糸島市は福岡県の最西部に位置し，北側および西端部は玄界灘に面し，東側は福岡市と接している[52]。南部には脊振山地が広がり，佐賀県との県境を形成する山岳地域となっている。市域面積は 215.69km^2，総人口は 100,382 人である。福岡市に近接しており，福岡都市圏との結び付きが強いことから，観光地や移住先として注目されており，近年は人口増加傾向が続いている。

一方で，市内は地形が複雑で，広い山地を抱えるとともに，北部の平野部は海岸沿いに広がり，瑞梅寺川や雷山川などの主要河川が流れている。このため，豪雨時には洪水と土砂災害の両方のリスクが高い。平成 30 年 7 月豪雨では，市南部の農村地域で多数の土砂崩れが発生し，道路が損壊したほか，河川の溢水および広範囲の浸水により，甚大な被害をもたらした[53]。

(11) 福岡県東峰村

東峰村は福岡県中南部に位置する村で，産業構造は農業が中心となっている。居住人口は 1,596 人と少なく，総面積 51.97km^2 のうち可住地面積は約 16.47%にとどまる[54-56]。また，**図 3-1** からも分かるように，本研究で対象とする 13 地域の中で，東峰村は唯一用途地域が指定されていない地域である。他の地域と比較して，地域の規模が小さく，経済的な発展は限定的である。

東峰村は山岳地帯に位置することから，豪雨時には土砂災害への警戒が特に必要である。近年では，2017 年 7 月 5 日の九州北部豪雨や 2023 年 7 月 10 日の梅雨前線豪雨の際に，大規模な土石流が発生し，大量の土砂・流木が流入したほか，死傷者の発生，家屋の倒壊，交通の寸断など，村内全域で甚大な被害が生じた[57,58]。東峰村は道路網が脆弱であり，一度道路が損壊すると地域機能に大きな支障をきたすため，土砂災害に対する防災施設の充実が不可欠である。

(12) 熊本県人吉市

人吉市は熊本県の最南部に位置し，山地に囲まれた人吉盆地に市街地が形成されている[59]。中心部には球磨川が東西に流れ，万江川や山田川など複数の支流がそれに合流する。市域の面積は 210.55km^2，総人口は 28,565 人で，居住者の多くは球磨川沿いの平地に集中している。このため，洪水時の被害リスクが高い地形的特性を有している。

令和 2 年 7 月の豪雨では，球磨川とその支流が増水して氾濫し，氾濫流により建物や橋梁の破壊・流失に加えて，広範囲の浸水被害が生じた[60]。なかでも，球磨川本流沿いの低地に位置する住宅地では甚大な被害が確認された。これらの経験を踏まえ，人吉市では将来の洪水時に備えた避難体制の強化が重要となっている。

(13) 東京都足立区

足立区は東京都区部の北東部に位置する特別区であり，隅田川と荒川にはさまれた千住

地区と，荒川以北の地区から構成されている[61]。区の面積は 53.25km²で，13 地域の中では博多区および東峰村に次いで 3 番目に小さいが，総人口は 706,352 人と最も多く，人口密度が非常に高い。近年は商業施設の整備が進み，区全体が用途地域として計画的に利用されている。

また，足立区は地形が平坦で河川も多く，南部の千住・五反野・綾瀬周辺には海抜 0m 未満の低地が広がっている。このような地形から，豪雨時には洪水や浸水の危険性が高い。実際に，平成 21 年以降，台風や局地的豪雨に伴う浸水被害が多数報告されている[62]。さらに，近年の集中豪雨の激甚化を踏まえると，将来的に荒川と江戸川が同時に氾濫した場合，甚大な浸水が発生する可能性が指摘されている[63]。そのため，平常時から防災対策を強化し，適切な避難体制を整備することが重要である。

３．３ 異なる機械学習手法に基づくベースモデルの構築および比較

ベースモデルの構築においては，多様な説明変数と目的変数との非線形な関係を扱うことができ，さらに各説明変数の寄与を把握できる点から，Random Forest を用いている[64]。また，茨城県常総市を対象とした適用において，モデル構築および精度検証が行われ，その有効性が確認されている。一方で，Random Forest には，前節で述べたような計算効率やモデルの表現能力の面で制約があることから，本研究では，それらの改善が期待される LightGBM を新たに導入し，比較検討を実施する[65-67]。

具体的には，３．３．１では Random Forest および LightGBM のアルゴリズム概要について述べる。続いて，３．３．２では，ベースモデルの構築に用いる説明変数，目的変数，および教師データの作成手順を示す。その後，３．３．３では，Random Forest に基づいて対象地域における予測モデルを構築し，予測精度の検証を行う。その上で，３．３．４では同地域において LightGBM に基づくモデルを構築し，両手法の予測性能を比較する。

３．３．１ 機械学習手法の概要

(1) Random Forest

Random Forest は，複数の決定木を組み合わせて予測を行うアンサンブル手法である。**図 3-2** は，Random Forest による「回帰方法」の処理の流れを示している。まず，入力データから重複を許したランダムサンプリングを行い，得られた各サンプルに対して決定木を個別に構築する。つぎに，各決定木が出力した値を平均し，それを最終的な予測値として用いる。ベースモデルでは「回帰方法」が採用されているため，**図 3-2** には回帰の場合の処理過程を示している。なお，複数の決定木の結果を多数決で統合する「分類方法」も存在するが，本研究では扱わない。

また，Random Forest の特徴として，学習データをランダムに抽出するだけでなく，各決

定木を構築する際に用いる説明変数もノードごとにランダムに選ばれる点が挙げられる。この仕組みにより，特徴量が多い場合でも効率的に構築でき，また決定木の多様性が確保されることで予測精度が向上する。さらに，複数の決定木の結果を平均することで，単一の決定木に生じやすい過学習を抑え，予測結果の安定性を高める効果がある[68]。これらの特性により，現在では Random Forest がさまざまな研究分野で広く活用されている[69,70]。

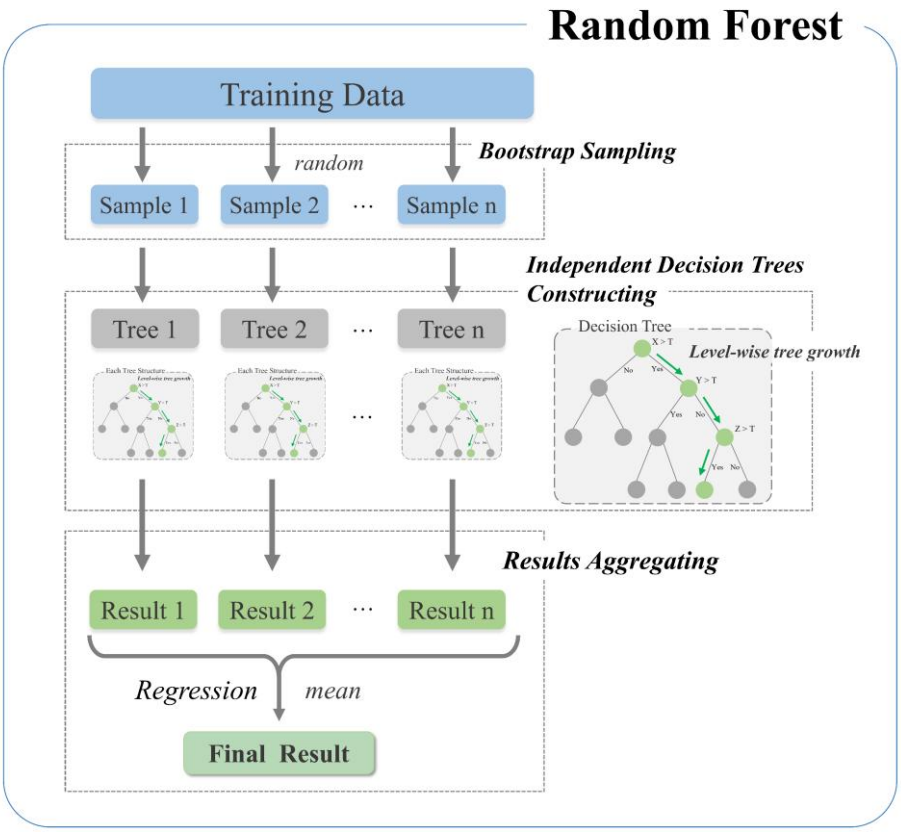


図 3-2 Random Forest の処理の流れ

(2) LightGBM

LightGBM（Light Gradient Boosting Machine）は，勾配ブースティング決定木をベースとした学習手法であり，ヒストグラム最適化と葉ノードの分割ゲインに基づく葉方向分割戦略（Leaf-wise tree growth）を特徴としている（**図 3-3**）。

ヒストグラム最適化によって特徴量の処理に要する計算量を抑えつつ，葉方向分割により分割効率を高めることで，モデルのトレーニング時における計算負荷を効果的に軽減できる。また，勾配残差に基づく逐次的な最適化により，特徴量およびその組合せがもたらす影響を適切に評価しながら学習を進めるため，複雑な非線形構造や特徴量間の相互作用をより精度高く捉えることができる。

これら特性は，前述の Random Forest における「計算負荷の大きさ」および「複雑な非線形性や相互作用の把握の難しさ」といった課題を補完する上で有用であると考えられる。

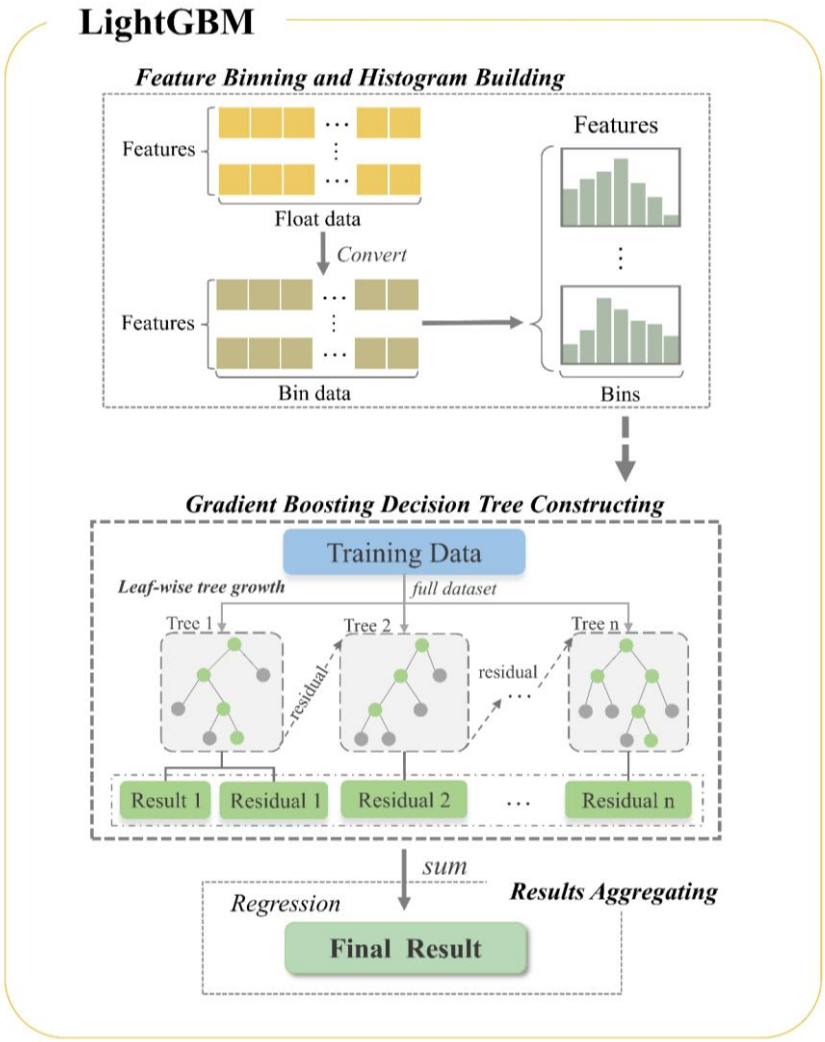


図 3-3 LightGBM の処理の流れ

３．３．２ ベースモデルの作成手順

図 3-4 は，ベースモデルに基づく避難所要時間予測モデルのの構成を示している。ベースモデルで用いる機械学習手法は教師あり学習に基づくため，まず対象地域において，避難時の移動特性を代表すると考えられる複数の経路を選定する。次に，これらの経路に対して説明変数および目的変数を算出し，教師データを作成する。作成した教師データを用いてモデルを学習させることで，新たな経路に対しても，説明変数から避難所要時間を推定することが可能となる。以下では，ベースモデルにおける目的変数および説明変数の設定，教師データの作成手順，ならびにモデルの構築および検証方法について順に述べる。

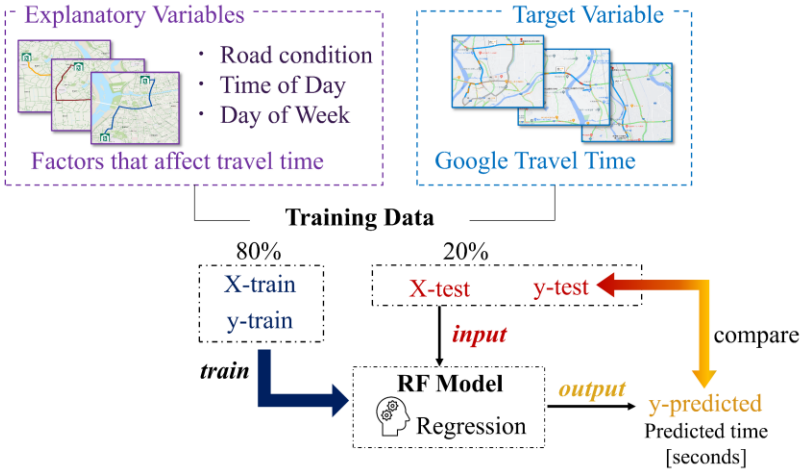


図 3-4 予測モデルの構築フロー

表 3-1 ベースモデルに用いる目的変数および説明変数

情報種別	項目	詳細	区分
目的変数	平均速度	時刻 t における経路 i の避難速度	V_t
道路条件に関する入力変数	経路距離	経路 i の総延長	*Length*
	道路幅員	道路幅員区分ごとの延長割合	*W1-W5*
	縦断勾配	道路勾配区分ごとの延長割合	*S0, SK1-SK9, SN1-SN9*
	曲率	道路曲率区分ごとの延長割合	*C1-C4*
	道路ランク	道路種別ごとの延長割合	*R1-R4*
周辺環境に関する入力変数	土地利用・土地被覆	土地利用区分ごとの道路延長割合	*Lu1-Lu6*
交通規制施設に関する入力変数	信号	信号機の通過回数数	*SIGNAL*
	交差点	交差点における直進回数	*STRAIGHT* *STRAIGHT1~4*
		交差点における左折回数	*LEFT* *LEFT1~4*
		交差点における右折回数	*RIGHT* *RIGHT1~4*
日時に関する入力変数	時間帯	避難時の時間帯	*Hour (0-23)*
	曜日	避難時の曜日	*Day (0-6)*

ベースモデルで用いる目的変数および説明変数を**表 3-1** に示す。本研究では避難所要時間の予測を目的としているが，実際の予測モデルでは，まず避難経路を移動する際の平均速度を目的変数として推定し，その後，移動距離をその推定速度で除することで避難所要時間を算出している。また，説明変数は，避難経路の移動所要時間に影響を与える時空間的特徴を取り入れており，**表 3-1** に示したうち 2 行目以降の道路条件，周辺環境，交通規制施設，および日時に関するすべての変数を用いている。以下では，これらのデータの収集および整理の方法について述べる。

３．３．２．１ 目的変数の取得

ベースモデルでは，全国どの地域でもモデルを構築できるよう，使用するデータを全国的に入手可能なものに限定している。そのため，教師データに用いる目的変数の取得には，Google Maps Platform の Directions API を使用した[71]。具体的には，対象地域で選定した代表的な経路について，その起点と終点の座標を API に与え，リクエスト送信時点における当該経路の予測移動時間を取得する。その後，経路の総延長をこの予測時間で割ることで平均移動速度を算出し，これを目的変数として用いる。

３．３．２．２ 説明変数の作成

３．３．２．１で述べた移動時間データの取得時には，Directions API が起点から終点までの最適経路に沿った座標情報も同時に返す。これらの座標情報は，GIS のジオプロセシングツール（「XY テーブル→ポイント」，「ポイント→ライン」など）を用いることでラインデータに変換することができる[72]。その後，Python が提供している地理空間情報を処理できるライブラリである Geopandas などを用いて，国土地理院が公開している数値地図に含まれる道路中心線のデータと結び付け，ルートが経由する道路の属性情報を参照できるようにしている[73]。

(1)　道路条件に関する変数

数値地図には道路の形状に加えて，道路分類や幅員区分などの属性情報が含まれており，また国土地理院が公開する数値標高モデル (DEM) からは縦断勾配に関する情報を取得できる[74,75]。ベースモデルでは，これらのデータをもとに，道路条件に関する説明変数を以下のように整理している。

1)　経路距離

GIS ソフトウェアを用いて，通過するルートの長さをメートル単位で算出し，説明変数として「LENGTH」に格納する。

2)　道路幅員

数値地図には各道路がその幅員に応じて５種類に分類されている。この情報をもとに，**表 3-2** に基づいて経路上の道路における各幅員の長さの合計を算出し，それを経路距離で除して求めた長さ割合を説明変数「W1」~「W5」として格納する。

表 3-2 説明変数における道路幅員の区分

道路幅員	19.5m 以上	13m ~ 19.5m	5.5m ~ 13m	3m ~ 5.5m	3m 未満
変数名	W1	W2	W3	W4	W5

3)　縦断勾配

DEM データを用いて，経路上の道路における縦断勾配の分布を算出する。ここでは，経路に含まれる各縦断勾配区分（**表 3-3**）の長さの合計を算出し，それを経路全体の距離で

除して求めた長さ割合を，説明変数として，平坦区分を表す「S0」，下り勾配を表す「SK1」～「SK9」，上り勾配を表す「SN1」～「SN9」などの変数に格納する。

表 3-3 説明変数における縦断勾配の区分

勾配の区分	縦断勾配	変数名
下り	-12%以上-9%未満	SK9
	-9%以上-7%未満	SK7
	-7%以上-5%未満	SK5
	-5%以上-0.01%未満	SK1
平坦	-0.01%～+0.01%	S0
上り	+0.01%以上+5%未満	SN1
	+5%以上+7%未満	SN5
	+7%以上+9%未満	SN7
	+9%以上+12%未満	SN9

縦断勾配については，道路構造令において道路区分および設計速度ごとに勾配の上限値が定められており，ベースモデルではそれらの上限値を縦断勾配区分のしきい値として用いた[76]。ここでの道路区分には，**表 3-4** に示す第一種から第四種までの区分および普通道路か小型道路の区分がある。小型道路とは小型自動車等（小型自動車等および歩行者または自転車）のみの通行の用に供する道路および車線に係る道路の部分であり，災害時にはこの小型道路および高速自動車国道や自動車専用道路を避難経路として避難する場合は少ないと考えられる。そのため，**表 3-5** に示す第三種および第四種の普通道路に対する縦断勾配の規定値のうち，設計速度 60，40，20 km/h のものをしきい値に設定する。また，緩やかな勾配が避難所要時間に与える影響を考慮し，5%未満の区分についても細分化した。さらに，経路が上り坂であるか下り坂であるかによって移動速度が異なることから，これらを区別した区分（**表 3-3**）も設定している。

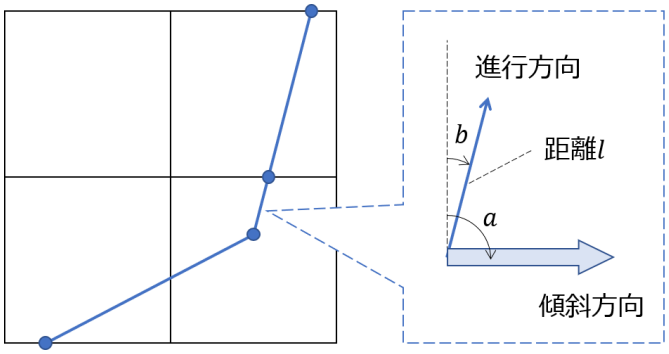
縦断勾配の計算には，DEM のデータをもとに GIS のジオプロセシングツールを用いている。まず，道路中心線を方向角が変化する点で分割し，分割後の道路中心線に対して DEM データをもとに算出した傾斜角および傾斜方向の数値を付与する。道路中心線が複数の傾斜角および傾斜方向のメッシュと重なる場合には，その区間をさらに細分化する。最後に，**図 3-5** に示すとおり，各線分について経路に沿った縦断勾配を算出する。

表 3-4 道路構造令における道路区分[76]

道路	道路の存する地域	
	地方部	都市部
高速自動車国道及び自動車専用道路	第一種	第二種
その他の道路	第三種	第四種

表 3-5 道路構造令に定める第三種と第四種の普通道路に対する縦断勾配の規定値[76]

設計速度 (km/h)	縦断勾配 (%)
60	5
50	6
40	7
30	8
20	9



$$slope_{rev} = \frac{slope \times l \times \cos(a-b)}{l} = slope \times \cos(a-b)$$

$slope_{rev}$ ：進行方向に沿った勾配
$slope$ ：GISにより算出した勾配
a ：傾斜方向
b ：方向角

図 3-5 進行方向に沿った縦断勾配の算出

4) 曲率

経路に含まれる各曲率区分（**表 3-6**）の長さの合計を算出し，それを経路距離で除して求めた長さ割合を説明変数「C1」～「C4」として格納する。道路構造令において，道路の設計速度ごとに**表 3-7** に示す曲率半径の閾値が定められており，従来研究では設計速度 60, 40，20 km/h に対応する曲率半径の基準値を参照して曲率区分を設定している。ただし，説明変数としてのは曲率半径そのものではなく，その値から算出した曲率である。

ここで，曲率の算出には，道路中心線の始点・終点および方向角が変化する全ての点の緯度経度情報を用い，最小二乗法により道路中心線にフィッティングした円を求め，その円の半径を曲率半径としている。そして，得られた曲率半径の逆数を曲率として算出する。

表 3-6 説明変数における曲率の区分

変数名	曲率半径 (B)	曲率 (Curvature)
C1	15m 未満	Curvature > 0.0667
C2	15m 以上 60m 未満	0.0667 <= Curvature < 0.1667
C3	60m 以上 150m 未満	0.1667 <= Curvature < 0.00667
C4	150m 以上	Curvature <= 0.00667

表 3-7 道路構造令における曲率半径の規定値[76]

設計速度 (km/h)	曲率半径基準 (m)
20	>= 15
30	>= 30
40	>= 60
50	>= 100
60	>= 150

5)　道路ランク

数値地図には各道路がその分類に応じて４種類に分類されている。この情報をもとに，**表 3-8** に基づいて経路上の道路における各幅員の長さの合計を算出し，それを経路距離で除して求めた長さ割合を説明変数「R1」~「R5」として格納する。

表 3-8 説明変数における道路ランクの区分

道路分類	国道	都道府県等	市区町村道	高速自動車国道
変数名	R1	R2	R3	R4

(2)　周辺環境に関する変数

避難経路周辺の環境を表す変数について，ベースモデルでは JAXA が提供する土地利用・土地被覆図に基づき，「土地利用・土地被覆」という説明変数を設定している。具体的な内容を以下に示す[77]。

1)　土地利用・土地被覆

ベースモデルでは，JAXA が公開する ALOS 衛星の観測データをもとに作成された 10m 解像度の土地利用・土地被覆図に含まれる区分情報を用いている。これらの区分のうち森林に該当する項目を統合し，**表 3-9** に示す説明変数「Lu1」~「Lu6」を設定した。また，避難経路が各区分と重なる区間の延長を経路全体の距離で除して求めた長さ割合を，各区分に対応する値として用いる。

表 3-9 説明変数における土地利用・土地被覆の区分[77]

JAXA データの区分	変数名	JAXA データの区分	変数名
人工構造物	Lu1	落葉広葉樹	Lu6
水田/畑	Lu2	落葉針葉樹	Lu6
草地	Lu3	常緑広葉樹	Lu6
裸地	Lu4	常緑針葉樹	Lu6
ほか	Lu5	竹林	Lu6

(3)　交通規制施設に関する変数

交通規制施設に関連する変数としては，避難経路に沿って配置されている信号機および経路が通過する交差点の箇所数を集計する。信号機は，数値地図に含まれる信号機の位置情報を用いて通過回数を算出する。一方，交差点については，道路中心線が三つ以上交わる点を交差点とし，通過方法ごとに回数を整理する。

交差点の通過には大きく分けて直進，左折，右折の 3 種類があり，それぞれ通過に要する時間が異なると考えられる。そのうえ，主要道と細街路など，異なる規模の道路が交わる交差点の場合，主要道から細街路に侵入するときと，細街路から主要道に侵入するときなどで通過の時間が異なる可能性がある。このため，交差点前後における道路規模の違い

を踏まえ，交差点の種類を区別して説明変数に反映させている。以下に，各説明変数の算出方法を示す。

1)　信号

信号の算出にあたっては，数値地図から取得した信号機を表すポイントデータを用いて，GIS 上で避難経路のラインデータと「空間結合」を行うことで，各経路に含まれる信号機の数を求め，それを説明変数の「SIGNAL」に格納する。

2)　交差点

交差点における通過回数の算出は二つの部分に分けられる。一つ目は，直進，左折，右折といった通過方向別に通過回数を集計する。二つ目は，各通過方向について，進入路と退出路の規模の差異に基づいて通過回数を細分化し，個別に算出する。

一つ目については，まず，避難経路と交差する道路ネットワークにおいて，道路中心線の始点・終点および方向角が変化するすべてのノードのうち，道路中心線が 3 本以上接続するものを交差点として抽出する。続いて，これらの交差点において，避難経路が進入する前後の道路方向の角度変化に基づき，角度差が 45° 未満の場合を「STRAIGHT」，45° 以上で左側へ曲がる場合を「LEFT」，45° 以上で右側へ曲がる場合を「RIGHT」に分類し，各経路における該当回数を説明変数として記録する。

さらに，二つ目に関しては，道路中心線の属性情報に含まれる道路分類種別から，道路規模の順位を，「国道」，「都道府県道」，「市町村道」の 3 区分に分ける。なお，本来は「高速自動車国道」も分類に含まれるが，高速道路は一般道路とは異なる専用構造を有し，これらと直接交差する状況は少ないため，本研究では考慮しないこととする。

各通過方向ごとに，道路規模の違いに基づく変数の区分を**表 3-10** に示す。ここで，通過前後の道路規模の順位付けは，以下の基準に基づいて行う。交差点を構成する道路が「国道」のみ，あるいは「都道府県道」のみで構成されている場合は「主要道―主要道」，「市町村道等」のみで構成されている場合は「細街路―細街路」の交差点とする。一方，順位の異なる道路が交差する場合は「主要道―細街路」の交差点とし，この際，道路の順位が高いほうを「主要道」，低いほうを「細街路」の道路として扱う。**図 3-6** に，直進時における各変数とその区分イメージを示す。

以上により，交差点に関する説明変数としては，「STRAIGHT」，「LEFT」，「RIGHT」に加え，それぞれを細分化した「STRAIGHT1」～「STRAIGHT4」，「LEFT1」～「LEFT4」，「RIGHT1」～「RIGHT4」の計 16 変数を設定する。

表 3-10 交差点の通過方法の区分

通過方向	通過前後の道路の規模の順位		変数名
	通過前	通過後	
直進	主要道	主要道	STRAIGHT1
	主要道	細街路	STRAIGHT2
	細街路	主要道	STRAIGHT3
	細街路	細街路	STRAIGHT4
左折	主要道	主要道	LEFT1
	主要道	細街路	LEFT2
	細街路	主要道	LEFT3
	細街路	細街路	LEFT4
右折	主要道	主要道	RIGHT1
	主要道	細街路	RIGHT2
	細街路	主要道	RIGHT3
	細街路	細街路	RIGHT4

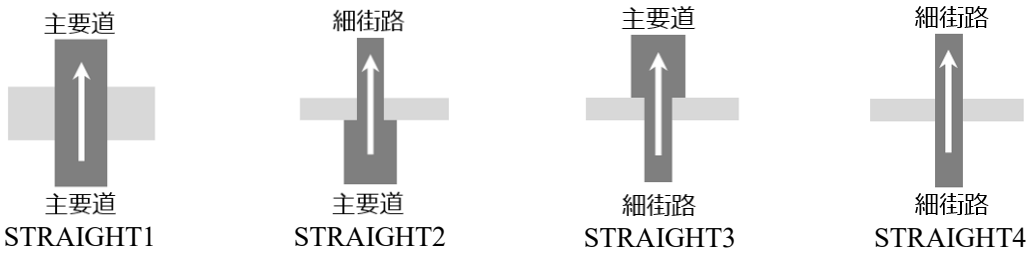


図 3-6 直進時における各変数とその区分

(4) 日時に関する変数

Google Maps Platform から取得したデータの日時情報については，曜日および時間帯をそれぞれ整数値（曜日は「0」~「6」，時間帯は「0」~「23」）で表して説明変数として用いる。ここで，これらの値はカテゴリを区分するためのラベルとして扱い，量的な意味を持つ連続変数としては解釈しない。

1) 曜日

所要時間データを取得した曜日については，各曜日に対して整数値を割り当て，月曜日を「0」，火曜日を「1」，水曜日を「2」のように数値化して扱う。

2) 時刻

所要時間データを取得した時間帯については，曜日と同様に，各時間帯に対して整数値を割り当て，0 時を「0」，1 時を「1」，23 時を「23」のように数値化して扱う。

３．３．２．３ 教師データの作成

災害時の実際の避難経路は個々人によって大きく異なるため，予測モデルの教師データを作成する際に，住民が実際に辿った避難経路を直接に用いることはできない。そこで，ベースモデルでは，対象地域における避難経路の特徴をより適切にモデルに学習させるために，2 種類のルートを教師ルートとして採用する。一つは市内の指定避難所から別の避難所までのルート，もう一つは典型的な住宅からランダムに選定した避難所までのルートである。

これらの経路について，Google Maps API を用いて 1 週間分の各時刻（7 日×24 時間）における平常時の予測所要時間を取得し，これを教師データの目的変数として用いる。続いて，３．３．２．２に示した方法に従って説明変数を算出し，最後にそれらを統合することで教師データを作成する。

３．３．２．４ 予測モデルの構築と精度検証

Random Forest モデルの構築には，Python のオープンソース機械学習ライブラリである scikit-learn を用いる[78]。一方，LightGBM モデルの構築には，LightGBM の公式ライブラリを用いる[79]。

精度検証を行うにあたっては，教師データを学習データとテストデータに分割する必要があり，ここでは 5 分割交差検証法を用いて，データセットをルート番号に基づきランダムに分割する。ここでルート番号に基づいて分割するのは，モデルの性能を正しく評価するためには，未知のルートに対して平均速度を予測することが求められるためである。したがって，教師データ全体をシャッフルして分割するのではなく，教師データの作成対象としたルートをランダムに学習用ルートとテスト用ルートに分け，それぞれに対応する教師データを学習データおよびテストデータとして抽出する必要がある。

また，ルートの分割はランダムであるため，どのルートが学習データとして選択されるかによって構築される予測モデルの特性が変化し，予測精度も試行ごとにわずかに変動する。そこで，本研究では，「データ分割」「トレーニング」「精度検証」の一連のプロセスを 100 回繰り返し，予測精度の検証およびモデル特性の考察には，作成された 100 個のモデルの予測精度および寄与率の平均値を用いる。

精度検証には，決定係数（R^2），二乗平均平方根誤差（$RMSE$），平均絶対パーセント誤差（$MAPE$）の 3 種の代表的な回帰評価指標を用いる。R^2 はモデルがデータをどの程度説明できているかを示す指標であり，値が 1 に近いほど当てはまりが良いことを意味する。$RMSE$は予測値と基準値のずれを表す指標であり，値が小さいほど誤差が小さいことを示す。$MAPE$は予測誤差をパーセントで表した指標であり，値が小さいほどモデルの予測精度が高いと判断できる。各指標の算出式を以下に示す。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i^{real} - y_i^{pre})^2}{\sum_{i=1}^{n}(y_i^{real} - \bar{y}^{real})^2} \tag{3-1}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i^{real} - y_i^{pre})^2} \tag{3-2}$$

$$MAPE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{\left|y_i^{real} - y_i^{pre}\right|}{y_i^{real}} \times 100\% \tag{3-3}$$

ただし，　n ：テストデータの個数
y_i^{real} ：i番目の所要時間の正解値
y_i^{pre} ：i番目の所要時間の予測値
$\bar{y}^{real}$ ：正解値の平均

さらに，処理効率を比較するための補足的な指標として，計算時間（T）を導入する。。その算出式を以下に示す。なお，t_{end} および t_{start} はそれぞれモデル学習処理の終了時刻と開始時刻を示し，T は t_{end} と t_{start} の差分により求められる総計算時間である。

$$T = t_{end} - t_{start} \tag{3-4}$$

３．３．３ 対象地域における予測結果

表 3-11 には，それぞれ対象地域において選定された教師ルートの数，所要時間の収集期間および最終的に作成された教師データの数の詳細を示す。これらの教師データを用いて，ベースモデルに基づく予測モデルを構築した。また，構築されたモデルを用いてテストデータの予測を行い，その結果を**表 3-12** に示す。

表 3-11 対象地域におけるデータ収集の詳細

対象地域	ルート数	データ収集期間	サンプル数
帯広市	651	2023/11/27 ~ 2023/12/07	109368
芽室町	749	2024/04/15 ~ 2024/04/27	101598
常総市	231	2022/05/18 ~ 2022/05/30	38808
香取市	213	2024/07/16 ~ 2024/07/30	38629
舞鶴市	640	2023/11/28 ~ 2023/12/20	75735
高梁市	180	2022/07/11 ~ 2022/07/26	27483
加古川市	320	2024/07/13 ~ 2023/07/30	53760
小野市	758	2024/05/21 ~ 2024/07/07	104922
博多区	316	2022/07/12 ~ 2022/07/26	37022
糸島市	480	2022/07/12 ~ 2022/07/26	80640
東峰村	480	2022/05/20 ~ 2022/05/26	65408
人吉市	700	2024/05/21 ~ 2024/07/08	95460
足立区	404	2022/07/12 ~ 2022/08/08	40851

表 3-12 より，すべての対象地域において高い予測精度が確認できる。特に，東峰村と糸島市では MAPE が 4% 以下で，他の地域よりも良好な性能を示している。一方で，高梁市および加古川市では MAPE が 10% を上回っている。また，加古川市では R^2 が 0.9 を下回っている。ただし，RMSE に着目すると，いずれのモデルも誤差が 1 分 30 秒以内に収まっている。災害時に避難判断を支援する防災気象情報などの災害関連情報は，多くの場合，5 分または 10 分間隔で発表される。そのため，予測誤差が 5 分未満であれば，災害時において十分に適用可能な範囲であると考えられる[80-82]。

表 3-12 対象地域における各モデルの予測結果

対象地域	RMSE (s)	MAPE (%)	R^2	T(s)
帯広市	77.8	9.56	0.947	64.0
芽室町	71.0	8.97	0.914	33.2
常総市	48.6	5.16	0.981	32.3
香取市	60.8	8.09	0.894	26.0
舞鶴市	76.9	8.47	0.946	75.7
高梁市	88.5	10.05	0.912	11.4
加古川市	52.9	12.00	0.873	24.8
小野市	45.7	9.35	0.938	73.4
博多区	66.4	9.16	0.949	29.6
糸島市	25.6	3.72	0.972	47.5
東峰村	35.4	2.84	0.994	79.3
人吉市	75.3	11.36	0.897	53.8
足立区	58.9	7.06	0.944	24.2
平均値	60.3	8.14	0.935	44.3

３．３．４ LightGBM によるモデル構築と性能比較

３．３．３で用いた各対象地域の教師データを用いて，LightGBM によりモデルを構築した結果を**表 3-13** に示す。表により，ほぼすべての対象地域において LightGBM の方が Random Forest より高い精度を示していることが分かる。全ての対象地域の平均値を見ると，LightGBM を用いた場合，RMSE は 7.7 秒，MAPE は 1.14%それぞれ低下し，R^2 は 0.017 向上している。これは，LightGBM が残差に基づいて逐次的にモデルを改良していく仕組みを持ち，複数の説明変数間の関係性をより的確に捉えられるためと考えられる。

さらに，計算時間に着目すると，LightGBM は Random Forest と比べて計算負荷が大きく低減されている。とりわけ，小野市，帯広市，舞鶴市のように面積が広い，あるいは地形が複雑であるといった理由から教師データが大きくなる地域では，Random Forest による学習に 1 分以上を要する一方，LightGBM では 10 秒程度で完了している。こうした結果からも，LightGBM が大規模データに対して高い処理性能を有することが確認できる。

以上より，本研究では，後続の分析においてLightGBMを採用することとする。

表 3-13 Random ForestとLightGBMを用いたモデルの予測結果

対象地域	Random Forest				LightGBM			
	RMSE [s]	MAPE [%]	R^2	T(s)	RMSE [s]	MAPE [%]	R^2	T(s)
帯広市	77.8	9.56	0.947	64.0	62.2	7.68	0.966	1.9
芽室町	71.0	8.97	0.914	33.2	58.9	7.26	0.941	2.1
常総市	48.6	5.16	0.981	32.3	44.4	4.67	0.984	1.0
香取市	60.8	8.09	0.894	26.0	52.2	7.09	0.922	1.1
舞鶴市	76.9	8.47	0.946	75.7	63.6	7.10	0.962	6.1
高梁市	88.5	10.05	0.912	11.4	76.6	8.78	0.933	2.4
加古川市	52.9	12.00	0.873	24.8	44.4	9.86	0.911	1.1
小野市	45.7	9.35	0.938	73.4	37.6	7.51	0.958	3.0
博多区	66.4	9.16	0.949	29.6	64.9	8.46	0.951	9.5
糸島市	25.6	3.72	0.972	47.5	28.5	4.47	0.965	10.7
東峰村	35.4	2.84	0.994	79.3	36.7	2.95	0.994	1.6
人吉市	75.3	11.36	0.897	53.8	59.5	8.73	0.935	2.9
足立区	58.9	7.06	0.944	24.2	54.7	6.46	0.951	6.1
平均値	60.3	8.14	0.935	44.3	52.6	7.00	0.952	3.8

３．４ 地域内の特性を考慮した予測手法の提案

前述のとおり，同一の地域内であっても，市街地と農村部では経済状況や交通条件，避難施設の配置などが異なるため，避難行動の特性や直面する課題にも差異が生じる。また，市街地においても，避難経路が通過する用途地域（住宅地や商業地など）の違いによって人間活動や周辺環境が変化し，これが避難所要時間に影響を及ぼす可能性がある。したがって，これら地域内の特性を踏まえた予測モデルを構築することが必要である。

そこで，本節では地域内の特性を考慮した新たな予測手法を提案し，その詳細について３．４．１で述べる。続いて，３．４．２では，提案手法を対象地域に適用した結果を示し，各説明変数の寄与率分布について分析する。さらに，３．４．３では，提案手法と３．３．４で構築したベースモデルを比較し，提案手法の妥当性について検討する。

３．４．１ 提案手法の概要

本研究では，ベースモデルに基づき，地域内のエリア単位でモデルを構築する新たな避難時間予測手法（エリアモデル）を提案する。エリアモデルでは，各対象地域を，住宅地や商業地などの用途地域から構成される市街地エリアと，それ以外の農村部エリアに区分し，LightGBM を用いてそれぞれのエリアに対してモデルを構築する。目的変数はベース

モデルと同様に，避難経路を移動する際の平均速度とする。説明変数については，ベースモデルで用いた項目をベースに，各エリアの状況を反映した変数を追加した。

市街地モデルでは，交通量が多く施設が集中する区域における交通状況を把握するため，交通規制施設や交通ハブに関する変数を設定した（**表 3-14**）。また，用途地域の分布や大型商業施設の立地によって避難需要や交通渋滞のリスクが高まる点を踏まえ，社会経済的な要因を表す変数も追加した。

表 3-14 市街地モデルで新たに設定した説明変数

情報種別	項目	詳細	区分
交通規制施設に関する変数	信号密度	経路延長当たりの信号機数	*DSI*
	交差点密度	経路延長当たりの交差点数	*DI*
	歩道交差点	歩道交差部の通過回数	*PI*
交通ハブに関する変数	公共交通駅	経路周辺の公共交通駅の数	*TS1*: Rail Stations *TS2*: Bus Stations
	駅影響力	経路周辺の鉄道駅の距離減衰影響	*DIRS*
	バス路線重複率	バス路線と重複する区間の延長割合	*BR*
社会経済的要因に関する変数	物流路線重複率	重要物流道路と重複する区間の延長割合	*FLR*
	用途地域	各用途地域内に含まれる区間の延長割合	*FZ1*: Residential zone, *FZ2*: Commercial zone, *FZ3*: Industrial zone
	商業施設	経路周辺の商業施設数	*RS*

一方，農村部モデルでは，**表 3-15** に示す道路勾配に関する変数を追加し，山間部でみられる起伏の大きい道路が避難所要時間に与える影響を取り入れた。また，農村部では道路網がまばらで，避難施設の配置間隔も大きいため，自家用車の利用が増えやすいと考えられる。そこで，交通に関する変数を追加し，エリアの特性をより適切に反映できるようにした。

表 3-15 農村部モデルで新たに設定した説明変数

情報種別	項目	詳細	区分
道路条件に関する変数	勾配変動率	経路 i における勾配変動の程度	*SVI*
交通に関する変数	公共交通駅	経路 i から最寄りの公共交通駅までの距離	*DS1*: Rail Stations, *DS2*: Bus Stations
	物流路線重複率	重要物流道路と重複する区間の延長割合	*FLR*

３．４．２ 対象地域におけるエリアモデルの構築結果

エリアモデルを構築するにあたり，本研究では**図 3-1** に示す用途地域の分布に基づいて，各対象地域を市街地エリアと農村部エリアに区分し，それぞれのエリアに対してデータ収集を行った。具体的には，GIS を用いて，数値地図データに含まれる各対象地域の市界ポリゴンと，国土交通省が提供する用途地域ポリゴンに対して，「インターセクト」および「イレース」の処理を行い，用途地域ポリゴンと重なる部分を市街地エリア，重ならない部分を農村部エリアとして抽出した。続いて，以下の 3 つの手順に従って，教師ルートの選定を行った。

(1) まず，対象地域に含まれる全ての住宅データを 1km メッシュで集計し，各メッシュ中心点から全ての避難所までのルートを作成する。得られたルートのうち，通過範囲が市街地エリア内にあるもの，または農村部エリア内にあるものを抽出し，候補データセットとする。

(2) 次に，候補となったルートの重複を除去する。各ルートを 1 本ずつ確認し，他のルートとの重複率が 60%を超える場合には，同一グループからランダムに 1 本を選定し，それ以外を削除する。

(3) 最後に，経路距離が避難所要時間に大きく影響することが従来研究で示されている点を踏まえ，ルート長に応じて教師ルートを段階的に抽出する。具体的には，[500～2000m]，[2000～3000m]，[3000～4500m]，[4500～6000m]，[6000～8000m]，[8000m 以上]の区間に分け，各区間からランダムに 1 本ずつルートを選び，本数が所定の閾値に達するまで繰り返す。なお，最小区間を 500m 以上とするのは，過去の災害調査において 500m 未満では徒歩避難が多いことが報告されているためである。

以上の手順に基づき，各対象地域で選定した教師ルート数と，それらに対して実施したデータ収集の結果を**表 3-16**（市街地エリア）と**表 3-17**（農村部エリア）に示す。

なお，東峰村には用途地域の指定がないため，市街地エリアに対するデータ収集は対象外となる。一方，足立区と博多区は全域が用途地域で構成されていることから，農村部エリアにおけるデータ収集は行っていない。また，常総市や高梁市のように市街地エリアの分布が少ない地域では，抽出可能な教師ルート数が限られ，教師データもほかの地域に比べて小規模となっている。

表 3-16 市街地エリアにおけるデータ収集の詳細

対象地域	ルート数	データ収集期間	サンプル数
帯広市	300	2024/09/21 ~ 2024/10/11	36718
芽室町	279	2024/10/16 ~ 2024/10/30	40551
常総市	80	2024/09/21 ~ 2024/10/04	12853
香取市	300	2024/07/25 ~ 2024/08/05	35248
舞鶴市	320	2024/07/26 ~ 2024/08/02	33678
高梁市	80	2024/09/21 ~ 2024/10/04	12512
加古川市	308	2024/07/22 ~ 2023/07/30	31269
小野市	169	2024/10/06 ~ 2024/10/15	24800
博多区	316	2022/07/12 ~ 2022/07/26	37022
糸島市	228	2024/09/24 ~ 2024/10/11	32469
人吉市	275	2024/10/05 ~ 2024/10/14	41035
足立区	404	2022/07/12 ~ 2022/08/08	40851

表 3-17 農村部エリアにおけるデータ収集の詳細

対象地域	ルート数	データ収集期間	サンプル数
帯広市	340	2024/09/21 ~ 2024/10/11	40221
芽室町	320	2024/10/16 ~ 2024/10/30	44750
常総市	364	2024/09/21 ~ 2024/10/04	55587
香取市	290	2024/07/24 ~ 2024/07/31	37691
舞鶴市	320	2024/07/26 ~ 2024/08/02	35079
高梁市	320	2024/09/21 ~ 2024/10/04	42853
加古川市	320	2024/07/22 ~ 2023/07/30	39684
小野市	308	2024/10/06 ~ 2024/10/15	45184
糸島市	319	2024/09/24 ~ 2024/10/11	43242
東峰村	480	2022/05/20 ~ 2022/05/26	65408
人吉市	311	2024/10/05 ~ 2024/10/14	48892

これらの教師データを用いて，市街地エリアと農村部エリアに対してそれぞれ構築したモデルの結果を**表 3-18** に示す。全体として，二つのモデルとも高い予測精度を示した。市街地モデルでは，各地域の平均値は RMSE が 32.9s，MAPE が 7.58%，R^2 が 0.936 であり，農村部モデルでは RMSE が 54.9s，MAPE が 7.42%，R^2 が 0.966 となった。ただし市街地モデルでは，常総市の R^2，および高梁市の MAPE と R^2 が，他地域に比べて相対的に低かった。これは，これらの 2 地域では市街地エリアがきわめて狭く，教師データとして取得できたルート数が約 80 本と少なかったことによるものと考えられる。このようにデータ量が限られていたため，学習したモデルの性能もやや低下したと推察される。それでも，各エリアの平均 RMSE は 1 分以内，MAPE も 15% 未満に収まっており，実際の運用においては問題のない水準であると判断できる。

表 3-18 対象地域における市街地モデルおよび農村部モデルの予測結果

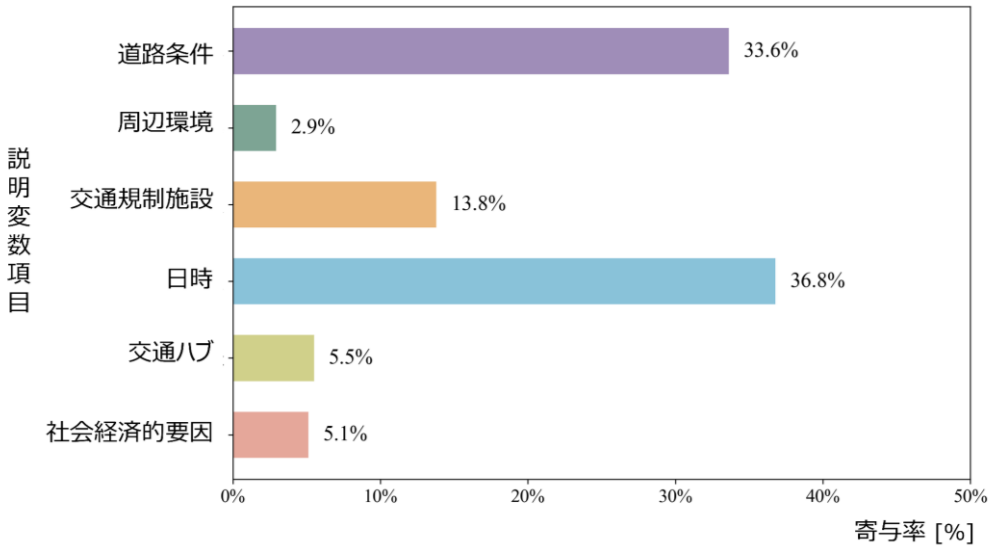
対象地域	市街地モデル			農村部モデル		
	RMSE [s]	MAPE [%]	R^2	RMSE [s]	MAPE [%]	R^2
帯広市	38.5	6.35	0.978	56.9	8.46	0.952
芽室町	25.0	9.35	0.908	66.1	7.49	0.962
常総市	26.0	9.72	0.878	42.1	6.83	0.971
香取市	23.7	6.00	0.954	43.3	6.58	0.956
舞鶴市	27.4	6.59	0.965	67.9	8.08	0.960
高梁市	24.6	11.99	0.797	112.9	10.84	0.942
加古川市	52.9	7.47	0.966	32.4	5.67	0.979
小野市	21.5	6.64	0.943	44.1	9.46	0.964
博多区	56.7	7.06	0.963		-	
糸島市	22.1	6.79	0.974	36.7	5.93	0.970
東峰村		-		36.4	2.96	0.994
人吉市	20.1	6.60	0.951	65.1	9.31	0.979
足立区	56.0	6.36	0.960		-	
平均値	32.9	7.58	0.936	54.9	7.42	0.966

エリアモデルに新たに追加した変数が避難所要時間の予測に及ぼす影響をより詳細に把握するとともに，市街地モデルおよび農村部モデルがそれぞれの区域特性を適切に表現できているかを検証するため，各モデルにおける説明変数の寄与率も算出した。13 地域の結果を平均化した上で寄与率分布として可視化した結果を**図 3-7** に示す。図の (a) には市街地モデルにおける説明変数の寄与率分布を示しており，「道路条件」と「日時」が支配的な役割を果たしている。次いで，「交通規制施設」が 13.8% を占め，新たに追加した「交通ハブ」および「社会経済的要因」を合わせると 10.6% に達する。一方で，土地利用・土地被覆の影響は最も小さく，わずか 2.9% にとどまっている。市街地はほぼ人工構造物で構成されたエリアであり，土地利用の多様性が相対的に低いことから，土地利用に関する変数の寄与率が小さくなったものと考えられる。これらの結果は前節で述べた考察とも一致しており，市街地における移動所要時間は交通環境や社会経済的条件といった人的要因の影響をより強く受ける傾向があることを示している。

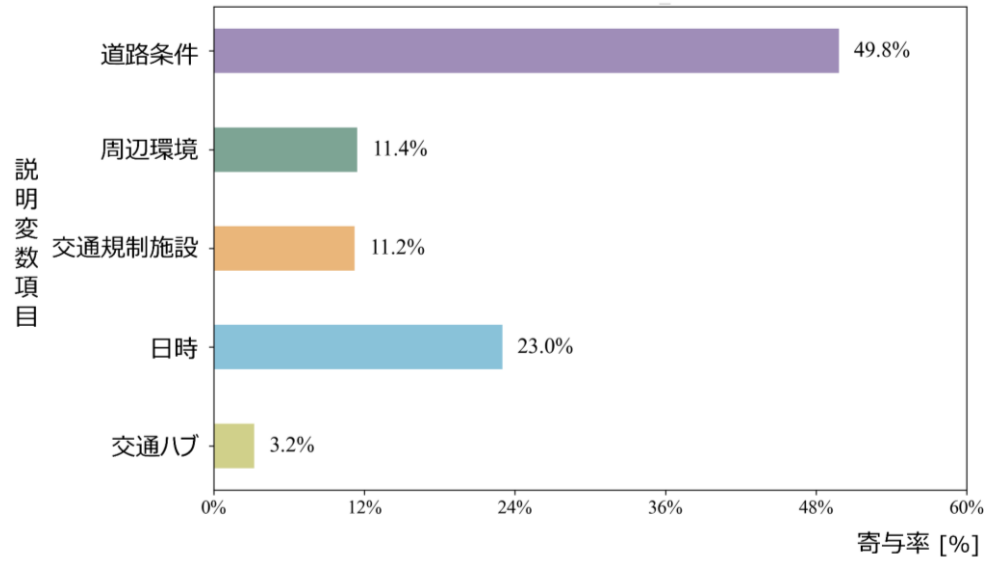
一方で，農村部モデルでは「道路条件」が支配的であり，寄与率は約 50% に達している。「日時」がこれに続くものの，重要度は市街地モデルほど高くはなく，寄与率は 23.0% にとどまっている。また，農村部エリアでは土地利用・土地被覆の影響が相対的に大きく，その寄与率は 11.4% と市街地モデルの約 4 倍に相当する。これらの結果は，農村部においては交通混雑が相対的に少なく，移動所要時間が地形的要因や道路条件，周辺環境の影響

を強く受けるという前節の考察とも一致している。

以上より，エリアモデルを構築することで，各区域の特性に応じた学習が可能となり，災害時におけるエリア内の避難経路所要時間をより高精度に予測できると考えられる。



(a) 市街地モデル



(b) 農村部モデル

図 3-7 説明変数項目ごとの寄与率分布

３．４．３ ベースモデルとの比較による提案手法の妥当性評価

実際の災害時には，多様な避難経路に対して安定した精度で予測できる避難所要時間モデルが求められる。住民がどの避難経路を通るかは，その居住地と避難所の位置関係に左右される。一般に，住民は自宅から近い避難所へ向かう傾向が強く，その結果，避難経路も同一エリア内に収まる場合が多い。しかし，エリア内の避難者数と避難施設の配置状況によっては，避難所が満員となったり，経路上で渋滞が発生したりして，予定どおりに避難できない場合もある。したがって，住民が実際に選択する避難経路は，状況に応じて変化することがある。たとえば，エリア内の避難需要が供給を上回る場合には，他エリアへ移動する避難行動が発生し，市街地と農村部の両方にまたがる広域的な経路が選ばれることもある。このような背景から，避難所要時間予測モデルには，エリア内で完結する経路（エリアルート）と，地域全体に広がる経路（全域ルート）の両方に対して，十分な精度で予測できることが求められる。そこで本節では，実際の災害時により適した手法を明らかにするため，エリアモデルとベースモデルを市街地エリアルート，農村部エリアルート，全域ルートにそれぞれ適用し，その予測精度を比較する。

表 3-19 は，各対象地域において二つの手法を 3 種類の避難ルートに適用し，得られた予測結果の平均値を示したものである。ただし，足立区および博多区には農村部エリアがなく，東峰村には市街地エリアが存在しないため，これら 3 地域は比較対象から除外している。なお，予測に用いたデータはモデル構築時と同一である。市街地モデルで市街地ルートを予測する場合のように，モデル適用先のルートが構築時と同一スケールに属する場合は，交差検証を行い，100 回の試行で得られたテストデータの予測結果を平均して精度評価に用いた。一方，全域ルートについては，ベースモデルではルート全体に対して直接予測を行うのに対し，エリアモデルではルートを市街地エリアと農村部エリアの境界で分割し，各区間を対応するモデルで予測した上で，それらを加算して全域ルートの予測所要時間を算出した。

表 3-19 の結果を見ると，エリアモデルは多くの地域でベースモデルより高い精度を示している。舞鶴市と糸島市ではベースモデルの精度が上回ったものの，エリアモデルも R^2 が 0.88 以上，平均 RMSE が 1 分 30 秒未満と，いずれも実用上十分な水準に達している。一方，ベースモデルは地域によるばらつきが大きく，常総市では R^2 が 0.8 を下回り，帯広市，芽室町，高梁市では 0.7 未満にとどまった。また，これらの地域では MAPE も 15%を超えており，予測の不安定さがみられる。

さらに，この二つのモデルをそれぞれ避難ルートに適用した際の平均予測結果を**表 3-20** に示す。表に示すように，全域ルートに関してはベースモデルがエリアモデルを上回る結果を示したものの，エリアモデルも RMSE が 89.3s，MAPE が 11.60%，R^2 が 0.849 と，いずれも実用上十分な予測精度を示している。一方，ベースモデルを市街地ルートおよび農村部ルートの予測に用いた場合，農村部エリアでは一定の水準を確保したが，市街地エリ

アでは適用性の限界が顕著であり，R^2 は 0.669 にとどまり，MAPE も平均で 15%を超えた。これに対し，エリアモデルは各エリア内の避難ルートに対して安定して高い精度を示した。

これらの結果を踏まえると，エリアモデルは多様な避難ルートに対して高い適用性を示しており，とくにいずれのルートにおいても低い誤差と高い安定性が確認されたことから，時間的制約が大きい災害時の避難判断を支援する上で有効であると考えられる。

表 3-19 ベースモデルとエリアモデルにおける 3 つの避難ルートの平均予測結果

対象地域	ベースモデル			エリアモデル		
	RMSE [s]	MAPE [%]	R^2	RMSE [s]	MAPE [%]	R^2
帯広市	120.4	17.83	0.672	55.9	7.44	0.962
芽室町	72.0	16.44	0.666	90.9	13.26	0.785
常総市	50.9	11.94	0.792	65.5	9.29	0.909
香取市	53.6	10.06	0.845	44.4	7.01	0.930
舞鶴市	68.1	9.55	0.937	89.8	11.39	0.887
高梁市	96.0	15.63	0.665	61.2	8.95	0.919
加古川市	58.8	9.18	0.929	43.2	7.94	0.955
小野市	42.8	10.08	0.894	38.0	8.64	0.948
糸島市	36.4	7.43	0.953	39.7	7.50	0.931
人吉市	62.8	10.96	0.905	54.6	9.31	0.942
平均値	66.2	11.91	0.826	58.3	9.07	0.917

表 3-20 両手法の避難ルート別平均予測結果

ルート種別	ベースモデル			エリアモデル		
	RMSE [s]	MAPE [%]	R^2	RMSE [s]	MAPE [%]	R^2
全域ルート	53.1	7.32	0.949	89.3	11.60	0.849
市街地ルート	54.8	16.51	0.669	28.3	7.75	0.937
農村部ルート	90.6	11.91	0.859	57.4	7.87	0.964

３．５　エリア手法に基づく汎化予測モデルの構築

３．１では，費用や労力の制約を踏まえ，全国各地で適用可能な高い汎用性を備えた避難所要時間予測モデルの構築が求められることを示した。過去には，モデルの汎化性能を高めるために多様な取り組みが行われてきた[83–85]。Mo らは，ddCRP（Distance-dependent Chinese Restaurant Process）を用いて学習地域の時空間特性をクラスタリングし，クロスシティ型のメタナレッジベースを構築している[86]。モデルを新たな地域へ適用する際には，このメタナレッジベースから対象地域と最も関連性の高いパターンを自動的に

選択し，それを用いて予測を行うことで汎化性能の向上が期待される。しかし，この手法はニューラルネットワークを用いた複雑なモデル構造となっており，学習コストが大きいため，災害時のように高い即時性が求められる場面では実用性に限界がある。Tao らは，交差点の混雑状況を予測する研究において，交通混雑特性に基づくネットワーククラスタリング手法を導入し，混雑状況が類似する区間をグループ化した上で，それぞれに対してモデルを構築する枠組みを提案している[87]。異なるデータソースからの大規模な交通データを近似的なクラスタに分割することで，クラスタ内の均質性を確保でき，モデルの安定性が大幅に向上することが示されている。

これらの研究は，クラスタ分析によって学習データの類似性を高めることが，モデルの安定性や汎化性能の向上に有効であることを示している。そこで本節では，13 の対象地域に対してクラスタ分析を行い，得られたクラスタごとにモデルを構築し，その汎化性能を検討する。性能評価に際しては，構築した汎化モデルを 13 地域それぞれに適用した場合の予測精度に加え，クラスタ分析に用いていない新たな地域に適用した場合の結果も評価し，モデルの実用性を確認する。

３．５．１ 対象地域に対するクラスタ分析

３．５．１．１ クラスタ手法

本研究で対象とする 13 地域は，経済発展の程度，人口密度，交通条件，地形特性がそれぞれ異なっている。また，**図 3-7** に示した寄与率分布からも分かるように，これらの地域特性に関連する変数は避難所要時間に影響を及ぼす重要な要因であり，クラスタ分析においても考慮すべきである。そのため，本研究では，地域間での特徴のばらつきが大きく，変数の分布が不均質なデータに対しても高い性能を示す手法として，密度ベース階層型クラスタリング（HDBSCAN）を用いてクラスタ分析を行う。HDBSCAN は，データ密度の違いに基づいて類似した点をまとめるクラスタリング手法であり，DBSCAN をもとに拡張したアルゴリズムである。また，階層的な密度構造（density-based hierarchy）を用いてグループを抽出するため，従来の DBSCAN のように全てのクラスタが類似した密度であることを前提とせず，密度のばらつきが大きいデータが混在する場合でも的確にクラスタを取り出すことができる点に特徴がある。しかし，この手法は高次元データを扱う際に性能が低下する傾向があるため，本研究ではまずカーネル主成分分析（KPCA）により次元削減を行った上で，クラスタ分析を実施する。

ここで，同一のエリア内であっても，道路リンクごとに時間的・空間的条件が異なるため，避難所要時間の特性は大きく異なる。したがって，避難所要時間をエリア全体の特性としてまとめて反映させることは困難である。本研究では，避難所要時間の特性を直接用いるのではなく，各エリアの全体的な特徴を表す変数に基づいて，クラスタ分析を行う。具体的には，**表 3-21** に示す日本全国の公開データを用いて，人口密度・土地利用に関す

る指標，経済状況，産業構成，就業状況，交通条件など，多様な側面から各エリアの特徴を表す変数を設定している。

このうち，人口・土地利用，経済条件，交通条件については，前述の分析により避難所要時間に影響することが示されている。また，産業構成や就業状況を取り入れたのは，昼間人口の分布に影響するためである。たとえば，第一次産業の割合が高い地域では，昼間人口が農地や漁港などに集まりやすく，災害時の避難需要も変化し得る。また，他市区町村への通勤や対象地域への流入人口といった就業状況も，昼間人口の偏りを通じて交通の混雑状況に影響を与えると考えられる。

これらのデータの多くは，日本政府統計ポータルサイト「e-Stat」で公表された 2023 年の統計データをもとにしている。また，道路ネットワークにおける旅行速度については，ESRI が提供する全国の道路ネットワークデータに含まれる各道路リンクの平均旅行速度を用いている。

表 3-21 クラスタ分析に用いるエリア特性データの一覧

人口・土地	可住地面積 1km² 当たり人口密度	土地利用比率 (可住地面積/総面積)	
経済条件	課税対象所得	地価	
産業条件	第 1 次/第 2 次/第 3 次 産業従業者比率		
就職条件	他市区町村への通勤者数	他市区町村からの通勤者数	
交通条件	混雑時旅行速度	昼間非混雑時旅行速度	交通施設

※　ただし，農村部のクラスタ分析では地価統計のデータが不足しているため，「地価」は分析指標から除外した。

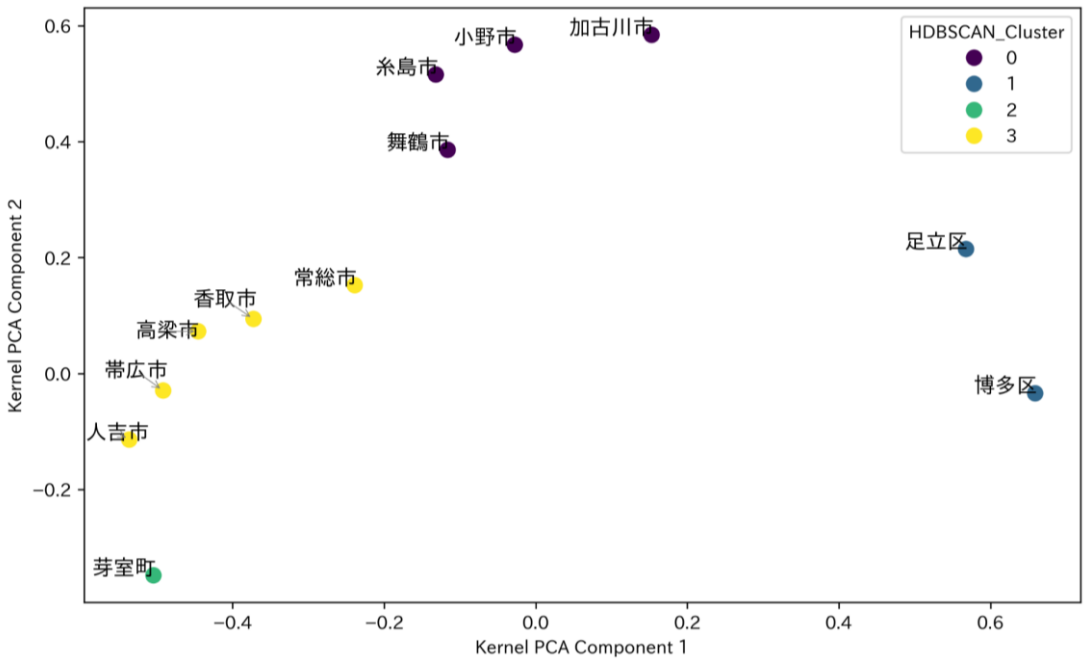


図 3-8 市街地エリアにおける HDBSCAN によるクラスタリング結果

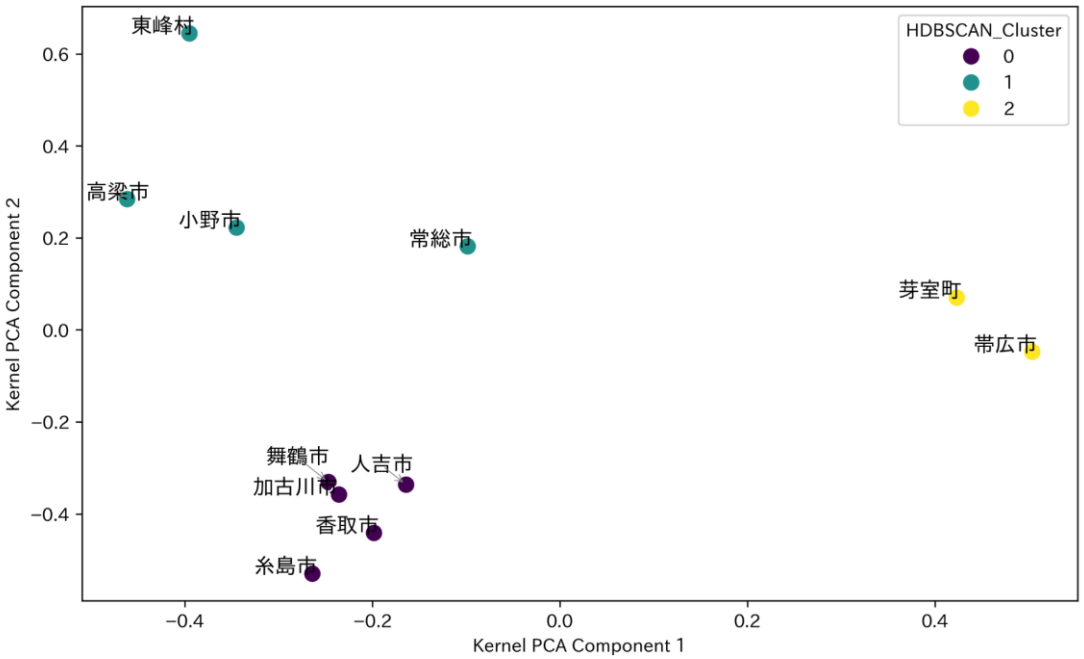


図 3-9 農村部エリアにおける HDBSCAN によるクラスタリング結果

３．５．１．２ クラスタ結果

市街地エリアおよび農村部エリアに対してそれぞれ HDBSCAN によるクラスタリングを行った結果を，**図 3-8** および**図 3-9** に示す。なお，各エリアにおける HDBSCAN のクラスタ数は，手動による設定ではなく，アルゴリズムが自動的に推定した最適なクラスタ数である。

３．５．２ クラスタ別汎化モデルの構築と学習地域における評価

本節では，３．５．１．２で得られたクラスタの妥当性を検証するため，各クラスタに対して予測性能の評価を行う。具体的には，**表 3-22** に示すクラスタとそれに対応する対象地域のエリアをもとに，各クラスタ内のエリアを 1 つずつテストデータとし，同一クラスタに属するほかのエリアを学習データとしてモデルを構築し検証する。例えば，Urban-G0 の市街地エリアには，加古川市，糸島市，小野市，舞鶴市の 4 地域が含まれる。この場合，Urban-G0 の加古川市に対する汎化性能を検証する際には，糸島市，小野市，舞鶴市の市街地エリアを学習データとしてモデルを構築し，加古川市の教師データ所要時間を予測する。また，予測結果の安定性を確保するため，最終的な評価値には，この学習と検証の流れを 100 回繰り返した平均値を用いている（**表 3-23**）。

表 3-22 クラスタと対象地域の対応関係

エリア	クラスタ	対象地域
市街地	Urban_G0	舞鶴市，糸島市，加古川市，小野市
	Urban_G1	足立区，博多区
	Urban_G2	芽室町
	Urban_G3	香取市，帯広市，常総市，人吉市，高梁市
農村部	Rural_G0	人吉市，舞鶴市，加古川市，糸島市，香取市
	Rural_G1	東峰村，常総市，高梁市，小野市
	Rural_G2	帯広市，芽室町

表 3-23 各クラスタ内における汎化性能の検証結果

エリア	クラスタ	対象地域	RMSE [s]	MAPE [%]	R^2
市街地	Urban_G0	舞鶴市	40.4	9.21	0.925
		糸島市	46.6	13.72	0.886
		加古川市	97.8	12.36	0.886
		小野市	43.9	13.22	**0.779**
	Urban_G1	足立区	84.3	9.67	0.910
		博多区	122.3	14.45	0.829
	Urban_G2	芽室町	23.3	8.73	0.922
	Urban_G3	香取市	47.4	10.89	0.823
		帯広市	48.4	7.84	0.967
		常総市	26.0	9.28	0.884
		人吉市	27.5	8.29	0.909
		高梁市	28.4	12.20	**0.788**
農村部	Rural_G0	人吉市	154.9	12.86	0.884
		舞鶴市	99.2	12.33	0.918
		加古川市	44.0	7.01	0.964
		糸島市	46.9	8.28	0.952
		香取市	75.2	11.41	0.870

表 3-23 より，クラスタごとに構築した汎化モデルは，全体として良好な予測性能を示したことが分かる。農村部モデルでは，いずれのクラスタでも R^2 が 0.85 を上回り，加古川市および糸島市ではそれぞれ 0.96，0.95 と特に高い精度を示した。また，市街地モデルにおいても，全てのクラスタの R^2 の平均値が 0.87 に達し，MAPE も 15% 未満であった。これらの結果から，クラスタリングによってデータの不均質性が低減され，同一クラスタ

内の異なる地域間においても高い汎化性能が確保されていると考えられる。ただし，小野市および高梁市では R^2 がやや低い傾向がみられたものの，この傾向は３．４．２の分析結果とも一致しており，これらの地域では都市化レベルが相対的に低く，市街地エリアが狭小であることから，テストデータと他地域の学習データとの間に差異が生じたことによるものと考えられる。それでも，MAPE はいずれも 15% 未満であり，RMSE も 1 分未満に抑えられていることから，実用上問題のない精度が確保されていると言える。

さらに，**表 3-24** に示すように，汎化モデルを用いて同一クラスタ内の各対象地域に対して市街地エリアルート・農村部エリアルート・全域ルートの予測を行った平均結果をみると，いずれの地域においても良好な精度が得られ，全地域の平均 R^2 は 0.88，MAPE は 11.56% に抑えられている。市街地エリアで精度がやや低かった小野市および高梁市においても，三種類の避難ルートの平均予測結果では R^2 がそれぞれ 0.88，0.85 と高い精度を示した。これらの結果から，本研究で提案した HDBSCAN に基づいたクラスタリング手法は有効であり，そのクラスタ結果に基づいて構築したモデルは十分な汎化精度を有していると考えられる。

表 3-24 汎化モデルによるクラスタ内各地域の 3 種類の避難ルートの平均予測結果

予測市区町村	MAPE [%]	R^2
足立区	9.67	0.910
博多区	14.45	0.829
人吉市	12.70	0.859
糸島市	10.91	0.886
常総市	10.64	0.899
加古川市	10.31	0.904
香取市	11.63	0.817
舞鶴市	12.54	0.896
芽室町	11.94	0.854
帯広市	10.60	0.907
小野市	11.95	0.880
高梁市	13.05	0.855
東峰村	9.92	0.942
平均結果	**11.56**	**0.880**

３．５．３ 汎化モデルの未学習地域への適用と評価

汎化モデルがクラスタ分析に用いていない新たな地域に対しても適用できるかを検証するため，本節では熊本県山江村を対象として評価を行った。既存のクラスタ分けに基づき，山江村と特性が最も類似するクラスタを抽出し，当該クラスタの汎化モデルを用いて山江村の選定ルートにおける移動所要時間を予測する。なお，山江村には用途地域が存在しないため，本検討では農村部汎化モデルのみを対象とする。

図 3-10 は，山江村を含む 12 の農村部エリアにおける特徴指標を標準化した分布を示したものである。特徴の類似性からみると，山江村に最も近いのは東峰村であり，それに続いて人吉市と高梁市が位置付けられる。また，クラスタリングの結果では山江村は Rural_G1 に分類されており，このクラスタには東峰村，高梁市，常総市，小野市が含まれる。これにより，クラスタリングの結果は特徴分布の傾向と一致していることが明らかである。

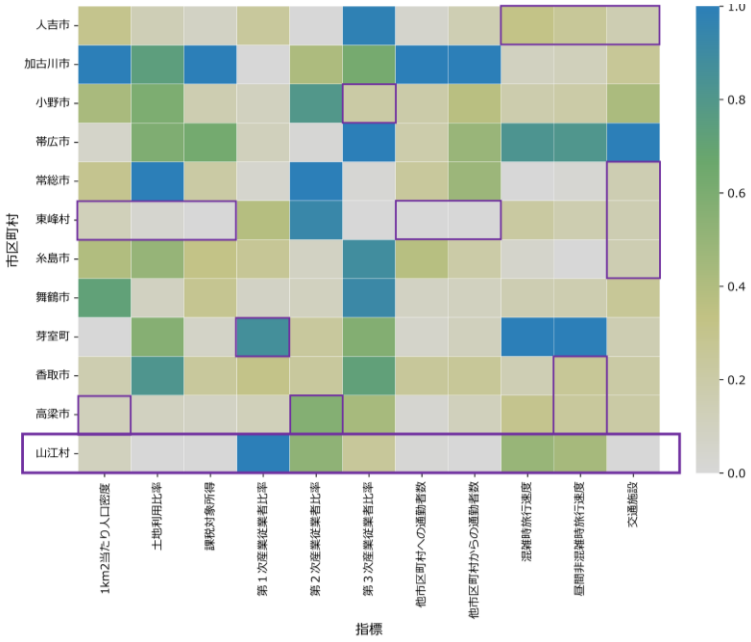


図 3-10 山江村と他地域におけるクラスタ分析に用いた特徴分布の比較

山江村の全ての住居を対象に GIS で最短避難経路を作成したところ，計 826 本のルートが得られ，距離は平均 2,142m，最大 11,301m であった。また，検証用の正解値として，2025 年 3 月 10 日 22 時から 3 月 11 日 10 時までの間に 1 時間間隔で Google API から取得した移動予測時間データを用いた。予測結果を**表 3-25** と**表 3-26** に示す。**表 3-25** では RMSE，MAPE，R^2 を用いて精度を評価した。

山江村における予測では，平均 RMSE が 1 分 30 秒以内，MAPE が 20% 未満に収まり，R^2 も 0.8 に達しており，全体として高い精度が得られた。**表 3-26** では，正解値に対する所要時間の絶対予測誤差を示している。誤差 1 分以内が 68%，5 分以内が 99%を占め，全てのデータが 10 分以内であった。また，**図 3-11** には避難所要時間の区間別に予測誤差の箱ひげ図を示している。所要時間が 15 分未満のルートでは誤差の中央値が約 1 分となり，「15~20 分」の区間でも中央値は 3 分未満であった。一部に誤差の大きい外れ値がみられるものの，その数は少なく，いずれも 10 分以内に収まっている。

以上の結果から，本研究で構築したエリア単位の避難所要時間汎化モデルの有効性が確認された。本モデルは高い精度を示しており，全国規模での適用にも十分な水準にあると考えられる。

表 3-25 山江村の避難経路に対する汎化モデルの予測精度

RMSE [s]	MAPE [%]	R^2
70.9s	19.67%	0.80

表 3-26 山江村における絶対予測誤差の割合

絶対予測誤差の区分	1 分以内	2 分以内	3 分以内	5 分以内	10 分以内
データ割合	68.11%	92.30%	98.99%	99.55%	100.00%

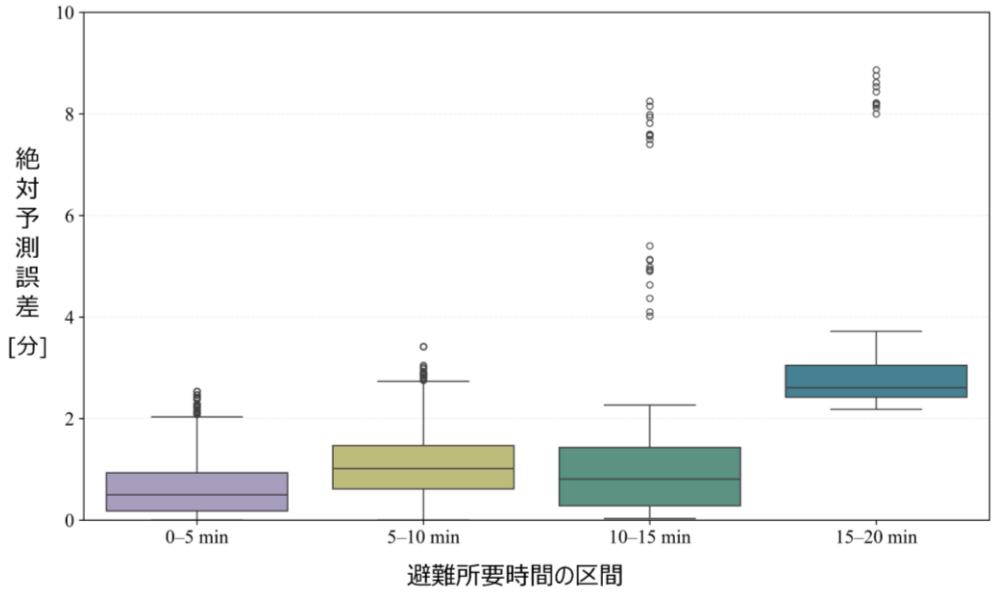


図 3-11 避難所要時間の区間別にみた絶対予測誤差の箱ひげ図

３．６ まとめ

本章では，これまでの研究で開発されてきた避難所要時間の予測手法を踏まえ，その改良として，従来用いていた Random Forest を LightGBM に置き換えることで，予測精度および計算効率の向上を図った。また，この改良手法をもとに，一つの地域を市街地エリアと農村部エリアに区分し，各エリアの特性を反映した変数を組み込んで個別にモデルを構築する新たな避難所要時間予測手法を提案した。ベースモデルと比較検証を行った結果，本手法は市街地エリアおよび農村部エリアの両方でベースモデルより明らかに優れた予測性能を示し，高い実用性を有することが確認された。さらに，全域ルートに対しても安定して高精度の予測が可能であることが示された。

最後に，提案したエリア手法に基づき，13 地域を対象に HDBSCAN によるクラスタ分析を実施し，各クラスタに対して汎化モデルを構築した。その結果，クラスタ内の地域に対して高い予測精度を示しただけでなく，クラスタ分析に含めていない新たな地域に対しても良好な汎化性能を示した。したがって，本研究で提案したエリア単位の汎化モデルは実用性が高く，今後，全国規模での適用が期待される有効な手法であると考えられる。

しかし，本研究における自動車避難に対する所要時間予測モデルには，いくつか考慮できていない点が残されている。以下に，それらを整理する。

まず，本研究では，自動車避難を対象として単一の予測モデルを用いており，車両の種類や性能の違いによる走行特性の差異は考慮していない。実際には，車両特性の違いによって走行挙動が異なる可能性があり，これらを反映したモデル化については今後の課題である。

次に，本研究において，モデル構築に用いた教師データの移動所要時間データは，Google Directions API により取得した予測移動時間に基づいている。この Google 予測所要時間は，各道路における平常時の交通流などを考慮して算出されたものであり，災害時の実際の交通状況を直接反映したものではない。災害時の交通データは取得が困難であることから，本研究では平常時と災害時の交通状況の違いについては考慮していない。

さらに，本研究で構築した汎化モデルは，13 地域から収集したデータをもとにクラスタ分析を行い，各クラスタ内の既存データを用いて学習したものである。これまでに検証した新規地域に対しては，一定の予測精度が得られているものの，未検証の地域は多数存在しており，本モデルがすべての地域に対して高い精度で適用可能であるかについては，現時点では十分に確認できていない。今後は，対象地域を拡大して検証を行うとともに，予測精度が低い地域については追加的なデータ収集を行い，学習データを充実させることで，汎化モデルの適用性向上を図る予定である。

参考文献

1. M. A. R. Shah, A. Rahman, and S. H. Chowdhury, “Challenges for achieving sustainable flood risk management,” Journal of Flood Risk Management, vol. 11, pp. S352-S358, 2018. https://doi.org/10.1111/jfr3.12211
2. S. A. Mashi, A. I. Inkani, O. Obaro, and A. S. Asanarimam, “Community perception, response and adaptation strategies towards flood risk in a traditional African city,” Natural Hazards, vol. 103, pp. 1727–1759, 2020. https://doi.org/10.1007/s11069-020-04052-2
3. S. N. Jonkman, L. A. Hiel, R. G. Bea, H. Foster, A. Tsioulou, P. Arroyo, T. Stallard, and L. Harris, “Integrated risk assessment for the Natomas Basin (California): Analysis of loss of life and emergency management for floods,” Natural Hazards Review, vol. 13, no. 4, pp. 297-309, 2012. https://doi.org/10.1061/(ASCE)NH.1527-6996.0000079
4. T. Suzuki, T. Watanabe, and S. Okuyama, “Facilitating community risk communication for wide-area evacuation during large-scale floods,” International Journal of Environmental Research and Public Health, vol. 16, no. 14, p. 2466, 2019. https://doi.org/10.3390/ijerph16142466
5. 平成 30 年 7 月豪雨を教訓とした安全・避難対策のあり方研究会，「平成 30 年 7 月豪雨を教訓とした安全・避難対策のあり方」，2018 年 12 月．https://www.pref.tottori.lg.jp/secure/1153500/H30arikata.pdf,（参照日：2025 年 11 月 20 日）.
6. J. M. Marrero, A. García, A. Llinares, S. De La Cruz-Reyna, S. Ramos, and R. Ortiz, “Virtual tools for volcanic crisis management and evacuation decision support: applications to El Chichón volcano (Chiapas, México),” Natural Hazards, vol. 68, pp. 955-980, 2013. https://doi.org/10.1007/s11069-013-0672-4
7. Y. Liu, G. Wang, Z. Jiang, J. Qian, and Y. Chen, “An integrated decision support system for emergency evacuation management,” in Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC 2016), Budapest, Hungary, Oct. 9-12, 2016. https://doi.org/10.1109/SMC.2016.7844362
8. R. Gudishala and C. Wilmot, “Modeling emergency managers’ hurricane evacuation decisions,” Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, vol. 2604, pp. 82-87, 2017. https://doi.org/10.3141/2604-10
9. H. Gehlot, A. M. Sadri, and S. V. Ukkusuri, “Joint modeling of evacuation departure and travel times in hurricanes,” Transportation, vol. 46, pp. 299-322, 2018. https://doi.org/10.1007/s11116-018-9958-4
10. Q. Deng, B. Zhang, Z. Zhou, H. Deng, L. Zhou, Z. Zhou, and H. Jiang, “Evacuation time estimation model in large buildings based on individual characteristics and real-time congestion situation of evacuation exit,” Fire, vol. 5, no. 6, p. 204, 2022. https://doi.org/10.3390/fire5060204
11. H. Qiu, X. Liang, Q. Chen, and E. W. M. Lee, “Effect of different time step sizes on pedestrian evacuation time under emergencies such as fires using an extended cellular automata model,” F

ire, vol. 7, no. 3, p. 100, 2024. https://doi.org/10.3390/fire7030100
12. B. Kunwar, F. Simini, and A. Johansson, “Evacuation time estimate for total pedestrian evacuation using a queuing network model and volunteered geographic information,” Physical Review E, vol. 93, p. 032311, 2016. https://doi.org/10.1103/PhysRevE.93.032311
13. 内閣府，「自動車で安全かつ確実に避難できる方策（補足資料）」，2012 年 5 月 23 日．https://www.bousai.go.jp/jishin/tsunami/hinan/6/pdf/2.pdf，（参照日：2025 年 11 月 20 日）．
14. Y. Liu, G. Wang, Z. Jiang, J. Qian, and Y. Chen, “An integrated decision support system for emergency evacuation management,” in Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC 2016), Budapest, Hungary, Oct. 9-12, 2016. https://doi.org/10.1109/SMC.2016.7844362
15. K. F. Qiu and W. L. Jin, “Studies of emergency evacuation strategies based on kinematic wave models of network vehicular traffic,” in Proceedings of the 11th IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2008), Beijing, China, Oct. 12-15, 2008. https://doi.org/10.1109/ITSC.2008.4732595
16. 内閣府，「水害からの広域避難に関する基本的な考え方（令和 3 年 5 月）」，2023 年 5 月．https://www.bousai.go.jp/fusuigai/suigai_kouikihinan/pdf/kangaekata.pdf，（参照日：2025 年 11 月 20 日）．
17. 国土交通省，「河川事業概要 2024 I 我が国の水害リスクの現状」，2025 年 1 月．https://www.mlit.go.jp/river/pamphlet_jirei/kasen/gaiyou/panf/pdf/2025/kasengaiyou2025_1.pdf，（参照日：2025 年 11 月 20 日）．
18. 孟 楽，三谷 泰浩，川野 浩平，韓 子双，菅原 巧，谷口 寿俊，本田 博之，「避難所要時間による定量的災害リスク評価と避難判断支援への適用」，地域安全学会論文集，No. 43，pp. 9-17，2023．https://doi.org/10.11314/jisss.43.9
19. Z. Liao, H. Huang, Y. Zhao, Y. Liu, and G. Zhang, “Analysis and forecast of traffic flow between urban functional areas based on ride-hailing trajectories,” ISPRS International Journal of Geo-Information, vol. 12, no. 4, p. 144, 2023. https://doi.org/10.3390/ijgi12040144
20. J. Yuan, Y. Zheng, and X. Xie, “Discovering regions of different functions in a city using human mobility and POIs,” in Proceedings of the 18th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD ’12), Beijing, China, Aug. 12-16, 2012, pp. 186-194. https://doi.org/10.1145/2339530.2339561
21. B. Pan, Y. Zheng, D. Wilkie, and C. Shahabi, “Crowd sensing of traffic anomalies based on human mobility and social media,” in Proceedings of the 21st ACM SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems (SIGSPATIAL ’13), Orlando, FL, USA, Nov. 5-8, 2013, pp. 344-353. https://doi.org/10.1145/2525314.2525343
22. L. Hong and V. Frias-Martinez, “Modeling and predicting evacuation flows during Hurricane Irma,” EPJ Data Science, vol. 9, no. 1, pp. 1–24, 2020. https://doi.org/10.1140/epjds/s13688-020-

00247-6
23. T. T. Tran and V. Nitivattananon, “Adaptation to flood risks in Ho Chi Minh City, Vietnam,” International Journal of Climate Change Strategies and Management, vol. 3, no. 1, pp. 61-73, 2011. https://doi.org/10.1108/17568691111107943
24. B. S. N. Easterday, “Transportation for evacuations: The variation in planning between urban and rural cities,” Journal of Emergency Management, vol. 6, no. 5, pp. 51-56, 2008. https://wmpllc.org/ojs/index.php/jem/article/view/1441
25. J. Chodur, K. Ostrowski, and M. Tracz, “Variability of capacity and traffic performance at urban and rural signalised intersections,” Transportation Research Procedia, vol. 15, pp. 87-99, 2016. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.06.008
26. Y. Zhang, Y. Yang, and W. Zhou, “Multi-city traffic flow forecasting via multi-task learning,” Applied Intelligence, vol. 51, pp. 6895-6913, 2021. https://doi.org/10.1007/s10489-020-02074-8
27. 都市計画法（昭和 43 年法律第 100 号，最終改正：令和 2 年 6 月 10 日法律第 43 号）．https://hourei.net/law/343AC0000000100，（参照日：2025 年 11 月 20 日）．
28. ウィキペディア，「帯広市」，https://ja.wikipedia.org/wiki/帯広市，（参照日：2025 年 11 月 21 日）．
29. 帯広市，「平成 28 年台風 10 号による災害対応の検証結果」，2017 年 5 月．https://www.city.obihiro.hokkaido.jp/_res/projects/default_project/_page_/001/002/382/zenbun.pdf，（参照日：2025 年 11 月 21 日）．
30. ウィキペディア，「芽室町」，https://ja.wikipedia.org/wiki/芽室町，（参照日：2025 年 11 月 21 日）．
31. 芽室町，「平成 28 年台風 10 号災害対応検証報告書」，2017 年 4 月．https://www.memuro.net/administration/soshiki/soumu/bousai-keikaku/files/kensyohoukokusyo.pdf，（参照日：2025 年 11 月 21 日）．
32. ウィキペディア，「常総市」，https://ja.wikipedia.org/wiki/常総市，（参照日：2025 年 11 月 21 日）．
33. 常総市水害対策検証委員会，「平成 27 年常総市鬼怒川水害対応に関する検証報告書」，2016 年 6 月．https://www.city.joso.lg.jp/data/doc/1674176111_doc_6_0.pdf，（参照日：2025 年 11 月 21 日）．
34. 産経ニュース，「東日本豪雨・鬼怒川決壊 2 年 転出続き戻らぬ活気」，2017 年 9 月．https://web.archive.org/web/20170910075238/http://www.sankei.com/affairs/news/170910/afr1709100006-n1.html，（参照日：2025 年 11 月 21 日）．
35. ウィキペディア，「香取市」，https://ja.wikipedia.org/wiki/香取市，（参照日：2025 年 11 月 21 日）．
36. 香取市，「香取市の被災状況・対応状況について」，2013 年 7 月．https://www.city.katori.lg.jp/living/anzen_anshin/daishinsai/index.files/20130731_hisai.pdf，（参照日：2025 年 11 月

21 日）.
37. 香取市,「広報香取 台風 15 号 被災者支援号」, 2019 年 10 月. https://www.city.katori.lg.jp/government/koho/koho_web/koho_back01/koho_191014.files/20191014.pdf,（参照日：2025 年 11 月 21 日）.
38. 銚子地方気象台,「令和 5 年 台風第 13 号に関する千葉県気象速報」, 2023 年 9 月. https://www.jma-net.go.jp/choshi/shosai/doc/sokuhou/20230908.pdf,（参照日：2025 年 11 月 21 日）.
39. ウィキペディア,「舞鶴市」, https://ja.wikipedia.org/wiki/舞鶴市,（参照日：2025 年 11 月 21 日）.
40. 生活ガイド,「舞鶴市：統計データ」, https://www.seikatsu-guide.com/info/26/26202/1,（参照日：2025 年 11 月 21 日）.
41. 舞鶴市,「舞鶴市統計章 令和 6 年版」, https://www.city.maizuru.kyoto.jp/shisei/cmsfiles/contents/0000013/13800/R6toukeisyo.pdf,（参照日：2025 年 11 月 21 日）.
42. ウィキペディア,「高梁市」, https://ja.wikipedia.org/wiki/高梁市,（参照日：2025 年 11 月 21 日）.
43. 高梁市 秘書企画課,「統計データからみる 高梁市の姿（令和 3 年度）」, https://www.city.takahashi.lg.jp/uploaded/life/46930_151749_misc.pdf,（参照日：2025 年 11 月 21 日）.
44. 高梁市,「高梁市平成 30 年 7 月豪雨災害記録誌」, 2021 年 4 月. https://www.city.takahashi.lg.jp/uploaded/attachment/19261.pdf,（参照日：2025 年 11 月 21 日）.
45. ウィキペディア,「加古川市」, https://ja.wikipedia.org/wiki/加古川市,（参照日：2025 年 11 月 21 日）.
46. 国土交通省,「平成 30 年 7 月豪雨の概要（近畿管内）≪第 8 報≫」, https://www.kkr.mlit.go.jp/news/river/disaster/2018/ol9a8v000000yue8-att/ol9a8v00000117n3.pdf,（参照日：2025 年 11 月 21 日）.
47. 国土交通省,「1. 平成 30 年 7 月豪雨災害の概要と被害の特徴」, https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/hazard_risk/dai01kai/dai01kai_siryou2-1.pdf,（参照日：2025 年 11 月 21 日）.
48. ウィキペディア,「小野市」, https://ja.wikipedia.org/wiki/小野市,（参照日：2025 年 11 月 21 日）.
49. 小野市,「主な災害の記録」, https://www.city.ono.hyogo.jp/material/files/group/12/atc_1338827951.pdf,（参照日：2025 年 11 月 21 日）.
50. ウィキペディア,「博多区」, https://ja.wikipedia.org/wiki/博多区,（参照日：2025 年 11 月 21 日）.
51. 福岡市,「福岡市総合ハザードマップ」, https://webmap.city.fukuoka.lg.jp/bousai/f_higai.html,（参照日：2025 年 11 月 21 日）.
52. ウィキペディア,「糸島市」, https://ja.wikipedia.org/wiki/糸島市,（参照日：2025 年 11

月 21 日).
53. 糸島市,「市長短信 災害に強いまちづくりのために」, 2018 年 7 月. https://www.city.itoshima.lg.jp/s007/010/040/030/050/040/3007tansin.pdf, (参照日 : 2025 年 11 月 21 日).
54. ウィキペディア,「東峰村」, https://ja.wikipedia.org/wiki/東峰村, (参照日 : 2025 年 11 月 21 日).
55. 農林水産省,「市町村の姿 グラフと統計でみる農林水産業 (東峰村)」, https://www.machimura.maff.go.jp/machi/contents/40/448/index.html, (参照日 : 2025 年 11 月 21 日).
56. 都道府県市区町村,「市区町村データランキング 可住地面積」, https://uub.jp/cdr/g/habitable.html, (参照日 : 2025 年 11 月 21 日).
57. 東峰村観光ガイド,「九州北部豪雨被災地視察のご案内」, https://toho.main.jp/tourism/hisaichishisatsu/#index_id1, (参照日 : 2025 年 11 月 21 日).
58. 土木学会 水工学委員会 2017 年九州北部豪雨災害調査団,「平成 29 年 7 月九州北部豪雨災害 調査報告書」, 2020 年 6 月. https://committees.jsce.or.jp/report/system/files/H29 九州北部豪雨災害調査団_報告書.pdf, (参照日 : 2025 年 11 月 21 日).
59. ウィキペディア,「人吉市」, https://ja.wikipedia.org/wiki/人吉市, (参照日 : 2025 年 11 月 21 日).
60. 内山 庄一郎, 檀上 徹,「令和 2 年 7 月豪雨による熊本県人吉市および球磨村渡地区の洪水被害の特徴—2020 年 7 月 9 日調査速報 第 1 版—」, 防災科学技術研究所 調査速報, Ver. 1.1, 2020 年 7 月 14 日. https://www.bosai.go.jp/info/saigai/2020/pdf/20200715_01.pdf, (参照日 : 2025 年 11 月 21 日).
61. ウィキペディア,「足立区」, https://ja.wikipedia.org/wiki/足立区, (参照日 : 2025 年 11 月 21 日).
62. 足立区,「足立区水害区域図 (浸水履歴) 平成 21 年度～」, https://www.city.adachi.tokyo.jp/documents/2807/240625suigaikuikizu2.pdf, (参照日 : 2025 年 11 月 21 日).
63. 足立区,「特集 大規模水害で足立区が沈む。」, 2020 年 6 月. https://www.city.adachi.tokyo.jp/pickup/003.html, (参照日 : 2025 年 11 月 21 日).
64. L. Breiman, “Random forests,”Machine Learning, vol. 45, no. 1, pp. 5-32, 2001.
65. G. Ke, Q. Meng, T. Finley, T. Wang, W. Chen, W. Ma, Q. Ye, and T. Y. Liu, “LightGBM: A highly efficient gradient boosting decision tree,” in Proceedings of the 31st International Conference on Neural Information Processing Systems (NeurIPS 2017), Long Beach, CA, USA, Dec. 4-9, 2017, pp. 3149-3157.
66. B. Li, G. Chen, Y. Si, X. Zhou, P. Li, P. Li, and T. Fadiji, “GNSS/INS integration based on machine learning LightGBM model for vehicle navigation,” Applied Sciences, vol. 12, p. 5565, 2022. https://doi.org/10.3390/app12115565
67. N. Li, F. Zou, and F. Guo, “Vehicle traveling speed prediction based on LightGBM algorithm,” in Genetic and Evolutionary Computing, vol. 1114, pp. 1-10, 2024. https://doi.org/10.1007/978-

981-99-9412-0_1

68. 波部 斉,「ランダムフォレストの基礎と最近の動向」, 映像情報メディア学会誌, 第 70 巻, 第 9 号, pp. 788-791, 2016.
69. C. Li and P. Xu, “Application on traffic flow prediction of machine learning in intelligent transportation,” Neural Computing and Applications, vol. 33, pp. 613-624, 2021. https://doi.org/10.1007/s00521-020-05002-6
70. W. Yang, L. Chen, T. Ke, H. He, D. Li, K. Liu, and H. Li, “Carbon emission trend prediction for regional cities in Jiangsu Province based on the random forest model,” Sustainability, vol. 16, p. 10450, 2024. https://doi.org/10.3390/su162310450
71. Google, “Directions API,” Google Maps Platform Documentation, https://developers.google.com/maps/documentation/directions, (参照日 : 2025 年 11 月 22 日).
72. ESRI ジャパン,「ArcGIS Pro」, https://www.esrij.com/products/arcgis-pro/, (参照日 : 2025 年 11 月 22 日).
73. 国土地理院,「数値地図 (国土基本情報)」, https://www.gsi.go.jp/kibanjoho/kibanjoho40027.html, (参照日 : 2025 年 11 月 22 日).
74. 国土地理院,「電子国土基本図 地図情報 ファイル仕様書 第 1.5 版」, 2021 年 7 月, p.32.
75. 国土地理院,「基盤地図情報数値標高モデルについて」, https://fgd.gsi.go.jp/download/ref_dem.html, (参照日 : 2025 年 11 月 22 日).
76. 道路構造令 (昭和 45 年政令第 320 号). https://laws.e-gov.go.jp/law/345CO0000000320, (参照日 : 2025 年 11 月 22 日).
77. JAXA,「高解像度土地利用・土地被覆図」, https://earth.jaxa.jp/ja/data/2562/index.html, (参照日 : 2025 年 11 月 22 日).
78. Scikit-learn developers, Scikit-learn 1.20 documentation, https://scikit-learn.org/stable/index.html, (参照日 : 2025 年 11 月 22 日).
79. LightGBM, https://lightgbm.readthedocs.io/en/latest/index.html, (参照日 : 2026 年 1 月 12 日).
80. 内閣府 (防災担当),「避難情報に関するガイドライン (別冊資料)」, 2021 年. (参照日 : 2025 年 11 月 23 日).
81. K. Shoyama, Q. Cui, M. Hanashima, H. Sano, and Y. Usuda, “Emergency flood detection using multiple information sources: Integrated analysis of natural hazard monitoring and social media data,” Science of the Total Environment, vol. 767, p. 144371, 2021. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144371
82. T. Honda, S. Kotsuki, G. Y. Lien, Y. Maejima, K. Okamoto, and T. Miyoshi, “Assimilation of Himawari-8 all-sky radiances every 10 minutes: Impact on precipitation and flood risk prediction,” Journal of Geophysical Research: Atmospheres, vol. 123, pp. 965-976, 2018. https://doi.org/10.1002/2017JD027096

83. Y. Zhang, Y. Yang, and W. Zhou, “Multi-city traffic flow forecasting via multi-task learning,” A pplied Intelligence, vol. 51, pp. 6895-6913, 2021. https://doi.org/10.1007/s10489-020-02074-8
84. M. Taamneh, S. Taamneh, and S. Alkheder, “Clustering-based classification of road traffic acci dents using hierarchical clustering and artificial neural networks,” International Journal of Injur y Control and Safety Promotion, 2016. https://doi.org/10.1080/17457300.2016.1224902
85. L. Xu, H. Liu, J. Song, R. Li, Y. Hu, X. Zhou, and P. Patras, “TransMUSE: Transferable traffic prediction in multi-service edge networks,” Computer Networks, vol. 221, p. 109518, 2023. htt ps://doi.org/10.1016/j.comnet.2022.109518
86. J. Mo and Z. Gong, “Cross-city multi-granular adaptive transfer learning for traffic flow predict ion,” IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, vol. 35, no. 11, pp. 11246-11258, 2022. https://doi.org/10.1109/9999315
87. Z. Tao, C. Li, and Q. Yang, “Network clustering-based multi-agent reinforcement learning for l arge-scale traffic signal control,” in Proceedings of the 2023 International Annual Conference o n Complex Systems and Intelligent Science (CSIS-IAC 2023), Shenzhen, China, Oct. 20-22, 20 23. https://doi.org/10.1109/CSIS-IAC60628.2023.10364020

第４章 避難所要時間に基づく災害リスク評価と避難判断への適用

４．１ はじめに

災害時に自治体が適切な避難情報の発令判断を行うためには，避難所要時間を正確に推定することが不可欠である。本研究の**第３章**では，自動車による移動時間を予測する手法を開発したが，実際には徒歩で避難する住民も少なくない。そのため，自動車に加えて徒歩による移動所要時間の推定も必要となる。また，避難経路が浸水した場合には，速度低下や通行不能などにより避難困難度が上昇するため，その影響を適切に反映した所要時間を算定して，避難リスクを把握することが重要である。これにより，どの住民がより厳しい状況に置かれるのか，あるいはどの地点で避難不能となる住民が生じるのかを明らかにすることができる。

しかし，これらはあくまで個々の住民に着目した評価であり，自治体が「いつ」「どの区域」に避難情報を発令すべきかを判断する際に必要となる，発令区域単位での危険度の把握には直結しない。特定地点のみでリスクが上昇した段階で広範囲に一斉発令を行えば，大規模な同時避難に伴う交通渋滞を招く可能性があるうえ，危険が及んでいない区域においては避難情報への信頼性低下を招くおそれがある。

したがって，的確な避難判断を行うためには，個々のリスク変化を発令区域ごとに把握し，区域間の危険度の差異を踏まえて全体を俯瞰しつつ判断することが求められる。

本章では，これらの課題に対応するため，次の三つの内容を中心に構成する。

(1) 浸水時における自動車および徒歩の避難所要時間の算出，
(2) 算出した所要時間に基づく個人レベルの災害リスク評価手法の提案と，区域ごとの発令タイムリミットの算出，
(3) 加古川市を対象としたケーススタディに本手法を適用し，その適用性を検証する。

４．２ 浸水時における避難所要時間の算出方法

本節では，自動車避難と徒歩避難のそれぞれについて，避難経路の作成方法および浸水時の所要時間の推定手法を述べる。

４．２．１ 自動車避難時の所要時間計算

災害時における自動車避難の所要時間は，第 3 章で説明変数として考慮した要因に加え，洪水災害時特有の条件，とりわけ浸水の影響を考慮する必要がある。浸水深が一定の範囲を超えると，エンジンが冠水して走行不能となり，実際に浸水路面を走行した車両が被災した事例も多数報告されている[1,2]。そこで本研究では，**表 4–1** に示すとおり，多くの研究で採用されている「30cm」を，自動車の通行限界水深として設定する[3-6]。浸水深が 30cm 未満の場合は，通行時の速度低下は生じない想定とし，通常どおり走行できる。一方，30cm を超える場合はその区間を通行不能と判定し，新たな経路の探索を行う。

表 4-1 既往研究における自動車走行可否の限界水深[3-6]

出典	資料の分類	限界水深 (cm)	
桑沢ら(2008)	水害避難シミュレーション	**30**	
町田ら(2016)	水害避難シミュレーション	**30**	
国土交通省(2016)	水害時の避難に関する基礎知識	走行困難	**30**
		走行不可	50
押川ら(2020)	豪雨災害における自動車流出事故の実態調査	流速あり	**30**
		流速なし	40

自動車避難時の経路選択については，本章の目的が自治体の意思決定支援にあることから，実際の住民ごとの経路選択を把握することは現実的ではない。そこで本研究では，住民が避難時に Google Maps などのナビゲーションアプリを利用すると仮定し，それらが一般に「距離または時間の最短経路」を提示することを踏まえて，「距離が最短となる経路」を基本の避難ルートとして設定した。また，最短経路上に通行不能区間が発生した場合には，その地点を起点に避難所までの新たな最短経路を再探索し，浸水によりすべての経路が通れなくなるまで，この再探索処理を繰り返す。**図 4-1** に示す手順に従い，本研究ではダイクストラ法を用いて避難経路を作成する[7]。ダイクストラ法は，通行可能なノードを網羅的に探索することで局所最適解に陥ることを避け，ネットワーク全体における最短経路を的確に算出することができるため，災害対応のように高い信頼性が求められる場面に適している。また，大都市規模のネットワークに対しても計算速度が十分に速く，時間的制約の厳しい状況でも実用性が高いことから，本研究で同手法を採用した。

以上の手順で作成した避難経路に対して，道路条件などの説明変数を算出するとともに，避難時の出発時刻を日時情報として付与し，３．４で構築したエリアモデルにより避難所要時間を予測する。

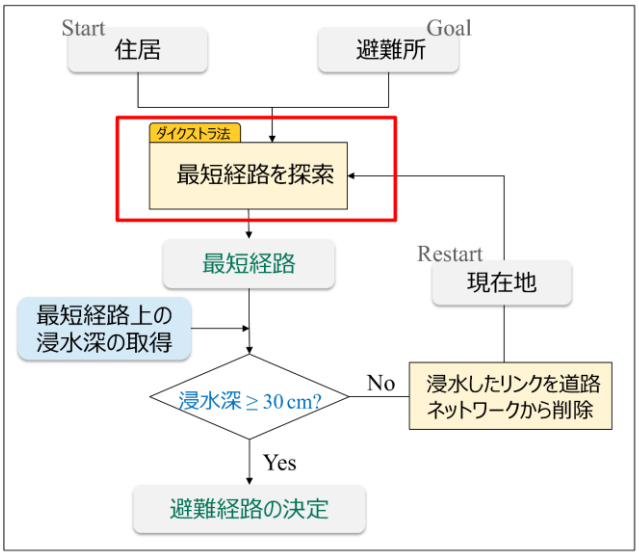


図 4-1 避難経路作成浸水状況を考慮した自動車避難経路の作成フロー

４．２．２ 徒歩避難時の所要時間計算

徒歩による避難経路の作成は，**図 4-1** に示す自動車避難の場合と基本的な手続きは共通しており，ダイクストラ法を用いて経路を探索しつつ，浸水状況の変化に応じて通行可能なリンク情報をリアルタイムで反映する。しかし，歩行速度は道路勾配の影響を強く受け，特に山間部のように傾斜が急な区間では速度が大きく低下することが指摘されている[8-10]。したがって，徒歩避難における経路探索では，距離の短さだけを追求するのではなく，勾配などによる歩行速度の変化を踏まえ，移動時間を最小化する経路を選択する必要がある。そこで，本節では，徒歩移動に影響を与える要因として勾配に着目し，既往研究に基づく歩行速度の算定式を設定する。その算定式を用いて道路ネットワーク上の各リンクの移動所要時間を求め，これをダイクストラ法の重みとして設定することで，「所要時間が最短となる経路」を避難ルートとして作成する。また，浸水深の影響を反映するために，歩行可能な限界水深および浸水深に応じた速度低減率を既往研究に基づき設定する。

まず，歩行速度に関する既往研究で広く用いられている Tobler (1993) の式を参考に，勾配の影響を考慮した平常時の歩行速度を式（4-1）のように設定する。ただし，本研究では，Tobler 式の初期速度 (v_0) をそのまま用いず，**図 4-2** に示すように，複数の既往研究で報告されている歩行速度データを取りまとめた結果を踏まえて設定している[11-19]。具体的には，年齢・性別ごとの歩行速度分布を考慮し，平均速度が最も低い「子供」および「高齢者等」の水準に合わせて，初期速度を 1m/s としている。

$$
\begin{aligned}
v &= v_0 \times f_{slope} \\
v_0 &= 1\ m/s \\
f_{slope} &= e^{-3.5|\tan\theta+0.05|}
\end{aligned}
\tag{4-1}
$$

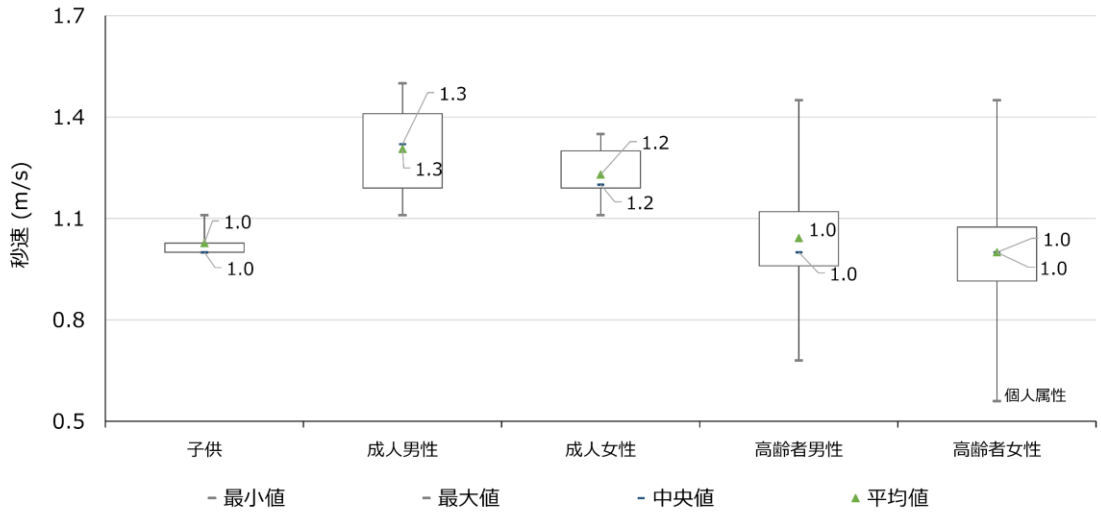


図 4-2 既往研究に基づく属性別歩行速度の集約結果[11-19]

道路ネットワーク上の各リンクにおける徒歩移動時間を算出するにあたり，まず GIS ソフトを用いて，国土地理院が公開する 10m メッシュ DEM と数値地図の道路中心線データを空間的に結合し，各リンクの傾斜角および傾斜方向を求める[20,21]。次に，リンクごとに順方向および逆方向の両方について勾配を算出し，その値を式（4-1）に代入して歩行速度を求める。最後に，得られた速度をリンク延長で割ることで，各リンクの移動時間を算出する。こうして求めた移動時間をダイクストラ法のリンク重みとして設定することで，平常時における所要時間が最短となる徒歩避難経路を作成できる。

一方，道路が浸水した場合の徒歩移動については，多くの既往研究では「50cm」を歩行が困難になる限界水深として用いている。本研究でも同様にこの値を基準とし，式（4-2）のように，限界水深までの浸水深に応じて歩行速度を線形的に低減させることで，浸水による速度低下を反映させる。

$$v_{inundation} = v \times f_{inundation}$$
$$f_{inundation} = 1 - {}^{d}/_{50} \quad [0 \leq d \leq 50\ cm] \tag{4-2}$$

以上で示した平常時および浸水時の歩行速度の設定を踏まえ，**図 4-1** に示す手順により，避難経路を浸水状況に応じて更新しながら算定する。具体的には，現在の経路上の次のリンクの浸水深を確認し，通行不能となる場合にはその時点で再度ダイクストラ法による最短経路探索を行う。この処理を，避難所に到達するか，浸水により避難が継続できない状況に至るまで繰り返す。また，各リンクにおいては，平常時の歩行速度と当該時刻の浸水深に基づいて避難時の移動時間を算出し，それらを累積することで徒歩避難に要する総所要時間を求める。

４．３ 避難リスク評価手法の提案

本節では，４．２で示した各移動手段における災害時の避難所要時間の算出方法をもとに，浸水の進行が避難所要時間に及ぼす影響を定量化し，その結果として得られる「避難の困難度」を災害リスクとして評価する。また，自治体が実際の災害時に本評価結果をどのように避難情報の発令判断へ活用できるかを明確にするため，避難所要時間およびリスク評価結果に基づく発令タイムリミットの設定基準についても検討する。

４．３．１ 避難リスク評価式の構築

本研究における避難リスクの評価は，以下の前提に基づいて実施する。

(1) 災害発生前に発令される避難情報には「高齢者等避難」と「避難指示」があるが，本研究では前者を対象外とする。「高齢者等避難」は，避難に時間を要する高齢者や障害者など，一人では避難が困難な要配慮者を対象として発令されるものであり，

これらの対象者情報は外部に公開されていないため，本研究ではその属性や空間分布を把握することができない[22,23]。また，要配慮者の避難には，その支援者が対象者のもとへ向かう移動や，支援者と同行して避難所へ向かう際の所要時間など，個別状況に左右される要素が多く，一律の評価が困難である。
このため，本研究では「高齢者等避難」は扱わず，「避難指示」を発令判断支援の対象とする。

(2) 避難指示の発令は原則として，立ち退き避難が必要と判断される居住者に対し，発災までに安全な場所へ退避するための時間的猶予を確保したうえで市町村長が発令するものとされている。しかし，**２．２．２**で述べたように，居住地の地形条件，住宅構造，家族構成，浸水継続時間に対する許容度などは住民によって大きく異なるため，実務上，市町村長が「立ち退き避難が必要な者のみ」を厳密に選別して発令することは困難である。その結果，現在の運用では，垂直避難の可否にかかわらず，危険が想定される区域の住民全体を対象として避難指示が発令されている。
以上を踏まえ，本研究では，自治体の発令判断を支援するという観点から，垂直避難の可否を考慮せず，住民が水平避難を行う場合の避難困難度の変化をもとにリスクを評価する。

(3) 避難行動に関する過去の調査では，住民が避難指示を受けてから実際に避難を開始するまでには，家族の合流を待つ時間や必要物資の準備，屋内の保全措置など，一定の準備時間を要することが指摘されている[24,25]。このため，避難行動が直ちに開始されることを前提とした「現時点の危険度」だけでは，住民が実際に直面する避難リスクを十分に捉えることができない。避難開始が遅れる現実的な状況を踏まえ，将来時点での危険度を見据えて評価する視点が必要となる。
この将来時点については，**図 4-3** に示すように，気象庁が大雨警報（浸水害）および洪水警報の危険度分布を作成する際に用いている予測リードタイムを参考とする[2625]。危険度分布では，大雨警報（浸水害）に 1 時間先，洪水警報には 3 時間先の予測値が用いられることから，本研究では予測精度の確保を優先し，1 時間先の浸水予測値を基にリスク評価を実施する。

色	判断基準	表示条件（危険の切迫度）		
		大雨警報(土砂災害)の危険度分布	大雨警報(浸水害)の危険度分布	洪水警報の危険度分布
濃い紫		**すでに**基準Ⅲに到達した場合	**すでに**基準Ⅲに到達した場合	**すでに**基準Ⅲに到達した場合
薄い紫	↑基準Ⅲ 警報基準の一段上の基準	**2時間先**までに基準Ⅲに到達すると予測される場合	**1時間先**までに基準Ⅲに到達すると予測される場合	**3時間先**までに基準Ⅲに到達すると予測される場合
赤	↑基準Ⅱ 警報基準	**2時間先**までに基準Ⅱに到達すると予測される場合	**1時間先**までに基準Ⅱに到達すると予測される場合	**3時間先**までに基準Ⅱに到達すると予測される場合
黄	↑基準Ⅰ 注意報基準	**2時間先**までに基準Ⅰに到達すると予測される場合	**1時間先**までに基準Ⅰに到達すると予測される場合	**3時間先**までに基準Ⅰに到達すると予測される場合
－		**2時間先**までに基準Ⅰに到達しないと予測される場合	**1時間先**までに基準Ⅰに到達しないと予測される場合	**3時間先**までに基準Ⅰに到達しないと予測される場合

図 4-3 危険度分布における切迫度判定と予測リードタイムの関係

以上の三つの前提を踏まえ，本研究では，個々の住民における避難困難度の上昇と，同一地域内での避難者間の相対的な困難度の差異を併せて考慮し，災害リスクを評価するための指標として式（4-3）を設定する。

$$Risk_i = \max\left(0, \frac{T_{real,i} - T_{min,i}}{T_{min,i}} - Tol_i\right) \times g(T_{real,i}) \tag{4-3}$$

ここで，$T_{min,i}$ は，避難者i が浸水の影響を受けずに最短経路を通って避難した場合の最短所要時間を示す。一方，$T_{real,i}$ は，評価時点から避難を開始した場合に想定される実避難所要時間であり，最短経路の一部が浸水により通行不能となる場合や，浸水を回避するために経路を迂回せざるを得ない場合などの状況を反映している。$T_{real,i}$ が $T_{min,i}$ と比べてどの程度増加するかを把握することで，避難者i にとって平常時と比べてどれだけ避難困難度が上昇したかを評価できる。

また，自治体が総合的な発令判断を行う際には，地域内の異なる区域や避難者間で生じるリスクの差異を相対的に把握することも重要となる。たとえば，平常時の避難所要時間が短い避難者では，浸水により時間の増加率が大きく見えても，実際には所要時間は依然として短く，直ちに高い危険性を示すものではない。したがって，増加率のみを指標とした評価では，リスクを適切に把握できない場合が生じる。この点を補うために，平常時の避難所要時間が極端に短い避難者のリスクが過大に評価されることを防ぐ補正指標として，許容値（Tol_i）を導入している。Tol_i の算定は式（4-4）に示すとおりであり，避難者i の $T_{min,i}$ が，同一地域内の避難者全体における所要時間分布の中で占める相対的位置を示す指標 $Percentile_i$ を用いて補正を行うものである。

$$Tol_i = 1 - Percentile_i \tag{4-4}$$

一方で，平常時から避難所要時間が長い避難者では，たとえ浸水による所要時間の増加率が小さくても，実際は避難完了までに要する時間は著しく長くなり，相対的に高い危険性を抱える可能性がある。そこで，こうした避難者の危険性が評価上十分に反映されず，結果として見落とされることを避けるため，本研究では補完的な指標として $g(T_{real,i})$ を導入している。$g(T_{real,i})$ は式（4-5）に示すとおり，評価時点における避難者 i の避難所要時間が，地域内の所要時間分布の中央値（T_{50}）に対してどの程度大きいかを比率として表す指標である。

$$g(T_{real,i}) = 1 + \frac{T_{real,i}}{T_{50}} \tag{4-5}$$

最後に，これらの指標を踏まえて算定した各避難者のリスクを均一化し，すべての避難者を共通の尺度で比較可能な形に整理する。

本手法により，浸水時における住民一人ひとりの避難困難度を適切に評価できるとともに，自治体においては，地域内のどの区域でリスク水準が相対的に高まっているのかを把握し，発令判断において優先的に検討すべき区域を明確化することが可能となる。

４．３．２ 自治体向け避難情報発令タイムリミットの設定

発令タイムリミットは，前節で算定した均一化後の災害リスクに基づき，発令区域ごとに設定する。具体的には，以下の考え方に基づいて定めている。

まず，式（4-3）は，評価時点において避難者 i の実避難所要時間 $T_{real,i}$ を算出できることを前提としている。したがって，当該時点で浸水によりすでに避難を完了することができない避難者については $T_{real,i}$ が算出できず，災害リスクの計算自体が成立しない。このような避難者は，評価上「避難困難」と見なし，個別のリスク算定を行わずにリスク値を一律に 1 と設定する。一方，評価時点で避難が可能な避難者については，算定されたリスクを標準化したうえで，その値を $[0, 1)$ の範囲で扱う。

次に，市町村長は，発令区域内のすべての住民が発災前に避難を完了するために必要な時間的猶予を確保したうえで避難指示を発令することが求められている。この点を踏まえ，本研究では，ある発令区域内でリスク値が 1 と評価される住民が初めて確認された時点を，当該区域に対して避難指示を発令すべき最遅時刻（タイムリミット）とみなす。これにより，発令区域 A の発令タイムリミット $t_{limit,A}$ は，式（4-6）のように表される。

$$t_{limit,A} = \min_{i \in A} \{t | Risk_i(t) = 1\} \tag{4-6}$$

４．４　ケーススタディによるリスク評価手法の適用性検証

本節では，提案手法の実用性を検証するため，洪水発生時を想定したケーススタディを実施する。まず，４．４．１では対象地域の概要を示し，４．４．２でケーススタディに用いる洪水予測データについて述べる。続いて４．４．３にて，自動車および徒歩による避難経路の算定結果を示し，４．４．４ではそれらに基づく避難所要時間およびリスク評価の結果を検討する。最後に，４．４．５において区域ごとの避難指示発令タイムリミットについて検討する。

４．４．１ 対象地域の概要

本研究では，兵庫県加古川市を対象としてケーススタディを実施する。３．２．１で述べたように，加古川市は市内を加古川が貫流しており，とりわけ人口密度の高い市街化区域はその両岸の平坦地に分布している[27]。このような地形的特性から，豪雨時には浸水が広がりやすく，住宅地が広範囲に影響を受けやすい脆弱な地域となっている。また，加古川市では，前述の平成 30 年 7 月豪雨に加え，平成 29 年 9 月豪雨，平成 23 年台風 15 号および台風 12 号に伴う豪雨など，これまでにも度重なる豪雨災害が発生しており，浸水被害が報告されている[28,29]。したがって，加古川市において浸水時の避難リスクを評価し，自治体が避難指示の発令タイミングや対象区域を適切に判断できるよう支援することは重要であると考えられる。

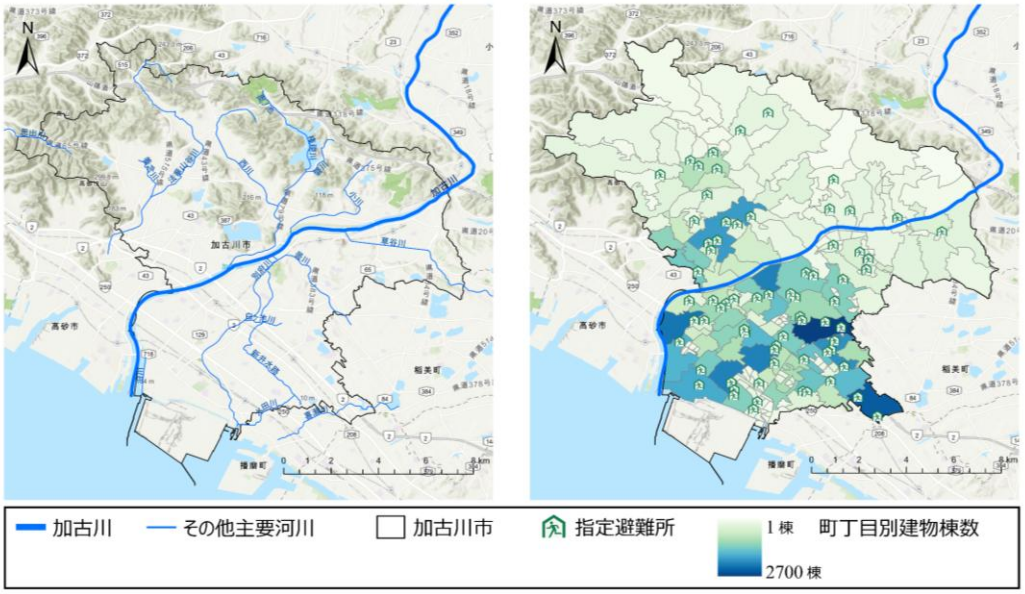


図 4-4 加古川市の概要図

図 4-4 は，加古川市内における主要河川および指定避難所の分布に加え，町丁目単位で集計した住宅建物棟数を示したものである。河川データは国土交通省が公開する河川中心線を用いており，加古川市内では，加古川本川が南北に貫流しているほか，その両岸には複数の主要河川が分布していることがわかる[30]。

住宅建物データについては，ゼンリン社が提供する全国建物データから個人住宅を抽出して作成した[31]。さらに，2020 年国勢調査の人口統計に基づき，世帯属性に応じて各住宅に人口を割り当て，建物単位の人口分布データを作成している[32]。右図からは，住宅建物が加古川両岸と市南西部に集中して分布していることが確認できる。とりわけ市南部の臨海域では居住密度が高く，豪雨時には浸水被害のリスクが相対的に大きい区域であることが示されている。また，避難所データについては，国土交通省の公開データをもとに，加古川市が公表する指定避難所の情報で補正したうえで作成した[33,34]。これらの避難所を町丁目単位で集計した結果を**表 4-2** に示す。191 区域のうち避難所が存在するのは 47 区域にとどまり，区域によっては複数の避難所が立地する一方，144 区域では避難所が全く設置されていない。このような避難所までの距離が相対的に長い区域では，住民がより早期に避難を開始する必要がある。

表 4-2 加古川市における指定避難所の町丁目別分布

No	町丁目名	避難施設名
1	加古川町篠原町	氷丘南小学校
2	加古川町寺家町	加古川公民館，加古川市総合福祉会館
3	加古川町本町	県立加古川西高等学校
4	加古川町木村	加古川小学校
5	加古川町稲屋	鳩里小学校
6	加古川町友沢	県立加古川南高等学校
7	加古川町北在家	市民会館
8	加古川町備後	加古川中学校
9	加古川町大野	日岡山公園，氷丘中学校
10	加古川町中津	氷丘小学校
11	神野町西条	加古川北公民館
12	西条山手二丁目	北山公園
13	神野町石守	神野小学校，石守公園
14	新神野五丁目	陵北小学校
15	神野町日岡苑	日岡山体育館
16	山手一丁目	山手中学校
17	野口町野口	野口小学校
18	野口町古大内	野口南小学校
19	野口町長砂	野口公民館
20	野口町良野	勤労会館，中部中学校
21	野口町水足	県立加古川北高等学校，陵南公民館，陵南中学校
22	野口町北野	北野公園，野口北小学校
23	平岡町高畑	平岡小学校
24	平岡町土山	平岡公民館，平岡東小学校

表 4-2 加古川市における指定避難所の町丁目別分布

No	町丁目名	避難施設名
25	平岡町二俣	平岡南小学校，平岡南中学校
26	平岡町新在家	東加古川公民館，加古川総合文化センター，県立農業高等学校，平岡中学校，平岡北小学校
27	尾上町養田	若宮小学校
28	尾上町池田	池田公園
29	尾上町長田	尾上小学校
30	尾上町口里	浜の宮小学校
31	別府町宮田町	別府公民館
32	別府町西町	別府小学校
33	別府町新野辺	浜の宮中学校，別府西小学校
34	別府町新野辺北町八丁目	別府中学校
35	八幡町宗佐	八幡小学校
36	平荘町山角	平荘小学校，両荘公民館
37	平荘町上原	いずみ荘
38	上荘町都染	上荘小学校
39	東神吉町神吉	県立東播工業高等学校，少年自然の家，神吉中学校，東神吉小学校
40	東神吉町天下原	ウェルネスパーク
41	東神吉町砂部	東神吉南小学校
42	西神吉町西村	西神吉小学校
43	西神吉町鼎	加古川運動公園
44	米田町平津	川西小学校
45	志方町志方町	志方公民館，志方小学校，志方体育館，志方中学校
46	志方町細工所	志方東公園，志方東小学校
47	志方町原	志方西小学校

４．４．２ 洪水予測データの設定

シナリオは，平成 30 年 7 月豪雨時に記録された加古川の河川水位と浸水想定区域図から作成する。ここで用いる浸水想定区域図は，国土交通省が管理する一級水系河川が破堤した場合の浸水想定を， 10 分間隔で時系列的に示したものである。

具体的には，平成 30 年 7 月 5 日 20 時 50 分から 6 日 20 時 40 分まで 10 分間隔で記録された加古川の河川水位を使用し，水位が計画高水位を超過した時点から，浸水想定区域図に示される 50m メッシュの時系列浸水深のうち 1 時間先の値を用いる。

図 4-5 は，シナリオ期間における浸水予測の時系列的な推移を示したものである。7 月 6 日 1 時 50 分の時点で浸水が予測されているが，本研究では 1 時間先の浸水深を用いている

ため，実際の浸水発生時刻は同日 2 時 50 分頃と推定される。その後，時間の経過に伴い浸水範囲は徐々に拡大し，浸水深が 30cm および 50cm を超えるメッシュの割合も増加する。これにより，一部の経路では自動車または徒歩による通行が困難となる区間が生じる。また，浸水範囲は 6 日 17 時 20 分頃に最大となり，以降は縮小に向かう傾向がみられる。

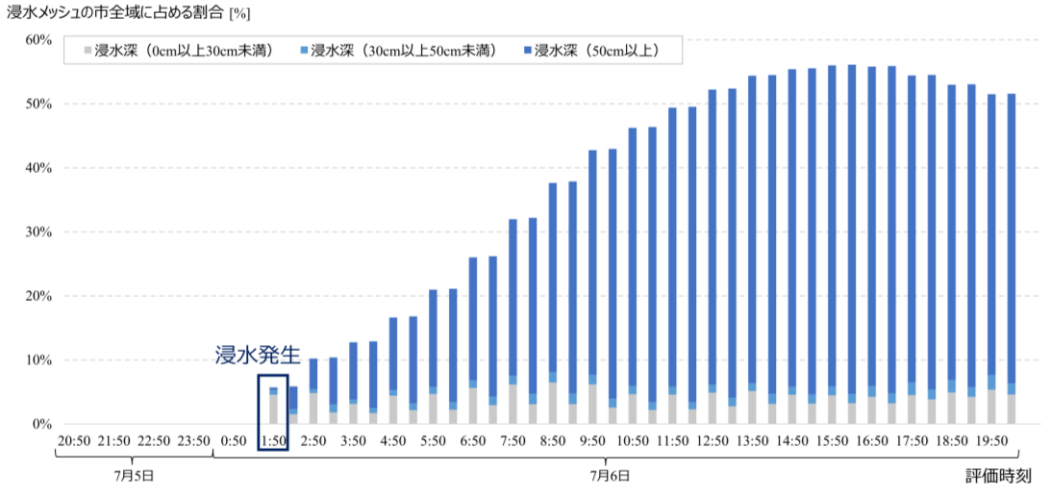
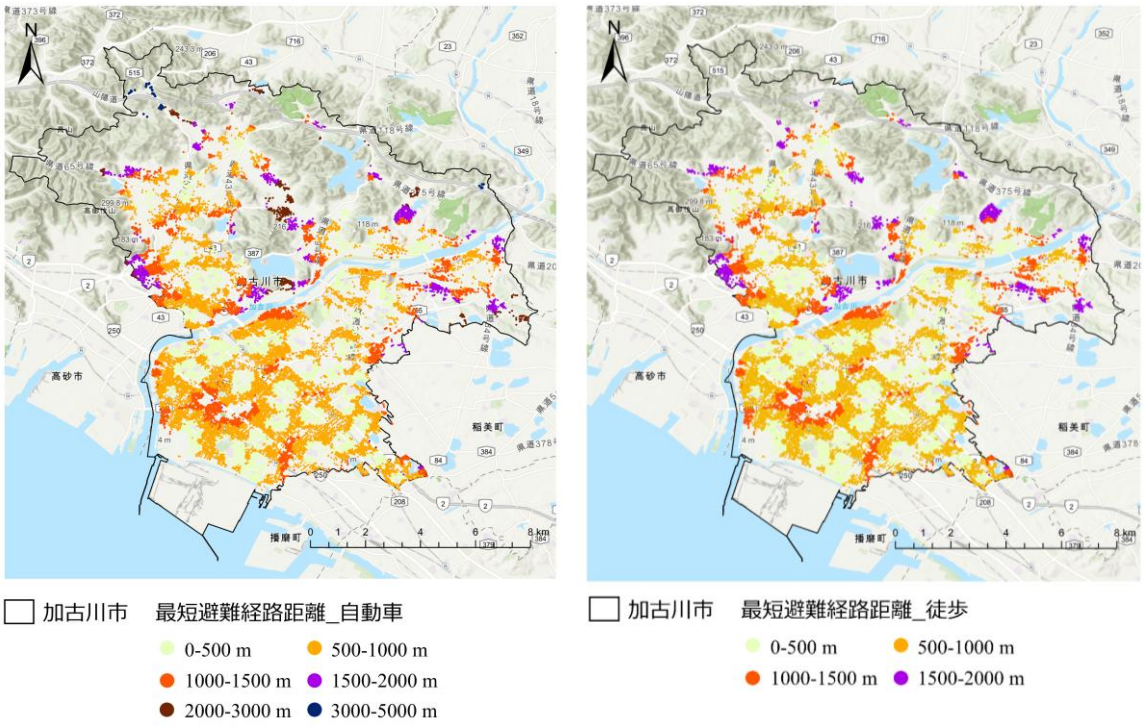


図 4-5 浸水深分布の時系列推移

４．４．３ 浸水の影響を考慮した避難経路の作成

避難経路の作成にあたっては，住民が想定する避難手段を自動車と徒歩に分け，各手段に応じて経路を算定する。避難所に近い住民は，一般に自動車ではなく徒歩による避難を選択しやすいと考えられるものの，実際の手段選択には個人差が大きい。そのため，本研究では，国土交通省が示す「徒歩で避難する場合の避難距離は 2km 以内が望ましい」との指摘を踏まえ，最短避難経路が 2km 以内の住民については，自動車避難と徒歩避難の両方について経路を作成する[35]。一方，最短避難経路が 2km を超える住民については，自動車で避難すると仮定し，**図 4-1** に示す手法をもとに距離が最短となる経路を求める。

図 4-6 は，平常時の自動車避難 (a) と徒歩避難 (b) における最短経路距離の分布を示している。徒歩避難では避難距離がすべて 2,000m 以内であるのに対し，自動車避難では最長 4,465m の経路がみられる。加古川市は全体として平坦であり，歩行速度が勾配の影響を受けにくいため，両手段における経路距離の差は大きくない。しかし，**図 4-7** に示すように，山沿いの地域に住む住民では状況が異なる。図に示す住民の場合，自動車避難では距離が最短となる山間部の経路が選択される一方，徒歩避難では，その山道が急勾配で通行に 2 時間以上を要するため，時間を短縮するための探索では距離が多少長くても勾配の緩い経路が選ばれる。このことから，本研究で自動車と徒歩を分けて経路を算定する方法は，各手段の特性を適切に反映した避難経路を得る上で有効であると考えられる。



(a) 自動車避難　　(b) 徒歩避難

図 4-6 避難手段別にみた住民の最短経路距離の分布



図 4-7 山沿いの住民に見られる自動車避難と徒歩避難における経路の違い

また，**図 4-8** は，30 分間隔で集計した浸水の影響による迂回発生の割合と，浸水に伴って避難が困難となった住民の割合を示している。浸水が発生した 7 月 6 日 1 時 50 分には，徒歩避難では居住者全体の 4.0%，自動車避難では 0.9% が迂回を要する状況となった。また，自動車で通行可能な限界水深は 30cm と徒歩よりも低いため，同時刻には自動車避難で 62 戸が避難できない状態となり，徒歩避難でも 1 戸が避難困難となった。浸水の拡大に伴い，両手段における迂回避難の割合と避難困難となる住民の割合はともに増加した。徒歩避難では 16 時 20 分に避難困難がピークに達し，18,183 戸が避難を継続できなかった。一方，自動車避難では 15 時 20 分に避難困難が最大値を示し，18,417 戸が自動車による避難が不可能となった。

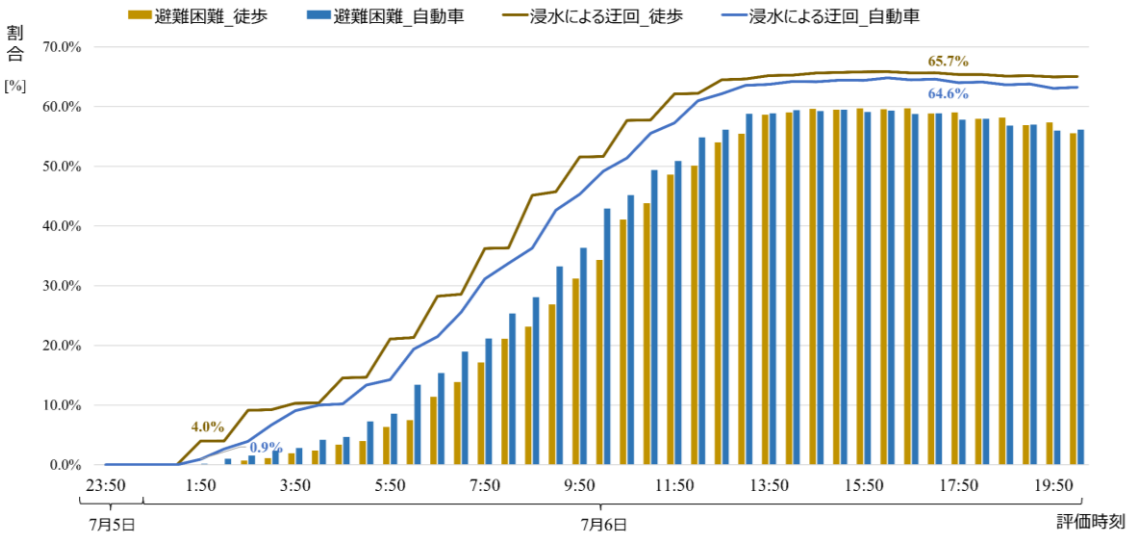


図 4-8 迂回避難および避難困難の発生割合の時系列推移

４．４．４ 避難所要時間および災害リスクの評価結果

前節で作成したシナリオ各時刻の避難経路に基づき，本節では，４．２に示した避難所要時間の算定方法および４．３で提案した災害リスクの評価手法を適用して分析を行う。

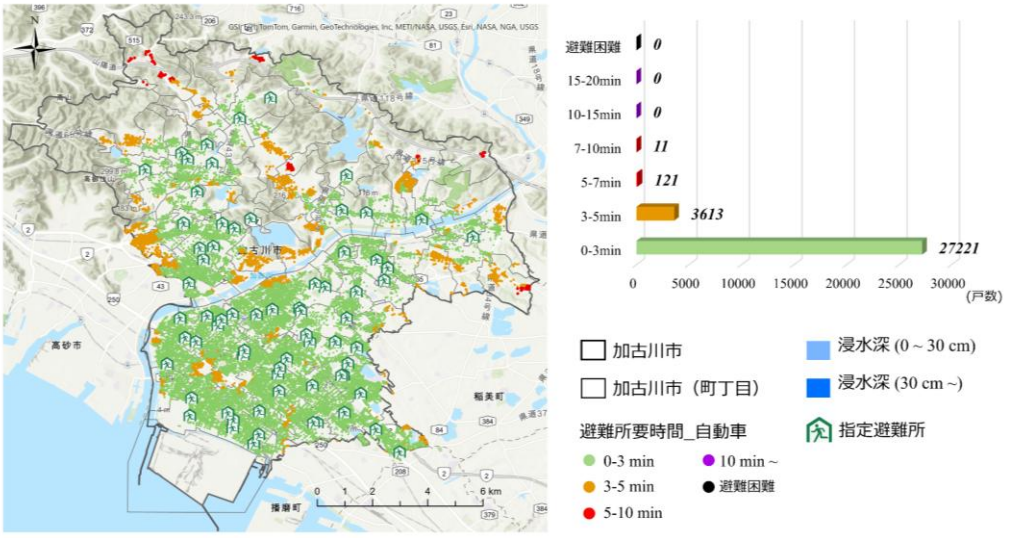
自動車避難と徒歩避難における避難所要時間について，浸水開始前の 1 時 20 分，浸水発生時刻の 1 時 50 分，およびその後 2 時間間隔の 3 時 50 分，5 時 50 分，7 時 50 分，9 時 50 分の算出結果を取りまとめ，それぞれ**図 4-9** と**図 4-10** に示す。

図 4-6 に示す平常時の避難経路をもとに算出した避難所要時間を見ると，自動車避難では全ての住民の所要時間が 10 分以内に収まり，約 88%が 3 分以内に避難を完了できる。一方，徒歩避難では避難距離はいずれも 2km 以内であるものの，勾配などの影響により 11 戸が 30 分を超え，121 戸の所要時間は 15 分から 30 分となった。これらの住民は相対的に避難に時間を要するため，より早い段階で避難行動を開始する必要があると考えられる。

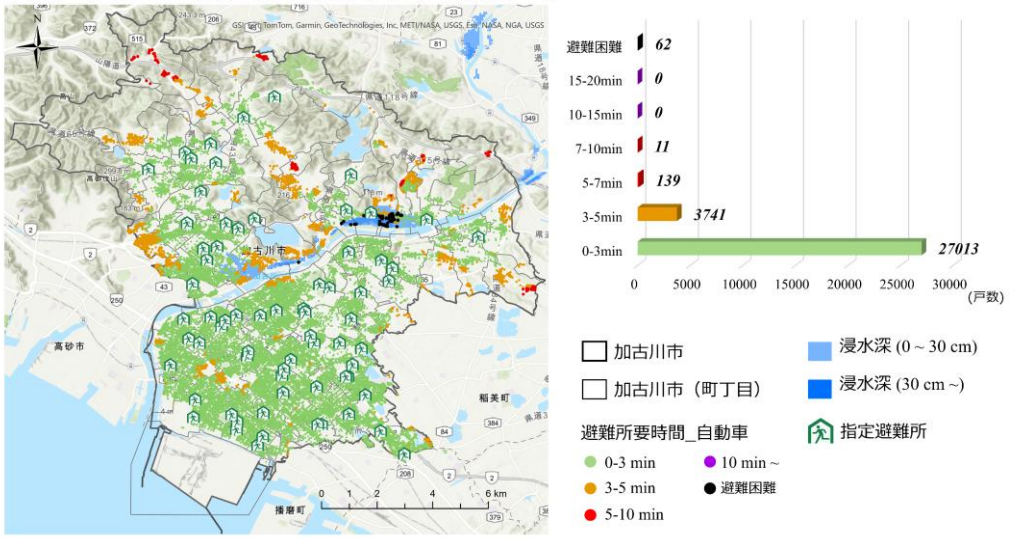
自動車避難と徒歩避難のいずれにおいても，1 時 50 分に浸水が発生した後は時間の経過とともに避難所要時間の分布が上昇傾向を示し，避難困難となる戸数も増加した。これは，**図 4-8** に示したように，浸水の進行に伴って迂回を要する避難の割合が高まり，通行可能な経路を確保できない住戸が増加する傾向と一致している。

また，前述のとおり，自動車が通行可能な限界水深は徒歩よりも低いため，各時点において自動車のほうが徒歩避難より避難困難戸数が多いことが確認できる。とりわけ，浸水発生から 8 時間後の 9 時 50 分には 1 万戸を超える住民が避難困難となり，2 時間前と比べて約 4 千戸増加した。これらの結果は，浸水発生後に速やかに避難を開始する必要性を強く示している。

7月6日1時20分における自動車避難の所要時間分布（未浸水時）



7月6日1時50分における自動車避難の所要時間分布（浸水発生時）



7月6日3時50分における自動車避難の所要時間分布（浸水発生2時間後）

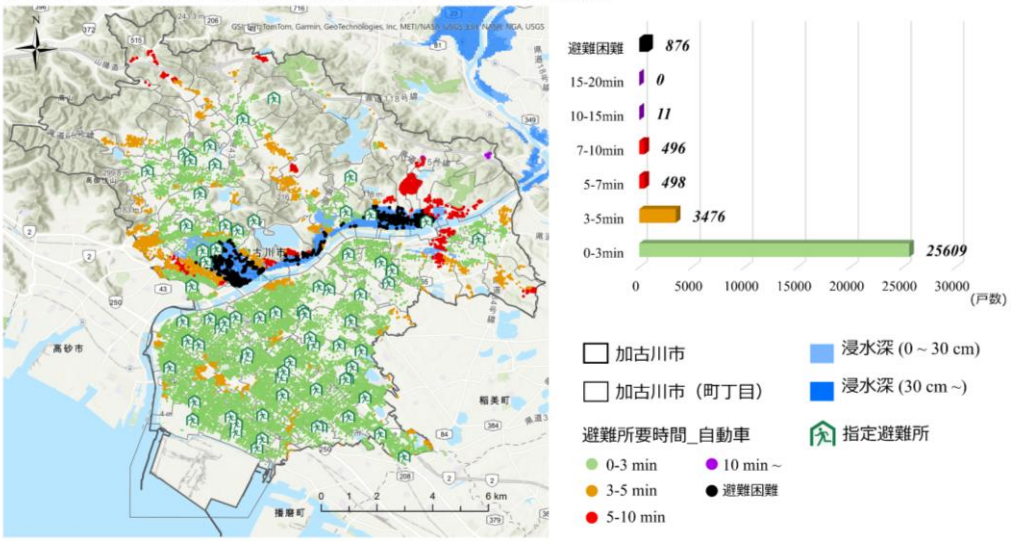


図 4-9 自動車避難における所要時間分布の時系列推移

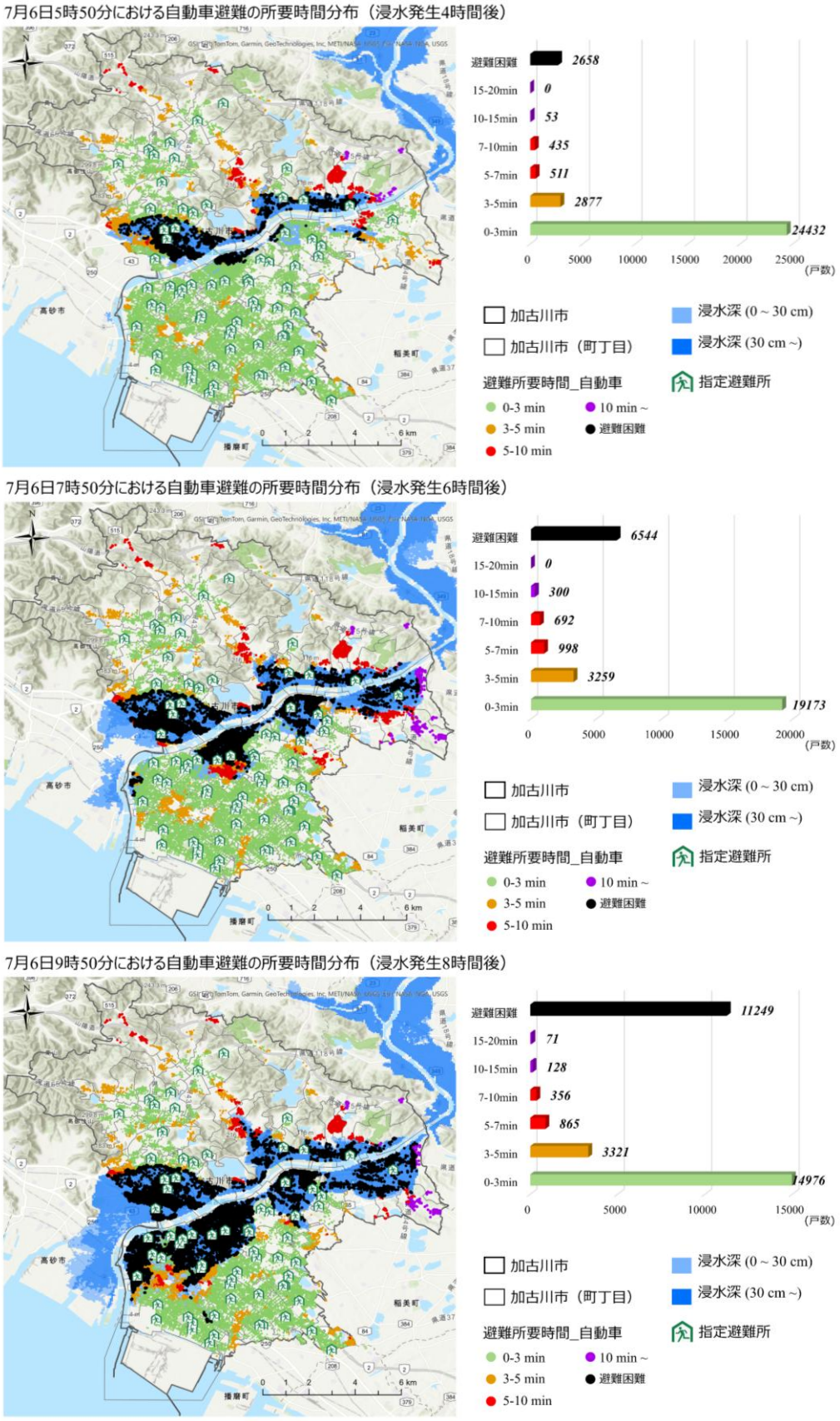


図 4-9 自動車避難における所要時間分布の時系列推移

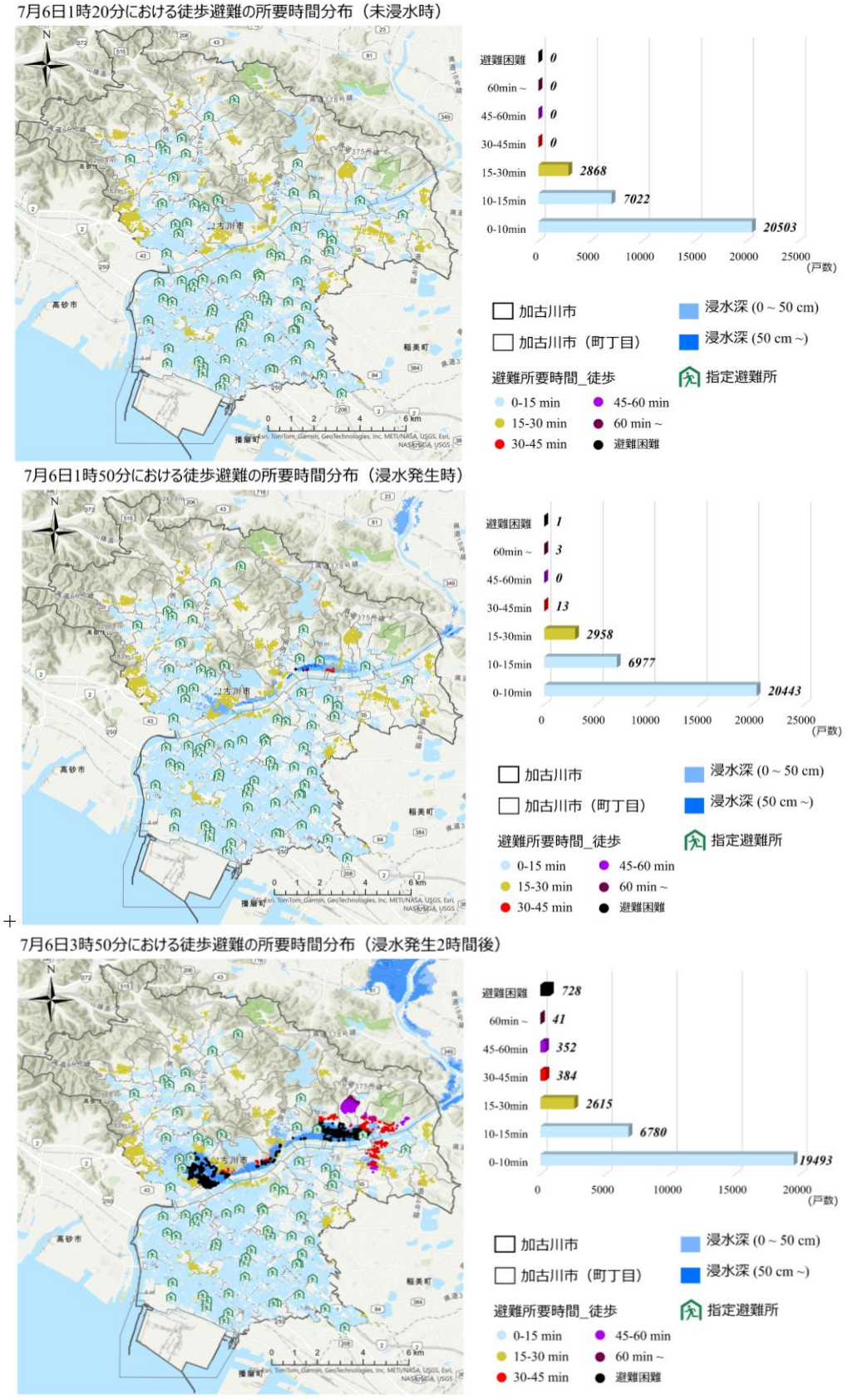


図 4-10 徒歩避難における所要時間分布の時系列推移

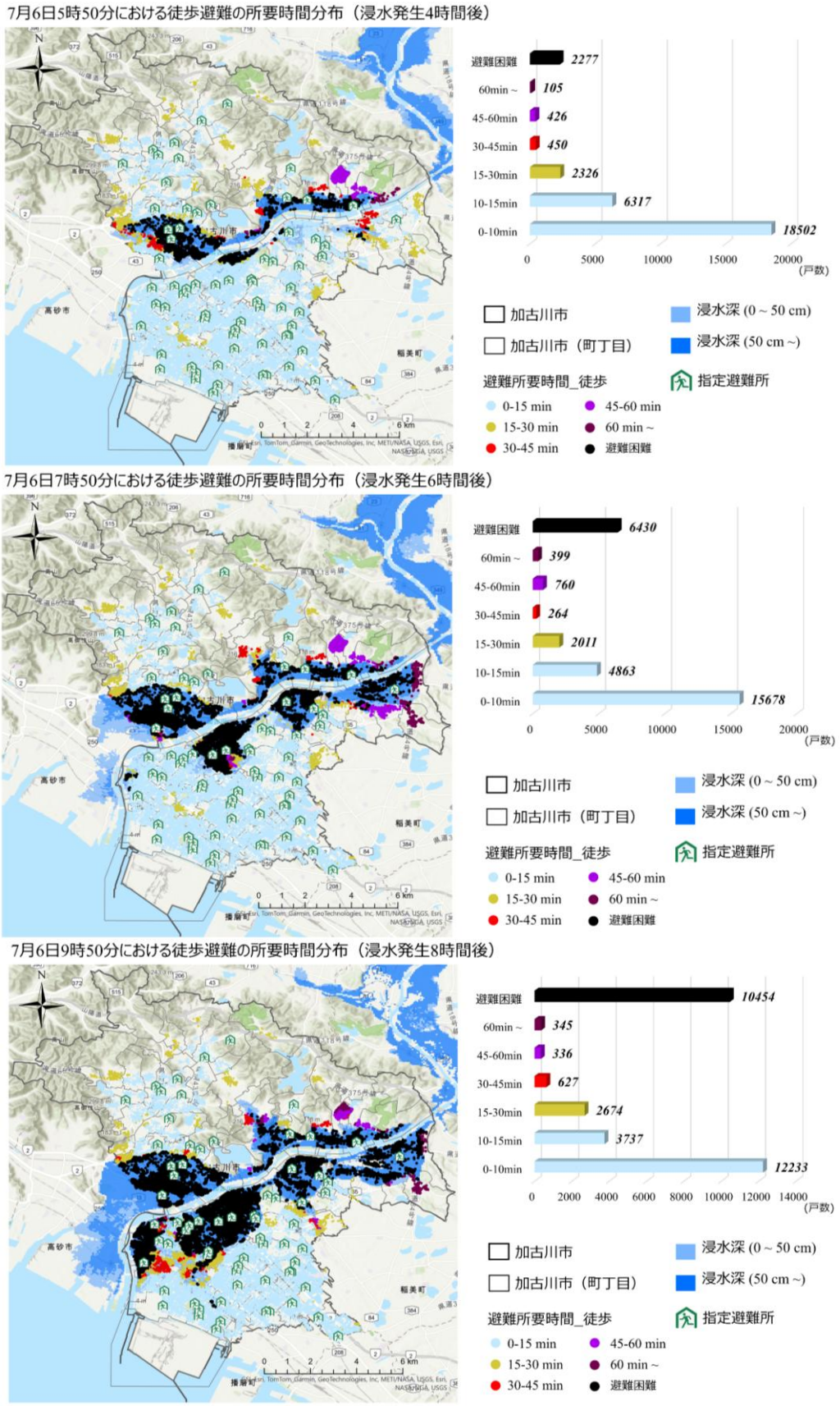


図 4-10 徒歩避難における所要時間分布の時系列推移

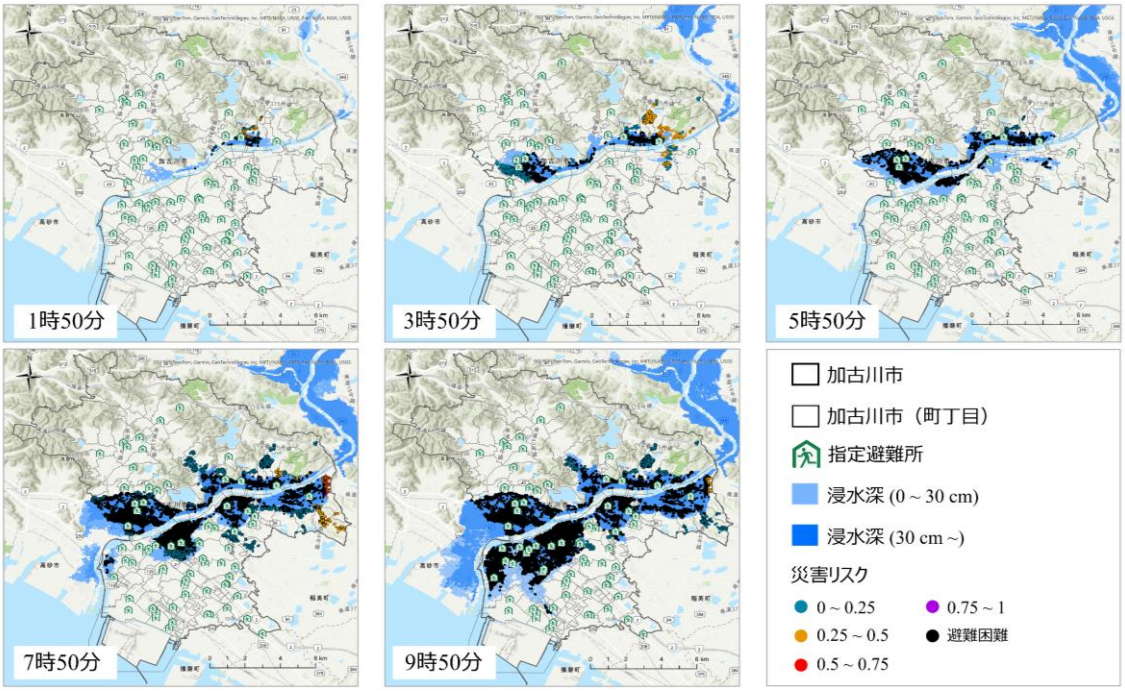


図 4-11 自動車避難における災害リスク分布の時系列推移

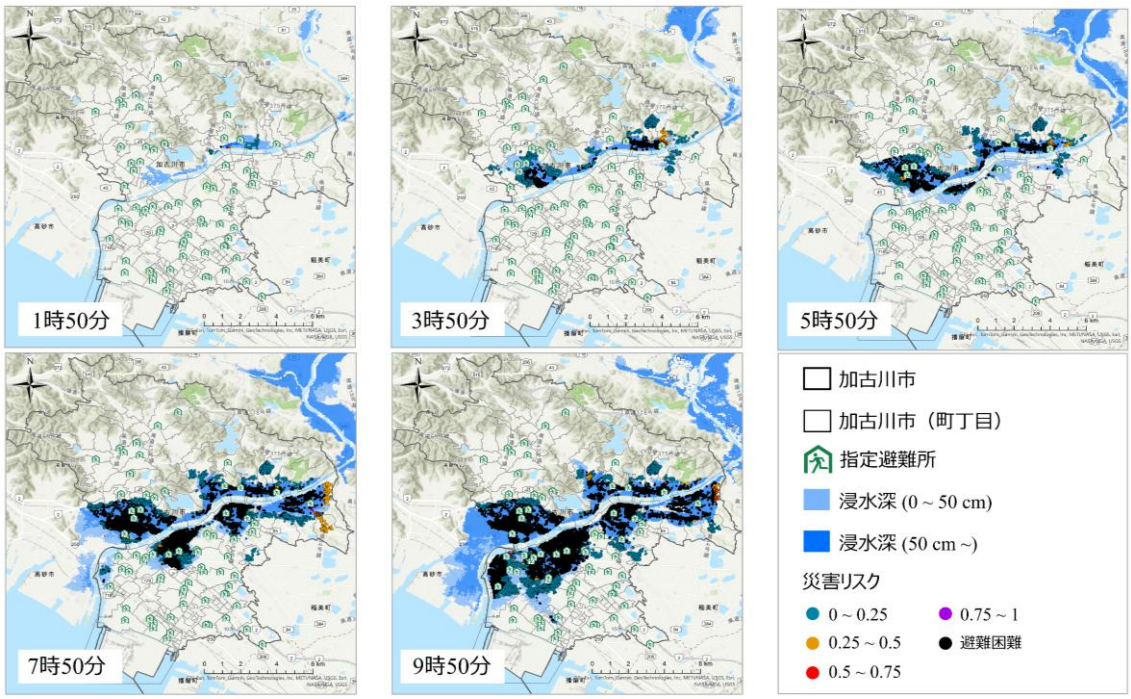


図 4-12 徒歩避難における災害リスク分布の時系列推移

また，これらの避難所要時間を基に算出した避難リスクについて，自動車避難および徒歩避難の結果を図 4-11 および図 4-12 に示す。1 時 50 分時点では，自動車避難のリスクが相対的に大きく上昇している。これは，浸水発生直後に浸水が周辺へ拡大し，多くの経路で浸水深が自動車通行の限界水深を超えたため，迂回が必要となる住民が多く生じたこと

による。一方，徒歩避難では速度が低下するものの，避難者のほとんどは引き続き最短の避難経路を通行できたことから，リスクの上昇は比較的緩やかであった。しかし，5 時 50 分には前述とは異なる傾向がみられる。この時刻には，多くの徒歩避難者の最短経路上で浸水深が 50cm に達し，速度の低下に加えて迂回を要する住民が増加した。一方，自動車避難でも迂回は発生しているものの，自動車は距離の影響を受けにくく，経路変更後も全ての住民が 15 分以内に避難を完了できた。それに対して，徒歩避難では 100 戸以上が 1 時間を超える所要時間を要しており，こうした住民は避難所要時間が自身の最短避難時間より大幅に増加することに加え，他の住民と比べて相対的に危険な状況に置かれることから，避難リスクがより高くなる傾向がみられた。さらに，7 時 50 分および 9 時 50 分では，避難所要時間の算出結果と同様，自動車避難と徒歩避難のいずれにおいても避難困難となる戸数が大きく増加し，全体のリスク水準も前の時刻と比べて高まった。徒歩避難では，自動車避難より避難困難となる戸数は少ない一方で，リスクが上昇する住民は増加した。ただし，そのリスク水準は相対的に低く，徒歩避難は浸水が生じても通行可能な区間が比較的広いため，危険な状況でもリスクが抑えられやすいと考えられる。こうした傾向は，徒歩避難が災害時の基本的な手段として用いられている状況とも合致している。

最後に，住民が利用可能な避難手段のうち，各時刻でより危険となる方を当該住民の最終的なリスク値として整理し，1 時 50 分から 7 時 50 分までの総合リスク分布を**図 4-13** にまとめた。この総合リスクは，実際の避難時に住民が直面するリスクより高めに算出される可能性があるものの，災害時には予測し難い要因が多く存在するため，一定程度高く評価されたリスクの方が自治体および住民が避難判断を行う上でより慎重な判断につながり得る点で有用と考えられる。

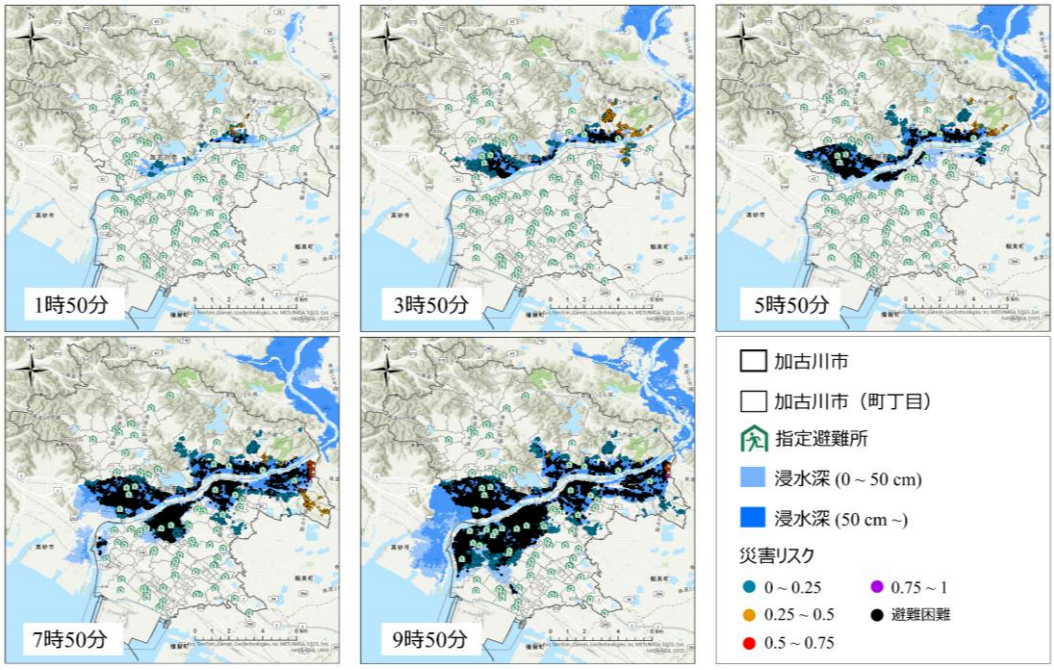


図 4-13 各住民の総合避難リスク分布の時系列推移

４．４．５ 避難情報発令タイムリミットの算出

式（4-6）に基づき，各区域で初めて住民のリスクが 1 に達した時刻を発令タイムリミットとして算出し，その結果を**表 4-3** にまとめた。浸水が発生した後，時間の経過とともに早期の避難指令が必要となる区域が増加している。一方，シナリオ期間内にリスクの値が 1 に達していない区域は 61 個所あり，これらは加古川市の西北部および東部に位置し，加古川の氾濫地点から離れていることから浸水の影響が比較的小さく，避難の優先度も低いと考えられる。

また，表に示されるように，30 分間隔で評価した各時刻において新たに避難指令が必要となる区域の数は異なっており，多くの区域が同一時刻に集中する場合もあれば，1 つの区域のみが追加される時刻もある。例えば，9 時 20 分には，14 区域が同時に発令タイムリミットに達している。このような場合，該当区域に対して一斉に避難指令を発令すると，大規模な同時避難により交通の渋滞や避難所の収容能力超過などが生じる可能性がある。このような状況に対しては，本研究で提案した手法により 1 時間先のリスクを事前に評価することで，猶予時間内に各区域の避難者数や避難困難者数，避難施設の開設状況などを踏まえつつ計画的に避難指示を発令することが可能となり，前述の問題の発生リスクを低減できる。

表 4-3 各区域における発令タイムリミットの一覧

発令タイムリミット	町丁目数	町丁目名
7 月 6 日 1 時 50 分	5	平荘町山角，平荘町養老，平荘町池尻，上荘町小野，上荘町薬栗
7 月 6 日 2 時 20 分	5	平荘町里，上荘町都染，東神吉町神吉，東神吉町升田，東神吉町出河原
7 月 6 日 3 時 20 分	3	上荘町見土呂，東神吉町砂部，米田町船頭
7 月 6 日 3 時 50 分	2	東神吉町天下原，東神吉町西井ノ口
7 月 6 日 4 時 20 分	2	八幡町上西条，八幡町中西条
7 月 6 日 4 時 50 分	4	平荘町西山，上荘町国包，西神吉町岸，西神吉町中西
7 月 6 日 5 時 20 分	7	加古川町大野，加古川町中津，新神野一丁目，新神野六丁目，新神野八丁目，西神吉町大国，米田町平津
7 月 6 日 5 時 50 分	4	神野町神野，神野町西之山，新神野四丁目，平荘町神木
7 月 6 日 6 時 20 分	7	加古川町河原，神野町西条，新神野二丁目，新神野三丁目，新神野五丁目，新神野七丁目，上荘町井ノ口
7 月 6 日 6 時 50 分	2	八幡町宗佐，平荘町小畑
7 月 6 日 7 時 20 分	9	加古川町篠原町，加古川町寺家町，加古川町稲屋，加古川町溝之口，加古川町美乃利，神野町石守，八幡町下村，八幡町船町，西神吉町西村
7 月 6 日 7 時 50 分	3	加古川町本町，加古川町平野，野口町水足
7 月 6 日 8 時 20 分	7	加古川町木村，加古川町友沢，加古川町粟津，尾上町養田，西条山手一丁目，西条山手二丁目，野口町坂元北一丁目

表 4-3 各区域における発令タイムリミットの一覧

発令タイムリミット	町丁目数	町丁目名
7月6日8時50分	3	加古川町西河原，神野町西条，野口町良野
7月6日9時20分	14	加古川町北在家，加古川町備後，加古川町南備後，野口町坂元，野口町坂元，尾上町養田三丁目，尾上町安田，別府町新野辺，別府町新野辺北町一丁目，別府町新野辺北町五丁目，別府町新野辺北町六丁目，八幡町野村，野口町坂元北二丁目，野口町坂元北五丁目
7月6日9時50分	4	尾上町口里，尾上町旭二丁目，尾上町旭三丁目，別府町新野辺北町二丁目
7月6日10時20分	11	神野町福留，野口町長砂，尾上町養田一丁目，尾上町養田二丁目，尾上町長田，尾上町今福，尾上町旭一丁目，別府町別府，別府町新野辺北町八丁目，野口町坂元北三丁目，野口町坂元北四丁目
7月6日10時50分	4	尾上町池田，別府町新野辺，別府町新野辺北町四丁目，別府町新野辺北町七丁目
7月6日11時20分	8	神野町石守三丁目，野口町坂井，別府町朝日町，別府町中島町，別府町新野辺，別府町新野辺北町三丁目，平荘町一本松，西神吉町辻
7月6日11時50分	1	別府町新野辺
7月6日12時20分	9	神野町石守二丁目，別府町宮田町，別府町石町，別府町緑町，別府町本町一丁目，別府町本町二丁目，別府町東町，別府町西町，西神吉町鼎
7月6日12時50分	5	野口町野口，平岡町一色，別府町元町，別府町港町，別府町西脇二丁目
7月6日13時20分	7	野口町古大内，平岡町中野，平岡町八反田，平岡町一色西二丁目，別府町西脇，別府町西脇三丁目，志方町横大路
7月6日14時20分	3	志方町志方町，平岡町一色東二丁目，平岡町一色東三丁目
7月6日14時50分	1	平岡町一色西一丁目

さらに，浸水が発生した1時50分において，各町丁目に居住する住民のリスク値のうち最大値を抽出し，可視化した結果を**図 4-14** に示している。このうち，平荘町山角，平荘町養老，平荘町池尻，上荘町小野，上荘町薬栗の 5 区域は紫色で表示されており，これは**表 4-3** に示した同時刻の結果に対応している。これらの区域では，1時間後にリスク値が1に達する住民が生じると評価されているため，早急な避難指令の発令が必要である。

一方，上荘町都台一丁目，平荘町里，東神吉町升田，東神吉町出河原，上荘町都台三丁目などの区域では，一部の住民の避難リスクが上昇し始めている。これらの区域ではリスク水準は比較的低いものの，自治体としては避難所の開設や早期の避難支援体制の準備など，事前の対応が求められる。

このように，各区域のリスクを定量的に評価し可視化することで，自治体はどの時点でどの区域に対して対応を講じるべきかを，より明確に把握することができる。

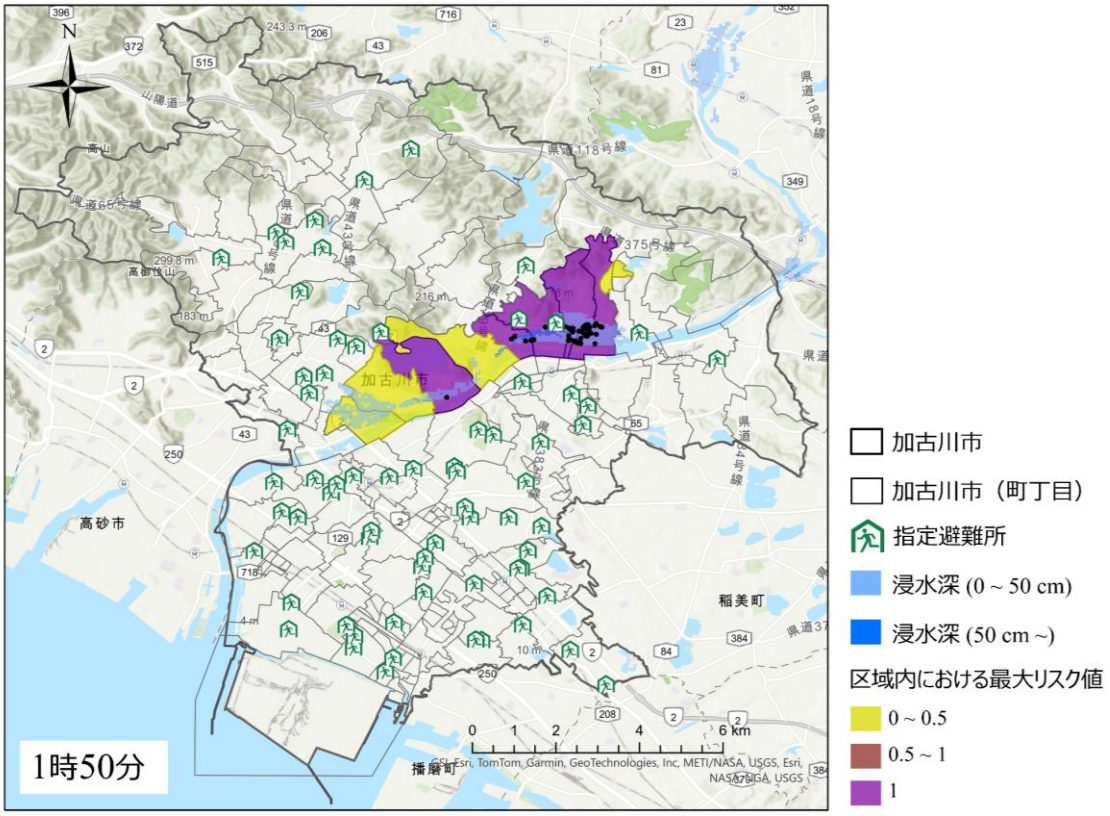


図 4-14 1 時 50 分における区域内最大リスク値の空間分布

４．５ まとめ

本章では，洪水災害時に自治体の避難情報発令判断を支援するため，避難所要時間に基づく災害リスク評価手法を提案する。本手法では，浸水の進行に伴って変化する各住民の避難所要時間を算出し，その増加の度合いを避難困難度として定量化することでリスクを評価する。具体的には，各住民のリアルタイムの避難所要時間が自らの最短避難時間と比べてどの程度上昇しているかに加え，同一地域内における他住民との相対的な時間差も踏まえてリスク値を算出する。また，評価に用いる避難経路の算出にあたっては，自動車および徒歩の二つの移動手段を対象に，最短距離コストおよび最短時間コストを用いたダイクストラ法を適用し，各時刻の浸水状況を反映した通行可能な経路を求める。

また，提案手法の適用性は，兵庫県加古川市において 2018 年 9 月の洪水を想定したケーススタディを通じて検証された。ケーススタディでは，加古川市内において 7 月 6 日 1 時 50 分の時点で 1 時間後に浸水が発生すると予測され，同時刻には，いずれの避難手段においても既に通行不能な区間が生じ，避難が困難となる住民が確認された。その後，浸水の進行に伴い，迂回して避難せざるを得ない住民や，浸水区間を低速で移動する住民が増加

し，避難所要時間の増加とともにリスク水準も上昇したことが確認された。ここで，本研究では 1 時間先の浸水予測データを用いて評価を行っているため，住民が危険に直面する前に猶予をもって避難行動を開始できる点で有効であると考えられる。

さらに，自治体における避難判断支援の観点から，避難リスク評価に基づき区域別の避難指示発令タイムリミットも算出した。その結果，浸水発生時点で既に 5 区域が早急な避難指示を要する状況にあることが明らかとなった。これらの区域では，1 時間後にリスクが 1 に達した住民が確認されており，人的被害の発生を防ぐためにも，猶予時間内に速やかな避難指示の発令が求められる。一方，加古川沿岸の複数区域ではリスクの上昇が見られ，これらの区域における今後のリスク推移を把握しつつ，適切な避難支援策を講じる必要がある。このように，各区域の発令タイムリミットを総合的に把握することで，自治体は住民の安全な避難を確保しつつ，交通渋滞の回避や避難施設の開設状況なども考慮したうえで，計画的かつ段階的に避難指示を発令することが可能となる。

以上より，本章で提案した評価手法は災害時の避難判断を支援する上で有効な手法であると考えられる。

一方で，本章で示した評価手法には，いくつかの課題も残されている。

1)　避難所要時間の算定に関する課題

本研究では，災害リスク評価を行うため，区域全体を一律の条件として避難所要時間を算定している。そのため，避難所要時間の推定にあたっては，以下の二つの側面について十分に考慮できていない点がある。

一つ目として，避難所要時間は住民の水平避難を前提として算定しており，建物内における垂直避難に要する時間については考慮していない。

二つ目として，区域内で多数の住民が同時に避難を開始することにより生じる交通渋滞や移動速度の低下については，本研究では扱っていない。なお，自動車避難所要時間の予測については，予測モデルの学習に用いた移動所要時間データが，Google により提供される平常時の道路交通状況に基づく推定値である。そのため，本研究で算定した自動車避難所要時間も，平常時の道路交通の影響のみを反映したものとなっている。また，徒歩避難については，道路勾配および浸水状況の影響を考慮して所要時間を算定しているが，歩行者の混雑や信号待ちなど，実際の避難時に生じ得る移動制約については考慮できていない。

2)　避難行動の想定に関する課題

本研究では，住宅から避難所までの一般的な水平避難行動を想定しており，以下の三つの側面については考慮していない。

まず，避難行動は理想的に行われることを仮定しており，避難途中で一度帰宅した後に

再度避難を開始する場合など，実際の避難行動に伴う多様な個人差については十分に反映できていない。

次に，自動車避難を行う住民が，避難途中で浸水等により走行不能となり，徒歩避難へ移行するような避難行動については，本研究では考慮していない。

最後に，避難所の収容人数や受入れ状況については考慮しておらず，避難所が満員となった場合に，他の避難先へ移動する二次避難の発生については扱っていない。

これらの課題は，実際の災害時における避難行動や避難所要時間に大きな影響を及ぼす可能性があり，これらを踏まえた評価手法の高度化が今後の検討課題である。

参考文献

1. 気象庁,「平成 27 年 9 月関東・東北豪雨及び平成 27 年台風第 18 号による大雨等」, 2015 年 12 月. https://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/saigaiji/saigaiji_2015/saigaiji_201501.pdf, (参照日 : 2025 年 11 月 27 日).
2. 牛山 素行, 横幕 早季,「2017 年の豪雨災害による人的被害の特徴」, 東北地域災害科学研究, Vol. 54, pp. 131-136, 2018 年 3 月.
3. 押川 英夫, 中野 澪,「令和元年 8 月佐賀豪雨災害における自動車流出事故に関する調査研究」, 2020 年.
4. 国土交通省 水管理・国土保全局 河川環境課 水防企画室,「水害ハザードマップ作成の手引き」, 2016 年. (参照日 : 2025 年 11 月 27 日).
5. 町田 岳, 曽田 康秀, 幸 弘美, 竹下 幸美,「高齢化社会における大規模水害時の避難に関する一考察」, 第 15 回 都市水害に関するシンポジウム, 2016 年 11 月.
6. 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, Vol. 64, No. 3, pp. 354‐366, 2008 年.
7. E. W. Dijkstra, “A note on two problems in connexion with graphs,” Numerische Mathematik, vol. 1, pp. 269–271, 1959.
8. W. Tobler, “Three presentations on geographical analysis and modeling: Non-isotropic geographic modeling; speculations on the geometry of geography; and global spatial analysis,” NCGIA Technical Report 93-1, 1993.
9. N. A. Gomeñuka, R. L. Bona, R. G. da Rosa, and L. A. Peyré-Tartaruga, “Loaded walking on gradients,” Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports, vol. 24, pp. e165-e173, 2014. https://doi.org/10.1111/sms.12129
10. W. G. Rees, “Least-cost paths in mountainous terrain,” Computers & Geosciences, vol. 30, no. 3, pp. 203-209, 2004. https://doi.org/10.1016/j.cageo.2003.11.001
11. J. Fruin, 歩行者の空間, 鹿島出版会, 1974 年 12 月.
12. 熊谷 兼太郎,「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」, 国土交通省 国土技術政策総合研究所, 2013 年.
13. 岡田 光正, 浅野 博光, 俵 元吉,「自由歩行速度と歩幅に関する調査・研究 : 主として老人や子供の場合について(建築計画)」, 日本建築学会近畿支部研究報告集, pp. 237-240, 1978 年 5 月.
14. 古名 丈人, 伊東 元, 長崎 浩, 橋詰 謙, 丸山 仁司, 衣笠 隆,「高齢者の歩行速度, 歩幅, 歩行率, および歩行パターン」, 理学療法学, Vol.21, Suppl. No.2, p.417, 1994 年. https://doi.org/10.14900/cjpt.1994.21.2.417
15. 中原 凱文, 北川 淳, 樋口 雄三,「高齢者の歩行速度に関する検討」, デザインスポーツ科学, Vol. 16, pp. 160-170, 1995 年.

16. 後藤 仁志，原田 英治，久保 有希，酒井 哲郎，「個別要素法型群衆行動モデルによる津波時の避難シミュレーション」，海岸工学論文集，Vol. 51，pp. 1261-1265，2004 年. https://doi.org/10.2208/proce1989.51.1261
17. 森下 朔，水口 竜一，金井 純子，馬場 俊孝，「要介護者の避難行動速度」，自然災害科学，Vol. 37，No. 4，pp. 397-406，2019 年．https://doi.org/10.24762/jndsj.37.4_397
18. 赤穂 良輔，前野 詩朗，高橋 巧武，工代 健太，吉田 圭介，「市街地レイアウトを考慮した岡山市における津波到達前後の浸水範囲予測および避難時間の検討」，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol. 72，No. 2，pp. I_289-I_294，2016 年．https://doi.org/10.2208/kaigan.72.I_289
19. 田井中 幸司，青木 純一郎，「高齢女性の歩行速度の低下と体力」，体力科学，Vol. 51，pp. 245‐251，2002 年．https://doi.org/10.7600/jspfsm1949.51.245
20. 国土地理院「数値地図（国土基本情報）」，https://www.gsi.go.jp/kibanjoho/kibanjoho40027.html（参照日：2025 年 11 月 28 日）
21. 国土地理院，「基盤地図情報数値標高モデルについて」，https://fgd.gsi.go.jp/download/ref_dem.html（参照日：2025 年 11 月 28 日）
22. 「災害対策基本法（昭和三十六年法律第二百二十三号）」，https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=336AC0000000223（参照日：2025 年 11 月 29 日）
23. 内閣府，「避難行動要支援者の避難行動支援に関する取組指針（令和 3 年 5 月改定，令和 7 年 6 月更新）」，https://www.bousai.go.jp/taisaku/hisaisyagyousei/youengosya/r3/index.html（参照日：2025 年 11 月 29 日）.
24. Chen, J., Yu, J., Wen, J., Zhang, C., Yin, Z., Wu, J., and Yao, S., “Pre-evacuation time estimation based emergency evacuation simulation in urban residential communities,” International Journal of Environmental Research and Public Health, vol. 16, p. 4599, 2019. https://doi.org/10.3390/ijerph16234599
25. Michael, K. L., and Carla, S. P., “Critical behavioral assumptions in evacuation time estimate analysis for private vehicles: examples from hurricane research and planning,” Journal of Urban Planning and Development, vol. 133, no. 1, pp. 18-29, 2007. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9488(2007)133:1(18)
26. 気象庁，「大雨・洪水警報の危険度分布とその利用について」，https://www.jma.go.jp/jma/kishou/minkan/koushu180228/shiryou2.pdf（参照日：2025 年 11 月 29 日）.
27. ウィキペディア，「加古川市」，https://ja.wikipedia.org/wiki/加古川市（参照日：2025 年 11 月 29 日）.
28. 国土交通省，「1．平成 30 年 7 月豪雨災害の概要と被害の特徴」，https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/hazard_risk/dai01kai/dai01kai_siryou2-1.pdf（参照日：2025 年 11 月 29 日）.
29. 兵庫県，「浸水実績図」，https://www.hazardmap.pref.hyogo.jp/hyogo/hazmapap/top/select.a

sp?dtp=39#（参照日：2025 年 11 月 29 日）.
30. 国土交通省,「国土数値情報 河川データ」, https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-W05.html（参照日：2025 年 11 月 29 日）.
31. ZENRIN,「建物ポイントデータ」, https://www.zenrin.co.jp/product/category/gis/contents/building-point/index.html（参照日：2025 年 11 月 29 日）.
32. 政府統計の総合窓口 e-Stat,「統計データダウンロード 国勢調査（2020 年）」, https://www.e-stat.go.jp/gis/statmap-search?page=1&type=1&toukeiCode=00200521（参照日：2025 年 11 月 29 日）.
33. 国土交通省,「国土数値情報 避難施設データ」, https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-P20.html（参照日：2025 年 11 月 29 日）.
34. 加古川市,「指定緊急避難場所・指定避難所」, https://www.city.kakogawa.lg.jp/soshikikarasagasu/bousai/kikikanrisitsu/sizensaigai/hinansho_hinanshien/39676.html（参照日：2025 年 11 月 29 日）.
35. 「洪水ハザードマップ・マニュアル概要版」, 2003 年 3 月, https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/inter/keizai/gijyutu/pdf/flood_manual_j.pdf（参照日：2025 年 11 月 30 日）.

第５章 災害時避難経路探索システムの開発

５．１ はじめに

第４章で提案した災害リスク評価手法に基づくと，自治体は過去の災害対応経験に依存することなく，定量的に避難判断を行うことが可能になると考えられる。しかし，自治体が適切なタイミングで避難指示を発令できるよう支援するだけでは十分とは言えない。住民が避難指示を受けた後，危険が切迫する前に避難を開始し，安全に避難所へ到達できることを確保するも重要である。 平成 27 年関東・東北豪雨において鬼怒川が決壊した際には，多くの住民の逃げ遅れが報告され，ヘリやボートなどにより約 4,258 人が救助された[1]。その原因として，住民による避難開始の判断が遅れたことに加え，避難時に不慣れな経路の確認や浸水箇所の把握が十分に行えなかったため，避難行動が円滑に進まなかったことが考えられる。

こうした課題を踏まえ，住民の立場から避難行動の円滑化を図るために，自治体ではハザードマップの配布や避難訓練の実施など，「自助・共助」の意識を高める施策が進められてきた。しかし現状では，多くの住民が行政から配布されたハザードマップを十分に確認せず，自宅内に保管したまま有効に活用できていないのが実情である[2]。また，一部の自治体で実施されている避難訓練は希望者の参加にとどまっており，防災意識の低い住民や若年層への働きかけが十分とは言えない点も課題である[3,4]。したがって，平常時から防災情報を十分に把握していない住民に対しても，災害時において危険区域を回避し，迅速かつ安全に避難できるよう支援する研究が数多く進められている。その中でも，浸水域の回避を考慮した安全な避難経路を提示するシステムの開発は，実効性の高い対策として特に注目されている。

現状，平常時においては Google Maps に代表される経路探索サービスが広く利用されているが，災害発生時の利用を想定すると，道路の冠水や土砂崩れによる通行止めなど，刻々と変化する状況を経路探索に即時かつ自動的に反映することが難しいという課題がある。したがって，災害時の状況に対応できる経路探索システムの開発に関する研究がこれまで数多く行われてきた。明田らは，GIS を用いた洪水氾濫時の避難行動解析システムを開発し，リアルタイムに最適避難経路を提示する手法について検討した[5]。しかし，GIS ソフトに依存しているため，GIS 環境を有さない端末では利用が困難である。また，当該システムの目的は避難時の行動シミュレーションを通じて避難所の配置や防災備蓄物資の適正性を評価し，洪水防災対策の策定に資することであり，住民の避難行動を支援するものではない。加えて，小川らは，避難途中で氾濫域に巻き込まれる危険性を考慮した経路探索システムも開発しているが，使用した道路データでは細街路が省略されており，経路探索の精度に課題がある[6]。さらに，浸水が発生した道路を一律に通行不可とみなしているため，浅水域を回避することによって生じる時間的コストとのバランスが取れておらず，経路選択の合理性に課題がある。

一方，住民向けに公開されている避難行動支援アプリとして，MSI Emergency Navigation や全国避難所ガイドが挙げられる[7,8]。MSI は，最寄りの避難所への案内や徒歩避難時のナビゲーションに加え，AR による方向表示やオフライン環境での利用など，実用性の高い機能を備えており，防災行動を支援するツールとして有用である。しかし，災害発生時における浸水や通行止めなどの状況変化をリアルタイムで反映する仕組みは整備されておらず，刻々と変化するハザード状況に応じた動的な経路探索を行うことはできない。また，全国避難所ガイドは，現在地周辺の避難所検索や経路案内に加え，洪水浸水想定区域などのハザードマップを提示することができる。ただし，利用されているハザード情報などは事前に作成された静的データであり，実際の浸水状況や道路の通行可否を考慮した経路探索を実施することはできない。

以上で述べた既存システムの課題を踏まえ，本章では，リアルタイムの浸水情報を取り込み，住民が安全かつ効率的に避難できる経路を提示する新たな避難経路探索システムを開発する。具体的には，まず５．２で本システムの開発方針を示し，５．３にてシステムの設計と実装の概要を詳細に説明する。最後に，５．４では本システムを実際に適用した結果をもとに，その適用可能性を考察する。

５．２ システムの開発方針

現行システムに見られる課題を解決し，住民が安全かつ円滑に避難できるよう支援するために，本研究では以下の３つの方針に基づいてシステムの設計を行う。

(1) 現行の避難行動支援システムの多くは GIS を用いて構築されており，GIS が提供する機能によって地理空間データの可視化やシステムの構築が比較的容易である一方，静的な地図情報を事前に読み込む形式であるため，災害時に時系列的に変化するデータを適切に反映することが困難である[9-12]。また，ArcGIS Online や ArcGIS Enterprise など特定の環境を利用する場合には，ライセンス等の制約により他地域への適用やシステムの移行に支障をきたす可能性がある。
そこで，本研究では，動的災害への対応力および地域間の汎用性の向上を図るため，ライセンスが必要なソフトウェアに依存せず，Web ベースで実装することにより，幅広いユーザーが容易にアクセス可能なシステムの構築を目指す。

(2) 現状，避難場所に関する情報は各自治体のホームページで提供されているものの，住民が実際に避難する際には，避難所までの適切な経路を把握するために，Google マップや NAVITIME などのナビゲーションアプリに避難所名を手動で入力する必要がある。しかし，避難時には時間的制約が大きく，目的地を繰り返し検索したり，自ら最短で安全な経路を判断したりする作業は，住民の避難効率を大きく低下させる可能性がある。一方，「全国避難所ガイド」や「全国指定緊急避難場所マップ」など，周辺の避難所情報や最短経路を提示する既存アプリも存在するが，これらの多くは徒歩移動の

みを前提としており，自動車避難には対応していない[13]。
以上を踏まえ，本システムでは，住民が現在地から適切な避難所とその経路を即時に把握できるように，徒歩避難と自動車避難の両方に対応した経路探索機能を実装する。

(3) 前述したような避難経路探索システムは，現在地周辺の避難所位置を可視化でき，さらに Google マップや Apple マップと連携することで，避難所までの最短経路や推定移動時間を迅速に提示することができる。しかし，これらのシステムは災害時の道路浸水を考慮しておらず，経路探索そのものを外部のナビゲーション API に依存しているため，たとえ浸水情報を取り込んだとしても，通行不能区間の発生に応じて柔軟に迂回経路を探索することはできない。また，近年では浸水域を回避した経路探索手法も提案されているものの，多くは浸水が発生した道路を一律に回避することを前提としており，浅水域を回避することで生じる時間的コストとのバランスといった観点は十分に考慮されていない[14]。
そこで本システムでは，これらの課題を解決するために，リアルタイムで更新される浸水予測結果を取り込み，浸水によって各移動手段が受ける影響を考慮したうえで，「安全性」と「効率性」を両立した最適経路を提示する方針とする。

５．３　システムの設計

５．３．１ システムの全体像

５．２節で示した方針を踏まえ，本研究で開発した避難経路探索システム RFERS (Real-time Flood-responsive Evacuation Route Support System) の基本構成を図 5-1 に示す。

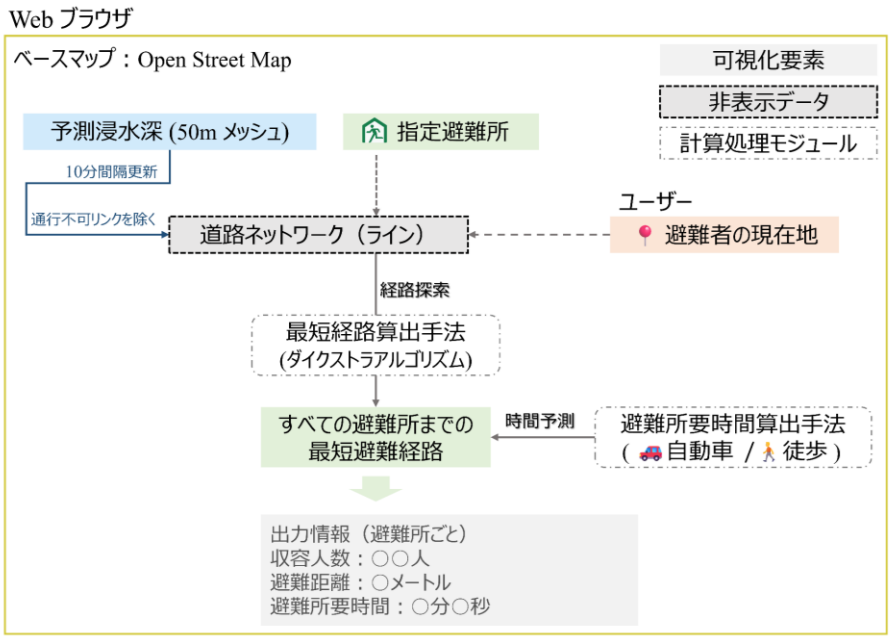


図 5-1 RFERS の仕組み

本システムでは，リアルタイムで取得した浸水情報と道路ネットワークデータを統合し，浸水状況を考慮して通行可能なリンクのみを抽出した上で，避難経路探索を実施する。利用者が Web ブラウザ上で現在地情報の取得を許可し，徒歩または自動車などの避難手段を選択すると，システム側で全ての避難所または指定した避難所までの最適経路が自動的に算出される。また，算出された経路に対しては，本研究で提案した避難所要時間算出手法を適用し，予測移動時間および避難距離を算出して地図上に提示することで，利用者が安全かつ迅速な避難判断を行えるよう支援する。

これらの各機能の設計および実装の詳細については，本節の５．３．２以降で述べる。

５．３．２ 使用するデータセット

RFERS は，Web ブラウザ上で地図を用いて情報を表示するシステムであり，ベースマップにはオープンソースの地理空間データ OpenStreetMap (OSM) を利用している[15]。また，地図描画には JavaScript の地図表示ライブラリである Leaflet を用いて実装している[16]。

さらに，**図 5-1** に示すように，OSM 上には，利用者が指定する現在地情報のほか，道路ネットワークデータ，指定避難所データ，および浸水深ハザード予測データの 3 種類の外部データが重ね合わせて表示される。以下では，これら外部データの取得元およびシステム内での処理方法について順に説明する。

(1) 道路ネットワークデータ

道路ネットワークデータには，国土地理院が提供する「数値地図（国土基本情報）」をもとに作成している[17]。数値地図データは，2 万 5 千分の 1 地形図に相当する精度を有し，細街路を含む道路中心線の情報が整備されている。

本研究では，この道路中心線をもとに，各線分に対してそれぞれの移動手段に対応したコストとして「長さ」または「徒歩移動時間」を設定している。また，igraph ライブラリを用いて道路ネットワークをグラフ構造として構築し，GeoJSON 形式で格納している[18]。これにより，GIS 環境を必要とせずに地理空間データを高速かつ的確に読み込むことが可能になる。

なお，ここで述べた道路ネットワークデータの処理は，浸水が発生していない平常時を想定したものである。浸水により一部のリンクが通行不能となる場合や，歩行時の移動コストが増大する場合には，該当リンクを除外またはコストを再設定する処理を行う。これらの詳細については，後続の節で詳述する。

(2) 指定避難所データ

避難所データは，４．４節で用いたものと同様に，国土交通省が提供する都道府県単位の避難施設データを使用している[19]。GIS 上でシステム構築対象地域の行政区ポリゴンとの空間検索を行い，該当地域内に含まれる避難所のみを抽出した。その後，各自治体の公

式ウェブサイトで公開されている最新の避難所設置情報を参照してデータの確認および校正を行い，GeoJSON 形式に変換して格納した。

(3)　浸水深ハザード予測データ

浸水データは，降雨流出氾濫モデル（Rainfall-Runoff-Inundation：RRI Model）による過去の氾濫解析結果に基づいて作成されたものである[20]。RRI Model は，水災害・リスクマネジメント国際センター (ICHARM) によって開発された数値モデルであり，降雨の流出から河川流下，さらに氾濫原への溢水に至る一連の過程を流域スケールで統合的に表現することで，低平地における大規模氾濫を迅速に予測することを可能としている。**図 5-2** に RRI Model の概略図を示す。

４．４節のシナリオで用いた浸水予測データは，過去の災害時に 10 分間隔で観測された河川水位等を入力として，RRI Model により 50 m メッシュ単位で 1 時間先の浸水深を推定したものである。一方，本研究で構築するシステムは，実際の避難行動時に利用者が参照することを想定しており，リアルタイムで浸水状況を可視化するとともに，その状況を反映した経路探索が求められる。

そこで本システムでは，過去の氾濫解析結果に加え，河川からの距離，地形湿潤指標など浸水と関連性が高い要因を説明変数とする Random Forest モデルを用い，その推定結果をリアルタイムの浸水深として取り込んでいる[21]。これにより，災害時における道路浸水状況を迅速かつ高精度に把握することが可能となる。また，この浸水深データは 50m メッシュを単位とし，10 分間隔で推定値が更新される。

なお，浸水深データも GeoJSON 形式でシステムに読み込み，可視化には Leaflet の Canvas レンダラーを用いることで，高密度のメッシュデータに対しても描画遅延が生じないようにしている。また，浸水深の閾値に応じて色を段階的に濃くし，さらに 80%の透明度で描画することで，浸水域と重なる経路が視認しやすくなり，浸水の程度も直感的に把握できるようにしている。

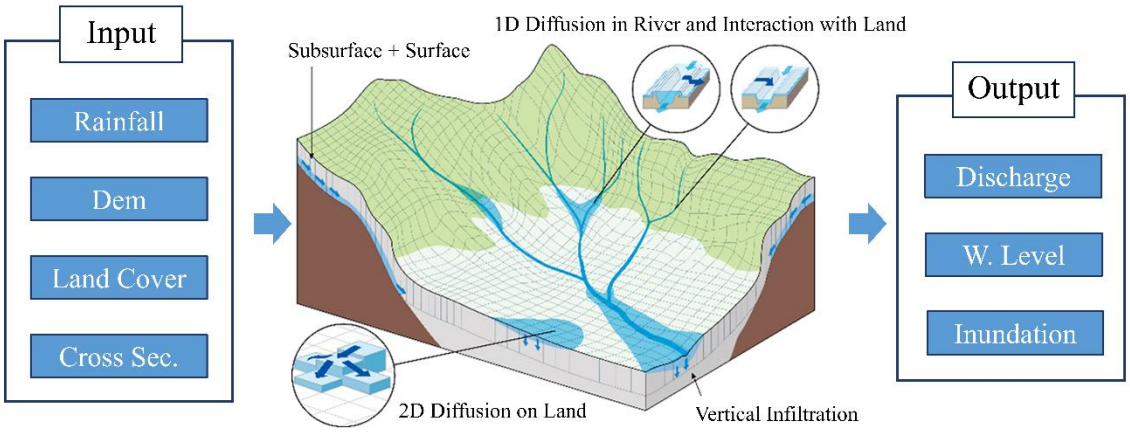


図 5-2 降雨流出氾濫モデル (RRI) の概略図

５．３．３ 避難経路探索機能の実装

避難経路の探索は，避難経路の起点を特定する処理と，起点から各避難所までの通行可能な最短経路を算出する処理の二つから構成される。本節では，これら二つの処理について順に述べる。

(1) 避難経路の起点の特定

本システムでは，利用者が状況に応じて柔軟に起点を設定できるよう，以下の三つの手法を実装している。

1) 地図上の任意地点をクリックして起点を指定する方法

利用者が Web ブラウザ上の地図で任意の地点をクリックすると，システム側でその地点の緯度・経度情報を受け取り，道路ネットワークに含まれるノードの中から，その地点に最も近いノードを探索して避難経路の起点として設定する。これにより，現在地とは異なる地点から経路探索を行う場合や，地図上で視覚的に位置を指定して経路探索を開始する場合にも対応できる。

2) 検索ボックスに住所または座標を入力して起点を指定する方法

利用者が検索ボックスに住所や緯度・経度などの位置情報を入力すると，フロントエンド側でその文字列を受け取り，バックエンドへ送信する。バックエンドでは，OSM が提供するジオコーディングサービス (Nominatim) を用いて入力文字列を座標へ変換し，取得した座標に基づいて道路ネットワーク内の最も近いノードを特定し，避難経路探索の起点として設定する[22]。この方法は，現在地とは異なる出発地点を指定したい場合や，地図上で自分の位置を特定しにくい状況でも活用できる。

3) GPS 機能により現在地を起点として指定する方法

利用者がシステム画面の現在地取得ボタンをクリックすると，ブラウザが位置情報の取得許可を求め，許可後に Web ブラウザに実装されている Geolocation API を介して端末の現在位置の座標情報が取得される。取得した座標は検索ボックスの起点入力欄に自動入力され，その位置に基づいて道路ネットワーク上の最寄りノードを特定し，経路探索の起点として設定する。この方法は，災害時に迅速に避難を開始する必要がある場合に有用である。また，避難途中で浸水により既存の経路が通行不能となった際の再探索にも適している。

(2) 通行可能な最短避難経路の算出

RFERS では，自動車と徒歩の二つの避難手段に対応している。バックエンドは，前述の処理で得られた起点情報を受け取り，各避難手段ごとに最短経路の算出を行う。経路探索には**第４章**と同様にダイクストラ法（**図 5-3**）を用い，自動車では「距離」，徒歩では「移動時間」をコストとして設定し，最短経路を導出する。

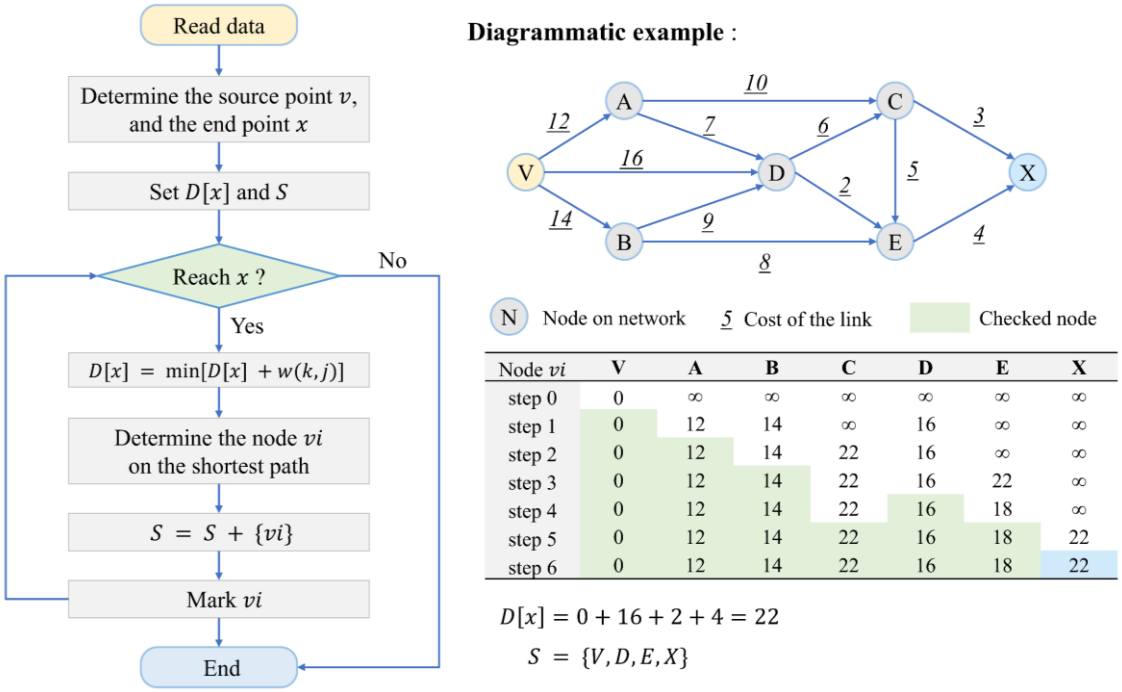


図 5-3 ダイクストラ法の流れと最短経路の算出例

浸水のない平常時においては，５．３．２で構築した道路ネットワークデータを用いて経路探索を実施する。まず，利用者が選択した避難手段に基づき，起点から全ての避難所までの最短経路を計算する。次に，得られた各経路について，道路ネットワークのリンクごとに格納された「ルートの長さ」または「徒歩移動時間」を用いてコストを比較し，その値に基づき昇順に並べ替えたうえでシステム上へ可視化する。表示に際しては，初期表示では最小コストの経路を青色で強調し，その他経路は灰色で示す。さらに，画面右上部の経路情報パネルにおける左右操作により，表示経路を切り替えることができる。

なお，これらのコスト情報のうち，「ルートの長さ」は GIS 上の「ジオメトリ属性の計算」により求めた値であり，「徒歩移動時間」は ４．２．２で述べた手法に従い，式 (4-1) を用いて算出している。

一方，避難経路上で浸水が生じた場合の経路探索は，移動手段ごとに設定された条件に基づいて実施される。まず，自動車による避難については，**第４章**と同様にリンクの通行可能な限界浸水深を 30cm と仮定する。各リンクと交差する浸水メッシュのうち最大浸水深が 30cm 未満である場合は，当該リンクを支障なく通行できるものとして扱う。一方で，30cm 以上の浸水が確認された場合には，当該時刻の浸水予測データに応じて通行不可のリンクを除外し，道路ネットワークを更新する。

続いて，徒歩で避難する場合については，リアルタイムの浸水予測データを用いて，各時刻において歩行の限界浸水深である 50cm を超えるリンクを除外する。残ったリンクをもとに道路ネットワークを再構築し，その際の各リンクのコストは式（5-1）により，当該

浸水状況における歩行に要する時間として再計算する。これにより，浸水状況と移動時間コストの両方を踏まえた経路探索が可能となり，その時点で最適な避難経路を導出できる。なお，浸水予測データは 10 分間隔で更新されるため，道路ネットワーク上の歩行時間コストも同じ間隔で再計算される。

$$t_{i,d} = \frac{t_{i,0}}{1 - \frac{d_i}{50}} \quad [0 \leq d \leq 50\ cm] \tag{5-1}$$

ただし，　i　：i 番目のリンク
d_i　：i 番目リンクの最大浸水深
$t_{i,0}$　：浸水がない場合の i 番目リンクの徒歩所要時間
$t_{i,d}$　：浸水深が d のときの i 番目リンクの徒歩所要時間

５．３．４ 避難所要時間算出機能の実装

RFERS では，本研究で提案した避難所要時間予測手法をシステムに統合するため，フロントエンドの操作とバックエンドの計算処理を連携させる仕組みを構築している。具体的には，利用者が前節で述べた避難経路探索機能を実行すると，探索結果が地図上に可視化されると同時に，画面右上に経路情報パネルが表示される。このパネルには時間予測機能が組み込まれており，利用者が「時間予測」ボタンをクリックすると，現在表示中の経路情報がバックエンドへ送信される。その後，バックエンドは受信した経路データと選択された避難手段に基づき，対応する手法により避難所要時間の算出を行う。

自動車避難の場合には，対象地域について第 3 章で提案した避難所要時間予測モデルを事前に構築し，pickle 形式で保存する。また，適用する際には joblib ライブラリによってシステムのバックエンドに読み込んで用いる。その後，フロントエンドから送信された各避難所への最短経路情報に基づいて説明変数の算出を行う。これらの説明変数の多くは，モデル構築段階において市域全体を対象に事前計算されているため，各変数に対応する既存データから，当該経路を構成するリンクに該当する値を抽出することで，必要なデータを効率的に整備することができる。最後に，算出された説明変数をモデルに入力して得られた予測結果をフロントエンドへ返送し，画面右上の経路情報パネルに，各経路の予測時間として順次表示される。

徒歩避難の場合には，経路探索の段階において各リンクの徒歩移動時間をコストとして算出しているため，フロントエンドから送信される経路情報には，各リンクの移動所要時間が属性としてすでに含まれている。したがって，バックエンドでは，受信した経路データに含まれるリンクごとの移動時間を累積することで，各経路の徒歩による避難所要時間を算出する。算出後は，すべての経路に対する計算結果をフロントエンドへ返送し，経路情報パネルに順次表示する。

５．３．５ ユーザーインターフェースの設計

図 5-4 は，加古川市を対象として構築した RFERS の初期表示画面を示したものであり，市役所付近を中心に地図が展開される。本画面には，前節で述べた避難経路探索機能および避難所要時間算出機能に加え，画面の拡大縮小や表示の初期化など，操作性を補助する各種ボタンが配置されている。以下では，これらの操作要素について順に説明する。

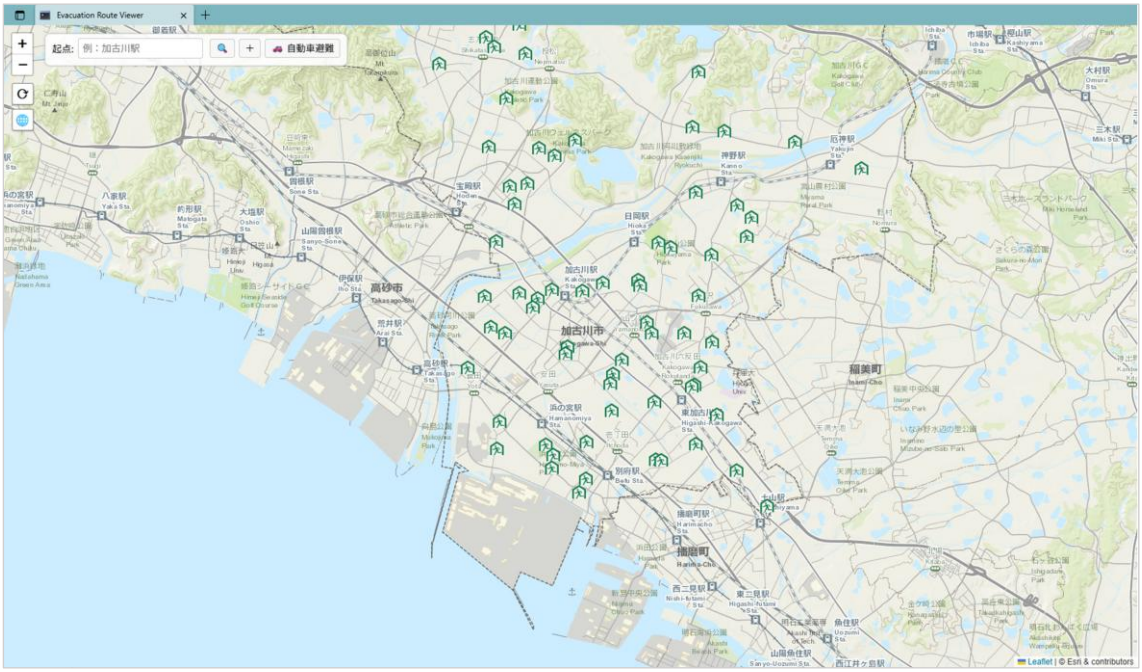


図 5-4 システム画面の構成

図 5-5 に，RFERS の画面左上に配置された基本操作ボタンと表示モード切替ボタンを示す。①の拡大・縮小・リセットボタンは，地図の表示範囲を調整したり，システム画面を初期表示に戻したりするための基本的な操作要素である。

また，②の表示モード切替ボタンをクリックすると，図に示す選択パネルが表示され，リアルタイムモード（デフォルト設定）とシミュレーションモードを切り替えることができる。リアルタイムモードは，現在時刻を参照し，実際の浸水状況を反映した経路探索および所要時間算定を行うための機能である。一方，シミュレーションモードは，浸水が発生していない平常時においても，仮想的な浸水条件を用いてシステムの挙動を確認できるよう設計されている。このモードにより，浸水時における避難行動の事前評価や，防災訓練への活用も期待できる。

シミュレーションモードに切り替えると，画面中央下部に**図 5-6** に示す時間調整パネルが表示される。パネル上部のタイムスライダーは，シミュレーション時刻に応じて自動的に進行するほか，利用者がスライダーを手動で移動させることで任意の時刻へ切り替えることもできる。スライダーを手動で移動した場合は，その位置に応じた時刻を基準として

シミュレーションが自動的に再生され，浸水状況は 10 分間隔で更新される。また，必要に応じて，一時停止ボタンをクリックすることで更新を停止することができる。 一方，パネル下部には日時を選択するための入力欄が配置されており，入力欄右側のカレンダー呼び出しボタンをクリックすると，図に示すカレンダーウィンドウが表示される。シミュレーション日付はカレンダー上の日付を選択することで設定され，時刻はウィンドウ下部の調整ボタンによって変更できる。なお，シミュレーションモードを終了する場合は，「停止」ボタンをクリックすることで元の表示に戻る。

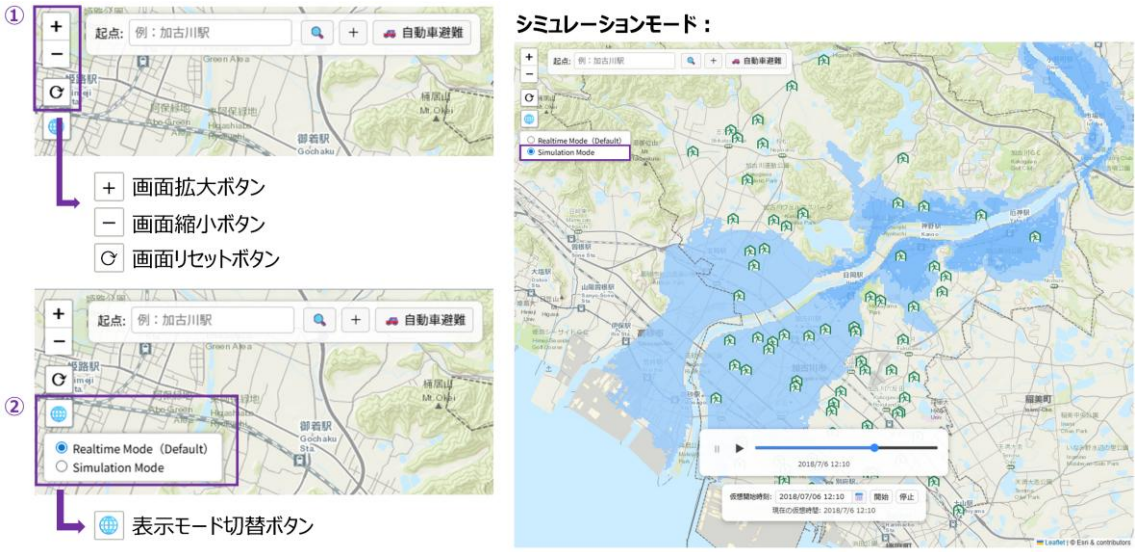


図 5-5 基本操作ボタンおよび表示モード切替機能



図 5-6 シミュレーションモードにおける時間調整パネル

システム画面左上の基本操作ボタンの右側には，避難経路探索に用いる入力パネルを配置している。起点入力欄は，５．３．３節で述べた「住所・座標による起点特定方法」に対応しており，利用者が任意の地点名を入力し，右側の経路探索ボタンをクリックすることで，入力地点から全ての避難所への最短経路が自動的に算出される。

続いて，展開ボタンをクリックすると，終点入力欄と現在地取得ボタンが追加表示される。終点欄に地点名を入力した場合には，当該地点に最も近い避難所が自動的に特定され，一対一の経路探索が実行される。一方，現在地取得ボタンは「利用者端末の位置情報を起点とする方法」に対応しており，クリックするとブラウザによる位置情報取得の許可ダイアログが表示され，許可後に利用者の現在位置が自動的に起点として設定される。

また，本パネルには避難手段の切替ボタンも配置している。利用者が手動で指定しない場合，システムは自動車による避難を前提として経路を計算するため，初期状態では自動車避難ボタンが表示されている。これをクリックすると徒歩避難ボタンに切り替わり，以降は徒歩移動を前提とした経路探索が実行される。

なお，避難経路が算出されると，前節で示したように画面右上に経路情報パネルが表示される。このパネルには，複数の避難経路を切り替えて表示するためのボタンや，バックエンド側で避難所要時間予測を実行する「時間予測」ボタンが設けられている。



図 5-7 避難経路探索に関する UI 構成要素

５．４　システムの実装と検証

本節では，開発した RFERS の実用性を検証するために，リアルタイムモードおよびシミュレーションモードを用いて，平常時と浸水時における避難経路探索の動作を評価する。システムの構築対象地域は兵庫県加古川市であり，シミュレーションモードにおける浸水予測データには，**第４章**と同様に，平成 30 年 7 月 5 日 20 時 50 分から 6 日 20 時 40 分までの加古川の河川水位と浸水想定区域図を基に，10 分間隔で作成された時系列浸水深データを使用する。なお，ここでは，５．３．２で述べたとおり，リアルタイムの浸水深予測データを用いている。

以下では，５．４．１における平常時の動作検証結果と，５．４．２ における浸水時の動作検証結果について，それぞれ説明する。

５．４．１ 平常時における動作検証

加古川市を対象に，起点を特定する三つの方法を用いて動作検証を実施した。具体的には，地図クリックによる起点として加古川市の「尾上神社」を，検索ボックスによる起点として「加古川駅」を，そしてコンソール上での仮想 GPS 位置として「加古川市役所」をそれぞれ設定し，避難経路探索を行った。

まず，「尾上神社」を起点とした経路探索の結果を**図 5-8** に示す。起点に設定された「尾上神社」は赤色のマーカーで表示されている。最短経路が算出されると，システムは当該経路全体が視認しやすいように地図の縮尺を自動調整し，画面右上には経路情報パネルが表示される。このパネルには，現在表示中の経路の全通行可能経路における順位，目的地となる避難施設名，同施設の収容可能人数，避難距離などの情報が表示される。さらに，時間予測ボタンをクリックすると，バックエンド側で避難所要時間の計算が実行され，結果が自動的に同パネル内へ表示される。「尾上神社」を起点とする 69 本の避難経路について，自動車移動を前提とした所要時間の推計に要した計算時間は 10.3 秒であった。

また，各避難施設へ向かう経路情報の一覧を**表 5-1** に示す。自動車避難の経路探索は距離をコストとして実施しているため，表に示した経路の並び順も距離の短い順となっている。ただ，表から分かるように，距離が短い経路ほど必ずしも避難所要時間が短くなるわけではない。例えば，6 番目の「勤労会館」への経路は，距離が約 2,061 m と，その後に続く「別府西小学校」への経路より短いにもかかわらず，所要時間は後者より数十秒長くなっている。

さらに，前述のとおり，経路情報パネルでは，各経路の目的地となる避難所の収容人数も確認できるため，利用者は自身の状況に応じて適切な避難先および経路を判断できる。例えば，「勤労会館」は距離こそ近いものの，収容人数が 159 人と比較的少なく，満員となって避難を完了できない可能性も考えられる。同様の傾向は，市民会館，野口公民館，加古川公民館などでもみられる。

なお，自動車避難の場合，最も遠い「志方東公園」であっても所要時間は 22 分 26 秒であり，全ての避難所への到達時間が 25 分以内に収まっている。このことから，浸水発生前に避難を開始できれば，利用者には避難準備を行い，適切な避難行動を取るための十分な猶予時間が確保されていると考えられる。

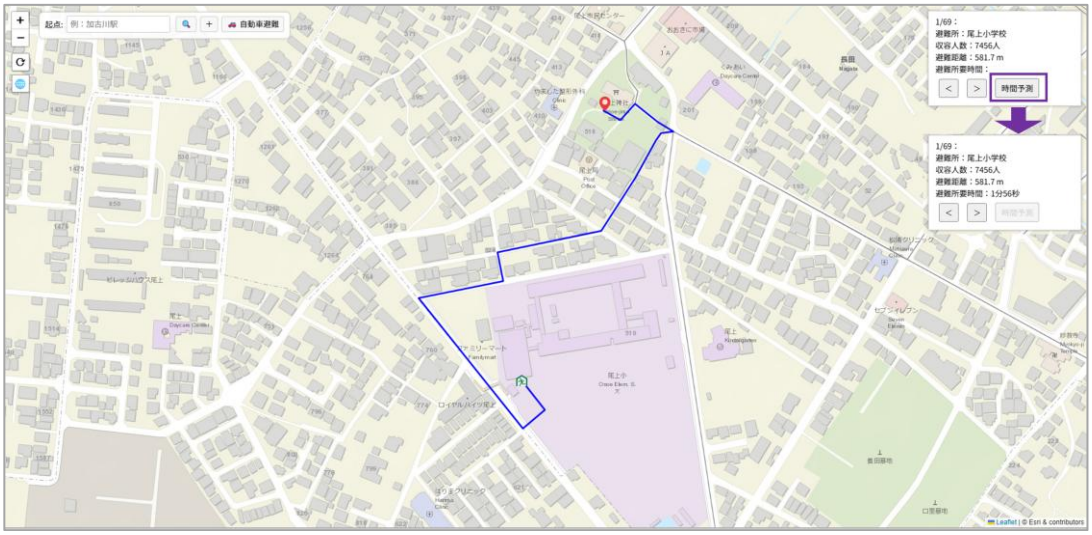


図 5-8 「尾上神社」を起点とした避難経路探索結果

表 5-1 尾上神社から各避難所への最短経路情報一覧

経路順序	避難施設名	収容人数	避難距離	避難所要時間
1	尾上小学校	7456 人	562.8 m	1 分 51 秒
2	池田公園	4200 人	1101.7 m	3 分 10 秒
3	浜の宮小学校	5024 人	1403.5 m	3 分 52 秒
4	浜の宮中学校	13940 人	1657.5 m	3 分 47 秒
5	若宮小学校	5440 人	1764.8 m	4 分 13 秒
6	勤労会館	159 人	2060.7 m	5 分 30 秒
7	別府西小学校	6404 人	2129.8 m	4 分 51 秒
8	別府中学校	9896 人	2336.9 m	5 分 51 秒
9	市民会館	234 人	2358.4 m	5 分 47 秒
10	加古川中学校	11360 人	2390.3 m	5 分 18 秒
11	別府公民館	144 人	2674.9 m	6 分 32 秒
12	別府小学校	5279 人	2725.9 m	6 分 24 秒
13	鳩里小学校	6534 人	2736.0 m	6 分 43 秒
14	野口公民館	157 人	3002.3 m	7 分 32 秒
15	加古川小学校	7341 人	3063.8 m	7 分 57 秒
16	野口南小学校	7097 人	3100.1 m	9 分 11 秒
17	中部中学校	10958 人	3170.0 m	9 分 30 秒
18	野口小学校	5096 人	3170.1 m	10 分 3 秒
19	加古川公民館	146 人	3186.8 m	8 分 16 秒
20	加古川市総合福祉会館	277 人	3411.3 m	9 分 16 秒
21	県立加古川南高等学校	355 人	3529.4 m	10 分 4 秒
22	県立加古川西高等学校	408 人	3529.7 m	8 分 56 秒
23	氷丘南小学校	6911 人	3648.9 m	9 分 57 秒

表 5-1 尾上神社から各避難所への最短経路情報一覧

経路順序	避難施設名	収容人数	避難距離	避難所要時間
24	氷丘小学校	4828 人	4074.3 m	10 分 11 秒
25	東加古川公民館	100 人	4149.0 m	10 分 43 秒
26	陵南中学校	11680 人	4229.4 m	13 分 2 秒
27	陵南公民館	111 人	4338.2 m	13 分 23 秒
28	平岡南小学校	9773 人	4447.5 m	11 分 31 秒
29	平岡南中学校	10031 人	4656.5 m	9 分 34 秒
30	県立加古川北高等学校	323 人	4712.5 m	11 分 34 秒
31	氷丘中学校	10200 人	4713.0 m	11 分 12 秒
32	川西小学校	8154 人	4931.3 m	12 分 51 秒
33	野口北小学校	7726 人	5065.8 m	12 分 43 秒
34	平岡北小学校	9307 人	5235.4 m	12 分 22 秒
35	平岡小学校	7015 人	5403.0 m	13 分 2 秒
36	県立農業高等学校	373 人	5422.9 m	12 分 57 秒
37	加古川総合文化センター	450 人	5560.3 m	12 分 31 秒
38	北野公園	3687 人	5642.2 m	15 分 9 秒
39	石守公園	3082 人	5720.9 m	13 分 32 秒
40	日岡山公園	25500 人	5818.6 m	13 分 8 秒
41	東神吉南小学校	7528 人	5880.7 m	13 分 53 秒
42	日岡山体育館	504 人	5895.3 m	14 分 4 秒
43	平岡中学校	9753 人	5931.2 m	13 分 53 秒
44	東神吉小学校	5068 人	6205.8 m	15 分 59 秒
45	神吉中学校	10836 人	6399.2 m	16 分 22 秒
46	平岡公民館	123 人	6433.5 m	16 分 8 秒
47	神野小学校	8266 人	6678.8 m	13 分 23 秒
48	陵北小学校	6536 人	7142.3 m	17 分 18 秒
49	平岡東小学校	5634 人	7326.0 m	16 分 30 秒
50	ウェルネスパーク	100 人	7363.7 m	17 分 14 秒
51	西神吉小学校	8775 人	7450.4 m	17 分 57 秒
52	県立東播工業高等学校	378 人	7536.2 m	17 分 33 秒
53	少年自然の家	411 人	7646.8 m	17 分 19 秒
54	山手中学校	11367 人	7929.2 m	17 分 15 秒
55	加古川北公民館	105 人	8276.2 m	20 分 12 秒
56	北山公園	5108 人	8387.3 m	18 分 42 秒
57	平荘小学校	5312 人	8764.1 m	21 分 4 秒
58	加古川運動公園	32500 人	8771.5 m	20 分 36 秒
59	両荘公民館	99 人	9356.0 m	22 分 18 秒
60	志方西小学校	4620 人	9872.1 m	19 分 28 秒
61	志方体育館	207 人	9946.4 m	23 分 37 秒
62	志方小学校	4498 人	10004.4 m	23 分 47 秒
63	いずみ荘	37 人	10045.3 m	19 分 29 秒
64	志方公民館	152 人	10240.0 m	23 分 17 秒
65	上荘小学校	4259 人	10397.4 m	24 分 22 秒
66	志方中学校	10981 人	10652.4 m	23 分 8 秒
67	志方東小学校	4256 人	11242.0 m	24 分 59 秒
68	八幡小学校	7409 人	11375.4 m	22 分 56 秒
69	志方東公園	11500 人	12655.7 m	22 分 26 秒

続いて，検索ボックスを用いて「加古川駅」を起点とした場合の結果を**図 5-9** に示す。図の (a) は，探索後に表示されるシステム画面全体であり，可視化された経路および経路情報の表示内容は，地図クリックによる探索結果と同様である。計 69 箇所の避難所に対する最短経路が算出され，所要時間の計算に要した処理時間は 9.8 秒であった。69 本の経路のうち，避難所要時間が最も短かったのは「氷丘南小学校」への経路であり，**図 5-9** (b) に示すように，所要時間は 1 分 41 秒であった。一方，最も所要時間を要したのは「志方東公園」への経路であり，**図 5-9** (c) に示すように，所要時間は 18 分 33 秒であった。また，当該経路の避難距離は約 9,828 m と，全経路の中で最も長い距離となっている。

ここでは，検索ボックスにおける終点指定機能についても併せて検証を行った。「加古川駅」から「鳩里小学校」へ向かう一対一の避難経路探索結果を**図 5-10** に示す。図の左側は，終点欄に「鳩里小学校」と直接入力した場合の探索結果である。一方，右側は，同校周辺の地点として「天満神社」を入力した場合の結果を示している。「天満神社」は避難施設ではないため，システムは自動的に当該地点から最も近い避難所である「鳩里小学校」を特定し，その目的地に対する経路探索を実行している。

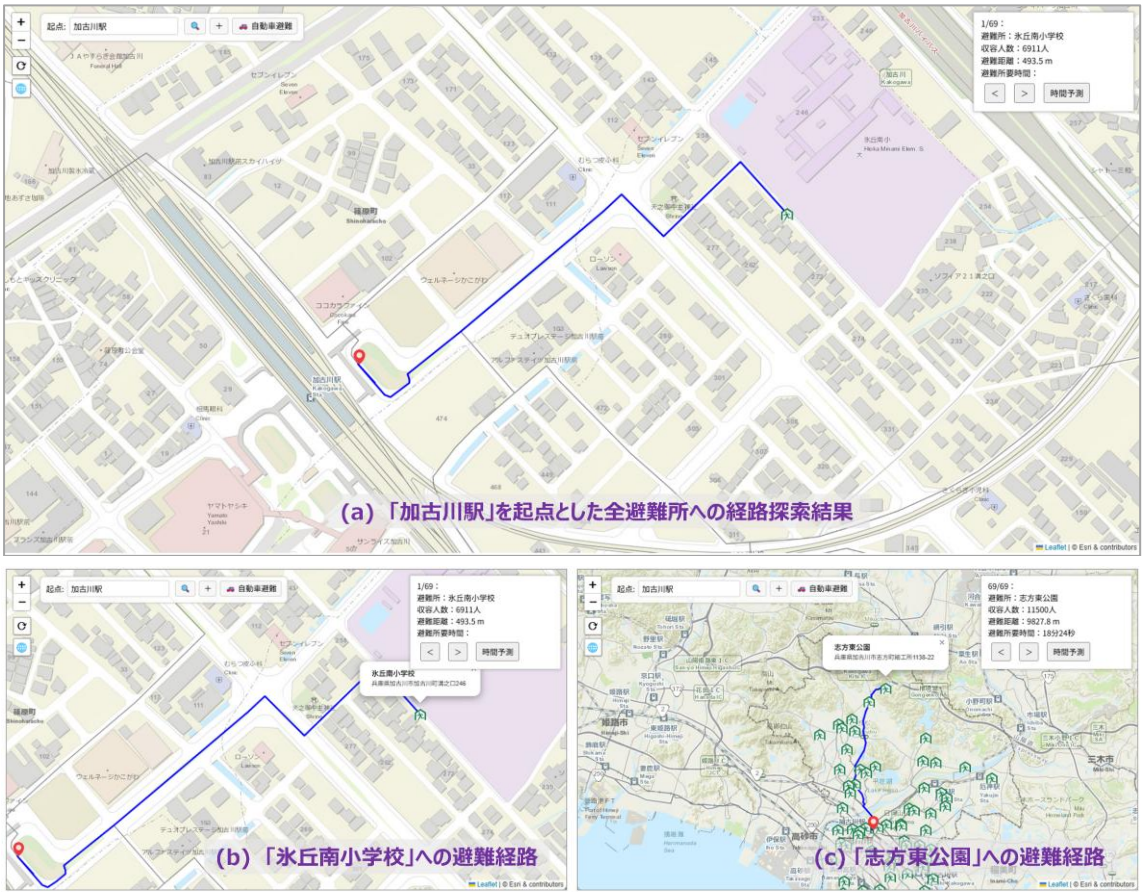


図 5-9 「加古川駅」を起点とした避難経路探索の結果



図 5-10 終点欄への直接入力および周辺地点入力による経路探索結果

検索ボックスによる終点指定機能は，避難先が既に明確である場合に有効である。この方法では，特定の避難所に対して一対一の経路探索を行うため，計算対象が一つの経路に限定される。そのため，避難所要時間の算出に要する処理時間は 0.2 秒未満と極めて短く，高い効率性を有すると考えられる。

最後に，GPS による現在地取得の結果を**図 5-11** に示す。開発端末は実際には加古川市外にあるため，本検証では Web コンソール上で仮想座標を「加古川市役所」に設定して実行している。取得された現在地は青色のマーカーとして表示される。

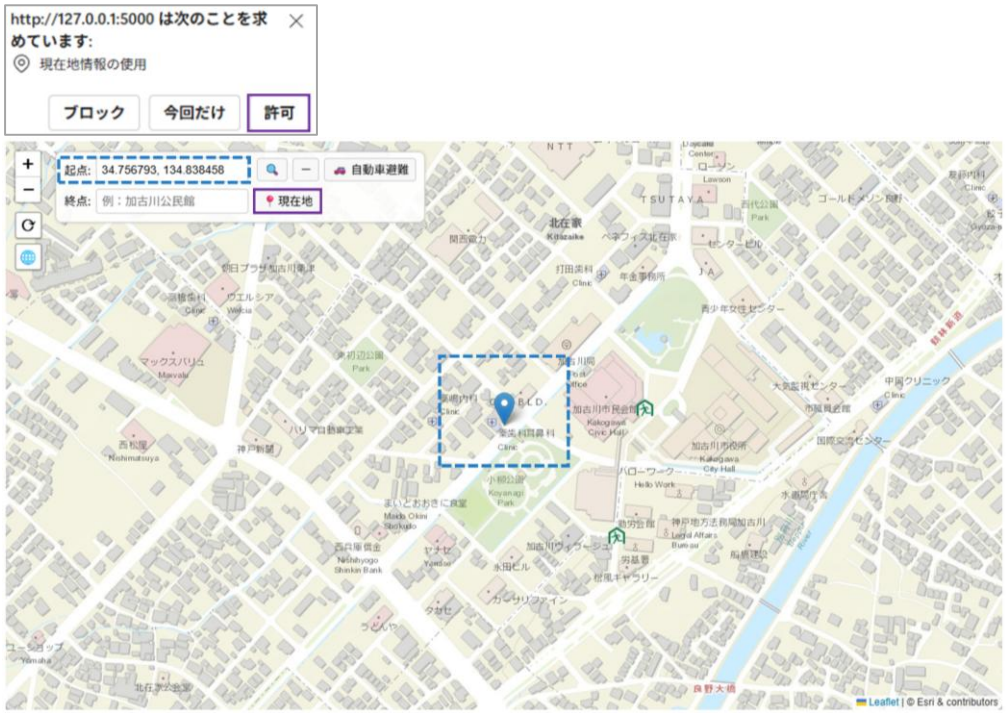


図 5-11 「加古川市役所」を仮想現在地とした GPS 位置取得の表示結果

また，経路探索ボタンをクリックすると，この青色マーカーは起点を示す赤色マーカーに置き換わり，前述と同様に経路探索が実行される。その結果を**図 5-12** に示す。さらに，**図 5-13** には，移動手段を徒歩に切り替えたうえで現在地を起点として探索した結果を示す。「加古川市役所」を起点として検索した避難経路は，いずれの避難手段でも最短経路が「勤労会館」への経路となることが分かる。「加古川市役所」周辺は比較的平坦であるため，徒歩速度に対する勾配の影響は小さく，多くの避難先において距離コストと時間コストに基づいた最短経路が一致する傾向にある。ただし，距離は同一であっても所要時間には大きな差があり，自動車では「勤労会館」へ 45 秒で到達できるのに対し，徒歩では 2 分 34 秒を要している。

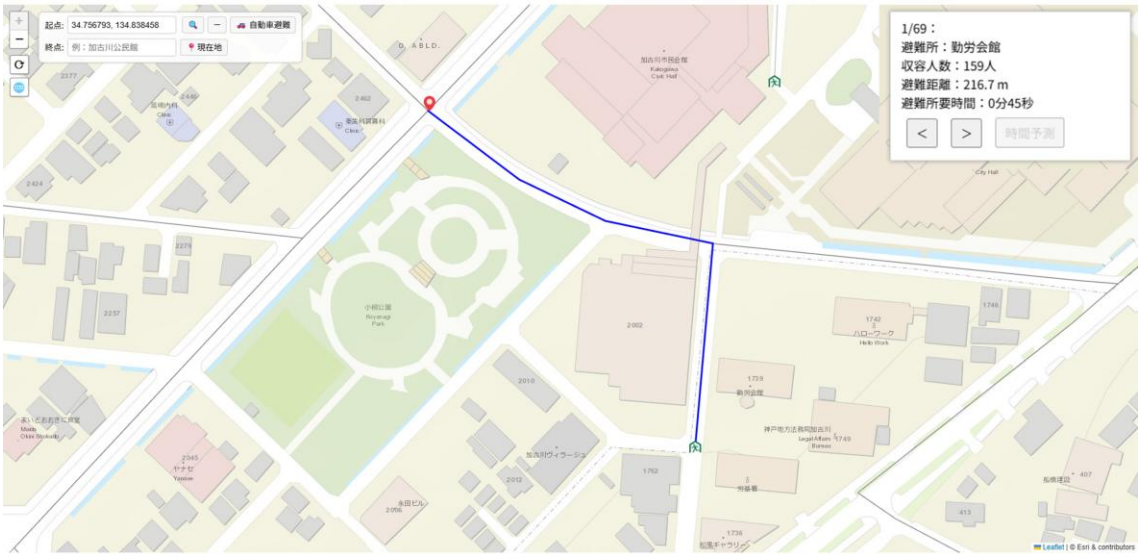


図 5-12 「加古川市役所」を起点とした自動車避難経路探索結果

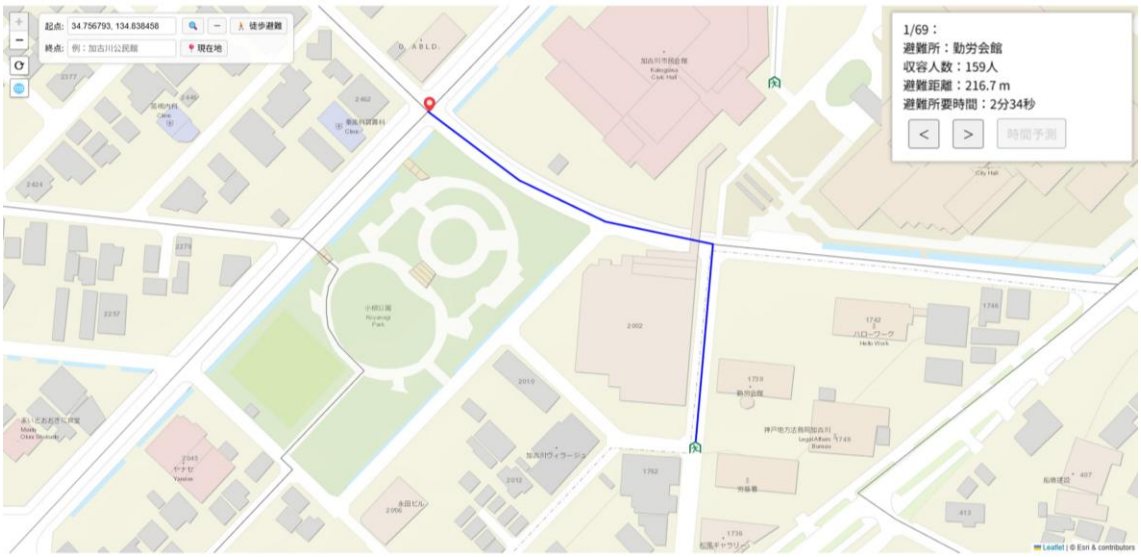


図 5-13 「加古川市役所」を起点とした徒歩避難経路探索結果

一方，**図 5-14** に示す 20 番目の「別府中学校」への経路では，両手段で最短経路が異なっている。これは，徒歩経路では「小柳公園」内の歩行者道を利用できるのに対し，自動車は当該区間を走行できないためである。したがって，徒歩避難の方がより柔軟に経路を選択できることが示される。また，両手段における避難距離はほぼ同じであるにもかかわらず，徒歩では約 32 分，自動車では約 6 分と，所要時間には大きな差が生じている。これにより，利用者が避難行動を取る際には，目的とする避難施設の位置や周辺状況などを踏まえ，適切な避難手段を選択することが重要である。



図 5-14 「別府中学校」を目的地とした徒歩と自動車の最短経路の比較

５．４．２ 浸水時における動作検証

システムが浸水時においても適切に経路探索を実行できるかを検証するため，前節で使用した「尾上神社」，「加古川駅」，「加古川市役所」の三つの起点を対象として，シミュレーションモードにおける経路探索を実施した。シミュレーションに用いる浸水予測データでは，7 月 6 日 2 時 50 分から浸水が発生し始めるため，2 時 50 分，5 時 50 分，8 時 50 分のそれぞれについて，平常時と浸水時の経路探索結果を比較した。

図 5-15 は，「尾上神社」を起点とした自動車避難および徒歩避難の経路探索結果を示している。図の左側が平常時の探索結果，右側が浸水時の探索結果である。シミュレーション時刻の推移に伴い，浸水による避難への影響は徐々に増加し，到達可能な避難所の数も減少していくことが分かる。浸水深が 30cm に達すると自動車は通行できなくなるため，2 時 50 分時点では，「両荘公民館」付近の浸水により，自動車避難で通行可能な経路が 1 本減少した。一方，この時刻においても徒歩であれば 69 箇所すべての避難所へ到達することが可能である。その後，5 時 50 分，8 時 50 分，11 時 50 分と時刻が進むにつれて，いずれの避難手段においても通行可能な経路はさらに減少していくことが分かる。最終的に，14 時 50 分には「尾上神社」の浸水深が 50cm を超え，両手段とも避難経路が確保できなくなる。この場合，システムは「経路が見つかりませんでした」と表示する。

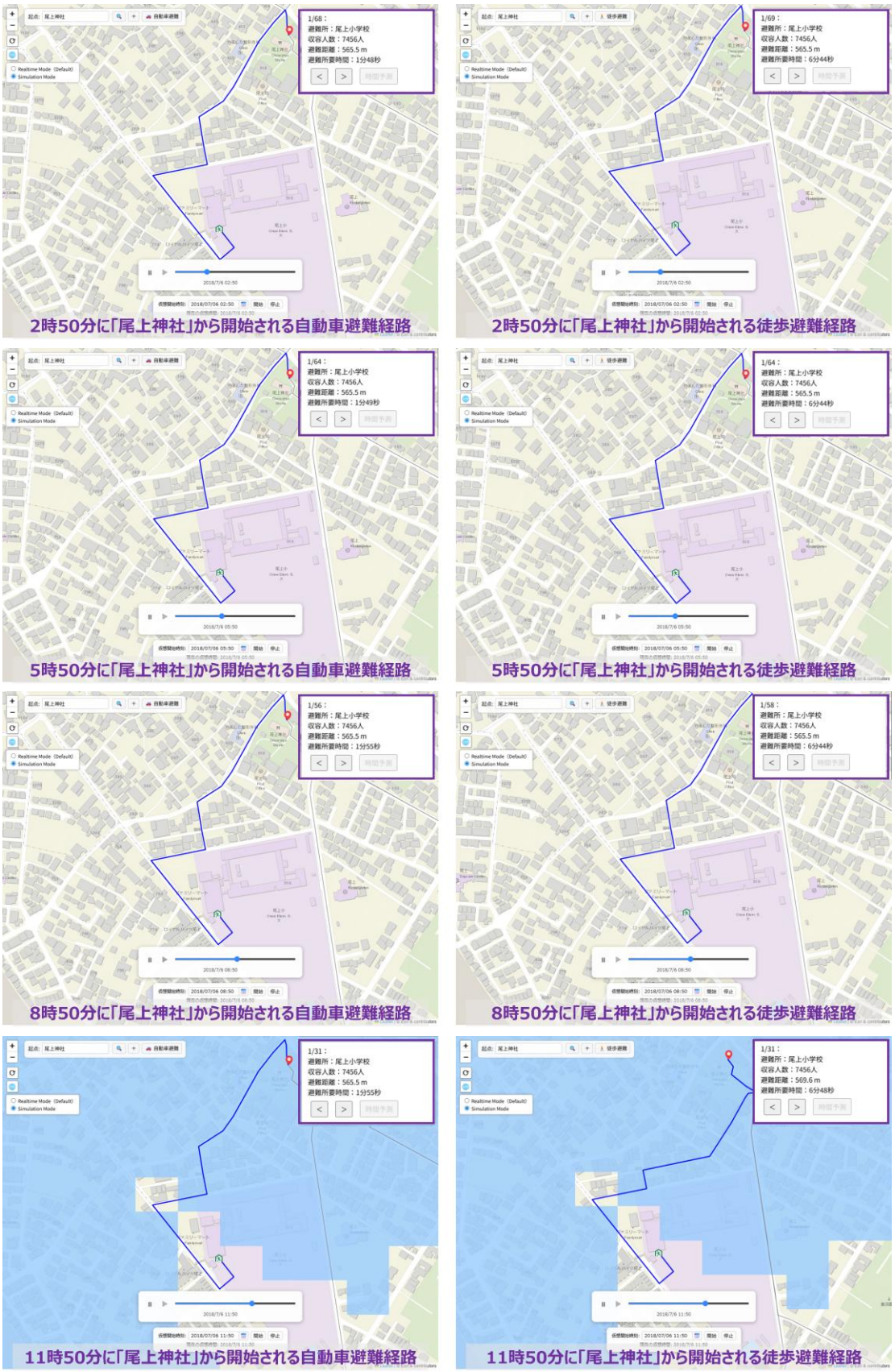


図 5-15 「尾上神社」を起点とした自動車避難および徒歩避難の経路探索結果



図 5-15 「尾上神社」を起点とした自動車避難および徒歩避難の経路探索結果

表 5-2 各起点における浸水時刻別の避難可能状況

シミュレーション時刻	7 月 6 日 2 時 50 分		
出発地	尾上神社	加古川駅	加古川市役所
自動車到達可能数	68	68	68
自動車平均時間	10 分 20 秒	8 分 14 秒	8 分 22 秒
徒歩到達可能数	69	69	69
徒歩平均時間	67 分 43 秒	51 分 59 秒	53 分 52 秒
シミュレーション時刻	7 月 6 日 5 時 50 分		
出発地	尾上神社	加古川駅	加古川市役所
自動車到達可能数	64	64	64
自動車平均時間	10 分 49 秒	9 分 2 秒	8 分 52 秒
徒歩到達可能数	64	64	64
徒歩平均時間	69 分 36 秒	56 分 27 秒	56 分 28 秒
シミュレーション時刻	7 月 6 日 8 時 50 分		
出発地	尾上神社	加古川駅	加古川市役所
自動車到達可能数	56	-	56
自動車平均時間	13 分 38 秒		12 分 2 秒
徒歩到達可能数	58		58
徒歩平均時間	74 分 27 秒		66 分 35 秒
シミュレーション時刻	7 月 6 日 11 時 50 分		
出発地	尾上神社	加古川駅	加古川市役所
自動車到達可能数	31	-	
自動車平均時間	13 分 37 秒		
徒歩到達可能数	31		
徒歩平均時間	69 分 10 秒		
シミュレーション時刻	7 月 6 日 14 時 50 分		
出発地	尾上神社	加古川駅	加古川市役所
自動車到達可能数	-		
自動車平均時間			
徒歩到達可能数			
徒歩平均時間			

三つの起点について，異なる浸水時刻における避難経路情報を集計した結果を**表 5-2** に示す。本表では，各時刻におけるそれぞれの起点から，避難手段別の到達可能な避難所数と，通行可能な経路の平均所要時間を整理している。

まず，2 時 50 分においては，徒歩避難では 3 つの起点のいずれも全 69 箇所の避難所に到達可能であった。一方，自動車避難については，前述の「尾上神社」を起点とする場合と同様であり，この時刻にはすでに浸水により到達不能となっている避難所が 1 箇所存在している。5 時 50 分になると，いずれの起点においても浸水の影響により到達可能な避難所数が減少し，到達可能な避難所であっても浸水区間の通行や迂回の発生によって避難所要時間が増加していることが確認できる。さらに，8 時 50 分時点では「加古川駅」が浸水により避難不能となり，「加古川市役所」および「尾上神社」もそれぞれ 11 時 50 分と 14 時 50 分に浸水により避難困難な状態となる。

以上より，RFERS は浸水状況の変化に応じて避難可能範囲や避難所要時間を的確に反映し，浸水時における避難経路探索を支援する上で有効なツールであると考えられる。

５．５ まとめ

本章では，住民の避難時の利用を想定し，リアルタイムの浸水状況に基づいて避難経路および避難所要時間を提示するシステム RFERS を開発した。本システムは，既存研究の限界に対応するため，以下の 3 点を中心に実装上の改良を施している。

第一に，Python と JavaScript を用いた実装により，地理空間データを含む多様なデータを効率的に処理し，ライセンスを要するソフトウェアに依存せずに動作する Web システムとして構築した点である。これにより，動的な災害予測データへの対応力と，地域を問わず利用できる汎用性が向上した。

第二に，自動車および徒歩の両方に対応した経路探索機能を実装した点である。これは，既存研究が徒歩避難のみに対応していたという制約を解決し，住民が現在地から状況に応じて適切な避難行動を柔軟に選択できるようになった。

第三に，本システムでは，従来システムがハザードマップ等の静的な浸水情報のみを考慮していた点を改め，10 分間隔で更新されるリアルタイム浸水予測データを組み込んだ点である。自動車と徒歩それぞれに対して通行不能となる限界水深を設定し，自動車については，浸水状況を踏まえて通行可能な道路のみを対象に最短経路を算出する仕組みを導入した。また，徒歩については，通行可能範囲の判定に加えて，浸水が歩行速度に及ぼす影響を定量的に評価し，浸水区間の速度を補正することで，「安全性」と「効率性」を両立した経路探索を実現している。

さらに，加古川市に本システムを実装し，平常時および浸水時の経路探索を通じて RFERS の実用性を検証した。平常時においては，地図クリック，検索ボックス入力，GPS による現在地取得の 3 つの方法で起点を設定し，経路探索を行った。浸水時においては，

異なる浸水時刻および起点に対する避難経路を対象に，浸水が避難可能範囲や所要時間に及ぼす影響を評価した。いずれの場合においても，RFERS は適切な避難経路を提示し，迅速に避難所要時間を算出することが可能であった。

以上より，本章で提案した避難経路探索システムは，災害時における住民の安全な避難行動を適切に支援できる有効な手段であると考えられる。

一方で，本システムを実際の災害対応に適用することを想定した場合，今後検討すべき課題がいくつか残されている。以下では，システムの実行環境，避難経路探索，および避難所要時間予測の三点に分けて整理する。

1)　システム実行環境に関する課題

本システムは，Web ブラウザ上での動作を前提として構築しており，現時点では PC 端末での利用を想定した画面設計となっている。そのため，スマートフォン等のモバイル端末からも Web リンクを介して利用することは可能であるものの，画面表示の細部や UI の配置については，モバイル端末での利用を十分に考慮した最適化が行われていない。これらの点については，今後の改良が必要である。

また，本システムの利用には通信環境が前提となる。このため，実際の災害時に想定される通信障害や回線混雑が発生した場合に，システムの利用に与える影響については，十分に対応できていない。

2)　避難経路探索に関する課題

本研究における避難経路探索では，各時刻において通行可能と判定された各避難所を対象に，それぞれ最短距離または最短時間となる経路を一つずつ算出している。そのため，同一の避難所に対して複数の経路を提示するような経路探索は行っていない。

また，浸水の影響については，自動車避難および徒歩避難それぞれに対して通行可否を判定するための限界水深を一律に設定しており，本研究では，自動車避難の場合を 30cm，徒歩避難の場合を 50cm としている。しかし，車両の種類による耐浸水性能の違いや，年齢・性別・健康状況といった個人属性に起因する浸水に対する耐性の差異については考慮していない。

さらに，経路探索における評価指標は距離コストまたは時間コストに基づくものであり，浸水以外の危険要因については考慮していない。具体的には，道路の標高差や幅員，河川沿岸部への近接性といった，道路沿線の地形的・環境的条件が避難時の安全性に及ぼす影響については，本研究の経路探索には反映されていない。

加えて，前章で述べた課題と同様に，本章における避難経路探索においても，避難所の受入れ状況については考慮していない。本研究では，各避難所の理論上の収容人数を参考

情報として提示するにとどまっており，実際に避難所が満員となった場合に，当該避難所への避難が成立するか否かについては扱っていない。

3)　避難所要時間予測に関する課題

避難所要時間の予測については，前章で述べたとおり，いくつかの点について十分に扱えていない部分がある。まず，自動車避難および徒歩避難のいずれにおいても，区域内で多数の住民が同時に避難を開始した場合に生じる交通渋滞や，それに伴う移動速度の低下については，本研究では扱っていない。

また，浸水が移動速度に及ぼす影響については，簡易的な取り扱いに基づいて評価を行っている。自動車避難については，通行可能と判定された浸水区間では，走行速度の低下を考慮せずに避難所要時間を算定しており，実際の浸水条件下における走行挙動を反映した検証は行っていない。徒歩避難については，限界水深を基準として浸水時の歩行速度を設定しているが，個人属性の違いや浸水時の流速が歩行に及ぼす影響については考慮していない。

これらの課題は，災害時における本システムの実用性に影響を及ぼす可能性があることから，今後は実運用を見据えた更なる改良が必要である。

参考文献

1. 常総市水害対策検証委員会，「平成 27 年常総市鬼怒川水害対応に関する検証報告―わがこととして災害に備えるために―」，2016 年.
2. 深田 秀実，橋本 雄一，赤渕 明寛，沖 観行，奥野 祐介，「タブレット PC を用いた津波避難支援システムの提案」，マルチメディア，分散，協調とモバイル（DICOMO2013）シンポジウム，平成 25 年 7 月，pp. 1938-1944.
3. 片田 敏孝，金井 昌信，細井 教平，桑沢 敬行，「希望者参加型の防災実践の限界―津波避難個別相談会の実施を通じて―」，土木学会論文集 F5，Vol. 67，No. 1，pp. 1-13，2011 年.
4. 内閣府，「防災に関する世論調査『4. 防災訓練等に関する意識について』」，https://survey.gov-online.go.jp/h29/h29-bousai/2-4.html（参照日：2025 年 12 月 6 日）.
5. 明田 修，天野 貴文，内田 裕丈，「GIS を用いた洪水氾濫時避難行動解析システムの開発」，Theory and Applications of GIS，Vol. 15，No. 1，pp. 23-38，2007 年.
6. 小川 康平，井上 卓也，平松 裕基，「避難中に氾濫域に巻き込まれる危険性を考慮した経路検索システムの開発」，土木学会論文集 B1（水工学），Vol. 78，No. 2，pp. I_1009-I_1014，2022 年.
7. 三井住友海上，「iPhone，Android 専用アプリ 三井住友海上『スマ保』アプリのご紹介」，https://www.ms-ins.com/sumaho（参照日：2025 年 12 月 6 日）.
8. 防災情報，「全国避難所ガイド」，https://www.hinanjyo.jp（参照日：2025 年 12 月 6 日）.
9. 北村 福太郎，稲津 大祐，池谷 毅，岡安 章夫，「津波浸水を考慮した避難経路および避難所選定ツールの開発」，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol. 74，No. 2，pp. I_391-I_396，2018 年．https://doi.org/10.2208/kaigan.74.I_391
10. 石田 智行，「自然災害時における自助ウェブアプリケーションの開発」，福岡工業大学総合研究機構研究所所報，Vol. 3，pp. 21-24，2021 年.
11. 飯田 進史，舘 健一郎，武富 一秀，川本 一喜，金木 誠，平川 了治，谷岡 康，「水害時の避難解析システムの構築と危機管理対応支援への適用性検討」，河川技術論文集，第 8 巻，2002 年 6 月.
12. 国立研究開発法人防災科学技術研究所，「e コミュニティ・プラットフォーム」，https://ecom-plat.jp/index.php?gid=10457（参照日：2025 年 12 月 7 日）.
13. 「全国指定緊急避難場所マップ」，https://apps.apple.com/jp/app/全国指定緊急避難場所マップ/id6464368989（参照日：2025 年 12 月 7 日）.
14. 山田 航大，久保 栞，吉田 秀典，「多角的情報を統合した Web ベース避難支援システムの構築」，AI・データサイエンス論文集，Vol. 6，No. 3，pp. 452-460，2025 年．https://doi.org/10.11532/jsceiii.6.3_452
15. OpenStreetMap，https://www.openstreetmap.org（参照日：2025 年 12 月 9 日）.
16. Leaflet，「An open-source JavaScript library for mobile-friendly interactive maps」，https://lea

fletjs.com（参照日：2025 年 12 月 9 日）.
17. 国土地理院,「数値地図（国土基本情報）」, https://www.gsi.go.jp/kibanjoho/kibanjoho40027.html（参照日：2025 年 12 月 9 日）.
18. igraph,「The network analysis package」, https://igraph.org（参照日：2025 年 12 月 9 日）.
19. 国土交通省,「国土数値情報 避難施設データ」, https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-P20.html（参照日：2025 年 12 月 9 日）.
20. 佐山 敬洋, 岩見 洋一,「降雨流出氾濫（RRI）モデルの開発と応用」, 土木技術資料, 56-6, pp. 1-4, 2014 年.
21. 菅原 巧, 三谷 泰浩, 川野 浩平, 谷口 寿俊, 本田 博之, 堀 真輝也, 佐藤 辰郎,「ランダムフォレストを用いた洪水氾濫動態の推定に関する研究」, 河川技術論文集, Vol. 27, pp. 81-86, 2021 年.
22. Nominatim,「Open-source geocoding with OpenStreetMap data」, https://nominatim.org（参照日：2025 年 12 月 9 日）.

第６章 結言

近年の豪雨災害が頻発する状況を背景として，本研究では，日本における防災施策の動向，過去の豪雨災害における人的被害，および住民の避難実態を整理し，現在の避難に関する主要な課題を明らかにした。自治体においては，災害リスクを定量的に評価する指標が十分に整備されておらず，「いつ」「どの区域」に避難情報を発令すべきかの判断が難しいという問題がある。一方，住民においては，自身が置かれている災害リスクの把握に加え，避難途中で浸水域をどのように回避し，安全かつ迅速に避難を完了させるかを適切に把握することが難しいという課題がみられる。

本研究では，これらの課題を解決し，避難の円滑な実施に資することを目的として，自治体の避難判断支援と住民の避難行動支援の二つの側面から検討を進めてきた。具体的な取り組みは，以下の三点にまとめられる。

(1) 洪水発生時に自治体が住民の避難に必要な時間的余裕を把握できるよう，機械学習を用いて住民一人ひとりの避難所要時間を予測する手法を開発した。

具体的には，これまで開発されてきた予測手法を踏まえ，その改良として，従来用いていた Random Forest を LightGBM に置き換えることで，予測精度と計算効率の向上を図った。

また，改良モデルをもとに，一つの地域を市街地エリアと農村部エリアに分け，各エリアの特性を反映した変数を組み込んだ個別モデルを構築する新たな予測手法を提案した。ベースモデルとの比較検証の結果，提案手法は多くの地域において高い予測性能を示し，実用性が確認された。

加えて，全国的な適用可能性を検討するために 13 地域を対象として，HDBSCAN によるクラスタ分析を行い，クラスタ単位で汎化モデルを構築した。その結果，クラスタ内の地域のみならず，未学習地域に対しても良好な予測性能を示し，全国規模で適用可能な汎化性能を有することが明らかとなった。

(2) 自治体が避難情報の発令タイミングや対象区域を適切に判断できるよう，予測された避難所要時間に基づいて避難リスクを評価する手法を構築し，個々の住民における危険度の変化と，区域ごとの発令タイムリミットを明らかにした。

まず，災害リスクを，浸水によって避難所要時間がどの程度増加するかという避難困難度として評価した。具体的には，各住民のリアルタイムの避難所要時間が，自らの最短避難時間と比べてどの程度上昇しているかに加え，同一地域内における他住民との相対的な時間差も踏まえてリスク値を算出した。本評価では，自動車避難と徒歩避難の両方を対象とし，それぞれの移動特性に応じたリスク算定を行った。自動車避難では，距離コストを用いたダイクストラ法により各住民の最短経路を探索し，予測モデルに基づいて避難所要時間を算出した。また，30cm を自動車の通行限界水深として設定し，経路上の浸水により通行不能となった場合には迂回による所要時間の増加でリスクを評価した。一方，徒歩避

難では，道路勾配および浸水の影響を反映した歩行速度を算定し，道路ネットワーク上のリンクごとに歩行時間コストを設定して最短経路を導出した。また，50cm を徒歩の通行限界水深として設定し，浸水域の通行可能性を踏まえて徒歩避難時のリスクを定量化した。

続いて，加古川市を対象としたケーススタディにより，提案したリスク評価手法の適用性を検証した。浸水が発生した 7 月 6 日 1 時 50 分時点では，すでに通行不能となる道路区間が生じ，一部の住民では避難が困難となる状況が確認された。その後，浸水の進行に伴い，迂回が必要となる住民や，浸水区間を低速で移動せざるを得ない住民が増加し，避難所要時間の増大とともにリスク値が上昇していくことが示された。

さらに，算出したリスクに基づき，加古川市内の各区域について避難指示発令のタイムリミットを求めた。本研究では，区域内でリスク値が 1 に達する住民が初めて確認された時点を，当該区域の発令タイムリミットとして整理した。ケーススタディでは，浸水が発生した 7 月 6 日 1 時 50 分の時点で，すでに 5 区域において発令すべき時刻に達していることが明らかとなった。また，他の複数の区域でもリスク値の上昇が確認され，浸水の進行に伴い避難が困難となる住民が増える可能性が示された。これらの結果から，各区域の発令タイムリミットを適切に把握することが，住民の安全を確保した上で計画的に避難指示を発令するために重要であることが示された。

(3) 住民が現在地から安全な避難所までの最適経路を迅速に把握できるよう，リアルタイムの浸水予測を組み込んだ避難経路探索システムを構築した。

本研究では，Web ベースで動作する避難経路探索システム RFERS（Real-time Flood-responsive Evacuation Route Support System）を開発した。本システムは，既往手法と比較して主に三つの点で改良を加えている。まず，Python と JavaScript を用いることで，地理空間データを含む多様なデータを効率的に処理できるようにし，GIS などライセンスを要するソフトウェアに依存しない仕組みを構築した。また，従来研究の多くが徒歩避難のみを対象としていたのに対し，本システムでは自動車および徒歩の両方を考慮し，それぞれに対応した避難経路の探索機能を実装した。さらに，10 分間隔で更新されるリアルタイム浸水予測を組み込み，二つの移動手段における浸水時の通行可能性や避難所要時間への影響を考慮した経路探索を可能とした。これにより，「安全性」と「効率性」を両立する最適な経路提示を実現した。

構築したシステムを加古川市で検証した結果，平常時および浸水時のいずれにおいても，本システムは適切な避難経路を提示し，避難所要時間を迅速に推定できることが確認され，災害時における住民避難支援への有用性が示された。

以上より，本研究で提案した避難所要時間予測手法および災害リスク評価手法は，災害時に自治体が定量的かつ的確な避難判断を行う上で有用であることが示された。また，個々の住民に対する災害リスクの評価結果は，自身の危険性をより適切に認識することに

つながり，住民の避難行動を促進する効果が期待される。さらに，開発した RFERS は，避難時に危険なエリアを回避し，安全かつ迅速な避難の実現を支援できることが確認された。したがって，本研究で得られた成果は，将来の災害発生時における円滑な避難の実施を可能にし，人的被害の軽減に寄与しうると考えられる。

一方で，本研究では，**第３章**，**第４章**および**第５章**で述べたとおり，いくつかの課題が残されている。これらについては，今後さらなる検討および手法の改善が必要である。以下に，各章で示した課題をまとめて整理する。

[1] 災害時の交通流および人流状況を考慮していない点

本研究では，避難所要時間の算定にあたり，主として平常時の交通条件を前提としている。そのため，災害時に発生し得る交通渋滞や交通流の変化に伴う移動速度の低下については，十分に反映できていない。実際の災害時には，多数の住民が同時に避難を開始することで，道路上の交通状況が大きく変化する可能性があり，これが避難所要時間に大きな影響を及ぼすと考えられる。したがって，今後は，災害時の交通流を想定したシミュレーション等を通じて，こうした交通状況の変化が避難所要時間に及ぼす影響を評価する必要がある。また，徒歩避難についても，同時避難による人の集中や混雑が歩行速度に与える影響は考慮していない。この点は，**第５章**で提案した徒歩避難時の経路探索方法においても共通する課題であり，今後の改善が求められる。

[2] 車両特性および個人属性の違いによる避難所要時間の差異を考慮していない点

本研究では，自動車避難の所要時間予測において，車両の違いを区別せず，一律の条件のもとでモデル化を行っている。そのため，車両の種類や性能による走行特性の差異は，モデルには反映されていない。実際の避難行動においては，車両特性の違いによって走行挙動が異なる可能性があり，これらを考慮したモデルの構築については今後の検討課題である。また，徒歩避難の所要時間算定においては，すべての避難者に対して同一の初期歩行速度を設定しており，年齢，性別，健康状態などの個人属性による歩行能力の違いは考慮していない。これらの個人属性の違いは，浸水時に通行可能と判断される限界水深や，長時間の避難に伴う疲労の影響など，避難時の耐性にも影響を及ぼす可能性がある。今後は，こうした要素についてさらなる評価を行い，避難所要時間の算定手法の改善を進める必要がある。

[3] 避難所の受入れ状況を考慮していない点

本研究の**第４章**における個人単位の避難リスク評価では，評価時点の浸水条件のもとで到達可能と判断された避難所のうち，最も近い避難所までの所要時間に基づいてリスクを算定している。しかし，実際の災害時には，避難所の収容人数や周辺住民の分布状況によ

って，避難所が満員となり，当該避難所への避難が成立しない状況が生じる可能性がある。一方で，本研究は自治体による避難判断の支援を目的としており，個々の住民が最終的にどの避難所を選択するかを事前に特定することを前提としていない。そのため，各住民の避難可能性は，浸水状況に基づく避難経路の通行可否を指標として評価しており，避難所の収容人数や受入れ状況を動的に反映した避難先の個別推定は行っていない。

また，**第５章で**提案した避難経路探索手法においても，同様の課題が残されている。本研究では，各利用者に対して，リアルタイムの浸水条件に基づき，通行不能と判定された避難所を除外したうえで，残りの避難所への最短経路を算出している。しかし，避難所ごとの収容人数や受入れ状況を考慮した経路提示は行っていない。実際の災害対応においては，各避難所の収容状況を踏まえた上で，より合理的な避難先および避難経路を提示することが求められる。今後は，災害時に本システムを利用する住民の実際の避難状況や，現地から取得される避難所の受入れ情報を踏まえ，より実態に即した避難経路提示の実現に向けて，システムの改良を進めていく予定である。

謝辞

博士後期課程の三年間にわたり，終始懇切丁寧なご指導を賜りました三谷泰浩教授に，心より御礼申し上げます。研究の進め方のみならず，研究者としての姿勢についても多くのことをご教示いただきました。

また，ご多忙の中にもかかわらず，本論文の審査に際し貴重なお時間を割いていただき，多くの有益なご助言を賜りました浅井光輝教授ならびに杉山高志准教授に，厚く御礼申し上げます。

さらに，研究を進めるにあたり，多方面からのご支援とご指導をいただきました川野浩平助教に，深く感謝申し上げます。あわせて，既にご卒業された同グループ先輩の韓子双さんには，研究に関する多くの疑問に丁寧にお答えいただき，貴重なご意見を賜りましたことを，ここに記して感謝申し上げます。

これまで九州大学において関わってきた研究室の皆様，ならびに中国出身の友人の皆様にも，研究や生活のさまざまな場面において寄り添っていただきましたことに，心より感謝いたします。

最後に，本研究の遂行および博士課程における研究生活を支援していただきました SIP および JST SPRING（助成番号 JPMJSP2136）に，深く感謝申し上げます。