

令和元年東日本台風による長野県長野市の洪水事例における 浸水開始後の水平避難実施可能性の検証

Estimating the Possibility of Horizontal Evacuation After the Start of Flooding
in the Case of Typhoon Hagibis Flooding in Nagano City

水村 拓洋¹, 田口 博之², 中村 仁²

Takuyou MIZUMURA¹, Hiroyuki TAGUCHI² and Hitoshi NAKAMURA²

¹ 芝浦工業大学 大学院理工学研究科 システム理工学専攻

Systems Engineering and Science Course, Graduate School of Engineering and Science, Shibaura Institute of Technology

² 芝浦工業大学 システム理工学部 環境システム学科

Department of Planning, Architecture and Environmental Systems, College of Systems Engineering and Science, Shibaura Institute of Technology

This study estimates the possibility of horizontal evacuation after the start of flooding in the case of Typhoon Hagibis flooding in Nagano City, Japan. A combined inundation and multi-agent evacuation simulation analyses was conducted. In areas where the small river inundation was confirmed, the evacuation success rate was 100% if carried out before the large river began to flood. In areas where there is a significant elevation difference between houses and surrounding roads or where road connectivity is poor, the likelihood of horizontal evacuation after inundation was low. However, in these areas, evacuation success rates improved when people evacuated inundated areas via the shortest possible route.

Keywords: horizontal evacuation, evacuation route, inundation simulation, multiagent simulation, Nagano City

1. はじめに

近年、国内各地での洪水ハザードマップの整備が進められているが、洪水ハザードマップに記載されている情報は大河川の最大浸水深の情報に限られる場合が多い。小河川は流下能力が低く、氾濫までの時間が短いにも関わらず、提供される情報が少ないため実際の氾濫リスクとの齟齬が見受けられ、避難開始のタイミングの判断が困難である。また、田中ら¹⁾は、日本国内の災害調査に関する論文を分析し、避難所に避難するよりも自宅に留まる方が安全と思込んでいる住民や、自分は被害を受けることはないと思込んでいる住民は、自発的に避難行動を起こさないと指摘した。これらのことから、避難の判断が遅れ、周辺の地域が浸水してから避難を開始するような住民が存在することは明らかであり、浸水後の避難行動の妥当性についての検討が重要である。

避難手法では、主として水平避難と垂直避難の二種類が考えられる。最も理想的な避難とは、「氾濫が発生する前に浸水しないような標高の高い地区へ水平避難すること」である。高い浸水深が想定されないケースでは、垂直避難による避難行動は有効である。しかし、浸水深が自宅の最上階位よりも高くなる場合、垂直避難で生命の安全を確保することは困難である。垂直避難の危険性

に関して、佐藤ら²⁾は、水位上昇によってドアが開かなくなることや、家具の転倒や散乱によってケガのリスクが増加し避難経路をふさぐ可能性があることを指摘した。これらのことから、もし、垂直避難で安全確保が難しい浸水深が想定されている場合には水平避難の実施が重要である。ただし、水平避難を実施する場合には、避難経路上で歩行困難な状況に遭遇しないことが重要である³⁾。

避難経路について、小川ら⁴⁾は、避難所との標高差と浸水域との距離とを考慮した浸水域を迂回する経路による避難が避難成功者数の改善に寄与することを示した。水村ら⁵⁾は、浸水後の水平避難として、浸水域内での移動を最短とする経路での避難の実施が迅速な身の安全の確保につながる可能性を示した。さらに、Mizumuraら⁶⁾は、マルチエージェントシミュレーション(MAS)モデルによる検証によって、浸水域内での移動を最短とする経路での避難は、避難所への最短経路による避難と比較して避難時間を短縮できることを統計的に明らかにした。久保ら⁷⁾は、MASモデルによる検証を行い、避難者が危険な浸水想定箇所を把握することで、浸水に巻き込まれずに短時間で避難できることを示した。このように、浸水リスクを正確に把握して避難経路を事前に検討することが、安全な避難の実施に繋がると考えられるため、浸水後の避難経路についての検討は重要であると考えられる。

浸水時の徒歩避難の限界に関して、大西ら⁸⁾は、式[1]に示す単位幅比力 M_0 (m^3/m)による水中避難困難度評価を提案した。ここで、 u は流速(m/s)、 h は水深(m)、 g は重力加速度(m/s^2)である。さらに、浅井ら⁹⁾は、成人男性、成人女性、高齢者男性、高齢者女性の4つの避難者属性別に、安全な避難の限界となる「安全避難」と避難行動が完全に不可能となる「避難困難」の単位幅比力の基準値、及び歩行実験の結果から得られたデータをもとに歩行速度 V (m/s)を推定する式[2]を提案した。避難者属性別の単位幅比力による避難困難度評価の基準値と式[2]の定数($\alpha, \beta, \gamma, \delta$)の値を表1に示す。吉田ら¹⁰⁾は、この単位幅比力を歩行困難度の評価に採用し、水位観測所が避難判断水位に達した時刻を基準とした避難可能時間を明らかにした。若山ら¹¹⁾は、避難所とその前面道路について単位幅比力による評価を行い、避難所ごとの安全性を評価した。平川ら¹²⁾は、単位幅比力に加えて避難所要時間、歩行速度の減少率等を考慮して避難困難度を評価した。これらのように単位幅比力で避難困難度を評価した研究は存在するが、いずれの研究も避難困難度の評価はその地点のみの浸水状況によって評価されている。しかし、実際の避難においては、その地点のみではなく、避難所までの避難経路が避難困難に至っているのかを評価することが重要であると考えられる。さらに、避難実施中にも浸水状況は時々刻々と変化するため、静的な避難困難度は危険側の評価となってしまおうと考える。

以上より、本研究の目的は、避難の判断が遅れて周辺地区の浸水が開始した後の状況下で複数の避難経路を想定し、浸水拡大を考慮した避難困難度を単位幅比力によって評価することで、浸水開始後における水平避難の実施可能性を検証することである。

$$M_0 = \frac{u^2 h}{g} + \frac{h^2}{2} \quad [1]$$

$$V = \alpha e^{-\beta M_0} - \gamma M_0 + \delta \quad [2]$$

表1 M_0 (m^3/m)による避難困難基準値と式[2]の定数⁹⁾

	避難困難指標 (M_0)		歩行速度推定式[2]の定数			
	安全避難	避難困難	α	β	γ	δ
成人男性	0.125	0.250	0.63	120	1.19	0.77
成人女性	0.100	0.200	0.78	150	0.65	0.52
高齢者男性	0.100	0.200	0.48	120	1.02	0.72
高齢者女性	0.080	0.160	0.50	125	0.41	0.41

2. 研究方法

本研究では、令和元年東日本台風時の長野県長野市の洪水を対象として、氾濫解析とMASモデルでの避難シミュレーションを複合的に実施し、時系列の浸水状況を考慮した水平避難の実施可能性を検討する。水平避難実施の評価については、浅井ら⁹⁾の単位幅比力の「避難困難」の基準値を用いた。氾濫解析ではiRIC Nays2DFlood¹³⁾を、MASモデルではArtisoc 4.2.1¹⁴⁾をそれぞれ使用した。MASモデルでの避難は、通行困難な道路を除外した最短経路での避難 (Evacuating under Exclusion of Impassable Roads via the Shortest Possible Route, 以下「EEIR-SPR」と記載) と浸水域内での移動を最短とする経路での避難 (Evacuating Inundated Areas via the Shortest Possible Route, 以下「EIA-SPR」と記載) の2種類を想定した¹⁾。一般に、EIA-SPRは、EEIR-SPRと比較して、全体の避難距離が長くなるものの、浸水域をいち早く脱出することで迅速に安全を確保できる避難となる可能性がある⁵⁾ (図1)。

(1) 対象地域と洪水事例の概要

本研究では、長野県長野市の長沼地区と豊野地区を対象地域とした (以下それぞれを長沼、豊野と記載)。これらは、北西の山地と東側の千曲川に挟まれた地域である。なお、図2(a)に示したように大字赤沼、大字津野、大字穂保、大字大町の旧長沼村を長沼、豊野町豊野の都市地域の一部と豊野町石の三念沢以北を豊野と定めて分析を実施した。長沼は全域が市街化調整区域、豊野は市街化区域を一部含んでおり、人口、世帯ともに豊野の方が多いが、いずれの地区も居住人口は減少傾向にある。長沼・豊野は、国管理の千曲川の浸水リスクが非常に高

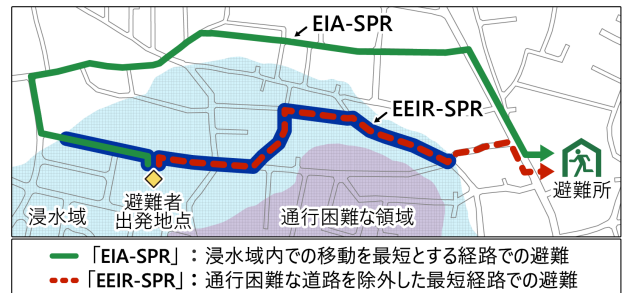


図1 本研究で想定する避難経路の概念図

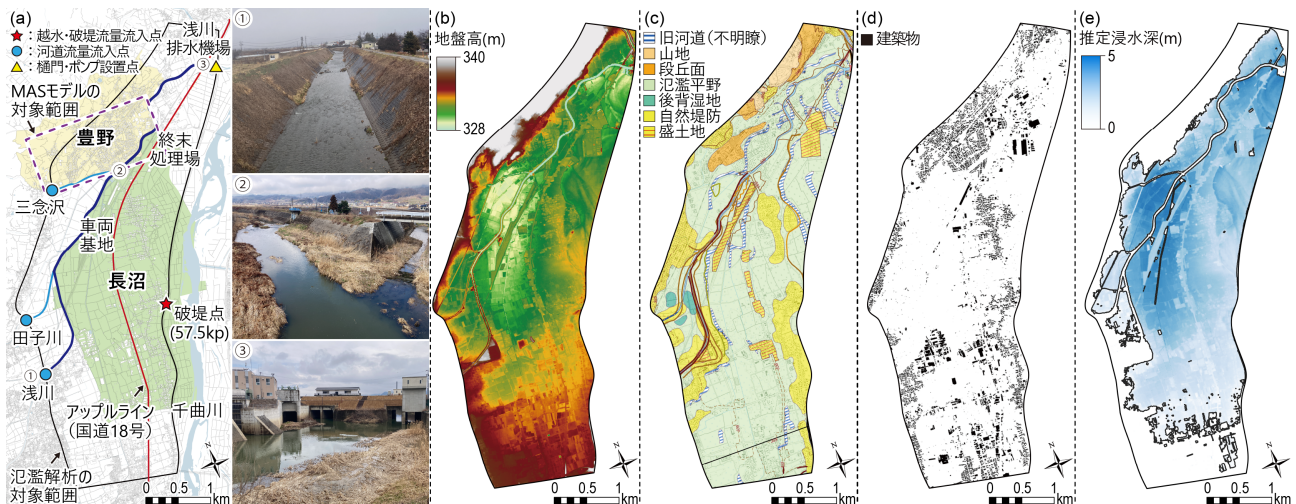


図2 対象地域の概要：(a) 対象地域の位置と氾濫解析・MASモデルの対象範囲、(b) 地盤高、(c) 地形分類、(d) 建築物の位置、(e) 令和元年東日本台風時の浸水推定段彩図¹⁶⁾

い地区であり、想定最大規模の降雨時の最大浸水深は10~20m、中低頻度（1/100）の降雨規模では地区の全域が3.0m以上、中高頻度（1/30）でも地区の全域が0.5m以上の浸水深に達する想定である。長沼・豊野には、長野県管理の浅川、田子川、三念沢などの中小河川が流れており、これらの浸水想定は長野県のホームページで公開されている。地理的特徴として、長沼・豊野は標高が低く、過去の内水、外水氾濫の被災経験が多いことが特徴である。特に、長沼では平成27年（2015年）4月に地区防災計画が定められるなど住民の水害対策意識が高い。

長野市¹⁵⁾によると、令和元年東日本台風（2019年10月12日~13日）では、千曲川の越水（13日00:55頃）と浅川の内水氾濫（13日01:00頃）がほぼ同時刻に発生し、その約3時間後の13日04:00頃に図2(a)に示す千曲川57.5kp地点が破堤したとされており、長沼・豊野は934haという広範囲が浸水した。住家被害は、長沼で全壊560軒、大規模半壊78軒を含む899軒、豊野で全壊474軒、大規模半壊172軒を含む917軒であった。また、長沼では死者2名という人的被害もあった。両地区では、中小河川の浅川の樋門が閉められ、ポンプ排水が行われていたが、00:08に千曲川の水位上昇に伴いポンプ排水が止められたことに起因した内水氾濫が発生し、その後、千曲川の氾濫流が到達したとされている。図2(c)¹⁶⁾で示した通り、地区の浸水深は3m以上であったため、2階建ての住居では垂直避難での身の安全の確保は困難であった。

入江ら¹⁷⁾のアンケート調査によって、長沼では、約8割の住民が水平避難を実施しており、避難を開始したタイミングは、千曲川の越水と浅川の内水氾濫の発生以前に約7割の住民が避難を開始し、これ以降に約3割の住民が避難を開始していることが明らかとなった。豊野では、4割程度の住民が水平避難を実施しており、そのタイミングは、千曲川の越水と浅川の内水氾濫発生以前が約3割、これ以降が約7割であったことが明らかとなった。このことから、長沼と豊野では避難開始のタイミングに差があったと考えられる。加えて、千曲川の破堤以降に避難した割合をみると、長沼は約0.3割、豊野は約5割と大きな差があることが示された。いずれの地区でも、逃げ遅れて孤立した住民が発生したことが指摘されており、死者も発生しているため、やはり水平避難の実施が重要であると考えられる。

(2) 氾濫解析の計算条件と分析手法

氾濫解析の対象範囲は図2(a)に示した。計算期間は、12日21:00から13日15:00までの18時間、計算タイムステップは0.05秒、計算結果出力間隔は300秒とした。計算格子は、5m間隔を基本として、中小河川の流路を詳細に再現できるように格子分割線を設定したうえでラプラス方程式を解いて作成した。地形データは5mメッシュの数値標高モデル（5mDEM）を基本として設定した。境界からの流入は、図2(a)で示した位置から浅川と田子川と三念沢の河道流量、及び、穂保（57.5kp）の越水・破堤流量を流入させた。なお、浅川と田子川と三念沢の河道流量は、1秒メッシュで解析したRainfall-Runoff-Inundation（RRI）モデル¹⁸⁾の計算結果を用いた。穂保での越水と破堤の幅と流量は、Priyambodohoら¹⁹⁾と赤堀ら²⁰⁾の情報を参考に設定した。また、浅川排水機場の樋門とポンプの稼働状況については、吉谷ら²¹⁾の情報を参考に設定した。さらに、計算格子ごとに建物占有率を算出し、建物への浸水による水流の障害を考慮して計算を実施した。

氾濫解析の結果での分析は、浸水開始時刻と避難者属

性別の歩行困難に至った時刻、さらには、浸水開始後、歩行困難に至る迄の時間差 TI_{Flood} (分)を算出し、浸水後の水平避難の実施可能性について静的に分析した。

(3) MASモデルの解析条件と分析手法

氾濫解析の結果から得られる避難困難の評価のみでは、浸水した状況下での避難が可能であったのかについて避難開始時刻別に評価することは難しい。そこで、MASモデルを構築し、時々刻々と変化する浸水状況を考慮して住宅から避難所までの避難が可能かどうかを避難開始時刻別に評価した。MASモデルの対象地区は、長沼よりも豊野の方が明らかに避難開始の時刻が遅かった¹⁷⁾ことを考慮して図2(a)に示す豊野の一部の地区とした。

ここで、MASモデルの対象地区の住宅と避難先となる地区内唯一の指定避難所である豊野西小学校の位置、地盤高、道路ネットワークを図3に示す。MASモデルでは、避難者が道路上を避難することを想定して、ノード（交差点や道路網上の結節点などの「点」）とリンク（ノードとノードを結ぶ「線」）の組み合わせによる道路ネットワークを構築した。道路ネットワークの基となる道路線には、国土地理院ベクトルタイル内の道路中心線と、株式会社ゼンリンの住宅ポイントデータをもとにした住宅ポイントと避難所から道路中心線の最近接点とを結ぶ線の2種類をマージしたものをを用いた。また、氾濫解析の結果として、浸水深、流速、単位幅比力などを10分間隔でMASモデル内の各エージェントに反映させることで、時々刻々と変化する浸水状況を再現した。MASモデル内の時間を表すステップは、1ステップを1分となるように設定した。シミュレーション期間は、氾濫解析の計算期間と同様に12日21:00から13日15:00までの18時間とした。

以下に避難者の基本情報について述べる。避難者の出発点は、氾濫解析で浸水した住宅ポイントの406地点とした。406地点の住宅ポイントそれぞれから、成人男性、成人女性、高齢者男性、高齢者女性が避難することとし、合計 $406 \times 4 = 1624$ 名の避難者を想定した。避難者それぞれの避難開始時刻は、住宅ポイントと道路中心線とを最短距離で結んだ線の浸水開始時刻 T を基点として、 $T-60$ 分から $T+180$ 分までを10分間隔で25パターン想定した。なお、 T は、浸水の目視が避難のきっかけとなることを想定して設定しているものであり、その分布は図3(a)に示したとおりである。そして、住宅地点と避難者属性ごとに、避難成功の限界時刻 T_{Limit} を特定した後、浸水開始時刻 T を基点とした避難成功の限界時刻 T_{Limit} までの時間差 TI_{Mas} (分)を算出し、住宅地点のリスクと避難経路上のリスクについてどれほどのギャップがあるかを計測した。具体的な例を挙げると、 T_{Limit} が $T-60$ 分のときの TI_{Mas} は -60 分、 T_{Limit} が $T+120$ 分のときの TI_{Mas} は120分となる。

ここで、避難者の毎ステップの行動フローを図4に示す。避難者の避難経路については、EEIR-SPRとEIA-SPRの二種類を想定した。いずれの避難経路においても、A-star探索²²⁾の一部の条件を以下のように修正することで経路の取得を可能とした。EEIR-SPRについては、A-star探索を歩行困難なリンクを除外した状態で実施することで、避難困難の道路を除外した避難所までの最短経路を随時取得できるようにした。EIA-SPRについては、EEIR-SPRと同様に歩行困難なリンクを除外した状態で、Mizumuraら⁹⁾の手法と同様にA-star探索内のコスト関数に浸水深ランクごとの重みを割り当てることで、なるべく低い浸水深を通り、かつ確実に浸水域内での移動距離を最短とする経路を取得できるようにした。なお、いずれの避難も避

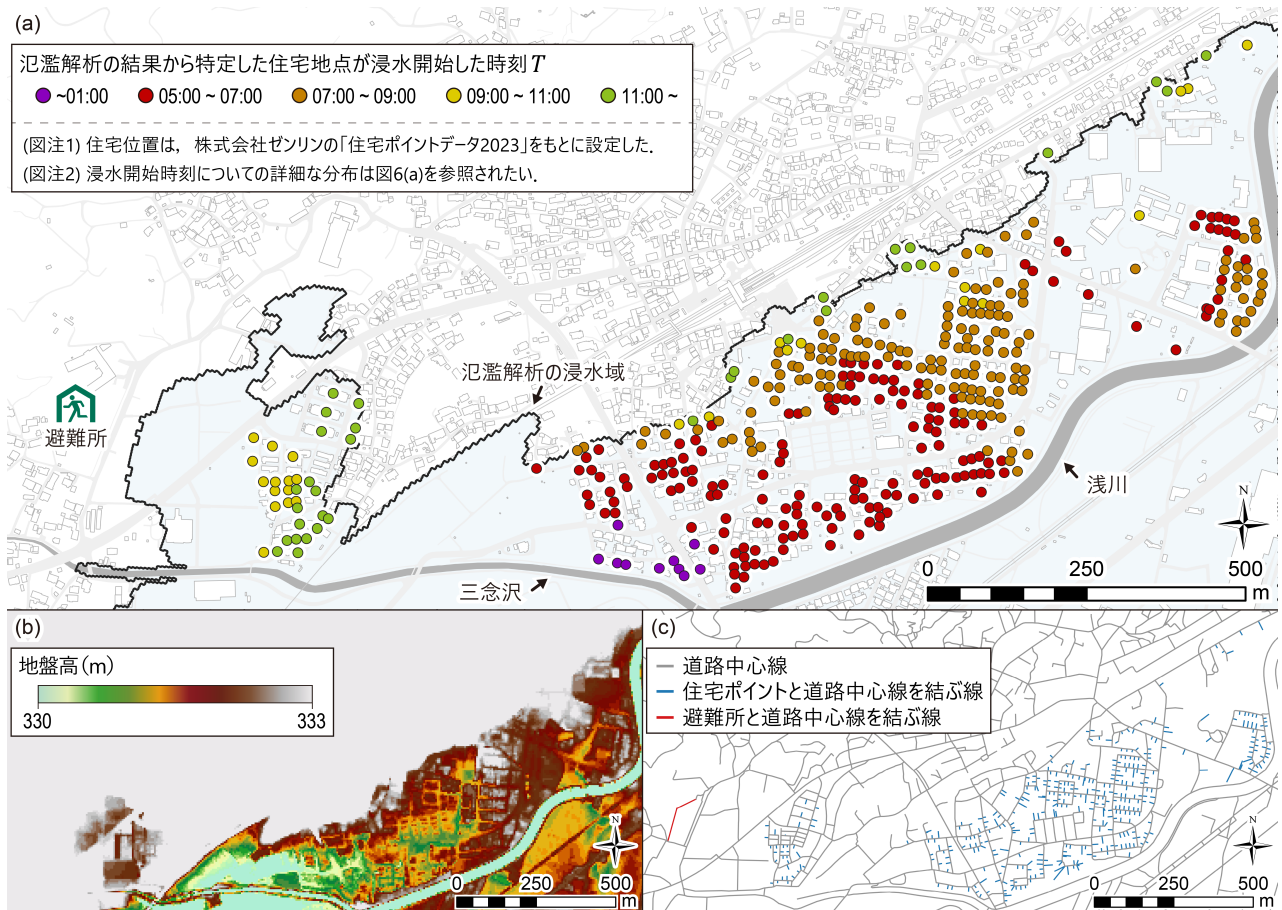


図3 MASモデルの対象地区の詳細図：(a)住宅と避難所位置、(b)地盤高、(c)道路ネットワーク

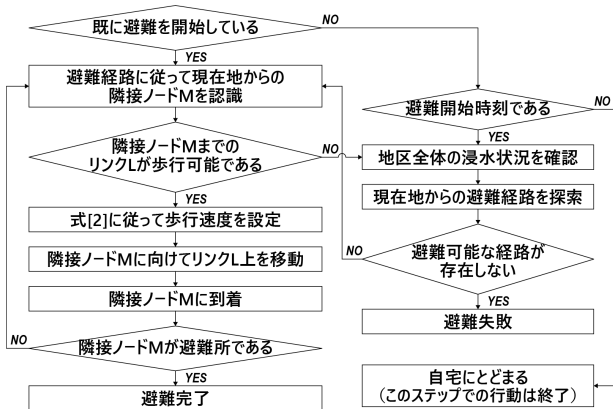


図4 毎ステップ実行される避難者の行動フロー

表2 避難結果をもとにした住宅の分類条件

グループ	分類条件
G1	① 氾濫解析による分析で避難困難にならない ② $TI_{Mas} \neq 180$ (MASモデルで避難困難にならない)
G2	① 氾濫解析による分析で避難困難にならない ② $TI_{Mas} = 180$ (MASモデルで避難困難にならない)
G3	① 氾濫解析による分析で避難困難になる ② $TI_{Mas} = 180$ (MASモデルで避難困難にならない)
G4	① 氾濫解析による分析で避難困難になる ② MASモデルで想定した避難開始時刻全てで避難不可能
G5	① 氾濫解析による分析で避難困難になる ② MASモデルで想定した避難開始時刻何れかで避難可能

避難所までのすべての経路中に歩行困難なリンクが存在した場合には避難失敗とした。避難者の歩行速度については、移動中のリンク上の単位幅比力の値と避難者属性をもとに式[2]により定義した。つまり、歩行速度は浸水情報が反映される10分間隔での更新ではなく、移動中のリンクの浸水状況に依存して常に変動するものとした。また、避難者同士の相互扶助は考慮しないものとした。

解析結果の分析については、(a) T を基点とした T_{Limit} までの時間差 TI_{Mas} の算出と評価、(b)氾濫解析の TI_{Flood} とMASモデルの TI_{Mas} との比較と評価、(c)EEIR-SPRとEIA-SPRの比較と評価を実施した。(b)について、MASモデルで対象とした住宅を表2に従ってG1~G5の5つに分類し、 TI_{Flood} と TI_{Mas} のいずれか、あるいは両方で上限、ないし下限を特定できないケース (G1~G4) を抽出した。そして、G5に分類された住宅のみを対象として、 TI_{Mas}

から TI_{Flood} を減算することでこれらの差分 D (分)を算出した。(c)について、EEIR-SPRとEIA-SPR実施時において、浸水した道路を移動した距離の差 $L_{Flooded}(m)$ を分析した。 $L_{Flooded}$ は、EIA-SPR実施時の浸水した道路を移動した距離からEEIR-SPR実施時のそれを減算することで算出した。

3. シミュレーション結果

(1) 氾濫解析の結果と妥当性の確認

氾濫解析の結果として、時系列浸水深と最大浸水深を図5に示す。以下より、解析結果の妥当性の確認について記述する。まず、時系列浸水深の状況について、ポンプによる排水が止められた後の00:35以降に中小河川の氾濫が発生していること、千曲川の氾濫流が浅川まで到達し

た時刻等について実績との比較を実施し、概ね再現されていることを確認した。ここで、吉田²³⁾の浸水深の推定方法を参考にして国土地理院¹⁶⁾から公開されている浸水範囲の輪郭線から浸水深を推定し、氾濫解析の最大浸水深と比較を行うこととした。まず、浸水範囲の輪郭線上に等間隔で作成した点群に5mDEMを与えた後、Natural Neighbor法による空間内挿で浸水位サーフェスを作成し、作成した浸水位サーフェスと5mDEMの差分を求めることで推定浸水深を得た。氾濫解析の対象範囲内からランダムに作成した500個の点群のそれぞれの地点における推定浸水深と氾濫解析の最大浸水深について、root mean squared error (RMSE)値を算出することにより妥当性の確認を実施した。RMSE値は0.46mであったが、5mDEMの誤差の標準偏差が0.3mであることを考慮すると氾濫解析の結果は概ね妥当であると言える。さらに、穂保の越水・破堤(57.5kp)を無効とし中小河川の氾濫状況のみを再現し、長野県が算出した中小河川のみが氾濫したときの浸水状況²⁴⁾との比較も実施した。こちらも浸水範囲と浸水深の分布が概ね再現されていることを確認し、中小河川の氾濫状況の再現も妥当であると判断した。

(2) 氾濫解析の結果による徒歩避難の実施可能性の検証

浸水開始時刻とともに、成人男性、成人女性・高齢者男性、高齢者女性の3種類の避難者属性それぞれが歩行困難に至った時刻と、浸水開始から避難困難に至る迄の時

間差 TI_{Flood} をまとめたものを図6に示す。そして、これらの結果を住宅ポイントデータと空間結合し、浸水した住宅について、時刻、時間差別に住宅棟数の割合を算出し、まとめたものを表3と表4に示す。ここで、成人女性と高齢者男性をまとめているのは、表1に示した避難困難基準値が同じであるためである。以下に特筆すべき特徴が見られた地区について述べる。以降、記述する各地区の位置については、図2(a)を参照されたい。まず、破堤前に避難困難に至ったのは、越水点周辺の地区、アップルラインの越水地点側の地区、新幹線車両基地周辺の地区、浅川排水機場周辺の地区、浅川との合流点付近の三念沢右岸の地区であることが分かった。越水点周辺の地区は流速が早いことが理由である。アップルライン周辺の地区は、図2(c)に示した地形分類で確認すると盛土地であり、周辺よりも標高がわずかに高いことから水が一時的に堰き止められ、浸水深が大きくなるとともに北側へ流下したことが理由であると分析できる。新幹線車両基地周辺の地区についても、アップルライン周辺の地区と同様の理由であると言える。浅川排水機場周辺の地区はポンプ排水が止められ、内水氾濫により浸水深が大きくなったことが理由である。主に水田が広がる浅川との合流点付近の三念沢右岸の地区では、浅川の水位上昇に起因する三念沢からの越水が確認でき、浸水深、流速ともに大きくなったことが理由である。

TI_{Flood} が特に短いのは、越水点周辺の地区、アップル

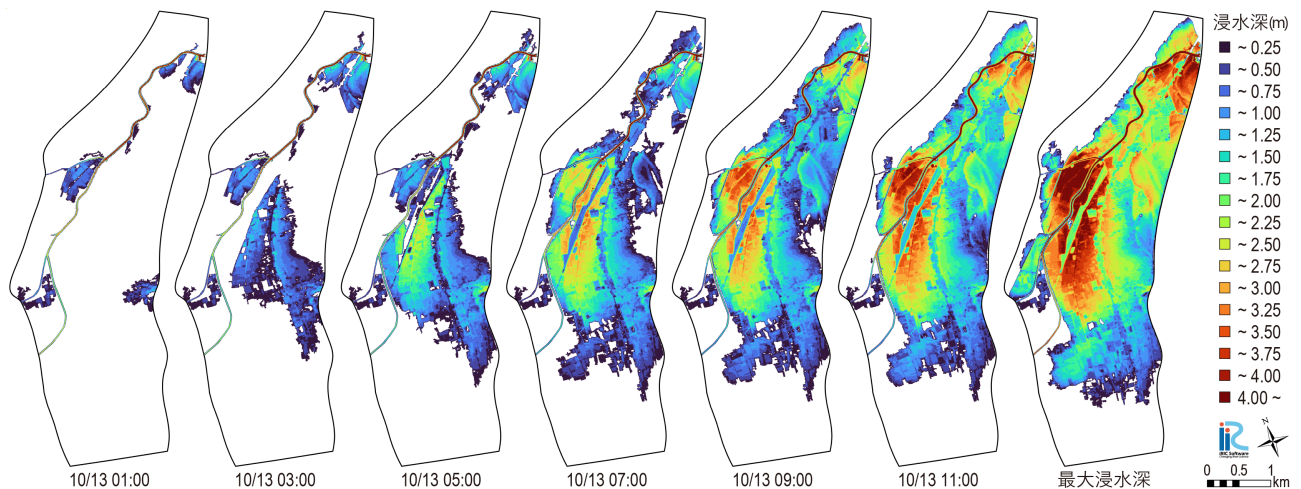


図5 氾濫解析の結果(2時間毎の時系列浸水深と最大浸水深)

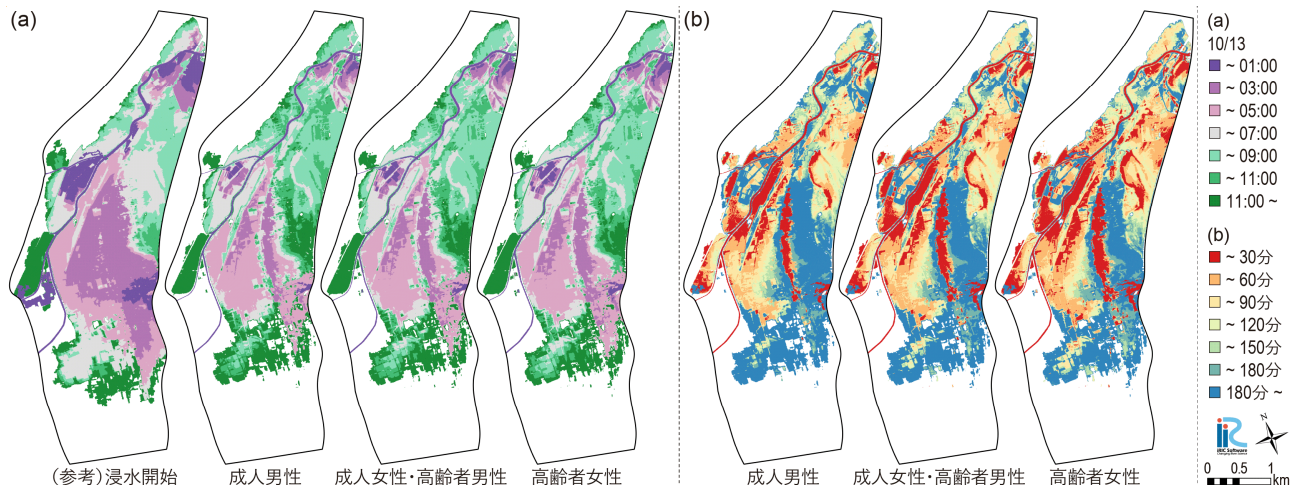


図6 氾濫解析の結果による避難困難度の分析：

(a) 浸水開始と避難困難に至った時刻、(b) 浸水開始から避難困難に至る迄の時間差 TI_{Flood} (分)

ラインの越水地点側の地区、新幹線車両基地周辺の地区、終末処理場の付近の地区である。終末処理場付近の地区については、処理場が盛土地であることと、周辺の旧流路に分類される地盤高が低い地域があることが理由である。これらはいずれも周辺に盛土地のようなわずかに地盤高の高い地点があるという共通点が見られた。

続いて、住宅地点における浸水開始と避難困難に至った時刻については地区により大きな違いが見られた。浸水開始時刻については、千曲川沿いに位置する長沼の方が明らかに早く、浸水した住宅のうち43%程度が05:00までに浸水している。一方、豊野は1%未満であり、00:35から00:50の間に浸水した。早期に浸水した住宅の位置について、長沼では、本川の越水点周辺では地形分類に関わらず放射状に位置していた。また、越水点から離れるにつれて、標高が低い地点ほど早期に浸水し、氾濫平野に位置する住宅が浸水した後に自然堤防上の住宅が浸水したことが終末処理場と破堤点の間の地点で顕著にみられた。豊野で早期に浸水した住宅は、浅川と三念沢の合流部付近のみでわずかに存在した。避難困難に至った時刻については、長沼は05:00までに避難困難に至る住宅が存在するが豊野は存在しない。しかし、豊野では、浸水した住宅の70%程度が07:00~11:00までの間に避難困難に至っており、結果的には浸水後に避難困難に至る住宅の割合は長沼よりも高いという結果を得た。

浸水した住宅地点における TI_{Flood} の分析について、長沼では、越水・破堤点付近やアップルライン付近では10分未満の住宅がわずかにある一方、高齢者女性の基準値であっても、住宅の98%程度は浸水後、歩行困難に至るまで60分以上かかることが分かった。また、長沼の南部をはじめとして歩行困難に至らない建物も多く見られた。豊野では、高齢者女性の基準値であっても、30分未満の

表3 浸水した住宅地点における浸水開始と避難困難に至った時刻別の割合(%) (浸水した住宅数:長沼548,豊野406)

時刻	避難困難							
	浸水開始		成人男性		成人女性 高齢者男性		高齢者女性	
	長沼	豊野	長沼	豊野	長沼	豊野	長沼	豊野
~01:00	0.00	0.98	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
~03:00	28.10	0.00	0.36	0.00	0.91	0.00	1.64	0.00
~05:00	15.33	0.00	10.04	0.00	13.69	0.00	17.15	0.00
~07:00	29.01	26.04	8.94	3.69	8.76	4.91	8.76	6.14
~09:00	9.85	52.58	7.30	32.68	10.22	34.89	11.68	39.07
~11:00	3.28	8.11	25.18	36.12	25.36	35.63	23.72	31.94
11:00~	14.42	12.29	24.45	17.44	18.07	15.23	14.78	14.00
浸水開始後、 避難困難に至らない			23.72	10.07	22.99	9.34	22.26	8.85

表4 浸水した住宅地点における浸水開始から避難困難に至る迄の時間差 TI_{Flood} (分)の範囲別の住宅割合(%)

TI_{Flood} (分)	成人男性		成人女性 高齢者男性		高齢者女性			
	長沼	豊野	長沼	豊野	長沼	豊野		
	~30	0.36	0.49	0.73	0.98	1.09	1.97	
~60	0.18	15.48	0.55	22.60	1.46	26.78		
~90	2.55	16.71	3.10	13.76	3.65	13.27		
~120	1.64	11.30	3.83	14.74	5.29	19.16		
~150	4.20	15.97	3.47	20.15	3.28	18.18		
~180	3.65	17.20	5.47	9.09	7.30	5.41		
180~	63.69	12.78	59.85	9.34	55.66	6.39		
浸水開始後、 避難困難に 至らない			23.72	10.07	22.99	9.34	22.26	8.85

住宅は1%程度に留まるが、長沼よりも30分から60分の間に歩行困難に至る住宅数が多いという結果を得た。

以上より、水平避難が可能な地区もあったものの地点による差が大きいことが分かった。ただし、この評価では、いずれの地区でも概ね浸水から30分は歩行困難に至らない結果が得られたことから、浸水後に水平避難を実施できる可能性がある。なお、対象とした長沼・豊野は、氾濫水が閉鎖的に貯留される貯留型氾濫を引き起こす地域であり、今回の検証結果は貯留型氾濫であったことに影響を受けている可能性が高いと考えられる。詳細に浸水過程を見ると、長沼は氾濫解析終了時刻でも南部に広がる氾濫平野に浸水範囲を拡大させていたものの、豊野は段丘面で浸水範囲の拡大が止まっている。これによって、豊野の一部では浸水深上昇の早さは長沼よりも早いことが見て取れる。これは、長沼よりも豊野の方が浸水後、移動困難となる住宅数の割合が高いことに影響を与えている可能性がある。

(3) MASモデルを用いた徒歩避難の実施可能性の検証

本節は、a) T を基点とした T_{Limit} までの時間差 TI_{Mas} の算出と評価、b) 氾濫解析の TI_{Flood} とMASモデルの TI_{Mas} の比較と評価、c) EEIR-SPRとEIA-SPRの比較と評価の3つの項で構成されるが、a)、b)では、EEIR-SPRとEIA-SPRによる大きな差は見られなかったためEEIR-SPRの結果のみを述べる。

a) T を基点とした T_{Limit} までの時間差 TI_{Mas} の算出と評価

表5に TI_{Mas} の範囲別の割合を、図7に成人男性における T を基点とした T_{Limit} までの時間差 TI_{Mas} の空間分布を示す。前節の TI_{Flood} の評価(表4)では、浸水開始から30分未満に歩行困難に至る豊野の住宅はいずれの避難者属性であっても2%未満しか存在しないという結果を得た。しかし、MASモデルによる解析では、浸水開始から30分後までに避難を開始したケースでは、成人男性では30%程度、成人女性・高齢者男性では37%程度、高齢者女性では47%程度が避難失敗に終わるといった結果が得られ、大きく評

表5 T を基点とした T_{Limit} までの時間差 TI_{Mas} (分)についての住宅の範囲別の割合(%)

TI_{Mas} の範囲	成人男性	成人女性	高齢者男性	高齢者女性
$-60 \leq TI_{Mas} < -30$	2.71	2.22	2.22	1.23
$-30 \leq TI_{Mas} < 0$	1.72	2.22	2.22	4.93
$0 \leq TI_{Mas} < 30$	25.12	32.51	32.51	40.64
$30 \leq TI_{Mas} < 60$	30.05	28.82	28.82	21.67
$60 \leq TI_{Mas} < 90$	11.33	7.64	7.64	9.11
$90 \leq TI_{Mas} < 120$	9.11	7.64	7.64	3.45
$120 \leq TI_{Mas} < 150$	3.45	1.48	1.48	1.23
$150 \leq TI_{Mas} < 180$	0.99	1.48	1.48	1.48
$TI_{Mas} = 180$	12.56	11.33	11.33	10.59
想定避難開始時刻 全てで避難失敗	2.96	4.68	4.68	5.67

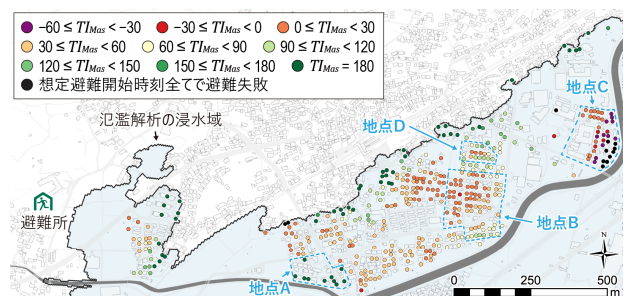


図7 成人男性における T を基点とした T_{Limit} までの時間差 TI_{Mas} (分)についての住宅の空間分布

価結果が異なることが分かった(表5)。浸水開始の60分前に避難を開始した場合であっても避難を成功できない避難者が存在することが分かった。

以下、特筆すべき特徴が見られた地点(図7に示した地点A, B, C)に着目した分析を述べる。地点Aは、いずれもTが01:00よりも前、すなわち中小河川の氾濫で浸水した住宅群が存在する。これらの TI_{Mas} は180分、つまりすべてのケースで避難が成功したという結果が得られた。これは、中小河川の氾濫による浸水の場合は水平避難の実施可能性が高いことを表す結果であると考えられる。地点Bは、 TI_{Mas} が短い住宅が密集する地点(豊南団地, 中央団地)である。豊野は浸水常襲地区であるため、地点の至る所で嵩上げされた土地が見られるが、地点Bは特にそれが顕著である。地点Bの TI_{Mas} が短い理由は、嵩上げされた住宅が浸水した時点では、それより低い位置の避難経路となりうる道路が、すでに歩行困難となっているためであると考えられる。

地点Cは、浸水開始60分前に避難を開始しても避難を成功できない住宅が密集している浅川沿いに位置する地点(ゆたかの団地)である。地点Cは、嵩上げされた住宅が存在する他、地点の南西部の地盤高が住宅よりも1m程度低いことが特徴である。地点Cで著しく TI_{Mas} が短い理由は、避難経路が地点の南部に位置する県道66号(豊野南志賀公園線)を通る選択肢しかなく、県道66号が歩行困難となった場合の代替経路が存在しないためであると考えられる。

まとまった特徴として明確に現れているのはこれらの3地点であるが、その他にも、浸水域の輪郭線付近では浸水深が比較的低いことから TI_{Mas} が180分(すべてのケースで避難が成功)である避難者が多い傾向があることが分かった。

b) 氾濫解析の TI_{Flood} とMASモデルの TI_{Mas} の比較と評価

表6に各避難者の避難結果によるグループ別の割合を、表7にG5に分類された住宅における差分Dの範囲別の割合と要約統計量を示す。氾濫解析による分析で避難困難にならないが、MASモデルによる解析で避難困難になる住宅(G1)は、いずれの避難者属性も2%程度存在した。MASモデルで想定した避難開始時刻全てで避難失敗となった住宅(G4)は、2~5%程度存在した。これらのG1, G4に分類された4~7%の住宅は氾濫解析による評価がMASモデルによる評価よりも危険側となっていると言える住宅である。G5に分類された住宅における差分Dについて、避難者属性で比較すると、成人男性が他の属性よりも値が大きく、ばらつきも大きいと分かった。いずれの避難者属性でも、G5に分類された97%程度の住宅(住宅全体の80%程度)が $D < 0$ であることが分かった。つまり、住宅全体の84~87%程度が氾濫解析のみの結果では危険側の評価結果になっていると言える。

図8に成人男性の避難結果グループ分けとG5に分類された住宅における差分Dの空間分布を示し、以下で特筆すべき特徴が見られた地点について述べる。地点Cは、 TI_{Flood} が120分以上180分未満となる住宅群である。地点Cでは、G4とG5が多く、G5の中でも $D \leq -60$ となる住宅が多い。地点Dは、 TI_{Flood} が240分以上となる住宅群である。地点Dは、G5が多く $D \leq -120$ となる住宅が存在し、中には、 $D \leq -180$ となる住宅や、G1に分類される住宅が存在した。また、地点Bでも、 $D \leq -120$ となる住宅が存在した。以上で挙げた地点が氾濫解析の TI_{Flood} との相違が大きい地点である。なお、 TI_{Mas} は、地点B, Cの方が地点Dよりも全体として小さい(図7)ことから、浸水

表6 避難結果グループについての住宅の分類割合(%)

グループ	成人男性	成人女性	高齢者男性	高齢者女性
G1	2.22	1.97	1.97	1.97
G2	8.13	7.88	7.88	7.14
G3	4.43	3.45	3.45	3.45
G4	2.46	4.19	4.19	5.17
G5	82.76	82.51	82.51	82.27

表7 G5に分類された住宅における TI_{Flood} と TI_{Mas} の差分D(分)についての住宅の範囲別割合(%)と要約統計量

Dの範囲	成人男性	成人女性	高齢者男性	高齢者女性
$D \leq -180$	5.06	3.28	3.28	2.40
$-180 < D \leq -120$	16.96	15.22	15.22	10.48
$-120 < D \leq -60$	30.36	27.46	27.46	31.74
$-60 < D \leq -30$	21.73	24.18	24.18	24.55
$-30 < D < 0$	23.51	26.87	26.87	28.14
$D = 0$	2.38	2.99	2.99	2.69
Dの要約統計量				
平均値	-70.92	-64.16	-64.16	-59.85
標準偏差	54.86	50.35	50.35	46.22
最小値	-240.00	-220.00	-220.00	-220.00
Q1	-110.00	-100.00	-100.00	-90.00
Q2(中央値)	-60.00	-50.00	-50.00	-50.00
Q3	-20.00	-20.00	-20.00	-20.00
最大値	0.00	0.00	0.00	0.00

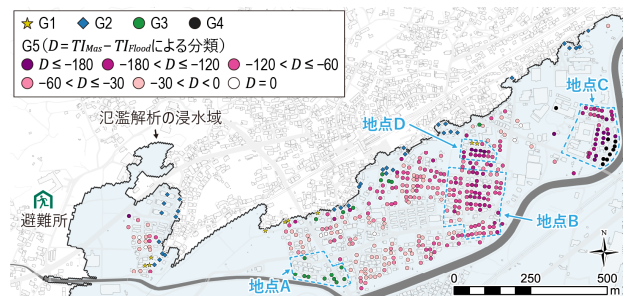


図8 成人男性の避難結果グループ及び TI_{Flood} と TI_{Mas} の差分D(分)についての住宅の空間分布

後の水平避難実施のリスクは、地点B, Cの方が地点Dよりも高いと分析できる。以上で述べた地点は、氾濫解析の結果のみで評価した場合は水平避難の実施可能性が高いと評価される地点であるが、MASモデルでの検証では住宅からの避難経路が歩行困難になるリスクが高いことが示され、氾濫解析の結果のみによる静的な評価では危険側の評価となる可能性がある。

c) EEIR-SPRとEIA-SPRの比較と評価

以上、EEIR-SPRの分析について述べてきたが、EIA-SPRにおいても同様の傾向があり、経路選択による大きな差は見られなかった。ただし、避難失敗と判定された要因について分析すると差が見られた。本モデルにおける避難失敗の判定は、(I)「避難を開始する際の経路探索で経路が見つからない場合」、(II)「避難中に経路を再探索して経路が見つからない場合」、(III)「避難中に浸水状況が更新されて移動中のリンクが歩行困難となった場合」の3つの要因に分けられる。ここで、表8に時刻Tに避難開始したケースにおけるEIA-SPRとEEIR-SPRの避難成否及び失敗要因別の割合を示す。避難成功率について、避難者属性別にみると、いずれの避難経路でも、成人男性、高齢者男性、成人女性、高齢者女性の順に高いことが分かった。続いて、避難失敗の要因について述べる。要因(I)について、EEIR-SPR、EIA-SPR共に7~12%程度であった。なお、要因(I)については、モデルの性質上、避難経路による違いは存在しない。要因(II)について、

EEIR-SPRでは高齢者女性では10%程度、それ以外では5%程度であったが、EIA-SPRでは存在しなかった。要因(III)について、EEIR-SPRでは成人女性では4%程度、それ以外では2%程度であったが、EIA-SPRでは成人女性で0.7%存在したのみであった。総合すると、EIA-SPRでのみ避難成功する住宅が6~12%程度存在することが分かり、避難者属性別にみると、高齢者女性が最も高いことが分かった。これは、避難経路の選択により、避難成功限界時刻 T_{Limit} を遅らせる可能性があることを表している。

続いて、図9に時刻 T に避難開始したケースにおける成人男性の避難成否及び $L_{Flooded}$ の範囲別の空間分布を、表9に避難開始時刻別（30分間隔）の成人男性における $L_{Flooded}$ の範囲別の割合と要約統計量を示す。EIA-SPRは、経路探索を行った時点における浸水域での移動を最短と

する経路であるため、浸水情報の更新によってEIA-SPRよりもEEIR-SPRの方が浸水している道路を通る距離が短くなる場合、つまり $L_{Flooded} > 0$ となっている住宅が存在した。加えて、 $L_{Flooded} > 0$ となっているのは、EEIR-SPRよりも浸水深が小さい経路を選択していることも要因であると考えられる。ただし、 $L_{Flooded} > 0$ となるのは、避難開始時刻が $T+30$ 分のケースでは住宅全体の6%程度、それ以外のケースでは住宅全体の0~2%程度であり、これら以外では $L_{Flooded} < 0$ 、つまり浸水している道路を移動する距離はEIA-SPRの方が短くなるため、EEIR-SPRよりも早期に安全を確保できる経路選択になると言える。なお、 $L_{Flooded} = 0$ の場合は、EEIR-SPRの経路がEIA-SPRと一致していることを示しており、避難所までの最短経路が浸水域での移動を最短とする経路となっている。

表8 時刻 T に避難開始したケースにおけるEEIR-SPRとEIA-SPRの避難成否及び失敗要因別の住宅の割合 (%)

	成人男性	成人女性	高齢者男性	高齢者女性
EEIR-SPR				
避難成功	86.21	81.77	84.73	75.86
避難失敗	13.79	18.23	15.27	24.14
要因(I)	7.39	9.11	9.11	11.82
要因(II)	4.93	4.93	4.19	10.59
要因(III)	1.48	4.19	1.97	1.72
EIA-SPR				
避難成功	92.61	90.15	90.89	88.18
避難失敗	7.39	9.85	9.11	11.82
要因(I)	7.39	9.11	9.11	11.82
要因(II)	0.00	0.00	0.00	0.00
要因(III)	0.00	0.74	0.00	0.00
EIA-SPRのみ				
避難成功	6.40	8.37	6.16	12.32

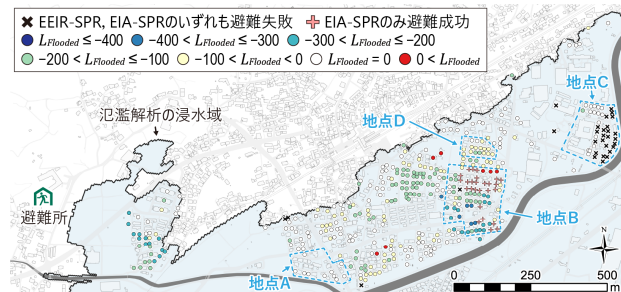


図9 時刻 T に避難開始したケースにおける成人男性の避難成否及び $L_{Flooded}$ (m) についての住宅の空間分布

$L_{Flooded}$ の範囲別の割合について、すべての避難開始時刻で $L_{Flooded} < 0$ となる住宅が存在した。特に、避難開始時刻が T 、 $T+30$ 分、 $T+60$ 分では半数以上の住宅で $L_{Flooded} < 0$ となった。避難開始時刻が T のときをピークとして、避難開始時刻が遅くなるにつれて $L_{Flooded}$ は0に近づく住宅が多いことが分かった。これは、浸水拡大の影響で浸水している道路の代替経路においても、浸水が確認されるためであると考えられる。避難開始時刻が T よりも前である場合は、EEIR-SPRとEIA-SPRの避難経路が同じとなる可能性が高くなるため、 $L_{Flooded} = 0$ となる住宅が多くなったと分析できる。

続いて、特筆すべき特徴が見られた地点について述べる。地点Bでは、EIA-SPRのみで避難成功する住宅が多いことが特徴であると言える。また、 $L_{Flooded} \leq -100$ となる住宅が多く、 $L_{Flooded} \leq -400$ となる住宅も存在した。このことから、地点Bとその周辺は、MASモデルで対象とした地区全域の中でもEIA-SPRの実施効果が高く、避難経路の選択について検討する意義が高い地区であると言える。その他にも、避難所付近の住宅群で $L_{Flooded} \leq -200$ となる住宅が複数軒存在した。これは、これらの住宅群の西側から浸水が開始しており、その方向に避難所が存在することに起因すると考える。

図10に想定した4つの避難者属性のいずれかでEEIR-SPRの T_{Limit} とEIA-SPRの T_{Limit} が異なる結果となった住宅の空間分布を示す。このような住宅は避難者属性や、EEIR-SPR時の T_{Limit} の早さに関わらず、地点B、Dとそれらの西側の地点で顕著に見られた。これらの地点は、a) で述べたように住宅よりも周辺の道路の浸水が早い地形

表9 避難開始時刻別（30分間隔）の成人男性における $L_{Flooded}$ (m) の範囲別の住宅の割合 (%) と要約統計量

避難開始時刻	$T-60$ 分	$T-30$ 分	T	$T+30$ 分	$T+60$ 分	$T+90$ 分	$T+120$ 分	$T+150$ 分	$T+180$ 分
$L_{Flooded}$の範囲									
$L_{Flooded} \leq -400$	0.49	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$-400 < L_{Flooded} \leq -300$	0.00	3.46	1.48	1.73	0.50	0.00	0.25	0.51	0.52
$-300 < L_{Flooded} \leq -200$	2.46	3.21	7.39	0.99	0.74	1.26	0.76	0.26	0.26
$-200 < L_{Flooded} \leq -100$	4.19	17.28	20.69	10.40	5.96	3.28	2.54	1.54	0.52
$-100 < L_{Flooded} < 0$	4.19	6.17	19.21	19.31	11.41	5.30	1.53	0.51	0.78
$L_{Flooded} = 0$	85.47	62.47	35.71	25.50	14.89	13.89	8.91	6.94	5.71
$0 < L_{Flooded}$	0.25	0.00	1.72	6.19	1.74	0.51	0.25	0.00	0.00
(避難開始できない)	2.96	5.68	7.39	32.67	63.03	75.76	85.75	90.23	92.21
(EIA-SPRのみ避難成功)	0.00	1.73	6.40	3.22	1.74	0.00	0.00	0.00	0.00
$L_{Flooded}$の要約統計量									
平均値	-17.52	-50.13	-70.56	-43.79	-49.36	-37.99	-50.39	-49.28	-46.98
標準偏差	58.98	88.02	85.97	79.10	77.41	67.76	86.92	94.95	106.94
最小値	-469.66	-372.34	-354.58	-339.86	-396.33	-250.32	-396.33	-339.86	-396.33
Q1	0.00	-114.70	-149.21	-66.42	-76.54	-54.48	-82.75	-40.92	-30.69
Q2 (中央値)	0.00	0.00	-37.93	-5.27	-6.40	0.00	0.00	0.00	0.00
Q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
最大値	24.05	0.00	52.67	130.11	67.21	108.65	8.05	0.00	0.00

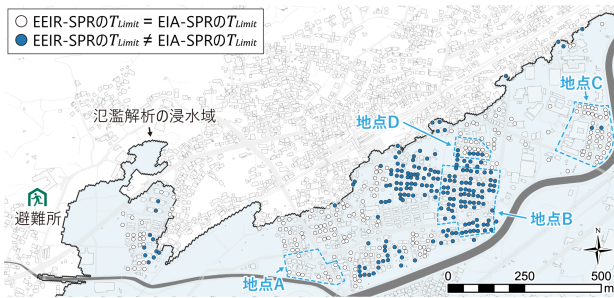


図10 EEIR-SPRとEIA-SPRの T_{Limit} が異なる住宅の空間分布

となっているため、避難経路によって避難成功率に差が見られたと考えられる。また、避難所までの経路について、住宅から避難所に向かってすぐに西に向かう経路の他に北や東に向かう経路が考えられるなど選択肢が多いことも特徴である(図3(c))。この点に関して、地点Cで避難成功の改善率が低かったのは経路の選択肢が少ないことに起因すると考えられる。

4. 考察と結論

本研究は、令和元年東日本台風時における長野県長野市長沼・豊野地区の洪水を事例として、氾濫解析による住宅ごとの浸水状況の分析、及び避難者の属性、避難開始時刻、避難経路についての多様な条件を設定した避難シミュレーションによる分析を実施することで、浸水開始後の水平避難の実施可能性を検証した。

氾濫解析によって、災害当時の浸水の拡がり方、浸水深分布を再現した。早期に浸水した住宅は、長沼では、本川の越水点周辺では放射状に位置し、越水点から離れるにつれて標高が低い地点に多く位置していた。豊野では、越水発生前に浸水した住宅が中小河川の合流部付近でわずかに存在した。また、住宅ごとに浸水後の徒歩避難が実施可能であったかを分析した結果、長沼、豊野の両地区において、浸水後、30分は歩行困難に至らない住宅が多いという結果を得た。周辺に盛土地などをはじめとした標高が高い地点が存在する地点では、歩行困難に至るまでの時間差が著しく短い場合があり、それらの地点では水平避難が困難であったと言える。災害の状況や地形によっては浸水開始後の水平避難の実施が困難である地点が存在するものの、長沼、豊野の両地区で浸水開始から30分間は歩行が可能であった住宅が存在したことを踏まえると、本事例においては、浸水認知後に水平避難を実施できた可能性があった地点が存在したと言える。

MASモデルでは、25パターンの避難開始時刻を想定した分析を実施し、住宅ごとの避難成功の限界時刻を算出した。千曲川の支川(浅川、三念沢)の氾濫による浸水が確認された住宅では、想定した全ての避難開始時刻で避難を実施できたという結果を得ており、本事例においては、支川の氾濫による浸水時には水平避難の実施が可能であったと言える。ただし、本事例では支川からの氾濫は局地的な浸水にとどまっており、浸水により阻害された避難経路が少なかったことも関係していると考えられ、汎用性のある結論でないことは注意が必要である。本研究では各住宅への浸水開始時刻を基準とした水平避難を検証していることから、嵩上げされた住宅では、浸水開始時刻には避難経路となる低位部の道路がすでに歩行困難な状態であり、浸水開始後の水平避難が困難である傾向が見られた。これは、水平避難を実施する場合は

嵩上げた敷地が浸水する前に避難行動を開始する必要がある。周辺道路の浸水状況を注視することの重要性を示している。また、周辺道路の地盤高が住宅よりも著しく低いことに加えて、道路の接続性が悪く、避難経路の選択肢が少ない住宅群では、浸水開始の60分前に避難を開始しても避難成功できないという結果も得た。以上より、住宅地点と周辺道路との地盤高の差が大きい地点や道路の接続性の悪い地点では、浸水後の水平避難の実施可能性は低く、早期の避難が特に重要な地点であると言える。

全体的な傾向として、MASモデルの評価では、住宅地点だけでなく、浸水拡大を考慮した経路全体の評価を行ったため、氾濫解析の結果と大きく異なる結果となった。住宅全体の84~87%程度が氾濫解析による浸水から歩行困難に至る迄の時間差よりも、MASモデルの避難開始時刻から避難成功の限界時刻までの時間差の方が少ないという結果が得られ、氾濫解析のみの結果では危険側の評価結果となる可能性があると言える。

避難経路について、EEIR-SPR(通行困難な道路を除外した最短経路での避難)とEIA-SPR(浸水域内での移動を最短とする経路での避難)の2種類で検証を実施した。その結果、浸水開始した時刻に避難開始したケースでは、6~12%程度の避難者(住宅)がEIA-SPRのみで避難が成功したという結果を得た。それらの避難者(住宅)は、周辺道路において、浸水が早い地形となっていることと経路の選択肢が多いという共通点が見られた。本事例においては、これらの特徴を持つ地点ではEIA-SPRを考慮した避難経路の検討の意義が大きいと言える。EIA-SPRは、浸水域内を最短で抜け出すことにより安全な道路へと早く辿り着くことができ、その後の経路選択の幅を広げることに繋がると考えられる。しかし、住宅が浸水する60分前に避難を開始したとしても、EIA-SPRで避難を成功できない地点が存在している。その要因は、この地点の道路の接続性が悪く、経路の選択肢が少ないことである。以上の要因に加えて、避難開始時刻が遅れるにつれて避難開始不可能である住宅が増加し、EIA-SPRの実施可能性が減少していくため、避難経路の検討による避難行動の最適化には限界があると言える。

以上で述べた本研究の成果は、想定される洪水に対して事前に避難経路を考えるうえで地理的特徴を考慮することの重要性を再認識させるものであるとともに、避難経路の違いによって避難成功率に影響を及ぼすことを示したものである。中小河川による氾濫も含めた評価を実施しており、小規模の浸水のうちに大規模の浸水に備えて水平避難を実施することが重要であることも示している。氾濫が発生する前に浸水しないような標高の高い地区へ水平避難することが最適な避難であることは明らかであるが、浸水後の水平避難について周囲の地理的特徴を考慮して検討する一助になると考えられる。

続いて、既往研究と本研究の相違点について述べる。浸水域を迂回するような経路についての既往研究^{4),7)}では、浸水域に触れた場合、または基準浸水深を超えた場合に避難失敗の判定とする設定となっているが、本研究では、流速も考慮した単位幅比力による検討を行っている点と相違点であり、より厳密に避難困難度を評価していると言える。浸水域内での移動を最短とする経路での避難に関する既往の研究^{5),6)}では、避難失敗を想定しない設定であるが、本研究では避難失敗を想定してその実施可能性まで検証している点が相違点であると言える。単位幅比力による避難困難度の評価を用いて行われた既往の研究

^{10),11),12)}では、浸水開始から避難困難に至る迄の時間差については着目されておらず、避難所や道路に対する静的な評価のみに留まっているが、本研究では、氾濫解析とMASモデルの両方で浸水開始から避難困難に至る迄の時間差について算出を行い、その2つの評価結果には大きなズレがあることを明らかにしている。また、MASモデルによる動的な避難困難度の評価を行い、避難の限界時間を明らかにした初めての研究であると言える。

続いて、本研究の課題点について述べる。本研究で構築したMASモデルでは、住宅地点における浸水後の水平避難の実施可能性の検証に焦点を当てたため、住民同士の相互扶助について考慮できていない。加えて、高齢者、身体障がい者、疾病者、乳幼児、妊産婦など、歩行が困難あるいは歩行速度が著しく遅い住民がいることを踏まえ、徒歩だけではなく、自動車による避難、及び住民同士の相互扶助について同時に検討することが重要であり、本MASモデルはさらなる改良の余地があると考えられる。さらに、今次災害では夜間の時間帯での避難が想定されるため、浸水状況の把握が困難であると考えられる。これらの点に関して、今回の分析では、避難者の意思決定や避難の時間帯が夜である場合についての検討に触れていないことが課題であり、避難者に避難を促す方策とその効果について時間帯を含めた検証を実施し、具体化することが求められると考える。

今後の展望として、浸水後の水平避難を実施できる可能性があった過去の洪水被災地での検証を他の事例でも進め、本事例で得られた結果が汎用的な条件となり得るのか、この事例の特有の条件であるのかを検討するとともに、既往洪水に限らない生起確率年別の検討を行い、浸水リスクとの関係を明らかにしたいと考える。また、避難経路についての検討が重要であると考えており、EIA-SPRに着目し、EIA-SPRが実施可能な地区の地理的特徴や避難者の特徴、災害の特徴等を類型化し、避難計画を最適化するための水害対策の政策的な実施を促すことができる地区が存在するかを明らかにしていく意向である。さらに、以上のことを明らかにしたうえで、内水氾濫や小河川の氾濫想定や避難困難度をもとにした避難開始のタイミングの限界を明確にすることで、浸水前の避難行動を検討することに活かせるものとなると考える。

補注

- (1) 本研究で想定した2種類の避難経路の名称について、EEIR-SPRは、“Evacuating under exclusion of impassable roads via the shortest possible route”，EIA-SPRは、“Evacuating inundated areas via the shortest possible route”というそれぞれの英語表現から命名した。これは、日本語表現では意味が混同する可能性が高く、適切でないと考えたためである。

謝辞

本研究はJSPS科研費JP24K07987の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) 田中皓介, 梅本通孝, 糸井川栄一: 既往研究成果の系統的レビューに基づく大雨災害時の住民避難の阻害要因の体系的

整理, 地域安全学会論文集, 29巻, pp.185-195, 2016.

- 2) 佐藤佑太, 太田夏帆, 鈴木利佳子, 篠原麻太郎, 小野村史穂, 川端陽平, 衣川悠貴, 二瓶泰雄: 家屋内浸水時の潜在リスクに関する実験的検討～H30年西日本豪雨における倉敷市真備町の人的被害要因の解明に向けて～, 土木学会論文集B1(水工学), 75巻, 2号, pp.I_1375-I_1380, 2019.
- 3) 原田翔太, 村岡治道, 田中耕司, 七里豊伸, 手塚聡, 瀧健太郎: 中小河川の氾濫原における水害リスクを考慮した地区別避難判断基準の設定, 土木学会論文集F6(安全問題), 68巻, 2号, pp.I_18-I_23, 2012.
- 4) 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), 78巻, 2号, pp.I_1009-I_1014, 2022.
- 5) 水村拓洋, 田口博之, 中村仁: 中小河川同時氾濫時における浸水域脱出を最優先とした避難経路の有効性の検証～埼玉県久喜市を事例として～, 土木学会論文集, 79巻, 27号, 論文ID: 23-27023, 2023.
- 6) Mizumura, T., Taguchi, H. and Nakamura, H.: Confirming the safety improvement and evacuation time reduction effects by the method for evacuating inundated areas via the shortest possible route, *International Journal of Disaster Risk Reduction*, Vol. 101, Article 104252, 2024.
- 7) 久保菜, 吉田秀典, 市村強, M.L.L.Wijerathne, 堀宗朗: 浸水域の事前認知が避難行動に与える影響に関する研究, 土木学会論文集A2(応用力学), 76巻, 2号, pp.I_499-I_510, 2020.
- 8) 大西良純, 石垣泰輔, 馬場康之, 戸田圭一: 地下空間浸水時における避難困難度指標とその適用, 水工学論文集, 52巻, pp.841-846, 2008.
- 9) 浅井良純, 石垣泰輔, 馬場康之, 戸田圭一: 高齢者を含めた地下空間浸水時における避難経路の安全性に関する検討, 水工学論文集, 53巻, pp.859-864, 2009.
- 10) 吉田季生, 谷口健司, 渋尾欣弘: 氾濫シミュレーションに基づくリスクランク評価と避難可能時間の算定, 土木学会論文集B1(水工学), 75巻, 2号, pp.I_1351-I_1356, 2019.
- 11) 若山侑未, 川中龍児, 石垣泰輔: 小河川を含む内水域の浸水特性と安全避難に関する検討, 土木学会論文集B1(水工学), 75巻, 2号, pp.I_1285-I_1290, 2019.
- 12) 平川隆一, 仲本小次郎, 根岸智和, 星野裕也: 内水氾濫時の避難困難度に関する実験的研究, 土木学会論文集B1(水工学), 78巻, 2号, pp.I_1003-I_1008, 2022.
- 13) iRIC: Nays2D Flood ver5.0 マニュアル, <https://i-ric.org/download/nays2dflood-solver-manual/> (最終閲覧日: 2022-04-14).
- 14) 構造計画研究所: Artisoc 4.2.1, <https://mas.kke.co.jp/artisoc4/> (最終閲覧日: 2022-05-01).
- 15) 長野市: 令和元年東日本台風長野市災害記録誌, <https://www.city.nagano.nagano.jp/documents/668/363607.pdf> (最終閲覧日: 2023-08-24).
- 16) 国土地理院: 令和元年東日本台風に関する情報－浸水推定段彩図－, <https://www.gsi.go.jp/BOUSAI/R1.taihuu19gou.html#11> (最終閲覧日: 2023-08-24).
- 17) 入江さやか: 令和元年台風19号における住民の防災情報認知と避難行動調査報告①～長野・千曲川決壊住民の「8割避難」を可能にしたものは何か?～, 放送研究と調査, 70巻, 8号, pp.18-34, 2020.
- 18) Sayama, T., Ozawa, G., Kawakami, T., Nabesaka, S. and Fukami, K.: Rainfall-runoff-inundation analysis of the 2010 Pakistan flood in the Kabul River basin, *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 57, Issue 2, pp.298-312, 2012.
- 19) B Priyambodoho, 八木隆聖, 木藤あや音, 石川彰真, 呉修一: 2019年長野県千曲川洪水災害における家屋被害状況と洪水氾濫流況の関係, 土木学会論文集B1(水工学), 76巻, 2号,

- pp.I_619-I_624, 2021.
- 20) 赤堀良介, 浅井秀介: 2019年台風19号時の千曲川破堤箇所周辺における水量の空間分布と流木挙動の検討, 土木学会論文集B1(水工学), 77巻, 2号, pp.I_349-I_354, 2021.
 - 21) 吉谷純一, 豊田政史: 2.2章 氾濫痕跡調査による越水・溢水氾濫域, 令和元年台風19号豪雨災害調査団報告書(中部・北陸地区)(土木学会水工学委員会), pp.16-19, 2020.
 - 22) Hart, P. E., Nilsson, N. J. and Raphael, B.: A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths, *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics*, Vol. 4, No. 2, pp.100-107, 1968.
 - 23) 吉田一希: 平成30年7月豪雨に伴う高梁川流域と肱川流域の浸水範囲と浸水深分布の推定, 日本リモートセンシング学会誌, 38巻, 5号, pp.422-425, 2018.
 - 24) 国土交通省: 浸水対策重点地域緊急事業【信濃川水系浅川・三念沢】(長野県), <https://www.mlit.go.jp/report/press/content/001338516.pdf> (最終閲覧日: 2023-08-24).

(原稿受付 2024.8.31)

(登載決定 2025.1.25)