

浜松市沿岸地域における津波避難先への到達可能性に関する研究

岩井優祈

筑波大学大学院生

本研究では、津波避難施設の収容可能面積に着目しながら収容超過によって避難が不可能になった人々の空間的な再配分を目的として、彼らの居住地に対する別の避難先への到達可能性についてGISによる定量的な空間分析を行った。事例地域には静岡県浜松市の沿岸地域を選定し、南海トラフ巨大地震による夜間の津波襲来を想定した。分析の結果、最近隣に立地する津波避難施設へ避難した場合の避難達成率は54%であり、収容超過した人々を浸水域外もしくは収容面積に余剰のある津波避難施設へ再配分することで、避難達成率は86%に上がることが明らかになった。また、浸水域外へ避難した方が収容超過した人々の再配分に対するポテンシャルが高いことがわかった。一方で収容面積に余剰のある津波避難施設は、避難可能時間内に浸水域外へ到達できない人々にとって特に有用であることが判明した。本研究で得られた知見は、津波避難施設の配置計画や住民による初期避難の精度向上に役立つ。

キーワード：津波、避難、南海トラフ巨大地震、浜松市、GIS

I はじめに

1. 研究背景

近い将来、南海トラフを震源とした巨大地震の発生が予想されている。この地震・津波の規模は東北地方太平洋沖地震に匹敵する可能性があり、沿岸地域の各自治体では津波ハザードマップの見直しが進められている。例えば、過去にも南海トラフ沿いを震源とする地震・津波の被害を受けてきた地域の一つである静岡県では、東北地方太平洋沖地震の発災以前と比較して5倍以上の浸水域を推定した地震被害想定を発表した（静岡県、2013）。このような被害想定的大幅な見直しの背景には、内閣府中央防災会議（2013）が東北地方太平洋沖地震の被害を教訓に、今後の津波防災対策では発生しうる最大規模の地震津波を想定することが肝要であると報告したことなどがある。

推定浸水域が拡大すると、それに含まれる人口（以下、浸水域内人口と記す）は増加する。より多くの人命を救うためにも、喫緊の課題として避難に関する科学的研究の蓄積が重要である。と

りわけ津波避難では、避難先として津波の浸入に耐えられる強度をもつ施設や、浸水深よりも高い階層に避難場所をもつ施設、もしくは浸水域外が選定される。このように津波災害時の避難先には様々な制約があるため、浸水域内のすべての人々が避難できず、津波避難施設にて収容超過人口が発生する等の問題を抱える地域も存在する（佐野、2014）。これに関して田中ほか（2016）は、津波高を上回る標高地点への避難があくまで第一に優先されるべきであり、建築物への避難は緊急避難的な第二の選択肢として考慮されるべきであると論じている。これは周囲に高台などが存在する地域では理想とされる避難方法であるが、起伏のない平野部では移動距離の制約から高台へ避難するのは困難である。したがって、平野部では避難先として津波避難施設の優先度が高くなる。

こうした平野部における問題に対して、本研究ではまず各最寄り津波避難施設が浸水する前にそれらへ到達できる人数を推計し、彼らのうち何人が収容超過するのかを分析する。その結果を踏まえ、収容超過で避難が不可能になった人々に対す

る別の避難先への到達可能性について考察する。

2. 既往研究

津波避難施設への到達可能性に関する既往研究として、田中ほか（2016）は徳島県沿岸地域を対象に、ジオ・エバキュエイタビリティ（Geo Evacuatability）という概念を用いて、浸水域内の各測定地点から浸水域外までの距離と、浸水域外に加えて最上階が津波高を上回る建築物を考慮した場合の距離をそれぞれ算出し、その距離ごとの人口を津波の規模別に推計した。安藤（2014）は静岡県浜松市沿岸地域を対象に、津波避難施設を母点としたボロノイ領域を生成することで、各津波避難施設の収容人口やボロノイ領域内の最遠地点からの移動時間について分析した。安藤（2014）が直線距離に基づいて分析したのに対して、橋本（2015）は北海道釧路市を対象に、道路距離に基づくボロノイ領域を生成した。これは単純な空間分割とは異なり、橋などの交通条件が考慮されたより現実的な空間分析といえる。彼はこのネットワークボロノイ領域ごとに建物の延床面積を年代別に集計することで、推定浸水域内において住宅が増加傾向にあることやその空間パターンの変化を解明した。さらに、酒井ほか（2016）では豪雨を想定した場合について、佐賀県の平野部に立地する避難施設を対象にボロノイ領域を生成し、その配置を考察している。彼女らはこの領域面積に着目し、特に郊外にて避難施設のサービス水準が低いことを明らかにした。

ボロノイ分割による領域分析を用いれば、各地物の最近隣勢力圏を把握することができる。しかしこれは、「ある一定時間内に避難が可能な領域」のような時間・距離・速度等の条件に基づく領域分析には適さない。一方、バッファ分析では各地物が影響を与える空間的範囲を生成することができる。そのため、空間的範囲が重複する部分の処

理が別途必要となるが、上記の条件に基づいた領域分析が可能になる。バッファ分析を用いた研究には以下が挙げられる。

北島（2014）は和歌山県田辺市に立地する津波避難施設を対象に、避難者の歩行速度および道路傾斜を考慮したネットワークバッファ（直線距離ではなく、道路距離に基づいたバッファ）を生成することで、そこへ避難可能な人口を算出した。同様に、佐野（2014）は静岡県浜松市西区に立地する津波避難施設を対象に、道路傾斜に加えて踏切やトンネルなどの交通障害を考慮したネットワークバッファを生成した。

両者の研究では、津波が発生地点から海岸へ到達する時間内に人々が最寄り津波避難施設へ到達できるかどうかを評価している。しかし、津波が内陸へ広範囲に浸水する場合では、海岸側と内陸側にて避難に費やすことができる時間（以下、避難可能時間と記す）に大きな差が生じると考えられる。津波が発生地点から海岸へ到達するまでの時間を評価基準にすると、内陸側にて避難可能時間を過小評価してしまうおそれがあるためである。これを克服する手法として、時々刻々と変化する津波の浸水時間を考慮した避難シミュレーションを可能とするマルチエージェントシステム¹⁾の導入が挙げられる。藤岡ほか（2002）は神奈川県藤沢市の江ノ島海岸を対象に、マルチエージェントシステムを用いたシミュレーションを実行した。これにより、津波発生後の経過時間ごとに避難完了人口を算出した。

また、津波避難ではたとえ避難先が近くに存在するとはいえ、海岸側に向かって避難行動をとることは考えにくい。上記に挙げた領域分析に関する既往研究ではこの点が考慮されていないため、分析方法を精緻化する必要がある。これに関して、竹内・近藤（2002）は高知県須崎市を対象に、海岸線の位置に着目することで、避難者からみて

海岸とは反対側にある津波避難施設・浸水域外へ避難する様子をシミュレーションした。また、佐藤・平岡（2014）は竹内・近藤（2002）のシミュレーション手法を応用し、単に海岸線の反対側に避難するのではなく、海や河川に囲まれた地域でも適用できるよう改良を行った。

以上を含め、地震大国である我が国では津波避難に関する研究が豊富に蓄積されてきた。なかでも津波避難施設への到達が困難な地域の推定や、津波避難施設に対する収容超過人口の推計については学際的な研究が進められている。しかし、避難可能時間内に津波避難施設まで到達が可能であるにもかかわらず、その施設の収容制限によって避難不可能になった人々が他の避難先へ向かわざるを得なくなる状況を研究した事例は少ない。こうした状況をシミュレーションするためには、津波避難施設に対する収容超過人口の推計に加えて、彼らの居住地（避難元）と残りの避難可能時間内に彼らが到達できる他の避難先を推定する必要がある。

今後の津波防災対策では「想定外」を繰り返さないために、起こりうる最大規模の津波襲来を想定することが各自治体に求められている。これに伴い収容超過人口が相対的に増加すると予想されるなかで、津波避難施設までの距離と収容可能面積を考慮した適切な避難先を地域ごとに提示することができれば、地域全体として収容超過人口を減らすことが可能になる。また、津波避難施設の空間的位置関係を把握したうえで避難先への到達可能性に対する地域差を分析することは、地理学的に意義が深い。

以上を踏まえ、本研究では地域全体として被害を最小化することをめざし、津波避難施設の規模（収容可能面積）に着目しながら収容超過人口の空間的再配分について検討する。すなわち、収容超過で避難が不可能になった人々にとって、彼ら

の居住地（避難元）から別の避難先へ再移動がどの程度可能か、GISによる定量的な空間分析を試みる。研究対象地域には、静岡県浜松市の沿岸地域を選定する。南海トラフ巨大地震がもたらす津波による死亡者数が全国で最も高く推定されている静岡県のなかでも、浜松市の沿岸地域は平野が広がるため、浸水域が広範囲に及ぶと推定されている。よって浸水域内人口が多く発生すると予想される同地域は、本研究の事例に適している。想定する津波高は、南海トラフ巨大地震によって浜松市を襲う最大規模（約15m）とする。

本研究の目的を達成するための手順は以下の通りである。Ⅱにて、浜松市沿岸地域を概観したのち、同地域に立地する津波避難施設に対する収容超過人口の推計方法を論じる。Ⅲでは、Ⅱで論じた方法に従い収容超過人口を推計する。そして、その発生状況の地域差について考察する。Ⅳでは、様々な避難行動を設定することによってⅢで推計された収容超過人口の空間的再配分を行い、避難行動ごとの避難達成率を比較する。最後に、Ⅴにて本分析を総括する。

Ⅱ 津波避難施設に対する収容超過人口の推計

1. 研究地域の概要

静岡県浜松市は七つの行政区からなる（図1）。そのうち、静岡県（2013）によって津波浸水が推定されたのは、西区・中区および南区の3区である。したがって、本研究の分析対象地域はこの3区における沿岸地域とした（図1の黒枠内）。浜松低地が広がる本研究対象地域は、天竜川扇状地の扇端に位置する。それぞれの区全体の平均標高は、西区が14.1m、中区が19.4m、南区が3.2mである。西区と中区にて標高が高いのは、区のほとんどが三方原台地上に位置するためである。しかし、三方原台地は推定浸水域に含まれないため、推定浸水域内で平均標高を算出すると西区が

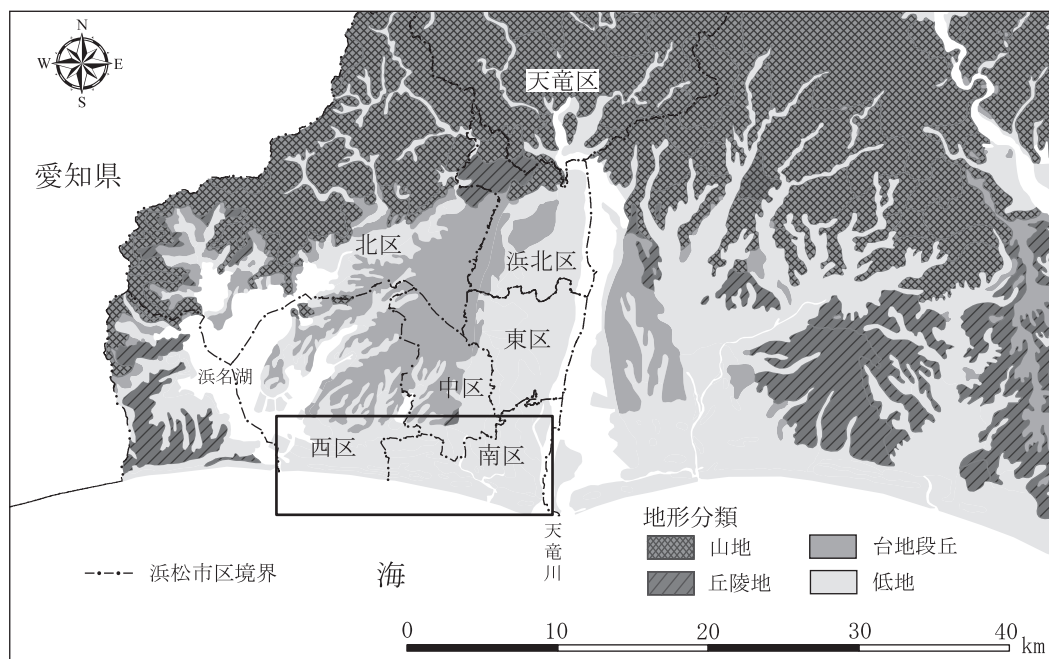


図1 研究対象地域図

- 1) 地形分類は、20万分の1土地分類基本調査より作成。
- 2) 黒枠内は分析対象地域を示す。

3.9m, 中区が4.5m, 南区が2.7mになる。よって、高台への避難は南区の住民はもちろん、中区や西区の海岸側に居住する人々にとっても困難であると予想される。

図2は、推定浸水域²⁾と重なる町丁目の面積に対する浸水面積の割合と人口総数(2015年国勢調査)を、それぞれ示している。町丁目を分析単位として用いることで、ある程度完結したコミュニティごとに危険性を抽出し、それを住所に基づいて比較する。

図2をみると、町丁目の面積に対する浸水面積の割合は、中田島町を除くと西区で低い傾向にある。研究対象地域では、西区の舞阪町を宿場町として東海道沿いに町が発展してきた歴史があるため、舞阪町や馬郡町では比較的海岸側にも家屋が多く立地し、それが浸水を抑止したことで浸水面積の割合が低くなったと考えられる。一方、馬郡

町から東側では海岸側に農用地が広がるため、浸水面積の割合が高くなったと考えられる。また、中田島町にて周囲よりも浸水面積の割合が低いのは、微高地である中田島砂丘が町内の大部分を占めることに基因すると考えられる。

人口分布についてみると、入野町や篠原町で多いことがわかる。両地域は周囲と比べて標高がやや高いため、これらの地域の住民は近隣に立地する津波避難施設が収容超過した場合でも、標高が高い場所へ避難することができると予想される。むしろ人口規模が小さい海岸付近の町丁目の方が、浸水面積や海岸からの距離などの側面からみて潜在的危険性が高いことがわかる。

2. 避難シミュレーションの概要

浜松市沿岸地域に立地する津波避難施設の規模・分布による制約から発生する収容超過人口の

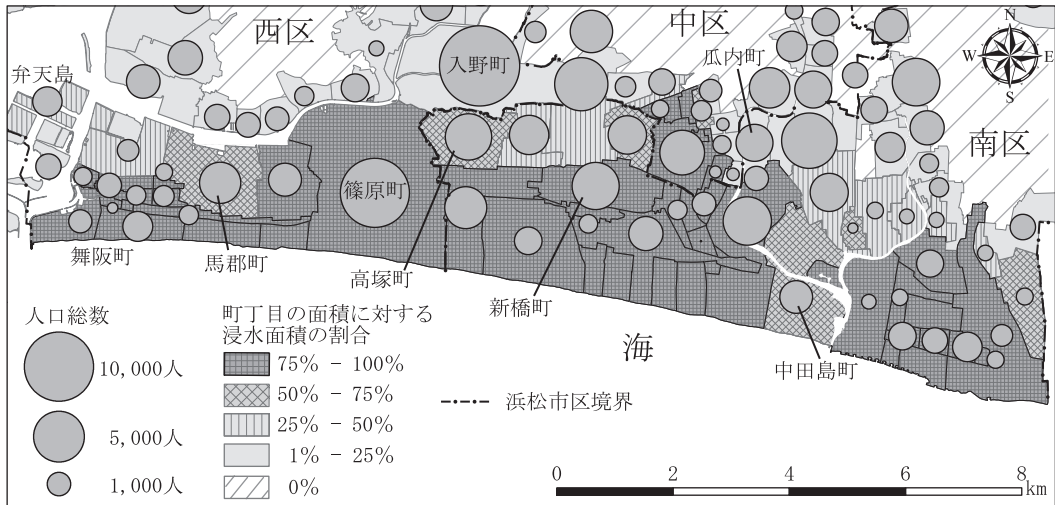


図2 浜松市沿岸地域における各町丁目の人口総数

(2015年国勢調査より作成)

推計方法を論じる。その際、既往研究で用いられた様々な分析手法の導入を検討する。

津波避難施設に対する収容超過人口は、避難シミュレーションの結果から推定される。よって、以下では避難シミュレーション手法について論じる。本シミュレーションは(1)地震・津波の発生時間帯の設定、(2)避難開始までの準備時間の設定、(3)避難行動の設定、の3部から構成され、地理情報システム(GIS)上にて実行される。

(1)では、大きく分けて日中もしくは夜間、平日もしくは休日の4パターンが想定される。2015年の国勢調査では、浜松市沿岸地域は昼間人口よりも夜間人口の方が多いことが報告されている³⁾。津波避難施設に対する収容可能性を最大限評価するために、本研究では夜間の発災を想定する。使用する人口データには、国勢調査250mメッシュ⁴⁾を選定する。これは町丁目単位と異なり集計単位が均一であるため、人口分布の分析に適している。また、誰でも入手可能な分析単位のなかで最小のため、汎用性が高い。

(2)では、避難行動を開始するまでの時間(以

下、避難準備時間と記す)を設定する。片田・桑沢(2006)は三重県尾鷲市を対象に、広報車やマスメディアなどによる情報伝達状況を考慮した避難準備時間の設定を、モンテカルロ手法によって実行した。片田・桑沢(2006)によると、地震発生から3分後に情報の伝達が始まった場合の平均情報取得時間は、地震発生後から4分58秒である。一方、内閣府中央防災会議(2012)では北海道南西沖地震や東日本大震災などの実績をもとに、避難準備時間を昼間に発災した場合では5分、夜間に発災した場合では15分として設定している。片田・桑沢(2006)では、情報が伝達されてから避難行動を開始するまでの時間に対する昼夜間の差が考慮されていないことから、本研究では内閣府中央防災会議(2012)に従い、避難準備時間を地震発生後15分とする。

(3)では、①避難に要する時間、②避難する方向をそれぞれ設定する必要がある。①を設定する際、既往研究で述べたマルチエージェントシステムを導入する方法が考えられるが、この手法は広域を対象とする場合には膨大な計算労力を必要と

するため、現段階では限られた範囲を解析する際にのみ導入されている（村上ほか，2015）。現に藤岡ほか（2002）で解析された範囲は約1km四方にすぎず、東西約16kmに及ぶ本対象地域にこの方法を導入することは困難である。

そこで、本研究では海岸線からの距離に応じて津波の浸水速度を変化させることで、各津波避難施設までの浸水時間を予測する。これにより、避難可能時間が津波襲来後の経過時間に伴って変化する様子を導出する。

陸上に遡上した直後の津波浸水速度は時速約36km⁵⁾と考えられている。そこで、本研究では津波が遡上した直後の浸水速度を時速36kmと設定し、その後の浸水速度を浜松市（2014）に記された浸水時間等を参考にしながら海岸線から1km地点で時速4.8km、浸水域外との境界線へ到達する時点で時速0kmに変化する回帰式（1）を設定した⁶⁾。

$$y = -0.0965x + 408.73 \quad (1)$$

ここで y は浸水速度（m/分）、 x は海岸からの直線距離（m）である。

以上より、本シミュレーションでの避難可能時間は、津波が海岸に到達し、各津波避難施設まで浸水する時間から、避難準備時間を引いた時間として導かれる。海岸までの津波到達時間は、浜松市（2015）を参考に20分とする。歩行速度は、内閣府中央防災会議（2012）を参考に0.58m/秒とする。これは夜間時の避難が考慮された値であり、また東北地方太平洋沖地震での経験に基づき設定されている。この歩行速度と避難可能時間から、避難可能距離が算出される。本研究では避難可能距離の算出基準を災害時要援護者等の体力に合わせるものとし、消防庁（2013）や浜松市（2015）を参考に最大500mまでとした。したがっ

て500m以内に避難先が存在しない住民については、本研究では対象外とする。津波避難施設の収容可能面積については消防庁（2013）や浜松市（2015）を参考に1m²=1人とする。

②では、避難者は自宅から水域（海岸・河川・湖）とは反対側に位置する避難先へ向かうことを前提とする。避難方向の設定にあたり、住民の現在位置から避難先までの経路を結ぶ方法と、避難先から避難可能時間内に移動可能な最大道路距離を示す到達圏（以下、ネットワークバッファと記す）を生成する方法の二つが考えられる。前者を用いる場合、現在位置から避難先までの経路を結んだ後、水域方向へ向かうような経路を削除することで設定できる。一方、後者を用いる場合は、生成したネットワークバッファのうち、水域方向へ向かうような範囲を削除することで設定できる。

ただし前者を採用する場合には、住民の現在位置をポイントデータとして入手する必要があり、従来では携帯電話のGPSデータなどが用いられてきた（例えば小川ほか，2018）。一方で本研究のように、メッシュ統計の人口データを用いた避難分析では、メッシュの中心点を住民の現在位置または居住地と仮定する方法が度々用いられてきた（例えば高阪，2000）。しかしこの方法を用いる場合、本研究で使用する250mメッシュでは約125mの誤差が生じてしまい、それを避難可能時間に換算すると1分以上の誤差となる。そこで、本シミュレーションでは後者のネットワークバッファを生成する方法を採用する。

ネットワークバッファを用いる手法を、津波避難施設へ向かう場合を例に説明する。まず、①で算出された避難可能距離に基づくネットワークバッファを、各津波避難施設から生成する。次に、各津波避難施設を通り、海岸線と平行な線を引くことで、ネットワークバッファを分割⁷⁾する。最

後に、分割された二つのバッファのうち、海岸とは反対側のバッファを取り除く。以上より、避難者は必ず水域とは反対側に位置する津波避難施設へ向かうことができるようになる（図3a）。ただし、水域方向であっても近くに避難施設がある場合にはそこへ向かうことができるよう、各避難施設から50 mに限りネットワークバッファを残すことにする。距離を50 mとした根拠は、自宅から道路を挟んで反対側に立地する建物を目視できる距離として妥当であると考えたからである。

また周囲に河川・湖が存在し、それらと自宅との間に津波避難施設が存在する場合には、その津波避難施設へ向かわないことにする。つまり図3aと同様に、津波避難施設を通り河川と平行な線を引くことで、ネットワークバッファを分割する（図3b）。ただしこの条件が適用される津波避難施設は、生成したネットワークバッファが河川・湖と重なる施設とする⁸⁾。ネットワークバッファが河川・湖と重なることは、それだけ河川・湖と津波避難施設との距離が近く、河川津波の影響を受けやすいからである。ただし、周囲を湖に囲まれた弁天島は例外とする。また、橋を渡って避難する場合も無効とするために、河川の向こう岸に生成されたネットワークバッファについては取り除くことにする。

次に図3cのように、津波避難施設が周囲に複数存在する地域では、生成したネットワークバッファ同士が重なることがある。ネットワークバッファが重なる部分には、重なった数だけ津波避難施設への選択性が生じる。この場合、本シミュレーションでは避難者はより内陸側に立地する津波避難施設へ向かうと仮定する。ただし、この場合においても津波避難施設からネットワーク距離で50 m以内の範囲に居住する避難者は、最近隣の津波避難施設へ避難するように設定する。なぜなら、居住地の目前に立地する津波避難施設を無

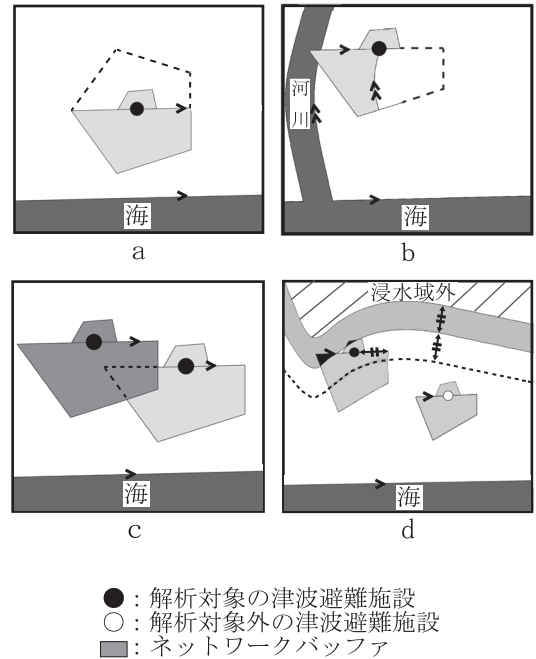


図3 避難方向の設定方法 (a, b, c) と解析対象とする津波避難施設の選定方法 (d)

視して遠くの避難先へ向かうことは現実的ではないからである。

以上より、作成されたネットワークバッファが避難者の避難元として推定される。また、このシミュレーションは最近隣に立地する津波避難施設への避難行動であり、本研究ではこれを「単ストップ・避難」と定義する。避難元の人口は、作成されたネットワークバッファ（避難元）でクリップした人口250 mメッシュを面積按分することで算出する。

最後に、解析対象とする津波避難施設を選定する。本シミュレーションを海岸付近に立地する津波避難施設へ適用した場合、収容超過した人々が浸水域外へ到達不可能であることは明白である。それに加えて、分析対象地域に立地する全ての津波避難施設に適用する場合、分析の試行回数が膨大になるため現実的な分析を行うことは難しい。

そこで、解析対象とする津波避難施設を限定する。具体的には、浸水域内もしくは微高地のために周囲を浸水域に囲まれたドーナツ型の浸水域外⁹⁾に立地し、かつ浸水域境界線と道路ノードの各交点（図8参照）から避難可能距離に基づき生成するネットワークバッファの2倍の範囲以内に立地する津波避難施設とする（図3d）。住民にとって最寄り津波避難施設がこの2倍の範囲を超えた位置に立地する場合、避難可能時間内に浸水域外へ到達することが不可能になるからである。これにより、分析対象地域に立地する夜間にも使用可能な津波避難施設220件のうち、53件が解析対象として選定された¹⁰⁾。

Ⅲ 収容超過人口の空間分布

ⅢではⅡで設定した避難方向や最大避難距離500m等の各条件に基づき、津波避難施設に対する避難者数を推計した上で収容超過人口の空間分布を考察する。

図4は、Ⅱの2で選定された津波避難施設53件に対する避難者の避難元と彼らの収容状況を示

している。53件に対する避難元の人口は、合計14,552人であった。そのうち、収容超過人口は合計6,701人であり、それを抱える津波避難施設は53件中24件みられた。したがって、津波避難施設へ到達できる人々のうち、46%が収容超過人口になることが判明した。

収容超過人口は、篠原町と高塚町の付近に集中がみられた。ここは住宅密集地域であるため、浸水域人口が多いことが影響していると考えられる。ただし、この付近には推定浸水域のなかでも標高がやや高いドーナツ型の浸水域外が存在するため、避難可能時間内に浸水域外へ到達できる人々はそこへ向かうことで、収容超過人口は減少すると考えられる。

また、入野町でも多くの収容超過人口がみられた。これは「避難者はより内陸側に立地する津波避難施設へ向かう」というシミュレーションの設定によって避難者が集中したことが要因であると考えられる。ただし、入野町にも津波避難施設のすぐ近くに浸水域外があることから、収容超過した人々の最終的な避難達成率は上がることが予想

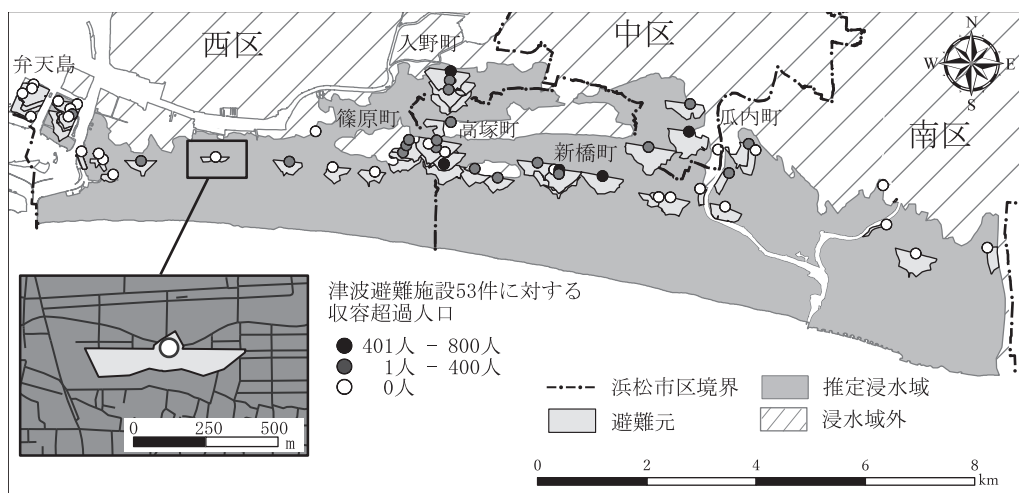


図4 解析対象の津波避難施設53件の分布とその収容状況
ネットワークバッファは道路網の影響を受けて、様々な形状になる。

される。さらにシミュレーションの設定によって、収容超過人口が発生する津波避難施設と発生しない津波避難施設が近接して存在した地域もみられた。弁天島付近では、収容超過人口が発生する津波避難施設の周囲に収容面積に余剰のある津波避難施設が立地している。同様のケースが新橋町や瓜内町周辺でも確認された。こうした地域では、住民に対して自宅から避難する際の最適な避難先を予め示すことで、計画的な収容超過人口の減少が可能になると考えられる。

一方、避難者をすべて収容することができた津波避難施設29件には、次のような特徴がみられた。まず、29件の平均収容可能面積は754㎡と広く、最小でも150㎡であった。次に、病院や学校などの公共施設が13件含まれていた。他には福祉施設が7件含まれており、その7件の平均収容可能面積は794㎡と非常に大きかった。また、全29件のうち16件が避難場所に屋上を指定しており、広い避難スペースを確保していることがわかった。

図5は、収容超過した津波避難施設24件に対し、意図的に65歳以上の人々を優先的に収容した場合の、彼らの収容状況を示している。収容超

過した全24件のうち、12件にて65歳以上の人々を全員収容できることが判明した。一方で、残りの12件では65歳以上の人々が収容超過人口に含まれることが判明した。彼らは避難困難者であるにもかかわらず、避難を達成するためには他の避難先まで移動しなければならない。これら12件はほとんどが5階建ての集合住宅であり、施設内の指定避難場所は1件を除いて3階以上の通路や階段踊り場であった。つまり、収容可能面積が他の建物形態と比べて非常に小さいのが特徴である(図6)。実際、11件の平均収容可能面積は38㎡であった。一方、除かれた1件の収容可能面積は88㎡であった。この施設は唯一屋上を避難場所として指定しており、そのため上記と比較して収容可能面積が大きかったと考えられる。

IV 収容超過人口の空間的再配分

IVでは、収容超過人口を抱える津波避難施設24件の避難元の中で、他の避難先へ到達が可能な範囲とその範囲に居住する人口を推定する。すなわち、「どこに住む人がどこへ」避難すれば収容超過した人々がより多く避難を達成できるのかを考察する。なお、分析の手順を図7に示す。

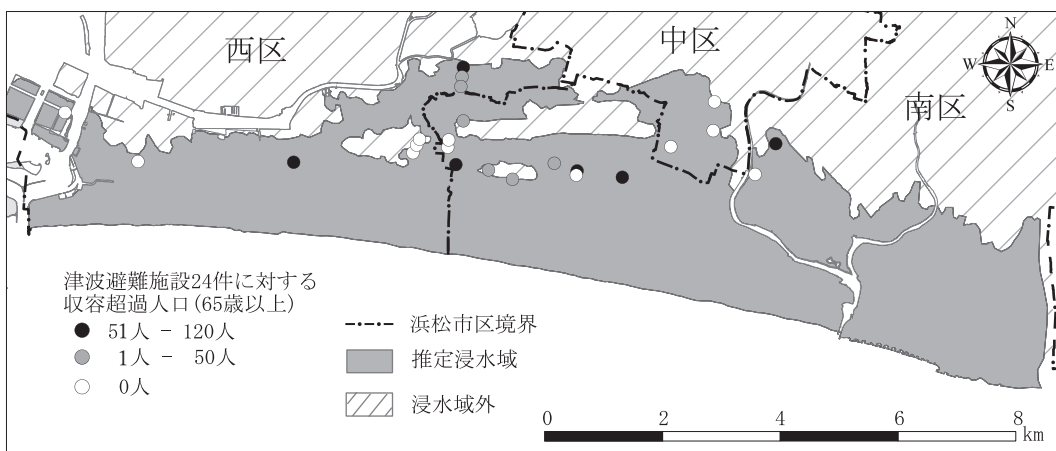


図5 収容超過した津波避難施設24件の分布とその65歳以上人口の収容状況



図6 分析対象地域における集合住宅の一例
(2018年3月撮影)

この津波避難施設では、3階から5階の通路が避難場所として指定されている。

1. 浸水域外への2ストップ・避難

Ⅳの1, 2では、最寄り津波避難施設が収容上限に達していた場合に対する、その施設から他の避難先への到達可能性を分析する。本研究ではこの再移動を「2ストップ・避難」と定義する。

Ⅳの1では、避難先が浸水域外の場合について分析する。その手法を図8を用いて説明する。まず、対象とする津波避難施設と、それよりも内陸側かつ最近隣に位置する浸水域境界線と道路ノードの交点とのネットワーク距離 m を測定する。次に、対象とする津波避難施設の避難可能距離から測定された道路距離を引くことで、距離 n を算出する。最後に、算出し距離 n に基づくネットワークバッファを津波避難施設から生成することで、収容超過した津波避難施設に対する避難元のうち、その津波避難施設を経由¹¹⁾してから浸水域外へ避難できる範囲を推定する。

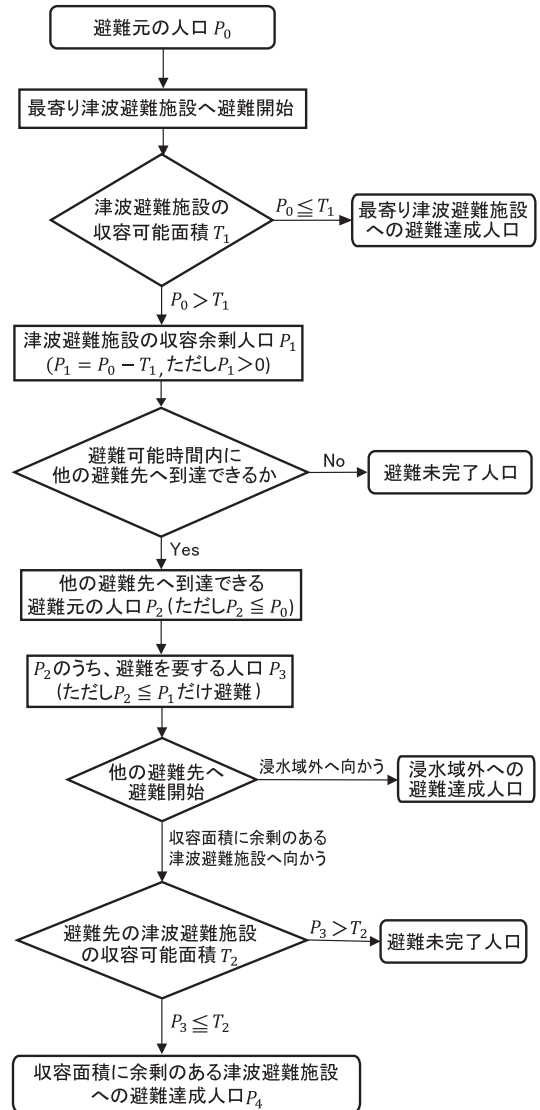
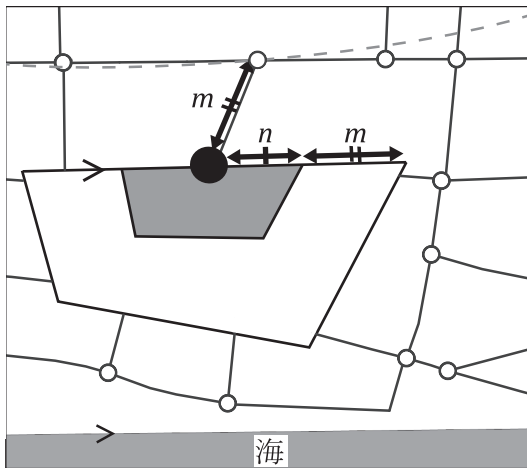


図7 Ⅳの分析のフローチャート

「他の避難先へ避難開始」にて、避難開始場所はⅣの1, 2が最寄り津波避難施設、Ⅳの3, 4が他の避難先へ到達できる避難元である。

図9は、避難可能時間内に浸水域外へ到達できる範囲を示している。合計15件の津波避難施設にて範囲が推定された。この範囲に居住する人々¹²⁾であれば、単ストップ・避難の避難先である津波避難施設が収容超過した場合でも、そこから避難

可能時間内に浸水域外へ到達できる。つまり、この範囲以外に居住する人々が津波避難施設へ避難し、この範囲内に居住する人々が浸水域外へ向か



- : 道路ノード
- : 道路
- : 浸水域境界線
- : 収容上限に達した津波避難施設
- : 収容上限に達した津波避難施設に対する避難元
- : 収容上限に達した津波避難施設を経由してから他の避難先へ到達することができる範囲

図8 2ストップ・避難の概念図

例) 避難先への避難可能距離が $l = m + n$ の場合。

うことで、収容超過人口を減らすことができる。15件の津波避難施設の分布をみると、いずれも津波避難施設と非浸水域に近い位置にあることがわかった。

一方で、収容超過人口を抱える24件のうち、9件からのネットワークバッファは浸水域外からのネットワークバッファと重ならなかった。これらの空間分布の特徴として、津波避難施設と浸水域外の距離が離れていたことが挙げられる。

推定された15の範囲の人口を推計した結果、収容超過した津波避難施設は24件から18件に減少することが判明した。収容超過人口を解消することができた6件(図中○印)のうち3件は、既に浸水域外に立地していた。また、残りの3件に対する浸水域外からの平均道路距離は124mであったことから、浸水域外への近接性が比較的良好な地域にてこの避難行動が成立したと考えられる。

2. 収容面積に余剰のある他の津波避難施設への2ストップ・避難

前節の手法を、本節では道路ノードに代わり収

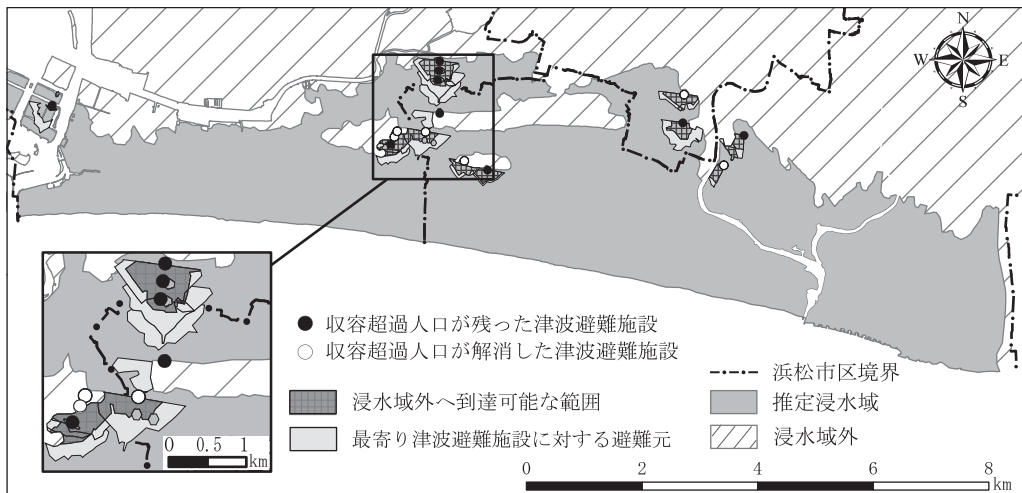


図9 2ストップ・避難によって浸水域外へ到達できる範囲

容面積に余剰のある津波避難施設を用いることで2ストップ・避難を分析する。

図10は、2ストップ・避難によって収容面積に余剰のある津波避難施設へ到達できる範囲を示している。合計4つの範囲が推定された。その分布は、浸水域外への2ストップ・避難（図9）の場合よりも浸水域外までの距離が遠く、また収容面積に余剰のある津波避難施設の近隣にみられた。

推定された範囲の人口を推計した結果、収容超過した津波避難施設は24件から23件に減少した。収容超過人口を解消することができた1件は、避難先までの距離が近かった。しかし、避難先までの距離が近いにもかかわらず収容超過人口を解消できなかった津波避難施設も存在した。その理由として、避難先の残り収容可能面積が避難者に対して足りなかったことが挙げられる。

3. 浸水域外への最適な単ストップ・避難

Ⅳの1, 2では、最寄り津波避難施設が収容超過のため避難が不可能になった人々に対して、そこから他の避難先への到達可能性を分析した。Ⅳ

の3, 4では、単ストップ・避難で収容超過人口が発生した最寄り津波避難施設をあらかじめ避け、避難元から他の避難先へ直接的に避難した場合の到達可能性を分析する。これにより、はじめから最適な避難が行われた場合では、Ⅳの1, 2と比べて収容超過人口がどれだけ減少するのかを明らかにする。本研究ではこの避難行動を「最適な単ストップ・避難」¹³⁾と定義する。

Ⅳの3では、避難先が浸水域外の場合を分析する。分析手法は次の通りである。まず、津波の海岸への到達時間および浸水域境界線と道路ノードとの各交点までの浸水時間の和から避難準備時間を引くことで、浸水域外への避難可能時間を算出する。次に、浸水域境界線と道路ノードの各交点から、算出した避難可能時間に基づくネットワークバッファを生成する。以上より、このネットワークバッファと、収容超過した津波避難施設24件から生成した避難可能距離に基づくネットワークバッファの重なる範囲が、最適な単ストップ・避難によって浸水域外へ到達できる人々の避難元として推定される。ただし、推定された範囲

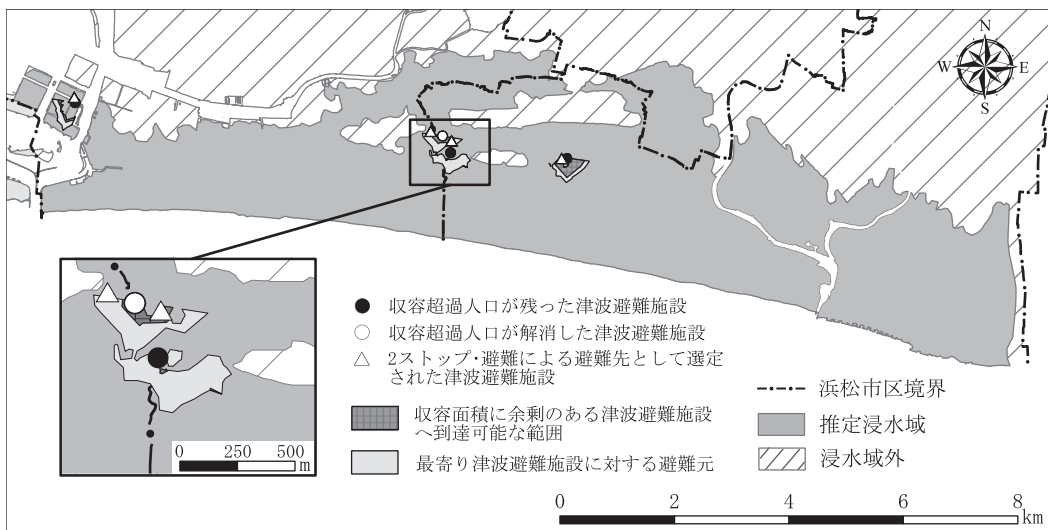


図10 2ストップ・避難によって収容面積に余剰のある津波避難施設へ到達できる範囲

の位置によって南下および河川方向へ向かう避難行動が生じた場合は、その範囲を取り除く。

図11は、最適な単ストップ・避難によって浸水域外へ到達できる範囲を示している。合計19の範囲が推定された。浸水域外への2ストップ・避難（図9）と比べると推定された避難元の数はいつ増加し、総面積は約2倍であった。増加した4つの範囲の分布は、ドーナツ型の浸水域外が存在する地域の周辺にみられた。この浸水域外は、他の浸水域外よりも海岸に近い位置にある。そのため、避難元との距離が比較的近くなることから、範囲の数や面積が増加したと考えられる。

推定された範囲の人口を推計した結果、収容超過した津波避難施設は24件から12件に減少することが判明した。収容超過人口を解消することができた12件はいずれも浸水域外から200m（徒歩約5分）未満の範囲に立地していた。一方、浸水域外からのネットワークバッファと重なったにもかかわらず収容超過人口を解消できなかった7件は、浸水域外までの平均距離が390m（徒歩約11分）であった。また、これら7件の特徴として平

均収容可能面積は58㎡であり、7件中6件が集合住宅であったことが挙げられる。残りの1件は企業の事業所建築物であり、収容可能面積は225㎡であった。この企業のネットワークバッファでは東側に人口が集中しているものの、浸水域外からのネットワークバッファが重なるのは西側であった。ここには畑が分布しており、そのため浸水域外へ到達できた人数は少なく、収容超過人口が解消できなかったと考えられる。

4. 収容面積に余剰のある津波避難施設への最適な単ストップ・避難

前節の手法を、本節では道路ノードに代わり収容面積に余剰のある津波避難施設を用いることで最適な単ストップ・避難を分析する。

図12は、避難可能時間内に収容面積に余剰のある津波避難施設へ到達できる範囲を示している。合計7つの範囲が推定された。収容面積に余剰のある津波避難施設への2ストップ・避難（図10）と比べると、推定された範囲の数は3つ増加し、その総面積は約3倍であった。増加した3つ

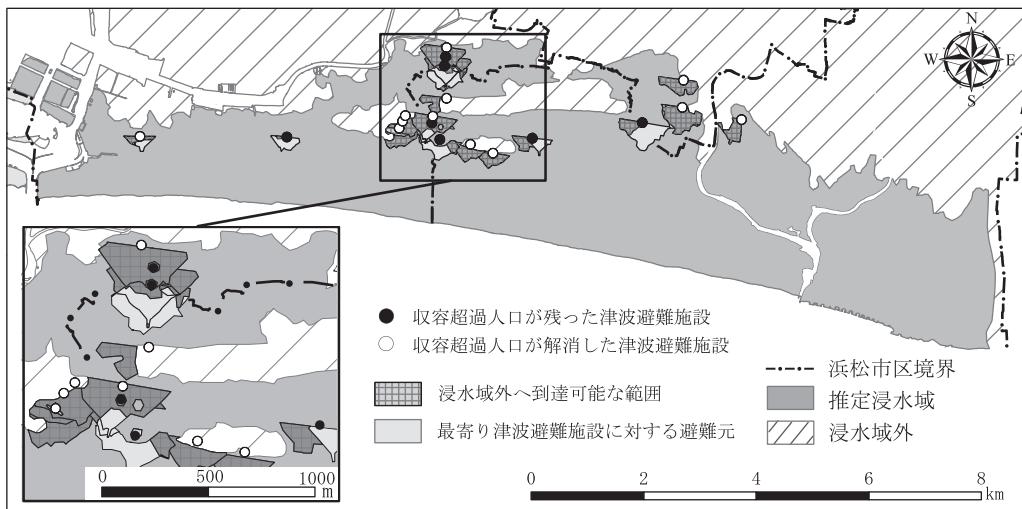


図11 最適な単ストップ・避難によって浸水域外へ到達できる範囲

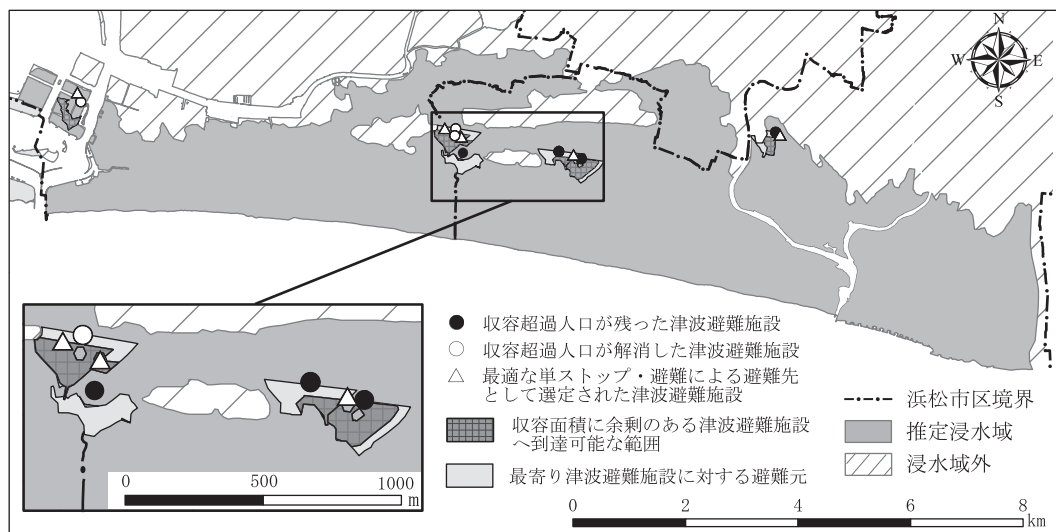


図12 最適な単ストップ・避難によって収容面積に余剰のある津波避難施設へ到達できる範囲

の範囲の分布は、概ねⅣの2で推定した範囲の周辺にみられた。これは、津波避難施設が近隣に多く立地している地域ほど収容超過した人々の到達可能性が高いことを意味している。また、7つの範囲に対して避難先である収容面積に余剰のある津波避難施設は5件存在した。したがって、この5件のうち2件は、2つの範囲から収容超過した人々が避難してくることになる。

推定された範囲の人口を推計した結果、彼らが収容面積に余剰のある津波避難施設へ直接的に避難することで、収容超過した津波避難施設は24件から21件に減少することが判明した。収容超過人口を解消することができた3件は、収容可能面積にかなりの余裕があった。一方、収容超過人口を解消できなかった施設が4件存在したのは、推定された範囲が小さすぎたために避難可能時間内に到達できる人数が僅かであったことや、避難先の収容可能面積が足りなかったこと、また推定された範囲から避難先までの距離がはなれていたことが要因として考えられる。実際、2つの範囲から避難者を受け入れた津波避難施設2件のうち

1件は、避難者を全て受け入れきれていなかった。

5. 各避難行動に対する避難先への到達可能性の比較

この節ではⅣの1から4の結果を踏まえ、各避難行動に対する避難先への到達可能性を比較する。

表1は、2ストップ・避難および最適な単ストップ・避難分析によって算出された避難達成人口を示している。避難行動・避難先別にみると、最も避難達成人口が多かったのは浸水域外への最適な単ストップ・避難であった。この避難を行った場合、避難元の総人口14,552人に対する合計避難達成人口は、単ストップ・避難による合計避難達成人口7,851人（54%）から12,278人（84%）に増加することが判明した。

次に避難達成人口が多かった避難行動は浸水域外への2ストップ・避難であり、避難元の総人口のうち74%が避難を達成できることがわかった。続いて、収容面積に余剰のある津波避難施設への最適な単ストップ・避難では60%、収容面積に

表1 避難達成人口の推計結果

避難行動	避難先	合計避難達成人口 ¹⁾	避難行動別の ²⁾ 合計避難達成人口
単ストップ・避難	最寄り津波避難施設	7,851 (54%)	7,851 (54%)
2ストップ・避難	浸水域外	10,740 (74%)	10,901 (75%)
2ストップ・避難	津波避難施設	8,060 (55%)	
最適な単ストップ・避難	浸水域外	12,278 (84%)	12,512 (86%)
最適な単ストップ・避難	津波避難施設	8,664 (60%)	

1) カッコ内は、ネットワークパッファ内における全体の居住人数に対する割合を示す。

2) 「2ストップ・避難」および「最適な単ストップ・避難」における合計避難達成人口は、避難先ごとに推定した避難元の範囲の共通部分を推計した後、各避難先の合計避難達成人口の和から減算することで算出した。

余剰のある津波避難施設への2ストップ・避難では55%が避難を達成できることがわかった。

したがって、避難行動としては最適な単ストップ・避難の方が2ストップ・避難よりも避難達成率は11%高く、避難先としては浸水域外の方が収容面積に余剰のある津波避難施設よりも収容超過人口の再配分に対する可能性が最大24%高いことが明らかになった。その理由として、最適な単ストップ・避難では、あらかじめ収容超過する最寄り津波避難施設を避けるように設定したことで、避難可能時間を最大限活用できたことが挙げられる。また避難先に関しては、浸水域外には収容上限が存在しないこと、また避難先としての機会数（浸水域境界線と交差する道路ノード）が多いことが理由として考えられる。

V おわりに

巨大地震・津波を想定した近年の津波防災対策を踏まえて、本研究では最寄り津波避難施設にて生じた収容超過人口の最小化について分析した。分析にあたり、二つの避難行動を設定した。一つ目は最寄り津波避難施設へ到達した時点で収容状況を把握し、そこから他の避難先へ再移動を行う「2ストップ・避難」、そして二つ目は最寄り津波避難施設の収容状況をあらかじめ把握した上で、行政などの第三者の視点からみて最適と思われる

避難先へ移動する「最適な単ストップ・避難」である。

各避難行動を比較した結果、収容超過人口を浸水域外および収容面積に余剰のある津波避難施設へ再配分することで、浜松市沿岸地域における避難達成率は最大32%増加することが明らかになった。また避難先の機会数や津波避難施設の規模の観点から、浸水域外への避難の方が収容面積に余剰のある津波避難施設よりも収容超過人口の再配分に対する可能性が高いことが明らかになった。一方で、収容面積に余剰のある津波避難施設は、とりわけ避難可能時間内に浸水域外へ到達できない避難者にとって有用であることがわかった。以上より、津波避難の分析では、最寄り津波避難施設への避難を前提とするのではなく、津波の到達時間や代替可能な避難先を複合的に考慮し、避難行動を時空間的に検討することが効果的である。

一方で、本研究の避難行動には手法的な制約による課題が幾つか残された。まず、水域方向への避難距離に対する妥当性の検証が求められる。次に、本研究では最大避難距離が500mの場合を検討しているため、500m以内に避難先が存在しない住民の避難可能性について検討が必要である。これらに関して、年齢や健康状態などを属性に持つ地理空間情報を活用し、避難者ごとに避難距離

を設定するといった分析アプローチが考えられる。また2ストップ・避難や最適な単ストップ・避難では、収容超過人口を最小化するには最寄り津波避難施設に近い範囲に住む人々がより長距離を移動しなければならない。この避難行動の有効性を検証するためには、住民による避難先の選定に関する意識調査が必要である。さらに、本研究の成果を現地の避難計画に直接適用する場合、住民に対して「居住地以外の場所から避難する際にも常に決められた避難先へ向かわなければいけない」という誤認を生じさせる危険性がある。したがって、住民の災害リスク認知に対する考慮も求められる。以上より、今後の避難行動に関する分析では本研究で用いたGISによる定量的な分析に加えて、フィールドワークに基づく定性的な分析を組み合わせることが重要である。

[付記]

本研究を進めるにあたり、筑波大学生命環境系の村山祐司先生と森本健弘先生をはじめ、諸先生方から貴重なご助言をいただきました。また、匿名の査読者と編集委員の方々には貴重なご指摘を賜りました。ここに記して、感謝申し上げます。

注

- 1) マルチエージェントシステムとは、個々の情報処理を記述することのできるエージェントモデルを利用してシミュレーションを実行するシステムである。そのためこのシステムを利用すると、エージェントごとに千差万別な避難行動をシミュレーションすることが可能になる。
- 2) 使用した浸水域データは、静岡県危機情報課によって2016年11月に作成されたものである。本研究では可視化の際に見やすくなるよう、そのデータを一部改変して使用した。
- 3) 2015年国勢調査によると、浜松市の昼夜間人口比率は南区が97.3%、西区が90.2%、中区が106.8%である。中区のみ昼間人口が夜間人口を上回るものの、分析対象とした浜松市沿岸地域はそのほとんどを南区と西区が占めるため、夜間の発災を想

定した。

- 4) 分析対象地域におけるメッシュのサイズは、縦231.1m、横289.2m程度である。
- 5) 気象庁HP (<https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/tsunami/generation.html>, 最終閲覧日: 2018年1月23日) による。
- 6) 回帰式(1)の決定係数は $R^2 = 0.5454$ である。本研究では浸水速度を算出するのが目的ではないため、分析を簡潔にするために回帰式(1)を使用した。なお、ここで用いた「浸水域外との境界線」は、対象とした浸水域のうち海岸から最も遠い地点とした。
- 7) 海岸線のラインデータを北方向に平行移動させることで、ネットワークバッファを分割した。
- 8) 浜松市(2014)によると、分析対象地域の北西部を流れる河川(新川)における津波の影響はほとんどみられなかった。
- 9) ドーナツ型の浸水域外は、周囲の浸水深より標高が1m以上高い範囲のみを避難先とした。
- 10) 解析対象とした津波避難施設は、すべて浜松市の指定を受けている。指定の基準は、3階建て以上のRC造またはSRC造の建物かつ、1981年6月以降の新耐震基準を満たすことである。また各津波避難施設の避難面積は、浜松市HPを参照した。<http://www.city.hamamatsu.shizuoka.jp/kiki/disaster/bousai/building/index.html> (最終閲覧日: 2018年1月23日)
- 11) ただし、避難者は津波避難施設に到達した時点でそれが収容上限に達していると理解するものとし、そこでの滞在時間は考慮しない。
- 12) 彼らの方が津波避難施設の近くに居住しているため、先に津波避難施設へ避難することができる。しかし、本研究では収容超過人口の最小化を目的としているため、彼らはより遠くに居住している避難者のために収容可能性を譲るものとした。
- 13) 本研究で設定した最適な単ストップ・避難であるが、「最適」とは対象となる避難者からみたものではなく、収容超過人口を最小化するための第三者的視点からみたものである。

文 献

- 安藤和敏(2014): 浜松市南部における津波避難ビル配置のボロノイ図を用いた分析. オペレーションズ・リサーチ, **59**, 330-335.
- 小川芳樹・秋山祐樹・金杉 洋・柴崎亮介(2018): ジオビッグデータを用いた多様なシナリオに基づく南海トラフ地震津波の人的被害推定-高知市周辺を対象として-. Ejournal GEO, **13**, 140-155.

- 片田敏孝・桑沢敬行 (2006) : 津波にかかわる危機管理と防災教育のための津波災害総合シナリオ・シミュレータの開発. 土木学会論文集D, **62**, 250-261.
- 北島理司 (2014) : ネットワーク解析を用いた避難所配置に関する研究－和歌山県田辺市を事例として－. 日本都市学会年報, **45**, 356-360.
- 高阪宏行 (2000) : GISを利用した火砕流の被害予測と避難・救援計画－浅間山南斜面を事例として－. 地理学評論, **73**, 483-497.
- 酒井莉奈・寺町雄太・猪八重拓郎 (2016) : 水害リスクからみた人口分布と避難施設の配置に関する基礎的研究. 低平地研究, **25**, 33-37.
- 佐藤龍治・平岡透 (2014) : 津波侵入方向を考慮した避難場所選定のための一手法. 写真測量とリモートセンシング, **53**, 83-86.
- 佐野浩彬 (2014) : 浜松市沿岸部における津波避難施設の圏域分析－避難に影響する環境条件に注目して－. 中部大学大学院国際人間学研究科修士論文.
- 静岡県 (2013) : 静岡県第4次地震被害想定 (第一次報告).
- 消防庁 (2013) : 津波避難対策推進マニュアル検討会報告書.
- 竹内光生・近藤光男 (2002) : 地震津波発生時の避難場所の選定に関する研究－須崎市を事例として－. 土木計画学研究・論文集, **19**, 297-304.
- 田中耕市・駒木伸比古・貝沼恵美 (2016) : 地理的条件からみた津波避難のアクセシビリティ評価－徳島県沿岸部を事例として－. GIS－理論と応用, **24**, 97-103.
- 内閣府中央防災会議 (2012) : 南海トラフの巨大地震による震度分布・津波高について (第一次報告).
- 内閣府中央防災会議 (2013) : 南海トラフ巨大地震対策について (最終報告).
- 橋本雄一 (2015) : ネットワークボロノイの領域分割による積雪期の津波避難圏に関する空間分析. 橋本雄一編『QGISの基本と防災活用』135-144, 古今書院.
- 浜松市 (2014) : 浜松市地震防災マップ.
- 浜松市 (2015) : 浜松市津波避難計画.
- 藤岡正樹・石橋健一・梶 秀樹・塚越 功 (2002) : 津波避難対策のマルチエージェントモデルによる評価. 日本建築学会計画系論文集, **67**, 231-236.
- 村上啓介・前原翔太・椎葉倫久 (2015) : 浸水域の時間的広がりや地盤の液状化を考慮した津波避難困難エリアの抽出に関する研究. 土木学会論文集B3 (海洋開発), **71**, I_707-I_712.

An Analysis of Reachability to Tsunami Evacuation Destinations in Hamamatsu Coastal Area

IWAI Yuki

Graduate Student, University of Tsukuba

Keywords: Tsunami, Evacuation, Megathrust Earthquake of Nankai Trough, Hamamatsu City, GIS