

卒業研究

津波に対する内陸方向退避を考慮した
避難計画の定量的評価

文教大学 経営学部経営学科
根本研究室
土屋慧介

概要

2011年3月11日東北地方太平洋沖地震が発生し、津波に注目が集まった。その経験を踏まえ、地方自治体では津波に対する避難計画を策定している。年間400万人もの観光客が訪れる藤沢市も例外ではなく、藤沢市により避難計画が策定されているが、それとは別に同地区における津波避難に関する研究にも取り組まれている。それらの研究のうち檜山ら(2012)によって、避難時間の視点から津波避難時の避難施設として指定されている海岸方向にもある津波避難ビルへの避難の有効性がシミュレーションにより示された。しかし、津波避難時に海岸方向への避難を躊躇する人は多いだろう。そこで、津波避難の際に内陸方向への避難を優先した場合の避難モデルと既存研究モデルで定量的比較を試みた。具体的には藤沢市片瀬西浜・鵜沼地区の人口データと津波浸水域データ、津波避難施設の座標データを利用し、津波避難ビルまでの移動距離を小さくする数理モデルを考案し、その解を導出した。その結果、既存研究モデルと比較して内陸方向のみへの津波避難モデルでは平均移動距離は40m、最大移動距離は502m長くなる結果となった。他にも複数のモデルを考慮したが、いずれも海岸方向の津波避難ビルを利用する既存研究モデル以上に良い結果を得ることはできなかった。そこで、新たに内陸部に津波避難施設を8棟建設した場合のモデルを検討してみた。その結果、平均移動距離12m、最大移動距離は16m短くすることができた。結果として、津波避難の際、海岸付近にある津波避難ビルへの避難は避けられないが、内陸部に津波避難施設を建設することで自然な内陸方向への避難を効果的に実現可能であることを明らかにした。

目次

- 1 はじめに
- 2 藤沢市津波避難計画の紹介
- 3 先行研究で用いられた設定の紹介
- 4 藤沢市における津波避難ビルへの避難設定
- 5 津波避難ビル選択モデルの設計
- 6 内陸方向への避難制限の影響
- 7 津波避難タワーの増設効果の検証
- 8 おわりに

謝辞

参考文献

1 はじめに

2011年3月11日14時46分にマグニチュード9.0の東北地方太平洋沖地震が発生した。この地震によって発生した津波によって、東北地方の太平洋側では多くの死者・行方不明者を出し、甚大な被害を受けた。その経験を踏まえ、国や都道府県、市町村では防災に対する計画を策定している。

防災の中の津波避難に対する計画のひとつに「内閣府の津波避難ビル等に係るガイドライン」¹がある。ここにある津波避難ビルとは、地域住民等が一時避難・退避等の避難行動を行うための施設(人工物に限る)であり、様々な自治体が津波による被害を減らすために津波避難ビルの指定数を増やす政策を実施している。

この政策に力を入れている自治体のひとつに神奈川県藤沢市がある。藤沢市のうち海岸部は津波による被害が予測されている地域である。特に、海岸に面している藤沢市片瀬西浜・鶴沼地区は、津波による浸水域が広大になる地域とされている。

内閣府の防災情報のホームページによると、2018年8月時点で藤沢市では291棟が津波避難ビルに指定されている。これは神奈川県内の市町村で最も多く、神奈川県にある津波避難ビルの28%が藤沢市にあることになる。また、2011年10月の時点で指定されていた津波避難ビルの棟数は183棟であったが、2018年までの7年間で108棟追加指定されている。このことから、藤沢市は津波避難に対する意識が高い地域であると推測される。

このような背景から藤沢市を対象とした津波避難に対するいくつかの研究がなされてきた。その研究のうち檜山らによって、避難時間の視点から津波避難時の避難施設として指定されている津波避難ビルへの避難の有効性が示された[1]。また、関らの研究では、地域住民のみの避難であれば既存の津波避難施設で収容可能であることを明らかにしている[2]。なお、以降は檜山らと関らの研究を「先行研究」と呼ぶこととする。ところで、先行研究では内陸部の住民が海岸方向に位置する津波避難ビルを指定される状況を許容している。しかし、津波襲来時に海岸方向にある津波避難ビルへの避難を躊躇する人は多いだろう。

そこで、津波避難の際、先行研究の設定通りである避難方向を制限しないモデルと避難方向を内陸方向に制限したモデルではどのような差が出るのかについて定量的比較を試みることにした。具体的には藤沢市の人口データと津波浸水域データ、津波避難ビルの座標データ、津波避難ビルの収容人数データを利用し、津波避難ビルまでの移動距離を小さくする数理モデルを考案し、住民の移動距離の導出を試みた。その結果、津波避難の際、海岸付近にある津波避難ビルへの避難は避けられないが、内陸部に津波避難施設を建設することで自然な内陸方向への避難を効果的に実現可能であることを明らかにした。

本論文の構成として、2節で住民が避難する設定の基盤となる藤沢市の津波避難計画に

¹ 内閣府の津波避難ビル等に係るガイドライン

<http://www.bousai.go.jp/kohou/oshirase/h17/pdf/050323shiryou2.pdf>

ついて説明する。3 節では檜山らと関らの研究で用いられた設定を紹介する。4 節では避難方向を制限する本研究の津波避難の設定を提案し、5 節で津波避難のモデルの最適解を導出する数理モデルの提案をする。6 節と 7 節で導出された解を示し考察を行う。最後に、7 節でまとめと今後の課題を述べる。

2 藤沢市津波避難計画の紹介

藤沢市は神奈川県中央南部に位置し、相模湾に面しており、おおむね平たんな地形をしている。海岸部には江ノ島や新江ノ島水族館、海水浴場といった観光地があり、平成 30 年度には 1,840 万人以上²の観光客が訪れている。国内有数の観光地であり、津波が発生した場合、甚大な被害が予測される藤沢市では、津波避難の対策として「藤沢市津波避難計画」を策定している。ここではまず住民の避難計画を考えるときの基盤として「藤沢市津波避難計画」³について説明していく。

藤沢市では地震に伴う津波が発生した場合、一時的または緊急に避難するための高台・建築物を津波一時避難場所・津波避難ビルと指定している。津波避難ビルは、原則として「昭和 56 年の建築基準法施行令改正により導入された新耐震基準に適合している、若しくは耐震診断や耐震改修により耐震安全性が確認されていること」、「RC 造（鉄筋コンクリート造）又は SRC 造（鉄骨鉄筋コンクリート造）であること」、「建築物に 3 階以上の部分（共同住宅である場合は共有の部分）があること」などの要件を満たしているものを指定するとされている。

藤沢市は、津波発生時の避難のあり方として、一刻も早く避難対象地域の外へ避難する、または、避難対象地域内の津波一時避難場所・避難ビルに避難するとしている。避難対象地域とは、津波の浸水被害が及ぶ地域のことである。図 1 では藤沢市の津波浸水域と津波避難ビルを表している。色で塗りつぶされている地域を津波浸水域とし、丸い点を津波避難ビルとしている。

そのほかに、津波避難時に留意する項目として、「原則として津波避難経路に橋りょうは含めない」、「津波の進行方向と同方向に避難する」、「避難方法は原則として徒歩によるものとする」などが挙げられている。よって、藤沢市は避難行動を行う際、徒歩で橋を渡らずに内陸方向へ避難することを推奨している。

²藤沢市

<https://www.city.fujisawa.kanagawa.jp/kankou/press/2018kankoukyaku.html>

³藤沢市津波避難計画

https://www.city.fujisawa.kanagawa.jp/bousai/bosai/bosai/taisaku/documents/tu_namihin_ankeikaku.pdf

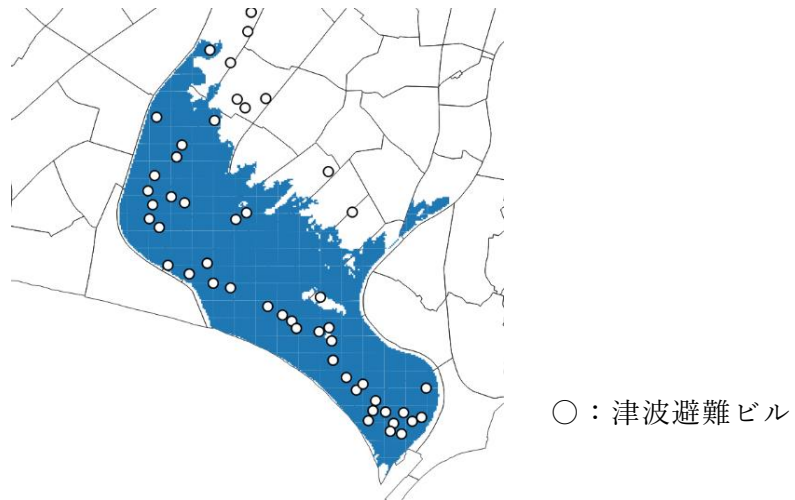


図1 藤沢市の津波浸水域と津波避難ビルの所在

3 先行研究で用いられた設定の紹介

檜山らによる「藤沢市片瀬西浜地区における住民の津波避難ポテンシャルと津波避難ビル利用の効果」[1]では現地調査を実施し、地域住民が、津波襲来時は内陸方向へ避難する意識があることを明らかにしたうえで、津波襲来時に海岸方向にある津波避難ビルまたは、内陸方向への避難どちらが望ましいのかについて検証を実施している。その結果、既存の津波避難ビルを利用することによって避難完了度が大幅に高くなり、津波避難ビルを有効に利用することが重要であるとしている。

しかし、この研究では津波避難ビルの収容人数を考慮していないため、津波避難ビルの有効性を証明するには情報が乏しい。関らによる「藤沢市片瀬西浜・鶴沼地区における津波避難ビル収容能力を考慮した津波避難計画」[2]では、津波避難ビルとして指定されている建物だけでなく、ゼンリン住宅地図と Google Map を利用し3階以上の建物の抽出を行い、個人住宅と木造建築を除いた建物も津波避難ビルとして加え、収容人数を考慮した際の津波避難を検証している。その結果、地域住民のみの避難であれば既存の津波避難施設で収容可能であることが明らかになったとしている。

檜山らの研究では、津波襲来時に海岸方向にある津波避難ビルへの避難を促しているが、藤沢市の津波避難計画では内陸方向への退避を推奨しており、地域住民が避難すべき方向に矛盾が生じている。また、関らの研究において独自に追加した津波避難ビルは、藤沢市が津波避難ビルを指定する要件を十分に満たした建物と言い切ることができない。

次節では、避難方向を制限しない際の津波避難と避難方向を内陸方向に制限した際の津波避難の比較検証を行っていく。

4 藤沢市における津波避難ビルへの避難設定

前節では、先行研究の設定では海岸方向に住民が避難することを許容する点に問題があることを提起した。ここでは、避難方向を制限しない場合と避難方向を内陸方向に制限し

た場合の住民の避難の際の移動状況の比較検証を行うために、どのようにアプローチしていくかを提示する。

まず、先行研究の結果と比較をおこなうため、同じ藤沢市片瀬西浜・鵜沼地区を検証の対象とする。また、藤沢市津波避難計画において避難時に橋りょうを渡らないとしているためこの対象地域の設定は妥当である。図2の塗りつぶされている地域が対象の地区である。

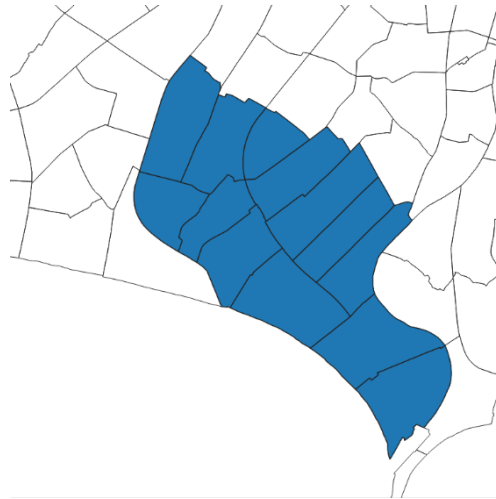


図2 藤沢市片瀬西浜・鵜沼地区

2節でも述べたが、藤沢市は神奈川県中央南部に位置し、相模湾に面しており、おおむね平坦な地形をしている。特に海岸に面している藤沢市片瀬西浜・鵜沼地区は、津波による浸水域が広くなる地域とされている。そのような地形的特徴から被害を軽減するため、津波避難ビルが同地区には多く指定されている。

次に、津波襲来時に津波による浸水被害が及ぶ地域である津波浸水域を設定する。津波浸水域は、国土数値情報⁴で公開されている各都道府県から提供された津波浸水想定データを整備したものを利用した。

津波襲来時に避難する津波避難ビルは、藤沢市津波避難計画で指定されている建物であり、藤沢市が指定する津波避難ビルの中で津波浸水域内の57棟に避難が可能とする。津波避難ビルの収容人数は藤沢市津波避難計画に公開されているデータを利用した。また、内陸方向への退避を考慮するため、津波浸水域外となる地点を津波一時避難場所とする。津波浸水域外は津波による浸水が及ばなくなる地点である。津波浸水域外となる地点よりも内陸方向へ避難を行うことで収容できる人数に限りはなくなるので、津波浸水域外は収容人数を無限大とする。

⁴ 国土数値情報 <http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/>

片瀬西浜・鶴沼地区の津波浸水域の地域住民の人口は、e-Stat 政府統計の総合窓口⁵の 250m メッシュ人口データを利用した。なお、檜山らと関らの研究では 100m メッシュの設定で実験を行っており、差異が生じることが懸念されたため、250m メッシュを地理情報ソフトウェア QGIS で 125m メッシュに細分化し、先行研究の設定との差異を小さくすることに努めた。

さらに、避難の完了度を数値的に示すため、藤沢市津波避難計画で示されている避難距離をもとに評価を行う。避難距離とは、地震が発生後から津波襲来までに避難可能な距離を表したものである。藤沢市では約 300m としており、本研究では 300m を目安に避難完了度を表す。

以上の点を踏まえ、津波浸水域を 125m メッシュに区切り、各メッシュの中心点に地域住民が居住していると想定し、津波避難ビルもしくは津波浸水域外へ避難を行うモデル考案した。図 3 は、対象地区での設定を表したものである。図 3 の色で塗りつぶされている地域を津波浸水域とし、その地点を 125m のメッシュで区切っている。津波浸水域内の丸い点を津波避難ビル 57 地点、津波浸水域外の丸い点を津波一時避難場所 25 地点としている。

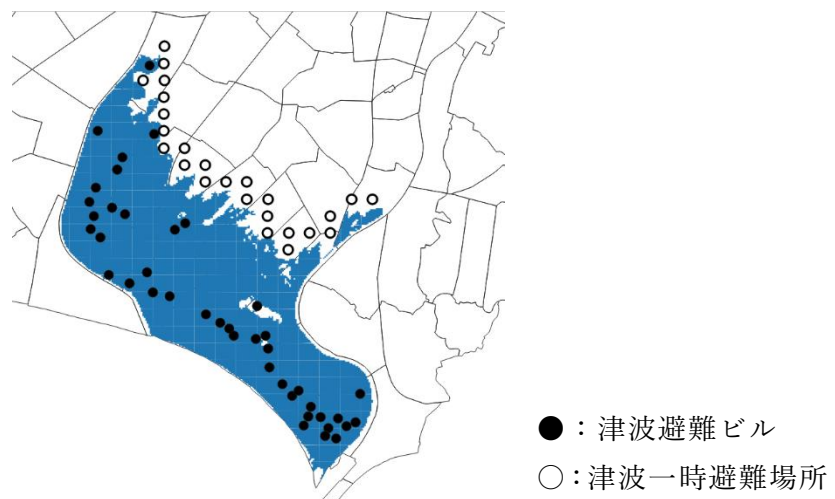


図 3 藤沢市の津波浸水域と津波避難施設

5 津波避難ビル選択モデルの設計

ここでは、前節で設定した津波避難ビルの利用において住民の移動を決定する数理モデルを設計し、その定式化を行う。まず、住民全体の平均移動距離の最小化を住民移動の基準とおく。そのため、この基準では 1 人の住民が必ずしも最短距離の津波避難ビルもしくは津波浸水域外を選択するわけではない。なお、避難する際の経路は、実際の道路ネットワークを利用することも可能だが、各メッシュの中心点から津波避難ビルもしくは津波浸

⁵ e-Stat 政府統計の総合窓口 <https://www.e-stat.go.jp/>

水域外へ避難する経路は何通りも存在する。今回の実験では、それぞれの点間の最短距離を導出する必要があるが、実際の道路ネットワークでは導出するのに膨大な時間を要してしまうことが明らかとなった。そのため、モデルの簡略化のために住民は各メッシュの中心点から津波避難ビルもしくは津波浸水域外への移動を直線距離で行うとする。

本研究では、住民が居住する 176 地点のメッシュから津波避難ビルまたは津波浸水域外への距離を地理情報ソフトウェア QGIS の距離マトリックスの機能を用いて算出した。算出後、地域住民の人口と津波避難ビルの収容人数を考慮したうえで、住民の移動距離を小さくする数理モデルの定式化を行った。そして、推理計画問題ソルバーである CPLEX を使用しその最適解を導出し、最適な津波避難場所の選択を提示した。

なお、次の 6 節の設定 2 では避難できる方向を内陸方向のみとする制約が出てくる。これは、地理情報ソフトウェア QGIS で算出した距離マトリックスの数値の中で、海岸方向に移動する距離を表している数値を無限大に書き換え、海岸方向の津波避難ビルを選択しないようにした。以下に示す定式化を行い、住民の津波避難ビル選択モデルの最適解の導出を行った。

[入力データ]

地区 i の人口 : w_i

施設 j の収容人数 : c_j

地区 i から施設 j への距離 : d_{ij}

配置する施設数 : p

[変数の設定]

地区 i の人が施設 j を利用割合 : x_{ij}

施設 j を開設 : y_j

[定式化]

$$\min. \quad \sum_{i,j} d_{ij} x_{ij}$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_j x_{ij} \geq 1 \quad (\text{地区 } i \text{ 毎に})$$

$$\sum_j w_i x_{ij} \leq c_j \quad (\text{施設 } j \text{ 毎に})$$

$$\sum_j y_j = p$$

$$x_{ij} \leq y_j \quad (\text{地区 } i \text{ と施設 } j \text{ のペア毎に})$$

$$y_j \in \{0,1\} \quad (\text{施設 } j \text{ 毎に})$$

pの大きさを変えることで配置する施設数を変化させることが可能ではあるが、今回の実験では全ての施設を利用可能とするため制限を設けていない。

6 内陸方向への避難制限の影響

ここでは、5節で示した藤沢市における住民の津波避難ビルへ選択モデルを実装して得られた結果を紹介し考察していく。

設定1 避難方向に制約を設けない

設定1では、先行研究と同じ避難方向に制約を設けない場合の住民の避難施設選択を検証した。全体の平均移動距離は162m、最大移動距離は441m、避難完了する割合は95.5%となった。この結果から、既存の津波避難ビルまたは津波浸水域外だけでは、津波襲来までに4.5%の住民の避難完了が困難であるといえる。

設定2 避難方向を内陸方向に制限

設定2では、設定1に避難できる方向は内陸方向のみという制約を加え、検証を行った。全体の平均移動距離は201m、最大移動距離は943m、避難完了する割合は82.2%となった。この結果から、海岸方向への避難を考慮しない場合では、津波襲来までに避難完了する人口は13.3%減少することが明らかとなった。

ここでは、上記の2つ設定から得られた結果をもとに、津波避難時の移動距離についての考察を行う。設定1と設定2の結果を図4にまとめて示した。

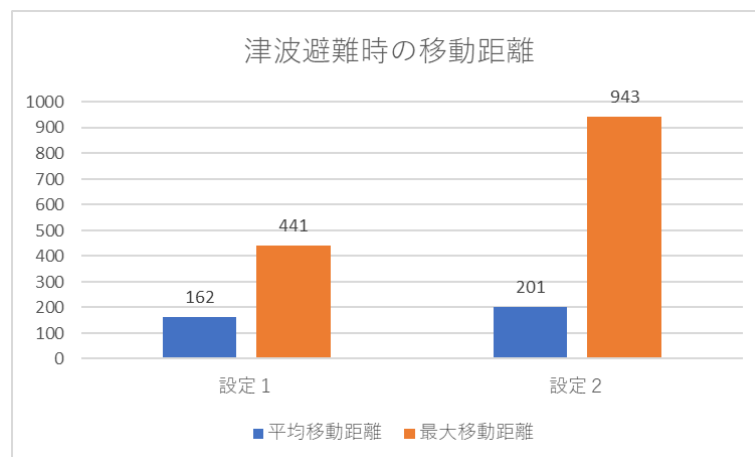


図4 設定1と設定2の比較

結果を見ると、避難方向を内陸方向に制限することで、平均移動距離は24%、最大移動距離は214%増加することが明らかとなった。このことから、片瀬西浜・鵜沼地区にお

いては海岸方向の津波避難ビルを利用しなければ避難完了度の向上に効果的でないことを明らかにした。

しかし、藤沢市津波避難計画にあるように津波襲来時に海岸方向に避難するのは不自然で、津波の進行方向と同方向に避難するのが自然といえるだろう。そこで、次節では、内陸方向に津波避難が可能な建物を設置することで避難完了度を向上させるとはできないか検証することとする。

7 津波避難タワーの増設効果の検証

前節では、避難方向を内陸方向に制限すると、住民の平均移動距離は 24%、最大移動距離は 214% 増加することを示した。ここでは、内陸方向に津波避難が可能な建物を設置することで避難完了度を向上させる効果について検証する。

具体的には、津波避難ビルとは別に「津波避難タワー」を設置することとする。津波避難タワーとは、建築物である津波避難ビルとは異なり、建築物以外の工作物とされている。工作物とは一般的に柱と梁を構造とする鉄骨造のものである。津波避難タワーは、上部に避難スペースを有しており、そこに上るための階段やスロープを有するものである。今回のモデルでは、電気興業株式会社⁶が取り扱いしている 7.5m×7.5m 幅で 100 人収容可能な津波避難タワーの利用を仮定した。

なお、設置場所の面積に応じて収容人数は比例して増減できるとした。津波避難タワーの設置場所は、Google Map のストリートビューを用いて対象地域の探索を行い、設置が可能と捉えられた地点 8 か所に設置することとした。以下の設定では津波避難ビル、津波浸水域外に加え、増設した 8 棟の津波避難タワーに避難が可能とするモデルでの検証を行った。

以下の設定では、「沿岸部」と「内陸部」それぞれに津波避難タワーを設置すると仮定して検証を行っている。前節では、海岸方向の津波避難ビルを利用することで避難完了度を向上させる効果が明らかとなった。そこで、津波襲来時により多くの住民が避難可能な施設を沿岸部に設置した場合、どのような効果をもたらすのか検証するため、「沿岸部」と「内陸部」それぞれに設置すると仮定することとした。設置した地点を沿岸部は図 5、内陸部は図 6 に示した。

⁶ 電気興業株式会社

<http://www.denkikogyo.co.jp/business/elec/product/disaster/evac.html>

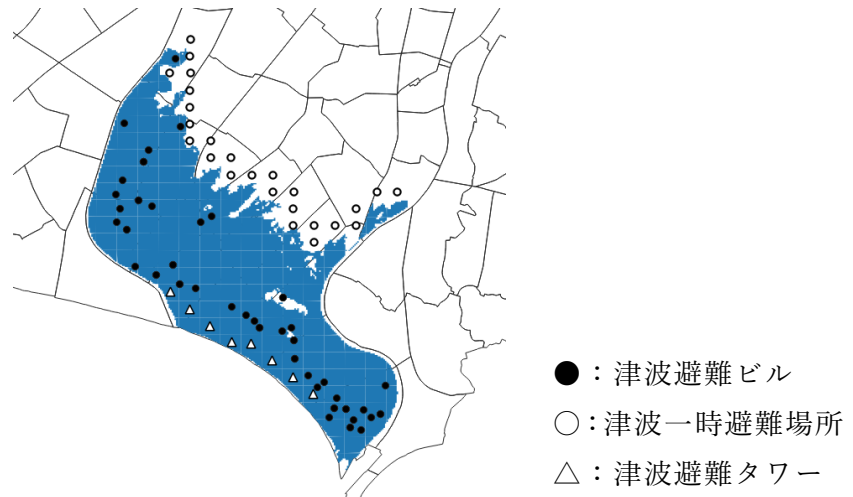


図5 沿岸部の津波避難タワー設置地点

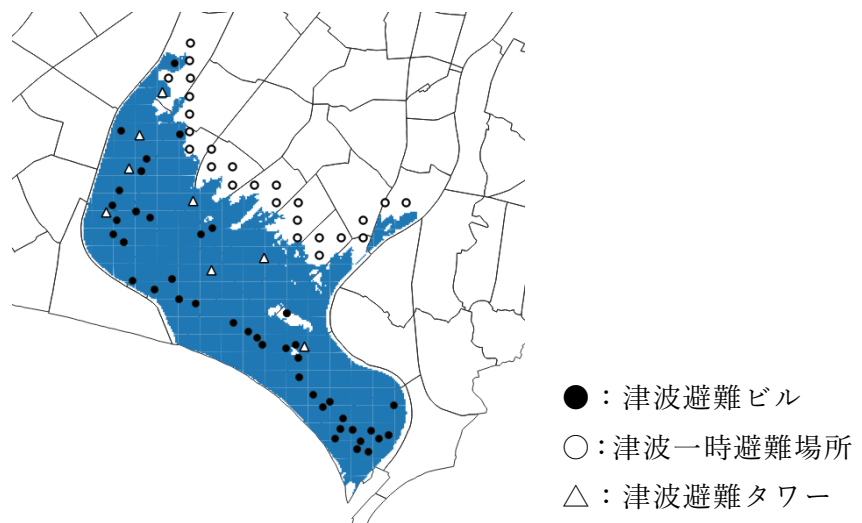


図6 内陸部の津波避難タワー設置地点

設定3 沿岸部に津波避難タワーを設置

設定3では、避難方向に制約を設けず、沿岸部に津波避難タワー8棟を設置した際の検証を行った。全体の平均移動距離は161m、最大移動距離は441m、避難完了する割合は94.9%となった。

設定4 内陸部に津波避難タワーを設置

設定4では、避難方向に制約を設けず、内陸部に津波避難タワー8棟を設置した際の検証を行った。全体の平均移動距離は150m、最大移動距離は425m、避難完了する割合は96.1%となった。

設定 5 避難方向を内陸方向に制限し、内陸部に津波避難タワー 8 棟を設置

設定 5 では、避難方向を内陸方向に制限し、内陸部に津波避難タワーを設置した際の検証を行った。全体の平均移動距離は 184m、最大移動距離は 696m、避難完了する割合は 85.4%となった。

ここでは、前節のモデルと上記の 3 つの設定の結果をもとに、津波避難時の移動距離についての考察を行う。避難方向を制限しない設定の結果を図 7、避難方向を内陸方向に制限した設定の結果を図 8 にまとめて示した。

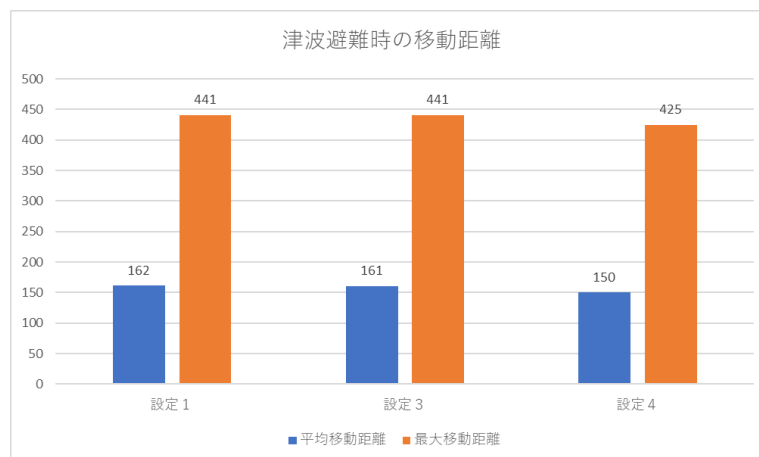


図 7 避難方向を制限しない設定の比較

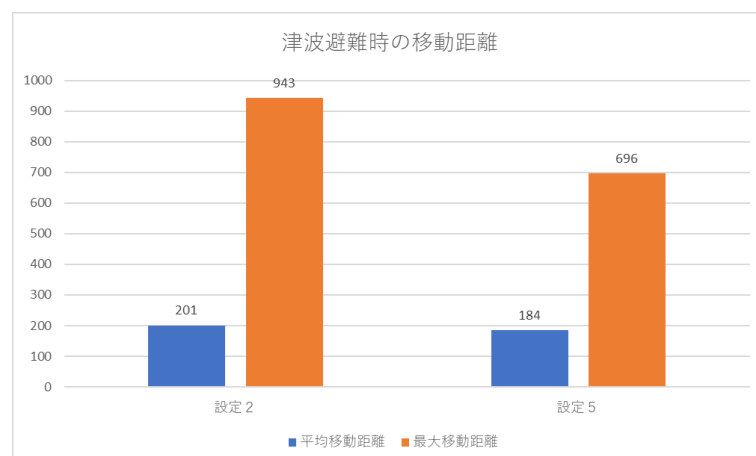


図 8 内陸方向避難の設定の比較

まず、避難方向を制限しない設定の結果を考察する。設定 1 と設定 3 を比較すると、平均移動距離は 0.6%の改善が見られたが、最大移動距離は改善が見られなかった。この結果から、地域住民の避難において、沿岸部の津波避難タワーは有益な効果をもたらさない

ことが明らかとなった。また、設定1と設定4の結果を比較すると、平均移動距離は8%、最大移動距離は3.8%の改善が見られた。この結果から、避難方向に制約を設けない場合では、内陸部に津波避難タワーを設置することで、住民の避難完了度の改善に有効な手段といえる。

次に、避難方向を内陸方向に制限した設定の結果を示す。設定2と設定5の結果を比較すると、平均移動距離は9.2%、最大移動距離は35.5%の改善が見られた。この結果から、避難方向を内陸方向に制限した場合でも、内陸部に津波避難タワーを設置することは、住民の避難完了度の改善に有効な手段といえる。

以上の3つの結果より、片瀬西浜・鶴沼地区においては沿岸部に津波避難タワーを設置することは地域住民に有益な効果をもたらすことはない。一方、内陸部に津波避難タワーを設置することは避難する方向に限らず、住民の避難完了度の改善に有益な効果をもたらすことが明らかとなった。

6 おわりに

本研究では、津波襲来時に海岸方向に避難するのは不自然で、津波の進行方向と同時方向に避難するのが自然ではないのかという疑問から退避方向の制限が避難に与える影響を把握したいと考えた。そこで、津波避難時の移動距離をもとに、5つの設定で避難完了度の検証を行った。検証の結果、避難を内陸方向に制限した設定より、避難方向を制限しない設定の避難完了度のほうが高く、先行研究の主張が正しかったことを裏付ける結果となった。ただし、避難方向を制限する場合もしない場合も、海岸部ではなく内陸部に津波避難タワーを設置することで避難完了度を向上させることができることが明らかとなった。結果として、津波避難の際、海岸付近にある津波避難ビルへの避難は避けられないが、内陸部に津波避難施設を建設することで自然な内陸方向への避難を効果的に実現可能であることを明らかにした。現実には空き空間の多さから海岸部に津波避難タワーの設置がされることが多いように見受けられるが、内陸部への設置が望まれる。

ところで、本研究では津波避難タワーを実際に設置可能か検証するまでに至っていない。住宅地が密集している片瀬西浜・鶴沼地区の内陸部に津波避難タワーを設置することは現実的に可能なのか検証し、津波に対する避難計画をより効果的に更新していくことが今後の課題となる。

謝辞

本研究を行うにあたり、ご意見やアドバイスしていただきました根本俊男教授をはじめ、根本研究室のメンバーに感謝を申し上げます。

参考文献

- [1] 檜山貴史、齋藤拓也、高点哲、村尾修：藤沢市片瀬西浜地区における住民の津波避難ポテンシャルと津波避難ビル利用の効果, 2012年地域安全学会梗概集, No.31, 2012
- [2] 関脩大、村尾修、杉安和也：藤沢市片瀬西浜・鶴沼地区における津波避難ビル収容能力を考慮した津波避難計画, 地域安全学会論文集, No.24, 2014