

避難施設を核とした災害に強いまちづくりの研究

—津波避難者の避難先選択行動モデル化と避難施設の最適配置計画—

主査 山田 崇史^{*1}

委員 岸本 達也^{*2}

本研究では、東日本大震災の避難行動データを用いて、徒歩と車による避難者の選択行動モデルを作成、分析した。沿岸地域に平野部が広がる宮城県仙台市、名取市、岩沼市を対象とした。パラメータ推定の結果、避難方向、移動距離、階数、建築面積は、避難者の避難施設の選択行動に影響する要因であることを確認した。選択行動モデルから複数の施設が配置している場合の避難圏域図を作成した。本研究のモデルは、従来モデルと比較して、高い精度で避難圏域の割り当てが可能であることを示した。避難施設を配置する際には、施設の規模および施設間の距離について考慮すること、徒歩と車の避難者それぞれに応じた施設について考慮する必要がある。

キーワード：1) 津波避難施設、2) 避難行動、3) 施設選択、4) モデル化

A STUDY ON DISASTER RESILIENT COMMUNITY DEVELOPMENT WHICH SET EVACUATION FACILITIES AS CORE

-Choice Behavior Model of Evacuation Destination for Tsunami Evacuees and Suitable Location Plan for Evacuation Facilities-

Ch. Takashi Yamada

Mem. Tatsuya Kishimoto

This study proposed an evacuation shelter choice model from great tsunami by using the actual behavioral data collected by the survey of the MILT in the Great East Japan Earthquake. The behavioral data in the flat land of Sendai-city, Natori-city and Iwanuma-city were analyzed. As a result, it was confirmed that “direction to shelter”, “distance to shelter”, “height of shelter” and “footprint of shelter” strongly affected choice of evacuation facility. The covered areas of shelters, where each shelter has the highest choice probability, were drawn by using the estimated model formulas. Compared with previous models, it was shown that the model of this study can make highly accurate covered areas of shelters. When it comes to layout of evacuation shelters, it is necessary to consider scale of shelters and distance between shelters in addition to choice behavior of evacuees on foot and choice behavior of evacuees by car.

1. 研究の背景と目的

1.1 研究の背景

2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震に伴って発生した津波は、青森県・岩手県・宮城県・福島県・茨城県・千葉県で観測され、国土地理院（2011）^{文1)}によると「浸水範囲面積は561km²」に及ぶ。内閣府（2011）^{文2)}の防災白書によると「東日本大震災の死因は92.4%が溺死」であり、震災による犠牲者の多くが津波により亡くなった。「南海トラフ巨大地震」、「慶長型地震」等の地震が発生した場合、太平洋側の沿岸地域において津波による浸水が予想される。津波から身を守るためには、まず高台に避難することが大原則である。しかし高台までの避難に相当の時間を要する平野部や、背後に避難に適さない急峻な地形が迫る海岸集落等では、津波からの避難

地確保が容易ではなく、大きな課題である。

先の東日本大震災の津波襲来時に津波避難施設へ避難したことにより助かった事例からも明らかであるように、津波から生命を守る手段として、津波避難施設は有効である。現在、津波避難施設を整備するための法整備が行われ、地震・津波に対する備えとして津波避難施設が整備されている。津波避難施設を整備を行うためには、整備が求められる地域において、どのような避難行動を想定し、どのような施設を整備するかが課題である。その方法を示すものとして、内閣府（2005）^{文3)}のガイドラインは、「津波避難ビル等候補の選定に伴うカバーエリア」の設定方法を示しており、ここでは避難者は一番近くの津波避難ビル等に避難すること、海方向への避難を想定しないことを条件としている。

^{*1}近畿大学生物理工学部 助教、^{*2}慶応義塾大学理工学部 准教授

1.2 既往研究の概要

津波避難行動および津波避難施設計画に関係した研究は多くあるが、その中でも本研究に関係が深い既往研究である。津波避難行動シミュレーションに関する研究と津波避難場所の評価・配置計画に関する研究を次に述べる。津波避難行動シミュレーションに関する研究では、避難者の避難経路や目的地といった条件を設定し、避難行動の再現または予測をしている。今村ら（2001）^{文4)}は、北海道奥尻島青苗地区において、1993年の北海道南西沖地震時の住民の避難行動を再現している。この中では、避難者は標高のより高い方向へ向かうものとしている。この追跡研究として、鈴木ら（2004）^{文5)}は、現地調査から経路選択の要因を抽出し、経路選択モデルの開発を行っている。そして、アンケート調査から得た避難者の避難行動に関係するパラメータを用いて避難シミュレーションを行っている。また齋藤ら（2005）^{文6)}や大畑ら（2007）^{文7)}によるマルチエージェントシミュレーターを用いた研究がある。齋藤ら（2005）は、奥尻島青苗地区において、1993年の北海道南西沖地震時の避難行動をシミュレーションしている。また大畑ら（2007）は、北海道釧路市中心市街地を例に、津波避難施設への避難行動をシミュレーションし、津波避難施設配置の評価をしている。この中で、「海岸平野部の、高台避難の確保が難しい市街地で、ビル等の津波避難施設の果たす重要性を確認できた」と述べている。

津波避難場所の評価・配置計画に関する研究では、現在整備されている津波避難施設の配置や収容力などを分析している。竹内ら（2003）^{文8)}は、避難場所の容量に焦点を当て、想定される3パターンの津波について津波浸水シミュレーションを行い、避難行動の違いによる避難状況の差をみるため「方向に関係なく最も近い避難場所に避難する」と「波の浸入方向と反対側にある避難場所に避難する」という2つのケースについて避難行動シミュレーションを行うことにより、高知県須崎市の避難場所整備状況の評価している。Ratna（2012）^{文9)}は、インドネシアの沿岸地域において、GISを用いて津波からの避難経路を選択する方法と避難施設の配置と容量を分析している。村尾ら（2014）^{文10)}は、神奈川県藤沢市片瀬・鵠沼地区を対象として、既存の津波避難ビルによる津波避難者収容能力を評価している。

1.3 本研究の位置づけと目的

これまでの研究では、避難行動予測モデルにおいて、避難者が避難先または避難経路を選択する場合「より標高の高い方向へ向かう」や「自分のいる地点から一番近い津波避難施設を避難先とする」等のように避難者の避難行動を一律に設定している。しかし、各避難施設の配置、階数、収容人数といった規模は施設ごとに異なり、

各避難者の施設までの距離や避難する方角は避難者ごとに異なる。そのため避難者がどの施設に避難するかという施設選択行動は、一律に設定される避難行動とは異なると考えられる。実際の避難行動をより正確に把握、予測するためには、避難施設や避難者ごとに異なる要因を考慮した避難施設の選択行動モデルを用いて、津波避難行動を予測することが必要である。

本研究の目的は、津波避難者の避難施設の選択行動をより正確に把握できるモデルを提案することである。そして、避難施設の整備計画に有用な知見を得ることである。東日本大震災で津波被害を受けた宮城県仙台市、名取市、岩沼市を対象として、津波避難行動のモデル化および避難先選択に影響する要因を分析し、従来の避難圏域モデルと本研究で提案する避難圏域モデルを比較する。そして、避難圏域の大きさや形状から、最適配置やまちづくりについて考察する。図1-1に津波避難施設選択の概念図を示す。避難者が津波から避難する際、図中の施設A、施設B、施設Cのうち、どの施設に避難するだろうか？本研究では、津波避難施設の規模および地理的特性を考慮して津波避難時の選択行動を明らかにする。

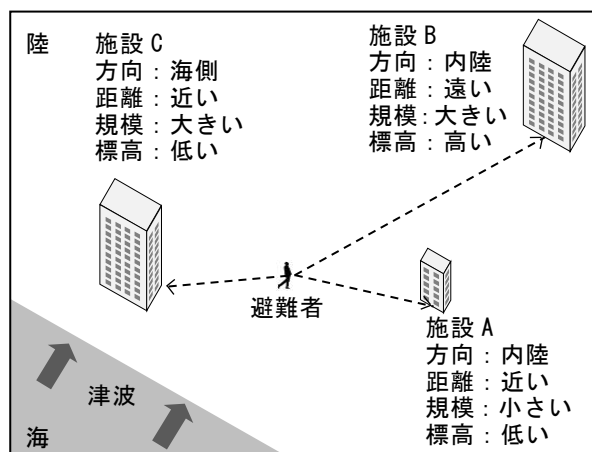


図 1-1 津波避難施設選択の概念図

2. 沿岸地域における避難先選択行動

2.1 研究対象地域の津波被害の概要

本研究の対象地域は、東日本大震災で津波被害を受けた沿岸地域に平野部が広がる宮城県仙台市、名取市、岩沼市とする。東北地方太平洋沖地震における津波では、海岸線 30km 以上に渡って浸水区域が続き、海岸線から 5km 離れた地域まで浸水した場所もある。この地域は、津波避難時に高台へ避難することが難しく、津波避難施設が避難先となることが多かった。表 2-1 に対象地域の津波による浸水被害状況の概略を示す^{文11)~14)}。東北地方太平洋沖地震は、14 時 46 分に発生し、気象庁（2011）^{文15)}は、宮城県に津波警報（大津波）を 3 月 11 日 14 時 49 分に発表した。その後、宮城県は 2011 年 3 月 12 日午後 12 時に大津波警報が解除になった。

表 2-1 対象地域の津波による浸水被害

	仙台市	名取市	岩沼市
津波の高さ または 最大浸水高さ	仙台港 7.2m ^{文 11)} (推定津波高)	関上漁港 9.09m ^{文 12)} (最大浸水高)	長谷釜地区 6.9m ^{文 13)} (最大浸水高)
市町村面積 ^{文 14)}	784 (km ²)	100 (km ²)	61 (km ²)
浸水面積 ^{文 14)}	47 (km ²)	26 (km ²)	26 (km ²)

2.2 復興支援調査アーカイブによる津波避難行動

避難施設の選択行動モデルを作成するための避難行動データは、東日本大震災津波被災市街地復興支調査^{文 16)}のアーカイブ（以下、「復興支援調査アーカイブ^{文 17)}」）の「避難方法（個人）」を用いる。これは、国土交通省が行った東日本大震災当日の「移動行動」を世帯単位で、調査員による聞き取りによるアンケート調査により得られた避難場所のポイントデータおよび避難経路のポリラインデータである。表 2-2 は復興支援調査アーカイブの調査概要である。津波の浸水被害を受けた青森・岩手・宮城・福島・茨城・千葉の 6 県の 49 市町村の 10,603 人の 20,503 経路が含まれる^{文 18)}。移動目的を「津波からの避難のため」「身を寄せる避難所へ行くため」と回答した移動経路データは 12,340 経路である。避難者の年代、性別などの個人属性のほか、避難先の施設の種類、移動目的、移動手段、避難開始時刻、避難終了時刻の情報が含まれる。対象エリアでは、1,692 経路（仙台市 529 経路、名取市 761 経路、岩沼市 402 経路）がある。安否確認や被害の情報確認のための移動など避難以外の移動を除外すると、941 移動経路（仙台市 293 経路、名取市 444 経路、岩沼市 204 経路）がある。

本研究では、避難施設の選択行動の分析を目的とするので、目的地が自宅などの避難施設でない移動を除外し、さらに浸水しなかった区域からの避難を除外し、さらに徒歩および車による避難のみに限定した。その結果、分析経路数は徒歩による避難 123 経路、車による避難 245 経路である。表 2-3 は本研究の分析対象である。

避難施設の選択肢集合は、東日本大震災当時に仙台市^{文 19)}、名取市^{文 20)}、岩沼市^{文 21)}が震災前に指定していた避難施設で、海岸線からおよそ 5km までの施設、及び多くの避難者がいた仙台空港ターミナルビル、震災当日に避難施設指定となった名取市文化会館とする。

図 2-1 と図 2-2 は、復興支援アーカイブのデータを元に、対象地域における避難者の避難開始位置と避難終了位置を線で結んだ希求線図であり、避難者と避難施設、海岸線、および浸水の範囲を示している。多くの避難者は陸方向に避難しているが、一部の避難者は海方向にも避難していること、避難者から一番近い施設に避難するとは限らないことが見られる。

表 2-2 復興支援調査アーカイブの調査概要^{文 16)}

調査趣旨	各県において策定される津波避難計画ガイドライン等への活用とともに、各市町村における防災計画や避難計画、復興市街地の具体的な計画や設計において活用するため、避難実態の聞き取り調査を実施した。
調査対象市町村	津波の浸水被害を受けた、青森・岩手・宮城・福島・茨城・千葉の計 6 県の内、太平洋側に位置する 62 市町村を対象とし、49 市町村において調査票を回収した。
調査対象	サンプル回収数：10,603 人
調査時期	2011 年 9 月～2011 年 12 月
調査方法	調査員により、避難所・仮設住宅・自宅等へ訪問し、聞き取り調査を実施（ヒアリング方式）
調査項目	(1) 津波に関する認識、警報等の情報入手 (2) 避難をしたか、しなかったか (3) 発災から当日の日没までの行動（避難ルート、移動手段、避難時の状況、避難先など）

表 2-3 本研究の分析対象

対象地	仙台市・名取市・岩沼市（宮城県仙台平野）
対象者	津波避難者（移動手段：徒歩／車、浸水区域から移動した人、目的地：避難施設、移動目的：津波避難のため、身を寄せる避難所へ行くため）
分析経路数	徒歩：123 経路、車 245 経路 (計 368 経路、計 338 人、経路には 2 重避難者を含む)

3. 選択行動モデル

本章では、津波避難施設の選択行動をモデル化する。さらに、従来の避難施設選択モデルと比較して、本研究で提案するモデルが高い精度で避難施設選択をモデル化することができ、施設の圏域を検討可能であることを示す。具体的には、最近接の施設を選択するボロノイ図により作成されるモデルと、内閣府によるガイドラインにより示されている陸側の最近接の施設を選択するとした場合の避難圏域モデルを比較する。これら 2 つのモデルは、避難施設配置の検討において用いられる代表的なモデルである。本研究は津波避難者の避難施設の選択行動について、それぞれの避難施設の効用を設定し、多項ロジットモデル^{文 22)}から効用関数のパラメータ推定を行う。個人 i が J 個の選択対象の中から対象 j を選択するという行動を考える。各対象 j には、それを個人 i が選択したときに効用 v_{ij} が得られる。このとき、各個人は各対象における効用のうち最も大きいものを選択すると考える。効用 v_{ij} は確定量ではなく、様々な状況の中で変動するものとする。まず、効用を式 (1) のように定式化する。

$$v_{ij} = u_{ij} + \varepsilon_{ij} \quad (1)$$

3.1 選択行動のモデル化

効用 v_{ij} は効用関数であり、 u_{ij} は非確率的な変量であり、 ε_{ij} は確率的な変量である。確率項 ε_{ij} はガンベル分布に従うと仮定すると、個人 i が対象 j を選択する確率 P_{ij} は式 (2) で表すことができる。^{文 22)}

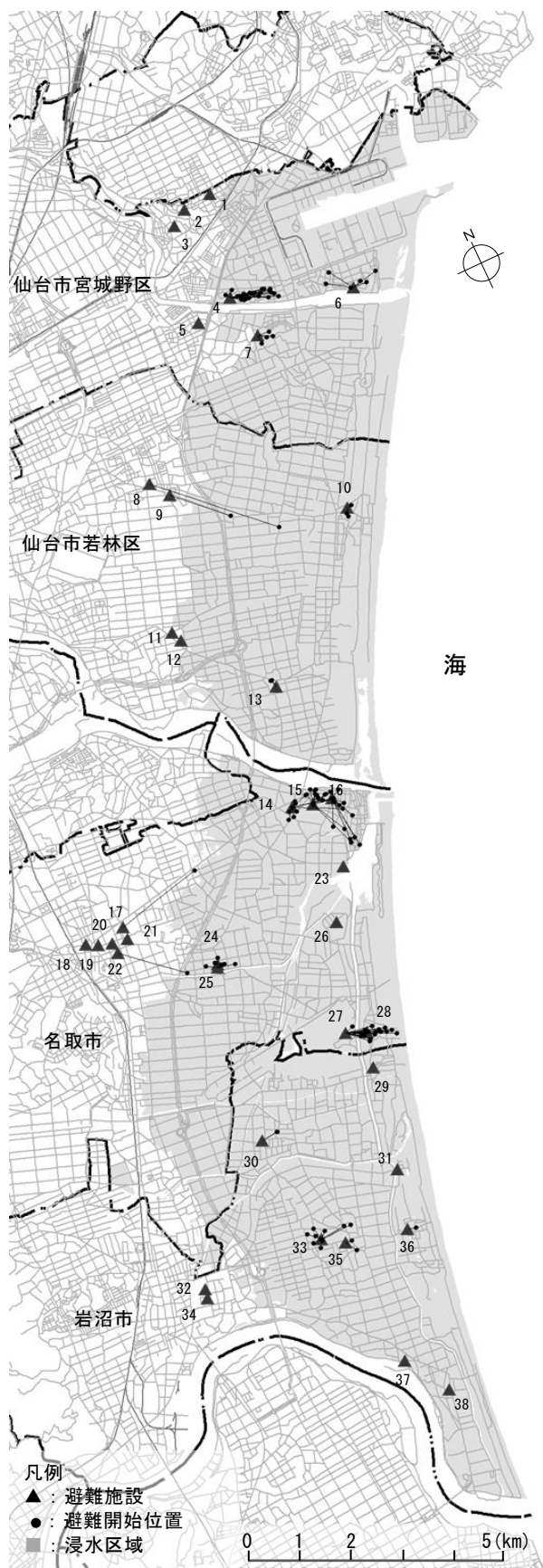


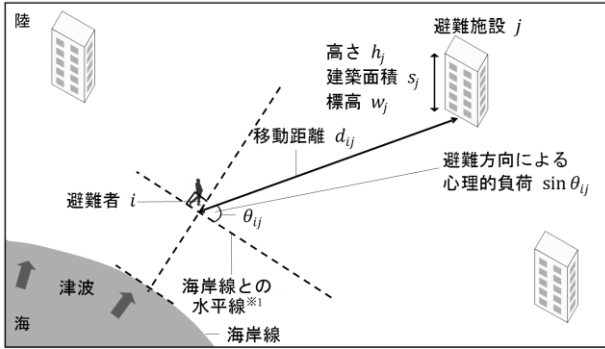
図 2-1 徒歩による避難者の対象地域と避難者の選択した避難施設への希求線図 (N=123)



図 2-2 車による避難者の対象地域と避難者の選択した避難施設への希求線図 (N=245)

$$P_{ij} = \frac{\exp[v_{ij}]}{\sum_{j=1}^J \exp[v_{ij}]} \quad (2)$$

つぎに、効用関数 v_{ij} は、図 3-1 に示すように避難者の避難する方向、避難者から避難施設までの移動距離、避難施設の階数、避難施設の建築面積、避難先の標高が影響すると考える。



※1：避難者iの場所から海岸線に垂線を引いた海岸線との平行線

図 3-1 モデル化において考慮する変数の模式図

(a) 避難方向による心理的効用 θ_{ij}

津波の避難行動を考えると、海に近づく方向への避難には心理的に大きな負荷があると考えられ、どの方向に向かって避難するかを考えるのは重要なことである。内閣府のガイドライン^{文 3)}においても「人は海に向かう方向には避難しない」という設定を設け、人が避難する方向を考慮している。このような側面の効用として、本研究は避難方向による心理的効用を考慮する。具体的には式 (3) で表すように、海岸線と避難者iから避難施設jまでの直線の間の角度を θ_{ij} として、 θ_{ij} の効用を得る。 β_1 は係数である。

$$\theta_{ij} = \beta_1 \sin \theta_{ij} \quad (3)$$

θ_{ij} は、避難者から避難施設までの直線距離と避難者iの場所の海岸線との平行線のなす角度($-90^\circ \leq \theta_{ij} \leq 90^\circ$)とする。 $\sin \theta_{ij}$ は、-1から1の値をとる。 θ_{ij} は、海岸線と並行にx軸、海岸線と垂直にy軸としたとき、x軸より内陸側が $0^\circ \leq \theta_{ij} \leq 90^\circ$ 、x軸より海側が $-90^\circ \leq \theta_{ij} \leq 0^\circ$ の範囲である。 θ_{ij} が 90° に近づくとき θ_{ij} は大きくなり、その避難施設の効用に対してプラスに働く。なお、性質として θ_{ij} は 0° に近づくほど 1° あたりの効用の変化の絶対値は大きくなる。

(b) 避難施設までの移動距離による効用 D_{ij}

$$D_{ij} = \beta_2 d_{ij} \quad (4)$$

避難者から避難施設までの距離を d_{ij} (m) とすると、その距離に比例する移動負担が生じる。これは避難時の移動距離に置き換えられる。 β_2 は係数である。 D_{ij} はコストなので、係数 β_2 は負の値となることを想定している。ここでは、 d_{ij} (m) を直線距離とする。避難者は避難す

る際、避難方向と避難施設までの距離をイメージして避難すると考えられるため、移動距離は直線距離を用いた^{注 1)}。

(c) 避難施設の階数による効用 H_j

$$H_j = \beta_3 \ln(h_j) \quad (5)$$

一般的に津波避難時は、より高い避難施設の方が好まれることが予測されるため、避難施設の階数 h_j (階) について考慮する。 β_3 は係数である。ここで、避難施設の階数は、物理量ではなく感覚量として扱うものとしている。具体的には、3階建てと4階建ての建物の階数による効用の差と、13階建てと14階建ての効用の差を同じとすると、高い建物の効用値が必要以上に大きくなる危険性を回避するためのものである。したがって本研究ではウェーバー・フェヒナーの法則に基づき、避難施設の階数に対数をとる。

(d) 避難施設の建築面積による効用 S_j

$$S_j = \beta_4 \ln(s_j) \quad (6)$$

災害時には一度に大勢の避難者が発生する。そのような状況下で、自分が望む避難施設が既に満員で入れない可能性がある。したがって、選択行動に影響を与えるものとして建築面積 s_j (m²) を考慮する。階数と同様に建築面積に対数をとった値をモデル式に組み込んでいる。 β_4 は係数である。

(e) 避難施設の標高による効用 W_j

$$W_j = \beta_5 w_j \quad (7)$$

津波から避難するとき、標高の高い場所に避難することが重要であると考えられる。そのため、避難施設の標高 w_j (m) を考慮する。 β_5 は係数である。

効用を組み込んだモデル式は、効用関数 v_{ij} として、式 (8) で表される。そして、最尤推定法^{文 23)}により効用関数のパラメータ推定を行う。ここで $\beta_1 \sim \beta_5$ は、 β_1 ：避難方向による心理的効用の係数、 β_2 ：避難施設までの移動距離による効用の係数、 β_3 ：避難施設の階数による効用の係数、 β_4 ：避難施設の建築面積による効用の係数、 β_5 ：避難施設の標高による効用の係数とする。

$$v_{ij} = \beta_1 \sin \theta_{ij} + \beta_2 d_{ij} + \beta_3 \ln(h_j) + \beta_4 \ln(s_j) + \beta_5 w_j \quad (8)$$

上記で求めた係数の推定値に加え、 t 値、尤度比 ρ^2 、適中率を求めることで推定モデルの検定を行う^{文 23)}。

3.2 パラメータの推定結果

表 3-1 に徒歩による避難者のパラメータの推定結果、表 3-2 に車による避難者のパラメータの推定結果を示す。はじめに全ての効用を考慮したモデル 1 としてパラメータ推定を行った。つぎにモデル 2 とモデル 3 は、説明変数の数を変更した場合に生じる尤度比、適中率の変化を確認するため、モデル 1 で有意でなかった説明変数を 1 つ除いたモデルである。モデル 4 は、説明変数を 3 つにしたモデルである。階数と建築面積に相関関係が見られ

たため、モデル4は建築面積を除いたモデル、モデル5は階数を除いたモデルである。モデル1から5は、モデルの適合度を表す尤度比の値が全てのモデルで0.2以上を満たすため、モデルとして十分高い適合度を持つと判断される^{文23)}。

つぎにモデル1からモデル5を比較する。表3-1の徒歩による避難者のパラメータの推定結果では、説明変数を「避難方向」「移動距離」「階数」としたモデル4が、モデル5と比較して高い尤度比 ρ^2 と適中率で避難施設の選択行動が示された。一方、表3-2の車による避難者のパラメータの推定結果では、説明変数を「避難方向」「移動距離」「建築面積」としたモデル5が、モデル4と比較して高い尤度比 ρ^2 と適中率で避難施設の選択行動が示された。

3.3 選択行動に影響する要因の比較

表3-1の徒歩による避難者の各効用の最大値と最小値を図3-2に示す。表3-2の車による避難者の各効用の最大値と最小値を図3-3に示す。値域の幅が最も大きい説明変数が、選択行動の決定に大きな影響を与えている。図3-2と図3-3で()の数値は、各効用値のとき説明変数がとる値である。図3-2のモデル1は、避難者から避難施設までの距離が持つ効用 $\beta_2 d_{ij}$ の最大値と最小値の差が大きい。徒歩の避難者は、避難施設までの距離 d_{ij} が避難施設の効用値を決める際に重要な変数である。一方、図3-3のモデル1は、避難方向 $\beta_1 \sin \theta_{ij}$ の最大値と最小値の差が大きい。車の避難者は、避難方向 $\sin \theta_{ij}$ が

避難施設の効用値を決める際に重要な変数である。

3.4 避難圏域図の作成と比較

作成したモデルから避難圏域を作成し、最近接避難圏域、陸側最近接避難圏域といった既往研究やこれまでガイドラインで示されてきた圏域との比較を行う。

(a) ボロノイ図による最近接避難圏域

ボロノイ図は、利用者の施設選択と施設の圏域を示すための図である。利用者はもっとも近い場所にある施設を選択すると仮定すると、ボロノイ多角形(Thiessen多角形とも呼ぶ)がそれぞれの施設の圏域を表すこととなる。図3-4で示すように避難施設間を結んだ線分の垂直二等分線が境界線である。

(b) 政府のガイドラインが定める陸側最近接避難圏域
津波避難における施設選択に関するモデルには、内閣府(2005)^{文3)}が発行したガイドラインが定める津波避難ビル等候補の選定にかかわるモデル(以後ガイドラインモデル)がある。これは津波避難の施設計画における代表的なモデルであり、竹内ら(2003)^{文8)}による高知県須崎市の津波避難場所の評価に関する研究、Ratna(2012)^{文9)}によるインドネシアの津波避難施設配置に関する研究、村尾ら(2014)^{文10)}による藤沢市片瀬地区における津波避難計画の研究などでも同様のモデルが用いられている。

ガイドラインモデルは、避難施設のカバーエリア(圏域)の設定において、原則として避難者は一番近くの施

表3-1 徒歩による避難者のパラメータ推定結果

変数	係数	モデル1	モデル2	モデル3	モデル4	モデル5
避難方向	β_1	1.87095***	1.81716***	1.76652***	1.78774***	1.65652***
移動距離	β_2	-0.00581***	-0.00566***	-0.00581***	-0.00591***	-0.00493***
階数(対数)	β_3	2.22327	-	3.43445**	4.14351***	-
建築面積(対数)	β_4	0.58891	1.27605***	0.26116	-	1.14003***
標高	β_5	-0.42672	-0.69332**	-	-	-
尤度比 ρ^2		0.858	0.856	0.855	0.855	0.841
適中率		85.37%	85.37%	84.55%	85.37%	85.37%

***: 1%有意水準, **: 5%有意水準, *: 10%有意水準

表3-2 車による避難者のパラメータ推定結果

変数	係数	モデル1	モデル2	モデル3	モデル4	モデル5
避難方向	β_1	2.02246***	1.96420***	1.94627***	1.88473***	1.95832***
移動距離	β_2	-0.00110***	-0.00111***	-0.00116***	-0.00112***	-0.00116***
階数(対数)	β_3	-0.32696	-	0.06816	1.23229***	-
建築面積(対数)	β_4	0.76200***	0.68791***	0.68169***	-	0.69768***
標高	β_5	-0.19800**	-0.16420*	-	-	-
尤度比 ρ^2		0.455	0.454	0.451	0.429	0.451
適中率		60.41%	59.59%	58.37%	53.88%	58.37%

***: 1%有意水準, **: 5%有意水準, *: 10%有意水準

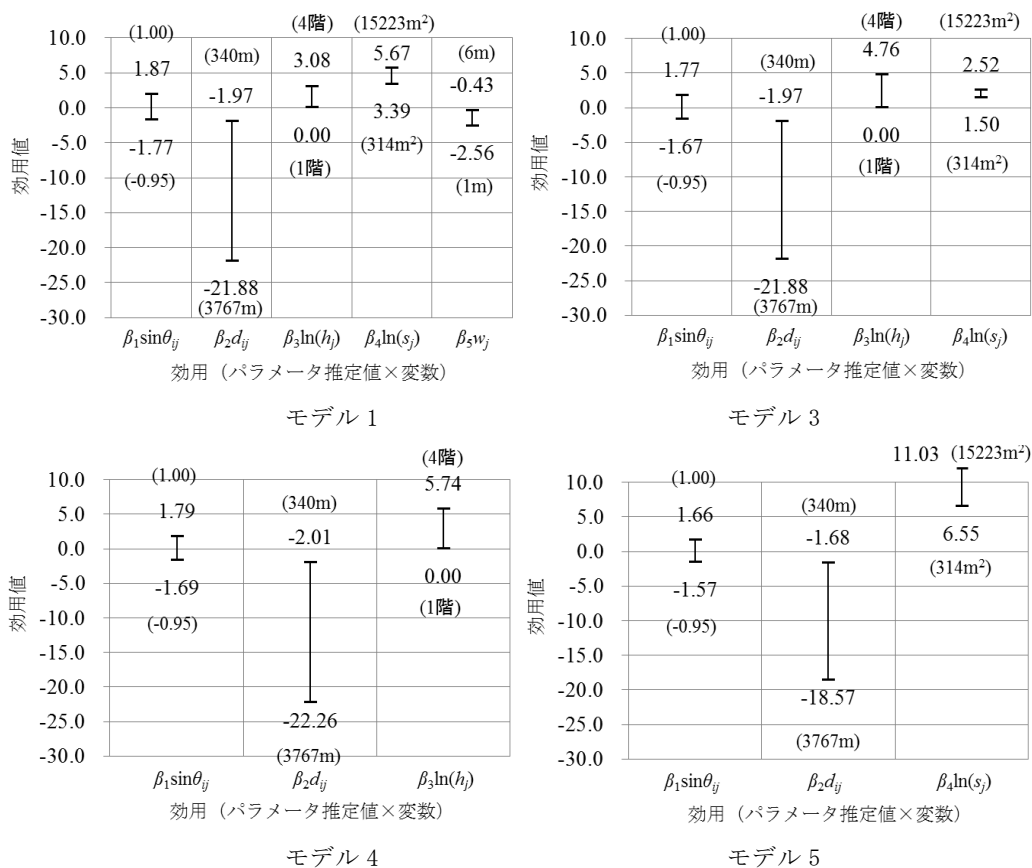


図 3-2 徒歩による避難者の各効用の値域の幅

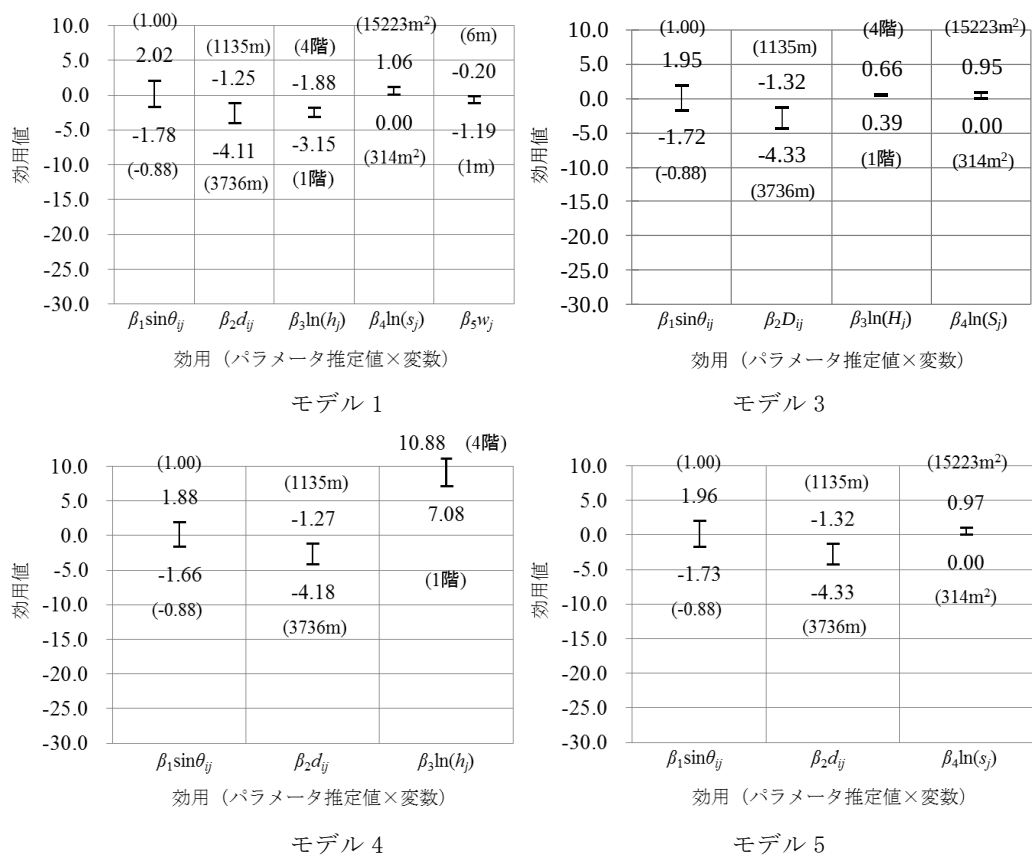


図 3-3 車による避難者の各効用の値域の幅

設を選択するが、海方向（津波の襲来方向）への施設へは避難せず、その避難者から見て海側の施設は選択しないとするモデルである。図 3-5 はその作図方法を示しており、海岸線との平行線と垂直二等分線を組み合わせて圏域を作成する。海岸線との平行線を施設の位置で描き、施設と施設を結ぶ線分の垂直二等分線を描き、それらを組み合わせて圏域の境界線を描く。ボロノイ図による圏域と類似するが、施設より陸側に圏域が広がらない点で大きく異なる。なおガイドラインで示される考え方を図 3-6 に示す。ガイドラインモデルは、避難施設の収容可能人数を考慮し、収容人数の多い施設は広範囲を、収容人数の少ない施設はその人数に応じて狭い範囲をカバーするとしている。施設の容量を考慮することも重要であるが、とても複雑になるので、避難施設が満員で避難できなかった事例が報告されていないこともあり、ここでは容量を考慮せずに検討する。

(a) の各避難施設を母点としたボロノイ図によって描かれる対象地域の最近接避難圏域を図 3-7 に示す。(b) の政府ガイドラインの考え方によって描かれる対象地域の陸側最近接避難圏域を図 3-8 に示す。

(c) 避難施設の選択行動モデルを用いた避難圏域

前節で導出した避難施設の選択モデルを用いることにより、避難施設がもっとも選択されやすい領域を描画することができる。全ての避難施設の選択確率のうち最も選択確率が高い施設の領域をその施設の圏域とみなすと、その領域とその境界線が描画できる。ただし、選択確率の境界線を解析的に求めることは困難なので、ここでは 50m 間隔のグリッド状の点データを作成し、それぞれの点の選択確率を最大とする施設を求める。50m のグリッドデータの間を直線で補完することによって境界を描画する。

図 3-9 は、(c) 避難施設の選択行動モデルを用いた避難圏域の徒歩による避難者の避難圏域図である。表 3-1 の説明変数「避難方向」「移動距離」「階数」としたモデル 4 を用いて作成した。図 3-10 は、(c) 避難施設の選択行動モデルを用いた避難圏域の車による避難者の避難圏域図である。表 3-2 の説明変数「避難方向」「移動距離」「建築面積」としたモデル 5 を用いて作成した。図 3-9 と図 3-10 の等高線は、最大選択確率の等確率線である。各避難施設の圏域は、やや海方向に広がっている。海方向に広がっているのは、角度 θ_{ij} に対するパラメータ β_1 の影響であり、施設によって圏域の大きさが異なるのは、施設の階数または建築面積の大小が選択確率に影響しているためである。図 3-9 と図 3-10 を比較すると、図 3-10 は図 3-9 に比べて内陸側の避難施設が持つ避難圏域が海方向に広がっている。この理由として車の避難者は、徒歩の避難者に比べて移動距離が長く、徒歩の避難者に

比べて内陸の避難施設を選択したため、内陸側の避難施設の選択確率が高くなり、海側の選択確率が低くなったと考えられる。

最近接、陸側最近接、本研究の 3 つの圏域モデルの適合具合を比較するため、実際の避難施設選択と、避難圏域による施設選択の適中数を計算した。その結果、徒歩の避難者を表 3-3、車の避難者を表 3-4 に示す。適中数は、避難者が避難圏域内で避難した時は適中、避難圏域外に避難した時は適中しないとして計算している。各圏域の適中数を比較したとき、(c) の適中率がいずれも最大となっている。この結果から従来の避難圏域の考え方よりも避難施設の選択行動モデルから作成した避難圏域の割り当ての方が、実際の避難者行動に応じた圏域の割り当てが可能になると考えられる。

4. 津波避難施設の最適配置・まちづくりの考察

本章では、3 章で作成した避難圏域の大きさや形状から、最適配置やまちづくりについて考察する。3 章で作成した避難圏域図を用いると、現状の配置の問題点、課題などが明らかになり、新たな配置、最適配置を検討しやすくなる。具体的には、海岸付近において避難者が避難した施設が隣接する図 3-9、図 3-10 の A で示す名取市の仙台空港がある下増田地区では、図 3-9 徒歩の圏域も図 3-10 車の圏域も規模の大きな施設の避難圏域が小さい規模の避難圏域を包含している。実際、避難者の多くは大きな施設に集まっている。このため、規模の小さい避難施設が大きい施設から 200m や 300m 程度の近い場所に存在していても避難者は避難せず、施設は使用されない。避難施設を配置する際には、一方の避難施設の圏域が他方の避難施設を包含しない場所に配置することが望ましい。

徒歩の避難者は、多くが 1km 未満の近い避難施設に避難している。図 3-9 の B、C、D で示す仙台市の海岸に近い地域では、徒歩の避難者にとって大きな圏域となっている。これらの地域では、避難距離が長くなり、避難施設到達までに時間がかかるため、避難施設を新たに配置し、小さな避難圏域とすることが望ましい。一方、車の避難者は、近い避難施設でなく内陸方向（市街地方向）の避難施設に避難する傾向がある。図 3-10 の E で示す名取市の市街地域、F で示す岩沼市の市街地域のような場所の避難施設には、多くの車による避難者が避難する。これらの地域では、小さな避難施設を数多く整備するよりも、大きな避難施設を配置し、車の避難者が確実に避難できる体制を整備することが望ましい。

避難施設の配置計画について、本研究の知見を基にして避難施設整備の方策を述べると、まず自治体の既存津波避難施設の配置と人口分布から各津波避難施設の推定避難者数を計算する。推定避難者数が既存施設の収容人

数に対して多い場合、既存施設の規模の見直しや新しい施設の配置を検討する。このように施設配置の検討を行い整備することで、地域の安全性を高めることが可能である。現在、国はどこに津波避難施設を配置するか、どの建物を津波避難施設に指定するかといった施設整備の方針を自治体に委ねている。今後、施設整備を行うための方法論やルールづくりが必要である。実際の津波避難

者は指定した津波避難施設に行かない可能性がある。そのため、津波から避難する際、津波避難者が本能的に選ぶ施設の配置が望ましいと考える。本研究のモデルを施設配置計画に役立てることで、津波避難者の本能的な津波避難施設の選択行動を考慮した施設整備を行うことができる。と考える。

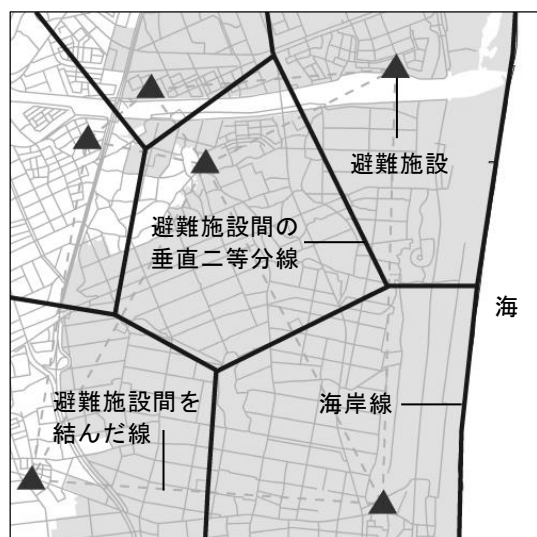


図 3-4 最近接避難圏域の作成

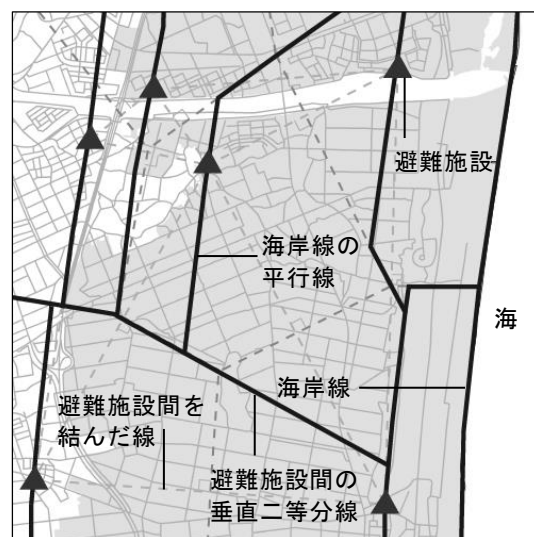
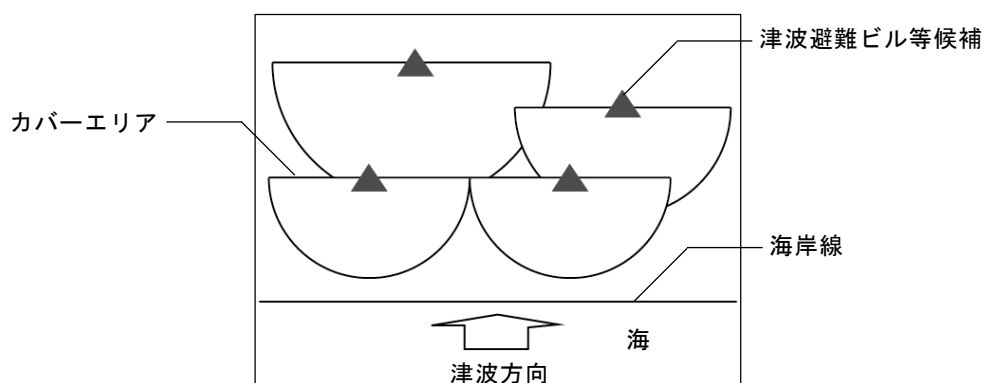


図 3-5 陸側最近接避難圏域の作成



避難可能な範囲の設定は、津波から遠ざかる方向のみとしている。内閣府（2005）^{文3)}のガイドラインを基に作成。

図 3-6 ガイドラインによる圏域

表 3-3 徒歩による避難者の各避難圏域の適中数

	仙台市 41 人	名取市 67 人	岩沼市 15 人	対象三市 123 人
(a) 最近接	39 人 (95.12%)	26 人 (38.81%)	13 人 (86.67%)	78 人 (63.41%)
(b) 陸側最近接	32 人 (78.05%)	33 人 (49.25%)	7 人 (46.67%)	72 人 (58.54%)
(c) 提案モデル	40 人 (97.56%)	51 人 (76.12%)	14 人 (93.33%)	105 人 (85.37%)

表 3-4 車による避難者の各避難圏域の適中数

	仙台市 86 人	名取市 108 人	岩沼市 51 人	対象三市 245 人
(a) 最近接	44 人 (51.16%)	12 人 (11.11%)	10 人 (19.61%)	66 人 (26.94%)
(b) 陸側最近接	50 人 (58.14%)	23 人 (21.30%)	15 人 (29.41%)	88 人 (35.92%)
(c) 提案モデル	65 人 (75.58%)	44 人 (40.74%)	34 人 (66.67%)	143 人 (58.37%)

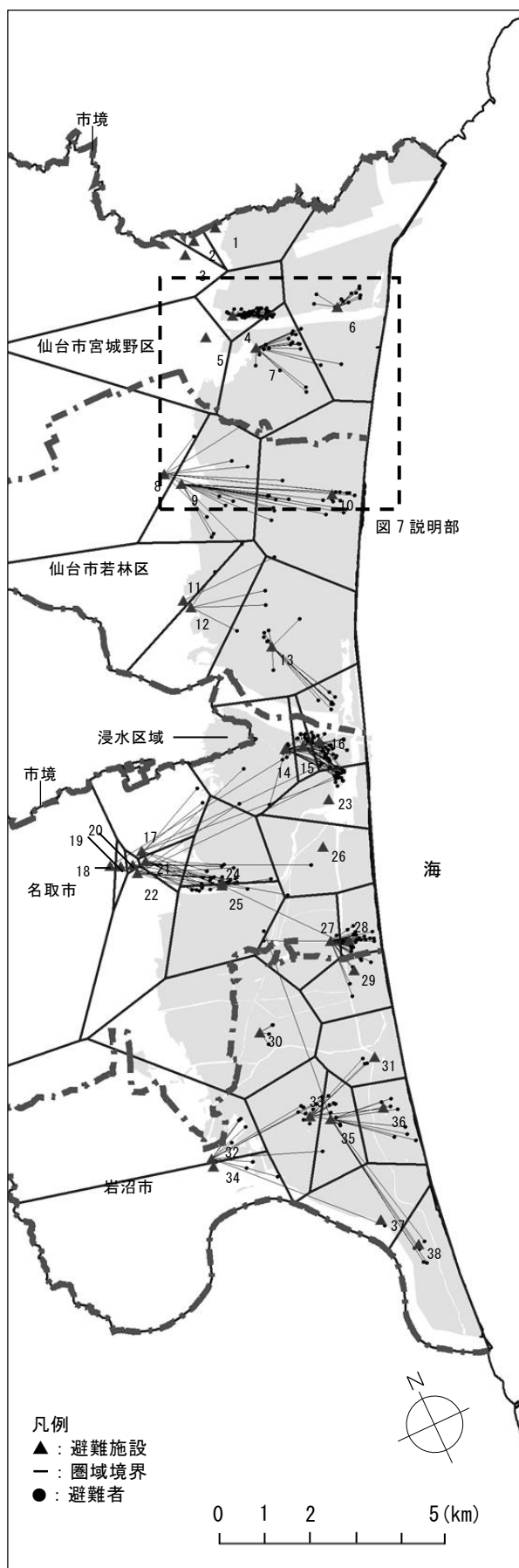


図 3-7 (a) 最近接避難圏域

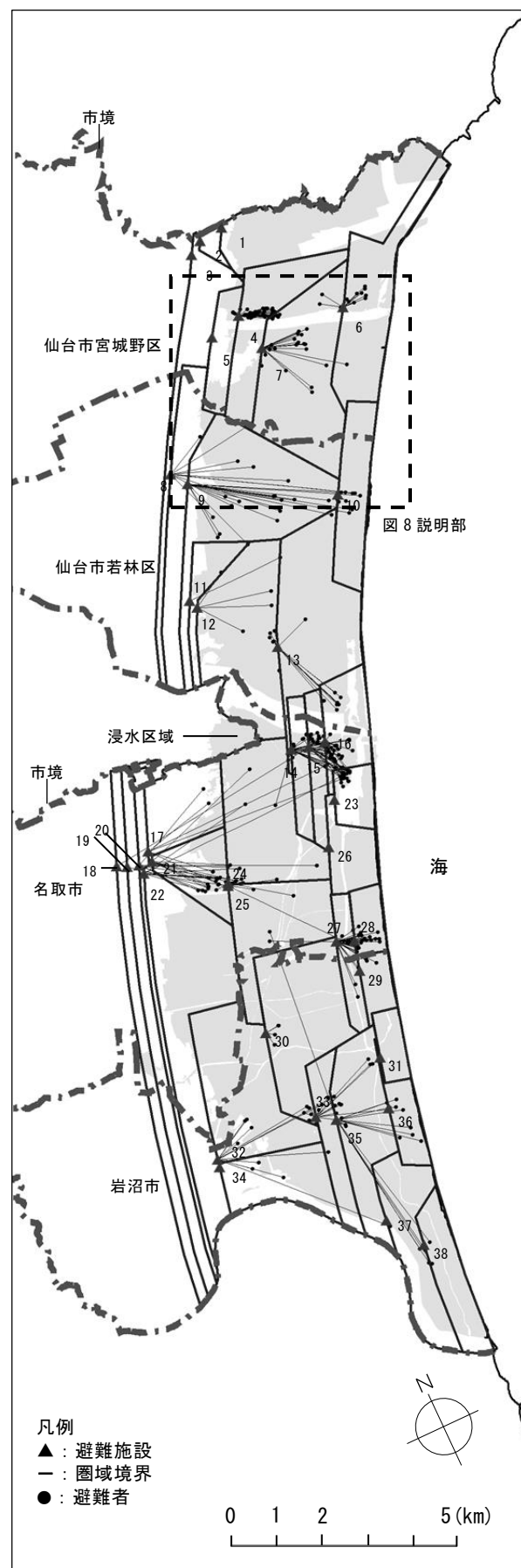


図 3-8 (b) 陸側最近接避難圏域

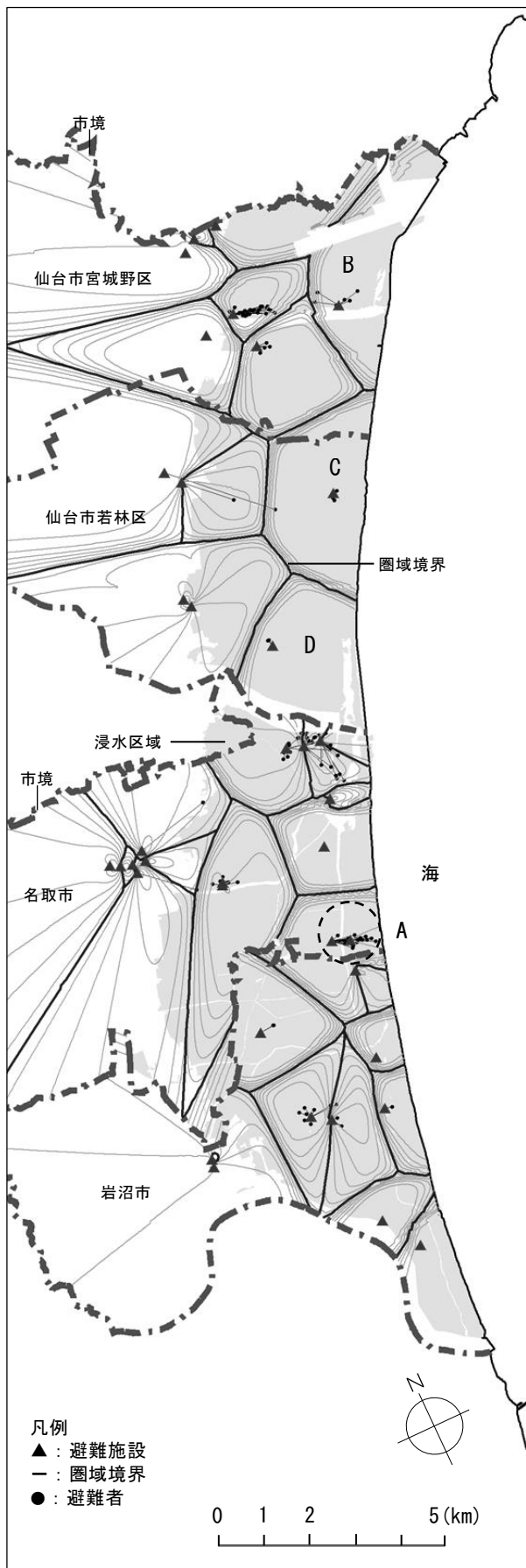


図 3-9 (c) 徒歩による避難者の最大選択確率と避難圏域

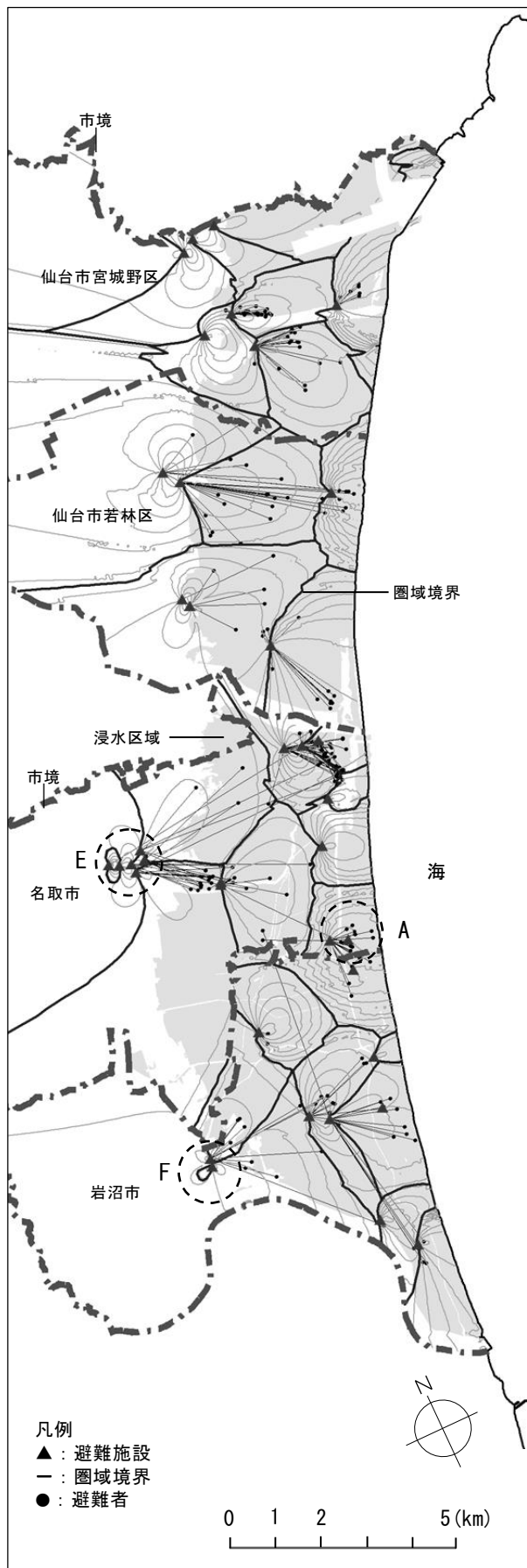


図 3-10 (c) 車による避難者の最大選択確率と避難圏域

5. まとめと今後の課題

本研究では、復興支援調査アーカイブを用いて、宮城県仙台市、名取市、岩沼市を対象として、実際の津波避難者の避難行動に基づく避難施設の選択行動をモデル化した。モデルの説明変数は、津波避難者の「避難方向」と「移動距離」、避難施設の「階数」と「建築面積」「標高」を考慮した。また従来の避難施設選択モデルと比較して、本研究で提案するモデルの方が高い精度で避難施設の選択行動をモデル化することができ、施設の圏域策定において有効であることを示した。そして、避難圏域の大きさや形状から、徒歩の避難者にとって望ましい施設配置、車の避難者にとって望ましい施設配置を考察した。

今後の課題として、津波避難施設以外にも避難先となる場所を選択肢集合として考慮することが課題である。津波避難者の避難先候補（選択肢集合）は、自宅、商業施設、指定避難所となっていない公共施設などが考えられるため、これらの場所を選択肢集合に含めて津波避難者の避難先選択行動を検討する余地がある。また東日本大震災被災地の宮城県仙台市、名取市、岩沼市の分析データには、津波により亡くなった方や避難施設に行かなかった自宅待機者を考慮していない。これらの方々の避難行動についても検討する必要がある。そして本研究では、平野部で津波避難施設の避難行動のモデルを作成したが、津波はリアス部や扇状地を持つ地域でも起きる。平野部以外の地域でも津波避難者の避難行動を分析する必要がある。さらに津波到達時間は、地震の震源地や沿岸地域の位置により異なるため、避難開始時間や避難距離を考慮して避難行動分析、津波避難施設配置を検討することが課題である。

<付記>

本助成による研究は、著者らによる先行研究^{文 24)-26)}の成果を踏まえ行われた。先行研究^{文 24)-26)}および本助成による研究成果は、本研究主査の学位論文の主要な部分となったことを付記する。

<注>

1) 移動距離はネットワーク距離を用いたこともあるが、直線距離の方がモデルの適合度（尤度比）が高かった。

<参考文献>

- 1) 国土地理院：津波による浸水範囲の面積（概略値）について（第5報），<http://www.gsi.go.jp/common/000059939.pdf>，（参照 2015-11-01）
- 2) 内閣府政策統括官（防災担当）：平成23年版防災白書，内閣府，p. 12，2011
- 3) 内閣府政策統括官（防災担当）：津波避難ビル等に係るガイドライン，pp. 19-24，2005
- 4) 今村文彦，鈴木介，谷口将彦：津波避難数値シミュレーション法の開発と北海道尻屋敷青苗地区への適用，自然災害科学，Vol. 20，No. 2，pp. 183-195，2001

- 5) 鈴木介，今村文彦：住民意識・行動を考慮した津波避難シミュレーションモデル，自然災害科学，Vol. 23，No. 4，pp. 521-538，2004
- 6) 齋藤崇，鏡味洋史：マルチエージェントシステムを用いた津波からの避難シミュレーションー奥尻島青苗地区を例としてー，日本建築学会計画系論文集，No. 597，pp. 229-234，2005
- 7) 大畑大志郎，高井伸雄，鏡味洋史：釧路市中心市街地における津波避難施設配置の評価マルチエージェントシステムを用いた津波からの避難シミュレーションその2，日本建築学会計画系論文集，No. 612，pp. 87-91，2007
- 8) 竹内光生，近藤光男，山口満，濱田洋平：容量を考慮した津波避難場所の評価に関する実証分析ー須崎市を対象としてー，土木計画学研究・論文集，Vol. 20，No. 2，pp. 345-354，2003
- 9) Ratna Sari Dewi：A-Gis Approach of an Evacuation Model for Tsunami Risk Reduction，Journal of Integrated Disaster Risk Management，Vol. 2，No. 2，pp. 108-139，2012
- 10) 村尾修，杉安和也：藤沢市片瀬地区における津波避難計画の提案（概要），民間都市開発推進機構都市研究センター，Urban study，Vol. 58，pp. 59-78，2014
- 11) 仙台市：大震災による被害状況，http://www.city.sendai.jp/shisei/1199059_1984.html，（参照 2015-03-12）
- 12) 名取市震災記録室：名取市の被害 2. 被害の概要，<http://www.city.natori.miyagi.jp/soshiki/soumu/311kiroku/index/higai/gaiyou>，（参照 2015-03-12）
- 13) 岩沼市：岩沼市震災復興計画ランドデザイン，被災状況，p. 6，2011
- 14) 消防庁：東日本大震災記録集，第2章地震・津波の概要 2.2 津波の概要，p. 45，2013
- 15) 気象庁：災害時地震・津波速報，平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震，（3）津波警報等の発表状況，災害時自然現象報告書 2011年，No. 1，p. 4，2011
- 16) 国土交通省都市局：東日本大震災からの津波被災市街地復興手法検討調査のとりまとめについて，国土交通省，2011
- 17) 国土交通省都市局：『復興支援調査アーカイブ』データ，2012
- 18) 国土交通省：津波避難を想定した避難路，避難施設の配置及び避難誘導について（第3版），p. 18，2013
- 19) 仙台市ホームページ：避難所・避難場所リスト，http://www.city.sendai.jp/kurashi/bosai/hinanjo/1188545_1388.html，（参照 2015-03-27，仙台市危機管理室減災推進課に問合せして東日本大震災当時の避難所を確認した。）
- 20) 名取市消防本部：避難所地図検索，http://www.fdn119.jp/search_map/index.html，（参照 2014-05-23）
- 21) 岩沼市防災課ホームページ：指定避難所・指定救護所一覧，<http://web.archive.org/web/20110322201041/http://www.city.iwanuma.miyagi.jp/kakuka/010800/010801/untitled.html>，（参照 2015-02-09）
- 22) 青木義次：建築計画・都市計画の数学，数理工学社，pp. 45-47，2006
- 23) 土木学会土木計画学研究委員会：非集計行動モデルの理論と実際，土木学会，pp. 51-52，pp. 62-70，1995
- 24) 山田崇史，秋山和範，末澤貴大，岸本達也：海水浴場における津波避難施設の選択行動モデル化ー神奈川県藤沢市をケーススタディとしてー，都市計画論文集，Vol. 49，No. 3，pp. 549-554，2014
- 25) 山田崇史，岸本達也：沿岸地域における津波避難ビルの選択行動モデル化，日本建築学会計画系論文集，Vol. 80，No. 707，pp. 125-133，2015
- 26) 山田崇史，佐々木雅宏，岸本達也：津波避難時の避難施設選択モデルを用いた避難施設圏域の推定，日本建築学会技術報告集，Vol. 22，No. 51，pp. 825-830，2016