

津波による人的被害軽減のための避難戦略の評価手法に関する研究

越村俊一*・片田敏孝**・桑沢敬行***・石橋晃睦****

津波災害発生時の住民間情報伝達と避難行動に着目して、津波被災想定地域における避難計画を総合的に評価するための手法を開発し、地理情報システムに展開する。本評価手法は、非線形長波理論に基づく津波汎濫解析、偏ネット生成モデルに基づく住民間情報伝達、避難行動解析の3つのシミュレーション要素で構成される。本手法を、米国ワシントン州ブレマートン市における想定津波災害に適用し、津波災害の現象と情報伝達・避難行動の状況を視覚的に把握することにより、想定した災害情報伝達体制において、津波からの避難に問題がある地域を特定することが可能であることが示された。

1. 序論

平成9年に関連7省庁（1997）から津波防災対策指針が提案されて以来、沿岸部自治体では、防災構造物だけでなく、津波予警報等の情報伝達体制や避難体制を含めた総合的な津波防災対策が進められつつある。津波防災対策の最重要事項は「津波災害から国民の生命を守る」ことであり、策定される津波防災計画が人的被害の軽減に対して有効に機能するかを系統的に評価するためには、科学研究成果に基づく外力と被害の想定、津波警報や避難勧告等の情報戦略、適切な避難所と避難経路の設定などの避難戦略について、総合的かつ一貫性をもって検討が評価する手法が必要である。

本研究では、津波発生時の情報伝達と避難行動に着目し、策定された避難計画を評価するための手法を提案し、それを地理情報システム(GIS)上に展開する。本手法は、近年の地殻活動の活発化に伴い、直下を走る活断層上のマグニチュード7.6規模の大地震による津波の発生が懸念されている、米国ワシントン州シアトル郊外のブレマートン市に適用し、その有効性を確認する。当地は、日本のように津波防災構造物が存在しない上に、津波災害に対する防災意識が住民間にはほとんどなく、地震発生直後の自主避難が期待できない。避難勧告等の災害情報と住民避難の関係が直接的に現れると思われる地域である。

2. 総合的津波避難戦略評価の手続き

本研究で提案する津波避難の総合的評価手法は、以下の4つのシミュレーション要素で構成される。(1)津波の外力想定に関する要素、(2)津波警報や避難勧告等の住民への情報伝達に関する要素、(3)避難所に住民が到達するまでの避難行動に関する要素、(4)避難中に発生

し得る人的被害評価に関する要素である。本研究では、これらのシミュレーション要素を有機的に統合、津波の発生から避難開始、あるいは被災するまでの物理的・社会的な現象を総合的に記述し、自治体において策定される避難計画が有効に機能するかを評価する手法を開発する。図-1に、本研究で開発する評価手法の構造を示す。コンピュータ上で展開される津波災害の時空間において、各シミュレーション要素で求められる解は、他の要素に対する境界条件となる。

たとえば、対象領域に居をかまえる住民は、地震発生後、なんらかの情報を受け取ってから、避難の意思決定をし、行動に移る。避難の意思決定を促す情報は、地震動そのものである可能性もあるが、ここでは津波警報や避難勧告などのさまざまな伝達媒体を経て伝えられる情報であると仮定する。現在の我が国の津波予警報システムでは、発震後数分で津波有無の情報が出力され、津波の恐れがある場合には、ただちに、津波警報が各管区气象台や報道機関を通じて発令される。その情報は地域に伝達され、最終的に住民の避難行動の開始を促す。すなわち、住民一人ひとりが情報を取得した時間が避難行動を開始する最も早い時間になる。一方、災害情報の伝達、地域住民の避難行動という社会現象と並行して、津波は

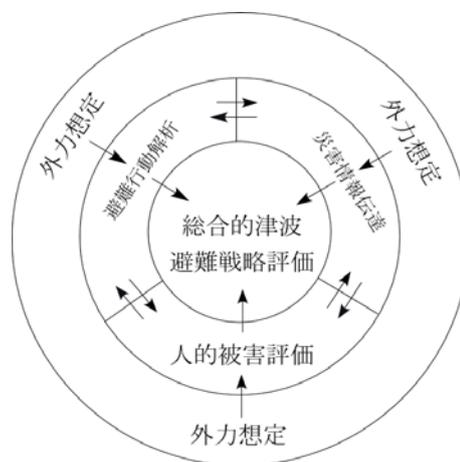


図-1 津波避難戦略の総合的評価手法の構造

* 正会員 博(工) 専任研究員 人と防災未来センター

** 正会員 工博 群馬大学助教授 工学部建設工学科

*** 非会員 日本工営株式会社

**** 正会員 日本工営株式会社

沿岸部に到達し、市街地氾濫に到る。市街地に氾濫した津波は、時に避難途中の住民や避難していない住民を巻き込み、人的被害が発生する。避難計画の評価のためには、上記の社会現象と物理現象をコンピュータ上の仮想空間において同一の時間軸で再現しなければならない。以下では、本研究で提案する評価法の基礎となる4つのシミュレーション要素と、その統合化について述べる。

(1) 津波の市街地氾濫シミュレーション

地震津波の発生から、沿岸部への伝播、市街地氾濫を予測するモデルには、底面摩擦項を含む非線形長波式を Leap-frog 法で差分化したモデルを採用する (Imamura, 1996)。シミュレーションの初期条件となる津波初期水位分布の計算は、Okada (1985) の解析解を用いる。津波の市街地氾濫シミュレーションで得られる、各グリッドの水位、流速は他のシミュレーション要素の境界条件として用いる。

(2) 災害時の情報伝達シミュレーション

a) 災害時情報伝達シミュレーションの概要

津波災害時の情報伝達シミュレーションとは、対象地域における津波災害の時空間において、津波予警報、避難勧告・指示等の災害情報が住民に発令されてから、その情報がメディアを通じて伝達される過程を表現するものである。地域の社会構造が、その集団を構成する個人間のネットワーク構造であると解釈するならば、地域間を情報が伝達してゆく過程は、ネットワークそのものの生成過程にはほかならない。すなわち、このネットワークの生成プロセスを数理社会的に分析することにより、地域住民間の情報伝達特性を議論することができる。

住民間の情報伝達ネットワーク形成過程のモデル化には、数理社会学における偏ネットモデル (Rapoport, 1979; Fararo, 1981) を適用する。偏ネットモデルとは、社会において任意の個人を出発点としたネットワークが形成される過程において、結合する相手の選択がランダムなものであると仮定するのではなく、特定の個人に対して偏向 (バイアス) が作用することを仮定したモデルである。たとえば、ある個人が別の個人を友人として選択した場合には、選択された個人が逆に、自分を選択した者を友人として選択する確率が高くなる。この選択の偏向性が偏ネットモデルにおけるバイアスとして定義される。片田ら (1999) は、偏ネットモデルを災害時における住民間情報伝達過程の分析に応用した。本研究では、片田らのモデルを津波災害の時空間に適用する。

b) 口頭による情報伝達過程に生じるバイアス

偏ネットモデルで定義されるバイアスには、主に「反射的バイアス」、「推移的バイアス」がある。図-2に示す

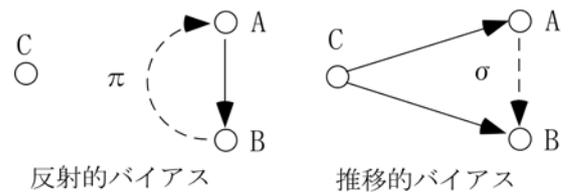


図-2 バイアスパラメータの定義 (片田ら, 1999)

ように、これらのバイアスは、ネットワークを生成する個人二者間の布置関係に基づいて定義されている。反射的バイアスとは、ある個人 A から情報伝達の相手として選択された個人 B が、自らを選択した相手 A を選択し返すときに定義され、推移的バイアスとは、同一の相手 C に選択された二人の A, B が、二人の間で互いに選択しあう場合に定義される。偏ネットモデルでは、個人間のランダム選択を基本過程とし、情報を伝達する個人二者間の布置関係に基づき、これらのバイアスを作用させてネットワークを生成する。個人 A, B 間の布置関係には、(a) バイアスが生じない関係、(b) 反射的バイアスが生じる関係、(c) 推移的バイアスが生じる関係の3つの可能性を考慮し、それぞれのバイアス事象が発生した場合の選択確率を式 (1), (2), (3) に示す。式 (1) は、バイアスが生じない布置関係の場合で、ランダムな選択が発生する場合の個人 A が B を選択する確率 d である。 N は地域を構成する住民の総数で、 α はある個人が選択する相手の数である。式 (2) は、反射的バイアスが生じる布置関係の場合で、A から B への選択が存在している場合に B が A を選択する確率 P_1 である。 π は反射的バイアス事象の発生確率である。式 (3) は、推移的バイアスが生じる場合で、共通の情報提供者をもち、A から B への選択が起こる確率 P_2 である。 σ は推移的バイアス事象の発生確率である。

$$d = \frac{\alpha}{N-1} \quad (1)$$

$$P_1 = \pi + (1-\pi)d \quad (2)$$

$$P_2 = \sigma + (1-\sigma)d \quad (3)$$

ところで、個人間の口頭による情報伝達には、その個人間の物理的な距離や伝達する相手数の制約がある。特に、災害時には身近に位置する人々への情報伝達が増加する。シミュレーションでは、あらかじめ情報を伝達する個人の選択に対し距離と伝達相手数の制約を設けるようにする。これらの制約条件はシミュレーションのアルゴリズムにおいてすべて変数として定義する。

c) 他の媒体を通じた情報伝達

個人間の口頭による情報伝達に加え、本シミュレーション



図-3 作成されるネットワークの一例

ョンでは、電話、同報無線や広報車、テレビやラジオ等の大衆メディアによる情報の伝達も考慮する。これらのメディアによる情報伝達を導入する場合には、スピーカ等の性能（情報到達範囲）や時間帯による情報取得率の変化も考慮する。広報車の走行経路はあらかじめ決定しておき、シミュレーションの実施にともない逐次移動させながら情報を伝達していく。

d) シミュレーションの実行

シミュレーションの実行にあたり、以下のデータを準備する。

- ・ 対象領域の世帯情報と街路網データ
- ・ 広報車の巡回経路や、同報無線の位置・個数
- ・ 口頭による情報伝達過程の特性情報（バイアスパラメータ、情報伝達相手数、情報伝達距離）
- ・ 各種情報伝達メディアの特性情報（情報到達範囲、情報取得率）

なお、世帯情報と街路網データは市販のものを利用し、ポリゴンで形成される世帯の中心点を情報伝達過程における個人として表現する。ポリゴンの中心点をノードとし、街路線をリンクとしてネットワークデータを作成する。図-3に、作成したネットワークの一例を示す。なお、広報車の走行経路はすべてこのネットワーク上で定義される。

シミュレーションは、片田ら（1999）の流れ図に従って実行する。

(3) 津波避難行動シミュレーション

津波の避難行動解析は、情報伝達シミュレーションで作成したネットワークデータを用いて、各避難対象世帯から指定した避難所までの最短経路探索問題（移動時間に関する最小コスト問題）として扱う。ここでは、歩行のみによる避難を仮定し、情報伝達シミュレーションから得られた情報取得時間を避難行動の開始時間とする。

シミュレーションの実行に必要なデータを以下に列挙する。

- ・ 対象領域の街路・世帯のネットワークデータ
- ・ 避難所の位置データ
- ・ 世帯毎の避難開始時間（情報取得時間）データ

(4) 津波氾濫流による人的被害評価

避難計画の総合的評価には、津波災害の仮想時空間において、避難中に発生し得る人的被害の有無を評価する必要がある。本研究では、著者ら（2002）が提案した、簡便な人体モデルを仮定した人的被害評価モデルを採用する。津波氾濫流による人的被害発生の有無を、氾濫流により自立が困難となる場合と定義し、その条件式を以下に示す。

$$f(mg - w) \leq \alpha \int 0.5\rho C_D u^2 dS + \int \rho C_M \frac{\partial u}{\partial t} dV \quad (4)$$

左辺は歩行面の摩擦力であり、右辺はモリソン式に基づく流体力である。CD、CMはそれぞれ抗力係数、付加質量係数である。fは歩行面における静止摩擦係数(=0.7)、mは考慮する人体の質量、wは流水中の人体に作用する浮力、dS、dVは人体モデルの流れに対する微小投影面積、浸水した人体部分の体積要素である。αは、歩行者の体力、流れに対する感じ方を考慮した係数であり、須賀ら（1995）を参考にα=2とした。uは津波氾濫解析から求められる計算グリッド上の断面平均流速である。氾濫シミュレーションの結果と避難行動シミュレーションで得られる避難者の位置情報を関連づけて式（4）を逐次適用し、人的被害発生の有無を評価する。

(5) シミュレーション要素の統合

上に述べたシミュレーション要素を統合し、仮想時空間において進行する津波災害過程を効果的に表示するために、GIS (Geographic Information System) のもつ優れた情報処理・分析機能を利用する。GISを利用した防災研究には数多くの事例があり、今後防災分野での技術発展とその活用が期待されている。片田ら（2000）は、河川堤防の決壊による洪水時の災害時空間における避難勧告等の情報伝達に着目し、防災情報システム評価のためのGISアプリケーションを開発した。片田らにより開発されたGISアプリケーションは、ESRI社のArcView 3.2を基礎とし、ArcViewに備わるスクリプト言語 (Avenue) でインターフェースが構築されており、汎用性が高い。情報伝達のシミュレーションはこのインターフェースにより制御され、あらかじめ構築しておいたGISデータベースからのデータ読み込み、ダイナミックリンクライブラリ (DLL) 化したシミュレーションプログラムの実行、結果の可視化を行うためのコマンドを制御する。

本研究では、片田らにより開発されたインターフェー

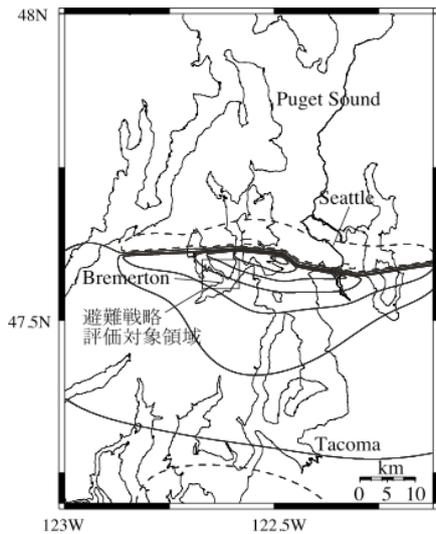


図-4 津波の氾濫シミュレーション対象領域

スを津波災害の仮想時空間の構築に拡張する。具体的には、津波の氾濫シミュレーションにおいて出力した各グリッドにおける氾濫水位、流速の空間分布の時系列データをGISデータベースに格納し、それらを逐次呼び出しながら情報伝達、避難の各シミュレーションを実行し、人的被害の評価を行う。ただし、津波の氾濫シミュレーションプログラム自体はGISアプリケーションには統合化されておらず、これは今後の課題である。

3. 適用例

ここでは、前述の手法を米国ワシントン州ブレマートン市の想定津波災害に適用した事例を示す。ブレマートン市は、氷河により削られたフィヨルド地形であるPuget Soundの入り江の奥に位置する人口4万人の都市であり、ワシントン州最大の都市シアトルの約20 Km西方に位置する。直下にはシアトル断層と呼ばれる活断層が東西に走り、シアトル市と共に、地震により発生する津波の被害が懸念されている。しかも、Puget Soundに面した地域は太平洋から遠く離れており、カスケード沈み込み帯で発生するプレート型巨大地震津波に対する備えが全く行われていない。また、この地域では米国建国以後の津波被災歴が無いため、住民の津波防災意識は極端に低い。したがって、我が国のように地震の揺れを感じたら津波が来るという教訓が定着しておらず、地震発生後如何に効果的な避難情報伝達活動を展開できるかが人的被害軽減の最重要課題となる。

GISデータの整備

シミュレーションを実行するにあたり、以下のGISデータを取得・整備した。

- 対象領域の世帯・街路データ。これはKitsap County

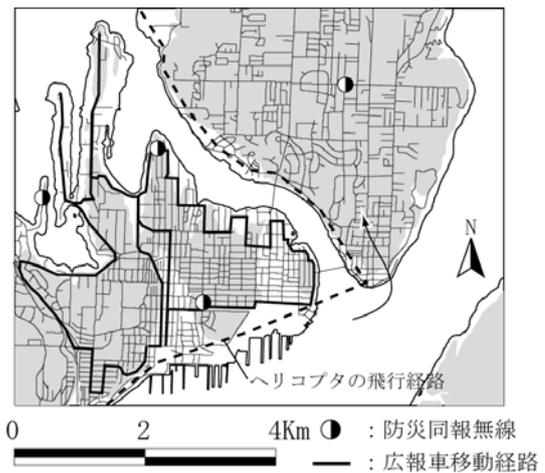


図-5 避難戦略総合評価対象領域

から提供を受けた。

- 広報車、ヘリコプタの移動ルート、同報無線の位置に関する空間情報。Kitsap Countyの防災担当者と協議のうえ仮想に設定した。
- 津波氾濫解析のための水深・陸上地形グリッドデータセット。これはワシントン大学から提供を受けた(Finlaysonら, 2001)。空間解像度は30mである。

図-4に津波伝播・氾濫シミュレーションの対象領域とシアトル断層地震(想定マグニチュードは7.6)の発生による推定地盤変動分布を示す。図の実線は、地盤上昇量のコンター(1 m 毎)で、点線は地盤沈降量のコンター(25 cm 毎)である。ここで想定している地震の詳細については越村ら(2002)を参照されたい。図-5は、避難戦略の総合的評価を行う領域である。対象領域では、津波避難所が未だ設けられておらず、ここでは、海面から標高20 mの区域(図-5中の灰色の領域)を仮想避難所と指定した。なお、避難情報伝達シミュレーションで仮定したパラメータ群は片田ら(2000)に倣った。

シミュレーションの実行と結果の一例

本研究で実行したシミュレーションでは、各要素において得られる解を統合し、最終的な解は、対象領域内の世帯が、発震後避難所に到達するまでに要する時間として得られる。図-6にその結果の一例を示す。津波は、図の南側の海岸において浸水している。来襲する津波の波高は3メートル程度で、海面の振動は地震発生直後から80分以上継続し、情報伝達による効率的な避難計画が必要であることが分かる。Puget Sound内の詳細な津波の計算結果についてはKoshimuraら(2002)を参照されたい。便宜上、図-6には避難完了まで60分以上かかった世帯のみを黒丸で表示している。このように、シミュレーション結果を他のGISデータと統合することにより、

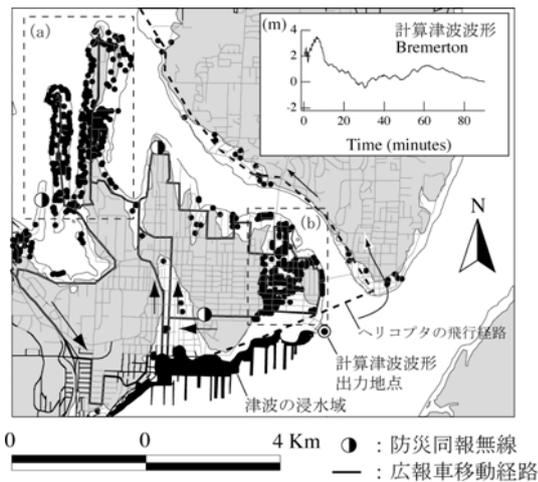


図-6 避難戦略総合評価結果の一例

避難計画に問題のある世帯群を特定することができる。ここでは、大きく分けて2つの世帯群を特定することが出来た。1つは図中の点線で囲った(a)の領域である。ここは、北に延びる砂嘴の上に世帯群が形成されており、設定した避難所まで到達するには南北に延びる道路上を長距離移動しなければならない。すなわち、避難所位置の設定に問題があることが分かる。一方、(b)の領域は、避難所までの経路については問題無いものの、巡回する広報車や同報無線からの避難情報の到達範囲の外にある世帯群であることが分かった。

今回の解析では、陸上における津波の浸水が図中南側の海岸線において発生したものの、浸水域に世帯は形成されておらず、この領域は米国海軍の造船所であることが分かった。軍事上の理由から、この造船所の領域に関しては一連の解析を行うことが出来なかったが、仮に造船業務にあたる工員が存在する場合には、かなりの人的被害が発生することが予想される。

現段階では、各世帯の避難開始時刻が災害情報の取得時間に等しいと仮定してシミュレーションを行っている。しかし実際は、情報の取得から避難開始までの意志決定に到る時間には個人差があることが住民のヒアリングにより判明した。情報取得から避難開始の意志決定に到るまでの行動過程のモデル化が今後の課題となる。

4. 結論

津波の市街地氾濫、住民間災害情報伝達、避難行動解析のシミュレーション要素をGIS上に統合し、特に情報伝達と住民避難に着目して、自治体が策定する津波防災対策を総合的に評価するための手法を開発した。本研究で得られた結論を以下に列挙する。

(1) 米国ワシントン州ブレマートン市を対象として、津波の氾濫シミュレーションを実施し、想定すべき外力の規模を明らかにした。

(2) ブレマートン市において、居住地の標高が20m以下である世帯を避難対象として、本評価手法を実施した結果、想定した情報伝達体制において津波からの避難がうまくいかない地域を特定できた。これらの地域においては、避難所設置の再検討と、情報伝達体制の見直しが必要であることが分かった。これは、同報無線や広報車からの情報が届かない、広報車が通過する時間が遅い、避難所への距離が遠いなどが原因であることがシミュレーション結果の可視化により分かった。

(3) 本評価結果を効果的に可視化することにより、津波災害の現象と情報伝達・避難行動の状況を視覚的に把握することが可能となる。さらに、津波危険区域における津波防災対策の事前評価だけでなく、自治体職員や住民の防災意識を高める啓発ツールとしての利用が可能である。

謝辞：本研究の一部は、文部科学省 大都市大震災軽減化特別プロジェクトによる研究助成を受けた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 片田敏孝・及川 康・田中隆司 (1999) : 災害時における住民への情報伝達シミュレーションモデルの開発, 土木学会論文集 No. 625/IV-44. pp. 1-13.
- 片田敏孝・浅田純作・桑沢敬行 (2000) : GISを用いた災害情報伝達のシミュレーション分析, 土木情報システム論文集, Vol. 9, pp. 49-58.
- 国土庁・農水省構造改善局・農林省水産庁・運輸省・気象庁・建設省・消防庁 (1997) : 地域防災計画における津波対策強化の手引き, 99p.
- 越村俊一・H. Mofjeld・片田敏孝・河田恵昭 (2002) : 津波の市街地氾濫による人的被害に関する一評価法, 米国シアトルウォーターフロントにおけるケーススタディ, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 1441-1445.
- 須賀堯三・上阪恒雄・吉田高樹・浜口憲一郎・陳志軒 (1995) : 水害時の安全避難行動(水中歩行)に関する検討, 水工学論文集, 第39巻, pp. 879-882.
- Fararo, T. J. (1981) : Biased Network and Social Structure Theorems, Social Networks, No. 3, pp. 137-159.
- Finlayson, D. P., R. Haugerud and R. Greenberg (2001) : Building a seamless digital elevation model of the Puget Sound basin, Puget Sound Regional Research 2001 : Abstracts and biographies, Puget Sound Water Quality Action Team, Olympia, WA.
- Imamura, F. (1996) : Review of Tsunami Simulation with a Finite Difference Method, Long-Wave Run-up Models, World Scientific, River Edge, NJ, pp. 43-87.
- Koshimura, S., H. O. Mofjeld, and A. Moore (2002) : Modeling the 1100 bp palaeotsunami in Puget Sound, Washington, Geophysical Research Letters, Vol. 29, No. 20, pp. [90-1]-[9-4].
- Okada, Y. (1985) : Surface Deformation due to Shear and Tensile Faults in a Half-space, Bulletin of the Seismological Society of America, 75 (4), pp. 1135-1154.
- Rapoport, A. (1976) : A Probabilistic Approach to Networks, Social Networks, No. 2, pp. 1-18.