

災害情報伝達と住民避難に着目した 津波防災戦略の評価手法

越村俊一¹・片田敏孝²

¹阪神・淡路大震災記念 人と防災未来センター 専任研究員
(〒651-0073 兵庫県神戸市中央区脇浜海岸通1-5-2)

E-mail : koshimuras@dri.ne.jp

²群馬大学工学部建設工学科 助教授
(〒376-8515 群馬県桐生市天神町1-5-1)

E-mail : katada@ce.gunma-u.ac.jp

津波災害発生時の住民間情報伝達と避難行動に着目し、津波被災想定地域における避難計画を評価するための手法を開発する。本評価手法は、非線形長波理論に基づく津波氾濫解析、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た結果、津波災害の時空間における自然現象と社会現象を視覚的に把握し、想定した津波避難計画の問題点を抽出することができた。

Key Words : *Tsunami Disaster, Evacuation Planning, Disaster Information, Tsunami Casualty*

1. はじめに

平成9年に関連7省庁から津波防災対策指針¹⁾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。上記指針にも明記されているように、将来沿岸部に来襲する津波が計画規模の津波高を上回る可能性があり、防災構造物の機能限界を正しく認識したうえで、それを超えるものについては他の方法での対策を準備しておく必要がある。すなわち、津波災害から生命を守るためには、守る側（行政）だけではなく、守られる側（住民）の努力も求められることが明記された。

平成15年5月26日、三陸地方南部を震源とするマグニチュード7の地震が発生した。この地震により、岩手県、宮城県を中心に三陸沿岸部で震度4～6の地震動が観測され、津波の発生が直ちに懸念された。実際にはこの地震の震源は71Kmと深く、結果的に有意な海面変動は観測されなかったが、この地震の揺れは過去大津波を引き起こした明治・昭和の三陸地震の時よりも強いものであった。このとき、気象庁による「潮位の変化はあるが津波被害のおそれなし」の情報が発表されるまで12分の時間が経過しており、いわば津波情報が発令されるまでの空白の12分間となった。この間の住民がとった行動

は、将来発生が確実視されている宮城県沖地震における住民の津波避難に対する意識を見るうえでも興味深い。地震後、著者らは三陸地方に赴き、今回の地震直後の住民の津波避難行動に関する聞き取り調査を行った²⁾。調査の結果、多くの住民が地震直後に津波のことを想起しているにもかかわらず、自宅でテレビを見ながら津波の情報を待つという、災害情報に過度に依存した姿勢が見られた。津波災害から生き延びる唯一の方法は、海際で地震の揺れを感じたら直ちに避難することであり、そのためには災害情報を出す側の努力だけでなく、情報に過度に依存しない住民の災害文化の形成が重要であろう。

本研究では、津波発生時の情報伝達と避難行動に着目して、津波の発生から市街地氾濫、住民への災害情報伝達、避難行動という一連の災害過程を総合的に記述するシミュレーションモデルを開発する。シミュレーション結果の可視化により、災害情報に依存したコミュニティにおける津波災害に対する弱い弱性を評価する。この評価結果は、情報の出し手側（行政）にとっての避難計画の有効性を評価することになると同時に、情報の受け手側（住民）にとっても、情報に過度に依存した津波避難意識に対する警笛として有効に活用できるという2面性を有することを示す。

モデルの適用には、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を対象とした．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地域である．住民が避難勧告等の災害情報に完全に依存した状態であり，本手法の検証に適した地域であると判断したためである．

2. 津波避難計画評価の手法

本研究で提案する津波避難計画の評価手法は，以下の3つのシミュレーション要素で構成され，それぞれのシミュレーション要素を地理情報システム（GIS）上で統合する．すなわち，（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を統合し，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・社会的現象を総合的に記述することによって，避難計画の有効性を評価する．

コンピュータ上で展開される津波災害の仮想時空間において，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，避難の意思決定を行い，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，津波警報が各管区気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，津波は沿岸部に到達し，市街地氾濫に到る．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3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³⁾を採用する．シミュレーションの初期条件となる津波初期水位分布は，断層運動に起因する海底地盤の鉛直変動量と等価であると仮定し，断層運動の諸量を表すパラメータから地盤変動量を Okada (1985) の解析解を用いて求める⁴⁾．

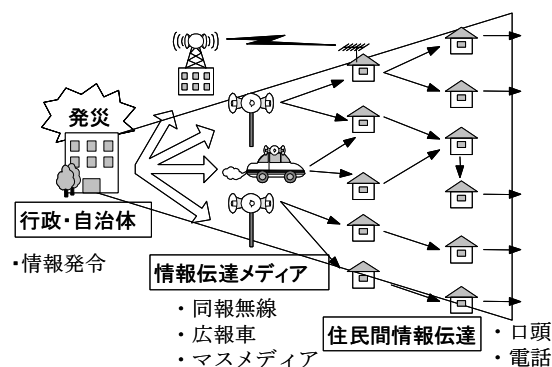


図-1 情報伝達ネットワーク形成モデルの概念

（2）津波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，図-1に概念的に示すように，ネットワークそのものの生成過程にほかならない．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^{5), 6)}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⁷⁾．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

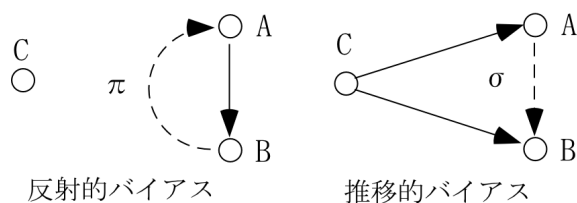


図-2 バイアスパラメータの定義（片田ら，1999）

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は、(a) : $d=Z/(N-1)$, (b) : $P_1=\pi+(1-\pi)d$, (c) : $P_2=\sigma+(1-\sigma)d$, とそれぞれ表せる。D は個人 A が B をランダムに選択する確率である。N は地域を構成する住民の総数で、Z はある個人が選択する相手の数である。 π , σ はそれぞれ、反射的バイアス事象、推移的バイアス事象の発生確率である。

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、情報の発令時刻）

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



図-3 作成されるネットワークの一例

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⁷⁾。

（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。住民の避難行動解析については、人間の経路選択の曖昧さ等を表現するものではなく、あらかじめ設定された避難経路を用いて避難することを前提としている。これは、津波災害の対象地域に居住する住民をその解析対象としているためで、避難計画とは、あらかじめ決めておいた経路を災害時においても間違いなく利用することが前提となるためである。ここでの津波避難経路設定は、第1近似として最短経路探索問題としたが、対象領域において避難路がすでに決まっている場合には、その経路を元にネットワークを生成することで実現に近づけることが可能である。現段階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刻を避難行動の開始時刻とする。シミュレーション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）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

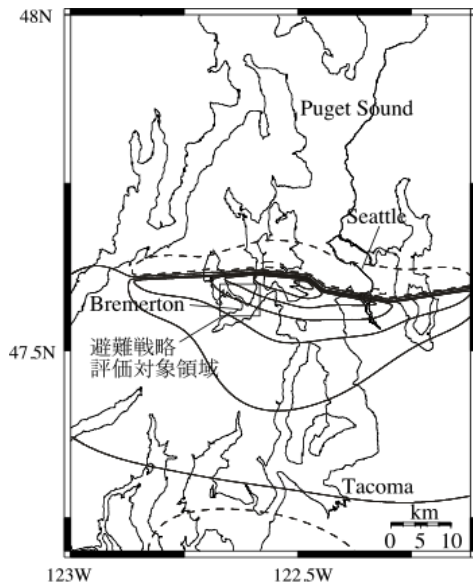


図-4 津波の氾濫シミュレーション対象領域

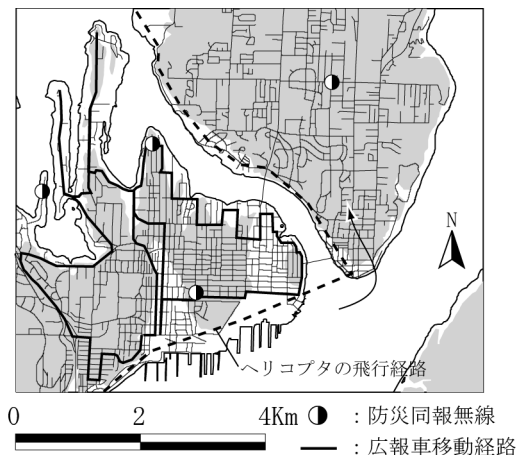


図-5 避難計画の評価対象領域

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⁸⁾。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、

表-1 情報伝達シミュレーションパラメータ

	防災無線	マスメディア
可聴範囲	250m	
聴取率	30%	40%
伝達回数	3回	3回
1回目	5分	3分
2回目	10分	8分
3回目	15分	13分

	広報車	ヘリコプタ
可聴範囲	250m	500m
聴取率	30%	30%
伝達時間間隔	50秒	60秒
走行速度	5km/hr	60km/hr
出発時刻	5分後	5分後

それらをバックグラウンドで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する。しかしながら、浸水した地域における情報伝達経路の寸断や、津波氾濫流に巻き込まれた住民の取り扱いとは現段階では行わない。この点については今後の課題である。

3. 評価手法の適用例

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ので、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。

(1) 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 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⁹⁾。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¹⁰⁾。図-5 は、避難計画の評価を行う領域である。対象領域には 14648 世帯あり、そのうち避難対象世帯を標高 20 m 以下に位置する世帯とした。津波避難所は指定されていないので、標高 20 m の地点を避難場所として定義する（図-5 の灰色の領域）。

（2）情報伝達シミュレーションの実行

表-1 に示すシナリオを仮定して、対象地域における災害情報伝達シミュレーションを実施する。広報車は 2 台体制であらかじめ設定されたルートを通じて避難情報を伝達する。広報車は発震後 5 分で出発し、一定の速度で走行しながら 50 秒間隔で自動的に情報を伝達する。また、空からもヘリコプタにより情報伝達を行うこととする。電話による住民間の情報伝達については、モデルでの設定は可能であるが、地震時の輻輳を考慮して行われえないものとする。マスメディアからは、発震後 3 分で第 1 回目の避難情報が発令されると仮定し、以後 5 分ごとに同様の情報を伝達する。また同報系の防災無線も、発震後 5 分で避難に関する情報を流し、以後 5 分間隔で放送を行うとする。

本シミュレーションは、ランダムネットワークの生成を行うために、得られる解の安定性を考慮して、試行回数を 100 回とし、その平均値を求めた。各世帯の情報取得時間の空間分布を図-6 に示す。全 14648 世帯の情報取得率は 98.42% であり、世帯平均をとった情報取得時間は 6 分 25 秒であった。図の黒丸が 5 分以内に情報取得を終了した世帯、灰色の丸が 5 分から 10 分の間に情報取得を終了した世帯である。ここで設定したシナリオに基づく情報伝達体制では、全世帯の約 97%（14207 世帯）にあたる世帯が発震後 10 分以内で情報を取得することが分かった。

（3）避難計画の評価

本研究で実行したシミュレーションでは、最終的な解は、対象領域内の世帯の住民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-7 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（図中の灰色の地域）。図中の計算津波波形からも分かるように、Bremerton はシアトル断層の地盤変動域に位置しているため、地震発生直後から津波が来襲し、発震後 10 分で最大波が来襲する。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 分以上継続する。Puget Sound 内の詳細な津波の計算結果については Koshimura ら（2002）に詳しい¹⁰⁾。図-6 から分かるように、避難情報が各世帯に行き渡るまで 10 分を要しているの、従来の避難体制では津波来襲前に避難を完了することが不可能ある。津

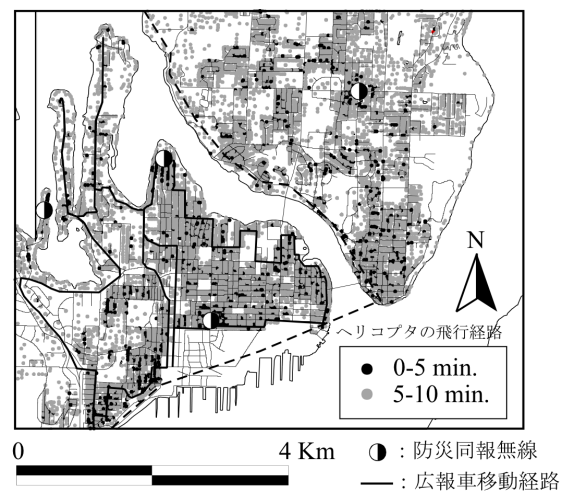


図-6 情報伝達シミュレーション結果

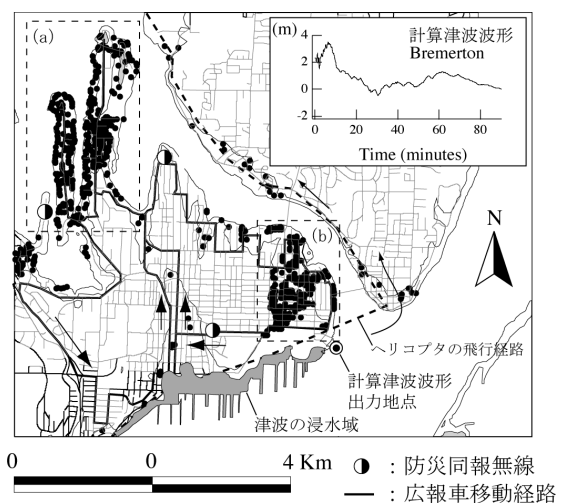


図-7 避難計画評価結果の一例

波避難計画の最終的な目標は、津波の来襲前に避難を完了するための情報戦略、避難路・避難所設定を行うことにあるが、現段階では単に津波来襲時間との関連で津波避難計画を評価することは現実的ではない。まず避難完了までにどの領域が問題となっていて、その問題の原因は何にあるかを調べる必要がある。本研究ではシミュレーション結果の可視化から、問題となる 2 つの地域を特定した。図-7 に示した一例では、問題となる地域を表示するために、便宜的に避難完了まで 60 分以上かかった世帯を黒丸で表示している。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切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。

4. 結論と今後の課題

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の有効性を評価するための手法を開発した。

米国ワシントン州ブレマートン市において、居住地の標高が 20 m 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。

シミュレーションに基づく評価結果を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。本研究で提案した手法を、自治体における津波避難計画の検証や、住民の迅速な自主避難、自助努力による避難路整備等に効果的かつ幅広く利用できるよう、拡張性と汎用性を高めていく。

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（代表：片田敏孝）。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 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：地域防災計画における津波対策強化の手引き，99p.，1997.
- 2) 社会安全研究所：2003 年 5 月 26 日宮城県沖を震源とする地震災害調査報告（速報），4p.，2003.
- 3) Imamura, F. : Review of Tsunami Simulation with a Finite Difference Method, Long-Wave Run-up Models, World Scientific, River Edge, NJ, pp.43-87., 1996.
- 4) Okada, Y.: Surface Deformation due to Shear and Tensile Faults in a Half-space, Bulletin of the Seismological Society of America, 75 (4), pp.1135-1154., 1995.
- 5) Rapoport, A. : A Probabilistic Approach to Networks, Social Networks, No.2, pp.1-18., 1976.
- 6) Fararo, T. J. : Biased Network and Social Structure Theorems, Social Networks, No.3, pp.137-159., 1981.
- 7) 片田敏孝, 及川 康, 田中隆司：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.. 1999.
- 8) 片田敏孝, 浅田純作, 桑沢敏行：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., 2000.
- 9) Finlayson, D. P., R. Haugerud and R. Greenberg : 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., 2001.
- 10) Koshimura, S., H. O. Mofjeld, and A. Moore : Modeling the 1100 bp paloetsunami in Puget Sound, Washington, Geophysical Research Letters, Vol.29, No.20, pp.[90-1]-[9-4], 2002.

(2003. 7. 1 受付)

AN EVALUATION MODEL FOR TSUNAMI EVACUATION PLANNING FOCUSING ON THE TRANSMISSION OF DISASTER INFORMATION

Shunichi KOSHIMURA and Toshitaka KATADA

Focusing on the transmission of disaster information within a coastal community, the authors develop a simulation model to evaluate a tsunami evacuation planning. The model consists of three simulation factors, i.e. tsunami inundation model based on the non-linear shallow water equations, disaster information and evacuation model based on the biased net model. The developed model is applied to City of Bremerton, Washington State, U.S., that is under the threat of possible tsunami disaster due to Seattle Fault earthquake.