

# 津波来襲時における住民の避難過程を考慮した人的被害評価手法の検討

## Study on the Evaluation Method of Human Loss including Evacuation Process from Tsunami

宍戸直哉<sup>1</sup>・宇川弘朗<sup>2</sup>・今村文彦<sup>3</sup>

Naoya SHISHIDO, Hiroo UKAWA, Fumihiko IMAMURA

In order to estimate human loss caused by tsunamis, we proposed the method in consideration of resident's evacuation process that affected human behaviors and loss greatly. The process can be divided into may three steps after earthquake, which could be modeled in this study. The evacuation process became clear and factors affecting the evacuation can be statistically clarified through the questionnaire survey. And we evaluated the effective method and proposed the high human loss evaluation method considering a local evacuation characteristic. Finally we applied it and carried out the evaluation of human loss in the target area.

### 1. 緒言

津波による被害の軽減対策を講じるためには、事前の被害予測がきわめて重要である。その中で、人的被害の予測は、我が国の防災対策で国民の生命、身体を災害から保護することを最重要と位置付けていることから必要不可欠である。津波による人的被害推定は、これまで多くの自治体や国の中央防災会議において被害想定報告書として公表されているほか、既往研究としては竹内ら(2008)、島田ら(1999)をはじめ精力的に行われている。しかしながら、これらの手法に共通して挙げられる課題が、推定方法が過去の事例の避難率による評価であり、一人ひとりで異なる避難過程を一律として仮定している点である。現在、志方ら(2005)は、早期避難が確実に被害軽減につながることを示しており、内閣府(2004)では被害軽減に向けた避難行動の役割の重要性を述べている。

人的被害評価手法については、最近、竹内ら(2008)や宍戸・今村(2009)により、評価式が提案されている。本研究では、これらの研究成果を発展させるために、住民の避難過程に着目し、避難開始時間や避難場所への移動時間などをより詳細にモデル化し、様々な地域において適用可能な一般性の高い人的被害評価手法の検討を目的とする。ここで、避難完了率と避難意向率を設定し、これを対象地域での住民アンケート調査により評価するという提案を行う。

### 2. 住民の避難過程を考慮した津波人的被害評価手法

津波来襲時の避難行動は、津波到達前に迅速、且つ的確に行うことで被害を免れる可能性が高いように、時間が非常に重要である。本研究では、住民の避難過程を考える際、避難の判断基準、津波(地震)発生から避難するか

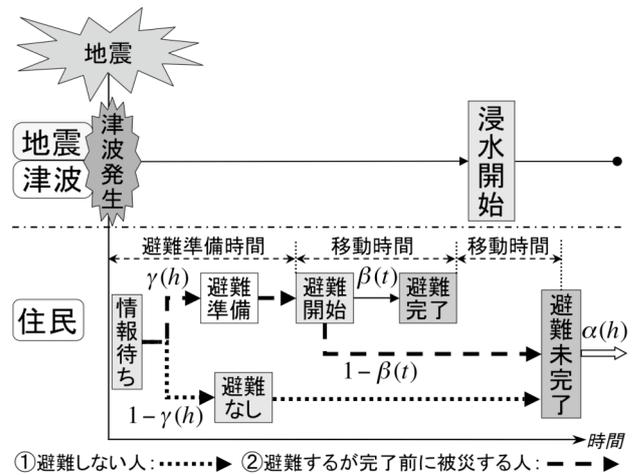


図-1 津波来襲時における住民の避難過程

否かの判断をするまでの時間(避難準備時間)、そして避難場所までの移動時間が人的被害規模に大きく影響を及ぼすと考え、この点に着目した評価手法を提案する。この時、提案手法における被害評価式は、竹内ら(2008)の評価式(式(1))の避難率を表す項を拡張することで定義する。

$$D = \alpha(h)\{1 - \beta(LT)\}Pop \quad (1)$$

$$\alpha(h) = \Phi \left[ \frac{h - \mu}{\sigma} \right] \quad (2)$$

ここで、 $D$  : 死者数、 $\alpha(h)$  : 2004年スマトラ島沖地震津波でのバンダ・アチェにおける津波浸水計算結果と実際の人的被害調査データよりKoshimura et al.(2009)が構築した津波被害関数(浸水深に対する死亡率、 $h$ :浸水深(m)、 $LT$ :海洋観測を行うブイによる津波警報発令から沿岸域への津波到達までの時間、 $\beta(LT)$ : $LT$ に対する住民避難率、 $Pop$ :人口、 $\Phi$ :標準正規分布の累積確率密度関数、 $\mu$ : $h$ の平均値( $\mu = 3.75$ )、 $\sigma$ : $h$ の標準偏差( $\sigma = 1.35$ )である。本提案手法における被害評価式を式(3)のように定義する。

1 学生会員 JR 東海旅客鉄道株式会社  
 2 学生会員 東北大学 大学院工学研究科  
 3 正会員 工博 東北大学教授 大学院工学研究科

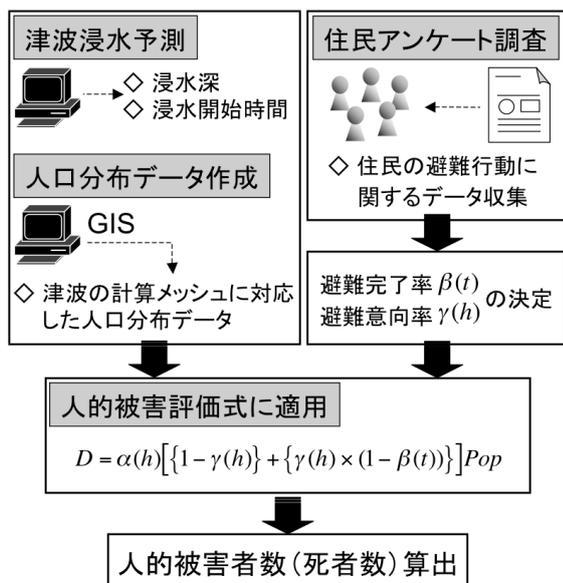


図-2 人的被害評価の流れ(提案手法)

$$D = \alpha(h) \left[ \{1 - \gamma(h)\} + \{\gamma(h) \times (1 - \beta(t))\} \right] Pop \quad (3)$$

ここで、 $\beta(t)$ ：津波(地震)発生から避難開始までの準備時間と避難所までの移動時間を考慮した避難完了率、 $\gamma(h)$ ：住民の避難意向率である。式(3)の $1 - \gamma(h)$ は、避難しない人の割合を表し、ここに属する人は途中で避難行動をとることはない。 $\gamma(h) \times (1 - \beta(t))$ は、避難するが完了前に被災する割合を表す。前者を①、後者を②とし、それぞれの過程を図-1に示す。また、本研究での新規提案として、地域特性を考慮するために $\beta(t)$ 、 $\gamma(h)$ は住民アンケート調査より求める。そして、津波の浸水予測、人口データについては従来の手法を用いて算出する。図-2に本提案手法における人的被害評価の流れを示す。

### 3. 宮城県東松島市住民アンケート調査

#### (1) 住民アンケート調査

宮城県東松島市は、仙台市の北東に位置し、平成17年4月に旧矢本町と旧鳴瀬町の合併により誕生した人口4万3千人程度の市であり、津波防災マップの作成(平成19年度)や海岸堤防の改良工事など、現在、防災・減災に対する活動が積極的に行われている地域である。アンケート調査地域を図-3、概要を表-1に示す。

この調査は、式(3)の避難完了率 $\beta(t)$ 、避難意向率 $\gamma(h)$ を決定するためのデータ収集と津波防災マップの活用実態の把握を目的として実施した。ここでは、 $\beta(t)$ 、 $\gamma(h)$ を決定するために着目した設問について示す。 $\beta(t)$ は、地震発生から避難開始までの準備時間と避難場所までの移動時間を昼夜で回答してもらい、準備+移動時間を避難所要時間とする。そして、時間毎に分類し、全回答者に対する各時間の避難完了者の割合と考える。 $\gamma(h)$ は、避難

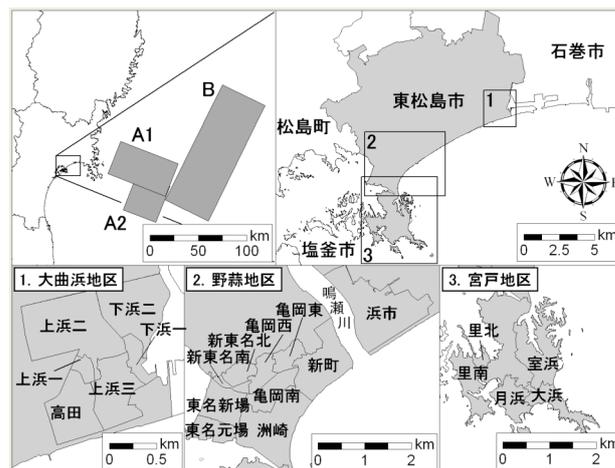


図-3 対象地域及び想定宮城県沖地震(連動)断層位置

表-1 住民アンケート調査の概要

|         |   |
|---------|---|
| 調査方法    | 配布：東松島市広報誌への折り込み<br>回収：各行政区の班長による回収       |
| 調査期間    | 2009年6月1日～6月21日                           |
| 調査対象者   | 想定宮城県沖地震による津波で浸水が予想される行政区(21行政区, 2,313世帯) |
| 調査票配布数  | 2,313票                                    |
| 調査票回収状況 | 1,197票(52%)                               |

の判断が浸水規模(浸水深)により行われるものと考え、どの程度の浸水深で避難するか回答してもらい、避難する人とししない人の総計に対する、各浸水深での避難意向者数の割合と考える。

#### (2) 避難完了率 $\beta(t)$ 、避難意向率 $\gamma(h)$ の決定

$\beta(t)$ 、 $\gamma(h)$ は行政区毎(大曲浜、野蒜、宮戸地区)に決定する。方法として、まず、得られたデータが正規分布に従うと考え、正規分布曲線に回帰させることを検討する。そのため、 $\chi^2$ 検定による正規性の検定を行った。その結果、 $\beta(t)$ 、 $\gamma(h)$ ともに正規性が見られなかった。そこで、それぞれの調査結果の累積相対度数分布が双曲線正接関数曲線に従うものと考え、回帰式を式(4)のように定義した。

$$y(x) = a \times \tanh(b(x - c)) + d \quad (4)$$

ここで、 $a, b, c, d$ は変数である。そして、Levenberg-Marquardt法により非線形モデルの二乗誤差を最小にする $a, b, c, d$ を求めることで $\beta(t)$ 、 $\gamma(h)$ を決定する。調査結果の累積相対度数分布と回帰させた結果を図-4( $\beta(t)$ -昼-)と図-5( $\gamma(h)$ )に示す。結果を見ると、分布状況を良好に表していることが確認できる。

#### (2) アンケートの簡便化(項目数の軽減)

提案手法は、アンケート調査から住民の避難過程を把握する手法をとり、行政区毎に $\beta(t)$ 、 $\gamma(h)$ を決定する。

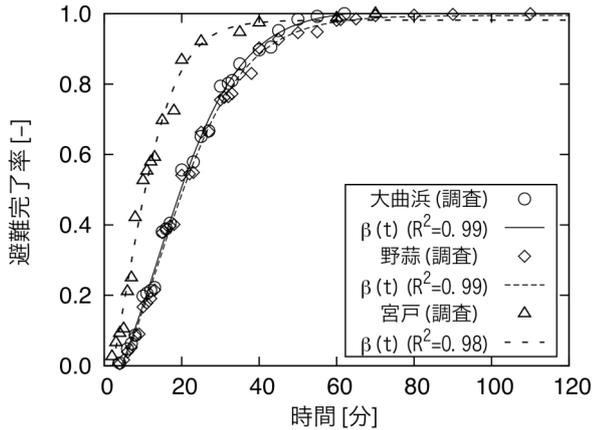


図-4 住民の避難完了率  $\beta(t)$  [昼]

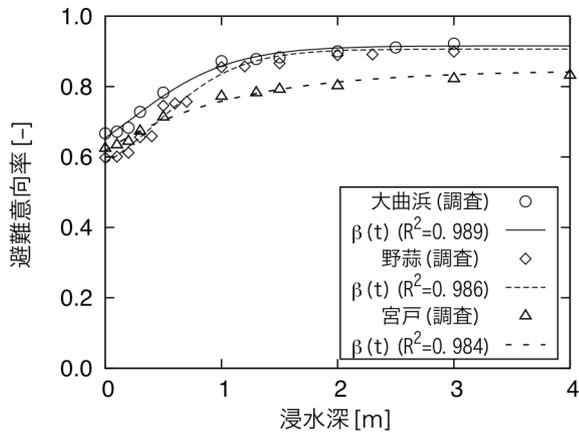


図-5 住民の避難意向率  $\gamma(h)$

このとき、行政区は、性別・年齢など異なる項目で構成されているため、これらの項目も検討する必要があるが、調査時は最小限の項目で作業負担を軽減する必要がある。そこで調査項目毎に結果を比較し、住民の避難過程に影響を与える(差異が出る)項目を明確にして調査の簡便化を検討した。

それぞれの項目中の要素間における差異の検定として、2標本 Kolmogorov-Smirnov 検定(以下、2標本 K-S 検定)を行う。2標本 K-S 検定は、標本の代表値の差の検定として用いられるノンパラメトリック手法の1つである。

まず、前提条件として、「2つの要素間に差がない」と帰無仮説を立て、その仮説に対し有意水準 5%、1%で両側検定を行う。評価過程は、項目の各要素毎に累積相対度数分布を求め、2要素間の各階級で累積相対度数の差をとり、絶対値で最大のものを検定量  $D$  とし、以下の検定統計量  $\chi_0^2$  を計算する。

$$\chi_0^2 = 4D^2 \frac{n_1 n_2}{n_1 + n_2} \quad (5)$$

表-2 2標本 K-S 検定結果 (避難所要時間(昼))

| 項目  | 要素  |    | D 値   | $\chi_0^2$ 値 | p 値                    | 有意水準 |    |
|-----|-----|----|-------|--------------|------------------------|------|----|
|     |     |    |       |              |                        | 5%   | 1% |
| 行政区 | 大曲浜 | 宮戸 | 0.370 | 25.94        | $4.651 \times 10^{-6}$ | ×    | ×  |
|     | 野蒜  | 宮戸 | 0.388 | 39.34        | $5.734 \times 10^{-9}$ | ×    | ×  |
| 職業  | 漁業  | 主婦 | 0.313 | 11.68        | 0.006                  | ×    | ×  |
|     | 漁業  | 無職 | 0.261 | 8.72         | 0.026                  | ×    | ○  |
| 性別  | 男性  | 女性 | 0.177 | 20.95        | $5.643 \times 10^{-5}$ | ×    | ×  |

○：差がない ×：差がある

表-3 2標本 K-S 検定結果 (浸水規模(浸水深))

| 項目 | 要素    |     | D 値   | $\chi_0^2$ 値 | p 値   | 有意水準 |    |
|----|-------|-----|-------|--------------|-------|------|----|
|    |       |     |       |              |       | 5%   | 1% |
| 年齢 | 70代以上 | 60代 | 0.109 | 5.45         | 0.131 | ×    | ×  |
|    | 70代以上 | 40代 | 0.142 | 5.66         | 0.118 | ×    | ×  |
| 性別 | 男性    | 女性  | 0.081 | 5.37         | 0.137 | ×    | ×  |

○：差がない ×：差がある

ここで、 $n_1, n_2$  は各要素の合計度数である。 $\chi_0^2$  値は、 $n_1, n_2$  が 40 よりも大きい場合、近似的に自由度 2 の  $\chi^2$  分布に従うことが知られていることから、自由度 2 の場合における  $\chi_0^2$  有意確率を求め帰無仮説の採否を決め、採択の場合「要素間に差がない」とする。

2標本 K-S 検定結果の一部を表-2(避難所要時間-昼-)、表-3(浸水規模)に示す。結果、 $\beta(t)$  については、昼夜ともに項目「行政区」において有意差が認められた。これは、 $\beta(t)$  が時間により決まるパラメータであるため、地理的要因が最も大きいものと考えられる。また、「職業」、「性別」の各要素間で有意水準 5%、1%のいずれかにおいて有意差が認められた。したがって、「職業」、「性別」の項目も差異要因となる可能性が高いことがわかった。

$\gamma(h)$  については、全ての項目において統計的有意差は認められなかった。しかしながら、その中でも項目「性別」、「年齢」については、有意確率  $p$  が 0.1 程度と、 $\gamma(h)$  に差異が生じる可能性があることは否定できないと考えられる。

以上の結果より、調査では「行政区」以外に「性別」、「職業」「年齢」の項目を設けることが適当である。結果として、最小限の項目でアンケート調査が実施可能であり、住民・調査実施者の負担軽減、有効回答率の増加、最低限の費用での調査実施が見込める。

#### 4. 人的被害評価式の適用

##### (1) 津波浸水予測

東松島市において発生が懸念されている宮城県沖地震の運動型(図-3 の断層 A1, A2, B)を対象地震とした。断層パラメータは、宮城県発表の「第三次地震被害想定調査報告書(2004)」を参照した。断層 A1, A2 はアスペリティも考慮する。

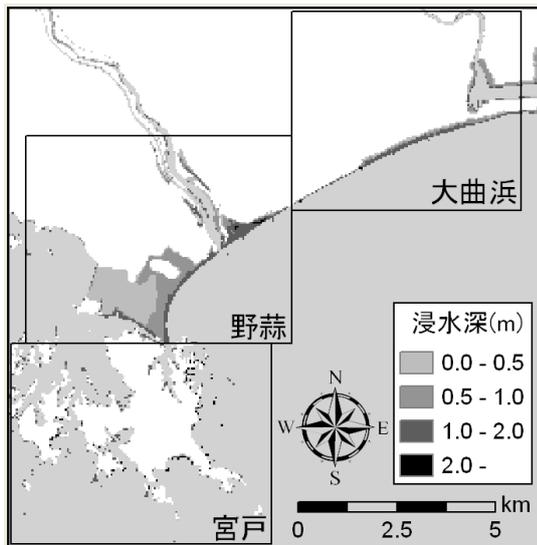


図-6 浸水予測結果(計算メッシュ 50m)

浸水予測計算の基礎方程式として、連続式と Navier-Stokes 方程式を水深方向に積分した、非線形長波理論を用いた。計算メッシュは 1,350m, 450m, 150m, 50m を接続して行う。また、粗度・地形・堤防データは中央防災会議の公開データを利用した。初期条件として、断層パラメータから Mansinha and Smylie(1971)の方法を用いて計算した鉛直海底地盤変動量を、津波初期波形として与える。潮位は朔望平均満潮位とし、海岸構造物は、機能しない場合を想定した。浸水予測結果を図-6 に示す。

東松島市周辺では、最大2m程度の浸水が予想された。2mを超える地点は、宮戸地区、鳴瀬川河口部など限定的である。さらに、野蒜地区内の低地で浸水面積が大きいことがわかった。ここは大部分が、0~50cmの浸水深であり、海岸部に比べ大きな値ではない。そして市内の鳴瀬川を遡上していることも確認できる。また、東松島市沿岸部には、最短で45~50分程度で津波が到達する結果であった。人的被害評価では、浸水深と浸水開始時間のデータを用いる。

### (2) 人口データの作成

作成方法は、平成 12 年国勢調査 100m メッシュ推計データをポイントデータに分割し、そのポイントに人口を単純に分割した値を持たせ、そのポイントを GIS により津波の計算メッシュに対応付け、津波計算の各メッシュに入るポイント数の合計値をとることで各メッシュの値とする。

### (3) 人的被害評価

各データを評価式に代入し、各地区毎に死者数を算定した。また、既往手法(宮野・呂(1992), 静岡県(2001), 中央防災会議(2005)の手法)を用いて評価した結果と比較した(表-5)。

提案手法では、各行政区で求めた  $\beta(t)$ ,  $\gamma(h)$  を用いて、行政区毎に評価したところ、東松島市における人的被害

表-4 既往の人的被害評価式

| 評価手法         | 評価式   |
|--------------|---|
| 宮野・呂(1992)   | $D = 0.072 \times (L + \frac{1}{2}M)^{1.018}$                               |
| 静岡県(2001)    | $D = 0.0424 \times \exp[0.1763 \times (l + \frac{1}{2}m)] / 100 \times Pop$ |
| 中央防災会議(2005) | $D = 0.0282 \times \exp(0.2328 \times h) \times Pop$                        |

$D$ :死者数(人),  $L$ :大破棟数(棟),  $M$ :中破棟数(棟),  $l$ :大破棟数率(%),  $m$ :中破棟数率(%),  $Pop$ :人口,  $h$ :浸水深(m)

表-5 人的被害評価結果

| 評価式          | 人的被害(人) |     |    |    |   |
|--------------|---------|-----|----|----|---|
|              | 全域      | 大曲浜 | 野蒜 | 宮戸 |   |
| 提案手法         | 昼       | 6   | 1  | 4  | 1 |
|              | 夜       | 7   | 1  | 5  | 1 |
| 宮野・呂(1992)   | 1       | 0   | 0  | 1  |   |
| 静岡県(2001)    | 1       | 0   | 1  | 0  |   |
| 中央防災会議(2005) | 5       | 2   | 1  | 2  |   |

表-6 建物被害評価結果

| 被害規模 | 建物被害(棟) |     |    |    |
|------|---------|-----|----|----|
|      | 全域      | 大曲浜 | 野蒜 | 宮戸 |
| 大破   | 1       | 0   | 0  | 1  |
| 中破   | 28      | 14  | 6  | 8  |

首藤(1988)による浸水深と建物被害の関係を用いた

は小規模であり、最悪の場合でも 10 人未満であることがわかった。条件として 1m 以上の浸水深の領域を対象としたことで、穴戸・今村(2009)と比べ人的被害推定結果の被害者数が大きく減少する結果となったと考えられる。

次に、既往の評価手法との比較として、多くの自治体や中央防災会議で用いられている代表的な 3 手法を用いた人的被害評価値と、提案手法との結果を比較した。結果として、宮野・呂(1992), 静岡県(2001)の 2 手法は、他の手法に比べ小規模な被害数となっていることがわかる。これは、2 手法が建物被害(大破・中破棟数)(表-6)から死者数を求める手法であり、東松島市での建物被害予測結果が微小と予測されたためだと考えられる。また、提案手法と既往手法との違いとして、野蒜地区での差が大きかった。これは、野蒜地区が、浸水深は小さいが、浸水面積が広い場所であり、避難場所までの移動時間を要するために、本手法において考慮した避難過程を表すパラメータが影響したものと考えられる。しかしながら、東松島市では全体の人的被害が小さく、差の見られない地域もあるので、一概に避難過程の効果についての議論はできない。そのため、今後は津波により大きな被害の予想される地域、例えば、宮城県気仙沼市や三重県尾鷲市など、予想される浸水規模(浸水面積, 浸水深)が大きく、浸水域内に広く人口が分布している場所に本手法を適用し更なる検討をする必要がある。

#### (4) 提案手法の利用方法

提案手法の利用方法を図-7に示す。住民アンケート調査では、 $\beta(t)$ 、 $\gamma(h)$ を決定するためのデータ収集をする。 $\beta(t)$ については、行政区間において有意差が見られ、これは、 $\beta(t)$ が時間によるものであるため、地理的条件が最も影響を及ぼすものとした。それに加え「職業」と「性別」で有意差が認められたことから、これらの要素も避難過程に影響を及ぼす可能性があることから、調査時は行政区による地理的な要因とともに、「職業」と「性別」について比較検討することが望ましい。一方、年齢や津波経験、津波防災マップなどの項目が $\beta(t)$ に影響を及ぼす可能性は低いと見做すため、重要視する項目ではない。

住民の避難意向率 $\gamma(h)$ は、全項目で統計的有意差は認められなかったが、「年齢」と「性別」では有意差が出る可能性を否定することはできないとした。 $\gamma(h)$ は、住民一人ひとりの意識に基づき決定されるものであるから、地理的条件に大きく依存する行政区間でも有意差はなかった。このことから、地域による避難に対する意識の違いで大きく変化する可能性がある。

以上、 $\beta(t)$ については、「行政区」に加え「職業」と「性別」の項目を、 $\gamma(h)$ については「性別」と「年齢」の項目を設けることが適当である。結果として、最小限の項目でアンケート調査が実施可能である。これにより、アンケート調査による住民への負担軽減と有効回答率の増加、最低限の費用での調査の実施が見込める。調査実施後は、双曲線正接関数(式(4))の変数を求めることで $\beta(t)$ 、 $\gamma(h)$ を決定できる。

外力条件は、算定する際に全国で整備されている地形・海岸構造物・粗度データを用いることで、データ作成の負担が軽減される。人口データは、国勢調査に基づいた100mメッシュデータ(大都市圏は50m)が全国で整備されているので、このデータを人的被害評価の計算メッシュに対応付けることで作成できる。そして最後に、式(3)を用いて評価する手順となる。

以上、提案手法は、アンケート調査を含めた一連の評価により、適用地域の特性を含めた実際の津波来襲時の状況に近似した被害評価が可能であり、一般性の高い人的被害評価として、効果的な手法であるといえる。

#### 4 結 言

本論文では、住民の避難過程に着目した人的被害評価手法の提案を行った。結果、住民アンケート調査から住民の避難過程を明確にし、さらに避難に影響を及ぼす要因を統計的に明らかにした。そして得られた知見から、効果的な手法の利用方法について説明し、提案手法が適用地域の特性を考慮可能な一般性の高い人的被害評価手法であることを示した。

謝辞：本研究の一部は、文科省科学技術試験研究委託事業「東

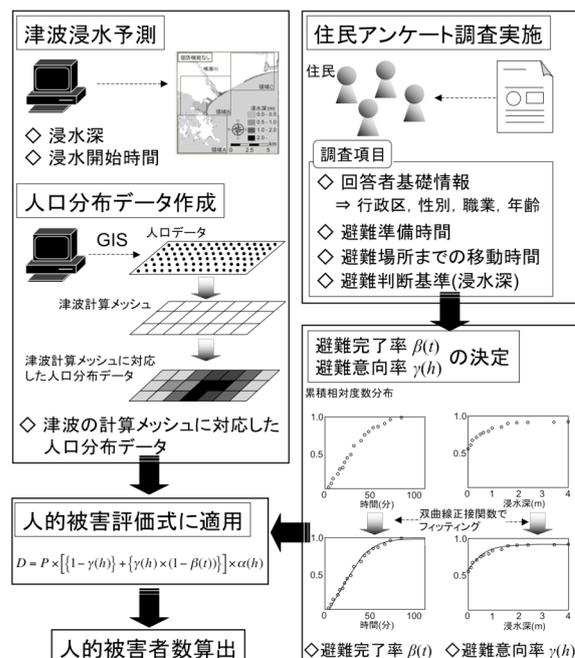


図-7 提案手法の利用方法

海・東南海・南海地震の運動性評価のための調査観測・研究」により行われた。東松島市には多大な協力を得た。ここに記して謝意を示す。

#### 参 考 文 献

- 宍戸直哉・今村文彦 (2009) : 津波リスクマップ作成のための被害評価手法の検討, 海岸工学論文集, B2-65(1), pp. 1346-1350
- 志方建仁, 村上仁士, 上月康則, 大谷寛, 宮本大輔 (2005) : 津波による人的被害最小化因子の影響度評価について, 海岸工学講演会論文集, 第 52 巻, pp.281-285.
- 静岡県 (2001) : 第 3 次地震被害想定結果, pp. 171-175.
- 島田富美男・村上仁士・上月康則・杉本卓司・西川幸治 (1999) : 津波による人的被害予測に関する一考察, 海岸工学講演会論文集, 第 46 巻, pp.361-365.
- 首藤伸夫 (1988) : 津波災害の変遷と対策上の問題点, 海岸工学講演会論文集, 第 35 巻, pp. 237-241.
- 竹内政彦・越村俊一・目黒公郎 (2008) : 多目的プイを用いたネットワーク型津波警報システムの人的被害軽減効果に関する研究, 海岸工学講演会論文集, 第 55 巻, pp.1416-1420.
- 中央防災会議東南海, 南海地震等に関する専門調査会 : [http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/nankai/index\\_nankai.html](http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/nankai/index_nankai.html), 参照 2009-01-25.
- 内閣府・農林水産省・国土交通省 (2004) : 津波・大潮ハザードマップマニュアル, pp.7-13.
- 宮城県 (2004) : 第三次地震被害想定調査報告書, 巻末資料, p.5.
- 宮野道雄・呂恒俊 (1992) : 既往の被害調査資料に基づく地震時の人的被害に関する検討, 地域安全学会論文報告集, No. 2, pp. 127-135.
- Koshimura, S., T. Oie, H. Yanagisawa and F. Imamura (2009) : Developing fragility functions for tsunami damage estimation using numerical model and post-tsunami data from Banda Aceh, Indonesia, Coastal Engineering Journal, JSCE, Vol.51, No.3, pp.243-273.
- Mansinha, L. and D. E. Smylie (1971) : The Displacement Fields of Inclined Faults, Bulletin of Seismological Society of America, Vol. 61, No. 5, pp. 1433-1440.