

# スマトラ沖地震津波被害実態調査に基づく波源モデルの検証と 建物被害関数の提案—スリランカ国 Matara 市の被害を対象として—

VERIFICATION OF TSUNAMI WAVE SOURCE MODEL AND FORMULATION OF A  
VULNERABILITY FUNCTION FOR BUILDINGS BASED ON THE INVESTIGATION OF  
ACTUAL DAMAGE DUE TO THE SUMATRAN EARTHQUAKE AND TSUNAMI  
— SUBJECT AREA BEING THE DAMAGE AT MATARA CITY, SRI LANKA —

石見和久\*・佐藤誠一\*\*・福田忠弘\*\*\*・木村健太郎\*

Kazuhisa IWAMI, Seiichi SATO, Tadahiro FUKUDA and Kentaro KIMURA

Coastal areas in Sri Lanka were devastated by the December 2004 Indian Ocean Tsunami. The authors conducted a site survey on the conditions of the disaster at Matara city, which is a main city in the southern part of the country, from October to December, 2005. The survey was composed of interviews and questionnaires, measurement of the geometry and damages to buildings, and the topography of the study area with the aim of obtaining data for the prediction of Tsunami damage. Another aim of the study was to provide basic data for the establishment of a tsunami disaster prevention system by use of numerical simulation.

**Key Words :** *Tsunami, Tsunami simulation, Indian Ocean Tsunami, functional damage, damage estimation, Sri Lanka*

## 1. はじめに

2004 年 12 月 26 日スマトラ沖地震津波によって、スリランカ国は死者・行方不明者数約 31,000 人、被災者数約 55 万人という甚大な被害を受けた。ここまで被害が拡大した背景には、住民・行政を含めた災害に対する認識不足と、それによる避難活動の遅れが指摘されている。住民の防災意識の向上や防災・減災計画策定にあたっては、被害状況の正確かつ詳細な実態把握に加え、構造物や人的な被害を定量的に示すことが効果的かつ不可欠である。スマトラ沖地震津波調査は国内外のいくつかの機関で実施されているが、その多くは広域でのスポット的な津波の遡上調査がほとんどであり、ある市街地を特定して詳細かつ面的な被害調査を実施した例は少ない。また、日本と建物構造が異なる現地建物の特徴を踏まえた建物被害発生率の算定式は国内外において一般化されていない。

そこで本研究では、被害状況の正確かつ詳細な実態を把握することを目的として、スリランカ国南部の主要都市である Matara 市(図-1)をモデルケースとした訪問面接方式による詳細なアンケート調査および構造物・地形測量調

査を実施した。さらに、同国における津波防災・減災計画に寄与することを目的として津波シミュレーションおよび被害調査結果の整理を行い、被害状況の再現性に着目した検討を行うとともに、津波被害想定に活用可能な現地建物の特徴を反映した建物被害関数を提案した。あわせて津波による人的被害関数についても検討した。

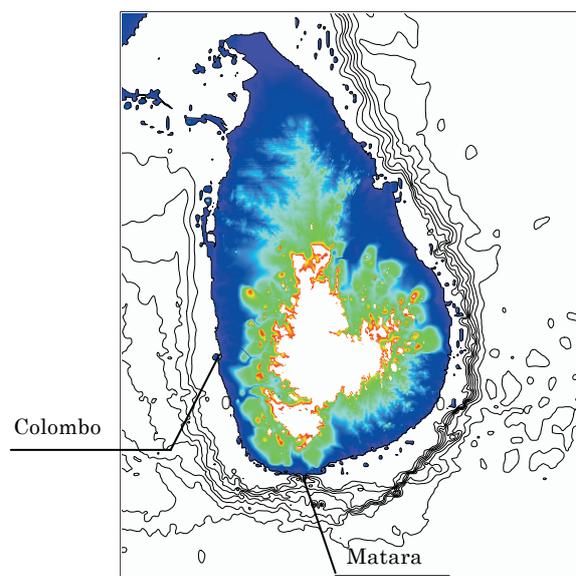


図-1 調査対象地域位置図

\* コンサルタント海外事業本部 運輸・交通事業部  
港湾・空港部  
\*\* コンサルタント国内事業本部 首都圏事業部  
総合技術センター 地盤技術室  
\*\*\* コンサルタント海外事業本部 地域社会事業部  
水資源管理部

## 2. 現地津波被害実態調査

調査対象地域の Matara 市では、2004 年スマトラ沖地震津波により総人口 10.8 万人の約 3% の 3,872 人（死者 697 人、行方不明者 325 人、負傷者 2,850 人）が死傷し、総建物数 30,500 軒のうち約 14% に相当する 4,330 軒の建物が被災（全壊・半壊）したことがスリランカ政府（2006）によって報告されている。現在、同市ではコミュニティ規模の災害に強いまちづくりが進められているが、本調査は、それに利用可能な高精度で面的な津波浸水情報を収集するとともに、現地特有の建築物の被害実態を把握することを目的として、訪問面接方式によるアンケート調査を実施した。調査対象として、延長約 9km の Matara 市海岸線に沿った浸水範囲から、面的にほぼ均等に 586 軒の被災建物を抽出した。標本母数は総被災建物数の約 13% であり、面的には 100m 四方に 1 軒程度のデータに相当する。調査はスマトラ沖地震津波から約 10 ヶ月が経過した 2005 年 10 月から 11 月に実施したものであるが、住民の被災時の記憶は比較的鮮明で痕跡水位が明瞭に残っている箇所が多く、浸水実績ならびに避難行動ともに信頼性の高い情報が得られた。また、既存地形図（S=1/2000、等高線間隔 1m 相当）では、津波浸水挙動に影響を及ぼすような小規模な地形の起伏（以下、微地形）や海岸護岸、比較的大きい RC 建築物などの位置や構造の把握が困難であったため、アンケート調査と合わせて地形測量・構造物調査を実施した。

Matara 市の中でも特に被害の大きかった地域の被害状況を写真-1~4 に示す。現地の建築物の約 9 割は、写真-1、2 に示すようにモルタルもしくはレンガ造建物である。そのため、写真-3 に示すようにこれらの建築物が密集する区画では海岸線から約 500m 内陸部に位置するにも関わ

らず、基礎を残し全壊していた。一方、写真-4 に示すように海岸線近傍の寺院は RC 構造であったため、建築物の側壁は倒壊せず、天井や戸板のみが破損した軽微な被害であった。これらの傾向はアンケート調査結果にも示されており、現地建物の特徴としてレンガ造建物が多く、RC 構造物が少ないために被災度が高くなっていた。調査結果より得られた Matara 市の津波浸水実績を図-2 に示す。現地調査とアンケート調査を総合した結果から得られた海岸部の最大浸水深は 4.1m を記録し、浸水時間は約 6 時間で、津波遡上距離は海岸線から平均約 800m であった。津波浸水実績図には河川に沿った津波の遡上や局所的な浸水深の違いが示されており、アンケート結果は痕跡水位に良好に一致していた。



写真-1 モルタル造建物側壁



写真-2 レンガ造建物側壁



写真-3 全壊の建物



写真-4 RC 建築物

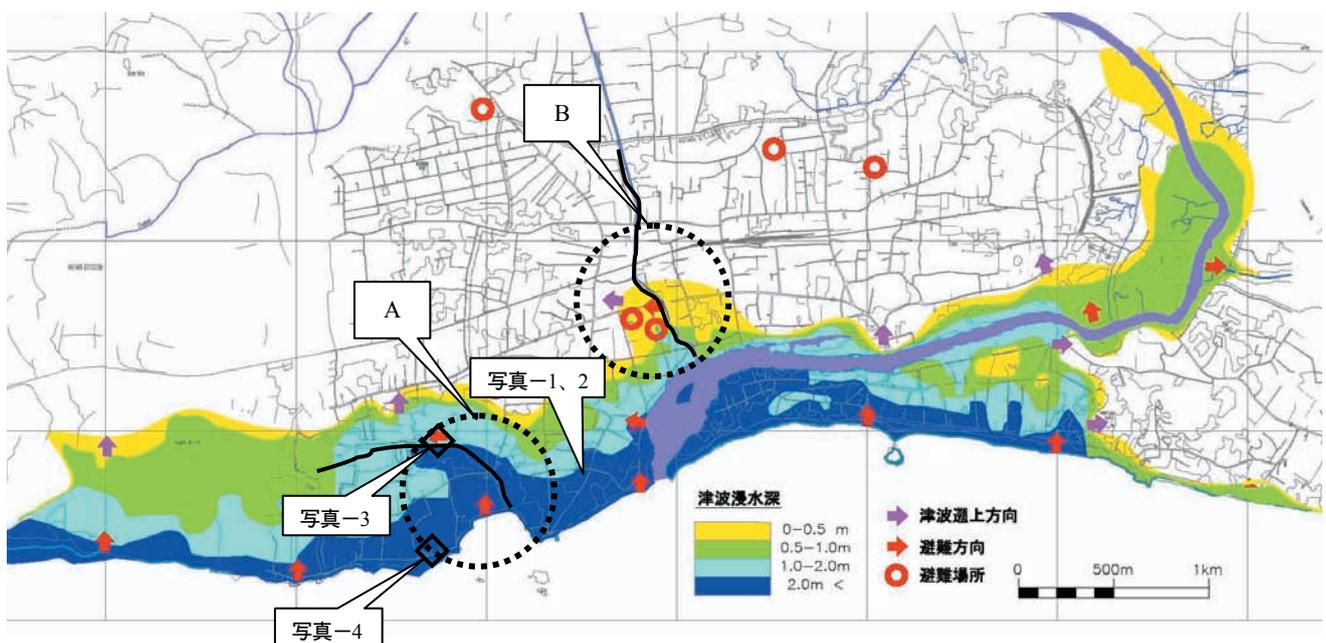


図-2 アンケート調査結果による津波浸水実績図および写真位置

特に、現地の河川と陸域にはほとんど標高差がなく、また堤防がないため、河川を遡上した津波が浸水しやすい状況であり、市中央部を蛇行して流下する主要河川では、河川沿いに4km上流（海岸線からは約2km）まで津波が遡上し、その遡上距離は周辺の河川の無い地域に比べ2倍以上に達している。また、河口から西へ約500mに位置するU字湾の湾奥（図-2：エリアA）や、主要河川に河口部北約500m（図-2：エリアB）で合流する小支川でも、河川に沿って浸水域が広がっており、低標高で障害物のない河川周辺で津波浸水範囲が拡大したことが、アンケート調査結果からも確認できた。

避難状況に関するアンケート調査結果から、住民のほとんどが津波について事前に知識を有しておらず、避難警報なども伝達されなかったこと、津波の遡上波は、場所によっては多方面から数分間隔で数回来襲し、浸水水位の上昇速度が非常に速かったことが確認された。緊急的な避難のパターンとして津波を目視してから、あるいは浸水開始後に2階建て以上のRC構造物や椰子の木の上に待避して助かった例もあり、緊急避難箇所の有無が生死を分けた状況もあった。また、建物周辺のブロック塀が津波の波力を低減し、建物本体の倒壊を免れた例もあり、建物・塀の構造強化や緊急避難所の確保、警報システム整備による避難率の向上が当地域での効果的な津波対策となり得るものと考えられる。

### 3. 津波シミュレーションに用いる波源モデルの検討

津波シミュレーションの手順を図-3に、津波シミュレーションの実施概要を以下に示す。

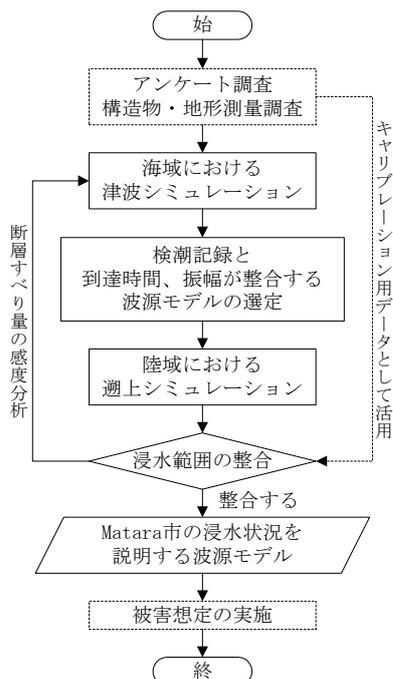


図-3 津波シミュレーションの手順

- ・ **対象範囲および格子間隔**：震源域（スマトラ島沖）～スリランカ国およびモルジブ沿岸域を含めたインド洋海域、Matara市周辺海域および陸域をシミュレーション範囲とした。格子間隔は、最大約3.7kmから段階的に縮小し、陸域では最小格子間隔の50mとした。
- ・ **計算式**：津波シミュレーション波源域から沿岸域までを線形長波理論、沿岸域から対象海岸までを非線形長波の式（浅水理論）、陸域の遡上計算は岩崎ら（1979）の方法によって数値計算を行った。
- ・ **地形および構造物**：津波の遡上に影響を与える微地形や河岸・海岸線構造物については、現地測量調査から得られた位置、形状および高さなどを考慮した。

Matara市の浸水状況を再現できる波源モデルを選定することを目的として、まず各種機関から提案されている波源モデル（表-1）による海域の伝播計算結果と、スリランカ（Colombo）および周辺国としてモルジブ（Hanimaadhoo, Male）の計3ヶ所における検潮記録との比較を行った。

その結果、図-4に示すように、津波波形はモデル毎にばらつきが大きくすべての検潮記録を説明できるモデルはないが、振幅はやや小さいものの、検潮地点における到達時間や波形形状の整合性が高い東北大学(1)の提案モデル（以下、東北大学モデル）（図-5）を基本波源モデルとして採用した。

表-1 検討対象とした波源モデル

提案機関等	セグメント数	すべり量	長さ	幅
東北大学(1)	3	11m	1200km	150km
JAMSTEC	14	0.6～29.7m	1400km	150km
産総研	22	0.0～24.6m	2200km	100km
秋田大学	14	8.9m	980km	240km
東北大学(2)	2	11m	900km	150km
京都大学	1	13.9m	560km	150km

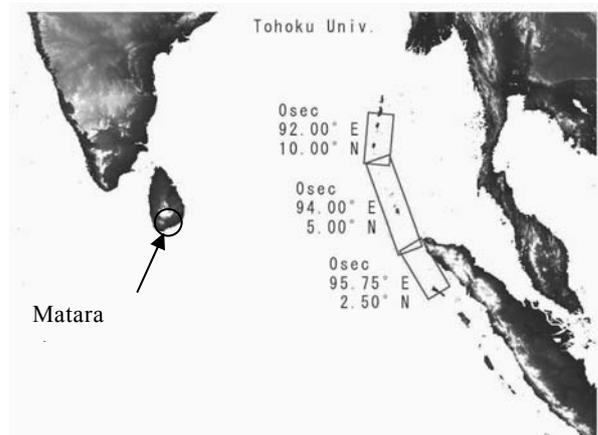


図-5 津波波源モデル（東北大学モデル）

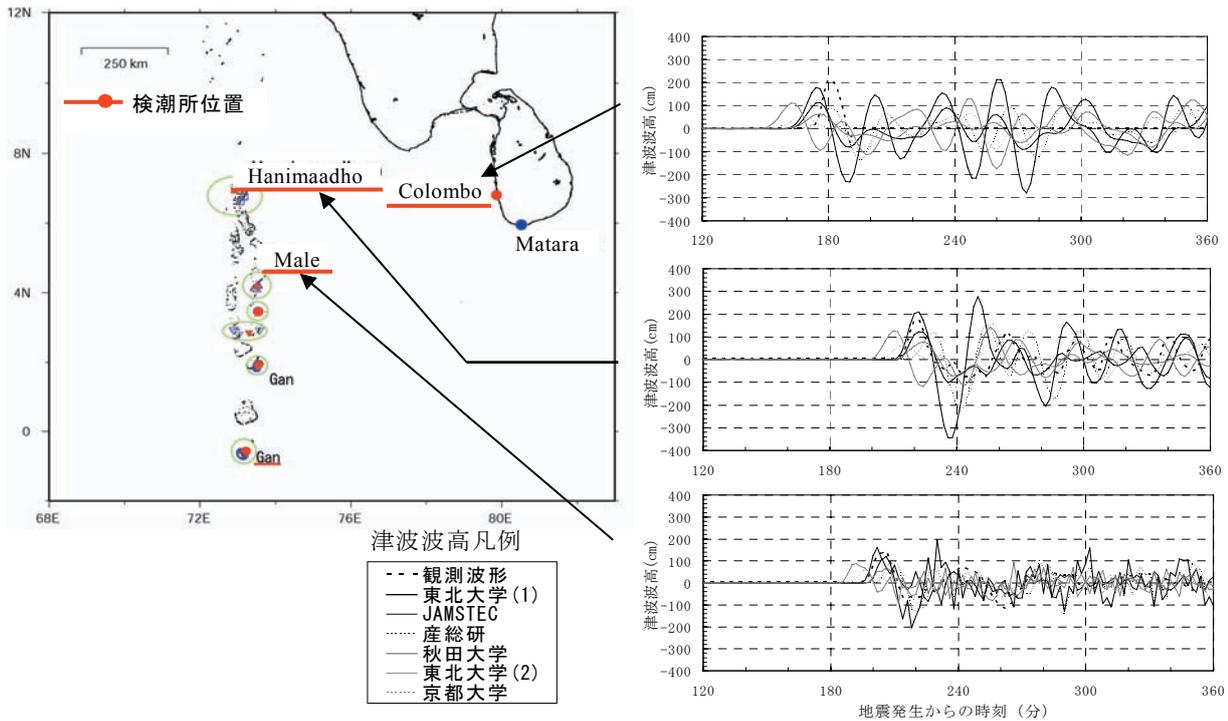


図-4 検潮記録とシミュレーション結果の比較

次に、基本波源モデルを使用して、陸域における津波遡上シミュレーションを実施した。その結果、得られた浸水範囲はアンケート調査結果と比較するとやや狭く、Matara 市の被害状況を十分に説明できなかった。そこで、津波高さとの相関が強い断層すべり量をパラメータとしたシミュレーションを行い、浸水範囲の変化と断層すべり量の関係を分析した。図-6 に断層すべり量を 11m から 18m まで変化させた Matara 市内の浸水範囲の変化を示す。

この結果、断層すべり量を 14m とした場合、アンケート調査結果に基づく浸水範囲と良好に一致し、また、精度検証の指標である相田 (1978) の方法により、幾何平均 ( $K=1.04$ ) および幾何標準偏差 ( $\kappa=1.22$ ) の結果が得られたことから、本波源モデルが Matara 市の浸水状況を説明しうることが示された。

#### 4. MATARA 市の建物の特徴を反映した建物被害関数

日本では、津波による構造物被害の算出にあたって、過去の津波被害実績に基づいた経験式に建物数 (木造、非木造構造物) をあてはめる手法が用いられている。しかし、現地建物の多くはレンガ、珊瑚およびモルタルなどを利用しており、木造建物の被害事例を中心として構築された日本の建物被害関数の適用性は低い。これを踏まえ、アンケート調査結果に基づき、構造物の被害程度 (全壊、半壊、軽微な被害、無被害) と津波浸水深の関係を整理し、その定式化を試みた。なお、本研究では構造物の被害程度は、浸水深 10cm 毎の全建物数と被害建物数の比率である建物被害発生率を用いて整理した。建物被害発生率は、その浸水深において建物に被害が生じる確率を意味する。

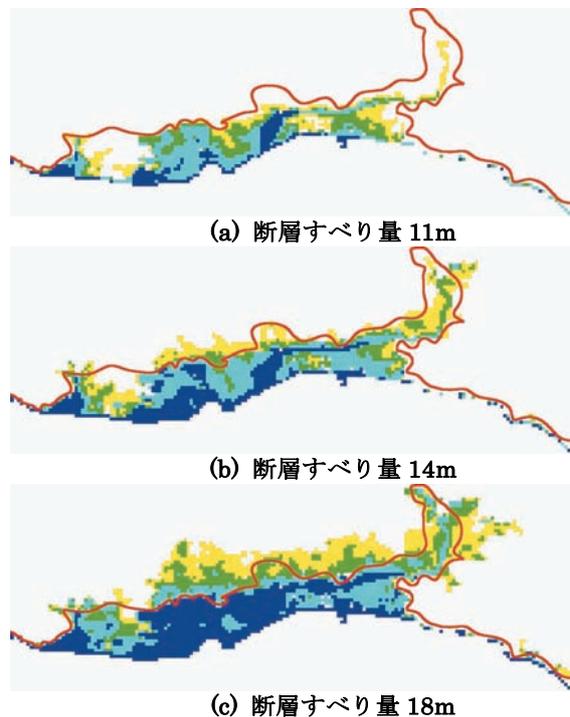


図-6 断層すべり量をパラメータとしたシミュレーションから得られた浸水範囲の変化 (図中の赤線はアンケート結果の津波浸水範囲)

アンケート調査結果における建物被害発生率と浸水深の関係を図-7に示す。これより全壊および被害無しについては浸水深との相関が認められるが、半壊および軽微な被害についてはばらつきが大きく、明確な相関は認められない。これは、アンケート対象者の主観に起因して大きくばらつくものと考えられるため、アンケート調査結果は全壊および被害無のデータのみ採用するものとした。

これらのデータに基づき、全壊および何らかの被害が生じた場合（以下、被害有り）の2パターンに対して、建物被害発生率と津波浸水深の関係を累積分布関数とした定式化を行い、建物被害関数として式(1)を得た（図-8）。上述したように建物被害発生率は累積の被害発生率として扱っていないが、建物被害発生率と浸水深との関係を最も説明しうる関数として累積分布関数を採用した。なお、アンケート調査結果の建物被害発生率と浸水深の関係は浸水深30cm以下では被害が皆無であったことから、30cm以下では被害発生率が0%となるよう補正を行った。なお、半壊および軽微な損壊建物数の推定は、全建物数から全壊建物数および無被害建物数を減じた建物数とし、土木学会の調査結果（海岸工学委員会、2005）に示される半壊状況の分類（使用可能な損壊と使用不可能な損壊）の比率、約1:6

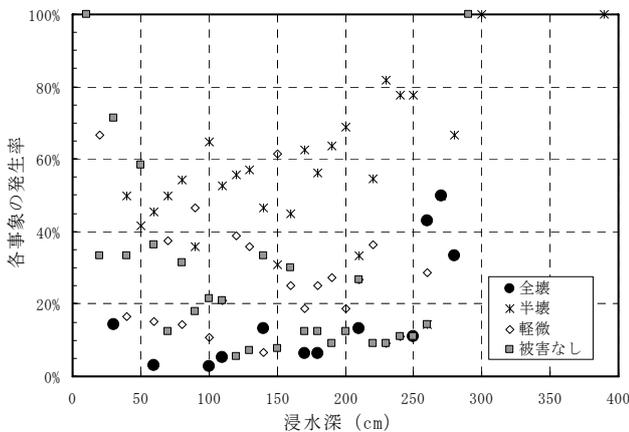


図-7 建物被害発生率と浸水深の関係

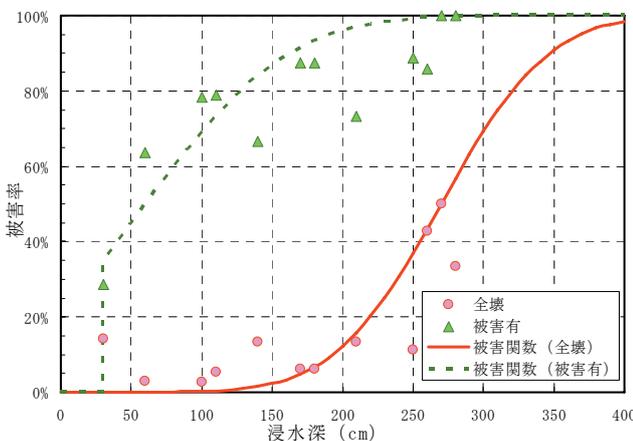


図-8 建物被害発生率と浸水深の関係

を考慮して、被害程度毎の建物数を算定した。

シミュレーション結果から得られた陸域 50m メッシュ毎の浸水深に対して提案した被害関数を適用すると、全壊戸数 504 戸、半壊戸数 1,541 戸となり、同地区を対象とした土木学会による調査結果（全壊 562 戸、使用不可な損壊 1,449 戸、使用可能な損壊 252 戸）とおおむね整合した。

$$P(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{30}^x \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right\} dx \quad (1)$$

- $x$  : 浸水深(cm) ( $30 \leq x$ )
- $P(x)$  : 被害発生率(全壊および被害有)
- $\mu$  : 全壊 : 270cm、被害有 : 60cm
- $\sigma$  : 全壊 : 60cm、被害有 : 80cm

### 5. スマトラ沖地震の特徴を踏まえた人的被害関数

津波による人的被害の推定方法は、日本国内における被害実績に基づき、津波高さとの関係から算定する方法（中央防災会議、2003）、建物被害数との関係から算定する方法などが提案されている（静岡県防災局、2001）。

津波高さとの関係から人的被害を算出する方法として、日本海中部地震および北海道南西沖地震の被害実績に基づいた経験式が公表されている。これらの地震では、過去の経験や警報などにより一部の住民が地震発生と同時に避難した実績があるため、算定条件として津波来襲前の避難率を20%、70%としている。それに対し、Matara市では津波に関する知識を持つ住民がほとんどおらず、かつ警報などが住民に伝わらなかった実情を踏まえ、避難率を0%として人的被害の算定を行った（式(2)、図-9）。その結果、Matara市における死者数は981人と算定され、被害実態をおおむね説明できる結果となった。

$$Y = 0.029e^{0.225x} + 0.112 \quad (2)$$

- $Y$  : 死者率 (%)
- $x$  : 浸水深 (m)

一方、北海道南西沖地震の実績に基づく建物被害との関係から人的被害を想定すると541人となり、Matara市における実被害者数(1,022人)と比較して過小評価となった。これはMatara市の1世帯あたりの人口が4.2人であり、北海道南西地震発生前の奥尻島の2.9人(奥尻島、2006-5-18参照)と比較して多いことなどが考えられる。

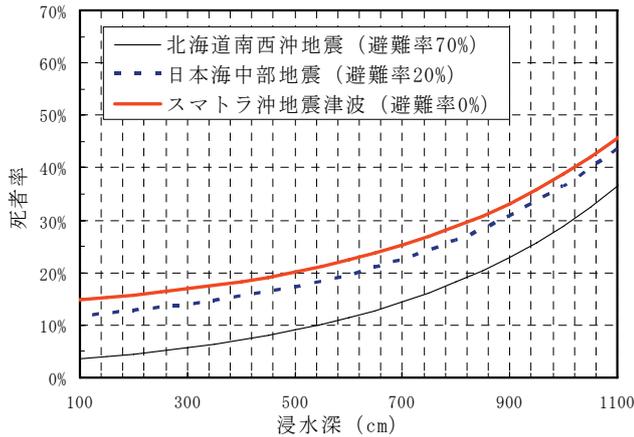


図-9 人的被害発生率と浸水深の関係

## 6. おわりに

- a) 母数に対して 10%程度を標本としたアンケート調査結果により、MATARA 市における詳細な浸水深分布図を作成した。これを検証用データとして津波シミュレーションを行い、MATARA 市の浸水状況を説明できる波源モデルを設定した。
- b) アンケート調査結果を建物被害程度と浸水深について整理し、建物の特徴を反映させた建物被害関数を提案した。この建物被害関数と津波シミュレーションから得られた浸水深分布を用いることにより、MATARA 市全体の建物被害を精度良く説明できた。
- c) 日本国内の人的被害想定に用いられている津波浸水深と死者率の関係は、事前避難率を MATARA 市の実態にあわせることにより、被害状況を説明できた。
- d) 本研究で得られた知見は、MATARA 市と類似する都市の津波被害想定に活用することが可能であり、津波防災・減災計画に寄与することが期待される。ただし、建物被害関数の作成にあたって採用したデータの最大浸水深は 3M 程度であるため、同様な構造物の津波被害があり、かつ浸水深がより高い地域のデータを用い、本提案式の汎用性や適用範囲に関する補足・検証を行うことが必要である。
- e) 調査および研究結果から、津波簡易ハザードマップ・津波アニメーションを作成しており、今後の同国の防災・減災計画の一助としての活用が期待される。

謝辞：本調査は、独立行政法人国際協力機構(JICA)によるスリランカ民主社会主義共和国南部地域津波災害復旧・復興支援プロジェクトを通して得られたデータを基に作成した。調査データの本報告への使用許可ならびに御指導を頂いた関係者各位に深甚の謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 岩崎敏夫・真野 明(1979):オイラー座標による二次元津波遡上の数値計算、第 26 回海岸工学講演論文集、pp. 70-74.
- 2) 奥尻島：奥尻町の人口・世帯について(オンライン)、[http://www.town.okushiri.lg.jp/gaiyo/jinko\\_setai.html](http://www.town.okushiri.lg.jp/gaiyo/jinko_setai.html), 参照 2006-5-18.
- 3) 越村俊一・高島正典・鈴木進吾・林春男・今村文彦・河田恵昭(2005):インド洋における巨大地震津波災害のポテンシャルの評価、海岸工学論文集、第 52 巻、pp. 1416-1420.
- 4) 産業技術総合研究所：インド洋の地震・津波(オンライン)、<http://staff.aist.go.jp/kenji.satake/Sumatra-J.html>, 参照 2006-05-17
- 5) 鈴鹿陽・高橋智幸・松富英夫(2005)：タイ南西部に襲ったスマトラ島地震津波の数値解析、海岸工学論文集、第 52 巻、pp. 1341-1345.
- 6) 静岡県防災局(2001)：第 3 次地震被害想定報告書、p. 175
- 7) 土木学会 水工学委員会・海岸工学委員会(2005)：2004 年 12 月インド洋大津波 スリランカ被害調査報告書、pp. 32-38.
- 8) 内閣府中央防災会議(2003)：東南海・南海地震等に関する専門調査会第 10 回参考資料(オンライン)、pp. 17-27、参照 2006-5-17.
- 9) Aida, I., (1978) : Reliability of a tsunami source model derived from fault parameters, J. Phys. Earth, 26, pp. 57-73.
- 10) Hirata, K., Satake, Y., Tanioka, T., Kuragano, Y., Hasegawa, Y., Hayashi, and N., Hamada (2006) : The 2004 Indian Ocean tsunami : Tsunami source model from satellite altimetry, Earth Planets Space, 58, pp. 1-7.
- 11) Government of Sri Lanka : MATARA City Renewal Action Program (McRAP), pp. 4-16.
- 12) Reseach Center for Disaster Reduction Systems : Tsunami Numerical Modeling Report, December 26, 2004 Earthquake Tsunami Disaster of Indian Ocean (オンライン), <http://www.drs.dpri.kyoto-u.ac.jp/sumatra/drs/>, 参照 2006-05-17.
- 13) Tsunami Engineering Laboratory Disaster Control Research Center Graduate School of Engineering, Tohoku University : Modeling a tsunami generated by Nothern Sumatra earthquake(オンライン), <http://www.tsunami.civil.tohoku.ac.jp/hokusai2/topics /04sumatra/index.html>, 参照 2006-05-17.