

津波被害関数の構築

越村俊一¹・行谷佑一²・柳澤英明³

¹正会員 東北大学准教授 大学院工学研究科 (〒 980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-11-1104)

E-mail: koshimura@tsunami2.civil.tohoku.ac.jp

²正会員 産業技術総合研究所 活断層・地震研究センター (〒 305-8567 茨城県つくば市東 1-1-1 中央第 7)

E-mail: yuichi.namegaya@aist.go.jp

³正会員 東電設計株式会社 (〒 110-0015 東京都台東区東上野 3-3-3)

E-mail: h-yanagi@tepsco.co.jp

津波数値解析技術の高度化およびリモートセンシング技術・地理情報システム (GIS) の普及を背景に, 新しい津波被害想定指標としての津波被害関数の概念とその構築手法を提案した. 津波被害関数とは, 津波による家屋被害や人的被害の程度を被害率 (または死亡率) として確率的に表現し, 津波浸水深, 流速, 波力といった津波の流体力学的な諸量の関数として記述するものである. 本稿では, 被災地の衛星画像, 数値解析, 現地調査結果および歴史資料の分析を通じて被害関数を構築し, 津波外力と被害程度の関係についての考察を行うとともに, 被害関数の適用性や工学的利用にあたっての留意点について論じた.

Key Words : tsunami fragility, damage estimation, remote sensing, geographic information system

1. 序論

津波による被害の量的な推計には, 対象とする地域の津波浸水深 (地表面から測定した津波高さ) や流速等の外力を数値解析により推定し, それら外力との関連で建物被害棟数や人的被害数を求めるのが一般的である. たとえば首藤 (1992) は, 我が国の津波被害実績から浸水深と家屋被害程度との関係を丹念に調べ, 津波外力と被害の関係を津波強度指標を用いて表現した¹⁾. 内閣府中央防災会議の専門調査会は首藤の津波強度指標を採用し, 数値解析により得られた浸水深分布に応じて建物被害棟数を推計しているが¹, 浸水深 2m 以上で全壊, 1m 以上 2m 未満で半壊と一律に評価しているのが現状である. しかし津波氾濫の流況は本来きわめて局所的であり, 被害の発生過程も不確実な現象である. 従来の被害推定手法では, 津波のもつ局所性と被害発生過程の不確実性を十分に考慮しているとはいえない.

近年の数値解析技術はその空間的・時間的分解能が飛躍的に向上し, 場合によっては数 m の空間分解能で浸水計算を実施することが可能になった. 数値計算による津波氾濫流の外力推定精度の向上と被害発生の不確実性に対応して, 被害評価指標を高度化する必要がある.

一方, 津波被災地における詳細な被害調査を通じても津波被害発生メカニズムに関する知見は蓄積されてきた. たとえば松富らの一連の研究^{2),3),4),5),6),7),8)}は国内外の津波被害調査の蓄積であり, 津波氾濫流の流況に関連して家屋被害を議論する際に貴重な資料となる. し

かしながら, 現地調査から得られる津波被害の情報は, 調査期間や調査体制の制約により, 局所的な津波被害の側面を断片的にとらえたものにならざるを得ない. 津波被害想定の高度化に必要なものは, 対象領域の建物群に対する被害程度を確率的にとらえた指標であり, 津波外力に対する家屋群の破壊率としての統計的な関係を得るためには更なる調査の蓄積を待たねばならないという問題がある.

近年, 高分解能衛星画像を利用したリモートセンシング技術の飛躍的発展や地理情報システム (GIS) の普及を背景として, 津波被災地の面的な情報の把握手法が多様化しつつある. 2004 年スマトラ島沖地震津波災害直後には, QuickBird (米 DigitalGlobe 社) や IKONOS (米 Space Imaging 社) に代表される高分解能衛星画像が津波被災地の状況を詳細にとらえたのは記憶に新しい². これらの衛星画像を利用すれば被災地の家屋一棟毎の被害判読が可能であり, 衛星画像による被害判読作業を現地調査に代用し, 現地調査とは異なる質と量の被害情報を被災地に入らずとも取得できるという利点もある.

本研究は, リモートセンシングや現地調査, 数値解析等から得られる津波被害・外力の情報を地理情報システム (GIS) に統合し, 新しい津波被害想定指標である「津波被害関数 (Tsunami Fragility)」を構築することを目的とする. ここでいう津波被害関数とは, 対象地域にある建物群や集落の家屋被害や人的被害の程度を被害率 (または死亡率) として確率的に表現し, 津波浸水深, 流速, 波力等の流体力学的な諸量の関数として記述するも

¹ たとえば www.bousai.go.jp/jishin/nihonkaikou/17/

² たとえば国際災害チャータ, www.disasterscharter.org

のである。元来被害関数は地震動の外力(最大加速度, 最大速度)に対する建物群の被害程度(被害率)を記述する指標として, 特に1995年阪神・淡路大震災以降, 地震工学の研究者により整備されてきた。本研究は地震工学分野における被害関数構築の概念を津波工学に拡張する立場をとる。

本稿では, まず津波被害想定指標(津波外力と被害程度)に関する既往研究をレビューし, 津波被害想定指標構築の学術的背景と課題を論ずる。次に, 本研究で提案する津波被害関数の構築手法について述べ, 津波被害関数の活用やその適用限界について論ずる。なお, 本稿の第一義的な目的は津波被害関数の構築手法を系統的にまとめることであり, 筆者らのこれまでの研究成果^{9), 10), 11)}や他の研究者がすでに公表してきたデータを利用して展開する。各データの出典や諸元, データの詳細については本文中に引用する原著論文や文献を参照されたい。

2. 既往の津波被害想定指標

津波外力と被害の関係を求めた研究には大別して3つのアプローチがある。1つ目は既往の津波災害資料の分析に基づく方法, 2つ目は津波被災地での現地調査による方法, 3つ目は水理実験による方法である。ここではそれぞれのアプローチについてレビューする。

(1) 資料分析に基づく方法

津波の規模と家屋被害の関係について, 破壊率に着目して定量的な調査を最初に行ったのはHatori (1964)および羽鳥(1984)である^{12), 13)}。特に羽鳥(1984)は1896年明治三陸地震津波, 1933年昭和三陸地震津波, 1960年チリ地震津波の3事例についての資料の分析を通じて集落における津波高(平均海面上の高さ)とそこでの家屋破壊率についてまとめた。羽鳥(1984)は, 家屋被害率 P_D を次式で定義している。

$$P_D = \frac{a + b/2}{a + b + c} \times 100(\%) \quad (1)$$

ここで a は流失・全壊家屋数, b は半壊家屋数, c は床上・床下浸水家屋数である。羽鳥は, 三陸沿岸で津波高が3 m以下で家屋破壊率10–20%, 4 mを超えると50%以上に達すると結論づけた。また, 津波の陸上氾濫流速による家屋被害の程度についても, 歴史資料と当時の数値実験に基づき検討を行った^{14), 15), 16), 17)}。津波による家屋破壊の程度は氾濫流速にかなり依存し, 氾濫流の水流圧力(水深と流速の2乗の積)が5–9 m³/sec²に達すると家屋破壊率が50%を超えると結論づけ, さらに家屋破壊に伴う漂流物が被害拡大に寄与し得ることを指摘している。

一方, 首藤(1992)は, 羽鳥と同様に既往の津波事例

を調べ, 報告された津波高と数値計算結果から, 津波外力と家屋被害程度(被害率)の関係を求めた¹⁾。また, 独自に提案した津波強度式 $i = \log_2 H$ (H は局所的な津波浸水深や港湾内の津波高)との関連で構造別家屋被害, 漁船, 養殖施設, 防潮林の被害程度を整理し, 津波被害想定指標としてまとめた。首藤の津波強度と家屋被害の関係を図-1に示す。たとえば, 浸水深が2–4 mでは木造家屋は全面破壊, 石造家屋は「持ちこたえる」と評価される。首藤の指標は我が国の津波被害評価の基準として広く利用されており, 対象とする地域の津波数値計算結果から得られた浸水深に対して浸水域内家屋の被害数を推計する手法がとられている。また, 津波氾濫に伴う漂流物(流木)の被害拡大要因についても, 松富(1990)に基づき浸水深に約1.6を乗ずることにより推計されている¹⁸⁾。

(2) 現地調査に基づく方法

一般的に, 津波被災地における現地調査では, 建物壁面や樹木に付着した津波氾濫流の痕跡の高さや浸水深, 陸上の遡上限界点での津波遡上高を測定し, 建物被害の程度と関連づける。この手法を確立したのは松富, 首藤の一連の研究であろう。特に建物前面と背面の痕跡高の差から氾濫流速を推定し建物被害程度と関連づけることにより, 家屋破壊条件に流体力学的な考察を導入することが可能になった^{2), 3), 19)}。彼らの成果はたとえば表-1のようにまとめられている。また, 庄司ら(2007)は津波被災地における被害家屋の構造部材の強度に着目し, 家屋の損傷状態から津波波圧を逆推定する試みを行っている²⁰⁾。現地調査の最大の利点は, 家屋の破壊状況の詳細な把握が可能なことであり, また現地での観察に基づいた流体力学的な諸量の推定方法が確立されていることであろう。一方, 統計的な議論を行う場合のサンプル数の限界がこの手法の欠点である。結果として, 少ないサンプル数に基づいた破壊条件は一元的な評価にならざるを得ず, 家屋群の被害棟数を推計したり確率的な評価を行う場合には更なる調査の蓄積を待たねばならない。

(3) 水理実験に基づく方法

構造物に作用する津波波力についての流体力学的な考察や構造物の耐津波性能の評価を目的として水理実験が行われている。主として, 津波氾濫流先端部の衝撃力に関する検討²¹⁾, 津波氾濫流先端部およびその後の準定常的な特性を考慮した津波波力の検討^{22), 23), 24)}, 建物群に作用する津波波力の検討²⁵⁾などが挙げられる。これらの研究は, 構造物に作用する津波波圧や波力の把握を第一義の目的としており, 家屋被害程度との関連づけはなされていない。最近になって, 有川ら(2007, 2008)

津波強度	0	1	2	3	4	5
津波高 (m)	1	2	4	8	16	32
木造家屋被害	部分的破壊	全面破壊				
石造家屋被害	持ちこたえる		資料なし	全面破壊		
鉄筋コンクリート ビルの被害	持ちこたえる			資料なし		全面破壊
漁船被害		被害発生	被害率 50%	被害率 100%		

図-1 首藤 (1992) の津波強度指標¹⁾(オリジナルの表から構造物被害・漁船被害の部分を抜粋)表-1 飯塚・松富 (2000) による家屋破壊基準¹⁹⁾

家屋の種類	中破			大破		
	浸水深 (m)	流速 (m/s)	抗力 (kN/m)	浸水深 (m)	流速 (m/s)	抗力 (kN/m)
鉄筋コンクリート造	—	—	—	7.0 以上	9.1 以上	332-603 以上
コンクリート・ブロック造	3.0	6.0	60.7-111	7.0	9.1	332-603
木造	1.5	4.2	15.6-27.4	2.0	4.9	27.4-49.0
被害程度	柱は残存, 壁の一部が破壊			壁と柱のかなりの部分が破壊されるか流失		

により津波力による構造物の大規模破壊実験が実施されるようになったが^{26),27)}, 家屋全体および構造物の一般化した破壊基準を策定するまでには, 部材単位の破壊実験を構造物全体に拡張する必要がある。

3. 津波被害関数の構築

(1) 被害関数とは

被害関数とは, 災害の外力と被害 (人的被害, 建物被害) 規模の関係式のことであり, フラジリティ関数またはフラジリティカーブとも呼ばれる。地震動による家屋被害の程度を数量的に表した被害関数は, 地盤の揺れの強さに対する建物群としての集団的耐震性能を記述したり, ある地域内の建物群の被害程度の評価に用いられる²⁸⁾。被害関数に関する研究は, 従来地震工学の分野で研究が進められており, 物部 (1926) が家屋倒壊率と震度との関係を定式化したのが始まりであると言われている^{29),30)}。特に建物被害の詳細な調査結果が得られた 1995 年阪神・淡路大震災を契機に, 構造別や建築年代別に整備が進んだ^{31),32)}。地震動による建物被害関数は, 既往地震による被害情報 (家屋被害) と地震動の強さの関連を回帰分析により求め, 対数正規分布, 正規分布による式 (2), (3) で表されるのが一般的である。

$$P_D(x) = \Phi \left[\frac{\ln x - \lambda}{\xi} \right] = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}\xi t} \exp \left(-\frac{(\ln t - \lambda)^2}{2\xi^2} \right) dt \quad (2)$$

$$P_D(x) = \Phi \left[\frac{x - \mu}{\sigma} \right] = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp \left(-\frac{(t - \mu)^2}{2\sigma^2} \right) dt \quad (3)$$

ここで x は最大加速度, 最大速度, 震度等の地震動の外力指標で, λ (または μ), ξ (または σ) は $\ln x$ (地震動指標 x の自然対数), または x の平均値と標準偏差である。

以下では, 地震工学研究のアプローチを基礎として, 様々な手法により得られる津波外力・被害情報を活用した津波被害関数の構築手法について述べる。

津波被害関数の構築は, 以下の手順で行う。

- 1) 衛星画像の判読, 現地調査, 歴史資料等から被害情報を取得し, 家屋一棟毎の被害程度や建物群の被害率 P_D を算定する。
- 2) 数値解析, 現地調査, 歴史資料から津波外力を推定する。数値解析による場合には現地調査結果等との比較を通じてその再現精度を検証しておく。
- 3) 津波外力と家屋被害率 P_D を関連づける。衛星画像や現地調査により被害建物群の棟数を集計して被害率を算定する場合には, 被害率算定の母集団に対応した浸水深 (または流速, 波力) の範囲と代表値を決定し, 被害率と外力とを関連づける。各種の空間情報 (被害, 外力) の関連づけは必要に応じて GIS の空間分析機能を利用して行い, 最終的に津波外力と家屋被害率の離散的な関係を得る。歴史資料を用いる場合には集落毎または建物群毎に津波高などの外力情報を整理しておく。
- 4) 上で得られた津波外力と被害率の関係から回帰式を

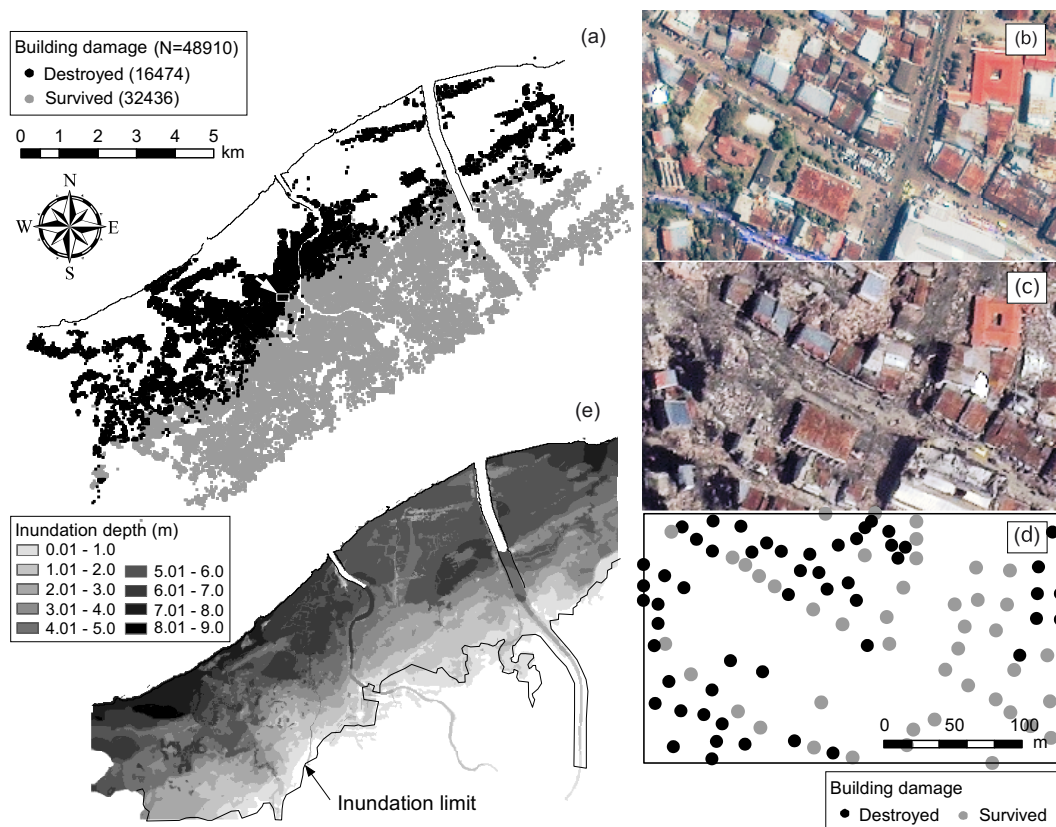


図-2 (a)IKONOS 画像を用いた Banda Aceh の家屋被害判読結果. 白矢印で示した□内が領域 (b)–(d) である. (b) 津波発生前の IKONOS 画像 (2004 年 6 月 18 日), (c) 津波後の画像 (2004 年 12 月 29 日), (d) 津波前後の画像比較による家屋被害判読例 (図 (a) 矢印で示した地域), (e) 津波数値解析による浸水深分布 (図中の実線は衛星画像と現地調査から得られた津波浸水域)

求める. 外力 x に対する家屋群の被害率 $P_D(x)$ は, 村尾・山崎 (2000) の方法³¹⁾に倣い, 標準正規分布の累積確率分布関数を用いて, 正規分布または対数正規分布で表せると仮定して回帰分析を行う.

以下では, 様々な被害情報・外力情報の質と量に応じた被害関数の構築手法について具体的に述べる.

(2) 衛星画像による被害判読結果と数値解析との統合による家屋被害関数

ここでは建物被害情報の取得に衛星画像を利用し, 津波外力情報の取得に数値解析を利用した場合の被害関数構築手法を述べる.

近年に打ち上げられた人工衛星に搭載された光学センサは, 家屋一棟毎の判別や被害の判読が可能な分解能を有している. その代表的なものが IKONOS (1999 年に米 Space Imaging 社が打ち上げ) と QuickBird (2001 年に米 Digital Globe 社が打ち上げ) であり, それぞれ 1 m, 60 cm という高い空間分解能をもつ. 従来の光学画像の空間分解能は高くとも数 m であり, 家屋一棟毎の被害有無の判読は不可能であったが, IKONOS や QuickBird の画像を利用すれば津波被災地における家

屋被害等の詳細な判読を行うことができる.

図-2 に示すのは, 2004 年スマトラ島沖地震津波で壊滅的な被害を受けたスマトラ島北部 Banda Aceh の IKONOS 画像 (被災前と後のもの) とその被害判読結果 (大破・流失と残存), および Banda Aceh の津波浸水計算結果である⁹⁾. 家屋被害情報の取得は, 幾何補正後の衛星画像上に家屋一棟毎のポイントデータを作成し, 被災前後の画像を屋根の有無に着目して比較し, 目視により被害 (=大破・流失), 残存・無被害の属性をつけた (図-2(a)–(d)). ただし, 衛星画像のみからでは, 家屋被害が地震動によるものか津波によるものかを判別することは難しい. ここでは, Banda Aceh 市街地の家屋の多くが地震動による倒壊を免れたという Saatcioglu *et al.* (2006) の調査結果³⁸⁾を参考にし, 家屋被害 (大破・流失) は津波により発生したと仮定する.

一方, 津波外力情報の取得には数値解析を利用する. Banda Aceh 市街地を対象とし, 非線形長波理論に基づく Leap-frog 差分法で実施した. 詳細については筆者らの既往研究⁹⁾を参照されたい. 数値解析結果は, Aida (1978) による幾何平均 K および幾何標準偏差 κ ³³⁾に基づき, 現地調査結果等を用いて検証しておく必要

がある。ここで示した Banda Aceh の津波浸水計算は, Borrero (2005), Tsuji *et al.* (2006), Matsutomi *et al.* (2006) の現地調査結果^{34),35),36)}を利用して検証した。結果として $K = 1.01$, $\kappa = 1.40$ を得ており, 土木学会が提案している痕跡高を用いた津波計算の妥当性の基準³⁷⁾ ($0.95 < K < 1.05$, $\kappa < 1.45$) を満たしている。

次に, GIS 上に幾何補正後の衛星画像と家屋のポイントデータ (被害・無被害の属性つき) および数値解析結果を統合し, 浸水域内の家屋位置における被害有無の情報と津波外力情報 (浸水深, 流速, 波力) を関連づけて被害率を算定する。具体的には, (i) 津波外力情報, 被害有無を関連づけたデータシートを作成して, (ii) 浸水深 (または流速, 波力) の昇り順にデータをソートし, (iii) 上から一定のサンプル数 (家屋数) で被害率算定のグループおよび母数を決定し, それに対応した津波外力および被害家屋棟数のヒストグラムを作成する。このとき, 各外力に対応したグループのサンプル数 (家屋被害率算定のための母数) ができるだけ同一になるように留意する。その結果が図-3 である。ここでは, 各外力範囲 (図では浸水深) における家屋棟数がおよそ 1,000 棟になるように設定した。最後に各外力範囲毎にその中央値 (メディアン値) を求めて代表値 x とし, 被害率 $P_D(x)$ を次式で算出して津波外力と被害率との関連付けを行う。

$$P_D = \frac{N_D}{N_D + N_S} \quad (4)$$

ここで N_D は全壊・流失家屋棟数 (衛星画像で屋根なしと判読された建物棟数), N_S は残存家屋棟数 (衛星画像で屋根ありと判読された建物棟数) である。衛星画像から判読した被害は, 被災前後の屋根の有無を判断基準としているため, 壁に生じた被害は屋根が残っている限りは判読できない。すなわち, ここでの破壊率の定義は屋根の有無に着目した家屋破壊率・流失率であり, 例えば飯塚・松富 (2000) の基準 (表-1) では大破以上の破壊率に相当する。

次に回帰分析により被害関数を同定する。ここでは浸水深に関する被害関数を求める過程を説明する。式 (3) に回帰させることを考え, 村尾・山崎 (2000) の方法を参考にして確率紙を用いて μ と σ を求める³¹⁾。すなわち正規確率紙上で, 横軸に式 (3) の Φ の逆関数 Φ^{-1} を, 縦軸に数値解析で求めた最大浸水深をとりプロットする。これから回帰直線を最小二乗法により求めれば, その傾きが σ , 切片が μ となる。図-4 はその一例である。なお, 回帰式として正規分布か対数正規分布のどちらを選択するかは P_D と外力 x または $\ln x$ の関係を見て選べばよい。ここでは, 最大浸水深について正規分布, 最大流速および最大抗力については対数正規分布を選んだほうが適合度が良いことがわかった。上記の結果として, 図-5 のように各種津波外力と建物被害率の関

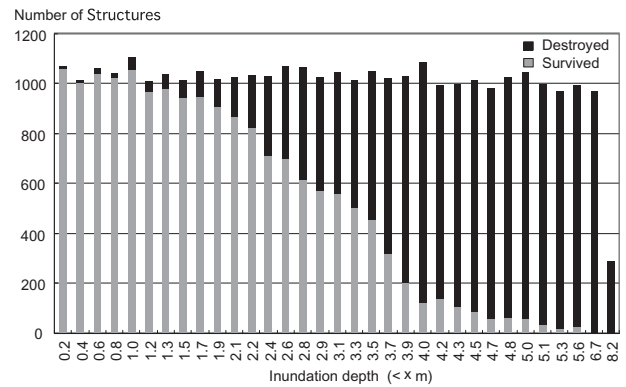


図-3 最大津波浸水深 (計算値) と被害家屋棟数 (流失, 生存) を関連付けたヒストグラム

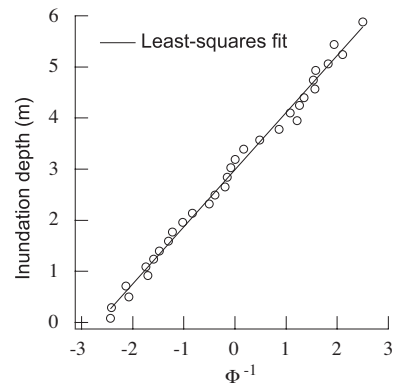


図-4 最大津波浸水深と家屋被害率の確率紙プロット

係 (○), そして回帰式としての被害関数 (実線) が得られる。表-2 には各被害関数の回帰パラメータを示す。なお, 最大抗力は構造物の単位幅あたりに作用する力として次式を用いて数値解析の実行中に逐次求め, その最大値をとる。

$$F = \frac{1}{2} C_D \rho \max\{u^2 d\} \quad (5)$$

ここで F は建物単位幅あたりの最大抗力 (N/m), C_D は抗力係数 (ここでは簡単のために $C_D = 1.0$ としている), ρ は水の密度 ($\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$), u, d はそれぞれ数値解析で逐次求められる流速 (m/s) および浸水深 (m) を代入する。

図-5 より, 流失率が 20% を超えて家屋破壊が顕著になるのは, 浸水深で約 2 m 以上, 流速で約 1.8 m/s 以上, 単位幅あたりの抗力で約 2.3 kN/m 以上となることがわかる。Saatcioglu *et al.* (2006) は, Banda Aceh における津波後の現地調査で, 市街地内の主要な建物は低層木造家屋, 丸太造の家屋, 低層の RC 造 (Non-engineered) の構造であると報告している³⁸⁾。参考までに, 飯塚・松富 (2000) 木造家屋の被害基準¹⁹⁾では, 大破の場合, 浸水深は 2.0 m, 流速で 4.9 m/s, 抗力で 27.4–49.0 kN/m

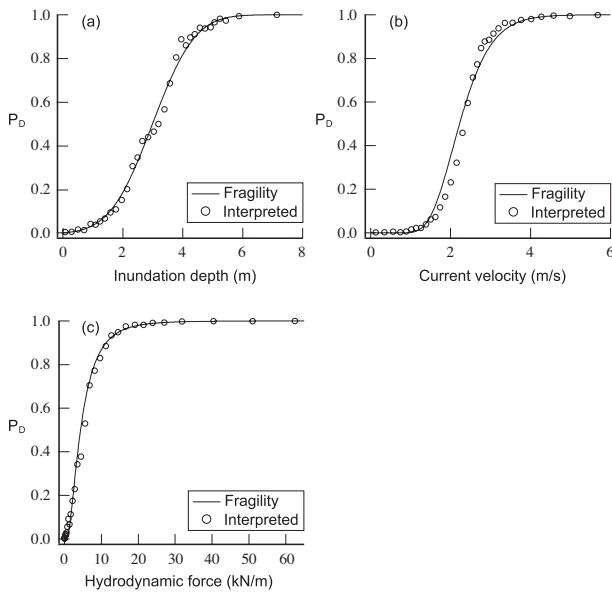


図-5 (a) 最大浸水深, (b) 最大流速, (c) 最大抗力に対する家屋被害率と津波被害関数

表-2 津波被害関数の回帰式のパラメータ (N/A ではパラメータ同定を行っていない). R^2 は回帰式の決定係数.

外力	μ	σ	λ	ξ	R^2
浸水深 (m)	2.99	1.12	N/A	N/A	0.99
流速 (m/s)	N/A	N/A	0.80	0.28	0.97
抗力 (kN/m)	N/A	N/A	1.47	0.75	0.99

である (表-1). 本研究で得られた津波被害関数と比較すると, 特に流速, 抗力に関する破壊基準において飯塚・松富 (2000) との差違が顕著に見られる. 飯塚・松富の基準では, 流速と抗力の評価において, 現地調査から測定した津波浸水深 (被災家屋またはその近隣の構造物の前面・背面の浸水深) を, フルード数 $2.0 (Fr = u/\sqrt{gh})$, u : 流速, h : 浸水深) と仮定して流速・抗力に換算している. すなわち, 彼らの評価は津波氾濫流速について危険側の上限值として設定していると考えるのが妥当であろう. 一方, 本研究は津波外力の取得に数値解析を用いている. 筆者らが実施した市街地内の津波氾濫解析においては 23 m の空間格子を用い⁹⁾, 建物密集地域の計算には合成等価粗度^{39),40)}を導入しているため, 街路を走る津波氾濫流の流速の推定精度はさほど高くないと考えられる. 数値計算で求めた津波氾濫流速を現場で検証した事例は極めて少ないが, 著者らの計算結果を Banda Aceh のビデオ解析から推定された氾濫流速⁴¹⁾と比較した場合には若干の過小評価が認められた⁹⁾. したがって, ここで示した氾濫流速に関する被害関数は, 実際の流速を過小評価している可能性を有している.

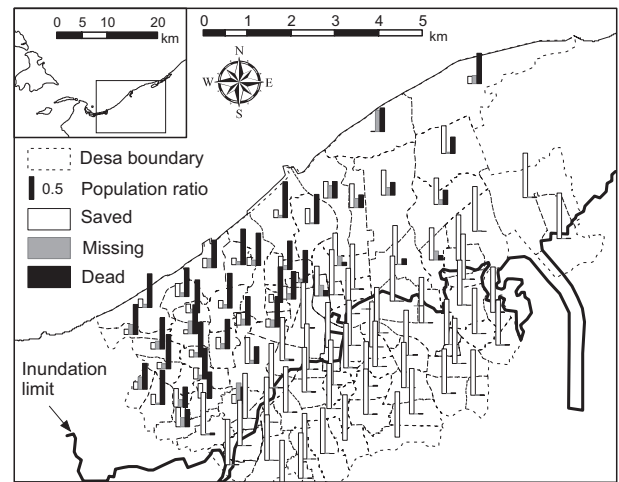


図-6 Banda Aceh の津波による死亡率の分布⁴²⁾

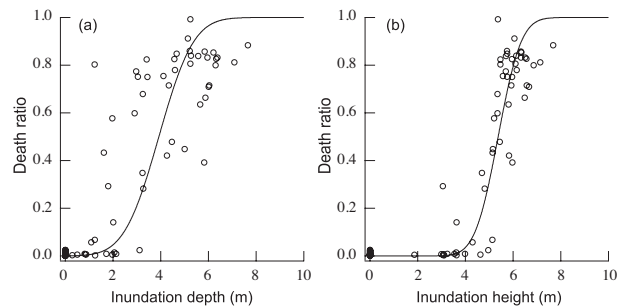


図-7 津波による人的被害関数 ((a) 浸水深, (b) 浸水高に対する死亡率)

(3) 被害実績データと数値解析との統合による人的被害関数

既往の津波事例から人的被害数の空間的な情報を得ることができれば, 数値解析と統合することにより死亡率に関連した被害関数を構築することも可能である. 図-6 は JICA (2005) による調査結果⁴²⁾で, Desa (村) 毎の住民の死亡率を示したものである. この被害実績と図-2(e) を統合し, 図-7 のような人的被害関数が構築できる. これは各 Desa 内の津波浸水深と浸水高 (平均海面から測った津波痕跡の高さ) をサンプリングして得られた中央値 (メディアン値) と死亡率との関係 (図の \circ) を, 前節と同様に式 (3) を仮定して回帰分析を行うことにより被害関数を求めたものである (回帰パラメータは表-3 参照). 結果として, Banda Aceh を襲った津波の事例では, 浸水深が 2 m (浸水高 4.5 m) を超えると死亡率は急増し, 浸水深 6 m を超える地域では生存はほとんど不可能であったことがわかる.

ところで, Banda Aceh の津波規模と死亡率の関係は, 既往の事例に対してどのような特徴があるかを考えてみる. 図-8 は, 河田 (1997) がまとめた日本国内の津波災

表-3 人的被害関数の回帰式のパラメータ (R^2 は回帰式の決定係数)

外力	μ	σ	R^2
浸水深 (m)	3.92	1.15	0.62
浸水高 (m)	5.37	0.76	0.72

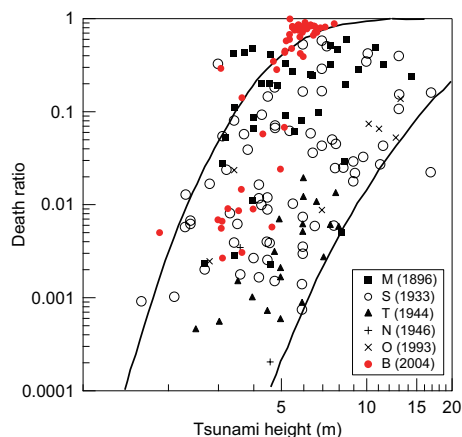


図-8 既往の津波災害における津波規模と死亡率の関係⁴³⁾と Banda Aceh の人的被害特性の比較。凡例は M: 1896 明治三陸地震津波, S: 1933 年昭和三陸地震津波, T: 1944 年東南海地震津波, N: 1946 年南海地震津波, O: 1993 年北海道南西沖地震津波, B: 2004 年インド洋大津波 (Banda Aceh)。実線は河田 (1997) が引いた上限と下限の線である。

害 (5 事例) における津波高と死亡率の関係⁴³⁾に図-7(b) で得られた結果をプロットしたものである。図の実線は、河田 (1997) が引いた上限・下限のラインであるが、2004 年の Banda Aceh の事例はその上限を超える被害規模であったことが理解できる。同じ津波高であっても死亡率が場合によっては 3 桁異なるのは、津波の来襲特性 (到達時刻, 規模, 周期, 振動の継続時間等) としての外力のばらつきと、避難行動の有無や人々の危機意識といった社会的条件のばらつきの結果であろう。

(4) 衛星画像と現地調査との統合による家屋被害関数

次に、衛星画像による被害判読と現地調査を統合した家屋被害関数の構築手法について述べる。行谷・都司 (2006) は、QuickBird 衛星画像の津波前 (2004 年 6 月 23 日) と津波後の画像 (2004 年 12 月 28 日) を用いて、前節と同様に家屋被害判読を行った¹¹⁾。その結果を図-9 に示す。これは Banda Aceh 市街地中心部の家屋流失分布状況を示したもので、図中の●と○はそれぞれ QuickBird 画像から判読した残存家屋、流失家屋の分布である。彼らは津波直後に現地へ赴き津波浸水深および津波浸水高の詳細な調査も行っている³⁵⁾。そこで、衛星画像から判読した被害情報と現地調査で得られた津

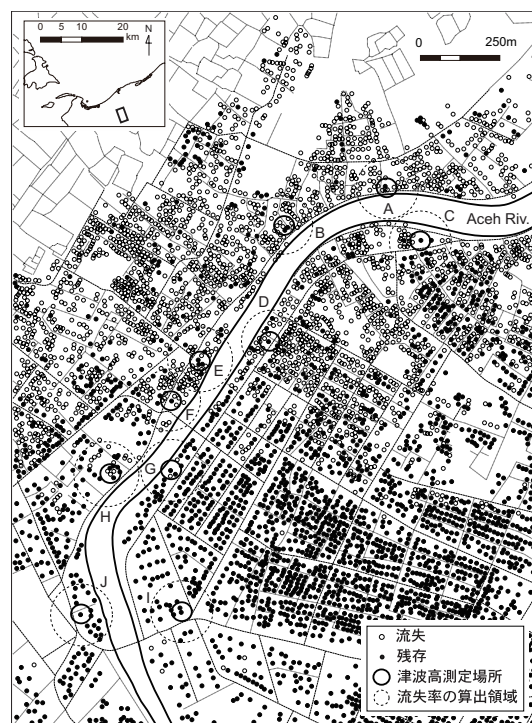


図-9 Banda Aceh 市内中心部の家屋流失分布¹¹⁾

波外力情報を統合して被害関数を構築する。この場合重要なことは、現地調査結果と家屋被害情報との関連付けである。全ての被災家屋の地点で浸水深または浸水高を測定することは不可能であるから、ここでは浸水深・浸水高の測定点を中心に半径 100 m の領域内 (図-9 点線円内) で家屋流失率を計算し、測定点での浸水深・浸水高を代表値として外力-被害率のデータセットを作成した。その結果の一部を表-4 に示す。なお、表に示す以外にも Banda Aceh 市内 5 地点 (計 15 地点) で調査を実施し、同様のデータを準備した。調査箇所については行谷・都司 (2006) を参照されたい¹¹⁾。ただし、被害率の算定および回帰分析を行うにあたり、母集団の家屋数が他のグループと比較して極端に少なかった場合 (母数 30 棟未満) のデータは分析の対象外とした (回帰分析に用いたのは 13 地点のデータ)。図-10 は、その結果を浸水深または浸水高と流失率の関係としてプロットしたものに、前節の方法により求めた被害関数 (回帰式) を重ねたものである。また、比較のために図-5(a) の被害関数 (衛星画像による判読と津波数値解析により得られたもの) も重ねて示す (点線)。得られた回帰式のパラメータを表-5 に示す。

図-10(a) に示した津波浸水深と被害率に関する 2 つの被害関数のプロットを見ると、どちらも浸水深 2 m を超えると被害確率が急激に増加し、5 m を超えるとほぼ全ての家屋が全壊・流失することがわかる。一方図-10(b) は、浸水高と被害率の関係であるが、4 m を

表-4 Banda Aceh 中心部の家屋流失率と現地調査結果の関係 (表中の領域 A-H は図-9 に対応, ただし被害率算定時の母数が 30 棟以上の場合のみ表示)

領域	浸水深 (m)	浸水深 (m)	流失戸数	全戸数	被害率 (流失率)
A	7.0	5.4	40	41	0.98
B	7.1	5.0	51	57	0.89
C	7.6	4.7	32	45	0.71
D	7.1	5.0	72	83	0.87
E	8.2	4.9	46	57	0.81
F	6.6	3.7	51	60	0.85
G	4.6	2.5	2	31	0.06
H	4.7	2.1	12	30	0.40

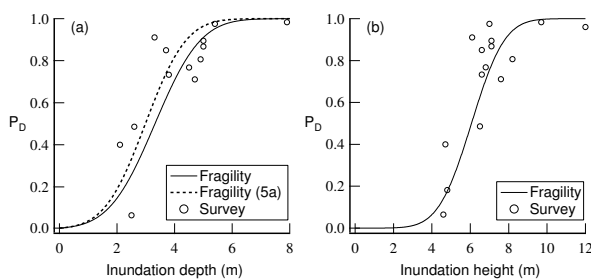


図-10 衛星画像による被害判読と現地調査から得られた津波被害関数. (a) 浸水深と被害率 (実線), (b) 浸水高と被害率. 点線は前節図-5(a) で得たもの.

表-5 衛星画像による判読と現地調査から得られた津波被害関数の回帰式のパラメータ (R^2 は回帰式の決定係数)

外力	μ	σ	R^2
浸水深 (m)	3.33	1.25	0.62
浸水高 (m)	6.07	1.36	0.53

超えると被害率が顕著に増加し, 8 m でほぼ全ての建物が全壊・流失することがわかる. 図-10(a) の 2 つの関数 (実線と点線) には若干の差違が認められるが, これはサンプル数とデータ処理方法の違いによるものである. 点線で示した関数には Banda Aceh 全域の家屋被害とそれぞれの家屋に対応した数値解析による外力情報が反映されているが, 実線で示した関数は限られた地域 (図-9) の衛星画像による判読と現地調査に基づく測定結果のみを反映したものである (浸水深や浸水高に応じた家屋被害率の算定にはそれぞれ 31-83 棟分のサンプルを用いた). 回帰式の適合度も点線 (図-5(a)) のほうが高いことから, 被害関数の構築にはできるだけ広範囲に取得したサンプルを用いることが統計的にも望ましいといえよう.

(5) 資料・文献による被害関数

津波の歴史資料から津波被害関数の構築を試みる. ここで使用したのは, 先述の羽鳥 (1984) と首藤 (1992), および首藤 (1987)⁴⁴⁾ にまとめられている津波高および浸水深と集落の家屋被害率の関係である. どちらも歴史資料の分析や現地調査を通じて得られたものであるが, 羽鳥のデータは 1896 年明治三陸地震津波, 1933 年昭和三陸地震津波, 1960 年チリ地震津波の 3 事例について, それぞれ山下 (1982) がまとめた山奈宗真による調査結果⁴⁵⁾, 東京大学地震研究所による調査報告⁴⁶⁾, 仙台管区気象台の報告⁴⁷⁾ の分析を通じて集落における津波高 (平均海面上の高さ) とそこでの家屋破壊率についてまとめた. 一方, 首藤 (1987, 1992) も同様の関係を 1896 年明治三陸津波に対して分析した. ただし, 山奈による被害調査報告に加え, 津波高については伊木 (1896) がまとめた震災豫防調査會報告⁴⁸⁾ と岩手県による調査結果⁴⁹⁾, さらに独自に実施した現地調査^{50), 51), 52)} と数値解析⁵³⁾ を元に多角的な検討を行った.

以下では羽鳥 (1984) によるデータと首藤 (1987, 1992) のデータを用いて, 前節と同様に津波被害関数を構築する. 表-6 に利用したデータをまとめる. 家屋被害率 P_D の計算は, 羽鳥は式 (1), 首藤は式 (6) の定義に基づいており, 浸水域内の家屋被害率の表現が若干異なるが, その意味は同じである (羽鳥は流失・全壊家屋数を 1 つの変数で扱い, 首藤は個別に扱っている).

$$P_D = \frac{a + b + c/2}{a + b + c + d} \times 100(\%) \quad (6)$$

ここで a は流失家屋数, b は全壊家屋数, c は半壊家屋数, d は浸水家屋数である.

上記データから得られた被害関数を図-11 に示す. ただし P_D は百分率ではなく割合で統一した. それぞれ (a) から (d) は羽鳥 (1984) のデータから得られたもので, (a) 1896 年明治三陸地震津波, (b) 1933 年昭和三陸地震津波, (c) 1960 年チリ地震津波, (d) 3 つのイベント全てに対してのものである. どれも論文中のデータ (○: 津波高と家屋被害率) と被害関数を示してある. また, (e) と (f) は首藤 (1987, 1992) を利用して津波高および浸水深と家屋被害率について論文中のデータ (○) と被害関数をプロットしたものである. 図中の実線は回帰分析から得られた被害関数で, 点線で示すのは各データを包絡するような上限・下限の線であり, 全て式 (3) を用いて回帰したものである. ただし, (c) と (f) については上限・下限の包絡線は示していない. (c) は回帰式の適合度がもともと良く, (f) はサンプル数が少なく, 上限・下限を包絡するのは不適当であると考えたためである. 得られた被害関数の回帰パラメータを表-7 に示す.

図-11 の全体的な傾向を見ると, 特に明治三陸・昭和三陸地震 (図-11(a), (b), (e)) の津波高-家屋被害率

表-6 津波被害関数構築に用いた資料

使用データ	対象津波	オリジナルの資料
羽鳥 (1984) ¹³⁾	1896 年明治三陸, 1933 年昭和三陸, 1960 年チリ	山下 ⁴⁵⁾ , 東大地震研 ⁴⁶⁾ , 仙台管区気象台 ⁴⁷⁾
首藤 (1987, 1992) ^{44),1)}	1896 年明治三陸	山下 ⁴⁵⁾ , 伊木 ⁴⁸⁾ , 岩手県 ⁴⁹⁾ , 首藤ら ^{50),51),52),53)}

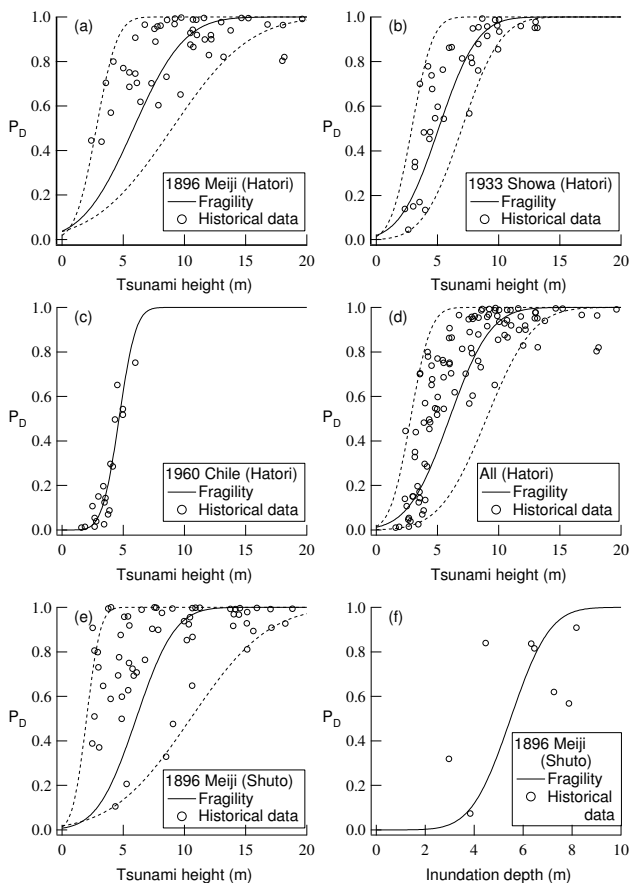


図-11 歴史資料から得られた津波被害関数。(a)1896 年明治三陸地震津波(羽鳥), (b)1933 年昭和三陸地震津波(羽鳥), (c)1960 年チリ地震津波(羽鳥), (d)羽鳥のデータ全て, (e)1896 年明治三陸津波(首藤), (f)1896 年明治三陸津波(首藤)

の関係には大きなばらつきが認められる。羽鳥、首藤の明治三陸地震津波のデータは文献に記録されていた津波高と被害率を集計したものであり、それが集落毎の代表的な津波高をとったものか最大値をとったものかは判断できないため、被害率曲線(被害関数)として津波高-家屋被害率の一意的な関係を求めることは難しい。また、同じイベントであっても得られたデータの質と量により被害関数は大きく異なることがわかる(たとえば図-11(a)と(e))。首藤のデータ(図-11(e))は羽鳥のデータ(図-11(a))よりもばらつきが大きく見えるが、首藤は津波高の測定値の信頼度を上げた結果のものである。したがって、歴史資料を元に構築した被害関数で

表-7 歴史資料から得られた津波被害関数の回帰式のパラメータ。表中の(a)-(f)は図-11に対応。 μ, σ は実線の津波被害関数のパラメータ、 $\mu', \sigma', \mu'', \sigma''$ はそれぞれ上限, 下限の関数のパラメータである。 R^2 は回帰式(実線)の決定係数。

関数	μ	σ	R^2	μ'	σ'	μ''	σ''
(a)	5.84	3.28	0.30	2.80	1.35	9.00	5.00
(b)	5.09	2.50	0.70	2.90	1.35	7.00	2.50
(c)	4.66	1.09	0.80	N/A	N/A	N/A	N/A
(d)	5.97	2.66	0.55	2.80	1.30	10.0	3.60
(e)	6.05	2.49	0.24	2.00	0.90	10.5	5.00
(f)	5.49	1.26	0.36	N/A	N/A	N/A	N/A

は津波外力と被害程度は一意的ではなく、津波高に対して起こりうる家屋程度の幅(または被害程度に対する津波高の幅)を示した巨視的な指標として考える方が妥当であろう。たとえば、図-11(d)を用いると、津波高2 mに対応する三陸地方の家屋被害率は0-30%程度であると評価でき、あるいは家屋被害率30%程度と文献中に記述されていた地域の津波規模(津波高)は2.1-7.4 mと推定できる。

4. 津波被害関数の活用と留意点

津波被害関数の工学的利用にあたっての適用性と留意点および課題について論ずる。これまで構築した被害関数は得られたデータの種類やその質と量に応じて次の4種類にまとめられる。

- 衛星画像による被害判読と詳細な氾濫解析結果を統合した家屋被害関数(図-5)
- 被害実績データ(死亡率の空間分布)と詳細な氾濫解析を統合した人的被害関数(図-7)
- 衛星画像による被害判読と現地調査結果を統合した家屋被害関数(図-10)
- 歴史資料の文献の解析から導いた家屋被害関数(図-11)

被害関数の用途は、想定津波の数値計算結果と統合して浸水域内の家屋被害棟数や人的被害者数を推計する用途(被害想定用途)と、歴史資料や古文書に記載されている情報から当時の津波外力を逆推定する用途(津波規模推定用途)に大別できる。

前者の用途には、上記 (a), (b) の方法による被害関数を用いるのがよい。または、詳細な現地調査を行い統計的に十分なデータが確保できているのであれば (c) の関数を利用することも可能である。高分解能の地形データを用いた詳細な津波氾濫解析を実行し、浸水域内の家屋の位置または人口メッシュデータとそれに関連付けた津波浸水深に応じて被害率や死亡率を算定することにより、被害家屋棟数や人的被害の量的な推計が可能となる。

後者の用途 (津波規模推定用途) については、(d) を用いれば地域の伝承や古文書等に記載されている被害情報のみから当時の津波来襲規模を推定したり、逆に津波高に関する記述から当時の被害程度を推定することが可能である。特に歴史津波の研究において、歴史資料の限られた記述や伝承から未知の津波規模を推定する際に利用して欲しい。たとえば歴史資料には「寺の階段の何段目まで浸水」や「ある集落で何軒の家屋が流失した」といった断片的な情報しか記述されていない場合がある。このような情報のみから被害の程度や津波の規模を推定する際には、津波外力と被害の関係を一意的に定めることに意味はない。図-11 から上限・下限の幅を考えるべきであろう。

一方、被害関数の利用にあたっては十分な注意が必要である。本来、津波被害の特性は津波外力の局所性 (津波氾濫流の時空間的な特性、漂流物の有無)、被災地の地形や土地利用状況、家屋の耐津波性能 (家屋の構造、集落の家屋密集度) といったさまざまな要因の集積として得られるものである。たとえば、図-5 で得られた被害関数は 2004 年スマトラ島沖地震津波の Banda Aceh の津波被害の特性が反映されたものであり、この事例から構築された被害関数が、いかなる想定津波や地域でも利用可能な被害推計モデルとしての普遍性を有していると考えるのは間違いである。特に Banda Aceh の津波の来襲状況はビデオ等からも認められるように、流木や瓦礫等の漂流物の存在が被害拡大に寄与したことが推察される。その意味では、本研究で提案した被害関数のデータには漂流物の効果が含まれており、純粋な津波波力による被害よりも危険側の評価となっていると考えるのが妥当である。

加えて、人的被害の推計に被害関数を用いる場合にも、その被害関数構築の背景を理解しておく必要がある。Banda Aceh の事例で構築した人的被害関数は、計算した津波浸水深と住民台帳に基づく人口データおよび報告された死者数を Desa (村) 毎に関連づけたものである。津波来襲時には、人々は津波から逃れようと避難したであろうから、どこで (またはどのような津波外力により) 死に至ったかは正確にはわからない。ここで提案した被害関数は、津波外力と死亡率の統計的な情

報として利用すべきであろう。近年発展が著しいマルチエージェント避難シミュレーション (たとえば後藤ら (2008)⁵⁴⁾) と津波氾濫解析を融合して人的被害を推計する場合には、人体に作用する津波の流体力を考慮したミクロな人的被害評価モデル (たとえば Koshimura *et al.* (2006)⁵⁵⁾) を利用するのが望ましい。今後さらなる津波被害関数の整備には、津波来襲の状況が十分にわかっている事例 (詳細な現地調査結果や航空写真が整備されている事例)、たとえば 1993 年北海道南西沖地震津波など日本国内の事例等を通じて再構築し、本研究で得られた関数と比較検討する必要がある。

また、数値解析結果を被害推計に用いる場合には、その推定精度についても留意しなければならない。たとえば、津波数値解析の精度はその計算の空間分解能に大きく依存することがわかっている。特に家屋密集地における津波氾濫流速の予測精度は計算の空間分解能の影響を強く受ける。局所的な氾濫流速の再現性に問題がある場合には、氾濫流速や津波波力に関する被害関数 図-5(b), (c) を利用することは避けて、浸水深についての関数 図-5(a) を利用の方がよい (浸水深の推定精度は計算の空間分解能の影響を比較的受けにくい)。津波被害想定業務等に被害関数を利用して被害推計を行う際には、津波計算の条件 (空間分解能や陸上遡上解析時の抵抗則等) も付記し、どのような条件で得られた推計結果かを明記する必要がある。数値計算の空間分解能に応じた被害関数を構築することも今後の課題として挙げておかなければならない。

5. 結論

新しい津波被害想定指標として津波被害関数を提案し、その構築手法、適用性、工学的利用にあたっての留意点について論じた。津波被害関数とは、津波による家屋被害や人的被害の程度を被害率 (または死亡率) として確率的に表現し、津波浸水深、浸水高、氾濫流速、波力といった津波の流体力学的諸量の関数として記述するものである。

本稿では、2004 年スマトラ島地震津波の Banda Aceh における事例を通じて、衛星画像による家屋被害判読結果、被害実績データと数値解析や現地調査との統合により津波被害関数を構築した。津波被災地の状況を詳細に判読できる高分解能衛星画像や航空写真、詳細な被害調査、津波数値解析結果を GIS (地理情報システム) を用いて統合することで、新しい津波被害想定指標が得られることを示した。

また、既往津波・歴史津波の津波高と被害データから被害関数を再構築し、歴史資料にある津波被害に関する記述や津波高に関する記述からそれぞれを逆推定する

ための指標を得ることができた。ただし、この場合の被害関数は、津波高に対して家屋程度の起こり得る幅(または被害程度に対しての津波高の幅)を示した巨視的な指標として考える必要がある。

今後は、国内外の様々な津波災害事例から津波被害関数を構築し、それぞれの比較検討を通じて被害推定指標の整備を図っていくことが課題である。

謝辞：本研究は科学研究費補助金(課題番号 19681019, 18201033)および平成 20 年度産業技術研究助成事業(プロジェクト ID:08E52010a)の補助を受けて実施された。また、本稿をまとめるにあたり大家隆行氏(パシフィックコンサルタンツ株式会社)、今村文彦教授(東北大学大学院工学研究科)の協力を得た。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 首藤伸夫：津波強度と被害，東北大学津波工学研究報告，第 9 号，pp.101-136, 1992.
- 2) 松富英夫，首藤伸夫：津波の浸水深，流速と家屋被害，海岸工学講演会論文集，第 41 号，pp.246-250, 1994.
- 3) 松富英夫，首藤伸夫：津波の浸水深と流速，東北大学津波工学研究報告，第 11 号，pp.29-32, 1994.
- 4) 松富英夫，今村文彦，都司嘉宣，韓世燮，G. S. Prasetya：1994 年東ジャワ地震津波の現地調査，海岸工学論文集，第 42 巻，pp.346-350, 1995.
- 5) 松富英夫，今村文彦，高橋智幸，倉吉一盛，小舟浩治，G. Watson, H. Rahman, 首藤伸夫：1996 年イリアンジャヤ地震津波とその被害，海岸工学論文集，第 43 巻，pp.311-315, 1996.
- 6) 松富英夫，河田恵昭，首藤伸夫，都司嘉宣，藤間功司，今村文彦，松山昌史，高橋智幸，牧紀男，韓世燮：1998 年バプアニューギニア津波の陸上での流勢と被害，海岸工学論文集，第 46 巻，pp.376-380, 1999.
- 7) 松富英夫，高橋智幸，松山昌史，原田賢治，平石哲也，S. Supartid, S. Nakusakul：タイの Khao Lak と Phuket 島における 2004 年スマトラ島沖津波とその被害，海岸工学論文集，第 52 巻，pp.1356-1360, 2005.
- 8) 松富英夫，榊山勉，S. Nugroho，都司嘉宣，谷岡勇市郎，西村裕一，鎌滝孝信，村上嘉謙，松山昌史，栗塚一範：Banda Aceh と周辺における 2004 年インド洋津波と被害想定からみた課題，海岸工学論文集，第 52 巻，pp.1366-1370, 2005.
- 9) Koshimura, S., Oie, T., Yanagisawa, H. and Ima-mura, F.：Developing fragility functions for tsunami damage estimation using numerical model and post-tsunami data from Banda Aceh, Indonesia, *Coastal Engineering Journal*, Vol.51, No.3, pp.243-273, 2009.
- 10) 大家隆行，越村俊一，柳澤英明，今村文彦：2004 年インド洋大津波によるバンダ，アチェ市街地の津波氾濫解析と被害評価，海岸工学論文集，第 53 巻，pp.221-225, 2006.
- 11) 行谷佑一，都司嘉宣：衛星画像から判明した Indonesia 国 Banda Aceh 市街地の 2004 年インド洋津波による流失家屋の分布，海岸工学論文集，第 53 巻，pp.286-290, 2006.
- 12) Hatori, T.：A study of the damage to houses due to a tsunami, *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, Vol.42, pp.181-191, 1964.
- 13) 羽鳥徳太郎：津波による家屋の破壊率，地震研究所彙報，Vol. 59, pp.433-439, 1984.
- 14) 羽鳥徳太郎，相田 勇，岩崎伸一，日比谷紀之：尾鷲市街に遡上した津波の調査，地震研究所彙報，Vol. 55, pp.245-263, 1981.
- 15) 相田 勇，羽鳥徳太郎：尾鷲市街に遡上した津波の数値実験，地震研究所彙報，Vol.57, pp.337-350, 1982.
- 16) 相田 勇，羽鳥徳太郎：大船渡市街に遡上した津波の数値実験，地震研究所彙報，Vol.58, pp.175-185, 1983.
- 17) 相田 勇，羽鳥徳太郎：和歌山県，湯浅・広川両町に遡上した津波の数値実験，地震研究所彙報，Vol.58, pp.667-681, 1983.
- 18) 松富英夫：流木を伴う碎波段波衝突による波力について一段波波高と流木径が同程度の場合，海岸工学論文集，第 37 巻，pp.654-658, 1990.
- 19) 飯塚秀則，松富英夫：津波氾濫流の被害想定，海岸工学論文集，第 47 巻，pp.381-385, 2000.
- 20) 庄司 学，森山哲雄，幸左賢二，松富英夫，嶋原良典，村嶋陽一：2006 年ジャワ南西沖地震津波による家屋等構造物の被災分析，海岸工学論文集，第 54 巻，pp.861-865, 2007.
- 21) 水谷 将，今村文彦：津波段波の衝撃性および越流を考慮した設計外力算定フローの提案，海岸工学論文集，第 49 巻，pp.731-735, 2002.
- 22) 朝倉良介，岩瀬浩二，池谷 毅，高尾 誠，金戸俊道，藤井直樹，大森政則：護岸を越流した津波による波力に関する実験的研究，海岸工学論文集，第 47 巻，pp. 911-915, 2000.
- 23) 松富英夫，大向達也，今井健太郎：津波氾濫流の構造物への流体力，水工学論文集，第 48 巻，pp.559-564, 2004.
- 24) Yeh, H.: Design tsunami forces for onshore structures, *Journal of Disaster Research*, Vol.2, No.6, pp.531-536, 2007.
- 25) チャルレス・シマモラ，嶋原良典，藤間功司：建物群に作用する津波波力に関する水理実験，海岸工学論文集，第 54 巻，pp.831-835, 2007.
- 26) 有川太郎，中野史丈，大坪大輔，下迫健一郎，石川信隆：遡上津波力による構造物の変形・破壊挙動の検討，海岸工学論文集，第 54 巻，pp.841-845, 2007.
- 27) 有川太郎，中野史丈，下迫健一郎，山野貴司：津波力による壁・柱部材の変形・破壊に関する大規模実験，海岸工学論文集，第 55 巻，pp.261-265, 2008.
- 28) 岡田成幸，高井伸雄：被害関数による建物被害の集団特性記載と単体特性記載，日本建築学会学術講演梗概集，pp.37-38, 1999.
- 29) 物部長穂：土木工事震害調査報告，震災予防調査会報告，第 100 号，65p., 1926.
- 30) 長谷川浩一，翠川三郎，松岡昌志：地域メッシュ統計を利用した広域での木造建築物群の震害予測-その 2 建築年代別木造建築物の被害関数の作成と震害予測例-，日本建築学会構造系論文集，第 505 号，pp.53-59, 1998.
- 31) 村尾 修，山崎文雄：自治体の被害調査結果に基づく兵庫県南部地震の建物被害関数，日本建築学会構造系論文集，第 527 号，pp.189-196, 2000.
- 32) 翠川三郎，藤本一雄：計測震度と住家被害率の関係-罹災証明を用いた検討-，日本地震工学会論文集，第 2 巻，第 2 号，pp.15-22, 2002.
- 33) Aida, I.：Reliability of a tsunami source model derived from fault parameters, *J. Phys. Earth*, Vol.26, pp.75-73, 1978.
- 34) Borrero, J.：Field survey of northern Sumatra and Banda Aceh, Indonesia after the tsunami and earthquake of 26 December 2004, *Seismological Research Letters*, Vol.76, No. 3, pp.309-318, 2005.
- 35) Tsuji, Y., Tanioka, Y., Matsutomi, H., Nishimura, Y., Kamataki, T., Murakami, Y., Sakakiyama, T., Moore, A., Gelfenbaum, G., Nuguroho, S., Waluyo,

- B., Sukanta, I., Triyono, R. and Namegaya, Y. : Damage and height distribution of Sumatra earthquake – Tsunami of December 26, 2004, in Banda Aceh city and its environs, *Journal of Disaster Research*, Vol. 1, No. 1, pp.103–115, 2006.
- 36) Matsutomi, H., Sakakiyama, T., Nugroho, S. and Matsuyama, M. : Aspects of inundated flow due to the 2004 Indian Ocean tsunami, *Coastal Engineering Journal*, Vol.48, No. 2, pp.167–195, 2006.
- 37) 土木学会 (原子力土木委員会津波評価部会) : 原子力発電所の津波評価技術, 321p., 土木学会, 2002.
- 38) Saatcioglu, M., Ghobarah, A. and Nistor, I. : Performance of structures in Indonesia during the December 2004 great Sumatra earthquake and Indian Ocean tsunami, *Earthquake Spectra*, Vol.22, No.3, pp.S295–S317, 2006.
- 39) 油屋貴子, 今村文彦 : 合成等価粗度を用いた津波氾濫シミュレーションの提案, 海岸工学論文集, 第 49 巻, pp.276–280, 2002.
- 40) Dutta, D., Alam, J., Umeda, K. and Hayashi, M. : A two-dimensional hydrodynamic model for flood inundation simulation : a case study in the lower Mekong river basin, *Hydrological Processes*, Vol.21, pp.1223–1237, 2007.
- 41) Fritz, H. M., Borrero, J. C., Synolakis, C. E. and Yoo, J. : 2004 Indian Ocean tsunami flow velocity measurements from survivor videos, *Geophysical Research Letters*, Vol.33, L24605, 2006.
- 42) Japan International Cooperation Agency (JICA) : The study on the urgent rehabilitation and reconstruction support program for Aceh province and affected areas in north Sumatra, Final Report (1), Vol. IV : Data Book, 2005.
- 43) 河田恵昭 : 大規模地震災害による人的被害の予測, 自然災害科学, Vol.16, No.1, pp. 3–13, 1997.
- 44) 首藤伸夫 : 津波被害の変遷, 東北大学津波防災実験所報告, 第 4 号, pp.1–41, 1987.
- 45) 山下文男 : 哀史三陸大津波, 413p., 青磁社, 1982.
- 46) 東京帝国大学: 昭和 8 年 3 月 3 日三陸地方津浪に関する論文及び報告, 東京帝国大学地震研究所彙報, 別冊第 1 号, 248p., 1934.
- 47) 仙台管区气象台 : 昭和 35 年 5 月 24 日チリ地震津波調査報告, 1961.
- 48) 伊木常誠 : 三陸地方津浪実況取調報告, 震災豫防調査會報告, 第 11 号, pp.5–34, 1896.
- 49) 岩手県 : チリ地震津波災害復興誌, 251p., 1969.
- 50) 首藤伸夫, 後藤智明: 三陸大津波痕跡調査 – 羅賀・平井賀・島の越 (田野畑村)・小本・下小成 (岩泉町) –, 東北大学津波防災実験所研究報告, 第 2 号, pp.39–45, 1985.
- 51) 首藤伸夫, 後藤智明 : 三陸大津波痕跡調査 – 越喜来湾 (三陸町) –, 東北大学津波防災実験所研究報告, 第 2 号, pp.46–53, 1985.
- 52) 首藤伸夫, 佐山順二, 藤間功司 : 三陸大津波痕跡調査 – 大船渡市末崎町 –, 東北大学津波防災実験所報告, 第 4 号, pp.101–113, 1987.
- 53) 今村文彦, 後藤智明, 首藤伸夫 : 津波数値予報の可能性に関する研究 – 津波数値シミュレーションの精度 –, 東北大学津波防災実験所報告, 第 3 号, pp.23–87, 1986.
- 54) 後藤仁志, 原田英治, 丸山由太, 高橋和秀, 大庭啓輔 : 津波防災のための市街地改造計画に対する避難行動シミュレータの貢献, 海岸工学論文集, 第 55 巻, pp.1371–1375, 2008.
- 55) Koshimura, S., Katada, T., Mofjeld, H. O. and Kawata, Y. : A method for estimating casualties due to the tsunami inundation flow, *Natural Hazards*, Vol.39, pp.265–274, 2006.

(2009. 4. 20 受付)

FRAGILITY FUNCTIONS FOR TSUNAMI DAMAGE ESTIMATION

Shunichi KOSHIMURA, Yuichi NAMEGAYA and Hideaki YANAGISAWA

The tsunami fragility functions are proposed as new measures for estimating structural damage and fatality due to tsunami inundation, by integration of satellite remote sensing, field survey, numerical modeling, and GIS analysis. The tsunami fragility functions are expressed as the damage probabilities of structures or fatality ratio with regard to the hydrodynamic features of tsunami inundation flow, such as inundation depth, current velocity and hydrodynamic force. It expands the capability for estimating potential tsunami damage in a quantitative manner.