

水工学シリーズ 09-B-2

津波の数値計算と予報システムおよび被害推定

東北大学大学院 工学研究科 准教授

越村 俊一

土木学会
水工学委員会・海岸工学委員会

2009 年 8 月

津波の数値計算と予報システムおよび被害推定

Numerical modeling of tsunamis — Implications to tsunami warning and damage estimation —

越村 俊一

Shunichi KOSHIMURA

1 はじめに

22 万人以上の犠牲者を生んだ 2004 年 Sumatra 島沖地震津波 (インド洋大津波) 災害から 5 年が経過しようとしている¹。津波発生直後から、世界中の数多くの研究者が津波の来襲状況や被害の全貌解明に取り組んだ。結果として、我々はインド洋大津波災害からどのような知見を得たのか。本稿ではその教訓を踏まえ、工学上特に重要な津波数値計算と近年発展が著しいリモートセンシング技術との融合による津波被害の評価手法の新しい展開、および太平洋・インド洋で整備が進められている沖合津波観測技術を利用した津波予警報システムについて述べる。

次章以降では、まず 2004 年 Sumatra 島沖地震津波の数値計算による再現の手順を簡単に紹介する。次に、2004 年の津波から明らかになった、津波外力と被害の関係 (津波被害予測式) の新しい展開を紹介する。特に、光学リモートセンシングとの融合による新しい被害評価式 (津波被害関数) 構築の手続きを詳細に説明する。最後に、2004 年以降にインド洋で整備された沖合津波観測網と津波予警報の防災上の効果についての展望を述べる。

ただしここでは紙数の都合により全てを詳細に説明することは不可能であるので、本稿の最後に示す文献をじっくり読まれることをお勧めする。

2 2004 年 Sumatra 島沖地震津波の再現

(a) 地震の発生機構

図 1 にインド洋のテクトニクスを示す。2004 年の地震は、いわゆる Sunda Megathrust というプレート沈み込み帯で発生した。Sunda Megathrust は、Bangladesh から Sunda 海溝および Java 海溝に沿って南方に延びており、これまで約 230 年程の繰り返し間隔で巨大地震が発生していたことが分かっている [1]。海洋プレート (Indian/Australian oceanic plate) が北・北東向きに 50–57 mm/year の速度で Sunda プレートに沈み込んでおり [2]、プレート間に蓄積されていた歪みが解放されて発生したのが 2004 年 Sumatra 島沖地震である。

本震による断層の破壊は、南北に 1000 km 以上にもおよび、モーメントマグニチュード (M_w) 9.0–9.3 となる過去 40 年間の観測史上で最大の地震であった。2004 年の地震以降も Sunda Megathrust での歪みの解放は依然として進んでおり、2005 年に M_w 8.6、2006 年に M_w 7.7、2007 年に M_w 8.5 の地震が発生している。

Sumatra 島沖地震の発生機構で最も特徴的な性質は、断層の破壊過程が時空間的に非常に長かったということであろう。地震波の解析結果によると、断層の破壊は Simeulue 島北部から始まり、2.0–3.0 km/s の速度で 1200–1300 km 進展し、破壊開始点から 800 km 程の断層面の破壊が津波発生に寄与したと言われている [3, 4, 5]。

(b) 津波の波源モデル

ここでは津波波源モデル (津波発生の初期水位分布) 構築の手続きについて説明する。津波波源モデルの構築には地震学の知見 (テクトニクス、余震分布、断層メカニズム、地盤変動量) と整合するように順問題的に取り組むアプローチと、観測された津波波形にインバージョンにより逆問題的に扱うアプローチの 2 通りがあるが、ここでは前者について説明する。津波波形のインバージョンについては [1] を参照されたい。

¹本稿の執筆は 2009 年 7 月

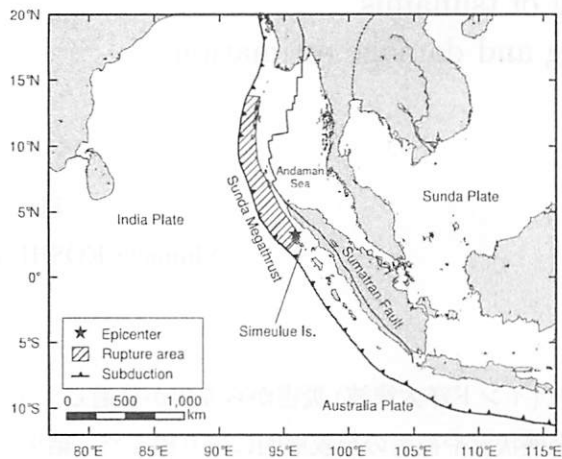


図 1: Sumatra-Andaman 諸島のテクトニクス

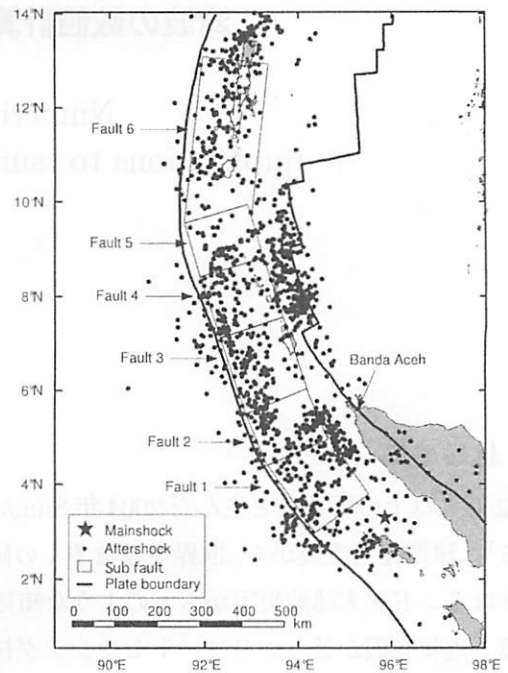


図 2: 地震断層の位置と余震分布の関係

図 2 に本震から 1 ヶ月間に観測された余震の分布を示す。余震分布は本震による断層の破壊領域を反映していることは分かっているから、Sunda 海溝のテクトニクスとモーメントテンソル解を考慮して 6 枚の低角逆断層を設定した。断層破壊による海底地盤の変動は、くいちがいの弾性論に基づく解析解 (たとえば [6, 7]) を用いて計算する。その結果を図 3 に示す。コンターの間隔は 0.5 m で、隆起を実線、沈降を点線で表示している。また、図には合成開口レーダを用いた地盤変動解析の結果も示す [8]。波源モデル構築の詳細については文献 [9] を一読されたい。

(c) 津波伝播・遡上計算とその検証

長波理論の差分法に基づく津波数値計算の場合、座標系と支配方程式を、再現する津波の対象 (遠地/近地, 外洋伝播/遡上) に応じて適切に選択する必要がある。2004 年 Sumatra 島沖地震津波の場合、Sumatra 島近海の津波の再現には直交座標系による非線形長波理論式を、モルディブ、インド、スリランカ (Maldives, India, Sri Lanka) への外洋伝播を含めた津波を再現する場合には球面座標系による分散波理論式および非線形長波理論式が必要である [10]。津波数値解析手法における支配方程式や格子間隔の選択、その精度の検証についての議論は、紙数の関係上ここでは割愛する。引用文献 [11, 12] を一読されることをお勧めする。

実地形における津波数値計算の検証は、観測された津波波形 (検潮記録) や陸上遡上の津波痕跡の測量結果を用いて行うのが一般的であるが、2004 年 Sumatra 島沖地震津波では、これまでになく 3 つの貴重な記録が得られた。

1 つ目は、人工衛星に搭載されたレーダからの海面高度である。地震発生から 2 時間後、レーダを搭載した 2 基の人工衛星がインド洋上空を飛来していた [13]。図 4 に示すのは、人工衛星 Jason-1 がとらえたインド洋を伝播途上の津波である (潮汐・波浪成分は除去済み [14])。沿岸部の局所的な海底地形の影響を受けない沖合の津波波形を空間的にとらえたのはこれが初めてである。多くの研究者が津波波源の解明に活用した (たとえば [15, 16])。

次に、光学衛星リモートセンシングによる被災地の画像と生存者が記録した津波氾濫のビデオである。前者は津波被災地の浸水域、家屋被害 (後述) および土壌浸食の状況を詳細に把握するのに活用され、後者は実際に来襲した津波の氾濫流速の実測値を得た最初の例 [17] となった。図 5 に示すのは、筆者らが行った Banda Aceh での津波氾濫解析の結果とを比較したものである [9]。ここで示した計算結果は、空間格子間隔が 23 m の地形データで実施したものであり、浸水深については高い再現性が得られたものの、市街地を走る津波氾濫流速の再現は難しいことが示されている。

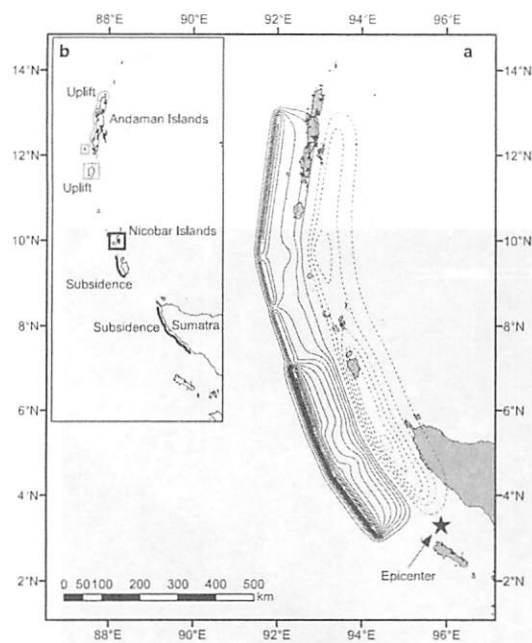


図 3: 2004 年 Sumatra 島沖地震津波の波源モデル

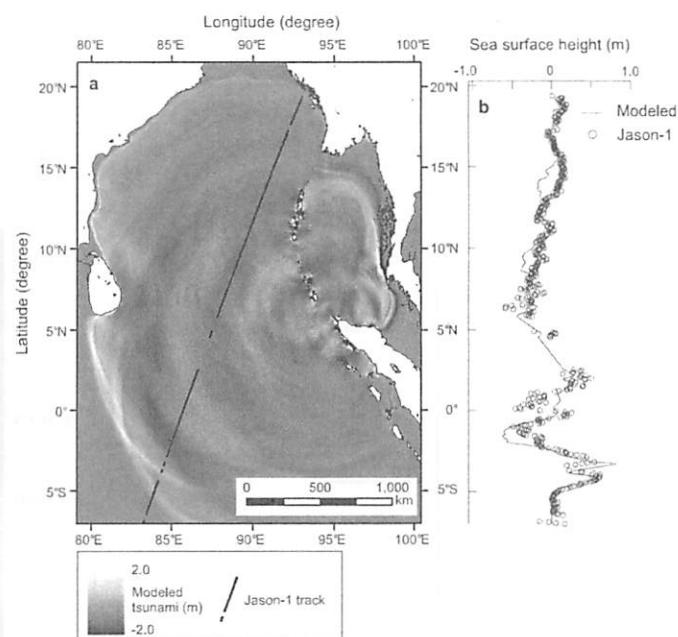


図 4: Jason-1 海面高度計による観測水位と計算波形の比較

次章以降では、これらの津波数値解析結果と被害データを統合した新しい津波被害推定法について詳細に述べる。

3 津波被害関数—新しい津波被害想定指標—

(a) 津波被害想定指標

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津波高および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 [19]。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津波浸水深分布に応じて建物被害棟数を推計しているが [20]、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言い難い。

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 [21, 22, 23, 24, 25, 26, 27] 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離散的にとらえたものにならざるを得ない。津波被害想定的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 Sumatra 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

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

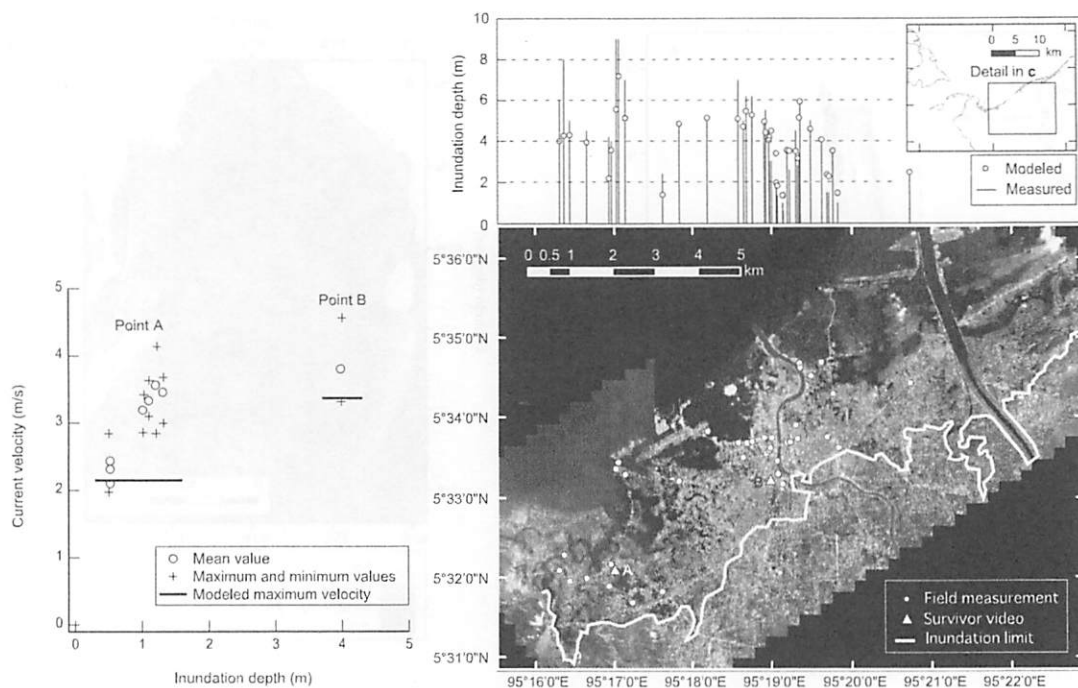


図 5: 左：Banda Aceh のビデオ解析から推測された氾濫流速 [17] と計算流速の比較, 右：浸水深の測定値 [18] と計算値の比較 (図の背景の画像は津波来襲後に撮影された IKONOS 衛星画像)

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。

ここではリモートセンシングと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)」を構築する手順を説明する。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。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。

ここでは、まず従来の津波被害想定指標 (津波外力と被害程度の関係) に関する研究の学術的背景を論ずる。次に、新しい津波被害関数の構築手法について述べる。各データの出典や諸元、データの詳細については原著論文や文献を参照されたい。

津波外力と被害の関係を求めた既往の研究には大別して 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。以降ではそれぞれのアプローチについて述べる。

資料分析に基づく方法

津波高さ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羽鳥 (1984) である [28]。彼は 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最大津波高さ (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、三陸沿岸で平均海面上の津波高さが 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

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 6: 首藤 (1992) の津波強度指標 [19](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 [35]

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		

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 [29, 30, 31, 32, 33]。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 $5-9 \text{ m}^3/\text{sec}^2$ 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の関係性を求めた [19]。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性を図 6 に示す。たとえば、津波高が 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 倍を乗ずることにより推計されている [34]。

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 [21, 22, 35]。彼らの成果はたとえば表 1 のようにまとめられている。一方、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 [36]。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論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。

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 [37]、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総合的な検討 [38, 39, 40]、建物群に作用する津波波力の検討 [41] 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) 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 [42, 43]、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だろう。

(b) 津波被害関数の構築 —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 [44]。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) が家屋倒塌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 [45, 46]。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 [47, 48]。地震動による建物被害関数は、既往の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、家屋被害率 $P(x)$ を対数正規分布、正規分布による式 (2) または式 (3) で表されるのが一般的である。

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

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

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 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 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、建物被害率の母数に対応した浸水深 (または流速, 波力) の範囲を定義し、被害棟数のヒストグラムを作成する。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。

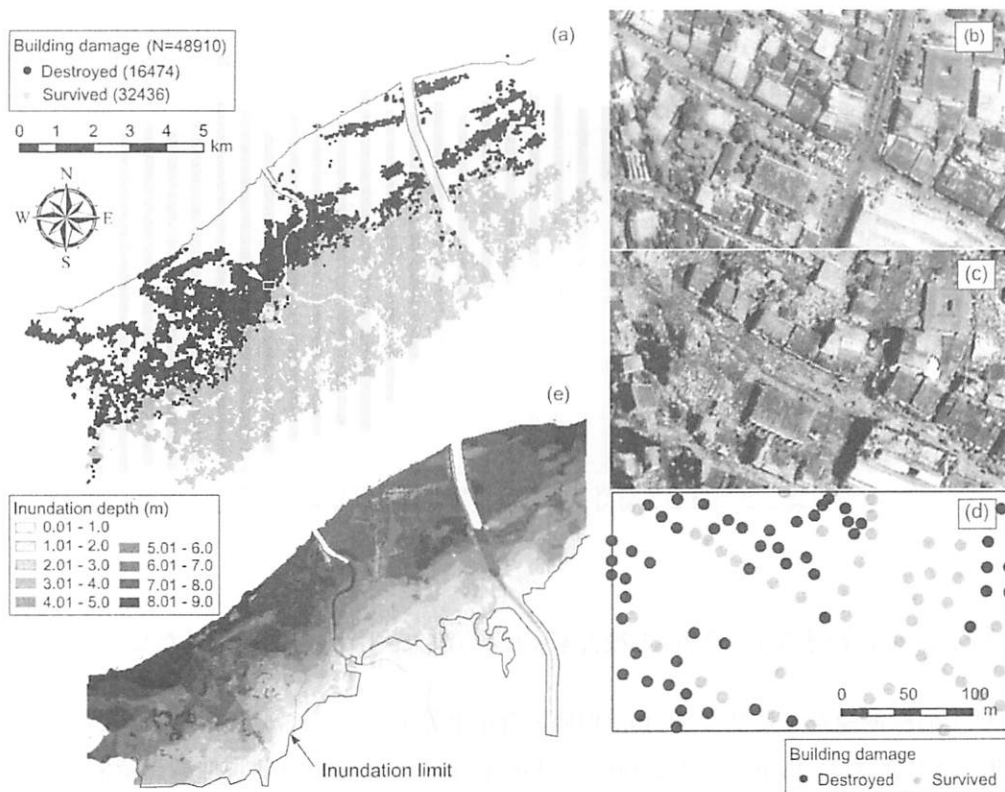


図 7: (a)IKONOS 画像を用いた Banda Aceh の家屋被害判読結果。白矢印で示した□内が領域 (b)–(d) である。(b) 津波発生前の IKONOS 画像 (2004 年 6 月 18 日), (c) 津波後の画像 (2004 年 12 月 29 日), (d) 津波前後の画像比較による家屋被害判読例 (図 (a) 矢印で示した地域), (e) 津波数値解析による浸水深分布 (図中の実線は衛星画像と現地調査から得られた津波浸水域)

4) 上で得られた津波外力と被害率の関係から回帰式を求める。外力 x に対する家屋群の被害率 $P(x)$ は、村尾・山崎 (2000) 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。

(c) 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 7 に示すのは、2004 年 Sumatra 島沖地震津波で壊滅的な被害を受けた Sumatra 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 7(a)–(d))。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 Koshimura *et al.* (2009) を参照されたい [9]。数値解析結果は、Aida (1978) による

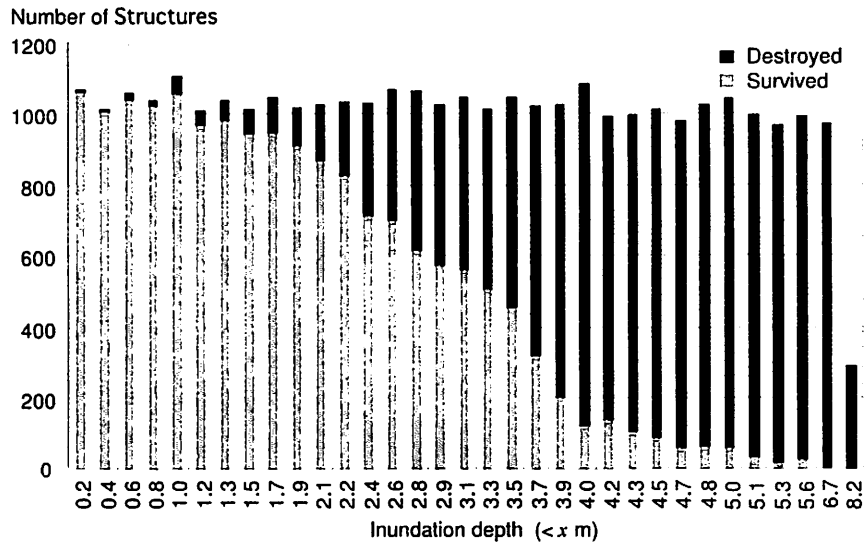


図 8: 最大津波浸水深 (計算値) と被害家屋棟数 (流失, 生存) を関連付けたヒストグラム

幾何平均 K および幾何標準偏差 κ に基づき [49], 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, Tsuji *et al.*(2006) と Matsutomi *et al.*(2006) の現地調査結果 [50, 51] 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 ($0.95 < K < 1.05, \kappa < 1.45$) を満たしている [52]。

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 (浸水深, 流速, 波力) を統合表示し, 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の関連付けを行う。具体的には, 浸水深 (または流速, 波力) の昇り順にデータをソートして被害率算定の母数を決定し, 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, 各外力に対応した家屋棟数の数 (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 8 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) を求めて代表値とし, 被害率 P_D 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。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・流失率としていることに注意が必要である。

次に回帰分析により被害関数を同定する。ここでは式 (3) に回帰させることを考え, 村尾・山崎 (2000) の方法 [47] を参考にして確率紙を用いて μ と σ を求める。すなわち正規確率紙上 (または対数正規確率紙) で, 横軸に被害率 Φ の逆関数 Φ^{-1} を, 縦軸に数値解析で求めた最大浸水深または最大流速, 最大抗力を取りプロットする。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 9 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近似が良いことがわかった。上記の結果として, 図 10 のように各種津波外力と建物被害率の関係 (○), 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, 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。

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

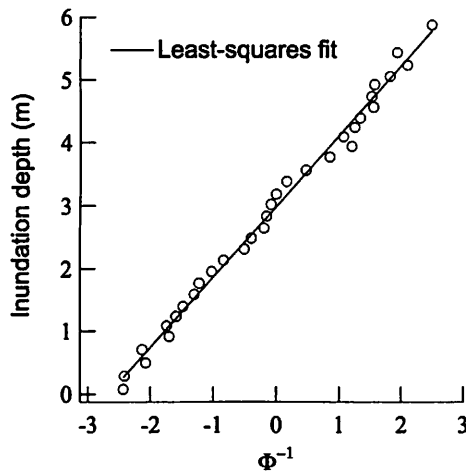


図 9: 最大津波浸水深と家屋被害率の確率紙プロット

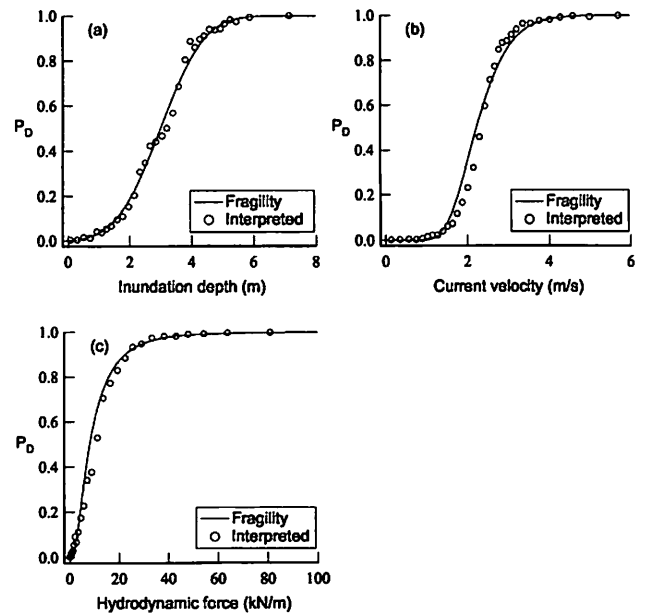


図 10: (a) 最大浸水深, (b) 最大流速, (c) 最大抗力に対する家屋被害率と津波被害関数

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

ここで F は建物単位幅あたりの抗力 (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 10 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 [53]. 参考までに, 飯塚・松富 (2000) 木造家屋の被害基準 [35] 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 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 $2.0 (F_r = u/\sqrt{gh}, u: \text{流速}, h: \text{浸水深})$ 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, 津波外力の取得に数値解析を用いている. 図 5 に示すように, 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, 建物密集地域の計算には合成等価粗度 [54, 55] を導入しているため, 街路を走る津波氾濫流速の推定精度はさほど高くないと考えられる. 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ことに注意が必要である.

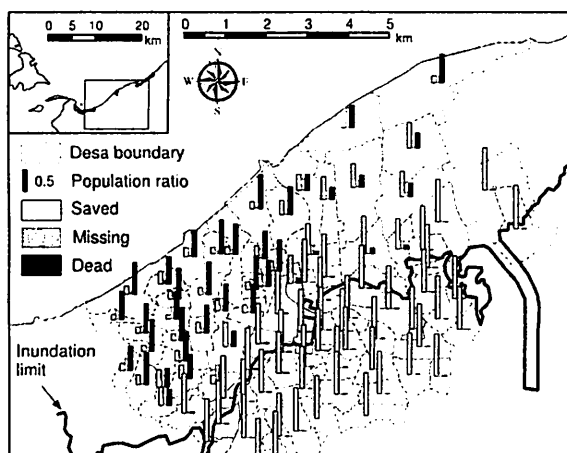


図 11: Banda Aceh の津波による死亡率の分布 [56]

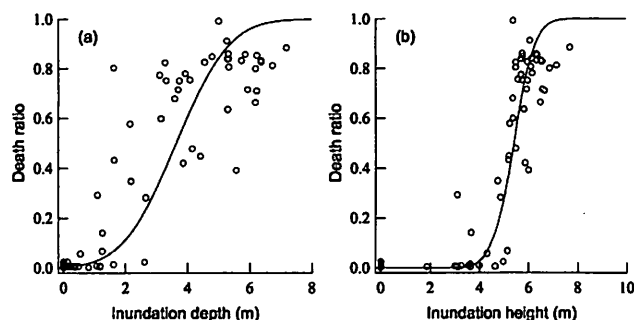


図 12: 津波による人的被害関数 ((a) 浸水深, (b) 浸水高に対する死亡率)

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)	3.75	1.35	0.80
浸水高 (m)	5.37	0.72	0.71

(d) 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 11 は JICA(2005) による調査結果 [56] 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 7(e) を統合し、図 12 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 (計算値) 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 o) 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 13 は、河田 (1997) がまとめた日本国内の津波災害 (5 事例) における津波高と死亡率の関係 [57] に図 12(b) で得られた結果をプロットしたものである。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) 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。

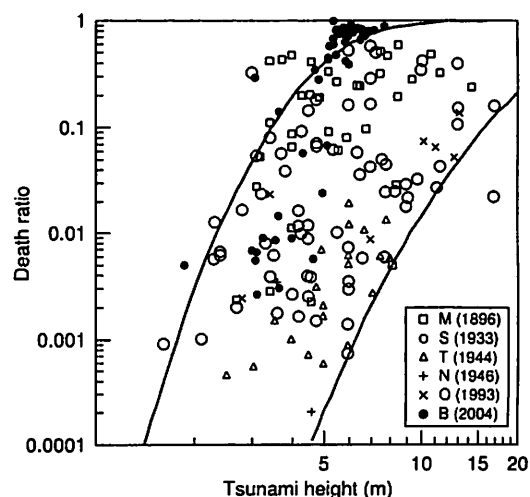


図 13: 既往の津波災害における津波規模と死亡率の関係 [57] と Banda Aceh の人的被害特性の比較

表 4: 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)	1896 年明治三陸, 1933 年昭和三陸, 1960 年チリ	山名 [58], 東大地震研 [59], 仙台管区气象台 [60]
首藤 (1987, 1992)	1896 年明治三陸	山名 [58], 伊木 [61], 岩手県 [62], 首藤ら [64, 65, 66, 67]

(e) 資料・文献から得られる被害関数

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) にまとめられている津波高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) がまとめた山名宗真による調査結果 [58], 東京大学地震研究所による調査報告 [59], 仙台管区气象台の報告 [60] 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 [19, 63]。ただし、山名による被害調査報告 [58] 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 [61] と岩手県による調査結果 [62], さらに独自に実施した調査 [64, 65, 66] と数値解析 [67] を元に多角的な検討を行った。

上記データから得られた被害関数を図 14 に示す。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 4 に本研究で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)。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。

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

図は上から (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) ただし P_D は百分率ではなく割合で統一した。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、(c) 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。得られた被害関数の回帰パラメータを表 5 に示す。

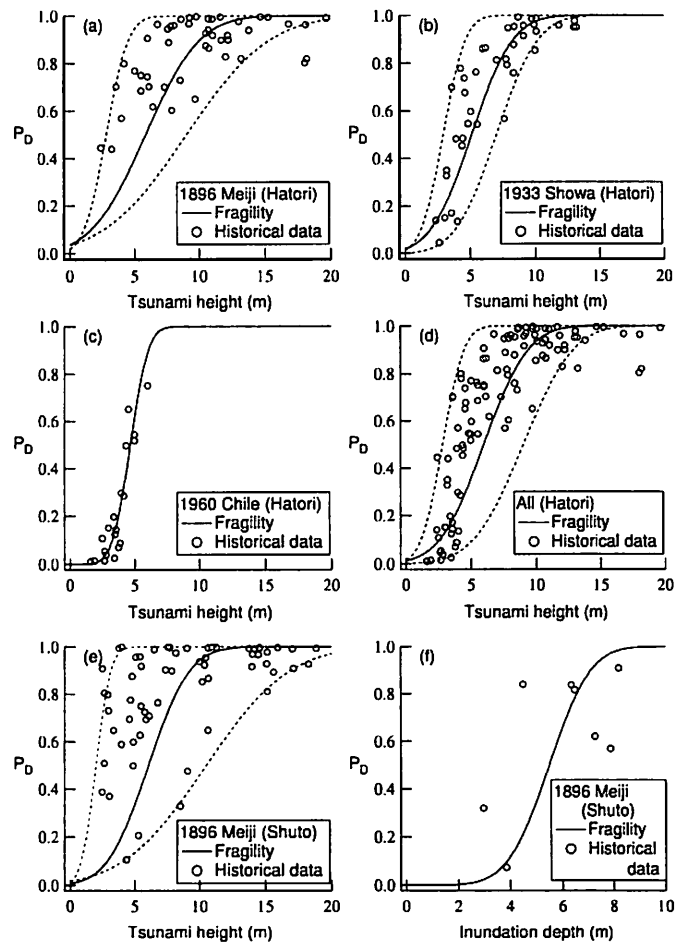


図 14: 歴史資料から得られた津波被害関数

表 5: 羽鳥 (1984) と首藤 (1987, 1991) のデータから構築した津波被害関数の回帰式のパラメータ。表中の (a)–(f) は図 14 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

図 14 の全体的な傾向を見ると、特に明治三陸・昭和三陸地震 (図 14(a), (b), (e)) の津波高–家屋被害率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 14(a) と (e))。首藤のデータ (図 14(e)) は羽鳥のデータ (図 14(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。歴史資料を元に構築した被害関数で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の津波高の幅) 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 14(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 津波観測網の整備による予報システムの構築

(a) インド洋の津波警報システム

2004 年 Sumatra 島沖地震津波後には、Indian Ocean Tsunami Warning System(IOTWS) の枠組みが発足し、インド洋において津波の沖合観測網の整備が計画されている (図 15)[70]。IOTWS とは、インド洋沿岸における国際的な津波防災対策の枠組みであり、沿岸諸国 27 カ国を対象に、津波の観測技術、住民への警報の発令といった防災体制の整備と、各国関係機関による早期警戒ネットワークの構築を目指している。日本を含む太平洋での津波警報体制の枠組みを参考としながら、国際社会からの技術・財政支援を求め、国連機関が活動している。我が国においても内閣府や気象庁が全面協力し、財政的支援も行っている。特に、インド洋での本格的な津波警報センターが構築されるまでの間、暫定的に太平洋津波警報センター (Pacific Tsunami Warning Center : PTWC) と気象庁とが連携して、インド洋沿岸諸国に対して津波監視情報を提供することになっている。この津波監視情報は、インド洋でマグニチュード 6.5 以上の地震が発生した場合に、地震の発生時刻、震源位置、マグニチュード、津波発生の有無、津波の予想到達時刻を、インド洋沿岸を 43 の区域に分割して伝えて



図 15: インド洋における沖合津波観測計画 [70]

いる。

(b) 我が国の沖合津波観測網

近年、我が国においても津波の早期検知を目指した沖合津波観測網が整備されつつある。(独)港湾空港技術研究所が主体となって進めている GPS 波浪計 (GPS 津波計) である。平成 20 年 3 月現在で、我が国太平洋岸の沖合 8ヶ所においてすでに GPS ブイの設置・運用を開始しており、日本全国でおよそ 50 地点でのリアルタイム津波観測計画が進行中である。ここでは、GPS 津波計による津波観測網の津波予報への利活用に着目し、その展望と技術的課題について論ずる。GPS 波浪計とは、沖合洋上に浮かべた観測ブイ上に搭載した GPS によりブイの上下・水平の変動を毎秒測位し、津波を検出するシステムである。通常のカーナビゲーション等に利用される GPS は 1 台の GPS アンテナで測位を行うために (単独測位) 数メートルの測位誤差が含まれるが、GPS 津波計の測位は、ブイ上のアンテナと陸上の基地局のアンテナを用いて逐次相対測位を行うため (RTK-GPS: リアルタイムキネマティック測位)、誤差 1cm という高い精度での海面変動測位を実現している [71]。

GPS 波浪計は、東京大学地震研究所加藤照之教授と日立造船株式会社寺田幸博氏 (現高知工業高等専門学校教授) を中心としたグループにより開発が進められ、神奈川県油壺沖、岩手県大船渡沖、高知県室戸岬沖で試験観測が行われた [72]。観測期間中、2001 年ペルー沖地震津波、2003 年十勝沖地震津波、2004 年紀伊半島沖地震津波の沖合観測に成功している。その後、(独)港湾空港技術研究所が中心となり、実用化に向けての本格的な研究・開発が進められ、主に海象の測定精度や活用方策、耐用年数や耐久性についての技術的課題の解決後、実用化された。現在、設置されている標準的なブイ筐体の諸元は、直径約 5m、高さ約 18m (海面上約 8m)、重量約 40t で、耐用年数は 10 年以上を目標としている。GPS 津波計の標準的な設置位置は沖合約 15km で、水深 150-200m の海底に沈められたアンカーにチェーンで係留される。沖合の GPS ブイで測位した情報は無線で陸上基地局に転送され、ノイズやブイ固有の応答特性の除去、長周期成分と単周期成分の分離、ブイの変動成分の分離等 (上下動=海面変動、水平変動=海面流速) のデータ処理後に、各関係機関へ配信される。

(c) 津波予報技術への GPS 津波計の利活用

GPS 津波計の津波予報技術への貢献は、以下の 4 つが挙げられよう。

津波の早期検知

沖合で津波を観測する最大の利点は、津波が沿岸部に到達する前に水位変化の検知ができることである。図 16 は、南海地震津波の発生を想定して、室戸沖に設置された GPS 津波計と周辺の港 (室戸漁港) における津波波形を試算したものである [73]。この場合、GPS 津波計の設置位置は南海地震津波の想定波源域内にあるため、地震発生時にすでに海面が上昇している。波形のピークが出現する時間で比較すると、沖合の津波が沿岸に到達するまでにはおよそ 10 分の時間的猶予が見込める。地震発生直後の海面変動をリアルタイムで監視し、潮位の異常を検知できれば、緊急対応へのリードタイム (時間的猶予) を得ることができる。しかし実際には、南海地震のような近地の場合を除けば理論的なリードタイムを得るのはかなり難しいと考えるべきであろう。津波の周期は、一般的には数十分から長いもので 1 時間程度になる。沖合津波計で観測された波高に対する沿岸の津波増幅特性を数値シミュレーションによりある程度予測しておくことは可能であるが、遠地で発生した地震による津波を GPS 津波計がとらえても、立ち上がりのピークを確認するためには少なくとも 1/4 周期 (5 分から 15 分程度) は待たなくてはならない。沖合観測波高のみに頼った予測手法ではリードタイムを活かせない。世界中の地震発生情報をトリガーとし、ある閾値以上の水位変動が観測されたと同時に緊急対応体制の発動とするような仕組みが必要であろう。

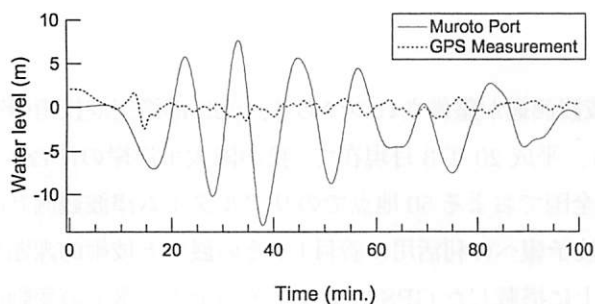


図 16: 室戸沖 GPS 津波計と室戸漁港における津波波形 (南海地震津波の発生を想定して筆者が試算)

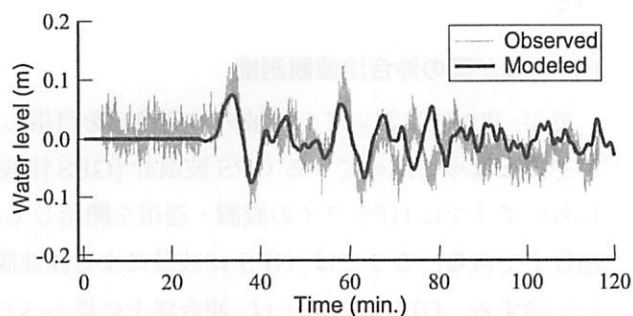


図 17: 2004 年紀伊半島沖地震津波における室戸岬 GPS 津波計の観測波形とシミュレーション波形

津波発生機構の解明

沖合津波観測のもう一つの利点は、津波発生機構解明への活用である。沿岸の津波を予測するための数値解析には、その初期条件として断層運動による初期水位変動を与える。地震発生直後の地震波解析だけでは断層破壊領域の位置を推定することは難しいが、津波観測記録を利用して逆解析を行うことことで、詳細な津波発生機構 (初期水位変動分布や断層破壊領域) を推定することができる (たとえば, [74])。しかし、港湾内の検潮儀等で得られる波形には検潮儀特有の水理フィルターの特性や湾固有の振動・波高増幅の効果といった情報が含まれる。純粋な津波波源の情報を得るためには、ローカルな振動特性を除去するための波形処理を施さなければならない。沖合観測波形を用いる場合にはそのような波形処理を施す必要がなく、津波発生機構をより正確に予測できる可能性が高くなる。図 17 は、2004 年 9 月 5 日に発生した紀伊半島沖地震津波の室戸沖 GPS 津波計の観測波形と計算波形の比較である [72]。このように、数値解析と沖合観測情報の融合により、予測精度の飛躍的向上が期待できる。また、近年の計算機性能の向上を背景に、リアルタイムで津波の浸水予測を実施する技術も先駆的に開発されている (たとえば [75])。沖合観測情報から推定した津波初期水位分布を初期条件として、より精度の高い浸水予測や津波被害予測計算を津波到達前に終了させる技術の開発も進められている。

津波予報の修正

1999 年に施行された気象庁の量的津波予報は、世界に先駆けた津波数値シミュレーションのデータベースを利用した数値予報システムである。日本近海の 40 万通りの地震を想定して、それぞれの地震に対する沿岸津波高をあらかじめ計算しておくことで、地震発生から数分以内に予報値を発表することが可能となる。しかし、このデータベース駆動型数値予報は、津波予測値をデータベースから引き出す際に地震発生直後の震源情報 (震源位置、マグニチュード) を利用するため、地震動の強さに比してより大きな津波を発生させる「津波地震」による津波高を過小評価する傾向がある。沖合観測情報を逐次利用すれば、一旦予報値を決定した後であっても予報の修正を行うことができる。

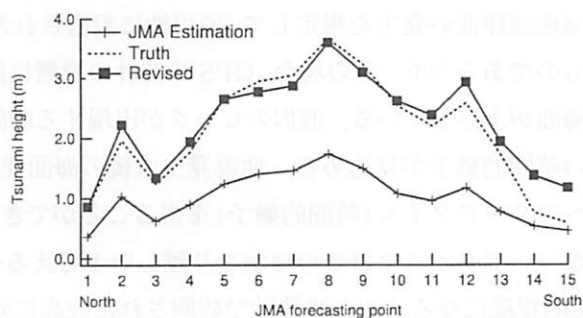


図 18: 津波地震を想定した場合の気象庁データベースに相当する予測値と沖合観測情報を利用した修正予測値

図 18 は津波地震を想定した場合の気象庁データベースに相当する津波予測値の分布 (筆者らが疑似的に作成したデータベース) と沖合津波観測情報を利用した修正予測値の比較である [76]。沖合観測点において出力した予測結果

と実際に観測された津波高の比を修正係数としてデータベース値に乗ずることにより、即時性に優れる気象庁のデータベースを活かしながら、リアルタイム観測データの取得状況に応じて段階的に予報値を修正することが可能である。しかし、この方法は沖合観測による「津波高」の情報を利用するため、現状の GPS 津波計の配置では沿岸への津波到達前に予報値を修正することは難しい。GPS 津波計は、陸上の基地局への測位結果の送信・修正に無線を使用するため、沖合の設置位置に制限がある（陸上基地局からの距離は約 20km 以内）。津波発生域により近い位置で観測が可能な海底ケーブル式津波観測システムとの融合や（たとえば [77]）、GPS ブイの更なる沖合展開が今後の課題であろう。

広域的津波監視による人的被害の軽減

津波災害最大の特徴はその被害の広域性にある。地震動による被害が震源域周辺に集中し震源から離れるに従いその程度が小さくなるのに対し、津波は大洋を伝播し地震動による被害が無い沿岸地域に対しても広範囲にわたり被害を及ぼすことがある。津波のリアルタイム観測の最大の意義は、広域的津波監視による人的被害の軽減にあるといつてよい。すなわち、沖合津波計単独での水位計測によりそれを実現するのではなく、複数の観測施設による広域的な監視体制の確立が必要である。津波の発生した波源域近傍の地域では、たとえ沖合観測が実現したとしても津波到達前にその検知情報を活用するのは難しい場合がある。しかし、伝播途上の津波を時々刻々ととらえ、それを国や地域全体で共有することができれば、その情報は他の地域にとって大きなリードタイムを与えてくれることになる。

図 19 に示すのは、筆者らによる最近の研究で [78]、スンダ海溝に沿って 160 通りの地震津波の発生を想定し、津波ブイの観測情報により得られたリードタイムを数値計算により求めその効果を人的被害の軽減率として算出した結果である。インド洋に津波ブイネットワークを配置した場合、自国のみのネットワークによる情報共有よりも大幅に人的被害の軽減が可能であることが分かる。したがって、津波観測網の設置・整備・維持管理は国の責任であるとか、施設設置位置近傍の自治体や組織だけが行うべきであると考えるのは間違いである。むしろ遠く離れた地域こそがその恩恵を受ける場合の方が多いのである。

また、広域津波監視の目的は津波の発生や津波第 1 波の検知だけではない。津波は第 1 波以降、何度も振動を繰り返す。場合によっては地震発生から半日経った後に最大波が後続波として到達し被害を生む場合がある。後続波の予測は現在の津波予報技術においては不可能であり、特に予報解除のタイミングの意志決定は観測情報に頼らざるを得ない。沖合・沿岸にかかわらず津波観測情報の一元集約と情報共有は依然と大きな課題と言えるだろう。沖合観測と沿岸観測を一元的に集約し、津波観測網の充実を目指した計画は現在進行中である。詳細については参考文献 [79] を参照されたい。

5 おわりに

2004 年 Sumatra 島沖地震津波災害後の津波災害研究の発展の一側面を、主に筆者が取り組んできた研究領域において概説した。本稿のタイトルである津波数値計算、津波予警報、被害推定という 3 つの大きなテーマを限られた紙

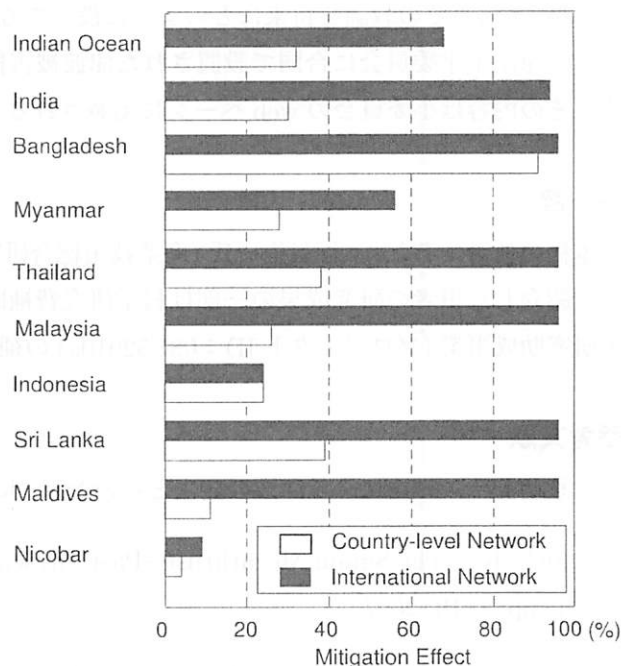


図 19: 津波観測ブイの多国間共有による人的被害軽減効果 [78]

数で俯瞰することは難しく、執筆依頼を受け取った段階では、インド洋全体での津波数値計算の検証に紙数のほとんどを割くことを考えていたが、場合によっては焦点の定まらない原稿になってしまう恐れがあった。そこで、最も被害が甚大であった Sumatra 島の Banda Aceh から得られた被害評価式の構築に焦点を絞ることにした。結果としてタイトルにそぐわないものになってしまったことは筆者の力量不足である。

津波被害発生メカニズムについては未だ未解明な点も多い。複合性や不確実性の高い現象であるために、理論的な取り扱いや流体力学的な考察が困難であることがその主因である。たとえば市街地の漂流物がどの程度津波被害を拡大させたか、南アジア地域で期待されている沿岸の植生の津波防護の効果はどの程度あったかなど、被害評価の観点からもまだ課題は山積している。それらについては機会を改めて論じてみたい。

一方、この津波から5年が経過し、我々津波研究者は得られた成果をもう一度見直し、インド洋の津波の教訓として何を得たのか、その教訓を将来にどのように役立てるかを考える時期に来ているのだと思う。土木学会の地震工学委員会・海岸工学委員会に合同で設置された津波被害推定ならびに軽減技術研究小委員会ではそのまとめを行っている。その内容は小委員会の web ページに掲載される予定であるので参考になれば幸いである。

謝 辞

本稿の執筆にあたり、行谷佑一氏(産業技術総合研究所)、柳澤英明氏(東電設計株式会社)の助力を得た。また、本稿で紹介した筆者の研究成果の一部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。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- [1] 佐竹健治: 地震による津波の発生とその予測, 水工学に関する夏期研修会講義集, 42, 土木学会, B-7-1-20, 2006.
- [2] Sieh, K.: The Sunda Megathrust –Past, present and future, *Journal of Earthquake and Tsunami*, Vol. 1, No. 1, pp. 1–19, 2007.
- [3] Lay, T., H. Kanamori, C. J. Ammon, M. Nettles, S. N. Ward, R. C. Aster, S. L. Beck, S. L. Bilek, M. R. Brudzinski, R. Butler, H. R. DeShon, G. Ekström, K. Satake, and S. A. Sipkin: The great Sumatra–Andaman earthquake of 26 December 2004, *Science*, **308**, pp.1127–1133, 2005.
- [4] Ishii, M., P. M. Shearer, H. Houston, and J.E. Vidale: Extent, duration and speed of the 2004 Sumatra–Andaman earthquake imaged by Hi–Net array, *Nature*, **435**, pp.933–936, 2005.
- [5] Ammon, C. J., C. Ji., H. K. Thio, D. Robinson, S. Ni, V. Hjorleifsdottir, H. Kanamori, T. Lay, S. Das, D. Helmberger, G. Ichinose, J. Polet, and D. Wald: Rupture process of the 2004 Sumatra–Andaman earthquake, *Science*, **308**, pp.1133–1139, 2005.
- [6] Mansinha, L. and D. E. Smylie: The displacement fields of inclined faults, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **61**(5), pp.1433–1440, 1971.
- [7] Okada, Y.: Surface deformation due to shear and tensile faults in a half–space, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **75**(4), pp.1135–1154, 1985.
- [8] Tobita, M., Suito, H., Imaikire, T., Kato, M., Fujiwara, S. and Murakami, M.: Outline of vertical displacement of the 2004 and 2005 Sumatra earthquakes revealed by satellite radar imagery. *Earth, Planets and Space*, **58**, e1–e4, 2006.

- [9] Koshimura, S., T. Oie, H. Yanagisawa and F. Imamura, Developing fragility functions for tsunami damage estimation using numerical model and post-tsunami data from Banda Aceh, Indonesia, *Coastal Engineering Journal*, JSCE, in press for September issue, 2009.
- [10] 嶋原良典, 藤間功司 : インド洋津波における波数分散効果について, *海岸工学論文集*, 第 53 巻, pp.266-270, 2006.
- [11] 後藤智明 : 津波の線形, 非線形および波数分散現象, *水工学に関する夏期研修会講義集*, 35-B, 土木学会, B-9-1-20, 1999.
- [12] 高橋智幸 : 津波の解析技術 —南海地震津波を例として—, *水工学に関する夏期研修会講義集*, 38, 土木学会, B-5-1-20, 2002.
- [13] Gower, J. : The 26 December 2004 tsunami measured by satellite altimetry. *International Journal of Remote Sensing* **28**, pp.2897-2913, 2007.
- [14] Hayashi, Y. : Extracting the 2004 Indian Ocean tsunami signals from sea surface height data observed by satellite altimetry, *Journal of Geophysical Research*, **113**, C01001, doi:10.1029/2007JC004177, 2007.
- [15] Fujii, Y. and K. Satake : Tsunami source of the 2004 Sumatra-Andaman earthquake inferred from tide gauge and satellite data, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.97, No. 1A, pp.S192-S207, 2007.
- [16] Hirata, K., K. Satake, Y. Tanioka, T. Kuragano, Y. Hasegawa, Y. Hayashi, and N. Hamada : The 2004 Indian Ocean tsunami : Tsunami source model from satellite altimetry, *Earth, Planets and Space*, **58**, pp.195-201, 2006.
- [17] Fritz, H. M., J. C. Borrero, C. E. Synolakis, and J. Yoo : 2004 Indian Ocean tsunami flow velocity measurements from survivor videos, *Geophysical Research Letters*, Vol.33, L24605, 2006.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 内閣府中央防災会議 : 日本海溝・千島海溝周辺海溝型地震に関する専門調査会資料, *日本海溝・千島海溝周辺海溝型地震に係る被害想定手法について* (第 17 回会議資料 www.bousai.go.jp/jishin/nihonkaikou/17/)
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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 年パ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.
- [26] 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.

- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] 相田 勇: 陸上に溢れる津波の数値実験-高知県須崎および宇佐の場合-, 地震研究所彙報, Vol. 52, pp.441-460, 1977.
- [31] 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.
- [32] 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, 1983a.
- [33] 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, 1983b.
- [34] 松富英夫: 流木を伴う碎波段波衝突による波力について-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.
- [35] 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.
- [36] 庄司 学, 森山哲雄, 幸左賢二, 松富英夫, 鳴原良典, 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.
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] 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.
- [40] Yeh, H.: Design Tsunami Forces for Onshore Structures, Journal of Disaster Research, Vol.2, No.6, pp.531-536, 2007.
- [41] チャルレス・シマモラ, 鳴原良典, 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.
- [42] 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.
- [43] 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.
- [44] 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.
- [45] 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.

- [46] 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.
- [47] 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.
- [48] 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.
- [49] Aida, I. : Reliability of a tsunami source model derived from fault parameters, J. Phys. Earth, 26, pp.75-73, 1778.
- [50] Tsuji, Y., Y. Tanioka, H. Matsutomi, Y. Nishimura, T. Kamataki, Y. Murakami, T. Sakakiyama, A. Moore, G. Gelfenbaum, S. Nugroho, B. Waluyo, I. Sukanta, R. Triyono and Y. Namegaya : 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.
- [51] Matsutomi, H., T. Sakakiyama, S. Nugroho and M. Matsuyama : Aspects of inundated flow due to the 2004 Indian Ocean tsunami, Coastal Engineering Journal, Vol.48, No. 2, pp.167-195, 2006.
- [52] 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.
- [53] Saatcioglu, M., A. Ghobarah and I. Nistor : 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.
- [54] 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.
- [55] Dutta, D., J. Alam, K. Umeda and M. Hayashi : 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.
- [56] 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.
- [57] 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.
- [58] 山下文男, 哀史三陸大津波, 青磁社, 413p. 1982.
- [59] 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.
- [60] 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.
- [61] 伊木常誠 : 三陸地方津浪實況取調報告, 震災豫防調査會報告, 第 11 号, pp.5-34, 1896.
- [62] 岩手県 : チリ地震津波災害復興誌, 251p., 1969.
- [63] 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.

- [64] 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.
- [65] 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.
- [66] 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.
- [67] 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.
- [68] 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.
- [69] Koshimura, S., T. Katada, H. O. Mofjeld, and Y. Kawata: A method for estimating casualties due to the tsunami inundation flow, *Natural Hazards*, 39, pp.265-274, 2006.
- [70] UNESCO, Indian Ocean Tsunami Warning and Mitigation System, Intergovernmental Oceanographic Commission Technical Series, 71, 2006.
- [71] 寺田幸博, 加藤照之: GPS 津波計, 非破壊検査, Vol. 52, No.7, pp.338-343, 2003.
- [72] 加藤照之, 寺田幸博, 越村俊一, 永井紀彦, GPS 津波計による津波観測, 月刊地球, Vol. 37, No.3, pp.179-183, 2005.
- [73] 越村俊一, 鈴木進吾, 大利桂子, 村田行泰, 寺田幸博, 河田恵昭, 加藤照之, 今村文彦: 東南海・南海地震津波対策に向けての広域連携情報ネットワークの提案, 地域安全学会論文集, Vol. 6, pp.139-148, 2004.
- [74] Satake, K., T. Baba, K. Hirata, S. Iwasaki, T. Kato, S. Koshimura, J. Takenaka and Y. Terada: Tsunami Source of the 2004 Off Kii-Peninsula Earthquakes Inferred from Offshore Tsunami and Coastal Tide Gauges, *Earth, Planets and Space*, Vol. 57, pp.173-178, 2005.
- [75] 阿部郁男, 今村文彦: 並列計算によるリアルタイム津波(浸水)計算の高速化, 海岸工学論文集, 第51巻, pp.251-255, 2004.
- [76] 大垣圭一, 安間友輔, 越村俊一, 今村文彦, リアルタイム観測情報を用いた津波予報の段階的修正法, 海岸工学論文集, 第53巻, pp.216-220, 2006.
- [77] 日野亮太, 藤本博巳, 桑野亜佐子, 西野 実, 金沢敏彦, 酒井慎一, 中尾 茂: 三陸沖光ケーブル式海底地震・津波観測システムによる津波計測 —リアルタイム・沖合観測の有効性—, 月刊地球, Vol. 37, No.3, pp.190-196, 2005.
- [78] 竹内雅彦, 越村俊一, 目黒公郎: 多目的ブ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, 海岸工学論文集, 第55巻, pp.1416-1420, 2008.
- [79] 永井紀彦, 加藤照之, 額田恭史, 泉裕明, 寺田幸博, 三井正雄: 沖合・沿岸・オンサイト観測を組み合わせた津波観測網に関する提言, 海洋開発論文集, 第21巻, pp.61-66, 2005.
- [80] 津波被害推定ならびに軽減技術研究小委員会 web ページ <www.hel.ce.akita-u.ac.jp/association/cvl_tsnm/>