



1993年北海道南西沖地震津波の家屋被害の再考

—津波被害関数の構築に向けて—

越村俊一¹⁾、萱場真太郎²⁾

1) 正会員 東北大学大学院工学研究科、准教授 博(工)

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

2) 非会員 東北大学大学院工学研究科

e-mail : kayaba@tsunami2.civil.tohoku.ac.jp

要約

我が国の津波災害による家屋被害評価手法の高度化を目的として、1993年北海道南西沖地震津波の奥尻島青苗地区における航空写真の目視判読による家屋被害評価と津波氾濫解析とを統合して、新しい津波被害関数を構築した。津波被害関数は、家屋の大破・流失率と津波氾濫の流体力学的な諸量（最大浸水深、最大浸水高、最大流速、家屋単位幅あたりの最大抗力）との関連で表現し、想定される津波の諸量に対する家屋被害棟数を定量的に評価する新しい津波被害想定指標を構築することができた。

キーワード： 津波、被害関数、1993年北海道南西沖地震

1. はじめに

我が国の津波被害の量的な推定では、対象とする地域の津波外力（浸水深や流速等）を数値解析により推計し、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、内閣府中央防災会議の実施する津波被害想定では、数値解析により得られた浸水深分布と浸水域内の家屋数に対して、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¹⁾。この評価の基盤となっているのは、我が国の過去の津波被害実績から津波高および家屋被害程度の関係性を調べた首藤（1992）の津波強度指標である²⁾。一方、津波氾濫の流況は本来きわめて局所的であり、家屋被害の発生過程もきわめて不確実性の高い現象であることはいままでもない。従来の津波被害想定指標は、津波氾濫流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。

著者らは、この問題を解決するために、2004年スマトラ島沖地震津波災害の被災地Banda Acehを対象として、高分解能衛星画像による家屋被害の判読と津波数値解析結果をGIS上で統合解析し、新しい津波被害想定指標としての津波被害関数を提案した³⁾。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、津波浸水深や氾濫流速、氾濫流の流体力といった流体力学的な諸量の関数として記述したものである。元来被害関数とは、地震動の外力（震度、最大加速度、最大速度）に対する建物群の被害率を記述する指標として、特に1995年阪神・淡路大震災以降に地震工学の分野において整備されてきた。著者らが構築した津波被害関数は、地震工学分野における家屋被害関数構築の概念を津波工学に拡張したものとして位置づけられる。

一方、ある災害による被害発生メカニズムの経験則として得られた被害関数が他の災害の被害予測においても高い精度で利用できるか、その普遍性については疑問が残る。例えば、1995年阪神・淡路大震



災から得られた家屋被害関数を基礎として平成8年に運用が始まった内閣府による地震被害早期評価システム (EES) は、2000年鳥取県西部地震において建物倒壊約8,000戸、死者約200人という推計を行ったのに対し、実際の被害は全壊戸数約400戸、死者0人であった⁴⁾。この事例から類推すると、津波被害関数も様々な事例における評価を通じてその適用範囲を検討する必要がある。

本研究では、津波被害関数の高度化を目指し、1993年北海道南西沖地震津波の被災地であった奥尻島青苗地区を対象地域として、航空写真による家屋被害判読と津波氾濫解析の統合により、我が国の津波被災事例に対応した津波被害関数を新たに構築することを目的とする。次章以降では、まず従来の津波被害予測式のレビューおよび津波被害関数の構築について概説する。次に、1993年北海道南西沖地震津波の奥尻島青苗地区における津波数値解析、および航空写真による家屋被害判読結果について報告し、津波被害関数構築の手続きについて詳しく述べる。最後に、本研究で得られた津波被害関数の特徴について、著者らがすでに提案したスマトラ島Banda Acehの津波被害関数との比較を通じて考察するとともに、津波被害関数の高度化に向けた課題を論ずる。

2. 津波被害関数の構築

2.1 既往の津波被害予測式

津波外力と被害の関係について検討した既往の研究は、津波災害資料の分析に基づく方法、津波被災地での現地調査による方法、水理実験による方法の3つのアプローチに大別される。

過去の津波災害資料の分析において、津波高さの家屋被害の関係について定量的な調査を最初に行ったのは羽鳥 (1984) である⁵⁾。羽鳥は、1896年明治三陸地震津波、1993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、文献資料の分析を通じて集落における最大津波高さ (平均海面上の津波の高さ、以下浸水高と呼ぶ) と家屋被害率についてまとめた。その結果、三陸沿岸で平均海面上の津波高が3m以下で家屋破壊率10-20%、4mを越えると50%以上に達すると結論づけている。一方、首藤 (1992) も羽鳥と同様に既往津波事例を調べ、報告された津波高と数値解析結果から、津波外力と家屋被害程度の間を求め、独自に提案した津波強度式 $i = \log_2 H$ (H は津波浸水深) との関連で構造別家屋被害、漁船・養殖施設被害、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²⁾。首藤の津波強度と家屋被害等の関係を図1に示す。たとえば、津波浸水深が2-4m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。

次に、津波被災地での現地調査に基づく方法について述べる。一般的に、津波被災地における現地調査では、建物壁面や樹木等に付着した津波氾濫流の痕跡の高さを浸水深または浸水高として測定し、測定地点周辺の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らの一連の研究である^{6), 7), 8)}。彼らの成果は、表1のように破壊基準としてまとめられている⁹⁾。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新たな試みを行っている¹⁰⁾。現地調査の最大の利点は家屋の破壊状況を詳細に把握することが可能であることにあり、統計的な議論を行う際のサンプル数の限界が欠点として挙げられよう。結果として、家屋の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するための確率的な評価には向かない。

一方、構造物に作用する津波波力等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や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等の総合的な検討、建物群に作用する津波波力の検討などが挙げられる^{11), 12), 13)}。これらの研究は構造物に作用する津波波力の把握を目的としており、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^{14), 15)}が実施されるようになったが、家屋および構造物全体の一般化した破壊基準を策定するまでには至っていない。



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)の津波強度指標と被害の関係²⁾
(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⁹⁾

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
被害程度の記述	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		

2.2 被害関数とは

被害関数とは、災害の外力と被害（建物被害や人的被害）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¹⁶⁾。被害関数に関する研究は、地震工学の分野で積極的に研究が進められており、物部(1926)が家屋倒壊率と震度の関係を定式化したのが始まりであると言われている^{17),18)}。特に建物被害の詳細な調査が行われた1995年阪神・淡路大震災を契機に、構造別や建築年代別に被害関数の整備が進められた^{19),20)}。

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（家屋被害率 P_D ）と地震動の強さの関連を回帰分析により求め、対数正規分布や正規分布を仮定した次式で表されるのが一般的である。

$$P_D(x) = \Phi \left[\frac{\ln x - \lambda}{\xi} \right] \quad (1)$$

$$\in P_D(x) = \Phi \left[\frac{x - \mu}{\sigma} \right] \quad (2)$$

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 ）はそれぞれ $\ln x$ または x の平均値と標準偏差である。

2.3 津波被害関数

津波被害関数とは、上に述べた地震工学のアプローチを基礎として、家屋・人的被害の規模を津波氾濫流の流体力学的な諸量との関連で記述したものと定義する。ここでは、建物被害に着目した津波被害



関数の構築手法を述べる。

- 1) 被害情報の取得：衛星画像や航空写真等の判読や現地調査から対象地域の家屋被害情報を取得し、建物一棟毎の被害の有無・程度や建物群の被害率を算定する。
- 2) 津波外力情報の取得：数値解析や現地調査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あらかじめ検証しておく。
- 3) 外力・被害の関連づけ：津波外力と被害を関連づける。既に集落毎に被害率を集計している場合には、その集落に対応した津波外力との関連をとる。
- 4) 回帰式の決定：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て被害関数を得る。

以下では、1993年北海道南西沖地震津波の被災地となった奥尻島青苗地区を対象とし、津波数値解析と被災前後の航空写真の被害判読結果を統合利用した津波被害関数の構築手法を述べる。

3. 北海道南西沖地震津波の数値解析

3.1 津波波源モデル

北海道沿岸に來襲した津波の到達時間および津波初動の押し引き、奥尻島における地盤変動、余震分布を最も良く説明する津波波源モデルは、高橋ら（1994, 1995）が提案している^{21), 22)}。ここでは彼らのモデルのうちDCRC-26モデルを採用する。図2に津波発生時の初期水位分布を示す。コンター間隔は0.2mで表示し、実線は隆起、点線は沈降を示す。また、断層パラメータを表2に示す。これらの断層パラメータを基に、Okada（1985）の解析解²³⁾を用いて初期水位分布を計算した。

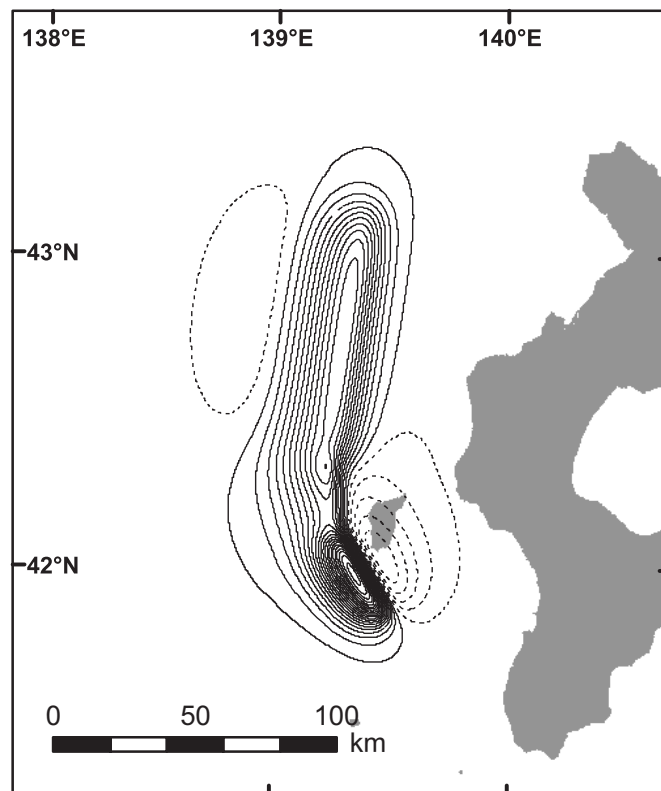


図2 北海道南西沖地震津波の波源モデル（津波発生時の水位分布）²²⁾

表2 断層パラメータ (DCRC-26 : 高橋ら、1995) ²²⁾

パラメータ	北側	中央	南側
断層幅 (km)	25.0	25.0	15.0
断層長 (km)	90.0	26.0	30.5
走向 (°)	188	175	150
傾斜 (°)	35	60	60
滑り角 (°)	80	105	105
断層深さ (km)	10	5	5
滑り量 (m)	5.71	4.00	12.0

表3 津波数値解析の諸条件

基礎方程式	非線形長波方程式
空間格子間隔	1350m/450m/150m/50m/17.7m
時間格子間隔	0.25 sec.
潮位条件	T.P. 0.0
境界条件	沖側：自由透過、陸側：遡上
現象再現時間	地震発生から2時間

3.2 地形モデルと計算法

奥尻島の津波氾濫解析のために、外洋部から沿岸・陸上にかけて格子間隔1350mから1:3の割合でネスティングした地形モデルを作成した。図3に計算領域を示す。外洋部は、日本海洋データセンター (JODC) 発行の500m間隔メッシュデータ (J-EGG500) および日本水路協会発行の沿岸海の基本図の海岸線データを用いてメッシュを作成した。奥尻島青苗地区においては津波直後に奥尻町が作成した1/500地形図を基に地形メッシュ (メッシュサイズ17.7m) を構築し、さらに海岸部については新たにGPSを用いたVRS-GPS (Virtual Reference Station) 測位による高精度地形測量を行い、奥尻島復興後の地盤嵩上げ分を差し引いて1993年当時の地形を再現した。

津波の計算には、Koshimura et al. (2009)と同様の非線形長波理論を基礎式とするLeap-frog差分法を用い³⁾、土地利用状況やメッシュ単位での建物占有率に関する合成等価粗度²⁴⁾による抵抗則を導入する。そのため、青苗の市街地においては、津波前の航空写真 (三和航測株式会社撮影、1990年10月29日) から家屋のポリゴンを作成し、メッシュ毎の家屋占有率を計算した (図4)。計算の諸条件は表3の通りである。津波計算法の詳細についてはKoshimura et al. (2009)³⁾を参照されたい。

3.3 津波氾濫計算結果とその検証

奥尻島における津波氾濫解析を通じて、最大浸水深 (Inundation depth : 陸上に遡上した各地点の津波の最大水位をその直下の地盤からの高さとして測ったもの)、最大浸水高 (Inundation height : 各地点の津波の最大水位を平均海面上からの高さとして測ったもの)、最大流速、家屋壁面の単位幅あたりの最大抗力 (後述) の4つの流体力学的諸量を得た。結果の一例として、最大浸水深の分布を図5に示す。図中の黒色の点線はShuto (2007) の調査²⁵⁾による津波浸水エリアである。津波は青苗岬を西側から襲い波源からの直接波が最大となった。青苗5区 (青苗岬の南端部) では浸水深4-10mの津波が氾濫流として通過していたことが分かる。また、青苗1区から4区でも海岸線から高台の麓までの市街地のほとんどが浸水した。津波の来襲状況については、たとえば首藤 (1994a) ²⁶⁾に詳しいのでここでは詳しくは述べない。

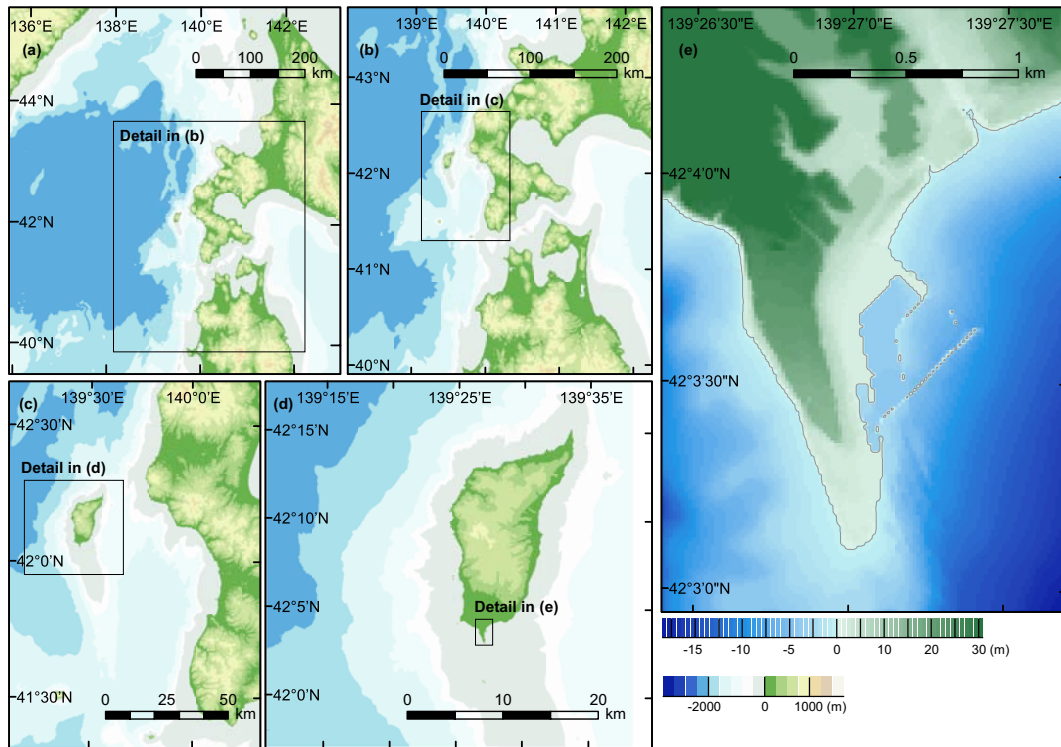


図3 奥尻島の津波数値解析に用いる地形メッシュデータ (a:1350m、b:450m、c:150m、d:50m、e:17.7m)

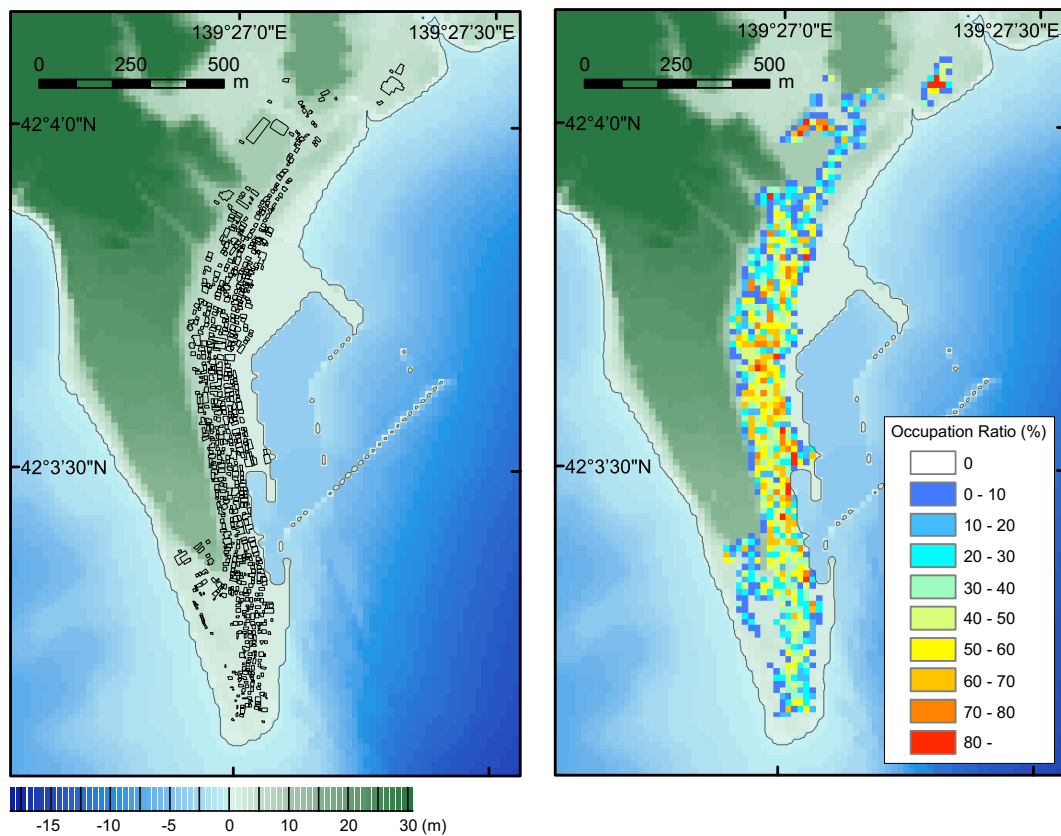


図4 奥尻島青苗地区の家屋ポリゴンデータと家屋占有率 (17.7mメッシュ毎) の分布

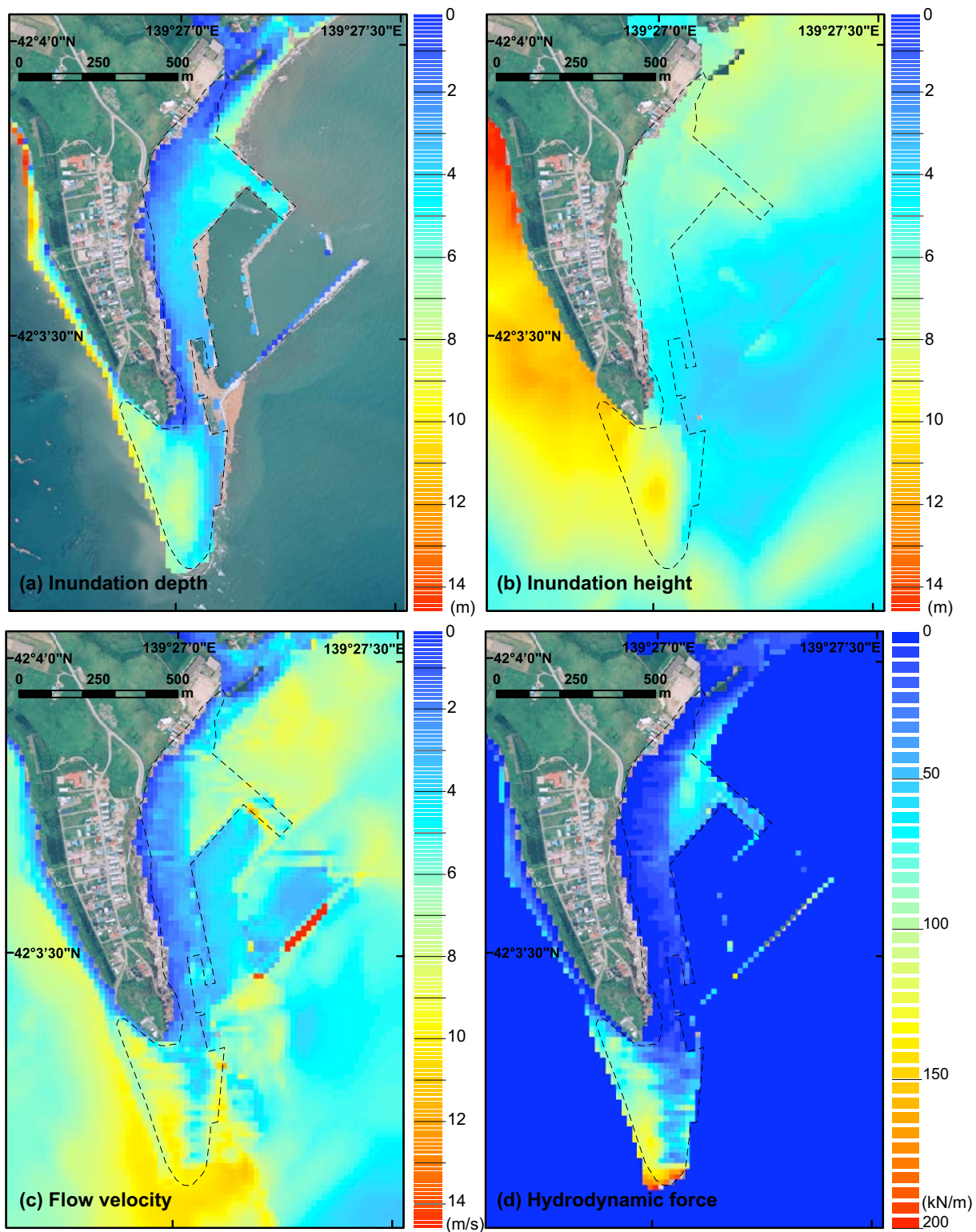


図5 奥尻島青苗地区の津波氾濫解析結果の一例 (a: 最大浸水深分布、b: 最大浸水高分布、c: 最大流速分布、d: 家屋壁面の単位幅あたりの最大抗力分布)

津波数値解析の検証は、東北大学がまとめた現地調査結果²⁷⁾と計算浸水高との比較により行う。図6に示すのは、青苗地区における津波浸水高測定の結果と計算結果との比較である。津波浸水解析結果は現地調査の結果とも概ね一致していることが分かる。なお、津波の測定高さとして計算結果の空間的な再現性を評価するための指標は、Aida (1987) による幾何平均 K および幾何標準偏差 κ が用いられるのが一般的である²⁸⁾。図5に示す結果において得られた K と κ は $K=1.006$ 、 $\kappa=1.232$ であった。土木学会²⁹⁾が目安としている津波計算の妥当性の基準は $0.95 < K < 1.05$ かつ $\kappa < 1.45$ であり、本計算結果はその基準を満たしていると考えて差し支えない。

4. 航空写真を用いた家屋被害判読

1993年北海道南西沖地震津波前後の航空写真を用いて家屋被害を判読する。具体的には以下の手順で実施した。

- 1) 航空写真のオルソ化：被災前後の2枚の航空写真を入手し、スキャナでデジタル化した後にオルソ化する。航空写真は、1990年10月29日（三和航測株式会社撮影）と1993年7月14日（国際航業株式会社撮影）の2枚を利用した。
- 2) 建物インベントリの作成：被災前の建物のポリゴンおよびポイントデータを作成する（図4）。
- 3) 被害判読：被災前後の建物の屋根の形状変化とShuto (2007) による津波被災地図²⁵⁾（浸水域、火災域を示したもの）を参考にしながら、建物データに被害属性をつける。

なお、被害判読結果は表4に示す様に5通りに分類し、被害の有無は屋根の形状変化に着目して判断した。ここでいう屋根の形状変化とは、被災前後の航空写真の比較において、屋根が消失（流失あるいは焼失）、または部分的に欠損していた場合には被害有（Damaged）とした。すなわち、被害有の場合には津波による流失・全壊・大破・および火災による焼失のいずれかに相当することになる。

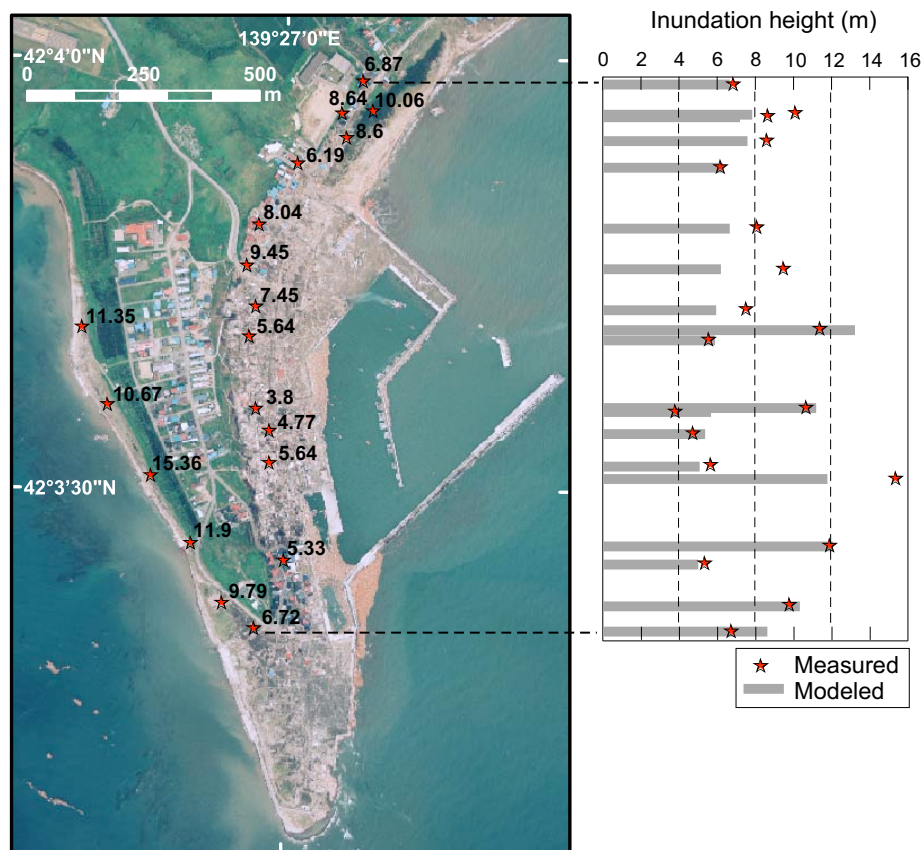


図6 奥尻島青苗地区の津波氾濫解析の検証（最大浸水高分布、左図中の数字は測定値（m））

表4 航空写真の目視判読による奥尻島青苗地区の家屋被害

被害分類	判読基準	原因	棟数
a) 流失・全壊・大破	浸水域内で流失か屋根の形状に変化が認められる	津波浸水	417
b) 流失・全壊・焼失・大破	浸水・火災域内で流失か屋根の形状に変化が認められる	津波浸水および火災	123
c) 焼失・全壊・大破	火災域内で焼失か屋根の形状に変化が認められる	火災のみ	75
d) 全壊・大破	津波浸水域・火災域に含まれないが屋根の形状に変化が認められる	不明	11
e) 中破以下	屋根の形状に変化が認められない	-	143
合計			769

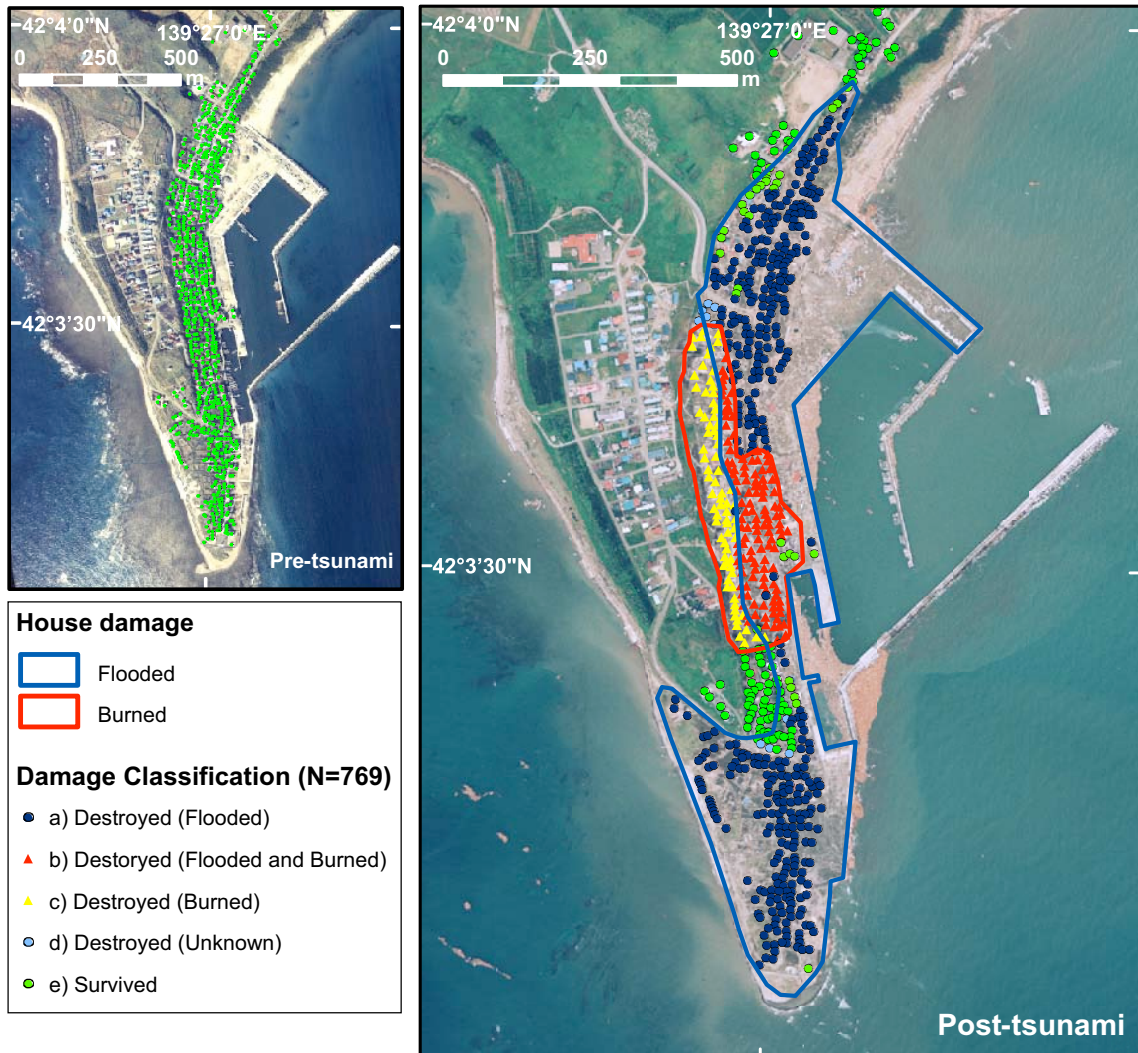


図7 航空写真の判読による奥尻島青苗地区の家屋被害の分類
(青と赤のラインはShuto (2007) で報告された津波浸水域と火災域)

一方、中破以下の軽微な被害状況を航空写真からは判読することは難しい。既往の現地調査結果をみても、悉皆的に家屋被害状況を調査した事例が無いため、本研究では「中破」以下 (Survived) として分類することにした。

家屋被害分類の空間分布を図7に示す。なお判読した家屋被害の棟数は表4のとおりである。ここで重要なのは被害分類bとcの解釈である。特に、bは浸水域と火災域とがオーバーラップする領域にあるため、津波のみによって破壊・流失した、津波により部分的に破壊された後に延焼火災により焼失した、津波に耐えた後に延焼火災によって焼失した、という3通りの解釈が成り立つはずである。一方、cの被害(火災域で見られた家屋被害)は津波の浸水が認められないため、火災によるものであることは明らかである。bとcの被害棟数の合計は198棟であり、室崎(1994)³¹⁾が報告した奥尻大火の焼損棟数計189件ともほぼ一致する。したがって、ここでは津波氾濫による被害を考えるため、不確実性の高いbとcの被害棟数は分析から除外することとした。

5. 奥尻島の津波被害関数の構築

津波数値解析結果と図7の家屋被害判読結果を統合処理し、津波被害関数を構築する。具体的な方法を以下に述べる。

5.1 被害関数の構築手法

津波数値解析結果(たとえば図5)と家屋被害判読結果(図7)をGIS上のレイヤとして統合処理し、津波浸水域内の家屋一棟毎(被害の属性つき)に数値解析から得られた津波氾濫流の諸量(最大浸水深、最大浸水高、最大流速、家屋単位幅あたりの最大抗力)とを関連づける。津波浸水域は数値計算結果を真として扱うこととする。結果、浸水域内家屋棟数523棟が解析対象となった。このデータセットを、津波の流体力学的諸量それぞれに関して昇順にソートして一定のサンプル数でグルーピングし、各グループ内での家屋被害率を求める。ここでは、48棟毎のグループを作成して被害率を求めた(ただし最後は43棟)。ただしここでいう被害率は航空写真による判読結果によるものであるため、流失・全壊・大破率(大破以上の破壊率)と考えるのが妥当であろう。

また、津波氾濫流の代表的な外力値は、各グループ内のメディアン値をとる。なお、奥尻島においては、地震動による家屋被害についてはさほど多くは報告されていない³²⁾。ここで得られた被害率には地震動による建物被害の影響はほとんどないと考えて差し支えない。

上記の手続きの結果として、津波外力の代表値(最大浸水深、最大浸水高、最大流速、家屋壁面単位幅あたりの最大抗力)と家屋被害率のデータセットを得る。図8は、外力毎に求めた家屋棟数(Damaged: 流失・全壊・大破、Survived: 中破以下)のヒストグラムである。なお、家屋壁面単位幅あたりの抗力 F は式(3)に定義する抗力を数値解析の実行中に逐次求め、その時刻歴最大値をとる。

$$F = \frac{1}{2} C_D \rho u^2 d \quad (3)$$

ここで C_D は抗力係数(ここでは簡単のために $C_D=1.0$ とする)、 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)と浸水深(m)である。

上に述べた手続きで得られたデータセットを、村尾・山崎(2000)の方法¹⁹⁾に倣い、最小二乗法による回帰分析から被害関数を求める。ここでは式(1)の対数正規分布関数による回帰を行った。表5に被害関数の回帰式のパラメータおよび決定係数を示す。

以下では、得られた被害関数の特徴について考察する。

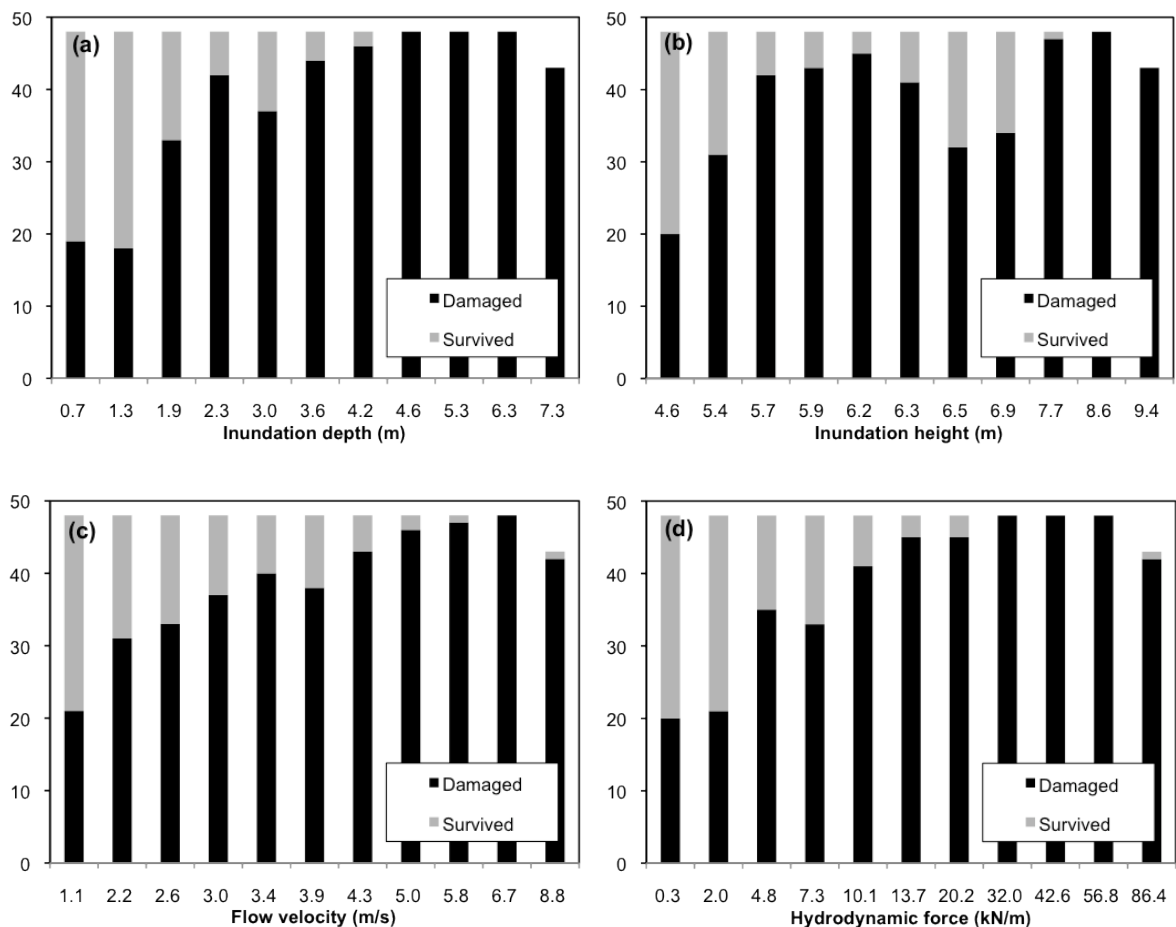


図8 外力毎にまとめた被害家屋（大破以上）のヒストグラム
(a: 最大浸水深、b: 最大浸水高、c: 最大流速、d: 最大抗力)

表5 津波被害関数（図9；大破以上の破壊率）の回帰式のパラメータ

外力 x	λ	ξ	R^2
最大浸水深 (m)	0.216	0.7364	0.820
最大浸水高 (m)	1.672	0.148	0.469
最大流速 (m/s)	0.475	0.776	0.892
家屋単位幅あたり最大抗力 (kN/m)	1.033	1.186	0.920

5.2 奥尻島の津波被害関数の特徴

図9に、得られた津波被害関数を示す。また、比較のために著者らが提案した2004年スマトラ島沖地震津波におけるBanda Acehの家屋被害関数³⁾も重ねて示す。ただし、図9(b)の浸水高についてはBanda Acehの被害関数が得られていないので比較は行わない。図中の●は奥尻島での家屋被害率と津波外力との関係、○はBanda Acehでのそれである。また、実線が奥尻島の津波被害関数、点線がBanda Acehでの津波被害関数である。それぞれの関数のパラメータとその回帰式の決定係数は表5に示してある。

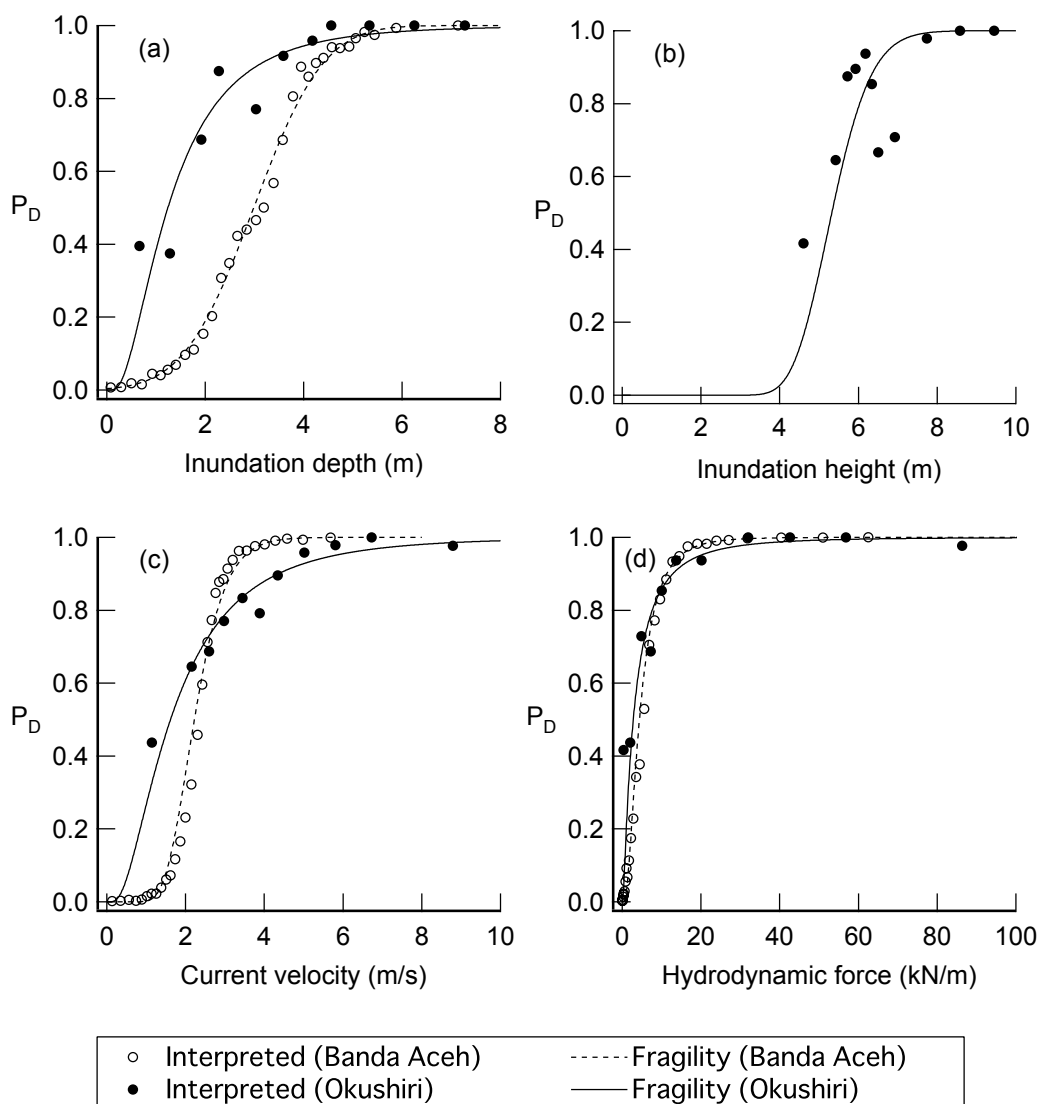


図9 1993年北海道南西沖地震津波の被害関数（大破以上の破壊率）

(a：最大浸水深、b：最大浸水高、c：最大流速、d：家屋単位幅あたり最大抗力)

奥尻島青苗の被害関数の立ち上がりは鋭く、浸水深1m、流速1m/sで約4割の家屋被害（大破以上）が発生し、浸水深4m以上、流速4m/s以上でほとんどすべての家屋に大破以上の被害が生ずることが分かる。また、家屋壁面に作用する単位幅あたりの抗力は20kN/mが大破以上の閾値になるであろう。表1に示した飯塚・松富（2000）の家屋破壊基準⁹⁾においても、木造家屋の場合は浸水深2m、流速5m、抗力27kN/mが大破の基準となっており、本研究で得られた結果と整合している。ただし、飯塚・松富による流速の評価は、現地調査で得られた浸水深（被災家屋前面・後面の水位差）を用い、氾濫流のフルード数2を仮定して流速を推定しているため、流速を高めに見積もっているといえる。一方、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する必要がある。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。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や家屋形状の考慮の有無に大きく依る³⁾。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-9(c)(d)を利用することは避けて、浸水深や浸水高についての関数を利用の方がよい（浸水深や浸水高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。

ところで、Banda Acehの被害関数との比較で考えると、浸水深4m・流速4m/sまでの被害率に大きく違いが現れている。奥尻島青苗地区の住宅の建築構造はほとんどが木造で³²⁾、Banda Aceh市街地では低層RC造あるいは石造(Masonry)や木造家屋が主であったとの報告がある³³⁾。建物群の支配的な家屋構造の違いが被害関数に大きく表れている可能性がある。津波被害関数の高度化には、家屋構造別で再検討することも今後必要となるであろう。また、首藤(1994a)の調査²⁶⁾では、奥尻島青苗の被災集落周辺での大量の漂流物の存在が指摘されており、被災家屋の室内で計測した浸水深が僅か40cmしかないのに、2階の窓や屋根に影響が及ぶほどの漂流物があったと報告されている。漂流した船舶も含めてBanda Acehでも瓦礫等漂流物の存在は指摘されていたが、奥尻島青苗のケースは漂流物による被害拡大の影響がより顕著に表れた可能性が高い。いずれにしても、我が国での津波被害想定指標としては、漂流物の影響が大きく現れる危険側の指標として利用すべきであろう。

津波という現象で考えてみると、奥尻の津波は北海道江差での観測波形によると周期がおよそ10分程度、スマトラ島沖の津波の観測周期は100分以上あり、同じ浸水深・流速・流体力であってもその時間的变化(時間微分)には大きな違いがある。衝撃力という尺度との関連で被害程度を検討することも今後の課題として挙げられよう。

6. 結論

1993年北海道南西沖地震津波において、奥尻島青苗地区で実施した航空写真の判読による家屋被害の情報と津波氾濫解析によって得られた津波の流体力学的な諸量を統合的に処理し、新しい津波被害関数を構築した。その結果、奥尻島における家屋被害は浸水深1mおよび流速1m/sで流失・全壊・大破率が4割以上、浸水深4m、流速4m/sを超えるとほとんど全ての家屋が破壊されることが分かった。

奥尻島で得られた津波被害関数とスマトラ島Banda Acehで構築したそれとの比較においては、特に浸水深4m、流速4m/sまでの被害率に大きな差が見られた。津波被害関数の工学的利用にあたっては、津波外力の局所性(津波氾濫流の時空間的な特性、氾濫流の衝撃力等)や漂流物の有無、家屋の構造といった様々な要因を十分に考慮する必要がある。津波被害関数の普遍性を高め、津波被害推計手法の高度化を実現するためには、これらの要因との関連で被害関数の適用範囲を明確にした上で整備していくことが今後の課題である。

謝辞

本研究は、科学研究費補助金(課題番号19681019)、平成20年度産業技術研究助成事業(プロジェクトID:08E52010a)、JST/JICA地球規模課題対応国際科学技術協力事業(ペルーにおける地震・津波減災技術の向上に関する研究)の補助を受けて実施された。奥尻島における地形測量および津波数値解析に用いる地形データの作成には国際航業株式会社村嶋陽一氏、鈴木崇之氏および関係諸氏の協力を得た。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 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(たとえば www.bousai.go.jp/jishin/nihonkaikou/17/)
- 2) 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、1992、pp.101-136.
- 3) 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, Vol. 51, No. 3, 2009, pp.243-273.
- 4) 内閣府：地震被害に関する検討委員会記者発表資料 1-1および1-2、2004(たとえば www.bousai.go.jp/oshirase/h16/040223jishinhigai4.html)
- 5) 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、1984、pp.433-439.

- 6) 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、1994a, pp.246-250.
- 7) 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、1994b, pp.29-32.
- 8) 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、1990、pp.654-658.
- 9) 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、2000, pp.381-385.
- 10) 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建造物の被災分析、海岸工学論文集、第54巻、2007、pp.861-865.
- 11) 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、2002、pp.731-735.
- 12) Yeh, H.: Design Tsunami Forces for Onshore Structures, Journal of Disaster Research, Vol.2, No.6, 2007, pp.531-536.
- 13) 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、2007、pp.831-835.
- 14) 有川太郎、中野史丈、大坪大輔、下迫健一郎、石川信隆：遡上津波力による建造物の変形・破壊挙動の検討、海岸工学論文集、第54巻、2007、pp.841-845.
- 15) 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、2008、pp.261-265.
- 16) 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、1999、pp.37-38.
- 17) 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、1926、65p.
- 18) 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、1998、pp.53-59.
- 19) 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、2000、pp.189-196.
- 20) 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、2002、pp.15-22.
- 21) 高橋智幸、首藤伸夫、今村文彦、M. Ortiz：津波を説明するための北海道南西沖地震断層モデル、土木学会海岸工学論文集、第41巻、1994、pp.251-255.
- 22) 高橋武之、高橋智幸、今村文彦、首藤伸夫：北海道南西沖地震津波の波源の再検討、土木学会東北支部技術研究発表会概要集、1995、pp.180-181.
- 23) Okada, Y. : Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space, Bull. Seismol. Soc. Am., 75(4), 1985, pp.1135-1154.
- 24) 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、2002、pp.276-280.
- 25) Shuto, N. : Damage and Reconstruction at Okushiri Town Caused by the 1993 Hokkaido Nansei-oki Earthquake Tsunami, Journal of Disaster Research, Vol. 2, No.1, 2007, pp.44-49.
- 26) 首藤伸夫：北海道南西沖地震津波による家屋の被害、東北大学津波工学研究報告、第11号、1994a, pp.11-28.
- 27) 首藤伸夫：1993年北海道南西沖地震津波の痕跡高、東北大学津波工学研究報告、第11号、第2編調査資料、1994b、pp.1-120.
- 28) Aida, I. : Reliability of a tsunami source model derived from fault parameters, J. Phys. Earth, 26, 1978, pp.75-73.
- 29) 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、2002、321p.
- 31) 室崎益輝：1993年北海道南西沖地震における奥尻大火、文部省科学研究費補助金突発災害調査研究成果(No. 05306012)、平成5年北海道南西沖地震・津波とその被害に関する調査研究、1994、pp.161-170.
- 32) 岡田成幸、村上ひとみ、宮野道雄：1993年北海道南西沖地震の奥尻島における建物被害・人的被害・

島民避難行動パターンにみる特徴、文部省科学研究費補助金突発災害調査研究成果(No. 05306012)、平成5年北海道南西沖地震・津波とその被害に関する調査研究、1994、pp.171-181.

- 33) 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, 2006, pp.S295-S317.

(受理：2009年8月3日)

(掲載決定：2010年3月9日)

Tsunami fragility inferred from the 1993 Hokkaido Nansei-oki earthquake tsunami disaster

KOSHIMURA Shunichi ¹⁾ and KAYABA Shintaro ²⁾

1) Member, Associate Professor, Graduate School of Engineering, Tohoku University, Ph. D.

2) Graduate Student, Graduate School of Engineering, Tohoku University

ABSTRACT

The authors proposed the tsunami fragility curves to estimate the structural damage by the 1993 Hokkaido Nansei-oki earthquake tsunami, by the integrated approach of damage inspection of aerial photographs of pre and post tsunami in Aonae town and the numerical modeling of tsunami inundation flow. The tsunami fragility curves are expressed as the structural damage probabilities with regard to the hydrodynamic features of tsunami inundation flow, such as inundation depth, inundation height, current velocity and hydrodynamic force, to expand the capability of estimating potential tsunami damage in a quantitative manner.

Key Words: Tsunami, Tsunami Fragility Curve, The 1993 Hokkaido Nansei-oki Earthquake