高解像度衛星画像を利用した津波被害の把握手法に関する研究

Developing A Method For Tsunami Damage Detection Using High-Resolution Optical Satellite Imagery

萱場真太郎¹•越村俊一²•村嶋陽一³

Shintaro KAYABA, Shunichi KOSHIMURA and Yoichi MURASHIMA

The authors propose a method to detect the structural damage due to tsunami inundation flow, by using the visual interpretation and analysis of high-resolution optical satellite imagery. The method is implemented to the recent tsunami event, the 2007 Solomon Islands earthquake tsunami, to identify the damage probabilities within the inundation zone and construct the fragility function (damage probability to tsunami height), combined with the post-tsunami survey data.

1. はじめに

2004年12月に発生したスマトラ島沖地震津波災害では インド洋沿岸12カ国が被災地となった.その被害は離島 を含めて極めて広範囲に及び,壊滅的な被害を受けた地 域との連絡の断絶や断片化した被災地の情報により,死 者・行方不明者の合計約22万人以上という被害の全容が 把握されたのは津波発生から数ヶ月後であった(越村, 2007).

このように、地震や津波のような巨大災害の発生直後 は、激甚な被害を受けた地域の情報がある期間欠落し、 救援活動が難航して被災地が孤立した状況に陥る「情報 空白期」が存在する.この事例を教訓として、津波発生 直後に被災地を特定し、被害状況を外部から迅速かつ詳 細に把握する技術への要請が高まっている.

そこで本研究では,近年その技術的発展が著しい地理 情報システム(GIS)および高解像度衛星画像に注目し, 従来の数値シミュレーション技術,衛星画像解析技術と 統合することで津波被害情報を外部から能動的に入手す る手法について検討を行うことを目的とする.

本研究では2007年4月に発生したSolomon諸島沖地震 津波を対象とし、まず越村(2007)の方法に従い、津波 数値解析結果と人口分布データを統合してGIS分析を行 い、津波被災の可能性の高い地域を推定する。その結果 に基づき、津波被災地の一つであるSolomon諸島Ghizo 島を撮影した高解像度衛星(QuickBird 衛星)画像を入 手し、建物の被害状況を目視判読によって評価し、GIS 上で被害の空間分布を把握する。また衛星画像のバンド 情報(可視・近赤外)から正規化植生指標(NDVI)を 算出し、植生活性度に着目して津波浸水域を推定する。 さらに、浸水域内の建物被害率を算出し、津波高-建物 被害率の関係を示すフラジリティ関数を構築することで、 津波高と建物被害の関係を明らかにする。

1 学 生 会		東北大学大学院	工学研究科
2 正 会 員	博(工)	東北大学准教授	大学院工学研究科
3 正 会 員	工修	国際航業株式会社	£



図-1 ソロモン諸島と震源の位置関係(□は図-3の表示範囲)

2. Solomon諸島沖地震津波

(1) 概要

Solomon諸島沖地震の本震は現地時間2007年4月2日 07:40頃, Solomon諸島Western州の海域8.48°S, 156.9°E で発生した. 震源の深さ10km, Mw8.1 (USGS, 2007) で, 直後に発生した津波によって52名の死者と3150棟の 建物被害が発生した (Government of Solomon Islands, 2007). 図-1に震源と周辺諸島の位置関係を示す.

(2) 津波被災地域の推定

津波発生直後に被災地を探索するために必要な情報と して「津波高さ」と「沿岸の人口分布」に注目し、外部 からこれらの情報を推定する手段として「津波数値解析」 と「人口分布データ」を利用し、GIS上で空間的な解析 を行う.津波の数値解析は、非線形長波理論に基づき GEBCOデータを利用して実施した.また、人口分布デー タはLandScan[™](OakRidge National Laboratory, 2002)を 利用した.

図-2に、Solomon諸島周辺のLandScan[™]データと数値 解析によって求められた最大波高分布を重ね合わせた結 果を示す.図-2(a)で沿岸のグレー色が濃い部分が人口 密度の高い地域であり、震源域の北西に位置するGhizo 島、Choiseul島南部沿岸の津波高(>2m)との対応を考



図-2 数値計算結果と人口データの統合による被災域の推定 (a)人口分布データ,(b)数値解析結果

えると,これらの島で特に大きな被害の発生が予想される.

一方,藤間ら(2007)の調査によると,Ghizo島およ びChoiseul島南部で最大5m程度の津波が襲来したこと が確認されており,これらの調査結果と数値計算結果は 整合している.また西村ら(2007)によればGhizo, Choiseul両島で全死者数の75%を占める39名が津波によっ て死亡していることが報告されており,このことから被 災地の推定結果についても整合性を認めることができる. 以上より,本事例において数値計算と人口分布データか ら被災地を推定することが可能であることが分かった.

3. 衛星画像を用いた被害判読

(1) 衛星画像の概要

QuickBird 衛星は2001年に打ち上げられた商業観測衛 星で,可視域3バンドと近赤外域1バンドのセンサーから なる.最高解像度はパンクロモードで0.61m,マルチス ペクトルモードで2.44mである.今回使用したのは, 2003年9月23日と2007年4月5日にGhizo島周辺を撮影し たQuickBird 衛星画像で,パンクロ・マルチの2画像を合 成したパンシャープン画像(解像度:0.61m)である. 4月5日の画像は津波被災から4日後に撮影されており, 被災直後の様子を示している.解析にあたり,被害の大 半が集中した島南部に集落を1つの領域として5つの解析 領域(I-V)を設定した(図-3).



図-3 Ghizo島のQuickBird衛星画像と解析領域の設定置

(2) 目視判読による建物被害評価

領域I-Vのそれぞれにおいて,被災前後の画像を目視 で比較して建物被害を評価する.評価基準はMiura et al. (2005)を参考に,図-4および表-1に示す5段階で設定し た.

判読結果をGIS上で表示し,建物被害の空間分布を明 らかにする.図-5に、領域IV及びVでの判読結果を例示 する.領域IVとVは半島の南北に隣り合って位置してい るが、領域Vではほとんどの建物が無被害であったのに 対し、領域IVでは大きな建物被害が発生していたこと が分かる.また領域I-IIIにおいては、大破もしくは流失 の被害を受けた建物が非常に多いことが分かった(表-2). 現地調査の結果では、領域I-IVにおける最大津波高はそ れぞれ4mを超えていたのに対し、領域Vでは2m未満で あったこと、また領域Vには港湾施設が集中しており、 領域I-IVに多い伝統的高床式住居に比べ頑強な構造物が 多かったことが確認されており、被害判読結果はこの津 波の特徴を反映していると言える.また集落ごとの被災 状況を撮影した写真と比較することで、目視による被害 判読精度を確認することができた.

(3) 浸水域の抽出

衛星画像を注意深く観察すると,被災前後で植生が著 しく変化した範囲(浸水域)とその境界線(津波遡上線)



図-4 津波被害の目視判読例(左:津波前,右:津波後)

表-1 Miura et al. (2005)による目視判読基準

評価	基準
不明	新しく建設されたと考えられる
無被害/小破	画像から確認できる明確な変化無し
中破	形状に変化が見られるが,屋根は残っている
大破	屋根も無くなっているが,建材は残っている
流失	建材を含め全て津波に流されている

が明瞭に確認できる(図-6).この境界線上にある100地 点のNDVI値を教師データとし、その平均値以下のNDVI 値を持つピクセルを浸水域として分類する.ここで、 NDVIはピクセル毎に次式で算出される.

$$NDVI = \frac{IR - R}{IR + R} \quad (-1 \le NDVI \le 1) \tag{1}$$

IR、Rはそれぞれ近赤外域バンド、可視域赤バンドの反 射率に対応し、QuickBird画像においてはそれぞれバン ド4、バンド3が相当する.結果、津波遡上線上のNDVI 値は0.340を平均として上下に0.05ほどのばらつきが見ら れた(図-7).この値を閾値として、それ以下のNDVI値 を持つピクセルを浸水域として抽出する.図-8に、領域 Iでの抽出結果と現地調査時の遡上高調査点を重ねて示 す.この図より、浸水域の抽出結果は実際の津波遡上の 様子を良好に再現していることが分かる.また図は割愛 するが、他の領域でも良好な結果を得た.

4. 建物被害率の算出とフラジリティ関数の構築

前章で求められた建物被害状況と浸水域から、各領域

□ 詳細不明 □ 無被害/小破 □ 中破 □ 大破 ☑ 流失 0 50 100 □ m

図-5 被害程度の目視判読結果(上:領域IV,下:領域V)

表-2 衛星画像を用いた建物被害判読結果(被害建物棟数)

領域	最大津波高[m]	流失	大破	中破	小破	不明
I	4.35	49	7	6	12	1
II	4.71	75	8	10	5	0
III	4.94	26	8	5	0	0
IV	4.53	12	32	16	36	0
V	1.98	0	2	3	158	0

における浸水域内の建物被害率を求める.本事例では被 害を受けた建物が非常に多かったため、特に大破以上の 被害を受けた建物を新たに被害建物と定義した.浸水域 内にある建物棟数,うち大破以上の被害を受けた建物数 をそれぞれN₀, N₀として,各領域の建物被害率P₀を以 下の式で定義する.

$$P_D = \frac{N_D}{N_0} \tag{2}$$

さらに、現地調査結果から得られた各領域での津波高 と建物被害率の関係を示すフラジリティ関数を構築する. フラジリティ関数は、外力(津波高、浸水深、流速等) と被害の程度(建物破壊率、死亡率等)を表す関係式で ある.ここでは、大破以上の被害を受けた建物について、 フラジリティ関数を被害率 P および測定津波高の関連 で求める.具体的には Koshimura et. al (2008) が Banda Aceh での浸水計算と被害データを元にして提案した手 法に倣い次式で定義する.

$$P(x) = \Phi\left[\frac{x-\mu}{\sigma}\right] \tag{3}$$

ここでΦは標準正規分布の累積確率分布関数であり、μ,



図-6 津波浸水による植生の変化



図-7 津波遡上境界上のNDVI値の分布

 σ はそれぞれx(津波高)の平均値および標準偏差である.まず,現地で測定された津波高の空間分布を作成し, 領域毎に最大測定値,平均値,下限値を求め,衛星画像から判読した家屋の大破率との関係をプロットする.次に,上記関数を確率紙を用いた最小二乗法によりパラメー タ μ および σ を決定する.

表-3に、各領域における建物被害率の算出結果と、津 波高の調査結果を示す. P_0 は領域内で算出した被害率、 H_{max} , H_{ave} , H_{min} は、それぞれ領域内で得られた津波高測定 値の最大値、領域内平均値、最小値である. このデータ から、領域内の(a)最大津波高(b)平均津波高(c)最小津波 高のそれぞれに対応するフラジリティ関数を求めたとこ ろ、図-9(a)-(c)に示す曲線が得られた. たとえば、図-9 (a)からは、津波高3mを超えると被害率は急激に増加し、 5mでほぼすべての建物が大破・流失することが分かる. ただし先に述べたように、領域Vのデータは構造物の特 徴が他の領域と大きく異なっていたことに注意が必要で ある. 仮にこの領域の建物が他の領域と同じ構造・脆弱 性を持っていた場合には、津波高2mであってもより高 い被害率となったことが推測できる. すなわち、 Fragility 関数とは、津波の外力に加え建物の構造や密集

度等の site condition により異なるものであることに注 意が必要である.



図-8 NDVIの閾値を利用した浸水域抽出結果

表-3 建物被害率の算出結果

領域	N_0	N_D	P_D	H_{max}	H_{ave}	H_{min}
Ι	85	68	0.80	4.35	4.22	4.10
II	98	88	0.90	4.71	4.15	2.95
III	40	35	0.86	4.94	3.41	2.48
IV	62	44	0.71	4.53	3.38	1.88
V	134	2	0.01	1.98	1.53	1.09

5. 結論

本研究で得られた結論を以下に列挙する.

2007年4月に発生した Solomon 諸島沖地震津波の被災 地を, 津波数値計算と人口分布メッシュデータ LandScan[™]から推定し,報告された被害状況と整合し た結果を得た.この手法を用いることで,津波発生後の 被災地探索が可能であることが示された.

被災地の1つである Solomon 諸島 Ghizo 島を撮影し た高解像度衛星 QuickBird の被災前後画像から目視判読 によって建物被害を5段階で評価し,結果をGIS上で図 示した.判読結果は被害調査結果とよく整合しており, 高解像度衛星画像を利用して建物被害を空間的に把握す ることが可能であることが分かった.

衛星画像のバンド情報からNDVIを算出し,津波遡上 境界上のNDVI値を教師データとして津波浸水域を抽出 したところ,現地で測定された津波浸水域とほぼ一致す る結果を得た.衛星画像から算出した植生の活性度を利 用して,津波浸水域を推定できることが示された.

得られた建物の被害状況と浸水域から領域毎の建物被 害率を算定し,津波高(最大・最小・平均)との関係を 示すフラジリティ関数を求めることができた.建物被害 率は,領域内で測定された最大の津波高と最も強い相関 を示していた.



図-9 衛星画像解析と現地調査データを統合したフラジリティ 関数(建物大破率)

以上より,津波発生後に外部から入手できる情報を利 用して津波の被害状況を把握可能であることが分かった. 今後は,衛星画像を用いて家屋の被害状況を自動で判読 する画像処理アルゴリズムを開発する予定である.

謝辞:本研究を実施するにあたり、防衛大学校の藤間功

司教授をはじめとする調査チームが測定した Solomon 諸 島沖地震津波の貴重なデータを利用させていただいた. ここに記して謝意を表する.本研究の一部は,科学研究 費補助金若手A(代表者:越村俊一,課題番号19681019) および平成20年度産業技術研究助成事業(代表:越村俊 一,プロジェクトID:08E52010a)の補助を受けて実施 された.

参考文献

- 越村俊一(2007):巨大津波災害の広域被害評価, 第四紀研究, 第46巻, 第6号, pp.499-508
- 西村 裕一・谷岡勇市郎・中村有吾・都司嘉宣・行谷佑一・ 村田昌彦(2007):2007年ソロモン諸島地震津波の現地調 査(C32-08)(演旨),日本地震学会講演予稿集秋季大会, 2007,107,日本地震学会
- 藤間功司(2007): Tsunami Measurement Data,
- http://www.nda.ac.jp/~fujima/TMD/index.html
- 松冨英夫・藤間功司・鴫原良典(2007): 2007年ソロモン諸 島地震津波の現地調査,第26回日本自然災害学会学術講 演会概要集, pp.85-86
- British Oceanographic Data Centre (1997) : The Centenary Edition of the GEBCO Digital Atlas (CD-ROM)
- Government of Solomon Islands (2007) : Recovery Action Plan, Draft for Discussion Subject to SIG Cabinet Approval, Western and Choiseul Provinces Earthquake Tsunami
- Koshimura, S., T. Oie, H. Yanagisawa and F. Imamura (2008) : Developing fragility functions for tsunami damage estimation using numerical model and post-tsunami data from Banda Aceh, Indonesia, Coastal Engineering Journal, JSCE, submitted.
- Miura, H., A. C. Wijeyewickrema and S. Inoue (2007) : Evalu ation of Tsunami Damage in the Eastern Part of Sri Lanka Due to the 2004 Sumatra Earthquake Using High-Resolution Satellite Images, Proceedings of 3rd International Workshop on Remote Sensing for Post-Disaster Response
- Ork Ridge National Laboratory (2002) : LandScan[™] Global Population Databese, http://www.ornl.gov/landscan/
- United States Geological Survey (2007) : Magnitude 8.1-SOLOMON ISLANDS 2007 April 120:39:56 UTC, http://earthquake.usgs.gov_eqcenter/eqinthennews/2007/ us2007_aqbk