

数値解析・GIS分析・衛星画像解析の統合による津波被災地探索技術 － 2009年サモア諸島沖地震津波災害における実践と検証－

Detecting Tsunami Affected Area by Integrating Numerical Model, GIS Analysis and Remote Sensing - Implementation to the 2009 Tsunami Disaster in American Samoa -

越村俊一¹・郷右近英臣²・行谷佑一³・西村裕一⁴
中村有吾⁵・Gerard Fryer⁶・Akapo Akapo⁷・Laura Kong⁸

Shunichi KOSHIMURA, Hideomi GOKON, Yuichi NAMEGAYA, Yuichi NISHIMURA
Yugo NAKAMURA, Gerard FRYER, Akapo AKAPO and Laura KONG

The authors propose a method to search and detect the impact of tsunami disaster by integrating numerical modeling, remote sensing and GIS technologies. This method consists of regional hazard/damage mapping, identifying exposed population, and satellite image interpretation in terms of structural damage. The method is implemented to the recent tsunami event, the 2009 tsunami in American Samoa, to identify the structural damage by the tsunami.

1. はじめに

巨大災害の発生時には、交通・通信インフラの途絶や被災地の孤立化により、全ての災害救援活動が難航する。特に激甚な被害を受けた地域は、救援要請さえ出せずに取り残されることが多い。この問題を解決するためには、現地からの要請を待たずに外部から能動的に被災地を探索し、災害救援活動を展開すべき地域をできるだけ早く決定する必要がある。

本研究では、津波災害発生直後に実施する津波数値解析と、人口統計データを用いたGIS分析、リモートセンシング技術を統合して津波被災地を探索し、被害状況を定量的かつ能動的に把握する手法を提案する。また、2009年9月29日に発生したサモア諸島沖地震津波災害において本手法を適用して検証し、手法の妥当性や課題を整理する。

具体的にはまず、地震発生後即時的に得られる地震情報のみ(震源位置、マグニチュード、断層メカニズム、余震分布)を用いて非線形長波式による広域津波計算を実施する。海底地形データは、全世界をカバーする

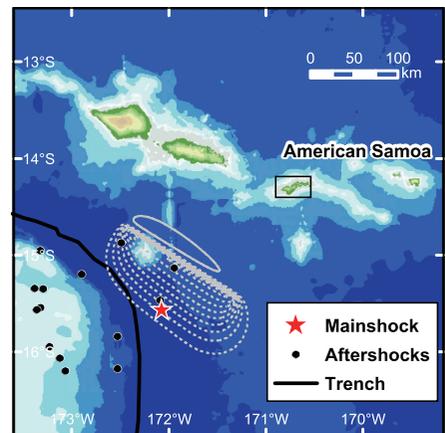


図-1 2009年サモア諸島沖地震津波の計算領域および津波波源モデル(実線:隆起,点線:沈下,コンター間隔:0.2m)

GEBCO 30秒メッシュのデータ (IOC, IHO and BODC, 2003) を使用する。次に、数値解析から得られた津波高予測値と世界の人口統計 (LandScan™; Dobsonら, 2000) をGISで統合表示して、津波に曝されている人口 (津波曝露人口) を算出し、沿岸津波高との関連で被災地を探索する。ここで津波被災地として探索する基準は、既往の津波災害事例における津波高と建物被害率、死亡率の関係を調査して検討する。

上記の基準により想定被災地をリストアップし、人工衛星の観測軌道、観測状況、過去の撮影アーカイブの有無をチェックする。被災直後に緊急観測を行った場合には撮影画像を入手し、津波浸水域の把握 (光学画像の場合) や家屋被害の判読を行って被害把握を行う。

最後に、2009年サモア諸島地震津波の被災地における

- | | | | |
|---|------|-----------|--|
| 1 | 正会員 | 博(工) | 東北大学准教授大学院工学研究科 |
| 2 | 学生会員 | | 東北大学大学院工学研究科 |
| 3 | 正会員 | 博(工) | 産業技術総合研究所研究員活断層・地震研究センター |
| 4 | | 博(理) | 北海道大学助教大学院理学研究院附属地震火山観測センター |
| 5 | | 博(地球環境科学) | 北海道大学理学研究院研究員大学院理学研究院附属地震火山観測センター |
| 6 | | Ph.D. | NOAA, Pacif Tsunami Warning Center |
| 7 | | | NOAA, National Weather Service Pago Pago |
| 8 | | Ph.D. | International Tsunami Information Center |

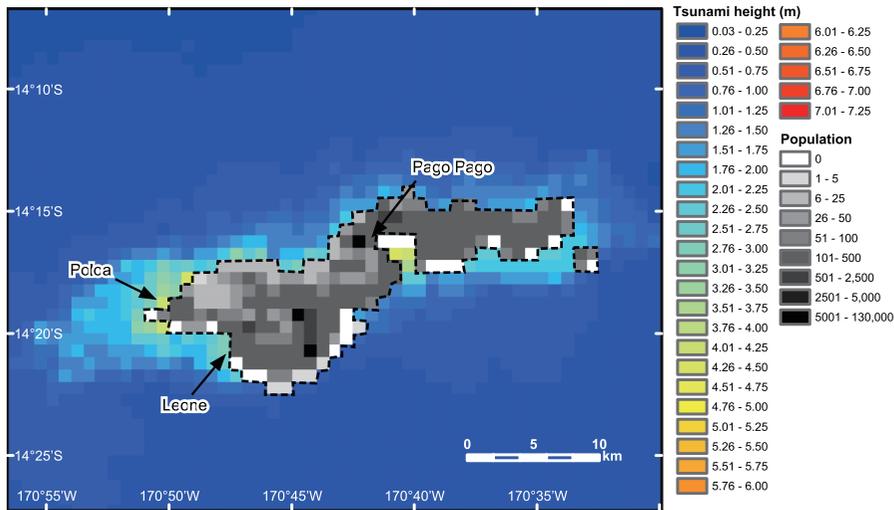


図-2 2009年サモア諸島沖地震津波における米領サモア (Tutuila島)の予測津波高と津波曝露人口表示による津波被災地の探索結果。沿岸部人口が多く(200人以上)、津波高が高い(3.5m以上)3集落(Pago Pago, Leone, Poloa)が想定被災地として推定された。

表-1 2009年サモア諸島沖地震の断層パラメータ

断層長さ×幅 [km]	150km×75km
走向, 傾斜角, 滑り角 [°]	(124, 46, -120)
滑り量 [m]	3.6
地震モーメント [Nm]	1.2×10^{21}

現地調査 (建物被害調査) 結果に基づき, 本手法の検証を行う。

2. 2009年サモア諸島沖地震津波と被災地の探索

2009年9月30日(現地時間), 米領サモア南西190kmの地点でM8.3(西経: 172.034°, 南緯: 15.509°)の地震が発生し, それに伴い発生した津波が, 独立国サモアおよび米領サモアに襲撃した。ここでは, 津波数値解析と人口統計との統合分析により津波被災地を探索する(越村, 2007)。図-1に津波の計算領域と津波計算の初期条件(津波発生時初期水位分布)を示す。採用した断層パラメータは表-1の通りである。パラメータはU.S. Geological SurveyのCMT解(USGS, 2009)を参考に決定した。

図-2に米領サモアにおける予測津波高と人口統計を示す。沿岸部における津波被災規模は, 単に襲撃する津波の高さだけでは規定できない。津波被害の全体像を把握することは, すなわち, 津波高さの推計・把握に加え, その津波に曝される社会的条件(脆弱性)を考慮することが津波被災地推定の要件となる。ここでは, 世界の人口統計LandScan™を利用して津波高と人口を統合表示し, 被災地を探索した。既往の研究(たとえば越村ら, 2009; 河田, 1997)では, 沿岸の津波高が3-4mを超えると家屋破壊率および死亡率が急増することが知られて

いる。ここでは予想津波高3.5mおよび人口200人という基準で被災地を探索した結果, Pago Pago, Leone, Poloaの3地域が被災地として想定された。

3. 人工衛星画像による津波浸水域と家屋被害の把握

地震発生直後からの衛星観測の状況を調査し, 被災地の把握に利用できる衛星画像をリストアップした。その結果, 地震発生から4時間後にDigitalGlobe社のQuickBird衛星が米領サモアPago Pago湾の観測を行ったことが分かった。さらにQuickBirdは地震発生5日前の撮影にも成功しており, これらの画像をセットで取得して被害把握を行う。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。QuickBird衛星および光学センサーの諸元を表-2に示す。

まず, NDVI(正規化植生指標, Normalized Difference Vegetation Index)により浸水域を推定し, 被害判読を実施する領域を決定する。NDVIは各バンドの画素値を用いて次式で算出される。

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (-1 \leq NDVI \leq 1) \dots\dots(1)$$

NIR, Rはそれぞれ近赤外域バンド, 可視域赤バンドの反射率(または放射輝度)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。通常, NDVIは植生の活性度を表す指標として利用される。

津波発生からある程度日数が経過した後の衛星画像を用いる場合には, 塩水の遡上により枯死した植生等をNDVIから抽出することで浸水域を把握することは可能

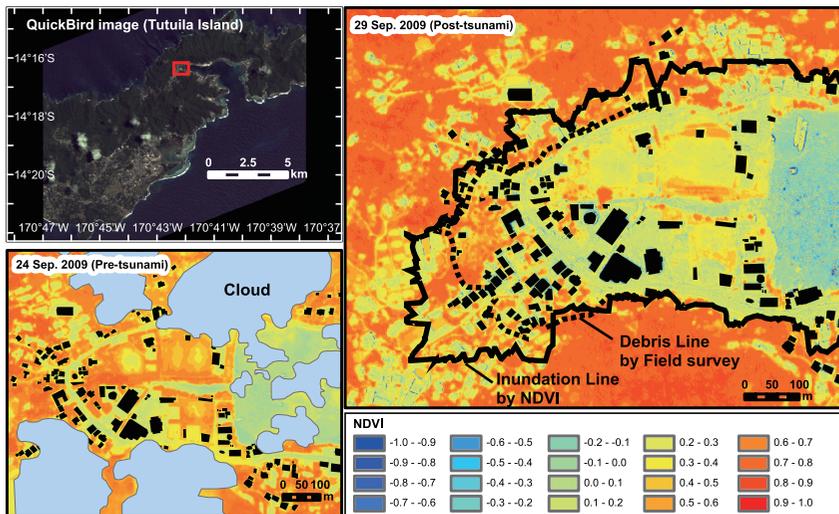


図-3 Pago Pagoにおける津波前後のNDVIの分布と抽出した浸水域（実線：NDVIから求めた浸水ライン，点線：現地調査で得られた瓦礫の漂着ライン）

表-2 QuickBird衛星および光学センサの諸元

回帰日数 [日]	1-3.5
軌道周回時間 [分]	93.5
分解能 [m]	バンクロー0.6, マルチ2.4
観測波長 [nm]	青 (B) : 450-520 緑 (G) : 520-600 赤 (R) : 630-690 近赤外 (NIR) : 760-900

である。たとえばKouchi・Yamazaki (2007) は、津波浸水域を抽出する際の津波前後のNDVIの閾値を0.46としている。本研究で利用した画像は地震発生から4時間後であり、津波前の画像のCloud Coverが大きいため植生の活性度の変化に着目した浸水域把握は不可能である。ここでは津波後の画像のみを用いて、NDVIが水に対して負の値をとるという特性（水は近赤外を強く吸収するという特性）に着目する。Pago Pago湾内の水域のサンプルデータを取得し、画素の輝度値に関するヒストグラムを作成した上で、浸水域の閾値をNDVI=0.098として浸水ラインを求めた。その結果を図-3に示す。図中の実線はNDVIの閾値の適用によって求めた浸水ライン、点線は著者らが実施した現地調査での瓦礫の漂着ラインである。NDVIによる浸水ラインは瓦礫のラインより内陸にあり、NDVIに着目した浸水域の把握がある程度可能であることが分かる。しかし、現地調査で得た漂流物漂着ラインが浸水ラインと等価かどうかも含め、浸水域の抽出精度の評価にはさらなる検討が必要であることが分かった。

次に、浸水域内の家屋127棟を対象に、津波前後の衛星画像の比較により被害判読を実施した。Miuraら(2006)を参考に、図-4を例として被害を表-3の通り5段階に分類した。なお、表には判読棟数も付記する。



図-4 QuickBird衛星画像の目視判読による建物被害分類の例（左が津波前，右が津波後）

4. 衛星画像による建物被害判読精度の評価

衛星画像を利用した建物被害判読は、同一の判定基準による広域な被害把握が可能である反面、直上からの情報（主に屋根の形状）のみに頼らざるを得ないため、判読精度に限界がある。ここでは、衛星画像を用いた建物被害判読の精度評価を行う。

図-5および表-4は、著者らがPago Pagoにおいて実施した現地調査で得られた建物被害調査結果である。これを真値（Ground Truth）として衛星画像判読結果を評価する。被害評価結果の比較は表-5の通りである。なお、現

表-3 衛星画像による建物被害判定基準と判読結果

被害分類	基準	棟数
Washed away	建材を含め全て流失	34
Collapsed	構造破壊. 建材は残存	7
Major	屋根の形状変化. 屋根は残存	14
Survived	明確な変化無し	54
Unknown	不明	18

地調査での被害判定において Moderate, Only flooded, No damage の3クラスは衛星画像判読の Survived に相当するとして比較を行った。以下では衛星画像の判読で生じた誤差要因について考察する。

表-5の最下部に、現地調査の結果を真とした衛星画像判読による被害建物棟数の正解率を示す。正解率はそれぞれ、Survived (衛星画像からは無被害と判読、現地では Moderate, Only flooded, No damage) のクラスは 100%, Major : 0%, Collapsed : 14.2%, Washed away : 100% を得た。特に Major から Collapsed に関しては、衛星画像のみの建物被害判読では誤分類が生じることが分かった。

衛星画像から判読した建物被害が現地調査における評価結果よりも過大評価となる誤分類を Positive Error (PE) とし、その逆を Negative Error (NE) として考える。衛星画像からの Major 判定において PE (10棟) が生じるのは、主として、ひさしのような建物の付属物のみが破壊された時に建物本体に構造的破壊が生じたと誤認識する場合である。一方、NE (4棟) が生じるのは、衛星画像では大きな形状変化を確認できないものの、側面からは壊滅的な被害を受けていることが原因であることが分かった。また、Collapsed において生ずる NE (5棟) は、流失した建物の白い基礎の上に泥が残っているために、大規模な破壊を受けた建物がまだその場所に留まっていると誤認識した場合である。結局、これらの誤分類の要因の多くが建物の構造や現地の条件によるものであり、衛星画像のみから判読することは難しい。その一方、Survived と Washed away の正解率に関しては衛星画像のみの解析により良好な結果を得られる事が分かった。

5. 結論

津波数値解析・人口統計データの GIS 分析・衛星画像解析を統合して津波被災地を探索する技術を提案し、2009年サモア諸島沖地震津波の解析、現地調査を通じてその有効性を実証した。以下に主要な結論を列挙する。

既往の津波災害事例を参考にして、津波被災地の探索基準を津波高 3.5m, 集落人口 200人以上と設定し、米領サモア Tutuila 島における津波被災地の探索を行った。その結果、Pago Pago, Leone, Poloa の3集落が被災地となり得ることが判明した。また、Pago Pago と Leone では

表-4 現地調査による建物被害判定基準と判定結果

被害分類	基準	棟数
Washed away	建材を含め全て流失	35
Collapsed	構造全体が破壊	4
Major	構造の一部が破壊	0
Moderate	壁や柱の一部が破壊	5
Only flooded	窓ガラスが割れる程度	61
No damage	浸水無し	12
Unknown	不明	10

100棟以上の建物が流失・大破、Poloa はほとんど全ての家屋が流失して集落が壊滅するなどの被害を受けていたことが分かった。

地震発生から4時間後の Pago Pago で撮影された QuickBird 画像 (分解能 60cm) を取得し、NDVI (正規化植生指標, Normalized Difference Vegetation Index) により浸水域を推定した。また、浸水域内の家屋を対象に、目視による家屋被害の判読を行った。浸水域の把握精度には課題が残るが、地震発生直後に被災地を探索し、その結果に対応して緊急衛星観測が実現すれば、迅速な被災地の把握が可能であることが実証できた。

衛星画像による建物被害判読の精度を現地調査により検証した結果、無被害 (Survived) と流失 (Washed away) に関する精度 (正解率) は 100% であるが、大破・倒壊 (Major, Collapsed) という被害に関しては誤分類が生じてしまうことが分かった。その要因は、ひさしのような建物の付属物のみが破壊された時に建物本体に構造的破壊が生じたと誤認識する場合の過大評価 (Positive Error) と、画像のみから建物の形状変化を確認できないものの実際には壁面が壊滅的な被害を受けている場合の過小評価 (Negative Error) が存在することが分かった。

謝辞: 本研究の一部は平成 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) および JST-JICA 地球規模課題対応国際科学技術協力プロジェクト (代表: 佐竹健治) 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

- 河田恵昭 (1997): 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.
- 越村俊一 (2007): 巨大津波災害の広域被害評価, 第四紀研究, Vol.46, pp. 499-508.
- 越村俊一・行谷佑一・柳澤英明 (2009): 津波被害関数の構築, 土木学会論文集B, Vol.65, No.4, pp. 320-331.
- 行谷佑一・越村俊一・西村裕一・中村有吾・G. Fryer・A. Akapo・L. Kong (2010): 2009年サモア諸島沖地震津波の米領サモアにおける津波高さおよび被害の調査, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol. 65, pp. 1366-1370.
- Dobson, J. E., E. A. Bright, P. R. Coleman, R. C. Durfee and B. A. Worley (2000): LandScan: A Global Population Data-base for Estimating Populations at Risk, Photogrammetric Engineering

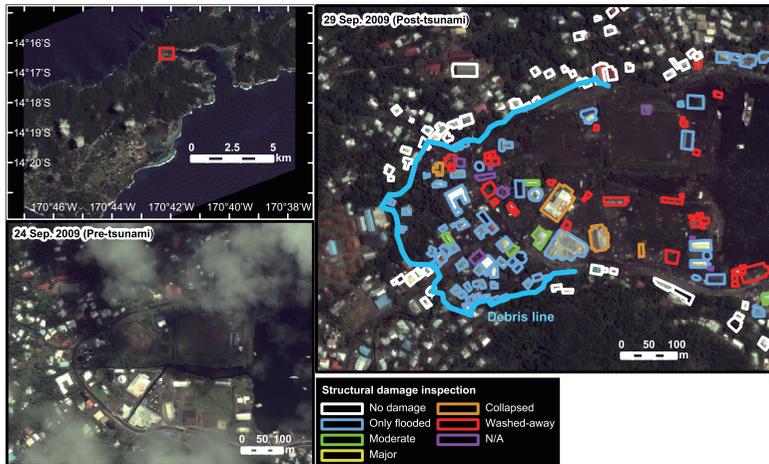


図-5 米領サモア Tutuila 島における津波前後の QuickBird 画像と Pago Pago における家屋被害把握（現地調査）の結果

表-5 衛星画像による建物被害判読と GroundTruth データとの比較

		衛星画像判読結果					計
		Survived	Major	Collapsed	Washed away	Unknown	
現地調査結果	No damage	8	1	0	0	3	12
	Only flooded	40	7	1	0	13	61
	Moderate	3	2	0	0	0	5
	Major	0	0	0	0	0	0
	Collapsed	0	3	1	0	0	4
	Washed away	0	1	5	29	0	35
	Unknown	3	0	0	5	2	10
	計	54	14	7	34	18	127
正解率 (%)	100	0	14.3	100			

& Remote Sensing, Vol. 66, No. 7, pp. 849-857.

IOC, IHO and BODC (2003) : Centenary Edition of the GEBCO Digital Atlas, published on CD-ROM on behalf of the Intergovernmental Oceanographic Commission and the International Hydrographic Organization as part of the General Bathymetric Chart of the Oceans, British Oceanographic Data Centre, Liverpool, U.K.

Koshimura, S., Y. Nishimura, Y. Nakamura, Y. Namegaya, G. J. Fryer, A. Akapo, L. Kong and D. Vargo (2009) : Field survey of the 2009 tsunami in American Samoa, Eos Trans. AGU, 90 (52), Fall Meet. Suppl., Abstract U23F-07.

Kouchi, K. and F. Yamazaki (2007) : Characteristics of Tsunami-Affected Areas in Moderate-Resolution Satellite Images, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 45, No. 6, pp.1650-1657.

Miura, H., A. Wijeyewickrema, and S. Inoue (2006) : Evaluation of tsunami damage in the eastern part of Sri Lanka due to the 2004 Sumatra earthquake using remote sensing technique, Proc. 8th National Conference on Earthquake Engineering, Paper No.8, NCEE-856.

U.S. Geological Survey (USGS), Earthquake Hazard Program, <http://earthquake.usgs.gov/>