

2009 年サモア地震津波における脆弱性の評価

郷右近英臣*・越村 俊一*・松岡 昌志**・行谷 佑一***

1. 序論

1.1 研究の背景・目的

2009 年 9 月 29 日、米領サモア南西 180 km を震源とする Mw8.1 の地震が発生した。地震に伴い発生した津波は、サモア諸島・トンガを襲い、死者・行方不明者は約 226 人に達した (Reese et al., 2011)。発災後、複数の機関による現地調査が行われ、浸水深・遡上高のような津波流況や、人的・物的被害のような実被害の実態が明らかにされてきた (行谷ら, 2010)。しかし、これらの成果を、サモアおよび米国の津波対策に活かすためには、被害実態を津波被害評価式という形に置き換える必要がある。本研究では、現地調査および衛星画像からの建物被害の判読結果と津波数値解析とを統合し、津波被害関数を構築することを目的とする。

津波被害関数とは、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) の普及を背景に提案された、新しい津波被害想定指標であり、津波による建物・人的被害の程度を被害率 (死亡率) という尺度で、津波の流体力学的諸量 (浸水深、流速、波力等) の関数として表すものである (越村ら, 2009)。

1.2 本研究の流れ

まず、非線形長波式に基づく津波数値解析を行い、現地調査結果との検証を踏まえ

て、米領サモア (Tutuila 島) に来襲した津波の流況を再現する。次に、被災前後の高解像度衛星画像を GIS 上で同一座標系に統合し、津波被災地の建物被害を一件一件目視判読する。判読結果は、現地調査結果に基づく建物の悉皆調査により、精度向上を図る。最後に、津波氾濫解析結果と建物被害判読結果を GIS 上で統合分析することにより、津波被害関数の構築を行う。

2. 現地調査

本研究の対象領域は、被災前後の高解像度衛星画像のセットが手に入り、さらに現地調査により詳細な被害状況、地形の情報が得られた米領サモアの Pago Pago, Leone, Poloa, Amanave とする (図-1)。現地調査は被災直後と、被災から 10 ヶ月後の 2 回行われた。被災直後の調査は被害の実態解明を目的とし、著者らにより、浸水域や、浸水深等の津波流況、建物被害の悉皆調査が行われた。被災から 10 ヶ月後の調査では、津波氾濫解析に使用する地形モデルを補正するため、キネマ

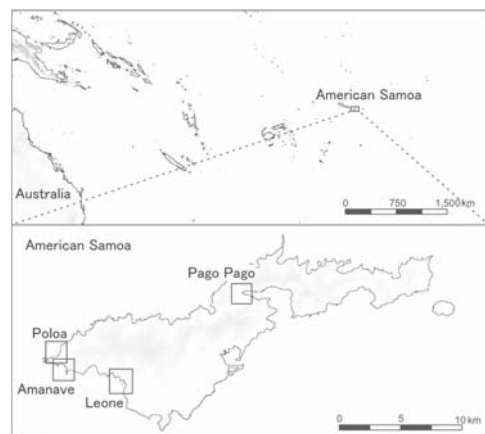


図-1 本研究の対象領域

* 東北大学大学院工学研究科附属災害制御研究センター

** 産業技術総合研究所地質調査情報センター

*** 産業技術総合研究所活断層・地震研究センター

ティック GPS による高精度地形測量を行った。

3. 地震発生メカニズムの解明

3.1 波源の推定

本地震の発生メカニズムに関して、Nature 誌 (2010 年 8 月) に掲載された 2 編の論文 (Beavan et al., 2010 ; Lay et al., 2010) では、スラブ内における正断層型地震とプレート境界の逆断層型地震の双子地震であったことが明らかにされたが、どちらの断層破壊が先に発生したかについての主張が対立していた。

以上の論争に対し郷右近 (2011) では、断層破壊の発生メカニズムを解明するために、逆伝搬解析と、正断層と逆断層ごとに個別に解析を実施することにより逆断層の断層破壊継続時間を 480 秒、正断層の断層破壊継続時間を 60 秒とし、逆断層の断層破壊が 3 分ほど進んだところで正断層の破壊が発生する場合に、サモア諸島から最も近い 3 点の DART の津波観測波形を説明できることを示した。これらの波源モデルを参考にし、本研究では津波氾濫解析を実施した。

3.2 地形データの作成

地形データは、30 秒メッシュの General

Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO) を、27 秒から 1 秒へと格子間隔が 3 分の 1 ずつになるようにネスティングしたものと、10 m メッシュの NGDC 版高解像度 DEM と ASTER GDEM を組み合わせたものを、大領域から小領域へ接続することにより作成した (図-2)。浸水域における地形の再現性を高めるために、キネマティック GPS による高精度地形測量を行い、GIS 上で DEM の補正を行った。底面摩擦はマニング式により算出し、特に人口密度の高い領域では、建物占有率に基づく抵抗則を適用した (Koshimura ら, 2009)。建物の位置は、津波被災前の被災地を捉えた QuickBird 衛星画像 (2009 年 9 月 24 日撮影) および IKONOS 衛星画像 (2007 年 4 月 15 日撮影) より建物ポリゴンを作成することで特定した。

3.3 津波氾濫解析

以上の地形データを使用して、非線形長波式に基づく津波遡上計算を、米領サモアの Pago Pago, Leone, Poloa, Amanave の 4 領域において実施した。波源は、これまでに提案された Beavan ら (2010) と Lay ら (2010) の二つのモデルのうち、詳細な記述のある Beavan ら (2010) の断層パラメータ (表-1) を参考にし、津波数値解析結果が 4 領域

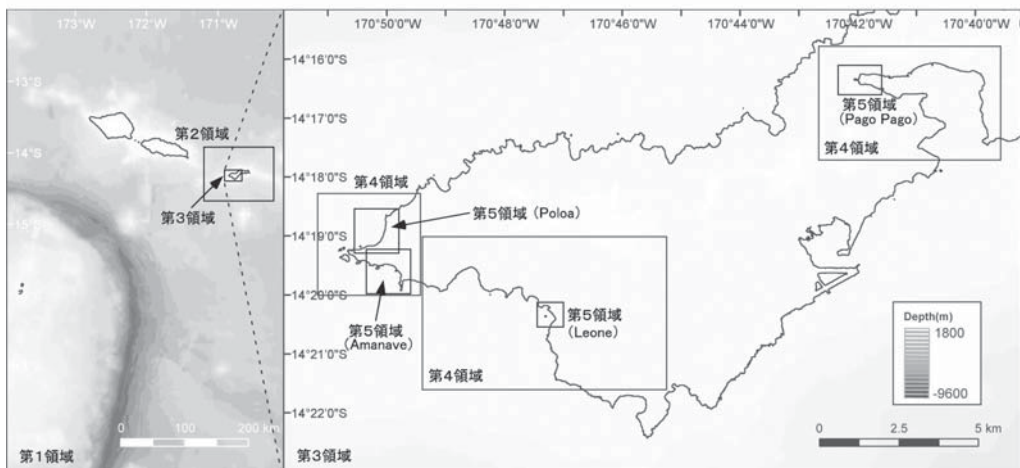


図-2 津波数値解析に使用する領域

表-1 Beavanら(2010)の提案した断層パラメータ

断層パラメータ	正断層	逆断層
断層位置(緯度)	-15.542	-15.940
断層位置(経度)	-172.237	-172.718
走向(°)	352	175
傾斜角(°)	48	16
滑り角(°)	-41	85
断層長さ(km)	114	109
断層幅(km)	28	90
断層深さ(km)	13	18
滑り量(m)	8.6	4.1

の浸水深や浸水域をそれぞれ十分再現するように、断層滑り量を調整した。Pago Pagoでは、痕跡高を数十点計測したので、Aida(1978)の判定式を用いて、解析結果の検討を行った。本判定式は、幾何平均 K および、幾何標準偏差 κ に基づき、現地調査結果等のような測定値を使用することで、津波数値解析結果の再現性の検証の際に使用されるものである。特にPago Pagoでは、 $K=0.97$ 、 $\kappa=1.13$ 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、また、その他の3領域では、浸水深の計測地点数が津波数値解析結果を検討する上で不十分であると判断し、主に、瓦礫漂着ラインを検討に使用した。

4. リモートセンシングによる建物被害判読

津波被災地を捉えた被災前後の高解像度衛星画像をGIS上で同一座標系上に表示し、建物屋根の形状変化に着目した建物被害調査を行った。

被災前の衛星画像には、米国GeoEye社のIKONOS衛星画像(2007年4月15日)および、米DigitalGlobe社のQuickBird衛星画像(2009年9月24日)を使用し、被災後の衛

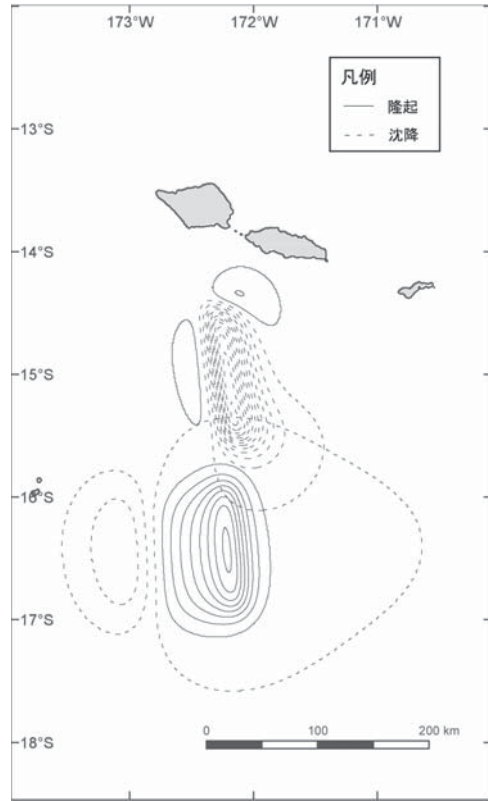


図-3 初期水位分布(Beavanら, 2010)

星画像として米DigitalGlobe社のQuickBird衛星画像(2009年9月29日, 2009年10月2日, 2009年11月2日撮影)を使用した。

本研究では、PagoPago, Leone, Poloa, Amanaveの4領域において、現地調査により判明した浸水域内建物451棟を対象とし、衛星画像を用いて建物被害の目視判読を実施した。被害の程度は、Miuraら(2006)が提案した基準を参考にし、Survived, Major damage, Collapsed, Washed-awayの4段階に分類した(図-4:左図)。さらに、現地調査による建物被害悉皆調査結果を併用することにより、建物被害分類の精度向上を図った。以上の過程により得られた、建物被害の調査結果を図-4:右図と表-2に示す。

5. 津波被害関数の構築

5.1 被害関数とは

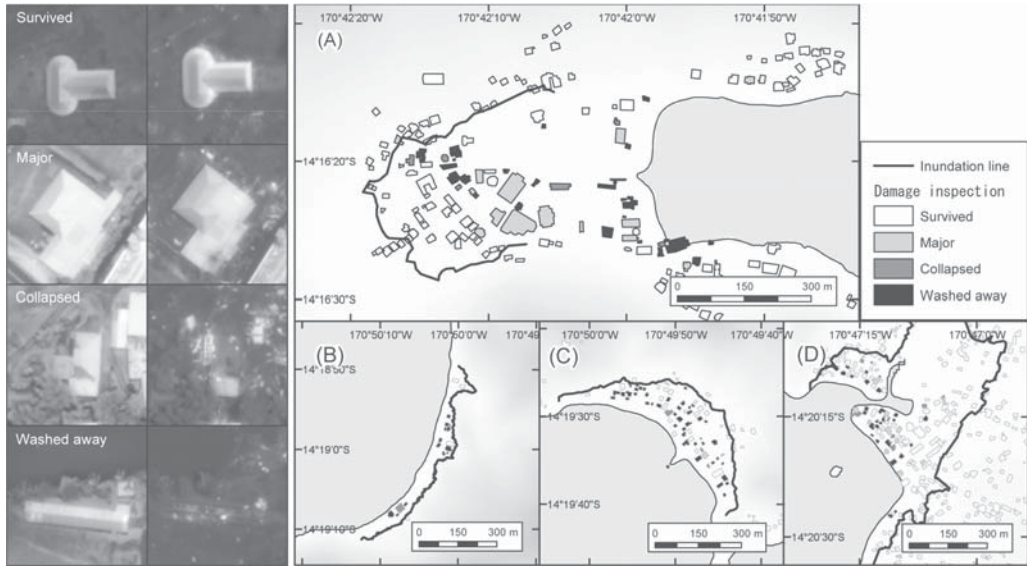


図-4 左図：建物被害判読基準（左：被災前，右：被災後），右図：被害判読結果
 ((A) Pago Pago, (B) Poloa, (C) Amanave, (D) Leone)

表-2 建物被害判読結果

Damage category	建物数 [PagoPago/Amanave/Poloa/Leone/ 計]
a) Washed-away	34/42/13/28/117
b) Collapsed	7/3/1/7/18
c) Major damage	14/2/0/12/28
d) Survived	54/34/4/196/288

津波被害関数とは、建物・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である (Koshimura ら, 2009)。一般的には、津波被害関数は、被害情報（建物被害率 P_D ）と津波流況の関連性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。

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

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

ここで、 x は最大流速，最大浸水深，津波外力などの外力指標で， 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。

5.2 津波被害関数の構築

数値解析により求めた津波流況と、建物被害の悉皆調査結果を GIS 上で統合分析し、最大流速，最大浸水深，最大抗力の 3 つの外力指標と、建物被害率に関する津波被害関数を構築する。津波被害関数の構築は、越村ら (2009) の手法を踏襲し、Major damage 以上の被害を受けた建物を「被害あり」、それ

以外の建物は「被害なし」と判定した。

本研究で構築した津波被害関数を図-4、図-5、図-6に、津波被害関数の回帰式に使用したパラメータを表-3に示す。

5.3 津波被害関数の検証

図-4より、米領サモアの建物は浸水深が6mを超えるとほぼ80%が甚大な被害を受けていたことがわかった。また、浸水深が2m程度の領域においても20～30%の建物が被害を受けていた。

氾濫流速については、およそ最大流速が5m/sを超えると、浸水域内の80%以上の建物が壊滅的な被害を受ける事がわかった(図-5)。特に、流速が1m/s程度の場所でも、半分程度の建物が被害を受けている。現時点では津波数値解析における氾濫流速の推定精度を検証することはできないが、流速が低くても水位の上昇による浮力で建物被害が拡大した可能性がある。

最大抗力については、10kN/m以下の地域において被害率が急上昇し、10～20kN/mにおける被害率のばらつきが大きくなる(図-6)。従って、現時点では被害関数としての利用は避けるべきである。氾濫流速の再現精度をあわせてより詳細な解析が必要である。

米領サモアにおける調査地域内の建物は、主に一般家庭の木造建物、教会や大規模商業施設のようなRC構造物、柱と屋根で作られた簡易的な円形の集会場(屋根部分は木造)に分類できる。衛星画像の解析と、現地調査の結果、一般家庭の木造建物は津波により壊滅的な被害を受けたが、それ以外の鉄筋やコンクリート製の構造物、円形の集会場は、構造的には比較的軽微な被害で済んだ。流速が低くても、浸水深が大きくなると、木造建物は浮力により浮いた後、流失してしまう可能性が高い。鉄筋コンクリート製の構造物は、今回の津波では流失した例は無かった。柱と

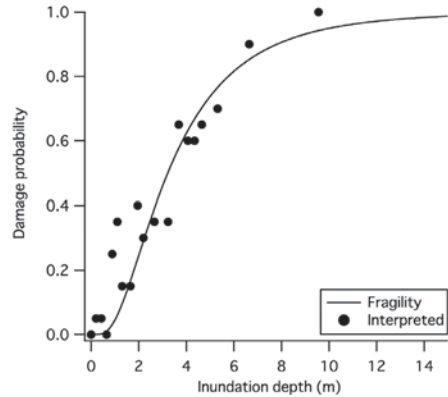


図-5 津波被害関数(浸水深)

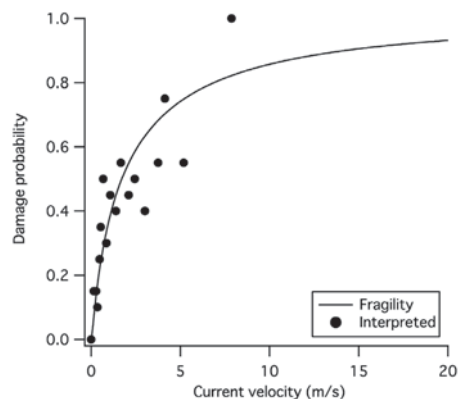


図-6 津波被害関数(最大流速)

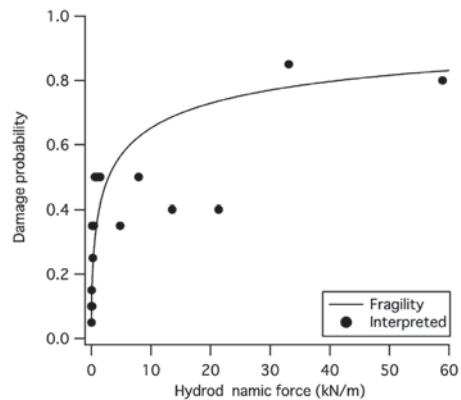


図-7 津波被害関数(最大抗力)

表-3 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.)。R² は回帰式の決定係数。

外力	μ	σ	λ	ε	R ²
浸水力 (m)	N/A	N/A	1.17	0.69	0.89
流速 (m/s)	N/A	N/A	0.54	1.65	0.73
抗力 (kN/m)	N/A	N/A	1.07	3.16	0.72

屋根のみの構造物は、津波を受け流す作りとなっているため、船舶のような大規模漂流物が衝突しない限りは、残存する可能性が高い。

以上の津波被害関数と数値解析により得られた津波流況の分布図を掛け合わせることで、津波危険度のゾーニングを行う事ができる。ゾーニングにより得られた建物被害率の空間分布は、地域の建物の津波に対する脆弱性を示しており、行政の防災計画策定の際に活用されることが期待される。

6. 結論

本研究では、2009年サモア地震津波被災地の米領サモア (Tutuila 島) において、リモートセンシングと津波数値解析を GIS 上で統合することにより、新しい津波被害評価式である津波被害関数を構築した。本関数は、津波外力指標 (浸水深, 最大流速, 最大抗力) と、建物被害率を関連づけたものである。米領サモアの中心都市 Pago Pago において具体的に被害率 60% 以上と判定された領域を示すことにより、本関数の精度検証を行うとともに、その有効性を実証した。

また、本研究で構築した津波被害関数により、米領サモアとその周辺の地域において、浸水深 6 m 以上の津波が到達する領域では、80% 以上の建物が構造的破壊を受けることを明らかにした。

謝辞

本研究の一部は、本研究の一部は平成 20 年度産業技術研究助成事業 (プロジェクト ID:08E52010a) および科学研究費補助金 (課題番号: 22681025, 21221007) 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

- 郷右近英臣・越村俊一・今井健太郎 (2009) : 2009 年米領サモア地震・津波の発生メカニズムの検討, 土木学会論文集 B, Vol. 67, No. 2, 2011, I_211-I_215
- 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, Fryer Gera rd, Akapo Akapo, Kong S. L. Laura; “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. 66, No. 1, pp.1366-1370 2010.
- Aida, I.: Reliability of a tsunami source model derived from fault parameters, J. Phys. Earth, Vol.26, pp.73-75,1978
- Beavan, J., X. Wang, C. Holden, K. Wilson, W. Power, G. Prasetya, M. Bevis and R. Kautoke (2010) : Near-simultaneous great earthquakes at Tongan megathrust and outer rise in September 2009, Nature, Vol 466, 19, doi:10.1038/nature09292
- IOC, IHO and BODC (2003) : Centenary Edi-

- tion 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.
- Lay, T., C. J. Ammon, H. Kanamori, L. Rivera, K. D. Koper, A. R. Hutko (2010) : The 2009 Samoa-Tonga great earthquake triggered doublet, *Nature*, Vol. 466, 19, doi:10.1038/nature09214.
- 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.