

## 高解像度衛星画像による 2009 年米領サモア地震津波被災地の解析

郷右近 英臣\*, 越村 俊一\*, 行谷 佑一\*\*, 西村 祐一\*\*\*, 中村 有吾\*\*\*

### 1. 序論

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波高 3m を超える津波が, 米領サモア Tutuila 島の中心部の都市 Pago Pago を襲った。

巨大災害の発生時には, 被害の全容把握に時間を要し被災者救援活動が難航する。実際, 越村 (2007) によると, 2004 年のインド洋大津波の際に, インド洋全体で 22 万人以上という死者・行方不明者数が確定したのは, 発災から数ヶ月してからのことであった (情報空白期)。この問題を解決するために, 人工衛星による緊急観測を実施し, 被災地の衛星画像を利用して被害状況を定量的かつ能動的に把握するリモートセンシング技術が開発されている (萱場ら, 2008)。既往の研究では, 災害発生前後の高解像度衛星画像セットの目視比較により建物被害状況を 4 段階に分類する手法は提案されているが (Miura et al, 2005), 屋根の形状や周辺の瓦礫の有無に着目した画像判読結果だけでは現地の被災状況を正確に把握できるとは限らない。そこで本研究では, 2009 年 9 月 30 日にサモア諸島沖で発生した津波による被災地の衛星画像の分析を実施し, 緊急衛星観測による被害把握手法の有効性を実証する。次に, 衛星画像解析結果と現地における建物被害調査の結果 (Ground Truth) との比較を通じて, 緊急観測による建物被害把握技術の精度と誤差の要

因について考察する。

### 2. 津波被災地の探索

まず, 人口分布メッシュデータ LandScan<sup>TM</sup> と津波数値計算との統合分析手法により (越村, 2007), 津波被災地の探索を行い, 緊急観測を実施すべき地域を明らかにする。図-1 に示すのは, 米領サモア Tutuila 島の予測津波高と人口統計データを統合表示したものである。複数の地震シナリオに基づき, 予測した津波高が 3m を超え, かつ人口密度が高い地域を探索した結果, Pago Pago 湾奥が激甚津波被災地となり得ることが分かった。その後, イベント前後における衛星観測状況を検索し, 地震発生から 4 時間後に Digital-Globe 社の QuickBird 衛星が Pago Pago 湾の観測を行ったことが分かり, 地震発生の 5 日前の画像とのセットを取得して詳細な被害状況把握を行った。これについては 4 章以降で報告する。

### 3. 現地調査の実施

2 章の検討結果を踏まえて実施した現地調査の概要を述べる。

調査団は, 地震発生から 5 日後の 10 月 4 日夜にアメリカ領サモアに到着し, 5 日から 8 日までの 4 日間調査を実施した。調査には日本からの 4 名に加え, アメリカとサモアの研究者 3 名が参加し, 合計 7 名で調査を行った。ここでは, Tutuila 島の津波高さ と津波による建物被害について報告する。

図-2 に, 測定した津波高さ (遡上高) と浸水深の分布を示す。ここでいう「津波高さ (遡上高)」とは, 建物に残った海水の痕や樹木等に付着した雑草などの津波の痕跡を津

\*東北大学大学院・工学研究科

\*\*産業技術総合研究所・活断層・地震研究センター

\*\*\*北海道大学大学院・理学研究院

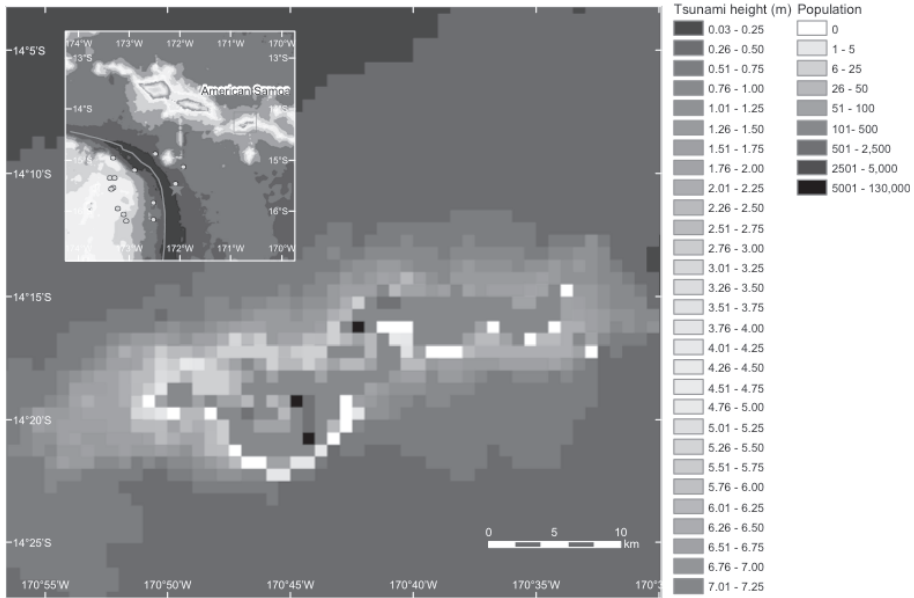


図-1 津波数値計算と人口分布メッシュデータ LandScan<sup>TM</sup>との統合分析結果 (米領サモア Tu-tuila 島).

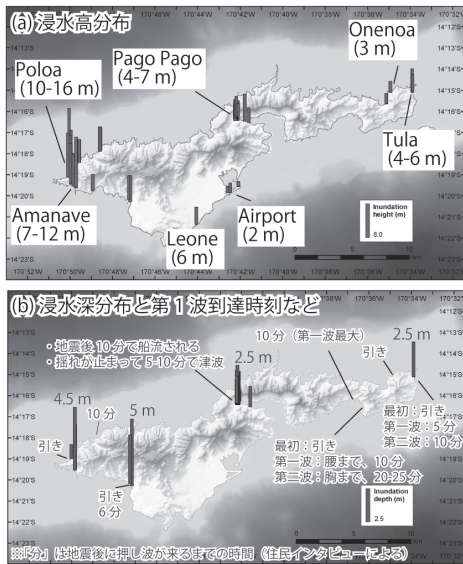


図-2 アメリカ領サモア・トゥトゥイラ島 (Tu-tuila 島) における現地調査で得られた津波高 (浸水高) と浸水深の分布 (行谷ら, 2009)

波来襲前の海面からの高さとして表現したものである。また浸水深とは、痕跡を地表からの高さで表現したものである。我々が調査した範囲では、島の南西部を 10 メートル以上の津波が襲い (最大 16 メートル)、津波のエネルギーは島の西側に集まっていたことが分かった。また、中央部の湾の奥でも津波高さが 5 メートルに達するほど増幅されたことが分かった。以下では、島の南側の 2 地点について詳しく述べる。

ポロア村 (Poloa) は島の南西部にある小さな集落である。ここでは村全体が津波の被害を受けた。図-3 にポロアで調査した津波の高さと被害の様子を示す。最大 16 メートルの津波が来襲していたことが分かり (図-3 写真 1)、全ての建物が流失・破壊された (図-3 写真 2)。

次に、島中央部のパゴパゴ (Pago Pago) の被災地の状況を述べる。パゴパゴは島の中で最も人口密度の高い市街地であり、地震発生から約 20 分で津波が到達したことが報告されている。図-4 に地震前後のパゴパゴの衛星画像と被災地の写真を示す (上が津波来

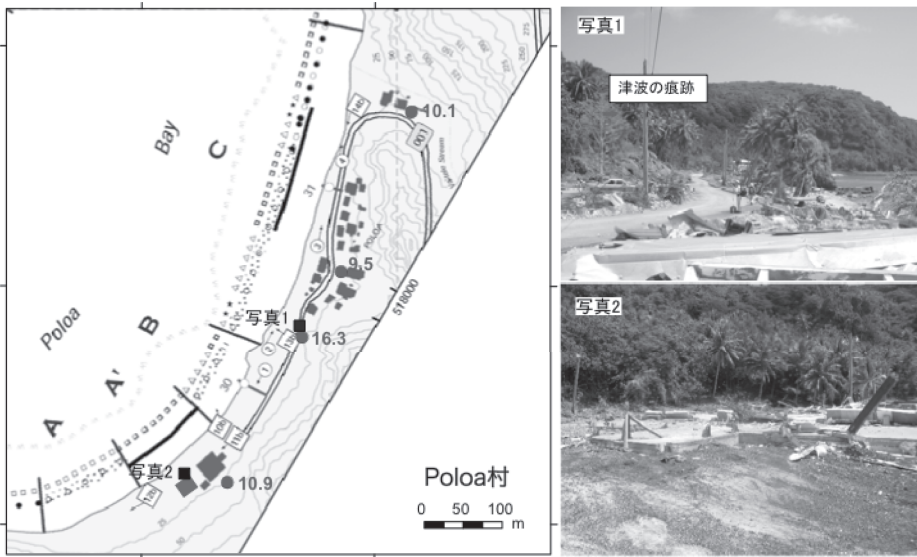


図-3 最大 16 メートルの津波が来襲したポロア村 (Poloa)。ここではほとんど全ての建物が津波によって破壊・流失した。図中の赤い丸と数字は測定した地点と測定した津波高さ。黒四角は写真の撮影位置 (写真 1: 16 メートルの津波の痕跡位置 (矢印), 写真 2: 津波によって流失した建物の跡 (残っているのは基礎のみ))。

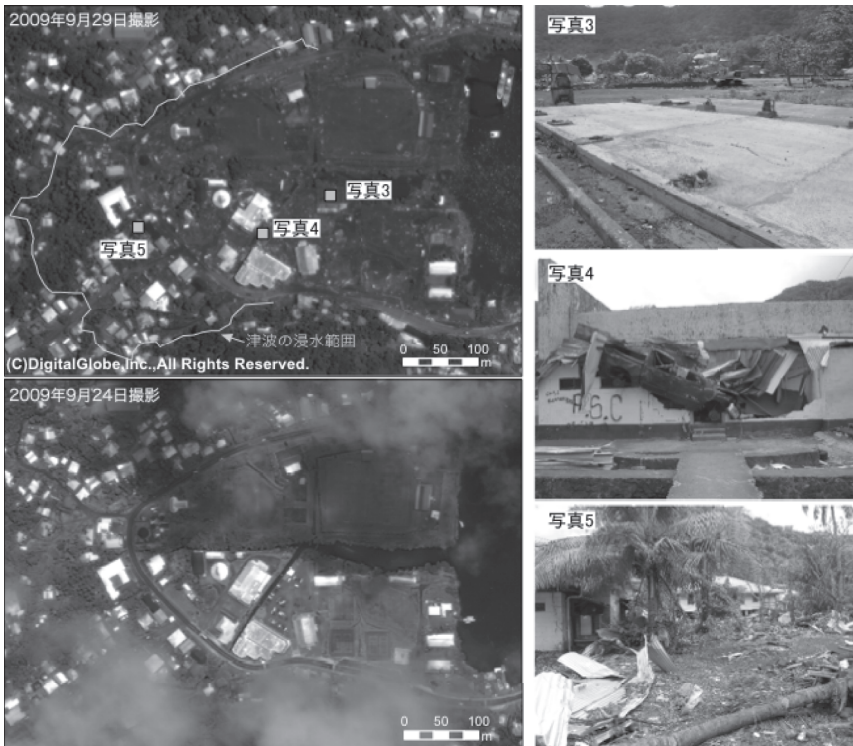


図-4 被災前後の Pago Pago を捉えた Quickbird 衛星画像 (上:被災前, 下:被災後) と被災状況。四角は現地写真の撮影位置 (写真 3: 津波によって流失した建物の跡, 写真 4: 津波で流された自動車と建物破壊の状況, 写真 5: 市街地内に残された瓦礫)。

襲後、下が津波来襲前)。津波の来襲前の衛星画像からは、緑の草地やグラウンド、バスケットボールコートがはっきり見えるが、津波後の画像を見ると津波の浸水により草が姿を消し、瓦礫や土砂に覆われていることが分かる。また、写真3に示す場所には建物があつたが、現地で流失していたことが確認できた。また写真4は衛星画像には写っていないが、津波によって流された自動車が建物の中にまで漂流していたことも確認できた。同様に、街中にも津波によって破壊されて流された建物の瓦礫が多く残されていた(写真5)。パゴパゴでの調査の結果、津波の高さは海面から5メートルにまで達し、街中には2~3メートルの厚さの海水が浸入したことが確認された。以下では、Pago Pagoにおける家屋被災状況をGPSカメラで撮影したものを建物被害判読の検証データ(Ground Truth)として利用する(例えば写真6)。

#### 4. 津波浸水域の抽出

##### 4.1 NDVI による抽出

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 は以下の式で定義される。

$$NDVI = \frac{DN_{NIR} - DN_R}{DN_{NIR} + DN_R} \quad (\text{但し, } -1 \leq NDVI \leq 1)$$

NDVI の特性として、水域では負の値をとることが知られている。ここでは、浸水域内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、閾値  $NDVI=0.098$  とした(図-5)。抽出した浸水域と現地調査から得られた瓦礫の漂着範囲の比較を図-6に示す。本研究では、浸水域内の建物のうち、127棟を対象として被害分類を試みる。



写真6 GPSカメラで撮影したPago Pago市街地の建物被害状況の例。



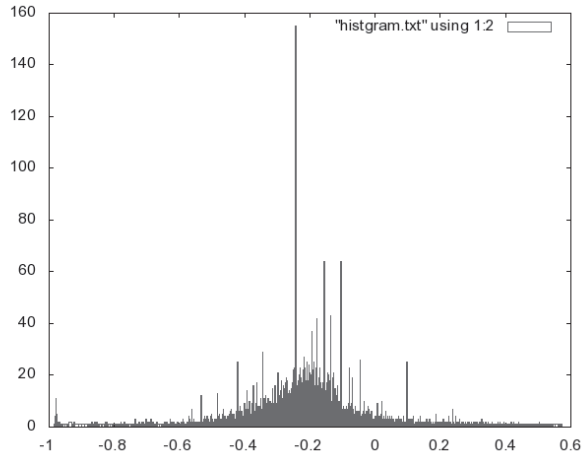


図-5 浸水域内のサンプルデータの基づく輝度値に関するヒストグラム。

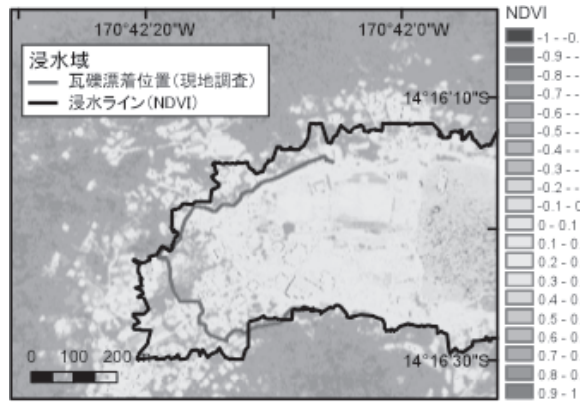


図-6 津波被災から4時間後の衛星画像から求めたNDVIと津波浸水域。

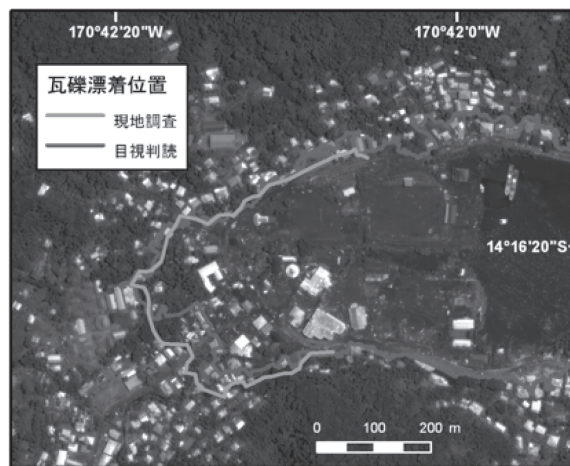


図-7 衛星画像判読および現地調査による瓦礫漂着ライン抽出結果。

#### 4.2 目視による抽出

次に、衛星画像のみを利用して目視による浸水ラインの抽出を行い、その精度の検証を試みる。目視による浸水ラインの抽出基準として、以下のような地点を浸水域と定める。

- ・津波堆積物が観測された地点
- ・植生が剥ぎ取られた地点
- ・瓦礫漂着地点
- ・損壊した構造物が観測された地点

以上の基準により抽出した津波浸水域と、現地調査から得られた瓦礫漂着範囲の比較を図-7に示す。概ね、整合性を確認する事ができた。

### 5. 衛星画像による建物被害分類

#### 5.1 建物被害分類手法

まず Miura et al. (2005) を参考に、衛星画像のみを用いた家屋被害判読を実施し、被害を4段階に分類した(表-1)。次に、Koshimura et al. (2009) による現地調査の結果(建物被害の悉皆調査)を用いて、(表-2)

の右下の表に示す6段階の基準により被害分類を行った。それぞれの具体例を、写真7および8に示す。また、現地調査結果との統合で得られた家屋被害把握結果を図-8に示す。

#### 5.2 建物被害分類の比較とその検証

画像のみの目視判読結果と現地調査による被害分類結果の比較を、表-3に示す。表中の赤い枠線は、衛星画像の判読と現地調査結果が整合する箇所である。また、現地調査の結果を真として、衛星画像判読による被害建物棟数の正解率を表の最下部に示す。正解率として、Survived(衛星画像からは無被害と判読、現地ではModerate以下)=100%、Major=0%、Collapsed=14.2%、Washed away=100%を得ることができた。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判明した。

衛星画像上での建物被害が、現地調査における建物被害よりも過大評価となる誤分類をPositive Error(PE)とし、その逆の事例を

表-1 衛星画像判読による建物被害分類基準

判読結果	判断基準
Survived	明確な形状変化なし
Major	明確な形状変化あり(小規模)
Collapsed	明確な形状変化あり(大規模)
Washed away	建物基礎以外は流失
Unknown	衛星画像から判定する事が不可

表-2 現地調査による建物被害分類基準

判読基準	判断基準
No damage	浸水なし
Only flooded	窓ガラスが割れる程度の被害
Moderate	壁や柱の一部が破壊される
Major	構造の一部・多くが破壊される
Collapsed	構造全体が破壊(修復不可)
Washed away	建物基礎以外は流失
Unknown	建物被害評価に不適切

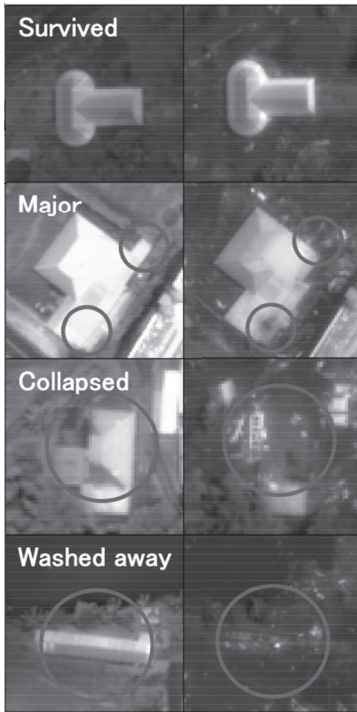


写真 7 衛星画像判読による建物被害の分類例

Negative Error (NE) とする。Major において PE 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。そして NE 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、側面からは壊滅的な被害を受けている場合であることが分かった。また、Collapsed において生ずる NE5 件は、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判断した場合である。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判明した。



写真 8 現地調査による建物被害の分類例

表-3 衛星画像判読による建物被害分類結果に対する、現地調査による建物被害分類結果の内訳

建物数		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		

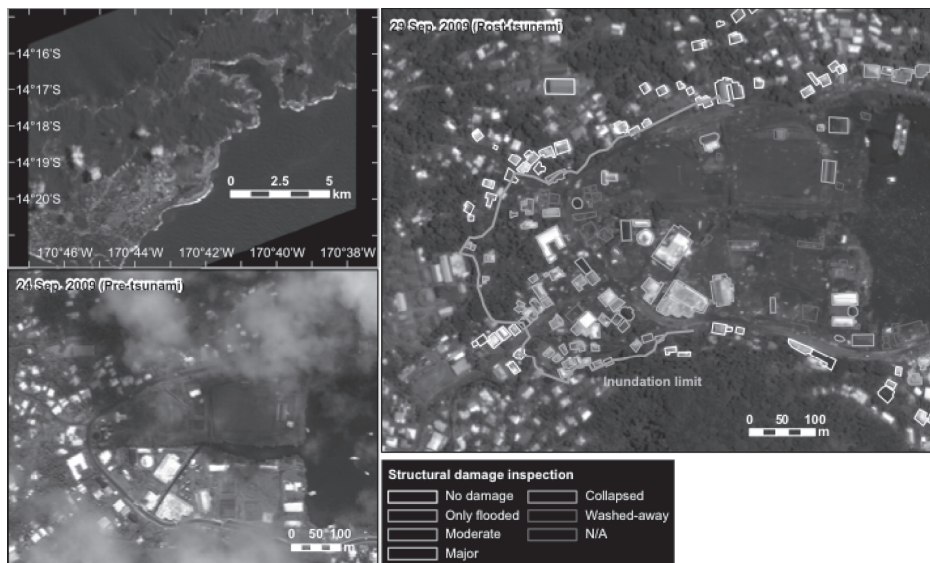


図-8 Pago Pago における家屋被害把握の結果

## 6. 結論

2009年サモア諸島沖地震津波を対象に、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)を入手し、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127棟を対象に、目視による家屋被害の判読を行った。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)に関する精度は100%であるが、倒壊、大破(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。今後、衛星画像による津波被災地解析を定量的に行う際に、本研究で得た結果を考慮した解析を行うことで、定量的被害把握の精度の向上が期待される。

## 謝辞

本研究の一部は、JST-JICA 地球規模課題対応国際科学技術協力事業 (インドネシアにおける地震火山の総合防災策, 代表: 佐竹健治) 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, 代表: 越村俊一) の補助を受けた。ここに記して謝意を表す。

## 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

萱場真太郎, 越村俊一, 村嶋陽一 (2008) : 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, 海岸工学論文集, 第 55 巻, pp.1456-1460

行谷佑一, 西村裕一, 越村俊一, 中村有吾, G. Fryer, A. Akapo, L. Kong, D. Vargo (2009) : 2009 年サモア諸島沖地震津波のアメリカ領サモアにおける緊急調査報告, 日本地震学会 2009 年秋季大会緊急ポスターセッション, X1-04.

Miura, H., A. C. Wijeyewickreme and S. Inoue (2005) : Evaluation 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

Koshimura, S. et al. (2009) : Field survey of the 2009 tsunami in American Samoa, Eos Trans. AGU, 90 (52), Fall Meet. Suppl., Abstract U23F-07, 2009