

## 建物回りの津波痕跡分布\*

—2009年サモア地震津波を例に—

秋田大学 松富英夫 埼玉大学 原田賢治

### 1. はじめに

静水圧（浮力を含む）や揚圧力を除き、流体力（せん断応力、抗力、揚力など）は最終的に流速へ結びつけられる。これは、流体力（流体現象）の基本が流速であることを物語っている。

津波氾濫流速の推定に津波石や津波堆積物を用いる方法が開発されている<sup>1)~4)</sup>。これらの方は、例えば、津波の初期波形を地震情報から間接的に推定する現行の方法に相当する。本来ならば、津波の初期波形は人工衛星などによる面的な直接測定に基づく推定が望ましい。これは津波氾濫流速でも同じである。ただし、津波石や津波堆積物を用いる方法は過去の津波、特に古津波には非常に有用である。

松富・首藤は建物の前・背面の津波痕跡から津波氾濫流速を推定する方法を提案した<sup>5)</sup>。現地調査や水理実験を重ね、その信頼性の向上が試みられている<sup>6)</sup>。しかし、建物回りの津波痕跡分布特性がよく判っておらず、①痕跡が引き波の影響を受けているかどうか（データの有効性の問題）、②一般に、目立たず、部分的に存在する痕跡から有用な現地調査データを得るには、建物回りのどこを測定すればよいか、などが判断できない状況にある。

本研究は、2009年サモア地震津波を例に、建物回りの津波痕跡分布の現地調査結果を報告する。その現地調査結果と水理実験結果<sup>5)</sup>の比較・検討、氾濫流速と建物被害の調査結果、氾濫流速や抗力からみた建物の造り別の被災程度の判断基準も報告する。

### 2. サモア地震津波の概要

2009年9月29日午前6時48分（日本時間30日午前2時48分），サモア諸島南方沖（15.559°S, 172.034°W）で $M_W=8.0$ の地震（深さ18 km, 傾斜角52°, 走向345°, すべり角-61°）とそれに伴う津波が発生した。証言によれば、米領サモアの南西岸における津波初動は引きで、Pago Pagoでは第1波が引ききらないうちに第2波が打ち寄せ、第2波が最大であった。Pago Pagoの検潮記録によれば、地震の20分後に小さな押しの初動が認められるが、これは目視では見過ごされた可能性が高い。米

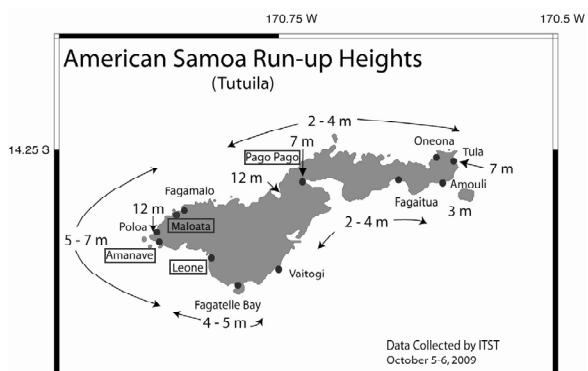


図-1 米領サモアにおける津波高分布

\* Tsunami Trace Distribution around Building — Examples in the 2009 Samoa Earthquake tsunami —  
by Hideo MATSUTOMI and Kenji HARADA

領サモアにおける津波高分布を図-1に示す<sup>7)</sup>。死者はサモア独立国で183人(人口約18.9万人)、米領サモアで34人(約6.0万人)、トンガで9人(約10.4万人)に達した。

### 3. 建物回りの津波痕跡分布

現地調査は2009年10月16日～18日(正味)にかけて米領サモアのTutuila島で行った。調査地域は島の西側から反時計回りにMaloata, Amanave, LeoneとPago Pagoで、図-1の四角で囲ったところである。

できるだけ平坦地にあり、孤立的な建物で、痕跡が引き波の影響を受けていない有意なデータを図-2～4に示す。建物は写真と平面図の両方で表示してある。図中の太い黒実線と矢印は各々浸水深と建物回りの痕跡分布から推定した津波の氾濫方向を示す。Pago Pagoは細長く曲がった湾の奥に位置する(図-1)。ここで調査した3軒の建物回りの痕跡は全て引き波の影響を受けており、有意なデータが得られなかった。その例を図-5に示す。

図-2にMaloataでの調査結果を示す。建物はほぼ平坦地(衛星写真中の白矢印線に沿って、勾配約+1/19の前浜に引き続く勾配約+1/52の緩斜面上)にあり、汀線からの距離約64m地点に孤立的に建っている。建物の平面形状はやや複雑(トの字形)であり、ここでは12点で痕跡



図-2 建物回りの津波痕跡分布 (Maloata)



図-3 建物回りの津波痕跡分布 (Amanave)



図-4 建物回りの津波痕跡分布 (Leone)



図-5 建物回りの津波痕跡分布 (Pago Pago)

の水位と水深を得た。建物がないとしたときの津波ピーク時の入射氾濫流速（エネルギー損失を考慮した補正後<sup>6)</sup>で、以下同じ）は 3.0 m/s、入射フルード数  $F_r$  は 0.79 と推定された。

図-3 に Amanave での調査結果を示す。建物は高さ約 1 m の浜崖に引き続く勾配約 +1/40 の緩斜面上にあり、汀線からの距離約 142 m 地点にやや密集して建っている。ここでは 6 点で痕跡の水位と水深を得た。津波ピーク時の入射氾濫流速は 1.7 m/s、入射フルード数は 0.42 と推定された。入射フルード数が小さいが、これは建物が緩斜面上で、氾濫域の奥部に建っているためと思われる。参考までに、これまでに現地調査で収集された補正後の入射フルード数は 0.42~1.2（補正前は 0.7~2.0）の範囲である。

図-4 に Leone での調査結果を示す。建物は平坦地（高さ約 1 m の浜崖に引き続く勾配約 +1/220 の緩斜面上）にあり、汀線からの距離約 109 m 地点にやや孤立的に建っている。今回の現地調査において最も理想的なデータであり、ここでは 7 点で痕跡の水位と水深を得た。津波ピーク時の入射氾濫流速は 2.5 m/s、入射フルード数は 0.72 と推定された。



図-6 地震と津波の両方に耐えた Putri 家の家

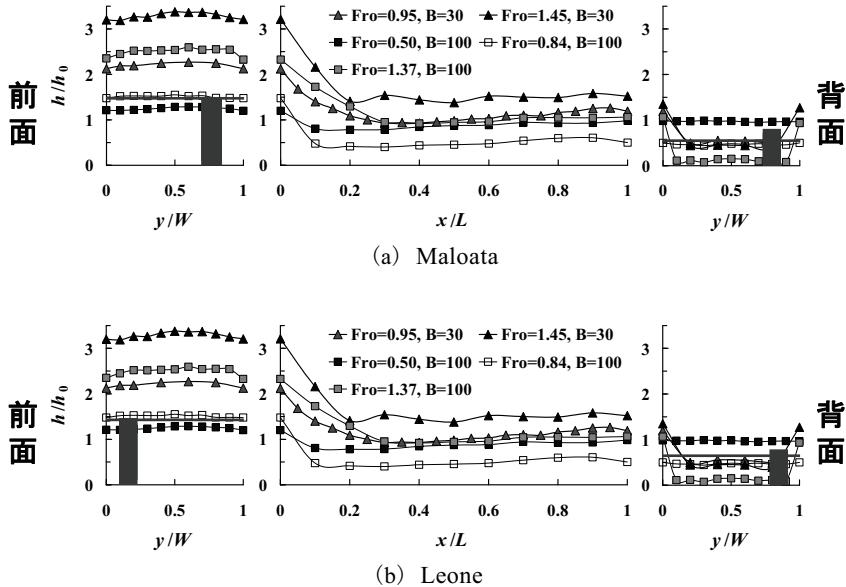


図-7 正四角柱回りの浸水深分布（実験）と現地調査データ（縦棒）の比較

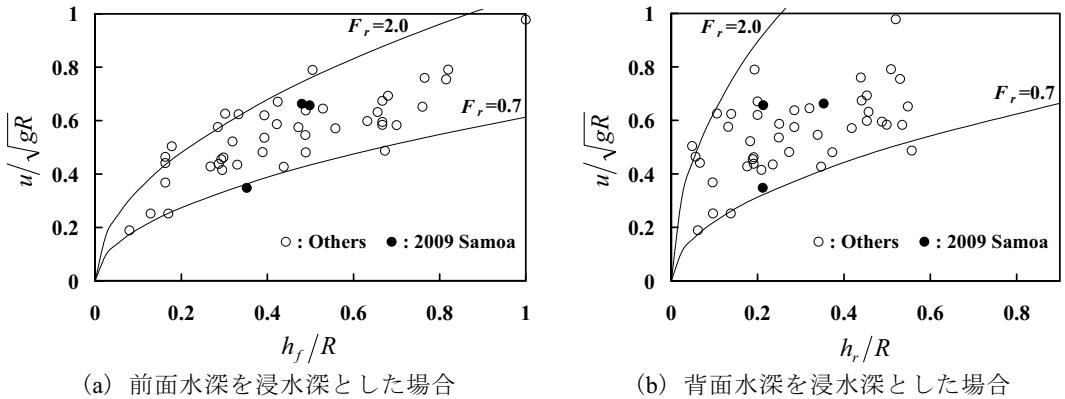


図-8 泛濫流速と浸水深の関係

上述した何れの場合も津波ピーク時の入射フルード数は1以下で、流れは常流である。これは、汀線から陸側へ離れた場合を対象とした氾濫流実験での結果<sup>7)</sup>や2004年インド洋津波時のBanda AcehのPutri家（図-6）でのもの（ $F_r \approx 0.92$ <sup>8)</sup>。本研究の方法では0.56）と整合している。

図-7(a)と(b)にMaloataとLeoneでの建物の前・背面痕跡水深（縦棒）と正四角柱模型での実験結果（自由曲線）<sup>6)</sup>の比較を示す。実験結果は定常流実験で得られたもので、凡例のBは水路幅(cm),  $F_{r0}$ は等流のフルード数である。また、hは水路底面から水際線までの高さ、 $h_0$ は等流水深、yは模型前面（左図）では模型左端、模型背面（右図）では模型右端を原点とする水平距離座標で、模型幅Wで無次元化されており、xは模型右側面に沿い、模型上流端を原点とする距離座標で、模型長さLで無次元化されている。ここで、無次元前面痕跡水深は入射

フルード数  $F_r$  ( $\approx F_{r0}$  と考える) に応じて実験結果 ( $B=100$  cm) のそれ (太い水平直線) と一致させ、それに基づいて、順次、等流水深と無次元背面痕跡水深を評価し、背面での無次元痕跡水深と実験結果のそれ (太い水平直線) を比較している。図から、無次元背面痕跡水深は定常流の実験結果より大きめであることが判る。この理由として、実際の氾濫流は非定常であり、窓や戸口を通して建物背面へ流れ込むことなどが考えられる。

#### 4. 泛濫流速と建物の被災程度

図-8 に補正前の氾濫流速  $u$  と前・背面浸水深  $h_f$ ,  $h_r$  の関係を示す。図中、 $g$  は重力加速度、 $R$  は前面浸水深の測点やその近傍での津波来襲時の海面からの津波高である。●が今回のサモア地震津波で得られたもので、氾濫流速はこれまでの変動範囲内であることが判る。

図-9 に前面浸水深と建物の被災程度の関係を示す。▲と●が今回のサモア地震津波で得られたもので、右横の数値は汀線からの距離である。このような表示法は洪水氾濫ですでに行われている<sup>9)</sup>。コンクリート・ブロック造の建物において貴重なデータが得られた(図-9 中の丸囲い)。地震で揺られ、汀線から 70 m 以上離れて、前面浸水深が 5.3 m に達したにもかかわらず、建物の被災程度は中破 (Partially Damaged)<sup>5)</sup>であった。

#### 5. 泛濫流速や抗力からみた建物の被災程度

段波先端部や氾濫流先端部 (サーボフロント) の衝突時を除けば、建物に働く流れ方向の流体力では抗力が支配的と言われている<sup>10)</sup>。現地調査で得られた浸水深を氾濫流速に換算し、建物の被災程度を氾濫流速  $u$  と抗力  $F_D$  で表現する試みが行われている<sup>11)</sup>。現地調査と実験の結果を考慮した氾濫流速に関する最新の知見<sup>6)</sup>を用いて、建物の造り別の被災程度の判断基準<sup>12)</sup>を再整理した結果を表-1 に示す。表中、氾濫流速は  $u = 0.66\sqrt{gh_f} = 1.2\sqrt{gh_r} \approx 1.2\sqrt{gh}$ 、抗力は  $F_D = 0.22\gamma_s C_D h_f^2 B$  で評価されている。ここで、 $h$  は建物への入射氾濫水深、 $\gamma_s$  は海水の単位体積重量 ( $=10.1$  kN/m<sup>3</sup>)、 $C_D$  は抗力係数、 $B$  は建物の幅で、氾濫流速は建物にとって最も危険 (大き) なもの、抗力係数は建物の形状と氾濫流の流向を考慮して 1.1~2.0 が採用されている。氾濫流速として最も小さなものが採用されれば、氾濫流速は表の値の 5 割強、抗力は約 3 割となる。建物の被災程度を氾濫流速や抗力で表現すれば、このように大きな幅を持つことになる。

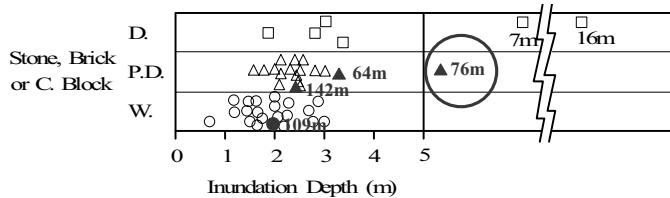


図-9 浸水深と建物の被災程度の関係

表-1 建物の造り別の被災程度の判断基準

建物の造り	中 破			大 破		
	$h_f$ (m)	$u$ (m/s)	$F_D$ (kN/m)	$h_f$ (m)	$u$ (m/s)	$F_D$ (kN/m)
鉄筋コンクリート造	—	—	—	8.0 以上	5.8 以上	155~281 以上
コンクリートブロック造	3.0	3.6	21.8~39.6	7.0	5.5	118~215
木 造	1.5	2.5	5.4~9.9	2.0	2.9	9.7~17.6
被災程度	ほとんどの柱は残っているが、壁の一部が破壊されている。			壁はもちろん、柱のかなりの部分が折れるか失われている。		

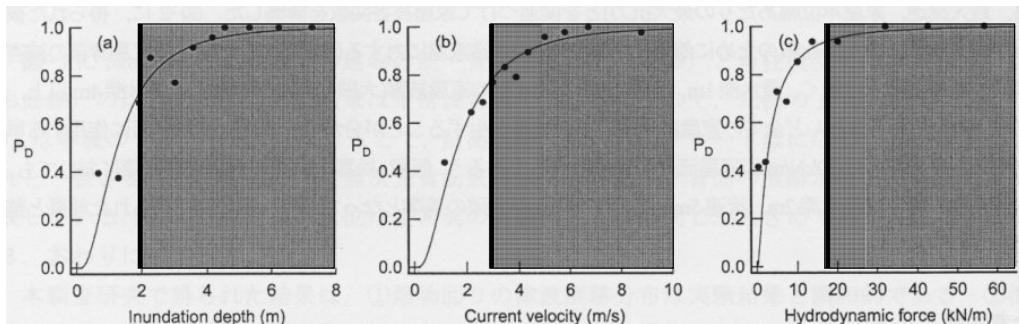


図-10 我が国の木造家屋に対する大破の新判断基準と越村の津波被害関数の比較

これは、浸水深が同じでも、氾濫流速は千差万別だからである。

図-10 に我が国の木造家屋に対する被災程度（大破）の新判断基準（表-1）と越村<sup>13)</sup>の津波被害関数  $P_D$  の比較を示す。図から、両者の対応が比較的よいことが判る。

## 6. おわりに

本調査研究で得られた主な結果は次の通りである。①建物回りの津波痕跡分布は実験結果と調和的である。②氾濫流速はこれまでの変動範囲内であった。③コンクリート・ブロック造の建物において貴重なデータが得られた。地震で揺られ、汀線から 70 m 以上離れて、前面浸水深が 5.3 m に達したにもかかわらず、建物の被災程度は中破であった。④最新の津波氾濫流速に関する知見を用いて、氾濫流速や抗力からみた建物の造り別の被災程度の判断基準を示した。

**謝辞：**本調査研究は JST-JICA 地球規模課題対応国際科学技術協力「インドネシアにおける地震火山の総合防災策」（研究代表 東京大学教授 佐竹健治）の一環として行われた。また、日本地震工学会「津波災害の実務的な軽減方策に関する研究委員会」から調査費の補助を受けた。ここに記して感謝の意を表する。

## 参考文献

- Nott, J.: Waves, coastal boulder deposits and the importance of the pre-transport setting, *Earth and Planetary Science Letters*, **210**, pp.269-276, 2003.
- Goto, K. et al.: Distribution, origin, and transport process of boulders deposited by the 2004 Indian Ocean tsunami at Pakarang Cape, Thailand, *Sedimentary Geology*, **202**, pp.821-837, 2007.
- Moore, A. L., McAdoo, B. G. and Ruffman, A.: Landward fining from multiple sources in a sand sheet deposited by the 1929 Grand Banks tsunami, Newfoundland, *Sedimentary Geology*, **200**, pp.336-346, 2007.
- Jaffe, B. E. and Gelfenbaum, G.: A simple model for calculating tsunami flow speed from tsunami deposits, *Sedimentary Geology*, **200**, pp.347-361, 2007.
- 松富英夫・首藤伸夫：津波の浸水深、流速と家屋被害、海岸工学論文集、第 41 卷、pp.246-250, 1994.
- 岡本憲助・松富英夫：津波氾濫流速の簡易推定法に関する基礎的研究、海岸工学論文集、第 56 卷、pp.296-300, 2009.
- ITST から提供を受ける。
- 榎山 勉・松富英夫・都司嘉宣・村上嘉謙：ビデオ画像による津波氾濫流速と現地調査による推定値との比較、津波工学研究報告、第 22 号、pp.111-117, 2005.
- 土木学会平成 16 年 7 月北陸豪雨災害緊急調査団：破堤氾濫と家屋被害、平成 16 年 7 月北陸豪雨災害調査報告書、pp.67-72, 2005.
- 松富英夫：碎波段波衝突時の圧力分布と全波力、海岸工学論文集、第 38 卷、pp.626-630, 1991.
- 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 卷、pp.381-385, 2000.
- 松富英夫：最近の沿岸・陸上津波における課題、土木学会 2009 年度（第 45 回）水工学に関する夏期研修会講義集、B コース、pp.B-3-1-B-3-20, 2009.
- 越村俊一：我が国の木造家屋に対する津波被害関数 —1993 年北海道南西沖地震津波の事例から—、東北地域災害科学研究、第 46 卷、2010. (印刷中)