

建物周りの津波痕跡分布とその活用 - 2009年サモア地震津波を例に -

Tsunami-trace Distribution around Buildings and Its Practical Use - Examples in the 2009 Samoa Earthquake Tsunami -

松富英夫¹・原田賢治²

Hideo MATSUTOMI and Kenji HARADA

Examples of tsunami-trace distribution around building in the 2009 Samoa Earthquake tsunami are presented, and compared with those by laboratory experiments. It is confirmed through the comparison that the tsunami-trace distributions around buildings by the field survey are consistent with those by the laboratory experiments and involve information such as an inundation flow direction, velocity and force at the maximum incident inundation depth, and strength of buildings. Variation coefficient of inundation flow velocity caused by a measured point difference at the front and the back of building is also examined. In addition, based on a recent knowledge of inundation flow velocity, the existing judgment criterion for the degree of damage to buildings is re-examined, and a newly proposed judgment criterion is confirmed to be consistent with Koshimura *et al.*'s tsunami fragility curve for Japanese wooden buildings.

1. はじめに

静水圧や揚圧力を除き、流体力（摩擦力、抗力、揚力など）は最終的に流速で表現される。これは、流体力の本質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ある（例えば、Nott, 2003；Mooreら, 2007；Jaffe・Gelfenbaum, 2007）。これらは間接的な方法であり、できるだけ直接的なものが望まれる。ただし、これらは過去の津波、特に古津波に非常に有用である。

松富・首藤（1994）は建物前・背面の津波痕跡から津波氾濫流速を推定する簡便法を提案した。現地調査や水理実験を積み重ね、その信頼性の向上を図っている（岡本・松富, 2009）。しかし、①実際の建物周りの津波痕跡分布は検討されたことがなく、②一般に目立たず、部分的に存在する痕跡から有意な津波氾濫流速を推定するには、建物周りのどこを測定すればよいか、③痕跡が引き波や反射流の影響を受けていないかどうか（データの有効性）の判断基準、といった課題が残されている。

本研究は、まず2009年サモア地震津波を例に、建物周りの津波痕跡分布の現地調査結果を示す。次に、その結果と実験結果（岡本・松富, 2009）の比較・検討を行う。建物前・背面の痕跡測定位置の違いによる推定氾濫流速の変動係数、痕跡が引き波や反射流の影響を受けていないかどうかの判断基準や建物被害の調査結果も示す。さ

らに、最新の氾濫流速推定法（岡本・松富, 2009）を用いて、既存の氾濫流速や抗力による建物の造り別の被災程度判断基準（飯塚・松富, 2000）を再検討し、新判断基準の妥当性をKoshimuraら（2009）の日本の木造家屋に対する津波被害関数との比較を通して検討する。

2. サモア地震津波の概要

2009年9月29日06時48分（日本時間30日02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18km, 傾斜角52°, 走向345°, すべり角61°）に伴う津波が発生した（USGS, 2009）。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波が最高水位となった。Pago Pagoの検潮記録には地震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よう。米領サモアにおける津波高分布を図-1に示す。死者は、2009年12月18日現在、サモア独立国で183人（人口18.9万人）、米領サモアで34人（6.0万人）、トンガで9人（10.4万人）に達した。

3. 建物周りの津波痕跡分布

現地調査は2009年10月16～18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周りにMaloata, Amanave, LeoneとPago Pagoで、図-1において四角で地域名を囲ったところである。

図-2～4にできるだけ平坦地の孤立的な建物で、痕跡が引き波や反射流の影響を受けていないデータ（この判定条件は後述）を示す。建物は写真と平面図の両方で表

1 正会員 工博 秋田大学工学資源学部地域防災力研究センター長
2 正会員 博(工) 埼玉大学大学院理工学研究科助教

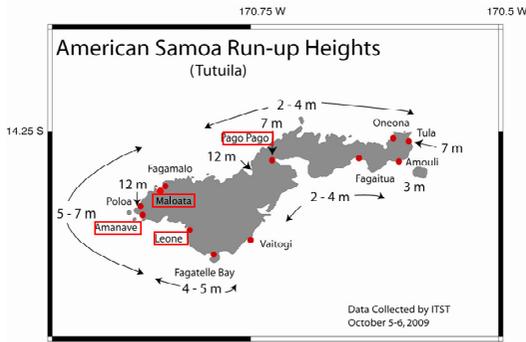


図-1 米領サモアにおける津波高分布 (ITST 提供)

示してある。図中の太い実線と矢印は各々浸水深と建物周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軒の建物周りの痕跡は全て引き波や反射流の影響を受けており、有意なデータが得られなかった。その一例を図-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(衛星写真中の矢印線に沿って、勾配+1/19の前浜に引き続く勾配+1/52の緩斜面上)にあり、汀線から64m地点に孤立的に建っている。建物の平面形状は複雑で、ここでは12点で痕跡の水位と浸水深を得た。建物がなかったときの津波ピーク時の入射氾濫流速 u (後述の式

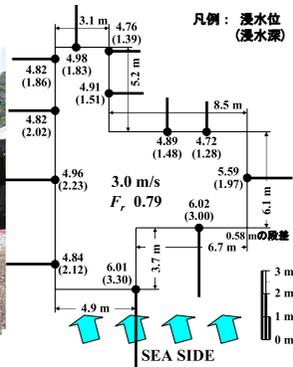


図-2 建物周りの津波痕跡分布 (Maloata)

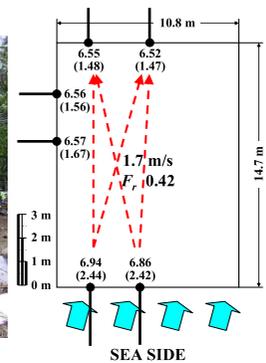


図-3 建物周りの津波痕跡分布 (Amanave. 破線の矢印は建物前・背面の浸水深の組合せ例を示す)

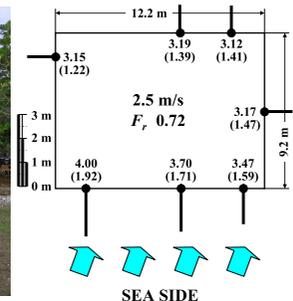


図-4 建物周りの津波痕跡分布 (Leone)



図-5 建物周りの津波痕跡分布 (Pago Pago)

(1) (岡本・松富, 2009) で評価。以下も同じ) は3.0 m/s, 入射フルード数 $F_r (=u/\sqrt{gh_f})$ は0.79と推定された。ここで, g は重力加速度, h_f は建物の背面浸水深である。

図-3に Amanaveでの調査結果を示す。建物は高さ約1 mの浜崖に引き続き勾配+1/40の緩斜面上にあり, 汀線から142m地点にやや密集して建っている。ここでは6点で痕跡の水位と浸水深を得た。津波ピーク時の入射氾濫流速は1.7m/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, 氾濫域の奥域に建っているためである。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1mの浜崖に引き続き勾配+1/220の緩斜面上) にあり, 汀線から109m地点にやや孤立的に建っている。今回の調査において最も理想的なデータであり, ここでは7点で痕跡の水位と浸水深を得た。津波ピーク時の入射氾濫流速は2.5m/s, 入射フルード数は0.72と推定された。

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, 汀線から陸側へある程度離れた場合を対象とした氾濫流実験の結果 (岡本・松富, 2009) や2004年インド洋津波における Banda Aceh の Putri 家 (図-6) でのもの ($F_r \cong 0.92$ (榊山ら, 2005)。本研究の評価方法では0.56) と整合する。

図-7 (a)~(c) に Maloata, Amanave 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) (岡本・松富, 2009) の比較を示す。実験結果は定常流で得られたもので, 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水深, 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。図において, 実津波の無次元前面痕跡水深は, 入射フルード数 $F_r (=F_{r0}$ と考える) を考慮しながら実験結果から線形補間して決めたもの (図面左側の太い水平直線) と一致させている。これに基づいて実津波の等流水深と無次元背面痕跡水深を順次評価し, 実験のそれ (図面右側の太い水平直線) と比較している。図から, 実津波の無次元背面痕跡水深は実験のもの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後へ流れ込むことが考えられる。

4. 氾濫流速の変動係数と建物の被災程度

図-8に補正前の氾濫流速 u と建物前・背面浸水深 h_f, h_r の関係を示す。図中, 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と同傾向であることが判る。

図-2~4の現地調査データを用いて, 建物前・背面での痕跡測定位置の違いによる推定氾濫流速の変動係数 (=標準偏差/平均) を検討する。図の順に 10 (=2×5), 4 (=2×2), 6 (=3×2) 通りの推定氾濫流速が考えられ (図-3中の破線参照), 変動係数は順に0.043, 0.059, 0.20である。ただし, 氾濫流速は次式で評価している。

$$u = 0.6\sqrt{2g(h_f - h_r)} \dots\dots\dots (1)$$

建物に対する斜め入射の度合 (各図下部の矢印の向き参照) が強いほど, 変動係数は大きい傾向にあると言える。

図-8のデータはできるだけ平坦地の孤立的な建物で得たものである。よって, 図中の下限曲線は痕跡が引き波



図-6 地震と津波の両方に耐えた Putri 家の建物

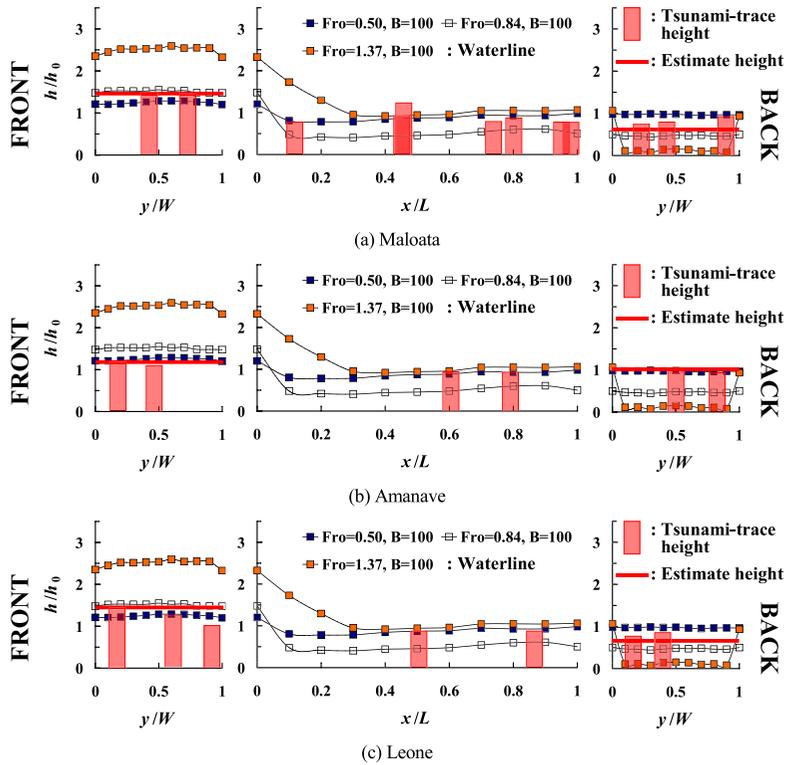


図-7 正四角柱周りの浸水深分布 (自由曲線) と現地調査データ (縦棒) の比較

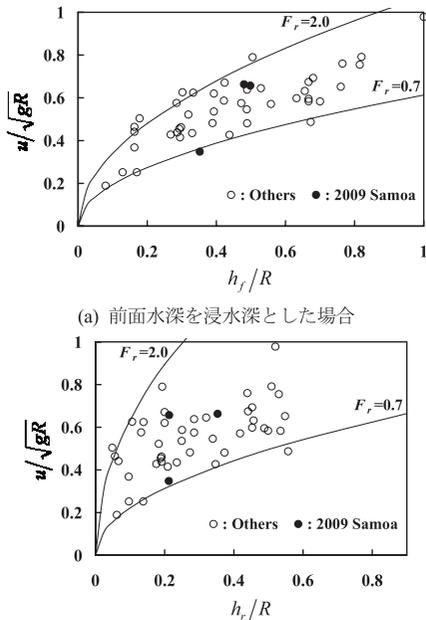


図-8 氾濫流速と浸水深の関係

2009) と補正後の入射フルード数の下限値 (上述) から、その判断基準として $h_r/h_t > 1.3$ かつ $F_r > 0.42$ が得られる。

図-9に前面浸水深と建物の被災程度の関係を示す (松富, 2009)．▲ (P. D., 中破) と● (W., 小破) が今回のサモア地震津波で得られたもので、これらの右横や右下などの数値は汀線からの距離である。このような浸水深と建物の位置による被災程度の表示は洪水氾濫で行われている (松富, 2005)．今回の調査ではコンクリート・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80m程度で、前面浸水深が5.3mに達したにもかかわらず、建物の被災程度は中破 (松富・首藤, 1994) であった。

5. 建物の被災程度の新判断基準

段波先端部や氾濫流先端部の衝突時を除けば、建物に働く流れ方向の流体力では抗力が支配的である (松富, 1991)．現地調査で得られた浸水深を氾濫流速に換算し、

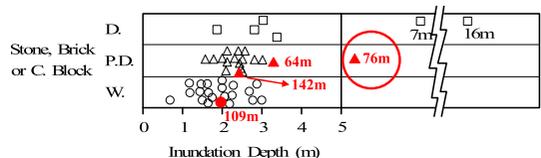


図-9 浸水深と建物の被災程度の関係

や反射流の影響を受けていないかどうかの判断基準に使える．図-8 (a) と (b) の両下限曲線の式 (岡本・松富,

建物の被災程度を氾濫流速 u や抗力 F_D で表現する試みが
行われている(飯塚・松富, 2000). 現地調査と実験結
果を考慮した最新の氾濫流速推定法(岡本・松富, 2009)
を用いて, 建物の造り別の被災程度の判断基準(松富,
2009)を再整理した結果を表-1に示す. 表中, 氾濫流速
は $u=0.66\sqrt{gh_f}$, 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, γ_s は海水の単位体積重量(=10.1kN/m³),
 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(大きい)なもの, 抗力係数は建物の平面形状
と氾濫流の流向を考慮して1.1~2.0が採用されている.

図-10に木造家屋に対する被災程度(大破)の新判断
基準(表-1)と我が国の木造家屋に対するKoshimuraら
(2009)の津波被害関数 P_D の比較を示す. 図から, 両者
の対応はよく, 浸水深と氾濫流速, 流体力の対応度にも
矛盾がないことが判る.

6. おわりに

本研究で得られた主な結果は次の通りである.

- ①建物周りの津波痕跡分布は実験結果と調和的である.
- ②実津波における痕跡測定位置の違いによる推定氾濫流速
の変動係数を示した. その値は0.043~0.20で, 建物に
対する斜め入射の度合いが強いほど, 大きい傾向にある.
- ③痕跡が引き波や反射流の影響を受けていないかどうか
の判断基準として, $h_f/h_r > 1.3$ かつ $F_D > 0.42$ を得た.
- ④最新の津波氾濫流速推定法を用いて, 氾濫流速や抗力

による建物の造り別の被災程度の新判断基準を示した.
⑤我が国の木造家屋に対する新判断基準とKoshimuraら
の津波被害関数の対応はよい.

謝辞: 本研究は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」
(代表 東大教授 佐竹健治)の一環として行われた.
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」から補助を受けた. 記して謝意を表する.

参考文献

飯塚秀則・松富英夫(2000): 津波氾濫流の被害想定, 海岸工
学論文集, 第47巻, pp. 381-385.
岡本憲助・松富英夫(2009): 津波氾濫流速の簡易推定法に関
する基礎的研究, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol.
B2-65, No. 1, pp. 296-300.
榊山 勉・松富英夫・都司嘉宣・村上嘉謙(2005): 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.
松富英夫(1991): 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巻, pp. 626-630.
松富英夫・首藤伸夫(1994): 津波の浸水深, 流速と家屋被害,
海岸工学論文集, 第41巻, pp. 246-250.
松富英夫(2005): 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, 土木学会, pp. 67-72.
松富英夫(2009): 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.
Jaffe, B. E. and G. Gelfenbaum(2007): A simple model for
calculating tsunami flow speed from tsunami deposits,
Sedimentary Geology, 200, pp. 347-361.
Koshimura, S., M. Matsuoka and S. Kayaba(2009): Tsunami hazard
and structural damage inferred from the numerical model, aerial
photos and SAR imageries, Proc. of the 7th Intl. Workshop on
Remote Sensing for Post Disaster Response (CD-ROM).
Moore, A. L., B. G. McAdoo and A. Ruffman(2007): Landward
fining from multiple sources in a sand sheet deposited by the
1929 Grand Banks tsunami, Newfoundland, Sedimentary
Geology, 200, pp. 336-346.
Nott, J.(2003): Waves, coastal boulder deposits and the importance
of the pre-transport setting, Earth and Planetary Science Letters,
210, pp. 269-276.
USGS: Magnitude 8.1 -Samoa Islands Region, <http://earthquake.usg.gov/eqcenter/eqinthenews/2009/us2009mdbi/>, 参照2009-10-1.

表-1 建物の造り別の被災程度の新判断基準

建物の造り	中破 (P. D.)			大破 (D.)		
	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.		

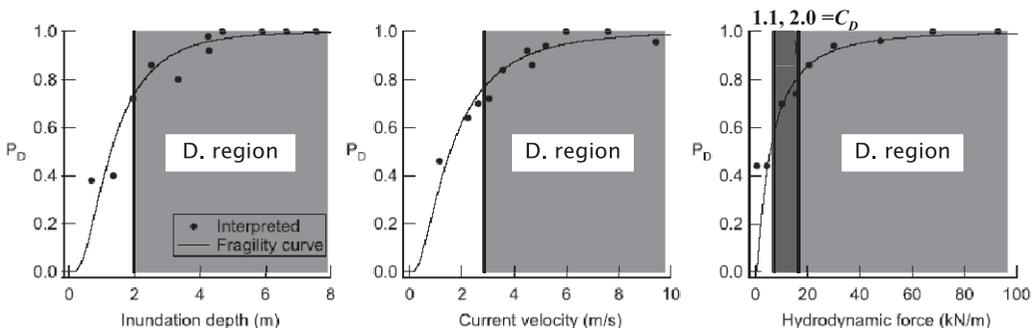


図-10 我が国の木造家屋に対する大破 (D.) の新判断基準とKoshimuraら (2009) の津波被害関数 P_D の比較