

1998年パプアニューギニア津波の陸上での流勢と被害

松 富 英 夫* ・ 河 田 恵 昭** ・ 首 藤 伸 夫*** ・ 都 司 嘉 宣****
藤 間 功 司***** ・ 今 村 文 彦***** ・ 松 山 昌 史*****
高 橋 智 幸***** ・ 牧 紀 男***** ・ 韓 世 燮*****

1. ま え が き

1998年7月17日18時49分(日本時間17時49分),
パプアニューギニア・西セピック州北岸のAitape沖約
60 km (2.78°S, 142.57°E), 深さ約15 kmを震源とした
 $M_w=7.1$ の海底地震により大津波が発生した(地震パラ
メータはHarvard大学による推定).ただし,津波主要部
の発生因はまだ特定されていない.この津波は震源域正
面に位置するSissano Lagoon海岸を直撃し,Lagoonの
右岸砂嘴上で最大津波高14.8 mを記録した.同年7月
31日現在(The Independent, 1998),この津波による死
者は確認されただけで2205人に達し,他に500人以上の
行方不明者,476人の負傷者が出ている(表-1参照).

著者らは日本・米国・オーストラリア・ニュージーラ
ンド・パプアニューギニアを中心とした国際津波調査団を
組織し,同年8月3日~6日(正味)と9月30日~10月
3日(正味)の2回,現地調査を行った.本研究はこれ
らの調査で判明したことの一部,すなわち砂嘴上での津
波の流勢や水理特性,諸被害などを報告するものである.

2. 現 地 調 査

調査団は日本主体と米国主体の2チームに別れた.日
本主体チームの調査域は西のSissanoからWarapu,
Arop, Malolを経て,東のAitapeまでの延長約35 kmの
海岸である.ただし,内陸方向の調査範囲は,物理的な
制約(時間,道路,移動手段など)や安全性(蚊やワニ
など)から,一部を除いて汀線から100~200 m程度まで
である.調査域の概略(太線)と震央を図-1に示す.

特徴的な陸上地形がWarapuからMalolの西部にか
けて認められ,これらの地域では海岸線の直ぐ背後が

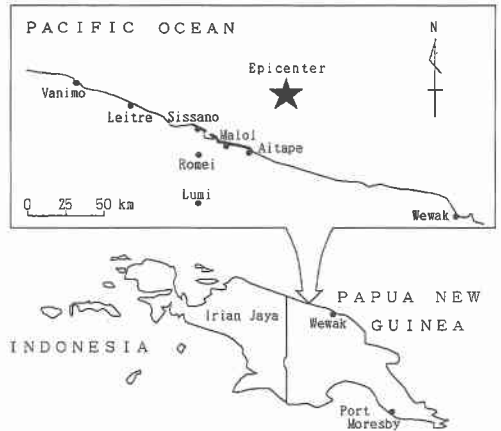


図-1 津波調査域と震央



図-2 Malolの西部からWarapuにかけての海岸地形

Lagoonや低湿地といった1山(海側がやや急な非対称
形)の“こぶ地形”となっている.これら地域の斜め空
中写真を図-2に示す.左下がMalolの西部で,右上が
Warapuである.左側の細長い水溜まりは,水はけが悪い
ためか,津波来襲後に形成されたものである.

調査項目は,①地震の状況,②津波の来襲状況,③海
岸沿いの津波高分布,④こぶ地形上の津波高と浸水深の
平面分布,⑤木造家屋の前面と背面での浸水深,⑥浸水
域での家屋諸元の平均像,被災条件と被害程度,⑦砂地
盤の侵食深,粒径と侵食域近傍での浸水深,⑧余震観測
である.本研究では主に③~⑦の調査結果を報告する.

3. 津波の特徴

地震観測記録によると(河田ら,1999),大きな地震は
2回で(証言では3回が多い),その時間間隔は20分であ

* 正会員 工博 秋田大学助教授 工学資源学部
** 正会員 工博 京都大学教授 防災研究所
*** 正会員 工博 岩手県立大学教授 総合政策学部
**** 理博 東京大学助教授 地震研究所
***** 正会員 工博 防衛大学校助教授 土木工学教室
***** 正会員 工博 東北大学助教授 大学院工学研究科
***** 正会員 工修 (財)電力中央研究所
***** 正会員 工博 京都大学助手 防災研究所
***** 工博 理化学研究所
***** 韓国気象庁

表一 各地域の人的被害

	Dead	Missing	Injured	Pop.	Rate (%)
Sissano	170	28	82	1587	10.7
Warapu	1071	—	389	1395	76.8
Arop 1 & 2	862	—	—	1644	52.4
Malol	95	—	5	892	10.7
Aindrin	0	—	—	510	—
Lambu	0	—	—	293	—
Teles	5	—	—	573	0.9
Yakoi	2	—	—	372	0.5
Total	2205	28	476	7266	30.3

る。そして、証言による津波は2回目の地震後数分以内に引き波初動で来襲し、1波目の周期は10分程度である。津波は3波来襲したが、何波目が最大であったかは場所により異なる。最大津波高はSissano Lagoonの右岸砂嘴上で記録され、14.8 mである。海岸沿いの津波高分布の詳細は河田ら(1999)を参照されたい。本津波の特徴を列挙すれば、次のようである。

①地震規模の割に津波が非常に大きい広い意味の“津波地震”と考えられる。ただし、噴砂現象が見られ、Malolでは気象庁震度で4程度を感じており、ヌルヌル型の津波地震ではない。

②平滑な砂浜海岸の狭い範囲(延長30 km程度)に集中し、こぶ地形を越流する形態の津波である。

③地震以外の津波発生源(例えば、地震に伴う海底地滑り)が関与している可能性が高い津波である。

④死者が非常に多い津波である(表一)。被災地全体の死亡率は30%強、Warapuでは実に77%、Aropでも52%に達している。ただし、人口は1990年調査のものである。そして、こぶ地形が、通常の地形に比べて、津波被害を大きくするかどうかを問いかける津波でもある。

⑤低平地での津波防災の在り方を問う津波である。本地域の地盤高は高い所で3 m程度で、避難場所がない。

⑥防災教育の重要性が指摘できる津波である。住民は地震・津波に関して無知なため、余震は火山の前兆現象ではないか、津波がまた来襲するのではないかとといった恐れをいだき続けている。歴史的には、1907年の地震でSissano Lagoonが形成され、津波も来襲したが、伝承されていない。

4. 津波高と浸水深の平面分布

4.1 実測

津波高、浸水深の平面分布と推定陸上流速を図-3に示す。図中、○が津波高、縦棒が浸水深または推定陸上流速の値域である。津波高は来襲時の潮位から補正してある。本海域のこの時期の潮差は65 cm程度で、来襲時はほぼ低潮(低潮から約+10 cm)であった。また、■は松富ら(1993, 1994, 1995, 1996)がこれまでに推定した最大陸上流速、▲はこれまでに報告されている推定最大陸上流速(首藤, 1988)である。WarapuからMalol

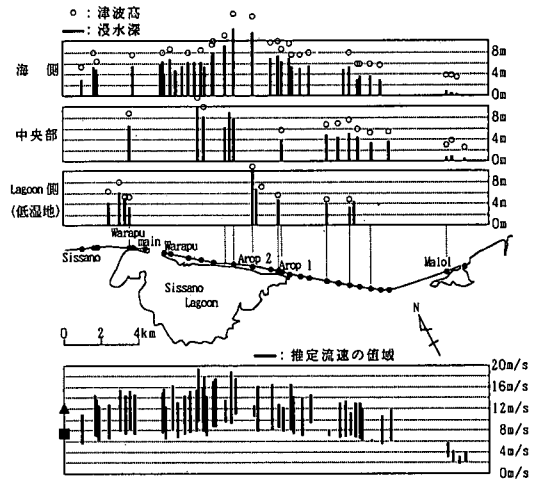


図-3 津波高、浸水深の平面分布と推定陸上流速

の西部にかけての海側、中央部、Lagoon(低湿地)側の区分は、海側汀線から砂嘴などの頂部をやや越えた辺りまでを海側、頂部の背後で洗掘された所からLagoonの水際までをLagoon側、残りを中央部と思えばよい。陸上流速の推定法については後述する。

津波高と浸水深の平面分布から、①Arop2の西側で津波が最も大きく、津波高は12 m以上、浸水深は10 m以上に達した(ここには住人がほとんどおらず、不幸中の幸いであった)こと、②全体的に見れば、津波高と浸水深は海側で大きく、Lagoon側で小さいことが判る。

津波は周期の長い波であるから、波峰が砂嘴上を通過する時は準定常流と見なせる(松富ら, 1998)。よって、上記②の平面分布をも考慮すると、図-4のような流況が考えられ、砂嘴上で限界流が生じたと推定される。

そこで、海側の頂部辺りで限界水深が生じたとして、海側の浸水深を用いて限界流速を評価したものが推定陸上流速の下限値である。海側の浸水深が測定されていない場合は、海側により近い浸水深を限界水深としている。

上限値は次のどちらか一方の方法で評価している。1つは砂嘴横断線上で複数箇所の浸水深が測定されている場合で、流量連続条件を用いて評価する方法である。もう1つは、平坦地に適用される経験的な最大陸上流速推定式(松富ら, 1998)を用いて評価する方法である。後者は限界流速の約2倍の流速を与える。図中、推定陸上流速の値域が狭いものは前者で評価したもので(図-3中、縦の点線が施された地点)、全横断線49本中、10本がそれに該当する。これら横断線のLagoon側でのフルード数は1.04~2.04、平均で1.59である。図から、①Lagoonの右岸砂嘴上で陸上流速が12 m/s以上に達した所があること、②陸上流速が6 m/s以上に達した海岸線の延長は16 km以上に及んだことが判る。

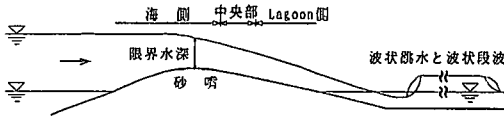


図-4 砂嘴周辺での推定流況

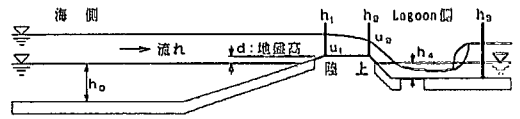


図-6 計測機器の配置と諸記号の定義

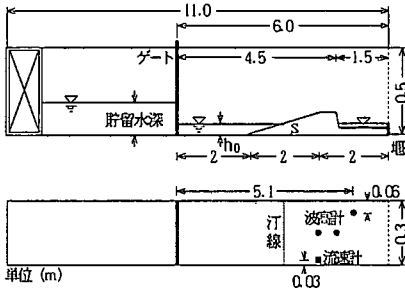


図-5 実験装置の概略

表-2 砂嘴を越える流れの実験結果 (単位: cm)

Run No.	貯留水深	地盤高	h_0	h_1	h_2	h_3	h_4	F_{r1}	F_{r2}
1	10	0.2	4.8	3.01	2.19	1.78	1.8	0.75	1.20
2	11	〃	〃	3.56	2.38	2.17	〃	0.70	1.29
3	12	〃	〃	4.12	2.94	2.57	〃	0.71	1.18
4	13	〃	〃	4.58	3.14	2.76	〃	0.69	1.22
5	14	〃	〃	5.25	3.09	3.16	〃	0.72	1.60
6	15	〃	〃	5.79	3.55	3.36	〃	0.70	1.45
7	10	1.0	4.0	3.10	1.95	—	1.0	0.65	1.30
8	11	〃	〃	4.10	2.43	—	〃	0.59	1.29
9	12	〃	〃	4.13	2.72	—	〃	0.66	1.23
10	13	〃	〃	5.27	3.21	—	〃	0.63	1.31
11	14	〃	〃	5.06	3.21	—	〃	0.66	1.30
12	15	〃	〃	5.78	3.31	—	〃	0.68	1.56

実測の最大津波高地点の氾濫に最もよく対応している。

表から、①砂嘴上で限界流が生じること、②跳水高は Lagoon 側の浸水深より小さいが、同程度となることが判る。海側と Lagoon 側のフルード数が推定や実測のものより小さく、平均の浸水深比は実測のものより大きい。これは、実験での陸上地形や海側の浸水深測定位置などが実際とやや異なっていることによると思われる。また、Lagoon に流入した氾濫流は跳水和段波を形成すること、地盤高、浸水深や Lagoon 部の水深次第で、跳水の時間波形が大きく異なり、微妙であることを確認した。

4.3 既往津波との比較

今回の最大津波高は津波が比較的容易に透過できる Lagoon の砂嘴上で記録された。この状況は 1983 年日本海中部地震津波 (水沢川河口北の急斜面で津波高約 15 m, 河口部の大きく氾濫した所で約 7 m), 1993 年北海道南西沖地震津波 (奥尻島濠内の北で津波高約 24 m, 隣接した南西岸で約 15 m) や 1994 年東ジャワ地震津波 (Bandialit の急斜面で津波高約 11 m, 隣接の大きく氾濫した所で約 6 m) の場合と異なる。仮に、砂嘴の地盤高を 2 m, 浸水深を 10 m, 流速を 10 m/s, 砂嘴上に急斜面があるとして、ベルヌーイの定理を用いて津波高を評価すると約 17 m となり、急斜面がない場合の 1.4 倍程度になる。これは定常流としての議論であって、実際は上述した過去の事例のように 1.6 (24/15)~2.1 (15/7) 倍程度になり得て、津波高は 20 m 程度に達するものと思われる。

5. 平坦地での陸上流速

図-7(a) と (b) に浸水深 h と陸上流速 u の関係を示す。●が本津波で得られたデータ、○が過去の津波 (1992 年フローレス島地震津波, 1993 年北海道南西沖地震津波, 1994 年東ジャワ地震津波, 1996 年イリアンジャヤ地

Lagoon 側の流れは射流と推定され、Lagoon には浅いけれども水が存在する。よって、上述した Lagoon 側でのフルード数から推して、Lagoon の水際近くで波状跳水が、波先端部で波状段波が形成されたものと思われる。砂嘴周辺での推定流況を図-4 に示す。

4.2 再現実験

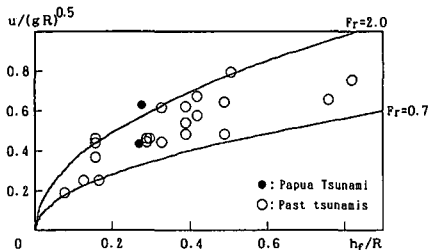
推定流況の確認などのため、津波氾濫の再現実験を行った。その津波氾濫はゲート急開流れで模擬した。ピーク時の津波氾濫をこの流れで模擬してよいことは確認済みである (松富ら, 1998)。実験装置の概略を図-5 に示す。貯水長が 5 m, 一様水深部、一様勾配斜面部 (勾配 $s=1/40$) が 2 m, 平坦な陸上部が 0.5 m, 一様水深の Lagoon 部が 1.5 m で、全長が 11 m の両面ガラス張り鋼製矩形水路である。陸上部と Lagoon 部は勾配 1/2 の斜面で接続し、沖の一様水深部と Lagoon 部の静水面位は同じとする。水路下流端には Lagoon 部の水深調節用の堰のみが存在し、氾濫流はそこを越流できる。一様勾配斜面部、陸上部と Lagoon 部は塩化ビニール樹脂製である。

浸水深の測定は容量式波高計 (計測技研製)、陸上流速 u の測定 (1 点法) はプロペラ流速計 (直径 3 mm, 中村製作所製) で行った。計測機器の配置や諸記号の定義を図-6 に示す。

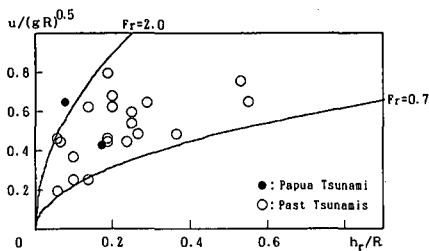
実験ケースと結果を表-2 に示す。縮尺は 1/200 を想定しており、本条件は周期 7.8~9.5 分の津波に相当する (松富ら, 1998)。地盤高 d は静水面からの高さ、 h_1 と h_2 は海側と Lagoon 側の最大浸水深、 h_3 は静水面からの最大跳水高さで、フルード数 F_r の添字は浸水深の測定場所と対応しており、各浸水深と同位置・同時刻の陸上流速を用いて評価している。ただし、 F_{r2} は実測と同じ方法で推定している。- はデータの未測得を示す。Run 11 が

表-3 浸水域での家屋諸元例

	杭列(本)	杭高(m)	杭径(m)	床寸法(m)	面積(m ²)	備考
Sissano	4×9	1.5	0.15	4.7×11.8	55.5	
	3×6	1.45	0.25	4.8×10.0	48.0	
	3×5	0.75	0.20	3.5×7.7	27.0	
Warapu main	4×5	1.28	0.18	5.0×7.7	38.5	
	3×5	3.25	0.18	5.0×8.8	44.0	
	3×5	1.45	0.11	3.4×8.2	27.9	
Arop 2	3×5	1.56	0.18	5.6×12.4	69.4	d ₅₀ =0.37 mm
	3×6	1.35	0.10	3.8×9.3	35.3	
	3×5	2.3	0.21	6.0×7.0	42.0	
	3×4	1.7	0.14	4.4×7.0	30.8	
Arop 1	4×4	1.6	0.14	5.0×7.5	37.5	
	3×4	1.55	0.15	4.0×7.0	28.0	
	4×6	1.22	0.17	5.0×8.5	42.5	
Malol main	4×7	1.4	0.14	5.0×12.7	63.5	2階建て
	3×6	1.4	0.16	5.1×11.6	59.2	
	3×6	1.2	0.20	3.6×9.3	33.5	
	3×4	1.4	—	4.0×5.4	21.6	
平均	3.3×5.4	1.55	.156	4.6×8.9	41.4	



(a) 前面水深を浸水深とした場合



(b) 背面水深を浸水深とした場合

図-7 実津波の浸水深と陸上流速の関係

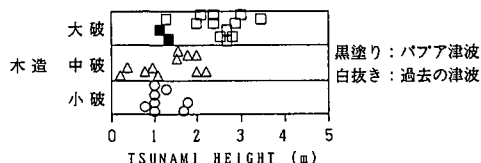


図-8 浸水深と木造家屋の被害程度の関係

震津波)で得られたデータである。これらのデータはほぼ平坦か、周囲に比べてやや高所の頂部辺りに位置する家屋などから、すなわち海水が滞留し難い所で得られたものである。ただし、陸上流速は流れ方向に見て、家屋などの前面と背面に残された津波痕跡から水位差を割出し、ベルヌーイの定理を用いて評価している。図-7(a)と(b)の違いは、浸水深として各々前面と背面のものを採用している点にある。各図中の実線は各々次式である(松富ら, 1998)。

$$u/(gR)^{0.5} = \{2C_v^2 F_r^2 / (F_r^2 + 2C_v^2)\}^{0.5} (h_f/R)^{0.5} \dots\dots (1a)$$

$$u/(gR)^{0.5} = F_r (h_r/R)^{0.5} \dots\dots\dots (1b)$$

ここで、 g は重力加速度、 R は調査地点最寄りの津波高、 C_v は流速係数で0.9を採用、 $F_r = u/(gh_r)^{0.5}$ はフルード数、添字 f と r は家屋などの前面と背面の区別を示す。

図-7(a)と(b)から、本津波の平坦地での陸上流速は、2データしか得られていないが、過去のものとも基本的に変わらないことが判る。

6. 家屋の実際と被害

6.1 家屋の諸元

浸水域での残骸家屋の諸元例を表-3に示す。家屋の抽出は無秩序に行った。浸水域では、教会や学校などの公的なものを除いて、ほとんどの家屋が高床式である。表から、どの村の家屋も諸元は基本的に同じで、床面積は日本の家屋に比べて極端に狭くないことが判る。

Malolのデータは大破や中破(後述)を免れた家屋のもので、杭(床)高は全て1.2m以上である(表以外に17

家屋の杭高も調査)。杭高が0.9mの家屋は杭を残すのみであった。Malolの海側で測定された最大浸水深は0.8mであるが(図-3参照)、教会や杭高の低い家屋などによる流れの堰上げや偏向により、実際はそれよりも大きくなった所もあったと思われる。事実、村の中心に位置する教会での堰上げ浸水深 h_f は1.14mに達しており、杭高1.2m以上の家屋がほとんど無傷で残ったことと符合している。このことから、氾濫流が高床式家屋の壁面に直接当たらない限り、高床式家屋は大破しないと言えよう。ただし、これには限界の浸水深や陸上流速があると思われるが(杭の形状や埋め込み長さ、砂地盤の粒径分布なども関係しよう)、それらは判っていない。

Sissano, Warapu, Aropでは浸水深(流勢)があまりにも大き(強)過ぎて、沿岸部の家屋は全てが流されるか、残骸が残っていても杭のみであった。

6.2 浸水深と家屋の被害程度

浸水深と家屋の被害程度の関係は、上述したMalolでの高床式家屋を除いて、平坦地に建てられた木造家屋(教会)に対してのみ得られた。それも、2データのみである。図-8に浸水深と家屋の被害程度の関係を示す。黒塗りが本津波で得られたデータ、白抜きが過去の津波で得られたデータである。浸水深は家屋前面水深を採用している。被害程度の定義は既報(松富ら, 1994)と同じで、次のようである。

大破: 全てが破壊されているか、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。修復は

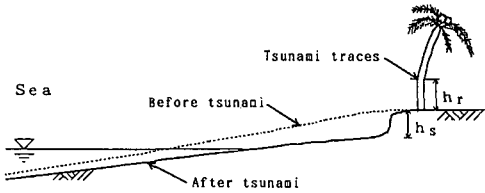


図-9 侵食深などの定義

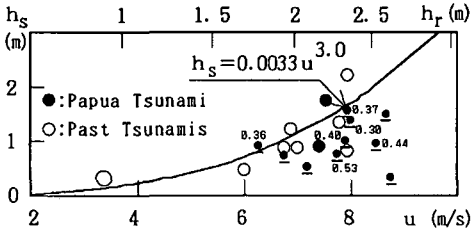


図-10 砂地盤の侵食深と陸上流速の関係

不可能である。

中破：柱は残っている。壁の一部は破壊されている。
修復は可能である。

小破：窓などは破壊されても、壁は残っている。僅かな補修で利用可能である。

図-8中の四角、三角、丸印が各々に対応している。

図によると、本地域の木造家屋は1.1 m程度の浸水深で大破に至っている。日本では、漂流物が関与しない限り、2 m程度である。本地域の木造家屋の強度は日本のものに比べて弱いと言える。

7. 砂地盤の侵食深

これまでに対象としてきた砂地盤の侵食は、背後が平坦となっている地形でのものである(図-9参照)。この地形での本津波(●)と過去の津波(○)で得られた侵食深 h_s と陸上流速 u (または浸水深 h_r)の関係を図-10に示す。侵食深は後浜とそれに連続した平坦地の境界付近で得たものである。陸上流速は侵食部近傍の平坦地での浸水深を測定し、フルード数が不明なため、次式から推定している(松富ら, 1996)。

$$u = 3.78 h_r^{0.87} \quad (\text{単位: m, s}) \dots\dots\dots (2)$$

本津波では2データしか得られていないが、その傾向は過去のものとは基本的に変わらない。

こぶ地形でもデータ(●)を収集した。図は海側でのもので、陸上流速には海側の浸水深から評価した限界流速を採用している。よって、本データと横軸の浸水深は無関係である。図中の数値は砂地盤表層の中央粒径(単位: mm)である。図から、平坦地でのものに比べて、侵食深が陸上流速の割に小さい傾向にあることが判る。

ところで、砂嘴上では何故か海側で侵食深が小さく、

Lagoon側で大きかった。この理由として、①こぶ地形を越える流れのため、Lagoon側で射流となり、Lagoon内の水の存在で不安定な波状跳水が生じた、②Lagoon側で剝離渦が生じた、③砂嘴があたかも短周期波における沿岸砂州のような役割を果たし、碎波水塊がLagoon側に突入した、などが考えられる。③は津波のような長周期波では考えにくいだが、津波が最も大きかったArop 2の西で、碎波水塊が突入するのを目撃したという証言を得ている。

8. むすび

本調査研究で得られた主な結論は次の通りである。

① Sissano Lagoonの右岸砂嘴上で、浸水深は10 m以上、陸上流速は12 m/s以上に達した。

② 陸上流速が6 m/s以上に達した海岸線の延長は16 km以上に及んだ。

③ 砂嘴上に急斜面があったとすると、エネルギー面からは17 m程度、過去の津波例からは20 m程度の津波高が推定される。

④ 浸水深が0.8 m程度の時は、氾濫流が高床式家屋の壁面に直接当たらない限り、高床式家屋は大破しない。

⑤ 本地域の木造家屋は1.1 m程度の浸水深で大破し、日本での2 mより小さい。

⑥ こぶ地形では、陸上流速の割に侵食深が小さい傾向にある。ただし、砂の中央粒径は0.40 mm程度である。

⑦ 平坦地での浸水深と陸上流速の関係、背後が平坦地となっている砂地盤の侵食深と陸上流速の関係は、今回の津波でも基本的にこれまでと変わらなかった。

謝辞：本調査研究を行うにあたり、文部省科学研究費基盤研究(B)(1)(代表：京都大学教授 河田恵昭)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

河田恵昭・他(1999)：1998年バブアニューギニア地震津波の現地調査，海岸工学論文集，第46巻，pp. 391-395。
 首藤伸夫(1988)：沿岸災害の予知と防災，白亜書房，pp. 138-150。
 松富英夫(1993)：フローレス島東北部の津波とその被害，月刊海洋，海洋出版，Vol. 25, No. 12, pp. 756-761。
 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. 264-250。
 松富英夫・新村文彦・都司嘉宜・韓世燮・G. S. Prasetya(1995)：1994年東ジャワ地震津波の現地調査，海岸工学論文集，第42巻，pp. 346-350。
 松富英夫・新村文彦・高橋智幸・倉吉一盛・小舟浩治・G. Watson・H. Rahman・首藤伸夫(1996)：1996年イランジャヤ地震津波とその被害，海岸工学論文集，第43巻，pp. 311-315。
 松富英夫・飯塚秀則(1998)：津波の陸上流速とその簡易推定法，海岸工学論文集，第45巻，pp. 361-365。
 The Independent：1998年8月7日付。