

1999 年バヌアツ地震津波とその特徴・課題

松 富 英 夫* ・ 越 村 俊 一** ・ 高 橋 智 幸*** ・ Andrew Moore****
今 村 文 彦***** ・ 河 田 恵 昭***** ・ 松 山 昌 史*****

1. ま え が き

1999 年 11 月 27 日 0 時 21 分 (日本時間 26 日 22 時 21 分), 南太平洋のバヌアツ共和国 Pentecost 島南端の Martelli 湾南東沖約 10 数 km (16.08°S, 168.31°E), 深さ約 1.5 km を震源とした $M_w=7.4$ 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)。この津波は震源に最も近い Martelli 湾を直撃し, 湾内の東奥に位置する平坦な居住区で最大津波高 6.6 m に達した。この居住区の人口は 300 人強, 津波による死者は 5 人 (死亡率 1.7%程度) で, 津波の規模や来襲時刻の割に死者が非常に少なかった。

著者らは日本・米国・バヌアツからなる国際津波調査団を組織し, 同年 12 月 15~18 日の 4 日間 (正味), 現地調査を行った。本研究はこの調査で明らかになった津波の全体像, 被害や特徴・課題などを論じるものである。

2. 現 地 調 査

バヌアツ共和国は 60 余の島からなり, 個々の島の間はもとより, 震源に近い島々では道路も地震に伴う地割れや地滑りで寸断され, 移動はヘリコプターやボートに限られ, 調査域も限られた。

調査域は北から Pentecost 島, Ambrym 島, Malakula 島, Efate 島で, 調査拠点は Pentecost 島とした。ヘリコプターへの給油, 物資補給などのために立ち寄った Espiritu Santo 島でも, 地震や津波の聞き込みを行った。調査域, 本震の震央と余震の分布を図-1 に示す。

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 Martelli 湾内東奥の居住区での地盤高, 浸水深と津波高の分布, ⑤④の浸水域での鉄筋コンクリート造やブロック造家屋の軒数, 諸元, 浸水深と被害程度の関係, ⑥④の浸水域での砂の移動・堆積分布状況である。本研究では①~⑤の調査結果を報告する。

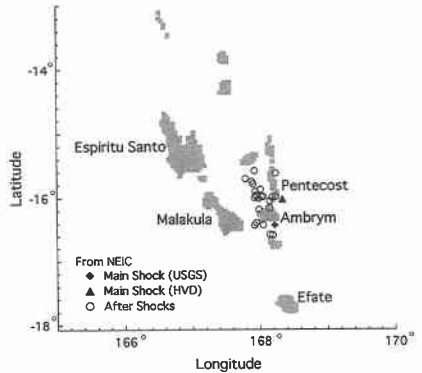


図-1 津波調査域, 本震の震央と余震の分布

3. 津波の全体像

3.1 地震と津波来襲の状況

地震計に記録された強い地震は 2 回で, 両者の時間間隔は 17 分である。証言に基づく Pentecost 島周辺の津波は, 平均的に現地で感じられた 2 回目の地震後 5 分以内に来襲している。以上のパターンは 1998 年パプア・ニューギニア津波とほぼ同じである (松富ら, 1999)。

証言に基づく Pentecost 島南部の津波は東西の両海岸とも引き波初動で 3 波来襲し, 2 波目が最大であった。津波主要部の周期は 15 分程度で, 後述の Efate 島での 20 分程度にほぼ対応している。来襲波数も対応している。

地盤は Pentecost 島南部で沈下し, Ambrym 島南東部で隆起した。Pentecost 島南部の沈下は同島での引き波初動と整合する。空中からであるが, Ambrym 島の南に位置する Paama 島で, ほぼ南北に延びる地割れを確認した。以上から判断して, 断層の走行はやや東に傾いた南北方向と考えられる。この判断は公表された断層パラメータ (表-1) とほぼ一致している。

3.2 津波高分布

本調査で得られた津波高分布を図-2 に示す。図中の×印は津波痕跡が確認できなかったことを示す。高さの基準は Malakula 島 Sandwich 港 (PS と略記) での地震発生時の潮位である。この潮位は平均潮位下 64 cm で, 大潮 (満月の 3 日後で, 潮差は 144 cm) のほぼ干潮

* 正会員 工博 秋田大学助教授 工学資源学部土木環境工学科
** 正会員 工博 学振特別研究員 東京大学地震研究所
*** 正会員 工博 京都大学助手 防災研究所
**** Ph.D. 東北大学研究員 災害制御研究センター
***** 正会員 工博 東北大学助教授 災害制御研究センター
***** 正会員 工博 京都大学教授 防災研究所
***** 正会員 工修 主任研究員 (財)電力中央研究所

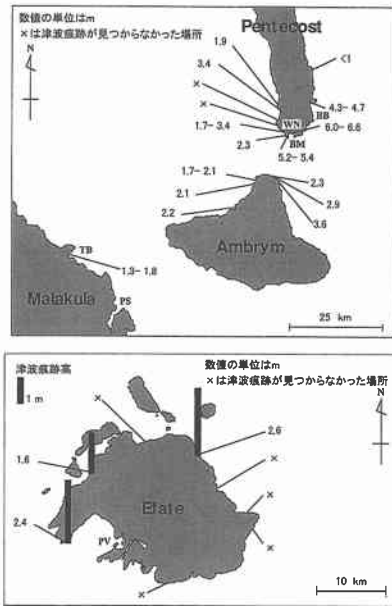


図-2 津波高分布

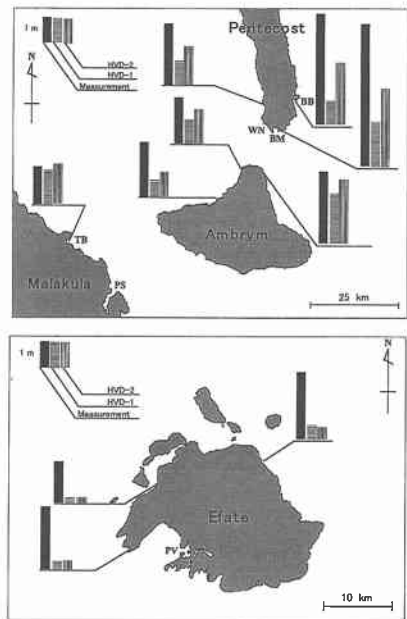


図-4 実測津波高と計算津波高の比較

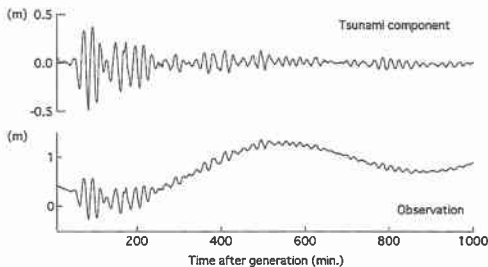


図-3 Port Vilaでの検潮記録

に当たる。

津波は Martelli 湾から Barrier 湾(図中、各々を BM, BB と略記)にかけての約 10 km の海岸に集中しており、津波高は 6.6~4.7 m である。津波高分布から推定される波源の主要部は Pentecost 島と Ambrym 島の東側で、これらの島の間である。これは Harvard 大学が推定したものに近い(表-1)。

海崖や珊瑚礁の発達している所が多々あり、目立った遡上はポケットビーチで見られた。珊瑚礁のため、背後地が平坦なポケットビーチで、氾濫部と非氾濫部が混在するものもあった。Pentecost 島 Wanuru (WN と略記、Martelli 湾から西北西方向に 3.5 km) では、ビーチの南西側約 1/4 区域(非居住区)のみで浸水し、浸水深が 1 m 強に達した。津波来襲時の平坦部の地盤高は 2.4 m 程度で、満潮時であれば、居住区でも浸水深が 0.6 m 程度に達し、人的被害も生じていたと思われる。

波源から南に約 180 km 離れた Efate 島でも、大きな

津波高が測定された。ただし、波源に対して島影でない島東部で津波痕跡を確認できなかった(だからと言って、島東部に津波が来襲しなかったと解釈すべきではない)。津波は南西方向に開口した Mele 湾内の Port Vila (PV と略記)検潮所に地震後 50 分程度で到達した。その検潮記録を図-3 に示す。上段の図は津波成分のみを取り出したものである。小さな押し波から始まっており、2 波目が最大である。最大波高は約 0.8 m で、周期は 20 分程度である。これらは近場の地滑りに起因する津波でないことを示している。

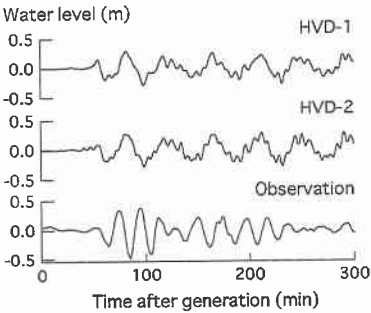
Espiritu Santo 島では、地震は感じられたが、目立った津波は目撃されていない。

3.3 数値計算結果との比較

主だった調査点での実測と計算津波高の比較を図-4 に示す。計算は直交座標系の非線形長波理論に基づいており、空間格子間隔は 0.3 分(約 540 m)、陸側境界は完全反射としている。図中の棒グラフは左から順に実測値、Harvard の低角 (HVD-1) と高角 (HVD-2) モデルに基づく計算値である。各モデルのパラメータを表-1 に示す。地盤剛性率は $3 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ を仮定している。表には USGS の低角 (GS-1) と高角 (GS-2) のメカニズム解も示してある。断層位置は震源と余震分布、および Pentecost 島南部の沈降、Ambrym 島南東部の隆起といった現地調査結果と整合するように決めた。図によると、計算値は実測値よりかなり小さめであるが、計算条件(支配方程式、空間格子間隔、陸側境界条件など)を

表一 断層パラメータ

Institution	Harvard		USGS	
M _w	7.4		7.3	
M ₀ (Nm)	1.67×10 ³⁰		0.93×10 ³⁰	
Hypocenter	16.08°S, 168.31°E		16.45°S, 168.18°E	
Model Name	HVD-1	HVD-2	GS-1	GS-2
Strike (°)	174	20	150	15
Dip (°)	30	62	23	73
Slip (°)	67	103	48	106
Dislocation (m)	3.71	3.71	—	—
Width (km)	25	25	—	—
Length (km)	60	60	—	—
Depth (km)	1.5	1.5	—	—



図一五 Port Vila での時間波形の比較

考慮すると、ほぼ妥当と思われる。全体的に高角モデルの方が大きめで、実測値は高角モデルを支持する。Efate 島ではどちらのモデルも非常に小さめである。

図一五に Efate 島 Port Vila での計算波形と検潮記録 (井戸のフィルター効果を見ない) の比較を示す。Efate 島が波源から約 180 km 離れていることもあり、メカニズムの違いが計算結果にほとんど現れていない。初動時刻と波高は計算と検潮記録の対応が比較的よいが、周期は計算の方が長い。この原因の解明は今後の課題である。

以上などから総合的に判断して、Martelli 湾と Efate 島の津波を除くならば、本津波の規模は推定された地震規模に見合ったものと言えよう。

4. Martelli 湾での津波と被害

Martelli 湾を北から望む空中写真を写真一に示す。湾口幅は約 1.4 km で、湾奥は浅く 2 つに分かれている。右 (西) 側の湾奥は珊瑚礁が発達し、平地が無く、人が住んでいない。左 (東) 側の湾奥は今回の津波で最大の津波高を記録し、唯一の津波犠牲者を出した所である。

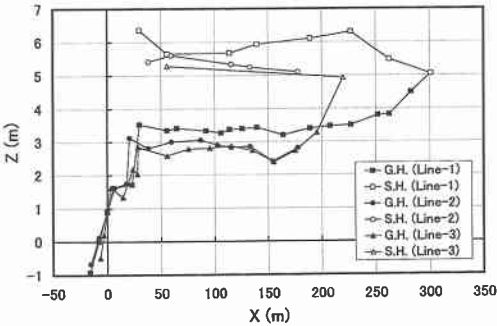
東側の居住区の斜め空中写真を写真二に示す。東から望んだもので、写真には後述の地盤高や浸水深の測線が実線で示されている。写真中央 (測線 3 のやや下) の建物は教会で、本地区で一番大きくかつ堅牢な建物であり、汀線から約 60 m の所に位置している。



写真一 Martelli 湾の全景 (北から望む)



写真二 Martelli 湾内の東奥に位置する居住区



図一六 居住区での地盤高と浸水深

4.1 津 波

証言によれば、Martelli 湾での地震は 1 回目弱く、2 回目強かった。その時間間隔は 2 ～ 3 分で、津波は 2 回目の地震後 5 分以内に引き波初動で来襲した。1 波目は小さく、その約 5 分後に 15 分程度の間隔で 2 つの大きな津波が来襲した。証言は 2 回目の地震による津波発生を示唆しているが、本震 (0 時 21 分) の 17 分後に発生した余震は小さく ($m_b=5.7$)、証言と食い違いが見られる。本震以前にその予兆的な地震が発生したという記録は現段階のところ見あたらない。一方、本震による津波発生を想定して行った数値計算結果と Port Vila の検潮記録は本震による津波発生を支持している。どの段階で津波が発生したかの見極めは今後の重要な課題である。

本居住区の地盤高 (G.H.) と浸水位 (S.H.) の例を図一六に示す。各測線は写真二中に示してある。本図は測線 1 の結果を基準に、前浜や後浜の高さが 3 測線で同じになるように表示してある。波浪のため、各々の測線で汀線

位置の評価が異なっている可能性があるからである(測線1の汀線位置は念入りに評価した)。また、水平距離Xの原点は測定時の汀線位置、高さZの原点は地震発生時の潮位である。仮に、地震発生後30分で津波が来襲したとしても、この間の潮位変動は高々6cmである。測線2では測定が途中で終わっている。これは時間不足で測定できなかったためである。図-6から、①津波来襲時の平坦部の地盤高は3m程度、②浸水長は300m以上、③浸水深は2m以上で、最大2.8m程度に達したことが判る。測線1の230m付近で浸水位がやや高い。理由は定かでないが、本居住区の東側境界に沿い、背後を流れる川を遡上してきた津波と会合したことが考えられる。

鉄筋コンクリート造の教会の諸元は、海側の前面高が3.5m(一部4m)、幅が7.3m、奥行きが12.1m、側面の底高が3.2mである(表-2)。前面側の屋根(波形の薄い金属板製)は津波越流水の落下で破壊されており、前面側浸水深は4m程度に達したと考えられる。周辺での浸水深は2.4~2.8mである。よって、周辺との水位差は1.2~1.6m程度であり、流速は4.8~5.6m/s程度に達したと推定される(松富ら, 1998)。ただし、1998年バプア・ニューギニア津波のように、流勢で樹木がなぎ倒されたということはない。写真-2の空き地部分には多くの高床式家屋が建っていたものと思われる。

4.2 被害

a) 人的被害

広範囲(約400×100~300m)に渡って2m以上浸水し、また深夜に來襲したにもかかわらず、死者が5人と非常に少なかった。しかも、犠牲者は老人、泥酔者や小さな1波目の後に家財などを求めて家に戻った人達であった。人口が300人強なので、死亡率は1.7%程度ということになる。これには次の5つが幸いした。

①結婚の祝宴が継続されていたため、住民の多くが深夜にもかかわらず起きていた。

②数ヶ月前に1998年バプア・ニューギニア津波に関するビデオを見て、津波の基礎知識を得ていた。その上、津波が引き波初動で、察知し易かった。

③大潮(満月の3日後)のほぼ干潮であった。

④満月で外が明るかった。

⑤すぐ近くに避難する丘があった。

交通・情報などから孤立した地域で、津波を予想し、避難した例は1994年東ジャワ地震津波時のBandialitでも見られた(松富ら, 1995)。

b) 家屋被害

本居住区には鉄筋コンクリート造またはブロック造の家屋が少なくとも16軒存在した。これらの中、4軒のみが小破(教会)または中破(一般住家)が残った。そして、同じ中破でも、海に近い程、被害が大きかった。こ

表-2 浸水域での家屋諸元

場 所	幅×奥行 (m)	底高 (m)	床面積 (m ²)	備 考
Martelli	7.3×12.1	3.2	88.3	小破、鉄筋コン造
〃	10×6	3.0	60.0	中破、ブロック造
〃	8.6×6.6	2.5	56.8	中破、ブロック造
〃	7.2×5.8	2.5	41.8	中破、ブロック造
平均	8.3×7.6	2.8	61.7	



写真-3 大破した鉄筋コンクリート造の家屋

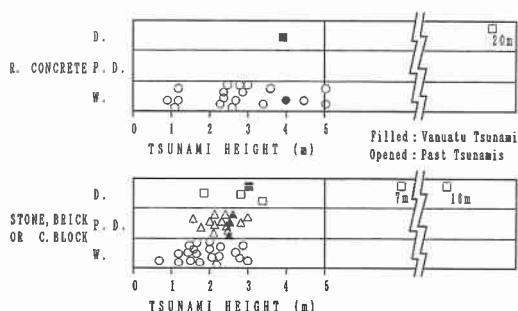


図-7 浸水深と家屋の被害程度の関係

の種の家屋の大破率は75%程度ということになる。残った家屋の諸元などを表-2に示す。

一方、高床式の簡易な家屋は全てが流失した。

鉄筋コンクリート造の家屋で大破したものがあった。その様子を写真-3に示す。右側が海で、氾濫流の方向に鉄筋柱が倒れている。2.5m程度の浸水深であったことを考えると、これまでの経験(松富ら, 1995)からは想定し難いことである。地震で弱体化し、その後の津波で大破したものと思われる。津波氾濫の可能性もある地域では、地震と津波の両外力を考慮する必要がある。

浸水深と家屋の被害程度の関係を図-7に示す。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。ただし、本津波では教会でのみその水深が評価されており、他の鉄筋コンクリート造の家屋については教会での平均水位差1.4mに家屋周辺での浸水深を加えたもの、ブロック造の家屋については底高(表-2)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。修復は不可能である。

中破：柱は残っているが、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-7中の四角、三角、丸印が各々に対応している。

図によると、本居住区ブロック造の家屋は2.5~3 m程度の浸水深(庇高)で中破に至っている。大破して庇高が得られず、図示できないが、同種の家屋が同じ浸水深で11軒以上大破している。この大破浸水深はこれまでの他の南アジア地域のもの(松富ら, 1995, 1996)と大差がないと言えよう。

5. 本津波の特徴と課題

本津波の特徴・課題として事項が挙げられよう。

①Martelli 湾での大きな津波：湾内東奥の居住区全体に渡って5 m以上の津波高となった。これは地震規模の割に、また他地点に比べて異常に高い。

②Efate 島での大きな津波：推定波源から約180 km離れているにもかかわらず、しかも島影に位置する所でさえも、推定波源に直面した Ambrym 島北岸の津波高と同程度になった。

③数値解析結果との隔たり：現存の断層モデルは、本津波や1998年パプア・ニューギニア津波をはじめとして、多くの津波の実態を説明できないでいる。断層モデルの発展・開発が望まれる。

④Martelli 湾での2回の地震と津波発生：1回目の弱い地震は津波を発生させた本震の予兆的なものと考えられるが、その地震計記録は見あたらない。

⑤引き波と押し波の大きな差：Malakula 島 Tisman 湾(TBと略記)では、押し波は小さかったのに、直前の引き波は異常に大きかった。このため、椰子の実を満載した長さ20 mの木造船が引き波時に座礁、沈没した。このような大きな差は、大きな打ち上げ後の引き波の影響結果として1983年日本海中部地震津波でも確認された(Shuto, 1985)。しかし、本津波の場合は先だった大きな打ち上げはなく、貴重な波源情報の1つと考えられる。

⑥防災教育の有用性が確認できた津波：Pentecost 島には日米が共同して津波調査を行っていることをいぶかる老人達がいた。その老人達は第二次世界大戦を知っており、日米はいまだに仲が悪いと思っている。すなわち、その後の日米関係に関する情報が老人達によく伝わっていなかった。また、Barrier 湾では湾の西地区でフランス語が、東地区で英語が共通語として使われていた。

上記のような情報環境や言語環境にありながら、ビデオによる視覚的かつ集中・集団的な防災教育が非常に効果的であったため、津波犠牲者が少なくて済んだ。

6. 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。

①Martelli 湾と Efate 島の津波を除いて、津波規模は地震規模に見合ったものである。

②津波は Martelli 湾から Barrier 湾の約10 kmの海岸に集中し、津波高は6.6~4.7 mに達した。

③Pentecost 島の津波は東西の両海岸とも引き波初動で3波来襲し、Martelli 湾では2度目の地震後5分以内に小さな1波目、その約5分後に15分程度の間隔で2つの大きな津波が来襲した。

④Martelli 湾内東奥の居住区での津波来襲時の地盤高は3 m程度で、浸水長は300 m以上、家屋前面でのせき上げによるものを除いた浸水深は最大で2.8 m程度に達した。

⑤Martelli 湾内東奥の居住区では氾濫流速が4.8~5.6 m/s程度に達した。

⑥鉄筋コンクリート造の家屋で大破したものがあつた。地震で弱体化し、その後の津波で大破したものと思われる。津波氾濫の可能性もある地域では、地震と津波の両外力を考慮する必要がある。

⑦防災教育の有用性が確認された。

謝辞：本調査研究を行うにあたり、平成11年度科学技術庁振興調整費(代表：京都大学教授 亀田弘行)の補助と岩手県立大学首藤伸夫先生から助言を得た。また、東京大学の都司嘉宣先生から海図と潮位表の提供を受けた。ここに記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 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・今村文彦・都司嘉宣・韓 世燮・G. S. Prasetya (1995): 1994年東ジャバ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・今村文彦・高橋智幸・倉吉一盛・小舟浩治・G. Watson・H. Rahman・首藤伸夫 (1996): 1996年イリアンジャバ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.
- 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 (1999): 1998年パプアニューギニア津波の陸上での流勢と被害, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 376-380.
- Shuto, N. (1985): The Nihonkai-Chubu earthquake tsunami on the North Akita coast, Coastal Eng. in Japan, Vol. 28, pp. 255-264.