

1996年イリアンジャヤ地震津波とその被害

松富英夫*・今村文彦**・高橋智幸***・倉吉一盛****小舟浩治*****
Gary Watson*****・Hidayat Rahman*****・首藤伸夫*****

1. まえがき

1996年2月17日14時59分頃(日本時間同), インドネシア・イリアンジャヤ州北部のピアク島北東沖約60 km (0.6°S, 136.5°E), 深さ15 kmを震源とした $M_w=8.2$ (ハーバード大学)の海底地震により津波が発生した。この津波はピアク島を直撃し, 島影部で最大の津波打ち上げ高7.7 mを記録し, ピアク島だけで107名の死者, 51名の行方不明者, 55名の重傷者と2700戸以上の全半壊の家屋被害をもたらした(同年3月4日現在)。死者・行方不明者の大半は津波によるものである。

著者らは, 日本・インドネシア・米国を中心とした国際調査チームを組織し, 同年3月4~8日(正味)にかけてピアク島での津波現地調査を行った。本研究は, 被災に直接関連する側面から見た津波を中心に, その実際を報告するものである。

2. 現地調査

調査域は, 島北岸がRasaidoriからSauriまでの延長約100 km, 西岸及び南岸がRayoriからArnini, Biakを経てWarariまでの延長約140 kmである。島の南東に位



図-1 調査域と震央

置するパダイド諸島の一部の島でも調査を行った。島の北西部は道路が不通だったため調査できなかった。調査域の概略と震央を図-1に示す。図中の数値は分単位で津波来襲時間である(3.3節参照)。

本津波はピアク島南のYapen島, イリアンジャヤ本島北東部のSarmiや北西部のManokwariも襲い, 被害を及ぼしている。しかし, これら地域の調査は調査期間, 交通の便の制約や治安問題などによりできなかった。この点で, 本調査結果は本津波の全体像を示すものでないことを断っておく。

主な調査項目は, ①津波の打ち上げ高, その測点位置(GPSによる)と浸水長, ②津波の来襲状況(方向, 時刻, 形態, 周期, 波数, 最大波の順位, など)の聞き込み, ③家屋の前面と背面での浸水深, 家屋の平面形状とその諸元, ④浸水深と家屋の造り別の被害程度, ⑤砂質地盤の侵食深とその近傍での浸水深であり, 基本的にこれまでの調査と変わらない(松富ら, 1994, 1995)。

3. ピアク島の津波

3.1 打ち上げ高

各地の津波打ち上げ高を図-2に示す。高さの基準は津波来襲時の潮位で, 平均海面上0.31 mである。この時期, この海域の潮差は1.5 m程度である。

打ち上げ高が4 m以上の海岸は限られ, 西岸のFarusi(後述)を除けば, 北岸のKorimからWarsaにかけての20 km程度のみである。とは言え, 北岸の平地の地盤高は一般に低く, 打ち上げ高が2 mもあれば大幅に浸水する。例えば, Mansobenでは2 mの打ち上げ高で120 m以上浸水した。

本津波の最大打ち上げ高はFarusiでの7.7 mである。ここは波源から見れば島影部である。この打ち上げ高は周辺に比べて非常に大きく, しかも局所的である。本津波によるものかどうか, 疑問が投げられている(朝日新聞, 1996)。

北岸での最大打ち上げ高はKorimでの5.4 mである。ただし, この打ち上げ高は背後が大きく開けた平地の家屋壁面上で測定されたものである(表-2参照)。この家屋は汀線から約270 mの所に位置している。平坦

- * 正会員 工博 秋田大学助教授 鉱山学部土木環境工学科
- ** 正会員 工博 東北大学助教授 工学部災害制御研究センター
- *** 正会員 工修 東北大学助手 工学部災害制御研究センター
- **** 学生会員 東北大学大学院 工学部災害制御研究センター
- ***** 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所水工部長
- ***** Ph.D. 京都大学招聘学者 防災研究所
- ***** インドネシア BPPT
- ***** 正会員 工博 東北大学教授 工学部災害制御研究センター

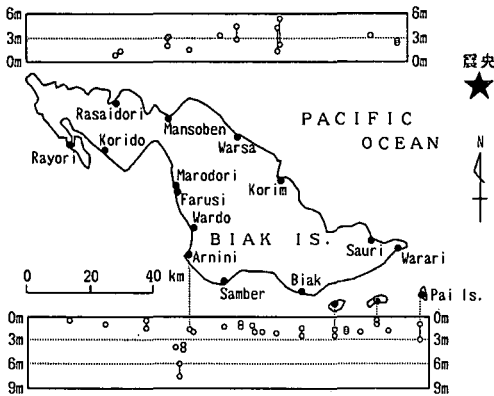


図-2 各地の津波打ち上げ高

地の奥まった浸水境界(汀線から約450m)での打ち上げ高は2.5m程度である。Korimを中心に、両側へ離れるほど打ち上げ高は小さくなっている。

南岸での最大打ち上げ高はPai島での2.9mである。この打ち上げ高も背後が開けた平坦地の家屋壁面上で測定されたものである。この家屋は汀線から約50mの所に位置し、平坦地で最奥にある浸水境界(汀線から約150m)での打ち上げ高は1.0m程度である。この地区は波源から見れば島影部に位置する。前面には広大な珊瑚礁が発達し、水深は浅い。津波は南北の両側から来襲、前面で会合し、海岸線近くで砕波して打ち上がっている。

3.2 津波マグニチュード

津波マグニチュードの評価法には、①波源に面した各地区での平均的な打ち上げ高 R_A と、全体的に判断した海岸線の方向と平行な一直線上に正投影された最大打ち上げ高地点と他の打ち上げ高地点の投影点間距離 L によるもの(羽鳥, 1986)、②平均的な打ち上げ高 R_A と震央距離 Δ によるもの(羽鳥, 1986)、などがある。震央位置が正確に推定できる場合は、②の方法がより物理的に推察される。

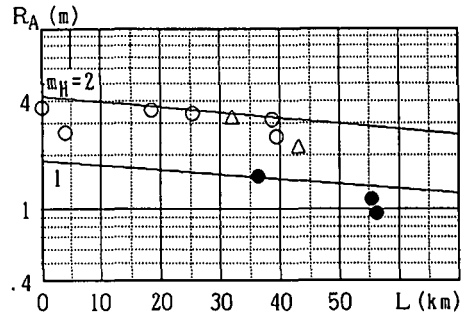
上記方法による本津波の結果を各々図-3(a) と (b) に示す。図-3(a)での最大打ち上げ高地点はKorimである。各図中、白三角はKorim以東のSauriとWarari(図-2参照)、黒丸は前面に珊瑚礁が大きく発達している地区やその影に位置する地区、実線は羽鳥の津波マグニチュード m_H に関する経験曲線で、各々次式である。

$$m_H = 2.7 \log R_A + 0.008L + 0.31 \dots\dots\dots (1a)$$

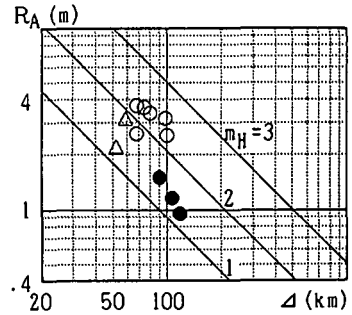
$$m_H = 2.7 \log R_A + 2.7 \log \Delta - 4.3 \dots\dots\dots (1b)$$

ここで、 R_A の単位はm、 L と Δ の単位はkmである。

図-3(a)からは、黒丸を除けば、津波マグニチュードは2弱と評価される。図-3(b)からは2強と評価される。両者に大差はないが、本地震の場合、地震観測網が



(a) 打ち上げ高と投影点間距離の関係



(b) 打ち上げ高と震央距離の関係

図-3 羽鳥の津波マグニチュード

粗く、震央位置があまり正確でないと思われるので、図-3(a)の結果である2弱を採用した方がよからう。この値は地震規模から推定される(渡辺, 1985)2強に比べてやや小さい。この理由として、断層が低角(傾斜角 $\delta=11^\circ$ 、ハーバード大学)であったこと、相対的に珊瑚礁が発達していたこと、などが考えられる。

3.3 来襲状況

証言に基づく津波の来襲状況を表-1に示す。場所は上から順に北岸の西部から時計回りとなっている。

全体的には、津波は引き波初動で、3波来襲し、2波目が大きかったようである。引き波初動は北岸に位置するSansundiでの地盤沈下(その量は0.1~0.3m)や断層モデルの結果と整合する。

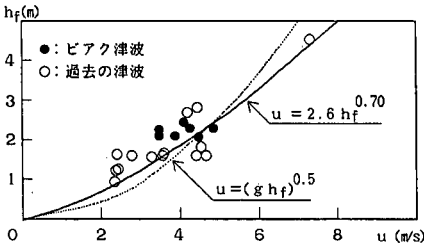
北岸と南・西岸では来襲時間と周期に差が見られる。

北岸では地震発生後10分程度で津波が到達し、周期も10分程度であったようである(図-1参照)。Korimでは周期1分以内の短周期波成分の発達が見られた。同じような現象と周期の波は1994年東ジャワ津波時のLamponでも見られている(松富ら, 1995)。

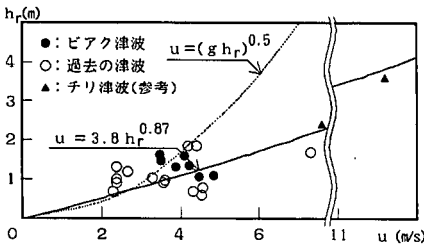
南岸と西岸の津波は、北岸の津波に比べて、波源から遠いにもかかわらず到達が速く、周期が短かったようである。この理由の可能性として、地震に伴う西岸での海底地滑りの発生が指摘されている(朝日新聞, 1996)。Owi

表-1 証言に基づく津波の来襲状況

地域	場所	時間(分)	周期(分)	波数	最大波	備考
北岸	Kpudori	—	—	4	2波目	2~3分で続く
	Mansoben	—	—	3	—	—
	Sansundi	10~15	—	3	1波目	珊瑚礁上で砕波
	Korim	10	10	—	—	1~3分に3波の分裂波、砕波
南岸	Anggaduber	—	—	3	2波目	—
	Auki Is.	—	—	3	—	南から(南面の集落)
	Saba	—	—	3	2波目	南東から
	Bosnik	—	—	3	2波目	—
	Owi Is.	5	2	3	—	引きで、北北東から、砕波
	Biak	—	—	—	—	壁面上に5本の痕跡線
	Sorido	5	—	—	—	南西から
	Yendidori	—	—	2	2波目	南南東から
	Indendi	—	—	3	—	南西から
	Adoki	—	—	5	—	南から、分裂波
西岸	Urfu	5	—	3	2波目	南東から
	Samber	2	—	—	—	東から
	Armini	2	—	—	—	—
西岸	Wardo	—	2~3	2	2波目	引きから
	Mamoribo	—	—	2	2波目	—
	Farusi	—	2~3	2~3	2波目	—
	Marodori	1	2	2	2波目	—
	Marsam	10	—	3	2波目	引きから
	Korido	5	—	—	—	引きから、地震2回(間隔1分)
Rayori	5	—	—	5	2波目	地震2回



(a) 前面水深を浸水深とした場合



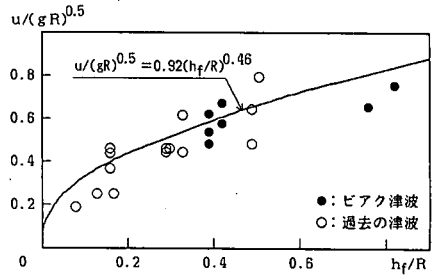
(b) 背面水深を浸水深とした場合

図-4 実津波の浸水深と流速の関係

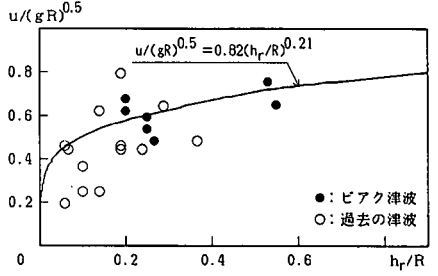
島周辺の津波は明らかに北岸を襲った津波と同一のものと解されるが、到達時間5分、周期2分と証言されている。証言の信憑性に問題があるのかもしれない。周期については、分裂した短周期波を指しているのかもしれない。なお、西岸の津波については倉吉ら(1996)に詳しい。

4. 浸水深と流速

津波の流体力、漂流物の移動速度、ひいては漂流物の



(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-5 無次元の流速と浸水深の関係

衝突力、家屋の被害程度や土砂移動などの定量的評価を目指して浸水深と流速の関係を検討してきた(松富ら, 1994, 1995)。本津波でもデータの収集を行ったので、両者の関係を再検討してみる。

図-4(a)と(b)に浸水深 h と流速 u の関係を示す。黒丸が本津波で得られたデータ、白丸が過去の津波で得られたデータ(松富ら, 1995)、黒三角が1960年チリ津波で得られたデータ(首藤, 1988)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、つまり海水が滞留し難い所で得られたものである。ただし、流速は、チリ津波のものを除き、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。この評価法から、得られる関係は陸上の定常的な流れに適用できるものである。これまでのデータを取捨選択し、新たなデータを加えて、各データの測定場所、具体的な数値や測定家屋の平面形状などを表-2に示す。図-4(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、既報(松富ら, 1994)の回帰曲線で、各々次式である。

$$u = 2.60 h_f^{0.70} \quad (\text{単位: m, s}) \dots\dots\dots (2a)$$

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

ここで、添字 f と r は前面と背面の区別を示す。また、各図中の破線はフルード数が1の流れを示す。

図-4(a)と(b)によれば、本津波で得られたデータ

表-2 現地調査データの一覧

測定場所	水深(m)		水位差(m)	流速(m/s)	前面の浸水水位(m)	近傍の冠上高(m)	家屋の平面形状	家屋の造り	記号	備考	
	前面	背面									
Wuring (モスク)	1.56	0.91	0.65	3.57	3.19	3.19	正方形(17.7×17.7 m)	煉瓦モルタル	○	側面	
	1.56	1.19	0.37	2.69	3.19	3.19	//		○		
灘内	1.29	1.00	0.29	2.38	14.01	16.19	長方形(7×12 m)	木造	○		
養ノ河原	4.45	1.70	2.75	7.34	8.81	8.81	六角形(15.6×19.0 m)	鉄筋コン	○		
稲穂小学校	1.60	0.65	0.95	4.32			長方形(36.3×29.3 m)	木造モルタル	○	海側 中間 陸側	
	1.60	0.55	1.05	4.54		9.79	//		○		
	1.60	0.94	0.66	3.60					○		
江差港	0.94	0.67	0.27	2.30		2.85	長方形(14.5×48.0 m)	鉄筋コン	○	引き波	
Pancer	1	1.60	1.30	0.30	2.42	7.50	9.40	長方形(8.2×5.9 m)	煉瓦モル	○	
	2	2.70	1.80	0.90	4.20		9.40	長方形(12.8×5.3 m)	煉瓦モル	○	
	3	1.21	0.91	0.30	2.42		9.40	H形 (15.0×9.0 m)	煉瓦モル	○	
	4	2.80	1.80	1.00	4.43		9.40	長方形(10.2×19.2 m)	煉瓦モル	○	
Lampon	1	1.58	1.02	0.56	3.31		5.40	長方形(10.6×6.0 m)	煉瓦モル	○	
	2	1.80	0.75	1.05	4.54		5.40	長方形(8.9×10.0 m)	煉瓦モル	○	
Korim	1	2.26	1.34	0.92	4.25	4.56	5.35	長方形(15.0×14.0 m)	ブロックモ	●	モ:モルタル
	2	2.10	1.33	0.77	3.88	5.27	5.35	長方形(30.2×10.5 m)	ブロックモ	●	
	3	2.10	1.07	1.03	4.49		5.35	長方形(18.0×7.6 m)	ブロックモ	●	
	4	2.27	1.07	1.20	4.86		5.35	長方形(27.0×7.3 m)	ブロックモ	●	
	5	2.08	1.46	0.62	3.49		5.35	長方形(14×7 m)	ブロックモ	●	
Mansoben	2.43	1.58	0.85	4.08	2.98	2.98	2.98	長方形(15.2×12.1 m)	ブロックモ	●	
Pai ls.	2.22	1.60	0.62	3.49	2.92	2.92	2.92	長方形(8.2×6.0 m)	ブロックモ	●	

5. 浸水深と家屋の被害程度

本津波ではブロック造の家屋に対してのみデータが得られた。浸水深とブロックや煉瓦造家屋の被害程度の関係を図-6に示す。黒塗りが本津波で得られたデータ、白抜きが既報(松富ら, 1994, 1995)のデータである。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。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。

上段は本津波と東ジャワ津波、下段は本津波とこれまでの津波(東ジャワ津波を除く)における関係である。参考までに、ビアク島のブロックは珊瑚製で、家屋には僅かながら細い鉄筋が用いられている。東ジャワの家屋は珊瑚製の煉瓦造である。東ジャワの家屋は1.5m程度の浸水深で中破に至っている。ビアク島の家屋は2m程度、他地域(外国)の家屋は3m程度を必要としている。ビアク島のブロック造の家屋強度は、東ジャワの煉瓦造のものに比べれば強く、インドネシア国外のものに比べればやや弱いと言えよう。後者のやや弱いという判断は、

の傾向は過去のものとは変わらないように見える。事実、前面水深を用いた時の回帰式は、本津波までのデータを用いても()内は東ジャワ津波まで、係数とべき指数が各々 -0.23 (-0.04) と +0.02 (-0.02) 変化するだけで、基本的に変わらない。前面水深による回帰式はほぼ固まったと言えよう。しかし、背面水深を用いた時の回帰式は、各々が -0.09 (-0.08) と -0.50 (-0.45) 変化し、べき指数の変化が著しい。参考値であるチリ津波のデータまでを用いると、各々が 0.67 と 0.12 変化し、逆に係数の変化が著しい。背面水深による回帰式に関しては、これまでよりも大きな浸水深でのデータを収集して、再検討を行う必要があろう。

浸水深と流速の関係に一層の普遍性を持たせるには、その関係の無次元表示化が必要である。図-5は最寄りの打ち上げ高Rと重力加速度gで無次元化した場合の流速と浸水深の関係である。各図中の記号の意味は図-4と同じで、実線は各々次式に示される回帰曲線である。

$$u/(gR)^{0.5} = 0.92(h_f/R)^{0.46} \dots\dots\dots (3a)$$

$$u/(gR)^{0.5} = 0.82(h_f/R)^{0.21} \dots\dots\dots (3b)$$

ただし、現段階では式(2)の大幅な修正が必要ないことから、式(2)の誘導時と同じデータを用いて回帰式を求めている。参考までに、本津波までのデータを用いて回帰式を求めると、係数とべき指数は式(3a)で各々 -0.07 と -0.02、式(3b)で各々 0 と +0.05 変化し、その変化は式(2)ほどは大きくない。図-5より、流速と浸水深の関係は打ち上げ高で比較的良く整理されることが判る。流速データの収集にあたって、それを一層活かすには、打ち上げ高の収集も同時に行う必要があろう。

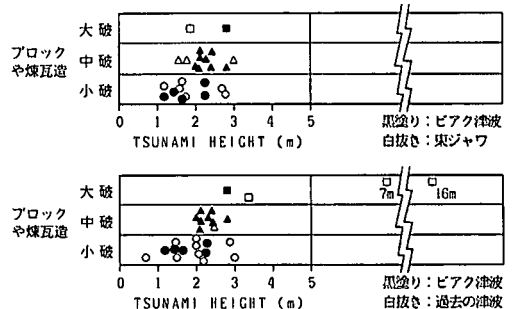


図-6 浸水深とブロックや煉瓦造家屋の被害程度の関係

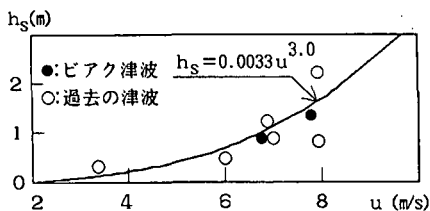


図-7 砂質地盤の侵食深と流速の関係

ビアク島の津波による家屋被害に地震動の影響が否定しきれないからである。

6. 砂質地盤の侵食深と流速

津波流砂量を議論するため、砂質地盤の侵食深と流速の関係を検討してきた(松富ら, 1995)。本津波でも若干のデータ収集を行ったので、両者の関係を再検討してみる。

本津波(黒丸)と過去の津波(白丸)で得られた砂質地盤の侵食深 h_s と流速 u の関係を図-7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られたもので、流速は侵食部近傍の浸水深を測定し、式(2b)から推定されたものである。図中の実線は既報(松富ら, 1995)の回帰曲線で、次式である。

$$h_s = 0.0033u^{3.0} \quad (\text{単位: m, s}) \dots\dots\dots (4)$$

図-7によれば、本津波で得られたデータの傾向は過去のものとは変わらない。事実、本津波のデータも含めて回帰式を求めると、係数とべき指数が各々 -1.4×10^{-4} と -0.01 変化するだけで、データ数が少ないことを考えると、その変化は非常に小さい。

実データの侵食深は流速の3乗に比例している。これは流砂量が流速の4乗に比例していることを示す(松富ら, 1995)。最近、高瀬ら(1996)は津波を想定した高シールズ数下の砂移動実験を行い、次式を得た。

$$q_s / u_* d \sim (\tau_* - \tau_{*c})^2 / \tau_*^{0.5} \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 q_s は単位幅当たりの流砂量、 u_* は摩擦速度、 d は砂粒径、 τ_* は無次元掃流力、 τ_{*c} は無次元限界掃流力である。式(5)は、津波では $\tau_* \gg \tau_{*c}$ と考えられるので、次式のように書き換えられる。

$$\begin{aligned} q_s &\sim u_* (\tau_* - \tau_{*c})^2 / \tau_*^{0.5} \\ &\sim u_* \tau_*^{1.5} \\ &\sim u_*^4 \sim u^4 \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

式(6)は流砂量が流速の4乗に比例していることを示しており、実測結果から推定された結果と同じである。

高橋ら(1992)は津波による土砂移動がBrownの式で

比較的良好に説明されることを示した。式(6)の誘導時と同じ考え方をすれば、Brownの式は流速の5乗に比例していると解釈され、実測や実験結果と近いものになっている。

7. 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 珊瑚礁が大きく発達した地区やその影に位置する地区の津波打ち上げ高を除けば、羽島の津波マグニチュード m_H は2弱と評価される。これは地震規模 ($M_w = 8.2$)の割にやや小さい。この理由として、断層が低角 ($\delta = 11^\circ$)であったこと、相対的に珊瑚礁が発達していたこと、などが考えられる。

② 浸水深と流速の関係は、今回の津波でも基本的に既報のものと変わらなかった。打ち上げ高 R を長さの測度として、両者の無次元関係式を誘導した。

③ 津波に対するビアク島のブロック造の家屋強度は、東ジャワの煉瓦造のものに比べれば強く、インドネシア国外のブロックや煉瓦造のものに比べればやや弱い。

④ 砂質地盤の侵食深と流速の関係も基本的に既報のものと変わらなかった。本関係から導かれる流砂量式と高瀬らの高シールズ数実験による流砂量式は共に流速の4乗に比例している。

謝辞：本調査はインドネシア BPPT の D. Subandono 氏、東京大学の都司嘉宣氏、東北大学の李 昊俊氏、越村俊一氏と堀内信哉氏と共同して行った。本論文の公表に当たり、小川記念基金の補助を受けた。記して感謝の意を表す。

参考文献

朝日新聞：1996年5月1日付。
 倉吉一盛・今村文彦・高橋智幸・松富英夫・D. Subandono・首藤伸夫(1996)：1996年2月17日 Irian Jaya 地震津波の現地調査，海岸工学論文集，第43巻。
 首藤伸夫(1988)：沿岸災害の予知と防災，白亜書房，pp. 138-150。
 高瀬智壮・高橋智幸・首藤伸夫(1996)：津波による土砂移動の実験，土木学会東北支部技術研究発表会講演概要，pp. 176-177。
 高橋智幸・今村文彦・首藤伸夫(1992)：土砂移動を伴う津波計算法の開発，海岸工学論文集，第39巻，pp. 231-235。
 羽島徳太郎(1986)：津波の規模階級の区分，東京大学地震研究所彙報，Vol. 61，pp. 503-515。
 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年東ジャワ地震津波の現地調査，海岸工学論文集，第42巻，pp. 346-350。
 渡辺偉夫(1985)：日本被害津波総覧，東京大学出版会，p. 206。