

## 1992年フローレス津波による堆積作用—バビ島の津波堆積物

箕浦 幸治

## はじめに

1992年12月12日、インドネシア・フローレス島北方沖約50kmの海域で地震規模(Ms)7.5の背弧逆断層型地震が発生し、これによってもたらされた津波が地震発生後数分でフローレス海の沿岸各地に襲来し2,000名を超す犠牲者を出した。地震と津波による災害に対し正しい評価を与える目的で直ちに専門家による調査団が編成され、現地調査により多くの事実が明らかにされた(例えば、Yeh et al., 1993; Imamura et al., 1995)。被害規模の大きかったフローレス島と近隣の島々に於ける堆積物分布調査結果(Shi et al., 1995)からは、津波の溯上過程に関する幾つかの興味ある現象の発生が示唆される。それらのうち最も注目すべきは、溯上する津波による大規模な海岸浸蝕と攪拌物質の移動・集積作用の発現である。津波による物質の運搬・堆積過程は、流体運動エネルギーの減衰に伴い、陸側に急速に薄化する楔状の海成堆積物より成る集積体を形成すると考えられる(例えば、Dawson et al., 1989)。しかし、実際的には津波の溯上は複雑且つ多様であると予想され、海浜地形に依存した波浪エネルギーの集中・分散や屈折波の到達により予想を凌駕する現象もたらされる可能性が推定される。堆積作用の評価が地層中に残された津波堆積物の層位学的観察結果に多くに基づいており、資料採集の制約上しばしば現象は非常に単純に解釈される傾向にあって、これが予測と実際の不一致を招来することとなる。ここに、由緒正しい(即ち溯上過程の明確な)津波の堆積・運搬過程を理解することの重要性が主張

される。

著者は、国際学術研究「堆積学的アプローチによる歴史津波の検証手段の開発(代表:東北大学工学部教授首藤伸夫:課題番号06044015)」に基づき、東北大学工学部の今村文彦・高橋智幸両氏及び秋田大学鉱山学部の松富英夫氏と共に、1994年12月現地に赴きフローレス津波の痕跡調査を行った。被害の大きかったバビ島での調査により津波堆積物の存在が確認され、現地聞き取り調査の結果及び年代の明らかな人工物の産出により、1992年フローレス津波による堆積層であることが判明した。層位学的検討並びに粒子組成の解析により、津波の溯上過程を示唆する地質学的事実をこの堆積層中に見出すことができた。ここに、これらの成果を紹介し、津波による物質の運搬過程に関する予察的考察結果を報告する。研究代表者並びに現地調査に同行された方々には様々な協力を頂いた。篤く御礼申し上げる。

## フローレス島の地質学的背景

インドネシアを含む南アジア地域は、構造的に究めて複雑且つ多様である。これは、この地域で3つの大きなプレート(ユーラシアプレート、太平洋プレート、インド洋-オーストラリアプレート)が交差し、これら相互の運動学的作用により様々な場所で地殻の拡大と消滅が頻りに繰返してきたからである。

インドネシア弧の南側には、東西に連なる長大な収束帯が存在し、インド洋地殻が島弧の下に沈み込むことによるジャワ海溝が発達している(図-1)。海溝と島弧の間にはこれらに並列する前弧隆起帯が東西に挟長に連なり、その東縁部ではニューギニアプレート

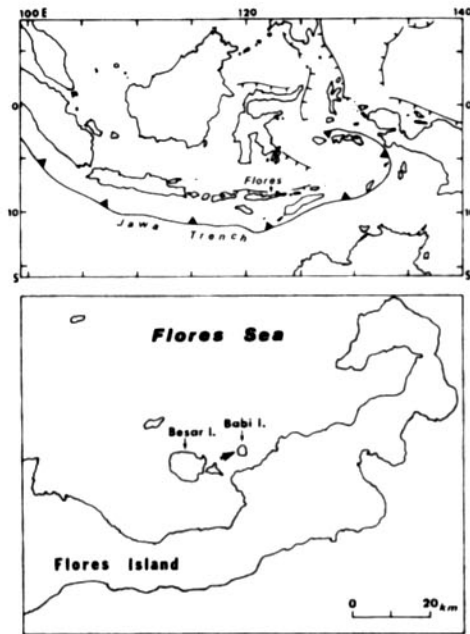


図-1 インドネシア島弧(上)とフローレス島及び周辺諸島(下)の位置図。

の西進に伴い西方に開く円弧状に大きく湾曲している(パンダ弧の発達)。島弧の西部にあって典型的な火山弧を形成するフローレス島は北方に深さ4,000mを超すフローレス背弧海を望み、太平洋プレートの南進に伴いフローレス海盆の周辺では局地的に地殻の収斂が始まっている(図-1)。フローレス縁海プレートの島弧地殻下への沈み込により出現した小規模海溝及び地殻短縮部では主として逆断層型の地震が起き、しばしば地震に伴って津波が発生している。縁海は地形的に広がり制限されており、津波は、大規模である場合、周辺の島々に直達して度々大災害を波及し人々に悲惨な試練を歴史的に与えてきた。1992年フローレス津波は、島の中心地マウメレの北方約50kmの海底で発生した背弧逆断層型地震(Ms7.5)によってもたらされた。

#### バビ島の津波堆積物

地震発生後4分程で津波はフローレス島と周辺の島々に到達し、バビ島(図-1)では

島の南にある2つの集落に襲来して壊滅的な災害をもたらし、1,100名の住民のうち263名の命が失われた(Tsuji et al.,1995)。津波は北方より押し寄せてきたが、被害は島の反対側の南岸で最も大きく(Tsuji et al.,1995)、ここでは津波によると思われる礁湖起源の石灰質砂が浮石を含むラテライト質土壌を被覆して広範に堆積しているのが観察された。堆積物分布の南域では、大小様々な礁湖軟体動物の遺骸殻が密集し或いは散在している(図-2)。バビ島は安山岩質の地質で構成され、島の主部を占めて浮石質凝灰岩が広く露出している。ラテライト質土壌は、この浮石質凝灰岩が風化したものと考えられる。トレンチ断面では、土壌とこれを被覆する石灰質砂は岩相上明瞭に識別される。石灰質堆積層に級化構造は認められず、運搬媒体からの石灰砂の急激な堆積を示唆している。軟体動物殻は、現在石灰質砂層上に散在しているが、初成的には砂層中に含まれていたものと考えられる。堆積後降水の浸透により基質粒子が下位に移動し、結果的に遺骸殻が地表に露出したと考えられる。海岸に沿って後浜の表層に、下位の土壌に由来する浮石が分布している。海岸から陸側20~40mまでは津波堆積物の集積は認められずまたラテライト土壌も削剝されており、更に土壌に由来する浮石が石灰質砂に含まれることから、津波の溯上時に後浜が大きく侵蝕されたと考えられる。ラテライト質土壌が津波の波浪により洗われ、浮力の大きい浮石が選別され浮遊し陸側に移送されたのであろう。

海岸線に斜交する測線(N55°E; 図-5参照)を設け、これに沿って堆積層の観察を連続的に行った。層学的結果を、図-3A~Cに示してある。津波堆積物(厚さ数cm~10cm)は、海岸から陸側40m付近より470mまでの平坦面の大部分を被覆して分布し、これより山側にかけて広がる椰子林には堆積が認められない(図-3C, 柱状図番号E-47)。測線の中程140~250m付近には礁湖起源の軟体動物殻及び珊瑚片が密集或いは散在して分布している(図-2及び図-3)。こ

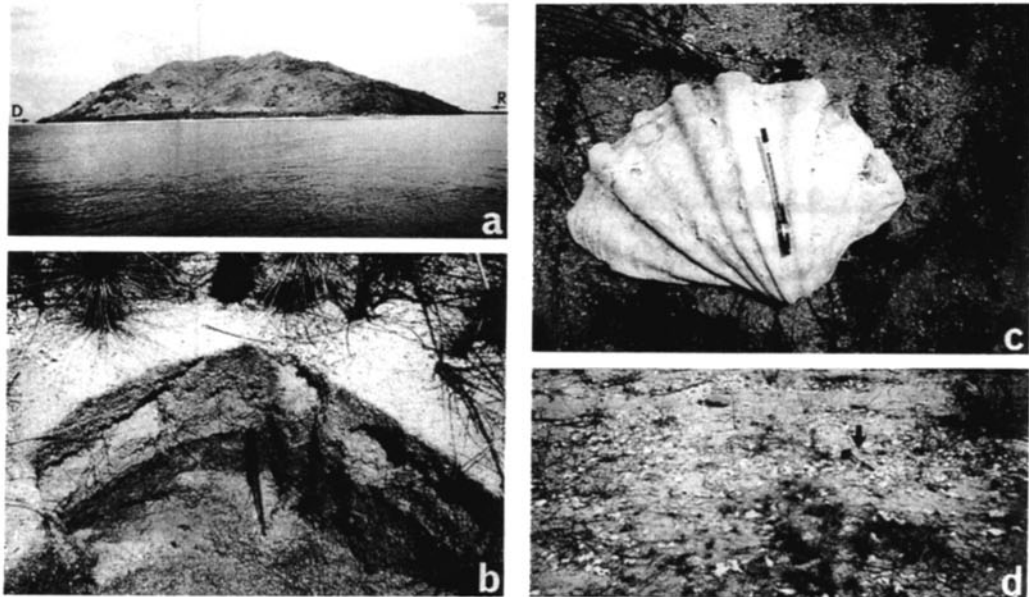


図-2 パビ島の遠景 (a) 及び津波による堆積層 (b) と礁棲軟体動物殻 (c) の分布 (d)。(a) 直接波がDの方向から、次いで反射波が数分後にRの方向から到来した。(b) 津波による堆積層は、直接下位の安山岩質土壌を被覆している(観察位置は柱状図番号E-7に対応)。(c) 長径35cmに達するシャコ貝の右殻。全ての斧足類殻は内殻を伏せて堆積している。(d) 柱状図番号E-20の観察地点付近に見る軟体動物殻の分布状態(矢印は柄の長さ60cmの簡易式スコップ)。

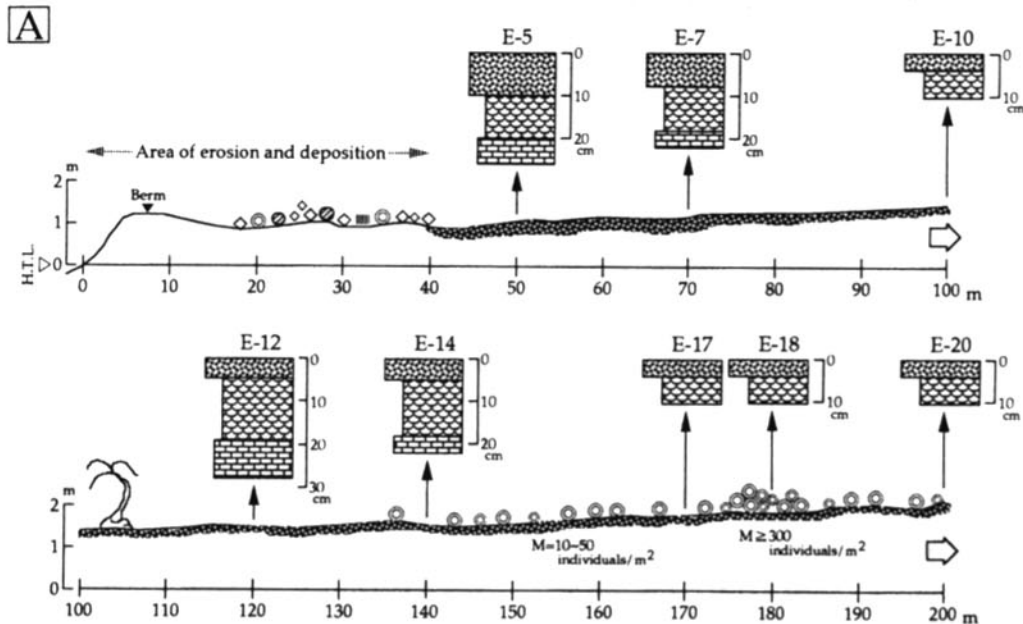
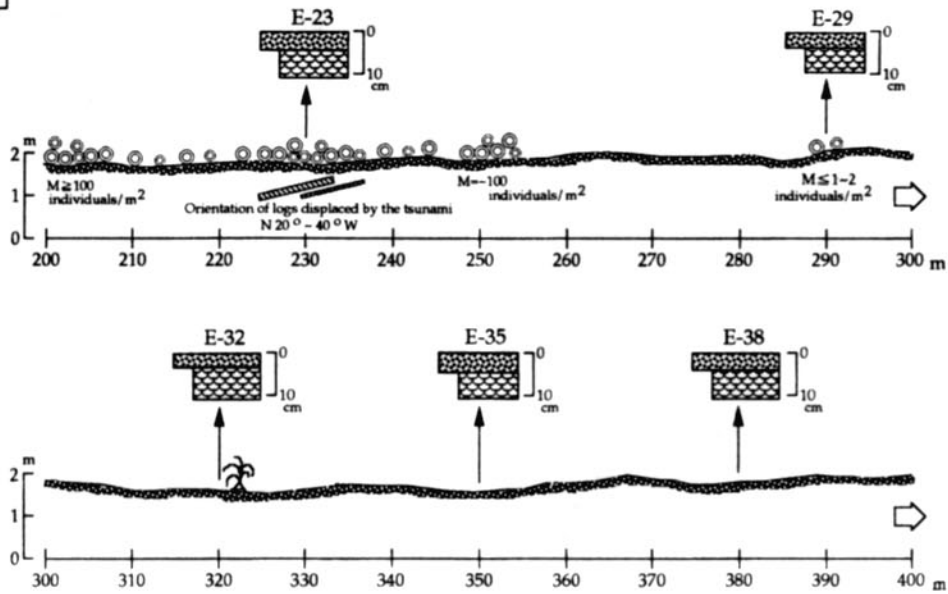


図-3 A~C 海岸に斜角する測線(方向N55°E, 長さ約500m; 図5参照)に沿った表層地質断面と津波堆積物の分布。E-5~E-47: 堆積物柱状図。

B



C

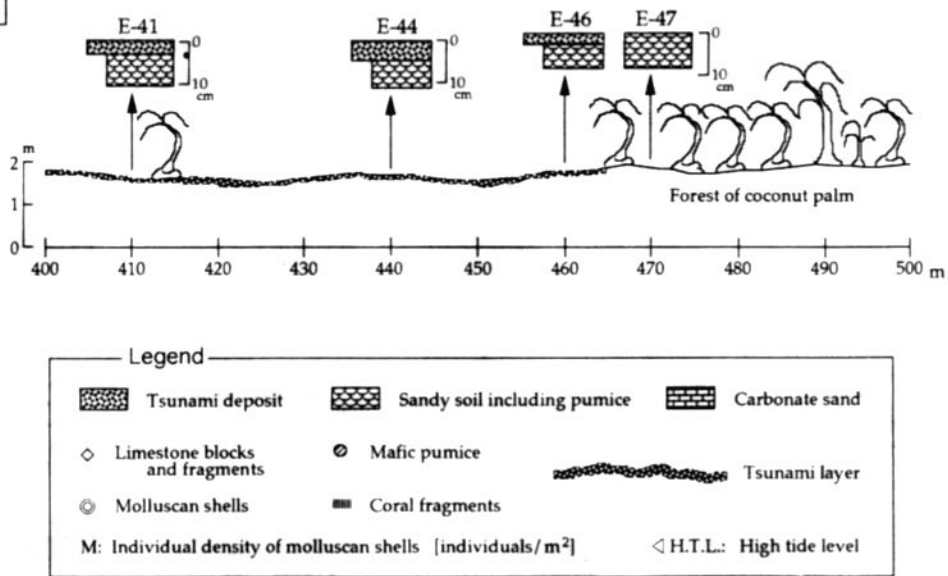


図-3 続き

れを堆積物としてみる場合、この部分でより大きな運搬能力が及んだであろうことが示唆される。海岸より230m付近で、大小の建築用木材が配列して軟体動物殻と共に堆積している。配列の方位はN20°~40°Wであることから、これらを運搬した津波は島の南西方

(S50°~70°W)より到来したことが推定される。椰子林には津波堆積物が分布せず、津波の運動エネルギーは植生により急速に減衰したと解釈される。津波堆積物は概ね陸側に薄化し且つ細粒化しているが、軟体動物殻分布域の堆積物は一段と粗く、海側或いは陸側

の堆積物に較べてより大きな運搬営力を示唆している。斯くして、津波襲来時異なる2つの波の溯上があったと推定され、南西方より到来した波はより大規模であったと解釈される。

### 堆積物の粒子径分布

流体の移動に伴って発生する運動様式の変化或いは運動営力の減衰は、これによって運ばれる物質の粒子径組成に明瞭に表現される(例えば、Minoura et al., 1996)。斯くして、堆積物粒子径分布の測定により、溯上する津波の流体力学的運動性を直接理解することが可能となる。ここでは、ストークスの法則を応用した沈降管式流度分析法(箕浦ほか, 1989)を適用し、堆積物粒度組成を測定した。図-2の測線に沿って採取した津波堆積物試料の粒度分析結果を図-4に示してある(柱状図に示した津波堆積層より分析試料を採取し、試料番号E-5~E-46は柱状図番号E-5~E-46に対応している)。分析に先んじて泥成分を懸濁法により選別除去し、砂単成分として測定に用いた1試料量は凡そ1cm<sup>3</sup>である。この図で粒度は、温度20℃の水中で堆積物試料と同一の沈降速度を有する完全石英球の粒子径に対応しており、 $\phi$ スケールで表現されている。試料粒度組成は粒径分布曲線の描く面積によって表わされ、例えば0 $\phi$ から1.5 $\phi$ までの粒子群は重量比で全体の約80%を占めることになる。

粒径組成曲線は、概ね1.5 $\phi$ 前後に極大を持ち、試料番号E-18~E-29の堆積物に関しては幾分粗粒で1.3 $\phi$ 付近に極大を有している(図-4)。極大の系統的左方遷移は、堆積物の陸側細粒化を示している。軟体動物殻分布域の堆積物はより粗粒且つ淘汰に優れた粒子群で構成されていることから、軟体動物殻を含む堆積物を運搬した流体が、殻を含まない物質を運搬した流体とは明らかに異なり、より大きな運動エネルギーを有していたと理解される。試料番号E-20とE-23の粒度分布曲線は細粒側に開いており、これらの

試料は軟体動物殻を含まない堆積物の粒子成分も含有していると考えられる。南方から到来した強い流れの津波はこれに比較して弱い流れの津波より後に襲来し、運搬過程で前者

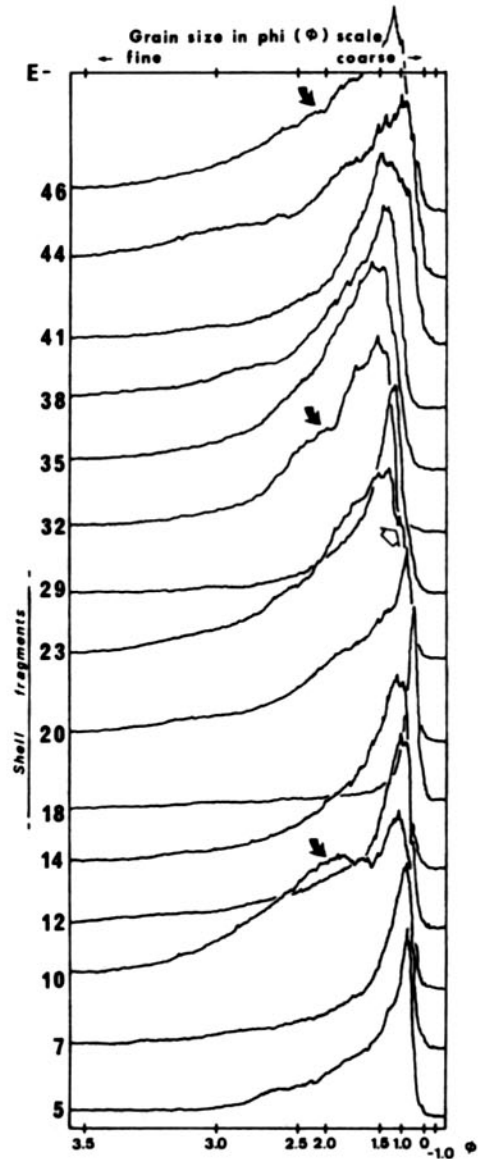


図-4 津波堆積物の粒度分布曲線。試料番号(5~46は図3の柱状図番号(E-5~E-47)に対応しており、矢印は副極大(黒矢印: 2.0 $\phi$ 付近の副極大, 白矢印: 1.0 $\phi$ 付近の副極大)の位置を示している。

による粒子を取り込んで堆積したのであろう。樹木が立っている場合、2.0φ付近に1つの副極大(図-4の矢印)を有する粒子群の堆積が認められる。立ち木が抵抗となって流体の運動エネルギーが減衰し、浮遊砂が沈殿したものと解釈される。この解釈は、軟体動物殻を含まない堆積物をもたらした津波が、2つの運搬様式を有して溯上したことを暗示している。運搬様式の1つは1.0φ前後の粒子を運んだ転動であり、もう1つは浮動で、これに依って2.0φ付近に極大を有する細かい粒子群が運ばれたのであろう。

### 1992年フローレス津波による堆積作用

バビ島の南西海岸での地表踏査により、初めて新鮮な生物殻破片より成る中粒の石灰質砂が広く分布していることが明らかにされた。石灰質堆積物は、島を取り囲む礁湖に起源すると考えられ、場所により保存良好な大型の軟体動物殻を含み、海側で厚く陸側に薄化・殲滅する層位的特徴を有している。堆積層中からの生活用器具片の産出と現地聞き取り調査により、堆積物は1992年フローレス津波によってもたらされたことが判明した。堆積物は大きく2つの層相に区分され、軟体動物殻を多産する石灰質砂は分布の南側にのみ見出される。海岸には著しい再堆積の痕跡(図-5)が認められ、津波の溯上に際して海浜が激しく浸蝕された可能性が示唆される。堆積相並びに粒子径組成の解析結果から、2相の石灰質砂は異なる流体による堆積が考えられ、軟体動物殻を含む堆積物はこれらに含まないものに比較してより大きな規模の流れによって運ばれたと解釈される。即ち、バビ島南西海岸への1992年フローレス津波の襲来は2波に亘り、より規模の大きな第2波はこれによって運ばれた木材の分布配列から島の南西方より到来したのであろう。Tsuji et al. (1995)は現地聞き取り調査によりより大規模な反射波が南～南西方より到来したことを明らかにしており、地質学的な証拠はこれに完全に調和している。現地住民の目撃談と

堆積物が軟体動物殻を含まない事実(島の北～北西では礁湖の発達が大規模で大型の礁棲動物は少ない)から、第1波は島の北或いは北北西より襲来したと考えられる。

図-5に津波堆積物の分布と物質の運搬方向を具体的に示してある。上記の諸結果と考察に基づき、1992年フローレス津波は、バビ島の北側海岸に到来して直接溯上し、更に南方のフローレス島で反射波を形成し幾分の時間遅れを伴って島の南海岸に襲来したと結論される。静かな環境に好んで棲息する軟体動物の遺骸殻が多数打ち上げられていることから、反射波の底面は島の南側に広がる陸棚深部(100m以深)に到達しそこで堆積物を獲

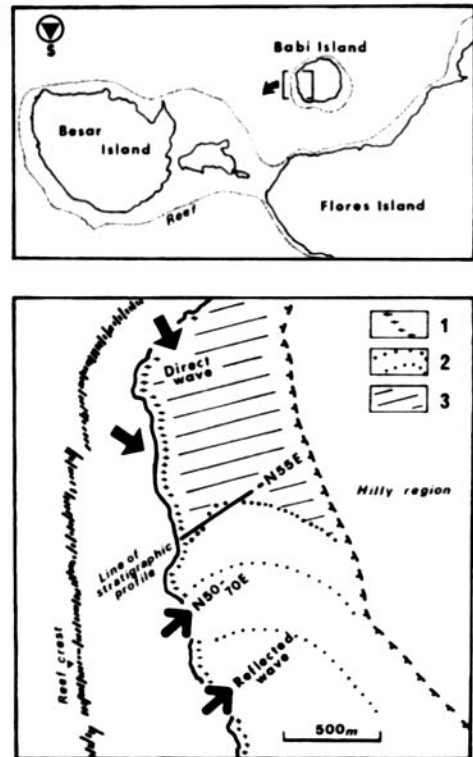


図-5 バビ島の位置図(上)と直接波及び反射波による津波堆積物の分布図並びに堆積物観察測線(下)。1:津波による海岸侵蝕域, 2:軟体動物殻(即ち反射波による津波堆積物)の分布域, 3:直接波侵入域とこれによる津波堆積物の分布。



拌したと推定される。直接波による堆積物は反射波の溯上時に再移動したはずで、E-20とE-23の粒度分布曲線に認められる2.0φ付近の粒子群の存在がその可能性を強く示唆している。津波の襲来を復元した数値計算結果 (Imamura et al., 1995) は、フローレス島側で反射した波が津波発生後8~10分でバビ島の海岸に押し寄せた様子を具体的に示している。図-5の位置図で明らかのように、フローレス島からベサル島にかけての北側礁外縁海底地形に、バビ島に向かって開く半円状構造が認められる。遙か北方より到来した津波はこの地形構造によって回折され、北上した反射波はバビ島の南沖で集中して大きなエネルギーを獲得したのかもしれない。外洋に直面せず津波の直接的襲来を免れるであろうと思われる海岸で発生した予想外の大規模な津波被害は、斯くして、この海域特有の海底地形にその原因を求めることができる。

#### 引用文献

- Dawson, A. G., Lomg, D., and Smith, D. E., 1988: The Stregga Slide: evidence from eastern Scotland for a possible tsunami. *Marine Geology*, vol. 82, p. 271-276.
- Imamura, F., Takahashi, T., and Shuto, N., 1994: Numerical simulation of the 1992 Flores Tsunami in Indonesia: Discussion on large runup heights in the northern Flores Island. *Coastal Engineering 1994 Proceedings, 24th International Conference. Coastal Engineering Research Council/ASCE, Kobe, Japan.* p. 821-831.
- Imamura, F., Gica, E., Takahashi, T., and Shuto, N., 1995: Numerical simulation of the 1992 Flores Tsunami: Interpretation of tsunami phenomena in northern Flores Island and damage at Babi Island. *PAGEOPH*, vol. 144, Nos. 3/4, p. 555-568.
- 箕浦幸治・山内 仁・藤岡一峻・柴 正敏: 新しく考案した沈降管式粒度分析装置とその陸奥湾底質堆積物への応用. 弘前大学理科報告, vol. 35, p. 50-63.
- Minoura, K., Gusiakov, V.K., Kurbatov, A., Takeuchi, S., Svendsen, J.I., Bondevik, S., and Oda, T., 1996: Tsunami sedimentation associated with 1923 Kamchatka earthquake. *Sedimentary Geology*. in press
- Shi, S., Dawson, A.G., and Smith, D.E., 1995: Coastal sedimentation associated with the December 12th, 1992 Tsunami in Flores, Indonesia. *PAGEOPH*, vol. 144, Nos. 3/4, p. 525-696.
- Tsuji, Y., Matsutomi, H., Imamura, F., Takeo, M., Kawata, Y., Matsuyama, M., Takahashi, T., Sunarjo, and Harjadi, P., 1995: Damage to coastal villages due to the 1992 Flores Island Earthquake Tsunami. *PAGEOPH*, vol. 144, Nos. 3/4, 481-524.
- Yeh, H., Imamura, F., Synolkis, C., Tsuji, Y., Liu, P., and Shi, S., 1993: The Flores Island Tsunamis. *EOS, Trans. Am. Geophys. Union*, vol. 74, p. 371-373.