

1992 年フローレス島地震津波による堆積作用に関する現地調査

今村文彦*・箕浦幸治**・高橋智幸***・首藤伸夫****

1. はじめに

従来より津波災害のアセスメントを行うとき、その発生頻度を推定することはきわめて重要であるが、既存の歴史資料はその年代の限界と確実性において問題が残される。また、ほとんどの場合に、来襲中の挙動や形態などの詳細な情報はない。その中、箕浦・中谷 (1990) により、津軽十三湖における歴史津波の発生頻度が津波堆積物に着目して推定されて以来、海水流入による急変部を持つ堆積層の研究が注目されている。津波堆積層は陸上に残された津波石と共に、文献には残されていない歴史津波をも推定できる可能性を示しており、地学的アプローチからの歴史津波の検証成果が期待される。一方、Dawson ら (1991) により、津波による物質の運搬・堆積作用は、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形の海成堆積物により成る集積体を形成するとされ、層位的観察により研究が進められている。しかし実際には、エネルギーの集中・分散や波向きやエネルギーの異なる津波の複数の来襲により、同じ層内でも複雑かつ多様であることが容易に予想できる。このような中で本研究は、1992 年インドネシア・フローレス島で生じた津波を対象に現地調査を実施し、津波による堆積作用の過程を詳細に検討し、地学的アプローチの有効性を調べることを目的とする。

2. 調査対象及び方法

2.1 調査対象領域

1992 年 12 月 12 日インドネシア国 Sunda 列島に属するフローレス (Flores) 島東部の北側沿岸地方で発生した津波を対象とする。この津波は最大遡上高 26 m を記録、1,700 名もの犠牲者を出し、今世紀の最大級の規模を持つ (今村ら, 1993; Yeh et al., 1993)。本研究による土砂移動調査は 2 年後の 1994 年 12 月に実施した。調査地点は図-1 に示す Besar 島, Babi 島, Flores 島 Nebe の 3 カ所である。写真-1 には、Besar 島 Nele での津波の

堆積物を示す。堆積量は、河口部 (小河川が多い) において多く見られ、閉塞に至る例も見られる。

多くの津波堆積層は海起源の砂が陸上に打ち上げられ、陸上部の粒径または色の異なる砂や土の上に堆積して形成するため、その判別は比較的容易である。

本研究では、特に図-2 に示された Babi 島南西部での調査結果を報告する。

2.2 調査方法

まず、地表面に見られる土砂移動、堆積物の種類および植生の変化 (色及び倒された方向) より、津波堆積物の表面分布を調べた。次に、堆積層の調査としては、図-2 に示された海岸線から測線を設け、一定間隔毎に堆積層の厚さの変化、各層での粒径分布、砂以外の堆積物の有無を調べた。なお、津波の流体運動性を粒度径組成に見られる微細な変化により調べるためには、非常に詳細な分析が必要であり、ここでは、新たに開発されたストー

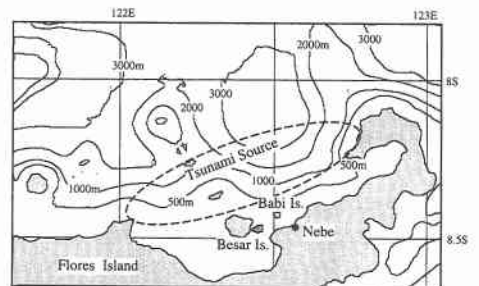


図-1 フローレス島と津波の波源



写真-1 津波による河口部での堆積

* 助教授 工博 東北大学工学部災害制御研究センター

** 助教授 理博 北大学大学院理学研究科地学専攻

*** 助手 工修 東北大学工学部災害制御研究センター

**** 教授 工博 東北大学工学部災害制御研究センター

クス法則を応用した沈降管式粒度分析方法により行なわれた(箕浦ら, 1989)。一方, 土砂移動の調査の他に, 対象地域での津波の挙動を推定するため, 津波痕跡高さ, 住民への聞き込みの調査も併せて行った。また, 津波発生直後に行われた調査結果(Tsuji et al., 1995)も参考にしている。

3. Babi 島での津波堆積層の調査結果

3.1 津波堆積物の表面分布

図-2には, 土砂移動, 堆積物の種類および植生の変化より推定した, 津波による土砂移動状況を示す。領域1(4印)は岸に沿った幅20~40mの地域で, 明らかに津波による浸食を受けた所である。領域2(点), 領域3(斜線)の地域は, どちらも津波による堆積が認められる場所であるが, 堆積物の内容に差がある。南側の領域2の部分には, 静かな環境を好んで生息する軟体動物の遺骸が多く含まれる。ここには, 島の南側に広がる陸棚深部(100m以深)に堆積していた軟体動物殻が運搬されたものと推定される。これに反し, 領域3の部分には軟体動物殻が含まれていない。島の北側には礁湖の発達が小規模で, 大型礁棲動物はいない。以上の事実と住民の証言から, 領域3の堆積物は北から襲った波でもたらされたこと, 領域2の部分は南からの津波でもたらされたことが結論される。これは雑草の倒伏状況とも一致する。さらに, 南からの波は, 深い所の堆積物を運搬してきているので, その勢いも大きかったであろうと推定される。

3.2 津波堆積層

図-2に示されるように, 領域3の地域で始まり, 途中に領域2を挟んで, また領域3で終わる全長500m程の測線を選んだ。これに沿った堆積物分布の観察の結果を図-3に示す。主に三つの層が確認できた。上層は, 津波による堆積物であり, 珊瑚礁起源の石灰質砂を主に含んでいる。中層は浮石を含むラテライト質土壌である。Babi 島は安山岩質で, 浮石質凝灰岩が広く露出している。これが風化して出来上がった土壌である。下層は砂層である。

汀線から40mまでは侵食されており, 堆積はない。40mから460mまでの平坦面の大部分は石灰質砂により被覆されていた。堆積層は, 50mの地点(E-5)で最も厚く10cm程度であったが, 概して陸側に行くほど厚さは薄くなり且つ細粒化している。470mより山側の椰子林には堆積していない。堆積層の中には, 本来下位のラテライト土壌に起因する浮石も見られた。汀線近くで浸食され, 浮力が大きいために選別・浮遊され, 移送されたものであろう。

ところで, 測線の中程140~250m付近(領域2)には, 珊瑚礁起源の軟体動物殻および珊瑚片が分布していてお

り, 180mの地点で最もその密度が高い。これらは粗く, その左右の堆積層に比べ大きな運搬能力が働いたことを物語っている。さらに, 海岸より230m付近には, 大小の建物用木材が配列して軟体動物殻と共に堆積している。配列の方向はN20°~40°Wであった。これらを運搬した津波は島の南西方向(N50°~70°W)より到来したものと推定される。

3.3 粒度分布

沈降管式粒度分析方法により堆積物粒度組成を調べた結果を図-4に示す。試料番号は図-3中の柱状図番号と対応している。分析に先立ち, 泥成分は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1cm³である。横軸はφ値である。温度20°C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d(mm)に対応しており, 次式で与えられる。

$$\phi = -\log_2 d \quad \dots\dots\dots (1)$$

φ値の大きい方が細粒である。

図-4の粒径分布曲線は, 大きな極大値を持ち, これに関して左右の非対称性が大きいという一般形状をしている。中には副次的な極大を黒矢印, 白矢印の場所に持つものもある。

一般的に, 汀線から陸へ行くにつれ, 最大値のφは大きくなり, また細粒部の占める割合が大きくなっていく。ところが, 珊瑚礁起源堆積物の存在する18番~29番あたりでは, φは一度小さくなり, 淘汰が優れた状態となる。ここで水理的に換算した粒径が大きくなっているこ

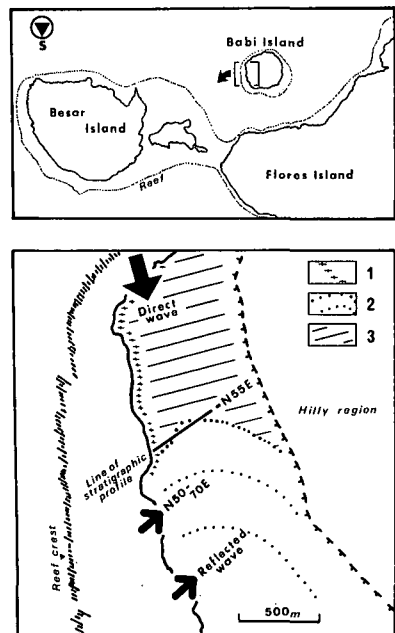


図-2 Babi 島(上图)と調査地点(下图)

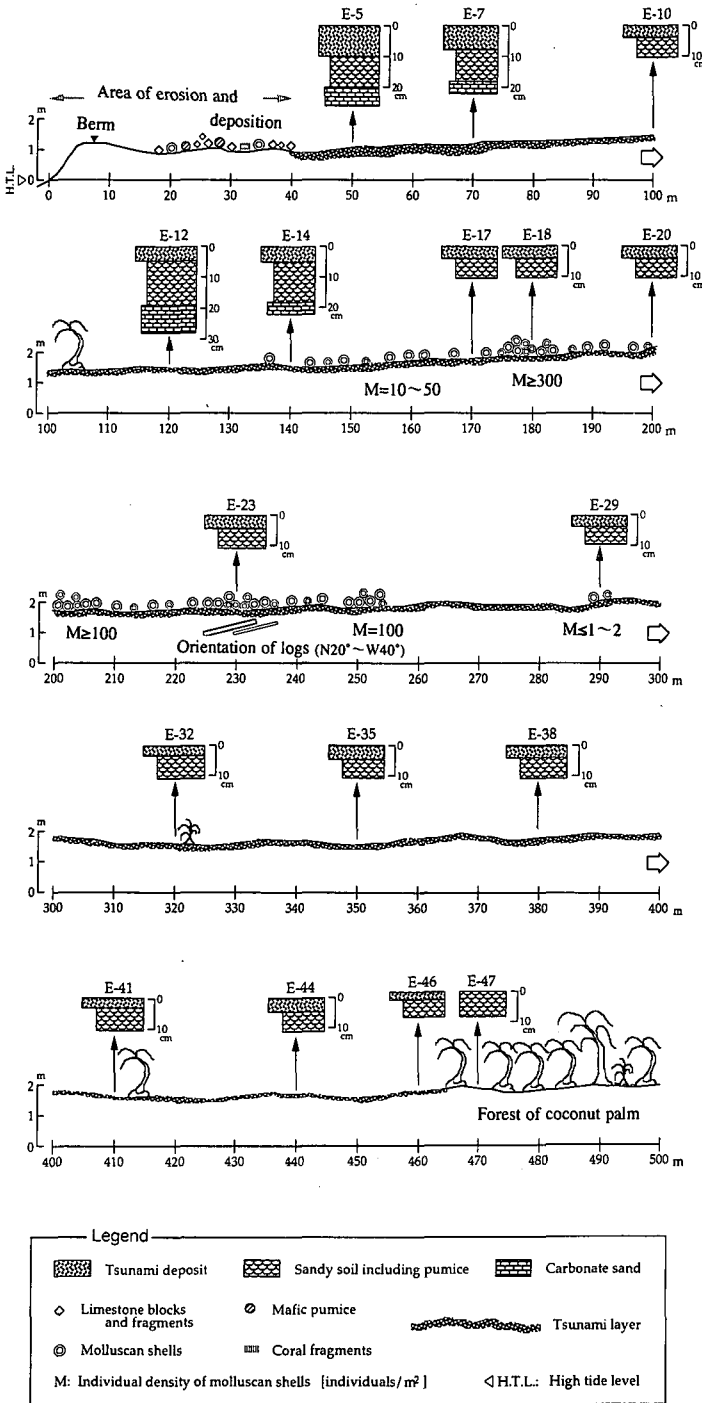


図-3 Babi 島での津波堆積物の分布

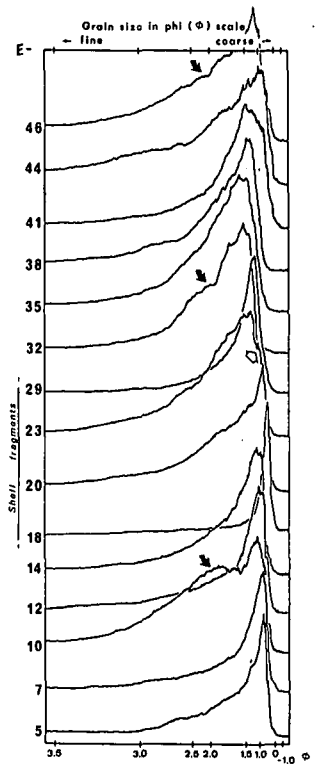


図-4 Babi 島での津波堆積物の粒度組成

とは、前に述べた大きな営力（南方から来た）による運搬の結果であることを示している。また、20 番、23 番の粒度分布において細粒部の面積が大きくなっているが、これは軟体動物殻を含まない堆積物の粒子を含んだからだと思われる。南方から来た津波が、これより弱い流れ

で既に堆積されていたものを、再度流れに取り込んで運搬し、落としていったものであると考える事が出来よう。特に 23 番では再浸食・運搬・堆積されたものの方が、南から運ばれてきた軟体動物殻起源のものより多かったのであろう。後者に対応するものは、白矢印で示される副

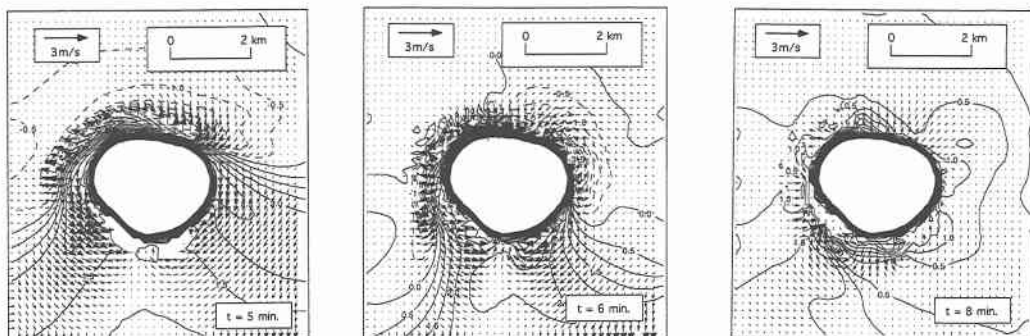


図-5 Babi 島での計算された流速ベクトルと水位コンター

極大として僅かに示されている。

E-10. 32, 46 の 3 か所で、 $\phi=2.0$ 付近の副極大（黒矢印）の存在が認められる。これらの場所に共通な事項は、立ち木の存在である。来襲津波が立ち木の抵抗により、運動（運搬）エネルギーを低下させ、その結果粒径の小さな浮遊砂の沈降堆積が生じたものと解釈される。

3.4 推定される津波の来襲状況

以上の結果をまとめると以下になる。堆積物は大きく 2 つの層相に区別され、一方の軟体動物殻を多産する石灰質砂は、南側にのみ存在した。これは南西方向からの、より大きな規模の流れによって運ばれたものと推定される。北側からの流れによる堆積物は比較的細粒成分を多く含み、南側からの流れよりも運動エネルギーが小さく、しかも先だって来襲したものと考えられる。

4. Babi 島周辺での再現計算

堆積層調査により推定された津波の来襲状況を検証するために、津波数値モデルによる再現計算を行った。津波波源モデルおよび計算方法は Imamura et al. (1995) の結果を用いており、Babi 島では遡上計算（空間格子間隔は 100 m）も行っている。Babi 島での最大波出現時間を含むように、再現時間は 1 時間としている。

まず、図-5 には流速ベクトルと水位コンターを示す。津波発生 5 分後には、第一波が Babi 島に到達し、島の北側で反射波が見られる。次に、津波は左右に分かれ、島の南側へ伝播している。この時、堆積層調査地点（南西部）に第一波として北または北西部より津波の遡上・進入が見られる。6 分後には左右に分かれた津波先端が島背後で衝突し、高い水位を示しているが流速値は小さい。8 分後には、衝突した津波は一端沖へ向かうが、南西方向から戻り流れのようにしてバビ島南部を再来襲した様子が見られる。これは、島周辺の珊瑚礁での拘束波と沖には放射されず、しかも、強い流れとなり島南西部より再遡上している。この来襲状況を図-6 にまとめる。

次に、図-6 中の 4 地点において、水位時系列を出力した。Babi 島北西の地点 1 には、押し波の津波第一波が 3 分後には到達した。この波は 5 分後に島西部沿岸の地点 2 に到達する。この時点では、地点 3、4 への浸水はほとんどない。さらにこの波は地点 3 への押し波として 7 分頃に現れるが、その南の地点 4 では明確な山となつては生じない。これは、島背後で反射して回り込んでくる波との干渉が始まったためであろう。その後、この干渉の結果として、地点 3、4 においては、地点 2 での来襲状況に比べ水位は低いものの浸水が長時間続く。ここでは示さないが、この時の流速値は、地点 2 での最大値 2 m/s に対し、地点 3、4 では 3 m/s を越え、1.5 倍以上に達する。

これらは、地点 3 付近で行われた堆積層調査から推定されるものと一致している。すなわち、来襲方向が異なる 2 つの波が遡上したこと、また第二波が第一波より大きな流体力を持っていたことである。なお、地点 2 付近での実測された遡上高さは 3.6 m (Tsuji et al., 1995) で

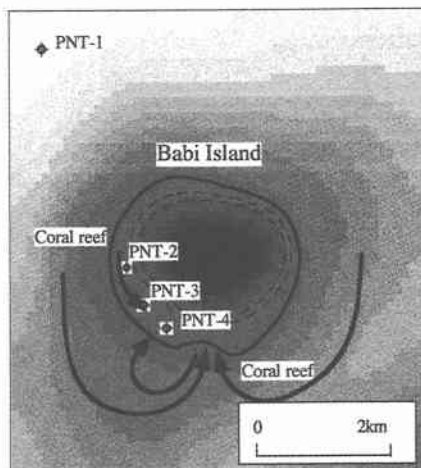


図-6 Babi 島での計算による津波来襲状況

あり、計算値 (3 m) とよい一致を示している。

5. おわりに

Babi 島では地震発生前には、1,100 名の住民が島南部に 2 つの集落に分かれて住んでいた。津波は北方より押し寄せたが、被害は島の反対側の南岸部をも襲い、住居は壊滅し 263 名の犠牲者を出している (Tsuji et al., 1995)。本調査および数値計算結果は、この時の津波来襲状況及びその破壊力を検証したことになる。本研究により、得られた主な結果は次の通りである。

① 来襲方向および運動エネルギーの異なる二つの波が、Babi 島南西部沿岸を襲ったことが推定された。これは、堆積相および粒子径組成の解析結果より判別でき、さらに軟体動物殻分布や家屋木材の配列がこれと調和した結果を示している。

② 堆積物の解析から、まず第一波が北西から、ついで第二波が南西から来襲したものと推定された。

③ 数値計算により、Babi 島北部に位置する波源から進化した第 1 波は、北側からバビ島を襲い、背後にも回り込む。両側から回り込んで島背後で衝突した津波は、一端沖へ向かいながらも屈折して島へ戻り、堆積物調査地点へは南西方向から再来襲した。この第 2 波は流速及び流体力とも第一波より大きく、堆積相調査の結果と一致した。

謝辞：本研究の一部は、文部省科学研究費国際学術研

究 (代表：首藤伸夫、課題番号 06044015) により行われた。また、本論文の公表にあたり小川記念基金の補助を受けた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 今村文彦・松富英夫・都司嘉宣・松山昌史・河田恵昭・高橋智幸 (1993): 1992 年インドネシア・フローレス島津波の現地調査とその解析, 海岸工学論文集, 第 40 巻, pp. 181-185.
- 箕浦幸治・中谷・周 (1990): 津軽十三湖及び周辺湖沼の成り立ち, 地質学論集, 第 36 号, pp. 71-87.
- 箕浦幸治・山内 仁・藤岡一峻・柴 正敏 (1989): 新しく考案した沈降管式粒度分析装置とその陸奥湾低質堆積物への応用, 弘前大学理科報告, Vol. 35, pp. 50-63.
- Dawson, A. G., D. Long and D. E. Smith (1988): The stregga skide: evidence from eastern scotland for a possible tsunami, Marine Geology, Vol. 82, pp. 271-276.
- Imamura, F., E. Gica, To. Takahashi and N. Shuto (1995): Numerical simulation of the 1992 Flores tsunami: interpretation of tsunami phenomena in northeastern Flores Island and damage at Babi Island, Topical issue of Tsunami 1992-94, Pure and Applied Geophysics, Vol. 144, No. 3/4, pp. 555-568.
- Tsuji, Y., H. Matsutomi, F. Imamura, M. Takeo, Y. Kawata, M. Matsuyama, To. Takahashi, Sunarjo and P. Harjadi (1995): Damage of coastal villages due to the 1992 Flores Island earthquake tsunami, Topical issue of Tsunami 1992-94, Pure and Applied Geophysics, Vol. 144, No. 3/4, pp. 481-524.
- Yeh, H., F. Imamura, C. E. Synolakis, Y. Tsuji, P. L-F Liu and S. Shi (1993): The Flores Island Tsunamis, EOS, Trans. Am Geophy. Union, Vol. 74, pp. 371-373.