

## 最近の津波による土砂移動に関する現地調査

今村 文彦<sup>1)</sup>・箕浦 幸治<sup>2)</sup>・高橋 智幸<sup>1)</sup>・首藤 伸夫<sup>1)</sup>

## 1. はじめに

津波は陸上に残した浸水跡だけでなく、海域または陸上の土砂を輸送して、その痕跡を残す。また時には、数mもある珊瑚石を移動させることもある。これら陸上に残された堆積物や層に対し詳細な分析することにより、津波の来襲の回数、規模および形態を推定できる可能性がある。実際、箕浦・中谷(1991)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、津波の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。また、Dawsonら(1988)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高成堆積物により成る集積体を形成するとして、層位学的観察により研究が進められている。

本文では、最近発生した1992年フローレス地震津波、1994年東ジャワ地震津波、1994年フィリピン・ミンドロ地震津波の3つの津波を対象として現地調査を実施し、津波による堆積作用を調べてきた結果をここに報告する。

## 2. 対象地震と津波

ここで、取り上げる3つの地震津波の概略は以下の通りである(場所は図-1を参照)。また、地震・津波規模や被害数(犠牲者数)を表-1にまとめる。

1992年12月12日の13時29分(現地時間)、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M7.5(アメリカ地質調査所発表)の大きな地震が発生し、Maumere市をはじめとするフロレス島、および付近の島の各地で激しい震動による被害を生じた。震源が沿岸に近いために、沿岸では本震から3ないし5分後に大きな津波に襲われ、多くの家屋が流出した(都司, 1993)。犠牲者は、1,700名を越えた。

1994年6月2日、午前1時頃(現地時間)、インドネシアの東ジャワ島南沖(震源位置は図-1に示す)において、Mw=7.5の地震が発生した。この周辺はインド・オーストラリア海洋プレートがユーラシアプレートの下に沈み込んでいる場所であり、過去にも多くの地震や津波が発生している。今回の地震による地震動は小さく、構造物などの被害は報

表-1 3つの地震津波の特発

	発生日月日	Ms	推定震源深さ	最高津波高さ	犠 牲 者
フローレス津波	1992年12月12日	7.5	28km	26m	1,713
東ジャワ津波	1994年6月2日	7.2	18km	14m	238
ミンドロ津波	1992年11月15日	7.1	33km	7 m	71

<sup>1)</sup> 東北大学工学部災害制御研究センター

<sup>2)</sup> 東北大学大学院理学研究科地学専攻地圏進化学

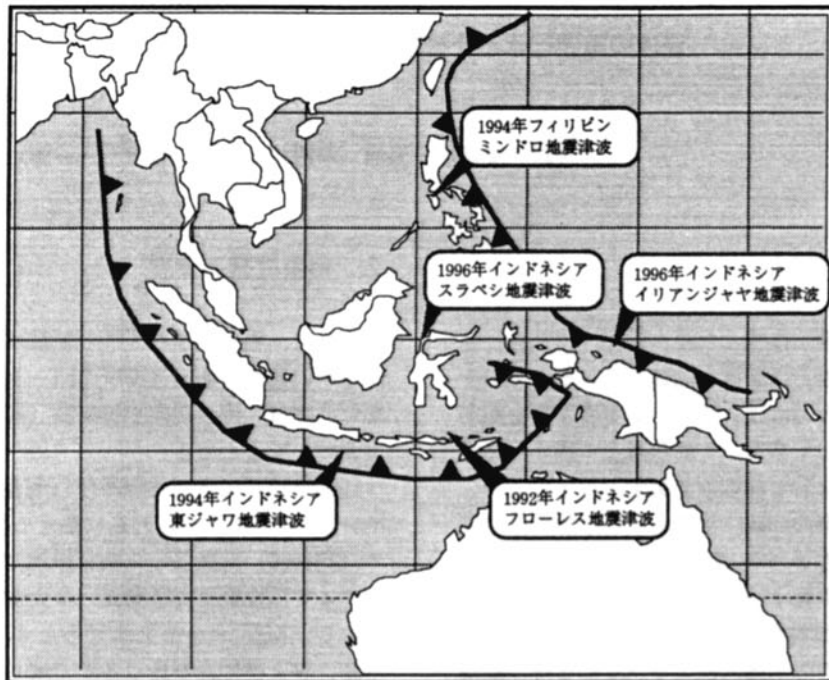


図-1 本研究で取り上げる3つの津波イベントと最近の津波

告されていないが、地震発生から約1時間後、津波がジャワ島南部およびバリ島南西部を来襲し、死者200名以上の被害を与えている(今村・高橋, 1995)。

1994年11月15日の午前3時17分(現地時間)、フィピン中部ミンドロ(Mindoro)島北部で発生した津波で70名あまりの犠牲者を出した。地震は横滑り断層により発生したと推定されており、通常であれば、地盤の鉛直変位が小さいために、津波が発生することはない。しかし、実際には、7mに及ぶ打ち上げ高さが記録されており、その津波発生機構に課題が残っている。(今村, 1996)。

### 3. 1992年フローレス津波

1992年フローレス津波の土砂移動調査は2年後の1994年12月に実施された。場所は図-2に示すBesar島Neleとフローレス島Nebeの2カ所である。写真-1には、Besar島Neleでの、津波の堆積層を示す。通常、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、形成されるため、その判別がし易い(写真-1を参照)。また、堆積量は写真-2の下にあるような河口部(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。測定は、沿岸から陸側へ測線を設け、一定間隔で穴を掘り、堆積層厚さ、そこでの粒径、化学成分などを調べた。図-3は測線上での例であり、図中斜線部が堆積厚さを示している。沿岸から40m付近で層厚さが最も大きく(30cm程度)、遡上するにつれ層厚さは小さくなっていく。これは、典型的な楔形の堆積層である。点線は、数値計算により推定された最高水位であり、ほぼ堆積層が見られた地点での高さとも一致している。つまり、浸水域と堆積土砂域がほぼ一致していることになる。しかし、通常は前者の方が大きい。特にBabi島での土砂移動の移動方向や形態についての調査結果と数値解析に関しては、今村ら(1996)により詳細にまとめられているので参照されたい。

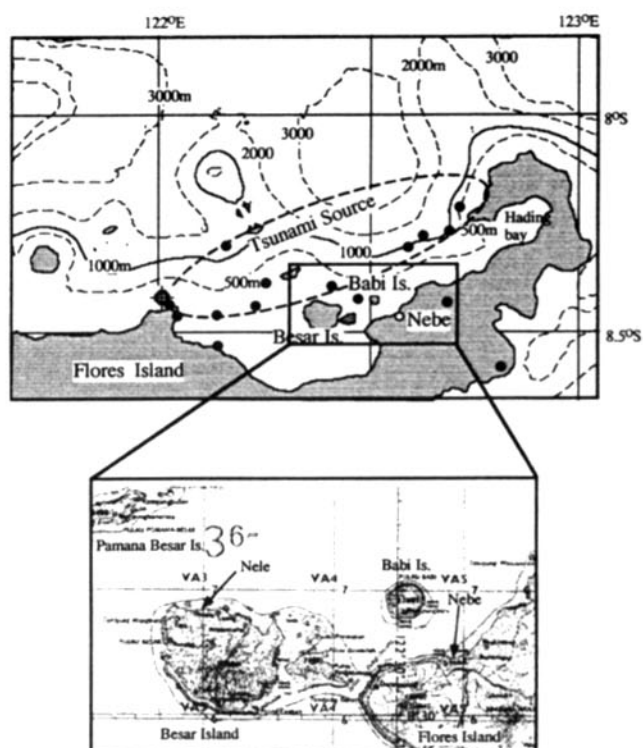


図-2 調査対象箇所 (Besar島 Neleとフローレス島 Nebe)



写真-1 Besar島 Neleでの津波堆積層。上層が津波堆積層であり白く粒径が大きい。下層は元の層であり、黒く粒径が細かい。



写真-2 Besar島Neleで、津波による河口閉塞

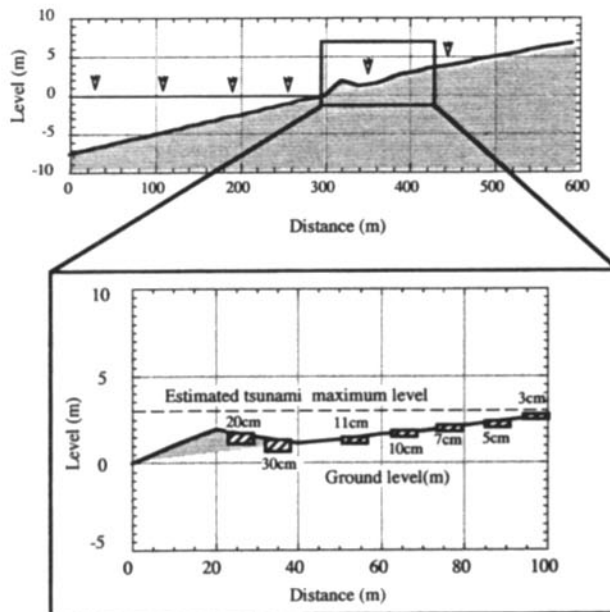


図-3 Besar島Neleにおける測線上での津波堆積層厚さ

4. 1994年東ジャワ津波

1994年東ジャワ津波の調査により明らかにされた打ち上げ高さを図-4にPancerの地形図を図-5に示す。Pancer村での津波被害は最も大きく、犠牲者が121名と全体の半分以上の割合を占めている。図-5下図の斜線部は全壊した家屋の地域を表す。集落の殆ど

が甚大な被害を受けていることが分かる。縦断図を見ると、津波により海岸付近での侵食が見られ（A領域）、村の中心を走る道路より沿岸部側の住居がほぼ全壊している（B領域）。これと対照的に、道路反対側での被害は軽減されていることから（C領域）、沿岸での侵食と家屋の破壊によってエネルギーの多くが損失されたと推定される。さらに、津

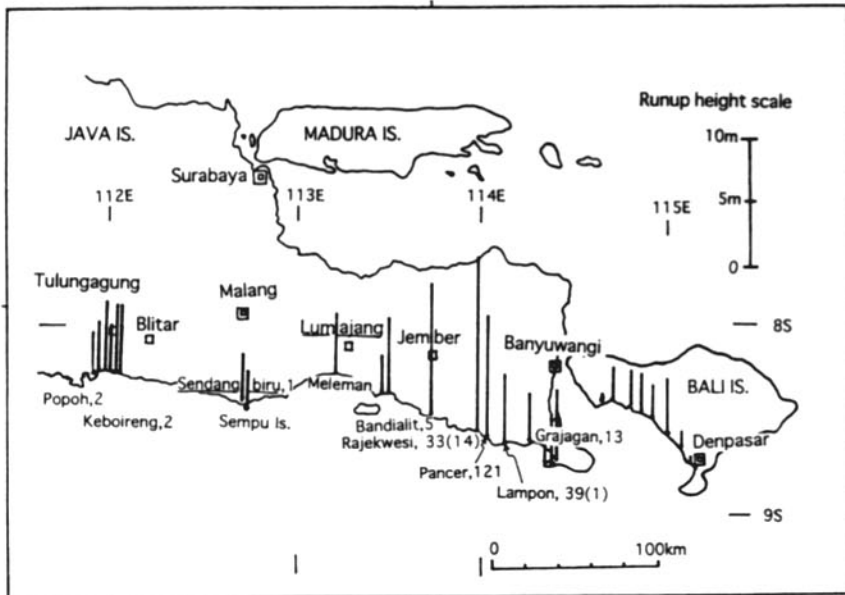


図-4 東ジャワ津波の打ち上げ高さ

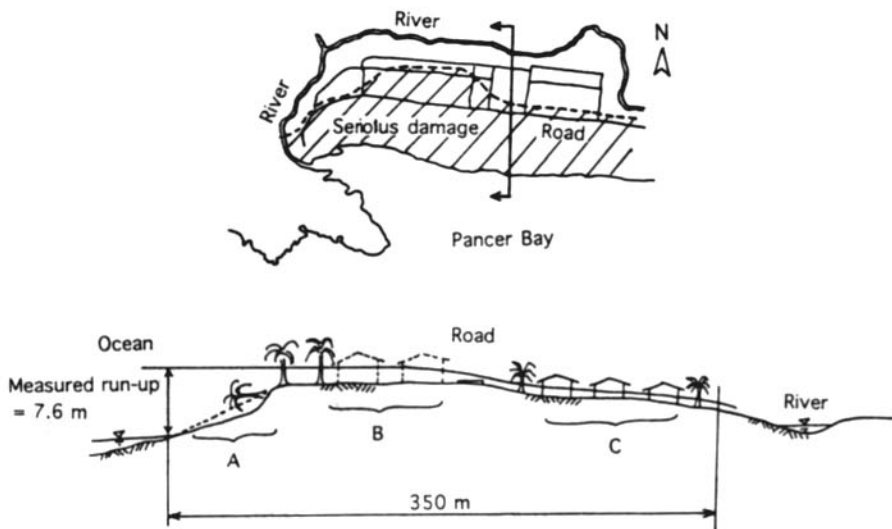


図-5 Pancer村の地形図



写真-3 Pancer村の沿岸に見られた侵食

波は集落の低地部分を進み、Pancer村背後の河川に流れ込んでいた。

今回の津波被災状況の中で特筆すべき点は沿岸侵食(写真-3に見られるような段差の形成)であった。Rajekwesiでは最も侵食が激しく、最大2mにも及ぶ段差が確認されている(写真-4)。このような津波による侵食が構造物の基礎付近で生じた場合には、その倒壊などの危険性がある。今回の調査結果では、ほぼ5m以上の打ち上げ高さを記録した地域では、沿岸に侵食による段差が見られた。

一方、沿岸部での侵食と堆積の双方が顕著に見られたのが、Sendangbiruの沖に位置するSempu島である(図-6上図参照)。島の背後にいくつかのポケットビーチがあり、その1つで海岸の侵食と内陸部での堆積が確認された(図-6下の縦断面図を参照、上図においてSempu島での2.7mを表示している二重丸印)。恐らく、島背後に左右から回り込んだ津波がここでぶつかり合い、一部が島の内陸部に浸入し、海岸で削り取った土砂をそ



写真-4 Rajekwesiでの最大2mにも及ぶ段差

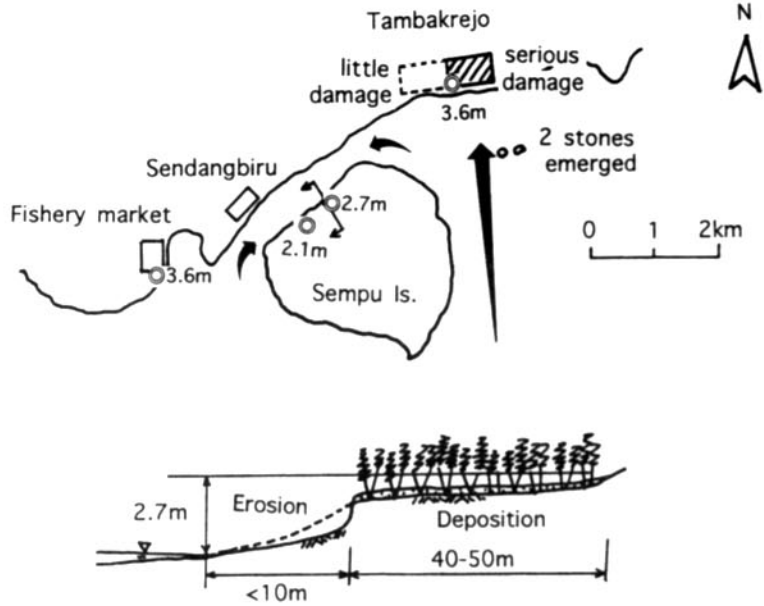


図-6 Sendangbiruの沖に位置するSempu島（上図）とその周辺図（下図）



写真-5 Sempu島での見られた葉上の砂

のまま陸部へ運んだものと推定される。写真-5に示されるように、内陸部の雑木には運ばれた白砂の痕跡がはっきりと残されている。これは、津波発生2週間後に撮影されたものである。この翌年（1995年）11月に再度、同じ地点で詳細な津波堆積層調査を行った。その様子を写真-6に示す。同じ堆積層内に何層もの異なった色の層が見られ、各層の下方は色が黒く、粒径は大きいようである。



写真-6 Sempu島での津波堆積層の拡大写真。サンゴ片が横を向いて、中間の堆積層に残されている。

## 5. 1994年ミンドロ津波

最後の例は1994年フィリピン・ミンドロ津波である。調査範囲は、甚大な被害が報告されていたミンドロ島北部を始め、ルソン (Luzon) 島南部のバタンガス (Batangas) やベルデ (Verde) 島海峡内の小さな島々である (図-7 参照)。

まず、Baco地区を始めとして、ミンドロ北部海岸では海砂の堆積による河口閉塞が見られた (写真-7 参照)。Baco地区での被害状況についてはすでに述べたが、この周辺は盤が低く、ほぼ水平であり、場所によっては渦や分岐水路 (河川) があり、内陸部で逆に地盤が低下している箇所もある。従って、遡上した津波は、内部奥深く浸入し、戻り流れがないために、海域から持ち込まれた海砂が堆積し易い状況にあると思われる。これに対し、Baco島 (Baco地区の沖合いに位置する小さな島) での地形は (写真-8 参照)、汀線から島中央部にかけて一様に地盤高さが増加する勾配である。そこでは、引き抜かれた椰子が戻り流れにより他の木の根本に引っかかっている様子が見られた。この地域では、

土砂の堆積は殆どなく海岸線で1-2mにわたる侵食が顕著に見られた (写真-9 参照)。ミンドロ津波では、陸上地形との関係により2つの砂移動が見られたことになる。

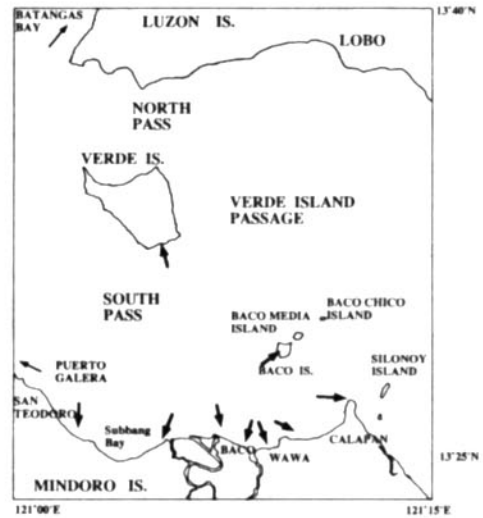


図-7 ミンドロ島北部とルソン島南部に位置するベルデ海峡。ここで、横ずれ断層による津波が発生した。矢印は、推定される第一波の進行方向。



写真-7 ミンドロ北部海岸での小さな侵食や海砂の堆積による河口閉塞





写真-8 津波来襲後のBaco島の沿岸の様子

## 6. 地形と土砂移動形態の関連

以上、現地調査で見られた土砂移動形態を地形との関連で分類すると、図-8のようになる。上3例が侵食、下2例が堆積となる。

侵食が顕著な例では、一様な緩勾配（東ジャワ津波のPancer村など）と同じく一様な急勾配と分類できる（ミンドロ島津波のBaco島など）。前者の場合は、汀線付近または汀線近傍の砂州において波先端（予想）での激しい乱流により砂が巻き上げられて掘り下げられ、津波は陸側奥へこの砂を移動したと思われる。後者の場合には、同様に押し波時に汀線で侵食が見られたが、この場合には津波の遡上後の浸水域からの激しい戻り流れにより、汀線付近で砂が削りこられるように侵食したものと考えられる。図-9には、一様勾配（1/50）での推定される底面摩擦力分布を時間軸を縦に水平距離を横軸にして示す。この結果は、津波の打ち上げ時の摩擦力が戻り流れの際のものに比べて小さく、沖合



写真-9 Baco島での海岸侵食

いへの砂の移動を示唆している。特に汀線より少し海側で非常に大きな摩擦力を示しており、図-8の説明を支持する結果である。

その他、海岸線で突然切り立ったような浸食が見られた(東ジャワ津波の Rajekwesi 村

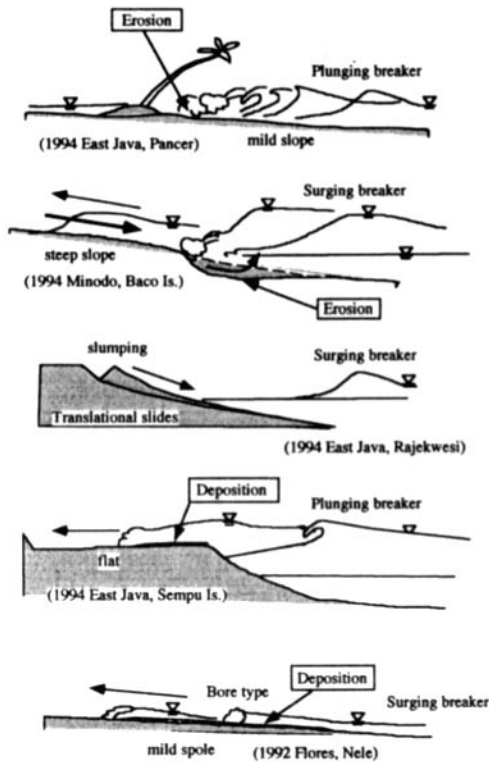
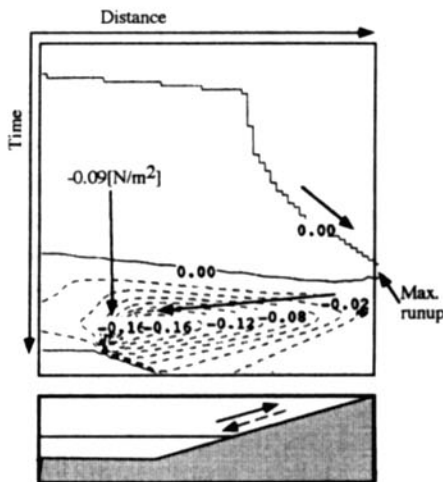


図-8 侵食例(上から3例)と堆積例(下から2例)



など)。浸食面の勾配が非常に急であり、またその範囲が数百m程度に限定されている。このことから、海面下を含めた地滑りが起こり、その陸側で地盤の低下が見られと想像する。この地滑りの原因は、強い地震動の他に津波来襲による水圧の変化も考えられる。

次に、堆積の見られたケースであるが、始めの例はステップ状地形で汀線付近はある程度勾配があるが陸側では勾配が小さく、さらに奥に行くと山の様に切り立つ斜面がある場合である(図-8の Sempu 島の例など)。ここでは、一様勾配の場合と異なり、押し波時の摩擦力が大きく、底面の砂を巻き上げながら、進入すると思われる。一方、陸上での戻り流れによる摩擦力は小さく、点線付近でのみ摩擦が働くと思われる。これは、図-9で示された数値計算結果からも説明が出来る。ただし、このような場合では、海起源の砂の移動を説明することは難しい。斜面勾配が緩やかな場合には、砕波後に、津波は段波状となり斜面を駆け上がり、徐々にエネルギーを減衰しながら遡上する。その際に、巻き込んでいた砂を沈降させ堆積していたと思われる。さらに、斜面が緩やかなために戻り流れは小さく、陸上に堆積した砂は海域に戻ることなく止まる。以上の2例はいずれも、陸上での斜面勾配の小さいことが共通にある。

以上の移動形態を、いくつかのパラメータ

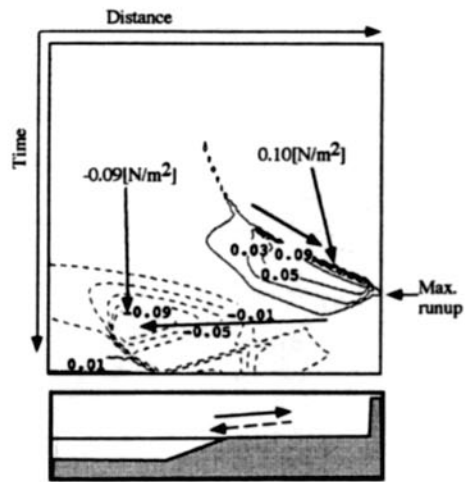


図-9 一様勾配とステップ状地形上での水面変化と摩擦力の時空間変化

で分類することを試みる。表-2には、現地で得られたデータに加えて、次式に示すパラメータ Surf Similarity Parameter (Battjes, 1974) を示している。

$$\xi_s = \tan \beta / \sqrt{H_s/L_s} \quad (1)$$

ここで、 $\xi_s$ ：碎波高を用いた Surf Similarity Parameter [Battjes, 1974]  $\tan \beta$ ：勾配、 $H_s$ ：碎波時の波高（ここでは、調査で得られた津波高さをを用いた）、 $L_s$ ：沖合いでの波長（断層パラメータより推定）、

$\xi_s$ は碎波形態の分類に用いられており、図-10に示すように、3つの形態に分けられる。沿岸での侵食には、汀線での津波の海底せん断力が重要であり、Plunging Breakerより、Plunging breakerやSurging breakerが底面に作用するせん断力は大きいと予想される。従って、 $\xi_s$ 値が大きいほど、沿岸での侵食が

大きくなるはである。図-8で示されたように、土砂移動形態は地形勾配にも関係しており、 $\xi_s$ を含めた2つのパラメータで形態の分類を試みる。その結果を図-10に示す。全体の傾向として、 $\xi_s$ 値が大きいほど侵食が卓越しその侵食深も大きい。また、勾配が緩やかな程、堆積が見られる。この堆積厚さと勾配との関係は明確には見られない。以上により、図中に表されるように、1つの境界線を引くこともできる。

## 7. おわりに

3つの津波のケースであるが、地形に対応した土砂移動形態が見られた。基本的には図-9のような分類が出来ると思われるが、地形の水平2次元的な要素の影響も大きく、今後の課題である。また、図-11に示した波先端での乱流やそれによる浮遊砂の巻き上げ率また、浮遊砂と掃流砂の堆積過程の違いなど

表-2 各地での津波土砂移動に関するデータ

	主な土砂移動携帯	最大堆積層厚または侵食深	地 形	平均勾配	測定された津波高さ	推定される波長	$\xi_s$
1992 Flores Nele	堆 積	30cm	一様勾配 + Sand bar	0.03	2.8m	30km	3.1
1992 Flores Nebe	堆 積	50cm	一様勾配	0.02	3.3-4.6m	30km	1.7
1992 Flores Babi	堆 積	10cm	平 坦	0.01	5.6-7.1m	30km	0.67
1994 Java Pancer	侵 食	0.8-1.5m	勾配+平坦	0.02	6.7-9.4m	40km	1.3
1994 Java Rajekwesi	侵 食	1.8m	勾配+平坦	0.04	4.2-7.5m	40km	2.9
1994 Java Sempu Is.	堆積 & 侵食	50-70cm	ステップ状	0.01	2.7m	40km	1.2
1994 Mindoro Baco	堆 積	50-80cm	平 坦	0.001	2.7-4.1m	10km	0.1
1994 Mindoro Baco Is.	侵 食	1-1.3m	一様勾配	0.06	6.6-7.3m	10km	2.2

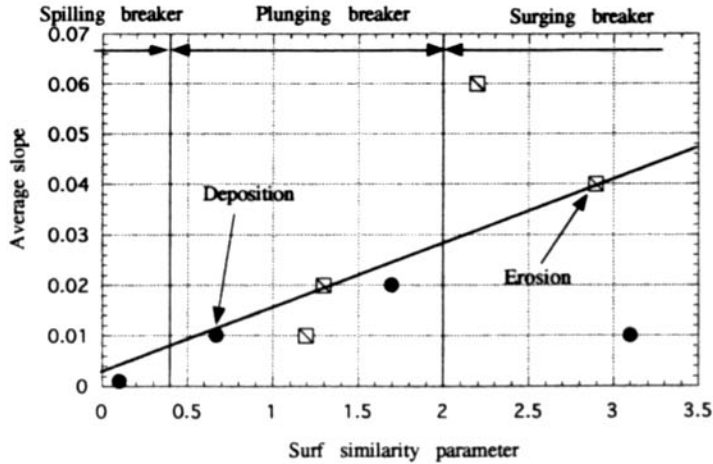


図-10 2つのパラメータによる土砂移動形態の分類

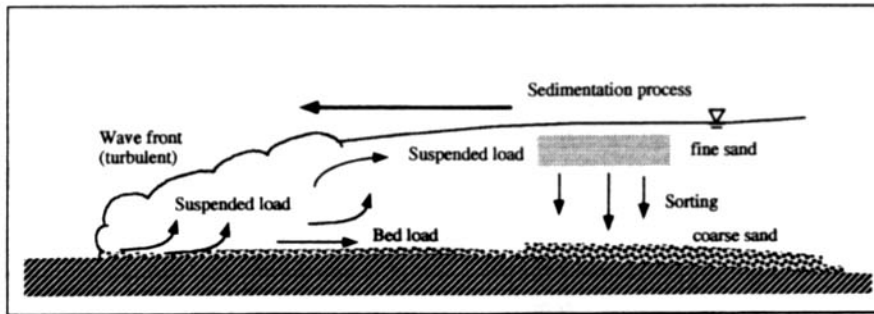


図-11 推定される津波先端部での砂移動形態

が判明すれば、津波来襲時の水理特性がさらに詳細に推定できると思われる。

**謝 辞：**この研究の一部は、文部省科研費国際共同研究（代表：首藤伸夫）により、行われた。ここに記して謝意を表す。

### 参 考 文 献

- 今村文彦, 高橋智幸 (1995), 1994年ジャワ東部地震津波の調査, 自然災害科学, Vol.14, No. 3, pp.213-218.
- 今村文彦 (1996), 1994年フィリピン・ミンドロ島地震津波の調査, 自然災害科学, Vol.15, No. 1, pp. 3-10.
- 今村文彦・箕浦幸治・高橋智幸・首藤伸夫 (1996), 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, 海岸工学論文集, 第43巻, pp.686-690.

箕浦幸治・中谷 周, 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, 1990.

都司嘉宜 (1993), 1992年インドネシア国フローレス島地震とその津波に関する調査研究, 平成4年度科学研究費補助金(総合A) 研究報告書(04306024), p.115.

Battjes, J. A., 1974, Surf similarity, Proc. 14th Coastal Eng. Conf., ASCE, pp.466-480.

Dawson, A. G., Long, D., and Smith, D. E. (1988), The stregga skide : evidence from eastern scotland for a possible tsunami, Marine Geology, Vol. 82, pp.271-276.