

## 1994年6月2日の津波によるジャワ島 Rajegwesi 村での堆積物\*

A. G. Dawson<sup>1</sup> · S. Shi<sup>2</sup> · S. Dawson<sup>1</sup> · T. Takahashi<sup>3</sup>  
and N. Shuto<sup>3</sup>

この論文では、1994年6月インドネシア・ジャワ東部地震津波に伴う堆積物の粒度解析結果について述べる。津波堆積物に関する証言が得られた地域において、サンプリングが行われている。サンプルの粒度解析の結果、粒径、標準偏差、歪度、尖度が鉛直方向に変化しており、津波氾濫の複雑さを示している。これらの情報を、最近発生した他の津波（1992年インドネシア・フローレンス津波）のデータと照らし合わせ、津波による堆積過程の有用であるか検討する。これにより、世界の他地域での歴史津波による堆積物の理解に貢献できるはずである。

## 1. はじめに

近年、歴史津波の研究が数多く成されている。例えば、北アメリカの太平洋側の海岸線 (Atwater and Yamaguchi, 1991; Atwater and Moor, 1992), ハワイ (例えば, Moor and Moor, 1988), チリ (Paskoff, 1991), 日本 (Minoura and Nakaya, 1991), スコットランド (例えば, Dawson 他, 1988), ポルトガ

ル (Andrade, 1992) についての研究がある。これらの研究は、海岸変形の研究と同様に、地震危険度の研究においても、歴史津波が重要であることを述べている。

これらの有史前の津波は、地形学的、堆積学的痕跡の多様性を示している。このような痕跡による研究では、対象の堆積物や地形が津波による結果であって、永年の海面変化や高潮によるものではないことを判別する必要がある。

このような問題のため、最近の津波に対する堆積学的手法を早急に検討する必要があると思われる。例えば、最近3、4年間に発生した津波は、観測によって津波堆積物がどのような場所で生じるかを確認できるため重要である。このような研究を行う機会が、1994年6月、インドネシアのジャワで発生した地震津波直後に得られた。

## 2. 1994年ジャワ津波

1994年6月2日、マグニチュード7.7の地震が、ジャワ海岸のおよそ200km南方で発生

<sup>1</sup>Centre for Quaternary Science, School of Natural and Environmental Sciences, Coventry University, Priory Street, Coventry, England.

<sup>2</sup>School of Applied Sciences, Inverness College, 3 Longman Road, Longman South, Inverness, Scotland.

<sup>3</sup>Disaster Control Research Center, Tohoku University, Sendai 980-77, Japan.

\*原論文は、1995年11月に南米チリで開催された The IGCP 367 Meeting on 'Rapid Coastal Changes' での Quaternary Science Reviews に掲載されたものである。本原稿は、著者の一人である高橋智幸が訳した。

\*原題は「COASTAL SEDIMENTATION ASSOCIATED WITH THE JUNE 2ND AND 3RD, 1994 TSUNAMI IN RAJEGWSI, JAVA」である。津波の日付が6月2日と3日となっていたが、本原稿では、実際に津波が発生した6月2日に修正してある。

\*原論文には、章節番号は付いていないが、訳者が加筆した。

した(図-1)。この地震に伴う津波は、インドネシアとオーストラリアの一部に襲撃している。ジャワ島Rajegwesi村では、最高12~13mにおよぶ津波が何人かにより目撃されている。高橋と首藤による津波数値モデルでは、海岸での複雑な遡上を示しているが、全

体的に観測と一致している(図-2)。調査の結果、Rajegwesi付近では、津波による氾濫が3回あり、それらが広範囲な破壊を招いたと考えられる(図-3, 図-4)。堆積物のコアは2つの測線上で採取された(図-1)。

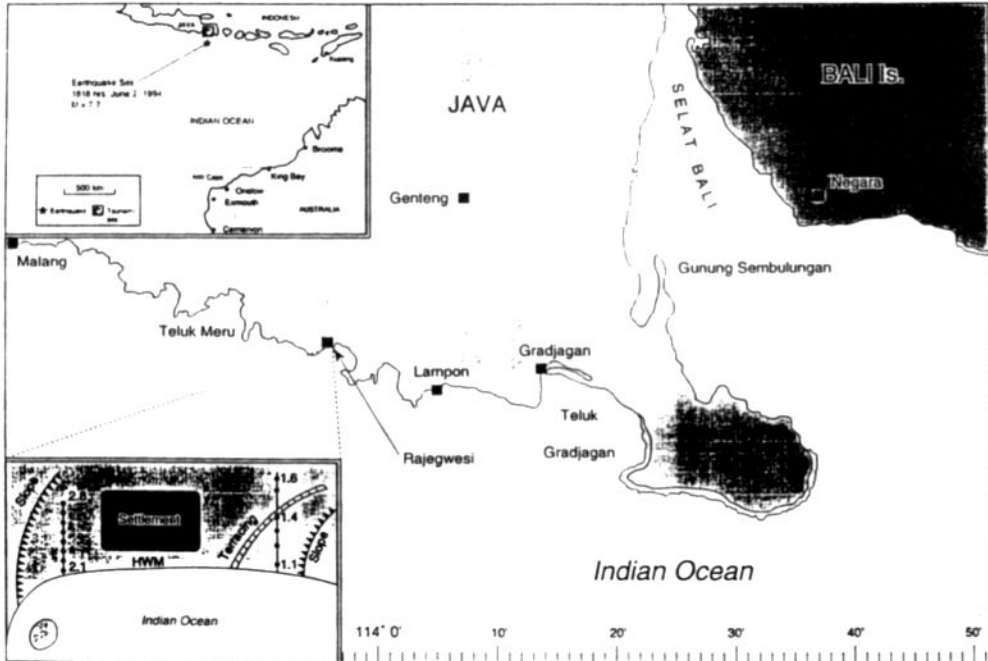


図-1 地震とRajegwesi村の位置。罫みはコア採取位置

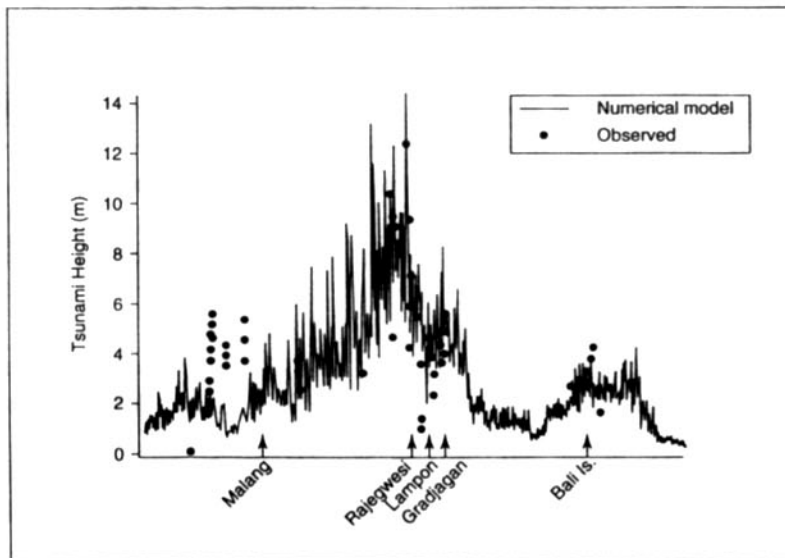


図-2 証言より得られた津波遡上高分布と計算結果(首藤・高橋)の比較。



図-3 1994年ジャワ津波による沿岸部での被害。前面に不連続な津波堆積物が見られる。また、津波により倒された草も見られる。(写真：S. Tinti氏提供)



図-4 Rajegwesi村での破壊された集落。不連続な堆積物、流されたコンクリートブロックや木が見られる。(写真：S. Tinti氏提供)

## 2.1 研究方法

本研究では、Rajegwesi村の堆積物に対する詳細な粒度分析の結果について検討している。サンプルの粒径解析は、レーザー粒度分析器 (Malvern 2600 シリーズ, Malvern 機器, 1990) を用いて行われた。堆積物のコアを隙間無く 1cm 厚で切り出してサンプルを作成し、粒径の鉛直分布を調べた。この研究で使われている統計的手法として、対数正規型理論 (McBride, 1971) を基礎としたモーメント統計式を採用している。Malvern 機器は、解析結果を異なる粒径の階級毎に百分率で示し、それぞれの階級の上限と下限は  $\mu\text{m}$  の単位で表されている。 $\mu\text{m}$  での値は、次式により  $\phi$  に変換する。

$$\phi = -\log_2 X \quad 1.1$$

ここで、 $X$  は  $\text{mm}$  単位での粒径。

サンプル中の平均粒径  $d$  は、次式で求められる。

$$d = \sum X_i d_i / \sum X_i \quad 1.2$$

ここで、 $d_i$  は階級  $i$  の中央値、すなわちその階級の上下限の算術平均である。 $X_i$  は、階級  $i$  の粒径に分類される粒子の全体に対する割合である。

標準偏差は平均粒径からの広がりを表す尺度であり、次式から求められる。

$$\delta = \{ \sum (d_i - d)^2 X_i / \sum X_i \}^{1/2} \quad 1.3$$

歪度は、度数分布の偏りの大きさと方向を表す尺度、すなわち、対称性からのずれを表している。次式から求められる。

$$s = \sum (d_i - d)^3 X_i / \sum \delta^3 X_i \quad 1.4$$

尖度は、粒径分布の均一性を表す尺度で、次式から求められる。

$$k = \sum X_i (d_i - d)^4 / 100 \delta^4 \quad 1.5$$

## 2.2 堆積物サンプルの採取

ジャワ津波発生の数日後、著者の一人 (高橋) が現地を訪れ、津波が数波氾濫した Rajegwesi 村周辺で、証言に基づく詳細な情報を入手した。証言から堆積した場所が判明したため、短期間の調査を行い、津波堆積物のサンプルを採取した。幾つかのコアを 2 測線に沿って採取し (図-1)、詳細な解析を

行うため研究室へ送った。Rajegwesi 付近の幾つかの地域では、コンクリート・ブロックや巨礫を含む粗い漂流物が津波により輸送されている。Rajegwesi でも、厚さが 0.4m にもおよぶ連続または不連続な堆積層が、津波により形成されている (図-3, 図-4)。研究室では、各コアを 1cm の間隔 (時には、5~10mm) で薄く切断し、平均粒径 ( $\mu\text{m}$ )、標準偏差、歪度、尖度を測定した。

## 2.3 粒径分析: コアの深さ方向の変化

通常、各コア内に見られる津波堆積物の粒子は、100~400  $\mu\text{m}$  の範囲内にある。希に、貝殻を含んだ砂が堆積する (例えば、コア 2.8 (図-5))。図-6, 図-7 のヒストグラムでは、粒径がよく分級された堆積物から、あまり分級されていない堆積物まで見られ、粒径分布の組成に大きな変化があることが分かる。粒径分布は、Shi 他 (1995) が述べているよりも大きな尖度 (よく分級されている) を示し、また、Shi 他 (1995) が述べている 1992 年インドネシア・フローレス津波での粒径分布の変化に類似した以下の 3 つのグループが生じている。

1) 主要な 1 つのモードで特徴づけられ、よく分級されていることを示す対数正規型に近似できる粒径分布。一般的に、これらの堆積物は砂質で、多くの場合、シルトや粘土で構成されたはっきりとした裾を持つ。ただし、シルトや粘土の全組成中での割合は小さいため、主要な粒径は 250~400  $\mu\text{m}$  の範囲に存在する。(訳者注: 図-6 の B, C, D。粒径が 100  $\mu\text{m}$  から 200  $\mu\text{m}$  の範囲に数パーセントの分布が存在している。)

2) 複数の最頻粒径を持つ分布。少なくとも、細粒の砂と粗粒の砂 (ここでは、300  $\mu\text{m}$  以上と定義する) の間に 2 つの支配的なモードを持つ。(訳者注: 図-6 の A や図-7 の A。細砂と粗砂の区切りとして定義されている 300  $\mu\text{m}$  辺りで最頻となる分布を持つ。ただし、土質工学では、それらの区切りは 420  $\mu\text{m}$  である。)

3) あまり分級されていない分布。明確な

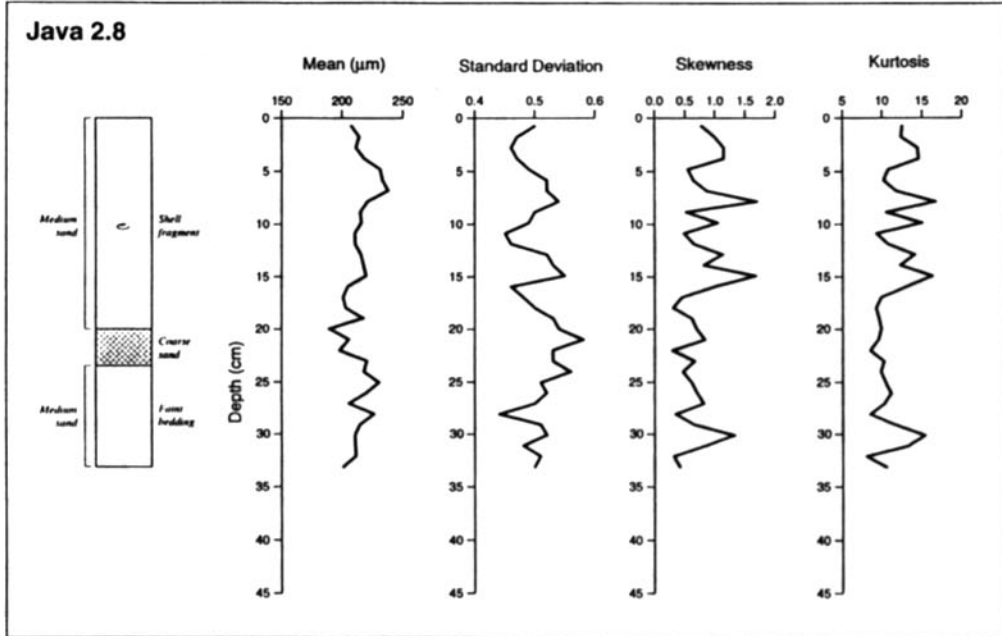


図-5 コア2.8の平均粒径，標準偏差，歪度，尖度の鉛直変化。

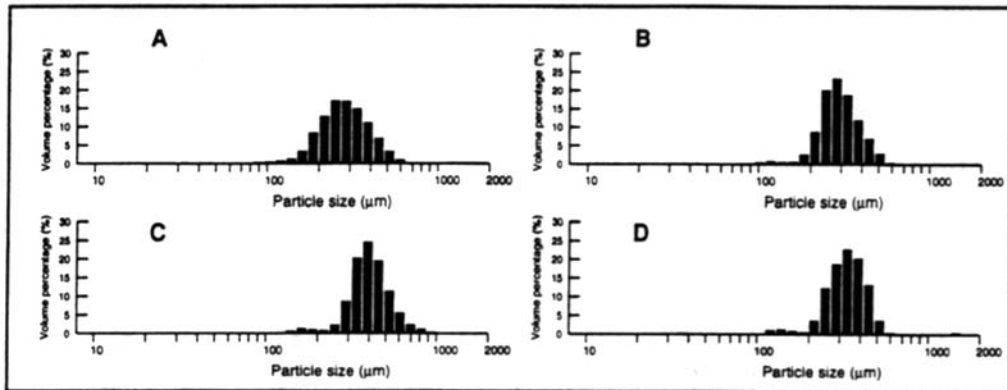


図-6 コア1.2の粒径分布。記号A～Dは図-9を参照。

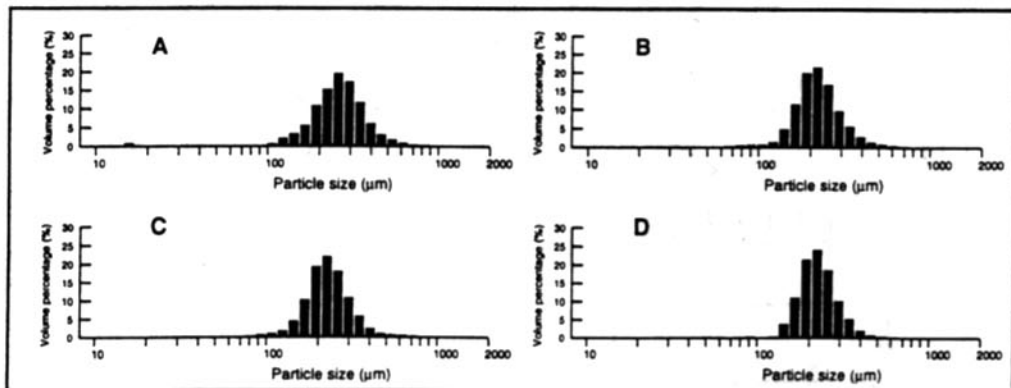


図-7 コア2.7の粒径分布。記号A～Dは図-10を参照。

単一の最頻度を示さず、シルトや粘土から砂に至るまでよく混合された組成を持つ。(訳者注：図-7のB, C, D. 200 $\mu\text{m}$  辺りで最頻となる分布を持つ。土質工学では、シルトと粘土の区切りは5 $\mu\text{m}$ 、シルトと砂の区切りは74 $\mu\text{m}$ である。)

Rajegwesiでの津波堆積物は、卓越した3つ粒径集団で構成されている。それらは、a) 200~400 $\mu\text{m}$ の範囲にある最も頻度の高い集まり、b) 100~150 $\mu\text{m}$ の範囲の細粒径で構成されている集まり、c) およそ350 $\mu\text{m}$ 以上の粒子で構成されている最も頻度の低い集まりである。概して、ジャワ津波での堆積物は、フローレス津波でのそれに比べ、極めて均一な粒度分布を示している。

粒径の激しい変動が説明している様に、平均粒径、標準偏差、歪度、尖度の計算結果は、明らかな鉛直変化を示す。多くのコアは、これらのパラメータの深さ方向の変動によって特徴づけられている。

## 2.4 平均粒径の鉛直変化

平均粒径の鉛直変化には、裸眼では辛うじて気付く程度で、高精度の粒度解析でやっと判別できる様な場合がある。例えば、コア2.4(図-8)では、底部から上部までの変化が50 $\mu\text{m}$ にも満たない。一方、はっきりとした変化が見られる場合もある。例えば、コア1.2(図-9)では、コアの深さ31cmに渡って、約200 $\mu\text{m}$ (210~380 $\mu\text{m}$ )も平均粒径が変化している。

他のコアでは、局所的な変化はあるが、全体的に見て、浅くなるに連れて平均粒径が減少する傾向がある(例えば、コア2.7(図-10))。このコアでは、底部で最大の250 $\mu\text{m}$ となり、上部で210 $\mu\text{m}$ 近くまで減少する。また、局所的に、約50 $\mu\text{m}$ のオーダーで平均粒径が変化している。コア2.5も同様の傾向を示す。この様に、平均粒径が鉛直方向へ連続的に変化するという特徴は、幾つかのコアで明瞭に見られる。例えば、コア2.7では、深さ24~30cmと14~18cmの範囲で、上方へ向か

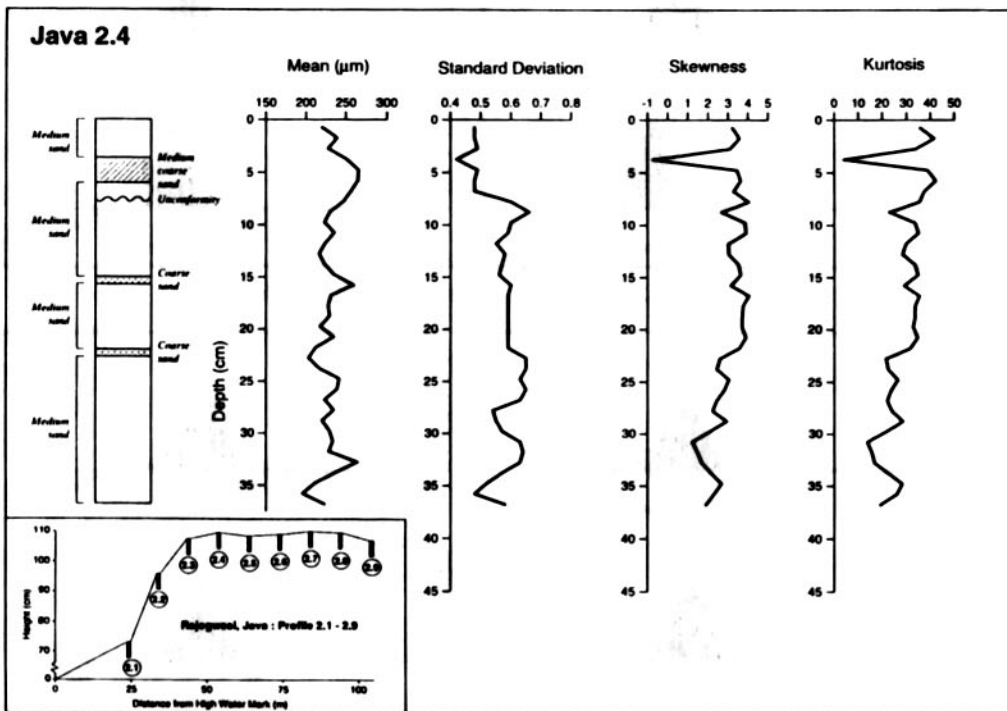


図-8 コア2.4の平均粒径、標準偏差、歪度、尖度の鉛直変化。囲みは測線とコア採取地点。

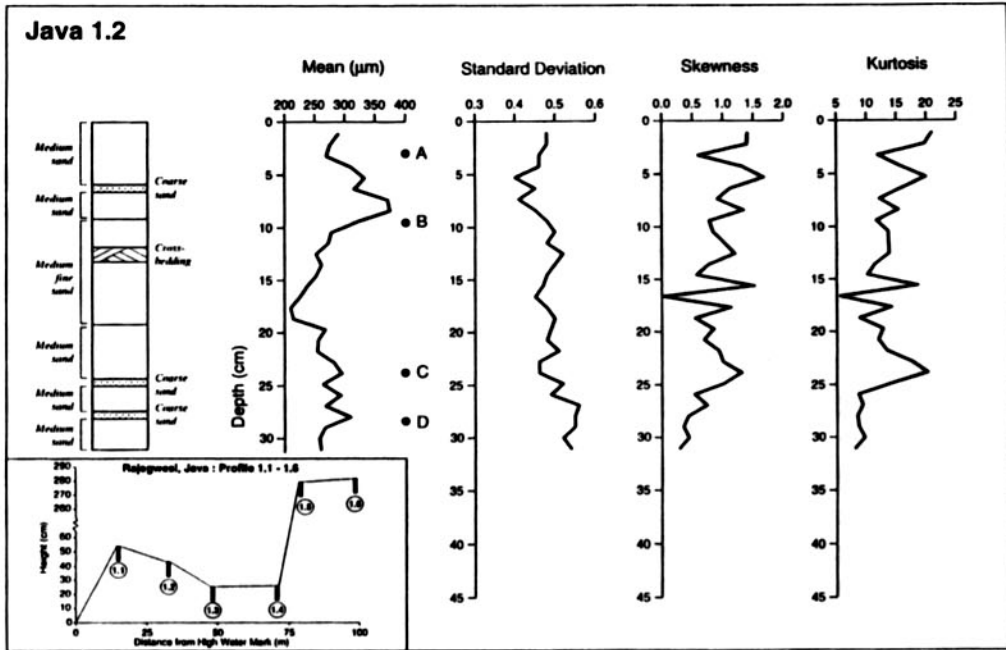


図-9 コア1.2の平均粒径，標準偏差，歪度，尖度の鉛直変化。囲みは測線とコア採取地点。

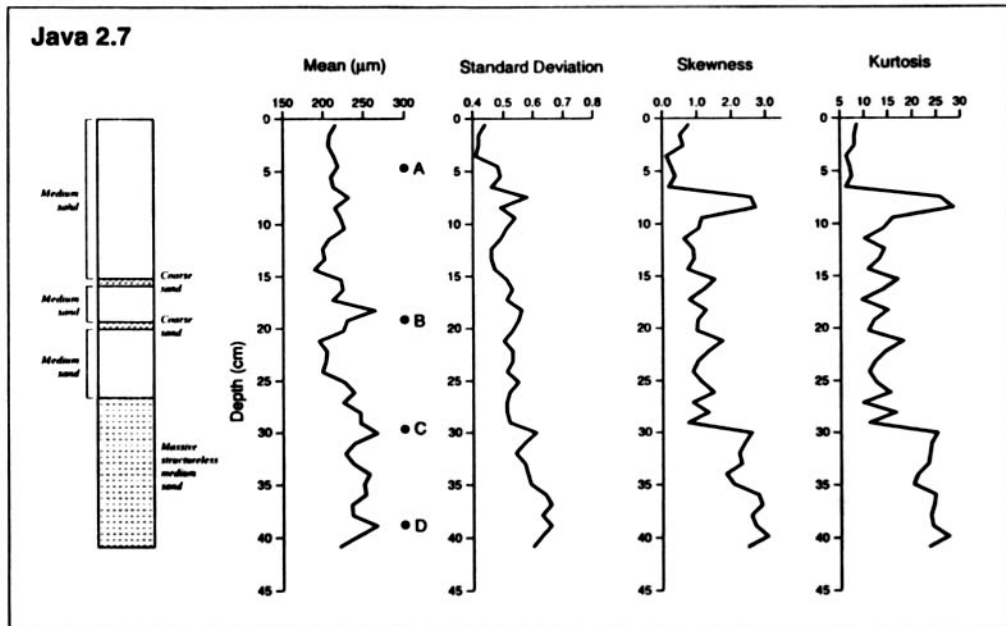


図-10 コア2.7の平均粒径，標準偏差，歪度，尖度の鉛直変化。

うほど，平均粒径が連続的に減少している（図-10）。

また，内陸へ向かう方向にデータを観察すると，平均粒径の空間変化はわずかで，顕著な減少も見られない。

### 2.5 標準偏差

概して，標準偏差の変化は，平均粒径で見られる傾向に類似している。しかし，この類似は，全体的に見た場合であり，詳細に観察した場合にも言えるわけではない。例えば，



コア2.7では、平均粒径と標準偏差の両者とも、上方へ向かうにつれて連続的に減少しているが、細かく部分的に見るとそれぞれ異なっている。多くのこの様な不一致は、粒径分布の形状が様々で、平均粒径の連続的な変化とは一致していないことを示している。

幾つかのコアでは、標準偏差が突然に変化している。例えば、コア2.4 (図-8) では、深さ4~8cmの間の平均粒径の増大が、標準偏差の急激な減少に一致している。この減少は、コアの他の部分 (例えば8~33cm) に比べて、極めて大きい。

標準偏差の測定値は、データが平均粒径からどれだけばらついているかを表している。したがって、標準偏差の急激な変動は、独自のピークを持つ異なる粒径の粒子群が混在していることを示している。

## 2.6 歪度

歪度も、比較的短い鉛直間隔の間に、大きな変化を見せる。例えば、コア2.7 (図-10) では、深さ5~10cmの間に、0.3~2.9の範囲にも至る。

高い歪度は、中程度の砂粒子がピークとなり、裾は細かい粒子から構成されている粒径分布に一致する。一方、低い歪度は、粗い粒子から裾が構成されている粒径分布に一致する。

その様な歪度の大きな変化は、多くのコアで生じている。例えば、コア1.2 (図-9) では、深さ15~18cmの3cmの間に、歪度は0.0~1.5まで変化している。対応する平均粒径のデータを観察すると、これらの大きな歪度の変化は、平均粒径の変化とは関連していないことが分かる。しかし、粒径の全体的な組成には関係していると思われる。

## 2.7 尖度

尖度という指標は、一般的に、粒径分布がどの程度尖っているかを表している。高い尖度は、特徴的な1つのピークがある急な粒径分布に一致する。一方、低い尖度 (例えば、5~10 (McBride, 1971)) は、極めて平らな

粒径分布に一致する。

尖度の減少は、裾に粗い粒子が増加したことを暗示しているが、この粗い粒度の裾がいつも、ヒストグラム中の明らかな分かれ成分として示される訳ではない。図-8~10を見ると、尖度の変化は、通常、歪度の鉛直変化をよく反映している。粗い粒子の裾を持つ粒径分布は、一般に、平らな分布を表す低い尖度が特徴である (例えば、コア1.2 (図-9))。

しかし、Rajegwesiでは他に、中程度の粒径の砂粒子が卓越しており、高い歪度を持つ分布もよく観察されている。また、それらは、尖度も高く、粒径分布中、比較的明瞭な1つのピークが存在することを示している。ただし、粒径分布に関するこれらの2つの指標は、コアの各深さでの平均粒径の増加や減少とは類似していない。また、標準偏差の鉛直変化とも明らかに一致していない。

Rajegwesiで多く見られる堆積物は、中程度の粒径の砂粒子に富んでおり、卓越した一様な粒径分布が特徴である。

また、輸送と堆積の物理過程は、粒度曲線のわずかな勾配の変化によって分類される様な、より微妙な粒径分布に関連していると思われる。

## 3. 考察

海岸堆積物と歴史津波の因果関係については多数の発表が成されているにも関わらず、最近の津波堆積物に関する研究は相対的に少ない。著者の知るところによれば、堆積物についてのデータが調査された最近の津波としては、1992年12月12日インドネシア・フローレス津波 (Shi他, 1993; Shi, 1995; Shi他, 1995) のみである。

今回のジャワ津波に関する解析結果は、津波堆積物がそれぞれ異なる性質を持っていることを示してしる。ただし、それらの相違は、ジャワ津波調査で入手でき、しかもフローレス津波と比較できた情報から導かれた結論であることを断っておく。



### 3.1 空間変化と粒径

Shi (1995) と Shi 他 (1995) が述べているように、フローレス津波では、海岸から内陸部へ向かうにつれ、粒径が明らかに減少している。しかし、Rajegwesiではこの傾向はみられていない。各コア内に見られる粒径の鉛直変化の方が、コア同士の空間変化よりも大きい。

この相違の原因は不明である。砂の供給元の領域における粒径の均一性が関係していることも考えられる。

Rajegwesiでは、目撃されている主要な3波が、堆積に関与したと思われる。また、それらの結果、短い間隔で、堆積物の性質と形状が大きく変化する様な堆積過程が生じたものと考えられる。ちなみにその変化は、フローレス津波の場合に比べて、極めて大きい。

Rajegwesiでの粒径分布は、全体的に見ると、1つの卓越した粒径で特徴づけられる。そして、細かい粒子による裾と密接に結びついている。また、フローレスで観察されたような複数のモードを持つ例は多くない。

この相違はやはり不明であるが、ジャワ津波での供給砂は、フローレスのそれに比べて均一であったことはあり得る。(Shi 他, 1995)。

Rajegwesiでの粒径分布の多くは、特徴的だが、目立たない細かい粒子から成る裾を持つ。そして、時に、明瞭な小さな第二のモードを持つ。

フローレス津波の場合では、津波氾濫域内の多くの細粒子は沖に運ばれ、中程度か粗い砂粒子のみが残ったことが分かっている。しかし、Rajegwesiでは、津波の影響を受けていない場所の堆積物が得られていないため、フローレスとの類似性を示すことも、比較することもできない。しかし、第二の細かい粒子モードは、その場所に元からあった多くの細砂が津波により乱されたことを示しているのかもしれない。

3.2 平均粒径および標準偏差の鉛直変化  
幾つかのコアにおいて、平均粒径と標準偏

差の鉛直変化は、全体的に見るとよく対応している。しかし、内部では微妙に変化しており、必ずしも一致していない。多くの場合、標準偏差の変化は、平均粒径の連続的な増加または減少に対して連動していない。

このような相違の原因は不明であるが、堆積物の供給元や堆積過程の特徴によって、堆積そのものが制御されている結果とも考えられる。

### 3.3 歪度と尖度

ほとんどのコアでは、歪度と尖度は互によく似ている。また、粗い粒子からなる裾を持ち、尖度が低く、平坦な粒径分布となる。一方、高い歪度（よく見られる特徴）は、高い尖度に関係しており、比較的ピークを持ちやすい分布となる。

しかし、これらの2つの指標は、標準偏差や平均粒径の変化との相関は高くない。また、歪度および尖度の両者が急変する様な粒径分布の変化がなぜ起こるのかは不明である。

### 3.4 フローレス津波での堆積物と分級

フローレス津波の場合には、一連のコアで、上方へ向かうほど、平均粒径が連続的に減少し、細くなる特有の傾向が見られた。様々な粒径毎の集まりは容易に判別でき、最も粗い粒子が堆積物の下層に堆積し、上方にいくほど細くなり、堆積物の割合も減少している。

これらの測定結果は、同津波で注目された現象によく一致しており、大きな沈降速度で、細かい粒子と粗い粒子が同時に堆積する特殊な沈降過程を示している (Shi 他, 1995)。

また、同津波でみられた深さ方向の粒径の大きな変動は、上方へ向かうほど、連続的に細くなる性質と分級が大きくなる度合いの間に高い相関があることを示している。結論として、その様な上方へ細くなる傾向と短時間での分級の効果は、津波エネルギーの連続的な減少から生じていると考えられる。

#### 4. おわりに

ジャワ島 Rajegwesi での研究が、最近の津波による特徴的な粒径分布を持つ堆積物およびその津波堆積物の輸送過程の複雑さを示す第二の実例である (インドネシア・フローレス津波に続く)。フローレス津波の場合とは異なり、ジャワ津波での堆積物は、局所的な浸食との明確な関係は見られない。代わりに、裾が細粒分から成る分布と支配的な単一モードを持つ堆積物の輸送と沈降を示している。

Shi 他 (1995) は、フローレス津波では、津波が海岸部に浸水している間、十分な砂の供給が有り、異なる粒径範囲の粒子集団が何度か堆積したため、堆積量が多くなったのだと推測している。

結論として、乱流作用や急速な堆積作用、輸送物質特性の相互作用が、特定の津波堆積物の特徴を述べる場合に大きな役割を演じていると言える。この考えは、ジャワ津波に適用され、フローレス津波と比較された。

津波は、エネルギー状態の急激な変化に関与しているため、乱れの大きい期間 (遡上時) は、静水状態 (引き波に転じる時) になる前や乱れが増加する状態 (引き波) になる前にも発生する。

津波のこの複雑な流体力学から、堆積の生じているような比較的短い時間で、水の状態が急変している様な場合には、海岸のそれぞれの場所でその場所だけの特徴を持つことになる。つけ加えると、その様な短時間で、海岸を横切る水流が方向を急に変えたら、海岸堆積物の輸送および沈降過程は全く個別なものになる。

個々のコアに見られる粒径分布の複雑なパターンと堆積物の特性の大きな鉛直変動は、これらの過程の複雑性をよく表している。しかし、本論で述べている様な特性を示す堆積物の輸送・沈降については、現在のところ、全体的な物理過程のみを検討できているだけである。

最近の津波を対象としている限りでは、津

波堆積物のパターンが複雑なのは明らかである。ある場合には、上方へ向かうほど連続的に細くなる性質が、極めて明瞭に現れている。しかし、他の場合では、その様な傾向はほとんど見られない。

もし、多くの津波堆積物が、押し波や引き波の状態だけで生じており、その途中の状態、すなわち押しから引きへ転じる時に生じていないのなら、堆積物のパターンはそれほど複雑ではないであろう。その押しから引きへ向きを変える間に堆積物が生じると言う仮説には、より多くの検討が成されるべきである。この仮説は、詳細に検討される余地を残しており、最近の津波で観測されている堆積過程についての経験的研究をより多く必要としている。

謝辞：研究室での解析において Peter Taylor 氏の協力を得た。また、図面の作成に当たっては Jason Jordan 氏と Paul Bird の助けを得た。ここに記して、謝意を表す。

#### 参 考 文 献

- Andrade, C. (1992) : Tsunami generated forms in the Algarve barrier islands, In : A. G. Dawson (ed), *European Geophysical Society 1992 Tsunami Meeting. Sci. Tsunami Hazards*, 10, 21-34.
- Atwater, B. F. And Moor, A. L. (1992) : A tsunami about 1000 years ago in Puget Sound, Washington. *Science*, 258. 1614-1617.
- Atwater, B. F. And Yamaguchi, D. K. (1991) : Sudden, probably coseismic submergence of Holocene trees and grass in coastal Washington State. *Geology*, 19, 706-709.
- Dawson, A. G., Long, D. And Smith, D. E. (1988) : The Storegga Slides : evidence from eastern Scotland for a possible tsunami. *Marine Geology*, 82, 271-276
- McBride, E. F. (1971). *Mathematical treat-*

- ment of size distribution data. In Carver, H. (ed), *Procedures in Sedimentary Petrology*. Wiley. New York.
- Malvern Instruments (1989). Series 2600-User Manual. Spring Lane South, Marlvern, Worcs. WR14 1AQ, UK.
- Minoura, K. And Nakaya, S. (1991). Traces of tsunami preserved in inter-tidal lacustrine and marsh deposits : some examples from northeast Japan. *Journal of Geology*, 99, 265-387.
- Moor, G. W. And Moore, J. G. (1988). Large-scale bedforms in boulder gravel produced by giant waves in Hawaii. In : Clifton, H. E. (ed), *Sedimentologic Consequences of Convulsive Geologic Events*, *Geological Society of America Special Paper*, 229, 101-110.
- Paskoff, R. (1991). Likely occurrence of a mega-tsunami in the Middle Pleistocene near Coquimbo, Chile. *Revista Geologica de Chile*, 18, 87-91.
- Shi, S (1995). Observational and theoretical aspects of tsunami sedimentation. *Unpublished PhD Thesis, Coventry University*, 282p.
- Shi, S., Dawson, A. G. and Smith, D. E. (1993). Geomorphological impact of Flores tsunami of 12th December 1992. In : *Tsunami '93, Proceedings of IUGG/IOC International Tsunami Symposium, Wakayama, Japan, August 23-27, 1993*, pp. 689-696.
- Shi, S., Dawson, A. G. and Smith, D. E. (1995). Coastal sedimentation associated with the December 12th, 1992 tsunami in Flores, Indonesia. *Pure and Applied Geophysics*, 144, 525-536.