

Paris, R., Lavigne, F., Wassmer, P. and Sartohadi, J., 2007. Coastal sedimentation associated with the December 26, 2004 tsunami in Lhok Nga, west Banda Aceh (Sumatra, Indonesia). *Marine Geology*, 238, 93-106.

## Abstract

2004年12月26日のスマトラでの津波は人類史上で最大規模の津波の一つであり、津波の高さは最高30m、遡上高は海拔50mで、内陸6kmまで遡上した。本論では、主に粒度分析に基づいたLhok Nga湾(Banda Acehの西岸)におけるイベントの記載と、津波堆積物の解釈を示す。Lampuukにおける海から内陸3.5kmまでの横断面は、内陸へ向かって細粒化、薄層化、分級の良くなるシーケンスが2層見られる。第1シーケンスの最も厚い部分(0~1.5km内陸)の断面は、連続した三度の遡上(流入)と、最後の余波(引き波または流出波)の堆積物であることを示唆する。1.5kmから3.5km内陸では、(堆積)記録は第2波の最大級の波(15-30m)を主体とする。正級化した2対または3対の層は、それぞれの波の遡上の識別に使用されてきた。引き波の堆積物として解釈される最上位の層は、海側に向かって粒径が増大し、分級度は小さくなる。地形の局地的な影響は以下の通りに識別できる：低地(50-80cm)の堆積物が最も厚いこと、堆積作用が急傾斜によって制限された時には上部の葉理を持つ組織と層厚は空間的にかなり変化すること、遡上の限界での内陸への粗粒化と分級の著しい低下、異なる堆積物の起源を反映する粒径分布の二峰性、である。最後に、26の地層断面における水平方向と垂直方向の傾向を合わせることで、我々は巨大津波の堆積物の運搬モデルと堆積モデルを提案する。

## 1. Introduction

巨大津波は、数分で大規模な浸食、堆積物の運搬と堆積をもたらすので、主な地形的災害である。津波の痕跡は、海岸線に数百kmに沿って浅瀬から内陸数kmまで広がる。津波堆積物は埋没し保存されると、過去の津波の地質学的な記録となる。そのような堆積物の識別と分析は、歴史上の津波の復元や津波の災害をより良く評価するために必要なエネルギーの非常に大きいイベントの堆積物特性を提供する(Dawson, 1996; Goff *et al.*, 2001; Felton and Crook., 2003; Geifenbaum and Jaffe, 2003; Scheffers, 2004)。さらに、過去の津波堆積物は、地震が頻繁に起こる地域での、地震の再来間隔を決定するためにしばしば使用されている(Atwater, 1987; Minoura and Nakaya, 1991; Shennan *et al.*, 1996; Luque *et al.*, 2001; Cisternas *et al.*, 2005; Williams *et al.*, 2005)。津波自体の特徴(波高、速度、方向)と、地形と堆積物の供給源との間の相互作用は、津波堆積物の空間分布と特性を決めているようである(Dawson *et al.*, 1996; Jaffe *et al.*, 2003)。一連の判定(診断)の際の特徴は、過去の津波堆積物か、または高浪による堆積物のような他の堆積物かどうかを区別できる：津

波堆積物は広域的に広がり、一般的に内陸に向かって細粒化し、級化を示し、上部と下部のサブユニットを明瞭に識別でき、基底面は不整合的あるいは浸食面であり、碎屑物の大きさは 256 mm より大きい巨礫から細粒シルトまであり、化石(サンゴ, 貝)を豊富に含むサブユニット, 再堆積したリップアップクラスト(偽礫)(例, 土壌, 根, 樹木, 碎屑物), そして, 礫のファブリックは, 陸側, 海側の振動する古流向を示す(Dawson, 1994; Fujiwara *et al.*, 2000; Nanayama *et al.*, 2000; Takashimizu and Masuda, 2000; Goff *et al.*, 2001; Bondevik *et al.*, 2003; Goff *et al.*, 2004; Perez Torrado *et al.*, 2006).

現在のところ, 我々は津波時の堆積輸送と堆積の過程については推測しかできない. 解決すべき主な問題は, 堆積物のシーケンスは, 全ての津波の段階を記録しているか, あるいは, ある地域の記録の主体は, 主要な波あるいは最後の波かどうかである. 最近の津波堆積物とそれらを堆積させたイベントの詳細な分析は, Shi *et al* (1995), Minoura *et al* (1997)によるフローレス島において(1992年12月の津波), Bourgeois and Reinhart (1993)によるニカラグアにおいて(1992年9月の津波), Nishimura and Miyaji (1995), Sato *et al* (1995)による北海道において(1993年7月の津波), Dawson *et al* (1995)によるジャワ島において(1994年6月), Gelfenbaum and Jaffe (2003)によるパプアニューギニアにおいて(1998年7月), そして, Jaffe *et al* (2003)によるペルーにおいて(2001年6月)において実施されてきた.

本論文では, 人口密度の高い Lhok Nga の湾(バンダアチェの西海岸, 25km<sup>2</sup>: Fig. 1)での 2004年12月26日の津波の記述(説明)と, 主に粒度分析に基づいた津波の砂質堆積物の解釈を示す. スマトラ(インドネシア)の 2004年12月26日の津波は, 人類史上で最大規模の津波の一つであり, 最悪であった. 津波は, マグニチュード 9.3 の地震が発生してから 15 分後に Banda Aceh の海岸に達し, 次に, 都市と耕地の 100 km<sup>2</sup> が浸水した. International Tsunami Survey Team (ITST)により 2005年1月, さらに最近では Tsunarisik チームが 2005年の8月と12月に, 海岸での津波の高さは 5-30m で遡上高は 51m と(遡上高は陸側の浸水した限界と海面からの相対的な高さである)報告されている.

## 2. Methodology

12月26日の3週間後に Lhok Nga で, ITST の第1回調査において野外調査を実施し, そして, 追加のデータを 2005年8月に採取した. 我々は様々な場所で, 津波の到着時刻, 津波の方向, 大きさ, 速度と波の数について複数の証言を集めた. 流れの方向は, 傾いた幹や支柱, 木の周りに付着した残骸を対象に, コンパスを用いて計測した. 最小限の浸水の高さは, 折れた枝や, はがれた樹皮, また建物について水の跡や木の上に残された破片の標高から推定した. これらのデータを, 潮の干潮に関して補正し, 26地点でピットとトレンチを掘り, その内の15地点は Lampuuk と Lhok Nga の間の 3.5km の横断面(トランセクト)沿いにある(Fig. 1). この横断面の向きは, 裾礁から水田の方向であり, 津波の

遡上した方向に一致する。地形プロファイルは GPS とレーザーレンジファインダを用いて測定した (Fig. 2)。

津波堆積物は計測し、記載し、撮影を行い、59 試料を実験室での分析のために採取した。試料は過酸化水素溶液で加熱して有機物を除去した後、2mm (-1φ) のふるいにかけてから、レーザー回析粒度分析を行った。結果は  $\mu\text{m}$  で表示し、 $\phi$  スケールに変換した。平均サイズ、分級度、歪度、尖度をそれぞれのサンプルごとに計算した。歪度は、粒度分布の対称性の尺度である。尖度は粒度分布が、正規分布に対して尖っているか、またはフラットであるかどうかの尺度である。粒度サイズの勾配は、全断面 (粒度分析による) に沿ったものと、各層の内部 (フィールドでの観察時) の両方で考察した。

### 3. The December 26, 2004 tsunami event in Lhok Nga

2004 年、12 月 26 日、午前 8 時 (現地時間 7 時 58 分、協定世界時 UTC 00 時 58 分) に、Lhok Nga でマグニチュード 9.3 の地震が起こった。ほぼ全ての建物や樹木が流され、全ての道路や橋が激しく破損または完全に破壊された。津波が Lampuuk (港の北部) の村を襲った後には、モスクや少数のココナッツとカジユアリーナの木々が残っているのみであった。湾の南部にある港やセメント工場では、部分的な被害を受けた。Lhok Nga で確認された死者数は 7000 人を超えた。

津波は主に 3 つの波から構成されていた。地震発生後、津波が 10 分後に海上から観察されたのちに、第一波は、その 3 分後に南西から押し寄せてきた。目撃者によると、第一波は非常に高速で、海岸で 5m 未満の高さで押し寄せ、巻き波が確認できた。最大級の高さである第二波は、第一波の 5 分後に西南西の方向から押し寄せ、第二波は海岸で少なくとも 15m-30m の高さであった。生存者によると、第二波の前面の巻き波は、波の頂上の急落渦を伴っていた。第 3 波に関する観察は非常に少ない。引き波 (余波) は第三波の 5 分後に起こり、そして、その空間分布は河川や潟湖のような地形の低い場所によりコントロールされた。(Lampuuk の) 湾の北部の場所での、我々の調査した地形断面は海岸線から約 1km の所に緩やかな斜面の変換点がある (Fig. 2)。そのため、引き波は斜面の変換点の西側の数百 m までに限定されていた [注釈: 引き波は下り坂でしか起こらない]。一方で、東側では 3 日間浸水していた。残骸の集まり (停滞) は Lhok Ngano の川に沿って、内陸 4km にまで溜まっていた。

地震と津波の地形的な痕跡は、深刻な海岸の浸食と地盤沈下によって証拠づけられる (Fig. 3)。これらの変化は、複数の段差を持つ崖や川や溪谷沿いの堤防の浸食により証明される。崖の高さは、表層を土で覆われているところでは 0.5m-2m が典型的で、砂丘では 2m-5m が典型的である。多数の水没した幹線道路で示唆されるように、海岸の後退は地盤沈下によって増幅され、Lhok Nga では内陸に 60m-100m まで海岸線が後退している。津波堆積物は、内陸 5km までの広範囲に広がった砂層によって主に示される。土壌からなる大きな碎屑物や数

十cmから数mのサンゴとビーチロックの礫も、内陸 1km に堆積していた。

#### 4. Characteristics of the tsunami deposits

##### 4.1. Thickness, texture and composition

2004年12月26日のLhok Ngaの津波堆積物は、灰色から黄色の中粒砂から粗粒砂で、厚さ、粒径、垂直方向の傾向にかなりの変化を示す。津波堆積物は海岸近くでは、褐色砂質土壌、砂丘の堆積物あるいはビーチロックを覆い、河川では赤色砂を覆い、水田では暗褐色のシルト質土壌を覆う。津波堆積物とその下位の土壌の境界は唐突で(Fig. 4)、砂のように軟らかい堆積物を覆う所では境界は浸食面となる(Fig. 5)。津波堆積物の厚さは、大局的には陸側に向かって減少するが、波高や強さとは単純には関連していないようにである(Fig. 2)。最も厚い津波堆積物が見られたのは低地であり、Labuhan (sample LAM 3) 付近の小さな湾では44cm, LampuukとLhok Ngaの間にある潟湖(NGA 2)では52cm, Lampuukの破壊された砂丘と砂丘の間では70cm, セメント工場付近の砂の崖の麓(LHO 4)では82cmであった。Lampuukの横断面に沿った堆積物の厚さの分布は、4つのゾーンを示し(Fig. 2)、(1)内陸の道路に向かっての厚さの減少がある地帯(海岸線から0km-1km)、(2)緩やかな斜面の変換点に伴う堆積作用の途絶地(1km -1.5km)、(3)水田に到達し、新たに層厚が増加する地帯(1.5km -2km)、(4)水田より内陸において層厚が減少する地帯(2km-3.5km)である。それにもかかわらず、地形起伏がより強くなる所では、海側に向かって層厚が増加する傾向は、観察されなかった。調査地域の南部(Labuhanのセメント工場)では、津波堆積物は、急斜面になっている三日月型の湾でトラップされている。内陸に向かって層厚の増加するのが観察できる場所は、Labuhan付近の小さな湾で(LAM 1-3)、そこではピットごとに堆積物は多様な組織の変化を示す。

津波堆積物での津波の数と層の数が一対一の関係にある堆積物は観察できなかった。Jaffeら(2003)によると、堆積運搬の変化をもたらして、その結果、複数の層を形成する要因としては、一連の津波、一回の波の遡上と返し波、あるいは一回の波での遡上と返し波のどちらかが層となり、そちらかが層として残らない場合であると指摘している。Lhok Ngaでは、26の断面図の内の75%は複数の層の累重を示す成層構造が見られた。前述の最も厚いシーケンスは7から15の層で構成されている。シーケンスの下部は、通常、粗粒で塊状である。上部は、通常はより細粒であり、しばしば堆積時の複数の〔波の〕振幅による葉理ができる(Fig. 6)。不連続な薄い泥層が、しばしば、主要な層の間に見られる。いくつかの層の、内部に、より粗いか、またはより細粒なレンズ状の層が挟まれる。

双眼鏡での観察で、津波堆積物は土壌のリップアップクラスト、根、樹木、葉や人工物のかけら(ガラス、レンガ、金属、プラスチック、タール等)の量が内陸に向かって増加する。Bondevikら(1997)による湖での観察と同様に、沿岸

の潟湖や水田付近の津波堆積物には土壌の破砕物が特に豊富に含まれる。石英の粒子は浜辺から採取したような、大部分がやや角ばった粒子か、やや丸い粒子である。いくつかの粒子は、部分的に酸化鉄で覆われている。多くの生物片を同定でき、サンゴの断片、サンゴや海綿の骨片、紅色石灰藻類、底生有孔虫、巻貝、棘皮動物(ウニ)そして、稀にコケムシである。この微小生物相は浅瀬の環境に典型的なものである、生物片の組成の比率に関しては、海側あるいは陸側の方向への変化は検出されない。

#### 4.2. Landward-fining and sorting trends

内陸方向への細粒化及び級化は、津波堆積物の共通した特徴として引用され (Goff *et al.*, 2001), また, 1992 年のフローレス島での津波で明確に実証された (Minoura *et al.*, 1997; Shi *et al.*, 1995). それにもかかわらず, 1994 年のジャワ島での津波堆積物ではその特徴はなかった (Dawson *et al.*, 1996). 確かに, 平均粒径の空間的变化は堆積物の供給源や地形によっても支配される (Dawson *et al.*, 1996; Gelfenbaum and Jaffe, 2003; Jaffe *et al.*, 2003; Nanayama and Shigeno, 2006). Lampuuk の横断面に沿った粒径分布は, 内陸に向かって細粒化する 2 層の連続したシーケンスで特徴づけられるが (Fig. 2), しかし, 平均粒径と層厚の増加や減少の間の関係は明らかでない (Fig. 2). 第一の細粒化するシーケンスは, 海岸から 1km の緩やかな地形変換点のところで終わり (試料 NGA4-12), 第二の細粒化するシーケンスは, それより内陸部の水田の地域に分布する (NGA 14-18). この二段階の内陸への細粒化は, 波高と内陸への伝搬が異なる波であったことを反映するかもしれない. 1992 年のフローレス島と 1994 年のジャワ島では (Shi *et al.*, 1995; Dawson *et al.*, 1996), 内陸に向かっての細粒化傾向と分級度の増加の間で正の相関が見られるが (Fig. 2: 分級度と尖度), ただし, 波が最初に遡上する斜面が非常に急な場合は除く (例; LH0). 供給された堆積物の粒度分布に支配されないのだから, 歪度と関連する尖度は, 分級度よりも平均粒径と関連があると思われる. サンプル NGA 16 から NGA17 までの局地的な内陸に向かっての粗粒化については, NGA 7 が最も高い分級度であることから, 丘の麓での波の破砕の結果かもしれない (Fig. 2). [注釈: 波が砕ける場所は最も営力が強いのでそこでは堆積物が粗粒化してかつ分級が良くなる]. つまり, 穏やかな勾配でも (<5° Lampuuk), 15m-30m の波高の津波がもたらした堆積物の厚さや粒径分布の変化に影響を与える. Lampuuk の北部にある崖では, 波高が最低 30m の津波が, 地面から少なくとも 20m の部分で砂サイズの粒子を浮流状態で運搬してきた. これらの観察は, 浮遊とベットロードの両方が津波堆積物の厚さと粒度分布を決定しているかもしれないことを示唆する. 実際に, 単一の津波では, 遡上から引き波までのエネルギー領域や浸水の高さなどの急速な変化に伴って, 堆積物の運搬と堆積(沈着)の変化をもたらす.

### 4.3. Typology of grain-size distributions and sediment sources

平均粒径の低い値は、論理的に歪度と尖度の高い値に伴う(相関係数 $>0.8$ )。層厚と分級度と他の指標との関係は、明らかではない(相関係数 $<0.4$ )。最終的には、全ての統計的データを組み合わせると、堆積物を以下の三つの異なるタイプに識別できる(Fig. 7):

(1) 粗粒砂( $800-580 \mu\text{m}$  または  $0.3-0.8 \phi$ )で分布が粗い側に片寄り(歪度 $<0.7$ )、しばしば二峰性を示し(例, NGA 6 と 8), 粒径分布は平坦である(尖度 $<0$ )。分級度の範囲は、1.3 から 1.6 である。タイプ I の堆積物は粗粒な生物源物質に富み、海拔 4m より高いところではほとんどない(Lampuuk の横断面の海岸線から 500m)。

(2) 粗粒砂から中粒砂( $580-400 \mu\text{m}$  または  $0.8-1.3 \phi$ )は定義が難しいが、他の二つのタイプと同じ頻度で、粒度分布は正規分布に近く、非常に低い分級度である( $So > 1.5$ ) (NGA 2e, 9a と 14a)。二峰性の分布も見られる(例 NGA 7e, NGA 2d)。

(3) 中粒砂( $400-230 \mu\text{m}$  または  $1.3-2.1 \phi$ )で分布が細かい側に片寄り(歪度 $>1.1$ )、しばしば、わずかな二峰性を示し(例 NGA 18)、尖った分布を示す(尖度は高い)。タイプ 3 の堆積物は、内陸に向かってより頻繁になる。タイプ 3 はタイプ 1 や 2 よりも、より分級が良い( $So < 1.5$ )

それぞれ砂のタイプ(タイプ 1 は 7.9 cm, タイプ 2 は 7.1 cm, タイプ 3 は 6.9 cm)の平均層厚の間には有意な差は見られなかった。浜辺で採取した砂の、平均粒径は  $422 \mu\text{m}$ , 尖度は 1.52, 歪度は 1.08 でタイプ 2 とタイプ 3 の中間にあたる(Fig. 2)。これらの観測と Lhok Nga での海岸の後退の高い比率を考慮すると、津波堆積物の大部分は浜辺からきた堆積物かもしれないが、浅い陸棚、サンゴ礁、潟湖や砂丘からも堆積物が供給されたのだろう。Sato ら(1995)は、日本での 1983 年と 1993 年の津波堆積物は主に浜辺からきたことを見出している。Gelfenbaum and Jaffe (2003)は、1998 年のパプアニューギニアでの津波の時に、沖合から来た砂よりも、2 倍以上の砂が浜辺から来たと仮定している。[注釈: beach から多量の砂が来ることを強調している文章である]

Lhok Nga では 3 つタイプの堆積物が存在するものの、二峰性の分布は分級度の低い度合と関連がある(尖度 $<-0.4$ , 分級度  $So > 1.4$ )。それらは、海岸から 150m から 400m の間でよく見られ、その場所は堆積物の供給源がとりわけ多様であり、また、引き波の終わりの場所である。津波堆積物における粒径分布の二峰性の発生は、複数の過程で説明でき、遡上時における海浜から陸棚の堆積物への段階的な流入、引き波あるいは次の津波の遡上した波による堆積物の浸食、再堆積である。二峰性の傾向は、最も高い波の砕けた丘の麓から採取した NGA 17 が特に顕著である(Fig. 8)。垂直方向の傾向の分析は、粒径分布と堆積物の運搬と堆積の過程、そして、津波の特性との関係性を推測するために必要である。

#### 4.4. Interpretation of the vertical trends

津波堆積物の垂直方向の傾向と空間的変動の解釈は困難なままである。Lhok Nga での断面の観察結果から、海岸を襲ったそれぞれの波は単層、または1対の層を堆積しなかった。第一波の最も低い波 (<5m) でさえも、浸食し、大量の砂質の粒子を堆積させたが、これらの砂質堆積物は、15m-30m の高さである第二波で再浮遊し、そして、第三波や引き波によって再堆積した。Lampuuk の横断面の第二の部分 (1.5km-3.5km の陸地) は、引き波がなく、第二波の影響しか受けていないので、堆積層の堆積過程の理解は容易である (Lavigne et al., 2006)。NGA14 から 18 の断面図は、第二波による堆積を記録していると考えられる (Fig. 9)。NGA15 と 16 の断面は 2 層 (a-b) の存在を示し、明確に、正級化を示し、それらは NGA での 14b と 14c でも見られる。これらの観察は、Bretwood and Bourgeois (2002) によって記載された 1992 年のニカラグアでの津波堆積物と一致している。彼らは、平坦な地形が引き波を制限する場所では、単体の波が上層よりも下層の方がより粗い 2 層の堆積をもたらした、と報告している。このような二対の層は、ブリティッシュコロンビア州での Clague ら (2000) の報告やジャワ島での Dawson ら (1996) でも記載されている。Lhok Nga での津波堆積物に適用する際には、対の堆積物の同定は、多くの断面が単体の波での堆積を記録したということを示唆する (水田の NGA 14, 15, 16, セメント工場付近の LHO の 1-2-5-6)。Lampuuk の横断面の第一部分 (内陸 0km-1km) では、4 つの断面図では正級化した層が 2 層見られ (NGA9b-c, NGA10a-b, NGA2e-f, NGA7d-e)、最も厚い堆積物ではそれらの下に 3 層の正級層がある (NGA2b-c-d, NGA7a-b-c)。級化した 2 層または 3 層の上部は、下部よりも通常は (低い尖度) 分級が良い。下層の内部では逆級化が見られる (NGA 7b)。NGA 2 と 7 の断面の垂直方向の傾向に関する統計解析は、異なる 2 つの波、おそらく第二波と第三波を示唆する (Fig. 10)。この解釈を基に、津波堆積物に覆われた土壌とこれらの級化したシーケンスの間に挟まれた層は、第一波の残り (NGA 2a) もしくは第二波の残り (NGA 9c) (残った堆積物) であるかもしれない。

5 つのピットでは、津波堆積物の厚さは 10 cm 以下で、粒径変化の勾配がない 1 層だけが見られる (NGA 4, 6, 8, 11, 12)。これら単一の層のセクションのシーケンスは、引き波による堆積物、または、少なくとも再懸濁された堆積物と思われる。この考えは、これらのセクションの付近においては、海に向かう流れを示唆する樹木が多くあることにより支持される。遡上による堆積物と引き波による堆積物との境界は、厚い層ほど、認識が困難になる。多重の層のあるセクションでは、我々は、上位の層が下位の級化層よりも粗い場合、上層は引き波により堆積したと解釈する (例, NGA 2g, NAG 7f, LHO 2c)。最終的に、引き波による全ての層は、海側に向かって粗粒化し (タイプ 3 からタイプ 1 の砂)、分級度の減少 (特に、尖度) を随伴する。ゴルフ場の北部にある河床のセクションでは、引き波による砂の乱流状の浸食と、水田からの高密度の有機物の部分的混合を示す (Fig. 11)。

セメント工場付近(LHO と LAM)のセクションでは, Lampuuk のセクションのような, 垂直方向の傾向は見られない. 津波の堆積物の運搬は, 海岸から 250m のやや垂直な斜面でさまたげられ, 一連の津波の波は横断面に沿って堆積物を残せなかった. セクション LAM 1, LAM 3 と LHO 4 は 10 以上のサブユニットに分けられる. セクションの下部は塊状で, 厚さ 15 cm-30 cm で, サンゴの礫が多く, 2 つのサブユニットに分けられ, 下部のユニットの方がより粗粒で, より細粒なレンズ状の構造を示す(Fig. 6). LHO 3 の上部は, 異なる 3 層から構成されているが, それらの特徴には大きな違いはない(Fig. 10). LHO 4 の上部は, 厚さ 54cm の粗粒で葉理の発達した砂のシーケンスで, 表面には浜辺の礫がある. Dawson ら(1996)が示唆した通り, 津波の堆積作用は, 遡上と引き波の間の流れの方向が変わる間に生じるのかもしれない. 目撃証言から示唆されるように, (波の)方向が変わるのは, セメント工場付近の急斜面の底で特に顕著に見られたということであり, したがって, 遡上後の葉理の発達したユニットの複数回の堆積を説明できる.

## 5. Discussion: sediment transport and deposition in a tsunami

2004 年 12 月の Lhok Nga での津波堆積物の特性は, 大規模な津波の波での堆積物の運搬と堆積に, 新たな洞察を提供する. 第二波で最高の高さ(海岸で 15m-30m)の波は, Lampuuk の横断面に沿って全て記録されており[注釈: 堆積物を残したということ], そして, いくつかのセクションでは第二波のシーケンスが優位に卓越する. 堆積物の我々の解釈は, 次のような巨大な津波の堆積運搬と堆積モデルを導いた(Fig. 12):

- ・最初に, 浅瀬において, 水平方向のはぎ取りが起きてから, 崩れ波が到達して, 直前の波の堆積物を再懸濁する.
- ・浸食段階: 崩れ波自体はかなり乱流で浸食性があるため, 大量の堆積物や, 土壌のリップアップクラストやサンゴ等の巻き上げられた礫などを, 取り込む. 砂のブルーム(上昇流)が, 運搬がより組織化される前の主要な運搬メカニズムになると想定される.
- ・堆積の第一段階: Lhok Nga での最も高い波は, 多数の生存者による情報で, 崩れ波の背後に巻き波が存在することが判明している. 渦巻の中で回っている堆積物と粒子流として動いているベッドロードとの分離が起こるのは, 崩れ波から巻き波への変換するところである(2層または3層の中でより下部で粗粒な部分). 転動あるいは滑動のような二次的過程は, 低地(河川や潟湖のほとり)において堆積物を再浸食しているかもしれない.
- ・堆積の第二段階: 波の前線が通過した後に, 堆積物の運搬は, 懸濁(浮流)中で組織化され, これは級化と上に向かっての分級の悪化で立証される(2層, または3層の上部). 実際, それぞれ級化を示すシーケンスは流速や乱流が減少するにつれて, 懸濁(浮流)からの粗粒な砂がより細粒な砂よりも早く沈殿することを意味する, Gelfenbaum and Jaffe (2003)によるパプアニューギニアでの記



述と同様に、いくつかの層は内部で級化しているが、ある層から他の層への垂直方向の勾配が観察されることは、懸濁状態(浮流)の連続した段階を推定させる。

- ・堆積の第三段階：次の波の前、または引き波の前での流れの方向が変わる時は、その場所での最後の遡上津波の堆積物がたまり(三対の最後の層(上層))、急斜面が遡上を止める所では葉理が発達する。第二段階と第三段階の堆積は、(Lampuuk の横断面に沿った層厚を累積した)堆積物の総量の50%以上に及ぶ。

- ・堆積と浸食の最終段階：津波の後退あるいは引き波は、重力駆動型の流れであり、その特徴は地形と堆積物の濃度に依存する(Cantalamessa and Di Calma, 2005)。我々が、引き波からのものと解釈した堆積物は、Lampuuk の横断面に沿って累積した総量の20%に及ぶ(引き波のみが発生した場所で考慮した場合は30%)。それらは、海側に向かって分級度が減少するとともに、粗粒化するシーケンスを示す。引き波が川などの流路を流下する時には、Bondevikら(1997)の西ノルウェーの湖での観察、さらに Nanayama and Shigeno (2006)の北海道南西の河床で観察されたのと同様に、堆積物はより浸食され、遡上した堆積物の上部を再浸食する。

堆積物の運搬と堆積に関する我々のモデルは、砕けた後の波の変化を含んでいない。海岸から2.5kmの丘の麓にある地点から我々が採取した試料は、非常に不均一であり、不分級である。この場所は、最高の高さである第二波の波が砕けた場所で、砕けた後に、流速の増加が観察されている(目撃者によると時速70kmまでとされる)。それにもかかわらず、大量のがれきが、徐々に流れの挙動を変化させて、内陸に2km伝播した後は、段波フロントを持つ土石流のようになる。堆積記録は、その後、主に瓦礫(がれき)の相互作用や都市の地形によって、コントロールされる。

## 6. Conclusions

スマトラの海岸の2004年12月26日の津波の堆積物は、大津波に伴った、海岸での堆積作用の解釈のための事例研究となる。Lampuuk (Lhok Nga Bay)での3.5kmもの長い内陸へ向かっての横断面では、3つの主要な波と最後の引き波が第一部分(0-1.5km)に記録されている。第二部分(1.5-3.5km)には、最高の波高を持つ第二波(15-30m)堆積物のみが分布し、陸側に向かって、薄層化、細粒化、分級の良くなる2層のシーケンスを説明する。正級化を示す二対または三対の層は、それぞれの波の遡上の識別に使用されてきた。最上位の層は、引き波による堆積物であると解釈され、海側に向かって平均粒径が増加し、分級度が減少するシーケンスである。異なる堆積物の供給源を反映する二峰性の粒度分布は、引き波の層か、または丘の麓に位置する遡上による層に典型的に見られる。地形の局地的な影響を同定できた。すなわち、低地で堆積物が最も厚いこと、急傾斜によって堆積が制限された時には、層厚と上部の葉理を持つ組織はかなりの空間的变化を持つこと、崩れ波のところでは、内陸に向かって粗粒化し分

級度が著しく低下すること，である．大津波の堆積運搬と堆積作用の我々のモデルは，津波堆積物の粒度分析と側方傾向と垂直傾向とを合わせることで，過去の流水学的イベントの堆積記録のより良い理解のために強力な方法論を残す．ここ 4 世紀の間に最低 235 の津波があった (National Geophysical Data Center, NOAA)，インドネシアは世界中で最も津波の多い国の一つである．災害は知られているが，インドネシアでの過去の津波堆積物や津波の再来間隔は，ごくわずかしかな文書に残されていない．2004 年 12 月 26 日の劇的な津波の教訓から，津波の危険度評価 (ハザード評価) とマッピングの研究の枠組みには，より多くの堆積学的な調査が必要である．