

Kortekaas, S. and Dawson, A. G., 2007. Distinguishing tsunami and storm deposits: An example from Martinhal, SW Portugal. *Sedimentary Geology*, 200, 208-221.

ポルトガル南西に位置する Martinhal を例に挙げた津波堆積物と高潮堆積物の識別

概要

過去の津波を地質学的に証明することは、特に歴史記録が存在しない地域において、津波の危険性を予測する研究を行う上で重要である。地質学的証拠を用いる際に、主な問題となるのは、津波堆積物と高潮堆積物の識別である。どちらも海の痕跡を沿岸の層位記録に残す、高エネルギーイベントである。ポルトガル南西に位置する Martinhal では、暴風に伴う高潮堆積物と津波堆積物の双方が、同じサイトの層位内に存在する。そのため、局地的要因による相違を除けば、両方の堆積物の違いを研究するのに適した場所と言える。

1775年11月1日に発生したリスボン地震に伴う津波は、Martinhalの地形と堆積作用に大きな影響を与えた。目撃報告によると、その津波は、バリアーを突破し、広範囲に砂層をもたらした。津波堆積物に加えて、Martinhalの層位は、暴風による高潮の証拠を示している。高潮もバリアーを超え、低地を水浸しにして、砂層を残したのだ。これらの海からの洪水による堆積物は、類似した粒子サイズと特徴を示し、海生有孔虫を含む。最も重要な違いは、リップアップクラストや巨礫は津波堆積物のみが存在することと、津波堆積物の内陸への分布は、高潮堆積物の範囲をはるかに上回っていることが挙げられる。これらの堆積物のユニットを識別するには、トレンチやコアから様々なデータを集め、使用していく必要がある。

1. はじめに

津波浸水のリスクにおける現在の研究は、過去のイベントの発生頻度と規模に関する情報が不十分なことによってしばしば妨げられている。多くの場合では、使うことのできる情報は歴史記録に一致するものだけである。それゆえ、歴史記録は比較的短期間しかカバーしないので、津波リスクの定量的予測を求めることは難しい。最近10年間で、こうした研究は、沿岸の堆積物を対象とした過去の沿岸の浸水イベントを証明できる地質学的方法の使用を通じて、かなりアシストされている。その結果、測器記録や歴史記録よりも古い過去の浸水記録を復元できる沿岸地域の選択が可能となり、より正確な浸水リスクの定量的評価が可能となってきている。

だが、地質学的記録を、歴史津波や歴史以前の津波イベントの同定・研究に使うには、津波堆積物を認識し、暴風による高潮堆積物と識別することが必要である。

津波は、広範囲にわたる沿岸の浸食や堆積を起こすことが観察されている。文献にある多く

の津波堆積物は類似した特徴を持つ(Goff et al., 1998). 残念ながら, これらの特徴の多くは, 紛らわしく, そして単に高エネルギーあるいは海由来の堆積物であることしか示さない. そのため, 暴風による高潮堆積物もまた似た特徴を示す(Table 1). 最近, 現世の津波を研究することが, 津波堆積物の理解や認定を向上させている(e. g. Shi et al., 1995; Sato et al., 1995; Nishimura and Miyaji, 1995; Dawson et al., 1996; Minoura et al., 1997; McSaveney et al., 2000; Gelfenbaum and Jaffe, 2003). それにもかかわらず, 津波と高潮の堆積物を識別する問題は依然として未解決で, その問題は認識されているにもかかわらず, 二つの高エネルギーによる堆積物の違いを直接的に研究した調査はほとんどない.

Tuttle et al. (2004)によると, ニューファンドランドの1929年のGrand Banks地震に伴う津波堆積物と, マサセッチュで1991年に起きたハリウィン暴風による堆積物の比較は, 二つの堆積物の位置と堆積学的特徴における違いを示している. 津波堆積物は, 塊状の砂層あるいは級化した砂層の1~3つのサブユニットからなり, 一方暴風による堆積物は, 層理を持ち, 前置面の前進による層理, ほぼ水平な平行層理を示し, チャンネル構造が見られる. 津波堆積物は, 暴風による堆積物に比べ, はるか内陸にそして標高の高いところまで追跡ができる. しかし, 両者の堆積物は同じ場所では見られないため, 水深, 地形あるいは再堆積に使われた供給源物質などの地域固有の相違を考慮できなかった.

Nanayama et al. (2000)は, 日本の北海道沿岸で1つのトレンチから1993年の日本海津波と1959年の宮古島台風による堆積物を記述している. 二つの堆積物は同じく厚さ50 cmで, トレンチ内で内陸へいくほど薄くなっている. しかし, 津波堆積物は四つの単層で構成され, 二つの主要波の遡上と引き波による陸へ向かう流れと海に向かう流れの二方向性の流れの証拠を持ち, また, 海の砂, 砂礫, 貝そして浸食された土壌を含む. 対照的に, 高潮堆積物は一定方向の流れを示し, 斜交層理があり, 津波堆積物よりも分級されている.

同様に, Goff et al. (2004)もニュージーランドの同一地域において, 15世紀の津波堆積物と推測されるものと現世の高潮堆積物とを比較し, それらは空間的広がり, 厚さ, 粒子サイズの特徴といった点で異なることを見出した. 津波堆積物は, 内陸に行くほど薄くなり細粒化する一方, 高潮堆積物はかなり多様な粒子サイズの分布を示し, 内陸に向かって粗粒化する. 高潮堆積物は津波堆積物よりも分級が良く, 内陸に200mにも広がる津波堆積物に比べて, 約40mの分布である. さらに津波堆積物は高潮堆積物とは異なり, リップアップクラストを含み, 浸食性の基底面をもつ.

本論文では, ポルトガル南西に位置するMartinhalの沿岸の浸水について述べたものである. 詳しい歴史的な報告書は, 1775年のリスボン地震による津波で浸水した地域を記述している. さらに, 現世の暴風による浸水がしばしば起きており, 我々の2回の調査は高潮時に行った(Fig.

1). これらの暴風はバリアーの突破と砂の堆積を引き起こした。暴風で打ち上がった堆積物は地表面に見られ、採取した。この暴風による堆積物と 1775 年の津波堆積物は、同じ層位内に保存されており、したがって、この地域は二つの高エネルギーによる堆積物の違いを研究するのに非常に適した地域である。

2. 調査地域

Martinhal はポルトガルの南 Algarve 海岸にあり、Cape Saint Vincent の 3 km 東である (Fig. 2)。この地域は、砂丘と砂浜によって海から分けられた小さな三角形で平坦なエスチュアリー谷からなる。この谷は二つの小さな川からなり、ジュラ紀の石灰岩を刻む。二つの川のうち、大きい方の Barranco das Mos は西から谷に入り、小さな河川性の扇状地を形成している。その低地では塩水湿地が形成され、夏には干上がるが、冬には定期的に洪水が起きている。バリアーは一年中常に切れ目のない地形を呈すが、高潮が起こった短期間に壊れる。この地域の潮位は約 2.1 m で春の大潮は約 3 m である。大潮の最も高い潮位は平均海水準の 2 m を超える (Andrade and Hindson, 1999)。

1775 年のリスボン地震に伴う津波とその影響は非常に良く記述されている。多くの歴史記録は、出版物、絵画、手紙、描写から得られ、そしてそれらには哲学的かつ厳密な説明がなされている (Baptista et al., 1998)。この Martinhal の浸水のその後の記述は、Silva Lopes (1841) によって与えられ、Pereira de Sousa (1919) によって議論され、Andrade et al. (1997) によって翻訳された：

“海が東に向いた Martinhal と呼ばれる浜を約 2 km まで侵入し、その土地をまるで浜辺のようにして、多様な魚や 4500 kg 以上の巨石で覆い、多くの魚や貝を地表に打ち上げた。3 回の波が襲い、第一波が最も大きかった。”

3. 方法

最長 4.7 m の深さの 24 本のコアを Martinhal 低地の層位を調査するために採取し、より詳細に調査するために 7 ヶ所でトレンチをつくった (Fig. 2)。すべてのコアとトレンチは、平均海水準の 4.767 m にあたる HZ6.767 m 上にあるレストランの北西角にある基準点に合わせた (Fig. 2)。コアとトレンチは南—北、北西—南東方向に走る 4 つの交差したラインに沿ってとられた (Figs. 2 and 3)。多くのコアは谷の中でも標高の高い部分で採取した。これは、2 回のフィールド調査時に、この場所が高潮で浸水しており、コア採取ができなかったためである。しかしながら、4 つのラインはこの地域の層位を十分にカバーしている。

2つのコアを詳細な有孔虫分析用に選んだ；コア9とその100m西に位置するコア45(トレンチ3)である。これらのコアの深さはそれぞれ1.72m, 4.70mである。コア45は、トレンチの深さ1.12mよりも下位の層序を検討するために、トレンチ3のすぐ隣で採取した。有孔虫をわずかしかなかったサンプルから、有孔虫を数えるために重液分離法で100gの堆積物から有孔虫を浮かばせて集めた。これは、十分な堆積物を合理的な採取間隔で採取できるトレンチから得たサンプルでのみ可能である。コアは、2cmのサンプルを連続的に採取した。コア9のサンプルはまた粒度分析に使用した。コアの粒子サイズの特徴をMartinhoalの現在の砂の堆積環境と比較するために、現世の海浜、砂丘、汀段、オーバーウォッシュファン(14試料)と現世の高潮堆積物の分析も行った。粒度分析には、 $-2.5\phi \sim 4\phi$ のサイズの範囲内で0.5 ϕ 間隔の14のふるいを使った。

4. 層位

4.1. 層位の概略

Martinhoalにおける全体的な層位は、砂質の基盤の上を覆う細粒堆積物で、細粒堆積物は1枚以上の砂層を挟み、4つの層位ユニットに分けることができる(Fig. 3)。

・Unit 1は層位ユニットの最上部であり、砂層とシルト層の互層で砂層の厚さは変化に富み、小さな貝破片や小石を含む。このユニットは東に位置する砂丘や北西の河川に近づくとき砂が優勢となる。また谷の中央では細粒化し、現世の表層堆積物を反映している。

・Unit 2は多くの貝破片、砂で固く覆われた泥の塊や小石を含み、粗粒から極粗粒砂からなる広く分布する層にあたる。海に近いトレンチ(T1, T7, T8)では、ユニット2の基底に直径30cmの大きな石灰岩の礫が見られた。堆積物は内陸に、また上方に向かって細粒化するが、内部構造は近い距離でも大きく変わる。例えば、T7の両サイドのコア56とコア60は一つの上方細粒化シーケンスしか見出せない一方、T7では4つも見られた。ユニット2の基底は明らかに浸食されていて、下位のユニットは部分的に引きちぎられ、砂と混合していた。ユニットの厚さは狭い範囲でもかなり変わるが、全体的には内陸に向かって薄くなり、砂丘の背後のトレンチで最も厚くなる(50cm)。地層断面は、ユニット2が内陸そして北に向かって上がっていくことを示し、おそらく現世に似た旧地形表面を反映する。ユニット2は海岸線から約400mにあるトレンチ6よりも内陸で見つかる。低地の南端へ向かうと(断面C-D)、ユニット2は非常に薄くなり、コア103では見られなかった。

・Unit 3は茶・灰色のシルト質粘土からなり、数枚の砂層をはさむ。このユニットは平均2mの厚さで小さな貝破片、木片、植物片を含む。

・Unit 4は海生貝類の破片を伴う中粒砂である。このユニットは、シルト層やより粗粒な層を挟む。このユニットは地表から最も深いところで4.7mまで掘られた場所でも基底まで到達しなかった。

ユニット1に見られる砂層はユニット2と似ていて、低地の南東ではそれらの砂層のうちの一つの層はユニット2を直接覆っていた。トレンチ7では、この最上位の砂層は、分級が非常に良い中粒砂からなり、その最上部には貝破片を伴う粗粒砂が3cmほど存在する。ユニット2の砂層は一定の厚さのままだが、最上位の砂層はトレンチで尖滅する(Fig. 4)。しかし、コアでは変化する砂層間の識別は不可能で、この理由から、いくつかはユニット2の一部として誤解しているかもしれない。

4. 2. コア9

コア9は盆地の中央の北東に位置し(Fig. 2)、ユニット2が最も厚い。低地のこの部分は、より高く、表層は砂からなる。コアの最上部は平均海水準の1.53mにあたる、HZ上3.53mである。分級の良い中粒砂層がこのコア内のユニット2を直接覆っており、トレンチ7に似ている(Fig. 4)。

4. 2. 1. 層位

このコアの層位は、ユニット1, 2, 3は示すが、4は採取されていない(Fig. 5)。

・Unit 1 (平均海水準上1.53 - 1.23 m) コア9では、最上部の層位ユニットは2つの砂層とそれらに挟まれた褐色シルトからなる。コア最上部の砂層は、3cmの厚さで貝破片を伴う粗粒砂からなる。ユニット1基底部の砂質堆積物は分級の良い中粒砂からなる。しかし、この層の最上部3cmは極粗粒砂で多くの貝破片を伴う。

・Unit 2 (1.23 - 1.01 m) ユニット2は粗粒から極粗粒砂で分級が悪く、豊富な貝破片を伴う。砂質堆積物は正級化を示し、基底に中礫を含む。

・Unit 3 (1.01 - 0.19 m) ユニット3は硬くなった褐色粘土で、平均海水準上の0.93 - 0.73mとコア基底の0.00 - 0.19mに砂質層があり、後者は貝破片を含む。

4. 2. 2. 有孔虫

ユニット3は*Ammonia beccarii*と*Haynesina germanica*が優占している(Fig. 5)。コアの基底では優占種は*A. beccarii*だが、その存在量は急激に減少し、*H. germanica*に置換されている。両種は、汽水性の河口または潟湖に生息するが、*H. germanica*は*A. beccarii*に比べてわずかに塩分変化に対する耐性が大きい(Murray, 1991)。このユニットでは海生種の増加は、ユニット3の最上部の砂質層と、その20cm下方から見られた。

ユニット2の基底(平均海水準上1.01m)では、有孔虫の密度が減少し、ユニット3の汽水生

の有孔虫の群集から、*Elphidium macellum*, *Elphidium crispum*, *Quinqueloculina seminulum*, *Cibicides refulgens*, *Eponides repandus*, *Ammonia beccarii* var. *batavus* から成る海生の有孔虫群集へと明瞭に急変する。

ユニット2の上位の分級の良い砂層は、ユニット2と類似の海生有孔虫群集を含むが、有孔虫の密度は低い。ユニット1の最上部は有孔虫をほとんど含まず、各サンプルでは3標本以上のサンプルはなかった。両方の砂層は、ユニット3のより細粒な堆積物よりも、破片化した有孔虫を多く含むが、二枚の砂層間における違いは見られなかった。

4. 2. 3. 粒子サイズ

「シルトと粘土の組成が83%に達する細かい粒子($<63\mu\text{m}$)からなるユニット3」から「シルトや粘土を全く含まないユニット2」へは非常に明瞭に変化する(Fig. 6)。ユニット2とその上位の砂層は、砂($63\mu\text{m} - 2\text{mm}$)の含有率が高く、上の砂層では99.9%に達する。しかし、ユニット2はユニット1の砂層に比べて、かなり多くの礫($>2\text{mm}$)を含む(Fig. 6)。さらに詳細には粒子サイズ分布は、ユニット2の最上部に向かって細粒粒子が増加し、ユニット2の基底よりも細粒粒子の含有率は非常に少ない(Fig. 7A)。ユニット2の基底面は浸食面であるため、ユニット2基底部の細かい堆積物は、おそらく下位のユニット3から浸食されたものだろう。ユニット2では、砂の含有率が75~93%の間で変化する一方、ユニット1の砂層は常にほぼ100%の組成を示している。例外はこの砂層の最上部で、貝破片や砂利といった粗粒物質が増加している(Fig. 7B and C)。

粒子サイズの特徴は、二枚の砂層間で明らかな違いを示している。ユニット2の平均粒径は約 0.5ϕ ($710\mu\text{m}$)で、一方その上の砂層が 1.5ϕ ($355\mu\text{m}$)だが、その最上部の平均粒径はより大きい。ユニット2では、平均粒径が3つの上方細粒化シーケンスを示すにもかかわらず、フィールドでコア9を記載した時はたった1つの上方細粒化シーケンスを示すと思われた(Fig. 7D)。これらのシーケンスは、礫の占有率の減少と砂の占有率の増加によってコントロールされている。しかし、シルトと粘土の占有率は正級化を示している。

標準偏差はユニット2で高く、これは分級の悪い堆積物を示し、標準偏差はユニット1の砂層に入ると突然減少し、これは分級が非常に良いことを示す。しかし、最上部の二つのサンプルはユニット2と同じ標準偏差を示す(Fig. 7E)。同様に、非対称性における負の値はユニット1よりもユニット2のほうが顕著で(Fig. 7F)、ユニット2の粒子サイズ分布が、対称でなく、粗い方へ片寄っていることを示す。粒子サイズの特徴は、明瞭に二つの砂層に分かれるにもかかわらず、両方とも 2ϕ ($250\mu\text{m}$)の粒子サイズが普通である(Fig. 8)。

4. 3. コア45, トレンチ3

コア45, トレンチ3は、谷の中央の低地の塩水性湿地に位置する(Fig. 2)。ユニット2を除

き、ユニット 3 とユニット 1 は数枚の砂層からなる (Figs. 3 and 9). このコアの採取場所は平均海水準上の 1.73 m で、HZ 上 3.37 m の高さである。

4. 3. 1. 岩相層序(原文は Lithostratigraphy)

このコアは 4 つの層位ユニットすべてを含む (Fig. 3).

・Unit 1 (平均海水準上の 1.73-1.19 m) : コア 45 の最上部は、砂層を伴うシルトと粘土の互層からなる。平均海水準上の 1.35m では、旧地表面が見られ、それはマッドクラックを示し、クラックは貝破片を含んだ砂で充填されている。

・Unit 2 (1.19 m-1.15 m) : 貝破片を含む中粒砂、中礫、そして下位層をつくる物質の破片を含む。

・Unit 3 (1.15-0.12 m) : このユニットは、小さな貝破片を含む層を伴った褐色シルト質粘土からなる。

・Unit 4 (-0.12 to -2.97 m) : 灰色中粒砂、分級が悪く、貝破片や中礫を含む。

4. 3. 2. 有孔虫

このコアは有孔虫の密度がとても低いため、重液分離法を適用した。残念ながら、この方法は大きな堆積物サンプルを必要とするため、トレンチからのサンプルにしか適用できなかった。そのため、有孔虫のグラフはトレンチから採取した堆積物のものしかプロットできず、コアを用いてサンプリングをした深さまで広げることができなかった。ユニット 3 は全く有孔虫が存在せず、そのためグラフにも含まれていない。ユニット 4 からの 1 サンプルを解析し、重要な種が含まれていたため、以下に議論する。

コアの基底のユニット 4 は有孔虫を豊富に含む。この群集は、*H. germanica*, *A. beccarii*, *A. beccarii* var. *batavus*, *Q. seminulum* と *Elphidium* spp. が優占し、エスチュアリーや潮間帯の環境を指示する。多くの腹足類の殻は、このユニットから見つかって *Hydrobia ulvae* と *H. ventrosa* が見られ、これらは潮間帯の中央に生息している。

ユニット 3 では平均海水準上の 0.90-0.83 m の貝破片を含む層を除けば、有孔虫、介形虫や腹足類は見つからなかった。この貝殻片を含む層は海生と汽水生の混合群集で *H. germanica* と *E. macellum* が優占するが、有孔虫の密度は低く、1 サンプルにつき 39 標本以下しか同定されなかった。有孔虫の密度の低さは、汽水やエスチュアリーに生息する種を豊富に含むコア 9 のユニット 3 と対照的である。

ユニット 2 (平均海水準上の 1.19-1.15 m) は、海生群集が主体で非常に高い種多様性を持つが、*H. germanica* や *A. beccarii* といった汽水種もまた豊富である。このユニットで最も豊富な海生種は、*E. macellum*, *E. crispum*, *Q. seminulum*, *C. refulgens*, *C. lobatulus*, *E. repandus*, *A. beccarii* var. *batavus* である。

ユニット1の基底では、有孔虫の密度が減少し、平均海水準上の1.33mの砂層の直下では、2,3の磨滅した標本しか産しない。群集は *H. germanica* が優占する。平均海水準上の1.33-1.45mの砂層は、有孔虫の密度の増加を示し、ユニット2に類似する海生群集である。ユニット1の最上部は *Trochammina inflata* が優占し、地表面に向かって *Jadammina macrescens* に置換される。両種とも高湿地に生息するが、*J. macrescens* は特に高い湿地でも生き残ることができる (Murray, 1991)。このユニットには海生種も存在し、特に砂層に多い。

4. 4. 表層堆積物の粒子サイズ分布の特徴

現在の堆積環境と、コア9の二枚の砂層の平均粒径と標準偏差の比較は、ユニット1の砂と砂浜、砂丘、汀段のサンプルが同一群内にプロットされることを示す (Fig. 10)。それらの堆積物は全体的に分級が良く、ユニット2よりも細かい。オーバーウォッシュファン（オーバーウォッシュファン）の砂は、かなり幅広い粒子サイズ分布を示し、平均粒径は0から1.5φまで変化する。一般的に、オーバーウォッシュファンの堆積物は、砂浜や砂丘、汀段の堆積物よりも分級が悪く、粗い。ユニット2の砂質堆積物は、明らかに異なる一群にプロットされるが、その上位の砂層の最上部の2つのサンプル（ユニット1の二つの試料のこと）はユニット2と、非常に良く似た粒子サイズの特徴を示す。

4. 5. 年代学

低地の北東の角に位置するトレンチ1 (Fig. 2)からのサンプルは、ルミネッセンス年代測定用に送ったが、このデータの結果は問題があった。まず、これらは年代順にならなかった。層準の最上部から得た年代値は、ユニット3の年代値よりも古い。ユニット2の上部と下部から得た2つのサンプルの年代値も逆転している。ユニット2の砂層を津波堆積物と仮定すると、MRT3のとても古い年代は、急速な堆積で、堆積物がブリーチされるのに十分な時間がなかったことで説明される。津波堆積物のルミネッセンス年代の問題は、他の研究者によっても言及されている (e.g. Price et al., 1999)。しかし、MRT1, 2, 5, 6のデータが正しいと仮定すると、それらは年代順に現れるが、ユニット2から得たMRT2は、1775年の津波堆積物にしては新しすぎる年代を示す。MRT1は砂層の下、数cmから採取され、397±33年前の年代が得られた。ユニット2の基底は浸食され、ユニット2の砂層には下位層のイントラクラストが見られるため、ユニット3の最上部は津波によって浸食されたと仮定すると、AD 1755年よりも古い年代が期待される。ユニット3とユニット4の境界の年代は、1702±679年である。しかしながら、この解釈はデータの矛盾から非常に不十分な支持しか得られない。

5. 解釈

4つの堆積物のユニットが同定された。シーケンスの最下部のユニット4は、海生の貝破片を含む中粒砂から成る。有孔虫については海生種の次に汽水性種が高い占有率で産することは、ユニット4の砂が海の影響を強く受けるが、河川水の流入もそれなりに多い潮間帯あるいはエスチュアリーで堆積したことを示す。

ユニット3はシルトと粘土からなる。コア9でみられた汽水生有孔虫とコア45の有孔虫の不在は、より海水の流入が制限された状況へ変化したことを示している。このことは、Martinhoalを高いエネルギーの海の堆積作用から切り離れた、バリアーの確立の結果であると解釈される。バリアーの背後には、細かい堆積物が堆積する汽水性のラグーンまたはエスチュアリーが形成された。年代決定は不十分だが、ユニット3と4の境界年代が約1700年という値は、Martinhoalの約12km西に位置する、Boca do Rioの類似の層準の年代結果である約1300–1800年に一致する(Hindson et al., 1999)。Hindson et al. (1999)によると、バリアーの形成は沿岸帯の堆積物収支への調節の結果で、2300年前と1100年前の風循環の大きな変化に関係しているのかもしれない。

ユニット3の最上部に向かっての有孔虫の突然の減少と、コア9におけるユニットの基底の*A. beccarii*からユニットの最上部の*H. germanica*への優占種の変化は、塩分変化の激しい環境への変化、おそらく盆地への海の影響の減少によるものと示唆される。コア45のユニット3は有孔虫が存在せず、これは多分その場所が河口に近づいたことで説明されるかもしれない。この地域の塩分は河川から淡水が流入するために、有孔虫の生息には低すぎる。

ユニット3に見られた海生種の存在量の増加を伴う砂層と、海生有孔虫群集を伴う砂層は、低エネルギー環境が暴風時のバリアー突破や、浸水によって攪乱されたことを示す。これらの浸水イベントの一つだけが、コア45と同じくらいの内陸で見つかり、貝破片、海生と汽水生の有孔虫の混合群集を含む層で示され、内陸まで打ち寄せたことを示す。砂層のいくつかはより北西に位置したコアで見られ、それらは河起源とみられる。

ユニット2は粗粒から極粗粒の砂層から成る。海生有孔虫、大きな巨礫、そして基底面が浸食であるという特徴は、この砂の堆積が、強い流れでかつ海起源であることを示す。この層は内陸に向かって薄く、細くなることも海起源であることを裏付ける。この砂層は1775年の津波による堆積物と解釈される。その時の報告では、この場所は津波後、砂浜のような光景で、大きな巨礫の堆積物があったと言及されている。その堆積物の内部構造はかなり変化している。コア9の砂の詳細な粒度分析は、3つの上方細粒化シーケンスを示し、砂と礫の比率によってコントロールされている。他のコアでは正級化が見られる一方で、トレンチ7では4つの上方細粒化シーケンスが確認された。

ユニット2で見られた特徴の多くは、津波堆積物の他の記述と一致する(e. g. Dawson, 1994,

1996; Goff et al., 1998; Dawson and Shi, 2000; Kortekaas, 2002). ユニット 2 の内陸への広がりにはユニット 1 や 3 に見られる砂層の分布よりも広い。残念ながら、年代測定の結果は、他の証拠を支持するには不十分である。

ユニット 2 の上位のユニット 1 は、砂層と泥層の互層から成る。これは暴風時にしばしば砂の堆積が起こるバリアーの背後の低エネルギーの堆積環境での堆積サイクルを示し、ユニット 3 の堆積環境に似ている。しかし、ユニット 3 はユニット 1 よりも有孔虫の密度が高いことは、ユニット 1 の堆積環境は有孔虫の生息に適さなかったことを示唆する。この地域は、現在の状況のように暴風によりしばしば浸水するが、年間のほとんどは乾燥しているようだ。津波が多くの砂を堆積させたため、その結果、この地域の地面が高くなってより乾燥化した。あるいは、津波の後に新たに形成されたバリアーが、古いバリアーよりも高く強いいため海の影響を減らしたのかもしれない。

コア 9 のユニット 1 基底の砂層は、砂丘あるいは砂浜の粒子サイズの特徴を示すことから、津波による破壊後のバリアーの再形成期に、バリアーの基部で砂の再堆積があったのかもしれない。これは、薄く粗粒で分級の悪い砂層に覆われる。この砂層はおそらく新しく形成されたバリアーを突破した暴風によって堆積したものである。コア 9 の最上部は有孔虫を産出しないが、一方コア 45 の最上部は塩性湿地の種が豊富に見られる。これは、現在の状況を反映し、コア 9 は砂丘によって守られた地域で採取され、一方、後者は河と海の両方の洪水を受けている塩水性湿地において採取された。

6. 議論

Martinhal 地域の層位調査で、大きな問題となるのは、砂層が複数あることである。津波堆積物と高潮堆積物を識別することは、トレンチでも難しいが、特にコアについてはとても難しい。層位調査の結果は、津波堆積物は他の砂層よりも内陸に広がっていることを示す。これは、他の比較研究でも見られる (Goff et al., 2004; Tuttle et al., 2004)。さらに、他の砂層と違って、場所によっては大きな巨礫を含んでいる。大きな巨礫は暴風によっても堆積すると報告されているが (e.g. Foster et al., 1991; Dawson, 1994)、このサイトでは他の砂層内には見られなかった。さらに、下位の地表面から浸食された細粒堆積物のイントラクラストは、津波堆積物のみで見られる。これは、Goff et al. (2004) と Nanayama et al. (2000) によっても報告されており、それぞれ New Zealand と日本において津波と高潮による堆積物の比較に使われている。

堆積物の見かけは狭い範囲で変化する。1 つのトレンチでは 4 つの上方細粒化シーケンスが見つかり、コア 9 の粒度分析は 3 つの上方細粒化シーケンスを示す一方、多くのコアやトレン

チではたった1つの上方細粒化シーケンスしか見られない。たった3回の大波がこの地域を浸水したと報告されているので、上方細粒化シーケンスを三回の大波に関連付けることは難しい (Silva Lopes, 1841)。津波の洪水は遡上、引き波、浸食、堆積を伴う複雑な過程であり、しかも谷の険しい両端に沿って波は反射する。そのため、この地域のいたる所に変化をもたらす複雑な過程によって、堆積物がもたらされたことは、驚くことではない。

堆積物に影響する重要な要因は、利用可能な堆積物となる供給物質、沖合の深度分布、局地的な沿岸地形、そしてそれゆえに堆積環境であり、それらは保存のポテンシャルも決定する。それゆえ、各津波堆積物の特徴は各地形要素に依存し、同様なことは高潮堆積物にも言える。この理由で同じサイト内で2つの違いを調査することは重要なのである。

トレンチにおいて、巨礫やリップアップクラスト、浸食性の基底面の存在は、明らかに津波堆積物を示唆するかもしれないが、コアにおいてはこれらの特徴は識別できないことがあり、結果的に、津波の砂層と他の砂層を識別することが不可能なことがしばしば起こる。これが、微化石や粒子サイズの特徴を調査する理由である。

コア9と45の有孔虫解析の結果は、ユニット1と3の細粒堆積物内に存在する汽水性群集と比較して、津波堆積物も高潮堆積物も、海生種の有孔虫の増加を示す。また、壊れた有孔虫の殻の数は、2つの砂層において有意な違いを示さなかった。両者は高エネルギーによる堆積物であり、そのため壊れた殻の高い比率を示す。津波堆積物はわずかにより高い有孔虫の密度を示す。しかし総数は、全ての砂の堆積物の中で比較的低い。

粒子サイズ分析の結果は、津波堆積物と、砂浜、汀段、砂丘の砂との間に明瞭な違いを示す。後者は、一般的により細粒で分級が良い。ユニット1の高潮堆積物と最近の高潮堆積物のオーバーウォッシュファンは津波堆積物と似た特徴を示す。しかし、オーバーウォッシュファンはわずかに分級がより良い。過去および現在の砂堆積物を含む全ての堆積物は、250 μm の粒子サイズが最も多い。このことは全ての堆積物は主に砂浜、汀段、砂丘の砂から成るが、津波堆積物は現在の海岸環境は見られないが、より粗粒な物質—現在のオーバーウォッシュファンや過去の高潮堆積物には含まれる—の存在する場所も供給源である。この粗粒物質は貝破片や砂礫からなり、沖合起源かもしれない。

Hindson et al. (1991)とAndrade and Hindson (1999)は1755年の地震はAlgarve海岸に沿って地震性の沈下を起こしたと結論付けた。Martinkulでは沈下の証拠が見つからなかった。対照的に、本研究の結果は、地震の前に比べ、より乾燥し、これはおそらくは標高がより高い堆積環境となったことを示唆する。

当時の記載はMartihalでは、津波による砂や大きな巨礫の堆積を報告し、それが今回見つかった堆積物にあたる。しかし、ユニット2の津波起源の証拠はAD1755年かそれに近い年代

を示すことなのだが、しかし残念ながらルミネッセンス年代測定の結果は、同定に使うにはあまりに信頼性が低い。それにもかかわらず、1755年の津波堆積物を支持する年代値が、Boca do Rio から得られた。このサイトが Martinhal に近いことと、地形と層位の類似は、ユニット 2 が津波起源であることを支持する。

7. 結論

Martinhal における粒子サイズと有孔虫分析を複合した層位調査の結果は、津波堆積物(ユニット 2)と高潮堆積物にいくつかの違いのあることを示している。津波堆積物は大きな巨礫を含み、その表面にはしばしば軟体動物の掘削痕がみられ、また下位の堆積面から浸食されたイントラクラストを含み、両者はこの地域の他の砂層では見られない。有孔虫分析は、津波堆積物とその他の砂層を識別するのに非常に有効な手段とは思わない。有孔虫群集は同一で、どちらの高エネルギー堆積物も多くの有孔虫の破片を含む。しかしながら、津波堆積物は高潮堆積物に比べ、有孔虫の高い密度を示す。同様に、高潮堆積物の粒子サイズの特徴は、津波堆積物のそれとほとんど同じである。津波堆積物の内陸への広がり、他のどの砂層よりも上回っている。

過去の津波堆積物を調査する時には、その地域で良い層位データを得ることが重要である。ボーリングコアのデータに加えて、より細かく層位を調査するためにトレンチを利用することは重要である。層位のユニット間の境界の特徴、堆積構造、リップアップクラストや巨礫はしばしば、トレンチでのみ見られる。識別は地形、層序、堆積、化石についての情報や年代コントロールを含む様々なデータを集め、用いることで可能となる。

(北村晃寿・松下佳奈)