

Evidence of high-energy events in shelly layers interbedded in coastal Holocene sands in Cadiz Bay (south-west Spain)

スペイン南西 Cadiz 湾の完新世の海岸砂層に挟在する貝殻層の示す高エネルギーイベントの証拠

Gutiérrez-Mas, J. M., Juan, C. and Morales, J. A. 2009, *Earth Surface Processes and Landforms*, 34, 810–823.

要旨

現在のいくつかの沿岸部では、波の営力の及ぶ範囲外に、波の営力による堆積物が見られる。それらの堆積物は、異なった気候で、異なった海水準で形成したのだが、しばしば現在の海岸堆積物と似た特徴が見られる。それらは古い砂丘や浜堤あるいは放棄された砂嘴の一部と解釈され、また過去の形成時を代表する堆積物であると考えられている。それにもかかわらず、類似の堆積物が高エネルギーイベントを受けた海岸地域でも見つかる。高エネルギーイベントがいくつかの隣接した環境で起きた時、運搬と再堆積した堆積物は均質な堆積物を形成し、それは前述の古砂丘や浜堤、あるいは放棄された砂嘴と似た堆積物となり、我々を混乱させる。

本研究では、Cadiz 湾 (スペイン南西部)にある Rio San Pedro の潮流口の先端の La Algaida 松林内にある残留した海岸砂に挟まれた貝殻層を対象とする。貝殻層は主に *Glycimeris* の殻からなるが、この二枚貝は現在の Cadiz 湾の堆積物からは生きてものは見つかっていない。

それらの産出から、貝殻層の起源は、高潮や嵐によって発生したウォッシュオーバーによるかもしれないが、しかし、それらの配置や現在の海水準からの高さは、津波や嵐など、より大きなエネルギーイベントにより貝殻層が形成したことを暗示する。現在の海洋の営力の影響の及ばないすべての海洋環境にある均質な砂質堆積物について

での最重要プロセスは、亜潮間帯や海浜堆積物の可動と拡散、そして海岸の長さや幅である。例外は、San Pedro 潮流口の現在の海岸で、ここでは潮の満ち引きや小さな波により再堆積が起きている。

調査地域はアフリカプレートとリベリアプレートの境界と考えられている場所で、歴史地震や津波に見舞われている。これらの堆積物は、西暦 800 年から 1200 年の間に起きた津波により発生した散発的かつ連続的なウォッシュオーバーによる可能性がある。堆積学的または歴史的なデータは、その期間の地震や津波の活動の活発を示し、一方、貝殻層は、これらの高エネルギーイベント時に起きた最も激しい波で形成したと考えられる。

はじめに

現在の沿岸地域では、今日あるものとは異なる気候及び高エネルギー条件下で形成された古い海岸堆積物が見つかるのは比較的普通のことである。これらの堆積物は、かなりの頻度で植生に固定され、海岸から様々な高さや距離に位置している。それらの堆積相と化石により、それらは普通、放棄された沿岸堆積物と解釈されている。しかし、この解釈はしばしば適当ではなく、例えば、非常に高エネルギーな波の営力が隣接した沿岸環境の境界を乗り越えることがあるからだ。サイクロンや津波のような高エネルギーイベントは、浸食、均質化及び再堆積プロセスをもたらし、以前に存在した海岸堆積物に類似した堆積物を形成でき、容易に誤解を生む(Visher, 1969)。

La Algaida の松林にある完新世の残存堆積物は、Rio San Pedro 潮流口の端で調査されている(Cadiz 湾、スペイン南西部)(Figures 1, 2)。堆積物は、細粒砂と極細粒砂からなり貝殻層を挟む。堆積物の形態、粒径、そして風により容易に運搬されることから、何人かの研究者は、この堆積物を古砂丘の縁辺(Fernández-Palacios ほか, 1988)、または放棄された砂嘴(Zazo and Goy, 1987)と解釈している。

著者の知る限り、貝殻層についての先行研究はない。証拠はそれらが比較的大規模なウォッシュオーバーの結果であることを示唆するが、本当の起源はいぜんとして不明である。活発な地震地域に調査地域が隣接すること(Udias ほか, 1976; Campos, 1991, 1992; Ribeiro, 1995)は、高エネルギーイベントの作用が最もありえそうな仮説であることを示唆する。加えて、津波堆積物は、その活発な地震地域の近くでも記載されている(Dabrio ほか, 1998, 2000; Luque ほか, 2002a, 2002b; Lario ほか, 2002a, 2002b; Ruiz ほか, 2005; Whelan and Kelletat, 2005; Morales ほか, 2008)。本研究では、Cadiz 湾の堆積過程の現在の知識に貢献するため、堆積物の起源の解釈を可能にする堆積学的分析を行う。

研究地域

調査場所は Cadiz 湾の、Guadalquivir 川の河口と Trafalgar 岬の間にある(Figures 1 and 2)。海岸は北北西から南南東の方向に伸び、古い断層と最近の断層で形成された北北西から南南東の方向を持つ領域、西北西から東南東の方向を持つ領域、東西方向の領域がある(Baldy ほか, 1977; Sanz de Galdeano, 1990; Gutiérrez-Mas ほか, 2004)。流体力学的な状態は、大波や潮汐によって支配されている。潮の干満は半日周期で、春の大潮の時は 3.7 m である。この地域は大西洋の海流と地中海から大西洋に流れる海流の 2 つの流れに影響される。沿岸流は、卓越する西風と海岸方向のため南東方向に流れ、堆積物を同じ方向に運ぶ。東風も北と北西方向に沿岸流を発生させる。卓越風の風向は季節変動するが、全体的に西方向の風が優勢である。波高は平均 0.6~1 m だが、嵐の時には最大 4 m になる。西、北西、南西からの波が沖合では優勢である。一方、海岸近くの波は海底で反射する。

完新世より古い基盤層は、鮮新—更新世の泥灰岩、石灰岩と礫岩である(Figure 2a)。より古い岩石には三畳紀の泥灰岩や石膏などがある(Gutiérrez-Mas ほか, 2004)。

方法

フィールドワークは、いくつかのサンプリングの実施と代表的な層序セクションの調査を行った。古流向のデータを取るために、貝殻層の貝殻の方向を測定した。隣接する海域から、堆積物や海底の他の特性を明らかにするために、サンプル採取と掘削を行った。堆積構造を観察することを目的にラッカー剥離テストを行った。

実験室での作業は、サンプルの組織分析と砂の粒度分析を行った。微化石は双眼顕微鏡を用いて 1500 個体を計測した。粒径分布及び粒度パラメータを堆積物とプロセスを記述するために用いた。組織分析は、堆積物との違いを確定するために使われ、わずかな堆積物の特徴を認識し、組織や組成変化を通じて残存堆積物と現在の堆積物を区別するために役立つ堆積物プロセスのデータを提示した。粒度分布の分析のために、Folk(1974)と Folk and Ward(1957)による式を使用した。他の堆積学的及び古生物学的基準は、堆積環境を同定するために用いた。

サンプルの年代測定は、放射性炭素年代測定法(PE-03-01)を使用し、グラナダ大学の科学研究所の年代測定実験室で行った。年代較正は、ワシントン大学のプログラム (Stuiver and Reimer, 1993; Stuiver and Braziunas, 1993; Stuiver ほか, 1998)と Marine curve04(Hughen ほか, 2004)(CALIB program version 5. 01)を用いた。サンプル年代較正に使用した海洋リザーバ補正值(ΔR) : 2500 年前より古いサンプルは $\Delta R = 440 \pm 84$, 2500 年前から 1700 年前の間は $\Delta R = 412 \pm 45$, 1700 年前から 1000 年前の間は $\Delta R = 304 \pm 70$, そして 1000 年前以降のサンプルは $\Delta R = 114 \pm 90$ を使用した(Monge Soares, 1993; Reimer ほか, 2002; Morales ほか, 2008)。

結果

La Algaida の堆積物は、砂粒子が 97.7 % で、主に細粒砂と極細粒砂からなる。小礫

や泥はごく微量でそれぞれ 0.74 %, 1.21 % である。堆積物は塊状で級化成層を示し、わずかに平行ラミナと斜交ラミナが見られる。また、二枚貝が豊富に含まれ、化石化した植物根は含まない。堆積物中の主要な鉱物は、石英で 75~85 % 含まれている。石英粒子は丸みを帯び、曇りのかかった半透明であるが、いくつかの粒子は光沢のある角ばった形態を持つ。フィロ珪酸塩は、白雲母及び黒雲母(2 %) で存在する。その他の構成物は、鮮新—更新世の露頭由来の石灰砂岩などの岩片である。粘土粒子は、イライト、緑泥石、カオリナイト、スメクタイトや混合層イライト—スメクタイト粘土鉱物からなる。

堆積物は非常に均質で、第一モードは細粒砂、第二モードは極細粒砂である。平均粒径は 0.18 mm で淘汰度は 0.55 と淘汰の非常に良い堆積物である(Folk and Ward, 1957)(Table I)。炭酸塩堆積物は 15~30 % を占める。それは主に方解石からなる生物骨格で、二枚貝や腹足類の破片、有孔虫や他の生物骨格からなる。大型動物は、主に *Glycimeris* の殻と腹足類の殻で構成される。一方で微小生物は主に底生有孔虫や浮遊性有孔虫、貝形虫、骨針、棘皮動物の破片、コケムシやサンゴ、小型の魚の骨と海綿骨針からなる。

有孔虫は最も重要な微化石である。それらの殻の保存状態は良く、擦り傷や再結晶の跡はない。有孔虫の殻室は空になっているが、海緑石に充填されており、黄鉄鉱化した標本もある。底生有孔虫が卓越し、Miliolids, Rotalids と Anomalinids に代表される(Table II)。亜沿岸標本は *Lobatulus*, *Nonion pompiloides*, *Boneanum*, *Cassidulina laevigata* と *Amonia becarii* を含む。浅海の有孔虫の標本は、*Textularia articulate*, *Sagitula* や *Uvigerina mediterranea*, *Peregrina* と *Hyalinea balthica* を含む(Table II)。浮遊性有孔虫は Globigerinids (globigerinae と orbulinae) が卓越するが、*Globorrotalia truncatulinooides* などの深い水深に生息する種もいる(Table II)。

La Algaida の砂の有孔虫の平均含有率は 6.3 % で、そのうち底生種が 4.47 %、浮遊性

種が 1.44 % である。底生/浮遊性有孔虫種の比は 3.35 (Table II) で、これは現在の沿岸堆積物よりも高い値である。地点 7 の Valdelagrana ビーチの堆積作用が活発な砂丘では、有孔虫の含有率は 2.8 % で、うち底生種が 1.6 %、浮遊性種が 1.2 % で、その比は 1.3 であった。これらの値は、調査範囲外の堆積作用が活発な砂丘ではさらに低くなっているおり、例えば、Cadiz 湾内の Cortadura ビーチの砂丘では有孔虫の含有率は 0.6 % である。

Valdelagrana ビーチなどの研究から、堆積作用が活発な後浜堆積物では、有孔虫の含有率は 3.2 % で、底生/浮遊性有孔虫比は 1.28 である。堆積作用が活発なウォッシュオーバーチャンネルでは、有孔虫の含有率は 3.2 % で、底生/浮遊性有孔虫比は 1.3 である。堆積作用が活発な前浜堆積物では、含有率は 3.8 % で、底生/浮遊性有孔虫比は 2.1 である。最後に潮間帯では、有孔虫の含有率は 4 % で、底生/浮遊性有孔虫比は 2.07 である。

貝殻層

La Algaida の堆積物は細粒砂と極細粒砂で構成され、貝殻を除いて堆積物には明瞭なファブリックはない。層序セクションでは、非常に均一かつ単調な特徴を示し、層序セクションに記載した地点間の実質的な変化を示さない。この単調な配置は、砂に挟まれる貝殻層の存在でのみ変化する。貝殻層が地面で切られた時には、貝殻層は長さ 3~15 m、幅 1~3 m の帯状に分布し (Figures 3 and 4)、西北西 - 東南東、北東 - 南西と南北方向を持つ (Figure 4D)。貝殻は殻表を上に向け、水平な姿勢をとるが、いくつかの層では、二枚貝の殻はインブリケーションを示す。その例は、La Algaida の地点 5 の最下位の貝殻層である。

貝殻の化石は *Glycimeris* の殻からなる (Figure 4)。 *Glycimeris* の殻は、円形で左右の殻の形が同じで、殻縁は刻まれており、平均サイズは 3~6 cm である。それらは、一般

的によく保存されているが、貝殻層の下部では、退色や劣化によって灰白色になっている。さらに、貝殻は衝突痕、摩擦や溶解が見られる(Figure 4)。最も新しい貝殻層では、殻の表面の彫刻は良く保存されており、それらの色は灰色がかった茶色から紫色である。

地点 5 の最下位の貝殻層(Figures 2 and 5)は、西へ 5~10°、つまり海側に、わずかに傾く。貝殻は西傾斜したインブリケーションが発達し、西から来た流れ、つまり海から来た流れの証拠を示す。基底は殻長 5 cm の *Glycimeris* の殻と貝殻支持の貝殻層である。この上には泥や砂や *Glycimeris* の殻が互層した厚さ 1 cm の薄層がある。

この貝殻層の上位には *Glycimeris* を含む砂層と腐植物の層が互層している。この互層の上には、厚さ 12 cm の貝殻層があり、殻長 6 cm の *Glycimeris* の殻と珪岩質や砂質の小礫、貝殻片を含む。*Glycimeris* の殻はインブリケーションが発達している。この貝殻層の上に、現在の潮間帯の泥があり、露頭を覆っている(Figure 5)。

上位の貝殻層は、地点 3 にあり、より高い場所で層序的に上位にある(Figures 2, 6 and 7)。これらは、*Murex* や *Strombus* などの巻貝、殻長 5~6 cm の *Glycimeris* の殻で構成され、*Glycimeris* の殻はインブリケーションが発達している(Figure 5)。この貝殻層の上 25 cm には、さらに厚さ 10 cm の単層があり、*Glycimeris* の殻で構成され、貝殻は殻表を上にしてしている。

これらの層の上に細粒砂や極細粒砂の堆積物があり、最近の根や腐植物が豊富である。この特徴は地点 4 でよく見られる(Figures 2, 8)。砂の含有率は 98.43 %で、平均粒径は 0.19 mm である。モードは細粒砂と極細粒砂で、淘汰度は 0.72 と中程度の分級である。これらの砂の特徴は、高い有孔虫の含有率で、最大 14.34 %に達し、主に miliolids からなる(Table II)。

現在の海岸堆積物との比較

現在の砂丘は、La Algaida の砂の海岸堆積物によく似ている。研究場所の風成堆積物は、砂が 100 % (Table I) で、一峰性でモードは細粒砂である。淘汰度は 0.55 で、淘汰の良い砂にあたる (Folk and Ward, 1957, in McManus, 1998)。有孔虫の含有率は 2.8 % で、底生/浮遊性有孔虫の比は 1.3 で、La Algaida の砂の値よりも低い (Table I)。この違いは、研究地域外の砂丘堆積物と比較した場合、より顕著になり、例えば La Cortadura の海浜では、有孔虫の含有率は 0.6 % である。興味深いことに、調査地域内の現在の砂丘と La Algaida の砂層の高い場所で、miliolids が最も多産する。それにもかかわらず、砂の影のような小さな砂丘体では、miliolids はなく、planorbilinidae が多産する。現在の後浜と堆積作用が活発なウォッシュオーバーの堆積物も、La Algaida の砂と同様の特徴を有し、砂の含有率は 98~99.9 % で、モードは細粒砂または極細粒砂であり、淘汰度は 0.50~0.61 である。一方、La Algaida の砂との主な違いは、有孔虫の含有率 (3.2 %) がより低いことである。

堆積作用が活発なビーチの潮間帯堆積物は、砂の含有率が 94 % と最も低く、粒径は若干荒い。モードは中粒砂で、淘汰度は 1.05、淘汰の悪い堆積物で、有孔虫の含有量は 3.8 % である。亜潮間帯 (地点 9) では、堆積物は沿岸の堆積物に比べ、低い砂の含有率 (78.7 %) で、モードは中粒砂と細粒砂で、淘汰度は 1.06 と淘汰の悪い堆積物である。加えて、それらは小礫、インブリケーションの発達した *Glycimeris* の殻、腹足類、陸生の木や植物を含み、有孔虫の含有率は 4 % で、La Algaida の砂の値に最も近い。

Glycimeris の殻については、Cadiz 湾の沿岸地域では殻が豊富にもかかわらず、サンプリングが明確に示しているように、この軟体動物は Cadiz に隣接する海底から姿を消している。この生物の産卵場所の中で最も Cadiz 湾に近い場所は、ジブラルタル海峡に近い地中海地域で、La Atunara (San Roque) などは、*Glycimeris gaditanus* という *Glycimeris glycimeris* (Linné) (Consejería Agricultura y Pesca, 2002) の亜種を養殖している

場所だ.

貝殻層の年代

炭酸塩試料の放射性年代は、完新世後期を示す(Table III). 最古の貝殻層は潮下帯にあり、 1500 ± 70 BP で、補正年代は 1101 ± 121 BP で、暦年に換算すると西暦 849 ± 21 である(Figures 7, 9). 次に古い層は干出した場所に位置し、 1910 ± 60 BP で、補正年代は 1046 ± 85 BP で、暦年に換算すると西暦 904 ± 85 である(Table III).

最新の堆積物は、地点 3 (Figure 8)にあり、 1670 ± 60 BP で、補正年代は 898 ± 105 BP, 暦年に換算すると西暦 1052 ± 105 である(Table III). 同じ地点では、 1590 ± 60 BP で、補正年代 823 ± 90 BP で、暦年に換算すると西暦 1127 ± 90 の最新の試料が見出されている (Figure 6).

議論

結果は、La Algaida の砂は、多くの現在の沿岸堆積物に類似することを示す。それらは石英の砂と生物碎屑性の砂で構成され、礫や泥はほとんどない。主要な砂の粒径は細粒砂と極細粒砂である。それらは塊状の内部構造で、肉眼では堆積構造を認識できない。もう一つの類似は、La Algaida の砂の層序的に高いところにある堆積物のように、大きな砂丘の中で最も多い有孔虫が miliolids であることだ。

堆積作用が活発な砂丘と La Algaida の砂層における微古生物学的な内容の類似性 (Table II)は、堆積物の起源が共通するという考えを導くだろう。これらの砂丘は、元は La Algaida の砂層と同様の堆積物で構成された可能性があるが、今は、風、潮そして波の作用によって再堆積している。さらに、潮間帯堆積物は、より粗粒であり (Table I), 有孔虫の含有率は潮下帯堆積物よりも高い。亜潮間帯堆積物は、潮上帯や潮下帯の堆積物と顕著な違いがあり、砂の含有率は最小で、有孔虫の含有量は最大、インブ

リケーションの発達した *Glycimeris* の貝殻、小礫、陸生植物遺骸の産出の点で異なる。

La Algaida の砂層の起源

堆積相と現在の海岸近くという地理的な位置(Tables I and II)から、La Algaida の砂層は、海岸沿いの風成砂丘あるいは海浜や砂嘴などの他の沿岸環境のものであるように思われる(Figures 10 and 11)。それにもかかわらず、斜交層理、浸食トランケーション、カレントマーク、洗掘などの堆積構造がないことは、これらの堆積物を正確な堆積環境へ当てはめることを難しくする。さらに、高い有孔虫の含有率は、亜潮間帯や浅海域など、より深い海洋環境に関連付けられるので、これらの堆積物は海洋起源であることを示唆する。しかし、淘汰の良い砂と貝殻層の多産は、沿岸環境とより深い海域(Tables I and II)の両方が混合した特徴で、かなり特異な堆積物である。

これらの特徴は共通の起源を示唆し、おそらく同様の供給源と運搬機構から生じている。細粒砂と極細粒砂と淘汰の良い堆積物が卓越することは、供給源が古い風成砂丘の境界であることを示す。また、軟体動物の殻と底生・浮遊性有孔虫の産出は、隣接する亜潮間帯や浅海域からの物質の流れ込みを示し、高エネルギーの流れがあったことを意味する。

それらを運搬した流水力学的プロセスの後、堆積物は、様々な沿岸環境上に堆積し、その後のいつもの流水学的営力が波や潮汐作用によって回復されれば、各環境での支配的な作用に基づく新しい堆積の再分配が起こる。それにもかかわらず、激しい高エネルギープロセスが、堆積物に作用するが、それらは依然として供給源にあった前からあった堆積物と類似の粒径分布や組織を維持する。

貝殻層の起源

La Algaida の砂層は、前に存在していた海岸の堆積物を運搬させ再堆積させたプロセスの産物であるならば、貝殻層は 15~40 m の深さに生息していた *Glycimeris* の貝殻の運搬を可能にする最も強いエネルギーの波の結果である可能性がある。La Algaida の貝殻層は、明らかに、海岸域を超えたウォッシュオーバーの流れがあったことを示す。流向は、露頭における貝殻の方向から推定される。これらは、基本的に西北西から東南東の方向で、海岸線を横切る流れを示す。このタイプの唯一の水流は、海からくるもので、例えば、春の大潮、あるいは強力な嵐や津波で発生する高波などにより生じる。

また、*Glycimeris* の生きている集団は、Cadiz 湾の亜潮間帯の海底や隣接する大陸棚から消えた。その消失は、環境変化、破壊、過剰な採取、あるいは軟体動物の生息地となっていた砂の堆積物の一部を一掃した可能性がある高エネルギーイベントによる可能性もある。

流体力学的プロセス

潮汐作用は La Algaida の貝殻層の起源のためのもっともらしい説明である。実際に、潮流によるウォッシュオーバーは、この海岸地域では現在頻繁に起きるプロセスで、海浜堆積物や砂丘の境界を越え、内陸に流れが達している。この仮説の主な欠点は、この地域内の最大予測海面よりも上に複数の貝殻層があることだ。Cadiz 湾では、潮汐の最高値は 4 m なので、この潮流では堆積物や海底に生息する *Glycimeris* の貝殻を運搬するためには不十分で、さらに、それらをかなりの距離を運搬するには、はるかに強力な流れが必要である。

潮流と嵐の複合作用

潮流単独では貝殻層の形成を説明できないが、大潮と特定の気象条件が組み合わせ

った時、海岸の海面が異常に上がることもある。異常潮位は、嵐の時の気圧の低下、風や波の直接作用、またはこれらすべてが組み合わせられたことにより生じる。

研究地域で卓越する波は、西と南西から来るもので、最大波高は 4 m である。嵐による異常潮位は高さ 1 m を越えず、春の大潮と一致した場合でも、最大波高は平均海面より上 3 m 以下である(Fraile Jurado, 1995)。これは、複数の貝殻層の標高に達しうるウォッシュオーバーを発生するのに十分である。その上、大きな嵐の波は、浅い海底の堆積物や貝殻を動かすことができ、上げ潮と絶え間ない波の複合作用は岸に向かって物質を運搬できる。

この仮説の主な問題点は、異常潮位はあり得るが、統計的に非常に低確率であることだ。一方、La Algaida の貝殻層は、ある程度の周期性を示し、これは繰り返し起こるウォッシュオーバーの活動を示す。もう一つの問題点は、Valdelagrana の砂嘴が波に面しているという事実で、流れが La Algaida の貝殻層のある Rio San Pedro の潮流口の反対側に達する前に、堆積物の堆積を引き起こす可能性がある。したがって、Valdelagrana の砂嘴を乗り越えるために、より高い異常潮位及びより高いエネルギーの流れが必要となる。別の可能性は、貝殻層が形成された時には、砂嘴バーがなかったというものだ。この状況は、ビーチへの流れの直接作用を許しただろう。

貝殻層の起源については、これらの堆積物は、Valdelagrana ビーチの前浜にしばしば見られるコキナ層の一つを思い出させる。合弁の生きた状態の二枚貝が秋と冬の波により堆積し、0. 2~1 m の厚さの堆積物を形成する(Figure 4d)。前浜と後浜に見られる貝殻からなるコキナは、速やかに波や潮汐によって浸食され、その結果、海岸に沿って分散、堆積する。

コキナ堆積物は、La Algaida の貝殻層(Figure 4d)といくつかの類似性を共有するが、違いもある。Glycimeris の貝殻はコキナより大きくて重い。一方、コキナに見られる貝の生息地は、非常に浅く汀線に位置しているので、それらの再堆積及び運搬は、高波

や気象学的または流体力学的条件の複合作用を必要としないが、*Glycimeris* の生息地は沖合のより深い海底で、運搬するにはより高い波が必要となる。もう一つの違いは、コキナ堆積物は前浜・後浜堆積物にあるが、La Algaida の貝殻層は塊状の細粒砂と極細粒砂の上であり、この堆積物は海浜堆積物と異なる堆積構造を持つ。また、*Glycimeris* の貝殻層は砂層に挟まれており、迅速かつ即時の埋没の結果であるのに対し、コキナは短時間の露出で、潮流や波によって動かされ分散する。

巨大波

貝殻層の起源を説明する第三の仮説は、独立した巨大な波で、暴れ波や Freck wave(気まぐれ波)として知られ、周りの波より高い波である(Didenkulova ほか, 2006; Dysthe ほか, 2008)。これらの独立した巨大な波は、通常の波よりはるかに高く、最小でも高さ 20 m あり、波の位相の重なりで起こる。これらの波は、外洋では非常に危険で、船舶の沈没も引き起こしうる。巨大波の存在は、プロジェクト MaxWave (Rosenthal, 2002)により確認された。合成開口ローダー(SAR)を搭載した、欧州宇宙機関(ESA)の衛星は、客船ブレーメンとカレドニアン・スターの海難事故の前後 3 週間の海面の画像を解析した。スペクトル解析が行われた後、記録の期間が短いにもかかわらず、高さ 25 m を越える 10 個の巨大波が検出された。このデータは、巨大な波の存在と、以前考えられていたよりも発生頻度が高いことを示した。

巨大波の形成メカニズムはよく分かっていない。それらは、しばしば、強風で起きる通常の嵐の波が海流と合わさり、エネルギーの集中で波高の増加を起こす。また、強力かつ持続的な風で増幅した波あるいは波列が、別の嵐と複合して高さが増すことで巨大波となることもある。巨大波は地震に伴う津波と異なる。津波の場合には、より長周期で外洋ではほとんど見ることはできないが、海岸近くでは危険な高さとなる。

沿岸地域の巨大波の流体力学的挙動と、浅海における堆積ダイナミクスの含蓄に関して、波が大陸棚に到達した時、波はすぐに形を崩し、海岸に到達する前にそのエネルギーを拡散し、その海域の嵐の時の波浪限界より深い陸棚に影響して、その堆積物と生物遺骸を運搬する。しかし、狭い大陸縁辺では、これらの波はまた、海岸を崩し、異常潮位をもたらし、ウォッシュオーバーをもたらす可能性がある。Cadiz 地域では、単発の巨大波の記録はないが、地震や津波に関する十分な歴史的証拠がある。

地震によって誘発された津波の活動

Cadiz 湾のような地震活動が活発な地域では、貝殻層の津波起源の仮説を検討すべきである。研究地域周辺では、四世紀にローマ帝国の居住地 Baelo Claudia を破壊した地震や津波の証拠が発見されている(Silva, 2002; Silva ほか, 2005)。また、Huelva 河口の Doñana 砂嘴と Valdelagrana 砂嘴では複数の堆積物は、西暦 216~218 年の間に発生した津波に起因している(Galbis, 1932, 1940; Borja and Díaz del Olmo, 1995; Luque ほか, 2002a, 2002b; Morales ほか, 2008)。しかし、最もよく知られた津波の一つは、南西イベリア半島沿岸に壊滅的な結果をもたらした 1755 年のリスボン地震による津波で、Cadiz 湾内で最大 15 m の波を発生した。Valdelagrana 砂嘴(Cadiz 湾)のウォッシュオーバー扇状地のいくつかは、この津波に起因している(Dabrio ほか, 1998)。Andrade と共同研究者(Andrade, 1991; Andrade ほか, 1994, 1997, 2004)は、Algarve にある Formosa 砂嘴上への影響を示し、大規模なウォッシュオーバー扇状地の形成と多量の貝殻の集積があったことを示した。

津波は、海岸地形を変え、堆積物を移動させ、しばしば嵐による層と誤認される堆積物を作り出すことのできる高いエネルギーイベントである(Dawson ほか, 1988, 1996; Dawson, 2005; Nanayama ほか, 2000; Shi ほか, 1995; Goff ほか, 2004)。Cisternas ほか(2000)は、チリの Maullin 川の河口で、1960 年の津波によって生成された堆積物を確認

した。彼らは、砂が、河口に位置する砂丘の境界に由来すると推定した。

Cadiz 湾における本研究の堆積物は、津波起源であることの複数の明確な証拠を示し、西からの一方向流の作用を示唆するインブリケーションの発達した *Glycimeris* の殻を含むことなどである。層序断面(Figure 5)は、インブリケーションの発達した貝殻の層、泥層、砂層や薄い腐植物層の互層を示す。亜潮間帯堆積物に関しては、セクションは、インブリケーションの発達した *Glycimeris* の貝殻、小礫や陸生の植物遺骸を伴ない、小礫からなるという津波堆積物と類似した特徴を提示する(Figures 7 and 9)。

また、堆積物の年代を考慮するならば、亜潮間帯の堆積物は西暦 849±21 年、最下位の La Algaida 貝殻層は西暦 904±85 年で、これらは西暦 881 年と西暦 949 年に Cadiz 海岸を襲った 2 つの歴史津波と一致する(Galbis, 1932, 1940)(Table III and Figure 7)。この年代の一致は、亜潮間帯堆積物と西暦 881 年の津波とのより密接な一致を示す。それにもかかわらず、両方のイベントの間は 61 年と短く、これらの堆積物は連続して、両方の影響を受けている可能性を示唆する。

標高の高い貝殻層に関しては、最古のものは暦年で西暦 1052±105 年(Table III and Figure 7)で、その年代に近い津波は西暦 949 年と西暦 1033 年のものがあり、どちらも古文書記録に残っている(Galbis, 1932, 1940; Martins and Mendes, 2001)。この堆積物は、おそらく、西暦 1033 年の津波によって生成されたが、この堆積物はまた、西暦 1040 年に北部アルジェリアで発生した巨大地震によって、西暦 1033 年の堆積物の再堆積を引き起こしている可能性がある(Lorito ほか, 2007)。

より上位で最新の貝殻層の暦年代は西暦 1127±90 年である(Table III and Figure 7)。この時代の Cadiz 海岸には、地震イベントや津波イベントの文献はないが、ベニス(西暦 1117 年)、シリアとエジプト(西暦 1138 年)、南イタリア(西暦 1169 年)と北エジプト(西暦 1201 年)には、同時期に地中海で発生した巨大地震や津波の記録があり、これは西暦 1169 年のイベントは歴史の中で最も被害の大きいものの一つである(Tinti ほか,

2005; Lorito ほか, 2007).

それにもかかわらず、地震の歴史は不完全かもしれないし、年代測定の誤差で古文書に記されたイベントと堆積物の対比はかなり難しく、それゆえに繰り返し起こる短期イベントを判別するのは難しい。しかし、本研究で得たデータと結果は、西暦 850 年から 1200 年までの期間は、激しい地震と津波活動があったことを示す。最近の古地理研究の結果は、Cadiz 湾の実質的な変化を示し、いくつかの自然災害に起因する崩壊、隆起、堆積物の下に埋もれた建物などにより、この地域の地形が変化したことを指す。この点で、12 世紀のアンダルシアの作家 al-Zuhri は、Cadiz の住民が持っていた海に行くことへの恐怖心を記した。その恐怖心とは、古い町を破壊し水没させた山のような大波を示している(Sanchez-Saus, 2005)。

津波エリア

Cadiz の海岸は、大西洋と地中海で起きた津波の活動にさらされている(Figure 12)。イベリア半島の南西端は、ユーラシアプレートとアフリカプレートの境界に近いため、地震活動が多いことが特徴である(Grison and Chen, 1986)。ここは広域的発散領域で、テクトニック活動が 1775 年のリスボン地震のような大地震や大津波を引き起こしている(Dawson ほか, 1996)。このリスボン地震の震源は長期間不明だったが(Udias ほか, 1976; Campos, 1991, 1992; Ribeiro, 1995)、現在、San Vicente 岬から 100 km に位置すると考えられ、Marques de Pombal 断層の近くの Grringe Bank 沈み込み帯に関連したものとされている(Campos, 1991, 1992; Ribeiro, 1995; Gutster, 2005)。

他の潜在的な地震と津波の波源は地中海で、特に Tell-Atlas 衝上断層帯である。地中海は比較的小さいサイズのため、津波の波源は、潜在的に Cadiz 湾を含むスペインの海岸に達する可能性がある(Figure 12)。この地域で発生した最後の大地震の震源は Algiers から 40 km の場所で、震度は 6.8~6.9 であった。この地震の津波は、スペイン

沿岸の潮位ゲージに記録された (Lorito ほか, 2007). 45 分後, 波はスペインの南東海岸に到達し, 最終的に Alboran 海の Cadiz 湾に到達した. Algeria 北部に震源を持つ震度 6.8 の地震は, 北アフリカの海岸に高さ 2 m の津波を生じ, 大西洋のスペイン沿岸では, それより小さい波を起こすことができる. したがって, 西暦 1202 年に発生した地震など最も強烈な歴史地震に伴う津波は, 他の流体力学的あるいは気象学的な要因の結合で起こる異常潮位よりも高い波高となり, La Algaida の砂層の貝殻層を形成したウォッシュオーバーを正当化するのに十分である.

Cadiz 湾のイベントと堆積学的領域

Cadiz 湾では, 地震や津波の役割が堆積学的領域における重要な制御要因となっている. この制御は, 基本的に津波の動的作用によって行われ, 時々, 高潮や大潮のような他の作用と組み合わせることがある. 最も効率的なプロセスは, 沿岸地帯での堆積物の再移動とその運搬と再堆積である. これらのイベントの中で最も強い波は, 粗粒で, 軟体動物の殻, 小礫, 岩片の産状によって特徴付けられる. 加えて, 海底の持続的な動的作用は, 砂の底質を除去し, その結果 *Glycimeris* などの多くの生物の生息地を消失させた可能性がある.

Conclusions

スペイン西南部の Cadiz 湾の海岸で, 複数の完新世の貝殻層を研究した. これらの層は, La Algaida の残留砂と互層し, 主に *Glycimeris* の貝殻からなり, 巻貝, 転がってきた小礫, 岩片を含む. これらの貝類の生息地は, 深度 15~40 m の海底であるが, Cadiz 湾沿岸部では *Glycimeris* の貝殻は多数あるものの, 生きた個体は採取できず, この地域で最近実施された生物学的研究でも生きた個体は得られていない. このことから, この種は Cadiz の沿岸地域から消えており, その原因は, 気候変動, 過剰な採

取,あるいは生息地となっていた砂の堆積物の一部を一掃した高エネルギーイベントの繰り返しによる.

La Algaida の貝殻層の形成は, 想定される最大の海面高を数 m も超えるウォッシュオーバーによると思われる, そのような状況は嵐などの高エネルギーイベントが組み合わさった特異的な流水学的状況かあるいは津波による. 最も古い貝試料は亜潮間帯堆積物に対応し, それらは西暦 849 ± 21 年の年代を示し, 西暦 881 年に Cadiz 湾を襲った歴史津波と一致する. 次に古い La Algaida の貝殻層は西暦 904 ± 85 年に形成され, これは西暦 949 年に起きた歴史津波と一致する. これらの二つの歴史津波の間隔が短いため, 堆積物は両方の津波の影響を受けている可能性がある.

標高の高い貝殻層に関しては, 西暦 1052 ± 105 年のものは, 西暦 1033 年の歴史津波と一致する. しかし, 年代測定の分析誤差を考慮すると, 西暦 904 ± 85 年に起きた津波によって堆積し, その後, 西暦 1033 年の津波で再堆積した可能性がある. 最新の貝殻層は西暦 1127 ± 90 年である. 時代的に最も近いイベントは西暦 1033 年の津波で, 他の津波の記録はない. 年代測定の誤差を考慮すると, この堆積物は西暦 1033 年より前の津波の可能性もある.

La Algaida の砂層の組織や粒度組成の特徴は, 現在の Cadiz 湾に存在する複数の沿岸堆積物, 砂丘や後浜やウォッシュオーバーに類似する. それらは砂の割合が 100% に近く, 礫や泥はなく, モードは細粒砂である. 有孔虫の含有率には違いが見られ, La Algaida の砂層の場合, 海岸堆積物よりも含有率は高く, 亜潮間帯堆積物や浅海域の堆積物と類似の値である.

堆積物の組織や粒度データは, 供給源は古い風性砂丘の堆積物であることを示し, 連続的な海洋イベントによって可動し, 海岸に沿って再堆積し, 分散する. その後, 堆積物は, 通常の流水力学的作用を受け, 組織がわずかに変わるが, 供給源の堆積物に見られる特徴的な粒度組成は保持される.

研究地域の堆積物の制御は、基本的に津波の動的作用によって行われ、時々、高波や春の大潮のような他の作用の組み合わせた異常潮位が関係する。最も効果的な堆積作用は、元からある堆積物の再移動と海岸に沿った運搬と分散である。これらのイベントの中で最も強力な波は、粗い堆積物がより厚くなることと貝殻の存在により特徴づけられる。加えて、持続的な動的作用は、一部の海底の砂を除去し、*Glycimeris* などの Cadiz 湾から姿を消した生物の生息地を消滅させた。

津波堆積物は、これらのイベントの頻度に関する価値のある情報である。La Algaida の堆積物には、少なくとも 4 度の記録された連続的な津波があった。最近の地質学的データと考古学的データは、Cadiz 湾に作用を及ぼした地震や津波が続けざまに起きた(clustering)ことを示す。これらは、11 世紀から 13 世紀に起きた完新世後期の津波で、それらの堆積記録は同期間には、発生間隔がわずか 100 年であることを示す。

(北村晃寿・笹田将輝)