

Morales, J. A., Borrego, J., San Miguel, E.G., López-González, N., Carro, B.  
Sedimentary record of recent tsunamis in the Huelva Estuary (southwestern Spain)  
*Quaternary Science Reviews*, 27, 734-746.

スペイン南西部のウエルバエスチュアリーにおける現世の津波の堆積記録

## 要約

カディス湾の沿岸部は、後期完新世から有史時代にかけて繰り返し津波に襲われてきた。古文書にはこの海岸を少なくとも7回の大規模な津波が襲ったと記録されており、その他のものも海洋での計測(oceanic instruments)によって検出されている。それにも関わらず、カディス湾の低エネルギーな沿岸環境におけるこれらの津波の堆積記録を述べた研究は非常に少ない。ウエルバエスチュアリーは、カディス湾の中央部に位置し、Tinto川とOdiel川が流れ込むmesotidal(河川の流れと潮汐の両方の影響を受ける)エスチュアリーである。ウエルバエスチュアリーの平均潮汐レンジは約2 m、平均波高は約0.5 mである。エスチュアリーの外側は、広範囲にわたる砂に富む海洋起源の堆積物によって特徴づけられ、一方中央および内側部分は、泥質の潮汐堆積物が占めている。5つの側方に連続する貝殻のユニットが、これらのエスチュアリー堆積物中に記録されている。これらのユニットは、津波堆積物に典型的な特徴の多くを示し、浸食された基底面の上に、貝殻密集層に始まり生物攪拌を受けた泥質砂に終わる上方細粒化シーケンスを持つ。本研究における $^{14}\text{C}$ 年代と $^{226}\text{Ra}/^{228}\text{Ra}$ から求めた堆積速度の結果は、これら5つの津波堆積物が西暦1755年、1531年、949(1033?)年、881年、395(381?)年に起こった、古文書にある既知のイベントと一致することを示す。

## 1. 序

カディス湾の沿岸部は、後期完新世から有史時代にかけて繰り返し津波に襲われてきた。もっとも最近のイベントは、有史時代の中でヨーロッパにおいて知られる最大の地震の一つである有名な“リスボン地震”と連動して1755年11月1日に発生したものである。リスボン地震は、マグニチュード8.3、震央の震度はMSKスケールでXI~XIIと見積もられている。リスボン津波は、イベリア半島の沿岸地域とモロッコの沿岸地域を広範囲にわたって破壊し(Whelan and Kelletat, 2005; Gracia et al., 2006)、その影響はイングランドの南海岸にまで及んだ(Foster et al., 1991)。有史時代にカディス湾を襲った津波として知られるその他のものは、Galbis (1932, 1940), Campos (1991), Bermudez and Peinado (2005), Ruiz et al. (2005)で述べられている。これらには、西暦1531年(マグニチュード7.7, 震度IX)、西暦881年(震度VII)、そしてカディスに近いローマ時代のバエロクラウディア村を破壊した西暦395

年の津波(Silva et al., 2005)イベントが含まれる。これらの歴史的な地震の震央は、サンビセンテ岬の南西約200km, ゲーリングバンク付近の北大西洋(Fig. 1)で観測された, より最近の地震イベントとの比較から, 復元されてきた(Martínez Solares et al., 1979; Levret, 1991). しかし, より最近の分析では, おそらくアズレス - ジブラルタル断層(Fig. 1), またはMarques de Pombal断層(Baptista et al., 1998; Terrinha et al., 2003)のような小規模断層に沿った動きと, より関連していることが示唆されている。

潟湖, エスチュアリー, または海跡湖のような(波から)保護された低エネルギーな沿岸環境においては, 津波の衝撃は, チェニアー(chenier)やウォッシュオーバーファンを含むストーム堆積物との区別が難しいとされる複雑な堆積物記録を生成する。近年の研究は, 年代の分かっている津波堆積物の詳細な分析によって, ストーム堆積物と津波堆積物を区別するための明瞭な堆積物学的基準を開発しようと努めてきた。例えば, Nanayama et al. (2000)やSawai (2002)は西暦1993年の北海道南西沖地震に伴う津波堆積物を記載し, Goff et al. (2004)は15世紀にニュージーランドで起こったOkoropunga津波に伴う堆積物を報告しており, またVan den Bergh et al. (2003)は西暦1883年にクラカタウで起こった火山噴火に伴う津波堆積物について述べている。

ヨーロッパの大西洋沿岸で行われた先行研究は, ポルトガル南海岸のバリアー島(Andrade et al., 1994; Dawson et al., 1995; Hindson and Andrade, 1999)や, カディス湾の砂州(Dabrio et al., 1998; Luque et al., 2002; Whelan and Kelletat, 2005; Gracia et al., 2006)において, 西暦1755年のリスボン地震の堆積物の証拠を検出した。ローマ時代のさまざまな津波によるウォッシュオーバーの特徴は, カディス湾でも報告されており(Luque et al., 2001), より古い時代の津波の証拠がグアダルキビール川河口においても報告されてきた(Ruiz et al., 2005)。

本研究の目的は, カディス湾のウェルバエスチュアリーで後期完新世に起こった津波の堆積物を記載することである。我々の研究は, エスチュアリーを中心部のボーリングから得た堆積学的データの解析に基づいており, この場所では過去約2,000年間に5つの明瞭な貝殻に富む層が形成されている。我々は, それらのユニットに伴う堆積物の特徴を詳しく記し, 年代を報告し, また古文書記録から既知の地震と比較する。

## 2. 津波堆積物の特徴

津波堆積物の堆積相の組成, 粒径そして側方への連続性は, 元々の堆積環境の特性, サイトの地形の状況, 津波の遡上の特徴に依存して, しばしば変化し, 場所によって異なる。しかし, 既存の論文(例えば, Dawson et al., 1991; Foster et al., 1991; Atwater and Moore, 1992; Minoura and Nakata, 1994; Nelson et al., 1995; Bondevik et al., 1997; Dawson and

Smith, 2000; Goff et al., 2000; Sawai, 2002; Nichol et al., 2003; Goff et al., 2004)には、多くの津波堆積物に共通するいくつかの特徴が記載されている。それらの特徴は、(1)下位のユニットと浸食面で接触すること、(2)上下の層より粗い堆積物、である。津波堆積物は、貝殻密集層もしくは、泥クラストと再堆積した植物片を含む混合層で始まり(Bondevik et al., 1997; Dawson and Smith, 2000)、泥質砂もしくは、泥質マトリックスを伴う砂質礫で終わる。シーケンスの砂質上部は、生物攪拌を受けており、しばしばコンボリユート層理が発達する；(3)外浜または大陸棚に由来する重金属(Pb, Cu, Ni, Fe, Cr)に富む外来の堆積物の存在(Van den Bergh et al., 2003)、(4)開かれた環境や庇護された環境から運搬された、有孔虫、珪藻、貝形虫、海生軟体動物の混合群集からなる微生物や大型動物相を含む異地性堆積物が豊富であり、マトリックスは砂または泥である(Smoot et al., 2000; Sawai, 2002)。貝殻に富む堆積物は典型的に、合弁の殻と割れた殻の混合である(例えば、Fujiwara et al., 2000)。

津波堆積物の堆積相の空間的变化は、年代の分かっているイベントについてのいくつかの研究で詳しく記されている(例えば、Hindson and Andrade, 1999; Goff et al., 2000; Nanayama et al., 2000)。一般に、津波堆積物は、内陸側に向かって細粒化する分布を示し、砂または礫のバリアーの周辺には粗い堆積物があり、エスチュアリー中央部に沿って貝殻密集層があり、より内陸側の高い場所、特に塩湿地を取り巻く場所に砂質層がある。

上述のように、古津波堆積物の堆積相を復元する試みは、ストームイベントによる堆積物と区別するためである。いくつかの研究では、高エネルギーの産物であるウォッシュオーバーの特徴を述べ、強いストームによる津波が起源である可能性を議論している(例えば、Switzer et al., 2004, 2005, 2006)。すべての場合において、これらのウォッシュオーバー堆積物は直前までバリアー島であった所と接した場所に現れ、エスチュアリーの内部には現れない。Nanayama et al. (2000)とGoff et al. (2004)は、ストームと津波の堆積物について以下のような3つの違いを示唆している：(1)津波堆積物は常に浸食された基底を示すのに対して、ストームの層はときどき堆積物の下限がシャープである(原文はstorm layers sometimes present a sharp but depositional lower limit)、(2)ストーム堆積物の粒子サイズは通常津波堆積物より粗いが、淘汰は津波堆積物の方がより乏しい、そして(3)津波堆積物はエスチュアリーまたは三角州における移動能力が概して高いため、通常ストーム堆積物よりも広範囲にわたる。

### 3. ウェルバエスチュアリーの地形学的、流体力学的、堆積学的背景

ウェルバエスチュアリーは、南北方向を向いたY字型エスチュアリーを作るように結合したOdiel川とTinto川の流れによって形成されている(Fig. 1)。このエスチュアリーは、低海

面期である後期更新世に刻まれた低地の河川の谷が、完新世の海進の後に水没したものである。そして、相対的海水準(RSL)が約6500年前の高海面期に向かって上昇した初期から中期完新世の期間に、急速に堆積物に埋められた(Zazo et al., 1994; Rodríguez- Ramírez, 1996; Dabrio et al., 2000)。その後、相対的海水準の(上昇)速度は低下し、エスチュアリー(堆積物による)充填は低速で続いた。

ウエルバエスチュアリーは、4つの異なる地形的営力の領域に分類される(Fig. 1)。エスチュアリー上部の堆積作用は主に河川プロセスによる。Tinto川とOdiel川の流出量は、季節的に変化し、経年変化が大きい。淡水の流出は非常に少なく、Tinto川とOdiel川の平均年間流量は、それぞれ100.48 Hm<sup>3</sup>と429.40 Hm<sup>3</sup>である。両河川の水は、イベリア黄鉄鉱ベルトの大量の硫黄を流し込むために酸性であり、平均pHはTinto川で2.2、Odiel川は3.5である。これらの河川から供給される堆積物は、鉄の含有率が高い赤い砂と黄色いシルトから成る(Davis et al., 2000)。エスチュアリーの内陸側は、河川水と潮流の海水の混ざる混合エネルギー領域で特徴づけられる。主にプロセスに作用しているのは、川の洪水から供給される河川の砂の潮汐による再堆積である。この領域は、広大な塩湿地帯を支えている。中央の領域は潮汐プロセスに支配されている(Swinkbanks and Murray, 1981)。この場所は、平均レンジ2.69 mの半日周期のmesotidalを経験する。春の小潮の期間は、潮汐のレンジは3.06 mから1.70 mの間で変化する(Borrego et al., 1995)。Lower marine領域では、エスチュアリー堆積作用は潮汐と風-波プロセスの相互作用によって制御されている。波が押し寄せるのは主に南西からであり、それが作り出す東西方向の強い沿岸流が、ウエルバエスチュアリーの外側を部分的に閉ざす砂州を生み出す(Fig. 1)。

環境の鉛直分布はウエルバエスチュアリー全域でみられる。これは、潮汐の浸水域における空間的変化を大きく反映している(冠水の頻度と深さ)。本研究で我々は、以下に基づいて3つの主要な環境を特定する：(1)潮下帯(流路とエスチュアリー付加する堆積物)、(2)植生のない潮間帯(活動的な流路末端と干潟)、(3)植生のある潮間帯(塩湿地)。

海側と中央、内側の領域における付加する堆積物は、エスチュアリー潮下帯の主要な充填物となっている(Frey and Howard, 1986)。中央と内側の領域において、堆積物は通常、含砂率の低い泥質の堆積相を呈する。これらの堆積物は通常、環形動物(*Arenicolides ecaudata*)、二枚貝(*Scrobicularia plana*, *Crassostrea angulata*, *Mytilus galloprovincialis*)、腹足類(*Cymbium olla*, *Murex brandaris*, *Cerithium rupestre*)の活動によってかなり生物攪拌を受けている。泥質砂の堆積相は海側領域のエスチュアリー付加する堆積物において卓越し、また環形動物(*Nereis diversicolor*, *A. ecaudata*)、二枚貝(*Cerastoderma edule*, *Cerastoderma glaucum*, *Ruditapes decussatus*, *Solen marginatus*, *C. angulata*, *M. galloprovincialis*)、腹足類(*M. brandaris*, *C. rupestre*)によってかなりの生物攪拌を受ける。

## 4. 試料と方法

### 4.1. 露頭

感潮河川は、エスチュアリー中央および内側部分に見られる、より最近の表層付近の津波堆積物の特徴と側方への広がりを観察するための良い機会を提供する。さらに、もっとも最近起こった津波堆積物の層相を調査するため、我々は内側エスチュアリーの湿地の上部でトレンチを掘った。

### 4.2. コアリング調査

我々は、様々な方法で集めたコアの記録を主に用いて、ウェルバエスチュアリーの層序を調査した。データのほとんどは73本の振動コア(VH, VT, VB, VR)から得られた。コアの採取方法はLanesky et al. (1979)に記載されており、コアの長さは最大で6.40 mである。さらに、Ejkelkampのハンドコアラー-beeker sampler(TS)を用いて、57本の短いコア(最長2m)を得た。回転掘削法を用いて、さらに7本のコアを得た(SH)；この場合、コアは最長50mあり、完新世の記録全体を貫いている。これら深部のシーケンスのいくらかは、先行研究においてエスチュアリーの堆積物記録の復元に用いられている(Pendón et al., 1998; Borrego et al., 1999; Davis et al., 2000; Morales et al., 2003)。

### 4.3. 堆積相の記載

ここでは14本のコアの堆積物記録を報告するが、上述したすべての入手した試料から得た情報も用いた。異なる堆積相の存在は、トレンチ同様にコアでも明らかである。堆積相の記載はFrey and Howard (1986)の基準に従う。各堆積相について、平均粒径、組成、色、物理的堆積構造、タイプ、生物攪拌の程度を記載した。

### 4.4. 放射性炭素年代

放射性炭素年代測定は、振動コアに見出された貝殻の多い層から採集した10試料を年代決定のために用いた。試料は保存状態の良い合弁の二枚貝の貝殻である。試料のうちVR-3とVR-17の2つは、以前にPendón et al. (1998)で報告され、高エネルギーの潮汐堆積物と解釈されている。分析は、アメリカ合衆国マサチューセッツ州の地質年代研究所、クルーガーエンタープライズ株式会社が行った。研究所から提供された<sup>13</sup>C補正を行った結果は、Calib 5.0.1 (Stuiver and Reimer, 1993; Hughen et al., 2004)のMarine04データセットを用いて補正されたものである。Marine04データセットを用いた補正は、300年前以後の試料ではいくらか問題があり、これらの試料にはIntCal04曲線を用いた。用いた海洋リザーバー補

正( $\Delta R$ )は、試料の年代範囲に応じて変えた；>2500年前の試料は $\Delta R=440\pm 84$  (Dabrio et al., 2000; Lario et al., 2002)；2500から1700年前の試料は $\Delta R=412\pm 45$ ；1700から1000年前の試料は $\Delta R=304\pm 70$ ；<1000年前の試料は $\Delta R=114\pm 90$  (Monge Soares, 1993). 先行研究のデータも同様の方法で再校正した(Table 1).

#### 4.5. 放射性核種年代

もっとも最近の貝殻密集層について独立の年代評価を提供するために、ラジウム同位体比( $^{226}\text{Ra}/^{228}\text{Ra}$ ) (San Miguel et al., 2003)を用いて現世の堆積速度を決定した. 新たな放射性核種分析は調査した露頭の2本のコアで行い、先行研究による7本のコア(Fig. 1)のデータと合わせた. 全てのコアは、ポリ塩化ビニールの直径70 mmで長さ1 mのパイプで採集した. コアはプラスチックの袋に密閉し、即座に冷凍した. 研究室で、凍らせたコアを厚さ1~2 cmに切断し、各スライスについてチューブと接触していた外側の層を除去した. 均質化し粉末化したのち、堆積物コアのスライスの等分試料で放射性核種年代決定した.  $^{226}\text{Ra}$ と $^{228}\text{Ra}$ のアクティビティを、ガンマ線スペクトロメトリーによって得た. ガンマ線測定は、相対効率38%, 分解能(FWHM)が $^{57}\text{Co}$ の122 keVラインで0.95 keV,  $^{60}\text{Co}$ の1333 keVラインで1.9 keVである, XtRa同軸型Ge検出器(キャンベラ)を用いて行った. 検出器は、マルチチャンネルアナライザーを持つconventional electronic chainを備えており、厚さ15cmの鉄で遮蔽されている.  $^{226}\text{Ra}$ のアクティビティは、352 keVの $^{214}\text{Pb}$ の放射によって決定した. 試料容器を充填、密閉し、少なくとも1ヶ月間計測したところ、両核種は永続平衡状態であった.  $^{228}\text{Ra}$ の決定は、911 keVの $^{228}\text{Ac}$ (アクチニウム)の放射によって行った. 効率校正の手順はPérez-Moreno et al. (2002)で報告されている.

## 5. 結果

### 5.1. フィールド観察

#### 5.1.1. HEL1とHEL2

Odielエスチュアリーの内側のエリアは、エスチュアリーから約25kmに位置するいくつかの大きな蛇行した潮汐流路で特徴づけられる. これらの流路の攻撃斜面の高さ1 m以上の浸食された土手には、2枚の貝殻層(HEL1とHEL2)が露出する. 貝殻層は、貝殻の密集または貝殻を含む淘汰の良い砂の連続した層で、下位の堆積物との境界は浸食面である.

上部の高エネルギーな層(HEL1)は、長さ400 m、幅300 m、厚さ1.6 mの舌状の砂体である(Fig. 2A). 堆積物は主に淘汰の良い砂から成るが、破損していない貝殻、貝殻片、珪岩の中礫、貝化石を含む灰褐色石灰岩(lumachella)の大きな破片、泥質クラストといった様々なものを含む. この堆積物中でより豊富に産出する軟体動物は以下の二枚貝である：*C.*

*glaucum*, *C. edule*, *C. angulata*, *S. marginatus*, *Chamelea gallina*, *R. decussatus*, *Glycimeris variabilis*, *Chlamys* sp. 腹足類 (*Turritella communis*, *C. rupestre*) の未成熟個体もみられる。 *C. glaucum*のごくわずかな個体だけが、合弁の完全な状態で発見された。堆積物は、細粒化と粗粒化シーケンスの累重で構成され、常に下位層との境界は浸食面である (Fig. 2B)。砂層には大規模な平行層理あるいは斜交層理があり、層理はエスチュアリーの入りの方向に傾いている (Fig. 2C)。貝化石を含む灰褐色石灰岩片は直径10cmに達し、堆積物中の最も大きい断片であり、針鉄鉱のセメントで固められた *C. glaucum* と *C. angulata* の未成熟個体だけからなる (Fig. 2D)。

Odielエスチュアリー内側の主要流路の浸食溝でHEL2を観察した。ここはHEL1の露頭から約150 m東にあり、現在の湿地面から約3 m下にある (Fig. 3A, B)。HEL2は、黒色の泥質砂に挟まれた厚さ10 cmの貝殻密集層である (Fig. 3C, D と Fig. 4)。貝殻の層準は、明瞭な浸食面を持ち、 *C. glaucum* の完全な貝殻が多く *C. angulata*, *C. edule*, *S. plana*, *M. galloprovincialis*, *S. marginatus*, *M. brandaris* の合弁でない未成熟な殻を伴う。貝殻密集層の基底の浸食面は、針鉄鉱のセメントで形成された皮膜に覆われており、一方貝殻の表面は酸化鉄に覆われている。HEL2は、上方細粒化して厚さ12 cmの黒色泥質砂層に漸移する。上部の泥質砂の上には、生物攪拌をかなり受けた泥のユニットであり、その生物攪拌は *A. ecaudata* が作った網状に密集した巣穴である。HEL2貝殻層は、厚さ、組成あるいは地形の高さに顕著な変化はなく、側方方向に少なくとも3km追跡できる。

HEL2は、上述のトレンチから約1 km北東に位置するOdielエスチュアリー内側の主要流路の反対側の土手にも見られる。HEL2は、エスチュアリー内側の潮汐流路の支流にある高さ2 mのトレンチにも露出しており、上述のものと同じ地形的位置を占める (Fig. 5A, B)。ここで、HEL2は黒色泥層を覆う厚さ30 cmの貝殻のユニットで構成されている (Fig. 4, Fig. 5C, D)。HEL2の基底は浸食面で、 *C. edule*, *C. glaucum*, *S. plana* の完全な貝殻と *C. edule*, *C. angulata*, *C. glaucum* の離弁の未成熟の貝殻を含む。この貝殻層の上には厚さ10 cmの黒色泥層があり、 *S. plana* によって攪拌を受けており、その巣穴は垂直で、貝殻層下部から始まり、生息姿勢を保持していた位置で終わる。貝殻と貝殻片の層は上方細粒化して、黒色泥質砂に覆われる。

## 5.2. 堆積物記録

本研究で集めたコアの試料から、ウェルバエスチュアリーのより深部の堆積層についての情報を得た。ここで我々は、14本の堆積物コア (Fig. 1) に記録された堆積物のシーケンスに特に焦点を当て、古津波堆積物を記録していると思われる堆積物中に保存された貝殻に富むユニットに特に注意を払う。各堆積物のシーケンスは、厚い泥または砂質泥層と薄い貝殻密

集層の互層として記載できる(Fig. 6). シーケンスの最上部5mには4つの異なる貝殻層が記録されており, そのうち上位の2つは, Odielエスチュアリー(コアVH-5, TS-1, TS-2, TS-3, 1S, 2S, VH-6; Fig. 6)とTintoエスチュアリー(コアVT-15; Fig. 6)の露頭に見られた上述のHEL1, HEL2と一致する.

コア試料は, 貝殻に富む堆積相が様々な(潮下帯と潮間帯の)堆積場で堆積したことを示す. ほとんどのコアに記録された貝殻堆積相の第一のタイプは, HEL1とHEL2について上述したのと同様で, 基底は浸食面で, その上に貝殻密集層があり生物攪拌を受けた泥質砂が重なる. 貝殻密集層は, 破損していない完全な貝殻, 離棄の貝殻, そして二枚貝の様々な種の貝殻片を含み, *C. angulata*と*C. glaucum*が最も豊富である(Fig. 7A, B). 貝殻堆積相の第2のタイプは, エスチュアリー外側の潮下帯の堆積相(コアVB-1, VH-2, VR-3, VT-8)に見られ, HEL1とHEL2に似ているが, 貝殻の混ざった直径5cm以下の中礫を豊富に含む. この堆積相の軟体動物群集は*G. variabilis*, *C. gallina*, *R. decussatus*を含んだより海生の種で構成される(Fig. 7C). 貝殻堆積相の第3のタイプは, 泥の基質を伴う粗い貝殻の塊状密集層から成る. この場合, より豊富な種は, *C. angulata*と未成熟の*M. galloprovincialis*の個体である(Fig. 7D). この貝殻層は, すべてのコアの潮下帯堆積物(VH-2, VH-5, SH-1, VR-17, VT-11, VT-14, VT-15), またはエスチュアリー上部のコアの堆積物の上部(VR-3, VT-11, VT-14)で最もよく見られる.

これら3つのタイプの貝殻密集層とは別に, いくつかのコアは海生の貝殻を散在的に含む砂の堆積相を示し, 高エネルギーの層と解釈できるだろう. なぜならば, これらの地形的位置が現在の塩湿地堆積相よりも高くかつ現在の陸方向に向かう斜交層理を示すからである(Fig. 7E). これはVB-1, VH-2, SH-1, VH-5の上部砂体が該当する(Fig. 6).

### 5.3. 貝殻ユニットの放射性炭素年代

貝殻に富む層から採取した貝殻片の放射性炭素年代測定の結果をTable 2に示す.  $^{14}\text{C}$ 年代は堆積物コア間での貝殻層の対比を可能とし(Figs. 8-10, 注釈Figs 9, 10では“HEL”ではなくTLと誤記されている), 5つの高エネルギーイベント(HEL1からHEL5)を区別できる. 較正年代範囲の年代の中央値の推定は, カディス湾の歴史的津波記録のデータと比較した. この比較から, 較正 $^{14}\text{C}$ 年代と古文書記録の津波との偏差の平均はわずか47年という良い一致を示し, 年代決定された各貝殻堆積相は約2000年前以後, ウェルバエスチュアリーを襲った古津波を記録していることを暗示する.

### 5.4. 現世の堆積速度

現世の堆積速度は, OdielエスチュアリーとTintoエスチュアリーに沿って採られた9本の



コアについて、放射性核種の年代測定法を用いて決定した(Fig. 1, Table 3). これらのコアのうち7本に用いたデータは先行研究で報告されているが(Davis et al., 2000; Morales et al., 2003; San Miguel et al., 2003), 2本(TS1とTS2)は本研究で決定した. 特筆すべき重要な点は、ウエルバエスチュアリーが、2つのリン鉱石加工工場を含む大規模な工業団地を支えているということである. 過去40年間にこれらの工場からTintoエスチュアリーとその周辺に排出された廃棄物は、エスチュアリー全体にウラン系列放射性核種を有意に増加させた(Bolí var et al., 2000; Bolí var et al., 2002; San Miguel et al., 2004). リン鉱石加工工場からの放射性物質の影響の始まりは、 $^{226}\text{Ra}/^{228}\text{Ra}$ 同位体比に基づく年代学的層準を提供し、現世の堆積速度の決定に用いることができる(San Miguel et al., 2003).

堆積速度は、主に泥質の堆積相(平均粒径 $63\ \mu\text{m}$ 未満)について決定した. コアのうち1本(TS1)は潮間帯の流路末端から、もう1本(TS2)は塩性湿地帯から得た(Fig. 1). 塩性湿地の堆積相は流路末端の堆積相と容易に区別でき; 塩性湿地の堆積相は赤色で、植物の根による激しい生物攪拌が見られ、一方流路末端の堆積相は葉理の見られる黒い泥から成る.

Fig. 11は、これら2本の堆積物コアの $^{226}\text{Ra}/^{228}\text{Ra}$ のプロフィールを示す. これらのプロフィールでは、より深部の層の比は $0.8\sim 1.5$ であり、汚染されていない堆積物にみられる凡世界的な基準値(Ivanovich and Harmon, 1982)と一致する. コアの最上部の層に見られる有意に高い値は、リン鉱石加工工場の影響を示している.

Fig. 11より、コアTS-1とTS-2の汚染されていない層の最上部は、深さ $12\sim 14\ \text{cm}$ と $34\sim 35\ \text{cm}$ に位置する. この層準の年代を1968年と仮定すると、コアTS-1の汚染された部分の平均堆積速度は $3.3\sim 3.9\ \text{mm/year}$ であり、一方堆積物コアTS-2の場合、その値は $9.4\sim 9.6\ \text{mm/year}$ である.

これらのデータは、流路末端の堆積相の堆積速度を $2.1\sim 4.5\ \text{mm/year}$ とする、ウエルバエスチュアリーにおける先行研究のデータと一致している(Table 3). 対照的に、塩性湿地帯では、堆積相はより高い値で $9.5\sim 12.1\ \text{mm/year}$ の間で変動する. 放射性核種から求めた堆積速度は、泥層中に明瞭な季節的な層形成、すなわち冬の河川洪水の後に堆積したシルトに対応する黄色いラミナと、春季に藻類が繁茂した後に堆積した潮汐の有機質泥に対応する暗いラミナ(Morales et al., 2003)とも整合性がある. もっとも最近の貝殻ユニットであるHEL1へこれらの堆積速度を内挿すると、その年代が約250年前であることを示す. これらのデータは、300年前以降の年代の試料における放射性炭素年代の較正の不確かさの問題(Stuiver and Reimer, 1993)を解決するので、この層準から得られた放射性核種年代は、放射性炭素年代および歴史的記録とも一致することから、HEL1が西暦1755年のリスボン地震に付随することを裏付ける.

## 6. 議論と結論

本研究で確認された、繰り返す上方細粒化シーケンスと貝殻密集層は、Fujiwara et al. (2000)により記載された以下の特徴を持つ津波堆積物によく似ている：(1)浸食された基底面；(2)合弁の貝殻，離弁の貝殻，貝殻片の混合物の密集；(3)エスチュアリー内の異なる領域からもたらされた軟体動物の混合層；(4)多量の二枚貝および腹足類の未成熟個体の含有；(5)堆積物の側方方向の連続性。したがって，我々は，エスチュアリー内側の土手の露頭に見られる貝殻のシーケンスは，津波起源であると主張する。さらに，我々はコア中に見られる塊状の貝殻シーケンスも津波による生成物と解釈することができることを示す。我々はこれらの堆積相が高エネルギーの高潮起源であるという可能性は，以下の根拠により否定する：

- (1) 調査した全ての貝殻シーケンスは，エスチュアリーの内側へ数10kmという，高潮では浸入できない場所に位置している。海洋(に近い)河口領域に見られる堆積物のシーケンスは，より多くの貝殻層を示し，それらは高潮の波が起源である可能性がある。そのため，本研究にはこれらのコアは含まなかった。
- (2) 各層は，現在数10kmも離れた環境から運ばれた貝殻種を含む。エスチュアリーの内側に粗粒な生物源碎屑物をもたらし，それらを数10 km輸送できるような水流は，津波の遡上しかない。このエスチュアリーで記録された歴史的に最高の高潮はわずか73 cmであり，これは極端な春分の日の大潮(タイダルボア)に似た洪水流を生み出すだけで，このような長距離にわたって大きな貝殻を輸送することはできない(Morales et al., 2005)。
- (3) 調査した層の少なくとも1つ(HEL1)は，通常のタイダルボアが到達するエリアを越えた高い場所にある。この層は，陸に向かう斜交層理のセットを示し，したがって遡上流による生成物と解釈できる。この地形学的レベルに到達できる流れは津波しかない。

これらの解釈により我々は，ウェルバエスチュアリー内の堆積物記録の上部6 mに，5つの異なる津波堆積物の層(HEL1~HEL5)を認定する。 $^{14}\text{C}$ 年代測定により決定したこれらの年代は，カディス湾で歴史的に記録された津波と各層が一致することを示唆する。このように，HEL1の年代は西暦1792 $\pm$ 119年であり，西暦1755年のリスボン地震に対応する。HEL2の年代は西暦1588 $\pm$ 76年で，おそらく西暦1531年の津波(Galbis, 1932, 1940)に対応する。HEL3の年代は西暦1021 $\pm$ 99年で，西暦1033年の津波(Martins and Mendes, 2001)またはGalbis (1932,1940)により記載された西暦949年の地震が最有力候補である。HEL4の年代は西暦810 $\pm$ 89年で，西暦881年の津波に対応すると思われる。最後に，年代が西暦407 $\pm$ 70年であるHEL5の起源に関しては2つのイベントが考えられる。すなわち，Silva et al. (2005)により記載された，西暦395年にローマ時代のバエロクラウディア村を破壊した津波，またはGorringe Bankで西暦382年に発生した津波(Galbis, 1932, 1940)である。しかし，Silva et al. (2005)の支持した年代はいくらかの不確実性を持っているため，これら2人の著者によっ

て記載された津波は同一のものである可能性がある。

Odielエスチュアリー上部における表層付近の津波堆積物の層(HEL1)は、全層厚が約2 mで、基底の浸食面によって分けられた5つの上方粗粒化と上方細粒化のシーケンスの累重から成る。これらのシーケンスは、エスチュアリー上部における連続的な押し波と引き波の動きを記録しているのかもしれない。内部の斜交層理の傾斜方向が優勢的に海側に向かっていることは、遡上する波による浸食の後に引き波による堆積を示唆する。<sup>14</sup>C年代測定の結果と、それとは独立した現世の堆積速度からの推定年代、そしてより古い津波堆積物の層(HEL2)から再堆積した豊富なlumachellaの存在が示すように、この砂は西暦1755年のリスボン地震に続く津波(のエネルギー)の消失によりできた堆積物として解釈できる。

最もはっきり見えて側方へ広範囲に分布する津波堆積物の層はHEL2であり、Odielエスチュアリー内側にある2つの露頭と、Tintoエスチュアリー内側にあるもう1つの露頭、および多くのコアで直接観察できる。我々はHEL2を西暦1531年の津波の活動による堆積物と解釈する。(このとき津波は)エスチュアリーの内側に到達する前に、遡上した波が海洋とエスチュアリーの中央の堆積層を浸食した。したがって、堆積相は、エスチュアリーの海洋、中央、内側地帯の特徴づける貝殻の混合物を含む。いくらかの貝は、津波が海洋の堆積物から運び出したときにはすでに死んでおり、離棄の貝殻と貝殻片として堆積物中に現れる。その他の貝は、生きたまま運ばれてラグ堆積物中に合弁の貝殻として保存された。すばやく動き、容易には運搬されない*S. plana*のいくつかの貝は遡上する波の運搬から生き延び、上部の泥質砂層を通り抜けて逃げ、その結果垂直な穴をつくった。こうした構造はいくつかのコアにも見られるが、コアの変形のために保存状態は露頭より悪い。

振動コアは、泥質のエスチュアリーの堆積物の中に、津波堆積物の各層の幅広い分布を記録する。より深いところの津波堆積物は砂のマトリックスを伴う塊状の粗い貝殻密集層で、より細かい貝殻を伴った上方細粒化シーケンスの典型的な堆積物からなるより浅いところの堆積物より高いエネルギー状態を示す。(エスチュアリー)外側のコアには5つの津波堆積物の全てが見られるが、エスチュアリーの内側のコアは、もっとも最近の層についてのみ不連続な記録を示す。この事実は、もっとも最近の津波が、非常によく発達した網目状の潮流流路と広大な塩湿地を伴うエスチュアリーを襲った際の、堆積物充填による生成物と解釈できる。この浅水環境域では、津波は急速に減衰し、エスチュアリーの内側領域への伝達は妨げられる。

より深部のコアのいくつか(Fig. 10 VR-3, VT-15)は、津波堆積物と推定される古い貝殻の層準を示すが、これらの層準に関して現在のデータは乏しく、ローマ時代以前の津波についての歴史的文書もない。カディス湾における津波の再来周期の決定には、こうしたより古いイベントについての研究が必要で、今後の調査に含めるべきである。(北村晃寿・小林小夏)