

A unique 4000 year long geological record of multiple tsunami inundations in the Augusta Bay (eastern Sicily, Italy)

De Martini, P.M., Barbano, M.S., Smedile, A. Gerardi, F., Pantosti, D., Carlo, P. Del, Pirrotta C. 2010. *Marine Geology*, 276, 42-57.

イタリアのシチリア東部のオーガスタ湾での 4000 年間の複数の津波浸水の地質学的記録

要旨

我々はオーガスタ湾(シチリア東部)の海岸沿いで、4000 年間における複数の津波浸水の地質学的証拠を示し、その意味を議論する。我々がコア採取や研究室での分析、より詳細な地理学的かつ地質学的な調査を行うために用いたのは、並外れた長さの歴史記録であり、それについて複数のアプローチを通して調査は実行された。Augusta Hospital と Priolo Reserve と名付けた 2 つのサイトが選ばれ、オーガスタ湾の海岸線に沿った 25 km で詳細に調査した。我々は 6 つ(もしかしたら 7 つ)の津波堆積物の証拠をみつけた。それらのうち 3 つは西暦 1693 年と 365 年のイオニア海の歴史津波と、約 3600 年前のサントリーニのイベントに関連するかもしれない。他の 3 つ(4 つの可能性もある)堆積物は、西暦約 650-770 年、紀元前約 600-400 年、紀元前約 975-800 年(Augusta Hospital サイト)、そして紀元前約 800-600 年(Priolo Reserve サイト)に記録された未知の古い浸水の証拠である。我々は、この海岸地域から得た津波の歴史記録をさらに遡って拡大

するためにこれらの年代を用いる。この調査で見つかった予想外に多い津波堆積物は、オーガスタ湾での、地質的な津波の平均再発間隔は、過去 4 千年の間で約 600 年であることを我々に示した。これに対して、過去 1000 年間の歴史記録は、津波の平均再来間隔が約 250 年であることを示唆する。この平均再来間隔の違いは、調査サイトで、最も強い浸水の時のみ識別可能な地質学的証拠が残されているかもしれない(例えば 1908 年と 1169 年の津波の証拠が失われている)ことを示唆するだけでなく、サイトの地理的セッティングとその浸食/堆積の歴史が、データの記録には重要なことも示唆する。したがって、地質学的記録から得た平均再来間隔は最小の数字 (minimum figure) として考えられなければならない。

津波堆積物の識別と年代推定は、Civil Protection において海岸の危険評価のための津波のシナリオとモデル形成に、新しく、独立した貢献をする。さらに、我々の調査の場合は、エーゲ海で起きた特に大きなイベントに関連する津波堆積物の認識に新しい要素を提供する。

1. 導入

現実的な浸水のシナリオに基づいた防災計画の重要さは、2004 年 12 月 26 日のインド洋津波によって劇的に強調された。これらのシナリオは一般に、津波の波の伝播の数学的モデル(例えば Lorito et al., 2008 とその中の引用)—は実際に浸水した場所の分布とイベント発生の頻度を定める—によって、より現実的で効果的になる。この情報は一般的に歴史記録から

得られるが、我々は、地質調査からも適切に、かつ十分に得られると信じる (Atwater and Hemphill-Haley, 1996; Hutchinson et al., 1997; Pinegina and Bourgeois, 2001; Jaffe and Gelfenbaum, 2002; Fujiwara and Kamataki, 2008). 事実、歴史記録は「開拓地の変化」と「住民のいる沿岸地域での文書の情報源の入手」に強く依存しており、通常、過去数百年に限られ(イタリアでは、歴史は非常に長い、信頼できる情報は過去千年に関するものである; Tinti et al., 2007 とその中の引用を見よ)、従っておそらくは津波の浸水の記録は不完全である。逆に、現在の海岸線と海水準はその時から相対的に安定していたならば、津波に関係した堆積物の地質学的証拠は、過去 5-6 千年まで溯って拡張したより長い記録を提供できる。津波堆積物の分布と特徴についての知識は、将来どこで津波の浸水が起こりうるか、どれくらい大きくなりうるか、そしてどのくらいの頻度で起こりうるかという疑問への答えを助ける (Fujiwara and Kamataki, 2008; Pignatelli et al., 2009).

過去 20 年で、いくつかの地質学的調査は、古津波堆積物の認識と年代決定によって、浸水の正確な場所、分布、年代の範囲を与えた (Atwater and Moore, 1992; Dawson et al., 1995; Pinegina et al., 2003; Cochran et al., 2005; Dominey-Howes et al., 2006; Nanayama et al., 2007; Nichol et al., 2007; Bruins et al., 2008; Scheffers et al., 2008; Shiki et al., 2008). しかし、特定の地域(大体 1 か 2 ヶ所)で見つかった津波堆積物は限られた数のため、津波の平均再来間隔が求まることはめったにない。

イタリアでは、津波地質学はほんの 10 年前に始まった。津波堆積物を記述した最初の研究は、ガルガノ海岸(アドリア海側)に集中し、1627 年と、約 1700 年の間隔で再発して起こるそれ以前のもの(De Martini et al., 2003)と関連する可能性のある堆積物が強調された。同じ場所では、レージナの沿岸砂州でのウォッシュオーバーファンが津波の波の影響として解釈された(Gianfreda et al., 2001)。より最近、津波堆積物層は、シチリア北東の先端の考古学的発掘で識別された(Pantosti et al., 2008)。他の津波地質学の研究は、アプリア(Mastronuzzi and Sansò, 2000, 2004; Mastronuzzi et al., 2007)とシチリア南東部(Scicchitano et al., 2007; Barbano et al., 2010)の海岸に沿って散在する大きな岩の運搬と堆積に関連している。

シチリア東部は歴史時代に大地震(CPTI Working group, 2004)に続く破壊的な津波(Tinti et al., 2007)による影響を受けてきたので、我々は歴史津波および古津波の堆積物の地質学的証拠を調査する目的で、複数の学問分野にわたる研究を展開するのに、この地域を選んだ。シチリア東部の海岸に沿って、我々はオーガスタ湾をこの研究の重要な地域として選んだ。なぜならそこは、津波の影響に関して書かれた歴史的報告(津波が襲った場所、浸水と遡上の分布)と、古津波の地質学的証拠の調査にとっても好都合な現地の地形学的指標の両方の情報が入手できる場所の一つだからだ。

この論文では我々は、2 つの異なるサイト、すなわちオーガスタ湾海岸から約 10 km 離れたオーガスタ・ホスピタルとプリオロ・リザーブ(図 1a)

で、両方とも湿地/ラグーンの環境に位置し、古津波堆積物の地質学的証拠を示す。我々は複数の浸水イベントの認識という珍しいケースに関連する意味についても議論する。この研究は過去4年の間に行われ、歴史学、地形学的かつ地質学的な調査、コアの掘削、そしていくつかの研究室での分析(古生物学、放射分析、X線、帯磁率、テフラなど)を含む。

2. シチリア南東部の歴史津波

過去千年の津波の影響について入手できる歴史記録が豊富なため、これらのイベントのデータを集め、整理し、分析するために、シチリア東部は非常に好都合なケースである。以下で、私たちはオーガスタ湾域に特に強調してシチリア南東部の海岸で入手できるデータ(図1)を要約する。他の報告と歴史資料の原文は付録Aの補足資料から入手できる。

2.1. 365年7月21日

歴史地震一覧(Guidoboni et al., 1994; Papazachos and Papazachou, 1997)は、西暦365年にクレタ島を襲った古代の最も印象的な地震の一つは地中海東部と中部の全海岸を襲った津波を発生させた。より正確に言えば、Jerome(380)が、西暦365年に世界中で地震があり、海が海岸を越え流れ、シチリア島や他の多くの島で数えきれない人に被害を与えたと証言する。

2.2. 1169年2月4日

この津波は、局地的地震で $M_{aw}=6.6$ (M_{aw} =average weighted Magnitude derived from macroseismic intensities, 大規模地震の強さから得た平均加重のマグニチュード, CPTI Working group, 2004)と見積もられる地震に続いて起き、メッシーナの町とシメト川(河口はオーガスタの町の北約20 km, カタニアの町の南10 kmに位置する)の間の海岸が浸水した。メッシーナの町では波は都市壁を越え、道を浸水させた(Fazello, 1560)。Mongitore (1743)は、「地震は25,000の犠牲者を出し、島の全体の海岸に沿って上昇する海の波により他に多くの人々が犠牲になった」と報告している。

2.3. 1542年12月10日

この地震は、 $M_{aw}=6.6$ と見積もられ(CPTI Working group, 2004)、シチリア南東部の多くの場所を襲い、約6000 km²の範囲がダメージを受けた(Boschi et al., 2000)。いくつかの場所は破壊され、島全体で震動が感じられた(Barbano and Rigano, 2001)。Lacisio (1543)の報告によると、地震の後、オーガスタの町に海が押し寄せた。

2.4. 1693年1月9日と11日

1693年に2つの大きな地震(1月9日に $M_{aw}=6.2$, 1月11日に $M_{aw}=7.4$, CPTI Working group, 2004による)が、シチリア東部のほとんどの地域に

破壊と深刻な被害をもたらした。本震後に大津波が、シチリア東部沿岸全体、アイオリス島とシチリア南部の海岸(図 1 b)のマリーナ・ディ・ラグーザの古い港であるマッザレツリ (Campis, 1694)を襲った。明らかになっている「浸水した海岸線」の長さは約 230 kmであった (Gerardi et al., 2008)。

1 月 11 日の津波で、海はカタニアの町に溢れ、サン・フィリッポ街区(現在のマッチャーニ街区)や隣の農場を浸水させた。シラクサの町では海水が約 50 歩引いてから海岸を越えた (Boccone, 1697)。より具体的に言うと、オーガスタの町に関しては、海水が湾から完全に引き、その後海岸の約 30 キュービット (~165 m)まで越えて戻ってきて (Bottone, 1718)、サン・ドメニコ修道院まで町を浸水させた (Boccone, 1697)。その時の目的はまた、1 月 9 日のイベントの後にも津波があり、「1 月 9 日の夜 5 時ごろ(およそ 21 時の GMT にあたるイタリアの現地時間)、オーガスタの港に立っていた人は上がってくる海の波とその異常な動きに襲われた」(Campis, 1694)。

2.5. 1908 年 12 月 28 日

1908 年のメッシーナの地震 ($M_w=7.1$, Pino et al., 2000) はイタリアで 20 世紀に起きた最も破壊的なイベントである。それにより、カラブリア南部とシチリア北東部を含む地域に大規模な破壊をもたらした (Boschi et al., 2000 とその中の引用文献)。津波はカラブリア南部とシチリア北東部の海岸を激しく襲い、更なる損害と犠牲者を生んだ (Platania, 1909 ; Sabatini, 1910)。津波の波はまた、シチリアのティレニアン沿岸と、マル

タ諸島までのシチリア海峡で観察された (Platania, 1909; Baratta, 1910). 明らかになっている浸水したシチリアの海岸線の長さは少なくとも 270 km である (Gerardi et al., 2008).

津波はシチリア北東部で内陸 250m まで氾濫した (Platania, 1909). メッシーナの町では津波は港の事務所や聖サルヴァトーレ城を浸水させた (Platania, 1909). 波はカタニアの町 (図 1c) に 100m 以上内陸まで氾濫し, 藻類, オモダカ亜綱, イシサンゴやアナサンゴモドキの断片, 軟体動物や多くの死んだ魚を打ち上げた. 海岸は, シメト川河口から内陸に約 700 m 氾濫した (Baratta, 1910). シラクサでは, 引き波の後, 波が約 2 m 上がり, 水が堤防を覆っていくつかの船だけ被害を受けた (Baratta, 1910). オーガスタの町の少なくとも 10 km 北の, ブルコーリ村にある詳細な情報によると, 地震の 8 分後に海が 200 m 以上引き, そして約 50 m 内陸まで海が氾濫し, 船, 小魚, 棘皮動物, カニを堆積した (Platania, 1909). オーガスタ市では「揺れの約 20 分後, 岩一崖にぶつかって碎ける波によって生じたような音が港の中でも聞こえた. 数秒後, 海が一連の波によって海岸に氾濫し, 最も大きいのは最初の波で 1.75 m まで上がった.」この現象の継続時間は約 10 分間だったが, その後丸一日水は波立った」ままだった. 港の外では波が 2 m を越え, 沖合では約 15 m となる. 津波はオーガスタの町の塩田に被害を与えた (Baratta, 1910).

要約すると, オーガスタの地域では過去千年間 (我々が少なくとも主なイ

ベントについては歴史津波の記録を完全とみなされると信じる期間)に少なくとも 4 回(1908 年, 1693 年, 1542 年と 1169 年)津波を経験している. イタリアの歴史地震目録から既に知られているように, 不安定な社会と経済状態により中世は情報がかなり欠乏していて, よって西暦 1000 年より前は歴史津波の記録は非常に貧しい. しかし, 数学的モデル(Lorito et al., 2008 ; Shaw et al., 2008)からも支持されるように, 西暦 365 年の地震がもたらした大津波がオーガスタの港の地域を襲った(Jerome, 380)ことはよく知られている. これらの歴史記録を統計的な目的で使うことの困難さは分かっているが, オーガスタ湾での過去千年間の約 250 年の津波の平均再来間隔(ATRI)は報告書(歴史記録が約 2000 年なので, ARTI は 400 年)から得ることができる.

3. 津波堆積物

津波の堆積作用は陸と沖合の両方の環境で起こり, そして津波の挙動は深度と地形に強く依存するので, これらの環境の違いに依存して異なる堆積作用のパターンが生じうる(Sugawara et al., 2008). この研究で調査された 2 つのサイトは海岸の湿地/ラグーンの地域なので, 我々は主に内陸とこの特定の環境で観察された津波堆積物に集中した. 事実, 沿岸の湖水環境は, 津波堆積物を認識し同定するのに, 優れておりかつ都合の良い限定な状態を提供する(Shiki et al., 2008). この形態的なセッティングは, 津波堆積物の堆積とその後の保存の両方に好都合な優れたトラップである.

沿岸のラグーンや湖に見られる特徴的な海の砂層は、世界的に調査され、歴史津波または有史以前の津波浸水の記録として認識されてきた (Sugawara et al., 2008). 津波堆積物は一般的に、海岸平野、ラグーン、または干潟あるいは浅い沿岸セッティング中の外洋の微化石の産出といった低エネルギーの環境とは明らかに異なる、高エネルギーの堆積物として認識される (Goff et al., 2001; Scheffers and Kelletat, 2003).

一般的に、津波堆積物はシート状で場所によりパッチ状になり、一般に急速な堆積の証拠となる正級化や塊状構造、浸食基底面を有する (Clague et al., 1994; Gelfenbaum and Jaffe, 2003; Tuttle et al., 2004; Dawson and Stewart, 2007; Shiki et al., 2008). 沿岸の湖や潟湖では、津波堆積物は上方細粒化し内陸に向かって細粒化する傾向を示し、通常は無構造な明瞭な砂層で構成されるだろう (Sugawara et al., 2008). それはリップアップクラストや碎屑性粒子で生物性粒子を含むかもしれない。有機物や有孔虫や珪藻、サンゴや二枚貝の破片のような沖合からの化石は、遡上した津波による堆積物の特徴である (Shiki et al., 2008).

津波堆積物の性状のかなりの変化を考慮すると、津波堆積物が一義的に認識できるものではなく、嵐やハリケーンに由来するような他の堆積物も特徴のほとんどは津波堆積物と共通していても驚くべきことではない。なぜなら我々は津波堆積物を探するとき、嵐の堆積物と区別する困難さの考慮は避けられないからだ。

層厚、分級、明瞭な基底面や内陸への広がりといった堆積学的特徴は、

嵐起源の堆積物と津波堆積物を区別するのに利用されてきた。近年、ほんのわずかの研究が、堆積物と地形の相違の影響を減らすために、同じかごく近くのサイトで歴史津波の堆積物と嵐の堆積物の堆積学的特徴を比較するために行われた (Nanayama et al., 2000 ; Goff et al., 2004 ; Tuttle et al., 2004 ; Kortekaas and Dawson, 2007)。これらの研究に基づき、津波堆積物は厚さ(ふつう嵐より厚い)、粒度の特徴(嵐の堆積物はより分級が良い)と内部構造(嵐の堆積物は混合層とラミナ層で構成され、ファセットと斜交層理を示す一方で、津波堆積物は一層から数枚の塊状の層か上方細粒化する層で構成される)という点で嵐の堆積物と異なる。最近の報告書 (Morton et al., 2007) で、上述の区別の物理的な基準では、理想化された津波と嵐の堆積物を記述するためにいくつかの現世の例を用いる。一層(または2, 3の)層で構成する正級化の砂層からなり、しばしばリップアップクラストを伴う比較的薄い堆積物(平均 25 cm以下)の存在は津波起源を強く支持する。一方、フォアセットやリップルを伴う平行ラミナで構成された中程度の厚さの砂層(平均 30 cm以上)は、明らかに嵐起源であることを支持する (Morton et al., 2007)。さらに、物理的観点からすると(津波による波と嵐による波との波形の違いに関する最近の最新版については Fujiwara, 2008 を見よ)、高エネルギーの津波の波は長波長(数 100 kmに及ぶまで)を持つので、これらの波は嵐の波よりも内陸の遠くまで伝わる潜在能力を持ち。嵐の波のエネルギーは変わりやすく、短波長(数kmまで)により特徴づけられる。ゆえに、津波は嵐に比べ内陸によく物体を堆積させる

ことができ、嵐の堆積は一般的に海岸から 200 m に限られる (Nanayama et al., 2000 ; Goff et al., 2004 ; Tuttle et al., 2004). ハリケーンや台風の場合 (地中海では歴史的に観察されない), 堆積物の堆積は一般的に海岸から約 200-250 m に制限され, キロメートルスケールの距離 (通常, 河川の流路) の例・サイトは少ないので, 典型的な嵐の堆積物のものではなく, 例外的なものである (Morton et al., 2007). 最終的に, 沿岸地域での嵐の発生は, 普通は津波より頻繁であるので, 堆積記録における津波堆積物は嵐の堆積物よりも少ないと予想される.

このように, 地質学的アプローチは, 嵐に関する浸食/堆積の過程 (Morton et al., 2007), 津波による浸食あるいは津波/津波がバイパスした (堆積がない) 区域の存在する可能性—通常 150 m まで内陸である—によっても複雑化する (Gelfenbaum and Jaffe, 2003).

これらの問題のほとんどを避けるために, 我々は, 現在の海岸線から最短 200 m の距離から始め, できるだけ内陸方向にコアを掘削できる十分広いサイトだけを選んだ.

4. オーガスタ湾地域の古津波堆積物の調査

オーガスタ湾地域 (図 2) は自然の湾で, 幅約 15 km, 長さ 25 km の海岸線で, Hyblean 山脈のイオニア海沿岸に位置する. 過去 100 年間に, 湾の一部 (約 6 km の長さ) を, 重要な港の交通を行うため防波堤により塞ぎ, その防波堤は 2 つの狭い水路で海と通じている. 現在, 海に面する低地のほと

んどは、重要な石油化学工場の産業に利用され、港の一部はイタリアの海軍や NATO の基地である。完新世と後期更新世の河川堆積物を除けば、その場所では露出する岩石は主に白亜紀ほどの古さの粗粒砂、石灰砂岩や石灰岩である (Lentini et al., 1986)。

オーガスタ湾の詳細な地形学的研究の予察的調査の後、航空写真、人工衛星画像の解釈やフィールド調査を通して、我々はオーガスタ・ホスピタルとプリオロ・リザーブ(図 2)のサイトでの調査に専念した。これらのサイトは湿地/ラグーン環境で、津波堆積物の堆積、保存や年代決定に好都合であると思われる。

我々は2つの選ばれたサイトで、ハンドオーガー装置とガソリン動力の震動ハンマーの両方を使ってコアを掘削した。予察的な層序学的かつ堆積学的な記載と、コア堆積物の写真撮影はフィールドで直接行った。興味深い層序的シーケンスを見つけると、我々は最大 5m の深さまで、1.0 m の長いコア試料を (pvc チューブの中に) 採取した。コアの採取では常に、現在の海岸線に対する正確な位置を決めるため、GPS 調査を行った。研究室で、pvc コアのすべての部分について正確な堆積物学的記載を行い、古生物学的解析、テフラの解析そして年代決定のための試料採取を行った。湿地やラグーンのシーケンスに堆積した高エネルギーの粗粒な堆積層の海起源であることを明らかにするため、微化石解析を掘削した全コアの試料について行った。実際には、微化石は底生有孔虫群集の定量的かつ定性的解析である。保存状態が良く豊富に底生有孔虫を含む試料は、125 μm 以上の

大ききの粒子中の数を数えた。テフラの同定と放射性炭素分析 (Stuiver and Reimer, 2005 の Calib REV5.0.2 に基づき行った) は、堆積物の年代を制約し、堆積速度を求め「歴史津波イベント」と「海の浸水堆積物」を対比するために用いた。帯磁率の変動と堆積物の微細構造 (例えば、明瞭な接触面、コンボリユート層理など) を見るために、磁気解析と X 線解析をいくつかのコアで行った。堆積物の微細構造は標準的な層序学的分析では、常に明瞭に検出できるわけではない。それぞれの「海の浸水の堆積物」は上部からサイトのラベルと連続番号 (e. g. AU-01, PR-04, など) を付けた。

4.1. オーガスタ・ホスピタルサイト

オーガスタ・ホスピタルサイト (図 2) は湾の北東に位置し、その西側には小さな水路で隔てられた南北にのびる島があり、そこには古いオーガスタの町がつくられた。調査地の沖積層 (1~5 m) の表面は南西に傾斜し、海に囲まれた大きな塩生湿地 (0.3 km²) に向かう。このサイトで、我々は最大深度 4.3 m まで、海から最大 460 m の距離で 6 本のコアを掘った (図 3)。

サイトの層序は河川環境に関連しており、数 100m の範囲で起こる側方変化に特徴づけられる。全てのコアの層序を合わせることで、以下の通りの概略的シーケンスが得られる (下部から上部まで) (図 3a)。1) 深さ 4.3-1.0 m は、茶褐色~灰色の粘土質シルト~シルト層で、少量の小礫 (2 m 以下では強く風化された) を伴い、2~1 m の深度では植物片と貝の破片が豊富で、約 2 m の深さに約 8 cm の厚さの明瞭な生物碎屑性堆積物がはさま

り、約 1.5 m の深さに厚さ～10 cm の砂礫層がある。2) 深さ 1.0-0.3 m は、茶～赤褐色のシルト質粘土～粘土質シルト層で、石灰砂岩の砕屑物(特定の場所のみで 1-3 cm の厚さの小さなレンズ状にまとまった)をわずかに含み、大型化石の小さな破片や植物片を含む。3) 0.3 m-0 m、茶褐色の農業土壌で、植物の根、小さい小礫やレンガの破片を含む。

4.1.1. 海の浸水の層序学的証拠

OSA-S6 コアの詳細な層序シーケンスは表 1 に記載され、図 4 は OSA-S6 コアの柱状図と記載で、オーガスタ・ホスピタルサイトの典型である。よって、それは海の浸水の堆積物を認識する目的で、以下で議論される。

OSA-S6 の層序は、主に低エネルギーの環境で堆積したシルト質粘土、粘土質シルトとシルトの堆積物から成り、それらとは対照的な 2 層の「異常な」粗粒層がある（礫質で生物砕屑性の層、図 5 のイベント AU-01 とイベント AU-02）。「異常な」層は両方とも、約 10 cm の厚さで、上位と下位より明らかに粗い堆積物から成り、塊状で無構造、基底は侵食面でかなりの貝の破片の含有により特徴づけられる。これらの層は、塩性のラグーンの環境の中で(図 5)、明らかな海起源の高エネルギー堆積物であることを示す(浮遊性有孔虫とそれよりは少量の底生有孔虫が見つかった)。さらに、より新しい(AU-01)の堆積後に塩性のラグーンから傾斜のある沖積層へ堆積環境が突然変化し(例えば、暗灰色シルト(下部)から有機質な暗赤褐色シルトと淡い茶色粘土質シルト(上部)への変化)、これは局地的な地形状況の

変化に関連するかもしれない。

さらに、微化石分析により、約 1.0 m の深さで、沖積層から海洋環境への急激な変化を示す(図 4)。この変化をもとに、我々は、この深さでもう一つのイベント(AU-00)が発生し、地震/津波が海岸線の形態の変化あるいは、この低エネルギーの堆積地域を守っていた砂嘴の崩壊とそれに伴う急激な環境変化をもたらしたという仮説を立てる。

4.1.2. 年代決定

放射性炭素年代は OSA-S6 コアから採取された 5 試料について決定した(表 2, それぞれのサンプルはサイトの記号, コア番号, 深さ(cm)のラベルがつけられた)。

得られた年代は、層序学的に正しい順序(逆転は無い)で、調査したシーケンスの最上部の 2 m が約 3000 年の古さであることを示唆する。海の浸水の堆積物の層序学的位置に関して、年代の分かった試料の深度から、AU-00 と AU-02 の両方のイベントの年代が放射性炭素年代によって十分に限定された。

深さ約 1.0 m での急激な環境変化(イベント AU-00)は西暦 650-770 年頃に起きたと推定され、その年代はイベント AU-00 直上の OSA-S6-96(表 2 と図 4) から得た。

イベント AU-01 の年代は、OSA-S6-187 と OSA-S6-159 の年代から決定され、紀元前 900 年-西暦 120 年である。

最後に、イベント AU-02 の年代は、その生物碎屑層の直上、層の中、直下から採取した OSA-S6-187, OSA-S6-193, OSA-S6-198 の 3 試料の年代により決定できる。これらのデータは、この海の浸水の年代を紀元前 975-800 年に限定する。これら 3 サンプルは異なる深さで採取されたが、近い時間内であり、高エネルギー環境へのゆっくりとした移行よりもむしろ突然の浸水であるという仮説を支持する。

保護されたラグーンから沿岸低地への環境変化という証拠を我々が得たサイトでは、一定の堆積速度という考えは不相当だと考えられるが、興味深いことに、堆積速度の一樣なことは全てのコアで類似した結果であり、OSA-S6 の全コアまたはその最上部 1 m のみを計算すると、10% 以下の変化である(表 1, 2 と図 4)。よって、我々は厚さ 19 cm の海の浸水の堆積物とおそらく人為的な最上部 35 cm の堆積物を考慮あるいは除いて、つまり、浸食が高エネルギー堆積物の厚さと等しいかまたは浸食がないと推測して、0.7-0.5 mm/年の平均堆積速度を算出した。よって、堆積速度が一定という仮定に基づいて、我々はイベント AU-01 の年代を紀元前約 600-400 年に狭めることができる。最終的に、我々は、より若い(歴史的な)海の浸水の証拠の欠如は、浸食過程と堆積過程(自然と人為的どちらも)がオーガスタ・ホスピタルサイトの最上部 0.3-0.4 m に影響したためかもしれない(図 4 とその記述を見よ)。

4.2. プリオロ・リザーブサイト

プリオロ・リザーブサイト(図 2)は、湾の南部、オーガスタ・ホスピタルサイトから約 10 kmに位置し、最大 4.5 m の高さの厚い砂丘の砂州により海から隔てられた 0.5 km² の浅い沿岸のラグーンである(図 6)。ギリシャ時代(しかし十分な記載のある報告は西暦 1200 年からのみ存在)から、ラグーン北部は海塩生産に利用され、近くのマグロ工場のために非常に重要で貴重だった。現在、この地域は地域自然保護区(<http://www.salinepriolo.it/>)で、津波堆積物のトラップとなる地形的状況である。

この地域で、我々は最大深さ 4.2 m まで、海から最大 530 m の距離で 16 本のコアを掘った。コアの場所は、ラグーンの中心から端まで北北東-南南西のトレンドに沿う。

これらのコアによって明らかにされた層序は均一ではなく、ラグーンの中心から南西部と東部へ向かって堆積物に変化することが共通であり、この変化は砂丘の影響である(図 6)。

ラグーンの中心部のコア(例えばコア OPR-S2-S3-S4)は、約 2 m の厚さの淡灰色～濃灰色の粘土からなり、局地的に豊富に、貝の破片を含み、わずかに保存状態の良い腹足類と二枚貝、植物片を含み、所々粘土質シルトに変化する(図 6 に記録)。粘土層は、1 枚の明瞭な暗褐色～黒色の数 cm の厚さの火山灰層(深さ約 0.7 m)をはさむ。表層には厚さ 1-3 cm の、小さなタキライトやシデロメランの破片で構成された黒く細粒の火山灰層があり、2002-03 年のエトナ火山の噴火によると思われる。リザーブの南と東の場

所(例えば OPR-S1-S5 コア)のコアの深さ約 2.2~1.5 m は, 灰色シルト質粘土~粘土層であり, 小さな貝の破片を伴い, 約 1.6 m の深さに, 1 枚の明瞭な厚さ 2-4 cm の暗灰色砂層をはさみ(図 6c に記録), その砂層の上は厚さ約 1.5 m の褐色の細~中粒の良く分級された砂(隣接した砂丘から堆積物が再移動したと解釈される)で, 貝の破片や数cmの大きさの保存状態の良い腹足類や弁鰓類を伴う. また, この地域でも, 表層に薄い火山灰層が見つかっている.

海の浸水の堆積物の調査で最も興味深い地域は, ラグーンの南西の地区であった(例えばコア OPR-S6, OPR-S10, OPR-S11, OPR-S17). 深さ約 3.5~1.5 m で, コアは, 黄みがかった砂からシルト質砂から成り, mm~cm のサイズの炭酸碎屑物を散在的に伴う. 深さ 1.5 m~表面の堆積物(図 6c に記載)は灰~茶色のシルト質粘土~粘土質シルト層が優占し, 貝の破片, 植物片, 保存状態の良い二枚貝や腹足類を伴う, これらの細粒堆積物は, 深さ約 0.3 m と 0.5 m に 2 枚の 5~10 cm の厚さの生物碎屑性の層をはさみ, 深さ約 0.7 m に 1 枚の明瞭な茶褐色~黒色の厚さ 5 cm の火山灰層, 深さ約 0.9 m に厚さ 2-3 cm の有機質堆積物をはさむ. また, 表層で我々は前述の薄い火山灰層を観察した.

4.2.1. 海の浸水の層序学的証拠

OPR-S11 コアの完全な層序シーケンスを表 3 に示し, 一方で図 7 に上部 1.5 m の記録を示す.

海の浸水の堆積物を認識するために、OPR-S11 コア(長さ 3.4 m)はプリオロ・リザーブサイトの南西地区で最も典型的だと考えられる。よってそれを以下で議論する。

OPR-S11 コアの層序学的かつ古生物学的な分析は、堆積シーケンス全体はラグーンの高エネルギー環境であることを示す。実際、細粒堆積物は全て、貝形虫(*Cyprideis torosa*)、二枚貝と腹足類(*Hydrobia* spp.)、ラグーン特有の環境、ラグーンの底生有孔虫や少量の保存状態の悪い有孔虫(内陸の古い堆積物からの再堆積と思われる)によって特徴づけられる。例外は2つの生物碎屑性堆積物の PR-01 と PR-02 である。これらの層は上位と下位より明らかに粗粒な厚さ 10 cm 以下の堆積物で、級化は見られないが明瞭な基底面で特徴づけられる(視覚での分析と同様、X線写真ではっきりと見ることができる、図7を見よ)。さらに、PR-01 と PR-02 の堆積物は、貝殻丸ごと保存されている巻貝を大量に含み、巻貝の配列は異常に無秩序なパターンを示す。興味深いことに、PR-02 層は多層構造を示し、これは複数の波の結果として解釈される。

これらの層は、ラグーンの高エネルギー環境で、明らかに海起源(浮遊性有孔虫や底生有孔虫の種の多様性における異常な高さが見出された)の高エネルギー堆積物であることを示す。このサイトでは、海の浸水の堆積物の更なる証拠が、コア OPR-S11 の近くのコア OPR-S10 から検出され、我々は深さ 0.9 m に異常な碎屑物(PR-03)を見つけた(図8上部)。コア OPR-S10 の分析は、厚さ 100 cm 以下のシーケンスは暗灰～灰色の粘土が優占し、ま

れな全殻の貝，大型化石の破片，植物片，散在する mm サイズの炭酸塩クラストを伴い，深さ約 0.7 m には火山灰層があり，深さ約 0.9 m には特徴的な堆積物 (PR-03, 厚さ 2-3 cm) がある．この後者の堆積物は，異常な群集であり，大型哺乳類の骨断片 (Prof. A. Kotsakis, University of Roma Tre, personal communication), 少量の貝形虫 (*Cyprideis torosa*) と腹足類 (*Hydrobia* spp.), 様々な水深の海の環境からの保存状態の悪い底生有孔虫 (*Cassidulina carinata*, *Cibicidoides pseudoungerianus*, *Melonis barleanum*, *Planulina ariminensis*), 浮遊性有孔虫 (*Globigerinoides* sp.) を含む．

さらに，ラグーンの南東地区のコア OPR-S1 とコア OPR-S16 の，深さ約 1.6 m で (コアの位置は図 6 を見よ)，明瞭な砂層 (PR-04, 図 8 下部) が見つけられた．

OPR-S1 コアでは，貝の破片を含む著しく暗灰色の細粒砂層 (PR-04, 厚さ 3 cm) が，厚さ 0.6-0.7 m の灰色シルト質粘土～粘土が優占する堆積物には含まれている．この粘土層は少量の小さな貝の破片を伴う．興味深いことに，PR-04 層の中に，海洋大型動物とともに，海洋微小動物の底生有孔虫 (*Asterigerinata mamilla*, *Buccella granulata*, *Cibicides lobatulus*, *Elphidium* spp., *Nubecularia lucifuga*, *Quinqueloculina* spp., *Rosalina* spp.) と少量の浮遊性有孔虫 (*Globigerinoides* spp.) は保存状態が良く，その上位と下位の，細粒～極細粒の堆積物を特徴づける，まれで保存状態の悪い群集とは異なる．これらの場合もまた，PR-03 と PR-04 の層序学的特

徴は、ラグーンの低エネルギーの状態から海起源の高エネルギーの堆積への急速な変化を意味する。

4.2.2. 年代決定

テフラと放射性炭素年代を合わせることによって、我々は、プリオロ・リザーブサイトで見つかった高エネルギー堆積物の年代を決定した。

4.2.2.1. 火山灰年代学

プリオロ・リザーブサイトでは、厚さ 3-4 cm の黒い火山礫と火山灰の層が 6 つのコアの約 0.7 m の深さで見つかった。この層は普通 cm スケールの火山礫から粗粒火山灰へ細粒化し、基底は明瞭である。この堆積物は、コアで観察されたほぼ一定の厚さで示されるように、調査地域に均質に分布している。この特徴は、降下堆積物の過程の典型であり (Cas and Wright, 1987)、堆積物はもともとの地形を一面に覆う傾向があるのだ。

光学顕微鏡の分析に基づいて、堆積物はかなり発泡したスコリア質の碎屑物(シドロメランとタキライト)、斜長石の遊離した結晶、少量のかんらん石、溶岩片からなり、しばしば酸化している。

シドロメラン岩片中のガラスの組成は、INGV Sezione di Catania laboratories で、Oxford EDS micro-analytical system (SEM-EDS) と LE0-1430 走査型電子顕微鏡で測定した(表 4)。分析条件は、20 keV の加速電圧、1200 nA のビーム電流と XPP データ換算還元操作であった。分析

中のアルカリ損失を最小にするために、10 μm の四角いラスターを使った。国際標準の玄武岩質ガラス (Jarosewich et al., 1980) VG-2 の繰り返し分析で、分析精度を調整した。相対的標準偏差として表される精度は、 SiO_2 , Al_2O_3 , FeO , CaO で 1% より良く、 TiO_2 , MnO , Na_2O , K_2O , P_2O_5 で 3% より良い、サンプルはアルカリに富み、ミュージアライト組成を持ち、全アルカリ対二酸化ケイ素の図式で、エトナ火山のトレンド内にある (TAS ; Le Bas et al., 1986 ; Fig. 9)。岩石の化学的特徴と層序学的特徴から、このテフラ層は、紀元前 122 年のプリニー式のエトナ火山の噴火 (Coltelli et al., 1998) によってもたらされた降下堆積物に対比できた。

紀元前 122 年の噴火は、完新世に起きたエトナ火山の最大の爆発的イベントで、その広域分布のため、層序学的に主要な鍵層である。噴火は、おびただしい量の火山礫と灰をエトナ火山の南東の山腹へ降下させ、ローマの年代記にもカタニアと周辺の古代の町にひどい損傷をもたらしたと報告されている。紀元前 122 年のテフラは、イオニア海の火山の頂上から 400 km までの複数地点で見つかった (Coltelli et al., 1998)。プリオロ・リザーブサイトは、主要な降下した方向に位置し、その堆積物の厚さは火砕流の降下堆積物の噴出口からの距離の増加とともに厚さが減少する傾向とも調和的である。加えて、プリオロ・リザーブのサンプルの火山ガラスの組成は、紀元前 122 年の初生の砕屑物のそれと類似している (図 9)。

この堆積物の組成の類似とその火山学的特徴はプリオロ・リザーブのテフラ層は紀元前 122 年のエトナの噴火のものであることを示す。

4.2.2.2. 放射性炭素

放射性炭素年代は，OPR-S11 コアから 2 試料，OPR-S1 コアから 1 試料の合計 3 種の貝について測定した(表 2)．得た年代は層位順序(逆転はない)のままで，調査したシーケンスの最上部 1.6 m が約 4000 年前であることを示す．海の浸水の堆積物の層序学的位置に対する年代決定したサンプルの深度を考慮すると，我々はイベント PR-01 とイベント PR-04 の年代を放射性炭素年代により十分限定されるものとする。

イベント PR-01(図 7)は西暦 1420-1690 年よりわずかに若いはずで，その年代はその直下で採取した OPR-S11-44(表 2 と図 7)の年代である。

イベント PR-02 は，テフラとサンプル OPR-S11-44 の間で，紀元前 122-西暦 1690 年の間と解釈される。

OPR-S10 コアの深さ 0.9 m で見つかったイベント PR-03(図 8)の年代は，紀元前 122 年(深さ 0.64-0.70 m で見つかったテフラの年代)より古い．最後に，イベント PR-04 の年代は，「異常な」砂層内で採取したサンプル OPR-S1-158 によって定義され，その年代(紀元前 2100-1635 年)をイベント PR-04 の年代として考えられるべきである．放射性炭素とテフラ層序のデータを結びつけて，我々は OPR-S11 コアの平均堆積速度 0.35-0.25 mm/年と算出した．これらの値は，厚さ 13 cm の海の浸水堆積物，すなわち浸食が高エネルギー堆積物の厚さと等しいか浸食がないという仮定のそれぞれを，考慮に入れた場合と入れない場合によって計算される．この堆積速度を仮

定し、イベント PR-02 の年代の幅は西暦 160-320 年に狭めることができる。

同様の方法で、OPR-S10 コアで見つかった火山灰により得た 0.33 mm/年の堆積速度を用いると、イベント PR-03 の年代は紀元前 800-600 年頃のはずだ。イベント PR-02 とイベント PR-03 の時間間隔を減らすため、我々は一定の堆積速度を想定する必要がある。オーガスタ・ホスピタルサイトとは対照的に、プリオロ・リザーブの地域では、この仮説がとても現実的に見える。なぜならば、ラグーン内で調査した層序セクションにおける明瞭な侵食作用の欠如と、テフラの年代層序と ^{14}C 年代から厳密に同じ堆積速度が算出されるからである。

5. 議論

歴史的な研究に基づく複合的アプローチ—コアの堆積物の地形学-地質学的調査と実験室分析—は、我々に低エネルギーの堆積環境で、複数の海起源の高エネルギー堆積物を見つけることを可能にする。以下で我々は、津波起源を支持するまたは反対する証拠を議論する。

オーガスタ・ホスピタルサイトとプリオロ・リザーブサイトで集められた地質学的データは、過去 4000 年間に起こった 6 回から 7 回の海の浸水（津波または嵐）の異常な記録の証拠を与えた。異なるデータの組み合わせのみが、嵐起源の堆積物か津波起源の堆積物かの識別を可能にするので（Kortekaas and Dawson, 2007 ; Morton et al., 2007), 以下では我々は、最も見込みのある堆積の過程を明らかにするために、入手した目録や先行

研究も参考にして、調査した層の堆積学的特徴、古生物学的特徴、海岸からの距離、年代そして頻度を議論する。

オーガスタ・ホスピタルサイトで、我々は3層の海の浸水の証拠を見つけた(イベント AU-00, AU-01, AU-02, 図4と図5を見よ)。

我々は、AU-01とAU-02の特徴が津波の浸水と一致することを示唆する(sensu Morton et al., 2007)。実際、AU-01層とAU-02層は、比較的薄く(約10 cm)、一層で、塊状で無構造、基底は明瞭な侵食面である。これらの物理的特性は津波起源を支持する傾向がある。3番目のイベント AU-00は、河川環境から海への堆積環境の突然の変化により特徴づけられ、それに関連した層(厚さ約20 cmの粘土質細粒砂)はかなりの量の貝の破片と植物片を示すが、その層は粒径(粘土質シルトから粘土質細粒砂)の点に関しては明確な違いがない。我々は后者の堆積物を津波によるものとして解釈したが、地域の地震が、地震による海岸線の大幅な変更をもたらし、その地域を守っていた地形的バリアの破壊をもたらしたという仮説を除外できない。

プリオロ・リザーブサイトで、我々は4層の海の浸水の証拠を見つけた(イベント PR-01 から PR-04, 図7と図8を見よ)。

我々はPR-01とPR-02の物理的特徴は津波の浸水と一致することを示唆する(sensu Morton et al., 2007)。実際、PR-01とPR-02の生物碎屑性の層は、比較的薄く(約10 cm)、一層の、塊状で無秩序な層、底生有孔虫の種の多様性の増加、基底は明瞭な侵食面である。これらの場合もまた、物

理的特徴は津波起源を支持する傾向がある。さらに、3番目の異常な堆積物のPR-03は、薄く(約3 cm)、一層の、塊状で無構造な層で、大型哺乳類の骨片、貝形虫、腹足類、保存状態の悪い底生有孔虫と浮遊性有孔虫(浅海および開いた海の環境どちらからも)によりつくられた異常な群集である。この地域のシーケンスでは粘土層が発達するので、PR-03層の粗粒な粒径と、大型哺乳類の骨片の不規則な存在は、PR-03層が、津波のバックウォッシュの波の堆積物という解釈、つまり、このような異質の層の運搬と堆積を可能とすることを示唆する。最後に4番目の堆積物PR-04は、薄く(約3 cm)一枚の塊状細粒砂層で、その上位と下位の極細粒な堆積物と比べると明らかに粗粒でかつかなり異なる古生物群集で特徴づけられる。PR-04堆積物の堆積学的、地形学的、古生物学的特徴は、重要な津波の結果だろうと示唆される。

上で議論したように、津波堆積物と嵐の堆積物を見分ける鍵となる要素は、異常な堆積層の海岸からの距離である。地中海における本研究サイトでの異常な気象イベント(嵐)の最大浸水距離を見積もるために、我々は、RON - Rete Ondametrica Nazionale (= Italian Ondametric Buoy Network, www.idromare.it)のメテオ-マリンカタニア・ステーション(調査地域の北約35 kmに位置する)で記録された、1989-2006年の期間の風速風向とオンダメトロのデータ(Barbano et al., 2010を見よ)を解析し、我々は調査サイトでのこれらのイベントの最大の水の氾濫(表5)を算出した。結果は、観測史上最も強い嵐は海岸から55 m以内の浸水距離に限られることを示

す.

オーガスタ・ホスピタルサイトとプリオロ・リザーブサイトの両方で、海の浸水の証拠は現在の海岸線から約 400-500 m の所で採取され、したがって調査した堆積物は津波起源だろう。より古いイベントが津波起源であることを強化するもう一つの考察は、Lambeck et al. (2004) と Antonioli et al. (2009) による海水準は現在よりおそらく数 m 低かったことだ。この解釈に従って、-5m の等深線が約 600 m 沖合に位置するのを考慮に入れて、約 2000 年より古い異常層が見つかったサイトの海岸線からの距離は、現在よりも離れているとした。明らかに、これは非常に大規模な浸水の事例になるだろう!

嵐起源と津波起源の識別を助ける他の情報は、これらの極端なイベントの頻度であり、知られているように、沿岸の嵐と比べ、大津波はより頻度が少ない(Morton et al., 2007)。イオニア海の ERA-40 データセット(1957 年 9 月から 2002 年 8 月までの全球の大気と表層の状態の再解析-Spirito, 2006 による)によると、45 年間で 9 つの強いサイクロンが発生した。この頻度ならばコアに記録された 4000 年間には約 800 もの例外的な嵐が発生することになり、この頻度はオーガスタ湾で発見された海の浸水の数の総計より 2 桁も大きい。

最後に、浸水イベントのいくつかで得られた年代幅は、原因として津波の仮説を支持する。実際に、プリオロ・リザーブサイトで見つかった 4 つの浸水イベントは年代決定され、PR-01 は西暦 1420-1690 年よりわずかに

若く、PR-02 は西暦 160-320 年、PR-03 は紀元前 800-600 年、PR-04 は紀元前 2100-1635 年であった。それらの内 3 つはイオニア海やさらに東で起きた歴史津波と関連がある。堆積物 PR-01 は 1693 年の津波により、PR-02 は西暦 365 年のクレタ島の津波と関連し、PR-04 は、紀元前～3600 年のサントリーニのイベントと関連するのだろう (Friedrich et al., 2006)。オーガスタ・ホスピタルサイトでは年代の対比は行われていない。なぜなら、AU-00 (西暦 650-770) を別にして、海の浸水が検出された年代 (AU-01, 紀元前 600-400 年 ; AU-02, 紀元前 975-800 年) は、歴史記録と対比させるには古すぎるからだ。

1693 年の津波に関連する巨礫の運搬の地質学的証拠は、マグニシ半島 (プリオロ・リザーブサイトの目の前の約 1 km 東, 図 2) とマッダレーナ半島 (シラクサ湾の南へ約 15 km, 図 1a) と名付けられた 2 つのサイトで、最近、示唆されている (Scicchitano et al., 2007)。したがって、我々のデータはこの意見と同じで、これらの先行研究の発見を裏付ける。西暦 365 年のクレタ島の津波に関しては、確かな堆積学的証拠としてその堆積物は未だ見つかっておらず (Scheffers and Scheffers, 2007 を報告として見よ)、よって我々の見つけた PR-02 と比較できる堆積物やサイトはない。我々の PR-02 堆積物が、西暦 365 年のクレタ島の津波と関係するという解釈は、歴史記録 (Jerome, 380) や、津波のモデルと調和的だが (Lorito et al., 2008 ; Shaw et al., 2008)、より多くの年代測定とともにシチリア東部と地中海の他のサイトの調査が、エジプトからクロアチア沿岸の多くの

町を破壊し、数千人を溺死させたイベント (Guidoboni et al., 1994 ; Stiros, 2001) をよりよく理解するのに必要である。最後に、イベント PR-04 を後期ミノス文明のサントリーニのイベントと結びつける可能性に関して、限られた陸のフィールドでの証拠は、サントリーニ島 (McCoy and Heiken, 2000) から離れた遠くの地中海地域 (Dominey-Howes, 2004) で見つかっている。

サントリーニ津波の津波堆積物と考えられている発見は、ギリシャのクレタ島の北海岸 (約 150 km 離れている) 沿いのサイト (Bruins et al., 2008), トルコ南西からディディム・サイトとフェティエ・サイト (それぞれ約 200 km, 350 km 離れている) (Minoura et al., 2000), そしてイスラエルの沖合の大陸棚 (約 1000 km 離れた) (Goodman-Tchernov et al., 2009) で見つかっている。これらの堆積物は、津波の波源から北東-東-南東のみに分布し、かなり異なり、我々の調査結果による比較は可能ではない。サントリーニ島から (約 900 km 西方), 我々のサイトまでの距離は、出版されている論文のそれらに匹敵し、それは地中海中部-西部地域の最初の陸域からの証拠かもしれない。実際、最も西の証拠 (約 600 km 離れた) は、後期ミノス文明のサントリーニの津波 (Cita and Aloisi, 2000 とその中の引用) に起因すると思われる深海堆積物中の地震性堆積物である。

6. 結論

オーガスタ湾エリアを襲った海の浸水について集めたすべてのデータの

組み合わせに基づいて、我々は過去 4000 年間に少なくとも 6 回の津波イベントの証拠がオーガスタ・ホスピタルサイトとプリオロ・リザーブサイトで見つかったことを示唆する。津波のタイミングに関して、我々は以下のように一覧できる。すなわち西暦 1420-1690 年より新しい(PR-01), 西暦 650-770 年(AU-00), 西暦 160-320 年(PR-02), 紀元前 600-400 年(AU-01), 紀元前 800-600 年(PR-03), 紀元前 975-800 年(AU-02), 紀元前 2100-1635 年(PR-04)である。それらの年代の重複する可能性があるため、PR-03 堆積物と AU-01 堆積物または AU-02 堆積物が同じ津波イベントによる可能性もありえる。

プリオロ・リザーブサイトで見つかった津波堆積物のうち 3 枚は、歴史津波と関連があるかもしれない。すなわち PR-01 が 1693 年の局地的なイベント、PR-02 が西暦 365 年のクレタ島のイベント、PR-04 が紀元前約 3600 年のサントリーニのイベントの可能性がある。これらの結果は、1693 年の津波について同じ場所で発展した以前の研究を裏付けると思われる。西暦 365 年のクレタ島の津波と後期ミノス文明のサントリーニのイベントに対して、我々の調査結果は、地中海中部-西部地域で最初の陸上からの証拠を示すかもしれない。この調査の結果に基づいて、我々は、オーガスタ湾において過去 4000 年間で約 600 年の地質学的 ATRI を見積もる。もし我々がこの結果を約 250 年の歴史的 ATRI と比べるなら、我々は見落としたいいくつかのイベントを言及する。この矛盾に対し 2 つの主要な理由がある： a) オーガスタ湾地域で、この 1000 年の歴史記録には、堆積物を数 100 m 内陸

まで運搬し保存するのに十分な規模の津波は記録されていない(例えば 1908 年に遡上が約 2 m で, その浸水は明らかに 20 m 以上内陸に入りこまなかった. 図 1c), b) 特に最近, 津波の証拠を取り去るかもしれない海岸線沿いでの激しい人間活動や表面の浸食過程(オーガスタ・ホスピタルサイトは良い例になるかもしれない)で海岸地域の津波の調査は, 困難を被る. 結論として, 我々は沖合いの津波調査に重大な努力をする機会を考えるべきである. そこではそのような異常なイベントの証拠が良く保存されているかもしれない(Abrantes et al., 2008 ; Dawson and Stewart, 2008 ; Goodman-Tchernov et al., 2009).

我々は, シチリア東部での津波堆積物の調査は, 最近行われた新しい研究の方向(Scicchitano et al., 2007 ; Pantosti et al., 2008 ; Barbano et al., 2010)であることを言及すべきである. それにより, 津波堆積物の同定と年代決定に使われる異なるアプローチは, 更なる検証, 体系化と公式化を必要とする.

結論として, 我々はある地域の津波堆積物の同定と特徴づけは, 現実的な平均津波再来間隔, 最小浸水距離, 最後の津波イベントが起きてからの経過時間を得る唯一の機会を提供すると信じる. この情報は防災のための津波のシナリオとモデルの検証と制約に非常に関わる.

北村晃寿・山本有夏