

Vertical movements in NE Sicily and its offshore: Outcome of tectonic uplift during the last 125 ky

Attilio Sulli, Valeria Lo Presti, Maurizio Gasparo Morticelli, Fabrizio Antonioli

北東部シチリアおよびその沖合の垂直運動: 過去 12.5 万年間のテクトニックな隆起の結果

Abstract

イタリア, シチリア北東部のアックエドルチとパッティの間の海岸地域における新たなデータは, カビリアン—カラブリアン弧とシチリア—マグレビアン弧の間でカギとなる地域の地殻変動の速度を求めるために集められた. 大陸棚と大陸斜面における海洋地質学的データ (マルチビームと地震波反射断面探査) と海岸の調査から得た地形学的指標の放射性炭素年代との比較は, 新たな層序学的, 地形学的, 生物学的データを提供し, 過去 12.5 万年間のこの地域の地質学的変化の知見に寄与する.

この海岸地域は, シチリア北部の更新世の期間に活動している二つの主要な構造的な特徴の場である. すなわち, カビリアン—カラブリアの衝上断層 (アックエドルチ西部) とブルカノーティンダリ断層 (パッティ東部) である. 前者は圧縮, 後者は横ずれの, 構造的な特徴の発生は, この地域がテクトニック的に活発で異なった様式の垂直な「運動」を行うことを確証する. 断層系は, 陸上と沿岸地域ともに隆起速度の異なるブロックに分ける. パッティ湾では, 沿岸地域は沈み, 一方, 同時期に陸域では隆起が観測できる. 他のシチリア地域とは対照的に, この研究領域では, MIS 5.5 と完新世とで同程度の隆起速度を記録した.

1. 序

過去の海水準変動への理解は, 海水準変動の原因の決定に重要な役割を果たし, 入手可能なデータが存在しない場所や時代に, 過去の海水準の外挿を可能にする. アイソスタシーやテクトニックを取り入れていないが, 数千年スケールの分解能かそれ以上の分解能で, 深海の酸素同位体比に基づく汎世界的海水準曲線が 1970 年以来発表されている.

海水準変動は, 年代決定された化石, サンゴ礁の段丘, 鍾乳石, 海岸地域の隆起段丘, 考古学的な指標や海水準と密接に関係したその他の証拠から復元できる. 地

地中海ではサンゴ礁がないため、バルバドス、フォン半島、タヒチ、フロリダのような典型的なサイトと比較すると、第四紀後期の海水準変動の痕跡を得るのが難しい。しかし、潮位の変動幅が非常に小さな地中海は、精度の高い観測をもたらす機会を提供する。古海岸線や、海水準の位置に関係する、更新世—完新世の地形学的（内陸部の段丘）、古生物学的、考古学的そして生物学的指標は、隆起速度の計算や海水準変動とテクトニックな隆起の相乗効果の調査に役立つ手法である (Lambeck et al., 2004; Ferranti et al., 2006; Antonioli et al., 2009)。

イタリア沿岸の垂直変動に関する先行研究は、異なる年代の指標を用いた。最終間氷期 (LIG) と完新世の海岸線は、相対的に高精度で年代決定された海岸線であり、顕著な基準である。LIG の海岸線は、13.2~11.6 万年前の、海洋酸素同位体ステージ(MIS) 5.5 の間に形成された。諸島を含む、イタリア沿岸に沿いに、その指標高度に見られるばらつきは、テクトニックな過程であり、その量は LIG の高海水準(MIS 5.5, 12.5 万年前)の海面高度、地中海では $7 \pm 2\text{m}$ の差で求まる (Lambeck et al., 2004)。最終氷期最盛期と完新世に関して、海水準変動は、汎世界的海水準変動と氷河性—ハイドロ—アイソスタシー（氷と海水の荷重／非荷重）と、テクトニックな要因の総和である。汎世界的海水準変動は時間依存性だが、氷河性—ハイドロ—アイソスタシーとテクトニックな要因は場所によって変わる。これは同時期でも相対的海水準（汎世界的氷河性—ハイドロ—アイソスタシー、テクトニックな要因の和）が海岸線ごとに異なることを意味する。Lambeck ほかのモデルは(Lambeck et al., 2004)、氷河性・ハイドロ・アイソスタシーの効果を考慮し、年代データの高度の変更を通じて、テクトニックな垂直変動の速度を仮定し地中海のような遠隔地の氷河のリバウンドとマンツルのリバウンド(Lambeck et al., 2011)を用いて、相対的海水準変動を計算した。

本論の狙いは、複雑なテクトニックの地域であるシチリア北東部（イタリア南部）、カラブリア弧の海岸の隆起過程と反応の理解を進めること、この地域は主要な地中海地域の第四紀の垂直運動の一つを記録する。シチリア北部の大陸縁辺部に沿った海岸地域で計算された垂直運動のデータからは(Antonioli et al., 2006; Ferranti et al., 2006, 2010)、東から西にかけて、中期—後期更新世から完新世の間の隆起速度にかなりのばらつきがあることが認識された(Fig. 1)。テクトニックな隆起は、「連続的」と「間欠的」な寄与がある。連続的寄与は、深部の地域的な活動に起因するものと、海水準上昇速度に対応し、海水準上昇の間でも移動しない海岸線によって認識される。一方、「間欠的」寄与は、局所的な原因で、突発的だ

が規則性のある海水準のステップ的発達によって示され、この地形はおそらく地震性の活断層による下盤または上盤の急な隆起による(Ferranti et al., 2007; Scicchitano et al., 2011a).

過去 1 万年のデータを基に計算された隆起速度は、同じ場所で過去 12.5 万年のデータを基に計算された隆起速度より大きい値を示す(Antonioli et al., 2006; Ferranti et al., 2010). おそらく局所的な寄与の原因は地震であり、完新世にはそれ以前よりも隆起速度が増加した.

正確な位置の測量と年代値の情報によって制約された、アックエドルチとパッティの間(シチリア北部海岸)の地域の新たなデータは(Lambeck et al., 2004, 2011; Ferranti et al., 2006, 2010; Antonioli et al., 2009), このテクトニックな活動が活発な海岸の垂直運動の速度を明らかにした. この研究は、大陸棚の観測結果と海岸地域の地形学的観測結果を結び、最終間氷期(LIG, 125 ka BP)と完新世(10 ka cal BP)の指標に基づき、中期と短期の変形のパターンを説明する.

2. 地質学的・地形学的な背景

シチリア海岸の北東部は北部シチリア大陸縁辺部の一部であり、そこは南側のアペニン-マグレビアン褶曲と衝上断層帯があり、北側のティレニアン背弧盆には含まれた漸移帯である(Fig. 2). 本研究地域は、カビリアン-カラブリアユニット(KCU)で形成される、カラブリア弧のシチリア地域に属し、アペニク-マグレビアン褶曲と衝上断層帯の中央のユニットで、シチリアン-マグレビアンスラストシートの上部に衝上している. テクトニックな体系は、新生代のアフリカ-ヨーロッパの収束の期間に形成され、アフリカ縁辺部に属するハイブレード前弧の中生代から新生代のシーケンスの上に形成された、南方と南東方向で接する付加体で特徴づけられる.

カビリアン-カラブリアン帯は、大量の結晶片岩ユニット(Ferla, 1982), 中生代の炭酸塩岩(Deeé, 1969; Ogniben, 1969), 漸新世-中新世の陸源物質(Amodio Morelli et al., 1976; Bonardi et al., 1980)で形成され、その上位の上部中新統一第四系の碎屑岩と蒸発岩と炭酸塩堆積物との境界は不整合である. KUC 帯は、前期中新世に、北西-南東に延びるタオルミーナ線に沿って、下位のシチリアン-マグレビアンユニットの上に南から南東方向に向かって、テクトニック的に運搬された(Bigi et al., 1992), この線型構造は、以前は主要な横ずれ断層と解釈されていた(Amodio Morelli et al., 1976; Giunta et al., 1989).

ティレニア海盆は、カラブリア弧の下に沈み込むロニアンスラブのロールバックの結果として拡大した。ティレニア背弧海盆の拡大は、北東部シチリアの沖合の伸張をもたらし、後期中新世に北西—南東、東—西に延びる正断層が基盤を切断して、伸張する海盆をつくった。伸張性のテクトニクスは、沖合を含む(Catalano et al., 1996; Pepe et al., 2000)、北東部シチリアの海岸地域に影響し(Ghisetti and Vezzani, 1982; Di Stefano and Lentini, 1995; Lentini et al., 1995, 1996)、中期・後期鮮新世と続き、広域にわたって東—西、北西—南東、北東—南西に延びる正断層を生じ(Fabbri et al., 1981; Barone et al., 1982)、地殻を薄くさせた(Pepe et al., 2000)。北西—南東の圧縮／横ずれの断層は前期鮮新世の間、沖合地域に影響し(Pepe et al., 2005)、一方、北北西—南南東の主要な地域的なテクトニックのリニアメントである、主に右横ずれ断層の運動(部分的に伸張もしくは短縮)のブルカーノーティンダリ断層システムがカラブリア弧の南西部地域を分断した(Billi et al., 2006; Lanzafame and Bousquet, 1997)。更新世の間、北西—南東、北北西—南南東、北東—南西、西南西—東北東の伸張／横ずれ構造が発達し、部分的に圧縮される断層として連続的に再活動している(Nigro and Sulli, 1995)。更新世のシステムは、現在の複雑な形態のセッティングと海盆と地域的高まりの配列を作った。現世の北西—南東、西北西—東南東の伸張性の正断層は、最終氷期以降の海水準変動の間に堆積した第四紀後期の堆積シーケンスに影響した。何人かの著者は(Finetti and Del Ben, 1986; Giunta et al., 2009)、その地域の地質学的セッティングを南部ティレニアン剪断帯に帰属させている。この剪断帯は、東—西に延びる右横ずれシステムの形成のせいであり、北東—南西、北西—南東の共役断層も関連する。

北部シチリアの大陸縁辺部のテクトニックな活動は、大規模な上部プレートの地震活動により説明され、西へ向かっては、圧縮の発震機構により特徴づけられる地震領域が作り出され、一方、東の地域では、伸張と横ずれのメカニズムが卓越する(Figs. 2 and 3) (Pondrelli et al., 2006)。研究地域では、テクトニックな活動は、観測以来の地殻内地震(Chiarabba et al., 2005)と歴史地震(Mongitore, 1743; Incudine, 1882; Working Group CPTI, 2004)により記録され、主要な地震の震央は、ナージの南部では、そこを引き延ばす北東—南西の断層に沿って位置する(Fig. 4)。この地域の主要な地震活動は、北西—南東のトレンドを持つ右横ずれ断層系(ブルカーノーリパーリ、ティンダリーギャーディニ)に関係し、この地域の最近の地震を起こした(Neri et al., 1996, 2003)。特に、パッティ地域では歴史地震が、1978年の最大マグニチュード 6.1 が記録されている(Fig. 4)。東部に延びる、プロ

一口地域の地震活動は、より深く、イオニアン沈み込みプレートと関連する。

カラブリアン弧は、第四紀において、地中海でも最速の隆起速度の一つを記録し (Westaway, 1993; Miyauchi et al., 1994), カラブリア地域はシチリア地域より隆起し、MIS 5.5 の海岸段丘の垂直運動によって記録され、カラブリアで 1.1~1.4 mm/y, 北東部シチリアで 0.9 (ガンツィッリ) ~ 0.18 mm/y (チェファル) となる。この地域の完新世の隆起速度は、更新世の隆起速度より 50%近く速いことが分かっており (Pirazzoli et al., 1997; De Guidi et al., 2003; Antonioli et al., 2006, 2009; Ferranti et al., 2007; Scicchitano et al., 2011a), メッシーナ海峡と北東部シチリアで最大 2 mm/y に達する。

最近のテクトニックな活動は、GPS データでも示され、北部シチリアに関しては発散するベクトルで、10 mm/y の速度で北向き (Fig. 3), そして北北西から北に時計回りに回転することを示す (Oldow et al., 2002; D'Agostino and Selvaggi, 2004; Ferranti et al., 2008; Serpelloni et al., 2010)。これは、西部と東部の地域間の顕著な構造的境界 (ブルカーノーティンダリ断層) の存在を確かなものにし、一方、北東部シチリアとカラブリアの間の異なる運動を記録する (D'Agostino and Selvaggi, 2004; Goes et al., 2004; Devoti et al., 2008)。

断層セグメントの存在と異なる性質の岩石、すなわちヘルシニアンの変成岩の基盤岩、中生代—新生代の炭酸塩岩と漸新世—中新世の陸源堆積物と、更新世のデルタの砂や礫 (Carbone et al., 1998) などの互層は、陸地と海の両方で複雑な地質学的セッティングをもたらす。アックエドルチからティンダリに発達する 3 つの岬は、異なる地質学的起源をもつ (Fig. 5)。最も東のティンダリ岬とチェファル岬は変成岩から成り、一方、オーランド岬は堆積岩から成る。西部地域は、侵食性の大陸・海洋の過程で削られた、なだらかな丘が特徴的である。一方、東部地域は、外的営力と海水準変動の影響をほとんど受けていない。砂質のポケットビーチとオーバーハングした崖は、海岸地域にそって交互に分布する。後背地では、丘陵性の地形の連続が、大きな V 字形に刻まれた、急流 (この地域では “fiumare” と呼ぶ) で切られており、それらの河川は海岸線に直交し、大量の堆積物の供給は、幅広い海岸の沖積平野を形成し、大陸棚に注ぎ込む (Fig. 5)。

アックエドルチとオーランド岬の間は、保存状態の良い 4 段の海岸段丘を識別できる。標高約 40 m (Rocca Scodoni) に位置する段丘は陸側のへりを示し、45-50m の位置には崖があり、そこには *Lithodomus* の穴がある。ここには、生息姿勢の *Spondylus* sp. の二枚貝が見つかった：誤差は大きいですが、U/Th 分析でその年

代を決定し、MIS 5 (10~12.5 万年前) を示す (Scicchitano et al., 2011b). この領域は、0.36~0.5 mm/y のテクトニックな隆起速度が見積もられていた。オーランド岬の東部では、考古学的指標が海岸地域に沿って存在し (Scicchitano et al., 2011b), 0.36 mm/y の隆起速度と決定された (Scicchitano et al., 2011b) (Fig. 5).

海岸地域の複雑な地形学的セッティングは、大陸棚—大陸斜面システムでも認識できる。大陸棚は幅広く (最大 4.5 km), オーランド岬とティンダリ沖, カプリ・レオーネでは傾斜が緩い (約 1.74°)。ナージとカラヴァ岬沖では大陸棚は狭く (最大 300 m), 急勾配 (2.35°) だ (Lo Presti, 2010). 大陸棚縁辺は、場所によって深さが異なるが、主として深さ 140-145 m に位置し、パッティ沖にだけ前進性の堆積体が見られる。海底溪谷の先端で切られているところでは大陸棚縁辺部はない。海底溪谷の先端は多くの場合、海岸近くまでのびる (Fig. 5). 溪谷の密集したネットワーク, 溝, チャネル—堤防システム, 構造的なステップと高まり, 海底段丘, 地すべり, 堆積物の崩壊地形, それに V 字谷の急な側壁は、縁辺部がとて新しく, テクトニックな活動による連続的な再活動を示す。溪谷の形成は、テクトニックなリニアメントに沿った下方への発達によりもたらされ、たいてい急流河川の河口と一致し、また崩壊に伴う浅いところへの溪谷の谷頭の発達によりもたらされる。

3. 試料と方法

隆起速度の計算は、MIS 5.5 と完新世の 2 つの顕著な基準を示す年代決定された海岸線の詳細な測定から行う。古海岸線は、地形学的 (段丘の陸側の端), 古生物学的, 生物学的指標をもとに識別する。現在の露頭の標高 (Z) と古海水準の標高 (+7m) の違いを測量することで、過去 12.5 万年の間のテクトニックな垂直成分の平均の高さを定量的に決定でき、計算結果によると $(Z-7)/125$ (mm/y) である。テクトニックな速度は、地域的・地震性の垂直運動の両方を考慮するこの方法を用いることで得られ、後期完新世では隆起速度の増加は起きない。完新世に関しては、隆起速度は、イタリアでは Lambeck et al. (2011) によって計算されたように、氷河—ハイドロ—アイソスタシーの効果を補正して推定し、年代決定された標高を修正する。ブローロの海食柱と海岸平野で採取した完新世の貝化石の放射性炭素年代測定では、CALIB 5 プログラムを用いて較正した (Table 1). 放射性炭素年代は、較正年代 (cal BP) で示した。

沖合の地形、層序と構造の特徴は、浸水した地形や埋もれた構造のより良い地質

学的解釈を得るため、等深線のデータ（マルチビーム）と地震波反射断面（音速）を統合した分析で行う。マルチビームデータは、R/V “Tethis”に乘船し、2003年7月の海洋調査で得た(Catalano et al., 2011)。水深約 20 - 900 m で運用でき、100 kHz の周波数で 105 のビームを発生させる、Reson SeaBat 8111 を使用した。音速の速度のプロファイルは、Navitronic Systems AS-SVP-25 で収集した。等深線のデータを取得、解析し、ソフトウェア PDS2000 を用いて加工した。海岸線に平行に取得した、密集したネットワークの線は、水深 15-950 m の範囲の解析を可能にした。加工後は、ノイズのフィルタリング、ナビゲーションデータの加工、音速の補正、間違っただビームのグラフィックの除去を行った。最終的にはデジタル地形モデル (DTM) を得るために、大陸棚では 10 m の解像度、大陸斜面では 20 m の解像度のセルサイズを使い、深さごとに異なる最密点間隔の解像度で作った。Golden Software Surfer 8 と Global Mapper 10 は、海洋の等深線のデータから 3D マップと DTM を得るために使用した。

海岸線に平行、直交方向に沿った、長さ 165 km のネットワークのシングル・チャンネルの地震波反射断面は、海底下 200 m 以上の深さの堆積物の累重の高解像度のデータを提供した。マルチチップ・スパーカー・アレイが、震源であり、優れた透過率を維持した高解像度のデータを提供する。7つの高分解能の水中調音装置をつなげた、反応部分が 2.8 m のシングル・チャンネルのストリーマーを、データを得るために使用した。6 kHz で収集し、往復走時 (t.w.t.t.) 1.5 秒の長さを記録した。地震波のデータの加工は、Geosuite ソフトウェアのルーチンに従って行った。つまり、編集、ミューティング、swell filter, AGC, gain である。加工された地震波データは、地震波層序解析により解釈される。この層序解析は識別すべき異なった性質をもつサイスミックファシスによって特徴づけられる堆積物ユニットを明らかにする。Geosuite は、ESRI ASCII Grid として、解釈された層準の深さの変換、そして、出力できる。等深線と等層厚線の図は、Global Mapper ソフトウェアを用いて作成した。

4. データ分析

4.1. 沿岸の地形的データ

アックエドルチからパッティ湾にかけての沿岸地域を研究した(Fig. 6)。地形学的調査は、地形学的指標と生物学的指標を用いて、第四紀後期の隆起速度に関する新たなデータを提供した。

オーランド岬とカラヴァ岬の間の(Fig. 6), 小さな湾の中央の, ブローロの海食柱は(Bs, Fig. 7a), 不純物の多い中粒の大理石と古生代の準片麻岩や雲母片岩の互層の露頭があり, この岩体は後背地にも見られる(Fig. 7b). 現在の堆積物シーケンスが広がる場所では, これらの岩質は, 結晶片岩の基盤岩で, その上に現世の堆積シーケンスが重なる. 片理のシステムは, $N 5^{\circ} E 60^{\circ} SE$ で傾斜し, 白から灰色の数十 cm の明確な層となる(Fig. 7b). すべての構造は様々な方向に割れ, 共通して黒い固結度の低い火山岩を含む. 海岸線から 450 m 離れた, ブローロの海食柱は, 最大 14-18 m の海底から突き出した変成岩から成り「レンズマメ」状の構造を構成する. 海面から出た部分は, 東西に 43 m, 幅 29 m, 高さ約 15 m である(Fig. 7a). 海面から出た部分よりも水中の部分の方が細く, マッシュルームのような形である. この形は海水準上昇と垂直なテクトニックの動きにより引き起こされた海面から出た部分と水中部分の物理的, 化学的過程の結果である. 詳細な地形学的な調査は, 両者が異なる特徴を示すことが分かった(Fig. 7f). 大きな角礫のブロックは, 水中の崖のそばの海底で発見され(Fig. 7h), また, それらの崩落は高エネルギーな波と岩石の片理や, かなりの断片化による機械的浸食の結果である(Fig. 7e). 構造的な表面として認識された小さな段丘は, 沈水した部分の様々な深さにある. 海生の貝類化石を含む礫が, 標高 3.5m の岩棚の保護された場所で見つかり(Fig. 7c-d), 保存状態の良い *lithophaga* の穴が +70 cm から見つかった(Fig. 7g). 海生貝類を含む礫に発見された腹足類の放射性炭素分析は(Fig. 7c-d and Table 1), 4745 ± 59 BP の年代を示した(4965 ± 70 cal BP, Calib 5 プログラムを使用, Stuiver et al., 2005).

得られたデータと地形学的な考察に基づくと, より広く, より側方に連続的で, より傾斜のゆるい地形学的特徴を考慮せずに, 海食柱の海浜堆積物の形成を予想することは難しい(Fig. 7). <北村のコメント 隆起は傾動を伴ったということ> 堆積物の年代と予測された局地的な海水準曲線(Lambeck et al., 2011)を比較することで, そのデータは曲線より上にあり, 約 1.5 mm/y の隆起速度が得られた(Table 1; Fig. 8E).

幅広いボローロの沖積平野 (ボローロ島から 2 km) において様々な *Spondylus* の標本は, 標高 9.7 m にある大きな井戸の深さ 8.10 m の未固結の砂質中礫堆積物(Fig. 6 and Fig. 8A, B, C) から採取された. 礫に含まれる *Spondylus* の現在の標高は, 標高 1.60 m である. 堆積物の粒径から, 優れた保存状態の二枚貝は, 浅瀬に堆積したと思われる. *Spondylus* の現在の標高が死んだ時の海水準と一致する

と仮定すると、隆起速度の保守的な評価を支持する(Fig. 8). 二枚貝 *Spondylus* の放射性炭素分析は、較正年代で約 3600 years BP を示す(Table 1). Lambeck が計算したこの沖合の地域の海水準と *Spondylus* の年代を比較すると、この地点は、曲線よりも 8 ± 1 m 上にあり、 1.6 ± 0.27 mm/y の隆起速度を示す (Fig. 8E).

さらに、沖合地域に沿って、テクトニックな垂直運動の地形学的証拠がある。ブローロの東部には、完新世の証拠と推定されているものがあり(Fig. 6 and Fig. 9a), 以下に示す：

1. パッティ湾の海岸線から約 1 km, 淘汰の良い中粒砂を基質とした良く円磨された数十 cm の礫からなる厚い礫層から構成される海食柱(Fig. 9c)には、標高 1 m に位置するプラットホームは、波浪で摩滅された部分が隆起したものと解釈される(Fig. 6 and Fig. 9d).
2. パッティ地域の、モンジョヴェ近くでは、石灰質の変成岩に *Lithophaga* の穴が見られ、その標高は 2.2~3.5 m である(Fig. 6 and Fig. 9e). これらの *Lithophaga* の穴は、古海水準の上限と考えられる.

オーランド岬とパッティ岬の間には(Fig. 6), 後期更新世の波浪による摩滅の証拠がある。チポラ山の斜面の北西部 (ブローロの西), 標高 140~155 m には、狭く平坦な地形があり、年代決定のための適切な試料はないものの、円礫から成る、未固結の礫層があり、おそらく海成堆積物である(Fig. 8C, D).

4.2. 海洋の地質学的データ

等深線の分析は、幅数 km の限定された地域で、異なる動きをする、傾斜した海底を検出した。この地形は異なる上下運動の結果であり、大陸棚縁辺の地形学的セッティングにおけるテクトニックコントロールを示す(Figs. 6, 10 and 11). ブローロの沖合、ブローロ海食柱の西に向かい、東北東に傾く海底が、ナージ川の河口の沖合の峡谷の東のブローロの海食柱の基底の深さ 85–120 m にあり、 0.8° の勾配である(Fig. 5). 西部の側面は、絶壁、小規模の谷、溝がみられ、この地域が隆起していることを示し、傾いた海底面は、東部斜面に非常によく保存されている(Figs. 5 and 10). パッティ沖では、西北西に傾く海底があり、ここでは深さ 140~160 m の同じ方向で大陸棚縁辺も深くなる。傾斜は 0.24° である(Figs. 5, 6 and 11).

沿岸地域の岩石の組み合わせと構造物の枠組みは、高解像度の地震波反射断面により再現され、3つのサイスミックユニットに認識できる(Fig. 12) :

—ユニット A, 高い振幅と低い周波数, 側方への連続性が悪い. 局所的に内部構造は透明である. 上面は局所的に Horizon 1 と接する.

—ユニット B, 高い振幅と高い周波数が透明層との互層を示す. 内部の形態は平行, 波状もしくは, 沖合に向かってわずかに傾斜する. 上面は直線ないし, 波状の Horizon 1 と接し, Horizon 1 は, この研究地域で最もよく認識できる, 高い振幅, 振動数で示される.

—ユニット C, 上面は海底である. 高い振幅と周波数の Horizon 2 が, 側方に良く連続し, その上下で2つのサブユニットに分けられる(C1 and C2).

地震波のデータの地質学的解釈は, ユニット A が古生代の結晶片岩の基盤であり, 更新世の堆積物(ユニット B) が不整合を挟んで重なり, また場所によっては第四紀後期の堆積物シーケンス(ユニット C) が不整合を挟んで重なる. この解釈により, Horizon 1 は, 浸食トランケーションであり, 最新の堆積物シーケンスの基底部である. Horizon 2 は最大海氾濫面で, 海進期堆積体(サブユニット C1) と高海水準期堆積体(サブユニット C2) を分離する.

地震波構造解析は, 結晶片岩の基盤と更新世の堆積物中の褶曲と断層(主に圧縮による断層)を示した(Fig. 12b). これに関連するテクトニックイベントは, 浸食トランケーションよりも古い(horizon 1). より新しい伸張性の断層は第四紀後期の堆積物に影響している.

構造的なセッティングに基づくと, 3つの異なる地域を認識できる :

—オーランド岬の西, 外側陸棚は, 落差 25 m の, 最近の伸張性断層の影響を受けている. オーランド岬の周辺では, これらの断層は浸食トランケーションを切断し, 第四紀後期の同時進行の堆積作用を起こした堆積空間を作った. この堆積空間は伸張性断層の上盤の成長する形態に示される(Fig. 12c). 古生代の岩石と更新世の地層は, 断層ブロックの基盤となり, それを覆う. 第四紀後期の堆積物の厚さは 15 から 80 m までの変化があり, 外側陸棚から内側陸棚に向かって増加する(Fig. 12c). この構造の特徴は, 古生代の岩石の隆起を示し, それは地震波反射断面図により示される堆積物に覆われた結晶片岩の「地塁」(Fig. 12c), ブローロ, パッティ, ティンダリの海食柱の隆起や沈降の発生で示される(Fig. 9a, c, f, g).

—オーランド岬からスキーノ岬までの中央の地域では, 第四紀後期の堆積物と同

様に浸食トランケーションは、沖に向かって傾き、異なる堆積空間のため様々な厚さを示す(Fig. 12d-e). スキーノ岬からカラヴァ岬までの、最近の変形は、ほとんどない (Fig. 12f);
一東の地域では、伸張性断層により結晶片岩の基盤が -65 m まで隆起した. 第四紀後期の堆積物の厚さは 7-30 m である(Fig. 12g).

この地域のみで低海水準期の前進性堆積物(LPC)の累重のパターンは、深さ約 150 m で確認できる(Fig. 12g). LPC の下部の S 字状の反射面末端は、深さ 153 m に位置し、このトップラップの形態は、最終氷期最盛期の海水準の位置を示す点で重要である (Catuneanu, 2002). オフラップブレイクは、-154~-172 m に位置する: 最小値の-154 m は保守的な値 (より陸側に接する) で、最大値の -172 m の場合は (より海側に接する) 沈降したことになる. 海水準曲線によると(Lambeck et al., 2011), この値と予測される海水準の位置(-127 m, Caruso et al., 2011)との違いは、 2.2 万年間 (LGM) で 27 m の沈降が示唆される.

5. 議論

Figs. 1 and 6 は、新たな、もしくはすでに発表された、ティレニアン-カラブリアンと北部シチリアの過去 12.5 万年間のテクトニックな垂直運動の証拠を示し、研究された沿岸での異なる挙動を示す(Ferranti et al., 2010 参照). ティレニアン-カラブリアンの沿岸地域は、MIS 5.5 以降の速度は、北から南に向かって、0.35 から 1.4 mm/y に増加する. 最大の隆起速度は、メッシーナ海峡に面する内陸の段丘の縁辺で発見された. 同様の値 (0.8~1.63 mm/y) は、シメート平野、シチリア東海岸の段丘から発見されている. 南に向かって、沿岸の隆起速度は低下し、最終的には 0 となる. 12.5 万年前の堆積物 (*Strombus bubonius* または、セネガルの動物相を含む) に基づき、北東シチリアの垂直のテクトニックな隆起速度は、東から西に向かって減少する.

完新世の隆起速度は、潮間帯のノッチ、または、*Ctamalids* のような生物学的指標の正確な帯状配列に基づく計算をし、ティレニアンの段丘からの計算した値よりも 20~70 %高い値で、この地域の中で大きい値を示す (ただし、東部シチリアの南は安定的だと推定されるが). カラブリアのシラーとパルミの間(Ferranti et al., 2007)や、メラッツォ岬(Scicchitano et al., 2011a)といった、いくつかのサイトにおいて、地域的かつ地震性のテクトニックな垂直変動が識別された. この特徴

は、MIS 5.5 の隆起速度が 0.67 mm/y の、ティンダリ岬で認識される(Bonfiglio et al., 2010). 標高 4 m の完新世の潮間帯のノッチの存在から Bottari et al. (2009) により提示された定性的評価よりも、完新世の隆起速度は速い. パッティとオーランド岬の間の地域は、傾斜の発達により速いため、いくつかの段丘の地形が削れ、あまり硬くない岩質では、垂直方向のテクトニックな運動のデータは残らない. ティンダリ岬の西、完新世の指標で増加を示すものは発見されず、恐らく地震性の活動によるものだろう.

チェファル近くの、西側へ向かうと(Fig. 1), MIS 5 と年代決定された、化石を含む堆積物は、相対的に低い標高にあり(29 m, Antonioli et al., 2006), 垂直運動の速度は 0.2 mm/y より遅い. パレルモとエガディ諸島の間の西側で、テクトニックな垂直運動が 0.1 mm/y に達する横ずれ断層の活動のため(Fig. 1), 予想より小さく局所的な垂直運動 (カステランマーレ岬とカステルツォ平野) を除けば、MIS 5.5 を示す指標は実質的には安定である.

アックエドルチとパッティの間にある研究地域では、シチリアの地質学的、地殻変動的なセッティングが重要なポイントとなる. この地域では、シチリアの最も重要な構造の特徴の 2 つの間にある(Figs. 3 and 4). すなわち、パッティの東には、ブルカノーティンダリ断層があり、アックエドルチの西には、カビリアン—カラブリアンの衝上断層(ロンジータオルミーナライン)がある. これらの構造の特徴は、前者は横ずれで、後者は圧縮で、60 km の距離があり、シチリアの東端と西部から切り離されており、異なるテクトニックな垂直運動の、沿岸地域の地震性とテクトニックな活動を生じさせる.

ここでは、完新世と MIS 5.5 のそれぞれで、地形学的な指標は、様々な調査地域で異なる隆起速度を提示した. 隆起速度は、陸上の地域と大陸棚との間で異なる. 大陸棚に関しては、LGM までの、第四紀後期の堆積物シーケンスの分析から得た情報により、後期更新世の後期の隆起速度は完新世の期間の隆起速度と同じである.

- オーランド岬からブローロの間の(Fig. 6), 完新世の隆起速度は以下の通りだ:
 - ブローロの海食柱 (^{14}C 年代), 1.6 mm/y (Figs. 6 and 7; Table 1);
 - 0.36 mm/y, オーランド岬の東の石油を発見するための砥石から計算した (Scicchitano et al., 2011b) (Fig. 6 and Table 1);
 - ブローロ平野 (^{14}C 年代決定), 1.2 mm/y (Figs. 6 and 8; Table 1).

パッティの海食柱は、ブローロの海食柱の完新世の隆起と同様な値を示す。だが、それは未固結の礫だが、標高 1-1.5 m のわずかに隆起した平坦面を示し、ブローロの海食柱の潮間帯ノッチより上の標高 0.8 m の *lithophaga* の穴に対比される高さだ。

これらの異なる値は、異なる地域ではカップリングしていないテクトニックなリニアメントの存在に関連づけることで、異なる隆起速度を認めることができ、以下により確認される：

1. 地震のデータは、結晶片岩の基盤と第四紀後期の堆積物シーケンスとともに、第四紀の断層システムによりかなり変形させられていることを示す (Fig. 12);
2. 伸張性断層は、幅広く岩体を切り、ブローロの海食柱の隆起を説明する。
3. ブローロの海食柱の北西にある北東—南西の断層 (Figs. 4 and 6) は、Bigi et al. (1992) に記された位置に相当し、ブローロの海食柱をオーランド岬から外す不連続を示し、完新世の異なる隆起速度を説明する (Fig. 6; Table 1).
4. ブローロの海食柱の北西の沖合の等深線の分析は、海底溪谷の先端の平坦面が東北東に傾斜していることを明らかにし、反対側の西南西側の溪谷は隆起し、地形的回復をもたらした (Figs. 6 and 10).
5. オーランド岬とカルヴァ岬で測定された GPS のベクトルの異なった方向 (Figs. 3 and 6) は、2 地域が連結していない運動であることを示し、つまり非ブロック化(原文は *unblocking*) されている。ベクトルは西から東へ時計回りの回転を示し、オーランド岬—ブローロ地域とブローロー—カラヴァ岬の間の構造的な不連続の仮説を支持する。同様に、パッティ湾で、Serpelloni et al. (2010) は、ブルカノーティンダリ断層が GPS ベクトルの方向のばらつきをもたらしたとした (Fig. 3).
6. 歴史地震は、震央の分布がブローロの沖合で認識された断層の方向に配列し (Figs. 3 and 4)、また、ブローロの陸地とカプリ・レオーネとの間にある北東—南西方向の断層と関連することを示す (Bigi et al., 1992).
7. さらに、イオニアン沈み込みプレートの震源と関連した、深発地震 (100–300 km) が、ブルカノーティンダリ断層の周辺では途絶える。それはブローロ沖合に記録され、ブルカノーティンダリ断層の地域的な広がりとは地

殻内でのセッティングを明らかにする。

ブローロ平野の完新世の隆起は、ブローロの海食柱と同程度のオーダーで、ブローロの陸上と内側陸棚はカップリングしており、同じ隆起速度を示すことが確認されている。1804年と1847年の2つの歴史的な絵は(Grass, 1804; Lear, 1847)、現在の海岸線の位置と比較すると、同様に海退の傾向を示した(Fig. 13)。

パッティ湾では、入手されたデータにより、テクトニック的には不連続であることが示され、これはこの地域が隣接した地域から分断されており、この地域で異なる垂直運動による隆起がもたらされたことを説明する。数値的な隆起速度はないが、モンジョヴェの *lithophaga* の穴と、パッティ湾における波浪による摩滅の場所(Fig. 9)で隆起の証拠がある。垂直運動ともう一つ指標は、海岸線から内陸に数 m の崖で見つかった「中断した」扇状地である(Fig. 6 and Fig. 9b)。扇状地の堆積物と古海浜の砂との境界は、崖の基部に位置し、標高は 1.3 m である。扇状地の最も高いところは、小川により削られ、小川は落差 12 m の滝で海へ注ぐ。

ここに、海洋地質学的データからカギとなる証拠を提示する：

1. 地震波断面図は、結晶片岩の基部はかなり変形し、隆起していることを示す。
第四紀後期の堆積物シーケンスは、西部地域に向かって薄くなり、変形していない。
2. 基盤を変形させた北西-南東の伸張性断層システムは、パッティの海食柱の隆起(Fig. 9c, d)とパッティ湾の沈水した地形(ティンダリの海食柱; Fig. 9f, g)をもたらした。
3. 等深線のデータは、 0.2° の傾斜の西北西に傾く地形を示す。
4. 低海水準期の前進性堆積物の存在は(Fig. 12g)、最終氷期最盛期の海水準よりも 27 m 低く、これは 1.25 mm/y の沈降速度を示す。この沈降は海岸線に平行な断層システムが、大陸棚に沿って働いた役割を強調する(Fig. 12g)。これらの断層が大陸棚の外側から内側を分断することは明らかで、パッティ沖での(Table 1)、異なる垂直運動の証拠である(沈降 対 隆起)。安定な地域では、沈降も隆起もせず、活動が続く傾いた大陸棚縁辺(陸上も沖合の地域も含める)のヒンジの部分にあたる。

アックエドルチからオーランド岬の間では(Fig. 6)、MIS 5.5 の海岸段丘の 0.34 mm/y の隆起速度は、完新世の隆起速度(0.36 mm/y) (Scicchitano et al., 2011b)と

調和する。結果として、MIS 5.5 から完新世までの隆起速度の増加は、隣接するシチリア地域で記録されているが、ここでは起きていない。ボローロ地域の隆起速度が、MIS 5.5 と完新世で同じだと仮定すると、ボローロの海食柱と平野で計算した完新世の隆起速度を適用すると、チポラ山 (140 m) で発見された段丘は MIS 5.5 の段丘となる。

6. 結論

アックエドルチからパッティにかけての、北東部シチリアの沿岸地域では、テクトニックな垂直運動に関する定量的なデータが欠落していたが、隆起速度とそれに関連したテクトニックなリニアメントに関する新しいデータを得た。様々な地形学的指標と生物学的指標は、海洋地質学のデータと共に、陸上と沖合のデータを対比するために使用し、算出した隆起速度あるいはまた沈降速度に対するテクトニックな寄与の理解と海岸の垂直運動の過程とそれに関連した応答の理解に役立った。

北部シチリア大陸棚縁辺全体での MIS 5.5 以後のテクトニックな垂直運動の状況において、主なテクトニックのリニアメント (パッティ東部のブルカノーティンダリ断層とアックエドルチ西部のカビリアン-カラブリア衝上断層) はこの地域を隣接した地域から分断し、異なる隆起速度をもたらした。この研究地域では、内陸から沖合までに及ぶ、北東-南西の構造の不連続が、パッティのブローローパッティ湾からカルヴァ岬オーランド岬-ブローロの地域を分断し、この分断は異なる地震活動、GPS ベクトル、隆起速度に示される。低海水準期前進性堆積体の位置は、最終氷期最盛期の汎世界海水準よりも深く (Caruso et al., 2011)、外側陸棚の沈降速度の最速を示し、海岸線に平行な断層システムの存在を提示する。これらの断層システムは、大陸棚の外側陸棚から内側陸棚を分断し、パッティの沖合で異なる垂直運動 (沈降 対 隆起) を引き起こす。沈降も隆起もない、安定した地域は、活動が起き傾動するシチリア北東部の大陸棚縁のヒンジにあたる。調査地域全域では、MIS 5.5 と完新世の隆起速度は同じで、これは他のシチリア地域と比べ対照的である。(北村晃寿・今井啓文)