

**Raised Holocene paleo-shorelines along the Capo Vaticano coast (western Calabria, Italy):
Evidence of co-seismic and steady-state deformation Cecilia Rita Spampinato, Luigi
Ferranti, Carmelo Monaco, Giovanni Scicchitano, Fabrizio Antonioli. 2014. Journal of
Geodynamics 82, 178–193.**

イタリアのカラブリア西部のカーポ・ヴァチカーノ岬海岸における隆起した完新世の古海岸
線：地震性変形と定常的変化の証拠

ABSTRACT

イタリアのカラブリア西部のカーポ・ヴァチカーノ岬周辺の地形学的海水準指標と生物学的海水準指標の詳細なマッピングは、異なる標高の4つでの完新世の古海岸線の存在、すなわち隆起の発生を示した。最も高い海岸線（PS1）は、非常に浸食された化石を含む海成堆積物で示され、現在の海水準から標高 2.2m まで達し、また、天井の標高が 2.3m のノッチにより示される。その下の海岸線 PS2 は、標高 1.8m 発見され、ヘビガイの塊の同縁、フジツボ帯と波食台で示される。海岸線 PS3 は、標高 1.4m まで達し、ムカデガイのコンクリーションの残骸、フジツボ帯、ノッチと海成堆積物を含む。最も下位の古海岸線（PS4）は、波食台とノッチから成り、標高 0.8m である。個々の古海岸線からの試料の放射性炭素年代測定より、カーポ・ヴァチカーノ岬では、最近 6000 年間に平均 1.2~1.4mm/yr の隆起速度である。我々のデータは、完新世の隆起は非対称で、岬の南西部でより大きくなり、これは更新世の段丘によって求められた長期間の変形と同じであることを示した。南西部のより大きい隆起は、北東地域に記録されていない地震性変形イベントによる大きな波長の地域的なシグナルとなり、付加的な寄与に関連しているかもしれない。私たちは 5700–5400 年前、3900–3500 年前、約 1900 年前、1800 年前以降の4回の地震性隆起変形イベントを認識し、それらが重複することで約 1mm/yr の速度となる。私たちの発見は、半島の南部周辺の断層の最近の活動、1905 年の破壊的な地震の震源域の位置に新しい制約を与える。

1. 序

カーポ・ヴァチカーノ岬は、地中海域の主要な地震の発生する領域の一つのカラブリア弧の一部であり、大規模な歴史的地震 (Boschi et al., 1995, 1997)によって特徴づけられる。ほとんどの地震イベントは、カラブリア南部のティレニア側とシチリア東部のイオニアン海岸沿いの二つのオーバーラップしている伸張帯に位置する(Fig. 1a), そして、空間的に強い隆起域と一致する。垂直運動は、更新世の海岸段丘と完新世の古海岸線に記録されている。特に、シチリア北東部とカラブリア南部では、完新世の垂直運動のデータが、生物学的指標と地形的指標と標高計測と放射性炭素年代測定によって得た(Stewart et al., 1997; De Guidi et al., 2003; Antonioli et al., 2003, 2006; Ferranti et al., 2007; Scicchitano et al., 2011a,b; Spampinato et al., 2012).

更新世と完新世のカラブリア弧の垂直運動は、2つの成因がある(Westaway, 1993; Ferranti et al., 2006, 2007)。地域的な要素で、ゆっくりとした速度で、大きな(~100 km)定常的隆起である：局地的な要素は、より限定な(~10 km)波長運動で、断層すべりによる(地震性隆起)。この研究の主な目的は、カラブリアのティレニア海岸のカーポ・ヴァチカーノ岬の隆起のパターンを精査し、地域的な変化と局地的な変化を分離することである。

カーポ・ヴァチカーノ岬の長期的な隆起は、長期間に渡って研究されているが(Miyauchi et al., 1994; Tortorici et al., 2003; Cucci and Tertulliani, 2006; Bianca et al., 2011), 完新世の海岸変形のデータは稀である(Antonioli et al., 2006, 2009)。最近のテクトニックな隆起の歴史をより制約するため、隆起した完新世の海岸線の地形的海水準指標と生物学的海水準指標による新たな詳細なマッピングは、カーポ・ヴァチカーノ岬の海岸線全域で行われた。なぜなら、海水準は海岸域の垂直運動と短期・長期の構造運動の不安定性を決定する一般的な基準データなので(Lajoie, 1986), 私たちは、汎世界的海水準と氷河性・ハイドロ・アイソスタシーのプロセスを考慮した最近公表された海水準曲線(Lambeck et al., 2011)と後期完新世の海浜の位置を比較した。

加えて、私たちは、海岸線の隆起と正断層の活動の関連性を指摘することを目指す。本論で調査した短期間の時間スケールでの局地的、地域的な成因への垂直運動の割り当ての様式と規模の分解能は、重大な地震や津波の危険がある地域での震源域の識別に大きく寄与することを示す。

2. 地質学的設定

カラブリア弧(Fig. 1)は、新第三紀—第四紀のアフリカ—ヨーロッパの衝突の間に発達し(Dewey et al., 1989)、シチリア—マグリビアン列と繋がり、イオニアンスラブの沈み込みによるロールバックにより南東に定置する(Malinverno and Ryan, 1986)。鮮新世以降、造山帯の内部の短縮構造は伸張性の断層により取って代わられた。断層は島弧の伸張方向と垂直方向のものがあり、島弧を断片化して構造的な高まりと海洋堆積盆をもたらした(Ghisetti and Vezzani, 1982)。

カラブリア西側とシチリア東部海岸に沿って正断層は、伸張方向が西北西—東南東方向に発達し(Bianca et al., 1999; Monaco and Tortorici, 2000)。活動的な伸張は、地殻内地震の発震機構(Pondrelli et al., 2006; Scarfi et al., 2009; D'Amico et al., 2010, 2011)、構造地質的解析(Tortorici et al., 1995; Monaco et al., 1997; Monaco and Tortorici, 2000; Jacques et al., 2001; Ferranti et al., 2007, 2008)、測地による速度(D'Agostino and Selvaggi, 2004; Goes et al., 2004; Mattia et al., 2009; D'Agostino et al., 2011; Palano et al., 2012)により示された。伸張性のテクトニクスは、強い地域的な隆起により壮大なひとつづきの海岸段丘の出現を伴った(Ghisetti, 1981; Dumas et al., 1987; Westaway, 1993; Miyauchi et al., 1994; Tortorici et al., 2003; Cucci and Tertulliani, 2006; Bianca et al., 2011)。海岸段丘の標高と主要な断層を横切る段丘のずれの標高は、隆起の要因となる断層運動と、地域的な運動の相対的な寄与を明らかにするために用いられている。Westaway (1993)によると、カラブリア南部の更新世中期以後の1.7mm/yrの隆起のうち、1mm/yrは、地域的な作用によるもので、残りは主要な断層の活動によるものである。

様々なメカニズムが、カラブリア弧の隆起の説明に用いられている。モデルの1つの中に、スラブのブレイク・オフ(Westaway, 1993; Wortel and Spakman, 2000), もしくは、マントルウェッジ内での対流とスラブとからの上部地殻のディカップリングのどちらかによる高密度深部物質の除去によるアイソスタティックな反応として見なされる(Locardi and Nicolich, 1988; Miyauchi et al., 1994; Gvirtzman and Nur, 2001; Doglioni et al., 2001). あるいは、隆起は、ロールバック作用の停止と、アドリアと北部アフリカの浮力のある大陸地殻の間で、カラブリアの閉じ込めにより起こされているかもしれない(Goes et al., 2004).

カーポ・ヴァチカーノ半島は、二つの南西-北東方向の副次的な正断層によって境される構造的高まりである(トロペーアとミレト断層; Fig. 2a). 南部と東部へは、ミレト断層はメシマ盆地からカーポ・ヴァチカーノ岬の地塁を分ける。北部と東部へは、雁行状のトロペーア断層とビゴ断層の間のブリアーティコの地域オーバーラップ域を示し、Tortorici et al. (2003)により北東に傾斜するリレーランプとして解釈された。北部-東部の海岸線の沖にある西南西-東北東走向で、北北西に傾斜する正断層システムの存在は(Fig. 2a), シングルチャンネル地震波解析(Trincardi et al., 1987)と深度調査(Argnani and Trincardi, 1988)から推測された。南西部では、岬はジョイア・タウロ盆地から構造的な高まりを分離する。二つの西北西-東南東の走向で、南南西に傾斜する正断層(コッコリーノ断層とニコータラ断層)で切られる。

カーポ・ヴァチカーノ岬の主体は主に古生代の花こう岩と片麻岩から成り、部分的に中新世・鮮新世の炭酸塩堆積物と陸成堆積物に覆われている(Burton, 1971). この地域は、カラブリア弧の一部として、持続的に第四紀の隆起を経験している。この隆起は複数のオーダー第四紀の浸食面、海岸段丘と古海岸線によって示されるが、それらの数や分布は研究者間で異なる(Westaway, 1993; Miyauchi et al., 1994; Tortorici et al., 2003; Cucci and Tertulliani, 2006; Antonioli et al., 2006, 2009; Bianca et al., 2011). それにもかかわらず、一般的な見解は、北東に向かって更新世の海岸段丘の標高が低くなることで示される。岬の北東への傾動が存在する。隆起した更新世の段丘に示された傾動のパターンは、カーポ・ヴァチカーノ周辺の大陸棚外縁において最終氷期最盛期(LGM)の低海水準に前進した堆積体の差別的変形によっても

反映される(Pepe et al., 2013). 高解像度音響探査断面は、堆積体が南西から北東まで移動するにつれより深くなり、大陸棚の北東への傾動と矛盾しないことを示す.

カーポ・ヴァチカーノ地域は、相対的に低い地震活動性で特徴づけられる(Fig. 1a; Rovida et al., 2011). 前世紀の2つの重要な地震のうち、1905年(約M7)の地震については4つの震央が提案されており西北西の走向の断層システムに接する(Cucci and Tertulliani, 2006; Tertulliani and Cucci, 2009), 1928年(M=5.8)の地震については、半島の南端にそったところに位置する. 特に、1905年9月8日の地震は、カーポ・ヴァチカーノ地域で甚大に荒廃させ、イタリア半島の観測史上最も強い地震の一つである(Rovida et al., 2011). Cucci and Tertulliani (2006, 2010)によると、地質的、地形的、大規模地震のデータと予測される断層運動による変形の定性的な比較から、コッコリーノ断層は1905年のイベントの震源である. 最近の地震活動から、低いマグニチュードによって特徴づけられ、この断層システム周辺に集中している.

3. 隆起した完新世の地形と堆積物：観測データ

3.1. 手法

隆起した完新世の地形と海浜堆積物はすでにカーポ・ヴァチカーノで知られているが(Antonioli et al., 2006, 2009), しかし、年代測定した体系的な研究は存在しない. 私たちは隆起した堆積物の規模と古海岸線の数を明確にするために岬の海岸線(Fig. 2b)で完璧な調査を行った. 相対的海水準の変化と隆起の歴史を含め、復元する方法は以下の通りである：(i) 地形学的海水準指標と生物学的海水準指標の詳細なマッピング；(ii) 海岸線の年代を明らかにするための物質（貝殻）をAMSによる放射性炭素年代測定；(iii) 氷河性・ハイドロ・アイソスタティックの寄与から計算された、Lambeck et al. (2011)の予測した海水準上昇曲線との標高/年代のデータの比較.

第一歩は、それぞれの露頭で、隆起に関連する地形や、堆積物の特徴、例えば、海浜堆積物の下面と上面、藻類の塊、ムカデゴカイの塊、フジツボ帯の分布とノッチについての最大高度

の測定である(Table 1). 調査期間の間, 海の状態はいつも波がなく静かであったので(Cetraro buoy, RON—Rete Ondametrica Nazionale;www.idromare.it), 私たちは, 海水準測定の際, テープを参考にすることで, より正確な精度を得ることを選んだ. その後, トロペーアの検潮場(www.wxtide32.com)のデータと気象のウェブサイト www.wunderground.com のデータを用いることで, 平均海水準に対する潮位と気圧を補正した. 有意な不確かさが, 海水準に対するマーカーの位置の過程から生じるかもしれないが, マーカーの標高の誤差は数 cm オーダーなので無視できる (参照 4.1, 5.1).

以下, ヨッポロからトロペーア間の海岸沿いの 6 か所の調査地点について, 南から北に紹介する(Fig. 2b): ヨッポロ, コッコリーノ, リカーディ, グロッティチェッレ・カーポ・ヴァチカーノ, S.ドメニカ, トロペーア. それぞれの地点での観察の議論は, AMS による放射性炭素年代測定の結果とともに行う. 放射性炭素分析は CIRCE Laboratorium (Caserta, Italy) で行われた. 放射性炭素年代は, 約 400 年の期間の世界的海洋リザーバー補正を編入した, ソフトウェア CALIB 6.0 software (Stuiver et al., 2011)で校正した.

3.2. ヨッポロ

ヨッポロの海岸はカーポ・ヴァチカーノの南東部から約 9 kmの場所に位置する(Fig. 2b). この海岸は, 直径 2–5 m の花コウ岩の巨礫で特徴づけられ, 花コウ岩は過去の地すべりにより堆積した. トッレ・サラチーナ地域では(Fig. 3) 岩盤に化石を含む海浜堆積物が発見され, その標高は 1.5–1.8 m である(Table 1), ている. 海浜堆積物は, 中程度の分級度の黄色の砂で固結しており, 軟体動物を主体とする貝殻を含んでおり, パッチ状に分布する. 堆積物と化石が均質であるということは堆積の間, 潮下帯の海浜環境に変化しなかったことを示唆する. 腹足類の *Columella sp.* (CV1)を, 標高 1.8m の堆積物から採取し, 5756 ± 114 cal BP の年代であった(Antonioli et al.,2006). 同じ地域で, Antonioli et al. (2006)は過去のヘビガイの化石を発見した; 軟体動物のサンプルは標高 1.8m から採取され, 5455 ± 124 BP の年代を与えた(CV2; Table 1). プンタ・デロ・スピノーゾの北部に位置する(Fig. 3), 幅数 m の波食台は,

標高約 1.40 m にエッジがあり、堆積物あるいは生物の塊を伴う (Table 1).

3.3. コッコリーノ

コッコリーノ海岸の北西部 (Fig. 2b) では、高い崖と小規模の海浜が交互に存在することで特徴づけられる。この地域では、結晶片岩の岩盤で破碎によってかなり変質しており、結晶性の岩盤から成る過去の海水準指標の発達と保存のための理想的な場所ではない；しかしながら、局所的にイル・ポルティチェッロ周辺では (Fig. 4a)、海浜堆積物が広範囲に露出し、標高約 1.60 m と約 1.90 m の高さの裂かの中によく保存されている。堆積物は、淘汰の悪い砂層とかけていない貝殻または断片化した生物遺骸片（軟体動物と有孔虫とコケムシ）を含む。

同じ地域で、*Chthamalus depressus* から成る約 40 cm の幅のフジツボ帯は、最大 1.94 m 高さまで観察された (Table 1; Fig. 4b)。フジツボの化石の殻 (CV3; Fig. 5b) はフジツボ帯の上部縁から採取され、 3903 ± 151 cal BP の年代を得た。私たちは、約 40 cm の幅で帯が形成され、生きている *C. depressus* が同様に、現生の底生群集を特徴づけていることに注目した。

3.4. リカーディ

リカーディの海岸地域はカーポ・ヴァチカーノの南東部から約 2km のところに位置する (Fig. 2b)。海岸は多数の巨礫の地すべりにより特徴づけられるが、スコギリオ・ギャレーには過去の隆起した海岸線の残存物が見つかった (Fig. 4a)。この海浜堆積物は、固結し、欠けていない貝殻または断片化した生物遺骸片が豊富である。特に、海浜堆積物は、標高約 1.50 m と 1.80 m の間に見られたから観測された (Table 1; Fig. 4c)。二枚貝の化石 (CV4) は、堆積物の下部から採取され、その標高は 1.5 m で、 5701 ± 112 cal BP の年代を得た。同じ地域で厚さ 40 cm の海浜堆積物の下部は、標高 0.55 m と約 1.0 m で発見された (Table 1; Fig. 4c)。この堆積物は、淘汰の良い粗粒砂層と貝と浅海の軟体動物の断片を含む。それより低いところにある、波食台の最大標高は約 0.4 m である (Table 1; Fig. 4c)。

3.5. グロッチェッレ・カーポ・ヴァチカーノ

カーポ半島の名前の由来となったカーポ・ヴァチカーノの小さな岬に沿って行われた調査によって(Fig. 2b), 古海水準のいくつかの指標が見つかった。海岸線が深く湾入している, カーポ・サンタ・マリア地域では(Fig. 6a), *C. depressus* から成る保存状態の良いフジツボの化石帯は, 岩盤のくぼみの内側で発見された(Table 1; Fig. 6b)。その帯は約 50 cm の大きさで, その最上部は標高約 2.50 m に達する。この帯の中で, フジツボ化石の殻は標高 2.48 m から採取され, 1856 ± 83 cal BP の年代を得た (CV5; Fig. 5c)。同地域では, 波食台は標高約 50 cm から現在の海岸線までに至る。グロッチェッレの砂質堆積物のある湾(Fig. 6a)は, 2つの波食台の存在によって特徴づけられる(Table 1; Fig. 5d)。より高いほうの波食台は, 約 10 m の幅で, その内部の端は標高約 1.40 m の高さである; より低い波食台は数 m の大きさで, 標高約 0.50 m から現在の海岸線まで伸びる。

カーポ・ヴァチカーノでは(Table 1; Fig. 6a), 海浜堆積物とともに, パッチが標高約 1.50 m の高さで発見され, これは過去の殻の残骸を示すであろう。ムカデガイの殻が幅 10 cm (Fig. 6c)。ムカデガイの塊の最上部から採取されたヘビガイサンプルは, 3486 ± 99 cal BP の年代を示した(CV6; Fig. 5e)。約 20 cm の厚さの海浜堆積物は最大標高約 1.0 m まで達する(Table 1; Fig. 6c)。堆積物は粗粒と細粒砂からなり砂層と欠けていない貝殻または断片化した生物遺骸片(軟体動物と有孔虫とコケムシ)を含む。

3.6. サンタ・ドメニカ

サンタ・ドメニカはカーポ・ヴァチカーノの北東側に位置する(Fig. 2)。海岸は, 中新世の石灰質砂岩を削り, このため溶食地形, 例えばノッチがよく発達している。ロ・スコリオでは, 2つのノッチが小島の東部で明瞭に識別できる(Table 1; Fig. 5f)。下部のノッチはよく発達し, 保存されている。それは, 幅約 1 m の波食台を伴うが, 生物学的指標は観察されなかった。下部のノッチの天井の標高は約 0.90 m で, 最もくぼんでいるところは標高約 0.70 m である(Fig. 7b)。 *C. depressus* のフジツボの化石は標高 1.50 m で発見された。上部のノッチは下部のも

のより大きく、広く、天井は約 2.30 m である(Fig. 7b). 小島の東側は、約 70 cm 幅の波食台で特徴づけられ、標高約 0.40 m から現在の海岸線まで広がっている(Fig. 7b). 北側では(Fig. 7a), より高い波食台の内側のエッジは標高約 1.40 m である.

ペトリ・イ・ムリヌでは(Fig. 7a), 保存状態の良いノッチは、部分的に海浜堆積物におおわれる。最大のくぼみは、標高 0.65 m と測定されが(Fig. 7c). いくつかの穿孔二枚貝の穴があるが、穴の中には貝殻は見られない。幅約 20 cm のフジツボの化石帯は、標高 1.30 m の高さで、このノッチの上部に存在する。フジツボ化石の殻は、帯の上部、標高 1.26 m から採取され、 2914 ± 137 cal BP の年代を得た(CV7; Fig. 5g). 東部に向かうと、2つの保存状態の悪いノッチがある(Table 1). 2つのノッチの天井は、それぞれ、標高約 1.20 m と約 2.40 m と計測された。

3.7. トロペーア

北東部では(Fig. 2b), トロペーアの海岸線は、砂質の海岸とカーポ・クロースとして知られる。岩礁のある岬により特徴づけられる(Fig. 7a). 生物学的指標のない2つのノッチは、カーポ・クロース側の北東側にある(Table 1). 下部のノッチの最大のくぼみは、標高 0.60 m と測定された.; 上部のノッチは下部のノッチよりも大きく、幅が広く、天井は約 1.20 m である。もう一つの保存状態の悪いノッチは、より標高が高いところで観察され、おそらくサンタ・ドミニカの上部のノッチに対応するのだろう。

カーポ・クロース側の北西部に沿いで、*C. depressus* が大部分を占める幅約 40 cm のフジツボ帯が示され、最大標高 3.0 m まで観察される(Table 1; Figs. 5h and 7d). 幅約 30 cm の石灰藻類の塊の化石は、*Lithophyllum byssoides* から成り(Table 1; Fig. 5h), 標高約 2.70 m にあるフジツボ帯の下で発見された(Fig. 7d).

4. データの解釈

4.1. 古海岸線指標

カーポ・ヴァチカノ半島の南西海岸における隆起した海浜堆積物と潮間帯の生物化石の放射性炭素年代とフィールド観察の統合により、私たちは 4 つの個別の完新世の古海岸線を識別できる。古海岸線は、古い時代の方が高い高度であり、上から下に向けて、PS1 から PS4 である (Table 2)。これらの海岸線がすべて観察できる場所はない。それにもかかわらず、私達は、野外の層序学的関係、観察されたデータによる古等深線の妥当な修正、絶対年代の制約を用いて、個々の海岸線へ地形と堆積物を対応させることが出来た。

それぞれのサイトで、個々の指標は、以下で簡単に議論されるように、正確さと確からしさは異なるが古海岸線の位置の制約を与える。幸運なケースでは、指標は古海水準の良い指標で、考慮すべきは精度の曖昧さのみである。他の場合で、適用以前に必要なのは古水深の仮定の補正である。私達は補正または未補正の指標に分けて、これからの議論における位置の不確実性は無視した。測定の不確実性は、古水の深さの補正と精度の不確実性を含んで推定された。

化石により確立した過去の海水準の位置の不確実性は、それらの個々の環境条件にかなり依存して、波の方向に対する露出、あるいは保護の程度は重要である。Peres and Picard (1964) によると、十分に制限された古海水準の位置は、ノッチのような地形学的指標と潮間帯の動物により提示される：すなわち(i)ムカデガイの *Dendropoma petraeum*、その海水準に対する位置はその地域の潮間帯下部に制限される；(ii)石灰藻類の塊、*L. byssoides*（以前は *Lithophyllum lichenoides* として知られる；Faivre et al., 2010, 2013)、この指標は、平均海面から低潮位の間潮間帯下部の環境であり不確実性はほとんどない；(iii) フジツボの *C. depressus* は一般的に上部潮間帯の生物群集である。

フジツボ帯の厚さは、平均潮位幅より上の効果と局所的な波の飛沫帯の効果の複合効果を反映する。保護された場所では、この指標に関する海水準の不正確さは、無視でき (0.20 m) 補正は適用しなかった。しかしながら、開けたベンチや波が打ち上がるチャンネルのようなより露出した場所では、生きているフジツボは高さ 1 m 以上に達し、保護された場所よりも、数十 cm 上まで分布する。このように、露出した場所では、私達は 0.50~1 m まで補正值を採用した (Table 2)。

一方、海浜堆積物と波食台は形成される水深が分からないので、低い精度の海水準指標である。海浜堆積物について、均質な堆積物と化石種の構成の内容と保存の度合いにより提示され、初生の位置の証拠に基づき、私達は、それが海水準よりも上にあると嵐で浸食されたと考えて、+0.40 m の補正を採用した(Table 2)。現在における汀線の直下の海底の一般的な傾斜に基づき、私達は、波食台も 0.40 m の補正を採用した。

次に、それぞれの異なる海岸線について、私達は、層序学的位置、入手できるところでは絶対年代の制約、古深度の補正を組み合わせ、地形と堆積物を対応付けて定義する。

PS1 は、化石を含む海浜堆積物やノッチ、そして、石灰藻類とフジツボの殻で示される(Table 2)。化石を含む海浜堆積物の残骸は、ヨッポロとリカーディの間の海岸に沿って標高約 1.80 m に存在する。ノッチは、あまり発達しておらず、保存状態も悪く、天井は標高約 2.30 m から 2.50 m である。石灰藻類とフジツボの殻の残骸は、トロペーアでは、標高約 2.70 m から 3.0 m の高さで発見された。

最も高い海岸線と違い、3 つの下位の古海岸線は相対的に保存状態が良い。PS2 は、ヘビガイとフジツボ帯と波食台示される(Table 2)。 *Dendropoma sp.* から成るヘビガイのコンクリーションは、ヨッポロの標高約 1.80 m で発見された。 *C. depressus* から成るフジツボ化石の殻は、ココリーノの標高約 1.90 m で観察された。一方、波食台の内部エッジは、標高 1.40 m と計測された。

PS3 は、化石を含む海浜堆積物、フジツボとヘビガイの帯の残骸と、ノッチで示される(Table 2)。化石を含む海浜堆積物は、リカーディとカーポ・ヴァチカーノの間の標高約 1.0 m で発見された。フジツボ化石帯の残骸は、カーポ・サンタ・マリアとサンタ・ドメニカにおいて、それぞれ標高 2.50 m と 1.26~1.50 m で観察された。 *Dendropoma sp.* から成るヘビガイのコンクリーションは、カーポ・ヴァチカーノの標高 1.40~1.54 m で発見された。保存状態の悪いノッチの天井は、サンタ・ドメニカとトロペーアで標高約 1.20 m と計測された。

PS4 は波食台とノッチで示される(Table 2)。波食台の内部のエッジは、リカーディとサンタ・ドメニカの間の海岸に沿って存在し、標高約 0.40 m と測定された。ノッチは、PS1, PS2,

PS3 よりも保存状態の良いものが、サンタ・ドメニカとトロペアで観察された。その最大のくぼみは標高約 0.60 m から 0.70 m の幅で測定された。後述する年代の制約に基づき、PS4 は、Anzidei et al. (2013)により、PS4 の見られる場所から北東に 15 km の（ブリアーティコ近くのスコギリオ・ガレーア， Fig. 2a）カーポ・ヴァチカーノ半島の北部の標高約 0 m にあるローマ時代の考古学的な指標（水槽）と関連付けできる。正方形の穴の一つで発見された木製の柱の断片の放射性炭素年代測定は、 1806 ± 50 cal BP の年代を得た（Anzidei et al., 2013）。

4.2. 古海岸線の年代

個別のサイトから採取された試料の、放射性炭素の年代を統合することで、による古海岸線の年代に絶対的な制約を与えることができる（Table 3）。PS1 について、ヨッポロの海浜堆積物の最上部から採取した CV1 のサンプルは(Fig. 2b)，較正年代 5756 ± 114 BP を提供した（Antonioli et al., 2006）。この海岸線に関して同様の年代 5701 ± 112 cal BP が、私達の用いたリカーディの露頭から採取した、二枚貝のサンプル CV4 (Fig. 4c) から得られた。これらの制約に基づき、PS1 は約 5700 年前まで活動的であった(Table 3)。堆積物の基底から年代が得られない為、海岸線の開始年代は制約できない。

PS2 の開始の年代は、ヨッポロで約 5400 年前（サンプル CV2）であり、PS1 の形成終了と一致する(Table 3)。PS2 の期間は、コッコリーノの露頭からの放射性炭素年代の結果から示され(Fig. 4b)，そこのフジツボの殻(サンプル CV3)は 3903 ± 151 cal BP と計測された。これらの制約に基づき、海岸線 PS2 は、5400 年から 3900 年前の間、最小の形成期間は約 1500 年間であった(Table 3)。

同様に、PS3 の開始は PS2 の停止直後である。グロッチェッレ・カーポ・ヴァチカーノの PS3 のヘビガイの殻の最上部から採取した(Fig. 6c)，サンプル CV6 からは、PS2 の中断した約 3900 年前の年代と非常に近く、 3486 ± 99 cal BP 年代を得た(Table 3)。PS3 において、より新しい年代が、サンタ・ドメニカの露頭のフジツボの殻の(Fig. 7c)，サンプル CV7 から 2914 ± 137 cal BP の年代がもたらされた。海岸線のさらに新しい年代は、グロッチェ

ッレ・カーポ・ヴァチカーノ(Fig. 6b)のフジツボの殻(サンプル CV5)から提供され、その年代は 1856 ± 83 cal BP である。私達は、海岸線 PS3 が約 3500~1900 年前、最小の期間が約 1600 年間、海岸線であったと結論付けた(Table3)。

残念ながら、海岸線 PS4 の露頭は、年代を設定することはできなかった。海岸線 PS4 の開始の年代は PS3 の停止年代の 1900 年前以降である(Table 3)。注目すべきは、この最大年代の制約は、カーポ・ヴァチカーノ半島の北部側、スコギリオ・ガレーラ(ブリアーティコ)の魚を入れる水槽で測定された年代と非常に近い値で(1806 ± 50 cal BP; Anzidei et al., 2013)、PS4 に関連した信頼できる海水準指標と考えられる。

4.3. 古海岸線の明確な標高

隆起した完新世の指標に関する標高と放射性炭素年代の制約を組み合わせた検査は、半島周辺の各場所において、4つの海岸線の標高を設定する(Table 3; Fig. 8)。ヨッポロとカーポ・ヴァチカーノの間の南西部での PS1 の海水準の標高は 2.20 m で、これは、サンタ・ドメニカとトロペアの間、北西海岸の PS1 の標高 (2.30 m) と一致する(Table 3; Fig. 8)。PS2 の標高と PS3 の標高もまた、岬の南西部と北西部で同じであり、それぞれ、標高 1.80 m と約 1.40–1.30 m を示す(Table 3; Fig. 8)。あいにく、PS1、PS2 と PS3 の位置が変化するか、または、南部から北部まで同様の地形変動があるかを断定するために必要な半島北部(ブリアーティコ地域)のデータがない。

一方で、より新しい古海岸線(PS4)の標高は、カーポ・ヴァチカーノからブリアーティコ地域にかけて明らかに変化する。Anzidei et al. (2013)のデータの私達の評価に基づき(Table 3; Fig. 8)、本研究で立証したように、PS4 の標高は半島の南西と北西の領域で約 0.70~0.80 m で、ブリアーティコでは約 0 m に低下する。

5. 議論と結論

5.1. 氷河性・ハイドロ・アイソスタシーの補正と古海岸線の隆起速度

後期完新世のカーポ・ヴァチカーノ海岸沿いで発生した垂直変動の合計を推定するためには、海水準変動の補正をしなければならない。この目的で、標高と年代のデータを完新世の地域的海水準上昇曲線(Lambeck et al., 2011)と比較した。イタリアの 40 サイトからのデータを較正した予測モデルを使用して、Lambeck et al. (2011)は、最終氷期以降の氷床の融解による世界的な海水準上昇(海水準変動)に加えて、氷河サイクルの間、氷河と融水による荷重/非荷重に起因する地殻の垂直運動を計算した。これらの荷重の補正の中で、氷河融解は、最終氷期の間、北半球氷床の周囲で形成された広範囲の地形的高まりの沈降を引き起こし、溶けた水は、海洋と陸棚の溶けた水の重みによる沈降をもたらす。本論の地域は、氷河・ハイドロ・アイソスタシーと海水準変動の寄与があわさる。

海水準上昇の補正と海水準より上で隆起貝層の観察から、古海岸線が経験した隆起の総計を、Fig. 9 と Table 4 に示す。測定の誤差は、隆起速度の決定に対し影響は小さい。明らかに、全ての完新世の海岸線は、予測された位置よりも上に移動している。垂直変動は、データの位置と海水準曲線のモデルとの距離となる。カーポ・ヴァチカーノ地域で調査された古海岸線の垂直変動量と年代を統合すると、平均隆起速度は PS1 で約 1.4 mm/yr, PS2 と PS3 で 1.3-1.2 mm/yr であった。PS4 について、確定な年代を設定する制約がないため(上記の通り)、隆起速度の正確な推定は不可能である。しかしながら、最大の年代を約 1800 年前と仮定すると、約 1.1 mm/yr の隆起速度をカーポ・ヴァチカーノ半島から得ることができ、この値は北へ向かって減少する。なぜならば、カーポ・ヴァチカーノ半島の北のブリアーティコ地域での隆起速度は約 0.7 mm/yr だからだ(参照, Anzidei et al., 2013)。

5.2. 後期完新世の変異の歴史：地震性隆起と定常的隆起

隆起した完新世の海岸線とこの地域専用の海水準曲線との統合は、カーポ・ヴァチカーノでの相対的海水準変動と累積性構造地質的変位の影響を調査できる、優れた機会を提供する。現在の海水準より上にある 4 つの海岸線の現在は、それらの突然の高い場所への移動に合わせて、瞬間的な隆起イベントを示し、テクトニックに活発な場所では、通常、このような隆起

は、地震性の断層変位による(Lajoie, 1986; De Guidi et al., 2003; Ferranti et al., 2007, 2008; Scicchitano et al., 2011a,b; Spampinato et al., 2012). 地震起源の急激かつかなりの変位は、ノッチ、フジツボ帯、ヘビガイの殻、石灰藻類の塊の保存と調和的である。これらの海水準の地形は、隆起が定常的な場合、波の作用によって浸食される可能性が高いが、隆起が急激で隆起量が大きい場合、保存される機会がある。

観察された制約に基づき、私達は4回の地震性イベントを認識する(Table 5a; Fig. 9). これらのイベントによる、垂直変動量は、PS1とPS2の標高(イベントI)、PS2とPS3の標高(イベントII)、PS3とPS4の標高(イベントIII)と現在の海面からのPS4の高さとの違いから決定される。イベントIの年代の不正確さは約5700~5400年前の間の約300年の期間に限定される。私達は、約5700~5400年前の間に地震性イベントがPS1を海面状に隆起させて、PS2の海岸線の開始をもたらしたと結論づけた。このイベントIの垂直変動量は、PS1とPS2の標高の差異により決定され、カーポ・ヴァチカーノの南西部では約0.4 mで北西部では約0.5 mと異なる(event I; Table 5a).

その後の急激な変位(event II; Table 5a)は、3900~3500年前の間で、PS2の停止とそれと同等のPS3の形成で示される。このイベントの垂直変動量は、南西部では約0.4 mと北西部では約0.5 mであり、これはイベントIと同様である。

最後に、約1850年前の地震イベントでPS3が隆起し、PS4の形成が開始する。このイベント(event III; Table 5a)の垂直変動量は、PS3とPS4の標高の差異で決定され、南西部では約0.5 m、北西部では約0.6 mである。

同様に、PS4は最近の海岸線と明確に分けられ、これはより新しい地震性隆起があったことを示唆する。残念ながら、このより変動の年代は、海岸線の停止と現在の海岸線の開始に関する放射性年代の制約の欠如で、調査地域では決定出来なかった。カーポ・ヴァチカーノの北部ではAnzidei et al. (2013)の結果と対比する使用することで、私達は、PS4は約1800年前以降に隆起したことのみを示す。

カラブリアン弧の一部、カーポ・ヴァチカーノで、地震性イベントに加えて、更新世から完

新世の間に定常的隆起を経験したことが知られている(Westaway, 1993; Ferranti et al., 2007, 2010; Cucci and Tertulliani, 2006). そのため, 本論で研究した完新世の古海岸線の発達(最近~6000年前)の期間, 定常的な隆起の正確な見積もりも, Lambeck et al. (2011)の海水準曲線を用いて求めることができる.

放射性炭素年代の結果は, PS1 は約 5700 年前まで海岸線だったことを示す. 残念ながら, PS1 の発達期間における, 定常的な隆起の見積もりはより複雑である. なぜならば, 海岸線の形成開始に関する年代の制約がないからだ. しかしながら, サンタ・ドメニカではノッチが中新世の砂岩層に約 2.3 m の高さに見られ(Fig. 7b), これは PS1 の発達の間, 海水準に対するノッチの位置が固定されたことを意味する. すなわち, 海面の緩慢な上昇時に, 相対的海水準は変化しない状況だったのだ. 同様の発見は, カラブリアン弧に沿った他の海岸でも観察され(Ferranti et al., 2007; Scicchitano et al., 2011a; Spampinato et Spampinato et al., 2012), 長期間の海岸線の形成を可能とするには, 定常的地殻の隆起速度と海面上昇速度が一致していることを意味する. 海水準曲線の予測に基づき(Fig. 9), 私達は, PS1 は約 0.4~0.5 m 海面から急激に隆起する前に, 約 1.2 mm/yr の速度で定常的に隆起した主張する.

PS2 の期間から入手した正確な年代の制約によると, 最初の地震性イベントの後で PS2 の形成が開始され, 約 5400~3900 年前の 1500 年間に形成された. PS1 と同様に, PS2 の指標は(Fig. 8), この形成期間の海水準に対して, かなり安定していたことを示す. Lambeck et al. (2011)によると, 約 5400~3900 年前では, 海水準は約 1.0 mm/yr の速度で上昇した (Fig. 9). 従って, 定常的な隆起は約 1.0 mm/yr であり, それで, 海岸線の状態が維持された. その後, 約 3900~3500 年前の間に, PS2 はイベント II で隆起した.

統合した放射性炭素年代の結果は, PS3 は約 3500~1900 年前の約 1600 年間に海岸線であったことを示す. この期間, ムカデガイの塊は海浜堆積物の最上部の約 1.5 m で形成され (Fig. 6c), フジツボ帯は標高約 1.4 m に形成された(Fig. 7c). ノッチは, 標高約 1.3 m に形成され, 約 1600 年間に海水中に対する位置が固定されたことを意味する. すなわち, 海水準の緩慢な上昇時に, 相対的海水準は一定であったのだ. これは, 定常的で地域的な隆起が海水準上昇の

速度とほぼ同じ速度であったことを示唆する。予測された海水準曲線に基づき(Fig. 9), 私達は、イベントⅢにより突発的な隆起の起こる以前に、PS3が約3500~1900年前に約0.8 mm/yrの速度で定常的に隆起したと主張する。

調査地域ではPS4の存続期間は制約されない。カーポ・ヴァチカーノ半島の北部、ブリアーティコで、PS4は最近~1800年前に形成され、地震性隆起は経験していない(Anzidei et al., 2013)。海水準曲線に基づき(Fig. 9), この地域の隆起速度は海水準速度と同じ約0.7 mm/yrである。ブリアーティコでは地震性のシグナルの干渉はないので、地域的な変形速度はかなり制約される。しかしながら、カーポ・ヴァチカーノの南西部と北西部のサンタ・ドメニカとトロペアでは、ノッチと波食台が砂岩を削り(Fig. 7c), 南西と同じ潮間帯の地形を作っていることなら、年代が不明の地震性イベント(イベントⅣ)により、約0.7 - 0.8 m隆起が起きている。ブリアーティコで決定された定常的な隆起速度はかなり確かであり、カーポ・ヴァチカーノの他の地域の完新世隆起速度と有意な差があることを示唆するデータはない。そして、イベントⅣの隆起量はイベントⅠ, Ⅱ, Ⅲ, Ⅳと同様あるいはわずかに高いと仮定すると、イベントⅣはごく最近発生したと思われる。

5.3. 地震の地体構造への影響

カーポ・ヴァチカーノ地域を特徴づける、大きな歴史地震の様相(Rovida et al., 2011)と、破滅的な1905年の地震イベントの震源周辺についての議論(Galli and Bosi, 2002; Cucci and Tertulliani, 2006, 2010)において、我々の研究の結果は、重要な地震の地体構造の含蓄をもたらす。1905年のイベントである大規模な地震の震央の場所は、研究者で一致せず、この曖昧さはタイムリーな重要性の寄与を我々に与える(Fig. 1; この地震についての不確実性が評価された。参照, Tertulliani and Cucci, 2009)。

過去の地震が後期完新世の海岸線をずらした同発見は、活動的な構造運動による地震性変位はカーポ・ヴァチカーノで最初に記録された。特に古い3つのイベント(0.4-0.6 m)に関しては、1回のイベントの垂直スリップが同じであることは、これらの海岸線の変位の原因が同じ

で、そして沖合に位置することを示す。

4つのイベントで同様の垂直すべりが起きたことは、エネルギーの解放が同じであることを示唆する。だが、私達は、海岸での観察に基づいて、地震の規模が同じかどうかを明らかにすることはできない。なぜならば、震源の位置や形態が分からないからだ。しかし、観察できるほどの地形的シグナル(e.g. De Guidi et al., 2003; Ferranti et al., 2007, 2008; Scicchitano et al., 2011a; Spampinato et al., 2012)を残すには、古地震の規模はかなり大きかったはずだ。イベント I から III の再発の間隔は(Table 5), 約 1800 年ほどである。この追加された証拠は、イベント IV は、より古いイベントと同程規模かわずかに規模が大きく、最近のものであり、1905 年地震によると思われる。地震性イベントがブリアーティコで記録されていないという事実は、震央と震源に関する位置の重要な含蓄を与える。私達の結果に基づくと、1905 年の地震と震源、過去の地震性イベントの震源は、北部ではなく、半島の沖合の南西部、または北西部に位置するだろう。

1905 年の地震の震源は、更新世の強烈な活動で特徴づけられる(Tortorici et al., 2003), 半島南部で境する断層(e.g. コッコリーノ断層)と一致するという考えがある(Cucci and Tertulliani, 2010)。しかしながら、私達の研究で、以下で詳述するように、この断層は後期完新世には有意な活動がないことを示した。カーポ・ヴァチカーノ, リカーディ, コッコリーノは断層の北に位置し、下盤に属するのに対し(Fig. 2), 南部のヨッポロは、断層の南側にあり上盤に位置する。これらの地域の完新世の海岸線において、断層が跨いでいる場所で同様の標高にあることという観察(Fig. 8), さらに重要なのは断層をまたいで同様の隆起速度を得たことは(Table 4), その断層が後期完新世には活動していないことを示唆する。この結果は、コッコリーノ断層があると推定される大陸棚において、LGM (約 20000 年前) の低海水準堆積体に断層のズレがないとする、Pepe et al. (2013) の発見と調和的である。これらの観察データを統合すると、半島の南西部側のコッコリーノ断層は非活動的で、最近の地震活動で特徴づけられるニコテラ断層が震源の候補となることを示唆する。

北村晃寿・今井啓文