

1 Radiometric dates of uplifted marine fauna in Greece: Implications for the interpretation of recent
2 earthquake and tectonic histories using lithophagid dates

3 ギリシャの隆起した海棲動物群の放射性年代:二枚貝イシマテガイ亜科データを用いた現世の地震と構造発
4 達史の解釈に対する含蓄

5 B. Shaw, J.A. Jackson, T.F.G. Higham, P.C. England, A.L. Thomas. 2010, Earth and Planetary Science
6 Letters 297, 395–404.

7
8 要旨

9 西暦 365 年の大地震($M_w > 8$)によってクレタ島西部は隆起した。それにより海棲生物によって覆われた海
10 岸線と、その下の 10 m に及ぶ海底が露出した。古海岸線と現在の海水準の間に露出するサンゴとコケムシ
11 の放射性炭素年代は、測定誤差範囲内で互いにそして地震の年代と矛盾しない。しかし、同じ場所で見つ
12 った穿孔性二枚貝 *Lithophaga lithophaga* の放射性炭素年代は、少なくとも 350 年から最大 2000 年まで、
13 それらを海水準より上に隆起させた地震の年代よりも古い。これらの結果は、構造地質学、古地震学の研究
14 における二枚貝イシマテガイ亜科の放射性炭素年代の使用を制限する二つの重要な効果を明らかにする。一
15 つ目は、イシマテガイ亜科の異常に高い保存ポテンシャルにより、そのままの状態かつ生息姿勢のまま、
16 死後長い間残り、一方、二枚貝の穿孔する場所では最終的な隆起まで二枚貝が穿孔し続けるということであ
17 る。二つ目は、私たちが年代の分かっている博物館の標本の放射性炭素分析で確認したのだが、イシマテガ
18 イ亜科が穿孔する石灰岩の古い (^{14}C のない) 炭素を貝殻に取り込んでいることである。これらの二つの効
19 果は、クレタ島やギリシャ中部において重要で、イシマテガイ亜科の放射性炭素年代がそれらを露出させた
20 隆起イベントよりも最大で 2000 年古い値をもたらす。これらの効果を理解することは重要である。なぜな
21 らイシマテガイ亜科は他の海棲生物よりも大量に見つかり、隆起の年代決定に使われるからだ。この研究は、
22 それらで隆起イベントの回数を区別したり、あるいは 1000 年より精度良く年代を決定したり、観察された
23 隆起が一回のイベントによるか複数回のイベントによるかを区別するのに使うのは適当とはいいたいこ
24 とを示す。しかしながら、これらの不確実性を評価すれば、イシマテガイ亜科の年代は次の仮説に矛盾しな
25 い。その仮説は、ギリシャでは海水準の数メートル以内の最も高い顕著なノッチと、露出したイシマテガイ
26 亜科の孔が、最終氷期最盛期の後の急速な海面上昇に続く海水準が比較的安定した～6000 年前に形成され
27 たというものだ。

29 1. 導入

30 海水準は長期間、安定することはあまりないが、第四紀後期の、海水準変動の動きはよく理解されており、
31 活動的な構造学的プロセスに関する無数の研究、特に後期完新世の相対的安定性は沿岸地域の古地震の研究
32 に年代を入れる指標として広く利用されている(e.g. Wallace, 1986; Yeats et al., 1996). これらの海水準の
33 年代指標としての利用は、ギリシャが地球上の大陸地域で最も速い変形地域の一つであることを良く説明し
34 (McKenzie, 1978; McClusky et al., 2000), そこでは海岸線の上昇が、エーゲ海では活断層・正断層の下盤
35 の隆起(e.g. Jackson et al., 1982; Armijo et al., 1996)とエーゲ海と地中海の間の沈み込み帯の上盤の隆起
36 (e.g. Laborel et al., 1979; Thommeret et al., 1981b; Pirazzoli et al., 1996)が見られる。これらの場所での隆
37 起速度は、第四紀後期の海水準曲線と「隆起した海岸段丘のシーケンス」との対比(e.g. Armijo et al., 1996;
38 De Martini et al., 2004; McNeill and Collier, 2004)あるいは、更に新しいタイムスケールにおける、放射性
39 元素を用いた隆起した海棲生物の直接の年代決定によるもの(e.g. Laborel et al., 1979; Papageorgiou et
40 al., 1993; Laborel and Laborel-Deguen, 1994; Pirazzoli et al., 1996)か、どちらかにより推定されている。
41 これらの手法の二つ目が本論文で主となり、特に古地震学的な目的(つまり、歴史地震と観察された隆起と
42 の観察の関連性)における放射性年代の使用と精度には限界のあることを示し、その限界はこれまでほとん
43 ど認識・理解されていなかった。

44 この研究は、Shaw et al. (2008)による、西暦 365 年の地中海東部での大地震($M_w > 8$)の科学調査に起因し
45 た。この地震は長い間、古海岸線を最大~10 m の高さまで隆起させ、クレタ島南東部の海岸線の傾動の原
46 因として疑われてきた(Pirazzoli et al., 1996; Stiros and Drakos, 2006)。この隆起が、長期間に徐々にとい
47 うよりも、本当に一度のイベントによって起きたということを確認する試みの中で、Shaw et al. (2008)は、
48 現在の海水準と「隆起した古海岸線」との間の隆起した海棲生物の放射性炭素年代を得た。彼らはサンゴと
49 コケムシは全て、西暦 365 年の大きな歴史地震による隆起と矛盾しない放射性炭素年代を示すことを発見
50 した(誤差内、そして放射性炭素年代から暦年代に変換後の年代)。しかし、彼らは隆起した穿孔性二枚貝
51 *Lithophaga lithophaga* の 14 の放射性炭素年代は全て、西暦 365 年よりもかなり古く(誤差を考慮しても最
52 大 2000 年)、矛盾のない年代がサンゴやコケムシの年代よりも少なかったことを示した。

53 イシマテガイ亜科は地中海とエーゲ海に広くかつ多く分布し(Galinou-Mitsoudi and Sinis, 1995), そし
54 て隆起した海岸線でサンゴやコケムシよりもはるかに多く保存されている。従って、それらは隆起速度の推
55 定によく使われ、Shaw et al. (2008)によって明らかにされた、それらの年代とサンゴやコケムシの年代の
56 間の矛盾はそれゆえに非常に重要であり、隆起速度や隆起イベントのタイミングを限定するのに使われるそ

57 れらの年代の限界についての疑問を提起する.

58 この研究で我々は, このような海棲生物から得た放射性年代の解釈に対する二つの効果の重要性を論証す
59 る. 我々は, ギリシャ中央部の Corinth 湾や Evia 湾の伸張性の地溝システムにおける完新世の垂直変動速
60 度の検討によって, これらの効果を説明するに先立って, クレタ島の試料の放射性炭素年代や U-Th 年代,
61 採取時期や死んだ年代が分かっている博物館の標本の放射性炭素年代から, これらの効果を定量化する.

62

63 2. データ

64 この論文の主な議論は, クレタ島西部の隆起した海棲生物から得た放射性炭素年代に関するものである.
65 クレタ島はヘレニック海溝の沈み込み帯の真上に位置する. 顕著な古海岸線がクレタ島西部の海岸のへりを
66 なし, 今日の海水準よりも最大 10 m の高さに達する(Spratt, 1865 と Fig. 1b). このセクションで議論する
67 試料は Shaw et al. (2008)によって, 現在の海水準と古海岸線の間の高さで採取された. それにはサンゴ
68 (*Stenocyathus vermiformis*, *Caryophyllida* sp.と *Balanophyllia regia*), コケムシ(*Myriapora truncata*),
69 そしてイシマテガイ亜科(*L. lithophaga*)を含む.

70 これらの試料の放射性炭素年代は, 標準的な手法を用いてオクスフォードの Research Laboratory for
71 Archaeology and the History of Art (RLAHA)によって決定された. 放射性炭素年代決定の手法の原理は
72 広く知られており(Bronk Ramsey, 2008), そして~55,000 BP から現在までの地質学的, 考古学的な炭素
73 を含む物質の年代決定に広く利用されている. 海棲生物の年代を決定する時は, 大気と陸域の炭素リザー
74 バーと平衡状態の試料に比較するために補正が必要である. 大気と海洋の間の炭素の交換には遅れが生じ
75 るが, 最も重要な影響は ^{14}C に枯渇した炭素の深海から表層水の混合である(Mangerud, 1972). 平均的に,
76 世界の海洋リザーバーの ^{14}C 活性度と陸域のリザーバーとの間の違いはモデルでは 400 ^{14}C 年に相当する.
77 INTCAL 海洋較正データセット(Hughen et al., 2004)と最適なソフトウェアの使用によって, 放射性炭素
78 年代を補正でき, それによってリザーバー効果を補正できる. 海洋較正曲線は単純な拡散ボックスモデル
79 (Stuiver et al., 1986)を用いて陸域の較正のもとで作られた. 地中海エリアの研究は, Siani et al. (2000)や
80 Reimer and McCormac (2002)によって報告されている. データは Reimer and Reimer (2001)によりまと
81 められ, 海洋リザーバーデータベース(www.calib.org)にある. 我々は, 東地中海からの年代が記録されて
82 いる試料を用いて, 世界のモデル化されたリザーバーからの差を説明するために 53 ± 43 年という数値を
83 算出した. そしてこの数値を本論で放射性炭素年代の較正に使用した. Shaw et al. (2008)の試料について
84 のこれらの分析の結果は, Fig. 1 と Table 1 に示す.

85 この隆起した海岸線についての以前の研究は、海棲生物(ほとんどは石灰藻やムカデガイ、一般に‘へビ
86 ガイ’として知られ、イシマテガイ亜科とは異なる)は古海岸線の最上部付近のいくつかの地点で採取され、
87 大部分は従来の(AMS を用いない)方法によって放射性炭素年代決定をした(Pirazzoli and Thommeret,
88 1977; Laborel et al., 1979; Thommeret et al., 1981 a, b; Pirazzoli et al., 1982; Kelletat and Zimmermann,
89 1991). これらの年代も、Price et al. (2002)によって、再較され本論で報告し年代と矛盾した年代も、Fig. 1
90 に示してある. 最も若い較正年代は石灰藻から得られ(Pirazzoli and Thommeret, 1977; Laborel et al., 1979;
91 Thommeret et al., 1981a, b; Pirazzoli et al., 1982; Kelletat and Zimmermann, 1991), 詳しい記録のある非
92 常に大きな歴史地震の年代の西暦 365 年の~200 年以内であり(Thommeret et al., 1981b; Ambraseys et al.,
93 1995; Pirazzoli et al., 1996), その年代は少なくとも「古海岸線の下に露出した海底の上部」はそのイベン
94 トで隆起したという仮定と矛盾しない.

95 それらの研究の中で、Shaw et al. (2008)は 13 のサンゴやコケムシの新しい放射性炭素年代のうち 11 は
96 西暦 365 年の 2 σ の誤差の中に入ることを見出した. そして、試料は現在の海水準と古海岸線の間ほとん
97 どの範囲をカバーしているため(Fig. 1, Table 1), 彼らは、観察された隆起は全て西暦 365 年の一回のイベ
98 ントで起きたと結論付けた.

99 新しい U/Th 年代によるサンゴの死んだ年代の追加確認をここに示す. サンゴ試料の 3 つは二つの破片に
100 割った; 半分は放射性炭素年代に送られ、もう半分は U/Th 法(Edwards et al., 1986)を用いて年代決定し
101 た. Th 濃度の初期値が高く(おそらく炭酸塩骨格中の珪質泥の汚染による)やその結果としての相対的に大
102 きい誤差にも関わらず、U/Th 年代は放射性炭素年代と矛盾しなかった. これにより、サンゴやコケムシか
103 ら得られた放射性炭素年代が、正確に生物の死んだ年代を記録することを確認した(Fig. 2 と Table 2 と 3).

104

105 3. イシマテガイ亜科の年代の矛盾の原因

106 Shaw et al. (2008)は、隆起した海岸線の最上部と現在の海水準の間の孔に保存されていたイシマテガイ
107 亜科を 14 試料採取した(Fig. 1a 中の青いバー, Fig. 1b 中の青い点, Table 1). *Lithophaga lithophaga*
108 (Linnaeus, 1758) は、海洋性二枚貝の一種でムラサキイガイ科(Mytilidae)に属し、この科は石灰質の底質
109 に外套腺から分泌した酸で孔をあける(Yonge, 1955; Jaccarini and Bannister, 1968). それは、海面から深
110 度 30 m まで生きることができうるが、最も高い密集は海面の数メートル以内でそれらの上限は海水準にび
111 ったりと一致する(Antonioli and Oliverio, 1996). Fig. 1c は、隆起した古海岸線の代表的なものの写真であ
112 る. 隆起した海岸線の下に露出する崖面は、密集した *L. lithophaga* の孔に覆われており、いくつかの孔で

113 は貝殻が生息姿勢のままの状態で見つかる。

114 クレタ島西部で採取されたイシマテガイ亜科は、西暦 365 年に近い年代を示すサンゴやコケムシと同じ
115 隆起した海底で成長したため、それらの年代も同じ年代のグループに入ることが期待される。Shaw et al.
116 (2008)によって得られたイシマテガイ亜科の年代は、すべて 365 年よりも古く、従って地震の隆起と矛盾し
117 ないが、それらはサンゴやコケムシの年代の幅(640 年)よりもはるかに大きな幅(2107 年)を持ち、更に、サ
118 ンゴやコケムシの年代の平均値は、イシマテガイ亜科の最も若い年代よりも~350 年若い。これは、イシマ
119 テガイ亜科の年代において系統的な差があることを示唆する(Fig. 1a)。我々は、今や「サンゴおよびコケム
120 シ」と「イシマテガイ亜科」の年代の相違の、二つの考えられる原因について調査する。

122 3.1. コロニー形成の順序と保存ポテンシャル

123 イシマテガイ亜科は石灰質の底質に棲み、自分用の孔を掘り、幼生の時には表面に、成体になるにつれて
124 石灰岩のさらに深くまで掘っていく。従って、孔の入口は一般に成長した貝殻よりも狭い。このことは、貝
125 はしばしば死後もそこから出られず、それにより、それらの保存ポテンシャルがかなり高まるということ
126 意味する。イシマテガイ亜科のより新しい世代の孔が古い世代の個体に孔をあけられる関係は Evia 湾の南
127 部の海岸の Kynos で見られ、そこでは、後の世代がセメントで充填された以前の孔を掘っており(Fig. 3a,
128 b)、崖面の同じエリアに長期に渡って繰り返し棲むことができることを示す。クレタ島西部の例では、イシ
129 マテガイ亜科の貝殻が他の細長い二枚貝の種を保護し、この貝は空の貝殻の中に見つかった(Fig. 3c, d)。ク
130 レタ島西部で採取されたサンゴとコケムシの多くもまた、保存された空っぽのイシマテガイ亜科の孔の中で
131 見つかり(Fig. 3e)、それは、現在の崖にサンゴやコケムシが棲みつく前に、そこにはイシマテガイ亜科の世
132 代が棲んでいたことを示す。

133 対照的に、隆起したサンゴやコケムシが観察された全ての場所で、それらは明らかに後に棲みついた者た
134 ちであり、隆起前の最後の期間にいる。サンゴやコケムシは他の全ての固着生物や穿孔する者たちの上で成
135 長し、軟らかく、スティック状の構造で、そして石灰岩の底質にくっつき、そこから飛び出しているために
136 比較的低い保存ポテンシャルだった。それにより、イシマテガイ亜科の貝殻よりも非常に容易にそれらは取
137 り除かれる(Fig. 3e)。

138 コロニー形成の時期や保存ポテンシャルの違いが、「サンゴおよびコケムシ」と「イシマテガイ亜科」の
139 間の放射性炭素年代の不一致の単独の原因であったとするならば、我々はサンゴやコケムシによって詳細な
140 隆起の年代を確認できる可能性がある。一方、イシマテガイ亜科が約 6000 年前(最終氷期最盛期の後、海水

141 準が現在の海水準に近いところまで到達して比較的安定した時(Siddall et al., 2003; Bassett et al., 2005;
142 Rohling et al., 2009))から隆起の年代まで幅広い年代を持っているだろう。イシマテガイ亜科は実際にサン
143 ゴやコケムシよりも非常に幅広い年代の幅を示すが、最も若いイシマテガイ亜科の年代とサンゴやコケムシ
144 の平均の年代の間では約 350 年の差もある。コロニー形成のシーケンスや保存で、イシマテガイ亜科のサ
145 ンゴやコケムシの年代と比較して大きな幅の年代についての説明がつくが、系統的な差は説明ができない。
146

147 3.2. 貝殻への古い炭素の混入

148 一般に、二枚貝が貝殻を成長させるのに使う炭素には二つの供給源がある；代謝由来の炭素、これは餌か
149 ら供給される。そして、溶存無機炭素で、周囲の海水から供給される。貝殻の形成は、食用とされるムラサ
150 キイガイ *Mytilus edulis* について広く研究されてきた。この貝は 10%以下の代謝性炭素から貝殻を作る
151 (Gillikin et al., 2006)。二枚貝における測定された代謝性炭素の割合の最大値は 35%だが *Mytilus edulis* は
152 *Lithophaga* と同じ科であり、10%という数値は一般的に二枚貝にとって妥当な平均値である(Gillikin et al.,
153 2007)。貝殻の残りの炭素、つまり大部分は周囲の海水中の HCO_3^- と CO_3^{2-} から供給される。

154 イシマテガイ亜科の場合、複雑さが生じる。なぜなら、それらは底質に化学作用で孔をあけるため (Yonge,
155 1955; Kleemann, 1990)、それにより放出される重炭酸イオンの ^{14}C 活性度は生物ではなく母岩の年代を反
156 映するからだ。この炭素のいくらかがイシマテガイ亜科の貝殻に取り込まれると、貝殻の中の ^{14}C の ^{12}C に
157 対する割合は海水からのみ成長した貝殻よりも低くなり、不自然に古い放射性炭素年代を示す結果となる。
158 従って、石灰岩の底質が貝殻への炭素の供給源の役割を果たすならば、その貝殻は本来の年代よりも古い放
159 射性炭素年代を示すだろう。同様に、湖の集水地の古い石灰岩から溶解した重炭酸塩で ^{14}C が希釈されてい
160 ると、淡水性の軟体動物の放射性炭素年代は不自然に古い年代を示す可能性がある(Deevey et al., 1954;
161 Boecker and Kulp, 1956; Shotton, 1972)。

162 次の項では、我々は現世のイシマテガイ亜科の試料を用いて、この効果について調査する。
163

164 3.3. 現世のイシマテガイ亜科を用いた実験

165 イシマテガイ亜科が、古い砕屑性の炭素により不自然に古い年代を示すかどうかの、最も単純な実験は、
166 現在の海水準から採取した生きたイシマテガイ亜科の貝殻を放射性炭素年代決定し、直接その年代を現在の
167 大気中の ^{14}C レベルから期待される年代と比較することだ。しかし、これは海洋に入ってしまった核実験起源
168 の ^{14}C レベルが多く、濃度は海洋の深さと緯度に依存して変わりやすいため難しい(Toggweiler et al., 1989)。

169 したがって、我々は、1950年より前に生きたまま採取され、採取年代と場所が記録されたイシマテガイ
170 亜科を用いて実験を行った。我々は4つの博物館の標本を調査し、それらはテクトニックに安定な、あるい
171 は沈降する地域から生きたまま採取されたようだ(Table 4とFig. 4)。これらの試料のうちの3つは地中海
172 中部と西部で採取された *L. lithophaga* の貝殻であった。4つ目の試料は紅海で採取された *Lithophaga*
173 *obesa* であり、これは軟組織とともに完全にエタノール中に保存されていた。全ての試料は East Kilbride
174 にある Scottish Universities Environment Research Centre (SUERC) で分析し、放射性炭素年代はクレ
175 タ島の試料と全く同じ方法で、較正年代を得るために補正した。4つ全ての試料は極めて新鮮で、合弁で、
176 殻皮と貝殻の内側の真珠層は完全に保存されていた。このことはそれらが採取された時、生きていた、ある
177 いは死後すぐかのどちらかだということを示唆する。

178 博物館標本の較正放射性炭素年代を採取の年代(我々は死んだ年代と仮定する)に対して、Fig. 4d にプロ
179 ットする。現世の *L. lithophaga* の貝殻の全てが死んだ年代から約900–1400年古い年代を示す。*L. obesa*
180 の貝殻から得られた年代も、死んだ年代から古い。他の現世標本と対照的に、差はたった200年である。

181 Shaw et al. (2008)によってクレタ島西部で採取されたイシマテガイ亜科の較正年代もまた、Fig. 4d の一
182 番下(水平の軸上)に白抜きで三角形で西暦365年に対して(西暦365年をゼロにあるいは‘死んだ年代’)に
183 プロットする。これらの標本から得た西暦365年からの差の範囲(約350–2800年)を灰色の領域で示す。
184 博物館のイシマテガイ亜科の試料は灰色の領域内にある。Shaw et al. (2008)のサンゴとコケムシのデータ
185 はこの図の一番上にプロットされ(黒い三角形)、ゼロに近いところにプロットされており、サンゴとコケム
186 シの年代は西暦365年からの顕著な差はないことを示す。

187 現世試料によって、イシマテガイ亜科の放射性炭素年代は、不自然に古い年代を記録する可能性があるこ
188 とが確かめられた。興味深いことに、*L. obesa* の年代は *L. lithophaga* の年代に比べて非常に小さい差であ
189 り、これはそれらの生態の違いに関連するかもしれない。*L. lithophaga* は中生代の石灰岩(Fig. 3a,b)から現
190 世の藻類の外殻(Fig. 3f)まで、様々な炭素の基盤に孔をあけるのに反して、*L. obesa* は主に死んだサンゴに
191 孔をあけ(Kleemann, 1994; Owada, 2006)、サンゴは非常に若いようである。したがって、年代の差の違い
192 はイシマテガイ亜科が孔をあける基盤の年代と、その結果としての基盤の¹⁴Cの枯渇に依存するかもしれな
193 い。我々はここでこれらの見識をクレタ島西部のイシマテガイ亜科の年代に応用する。

194

195 3.4. イシマテガイ亜科の貝殻に混入した母岩の炭素の評価

196 この項では、我々はクレタ島西部のイシマテガイ亜科の放射性炭素年代と、それらを離水させた地震の年

197 代の間の差が, ‘死んだ’炭素が貝殻へ混入することによる可能性を検討する. ここで, 我々は ‘死んだ’
198 炭素という言葉, イシマテガイ亜科が, 中生代の基盤岩から取り込んだ炭素のように ^{14}C を含まない炭素
199 の供給源を指して使う. 我々は完新世の海洋固着生物からの炭素の混入のその後の影響について検討する.
200 汚染がない場合, 試料の年代 T は

$$201 \quad t = \frac{1}{\lambda} \ln\left(\frac{C_0}{C}\right)$$

202 によって与えられる. ここで, C_0 は現在の標準試料のシュウ酸の放射性炭素 $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比であり, 同位体分別
203 を標準化し, 1950 年が 0 年とする. C は未知試料の測定した活性度を示し, λ は $1/8033 \text{ year}^{-1}$ (例として
204 (Stuiver and Polach, 1977) を参照). 全ての年代は放射性炭素年代 BP (1950) で表される. 母岩により測定
205 された $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ が混入されている, あるいは希釈されている場合, 見かけの年代は

$$206 \quad t_{app} \approx \frac{1}{\lambda} \ln\left(\frac{C_0}{C(1-\bar{\gamma})}\right)$$

207 である. ここで, $\bar{\gamma}$ は ^{14}C のない(あるいは ‘死んだ’)炭素の比率(effective fraction)であり,

$$208 \quad \bar{\gamma} = \gamma(1 - \exp(-\lambda T)),$$

209 γ は貝殻の中に含まれる母岩の炭素の比率で, T は取り込まれた時の母岩の年代である.

210 従って, 見かけの年代と真の年代の違い, Δ は,

$$211 \quad \Delta \approx -\ln(1 - \bar{\gamma})/\lambda \quad (1)$$

212 クレタ島のサンゴおよびコケムシの試料の年代と一番若いイシマテガイ亜科の試料の年代の間に見られ
213 る差がおおよそ $\Delta = 500$ 年ならば, 母岩が中生代の石灰岩($T \approx \infty$)である時, $\gamma = 6\%$ である. 例え $\Delta = 1000$
214 年だとしても, $\gamma = 12\%$ である. 従って, イシマテガイ亜科の年代の差を有意なものとするためには, 石灰
215 岩の母岩から供給される炭素は貝殻の炭素のほんのわずかな比率でよい.

216 実際は, 一つの例外(試料 17020, Table 1)を除けば, クレタ島のサンゴとコケムシに対してイシマテガイ
217 亜科の年代の差は, ~ 1600 年よりも小さく, 現世のイシマテガイ亜科は全て, 年代の差が 1400 年よりも
218 小さい. これらの差は ^{14}C の崩壊定数と比較して小さく, 我々は線形近似の利用法を作れるかもしれない.
219 それは, 試料中に混入した ‘死んだ’炭素の 1% は, 崩壊定数の 1%, あるいは 80 年の試料の年代の見かけ
220 の増加に匹敵するものである. 従って, 現世のイシマテガイ亜科試料の 3 つとクレタ島西部の 14 の試料の
221 うち 4 つは, 母岩からの死んだ炭素の 10–20% の混入に匹敵する, およそ 800 から 1600 年の古い年代を
222 示す.

223 しかし, 我々は, クレタ島西部のイシマテガイ亜科の 14 試料のうち 7 つの試料が 530 から 340 年の間
224 の, より小さい年代差を示すことを記す. これは, それらの貝殻への死んだ炭素の, より小さい混入(4–7%)

225 を意味する。しかし、かわりに、これらの試料のいくつかは、中生代の炭酸塩の上に普通にいる(Fig. 3f に
226 示されるように)完新世の藻類の石灰からの炭素を取り込んでいるかもしれない。この固着生物は海面がほ
227 ぼ現在の海水準で安定した約 6000 年前に形成されていたのではない(Siddall et al., 2003; Bassett et al.,
228 2005; Rohling et al., 2009)。だから、西暦 365 年地震の時のその最大年代は約 4500 年前だっただろう。そ
229 して、固着生物の成長を一定とすると、その平均は約 2250 年(2250 ± 2250 ということ)だっただろう。この
230 固着生物の平均 ^{14}C 活性度は、従って海洋の活性度の約 75%だろう。ゆえにこの活性度に 1%の混入された
231 炭素を含むイシマテガイ亜科の見かけの年代における影響は、死んだ炭素が同じ割合含まれる影響のおよそ
232 1/4 だろう。完新世の固着生物からの炭素の混入によるイシマテガイ亜科の年代の差の幅が小さい範囲であ
233 ればあるほど、イシマテガイ亜科の貝殻への母岩由来の炭素はより大きな割合(16–30%)が必要となる。こ
234 のように、中生代の石灰岩と同様に、より若い固着生物からの混入は、イシマテガイ亜科の年代が非常に大
235 きな幅を持つことを許す。現在のデータセットのさらに詳細な分析をすることは妥当ではない。採取された
236 ほとんどの試料は、おそらく最低でもいくつかの固着生物を穿孔し、一番下の古い石灰岩に孔をあけたが、
237 固着生物が崖面から落ちてしまっている場合もある。

238 我々は、死後そのままの状態でのイシマテガイ亜科の貝殻が保存されたことによりもたらされた年代から
239 供給された、死んだ炭素の混入による年代の影響を識別する方法を持っていない。実際に、両方の効果は同
240 時に起きたようだ。クレタ島で観察された年代の差における、最小の年代差でも 350 年であることは、母岩
241 からの物質による炭素の希釈を必要とする。350 年という差を説明するのに必要な母岩由来の物質の最小の
242 割合は、その物質が ^{14}C を含まないならば約 5%である。現世のイシマテガイ亜科における年代の差は、 ^{14}C
243 を含まない炭素が 10%から 20%必要となる。それは、完全にそれらが完新世の固着生物からの炭素の混入
244 によって生じたとするならば、クレタ島西部から得られたイシマテガイ亜科の最も小さい年代の差から推定
245 される比率と同じである。

246 それらの説明の詳細にかかわらず、イシマテガイ亜科の年代における最大 2000 年までの差があることは
247 認めざるを得ない。ここで、我々はこれらの発見の、構造学や古地震学に対する意味を考察する。

248

249 4. テクトニクスおよび古地震学に対する意味

250 クレタ島西部では、西暦 365 年の大地震時の大規模な隆起が、放射性炭素年代と隆起した古海岸線の
251 物理的な証拠により確かめられたが(Shaw et al., 2008)、我々は二つの効果を見分けることができる。これ
252 らの効果は、イシマテガイ亜科の放射性炭素年代からの、隆起イベントの推定年代が異常に古い年代をもた

253 らすことになる。第一は、コロニー形成の順序と、死後長い間孔の中でそのままの状態で保存されることに
254 よるイシマテガイ亜科の貝殻の高いポテンシャルの組み合わせ。第二の効果は基盤の石灰岩からの ^{14}C のな
255 い炭素の貝殻への混入。この二つ目の効果のみによる年代差は、クレタ島の試料では最低で 350 年、博物館
256 の標本では最低で 800 年。この章では、異なるテクトニックな環境、ギリシャ中央部の伸張性の地溝システ
257 ムにおける、これらの効果の意味を説明する。

258 ギリシャ中央部の Corinth 湾や Evia 湾(Fig. 5)は大規模なスケールの活断層の正断層系である(e.g.
259 Goldsworthy et al., 2002)。これらの断層の下盤における隆起は、Corinth 湾ではおよそ 200–300 年(Collier
260 et al., 1998; Pantosti et al., 2004a), Evia 湾ではおよそ 1000–2000 年(Pantosti et al., 2004b)の再発間隔
261 を持つ地震の時に起きている。GPS によって測定された地溝を横切った伸張速度は、これらの古地震学的
262 な再発間隔の推定と矛盾しない(Avallone et al., 2004; Hollenstein et al., 2008)。断層のセグメントの長さは
263 最大約 20 km で、地震は西暦 365 年のクレタ島の地震よりもはるかに小さく、一般的に M_w 6.0–6.5 まで
264 で、一回のイベントでたったの 10 cm しか隆起しない(Jackson et al., 1982)。第四紀後期の Corinth 湾の隆
265 起速度は、隆起した海岸段丘の高さを現在の海水準に合わせることに、その海岸段丘で見つかったサンゴの
266 U/Th 年代によって推定できる(e.g. Armijo et al., 1996; Dia et al., 1998; De Martini et al., 2004; McNeill
267 and Collier, 2004)。

268 連続したノッチは最近の活断層の正断層の下盤でも観察され、特に Corinth 湾で見られる(Fig. 5 の写真)。
269 最も高いノッチの高さは東から西へ変化し、西部の最も高い高さ(~10 m)は、最も速い伸張速度(年間約 12
270 mm)であり、東部ではノッチはより低く、伸張速度も遅い(それぞれ~3 m と年間<5 mm; e.g. Clarke et al.,
271 1997; Goldsworthy and Jackson, 2001; Hollenstein et al., 2008)。ノッチの下の崖面は、イシマテガイ亜科
272 の孔があげられている。そのうちのいくつかは、ここ数千年間の隆起速度を調査するために採取され、放射
273 性炭素年代決定を行った(Mouyaris et al., 1992; Stiros et al., 1992; Papageorgiou et al., 1993; Vita-Finzi,
274 1993; Keraundren et al., 1995; Stewart, 1996; Stewart and Vita-Finzi, 1996; Pirazzoli et al., 1999, 2004)。

275 イシマテガイ亜科の孔と、孔の見られるノッチは Evia 湾でも、概して~1 m の最高の高さまで見られる。
276 ここでは、より高くより新しい年代のイシマテガイよりも下に、より古いイシマテガイがあるのは同地点で
277 の数百年にわたる沈降のあった後で隆起したことを示すと推測した(Stiros et al., 1992; Pirazzoli et al., 1999)。
278 クレタ島西部からの見識の見解は、イシマテガイ亜科の放射性炭素年代と高さとの逆転現象は、露出した基
279 盤に長期にわたり繰り返されたコロニー形成によるという結果は驚くことではなく、例えば Fig. 3a と b は
280 このような場所で撮影された。イシマテガイ亜科の貝殻が、死後そのままの状態でかつ生息姿勢のまま千年

281 以上残ると、垂直運動の逆転の複雑な歴史はこのような証拠により不十分ながらも支持されるように見え
282 る。

283 Goldsworthy and Jackson (2011)は、Corinth 湾および Evia 湾の最も高いノッチと最も高い位置にある
284 イシマテガイ亜科の孔はおよそ 6000 年前に形成されたことを示唆した。この時代に海水準は現在の海水準
285 付近で安定した時で、その前の 10,000 年間で一世紀あたり 1–2 m までの急速な速度で海水準は上昇した。
286 これが正しいならば、この大雑把な法則により完新世後期における非常に速い隆起を見積もれる。Fig. 5 で、
287 我々はこの示唆が公表されたイシマテガイ亜科の年代と矛盾しない範囲を検討する。

288 Fig. 5 では、未校正の放射性炭素年代をプロットしている。なぜなら、リザーバー効果への最適な校正
289 は、Corinth 湾および Evia 湾では十分に理解されていないからである。マップは試料の位置を A–G とし
290 て、放射性炭素年代のプロットと野外写真を示す。高さに対する放射性炭素年代のプロットでは、イシマテ
291 ガイ亜科の年代は赤点で示す。青丸は最も高いノッチ、あるいはそれぞれの場所でのイシマテガイ亜科の孔
292 の限界を示す。Lambiri では、連続した崖の最上部は、崖錐の下に埋まっており、それは 7 m よりは高い
293 ということが分かる。それぞれの場所で、最も高いノッチあるいはイシマテガイ亜科の孔が 6000 年前に形
294 成されたと仮定すると、青丸と原点を結ぶ黒い線は長期の隆起速度の平均を表す。イシマテガイ亜科の年代
295 は、このラインの左にプロットされるべきである。黒線上にプロットされると正しい年代を示す試料である
296 ことになる。いくつかの不確実性が生じるのは、その場所での初めての地震は海水準が安定したすぐ後に起き
297 たわけではないかもしれないからだ。だが、おそらく地震は 6000 年前とその場所における地震の平均再発
298 間隔と一致するその後の時間間隔の間のどこかで起きただろう。したがって、灰色の三角形は、二つの湾で
299 の予測される地震の再発間隔に基づいて、予測される隆起速度の平均の範囲を示す。

300 年代校正していないイシマテガイ亜科の年代の多数は、推定される隆起曲線の上か左側のどちらかにプロ
301 ットされる。これは、最も高いノッチが～6000 年前に形成されたという示唆と矛盾しない。その高さで予
302 期される年代(黒い直線によって得られる)に対するイシマテガイ亜科の年代の幅は場所によっては大きく、
303 最も古い年代は 9000 年前である(Fig. 5a, b, c)。このばらつきのいくらかは、イシマテガイ亜科が死後数世
304 紀から数千年の間そのままの状態と保存されるとすると、その基盤に他の生物がコロニー形成をする場合が
305 予想される。しかし、8000–9000 年前という最も古い年代は、この方法では説明できない。現在の海水準
306 に近い比較的安定した状態に到達した～6000 年前よりも前の、8000–9000 年前には、海水準は今日より
307 も最大 25 m まで低かった。その海水準では、段丘の高さと海面の位置の比較に基づいた第四紀後期の平均
308 隆起速度よりも 3 倍以上速くない限り、イシマテガイ亜科は現在見られる基盤上の位置での生息は不可能

309 だが、この隆起速度は GPS と古地震学と矛盾しない断層の滑り速度から予測されるよりはるかに速い。こ
310 れらのより古い年代は、予想される 6000 年前を最大 2000–3000 年越えているが、過去の石灰岩の基盤の
311 炭素の貝殻への混入による Corinth 湾でのイシマテガイ亜科の年代の差が 2000–3000 年であるかもしれ
312 ないことを示唆する。

313

314 5. 結論

315 地中海のイシマテガイ亜科、特に *L. lithophaga* は普通に分布し、保存のポテンシャルの高さからテクト
316 ニック的に活発なエリアでの隆起の非常に有効な指標となる。隆起を定量化するには年代の推定が必要とな
317 り、そして、イシマテガイ亜科の放射性炭素年代は、しばしばこれを目的として用いられてきた。一回でク
318 レタ島西部を 10 m まで隆起させた大きな隆起イベントの発生は、西暦 365 年の非常に大きな($M_w \geq 8$)地震
319 と関係があり、テクトニックおよび古地震学的な目的のための、イシマテガイ亜科の放射性年代の分解能と
320 適用を制限する二つの効果の存在を明らかにする。

321 第一の効果は、イシマテガイ亜科の良い保存ポテンシャルによって死後そのままの状態で長い間保存され
322 てしまい、一方、他のイシマテガイ亜科を含む他の海棲生物によってその基盤にはコロニーが形成され続け
323 るということ。第二の効果は、イシマテガイ亜科の年代の系統的な誤差で、これはそれらが穴を掘る母岩で
324 ある石灰岩からの‘死んだ’ (^{14}C のない) 炭素が貝殻に混入することに起因し、核実験の前に採取された
325 博物館の標本でさえも、最大 1000–2000 年のかなり古い年代をもたらす。クレタ島西部では、おそらく第
326 二の効果によって、最も新しいイシマテガイ亜科の年代と、正確に西暦 365 年に隆起したと記録している
327 サンゴとコケムシの年代、つまりこれらは地震直前に生息していたサンゴおよびコケムシの年代の間の約
328 350 年という値が最小の年代差をもたらす。

329 これらの二つの効果は、クレタ島での西暦 365 年のように、一回の大きなイベントで隆起が起きたとこ
330 ろでさえ、イシマテガイ亜科の年代のみでは、隆起の年代を 1000 年よりも精度よく決めたり、すべてが一
331 回に起きたことを説明したりするには適当でないことを意味する。Corinth 湾のような場所、数百年の間
332 隔ではるかに小さな規模(～10 cm 対 ～10 m)のイベントで隆起が起きるところでは、イシマテガイ亜科の
333 年代は、古地震学的な目的でそれぞれの隆起イベントを明確に識別することはできない。しかし、それらは、
334 ギリシャ中央部の沿岸地域における、最も高い位置にある隆起したイシマテガイ亜科の孔とノッチが約
335 6000 年前に形成されたという仮説をテストする(ただし証明するのではない)ために使うことができる。こ
336 の約 6000 年前は、最終氷期最盛期の終わりの急速な海面上昇の後の、海水準が現在の海水準に近く比較的

337 安定した時期である。ギリシャで得られるイシマテガイ亜科の年代は、実際にこの仮説に矛盾しない。

338

339 北村晃寿・坂本優衣