

1 Polonia, A., Vaiani, S. C. and Gert J. de Lange, 2016, Did the A.D. 365 Crete
2 earthquake/tsunami trigger synchronous giant turbidity currents in the
3 Mediterranean Sea? *Geology*, 44, 191-194.

4
5 西暦 365 年のクレタ島地震・津波は、地中海の巨大乱泥流を同時に引き起こしたの
6 か？

7 8 要約

9 地中海で最も地震が多い地域の一つであるイオニア海では、沈み込みは、カラブリア弧
10 やヘレニック弧沿いの沿岸の山地の隆起、侵食の促進、地震活動と関連しており、繰り返
11 し起こる大規模な破壊を起こす可能性がある。深海堆積盆で観察されるタービダイトの中
12 には、音響探査記録では厚くかつ目立つものがあり、これはそれらの上部にある無構造の
13 泥層が音響的に透明だからである。これらのメガベッドのうち、最も新しいメガベッドで
14 ある均質・オーガス・タービダイト (HAT) の高分解能研究により、破局的なイベントの
15 後に堆積した遠洋堆積物を特定するための重要なプロキシが得られた。150,000 km² を超え
16 る地域での放射性年代測定は、地中海の各地で、均質堆積物といわれる堆積物は、実際
17 は同時代のものであり、紀元 364 年から 415 年までに起きた 1 度の堆積盆全体に堆積した
18 ものであることを示す。このタービダイトをサントリーニ島のカルデラ崩壊を含む様々な
19 トリガーイベントに関連付ける解釈とは異なり、このタービダイトは紀元 365 年のクレタ
20 島の巨大地震による大津波に帰することができる。地中海の広範囲 (イオニア海北部から
21 地中海嶺、クレタ島南部の無酸素状態のチロ堆積盆まで) で 1 度のイベントによる HAT の対
22 比は、西暦 365 年のクレタ島地震と津波は、東地中海の広範囲に及ぶ大規模な堆積物の再
23 堆積を含む壊滅的な影響をもたらした。

24 25 はじめに

26 イオニア海は、カラブリア沈み込み帯とヘレニック沈み込み帯の間に位置する深さ
27 4000 m の海盆である。地中海で最も地震が多い地域であり、この地域では強い津波を
28 起こす地震が繰り返し発生した (Papadopoulos *et al.*, 2014)。第四紀後期のタービダ
29 イトの堆積は、深い堆積地で優勢であり、地震による重力流堆積物は歴史記録の期間
30 の堆積物の 90% 以上を占める (Polonia *et al.*, 2013a, 2013b)。

31 タービダイトのいくつかは、非常に厚く、音響記録では際立っている。なぜならば、
32 上部の泥層が音響的に透明だからである (Rothwell *et al.*, 1998 ; Hieke, 2000)。こ

33 れらのメガベッドのうち、最も新しいものはホモジナイトと呼ばれ、東地中海の広い
34 範囲で観察される (Kastens and Cita, 1981).

35 このホモジナイトは、異なるテクトニックセッティングや地形学的セッティングか
36 ら同定されている。タイプ A のホモジナイト (Cita and Aloisi, 2000) はカラブリア弧
37 と西地中海海嶺の小さなやや浅い場所にある堆積盆に堆積した局地的起源の遠海性ター
38 ビダイトを指す。タイプ B のホモジナイトは、厚さ 25 m にも及ぶもので、陸棚に関
39 連した地域が起源と考えられる陸性のメガタービダイトを指し、シルテと中央イオニ
40 ア深海平原から見つかり、また西ヘロドストラフから見つかった (Cita and
41 Aloisi, 2000)。Augias タービダイト (Hieke and Werner, 2000) は、タイプ B のホモ
42 ジナイトを指す。

43 このホモジナイトは、約 3500 年前に発生したサントリーニ火山の爆発とカルデラの
44 崩壊、それに続く津波に関連していると解釈されている (Kastens and Cita, 1981)。
45 西イオニア海 (GSA Data の Item DR1 リポジトリ) におけるタービダイトの組成と構造、
46 および放射年代測定と年代モデリングは、少なくともこの海域では、サントリーニ火
47 山噴火ではなく、その後の西暦 365 年のクレタ島地震の津波であることが判明してい
48 る (Polonia *et al.*, 2013a)。しかし、このような年代推定は、以前の研究で研究され
49 た地域とは異なる地域で決定されたものであり、最初に記載されたホモジナイトの堆
50 積は放射年代測定されていなかった。このため、異なるホモジナイトは、現在でもサ
51 ントリーニ島のカルデラ崩壊を含む異なるトリガーイベントに関連するものとして説
52 明されている (Papadopoulos *et al.*, 2014; Perriáñez and Abril, 2014)。

53 まとめると、地中海の異なる堆積盆では、ホモジナイトに分類されている重力流堆
54 積物の対比には、まだ大きな不確実性が存在する。本研究は、12 の異なる地形的セッ
55 ティングにおける十分に年代測定されたタービダイトの対比によりこのギャップを埋
56 めることを目的としている。深さ 4000m の深海平原から、ホモジナイトが最初に調査
57 されたボッティチェリ堆積盆 (Kastens and Cita, 1981; Blechschmidt *et al.*, 1982)
58 を含む、より浅い斜面の堆積盆、地中海海嶺外縁部、チロ堆積盆 (Fig. 1) まで及ぶ。
59 いわゆるホモジナイト堆積物の堆積時期を絞り込むために、そしてそれらの堆積物が
60 複数の堆積盆におよぶ 1 度の大災害によって引き起こされたものか否かのより良い理
61 解のために、放射年代測定を用いた。

62

63 掘削地点と方法

64 本研究で提示する堆積物コアは、1.2t クーレンベルグ重力コアラー (CALAMARE プロ

65 ジェクトの CALA コア ; CALAMARE プロジェクト ; カラブリア弧の現世の変形と地震ハザ
66 ードに関する海洋地球物理学調査), ボックスコア (core SL139), ピストンコア (コア
67 P46) を使って, 6 つの地域 (図 1) で採取した. 掘削場所を選択するために海底のチャー
68 プ音響データの分析を行った (図 2 ; 項目 DR2). 西側トランセクト (WT) はマルタ断層崖
69 (コア CALA04, CALA05, CALA07) の基部に位置し, 東部トランセクト (ET) はイオニア深
70 海平原から浅海に伸び (コア CALA09, CALA02, CALA03), Blechschmidt *et al.* (1982).
71 の大礫岩エリア 4 を横切る. これらのトランセクトの間のポッティチェリ堆積盆から 2
72 つの追加コア (CALA01 と CALA08) を採取した. 4 番目の調査地域はカラブリア地域で,
73 コア SL139 と P46 をそれぞれ地中海海嶺 (MR) とチロ堆積盆で採取した (図 1). ^{14}C デー
74 タの正確に年代モデルを得るために, 我々はタービダイトの上面と基底面の境界を特
75 定するための基準と記載した.

76 タービダイトの基底面の境界は, 明瞭で不規則な砂の基底を常に特徴とする. ター
77 ビダイトの上面は, 微古生物学的分析と Mn-Fe に富む数ミリの厚さの層 (項目 DR3) で示
78 される酸化還元フロントの存在で示される堆積相の変化に一致する. タービダイトの
79 尾部と現地性の遠洋堆積物との間の遷移 (図 3) を, 色, 平均粒径, 堆積構造, 微化石
80 群集などの観点から記載した.

81 加速器質量分析法による放射性炭素年代測定 (Item DR5) で, 浮遊性有孔虫と翼足類
82 の混合物の年代を測定した. 試料はタービダイトの上面から 1 から 3cm 上の部分を採
83 取した (図 3), ホモジナイトの年代決定には, タービダイトの上面から年代測定した
84 部分までの遠洋堆積物の厚さに相当する堆積時間を考慮した. 深海平原と閉鎖斜面堆
85 積盆 (コア CALA04 と CALA05) の遠洋堆積物の堆積速度は 0.095-0.100 mm/yr と 0.054-
86 0.083 mm/yr であった (Polonia *et al.*, 2013a). CALA21 コアでは, 年代層序はポンペ
87 イの西暦 79 年のテフラ層 (Z1) の産出と平均堆積速度平均沈降速度 (Polonia *et al.*,
88 2015) に基づく. SL139 コア (Item DR7) の年代層序は, 既知の指標層とサプロペル S1 の
89 上面と下面 (de Lange *et al.*, 2008) といった同時間性の堆積からの外挿に基づく. こ
90 の結果, 標準偏差は約 330 年 (未補正) であり, 一方, コア P46 の年代層序は, 放射年
91 代測定と年代モデリングによる外挿に基づく (項目 DR8 と DR9).

92

93 結果

94 チャープサブボトムプロファイルとホモジナイトの層厚

95 イオニア海の掘削地点の地形設定を項目 DR2 に示す. それは, 掘削地点に沿って測
96 定したチャープソナーによる音響探査断面を含む. コア CALA04 と CALA09 はカラブリア

97 ア弧付加体の基部にある深海平原から採取し，そこはホモジナイト・オージラス・タービダイト (HAT) が最も厚い場所である．コア CALA01, CALA02, CALA03, CALA05, 98 CALA07, および CALA08 は，付加体ウェジットの斜面堆積盆内で採取した．カラブリア 100 地域の掘削地点は，限定された堆積堆積盆 (CALA10) と地形的な高台 (CALA21) にある． 101 そのタービダイトの厚さは，0.1 m から 12 m 以上まで様々である (項目 DR6)．

102 ホモジナイトと上位の遠洋堆積物との間の遷移

103 タービダイトの上部は，すべてのコアで同様の特徴を示し，無構造の粘土質シルト 104 泥からなり，サイズが揃った (63-125 μm) の浮遊性有孔虫 (項目 DR4) が少量含まれる． 105 浮遊性有孔虫のサイズが揃っていることは，乱泥流の懸濁からの堆積を示す．

106 厚さミリメートルの Mn-Fe に富む酸化還元フロントはタービダイトの上面を示し (項 107 目 DR3)，その上の 2-7cm の紫がかかった灰色で塊状の泥は，様々なサイズの浮遊性有孔 108 虫を豊富に含み，翼足類の断片もかなり含む．堆積相の特徴と浮遊性種が卓越する有 109 孔虫化石群集，深海種の *Articulina tubulosa* の産出は (項目 DR4)，遠洋で未擾乱の 110 環境で堆積したことを示唆する．放射性炭素分析のために採取した浮遊性有孔虫と翼 111 足類は，すべてこの群集から手作業で採取した．

112

113 異なる掘削地点におけるホモジナイトの堆積年代

114 放射性年代測定 (項目 DR5 ; 図 3) は，タービダイトの最も狭い堆積年代が西暦 364 年 115 から 530 年であることを示すが，2つの異なるコアから採取された2つの試料は，より 116 若い年代を示す (図 3)．CALA21, SL139, P46 のコアの年代復元を通じて，西暦 265 年 117 から 451 年，紀元前 302 年から西暦 438 年，西暦 115 年から 415 年の3つの年代範囲 118 が追加された (図 3)．

119 深海平原の掘削地点 (コア CALA04 と CALA09) では，他のコアと比べて，タービダイト 120 の上面境界がより深い位置にあり，遠洋堆積物のユニットもより厚く，より詳細な年 121 代測定が可能であるので放射年代測定に理想的な場所である．これらのコアは，WT と 122 ET 地域で採取され，ホモジナイトの年代は一致している．このことは，Polonia et al. 123 (2013a) が WT で研究したタービダイトと，Hieke and Werner (2000) が ET から報告し 124 たタービダイトは年代的に一致することを暗示する．同様に，地中海海嶺，チロ堆積 125 盆，ポッティチェリ海盆では，タービダイトの堆積年代は，他の地域の HAT と同時代 126 である．カラブリア地域では，タービダイトが本研究以前には記載されておらず，構 127 造高所で同定された最初の地点であり，他のコアで記録された年代範囲と一致するこ 128 とがわかった (図 3)．CALA02 と CALA03 で得られた比較的若い年代は，コアトップに非

129 常に近い試料から推定されたものである。この海域では生物攪乱と低い堆積速度のため、
130 サンプリングの分解能が低下する。要するに、今回の年代推定から、異なる地形
131 環境で採取されたすべてのタービダイトは同時期に堆積したもので、最も狭い時間範
132 囲では西暦 364 年から 415 年にかけて堆積したものと考えられる。

133

134 議論

135 この研究の結果は、放射性年代測定に伴う誤差の範囲内で、地中海の異なる堆積盆
136 において、HAT の堆積時代は同じである。このことは地中海海嶺、イオニア深海平原、
137 チロ堆積盆、シチリア島とカラブリア島の大陸斜面など、非常に広い範囲で堆積物を
138 再懸濁させることができる単一の堆積盆規模のイベントであるという考えを支持する
139 ものである。この後者の発見(カラブリア沖の HAT)により、この堆積物は、これまで
140 北方では報告されていなかったもので、その分布が拡大した。

141 HAT の放射年代は、25,000km² 以上にわたって測定され、カラブリア地域と地中海海
142 嶺で記録された年代と、チロ堆積盆で修正された年代モデリング(項目 DR8, DR9)と統
143 合すると、その面積は 15 万 km² を超えるかもしれない。この巨大なイベントを引き起
144 こしたプロセスは、同時に、クレタ島、アフリカ北部、カラブリア島、シチリア島で
145 堆積物の再移動を誘発できた。

146 青銅器時代のサントリーニ島の噴火は、調査したタービダイトのいずれにも引き金
147 となる事象は起こしていない。なぜならば、サントリーニ島のカルデラ崩壊と、それ
148 に伴う津波は紀元前 1627-1600 年に発生し、HAT の堆積より約 2000 年前であるからだ
149 (Friedrich *et al.*, 2006)。HAT の放射性炭素年代は、歴史カタログに報告されてい
150 る地中海最強の地震イベントであるクレタ島の西暦 365 年の地震(マグニチュード 8.4)
151 である(Shaw *et al.*, 2008)。私たちは、この事象を地中海の広い範囲に壊滅的な影響
152 を与える可能性のある唯一の候補だと考えている。

153 イタリアの中規模地震(例えば、Ms. 6.60, 西暦 361 年のシチリア島地震や Ms6.30,
154 西暦 374 年の Reggio Calabria 地震; Rovida *et al.*, 2011)は、このような広範かつ
155 例外的な異地性の堆積物を生成する可能性のあるメカニズムとは考え難い。だが、HAT
156 を引き起こした期間に可能性のある 2 つの地震を考慮する必要がある。イタリア沖周
157 辺のものは、カラブリア地震による乱泥流で、深海底の残りは西暦 365 年のクレタ島
158 地震である。しかし、この仮説はあり得ないと考えられる。なぜならば、カラブリア
159 周辺の CALA10 の HAT は厚さ約 1.70m で、このような厚さのタービダイトは、このコア
160 全体で唯一のものだからである。これは、完新世における例外的な出来事であること

161 を示唆し、100-700 年周期で再発していると考えられる局地的な中規模の地震
162 (Polonia *et al.*, 2015)に関係するものではない。高マグニチュードの西暦 365 年の
163 クレタ島タイプの地震イベントだけが 6000-7000 年の再現時間を持つ(Shaw *et al.*,
164 2008)。しかし、地中海東部で別の地震が発生する可能性は低い。西暦 115 年から 415
165 年までに 4 回の中規模から大規模な地震(M6-7.8)がシリア、レバノン、イスラエルで
166 発生した(Salamon *et al.*, 2007)。しかし、海底溪谷システムからの供給のない孤立
167 したチロ堆積盆に厚さ 2m のタービダイトを形成するには遠すぎる。

168 タイプ B とタイプ A のホモジナイトの陸源組成と遠洋性組成は、全く異なる堆積プ
169 ロセスを必要とするが、トリガーは同時である。(1)主要な海底溪谷システムに沿った
170 重力不安定と大きなチャンネルを作ってきた乱泥流(乱泥流が流下時に海底を侵食し、チ
171 ャネルを形成)と堆積盆の最も深い場所に運搬される浅海域の物質。(2)局地的に限定
172 された堆積盆での重力流で、堆積物の供給源は隣接する高まりである。

173 西イオニア海の HAT の供給源はカラブリア北部やシチリア海峡にあると考えられ、
174 震源地から 600-800 km 離れているので、一回の大きな地震動では、巨大乱泥流を引き
175 起こすことはできない(Polonia *et al.*, 2013a)。本研究の放射年代測定で明らかにな
176 った HAT の面積は、HAT がクレタ島の地震に伴う津波によって、アフリカ北部からシ
177 チリア島、カラブリア島まで 1000 km 以上の巨大乱泥流を引き起こしたという仮説を
178 支持する(図 1)。

179 西暦 365 年 7 月 21 日の地震と 365 年の地震と津波は、歴史記録が年代や報告された
180 被害の範囲において必ずしも一致しないため、歴史学者、考古学者、地球物理学者の
181 間で議論を呼んでいる。Guidoboni *et al.* (1994)は、地震による影響はクレタ島に限
182 定され、津波はエジプト、リビアを襲うが中央アドリア海にはほとんど影響がなかつ
183 たというシナリオを提示した。しかし、マグニチュード 8.5 を超える異常事態が
184 Stiros (2010)によって提案されており、津波は地中海じゅうに広がる(Shaw *et al.*,
185 2008)。HAT が 15 万 km²以上の広範囲に同時に堆積していることは、例外的な地震と津
186 波が引き金となり、壊滅的な堆積プロセスを引き起こしたことを示唆する。

187

188 結論

189 HAT の放射年代測定は、約 15 万 km²に及び、その中にはこのタービダイトが最初に
190 記述された堆積盆も含まれ、地中海東部で西暦 364 年から 415 年の間に発生した破局
191 的イベントと同期して堆積したことを示す証拠で、西暦 365 年の Mw 8.3-8.5 のクレタ
192 地震・津波の時間枠と一致する。このことは、西イオニア深海平原に堆積した HAT で

193 既に実証されているが、ボッティチェリ堆積盆とチロ堆積盆のタービダイトの年代測
194 定は、この結果を地中海東部で報告されている大量の異なるホモジナイトに直接結び
195 つけるものであり、メガスラスト津波に関連した例外的なイベントの手がかりを提供
196 する。陸に囲まれた地中海には、地震による堆積過程を増幅させる隆起した沿岸山脈
197 がある。したがって、HAT はこれまで知られている中で最も厚く、最も広い地震性タ
198 ービダイトの津波堆積物であり、他の沈み込み帯における超巨大地震の再現間隔を復
199 元するプロキシを定義することに使える。

200

201 北村晃寿