

統計的グリーン関数を用いたAD 365年 クレタ沖地震の推定

大角 恒雄¹, 福島 康宏²

¹フェロー会員 (独) 防災科学技術研究所 主幹研究員 (〒305-0006 つくば市天王台3-1)

E-mail: t_ohsumi@bosai.go.jp

²正会員 (株) エイト日本技術開発防災保全事業部 プロジェクトリーダー (〒700-8617 岡山県岡山市
北区津島京町3-1-21) E-mail: fukushima-ya@ej-hds.co.jp

西アジアに甚大な地震・津波被害を及ぼしたAD 365年クレタ(Crete)沖地震は、 $M8.5$ クラスであったことが言われている。この地震による津波はギリシャ沿岸のみならず、古代都市であるアレキサンドリア(Alexandria)、シリア地域に大きな被害を及ぼしたことが伝えられている。AD 365年の地震は、東部地中海地域の代表的地震である。Pirazzoli(1986)は東地中海周辺の海岸線の隆起地形に着目し、AD 350-550年が過去2000年に遡ってこの地域で最も地震の活動期の一つであったことを記述している。当時の痕跡を現地の地盤隆起の痕跡が今でもクレタ島には存在し、その特徴と数多くの研究者のAD365年クレタ地震のパラメータを検証し、統計的グリーン関数法を用いて当時の地震動を推定した。

Key Words : AD365 Crete earthquake, upheaval, stochastic Green's function method, Mediterranean

1. 背景

西アジアは地殻変動が活発な地域で、多くの歴史的巨大地震が発生している。この地殻変動は現在も継続しており、地殻変動の最適解を求めることが、この地域の地震・津波防災に貢献することとなる。

この地域はインド西方から地中海にかけてのプレート境界付近のテクトニクスが存在する。プレート間の相対運動速度は2-4 cm/年であり、世界的に見て、収束境界としては他の地域に比べて小さい傾向である。また、ヒマラヤ地域と同様な、衝突境界が中心というのが特徴である。しかし、沈み込み帯(図-1: 黒線)や北アナトリア断層のような横ずれの境界も、部分的には存在する。これらの沈み込み帯で起こる地震とそれに伴う津波、そして北アナトリア断層のうちマルマラ海を通る津波被害を過去に起こしたことのある部分である(堀高峰・金田義行, 2013)¹⁾。

この沈み込み帯周辺で、時々巨大地震が発生し、AD 365年にはクレタ(Crete)島周辺で発生した地震は、 $M8.5$ クラスであったことが言われている(たとえば, Stiros (2001)²⁾, Fischer (2007)³⁾, Shaw (2008)⁴⁾, Papadimitriou (2008)⁵⁾)。この地震による津波はギリシャ沿岸だけでなく、古代都市であるアレキサンドリア(Alexandria)やシリア地域に大

きな被害を及ぼしたことが伝えられている。AD 365年の地震は、東部地中海地域の代表的地震である。Pirazzoli(1986)⁶⁾は東地中海周辺の海岸線の隆起地形に着目し、AD 350-550年が過去2000年に遡ってこの地域で最も地震の活動期の一つであったことを記述している。

ギリシャ共和国は、エーゲ海を中心に存在する約3,000の島のうち、南方の地中海に浮かぶ同国最大の島、クレタ島は、ギリシャ本土から約160 km南に離れた地中海東部に位置し、エーゲ海の南縁に存在する。クレタ島は、面積(8,336 km²)は、兵庫県(8,395 km²)と静岡県(7,780 km²)の大きさに相当する。

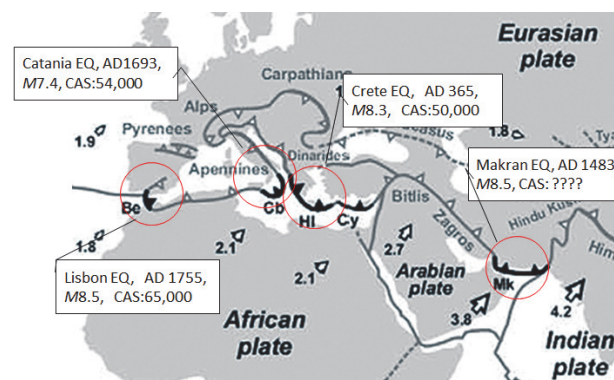


図-1 巨大地震・津波：地中海地域，地震予知連絡
会議会報 89,2013¹⁾

Ambrassey^{7,8)}はこれらの歴史地震に多くの著書を残している（たとえば、1994）．古代ローマ帝国後期、4～5世紀ごろ、キリスト教の布教が始まり、4世紀のローマ帝国後期の軍人であり、歴史家であるAmmianusは31巻からなる歴史書を残している．地中海における津波の影響は、クレタ島だけでなく、ギリシャ南部のペロポネス(Peloponnese)半島、アドリア(Adria)海では地震による震動被害よりも津波の被害はるかに深刻な事態となった．

AD 356年のクレタ沖地震（図-2）は地中海地方の全域で感じるような、広い範囲を考慮してもマグニチュードは8クラスが考えられる．4～5世紀の神学者であるJhon Cassian, 5世紀の Byzantineの歴史家のSozomenesによると、建物の屋根に残された津波の引き波後に残された、海岸線の後退と広い範囲の浸水域が記載されている．後世のビザンチンの歴史家（George the Monk:9世紀にChronicleに記載、Theopanos：8～9世紀、Cedrenus：11世紀、Glycas：12世紀）が津波に関して記載している．エジプトのアレキサンドリアで5万棟の住宅と5000人が津波によって流された．このような津波被害が現代でも繰り返す可能性があり、AD356年のクレタ地震を調査対象とした．

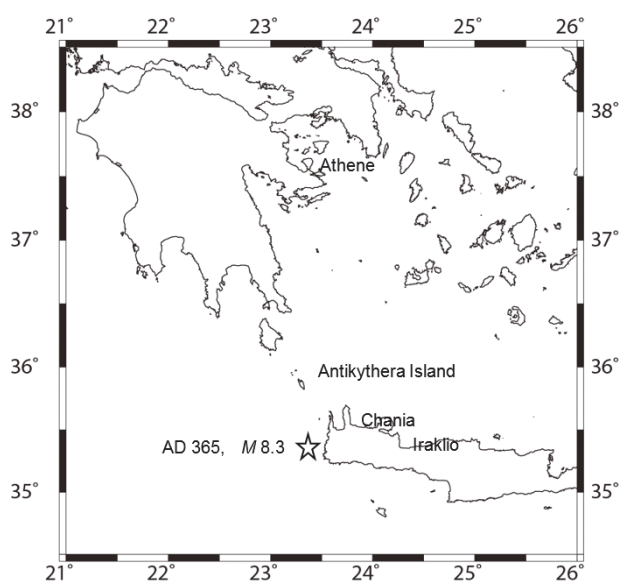


図-2 AD365年クレタ沖地震の震源

2. 地震・津波と神話

日本では地震とナマズの関係が伝えられてきたように、ギリシャ神話では巨人族が暴れることで、自然災害を引き起こすと考えられている．巨人族ギガンデス(Gigantes)は、ゼウス(Zeus)が率いる神々と巨人族の戦い(ギガンデスの戦い)が繰り返される．その巨人族の一人で地震・津波を引き起こすエンゲラドス(Engelados/Engeladus)が登場する．戦闘の女神アテナ(Athena)は、ゼウスの頭部から武装した姿で生まれ、

ギガンデスの戦いに参戦し、エンゲロドスを倒し、地震・津波を鎮めた．

この神々はオリンポス12神(ゼウス:Zeus, ヘラ:Hera, アテナ:Athena, アポロン:Apollon, アフロディーテ:Aphrodite, アレス:Ares, アルテミス:Artemis, デメテル:Demeter, ヘファイトス:Hephatistos, ヘルメス:Hermes, ポセイドン:Poseidon, ヘファイトス:Hephaistos, デオノソス:Dyonissos)をモチーフとした装飾に用いられ、パルテノン宮殿等のペデメント(切妻屋根の三角の装飾版)に祀られていたが、大部分はローマ時代に破壊されている．

海の神ポセイドン(写真-1)はギリシャ人にとっては海の神であり、ある時は波を鎮め、またある時は嵐を引き起こす．三叉の鉾(トライデント)を持ち、海をかき回すことで海を荒立て、海と大地を支配する力を持っていたので、古代ギリシャ人にはポセイドンの怒りが大地震と津波を引き起こし、島々の地形さえも形造って来たとされている．一方、自然の災害を鎮める神でもあった．アテネの支配権を巡って、アテナとポセイドンの戦いが神話として存在する．ポセイドンは三叉の鉾で大地を荒らし、アテナはオリーブを植え、市民たちから歓迎を受け、自分たちの都市名をアテナとした．この女神に敬意を払い、パルテノン神殿を建設した．



写真-1 海の神ポセイドン（国立考古学博物館:National Archaeological Museum）
(photo. by T.Ohsumi)

3. 地形変動年代特定

Pitazzoli et al.(1996)⁹⁾は、ギリシャ沿岸部の完新世の地震による隆起の痕跡は、4世紀中期と6世紀中期の間のビザンチン前期の構造の激動期(EBIP)と呼ばれる時期の上昇

として、Pitazzoli *et al.* (1982,1986)等の放射性炭素年代と詳細な現地調査でクレタ島とアンティキティラ(Antikythira)島で得られた新しい解釈に基づいて調査結果を修正している。EBTP隆起の量は、0.5 mと1.0 mの間であるが、クレタ島南西で最大約9 mまでに達しているとしている(図-2)。

Flemming (1978)⁹⁾は、エーゲ海のトルコ南西部およびキプロスの約175の地点での研究から、相対的な地盤沈下、隆起の評価を行い、相対的な年間海面上昇率を1.05 mm/yrと評価した。この結果を用い、連続的に増加する海面および断続的に生じる地盤隆起の仮説に基づいたクレタ西部の相対的な海面変化を図-3に示す。アンティキティラ(Antikythera)島およびクレタ島では隆起が、完新世に以前に生じ、クレタ島では、3,000数年間に地震後に起きた小さな沈下動作はEBTPの隆起に先行し、センチメートル規模のものが十回程度生じている。クレタ島西部の全体の海岸に沿って横に連続的に存在することから巨大地震によって隆起が一度に生じていた痕跡があり、海岸線の隆起の蓄積が、測定結果の誤差等によらないことを示すことを確認している。クレタ島南西部は切り立った海岸段丘が見られ、この大部分の上昇は、地震発生に基づくとされる。海岸の岩に残された一列に侵食されたくぼみや完全な形で残された海洋生物が封印されたサンゴの化石の破損状態から、現象が生じたのは通常の遅い隆起ではなく、急激な隆起であることが類推される。

4. 過去の地震

(1) 古代の地震被害

アプテラ(Apra: 写真-2)は、クレタ島北部でハニア(Hania)から30 km西側、イラクリオ(Iraklio)から120 km東側に位置する古代都市アプテラ(Apra)は、BC15-14 世紀

から建設され、AD4 世紀の地震と7世紀の地震で壊滅的な被害を受けた。古代神殿、城門・城壁の跡が残されている紀元前69年からローマ占領が始まり、ローマ帝国の終焉期にあたるAD365年に終了していることから、地震による被害が甚大であることが伺える。

(2) 歴史地震の震度分布

Sieberg(1932)¹⁰⁾によって示されたクレタ島周辺の歴史地震(1886年,1903年,1926年,1956年)の震度分布を図-4に示す。Wyss and Baer(1981)¹¹⁾これらの図を引用して以下の特徴を指摘している。

- 1) これらの地震はギリシア島弧全体に被害を及ぼしている。
- 2) 揺れを感じた範囲は広範囲に及ぶ。
- 3) 震度分布は非対称である。一般に、激震地域はギリシア島弧から離れた地域にまで記録されるが、背弧側に急激に減少する。
- 4) すべての地震で修正メリカリ震度 XI (気象庁震度階級関連解説表(1996)の震度6強に相当)に達している。

(3) ハザードマップ

Sieberg(1932)¹⁰⁾は、レバント地域の地震マップを作成している。図-5にクレタ島地域を示す。赤で示された地域は、建物損傷度が大きいと予想された地域で、首府のイラクリオンからクノッソス方向に分布する地域は、1926年(M7.5)の地震においても修正メリカリ震度9~10である。クレタ島北西部のハニア(Chania)、北東部のシティア(Sitia)、南東部のイエラペトラ(Ierapetra)、アイダ山のスロライデス(Psiloritis)が予想震度の高い地域である。

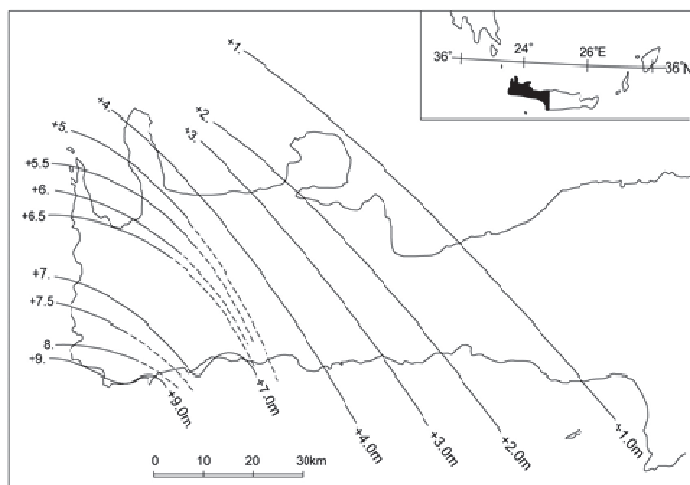


図-2 クレタ島における隆起のコンター(最大: 島南西部の9m) Pitazzoli *et al.*(1996)⁶⁾

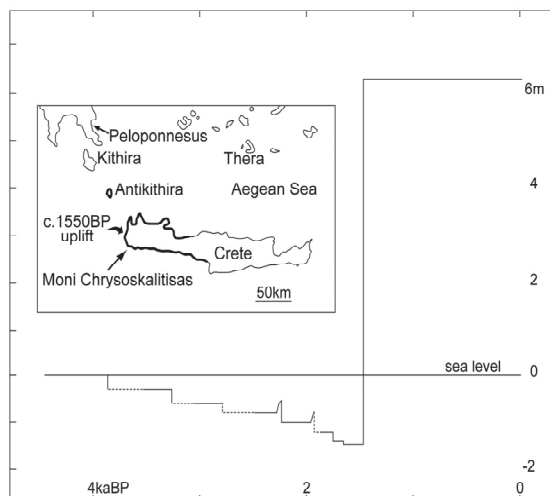
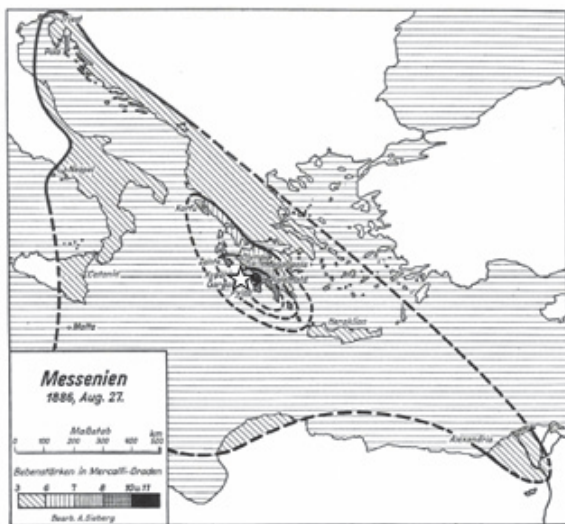


図-3 地盤隆起の仮説に基づいたクレタ西部の相対的な海面変化 Flemming (1978)⁹⁾



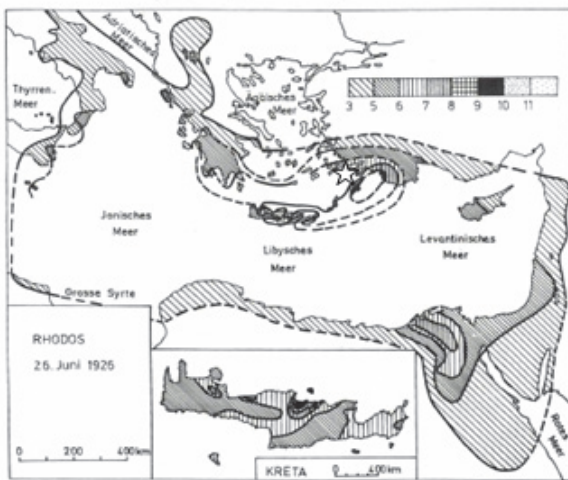
写真2 地震で崩壊したapteラの要塞の入り口復元図（左図）と現在の遺跡公園（右図）（Information plate of National Strategic Reference Framework (NSRF)) (photo by T. Ohsumi)



27 August 1886, $M7.5$



11 August 1903, $M7.9$



26 June 1926, $M7.5$



12 October 1956, $M7.5$

図4 歴史地震(1886年,1903年,1926年,1956年)の震度分布, Sieberg(1932)¹⁰⁾

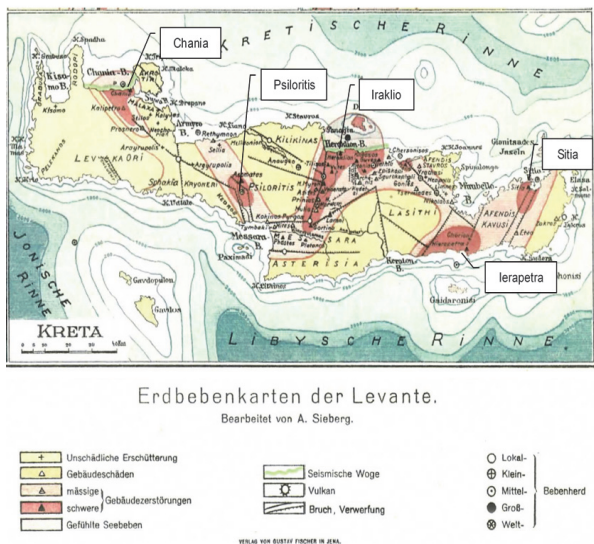


図-5 レバント地域の地震マップのクレタ島部分 Sieberg(1932)¹⁰⁾

5. AD365の地震の推定

AD365クレタ沖地震の地震波を統計的グリーン関数を用いて再現を試みる。

(1) AD365の地震のパラメータ

表-1 に巨視的断層パラメータの比較を示す。

表-1 巨視的断層パラメータの比較

		Fischer (2007)	Shaw <i>et al.</i> (2008)	Stiros (2010)	Papadimitriou <i>et al.</i> (2008)
Strike	°	297	315	292.5	315
Dip	°	13	30±5	40	35
Depth	km		45	70	5 to 50
Length	km	145	100	105	160
Width	km	130		100	80
Slip	m	42	20	16	8.9
M_0	dyne cm			5.04×10^{28}	5.7×10^{28}
M_w		8.5	8.3-8.5	8.5	8.3

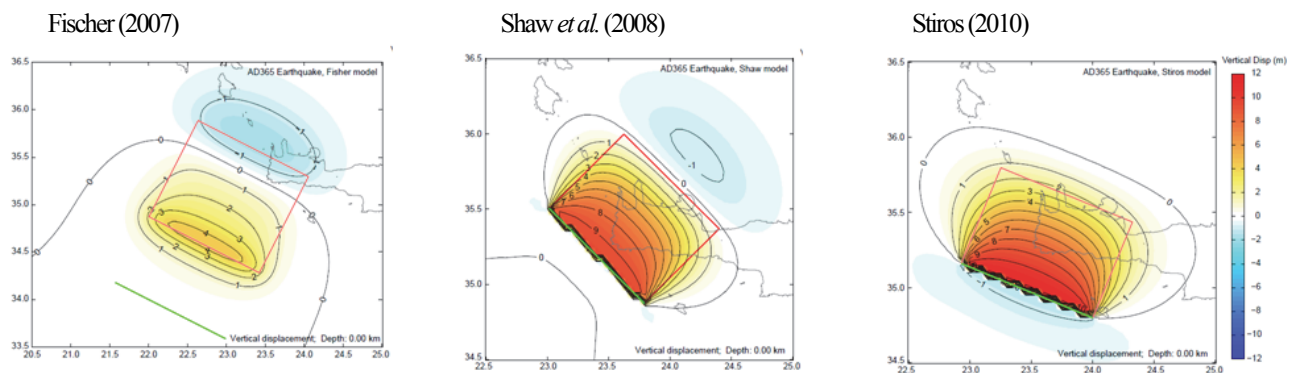


図-6 巨視的断層パラメータを変化させた Okada(1992)¹²⁾の算定式を用いた隆起分布

Okada(1992)¹²⁾の算定式を用いた隆起分布を図-6 に示す。

Fischer (2007) は、沈み込みプレート沿いに Dip を 13° と低角度に設定しているため、Slip を 42 m としているこれは、Murotani, *et al.*, (2013)¹³⁾の平均すべり量は 1960 年チリ地震・2011 年東北地方太平洋沖地震が最大でともに 10.6 m と比べると、4 倍近いすべり量である。また、Okada(1992)¹²⁾の算定式を用いた隆起分布でも十分な隆起量でない。

Stiros (2010)²⁾は沿岸隆起データの弾性逆解析から、この地震がクレタ島南西部沖の逆断層に起因し、考えられる最小のマグニチュードは 8.5 であったと想定した。

Papadimitriou *et al.* (2008)⁵⁾, Shaw *et al.*, (2008)⁴⁾によるクレタ島隆起の原因である断層のモデルを示した。エーゲ海島弧の走向および微小地震の深さがこのモデル域にあり、Stiros (2010)²⁾の設定した 70 km よりも浅い設定となっている。

Papadimitriou *et al.* (2008)⁵⁾は、Papazachos (2000, 2001)¹⁴⁾の地震学と地形学の観点から、315°の走向を考慮し、断層の面積と弾性係数から地震モーメントは 5.7×10^{28} dyne-cm とした。沈み込み帯で起こる地震のサイズとしては、 $M_w < 8.0$ クラスの地震 (Ruff and Kanamori, 1980)¹⁶⁾、強い結合は沈み込み帯は大きな $M_w > 8.0$ クラスの (Kanamori, 1977)¹⁷⁾をもたらすことがあるとして、 $M_w 8.3$ の設定をしている。

Fischer(2007)³⁾は、13°と低アングルで、沈み込みのプレート面に沿った角度である。平均滑り量は 42 m である。

Stiros (2010)²⁾は沿岸隆起データの弾性逆解析から、この地震が Crete 島南西部沖の逆断層に起因するもので、考えられる最小のマグニチュードは 8.5 であったと想定した。モデル化された断層の地表トレースは主な水深測量との適合を検討している。

Shaw(2008)⁴⁾, Papadimitriou *et al.* (2008)⁵⁾による Crete 島隆起の原因である断層の同様のモデルを示した。島弧の走向および微小地震の深さがこのモデル域にあり、Stiros (2010)²⁾に設定した 70 km よりも浅い設定となっている。

Papadimitriou *et al.* (2008)⁵⁾はすべり量が断層面で一様分布でなく、128 分割のメッシュにそれぞれのすべり量を与えて隆起量をインバージョンしている。断層のジオメトリーは断層の長さが 165 km と長いほかは、Shaw *et al.* (2008)⁶⁾とほぼ一致している。

Shaw *et al.* (2008)⁶⁾の 100 km²の断層面から地震規模を推定すると(例えば断層面積と地震規模の関係： $\log S = M - 4.07$)¹⁸⁾、 M_w が 8.0 程度となり、クレタ島地震の地震規模 ($M_w 8.3 \sim 8.5$)と乖離が生じる。

よって、統計的グリーン関数法による地震動策定は $M_w 8.5$ とし、Papadimitriou *et al.* (2008)⁹⁾の巨視的パラメータを採用した。

(2) 位相特性

統計的グリーン関数法に与える位相特性として、ランダム波や実際の観測波が用いられる。ここでは、クレタ島にて観測された 2013 年 10 月 12 日発生した地震 ($M_w 6.4$) を位相特性として検討した。4 観測点の速度波形を図-7 に示す。アテネ以外は、オーバースケールしている。同日の余震 ($M_w 4.0$: 図-8) はややマグニチュードが低下するが、速度記録が 5 観測点で得られたので、余震ではアテネはノイズが多いため、アテネは本震 ($M_w 6.4$)、それ以外は余震 ($M_w 4.0$) の観測波の位相特性を用いた。

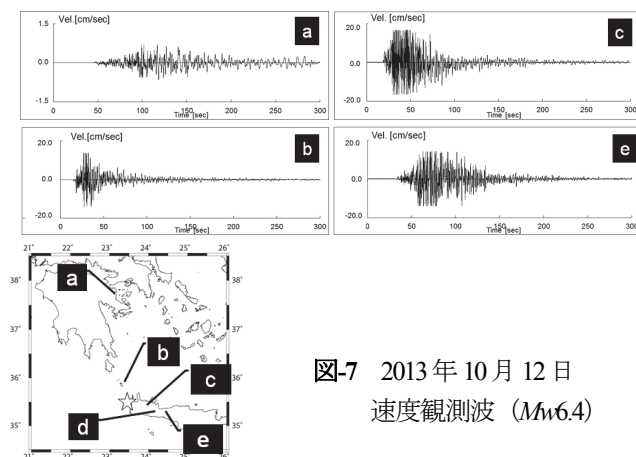


図-7 2013 年 10 月 12 日
速度観測波 ($M_w 6.4$)

(3) 地盤増幅特性

地盤増幅特性としては、Karagianni (2005)¹⁹⁾に示されている深部せん断波速度 V_s 値を参考に、5 km を断層上面として、一次元波動論でサイト増幅特性を評価した。

表層 200 m のうち、GL-100 m から 200 m までは $V_s = 700$ m/sec とし、堆積層が厚いハニア、イラクリオ地点では GL-0 m から 100 m までは、地震観測結果のコーダ波 (Coda waves) の部分から H/V スペクトルを算定し、GL-0 m から 100 m の卓越振動数と適合する地層構成とした。

H/V スペクトルを算定の結果、ハニアでは 0.4 Hz と 1.2 - 1.8 Hz 付近にピークをつので、一次元波動論の伝達関数のピークで適合する表層 100 m の地層構成を設定した。イラクリオでは 0.7 Hz と 3 Hz 付近にピークを持つので、1 次と 2 次のピークに一次元波動論の伝達関数のピークで適合する表層 100 m の地層構成を設定した。

(4) 算定結果

統計的グリーン関数法による AD 365 年クレタ沖地震算定結果を図-9 に示す。震源から 10 km 程のフィラサリア (Phalasarna) では、102 cm/sec、震源から 50 km 程のアンティキティラ (Antikythera) 島では、57 cm/s、震源から 50 km 程のハニアでは、108 cm/s、震源から 75 km 程のアプテラでは、55 cm/s、震源から 270 km 程のアテネでは、2 cm/s であった。一方、堆積層による増幅を考慮した 2 地

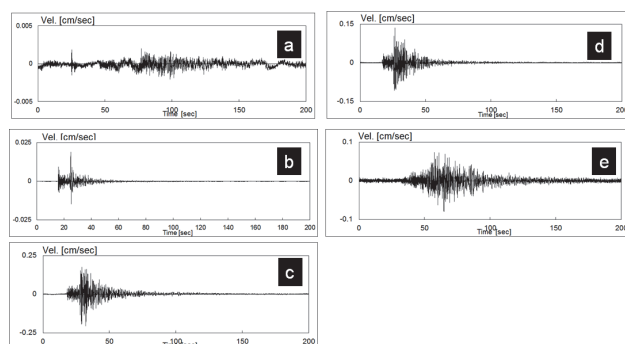


図-8 2013 年 10 月 12 日
余震速度観測波 ($M_w 4.0$)

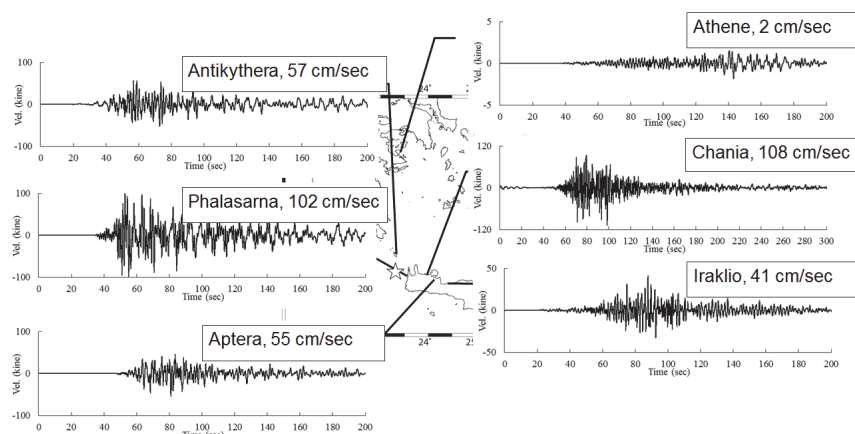


図-9 AD365 年クレタ沖地震推定速度波 ($M_w 8.5$)

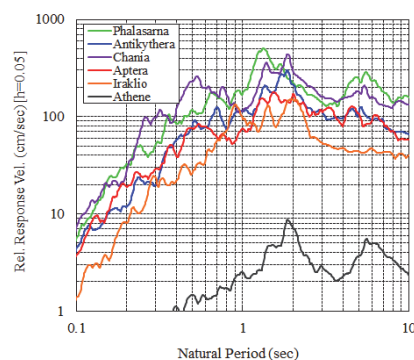


図-10 AD365 年クレタ沖地震
速度応答スペクトル

点（ハニア，イラクリオ）では，震源から 50 km 程のハニアでは，115 cm/sec と岩盤上で震源 10 km のフィラリアよりも大きな速度となった．震源から 150 km 程のイラクリオでは，41 cm/sec となった．

速度応答スペクトルを図-10 に示す．ハニア，イラクリオでは，卓越周期は 2 sec となり，堆積層内の非線形効果により，想定結果よりも非線形応答が影響することが懸念される．

6. 総括

- 1) 地中海周辺のプレート間の相対運動速度は2~4 cm/年であり，世界的に見て，収束境界としては他の地域に比べて小さい傾向である．
- 2) クレタ島南西部の隆起は放射性炭素年代とサンゴの化石、切り立った海岸段丘の現地調査でAD365年の地震のみの急激な隆起で最大約9 mまでに達している．
- 3) Okada(1992)による隆起分布で検証した結果，断層面は沈み込みのプレート面に沿った低角度ではなく，高角度であることが想定された．
- 4) 統計的グリーン関数法の地震波策定に用いた位相特性は，近年観測されてた各措定地点の地震波形を用いたことで，より現実的な波形となった．
- 5) クレタ島首府のイラクリオンとクレタ島北西部のハニアには堆積層が厚く分布し予想震度の高い地域である．また，速度応答スペクトルの卓越周期は2 sec となり，堆積層内の非線形応答が影響することが懸念される．

謝辞

Gerassimos A. Papadopoulos教授（Institute of Geodynamics National Observatory of Athens）には，クレタ島周辺の地盤情報をいただきました．Eleftheria Papadimitriou 教授およびVassilis Karakostas 准教授（Aristotele University of Thessaloniki）には，クレタ島の地震観測記録等貴重な現地データを提供いただきました．記して御礼申し上げます．なお，本研究はJSPS科研費 24101012の助成を受けたものです．

参考文献

- 1) 堀高峰・金田義行，「世界の巨大地震・津波」 地中海地域，地震予知連絡会議会報 89, 2013.
- 2) Stiros, S., The 8.5+ magnitude, AD365 earthquake in Crete: Coastal uplift, topography changes, archaeological and historical signature, *Quaternary International*, **216**, 54–63, 2010.
- 3) Fischer, K. D. & Babeyko, A. Modelling the 365 AD Crete earthquake and its tsunami. *Geophys. Res. Abs.* **9**, 09458, 2007.

- 4) Shaw, B., Ambraseys, N., England, P.C., Floyd, M.A., Gorman, G.J., Higham, T.F.G., Jackson, J.A., Nocquet, J.-M., Pain, C.C., Piggott, M.D., Eastern Mediterranean tectonics and tsunami hazard inferred from the AD365 earthquake. *Nature Geoscience* **1**, 268–276, 2008.
- 5) Papadimitriou, E., Karakostas, V., Rupture model of the great AD 365 Crete earthquake in the southwestern part of the Hellenic Arc. *Acta Geophysica* **56** (2), 293–312, 2008.
- 6) Pitazzoli, P.A., The Early Byzantine Tectonic Paroxysm. *Z. Geomorph. N.F., Suppl.-Bd.*, **62**, 31-49, 1986.
- 7) Ambraseys, N. N., 1994. The Seismicity Egypt, Arabic and the Red Sea, p.23.
- 8) Ambraseys, N. N., 2009. Earthquakes in the Mediterranean and Middle East : A Multidisciplinary Study of Seismicity up to 1900, Cambridge University Press; 1 edition, 968 p.
- 9) Flemming, N.C., Holocene eustatic changes and coastal tectonics in the northeast Mediterranean: implications for models of crustal consumption. *Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. A*, **289** (1362): 405-458 + Appendix I, 1978.
- 10) Sieberg, A., Iseisismal contours crete ad 365 crete earthquake intensity Iseisismal contours crete, *Untersuchungen über Erdbeben und Bruchschollenbau im Oestlichen Mittelmeergebiet*, Jena : [s.n.], BA49737430, 1932.
- 11) Wyss, M. and Baer, M., Earthquake Hazard in the Hellenic Arc, *Maurice Ewing Series*, Vol. 4, pp. 153-172, 1981.
- 12) Okada, Y. (1992), Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bull. Seismol. Soc. Am.* **82**, 1018-1040.
- 13) Murotani, S., Satake, K. and Fujii, Y., Scaling relations of seismic moment, rupture area, average slip, and asperity size for M-9 subduction-zone earthquakes, Volume 40, Issue 19, pages 5070–5074, 16 October 2013.
- 14) Papazachos, B.C., B.G. Karakostas, C.B. Papazachos, and E.M. Scordilis, The geometry of the Benioff zone and lithospheric kinematics in the Hellenic Arc, *Tectonophysics*, **319**, 275-300, 2000.
- 15) Papazachos, B.C., D.M. Mountrakis, C.B. Papazachos, M.D. Tranos, G.F. Karakaisis, and A.S. Savvaidis, The faults that caused the known strong earthquakes in Greece and surrounding areas during 5th century B.C. up to present, *2nd Conf. Earthq. Enging. and Engin. Seism.*, 28-30 September 2001, Thessaloniki 1, 17-26, 2001.
- 16) Ruff, L. and Kanamori, H., Seismicity and the subduction process, *Phys. Earth Planet. Inter.* **23**, 240-252, 1980.
- 17) Kanamori, H. (1977), The energy release in great earthquakes, *J. Geophys. Res.* **82**, 2981-2987.
- 18) 佐藤 亮輔 編著：日本の地震断層パラメータ・ハンドブック，390p，鹿島出版，1989.

- 19) Karagianni, E. E. , Shear velocity structure in the Aegean area obtained by inversion of Rayleigh waves, *Geophysical Journal International*, Volume 160, Issue 1, January 2005, Pages 127-143.

SEISMICITY IN MEDITERRANEAN SEA AND EVALUATION OF THE STRONG MOTION FOR THE AD 365 CRETE EARTHQUAKE BY THE STOCHASTIC GREEN'S FUNCTION

Tsuneo OHSUMI, Yasuhiro FUKUSHIMA

In AD 365 years, $M8.5$ class earthquake happened near Crete island. This earthquake, AD 365 was a typical earthquake in the eastern Mediterranean region. Pirazzoli (1986) papers focused on the upheaval of the coastline of the Eastern Mediterranean area and this period was one of the active phases of earthquakes in this area AD 350 to 550, which was the most active period of the past 2,000 years. We investigated the traces of the past upheaval in Crete island and verify the characteristic of the AD365 Crete earthquake waveforms by using the stochastic Green's function method.