統計的グリーン関数を用いたAD 365年 クレタ沖地震動の推定

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が、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顕著な地震の活動期の一つであったことを記述している。当時の痕跡である現地の地盤隆起は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年クレタ沖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

レバント(東部地中海地域)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、地殻変動データと最も適合する歴史地震の震源断層を推定して求めることが、この地域の地震・津波防災に貢献することとなる。

この地域に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。当該地域は、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が、部分的に存在する。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、

Stiros²⁾, Fischer³⁾, Shaw⁴⁾, Papadimitriou⁵⁾)。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、レバントの代表的地震であるが、Pirazzoli⁶⁾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顕著な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の島が存在し、その中で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。クレタ島の面積(8,336 km²)は、兵庫県(8,395 km²)や静岡県(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、地震予知連絡会会報 89¹⁾に
加筆

Ambraseys^{7,8)}はこれらの歴史地震について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による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Sozomeneによると, 建物の屋根に残された津波の引き波後, 海岸線の後退と広い範囲の浸水域が記載されている^{7,8)}. 後世のビザンチンの歴史家(George the Monk:9世紀にChronicleに記載, Theopano: 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ることから, 地震クロニクルを調査する必要がある, その中で甚大な地震・津波を引き起こした歴史地震のAD365年のクレタ沖地震を調査対象とし, まずは, 地震動を推定した.

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. 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, エンゲラドスを倒し, 地震・津波を鎮めた.

3. 地形変動年代特定

Pirazzoli⁹⁾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(EBTP)と呼ばれる時期の上昇として, 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(Antikythera)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-3).

Flemming⁹⁾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-4に示す. アンティキティラ島およびクレタ島では隆起が, 完新世に以前から始まり, 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が確認されている. 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考えられる. 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.

Shaw⁹⁾はSpratt¹⁰⁾のTravels and Researches in Creteを引用し, クレタ島西部の隆起に関する記載として, グランバサ(Grambousa)半島において, AD 365年の海岸線が崖の下部に存在する暗い帯状として認められる(写真-1). この暗い帯はスウギア(Sougia)の海岸でも見られる(写真-2). ハニアから48 kmの北西沿岸のファラ跡が海面から16フィート(約5 m)の高さに存在し, BC333年ころから構築された港を囲む擁壁や港が使用されていたころの海面の位置を示すものとしている(図-5). 隆起した軍事港湾施設(写真-3)は, 海水面から約8 mの高さにある. 船着場は3 mほど下に位置するので, 約5 mの隆起と調和する. パレオフォーラ(Paleochora)は, ハニアから南に80 kmのクレタ島南海岸の9 mの隆起が記録されている地点である. この半島部分は海の下に存在していた.

図-3 クレタ島における隆起のコンター(最大: 島南西部の 9 m)
Pitazzoli *et al.*(1996)⁶⁾

図-4 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⁾
(BP: Before Presence)

写真-1 グランバサ (Grambousa) の
A.D.365 年の海岸線が崖の下部の暗い
帯状 (Spratt¹⁰⁾)

写真-2 スウギア(Sougia)の海岸にも
暗い帯状が存在。

写真-3 ファラサリア(Phalasama)の隆起し
た軍事港湾施設。

図-5 ファラサリア(Phalasama)の BC333 年こ
ろから構築された港の遺跡の隆起。
(Spratt¹⁰⁾)

4. 過去の地震

(1) 古代の地震被害

クレタ島北部でハニア(Chania)から 30 km 東側, イラクリオ(Iraklio)から 120 km 西側に位置する古代都市アプテラ(Aptera)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

Sieberg¹¹⁾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)の震度分布を示している。Wyss and Baer¹²⁾は, これらの図を引用して以下の特徴を指摘している。

1) これらの地震はアフリカプレートの沈み込み境界の海溝沿いのギリシア島弧全体に被害を及ぼしている。

図-6 レバント地域の地震マップのクレタ島部分 (Sieberg¹¹⁾)

図-6 レバント地域の地震マップのクレタ島部分 (Sieberg¹¹⁾)

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

Sieberg¹¹⁾は、これら過去の地震に基づいて、レバント地域の地震マップを作成している。図-6 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、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) が想定される震度の高い地域である。

表-1 巨視的断層パラメータの比較

		Fischer <i>et al.</i> (2007)	Shaw <i>et al.</i> (2008)	Stiros (2010)	Papadimitriou and Karakostas (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

5. AD365の地震動の推定

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、これまでに推定されている巨視的断層パラメータの比較を示す。

Okada¹³⁾の算定式を用いた隆起分布を図-7 に示す。

図-7 巨視的断層パラメータを変化させた Okada¹³⁾の算定式を用いた隆起分布

Fischer³⁾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.*¹⁴⁾の平均すべり量(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、Okada¹³⁾の算定式を用いた隆起分布でも充分な隆起量でない。

Stiros²⁾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 であったと想定している。

Papadimitriou and Karakostas⁵⁾, Shaw *et al.*⁴⁾によるクレタ島隆起の原因である断層のモデルは、ギリシャ島弧の走向および微小地震の分布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 and Karakostas⁵⁾は、Papazachos (2000, 2001)^{15), 16)}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 Kanamori¹⁷⁾) ではなく、強く結合された沈み込み帯で生じる $M_w > 8.0$ クラス (Kanamori¹⁸⁾) の地震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。

Papadimitriou and Karakostas⁵⁾はすべり量が断層面で一様分布でなく、128 分割(長さ方向 16 分割×幅方向 8 分割)された 10 km^2 四方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。

以上を参考に、統計的グリーン関数法で用いる震源パラメータを設定した。その一覧を表-2 に示す。

断層基準点緯度経度、上端深さ、断層長さ、幅は Papadimitriou and Karakostas⁵⁾に基づいている。

断層面積について、Shaw *et al.*⁴⁾や Stiros²⁾は、いずれも断層面は約 100 km 四方であるが(表-1 に示した Shaw *et al.*⁴⁾では断層幅は示されていないが、図-7 の投影された矩形断層の沈み込み方向の長さから 100 km 程度と考えられる)、断層面積と地震規模の関係(例えば $\log S = M - 4.07$)¹⁹⁾によると、100 km 四方の断層面の M_w は 8.0 程度であり、クレタ島地震の地震規模($M_w 8.3 \sim 8.5$)には、もっと大きな断層面を考慮すべきと考えられるからである。

地震規模は、Papadimitriou and Karakostas⁵⁾のすべり量分布より求めた。表-3 に示すように、図-14 の各メッシュの色ごとにすべり量 D を仮定し、要素断層面積 S ($10 \text{ km} \times 10 \text{ km} = 100 \text{ km}^2$)と剛性 μ (Stiros²⁾より $3.0 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$)から $M_0 = \mu DS$ の関係を用い、各要素の地震モーメントを求めている。各要素の地震モーメントの和より、断層全体の地震モーメントは 3.44×10^{28} dyne-cm ($M_w 8.3$) とした。

このように、特性化震源モデルを用いているわけではないが、Somerville *et al.*²⁰⁾、石井・他²¹⁾より、図-14ですべり量が 17.8 m (平均すべり量 8.9 m の 2 倍)以上を要素をアスペリティ、17.8 m 未満を背景領域と便宜的に設定し、アス

表-2 解析パラメーター一覧

L (km)	100
W (km)	86
Strike (deg.)	315
Dip (deg.)	35.0
Depth (km)	5
M_0 (N·m)	3.44×10^{21}
Rise time (s) Asperity / Background	3.0 / 10.0
Hypocentre	N34.54, E24.08
Rupture-Propagating Direction	Radial
Cut off frequency (Hz)	13.5
ρ (g/cm ³)	2.6
V_s (km/s)	3.5
V_r (km/s)	2.7

表-3 要素ごとのすべり量と地震モーメント

Color in Fig.14	D (m)	M_0 (N·m)
Red	25	7.5×10^{19}
Orange	20	6.0×10^{19}
Yellow	15	4.5×10^{19}
Green	10	3.0×10^{19}
Blue	5	1.5×10^{19}

ペリティ要素では応力降下量 22.1 MPa、ライズタイム 3 秒、背景領域要素では応力降下量 2.6 MPa、ライズタイム 10 秒を仮定した。また、破壊伝播速度は、片岡・他²²⁾より、S 波速度の 80% とし、高周波遮断周波数は佐藤・他²³⁾より 13.5 Hz とした。

(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は、ランダム波や実際の観測波が用いられる。ここでは、クレタ島で観測された 2013 年 10 月 12 日に発生した地震 ($M_w 6.4$) を位相特性として検討した。なお、水平 2 成分を沈み込み方向 (走行に 90° 方向 : N45E) に合成して用いた。4 観測点の速度波形を図-8 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-9) はややマグニチュードが低下するが、速度記録が 5 観測点で得られている。アテネの余震波形はノイズが多いため、アテネでは本震 ($M_w 6.4$)、それ以外の地点では余震 ($M_w 4.0$) の観測波の位相特性を用いた。

図-8 2013年10月12日
速度観測波 ($M_w 6.4$)

図-9 2013年10月12日
余震速度観測波 ($M_w 4.0$)

(3) 地盤増幅特性

地盤増幅特性としては、Karagianni²⁴⁾に示されている深部せん断波速度 V_s 値を参考に、断層上面を 5 km として、一次元波動論で水平成層による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/s 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 (ハニア: 140.00~221.91 s, イラクリオ: 230.00~311.91 s) から H/V スペクトルを算定し、100 m 以浅の卓越振動数と適合する地層構成とした。

H/V スペクトルを算定した結果 (図-10)、ハニアでは 0.4 Hz と 1.2 - 1.8 Hz 付近にピークを有するので、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 (表-4、図-9)。他の地点は岩盤が露頭しているので、深部せん断波速度 V_s 値を参考に設定した。

(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-10 に示す。震源から 10 km 程のフィラサ

表-4 卓越振動数に適合する地層構成

Chania

	Layer 1	Layer 2	Layer 3
ρ	1.8	1.8	1.8
V_{si} (km/s)	60	150	350
H_i (m)	5	15	80

Iraklio

	Layer 1	Layer 2	Layer 3
ρ	1.8	1.8	1.8
V_{si} (km/s)	60	80	350
H_i (m)	5	15	80

図-10 ハニアとイラクリオ地点の H/V スペクトルと使用したコーダ波部分

リア (Phalasarna) は、観測点がないので、アンティキティラ島の位相を用いた。結果は、102 cm/s となり、震源から 50 km 程のアンティキティラ島では、57 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 地点 (ハニア、イラクリオ) では、震源から 50 km 程のハニアでは、108 cm/s と岩盤上で震源 10 km のフィラサ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/s となった。

速度応答スペクトルを図-13 に示す。ハニア、イラクリオでは、2 s 付近が卓越しており、堆積層内の地盤の非線形性により、算定結果よりもさらに長周期化することが懸念される。

(5) 震源位置の変化による検討

本検討では、Papadimitriou and Karakostas (2008)²⁾の断層面において震源の位置は歴史地震で示されている位置を用いたが、信頼性に乏しい。よって、アプテラにおいて、断層面における震源 (破壊開始点) の位置を図-14 に示す断層下端の 3 箇所 (Case 1 ~3 : Case 0 は歴史地震) で検討した。速度波形および速度応答スペクトルを図-15、16 に示す。震源位置の変化で顕著な速度応答スペクトルに関しては顕著な変化はないが、Case 3 は 1.1 s と 5.0 s にピークを持つ。予測波形の最大速度は 55 ~78 cm/s と変化し、Case 3 でやや大きく、相当する加速度波形は最大加速度が 328 cm/s^2 となった (図-17)。この最大加速度が煉瓦造にどれほどのダメージを与えると想定されるかを検証する。Ohsumi *et al.*²⁵⁾、Segawa *et al.*²⁶⁾はネパールにおける建物インベントリ調査、被害調査および被害想定においてフラジリティーカーブを設定している (図-18)。当時のアプテラの多くの構造物、住宅は、このフラジリティーカーブの AD (アドベ)、BM (泥目地煉瓦造) に相当すると推定される。この結果、50%以上の構造物が全壊、半壊の状態であることが類推される。

図-11 ハニアとイラクリオ地点の一次元波動論に基づく伝達関数

また、堆積層が厚く、古くから都市が発達しているハニアでの震源を同様に変化させた検討 (図-19, 20) では、震源位置の変化により最大速度は 84 ~126 cm/s となり、Case 2 が最も大きく、速度スペクトルは、アプテラ同様、2 つのピークを持つ。相当する加速度波形の最大加速度は 913 cm/s^2 と 1G 近い加速度値となった (図-21)。

図-13 AD365年クレタ沖地震推定速度波 ($M_w 8.5$) 速度応答スペクトル

図-12 AD365年クレタ沖地震

図-14 断層面における震源（破壊開始点）の位置の変化
(元図は Papadimitriou and Karakostas⁵⁾)

図-16 震源の位置の変化による速度応答スペクトル変化(Aptera)

図-15 震源の位置の変化による速度波形変化
(Aptera)

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化石、切り立った海岸段丘の現地調査によれば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ていた。
- 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、近年観測されていた各推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 s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。
- 6) 震源（破壊開始点）の位置を断層下端の3箇所（Case1~3）で検討した結果、アプテラでの最大速度は最大78 cm/sとなり、最大加速度は328 cm/s²となった。この最大加速度に対して、当時の煉瓦造の構造物、住宅では50%以上の構造物が全壊、半壊の状

態であることが類推される。

- 7) 堆積層が厚く、古くから都市が発達しているハニアで震源を同様に变化させた検討では、震源位置の変化により最大速度は最大126 cm/sとなり、最大加速度は913 cm/s²と1G近い加速度値となった。

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, 2001.
- 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.,

図-17 Case 3位置の加速度波形 (Apera)

図-19 震源の位置の変化による速度波形変化
(Chania)

図-18 煉瓦造被害曲線

ST(石積造), AD(アドベ), BM(泥目地煉瓦造), BMW(泥目地良質煉瓦造), BC(モルタル目地煉瓦造), RC3(RC 枠組煉瓦造 3 階建), RC5(RC 枠組煉瓦造 5 階建)²⁰⁾

図-20 震源の位置の変化による速度応答スペクトル変化
(Chania)

図-21 Case 2位置の加速度波形 (Chania)

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) Pirazzoli, P.A., The Early Byzantine Tectonic Paroxysm. *Z. Geomorph. N.F., Suppl.-Bd.*, **62**, 31-49, 1986.
- 7) Ambraseys, N. N., The Seismicity Egypt, Arabic and the Red Sea, p.23, 1994.
- 8) Ambraseys, N. N., Earthquakes in the Mediterranean and Middle East : A Multidisciplinary Study of Seismicity up to 1900,

Cambridge University Press; 1 edition, 968 p., 2009.

- 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) Spratt, T.A.B., Travels and Researches in Crete, vol 2 (J. van Voorst, London), 1865.
- 11) Sieberg, A., Iseismal contours crete ad 365 crete earthquake intensity Iseismal contours crete, *Untersuchungen über Erdbeben und Bruchschollenbau im Oestlichen Mittelmeergebiet*, Jena : [s.n.], BA49737430, 1932.

- 12) Wyss, M. and Baer, M., Earthquake Hazard in the Hellenic Arc, *Maurice Ewing Series*, Vol. 4, 153-172, 1981.
- 13) Okada, Y. (1992), Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bull. Seismol. Soc. Am.* **82**, 1018-1040.
- 14) 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, *Geophysical Research Letters*, **40**, Issue 19, 5070-5074, 16 October 2013.
- 15) 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.
- 16) 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.
- 17) Ruff, L. and Kanamori, H., Seismicity and the subduction process, *Phys. Earth Planet. Inter.* **23**, 240-252, 1980.
- 18) Kanamori, H. (1977), The energy release in great earthquakes, *J. Geophys. Res.* **82**, 2981-2987.
- 19) 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, 鹿島出版会, 1989.
- 20) Somerville, P.G., K. Irikura, R. Graves, S. Sawada, D. Wald, N. Abrahamson, Y. Iwasaki, T. Kagawa, N. Smith, and A. Kowada: Characterizing crustal earthquake slip models for the prediction of strongground motion, *Seismological Research Letters*, **70**, 59-80, 1999
- 21) 石井 透, 佐藤俊明, Paul G. Somerville: 強震動評価のための不均質断層モデルの主破壊領域の抽出, 日本建築学会構造系論文集, 527, 61-70, 2000
- 22) 片岡正次郎・日下部毅明・村越 潤・田村敬一: 想定地震に基づくレベル2地震動の設定手法に関する研究, 国土技術政策総合研究所研究報告, 15, 2003
- 23) 佐藤智美, 川瀬 博, 佐藤俊明: 表層地盤の影響を取り除いた工学的基盤波の統計的スペクトル特性, 仙台地域のボアホールで観測された多数の中小地震記録を用いた解析, 日本建築学会構造系論文集, 462, 79-89, 1994
- 24) 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, 127-143.
- 25) Ohsumi, T., Kaneko, F., Dixit, A., Fujitani, H., A Building Inventory of the Kathmandu Valley for Vulnerability Analysis & Disaster Mitigation Planning, *The 11th Japan Earthquake Engineering Symposium*, No.411, 2231-2236, 2002.
- 26) Segawa, S., Kaneko, F., Ohsumi, T., Kagawa, H., Fujitani, H., Damage Estimation of Buildings in Kathmandu Valley and Proposal for Improvement of the Earthquake-Resisting Capacity, *The 11th Japan Earthquake Engineering Symposium*, No.410, pp. 2225-2230, 2002.

(2014. 10. 29 受付, 2015. 2. 18 修正, 2015. 2. 21 受理)

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

West Asian region is a very active area of a crustal deformation, many historically huge earthquakes have occurred, crustal movement has continued up to today. To investigate the most suitable solution for the crustal movement will contribute greatly to this region's earthquake and tsunami disaster mitigation. Pitazzoli (1986) suggests that traces of upheaval caused by the AD 365 earthquake on the Greek coast in the Holocene shows the event which occurred in the period called the Early Byzantine tectonic paroxysm (EBTP) turbulent period from the mid-4th to the mid-6th centuries. Evidence of a 9 m upheaval by the AD 365 earthquake movement was found in a detailed survey and by radiocarbon dates by Pirazzoli *et al.* (1996), the date of the casualties' were estimated from coins found in a collapsed house by Stiros (2010), and by the ruins of an old harbor that existed, give the proof of the position of the sea surface at that time by the location of the quay wall. The AD365 earthquake occurred near Crete (e.g., Fischer (2007), Shaw *et al.* (2008), Stiros (2010), Papadimitriou and Karakostas (2008)). This study selected the most reliable parameters, which each researcher defined, and non-uniform distribution in the fault plane, which is based on Papadimitriou *et al.* (2008). The calculation of the AD365 earthquake's waveform gave an indication of the maximum acceleration by using the stochastic Green's function method with the selected parameters. Thus, an estimation of the damage to masonry structures could be made. The ancient Crete city of Aptara and Chania were both hit by the AD365 earthquake. Aptara built on out-cropping rock will be 80 % destroyed whereas Chania built on thick sedimentary layers will be completely destroyed. Chania in the north-west of Crete is expected to be high seismic intensity area. Thus, it is necessary to pay attention to the seismic risk at the high densely populated area with thick sedimentary layers.