

兵庫県南部沿岸域における中期更新世 (MIS11) の 珪藻化石群集と地殻変動量の評価

福本 侑^{1)*}・佐藤裕司²⁾・加藤茂弘³⁾・兵頭政幸⁴⁾

Diatom fossil assemblages of the Middle Pleistocene (MIS11) deposits and evaluation of crustal movements in the coastal area of southern Hyogo Prefecture

Yu FUKUMOTO^{1)*}, Hiroshi SATO²⁾, Shigehiro KATO³⁾
and Masayuki HYODO⁴⁾

Abstract

The coastal area of the southern part of Hyogo prefecture, central Japan, has been undergoing tectonic uplift, induced mainly by the Rokko-Awaji and the Osakawan fault systems. To investigate the activities of these fault systems, we estimated the degree of crustal movements by comparing the elevations of sea-level highstand obtained from diatom fossil assemblages. We analyzed marine sediment layers of Marine Isotope Stage (MIS) 11 from terrestrial section at Mt. Takatsukayama, west of Mt. Rokko, and borehole core samples from Ishiyagawa, south of Mt. Rokko. Data were compared with published diatom records of borehole cores from Maya and Higashinada, south of Mt. Rokko. Diatom flora of Takatsukayama section showed environmental changes of marine transgression, with a horizon of sea-level highstand that most probably corresponds with MIS11.3, which was observed in Maya and Higashinada cores as highest sea-level period during MIS11. Differences in the elevation of those highstands between Takatsukayama section, and Maya and Higashinada cores were 338.9 m and 318.0 m, respectively, reflecting the fault activities since MIS 11. Their displacement rate was calculated as approximately 0.8 m/kyr. Diatom flora of Ishiyagawa core had no clear signal of the highstand, but displacement of as much as 110 m and 90 m was estimated comparing with Maya and Higashinada cores, respectively.

Key words: crustal movement, diatom fossil, MIS11, Osaka Group, stratigraphic comparison

(2021年7月28日受付, 2021年10月8日受理, 2022年1月5日発行)

¹⁾ 島根大学エスチュアリー研究センター 〒690-8504 島根県松江市西川津町 1060
Estuary Research Center, Shimane University; 1060 Nishikawatsu, Matsue, 690-8504 Japan

* Corresponding author: yfukumoto_diatom-paleolim@yahoo.co.jp

²⁾ 兵庫県立大学自然・環境科学研究所 〒669-1546 三田市弥生が丘 6
Institute of Natural and Environmental Sciences, University of Hyogo; 6 Yayoigaoka, Sanda, 669-1546 Japan
併任: 兵庫県立人と自然の博物館 自然・環境評価研究部 〒669-1546 三田市弥生が丘 6
Division of Natural History, Museum of Nature and Human Activities, Hyogo; 6 Yayoigaoka, Sanda, 669-1546 Japan

³⁾ 兵庫県立人と自然の博物館 自然・環境評価研究部 〒669-1546 三田市弥生が丘 6
Division of Natural History, Museum of Nature and Human Activities, Hyogo; 6 Yayoigaoka, Sanda, 669-1546 Japan

⁴⁾ 神戸大学・内海域環境教育研究センター 〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1
Research Center for Inland Seas, Kobe University; 1-1 Rokkodai, Kobe, 657-8501, Japan

はじめに

大阪湾沿岸域では、中期更新世以降に逆断層を伴う断層ブロック運動が活発化し、現在も進行中の局地的な地殻変動（六甲変動）の影響下にある（藤田，1990）。六甲山地が現在も隆起を続ける一方で、その南東の大阪湾および大阪平野（以下、「大阪堆積盆地」という。）は沈降を続けており、両地域の間には六甲・淡路島断層帯や大阪湾断層帯を構成する多くの活断層が分布する（岡田，1996；加藤ほか，2008）。

大阪堆積盆地は、約350～330万年前（後期鮮新世）に形成され始めたと推定され（兵頭・Biswas，2002；加藤ほか，2008），盆地堆積物には第四紀後半における地球規模の周期的な気候変動（氷期－間氷期サイクル）に伴う海水準変動が記録されている。すなわち、約125万年前以降、間氷期の高海水準時には海進により盆地内に海成粘土層（Marine clay を略して Ma 層と呼ばれる。）が広く堆積した。それらは最下位の Ma-1 層から現在堆積中の Ma13 層までが知られ、挟在する火山灰の噴出年代や古地磁気層序などから、全球的な海洋酸素同位体ステージ（Marine oxygen Isotope Stage：MIS）との対比や堆積年代の推定がなされている（Biswas et al.，1999；吉川・三田村，1999）。

大阪堆積盆地に分布する海成粘土層は、露頭やボーリングコア試料の層序対比にあたって重要な鍵層となり、過去の海域などを推定する手掛かりになる。ボーリングコア試料に比べて、陸上において堆積時期を特定できる海成粘土層の露頭が見つかる機会は少ない。しかし、陸上の海成粘土層は過去の海水準とその後の隆起運動を示す貴重な証拠であり、他の露頭やコア試料からの同時代の層準を比較できれば、それらの地点間の相対的な地殻変動量を知ることができる（例えば、Sato et al.，2017；田中ほか，2019）。また、珪藻などの環境指標となる微化石を分析することで、均一に見える海成粘土層内でも沿岸環境や海水準高度の変遷を知ることができ、より詳しい層序の対比や最高海水準期の層準の認定ができる可能性がある（Maegakiuchi et al.，2016；Kariya et al.，2010）。

六甲山地の西麓、神戸市西区から垂水区にまたがる高塚山（標高186 m）周辺には、主に中期更新世の堆積物である大阪層群明美層中の高塚山部層が分布しており（髯本・前田，1989），その部層中の高塚山粘土層は、貝やサンゴ、海水生の珪藻など、海生生物の化石を多く含む（髯本・前田，1989；佐藤ほか，1997）。この海成粘土層は、挟在する高塚山火山灰層のフィッシュン・トラック（FT）年代および大阪層群中のテフラとの対比から、大阪層群の Ma9 層に対比され、MIS11 の間氷期（約42～37万年前）の海進に伴って堆積したこと

が明らかになっている（加藤ほか，1999）。

本研究では、六甲変動による兵庫県南部沿岸域の地殻変動量に関する基礎データを得ることを目的として、高塚山粘土層について珪藻分析を行った。本粘土層については佐藤ほか（1997）が珪藻化石の分析を行い、海進に伴う淡水から海水環境への変遷を明らかにした。しかし、その調査露頭では水準測量は行われておらず、地殻変動に関する定量的な議論はなされていない。その後、加藤ほか（1999）の露頭において近傍の標高点をもとに水準測量が行われたことから、本研究ではこの露頭で採取された堆積物試料の珪藻分析を行い、MIS11 の最大海進期に相当する層準とその標高を認定した。そして、神戸市南東部の大阪湾沿岸の2地点で採取されたボーリングコアの珪藻分析結果から認定された MIS11 の最大海進期層準（Kariya et al.，2010）の標高と比較することにより、各地点間の地殻変動量を評価した。また、神戸市灘区の石屋川沿いのボーリングコア試料（GS-K3）（関西地盤情報活用協議会，1998）で確認された Ma9 層に対比される海成砂または砂質粘土層についても珪藻分析を行い、推定される堆積環境と地殻変動について考察を行った。

試料採取地点と地質概要

高塚山部層の露頭

今回試料を採取した露頭は、神戸市垂水区多聞町、若葉学園南に位置し、大阪層群明美層高塚山部層の模式地となっている（北緯34度40分、東経135度3分；図1a、現在は開発により消失）。明美層は、高塚山付近から西方の加古川左岸にかけて広がるいなみの台地を構成する扇状地性三角州の堆積物を主体としており、砂礫層中に挟在する高塚山粘土層のほか2層の海成粘土層を鍵層として、下位より朝霧部層・高塚山部層・岩岡部層に区分されている（髯本・前田，1989；加藤，2009）。高塚山部層は主に高塚山から西の伊川谷にかけて分布しており、その堆積面は最高位段丘面に相当する（加藤，2009）。露頭の数百 m 東方には南北走向の高塚山断層が位置する（図1a）。本断層を境に東側には古第三系神戸層群が分布していることなどから、高塚山断層は六甲山地の隆起をもたらした東上りの逆断層とされている（前田・髯本，1983；藤田・笠間，1983）。

模式露頭の高さは約14 m（標高109～123 m）で、高塚山粘土層はその下部（標高110.90～113.95 m）を占め、上方粗粒化して上部は砂質となる（図1b）。粘土層中の標高112.6～112.75 m に高塚山火山灰層が挟在する。本火山灰層は大阪層群 Ma9 層の最下部に挟在する港島Ⅱ火山灰層（宮川ほか，1996）に対比できることから、高塚山粘土層は Ma9 層に相当し、MIS11

の間氷期に堆積したと推定されている（加藤ほか，1999；Kotaki et al., 2011）。珪藻分析用の試料 28 点を，高塚山粘土層の最下部よりその直上のシルト層および細砂層上部にかけての層準（標高 110.9 ～ 118.2 m）から，10 ～ 50 cm 間隔で採取した（図 1b, 2）。

石屋川南ボーリングコア

石屋川南ボーリングコア（GS-K3：関西地盤情報活用協議会，1998）は，神戸市灘区の石屋川公園南（北緯 34 度 43 分，東経 135 度 14 分，標高 34.67 m）において平成 7 年に採取された全長約 680 m のコア試料である（図 1a,b；以下，「石屋川南コア」という。）。コア堆積物はシルトや礫を主体に構成され，13 層の海成の砂層やシルト層が挟在する。それらのうちコア深度 168.9 ～ 158.9 m（標高 -134.2 ～ -124.2 m）に分布する海成の細砂あるいは砂質粘土層は，その下位の深度約 180 m に挟在する K3-180 火山灰層が港島 I 火山灰層（宮川ほか，1996）に対比できることから，Ma9 層に相当するとされている（Kobayashi et al., 2002）。この海成層中の深度 168.8 ～ 159.2 m（標高 -134.1 ～ -124.5 m）間から，15 ～ 50 cm 間隔で 26 点の珪藻分析用試料を採取した（図 1b, 3）。このうち深度 164.0 ～ 162.0 m（標高 -129.4 ～ -127.4 m）間はコア試料が欠損していたため，分析用試料を採取できなかった。

分析手法

乾燥重量 2 g の試料を試験管に計りとり，15 % 過酸化水素水を加え，70 °C で 3 時間湯煎した。遠心分離機により上澄みを除去した後，蒸留水で希釈した試料をカバーガラス上に定量滴下し，室温で乾燥後，マウントメディア（富士フィルム和光純薬）で顕微鏡用スライドガラスに封入した。これを光学顕微鏡の 1000 倍（油浸下）で珪藻殻の同定，計数を行った。高塚山部層の試料については最低 200 殻を同定，計数した。石屋川南コアの試料については珪藻殻の含有量が少なく，200 殻の計数が困難だったため，最低 100 殻まで計数できた試料をデータとして用いた。珪藻種の同定は Krammer and Lange-Bertalot (1986, 1988, 1991a, b), 渡辺 (2005), 小林ほか (2006), Round et al. (1990) に従った。出現した珪藻種は，Hartley et al. (1996) に従い海水生種，汽水生種，淡水生種に区分した。種名の表記は淡水生種に関しては渡辺 (2005)，それ以外は Hartley et al. (1996) に従った。主な出現種と，区分した海水 / 汽水 / 淡水生種の全体の出現数に対する割合を算出し，ダイアグラムを作成した。また各種の詳しい環境指標については千葉・澤井 (2014) を参照した。

結 果

高塚山粘土層

出現した主な珪藻種のダイアグラムを図 2 に示す。粘土層の下半部（標高 110.9 ～ 112.5 m）は淡水生種の割合が 90 % 近くに達し，*Staurosira construens* や *Staurosirella pinnata* などの無縦溝亜目が多く産出した。また最下部の標高 110.9 m では *Pinnularia* 属が約 8 % 産出した。汽水生種の産出は比較的少なかったが，*Opephora olsenii* が上位に向かって増加し，高塚山火山灰層準において 10 % 近くに達した。火山灰層では淡水浮遊性種の *Stephanodiscus minutulus* の増加が特徴的に見られた。火山灰層より上位では *Cyclotella striata/stylorum* などの海水生種が増加し，標高 113.1 m よりも上位では連続して 60 % 以上を占めるようになり，標高 114.5 m まで多く産出した。そして標高 113.5 m の層準において，海水生種の割合と，海水生でかつ浮遊性の種の割合がともに最大（それぞれ 76 %，52 %）となった。この層準では *Thalassiosira* 属や *Thalassionema nitzschioides* も特徴的に多産し，ともに 10 % 以上を占めた。それより上位では *Grammatophora oceanica* が増加し 10 % に達した。粘土層の上限（標高 113.95 m）よりも上位のシルト層では，珪藻殻の産出が急速に乏しくなったが，おおよそ海水生種が優占した。

石屋川南コアにおける Ma9 相当層

出現した主な珪藻種のダイアグラムを図 3 に示す。石屋川南コアでは珪藻殻の溶解，破損が顕著で，完個体はほとんど産出しなかった。分析を行った海成層のうちおおよそ上半分では比較的珪藻殻が保存されており，試料欠損部をはさんで下位（標高 -130.2 ～ -129.4 m）と上位（-127.4 ～ -126.2 m）の試料で 100 殻以上を計数することができた。淡水や汽水生の種の割合は全ての層準で 20 % 以下であり，*Cyclotella striata* や *Nitzschia cocconeiformis* を中心とする海水生種が連続して 80 % 以上出現した。また欠損部よりも上位では下位よりも *Auliscus sculptus* と *Dimeregramma minor* が特徴的に多く産出した。データ数が少ないこともあり，当試料では明瞭な海水生種のピークは見出されなかった。

考 察

高塚山粘土層と石屋川南コアにおける MIS11 期の古環境変遷

高塚山粘土層の珪藻化石群集の変遷はおおよそ，MIS11 期の海進に伴う淡水から海水環境への堆積環境

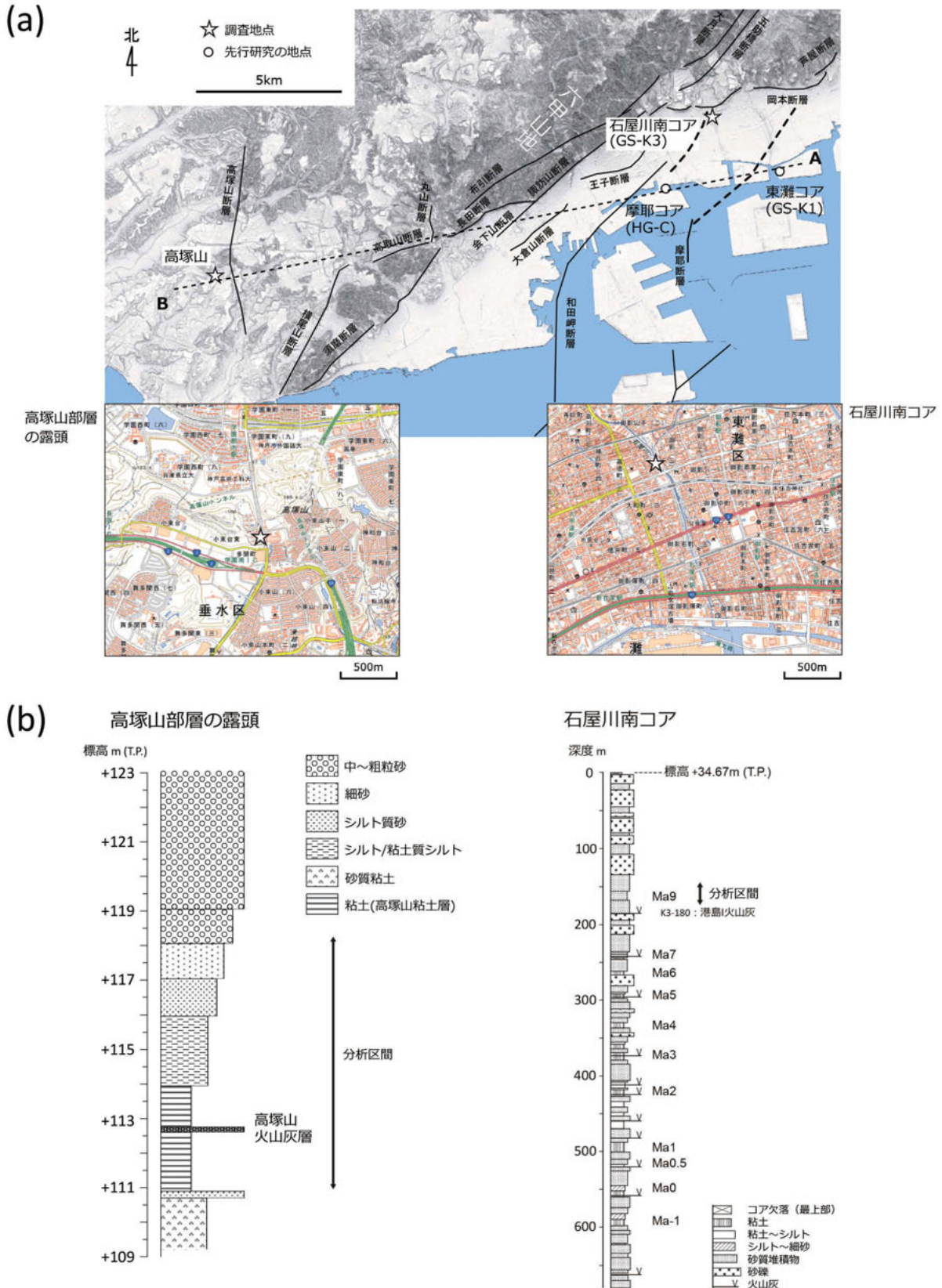


図1 (a) 高塚山の露頭試料と石屋川南 (GS-K3) コア試料の採取地点 (星印)。上図は国土地理院発行の基盤地図情報 (数値標高モデル 10 m メッシュ) を「カシミール3D」を使って加工して作成した。下図は国土地理院の電子地形図 (タイル) (ズームレベル 16) を引用した。本研究結果との比較を行う摩耶 (MY) コア, 東灘 (GS-K1) コア試料の地点を白抜きで示した。六甲山域の主な断層の分布 (実線) を神戸市・建設工学研究所 (1999), 前田・菅本 (1983) を基に, コア地点周辺の伏在断層 (破線) を苦瓜 (2009), 宮田・横道 (1999) において地図上に明示されているものを示した。高塚山と摩耶, 東灘コアとを結ぶ破線 (A-B) は図4aに示す地形断面図の測線を表す。
 (b) 高塚山における露頭試料と石屋川南コア試料の層相。コア試料の層相の記述は Kobayashi et al. (2002) による。

の移り変わりを表していると考えられる。まず粘土層の最下部では、淡水泥炭環境を示す *Pinnularia* 属 (千葉・澤井, 2014) が多く見られ、浮遊性の *Aulacoseira* 属の割合は少ないことから、水深の浅い淀んだ環境だったと考えられる。その後 *Staurosira construens* や *Staurosirella pinnata* が優占するようになるが、これらは様々な水深、水質の淡水環境に生育する普遍種 (Bennion et al., 2010; 渡辺, 2005) であり、環境の指標になりにくいとされている (Sonneman et al., 2000)。そのため当時の堆積環境は不明であるが、上位に向かってこれらが減少する代わりに汽水生種の *Opephora olsenii* が増加していったため、海水の影響が徐々に大きくなったと考えられる。そして火山灰層より上位の標高 113.1 ~ 114.5 m では、海水生種の *Cyclotella striata/stylorum* が連続して多産したが、*Cyclotella striata* が内湾指標種 (千葉・澤井, 2014) であることから、当時は内湾環境であったと考えられる。その中で標高 113.5 m に見られた海水浮遊性種の割合のピークについては、海進が最大となった層準と解釈できる。この層準で特徴的に見られた *Thalassionema nitzschioides* や *Thalassiosira* 属の多くの種は外洋の指標種 (千葉・澤井, 2014) であるため、外洋からの海水の流入がより大きくなったと考えられる。粘土層よ

りも上位のシルト層でも、引き続き海水生種が産出したため、海水の影響があったと考えられるが、化石殻の保存が悪くなり堆積物が粗粒になったことは、堆積に伴う浅海化を表すと考えられる。

上記の珪藻群集の変遷と推定される環境変化、すなわち高塚山火山灰層をおよその境として淡水環境から内湾環境へ移行し、その後浅海化していく傾向は、高塚山における先行研究の環境推定にも見られ、特に近傍の露頭について珪藻分析を行った佐藤ほか (1997) の結果とはおおそ類似していた。しかし、本研究で出現した淡水生種は *Staurosira* 属が圧倒的に多かった一方、佐藤ほか (1997) では淡水生種が優占する層準のうち下部では *Eunotia* 属など複数の分類群が出現し、上部では *Fragilaria construens* (= *Staurosira construens*) や淡水浮遊性の *Aulacoseira* 属が優占した。これは局所的な水環境の違いを表していると考えられる。高塚山火山灰層よりも上位において内湾環境が広がったことは、内湾から遠洋にかけて多く生育する円石藻 (*Gephyrocapsa oceanica*) の化石 (加藤ほか, 2000) や、汽水域や水深の浅い内湾に生息する貝形虫や有孔虫の化石 (Irizuki et al., 2005; 腎本・前田, 1989) の産出が報告されていることから支持される。また、標高 113.5 m で海進が最大になったと推定され

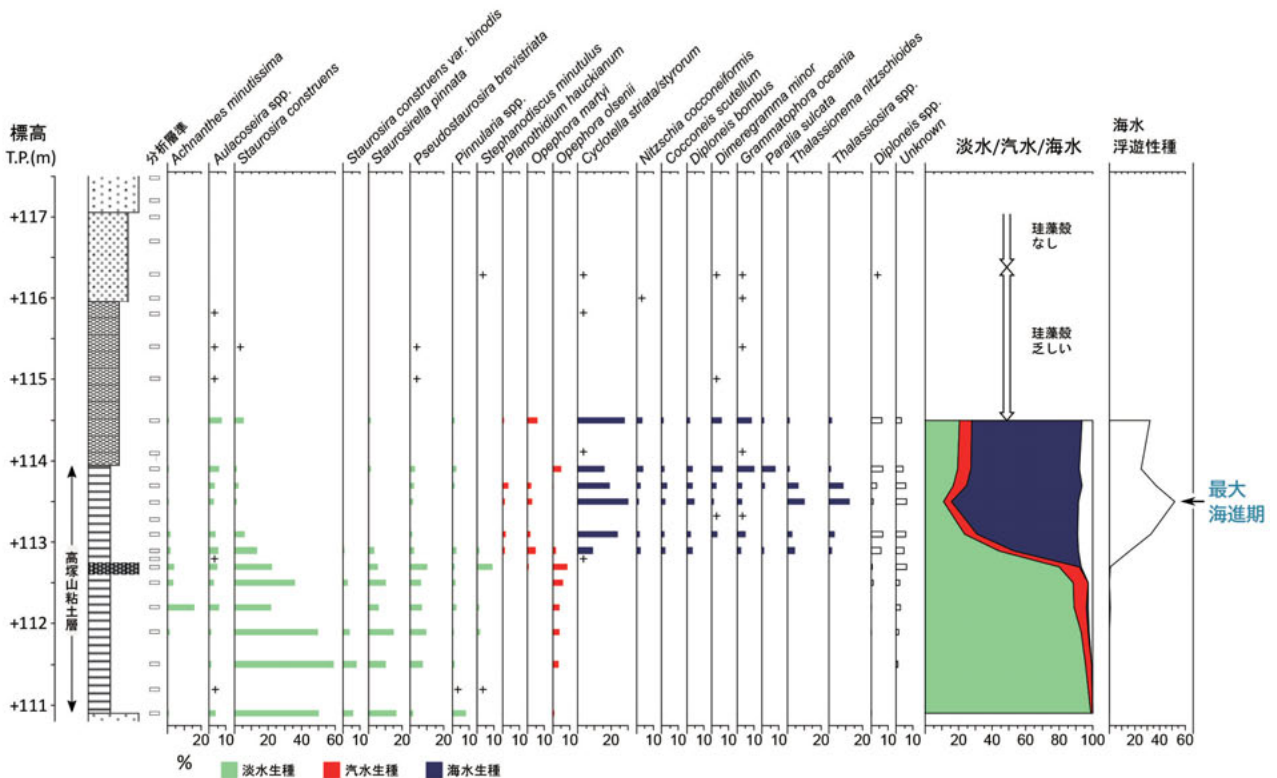


図2 高塚山の露頭試料の珪藻化石ダイアグラム。珪藻殻の計数が200殻に満たなかった試料について、優占して産出した種を+記号を付した。分析を行った28試料のうち、ここに示した25試料以外の3試料はダイアグラムの上限(標高116.5 m)よりも上位であるが、いずれも珪藻殻は産出しなかった。

たが、佐藤ほか (1997) の結果においても火山灰層の上位で *Thalassiosira* 属が一時的に 20 % 近くまで増加する層準が認められ、同様の海進の最大期を示していると考えられる。さらに粘土層の上位では、佐藤ほか (1997) の化学分析により、海底の還元から酸化環境への変化、つまり浅海化が示されている。以上のように今研究結果はおおよそ先行研究の結果を支持し、MIS11 期における海進に加えて海退を含む 1 サイクルの堆積過程が、高塚山粘土層に記録されている可能性がある。

石屋川南コアの Ma9 相当層 (MIS11 期) の珪藻化石群集は、*Cyclotella striata/stylorum* が高塚山粘土層よりもさらに優占することから、同様の内湾環境であったと考えられる。ただし、すべての層準で珪藻殻の溶解や破損が激しいため珪藻群集が選択的に保存されていると考えられ、殻の分厚い *Paralia sulcata* が高塚山粘土層よりも全体的に多産したことも、これが原因である可能性もある。また、試料欠損部よりも上位で砂質干潟の指標種 (千葉・澤井, 2014) である *Dimeregramma minor* がわずかに増えたのは、砂の堆積による浅海化を示す可能性がある。

兵庫県南部・大阪湾沿岸域における MIS11 期以降の地殻変動量と変位速度の推定

MIS11 の海面上昇に伴う、淡水から海水の内湾環境への古環境変遷を示す堆積物が標高 110 ~ 120 m の高塚山の露頭で見られたことは、六甲山最高峰のある六甲山地東部だけでなく、六甲山地西部や東播磨地方にかけても中期更新世以降、隆起を続けていること (髯本・前田, 1989) を支持する。現在みられる海成層の標高をもとに、六甲変動による土地の隆起、沈降量を具体的に求めた研究例は限られる。ただ珪藻分析からは、限られた環境の指標種、例えば満潮時に海面に浸るような干潟のみに生育する *Pseudopodosira kosugii* の産出手掛かりとして、当時の海水準のデータなどをもとに海水面からの正確な変動量が求められている (Sato et al., 1996; 佐藤, 2014)。本研究結果ではこのような指標種の出現はなかったため、海水面からの変動量の見積もりは難しいが、最大海進期の層準を特定することができた。海進がピークに達した期間は地質学的には短時間と考えられる (ただし MIS11.3 の温暖期は 1 万年以上の比較的長期間続いたとされる (Oba and Banakar, 2007))。そのため他の地点からも同様の層準が見つかる

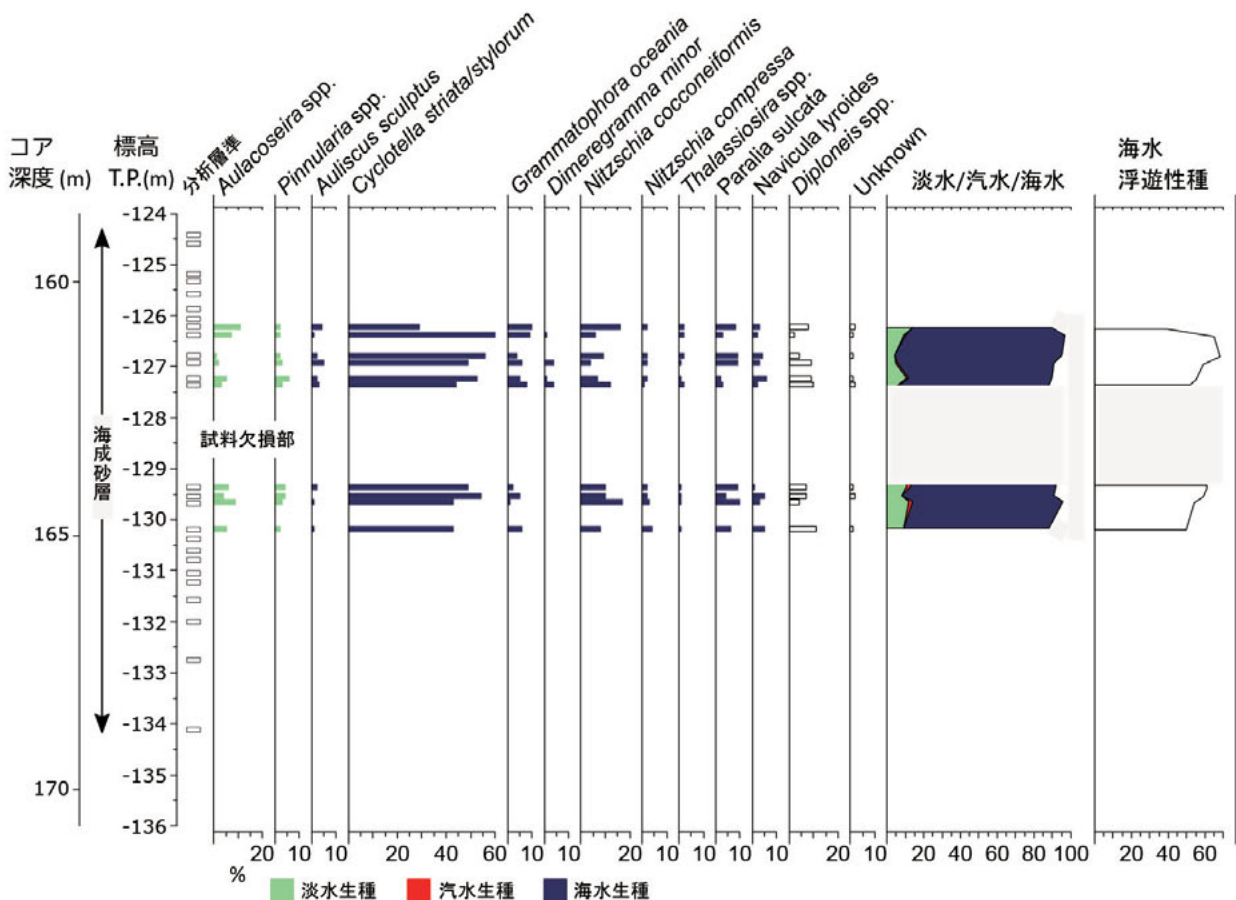


図 3 石屋川南コアの珪藻化石ダイアグラム。

れば、それらはほぼ同時期とみなすことができる。さらに産出する珪藻群集も類似していれば、当時の堆積面の標高もおおよそ同じと考えられる。従ってそれらの現在の標高差は、堆積当時から相対的な地殻変動量を表すと考えられる。そこで今節では、高塚山の試料と、神戸市南東部の大阪湾沿岸部から得られたコア試料の珪藻群集に見られた最大海進期の層準について、標高の比較を行う。

兵庫県南部の大阪湾沿岸では1995年の兵庫県南部地震以降、大阪層群の海成粘土層を含む数多くのボーリングコアが採取されている(三田村ほか, 2000)。そのうち、神戸市灘区摩耶埠頭で採取された摩耶コア(MYコア; 全長583 m)(兵庫県立人と自然の博物館, 1997)と、神戸市東灘区魚崎浜で掘削された東灘コア(GS-K1コア; 全長1,700 m)(関西地盤情報活用協議会, 1998)については、Kariya et al. (2010)により本研究と同じMa9層の珪藻分析が行われている。摩耶および東灘のコア採取地点と、高塚山粘土層の珪藻分析地点(以下、「高塚山地点」という)との直線距離は、六甲山地を挟んでそれぞれ約15 kmと約20 kmである(図1a)。Kariya et al. (2010)によると、両コアともにMa9層中に海水浮遊性種の産出頻度のピーク、つまり最大海進期が認められており、これらの層準の標高は摩耶コアで標高-225.4 m、東灘コアで標高-204.5 mであった(図4a)。この層準は、Bassinot et al. (1994)やLisiecki and Raymo (2005)の酸素同位体比カーブとの比較により、MIS11で最も温暖であったMIS11.3に相当するとされている(Kariya et al., 2010)。この年代については、天文層序学的年代として406 ka(Bassinot et al., 1994)もしくは405ka(Lisiecki and Raymo, 2005)が得られている。またその上位に、同じく海進を示す小さなピークが2回認められており、MIS11.23とMIS 11.1の温暖期に対比されている(図4a)。MIS11.23とMIS 11.1の年代は、それぞれ384 kaおよび369 Kaとされている(Bassinot et al., 1994)。

高塚山地点でみられた標高113.5 mにおける海水浮遊性種の産出頻度の最大ピークは、摩耶および東灘コアにおける3つの産出頻度のピークのいずれかに相当すると考えられる。ただ、高塚山地点の最大ピークは、淡水生種に代わって海水生種が現れはじめてから最初のピークにあたり、この部位周辺の層相には生痕化石は認められるものの、目立った時間間隙の痕跡はみられなかった(加藤ほか, 1999)。そのためこれは、摩耶および東灘コアにおいて最初に現れ、かつ最大であるMIS11.3のピークに相当する可能性が高い(図4a)。この場合、高塚山地点と摩耶および東灘コア地点のMIS11.3どうしの標高差は、高塚山地点と摩耶コア地点との間で

338.9 m、高塚山地点と東灘コア地点との間で318.0 mとなった(図4b)。

これらの標高差は、MIS11期以降の六甲変動による相対的な地殻変動量を表すと考えられる。また、高塚山地点の産出ピークがMIS11.3(約41万年前)に相当する場合は、千年あたりの平均上下変位速度(以下、「変位速度」という)を求めると、高塚山地点と摩耶および東灘コア地点間でともに約0.8 m/年と算出される。ただし、これらの値には複数の誤差の要因が考えられ、例えば各地点間で堆積当時の標高が異なっていた可能性がある。この誤差については、各地点における堆積当時の水深が推定できれば、解消することができる。高塚山地点については、最大海進期の水深は約15 mであったと貝形虫の化石から推定されている(Irizuki et al., 2005)。しかし、摩耶および東灘コア採取地点では、この層準における珪藻化石の海水浮遊性種の割合が高塚山地点より高いという特徴(高塚山は約50%; 摩耶と東灘コアは約80%)があるため、水深は15 m以上であった可能性があるものの、具体的な水深は不明である。そして、もう一つの誤差の要因として、各地点の圧密の効果が考えられ、湿潤密度や間隙比などに応じて実際には堆積後に圧密による沈下が起こっているとされる(須貝・杉山1999)。以上の要因のため、今回求められた標高差および変位速度は、各地点の当時の水深はおおよそ同じであると仮定し、圧密の効果も、地点間の比較により相殺されていると仮定した場合の値を示していると言える。また、圧密の効果は露頭試料よりもコア試料の方が大きいと考えられるため、求められた変位速度の値は、実際よりも若干大きい可能性も考えられる。

石屋川南コアの分析結果(図3)では海水浮遊性種の産出ピークが見られなかったため、MIS11.3などに相当する層準は認定できなかったが、摩耶および東灘コアの海成層準との間のおおまかな標高差は求めることができる。摩耶および東灘コアでは、Kariya et al. (2010)によりMa9層のほぼ全層準で海水生種の産出が報告されており、その標高範囲は摩耶コアで標高約-231.9 ~ -207.3 m、東灘コアで標高約-211.6 ~ -186.2 mである(図4a)。一方、石屋川南コアの海水生種が産出した層準は標高約-130.2 ~ -126.2 mである(図3)。そのため、先の二つのコア試料との間にはそれぞれ77 ~ 106 m, 56 ~ 85 mの標高差が算出され、これらの差違もMIS11以降の六甲変動を反映すると考えられる。

兵庫県南部・大阪湾沿岸域におけるMIS11期以降の断層運動

高塚山地点と摩耶や東灘のコア採取地点との間には、六甲山地の山体をはさみ、六甲・淡路島断層帯や大阪

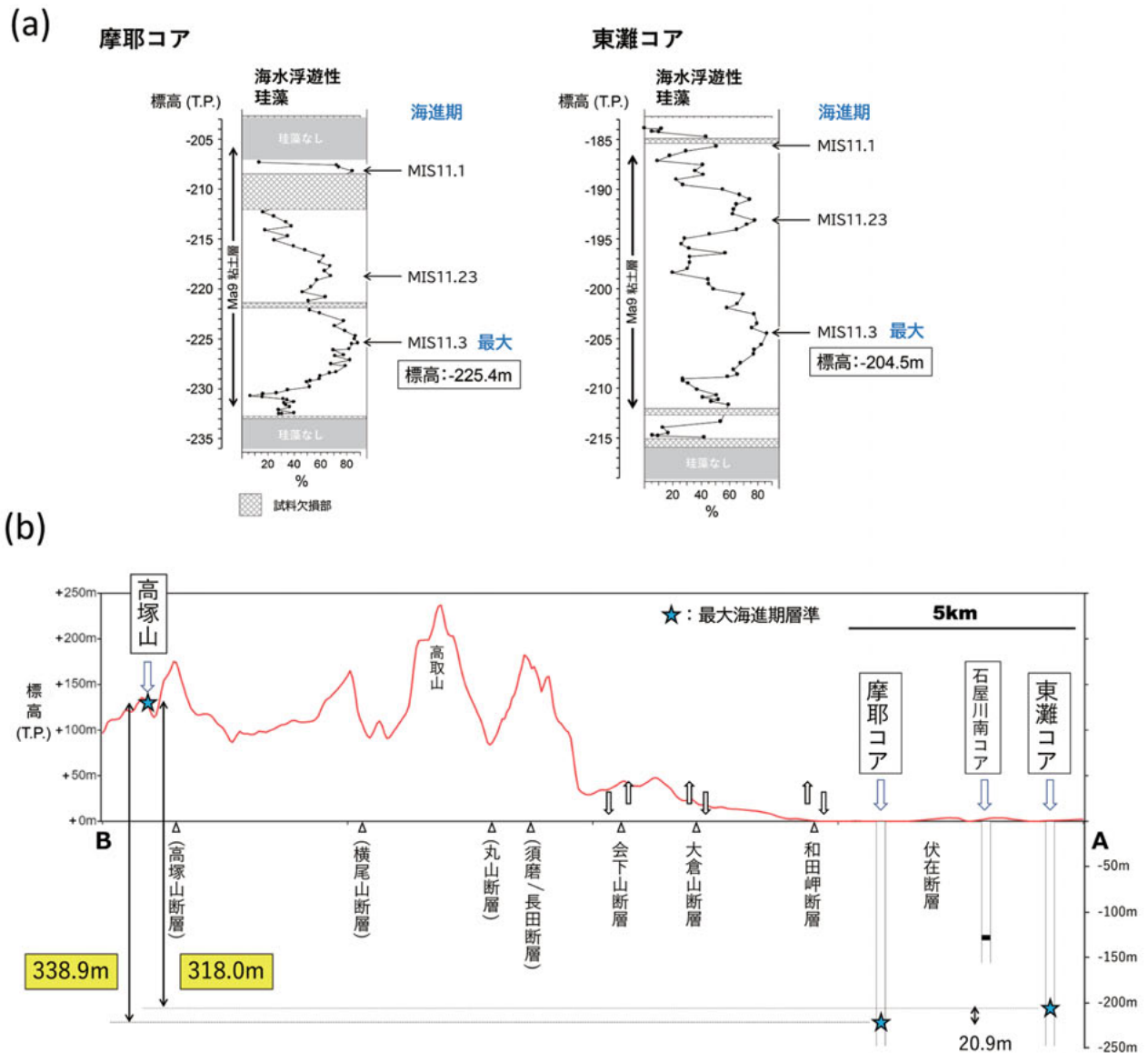


図4 (a)摩耶コア、東灘コアのMa9粘土層を中心に行われた珪藻分析による海水浮遊性種の割合のダイアグラム(Kariya et al.(2010)のデータに基づく)。割合がピークとなる海進期層準と推定されるMISの番号を矢印で示した。
 (b) 図1のAB測線上の地形断面図と、その間を走る主な断層。括弧つきで記した断層はおよそMa9堆積以降の活動履歴は報告されておらず(神戸市, 1998;岡田・東郷, 2000), それ以外の断層についておよその隆起, 沈降側を矢印で付した(神戸市・建設工学研究所, 1999)。高塚山の露頭試料, 摩耶コア, 東灘コアそれぞれのMIS11.3相当と推定される最大海進期の層準を星印で示した。石屋川南コアについてはMa9層準のうち海生種が産出した部位を黒の網掛けで示した。地形断面図は, 地理院タイル(標高タイル)を「Web地形断面図メーカー」サイトにて加工して作成した。

湾断層帯に属する多くの断層が走っている(図1a, 図4b)。前節で算出した各地点間の標高差やその変位速度は, これらのうち中期更新世以降も活動的な活断層の運動の総合的な結果と考えられる。六甲山周辺を走る断層の変動履歴については, 地形・地質調査, 反射法地震探査などの物理探査, および深層・浅層ボーリング調査により多くの報告がなされている(兵庫県, 1996;神戸市, 1998;岡田・東郷, 2000など)。それらによると, 必ずしもすべての断層の運動が, 先の標高差に関与したわけではない。例えば, 高塚山地点の東方を南北に走る高

塚山断層(図1a)は, 高塚山粘土層が堆積したMIS11以降の時代は活動していないとされている(菅本・前田, 1989)。また, 横尾山断層, 高取山断層, 丸山断層, 長田断層も, 第四紀後半には活動を停止したか, 活動が不活発になったとみなされている(神戸市, 1998;岡田・東郷, 2000)。したがって, それら以外の六甲・淡路島断層帯を構成する断層(大倉山断層など)が関与していると考えられる。大阪湾の沖合からおおよそ北東へ延びる大阪湾断層帯については, 沿岸部近くで垂直変位が小さくなり, 和田岬断層, 摩耶断層, 六甲アイランド断層

などに分岐すると推定されている(横倉ほか, 1999). そのうち摩耶断層は, MIS11以降に活動的ではなくなったと考えられている(加藤・小林, 2002). 以上より, 高塚山地点と摩耶および東灘コア地点間の標高差に大きく関与したのは, 大倉山断層をはじめとする六甲・淡路島断層帯と和田岬断層およびその北東延長の伏在断層と考えられる(図4a).

本研究で得られた, 高塚山地点と摩耶および東灘コア地点間の変位速度は約0.8 m/千年であったが, これに関与した可能性のある六甲・淡路島断層帯と和田岬断層の変位速度についても, 先行研究でおおまかな試算が出されている. 活断層帯ごとでは, 六甲・淡路島断層帯で0.4 m/千年, 大阪湾断層帯で0.5~0.7 m/千年であり, いずれも六甲山地を含む北西側を隆起させている(活断層研究会, 1991; 地震調査研究推進本部, 2005a, b). そして和田岬断層は0.3 m/千年と推定されている(兵庫県, 1996). そのため, 六甲・淡路島断層帯と和田岬断層を合わせた変位速度は約0.7 m/千年となる. 本研究で求めた約0.8 m/千年の値は, 堆積当時の地点間の標高差や圧密の効果など誤差要因を含むものの, 上記の変位速度の和(約0.7 m/千年)と調和的であると考えられる.

石屋川南コアについてはこのコア地点が上位となる形で, 摩耶および東灘コア地点との間にそれぞれ約80~110 m, 60~90 mの標高差があった. 石屋川南コア地点と両コア地点の間はともに約2.9 kmしか離れていないが, これも両地点間を走る断層の活動によるものと考えられる. 大阪湾沿岸部の当地域には, 大阪湾断層帯が北部で分岐した和田岬断層や摩耶断層などと六甲・淡路島断層帯の間を結ぶ形で, 伏在断層(宮田・横道1999; 横倉ほか, 1999)が走っていると考えられている(図1a). 当地域では扇状地性の堆積物が厚く堆積しており, 地表からの正確な断層位置の確認は難しい. しかし, 宮田・横道(1999)は地中レーダを使った地下浅部調査により, 石屋川南コア地点の北方において, 北東-南西方向に走る伏在断層(中川, 1996)が地下浅部まで変形を与えていることを確認している. また苦瓜(2009)は, 大阪湾断層帯の北端にあたる摩耶断層などを北東へ延長する形で, 石屋川南部や住吉川南部に伏在断層が複数存在することを指摘しており, 周辺地域の地下に分布するMa13層などの海成粘土層にみられる標高差の原因としている. 石屋川南コア地点と摩耶および東灘コア地点との間で検出された標高差は, 主にこれらの伏在活断層の活動によるものと考えられよう.

まとめ

神戸市垂水区, 高塚山の露頭試料と神戸市灘区石屋川

のボーリングコア試料について, MIS11の海進期に堆積したとされる海成層Ma9の珪藻分析を行った. そして, 海水浮遊性珪藻の産出頻度のピークから, 高塚山海成粘土層中に最大海進期を示す層準を認定した. この層準を, 大阪湾沿岸の摩耶および東灘のボーリングコア試料のMa9層の珪藻分析結果に見られた, 同じく最大海進期を示す層準と比較したところ, これらはMIS11.3の温暖期に相当する可能性が高いと考えられ, 標高差はそれぞれ338.9 mおよび318.0 mとなった. またこれらの変位速度はともに約0.8 m/千年となった. これらは大倉山断層をはじめとする六甲・淡路島断層帯の断層や, 大阪湾断層帯の一つである和田岬断層の北東へ延長して走る伏在断層などによる相対的な変動量と考えられる. 一般に, 単一地点の分析結果から求めた海面からの隆起量などの変動量は, 圧密の効果や堆積当時の標高などによる誤差が大きいと考えられるが, 本研究のように, 複数の地点で最大海進期の層準を特定して比較することにより, それらのある程度相殺, 減少させ, より正確な値を求めることができると考えられる. そのため, 今後他のコアや露頭試料, 他の間氷期の試料について分析を行うことにより, 六甲変動の変遷をより詳細に復元できると考えられる.

謝 辞

2名の査読者からは論文を改善するための有益なご意見をいただきました, 心よりお礼申し上げます.

要 旨

兵庫県南部沿岸域の中期更新世以降の地殻変動量の基礎データを得ることを目的として, 神戸市垂水区高塚山の露頭試料と, 同灘区石屋川のボーリングコア試料(石屋川南コア)についてMIS11の層準(大阪層群のMa9層)を対象に珪藻分析を行った. そして, 神戸市灘区, 東灘区のボーリングコア試料(摩耶コア, 東灘コア)の同時期の珪藻群集データと比較した. 露頭試料からは淡水から内湾環境への環境変遷とともに, 最大海進期とみられる, 海水浮遊性種の産出頻度が最大となる層準が見られた. これは摩耶および東灘コアの, MIS11.3の温暖期と考えられる. 同様の最大海進期の層準に対比される可能性が高く, 高塚山のそれとの標高差はそれぞれ338.9 m, 318.0 mであった. またそれらの変位速度は約0.8 m/千年と求められた. これらは, 六甲・淡路島断層帯や, 大阪湾断層帯の一つである和田岬断層による相対的な変動量と考えられる. 石屋川南コアについては明瞭な海進の層準は捉えられなかったが, 摩耶および東灘コアの海

成層準と比較すると約 80 ~ 110 m, 60 ~ 90 m の標高差がみられた。

文 献

- Bassinot, F. C., Labeyrie, L. D., Vincent, E., Quidelleur, X., Shackleton, N. J. and Lancelot, Y. (1994) The astronomical theory of climate and the age of the Matuyama-Brunhes reversal. *Earth and Planetary Science Letters*, **126**, 91–108.
- Bennion, H., Sayer, C. D., Tibby, J. and Carrick, H. J. (2010) Diatoms as indicators of environmental change in shallow lakes. In Smol, J. P. and Stoermer, E. F. (eds.), *The diatoms: applications for the environmental and earth sciences*, 2nd edition. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 152–173
- Biswas, D. K., Hyodo, M., Taniguchi, Y., Kaneko, M., Katoh, S., Sato, H., Kinugasa, Y. and Mizuno, K. (1999) Magnetostratigraphy of Plio-Pleistocene sediments in a 1700-m core from Osaka Bay, southwestern Japan and short geomagnetic events in the middle Matuyama and early Brunhes chrons. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **148**, 233–248.
- 千葉崇・澤井祐紀 (2014) 環境指標種群の再検討と更新。Diatom, **30**, 17–30.
- Hartley, B., Barber, H. G. and Carter, J. R. (1996) An Atlas of British Diatoms. In Sims, P. A. (ed.), Biopress Ltd., Bristol, 601 p.
- 菊本格・前田保夫 (1989) 神戸の地層を読む 2—神戸・200 万年の自然史—。神戸自然出版会, 119 p.
- 藤田和夫・笠間太郎 (1983) 神戸地域の地質。地域地質研究報告書, 地質調査所, 115 p.
- 藤田和夫 (1990) 満池谷不整合と六甲変動—近畿における中期更新世の断層ブロック運動と海水準上昇—。第四紀研究, **29**, 337–349.
- 兵頭政幸・Biswas, D. K. (2002) 神戸市東灘コアの古地磁気層序—基準時間軸。コア精密対比による京阪神地域の地下地質・地下構造の高精度解説, コア精密対比研究会・日本応用地質学会関西支部, 61–71.
- 兵庫県 (1996) 平成7年度地震調査研究交付金 六甲断層帯に関する調査成果報告書。兵庫県, 213 p.
- 兵庫県立人と自然の博物館 (編) (1997) 阪神・淡路大震災と六甲変動—兵庫県南部地震域の活構造調査報告—。兵庫県神戸土木事務所, 106 p.
- Irizuki, T., Matsubara, T. and Matsumoto, H. (2005) Middle Pleistocene Ostracoda from the Takatsukayama Member of the Meimi Formation, Hyogo Prefecture, western Japan: significance of the occurrence of *Sinocytheridea impressa*. *Paleontological Research*, **9**, 37–54.
- Kariya, C., Hyodo, M., Tanigawa, K. and Sato, H. (2010) Sea-level variation during MIS11 constrained by stepwise Osaka Bay extensions and its relation with climatic evolution. *Quaternary Science Reviews*, **29**, 1863–1879.
- 加藤茂弘・佐藤裕司・松原尚志・兵頭政幸・檀原徹 (1999) 六甲山地西麓に分布する高塚山火山灰層のフィッシュン・トラック年代とその対比。第四紀研究, **38**, 411–417.
- 加藤茂弘・堀内誠示・佐藤裕司・松原尚志・古谷裕 (2000) 播磨平野東部に分布する明美累層・高塚山部層の石灰質ナンノ化石。人と自然, **11**, 61–67.
- 加藤茂弘・小林岳 (2002) 神戸地域の地下地質と地質構造。コア精密対比による京阪神地域の地下地質・地下構造の高精度解説, コア精密対比研究会・日本応用地質学会関西支部, 143–159.
- 加藤茂弘・岡田篤正・寒川旭 (2008) 大阪湾と六甲山, 淡路島周辺の活断層と第四紀における大阪・播磨灘堆積盆地の形成過程。第四紀研究, **47**, 233–246.
- 加藤茂弘 (2009) 明石・播磨地域。日本地質学会編「日本地方地質誌5 近畿地方」, 朝倉書店, 232–236.
- 活断層研究会 (編) (1991) 新編日本の活断層—分布図と資料。東京大学出版会, 437 p.
- 関西地盤情報活用協議会 (1998) 新関西地盤—神戸および阪神間—。関西地盤情報活用協議会, 270 p.
- Kobayashi, G., Mitamura, M., Yoshikawa, S., Katoh S. and Hyodo, M. (2002) Detailed stratigraphy of the GS-K2 and GS-K3 drilling cores mainly based on the correlation of volcanic ashes in the northwestern part of the Osaka sedimentary basin, Southwestern Japan. *Journal of Geosciences, Osaka City University*, **45**, 101–123.
- 小林弘・出井雅彦・真山茂樹・南雲保・長田敬五 (編) (2006) 小林弘珪藻図鑑 第1巻。内田老鶴圃, 東京, 596 p.
- 神戸市 (1998) 六甲断層帯 (神戸市域) に関する調査成果報告書。神戸市, 45 p.
- 神戸市・建設工学研究所 (編) (1999) 阪神・淡路大震災と神戸の活断層。建設工学研究所, 55 p., 添付資料。
- Kotaki, A., Katoh, A. and Kitani, K. (2011) Correlation of Middle Pleistocene crystal-rich tephra layers from Daisen Volcano, southwest Japan, based on the chemical composition and refractive index of mafic minerals. *Quaternary International*, **246**, 105–117.
- Krammer, K. and Lange-Bertalot, H. (1986) Bacillariophyceae 1, Naviculaceae. In Ettl, H. (ed.), *Pascher's Süßwasserflora von Mitteleuropa*, Band 2, Teil 1. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, 876 p.
- Krammer, K. and Lange-Bertalot, H. (1988) Bacillariophyceae 2, Bacillariaceae, Epithemiaceae, Surirellaceae. In Ettl, H. (ed.), *Pascher's Süßwasserflora von Mitteleuropa*, Band 2, Teil 2. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, 596 p.
- Krammer, K. and Lange-Bertalot, H. (1991a) Bacillariophyceae 3, Centrales, Fragilariaceae, Eunotiaceae. In Ettl, H. (ed.), *Pascher's Süßwasserflora von Mitteleuropa*, Band 2, Teil 3. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, 576 p.
- Krammer, K. and Lange-Bertalot, H. (1991b) Bacillariophyceae 4, Achnanthaceae Kritische Ergänzungen zu Navicula (Lineolatae) und

- Gomphonema. In Ettl, H. (ed.), *Pascher's Süßwasserflora von Mitteleuropa*, Band 2, Teil 4. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, 437 p.
- Lisiecki, L. E. and Raymo, M. E. (2005) A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records. *Paleoceanography*, **20**, PA1003. doi:10.1029/2004PA001071
- 前田保夫・髯本格 (1983) 神戸の地層を読む1—神戸市研究学園都市の自然史—。神戸市立教育研究所, 115 p.
- Maegakiuchi, K., Hyodo, M., Kitaba, I., Hirose, K., Katoh, S. and Sato, H. (2016) Brief sea-level fall event and centennial to millennial sea-level variations during Marine Isotope Stage 19 in Osaka Bay, Japan. *Journal of Quaternary Science*, **31**, 809–822.
- 三田村宗樹・竹村恵二・北田奈緒子・斎藤礼子 (2000) 試錐資料からみた神戸・阪神間地域の地下地質。第四紀研究, **39**, 319–330.
- 宮川ちひろ・吉川周作・池田善考 (1996) 神戸市中央区港島ポートアイランド, ボーリングコアの中・上部更新統火山灰層序。地球科学, **50**, 456–465.
- 宮田隆夫・横道崇 (1999) 神戸市石屋川公園の伏在活断層を地下レーダで探る (予報)。神戸大学都市安全研究センター研究報告, **3**, 269–278.
- 中川康一 (1996) 深部地下構造と被害。地質環境と地球環境シリーズ3, 阪神・淡路大震災—都市直下型地震と地質環境特性。東海大学出版会, pp. 257–269.
- 苦瓜泰秀 (2009) 神戸市街地の表層地質から見た六甲・淡路断層帯と大阪湾断層帯の活動性の研究。博士学位論文, 神戸大学大学院自然科学研究所, 60 p.
- Oba, T. and Banakar, V. K., 2007. Comparison of Interglacial Warm Events since the Marine Oxygen Isotope Stage 11. *The Quaternary Research (Daiyonki-Kenkyu)*, **46**, 223–234.
- 岡田篤正 (1996) 兵庫県南部地震の地表断層と六甲・淡路島活断層帯。日本地形学連合 (編), 兵庫県南部地震と地形災害。古今書院, pp. 28–63.
- 岡田篤正・東郷正美 (編) (2000) 近畿の活断層。東京大学出版会, 東京, 408 p.
- Round, F. E., Crawford, R. M. and Mann, D. G. (1990) *The Diatoms. Biology and morphology of the genera*. Cambridge University Press, Cambridge, 747 p.
- Sato, H., Tanimura, Y. and Yokoyama, Y. (1996) A characteristic form of diatom *Melosira* as an indicator of marine limit during the Holocene in Japan. *The Quaternary Research (Daiyonki-Kenkyu)*, **35**, 99–107.
- 佐藤裕司・髯本格・ングチンケン・松浦康・前田保夫 (1997) 兵庫県における中部更新統・高塚山層 (神戸市垂水区) の堆積環境解析。人と自然, **8**, 53–62.
- 佐藤裕司 (2014) 珪藻分析を用いた完新世の相対的海水準変動の復元。 *Diatom*, **30**, 31–40.
- Sato, H., Ban, F., Katoh, S., and Hyodo, M. (2017) Sea-level variations during Marine Isotope Stage 7 and coastal tectonics in the eastern Seto Inland Sea area, western Japan. *Quaternary International*, **456**, 102–116.
- Sonneman, J. A., Sincok, A., Fluin, J., Reid, M., Newall, P., Tibby, J. and Gell, P. (2000) *An Illustrated Guide to Common Stream Diatoms from Temperate Australia*. Cooperative Research Centre for Freshwater Ecology, Thurgoona, 166 p.
- 須貝俊彦・杉山雄一 (1999) 深層ボーリング (GS-NB-1) と大深度地震探査に基づく濃尾傾動盆地の沈降・傾動速度の総合評価。地質調査所速報, no. EQ/99/3 (平成10年度活断層・古地震研究調査概要報告書), 77–87.
- 田中俊雄・佐藤裕司・加藤茂弘 (2019) 前期更新世における大阪堆積盆地北西部の環境変遷。人と自然, **30**, 1–22.
- 渡辺仁治 (編) (2005) 淡水珪藻生態図鑑 群集解析に基づく汚濁係数 DAIPo, pH 耐性能。内田老鶴圃, 東京, 666 p.
- 横倉隆伸・山口和雄・加野直巳・宮崎光旗・井川 猛・太田陽一・川中 卓・阿部進 (1999) 神戸・芦屋周辺地域における反射法深部構造探査。地質調査所月報, **50**, 245–267.
- 吉川周作・三田村宗樹 (1999) 大阪平野第四系層序と深海底の酸素同位体比層序との対比。地質学雑誌, **105**, 332–340.

付 記

- 地震調査研究推進本部 (2005a) 六甲・淡路島断層帯の長期評価について。
https://www.jishin.go.jp/main/chousa/05jan_rokko/index.htm (2021年7月20日閲覧)
- 地震調査研究推進本部 (2005b) 大阪湾断層帯の長期評価について。
https://www.jishin.go.jp/main/chousa/05jan_osaka/index.htm (2021年7月20日閲覧)

