

房総半島鴨川市東方沖から採取した海底コア試料の堆積学的特徴と 後期第四紀の古環境復元

Sedimentological characteristics of marine core samples obtained from east off Kamogawa,
Boso Peninsula, central Japan, and reconstruction of late Quaternary paleoenvironmental
changes

味岡 拓^{1*}・西田尚央^{1,2}・池原 研¹

Taku Ajioka^{1*}, Naohisa Nishida^{1,2} and Ken Ikehara¹

Abstract: Marine sediments off the coastal zone of the Boso Peninsula facing the Pacific Ocean have not been fully studied. In particular, those off the southern part of the peninsula, which is characterized by a narrow shelf and complicated sea-floor physiography, with respect to lithofacies, age, or depositional processes have been poorly understood. The region is also characterized by the prehistorical and historical records of the earthquakes and by influences of the Kuroshio Current. Therefore, the present study focuses on the marine core samples formed under the regional characteristics on the basis of sedimentology and paleoceanography. The core samples collected from five sites (water depth: 449–1,728 m) were 24–404 cm of length. Lithofacies of the three core samples collected from deeper than 1,000 m are characterized mainly by bioturbated hemipelagic mud. In particular, scoria or sand layers are intercalated with the mud partly. However, it is difficult to clarify their depositional processes in detail on the basis of the lithofacies and radiocarbon datings. Thus, consideration on the prehistorical earthquakes should be investigated in the future study. On the other hand, core sample collected from KM5 (water depth: 1,728 m) is characterized by stable and constant accumulation environment because of its continuous hemipelagic mud with no scoria or sand layers. These features suggest that the core sample is available to evaluate paleoceanography and paleovegetation reconstructed by organic geochemical proxy and pollen fossil analyses, respectively. Mean annual sea-surface temperature (SST) estimated by $\text{TEX}_{86}^{\text{H}}$ paleothermometer fluctuated in the range of 21–25.5°C during the last 15,000 years, and indicated temporary decrease in Younger-Dryas, increase in Preboreal and maximum around 7 cal kyr BP. The variation in $\text{TEX}_{86}^{\text{H}}$ -SST would reflect the change in the Kuroshio Current intensity. The decrease in $\text{TEX}_{86}^{\text{H}}$ -SST around 1.5 cal kyr BP likely reflects a temporal generation of cold water masses off the Boso Peninsula. In addition, the vegetational changes inferred by the pollen assemblages in KM5 core correspond to pollen records for the Kanto and the western central Japan, which is consistent to the variation in the Kuroshio Current intensity. It is recognized that sediment-accumulation rates decreased with coarsening upward of the grain size from the last glaciation maximum to 7 cal kyr BP. Both the changes are potentially attributed to the intensification of the Kuroshio Current. Likely, fine grains are easily transported when the Kuroshio Current is intensified. When the Kuroshio Current became weaker after 7 cal kyr BP, sediment-accumulation rates were relatively stable with still coarsening upward of the grain size. It might have been resulted from the influence of the Kuroshio Current in conjunction with the relative sea-level change. Therefore, it is concluded that the marine sediments have been formed under the regional factors such as the Kuroshio Current and/or the relative sea-level change.

Keywords: KM5 core off Boso Peninsula, grain size, Kuroshio Current, $\text{TEX}_{86}^{\text{H}}$ paleothermometer, vegetation history

要 旨

従来、房総半島沿岸域における海底堆積物の情報は、必ずしも十分に整備されていない。特に、陸棚の幅が狭く沿岸から急激に水深が深くなる南部の海域の海底地形は複雑であるが、堆積物コア試料の採取による岩相や形成年代、堆積過程について詳細に検討した例は

少ない。また、この海域は大規模地震の発生や黒潮の流軸に近いことが特徴であり、これらは堆積物の形成に影響すると考えられる。このため、本論ではそのような地域の特徴に着目し、水深 449 ~ 1,728 m の 5 地点から得られた長さが 24 ~ 404 cm のコア試料を対象として、堆積学的及び古環境学的検討を行った。対象としたコア試料のうち、水深 1,301 ~ 1,728 m の 3 地

*Correspondence

1 産業技術総合研究所 地質調査総合センター 地質情報研究部門 (AIST, Geological Survey of Japan, Research Institute of Geology and Geoinformation)

2 東京学芸大学 教育学部 環境科学分野 (Department of Environmental Sciences, Faculty of Education, Tokyo Gakugei University)

点から得られたコア試料は、いずれも生物擾乱の発達した半遠洋性泥で主に構成される点で共通する。また、このうち2地点から得られたコア試料は、スコリア層や砂層を挟在する。しかし、岩相や形成年代の特徴をふまえると、既存の地震履歴に関する研究との関係を詳しく議論することは難しい。一方、勝浦海底谷南方の水深1,728 mの地点KM5から採取されたコア試料は、岩相及び堆積年代の特徴から、最終氷期最盛期以降現在までに安定した底層環境で形成されたと推察される。そこで、有機地球化学プロキシを用いることで、古海洋環境と堆積物の形成過程の関連性を議論した。TEX₈₆^H古水温計によって海洋表層水温(SST)を復元したところ、過去15,000年間においてTEX₈₆^H-SSTは21~25.5°Cの範囲で変動しており、ヤンガードリアス期での一時的な低下、プレボレアル期での上昇、7 cal kyr BP前後での極大を示す。このTEX₈₆^H-SST変動は、黒潮の強度変動を反映していると解釈される。1.5 cal kyr BP付近では黒潮の一時的な弱化に伴って、房総半島沖で冷水塊が形成されたことが示された。加えて、花粉分析による陸上植生の復元を試みた。花粉組成にもとづく陸上植生の変遷は、関東地方及び西日本における陸花粉記録と概ね一致しており、黒潮の強度変動の影響を受けていたと推察される。一方、地点KM5のコア試料では、最終氷期最盛期以降7 cal kyr BPにかけて、堆積速度が低下し粗粒化する傾向が認められた。これは、黒潮の強化に伴って、細粒な粒子が堆積しなくなったためと解釈される。続く7 cal kyr BP以降では、堆積速度が大きく変化せずに粗粒化する傾向が認められた。このことは、黒潮の弱化とともに、相対的海水準が上昇傾向から安定~低下傾向に変化したことと関係する可能性が示唆される。すなわち、この海域において最終氷期最盛期以降に形成された海底堆積物は、黒潮や海水準変動などの地域的な特徴の影響を強く受けて形成されたと理解される。

1. はじめに

本論は、産業技術総合研究所「沿岸域の地質・活断層調査研究」の一環として平成26年9月19日~同23日に房総半島鴨川市沖で実施された柱状採泥調査、及びその後の採取試料の分析・解析結果に基づいて作成されたものである。採泥作業は調査船「望星丸」(東海大学所有、2,174トン)を用いて行われた。なお、本論は、地質調査総合センター速報No.68で概要を報告し(西田ほか, 2015)、その後、データ等の追加及び考察を行い、海陸シームレス情報集として取りまとめたものである。

房総半島東方の沿岸域は、従来、海底堆積物に関する情報が少ない海域であった。海上保安庁(1984a, b,

1986, 2000)は、主に九十九里浜沖の水深およそ50 m以浅までの範囲における底質分布の特徴を報告している。また、太東崎から勝浦の沖合については、陸棚を含む水深4,000 mまでの範囲の底質分布が示されている(Nishimura, 1984)。しかし、陸棚全域を対象とした堆積物の特徴は検討されてこなかった。このため、西田ほか(2019)では、陸棚全域を対象とした底質分布図を初めて示した。また、西田ほか(2019)では、九十九里浜沖の陸棚上から採取された堆積物コア試料をもとに、岩相の特徴や層序についても検討している。一方、陸棚の幅が狭く沿岸から急激に水深が深くなり、複雑な海底地形を有する房総半島南部の沖合では、コア試料の検討例は少ない(例えば、佐川ほか, 2003)。Nishimura(1984)は陸棚外縁以深で採取したコア試料の特徴を報告しているが、年代値が求められていないため、堆積物の形成年代や堆積環境の検討は十分に行われていない。特に、この海域近傍では、プレートの沈み込みにもなう大規模地震が多数発生していること(地震調査研究推進本部, 2014; Shishikura, 2014)、黒潮の流軸が近いこと(例えば、Kawabe, 1985)も特徴である。しかし、このような地域的な特徴に注目した検討はほとんど行われていない。

本論の目的は、房総半島南部の鴨川市沖から採取された堆積物コア試料を対象として、堆積学的な特徴を明らかにすることである。特に、有機地球化学プロキシを用いて復元した古海洋環境の変遷と堆積物形成の関係性を議論する。合わせて、花粉分析により、最終氷期最盛期以降から現在までの陸域の古植生と古海洋環境の変遷についても検討する。

2. 調査地域の概要

2.1 房総半島東方沖の海底地形・地質学的特徴

房総半島鴨川市東方海域周辺の海底地形は変化に富んでいることが特徴である。九十九里浜沖では陸棚が広く発達しており、その幅はおよそ45 kmである。この陸棚中央部に谷頭を持つ片貝海底谷は南東方向に深く刻み込み、水深およそ6,000 mで勝浦海盆に流入する(海上保安庁, 1986, 2000)。一方、太東崎以南では南方ほど陸棚の幅は狭くなり、陸棚外縁以深は御宿海底谷、勝浦海底谷、鴨川海底谷へと続く急峻な斜面となっており、複雑な海底地形を形成している(海上保安庁, 1984b)。また、勝浦市南東沖には安房堆と呼ばれる高まりがあるが、勝浦海底谷と鴨川海底谷をつなぐ勝浦海底地溝によって陸棚とは隔てられている。勝浦海底谷や鴨川海底谷は、延長部の勝浦海盆で相模トラフと合流する。この周辺では、プレートの沈み込みに伴って、マグニチュード7クラス以上の大規模地震が多数

発生している。例えば、1703年には、マグニチュード8.2の元禄関東地震が発生している（地震調査研究推進本部，2014；Shishikura *et al.*, 2014）。また、有史以前については、陸上地質・地形の特徴にもとづいて、およそ7 cal kyr BP以降の履歴が推定されている（地震調査研究推進本部，2014；Shishikura *et al.*, 2014）。

本海域周辺に分布する表層堆積物の特徴については、Nishimura (1984) 及び西田ほか (2019) にまとめられている。これらによると、九十九里浜沖の陸棚上では極細粒砂～細粒砂が広く分布する。太東崎より南方について、陸棚上では露岩や中粒砂～極粗粒砂が分布しており、陸棚斜面ではおよそ500 m深までは中粒砂、500～1,000 m深は砂質シルト、1,000 m以深では主にシルト質粘土が分布している。

完新世における九十九里浜沿岸域の相対的海水準は、6 cal kyr BPにかけて上昇し、それ以降は地震性隆起によって低下傾向にある（Tamura *et al.*, 2008）。6 cal kyr BP以前は、対象海域の相対的海水準変動は復元されていない。近傍の奥東京湾では、主に関東平野中央部の沖積層におけるボーリングコア試料を用いた研究で、およそ11～7 cal kyr BPの間に-50 mから+3 mまで海水準は上昇し、その後、現在の海水準まで低下する傾向が明らかとなった（遠藤ほか，1989，2013）。11 cal kyr BP以前の関東周辺における詳細な海水準変動は明確ではないが、基本的には汎世界的な海水準変動（Shackleton, 1987, Clark *et al.*, 2009）と大きな違いはないと考えられる。

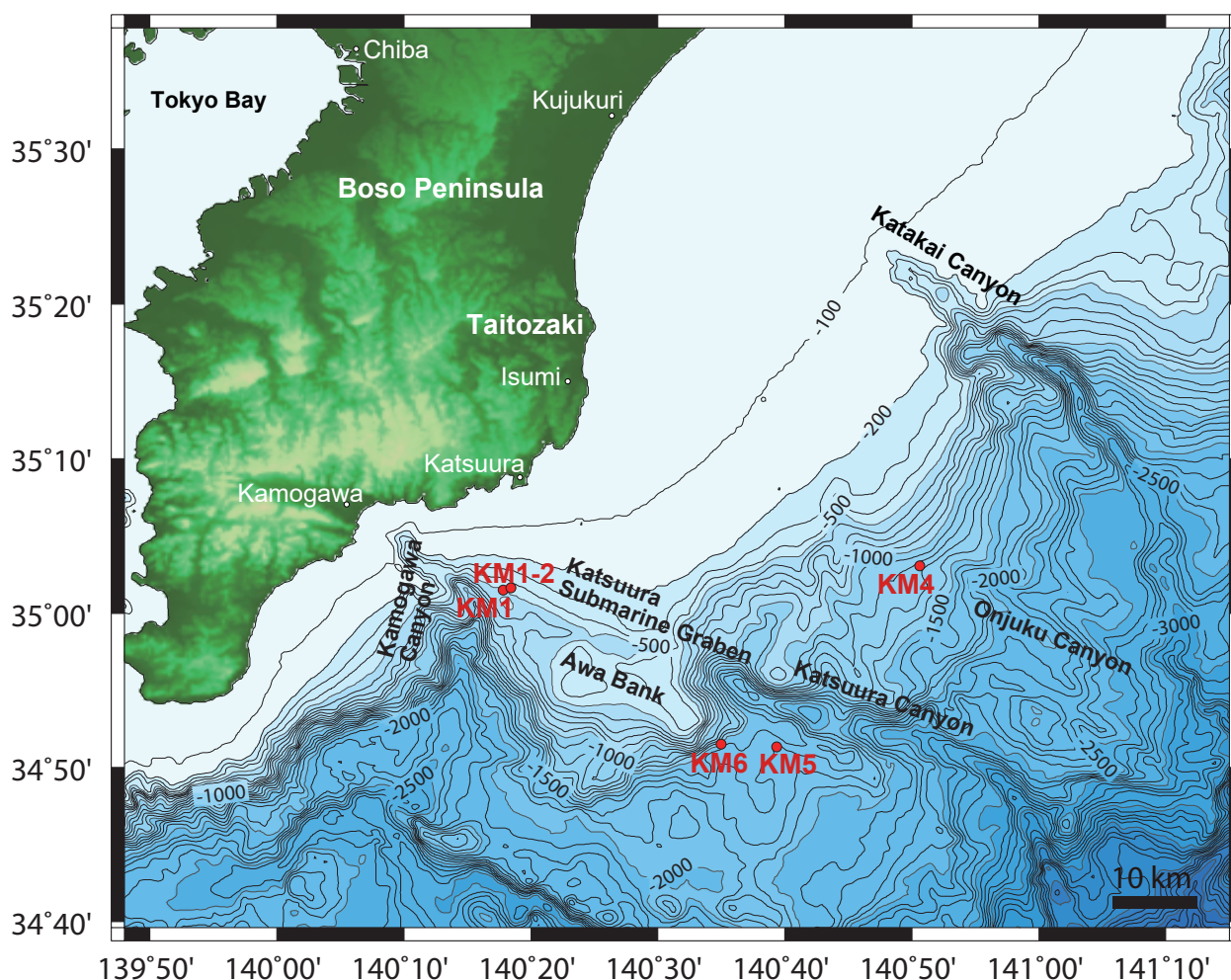
2.2 周辺海域の海洋学的特徴と後期第四紀の古環境

西部北太平洋における中緯度海域の表層環境は主に亜熱帯循環と亜寒帯循環によって決定される。日本列島太平洋岸は、亜熱帯循環の西岸境界流である黒潮と、亜寒帯循環の西岸境界流である親潮の影響を強く受ける。親潮は千島列島に沿って南下する東カムチャツカ海流に、ウルップ水道から流出してきたオホーツク海の水塊が合流し、北海道南方沖から本州東方沖を南下してくる海流であり、低温で栄養塩の豊富な水をもたらす。黒潮は北赤道海流を起源とし、フィリピン諸島東方沖から台湾東方沖を北上し、台湾と琉球弧南端の間を抜けて東シナ海の陸棚斜面上を流れ、トカラ海峡・大隅海峡を通過して、九州東方沖を北上する。その後、日本列島南岸沖で黒潮流路は変動するが、以下の3つの代表的な流路間で遷移することが知られている（Kawabe, 1985）。黒潮の非大蛇行接岸流路は、日本列島南岸全域で岸近くを流れ、八丈島北方を抜ける。非大蛇行離岸流路は、紀伊半島沖から徐々に東南東方向へ離岸し、八丈島南方を通過する。典型的な大蛇行流路は、四国沖で岸に接近しないまま東進し、紀伊半島・遠州

灘を避けるように大きく南方に蛇行した後、八丈島北方を通過する。この後、いずれの流路でも黒潮は房総半島東方沖を通過し、東に向きを変え、黒潮統流として太平洋に広く広がっていく。黒潮表層の流速は1～2 m/sで、流れの厚さは1,000 mに達する（Taft, 1978）。日本列島東部の太平洋岸は、親潮と黒潮統流の合流地点となっているため、地球規模での熱輸送、物質循環、海洋環境変動等を検討する上で、極めて重要な地域であると認識されている（例えば Matsumoto *et al.*, 2002）。親潮の南縁、及び黒潮統流の北縁はそれぞれ親潮前線、黒潮前線と呼ばれており、両前線間に黒潮統流－親潮混合域が形成されている。この混合域は、表層水温の南北差が大きいことで特徴付けられるが、親潮から切り離された冷水塊、または黒潮から切り離された暖水塊が非定常的に発生することもある。過去において、この黒潮統流－親潮境界が南北にシフトしていたことが指摘されている。Chinzei *et al.* (1987) は、遠州灘沖、房総沖、小名浜沖の3地点のピストンコア中に含まれる微化石の群集組成を用い、最終氷期には日本列島南岸に位置していた黒潮前線が、6,000年前頃にかけて小名浜沖に北上したことを示した。大場・安田 (1992) は、上記の3地点に四国沖のP-4コアを加え、浮遊性及び底生有孔虫の酸素同位体比の変動から、最終氷期の日本列島南岸には現在の三陸沖と同様な混合水塊と、その下層の親潮潜流が南下していたことを示した。尾田・嶽本 (1992) は、同様の4地点から黒潮及び冷水塊に特徴付けられる浮遊性有孔虫の産出頻度より、最終氷期最盛期以降の黒潮流軸の変動とそれに伴う冷水塊の分布について議論した。Sawada and Handa (1998) は、西七島海嶺の3本ピストンコアからアルケノン古水温 (U^{k}_{37} -SST) を復元し、最終氷期以降の黒潮流路の変遷を推定している。また黒潮統流－親潮混合域の鹿島沖では、アルケノン古水温計により過去144,000年間の表層水温が復元されており、氷期と間氷期で最大10°C程の水温差が認められた（Yamamoto *et al.*, 2004, 2005）。

2.3 後期第四紀の関東地方の花粉記録

関東地方における植生は、北方系の針葉樹林と南方系の照葉樹林がせめぎ合う場所に位置する。そのため、気候変動に伴って植物相は南方系、北方系の植物が移動して定着した歴史を反映していると考えられる。陸上ボーリング試料中の花粉化石組成より、関東地方は最終氷期以降で概ね以下のような植生変遷を辿ったことが示されている（吉川，1999）。12 kyr BP以前では針葉樹とコナラ亜属を主とする混交林が広がっていた。12 kyr BPからはコナラ亜属を主体とする落葉広葉樹が優占した。10.5 kyr BP以降、クリ属が出現し、クリ属とコナラ亜属を主体とする落葉広葉樹林が広がった。



第1図 房総半島鴨川市東方海域におけるコア試料の採取地点。
 Fig. 1 Locations of core sediments east off Kamogawa, Boso peninsula.

およそ 7 kyr BP からは照葉樹のアカガシ亜属が優勢となり、照葉樹と落葉樹広葉樹が共存していた。照葉樹林は関東南部から北部、沿岸域から内陸部へと拡大したとみられる。4 kyr BP からはスギ林が徐々に拡大し始め、3 kyr BP 以降には照葉樹と共に主要な森林構成要素になった。1 kyr BP 頃からはマツ林が拡大したとみられる。照葉樹林の発生と拡大については、黒潮が影響を及ぼしていたとする報告がある (松下, 1991)。ただし、陸上ボーリング試料では編年に問題がある場合も多い上、一地点の連続的な花粉記録ではなく、地点の異なる複数のボーリング試料によって検討されているため、最終氷期以降の関東地方における植生変化は十分に検討されているとは言えない。他方、安定した湖沼堆積物中の花粉組成からは、周辺陸域の植生を連続的に復元することができる (例えば, Nakagawa *et al.*, 2003; Yasuda *et al.*, 2004; Hayashi *et al.*, 2010)。海底堆積物試料では、放射性炭素 (^{14}C) 年代に加えて、有孔虫殻の海洋酸素同位体にもとづく時間軸を設定することができるため、最終氷期以前の植生変動のタイミングについ

て議論が可能である。例えば, Igarashi and Oba (2006) は、鹿島沖における海底コアの花粉分析より、過去 144,000 年間の関東平野北部の古植生を復元し、東アジアモンスーンの変動と中央日本における気候変動の関係を示した。

3. 調査及び分析・解析方法

堆積物コア試料の採取は、グラビティコアラーを用いて鴨川市東方沖において計 5 地点 (水深 449 ~ 1,728 m) で実施された (第 1 図, 第 1 表)。地点 KM1 (水深 511 m) 及び KM1-2 (水深 449 m) は、勝浦市南岸沖約 10 km 地点の鴨川海底谷へと続く急峻な陸棚斜面に設定した。地点 KM4 (水深 1,301 m) は、九十九里浜南東沖の陸棚斜面に設定した。北西方向の広い陸棚によって、陸地とはおよそ 45 km 離れている。斜面は南東方向で御宿海底谷へと続く。地点 KM5 (水深 1,728 m) 及び地点 KM6 (水深 1,556 m) は、勝浦市南東沖およそ 40 ~ 50 km, 共に勝浦海底谷の南方に設定し

第1表 柱状堆積物試料の採取位置, 水深, 試料長, 採取日.
Table 1 Locations, water depths, core lengths and dates of coring.

Site	Latitude	Longitude	Water depth (m)	Core length (cm)	Date
KM1	N 35°01'28.82"	E 140°17'49.14"	511	24	2017.9.21.
KM1-2	N 35°01'38.71"	E 140°18'24.09"	449	117	2017.9.21.
KM4	N 35°03'04.19"	E 140°50'37.14"	1301	328	2017.9.20.
KM5	N 34°51'20.02"	E 140°39'21.28"	1728	404	2017.9.22.
KM6	N 34°51'30.85"	E 140°34'57.57"	1556	307	2017.9.22.

た. 両地点は勝浦海底谷, 勝浦海底地溝, 及び安房堆によって陸棚と隔てられている. 地点 KM5 は緩やかな斜面に位置するのに対して, 地点 KM6 は安房堆の急斜面麓に位置する. 採泥調査にあたっては, 事前にサブボトムプロファイラー (SBP) 及びマルチビーム音響測深装置を用いて予定地点の表層堆積層や地形の特徴を確認した. 予定地点を確定した後, はじめに G.S. 木下式グラブ採泥器を用いて表層堆積物を採取し確認した. その上で, グラビティコアラを用いてコア採泥作業を行った. 今回は, バレル長 5 m でインナーチューブの内径が 114 mm のグラビティコアラを基本としたが, グラブ採泥によって表層堆積物が粗粒なことが確認された場合は, バレル長 3 m のものを使用した. 調査を予定していた地点 KM2 (北緯 34°58'03.88", 東経 140°20'05.06", 水深 555 m), KM3 (北緯 34°57'35.84", 東経 140°27'03.03", 水深 564 m), 及び KM3-2 (北緯 34°57'44.17", 東経 140°26'59.91", 水深 582 m) は, グラブ採泥で得られた粗粒堆積物から判断して, グラビティコアラによるコア採取を断念した. 堆積物コア試料は船上で 1 m ごとに分割し, 乾燥を防いだ状態で産業技術総合研究所に運搬した. 実験室でデグスを用いてコア試料を半割し, 半割面を整形後に写真撮影, 肉眼記載, 及び軟 X 線写真撮影用のスラブ試料の採取を行った. 軟 X 線写真は一定の条件下 (管電圧: 40 kVp, 管電流: 2.5 mA, 照射時間: 10 秒) で撮影を行った. 粒度分析用試料は肉眼観察及び軟 X 線写真を基に, 岩相の変化が見られる層準全てから採取した. 放射性炭素 ^{14}C 年代測定用試料は, 貝試料の場合はできる限り完全な状態で保存されているもの, 有孔虫試料の場合はイベント層の直上及び直下から採取した. コア KM5 の Glycerol dialkyl glycerol tetraethers (GDGT; 付録 A) 分析用試料には, 1 cm 間隔に分割したコア試料を凍結乾燥させたもの, およそ 2 g を使用した. コア KM5 の花粉分析には, 16 ~ 24 cm 間隔で 1 cm 厚, およそ 20 g の湿試料を採取した.

粒度分析は, 0.2 wt% ヘキサメタリン酸ナトリウム溶液中で超音波洗浄機を用いて 5 分間攪拌させた後, レーザー回折式粒度分析装置 (Horiba LA960) を用い

て実施した. 屈折率は 1.65 ~ 0.0i (1.33) を適用し測定した. 本論において, 堆積物の粒径はファイ尺度 (ϕ ; $\phi = -\log_2(d/d_0)$), ただし, d : (mm), d_0 : ϕ が 0 値の粒径 (1 mm)) で表現している. 堆積物の分類は, Shepard (1954) による砂-シルト-粘土三角ダイアグラムに基づいて行った. なお, 礫が含まれる試料については, 礫成分を砂成分に換算してダイアグラム上にプロットした (KM4 の深度 62 ~ 63 cm 及び深度 63 ~ 64 cm のスコリア層のみ, それぞれ 0.41%, 0.39% の細礫が含まれる). Φ_{50} は 50 パーセント (体積パーセントの累積 50% 値) のファイ尺度の粒径を示す. 淘汰度 (S_o : sorting) は Folk and Ward (1957) に従い, 以下の計算式により算出した.

$$S_o = (\Phi_{84} - \Phi_{16})/4 + (\Phi_{95} - \Phi_5)/6.6 \quad (1)$$

ここでの Φ_n は, n パーセントのファイ尺度の粒径を示す.

^{14}C 年代測定に供する貝試料について, 超音波洗浄器を用いて附着する堆積物を取り除いた. 有孔虫試料は, 目開き 63 μm の篩を用いて洗い出した上で, パリノサーヴェイ株式会社 に依頼して浮遊性有孔虫を拾い出した. これらの貝試料及び有孔虫試料について, 株式会社地球科学研究所を通じて Beta Analytic 社の加速器質量分析機によって ^{14}C 年代測定を行った. 得られた年代値について, ソフトウェア CALIB 7.1 (Stuiver *et al.*, 2015) により, MARINE13 データセット (Reimer *et al.*, 2013) を用いて暦年較正を行った. 海洋リザーバー効果の補正には, 調査海域から近い三浦半島で得られた 7 つの海洋リザーバー値 (Shishikura *et al.*, 2007) の平均値 $\Delta R = 133 \pm 16 \text{ yr}$ を用いた. 本論では, 暦年の確率分布中央値を用いた.

GDGT 分析について, まず Dionex 社製 ASE-200 を用い, 100°C, 1000 psi, 10 分の条件下で, 11 mL のジクロロメタン/メタノール (6:4 v/v) によって凍結乾燥試料から脂質の抽出操作を行った. この操作を 3 回繰り返して, 堆積物試料から脂質を完全に抽出した. ロータリーエバポレーターを用いて抽出溶媒を濃縮させた後,

カラムクロマトグラフィー（径 5.5 mm, 長さ 45 mm, 5% の蒸留水を添加したシリカゲルを充填）によって脂質を 4 つのフラクション（F1, F2, F3, F4）に分離した。F1（炭化水素類）は 3 mL の *n*-ヘキサン, F2（芳香族炭化水素類）は 3 mL の *n*-ヘキサン/トルエン (3:1 v/v), F3（ケトン類）は 4 mL のトルエン, F4（極性化合物類）は 3 mL のトルエン/メタノール (3:1 v/v) を溶離液として用い, それぞれ溶出させた。GDGT を含む F4 を窒素気流下で乾固させた後, *n*-ヘキサン/イソプロパノール (99:1 v/v) に溶解させ, フィルターに通して不純物を取り除いた。GDGT の分析には, 高速液体クロマトグラフィー (Agilent 社製 1100 HPLC system) - 質量分析計 (Bruker Daltonics 社製 micrOTOF - HS 飛行時間形質量分析計) を用いた。分離カラムには Prevail Cyano (内径 2.1 mm, 長さ 150 mm, 膜厚 3 μm) を使用した。機器の詳細な分析条件は, Ajioka *et al.* (2014) に従った。イオンの検出は, 選択イオン検出モードで実施した。GDGT の同定は, 質量スペクトルと GDGT 標準物質の保持時間を比較して行った。GDGT の定量は, (M + H)⁺ と (M + H + 1)⁺ のピーク面積の合計値を, C₄₆GDGT 内部標準 (M + H)⁺ と比較することで行った。Branched and isoprenoid tetraether (BIT) 指標は Hopmans *et al.* (2004) に従い, 以下の式で計算される。

$$\text{BIT} = \frac{([\text{GDGT II}] + [\text{GDGT III}])}{([\text{GDGT I}] + [\text{GDGT II}] + [\text{GDGT III}] + [\text{crenarchaeol}])} \quad (2)$$

TEX₈₆^H 指標は, 15°C 以上の水温の復元に用いられ, 以下の式で計算される (Kim *et al.*, 2010)。

$$\text{TEX}_{86}^{\text{H}} = \log \left\{ \frac{([\text{GDGT-2}] + [\text{GDGT-3}] + [\text{crenarchaeol regioisomer}])}{([\text{GDGT-1}] + [\text{GDGT-2}] + [\text{GDGT-3}] + [\text{crenarchaeol regioisomer}])} \right\} \quad (3)$$

TEX₈₆^H 指標を用いた水温換算は, 以下の式に従う (Kim *et al.*, 2010)。

$$T = 64.8 \times \text{TEX}_{86}^{\text{H}} + 38.6 \quad (4)$$

(calibration error of ±2.5°C; n = 255, r² = 0.87)

花粉分析は, コア KM5 の 19 層準から採取した試料 ①~⑱ について実施した。花粉分析の前処理と同定・計数はパリノサーヴェイ株式会社 に依頼した。分析方法は以下の通りである。堆積物試料約 20 g について, 塩酸によるカルシウム等の除去, フッ化水素酸による泥化, 水酸化カリウムによる腐食酸の除去, 0.25 mm の篩による篩別, 重液 (臭化亜鉛, 比重 2.2) による有機物の分離, フッ化水素酸による鉱物質の除去, アセト

リシス (無水酢酸 9 : 濃硫酸 1 の混合液) 処理による植物遺体中のセルロースの分解を行い, 花粉を濃縮した。残渣をグリセリンで封入してプレパラートを作成し, 400 倍の光学顕微鏡下で出現する全ての種類について同定・計数した。花粉の同定は, パリノサーヴェイ株式会社 保有の現生標本をはじめ, Erdtman (1952, 1957) や Faegri *et al.* (1989) などの花粉形態に関する文献や, 島倉 (1973), 中村 (1980), 藤木・小澤 (2007), 三好ほか (2011) 等の邦産植物の花粉写真集などを参考にした。原則として, 木本花粉は木本花粉総数を, 草本花粉・シダ類胞子は総数から不明花粉を除いた数をそれぞれ基数として, 百分率で出現率を算出した。なお, 複数の種類をハイフンで結んだものは, 科または属の間で形態上の区別が困難なものを示す。得られた花粉組成より, 気温の変動を復元するための花粉温度指標 (T_p) を, 以下の式に従って求めた (Igarashi and Oba, 2006)。

$$T_p = 100 \times T_w / (T_w + T_c) \quad (5)$$

ここで T_c は, 寒冷要素として関東地方における亜高山帯針葉樹 (林, 1960) のトウヒ属 (*Picea*), 及びツガ属 (*Tsuga*) の産出数の合計とした。 T_w は, 温暖要素として同地域の山地帯より下部に分布する暖~冷温帯広葉樹のコナラ属アカガシ亜属 (*Quercus* subgen. *Cyclobalanopsis*), コナラ属コナラ亜属 (*Quercus* subgen. *Lepidobalanus*), ニレ属/ケヤキ属 (*Ulmus-Zelkova*), クルミ属 (*Juglans*), ウルシ属 (*Rhus*), クマシデ属/アサダ属 (*Carpinus-Ostrya*), ブナ属 (*Fagus*), クリ属 (*Castanea*), シイノキ属 (*Castanopsis*), カエデ属 (*Acer*), ハシバミ属 (*Corylus*), トネリコ属 (*Fraxinus*), キハダ属 (*Phellodendron*), ウコギ科 (*Araliaceae*) の産出数の合計とした。

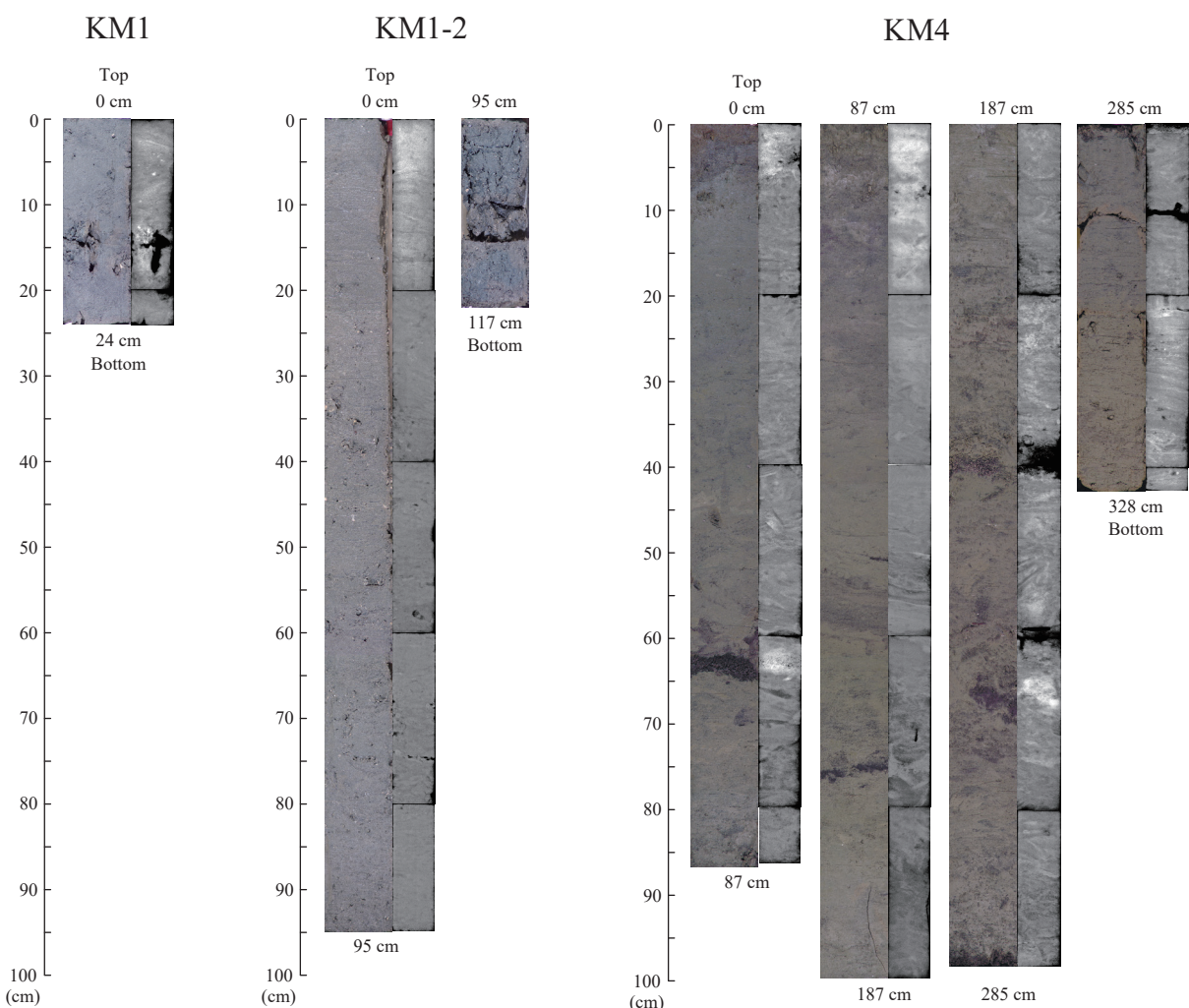
4. 結果

4.1 堆積物コアの岩相

地点 KM1 からは, 長さが 24 cm のコア試料が採取された (第 2 図 A, 第 3 図)。顕著な生物擾乱の影響を受けた極細粒砂によって構成される。ラミナは認められず, 一部には貝殻片が混じる。

地点 KM1-2 からは, 長さが 117 cm のコア試料が得られた (第 2 図 A, 第 3 図)。シルト質砂で構成されており, 貝殻片や植物片が一部で認められる。

地点 KM4 からは, 長さが 328 cm のコア試料が得られた (第 2 図 B, 第 3 図)。厚さおよそ 5 ~ 55 cm の砂質シルトと, 厚さおよそ 25 ~ 60 cm のシルト質砂が繰り返り重なることで特徴付けられる。全体的に生物擾乱が発達しており, 岩相の境界は不明瞭となっている。また, 一部には厚さ 2 ~ 3 cm のスコリアの層 (深度 63



第2図A コアKM1及びKM1-2の写真(左)と軟X線写真(右). KM1-2の95~117cmに関しては、スラブの採取が困難であったため、軟X線写真撮影を行っていない。

Fig. 2A Photograph (left) and soft-X radiograph (right) of KM1 and KM1-2 cores. Radiograph of 95-117 cm in KM1-2 core was not taken due to its fragility.

第2図B コアKM4の写真(左)と軟X線写真(右).
Fig. 2B Photograph (left) and soft-X radiograph (right) of KM4 core.

～65 cm, 深度283～286 cm), パミスを多く含むスコリアの層(深度226～228 cm), 及び厚さ3 cm程度のシルト質極細粒砂(深度142～145 cm)が挟在する。これらのうち、深度226～228 cmのスコリア層以外は上方細粒化を示すが、深度226～228 cmのスコリア層はコアのセクション分割位置に存在するため、その堆積構造は不明瞭である。

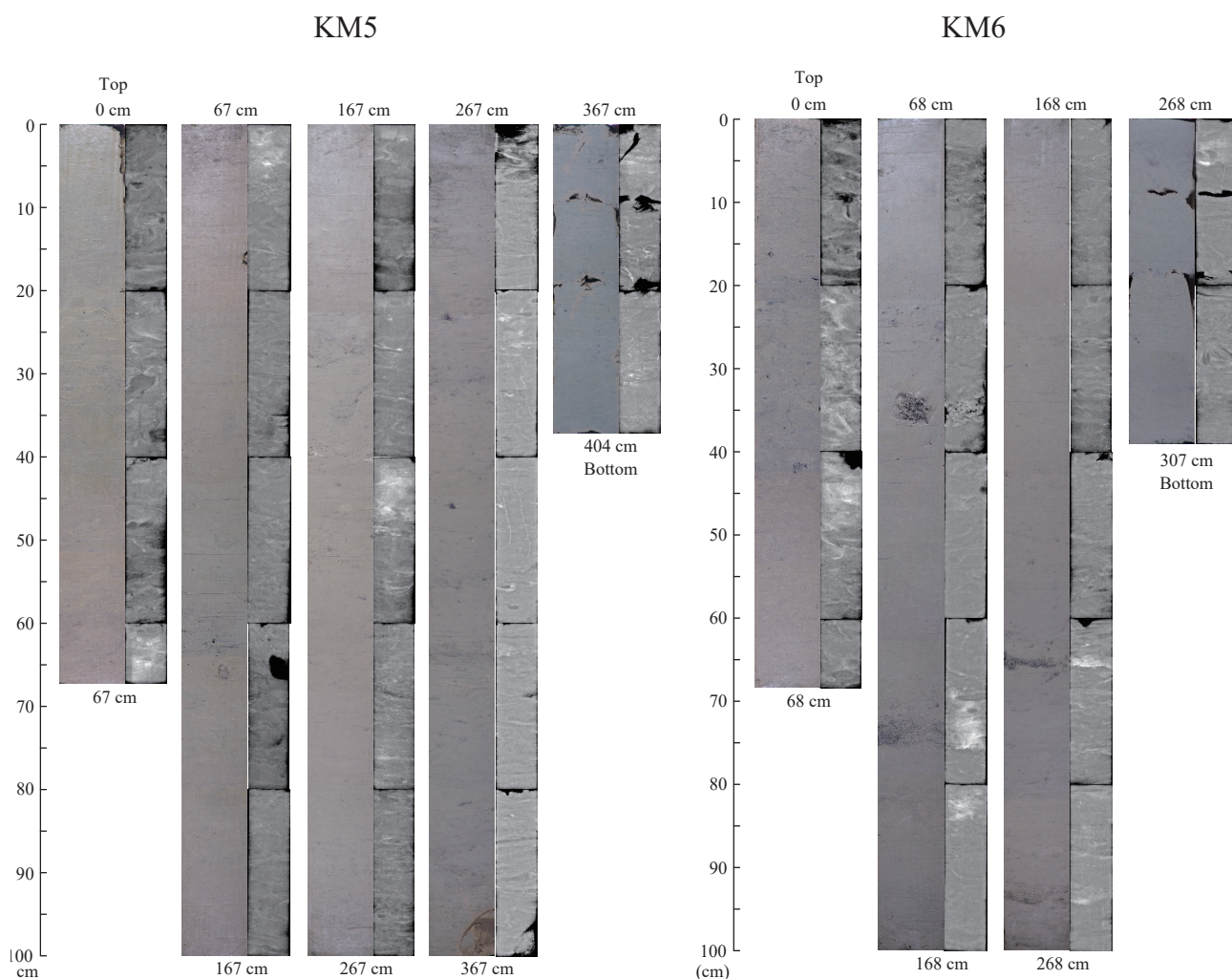
地点KM5からは、長さが404 cmのコア試料が得られた(第2図C, 第3図)。全体を通じて生物擾乱の発達したシルト～砂質シルトによって構成される。砂層の挟在は認められない。深度207 cmに火山灰と考えられる白～灰色のパッチが確認される。深度26 cmと深度179 cmにも同様の白色層が認められるが、層厚が2～3 mm程度と薄く不明瞭である。

地点KM6からは、長さが307 cmのコア試料が得られた(第2図D, 第3図)。全体的に生物擾乱の発達したシルト～シルト質砂によって構成される。ただし、最上部(深度0～53 cm)は砂の割合が多くなっている。一部で厚さ0.5～2 cmの基底面が侵食的な砂層(深度141～144 cm, 深度232～233.5 cm, 深度262～262.5 cm), 及びスコリアのパッチ(深度101～105 cm)が認められる。

4.2 粒度分析

4.2.1 粒度組成と堆積物の分類

コアKM1は、砂が49～60%, シルトが37～48%, 粘土が3%前後で構成されており(第4図A, 第2表), 砂-シルト-粘土三角ダイアグラムに基づきシルト質



第2図C コア KM5 の写真 (左) と軟 X 線写真 (右).
Fig. 2C Photograph (left) and soft-X radiograph (right) of KM5 core.

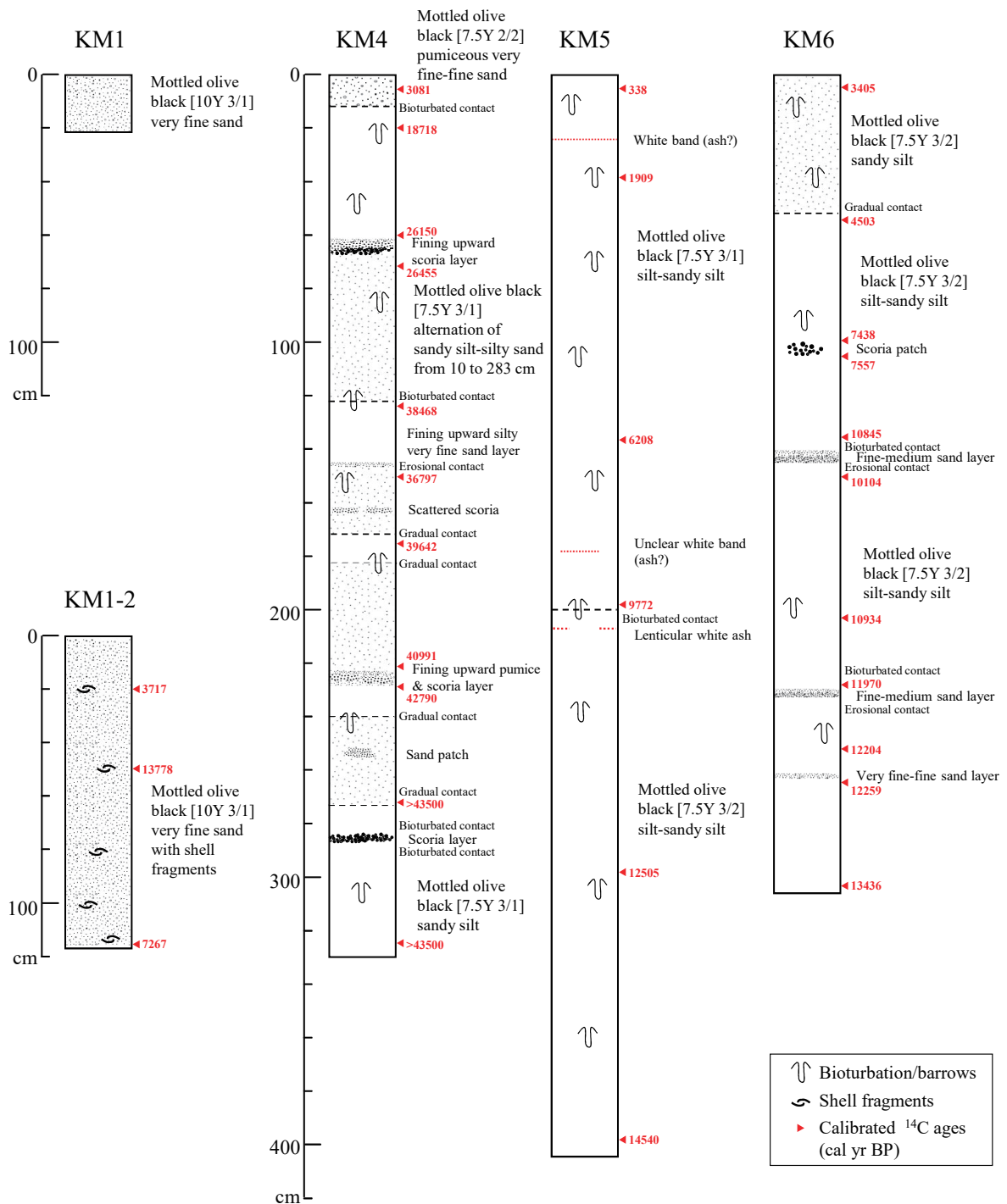
第2図D コア KM6 の写真 (左) と軟 X 線写真 (右).
Fig. 2D Photograph (left) and soft-X radiograph (right) of KM6 core.

砂に分類される (第5図). コア KM1-2 は, 砂が 48 ~ 78%, シルトが 20 ~ 50%, 粘土が 2% 前後から成っている (第4図A, 第2表). ほぼ全ての層準がシルト質砂に分類されるが (第5図), 基底部から上方にシルト及び粘土成分が減少し, 砂成分が増加する傾向が見られる. コア KM4 は, 砂とシルトがおよそ 25 ~ 75% の範囲で互いに増減し合っており, 粘土はほぼ全ての層準で 5% 未満しか含まれない (第4図B, 第2表). 岩相の主要部は砂質シルト~シルト質砂に分類される (第5図). コア KM5 は, 砂が 10 ~ 34%, シルトが 61 ~ 82%, 粘土が 2 ~ 10% で構成されており (第4図C, 第2表), シルト~砂質シルトに分類される (第5図). いずれの層準においても, 砂成分がシルト成分を上回ることはない. ただし, 基底部から深度 163 cm の間はシルトの含有率が高く安定しているが, 深度 163 cm から上方にシルト及び粘土成分が減少し, 砂成分が増加する傾向が認められる. コア KM6 は, 砂が 9 ~ 76%,

シルトが 22 ~ 83%, 粘土が 2 ~ 9% で構成されている (第4図D, 第2表). 基底部から深度 110 cm の間はシルトの含有率が高く, 大部分の層準がシルトに分類される (第5図). 深度 110 cm から上方にシルト及び粘土成分が減少し, 砂成分が増加しており, 堆積物は砂質シルトに分類される.

4.2.2 中央粒径値 (Md (ϕ))

コア KM1 では深度 2 ~ 4 cm, 深度 18 ~ 19 cm, 深度 20 ~ 22 cm において, Md はそれぞれ 4.03 ϕ , 3.67 ϕ , 3.61 ϕ である (第4図A, 第2表). コア KM1-2 では, Md は全体を通して 3.0 ~ 4.1 ϕ の範囲で変動しており, 下部から上部に Md は低下する傾向が見られる (第4図A, 第2表). コア KM4 では, Md は全体を通して 0.4 ~ 5.8 ϕ の範囲で変動しており, 岩相の主要部では 3.5 ϕ 以上を示す (第4図B, 第2表). Md が極端に低い値を示す層準は, スコリアやパミスを含む層 (深度 2

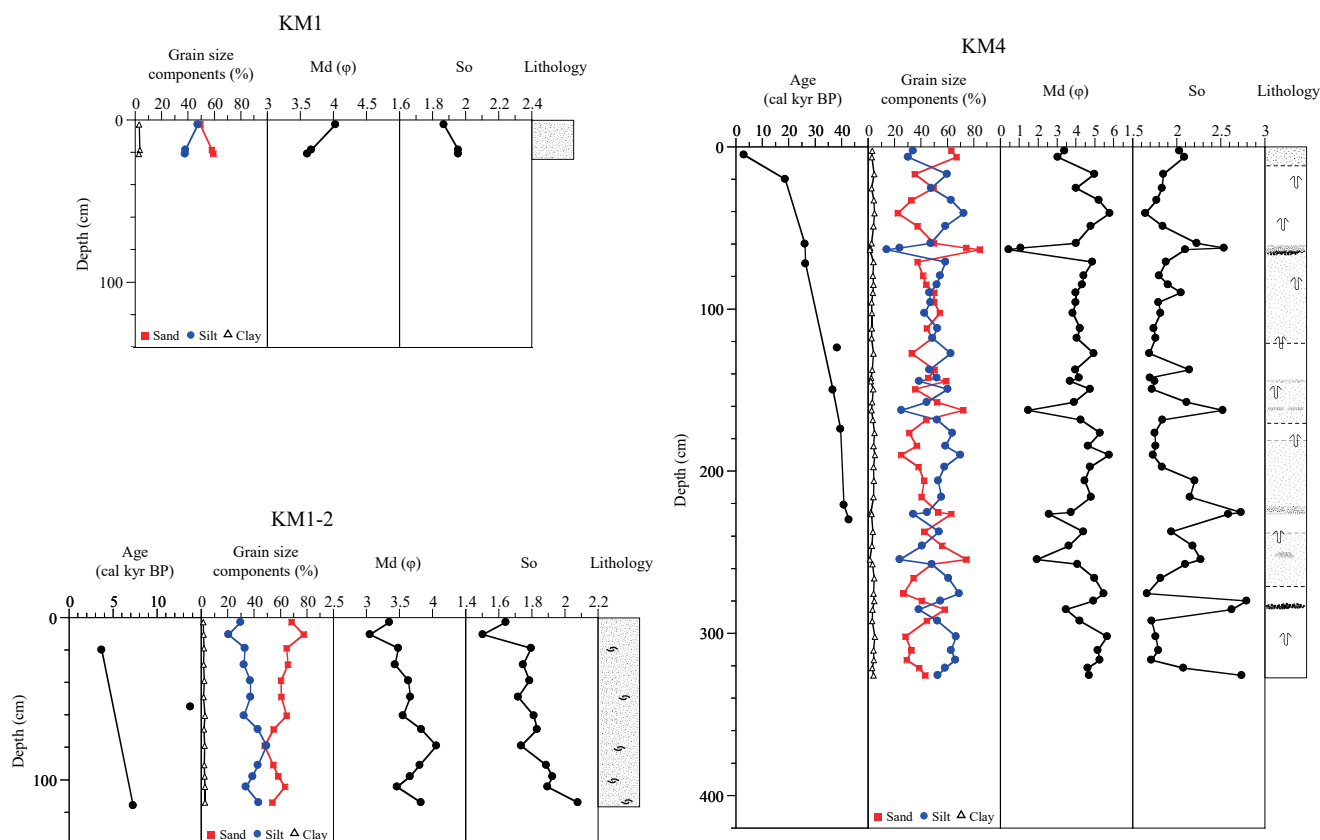


第3図 採取試料の柱状図と放射性炭素年代.

Fig. 3 Lithologies of sediment cores. Red triangles indicate calibrated radiocarbon ages.

～3 cm, 深度 6～7 cm, 深度 62～63 cm, 深度 63～64 cm, 深度 162～163 cm, 深度 225～226 cm, 深度 226～227 cm, 深度 285～286 cm) や, 生痕と考えられる砂のパッチ (深度 254～255 cm) に相当する (第3図, 第2表). コア KM5 において, Md は全体を通して 4.9～6.4 φ の範囲で変動している (第4図C, 第2表). 深度 163 cm 以深の大部分では, Md は 6.0 φ 以上

の値を示すが, 深度 163 cm 以浅では上方に 5.0 φ 前後に低下する傾向が認められる. コア KM6 では, Md は全体を通して 2.0～6.3 φ の範囲で変動している (第4図D, 第2表). 深度 110 cm 以深では, Md は 6.0 φ 前後で変動しているが, 深度 110 cm 以浅では上方に 4.5 φ 程度に低下する傾向を示す. 深度 141～142 cm, 深度 142～143 cm, 深度 233～234 cm 及び深度 261～262



第4図A コア KM1 及び KM1-2 の年代-深度モデル, 粒度組成, 中央粒径 (Md (φ)), 淘汰度 (So), 岩相の深度変化. 岩相は第3図の柱状図の凡例に従う.

Fig. 4A Variations in age-depth models, grain size components (%), median diameter (Md (φ)), sorting (So) and lithology of KM1 and KM1-2 cores for depth. Symbols in lithology column are referred to Fig. 2A.

第4図B コア KM4 の年代-深度モデル, 粒度組成, 中央粒径 (Md (φ)), 淘汰度 (So), 岩相の深度変化. 岩相は第3図の柱状図の凡例に従う.

Fig. 4B Variations in age-depth models, grain size components (%), median diameter (Md (φ)), sorting (So) and lithology of KM4 core for depth. Symbols in lithology column are referred to Fig. 2B.

cm は砂層, 深度 22 ~ 23 cm は生痕と考えられる砂を含むパッチに該当する (第3図, 第2表).

4.2.3 淘汰度 (So)

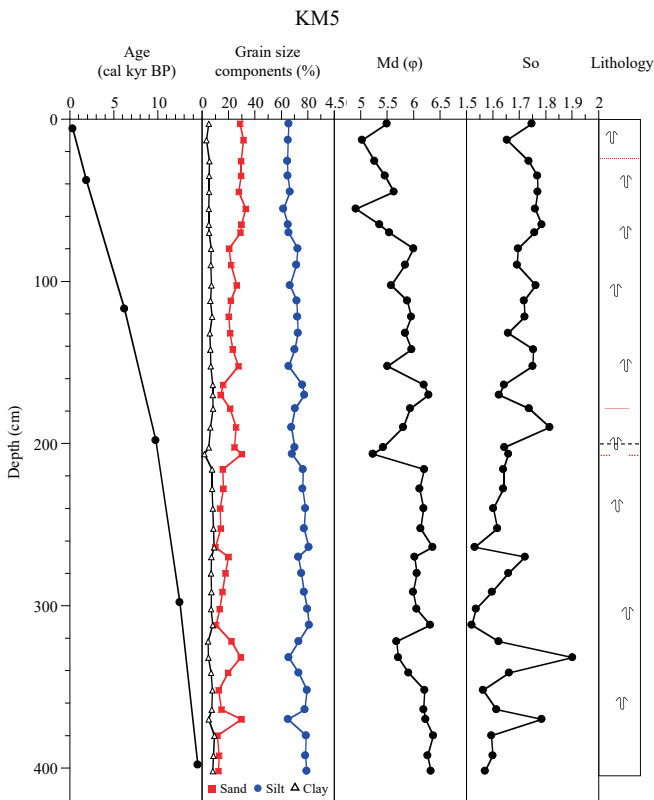
コア KM1 における So は, 深度 2 ~ 4 cm, 深度 18 ~ 19 cm, 深度 20 ~ 22 cm において, それぞれ 1.9, 2.0, 2.0 で, 「悪い」(1.0 ~ 2.0) にあたる (第4図A, 第2表). コア KM1-2 において, So は 1.5 ~ 2.1 の範囲で変動しており, 大部分は「悪い」に相当する (第4図A, 第2表). 上方に向かって, So が低下する傾向が認められる. コア KM4 では, So は 1.6 ~ 2.8 の範囲での変動を示す. 主要な岩相部分では 1.6 ~ 2.3 で, 大部分は「悪い」, スコリアやパミスを含む層準では 2.5 ~ 2.8 で, 「非常に悪い」(2.0 ~ 4.0) に該当する (第4図B, 第2表). コア KM5 において, So は 1.5 ~ 2.0 の範囲で変動しており, 全体を通じて「悪い」になる (第4図C, 第2表). 深度 263 cm 以深では, So は大きく増減しているが, 深度 263 cm 以浅では上方にかけて漸次増加する傾向を示

す. コア KM6 では, So は 1.4 ~ 2.6 の範囲を示し, 主要な岩相部分ではいずれも「悪い」に該当する (第4図D, 第2表). 深度 202 cm 以浅では, So は上方に向かって増加する傾向が認められる.

4.3 放射性炭素 (¹⁴C) 年代

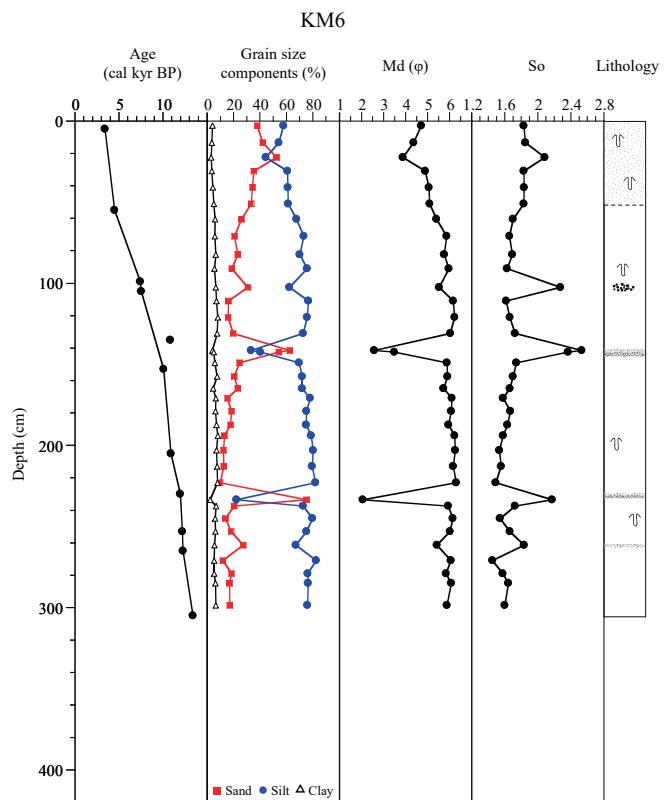
コア KM1-2 では, 3層準について貝試料の ¹⁴C 年代測定を行った (第3図, 第3表). 深度 20 cm では, 保存状態の良い二枚貝の殻を分析し, 3,717 cal yr BP の年代値が得られた. 深度 55 cm では殻に欠損が見られる二枚貝を分析したところ, 得られた年代値は 13,778 cal yr BP であった. 深度 116 cm では, ツノガイの殻の分析を行い 7,267 cal yr BP の年代値を得た. 深度 55 cm と深度 116 cm で年代値が逆転している.

コア KM4, KM5 及び KM6 では, 年代測定に浮遊性有孔虫殻を用いた (第3表). ¹⁴C 年代測定に最も良く用いられた有孔虫は *Neogloboquadrina dutertrei* で, いずれのコア試料においてもその産出頻度は高かった. *Glo-*



第4図C コア KM5 の年代-深度モデル, 粒度組成, 中央粒径 (Md (φ)), 淘汰度 (So), 岩相の深度変化. 岩相は第3図の柱状図の凡例に従う.

Fig. 4C Variations in age-depth models, grain size components (%), median diameter (Md (φ)), sorting (So) and lithology of KM5 core for depth. Symbols in lithology column are referred to Fig. 2C.



第4図D コア KM6 の年代-深度モデル, 粒度組成, 中央粒径 (Md (φ)), 淘汰度 (So), 岩相の深度変化. 岩相は第3図の柱状図の凡例に従う.

Fig. 4D Variations in age-depth models, grain size components (%), median diameter (Md (φ)), sorting (So) and lithology of KM6 core for depth. Symbols in lithology column are referred to Fig. 2D.

bigerinoides ruber もしくは *Globigerinoides sacculifer* が十分に産出する層準では, *N. dutertrei* に優先してそれらを ^{14}C 年代測定に供した. *Pulleniatina obliquiloculata* も比較的を多産しており, 4層準で ^{14}C 年代測定に用いられている (第3表). また, 表層に近い層準では, いずれのコア試料においても浮遊性有孔虫の産出頻度が著しく低くなる傾向が見られた. そのため, コア KM4 の最上部の層準では, 深層種である *Globorotalia menardii* を, KM5 及び KM6 では数種類の表層~中層の混合種を ^{14}C 年代測定に用いた.

コア KM4 では 11 層準の有孔虫 ^{14}C 年代測定を行った (第3図, 第3表). パミス混じりの極細粒~細粒砂の深度 4 ~ 6 cm では, 3,081 cal yr BP の年代値が得られた. シルト質粘土の深度 19 ~ 21 cm では, 18,718 cal yr BP であった. 深度 63 ~ 65 cm に挟在するスコリア層の直上深度 59 ~ 61 cm では 26,150 cal yr BP, 直下の深度 71 ~ 73 cm では 26,455 cal yr BP の年代値が得られた. シルト質粘土の深度 123 ~ 125 cm では, 38,468 cal yr BP

を示した. 深度 142 ~ 145 cm に挟在するシルト質極細粒砂直下の深度 149 ~ 151 cm では, 36,797 cal yr BP の年代値が得られた. 深度 162 ~ 164 cm に散在するスコリア下の深度 173 ~ 175 cm では, 39,642 cal yr BP であった. 深度 226 ~ 228 cm のパミスを含むスコリア層の直上, 深度 220 ~ 222 cm では 40,991 cal yr BP, 直下の深度 229 ~ 231 cm では 42,790 cal yr BP の年代値が得られた. 深度 271 ~ 273 cm 及び深度 323 ~ 325 cm では, 測定限界を超える (43,500 yr BP より古い) 値となった. 深度 123 ~ 125 cm と深度 149 ~ 151 cm で年代値の逆転が認められる. 前後の年代値と深度の関係を考慮すると, 深度 123 ~ 125 cm の年代値は再堆積の影響を受けた可能性が考えられる (第4図B). したがって, 年代モデルの作成に当たり, 深度 123 ~ 125 cm の年代値は除外した. なお, ^{14}C 年代の測定限界を超える深度 229 ~ 231 cm 以深については, 深度 220 ~ 222 cm から 229 ~ 231 cm の堆積速度と等しいものと仮定し, 外挿することによって年代値を計算した. 分析に供した各

第2表 粒度分析結果.
Table 2 Results of grain size analyses.

Core	Depth (cm)	Age (cal yr BP)	Md (φ)	Sorting (So)	Gravel (%)	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	Description
KM1	2-4	-	4.03	1.87	0	49.31	47.49	3.20	
KM1	18-19	-	3.67	1.96	0	58.26	38.16	3.58	
KM1	20-22	-	3.61	1.96	0	59.25	37.83	2.92	
KM1-2	2-4	558	3.35	1.64	0	68.41	29.93	1.66	
KM1-2	10-11	1951	3.06	1.50	0	77.61	20.64	1.75	
KM1-2	18-20	3531	3.49	1.80	0	64.69	33.20	2.11	
KM1-2	28-30	4050	3.43	1.75	0	65.72	32.39	1.89	
KM1-2	38-40	4420	3.64	1.79	0	60.50	37.24	2.26	
KM1-2	48-50	4789	3.67	1.72	0	60.67	37.43	1.90	
KM1-2	60-61	5215	3.56	1.81	0	64.74	32.46	2.80	
KM1-2	68-70	5529	3.83	1.83	0	54.78	43.11	2.12	
KM1-2	78-80	5899	4.06	1.74	0	48.12	49.40	2.48	
KM1-2	90-92	6343	3.81	1.89	0	54.73	42.91	2.37	
KM1-2	97-99	6601	3.66	1.93	0	58.46	38.90	2.63	
KM1-2	104-105	6842	3.47	1.90	0	63.37	33.87	2.77	
KM1-2	113-115	7193	3.83	2.08	0	53.78	43.37	2.86	
KM4	2-3	1541	3.40	2.03	0	63.00	34.05	2.95	scattered pumices
KM4	6-7	4645	3.05	2.09	0	66.90	30.37	2.73	scattered pumices
KM4	16-18	15590	4.99	1.85	0	35.53	59.93	4.54	
KM4	25-26	19740	4.02	1.83	0	49.65	47.77	2.58	
KM4	32-34	21133	5.22	1.78	0	32.81	62.93	4.26	
KM4	40-42	22620	5.79	1.64	0	22.55	72.62	4.84	
KM4	48-50	24106	4.79	1.84	0	37.37	58.62	4.00	
KM4	59-60	26057	4.01	2.23	0	49.78	47.51	2.71	
KM4	62-63	26214	1.08	2.54	0.41	73.95	24.06	1.58	scoria layer
KM4	63-64	26239	0.44	2.10	0.39	84.28	14.07	1.26	scoria layer
KM4	70-72	26430	4.89	1.88	0	37.32	58.70	3.99	
KM4	79-80	27449	4.41	1.80	0	41.65	54.66	3.69	
KM4	84-86	28179	4.34	1.90	0	44.07	51.94	3.99	
KM4	89-91	28842	4.00	2.05	0	50.08	46.40	3.53	
KM4	95-97	29637	3.99	1.79	0	50.15	47.28	2.57	
KM4	102-103	30499	3.83	1.82	0	54.44	42.77	2.79	
KM4	111-113	31759	4.23	1.74	0	44.59	52.53	2.89	
KM4	117-119	32554	4.06	1.76	0	48.48	48.87	2.65	
KM4	127-128	33814	4.95	1.69	0	33.13	62.63	4.24	
KM4	137-138	35140	3.98	2.15	0	50.40	46.47	3.13	scattered scoria
KM4	142-143	35803	4.17	1.70	0	45.57	52.06	2.37	sand layer
KM4	144-145	36068	3.70	1.75	0	59.18	38.61	2.21	sand layer
KM4	149-150	36731	4.76	1.72	0	35.73	60.34	3.94	
KM4	157-158	37686	3.90	2.12	0	52.23	44.58	3.19	sand patched barrow
KM4	162-163	38279	1.48	2.52	0	72.06	25.23	2.71	scattered scoria
KM4	168-169	38990	4.27	1.84	0	44.09	52.25	3.66	

第2表 続き.
 Table 2 Continued.

Core	Depth (cm)	Age (cal yr BP)	Md (φ)	Sorting (So)	Gravel (%)	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	Description
KM4	176-177	39714	5.29	1.75	0	31.03	64.04	4.93	
KM4	184-185	39943	4.66	1.76	0	37.07	58.72	4.21	
KM4	189-191	40101	5.76	1.73	0	24.95	69.95	5.10	
KM4	197-198	40317	4.76	1.84	0	38.26	57.80	3.94	
KM4	205-207	40560	4.48	2.21	0	42.54	53.03	4.44	
KM4	215-217	40847	4.80	2.15	0	40.41	55.57	4.03	
KM4	225-226	41891	3.75	2.73	0	53.21	44.66	2.14	pumice and scoria layer
KM4	226-227	42090	2.59	2.59	0	63.01	34.34	2.65	pumice and scoria layer
KM4	237-238	44289	4.41	1.94	0	42.65	53.87	3.48	
KM4	245-247	45988	3.63	2.18	0	56.09	41.02	2.90	
KM4	254-255	47687	1.95	2.27	0	74.61	24.00	1.39	sand patched barrow
KM4	257-258	48287	4.08	2.10	0	48.32	48.25	3.43	
KM4	265-267	49986	4.98	1.82	0	34.52	60.94	4.54	
KM4	275-276	51885	5.47	1.66	0	26.81	68.97	4.22	
KM4	279-281	52784	4.94	2.80	0	40.67	54.81	4.52	
KM4	285-286	53884	3.49	2.63	0	58.25	38.50	3.25	scoria layer
KM4	292-293	55283	4.20	1.72	0	44.52	52.49	2.99	
KM4	301-303	57182	5.66	1.76	0	28.18	66.68	5.14	
KM4	310-311	58881	5.16	1.79	0	32.94	62.90	4.16	
KM4	316-317	60080	5.27	1.71	0	29.34	66.34	4.32	
KM4	321-322	61080	4.64	2.08	0	38.60	58.29	3.11	
KM4	325-327	61979	4.70	2.74	0	43.18	52.82	4.00	
KM5	2-4	169	5.50	1.75	0	28.95	65.82	5.23	
KM5	12-13	682	5.03	1.65	0	31.35	65.33	3.31	
KM5	26	1320	5.27	1.74	0	29.63	64.63	5.75	tephra?
KM5	34-34	1762	5.46	1.77	0	29.68	64.92	5.40	
KM5	44-46	2290	5.63	1.77	0	27.89	66.66	5.45	
KM5	55-56	2861	4.91	1.76	0	33.20	61.61	5.19	
KM5	64-66	3378	5.36	1.79	0	29.74	65.12	5.14	
KM5	69-71	3650	5.54	1.76	0	29.07	65.66	5.28	
KM5	79-81	4195	6.00	1.70	0	20.42	72.61	6.97	
KM5	89-91	4739	5.84	1.69	0	21.96	71.50	6.54	
KM5	102-103	5419	5.58	1.76	0	26.40	66.62	6.99	
KM5	111-113	5936	5.89	1.72	0	21.77	71.91	6.32	
KM5	121-123	6428	5.96	1.72	0	20.32	72.18	7.50	
KM5	131-133	6868	5.85	1.66	0	21.35	72.85	5.80	
KM5	141-143	7308	5.97	1.75	0	23.29	70.29	6.42	
KM5	152-153	7770	5.51	1.75	0	27.68	65.81	6.51	
KM5	163-165	8276	6.20	1.64	0	15.97	75.99	8.04	
KM5	169-171	8540	6.29	1.62	0	14.08	77.65	8.27	
KM5	178-179	8914	5.94	1.74	0	21.17	70.44	8.38	tephra?
KM5	189-191	9420	5.81	1.82	0	25.81	67.78	6.42	

第2表 続き.
Table 2 Continued.

Core	Depth (cm)	Age (cal yr BP)	Md (φ)	Sorting (So)	Gravel (%)	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	Description
KM5	202-203	9895	5.43	1.64	0	24.49	70.27	5.25	
KM5	206-207	10004	5.23	1.66	0	30.04	68.16	1.81	tephra?
KM5	215-217	10264	6.20	1.64	0	15.77	76.47	7.76	
KM5	227-229	10592	6.12	1.64	0	16.17	76.24	7.59	
KM5	239-241	10920	6.19	1.60	0	13.60	78.23	8.17	
KM5	252-253	11261	6.14	1.62	0	14.23	77.19	8.58	
KM5	263-265	11576	6.36	1.53	0	10.23	80.72	9.05	
KM5	269-271	11740	6.02	1.72	0	19.96	73.05	6.99	
KM5	279-281	12013	6.07	1.66	0	17.79	75.25	6.96	
KM5	291-292	12327	6.00	1.60	0	15.51	77.22	7.27	
KM5	301-303	12586	6.06	1.54	0	13.49	79.74	6.78	
KM5	311-313	12790	6.32	1.52	0	10.74	81.14	8.11	
KM5	321-323	12993	5.68	1.62	0	22.16	73.15	4.69	
KM5	331-333	13197	5.71	1.90	0	29.36	65.79	4.84	
KM5	341-342	13390	5.91	1.66	0	19.77	73.36	6.88	
KM5	351-353	13604	6.21	1.56	0	12.61	79.56	7.83	
KM5	363-365	13848	6.19	1.61	0	14.81	77.86	7.33	
KM5	369-371	13970	6.23	1.79	0	29.74	65.12	5.14	
KM5	379-381	14174	6.37	1.60	0	11.72	78.91	9.37	
KM5	392-393	14428	6.27	1.60	0	12.95	78.37	8.68	
KM5	401-403	14621	6.34	1.57	0	12.40	79.35	8.25	
KM6	2-4	2043	4.72	1.83	0	38.06	57.98	3.97	
KM6	13-14	3592	4.37	1.85	0	42.21	54.26	3.53	
KM6	22-23	3789	3.88	2.08	0	52.55	44.38	3.07	sand patched barrow
KM6	30-32	3976	4.90	1.83	0	35.55	60.98	3.47	
KM6	40-42	4196	5.07	1.83	0	34.33	61.23	4.44	
KM6	50-52	4415	5.09	1.83	0	33.40	61.46	5.14	
KM6	60-61	4870	5.41	1.70	0	26.10	67.86	6.05	
KM6	70-72	5570	5.87	1.66	0	20.82	73.24	5.94	
KM6	82-83	6337	5.76	1.70	0	23.18	70.29	6.53	
KM6	90-92	6904	5.97	1.63	0	18.74	75.74	5.52	
KM6	102-103	7507	5.53	2.28	0	30.94	62.46	6.60	scoria layer
KM6	110-112	7875	6.17	1.62	0	16.07	76.94	6.99	
KM6	120-122	8406	6.23	1.66	0	16.04	75.86	8.11	
KM6	130-132	8937	6.03	1.73	0	19.60	72.85	7.55	
KM6	141-142	9494	2.58	2.54	0	62.53	33.50	3.97	sand layer
KM6	142-143	9547	3.49	2.37	0	54.38	40.57	5.05	sand layer
KM6	148-150	9892	5.88	1.74	0	24.57	69.64	5.79	
KM6	157-158	10176	5.92	1.70	0	20.49	72.02	7.49	
KM6	164-167	10296	5.74	1.66	0	23.35	72.08	4.58	
KM6	170-172	10391	6.11	1.58	0	15.42	78.10	6.49	
KM6	178-180	10519	6.08	1.67	0	18.41	75.29	6.30	

第2表 続き.
Table 2 Continued.

Core	Depth (cm)	Age (cal yr BP)	Md (ϕ)	Sorting (So)	Gravel (%)	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	Description
KM6	187-188	10655	5.96	1.63	0	17.74	75.10	7.16	
KM6	193-195	10758	6.23	1.58	0	13.12	78.89	7.99	
KM6	202-204	10902	6.26	1.53	0	12.47	80.49	7.04	
KM6	212-214	11266	6.18	1.56	0	12.83	79.56	7.62	
KM6	222-224	11680	6.30	1.49	0	9.96	82.09	7.95	
KM6	233-234	12006	2.07	2.18	0	75.23	22.37	2.40	sand layer
KM6	237-238	12046	5.94	1.73	0	20.51	72.64	6.85	
KM6	244-246	12123	6.16	1.54	0	14.01	79.78	6.22	
KM6	252-254	12204	6.02	1.66	0	18.29	75.25	6.46	
KM6	261-262	12243	5.42	1.83	0	27.39	67.10	5.50	sand layer
KM6	270-272	12436	6.06	1.45	0	11.99	82.57	5.44	
KM6	278-280	12671	5.83	1.57	0	18.42	76.23	5.35	
KM6	284-286	12848	6.08	1.64	0	17.04	76.55	6.42	
KM6	298-299	13245	5.89	1.60	0	17.34	76.10	6.56	

試料の年代値は、 ^{14}C 年代測定が行われた層準間で堆積速度が一定であり、無堆積の時期や海底侵食による欠如がないと仮定し、直近の ^{14}C 年代値を内挿したものである。

コア KM5 では、6 層準について有孔虫殻の ^{14}C 年代測定を実施した（第3図、第3表）。浮遊性有孔虫を拾い出した層準はいずれもシルト質粘土である。深度 5～7 cm、深度 37～39 cm、深度 116～118 cm、深度 197～199 cm、深度 297～299 cm、深度 397～399 cm で、それぞれ 338 cal yr BP、1,909 cal yr BP、6,208 cal yr BP、9,772 cal yr BP、12,505 cal yr BP、14,540 cal yr BP の年代値が得られた。

コア KM6 では、11 層準について有孔虫による ^{14}C 年代測定を行った。砂質シルトの深度 4～6 cm では、3,405 cal yr BP の年代値が得られた（第3図、第3表）。砂質シルトからシルト質粘土に岩相が変化する深度 54～56 cm の年代値は、4,503 cal yr BP であった。深度 101～105 cm に挟在するスコリア層の直上、深度 98～100 cm では 7,438 cal yr BP、直下の深度 104～106 cm では 7,557 cal yr BP であった。深度 141～144 cm の細粒～中粒砂層の直上・直下ではそれぞれ、深度 134～136 cm で 10,850 cal yr BP、深度 152～154 cm で 10,104 cal yr BP であった。シルト質粘土の深度 204～206 cm では、10,934 cal yr BP の年代値を示した。深度 232～233.5 cm の細粒～中粒砂層の直上、深度 229～231 cm の年代値は 11,970 cal yr BP であった。シルト質粘土の深度 252～254 cm では、12,204 cal yr BP の年代値が得られた。深度 262～262.5 cm の極細粒～細粒砂層直下、

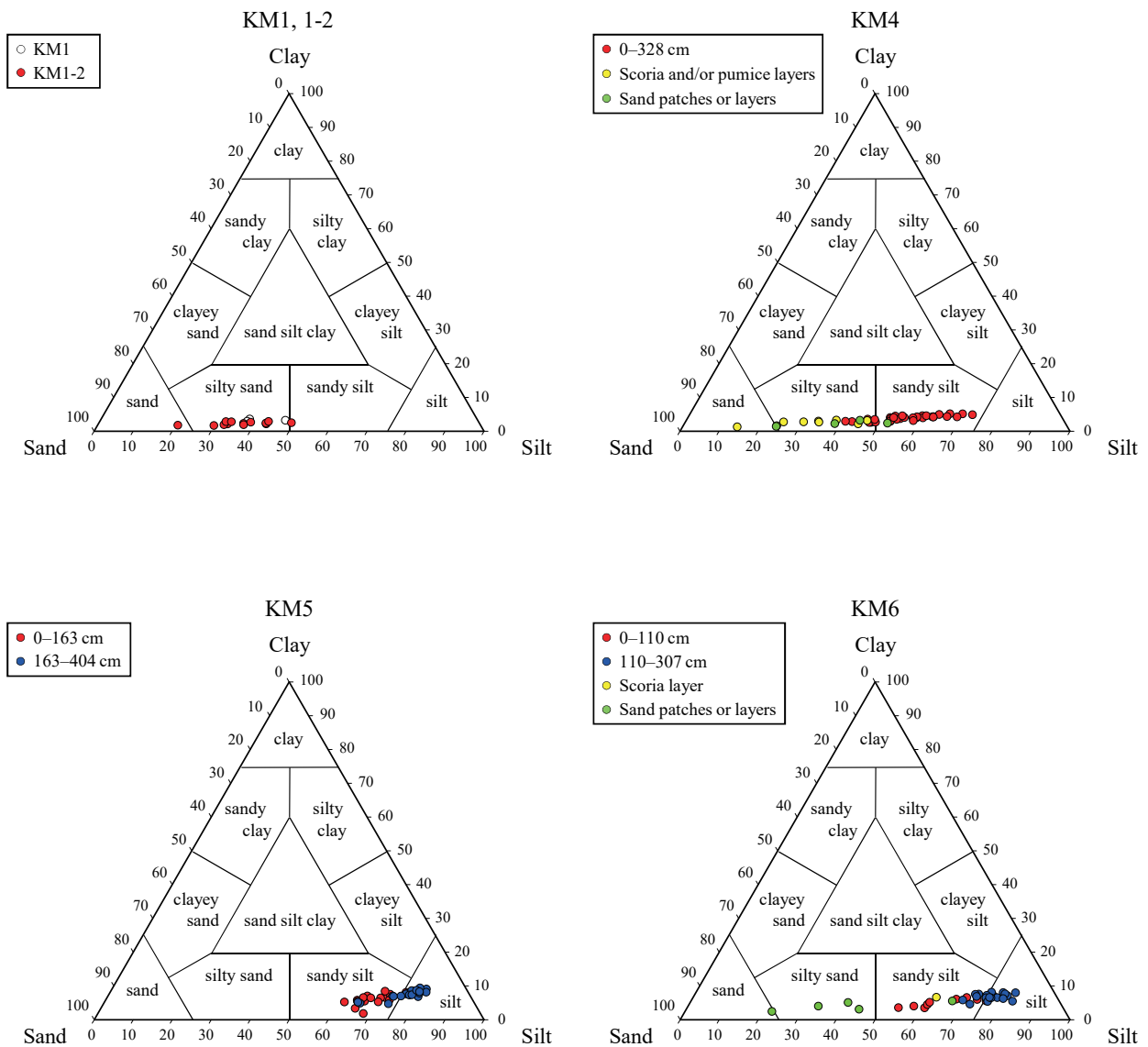
深度 264～266 cm は 12,259 cal yr BP であった。基底部に近い深度 304～306 cm では、13,436 cal yr BP の年代値が得られた。深度 134～136 cm と深度 152～154 cm で年代値の逆転が認められる。コア KM4 における年代値の逆転と同様、前後の年代値と深度の関係を考慮し、年代モデルの作成には深度 134～136 cm の年代値を除外した（第4図 D）。

4.4 GDGT 分析

コア KM5 おいて、25 層準の GDGT 分析を行った（第6図、第4表）。いずれの層準でも crenarchaeol の濃度が最も高い。次いで GDGT-0、GDGT-1、GDGT-2 の順に濃度が高く、ブランチ GDGT の濃度は極めて低い。深度 100 cm 以深と以浅で GDGT 濃度が大きく異なっており、crenarchaeol ではそれぞれ 14.29～49.73 $\mu\text{g}/\text{sed. g}$ 、15.99～125.8 $\mu\text{g}/\text{sed. g}$ と、深度 100 cm 以浅で高い。この傾向はいずれの GDGT でも共通する。

4.5 花粉分析

コア KM5 について、19 層準の花粉化石の分析を実施した（第7図、第5表）。いずれの層準においても、木本花粉が優占している。①～④では、マツ属、モミ属、ツガ属、スギ属（*Cryptomeria*）といった針葉樹花粉が多く、広葉樹花粉はあまり見られない。⑤では、広葉樹のアカガシ亜属の割合が約 20% と高く、他の種類の花粉は相対的に減少している。⑥～⑨も針葉樹花粉が主体となっている。⑩～⑮も針葉樹花粉が多いが、コナラ亜属の割合も比較的高い他、アカガシ亜属やブナ



第 5 図 砂-シルト-粘土三角ダイアグラム. 一部の試料 (コア KM4 62 ~ 63 cm, 63 ~ 64 cm) については礫分を砂分として換算している.

Fig. 5 Sand-silt-clay ternary diagrams. Gravel components of KM4 62-63 cm and 63-64 cm are added to its sand ones.

属などの広葉樹花粉も見られる。⑩以深では、マツ属、モミ属、ツガ属、トウヒ属の花粉が多く、広葉樹花粉はほとんど認められない。

T_p は、全体を通して 7.1 ~ 74.4 % の範囲で変動している (第 5 表)。①~④は 43.4 ~ 62.5% と、比較的高い値で推移する。⑤は 74.4% で、全層準で最も高い値を示す。⑥~⑧は 37.5 ~ 43.2% で、比較的低い値で安定している。⑨~⑮は 45.3 ~ 70.4% で、変動が大きい。⑯~⑲は 7.1 ~ 27.5% と低く、下方に低下する傾向が認められる。

4.6 堆積速度と粒度組成の年代変化

コア KM1-2, KM4, KM5 及び KM6 において、得ら

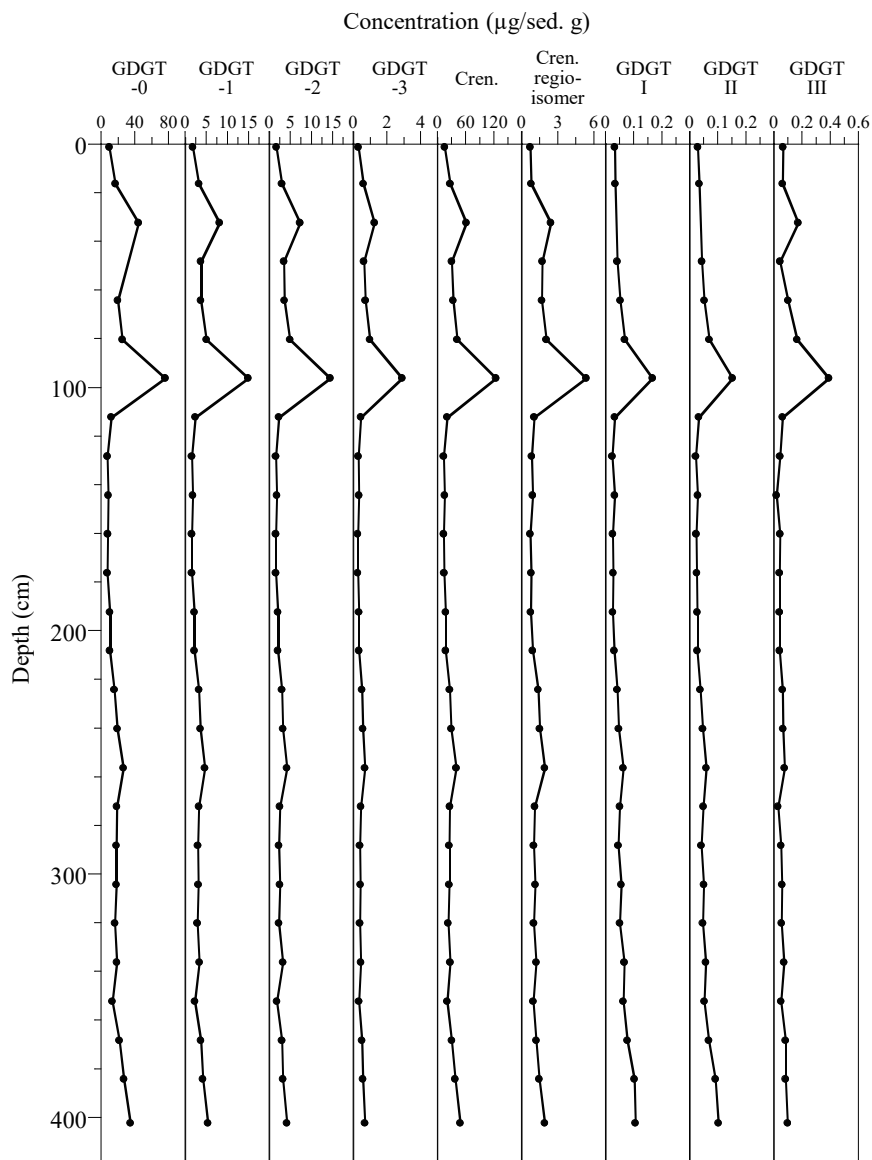
れた ^{14}C 年代を基に、堆積速度、粒度組成、Md (ϕ), So の年代変化を第 8 図に示す。コア KM1-2 について、全体の平均堆積速度は 16.0 cm/kyr である (第 8 図 A)。7 cal kyr BP から現在に向けてシルト成分が減少し、砂成分が増加する傾向が認められる。Md は低下、So は低くなり淘汰が良くなる傾向が見られる。コア KM4 について、スコリア・パミス層と砂層を除く堆積速度は、18.7 cal kyr BP 以前で 5 ~ 10 cm/kyr、18.7 cal kyr BP 以降で 1 ~ 1.6 cm/kyr となっており、最終氷期最盛期前後での堆積速度の変化が認められる (第 8 図 B)。完新世の堆積物はほとんど認められない。粒度組成、Md, So から特徴的な変動傾向は見られない。コア KM5 における堆積速度は、14.5 ~ 12.5 cal kyr BP 間で 49.1 cm/kyr,

第3表 放射性炭素年代値の結果一覧.
 Table 3 Lists of radiocarbon datings.

Core	Depth (cm)	Accession number	Materials	Conventional ¹⁴ C age (yr BP)	Calibrated ¹⁴ C age (cal yr BP)		
					Median probability (cal yr BP)	1σ range	2σ range
KM1-2	20	Beta-401473	Bivalve	3910 ± 30	3717	3660 - 3780	3609 - 3824
KM1-2	55	Beta-401472	Bivalve	12440 ± 40	13778	13708 - 13851	13625 - 13926
KM1-2	116	Beta-401471	Scaphopod	6870 ± 30	7267	7228 - 7309	7174 - 7355
KM4	4-6	Beta-457907	<i>Gr. menardii</i>	3390 ± 30	3081	3024 - 3143	2959 - 3189
KM4	19-21	Beta-403936	<i>G. ruber, G. sacculifer</i>	15990 ± 50	18718	18657 - 18783	18583 - 18833
KM4	59-61	Beta-427491	<i>N. dutertrei</i>	22490 ± 90	26150	26020 - 26254	25940 - 26424
KM4	71-73	Beta-403935	<i>G. ruber, G. sacculifer</i>	22780 ± 70	26455	26303 - 26589	26169 - 26754
KM4	123-125	Beta-403934	<i>N. dutertrei</i>	34510 ± 260	38468	38207 - 38780	37675 - 39071
KM4	149-151	Beta-457908	<i>N. dutertrei</i>	33350 ± 220	36797	36377 - 37096	36221 - 37660
KM4	173-175	Beta-403933	<i>N. dutertrei, Pulleniatina</i>	35630 ± 200	39642	39371 - 39924	39074 - 40168
KM4	220-222	Beta-403932	<i>G. ruber, G. sacculifer</i>	36870 ± 210	40991	40742 - 41266	40443 - 41465
KM4	229-231	Beta-427490	<i>G. ruber</i>	39420 ± 510	42790	42422 - 43128	42071 - 43571
KM4	271-273	Beta-403931	<i>N. dutertrei, Pulleniatina</i>	> 43500			
KM4	323-325	Beta-403930	<i>N. dutertrei, Orblina</i>	> 43500			
KM5	5-7	Beta-463624	Mix	820 ± 30	338	286 - 375	268 - 420
KM5	37-39	Beta-427493	Mix	2430 ± 30	1909	1862 - 1955	1812 - 2002
KM5	116-118	Beta-457909	<i>N. dutertrei, Pulleniatina</i>	5910 ± 30	6208	6174 - 6252	6113 - 6277
KM5	197-199	Beta-427492	<i>N. dutertrei</i>	9200 ± 30	9772	9697 - 9850	9618 - 9910
KM5	297-299	Beta-457910	<i>N. dutertrei</i>	11070 ± 40	12505	12451 - 12576	12317 - 12617
KM5	397-399	Beta-403937	<i>N. dutertrei</i>	12970 ± 40	14540	14339 - 14705	14212 - 14889
KM6	4-6	Beta-404658	Mix	3520 ± 30	3405	3364 - 3440	3326 - 3489
KM6	54-56	Beta-403943	<i>N. dutertrei</i>	4500 ± 30	4503	4437 - 4549	4404 - 4617
KM6	98-100	Beta-457911	<i>N. dutertrei</i>	7060 ± 30	7438	7407 - 7470	7361 - 7513
KM6	104-106	Beta-403942	<i>N. dutertrei, Pulleniatina</i>	7210 ± 30	7557	7516 - 7589	7480 - 7630
KM6	134-136	Beta-427495	<i>G. sacculifer</i>	10030 ± 40	10850	10748 - 10933	10696 - 11025
KM6	152-154	Beta-403941	<i>N. dutertrei</i>	9400 ± 40	10104	10061 - 10177	9927 - 10197
KM6	204-206	Beta-403940	<i>N. dutertrei</i>	10090 ± 40	10934	10845 - 11035	10755 - 11093
KM6	229-231	Beta-427494	<i>N. dutertrei</i>	10770 ± 40	11970	11873 - 12057	11761 - 12178
KM6	252-254	Beta-403939	<i>N. dutertrei</i>	10890 ± 40	12204	12065 - 12310	12012 - 12443
KM6	264-266	Beta-457912	<i>N. dutertrei</i>	10920 ± 40	12259	12135 - 12388	12047 - 12471
KM6	304-306	Beta-403938	<i>N. dutertrei</i>	12130 ± 40	13436	13374 - 13490	13317 - 13558

12.5 ~ 9.8 cal kyr BP 間で 36.6 cm/kyr, 9.8 cal kyr BP から現在までは 20 cm/kyr 前後であり, 徐々に低下する傾向が認められる (第 8 図 C). 粒度組成, Md, So は, 8 cal kyr BP 付近を境に変動傾向を分けることができる. 8 cal kyr BP 以前では, 粒度組成は砂 15% 前後, シルト 75% 前後で増減しているのに対し, 8 cal kyr BP 以降では現在にかけて砂は 20% から 30% 前後に増加, シルト

は 70% から 65% 程度に低下する傾向が認められる. 同様に Md 及び So は, 8 cal kyr BP 以降で共に低下する傾向が認められる. コア KM6 における堆積速度は, 砂層やスコリア層を除くと, 12.2 ~ 13.4 cal kyr BP 間で 34.0 cm/kyr, 10.9 ~ 12.0 cal kyr BP 間で 24.1 cm/kyr, 7.6 ~ 10.1 cal kyr BP 間で 18.8 cm/kyr, 4.5 ~ 7.4 cal kyr BP 間で 15.0 cm/kyr, 3.4 ~ 4.5 cal kyr BP 間で 45.5 cm/kyr で



第6図 コア KM5 における GDGT 濃度の深度変化。
Fig. 6 Depth profiles of GDGT concentrations in KM5 core.

あり、およそ 3 cal kyr BP 以降の堆積物はない (第 8 図 D)。粒度組成, Md, So の変動傾向はコア KM5 と類似している。およそ 8 cal kyr BP 以前では、粒度組成は砂 15 ~ 20% 前後、シルト 70 ~ 80% 前後で増減しているのに対し、8 cal kyr BP 以降では現在にかけて砂は 20% から 40% 前後に増加、シルトは 70% から 50% 程度に低下する傾向が認められる。同様に Md 及び So は、8 cal kyr BP 以降で共に低下する傾向が認められる。

5. 議論

5.1 堆積過程と形成年代

コア KM1-2 の岩相の特徴からは、その堆積過程を詳しく議論することは難しい。深度 55 cm の貝試料から

得られた年代値は 13,778 cal yr BP であるが、より下位の深度 116 cm の貝試料では 7,267 cal yr BP が得られている。深度 55 cm の貝試料は一部が欠損しており、再堆積によって堆積した可能性が考えられる。したがって、このコア試料は、7,267 cal yr BP 以降に形成されたと考えられる。

コア KM4 は、全体的に生物擾乱が発達する淘汰の悪い砂質シルトを主体として、ラミナなどの明瞭な堆積構造は認められない。このため、半遠洋性の環境下でゆっくりと堆積したことが示唆される。一方、泥質堆積物に挟在する上方細粒化を示すスコリア層は、近傍の海底火山の噴出によるものか、あるいは、基底面が侵食的事から重力流によって堆積した可能性などが考えられる。しかし、いずれかの堆積過程を断

第4表 コア KM5 における GDGT 分析結果.
Table 4 Results of GDGT analyses for KM5 core.

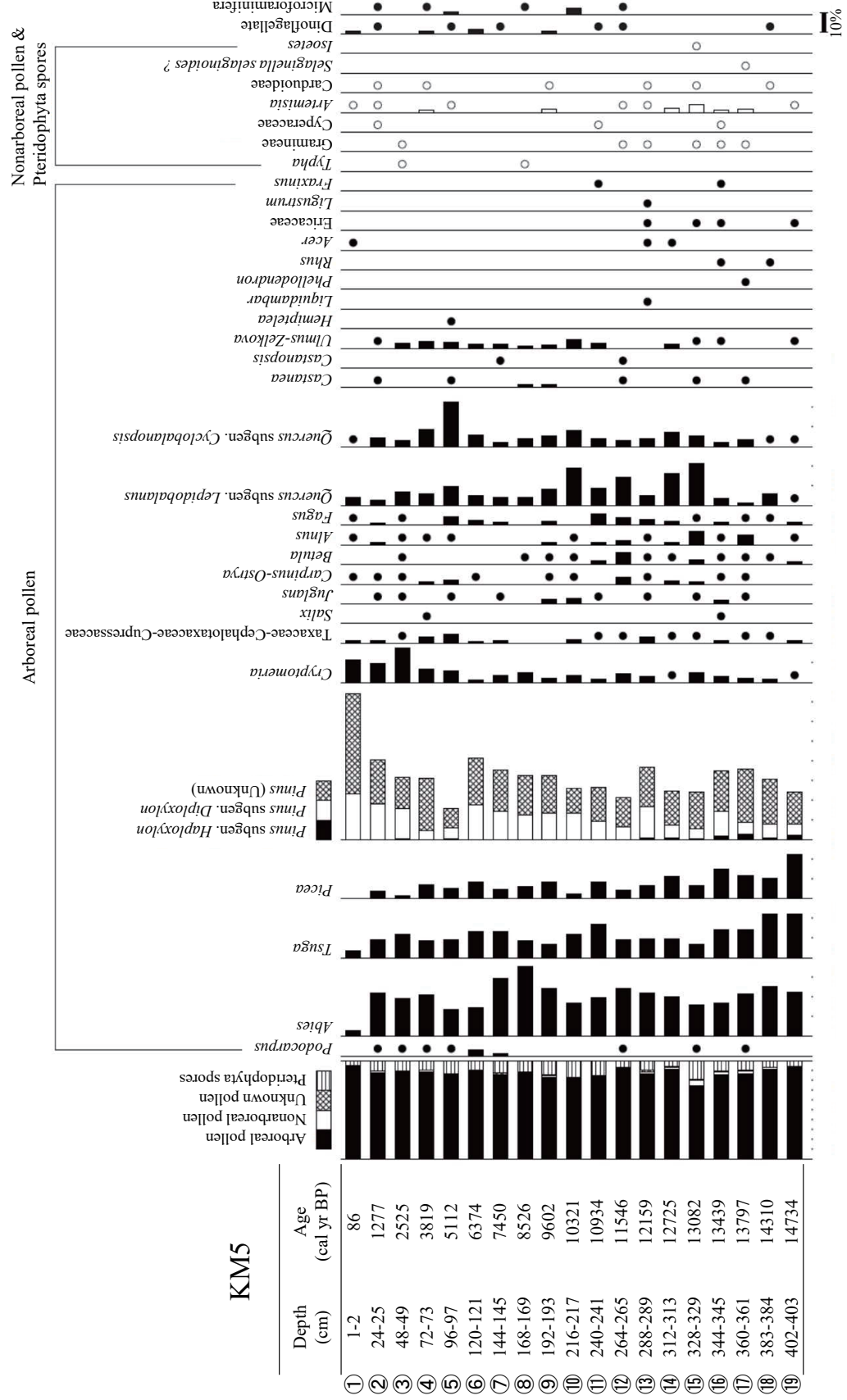
Depth (cm)	Age (cal yr BP)	Isoprenoid GDGTs ($\mu\text{g}/\text{sed. g}$)						Branched GDGTs ($\mu\text{g}/\text{sed. g}$)				Estimated $\text{TEX}_{86}^{\text{H}}$ -SST ($^{\circ}\text{C}$)
		GDGT -0	GDGT -1	GDGT -2	GDGT -3	Crenarchoeol	Cren. regio-isomer	GDGT I	GDGT II	GDGT III	BIT	
1-2	75	10.34	1.89	1.80	0.34	15.99	0.78	0.07	0.03	0.03	0.02	23.78
16-17	829	17.16	3.29	3.15	0.63	27.94	0.82	0.07	0.04	0.04	0.01	22.55
32-33	1633	44.62	8.26	7.36	1.29	61.80	2.47	0.18	—	—	—	22.09
48-49	2480	—	3.87	3.64	0.66	31.33	1.78	0.05	0.05	0.04	0.01	23.97
64-65	3351	20.19	3.88	3.71	0.75	34.18	1.72	0.10	0.05	0.05	0.02	24.13
80-81	4222	25.57	5.10	4.98	1.02	42.89	2.10	0.17	0.07	0.07	0.02	24.08
96-97	5092	76.54	14.99	14.56	2.93	125.75	5.40	0.39	0.15	0.17	0.02	23.63
112-113	5963	12.45	2.57	2.37	0.48	21.12	1.10	0.07	0.03	0.03	0.02	23.72
128-129	6714	7.64	1.67	1.75	0.33	14.29	0.89	0.05	0.02	0.02	0.02	25.38
144-145	7418	9.13	1.96	1.98	0.37	16.59	0.96	0.02	0.03	0.03	0.01	24.81
160-161	8122	8.43	1.76	1.72	0.32	14.55	0.74	0.05	0.03	0.03	0.02	24.05
176-177	8826	7.90	1.75	1.69	0.30	15.11	0.86	0.04	0.03	0.03	0.02	24.39
192-193	9530	10.83	2.24	2.18	0.37	18.11	0.80	0.04	0.03	0.03	0.02	23.38
208-209	10059	11.07	2.26	2.12	0.37	18.41	0.97	0.04	0.03	0.03	0.02	23.68
224-225	10496	16.40	3.33	3.13	0.55	26.87	1.41	0.06	0.04	0.04	0.02	23.64
240-241	10934	19.54	3.71	3.37	0.59	29.60	1.54	0.07	0.05	0.05	0.02	23.27
256-257	11371	26.94	4.83	4.30	0.71	41.49	1.96	0.08	0.06	0.06	0.01	22.96
272-273	11808	19.42	3.29	2.69	0.47	26.97	1.15	0.03	0.05	0.05	0.01	21.73
288-289	12245	18.54	3.07	2.45	0.41	25.51	1.06	0.05	0.04	0.05	0.02	21.43
304-305	12637	18.79	3.24	2.64	0.46	26.42	1.18	0.06	0.05	0.06	0.02	21.84
320-321	12963	16.51	2.97	2.46	0.41	23.47	1.04	0.06	0.05	0.05	0.02	21.81
336-337	13288	19.20	3.43	3.29	0.50	27.60	1.24	0.07	0.06	0.07	0.02	23.16
352-353	13614	13.57	2.40	1.98	0.36	21.90	1.01	0.05	0.05	0.06	0.02	22.54
368-369	13940	22.36	3.80	3.17	0.54	31.09	1.24	0.09	0.07	0.08	0.02	21.68
384-385	14265	27.75	4.31	3.38	0.60	38.69	1.53	0.09	0.09	0.10	0.02	21.45
402-403	14632	35.42	5.55	4.35	0.71	49.73	1.96	0.10	0.10	0.11	0.02	21.28

定することは難しい。本海域近傍では、他の堆積物コアにおいてもスコリア層が認められている (Nishimura, 1984; 佐川ほか, 2003) が コア KM4 のスコリア層との関係は不明である。コア KM4 の年代測定の結果からは、得られたコア試料は主に最終氷期最盛期 (26 ~ 19 ka; Clark *et al.*, 2009) 以前に形成されたことを示す。特に、深度 19 ~ 21 cm で 18,718 cal yr BP、深度 4 ~ 6 cm では、3,081 cal yr BP の値がそれぞれ得られていることから、完新世の堆積物はほとんどないと考えられる。

コア KM5 及び KM6 は、全体を通して生物擾乱が発達するシルトを主体として、ラミナなどの明瞭な堆積構造は認められない。いずれも淘汰が悪いことは、生物擾乱の影響と考えられる。有孔虫を対象とした ^{14}C 年代値の結果もふまえると、これらは最終氷期最盛期以

降現在にかけて、安定した半遠洋性の環境下で堆積したことが示唆される。一方、コア KM6 には一部で砂層が挟在し、侵食的な基底面を伴っている。しかし、厚さは 0.5 ~ 3.0 cm といずれも薄いため、堆積構造や内部の粒度変化を詳細に検討することはできない。

本海域ではプレートの沈み込みに伴う大規模地震が繰り返し発生しており、地震やそれに伴う変動が堆積過程に影響を与えている可能性は否定できない。コア KM4 や KM6 には半遠洋性泥中にスコリア層や砂層のより粗粒な堆積物が挟在する。例えばコア KM6 は、砂が分布する安房堆 (Nishimura, 1984) の斜面麓に位置していることから、安房堆から重力流によって輸送された可能性は否定できない。しかし今回得られた結果のみからは、それ以外の可能性も含めてより詳細な堆積



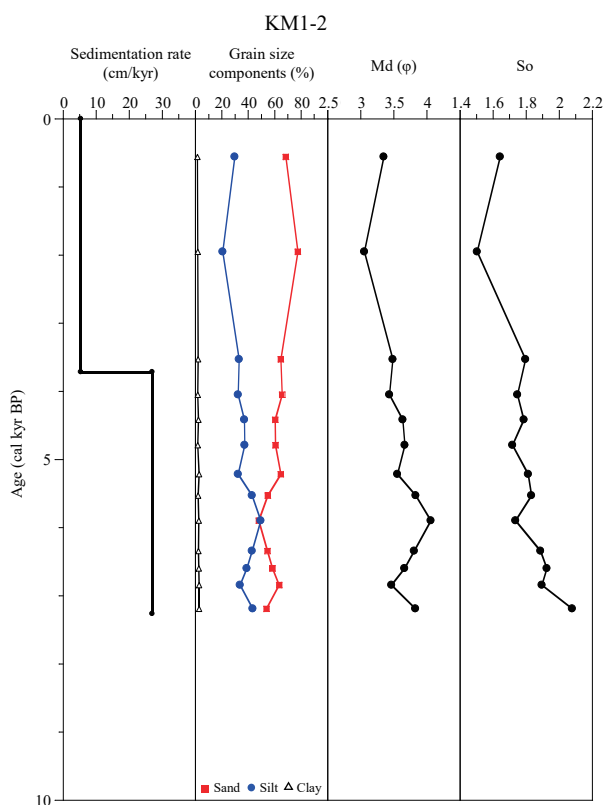
第7図 コア KM5 における花粉分析結果。●は1%未満を示す。
Fig. 7 Results of pollen analyses in KM5 core. ● and ○ indicate less than 1%.

第5表 コア KM5 における花粉分析結果.
 Table 5 Results of pollen analyses for KM5 core.

Sample number	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
Depth (cm)	1-2	24-25	48-49	72-73	96-97	120-121	144-145	168-169	192-193	216-217
Age (cal yr BP)	86	1277	2525	3819	5112	6374	7450	8526	9602	10321
Arboreal Pollen										
<i>Podocarpus</i>	-	1	2	1	1	6	3	-	-	-
<i>Abies</i>	8	50	42	35	21	29	65	50	32	19
<i>Tsuga</i>	9	21	26	14	14	27	29	12	9	13
<i>Picea</i>	-	9	3	12	8	17	11	9	11	3
<i>Pinus</i> subgen. <i>Haploxylon</i>	-	-	1	-	1	-	-	-	-	-
<i>Pinus</i> subgen. <i>Diploxylon</i>	60	41	34	8	8	36	32	18	18	15
<i>Pinus</i> (Unknown)	129	50	34	43	15	47	46	28	25	14
<i>Sciadopitys</i>	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-
<i>Cryptomeria</i>	29	22	38	11	9	3	8	7	3	4
Taxaceae-Cephalotaxaceae-Cupressaceae	3	3	1	5	7	2	3	-	-	2
<i>Salix</i>	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-
<i>Myrica</i>	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-
<i>Juglans</i>	-	2	2	-	1	-	1	-	3	3
<i>Carpinus-Ostrya</i>	1	2	1	2	3	1	-	-	1	1
<i>Corylus</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-
<i>Betula</i>	-	-	1	-	-	-	-	1	1	1
<i>Alnus</i>	1	3	2	1	1	-	-	-	2	1
<i>Fagus</i>	1	3	2	-	7	5	3	-	3	-
<i>Quercus</i> subgen. <i>Lepidobalanus</i>	11	6	15	10	15	10	9	6	11	21
<i>Quercus</i> subgen. <i>Cyclobalanopsis</i>	2	10	7	14	35	12	5	6	7	9
<i>Castanea</i>	-	1	-	-	1	-	-	2	2	-
<i>Castanopsis</i>	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-
<i>Ulmus-Zelkova</i>	-	1	6	6	5	4	5	2	2	5
<i>Hemiptelea</i>	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-
<i>Liquidambar</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Phellodendron</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Rhus</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Acer</i>	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Vitis</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-
Araliaceae	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ericaceae	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Styrax</i>	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-
<i>Ligustrum</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Fraxinus</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Weigela</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Nonarboreal Pollen										
<i>Typha</i>	-	-	1	-	-	-	-	1	-	-
Gramineae	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-
Cyperaceae	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Persicaria-Echinocaulon</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Chenopodiaceae	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Sanguisorba</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Rosaceae	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Leguminosae	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Geranium</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Artemisia</i>	1	1	-	2	1	-	-	-	3	-
Carduoideae	-	1	-	1	-	-	-	-	1	-
Unknown										
Unknown	1	2	2	1	1	2	3	-	1	1
Pteridophyta Spores										
<i>Lycopodium</i>	-	-	1	-	-	-	-	-	1	-
<i>Osmunda</i>	-	-	-	-	-	1	1	-	-	-
<i>Pteris</i>	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-
<i>Selaginella selaginoides</i> ?	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Isoetes</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
other Pteridophyta	12	25	25	16	24	20	31	18	21	22
TOTAL										
Arboreal Pollen	255	225	218	164	153	200	221	141	132	111
Nonarboreal Pollen	1	3	2	3	1	0	0	1	4	0
Unknown Pollen	1	2	2	1	1	2	3	0	1	1
Pteridophyta Spores	12	25	26	17	24	21	32	18	22	22
Total Number of Pollen & Spores	268	253	246	184	178	221	253	160	158	133
Others										
Dinoflagellate	4	2	-	3	1	5	1	-	2	-
Microforaminifera	-	1	-	1	2	-	-	1	-	4
T_p	62.5	43.4	52.5	53.6	74.4	41.3	37.5	43.2	58.3	70.4

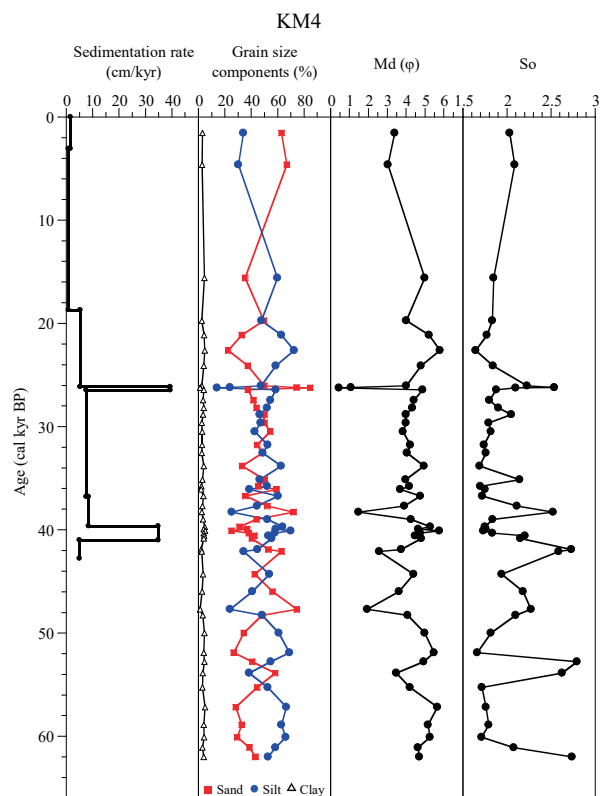
第5表 続き.
Table 5 Continued.

Sample number	⑪	⑫	⑬	⑭	⑮	⑯	⑰	⑱	⑲
Depth (cm)	240-241	264-265	288-289	312-313	328-329	344-345	360-361	383-384	402-403
Age (cal yr BP)	10934	11546	12159	12725	13082	13439	13797	14310	14734
Arboreal Pollen									
<i>Podocarpus</i>	-	1	-	-	1	-	1	-	-
<i>Abies</i>	39	45	47	27	36	38	44	53	52
<i>Tsuga</i>	34	17	21	13	15	32	29	47	52
<i>Picea</i>	17	8	14	15	15	34	24	22	53
<i>Pinus</i> subgen. <i>Haploxylo</i>	-	-	2	1	1	4	6	2	6
<i>Pinus</i> subgen. <i>Diploxylo</i>	19	12	34	9	12	29	12	15	13
<i>Pinus</i> (Unknown)	34	28	43	23	42	46	56	48	38
<i>Sciadopitys</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Cryptomeria</i>	3	8	7	1	11	7	5	4	2
Taxaceae-Cephalotaxaceae-Cupressaceae	1	1	7	1	2	3	2	1	3
<i>Salix</i>	-	-	-	-	-	1	-	-	-
<i>Myrica</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Juglans</i>	1	-	2	-	1	4	1	-	-
<i>Carpinus-Ostrya</i>	-	7	2	2	3	2	1	-	-
<i>Corylus</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Betula</i>	4	11	2	1	6	2	2	2	3
<i>Alnus</i>	3	4	2	2	16	2	10	-	2
<i>Fagus</i>	11	7	6	3	2	4	1	2	4
<i>Quercus</i> subgen. <i>Lepidobalanus</i>	18	27	11	22	49	8	3	13	1
<i>Quercus</i> subgen. <i>Cyclobalanopsis</i>	8	6	9	10	13	5	7	1	2
<i>Castanea</i>	-	1	-	-	1	-	1	-	-
<i>Castanopsis</i>	-	1	-	-	-	-	-	-	-
<i>Ulmus-Zelkova</i>	5	-	-	3	1	2	-	-	1
<i>Hemiptelea</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Liquidambar</i>	-	-	2	-	-	-	-	-	-
<i>Phellodendron</i>	-	-	-	-	-	-	1	-	-
<i>Rhus</i>	-	-	-	-	-	1	-	1	-
<i>Acer</i>	-	-	1	1	-	-	-	-	-
<i>Vitis</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Araliaceae	-	1	-	-	-	-	-	-	-
Ericaceae	-	-	1	-	1	1	-	-	1
<i>Styrax</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Ligustrum</i>	-	-	1	-	-	-	-	-	-
<i>Fraxinus</i>	1	-	-	-	-	1	-	-	-
<i>Weigela</i>	-	-	1	-	-	-	-	-	-
Nonarboreal Pollen									
<i>Typha</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Gramineae	-	1	1	-	3	1	2	-	-
Cyperaceae	1	-	-	-	-	2	-	-	-
<i>Pericaria-Echinocaulon</i>	1	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Chenopodiaceae</i>	-	-	-	-	1	-	-	-	-
<i>Sanguisorba</i>	-	-	-	-	2	-	-	-	-
Rosaceae	-	-	-	-	-	1	-	-	-
Leguminosae	-	-	-	-	-	-	1	-	-
<i>Geranium</i>	2	-	-	-	-	-	-	1	-
<i>Artemisia</i>	-	1	2	3	12	3	4	-	1
Carduoideae	-	-	1	-	1	-	-	2	-
Unknown									
Unknown	2	1	3	1	2	1	2	-	2
Pteridophyta Spores									
<i>Lycopodium</i>	-	-	-	-	-	1	-	-	-
<i>Osmunda</i>	-	-	-	-	-	2	-	-	-
<i>Pteris</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Selaginella selaginoides</i> ?	-	-	-	-	-	-	2	-	-
<i>Isoetes</i>	-	-	-	-	1	-	-	-	-
other Pteridophyta	35	14	24	8	56	25	21	16	15
TOTAL									
Arboreal Pollen	198	185	215	134	228	226	206	211	233
Nonarboreal Pollen	4	2	4	3	19	7	7	3	1
Unknown Pollen	2	1	3	1	2	1	2	0	2
Pteridophyta Spores	35	14	24	8	57	28	23	16	15
Total Number of Pollen & Spores	237	201	243	145	304	261	236	230	249
Others									
Dinoflagellate	2	1	-	-	-	-	-	1	-
Microforaminifera	-	2	-	-	-	-	-	-	-
T_p	46.3	62.7	45.3	58.2	69.1	27.5	19.7	19.8	7.1



第 8 図 A コア KM1-2 の堆積速度, 粒度組成, 中央粒径 (Md (ϕ)), 淘汰度 (So) の年代変化.

Fig. 8A Variations in sedimentation rates, grain size components (%), median diameter (Md (ϕ)) and sorting (So) of KM1-2 core for age.



第 8 図 B コア KM4 の堆積速度, 粒度組成, 中央粒径 (Md (ϕ)), 淘汰度 (So) の年代変化.

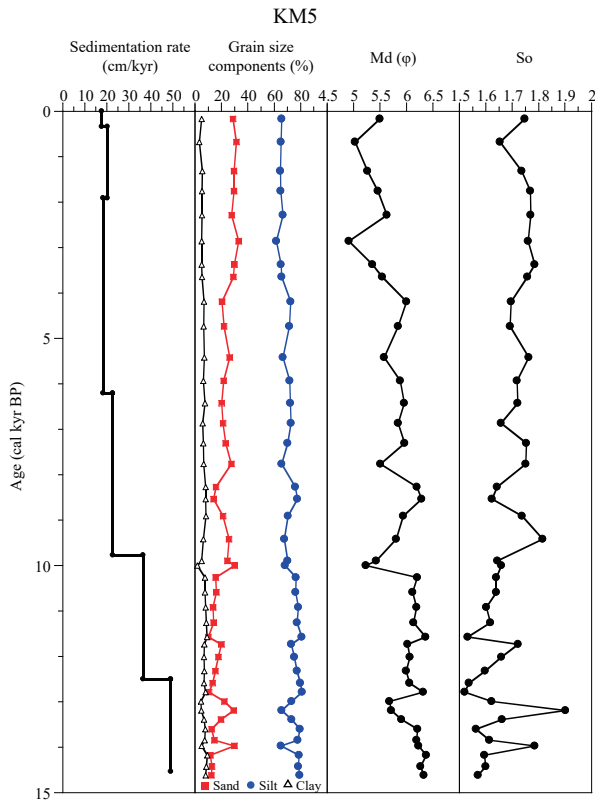
Fig. 8B Variations in sedimentation rates, grain size components (%), median diameter (Md (ϕ)) and sorting (So) of KM4 core for age.

過程について検討することは困難である。このため、今回得られたコア試料から本海域における地震履歴の議論はできない。一方、古環境復元には安定した底層環境下で形成され、砂層やスコリア層を含まない連続的な堆積物であるコア KM5 が適していると判断される。

5.2 過去 15,000 年間の古海洋環境変動

コア KM5 における GDGT 組成から見積もった過去 15,000 年間の古海洋変動を第 9 図に示す。BIT は、主に海洋に生息する Thaumarchaeota 由来の crenarchaeol と、主に陸上土壌に生息するバクテリアを由来とする ブランチ GDGT (GDGT I, II, III) の量比を指標化したものである (Hopmans *et al.*, 2004)。(2) の計算式で示される通り、陸起源の GDGT の割合が大きい程 BIT の値は 1 に近付き、逆に海洋起源の GDGT の割合が大きい程この値は 0 に近くなる。TEX₈₆^H 指標を用いて海水温を復元する際、陸起源の GDGT の寄与が大きいと、正確に海水温を評価できないことが指摘されている (Weijers *et al.*, 2006)。コア KM5 の BIT は 0 ~ 0.02 と

極めて小さい値を示すことから、コア KM5 中の GDGT のほとんどが海洋起源であると判断される。したがって、TEX₈₆^H 指標から復元される古水温は、海水温を反映すると解釈される。コア KM5 において、TEX₈₆^H 指標によって復元された海水温は、21.2 ~ 25.4°C の範囲で変動している (第 9 図)。西部北太平洋における、セジメントトラップを用いた沈降粒子中の GDGT 動態の研究 (Yamamoto *et al.*, 2012) によると、トラップの水深に関係なく、沈降粒子の示す TEX₈₆ 水温は一定であり、年平均海洋表層水温 (SST) に一致していた。同様に、近接する海底から得られた表層堆積物においても、TEX₈₆ 水温は年平均 SST と一致していた。これは、GDGT を有する Thaumarchaeota の細胞が糞石に取り込まれる、またはマリンスノーに凝集することで、水柱表層部の GDGT が優先的に海底へと輸送されるためと解釈されている (Wuchter *et al.*, 2005, 2006; Yamamoto *et al.*, 2012)。コア KM5 の最表層部 (深度 1 ~ 2 cm ; 75 cal yr BP) での TEX₈₆^H 水温は 23.78°C であり、この海域における現在の年平均 SST (約 22.5°C) と、水温換算に関する誤差 (2.5°C; Kim *et al.*, 2010) 内で一致してい

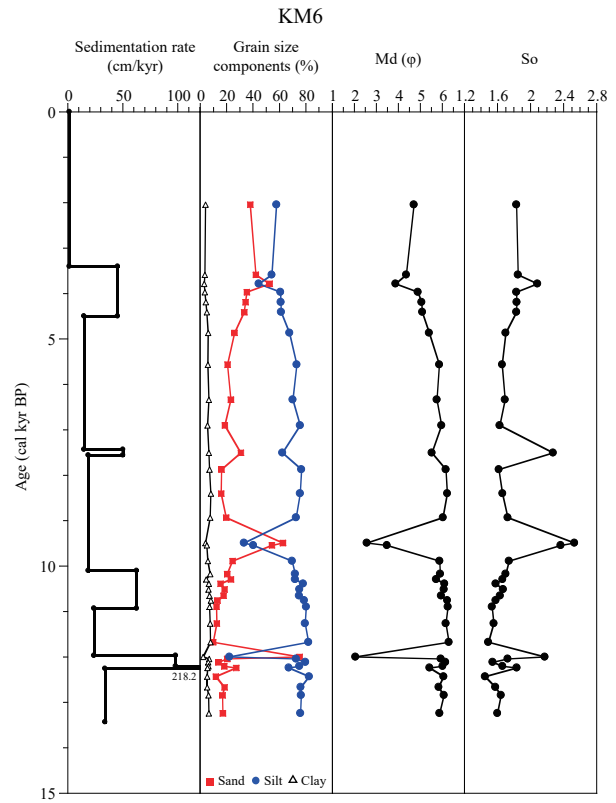


第 8 図 C コア KM5 の堆積速度，粒度組成，中央粒径 (Md (φ))，淘汰度 (So) の年代変化。

Fig. 8C Variations in sedimentation rates, grain size components (%), median diameter (Md (φ)) and sorting (So) of KM5 core for age.

る。したがって、コア KM5 における TEX_{86}^H 水温変動は、この海域における年平均 SST の変動を反映していると判断される。

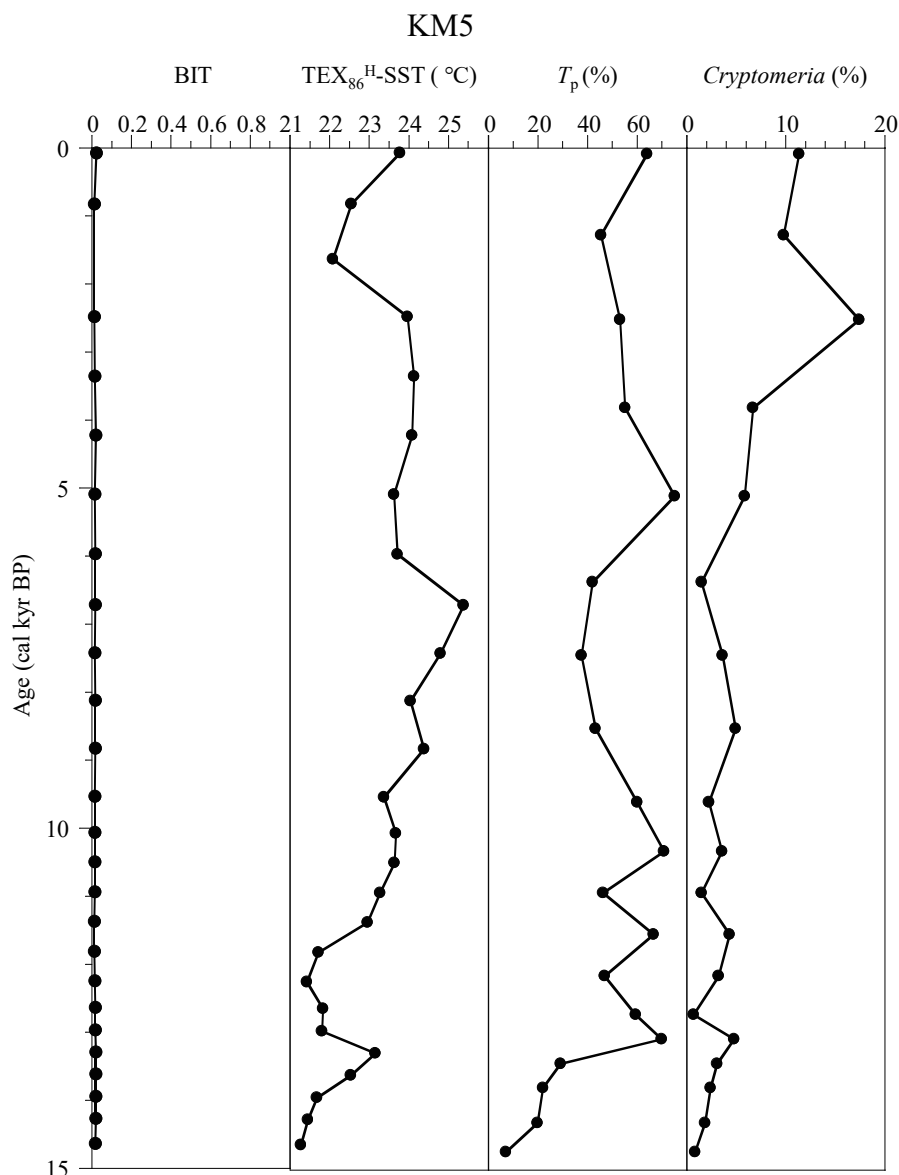
コア KM5 において、14 cal kyr BP 以前では TEX_{86}^H -SST は 21 ~ 22°C で推移しており、表層部の値 (23.8°C, 75 cal yr BP) より 2°C 程低い (第 9 図)。その後、ベリング/アレレード期に相当する 14 ~ 13 cal kyr BP には、 TEX_{86}^H -SST は 23°C 前後に上昇する。続くヤングアドリアス期 (12.9 ~ 11.5 cal kyr BP) では、 TEX_{86}^H -SST は再び 21 ~ 22°C に低下している。これに続くプレボレアル期 (11.5 ~ 10 cal kyr BP) には、 TEX_{86}^H -SST は 23.7°C まで上昇する。その後も 7 cal kyr BP 頃にかけて TEX_{86}^H -SST は上昇し、25.4°C と過去 15,000 年間で最も高い TEX_{86}^H -SST を示す。この時期は本海域での相対的海水準が最も高かった時期とほぼ一致している (遠藤ほか, 1989, Tamura *et al.*, 2008)。7 cal kyr BP 以降では、 TEX_{86}^H -SST は 1.5°C 程低下し、24°C 前後で推移する。1.5 cal kyr BP 付近では、さらに 2°C 程度の TEX_{86}^H -SST の一時的な低下が認められる。この TEX_{86}^H -SST 変動パターンは、房総半島東方沖コア C-6 (北緯 34°43.1',



第 8 図 D コア KM6 の堆積速度，粒度組成，中央粒径 (Md (φ))，淘汰度 (So) の年代変化。

Fig. 8D Variations in sedimentation rates, grain size components (%), median diameter (Md (φ)) and sorting (So) of KM6 core for age.

東経 140°32.7', 水深 2,020 m) における微化石温度指標 (Chinzei *et al.*, 1987; 尾田・嶽本, 1992), 西七島海嶺におけるコア St.14 (北緯 32°40.1', 東経 138°27.3', 水深 3,252 m) の U^k_{37} -SST (Sawada and Handa, 1998), 及び鹿島沖コア MD01-2421 (北緯 36°01.42', 東経 141°46.8', 水深 2,224 m) における U^k_{37} -SST (Yamamoto *et al.*, 2004, 2005; Isono *et al.*, 2009) の変動パターンと類似しており、本海域が過去 15,000 年間を通して黒潮統流の影響下にあったことを示唆している。ただし、鹿島沖の U^k_{37} -SST 変動幅がヤングアドリアス期と完新世で最大 7°C 程であるのに対して、コア KM5 の TEX_{86}^H -SST の変動幅は 4°C 程度である。これは、本海域が黒潮統流の流軸に近く、黒潮統流-親潮境界により近い鹿島沖ほど水温の緯度勾配がないことを反映している。また、黒潮の流路によって水温が変動することも考えられる (尾田・嶽本, 1992; Sawada and Handa, 1998) が、 TEX_{86}^H -SST の変動幅が小さいことから、黒潮が八丈島の南方を通過する流路 (非大蛇行離岸流路; Kawabe, 1985) が卓越した時期はなかったものと推察される。さらに、 TEX_{86}^H -SST 変動パターンは、黒潮の源流域に



第9図 コア KM5 における BIT, $\text{TEX}_{86}^{\text{H}}$ -SST, T_p (%), *Cryptomeria* (%) の年代変化。
 Fig. 9 Variations in BIT, $\text{TEX}_{86}^{\text{H}}$ -SST, T_p (%) and *Cryptomeria* (%) of KM5 core for age.

より近い琉球海溝斜面のピストンコア PN93-PC12 (北緯 24°01.3', 東経 124°25.9', 水深 2,160 m) における黒潮指標種の浮遊性有孔虫産出頻度 (Ujiié and Ujiié, 1999) とも調和的であり, $\text{TEX}_{86}^{\text{H}}$ -SST は黒潮の強度変動を反映していると解釈される。 $\text{TEX}_{86}^{\text{H}}$ -SST 変動から, 7 cal kyr BP 頃に最も黒潮が強化されたことを示しており, 黒潮前線が最も北上した時期 (Chinzei *et al.*, 1987; 尾田・嶽本, 1992) と一致する。なお, $\text{TEX}_{86}^{\text{H}}$ -SST 変動は西七島海嶺におけるコア St.14 の U^k_{37} -SST の変動より 1,500 年程度の遅延が認められる。これは, 最終氷期最盛期以降, 黒潮の強化に伴って黒潮前線が北上するのに有した時間だと推察される。 $\text{TEX}_{86}^{\text{H}}$ -SST の変動から, 7 cal kyr BP 以降に黒潮が弱化したことを示す。また, 1.5 cal kyr BP 頃に見られる $\text{TEX}_{86}^{\text{H}}$ -SST の低下は,

房総半島沖コア C-6 の同時期における黒潮指標種の減少, 及び冷水塊指標種の増加と調和的であり, 琉球海溝及び沖縄トラフにおける *Pulleniatina minimum* event (Jian *et al.*, 1996; Ujiié and Ujiié, 1999) の時期とも調和的である。しかし, 鹿島沖の U^k_{37} -SST は 7 cal kyr BP 以降, 現在にかけて漸次低下する傾向を示しており, このような一時的な水温低下は見られない (Isono *et al.*, 2009)。これらのことから, 1.5 cal kyr BP 頃に黒潮が一時的に弱体化し, 房総半島東方沖には冷水塊が形成されたが, この冷水塊は大規模なものではなかったと推察される。

5.3 コア KM5 における過去 15,000 年間の花粉記録

花粉組成から見積もった T_p は, 15 ~ 13 cal kyr BP に

かけて上昇傾向を示す(第9図)。その後10 cal kyr BPにかけて、 T_p は40～70%程度で推移する。10 cal kyr BP以降は、7 cal kyr BPにかけて T_p は40%程度に低下する。その後、5 cal kyr BP頃には T_p は75%程と、過去15,000年間で最も高い値を示し、現在にかけて45～65%程で推移する。この T_p の変動パターンは、 TEX_{86}^H -SSTの変動パターンと大きく異なっている(第9図)。15～13 cal kyr BPでは、 T_p と TEX_{86}^H -SSTの変動は概ね一致しており、最終氷期以降、黒潮の強化に伴って陸上も温暖化し、針葉樹林が減少したことが窺える。しかし、13 cal kyr BP以降から、両者の変動傾向に違いが認められる。 TEX_{86}^H -SSTはヤンガードリアス期に低下し、15 cal kyr BP頃と同程度の値を示すが、 T_p は15 cal kyr BP頃の低い値まで戻らない。これは13 cal kyr BP頃から拡大し始めたコナラ亜属を主体とする落葉広葉樹の勢力が衰えていないことに起因する。11.5～7 cal kyr BPでは、 TEX_{86}^H -SSTは再び上昇し黒潮が強化されたことを示すが、 T_p はそれに応答した変動を示しておらず、むしろ低下する傾向にある。これは依然としてマツ科の針葉樹花粉が産出するのに対して、コナラ亜属を中心に落葉広葉樹花粉が減少したことによる。6～0 cal kyr BPでは、 TEX_{86}^H -SSTは若干低下して24°C前後での安定した推移と、1.5 cal kyr BP付近での一時的な低下を示すが、 T_p は TEX_{86}^H -SSTの極大におよそ2,000年遅れて5 cal kyr BPで最終氷期以降最も高い値を示している。これは照葉樹のアカガシ亜属が拡大したことに起因するが、針葉樹は消失していない。 T_p と TEX_{86}^H -SSTの変動が同調しない原因として、マツ科花粉の産出頻度の高さが考えられる。12 kyr BP以降、関東地方の陸上ボーリング試料ではマツ科花粉はほとんど産出されない(吉川, 1999)。海洋堆積物中の花粉は、風による運搬と河川流入のほか、海流によっても輸送過程で影響を受ける(Faegri *et al.*, 1989)。本海域は、河川による陸域からの堆積物供給の影響が小さく、黒潮の流軸にも近い。このような堆積環境下では、様々な場所に由来する堆積物が流入するため、花粉組成も広範囲の植生を反映する可能性が考えられる。また、マツ科の花粉は生産量が多いだけでなく、気翼を持っているため飛散能力に優れ、水にも浮きやすい。さらに、マツ科は花粉外壁の主成分であるスポロポレニンの量が多く(Stanley and Linskens, 1974)、風化にも強い。これらのことから、マツ科の割合が高いコアKM5の花粉組成は、輸送・堆積過程でのシグナルの変質が示唆される。そのため、花粉組成を利用して気候変動を論ずるにあたり、 T_p による評価は不適切であると判断される。ただし、例外的に銚子半島高神低地におけるボーリング試料の花粉記録では、8～5.5 kyr BPでモミ属及びツガ属の産出頻度がそれぞれ最大30%と高い層準が

認められており(松下, 1991)、地点KM5に近い陸上でも12 kyr BP以降でマツ科針葉樹が広がっていた可能性を完全に否定するものではない。一方で、マツ科花粉が過大評価されているとしても、個々の植物種の変動は認められることから、各々の植物種に着目して植生変動を検討することは可能と判断される。

コアKM5と広大な関東平野に近い鹿島沖コアMD01-2421(Igarashi and Oba, 2006)の花粉組成を比較する。ヤンガードリアス期以前の15～13 cal kyr BPでは、コアKM5、MD01-2421共にマツ属、モミ属、ツガ属、トウヒ属の花粉が優占しており、最終氷期最盛期からまだ十分に温暖化していなかったことを反映していると推察される。また、コアMD01-2421ではハンノキ属(*Alnus*)やコナラ亜属やブナ属も見られ、平地には広葉樹も分布していたと推測される。13～10 cal kyr BP頃はツガ属、トウヒ属が減少し、コナラ亜属の増加が見られ、この時期から関東地方は次第に温暖化していったと考えられる。この結果は黒潮の強化と調和的であるが、コアKM5及びMD01-2421の花粉組成からはヤンガードリアス期での明瞭な寒冷化は見られない。7 cal kyr BP頃からは、コアKM5で暖温帯広葉樹のアカガシ亜属の産出頻度が上昇し始め、黒潮が最も強く、黒潮続流-親潮境界が最も北上していた時期に一致する。しかし、コアMD01-2421ではアカガシ亜属の産出は4 cal kyr BP頃であり、房総半島南部と鹿島周辺で照葉樹林の発達に3,000年程の時間差があったことが示唆される。4～1.5 cal kyr BPでは、コアKM5及びMD01-2421では共にスギ属花粉の増加で特徴的付けられる(第9図)。スギ属は年平均降水量が2,000 mmを超える地域に広く分布することが知られており(塚田, 1981; Tsukada, 1986)、この時期は降水量が高く、多湿であったことが示唆される。1 cal kyr BP以降ではマツ属が急増しており、関東地方において人間活動が活発になったことによる影響を受けた可能性が考えられる。

続いて、コアKM5の花粉記録と関東地方陸上ボーリング試料における花粉記録を比較する。13～12 kyr BPの温暖化が始まる頃の花粉記録は少ないが、関東北部や武蔵野台地では針葉樹林と、カバノキ属(*Betula*)やハンノキ属の冷温帯広葉樹が分布しており(吉川, 1999)、ヤンガードリアス期以前のコアKM5の花粉組成と概ね一致している。この時期には関東地方はまだ十分に温暖化していなかったことが示唆される。その後、関東地方のほぼ全域で針葉樹林は姿を消し、コナラ亜属を主体とする落葉広葉樹林に取って代わられた。10 kyr BP以降では、関東地方の広い範囲で次第にクリ属が増加し、コナラ亜属と共に森林の主要な構成要素となっていくが、コアKM5ではクリ属は10～8 kyr BP頃にわずかに出現するに過ぎない。関東地方では、

およそ 7 kyr BP からは照葉樹のアカガシ亜属が優勢となり、照葉樹と落葉樹広葉樹が共存していた。照葉樹林は関東南部から北部、沿岸域から内陸部へと拡大したとみられ、コア KM5 の結果は調和的であると言える。4 kyr BP からはスギ林が徐々に拡大し始め、3 kyr BP 以降には照葉樹と共に主要な森林構成要素になった。これはコア KM5 の花粉記録と一致しており、関東地方全域での湿潤化が示唆され、東アジア夏モンスーンが強化されたこと (Wang *et al.*, 2001, 2008; Yuan *et al.*, 2004) と概ね調和的である。1 kyr BP 頃からはマツ属花粉が増加しており、コア KM5 の花粉記録とも一致しており、人間活動の影響は関東地方に広く渡っていたと推察される。

最後に、コア KM5 と琵琶湖の堆積物コア BIW95-4 (北緯 35°15', 東経 136°03', 水深 67 m) の花粉記録による西日本における植生変動 (Hayashi *et al.*, 2010) を比較する。コア BIW95-4 では 15 ~ 13 cal kyr BP でマツ属、モミ属、ツガ属、トウヒ属の針葉樹が優勢で、カバノキ属、ハンノキ属、コナラ亜属の落葉広葉樹が混じる。13 ~ 10 cal kyr BP 頃には針葉樹はほぼ存在しなくなり、カバノキ属、ハンノキ属も減少した。代わりにコナラ亜属を中心としたクリ属/シイ属、クマシデ属/アサダ属のような暖温帯広葉樹の増加とスギ属の増加に特徴付けられる。このことから、最終氷期最盛期以降、関東地方と温暖化した時期に大きな違いはないが、西日本の方がより温暖で湿潤な気候であったと考えられる。アカガシ亜属を主体とする照葉樹林の発生は、琵琶湖周辺で 8 cal kyr BP 頃から始まっており、7 cal kyr BP 頃とするコア KM5 より 1,000 年程早い。これは、黒潮が強化されるに従い黒潮の流軸が北方へと移動することで、日本列島南部から徐々に温暖化が強まったことを反映している。4 cal kyr BP からはアカガシ亜属は減少し始め、スギ属はより勢力を強めた。スギ属花粉の増加時期はコア KM5 より 5,000 年以上も早く、西日本では 10 cal kyr BP 以前から湿潤化したことが示唆される。

5.4 堆積過程と海洋環境の関係

コア KM5 及び KM6 とともに、およそ 12 cal kyr BP 以降で堆積速度が低下すると同時に粗粒化する傾向が認められる (第 8 図 C, D)。これは、堆積量を減らしつつ相対的に粗い粒子が堆積するようになったか、あるいは細かい粒子が堆積し難くなったことを意味している。コア KM5 で低い BIT 値が示されている (第 9 図) ように、この海域では河川による陸域からの碎屑物供給の影響は小さいと考えられる。また、粗粒化が開始する 12 cal kyr BP は、TEX₈₆^H-SST の変動 (第 9 図) で示されるように、ヤンガードリアス期の終焉と共に黒潮が強化された時期と概ね一致している。これらのこ

とから総合的に判断すると、強化された黒潮の影響によって、細粒な粒子が堆積しなくなった可能性が考えられる。現在の黒潮は蛇行・非蛇行を問わず安定的に房総半島東方沖を通過し、その流れは深度方向に弱くなるものの、水深 3,000 m まで影響を与えている (Taft, 1978)。コア KM4 では完新世の堆積物がほとんど認められないことも、黒潮の強度変動と関係している可能性がある。さらにより水深の深い地点 KM5 及び KM6 における 7 cal kyr BP 頃の堆積速度の顕著な減少は、完新世で黒潮が最も強化された時期と調和的である。一方、7 cal kyr BP 以降では黒潮は弱化する傾向を示すが、コア KM5 及び KM6 の堆積速度に大きな変化は認められない。しかし、堆積物粒度の粗粒化の傾向は依然として維持されており、むしろその度合いは大きくなっている。この時期は 6 ~ 7 cal kyr BP をピークとした相対的海水準の最も高かった期間からそれ以降の高海水準期に対応している。このような堆積速度及び粒度組成の時間変化はコア KM1-2 でも認められる。また、西田ほか (2019) では、九十九里浜沖の陸棚上からおよそ 7 cal kyr BP 以降の上方粗粒化を示す堆積物が採取されており、浜堤列平野のプログラデーションの開始に伴って陸棚の広い範囲で堆積作用が進んだことが示されている。後氷期以降の黒潮変動に加えて、このような相対的海水準変動に対応した碎屑物供給の変化が陸棚斜面の深海域でも堆積作用に影響している可能性が考えられる。

6. まとめ

房総半島鴨川市東方沖における堆積物コア採取によって、コア試料の堆積学的特徴及び本海域の古海洋環境との関係性を議論した。対象としたコア試料は、水深 449 ~ 1,728 m の 5 地点から得られたもので、長さが 24 ~ 404 cm である。岩相の特徴や形成年代は地点によって異なる。水深 1,000 m を超える地点 KM4 (水深 1,301 m)、KM5 (同 1,728 m)、及び KM6 (同 1,556 m) から採取されたコア試料は、いずれも泥質堆積物で主に構成される点で共通する。また、コア KM4 と KM6 はスコリア層や砂層を挟在する。しかし、岩相の特徴からは、それらの堆積過程を限定することはできない。また、それらのスコリア層・砂層の形成年代は、コア KM4 では主に最終氷期最盛期より以前、コア KM6 では 10.8 cal kyr BP 以前であるため、既存の地震履歴に関する研究との関係を詳しく議論することは難しい。一方、コア KM5 は最終氷期最盛期以降現在までに、安定した底層環境で形成されたと考えられる。このため、有機地球化学的手法により、コア KM5 を用いて古海洋環境を検討した。その結果、コア KM5 に TEX₈₆^H 古

水温計を適用することで、房総半島東方海域における水温変動が定量的に復元された。過去 15,000 年間に於いて、TEX₈₆^H-SST は 21 ~ 25.5°C の範囲で変動しており、ヤンガードリアス期での低下、プレボレアル期での上昇、7 cal kyr BP 前後での極大などの特徴から、黒潮の強度変動を反映していると解釈される。また、コア KM5 の花粉分析を実施することで、陸域の植生変遷を検討した。15 ~ 13 cal kyr BP では針葉樹花粉が優占することから、房総半島南部は寒冷な気候下にあったことが示唆され、黒潮がまだ弱かったことと調和的である。13 ~ 10 cal kyr BP では針葉樹の減少、コナラ亜属を主体とする落葉広葉樹の増加より、黒潮の強化による温暖化が示唆される。照葉樹林の拡大はコア KM5 では 7 cal kyr BP 頃であり、琵琶湖コアの花粉記録より 1,000 年程遅い。これは西日本から温暖化がより強まったことを意味しており、黒潮前線の北方移動に起因すると推察される。スギ属花粉の増加は、コア KM5 では 4 cal kyr BP 頃であるが、琵琶湖コアでは 10 cal kyr BP 以前であり、関東地方の湿潤化は西日本より 5,000 年以上も遅かったと推察される。堆積物の岩相の特徴、粒度組成、¹⁴C 年代値及び GDGT 組成より、房総半島鴨川市東方沖の深海斜面域における堆積物は、最終氷期最盛期以降およそ 7 cal kyr BP まで堆積速度の低下を伴う粗粒化が認められ、黒潮の影響を強く受けていたと推察される。7 cal kyr BP 以降では黒潮による影響が弱まり、代わりに相対的の海水準が高まったことに関連する堆積作用が卓越した可能性が示唆される。この結果は、陸域からの碎屑物供給に限られる陸棚斜面下部における堆積物形成過程の理解を深めるのに重要である。

謝辞：本調査は千葉県、千葉漁業協同組合連合会ならびに各漁業協同組合のご理解・ご協力のもとで遂行することができた。柱状堆積物試料採取の作業に際しては、久保尚大氏、半場康弘氏、向山健二郎氏、堤 正光氏、澤田 顕氏（川崎地質株式会社）に行って頂いた。また、調査船望星丸の荒木直行船長、乗組員の方々、東海大学の坂本 泉氏ならびに学生諸氏には調査全般を通じてお世話になった。田中裕一郎氏、佐藤智之氏には地元説明に際してご協力頂いた。粒度分析に際しては、産総研地質調査総合センター共同利用実験室の装置を使用し、七山 太氏には使用法についてご指導頂いた。GDGT 分析においては、北海道大学大学院地球環境科学研究院の山本正伸准教授に、多大なるご助力を頂いた。感謝の意を表す。試料処理に関しては、平本 潤氏、三橋俊介氏、ならびに富田綾子氏にご協力頂いたことを厚く感謝申し上げる。片山 肇氏には調査結果、データの解析・取りまとめについて有益なご議論を頂いた。以上の方々には厚くお礼申し上げます。

文 献

- Ajioka, T., Yamamoto, M. and Murase, J. (2014) Branched and isoprenoid glycerol dialkyl glycerol tetraethers in soils and lake/river sediments in Lake Biwa basin and implications for MBT/CBT proxies. *Organic Geochemistry*, **73**, 70-82.
- Chinzei, K., Fujioka, K., Kitazato, H., Koizumi, I., Oba, T., Oda, M., Okada, H., Sakai, T. and Tanimura, Y. (1987) Postglacial environmental change of the Pacific Ocean off the coasts of central Japan. *Marine Micropaleontology*, **11**, 273-291.
- Clark, P.U., Dyke, A.S., Shakun, J.D., Carlson, A.E., Clark, J., Wohlfarth, B., Mitrovica, J.X., Hostetler, S.W. and McCabe, A.M. (2009) The Last Glacial Maximum. *Science*, **325**, 710-714.
- 遠藤邦彦・小杉正人・松下まり子・宮地直道・菱田 量・高野 司 (1989) 千葉県古流山湾周辺域における完新世の環境変遷史とその意義. 第四紀研究, **28**, 61-77.
- 遠藤邦彦・石綿しげ子・堀 伸三郎・中尾有利子 (2013) 東京低地と沖積層—軟弱地盤の形成と縄文海進—。地学雑誌, **122**, 968-991.
- Erdtman, G. (1952) *Pollen morphology and plant taxonomy: Angiosperms* (An introduction to palynology. I). Almqvist & Wiksells, Stockholm, 539p.
- Erdtman, G. (1957) *Pollen and Spore Morphology/Plant Taxonomy: Gymnospermae, Pteridophyta, Bryophyta* (Illustrations) (An Introduction to Palynology. II). Almqvist & Wiksells, Stockholm, 147p.
- Faegri, K., Iversen, J. and Krzywinski, K. (1989) *Textbook of Pollen Analysis, fourth edition*. Willy, New York, 328p.
- Folk, R. L. and Ward, W. C. (1957) Brazos River bar, a study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology*, **27**, 3-26.
- 藤木利之・小澤智生 (2007) 琉球列島産植物花粉図鑑。アクアコーラル企画, 155p.
- 林 弥栄 (1960) 日本産針葉樹の分類と分布. 農林出版, 東京, 202p.
- Hayashi, R., Takahara, H., Hayashida, A. and Takemura, K. (2010) Millennial-scale vegetation changes during the last 40,000 yr based on a pollen record from Lake Biwa, Japan. *Quaternary Research*, **74**, 91-99.
- Hopmans, E.C., Weijers, J.W.H., Schefuß, E., Herfort, L., Sinninghe Damsté, J.S. and Schouten, S. (2004) A novel proxy for terrestrial organic matter in sediments based on branched and isoprenoid tetraether lipids. *Earth and Planetary Science Letters*, **24**, 107-116.
- Igarashi, Y. and Oba, T. (2006) Fluctuations of monsoons and

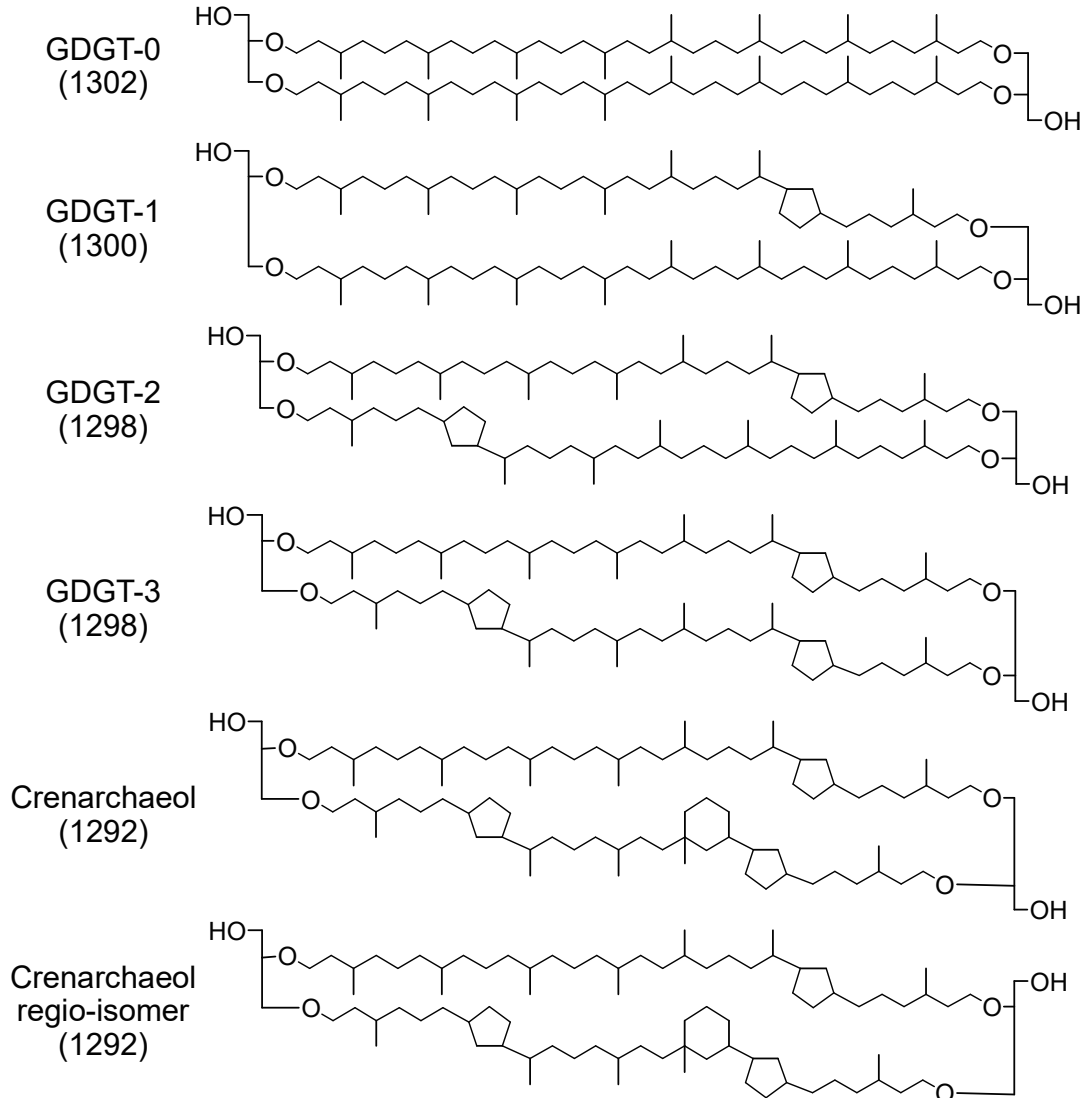
- insolation in the northwest Pacific during the last 144 kyr from a high resolution pollen analysis of the IMAG-ES core MD01-2421. *Quaternary Science Reviews*, **25**, 1447-1459.
- Isono, D., Yamamoto, M., Irino, T., Oba, T., Murayama, M., Nakamura, T. and Kawahata, K. (2009) The 1,500-year climate oscillation in the mid-latitude North Pacific during the Holocene. *Geology*, **37**, 591-594.
- Jian, Z., Li, B., Pflaumann, U. and Wang, P. (1996) Late Holocene cooling event in the western Pacific. *Science in China Series D-Earth Sciences*, **39**, 543-550.
- 地震調査研究推進本部 (2014) 相模トラフ沿いの地震活動の長期評価 (第二版) 概要資料. http://www.jishin.go.jp/main/chousa/14apr_sagami/sagami_gaiyou.pdf (2018年2月25日閲覧)
- 海上保安庁 (1984a) 沿岸の海の基本図 (5万分の1) 犬吠埼. 海上保安庁, 東京.
- 海上保安庁 (1984b) 沿岸の海の基本図 (5万分の1) 鴨川湾. 海上保安庁, 東京.
- 海上保安庁 (1986) 沿岸の海の基本図 (5万分の1) 太東埼. 海上保安庁, 東京.
- 海上保安庁 (2000) 沿岸の海の基本図 (5万分の1) 九十九里浜. 海上保安庁, 東京.
- Kawabe, M. (1985) Sea level variations at the Izu Islands and typical stable paths of the Kuroshio. *Journal of the Oceanographical Society of Japan*, **41**, 307-326.
- Kim, J. -H., van der Meer, J., Schouten, S., Helmke, P., Willmott, V., Sangiorgi, F., Koc, N., Hopmans, E.C. and Sinninghe Damsté, J.S. (2010) New indices and calibrations derived from the distribution of crenarchaeal isoprenoid tetraether lipids: implications for past sea surface temperature reconstructions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **74**, 4639-4654.
- Matsumoto, K., Oba, T., Lynch-Stieglitz, J. and Yamamoto, H. (2002) Interior hydrography and circulation of the glacial Pacific Ocean, *Quaternary Science Reviews*, **21**, 1693-1704.
- 松下まり子 (1991) 銚子半島高神低地の後氷期における植生変動史. *日本生態学会誌*, **41**, 19-24.
- 三好教夫・藤木利之・木村裕子 (2011) 日本産花粉図鑑. 北海道大学出版会, 札幌, 824p.
- Nakagawa, T., Kitagawa, H., Yasuda, Y., Tarasov, P.E., Nishida, K., Gotanda, K., Sawai, Y. and YRCP Members (2003) Asynchronous climate changes in the North Atlantic and Japan during the last termination. *Science*, **299**, 688-691.
- 中村 純 (1980) 日本産花粉の標徴 I・II (図版). 大阪市立自然博物館収蔵資料目録, 第12・13集, 91p.
- 西田尚央・味岡 拓・池原 研 (2015) 房総半島東方沖海底堆積物調査の概要, 平成26年度沿岸域の地質・活断層調査研究報告, 産業技術総合研究所地質調査総合センター速報, no. 65, 6-18.
- 西田尚央・味岡 拓・池原 研・中島 礼・宇都宮正志 (2019) 房総半島東岸沖海底堆積物の分布と層序, 海陸シームレス地質情報集「房総半島東部沿岸域」海陸シームレス地質図 S-6, 産業技術総合研究所地質調査総合センター.
- Nishimura, A. (1984) Bottom sampling and photographing on the southeastern offshore of the Boso Peninsula. *Geological Survey of Japan Cruise Report*, no. 19, 54-66.
- 大場忠道・安田尚登 (1992) 黒潮域における最終氷期以降の環境変動. *第四紀研究*, **31**, 329-339.
- 尾田太良・嶽本あゆみ (1992) 浮遊性有孔虫からみた黒潮流域における過去2万年間の海洋変動. *第四紀研究*, **31**, 341-357.
- Reimer, P.J., Bard, E., Bayliss, A., Beck, J.W., Blackwell, P. G., Ramsey, C.R., Buck, C.E., Cheng H., Edwards, R.L., Friedrich, M., Grootes, P.M., Guilderson, T.P., Haffidason, H., Hajdas, I., Hatté, C., Heaton, T.J., Hoffmann, D.L., Hogg, A.G., Hughen, K.A., Kaiser, K.F., Kromer, B., Manning, S.W., Niu, M., Reimer, R.W., Richards, D.A., Scott, E.M., Southon, J.R., Staff, R.A., Turney, C.S.M. and Van der Plich, J. (2013) INTCAL13 and MARINE13 radiocarbon age calibration curves, 0-50,000 years cal BP. *Radiocarbon*, **55**, 1869-1887.
- 佐川拓也・入野智久・新村 靖・川幡穂高・金松敏也 (2003) KR02-15 次航海で得られた日本列島東岸沖の海底コア (PC-1, 4, 5, 6) の岩相. *JAMSTEC 深海研究*, **23**, 141-153.
- Sawada, K. and Handa, N. (1998) Variability of the path of the Kuroshio ocean current over the past 25,000 years. *Nature*, **392**, 592-595.
- Shackleton, N. J. (1987) Oxygen isotopes, ice volume and sea level. *Quaternary Science Reviews*, **6**, 183-190.
- Shepard, F. P. (1954) Nomenclature based on sand-silt-clay ratios. *Journal of Sedimentary Petrology*, **24**, 151-158.
- 島倉巳三郎 (1973) 日本植物の花粉形態. 大阪市立自然科学博物館収蔵目録, 第5集, 60p.
- Shishikura, M. (2014) History of the paleo-earthquakes along the Sagami Trough, central Japan: Review of coastal paleoseismological studies in the Kanto region. *Episodes*, **37**, 246-257.
- Shishikura, M., Echigo, T. and Kaneda, H. (2007) Marine reservoir correction for the Pacific coast of central Japan using ¹⁴C ages of marine mollusks uplifted during historical earthquakes. *Quaternary Research*, **67**, 286-291.

- Stanley, R. and Linskens, H. (1974) *Pollen: biology, biochemistry, management*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, New York, 307p.
- Stuiver, M., Reimer, P.J. and Reimer, R.W. (2015) Calib. 7.1. WWW program and documentation, <http://calib.qub.ac.uk/calib/> (2018年2月25日閲覧)
- Taft, B. A. (1978) Structure of Kuroshio south of Japan. *Journal of Marine Research*, **36**, 77-117.
- Tamura, T., Saito, Y. and Masuda, F. (2008) Variations in depositional architecture of Holocene to modern prograding shorefaces along the Pacific coast of eastern Japan. *SEPM Special Publication* **90**, 191-205.
- 塚田松雄 (1981) 杉 : I. その花粉散布と森林のレジスティック拡大. *日本生態学会誌*, **4**, 371-383.
- Tsukada, M. (1986) Altitudinal and latitudinal migration of *Cryptomeria japonica* for the past 20,000 years in Japan. *Quaternary Research*, **26**, 135-152.
- Ujiié, H. and Ujiié, Y. (1999) Late Quaternary course changes of the Kuroshio Current in the Ryukyu Arc region, northwestern Pacific Ocean. *Marine Micropaleontology*, **37**, 23-40.
- Wang, Y.J., Cheng, H., Edwards, R.L., An, Z.S., Wu, J.Y., Shen, C.-C. and Dorale, J.A. (2001) A high-resolution absolute-dated late Pleistocene monsoon record from Hulu Cave, China. *Science*, **294**, 2345-2348.
- Wang, Y.J., Cheng, H., Edwards, R.L., Kong, X., Shao, X., Chen, S., Wu, J., Jiang, X., Wang, X. and An, Z. (2008) Millennial- and orbital-scale changes in the East Asian monsoon over the past 224,000 years. *Nature*, **451**, 1090-1093.
- Weijers, J.W.H., Schouten, S., Spaargaren, O.C. and Sinninghe Damsté, J.S. (2006) Occurrence and distribution of tetraether membrane in soils: implications for the use of the BIT index and the TEX₈₆ SST proxy. *Organic Geochemistry*, **37**, 1680-1693.
- Wuchter, C., Schouten, S., Wakeham, S.G. and Sinninghe Damsté, J.S. (2005) Temporal and spatial variation in tetraether membrane lipids of marine Crenarchaeota in particulate organic matter: implications for TEX₈₆ paleothermometry. *Paleoceanography*, **20**, PA3013.
- Wuchter, C., Schouten, S., Wakeham, S.G. and Sinninghe Damsté, J.S. (2006) Archaeal tetraether membrane lipid fluxes in the northeastern Pacific and the Arabian Sea: implications for TEX₈₆ paleothermometry. *Paleoceanography*, **21**, PA4208.
- Yamamoto, M., Oba, T., Shimamune, J. and Ueshima, T. (2004) Orbital-scale anti-phase variation of sea surface temperature in mid-latitude North Pacific margins during the last 145,000 years. *Geophysical Research Letters*, **31**, L16311.
- Yamamoto, M., Suemune, R. and Oba, T. (2005) Equatorward shift of the subarctic boundary in the northwestern Pacific during the last deglaciation. *Geophysical Research Letters*, **32**, L05609.
- Yamamoto, M., Shimamoto, A., Fukuhara, T., Tanaka, Y. and Ishizaka J. (2012) Glycerol dialkyl glycerol tetraethers and TEX₈₆ index in sinking particles in the western North Pacific. *Organic Geochemistry*, **53**, 52-56.
- Yasuda, Y., Yamaguchi, K., Nakagawa, T., Fukusawa, H., Kitagawa, J. and Okamura, M. (2004) Environmental variability and human adaptation during the Lateglacial/Holocene transition in Japan with reference to pollen analysis of the SG4 core from Lake Suigetsu. *Quaternary International*, **123**, 11-19.
- 吉川昌伸 (1999) 関東平野における過去 12,000 年間の環境変遷. *国立歴史民俗博物館研究報告*, **81**, 267-287.
- Yuan, D., Cheng, H., Edwards, R.L., Dykoski, C.A., Kelly, M.J., Zhang, M., Qing, J., Lin, Y., Wang, Y., Wu, J., Dorale, J.A., An, Z. and Cai, Y. (2004) Timing, duration, and transitions of the last interglacial Asian monsoon. *Science*, **304**, 575-578.

(受付 : 2018 年 2 月 26 日 ; 受理 2018 年 4 月 4 日)

Appendix A

Isoprenoid GDGTs



Branched GDGTs

