

## 論 説

## 有孔虫化石にみる過去 20 万年間の東地中海サプロペル堆積期における海洋環境

宇佐見和子\*・長谷川四郎\*・坂本竜彦\*\*・飯島耕一\*\*・大場忠道\*\*\*

\*熊本大学大学院自然科学研究科・\*\*独立行政法人海洋研究開発機構・\*\*\*北海道大学名誉教授

## Eastern Mediterranean Paleoceanography during deposition of sapropels over the last 200,000 years based on foraminiferal analyses

Kazuko Usami\*, Shiro Hasegawa\*, Tatsuhiko Sakamoto\*\*, Koichi Iijima\*\* and Tadamichi Oba\*\*\*

\*Graduate School of Science and Technology, Kumamoto University, 2-39-1 Kurokami, Kumamoto, 860-8555, Japan (usami@es.sci.kumamoto-u.ac.jp, shiro@sci.kumamoto-u.ac.jp); \*\*Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), Natsushima-cho 2-15, Yokosuka 237-0061, Japan (tats-ron@jamstec.go.jp, kiiijima@jamstec.go.jp); \*\*\*Emeritus Professor of Hokkaido University, 2-2-3, Sendagaya, Shibuya-ku, Tokyo, 151-0051, Japan (oba-tad@ees.hokudai.ac.jp)

**Abstract.** Pleistocene-Holocene assemblages of benthic and planktonic foraminifera from Hole 969F (Mediterranean Ridge) and Hole 967D (Eratosthenes Seamount) of ODP Leg 160 were examined to reconstruct the paleoenvironmental changes during deposition of sapropels (S1, S3~S7) over the last 200 kyr in the Eastern Mediterranean. On the benthic assemblages, three major species are dominant throughout the two cores, except for the sapropel horizons where benthic foraminifera are nearly absent, suggesting an anoxic bottom environment. A Q-mode factor analysis of planktonic foraminifera has extracted four varimax assemblages. The factors 1 and 3 correspond to warm and cool waters, respectively. Both the factors 2 and 4 show low-saline coastal waters. The factor 2 indicates enhanced fertility in surface water, and the factor 4 indicates warmer and low salinity water than other factors. Factor loading of factor 4 increases in sapropel layers from S3 to S7, while the factors 1 and 2 display relatively long-term periodicities and are not related to times of sapropel formation.

During the sapropels deposition from S3 to S5 and S7 in the interglacial intervals, the Eastern Mediterranean was stratified due to a cover of fresh and warm surface water inferred by the factor 4 and its ventilation in deeper water was reduced. The sapropel S6 formed in glacial period, and stratification in the surface water is relatively weak. However, the enhanced productivity may supply abundant organic matters to the sea floor. In the sapropel S1, spatial variability of paleoceanographic environment, which is recognized in this work, may be useful to understand the causes of sapropel formation.

**Key words:** Eastern Mediterranean Sea, planktonic foraminifera, benthic foraminifera, sapropel, Holocene, Pleistocene

## はじめに

地中海は、ユーラシア大陸とアフリカ大陸の間に位置する半閉鎖的海洋であり、大西洋とは水深約 300 m のジブラルタル海峡で仕切られ、水深約 400 m のシシリー海峡で東地中海と西地中海に分けられる。その半閉鎖海域という特性のために、地中海の堆積物は、河川流入や風成塵を通じて周辺地域の気候を鋭敏に反映するとともに、外洋域に比較して堆積速度が速いため、環境変動を高い時間解像度で解読することが可能である。

鮮新世以降の地中海の堆積物には黒色細粒堆積物層（サプロペル）が挟在し、その堆積時は数千年にわたり地中海の海底がほぼ無酸素環境になったことが知られている (Rossignol-Strick, 1985; Rohling, 1994 など)。有機炭素量は最大 30 wt% にも及び (坂本・小泉, 1997)、その堆積には周期性が認められ、ミランコビッチサイクルの 21,000 年の歳差周期の最小期にほぼ一致して生成されたことが明らかにされてきた (Hilgen, 1991)。歳差の最小期には、北半球は強い夏の入射光を受けて、アジア・アフリカの強い夏のモンスーンを引き起こす (坂本・小泉,

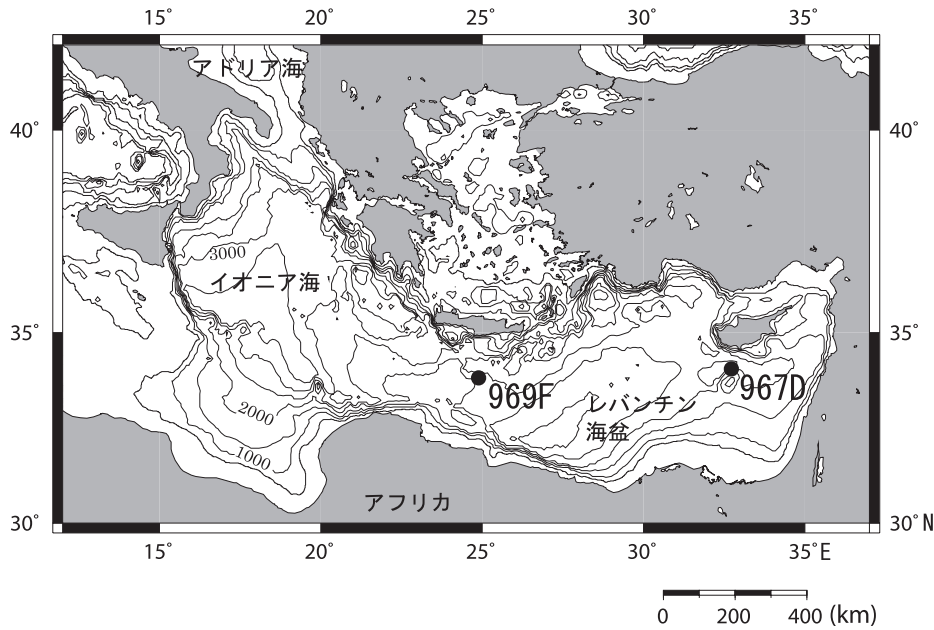


図 1. 東地中海の地形と柱状試料の採取位置.

1997). サプロペル形成の海洋環境的な原因については、アフリカモンスーンの強化と関連した淡水の流入による表層の成層化が、海洋生物生産増大と深層水循環の停滞を招いたというのが研究者の一般的な見解である (Rohling, 1994; Emeis and Sakamoto, 1998; Rossignol-Strick, 1999; Casford *et al.*, 2003 など). しかし、海底地形や生物生産量および深層水・中層水形成量などの違いにより、層準ごとに成因やその後の続成過程に差異のあったことが想定されており (Rohling and Gieskes, 1989; Emeis and Sakamoto, 1998; Jorissen, 1999; Schmiedl *et al.*, 2003), サプロペル形成過程の詳細は未だ解明されていない.

海底堆積物における生物起源粒子の主要な要素の一つとして、有孔虫殻が挙げられる。有孔虫は、石灰質の殻をもつ数十  $\mu\text{m}$  から数 mm サイズの微小な単細胞生物であり、その生態により浮遊性有孔虫と底生有孔虫に分けられる。それぞれ表層水および底層水の水温、塩分、栄養塩、溶存酸素濃度などの様々な環境要素に規制されて、種組成や生産量が変化することが知られている。このような特性を利用し、海洋環境を解き明かす指標として、有孔虫は既に広く古海洋学的研究に使われている。しかし、サプロペルの有孔虫については、Parker (1958), Vismara-Schilling and Coulbourn (1991), Hayes *et al.* (1999), Kallel *et al.* (2000) などにより、特定のサプロペル層準のみを対象とした研究がなされたのみである。

このような背景から、地中海のテクトニクスと古海洋学的研究を目的とした深海掘削が 1995 年の ODP (国際深海掘削計画) Leg160 および Leg161 次航海で実施された。本研究はその時に採取された柱状試料のうち、東地中海中央部 Mediterranean Ridge における Hole 969F (水深 2200m) と、東部の Levantine Basin における Hole 967D

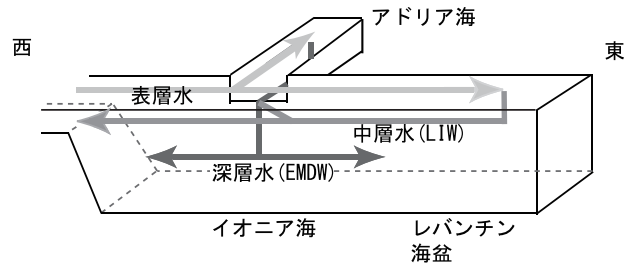


図 2. 東地中海における深層水循環の模式図 (Rohling, 2003 を改変). LIW: Levantine Intermediate Water, EMDW: Eastern Mediterranean Deep Water.

(水深 2553m) の試料 (図 1) を用いて、浮遊性および底生有孔虫化石群集を解析し、過去 20 万年間の古海洋環境変遷とサプロペル形成機構との関連を考察した。特に、本論では多数のサプロペルについて、サプロペルと互層をなす通常の酸化的な層とあわせて、有孔虫群集の変動を検討した。

### 試料および処理方法

本研究で用いた柱状試料の採取位置を図 1、また地中海の現在の海水循環を図 2 に示す。大西洋から流入した表層水は、東流するにつれて蒸発によって塩分が増加し、東地中海最東部で最大 39%以上に達して沈み込み、レバントン中層水 (LIW: Levantine Intermediate Water) となる。アドリア海からは冬季に冷却された表層水が沈み込み、イオニア海でレバントン中層水と混合して深層水 (EMDW: Eastern Mediterranean Deep Water) となり、東地中海全体に広がる。すなわち北部での冷却と東部での大規模な

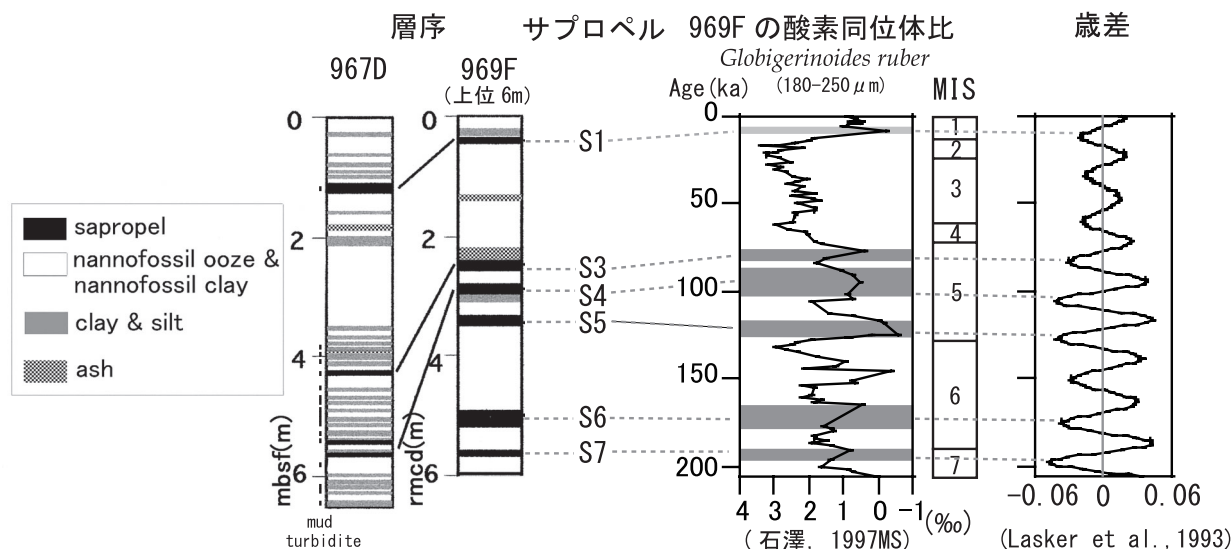


図3. Hole 967D と Hole 969F の岩相と、酸素同位体比曲線および年代のチューニングに用いた歳差曲線. mbsf: meter below seafloor, rmcd: revised meter composite depth, MIS: Marine Isotope Stage.

塩分増加により、底層にまで達する深層水が形成される (Wüst, 1961; Rohling, 2003).

使用した柱状試料は、水圧式ピストンコアラー (APC) を用いて採取された Hole 969F の Core 1H (全長 9.3 m) と Hole 967D の Core 1H (全長 6.5 m) である。両コアとも、全体として灰色～灰褐色の半遠洋性石灰質ナノ軟泥で構成され、数枚のサブロペルが挟在する。また、Hole 967D には多くの mud turbidite が含まれる (図3)。サブロペルは層位的に上位から下方に向かって、S1 から開始される番号が付されており (例えば Rossignol-Strick, 1985), そのうち Hole 969F で上部 6 m に S1 ~ S7, 967D では全長 6.5 m に S1 ~ S4 が確認された。969F における S1 は褐色を呈する部分を含み, “ghost sapropel” (坂本・小泉, 1997) と呼ばれる。

両 Hole における年代とサイト間の対比は、石灰質ナノ化石層序を基礎とし、浮遊性有孔虫殻の酸素安定同位体比の測定結果 (石澤, 1997MS) を、Imbrie *et al.* (1984) による SPECMAP 曲線と比較して、酸素同位体ステージ (Marine Isotope Stage: MIS) を決定した。また、可視分光反射能特性値 ( $L^*$  値) をスペクトル解析にかけて検出された 2 万年周期を地球軌道要素の歳差項 (Lasker *et al.*, 1993) にチューニングして時間較正を行った (坂本・小泉, 1997)。その結果、コア下限の年代は、Hole 969F の Core 1H で約 49 万年前、Hole 967D の Core 1H では約 12 万年前である。また、堆積速度は、Hole 967D で約 5.5 cm/千年、Hole 969F の上部 6 m では約 2.8 cm/千年で、タービダイトが多い前者は、後者の 2 倍程度になる。

分析用試料は、船上において 5 cm 間隔で直径 2.3 cm のプラスチックチューブにて 20 cc ずつ採取され、4°C で冷蔵保存された。1996 年 4 月～11 月の間に、湿潤状態の試料から約 3 cc を有孔虫群集解析および安定同位体比分析

用として切り出し、体積・重量を測定後、一昼夜水道水に浸して柔らかくしたのち、63  $\mu\text{m}$  のふるいを使って水洗し、自然乾燥させた。各試料を二分割して、それぞれ同位体分析用、有孔虫分析用とした。本研究で使用した有孔虫試料は、Hole 969F から 58 個、Hole 967D からは 52 個である。一般には約 10 cm 間隔、サブロペル周辺ではさらに高解像度 (最小 1 cm 間隔: S5) で試料の分析を行った。有孔虫化石は、各試料で 63  $\mu\text{m}$  以上の個体について、基本的に浮遊性・底生それぞれ 200 個体以上を目標に双眼実体顕微鏡下で拾い出した。その際、含まれる有孔虫個体数が目標に近づくまで分割し、その最小分割について含まれる有孔虫個体をすべて拾い出した。群集スライド上で種の同定と計数を行い、種ごとの相対産出量・単位体積当たり産出量を計算した。さらに、浮遊性有孔虫については相対産出量データから Q モード因子分析を行った。因子分析は、統計プログラム SYSTAT (version 5.21) を用いて、Hole 969F と Hole 967D のデータを一括して計算した。

## 結果

過去 20 万年に相当する試料から得られた有孔虫種のうち、浮遊性有孔虫に関しては、125  $\mu\text{m}$  以上の個体を検討し、7 属 19 種を同定した (図4)。 *Globigerinoides ruber* (白色)、 *Globigerina quinqueloba*, *Neogloboquadrina pachyderma*, *Neogloboquadrina incompta*, *Globorotalia inflata* は産出量が多く、特徴的な層位的変化を示す (図5)。特に Hole 969F では *G. ruber* (最大 75%) と *G. quinqueloba* (最大 64%) が、また、Hole 967D では *G. ruber* (最大 96%) が卓越し、最大で 50% 以上になる。*N. pachyderma* は、全試料を通して右巻き個体のみが産出した。以上に挙げた種以外では、 *Globigerina bulloides*, *Globigerinita glutinata*,

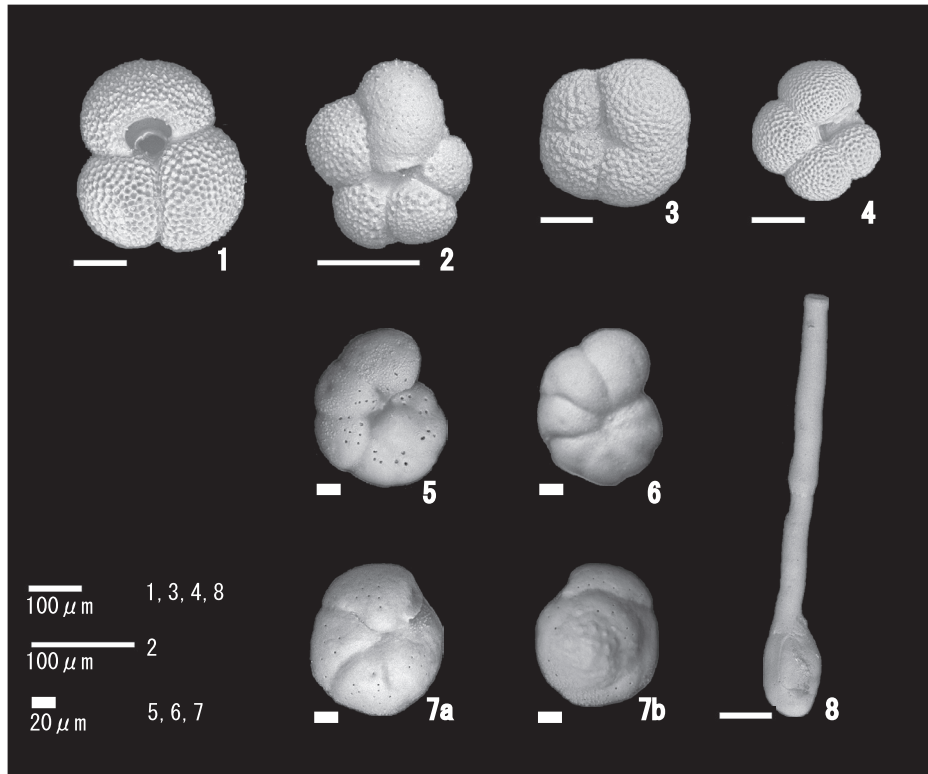


図4. Hole 969F から産出した浮遊性および底生有孔虫化石（主要種）の電子顕微鏡写真。  
 1. *Globigerinoides ruber* (d'Orbigny), 2. *Globigerina quinqueloba* Natland, 3. *Neogloboquadrina pachyderma* (Ehrenberg), 4. *Neogloboquadrina incompta* (Cifelli), 5-6. *Anomalinoidea minus* Vismara-Schilling, 5. 螺旋側面, 6. 臍側面, 7. *Eilohedra levicula* (Resig), a. 臍側面, b. 螺旋側面, 8. *Articulina tubulosa* (Seguenza).

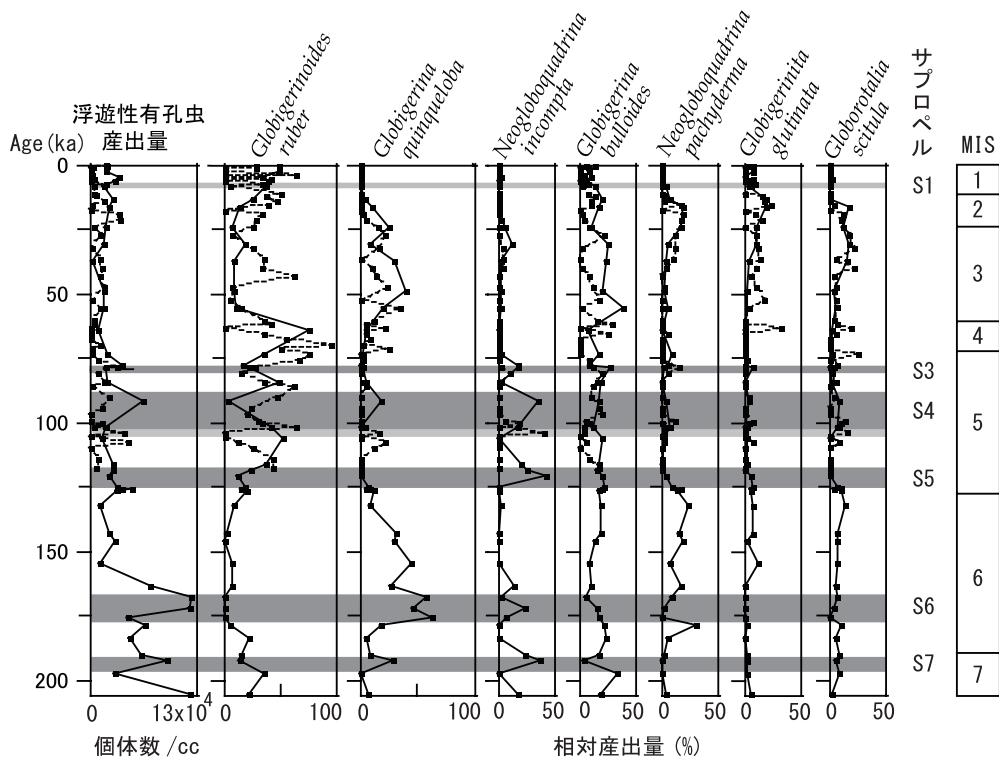


図5. 浮遊性有孔虫の単位体積あたり産出量（個体数/cc）と主要種の相対産出量（%）. 灰色に塗色した部分はサブオパール層準（967Dのみの部分は薄色）.

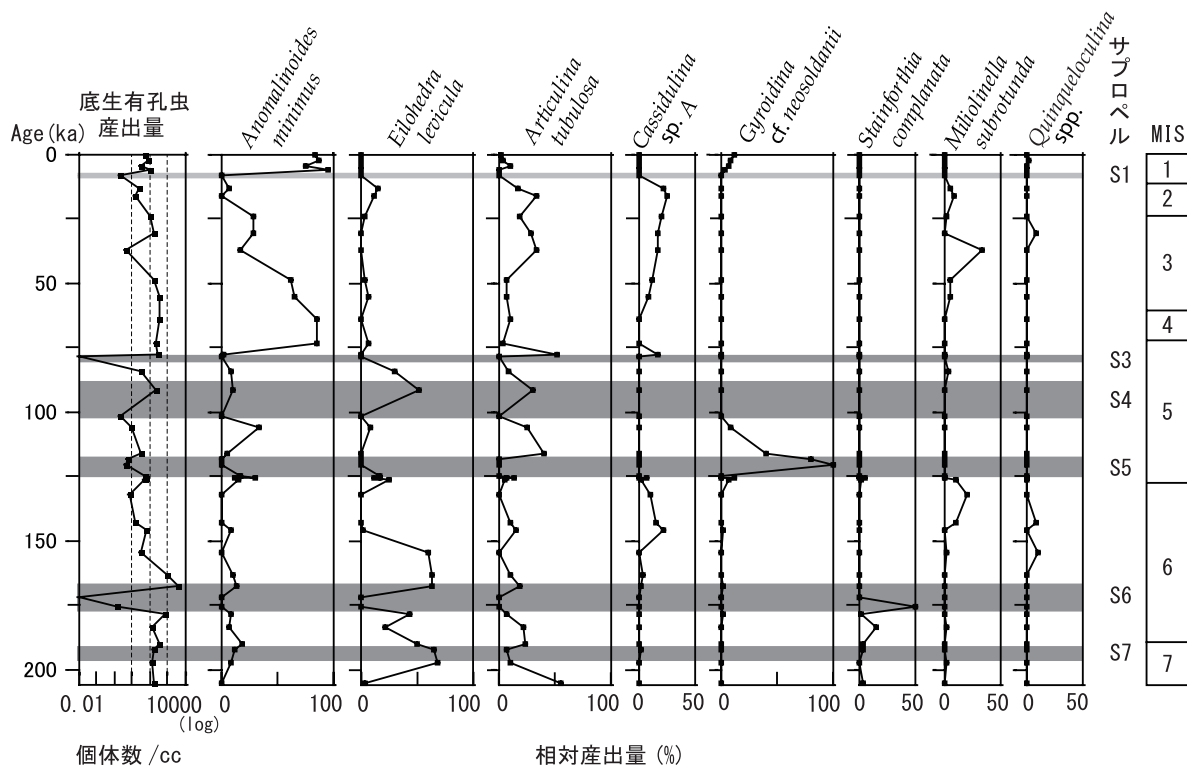


図 6. Hole 969F における底生有孔虫単位体積あたり産出量 (個体数 / cc) および主要種の相対産出量 (%).

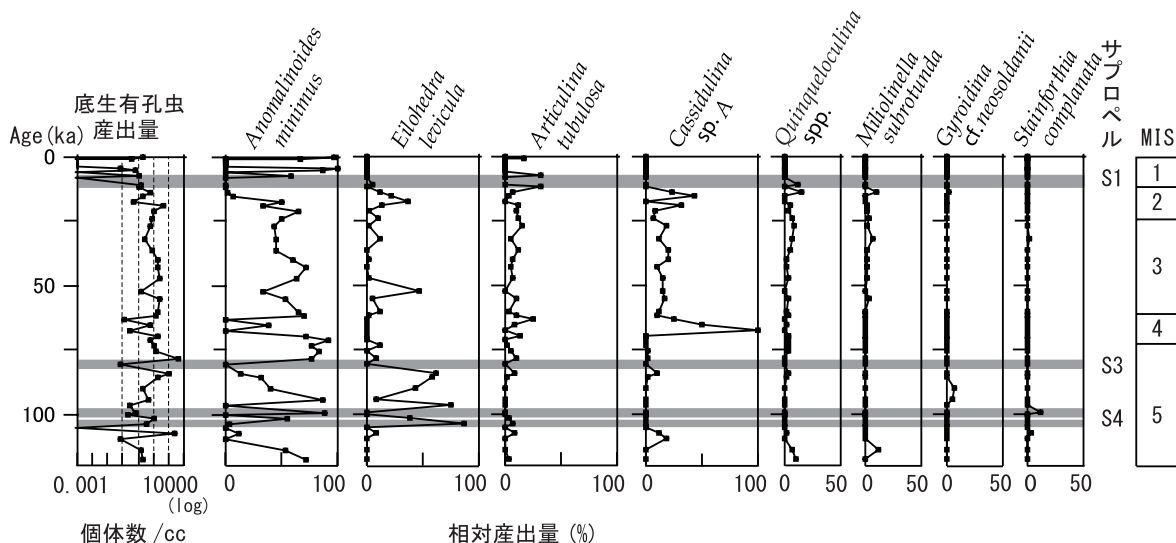


図 7. Hole 967D における底生有孔虫単位体積あたり産出量 (個体数 / cc) および主要種の相対産出量 (%).

*Globorotalia scitula* などが多産した。また, Hole 967D でも Hole 969F とほぼ同様の種構成であるが, Hole 969F に比較して全体的に *G. ruber* が多産した。

底生有孔虫は浮遊性有孔虫に比べて産出数が極端に少なく, 試料 1 cc あたり 100 個体に達しない層準が多数を占める (図 6, 図 7)。また, サプロペルでは浮遊性有孔虫が比較的多く, 底生有孔虫はほとんど産出しなかった。底生有孔虫の単位体積あたり産出量は, サプロペル層準で極端に減少し, 試料 1 cc あたり 10 個体を下回る層準もみ

られたが, サプロペルの直上で増加する。とくに S6 直上での増加が著しい (図 6)。

底生有孔虫種は 27 属 27 種を同定した (図 4)。そのうち *Anomalinooides minimus*, *Articulina tubulosa* および *Eilohedra levicula* の主要 3 種は群集の大部分を占める。各試料においては, そのうちのいずれか 1 種のみが優占しており, 群集の優占種は著しく交替を繰り返す (図 6)。これ以外の種では, *Cassidulina* sp. A や *Quinqueloquina* spp., *Miliolinella subrotunda* などが多く産出した。これら

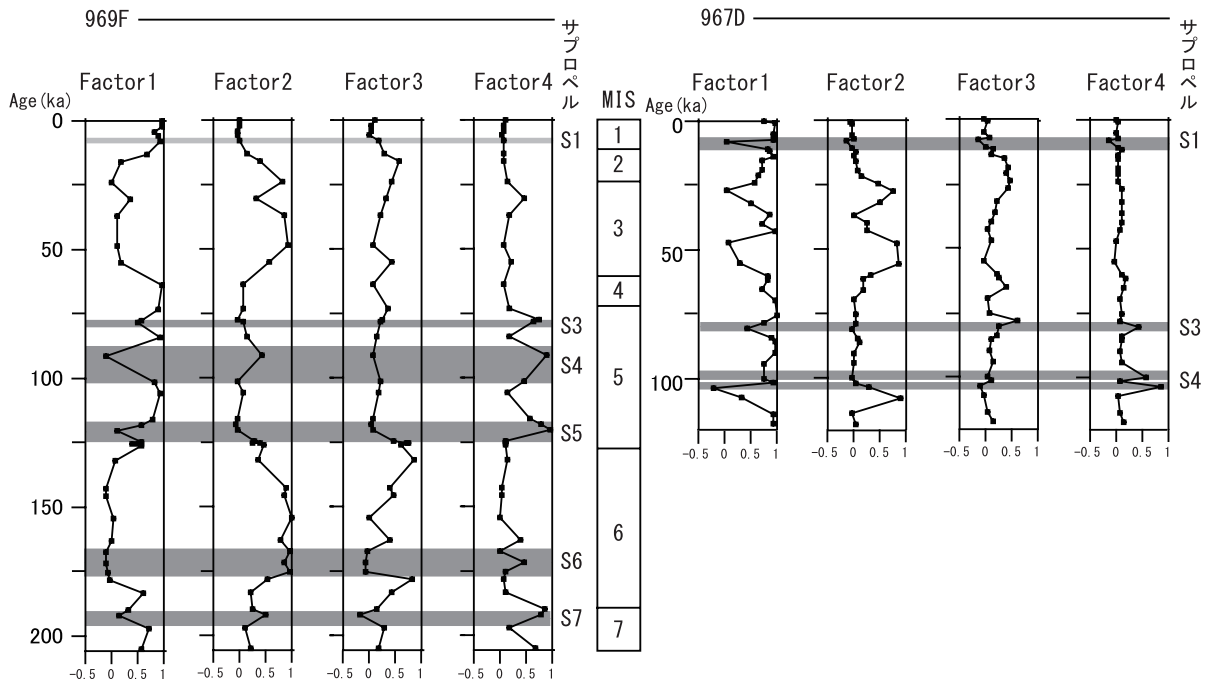


図 8. Hole 967D と Hole 969F における浮遊性有孔虫群集の 4 つの因子負荷量の時系列変化。

表 1. Hole 967D と Hole 969F の因子分析によって得られた浮遊性有孔虫主要種の第 1～第 4 因子の評点。

Factor		1	2	3	4	5	6
寄与率(%)		42.8	16.8	11.7	8.8	4.5	3.6
累積寄与率		42.8	59.6	71.3	80.1	84.6	88.2
因子 評点	<i>Globigerinoides ruber</i>	<b>4.050</b>	-0.001	0.290	0.117		
	<i>Globigerina quinqueloba</i>	-0.233	<b>3.962</b>	-0.136	-0.658		
	<i>Neogloboquadrina incompta</i>	-0.573	-0.444	<b>3.874</b>	-0.575		
	<i>Neogloboquadrina pachyderma</i>	-0.546	-0.061	-0.266	<b>3.493</b>		
	<i>Globigerina bulloides</i>	0.100	0.634	0.963	1.576		
	<i>Globorotalia scitula</i>	-0.549	0.141	0.069	0.160		
	<i>Globorotalia truncatulinoides</i>	-0.015	-0.503	-0.583	-0.183		
	<i>Globigerina calida</i>	-0.223	-0.391	-0.364	-0.495		

は、氷期のサブプロベル以外の層準で増加する。Hole 969F と Hole 967D における群集変化は、全般的には類似しているが、967D では *A. tubulosa* の産出が少なく、*E. levicula* が比較的多い傾向にある (図 6, 図 7)。

### 考察

#### 浮遊性有孔虫

分析した 97 試料について、産出した浮遊性有孔虫 19 種の相対産出量を元に Q モード因子分析を行った。その結果得られた Factor 1～4 (累積寄与率約 80%, 表 1) について、因子負荷量の時系列変化を図 8 に示す。Factor 1 (寄与率 43%) は *G. ruber* のみが高い評点 (4.05) を持

つ。Factor 2 は全体の約 17% を説明し、高い評点を持つのは *G. quinqueloba* (3.96) のみである。Factor 3 は全体の約 12% を説明するもので、*N. pachyderma* の評点が特に高く (3.49)、*G. bulloides* や *G. inflata* もやや大きく寄与する。Factor 4 は *N. incompta* の評点のみが高く (3.87)、全体の約 9% を説明している。Factor 1 と Factor 2 は明らかな逆相関を示す。前者は間氷期の層準で因子負荷量が高く、後者は逆に氷期で高い値を示す傾向がみられる。Factor 3 は S5 および S6 堆積前の時期に因子負荷量が高く、Factor 4 は S3～S7 のサブプロベルの層準で高い。

Factor 1 で高いスコアをもつ *G. ruber* (白色) は、赤道域～温帯域に分布する暖海生種である (Saito *et al.*, 1981)。また、Rohling *et al.* (1997) によれば、温暖で貧

表 2. 浮遊性有孔虫と底生有孔虫群集からみたサブロペル堆積期の海洋環境.

堆積時期	サブロペル				
	S3, S5	S4	S7	S6	S1
	間水期			氷期	間水期
① 底生有孔虫産出量	無産出—少産出				
② 直後の回復期 ( <i>Articulina tubulosa</i> )	深層水循環の活性化		—		
③ 浮遊性有孔虫 (Factor4)	生産性の増大による餌の増加			—	
④ 浮遊性有孔虫 (Factor2)	—	表層の低塩分化			—

栄養な混合水の指標である。Factor 2 と強い関連を示す *G. quinqueloba* の生息環境に関しては, Rohling *et al.* (1997) が, 低塩分への耐性・低温・表層水の富栄養状態の強化と関連するとまとめている。日本周辺海域の例では, 同種は日本海で広く分布し, 太平洋側での産出は少ない (尾田・嶽本, 1992)。これらから, Factor 2 は冷涼な, 沿岸水の影響を示すと考えられる。Factor 3 と関連する *N. pachyderma* (右巻) は日本周辺では親潮と黒潮が会合する混合水域に適応している (尾田・嶽本, 1992)。したがって, 現在の地中海のような暖流系水の影響を受けない, 寒冷な表層水塊に関連していると推定できる。Factor 4 と関連する *N. incompta* は, 日本周辺では日本海から三陸沖の津軽暖流水の分布域に多い (尾田・嶽本, 1992; Domitsu and Oda, 2005)。それは *N. pachyderma* で示されるよりも温暖で, やや低い塩分の沿岸水の影響を受けた表層水との対応を示唆するものと考えられる。

#### 底生有孔虫

底生有孔虫はサブロペル層準でほとんど無産出となる (図 6, 表 2-①)。このことは, サプロペル形成期の底層が底生生物の生存を許さない無酸素環境になったことの最も明瞭な証拠である。しかし, 無産出のゆえに底生有孔虫化石にもとづく考察はサブロペル形成期の直前および直後に限定される。

Hole 969F のサブロペルのうち S3 ~ S5 では, サプロペルの直上で, 底生の主要 3 種のうち, まず *A. tubulosa* が急激に増加し, 残りの *A. minimus* と *E. levicula* はそれより少し遅れて, それぞれ S3 と S5, あるいは S4, S6, S7 で増加する (図 6)。一方, サプロペルより下位の層準では, *A. minimus* が上方のサブロペルに向かって徐々に相対産出量を減少させる (図 7)。このような産状から, *A. minimus* と *E. levicula* はサブロペルが形成されない通常の酸化的底層環境の種であり, 一方の *A. tubulosa* はサブロペルの形成が終了する底層の環境変化に関連する可能性がある。

*A. minimus* は Hole 969F と Hole 967D において, コア表層部に多産する。この種は, 元来, 東地中海の水

深 1000 m 以浅のコア表層部から報告された種であるが (Vismara-Schilling and Parisi, 1981), その生態は明らかにされていない。一方, *E. levicula* は, 代表的な日和見種 *Alabaminella weddelensis* と分類的に密接な関係の種であり (Gooday, 2003), 貧栄養の海域において餌が間欠的に供給時にのみ増殖すると考えられる。

*A. tubulosa* は東地中海のイオニア海盆の最深部付近で多産する (Mullineaux and Lohmann, 1981)。同海盆はその北側に隣接するアドリア海で冷却された水塊が最初に沈み込む位置にあり, その深層水は東地中海の中では溶存酸素が多く, 低温な水塊である (Wüst, 1961)。*A. tubulosa* はこの低温で酸素の多い水塊に適応する種と推定される。この種の産出量は, イオニア海に近い Hole 969F のほうが, その東方に位置する Hole 967D より多い (図 5, 図 6)。これは, イオニア海盆に近いほど深層水の影響が強いことを示唆する。このような *A. tubulosa* と深層水の対応関係に基づくと, サプロペル S3 と S5 の直上における同種の急増はイオニア海の深層水の発達を示唆し, サプロペル形成の終了が東地中海の深層循環の活性化によって生じたものと推定される。一方, サプロペル直上での *A. tubulosa* の産出が少ない Hole 969F の S4, S6, S7 などは, サプロペルの終了に深層水の発達がさほど寄与していなかった可能性を示唆する。この場合は, さらに推論を重ねると, サプロペルの形成が深層循環の停滞によるものではないこと, たとえば, 表層付近における生産性の増加が原因である可能性が推定される。

#### サブロペルの形成環境

以上の有孔虫の産状から推定されるサブロペル形成時の海洋環境は, 表 2 のように総括される。20 万年前から現代までの地中海は, 暖水塊 (Factor 1) と冷たい沿岸水 (Factor 2) が交互に入れ替わる比較的長周期の変化が支配的であり, そこに, 間欠的にサブロペル形成に関わる水塊構造の変化 (Factor 4) が重なっていると考えられる。

Factor 4 は, Hole 969F の上部 6 m の区間に含まれ

る S1～S7 のサブロペルのうち、S3～S5 と S7 で、また Hole 967D でも S3 と S4 で因子負荷量が増加しており、サブロペル形成との関連性が極めて高い。Factor 4 がとくに高い因子負荷量を示す S5 は最終間氷期の最温暖期 MIS 5e (約 12 万年前) にあたるが、この時期の東地中海のギリシア南方の柱状試料 (ODP Leg 160, Site 971) から珪藻マットの産出が報告されている (Emeis and Sakamoto, 1998)。珪藻マットは、成層した貧栄養状態の表層水でゆっくりと成長した後急速に沈降し、海底へ多量の有機物フラックスをもたらすという (Emeis and Sakamoto, 1998)。Factor 4 は、このような貧栄養環境での生物生産の強化をもたらすような海洋表層の強い成層化をよく反映していると考えられる。

サブロペル S6 では、他のサブロペルとは異なり、Factor 4 よりも Factor 2 の因子負荷量が非常に高い。S6 は層厚が約 25 cm で、本論で扱うもっとも厚いサブロペルであり、また唯一、氷期に形成されたサブロペルである。その有孔虫に関する特徴としては、他のサブロペルに比べ浮遊性有孔虫の単位体積当たりの産出量 (有孔虫数) が突出して多いこと、サブロペル直上の底生有孔虫量の増加がとくに著しいことである。浮遊性有孔虫数が高くなる原因としては、生産量が実際に多かったこと、あるいは殻の保存条件が良好であったことのいずれかが考えられる。Factor 2 で高い因子評点を示す *G. quinqueloba* は薄殻の種であることから、その多産は良好な保存条件による可能性が高い。石灰質殻が保存されたことは、その溶脱の原因となる有機物の分解がサブロペル形成期にあまり進まなかったことを示唆する。その結果、底生生物が利用できる有機物が多量に保存され、貧酸素環境の終了直後にそれを利用する生物の繁殖を促進した可能性がある (表 2-④)。

Schmiedl *et al.* (2003) は、底生有孔虫産出数と構成種のマイクロハビタット組成から、サブロペル形成の直前直後で底生有孔虫の生産性が増大したことを述べている。また、Weldeab *et al.* (2003) は、Ba, 全有機炭素量、炭酸塩含有量の層位分布を基に、S6 で一次生産量が増加したと述べている。これらの結果は、Factor 4 で示される石灰質有孔虫の保存度の増加とその原因として推定される多量の有機物蓄積の可能性を支持している。

サブロペル S1 は、最上位のサブロペルで多くの研究がなされてきた。その成因に関しては、融氷期にナイル川、あるいはドナウ川から黒海を経て流入する淡水によって表層が覆われ、地中海が成層化して中層水生成および深層循環が停止した、それと同時に (あるいは) 流入水をもたらした栄養塩 (と季節格差の増大) によって生物生産性が高まり、底層が有機物過多になったことなどの可能性が提唱された (Rohling *et al.*, 1997; Rijk *et al.*, 1999)。しかし、未だに定説はない。

本稿で扱った Hole 969F と Hole 967D では、967D の S1 が通常のサブロペルと同様に黒色を呈するのに対し、969F では、ghost sapropel と呼ばれる褐色部を含んで

いる。これは二次的な有機物の分解によるものと考えられている (坂本・小泉, 1997)。有孔虫群集に関しても、Factor 1 の因子負荷量が 967D で高く、西側の東地中海中央部に位置する 969F に比べ、東側の東地中海東部に位置する 967D で表層水温が高かったことが示唆される。これは、現在の東地中海の表層水温と塩分が東方に向かって上昇すること (Murray, 1991) と一致する。これらのデータから、S1 に関する限り、サブロペル形成期の環境が東地中海のなかでも地域による差異が大きいたことが示唆される。したがって、サブロペルの成因に関しては、今後、地域的な特徴を吟味して、多角的調査に基づいた統括的解析が必要であると思われる。

## まとめ

本研究では、浮遊性有孔虫・底生有孔虫化石を用いて、過去 20 万年間の柱状試料から、東地中海のサブロペル形成時に起きた環境の変化を検討した。

- (1) 東地中海の表層環境は、温暖な水塊と寒冷な水塊が消長を繰り返す定常的な環境変動因子に加え、水塊構造の成層化に関わった因子がサブロペルの形成を支配している。
- (2) S1～S7 のサブロペルに関しては、形成を促進する要因としては表層での生物生産性および低塩分水による成層化、阻害する要因としては深層水の形成量変化が考えられる。
- (3) 間氷期のサブロペル S3～S5, S7 では、強く成層化し深層水形成が阻害された。一方、氷期の S6 では、成層化の程度は相対的に弱かったが、表層での生物生産が増し、海底に多量の有機物をもたらしたと考えられる。但し、S1 形成時には、(2) で挙げた条件に関してはどれも弱く、形成時の海洋環境が、東地中海東部と中央部で大きく異なっていた。

## 文献

- Casford, J. S. L., Rohling, E. J., Abu-Zied, R. H., Fontanier, C., Jorissen, F. J., Leng, M. J., Schmiedl, G., and Thomson, J., 2003. A dynamic concept for eastern Mediterranean circulation and oxygenation during sapropel formation. *Palaeoceanography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **190**, 103-119.
- Domitsu, H. and Oda, M., 2005. Japan Sea planktic foraminifera in surface sediments: geographical distribution and relationships to surface water mass. *Paleontological Research*, **9**, 255-270.
- Emeis, K.-C., and Sakamoto, T., 1998. The sapropel theme of Leg160. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, **160**, 29-36.
- Gooday, A. J., 2003. *Benthic Foraminifera (protista) as Tools in Deep-water Palaeoceanography: Environmental influences on Faunal Characteristics*. *Advances in Marine Biology*, **46**, 1-90.
- Hayes, A., Rohling, E. J., De Rijik, S., Kroon, D., and Zachariasse, W. J., 1999. Mediterranean planktonic foraminiferal faunas during the last glacial cycle. *Marine Geology*, **153**, 239-252.
- Hilgen, F. J., 1991. Astronomical calibration of Gauss to



- Matsuyama sapropels in the Mediterranean and implication for the Geomagnetic Polarity time scale. *Earth and Planetary Science Letters*, **104**, 226-244.
- Imbrie, J., Hays, J. D., Martinson, D. G., McIntyre, A., Mix, C., Morley, J. J., Pisias, N. G., Prell, W. L., and Shackleton, N. J., 1984. The orbital theory of Pleistocene climate: support from a revised chronology of the marine  $\delta^{18}\text{O}$  record. In Berger, A., Imbrie, J., Hays, J., Kukla, G., and Saltzman, B., eds., *Milankovitch and Climate*, 269-305. D. Reidel Publishing Company, Dordrecht.
- 石澤 聡, 1997MS, 東地中海の ODP コア中の有孔虫殻の酸素・炭素同位体比に基づく古環境解析. 北海道大学地質学鉱物学学科, 卒業論文.
- Jorissen, F. J., 1999. Benthic foraminiferal successions across Late Quaternary Mediterranean sapropels. *Marine Geology*, **153**, 91-101.
- Kallel, N., Duplessy, J.-C., Labeyrie, L., Fontugne, M., Paternò, M., and Montacer, M., 2000. Mediterranean pluvial periods and sapropel formation over the last 200 000 years. *Palaeoceanography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **157**, 45-58.
- Lasker, J., Joutel, F., and Boudin, F., 1993. Orbital, precessional, and insolation quantities for the Earth from -20Myr to +10Myr. *Astronomy and Astrophysics*, **270**, 522-533.
- Mullineaux, L. S., and Lohmann, G. P., 1981. Late Quaternary stagnations and recirculation of the Eastern Mediterranean: Change in the deep water recorded by fossil benthic foraminifera. *Journal of Foraminiferal Research*, **11**, 20-39.
- Murray, J. W., 1991. *Ecology and Palaeoecology of Benthic Foraminifera*. 397p., Longman Scientific & Technical, New York.
- 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.
- Parker, F. L., 1958. Eastern Mediterranean foraminifera. *Reports of the Swedish Deep-Sea Expedition*, **8**, 219-283.
- Rijk, S. D., Hayes, A. and Rohling, E. J., 1999. Eastern Mediterranean sapropel S1 interruption: an expression of the onset of climatic deterioration around 7 ka BP. *Marine Geology*, **153**, 337-343.
- Rohling, E. J., 1994. Review and new aspects concerning the formation of eastern Mediterranean sapropels. *Marine Geology*, **122**, 1-28.
- Rohling, E. J., 2003. Mediterranean palaeoceanography and palaeoclimate. Abstract of International Conference on the Suitable Development of the Mediterranean and Black Sea Environment. [http://www.iasonnet.gr/past\\_conf/abstracts/rohling.html](http://www.iasonnet.gr/past_conf/abstracts/rohling.html).
- Rohling, E. J. and Gieskes, W. C., 1989. Late Quaternary changes in Mediterranean intermediate water density and formation rate. *Paleoceanography*, **4**, 531-545.
- Rohling, E. J., Jorissen, F. J., and De Stinger, H. C., 1997. 200 Year interruption of Holocene sapropel formation in the Adriatic Sea. *Journal of Micropalaeontology*, **16**, 97-108.
- Rossignol-Strick, M., 1985. Mediterranean Quaternary sapropels, an immediate response of the african monsoon to variation of insolation. *Palaeoceanography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **49**, 237-263.
- Rossignol-Strick, M., 1999. A synthetic pollen record of the eastern Mediterranean sapropels of the last 1 Ma: implications for the time-scale and formation of sapropels. *Marine Geology*, **153**, 221-237.
- Saito, T., Thompson, P. R., and Breger, D., 1981. *Systematic index of recent and pleistocene planktonic foraminifera*. 190p. University of Tokyo Press, Tokyo.
- Schmiedl, G., Mitschele, A., Beck, S., Emeis, K.-C., Hemleben, C., Schulz, H., Sperling, M., and Weldeab, S., 2003. Benthic foraminiferal record of ecosystem variability in the eastern Mediterranean Sea during times of sapropel S<sub>5</sub> and S<sub>6</sub> deposition. *Palaeoceanography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **190**, 139-164.
- 坂本竜彦・小泉 格, 1997. Leg 160: Sapropels の形成の謎に迫る過去 500 万年間の 1 万年単位の連続堆積記録. 月刊地球, 号外 (19), 98-105.
- Vismara-Schilling, A. and Coulbourn, W. T., 1991. Benthic foraminiferal thanatofacies associated with late Pleistocene to Holocene anoxic events in the Eastern Mediterranean Sea. *Journal of Foraminiferal Research*, **21**, 103-125.
- Vismara-Schilling, A. and Parisi, E., 1981. *Anomarinoides minimus*, a new benthic foraminiferal species from Pleistocene and Holocene deep sea deposits of the Mediterranean Sea. *Rivista Italiana di Paleontologia*, **87**, 283-292.
- Weldeab, S., Emeis, K.-C., Hemleben, C., Schmiedl, G., and Schulz, H., 2003. Spatial productivity variations during formation of sapropels S<sub>5</sub> and S<sub>6</sub> in the Mediterranean Sea : evidence from Ba contents. *Palaeoceanography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **191**, 169-190.
- Wüst, G., 1961. On the Vertical Circulation of the Mediterranean Sea. *Journal of Geophysical Research*, **66**, 3261-3271.

