

兵庫県豊岡盆地中谷における 完新世後期の堆積環境と海成層の上限

佐藤裕司¹⁾*・前田保夫²⁾・松本英二³⁾・松島義章⁴⁾

¹⁾ 兵庫県立人と自然の博物館 地球科学研究部 ²⁾ 山形大学教育学部 理科教育教室

³⁾ 名古屋大学 大気水圏科学研究所 ⁴⁾ 神奈川県立博物館

Late Holocene Sedimentary Environments at the Nakanotani Site in Toyooka Basin (Hyogo Prefecture) and the Upper Limit of Marine Facies

Hiroshi SATO¹⁾, Yasuo MAEDA²⁾, Eiji MATSUMOTO³⁾ and Yoshiaki MATSUSHIMA⁴⁾

¹⁾ Division of Earth Sciences, Museum of Nature and Human Activities, Hyogo,
Yayoi-ga-oka 6, Sanda, 669-13 Japan

²⁾ Department of Science Education, Faculty of Education, Yamagata University,
Koshirakawa-cho 1-4-12, Yamagata, 990 Japan

³⁾ Institute for Hydrospheric-Atmospheric Science, Nagoya University,
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, 464-01 Japan

⁴⁾ Kanagawa Prefectural Museum, Minaminaka-dori 5-60, Naka-ku, Yokohama, 231 Japan

Abstract

Diatom assemblages in sediments and sedimentary sulfur contents were analyzed to clarify sedimentary environments during the late Holocene and to determine the upper limit of marine facies at the Nakanotani site in Toyooka Basin, Hyogo Prefecture.

Three paleoenvironmental phases were recognized and deductions were made as to the sedimentary environments as follows.

(1) Phase I (below the horizon of + 0.30m): *Crassostrea* bed and other molluskan fossils were found at the horizons between 0m and + 0.30m. *Crassostrea gigas* obtained from the horizon of ca. + 0.30m showed the ¹⁴C age of 3,110 ± 150 yrs BP. The appearance of marine diatoms such as *Nitzschia granulata* and relatively high sulfur contents indicate that sedimentation took place under marine littoral conditions.

(2) Phase II (the horizons between + 0.30m and + 0.70m): High sulfur contents in peat sediments indicate that sedimentation may have occurred under the influence of sea water such as in a salt marsh. A brackish-water diatom *Navicula pusilla* appeared characteristically at the horizons between + 0.50m and + 0.70m.

(3) Phase III (above the horizon of + 0.70m): Sulfur was not found in this phase. Although the appearance of a freshwater diatom *Amphora ovalis* var. *affinis* above the horizon of + 1.0 m suggests increasing wetness within the sedimentation basin, sedimentation is considered to have taken place under semiterrestrial conditions such as in a flood plain.

Based on the molluskan fossils, diatom assemblages and sulfur contents in sediments, the upper limit of marine facies at this site can be regarded to be the horizons between + 0.30m and + 0.70m.

Key words: diatom assemblage, sedimentary environment, sedimentary sulfur, upper limit of marine facies

はじめに

海岸低地の地下を構成する完新統は完新世の海面変化に伴う海進と海退の現象を記録している。特に完新世海進（縄文海進）時に堆積した海成層中には、かつての海面の位置を知るための手がかりが保存されている。旧海面の位置を示す海成層の上限はある地域の最高海面の位置を指示する可能性があるため、その上限認定は過去における海面変化を論じるうえで欠くことのできない作業である。

一般に、海成層の上限は層相観察、貝類化石群集および珪藻遺骸群集の解析などの方法に基づいて認定される。なかでも堆積物中に含まれる珪藻遺骸群集の解析は海成から陸成に至るまでの堆積環境の変化を知るための有力な手段であり、貝類化石などの大型化石が認められない場合には特に重要な環境指標となる（例えば、Sato and Kumano, 1985, 1986）。

堆積物中の硫黄含有量も海成と陸成（淡水成）を識別するためのよい指標となることが報告されている（狛ほか, 1983; 狛ほか, 1988; 狛, 1992）。これらの研究から堆積物中の全硫黄含有量は海成泥質堆積物において0.2~0.3%より多く、淡水泥質堆積物ではそれより少ないとされている。堆積物中において硫黄は様々な形態で存在するが、その中でも特にパイライト（ FeS_2 ）含有量が海成・淡水成堆積物の区別には有効とされている（中井ほか, 1982; 白神, 1985; 藤本, 1993）。佐藤（1989）はまた、堆積物中の硫黄含有量を過酸化水素水処理一比濁法により定量し、その含有量が珪藻分析の結果から海成もしくは汽水成と推定される堆積物において高くなることを報告している。

筆者らは兵庫県豊岡市中谷で採取したコア試料について、堆積物中の硫黄含有量の分析と珪藻遺骸群集の解析を行い、本調査地における堆積環境変遷の詳細を明らかにしたうえで海成層の上限認定を試みた。さらに、層相観察と貝類遺骸に基づいて認定される海成層の上限とも比較検討した。

堆積物中の硫黄含有量は海成層と陸成層の識別には有効であるが、堆積環境の詳細を明らかにすることは困難である。一方、珪藻遺骸群集は堆積環境に関して詳細な情報をもたらすが、試料に

よっては珪藻殻が含有されていない場合があり、必ずしも古環境解釈に十分な情報が得られるとは限らない。

本試料は全般的に珪藻殻含有量に乏しく、いずれの方法でも単独では古環境解釈には十分であるとは言えず、硫黄含有量の分析と珪藻遺骸群集の解析とを併用して、相互補完的に堆積環境変化を捉えることが必要と思われた。このようなクロスチェックによる古環境解釈は重要なものと考えられるので、以下にその結果を報告する。

方 法

堆積物コアは兵庫県豊岡市中谷において、ピートサンプラーを用いて採取された（Fig. 1）。調査地近くには中谷貝塚として知られる縄文時代後期の貝塚がある（直良, 1931）。

硫黄および珪藻分析用の試料はコアから、層相の変化するところを重点的に採取した。合計34試料を分析に供し、各試料について湿重量約0.3gを硫黄分析用に、約1gを珪藻分析用とした。

硫黄分析用の試料は二回水洗し、80℃下で乾燥させた。分析は乾燥試料0.1gを秤量し、以後の手順は佐藤（1989）の方法に従い、30%過酸化水素水処理によって硫酸イオンとして溶出した硫黄量をもって堆積物中の硫黄含有量（%）とした。本法によって定量される硫黄の大部分は堆積物中の硫酸塩化合物とパイライトに由来するものと考えられる。

珪藻分析用の試料1g（乾燥重量）は約10%過酸化水素水10mlと塩酸1mlを用いて酸処理を行った。遠心分離（3,000rpm, 10分間）によって水洗した後、ピロリン酸ナトリウムを加え、堆積物を十分拡散させ、粘土成分と粗砂成分を除去して珪藻画分を得た。珪藻画分は蒸留水を加えて100mlとし、0.5mlをカバーグラス上にマウントした。乾燥後、マウントメディア（和光純薬）で封入し、検鏡用プレパラートとした。珪藻殻の計数はカバーグラス二枚を全視野観察することにより、1mgあたりの殻数を算出すると同時に群集構成の解析を行った。種の同定と各珪藻種の生態に関する情報はCleve-Euler（1951-1955）、Hustedt（1930）、Patrick and Reimer（1966, 1975）、

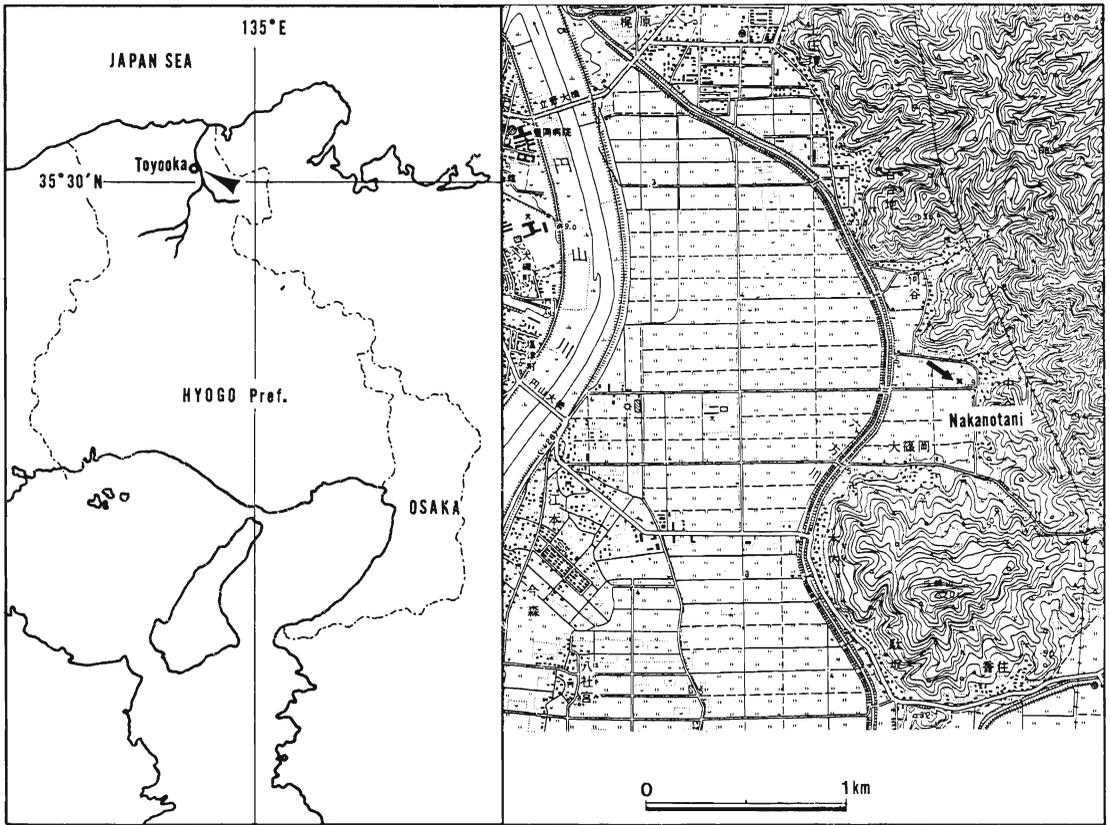


Fig. 1. Map showing the location of sampling site. Topographic map: "Toyooka", scale 1 : 25,000 by the Geographical Survey Institute.

Camburn *et al.* (1978), John (1983), 小杉 (1988) より得た。

^{14}C 年代測定は標高+0.30m 付近の層準より採取した貝化石試料について行った。試料を酸素気流中で燃焼させ、発生した二酸化炭素からベンゼンを合成し、ベンゼン中の ^{14}C 濃度を液体シンチレーションカウンターで測定した(富樫・松本, 1983)。年代計算では ^{14}C の半減期として5,568年を用いた。

結 果

1. 層相と ^{14}C 年代

堆積物コアの層相は下位から上位にかけて以下のように変化した (Fig. 2)。

標高-0.50m より下部：暗灰色シルトより成り、貝殻片を含む。

標高-0.50m から 0m：暗灰色の砂質堆積物より成り、貝殻片を含む。

標高 0m から +0.30m：青灰色シルトより成り、0 m と +0.30m 付近に厚さ約20cm および約10cm の2枚のカキ礁を挟在する。ここでは、マガキ *Crassostrea gigas* のほか、イボウミニナ *Batillaria zonalis*、カワアイ *Cerithideopsilla djadjariensis*、ヘナタリ *Cerithideopsilla cingulata* など、内湾の潮間帯に生息する貝類化石が含まれている。層相観察では、海成層の上限はカキ礁の挟在から +0.30m と認定され、カキ礁の ^{14}C 年代は $3,110 \pm 150$ yrs BP (WRI-8)であった。

標高+0.30m から+0.85m：黒灰色PEATより成り、上位にいくにつれて暗灰色へと色調は変化する。+0.40m から+0.50m 付近には青灰色シルトが混じる。

標高+0.85m から+1.85m：主として灰色シル

Table 1. Sulfur contents (%) in each sample.

Phase	Altitude(m)	S (%)
III	+1.83	0.00
	+1.73	0.00
	+1.56	0.00
	+1.50	0.00
	+1.40	0.00
	+1.30	0.06
	+1.19	0.00
	+1.00	0.00
	+0.95	0.00
	+0.88	0.05
	+0.80	0.00
II	+0.75	0.12
	+0.70	0.21
	+0.65	0.80
	+0.60	0.79
	+0.55	1.65
	+0.45	0.39
I	+0.35	1.14
	+0.32	2.26
	+0.25	1.68
	+0.24	0.60
	+0.15	0.77
	+0.14	0.72
	+0.08	0.40
	-0.02	0.57
	-0.30	0.58
	-0.37	0.43
	-0.47	0.82
-0.53	0.59	
-0.60	1.28	
-0.67	0.61	
-0.74	0.81	
-0.80	0.40	
-0.85	0.47	

トより成り、所々に細砂が混じる。

標高+1.85m から地表面 (+2.10m) までは耕作土である。

2. 硫黄含有量と珪藻遺骸群集

堆積物 1 g (乾燥重量) 中の硫黄含有量 (%) とその鉛直変化を Table 1 と Fig. 2 にそれぞれ示した。

硫黄含有量は+0.30m より下部の層準では0.4~1.7%の範囲で変動した。標高+0.30m ~+0.85m の黒灰色ピート層では、青灰色シルトの混じる部分を除いて、含有量は0.4~2.3%と非常に

高かった。標高+0.75m で0.8%含有されていた硫黄は、標高+0.75m より上部で0.2%に減少し、それより上位ではほとんど検出されなかった。

出現した珪藻は海生、汽水生、淡水生の生態区分に類別し、各区分と優占種の出現状況を堆積物 1 mg あたりの殻数として表した (Fig. 2)。また、珪藻遺骸群集中の主要出現種は Plate 1 に示した。本コア中の珪藻殻含有量は全体的に少なく、ほとんど出現しない試料もあった。

標高+0.30m より下部の層準では、海生種が卓越し、その中で *Nitzschia granulata* が優占した。標高-0.50mより下部では *Grammatophora oceanica* var. *macilenta* が特徴的に出現した。また、標高 0 m ~ +0.30m のカキ礁付近では *Navicula yarrensensis* も出現した。これらのほか、標高+0.30m より下部では *Actinocyclus ehrenbergii*, *Amphora proteus*, *Cocconeis scutellum*, *Diploneis pseudovalis* などがわずかに出現した。

標高+0.30m ~+0.50m の黒灰色ピート層下部では珪藻殻は認められなかったが、標高+0.50m ~+0.70m では *Navicula pusilla* が優占した。標高+0.85m ~+1.85m の主として灰色シルトから成る層では、標高+1.0m より上位で *Amphora ovalis* var. *affinis* が優占し、*Hantzschia amphioxys*, *Pinnularia borealis* などともわずかに出現した。

考 察

1. 堆積環境

硫黄含有量に基づく海成 (または汽水成) 堆積物と淡水成 (または陸成) 堆積物との区別は、狛ほか (1983) および狛 (1992) に従い、その含有量が0.3%より多い堆積物を海成と判断した。今回のコア堆積物中の珪藻殻含有量はいずれも非常に少なく、全く含有されていない試料もあった。そのため再堆積の可能性も考えられたが、珪藻遺骸群集から推定される堆積環境と硫黄含有量から推定されるそれとはよく一致していることから、各層準を特徴づける珪藻種はすべて現地性と判断された。出現した珪藻はいずれもケイ酸質の殻の強固な種に限られることから、珪藻殻の多くは溶解したものと考えられる。

堆積物は層相、硫黄含有量および珪藻遺骸群集

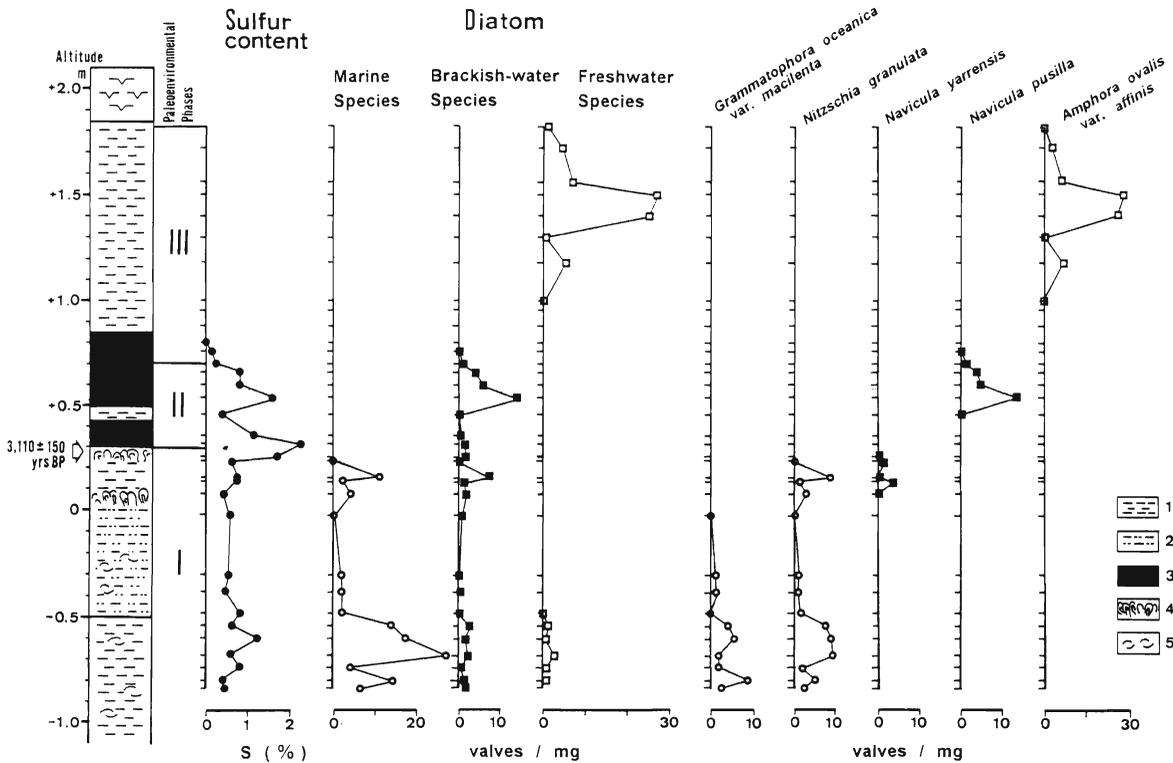


Fig.2. Columnar section, vertical variation in sulfur contents (%) and the occurrence of diatoms (valves/mg) are shown. (1, silt; 2, fine sand; 3, peat; 4, *Crassostrea* bed; 5, shell)

に基づいて、堆積環境の異なる三つの古環境相(I ~ III)に区分が可能であった。

(1)古環境相I (標高+0.30mより下部)

硫黄含有量は0.4~1.7%と多く、堆積物は海成と判断される。

珪藻遺骸群集は海生種が卓越した。標高+0.30mより下部では *Nitzschia granulata* が優占した。本種は河川の感潮域において、潮間帯下部に底生として出現し (John, 1983), 小杉 (1988) では海水泥質干潟指標種とされている。本種はまた、大阪湾周辺の完新世層では海成層中の珪藻遺骸群集の主要構成種であった (Sato et al., 1983)。標高+0.50mより下部で出現した *Grammatophora oceanica* var. *macilentia* は、潮間帯下部で付着性として出現する種であり、標高0m~+0.30mの層準で特徴的に出現した *Navicula yarrensensis* もまた潮間帯下部で底生として出現する種である

(John, 1983)。珪藻遺骸群集から古環境相Iの堆積環境は潮間帯下部と推定される。このことはカキ礁の挟在とそれを構成する貝類遺骸が内湾の潮間帯に生息する種から成ることと調和する。

+0.30m付近に挟在するカキ礁の¹⁴C年代から、約3,000年前には豊岡盆地中央付近に位置する本調査地まで海が進入していたことが示される。

(2)古環境相II (標高+0.30m~+0.70m)

硫黄含有量は0.4~2.3%と非常に多く、黒灰色ピートの堆積物では特に多かった。

ここでは、珪藻殻を全く含有しない試料もあったが、海生種は認められなくなり、標高+0.50m~+0.70mでは *Navicula pusilla* が優占した。本種は淡水生種とされながらも、塩分をわずかに含む水域にもよく出現し (Hustedt, 1930; Cleve-Euler, 1951-1955; Patrick and Reimer, 1966), 河

川の感潮域において潮間帯の上部でその出現が認められている (John, 1983). このことから、本研究では本種をわずかな海水の影響を示す汽水生種と判断した. 本種の優占は海退に伴って調査地点の堆積環境が潮間帯下部から上部へと変化し、塩分濃度が低下したことを示すものと解される.

この層準は黒灰色から暗灰色のピートから成る湿地性堆積物から成る. 一般に、干潟や塩水性湿地のように海水の影響下において、有機物量が豊富で嫌氣的な泥中では硫酸還元最終産物であるパイライトが盛んに生成されることが知られている (Howarth, 1979; Postoma, 1982). 堆積物の硫黄含有量から、この層準における堆積環境は干潟の後背地に発達した塩水性湿地と推定される.

(3)古環境相Ⅲ (標高+0.70m ~ +1.85m)

標高+0.70m より上位になると *Navicula pusilla* は出現しなくなり、堆積物中の硫黄もほとんど検出されなくなった. このことは標高+0.70m 付近を境に、完全に海水の影響がなくなったことを示すものと解される.

標高+0.85m ~ +1.85m は主として灰色シルトから成り、所々に細砂が混じる. 珪藻殻の含まれている標高+1.0m より上位では、淡水付着性種 *Amphora ovalis* var. *affinis* が優占した. この層準は河成堆積物から成るものと思われ、河川によって運搬された碎屑物質が沈積後しばらく滞水状態にあったとき、珪藻が生息する環境が生じたものと推定される.

2. 海成層の上限

約6,000年前の完新世海進 (縄文海進) 頂期が終わると海岸線は後退を始める. これに伴い、堆積環境が内湾から干潟を経由して淡水化もしくは陸化したところでは、旧海面の位置を指示する海成層の上限がよく保存されている (前田ほか, 1982; 鹿島, 1986). 珪藻遺骸群集および硫黄含有量の変動から、本調査地における堆積環境の推移は内湾から干潟・塩水性湿地を経て陸化したことが明らかにされた. すなわち、ここでの海成層の上限は¹⁴C年代測定の結果から約3,000年前の海面の位置を指示するものと考えられる.

層相観察において、潮間帯を指示するカキ礁の挟在から海成層の上限は+0.30m と認定された.

一方、硫黄含有量の鉛直変化と汽水生珪藻 *Navicula pusilla* の出現状況から、海水の影響が標高+0.70m までであったことが示された.

前田ほか (1982) は神戸市玉津において、貝類遺骸、生痕化石、硫黄の析出状態、珪藻遺骸群集に基づいて海成層の上限認定を試み、それぞれが指示する上限の間に若干の差異があることを報告した. 本調査地でも貝類遺骸の指示する海成層の上限と、珪藻遺骸および硫黄含有量が指示するそれとの間に若干の差異が認められた.

標高0 m ~ +0.30m におけるカキ礁の挟在は、その層準が堆積時には潮間帯に位置していたことを示している (鎮西, 1982). 一方、堆積物中の硫黄含有量はこれよりさらに上位の+0.70m まで海水の影響があったことを示し、この事実は汽水生珪藻 *Navicula pusilla* の出現によっても支持された. Sato *et al.* (1983) は堆積物中の珪藻遺骸群集から判断される海成層の上限と貝類遺骸が指示するそれとの差異は過去の海面変化における潮位差を反映し、珪藻遺骸群集が高潮位海面を指示する可能性を指摘した. 今回の場合も珪藻遺骸群集と硫黄含有量によって示される海成層の上限はカキ礁との位置関係から、高潮位海面を反映している可能性がある.

前田ほか (1982) は海成層の上限が認定方法によって異なることから、認定に際してそのもとなつた証拠を提示すべきであるとした. この提案に従い、本調査地における海成層の上限は標高+0.30m (貝類遺骸) から+0.70m (硫黄含有量および珪藻遺骸群集) と認定される.

謝 辞

本研究を行うにあたって、終始有益な助言を頂いた神戸大学理学部熊野 茂先生に深く感謝いたします.

文 献

- Camburn, K. E., Lowe, R. L. and Stoneburner, D. L. (1978) The haptobenthic diatom flora of Long Branch Creek, South Carolina. *Nova Hedwigia*, **30**, 149-279.
 鎮西清高 (1982) カキの古生態学(1). 化石, **32**, 27-34.
 Cleve-Euler, A (1951-1955) Die Diatomeen von Schweden

- und Finnland I-V. *Kungliga Svenska Vetenskaps-Akademiens Handlingar*, I-V. Serien **2** (1), 1-155, **3** (3), 1-143, **4** (1), 1-149, **4** (5), 1-240, **5** (4), 1-217.
- 藤本 潔 (1993) 能登半島七尾西湾岸日用川低地における完新世後期の海水準変動. 第四紀研究, **32**, 1-12.
- Howarth, R. W. (1979) Pyrite: Its rapid formation in a salt marsh and its importance in ecosystem metabolism. *Science*, **203**, 49-51.
- Hustedt, F. (1930) Bacillariophyta (Diatmeae). In Pascher, A. (ed.), *Die Süßwasser-Flora Mitteleuropas*, **10**, Gustav Fischer, Jena, 466p.
- John, J. (1983) The diatom flora of the Swan River estuary, western Australia. *Bibliotheca Phycologica*, **64**, 1-359.
- 鹿島 薫 (1986) 沖積層中の珪藻遺骸群集の推移と完新世の古環境変遷. 地理学評論, **59**, 383-403.
- 粕 武 (1992) 堆積岩の化学組成による堆積環境の研究—特に硫黄含有量による識別—. 地質調査所月報, **43**, 473-548.
- 粕 武・安藤一男・宇野沢昭・坂本 亨 (1988) 茨城県中部, 瓜連丘陵の第四系泥質層の化学組成・化石珪藻から見た堆積環境. 地質調査所月報, **39**, 573-599.
- 粕 武・鈴木慰元・小玉喜三郎 (1983) 房総半島における上総層群泥質岩中の硫黄, 炭素, 塩素, 鉄の形態・組成と堆積環境. 地質調査所月報, **34**, 191-206.
- 小杉正人 (1988) 珪藻の現生・化石群集間の類似度の測定—相同群集による古環境の復元法—. *Diatom*, **4**, 89-98.
- 前田保夫・松島義章・佐藤裕司・熊野 茂 (1982) 海成層の上限 (marine limit) の認定. 第四紀研究, **21**, 195-201.
- 中井信之・太田友子・藤沢 寛・吉田正夫 (1982) 堆積物コアの炭素同位体比, C/N 比および FeS₂含有量からみた名古屋港周辺の古気候, 古海水準変動. 第四紀研究, **21**, 169-177.
- 直良信夫 (1931) 但馬国城崎郡新田村中谷貝塚の貝類. 史前, no.207, 3-4.
- Patrick, R and Reimer, C. W. (1966) *The Diatoms of the United States*, **1**. Acad. Nat. Sci., 688p.
- Patrick, R and Reimer, C. W. (1975) *The Diatoms of the United States*, **2**. Acad. Nat. Sci., 213p.
- Postoma, D. (1982) Pyrite and siderite formation in brackish and freshwater swamp sediments. *Amer. Jour. Sci.*, **282**, 1151-1183.
- 佐藤裕司 (1989) 過酸化水素水処理—比濁法による堆積物の硫黄分析と堆積環境. 第四紀研究, **28**, 35-40.
- Sato, H., Kumano, S., and Maeda, Y. (1983) Diatom assemblages and Holocene sea level changes at the Tamatsu site in Kobe, western Japan. *The Quaternary Research*, **22**, 77-90.
- Sato, H. and Kumano, S. (1985) The succession of diatom assemblages and Holocene sea-level changes during the last 6,000 years at Sado Island, central Japan: The Holocene development of Lake Kamo-ko I. *Jpn. J. Limnol.*, **46**, 100-106.
- Sato, H. and Kumano, S. (1986) The succession of diatom assemblages and Holocene sea-level changes during the last 6,000 years at Sado Island, central Japan: The Holocene development of Lake Kamo-ko II. *Jpn. J. Limnol.*, **47**, 177-183.
- 白神 宏 (1985) FeS₂含有量からみた広島平野沖積層の堆積構造. 地理学評論, **58**, 631-644.
- 富樫茂子・松本英二 (1983) ベンゼン—液体シンチレーションによる¹⁴C年代測定. 地質調査所月報, **34**, 69-79. (1994年3月18日受理)

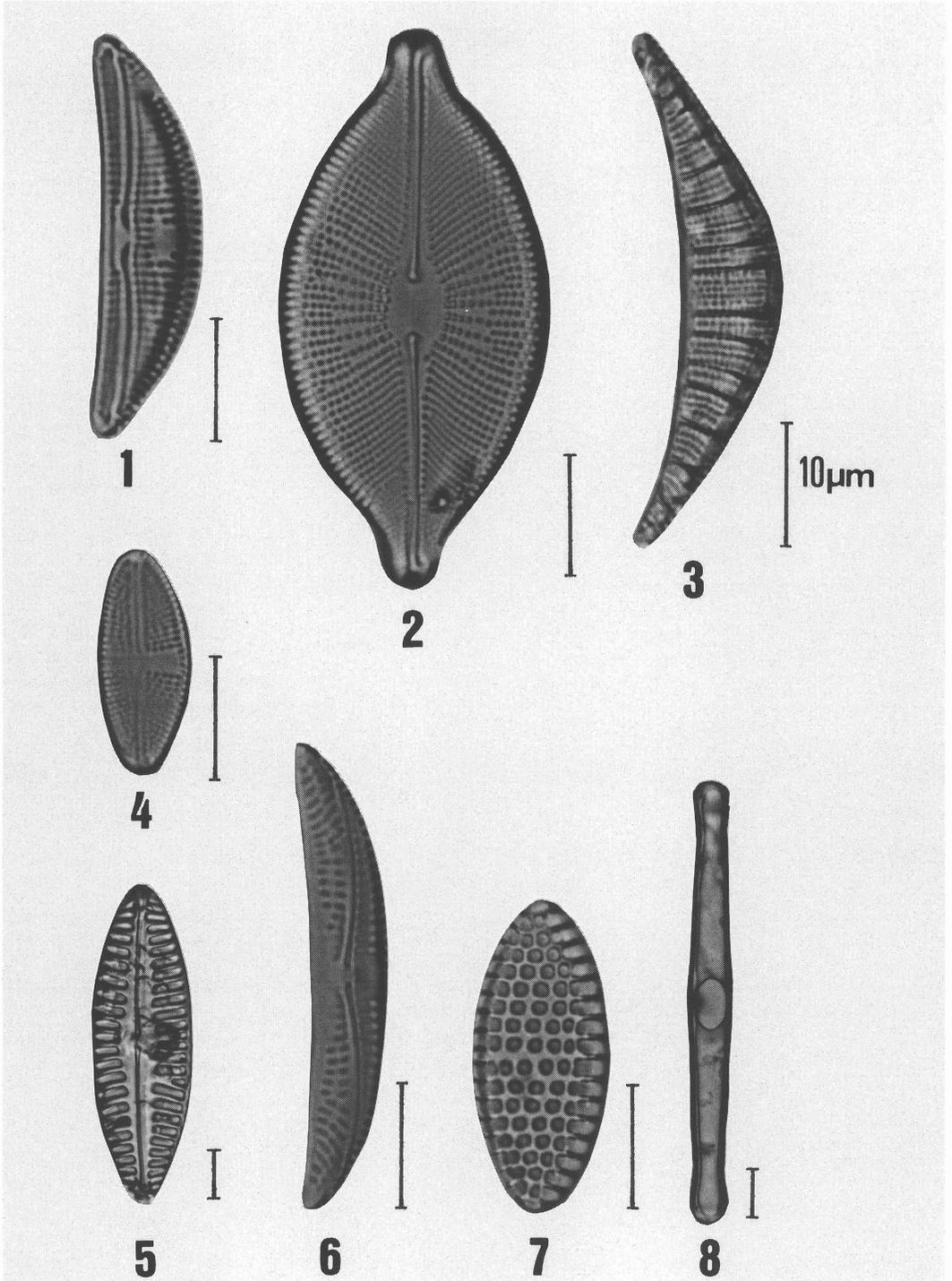


Plate 1

1. *Amphora ovalis* (Kützing) var. *affinis* (Kütz.) Van Heurck ex De Toni, 2. *Navicula pusilla* W. Smith, 3. *Rhopalodia gibberula* (Ehrenberg) O. Müller, 4. *Navicula mutica* Kütz., 5. *Navicula yarrensis* Grunow, 6. *Amphora proteus* Gregory, 7. *Nitzschia granulata* Grun, 8. *Grammatophora oceanica* (Ehr.) Grun. var. *macilenta* (W. Smith) Grun.