

## 珪藻類を用いた海岸古環境の復元に関する研究

● 総説  
● 解説

澤井 祐紀

国際日本文化研究センター (610-1192 京都市西京区御陵大枝山町 3-2)

Yuki Sawai: A review on tidal-wetland diatoms as a paleo-sea-level reconstruction at Japanese estuaries. Jpn. J. Phycol. (Sôru). 49: 185-191.

This paper reviews paleoenvironmental reconstruction using tidal-wetland diatoms. A great number of studies on paleoenvironmental reconstruction along coastal areas have been made on for over 60 years.

Assessing the relationship between the autochthonous and allochthonous components of fossil diatom assemblages is still a significant problem in their interpretation. That kind of study developed in 1980's. As the results, a few significant species, which should be treated as an allochthonous component in the fossil assemblage, are cleared. The tychoplankton *Paralia* is a typical example of a allochthonous component. Living specimens of *Paralia* form long interlocking chains. This long chains floats and are transported by a flow action of a tide, and then trapped by effects of vegetation. The process results in wide distributions of *Paralia* in entire tidal-wetlands. Therefore it is likely that concentration of *Paralia* should be understood as allochthonous origin.

*Pseudopodosira kosugii* Tanimura et Sato, a Japanese endemic diatom species, was formerly misidentified as one species of the genus *Melosira*. However, Tanimura & Sato (1997) placed the species not in the genus *Melosira* Agardh but in the genus *Pseudopodosira* Jousé based on culturing. Because this species lives on limited environments between mean tide level and mean high tide level, it can be a powerful indicator of paleo-sea-levels. Sawai & Mishio (1998), for example, reconstructed relative sea-level history using *Pseudopodosira kosugii* as a sea-level indicator at Akkeshi area, eastern Hokkaido, northern Japan. In Akkeshi estuary, fossil specimens of *Pseudopodosira kosugii* dominates in the uppermost of peaty mud and inorganic mud while numerous freshwater diatom fossil valves are in peat. Sawai & Mishio (1998) understood the distribution pattern as the change of sea-levels and reconstructed the detailed sea-level history during the past 3000 years at Akkeshi area. This discussion will be applied to other regions.

Key Index Words: Fossil diatoms, indicator of paleoenvironments, taphonomy

International Research Center for Japanese Studies, Oeyama-cho 3-2, Goryo, Nishikyo-ku, 610-1159 Kyoto, Japan

珪藻類は珪酸質の殻を持ち、海域や淡水湖沼だけでなくミズゴケ類の表面など(安藤1990)、水分の存在するあらゆる環境に適応放散した単細胞藻類である。この珪藻類は、環境の違いによって種構成を大きく変化させ、さらにその遺骸殻が堆積物中に保存されやすいことから、過去の環境(以下、古環境)変化を表す指標生物として広く用いられてきた。なかでも海岸地域では、堆積物中の珪藻化石群集の推移から、海跡湖の塩分復元、海岸線高度(海水準または相対的海水準; relative sea-level)復元、津波堆積物の認定など、様々な環境復元が行われている。本論では、海岸古環境復元と珪藻類に関する基礎的・応

用的研究例をレビューし、古環境復元を行う際の問題点などについて述べる。

## 過去の海岸環境復元と珪藻類に関する研究史

古環境と珪藻類に関する研究は世界各地で行われているが、最も古いものとして1920年代の北欧地域における沿岸研究の例を挙げることができる(Håkansson 1988)。それらは、主に第四紀地質学者であるHalden, Lundquist, Thomassonらによって行われ、バルト海の環境復元などに貢献した。彼らの業績以降、北欧地域だけでなくヨーロッパ諸国においても、珪藻類と過去の沿岸環境に関する研究が急激に増加した(Backman

& Cleve-Euler 1922, Alhonen 1971, Pennington 1943, Baldauf 1982, Gronlund 1990など)。北欧地域においてこの種の研究が発達した背景には、最終氷期最大海面低下期以降、アイソスタシー効果によって同地域の沿岸環境が変化したという地質学的な背景が大きいと考えられる。しかしながら、当時の研究初期段階では、バルト海的环境変遷史や海岸部の内湾が海から切り離される過程 (isolation) の復元の方に焦点が当てられており、過去の海水準を定量的に復元しようとする試みは見られなかった。以上のヨーロッパにおける研究例は、Kolbe(1927)の halobien diatom system や Hustedt(1937-39)の生態的区分を基に行われており、塩分変化から間接的に海水流入量を推定するものであった。この手法は、海生種の消長を見ることで、過去の海水の影響を捕らえることができることから、現在においても最も簡便な方法として使われている (Vos & de Wolf, 1993)。その後、北海・バルト海変遷に関連した研究がヨーロッパ各地で盛んに行われたが、南北アメリカ・東欧地域では湖沼に関連する研究が主に発達し、沿岸に関する研究はあまり報告されることがなかった。

1960年以降、沿岸古環境と珪藻類に関する研究は、日本の沖積低地において盛んに報告されるようになった (Hasegawa 1976 など)。これらの研究例も、ヨーロッパにおけるものと同様に、Hustedt(1937-39)やLowe(1974)などの生態的区分に基づくものが占めていた。その後1980年代中期以降に、小杉(1988)によって日本の潮間帯における環境指標種が導入され、具体的な地理環境を復元しようとする試みがなされるようになってきた (小杉 1988, 1989, 鹿島 1986)。小杉による研究は、環境復元の精度を飛躍的に向上させ、さらに潮間帯に生息する珪藻類の初期化石化過程を議論しようとした画期的な試みであった。その後、これらの研究例を基に多くの基礎的・応用的研究例が日本・ヨーロッパ地域を中心に報告されるようになった (安藤 1990, 1991, Denys 1999, 藤本 1990, 鹿島 1986, 加藤ほか 2000, 川瀬 1998, 小杉 1985, 1988, Kosugi 1987, 大平 1995, 大平・海津 1999, Sakaguchi *et al.* 1985, Sawai 2001a, 2001b in press, 安井ら 2001, Zong 1996, 1997など)。彼らの研究の多くは、海岸線の位置を推定するなど、縄文海進期以降の海岸環境の変遷を詳細

に復元しようとするものであった。

1990年代中期になると、アメリカ西海岸地域を中心に、海水準の微変動を復元する試みが急増した (Atwater & Hemphill-Haley 1997, Hemphill-Haley 1995a, 1995b, Sherrod 1999, Sherrod *et al.* 2000)。彼らの業績がそれまでの日本・ヨーロッパのものとは大きく違うのは、海岸環境の中でも特に潮位差に敏感な微地形環境 (塩性湿地環境) に注目し、珪藻類の生態情報、初期化石化情報を明らかにしていったことである (Nelson & Kashima 1993, Hemphill-Haley 1995a, Sherrod 1999)。また、それらの基礎情報をもとに transfer function法などの統計学的手法を用いて海水準微変動の復元を行い、そこから過去の地震活動の復元に成功している (Hemphill-Haley 1995b, Sherrod *et al.* 2000)。近年日本においても、北海道に点在する塩性湿地堆積物に注目し、そこから過去の海岸環境 (特に海水準) を復元しようとする試みが見られるようになった (Sawai 2001a)。

#### 海岸地域における珪藻類の初期化石化過程に関する研究

堆積物中に見られる生物群集と現在生きている群集は等価ではない。当然珪藻類にもこれは当てはまり、現在の群集と堆積物中の群集の間には、遺骸群集が存在する。これまでの第四紀古環境変遷に関する研究では、堆積物中の珪藻群集について「珪藻化石群集」「珪藻遺骸群集」などの用語が特に区別されず用いられてきたが、化石化過程を考慮に入れて定義すべきである。本研究では、生きている栄養細胞・休眠細胞・休眠孢子から構成されるものを珪藻生体群集 (または集団) (生体珪藻群集 (集団), 珪藻現生群集 (集団) または現生珪藻群集 (集団)); living diatom population), sediment-water interface に含まれる死滅した被殻などを珪藻遺骸群集 (遺骸珪藻群集; dead diatom assemblage), sediment-water interfaceより下位に埋没した遺骸などを珪藻化石群集 (化石珪藻群集; fossil diatom assemblage) と呼ぶことにする。厳密には、そこに生育していた珪藻類が死滅した群集を遺骸珪藻群集 (珪藻遺骸群集), そこに集積しているが何かの作用で再移動し得るものを集積珪藻群集 (珪藻集積群集), 埋没し再移動し得ないものを埋没珪藻群集 (珪藻埋没群集; buried diatom assemblage) と定義

すべきであるが、これらの区別が難しいため一括して「珪藻遺骸群集（遺骸珪藻群集）」とした。ただし、内湾・湖沼など、沈降遺骸と集積遺骸が区別できる場合（加藤ら 2000）はこの限りではない。

潮間帯の珪藻類と海岸古環境を議論する場合、しばしば問題となるのが珪藻化石の現地性・異地性評価である。現地性（autochthonous）群集とは、そこに生育していたものがそのまま化石化したものを指し、異地性（allochthonous）群集とは他の場所で生活していたものが運搬され化石化したものである。潮間帯に生育する珪藻群集の場合、常に潮汐作用に曝されているため、基本的にそこで形成される珪藻遺骸群集は、運搬された異地性要素の高い種組成になると考えられる。そのため、珪藻化石群集から古環境復元を行う際には、現地性・異地性要素の評価を詳細に行う必要がある。

従来、珪藻化石群集中における現地性要素・異地性要素の評価を行うために、個々の種の生活形態に注目して議論が行われてきた（Vos & de Wolf 1993）。例えば、浮遊生活をする珪藻類は潮汐作用によって洗い流されるために、基本的に異地性要素として扱われ、付着生活をする珪藻種は現地性要素として扱われることが多かった（Simonsen 1969）。また、遺骸の破壊が進んでいるものが異地性要素として扱われることもあった（Voorrips & Jansma 1974, Heyworth *et al.* 1985）。しかしながら、これらの議論は系統的なデータの蓄積によるものではなく、推論の域を出ていなかった。そのため 1980 年代以降、化石群集中の現地性・異地性評価を詳細に行うため、世界各地で古環境学者による珪藻類の生態調査が行われるようになった（小杉 1985, 1988, 安藤 1990, Hemphill-Haley 1995a, Zong & Horton 1998, Sherrod 1999, Sawai 2001b in press）。

堆積物中に見られる珪藻化石群集は、生体群集よりも遺骸群集に近い。これは、潮間帯の生物群が潮汐作用によって死後運搬を受けるためである。微細藻類である珪藻類の場合、この死後運搬作用の影響が強いと考えられ、古環境学者による潮間帯の生態調査はこの点に注目され行われてきた。なかでも小杉（1985）は、細胞染色法を用いることによって表層堆積物中の珪藻生体群集と珪藻遺骸群集の分離を行い、生体群集か

ら遺骸群集への変形過程を議論した初めての論文であろう。小杉の研究によれば、潮間帯に生育する珪藻生体群集は塩濃度と付着器物に関係して分布しており、潮の影響をどの程度受けるかによって、その後の群集変形度に違いが出てくる（小杉 1986）。例えば、閉鎖性の高いタイドプールなどでは遺骸殻の流出が少なくなる。また、常に潮の影響を受ける干潟底では、珪藻殻は死後即座に流されてしまい、結果として残留群集の性格が強い遺骸群集が形成される。このような地理環境による異地性程度の違いに加えて、個々の生活形態の違いによって初期運搬の程度が違うようである。例えば、interlocking spine によって長い鎖状群体を形成する *Paralia* 属は、その群体形態から潮汐作用によって流されやすく、異地性要素の強い珪藻類であると広く認知されている（Hemphill-Haley 1995a, Denys 1999, Sawai 2001b）。

死後運搬による群集の初期変形に加えて、溶解作用による群集変形も重要である。ただし、ここでいう「溶解作用」は、生物擾乱による殻の破壊、潮汐作用による物理的な殻の破壊、化学的な溶解、の 3 つの作用が並列に扱われる。潮間帯では、これら 3 つの作用が同時に働き珪藻殻の溶解が起きていると考えられる。なかでも、

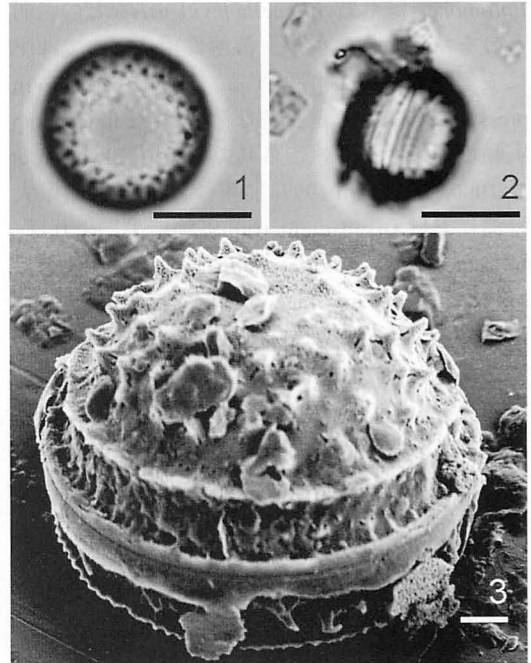


図1 *Pseudopodosira kosugii* Tanimura *et Sato*. 1, 2. 光学顕微鏡写真. (Scale bars=10 $\mu$ m) 3. SEM. (Scale bar=1 $\mu$ m)

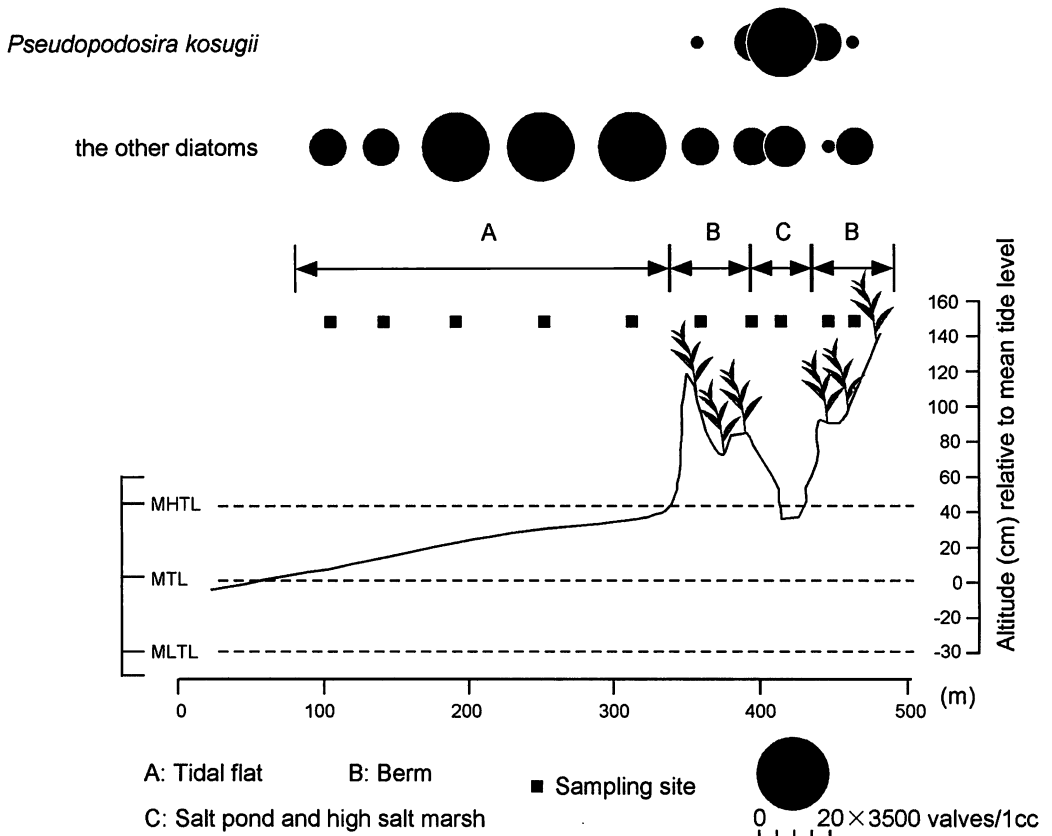


図2 小櫃川河口域における *Pseudopodosira kosugii* の分布状態。本種は限られた環境にのみ分布する。

*Entomoneis*属や *Tryblionella levidensis*などの脆弱な殻を持った珪藻種は、溶解作用によって即座に表層堆積物から消失する (Sawai 2001b in press)。このような選択的な溶解は、sediment-trap 実験の結果からも報告されている (Takahashi *et al.* 1990, Takahashi 1997, 加藤ら 2000)。長崎県大村湾における sediment-trap 実験結果によれば、*Chaetoceros* 属、*Skeletonema* 属などの珪藻種は sediment-water interface で選択的な溶解を受け、遺骸殻の大部分が消失してしまうことが明らかにされている (加藤ら 2000)。これらの観測結果に加えて、海洋における珪藻殻に関しては、海洋バクテリアの作用が大きく関係して珪藻殻の溶解が進行していることが、室内実験の結果から指摘されるようになった (Bidle & Azam 1999)。

以上のように、珪藻生体群集が珪藻化石群集に変化する過程において、溶解作用は重要な役割を果たしているが、その詳細は議論の余地が大きい。例えば、溶解作用の程度を客観的に評価する方法などは、今後の研究によって議論され

なければならない問題である。

#### 古海水準を表す珪藻種 *Pseudopodosira kosugii* Tanimura *et* Sato を用いた古環境復元例

本章では、具体的な研究例の一つとして日本における古海水準復元を取り上げる。1980年代以降、日本では考古学的・自然地理学的な観点から、縄文海進期以降の海岸線移動が詳細に議論されてきた (太田ら 1990)。その中で珪藻類は、環境指標種の提唱がされるなど (小杉 1988)、沿岸域の環境指標として活躍してきた。なかでも、日本における沖積低地の海成層中では、*Pseudopodosira kosugii* が第一優占種として産出する 경우가多く (Sato *et al.* 1996)、本種は日本の完新世沿岸環境変化と珪藻相の関係を考える上で重要な位置を占めていると考えられる。

日本の沖積堆積物中に特徴的に産出する珪藻種 *P. kosugii* は、その形態が *Melosira* 科珪藻類の resting spore に似ていたため、従来 *Melosira* 属の1種として報告されてきた (鹿島 1985: *Melosira*

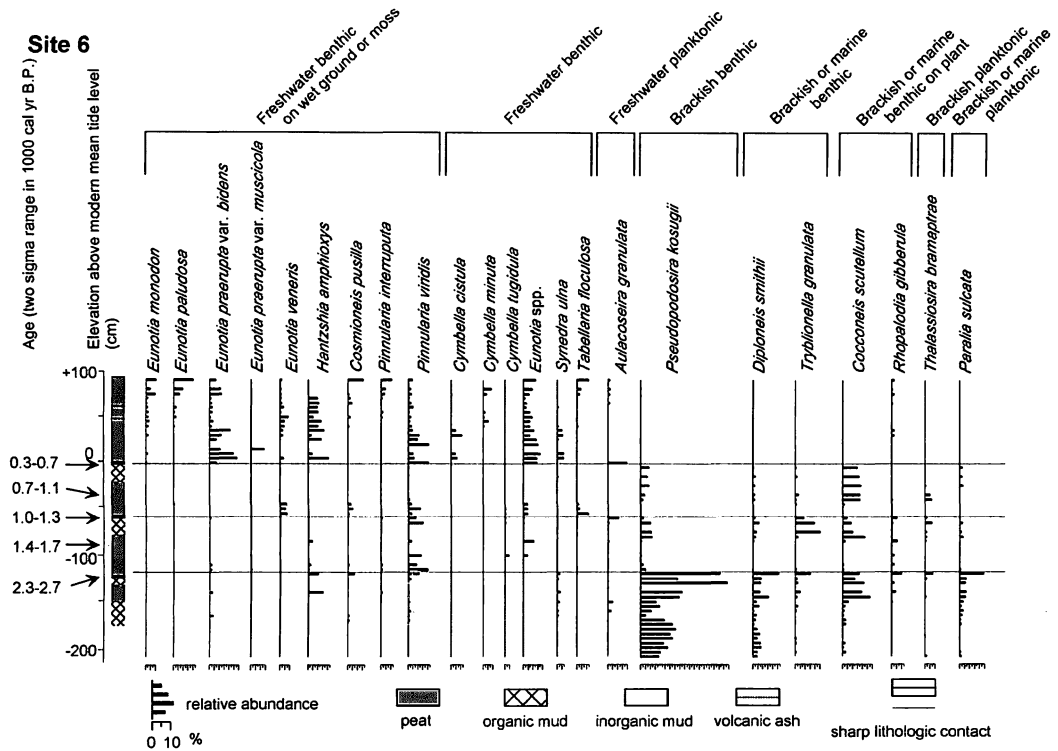


図3 北海道厚岸地方の湿原堆積物中における珪藻化石群集の推移 (Sawai 2001a を改変)。有機質泥層・無機質泥層では *Pseudopodosira kosugii* やその他の汽水-海水生珪藻が多産し、泥炭層では淡水性珪藻が特徴的に産出する。

sp.1, 小杉 1985, 1988 : *Melosira* sp.n, Sato *et al.* 1996 : *Melosira* sp.1 など)。しかしながら, Tanimura & Sato (1997)による培養実験で, それらが栄養細胞の被殻であることが明らかにされ, *Pseudopodosira* 属の *P. kosugii* (図1)と名付けられた。本種の分布は日本周辺のみに限られており, 生細胞は千葉県小櫃川河口域でしか報告されていない。

図2は, 千葉県小櫃川河口地域における *P. kosugii* の分布状態である。図2が示すように, *P. kosugii* の生育範囲は非常に限られた環境(平均高潮位から大潮時の高潮位)に限られており, 本種が過去の海岸線位置を推定するのに適していることを示している。本種は, *Paralia* 属, *Aulacoseira* 属に見られる linking spine に似た構造を持っており, 細胞分裂初期では短い鎖状群体を形成しているため (Tanimura & Sato 1997), *Paralia* 属のように潮汐作用によって流され易い種ととらえられ異地性要素として扱われることがある (Denys 1999)。しかしながら, 本種の連結は *Paralia* 属などのそれとは違って弱く, 干潟

底で観察される生細胞は単独のものがほとんどであった。さらに小櫃川河口における分布状態から推定すると, 本種は異地性要素というよりはむしろ現地性要素が高く過去の海水準(正確には平均潮位から平均高潮位)を表す指標種と定義することができる。

図3は, 北海道東部厚岸地方の湿原堆積物に見られた, 珪藻化石群集の推移である。本地域の湿原堆積物は, 下部無機質泥層と上部有機質層に分けられ, さらに上部有機質層は分解質泥炭層と有機質泥層の互層によって構成される。本堆積物中の, 下部無機質泥層上限付近では *P. kosugii* が特徴的に産出し, 加えて海生珪藻である *Diploneis smithii*, *Tryblionella granulata* なども随伴する。これらの珪藻種が多産する層準の直上では, 層相が泥炭に変化するとともに, 淡水環境に生育する珪藻種 *Eunotia praerupta* var. *bidens*, *Pinnularia viridis* などが特徴的に産出ようになる。これらは当時の海岸線が調査地点付近に存在し, 海岸線移動後に淡水環境に変化したことを反映したものと考えられる。このような特

微的な産出は、上部の有機質泥層にも見られ、過去数回にわたり調査地点付近の環境が変化したことが推定された (Sawai 2001a)。

*P. kosugii* が *Melosira* 属の1種と同定されてきた背景には、本種が沖積堆積物中に化石として普通に産出するにもかかわらず、現在では小櫃川河口域でしか生細胞が観察されていないことがある。沖積層中で *P. kosugii* が最も産出する時期は縄文海進期であるが (Tanimura & Sato, 1997)、当時形成されていた海水準上昇後の干潟と、それが埋積された現在の海岸では環境が大きく違っている可能性がある。またこのことは、当時の *P. kosugii* の生育範囲と現在のそれが違う可能性があることも含んでいる。このため、本種を指標種として使用する場合は、随伴種との比較や化学的手法を導入するなど (大平1995, 佐藤1995, 川瀬1998)、慎重に行う必要があることを強調したい。以上のような問題を解決するには、地史的・生態学的な視点からさらに研究を進める必要があり、本種を含めた海岸生態系の推移を考える上で重要な課題となるであろう。

#### まとめ

本論では、海岸古環境と珪藻類に関する研究のレビューを行い、用語の定義、具体的な研究例とその問題点を述べた。本論で指摘した幾つかの課題は、過去の環境と珪藻類の関係を明らかにさせていく上で、重要な位置を占めるものである。今後、それらの議論を発展させていくことによって、より詳細な古環境変遷・珪藻相変遷が明らかになっていくと思われる。

#### 謝辞

本研究を行うにあたり、日本歯科大学南雲保助教授に *Pseudopodosira kosugii* の同定および電子顕微鏡写真の提供をいただいた。記して感謝の意を表する。

#### 引用文献

Alhonen, P. 1971. The stages of the Baltic Sea as indicated by the diatom stratigraphy. *Acta Botanica Fennica* 92: 1-18.  
 安藤一男 1990. 淡水産珪藻による環境指標種群の設定と古環境復元への応用. *東北地理* 42: 73-88.  
 安藤一男 1991. 珪藻遺骸群集の推移からみた沖積低地における海退過程の類型化. *東北地理* 43: 98-110.

Atwater, B. F. & Hemphill-Haley, E. 1997. Recurrence intervals for great earthquakes of the past 3500 years at northeastern Willapa Bay, Washington. U.S. Geological Survey Professional Paper 1576, U.S. Gov. Print., Washington. pp.108.  
 Backman, A. L. & Cleve-Euler, A. 1922. Die fossile Diatomeenflora in Osterbotten. *Acta Forestica Fennica* 60: 209-244.  
 Baldauf, J. W. M. 1982. Identification of the Holocene-Pleistocene boundary in the Bering sea by diatoms. *Boreas* 11: 113-118.  
 Bidle, K. D. & Azam, F. 1999. Accelerated dissolution of diatom silica by marine bacterial assemblages. *Nature* 397: 508-512.  
 Denys, L. 1999. A diatom and radiocarbon perspective of the palaeoenvironmental history and stratigraphy of Holocene deposits between Oostende and Nieuwpoort (western coastal plain, Belgium). *Geologica Belgica* 2: 111-140.  
 藤本潔 1990. 松島湾岸谷底平野における後期完新世海水準微変動の連続的復元. *地理学評論* 63: 629-652.  
 Gronlund, T. 1990. Lagoonal diatom flora of the Holocene Baltic Litorina Sea in comparison with the Eemian Baltic Sea flora. p. 349-357. In: Kociolek, J. P. (eds.) *Proc. 11th Internat. Diatom Symp, Calif. Acad. Sciences, San Francisco*.  
 Håkansson, H. 1988. History of Diatom Research in the Nordic Countries. p. 7-16. In: Simola, H. (eds.) *Proc. 10th Internat. Diatom Symp, Koeltz Scientific Books, Koenigstein*.  
 Hasegawa, Y. 1976. Significance of diatom thanatocoenoses in the Neolithic sea-level change problem. *Pacific Geology* 11: 1-32.  
 Hemphill-Haley, E. 1995a. Intertidal diatoms from Willapa Bay, Washington: Application to studies of small-scale sea-level changes. *Northwest Science* 69: 29-45.  
 Hemphill-Haley, E. 1995b. Diatom evidence for earthquake-induced subsidence and tsunami 300 yr ago in southern coastal Washington. *Geological Soc. America Bull.* 107: 367-378.  
 Heyworth, A., Kidson, C. & Wilks, P. 1985. Late-Glacial and Holocene sediments at Clarach Bay, near Aberystwyth. *J. Ecology* 73: 459-480.  
 Hustedt, F. 1931-37. Die Kieselalgen Deutschlands, Oesterreichs und der Schweiz unter Berücksichtigung der übrigen Länder Europas sowie der angrenzenden Meeresgebiete, Oesterreichs und der Schweiz, Bd. VII, Teil 2, Lief. 6, 737-1179. *Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig, K.-G., Leipzig*.  
 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.  
 加藤めぐみ・谷村好洋・松岡敷充・福澤仁之 2000. 沿岸

- 域における珪藻遺骸群集と化石群—大村湾におけるセディメント・トラップ実験結果—。汽水域研究 7: 53-60.
- 川瀬久美子 1998. 矢作川下流低地における完新世後半の地形環境の変遷。地理学評論 71: 411-435.
- Kolbe, R. W. 1927. Zur Okologie, Morphologie und Systematik der Brackwasser-Diatomeen. Pflanzenforschung 7: 1-146.
- 小杉正人 1985. 染色像による珪藻の生体・遺骸の識別法とその意義。第四紀研究 24: 139-147.
- 小杉正人 1986. 現世干潟における珪藻遺骸の運搬・堆積パターン—小櫃川下流域の場合—。地理学評論 59: 37-50.
- 小杉正人 1988. 珪藻の環境指標種群の設定と古環境復原への応用。第四紀研究 27: 1-20.
- 小杉正人 1989. 完新世における東京湾の海岸線の変遷。地理学評論 62: 359-374.
- Kosugi, M. 1987. Limiting factors on the distribution of benthic diatoms in coastal regions—salinity and substratum. Diatom 3: 21-31.
- Lowe, R. L. 1974. Environmental Requirements and Pollution Tolerance of Freshwater Diatoms. EPA-670/4-74-005. Cincinnati, Ohio. pp. 344.
- Nelson, A. R. & Kashima, K. 1993. Diatom zonation in southern Oregon tidal marshes relative to vascular plants, foraminifera, and sea level. J. Coastal Research 9: 673-698.
- 大平明夫 1995. 完新世におけるサロベツ原野の泥炭地の形成と古環境化。地理学評論 68: 695-712.
- 大平明夫・海津正倫 1999. 北海道北部, 大沼周辺低地における完新世の相対的海水準変動と地形発達。地理学評論 72: 536-555.
- 太田陽子・海津正倫・松島義章 1990. 日本における完新世相対的海面変化とそれに関する問題—1980～1988における研究の展望—。第四紀研究 29: 31-48.
- Pennington, W. 1943. Lake sediments: the bottom deposits of the N. Basin of Windermere with special reference to the diatom succession. New Phytology 43: 1-27.
- Sakaguchi, Y., Kashima, K. & Matsubara, A. 1985. Holocene marine deposits in Hokkaido and their sedimentary environments. Bull. Dept Geography, Univ. Tokyo 17: 1-17.
- 佐藤裕司 1995. イオウの分別化学抽出と珪藻分析による古環境解析—兵庫県気比低地のコア堆積物を例に—。第四紀研究 34: 101-106.
- Sato, H., Tanimura, Y. & Yokoyama, Y. 1996. A characteristic form of diatom *Melosira* as an indicator of marine limit during the Holocene in Japan. The Quaternary Research (Daiyonki-Kenkyuu) 35: 99-107.
- 沢井祐紀・三塩和歌子 1998. 北海道東部厚岸湿原における過去3000年間の海進・海退。第四紀研究 37: 1-12.
- Sawai, Y. 2001a. Episodic emergence in the past 3000 years at the Akkeshi estuary, Hokkaido, northern Japan. Quaternary Research 56: 231-241.
- Sawai, Y. 2001b. Distribution of living and dead diatoms in tidal wetlands of northern Japan: relations to taphonomy. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. (in press)
- Sherrod, B. L. 1999. Gradient analysis of diatom assemblages in a Puget Sound salt marsh: can such assemblages be used for quantitative paleoecological reconstructions? Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 149: 213-226.
- Sherrod, B. L., Bucknam, R. C. & Leopold, E. B. 2000. Holocene relative sea level changes along the Seattle Fault at Restoration Point, Washington. Quaternary Research 54: 384-393.
- Simonsen, R. 1969. Diatoms as indicators in estuarine environments. Velöffentl. Inst. Meeresforsch. Bremerhaven 11: 287-291.
- Takahashi, K. 1997. Time-series fluxes of Radiolaria in the eastern subarctic Pacific Ocean. News of Osaka Micropaleontologists, Special Volume 10: 299-309.
- Takahashi, K., Billings, J. D. & Morgan, J. K. 1990. Oceanic province: assessment from the time-series diatom production in the northeastern Pacific. Limnol. Oceanogr. 35: 154-165.
- Tanimura, Y. & Sato, H. 1997. *Pseudopodosira kosugii*: a new Holocene diatom found to be a useful indicator to identify former sea-levels. Diatom Research 12 357-368.
- Voorrips, A. & Jansma, M. A. 1974. Pollen and diatom analysis of a shore section of the former Lake Wervershoof. Geologie en Mijnbouw 53: 429-435.
- Vos, P. C. & de Wolf, H. 1993. Diatoms as a tool for reconstructing sedimentary environments in coastal wetland; methodological aspects. Hydrobiologia 269/270: 285-296.
- 安井賢・小林巖雄・鴨井幸彦・渡辺其久男・石井久夫 2001. 越後平野中央部, 白根地域における完新世の環境変遷。第四紀研究 40: 121-136.
- Zong, Y. 1996. Holocene sea-level changes and crustal movements in Morecambe Bay, northwest England. J. Quaternary Science 11: 43-58.
- Zong, Y. 1997. Mid- & late-Holocene sea-level changes in Roudsea Marsh, northwest England: a diatom biostratigraphical investigation. The Holocene 7: 311-323.
- Zong, Y. & Horton, B. J. 1998. Diatom zones across intertidal flats and coastal saltmarshes in Britain. Diatom Research 13: 375-394.

(Received 1 Aug. 2001, Accepted 10 Sept. 2001)

