

珪藻遺骸を用いた汽水域の古環境復元に関する 現状と今後の課題

— 分析方法, 高精度化, 定量化, データベースの整備 —

鹿島 薫¹

The applications of diatom assemblages to reconstruct paleoenvironmental changes at brackish lakes in Japan — the trends of recent studies and their problems —

Kaoru Kashima¹

Abstract: Paleolimnological studies using biological remains of diatoms in sediment cores can provide information for the reconstruction of historical water chemistry and climatic changes. The trend of recent diatom studies at brackish lakes in Japan were compiled as follows.

- (1) Methodological and taxonomical discussion
- (2) Annually laminated sediments
- (3) Quantitative reconstruction of paleoenvironments
- (4) Database of living diatom assemblages for paleolimnological studies

Key words: diatom, environmental change, lake sediment, paleolimnology, Quaternary

汽水域の環境指標としての珪藻の重要性

珪藻は単細胞藻類の一つであり, その大きさは直径 5~200 μ m 程度である. その表面を, 電子顕微鏡や高倍率 (1000 倍程度) の光学顕微鏡で観察してみると, 無数の細かな模様が刻まれていることがわかる. これらの模様は, 珪藻の細胞を取り囲むように覆っている珪酸質 (ガラス質) の殻に刻まれたものであり, その形態は種ごとに固有のものとなっている. 言い換えるならば, 殻の形態を見るだけで, その珪藻の種名を特定することができる.

珪藻は, 自然界の重要な第一次生産者であり, 多くの動物の餌となっている. また, 光合成を通して, 大気中の二酸化炭素の同化に大きく寄与している. さらに, とても環境変化に敏感な生物であり, わずかな水質の変化に反応して, その群集構成を大きく

変えてしまう. 以上の点から, 湖や河川の環境や生態系を考える上で, 重要は生物指標としての役割を珪藻は占めていると言えよう.

しかし, 珪藻にはもう一つの重要な役割が残されている. それは, その殻を湖底や海底に堆積させることである. 珪藻土は, 日本でも, 日本海側地域を中心に多く分布し, 重要な地下資源として採掘が行われている. また, 顕著な珪藻土を形成するまでには至らぬまでも, 湖沼堆積物, 低地堆積物などには多くの珪藻殻が含まれていることが多い.

そこで, 珪藻の種がその殻の構造によってという特性を生かし, このような地層中に残された珪藻殻を観察することによって, 堆積当時どのような珪藻種がその場所で優占していたかを, そしてその構成から堆積時の古環境を復元することができる. これが珪藻分析である. 言い換えるならば, 珪藻は

¹ 九州大学理学部地球惑星科学教室

Department of Earth and Planetary Sciences, Kyushu University, Fukuoka 812-8581, JAPAN

地層の中に残された過去の環境を記した「古文書」としての役割を果たしているのである。

汽水域では、多様な珪藻群集の変化が見られる。また、これまで日本各地の汽水域において採取されたボーリングコア試料の分析より、その環境変動の復元に珪藻が有効であることが明らかにされている(例えば鹿島, 1993)。宍道湖・中海においても、多くの湖底ボーリングコア試料が採取され、珪藻遺骸群集に基づく古環境変遷が議論されてきた。

珪藻分析方法についての最近の動向

(1) 珪藻試料の処理とその封入方法

珪藻は大きさが1mmの数十分の1の大きさしかなく、肉眼で取り出すことは不可能である。そのため、まず堆積物を懸濁し、その中から珪藻殻をより分けることが必要である。この過程は堆積物の状態によって異なるが、原則は「Simple is the best」、つまり簡単な処理で済ませる方が最も良いと言えよう。これはどのような処理であっても、必ずその過程で珪藻殻を破壊・選別し、本来の群集組成を変えてしまう可能性があるからである。その中で最も簡便なのがスミアスライド法である。これは、試料を無処理のままで見する方法であり、湖沼堆積物など珪藻を豊富に含んでいる試料では特に有効である。また、過酸化水素を加えて煮沸する方法も一般的である。過酸化水素は堆積物中の有機物を分解し、その時放出される酸素の泡は堆積粒子の分散を容易にする。しかも、反応後は過酸化水素は水となるので、その後の水洗が簡単でよい。この他、塩酸などを加えて煮沸する方法もあるが、これはその後の脱酸が大変なので、お勧めできない。

(2) 珪藻種の同定について

珪藻は数万種が記載されており、その種名の同定には大変な労力が伴う。また、その微細な構造までも観察するためには、光学顕微鏡または電子顕微鏡を用いて、1000倍以上で検鏡する必要がある。しかし、珪藻の種名を同定するためには、珪藻殻のある特定の面を見ないと分からない場合があり、これを修得するには経験を要する。

珪藻の分類の基本については、属レベルのものを表1にまとめた。文献として全体をまとめたものは、日本語のものはまだ出版されていない。このため、種として外国の文献(主にドイツ語)を用いる必要がある。長い間、Husted(1930, 1930~1959)が基本的な文献として使われてきたが、近年の電子顕微鏡の進歩により、分類体系の再検討が行われている(Round *et al.* 1990)。国際珪藻学会などの傾向としては近年、Krammer & Lange-Bertalot (1986-1991)

が、淡水～汽水珪藻の新しいスタンダードとして用いられている傾向にある。なお、沖積低地堆積物などから産出する主要な種については、鹿島(1992)が写真付きで示してあるので、参照されたい。

現実には、珪藻種の同定を初心者が行うことは無意味である。まず、珪藻の顕微鏡写真を撮り、それを専門家に送り、同定を依頼することが必要である。近年は顕微鏡用のビデオ装置が簡便となり、それをパソコンにつなぐことによって、簡単に画像データとすることができるようになった。これを、インターネットまたはディスクとして送付すると、フィルム現像と印画紙焼き付けを行わなくても、大量の珪藻画像を送ることができる。

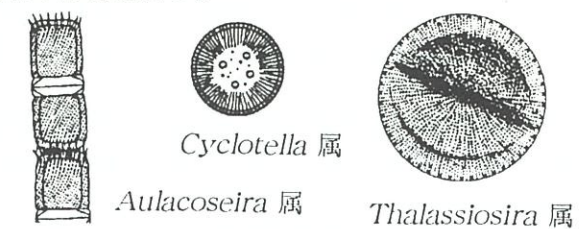
(3) 生息による環境珪藻種群の分類

通常、各試料から200個の珪藻殻を取り出し、同定を行うのが一般的である。しかし、これは堆積物の状態、珪藻の保存状態から変動させてかまわない。その結果得られた珪藻の種ごとの出現数の変動は、百分比を持って示すことが一般的である。しかし、堆積物中に顕著な珪藻殻数の変動が見られるときには、1gないしは1mgあたりの殻数の変化で示すこともあるが、珪藻の定量的な計数は極めて難しいの注意しなければいけない。

また、堆積物中から得られた珪藻の種構成から過去の環境を推定するためには、主要な種の出現頻度に加え、全出現珪藻種をいくつかの環境種群に区分し、その種群ごとの出現頻度変化を示すことが多い。しかしこのためには、まず、現在の珪藻の分布とその環境との関係を丹念に調査し、その結果に基づいて種群分類を行う必要がある。「現在は過去を説く鍵」これが原則である。このため、珪藻分析研究を志すものは、地質学のみならず、生物学、生態学の知識が必要となる。

珪藻の生息環境に基づく分類としては、淡水珪藻を中心とした、塩分、pH、流速に基づく区分が古典的ではあるが、現在でもよく用いられている。このことは、珪藻が塩分変動、pH変動、そして流速変動(河川性か又は湖沼性か)の指標として有効であることを示している。汽水域を中心とした珪藻群集の推移と塩分との関係については、日本においても鹿島(1986)、小杉(1988, 1989)、安藤(1990)らの研究があるが、北海道厚岸における研究例(沢井・鹿島 1996)はその具体的な調査の手順、古環境解析への応用の手順を示しているので参照されたい。

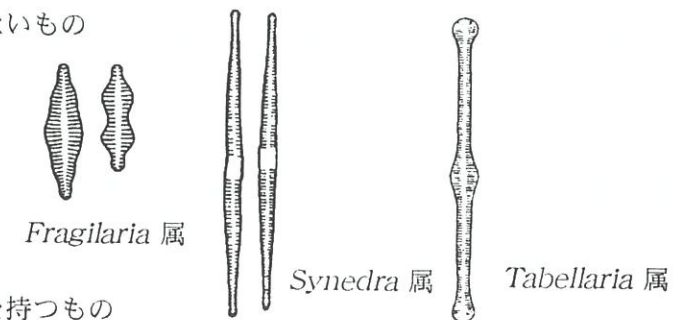
1 中心目 -- 円盤状または円筒状の形態を持つ。



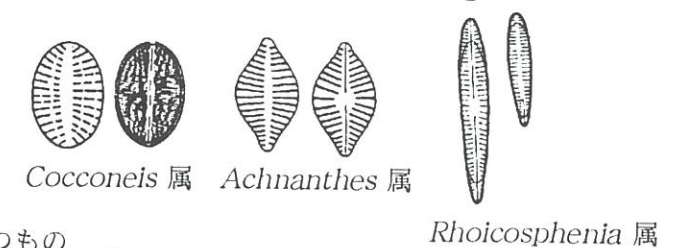
2 羽状目 -- 長楕円状、弓状、針状の形態を持つ。

縦溝(殻の中心付近を通る溝状の構造)の形態から、以下のように細分される。

(i) 両方の殻に縦溝を持たないもの

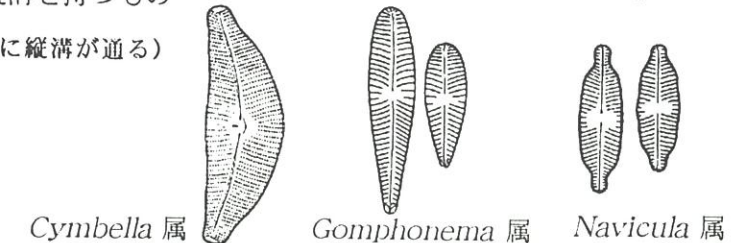


(ii) 片側の殻にのみ縦溝を持つもの



(iii) 両側の殻に縦溝を持つもの

(殻の中央付近に縦溝が通る)



(殻の縁、端部に縦溝が通る)

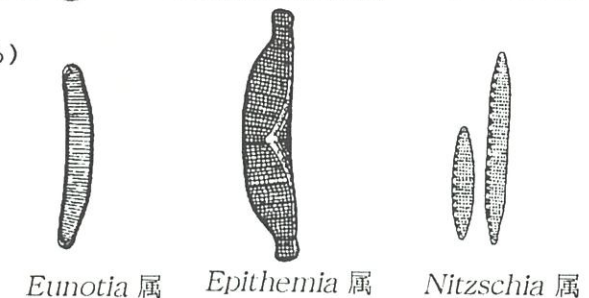


図1 珪藻分類の基本

淡水生・汽水生珪藻における属レベルの分類の基本を示した。鹿島・沢井(印刷中)を改変。

Fig.1 The principle of genus classifications of freshwater and brackish water diatoms.

堆積物の縞状構造と珪藻遺骸 — 高精度古環境解析のための試み —

日本各地の湖沼・浅海堆積物から、層厚数 mm の縞状の堆積構造が認められることが知られている。これは季節変動にともなう年周期ラミナである

とされる場合が多かったが、その詳しい検討がされないまま、これまでは細かなラミナ状のものと見えると成因をあまり重視せず、すぐに年周期としてきたように思える。

近年、これらのラミナの多くが、ラミナの形成と珪藻の関わりの多いもの(珪藻ラミナと呼ぶ)であ

ることが確認された（例えば、福沢 1995）。この珪藻ラミナは、汽水湖沼型（浜名湖など）と淡水湖沼型（水月湖など）の二つに二分されることを明らかにした。また、年周期のほか太陽の黒点周期に対応するような数年～10 年規模の変動が浜名湖で確認されている。

汽水湖沼型ラミナは、湖水の塩分成層と関連しており、海水の流入の少ないため、湖水の循環が悪く、湖の深部に無酸素状態の塩水が溜まるときに形成される。この時は、湖底表面での生物攪乱が減少し、堆積物が未攪乱のまま残されることが期待される（斉藤, 1988）。また、珪藻からみると、海水の流入が少ない汽水湖沼（低鹹汽水湖沼、塩分 10 パーミル以下、例としては宍道湖）では、*Cyclotella caspia* がほぼ一種、優占する様になり、この *Cyclotella caspia* は春先に湖水の色が変わるほど大発生する特徴があるので、この周期が堆積物に残される。実際、ラミナをはぐようにして分析をすすめると、*Cyclotella caspia* の季節による消長を確認することができた（鹿島 1993）。

一方、水月湖などからは、淡水環境において形成されたラミナが発見されている。淡水湖沼では、通常では年に 2 回湖水が強制的に循環されるので、無酸素層の形成がなされず、ラミナを形成することは不可能であるが、寒冷地域の場合は、湖水の循環がなくなるので、ラミナ形成が可能となると予想された。同様の淡水ラミナは現在の湖沼堆積物のほか、塩原湖成層などで見つかっているが、優先する珪藻種の組み合わせが異なっており、さらなる検討が必要である。

古環境の定量的復元

— Transfer Function 法による珪藻化石を用いた古環境の定量的復元 —

地層中に含まれる化石群集の変化から、古環境を定量的に復元することは、古環境研究の最終的な目標のひとつと言えよう。しかし、古環境復元の基礎となる現生群集と環境との対応が複雑なため、その定量化には多くの問題点が残されてきた。近年、国際珪藻学会などで Transfer Function 法による定量的な古環境復元に関する研究発表がなされるようになった。

カナダの Queens 大学の Smol らのグループは、以下の方法により、湖沼の pH 変動の復元を Diatom Based Transfer Function 法によって行った。以下その概略をまとめる。

a) 対象の湖沼群において、それぞれ、そのほぼ中央で湖底表層堆積物を不攪乱のまま採取する。そし

て、表層 0.5～1cm の試料を集め、この中に含まれる珪藻遺骸群集を明らかにする。この場合、この遺骸群集は最近 2～3 年に湖沼で発生した珪藻群集の平均を示しているものとする。また、あわせて水質の測定も行う。

b) 産出した主要分類群ごとに、出現頻度加重平均法により、それぞれの平均 pH 値と偏差を計算する。

c) 次に、古環境を復元したい湖沼において、ボーリングコア試料を採取する。そして、コア試料中に含まれる化石珪藻群集の変化を明らかにする。

d) 産出した主要分類群ごとに、その出現頻度と b で求めた平均 pH 値を掛け合わせ、珪藻群集の構成から推定される pH を計算する。上記の方法については、現生群集の代表として表層堆積物中の遺骸群集を用いていること、出現頻度加重平均法をもって平均を計算していること、サンプルのかたよりとその補正方法など、いくつかの疑問が出されているが、珪藻群集から計算された値と実測値との相関が極めてよいこと、ボーリングコア解析の結果、他の指標や過去の観測の結果と極めて調和的な、信頼性が高い結果が得られたことから、pH 以外の環境要素の復元にも用いられるようになった。

1991～1992 年にかけて、トルコで行われた海外学術調査において、トルコ中部～西部の淡水・塩性湖沼において珪藻試料のサンプリングを行った（鹿島・松原 1995 ほか）。これで得られた現生珪藻群集構成と水質データから、塩分と珪藻群集に関する Transfer Function を計算した。そして、それをトウズ湖で得られたボーリングコア試料の解析に応用し、古塩分の変動を復元した。基となる現生珪藻と水質に関するデータが少ないこと（68 試料）など、まだ多くの問題点が残されているが、珪藻群集から求められた値と実測値との相関がよいことなど、今後、本方法を多方面に応用することについての可能性を示している。

この方法による汽水環境下における古塩分復元は、まだ試験的なものの提示に留まっている。

珪藻分析に関するデータベースの整備

上述のような定量的な古環境復元のためには、多くの現生および化石試料中の珪藻遺骸群集のデータベース化を行う必要がある。しかし、これにはデータの均質化を保つための多くの問題点が残されている。例えば分類群の統一だけでも多くのステップが必要である。特に現生試料の場合は、試料の採取方法・水質データ等の測定方法がその試料の価値を左右するために、その統一も大きな課題となる。

国際珪藻シンポジウムにおいても、上記のような

データベース作成の提案が、北米やヨーロッパ地域からなされているが、データの均質化（特に種名、分類基準の特定）がネックとなり、まとまった形でのデータベース化はまだなされていない。

汽水域における珪藻の生態についての研究は、他の地域に比べて最も研究が進んでおり、日本を中心とした、汽水湖沼、塩性湿原などにおけるデータベース化を始める予定である。

ま と め

1996 年 9 月東京において国際珪藻学シンポジウムが開催され、日本の珪藻研究のレベルが世界的にみてもトップクラスであることが実証された。しかしその直前に国際珪藻学会副会長だった小林 弘氏が急逝されたことをはじめとして、日本における研究をリードしてきた小杉正人氏、安藤一男氏がここ数年の内に若くして亡くなられたこともあり、研究の後継者の育成に危機感がいだかれるようになって

いる。本稿では、これから珪藻の研究を始める学生や若手研究者を念頭に、最近すすめられている研究の動向をまとめ、さらに今後の研究方向について議論した。これが、一人でも多くの方が珪藻分析に興味を持ち、さらに自らの手で分析を行うための手がかりとなることを希望している。なお本稿は、1997 年 10 月開催された汽水域総研シンポジウムにおける講演要旨を基に、加筆修正を加えたものである。

文 献

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**: 73-73。
福沢仁之（1995）天然の「時計」・「環境変動検出計」としての湖沼の年縞堆積物。第四紀研究, **33**: 135-149。

Hustedt, F. (1930) *Bacillariophyceae (Diatomeae)*. S wasser-flora Mitteleuropa (Pascher, A. ed.) Heft 10, Gustav Fischer Verlag, Jena.

Hustedt, F. (1930-1966) *Die Kieselalgen*, Teil 1~3, L. Rabenhorst's Kryptogamen-flora Band VII.

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, **59A**: 383-403。

鹿島 薫（1992）沖積層から得られた珪藻化石カタログ（その 1）北海道常呂平野。九州大学教養部地学研究報告, **29**: 1-36。

鹿島 薫（1993）汽水湖沼における現生および化石珪藻群集。地質学論集, **39**: 7-14。

鹿島 薫・沢井祐紀（印刷中）珪藻分析による古環境の復元。環境考古学ハンドブック（安田喜憲 編著），朝倉書店。

鹿島 薫・松原 久（1995）珪藻分析によるトルコ中西部の内陸湖沼の塩分変動の復元 アナトリア考古学研究 **4**: 135-142

小杉正人（1988）珪藻の環境指標種群の設定と古環境復元への応用。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, **62A**: 359--374。

Krammer, K. & Lange-Bertalot, H. (1986-1991) *Bacillariophyceae* 1~4 Teil. S wasserflora von Mitteleuropa (Ettl, H. et al. ed.) Band2/1~2/4, Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, Jena.

太平明夫（1995）完新世におけるサロベツ原野の泥炭地形成と古環境変遷。地理学評論, **68A**: 695-712。

Round, F.E., Crawford, R.M. & Mann, D.G.(1990) *the diatoms, biology & morphology of the genera*. Cambridge University Press, p.747, Cambridge.

斉藤文紀（1988）海水準上昇期における浜名湖の堆積環境—完新世海岸砂州の復元上の問題点—。細屑性堆積物の研究, **5**: 109-132。

沢井祐紀・鹿島 薫（1996）珪藻遺骸群集からみた北海道厚岸地方における完新世後半の相対的海水準変動と古環境の復元。化石, **61**: 21-31。