

原著論文

珪藻化石の解析から古環境の変動を復元する理科教材の開発

高橋和成

Analysis of fossil diatoms as a material in high school science
education on paleoenvironmental changes

Kazunari TAKAHASHI

Abstract: Facies of fossil diatoms deposited in the Late Pleistocene diatomite in Hiruzen-bara, Okayama Prefecture, provide an indispensable sample for high school science education on paleoenvironmental change. The change of annual lamina width significantly aligned with the change of dark-colored thick lamina width ($r = 0.968$, $p < 0.01$). The diameter of big disciform diatoms (over ca. $75 \mu\text{m}$ of diameter, *Stephanodiscus* sp.) breeding in thick lamina rhythmically increased corresponding with the passage of varve years ($r = 0.593$, $p < 0.01$). The change in the diatom size led us to convince the students that there was a climatic change (cooling down) in the Late Pleistocene glacial epoch. Simple microscopic observation provides a means of revealing how the environmental change affected proliferation of diatoms. By observing the big disciform diatoms among the fossil diatoms in facies covering a series of fifty varves, we can promote high school students' scientific learning on environmental changes on earth.

Key words: big disciform shape diatom, fossil diatom, environmental change, science education

I. はじめに

今日の地球温暖化は危急で重大な問題として科学的にも社会的にも重大な課題となっている。理科教育においても、実際に観測された温暖化の事例がグラフなどの資料とともに教科書に記載されている(太田ほか 2007, 本川ほか 2008)。しかし、地球の気候変動は、過去にも温暖化や寒冷化が繰り返して起こってきたこともあり、今日の気候変動が高校生達に十分に理解されているわけではない。彼らは、今日の温暖化が人類の生存に影響する重大問題としてではなく、単に知識として知っているに過ぎないと思われる。気候変動への理解を深めるためには、気候変動に関する具体的な理科実験教材が必要であろう。本研究は、すでに知られている古環境の気候変動の復元を通して、気候変動への理解を深めるための教

材開発を行った。

岡山県真庭市八束の蒜山原(標高約500m)では、古蒜山原湖で更新世中-後期に堆積したと推定される湖成層の珪藻土が縞状堆積物として産する(<http://homepage2.nifty.com/showachem-lab/sub3.htm>)。その特徴は、有機物や粘土などの不純物が少なくほとんど珪藻だけで構成され、水平堆積層の年縞は肉眼で識別できる層厚を持っている。これは、過去の環境変動を読み取るには非常に優れた試料で、蒜山原珪藻土層を利用した珪藻分析や花粉分析から、古環境の復元がなされてきている(蒜山原団体研究グループ 1975a, 1975b, 広田 1975, 大西 1977)。

珪酸を成分とする珪藻の被殻は分解されにくい。ため、遺骸が湖底や海底に沈積すると珪藻土となる。安藤(1990)は、堆積速度が大きい湖成堆積物は

1. 岡山理科大学附属中学校, 〒700-0005 岡山市北区理大町 1-1 Okayama University of Science Junior High School, 1-1 Ridai-cho, North district, Okayama city, Okayama 700-0005, Japan. E-mail:kumakusu03@yahoo.co.jp

1年ごとに年縞と呼ばれるはっきりとした縞模様を残すことから、それに記録された古環境を復元している。また、石原・宮田(1999)は、湖成層の珪藻土層に記録された環境情報は地球規模の気候変動にもリンクした記録であるとしている。一般に、湖成層の珪藻土堆積層は海成層よりも環境変動に対して敏感であるため、過去の環境変動がより正確に記録されている。

地質学や古生態学では、珪藻分析による古環境の推定や復元に関する研究が多く見られる。こうした研究成果は、高校教育の理科総合Bや生物Ⅱにおける「進化」や「環境」の学習で、資料や実験教材として有用である。しかし、これらの研究報告は珪藻の分類学的能力や精巧な研究技術に基づいた調査研究であるため、素人が古環境の変動を容易に知ることができるとは認識されてこなかった。従来から、珪藻化石の観察は教材利用されてはいる。しかし、古環境の復元をねらいとした教材開発にまでは至っていない。本研究では、古環境の変動を復元する新たな理科教材として、珪藻土中の珪藻化石の簡便な観察と解析から古環境復元に取り組んだ。蒜山原珪藻土では、寒冷種とされている*Stephanodiscus* sp.の大型化が環境傾度の一つにあげられている(蒜山原団体研究グループ 1975b)。この大型珪藻は完全形を保持し生物顕微鏡でも観察しやすい。そこで、気候変動の環境指標種として着眼し、珪藻群集における相対頻度の変動や個体サイズの変動の分析から教材利用を検討した。

II. 材料と方法

1. 蒜山原層の珪藻土

岡山県蒜山原(岡山県真庭市八束)には、約50万年前以降に灌水したとされる古蒜山原湖があり、更新世中後期の亜間氷期に大繁殖した珪藻遺骸の堆積物として産出する(蒜山原団体研究グループ 1975b)。現在、その珪藻堆積物は昭和化学工業の岡山鉱床として露天掘りで採掘が進んでいる(図1)。この鉱床は、全国の珪藻土鉱床の中では最も不純物が少ないことで知られ、全層厚は60 m位と推定されている。

本研究では、昭和化学工業から許可を得て堆積層の中層に当たる堆積層で試料を採取した(地上から約40 mの深さ)。鉛直方向におよそ縦30 cm×横20 cm×幅20 cmのブロックの大きさを採掘し、ポリエチレンの袋に入れて実験室に持ち帰り、顕微鏡観察した。

2. 層位と珪藻化石の観察

珪藻土の堆積層(年縞)はデジタルカメラで写真撮影した。拡大してプリントアウトした写真上で、年縞の年ごとの層厚とそれを構成する暗色と淡色の一組のラミナの厚さを計測した。化石珪藻は、先端を削って平たくした爪楊枝でラミナからかきとった。それをスライドガラス上で洗剤液の一滴に浮遊させ、カバーガラスをかけてプレパラート標本とした。顕微鏡観察は、600倍で観察し、珪藻が分散した視野で、完全形の珪藻被殻を観察した。一枚のラミナの観察では、100個以上の珪藻を観察し、異なる形状の珪藻をそれぞれ計数した。珪藻はその形状から円盤状大型、円盤状小型、紡錘状、棒状の4タイプに類別した。各珪藻の相対頻度は、観察総数を母数



図1. 岡山県真庭市蒜山原層。A: 珪藻土露天掘り(昭和化学工業)、B: 中層にある珪藻土層。

として算出した当該珪藻の割合として求めた。

各層位中の完全形の円盤状大型珪藻と円盤状小型珪藻で、それらの個体直径をマイクロメータで計測した。顕微鏡の600倍の視野中で円盤状珪藻を無作為に500個以上計測し、その度数分布と平均値(M)標準偏差(SD)、変動係数($CV=SD/M$)を求めた。大型珪藻(直径 $75\mu m$ 以上)の層位ごとの直径は、顕微鏡の視野中で大きいものから20個体を計測し、それらの平均値を連続した50層位で求めた。小型珪藻(直径 $50\mu m$ 以下)でも同様の方法で直径の平均値を求めた。暗色ラミナで調べた大型珪藻の年縞ごとの相対頻度や個体直径の変動は、50年縞における時系列変化として解析した。それぞれの時系列順位との相関係数はコンピュータソフトSSRIエクセル統計2004を利用して求めた。また、時系列における移動平均は3区間平均してグラフ化した。

珪藻化石の微細構造は、走査電子顕微鏡(日本電子JSM-5410 CL)により観察した。真鍮製の試料台にカーボン粘着シートを貼り付け、十分に自然乾燥した試料を付着させた。サンプルに導電性を持たせるために、スパッタリング装置(日本電子製JUC-5000)で試料表面に白金を蒸着した。珪藻の種名は、走査電顕写真と従来の研究(広田 1975, 山岸 1998)を参照し、その被殻形態から、大型円盤状珪藻は*Stephanodiscus* sp., 小型円盤状珪藻は*Cyclotella comata* (Ehr.) Ralfsとした。

III. 結果

1. 年縞の変動

珪藻土は幅1~2mmの縞状のラミナが規則正しく重なり合って構成され、ラミナには暗色層と淡色層が見られた。それらが一組で年縞となり、連続した規則的なパターンを形成した(図2A)。年縞の平均値と標準偏差は 2.3 ± 1.3 mmであった。珪藻土堆積層の約18 cm厚で、年縞の連続した81層の層序幅の変動を計測した(図3)。層序幅は、数年から十数年の周期的な変動をしたが、層位の時系列変化との間に有意な相関関係は見られなかった(表1)。つまり、年縞の厚さの変動は珪藻の生産量の変動を表わしていた

が、層厚の計測からは一定方向の環境変動は検出されなかった。

暗色ラミナ幅は平均1.6 mm, 淡色ラミナ幅は平均0.4 mmで、暗色ラミナは淡色ラミナよりも層厚であった。暗色ラミナは、年縞幅の大きい層序で肥厚する傾向があり、暗色ラミナ幅と年縞幅の変動は有意な相関関係を示した(図4, 相関係数 $r=0.968$, $p<0.01$)。実体顕微鏡観察(60倍)からは、淡色ラミナでより大きな顆粒(図2B)が、暗色ラミナで小さな顆粒が観察された(図2C)。ラミナを構成する珪藻の特

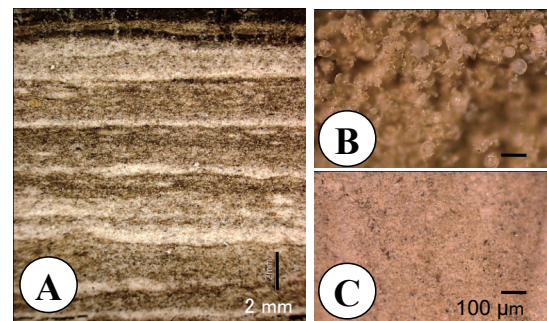


図2. A: 層序の葉理, B: 実体顕微鏡で観察した淡色ラミナの大型珪藻, C: 暗色ラミナの小型珪藻。

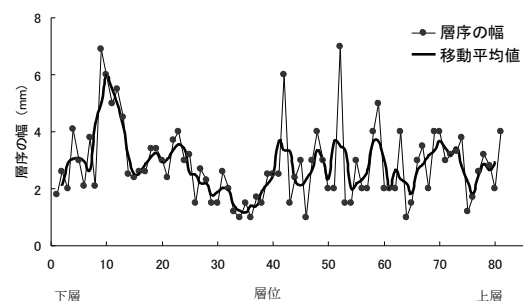


図3. 珪藻土の層位と層序幅の変動。移動平均は3区間平均値を示す。

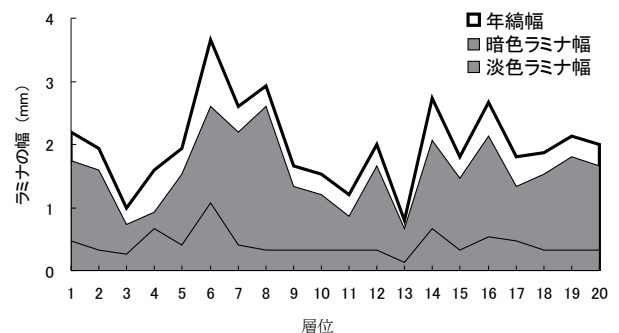


図4. 珪藻土の層序と年縞幅, 暗色ラミナ幅, 淡色ラミナ幅の変動。年縞幅の変動と暗色ラミナ幅の変動には有意な相関がある($r=0.968$, $p<0.01$)。

徴は実体顕微鏡でも観察可能で、ラミナの明暗は沈積した珪藻の大きさと関係があった。

2. 暗色と淡色のラミナの珪藻群集

珪藻土中での珪殻の保存状態は良好で透明度も高いので、光学顕微鏡でも微細構造が明瞭であった。暗色ラミナは、主として円盤状小型と円盤状大型の珪藻で占められ(図5A), その他に紡錘状や棒状の珪藻が1%程度で見られた(図5C, D)。淡色ラミナでは、円盤状大型珪藻が多くなった(図5B)。円盤状の大型珪藻は直径が45-110 μm で、小型珪藻は直径が10-30 μm の範囲であった(図5E)。これらの珪藻の個体直径の度数分布を暗色と淡色のラミナで調べると、直径の分布に違いがあった(図6)。暗色ラミナでは円盤状珪藻の大きさは直径と標準偏差で $34.8 \pm 27 \mu\text{m}$, 淡色ラミナでは $55.5 \pm 31.3 \mu\text{m}$ であった。淡色ラミナでは珪藻直径が大きく、変動係数の値が低くなった。全体に淡色ラミナは、暗色ラミナの珪藻群集よりも大型珪藻で構成されていた。

珪藻の大きさを直径75 μm 以上(大型)と直径50 μm 以下(小型)のグループに識別し、暗色と淡色ラミナにおける珪藻個体の相対頻度(珪藻個体数/総観察個体数 $\times 100$)を求めた(図7)。年稿中の暗色ラミナでは小型珪藻が65~97%を占めた。一方、淡色ラミナでは小型珪藻が減少し、大型珪藻が25~45%の頻度を占めてきた。小型珪藻は両方のラミナで優占したが、淡色ラミナでは大型珪藻の増加がくり返された。淡色ラミナは、寒冷種である大型珪藻が増加することから、冬季の環境を指標していた。つまり年稿の季節変動は大型珪藻の相対頻度の変動で推定された。

大型珪藻の相対頻度を年稿の50層序の暗色ラミナで調べると、その割合は5~49%の範囲で変動し、数年から10年にわたる周期的な変化が認められた(図8A)。しかし、大型珪藻の相対頻度の変動は、層位の時系列と有意な相関を示さなかった(表1)。大型珪藻の相対頻度は、一定方向の環境変動を示さなかったことから、環境傾度の指標にはならないと考えた。

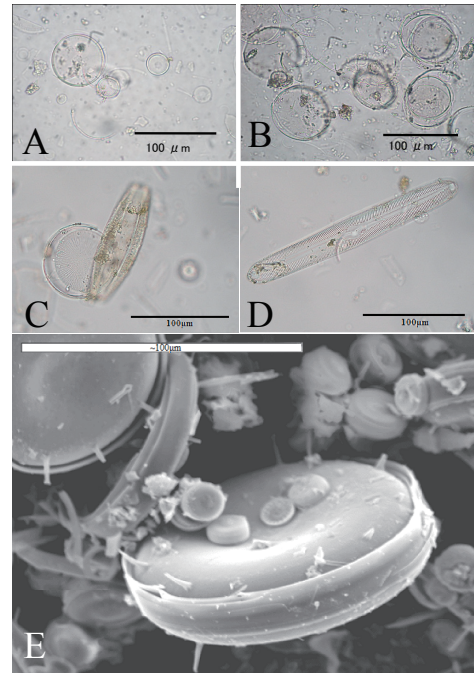


図5. 珪藻土中の化石珪藻の類別. A: 暗色ラミナの珪藻, B: 淡色ラミナの珪藻, C: 紡錘状の珪藻, D: 棒状の珪藻, E: 電子顕微鏡観察した円盤状の大型珪藻と小型珪藻. 被殻形態から、円盤状大型珪藻は*Stephanodiscus* sp., 円盤状小型珪藻は*Cyclotella comata*とした。

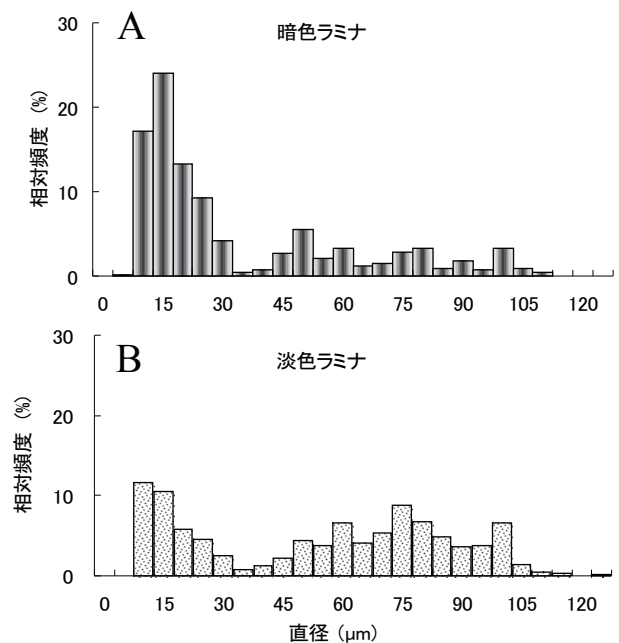


図6. 年稿中の暗色ラミナと淡色ラミナ中の円盤状珪藻の大きさの分布. A: 暗色ラミナ N=520, 平均値と標準偏差は $34.8 \pm 27 \mu\text{m}$, 変動係数0.78, B: 淡色ラミナ N=526, 平均値と標準偏差は $55.5 \pm 31.3 \mu\text{m}$, 変動係数0.56.

3. 大型珪藻の個体サイズの変動

連続した50年稿における円盤状大型珪藻個体の直径の変動を、移動平均グラフにより示した(図8B)。直径は、数年から十数年の周期で変動し、その振幅には大きい期間と小さい期間が見られた。全体として緩やかな大型化傾向があり、大型珪藻の大きさは、層位の時系列に対して有意な相関関係を示した(表1 $r=0.593$, $p<0.01$)。つまり、大型珪藻の大きさの計測により、堆積層の下層から上層へ一定方向に推移した環境変動が検出された。大型化の傾向は直線回帰式の推定によって当初の直径 $76\mu\text{m}$ から50年稿後には約 $98.5\mu\text{m}$ に肥大した。一方、小型珪藻では30年稿の計測から平均直径と標準偏差は $19.5\pm 1.7\mu\text{m}$ で、変動係数 0.087 であった。小型珪藻の直径は年稿毎に小刻みに振幅したが、時系列との間には有意な相関関係は見られなかった。

IV. 考察

1. 環境指標種としての円盤状大型珪藻

現在、珪藻は世界の熱帯から極地まで、海洋や淡水性湖沼に広く分布し、化石種を含めて2万種が知られている(千原編 2000)。珪藻は単細胞性の藻類で、その細胞は主にケイ酸質でできた被殻で被われ、上下2個の半被殻で構成される。分類は、黄藻植物門珪藻綱に属し、殻面から見て細胞が丸く見える中心珪藻と、線対称性をもつ羽状珪藻からなる。珪藻のケイ酸質は分解されにくいいため、太古に繁殖した珪藻類の被殻が化石として産出する。日本の主な珪藻土鉱床は北海道、石川県、岡山県、大分県、鹿児島県などにあり(<http://www.isolite.co.jp/ja/wall-style/place.html>)、淡水成珪藻土と海水成珪藻土がある。淡水成珪藻土は、軟質で珪殻の保存性が高く、完全形の珪藻化石が多く観察される。また、淡水成珪藻土では、鉱床ごとに分布する珪藻の優占種や随伴種が異なり、固有の種組成を示す。本研究では、岡山県蒜山原にある、氷河時代の更新世前期に蒜山火山、後期に大山火山の活動に伴い堰き止められた古蒜山原湖に沈積した淡水成珪藻土を試料とした。特に、大型の中心珪藻の化石が豊富に含まれている

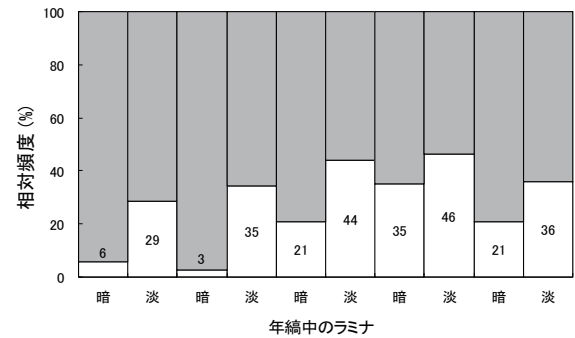


図7. 明暗ラミナにおける大型珪藻と小型珪藻の相対頻度の変動。横軸は連続した暗色ラミナと淡色ラミナを示す。大型珪藻(直径 $75\mu\text{m}$ 以上)の相対頻度は淡色ラミナで高くなる。

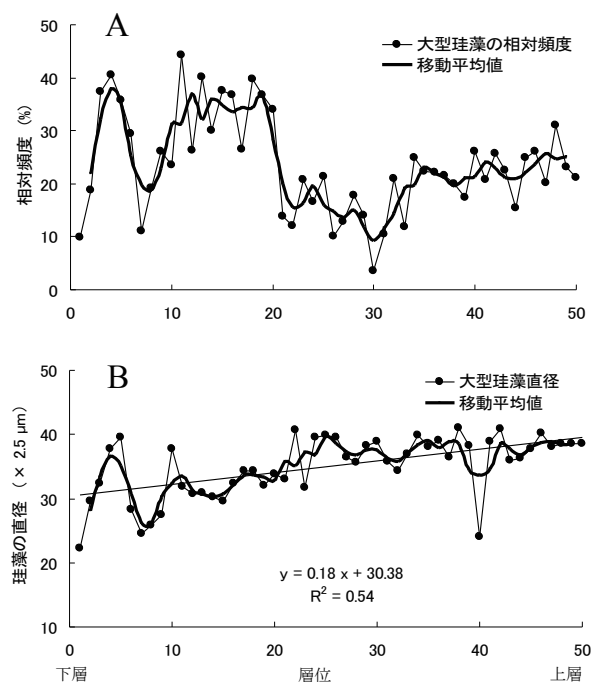


図8. 珪藻土層序における円盤状大型珪藻の相対頻度(A)および直径(B)の変動。層序順位と直径には有意な正の相関がある($r=0.593$, $p<0.01$)。

表1. 珪藻土の50層位の時系列順位と層序幅、大型珪藻の相対頻度、直径、小型珪藻の直径の相関関係(有意差 $**p<0.01$)。aは30層位の変動で相関関係を調べた。

時系列での調査形質	相関係数
層序幅 ^a	-0.313
大型珪藻の相対頻度 (%) ^a	-0.288
大型珪藻の直径 ^a	0.593 ^{**}
小型珪藻の直径 ^b	-0.369

^a50年稿の変動, ^b30年稿の変動における相関係数を示す

ために、光学顕微鏡でも観察が容易であった。従来の研究では、十数メートルの年縞の分析から、円盤状大型珪藻の *Stephanodiscus niagarae* Ehr. の大型化が報告されている(蒜山原団体研究グループ 1975b)。本研究では、堆積層の中層から採掘したわずか30 cm厚の堆積層からでも古環境の変動が復元された。つまり、大型珪藻 *Stephanodiscus* sp. は示相化石として有効で、その大きさが環境変動の高い指標機能を有することが判明した。

古蒜山原湖の周辺の植生は、花粉分析からブナやコメツガからなる森林で構成されていた(蒜山原団体研究グループ 1975a)。古蒜山原湖の珪藻土堆積中は、温暖気候から冷温気候を経て寒冷気候に変化したとされている。当時の珪藻の沈積による湖盆の埋積は、ほとんど粘土や有機物などの夾雑物を含んでいないことから、周辺の山野の環境が安定した植生で被われていたことが推定されている。堆積層の1 cmが5年とすると、60 mの深度をもつ層厚は3万年間に相当し、急速に大量な沈積があったことになる。本研究では、この珪藻土の中層を利用したが、ほとんど珪殻だけで構成されているため、試料を無処理で観察することができた。これは、高校理科の実験材料として容易に観察できる有用な試料である。

2. 季節変動

年縞は淡色と暗色のラミナからなり、大型珪藻の相対頻度は暗色ラミナよりも淡色ラミナで高くなっていた。ラミナの明暗は、優占する珪藻が季節的に異なることによる群集構造の違いを反映していた。三好(1989)は、円盤状大型珪藻の *Stephanodiscus* は冬季に、円盤状小型珪藻の *Cyclotella* は夏季によく繁殖するとしている。実際、堆積層の厚い暗色ラミナには小型珪藻が高密度で観察された。

珪藻は無性生殖では2分裂により増殖する。しかし、ガラス質の酸化ケイ素からなる硬い被殻は細胞周期の中で伸長成長することはない。そこで、無性生殖の繰り返しの結果では、被殻は最大長の1/2～1/3まで縮小するという(千原編 2000)。つまり、2分裂によって活発に増殖する時期には、小型の珪藻

が多くなる傾向がある。水温が上昇して細胞分裂が活発に行われる夏季の個体は冬季の個体と比較して細胞が小さいと推定される。円盤状大型珪藻は、どちらのラミナでも産出したが、その大きさは暗色ラミナでは淡色ラミナよりも小型の個体が多くなった。そこで、暗色ラミナは細胞分裂速度の速い夏季に形成されたといえる。暗色ラミナは淡色ラミナよりも厚く、これらの規則的なラミナ配列は夏季と冬季の季節変動を表すといえる。

3. 環境変動の指標

巖佐(1976)は、珪藻の種類や量による珪藻分析から、水質や気候が推定できるという。珪藻は、種ごとに淡水域から海水域の中の様々な水域と生態環境に適応して分布している。珪藻による環境指標として、海水域から河川への塩分濃度に対応した種群が設定され、応用されている(小杉 1988, 安藤 1990)。水質においては、富栄養化に伴った珪藻群集の種組成や生育量の変動が知られている(<http://www.paleolabo.jp/keisou.html>)。また、水温の違いや季節によっても珪藻の生育種が異なるという(Katoh 1991)。一方、化石珪藻においては、過去の地球環境を推定する示相化石として、古代に限らず数世紀以前の環境の推定にも利用されている(鹿島 1993)。

大西(1977, 1990)は、蒜山原の珪藻土に含まれる花粉分析や植物遺体の調査から、湖沼周辺の森林はブナからシラビソの森林へ推移したとしている。シラビソは、亜高山帯針葉樹林の構成樹種であるため、古代の気候は寒冷化したと推定されている。古蒜山原湖で珪藻土が沈積した時代は氷河時代であり、寒冷化が進んでいた。本研究の試料でも、珪藻群集における珪藻の大型化から、氷河時代の寒冷化が検証された。本研究の解析には、観察しやすい円盤状大型珪藻に着眼し、その相対頻度の変動と個体サイズの変化を環境変動の指標として利用した。それにより、珪藻の分類に精通していなくとも、気候変動を簡便に検証することができた。特に、円盤状大型珪藻の *Stephanodiscus* sp. の大きさは環境変動の傾度分析の検出計として有用であった。

石原・宮田(1999)は、約8000年の連続記録から層序を解析し、古環境の時系列変化と周期性を明らかにした。それによると11年～22年、35年および100年などの周期成分が層序に含まれていることを報告し、その周期的変動の原因として、湖沼の水質の変動や太陽の周期的な活動の影響をあげている。本研究では、わずか30年～80年における観察から古環境の変動を推定し、周期的な変動と寒冷化を確認した。本研究の簡便な方法でも、従来の精緻な研究による実証結果に合致した。このことから、簡便法による気候変動復元教材が蒜山原の珪藻土の利用によって可能になると考える。

4. 理科教材としての価値

珪藻は水質や水の汚れの環境指標(Labo et al. 1995, 小林・真山 1981)になるため、河川流域の環境指標に利用されているだけでなく、中学・高等学校の理科教材や環境教育教材としての開発が進んでいる(加藤・武内 1991, 加藤ほか 2004)。一方、珪藻化石の観察では、富山県総合教育センターでの紹介(<http://rika.el.tym.ed.jp/cms/57305b66/>)がある。しかし、珪藻を示相化石として古環境の変動を復元するといった教材の開発までは至っていない。それは、適切な観察試料の選定や環境指標種の探索およびその特定がなされず、試料の取り扱いや解析方法などが確立されていないためと考えられる。

本研究では、珪藻遺骸の葉状堆積層の中の化石珪藻を観察し、円盤状大型珪藻のもつ環境指標機能を明らかにした。それは、豊富な知識と経験を必要とする珪藻分類や群集解析によらなくとも、古環境の変動を復元することを可能にした。これは、蒜山原珪藻土の特性を生かした新たな理科教材としての有用性を表している。今まで、簡便な実験観察を通して環境変動を推定するという理科教材が開発されていなかった背景から、蒜山原珪藻土堆積の中層の教材的な価値は大きいと考える。本研究により、古環境の変動を解析する利便性の高い理科教材が発見された。今後は、深層から上層までの異なる層位での解析やより厚い層序での長期間にわたる円盤状

珪藻の個体サイズの変動を追跡することが課題と考える。

V. 謝辞

昭和化学工業様には、本研究のための珪藻土試料をご提供していただき、理科教育へのご理解とご協力に対し深く感謝します。岡山理科大学オープンリサーチセンターの西戸裕嗣教授は、岡山県蒜山原層の珪藻土の現地説明と化石珪藻の電子顕微鏡観察のご指導、さらに文献資料をご提供して下さいました。ここに紙上をお借りして厚く御礼申します。さらに、岡山理科大学附属高校の相馬美貴子先生からの研究補助に対して深く感謝します。

摘要

1. 岡山県蒜山原層の珪藻土の年縞堆積物は、約2 mm幅からなる淡色と暗色のラミナの一組からなり、珪藻群集は主に円盤状の小型珪藻と大型珪藻で構成されていた。本研究では、堆積層の中層から採掘した層序で、大型珪藻化石(直径約75 μ m以上, *Stephanodiscus* sp.)に着目して古環境の変動を推定した。

2. 年縞幅の変動は、暗色ラミナ幅の変動と同調した(相関係数 $r=0.968$, $p<0.01$)。50年縞の時系列に従った観察では、大型珪藻の暗色ラミナ中での相対頻度からは一定の変動傾向は検出できなかった。しかし、個体直径の変動からは大型化する一定の傾向が検出された(相関係数 $r=0.593$, $p<0.01$)。

3. 円盤状大型珪藻の大きさの変動に着目した環境傾度分析により、50年縞の短期間の解析からでも、従来の研究結果と一致する古環境の寒冷化の傾向が検証された。これは、珪藻分類の知識や特別な観察実験技能を必要とせず、無処理の珪藻土で珪藻の直径を計測するという簡便な分析方法から得られた結果であるため、高校理科教育の進化や環境の学習、あるいは課題研究にとって新たな教材として利用できる。岡山県蒜山原層の珪藻土の中層は、気候変動を推定する理科教材として利用価値の高い試料である。

引用文献

- 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 : 73-88.
- 千原光雄編(2000). 藻類の多様性と系統. pp207-214. 裳華房. 東京.
- 蒜山原団体研究グループ(1975a). 岡山県蒜山原の第4系(1). 地球科学29 : 153-160.
- 蒜山原団体研究グループ(1975b). 岡山県蒜山原の第4系(2). 地球科学29 : 227-237.
- 広田昌昭(1975). 岡山県蒜山原層の化石珪藻について. 地球科学29 : 253-261.
- 石原与四郎・宮田雄一郎(1999). 中期更新統蒜山原層(岡山県)の湖成縞状珪藻土層に見られる周期変動. 地学雑誌105 : 461-472.
- 巖佐耕三(1976). 珪藻の生物学. 東京大学出版会. pp140.
- 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.
- Katoh, K (1991). Spatial and temporal variation of diatom assemblages composition in a partly polluted river. Jap. J. Limnol. 52: 229-239.
- 加藤和宏・武内和彦(1991). 河川環境管理のための生物群集分析に関する研究. 造園雑誌54 : 281-286.
- 加藤和宏・真山茂樹・大森 宏・清野聡子(2004). 日本教育工学会論文誌28 : 217-226.
- 小林 弘・真山茂樹(1981). 強腐水域でのケイ藻による水質判定法の検討. 用水と排水23 : 1190-1198.
- 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.
- Lobo, E. A., K. Katoh, and Y. Aruga (1995). Epilithic diatom assemblages response to water pollution in rivers located in the Tokyo Metropolitan area, Japan. Freshwater Biol. 34: 191-204.
- 三好教夫(1989). 化石珪藻の観察. 蒜山生物学実習資料11 : 9-23.
- 本川達雄・谷本英一ほか18名(2008). 高等学校改訂版生物Ⅱ. 啓林館. pp279.
- 太田次郎・山崎和夫ほか22名(2007). 高等学校理科総合B. 啓林館. pp140.
- 大西郁夫(1977). 岡山県蒜山原層の花粉化石. 第四紀研究16 : 83-86.
- 大西郁夫(1990). 日本海西部沿岸地域の更新世中期以降の植生変化. 第四紀研究29 : 223-234.
- 酒井治孝(2003). 地球学入門 惑星地球と大気・海洋システム. 東海大学出版会. pp284.
- 上山 敏・小林 弘(1986). 高校生物のためのケイソウによる水質判定についてのドライラボ. 東京学芸大学紀要. 4 部門38 : 55-77.
- 山岸高旺(1998). 淡水藻類写真集ガイドブック. 内田老鶴圃. pp132.

(2010年7月28日受理)