

古気候指標としての湖沼堆積物中の全有機炭素・ 全窒素含有率の有効性

公文 富士夫*



湖沼堆積物中の全有機炭素 (TOC)・全窒素 (TN) 含有率に関連する最近の研究を概観した。TOC および TN には、湖水中で自生するものと、陸上から運び込まれる外来性のものがあり、通常の調和型湖沼では前者を起源とするものが優占する。木崎湖における最近の研究では、1983 年から 1999 年にかけての湖底堆積物中の TOC 含有率は、同じ期間の湖水中の年間クロロフィル a 量および冬の平均気温 (12 月～翌 3 月の平均) との間により相関があることが認められた。このことは、気温が湖水中の生物生産性に影響を与えることを通じて、湖沼堆積物中への有機物流入を支配していることを意味する。野尻湖底堆積物のコア試料中の TOC と TN の含有率および C/N の変動を過去 4.5 万年間にわたって解析したところ、グリーンランドの氷床コアにおける酸素同位体変動が示す寒暖変動とよく一致する結果を得た。野尻湖の堆積物コアについての最近の研究では、TOC や TN の増減が気候に支配された花粉組成の変化と対応することも示されている。これらの事実は、湖沼堆積物中の TOC や TN の含有率が、気候変動の指標として有効であることを示している。

キーワード：有機炭素含有率、気候変動、野尻湖、生物生産性、湖沼堆積物

I. はじめに

湖沼堆積物中の有機炭素 (TOC) や全窒素 (TN) の含有率は、湖沼における生物生産性の指標の一つとして、しばしば測定されてきた。また、両者の比 (C/N 比) が陸域由来の有機物の指標となることも指摘され、古環境解析の指標として利用されてきた (中井ほか, 1982; Ariztegui *et al.*, 1996; Sampei *et al.*, 1997; 石渡ほか, 1999)。気温変動の指標として湖沼堆積物中の有機炭素含有率を用いた研究は、Inouchi *et al.* (1996) が最初であった。その後、筆者らによってもいくつかの事例研究が積み重ねられ (公文ほか, 2000; Adhikari and Kumon, 2001; Adhikari *et al.*, 2002)、湖沼堆積物中の有機炭素・窒素の含有率が、おもに湖沼中の生物生産性を反映しており、古気候・古環境変遷の指標として有効であることが判明しつつある。

堆積物中の有機物が古環境や古気候の指標として有効であることは Meyers (1997) のすぐれた総説によって主張されている。湖沼堆積物中の TOC, TN 含有率 (濃度)

を規制する要因にはさまざまなものがあるが (Ibach, 1982; Lee, 1992; Hedges *et al.*, 1993; Fahl and Stein, 1997)、1) 生物基礎生産性、2) 分解過程、3) 堆積速度、4) 地理的状態などが重要なものであり、個々の堆積場ごとに支配的要素を検討する必要性が指摘されている (Sampei *et al.*, 1994)。今回取り上げる野尻湖のように、流入河川の影響が小さく、また深い深度をもつ閉鎖的な貧栄養湖では、湖外からの多量の有機物流入は考えにくい。そのため、堆積物中の有機炭素・窒素の含有率は、湖沼内の生物基礎生産性がもっとも大きな要因になるものと考えられる。生物生産性に関しては、湖水中の栄養塩が重要な要因となるが、その状態が急激に増減することは稀であり、気候等の影響も大きいと推定される。端的に言えば、気候 (おもに気温) の変動が生物生産性の変動を介して、堆積物中の有機炭素・窒素含有率に影響を及ぼすということである。この推論は、有機炭素と窒素含有率の変動を、花粉組成の変動と対応させて検討することによって、すでにある程度の妥当性が示されている (公文ほか, 2003)。また木崎湖において、気温 (冬の平

2003 年 1 月 30 日受付。2003 年 3 月 20 日受理。日本第四紀学会 2002 年大会シンポジウムにおいて講演。

* 信州大学理学部物質循環学科 〒390-8621 松本市旭 3-1-1. E-mail: shkumon@gipac.shinshu-u.ac.jp

均気温)が湖沼内の生物生産性の一つの指標としてのクロロフィルaの年間生産量、および堆積物中の総有機物濃度との間により相関があると認められている(金丸・公文, 2001; Kanamaru, 2002; 公文・金丸, 2002).

筆者は、第四紀学会2002年大会(松本)において開催されたシンポジウムでは、有機炭素・窒素の含有率と花粉組成の層序的变化に基づき、晩水期から後水期前半にかけての古気候変動を詳細に解明した講演を行った。そして最近、その主要な内容を公表した(公文ほか, 2003)。ここでは、まず生物基礎生産性が有機炭素・窒素含有率に大きな影響をもつ湖沼において、それらと気温との関係を検討する。次に、その結果を野尻湖底堆積物に適用して、過去約4.5万年間の寒暖変動を解明した事例を示して、有機炭素・窒素含有率が古環境・古気候の指標として有用であることを述べる。

II. 湖沼堆積物中の有機炭素・窒素の起源

湖沼堆積物に含まれる有機炭素・有機窒素の起源としては、植物プランクトン生産を基礎とした湖沼内の生物生産に由来するものと、湖外(陸域)に生育する植物から植物遺体とその破片および溶存有機物として供給されるものとがある。植物プランクトンは動物プランクトンに利用され、さらには魚類に捕食される。後者も湖沼内に流入後、動物や植物に利用され、様態を変えていく。

前者の生物生産性は植物プランクトンの生産を基礎としており、その生産性は一般的には栄養塩の規制が大きいとされるが、水温や日射量も重要な規制要因となりうる。栄養塩の供給は、人為的な負荷がない場合では中・長期的には大きな変動は考えにくく、その場合には、気温などの気候要因の影響が生物生産性に対して大きくなると考えられる。

湖外に由来する有機物の供給量は、陸域における植生の豊富さに依存するとともに、輸送過程の変化の影響を受ける。例えば、気温の上昇は一般に陸上植生の発達を促し、湖沼堆積物への寄与を増大させる。また、それは有機物の碎屑粒子としてだけでなく、可溶性の有機物としての供給をも増加させる(Baterbee, 2000)。

それでは、湖沼堆積物中の有機物における湖内生産と陸起源との区別は可能であろうか。それにはC/N比が有力な指標を提供する(中井ほか, 1982; Hedges and Clark, 1986; Thorton and McManus, 1994; Sampei and Matsumoto, 2001)。陸上に生育する高等植物は、セルロースやリグニンといった炭素比率の高い有機物に富んでおり、陸域に由来する有機物のC/N比は15~30

と高い値をとる。一方、湖内で生産される植物プランクトンや動物プランクトンに由来する有機物では、C/N比が6~15程度で小さいとされる。陸域から供給された有機物も湖沼内で動植物に再利用され、その過程での変化もありえるが、後述の事例から見てもC/N比の大きさは陸源有機物の寄与についてのよい指標と考えられる。

なお、湖水中に炭酸イオンとして溶存していた炭素が炭酸塩鉱物として沈着している場合がある。これは汽水湖堆積物にしばしば認められる。また、窒素には無機態のものが土壌などに含まれており、湖沼堆積物へも供給される。炭酸塩鉱物は、塩酸処理などによりある程度除去できるが、窒素有機態と無機態とにわけて分析することは困難である。それゆえ全窒素(TN)として測定する場合には、有機炭素の含有率が1%未満では有機窒素の含有率もかなり小さくなるので、無機態窒素の影響が増加して、C/N比が十分に信頼できないと指摘されている(Müller, 1977; Sampei and Matsumoto, 2001)。

長野県北部にある仁科三湖の一つである中綱湖の堆積物についてみると(図1)、TOCやTNの含有率は深度の大きな湖心部において高くなっている(Adhikari and Kumon, 2001)。濃度の高い場所は、細粒堆積物の場所と一致しており、有機物が懸濁状態での運搬・堆積過程を採っていることを示す。また、C/N比の平面的分布を見ると(図1-C)、TOCとTNの濃度分布とよく似ているが、C/Nのもっとも低い場所は沿岸からもっとも遠い位置といえる。また、麴原こうじはらの小さな河川の流入部を中心に、同心円上にC/N比が高いことも、陸域の影響をはっきりと表わしている。

同様の傾向は、木崎湖や諏訪湖でも認められている。これらの事例からいえることは、有機炭素・全窒素の含有率は、同じ湖でも場所によって違っており、たとえばある場所で採取したコア試料中の有機炭素含有率は、その相対的な変動に意味があることになる。また、C/N比は陸域の影響力の増減と置き換えることも可能であり、湖水量の増減や洪水の発生などの指標となることもできる。実際、木崎湖の湖底堆積物には、洪水起源の相対的に粗粒な堆積物が認められ、その部分は密度が高く、TOCとTNの含有率は低いが、C/N比が高いという特徴をもつ(公文ほか, 2000)。洪水によって陸源の無機碎屑物が多く供給されて希釈効果がおき、また微量ながら含まれる陸源の有機物(植物片)が、C/N比を増加させたと考えられる。

III. 有機炭素・全窒素含有率の測定方法

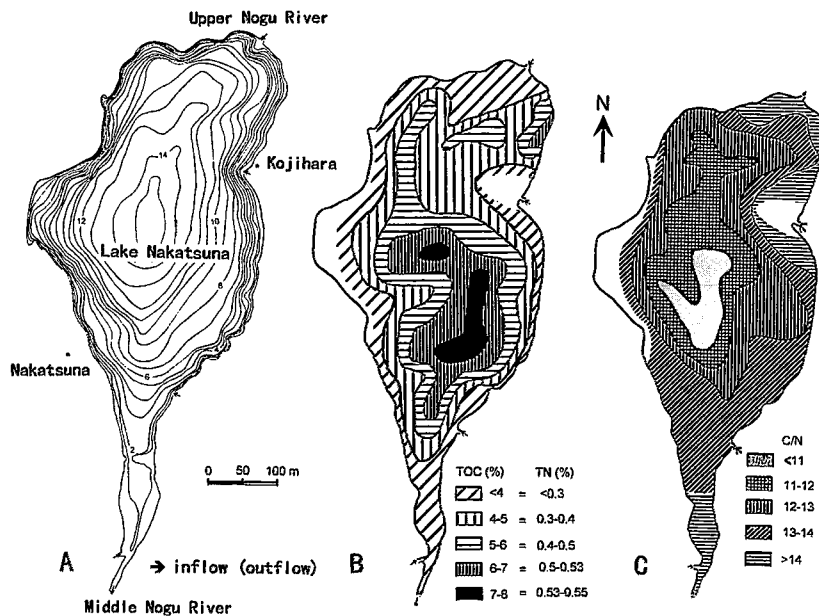


図1 長野県、中綱湖における有機炭素(TOC)、全窒素(TN)およびC/N比の平面的分布
A: 湖底地形, B: TOCとTN, C: C/N比

Adhikari and Kumon (2001) より引用.

Fig. 1 Distribution of total organic carbon (TOC), total nitrogen (TN) and C/N ratio in Lake Nakatsuna, Nagano Prefecture, Japan

A: Basin topography, B: TOC and TN, C: C/N ratio

After Adhikari and Kumon (2001).

この研究手法を新しく導入される方のために、試料の分析手順を概説しておく。採取した試料は冷凍保存するか、110°C以下の温度で乾燥させて保管しておく。カビなどの発生は含有率とC/N比を変化させる。TOC・TNの測定(元素分析)のためには、乾燥させた試料0.数g程度を分取する。この際に、葉片などの混入は避ける。ラミナなどの堆積構造が見られる場合には、その試料の代表値を得るために数gと多めの試料を採取して用いる。そして瑪瑙乳鉢で粒感がなくなるまですりつぶす。それを事前に重量測定した管瓶に移し、試料を含めた重量を測定する。

次に、堆積物中に炭酸塩鉱物が含まれる場合があるので、希塩酸を用いて炭酸塩鉱物を除去する。著者たちの研究室では簡便な方法として次のように行っている。

1. 管瓶に入れた試料に1~2ccの希塩酸を加え、しばらく反応を待つ。
2. その後、110°Cに設定したホットプレートで蒸発・乾固させる。

3. 残存する塩酸の除去のために、蒸留水を1~2ccほど加え、再び蒸発・乾固させる。

4. この操作を2, 3回繰り返す、塩酸分を完全に除去し、乾固させる。

5. デシケーター内で冷却させたあと、重量を測定する。炭酸塩が塩化物に置き換わるので、試料重量が増加する。秤量を行っているうちにも塩化物が潮解を起こして重量が増加することがあるため、迅速な測定を行う必要がある。

TOC・TNの含有率の計算には、この処理による重量増加分を補正して、もとの試料重量に対しての比率を求める必要がある。なお、塩酸処理には白金ボート(または銀コンテナ)上で処理する方法(鈴木ほか, 1986)や遠心分離器を用いる方法(石渡ほか, 1999)があり、それぞれ一長一短がある。

元素分析装置には各社のものがあり、土壌学や生態学の分野でかなり多く普及している。炭素だけでなく、窒素や硫黄も同時に測定できると情報量が多くなる。多数

の試料を分析することを考慮すると、オート・サンプラーの備わっている方が望ましい。筆者の研究室ではヤナコ社の元素分析装置を使い、手で試料を供給しているが、1試料あたり7.5分間で分析できるので、能率は悪くない。装置の使い方に習熟した上で、塩酸処理した試料から10~20mgを分取して、重量を正確に測定して分析にかける。塩酸処理した試料は固まっていることが多いので、葉匙でよくかき回して細かく粉碎してから使用する。固まりが残ったままで分析すると、芯の部分が完全には燃焼しないことになる。また、サンプリング誤差を小さくするために、測定可能な範囲内で多めの試料を分析する方がよい。

IV. 木崎湖における TOC・TN と気温との関係

木崎湖では、信州大学理学部の木崎湖観測グループによって約20年間にわたって継続的な湖沼観測がなされてきた。その資料と、長野県大町における気象観測資料、および湖沼堆積物中の TOC・TN 含有率との関係を検討したところ、三者の間にはよい正の相関が認められた(金丸・公文, 2001; Kanamaru, 2002; 公文・金丸, 2002)。その結果を紹介して、TOC・TN 含有率が気温変

動の指標として有効であることを示す。

気温の指標としては、年間平均気温や夏期平均気温などさまざまなものを採りうる。試行錯誤の結果、もっとも安定的にある傾向を示したものは冬の平均気温(12月~翌3月の平均気温)であったので、それを気温の指標とした。後述するように、冬の平均気温は生物生産性および有機炭素含有率ともっとも高い相関を示した。

木崎湖の湖沼定期観測は毎月1回行われ、湖心部にある定点観測点(水深28m)で一定の深度ごとにクロロフィル a の含有量が測定されている。その測定値をもとに、単位面積あたりの水柱全体に含まれるクロロフィル a 量を計算し、12ヵ月分を積算して湖沼の生物生産性の指標とした。これは各観測時点における存在量の和であるが、植物プランクトンのライフサイクルは1~2週間と短いのので、1月ごとの存在量の和を生産量の指標としてもよいと考えた。なお、結氷等によって測定できなかった月については、それ以外の月の平均値で代用させた。

湖沼堆積物は、2001年8月に湖心部の定点観測点の近くで、佐竹式コアラを用いて、乱れのないように38cmの柱状試料を採取した。それを0.5cm間隔で分取

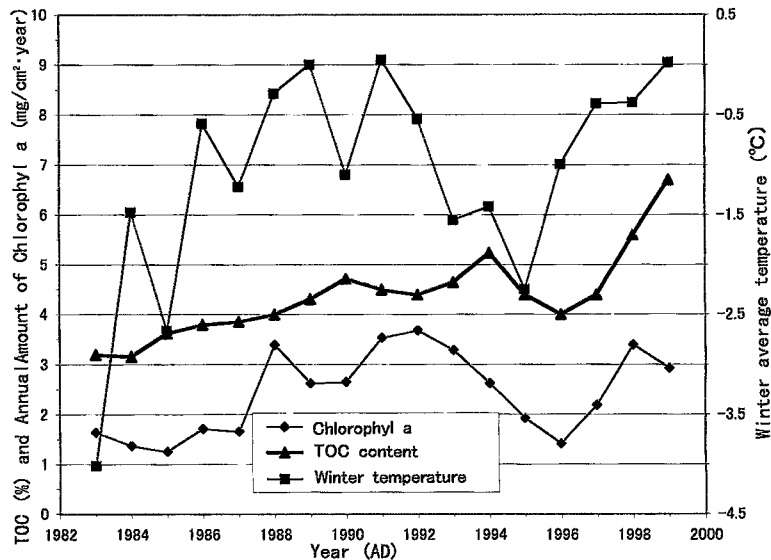


図2 木崎湖における冬の平均気温、年間クロロフィル a 量および堆積物の有機炭素含有率の1983~1999年の変動

Kanamaru (2002) より引用。

Fig. 2 Temporal changes of winter average temperature, annual chlorophyll a amount and carbon content in sediment in Lake Kizaki from AD 1983 to 1999

After Kanamaru (2002).

し、含水率とともに、TOCとTNを測定した。含水率から求めた見かけ密度(単位体積あたりの固形物重量)を検討すると、1983年と1995年の洪水でできた密度の高い堆積層を確認できた。この認定は、1983年4月に採取されたコア試料(林ほか, 1987)との比較によっても裏付けられるので、確実である。この2層の年代と最表層の年代とを鍵として、それらの間は一定の堆積速度として、コア試料の各深度における堆積年を求めた。コア試料の見かけは均質であり、洪水堆積物を除いた試料の見かけ密度はほぼ一定であるので、堆積速度を一定と仮定することは妥当である。

1983年から99年にかけての三者の変化を図2に示した。堆積物中の有機物量はTOCで代表させたが、三者がほぼ平行して推移している様子が読みとれる。図3では、冬の平均気温と年間のクロロフィルa量および年ごとの有機炭素(TOC)含有率との相関性を示した。冬の平均気温と湖における生物生産性(=年間クロロフィルa量)との間には、はっきりした正の相関性があり、相関係数は0.6に近い。冬の平均気温は堆積物中のTOC含有率と0.5以上の相関性をもっている。さらに、図には示していないが、年間クロロフィルa量とTOC含有率の間でも0.6以上の正の相関が認められる。これら

の相関性は推計学的検討でも有意性が確認される。

一般に、気温はさまざまな要因で大きく変化するものであって、気温に関わる現象は多いものの、気温と諸現象との間に明確な相関性が認められることは多くない。そのような事情を考慮すると、ここで認められた相関性はかなり安定した、有意性の高いものと判断できる。年間クロロフィルa量は湖水柱における実測値であり、有機炭素フラックス(沈積流量)に比例するはずである。それと堆積物中の有機炭素含有率が同じ挙動を示していることは、有機炭素がおもに湖沼内の植物プランクトンに由来していること、すなわち有機炭素含有率は生物生産性に関係していることを意味している。

V. 野尻湖湖底ボーリング・コアのTOC・TN変化と気候変動

野尻湖には、1988年に琵琶島沖で採取された45.1mのコア試料(NJ88:公文・井内, 1990)と、1995年に湖深部で採取した30mのコア試料(NJ95)がある。そのNJ88コアについては、表層からAT層準までと赤スコテフラ(図4: Akasuko)からプレッチャーゾーン・テフラまでについて、1~3cm間隔でTOCとTNの測定を行った。また、両層準の間に対応させて、NJ95コアのAT

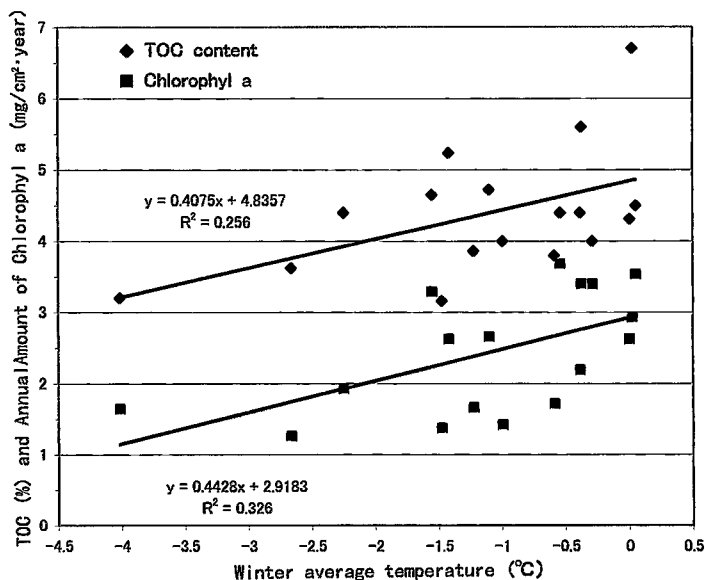


図3 冬の平均気温と年間クロロフィルa量および堆積物への有機炭素含有率との相関性

Kanamaru (2002) より引用。

Fig. 3 Relationship between winter average temperature, annual chlorophyll a amount and carbon content in sediment in Lake Kizaki, Japan

After Kanamaru (2002).

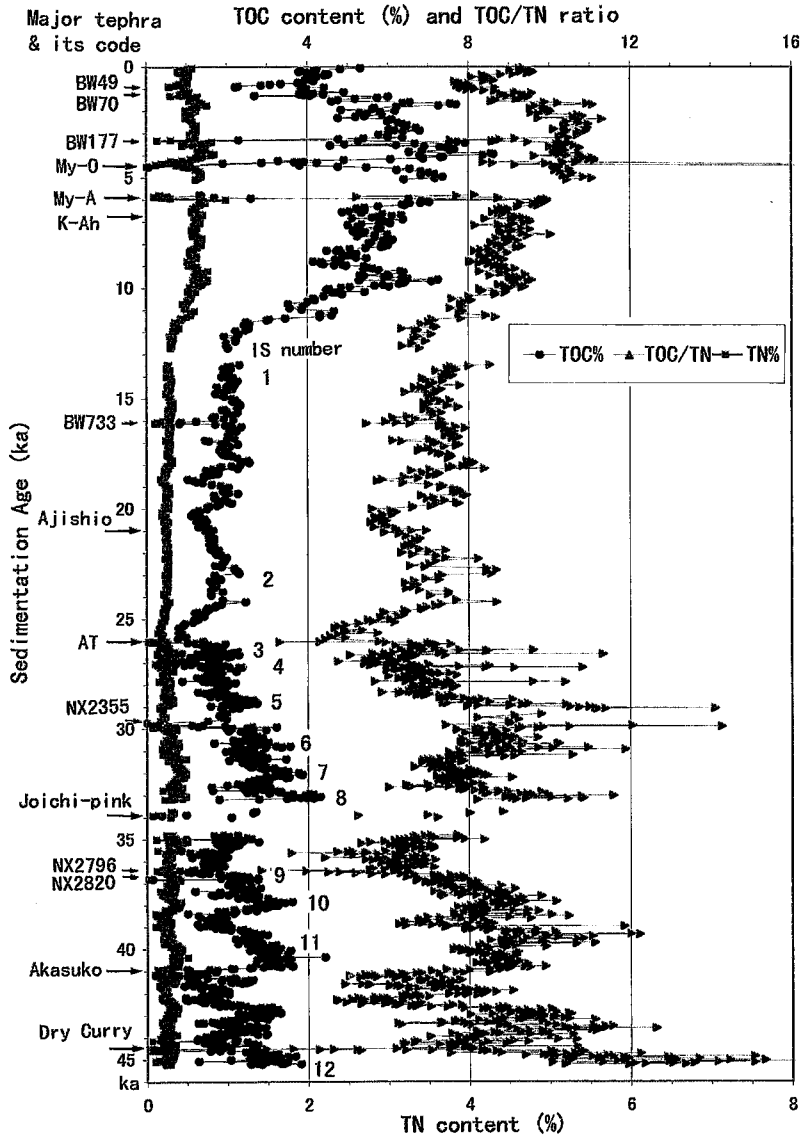


図4 野尻湖底堆積物における過去4.5万年間のTOC, TNおよびC/Nの変化に示される古気候変動
TOCプロファイルにふられた数字は Dansgaard *et al.* (1993) による IS 番号。

Fig. 4 Profiles of TOC, TN and C/N ratio in the sediment of Lake Nojiri in the past 4.5 ka, showing climate changes

IS number is after Dansgaard *et al.* (1993).

と赤スコ・テフラの間の層準について1cm間隔で分析した。時間軸をそろえて両者を統合し、それらの含有率とC/N比の時代的变化を図4に示した。

なお、時間面の基準としては、K-AhやATなどの広域テフラ(町田・新井, 1992)と4つの年代測定値(公文ほか, 2003)のほか、野尻湖西岸の発掘地における多数

の化石の ^{14}C 年代値(沢田ほか, 1992)をもとにした野尻湖における主要な指標火山灰の年代を使った。ごく短時間に堆積したテフラ層の層厚を除いた層厚(補正深度)と年代の関係を求め、2つの区間にわけて、それぞれで堆積速度が一定であったと仮定して、個々の層準の年代を決定した。その年代決定の方法については別の機会に

詳述する。

図4を大きくみれば、TOC、TNおよびC/N比はいずれも類似した時代的(時間的)変化を示し、約4.5万年前から2.5万年前までのやや低く、かつ激しく変動を繰り返す層準、2.5万年前から1.2万年前の低く安定した時期、1.2万年前から現在までの変動が大きく、かつ高い値をもつ時期の違いは明瞭である。ただし、厚いテフラの層準では、無機質の火山噴出物による希釈の結果として、TOCとTNがきわめて低い含有率を示す。また、その層準でのC/N比は、微量のゆえに測定誤差が大きくなるためか、乱高下することが特徴である。TOC含有率が急増する試料があるが、そこではC/N比も急増する。このようなデータは単発的であることが多く、葉片などの植物片の偶然的な混入によるものと考えられる。これらの特異的なデータを除いて、以下に検討する。

堆積速度をもとに約2.6万年前と計算されているATテフラから0.68万年前とされているK-Ahテフラの層準までについては、公文ほか(2003)でTOC・TN含有率が花粉組成とともに詳しく検討され、晩氷期における数百年～数千年規模の気候変動が詳細に復元された。ここでは、3回ほどの「寒の戻り」も認められたが、北大西洋地域の3つのドリラス期と比較すると、2,000年ほど先行している可能性も指摘された。なお、TOC・TN含有率の増減が、例えば落葉広葉樹花粉の増減と調和的であることも判明している。

赤スコ・テフラからATテフラまではNJ95コアの分析データであるが、赤スコ以前およびAT以降のNJ88コアのデータとはほぼ連続的につながり、この期間ではTOC、TNおよびC/N比が数百年周期で激しく増減することが特徴である。図5に示したグリーンランドにおける氷床コアの酸素同位体比変動(Dansgaard *et al.*, 1993)と比較すると、同じ時期の酸素同位体比も短周期で激しく変動しており、よい一致が見られる。また、急激な温暖化とゆっくりした寒冷化という、鋸の刃状の変化までも似ている。図4にはDansgaard *et al.* (1993)による酸素同位体ステージ番号(IS number)との対応をTOCのピーク位置に付してある。このステージ番号は相対的温暖期につけられており、No. 8は北欧の花粉ステージDenekamp期に、No. 12はHengelo期に対応させられている。

相対的温暖期には、水温の上昇および湖水の全循環期間の拡大などによって生物生産性が高まる。それとともに、降水の増加によって陸源有機物を含んだ河川性懸濁物の供給が増加し、同時に栄養塩も供給されるので、湖

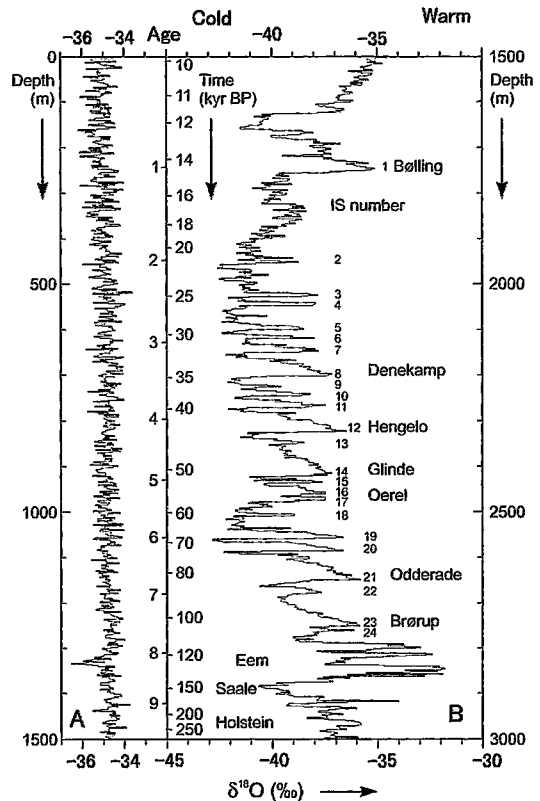


図5 グリーンランド氷床コア(GRIP)で明らかにされた連続的な酸素同位体比変動

A: 表層から深度1,500 mの完新世部分, B: 深度1,500~3,000 mで1~25万年前に相当。

Dansgaard *et al.* (1993) より引用。

Fig. 5 The continuous GRIP Summit $\delta^{18}\text{O}$ record plotted in two sections on a linear depth scale

A: Holocene from surface to 1,500 m, B: 1 to 250 ka from 1,500 to 3,000 m depth

After Dansgaard *et al.* (1993).

内生産性を一層高めてTOC含有率を増加させたと考えられる。泥質堆積物が一定量の無機窒素を含むので、C/N比には見かけの変化(Sampey and Matsumoto, 2001)が重なっている可能性もある。実際、TOCの増加に比してC/N比の増加はわずかなので、湖内生物生産は確実に起こっていると推察できる。

図4に示したTOCとTNの変化は、氷期一氷期の大きな気温変化とよい一致を示しており、生物生産性の主要な支配要因が「温度」であるとする考え方を支持する。しかしながら、ほかの要因も重なっている可能性に

も注意を要する。例えば、完新世でもっとも TOC 濃度が高い時期は 3,000 年ほど前 (TOC 7.5%) となっており、完新世でもっとも暖かかったとされる縄文海進期 (6,000~7,000 年前) とは必ずしも一致していない。このような気温と逆の変化は、中海の堆積物でも同じ時期に見いだされており、碎屑物供給量が増大したことで希釈されたと説明されている (Sampei *et al.*, 1997)。このような堆積速度の変化といったほかの要因の解析と併せて検討することで、より正確な古気候復元が可能となる。

VI. おわりに

図 4 に示した結果は、過去 4.5 万年間にわたる気候変動を詳細に反映しており、東アジアの中緯度地方で得られた気候変動の資料としては類例のないものである。小規模な湖沼の堆積物は、海洋堆積物と違ってリザーバー効果もほとんどないので、直接的に大気の状態を記録することができる。また、一般に堆積速度が大きいので、分解能が高くなるという利点もある。湖沼堆積物では、連続的な年縞計測が可能である場合を除き、年代決定の精度に多少の問題はある。しかし、多く場合に古気候資料の基準として使われている水床コアでも、1.5 万年前以前についてはモデル年代が用いられていて、年代精度は必ずしも高くない (図 5)。

先に述べたように、木崎湖における気温と生物生産性、および TOC の関係についての検討の結果、これらの間により相関性があることがわかった。しかし、完新世の堆積物では、含有率の変化に堆積速度の影響が表れている可能性も示された。この点から見ると、堆積物における有機物の含有率ではなくて、沈積流入量 (フラックス) が生物生産性を直接的に反映しており、気候のよい指標となるはずである。しかしながら、フラックスを求めるためには、密度の測定とともに精度の高い多数の年代測定が必要であり、かならずしも簡単ではない。堆積速度が一定であれば、含有率はフラックスにほぼ比例しているはずなので、含有率で代替できると考えられる。図 4 の結果も、含有率が十分に気候変動を表すことを示している。

実は、NJ88 コアと NJ95 コアとは湖盆の縁と中央という採取位置の違いがあり、堆積速度は 2 倍ほど NJ95 コアの方が大きい。それゆえ、フラックスに換算すると、両者で大きな差がでるはずであるが、含有率では両者にほとんど差がない。これは両者が連続的につながっているように見えるだけでなく、実際に両方で重なって TOC が測定された層準があり、そこでも両者がほぼ同

じ値をとっているので確かである。この原因ははっきりしないが、数千年~数万年間という長い期間についてみると、堆積速度の変動とフラックスの増減とが打ち消しあって、含有率に反映しているためかもしれない。

湖沼堆積物中の TOC・TN 含有率は、中緯度地域の陸域で気候変動を示す指標として活用できると考えられる。いろいろな湖での事例研究を積み上げ、相互の関係を地理的軸と年代的軸とでつないでいくことによって、第四紀後期の気候変動を解明する鍵とすることができると考える。

謝辞 林 秀剛信州大学名誉教授をはじめとする木崎湖観測グループには、長年にわたる木崎湖の定期観測資料を利用させていただいた。また、有機炭素・全窒素測定に当たっては信州大学理学部の福島和夫教授の指導を得た。これらの方々のご協力によって、今回報告したような研究の進展があったことを記して、厚く御礼申し上げます。

引用文献

- Adhikari, D.P. and Kumon, F. (2001) Climatic changes during the past 1300 years as deduced from the sediments of Lake Nakatsuna, central Japan. *Limnology*, 2, 157-168.
- Adhikari, D.P., Kumon, F. and Kawajiri, K. (2002) Holocene climate variability as deduced from the organic carbon and diatom records in the sediments of Lake Aoki, central Japan. *Jour. Geol. Soc. Japan*, 108, 249-265.
- Ariztegui, D., Farrimond, P. and McKenzie, A. (1996) Compositional variations in sedimentary lacustrine organic matter and their implications for high Alpine Holocene environmental changes: Lake St. Moritz, Switzerland. *Org. Geochem.*, 24, 453-461.
- Battarbee, R.W. (2000) Paleolimnological approaches to climate change, with special regard to the biological record. *Quat. Sci. Rev.*, 19, 107-124.
- Dansgaard, W., Johnsen, S.T., Clausen, H.B., Dahl-Jensen, D., Gundestrup, N.S., Hammer, C.U., Hvidberg, C.S., Steffensen, J.P., Sveinbjornsdottir, A.E., Jouzel, J. and Bond, G. (1993) Evidence for general instability of past climate from a 250-kyrs ice-core record. *Nature*, 364, 218-220.
- Fahl, K. and Stein, R. (1997) Modern organic carbon

- deposition in the Laptev Sea and adjacent continental slope : surface water productivity vs. terrigenous input. *Org. Geochem.*, 26, 379-390.
- 林 秀剛・飛沢 浩・清沢弘志 (1987) 木崎湖底堆積物中の珪藻殻. 信州大・環境科学論集, 9, 64-68.
- Hedges, J.I. and Clark, W.A. (1986) Compositions and fluxes of particulate organic material in the Amazon River. *Limnol. Oceanogr.*, 31, 717-738.
- Hedges, J.I., Keil, R.G. and Cowie, G.L. (1993) Sedimentary diagenesis : organic perspectives with inorganic overlays. *Chemical Geol.*, 107, 487-492.
- Ibach, L.E.J. (1982) Relationship between sedimentation rate and total organic carbon content in ancient marine sediments. *AAPG, Bull.*, 66, 170-188.
- Inouchi, Y., Yokota, S. and Terashima, S. (1996) Climatic changes around Lake Biwa during the past 300000 years and 2000 years. Mikami, T., Matsumoto, E., Ohta, S. and Sweda, T. (eds.) *Proc. 1995 Nagoya IGBP-PAGES/PEP-II Symp.* : 109-114.
- 石渡良志・鶴崎 実・山田桂太・山本秀一 (1999) 過去3万年間の琵琶湖環境の変遷 : 烏丸地区深層ボーリングコアの有機物解析からの知見. 琵琶湖博物館調査報告, 12, 97-107.
- Kanamaru, K. (2002) Total organic carbon and nitrogen contents in lake sediment as paleoclimatic proxies — case studies of Lake Kizaki and Lake Nojiri. 77 p, *Master thesis, Shinshu Univ.*
- 金丸絹代・公文富士夫 (2001) 木崎湖湖底堆積物中の有機炭素・窒素量とそれを支配する要因について. 地球惑星科学関連学会 2001年合同大会, Gn-002.
- 公文富士夫・林 秀剛・福島和夫 (2000) 平成10~11年度文部省科学研究費補助金基盤研究C(2)成果報告書「信州木崎湖湖底堆積物に基づく過去4,5千年間の環境変遷の高精度解析」(代表: 公文富士夫, 課題番号: 10640436), 3-32.
- 公文富士夫・井内美郎 (1990) 野尻湖の湖底ボーリング試料と音波反射層との対比. 地質学論集, 36, 167-178.
- 公文富士夫・金丸絹代 (2002) 気候が堆積物中の全有機炭素・全窒素量の変動に及ぼす影響—木崎湖の例—. 地球惑星科学関連学会 2002年合同大会, L023.
- 公文富士夫・河合小百合・井内美郎 (2003) 野尻湖湖底堆積物中の有機炭素・全窒素含有率および花粉分析に基づく約25,000~6,000年前の気候変動. 第四紀研究, 42, 13-26.
- Lee, C. (1992) Controls on organic carbon preservation : The use of stratified water bodies to compare intrinsic rate of decomposition in oxic and anoxic systems. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 56, 3323-3335.
- 町田 洋・新井房夫 (1992) 火山灰アトラス [日本列島とその周辺]. 276 p, 東京大学出版会.
- Meyers, P.A. (1997) Organic geochemical proxies of paleoceanographic, paleolimnologic and paleoclimatic processes. *Org. Geochem.*, 27, 213-250.
- Müller, P.J. (1977) C/N ratios in Pacific deep-sea sediments : Effect of inorganic ammonium and organic nitrogen compounds sorbed by clays. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 41, 765-776.
- 中井信之・太田友子・藤澤 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, 24, 167-177.
- Sampei, Y. and Matsumoto, E. (2001) C/N ratios in a sediment core from Nakaumi Lagoon, southwest Japan — usefulness as an organic source indicator —. *Geochem. Jour.*, 35, 189-205.
- Sampei, Y., Matsumoto, E., Tokuoka, T. and Inoue, D. (1997) Changes in accumulation rate of organic carbon during the last 8,000 years in sediments of Nakatsuna Lagoon, Japan. *Marine Chemistry*, 58, 39-50.
- Sampei, Y., Yomura, H., Otuska, M., Yoshida, K. and Suzuki, N. (1994) Decomposition of organic matter and the organic carbon content of sediments in Lake Shinji, southwest Japan. *Earth Science (Chikyu Kagaku)*, 48, 317-332.
- 沢田 健・有田陽子・中村俊夫・秋山雅彦・亀井節夫・中井信之 (1992) 加速器質量分析計を用いた¹⁴C年代測定による野尻湖層の編年. 地球科学, 46, 133-142.
- 鈴木徳行・山本順三・村中英寿・高安克己・山内靖喜・大西郁夫・徳岡隆夫・島田豊郎・三梨 昂 (1986) ヤナコCHNコーダー(MT-3型)による地質試料の分析I—低温燃焼法, 酸処理燃焼法による堆積物有機炭素の定量とパソコンとのオンライン化—. 島根大地質学研究報告, 5, 19-34.
- Thornton, S.F. and McManus, J. (1994) Application of organic carbon and nitrogen stable isotope and C/N ratios as source indicators of organic matter provenance in estuarine systems : Evidence from the Tay Estuary, Scotland. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 38, 219-233.

Total Organic Carbon and Total Nitrogen Contents in Lake Sediment as a Proxies of Paleoclimate

Fujio Kumon*

Recent researches on total organic carbon (TOC) and total nitrogen (TN) contents in lake sediment are overviewed. TOC and TN originate from autochthonous organic products in the lake and external products derived from the land area; the former are dominant in oligotrophic lakes. It has been recognized recently that the TOC content in modern sediments from AD 1983 to 1999 has a good relationship with annual chlorophyll *a* amounts and average winter temperatures (from December to March) in Lake Kizaki. This result means that temperature controls the TOC content and also flux in sediment via productivity

in lake water. The TOC, TN, and C/N amounts measured in a sediment core from Lake Nojiri show an excellent example of climate variability during the past 45 ka, which may correspond well with $\delta^{18}\text{O}$ change revealed in the ice core (GRIP) from Greenland. The study of lake sediments in Lake Nojiri also confirmed that the sequential changes of TOC and TN contents correspond well with the changes in pollen composition controlled by climate. These facts suggest that contents of TOC and TN, and C/N ratio in lake sediment may be a powerful tool to clarify climate change.

* Department of Environmental Sciences, Faculty of Science, Shinshu University, 3-1-1 Asahi, Matsumoto, 390-8621, Japan. E-mail : shkumon@gipac.shinshu-u.ac.jp