地質学雑誌　第 111 巻　第 10 号　599－609 ページ，2005 年 10 月
Jour. Geol. Soc. Japan, Vol. 111, No. 10, p.599－609, October 2005

湖底堆積物中の有機炭素含有率と湖水中の生物生産性，および気象要素との関係－長野県，木崎湖における 21 年間の湖沼観測からの検証－

Relationships among weather factors, biological productivity and TOC content of sediments in Lake Kizaki, central Japan

公文富士夫 [1]　金丸絹代 [2]
田原敬治 [3]　角田尚子 [4]
山本雅道 [5]　林　秀剛 [6]

Fujio Kumon[1], *Kinuyo Kanamaru*[2], *Takaharu Tawara*[3], *Naoko Kakuta*[1], *Masamichi Yamamoto*[4] *and Hidetake Hayashi*[5]

2005 年 2 月 15 日受付.
2005 年 8 月 25 日受理.

[1] 信州大学理学部物質循環学科
Department of Environmental Sciences, Faculty of Science, Shinshu University, Asahi 3-1-1, Matsumoto 390-8621, Japan
[2] Climate System Research Center, Department Geoscience, University of Massachusetts, Amherst MA0100, 3-9297, USA
[3] 信州大学大学院総合工学研究科
Interdisciplinary Graduate school of Science and Tecnology, Shinshu University, Asahi 3-1-1, Matsumoto 390-8621, Japan
[4] 信州大学大学院工学系研究科
Graduate School of Science and Technology, Shinshu University, Asahi 3-1-1, Matsumoto 390-8621, Japan
[5] 信州大学山地水教育環境研究センター
Research and Education Center for Inlandwater Environment, Shinshu University, Kogandori 5-2-4, Suwa 392-0027, Japan
[6] NPO 法人　信州ツキノワグマ研究会
Shinshu Black Bear Research Group, Kaichi 2-9-8, Matsumoto 390-0876, Japan

Corresponding author: F. Kumon, shkumon@gipac.shinshu-u.ac.jp

Abstract

Total organic carbon content（TOC）of lake sediments has been used recently as a useful paleoclimate proxy. But, no study has shown the genuine relationship between TOC content of lake sediments and climate parameters. Therefore, we try to examine modern relationships among TOC in lake sediments, biological productivity of lake water and weather factors using limnological observation data conducted monthly in Lake Kizaki since AD 1981.

The sediment cored on 11 December 2003 was cut into 0.5 cm interval, and apparent density and TOC content were measured. Apparent density peaks can be correlated with the known flood events. Sedimentation rates were determined precisely on the basis of flood ages, and were used for the age determination of the cored sediment. Then, annual TOC content can be determined from AD 1981 to 2002. Monthly measurements of chlorophyll *a* amount in water column were integrated to annual chlorophyll *a* amount which can be a representative of annual biological productivity. Meteorological data at Omachi City, 4 km south to the lake were used as weather factors during the same period. As a result, we have found a correlation（n = 21, r = 0.47）between winter temperature and annual chlorophyll *a* amount. The TOC of sediment also shows some concordance with chlorophyll *a*（n = 21, r = 0.50）and winter temperature（n = 23, r = 0.44）. When we compare TOC content in sediments with 3-year moving average of winter temperature and annual chlorophyll *a*, the correlations between them become much better. These results suggest that organic carbon of lake sediment reflects the lake biological productivity which is controlled by winter temperature, namely, shortness of the coldest season. It is concluded that the TOC content of lake sediments can be used as a useful paleoclimate proxy when sedimentation rate is almost constant.

Key words: total organic carbon, paleoclimate proxy, winter temperature, chlorophyll a, biological productivity, lacustrine sediment, Lake Kizaki

は　じ　め　に

湖沼堆積物中の有機炭素（TOC）および全窒素（TN）の含有率が，気候の変動をよく反映していることが最近の研究で判明しつつある（Inouchi et al., 1996; Meyers, 1997; Kumon et al., 2000; Adhikari and Kumon, 2001; 公文ほか, 2003; 公文, 2003）．このことは，花粉組成が示す植生変化や氷床における酸素同位体組成比の変動などとの整合性からも支持されるが，どのようなメカニズムで気候の変動が湖沼堆積物中の有機炭素含有率の変動に反映するのか，という点については十分に検証されているとは言えなかった．

長野県北西部にある木崎湖には過去に数多くの陸水学的研究があるだけでなく（例えば, 西条, 1956a, b; Horie et al., 1980 など），信州大学理学部の湖沼生態学研究グループによって 1981 年から始められた月 1 回の湖沼観測が 20 年以上にわたって続けられている（Hayashi and Yoshioka, 2001; 山本ほか, 2004）．また，林ほか（1987）によって 1983 年に採取されたコア試料について容積密度や珪藻組成が報告されており，それを新しく採取したコア試料と比較することによって堆積物の年代推定が可能である．さらに，アメダス気象

©The Geological Society of Japan 2005

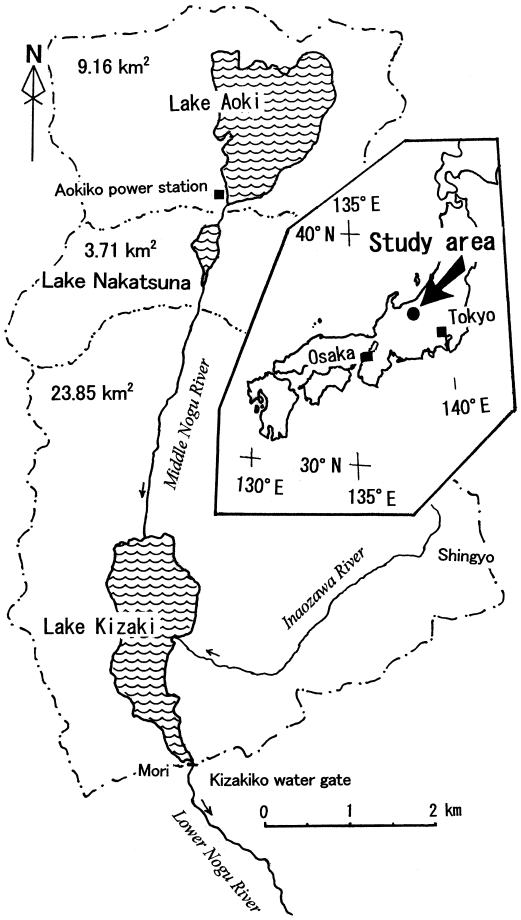

Fig. 1. Location of study area and drainages of Nishina Three Lakes.

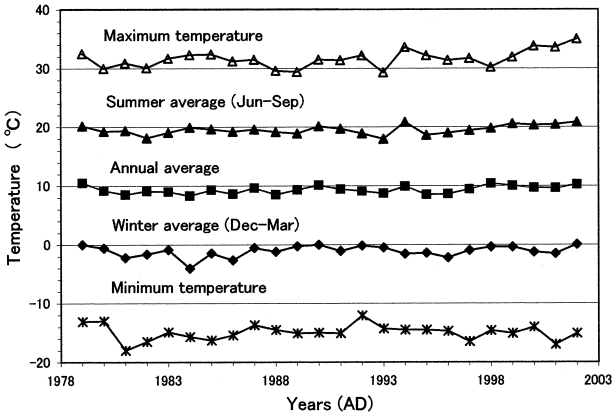

Fig. 2. Annual changes of temperature parameters at Omachi meteorological station.

記録や木崎湖の水位変動記録から高密度を示す堆積層に対応する強い豪雨のイベントを推定できるので，堆積物の一層精密な年代決定ができるという利点がある（公文ほか, 2004）.

このような長所を生かして，金丸・公文（2001）は2000年8月に採取したコア試料について，堆積物中のTOC含有率と湖沼生産性および気象要素との関係を予察的に検討し，3者の間に相関があることを見出した．その後，2003年12月に再びコア試料を採取し，TOC含有率と，湖水中の年間クロロフィルa量，およびいくつかの気象要素との関係を再検討した．その結果，TOC含有率と湖水柱全体における年間のクロロフィルa量および冬の気温との間に正の相関があることが確認され，またその原因が推定されたので，ここに報告する.

今回の検討によれば，暖かい冬とは寒さの厳しい期間が短い冬を意味していると考えられる．そのような条件下では，通常早春と晩秋に起きる湖水の全循環の期間が引き延ばされ，生物生産性の高い期間が長くなって，年間を通したクロロフィルaの生産量が増加するものと考えられる．クロロフィルa量は生物活動の基礎となる一次生産量を示しており，増大した生産物は様々な過程をへて多くの生物に利用されるものの，最終的に湖底に沈積する有機物量も増加して，堆積物中に保存されることになる．このようなプロセスの推定が大枠として正しいことが今回の検討によって明らかにされた．ここで明らかにされた湖水中の生物生産性が気温によって大きく支配されているということは，今後の研究の積み重ねによって，例えば有機炭素含有率を冬の気温に変換できる可能性を示唆する．比較的容易に分析ができる有機炭素・窒素含有率の測定を通して，過去の気候変動を詳細に解明する道が拓かれたものと考える.

研　究　対　象

1. 地理学的特徴

木崎湖は大町市の中心部から北に約4 kmの位置にあり，南北に並ぶ3つの湖（仁科三湖）の一つである（Fig. 1）．湖の西側には標高1300～1600 mの尾根が西からのびてきており，北アルプスの稜線から続く山塊の東縁を構成している．一方，東側には標高1000 m前後の尾根が続く大峰高原が広がっている．両地塊の地質境界にあたる糸魚川－静岡構造線にそった凹地に仁科三湖が南北に並んでいる．木崎湖の北岸には青木湖に源を発する中農具川が流れ込み，小規模な沖積平野が広がっている．一方，東側から稲尾沢川が流入し，木崎湖の東岸に円錐形の沖積扇状地を形成している．この2つが主要な流入河川である．流出河川は木崎湖の南東端から流れ出る下農具川だけであるが，流出量は木崎湖水門で人為的に調節されている．周辺の山地は落葉広葉樹林を主体としており，湖の北側と東側に小規模に水田が耕作されている．住宅は湖の南側に集中する以外には，各所に散在するのみである.

木崎湖は，湖面標高764 m，面積1.41 km²，平均水深14 m（最大水深29.5 m）の中栄養湖である（仁科三湖環境保全対策専門委員会, 1983）．木崎湖は南北に延びた25 m前後の水深の湖底平原をもち，湖水が年2回の全循環を行う2回循環湖である（Arai and Hayashi, 2001）．木崎湖の陸水学的，生態学的な特徴はSaijo and Hayashi（2001）によってまとめられている.

2. 気象の特徴

木崎湖の南端から約4 km南にある大町市市街に気象庁の

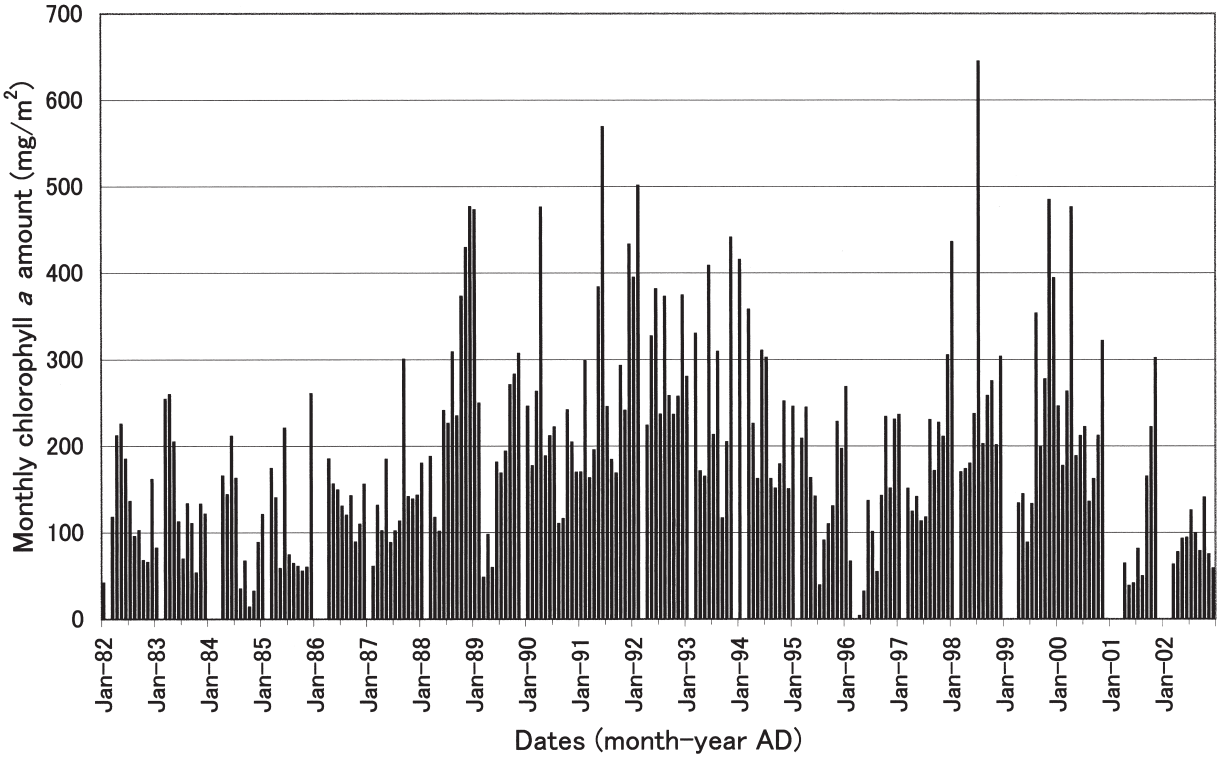

Fig. 3. Monthly changes of chlorophyll *a* amount in whole water column at the center of Lake Kizaki from AD 1982 to 2002.

アメダス観測点があり，1979 年から連続して種々の気象情報が記録されている．この記録に基づく各種の気温指標の経年変化を Fig. 2 に示す．夏の平均気温は 18 ～ 20 ℃，年平均気温は 8 ～ 10 ℃，冬の平均気温は－4 ～－1 ℃である．なお，本研究では夏と冬の平均気温はそれぞれ 6 ～ 9 月までと 12 ～翌 3 月までとした．このように冬の平均気温をとることで，12 月や 3 月の暖かさが冬の平均気温に反映して，冬の短さを表すことができると考えられる．

年間の降水量は 1000 ～ 1900 mm であり，夏季に 300 ～ 1000 mm，冬季に 200 ～ 450 mm の降水がある．冬季の降水の多くは雪である．ただし，大町の観測点は，木崎湖の集水域からは外れており，必ずしも集水域の降水を示さないことがある．木崎湖の北にある青木湖の発電所で測定された 1955 年～ 1986 年の間の降水量（昭和電工㈱提供）を同じ期間の大町気象観測所における観測結果と比較すると，青木湖における降水量が 2，3 割多い．

研究方法と結果

1. 湖沼観測とクロロフィル *a* 量の測定

木崎湖においては，著者の内の 2 人，林　秀剛と山本雅道を含む信州大学理学部生物学科の湖沼生態学研究グループ（当時）が 1981 年 5 月から月 1 回の定期湖沼観測を湖心部（水深 28 m）において行ってきた．観測は毎月の半ばに行われ，水温，pH，電気伝導度，溶存酸素量などとともに，生物生産の指標としてクロロフィル *a* 量が測定されてきた（Hayashi and Yoshioka, 2001; 山本ほか, 2004）．クロロフィル *a* 量の測定方法はユネスコ法（西条・三田村, 1995, p. 189-191）に準じたもので，年度によって多少の違いがあるが，水深 0，2，4，6，8，10，14，18，22，26 m の各深度において測定されている．この測定値を各深度における代表値とみなし，各測定深度の間は内挿して湖底面 1 m^2 当たりの全水柱における積算クロロフィル *a* 量を計算した．その値をもって各月のクロロフィル *a* 量とし，それを 1 月～ 12 月まで積算して年間のクロロフィル *a* 量とした．冬季には結氷のために観測できない月があったが，それは前後の年の観測値の平均でおきかえることにした．

このようにして測定され，集計された年間クロロフィル *a* 量は，月ごとに湖水中に存在した植物プランクトン（本報告では，シアノバクテリアなども含めて光合成する生物を植物プランクトンと一括して表現する）量の積算値であるが，植物プランクトンのライフサイクルが比較的短いことを考慮すると，1 ヶ月ごとの測定値は同じ個体を重複して測定することのない時間間隔をもつので，湖水中における生物生産量の一つの指標とみなすことができる．

測定された月ごとのクロロフィル *a* 量を Fig. 3 に示した．空白は観測できなかった月である．月ごとのクロロフィル *a* 量は，1982 ～ 87 年までは最大でも 300 mg/m^2 程度であるのに対して，1988 年以降は 400 mg/m^2 を越す月がしばしばみられるようになる．また，年間を通したクロロフィル *a* 量も 1996 ～ 97 年および 2001 ～ 02 年を除いて，1988 年以降は大きく増加している．また，1987 年以前では春季のクロロフィル *a* 量が最も多いのに対して，1989 年以降では夏

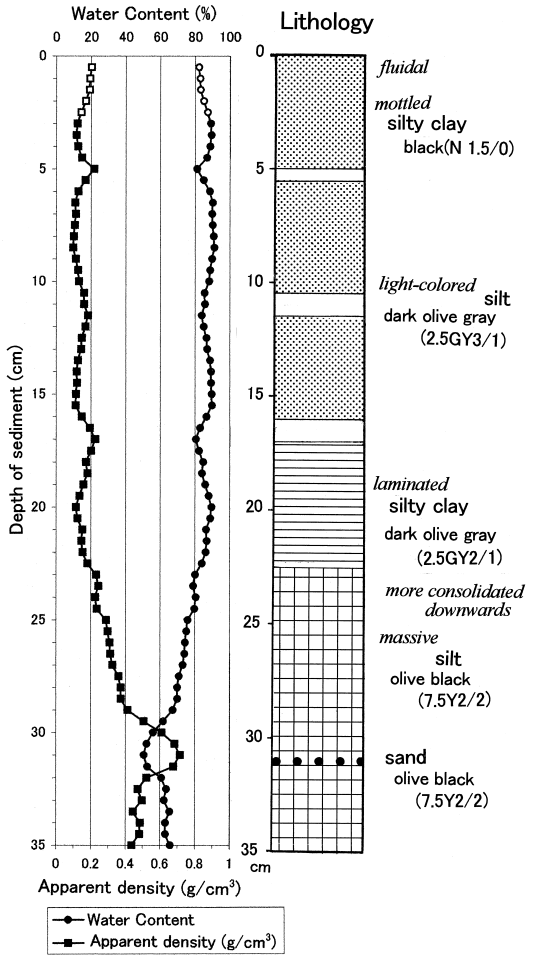

Fig. 4. Lithology and density profile of the cored sediment from Lake Kizaki on December 11, 2003.

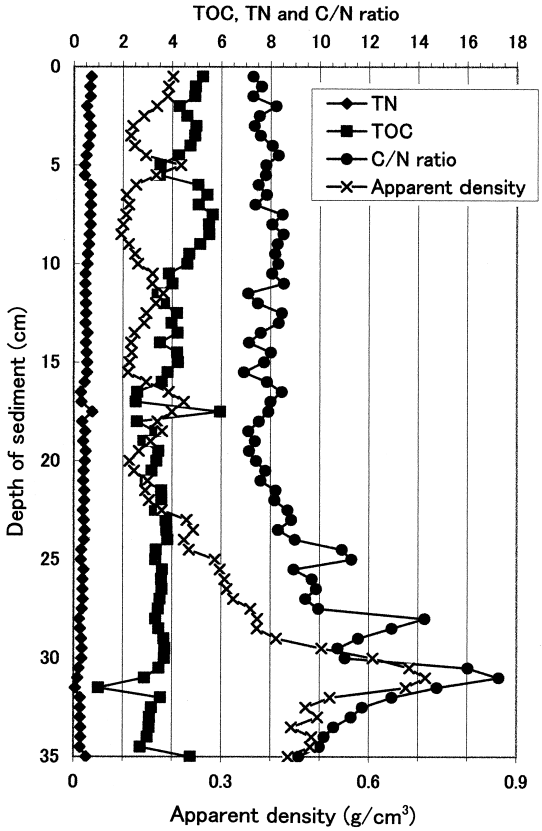

Fig. 5. Total organic carbon (TOC), total nitrogen (TN) and C/N ratio in the cored sediment taken from Lake Kizaki on December 11, 2003.

～秋にかけてしばしば顕著なクロロフィル *a* 量のピークがみられるようになっている．

一方，木崎湖においては，次のような富栄養化を示唆する現象が報告されている．1977 年に初めてシアノバクテリアの *Anabaena* が見出され，1981 ～ 83 年には部分的に湖水表面を覆う皮膜も形成されたが，1984 年 7 月末以降には *Anabaena* のブルームは出現しなくなった（Funakoshi et al., 2001）．また，1981 ～ 83 年の沈水植物（*Elodea*）の増殖（草魚の導入で 1984 年頃に終息），1981 ～ 84 年の正体不明の浮遊生物の発生，1986 ～ 94 年の渦鞭毛藻（*Peridinium bipes*）の大増殖と淡水赤潮の発生などが報告されている（Okino and Watanabe, 2001; Park and Hayashi, 1993; Park, 2001）．これらの変化は，Fig. 3 に示したクロロフィル *a* 量の変動に良く反映している．例えば，1988 年～1994 年にかけての高いクロロフィル *a* 量は渦鞭毛藻の高濃度の存在と密接に関係している（Hayashi and Yoshioka, 2001; Park, 2001）．なお，1981－83 年の *Anabaena* の増殖は夏期にクロロフィル *a* 量のピークをつくっているが，その発生が最表層部に限られるため，水柱全体としてみると極端な増加としては表れていない（Hayashi and Yoshioka, 2001）．

2. 湖底堆積物

2003 年 12 月 11 日に木崎湖の湖心部（北緯 36°33’17.5” 東経 137°50’24”：水深 28 m）において，佐竹式採泥器を用いて 35 cm 長のコア試料を採取した．コア試料は採取後直ちに実験室に持ち帰り，縦に半裁して層相を観察した後，0.5 cm 間隔で分取して，含水率を測定した．固体粒子の密度を 2.65 と仮定して，含水率を基にして湿試料 1 cm^3 あたりに含まれる固形物の乾燥重量を計算し，「見かけ密度」を求めた．これらの詳しい手順は公文ほか（2004）に示されている．また，暗色と明色の層ごとにスミアスライドを作成して，構成粒子を観察した．

層相，含水率および見かけ密度の深度変化を Fig. 4 に示す．表面から深度 17 cm までは全体として黒色であり，部分的（深度 5.0 ～ 5.5 cm, 10.5 ～ 11.5 cm, 16 ～ 17 cm）にやや明色の層を挟む．この明色層は，スミアスライドの観察から暗色層に比して鉱物質粒子が多いことが判明した．深度 17 ～ 23.5 cm は，数 mm の厚さの黒色縞とやや明るいオリーブ黒の縞との細かい繰り返しを示す．深度 23.5 ～ 35 cm は，褐色を帯びたオリーブ黒であり，ほぼ均質な見かけをもつ．深度 31 cm 付近には数 mm の厚さの砂層が挟まれる．

最上部の 3 cm ほどは極めて流動的であり，一方，23 cm 以深はかなり締まりが良くなる．最上部 2.5 cm の見かけ密

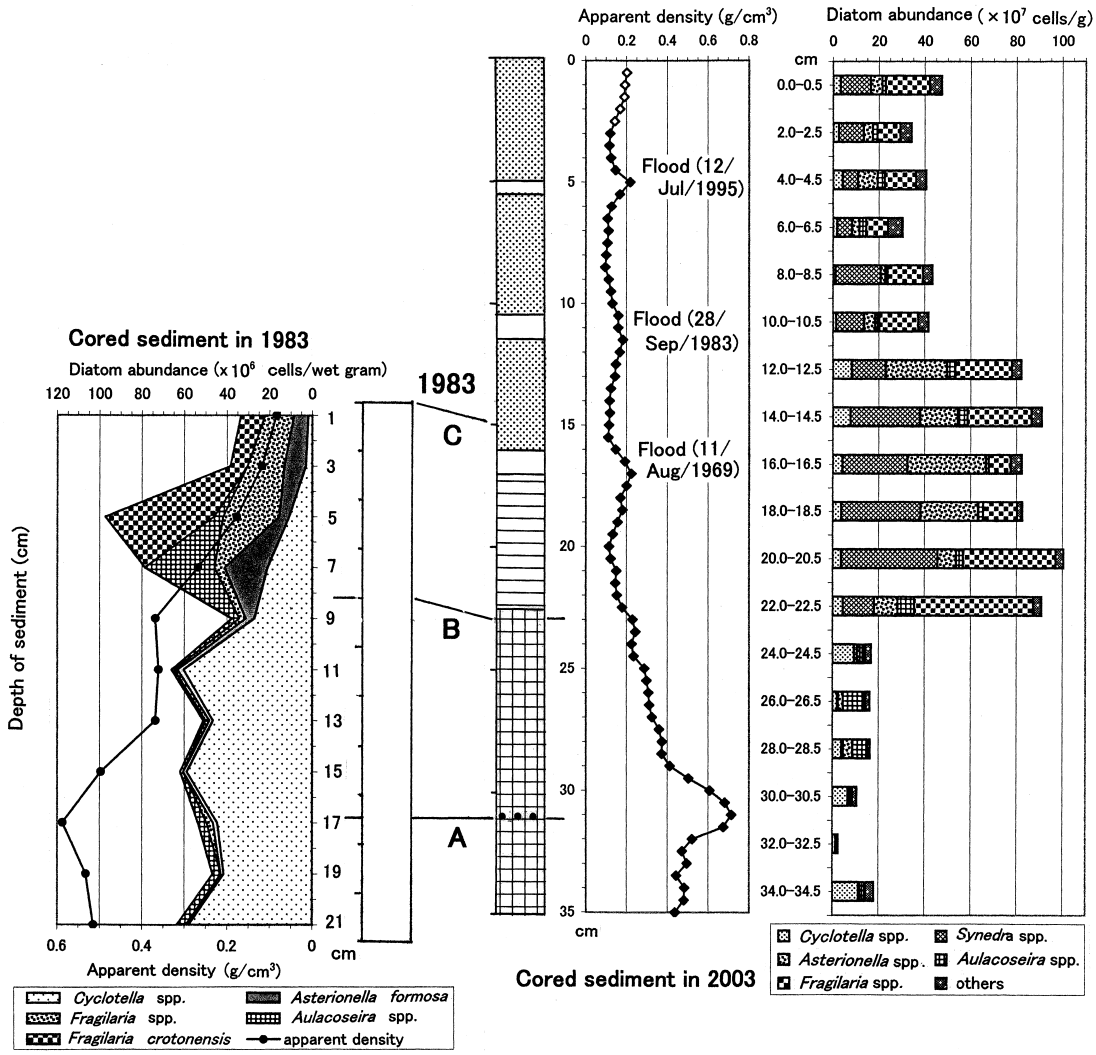

Fig. 6. Correlation between the core of 1983 and that of 2003 based on apparent density profile and diatom compositions. Compiled from Kumon et al. (2004). Correlation lines: A; apparent density peak, B; datum plane of diatom assemblages, C; estimated bottom surface of AD 1983 drawn parallel to Line B.

度は，上部に詰めた充填材に水分を吸収されたために実際よりも高く測定されている．深度 3 ～ 23 cm の間では見かけ密度は 0.1 ～ 0.2 g/cm³ で変動しており，深度 5，11，17 cm 付近に小さなピークが認められる．このピークは明色の色調を示す層準に対応している．深度 23 cm から見かけ密度は増加し始め，31 cm で最大の 0.7 g/cm³ に達した後 0.45 g/cm³ 前後まで減少する．この最大の密度をもつ深度は砂層が認められる層準と一致する．

3. 有機炭素・窒素含有率

含水率を測定した試料の一部をメノウ乳鉢で粒感がなくなるまで粉砕し，1N の希塩酸で炭酸塩を除去した後，サーモクエスト社製の元素分析装置 EA1112 を用いて，有機炭素（TOC）と全窒素（TN）の含有量を測定した．分析には約 30 mg の試料を用いた．分析結果を重量比に基づく含有率の深度プロファイルとして Fig. 5 に示す．

TOC 含有率はおおよそ 2 ～ 5 %の間で変動し，TN は 0.2 ～ 0.7 %の間で変動している．TOC は 10 cm 以浅で 5 %前後の高い値を示し，16 ～ 21 cm 付近で 3 %前後の低い値を示す．TN 含有率も類似した増減を示しており，両者がほぼ同じ割合で動くため，深度 0 ～ 23 cm の間では C/N 比は 7 ～ 8 とほぼ一定である．C/N 比 7 ～ 8 は有機物の起源がおもに湖水中で生産されたプランクトンであることを示唆する（中井ほか, 1982; Sampei and Matsumoto, 2001）．23 cm 以深では，TOC，TN が全体として微減し，間欠的には小さな落ち込みをつくる．C/N 比は全体として 9 ～ 11 に増加し，局所的にみられる 3 つのピークは，TOC と TN が減少する層準に当たっている．

議　　論

1. 堆積物の年代と TOC の経年変化

木崎湖の堆積物については 1983 年に採取された約 22 cm のコア試料について，含水率，かさ密度および珪藻組成が報告されている（林ほか, 1987）．2003 年 12 月に採取したコアについて見かけ密度や珪藻組成の深度変化を調べ，1983 年のコアと比較すると，Fig. 6 に示したような対応関係を見出すことができる．対比線 A は，見かけ密度プロファイルの形態を比較して，その極大の層準を対応させたものである．対比線 B は，珪藻の種組成が大きく変化する層準を対応させてもので，その層準を境として珪藻殻の含有量と種数の明瞭な増加がみられる．対比線 C は，1983 年のコア試料の上面を対比線 B と平行に伸ばして 2003 年のコアに対比したものである．2003 年のコア試料では 1983 年 4 月以降の堆積物はこの層準の前後より上位にあることになる．

一方，スミアスライドの観察に基づくと，見かけ密度の高い層準には，珪藻殻が少なくて鉱物・岩石粒子が多いという特徴がみられる．それ故，高密度の層準において TOC や TN 含有率が低いことは無機物の増加による希釈の結果とみることができる．また，見かけ密度の高い層準の鉱物質粒子は，上・下位の堆積物よりも相対的に粗粒である．このような相対的に粗粒な堆積物は，通常の懸濁運搬による堆積物ではなく，Strum and Matter（1978）がスイスのブレンツ湖で報告したような密度流（底層流）の堆積物である可能性が高い．すなわち，大規模な洪水によって発生した密度の高い懸濁水塊が密度流となって湖底を流下し，湖心部にまで粗粒な堆積物を運搬・沈積させたものと考えられる．また，見かけ密度が大きな層準では C/N 比が高くなっている場合もある．それは陸源の有機物が湖水中起源の自生有機物に対して高い比率で混入していることを示唆しており，高密度の層に含まれる粒子が陸上に直接的な起源をもつという考えを支持する．

Table 1 には 1 日当たり 5 mm 以上の降雨が連続し，総降雨量が 120 mm を越した豪雨が網羅されており，また，同時に起きた木崎湖の水位変動が示されている．そのうち，1 日の最大降雨が 100 mm を越し，かつ総水位変動（連続降雨前後の最低水位と最高水位との差）が 50c m 以上の豪雨を洪水強度 A ランクとした．これら A ランクの洪水の発生年月日を前述した堆積物の年代推定の枠組みの中に当てはめると，深度 5 cm 付近の相対的高密度層が 1995 年 7 月 11 ～ 12 日の豪雨に，深度 11 cm 付近の相対的高密度層を 1983 年 9 月 27 ～ 28 日の豪雨に，深度 17 cm 付近の高密度層を 1969 年 8 月 6 ～ 11 日の豪雨に対応させることが可能である．1983 年の前後には 3 つの A ランクの豪雨があるが，1983 年 9 月 28 日における日雨量の多さと 1 日当たりの水位増加の大きさとから 3 つの中で最も大きな洪水であると判断して見かけ密度のピークに対応させた．1983 年のコア試料の表面と対比させた層準は，ここで洪水と対応させた層準よりも 4 cm ほど下位にずれている．しかし，深度 11 cm 付近の見かけ密度ピークに対応させることができる年代の範囲内には，前述した 1983 年前後の 3 つ以外に大きな洪水はない．このずれは 2 つの柱状試料の分析間隔の違いや深度測定の誤差によって生じた差と考えられる．

Table 1. Heavy rainfalls and water level increases of Lake Kizaki in relation to flood impact during 1958 to 2002

Year(AD)/ Month/Dates	Continuous heavy rainfall* (mm) Total amount	One day maximum		Increasing of water level** (cm) Total	One day maximum	Flood impact	Remarks*** (Rainfall at Aokiko Power Station) Dates	(mm)
1959/8/10-13	156	8/13	93	42	34	A	8/11-14	165
1959/9/24-26	171	9/26	116	38	32	A	9/26-27	163
1960/8/10-14	239	8/13	89	20	8		8/11-15	193
1961/6/23-30	277	6/27	57	64	22	A	6/23-30	240
1964/7/7-9	163	7/8	82	90	36	A	7/7-10	270
1964/7/14-19	129	7/18	43	8	6			
1965/5/26-28	152	5/26	117	38	20		5/27-29	145
1965/9/16-17	161	9/17	120	30	18			
1966/9/16-18	124	9/18	70	15	8			
1969/8/6-11	137	8/11	60	66	63	A	8/7-11	290
1970/6/14-15	123	6/14	73	28	20		6/14-15	114
1971/9/5-7	139	9/6	71	27	19			
1972/7/9-14	216	7/11	68	41	12		7/9-14	236
1972/9/17-21	175	9/21	128	49	-10		9/17-18	11
1974/8/25-27	131	8/25	66	26	8			
1978/6/25-28	135	6/27	71	34	23		6/19-28	316
1981/8/22-23	122	8/23	65	10	-3			
1982/7/31-8/2	127	8/1	66	26	12			
1982/9/11-12	150	9/12	126	57	42	A	9/12-13	154
1983/7/20-27	217	7/25	52	56	20	A	7/21-25	374
1983/9/27-28	175	9/28	135	72	58	A	9/28-29	181
1985/6/28-7/1	145	6/30	77	36	11			
1988/6/27-30	138	6/27	56	15	4			
1995/7/11-12	151	7/12	109	66	39	A		
1996/6/24-25	147	6/25	107	46	14			
1997/7/7-12	142	7/12	41	5	4			
1998/8/27-30	129	8/28	80	23	18			
1999/9/14-15	128	9/15	101	34	26			
2000/9/7-12	165	9/11	92	16	13			

* Data at Omachi Meteorological observation site (Japan Meteorological Agency)
** From Showa Denko Co. Ltd.(1958-1986) and Omachi City Office (1987-2000)
*** From Showa Denko Co. Ltd

3 つの洪水の年代を基準とし，また，それぞれの洪水層間の堆積速度（厚さで計算）は一定と仮定することによって，Fig. 7 に示したような深さと年代の関係が求められる．それに基づき，各層準における有機炭素の含有率を年ごとの含有率に置き換え，各年の 6 月に当たる層準の含有率をもってその年の TOC 含有率と見なすことにした．堆積速度が一定で，かつ，堆積後の分解率が一定と仮定するならば，この含有率は湖底堆積物として沈積する有機物の割合に比例しており，有機物の沈積率を表す指標と見なすことができる．なお，洪水層は堆積に要する時間がほとんど瞬時であり，また，無機砕屑物の希釈を受けているので除外する，また，ここで認定した大規模な洪水以外にも，毎年数回発生する程度の小規模な洪水もあるはずで，その頻度の多少が年ごとの堆積量を変えている可能性もある．その点で，大規模な洪水層の間を堆積速度一定と仮定して深度を年代に変換することには多少の無理があり，年代値にはある程度の誤差が予想される．しかしながら，第一次近似としては妥当な推定値を与えるものと考えている．

TOC 含有率の経年変化を，クロロフィル a 量および冬の平均気温の経年変化とともに Fig. 8 に示した．TOC 含有率は 1980 ～ 84 年までは比較的低い値をもち，1985 ～ 88 年まで緩やかに上昇し，1989 ～ 94 年までは 5 %を越える高い

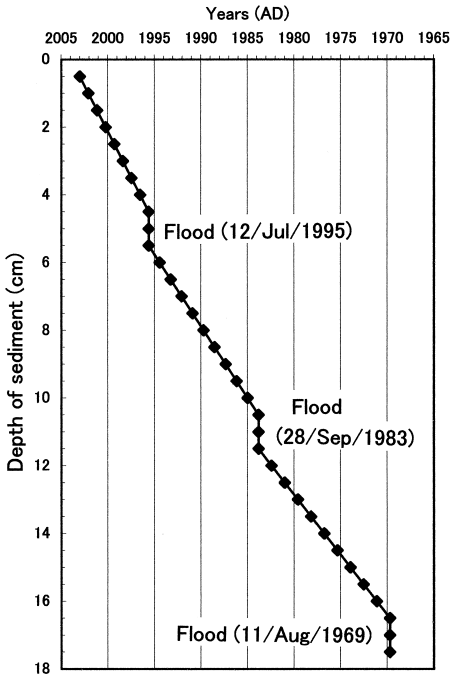

Fig. 7. Relationship between the depth and age in the upper cored sediment from Lake Kizaki on December 11, 2003.

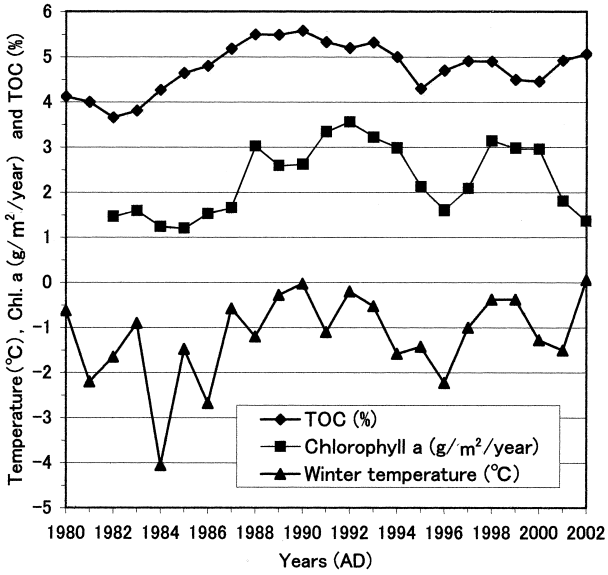

Fig. 8. Annual changes of TOC content, chlorophyll *a* and winter temperature (average of December to March).

値，1995 ～ 2002 年は増減はあるものの，やや低い値をとる．クロロフィル *a* 量および冬の平均気温も，多少の時間的なずれを伴いながらも，かなりよく似た変動を示す（Fig. 8）．1995 ～ 2000 年にかけては，TOC 含有量がクロロフィル *a* 量や冬の気温に少し先行して変動しているようにみえるが，それは堆積物における年代決定の誤差が原因であろう．一方，2001 年以降のクロロフィル *a* 量の変動は，冬の平均気温の変動と逆に動いているが，その原因は不明である．

2. クロロフィル *a* 量と気象要素との相関

降水量や気温といった気象要素と湖水中のクロロフィル *a* の年間存在量との間の相関について種々の検討を行った（Table 2）．例えば，降水量は当該年のみならず 1 年前の降水量との関係も検討した．それらの検討の中で多少なりとも明確な正の相関を示すものは気温であった．一方，日照時間と年間クロロフィル *a* 量との間には負の相関が見出されたが，その問題は別の機会に論じる．

Fig. 9 にクロロフィル *a* 量といくつかの種類の平均気温との相関を示した．これらの中でクロロフィル *a* 量と最も強い相関を示すものは冬の平均気温である．その相関係数は 0.47 であるが，ある程度の統計学的な有意性は満たしている（$n=21$, $p<0.05$）．この場合の冬の平均気温は 12 ～翌 3 月までの月平均気温の平均であり，冬の長さを表しているとみることができる．例えば，冬の平均気温を 1 ～ 3 月までの平均気温に変えてみると，両者の相関が悪くなる．このことも生物生産が単に真冬の気温の低さに支配されているのではないことを示唆する．

一般に，温帯に位置する湖沼のクロロフィル *a* 量は，春季と秋季における湖水の全循環期に多く，真夏や寒さの厳しい冬季には少ない（例えば，Wetzel, 1975, p. 322-323）．真夏には強い温度成層のために表層で栄養塩が不足し，また，強光障害も生じて生物生産が制限されるからである．真冬にも弱く温度成層する時期があり，栄養塩の不足と低温のために生物生産が低下する．一方，全循環期には，深層にあった栄養塩が表層にもたらされ，まだ十分に利用できる太陽光によって植物プランクトンの大増殖（ブルーム）がおきる．増殖したプランクトンは湖水の循環に伴って水塊の全体に均一に分散することもこの時期にクロロフィル *a* 量が大きくなる一因である．厳しい寒さの期間が短いということは，生産性の低い冬季が短いということである．それは，秋の全循環が遅くまで続くこと，および，早い時期から春の全循環がはじまることも意味している．この全循環期間が引き延ばされることが，年間の生物生産量を増加させているものと考えられる．

木崎湖における実情を検討する．前年 12 ～翌年 3 月までの各月のクロロフィル *a* 量の和を求め，冬季クロロフィル *a* 量 I とする．ただし，結氷が起きる 2 月を中心として観測値のない月があるので，12 ～ 3 月までのうちに 3 ヶ月以上の測定値がある場合に限って検討することとし，欠測月は他の 3 ヶ月の平均値で補うことにする．このことによって 1981 ～ 2002 年までの間で 15 年分の冬季クロロフィル *a* 量 I の資料を得ることができる．その冬季クロロフィル *a* 量 I と冬の気温（前年 12 月～翌年 3 月）との相関を検討すると，$r=0.59$（$n=15$）の良い相関をしめす．このことは，冬季に暖かいことが高い生物生産を生みだしているという見解を裏付けている．

次に冬季のクロロフィル *a* 量と年間クロロフィル *a* 量との関係を検討する．そのために，1 ～ 3 月までと 12 月のクロロフィル *a* 量の和を求め，それを冬季クロロフィル *a* 量 II と呼ぶことにする．欠測月に対して前述の場合と同様の手

Table 2. List of the weather factors, annual chlorophyll a amount and total organic carbon content of sediment in Lake Kizaki from AD 1979 to 2002

Factors / Year AD	Precipitation (mm/y)	Temperature (℃)					Annual chlorophyll a amount (mg/m^2)	TOC(%) in sediment
		Annual average	Summer average (Jun-Sep)	Winter average (Dec-Mar)	Maximum	Minimum		
1979	1093	10.5	20.2	–	32.5	−13.1	–	3.98
1980	1359	9.2	19.3	−0.6	30.0	−13.0	–	4.12
1981	1343	8.5	19.4	−2.2	30.9	−18.0	–	4.00
1982	1288	9.1	18.1	−1.7	30.1	−16.5	1465	3.66
1983	1620	9.0	19.1	−0.9	31.7	−14.9	1588	3.81
1984	1180	8.3	19.9	−4.1	32.3	−15.7	1238	4.27
1985	1874	9.3	19.7	−1.5	32.4	−16.3	1199	4.64
1986	1098	8.6	19.2	−2.7	31.2	−15.4	1525	4.80
1987	970	9.6	19.6	−0.6	31.5	−13.7	1649	5.18
1988	1656	8.5	19.2	−1.2	29.6	−14.5	3023	5.50
1989	1562	9.3	18.9	−0.3	29.4	−15.1	2585	5.49
1990	1313	10.1	20.1	0.0	31.5	−15.0	2619	5.58
1991	1692	9.4	19.7	−1.1	31.4	−15.1	3337	5.33
1992	1106	9.1	18.9	−0.2	32.2	−12.1	3803	5.20
1993	1653	8.7	18.0	−0.5	29.3	−14.3	3220	5.32
1994	776	9.9	20.8	−1.6	33.6	−14.5	2986	5.00
1995	1398	8.5	18.6	−1.4	32.2	−14.5	2116	4.30
1996	1300	8.6	19.0	−2.2	31.4	−14.7	1602	4.70
1997	1182	9.4	19.5	−1.0	31.7	−16.5	2086	4.91
1998	1738	10.4	19.8	−0.4	30.2	−14.6	3140	4.90
1999	1446	10.0	20.6	−0.4	31.9	−15.1	2979	4.50
2000	1345	9.7	20.3	−1.3	33.8	−14.0	2956	4.46
2001	1342	9.6	20.5	−1.5	33.6	−17.0	1808	4.92
2002	1418	10.2	20.8	0.1	35.0	−15.1	1360	5.07

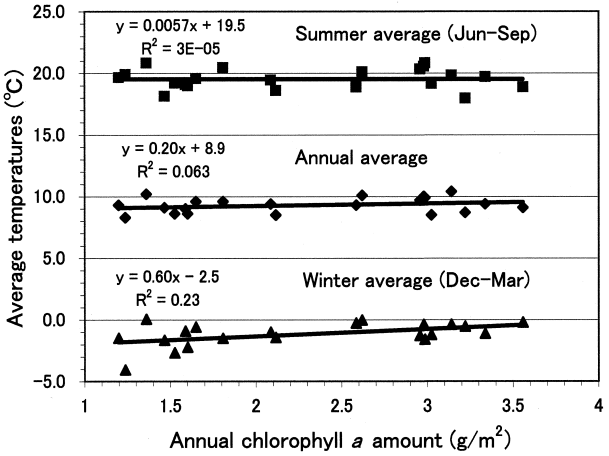

Fig. 9. Relationship between annual chlorophyll *a* amount and various kinds of average temperatures from 1980 to 2002.

続きを行うと，16 年分の冬季クロロフィル *a* 量Ⅱの測定値を求めることができる．それと年間クロロフィル *a* 量との間には 0.9 以上の高い相関がある．また，年間クロロフィル *a* 量が約 1200 ～ 3800 mg/m^2 で変動している（最大変動幅 2600 mg/m^2）のに対して，冬季のクロロフィル *a* 量は，400 ～ 1700 mg/m^2 で変動しており，その変動幅は最大 1300 mg/m^2 ほどあって，年間の変動幅の半分程度を賄っている．しかし，これだけでは年間の増減のすべてを賄うことはできない．冬季の生物生産の多さが他の季節の，とくに春から初夏，および秋の生物生産の多少に影響するメカニズムが存在する可能性も示唆される．いずれにしても冬季のクロロフィル *a* 量の多少が，年間クロロフィル *a* 量を支配する大きな要因となっており，そこに冬の気温が年間のクロロフィル *a* 量（生物生産性）に影響する原因があると考えられる．

3. TOC 含有率とクロロフィル *a* 量および気象要素との相関

堆積物中の TOC 含有率とクロロフィル *a* 量および冬の平均気温との関係を Fig. 10 に示したが，前 2 者の間の相関係数は 0.50 であり，1 %の有意水準をもつ（$n = 21, p < 0.01$）．TOC 量と冬の平均気温との間にも $r = 0.44$ の相関がある．

洪水層は瞬間的な堆積物であり，また，TOC 含有率は希釈されて低濃度となっているので，その層準は TOC 含有率の経年変化（Fig. 8）や相関の検討（Fig. 9）から除かれている．しかし，洪水層の前後の層準にまで洪水堆積物の影響が及んでおり，本来よりも含有率が低下している可能性があること，また，洪水のあった 1983 年と 1995 年が寒い冬と偶然に一致して，見かけ上の相関を生ぜしめている可能性も指摘できないわけではない．その検証のために 1983－84 年と 1994－95 年のデータを除外して相関を検討すると，TOC 含有率と年間クロロフィル *a* 量との相関係数は $r = 0.42$ と少し悪化し，TOC 含有率と冬の気温との相関は $r = 0.49$ と改善される（Table 2 の資料で計算できる）．このような検討によっても相関の度合いに大きな変化は起きないので，これら

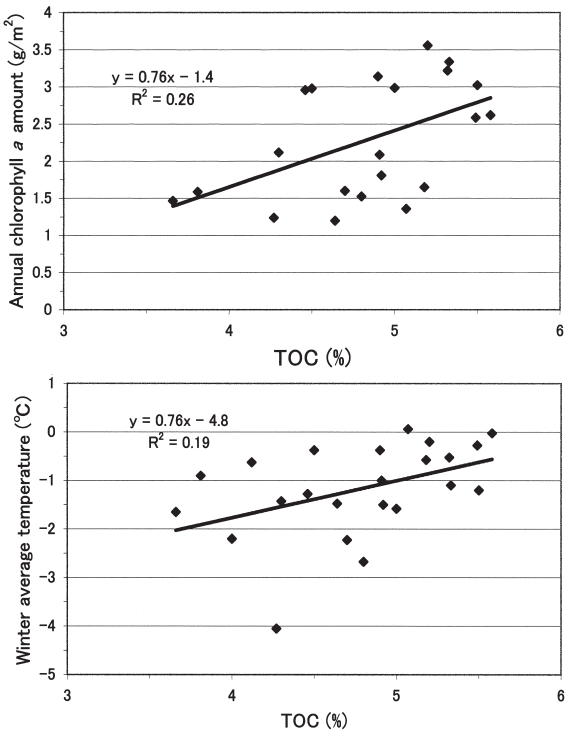

Fig. 10. Relationships of TOC content with annual chlorophyll a in water column and average air temperature of winter.

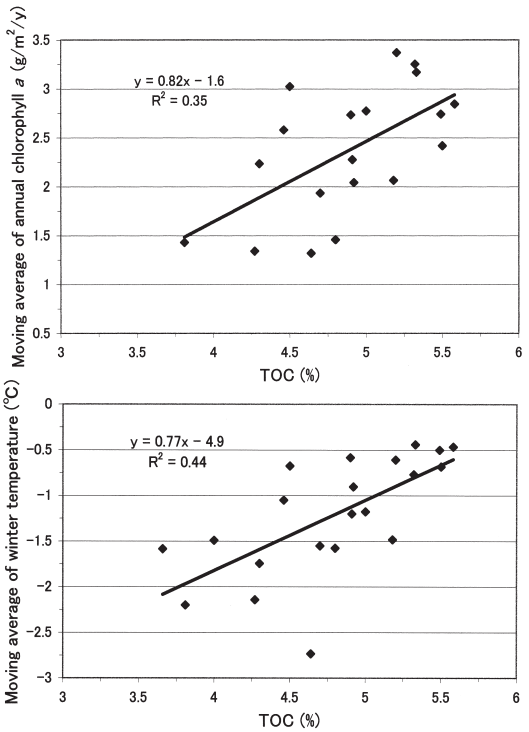

Fig. 11. Relationships of TOC content with 3-year moving averages of annual chlorophyll a amount and average winter air temperature.

の相関が偶然とは考えにくい．

堆積物中の TOC 含有率は 0.5 cm ごとに測定しており，約 1 年間の平均値であるが，ある年の 1 ～ 12 月にきちんと対応している保障はない．また，堆積後に多少の生物擾乱を受けるので，上下の堆積物とのある程度の混合も想定される．それ故，TOC は多少とも前後の年と平均化された値と考えられる．気象要素（冬の平均気温）やクロロフィル a 量は暦年の各年に相当しているが，その平均化された経年変化をみるために 3 年ごとの移動平均をとり，その各年の値と TOC 量との相関を検討すると，TOC 含有率はクロロフィル a 量とは $r = 0.59$（$n = 19$, $p < 0.01$），冬の平均気温とは $r = 0.67$（$n = 22$, $p < 0.01$）の高い正の相関が認められる（Fig. 11）．移動平均をとることによって相関が良くなるおもな原因は，堆積物中の TOC 含有率と他の要素との年代的ずれが緩和されたことによるものと考えられる．逆にいえば，これは年代推定に 1，2 年の誤差がある可能性を示唆する．

一般に，気候要素と生物活動や他の自然現象との間に明確な相関を見出すことはしばしば困難である．それの原因の一つは，ある現象を引き起こす要因が 1 つとは限らず，間に複雑なプロセスが介在していることである．また，統計学的に十分な検討を行うにたる数の資料を得ることが困難な場合が多いからである．ここで検討しているような自然の複雑な系の中で，栄養塩の増減や堆積物の年代決定の不確実さといった要素があるにもかかわらず，冬の平均気温が TOC 含有率との間に安定して正の相関があることは，前述したように，冬の気温が湖底堆積物中の TOC 含有率に強く影響するプロセスがあることを示唆している．

有機物および TOC などの含有率は無機的な砕屑物の供給量の増加によって希釈されうるので，そのままでは単位時間あたりの沈積率を表すとはいえない．しかし，砕屑物の供給量に変化がなければ堆積速度がほぼ一定となり，含有率は沈積率に比例する．地質時代の堆積物において正確な堆積速度を求めることは難しいが，しばしば堆積速度はおおよそ一定だったと仮定される．そのような仮定が許されるような条件下では，湖沼堆積物の TOC 含有率は，過去の冬の気温（短さ）を反映する指標として有効であることを示している．

この論文で検討した木崎湖における堆積物の場合，1995 年 7 月以降に当たる深度 0 ～ 4.5 cm では 0.54 cm/年，1983 年 9 月～ 1995 年 7 月に当たる深度 5.5 ～ 10.5 cm では 0.42 cm/年，1969 年 8 月～ 1983 年 9 月に当たる深度 11.5 ～ 16.5 cm では 0.35 cm/年という厚さ平均堆積速度が見積もられている．コアの最上部は極めて流動的であるのに対して，深度の増加とともに圧密作用の進行によって密度が増加する．その影響を除いた重量堆積速度に換算すると深度 0 ～ 4.5 cm と 5.5 ～ 10.5 cm の間ではほとんど差はない．深度 11.5 ～ 16.5 cm では前 2 者に比べてやや小さいが，その範囲の検討資料は少ないので，ここでの検討においては堆積速度が変化することによる影響はほとんどないものと考えられる．

長期間にわたる古気候情報はこれまで極域や遠洋の深海底に偏っていたが，TOC 含有率は湖水が全循環を起こす中緯度～高緯度地域の湖沼に広く適用できる可能性がある．例えば，北米，グレートベーズンの氷河湖堆積物においても

TOC 含有率が亜間氷期に対応したピークを示すことが報告されている（Benson et al., 1998, 2003）．TOC の測定は比較的容易に行えるので多数の試料を短時間で分析できる．それ故，高分解能の気候指標としての優位性をもっている点も強調しておきたい．

4. その他の要因との関係

堆積物には底棲動物の活動による擾乱の影響があるといわれている．木崎湖の堆積物中にもユスリカの幼虫が認められることもあり，底棲生物の活動による多少の上下混合があることは確かである．しかし，深度 17 ～ 23.5 cm にみられる数 mm 単位の平行な葉理が保存されていることからみても，また洪水堆積物もその特徴が残されていることからみても，生物活動による擾乱は相対的に軽微なものであると判断される．

湖底堆積物中の有機物量は，微生物の分解によって深度の増加とともに減少すること，なかでも窒素を含む有機物は炭化水素よりも分解を受けやすいために深度の増加とともに C/N 比が増加することが指摘されている（例えば, Matsuda and Koyama, 1977）．しかしながら，ここで検討した木崎湖のコア試料には，深度の増加に伴った規則的な TOC および TN の減少は認められず，また，C/N 比の増加もみられない．むしろ，深度の増加とは関係のない，不規則な変動とみるべき変化である．その原因の一つはすでに指摘した洪水堆積物による希釈であり，もう一つは生物生産量の経年的な変化と考えられる．木崎湖と中綱湖において初期続成過程を研究した Koyama（1966）の研究において，深度とともに規則的に TOC や TN が減少し，C/N 比が増加すると主張されているが，データはそれを裏付けていない．Matsuda and Koyama（1977）では，諏訪湖における事例研究が根拠の一つとされているが，筆者らの最近の調査では諏訪湖においても深度とともに規則的に TOC や TN が減少するという事実は認められない．それ故，堆積時に含まれた有機炭素・窒素含有量は，微生物による分解等によって組成や形態は変化するかもしれないが，総量としてはほとんど変化せずに保存されているものと考えられる．

湖水中の生物生産がリンや窒素といった栄養塩の多少に支配されていることは周知の事実である．木崎湖の定期観測においては栄養塩の継続的な測定は行われていないが，長野県の衛生公害研究所によって測定された 1982 ～ 92 年の全リン量および全窒素量の測定値がある（Okino and Watanabe, 2001）．それによれば全リン量は 0.009 ～ 0.014 mg/l で，全窒量は 0.34 ～ 0.54 mg/l で変動しているが，規則的な増加傾向はなく，また，同じ期間の年間クロロフィル a 量の変動とも相関を示さない．栄養塩に関する資料は断片的なので，栄養塩の影響を十分に検討することはできない．しかしながら，前述したようにいくつかの富栄養化の指標がみられる木崎湖においても，冬の気温と年間クロロフィル a 量，および堆積物中の TOC 量との間に相関が認められるということは，冬の気温が栄養塩供給の変化などの影響を越えて生物生産を大きく支配していることを示している．

木崎湖においても，クロロフィル a 量に反映する植物プランクトンの主体の一つは珪藻である．加ほか（2003）は，琵琶湖では年間（8 ～翌 7 月まで）の珪藻細胞数の増減はその夏期の降水量に支配されていると指摘している．木崎湖の資料について，同じ年および前年の夏半年および年間の降水量とクロロフィル a 量および堆積物中の TOC 含有率との関係を 21 年分について検討したが，いずれの場合にも TOC と降水量との間に相関は認められなかった．加ほか（2003）の結論の重要な根拠となった観測データは水深 0.5 m の表層 1 点における 15 年間の資料である．例えば，木崎湖における観測では，クロロフィル a 量は全循環期において全深度でほぼ同じ高い濃度を示すのに対して，夏期の成層期には深度 10 m ほどにある水温躍層の少し上にピークがあり，深度と季節による変化が大きい．琵琶湖と木崎湖とでは生物生産を規制するメカニズムに相違がある可能性もあるが，表層 1 点での観測資料で全水中の生物生産量を代表させることに無理があるとも考えられる．

結　　論

2003 年 12 月に採取したコア試料中の有機炭素含有率（TOC 含有率），木崎湖における 21 年間の湖沼観測資料，および近接する大町市の気象記録との間の相関を検討した結果，冬の平均気温と年間クロロフィル a 量および湖底堆積物中の TOC 含有率との間に正の相関が認められた．平均気温が高い（暖かい）冬は，厳しい寒さの期間が短いという点に特に意味がある．それは，生産性の低い冬の期間が短いことと，湖水が鉛直方向に全循環して湖深部からの栄養塩の供給によって高い生物生産が維持される春と秋の期間が長いことに対応して，年間を通しての全生物生産量が増加するものと考えられる．一方，増加した生物生産は，最終的に余剰となって湖底に沈積する有機物の量に反映しており，これが湖底堆積物に保存されるものと考えられる．このことは，堆積速度がほぼ一定ということが仮定できるならば，湖沼堆積物中の TOC 含有率が過去の気温（冬の暖かさ＝短さ）を示す指標として有効であることを示している．TOC 含有率の測定は比較的簡単に行えるので，高分解能の気候指標としての優位性をもつている点も重要である．

謝　辞　信州大学理学部の湖沼生態学研究グループとその後継者による長年にわたる木崎湖の調査・観測が本研究に不可欠の資料となった．同グループとその調査参加者に深く敬意と感謝を表する．本研究の一部には文部科学省科学研究費補助金（課題番号 15340168）を使用した．

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.

Arai, T. and Hayashi, H., 2001, Water temperature. *In* Saijo,Y.and Hayashi, H., eds., *Lake Kizaki-limnology and ecology of a Japanese lake-*, Backhuys Publishers, Leiden, 70-73.

Benson, L.V., Lund, S.P., Negrini, R., Linsley, B. and Sic, M., 2003, Response of North America Great Basin lakes to Dansgaard-Oeschger oscillations. *Quatern. Sci. Rev.*, **22**, 2239-2251.

Benson, L.V., May, H.M., Antweiler, R.C., Brinton, T.I., Kashgarian, M.,

Smoot, J.P. and Lund, S.P., 1998, Continuous lake-sediment records of glaciation in the Sierra Nevada between 52,600 and 12,500 ^{14}C yr B.P., *Quatern. Res.*, **50**, 113-127.
Funakoshi, M., Kiyosawa, H. and Hayashi, H., 2001, *Anabaena* and algophorous amoebae. *In* Saijo, Y. and Hayashi, H. eds., *Lake Kizaki -limnology and ecology of a Japanese lake-*, Backhuys Publishers, Leiden, 259-274.
林　秀剛・飛沢　浩・清沢弘志, 1987, 木崎湖湖底堆積物中の珪藻殻. 信州大学環境科学論集, no. 9, 64-68.
Hayashi, H. and Yoshioka, T., 2001, Chlorophyll *a* and primary production. *In* Saijo, Y. and Hayashi, H. eds., *Lake Kizaki -limnology and ecology of a Japanese lake-*, Backhuys Publishers, Leiden, 248-253.
Horie, S., Yasukawa, K., Yamamoto, A., Yokoyama, T. and Hyodo, M., 1980, Paleolimnology of Lake Kizaki. *Ardi. Hydrobol.*, **89**, 407-415.
Inouchi, Y., Yokota, S. and Terashima, S., 1996, Climatic change around Lake Biwa during the past 300,000 years and 2,000 years. *In* Mikami, T., Matsumoto, E., Ohta, S. and Sweda, T. eds., *Proc. 1995, Nagoya IGBP-PAGES/PEP- Symp.* 109-114.
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. 地球惑星関連学会 2001 年合同大会, Gn-002.
Koyama, M., 1966, Ratios of the organic carbon, nitrogen and hydrogen in recent sediments. *Coal Sci., Advan. Chem. Ser., Amer. Chem. Soc.*, no. 55, 43-57.
公文富士夫, 2003, 古気候指標としての湖底堆積物中の有機炭素・窒素含有率の有効性. 第四紀研究, **42**, 195-204.
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.
Kumon, F., Ohno, R., Sakai, T. and Sakai, J., 2000, Climatic records during the last 40,000 years in Lake Nojiri, central Japan. *In* Mikami, T., ed., *Proceedings of the International Conference on the Climatic Change and Variability-Past, Present and Future-*. Intern. Geographical Union, Comm. Climatology, 41-44.
公文富士夫・田原敬治・山本雅道, 2004, 信州, 木崎湖における最近の堆積物の年代と堆積速度. 山地水環境教育研究センター研報, no. 3, 77-84.
加　三千宣・吉川周作・井内美郎, 2003, 琵琶湖湖底堆積物の年間珪藻堆積記録から見た過去 14 万年間の降水量変動. 第四紀研究, **42**, 305-319.
Meyers, P. A., 1997, Organic geochemical proxies of paleoceanographic, paleolimnologic and paleoclimatic processes. *Org. Geochem.*, **27**, 213-250.
Matsuda, M. and Koyama, T., 1977, Early diagenesis of fatty acids in lacustrine sediments-I. Identification and distribution of fatty acids in recent sediment from a freshwater lake. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **41**, 777-783.
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対比, C/N 比および FeS_2 含有量から見た名古屋港周辺の古気候, 海水準変動. 第四紀研究, **24**, 167-177.
仁科三湖環境保全対策専門委員会, 1983, 仁科三湖の環境保全をめざして. 仁科三湖環境保全対策専門委員会報告, 157p.
Okino, T. and Watanabe, Y., 2001, Eutrophication and the nutrient balance. *In* Saijo,Y. and Hayashi, H., eds., *Lake Kizaki -limnology and ecology of a Japanese lake-*, Backhuys Publishers, Leiden, 363-370.
Park, H.D., 2001, Freshwater red tides of *Peridinium bipes*. *In* Saijo,Y. and Hayashi, H., eds., *Lake Kizaki -limnology and ecology of a Japanese lake-*, Backhuys Publishers, Leiden, 278-299.
Park, H.D. and Hayashi, H., 1993, Role of encystment and excystment of *Peridinium bipes* cf. *occulatum* (Dinophyceae) in freshwater red tides in Lake Kizaki, Japan. *Jour. Phycol.*, **29**, 435-441
西条八束, 1956a, 湖沼における物質代謝の化学的研究（第 1 報）－木崎湖, 中綱湖, 青木湖の化学的環境. 日本化学雑誌, **77**, 917-923.
西条八束, 1956b, 湖沼における物質代謝の化学的研究（第 4 報）－木崎湖, 中綱湖, 青木湖の沈殿現象に関する二, 三の考察. 日本化学雑誌, **77**, 930-936.
Saijo, Y. and Hayashi, H., 2001eds., *Lake Kizaki: Limnology and ecology of a Japanese lake*. Backhuys Publishers, 427p.
西条八束・三田村緒佐武, 1995, 新編湖沼調査法. 講談社, 230p.
Sampei, K. 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.
Strum, M. and Matter, A., 1978, Turbidites and varves in Lake Brienz (Switzerland) : deposition of clastic detritus by density currents. *IAS, Spec. Publ.*, no. 2, 147-168.
Wetzel, R.G., 1975, *Limnology*. W.B. Saunders Comp., Philadelphia, 743p.
山本雅道・戸田任重・林　秀剛, 2004, 木崎湖の定期観測（1981-2001）の結果（1）. 山地水環境教育研究センター研報, no. 3, 85-121.

（要　旨）

公文富士夫・金丸絹代・田原敬治・角田尚子・山本雅道・林　秀剛，2005，湖底堆積物中の有機炭素含有率と湖水中の生物生産性，および気象要素との関係－長野県，木崎湖における 21 年間の湖沼観測からの検証－．地質雑，111，599－609．（Kumon, F., Kanamaru, K., Tawara, T., Kakuta, N., Yamamoto, M., and Hayashi, H., 2005, Relationships among weather factors, biological productivity and TOC content of sediments in Lake Kizaki, central Japan. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **111**, 599－609）

木崎湖において 2003 年 12 月に採取した 35 cm 長の柱状堆積物について検討し，1969 年以降の 3 回の大洪水の層準を認定した．その年代をもとにして平均堆積速度を求め，有機炭素含有率の経年的な変化を求めた．一方，1981 年以降に木崎湖で行われてきた毎月の湖沼観測記録をまとめ，21 年間のクロロフィル *a* 量の経年的な変化を明らかにして，湖水中の生物生産量の指標とした．また，アメダス気象観測資料を用いて，気温や降水量などの気象要素の資料を得た．これら 3 者間の相関を検討して，有機炭素含有率は，年間クロロフィル *a* 量および冬の平均気温と有意な相関をもつことを見出した．冬の暖かさ（厳しい冬の短さ）が冬季の生物生産性を高め，それが年間の生物生産量に影響を与えて，堆積物として沈積する有機物量を増加させたと考えられる．湖沼堆積物中の有機炭素含有率は，過去の気温（冬の平均気温）の指標として有効である．