

中部山岳地域の湖沼堆積物の有機炭素含有率を指標とした過去 16 万年間の 気候変動復元

Detailed reconstruction of paleoclimate based on total organic carbon proxy of lake sediment during the past 160 ka in central Japan

公文富士夫 田原敬治

Fujio Kumon and Takaharu Tawara

地質学雑誌 第115巻 第7号 別刷

2009年7月

THE JOURNAL OF THE GEOLOGICAL SOCIETY OF JAPAN VOL. 115 NO. 7

July 2009

中部山岳地域の湖沼堆積物の有機炭素含有率を指標とした過去16万年間の気候変動復元

Detailed reconstruction of paleoclimate based on total organic carbon proxy of lake sediment during the past 160 ka in central Japan

公文富士夫* 田原敬治***

Fujio Kumon and
Takaharu Tawara****

2008年1月29日受付.

2009年3月5日受理.

* 信州大学理学部

Faculty of Science, Shinshu University, Asahi
3-1-1, Matsumoto 390-8621, Japan

** 信州大学大学院総合工学系研究科

Interdisciplinary Graduate School of Science
and Technology, Shinshu University, Asahi 3-
1-1, Matsumoto 390-8621, Japan

* 現所属: 和歌山県立新宮高校

present address; Shingu High school, Kamiku-
ra 3-2-39, Shingu 647-0044, Japan

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

Abstract

A detailed reconstruction of paleoclimate over the past 160 ka has been achieved with a 20-40 year interval, based on the total organic carbon (TOC) and total nitrogen (TN) contents of lake sediments from Lake Nojiri and the Takano Formation, central Japan. The validity of the reconstruction is supported by an analysis of pollen grains from the same sediments. The result represents one of the most detailed and continuous reconstructions of paleoclimate for a land area in Japan during the late Quaternary. The reconstruction provides a key to our understanding of late Quaternary climate in Japan, because the studied sediments contain many widespread tephra marker layers, thereby enabling the correlation of the reconstructed paleoclimate with other areas in and around the Japanese Islands.

The TOC content of lake sediment is controlled mainly by the biological productivity of lake water (aquatic organic matter) and the input rate of organic matter from land areas (terrestrial organic matter), as well as the degree of decomposition after deposition. Biological productivity appears to be the main controlling factor in lakes within mid-latitude Japan that contain silt- and clay-rich sediments. Short- and long-term fluctuations in TOC are well correlated with the marine $\delta^{18}\text{O}$ pattern of SPECMAP and with $\delta^{18}\text{O}$ profiles from ice cores in Greenland. The validity of the paleoclimate reconstructed based on TOC is supported by the results of pollen analysis, although the pollen data have relatively low temporal resolution. Therefore, in our reconstruction we can identify marine isotope stages (MIS) 1 to 6 and many of the interstadial events recognized in Greenland ice cores.

A detailed comparison of the obtained TOC curve with the SPECMAP curve reveals a slight lag in the TOC peaks, which are typically recognized in the MIS 5b and 5d stages. This lag may reflect local factors specific to the Japanese Islands.

Keywords: organic carbon content, lake sediment, late Pleistocene, paleoclimate, Lake Nojiri, Takano Formation

はじめに

第四紀後半の古気候や古環境の解明は、1970年代以降に極域や遠洋域において各種の手法と指標を用いて高精度で遂行され、全球的な気候変動が明らかにされてきた(例えば、Dansgaard et al., 1969; Hays et al., 1976; Martinson et al., 1987; Dansgaard et al., 1993)。一方、人類が多く居住する中緯度の陸域については、その重要性に比して、量と質においてかなり不十分な古気候・古環境情報しか得られていない。例えば、温室効果ガスの人為的増加が引き起こす気候変動は、全球的に一律に生じるものではなくて、その強制力に対する応答には地域的な違いがあるものである。極東アジアの海に囲まれた陸域に住む我々にとって、特に必要となるの

は日本列島地域の気候変動を正しく予測するための情報である。そのような地域性を反映した古気候情報はそれぞれの地域でしか得られないものであるとともに、全球的な気候変動の理解を深めるうえでも不可欠なものである。

湖沼堆積物は中緯度地域の古気候情報の媒体として、1) 長期間にわたる均質な記録、2) 陸域の環境をほぼ直接的に反映、3) 各地に普遍的に存在、4) 遠洋性堆積物などに比較して堆積速度が大きいために高い時間分解能の解析が可能、といった利点を持つ。一方では、1) しばしば年代決定が困難、2) 利用できる古気候プロキシが限定的、等の不利な面もある。筆者らは湖沼堆積物中の全有機炭素(TOC)および全窒素(TN)の含有率(量)とその比(C/N比)が、気候指標として有効であることに注目して、いくつかの事例研

究を進めてきた (Adhikari and Kumon, 2001; Adhikari et al., 2002; 公文ほか, 2003; 田原ほか, 2006). その研究を積み重ねるなかで、堆積物の有機炭素含有率や窒素含有率といった簡便な指標を有効に利用することで、陸域の古気候を高時間分解能で、かつ長期間にわたって復元することが可能であるという見通しを得た。本総説では、有機炭素含有率をおもに扱って、それが日本列島における第四紀後半の気候変動を詳細に解明する上でいかに有効に働くか、ということに重点をおいて事例を紹介し、その原理と有効性、限界についても言及する。

事例としては、TOC 含有率が高時間分解能で測定されており、かつ、花粉組成からもその古気候解析の妥当性が保証されている野尻湖堆積物と湖成高野層の資料を使い、それらを標準化して集成することによって解明できる古気候変動の「可能性」を提示する。なお、紹介する事例の出典を明示しておく。野尻湖堆積物の後半 (約 2.5 万年前以降) の有機炭素量・花粉組成については、公文ほか (2003) で公表したものである。前半の 7.2 万年前から 2.5 万年前までについては学会講演 (Kumon et al., 2004, 2006; 公文ほか, 2008) で紹介した。ただし、 ^{14}C 年代の較正などが必要であったので、年代モデルは本論文で改訂されている。高野層の有機炭素・全窒素含有率資料は、田原ほか (2006) で公表されたものであり、その花粉組成は叶内ほか (2007) による講演で紹介されている。高野層の年代モデルは田原ほか (2006) から改定され、長橋ほか (2007) のモデルに基づいている。両者の資料を統合させるために用いた TOC 含有率の標準化は本報告ではじめて行った作業である。講演の引用では資料提示が不十分なので、可能な範囲で具体的な資料を示した。

TOC 含有率や TN 含有率は、比較的簡単な機器分析で測定できるので、限られた予算や人力の範囲内でもデータ密度の高い研究が可能であり、高い時間分解能で気候変動の概要を把握するのに都合がよい。このような研究と花粉分析や有機化合物分析などの研究手法とを組み合わせることで、高精度の古気候・古環境復元を効率よく進めることができると考えられる。なお、日本列島の陸域とその周辺では、指標テフラを利用した対比と年代決定ができることが、解明された古気候を精密に、かつ広域的に対比して総合化する上での大きな強みであることも強調しておきたい。

古気候指標としての有機炭素・窒素含有率の意味

湖沼堆積物中の有機炭素 (TOC) や窒素 (TN) 含有率が過去の気候変動と同調して増減している事例としては、琵琶湖 (Inouchi et al., 1996; Yamada, 2004; Iwamoto and Inouchi, 2007)、中瀬湖 (Adhikari and Kumon, 2001)、青木湖 (Adhikari et al., 2002)、野尻湖 (公文ほか, 2003)、バイカル湖 (Matsumoto et al., 2003) などがある。陸化した過去の湖沼堆積物、高野層における研究でもその事例が報告された (田原ほか, 2006)。また、北米の水河湖、Great Basin Lakes の堆積物中の有機炭素量変動が気候変動を表すことも報告されている (Benson et al., 1996, 1998, 2003 など)。これらの研究の多くでは、TOC 含有率や TN 含有率の

増減が、花粉組成やその他の気候指標が示す寒暖変動または降水量変動と同調していることが示されており、TOC 含有率や TN 含有率の実用上の有効性が例示されている。

堆積物中の有機物が古環境や古気候の優れた指標になることは、Meyers (1997) の総説によっても主張されている。また、湖沼堆積物中の TOC 含有率・TN 含有率の気候指標としての有効性については、公文 (2003) がすでに議論しているので、詳しくは繰り返さない。その議論の要点は、1) 堆積物中の有機炭素量が湖沼内の生物生産性を反映しているのか、2) 生物生産性を支配する気候要因はなにか、3) 有機炭素量は埋没後に変化せずに保存されているのか、ということへの評価にある。なお、湖沼は基本的には閉鎖系であるので、例えば全循環期におけるブルームといった間欠的な生物生産の増加が保存されやすいという条件があることも重要である。

1) と 2) の点に関しては、公文ほか (2005) が木崎湖における過去 21 年間の湖沼観測結果、気象観測資料および湖底堆積物中の TOC 含有率を比較・検討し、生物生産性の指標としての年間のクロロフィル a 量、冬の平均気温および堆積物中の TOC 含有率に正の相関があることを明らかにするとともに、暖かい冬 (寒冷期間の短い冬) には、①生産性の低い冬の期間が短いこと、および、湖水が全循環する期間が長くなることによって、年間の生物生産量が増加し、それが湖底堆積物中に残存する有機物量を増加させる仕組みが存在する可能性を示した。また、Benson et al. (1996) は北米、シェラネバダ山脈中にある氷河湖、オーウェン湖の堆積物中の有機炭素量が氷期-間氷期に応じて変動していることを明らかにし、その原因を氷期における温度低下と結氷、および懸濁物の増加による太陽光透過量の減少に起因する光合成の低下と考えた。一方、Iwamoto and Inouchi (2007) は、温暖期の降水量増加が栄養塩供給を増やし、結果として生物生産量が増加する可能性を重視した。

3) の問題を広く見ると、水塊 (特にその表層) で生産される一次生産物 (有機物) の多くは、高次消費者に利用されるとともに、沈降過程における分解作用を受ける。また、海底 (湖底) 表層での分解や底生生物による利用もあり、それは酸化的な海底環境で顕著である。それらの作用の結果として、海底に沈積して堆積物として保存される有機物の量は当初の生産量から大きく減少し、海盆による差は大きい。深海域の海洋堆積物では 1 % 以下と推定されている (例えば、川幡, 2008, p.162-163)。しかしながら、その様な場合においても堆積物に保存された有機炭素量の変動から過去の生物生産を推定する変換式が提起されている (川幡, 2008 同前)。また西カリフォルニア海盆で生物生産性の変動が過去 30 万年間にわたって適切に復元されている例もある (川幡ほか, 1994)。湖沼では海洋に比べて水深が小さく、また、湖底が還元の場合が多いので、有機物の保存ポテンシャルは高い。

実際、海底 (湖底) 表層から数十 m の深度までの堆積物試料では、下位に向かって系統的に TOC 含有率が減少する現象は認められていない場合も多い (公文ほか, 2003; Matsumoto et al., 2003; 田原ほか, 2006)。Iwamoto and

Inouchi (2007) でも琵琶湖高島沖においては深度 100 m (約 30 万年前) までは系統的な全炭素量の低下はないことを明らかにしている。一方, Gupta and Kawahata (2006) は北西オーストラリア沖の海域で採取されたコア試料において深度とともに (40 万年間にわたって) 有機炭素含有率が減少していることを明らかにしているが, その系統的な減少を補正することによって, もとの生物生産性が復元できることを示している。バイカル湖でも最表層 10 cm ほどの酸化層において顕著な分解があるという指摘があるが, それ以深における過去の生物生産性 (古気候変動) を復元する制約とはなっていない (Fietz et al., 2007)。

また, TOC 含有率が湖内の生物生産とともに湖外からの有機物粒子の流入の影響を受けている可能性もある。この問題に対しては, 陸上植物の有機炭素量と全窒素量の比 (以下 C/N 比と略称する) は, 20 ~ 40 と高い値を取るのに対して, 水中プランクトンの C/N 比は 6 ~ 10 程度と低いことを利用して, 外来性と湖内性の有機物の C/N 比にある基準を導入して, 外来有機物と湖内自生有機物の寄与率を明らかにしようとする試みもなされている (中井ほか, 1982; Matsumoto et al., 2003; Tawara et al., 2007)。一方, 無機的な碎屑粒子による希釈が, 見かけ上の濃度変化を引き起こす可能性も考えられるが, 試料として均質な泥質堆積物を選び, 砂層や火山灰を避けて分析すれば希釈の影響は抑制できる。また, 分析数を増やして短い時間間隔での分析を行うことで, 偶発的な碎屑物の流入の影響を最小限に抑えることができる。

気候のどの要素が生物生産性に最も強く影響しているか, という点では, 降水量を重視する意見と気温を重視する見解とがある。加ほか (1997, 2003) や Kuwae et al. (2002) では, 珪藻殻数の検討から, 温暖化に伴う降水量の増加が陸域からの栄養塩供給を増やし, 生物生産性を高めたということが主張されている。Iwamoto and Inouchi (2007) も同様の見解を示している。一方, 公文ほか (2005) は, 冬季の気温の上昇が真冬の前後における湖水の全循環期間の拡大をもたらし, 深層水 (湖底) からの栄養塩の回帰が生物生産性を高める可能性を指摘している。また, 降水の増加に伴う河川流入量の増加は, 陸上の有機物片 (粒子) の流入を増やすので, 湖底堆積物中の有機炭素含有率を増加させる可能性もある。しかし, 一方では降水量の増加は無機的な碎屑物粒子の増加をもたらす可能性があり, その希釈効果があるので, 降水量の増加が陸源の有機炭素含有率を増やすと単純には言えない。例えば, 汽水湖である中海で明らかにされた過去 8000 年間の有機炭素含有率は, 生物生産性の増減とともに堆積速度 (碎屑物粒子の供給量) の大小に影響されて変動していることを示しており (三瓶ほか, 1996), 個別事例にそって検討が必要である。

モンスーン帯に位置する日本列島では, 温暖な時期には太平洋側からの水蒸気の供給によって降水量が増加し, 降水量の増加は陸から湖に流れ込む栄養塩の総量を増加させる可能性が高い。温暖期に暖流が日本海に流入するという条件も冬季の降水 (積雪) の増加要因となる。また, 研究対象としている中部地域の山地帯は, 温暖期には冷温帯性の落葉広葉樹

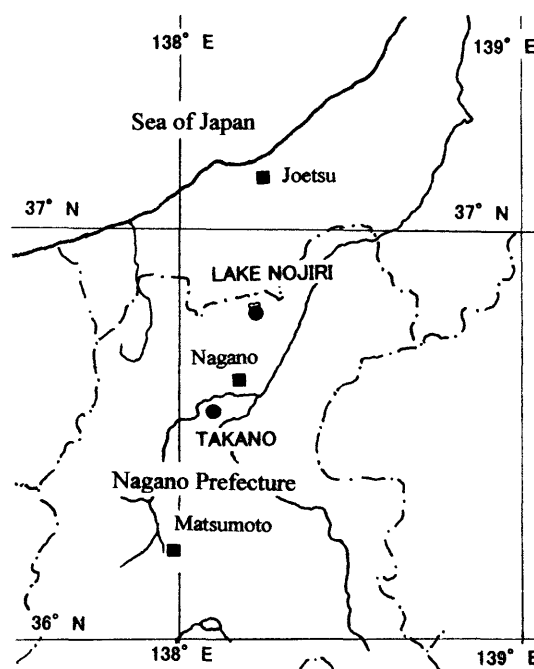


Fig. 1. Locality of study sites.

林が成立しており, 寒冷期の針葉樹林と比較して陸からの栄養塩や有機物粒子を多く湖内にもたらす可能性がある。これらの要素のどれが主要であるか, という点についての解明には課題を残しているが, 後述するように花粉組成が示す温暖期に湖底堆積物中の TOC 含有率が高いという関係があることは, 温暖化に応じて湖底に沈積する有機物量を結果として増加させるシステムが存在していることを示している。それ故, 日本列島のような中緯度にある湖沼堆積物中の TOC 含有率および TN 含有率は温暖化を表す古気候の指標として有効性を持つ可能性が高い, と結論づけることができる。

野尻湖堆積物に認められる過去 7 万年間の気候変動

1. 調査位置とボーリング試料の特徴

野尻湖は, 長野県の最北部, 新潟県との県境に近い位置にある面積 4.6 km² の貧栄養湖である (Fig. 1)。平均水深 20.8 m (最大水深 38 m) と比較的大きな水深を持ち, 湖底下には最大で 100 m に近い厚さの堆積物が存在する (野尻湖地質グループ音波探査サブグループ, 1987)。1988 年に野尻湖の北岸よりの水深 28.9 m の湖底で学術ボーリングが行われ, 基盤に達する 45.1 m のコア試料 (NJ88) が得られている (公文・井内, 1990)。また, 1995 年には堆積速度の大きい水深 36 m ほどの湖心部で湖底から 35 m の深さまでの学術ボーリング (NJ95) が行われている。これらのコア試料は, いずれもほぼ均質なシルト質粘土で構成され, 多数のテフラ層を挟むことで特徴づけられる (公文・井内, 1990; Kumon et al., 2004)。両コア試料は指標テフラで精確に対比されている (Fig. 2)。なお, NJ88 コアのテフラ同定と命名は野尻湖火山灰グループ (1993) に従い, NJ95 コアについ

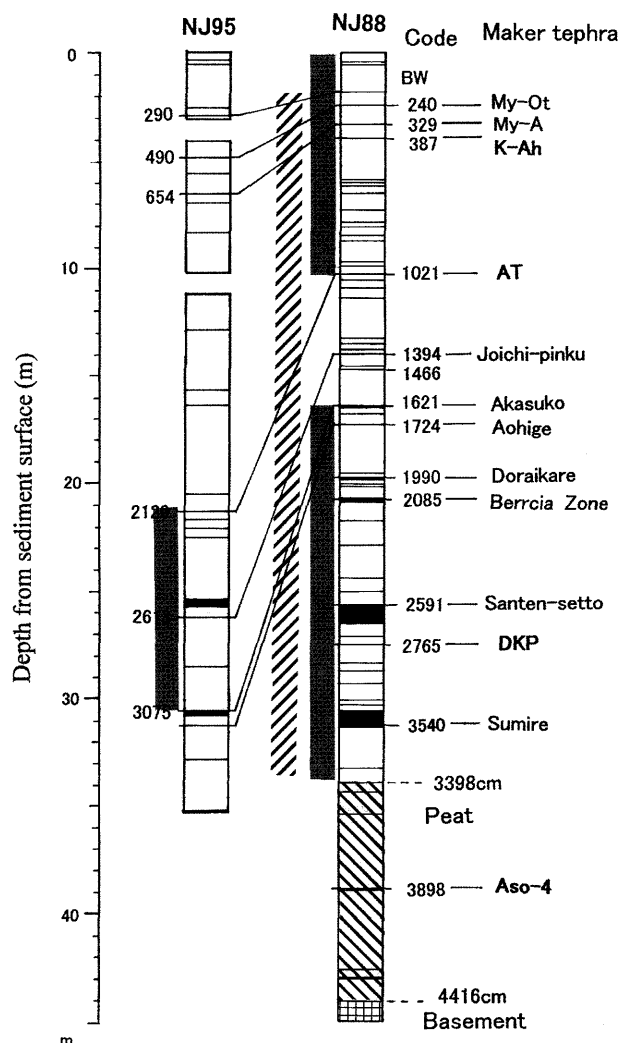


Fig. 2. Columnar sections of the sediment cores (NJ88 and NJ95) from Lake Nojiri, central Japan. Solid lines in the sections show marker tephra horizons, and tephra codes are after Volcanic Ash Research Group for Nojiriko Excavation (1993), and are same in Table 1 and Fig. 3. Shaded horizons are used for TOC and TN analysis, and hatched horizon is for pollen analysis.

でもそれに準じた。

2. 分析方法

これらのボーリング試料を用いて、NJ88 コアの深度 0 ~ 1021 cm および 1621 ~ 3398 cm については、厚さ 0.5 ~ 6 cm 間隔 (ほとんどは 1 ~ 2 cm 間隔) で、NJ95 コア試料については深度 2129 ~ 3075 cm を厚さ 1 cm 間隔で、TOC・TN 含有率を測定した (Fig. 2)。分析した NJ95 コア試料の最上部は AT テフラに、最下部はアカスコテフラに当たっている。TOC・TN の測定では、公文ほか (2003) に述べた手順に従い、乾燥試料を粉碎して塩酸処理を行った後、Yanako CHN コーダー MT-5 を用いて C, N の含有量を測定した。分析試料の時間間隔は 20 ~ 40 年程度である。また、花粉分析では NJ88 コアから 2 ~ 6 cm の間隔で分取された試料を、公文ほか (2003) で述べた手順で信州大学山岳科学

総合研究所の河合小百合博士が分析したもので、平均で 80 年程度の時間間隔を持つ。なお、肉眼でテフラと識別された試料に対しては TOC, TN の分析は行っていない。

3. 年代モデル

堆積物の年代は、Table 1 にあげた指標テフラの内、K-Ah (7.3 ka), AT (29 ka), Joichi-Pink (38 ka), Akasuko (43 ka), B.Z. (49 ka), DKP (62 ka) の深度と年代値、および公文ほか (2003) で報告した有機質泥層の AMS¹⁴C 放射年代値の一つ (深度 511 cm, 10,270 cal BP) を基準値として用いて、深度-年代の関係から求めた (Fig. 3)。その際に、基準値間は堆積速度を一定と仮定した。なお、本論文で扱う時間スケールで見ると、テフラの堆積に要する時間はごく短いと見なせるので、その累積層厚を除去した深度補正と年代の関係を検討した。

基準として用いた年代のうち、Joichi-Pink, Akasuko および B.Z. テフラの年代は、野尻湖西岸で発掘調査された試料について測定された ¹⁴C 年代測定値 (沢田ほか, 1992) を Fairbanks et al. (2005) の方法によって較正したものである。B.Z. の年代は較正の限界に近い。DKP は放射性炭素年代測定法の限界を超えており、町田・新井 (2003) でも 55 ka 以上とされているだけである。長橋ほか (2006) は、高野層中に NJ88 コアの DKP に相当するテフラ (SG) を見出し、その上位に確認された TKN301 (BW1446) の年代 (39.5 ka) と下位に見出される Aso-4 (88 ka) の年代を基にして、その間の堆積速度を一定と仮定して、SG (DKP) の年代を 62.0 ka と見積もった。信頼できる DKP の直接的な放射年代値は無いので、その年代値 62.0 ka をここでは採用した。作成した年代モデルを用いて、分析した堆積物試料の深度を年代に変換した。

4. TOC・TN 含有率の変動

Fig. 4.A に野尻湖堆積物中の TOC・TN 含有率および C/N 比の経年的な変動を示した。試料記載に基づいてテフラ混入が確認される分析値は除外してあるが、分散したテフラを含む泥質試料やテフラの薄層を挟む試料の分析値を除外しきれていない可能性があり、極端に小さい含有率を示すものにはテフラによる希釈効果がある可能性が考えられる。例えば、約 7 千年前に降に間欠的に見られる極端な落ち込みがそれである。また、2.9 万年から 4.3 万年の間の資料は NJ95 コア試料の分析値なので、NJ88 コアとの系統的な差異がある可能性はある。

TOC 含有率は全体として 1 % 以下の極端に低いものから 8 % に達するものまで大きく変動するが、現在から 1.2 万年ほど前までは 4 ~ 7 % の高い値を持つ。1.2 年前から 1.4 万年前にかけては 5 % から 2 % まで急速に低下するが、途中には一時的な停滞と回復が認められる。1.4 ~ 2.9 万年前では 1 ~ 2 % の低い値で安定している。2.9 ~ 3.8 万年前では、短周期の増減を繰り返すものの、古い時期ほど高い値を持ち、ピークでは 4 % に達する。3.8 ~ 4.9 万年前では数百年から 2, 3 千年の周期で鋸の歯状に増減することが特徴であり、平均として 2 ~ 3 % のやや高い TOC 含有率を持つ。4.9 ~ 6.0 万年前ではピークの不明瞭な増減があるが、全体として

Table 1. Marker tephra layers of the NJ88 core from Lake Nojiri.

tephra name	codes in Figs. 2 & 3	Depth (cm)	calibrated depth(cm)	age(ka)	reference/remarks
Myoko-Otagirigawa	My-Ot	234.6	230.1	4.5	Machida and Arai (2003)
Myoko-Akakura	My-A	329	310.5	6	Machida and Arai (2003)
Kikai-Akahoya	K-Ah	387	368.3	7.3	Machida and Arai (2003)
Aira-Tanzawa	AT	1021	981.1	29	Oba et al. (1995)*
Joichi-Pink	Joichi	1394	1347	38	Sawada et al. (1992)*
Akasuko	Akasuko	1621	1569	43	Sawada et al. (1992)*
Dry Curry	Doraikare	1990	1848	46.2	Sawada et al. (1992)*
Breccia Zone	B.Z.	2093	1916	49	Sawada et al. (1992)*
Daisen-Kurayoshi	DKP	2765	2475	62	Nagahashi et al. (2007)

* These data are calibrated after Fairbanks et al. (2005).

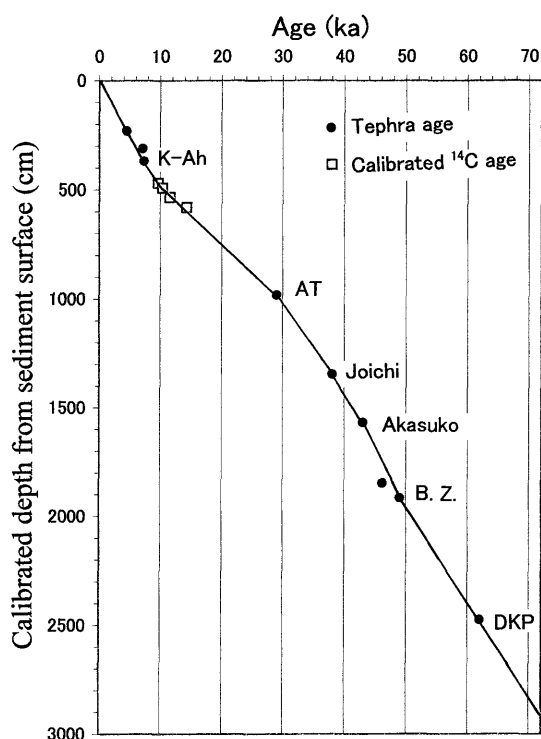


Fig. 3. An age-depth model of the sediment core NJ88 from Lake Nojiri. The depths and ages of the tephra layers used are listed in Table 1. Radiocarbon dates are after Kumon et al. (2003).

2～3%のやや高い値を持つ。6.0～7.2万年前では全体としては1.5%前後の低い値を示すが、6.4万年頃と7.1万年頃に3%を越えるピークが認められる。

TN含有率は、0.05～0.85%の範囲で変動している。一般にTOC含有率の高い層準ではTN含有率も高く、両者はほぼ同調した増減を繰り返すが、TOCの増加率の方がやや高い傾向を持つ。現在から1.2万年ほど前まではTN含有率は0.5%から0.8%の高い値を持つ。TN含有率は1.2万年前から1.5万年前かけて緩やかな低下を示し、1.5～2.9万年前では0.2%前後の低い値で安定している。2.9～5.2万

年前では、TN含有率は0.2～0.5%の範囲で小刻みな変動を繰り返す。5.2～6.0万年前は0.2～0.3%のやや高めで安定している。6.0～7.2万年前までは0.2%前後の低い値を持ち、間欠的には0.1%以下の値も見られる。

C/N比は、現在から1.2万年ほど前までは8から11程度の高い値を持つ。C/N比は1.2万年前から1.4万年前にかけては9前後から7前後まで低下し、1.4～2.9万年前の間では6～8の低い値で安定している。2.9～4.9万年前では、6から15までの大きな変動を周期的に繰り返す。4.9～6.2万年前では8前後で、振幅の小さい周期的変動を示す。6.2～7.2万年前では、全体としてC/N比は低く、変動幅が大きい。

5. 花粉組成からの検証

Fig. 4.BにはNJ88コア試料に含まれる冷温帯性落葉広葉樹の花粉の比率を示す。冷温帯性落葉広葉樹として、コナラ亜属、ブナ属、クルミ・サワグルミ属、ニレーケヤキ属およびクマシデ属の和をとり、亜寒帯針葉樹としてマツ単維管束亜属、モミ属、トウヒ属、ツガ属およびカラマツ属の和をとって、両者の総和に対する冷温帯性落葉広葉樹の比率を示したものである。なお、4千年前以降の時期については、Tsukada (1966)による詳しい花粉分析報告があるので、今回は分析を行っていない。花粉組成の変遷をTOC含有率の変化と対応させて、次に述べる。

落葉広葉樹の比率は4千年前～1.2万年前までは90～100%あり、1.2万年前から1.4万年前にかけて急激に低下して10～20%まで下がる。この変化は、TOC含有率が6%前後の高い値から2%台へ減少する経過と対応している。その途中の1.3万年頃に短い落ち込みの時期が挟まれる。1.4～1.8万年前にはその比率が20～50%でやや暖かい気候が示唆される。特に1.7～1.8万年前にはコナラを主体として落葉広葉樹が50%を超す明瞭なピークがあり、それが晩氷期の始まりを示す可能性が高いが、同じタイミングでのTOC含有率の増加は認められない。落葉広葉樹の比率は1.8～2.9万年前では10～20%の低い値をとり、TOC含有率が2%以下と低いことに対応している。2.9～4.5万年前では落葉広葉樹の比率が10～30%とやや高く、数百年

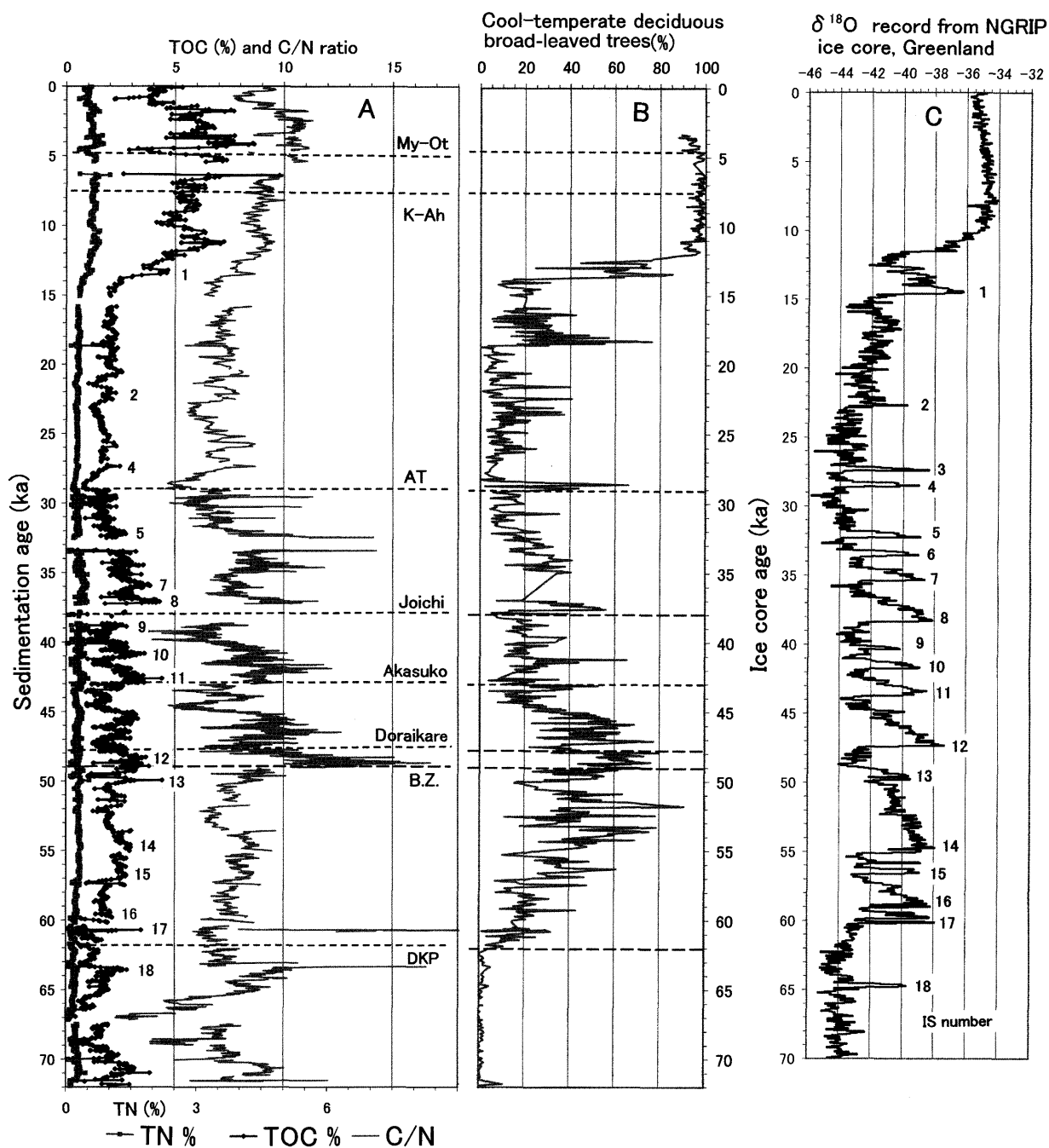


Fig. 4. Temporal sequences of TOC, TN, C/N ratio and pollen composition of the drilled sediments from Lake Nojiri, with comparison to $\delta^{18}\text{O}$ curve of NGRIP ice core. A. Profiles of TOC, TN and C/N ratio. Compiled from Kumon et al. (2003) and unpublished data. B. Ratio of cool-temperate deciduous broad-leaved trees (*Quercus* (*Lepidobalanus*), *Fagus*, *Juglans-Pterocarya*, *Ulmus-Zelkova* and *Carpinus*) to the total of themselves and subarctic conifer trees (*Pinus* (*Haploxylon*), *Abies*, *Picea*, *Tusga* and *Larix*). Compiled from Kumon et al. (2003) and unpublished data. C. $\delta^{18}\text{O}$ curve of NGRIP ice core (North Greenland Ice Core Project member, 2004) with IS numbers (Dansgaard et al., 1993)

から 2, 3 千年の周期で増減する。類似の増減は TOC 含有率にも認められる。なお、AT テフラ降下直後まで落葉広葉樹の比率が高く、TOC 含有率よりも少し遅れたタイミングで減少している点は、気候変動に対する植生の対応の遅れを示している可能性があり、興味深い。4.5 ~ 5.7 万年前では、一時期を除いて落葉広葉樹の比率が 40 % を超え、最高では

60 % に達しており、かなり温暖であったことを示唆する。この期間の TOC 含有率は比較的高いが、それほど顕著には増加していない。しかし、TOC の小さいピークがいくつか認められ、それが花粉組成における落葉広葉樹比率の短周期のピークに対応している。この時期の野尻湖堆積物にはテフラが多く堆積しているので (公文・井内, 1990), その影響に

よる希釈が起きている可能性がある。5.7 万年前から 6.2 万年前にかけては落葉広葉樹の比率が下位ほど下がり、6.2 ~ 7.2 万年前には落葉広葉樹花粉の比率はほとんど 0 % となる。6.2 ~ 7.2 万年前は、1.8 ~ 2.9 万年前と並んで最も寒冷な時代のひとつと考えられ、TOC 含有率も低い。なお、この時期の初期にはスギ花粉の比率が 10 ~ 20 % とやや高く、また中盤ではマツ属単維管束亜属（ゴヨウマツ類）の比率が 30 ~ 60 % と高い（Kumon et al., 2004）。1.8 ~ 2.8 万年前の最終氷期最寒冷期とは少し異なった気候条件があったものと推定される。

以上のような対応関係から見て、TOC 含有率の変動は花粉組成の変化が示す気候変動と同調していると言える。現在の植生は、気温や降水量などの気候条件によってその分布が規制されているので、このような対応関係の存在は、TOC 含有率が気候のある側面を表していること示している。日本列島のようなモンスーン帯では、温暖な時期と降水量の増加とはしばしば結びついているので、両者の影響の識別は難しいが、温度による影響が最も支配的であると考えている。細部においては差異が認められるが、それは、両者が気候のある側面にそれぞれ多少異なる仕方に対応しているためと考えられる。その原因や表現しているものの違いを具体的に解明するのは今後の課題である。

6. TOC 含有率変動の比較

TOC 含有率が表す古気候の変動を、北半球の気候変動を代表するグリーンランド氷床の酸素同位体比変動と比較してみる。Fig. 4.C に NGRIP 氷床コアの酸素同位体比変動（North Greenland Ice Core Project member, 2004）を示した。それには、酸素同位体比の変動パターンと年代値をもとにして interstadial (IS) 1 から 18 までの垂間氷期（Dansgaard et al., 1993）が識別されている。野尻湖堆積物の TOC 変動と NGRIP の酸素同位体比変動とはかなり良い一致を確認できる。大きな振幅での酸素同位体比変動だけでなく、数百年から数千年の周期で起きた寒暖変動（垂間氷期; IS 番号 1 ~ 18）の多くにも対応関係を認めることができる。特に、5 万年前から 3 万年前にかけて認められる周期的な変動は、Dansgaard-Oeschger サイクル（Bond et al., 1997）と呼ばれる短期間の激しい気候変動に対応しており、それがグリーンランド周辺の高緯度地方のみならず、極東アジアの中緯度地域の陸域にまで明瞭にその影響を及ぼしていたことを示している。

高野層に認められる 16 万年前から 4 万年前までの気候変動

1. 高野層とその年代

高野層は、長野市信更町高野（Fig. 1）に分布する後期更新世の湖成層で（木村, 1987a）、多数の指標テフラが含まれることが確認されていた（木村, 1987b, 1996; 竹本ほか, 1987）。現在の分布範囲は 1.5 km² ほどで、かつての湖心部と推定される場所において 2004 年に学術ボーリングが行われた。その結果、全長 54.4 m の連続したコア試料（TKN-2004）が採取され、1 cm ごと（平均 28 年間隔）の TOC・

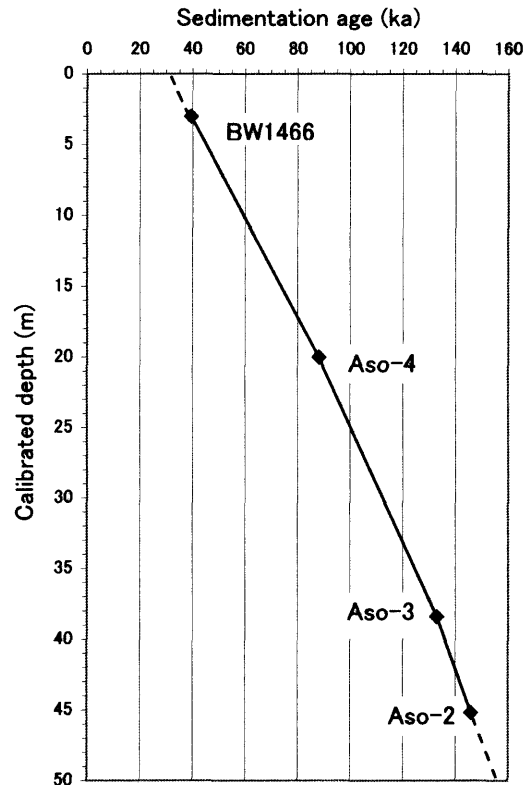


Fig. 5. An age-depth model of the sediment core TKN2004 from Takano Formation. The depths and ages of the tephra used are listed in Table 2. After Nagahashi et al. (2007).

TN 含有率が測定された（田原ほか, 2006）。また、それに挟まれる多数の指標テフラについて、長橋ほか（2007）が火山ガラスの化学組成を中心にした詳細な検討を行い、大阪湾や琵琶湖底で検出されている指標テフラとの対比を行った。長橋ほか（2007）では年代が信頼できると考えられる 4 つの指標テフラ、BW1466 (39.5 ka)、Aso-4 (88.0 ka)、Aso-3 (133 ka)、および Aso-2 (146 ka) を基準に選び、その年代と補正深度（テフラの累積層厚を差し引いた深度）との関係から年代モデルが作成された（Fig. 5）。なお、その深度-年代関係から求められた高野層の主要な指標テフラの堆積年代（長橋ほか, 2007）を Table 2 に示しておく。

2. TOC 含有率と花粉組成の経年的変動

Fig. 5 の年代モデルに基づいて深度を年代に置き換え、TOC・TN 含有率および C/N 比の経年的な変動を解明したものを Fig. 6.A に示す。同じ図に深度（層位）を年代に置き換えた主要指標テフラの層準も示した。また、Fig. 6.B には TKN-2004 コア試料について行った花粉分析の結果の一部（落葉広葉樹の比率: Fig. 4.B と同じ）を示す（叶内ほか, 2007）。なお、花粉分析では、下底から Tt-D の層準（深度 53.88 ~ 24.4 m: 160 ~ 99 ka）までは 50 cm ごとに、Tt-D 層準から深度 2.4 m まではほぼ 15 cm ごとに 1 cm 厚の試料を分析しており、前者で約 1250 年、後者では約 520 年ごとの約 25 ~ 35 年間の平均的な花粉組成である。分析方法は野尻湖堆積物の場合とほぼ同じである。

TOC・TN 含有率および C/N 比の層序的な変動は田原ほか (2006) に詳しく説明されている。3 者はおおよそ同調した変動を示すので、ここでは TOC 含有率を例として、花粉組成が示唆する気候変動との対応関係の概略を下位から説明する。Fig. 6.A に示されるように、TOC 含有率はおおよそ 1 ~ 8 % の範囲で、数千年から数万年の周期で準周期的に増減を繰り返している。一方、落葉広葉樹の比率で見た花粉組成の変動にも明瞭な準周期的変動がある (Fig. 6.B)。

16 万年前から 13.2 万年前までは TOC 含有率は 1.5 ~ 2.0 % と低く、落葉広葉樹の比率も数 % 以下と小さい。13.2 万年前から 11.2 万年前までは TOC 含有率は 4 ~ 8 % の高い値を取り、落葉広葉樹の比率も 80 % を越える期間がしばしばある。ただし、それは TOC よりも早く 11.6 万年前には減少し始めている。11.2 万年前から 10.8 万年前までの TOC は 2 ~ 3 % と低い値を取り、落葉広葉樹の比率も 10 % 以下と低い。10.8 万年前から 9.0 万年前までは TOC は 2 % から 6 % の振幅で短い周期の変動を示す。平均値は 4 % ほどでやや高い。この期間の前半では落葉広葉樹の比率が 60 % 前後と高いが、後半 (9.8 ~ 9.0 万年前) では 10 ~ 20 % と低い。この後半の時期には広温性のスギが大きく増加 (20 ~ 30 % を占める) している (叶内ほか, 2007)。9.0 万年前から 8.6 万年前までは TOC は 2 ~ 3.5 % と低く、落葉広葉樹の比率は 10 ~ 20 % で、スギの比率も 10 % 程度である。8.6 万年前から 7.7 万年前までは TOC 含有率はおおよそ 3.5 ~ 7 % で変動し、平均値も 5 % 程度と高い。落葉広葉樹の比率は 40 ~ 90 % と高く、スギの割合は 10 % 程度である。7.7 万年前から 6.0 万年前までは TOC はおおむね 2 ~ 3 % と低い値を持つが、7.2 万年前と 7 年前付近に 4 % を越える短い期間が認められる。花粉組成ではこの間に落葉広葉樹の比率がほとんど 0 % に近くなり、スギ花粉の割合も前半期 (7.7 ~ 6.8 万年前) に 10 % 程度あるにすぎない。6.0 万年前から 4.8 万年前までは TOC は 3 ~ 5 % で変動し、平均値も 4 % ほどとやや高い。落葉広葉樹の比率は 30 % 前後でやや高い。4.8 万年前から 3.8 万年前までは TOC は 2 ~ 4 % で変動し、平均値は 3 % ほどである。この間の落葉広葉樹の比率は 10 % 以下と低い。

以上のように、TOC 含有率の高い時期は落葉広葉樹花粉の比率が高い時期におおむね対応しており、高野層においても、TOC 含有率が気候のある側面 (おもに気温) を表していると考えて良いことを示している。なお、前述したように 9.8 万年前から 9.0 万年前までの間では、TOC 含有率の高さに比して、落葉広葉樹の比率が小さい。その不一致の一因は、この時期にスギ属花粉が 20 ~ 30 % を占めることにあると考えられる。すなわち、広温性のスギの優占によって落葉広葉樹が置き換えられた結果、落葉広葉樹の比率が小さくなっているのであって、この場合には落葉広葉樹の比率の低さが必ずしも気温の低さを示していない可能性が考えられる。

Fig. 6.C に海洋酸素同位体比の変動曲線と海洋酸素同位体ステージ区分 (SPECMAP; Martinson et al., 1987) を示した。これと TOC 含有率変動とを比較すると、全体として良い一致が見られる。例えば、MIS 5/6 境界 (Termination II)

Table 2. Marker tephra layers of the Takano Formation. Solid ages are used as keys for the age model of the Takano Formation. Others are estimated sedimentation age. After Nagahashi et al. (2007).

maker tephra code (Nagahashi et al., 2007)	code of Machida and Arai (2003)	sedimentation age (ka)
BW1466		39.5
SG	DKP?	62.0
Tt-E	Tt-E	70.0
SP-II	On-Ng	85.1
Aso-4	Aso-4	88.0
SP-I	On-Kt	94.9
K-Tz	K-Tz	95.2
B Ash	On-Pm1	97.6
Aso-ABCD	Aso-ABCD	97.7
Ata	Ata	98.9
Tt-D	Tt-D	99.2
SK	SK	99.9
Nanko-III		118.0
Nanko-II		119.2
Aso-3	Aso-3	133.0
Aso-2	Aso-2	146.0
SyPm		157.9

は、高野層で TOC 含有率の急変として明瞭に認められ、年代的にも 130 ka 前後でほぼ一致している。また、MIS 3/4 境界も TOC 含有率の急変として確認され、年代的にも SPECMAP の境界とほぼ一致する。この境界は、テフラが多数はさまる野尻湖堆積物の TOC 含有率変動ではわかりにくかったが、その層準においてテフラが少ない高野層では明瞭に認められる。この境界の位置は花粉組成の変化の上でもほぼ同じような位置にあたる (Fig. 6.B)。なお、SG テフラは、DKP との対比に疑問が残されているが、野尻湖で DKP とされてきた黄ゴマテフラとは同一のものと確認されている (長橋ほか, 2007)。

TOC 含有率の高い値は標準化した酸素同位体比の高値に、TOC 含有率の低い値が酸素同位体比の低値にほぼ対応しているが、相対的な変動の振幅やタイミングに少しずれも認められる。例えば、114 ka 付近に見られる TOC 含有率の高さは、MIS 5d の相対的寒冷期の中頃までの温暖気候の持続を示唆する。この部分では花粉組成の方が海洋酸素同位体比の変動との対応が良い。同様に、MIS 5b の前半にもその前の相対的温暖期 (MIS 5c) に引き続いて TOC 含有率の高い時期が続いていて、海洋酸素同位体比との対応は悪い。一方、MIS 5c および 5a の温暖期の後半においては、花粉組成は早い時期からの寒冷化を示すのに対して、TOC 含有率は酸素同位体比と同調した変動を示す。このような高野層における TOC と花粉組成とのずれは、同じ気候変動に対する応答の違いなのか、それぞれの指標が気候変動の異なる側面を表している結果なのか、今後の検討が必要である。また、SPECMAP 曲線とのずれについては本研究で用いた年代モデルの誤差という可能性についても検討せねばならない。

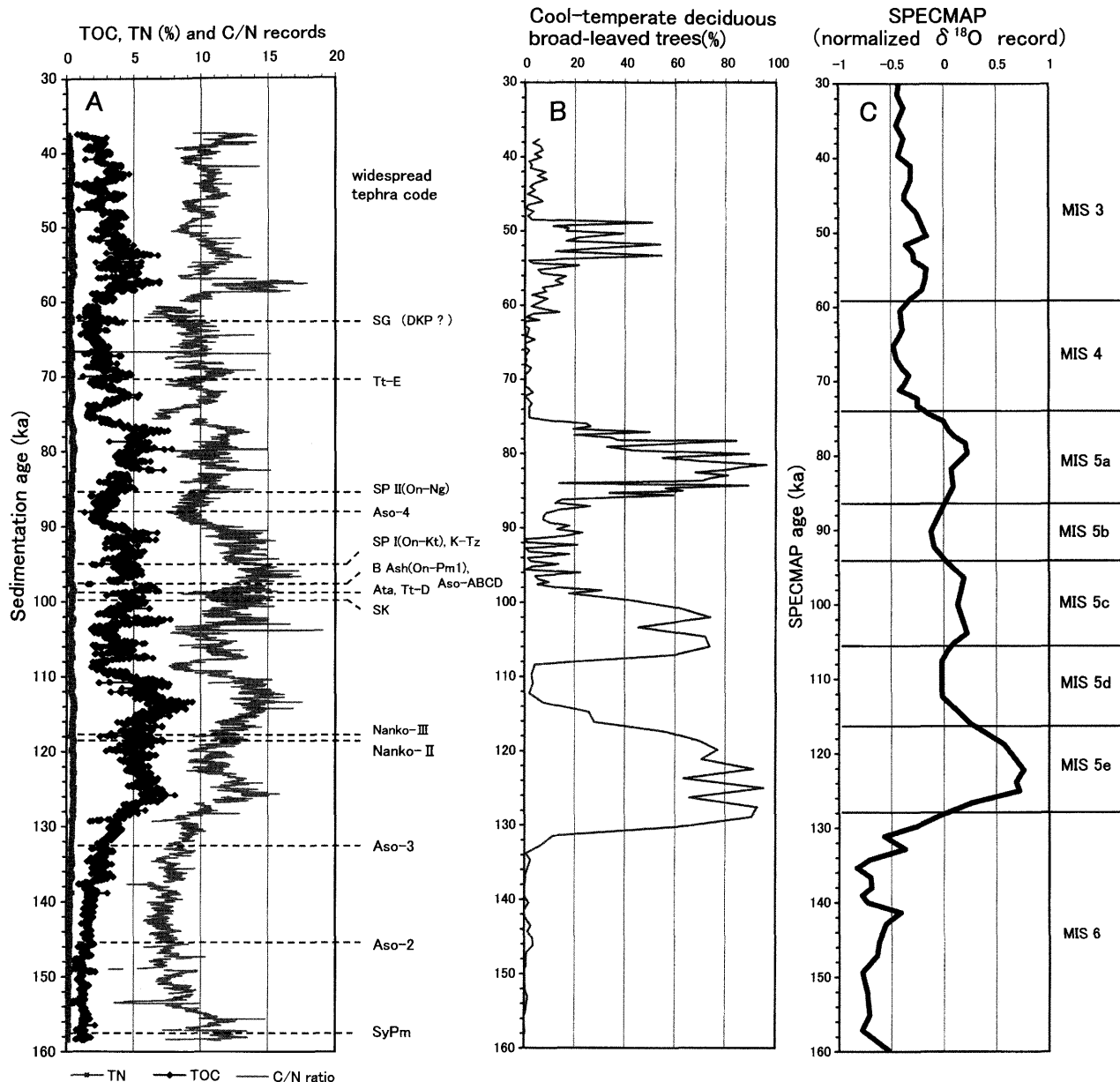


Fig. 6. Temporal sequences of TOC, TN, C/N ratio and pollen composition of the drilled sediments from the Takano Formation, with comparison to $\delta^{18}\text{O}$ curve of SPECMAP. A. Profiles of TOC, TN and C/N ratio of the Takano Formation. Modified from Tawara et al. (2006). B. Ratio of cool-temperate deciduous broad-leaved trees (*Quercus* (*Lepidobalanus*), *Fagus*, *Juglans-Pterocarya*, *Ulmus-Zelkova* and *Carpinus*) to the total of themselves and subarctic conifer trees (*Pinus* (*Haploxylon*), *Abies*, *Picea*, *Tsuga* and *Larix*). After Kanauchi et al. (2007). C. $\delta^{18}\text{O}$ curve of SPECMAP (Martinson et al., 1987)

TOC 含有率を指標とした過去 16 万年間の気候変動の解析

長期間の気候変動の資料は、その中に軌道要素の様々な周期的変動や突発的な火山活動などの影響を受けた時期を含むので、気候変動の多様性を評価し、将来予測を行う上で有用である。しかしながら、同一地点で長期間の記録が保持されることは希である。湖沼堆積物を用いた気候変動復元においても、より長期間の復元を行うためには、異なった場所から得られた古気候資料を統合する必要がある。その課題の一環として、TOC 含有率の変動を標準化して示すことによって、

過去 16 万年間を通じて統一的な古気候解析を行うことを試みた。

まず、野尻湖堆積物および高野層のそれぞれの TOC 含有率について、平均値との差を標準偏差で除すことによって標準化する。この操作によって個別の湖沼内の環境条件によって影響を受ける TOC 含有率やその変動度合いを一律に表すことができる。次に、年代軸を揃えて繋ぎ合わせるが、その際に同一の指標テフラを鍵とすることで、より正確な対応づけが可能となる。そのような作業の結果を Fig. 7.A に野尻湖堆積物と高野層とで線種を変えて示す。

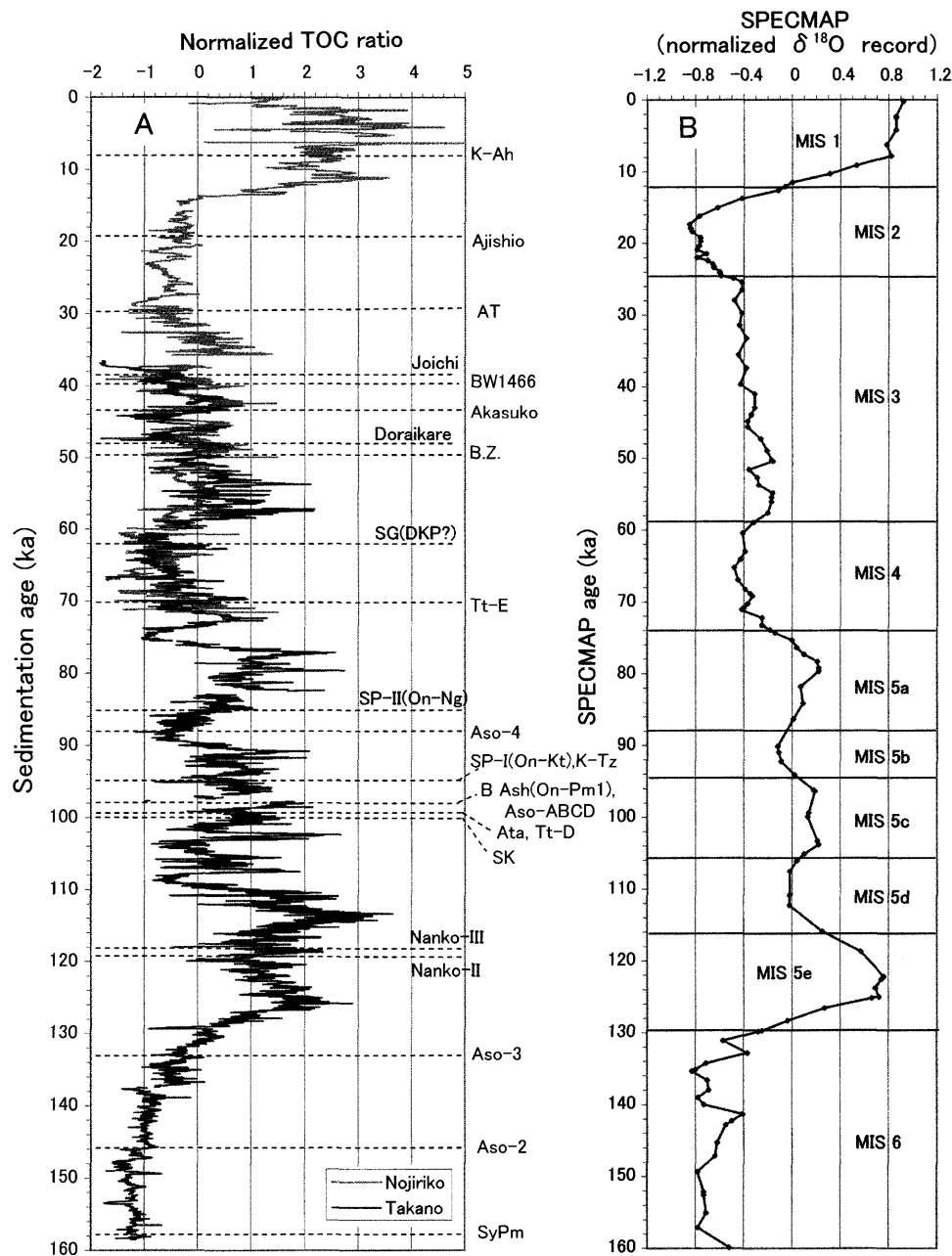


Fig. 7. A compile of the normalized TOC curves of the sediment cores from Lake Nojiri and the Takano Formation for the last 160 ka in central Japan. SPECMAP is after Martinson et al. (1987).

Fig. 7.A には、挟在する指標テフラの層準を示してある。この中のいくつかは九州を起源とする広域のテフラである。日本海や北西太平洋の海底堆積物に確認された始良・阿蘇起源の広域テフラ (AT, Aso-4, Aso-3) についてみると、その層準はこれまで明らかにされた海洋酸素同位体比変動史上での層位関係と矛盾がない。ただし、高野層の年代モデルの基準とされた 3 つの広域テフラ自体、その層位の海洋酸素同位体ステージとの整合性を考慮して選ばれているので、当然の結果かも知れない。

野尻湖堆積物と高野層の年代が重なる部分 (4 ~ 7 万年前) に注目すると、両者がよく類似した変動を示しているこ

とが確認できる。多少のずれが認められるのは 5 ~ 6 万年前で、そこでは野尻湖堆積物の TOC が多少低い。その原因は火山噴出物による野尻湖堆積物における希釈の可能性が考えられる。緯度や標高、閉鎖性といった点で互いによく似た自然地理的条件を持つ湖であるとはいえ、流域面積や流入量、滞留時間といった面では同じはずがない 2 つの湖で、互いによく似た TOC の変動パターンが見られることは偶然ではなく、両者を支配する共通の要因、すなわち気候の支配があったことを示唆している。

SPECMAP の酸素同位体比と比較してみると、高野層と一致する点はすでに述べたが、野尻湖堆積物がカバーする部分

においても、MIS 1/2 境界と 3/4 境界は変動の大きな境界として明確に認定できるし、年代的にも一致する。MIS 2/3 境界は変動パターンの比較から見れば 5,000 年ほどずれるが、この境界の年代については海洋堆積物の間でも議論があるところである（例えば、Pisias and Moore, 1981; Martinson et al., 1987）。長橋ほか（2007）が論じているように、高野層の露頭における花粉分帯（入谷ほか, 2005）との比較、および大阪層群中の海成粘土層との層位関係や琵琶湖底堆積物中の花粉組成の示す寒暖変動（Miyoshi et al., 1999）との比較から明らかにされた多数の指標テフラの海洋酸素同位体層序上の層位（長橋ほか, 2004）は、標準化された TOC 含有率変動曲線との比較に基づいて推定した海洋酸素同位体比曲線上の位置とよく一致している。また、最近になって、鹿島沖の海底コア MD01-2421 からの 7 層の指標テフラが報告された（青木ほか, 2008）。そこでは野尻湖堆積物と高野層で確認された指標テフラの内、始良一丹沢（AT）、阿蘇 4（Aso-4）、御岳第一軽石（On-Pm1）および立山 D（Tt-D）が見出されており、底生有孔虫殻の酸素同位体比変動曲線の上に位置づけられている。その位置は本研究で示した SPECMAP 曲線との対応関係とほぼ同じであり、TOC 変動が汎世界的な寒暖変動（氷床量変動）を反映していることを裏付けている。

なお、TOC 含有率は、SPECMAP の酸素同位体比変動に較べて大きな振幅で小刻みに変動している。これは前者が変動しやすい大気の状態に強く支配された環境を反映しているのに対して、後者は比較的ゆっくり変動する大陸氷床量を最も強く反映していることに由来すると考えられる。また、後者では短期間で発生する融氷や温度変化の影響が海洋全体に広がるために要する時間が長く、かつ大きなインプットがないと明瞭な変化が生じにくいという、海洋の大きさに由来する緩和効果を受けているためとも考えられる。

一方、分布範囲があまり広くない指標テフラについても海洋酸素同位体比層序との層位関係が求まることによって、海水準変動を考慮した地殻変動や堆積過程の復元が可能になると考えられる。例えば、御岳第 1 テフラ（On-Pm1）は、「最終間氷期以後の一つの温暖期に噴出した」とされているが（町田・新井, 2003）、高野層の TOC 含有率変動上でみれば、それは約 97.5 ka の年代で、MIS 5c に相当する温暖期の中頃に位置しており、全体としては寒冷化に向かう途中の高海水準期のものということが一層明確になる。前述した青木ほか（2008）では、赤城鹿沼テフラ（Ag-KP）、箱根東京テフラ（Hk-TP）および沼沢田頭テフラ（Nm-Tg）といった関東を起源とする指標テフラも海洋酸素同位体比曲線上に位置づけられている。

今回の結果は、0～16 万年前の時間スケールで見ると、野尻湖や高野層程度の比較的小さな湖沼でも、TOC 含有率の経年的変化は大局的には汎世界的な気候変動を反映しており、そこに地域特性が重なっていることを示している（Fig. 7）。なお、Fig. 7 に示した「TOC 標準曲線」は、試案の段階であることをお断りしておく。TOC 含有率の資料は、野尻湖堆積物と高野層でそれぞれ別に標準化しているために、それぞれの期間に含まれる寒冷期と温暖期の資料数に依存し

て平均値（0 点）と偏差が決まっている。両者を統合するためには、例えば、資料数の違いによる重み付けの効果も改善する必要がある。基準点としたテフラの年代にもまだ議論の余地があり、調整も必要である。前述の希釈効果の影響を取り除いた上で、野尻湖堆積物と高野層との重複部分を有効に使って、両者の整合性を確保するための補正を行う必要もある。今後、それらの改善を順次すすめる予定である。

前書きで述べたように、TOC 含有率を用いた古気候変動の解析は、比較的簡便な分析手段で能率的な測定が可能であって、限られた予算や人力の範囲内でもデータ密度の高い研究が可能であり、高い時間分解能で気候変動の概要を把握するのに都合がよい。また、議論で述べたように、資料を標準化することによって、各地の資料を統合して長期間の気候史へまとめ上げることが可能である。しかしながら、この手法は湖沼の堆積環境の変化による影響を大きく受ける。洪水などのイベントによる有機物量の希釈が起これ、逆に有機物の濃集も起これる。しかし、それらは記録媒体となる堆積物の層相に強く反映するので、常に層相に留意し、均質な泥質堆積物に対してこの手法を適用する必要がある。また、複数の気候指標を適用して、TOC 分析の結果を点検することも怠ってはならない。標準化にあたっては、元の含有率資料とともに提示しないと、解釈を誤る恐れがでてくる。

本研究で提示したような気候復元の試案は、今後、より長期間をカバーするように資料を繋ぎ合わせていくとともに、同時代の複数地点の試料を総合化することによって、一層精度と代表性の高いものに改善する必要がある。また、このような試案は、たたき台として様々な側面からの検討を加えられることによって、日本列島周辺の地形や環境の変遷、および考古学や人類史の解明に役立つ手がかりになるものと考え

ま と め

野尻湖堆積物および後期更新統高野層の TOC 含有率を指標として、過去 16 万年間の中部山岳地域における気候変動の詳細な解析を試みた。野尻湖堆積物は約 7 万年前までを、高野層は 4 万年前から 16 万年前までをカバーしており、TOC 含有率では 20 年から 40 年ほどの時間分解能の資料を得ることができた。TOC 含有率変動は、その増減は花粉組成が示す寒暖変動に対応しており、気候変動の指標として有効であることを確認した。その上で、TOC 変動を標準化し、共通する広域指標テフラ（DKP ? テフラ）を鍵としてつなぎ合わせて、過去 16 万年間の詳細な古気候変動の復元案を作成することができた。

今回得られた TOC 含有率の経年変動曲線は、グリーンランドの氷床が記録する気候変動に匹敵する時間分解能を持ち、極東アジアの中緯度地域にも北大西洋高緯度地域と同様な、短い周期の激しい気候変動があったことを示す。また、その大局的な変動は、海洋酸素同位体比変動とも対応しており、汎世界的な気候変動を反映していることが明らかになった。さらに、湖沼堆積物中に認められた指標テフラを気候変動史の上に位置づけることができたので、陸域で確認されて

きた多くの指標テフラの層準を海洋酸素同位体層序上に位置づけることも可能となった。今回明らかにした指標テフラの気候編年上の枠組みは、地域間の気候変動の比較のみならず、堆積盆の形成や埋積過程、海水準変動の影響などを高精度で解析する上で重要な土台を提供することができるであろう。

謝 辞 本論をまとめるに当たっては、野尻湖堆積物の研究および高野層の研究がその基礎となった。野尻湖堆積物の研究に際しては、井内美郎教授（早稲田大学）、近藤洋一博士（野尻湖ナウマンゾウ博物館）および野尻湖発掘調査団にご協力をいただいた。河合小百合博士（信州大学山岳科学総合研究所）には野尻湖堆積物の花粉分析資料を提供していただいた。高野層の研究においては、長橋良隆博士（福島大学）、竹下欣宏博士（栃木県立博物館）に火山灰分析を行っていた。また、角田尚子氏（当時信州大学工学系研究科学生）には試料記載・含水率測定および TOC 含有率分析において多大の協力をいただいた。高野層の花粉分析資料は河合小百合博士と叶内敦子博士（明治大学）から提供を受けた。2 名の査読者からは丁寧な指摘をいただき、本稿を大幅に改善することができた。以上の方々に厚く御礼申し上げる。なお、本研究には科学研究費補助金（代表者 公文富士夫、課題番号 15340168 および 18340157）を用いた。

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.
- 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.
- 青木かおり・入野智久・大場忠道, 2008, 鹿島沖海底コア MS01-2421 の後期更新世のテフラ層序. 第四紀研究, **47**, 391-407.
- Benson, L.V., Burdett, J.W., Kashgarian, M., Lund, S.P., Phillips, F.M. and Rye, R.O., 1996, Climatic and hydrologic oscillations in the Owens Lake Basin and adjacent Sierra Nevada, California. *Science*, **274**, 746-749.
- 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.
- Bond, G., Showers, W., Cheseby, M., Lotti, R., Almasi, P., deMenocal, P., Priore, P., Cullen, H., Hajdas, I. and Bonani, G., 1997, A pervasive millennial-scale cycle in North Atlantic Holocene and glacial climates. *Science*, **277**, 1257-1266.
- Dansgaard, W., Johnsen S.J., Moller, J. and Langway, Jr.C.C., 1969, One thousand centuries of climate record from Camp Century on the Greenland ice sheet. *Science*, **166**, 377-381.
- Dansgaard, W., Johnsen S.J., Clausen, H.B., Dahl-Jensen, D., Gundestrup, N., 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-kyr ice-core record. *Nature*, **364**, 218-220.
- Fairbanks, R.G., Mortlock, R.A., Chiu, T.-C., Cao, L., Kaplan, A., Guilderson, T.P., Fairbanks, T.W., Bloom, A.L., Groote, P.M. and Nadeau, M.-J., 2005, Radiocarbon calibration curve spanning 0 to 50,000 years BP based on paired $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ and ^{14}C dates on pristine corals. *Quatern. Sci. Rev.*, **24**, 1781-1796.
- Fietz, S., Nicklisch, A. and Overhansli, H., 2007, Phytoplankton response to climate changes in Lake Baikal during the Holocene and Kazantsevo Interglacials assessed from sedimentary pigments. *Jour. Paleolim.*, **37**, 177-203.
- Gupta, L.P. and Kawahata, H., 2006, Downcore diagenetic changes in organic matter and implication for paleoproductivity estimates. *Glob. Planet. Changes*, **53**, 122-136.
- Hays, J.D., Imbrie, J. and Shackleton, N.J., 1976, Variations in the earth's orbital: pace maker of the ice ages. *Science*, **194**, 1121-1132.
- Igarashi, Y. and Oba, T., 2006, Fluctuations in the East Asian monsoon over the last 144 ka in the northwest Pacific based on a high-resolution pollen analysis of IMAGES core MD01-2421. *Quatern. Sci. Rev.*, **25**, 1447-1459.
- 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.
- 入谷 剛・北川陽一・大井伸夫・古澤 明・宮脇理一郎, 2005, 長野県北部, 上部更新統高野層のテフラと花粉分析に基づく環境変遷. 第四紀研究, **44**, 323-338.
- Iwamoto, N. and Inouchi, Y., 2007, Reconstruction of the millennial-scale variations in the East Asian summer monsoon over the past 300 ka based on the total carbon content of sediment from Lake Biwa, Japan. *Environ. Geol.*, doi: 10.1007/s00254-006-0606-5.
- 叶内敦子・河合小百合・公文富士夫, 2007, 長野市信更町高野層ボーリングコアの花粉分析. 第四紀学会講演要旨集, no.37, 166-167.
- 川幡徳高, 2008, 海洋地球環境学. 東京大学出版会, 269p.
- 川幡徳高・氏家 宏・江口暢久・西村 昭・田中裕一郎・池原研・山崎俊嗣・井岡 昇・茅根 創, 1994, 西カリフォルニア海盆における過去 30 万年の有機炭素および無機炭素沈積流量の変遷. 第四紀研究, **33**, 19-29.
- 木村純一, 1987a, 長野県聖山北麓の更新統一中部から上部更新統一. 地質雑, **93**, 245-257.
- 木村純一, 1987b, 長野県における後期更新統の降下火山砕屑物層序. 第四紀研究, **25**, 247-257.
- 木村純一, 1996, 長野市信更町高野の湖成高野層—約 13 万年間の諸広域指標テフラの包含層—. 第四紀研究会編 第四紀頭集—日本のテフラ, 34-35.
- 公文富士夫, 2003, 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. 第四紀研究, **42**, 195-204.
- 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, no.36, 167-178.
- 公文富士夫・金丸綱代・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.
- 公文富士夫・河合小百合・井内美郎, 2003, 野尻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 年間の気候変動. 第四紀研究, **42**, 13-26.
- Kumon, F., Kawai, S. and Inouchi, Y., 2004, Detailed climate change during the last 56 ka deduced from TOC, TN and pollen analyses of the drilled sediments in Lake Nojiri, central Japan. 32nd IGC, Florence, Italy, Abstract, T30.02.
- Kumon, F., Kawai, S. and Inouchi, Y., 2006, Detailed climate changes from MIS 4 to 1 deduced from total organic carbon, total nitrogen and pollen analyses on the drilled sediments from Lake Nojiri, central Japan. 17th Int. Sed. Cong., Fukuoka, Abstract A, P-144.
- 公文富士夫・河合小百合・井内美郎, 2008, 野尻湖データによる過去 6 万年間の気候変動の復元. 日本旧石器学会第 6 回講演・研究発表・シンポジウム予稿集, 55-56.
- 加 三千宣・吉川周作・井内美郎, 1997, 琵琶湖湖底コア, 過去 40 万年間の珪藻化石記録. 第四紀研究, **36**, 113-122.
- Kuwae, M., Yoshikawa, S. and Inouchi, Y., 2002, A diatom record for the past 400 ka from Lake Biwa in Japan correlates with global paleoclimatic trends. *Paleogeog. Paleoclim. Paleoeco.*, **183**, 261-274.
- 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みた過去 14 万年間の降水量変動. 第四紀研究, **42**, 305-319.
- 町田 洋・新井房夫, 2003, 新編 火山灰アトラス. 東大出版会, 336p.
- Martinson, D.G., Pisias, N.G., Hays, J.D., Imbrie, J., Moore, T.C. and Shack-

- leton, N.J., 1987, Age dating and orbital theory of the ice ages: development of a high resolution 0 to 300,000-year chronostratigraphy. *Quatern. Res.*, **27**, 1-29.
- Matsumoto, G.I., Fujimura, C., Minoura, K., Takamatu, N., Takemura, T., Hayashi, S., Shikii, K. and Kawai, T., 2003, Paleoenvironmental changes in the Eurasian continental interior during the last 12 million years derived from organic components in sediment cores (BDP-96 and BDP-98) from Lake Baikal. *In* Kashiwaya, K. ed., *Long continental records from Lake Baikal*, Springer, 75-94.
- Meyers, P.A., 1997, Organic geochemical proxies of paleoceanographic, paleolimnologic and paleoclimatic processes. *Org. Geochem.*, **27**, 213-250.
- Miyoshi, N., Fujiki, T. and Morita, Y., 1999, Palynology of a 250 m core from Lake Biwa: a 430,000 years record of glacial-interglacial vegetation changes in Japan. *Rev. Palaeobot. Palynol.*, **104**, 267-283.
- 長橋良隆・佐藤孝子・竹下欣宏・田原敬治・公文富士夫, 2007, 長野県, 高野層ボーリングコア (TKN-2004) に挟在する広域テフラの層序と編年. 第四紀研究, **46**, 305-325.
- 長橋良隆・吉川周作・宮川ひろ・内山 高・井内美郎, 2004, 近畿地方および八ヶ岳山麓における過去 43 万年間の広域テフラの層序と編年— EDS 分析による火山ガラス片の主要成分化学組成—. 第四紀研究, **43**, 15-35.
- 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.
- 野尻湖火山灰グループ, 1993, 野尻湖の湖底ボーリング試料 NJ88 の火山灰層. 地団研専報, no.41, 1-26.
- 野尻湖地質グループ音波探査サブグループ, 1987, 音波探査による野尻湖底堆積物の層序と形成史. 地団研専報, no.32, 23-36.
- North Greenland Ice Core Project members, 2004, High-resolution record of Northern Hemisphere climate extending into the last interglacial period. *Nature*, **431**, 147-151.
- 大場忠道・村山雅史・松本英二・中村俊夫, 1995, 日本海隠岐堆コアの加速器質量分析 (AMS) 法による ¹⁴C 年代. 第四紀研究, **34**, 289-296.
- Pisias, N.G. and Moore, T.C., 1981, The evolution of Pleistocene climate: a time series approach. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **52**, 450-458.
- 三瓶良和・松本英二・徳岡隆夫・井上大栄, 1996, 中海における過去 8,000 年間の有機炭素埋積速度— Carbon sink としての汽水域堆積物—. 第四紀研究, **35**, 113-124.
- 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.
- 竹本弘幸・百瀬 貢・平林 潔・小林武彦, 1987, 新时期御岳テフラ層の層序と時代—中部日本における編年上の意義—. 第四紀研究, **25**, 337-352.
- 田原敬治・公文富士夫・長橋良隆・角田尚子・野末泰宏, 2006, 長野県, 高野層のボーリングコア試料の全有機炭素 (TOC) 含有率変動に基づく更新世後期の古気候変動の復元. 地質雑, **112**, 568-579.
- Tawara, T., Nagahashi, N., Kawai, S., Kanauchi, A. and Kumon, F., 2007, High-resolution analysis of the late Pleistocene climate in central Japan based on total organic carbon (TOC) content of lacustrine Takano Formation, Japan. *Quatern. International*, **167-168**, 414.
- Tsukada, M., 1966, Late postglacial absolute pollen diagram in Lake Nojiri. *Bot. Maga. Tokyo*, **79**, 179-184.
- Yamada, K., 2004, Last 40 ka climate changes as deduced from the lacustrine sediments of Lake Biwa, central Japan. *Quatern. International*, **123-125**, 43-50.

(要 旨)

公文富士夫・田原敬治, 2009, 中部山岳地域の湖沼堆積物の有機炭素含有率を指標とした過去 16 万年間の気候変動復元. 地質雑, **115**, 344—356. (Kumon, F. and Tawara, T., 2009, Detailed reconstruction of paleoclimate based on total organic carbon proxy of lake sediment during the past 160 ka in central Japan. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **115**, 344—356.)

野尻湖底堆積物および後期更新世高野層の TOC 含有率を指標として, 過去 16 万年間の中部山岳地域における気候変動の復元を試みた. まず, TOC 含有率の増減が花粉組成の示す寒暖変動で裏付けられており, 気候変動の指標として有効であることをそれぞれで確認した. 次に, それぞれで標準化した TOC 変動曲線を広域テフラ DKP を鍵としてつなぎ合わせて, 過去 16 万年間の詳細な変動を復元した. TOC の経年変動は, グリーンランドの氷床が記録する気候変動に匹敵する時間分解能を持ち, その大局的な変動は, 海洋酸素同位体比曲線とも対応しており, 汎世界的な気候変動を反映している. それを基に陸域の指標テフラを気候編年上に位置づけることができた. 解明された詳細な気候変動と指標テフラの枠組みは, 列島内の各地の気候変動の対比のみならず, 堆積盆の形成や埋積過程, 海水準変動の影響などを高精度で解析する上で重要な土台を提供する.