

## 中部山岳地域における第四紀後期の気候変動

公文 富士夫\* 河合 小百合\*\* 木 越 智 彦\*\*\*

### Late Quaternary Climate Changes around the Japanese Alps, Central Japan

Fujio KUMON\*, Sayuri KAWAI\*\* and Tomohiko KIGOSHI\*\*\*

[Received 15 March, 2013; Accepted 26 May, 2013]

#### Abstract

This paper reviews paleoclimate data from around the Japanese Alps in the late Quaternary period. The major data sources are total organic carbon content (TOC) of lake deposits and pollen composition from various sediments covering more than several thousand years. TOC reflects air temperature through the biological productivity of lake water. Pollen composition can show paleovegetation, and can be transformed into climate parameters using a modern analog method.

The paleoclimate was reconstructed as follows under assumed conditions of altitude of 600–700 m and latitude of around 36°N. Subarctic conifer forests were predominant and TOC was constantly low in the late MIS 6 (160–130 ka). It was cold as in MIS 2, the last glacial maximum. Vegetation changed significantly around 130 ka, and deciduous broadleaf trees of the cool-temperate zone became dominant in MIS 5e. TOC content in MIS 5e was also high, and temperature was as high as, or slightly cooler than, in MIS 1. Vegetation in MIS 5d to 5a comprised mixed forests of conifer trees and deciduous broadleaf trees, and their ratio changed substage by substage. TOC also fluctuated in periodicities of several thousand years, suggesting frequent temperature change. Climate in MIS 5d to 5a was a little colder than in MIS 5e and warmer than in MIS 3. The subarctic conifer forest was predominant and deciduous broadleaf trees were almost absent in MIS 4. TOC was also constantly low and temperature was much lower, as in MIS 2. Deciduous broadleaf trees flourished in MIS 3, and the ratio changed frequently in short periods of several hundreds of years to thousands of years, which corresponded to the D-O cycle. Although the annual mean temperature in MIS 3 was 5.0°C on average, that of a warm interstadial was 7.2°C and that of a cold stadial was 4.4°C. The vegetation in MIS 2 was characterized by the predominance of subarctic conifer forests and by the lowest TOC content. The reconstructed annual mean temperature was constantly around 3°C. Deciduous broadleaf trees increased abruptly from 14 to 12 ka and simultaneously TOC also increased sharply. Deciduous broadleaf trees became predominant in the Holocene (MIS 1), occupying more than 90% of arboreal pollen. TOC contents were also high, and reconstructed annual temperature was as high as 12°C in the early Holocene, a little higher than recent temperatures.

---

\* 信州大学理学部 (兼信州大学山岳科学総合研究所)

\*\* 元信州大学山岳科学総合研究所

\*\*\* 信州大学大学院総合工学系研究科

\* Faculty of Science, Shinshu University, Matsumoto, 390-8621, Japan

\*\* Institute of Mountain Science, Shinshu University, Matsumoto, 390-8621, Japan (retired)

\*\*\* Interdisciplinary Graduate School of Science and Technology, Shinshu University, Matsumoto, 390-8621, Japan

**Key words** : Japanese Alps, climate change, total organic carbon, pollen analysis, modern analogue method, Late Pleistocene

キーワード : 日本アルプス, 気候変動, 全有機炭素量, 花粉分析, モダンアナログ法, 後期更新世

## I. はじめに

258 万年前からはじまる第四紀という時代は、地球全体として気温が低下し、振幅と周期に多様性がある寒暖変動を繰り返してきた。寒冷期を象徴するものが山岳域や高緯度地方における氷河（氷床）の拡大であり、山岳氷河の消長に基づいた研究から第四紀には 4～5 回程度の氷期と間氷期の繰り返しがあったという学説が生まれ、それが長い間支配的であった。一方、陸域における氷床の拡大は海洋における<sup>18</sup>O の濃縮をもたらすという新しい視点から、1960 年代以降には海洋堆積物に含まれる有孔虫化石の殻（CaCO<sub>3</sub>）の酸素同位体比を測定する研究が大きく進んだ。その結果、従来の見解は大幅に修正され、第四紀には氷期-間氷期の繰り返しが多数あったことが明らかにされた。この海洋酸素同位体比変動は、初期の個別的な研究から国際的な共同研究（SPEC-MAP）へ発展した（Martinson *et al.*, 1987）。その成果を受けて海洋酸素同位体比の経年的な変動は、海洋酸素同位体ステージ（Marine Isotope Stage: MIS と略記）として年代区分に用いられるようになった。それは気候変動という新しい指標に基づく編年であり、いまでは第四紀の年代区分や気候変動の理解に不可欠の役割を果たしている。その後も海洋堆積物試料の採取地点が増され、また、底生有孔虫化石に限定した資料収集によってつくりあげた最新版の海洋酸素同位体比の変動曲線は LR04（Lisiecki and Raymo, 2005）として知られている（図 1）。

図 1 に示されたように約 258 万年前（再定義された第四紀のはじまり）から全体として徐々に酸素同位体比が大きくなっており、陸域に固定された氷床量が次第に拡大したことが表されている。また、新しい時代ほど、とくに 80 万年前以降は振幅が大きくなっており、それは氷期と間氷

期の間で氷床量の差が大きくなったことを示している。また、約 80 万年前を境にして、それまでは約 4 万年の周期性が卓越していたものが、それ以降では約 10 万年の周期が卓越するように変化している。このような氷床量の周期的な変動の要因は、ミランコビッチ（Milankovitch, 1941）によって提唱された北半球高緯度地域の日射量の周期的変動と一般に考えられている（例えば、Bradley, 1999）。

一方、グリーンランドや南極氷床で採取された氷床コアには、気温の記録としての酸素同位体比のみならず、大気自体の情報も長期間保存されていることが明らかにされてきた（Dansgaard *et al.*, 1969; Stuiver *et al.*, 1995）。グリーンランド氷床では約 12.6 万年前まで（North Greenland Ice Core Project members, 2004）、南極氷床では 74 万年前まで（例えば、Jouzel *et al.*, 1993; EPI-CA community members, 2004; Kawamura *et al.*, 2007）の古気候情報が解明されつつある。氷床の記録は、ミランコビッチの周期性や海洋酸素同位体比変動よりもずっと短い周期（数百年から数千年）（例えば、D-O サイクル; Dansgaard *et al.*, 1993）で、しかも数十年という短期間に年平均気温が 5～6℃も変わるといふ急激な気候変動が存在したことを明らかにした。

このような汎世界的な気候の変動は、東アジアに位置する日本の中部山岳地域にも強く影響したはずである。一般に陸域の古気候記録は断片的であり、また、しばしば年代目盛りが貧弱であるため、長期間にわたる時間精度の高い古気候情報は不足していたが、近年では湖沼堆積物の連続記録を解析することが進み、極域と同様に急激で大きな気候変動が中緯度地域にも生じていたことが明確になってきた（Adhikari *et al.*, 2002; 公文ほか, 2003, 2009; 公文・田原, 2009; Kumon *et al.*, 2012）。本総説では、最近の研究によって判明し

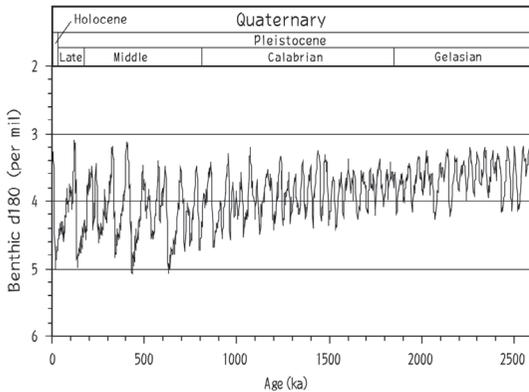


図 1 第四紀の海洋酸素同位体比変動（LR04カーブの一部）. Lisiecki and Raymo (2005) より引用.

Fig. 1 Quaternary  $\delta^{18}\text{O}$  curve of marine water, a part of the LR 04 curve after Lisiecki and Raymo (2005).

てきた中部山岳地域における第四紀後期の気候変動の資料をまとめ、今後の研究の展望を概観する。なお、中部山岳域には各地に山岳氷河の遺跡が発見されており（例えば、小林, 1956; 五百沢, 1966）、それらも古気候の重要な指標である。しかし、その形成時期を特定することが多くの場合に困難であり、連続的な気候変動をまとめることを目指した本総説からは割愛する。

## II. 湖沼堆積物の有機炭素・窒素量の変動に基づく気候変動

近年、均質で細粒な湖沼堆積物中の全有機炭素（total organic carbon: TOC）・全窒素（total nitrogen: TN）量が、おもに湖沼内における生物生産性を反映しており、その生物生産性を支配した気候変動の間接的な指標となることが多くの事例研究で報告されてきた（Inouchi *et al.*, 1996; Adhikari *et al.*, 2002; 公文ほか, 2003, 2009; 田原ほか, 2006; Tawara *et al.*, 2007; 公文・田原, 2009; Kumon *et al.*, 2012）。また、木崎湖において21年間の気象資料と湖沼観測記録、および堆積物の有機炭素量を比較した事例研究（公文ほか, 2005）では、冬の平均気温と湖水中のクロロフィル存在量および TOC 量の間には正の相関があることが明

らかにされている。気候のどの要素がどのような仕組みで湖沼内の生物生産性を支配するのか、という点でのメカニズムが十分に解明されているわけではないが（例えば、公文, 2003; 公文・田原, 2009）、汎世界的な気候変動をよく反映した指標となっている事実は先に述べた事例研究で判明しており、また、長い期間にわたって高い時間分解能での資料が得られているので、この古気候資料から紹介する。また、同じ堆積物試料から花粉分析結果もだされている場合にはあわせて報告する。

### 1) 野尻湖堆積物

#### 1-1) TOC, TN および C/N 比の変遷

野尻湖（北緯 36.8°, 東経 138.2°, 標高 654 m）では 1988 年に琵琶島沖で基盤まで達する学術ボーリングがなされており、7.2 万年前までの連続した湖成堆積物（湖底下深度 34 m まで）と、その下位に約 10 万年前まで遡る泥炭質堆積物（深度 34 ~ 44.2 m）が採取されている（NJ88 コア; 公文・井内, 1990）。また、1995 年には、樺ヶ崎沖の湖心部において湖底下の深度 35 m までの湖成堆積物が採取されており、両者で測定された有機炭素・窒素量を集成して、7.2 万年前までの有機炭素・窒素量の変動が明らかにされた（公文ほか, 2003; 公文・田原, 2009; 公文ほか, 2009; Kumon *et al.*, 2012）。

測定された有機炭素・窒素量の変動はほぼ平行するので、以下の記述では TOC 量で代表させる。TOC 量は、海洋酸素同位体比層序（marine isotope stage: 以下 MIS と略記）4 の時期には 1 ~ 2% の低い含有率を、MIS 3 では全体としてやや高く、2 ~ 4% の範囲で短周期の増減を繰り返し、MIS 2 では 1 ~ 2% の低い値で安定し、MIS 1/2 の境界期に 2% から 5% へ急増し、MIS 1 では 4 ~ 7% で高い値を保つものの、変動が大きい。また、グリーンランド氷床における酸素同位体比変動が示す数百年 ~ 数千年の短い周期の気候変動（D-O サイクル）に対応する短周期の TOC 量の増減も認められる。

#### 1-2) 花粉組成の変遷

NJ88 コア試料に対しては、平均 100 年ほどの時間分解能で花粉分析がなされており、MIS 4,

MIS 2 における亜寒帯針葉樹の卓越、MIS 1 における落葉広葉樹の卓越 (95% 以上) が明らかにされている。亜寒帯針葉樹花粉数と冷温帯落葉広葉樹花粉数の和に対する冷温帯落葉広葉樹花粉数の比率を指標とすると、その変動パターンは TOC 量の変動パターンとよく似ており、植生においても気候変動に伴って樹種の入れ替えが急激に起きていたことは明らかである (Kumon *et al.*, 2012)。

野尻湖の湖成粘土層の下部およびその下位にある泥炭層 (琵琶島沖泥炭層) については野尻湖花粉グループ (1993) によって約 500 年の平均間隔で 10 万年前から 5 万年前にかけての花粉分析が報告されている。詳細な年代論はないが、泥炭質堆積物の中位 (深度 38.98 m) に Aso-4 テフラ (8.8 万年前) が確認されており、泥炭質堆積物には MIS 5 の植生が記録されていると考えられる。湿地性の植生を除いて考えると、その時期はスギの多さで特徴づけられ、ブナ属やコナラ属も周期的に増減する。一方、モミ属やトウヒ属の亜寒帯針葉樹は低率である。これらの特徴は、後述べる諏訪湖堆積物における MIS 5 の植生と類似する。

## 2) 青木湖堆積物

1988 年に地質調査所によって青木湖の主盆地の北部 (Site A) と北東部緩斜面上 (Site B) で、学術掘削がなされた (地質調査所, 1988)。Site A では 28 m, Site B では 17 m のコア試料が採取された。最下部はいずれも礫層であるが、その上位はシルト質粘土を主体とする層相である。厚さ数 mm の薄い砂層も頻繁に挟まれている。次のような約 3.4 万年前以降の TOC 量の変動が明らかにされている (図 2; 公文ほか, 2007)。

MIS 3 の末期にあたる 3.4 ~ 3 万年前では TOC は平均で 2% ほどのやや高い含有率を示すが、1 ~ 3% 範囲で大きく変動する。MIS 2 にあたる 3.0 ~ 1.5 万年前では 0.5% から 2% と全体として低い値を示し、その前期の 3.0 ~ 2.5 万年では 0.5% ほどの非常に低い値を、中盤の 2.5 ~ 2 万年前では 1% 前後、後期の 2 ~ 1.5 万年前では 1.5% と、段階的に増加する。MIS 2 から MIS 1 に移り変わる

1.5 ~ 0.8 万年前では、TOC が 1.5 ~ 2.0% と低い時期と 3% 前後の高い時期とが交互に繰り返す。MIS 1 の中・後半にあたる 8 ka 以降では TOC 量は 4 ~ 6% の範囲で大きく変動するものの平均値は 5% ほどと高い。

同じコア試料の花分析結果 (図 2) では次のような植生の変遷が明らかにされている。3.4 ~ 1.4 ka の MIS 3 末期から MIS 2 の間では亜寒帯針葉樹が卓越し、その間でも 3 ~ 2.5 万年前では草本が増加する。MIS 2 末期から MIS 1 初期にかけての 1.4 ~ 1.2 万年前には落葉広葉樹の比率が急増し、温暖化が急激に進行したことが裏づけられる。

青木湖の堆積物コアには数 mm の厚さの砂の葉理が頻繁に挟まれている。青木湖の TOC 量に試料ごとのばらつきが大きいことの一因は、有機物をほとんど含まない砂質堆積物の間欠的な混入にあると考えられる。とくに 1.5 ~ 0.8 万年前においては TOC 量が増加しはじめるとともに、その後は周期的に増減する。花粉組成からみると同じ 1.5 万年前から落葉広葉樹の比率が圧倒的に多くなり、植生の入れ替えが起きたことが示されている。また、C/N 比は 1.5 万年前以前の 6 から以後の 10 へ増加しており、有機物の起源に違いが生じていたことを示唆する。1.5 万年ほど前には急激な温暖化に伴って湖内の生物生産性の急増があったものの、粗粒碎屑物流入の増加とその間欠的な変動によって、TOC 量の増加は段階的な変動となったものと考えられる。

## 3) 高野層

高野層は長野市南部の信更町高野の盆地を埋積している湖成層で (木村, 1987)、2004 年に元の湖心部にあたる位置 (標高 720 m) で 54 m 長の学術ボーリングがなされている (田原ほか, 2006)。このコア試料 (TKN2004 コア) は均質な粘土質シルトで構成され、多くの広域指標テフラを挟むので年代決定の精度が高い (長橋ほか, 2007)。約 16 万年前から 4 万年前まで 20 ~ 30 年の間隔で連続した TOC 量変動の資料が得られている。

高野層の TOC 量は、MIS 6 の後半に相当する約 16 ~ 13 万年前では 1 ~ 2% の低い値をもち、

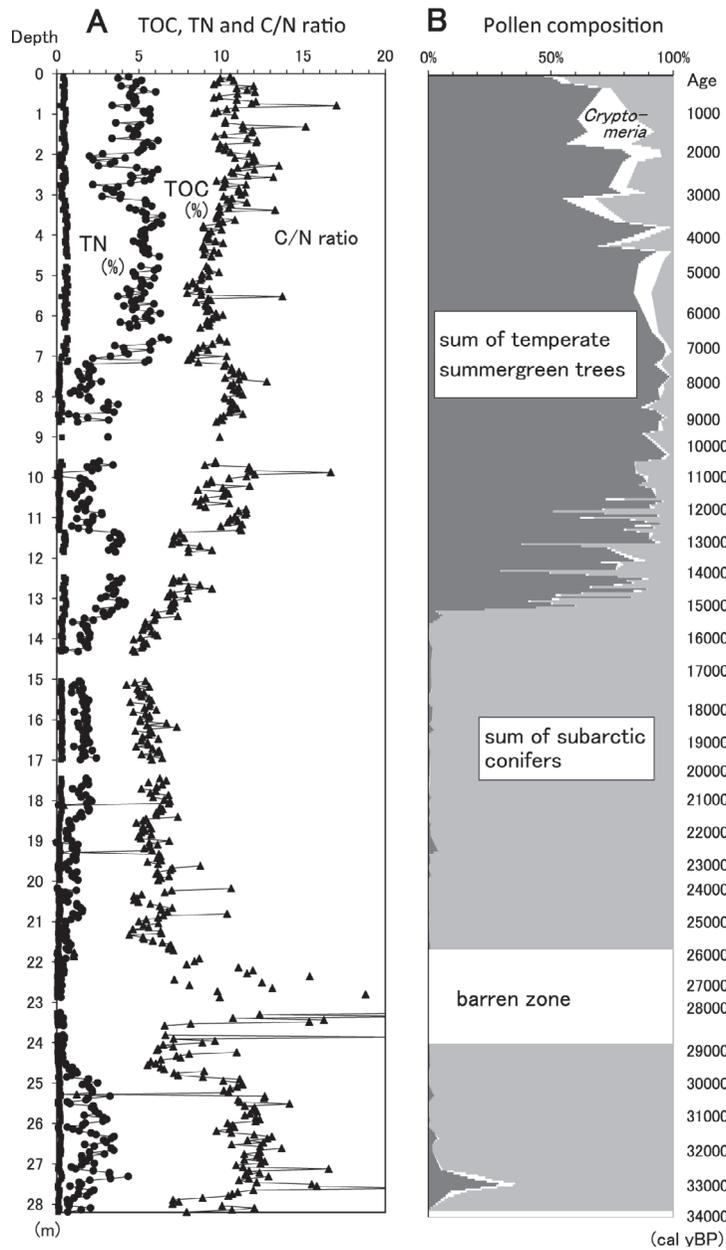


図 2 青木湖堆積物コアにおける最終氷期最盛期以降の全有機炭素量・全窒素量 (A) と花粉組成 (B) の変遷。  
 Fig. 2 Temporal changes in total organic carbon and nitrogen contents (A) and pollen composition (B) of a sediment core from Lake Aoki, central Japan.

MIS 6/5 境界付近で2%から6%へ急増する。MIS 5eには全体として5~7%の高い値を保ち、その後期には8%に達することもあった。MIS 5dには3%前後のやや低い値をもち、MIS 5c期には4%強のやや高い値を示す。MIS 5bの初期にはTOC量は2%近くまで急減し、その後4%ほどまで回復する。MIS 5aにはTOC量は5~6%の高い値をもつ。TOC量はMIS 4では、最初期に2%ほどまで急減し、間欠的に4%まで増加する短い期間を含むものの、全体としては2~3%の低い値を保つ。MIS 3では、最初期に5%ほどまで急増するが、その後は徐々に減少して3%程度まで低下する。

このような炭素量の変動は海洋酸素同位体比の変動とよく一致するだけでなく、氷床の酸素同位体比変動とも亜氷期-亜間氷期サイクルのレベルでも多くの類似性がみとめられる(田原ほか, 2006; Tawara *et al.*, 2007; 公文・田原, 2009)。

このコア試料については全層準にわたって花粉分析結果もだされており(叶内ほか, 2007), MIS 5cと5aで落葉広葉樹が優占し、MIS 3ではやや優勢である。一方、MIS 6, 5d, 5bおよびMIS 4では亜寒帯針葉樹の比率が卓越する。TOC量が多い時期には、樹木花粉全体に対する冷温帯落葉広葉樹の比率が増加し、少ない時期には亜寒帯針葉樹花粉の比率が増加するので、TOC量の変動は気候変動のある側面(気温)を表している。一方、地表に露出する高野層は約10万年前以降に限られているが、大まかな間隔での花粉分析はすでに報告されていた(酒井, 1987)。その後入谷ほか(2005)も露頭の試料を用いて、10cm間隔という高い分解能で花粉組成の変遷が明らかにした。その結果は酒井(1987)の予察を裏づけるとともに、叶内ほか(2007)がTKN2004コアに対して行った分析結果とも整合的である。

### III. 花粉組成および植生の変遷

表1に中部山岳地域で実施された花粉組成の調査研究事例を示す。TOC量を測定した試料についての花粉分析の結果の概要はすでに述べたので、繰り返さない。それ以外の地点では、諏訪湖堆積物に対してなされた過去20万年ほどをカ

バーする花粉分析(大嶋ほか, 1997)が特筆に値する。唐花見湿原や大阿原湿原の堆積物は、最終氷期最盛期以降の植生変遷を記録しており、貴重である。北アルプスの高標高域の湿原堆積物の多くは、約1万年前以降の完新世の堆積物であるが、それらに対する花粉分析もなされているので、そのうちの重要と判断したものを紹介する。

#### 1) 諏訪湖堆積物の花粉組成

諏訪湖(36.1°N, 138.1°E, 湖面標高759m)ではいくつもの比較的深いボーリングがなされている(例えば、安間ほか, 1990)が、ある程度の高い時間分解能で解析した例は限られている。そのなかで、大嶋ほか(1997)は、諏訪湖南東部の湖岸で掘削されたGS400コア(深度400m)に対して花粉分析を行い、MIS 6の初期にあたる約18万年前からMIS 3末期の3万年前までの植生の変遷を約1000年間隔で解明した。MIS 6に相当する18~13万年前は、トウヒ属やモミ属、マツ単維管束亜属(ゴヨウマツの仲間)を主とする亜寒帯針葉樹の花粉が卓越している。落葉広葉樹の花粉はほとんど産せず、草本花粉も多い。MIS 5にあたる13~7万年前においては、全体として冷温帯性落葉広葉樹(ブナ属、コナラ亜属、クルミ類など)と温帯性針葉樹(スギ、コウヤマキなど)の花粉の多さが特徴であり、それらがMIS 5e, 5c, 5aの温暖なサブステージでは増加し、MIS 5d, 5cの冷涼なサブステージでは減少するという周期的な変動を示す。そのなかで、温帯性針葉樹の花粉は、落葉広葉樹花粉の増加よりも少し遅れて増加をはじめ、かつ、少し遅れた時期に産出頻度のピークをもつ。一方、亜寒帯針葉樹は全体として温暖期に低率になるとともに、落葉広葉樹とは逆の位相で増減する。MIS 4に相当する期間は堆積物の厚さが薄いために花粉組成の分析数が少ないが、トウヒ属を中心とする亜寒帯針葉樹の卓越で特徴づけられるようである。MIS 3にあたる6~3万年前は、亜寒帯針葉樹花粉の多さ、マツ単維管束亜属の安定した産出、および落葉広葉樹花粉が若干高い比率を保つことで特徴づけられるが、亜寒帯針葉樹と落葉広葉樹の花粉の比率は経年的に大きく変動する。5~4.5

万年前に落葉広葉樹の増加（ピーク）と亜寒帯針葉樹の減少（谷）が認められる。なお、MIS 4以降には温帯性針葉樹はほとんど産出しない。

諏訪湖の堆積物で認められた花粉組成の経年的な変遷は、中部地方の各地で報告されている花粉組成の年代の変遷とよく一致することが指摘されており（大嶋ほか、1997）、たしかに中部山岳地域における基準となる花粉資料である。

諏訪湖における最終氷期末（約1.5万年前？）以降の花粉組成については、安間ほか（1990）が湖盆内で採取した2本のコア試料（SL-2, SL62-4）の分析結果を報告している。湖底の泥質堆積物の下位にある砂質堆積物の層準（1.5? ~ 1.3万年前）では、モミ属やツガ属が優占する亜寒帯針葉樹林であったものが、1.3万年前以降ではコナラ亜属の卓越する冷温帯落葉広葉樹林に急激に置き換わる。約4000年前以降ではコナラ亜属が減少し、替わって温帯性針葉樹が増加する。

## 2) 最終氷期末～更新世の花粉組成

### 2-1) 野尻湖堆積物

Tsukada (1967a, b) は野尻湖の湖底から採取した堆積物コアについての花粉分析を基礎として、その後各地で採取したコア試料を分析した結果を加えて、中部山岳地域における現植生の高度分布とも関連づけて、1.2万年前（暦年較正年代では約1.4万年前）から現在に至るまでの植生変遷を明らかにした。その後、検討対象を日本列島全域にまで拡大して、約5万年前から現在に至る間の日本の植生変遷を解明している（塚田、1981, 1986, 1987）。

野尻湖周辺を基準とした塚田（1987）の見解によれば4.5万年前から現在まで以下のような植生と気候の変遷が復元されている。4.5～3.5万年前の亜間氷期はIS花粉帯で示される冷温帯性の針広混交林であり、温暖な冬季が示されている。引き続き寒冷化が進む先主要氷期（3.5～2.5万年前: PF花粉帯）にはトウヒ属とマツ単維管束亜属が増加するが、温帯種の増減に反映した4回の寒暖変動があったことが示唆されている。その後、2.5～1.5万年前（FG花粉帯）ではトウヒ属とモミ属が優占し、その一方でほとんどの温

帯性種は消滅しており、この時期が最終氷期最盛期に相当する。1.5～1万年前（L花粉帯）は晩氷期と位置づけられ、亜寒帯性針葉樹種の急減に呼応してコナラ亜属やブナ属などの急増が進み、約1万年前にほぼ完全に入れ替わる。1万年前以降の後氷期は全体としてP花粉帯として設定され、初期（1～0.7万年前: P-1花粉帯）にはコナラ亜属が優占するが、ブナ属やクマシデ属、クルミ類も多く随伴する。中期（7000～4000年前: P-2花粉帯）にはナギ、コウヤマキ、アカガシ亜属などが連続して出現し、暖温帯種の影響が認められる。後期（4000年前～現在: P-3花粉帯）ではスギを主とする温帯針葉樹の増加が著しい。アワヤイネ、ソバもみられるようになり、農耕の影響が確認できる。なお、前述の年代値は、未較正の<sup>14</sup>C年代値に基礎をおいており、現在ではそれぞれの花粉帯の境界の年代を1000～5000年ほど古く見積もる必要がある。これらの花粉組成の変遷は、前節で野尻湖堆積物のTOC量変動にあわせて述べた花粉分析結果とほぼ同じである。

### 2-2) 北アルプス山岳域の湿原堆積物

Tsukada (1958) は、北アルプスの白馬岳周辺に点在する標高1,260～2,200 mの6地点の湿原の堆積物（厚さ0.5～2.4 m）についての花粉分析結果を報告している。いずれも堆積時期は更新世後半であり、花粉組成は高標高域に位置することを反映した亜高山帯の針葉樹を主体としている。全体として、更新世の後期に亜寒帯針葉樹が増加する傾向がある。同じ傾向は、志賀高原の瓢箪池堆積物（標高1,770 m）にも確認される（Tsukada, 1957）。また、Morita (1985) も中部地域の亜高山帯に点在する更新世後期の湿原堆積物の花粉組成を報告しているが、上部に向かって亜寒帯針葉樹の比率が高くなる傾向を読みとることができる。

一方、北アルプスの西側に位置する立山カルデラの弥陀ヶ原の2箇所の湿原堆積物（標高1,700 m, 1,890 m）に対して花粉分析が行われ、7300年前のK-Ahテフラ以降の連続的な花粉組成の変遷が解明されている（吉井・藤井、1981）。いずれも草原の草本花粉の比率が現在よりも高く、ブナ属やコナラ亜属、カバノキ属、ハンノキ属などの落葉

表 1 中部山岳地域における第四紀後期のおもな花粉分析地点の一覧。

Table 1 List of pollen analysis sites in the Japanese Alpine region, central Japan.

No.	Site	Location	Latitude (° N)	Longitude (° E)	Altitude (m)	Basin type	Thick- ness (m)	Estimated age		Marker tephra	Remarks	References
								Marine isotope stage (MIS)	Top (ka)			
1	Lake Nojiri	Nojiri, Shinano-machi, Nagano Pref.	36.826	138.213	654	lake	2.4	Late MIS 2-MIS 1	12	5?	detailed location unknown	Tsukada (1966, 1967a, b)
2	NJ88 core, Lake Nojiri	Off Biwajima, Shinano- machi, Nagano Pref.	36.83	138.216	630	lake and bog	44	MIS 5-1	100?	3	K-Ah, AT, DKP, Aso-4 core	Kumon <i>et al.</i> (2003, 2009, 2012), PRGN* (1993)
3	Tategahana, Lake Nojiri	Nojiri, Shinano-machi, Nagano Pref.	36.83	138.21	654	lake coast	8	MIS 4, MIS 3-2, MIS 1	70	0	AT, DKP	FPRGN**, PRGN (1980), PRGN (1984, 1987, 1990, 1996)
4	Ikejirigawa Lowland	Nishitambo, Shinano- machi, Nagano Pref.	36.83	138.2	650-660	bog	6	MIS 4- MIS 2			K-Ah, AT	PRGN (1990)
5	Site D, Midagahara	Midagahara, Tateyama- cho, Toyama Pref.	36.567	137.532	1690	bog	1.2	MIS 1	10	0	K-Ah	Yoshii and Fujii (1981)
6	Site L, Midagahara	Midagahara, Tateyama- cho, Toyama Pref.	36.564	137.55	1880	bog	0.9	MIS 1	10	0	K-Ah	Yoshii and Fujii (1981)
7	Murodo-taira	Murodo, Tateyama-cho, Toyama Pref.	36.578	137.597	2435	bog	0.8	MIS 1	8	0	K-Ah	Yoshii (1988)
8	Zako Valley	Okushiga, Yamanouchi- cho, Noagano Pref.	36.754	138.534	1520	river terrace with bog		MIS 3 or 5?				Tsukada (1959)
9	Tubogakure, Shiga	Tubogakure, Yamanouchi-cho, Nagano Pref.,	36.713	138.503	1500	bog	0-8.7	MIS 1	12	0		Tsukada (1967a, b)
10	Hyotan-ike, Shiga	Shiga heights, Yamanouchi-cho, Nagano Pref.,	36.693	138.693	1770	pond	5	late MIS 1	5?	0		Tsukada (1957)
11	Togakushi highland	Togakushi, Nagano-shi, Nagano Pref.	36.763	138.078	1205	fluvial fan with bog	3.7	MIS 2/1 boundary	18	14		Matsue <i>et al.</i> (2012)
12	Imaike	Okususobana, Kinasa. Nagano-shi, Nagano Pref.	36.792	137.99	1250	bog	2.2	late MIS 1	5?	0	Okususobana bog?	Hibino and Sasaki (1982)
13	Sankakuten	Gorin-Kogen, Itoigawa- shi, Niigata Pref.	36.829	137.762	1750	bog	0.9	late MIS 1				Tsukada (1958)
14	Heimantaira	Itoigawa-shi, Niigata Pref.	36.816	137.784	1320	bog	2.0	late MIS 1				Tsukada (1958)
15	Kaminotanbo	Tsugaike, Otari-mura, Nagano Pref.	36.771	137.831	1720	bog	2.4	late MIS 1				Tsukada (1958)
16	Seijodaigaku- hyuttetmae	Tsugaike, Otari-mura, Nagano Pref.	36.774	137.822	1800	bog	1.67	late MIS 1				Tsukada (1958)

表 1 (つづき)

Table 1 (continue)

No.	Site	Location	Latitude (° N)	Longitude (° E)	Altitude (m)	Basin type	Thick- ness (m)	Estimated age		Marker tephra	Remarks	References
								Marine isotope stage (MIS)	Base Top (ka) (ka)			
17	Tsugaikae	Tsugaikae, Otari-mura, Nagano Pref.	36.772	137.815	1900	bog	1.7	late MIS 1				Tsukada (1958)
18	Tengubara	Tsugaikae, Otari-mura, Nagano Pref.	36.784	137.814	2175	bog	0.54	late MIS 1				Tsukada (1958)
19	Hijikura	Hijikura, Otari-mura, Nagano Pref.	36.782	137.891	980	bog	3.9	full MIS 1			Ayame-ike ? starting point of Himekawa River	Hibino and Sasaki (1982)
20	Oumi	Sano, Hakuba-mura, Nagano Pref.	36.63	137.85	744	bog	2.5	late MIS 1				Hibino and Sasaki (1982)
21	Kamishiro	Kamishiro, Hakuba- mura, Nagano Pref.	36.648	137.863	750	fluvial fan with bog	3	MIS 3/2	30	28	AT	Ono <i>et al.</i> (2000)
22	Taira, Lake Aoki	Taira, Omachi-shi, Nagano Pref.	36.602	137.847	830	lake and river	7	MIS 3/2-2	30	20?	AT	Ono <i>et al.</i> (2000)
23	Aokiko Site A	Lake Aoki, Omachi-shi, Nagano Pref.	36.611	137.849	805	lake	28	MIS 3/2-1	30	0	K-Ah, AT?	TOC analysis Kumon <i>et al.</i> (2007)
24	Lake Kizaki	Kizaki, Omachi-shi, Nagano Pref.	36.56	137.84	770	lake	20	MIS 3/2-1	30	0		Hibino and Horie (1991)
25	Iyari	Iyari, Omachi-shi	36.548	137.853	830	bog	1.2	late MIS 1	5?	0		Hibino and Sasaki (1982)
26	Karakemi	Karakemi, Omachi-shi, Nagano Pref.	36.489	137.89	950	bog	3.2	MIS 3 to 1	40?	0		Hibino and Sasaki (1982), Takeoka (1991a)
27	Takano Formation	Takano, Shinko-cho, Nagano-shi, Nagano Pref.	36.549	138.035	730	lake	54	MIS 6-3	160	40	AT, Aso4, Aso-3	TOC analysis Sakai (1987), Iriya <i>et al.</i> (2005), Kanauchi <i>et al.</i> (2007)
28	Shirakoma- ike	Koumi-cho, Nagano Pref.	36.05	138.37	2110	lake	1.3	late MIS 1				Morita (1985)
29	Yashima-ga- hara bog	Shimosuwa-cho, Nagano Pref.	36.119	138.166	1630	bog	0-7.5	MIS 1	11	0		Tsukada (1967b)
30	Lake Suwa	Suwa-shi ~ Okaya-shi, Nagano Pref.	36.04	138.08	759	lake and river	20-30	MIS 2/1 to 1	14	0	U-G, AT	2 sites in the lake Anma <i>et al.</i> (1990)
31	Lake Suwa	Shibusaki, Suwa-shi, Nagano Pref.	36.04	138.1	760	fluvial	60-320	MIS 6-3	200	29	AT, Aso-4, Pm-I, III	GS400 core Oshima <i>et al.</i> (1997)
32	Oahara bog	Ina-shi, Nagano Pref.	35.886	138.178	1815	bog	3.2	MIS 2-1	28	0	KgP, AT	Tsuda (1990), Takeoka (1991b)
33	Kisohirasawa	Kisohirasawa, Shijiri-shi, Nagano Pref.	35.984	137.838	930	river terrace with bog	1.7	MIS 2	23	22		Sakai <i>et al.</i> (1979)
34	Tadachi bog	Nagiso-cho, Nagano Pref.	35.649	137.548	1520	bog	0.46	MIS 1	7	0		Takeoka (1990)

\*PRGN: Palynological Research Group for Nojiri-ko Excavation. \*\*TPRGN: Fossil Plant Research Group for Nojiri-ko Excavation.

広葉樹を主体とし、亜寒帯針葉樹のモミ属やツガ属の混じる植生を示す。堆積物の上部で亜寒帯針葉樹の比率が少し増加する。立山室堂平の湿原堆積物（標高 2,420 m）でも K-Ah テフラの下位付近から現在までの花粉組成が報告されており（吉井, 1988）、イネ科やカヤツリグサ科の草本の卓越する草原環境にカバノキ属やハンノキ属、およびハイマツが点在する植生が復元されている。

### 2-3) 唐花見湿原

唐花見湿原（北緯 36°29.3′, 東経 137°53.4′, 標高 945 m）は大町市の東部に位置する、乾陸化の初期段階にある低層湿原である。湿原の周辺はコナラ、クリを中心とする落葉広葉樹林が主体であるが、カラマツの人工林も点在する（竹岡, 1991a）。湿原の中央部でヒーラー型ボーリングコアラーを用いて採取された 5 m ほどの泥炭～有機質粘土について 10 cm おきに花粉分析がなされている（竹岡, 1991a）。年代決定の確度は高くないが、最終氷期後期から完新世にいたる堆積物と考えられる。

花粉帯としては 4 帯が区分される。最下部の花粉帯 I は、トウヒ属とマツ属が優勢でヒノキ科とコナラ亜属を普遍的に伴う。竹岡（1991a）は最終氷期最盛期に対比しているが、少なくともこの帯の中・下部は、MIS 3 の後半に相当する冷涼な気候下での針広混交林であったと考えられる。花粉帯 II ではトウヒ属、マツ属が引き続き優勢であり、カラマツやモミ属も増加する。一方、コナラ亜属やヒノキ科はほぼなくなり、寒冷化が進行した。花粉帯 I の後半からこの帯の中盤までにかけての時期が MIS 2 の最終氷期最盛期に相当すると判断される。花粉帯 III ではトウヒ属やモミ属、カラマツなど亜寒帯針葉樹がほぼ消滅し、一方でコナラ亜属が優占し、ヒノキ科も多くなる。約 1 万年以前以降の温暖期を反映している。花粉帯 IV は 1500 年前以降と推定されており、コナラ亜属の減少とともに、ハンノキ属とマツ属の増加で特徴づけられる。マツは複雑管束亜属であり、森林伐採などの人為的な影響が推定される。

### 2-4) 大阿原湿原

大阿原湿原（北緯 35°53.1′, 東経 138°10.6′, 標高 1,820 m）は、入笠山（標高 1,955 m）の南側に

位置する中間～高層湿原である（津田, 1990; 竹岡, 1991b）。周辺の現在の植生では、人工林が圧倒的であるが、標高 1,000～1,500 m の低高山帯にはミズナラやシラカンバ、フサザクラなどの落葉広葉樹林が残存しており、本来の植生を示唆するとされている（津田, 1990）。標高 1,500～1,800 m では落葉広葉樹に針葉樹が混交し、1,800 m 以上ではシラベ、ウラジロモミ、コメツガなどの亜寒帯針葉樹が優占する。

大阿原湿原の中央部において、ヒーラー型ボーリングコアラーで採取された 3 m ほどの泥炭～シルト質泥炭層についての花粉分析の結果は、約 2.2 万年前から 3000 年前までほぼ一貫してモミ属、トウヒ属、ツガ属などが卓越する亜寒帯針葉樹林が分布していたことを示す。2 万年ごろの最終氷期最盛期においても樹木花粉の比率が高く、草原やツンドラの状態であったとは考えにくいと指摘されている（津田, 1990）。約 1 万年以前以降では、コナラ亜属やカンバ属の増加、マツ単維管束亜属とツガ属の漸減が認められ、完新世の温暖化の影響が確認できる。

## IV. 議 論

### 1) 有機炭素量変動の古気候学的意味

木崎湖堆積物についての事例研究では、過去 21 年間の堆積物中の有機炭素量が湖水中のクロロフィル *a* の年間累積量および冬の平均気温と正の相関をもつことが明らかにされている（公文ほか, 2005）。また、野尻湖堆積物について例示したように、有機炭素量は同じ堆積物の花粉組成が示唆する気候変動（おもに寒暖変動）と同調して変動する。さらに、汎世界的な気候変動を表す海洋酸素同位体比（直接的には氷床量を反映）や極域の氷床に記録された酸素同位体比（氷床コアの掘削地点と水蒸気の供給源の距離）ともよく一致した変動を示す。気候変動がどのようなメカニズムを通じて堆積物の TOC 量変動として記録されているか、という点についての説明は必ずしも十分ではないが、前述した事例研究や他の気候指標との対応関係からみて、TOC 量の変動を日本列島における寒暖変動の相対的な指標とみなすこ

とができると考えられる。

## 2) 花粉組成から気候パラメーターへ

Nakagawa *et al.* (2002) は、現在の日本における潜在植生を反映した花粉組成資料と気象資料との関係に基づいて、過去の花粉組成から気象情報を復元するモダンアナログ法を提案した。その方法 (Polygon 1.5) を用いて、野尻湖堆積物の花粉組成資料を気候パラメーターに変換した例を図3に示す。また、その結果を海洋酸素同位体比層序 (MIS) ごとに平均化して表2に示す。ただし、野尻湖堆積物の花粉にはマツ属の比率が高いが、モダンアナログ法の基礎となる現世の花粉資料では寒冷気候に適応したマツ単維管束亜属 (ゴヨウマツの仲間) と広温性のマツ複維管束亜属 (ニヨウマツの仲間) との区別がなされていないので、モダンアナログが適正に機能しない。そのため、野尻湖堆積物の花粉組成の解析についてはマツ単維管束亜属を除外したうえで組成比率を再計算して使用した。なお、以下に述べる年代区分は MIS に対応させているが、もとの古気候復元には野尻湖堆積物の花粉組成における区分が使われており、境界の年代値には最近の海洋酸素同位体比層序 (LR04) の区分と多少の不一致がある。

MIS 4 (7.2 ~ 6.0 万年前) には、マツ属 (おもに単維管束亜属 (ゴヨウマツ類)) とトウヒ属を主とする亜寒帯針葉樹が卓越し、安定した植生をもつ。モダンアナログ法によって復元された各種の気候パラメーターも安定している。年平均気温 2.5 ~ 5.0°C (平均 3.0°C)、最暖月気温 15 ~ 18°C (平均 15.9°C)、最寒月気温 -11 ~ -8°C (平均 -10.2°C) と計算される。年間降水量も 1,050 ~ 1,400 mm (平均 1,060 mm) と推定される。

MIS 3 (6.0 ~ 3.0 万年前) にはコナラ亜属が増加して針広混交林となるが、落葉広葉樹の優勢な温暖期と亜寒帯針葉樹の優勢な寒冷期が数百 ~ 2, 3 千年の短い周期で繰り返す。年平均気温で 3 ~ 8°C の大きな変動があり、平均として 5°C の冷涼な気候を示す。最暖月気温 15 ~ 20°C (平均 17.2°C)、最寒月気温 -10 ~ -4°C (平均 -7.2°C) で、MIS 4 よりもある程度暖かく、気温が大きな幅で変動した。年降水量は 1,000 ~ 1,850 mm (平

均 1,360 mm) でやや多く、とくに夏季の降水量の比率が高い。約 5 万年前に気温のピークがある。

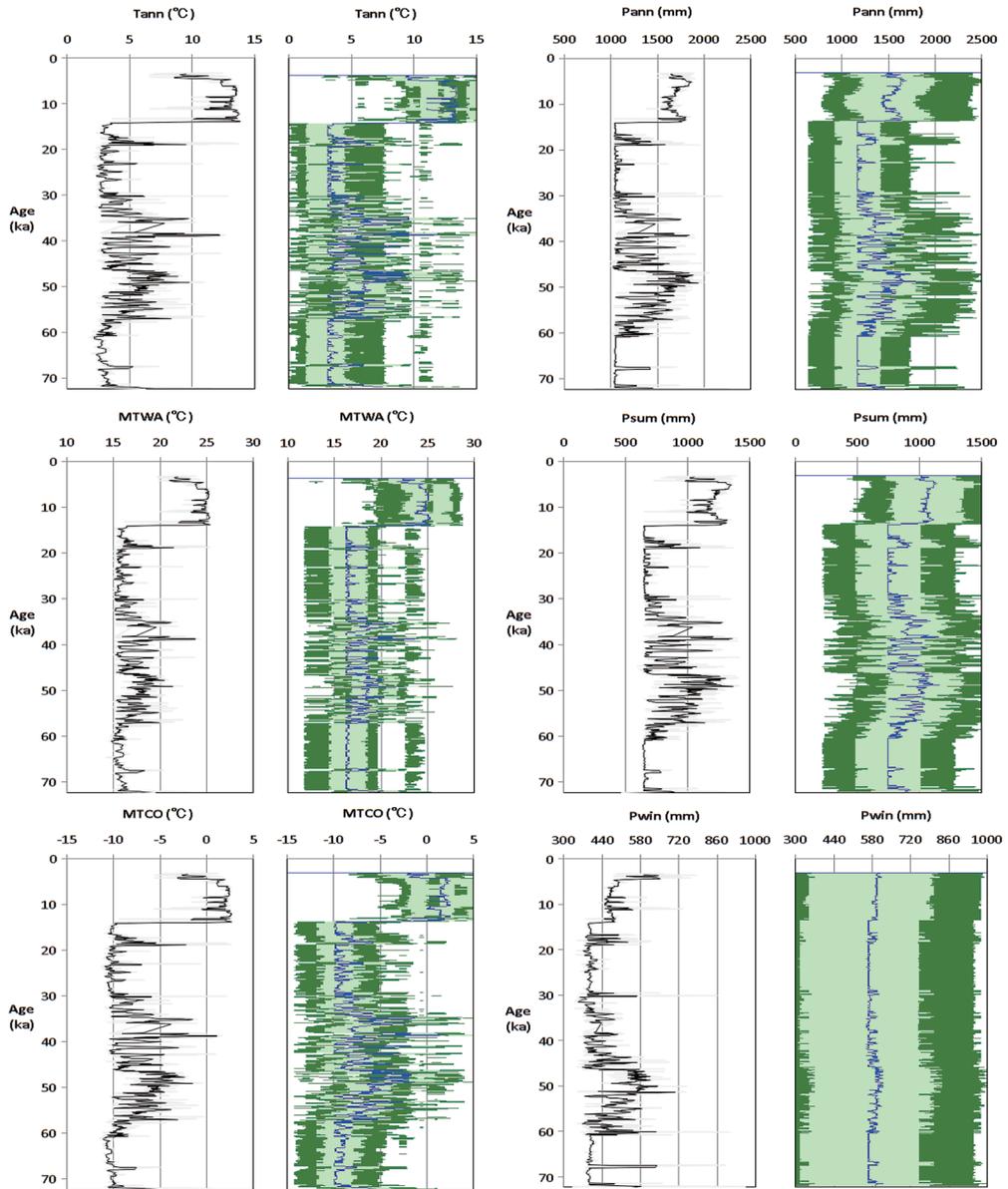
MIS 2 (3.0 ~ 1.4 万年前) では、亜寒帯針葉樹が圧倒的であり、樹種構成も安定している。年平均気温は 2.5 ~ 7°C (平均 3.4°C)、最暖月気温は 15.5 ~ 20°C (平均 17.4°C)、最寒月気温は -11 ~ -6°C (平均 -9.6°C) と計算される。平均気温が、わずかではあるが、MIS 4 よりも高い結果となって、この時期を最終氷期最盛期とする一般的な見解とは不一致である。寒冷気候を示す花粉組成のモダンアナログ資料が少ないことが一因となって、寒い側での温度変換の限界を超え、温度を高く計算する結果となった可能性がある。年降水量は 1,000 mm あまりであり、少ない。

MIS 1 (1.4 万年 ~ 3000 年前) の最初期 1.4 ~ 1.2 万年においては植生の急激な変化があり、気候の急変が表れている。その期間を除けば、年平均気温は 10 ~ 13.5°C (平均 12.6°C) で、最暖月気温 21 ~ 25°C (平均 24.4°C)、最寒月気温 -3 ~ 2.5°C (平均 1.4°C) である。年降水量は 1,000 ~ 1,900 mm (平均 1,800 mm) であり、高い値で安定している。4000 年前以降では年平均気温が 10°C まで低下するが、約 4, 5 千年前以降で常緑のアカガシ亜属の産出がみられるということと矛盾する。4000 ~ 3000 年前の復元された気温や降水量は現在のものと同じ程度であるので、MIS 1 期前半の年平均気温 11 ~ 12°C という値は高すぎる可能性がある。落葉広葉樹の比率が 90% を超えるという植生に対応する適切なモダンアナログがないことが高い温度が推定された一因かもしれない。

## 3) 中部山岳域の気候変動

16 万年前から現在までについては、ある程度古気候資料が整っているため、中部山岳地域の古気候復元を試みる。野尻湖および高野層の資料が中心となるので、北緯 36° 付近に位置する長野市周辺の標高 800 ~ 900 m の植生変遷を基準とし、標高と緯度差 (南北差) も可能な範囲で言及する。

MIS 6 後半 (160 ~ 130 ka) は、トウヒ属やモミ属、マツ単維管束亜属を中心とする亜寒帯針葉樹が卓越し、カバノキ属以外の落葉広葉樹はほと



Legend

Tann : mean annual temperature.  
 MTWA: mean temperature of the warmest month.  
 MTCO : mean temperature of the coldest month.  
 Pann : annual precipitation.  
 Psum : cumulative precipitation from April to September.  
 Pwin : cumulative precipitation from October to March.

: the confidence coefficients 68.2 %  
 : the confidence coefficients 95.4 %

図 3 野尻湖堆積物の花粉組成にモダンアナログ法を適用して復元した気候パラメーターの過去7.2万年間の変動。それぞれの左側の図(黒の実線)は平均気温や降水量の3点移動平均を示しており、右側の図(青線)は個々の資料の中央値とその誤差の範囲を示す。

Fig. 3 Past 72,000 years of changes of climate parameters reconstructed on the basis of pollen data of the NJ88 core from Lake Nojiri, central Japan.

The black line in the left figure is the moving average of three data sets and the blue line in the right figure is the median of each parameter with confidence intervals, respectively.

表 2 野尻湖堆積物コア (NJ88) の花粉組成からモダンアナログ法で復元した第四紀後期の気候パラメーター。3000 年前以降は農耕等による人為的な植生擾乱が激しいので復元ができない。1.4 ~ 1.2 万年前については急激な植生変化にモダンアナログ法を適用することが難しいので省略した。

Table 2 Late Quaternary climate parameters reconstructed from pollen data of NJ88 core from Lake Nojiri, central Japan.

The period from 12 to 14 ka is excluded from the table, because of difficulties in applying the modern analog method to rapid and large change of vegetation. Vegetation after 3ka was disturbed by anthropologic activities such as deforestation and agriculture.

Stage (Age)	Total organic carbon content (%)	Temperature (°C)			Precipitation (mm)			Vegetation type	
		Tann: annual mean	MTWA: warmest month	MTCO: coldest month	Annual mean	Summer (Apr.-Sept.)	Winter (Oct.-Mar.)		
MIS 1 (3-12 ka)	Cooler period (3-4 ka)	6.1	10.4	22.5	-1.1	1719	1138	579	Cool-temperate deciduous broadleaf forest
	Warmer period (9-8 ka)	5.7	12.8	24.6	1.6	1627	1157	469	
	Average	5.7	12.6	24.4	1.4	1676	1183	491	
MIS 2 (14-30 ka)	Warm period (17-18 ka)	2.0	4.8	17.2	-7.7	1244	807	437	Subarctic conifer forest
	Cold period (29-30 ka)	1.0	2.2	16.2	-11.0	1164	739	424	
	Average	1.8	3.4	16.1	-9.6	1102	696	406	
MIS 3 (30-60 ka)	Warm period (46.6-47.9 ka)	2.6	7.2	19.2	-4.7	1424	992	430	Cool-temperate broad-leaf forest with subarctic conifers
	Cold period (45.2-46.6 ka)	1.5	4.4	16.8	-8.0	1266	810	455	Subarctic conifer forest
	Average	2.2	5.0	17.2	-7.2	1364	884	479	—
MIS 4 (60-72 ka)	Warm period (63.1-64.5 ka)	1.9	3.3	16.0	-9.9	1084	666	418	Subarctic conifer forest
	Cold period (65.6-66.7 ka)	0.9	2.8	15.6	-10.5	1047	652	395	
	Average	1.5	3.0	15.9	-10.2	1061	657	405	

んど産出しない。この植生は高野層と諏訪湖とよく似ている。TOC 量も最少の水準で安定している。後述する最終氷期最盛期 (MIS 2) と類似した寒冷な気候であったと考えられる。

MIS 5e (130 ~ 116 ka) の高野層では、ブナ属を主とする冷温帯落葉広葉樹が優占し、亜寒帯針葉樹は低率である。諏訪湖でもこの時期に類似した植生が認められる。野尻湖では完新世にコナラ亜属やブナ属が優占する植生が発達する。その

比率は MIS 5e とは異なるが、冷温帯の落葉広葉樹が卓越する点は共通している。少量ながらモミ属などの亜寒帯針葉樹が定常的にみられるので、MIS 5e では完新世と同じ程度に温暖か、もしくは多少冷涼であった可能性が高い。

MIS 5d (116 ~ 103 ka) では、モミ属やツガ属、トウヒ属を主体とする亜寒帯針葉樹が優勢になり、落葉広葉樹の比率は低下する。TOC 量も低下している。この期の最初期を除いてスギの産

出は少ないので、後述する MIS 5b よりも寒冷で、MIS 4 よりも温暖であったと考えられる。

MIS 5c (103 ~ 92 ka) では、全体として落葉広葉樹の比率が 60% ほどと高くなり、亜寒帯針葉樹の比率は低くなる。一方、スギやコウヤマキ、およびヒノキ科の温帯性針葉樹も 20 ~ 30% と多くなっており、ある程度の暖かさを示唆する。高野層の TOC 量は全体として高く、2, 3 千年周期の増減を繰り返す。この時期には On-Pm1, K-Tz, SK などの広域指標テフラが多く降灰しており (町田・新井, 2003), 大規模な火山噴火が頻発していた。

MIS 5b (92 ~ 85 ka) では、冷温帯落葉広葉樹の比率が 10% 程度と低く、亜寒帯針葉樹が優勢である。この特徴は野尻湖の琵琶島沖泥炭層、高野層、諏訪湖堆積物で共通している。MIS 4 の亜氷期よりは暖かく、MIS 3 の平均的な亜間氷期よりは寒冷であったと推定される。この期の中頃に Aso-4 テフラが挟まれる。Aso-4 テフラは日本海においても MIS 5b の寒冷期に確認されている (大場・赤坂, 1990)。

MIS 5a (85 ~ 71 ka) では、全体として落葉広葉樹が優勢な針広混交林であることが高野層や諏訪湖堆積物において確認されている。野尻湖でも琵琶島沖泥炭層でこの時期に落葉広葉樹の比率が高い針広混交林が認められる (野尻湖花粉グループ, 1993)。この期は温帯性針葉樹のスギが多いという特徴も共通している。落葉広葉樹の比率から推定すると、MIS 3 よりも暖かく、MIS 1 よりも寒冷であったと推定される。TOC 量には 2, 3 千年周期の増減がはっきり認められ、花粉組成にも短周期の変動がみられるので、短周期の寒暖変動が存在したと推定される。

MIS 4 (71 ~ 57 ka) では、亜寒帯針葉樹が卓越し、カバノキ属を除いて落葉広葉樹がほとんど産しないことが野尻湖堆積物や高野層、諏訪湖堆積物において確認される。野尻湖ではマツ単維管束亜属 (ゴヨウマツの仲間) がとくに卓越している。モダンアナログ法によって平均気温は 3℃ と復元されているが、この復元にはマツ単維管束亜属を除外している。全体として TOC 量も低い。

6.4 ~ 6.3 万年前に TOC 量の小さいピークが認められ、花粉組成からの気温復元でもやや高く復元される。グリーンランド氷床で見いだされている IS 18 の亜間氷期に対応している可能性がある。なお、この期間の中頃に大山倉吉テフラ (DKP) が確認されており、富山県の立山においては山岳氷河の発達が発達が推定されている (町田・新井, 1979)。

MIS 3 (57 ~ 29 ka) の時期には、亜寒帯針葉樹と冷温帯落葉広葉樹からなる針広混交林が、時期ごとに両者の比率を変えて発達していた。AT テフラの下位にあるという層位関係から、この針広混交林の発達は、野尻湖や諏訪湖の堆積物、高野層だけでなく、青木湖周辺 (多ほか, 2000) や唐花見湿原 (竹岡, 1991a) の堆積物でも確認できる。野尻湖堆積物や高野層では TOC 量も数百年 ~ 2, 3 千年の周期で変動を繰り返しており、グリーンランド氷床コアの酸素同位体比の変動が示す亜氷期と亜間氷期との短周期の繰返し (D-O cycle) を反映していると考えられる。亜氷期には亜寒帯針葉樹が優勢し、最も寒冷な亜氷期では年平均気温が 4.4℃ と復元されて、MIS 2 (最終氷期最盛期) よりもやや温暖であった。亜間氷期は落葉広葉樹と亜寒帯針葉樹との混交林であり、最も温暖な期間で年平均気温は 7.2℃ と復元されている。MIS 3 の期間は全体としてもやや温暖であり (年平均気温の平均 5.2℃), 約 5 万年前には安定した、約 3.8 万年前には短期間のとくに温暖な時期が挟まる。

MIS 2 (29 ~ 14 ka) は最終氷期最盛期にあたり、モミ属やトウヒ属などの亜寒帯針葉樹の卓越で特徴づけられる。年平均気温 3.4℃ の寒冷な気候が復元された。TOC 量も全体として低く、とくに 2.9 ~ 2.8 万年前に低下する。この期間の下限はほぼ AT テフラの層準にあたり、中部地域の各地で亜寒帯針葉樹林の発達を確認できる (酒井ほか, 1979; 日比野・佐々木, 1982; Hibino and Horie, 1991; 多ほか, 2000; 松江ほか, 2012)。また、日本アルプスの高標高域に山岳氷河が点在して発達していたこと (例えば、小林, 1956; 町田・新井, 1979) や汎世界的な氷床の発達 (LR04: Lisiecki and Raymo, 2005), 北極域の寒冷化

(North Greenland Ice Core Project members, 2004) が知られており、それらと調和的な結果である。

更新世と完新世の境界 (11.7 ka) の直前の期間 (14 ~ 11.7 ka) は、晩氷期 (退氷期) とも呼ばれる時期で、野尻湖や青木湖、諏訪湖などにおいて植生が亜寒帯針葉樹から落葉広葉樹へ急速に置き換わることが確認される。その前後での温度差は年平均気温で 9℃ほどあることが復元され、2, 3 千年間という短い期間に急激に温暖化が進行したことが推定される。その途中の 1.2 ~ 1.3 万年前では、一時的に亜寒帯針葉樹の花粉比率が増加傾向に転ずるとともに TOC 量も減少する。これがヤングドリラス期に対応する短期の寒冷化を示すものと考えられるが、北欧や北大西洋域ほど強い寒冷化ではなかったと考えられる。水月湖においてもこの時期の一時的な寒冷化が確認されているが (Nakagawa *et al.*, 2003), 北欧ほど明瞭ではない。

完新世 (11.7 ~ 0 ka) は、冷温帯性落葉広葉樹林の卓越で特徴づけられ、大局的には現在とほぼ同じ気候と考えられる。しかし、その前期にはコナラ亜属がとくに卓越し、次いでブナ属が優勢となる。初期には 12℃を超える年平均気温が復元される。有機炭素量も前期の前半で高く、いったん減少した後に増加し、その後完新世の後半で徐々に減少する。完新世の中期 (8 ~ 6 ka) は汎世界的にヒプシサーマルと呼ばれる最温暖期とされ (例えば, Bradley, 1999), 日本においても縄文海進と呼ばれる高海水準期 (すなわち温暖期) が知られている。しかし、12.8℃という復元温度は、現在の気象観測値 (信濃町アメダス観測点: 北緯 36°48.5′ 標高 685 m, 1981 ~ 2010 年の平均) の年平均気温 9.1℃に比べて高すぎる可能性がある。完新世後期では、高標高域 (1,500 ~ 1,700 m) で落葉広葉樹が減り、亜寒帯針葉樹が増加する傾向が認められる (Tsukada, 1957, 1958, 1967b)。TOC 量も野尻湖堆積物で減少しており、寒冷化が示唆される。これは北半球高緯度地域の夏季の日射量の減少と一致している。また、樹木年輪や歴史資料に基づく過去 1000 年間の気温変動の推

定 (Mann *et al.*, 1999) では、最近の 100 年間を除いて一貫した気温の低下が示されていることと調和的である。

## V. まとめ

(1) 中部山岳地域の湖沼や湿地堆積物に記録された後期第四紀の古気候資料について、数千年 ~ 1 万年以上にわたる連続性のよい資料を中心に、有機炭素量と花粉組成の変遷を整理してまとめた。

(2) 有機炭素量については、野尻湖および青木湖、高野層の資料が有用で、湖における生物生産性を介して記録された相対的な寒暖変動が過去 16 万年間にわたって高時間分解能で解明された。

(3) 野尻湖堆積物から得られた約 100 年の時間分解能をもつ花粉組成資料にモダンアナログ法を適用して古気候を解析し、気温や降水量の復元を試みた。手法上の制約も判明したが、定量的な気候指標が提示された意義は大きい。

(4) 解析した結果を統合して、時代順 (海洋酸素同位体比ステージごと) に気候変動を復元すると以下のようにまとめられる。ただし、長野市付近の緯度 (北緯 36°) と野尻湖や高野層の分布する標高 700 ~ 800 m を基準とした。

MIS 6 後期 (16 ~ 13 万年前) には、トウヒ属やモミ属を主とする亜寒帯針葉樹が卓越した。最終氷期最盛期と同じ程度 (年平均気温 3℃程度) の寒冷な気候であったと考えられる。

MIS 5e にはブナ属やコナラ亜属などの落葉広葉樹が 80 ~ 90% と卓越するが、現在よりは 10% ほど少なかった。また、低率ながら亜寒帯針葉樹も連続して残存するので MIS 1 初期の気温 (年平均気温 12℃) よりもやや冷涼であったと推定される。ブナ属が優占するので、降水量が多かった可能性がある。

MIS 5d ~ 5a は亜氷期と亜間氷期との周期の長い繰り返しで特徴づけられる。亜氷期には亜寒帯針葉樹が優勢で、最終氷期最盛期よりは温暖で、MIS 3 の亜間氷期よりは寒冷であった。一方、亜間氷期には落葉広葉樹の比率が 70% 前後まで増加したので、MIS 1 初期よりも冷涼で、

MIS 3 の最温暖期 (年平均 9°C) よりも温暖であったと推定される。

MIS 4 にはモミ属, トウヒ属などとともにマツ属単維管束亜属が優占する亜寒帯針葉樹が卓越し, カバノキ属を除いて落葉広葉樹はほとんど消滅した。平均気温約 3°C と寒冷な気候が続いたと考えられる。

MIS 3 では, 亜寒帯針葉樹と落葉広葉の比率が数百年~数千年で逆転し, 平均気温 4°C 程度の亜氷期と平均気温 6~7°C の亜間氷期が短周期で繰り返していた。

MIS 2 は最終氷期最盛期にあたり, 亜寒帯針葉樹が卓越した寒冷な気候 (平均気温 3°C) であったと考えられる。MIS 2/1 境界では急激な温暖化とそれに伴う植生の入れ替わりがあった。温暖化の過程には一時的な停滞があり, ヤングドリラス期に相当する寒冷化があったが, 軽微なものであった。

MIS 1 では落葉広葉樹が 95% 以上と安定して優占した。MIS 1 初期には年平均気温が 12°C と復元されたが, 高すぎる推定の可能性もある。年平均気温は後半の時期には 9°C まで低下した。この値は現在の気象観測による平均値に近い。

## 謝 辞

本総説の執筆にあたっては, 中部山岳地域環境変動研究機構から「中部山岳地域の環境変動の解明から環境資源再生を目指す大学連携事業」の一環として進めてきた研究成果の発表の機会を与えていただいた。なお, 本研究で紹介した研究成果の一部には信州大学学長裁量経費および信州大学山岳科学総合研究所からの研究費の支援を受けた。文部科学省科学研究費補助金 (課題番号 15340168, 18340157 代表者 公文富士夫) も関連する研究に用いられた。関係当局に厚く御礼申し上げます。

## 文 献

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. *Journal of the Geological Society of Japan*, **108**, 249-265.  
安間 恵・長岡正利・丹羽俊二・関本勝久・吉川昌伸・藤根 久 (1990): 諏訪湖湖底の構造調査と環境地

質. 地質学論集, **36**, 179-194. [Anma, K., Nagaoka, M., Niwa, S., Sekimoto, K., Yoshikawa, M. and Fujine, H. (1990): A geological survey for the study on neotectonic movement and geoenvironment of Lake Suwa, Nagano Prefecture. *Memoirs of the Geological Society of Japan*, **36**, 179-194. (in Japanese with English abstract)]

Bradley, R.S. (1999): *Paleoclimatology—Reconstructing Climates of the Quaternary*. Academic Press, San Diego.

地質調査所 (1988): 青木湖の湖底堆積物採取作業報告書. [Geological Survey of Japan (1988): *Report on Lake Drilling of Bottom Sediments from Lake Aoki (Aokiko No Kotei Taiseikibutsu Saishu Sagyo Hokokusho)*. (in Japanese)\*]

Dansgaard, W., Johnsen, S.J., Moller, J. and Langway, 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**, 128-220.

EPICA community members (2004): Eight glacial cycles from an Antarctic ice core. *Nature*, **429**, 623-628.

Hibino, K. and Horie, S. (1991): Pollenanalytische Forschungen über Vegetationsveränderungen nach der letzten Eiszeit im Kizaki-See, Präfektur Nagano. in *Die Geschichte des Biwa-Sees in Japan* edited by Horie, S., 285-295. Universitätsverlag Wagner.

日比野絃一郎・佐々木昌子 (1982): 長野県北西部における花粉分析的研究. 宮城県農業短期大学学術報告, **30**, 93-101. [Hibino, K. and Sasaki, M. (1982): Palynological studies in the northwestern part of Nagano Prefecture, central Honshu, Japan. *Report of Miyagi Agricultural College*, **30**, 93-101. (in Japanese with English abstract)]

Inouchi, Y., Yokota, S. and Terashima, S. (1996): Climatic change around Lake Biwa during the past 300,000 years and 2,000 years. in *Proceeding of 1995 Nagoya IGBP-PAGES/PEP-Symposium* edited by Mikami, T., Matsumoto, E., Ohta, S. and Sweda, T., 109-114.

五百沢智也 (1966): 日本の氷河地形. 地理, **11**(3), 24-30. [Iozawa, T. (1966): Glacial landforms in the Japanese islands. *Geography (Chiri)*, **11**(3), 24-30. (in Japanese)\*]

入谷 剛・北川陽一・大井信夫・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. [Iriya, T., Kitagawa, Y., Ooi, N., Furusawa, A. and Miyawaki, R. (2005): Tephrochronology of late Pleistocene Takano Formation, Nagano Prefecture, central Japan, with environmental changes recon-

- structed from pollen spectra. *The Quaternary Research (Daiyonki Kenkyu)*, **44**, 323-338. (in Japanese with English abstract)
- Jouzel, J., Barkov, N.I., Barnola, J.M., Bender, M., Chappellaz, J., Genthon, C., Kotlyakov, V.M., Lipenkov, V., Lorius C., Petit, J.R., Raynaud, D., Raisbeck, G., Ritz, C., Sowers, T., Stievenard, M., Yiou, F. and Yiou, P. (1993): Extending the Vostok ice-core record of paleoclimate to the penultimate glacial period. *Nature*, **364**, 407-412.
- 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, **37**, 166-167. [Kanauchi, A., Kawai, S. and Kumon, F. (2007): Pollen analysis of the boring core, obtained from Takano formation, Nagano Prefecture, central Japan. *Programme and Abstracts, Japan Association for Quaternary Research*, **37**, 166-167. (in Japanese)]
- Kawamura, K., Parrenin, F., Lisiecki, L., Uemura, R., Vimeux, F., Severinghaus, J.P., Hutterli, M.A., Nakazawa, T., Aoki, S., Jouzel, J., Raymo, M.E., Matsumoto, K., Nakata, H., Motoyama, H., Fujita, S., Goto-Azuma, K., Fujii, Y. and Watanabe, O. (2007): Northern Hemisphere forcing of climatic cycles in Antarctica over the past 360,000 years. *Nature*, **448**, 912-917.
- 木村純一 (1987): 長野県聖山北麓の更新統一中部から上部更新統一. 地質学雑誌, **93**, 245-257. [Kimura, J. (1987): Middle and Upper Pleistocene Series in the north piedmont of Mt. Hijiri. *Journal of the Geological Society of Japan*, **93**, 245-257. (in Japanese with English abstract)]
- 小林国夫 (1956): 日本アルプスの自然. 築地書館. [Kobayashi, K. (1956): *Nature of the Japanese Alps (Nihon Arupusu No Shizen)*. Tsukiji Shokan. (in Japanese)\*]
- 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. [Kumon, F. (2003): Total organic carbon and total nitrogen contents in lake sediment as a proxies of paleoclimate. *The Quaternary Research (Daiyonki Kenkyu)*, **42**, 195-204. (in Japanese with English abstract)]
- 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. [Kumon, F. and Inouchi, Y. (1990): All-core boring and the correlation with the acoustic reflectors in Lake Nojiri, central Japan. *Memoir of the Geological Society of Japan*, **36**, 167-178. (in Japanese with English abstract)]
- 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. 地質学雑誌, **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. *Journal of the Geological Society of Japan*, **115**, 344-356. (in Japanese with English abstract)]
- 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., Kawai, S. and Inouchi, Y. (2003): Climate changes between 25,000 and 6,000 yrs BP deduced from TOC, TN, and fossil pollen analyses of a sediment core from Lake Nojiri, central Japan. *The Quaternary Research (Daiyonki Kenkyu)*, **42**, 13-26. (in Japanese with English abstract)]
- 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—. 地質学雑誌, **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. *Journal of the Geological Society of Japan*, **111**, 599-609. (in Japanese with English abstract)]
- 公文富士夫・河合小百合・藤田紀子・井内美郎 (2007): 信州の湖沼堆積物から推定される過去 6 万年間の気候変動. 公文富士夫編: 21 世紀における日本アルプスの自然環境. 信州大学プロジェクト研究 2006 年度成果報告書, 94-116. [Kumon, F., Kawai, S., Fujita, N. and Inouchi, Y. (2007): Detailed paleoclimate of the last 60ka deduced from the lake sediments in the Nagano Prefecture, central Japan. in *Project Report 2006 Titled Natures of the Japanese Alps in the Twenty-one Century (21 Seiki Ni Okeru Nihon Arupusu No Shizen Kankyo)* edited by Kumon, F., 94-116. (in Japanese)\*]
- 公文富士夫・河合小百合・井内美郎 (2009): 野尻湖堆積物に基づく中部日本の過去 7.2 万年間の詳細な古気候復元. 旧石器研究, **5**, 3-10. [Kumon, F., Kawai, S. and Inouchi, Y. (2009): High-resolution of paleoclimate during the last 72ka on the basis of the drilled sediments from Lake Nojiri, central Japan. *Palaolithic Research (Kyusekki Kenkyu)*, **5**, 3-10. (in Japanese with English abstract)]
- Kumon, F., Kawai, S. and Inouchi, Y. (2012): High-resolution climate reconstruction during the past 72ka from pollen, total organic carbon (TOC) and total nitrogen (TN) analyses of the drilled sediments in Lake Nojiri, central Japan. in *Environmental Changes and Human Occupation in East Asia during OIS 3 and OIS 2* edited by Ono, A. and Izuho, M., British Archaeological Reports International Series, **2352**, 1-12.
- Lisiecki, L.E. and Raymo, M.E. (2005): A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic  $\delta^{18}\text{O}$  records. *Paleoceanography*, **20**, PA1003, 1-17.
- 町田 洋・新井房夫 (1979): 大山倉吉軽石—分布の広域性と第四紀編年上に意義. 地学雑誌, **88**, 313-330. [Machida, H. and Arai, F. (1979): Daisen

- Kurayoshi pumice: Stratigraphy, chronology, distribution and implication to late Pleistocene events in central Japan. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **88**, 313-330. (in Japanese with English abstract)]
- 町田 洋・新井房夫 (2003): 新編火山灰アトラス. 東京大学出版会, 336p. [Machida, H. and Arai, F. (2003): *Atlas of Tephra in and around Japan, revised edition*. University of Tokyo Press. (in Japanese)]
- Mann, M.E., Bradley, R.S. and Hughes, M.K. (1999): Northern hemisphere temperatures during the past millennium: Inferences, uncertainties, and limitations. *Geophysical Research Letters*, **26**, 759-762.
- Martinson, D.G., Pisias, N.G., Hays, J.D., Imbrie, J., Moore, T.C. and Shackleton, N.J. (1987): Age dating and orbital theory of the ice ages: Development of a high resolution 0 to 300,000-year chronostratigraphy. *Quaternary Research*, **27**, 1-29.
- 松江実千代・稲田 彰・田辺智隆・楡井 尊・上中央子・本郷美佐緒・小林健助 (2012): 最終氷期極相期後半における長野県北部戸隠高原の植生復元. 第四紀研究, **51**, 79-92. [Matsue, M., Inada, A., Tanabe, T., Nirei, T., Uenaka, H., Hongo, M. and Kobayashi, K. (2012): Reconstruction of vegetation during the later half of the last glacial maximum in and around the Togakushi Highland of northern Nagano Prefecture, central Japan. *The Quaternary Research (Daiyonki Kenkyu)*, **51**, 79-92. (in Japanese with English abstract)]
- Milankovitch, M. (1941): *Canon of Isolation and the Ice-age Problem*. Royal Serbian Academy, Special Publication, Beograd, 132. (English translation by the Israel Program for Scientific Translations, published for the U.S. Department of Commerce and the National Science Foundation, Washington, DC., 1969)
- Morita, Y. (1985): Pollen diagrams of some peat moors in the subalpine zone in the Shinshu District. *Japanese Ecological Review*, **20**, 301-307.
- 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に挟在する広域テフラ層の層序と編年. 第四紀研究, **46**, 305-325. [Nagahashi, Y., Sato, T., Takeshita, K., Tawara, T. and Kumon, F. (2007): Stratigraphy and chronology of widespread tephra beds intercalated in the TKN-2004 core sediment obtained from the Takano Formation, central Japan. *The Quaternary Research (Daiyonki Kenkyu)*, **46**, 305-325. (in Japanese with English abstract)]
- Nakagawa, T., Tarasov, P.E., Nishida, K., Gotanda, K. and Yasuda, Y. (2002): Quantitative pollen-based climate reconstruction in central Japan: Application to surface and late Quaternary spectra. *Quaternary Science Reviews*, **21**, 2099-2113.
- Nakagawa, T., Kitagawa, H., Yasuda, Y., Tarasov, P.E., Nishida, K., Gotanda, K., Sawai, Y. and Yangtze River Civilization program members (2003): Asynchronous climate changes in the north Atlantic and Japan during the Last Termination. *Science*, **299**, 688-691.
- 野尻湖花粉グループ (1984): 野尻湖層および貫ノ木層の花粉化石群集. 地団研専報, **27**, 83-106. [Palynological Research Group for Nojiri-ko Excavation (1984): Fossil assemblages of pollen from the Nojiri-ko Formation and the Kanoki Formation. *Monograph Association of Geological Collaboration in Japan*, **27**, 83-106. (in Japanese with English abstract)]
- 野尻湖花粉グループ(1987): 下部野尻湖層IIIおよび(IV)の花粉化石群集と上部野尻湖層の花粉層序学的対比. 地団研専報, **32**, 73-93. [Palynological Research Group for Nojiri-ko Excavation (1987): Fossil pollen assemblages of the Lower Nojiri-ko Member III and (IV), and pollen stratigraphical correlation of the Upper Nojiri-ko Member. *Monograph Association of Geological Collaboration in Japan*, **32**, 73-93. (in Japanese with English abstract)]
- 野尻湖花粉グループ (1990): 貫ノ木および下部野尻湖層の花粉化石群集と上部野尻湖層 III (アジシオ) 火山灰層堆積期以後の古環境変遷. 地団研専報, **37**, 61-76. [Palynological Research Group for Nojiri-ko Excavation (1990): Fossil pollen assemblages of the Kannoki Formation and the Lower Nojiri-ko Member, and the change of paleoenvironment during the period after the deposition of the Ajishio volcanic ash layer. *Monograph Association of Geological Collaboration in Japan*, **37**, 61-76. (in Japanese with English abstract)]
- 野尻湖花粉グループ (1993): 野尻湖底ボーリング NJ88 試料の花粉化石群集と古環境変遷. 地団研専報, **41**, 39-52. [Palynological Research Group for Nojiri-ko Excavation (1993): Fossil pollen assemblages of a drilling core from the bottom of Lake Nojiri with reference to late Pleistocene environments. *Monograph Association of Geological Collaboration in Japan*, **41**, 39-52. (in Japanese with English abstract)]
- 野尻湖花粉グループ (1996): 長野県北部の野尻湖における下部野尻湖層 III B<sub>4</sub> (上部更新統) 堆積期の古環境. 野尻湖博物館研究報告, **4**, 87-95. [Palynological Research Group for Nojiri-ko Excavation (1996): Paleoenvironment during the depositional age of B<sub>4</sub> unit of the Lower Nojiri-ko submember III (Upper Pleistocene), northern Nagano Prefecture, central Japan. *Bulletin Nojiriko Museum*, **4**, 87-95. (in Japanese with English abstract)]
- 野尻湖花粉グループ・野尻湖植物グループ (1980): 野尻湖層の花粉化石と植物遺体. 地質学論集, **19**, 101-130. [Palynological Research Group and Fossil Plant Research Group (1980): Fossil pollen and macroscopic plant remains from the Nojiri-ko Excavation. *Memoirs of the Geological Society of Japan*, **19**, 101-130. (in Japanese with English ab-

- stract)]
- 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・赤坂紀子 (1990): 2本のピストンコアの有機炭素量に基づく日本海の古環境変化. 第四紀研究, **29**, 417-425. [Oba, T. and Akasaka, N. (1990): Paleoenvironmental change of the Japan Sea based on organic carbon contents of two piston cores. *The Quaternary Research (Daiyonki Kenkyu)*, **29**, 417-425. (in Japanese with English abstract)]
- 多里英・公文富士夫・小林舞子・酒井潤一 (2000): 長野県北西部, 青木湖の成因と周辺の最上部第四紀層. 第四紀研究, **39**, 1-13. [Ono, R., Kumon, F., Kobayashi, M. and Sakai, J. (2000): Late Quaternary sediments around Lake Aoki, Nagano, central Japan, and the origin of the lake. *The Quaternary Research (Daiyonki Kenkyu)*, **39**, 1-13. (in Japanese with English abstract)]
- 大嶋秀明・徳永重元・下川浩一・水野清秀・山崎晴雄 (1997): 長野県諏訪湖湖底堆積物の花粉化石群集とその対比. 第四紀研究, **36**, 165-182. [Oshima, H., Tokunaga, S., Shimokawa, H., Mizuno, K. and Yamazaki, H. (1997): Fossil pollen assemblages of core samples from Lake Suwa, Nagano Prefecture, and their correlation to other pollen assemblages in central Japan. *The Quaternary Research (Daiyonki Kenkyu)*, **36**, 165-182. (in Japanese with English abstract)]
- 酒井潤一 (1987): 中部地方における後期更新世の古気候. 第四紀研究, **25**, 269-275. [Sakai, J. (1987): Palaeoclimate during the Late Pleistocene in central Japan. *The Quaternary Research (Daiyonki Kenkyu)*, **25**, 269-275. (in Japanese with English abstract)]
- 酒井潤一・中島豊志・隈田耕治 (1979): 木曾平沢における後期更新世末の花粉化石および植物遺体. 信州大学理学部紀要, **14**, 35-45. [Sakai, J., Nakajima, T. and Sumida, K. (1979): Pollen fossils and plant remains of the latest Pleistocene in Kisohirasawa, Nagano Prefecture, Japan. *Journal of Faculty of Science, Shinshu University*, **14**, 35-45. (in Japanese with English abstract)]
- Stuiver, M., Grootes, P.M. and Braziunas, T.F. (1995): The GISP2  $\delta^{18}\text{O}$  climate record of the past 16,500 years and the role of the Sun, ocean and volcanoes. *Quaternary Research*, **44**, 341-354.
- 竹岡政治 (1990): 長野県南木曾町田立湿原の花分析. 京都府立大演習林報告, **34**, 55-62. [Takeoka, M. (1990): Pollen-analytical study of the moor of Tada-chi located in the Minami Kiso, Nagano Prefecture. *Bulletin of Kyoto Prefectural University Forest*, **34**, 55-62. (in Japanese with English abstract)]
- 竹岡政治 (1991a): 長野県北安曇郡唐花見湿原の花分析. 京都府立大演習林報告, **35**, 29-33. [Takeoka, M. (1991a): Pollen-analytical study of the moor of Karakemi located in the Kitaazumi Gun, Nagano Prefecture. *Bulletin of Kyoto Prefectural University Forest*, **35**, 29-33. (in Japanese)]
- 竹岡政治 (1991b): 長野県上伊那郡大阿原湿原の花分析. 京都府立大演習林報告, **35**, 35-39. [Takeoka, M. (1991b): Pollen-analytical study of the moor of Oahara located in the Kamina Gun, Nagano Prefecture. *Bulletin of Kyoto Prefectural University Forest*, **35**, 35-39. (in Japanese)]
- 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. 地質学雑誌, **112**, 568-579. [Tawara, T., Kumon, F., Nagahashi, Y., Kakuta, N. and Nozue, Y. (2006): Reconstruction of late Pleistocene climate based on total organic carbon (TOC) contents in TNK-2004 core drilled from Takano Formation, central Japan. *Journal of the Geological Society of Japan*, **112**, 568-579. (in Japanese with English abstract)]
- Tawara, T., Kumon, F., Nagahashi, Y., Kakuta, N. and Nozue, Y. (2007): High-resolution reconstruction of late Pleistocene climate based on TOC content in a 54 m sediment core drilled from Takano Formation, central Japan. *Journal of the Sedimentological Society of Japan*, **64**, 37-41.
- 津田美弥子 (1990): 長野県入笠山大阿原湿原堆積物の花粉分析. 第四紀研究, **29**, 439-446. [Tsuda, M. (1990): Pollen analysis of core from the Oahara bog at Nyugasa-yama in Nagano Prefecture. *The Quaternary Research (Daiyonki Kenkyu)*, **29**, 439-446. (in Japanese with English abstract)]
- Tsukada, M. (1957): Pollen analytical studies of postglacial age in Japan I. Hyotan-ike ponds on Shiga Heights, Nagano Prefecture. *Journal of the Institute of Polytechnics, Osaka City University, Ser. D*, **8**, 203-219.
- Tsukada, M. (1958): Pollen analytical studies of postglacial age in Japan II. Northern region of Japanese North-Alps. *Journal of the Institute of Polytechnics, Osaka City University, Ser. D*, **9**, 235-247.
- Tsukada, M. (1959): Pollen analytical studies of postglacial age in Japan III. Late-glacial plant-bearing deposits in montane zone in central Japan. *Journal of the Institute of Polytechnics, Osaka City University, Ser. D*, **10**, 65-73.
- Tsukada, M. (1966): Late postglacial absolute pollen diagram in Lake Nojiri. *The Botanical Magazine, Tokyo*, **79**, 179-184.
- Tsukada, M. (1967a): Vegetation and climate around 10,000 years B.P. in central Japan. *American Journal of Science*, **265**, 562-585.
- Tsukada, M. (1967b): Pollen succession, absolute pollen frequency and recurrence surfaces in central Japan. *American Journal of Botany*, **54**, 821-831.
- 塚田松雄 (1981): 過去一万二千年間—日本植生変遷史 II. 新しい花粉帯. 日本生態学会誌, **31**, 201-215.

- [Tsukada, M. (1981): The last 12,000 years: The vegetation history of Japan II. New pollen zones. *Japanese Journal of Ecology*, **31**, 201-215. (in Japanese with English abstract)]
- 塚田松雄 (1986): 関東地方における第四紀後期の植生史. 宮脇 昭編著: 日本植生誌 7 関東. 至文堂, 78-103. [Tsukada, M. (1986): Vegetation history of the Kanto region in the late Quaternary. in *Vegetation of Japan 7 Kanto (Nihon Shokuseishi 7 Kanto)* edited by Miyawaki, A., Shibundo, 78-103. (in Japanese)\*]
- 塚田松雄 (1987): 第四紀後期の植生変遷史. 宮脇 昭編著: 日本植生誌 8 東北. 至文堂, 93-126. [Tsukada, M. (1987): Vegetation history in the late Quaternary. in *Vegetation of Japan 8 Tohoku (Nihon Shokuseishi 8 Tohoku)* edited by Miyawaki, A., Shibundo, 93-126. (in Japanese)\*]
- 吉井亮一 (1988): 立山, 室堂平における湿原堆積物についての花粉分析. 日本花粉学会誌, **34**, 43-53. [Yoshii, R. (1988): Palynological study of the bog deposits from the Murodo-daira, Mt. Tateyama, central Japan. *Japanese Journal of Palynology*, **34**, 43-53. (in Japanese with English abstract)]
- 吉井亮一・藤井昭二 (1981): 立山, 弥陀ヶ原台地における湿原堆積物についての花粉分析 (予報). 植物地理・分類研究, **29**, 40-50. [Yoshii, R. and Fujii, S. (1981): Palynological study of the bog deposits from the Midaigahara plateau, Mt. Tateyama in Toyama Prefecture, central Japan (Preliminary report). *Journal of Phytogeography and Taxonomy*, **29**, 40-50. (in Japanese with English abstract)]

\*Title etc. translated by F.K.