地学雑誌
Journal of Geography
111(6) 900-911 2002

日本海沿岸，北陸地方における最終氷期-完新世変動に伴う気温と季節性の変動の復元

中　川　　毅*　TARASOV, Pavel E.**
西　田　　詩***　安　田　喜　憲*

Last Glacial to Holocene Changes in Temperature and Seasonality on the Coastal Area of Japan Sea, Japan

Takeshi NAKAGAWA *, Pavel E. TARASOV **,
Kotoba NISHIDA *** and Yoshinori YASUDA *

Abstract

Thermal climate changes from the Last Glacial through to the present on the coastal area of Hokuriku region, Japan, along the Japan Sea were quantitatively reconstructed using the pollen profile from Lake Mikata（Fukui Prefecture, central Japan）sediment core, Japanese surface pollen dataset, and Japanese meteorological dataset. The best-modern-analogues method firstly proposed by Guiot（1990）and recently revised/improved by Nakagawa *et al.*（2002）was adopted to infer climate indices from fossil pollen data. The change in seasonality is especially highlighted in this paper. Our results show that the seasonality（summer to winter temperature anomaly）during the Last Glacial was about 3 ℃ bigger than the present. This may reflect that, given that the sea level during the Last Glacial was much lower than the present, the heat transport to the Japan Sea by the Tsushima current was not active and the coastal area along the Japan Sea was more efficiently cooled down by the winter monsoon.

Key words：Last Glacial, seasonality, best-modern-analogues method, Japan Sea, Tsushima warm current

キーワード：最終氷期，季節性，ベストモダンアナログ法，日本海，対馬暖流

I. はじめに

日本海周辺地域における気候変動を考える際に，対馬暖流の影響を無視して通れないことは以前から指摘されていた（たとえば，Koizumi, 1989; Tada *et al*., 1999）。だが実際に，その影響を陸域において定量的に復元することは容易ではない。日本海に限らずとも，古気温を定量的に復元するには，大きな困難を伴う場合が大半である。たとえば酸素の同位体分析は，古気候を高い時間分解

*　国際日本文化研究センター
**　モスクワ大学地理学教室
***　鹿児島大学理学部数理情報科学専攻
*　International Research Center for Japanese Studies
**　Department of Geography, Moscow State University
***　Faculty of Science, Kagoshima University

能で復元するプロキシーとして有効であることが知られているが，分析結果は多くの場合，気温に換算されることなく同位体比のみで示されている（たとえば，Wang *et al.*, 2001 など多数）。珪藻分析やアルケノン分析など，分析結果を表面海水温などに換算することがさかんにおこなわれる手法もあるが（Prahl *et al.*, 1988; Pichon *et al.*, 1992 など），これらはいずれも水中で生成されたプランクトン遺骸や有機物を用いる分析手法であるため，気温を直接的に復元することはできない。この問題は，陸上の環境変動を復元・理解しようとするうえで，全世界に共通する非常に大きな制限要因であった。

1990 年代の初頭から始まった，花粉データによる気候の定量復元の試みは，このような問題意識から端を発したものであった。Guiot（1990）によって最初に方法論が提示され，やがて計算に必要なソフトウェアも整備されるようになると（Guiot and Goeury, 1996），世界の各地で急速に応用研究が進んだ（たとえば，Guiot, 1990; Peyron *et al.*, 1998, 2000; Tarasov *et al.*, 1999a, b など）。日本は，この流れに比較的遅く参入した国であり，復元に不可欠な表層花粉データセットは Gotanda *et al.*（2002）によって初めて，誰にでも引用可能な形で整備された。それを利用した気候復元の試みは，Nakagawa *et al.*（2002）によって報告されたものが最初であり，今後は日本各地の花粉データ（既存のものを含む）に対して応用が進むものと期待される。Nakagawa *et al.*（2002）では同時に，復元誤差を推定するための新しいアルゴリズムとソフトウェアが提唱されており，それによって，統計的に有意な変動とそうでない変動を視覚的に識別することまでできるようになってきた。

本論文では，こうした新しい方法論を用いることで，北陸地方の陸上における，年平均気温と季節性の変動の復元を試みる。復元結果を通して，とくに氷期から完新世にかけての北陸地方の気候変動に対して，対馬海流が果たした役割について考察する。なお本論文は，ベストモダンアナログ法を国内のコアに応用した事例に関する日本語による初めての報告であるため，結果に対する考察だけでなく，概念と手法の説明にやや多くの紙面を割いた。またソフトウェアのダウンロードサイトなどの情報は，すべて 2002 年 9 月 13 日現在のものである。

II. 試料と方法

1）化石花粉プロファイル

気候復元の材料として本研究で用いた化石花粉試料は，安田（1982）によって報告された，福井県三方湖（35°33′22″N，135°53′40″E，0 m a.s.l.：図 1）の 32 m の堆積物コアに対する花粉分析結果である（図 2）。安田（1982）の論文においては，花粉分析結果は花粉ダイヤグラムとしてのみ与えられているが，本研究ではその基になった生データを参照し（安田, 私信, 2002），数表を再構築した。復元に際して，花粉の出現率（百分率）を算出しなおす作業をおこなった。その際の基数として，表 1 に示すように，木本 32 分類群の合計を採用した。この 32 分類群とは，Gotanda *et al.*（2002）において，周辺植生をよ

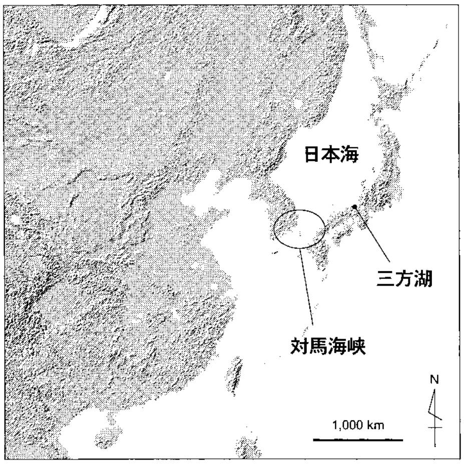

図 1　福井県三方湖.
本研究で気候復元に用いた化石花粉層序の得られた地点.

Fig. 1　Lake Mikata, Fukui Prefecture, Japan.
The fossil pollen profile that was used for the climate reconstruction in this study derives from this lake.

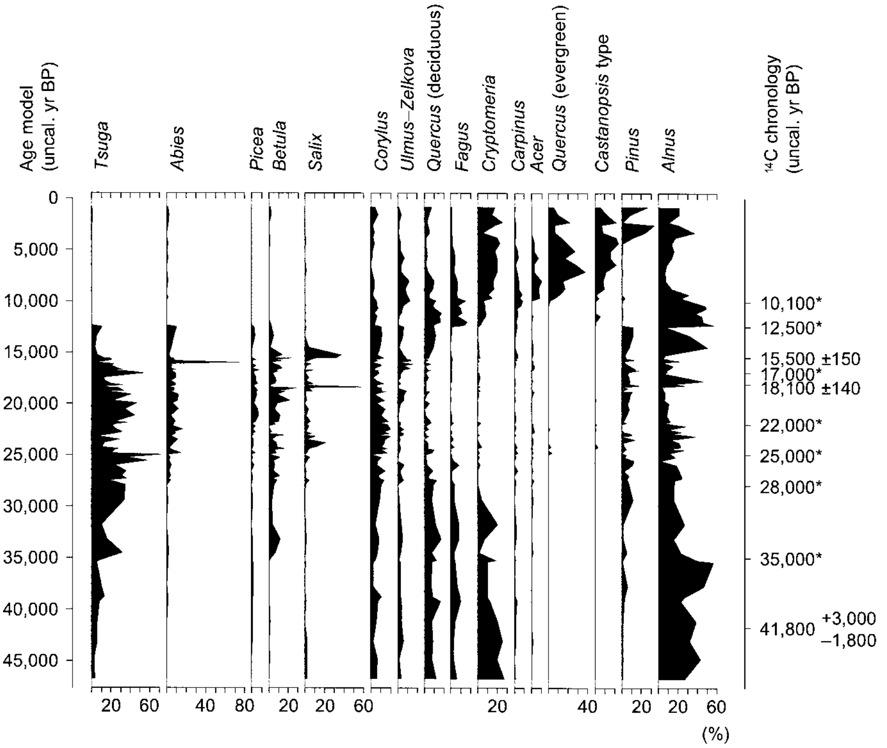

図 2　福井県三方湖から得られた，安田（1982）による花粉層序．
*印をつけた年代値は，同じく三方湖から採取された別のコアに与えられた年代（北川からの私信による）を，花粉層序の対比によって適用している．

Fig. 2　Fossil pollen profile from Lake Mikata by Yasuda（1982）.
Asterisks denotes the horizons where the radiocarbon ages were inferred from parallel core recovered from the same lake（Kitagawa, personal communication, 1998）. The correlation between two cores was established by the matching of pollen curves.

表 1　本研究で気候復元のために使用された，32 の木本花粉分類群．

Betula, *Pinus*, *Salix*, *Abies*, *Picea*, *Alnus*, *Myrica*, *Larix*, *Tsuga*, *Cryptomeria*, *Sciadopitis*, Taxodiaceae-Cupre-

く反映すると認定された分類群のことである。すなわち従来の花粉ダイヤグラムのように，三方湖において同定されたすべての木本花粉の合計を基数にしたわけではない。また，ハンノキ属（*Alnus*）が基数に含まれている点にも注意する必要がある。

なお Gotanda（submitted）によると，これら 32 の分類群のうち，とくに自然植生をよく反映しているのは 23 分類群であり，残りの 9 分類群は，攪乱を受けた植生の指標としての性格が強いとされている。この点に注目し，その 23 分類群のみを用

いて気候復元をおこなうという発想も成り立つであろうが，本研究ではそのような方法論上の比較は実施しなかった。

32 m のコアに対しては，複数の層準から放射性炭素年代が得られている（安田, 1982）。また三方湖からは同様に 100 メートルを超えるコアが採取されており，このコアに対しても花粉分析と放射性炭素年代測定がおこなわれている（北川, 私信, 1998）。二つのコアは花粉層序によって対比可能であるので，後者のコアに与えられた年代を，前者のコアに対しても適用することができた。図 2 では，そのように得られた年代値も併せて表示している。コアは全体で，過去のおよそ 47,000 年間をカバーしていると考えられる。花粉出現率が急激に変化する 12,500 uncal. yr BP（較正前の放射性炭素年代に基づいて，外挿ないし内挿によって決定した年代）前後には不整合が存在している可能性があるが，隣接する層準の年代から，不整合はあるとしても小規模であると判断し，本研究で採用した年代モデルにおいては，その影響を考慮に加えなかった。

2）表層花粉データセット

表層花粉データセットは，Gotanda *et al*.（2002）によって整備されたものをそのまま採用した。このデータセットは，日本各地の 285 地点から得られた表層花粉データを含んでいる（図 3A）。花粉出現率は，表 1 に示した 32 分類群の合計を基数とする百分率で表現した。なおこのデータセットは，Gotanda *et al*.（2002）が掲載された Quaternary Science Reviews 誌のウェッブサイト（http://www.elsevier.nl/locate/quascirev）から誰でもダウンロードすることができる。

3）気候データセット

現代の気候のデータセットは，気象庁発行の CD-ROM（Japan Meteorological Agency, 1998 a, b）を元に構築した。CD-ROM には 3 時間刻みのデータが収められているが，短期の変動および近年の温暖化の影響を除外するため，1961 年から 1990 年までの 30 年平均を算出し，それぞれの気象台の観測値とした。この 30 年間について，連続した観測値が得られない気象台は，データセットから除外した。このスクリーニングの結果，採用された気象台は日本各地の 147 地点である（図 3B）。なお本研究では気候パラメータとして，1）年平均気温，2）年間降水量，3）最暖月の平均気温と最寒月の平均気温の差，の三つを採用した。なお最後に挙げた，最暖月と最寒月の平均気温の差は，それぞれの地点における季節性を表している。本論文で季節性という言葉を用いる場合，とくにことわらない限りは，この指標によって表される量を指すものとする。

4）表層花粉サイトに対する気候推定とその誤差

表層花粉が採取されたすべての地点に対し，気候データセットを用いて気候推定をおこなった。気候推定の方法としては，近傍の複数の気象台を用いて内挿するか（interpolation method）最寄の気象台の観測値を採用する（minimum distance method）のが一般的であるが（Guiot and Goeury, 1996），日本においては気象台の地点密度が十分に高いとみなし，本研究では最寄の気象台の値を採用した。標高の差に起因する温度変化については，気温逓減率を 0.6 ℃/100 m とし，これを補正した。

この方法による気候推定の誤差を見積もるために，まったく同じ方法を用いて，表層花粉サイトではなく気象台に対して気候推定をおこなった。すなわち，ある気象台 A の最寄の気象台 B における気候の観測値を，気象台 A の地点に対する気候の推定値として採用した（この操作を，気候データセットに含まれる 147 の気象台すべてに対しておこなった）。この推定値を，気象台 A において観測された値と比較することで，日本で minimum distance method を用いて気候推定をおこなった場合の誤差を近似的に見積もることができる。この方法による誤差推定の結果を図 4B に示す。推定値と観測値の相関係数は，温度パラメータに対しては 0.9 以上と非常に高かったが，降水量に対しては 0.8 強にとどまった。なお，これらの計算には PPPbase というコンピュータソフトを使用した（Guiot and Goeury, 1996）。PPPbase のダウンロードサイトは次のとおりである：http://www.imep-cnrs.com/telechg/tlcharge.htm。

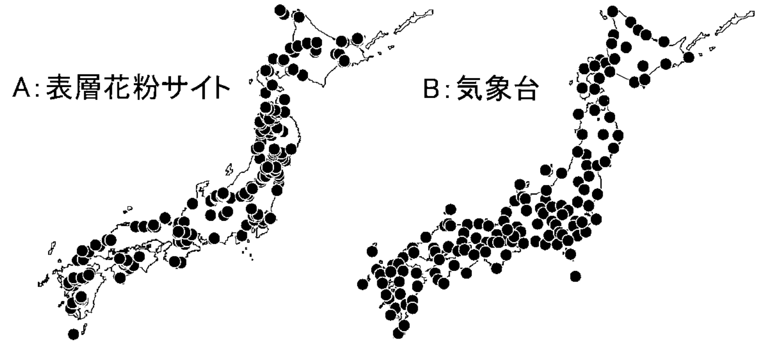

図 3　A：本研究で用いた表層花粉データセットに含まれる地点の分布（n＝285）.
B：本研究で採用した気候データが観測された気象台の分布（n＝147）.

Fig. 3　A : The surface pollen sites included in the dataset that we used in the present study（n＝285）.
B : Distribution of meteorological observatories the data from which we adopted in the present study（n＝147）.

5）ベストモダンアナログ法による気候推定とその誤差

本研究においては，Guiot（1990）によって提案された方法でベストモダンアナログの認定をおこなった。すなわち，まず化石および表層花粉データセットに組み入れられた 32 の花粉分類群すべてについて，出現頻度の平方根を求めた。次に，それらを 32 次元の正規直交底によって定義される空間中の点とみなし，その中のユークリッド距離をもって，二つの花粉群集間の類似度とみなした。この方法で，気候推定をおこなおうとするすべての化石花粉群集について，表層花粉データセットの中から 8 地点のベストモダンアナログを抽出した。その 8 地点に対して推定された気候値を用い，距離の逆数を係数とすることで加重平均を求め，当初の化石花粉群集に対する気候復元値とした。なお，この計算も同様に，PPPbase を用いて実行することができる。PPPbase の使用法については，中川（2002）に詳しい記述がある。

この方法による気候復元の誤差を見積もるために，まったく同じ方法を用いて，化石花粉群集ではなく表層花粉群集に対して気候復元をおこなった。すなわち，ある表層花粉群集 A に対して，A を除いた残りすべての表層花粉群集の中から 8 つのベストモダンアナログを認定し，それらに与えられている気候推定値の加重平均を求めた（この操作を，表層花粉データセットに含まれる 285 地点すべてに対しておこなった）。こうして復元された値を，A に対して直接推定された値と比較することで，日本でベストモダンアナログ法を用いて気候復元をおこなった場合の誤差を近似的に見積もることができる。この方法による誤差推定の結果を図 4A に示す。復元値と推定値の相関係数は，年平均気温が 0.89 と顕著に高く，次が季節性で 0.73，最後は降水量で，およそ 0.70 と相対的に低い値にとどまった。

6）復元値のキャリブレーション

ベストモダンアナログ法によって復元された気候を，気象台における観測値の確率分布に較正するために（キャリブレーション），上記の二つの誤差を合成し，復元値に対して連続的に定義された誤差モデルを生成した。離散関数を合成するアルゴリズムとしては，Nakagawa *et al.*（2002）の方法を採用した。得られた誤差モデル（復元値から観測値への写像）は図 4 の C 列に示した。グレーの濃淡が確率を表現しており，すなわち－∞から＋∞までの積分値が 1 になるように標準化されている。方法論の詳細は割愛するが，計算自体は専

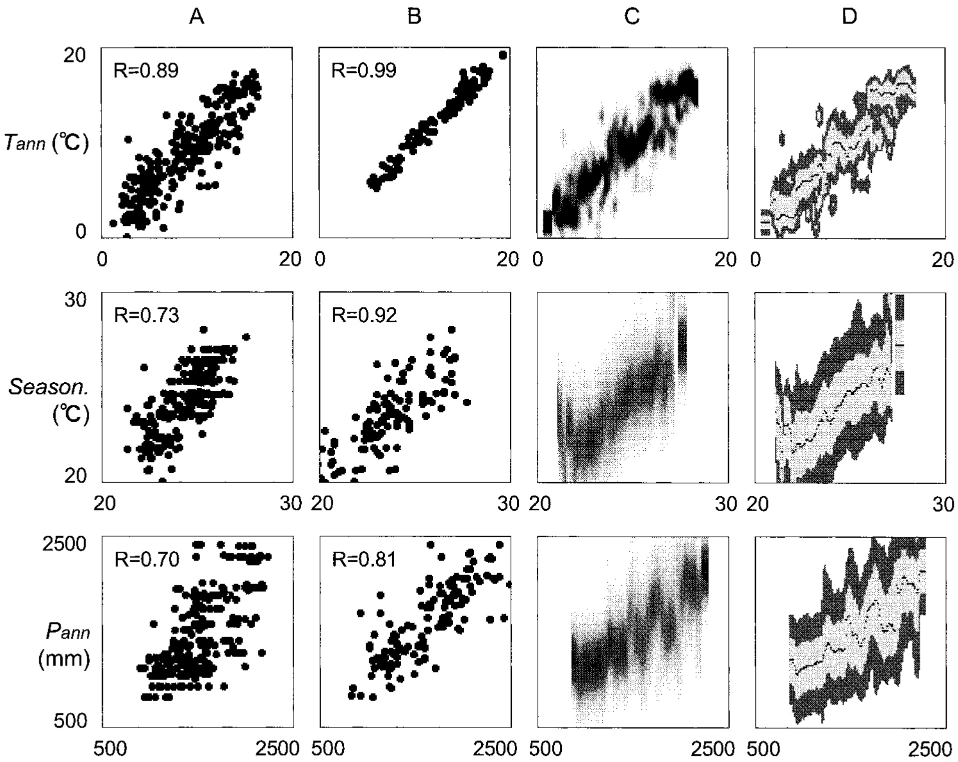

図 4　各気候パラメータに対する復元誤差モデルを生成する過程．
Tann：年平均気温，*Season*：季節性（最暖月と最寒月の平均気温の差），*Pann*：年間降水量．A 列：表層花粉サイトについて求めた，気候の復元値と推定値の関係．B 列：気象台について求めた，気候の推定値と観測値の関係．C 列：A と B を，Nakagawa *et al.*（2002）の方法で合成し，確率分布に変換することで作成した誤差モデル．濃いグレーが高い確率を示す．D 列：C を元に，確率分布を信頼区間に変換したもの．薄いグレーは 1 標準偏差，濃いグレーは 2 標準偏差，黒い線はモードを示す．

Fig. 4　The process to generate error model for the reconstructed climate indices.
Tann : mean annual temperature. Season : seasonality : *i.e.* the anomaly between the mean monthly temperatures of the hottest and the coldest months of the year. *Pann* : annual precipitation. A : relationship between reconstructed and estimated climates for all surface pollen sites. B : relationship between estimated and observed climates for all meteorological observatories. C : error model generated by combining A and B using the method of Nakagawa *et al.*（2002）. The darker is the color, the higher is the probability. D : confidence regions calculated from C for the confidence coefficients 68.2%（lighter grey）and 95.4%（darker grey）. Black dots show the mode of the probability.

用のソフト（PolCalib）で実行することができる（Nakgawa *et al.*, 2002）。なお，ここで得られた濃淡の分布パターンが，基本的には図 4 の A 列の散布図における点の分布を反映していることに注意する必要がある。

いったん確率分布が与えられてしまうと，そこから信頼区間を算出することも容易である。信頼係数を，仮に 68.2%および 95.4%とした場合（正規分布における 1 標準偏差と 2 標準偏差に対応する）の信頼区間を，図 4 の D 列に表示した。また，図 4 の C 列における確率分布のモードを，同じく D 列の図中に黒い線で示している。

このように，復元値と観測値の間をつなぐ写像が定義されてしまうと，これをキャリブレーションチャートとみなして古気候の復元値に対して適用し，気候変動曲線の較正をおこなうことができる。その結果は図5に示しており，次章において詳述する。なお，この操作も専用のソフトウェア（PolHist）によって自動化されている。これらのソフトは，以下の二つのサイトから無償でダウンロードすることができる：ftp://pixie.geo.brown.edu/pub/palynology/Takeshi または http://www.elsevier.nl/locate/quascirev。

III. 結果と考察

三方湖から得られた花粉プロファイルを元に，ベストモダンアナログ法によって気候を復元し，得られた変動曲線に対して較正を加えた結果を図5に示す。短周期の変動の影響と，花粉分析そのものが持つ誤差の影響をキャンセルするために，較正は気候復元値の移動平均（3層準ごとの平均）を直線で内挿した値に対して実施した。

復元された気候変動について，気候パラメータごとに分けて以下に記述する。

1）年平均気温（*Tann*）

コアの下限に相当する47,000年前ごろから20,000年前ごろにかけて，気候の寒冷化が復元された。この過程で，三方湖周辺の年平均気温は10℃ 前後から3℃ 前後にまで低下した。なお20,000年前ごろは，この地点における氷期の最寒冷期である。氷期の最寒冷期は，数千年続いた後に温暖化が開始した。温暖化は，およそ8,000年前ごろまで連続的に継続した。この温暖化の結果，同地域の年平均気温はおよそ15℃ 前後になり，それ以降は現在にいたるまで，統計的に有意と認定される気候変動は復元されていない。なお層序の全体を通じて，ここで言及された復元値にはプラスマイナス数度の誤差（1標準偏差）を伴っている。なお，ここで復元された三方湖の気温の変動は，グリーンランドのアイスコアの分析などによって復元された変動のパターンと，大きな傾向において非常に整合性が高い（Dansgaard *et al.*, 1993 など）。ただし花粉分析の分解能が十分に高くない

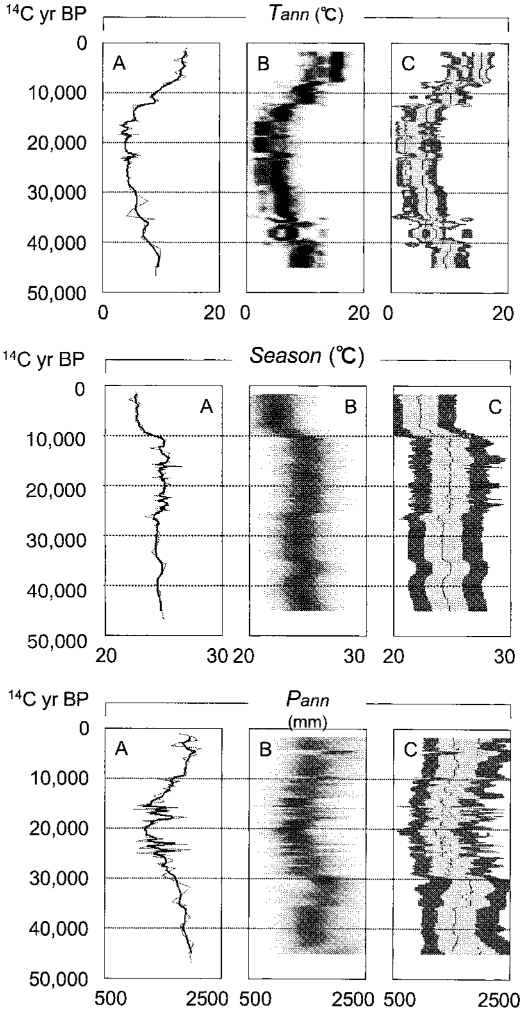

図5　三方湖において復元された，過去およそ47,000年の気候変動．
A：ベストモダンアナログ法による復元値（細線）と，3層準ごとの移動平均（太線）．
B：Aにおける移動平均を確率分布に変換したもの．
C：Bの確率分布を信頼係数68.2%（1標準偏差）と95.4%（2標準偏差）の信頼区間およびモードに変換したもの．

Fig. 5　The climate history for the last 47,000 years reconstructed at Lake Mikata.
A : raw reconstruction by the best-modern-analogues method (thinner line) and its running averages for each three horizons (thicker line).
B : probability distribution obtained from the thicker line in A.
C : confidence regions calculated from B using 68.2% (1 Std. Dev.) and 95.4 (2 Std. Devs.) as the confidence coefficients, and mode of the probability.

ため，1,000年オーダー以下の短周期の変動は検出できていない。

2）季節性（*Season*）

復元の誤差が相対的に大きいこともあって，年平均気温ほど細かな変動の様子は捉えられていない。しかし，今からおよそ10,000年前に季節変動の振幅が急激に小さくなったことは，誤差を1標準偏差まで認めたとしても，この復元結果から明示的に読み取ることができる。なおこの変動がデータセットの不備に起因するものでないことを確認するために，表層花粉データセットに含まれるすべての地点について，年平均気温と季節性（月平均気温の季節変化）の散布図を作成した（図6）。氷期と後氷期を典型的に分ける線（しきい値）を，年平均気温についておよそ10℃，季節性についておよそ23℃と認定した場合，これによって図6の散布図を四つの象限に区切ることができる。年平均気温の変化と季節性の変化が独立に復元できるための条件は，四つの象限のすべてに十分な地点数が得られていることである。この条件が満たされた場合にのみ，年平均気温の高低，季節性の大小の組み合わせからなる四つの仮想的な気候条件に対して，それぞれモダンアナログが得られることになる。なお本研究では，一つの化石花粉群集に対して気候を復元するために，合計8地点のモダンアナログを認定する方法を採用しているため，各象限に少なくとも8地点以上が存在していることが必要になる。

実際に作図してみると，2本の境界線の交点は，ちょうど点の集合の中心近くになった。詳しく見ると，左下の象限にはやや地点数が少ないため，「寒冷かつ季節変化が乏しい」という条件は相対的に復元されにくいことがわかるが，それでも2本の線の交点近くに最低限の8地点以上は確保できているため，年平均気温が8度程度までの寒冷条件であれば，化石花粉スペクトルに対応する表層データが存在しない状態（いわゆるno analogue situation。本論文では仮にスケールアウトと表現する）が発生するほどではない。ただしそれより気温が低い時代（すなわち散布図の左端近く）については，季節性の少ない地点はデータセットに含まれていない。すなわち，最終氷期最盛期近くに認められる大きな季節変動については，データセットの制約による見かけ上のものである可能性を排除できない。なお論理のうえでは，最終氷期最盛期の季節変動の乏しさは正しく復元されてい

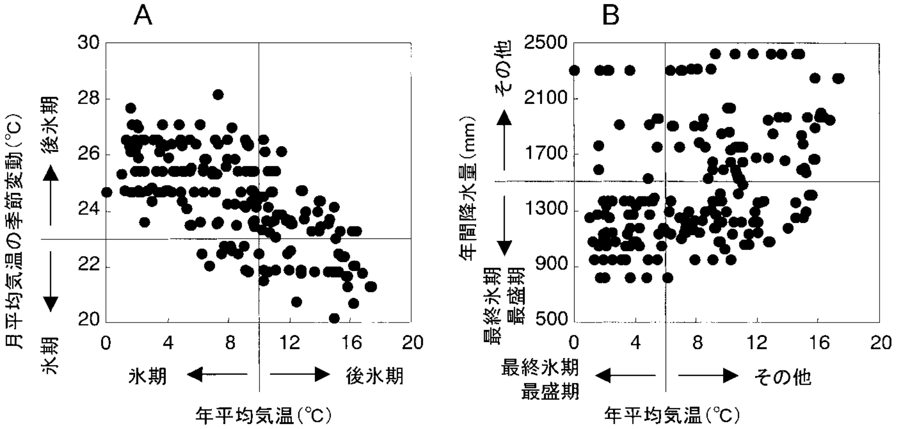

図 6　表層花粉サイトの分布を，気候要素によって張られる空間内で認識したもの．
A：年平均気温と季節性．B：年平均気温と年間降水量．

Fig. 6　Distribution of the surface pollen sites in the climate field.
A : scatter diagram in the field defined by Tann and Season. B : scatter diagram in the field defined by *Tann* and *Pann*.

るのに，それに対応した暖かい地点がないために，気温が必要以上に低く見積もられている可能性も同等に考慮に入れる必要がある。本研究では，先に見積もられた気候復元の精度が年平均気温において最大になる（図4のA列）ことを根拠に，植生は第一義的には年平均気温を反映し，年平均気温が許す範囲内で二次的に季節性を反映するとの立場を採用した。

もう一点，氷期から完新世にかけての季節性の減少が，徐々に進むのではなく，10,000年前ごろに突然起こっていることには注目する必要がある。この期間を通じて，年平均気温はゆるやかに上昇しているから，季節性の復元が不可能であるとした最寒冷条件は，最終氷期の最末期には解消していたことになる。すなわち季節性が急激に減少する直前（およそ12,000から10,000年前）の時期に見られる，現在よりも大きい季節性については，スケールアウトが発生したことによる見かけの復元結果ではなく，誤差モデルが示すとおりの信頼区間を持っているものと推定される。

3）年間降水量（*Pann*）

最終氷期最盛期にやや強い乾燥条件を示しているように見えるが，推定される誤差の範囲が大きいため，変動が確実に有意であると言うことはできなかった。なおNakagawa *et al*.（2002）では，本研究でも採用したパーセンテージによるベストモダンアナログ法に加え，PFT（Plant Functional Type）affinity scoreという概念（Prentice *et al*., 1992, 1996）によるベストモダンアナログ法（Peyron, *et al*., 1998, 2000）を併用し，両者の共通項として最終氷期最盛期の乾燥条件はおそらく現実のものであるとする推定をおこなっている。なお，その場合の復元結果がデータセットによる制約を受けていないかどうかの検定を，季節性の場合と同様の手法で実施した。最終氷期最盛期の典型的な年間降水量を，較正前の復元値で1,500 mm以下とし，氷期の典型的な年平均気温を6 ℃以下とすると，表層花粉サイトは，これらの境界線によって定義される四つの象限すべてにおいて，最低限の8サンプル以上が確保された（図6B）。すなわち，左上の象限に地点数が少ないことは事実であるが，最終氷期最盛期にもしも湿潤条件が成り立っていたとしても，スケールアウトのためにそのような気候を復元することが不可能であるとは想定されない。

4）三方湖周辺における過去47,000年の気候史

以上の結果を通事的に整理すると，おおむね以下のようなストーリーが復元されたことになる。すなわち，コアの最深部にあたるおよそ47,000年前は，年平均気温が現在より5度前後低い冷涼な気候であった。また，気温の季節変化の幅は現在よりも有意に大きかった（モード間の差で，現在よりおよそ3 ℃ほど大きかった可能性がもっとも高い）。最終氷期の最寒冷期は，20,000年前ごろをピークに前後数千年続いた。この期間の三方湖周辺地域における年平均気温は，現在より10℃以上も低かった。また，年降水量は現在よりも少なかったと推定される（誤差が大きいため，変位の幅を推定することは困難である）。季節変動の幅は，この時代については復元値の信頼性に問題があるため明言できない。最終氷期末期の温暖化は，おおむね16,000年前ごろから開始したようである。この頃から8,000年前ごろにかけて，年平均気温は比較的ゆるやかに上昇した。いっぽう季節性は，温暖化が始まったあとしばらくは高い水準を維持し，10,000年前ごろに急激に減少してほぼ現代の水準になった。降水量は，氷期から完新世にかけての変動の過程で増大した。最後に，およそ8,000年前から現代にかけては，本研究による気候復元の精度で検出できるような顕著な変動は見られなかった。

以上の結果からまず自明的にわかるのは，日本における過去およそ47,000年の気候変動は，長周期の変動に着目する限り，グリーンランドや南極で復元された変動と，ほぼ同じ傾向を示しているという事実である。すなわち日本における氷期・間氷期変動は，第一義的にはミランコビッチサイクルに連動しているものと解釈して問題ないであろう。

次に季節性に目を向けると，最終氷期最盛期における復元値の不確実性の問題はあるものの，氷期の季節変動は完新世よりもほぼ一貫して顕著で

あったようである。このことは，氷期においては海水準が現在よりも百数十メートル以上も低く，対馬海流の流入が妨げられていたことを原因と考えた場合に，非常に容易に解釈が可能である。すなわち，暖流が流入しないために日本海の表面海水温は現在よりも低く，したがって，冬の季節風に対する熱と水蒸気の供給は現在ほど活発でなかった。結果として，日本海岸の陸域はとくに冬において冷却が顕著になり，本研究で対象とした気候要素に置き換えると，季節性の増大が起こった。また季節風の水蒸気分圧が下がったために，水分条件で見ても降水量の低下が起こったものと推定される。

同様に（あるいは反対に），1 万年前ごろを境とする季節性の減少と降水量の増大，およびその背景としてのゆるやかな温度上昇を結びつけて考察した場合，もっとも自然な解釈とは，日本海への対馬海流の流入開始事件であろう。それにより日本海の表面海水温は上昇し，冬の季節風に対する熱と水蒸気の供給が盛んになった。結果として季節性は減少し，降水量は（おそらく，主に冬の積雪の寄与により）増加したものと推定される。ここで，年平均気温の変化はむしろ連続的であるのに，季節性はある時期を境に劇的に増加したという対比に注目する必要がある。これは，年平均気温は北半球全体の傾向を反映してある程度連続的に変化したのに対し，日本海側の冬の季節風に対する熱の供給は，ある種のオン・オフの二元論的な構造をとっていたことを示唆していると考えられる。ここでスイッチの役割を果たしたのが，対馬海峡だったとする解釈には，大きな不自然はないものと思われる。

本研究では，年代決定の精度と分析の分解能が，それぞれ十分に高いとは言えないため，具体的な流入の開始時期を 1,000 年以下のオーダーで特定することは困難であるが，三方湖に隣接する水月湖からは，年縞を持つ堆積物と年縞年代が得られており，これに対して高分解能の花粉分析が進行中である（Nakagawa *et al*., submitted）。この新しいデータに対して本研究と同様の解析をおこなうと，対馬海流に関するより詳細な歴史が明らかになるであろう。対馬海流の流入量は，縄文時代の沿岸航海や漁業，交易にとっても重要な背景要因であったはずである。人間の生活様式と自然環境のリンケージを精密に確立するには，自然科学的分析による時間分解能を，少なくとも土器編年の時間分解能（場合によるが，20–25 年に達する）に匹敵する水準にしておく必要があるが，水月湖においてはこの条件は満たされているものと考えられる。今後の研究の進展が期待される所以である。

5）ベストモダンアナログ法の応用範囲

日本において初めてベストモダンアナログ法を適用した Nakagawa *et al*.（2002）の研究において，年平均気温と年間降水量の復元はすでに試みられていたが，季節性の変動を同じ手法によって復元し，対馬海流の流入強度の変動史にまで言及したのは本論文が初めてである。その意味で，本研究によってベストモダンアナログ法の応用範囲はまた一つ拡大したと言える。とくに季節変動は，その産出の元となった最暖月・最寒月平均気温に比べると変動の幅が小さいため，当初は必然的に，復元には相当の困難を伴うものと予想された。じっさい復元された変動幅は，1 標準偏差を信頼係数としたときに有意であるかないかの瀬戸際であったが，それでも単純に年平均気温につられて変動するだけではない，より独立性の強い変動パターンが復元されたことは特筆されていいであろう。

なお，ベストモダンアナログ法による復元の信頼度を，近似的に与えられた復元値–観測値写像モデルだけでなく，スケールアウトの可能性まで視野に入れて議論した論文も，わが国ではおそらく初めてであろう。これは，近年では Litt *et al*.（1996）などがとくに精力的に主張している点であるが，ベストモダンアナログ法に限らず，表層花粉データセットを参照して気候復元をおこなおうとする場合，データセットに含まれる地点は地理的な空間（Geographical field）の内部でおおむね均等に分布しているだけでは不十分であり，復元対象とする気候要素の数だけ次元数を持つ，気候要素によって定義される多次元空間

(Climate field)の内部で均等に分布している必要がある。本研究においては，最終氷期最寒冷期に匹敵する寒冷条件の下にありながら，同時に季節性の乏しい地点の表層花粉群集が得られていなかったことが，典型的にこの問題に抵触する。

この点の改善方法は二つ考えることができる。一つは，復元をおこなおうとする化石花粉群集が，表層花粉データセットの中のいずれかの地点の花粉群集に十分類似しているかどうかを検証することである。これについては，筆者は現在新たなアルゴリズムとソフトウェアを開発中であり，うまくいけば1年以内程度を目処に発表できるものと期待している。第二の方法はより単純であり，より多様な気候条件の下にある日本周辺の外国からも表層花粉を採取することである。筆者らのグループはすでに，サハリンのおよそ100地点から表層サンプルを採取済みであり，試料は分析が進行中である。もちろん，サハリンだけではclimate fieldの内部を充填するには不十分であり，今後も野外調査を継続する必要があるのは言うまでもないが，本研究で実地的に検証を加えたclimate fieldの概念は，新たに野外調査を計画する際の，あるいは国際共同によって既存のデータを収集する際の，戦略的指針を与えるものとして重要であると考える。

文　献

Dansgaard, W., Johnsen, S.J., Clausen, H.B., Dahl-Jensen, D., Gunderstrup, N.S., Hammer, C.U., Hvidberg, C.S., Steffensen, J.P., Sveinbjornsdottir, A.E., Jouzel, J. and Bond, G. (1993): Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-corerecord. *Nature*, **364**, 218.

Gotanda, K. (submitted): *Biomization as a Quantitative Approach to Reconstruct Natural and Disturbed Biomes in Japan: Application to Surface and Fossil Pollen Spectra*. Thesis, Kyoto University, Faculty of Science.

Gotanda, K., Nakagawa, T., Tarasov, P., Kitagawa, J., Inoue, Y. and Yasuda, Y. (2002): Biome classification from Japanese Pollen data: Application to modern-day and Late Quaternary samples. *Quatern. Sci. Rev.*, **21**, 647–657.

Guiot, J. (1990): Methodology of the last climatic cycle reconstruction in France from pollen data. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, **80**, 49–69.

Guiot, J. and Goeury, C. (1996): PPPBASE, a software for statistical analysis of paleoecological and paleoclimatological data. *Dendrochronologia*, **14**, 295–300.

Japan Meteorological Agency (1998a): *Daily and Every 3-hours Meteorological Data at the Ground Surface (1961–1970)*. Japan Meteorological Agency, CD-ROM.

Japan Meteorological Agency (1998b): *Daily and Every 3-hours Meteorological Data at the Ground Surface (1971–1990)*. Japan Meteorological Agency, CD-ROM.

Koizumi, I. (1989): Pulses of Tsushima current during the Holocene. *Quatern. Res.*, **26**, 13–25.

Litt, T., Junge, F. and Boettger, B. (1996): Climate during the Eemian in north-central Europe - A critical review of the palaeobotanical and stable isotope data from central Germany. *Vegetation History and Archaeobotany*, **5**, 247–256.

中川　毅 (2002): 花粉分析による定量的環境復元と考古学．安田喜憲編：環境考古学ハンドブック．朝倉書店.

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. *Quatern. Sci. Rev.*, **21**, 2099–2113.

Nakagawa, T., Kitagawa, H., Yasuda, Y., Tarasov, P.E., Nishida, K., Gotanda, K., Sawai, Y. and YRCP members (submitted): Asynchronous Climate Changes between the N. Atlantic and Sea of Japan during the Last Termination. *Science*.

Peyron, O., Guiot, J., Cheddadi, R., Tarasov, P., Reille, M., Beaulieu, J.-L.de, Bottema, V. and Andrieu, V. (1998): Climatic reconstruction in Europe for 18,000 yr B.P. from pollen data. *Quatern. Res.*, **49**, 183–196.

Peyron, O., Jolly, D., Bonnefille, R., Vincens, A. and Guiot, J. (2000): The climate of East Africa from pollen data, 6000 years ago. *Quatern. Res.*, **54**, 90–101.

Pichon, J.-J., Labeyrie, L.D., Bareille, G., Labracherie, M., Duprat, J. and Jouzel, J. (1992): Surface water temperature changes in the high latitudes of the southern hemisphere over the last glacial-interglacial cycle. *Paleoceanography*, **7**, 289–318.

Prahl, F.G., Muehlhausen, L.A. and Zahnle, D.L. (1988): Further evaluation of long-chain alkenones as indicators of paleoceanographic conditions. *Goechim. Cosmochim. Acta.*, **52**, 2303-2310.

Prentice, I.C., Cramer, W., Harrison, S.P., Leemans, R., Monserud, R.A. and Solomon, A.M. (1992): A global biome model based on plant physiology and dominance, soil properties and climate. *J. Biogeography*, **19**, 117–134.

Prentice, I.C., Guiot, J., Huntley, B., Jolly, D. and Cheddadi, R. (1996): Reconstructing biomes from

palaeoecological data : A general method and its application to European pollen data at 0 and 6 ka. *Climate Dynamics*, **12**, 185–194.
Tada, R., Irino, T. and Koizumi, I. (1999): Land-ocean linkage in orbital and millennial timescales recorded in Late Quaternary sediments of the Japan Sea. *Paleoceanography*, **14**, 236–247.
Tarasov, P.E., Peyron, O., Guiot, J., Brewer, S., Volkova, V.S., Bezusko, L.G., Dorofeyuk, N.I., Kvavadze, E.V. and Osipova, I.M. (1999a): Last Glacial Maximum climate of the Former Soviet Union and Mongolia reconstructed from pollen and plant macrofossil data. *Climate Dynamics*, **15**, 227–240.
Tarasov, P.E., Guiot, J., Cheddadi, R., Andreev, A., Bezusko, L.G., Blyakharchuk, T.A., Dorofeyuk, N.I., Filimonova, L.V., Volkova, V.S. and Zernitskaya, V.P. (1999b): Climate in northern Eurasia 6000 years ago reconstructed from pollen data. *Earth and Planetary Sci. Lett.*, **171**, 635–645.
Wang, Y.J., Cheng, H., Edwards, R.L., An, Z.S., Wu, J.Y., Shen, C.C. and Dorale, J.A. (2001): A high-resolution absolute-dated late Pleistocene monsoon record from Hulu cave, China. *Science*, **294**, 2345–2348.
安田喜憲（1982）: 福井県三方湖の泥土の花粉分析的研究—最終氷期以降の日本海側の乾湿の変動を中心として—. 第四紀研究, **21**, 255–271.

（2002 年 9 月 20 日受付，2002 年 11 月 18 日受理）