

平成 26 年 9 月 3 日現在

機関番号：82503

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23540553

研究課題名(和文) 琵琶湖堆積物の花粉群解析による MIS1、5e、11 間氷期の古気温定量復元

研究課題名(英文) Quantitative palaeotemperature reconstruction on MIS1, 5e, 11 interglacial episodes based on pollen assemblages from Lake Biwa sediments

研究代表者

奥田 昌明 (Okuda, Masaaki)

千葉県立中央博物館・その他部局等・研究員

研究者番号：10311383

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000 円、(間接経費) 1,110,000 円

研究成果の概要(和文)：琵琶湖の堆積物を分析し、モダンアナログ法を用いて化石花粉(%)を古気温()に定量変換することにより MIS1～MIS11 間氷期の古気温を復元した。MIS5e および MIS11 は、気候状態が現在と似ていることから温暖化後の地球のアナログとみられる。この MIS11 (43 万年前) において本研究では、琵琶湖が今の和歌山県南部くらの暖かさであったことを突きとめた。具体的には、7 千年前の気候最適期に対して +1～1.5、300 年前の産業革命前と比べて +1.5～2.5 の温暖環境となる。これは 100 年後の気温上昇と比べるとやや足りないが、今後の CO2 削減努力いかんでは 100 年後の地球のアナログになり得る。

研究成果の概要(英文)：Using pollen analysis and modern analogue techniques (MAT) for Lake Biwa sediment (Japan), I present palaeotemperature levels of MIS1, MIS5e, MIS11 interglacials by quantitative reconstruction from fossil pollen percentage datasets.

The MIS5e and MIS11 are seen as "analogues for the warmer Earth climate" because of their resemblance to the present climate state. Here I reveal that Lake Biwa (37N; Shiga Pref) was as warm as the Shionomisaki Cape (33.5N; Wakayama Pref) at the MIS11 interglacials 430,000 years ago. This temperature anomaly is calculated as 1-1.5 degrees warmer than the Hypsithermal episode 7000 years ago, and 2-2.5 degrees warmer than the preindustrial period 300 years ago.

This warmer climate was rather lower than the expected global warming, but is similar when our effort to reduce atmospheric CO2 is successful. As there are no catastrophic event known at MIS11 in geological records, this is a result encouraging us to confront with the global warming problem.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・層位古生物学

キーワード：古環境 古気候 琵琶湖 花粉分析 モダンアナログ法 将来予測 MIS11 温暖化

1. 研究開始当初の背景

1980年代以降、地球環境における大きな論点のひとつとして扱われている問題として、地球温暖化があげられる。2013年発表の IPCC 第5次報告によるならば、人為 CO₂ による 100年後の地球平均気温の上昇幅は、2 ~ 5 の範囲内に予測されている。日本付近における上昇見積は 3 である [1]。ただし地球気温が年平均で 3 上昇する世界がどのようなものかはよく分かっていない。この情報を得るには、過去に実在したよく似た時代(アナログ)を地質記録中に見つけだし、参照する方法が有効である。

「100年後の地球」のアナログとして有望とされるのが、12万年前の MIS5e および 43万年前の MIS11 間氷期である [2,3]。この二つは現在の温暖期(いわゆる完新世、MIS1)に対して時代的に近く、かつ気候学的に「よく似た時代」として注目されてきた [4]。ただし時代が古いため、温暖化の評価に直結する陸域からのデータが乏しく、また統計的有意な精度に欠けるなどの問題をはらんでいた。

この問題の解決に適した試料が、琵琶湖底の堆積物に含まれる化石花粉である。日本最大の湖沼である琵琶湖には、湖底下 240 m の地底に MIS11 の堆積物が存在していることが 1983 年の調査から分かっており [5]、花粉分析の事例もすでにある [6]。なお化石花粉値(%)は、近年実用化されたモダンアナログ法(MAT)に基づき、年平均気温や冬季気温()に定量変換することが可能である [7] (図1)。ただそのためには温度計算の基礎となる現生花粉データ(表層試料)を別途準備しておくが必要になる。また MIS5e-11 をカバーす

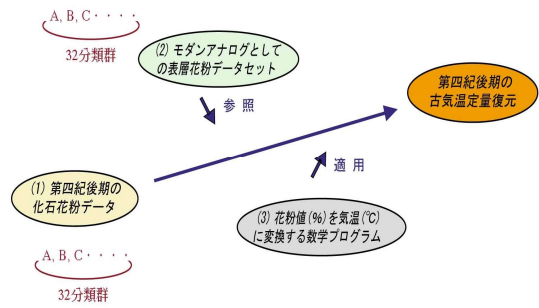


図1. 化石花粉(%)を古気温()に変換する MAT 法の原理。

る高精度の化石花粉記録が必要になる。

現実には、琵琶湖における既存の化石花粉データ [6] に MAT 法を適用した結果は芳しくない。その原因は大きく二つある。(1) 既存データ [6] の分解能が粗く、とくに完新世 (MIS1) 部分に大きなデータ欠落があること。(2) 復元された古気温曲線が年平均気温 17 以上の高温域で振り切れてしまっていること。このうちとくに深刻な問題は後者であった。現在の琵琶湖は年平均 14 の温帯域にあたるため、気温復元の上限が 17 では、温暖化予測に残された温度スペースはわずか 2-3 にすぎない。これに誤差区間を描くためのスペースも考えるなら、「100年後の地球」のアナログ探しという研究目的においては、既存の MAT システムは用をなさない状態にあった。

このような問題が生じる原因はどこにあったのか。結論から言うなら、比較対象としての現生試料群 [8] が、年平均 17 以上の高温域において振り切れていたのである。具体的には温度計算の基礎となるべき表層花粉データセットが、年平均 17 以上の高温域において存在していなかった (図2青)。参照データに欠落があれば、いかに高性能の数学プログラムといえども復元値を与える

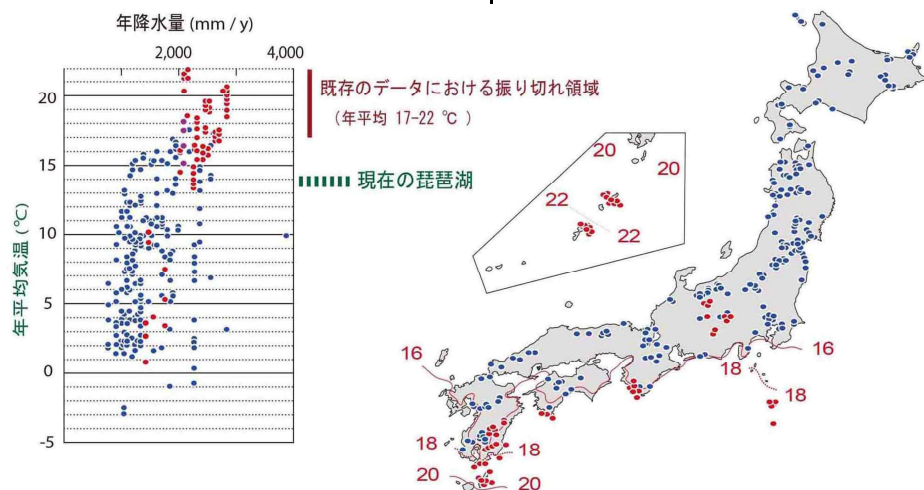


図2. 既存の日本列島表層花粉データセット [8] (青点) および前計画 [9] ~ 本計画 による追加点 (赤点)。

ことはできない。かくして現在より 2-3 以上暖かい高温環境を復元するには、同等の温暖域における表層試料を収集整備した上で、MAT 法を再試行する必要があった。

2. 研究の目的

化石花粉ベースのモダンアナログ法 (MAT) に基づき、12 万年前の MIS5e 間氷期および 43 万年前の MIS11 間氷期の古気温を定量復元すると同時に、現在より何 暖かったのか、あるいは暖かくなかったのかを定量的に明らかにする。

3. 研究の方法

次の 3 段階により実施した。(1) 日本列島南岸の暖温帯～亜熱帯をめぐり、年平均 17 以上をカバーする現生試料を収集すると同時に、室内分析して表層花粉データを得た。(2) 琵琶湖から得られた堆積物コアを花粉分析し、MIS1, 5e, 11 間氷期を含む化石データを得た。(3) 得られたデータに PC 上でモダンアナログ法を適用することにより、日本列島における MIS5e-11 間氷期の古気温レベルを定量復元し、1-2 σ の誤差区間とともに描画した。とくに現在の間氷期 (完新世、MIS1) からの気温偏差を計算した。

4. 研究成果

(1) 日本列島南部における表層花粉整備

まず日本列島太平洋岸における表層花粉試料の整備状況を示す (図 2 赤, 図 3) [9]。日本列島で年平均 17 以上の高温域にあたるのは、



図 3. 奄美大島の亜熱帯林 (ヒカゲヘゴ林). 撮影者奥田

西日本南岸の岬部分から南九州、太平洋上の島嶼部にかけての暖温帯～亜熱帯域である (和歌山県潮岬、高知県足摺岬、伊豆諸島八丈島～青ヶ島、宮崎県南部～鹿児島県佐多岬、種子島、奄美大島、沖縄など)。図 2 左の気温グラフをみるならば、最南端の沖縄本島は年平均 22 の亜熱帯にあたるため、この整備事業により日本列島の表層花粉データセットは年平均気温で 5、最寒月気温では実に 9、高温方向へ拡張されたことになる。これにより琵琶湖をはじめとする日本列島中軸部 (北緯 33-35 度) における MIS5e, MIS11 間氷期の復元準備は整ったといえる。

図 2 に新しく追加した表層花粉試料 (図中赤点) の分析結果を図 4 に示す。全体に、年平均 15 以上の高温域においては圧倒的なシイ属 *Castanopsis* の多産が認められるのが特徴である。総じて日本列島の暖温帯・亜熱帯における花粉フロラは、冷温帯～亜寒帯 (図 4 上端) と比べてとき顕著に多様性が低く、「暖帯は冷帯より多様性が

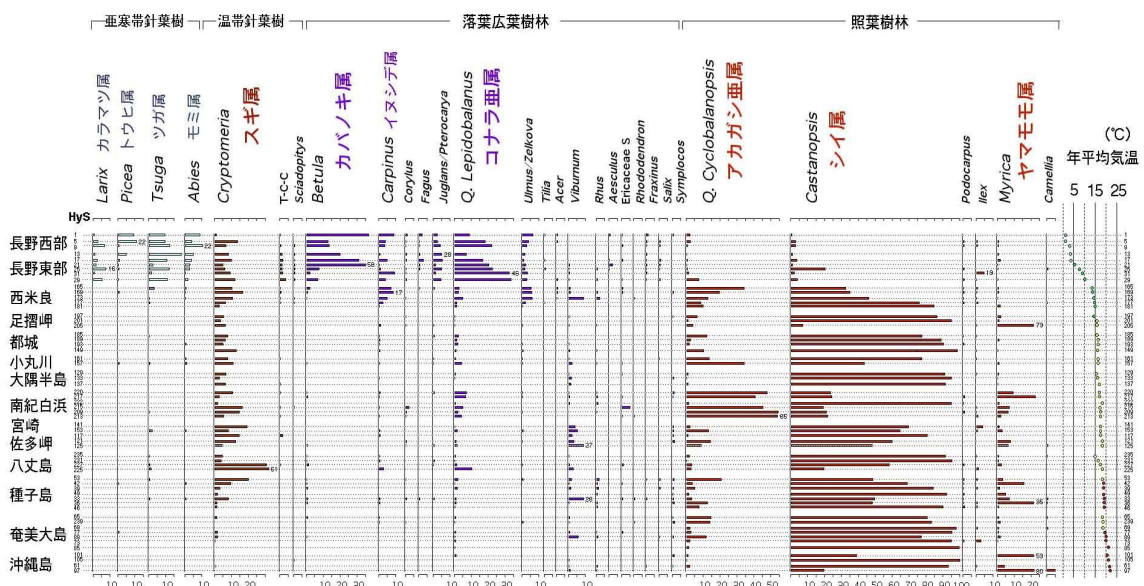


図 4. 前計画 [9] ~ 本計画で収集整備した表層試料 (N=60) の花粉組成. 右端に年平均気温 () を添えた.

高い」とする植物学上の通念[10]とは様相を異にしている。なお優先するシイ属の随伴種としてアカガシ亜属 *Quercus Cyclobalanopsis*、*Myrica* (ヤマモモ属)、*Alnus* (ヤシャブシ類)、*Trema* (ウラジロエノキ属)などを散発的に伴うことは特徴といえる。なおここでは表層試料として現生のコケ試料(毛足の長い蘚苔類群落)を採取している。これに池底の泥試料を適宜まじえてクロスチェックをかけることにより、試料タイプの違いから来るバイアスは除去されている。また図4に示された個々の表層花粉スペクトルは、緯度経度ほぼ同じ地点において採取された4点の表層試料データの平均値からなっている。これは現生コケ群落の集水域が一般的な湖沼と比べて顕著に小さいことによる問題を回避するための措置であり、従って図4の分析試料点数は一見60点であるが、現実にはその4倍にあたる240点の花粉分析をおこなっていることを付記しておく。

(2) 琵琶湖堆積物に対する化石花粉結果

化石花粉分析の試料写真を図5に示す。これは2008年に琵琶湖から採取されたボーリングコア(Biw08A,B)からの結果である。Biw08は同志社大学理工学部において保管される100mクラスのコア試料で、本体はA,B本のストロークからなり、上部50mは花粉粒に富む均質泥層からなっている。またK-Ah(7000年前)、AT(28,000年前)、Aso-4(7万年前)、Aso-3(15万年前)、At-Th(25万年前)といった指標テフラを多数含んでいる。このBiw08コアにおいて、MIS1とMIS5eはそれぞれ

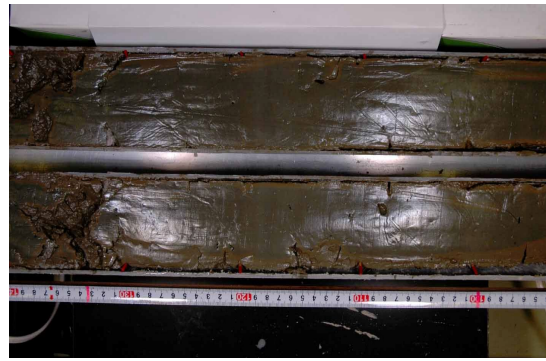


図5. 琵琶湖の湖底堆積物。(ピストンコア写真)

れコア深度2-3mおよび33-35mの区間に存在している。MIS11に関しては、大深度ゆえ1983年掘削の1400mコアに代わる新コアがいまだ得られていないことから、コア所蔵先にあたる京大総合博物館を訪ねて1400mコアから再分析のための試料を採取した。具体的にはMIS11に相当する深度229m~247m区間から50cm間隔で5g程度の泥試料を採取して持ち帰り、表層試料と同じ手順で花粉分析をおこなった。

以上のコア試料に対する分析結果を図6に示す。図の上半を含む主要部(深度45m)がBiw08コアのMIS1~MIS5eにあたり、図の下端に描かれている深度229-247mが1400mコアのMIS11部分をあらわしている。この結果、MIS1, MIS5e, MIS11間氷期は暖温帯の照葉樹林要素(アカガシ亜属~シイ属)によって特徴づけられることが示されている。ただその組成はアカガシ亜属が圧倒的に多く、シイ属は少ない。また、アカガシ亜属の値はMIS11では70%に達するのに対し、MIS1では45%であり、MIS5eでは20%にすぎないなど間氷期ごと

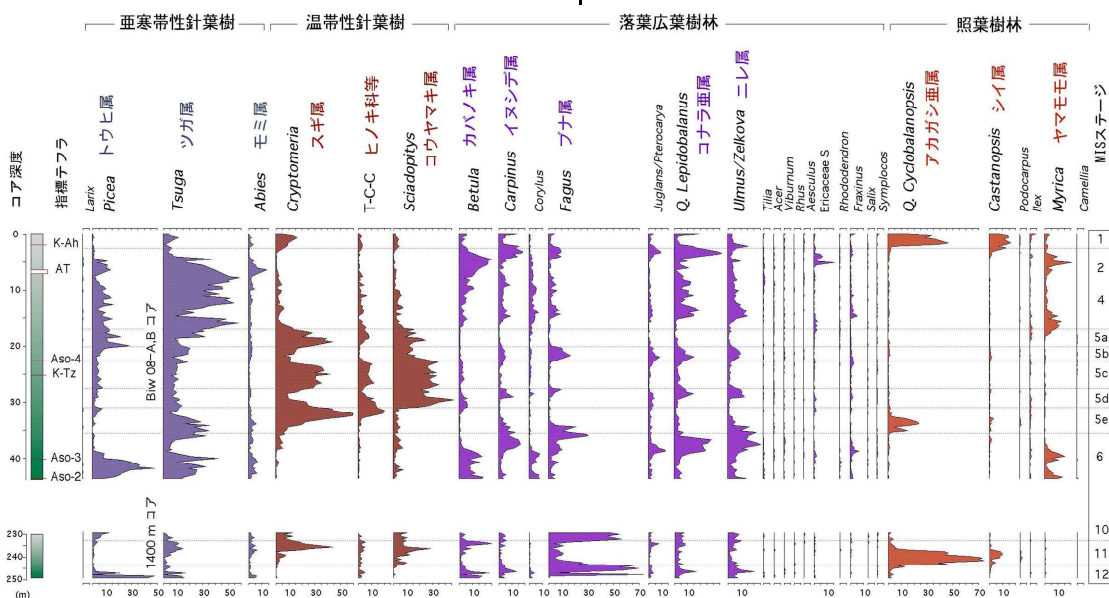


図6. Biw08コアおよび1400mコアから得られた化石花粉データ。MIS1、5e、11にアカガシ花粉のピークがある。

の差異がみとめられる。その他、氷期の最盛期（MIS2-4）にツガ・トウヒなど亜寒帯要素が多く、その間の亜間氷期（MIS5a-c など）ではスギ・ヒノキもしくはブナ属など冷温帯要素が多くなる点は、既存のデータ群[6]と調和的である。

(3) モダンアナログ法による古気温定量復元

この化石花粉データ（図6）を、図1のMAT計算アルゴリズムに基づいて図4の表層花粉データと統計的に比較し、古気温値に変換したものが図7である。花粉値を古気温に変換する数学プログラムについては、重回帰分析プログラム Polygon [7] を使用している。図7では年平均気温（Tann）および最寒月平均気温（MTCO）が描画され、復元曲線のみの線画（図左）と誤差領域つきの虹色画面（図右）が与えられている。図右の虹色画面において、黄色～緑色の領域は1σの、青～濃紺の領域は2σの誤差区間をあらわす。また虹色画面の中央付近に描かれた2本の実線については、青線は誤差区間の平均値（average）を、同じく赤線は最頻値（mode）を表したものである。

さて、図7に描画された琵琶湖花粉データに対するモダンアナログ法（MAT）の適用結果をみてみよう。本計画で得られた最大の収穫は、既存のデータ[6,8]において術者を悩ましていた高温域の振り切れがみごとに解消されたことである。既存データ[6]に対するMAT結果においては復元曲線（とくに図右の虹色画面）が年平均気温17、最

寒月では7で断ち切られたように消失していたのに対し、本計画（図7）では虹色画面の上限は年平均20、最寒月では12まで広がっている。今回新しく整備された表層データ（図2）は、年平均気温22、最寒月気温15.5までカバーしていることから、図7のMAT結果がなお高温域の振り切れを残している可能性はもうない。結論として、過去50万年間に現れた過去の間氷期において、琵琶湖が現在の奄美大島や沖縄（年平均21-22）の緯度域まで南下するほどの温暖化に見舞われたことは一度もなかったと考えられる。

(4) 琵琶湖の古気温復元から得られた知見

それではMIS11における古気温レベルはどの程度だったのだろうか。12万年前のMIS5eが現在の温暖期（完新世、MIS1）と大差なかったことは図7をみれば明らかである。では43万年前のMIS11に関してはどうか。図7においては、得られたMIS11の古気温は平均値（average）最頻値（mode）ともに年平均16.2と読みとれる。この付近の花粉群は70%近いアカガシ亜属からなるが（図6）、この化石組成に最も近いのは表層群中では図4の中段付近（南紀白浜）が該当する。言い換えれば、MAT法は琵琶湖のMIS11のアナログとして和歌山県白浜町付近（潮岬）を採用していると読みとれる。

実際、潮岬の今の気温が年平均で16.8（1961年から1990年までの平均値）[11]であることは

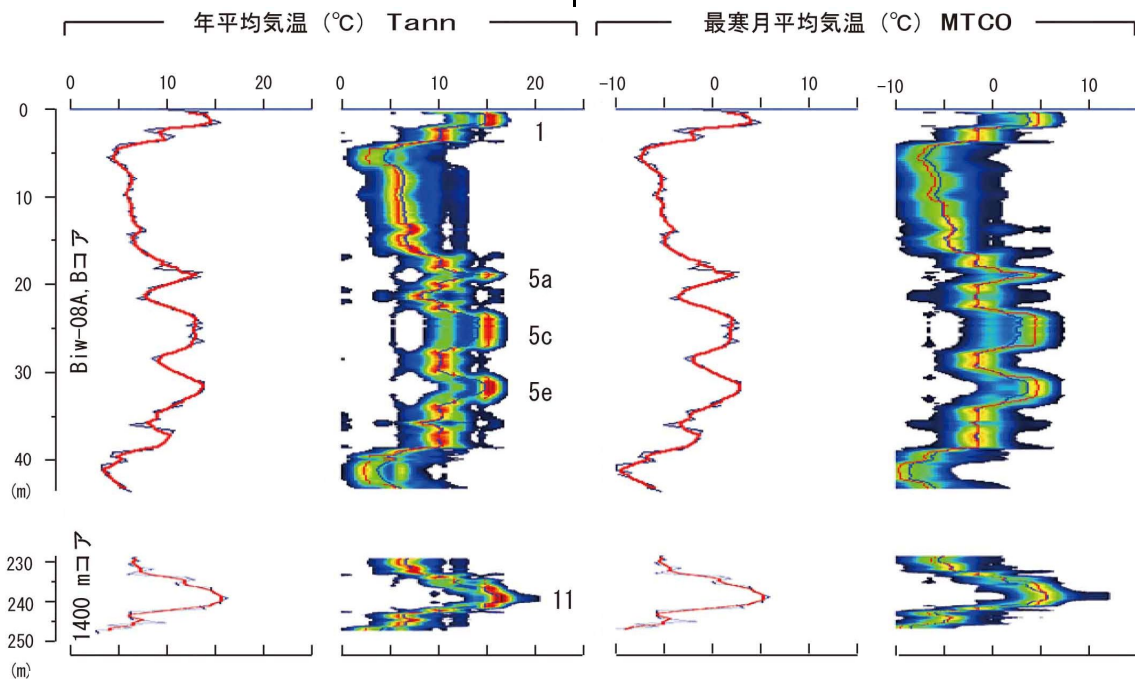


図7 .MAT法に基づくMIS1～MIS5eおよびMIS11間氷期の古気温定量復元図.色が赤い領域ほど存在確率が高い.

上の復元結果とよく合う。これに対して MIS1 の値は平均値 14.9 (最頻値 15.3) と復元されていることから、MIS11 は MIS1 と比べて年平均ベースで 1 から 1.5 暖かかったと計算できる。なおここで言う「MIS1」とは、実際には 7000 年前に訪れた完新世の最温暖期(ヒブシサーマル期)を指している。ヒブシサーマル期は現在(正確には産業革命前)と比べると約 1 程度暖かかったとされているので、この値を上乗せするなら 43 万年前の MIS11 間氷期は、300 年前の産業革命期よりも年平均で 1.5-2.5 程度暖かかったとみることができよう。総じて MIS11 間氷期の古気温レベルは、現在滋賀県中部に位置する琵琶湖が和歌山県南部まで移動するほどの温暖状態であったと考えることができる。

現在取りざたされている 100 年後の気温上昇量 [1] と比べたとき、この値はやや小さい。IPCC などが予測する 3 の温暖化を達成するには、琵琶湖は現在の鹿児島市付近まで移動せねばならない(年平均 17.6) [11]。以上の事実は、かりに今のまま地球温暖化が進むなら、100 年後の地球環境は MIS11 の古気温レベルをやや超えるであろうことを意味している。逆にいうなら、もし CO₂ の排出削減の取り組みが今後順調に進むなら、100 年後の気温レベルが MIS11 の枠内に収まることはあり得る。43 万年前の地球環境は必ずしも破局的だったとはいえないことから [12, 13]、これは我々の CO₂ 削減努力に勇気を与える結果といえる。現在より 2 前後までの温暖化は、地球気候システムの許容範囲内だったかもしれない。

引用文献

- [1] 気象庁 (2014). http://www.data.kishou.go.jp/observ/portal/chishiki_ondanka/p12.htm
- [2] Webb III et al. (1993). Use of paleoclimatic data as analogs for understanding future global changes. *In* Eddy & Oeschger (eds.) *Global Changes in the Perspective of the Past*, 51-71, Wiley.
- [3] Droxler et al. (2003). Unique and exceptionally long Interglacial Marine Isotope Stage 11: window into Earth warm future climate. *In* Droxler et al. (eds.) *Earth's Climate and Orbital Eccentricity: The Marine Isotope Stage 11 Question*, 1-14, American Geophysical Union, Washington.
- [4] Loutre and Berger (2003). Marine Isotope Stage 11 as an analogue for the present interglacial. *Global Planet. Change* 36, 209-217.

- [5] Takemura (1990). Tectonic and climatic record of the Lake Biwa, Japan, region provided by the sediments deposited since Pliocene times. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.* 78, 185-193.
- [6] Miyoshi et al. (1999). Palynology of a 250-m core from Lake Biwa: a 430,000-year record of glacial-interglacial vegetation change in Japan. *Rev. Palaeobot. Palynol.* 104, 267-283.
- [7] Nakagawa et al. (2002). Quantitative pollen-based climate reconstruction in central Japan: application to surface and Late Quaternary spectra. *Quat. Sci. Rev.* 21, 2099-2113.
- [8] Gotanda et al. (2002). Biome classification from Japanese pollen data: application to modern-day and Late Quaternary samples. *Quat. Sci. Rev.* 21, 647-657.
- [9] 奥田 (2011). 日本列島周辺の暖温帯・亜熱帯の表層花粉整備. 平成19-22年度文部科学省科学研究費補助金, 若手研究 (A) 研究成果報告書. 課題番号19684018, 178 pp.
- [10] 中西ほか (1983). 日本の植生図鑑 I 森林 208 p, 保育社, 大阪.
- [11] 国立天文台編 (1999). 理科年表 平成11年 (机上版). 丸善株式会社, 1058 pp.
- [12] Petit et al. (1999). Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature* 399, 429-436.
- [13] Lisiecki and Raymo (2005). A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}O$ records. *Paleoceanography* 20, PA1003, doi:10.1029/2004PA001071.

5. 主な発表論文等

(雑誌論文)(計1件)

Pavel E. TARASOV, Takeshi NAKAGAWA, Dieter DEMSKE, Hermann ÖSTERLE, Yaeko IGARASHI, Junko KITAGAWA, Lyudmila MOKHOVA, Valentina BAZAROVA, Masaaki OKUDA, Katsuya GOTANDA, Norio MIYOSHI, Toshiyuki FUJIKI, Keiji TAKEMURA, Hitoshi YONENOBU, Andreas FLECK. (2011). Progress in the reconstruction of Quaternary climate dynamics in the Northwest Pacific: A new modern analogue reference dataset and its application to the 430-kyr pollen record from Lake Biwa. *Earth-Science Reviews* **108**, 64-79.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

奥田 昌明 (OKUDA Masaaki)

千葉県立中央博物館・庶務部教育普及課・主任上席研究員

研究者番号: 10311383