

湖沼堆積物による過去2,000年間の気候・海水準・大気変動の復元と未来予測

High-resolution reconstructions of climatic, sea-level and atmospheric changes during last 2,000 years by using lake sediments and future prediction of environmental changes.

研究代表者 東京都立大学大学院理学研究科地理科学専攻助教授 福沢仁之
Associate Professor, Department of Geography, Graduate School of Science, Tokyo Metropolitan University
Hitoshi Fukusawa

共同研究者 東京都立大学大学院理学研究科地理科学専攻 教授 岩田修二
Professor, Department of Geography, Graduate School of Science, Tokyo Metropolitan University
Shuji Iwata

研究協力者 東京都立大学大学院理学研究科地理科学専攻 院生 山田和芳
Graduated student, Department of Geography, Graduate School of Science, Tokyo Metropolitan University
Kazuyoshi Yamada

Our research group have investigated chronology and sedimentology of non-glacial varved sediments over last 16 ka at Lake Suigetsu of central Japan and over last 35 ka at and Lake Tougo u-ike of western Japan and loess-paleosol sediments over last 75-140 ka at Lanzhou and Linxia of Chinese Loess Plateau. Based on chronology of varve counting and high resolution dating of ^{14}C in lake sediments of Lake Tougo u-ike, we investigated to reconstruct activities of Asian summer and winter paleomonsoons by using quartz flux and illite crystallinity over last 35 ka. Standard curves of ^{18}O in GRIP, quartz contents and illite crystallinity in varves of Lake Tougo u-ike over last 35 ka shows that changes of illite crystallinity indicating Asian summer paleomonsoon activity in time are closely similar to standard curve of ^{18}O in GRIP and also cooling events such as Younger Dryas and Heinrich events are recognized. Also, interrelationship between standard curve of ^{18}O in GISP2 and quartz flux ($\text{mg}/\text{cm}^2/\text{yr}$) from 20 ka to 10 ka shows that interrelationships between the timing of Asian winter paleomonsoon and climatic changes in North Atlantic by using GISP2 ice cores exist, and suggested that the strengthening of winter paleomonsoon go ahead of the weakening of summer paleomonsoon, and that responsibility of winter monsoon was rapid in global cooling stages, but its responsibility was slow in warming stage. Other results of our research in non-glacial varves and loess-paleosols show as follows; 1) Horizons of Heinrich events from H1 to H6 and Younger Dryas period existed in loess-paleosol sequence (T2 terrace) of Lanzhou, detected by measuring color reflectance of sediments. 2) Magnetic susceptibility and quartz contents in loess-paleosol sequences are useful proxy data to reconstruct activity of Asian summer and winter monsoon. 3) Though dry climate were dominant in Heinrich and 8.2ka events, precipitation increased in Younger Dryas period at Lanzhou. 4) Abrupt change from wet to dry climates, correlating to 8.2 ka events of GISP2, was observed in non-glacial varved sediments of Japan. 5) Based on archaeological chronology of Jyomon Culture by using calendar ages, Jyomon Culture seemed to be influenced by climatic and physical environmental changes.

研究目的

最近の東アジアは異常気象にみまわれたが、これが気候変動に結び付くとは一般には考えられておらず、気候は百年あるいは千年という長い期間にゆっくりと変わるものと考えられている。しかし、グリーンランドの氷床中の酸素同位体分析結果によれば、地球の年平均気温はわずか50年で7℃上昇した報告もあり、実際の気候はかなり劇的に変動している。いままで気候がゆっくりと変動するという暗黙の了解が出来上がった背景には、分析の精度とくに時間精度が数百年とか数千年のレベルであったことが挙げられる。したがって、気候変動のスピードとその実態を明らかにするには、より細かな精度でしかも寒暖や乾湿の変動を直接検出する指標を使って古気候の復元を行わねばならない。

前述の背景に基づいて、1年単位で古気候を復元できる試料を分析して気候変動のスピードを検出

することが必要である。また、気候変動の指標としては寒暖や乾湿が挙げられるが、これらの関係はまだ漠然としており明らかにする必要がある。日本列島の気候変動を考察する場合、とくに乾湿は日本海における対馬暖流のパルス的な消長にその原因がある。このため、生物擾乱作用に受けない日本海側の汽水湖の湖底に認められる年縞（non-glacial varve）堆積物を用いて、その鉄鉱物組成（海水環境では黄鉄鉱（pyrite, FeS_2 ）、淡水環境では菱鉄鉱（siderite, FeCO_3 ）・藍鉄鉱（vivianite, $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ ））や粘土鉱物組成から、対馬暖流の消長を決定する海水準変動・汽水湖周辺の乾湿（降水量）変動・黄砂フラックスの変動（中国大陸の乾湿変動）を1年単位で検出することを目的とした。これらの目的に基づいて採取された福井県水月湖（16,000年前以降の16mコア）と鳥取県東郷池（35,000年前以降の40mコア）の湖沼年縞

堆積物をすでに入手してあった。とくに、水月湖の縞状堆積物は¹⁴C分析によって年縞であることが明らかにされている。これら以外の多くの日本列島の湖沼のコアを採取して、紀元0年以降の歴史時代の気候変動を1年～数年単位で検出することを行なうことも目的とした。紀元0年以降を取り扱う理由は、日本や中国大陸での古文書記録を使って検証することができるためである。

これまでの堆積物を使った気候変動の研究は、欠層が少ない海洋底堆積物コアを使用して行われていた。しかし、海洋底コアは堆積速度が小さく1試料のデータは数百～数千年間の平均を示している。氷床コアも同様である。本研究で用いる汽水湖の堆積物は、陸上からの栄養塩の継続的な供給によってプランクトンの生産が活発で堆積速度が大きい。1年単位の分析が可能である。集水域の小さな汽水湖は湖底で晶出する鉄鉱物(黄鉄鉱)量や陸域起源の粘土鉱物量を検出することによって、天然の検潮儀・雨量計となりうる。また、淡水環境下で堆積する菱鉄鉱の¹⁸O・¹³C濃度を測定することによって、湖水の水温も検出できる可能性がある。年縞堆積物はその粒度がシルトサイズ以下であるため、その粘土鉱物組成は中国大陸起源の黄砂量を読み取る天然の集塵器にもなりうる。

これらの分析によって、気候変動の実態が1年単位で明らかにできると同時に、数値解析に基づいてそれらの周期性も明らかにできるはずである。また、対馬暖流の消長の結果である日本海の水温変動と、日本列島あるいは中国大陸の乾湿変動との間の関係について、タイムラグを含めて明らかにできる。そして、2000年間の気候変動から明らかにされる200年以下の変動周期に基づいて、近未来の気候変動予測も可能となり、意義は非常に大きいものと考えられる。

とくに、汽水湖では下部に海水が侵入して上部の淡水との間に躍層が形成されて、溶存酸素が乏しく生物活動が制限されて年縞堆積物が保存される。しかも、汽水湖は海水準・寒暖・乾湿変動の検出器となる。この地球システムの「目盛」と「検出器」という着想に基づいて、汽水湖堆積物を分析する独創的な研究であり、気候変動のスピードといったダイナミクスを検討して従来のゆっくり変動するという曖昧な定説を変えうる成果が期待できる。

研究経過

平成7年度日産学術研究助成「湖沼堆積物による2,000年間の気候・海水準・大気変動の復元と未来予測」が採択され、申請する本研究の準備研究がスタートした。そして、平成7～8年度には、日産研究助成ほかで購入した部品で夏原技研設計の空気圧入式ピストンコアラを組み立て、それを用いて日本列島各地の湖沼・内湾の数多くの表層コア(大村湾、琵琶湖、三方五湖、小川原湖、網走湖、サロマ湖、諏訪湖、鳥屋野淵、赤城大沼、芦ノ湖、余呉湖など)を採取した。これらのコアの掘削地点は75箇所、すべてのコアの全長は860mに及んでいる。これらの研究経過として

は、福井県水月湖コアや鳥取県東郷池コアの縞状堆積物のラミナ観察と同時に1年あるいは2年単位での分割をおこなうと同時に、滋賀県琵琶湖、青森県小川原湖、新潟県鳥屋野淵、長野県諏訪湖、などの湖沼堆積物コアの分析を行った。この中で、東郷池、琵琶湖と小川原湖の堆積物中に「年縞」が認められ、珪藻に富むラミナと粘土鉱物に富むラミナの律動的な互層から構成されていた。

珪藻殻は火山ガラスと同じくオパールAから構成されるため、両者をわけて検出する方法としては蛍光観察がもっとも有効な方法である。珪藻殻は有機物を含み蛍光を発する性質があるため、珪藻殻から大部分構成される縞状堆積物の1年形成部分の検出および基礎生産を示す珪藻量を落射蛍光顕微鏡下で行った。しかしながら、年縞自体にはさまざまな形態が認められたり、寒冷期と温暖期で年縞の形態が異なっており、それらの堆積構造から年縞形成メカニズムを明らかにすることが次の課題となった。そして、年縞堆積物の薄片観察に基づく堆積学的検討を行なって、年縞の成因を推定した。

また、風成塵起源鉱物や自生沈澱鉱物の組成を検討するために、X線回折装置を使用して鉄鉱物組成や粘土鉱物組成を検討した。そして、黄鉄鉱-菱鉄鉱の量比、鉄やマグネシウムに富む緑泥石量、イライトやアルミニウムに富む緑泥石量をそれぞれ検討して、1年あるいは2年単位での海水準・乾湿・大陸の乾湿変動を検出できた。しかしながら、風成塵起源鉱物には中国大陸起源に加えて日本列島起源のものも認められたり、自生鉱物でも同一結晶形をもつ組成が異なる鉱物が認められ、X線回折のみからは同定・定量できず、化学組成の検討が必要不可欠であることが明らかになり、化学組成分析も一部行なった。

一方、湖沼に降下する風成塵鉱物の同定に役立てるために、中国黄土高原西方の甘粛省蘭州と臨夏で野外調査および試料の採取を行なって、日本の風土を決定づけるアジアモンスーンの変動を湖沼・レス堆積物をつかって解明した。その結果、グローバルな環境変動とアジアにおける気候変動との間の時間的前後関係を明らかにすることができ、過去の気候変動のトリガーの一部を明らかにできた。これは、将来の気候変動を予測する上で重要であると考えられる。

研究成果

福井県水月湖で発見された天然の時計となる年縞を用いて、少なくとも過去16,000年間の年縞編年を行なうと同時に、鳥取県東郷池の過去35,000年間にわたる年縞編年を行なった。世界各地の年縞と比較して最も長い期間にわたる水月湖や東郷池の年縞堆積物には、海水準・降水・モンスーン変動が記録されていることを明らかにした。とくに、東郷池の湖底で1992年夏に採取されたシンワール式ピストンコアTGBの年縞の計数を行った結果、過去35,000年間の堆積物であることが明らかになった。これらの時計・環境変動検出計である年縞堆積物を利用して、過去35,000年間の海面

・降水・風成塵変動を検出した。そして、水月湖におけるデータとともに過去2,000年間の詳細な気候・海水準・降砂変動と35,000年間の概略的な変動について、地学雑誌（福沢ほか、1995）、第四紀研究（福沢、1995）、地形（福沢ほか、1996）、汽水域研究（加藤ほか、1998）および科学（福沢、1998）に論説として公表することができた。

一方、1996年11月と1997年5月に私費で中国黄土高原とチベット高原北東部に行って、蘭州大学地理科学系の協力を得ながら、蘭州郊外で過去75,000年間のレス古土壌堆積物と臨夏郊外で過去14万年間の堆積物の連続試料を採取した。また、黄土高原のレス古土壌堆積物の模式地である洛川における過去240万年間の試料も入手した。これらの試料の帯磁率や分光測色分析をおこなって、氷期一過水期サイクル、ハイリッヒ・イベントやヤングガードリアスなどの気候変動イベントを検出し、その一部を地学雑誌・月刊地球等で予報した（福沢ほか1997など）。

湖沼堆積物のみならずレス堆積物の高精度試料を採取して、それらの鉱物組成や化学組成を詳細に分析して、モンスーン変動に関して世界にアピールできる研究を中断することなく継続的に行なった。とくに、湖沼・内湾の年縞堆積物の「年縞」形態を詳細に観察して、年縞編年学の信頼性をより高めること、また湖沼・内湾・レス堆積物の構成鉱物の鉱物組成のみならず化学組成を明らかにして、鉱物の同定および定量の信頼性を向上させることに重点をおいた。

また、この研究によって、気候変動の実態が1年～10年単位で明らかにできると同時に、数値解析に基づいてそれらの周期性も一部について明らかにできた。

湖沼年縞およびレス堆積物を用いて明らかにした東アジアの気候・海水準・大気変動とグローバルな地球環境変動と対応関係についての成果をまとめる。①東郷池の年縞の枚数計測および¹⁴C年代の高分解能測定に基づいて、過去35,000年間の石英フラックスとイライト結晶度の変動を使用して、夏季と冬季のアジアモンスーン変動を復元した結果、グリーンランドの氷床コア（GISP2）における $\delta^{18}O$ 変動と比較すると、夏季モンスーン活動の指標とイライト結晶度の変動は氷床コアの $\delta^{18}O$ 変動と極めて一致しており、ヤングガードリアスやハイリッヒイベントのような寒冷イベントも認められた。②20,000年前から10,000年前にかけての石英フラックスと $\delta^{18}O$ 変動との関係は、アジアモンスーン変動と北大西洋における寒暖変動との間に時期的な相関関係があることを示しており、これらの時期的関係は冬季モンスーンの強化が夏季モンスーンの弱体化に時期的に先行することと、グローバルな寒冷化イベントにおいて冬季モンスーンは急速に強化するが、温暖化イベントにおいてはゆっくりと弱化することを示唆している。③堆積物の分光反射率を測定することによって、蘭州のレス古土壌堆積物においてH1からH6までのハイリッヒイベントとヤングガードリアスの層準を認定した。④レス古土壌

堆積物の初磁化率（帯磁率）と石英量は夏季および冬季のアジアモンスーン変動を復元する上で役立つ指標となった。⑤蘭州では、ハイリッヒイベントや8.2kaイベントにおいては乾燥気候が卓越したが、ヤングガードリアス期には降水量が増加した。⑥氷床コア（GISP2）での8.2kaイベントに対比される湿潤から乾燥への急激な変化は、日本の湖沼年縞堆積物中にも認められた。⑦日本の縄文文化の暦年代のよる編年に基づけば、縄文文化は気候変動やほかの自然環境変動によって影響を受けたものと思われる。

今後の課題と発展

海洋堆積物に比べて堆積速度が大きくて高分解能解析が可能な湖沼年縞およびレス古土壌堆積物を使って、気候・海水準変動を高精度に明らかにした。その結果、ダンスガード・オシュガーサイクルやその変調のボンドサイクルに対応する数百年から数千年スケールの突然かつ急激な大気循環や海水準の変動が最終氷期だけではなく完新世にも認められた。また、高緯度の氷床コアに認められる変動時期よりも東アジアの環境変動が先行している可能性が指摘された。そして、これらの突然かつ急激な気候変動が、日本における縄文文化という人間活動に強い影響を与えた可能性が指摘できた。これらの気候変動に関する事実は、①世界各地に認められるダンスガード・オシュガーサイクルのトリガーは、その伝播速度からいっても大気循環の変動であったことと、②この大気循環変動の発源地は氷期一過水期の交代にもかかわらず低緯度地域に存在したことを示唆している。ダンスガード・オシュガーサイクルの原因とメカニズムについては定説はないが、太陽活動の変動が有力な仮説であると考えられている（多田、1998）が、これに関して検討を湖沼・レス堆積物を使って行なうことが今後の課題の一つとなる。すなわち、過去1万年間続いた縄文時代とは違って、われわれ人類が地球表層システムに対して人為的なストレスを継続的にかけ続けている現在、システムが突然かつ急激に変動する可能性が指摘されている。その変動モードを知る上でもダンスガード・オシュガーサイクルのメカニズムを知ることが重要であろう。

一方、湖沼年縞堆積物の分析によって、気候変動の実態が1年単位で明らかにできた。そして、FFT法やMEM法などによるスペクトル解析に基づいてそれらの周期性も明らかにした（Fukusawa, 1996; 福沢、1997）。そして、対馬暖流の消長の結果である日本海の水温変動と、日本列島あるいは中国大陸の乾湿変動との間の関係について、タイムラグを含めて明らかにできた。このことは、過去2,000年間の気候変動から明らかにされる200年以下の変動周期に基づいて、近未来の気候変動予測も可能となることを意味しており、意義は非常に大きい。ただし、詳細な変動予測は、その変動モデルの未確立ゆえに、計画年度中には終了できず、反省点として残った。しかしながら、淡水湖沼も含めて、環境変動のProxy Dataを1年単位で得ることが可能となったことは、た

たとえば生物活動や生産量に影響を及ぼす太陽活動の周期性などの惑星のリズムを明らかにでき、世界的な成果が得られるものと考えられる。

発表論文リスト

福沢仁之 (1998) : 最終氷期以降の気候・海水準の年々変動を読む。科学、68、353-360.

福沢仁之 (1998) : 湖沼・内湾・レス堆積物を用いた東アジアにおける気候変動の高精度復元と人類史の関係。気象研究ノート、(35)、印刷中

福沢仁之・塚本すみ子・塚本 斉・池田まゆみ・岡村 真・松岡裕美 (1998) : 年縞堆積物を用いた白頭山一苦小牧火山灰 (B-Tm) の降灰年代の推定。汽水域研究、(5)、55-62.

福沢仁之・山田和芳 (1998) : 堆積物による過去75,000年間のアジアモンスーン変動の高精度復元。地学雑誌、106(2)、58-69.

Fukusawa, H., Kato, M., Yamada, K., Oi, K., and Yasuda, Y. (1998) : Asian summer monsoon activity during last 36 ka detected by using non-glacial varved and loess-paleosol sediments and origin of rice cultivation. *Sci. Rep. of The Yangtze River Civilization Program*, 1, 15-28.

福沢仁之・山田和芳・加藤めぐみ (1998) : 湖沼年縞およびレス-古土壌堆積物による地球環境変動の高精度復元。国立歴史民俗博物館研究報告、特別号、印刷中

加藤めぐみ・福沢仁之・安田喜憲・藤原 治 (1998) : 鳥取県東郷池湖底堆積物の層序と年縞。汽水域研究、(5)、27-37.

池田まゆみ・福沢仁之・岡村 真・松岡裕美 (1998) : 湖沼年縞堆積物によるグローバルな気候・海水準変動の検出—青森県小川原湖と十三湖における過去2,300年間の環境変遷を例として—。気象研究ノート、(35)、印刷中

塚本すみ子・福沢仁之・小野有五・大井圭一・方小敏 (1998) : 中国レス堆積物のIRSL年代測定。国立歴史民俗博物館研究報告、特別号、印刷中

山田和芳・斎藤耕志・福沢仁之 (1998) : 汽水湖底堆積物の採取・分析方法とその最近の進歩。汽水域研究、(5)、63-73.

福沢仁之 (1997) : 湖沼堆積物による古環境情報の高精度復元。環境情報科学、26(2)、42-53.

Fukusawa, H. (1997) : Non-glacial varved lake and loess-paleosol sediments as timekeepers and detectors of paleoenvironmental changes since Last Glacial in East Asia. *Proc. REKI-HAKU Intern. Symposium. of Terrestrial Environmental Changes and Natural Disasters during the Last 10,000 Years*, 101-105.

福沢仁之・大井圭一・山田和芳・岩田修二・鳥居雅之 (1997) : 日本海—黄土地帯—地中海トランセクトにおける過去240万年間の大気循環変動—チベット/ヒマラヤの上昇史との関係—。地学雑誌、106(2)、48-57.

福沢仁之・藤原 治・大井圭一・山田和芳・加藤めぐみ・小野有五・伊勢明広・米田茂夫 (1997) : 湖沼・内湾・レス堆積物によるアジアモンスーン変動の高精度復元。月刊地球、19、463-468.

大井圭一・福沢仁之・岩田修二・鳥居雅之 (1997) : 東アジアにおける過去240万年間のモンスーン・偏西風変動—中国内部のレス・古土壌堆積物と日本海の内湾堆積物の粘土鉱物分析—。地学雑誌、106(2)、58-69.

山田和芳・福沢仁之・ODP第161次研究航海乗船研究者一同 (1997) : 地中海深海堆積物 (ODP site 974B) で検出された過去450万年間の気候変動。地学雑誌、106(2)、70-76.

Fukusawa, H. (1996) : High-resolution reconstruction of environmental changes from the last 2,000 years varved sediments in Lake Suigetsu, central Japan. *Proc. 1995 Nagoya IGBP-PAGES/PEP-II Symposium*, 84-89.

福沢仁之 (1996) : 稲作の拡大と気候変動。季刊考古学、56、42-48.

福沢仁之 (1996) : 日本列島周辺における気候・大気変動、地震活動と人間活動—天然の時計・環境変動検出計としての湖沼堆積物の利用—。あおぞら、8、1-15.

福沢仁之・竹村恵二・林田 明・北川浩之・安田喜憲 (1996) : 年縞湖沼堆積物から復元された三方湖とその周辺の最終氷期最寒冷期の古環境変動。地形、17、232-341.

Kawakami, S., Fukusawa, H. and Kanaori, Y. (1996) : A new opportunity to detect paleo-earthquake events dating back to the past 10 millennia: a record from lacustrine sediment. *Eng. Geol.*, 43, 177-188.

遠藤邦彦・福沢仁之 (1996) : 地球環境変動の高精度記録計としての湖沼堆積物。第四紀研究、35(2)、111-112.

福沢仁之 (1995) : 天然の「時計」・「環境変動検出計」としての湖沼の年縞堆積物。第四紀研究、34(5)、135-149.

福沢仁之 (1995) : 海と湖のはざま—汽水湖沼は地球環境変動の共鳴箱—。海と文明 (小泉格・田中耕司編)、73-84、朝倉書店。

福沢仁之・安田喜憲 (1995) : 水月湖の細粒堆積物で検出された過去2000年間の気候変動。歴史と気候 (吉野正敏・安田喜憲編)、28-46、朝倉書店。

福沢仁之・小泉 格・岡村 真・安田喜憲 (1995) : 水月湖細粒堆積物に認められる過去2,000年間の風成塵・海水準・降水変動の記録。地学雑誌、104、69-81.

Kitagawa, H., H. Fukusawa, T. Nakamura, M. Okamura, K. Takemura, A. Hayashida, Y. Yasuda (1995) : AMS ^{14}C dating of the varved sediments from Lake Suigetsu, central Japan and atmospheric ^{14}C changes during the late Pleistocene. *Radiocarbon*, 37, 274-296.