

余呉湖・湖沼堆積物解析から推定される後期完新世の湖沼：流域系水文環境変動

著者	鳶田 敏行, 柏谷 健二, 兵頭 政幸, 増澤 敏行
著者別表示	Shimada Toshiyuki, Kashiwaya Kenji, Hyodo Masayuki, Masuzawa Toshiyuki
雑誌名	地形
巻	23
号	3
ページ	415-431
発行年	2002-07-25
URL	http://doi.org/10.24517/00053681

余呉湖・湖沼堆積物解析から推定される後期完新世の 湖沼－流域系水文環境変動

鳶田敏行¹・柏谷健二²・兵頭政幸³・増澤敏行⁴

Hydro-Environmental Fluctuation in a Lake-Catchment System during the Late Holocene Inferred from Lake Yogo Sediments

Toshiyuki SHIMADA¹, Kenji KASHIWAYA², Masayuki HYODO³ and Toshiyuki MASUZAWA⁴

Abstract

Hydro-environmental fluctuations in the central Japan during the Late Holocene have been imprinted in the sediment cores from Lake Yogo, where hydrological conditions changed at c. 700 AD; from low water regime to high water regime. An abrupt change in ²¹⁰Pb concentration of the cores shows that rapid increase in the sedimentation rate may have been connected to artificial channel construction in 1960.

Temporal fluctuation in mineral particle size of sediment corresponds to yearly averaged precipitation observed near the lake before the construction (1896-1960), leading to that an annual precipitation around Lake Yogo in the Little Ice Age may be estimated about 2,200 mm and in the late part of Medieval Warm Episode about 2,500 mm, larger than during the past 30 years (about 2,000 mm).

Key words: *lake sediments, paleo-precipitation, hydro-geomorphological environment*

1. はじめに

地球表層での物質移動を考えたとき、湖沼は流域で生産される物質の最終到達地点の一つである。その堆積物には流域における風化、侵食、運搬、堆積等の過程を含む水文環境

2002年1月7日受付, 2002年5月7日再投稿, 2002年5月13日受理

¹ 金沢大学大学院 自然科学研究科 博士(後期)課程, 〒920-1192 金沢市角間町

¹ Graduate Student, Division of Global Environmental Science and Engineering, Graduate School of Natural Science and Technology, Kanazawa Univ., Kanazawa 920-1192, Japan

² 金沢大学 自然計測応用研究センター, 〒920-1192 金沢市角間町

² Institute of Nature and Environmental Technology, Faculty of Science, Kanazawa Univ., Kanazawa 920-1192, Japan

³ 神戸大学 内海域機能教育研究センター, 〒657-8501 神戸市灘区六甲台町

³ Research Center for Inland Seas, Kobe Univ., Kobe 657-8501, Japan

⁴ 名古屋大学大学院 環境学研究科, 〒464-8601 名古屋市千種区不老町

⁴ Division of Earth and Environmental Sciences, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya Univ., Nagoya 464-8601, Japan

と地形の応答の情報が含まれている。即ち、湖沼堆積物は過去の情報を豊富に含んだ記録媒体の一つであるといえる。

これまでに、湖沼堆積物を用いて過去の水文環境を明らかにしようという研究は数多く行われてきた。例えば、東アジアモンスーン地域を対象とした研究は、中国の西藏高原 (Kashiwaya et al., 1991 a; 1995), 琵琶湖流域 (山本ほか, 1992), 余呉湖流域 (堀江・三宅, 1971) や若狭湾地域の水月湖 (福沢ほか, 1995) など進められてきている。しかし、定量的な議論までには至っておらず、今後、流域における水文プロセスまでをも考慮した研究を含め、さらなる発展が求められている。

本研究においては、水文環境の支配要因の一つである降水量の変動と湖沼堆積物の物理量との関係に注目した。「湖沼－流域」を一つの系と考えた場合、湿潤地域であり変動地帯の日本において、侵食量は多くの場合、降水特性に関わる侵食力を反映すると考えることが可能である。一般に、侵食量が大きい場合には運搬量も大きく、運搬量の大小は堆積物の粒径の大小に反映すると考えられる (柏谷, 1996)。本研究で対象とした余呉湖 (滋賀県) は直接の流出河川を持たない準閉塞湖であり、過去の水文環境の情報をその堆積物に保持していることが期待される。即ち、「湖沼－流域」系の水文環境を考える上で、好都合な湖沼－流域の一つであると言える。

そこで本小論では、1) 実測の気象観測資料が入手できる観測時代の堆積物試料を用いて、「湖沼－流域」系における降水量変動と堆積物粒径の第一近似的関係を明らかにし、2) その関係から、余呉湖流域における後期完新世の水文環境を復元し、歴史時代における余呉湖流域の降水量変動を定量的に推定することを目的とした。

2. 余呉湖の概要

2.1. 地形・地質

今回、対象とした余呉湖は滋賀県北部、琵琶湖の北方に位置する淡水湖沼 (Fig. 1) であり、その諸元を Table 1 に示す。余呉湖の湖水面標高は 132 m であり、北岸を除く三方を賤ヶ岳 (海拔 422.5 m) とそれに続く尾根に囲まれている。現在は水田となっている湖北部は余呉川の沖積地と考えられており (例えば、根来, 1956), 沖積層の層厚は 200 m 以上であると見積もられている (Nakao and Horie, 1975)。湖の東部には活断層である柳ヶ瀬断層が走っており、平行して流れている余呉川は断層線谷を成している (杉山ほか, 1993)。柳ヶ瀬断層は水平変位とともに垂直変位もみられ、相対的に余呉湖のある断層西側が沈降、断層東側が隆起 (武藤ほか, 1981) したことによって東側山地で侵食が激しくなり、その山麓に扇状地が形成されている。柳ヶ瀬断層のトレンチ調査を行った杉山ほか (1993) は、AD 1300 年代前半に柳ヶ瀬断層が活動し、それは 1325 年 (正中 2 年) の正中地震 (宇佐見, 1987) に相当する可能性を報告している。豪雨時に直接、余呉湖に流入した可能性のある余呉川上流域も含めた流域の地質は美濃・丹波帯の泥岩・チャートである

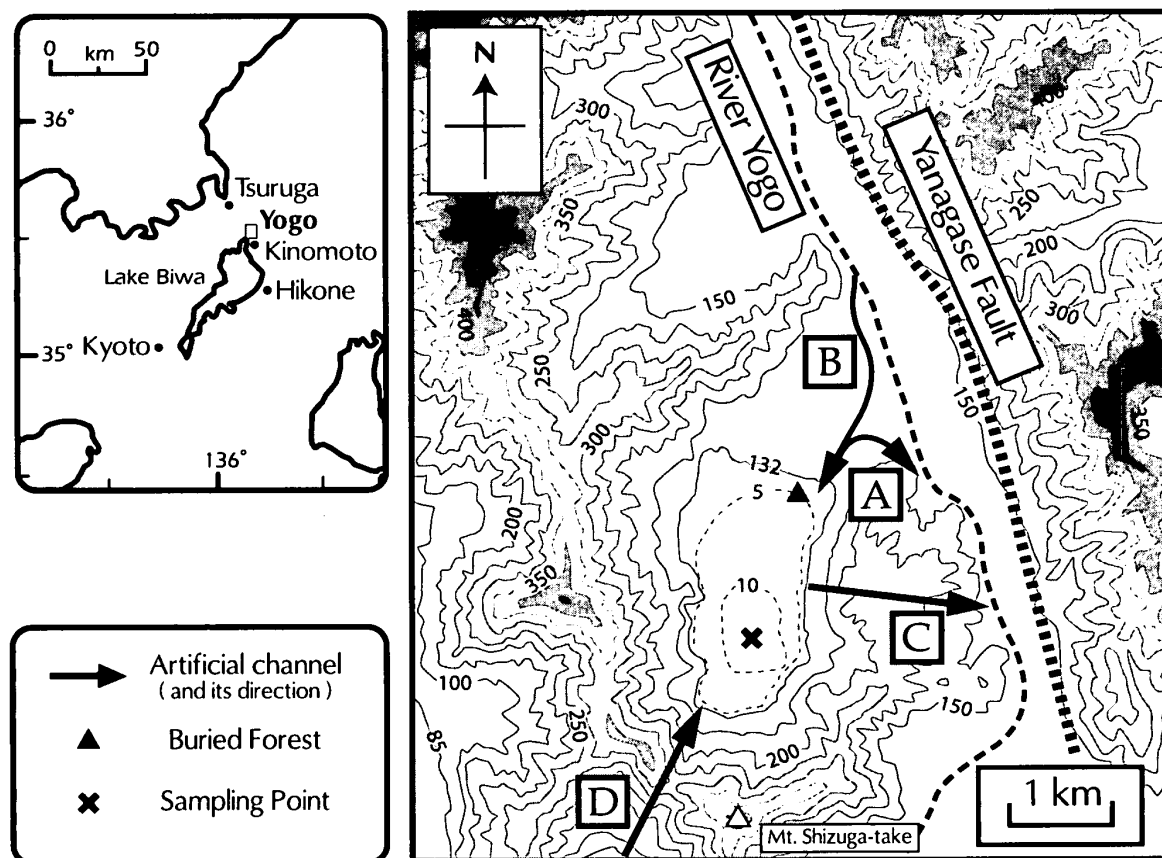


Fig. 1. Lake Yogo and its surrounding area.

Contour interval: - 50 m (land area); ... 5 m (lake area)

Table 1. Properties of Lake Yogo (Environment Agency Government of Japan, 1989).

Altitude (m)	Area (km ²)	Length of Shoreline (km)	Maximum Depth (m)	Mean Depth (m)
132	1.74	5.7	13.0	7.4

(地質調査所, 1994).

2.2. 気象・気候

余呉湖周辺で気象観測を行っている施設は、1) 滋賀県木之本土木事務所・余呉川管理課 (余呉湖北岸・1960～), 2) 彦根地方气象台・木之本観測所 (余呉湖南方4 km・1894～1978), 3) 彦根地方气象台・本署 (余呉湖の30 km南方・1894～) の3カ所である。ただし、2) 木之本の資料は欠測などの不備があるため本研究の資料としては用いない。

余呉湖の位置する滋賀県は、その地形の影響により日本海側の若狭湾から北西気流、大阪湾からの南西気流、伊勢湾からの南東気流が流入する (彦根地方气象台, 1993)。そのため北陸型、瀬戸内型、東海型の各気候区が重なり合う地域であり、気候の変化を反映する水文環境の鋭敏な変動が湖沼堆積物に記録されていることが期待できる。Fig. 2は余呉湖

北岸、および彦根において観測された降水量の月別変動（1966～1995）である。この2つの地点の距離は30 kmであるが、冬季の降水量の違いは顕著である。即ち、日本海側の気候要素が大きくなるか、それとも太平洋側の気候要素が大きくなるかによる冬季降水量の変化が顕著であることを示唆している。余呉湖流域（北岸）の年間降水量は2022 mm（1966～1995の平均）であり、降雪は概ね12月下旬から3月下旬まで認められる。

余呉湖流域の古気候を現在に伝えるものの一つに、湖底埋没林の存在が知られている。この、湖底埋没林は、1970年に余呉湖北岸、約50 m沖合の水深1.8 m地点（Fig. 1中▲）から発見された。Horie et al. (1975)によれば、その¹⁴C年代は2,780 ± 110 yrBP (c. 2,860 cal.yrBP)であり、このことは余呉湖では約3,000年前に湖水位が低下し湖盆が縮小したこと、言い換えれば、余呉湖は流出河川を持たないことから、湖水位低下は乾燥した時期の存在を示唆する。また、埋没林と同時に、一部加工痕の認められるクルミ・トチ・ハスの実10数個と縄文式土器2点が発見された。縄文式土器のうち1点は大津市の滋賀里I・II式との比定から縄文晩期初頭（約3,000年前）のものと推定されており（用田, 1985）埋没林の年代値と整合的である。

2.3 人工改変

余呉町（1991）によれば、最初の人工改変は、江戸時代（1604年・慶長9年）の新田開発や余呉川下流域の灌漑、および洪水調整を目的とする余呉湖と余呉川を連絡する人工河川（Fig. 1・矢印A）の開削である。この工事によって、余呉湖は史料で確認できる範囲では、初めて流出河川を持つようになり、流域面積は7.97 km²から余呉川本川流域を含めた35.37 km²になった。ただし、余呉川から余呉湖への直接流入が洪水時に発生していたことは、余呉湖北岸の平野部が余呉川の沖積地であることから容易に推測され、余呉湖北部の埋没林が粘土混じりの砂礫に埋まっていたこと（藤本, 1991）なども、それを支持している。さらに、歴史時代においても、余呉川から余呉湖への直接流入は文書に何度も記

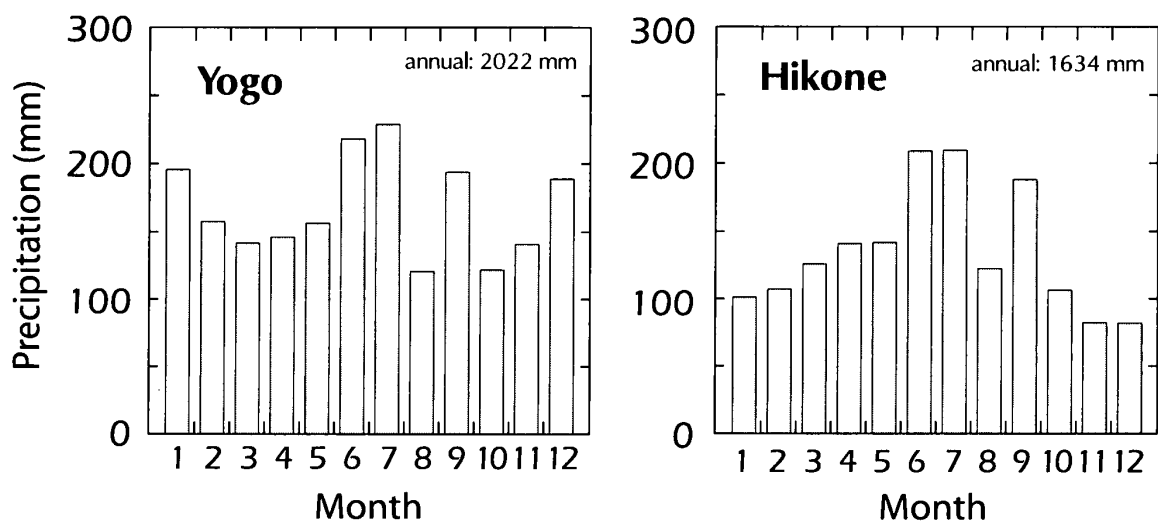


Fig. 2. Monthly precipitations in Yogo and Hikone (1966-1995).

録されている（余呉町，1995）。

近年には余呉湖を灌漑，洪水調整を目的とするダムとして使用するために，いくつかの大規模な人工改変（ダム化工事）が行われている。即ち，余呉川の途中に堰を設け，夏期の農業用水の確保，ならびに洪水時に余呉湖に水を貯留させるための導水路工事（Fig. 1・矢印 B），余呉湖の水を排出するための送水トンネル（Fig. 1・矢印 C）の掘削である。この結果 1960 年（昭和 35 年）から余呉湖の水収支が，人為的に管理・記録されるようになった。そして，1970 年からは渇水時の農業用水の確保のために琵琶湖から水を汲み上げるトンネル（Fig. 1・矢印 D）が掘られ，ポンプが設置されるようになった。

3. 手 法

3.1. 試料採取

今回の解析には，堆積後の物質の再移動の影響が最も小さいと考えられる湖最深部付近（Fig. 1中×）から，1996 年～1998 年にかけて採取された，表層コア（YGs 4），2 m コア（YG 4），4 m コア（YG 3）の 3 本のコアを用いた。4 m コアならびに 2 m コアは有効長 4 m の改良型 Mackereth 式ピストンコアサンプラー，表層コアは佐竹式重力落下型コアサンプラーで採取された。表層コア，2 m コアは主として観測時代における流域の水文環境の変動（特に降水量）がどのように湖沼堆積物に記録されるのかを解析する目的で採取された。4 m コアは 2 m コアと併せ，表層部の解析で得られた水文環境と物理量の関係を用いて，後期完新世における水文環境の変化を推定するために採取された。分割間隔は表層コアが 1 cm 間隔，2 m コアと 4 m コアは 2.5 cm 間隔である。

3.2. 分析

含水率は湿潤試料を 110 °C で 48 時間乾燥し，その操作で失われた水分量を重量百分率で表した。粒子密度は乾燥した試料を磁製乳鉢で鉍物粒子を破壊しない程度に粉碎し，再乾燥後にマイクロメリティクス（Micromeritics）社製のヘリウムガス置換方式の自動密度計 AccuPyc 1330 を用いて測定した。測定は 10 回行い，最大値と最小値をカットした 8 回分の平均値を粒子密度の値とした。強熱減量は，電気炉を用いて 750 °C で試料を 2 時間 30 分燃焼し，その際に失われた質量を重量百分率で表した。

堆積物試料の年代軸の導入は ^{137}Cs 法， ^{210}Pb 法， ^{14}C 法を用いた。 ^{210}Pb 法の適用にあたっては，流入フラックスが一定の場合に堆積物中ではその濃度が指数関数的に減少することを利用した CIC モデル（例えば，金井，2000）を用いた。

過剰 ^{210}Pb ， ^{137}Cs ， ^{40}K 濃度は，粉碎，乾燥済みの試料を外径 47 mm のペトリ皿に密封し金沢大学アイソトープ理工系実験施設の低エネルギー光子スペクトロメーターならびに高純度ゲルマニウム半導体検出器（EG&G, ORTEC 社製）で測定した。殆ど両核種が含まれない部分を除き，誤差が概ね 10 % 以下になる 100 カウント以上になるまで測定し，乾燥質量で規格化を行った。なお， ^{210}Pb の検出効率は 6.11 %， ^{214}Pb の検出効率は 3.04 %，分岐

比はそれぞれ 4.18 %, 36 % で補正を行った。 ^{14}C による年代測定は、コア分割中に発見した植物遺体を名古屋大学年代測定センターに設置されている TAMS において測定した。なお、 ^{14}C 年代値の暦年代補正は Stuiver et al. (1998) を基準としたプログラム「MacCALIB 4.1.2」を用いて行った。

粒度分析は鈹物粒子のみを対象とした。湖沼堆積物は一般的に流域起源の鈹物粒子と有機物質、湖内起源の無機物質（例えば生物起源シリカ）と有機物質に風成塵降下物、続成作用生成物質などが加わったもので構成される。この中で流域における侵食、運搬といった水文地形プロセスを反映するものは、主として鈹物粒子の物理量である。しかし、堆積物全体の粒度分析では、湖内で生産される生物起源シリカや有機物質の量が多い場合にそれらの影響を受け、粒径の大小が流水の状況（流域の物質移動環境）を直接反映していない場合が考えられる。そこで本研究では、生物起源シリカおよび、有機物質を除去した試料に対して粒度分析を行った。鈹物粒子の抽出は乾燥した試料 50 mg を用い、Mortlock and Froelich (1989) の方法を参考に 10 % $\text{-H}_2\text{O}_2$ で有機物質の除去を行い、2 M $\text{-Na}_2\text{CO}_3$ で生物起源シリカの溶解を行い、残った試料を鈹物粒子と見なして粒度分析用試料とした。また、湖内の生物生産量指標の一つである生物起源シリカの定量も行った。この量は溶けている生物起源シリカをモリブデン酸アンモニウムで発色させ、あらかじめ作成しておいた検量線を用いて重量百分率で定量した。鈹物粒子の抽出過程において、1 N-HCl を用いることにより Fe (II) を含む粘土鈹物（例えば chlorite など）の溶解が危惧された。しかしながら、4 m コアにおいて、25 cm 間隔で試料 15 点を選び西條・三田村 (1995) を参考に 1 N-HCl に溶解した鉄を定量したところ、全重量に対し 1 % 前後であり、粒度分析結果に深刻な影響を及ぼさないことが確認された。また、X 線の回折強度からは chlorite や illite はほとんど溶解しておらず、溶解したのは ferrihydrite などの amorphous なものであることが示唆された。これらのことから、塩酸処理における粒度分析への影響はほとんど考慮しなくて良いと考えられる。粒度分析は、レーザー回折式粒度分布測定装置「SALD-2000 J」（島津製作所製）を用いた。分散剤にはヘキサメタリン酸ナトリウム (0.2 wt %), 分散媒には蒸留水を用い、物理的な分散は試料の固結・非固結を問わず超音波で 5 分間震盪させた。

自然残留磁化（磁化強度、偏角、伏角）の測定はコア層序の対比のために行った。

4. 結 果

分析の結果は Fig. 3 に示す。ただし、年代測定のうち ^{137}Cs 法、 ^{210}Pb 法の結果の提示、解釈は次節で行う。 ^{14}C の年代値ならびに暦年代補正值は Table 2 に示す。

含水率は、一般に圧密の影響でコアの下方に向かって緩やかに減衰をする傾向を持ち、余呉湖のコアにおいても同様であった。また、極端に低い値 (20 % 程度) は湖沼が一時的に陸化したことを示唆する (Kashiwaya et al., 1995) が、余呉湖コアからはそのような状

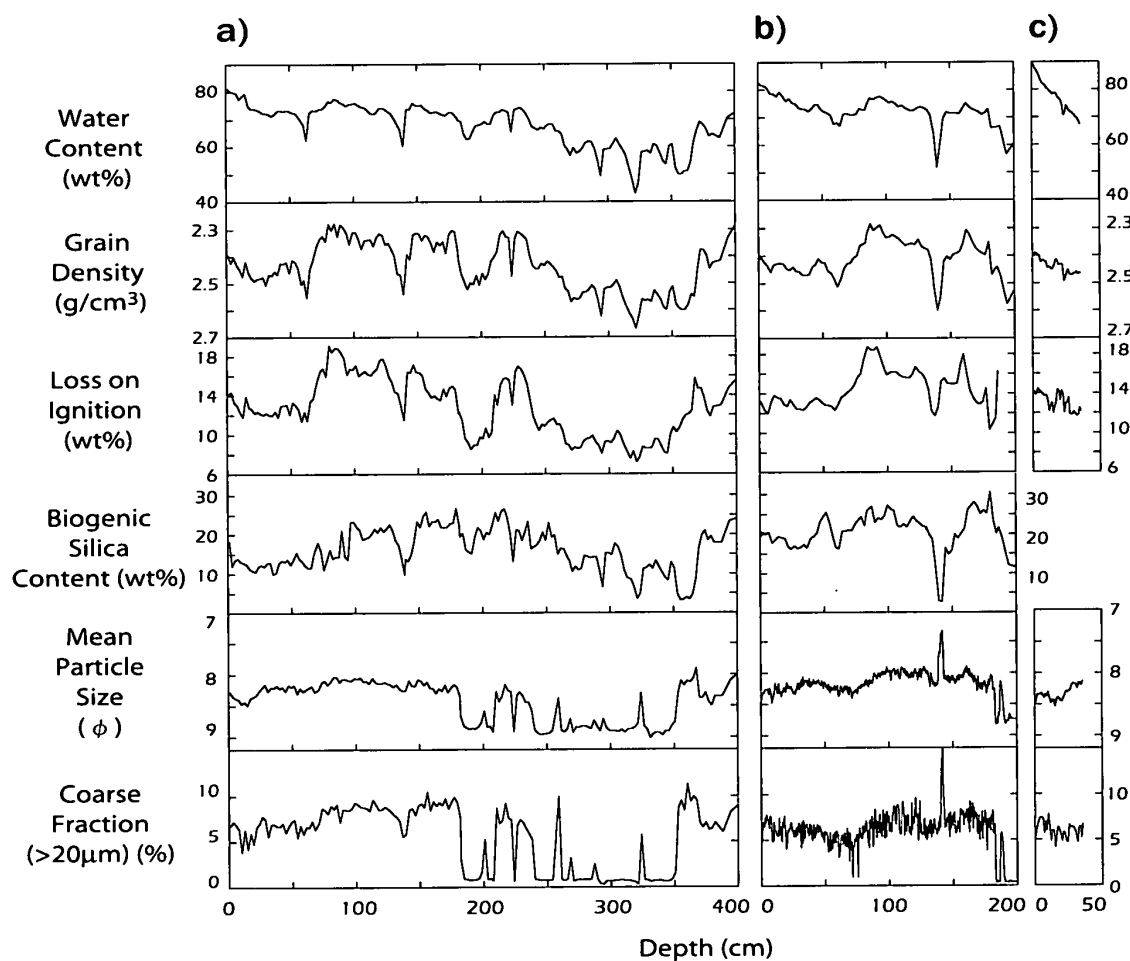


Fig. 3. Physical properties of a) 4 m core, b) 2 m core and c) Surface core.

Table 2. Radiocarbon dates in 4 m core.

Depth (cm)	Materials	¹⁴ C Age (yrBP)	Calibrated Age (cal. yrBP)	NUTA No.
139	Organic fractions	1,020 ± 150	932 ± 150	5901
394	Organic fractions	4,024 ± 90	4,475 ± 90	5178

況は認められなかった。粒子密度は、一般に鉱物粒子、有機物質、生物起源シリカの混合割合を反映する量であると考えられるが、周辺の値に対して異常に密度が高く、含水率の低下を伴う場合には洪水イベントなどによる何らかの堆積異常の存在（太井子・柏谷，1993）が示唆される。強熱減量は、生物起源シリカ量と同様な変動を示し、これら2つの量が増加するときに粒子密度は減少することが認められた。

粒度分析の代表値として平均粒径と粗粒物質の量を採用した。これまでの湖沼堆積物を用いた水文地形環境復元に関する研究の多くは、粗粒物質の閾値として、4 φ (63 μm)（例えば、柏谷ほか，1988）や4.5 φ (45 μm)（例えば、柏谷，1992）を採用してきたが、本研究では以下の理由により20 μmを採用した。それは、余呉湖の鉱物粒度分布が20

μm を鞍部とするバイモーダルな分布を示すこと、余呉湖近傍の琵琶湖の湖沼堆積物中の $20\mu\text{m}$ 以上の石英粒子は周辺地域起源であると推測されている (Xiao et al, 1997) ことによる。粒度は 180 cm 付近を境に最下部を除くと 2 つに分かれる。2 m コアの 140 cm 付近は、含水率、強熱減量、生物起源シリカ量が極端に低下し、粒子密度が周囲と比較すると高くなり、平均粒径は極端に大きく、粗粒物質も併せて激増する。

5. 議 論

5.1. 表層堆積物と観測時代の水文環境 — 2 m コア, 表層コアの結果から —

5.1.1. 人工改変と流域の水文環境

2 m コア, 表層コアの ^{137}Cs , ^{40}K , 過剰 ^{210}Pb 濃度, 平均粒径 (2 m コア) を Fig. 4 に示す。圧密の影響を除去するために、深度は単位面積あたりのコア最上部からの積算質量で表した。

まず, ^{137}Cs 濃度 (Fig. 4a, b) に注目すると、それぞれ深度 1.7g/cm^2 (8 cm), 2.8g/cm^2 (14 cm) 付近にみられる濃度の最大値は ^{137}Cs のフォールアウトが最大であった 1963 年 (例えば, Katsuragi, 1983) に対応すると考えられる。次に, ^{210}Pb の濃度変化 (Fig. 4c, d) をみると、1963 年の直前に屈曲し、この時を境に堆積速度が顕著に変化したことを示している。これは余呉湖のダム化工事が完了 (1960 年) し、水文環境が変化した時期に対応する。また、Fig. 4 は ^{210}Pb の濃度変化が屈曲点を境に直線的、つまり指数関数的に減少していること、 ^{40}K 濃度は各深度ともほぼ一定であることから、漁業や水質対策などによる人的擾乱や湖棲生物による影響は少ないということも示唆している。

そこで, ^{210}Pb で得られた年代を基に、ダム化以前、以降の堆積速度を鉱物粒子について算出した。鉱物粒子のみに限定したのは、湖内の生物生産の影響を除去することによって、流域で生産された物質の余呉湖への流入量の変化がより鋭敏に示されると考えたからである。ダム化以前の 66 年間 (1894–1959) では $17\text{mg/cm}^2/\text{yr}$ であった堆積速度は、ダム化工事を境に $54\text{mg/cm}^2/\text{yr}$ (1960–1998) へと増加した。この堆積速度の増加は、ダム化によって余呉湖に流入可能な水量が集水面積換算で 3.6 倍になっていることとも調和的である。つまり、流域における地形改変などの人間活動は水文環境の変動として堆積物に記録されているわけである。

5.1.2. 降水量と粒度

これまでに湖沼堆積物の粒度が降水量に対応するという事は数多く報告されており (例えば, Yamamoto, 1984), ある閾値以上の雨量には、ある閾値以上の粒径の含有量に対応することも報告されている (Kashiwaya et al., 1991 b)。こうした既存の研究で得られた知見の精度を高めるためには、観測時代を含めた降水量の定量的かつ連続的变化を推定する方法を確立しなければならない。従って、ここでは観測時代の降水量も含めた比較的新しい時代における降水量の粒度に基づいた推定法の導入を試みた。

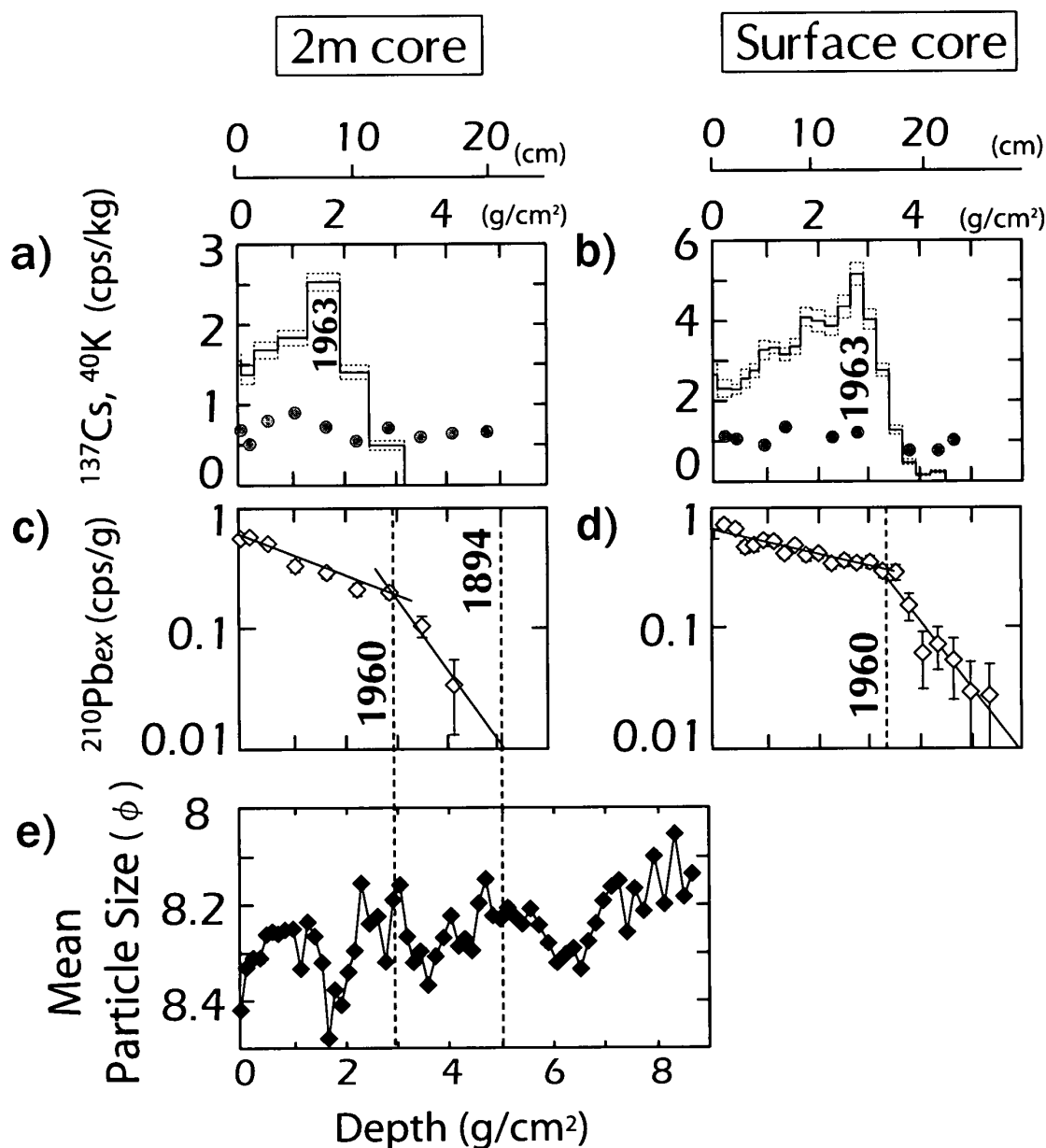


Fig. 4. a), b) Changes in concentration of ¹³⁷Cs (solid line) and ⁴⁰K (solid circle). Dashed lines indicate error of ¹³⁷Cs. c), d) Changes in concentration of ²¹⁰Pb_{ex}. Solid line is regression line for each part. e) Changes in mean particle size in 2 m core.

本研究においては、ダム化工事（1960年）以前に限定して降水量と粒度の関係を検討した。なぜならダム化工事以降は、流出河川を持つようになるなど、水文環境が大きく変化しているの同一の基準で議論ができないからである。まず第一近似的な関係を検討するために、降水量には年間降水量を、粒度は平均粒径を用いて議論を進めることにした。

降水量の資料は、余呉湖流域での観測はダム化工事以降に開始されているので、彦根で観測されたものを用いた。彦根と余呉湖流域では月別の降水パターンは特に冬季を中心に異なる（Fig. 2）が、年間降水量の変動傾向は同一傾向を示す（Fig. 5）。そこで、余呉湖流

域のダム化前の降水量資料は彦根と余呉湖流域の降水量から直線回帰式を作成し推定した。コアの年代軸は、 ^{210}Pb 法を用いて導入した (Fig. 4e)。

さて、Fig. 6a, bは上述の方法で得られた、余呉湖流域における1896年から1960年までの年間降水量の変動と2 m コアの平均粒径を比較したものである。この区間の粒径の資料が1試料あたり約5年分の情報を含むと推定されるので、降水量はそれに合わせて5年ずつ、13区間の平均値で示した。この図からは、両者に良い相関関係があり、また粗粒な粒子が堆積している部分は降水量が多い時期に、細粒な粒子が堆積している部分は降水量が少ない時期に対応していることがわかる。つまり、ここでは平均粒径の変動は降水量の変動を示しているのである。このことは、余呉湖最深部付近で採取されたコアの鉱物粒子粒度の変動は、観測記録が存在しない時代の降水量相当資料 (proxy) として使うことができるのではないか、ということを示唆している。

5.2. 後期完新世の水文環境 — 4 m コアの結果から —

次に観測時代を含めた後期完新世の水文環境の変動を検討しよう。この検討には、最も長い4 m コア (YG3) を用いた。このコアには ^{14}C 年代が2点入っており (Table 2)、2 m コアとの対応からダム化工事 (AD 1960年) に相当する部分も推定できるので、表層部 (AD 1996年) を含め4点の年代ポイントを使って年代軸の導入を行った。堆積速度は各年代ポイント間で一定と仮定し各々の試料の年代を決定した。

Fig. 7には4 m コアから得られたa) 平均粒径、およびb) 粗粒部 (20 μm 以上) の割合、

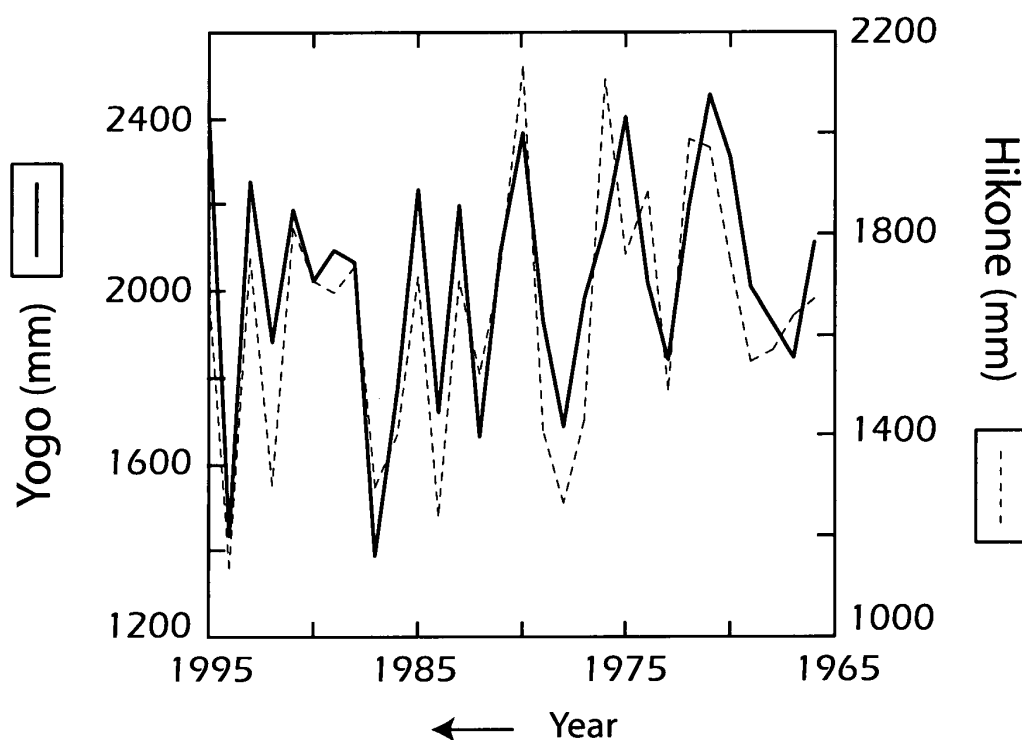


Fig. 5. Annual precipitations in Yogo and Hikone (1966–1995).
Solid line; observed in Yogo, dashed line; observed in Hikone.

c) 生物起源シリカ量, d) 強熱減量の変動をそれぞれ示した. 堀江・三宅 (1971) は, 6 m コア試料の全堆積物粒度分析, 有機炭素量測定から, 有機物質が多い部分には粗粒粒子 (4ϕ 以上) が多く, 有機物質が少ない部分には粗粒物質が少ないことを報告している. 同様の傾向は本研究の 4 m コアでも認められた (Fig. 7b, d).

ここで a) および b) のグラフに示した平均粒径や粗粒部の割合は, AD 700 年頃を境に大きく変化している. これはこの時期に水文レジームが大きく変化したことを示唆する (本小論では, ある水文環境が一定程度継続する体制を水文レジームと呼ぶことにする). BC 1800 年前付近においても, 水文環境の変化が認められるので, それ以降を議論の対象とし, 表層から BC 1800 年前までに二つの水文レジームを設定し, それぞれ Regime-1, Regime-2 とした.

AD 700 年頃の急速な水文環境の変化は, それまでの Regime-2 に対して, 新たな水文レジーム (Regime-1) を形成し, それは比較的最近まで続くことになる. こうした水文レジームの変化と降水量には密接な関係があると考えられるが, これに関しては以下のような可能性が考えられる. 即ち, 流出河川を持たない余呉湖では, 湖水位の低下は乾燥相の存在を示す (Horie et al., 1975) というに従えば, 埋没林の年代である BC 910 年頃 (Fig. 7a) は降水量の少ない時期に対応する. 埋没林の時代を含めた AD 700 年頃までの時代は降水量が少なく, 流域内の侵食力, 運搬力が小さかったため, 結果的に粒径の小さいものが堆積し (Regime-2), 一方, AD 700 年以降の粒径の大きい時期は降水量の多い時期に対応する可能性がある.

AD 700 年頃の降水量変動の記録は古文書などの史料には残されていない. しかし, 気温はこの時期に大きく変化したという報告がある. 例えば, 山本 (1976) は和歌に詠まれた櫻の満開日の記録を基に, AD 750 年頃に冷涼な気候から温暖な気候に推移したことを指摘している. また, 尾瀬ヶ原のハイマツ花粉の消長から気温変動の推定を行った阪口

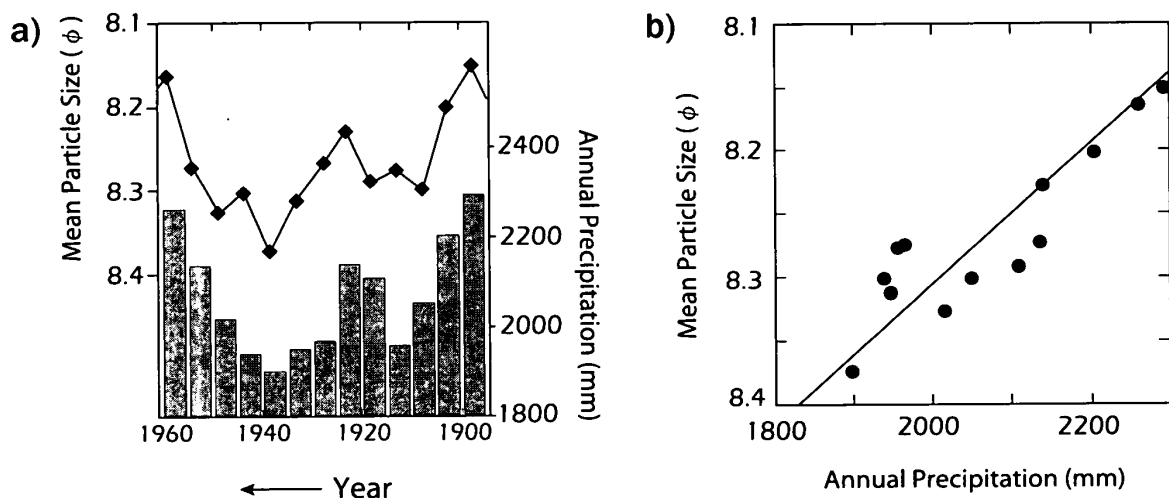


Fig. 6. Relationships between mean particle size and annual precipitation in Lake Yogo (1896-1960).

(1993) も, AD 732 年付近を寒冷期から温暖期への変移点としている. 水文レジームの変化には, このような気温の上昇が関与している可能性もあろう.

また, 柳ヶ瀬断層に関する地震などの地殻変動に関する直接的な記録は残されていないが, 宇佐見 (1987) は AD 745 年 (天平 17 年) に美濃において発生したと考えられる推定マグニチュード 7.9 の地震を報告している. この地震では摂津においても 20 日間余震が止

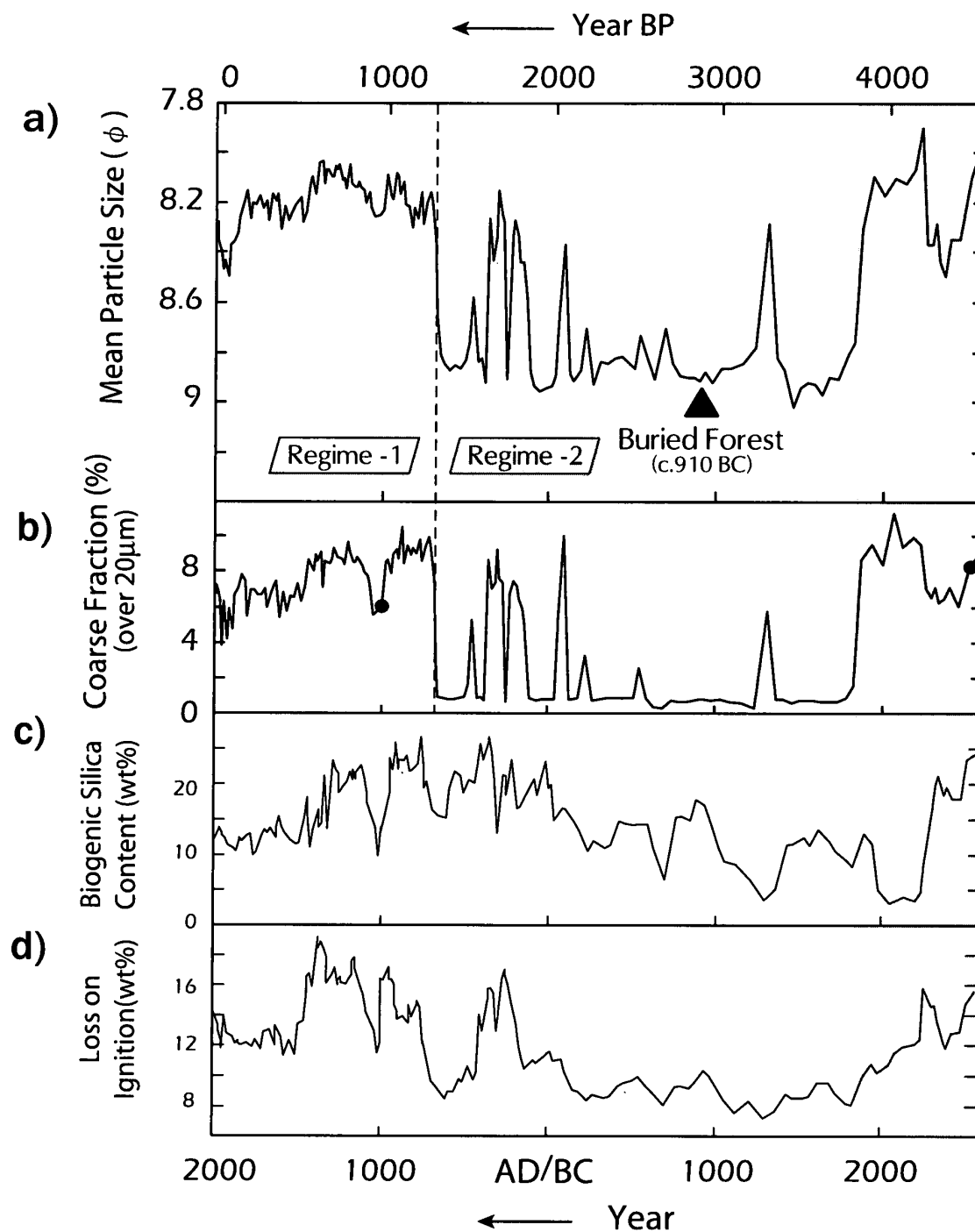


Fig. 7. Fluctuations in a) mean particle size, b) coarse fraction (20 μ m over), c) biogenic silica content and d) loss on ignition in 4 m core. Vertical dashed line indicates the boundary of hydrological regime in Lake Yogo. ●; 14 C dating point.

まなかったことが記録されている。さらに人為的な改変として、AD 701年の大宝律令を契機に日本全国で条里制が展開されたのもこの時期である。余呉湖周辺に関しては大規模な条里制が展開された記録はないが、坪単位の地割での区画整理が行われたことは推定されている(余呉町, 1991)。このように、今回検出されたAD 700年頃の余呉湖の湖沼一流域系における水文レジームの劇的な変化は、この時期における気候変動、地殻変動、人間活動のいずれとも関係している可能性があり、今後のさらなる検討が必要である。

5.3. 歴史時代の降水量変動

歴史時代のうちで現在と同様の水文レジームであった Regime-1に対応する時代を対象として降水量の変動を考えてみよう。ここでは、Fig. 6で示された粒径-降水量の関係がそれ以前にも適用できるものとして、歴史時代の降水量の変動について推定してみる。この推定にも2mコアを用いたが、このコアの深度45 g/cm²(140 cm)前後に粒径が周囲の値と比べて非常に粗粒な堆積異常層が存在する(Fig. 8)。現時点でその原因を特定することが不可能なため、異常層よりも上部のみを対象とした。そして、2mコアの堆積年代は¹³⁷Cs法、²¹⁰Pb法により推定された年代、また、それによって推測された人工改変の時期(Fig. 4)ならびに、¹⁴C年代値が挿入されている4mコアのとのピークマッチング(Fig. 8)により推定された年代値を用い、各々の間の堆積速度は一定のものとして推定した。また、得られた年代値を用いて2mコア、4mコアのNRMの各要素(磁化強度、偏角、

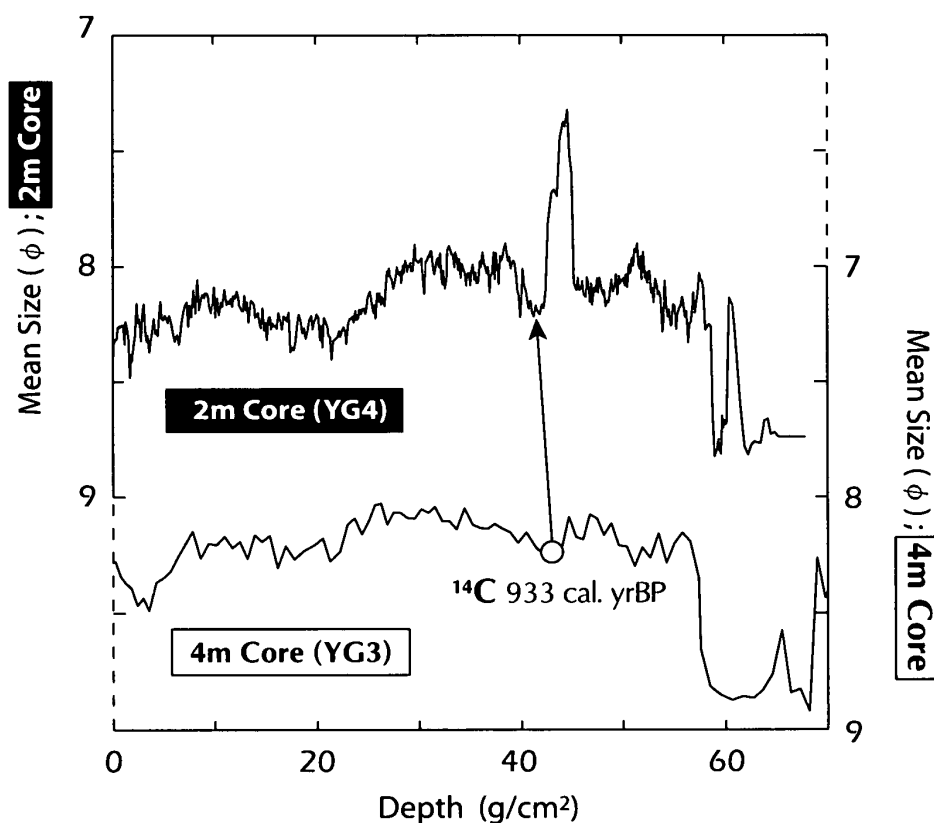


Fig. 8. Mean size of 2 m core and 4 m core.

伏角)を Hyodo et al. (1993) で得られている余呉湖で採取された 10 m コア (YG 1) と比較したところ, コア相互間でその変動パターン, 年代は概ね一致した。

Fig. 9は Fig. 6で示された粒径-降水量の関係を用いて, 余呉湖流域の過去約 1,000 年の降水量変動を定量的, かつ連続的に推定したものである。11 世紀初頭に 2,200 mm 程度だった降水量は徐々に増加し, 中世温暖期後半の 12 世紀 (鎌倉時代) には 2,500 mm 程度になる。そして, 14 世紀後半から降水量は減少し始めて 16 世紀 (室町時代) には現在 (約 2,000 mm) と同程度になるが, いわゆる, 小氷期に入る 17 世紀初頭から再び降水量は増加し 18 世紀 (江戸時代) には 2,200 mm 程度になり, その後, 徐々に減少しながら現在に至ったと推測される。

中部日本における歴史時代の乾湿変動は, 小氷期は相対的に湿潤傾向, 中世温暖期は乾燥傾向 (例えば, 阪口, 1993) とされていた。しかし, 水月湖から得られた, 若狭湾地域での乾湿変動では, 中世温暖期は湿潤傾向との報告 (福沢ほか, 1995) もある。本研究においても, 余呉湖流域では中世温暖期は相対的に小氷期よりも湿潤であるとの結果が得られた。これは, 余呉湖流域が現在, 日本海側の気候と太平洋側の気候との境界に位置することが多分に影響していると考えられる。例えば, 雨よりも雪の方が一般に侵食力は小さ

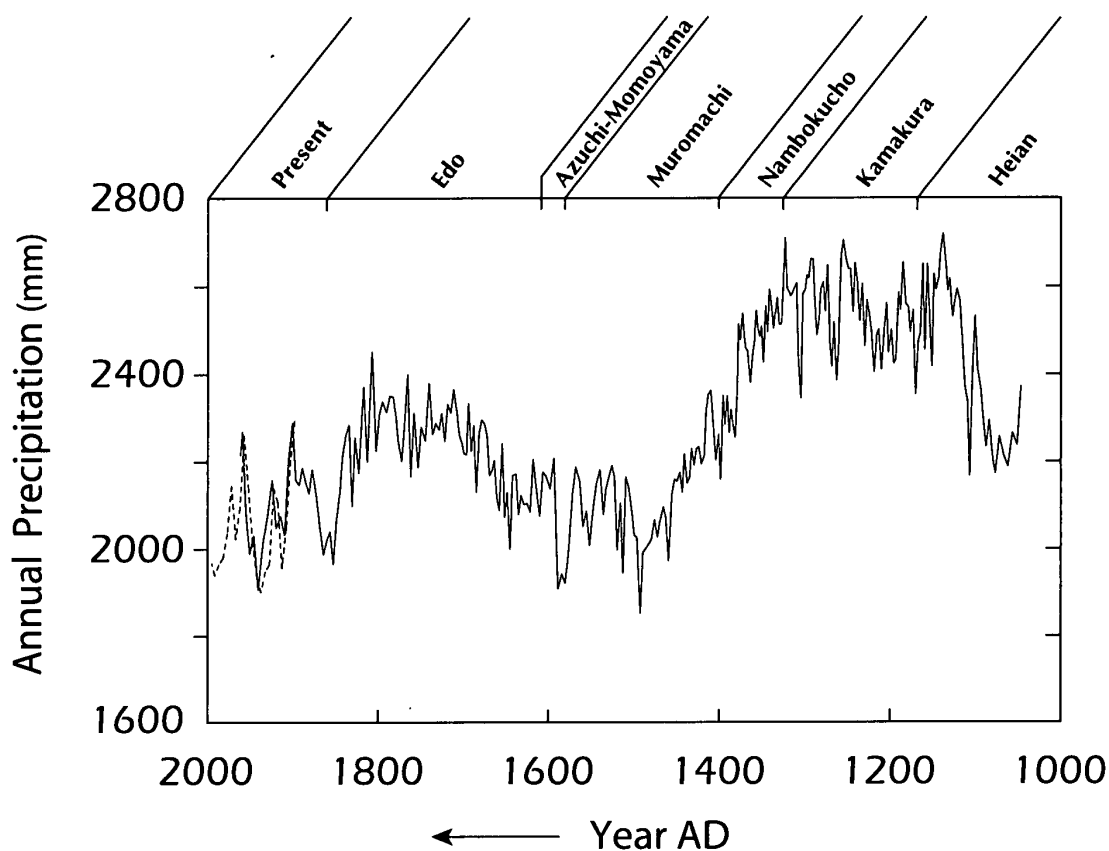


Fig. 9. Fluctuation in precipitation during the past 1,000 years in Yogo "lake-catchment" system. Solid line; estimated by particle size of sediment. Dashed line; data observed.

いと考えられることなどから考えても、気温の変化に伴い冬季の降水が雨として供給されるのか、雪として供給されるのか、という点は、余呉湖流域がその時代において日本海側的な気候、太平洋側的な気候のどちらがより卓越しているのか、ということよりも重要であると思われる。即ち、歴史時代の降水量の定量的かつ連続的な推定の精度向上のためには、まず降水の量、質（雨・雪）や強度と物質移動との関係を明らかにしなくてはならないであろう。また、こういった精度向上のために今回は取り上げることが出来なかった洪水時などのみに隣接流域から流入する物質の量の見積もりや、風成塵降下物と現地性碎屑物の分離も課題の一つになるとと思われる。

6. まとめと今後の課題

余呉湖から得られた湖沼堆積物試料の解析から、以下の結果が得られた。

- 1) 流域の人間活動、即ちダム化工事などの人工改変は水文環境に影響を与え、その変化は湖沼堆積物に記録されている。
- 2) 観測時代における有機物質、生物起源シリカを除去した粒子の粒径は観測から得られた降水量の変動に対応する。例えば、粒径が大きいときには降水量が多く、小さいときは少ない。
- 3) 余呉湖流域の水文環境はAD 700年頃に、流水の少ないレジームから、流水の増加するレジームに変化する。
- 4) 2で得られた降水量と粒度の第一近似的な関係が歴史時代において有効であると仮定するならば、余呉湖流域の降水量は中世温暖期後半が2,500 mm程度、小氷期には2,200 mm程度であり、現在（約2,000 mm）よりも降水量は多かったものと推測される。

このように、余呉湖の湖沼一流域系では降水量の変動という入力、堆積物に粒径の変動として出力されていることが示された。また、第一近似的だが、歴史時代の余呉湖流域における降水量の定量的かつ連続的な変化が明らかになった。しかしながら、粒径と降水量の因果関係を明らかにするためには、水文過程、流域過程に関する知見が不可欠である。さらに堆積過程に関する検討も必要である。つまり、余呉湖全湖域における堆積物（堆積速度、粒径など）と流域や湖盆の地形（集水面積、傾斜、湖沼への流出地点）との関係を解析し、削剥された物質がどのようなプロセスで湖内に流入し、堆積するのか検討しなければならない。同時に、堆積による湖盆地形の変化、侵食、運搬作用による流域地形の変化も考えていかなければならないと思われる。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、金沢大学自然計測応用研究センター助手、長谷部徳子博士、福井大学教育地域科学部（現所属、慶熙大）、田中幸哉助教授には調査などの際にお世話

になりました。試料採取，分析，解析に関しては金沢大学理学部水文地形環境研究室・熱年代学研究室や金子雅一君をはじめとする神戸大学理学部地球惑星科学科の学生諸氏のお世話になりました。また，金沢大学理学部地球学教室の教官各位にも多くの助言を頂きました。さらに資・史料提供，試料採取については滋賀県木之本土木事務所余呉川管理課，滋賀県伊香郡余呉町，彦根地方気象台防災業務課，余呉川管理事務所，余呉町教育委員会，余呉町余呉町誌編纂室の白崎金三氏，余呉湖漁業協同組合の皆様大変お世話になりました。ここに記して感謝申し上げます。

引用文献

- 地質調査所 (1994) 柳ヶ瀬-養老断層系ストリップマップ：構造図，10.
- 藤本秀弘 (1991) 余呉町の地形と地質：「余呉町誌」通史編上巻，余呉町誌編纂委員会，1-22.
- 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，104，52-64.
- 彦根地方気象台編 (1993) 「滋賀県の気象」：大蔵省印刷局，215 p.
- 堀江正治・三宅秀男 (1971) 粒度分析から推定される余呉湖の発達史：京都大学防災研究所年報，14 B，763-769.
- Horie, S., Kanari, S. and Nakano, K. (1975) Buried forest in Lake Yogo-ko and its significance for the study of past bio-environment : Proc. Japan Acad., 51 (No. 8).
- Hyodo, M., Itota, C. and Yaskawa, K. (1993) Geomagnetic secular variation reconstructed from magnetizations of wide-diameter cores of Holocene sediments in Japan : J. Geomag. Geoelectr., 45, 669-696.
- 金井 豊 (2000) 鉛-210 堆積年代測定法とその問題点：地球化学，34，23-39.
- 環境庁編 (1988) 「日本の湖沼環境」：大蔵省印刷局，196 p
- 柏谷健二・太井子宏和・川谷 健・沖村 孝 (1988) 六甲山系の湖沼堆積物の粒度組成の変動と崩壊環境：地形，9，193-200.
- Kashiwaya, K., Yaskawa, K., Yuan, B., Liu, J., Gu, Z., Cong, S. and Masuzawa, T. (1991a) Paleohydrological processes in Siling-co (Lake) in the Qing-Zang (Tibetan) plateau based on physical properties of its bottom sediments : Geophys. Res. Lett., 18, 1779-1781.
- Kashiwaya, K., Fukuyama, K. and Yamamoto, A. (1991b) Time variation in coarse materials from lake bottom sediments and secular paleoclimatic change : Geophys. Res. Lett., 18, 1245-1248.
- 柏谷健二 (1992)：地形形成営力の変動とミランコヴィッチサイクル. 安成哲三・柏谷健二 (編)：「地球環境変動とミランコヴィッチサイクル」，古今書院，東京，53-67.
- Kashiwaya, K., Masuzawa, T., Morinaga, H., Yaskawa, K., Yuan, B., Liu, J., and Gu, Z. (1995) Changes in hydrological conditions in the central Qing-Zang (Tibetan) Plateau inferred from lake bottom sediments : Earth Planet. Sci. Lett., 135, 31-39.
- 柏谷健二 (1996) 流域における地形環境の変動と湖沼の堆積環境：地形，17，265-274.
- Katsuragi, Y. (1983) A study of ⁹⁰Sr fallout in Japan : Pap. Met. Geophy., 33, 277-291.
- Mortlock, R.A. and Froelich, P.N. (1989) A simple method for rapid determination of biogenic opal in pelagic marine sediments. : Deep-Sea Research, 36, 1415-1426.
- 武藤 章・豊蔵 勇・松浦一樹・池戸正行 (1981) 活断層調査の例-柳ヶ瀬断層：応用地質，22，32-51.
- Nakao, K. and Horie, S. (1975) Sedimentary structure near Lake Yogo inferred from electrical depth sounding : Palaeolimnology of Lake Biwa and the Japanese Pleistocene, 3, 71-75, Otsu Hydrobiol Station, Kyoto Univ., Otsu, Japan.
- 根来健一郎 (1956) 余呉湖の湖底堆積物中の硅藻殻：陸水学雑誌，18，134-140.
- 阪口 豊 (1993) 過去 8000 年の気候変化と人間の歴史：専修人文論集，51，79-113.
- 西條八束・三田村 緒佐 武 (1995) 「新編 湖沼調査法」：講談社サイエンティフィック，238 p.

- Stuiver, M., Reimer, P. J., Bard, E., Beck, J. W., Burr, G. S., Hughen, K. A., Kromer, B., McCormac, F. G., v. d. Plicht, J., and Spurk, M. (1998) INTCAL 98 Radiocarbon age calibration 24,000-0 cal BP. *Radiocarbon*, **40**, 1041-1083.
- 杉山雄一・栗田泰夫・佃 栄吉・吉岡敏和 (1993) 1992年柳ヶ瀬断層 (椿坂地区) トレンチ調査：活断層研究, **11**, 100-109.
- 太井子宏一・柏谷健二 (1993) 琵琶湖湖底表層の堆積異常：月刊地球, 号外, **8**, 123-127.
- 宇佐見龍夫 (1987) 「新編 日本被害地震総覧」：東京大学出版会, 434 p.
- Xiao, J., Inouchi, Y., Kumai, H., Yoshikawa, S., Kondo, Y., Liu, T., An, Z. (1997) Fluvial Quartz Flux to Lake Biwa of Central Japan over the Past 145,000 Years：第四紀研究, **36**, 17-27.
- Yamamoto, A. (1984) Grain size variation: in Horie, S., ed., *Lake Biwa*, Dr. Junk Pub., Dordrecht, 439-459.
- 山本淳之・柏谷健二・福山 薫 (1992) 琵琶湖の堆積過程と古水文環境：「地球環境変動とミランコビッチ・サイクル」(安成哲三・柏谷健二 編), 第7章, 112-125, 古今書院.
- 山本武夫 (1976) 「気候の語る日本の歴史」：そしえて文庫, **4**, 245 p.
- 余呉町 (1991) 「余呉町誌」 通史編上巻：余呉町誌編纂委員会, 611 p.
- 余呉町 (1995) 「余呉町誌」 通史編下巻：余呉町誌編纂委員会, 728 p.
- 用田政晴 (1985) 余呉町埋蔵文化財発掘調査報告書 1 - 余呉湖底遺跡・松田遺跡：余呉町教育委員会・財団法人滋賀県文化財保存協会.