

## 湖沼一流域系から推定する地球環境変動

柏谷健二<sup>1</sup>・糸野妙子<sup>1</sup>・落合伸也<sup>1</sup>・石川一真<sup>2</sup>・長谷部徳子<sup>1</sup>

### Environmental changes in the earth surface inferred from lake-catchment systems

Kenji KASHIWAYA<sup>1</sup>, Taeko ITONO<sup>1</sup>, Shinya OCHIAI<sup>1</sup>,  
Kazuma ISHIKAWA<sup>2</sup> and Noriko HASEBE<sup>1</sup>

#### Abstract

Earth surface environmental changes printed in lacustrine sediments are introduced for the two time-windows (the long interval after the middle Pleistocene and the short one after the little ice age). Lake Baikal and Lake Biwa systems are picked up for the long interval discussion; temperature-related proxies for the two systems indicate similar fluctuations synthesized with solar insolation. Precipitation (discharge)-related proxy for Baikal system shows a similar fluctuation to the temperature-related proxies while the proxy for Lake Biwa shows a fluctuation different a little from the insolation-related one, with different periods. Sediment information from Oshima-Onuma lake-catchment system picked up for the short interval discussion shows clear cold period in the Maunder minimum period and more precipitation in the late little ice age (till the end of 19<sup>th</sup> century).

**Key words:** *lake-catchment system, sediment information, precipitation, climatic change*

キーワード：湖沼流域系，堆積物情報，降水量，気候変動

#### 1. はじめに

近年の東アジア地域における地表環境変動における大きな課題は地殻変動（地震活動や火山活動等），気候変動（豪雨災害等）そして人間活動（人工地形改変等）に関わるものであるが，この背景には地球温暖化問題のみならず東アジア地域での経済活動の拡大（中国東北部，朝鮮半島，極東ロシア，モンゴル）や資源問題（水・鉱物等）も大きく関係し

---

2018年6月30日受付，2018年7月31日受理

<sup>1</sup> 金沢大学環日本海域環境研究センター（〒920-1192 石川県金沢市角間町）

<sup>1</sup> Institute of Nature and Environmental Technology, Kanazawa University, Kakuma, Kanazawa, Ishikawa 920-1192, Japan

<sup>2</sup> 金沢大学大学院自然科学研究科（現ジャパンパイル（株））（〒920-1192 石川県金沢市角間町）

<sup>2</sup> Graduate School of Natural Science and Technology, Kakuma, Kanazawa, Ishikawa 920-1192, Japan

ている。越境汚染に関する懸念も含めて、この地域で共有すべき環境問題への関心は高まり、各種の研究交流は活発である。一般にこの地域における環境問題の深刻さは理解されてきているが、政治・社会・経済的な制約もあり、関係各国の系統的な資料収集・観測・地表プロセスの理解には大きな差異がある。しかしながら、今後グローバルなシステムの変更（温暖化等）が懸念されている環境への対応を考える場合には、これらの地域での地表プロセスの解明・資料収集等やその巨視的な背景に関する知見の獲得も喫緊の課題である。

想定される環境変動の定量的推定やその対応策には、現在や観測時代の諸資料（主として変動とそれへの応答に関する）のみならず、それ以前の環境変動とそれへの応答に関する諸資料は不可欠である。つまり、過去の環境に関する代替資料（観測時代以前の資・史料）の入手・検討、そしてその定量化（“観測記録”化）が必須の条件である。即ち、観測記録と定量化された代替記録を接続し、プロセスの理解に基づいて“観測”された環境変動を解明し、それらを環境管理計画の中で活用する必要がある。現行の環境システム（間氷期）にはいくつかのサブシステム（中世温暖期・小氷期等）が含まれているが、東アジアの歴史時代の記録には、小氷期中期以降の朝鮮王朝における観測記録が含まれ、その後の測器による観測時代に接続する。これは代替記録を“観測記録”へ変換するための重要な利点となる。

この地域には、朝鮮半島や日本列島のように歴史時代の詳細な記録が残されているとともに、19世紀後半以降における北海道や台湾の急速な人口増加・土地改変、朝鮮半島の土地利用変化、日韓両国や台湾における戦後の高度経済成長そして近年における中国の急激な経済発展・土地改変等と、大規模な地形改変・都市化等、人間と自然の関わりに関するあらゆる環境の変化が認められる。さらにモンゴルのように社会主義化による人為的自然改造とその放棄、そして近年の都市集中化が大きな環境変動をもたらした地域が存在し、また自然環境の変動（特に自然災害）への対応が記録として残されている地域も存在している。

また、東アジアでは長期の日射量変動に敏感な中緯度陸域（Short et al., 1991）に長期の環境情報が記録されている古代型湖沼が存在し、第四紀気候変動に関する詳細な情報が復元されている（Kashiwaya et al., 1991; 2001; BDP members, 1997; 1998）。観測時代・歴史時代の環境変動との直接的な対応は困難であるが、氷期・間氷期の変動等大きな枠組みの変更が地球、とりわけ地球表層部への大きな影響を与えてきたことは間違いのない事実であり、短期の環境変動のプロセスの解明が長期変動の理解に貢献していると同時に、長期変動に関する知見は比較的短周期の変動に関する検討にも大きな示唆を与えることになる。とりわけ、今後数千年以内とも推定されている現在の間氷期の終焉や MIS11 期に推定されているような超間氷期への移行等、現行の環境変動に関わりそうな課題もあり、その情報に関する理解は現代の気候環境変動を議論する場合もその基礎知識として不可欠である。

この観点から本報告では、まず、現行の環境変動の背景にある長周期の変動について取り上げる。この変動に関しては、近年の湖沼モニタリングシステムとしても利用されている日本最古・最大の湖沼である琵琶湖の湖沼堆積物情報と世界最古・最大の淡水湖のバイカル湖の湖沼堆積物情報が取り上げるが、琵琶湖の堆積物情報には過去の最温暖期の一つとされる MIS11 の記録を含む詳細な長期の気候変動・環境変動の記録が残され（比較的均質で詳細な情報は過去 45 万年）（Kashiwaya, 2017）、現在の記録とも接続可能な湖沼－流域系である。世界最古の湖沼堆積物情報をもつバイカル湖からは第四紀を大きく超える 1000 万年に近い過去の環境変動の情報が取得されているが（Kashiwaya et al., 2001）、琵琶湖との比較のためここでは中期更新世以降を対象とする。

歴史時代から観測時代に関わる比較的短期の環境変動に関しては、筆者等はこれまでに代替記録の“観測記録”化という観点から、日本のいくつかの湖沼－流域系で調査を実施してきた（余呉湖・琵琶湖等：畠田ほか，2002；Itono et al., 2012）。そこでの結果は、観測時代においては代替記録（堆積物の物理量）の“観測記録”（降水量）への変換が可能であり、代替記録の定量化が可能であることを示している（Kashiwaya et al., 2015）。これは代替記録の観測時代以前への拡張の可能性を示唆しているが、この検証には朝鮮王朝時代の観測記録等が有効であり（Kashiwaya, 2017）、そして東アジアモンスーン域に共通する基本則の理解が重要である。このためには東アジア地域では“モニタリングシステム”としての湖沼－流域系は、過去の環境変動の定量化に有効であるのみならず、温暖化等のサブシステムの変更が予想される今後の環境変動への対応を考察するためにも最も有効な“モニタリングシステム”の一つであろう。本稿で取り上げる大沼湖沼－流域系では、歴史時代の史料が極めて限られているが、この湖沼を形成した近世の火山活動の記録がいくつも堆積物に記録されており、観測時代の記録との接続が可能なシステムであり、代替試料の“観測記録”化には好都合である。

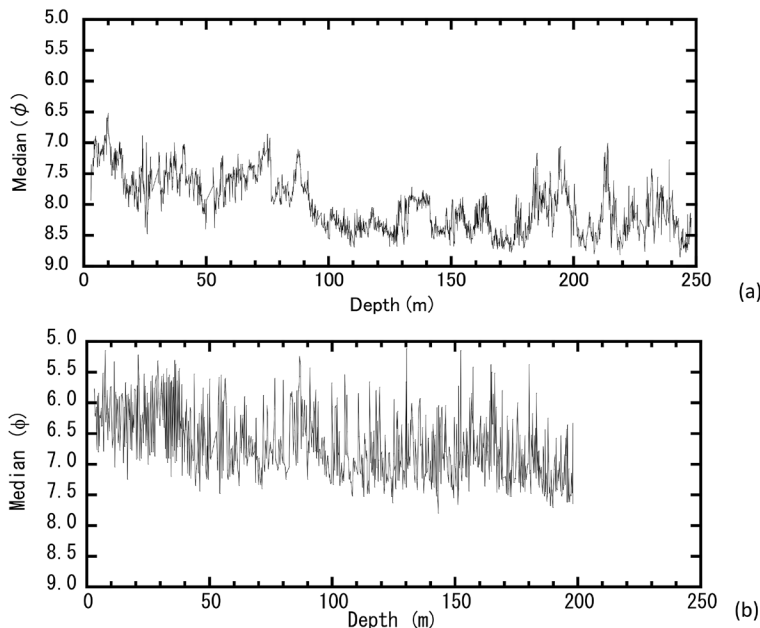
## 2. 長周期環境変動と湖沼－流域系

第四紀気候変動に関する基本的な仮説としてミランコヴィッチ理論（気候変動の天文学理論）（Milankovitch, 1941; 日本語訳：柏谷ほか，1992）が深海底のコア試料から復活して（Hays et al., 1976）からもそれなりの歳月が経過しているが、陸域堆積物情報からのミランコヴィッチ理論の推定は（山本ほか，1984；Yamamoto et al., 1985）、1971 年に採取された琵琶湖 200 m コア試料（Horie, 1984）の粒度情報がその先鞭を付けている。早期の解析に用いられた年代軸はあまり正確なものではなく、日射量変動に含まれる卓越周期（ミランコヴィッチ・サイクル）もそれほど明瞭なものではなかったが、1983 年に近傍で採取された 1400 m コア上部 250 m の主として粘土層からなる試料の解析結果を参考にして改良された年代軸からはより明瞭な周期が確認され、陸域での環境（気候）変動も日射量変動に対応していることが明らかになった。その後 200 m コアと 250 m 部分（1400 m

コア) の試料に対して別の手法を用いた物理量の分析が行われたので、ここではその結果を取り上げる。1990年代に採取されたバイカル湖の長尺コア(100 m, 200 m, 300 m, 600 m)については既にいくつかの報告が行われているが(Kashiwaya et al., 1998; 2001; 2003; 2010), ここでは琵琶湖との比較のため、主として1998年に採取されたBDP98コアの過去80万年の変動に注目する。

琵琶湖の200 m コアと1400 m コアの物理量分析用として分取された試料は大阪電気通信大学で分析され、保管されていたが、2001年に金沢大学に移管された。大阪電気通信大学では200 m コア試料の粒度分析は沈降法に基づく日立走査型粒度分布測定機PSA-2が用いられていたが、金沢大学では島津製作所のレーザ回折式粒子径分布測定装置SALD2000が使用された。また、全岩粒径の他に鉱物組成のみを対象とした鉱物粒径や生物起源シリカ( $\text{biSiO}_2$ )含有量、有機物含有量、鉱物含有量、HCl可溶物(主として $\text{CaCO}_3$ )含有量の測定が行われた。

Fig. 1は二つの方法で測定された全岩粒径の比較を示しているが、沈降法による結果は、 $4.5\phi$ 以上の粗粒部を除いた試料を分析しているにもかかわらず、全般的に粗い値でその振幅が大きいことを示している。手法の違いによる値の相違は避けられないが、大きな傾向



**Fig. 1.** Grain size variation (median) for Lake Biwa sediments: (a) grain size analysis with laser reflection method (200 m core samples and upper 200 m-250 m part of 1400 m core samples), and (b) grain size analysis by settling with photo-extinction method (200 m core samples).

**図 1** 琵琶湖堆積物の粒度変動(中央粒径): (a) レーザ回折法による分析結果(200 m コア+1400 m コアの200-250 m の部分), (b) 光透過法による分析結果(Yamamoto, 1984).

は対応しているようである。但し、沈降法による計測値の振幅の大きさは、測定値そのままを議論することの妥当性の検討が必要であること、そして何らかの処理が必要であることを示唆している。レーザ回折による分析結果（中央粒径）からトレンドを除去した曲線は日射量変動とよく対応させることができ、日射量変動による年代決定（orbital tuning）が琵琶湖の試料に関しても極めて有効であることが示されている（Fig. 2）。Yamamoto (1984) による 200 m コア試料の物理量測定値の中でグローバルな気候変動によく対応するのは（他の物理量も対応しているのであるが）、粗粒部（ $4.5\phi$  よりも粗粒な堆積物）の割合であるが、ミランコヴィッチ・サイクルも検出された変動例として引用されている（Fig. 3；柏谷，2007）。

グローバルな長期気候変動が議論となる場合には、温度変化が取り上げられることが多く、深海底堆積物ではその代替指標として有孔虫等の酸素同位体比がよく利用される。バイカル湖の湖底堆積物では温度の代替指標としては珪藻やそれを主成分とする生物起源シリカ（ $\text{biSiO}_2$ ）が解像度の優れているものとして、これまでに議論の対象となってきた（Williams et al., 1997; Macky et al., 1998; Colman et al., 1999）。琵琶湖の長尺湖底堆積物では温度の代替指標として様々な化学量、生物量、物理量が想定されているが（Horie, 1984; 堀江, 1987）、珪藻の有効性についても議論されてきている（Mori・Horie, 1975; 加ほか, 2002）。バイカル湖や琵琶湖においても全岩粒径は珪藻の大きさやその割合と温度に対応しており、生物資源シリカ量と共に温度の代替指標としても利用可能である（Kashiwaya et al., 1998; 2001）。後述するように、湖底堆積物の鉱物粒径は降水量や流量に対応すること（流域の土砂生産量等）が琵琶湖や余呉湖で知られているが（畠田ほか, 2002; Itono et al., 2012）、バイカル湖でもそれらに対応している（Kashiwaya, 2017）。鉱物含有量は鉱物粒径との直接的な因果関係は認められないことが多いが、バイカル湖では乾燥（寒冷）期の指標となっている（風成堆積物の生産）。

長期の気候変動・環境変動に関してはいずれの地域でも基本的長周期は同様であるが、

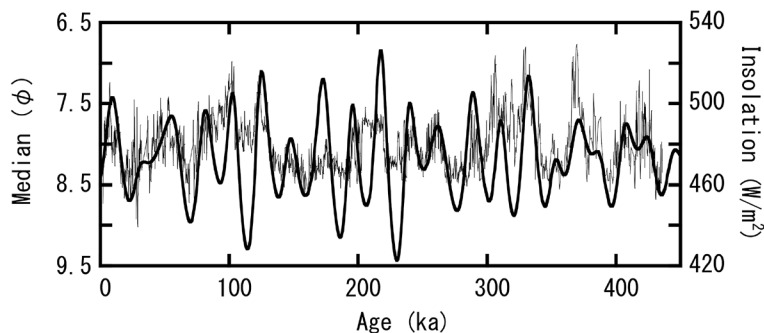
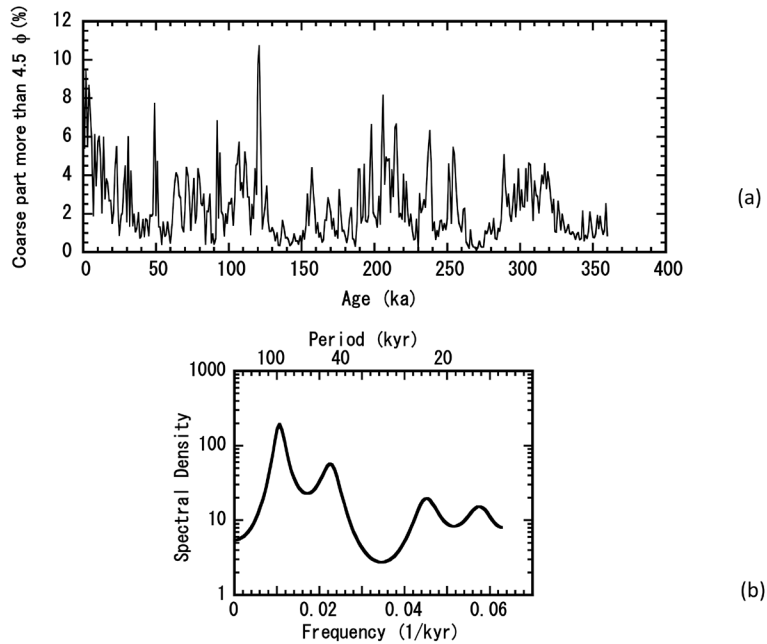


Fig. 2. Detrended grain size (median) with lazar reflection method (thin line) and insolation curve for 65°North (solid line)

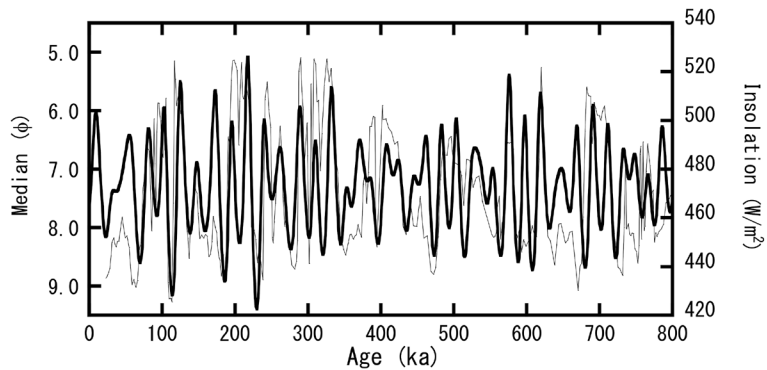
図2 傾向を除去した粒度変動（中央粒径）（細線）と北緯65°の日射量変動曲線（太線）

ユーラシア大陸内部の日射量変動に敏感な地域のあるバイカル湖と、周りが海洋で囲まれる弧状列島の中央部にある琵琶湖とは細かな反応は当然ながら異なる (Short et al., 1991). このことを議論するために、二つの指標 (温度に関するものと降水量・流量に関するもの) を取り上げて議論しよう (Kashiwaya, 2017). Fig. 4 は過去 80 万年におけ



**Fig. 3.** Change in coarse part (larger than  $4.5\phi$ ) (a) and results of spectral analysis (b) for Biwa 200 m core samples

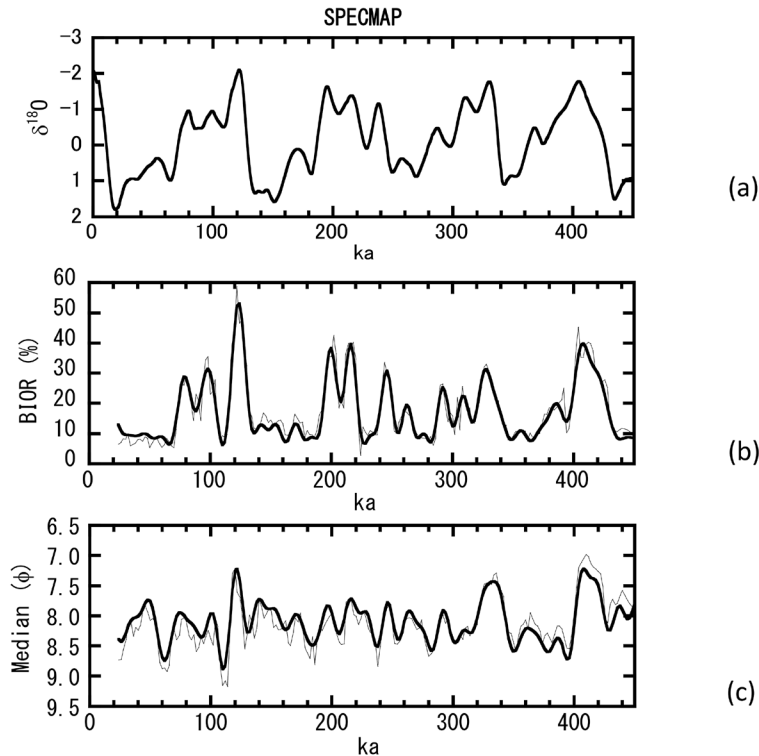
図3 粗粒部 ( $4.5\phi$ より粗い部分) 変動曲線 (a) とそのスペクトル解析結果 (b)



**Fig. 4.** Grain size variation (median for sediments) (thin line) (Baikal BDP98 core samples) and insolation curve for  $65^{\circ}$ North

図4 バイカル湖 BDP98 堆積物の粒度変動 (中央粒径) (細線) と北緯  $65^{\circ}$  の日射量変動曲線 (太線)

るバイカル湖 BDP98 堆積物試料の全岩粒径の変動と北緯 65° の日射量の変動を示したものであるが、それらの変動間には良い対応関係が認められる（琵琶湖の資料でもバイカル湖の資料でも地磁気資料により一時的年代を決定し、日射量と共通な卓越周期を確認した後日射量変動との調整（orbital tuning）を行っている）。琵琶湖の場合は長期的な粗粒化傾向が認められるが、その傾向を除いた粒径変動曲線と日射量曲線の間にも適切な対応が可能であることが示されている（Fig. 2）。このことは大陸内部でも海に囲まれた弧状列島でも日射量変動がそこの気候変動に大きな役割を果たしていることを意味している。ここではまず温度の代替指標として生物起源シリカ含有量と有機物含有量の和（biSiO<sub>2</sub> content + organic content）を取り上げよう。バイカル湖と琵琶湖の結果は Fig. 5b と Fig. 6a で示されるが、酸素同位体比の変動で示される深海底の堆積物から得られている結果（Fig. 5a）とよく対応している。離心率、地軸傾斜角、歳差運動に関係すると思われる卓

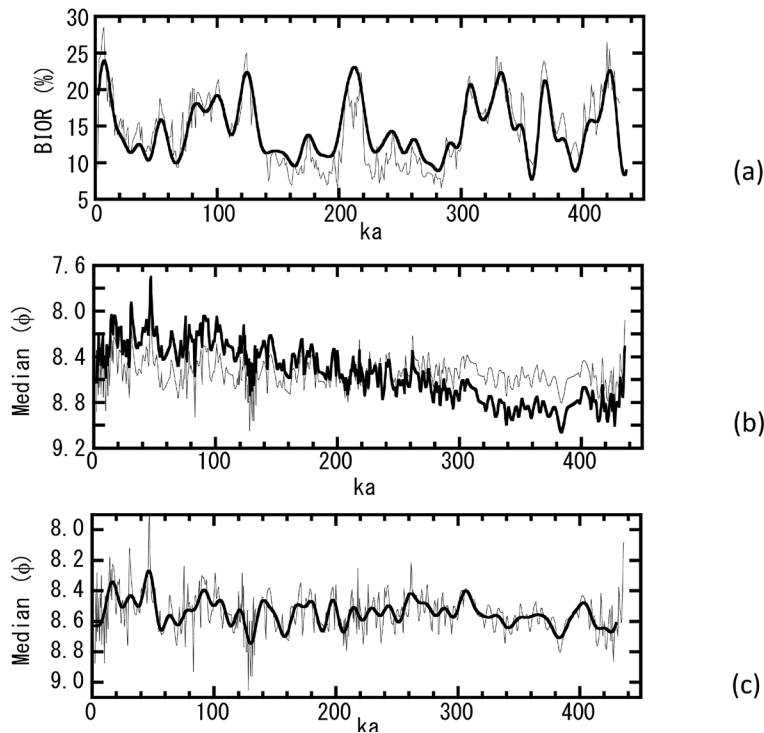


**Fig. 5.** Long-term climatic changes: (a)  $\delta^{18}O$  variation of oceanic sediments (Imbrie et al., 1989), (b) biSiO<sub>2</sub> content + organic content for Baikal BDP98 (solid line; filtered, thin line; original) and (c) mineral grain size for Baikal BDP98 (solid line; filtered, thin line; original)

**図 5** 長期気候変動曲線 (a) 深海底コアの $\delta^{18}O$ 変動曲線 (Imbrie et al., 1989), (b) バイカル湖 BDP98 堆積物の温度代替曲線 (biSiO<sub>2</sub> 含有量 + 有機物含有量) (太線: 濾過曲線, 細線: 実測曲線), (c) BDP98 堆積物の鉱物粒度変動曲線 (流量・降水量代替曲線) (太線: 濾過曲線, 細線: 実測曲線) 粒度変動

越周期も明瞭に認められる (Fig. 7).

さて、降水量・流量に関わるものはどうか。Fig. 6b に認められる、琵琶湖の降水量・流量に関わる鉱物粒径は、全岩粒径と同様に最深部で粗粒化傾向を示した後、徐々に細粒化して現在に至っている。この理由としては、初期の地殻変動等による深水化とその後の堆積作用などによる浅水化等が考えられるが、長期気候変動との関係は直接的ではない。従って、気候変動に関わる降水量・流量の変動を明瞭にするためにはやはり傾向 (トレンド) の除去が必要である。Fig. 6c で示した変動曲線は傾向 (トレンド) を除去し (細線), さらに小さな周期を濾過 (フィルター操作) したもの (太線) である。バイカル湖の鉱物粒径の変動曲線 (Fig. 5c) と比較すれば、その相違は明らかである。即ち、バイカル湖では気温の変動に対応して降水量・流量が変動しているのが、琵琶湖では必ずしも対応していない。このことはスペクトル解析の結果 (Fig. 8) にも明瞭に表れ

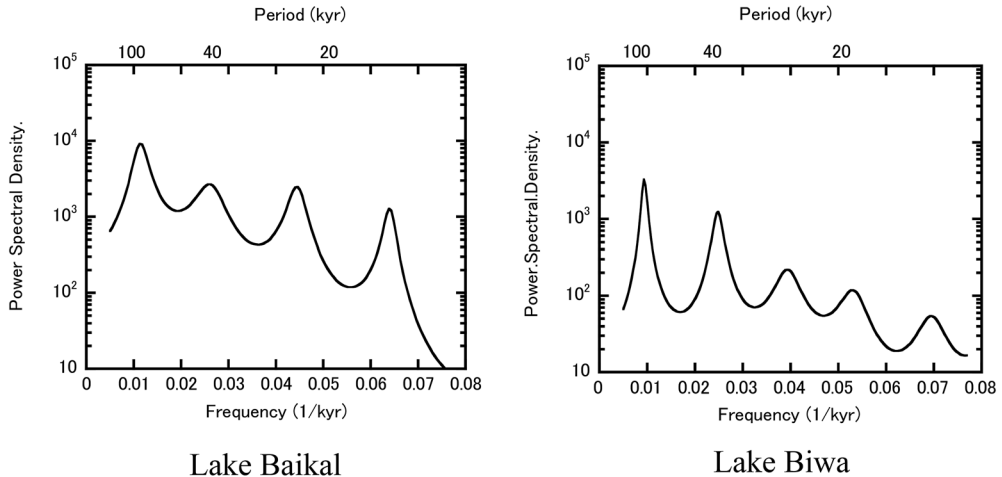


**Fig. 6.** Long-term climatic changes inferred from Lake Biwa sediment: (a)  $\text{biSiO}_2$  content + organic content (solid line; filtered, thin line; original), (b) mineral grain size (solid line; original, and fine line; detrended) and (c) detrended mineral grain size (solid line; filtered, thin line; detrended original)

**図 6** 琵琶湖堆積物における長期気候変動曲線 (a) 温度代替曲線 ( $\text{biSiO}_2$  含有量 + 有機物含有量) (太線; 濾過曲線, 細線; 実測曲線), (b) 鉱物粒度変動曲線 (流量・降水量代替曲線) (太線; 実測曲線, 細線; トレンド除去曲線), (c) 鉱物粒度変動曲線 (太線; トレンド除去値の濾過曲線, 細線; トレンド除去曲線)

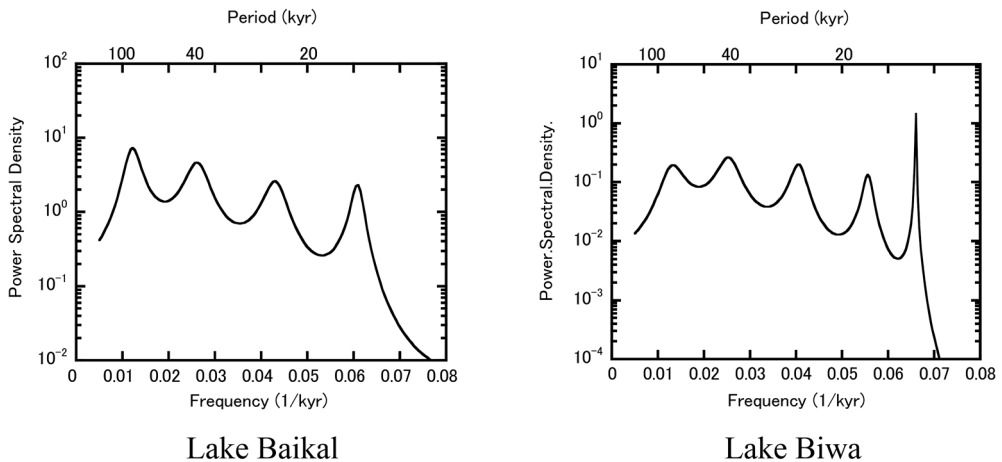
ている。バイカル湖では両者の卓越周期もほぼ同期しているが、琵琶湖では基本的な対応はあるが、微妙にずれたものになっている。つまり、琵琶湖の変動にはかなり局所的（地域的）な影響が認められるのである。

バイカル湖と琵琶湖の間には気候学的ないくつもの大きな違いが存在するが、流量の相違に大きく関係するものとして、氷期における氷河の有無が考えられる。バイカル湖において、MIS2時に水収支における氷河の融水水の占める割合は全流入量の60%、という



**Fig. 7.** Spectral analyses for proxy temperature variation (biSiO<sub>2</sub> content + organic content): (a) Lake Baikal sediments (BDP98) and (b) Lake Biwa sediments

図7 温度代替変動曲線に対するスペクトル解析結果：(a) バイカル湖堆積物、(b) 琵琶湖堆積物

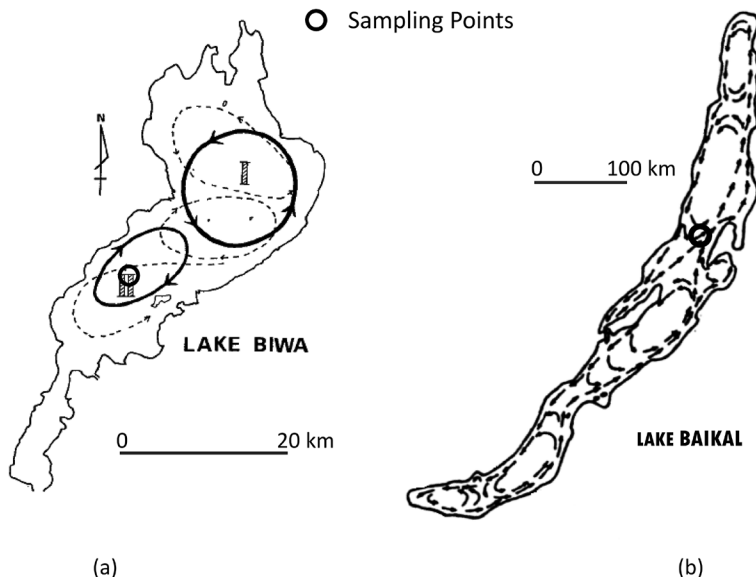


**Fig. 8.** Spectral analyses for proxy precipitation (discharge) (mineral grain size): (a) Lake Baikal sediments (BDP98) and (b) Lake Biwa sediments

図8 水文量（流量・降水量）代替変動曲線に対するスペクトル解析結果：(a) バイカル湖堆積物、(b) 琵琶湖堆積物

指摘がある (Osipov and Khlystov, 2010). 氷河の存在は気温に密接な関係があるから、一般に氷河量の変動は気温の変化と対応している。従って、バイカル湖における流量・降水量の代替指標である鉱物粒径が気温の代替指標である生物起源シリカ含有量と有機物含有量の和と極めて良い対応関係があることは頷ける。琵琶湖の場合にも流量としては春季の融雪水が寄与しているが (Itono et al., 2012), 過去 40 数万年間に氷河や万年雪が存在した証拠はないので、局所的 (地域的) な水文環境 (降水量・流量等) が鉱物粒径に大きく関係していると考えられる。この水文環境の長期的変動に関係するものを明らかにすることは降水量の地域的分布の変動とも関わり、かなり本質的な課題であるが、現段階では単なる指摘に留まらざるを得ない。

バイカル湖と琵琶湖の堆積物の鉱物粒径の比較でもう一つ気になることに触れよう。Fig. 5c と Fig. 6c で分かるように、バイカル湖ではその変動の振幅は大きく氷期と間氷期ではかなり異なるということ (分析間隔にも依存するが) と長期的には細粒化傾向 (深水化傾向?) にあるということである。一方、琵琶湖ではその逆である (浅水化傾向あるいは埋積傾向?)。即ち振幅が小さく、長期的には粗粒化の傾向がある。さらに、20 万年以前は温暖期も寒冷期もバイカル湖の粒径が琵琶湖のそれよりも粗く、それ以降も温暖期にはバイカル湖の方が粗い状態であることが分かる。採取地点がバイカル湖では水深が 340 m の凸部、琵琶湖が最深部に近い水深 70 m の平坦部ということと現在の流入河川の位置を考えれば、琵琶湖での粒径が大である方が尤もらしく思われる。更に、採取



**Fig. 9.** Sampling points (circles) and lake currents (arrows): (a) Lake Biwa (modified after Endo and Okumura, 1993), (b) Lake Baikal (modified after Shimaraev et al., 1994)

**図9** 堆積物採取地点 (○) と湖流 (矢印) : (a) 琵琶湖 (Endoh and Okumura, 1993 を修正), (b) バイカル湖 (Shimaraev et al., 1994 を修正)

地点付近の現在の湖流の流速は、バイカル湖で水深 10–15 m では 2–5 cm/sec (Shimaraev et al., 1994) であるのに対し、夏季の琵琶湖では水深 5–7 m で 10 cm/sec (Endoh and Okumura, 1993) と現在は物質移動により適した環境が琵琶湖に与えられているようである (Fig. 9). 従ってバイカルでの鉱物粒径 (流量) が琵琶湖よりも大きいということは他の因子を考える必要がある。例えば、バイカル湖では流域における春季の融水や氷河漂流運搬 (ice drafting) が大きな役割を果たしている可能性が示唆されるが、これも陸水環境の長期的変動に関わる課題として、今後の解明が期待されるものである。

### 3. 短周期環境変動と湖沼－流域系

ここでは歴史時代と観測時代の接続が可能な湖沼－流域系として人為的影響がほぼ観測時代に限られ、火山活動による時間軸の設定が比較的容易な北海道・渡島大沼を主たる議論の対象としよう。湖沼堆積物には解像度 (堆積速度) の相違により、認識可能な時間分解能は異なるが、多様な時間スケールのもので記録されている。先に述べたように記録された長期の変動と観測された短期の変動を直ちに結合させることはできないが、同一湖沼であれば大きな傾向と詳細な変動との関係を理解することが可能な場合がある。例えば琵琶湖の湖底堆積物には比較的一様な解像度で過去 40 数万年の長期変動の情報が記録されているのみならず観測時代の変動も記録されており、長期と短期の環境変動の両者を同時に認識できる絶好の場となっている。また、観測時代では測器による記録が残されており、そのプロセスの理解が容易である場合が多く文書や伝聞記録を中心とする歴史時代とではその認識のレベルは明らかに異なる。従って、歴史時代の記録を今後の予測に使用可能なものにするには (予測の精度によるが)、代替資料 (文書記録や各種代替試料) の“観測資料”化である。これには観測時代の記録と直接接続可能な試料が不可欠である。氷床コアや年輪試料も現在の観測時代の記録と歴史時代の記録 (ものによっては更に古い時代の記録) をいわば同じ“測器”で記録するのでそれなりに有効であるが、地域的な地形変化に関わる土砂移動を考慮する場合には湖沼堆積物が最適であろう。大規模な時間・空間スケールの変動にはいわば“均された”深海底の堆積物も有効であるが、ここでの議論の対象とはならない。

渡島大沼は 1640 年の駒ヶ岳大噴火で形成された堰止湖とされている。それ以前の古大沼の存在についても議論がある (鷹澤ほか, 2019) が、本報告では詳細な時間軸の設定が可能な 1640 年以降を対象とする。2011 年および 2012 年に大沼・小沼で掘削された湖沼堆積物の概要は他の報告 (Hasebe et al., 2015; Ochiai et al., 2015; Itono et al., 2015; Sun et al., 2016) に詳しいが、ここではその時に採取された最も長い ON12C コアに含まれる情報を主たる対象として議論を進める (Fig. 10 参照)。このコアには 1640 年、1694 年、1856 年および 1929 年の歴史上の四大噴火の記録が残されているとともに、文書記録のみに記載されていた 1756 年および 1784 年噴火の火山灰も発見されており (鷹澤ほか,

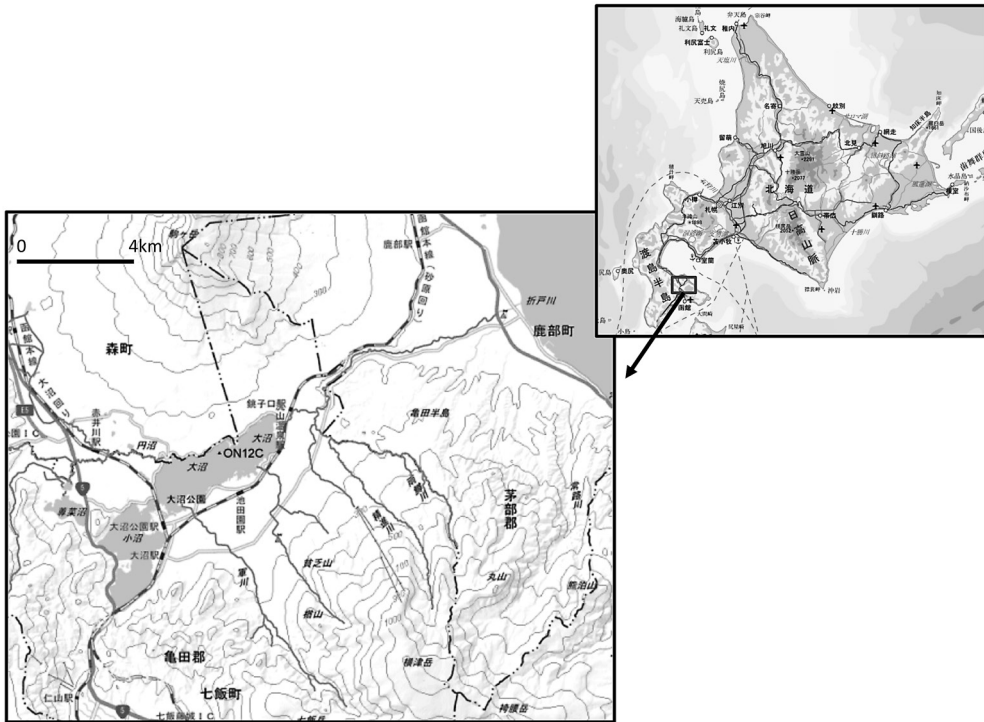


Fig. 10. Location of Lake Onuma and ON12C sampling point (Maps from the Geospatial Information Authority of Japan (GSI))

図 10 大沼湖沼－流域系と ON12C 採取地点 (地図は国土地理院地図を使用)

2019), 詳細な時間軸の設定が可能なのである。コア自体にはいくつかのラミナ層や斜交層理等が認められるが、顕著な構造は 1694 年の噴火以降に数 10 cm に及ぶ明瞭なラミナ層である。ここでのラミナ層は年縞と推定されるが、生物擾乱を殆ど受けていないように見られるので、おそらく寒冷な時期に対応しているであろう。この時期の寒冷化に、例えば 1640 年の駒ヶ岳の大噴火と 1663 年の有珠山の噴火の間の寒冷化に関しては添田ほか (2017) の報告があるが、その期間の長さについては明らかではない。大沼の南方約 10 km にある北斗市では寛文年間 (1661-1672 年), 1685 年 (貞享 2 年), 1692 年 (元禄 5 年) に稲作を始めたという記録は残されているが (北斗市, HP), 1692 年が「松前誌」その他の資料から、水田発祥の公式記録とされている。但し、その数年後には廃止したことも「松前誌」に記録されており、駒ヶ岳 1694 年大噴火後のさらなる寒冷化を示唆しているかもしれない。マウンダー極小期を含むこの時期の史実を Fig. 11 に示す。東北地方に大きな影響を与えた元禄飢饉は松前藩にも大きな影響を及ぼす。この時代の北海道 (南部) の記録は断片的であるが、東北諸藩にはそれなりの記録が残されている (Table 1; 細井, 1997)。当時下北半島まで領有していた南部藩 (盛岡藩) が残した凶作 (作況) の記録は北海道南部の環境にも関わる可能性があるため貴重である。元禄飢饉の時期は大沼の堆積

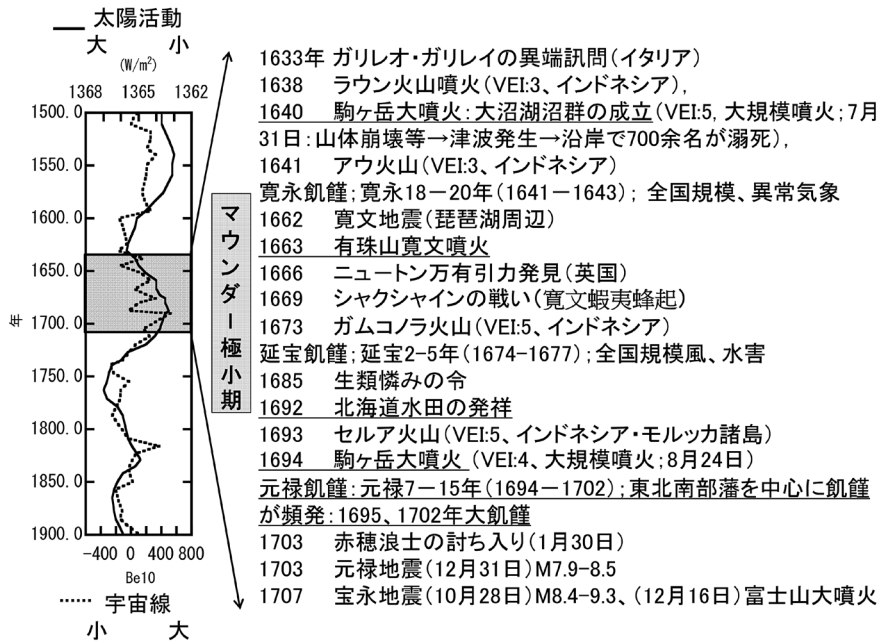


Fig. 11. Brief history around the Maunder Minimum

図 11 マウンダー極小期前後の出来事

Table 1. Famines of the Morioka clan in the period of 1688–1704 (modified after Hosoi, 1997)

表 1 元禄年間 (1688–1704) の盛岡藩飢饉 (細井, 1997 を一部修正)

年号	概況	年貢収納高 (俵)	年貢不足高 (俵)	摘要
元禄 7 年 (1694)	凶作	140,000		霖雨, 早冷 (雑)
8 年 (1695)	飢饉	40,000	100,000	霧雨, 早冷, 止雨祈祷
9 年 (1696)	耕作良	120,000~	20,000~	
10 年 (1697)		130,000	30,000	8・9 年の飢人救済 49,487 人 (史)
11 年 (1698)		123,980	16,200	
12 年 (1699)	大凶作	73,800	66,200	霖雨, 早冷, 洪水, 翌年 3 月まで 20,786 人 (内)
13 年 (1700)	不作	120,000	20,000	前年の影響, 代官所に代官 2 人詰 (雑)
14 年 (1701)	凶作	90,320	49,680	翌年 3 月までの飢人救済 2,858 人 (雑・史), 累計で 3,958 人 (雑)
15 年 (1702)	飢饉	59,070	80,930	霧雨, 大風, 洪水, 翌年 2 月までの飢人救済 51,253 人 (雑), 餓死者 20,500~20,600 人 (飢)
16 年 (1703)	耕作良			耕作良, 前年の影響, 長雨, 施粥, 止雨祈祷, 洪水 (雑)

摘要欄の ( ) 内の雑は「雑書」, 史は「南部史要」, 内は「内史略」, 飢は「飢饉考」の略

物に顕著な年縞が刻まれている期間に含まれているので、関係した何らかの情報が堆積物に記されている可能性もある。因みに平成飢饉といわれた1993年の東北・北海道の水田作況指数は Fig. 12 に示すが、北海道南部と東北太平洋側は同じ傾向が認められ、東北が中心である元禄飢饉時には東北太平洋側と北海道南部は似たような環境下にあった可能性が示唆される。

先に述べたように堆積物の年代は何枚かの降下噴出物そして Cs-137 濃度で規定されるので、比較的正確な年代が決定できる (Hasebe et al., 2015; Fig. 13 中●を伴う実線)。1640年の火山噴出物のうち、その時に湖底に堆積したものとその年以降に堆積したものの区別はそれほど明瞭ではないが、ここでは含水比が低下部分以降をその後に堆積したものとした (図中破線)。従って、精度の高い年代は1694年以降となる。他の報告では1640年、1856年、1929年の噴出物層序を利用している例はあるが (Sun et al., 2016)、大沼東部等の湖畔の堆積物での1856年噴出物 (Ko-c1) と1694年噴出物 (Ko-c2) が確認されている (鴈澤ほか, 2019) ので、Hasebe et al. (2015) の推定で問題ないであろう。また東部の堆積物露頭で噴出物 (Ko-c1) と噴出物 (Ko-c2) の間に見出された1765年と

1993年(平成5年)  
水稲作況指数

数字: 道・県単位  
数字: 地域単位

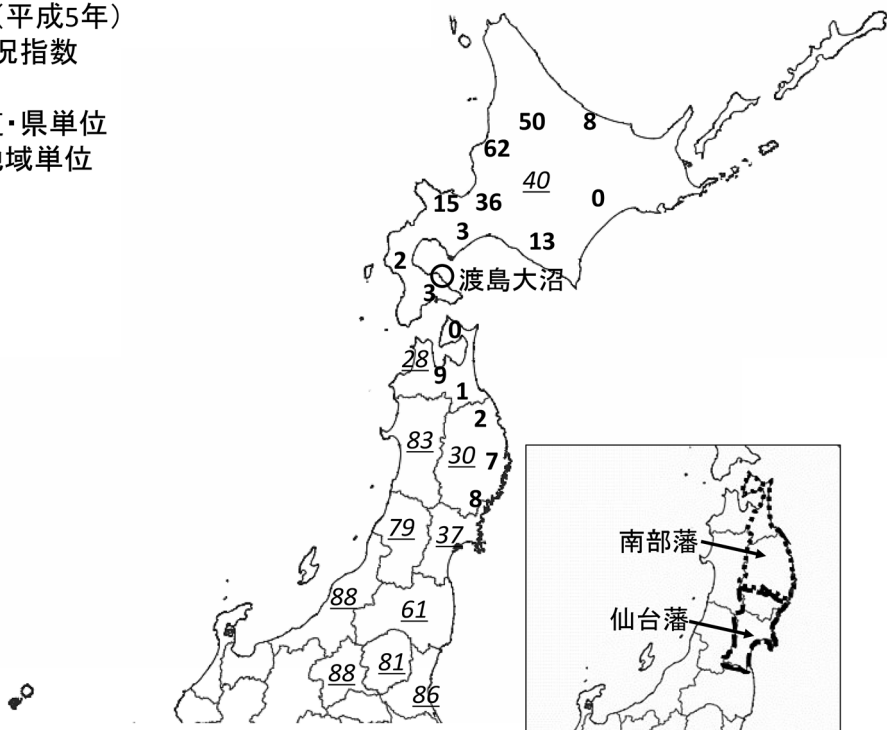


Fig. 12. Rice crop of North Japan in the 1993 Famine

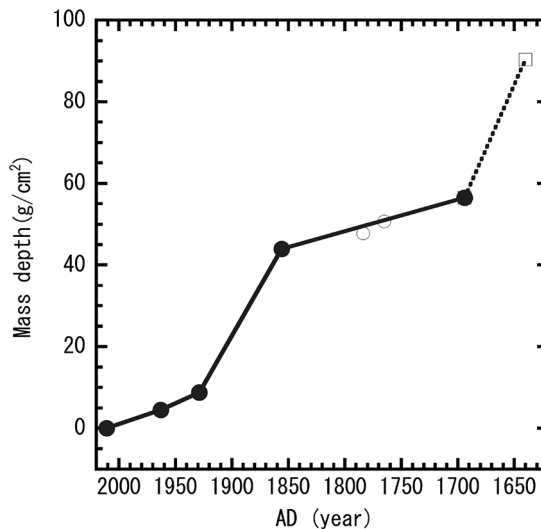
図 12 平成飢饉 (1993 年) における北日本の水稲作況係数

農林水産省 HP/ 北海道の気象と作柄 <http://www.maff.go.jp/hokkaido/toukei/index.html>

[http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/sityo\\_tyouki/index.html](http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/sityo_tyouki/index.html)

1784年の火山灰を ON12C の物理量（含水比）で推定したもの（図中○印）とも調和的であり、ここでは年代層序間を直線近似したものを年代として利用する。この年代に従えば1856-1929年の堆積速度は大きいですが、その他の期間ではそれほど大きくはなく、その相違はおそらく侵食営力（運搬営力）と生産物質と流域に貯留されている可動物質の量の組み合わせを反映しているものと思われる。また、この年代に基づいて各種変動曲線を記入したものが Fig. 14 である。多くの指標に共通の変化が見られるのは1694年、1856年そして1929年の大噴火時であるが、1770年前後等にいくつかの指標に変化が認められる。

先の報告（Sun et al., 2016）では、 $\delta^{18}\text{N}$  濃度変動から、約1770年～1900年（年代軸はここで導入したものを利用）における降水量の増加が推定されているが、ここでは降水量・流量・湖水位の変動を考えてみよう。堆積物の粒度（鉱物粒径）は準閉鎖湖沼では降水量の代替指標であり、代替降水量として利用できることは、既に余呉湖の堆積物と観測資料から実証されており（寫田ほか, 2002; Kashiwaya et al., 2015）、湖水位の大きな変動もまた粒度変動に影響をもたらすことを琵琶湖の堆積物で示している（Itono et al., 2012）。大沼での観測時代における粒度と降水量の対応については、既に指摘されているが（Itono et al., 2015）、ON12C コアに対応する期間の粒度（鉱物粒径）を中心に議論を進



**Fig. 13.** Age model for the ON13C core. Solid circles; 2012 (sampling year), 1963 (Cs-137 peak), 1929 (eruption), 1856 (eruption), 1694 (eruption). Open circles; 1784 (eruption, estimated), 1765 (eruption, estimated). Open square: 1640 (eruption, estimated).

**図 13** ON12C コアの年代：●印：2012 年（採取年）、1963 年（Cs-137 濃度のピーク）、1929 年・1856 年・1694 年（大噴火の発生年）、○印：1784 年・1765 年（推定噴火年代）、□印：1640 年（推定噴火年代）。

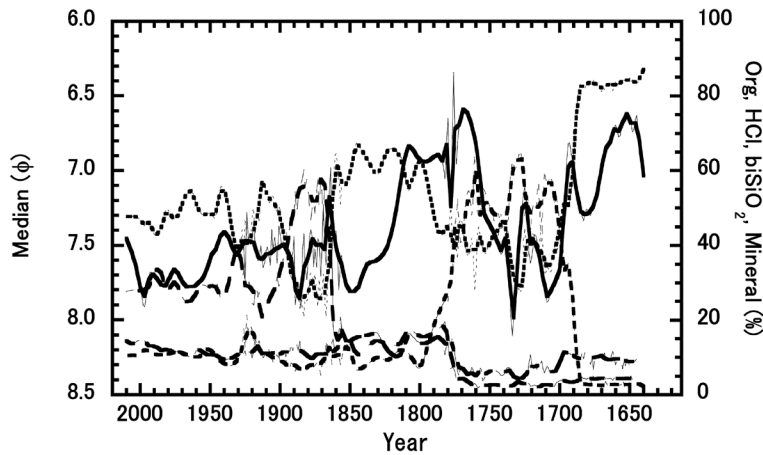
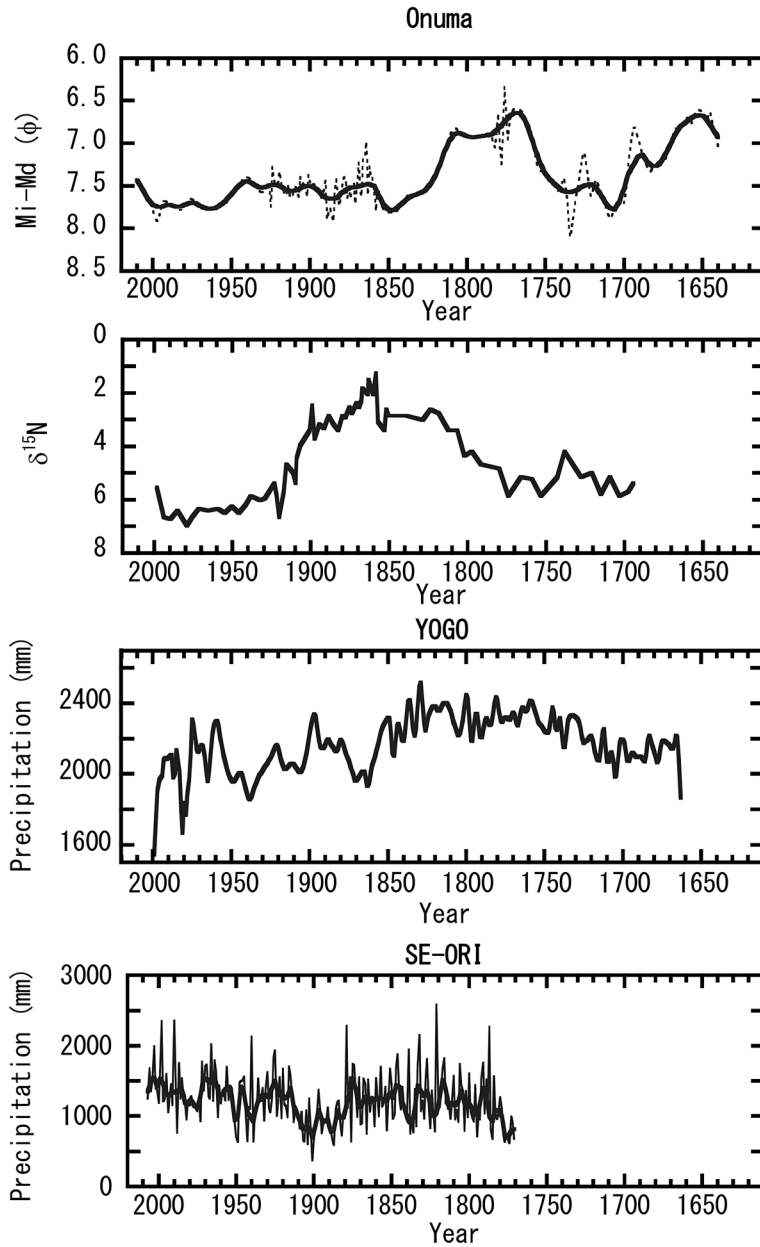


Fig. 14. Changes in some compositions: mineral median ( $\phi$ ) —, mineral content ·····,  $\text{biSiO}_2$  content - - -, HCl soluble content - · - ·, Organic content — — —

図 14 堆積物各要素の変動：鉱物粒径——，鉱物含有量·····，生物起源シリカ含有量- - -，HCl 溶解物含有量- · - ·，有機物含有量— — —

める。Fig. 15 には、大沼湖底堆積物の粒度（鉱物粒径）変動、大沼堆積物の  $\delta^{18}\text{N}$  濃度変動、鉱物粒径から推定される余呉湖の降水量変動、そしてソウルで観測された降水量を示す。余呉湖およびソウルでは 1700 年代および 1800 年代の頃の降水量の増加傾向が認められるが、大沼では状況が少し異なるようである。先に触れたように鉱物粒径も降水量の一義的な指示者ではないので、大沼における 1810 年頃からの粒径の減少（比較的小さな  $\delta^{18}\text{N}$  濃度の継続）は他の要因の検討も必要である。鴈澤ほか（2019）は 1800 年から 1856 年頃までの高水位期を指摘しているので、粒度の減少がそれに対応している可能性がある。

Fig. 16 は鉱物粒径の変動と簡易 XRF 測定装置で測定した Fe（Hasebe et al., 2015）の変動を示しているが、粒径が減少する 1810 年頃には Fe が増加している。それではこの増加は何に由来するのであろうか。給源は基本的に大沼の流域ということになるが、現在の流入河川の流域では Fe の増減に関わる鉱山等の存在は確認できない。しかしながら、大沼の東南にある横津岳付近を源頭部とする精進川・雨鱒川では明治以降に鉱山が開発され（両者を精進川鉱山が経営）、主に硫黄と褐鉄鉱が生産された。戦後は主として硫黄が生産されている（北海道七飯町, 1976；室住, 1951）。鉱山自体は精進川鉱山・雨鱒川鉱山のいずれもが昭和 34 年（1959）に廃止されているが、昭和 28 年頃には大沼南部の水質汚染が問題となり、その原因として精進川の水を西隣の大七川に導入して水田に利用した後アカシブ川を通して大沼に排水されたことが原因と考えられている（江口, 1954）。精進川と雨鱒川の合流点と大沼の標高差は僅か 1 m 程度であり、大沼の水位の僅かの増加で大沼と直接接することになり、両河川の影響が大沼にも及ぶことになる。また、両河川の大きな流量の増加もその一部は大沼への直接流入する可能性も考えられる。Fig. 16 に認めら



**Fig. 15.** Hydrologic fluctuations; (a) mineral grain size ( $\phi$ ) in ON12C core in Lake Onuma, (b)  $\delta^{15}\text{N}$  fluctuation in ON12C core (modified after Sun et al. (2015)), (c) estimated precipitation in Lake Yogo (after Kashiwaya, 2017), and (d) observed precipitation in Seoul (after Kashiwaya, 2017).

**図 15** 水文量の変動：(a) ON12C コアの鉱物粒径（中央粒径： $\phi$ ），(b) ON12C コアの $\delta^{15}\text{N}$ の変動（Sun et al. 2015 を修正），(c) 余呉湖の推定降水量変動（Kashiwaya, 2017 による），(d) ソウルの観測降水量（Kashiwaya, 2017 による）

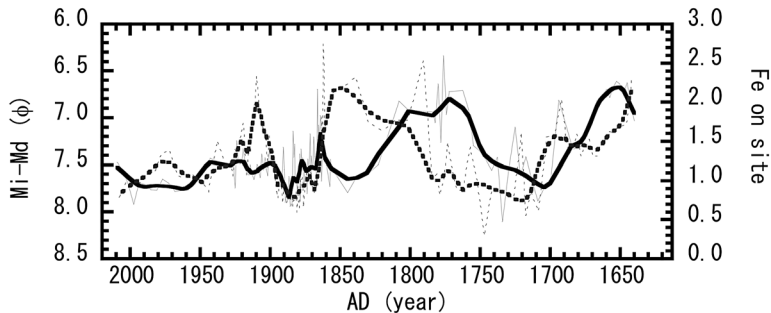


Fig. 16. Changes in grain size (mineral) (solid lines) and relative Fe content (dotted lines) in ON12C core; thick, filtered and thin, original.

図 16 ON12C コアの鉱物粒径（中央粒径： $\phi$ ）の変動（実線）と相対的な Fe 含有量の変動（点線；太線は濾過曲線で細線は原資料）

れる比較的長期の Fe の増加（1800–1850）は比較安定した安定した高水位期，その前後に見られるパルス的な増加は一時的な高水位あるいは両河川の流量の増加を意味していると考えられることも可能であろう。比較的安定した高水位期の存在は，鴈澤ほか（2019）の指摘と調和的であるが，高水位期の出現の可能性については今後更なる議論が必要であろう。

#### 4. まとめに代えて

筆者の一人（柏谷）にとって湖沼堆積物が興味の対象となったのは，今になっては当たり前のことであるが，地形変化の定量的推定には地形形成営力（外的営力）をある種の関数型で表現することが不可欠だと感じ始めた時期である（Kashiwaya, 1983）。その頃は水系の発達過程の解明を一つの課題としていたのであるが，空間を時間に置き換えて経時的な変化を議論するという，いわばエルゴード的な仮定を導入することで，その発達過程を検討しモデル化を進めていた。つまり，似たような環境下において年代が推定されている地形面の現在の水系を時間軸に沿った発達段階と仮定し，水系発達モデルを検討していたのである（Kashiwaya, 1987）。同一の環境下（外的営力が一定）という仮定で，モデルの検証は可能であったが，今後の発達の定量的推定にはそれを促す外的営力として気候変動を含む関数型の導入は必至であった。模型実験やシミュレーションによる観察記録や観測時代の記録・観測等からある程度の推測は可能な場合があるが，長期の外的営力に関する定量的な記録は皆無である。しかしながら，変化させる外的営力の記録は皆無でも，変化させられた地形の記録，特に侵食地形においては侵食された物質の記録は，ある条件下で利用できる可能性がある。この考えは，後に湖沼－流域系の地形学（陸水地形学）を考える契機となるのであるが，侵食された物質は運搬され，最後には堆積するという過程を経るので，堆積物には外的営力の記録も残されている可能性がある。この場合の堆積場は地形変化と直接結びつく変化する地形の下流部にある湖沼となる。この考え方は必ずしも長期

の外的営力の変動ばかりではなく、短期的な変動にも応用できることは、上述の通りである。

本稿のタイトルとした地球環境変動の意味するところは、地域規模の変動および地球規模の変動の両者であり、その趣旨は長周期変動であれ、短周期変動であれ、湖沼－流域を一つの系（システム）として捉えることにより、複合的で多様な情報の解明につながるということにある。

## 謝 辞

本稿における渡島大沼・駒ヶ岳に関する研究は、日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究 A（平成 23 年 -26 年）「湖沼－流域系に基づく東アジアの現在の地表プロセスと歴史的環境変動の解明」（代表・柏谷健二）および科学技術振興機構戦略的国際科学技術協力推進事業（平成 22 年 -26 年）「代替および観測資料に基づいた東北アジアにおける過去千年間の水文気候変動－東アジアにおける 21 世紀末の温暖化と降水量増加への対応－」（代表・柏谷健二）の助成を受けた。また、大沼での掘削については大沼漁業協同組合（宮崎司組合長）の助力を得た。本稿の完成には査読者からいくつかの適切な助言を頂いた。記して謝意を表したい。

## 引用文献

- BDP-93 Baikal Drilling Project Members (1997) Preliminary results of the first scientific drilling on Lake Baikal, Buguldeika site, southeastern Siberia: *Quaternary International*, **37**, 3-17.
- BDP Drilling Project Members (1998) Continuous records of climatic changes in Baikal sediments for the last 5MA: *Russian Jour. Geol. Geophys.*, **39**, 139-156.
- Colman, S.M., Peck, J.A., Hatton, J., Karabanov, E.B. and King, J.W. (1999) Biogenic silica records from the BDP93 drill site and adjacent areas of the Selenga Delta, Lake Baikal, Siberia: *Journal of Paleolimnology*, **21**, 9-17.
- 江口 弘 (1955) 大沼を涵養する河川の水質について：魚と卵, **7**, 1-8.
- Endoh, S. and Okumura, Y. (1993) Gyre system in Lake Biwa derived from recent current measurements: *Japanese Journal of Limnology*, **54**, 191-197.
- 鷹澤好博・岡島洋平・佐々木一郎・蒲生元樹・黒柳萌々子・人見美哉 (2019) 北海道駒ヶ岳, 1640 年大沼湖沼群の誕生と変遷：地形, **40**, 27-44.
- Hasebe, N., Itono, T., Katsuki, K., Murakami, T., Ochiai, S., Katsuta, N., Wang, Y., Lee, J.Y., Fukushi, K., Ganzawa, Y., Mitamura, M., Tanaka, K., Kim, J.Y. and Kashiwaya, K. (2015) Possible age models for Lake Onuma lacustrine sediments based on tuffs recovered in three cores. In: Kashiwaya, K., Shen, J. and Kim, J.Y. (eds.) *Earth surface processes and environmental changes in East Asia*, Springer, Tokyo, 239-255.
- Hays, J., Imbrie, J. and Shackleton, N. (1976) Variations in the Earth's orbit: Pacemaker of the ice ages: *Science*, **194**, 1121-1132.
- 北海道七飯町 (1976)「七飯町史」, 北海道七飯町, 1221p.
- Horie, S. (ed.) (1984) *Lake Biwa*, Dr. W. Junk, Dordrecht, 654p.
- 堀江正治 (編著) (1987)「琵琶湖底深層 1400 m に秘められた変遷の歴史」, 同朋舎出版, 京都, 284p.
- 細井 計 (1997) 盛岡藩領における元禄十五年の飢饉：岩手大学教育学部研究年報, **57(1)**, 1-14.

- Itono, T., Kashiwaya, K. and Sakaguchi, A. (2012) Disastrous flood events found in lacustrine sediments from Lake Biwa: *Transactions, Japanese Geomorphological Union*, **33**, 453-468.
- Itono, T., Kashiwaya, K. and Ochiai, S. (2015) Reconstructing modern hydro-environmental fluctuations inferred from lacustrine sediment in Lake Onuma, Hokkaido. In: Kashiwaya, K., Shen, J. and Kim, J.Y. (eds.) *Earth Surface Processes and Environmental Changes in East Asia*, Springer, Tokyo, 269-285.
- Kashiwaya, K. (1983) A mathematical model for the temporal change of drainage density: *地形*, **4**, 25-31.
- Kashiwaya, K. (1987) Theoretical investigation of the time variation of drainage density: *Earth Surface Processes and Landforms*, **12**, 39-46.
- 柏谷健二 (2007) 地質・湖沼堆積物：内藤正明 (監)「琵琶湖ハンドブック」, 滋賀県, 50-51.
- Kashiwaya, K. (2017) *Geomorphology of lake-catchment systems*: Springer, Singapore, 139p.
- Kashiwaya, K., Yamamoto, A. and Fukuyama, K. (1991) Time variation of in coarse materials from lake bottom sediments and secular paleoclimatic change: *Geophysical Research Letters*, **18**, 1245-1248.
- Kashiwaya, K., Ryugo, M., Sakai, H. and Kawai, T. (1998) Long-term climato-limnological oscillation during the past 2.5 million years printed in Lake Baikal sediments: *Geophysical Research Letters*, **25**, 659-663.
- Kashiwaya, K., Ochiai, S., Sakai, H. and Kawai, T. (2001) Orbit-related long-term climate cycles revealed in a 12-myr continental record from Lake Baikal: *Nature*, **410**, 71-74.
- Kashiwaya, K., Ochiai, S., Sakai, H. and Kawai, T. (2003) Onset of current Milankovitch-type climatic oscillations in Lake Baikal sediments at around 4 Ma: *Earth and Planetary Science Letters*, **213**, 185-190.
- Kashiwaya, K., Ochiai, S., Sumino, G., Tsukamoto, T., Szyniszewska, A., Yamamoto, M., Sakaguchi, A., Hasebe, N., Sakai, H., Watanabe, T. and Kawai, T. (2010) Climato-hydrological fluctuations recorded in long lacustrine records in Lake Hövsgöl, Mongolia: *Quaternary International*, **219**, 178-187.
- Kashiwaya, K., Okimura, T., Itono, T., Ishikawa, K. and Kusumoto, T. (2015) Present earth-surface processes and historical environmental changes inferred from lake-catchment systems. In: Kashiwaya, K., Shen, J. and Kim, J.Y. (eds.) *Earth Surface Processes and Environmental Changes in East Asia*, Springer, Tokyo, 1-24.
- 加三千宣・吉川周作・井内美郎 (2003) 琵琶湖湖底堆積物の年間珪藻殻堆積量記録からみた過去 14 万年間の降水量変動：第四紀研究, **42**, 305-319.
- Mackay, A.W., Flower, R.J., Kuzmina, A.E., Granina, L.Z., Rose, N.L., Appleby, P.G., Boyle, J.F. and Battarbee, R.W. (1998) Diatom succession trends in recent sediments from Lake Baikal and their relation to atmospheric pollution and to climate change: *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, **B353**, 1011-1055.
- Milanković, M. (1941) *Kanon der Erdbestrahlung und seine Anwendung auf das Eiszeitenproblem*. R. Serbian Acad., Belgrade, 633p.: (日本語訳) 柏谷健二・福山 薫・大村誠一・山本敦之・安成哲三 (1991)「気候変動の天文学理論と氷河時代」, 古今書院, 東京, 526p.
- Mori, S. and Horie, S. (1975) Diatoms in a 197.2 meters core sample from Lake Biwa-ko: *Proc. Jpn. Acad.*, **51**, 675-679.
- 室住正義 (1951) 北海道精進川及び雨鱒川鉦山電気探鉱調査：地質調査所月報, **2(7)**, 317-325.
- Ochiai, S., Nagao, S., Itono, T., Suzuki, T., Kashiwaya, K., Yonebayashi, K., Okazaki, M., Kaeriyama, M., Qin, Y.X., Hasegawa, T. and Yamamoto, M. (2015) Recent eutrophication and environmental changes in the catchment inferred from geochemical properties of Lake Onuma sediments in Japan. In: Kashiwaya, K., Shen, J. and Kim, J.Y. (eds.) *Earth Surface Processes and Environmental Changes in East Asia*, Springer, Tokyo, 257-268.
- Osipov, E.Y. and Khlystov, O.M. (2010) Glaciers and meltwater flux to Lake Baikal during the Last Glacial Maximum: *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, **294**, 4-15.
- 寫田敏行・柏谷健二・兵頭政幸・増沢敏行 (2002) 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：地質, **23**, 415-431.
- Shimaraev, M.N., Verbolov, V.I., Granin, N. and Sherstayankin, P.P. (1994) *Physical limnology of Lake Baikal: A review*, Baikal International Center for Ecological Research, Irkutsk/Okayama, 81p.

- Short, D. A., Mengel, J. G., Crowley, T. J., Hyde, W. T. and North, G. R. (1991) Filtering of Milankovitch cycles by Earth's geography: *Quaternary Research*, **35**, 157-173.
- 添田雄二・青野友哉・永谷幸人・渋谷綾子・中村賢太郎・菅野修広・松田宏介・三谷智広・宮地鼓・渡邊 剛・甲能直樹 (2017) 小氷期最寒冷期と巨大噴火・津波がアイヌ民族に与えた影響Ⅱ：北海道博物館研究紀要, **2**, 49-60.
- Sun, W., Shen, J., Zhang, E., Hasebe, N., Kashiwaya, K., Chen, R. and Itono, T. (2016) Stable nitrogen isotope record of lacustrine sediments in Lake Onuma (Northern Japan) indicates regional hydrological variability during the past four centuries: *Quaternary International*, **397**, 307-316.
- Williams, D.F., Peck, J., Karabanov, E.B., Prokopenko, A.A., Kravchinsky, V., King, J. and Kuzmin, M.I. (1997) Lake Baikal Record of Continental Climate Response to Orbital Insolation During the Past 5 Million Years: *Science*, **278**, 1114-1117.
- Yamamoto, A. (1984) Grain size variation. In: Horie, S. (ed.) *Lake Biwa*, Dr. W. Junk, Dordrecht, 439-459.
- 山本淳之・柏谷健二・福山 薫 (1984) 琵琶湖底 200 m コアサンプルにおける粒度変動の周期性, *地形*, **5**, 345-352.
- Yamamoto, A., Kashiwaya, K. and Fukuyama, K. (1985) Periodic variations of grain size in Pleistocene sediments in Lake Biwa and earth-orbital cycles: *Geophysical Research Letters*, **12**, 585-588.