

アジア大陸内陸部の古気候変動：バイカル湖の湖底堆積物の化学分析から
**Paleoclimate variability in continental Asia revealed by
chemical analyses of Lake Baikal sediment**

村上拓馬^{1*}・勝田長貴²・高松武次郎³・高野雅夫¹・
山本鋼志¹・中村俊夫⁴・河合崇欣⁵

Takuma Murakami^{1*}, Nagayoshi Katsuta², Takejiro Takamatsu³, Masao Takano¹,
Koshi Yamamoto¹, Toshio Nakamura⁴, Takayoshi Kawai⁵

¹名古屋大学大学院環境学研究科 (Nagoya Univ, Grad. Sch. Environ. Studies) ・²岐阜大学教育学部 (Gifu Univ, Fac Educ) ・³茨城大学広域水圏環境科学教育研究センター (Ibaragi Univ, CWES) ・⁴名古屋大学年代測定総合研究センター (Nagoya Univ, CCR) ・⁵(社) 国際環境研究協会 (AIRIES)

**Correspondence to: Takuma Murakami; E-mail: takuma@nagoya-u.jp*

Abstract

Lake Baikal sediment contain information for understanding of long-term climate changes in the in the continental interior. In the present study, we analyzed abundances of biogenic silica and uranium in the core sediment (BDP93-2 and BSS06-G2) from Buguldeika saddle in southern part of the lake. The uranium concentration shows a similar fluctuation pattern with the biogenic silica concentration (as a paleotemperature proxy) on a glacial and interglacial scale (i.e., 100-kyr periodicity), whereas these two chemical components an inverse correlation on a centennial to millennial scale during the interglacial and interstadial periods. This means that sedimentation process of biogenic silica and uranium in Lake Baikal is different from each other, suggesting that the uranium concentration of sediment is paleoclimate proxy different from palotemperature proxy (i.e., paleomoisture proxy). Also, comparison of the Baikal uranium concentration with the Hovsgol detrital component indicates a positive correlation during the late Holocene each other. Based on the above assumption, climate of continental Asia become wet condition during the interglacial and interstadial periods and dry condition during the glacial periods. In addition, the climate during interglacial and interstadial periods is characterized by alternation of cold-wet and warm-dry conditions.

Keywords: 古気候変動；アジア大陸；バイカル湖とフスグル湖；湖底堆積物；¹⁴C年代

1. はじめに

ユーラシア大陸東部（シベリア南東部）に位置するバイカル湖は、バイカル裂谷に発達した地溝湖であり、その最大水深（1643 m）と淡水量（23,000 km³）は世界最大を誇る。バイカル湖の集水域は、モンゴル北部からシベリア南東部の 570,000 km² の範囲に分布する。セレンガ川の流域は、集水域全体の約 83 %（447,000 km²）を占める。また、その流入量は約 50 %に達し、これはバイカル湖の流入河川の中で最大である。バイカル湖が位置するアジア大陸内部は、数万年スケールで見ると、日射量変動（ミランコビッチフォーシング）に対して、地球上で最も鋭敏な地域である（Short et al. 1991）。このため、日射量変動に応答した様々な環境変動の記録が、バイカル湖の湖底堆積層から見つかっている。バイカル湖の湖底堆積層は、数万年スケールに加えて、数百～数千年スケールの環境変動記録を保持している。バイカル湖の位置するアジア大陸内部は偏西風影響下にある。このため、バイカル湖の古環境記録は、北大西洋・深海堆積物やグリーンランド・氷床コアで見つかっている古気候記録と良く対応する。

本研究では、セレンガデルタ対岸のブルグジェイカ鞍部で掘削した湖底堆積物コアの生物起源シリカ（以下、BioSi とする）とウランの定量を連続的に行った。バイカル湖の湖底堆積層の珪藻量や BioSi 濃度は、気温の上昇に伴って珪藻量が増加することから、古気温指標と一般的に見なされている（Prokopenko et al. 2001）。一方、湖底堆積層のウラン濃度に関しては、その変動原因は定説までには至っていない。Edgington et al. (1996) は、ウラン濃度、BioSi と海洋の有孔虫 $\delta^{18}\text{O}$ が、氷期・間氷期（10 万年）スケールで正相関関係を示すことから、ウラン濃度の変動は古気温指標であることを示唆した。一方、Goldberg et al. (2001) は、バイカル湖の湖底堆積層のウラン濃度が河川流入量を反映すると仮定し、そのウラン同位体比データから、バイカル湖への河川流入量や流入比の推定を行っている。こうしたバイカル湖のウランに関する議論の中心は、氷期・間氷期（10 万年）スケールの変動に基づくものであり、それより短いスケールに関する議論はほとんど行われてこなかった。

本研究の目的は、(1) 氷期・間氷期（10 万年）スケールで見られた湖底堆積層の BioSi とウラン濃度の相関関係が、数百～数万年スケールでも同じように見られるのか、それとも異なっているのか、(2) 10 万年と数百～数万年のそれぞれの時間スケールで見られる相関関係の意味は何か、を解明することにある。

2. 試料と方法

2.1. 柱状試料

本研究で分析した柱状試料は、バイカル湖のブルグジェイカ鞍部で掘削された BDP93-2

(52°31'3.0"N, 106°09'6.0"E) と BSS06-G2 (52°27'27.1"N, 106°07'46.1"E) である (Fig. 1)。バイカル湖-セレンガ流域系はアジア大陸内陸部に位置し、その流域面積はシベリア南東部からモンゴル北部にわたる 540,000 km² に及ぶ。バイカル湖 (面積 31,500 km²、標高 456 m) とフブスグル湖 (2,800 km²、標高 1,645 m) はともに、バイカル湖-セレンガ流域系に属しており、両湖はセレンガ川とその支流により通じている。バイカル湖のブグルジェイカ鞍部は、セレンガ川河口の三角州対岸に位置し、鞍部の湖底堆積層は、セレンガ川から供給される半遠洋性の細粒碎屑物からなる (BDP93 Members, 1997)。

BDP93-2 の年代軸は、Colman et al. (1999) の年代モデルを使用した。この年代軸は、¹⁴C 年代で得た時間軸と古地磁気変動曲線の対比から得た時間軸を統合したものである。この年代モデルで使用された ¹⁴C 年代の各値は、リザーバー効果の補正值である。BSS06-G2 の年代軸は村上ほか(2010)の年代モデルを使用した。これらの年代モデルはいずれも、¹⁴C 年代値を校正年代に変換した値に基づき決定されたものである。¹⁴C 年代値は、名古屋大学年代測定総合研究センターのタンデトロン加速器質量分析計を用いて、堆積物中の全有機炭素から得られたものである。また、¹⁴C 年代から校正年代への変換には、IntCal04 (Reimer et al. 2004) と福井県水月湖の年層計数データ (Kitagawa and van der Plicht 2000) を使用した。

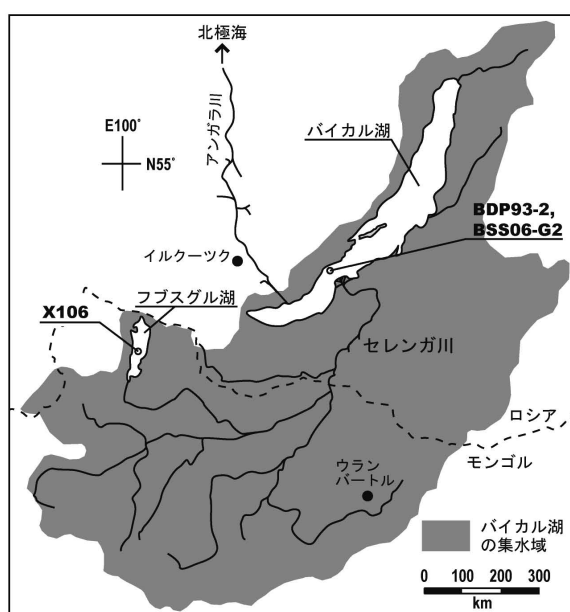


Fig. 1 Map showing the location of Lake Baikal and Hovsgol. Open circles in Lake Bikal and Hovsgol are drill sites of sediment cores (BDP93-2, BSS06-G2 and X106) used in this study. Gray area indicates Lake Baikal watershed.

2.2. 化学組成定量分析

BSS06-G2 の全岩ウラン濃度は、次の手順に従って決定した：全長 39 cm の堆積物試料を 1 cm 毎に取り分けた；凍結乾燥器で堆積物中の水分を取り、メノウ乳鉢で粉碎混合する；50 mg の乾燥試料を強酸混合溶液 (HNO₃、H₂O₂ と HF) に混合し、マイクロウェーブ装置を用いて完全に分解した；名古屋大学の誘導結合プラズマ質量分析装置 ICP-MS (HP4500, Yokogawa Analytical Systems) を用いて、溶液中のウランを定量した。一方、生物起源シリカ濃度は、次のように定量した (DeMster 1981)：500 mg の乾燥試料に Na₂CO₃ 水溶液を加えて、恒温槽 85°C で熱した；加熱後 3~6 時間にかけて 1 時間ごとに溶液を抽出した；それぞれの抽出溶液中の Si 濃度を、岐阜大学生命科学総合研究支援センターの誘導結合プラズマ発光分析計 ICP-AES (Ultima 2, HORIBA Jobin Yvon) により定量した；時間に対する Si 濃度の検量線を作成し、検量線の切片 (加熱後 0 時間) の Si 濃度を、生

物起源シリカ濃度と見なした。

BDP93-2 の全岩ウラン濃度は、京都大学原子炉研究所にて中性子放射化分析により定量した（高松ほか 2003）。なお、本研究では全長 102 m のうち、上部 25.54 m のデータを使用した。BioSi 濃度については、ウラン濃度を分析した試料に対応する深度の値を Colman et al. (1999) の Fig. 3 の変動曲線から読み取った。

3. 結果と考察

Figure 2 に、過去 18 万年間の BDP93-2 と過去 5,200 年間の BSS06-G2 における生物起源シリカと

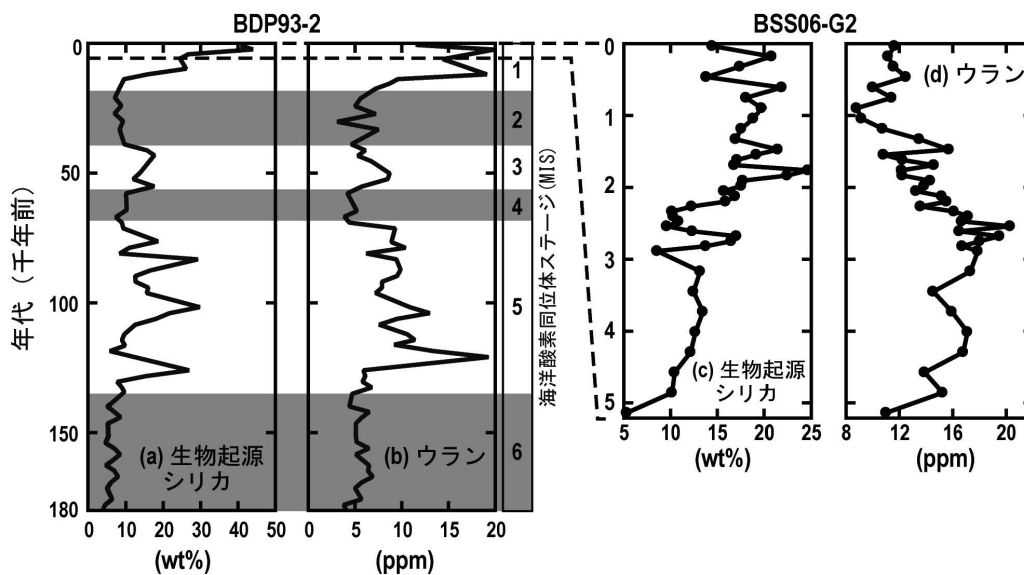


Fig. 2 Sequential profiles of biogenic silica and uranium contents in (a-b) BDP93-2 and (c-d) BSS06-G2 from Lake Baikal.

ウランのそれぞれの濃度の変動曲線を示す。過去 18 万年間のウラン濃度と生物起源シリカ濃度はともに、氷期に比べて間氷期により高い値を示す (Fig. 2a と b)。一方、過去 5,200 年間のこれら 2 成分を見ると、生物起源シリカ濃度は、5,200 年前から 3,000 年前にかけて増加傾向を示したのち、2,500 年前にかけて減少傾向、そののち現在にかけて増加傾向を示す。ウラン濃度については、生物起源シリカ濃度の変動パターンと鏡像パターンを示す。

Figure 3 に、BDP93-2 (Fig. 3a) と BSS06-G2 (Fig. 3b) のそれぞれの生物起源シリカ濃度とウラン濃度の相関図を示す。Fig. 3a に示すように、生物起源シリカ濃度とウラン濃度は、氷期・間氷期 (10 万年) スケールにおいて正相関分布 ($R = 0.565$) を示す。これに対して、過去 5200 年間のこれら 2 成分の関係を見ると (Fig. 3b)、氷期・間氷期スケールとは逆に (Fig. 3a)、逆相関分布を示す ($R = -0.496$)。この逆相関関係は、間氷期 (MIS 1 と 5) や亜間氷期 (MIS 3) でも見られる (Fig. 3a)。

バイカル湖の湖底堆積物中の生物起源シリカ濃度とウラン濃度は、氷期・間氷期 (10 万年) スケールでは正相関分布、間氷期にかける数万年～数百年スケールでは逆相関分布を示すように変化することが明らかとなった。こうした時間スケールの違いによって、生物起源シリカ濃度とウラン濃度の相関関係が変化することは、これら 2 成分が異なる堆積過程を経て湖底に堆積したことを意味する。

バイカル湖湖底堆積物の生物起源シリカ濃度は、珪藻の含有量を反映し (Karabanov et al. 1998)、それらの濃度変動は、古気温指標と見なされている (Prokopenko et al. 2001)。一方、バイカル湖のウランについては、Edgington et al. (1996)により、ウラン濃度が古気候指標になり得ることを指摘されている。Edgington et al. (1996)は、湖水、河川水と堆積物中のウラントリウム同位体比分析から、湖底堆積物中のウランの多くは溶存ウランを起源とした湖内で自生したものであることを明らかにし、その自生ウランの濃度は河川流入量を反映することが示唆された。さらに、その自生ウラン

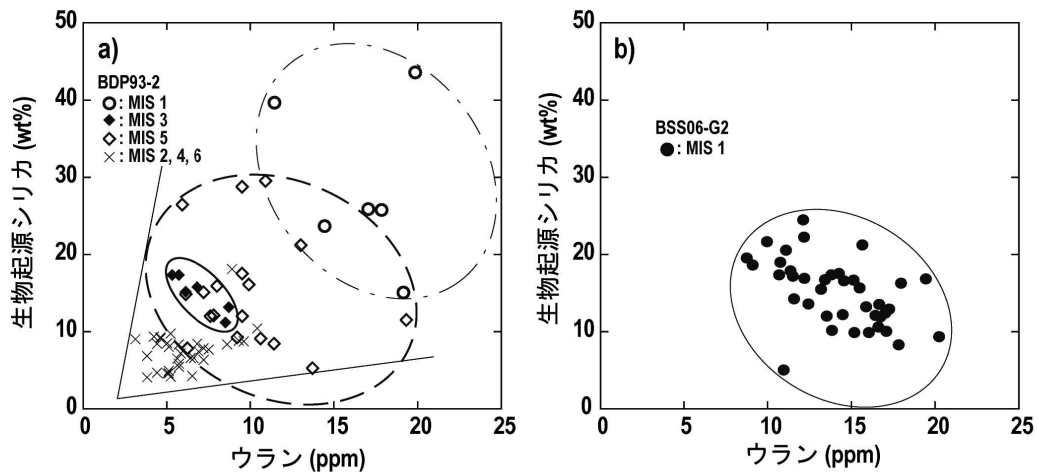


Fig. 3 Relationship between biogenic silica and uranium in (a) BDP93-2 and (b) BSS06-G2.

濃度が珪藻殻密度や $\text{SPECMAP}\delta^{18}\text{O}$ の変動曲線と正相関分布を示すことから、古気温指標となることを指摘した。Goldberg et al. (2009)では、Edgington et al. (1996)の仮説に基づき、バイカル湖のウラン濃度が河川流入量を反映すると見なし、バイカル湖湖底堆積物中のウラントリウム同位体比から、セレンガ川に対するその他の流入河川の割合の経時変化を見積もっている。

こうした従来のバイカル湖ウランに関する研究は、氷期・間氷期 (10 万年) スケールで見られた珪藻とウランの正相関関係による Edgington et al. (1996)の仮説に基づき議論がなされ、この仮説を

検証する古気候指標データを持ち合わせていなかった。今回、生物起源シリカと自生ウランが時間スケールに応じて正と逆の両相関を示すという本研究の発見は、これまでのウラン変動原因に関する解釈（すわなち、河川流入量）を前進させるものである。

そこで本研究では、この河川流入量の原因を後背地の乾湿指標と見なし、バイカル湖地域の古気候変動を推定すると、過去 18 万年間のバイカル湖地域の気候は、氷期に乾燥化し、間氷期に湿潤化したと推察される。また、過去 5,200 年間においては、5,200 年前から 2,500 年前にかけて寒冷湿潤化したのち、現在にかけて温暖乾燥化したと推測される。これと類似した変動パターンは、フブスグル湖地域の乾湿指標である碎屑性成分曲線 (PC-2 スコア) でも見られた (村上ほか 2009)。こうしたバイカル湖とフブスグル湖との古気候記録の対比は、高精度の ^{14}C 年代決定によってなされるものである。今後、アジア大陸内の様々な地域で得られた古気候記録が対比されることで、より詳細な内陸部の古気候変動が解明されていくものと思われる。

謝辞

本研究は、研究拠点形成費補助金 (21 世紀 COE プログラム No.G-4「太陽・地球・生命圏相互作用系の変動学」) ならびに文部科学省グローバル COE プログラム No.K04「地球学から基礎・臨床環境学への展開」の支援を受けて行われたものである。

引用文献

- BDP-93 Members, (1997) Preliminary results of the first scientific Drilling on Lake Baikal, Buguldeika site, southeastern Siberia. *Quaternary International* 37, 3-17.
- Colman, S. M., et al., (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.
- DeMaster, D. J., (1981) The supply and accumulation of silica in the marine environment. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 45, 1715-1732.
- Edgington, D. N. et al., (1996) Uranium-series disequilibrium, sedimentation, diatom frustules, and paleoclimate change in Lake Baikal. *Earth and Planetary Science Letter* 142, 29-42.
- Goldberg, E. L. et al., (2010) Uranium isotopes as proxies of the environmental history of the Lake Baikal watershed (East Siberia) during the past 150 ka. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology* 294, 16-29.
- Karabanov, E. B. et al., (1998) Evidence from Lake Baikal for Siberian glaciations during oxygen-isotope substage 5d. *Quaternary Research* 50, 46-55.
- Kitagawa, H., van der Plicht, J., (2000) Atmospheric radiocarbon calibration beyond 11,900 cal BP from

Lake Suigetsu laminated sediments. Radiocarbon 42, 369–380.

村上拓馬ほか (2009) モンゴル・フブスグル湖の湖底堆積物の化学組成データに認められる数千年スケールの環境変動. 名古屋大学加速器質量分析計業績報告書 XX, 93-102.

村上拓馬ほか (2010) バイカル湖堆積物コア BSS06-G2 の¹⁴C年代決定—全岩化学組成変動パターンの解明に向けて—. 名古屋大学加速器質量分析計業績報告書 XXI, 87-92.

Prokopenko, A. A., et al. (2001) Biogenic silica record of the Lake Baikal response to climatic forcing during the Brunhes. Quaternary Research 55, 123-132.

Reimer, P. J., et al. (2004) IntCal04 terrestrial radiocarbon age calibration, 0–26 cal kyr BP. Radiocarbon 46, 1029–1058.

Short, D.A., et al., (1991) Filtering of Milankovitch cycles by Earth's geography. Quaternary Research 35, 157–173.

高松武次郎ほか (2003) バイカル湖堆積物 (BDP93 と BDP96 コア) の元素組成に見る過去 500 万年の環境—乾燥化・気候変動・ミランコビッチ周期・水深変動—. 月刊地球/号外 42, 108-118.