

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 数千年スケールの周期的な環境変動

村上拓馬¹⁾, 勝田長貴²⁾, 山本鋼志¹⁾, 高松信樹³⁾, 高野雅夫¹⁾, 井上源喜⁴⁾, 尾田武文⁵⁾, 堀内一穂⁶⁾, 河合崇欣⁷⁾

1)名古屋大学大学院環境学研究科 2)岐阜大学教育学部 3)東邦大学理学部 4)大妻女子大学社会情報学部 5)名古屋大学年代測定総合研究センター 6)弘前大学大学院理工学研究科 7)(社)国際環境研究協会

1. はじめに

陸域で採取される湖堆積物は、大気や河川を通じてもたらされた様々な環境変動を記録した貴重な情報源である。湖堆積物を構成する鉱物粒子や生物遺骸などは、湖の地域性に大きく依存する。このため湖堆積物から読み出される様々な指標は、全球規模だけでなく地域・局地規模で生じた環境変動の理解に重要な知見を与えてくれる。

フブスグル湖はユーラシア大陸内部に位置し、典型的な内陸性気候下にある。Short et al. (1991) によると、フブスグル湖は氷期と間氷期の夏の最高気温の差が約 10°C 以上であり、寒暖の差が世界で最も大きい地域である。フブスグル湖の集水域の面積は、湖面積に対して 1.7 倍である (Prokopenko et al., 2005)。これは通常の湖と比べて小さい。したがって、フブスグル湖は湖およびその集水域の乾湿の影響を強く受ける。ちなみに最終氷期から後氷期にかけて湖水位が 170m (Fedotov et al., 2004) あるいは 100m (Prokopenko et al., 2005) 上昇したと推定されている。したがって、フブスグル湖堆積物は、最終氷期から後氷期の湖内および後背地の環境変動を色濃く記録していると期待される。

これまでにフブスグル湖堆積物コア試料を用いて最終氷期から後氷期にかけての様々な古気候指標が確立されている。元素含有量に基づく気候変動に対する湖内の元素の挙動の推定 (Fedotov et al., 2004)、コア記載に基づく湖水位変動の復元 (Prokopenko et al., 2005)、堆積物中の光合成色素量に基づく気候変動に対する植物性プランクトンの応答の研究 (Nara et al., 2005) などである。本研究は、最終氷期から後氷期のフブスグル湖堆積物コア試料の全岩元素含有量を測定した。本研究と類似した先行研究として、Fedotov et al. (2004)がある。この研究は堆積物コア試料中から HNO₃ を用いて抽出された元素含有量を測定した。これは、外来性および内来性の炭酸塩と有機物由来の元素含有量を知ることができる。一方、本研究は、堆積物コア試料の全岩元素含有量を測定した。これは、外来性物質および内来性物質の混合物に含まれる全岩元素含有量を知ることができる。

本研究では、まずフブスグル湖堆積物中の全岩の 19 元素、無機炭素 (TIC) および全有機炭素 (TOC) の定量分析を行う。そして、鉱物組成データに基づき、21 成分の堆積メカニズムの推定を行う。最後に、21 成分の主成分分析の結果に基づき、最終氷期から現在にかけてのフブスグル湖の集水域における環境の変化を議論する。

2. 試料と方法

2-1. コア試料と年代モデル

本研究で使用したコア試料は、2001 年 8 月にグラビティーコアラ採取された全長 130.3cm の X106 である。X106 コアは、湖中央の最深部付近 (50°53'01"N, 100°21'22"E; 水深 236m) で採取された (Fig. 1)。この採取地点は、先行研究 (Fedotov et al., 2004; Prokopenko et al., 2005) によると、最終氷期から現在にかけて、干上がらなかったと考えられている。

分析試料は、1.5cm 間隔でサブサンプリングされた後、3°C で冷蔵保存されたものである。堆積年代については、名古屋大学のタンデトロン加速器質量分析装置を用いて、堆積物中の全有機炭素から見積もられた 11 点の ¹⁴C 年代値を用いた。しかし、フブスグル湖堆積物の最表層における全有機炭素の ¹⁴C 年代値は、約 500 ¹⁴C year BP をとること (Prokopenko et al., 2005) が知られている。本研究では、11 点の ¹⁴C 年代値から 500 年を差し引き補正した後、210 - 21,371 ¹⁴C year BP については IntCal04

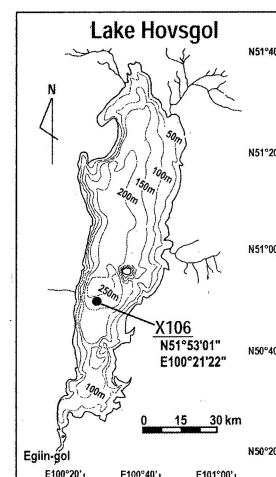


Fig. 1 Maps of Lake Hovsgol.

(Reimer et al., 2004) によって、23,489 ^{14}C year BP については水月湖の年縞堆積物の年縞係数データ (Kitagawa and Plicht, 2000) によって、暦年代に換算した。堆積モデルについては、両年代値の各 2 点間の堆積速度が一定であると仮定することにより、X106 コアの年代を決定した (Fig. 2)。その結果、時間長 26,364 cal. yr (23,768 ^{14}C yr) および時間分解能 59 - 408 cal. yr (58 - 476 ^{14}C yr) の 21 成分の変動曲線を得ることができた (Fig. 3)。

2-2. 分析方法

分析試料は、風乾・粉碎した後、試料を加圧分解装置を用いた酸分解法によって溶液化された。Na, Mg, K, Ca については原子吸光光度法を用いて、total-Fe については吸光光度法を用いて、定量した。また、Al, Ti, V, Cr, Mn, Ni, Cu, Zn, As, Rb, Sr, Cs, Ba, Pb の定量は、内標準元素を Au として誘導結合プラズマ質量分析法 (ICP-MS) を用いて、測定されたものである。全有機炭素量 (TOC) と全炭素量 (TC) は、元素分析計で定量されたものである。TOC の定量については堆積物中の炭酸塩を除去するために、前処理として、塩酸処理を行った。無機炭素量 (TIC) は、TC と TOC の差から見積もられたものである。また堆積物中の鉱物組成を明らかにするために、粉末 X 線回折計 (XRD) を用いて、最終氷期 3 ヶ所、遷移期 3 ヶ所および完新世 2 ヶ所の鉱物同定を行った (Fig. 4)。

解析については、得られた 21 成分の変動曲線の類似性を抽出するために主成分分析 (Fig. 5 と Fig. 6a,b) を、そして第二主成分得点の周期的な変動を明らかにするため、Lamb-Scargle periodogram (Scargle, 1982) を用いて周期解析を行った (Fig. 7)。

3. 結果

3-1. 堆積物の組成

X106 コア中の 19 元素と TIC および TOC の変動曲線を Fig. 3 に、XRD パターンを Fig. 4 に示した。X106 コアの鉱物組成は、完新世 (A-B) は、碎屑鉱物である chlorite, amphibole, quartz および albite から、最終氷期-完新世遷移期 (C-E) および最終氷期 (F-H) は碎屑鉱物に加え calcite および dolomite から構成される。また、H にのみ、以上の碎屑鉱物と炭酸塩鉱物に加えて、Mg-calcite が検出された。

3-2. 主成分分析

第一主成分および第二主成分の因子付加量については Fig. 5 にそして、それらの主成分得点については Fig. 6a,b 示した。

21 成分 (19 元素、TIC および TOC) は、各主成分の因子付加量に基づいて、4 つのグループに分類された (Fig. 5)。それぞれのグループは、Group-1 : Na, Mg, Ca, Sr および TIC、Group-2 : Ni, Cu, Zn および TOC、Group-3 : Al, K, Ti, V, Fe, Rb, Cs, Ba および Pb、そして Group-4 : Cr, Mn および As に分けられた。Group-1 と Group-2 は第一主成分の因子付加量が、Group-3 は第二主成分のそれが、そして Group-4 は第三主成分のそれが高かった。

第一主成分および第二主成分の得点は異なる変動を示した (Fig. 6a,b)。第一主成分得点は、最終氷期では正の値で、完新世では負の値を示し、大きな変動を示さない。しかし、最終氷期-完新世遷移期では約 15 cal. kyr BP から 5 cal. kyr BP にかけて、徐々に減少し、正から負の値へと遷移する。また一方で、第二主成分得点は、最終氷期から完新世を通じて、周期的な変動を示した。第二主成分得点の周期解析の結果は、約 8,700 年の周期を示した (Fig. 7)。

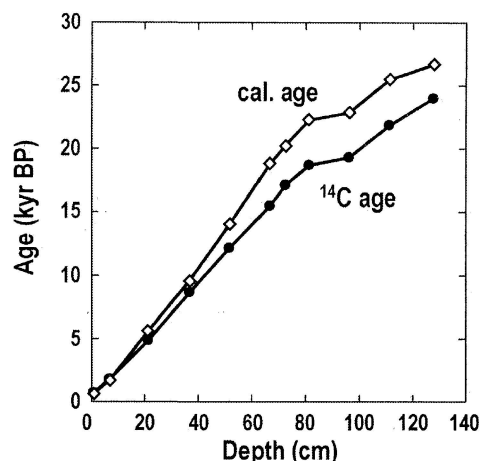


Fig. 2 Plot of age against core depth, based on eleven AMS ^{14}C dates of total organic carbon (TOC) in sediment of X106 core. Filled dots and blanked ones indicate ^{14}C dates and the corresponding calibrated ones, respectively.

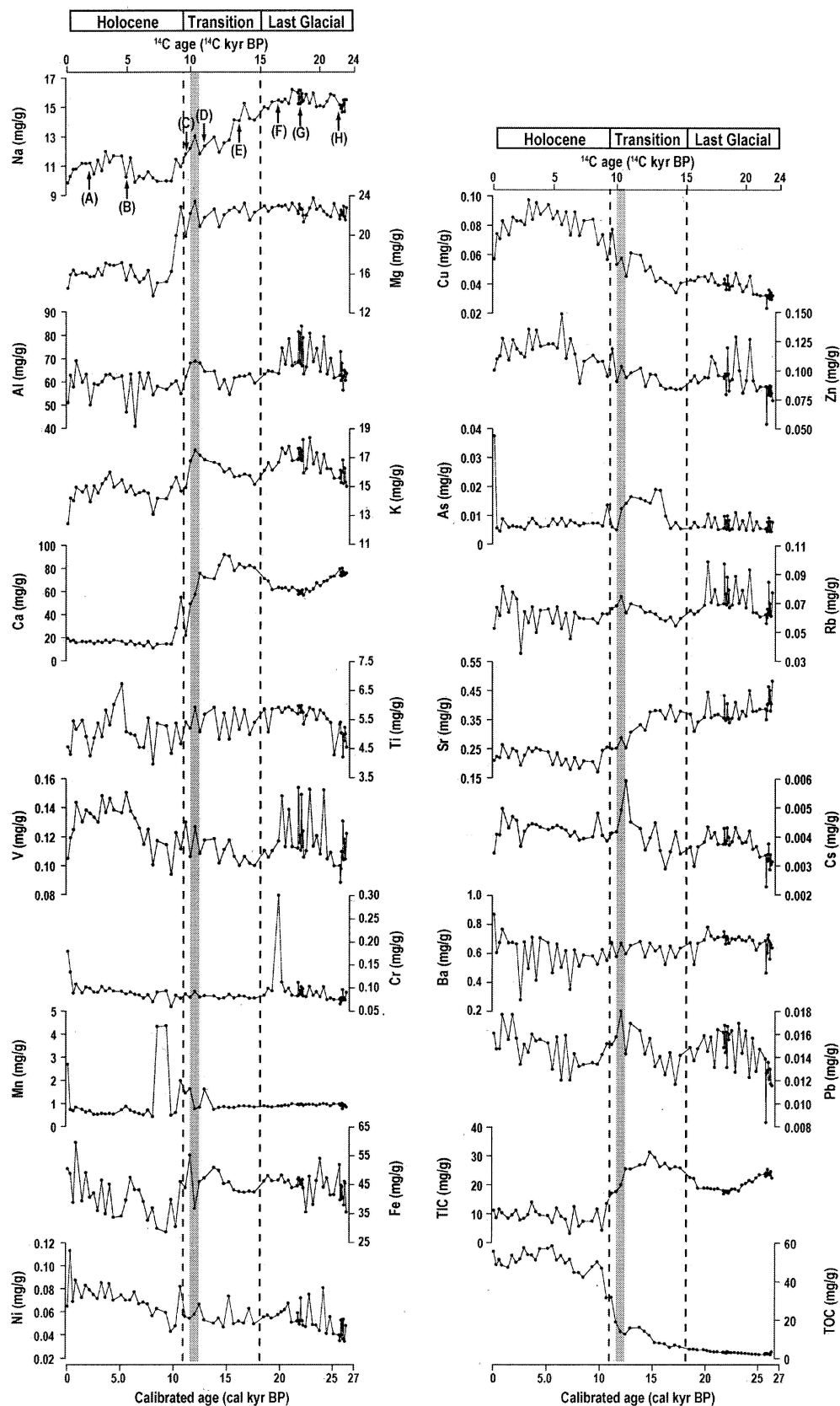


Fig. 3 Sequential profiles of 19 major and trace elements, total inorganic carbon (TIC), and total organic carbon (TOC) in sediment of X106 core. Gray vertical lines indicate a Younger Dryas cold period, which is recognized by Nara et al. (2005) using the same our core. The boundaries among the last glacial period, the last glacial/Holocene transition, and the Holocene period, which are sectioned by dashed lines, are defined by Nara et al. (2005).

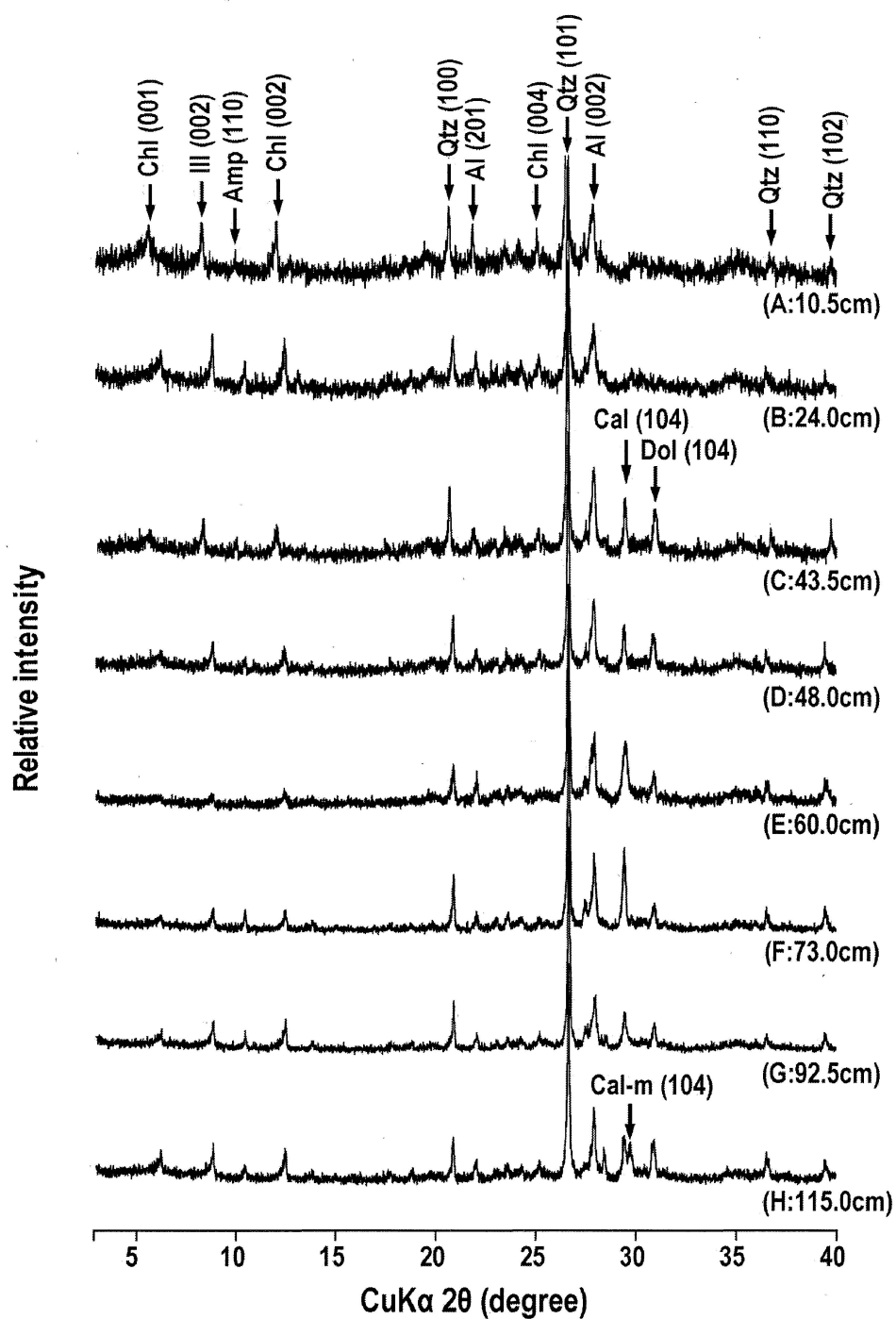


Fig. 4 X-ray diffraction patterns of sediment samples in X106 core from the last glacial to Holocene section. (A)~(H) correspond to those in Fig. 3. Chl. Chlorite; Ill, illite; Amp, amphibole, Qtz, quartz; Cal, calcite, Cal-m, magnesian calcite; Dol, dolomite; and Py, pyrite.

4. 考察

本稿では、第一主成分および第二主成分で累積寄与率が60%を示したため、これら2つの主成分に関する成分の起源と周期的な変動を示した第二主成分について、議論する。

4-1. 第一主成分 (Group-1 と Group-2) に特徴付けられる成分の起源

Na, Mg, Ca, Sr および TIC は、最終氷期から完新世にかけて減少傾向を示す (Fig. 3)。Ca, Mg および TIC は、炭酸塩鉱物の主要成分である。さらに、Na および Sr は calcite および dolomite 中に取り込まれやすい元素であることが知られている (e.g. Okumura and Kitano, 1986; Carpenter and Lohmann, 1992; Tucker and Wright, 1990)。したがって、堆積物中のこれらの成分の量は、主に calcite (CaCO_3)、dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) および Mg-calcite の炭酸塩鉱物の量を反映していると考えられる。これらの炭酸塩鉱物の起源としては、自生性あるいは外来性の2つの可能性が挙げられる。ここでは示さないが、砕屑物量のみを反映する Ti で規格化した Na, Mg, Ca, Sr および TIC の変動が、各元素の変動と類似していることから、Group-1 の変動は、主に自生性炭酸塩鉱物の量を反映していると考えられる。

Group-2 に分類された Ni, Cu, Zn および TOC は、第一主成分において、高い負の因子付加量を示し、Group-1 の成分と逆相関であった。これらの成分の起源については、TOC に関する考察が行われている (Nara et al., 2005)。Nara et al. (2005) は、同 X106 コア中の湖内の生物生産性の指標である全クロロフィル a 濃度と TOC を測定した。その結果、それらが切片 0 を通り正の相関を示したことから、フブスグル湖堆積物中の TOC は湖内の生物量を反映していると考えられている。また、Ni, Cu および Zn は親生物元素であり、有機物との錯体を形成しやすい元素である (e.g. Tribovillard et al., 2006)。したがって、Group-2 の成分については、湖内の生物生産量を反映したものであると考えられる。

4-2. 第二主成分 (Group-3) に特徴付けられる元素の起源

Al, K, Ti, V, Fe, Rb, Cs, Ba および Pb は、塩基性岩から酸性岩中の主要造岩鉱物に含まれる元素である。これらの元素の起源は、主に風化や浸食により集水域から供給される砕屑物である (e.g. Solotchina et al., 2003) と考えられる。

4-3. 第二主成分得点から得られた集水域から砕屑物の周期的な流入

第二主成分得点の変動は、集水域における風化・浸食によってもたらされる砕屑物の相対的な量を反映している (Fig. 6b)。その変動は、7,200 – 9,700, 14,700 – 18,800 および 24,500 – 26,200 cal. yr BP (6,500 – 8,600, 12,500 – 15,600 および 20,500 – 23,500 ^{14}C yr BP) の期間で相対的に低い値を示す (LH-1~LH-3 in Fig. 6B)。これらの期間は、フブスグル湖の周辺が湿潤であったと報告される時期 (Prokopenko et al., 2001 and 2007) と良く一致している。

完新世前期における LH-1 期は、フブスグル湖堆積物中の珪藻量のピーク (Prokopenko et al., 2007) や、花粉含有量と GCM 気候モデルから得られた湿潤極大期 (Bush, 2005) に対応すると考えられる。完新世前期のフブスグル湖における珪藻量の増加は、アジアモンスーンの中央アジアへの入り込みによる降水量および流出量の増加 (Bush et al., 2004) に応答した結果であると考えられている (Prokopenko et al., 2007)。

遷移期および最終氷期における LH-2 期および LH-3 期については、グリーンランド氷床コアと北大西洋の深海コアに記録されるハインリッヒイベント (H1 および H2) とボンドの寒冷化サイクル (Fig. 6c) (Bond et al., 1992, 1993 and 1995) に対応すると考えられる。ハインリッヒイベントは、ボンドの寒冷化サイクルの最も寒冷化が進む時期に起こり、その周期は約7千から1万年である。これには、北大西洋で生じた大規模な氷山の流出が関係していると考えられている (Bond et al., 1995)。さらには、バイカル湖堆積物中には、ハインリッヒイベント時に、フブスグル湖を含むバイカル湖の集水域で、北大西洋から偏西風によって運ばれる降水量が増加した記録が残っている (Prokopenko et al., 2001)。

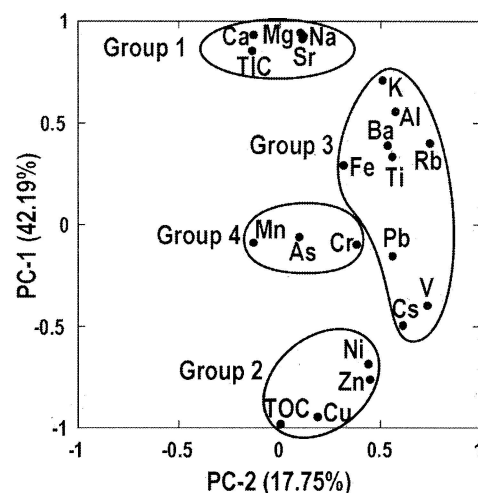


Fig. 5 Relationship of factor loadings between PC-1 and PC-2. Four groups of 21 components classified by the factor loadings are enclosed in ovals. Percentage in parentheses indicates contribution ratio of factors to respective principal component (PC).

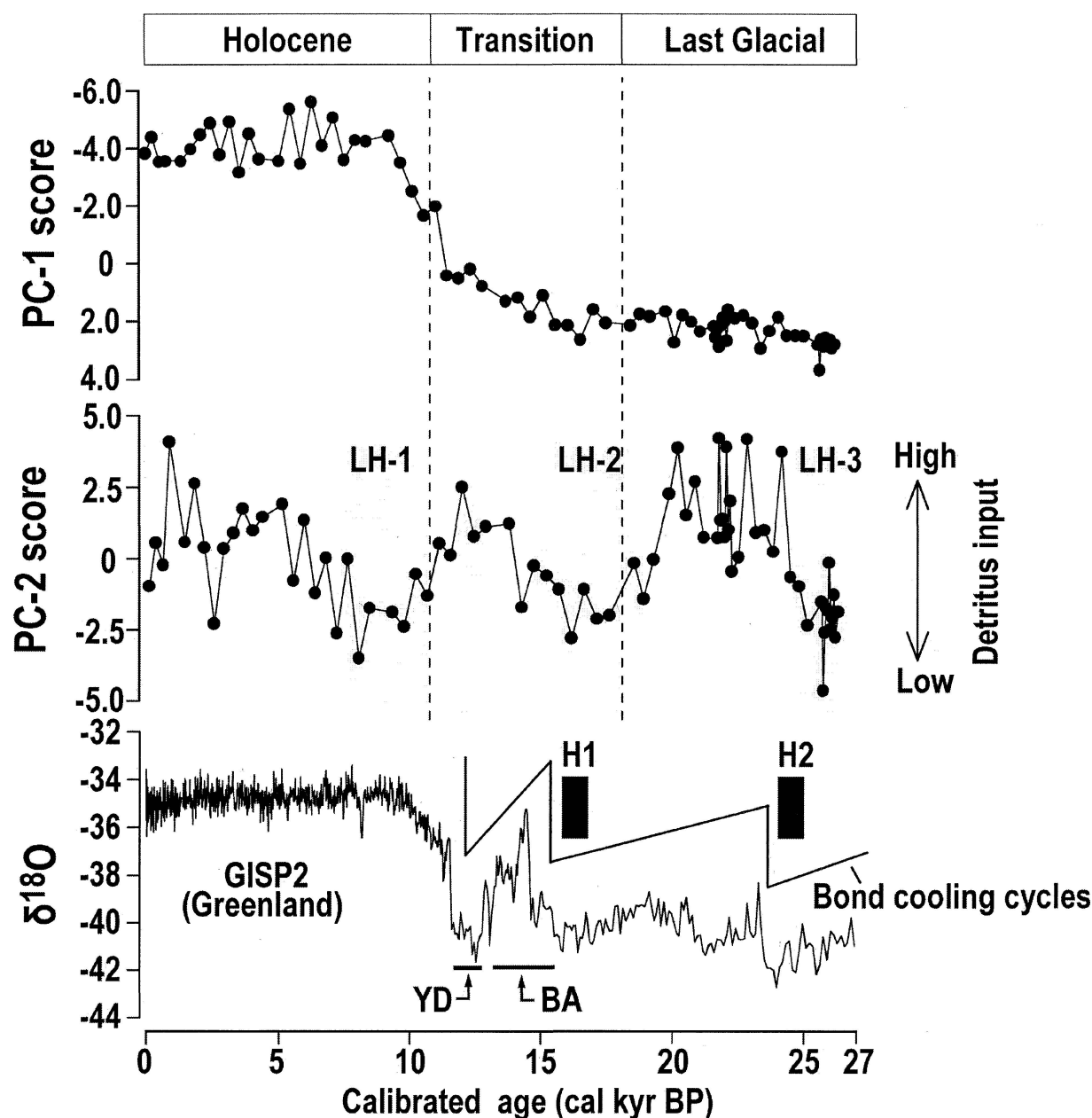


Fig. 6 Comparison of (a) PC-1 score and (b) PC-2 one in X106 core with (c) $\delta^{18}O$ in ice core of the Greenland Ice Sheet Project 2 (GISP2; Grootes and Stuiver 1997; Stuiver et al. 1995). Vertical dotted lines in (a) and (b) show boundaries between the last glacial period, the last glacial/Holocene transition, and the Holocene period. Vertical dash-dotted line in (a) shows boundary between closed lake system and open one. Dark gray line in (a) and (b) indicates Younger Dryas section recognized by Nara et al. (2005). Light gray lines of LH-1 to LH-3 in (b) show sections of relatively low PC-2 input of detritus. H1 and H2 in (c) denote the North Atlantic Heinrich events (Bond et al. 1992, 1995). Also, (c) shows Bond cooling cycle. Abbreviations of BA and YD in (c) represent Bølling-Allerød warm period and Younger Dryas cold period, respectively.

最終氷期から完新世における LH-1 ~ LH-3 期とフブスグル湖周辺域の降水量増加期の一致は、フブスグル湖への碎屑物の流入が低緯度域のアジアモンスーンによる夏の降水量の強度と偏西風による北大西洋からの降雨量の変化に応答していることが示唆される。そこで我々は、この碎屑物の流入プロセスの変動が集水域における植被率とそれに伴う土壌の状態によって、コントロールされると考えた。

フブスグル湖の集水域の植生は、最終氷期ではツンドラ-ステップ型であったが、完新世ではステッ

プ-タイガ型である (Prokopenko et al., 2007; Hövsgöl Drilling Project Group, 2007)。被植率の定量性は不明瞭であるが、いくつかの研究では、土壌の浸食が数百年から数千年スケールや氷期-間氷期スケールの気候変動に伴う植被率の変化に大きな影響を受けることを明らかにしている (Pantaléon-Cano et al., 2003; Huang et al., 2004; Pederson et al., 2005; May et al., 2008)。特に、フブスグル湖周辺域に似た植生地域：タイガ-ステップ型 (Pederson et al., 2005)、ステップ-フォレスト型 (Pantaléon-Cano et al., 2003) そしてタイガ-ツンドラ型 (Huang et al., 2004) でも、そのような現象は確認されており、周辺地域の植被率が減少した結果、土壌の浸食量が増加し、河川堆積物の量が増加したと報告している。

以上のことから、LH-1 期におけるフブスグル湖の堆積プロセスは次のように起こったと考えられる。まず、集水域において降水量が増加した結果、集水域の被植率が増加した。その結果、湖に供給される栄養塩が増加し、次に珪藻の生産量が増加した。それと同時に、集水域における土壌の浸食量が減少し、湖への碎屑物の供給が減少した。最終氷期-完新世遷移期の LH-2 と LH-1 の間については、被植率の減少よりも、永久凍土層の後退により、土壌の浸食量が増加したのかもしれない。

第二主成分に示された碎屑物量は、最終氷期から完新世にかけて、約 8,700 年の周期的な変動を示した (Figs 6b と 7)。世界各所で報告される様々な古気候指標によく認められる数千年スケールの変動は、サブミランコヴィッチサイクルとして言われている。特に最終氷期から完新世にわたる期間で、さらに北大西洋とアジアモンスーンに関係した 8,700 年周期に近いサブミランコヴィッチサイクルとしては、次のような周期が報告されている。まず、アジアモンスーンの影響下にある周期としては、西太平洋における 8–11 kyr の周期 (Oppo et al., 2003) とインド洋における 7–14 kyr の周期 (Pestiaux et al., 1988) がある。そして、北大西洋の気候変化の影響下にある周期としては、北大西洋におけるハインリッヒイベント 7–10 kyr の周期 (Bond et al., 1992, 1993 and 1995) やグリーンランドにおける 7.76 kyr の周期 (Greenland Ice Core Project (GRIP) (Yiou et al., 1995)) などがある。これらの一致した周期は、アジアモンスーンと北大西洋からの偏西風による相互作用がフブスグル湖周辺の気候に対して強い影響を与えていることを示唆しているのかもしれない。

5. 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」) による援助により、行われたものである。粉末 X 線分析については、名古屋大学博物館の吉田英一先生にご指導頂いた。以上の方々に、心より感謝致します。

6. 引用文献

- Bond GC, Lotti R (1995) Iceberg discharges into the North Atlantic on millennial time scales during the last glaciations. *Science* 267:1005–1010
- Bond G, Broecker W, Johnsen S, McManus J, Labeyrie L, Jouzel J, Bonani G (1993) Correlations between climate records from North Atlantic sediments and Greenland ice. *Nature* 365:143–147
- Bond G, Heinrich H, Broecker W, Labeyrie L, McManus J, Andrews J, Huon S, Jantschik R, Clasen S, Simet C, Tedesco K, Klas M, Bonani G, Ivy S (1992) Evidence for massive discharges of icebergs into the North Atlantic Ocean during the last glacial period. *Nature* 360:245–249
- Bush ABG (2005) CO₂/H₂O and orbitally driven climate variability over central Asia through the Holocene. *Quatern Int* 136:15–23
- Bush ABG, Little EC, Rokosh D, White D, Rutter NW (2004) Investigation of the spatio-temporal variability in Eurasian Late Quaternary loess–paleosol sequences using a coupled atmosphere–ocean general circulation model. *Quaternary Sci Rev* 23:481–498
- Carpenter SJ, Lohmann KC (1992) Sr/Mg ratios of modern marine calcite: Empirical indicators of ocean chemistry and precipitation rate. *Geochim Cosmochim Acta* 56:1837–1849
- Fedotov AP, Chebykin EP, Semenov MY, Vorobyova SS, Osipov EY, Golobokova LP, Pogodaeva TV,

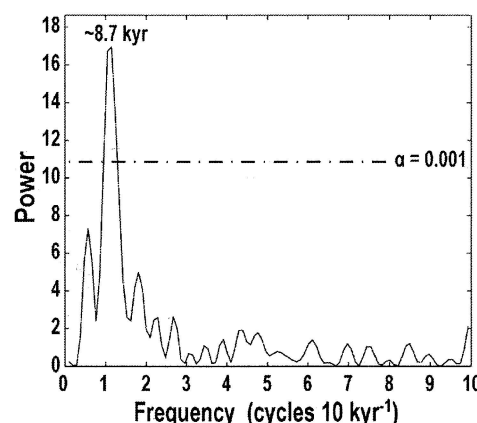


Fig. 7 Fourier power spectrum of a PC-2 score profile over the last glacial/Holocene period shown in Fig. 6b. Dash-dotted line ($\alpha=0.001$) represents the 99 % confidence level of the obtained spectrum.

- Zheleznyakova TO, Grachev MA, Tomurhuu D, Oyunchimeg T, Narantsetseg T, Tomurtogoo O, Dolgikh PT, Arsenyuk MI, Batist MD (2004) Changes in the volume and salinity of Lake Khubsugul (Mongolia) in response to global climate changes in the upper Pleistocene and the Holocene. *Palaeogeogr Palaeoclim Palaeoecol* 209:245–257
- Hövsgöl Drilling Project Group: Abzaeva AA, Bezrukova EV, Bychinsky VA, Fedenya SA, Geletiy VF, Goreglyad AV, Ivanov EV, Inoue G, Kawai T, Kalmychkov GV, Kashiwaya K, Kerber EV, Khomutova MY, Khursevich GK, Kim JY, Krainov MA, Kuzmin MI, Kulagina NV, Letunova PP, Minoura K, Narantsetseg T, Osukhovskaya YV, Oyunchimeg T, Prokopenko AA, Sakai H, Solotchina EP, Tkachenko LL, Tomurhuu D (2007) Structure of bottom sediments in Lake Hövsgöl: geological and climate controls. *Russ Geol Geophys* 48:863–885
- Huang CC, MacDonald G, Cwynar L (2004) Holocene landscape development and climatic change in the low arctic, Northwest Territories, Canada. *Palaeogeogr Palaeoclim Palaeoecol* 205:221–234
- Kitagawa H, Van der Plicht J (2000) Atmospheric radiocarbon calibration beyond 11,900 cal BP from Lake Suigetsu laminated sediments. *Radiocarbon* 42:369–380
- May JH, Zech R, Veit H (2008) Late Quaternary paleosol–sediment-sequences and landscape evolution along the Andean piedmont, Bolivian Chaco. *Geomorphology* 98:34–54
- Nara F, Tani Y, Soma Y, Soma M, Naraoka H, Watanabe T, Horiuchi K, Kawai T, Oda T, Nakamura T (2005) Response of phytoplankton productivity to climate change recorded by sedimentary photosynthetic pigments in Lake Hovsgol (Mongolia) for the last 23,000 years. *Quatern Int* 136:71–81
- Okumura M, Kitano Y (1986) Coprecipitation of alkali metal ions with calcium carbonate. *Geochim Cosmochim Acta* 50:49–58
- Oppo DW, Linsley BK, Rosenthal Y, Dannenmann S, Beaufort L (2003) Orbital and suborbital climate variability in the Sulu Sea, western tropical Pacific. *Geochem Geophys Geosyst* 4 doi:10.1029/2001GC000260
- Pantaléon-Cano J, Yll EI, Pérez-Obiol R, Roure JM (2003) Palynological evidence for vegetational history in semi-arid areas of the western Mediterranean (Almería, Spain). *Holocene* 13:109–119
- Pederson DC, Peteet DM, Kurdyla D, Guilderson T (2005) Medieval Warming, Little Ice Age, and European impact on the environment during the last millennium in the lower Hudson Valley, New York, USA. *Quaternary Res* 63:238–249
- Pestiaux P, Van der Mersch I, Berger A, Duplessy JC (1988) Paleoclimatic variability at frequencies ranging from 1 cycle per 10000 years to 1 cycle per 1000 years: evidence for nonlinear behavior of the climate system. *Clim Change* 12:9–37
- Prokopenko AA, Williams DF, Karabanov EB, Khursevich GK (2001) Continental response to Heinrich events and Bond cycles in sedimentary record of Lake Baikal, Siberia. *Global Planet Change* 28:217–226
- Prokopenko AA, Kuzmin MI, Williams DF, Geletiy VF, Kalmychkov GV, Gvozdkov AN, Solotchin PA (2005) Basin-wide sedimentation changes and deglacial lake-level rise in the Hovsgol basin, NW Mongolia. *Quatern Int* 136:59–69
- Prokopenko AA, Khursevich GK, Bezrukova EV, Kuzmin MI, Boes X, Williams DF, Fedenya SA, Kulagina NV, Letunova PP, Abzaeva AA (2007) Paleoenvironmental proxy records from Lake Hovsgol, Mongolia, and a synthesis of Holocene climate change in the Lake Baikal watershed. *Quaternary Res* 68:2–17
- Reimer PJ, Baillie MGL, Bard E, Bayliss A, Beck JW, Bertrand CJH, Blackwell PG, Buck CE, Burr GS, Cutler KB, Damon PE, Edwards RL, Fairbanks RG, Friedrich M, Guilderson TP, Hogg AG, Hughen KA, Kromer B, McCormac G, Manning S, Ramsey CB, Reimer RW, Remmele S, Southon JR, Stuiver M, Talamo S, Taylor FW, Van der Plicht J, Weyhenmeyert CE (2004) IntCal04 terrestrial radiocarbon age calibration, 0–26 cal kyr BP. *Radiocarbon* 46:1029–1058
- Scargle JD (1982) Studies in astronomical time series analysis. II. Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data. *Astrophys J* 263:835–853
- Short DA, Mengel JG, Crowley TJ, Hyde WT, North GR (1991) Filtering of Milankovitch Cycles by Earth's Geography. *Quatern Res* 35: 157–173
- Tribouillard N, Algeo TJ, Lyons T, Riboulleau A (2006) Trace metals as paleoredox and paleoproductivity proxies: An update. *Chem Geol* 232:12–32
- Tucker ME, Wright VP (1990) Carbonate Sedimentology. Blackwell Science, Oxford
- Yiou P, Jouzel J, Johnsen S, Røgnvaldsson ÖE (1995) Rapid oscillations in Vostok and GRIP ice cores. *Geophys Res Lett* 22:2179–2182

Periodic variation of paleoenvironments found by PCA of 27 kyr geochemical records of Lake Hovsgol sediment.

Takuma Murakami¹, Nagayoshi Katsuta², Koshi Yamamoto¹, Nobuki Takamatsu³, Masao Takano¹, Takefumi Oda⁴, Genki I. Matsumoto⁵, Kazuho Horiuchi⁶, Takayoshi Kawai⁷

¹Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, Aichi 464-8601, Japan

²Faculty of Education, Gifu University, Yanagido 1-1, Gifu 501-1193, Japan

³Department of Chemistry, Faculty of Science, Toho University, Funabashi, Chiba 274-8510, Japan

⁴Nagoya University Center for Chronological Research, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, Aichi 464-8602, Japan

⁵Department of Environmental Information Science, Otsuma Women's University, Tama, Tokyo 206-0035, Japan

⁶Department of Earth and Environmental Sciences, Faculty of Science, Hirosaki University, Hirosaki, Aomori 036-8561, Japan

⁷Association of International Research Initiative for Environmental Studies, 3-1-13 Shibakoen, Minato-ku, Tokyo 105-0011, Japan

Abstract

Geochemical proxy-records in a continuous 27 kyr (thousand years) core sediment from Lake Hovsgol in northwest Mongolia provides a detailed history of the response of the lake itself and the surrounding watershed to climate change during the last glacial to Holocene period. Principle component analysis (PCA) of 19 major and trace elements, total inorganic carbon (TIC), and total organic carbon (TOC) in the bulk-sediment samples revealed that the 21 chemical components are grouped by four assemblages: Group-1 components – Na, Mg, Ca, Sr, and TIC, hosted in carbonate minerals (calcite, dolomite, and magnesian calcite); Group-2 – Ni, Cu, and Zn, recognized as biophilic trace metals, and TOC; Group-3 – Al, K, Ti, V, Fe, Rb, Cs, Ba, and Pb, composed of rock-forming minerals; Group-4 – Cr, Mn, and As, sensitive to redox condition of sediment.

The four element assemblages were originated from relevant 3 factors in subsidence. The group-1 and group-2 components of authigenic products in the lake are end member on the PC-1 score. The group-3 components of detrital materials from watershed contribute to the PC-2 score. The group-4 components of redox sensitive elements contribute to the PC-3 score, which are not the end member due to a small amount. The

first two PC scores possibly suggest a sequential record of paleomoisture evolutions of central Asia. Especially, a variability of PC-2 score indicates erosion/weathering intensity of watershed which might be controlled by the ratio of vegetation cover associated with moisture change.

A periodic variation on ~8.7 kyr cycle was observed in the PC-2 score profile of detritus inputs of Lake Hovsgol over the last glacial and Holocene period. The decrease of detritus input of the lake coincided with the timing of dramatic supply of moisture from Asian monsoon regime and North Atlantic region to Baikal watershed to which Lake Hovsgol belongs. Our geochemical records demonstrate that climate system of continental interior Asia was strongly influenced by climate change on a Milankovitch scale as well as a sub-Milankovitch one.