

チベット湖沼堆積物の年代決定とモンスーン活動の復元

Radiocarbon chronology of a sediment core from Lake Pumoyum Co: Implications for past climate changes in south Tibetan Plateau

渡邊隆広^{1,2*}・奈良郁子²・Nathalie FAGEL³・松中哲也⁴・中村俊夫⁵・箕浦幸治²・

Liping ZHU⁶・Junbo WANG⁶・掛川 武²・西村弥重⁴

Takahiro WATANABE^{1,2*}, Fumiko Watanabe NARA², Nathalie FAGEL³, Tetsuya MATSUNAKA⁴,

Toshio NAKAMURA⁵, Koji MINOURA², Liping ZHU⁶, Junbo WANG⁶,

Takeshi KAKEGAWA², Mitsugu NISHIMURA⁴

¹ 東北大学大学院環境科学研究科・² 東北大学大学院理学研究科・³ University of Liege, Belgium・⁴ 東海大学海洋学部・⁵ 名古屋大学年代測定総合研究センター・⁶ Chinese Academy of Science, China

¹ Graduate School of Environmental Studies, Tohoku University, 6-3 Aramaki Aza Aoba, Aoba-ku, Sendai 980-8578, Japan.

² Graduate School of Science, Tohoku University, 6-3 Aramaki Aza Aoba, Aoba-ku, Sendai 980-8578, Japan.

³ AGEs, Department of Geology, University of Liege, B-18, Allée du 6 Aout, B-4000 Liege, Belgium

⁴ School of Marine Science and Technology, Tokai University, 3-20-1 Orido, Shimizu, Shizuoka 424-8610, Japan.

⁵ Center for Chronological Research, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa, Nagoya 464-8602, Japan.

⁶ Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, No.18 Shuangqing Road, Haidian District, Beijing 100085, China.

* Corresponding author. E-mail: twatanabe@geo.kankyo.tohoku.ac.jp,

twatanabe@y-mail.tohoku-university.jp

Abstract

To reconstruct climatic and environmental changes in the south Tibetan Plateau, a 3.77-m-long sediment core (PY608E-PC) was obtained from Lake Pumoyum Co in August 2006. Because terrestrial plant residues are extremely rare in this core, radiocarbon dating was performed on the total organic carbon fraction. We also estimated the old carbon effect and radiocarbon reservoir age of the total organic carbon fraction. Using these estimates, a new radiocarbon chronology for past climatic changes from ca. 12,500 to 700 cal BP was established. The linear sedimentation rate of the core was founded to be constant at 32.0 cm/kyr, indicating stable sedimentation conditions in Lake Pumoyum Co from the period of the Younger Dryas to the Holocene.

Keywords: Tibetan Plateau; radiocarbon dating, lake sediment, Lake Pumoyum Co, Asian monsoon, climate change

1. はじめに

気候環境変動のメカニズムを理解するためには、過去の環境を復元することが必要である。これまでに、アラビア半島や中国中央部および東部における鍾乳洞から採取された石筍の安定酸素同位体比から、連続的かつ高時間解像度（数十年スケール）でのモンスーン活動が復元されている（Fleitmann et al., 2003; Dykosky et al., 2005; Wang et al., 2008）。しかし、重要な研究対象地域であるチベット高原における研究例は限られている。特に、チベット高原南部は、インドモンスーン（西アジアモンスーン）の影響下にあり（Wang et al., 2002; Zhang et al., 2006; Hren et al., 2009）、気候変動に関する研究を進めるうえで重要な対象地域となる。既報として、チベット高原における地質調査や古環境解析に関する研究が進められているが（Lister et al., 1991; Wang et al., 2002; Ji et al., 2005; Morill et al., 2006; Juyal et al., 2009）、過去 1 万年程度の長期間にわたる連続的かつ高時間解像度（数十年スケール）での環境変動の復元は行われていない。

チベット高原南部に位置するプマユムツォ湖には、60 m 以上の湖底堆積層が存在していることが示されている（西村ら, 2003; 2007）。これまでに、プマユムツォ湖において長さ約 4m の柱状堆積物が 4 本採取されており（PY104PC, PY409PC, PY608W-PC, PY608E-PC）、これらの湖底堆積物の放射性炭素による年代決定に加えて、物理量や化学組成等を分析することにより、連続的な環境変動の復元が可能になると期待される（Wang et al., 2009; Watanabe et al., 2010a; Lu et al., 2011）。特に、湖底堆積物中の粘土鉱物組成は、湖周囲の水循環、乾湿変動の指標になることが報告されており（Sakai et al., 2005; Fagel et al., 2008）、重要な古環境プロキシの一つである。湖底堆積物を用いた環境復元を行うためには、精度の高い年代軸を構築することが必須である。堆積物から得られた放射性炭素年代を正確に解釈するためには、湖外から供給される古い有機物の影響（Old carbon effect）や湖内生物由来の有機物に含まれる淡水リザーバー効果（Fresh water reservoir effect）の影響を把握する必要がある。本稿では、PY608E-PC 堆積物試料の年代値の解釈と補正について報告する。さらに、作成した年代軸を用いて、PY608E-PC の粘土鉱物組成について報告する。

2. 試料と分析法

2006 年 8 月、プマユムツォ湖東部（28°33'14"N, 90°28'17"E; 湖面標高、約 5020 m asl）において湖底堆積物試料（PY608E-PC）をピストンコーラーを用いて採取した。試料の前処理については Watanabe et al. (2009; 2010a) に従った。 ^{14}C 測定は名古屋大学タンデトロン加速器質量分析計（HVEE, Model-4130）を用いて行われた。得られた ^{14}C 年代を IntCal09 (Reimer et al., 2009) により暦年代に校正した。また、粘土鉱物の同定および相対存在量の測定には、X 線回折装置（Bruker, D8 ADVANCE）を用いた。粘土鉱物の分析および解析については Fagel et al. (2008) に従った。

3. 結果と考察

PY608E-PC 試料の年代測定結果を Table 1 および Figure 1a に示す。渡邊ら (2011) において報告されているように、PY608E-PC 試料に含まれる TOC の年代値（校正なし年代）は、コア上部（深

さ 10.1-11.2 cm) で約 4700 ^{14}C BP と古く、コア底部において (深さ 369-269 cm), 約 3000 年の年代値の逆転が認められた。これらの結果は、湖外から供給される相対的に古い有機物の影響と淡水リザーバー効果に起因すると考えられる。

Table 1.

Conventional ^{14}C ages, $\Delta^{14}\text{C}_{\text{TOC}}$, $f_{\text{dead carbon}}$, calculated $\Delta^{14}\text{C}_{\text{PRC}}$, and corrected ages of PY608E-PC sediment core.

Core depth (cm)	Conventional ^{14}C age (BP $\pm 1\sigma$)	$\Delta^{14}\text{C}_{\text{TOC}}$ ^a (‰)	$f_{\text{dead carbon}}$ ^b	Calculated $\Delta^{14}\text{C}_{\text{PRC}}$ ^c (‰)	Corrected age ^d (cal BP, 1 σ range)
10.1-11.2	4731 $\pm$ 32	-445	0.40	-77	565-667
49.7-50.7	6417 $\pm$ 35	-550	0.37	-288	2865-2950
89.3-90.3	8660 $\pm$ 38	-660	0.47	-364	3995-4149
119.9-120.9	9828 $\pm$ 40	-706	0.51	-404	4827-4867
150.5-151.5	12,079 $\pm$ 46	-778	0.62	-414	4877-5257
178.1-179.1	14,074 $\pm$ 50	-827	0.66	-492	6314-6406
207.8-208.8	14,889 $\pm$ 51	-843	0.66	-541	7321-7419
238.6-239.6	14,072 $\pm$ 50	-827	0.62	-542	7325-7426
269.4-270.5	15,306 $\pm$ 54	-851	0.62	-605	8414-8536
303.4-304.4	13,266 $\pm$ 47	-808	0.39	-687	10,794-11,128
337.2-338.2	12,559 $\pm$ 46	-791	0.32	-693	11,175-11,229
349.5-350.5	12,919 $\pm$ 47	-800	0.32	-706	11,641-11,961
358.7-359.8	13,102 $\pm$ 47	-804	0.32	-713	12,027-12,374
368.0-369.0	12,937 $\pm$ 48	-800	0.32	-707	11,716-11,969

^a $\Delta^{14}\text{C}_{\text{TOC}}$ values were measured by AMS.

^b $f_{\text{dead carbon}}$ values were taken from Watanabe et al. (2010b).

^c $\Delta^{14}\text{C}_{\text{PRC}}$ values were calculated via mass balance using $f_{\text{dead carbon}}$ values.

^d These ages were obtained by calibrating the calculated ^{14}C ages of plant residue concentrate (PRC), based on the IntCal09 calibration data set (Reimer et al., 2009).

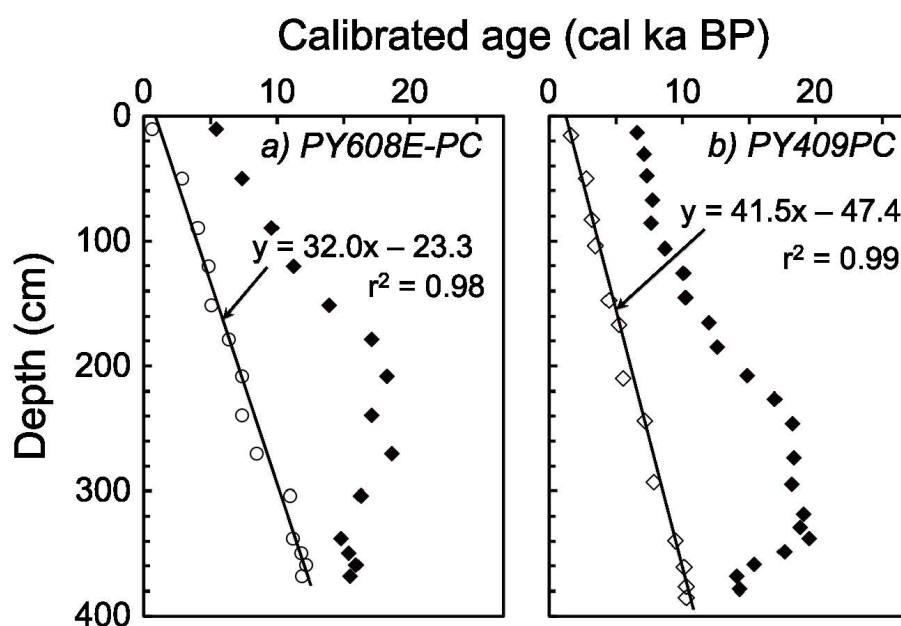


Figure 1. Age correction of PY608E-PC based on the $f_{\text{dead carbon}}$ values of TOC in PY409PC as provided in Watanabe et al. (2010a). a) Corrected ages (open circles) (from Table 1) and calibrated ages (filled diamonds) of TOC in PY608E-PC. b) Calibrated ages of TOC (open diamonds) and PRC fraction (filled diamonds) of PY409PC.

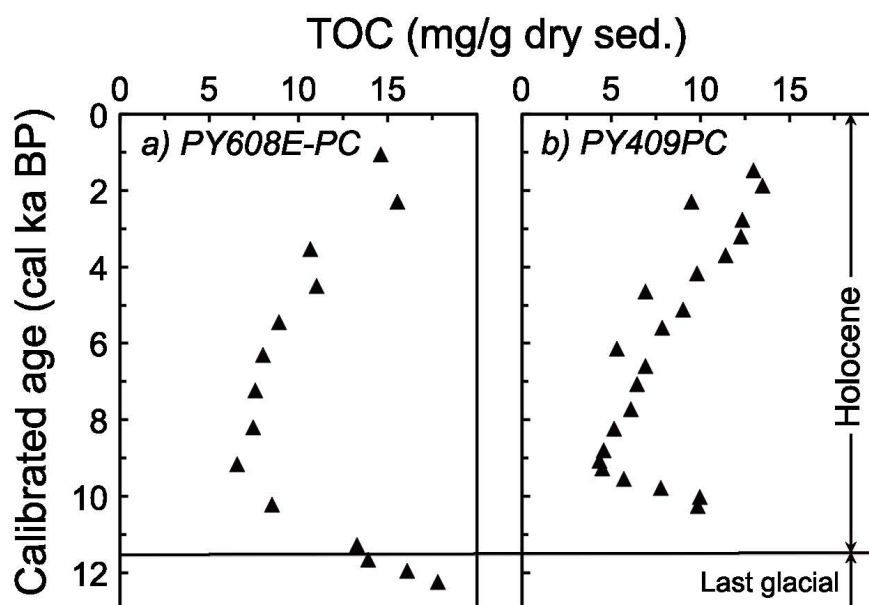


Figure 2. Vertical profiles of TOC concentration in the sediment cores (a) PY608E-PC and (b) PY409PC) with age. The horizontal solid line indicates the boundary between the Pleistocene and Holocene (11,600 cal BP).

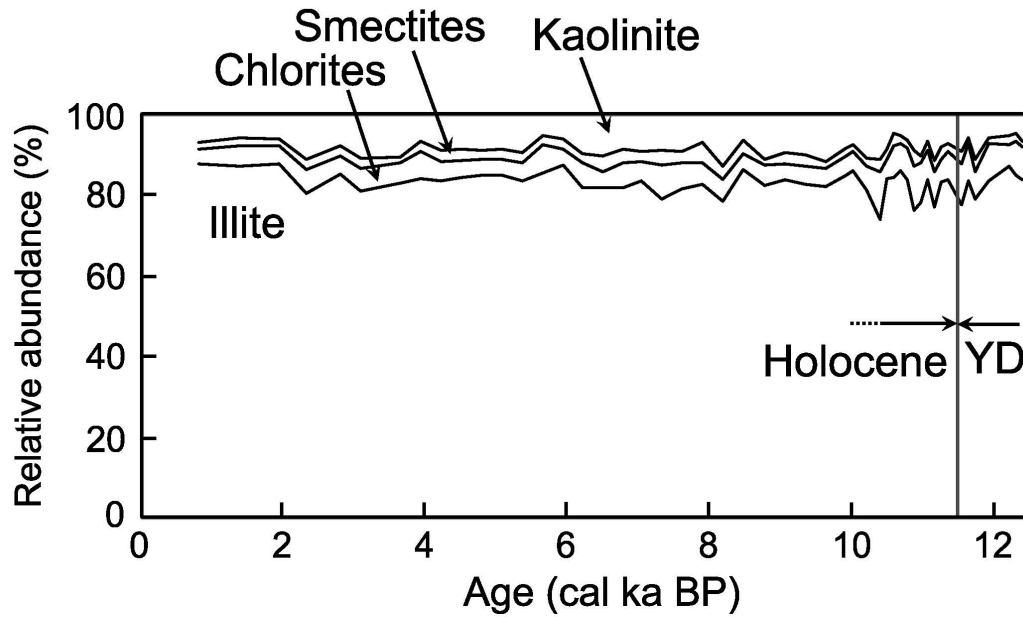


Figure 3. Relative abundance of clay minerals (Illite, Chlorite, Smectite and kaolinite) from PY608E-PC. YD, Younger Dryas (12,800-11,600 cal BP).

そこで、PY608E-PC 試料に含まれる TOC の年代値に関して、陸から供給される相対的に古い有機物の影響や淡水リザーバー効果の影響を下記のとおり評価し、補正および校正した年代を用いて年代軸を作成した (Table 1, Figure 1)。

- 既報である PY409PC の年代軸は、陸上植物残査の ^{14}C 年代に基づいて作成されている (Figure 1b; Watanabe et al., 2010a)。同時に TOC の ^{14}C 年代も報告されており、マスバランス計算 (式 1-3) によって、 ^{14}C を含まない古生層等から供給される古い有機物の混入割合 ($f_{\text{dead carbon}}$) を算出することが可能である。この計算により過去約 12,500 年間の Old carbon effect を復元した (Table 1)。
- 得られた $f_{\text{dead carbon}}$ から TOC の年代値を補正し (式 4)、PY608E-PC における陸上植物残査の ^{14}C 年代を算出した (calculated $\Delta^{14}\text{C}_{\text{PRC}}$)。
- 算出した補正年代値を IntCal09 によって暦年校正し (Reimer et al., 2009)、PY608E-PC の年代軸を構築した。

$$\Delta^{14}\text{C}_{\text{TOC}} = (\Delta^{14}\text{C}_{\text{PRC}} \times f_{\text{PRC}}) + (\Delta^{14}\text{C}_{\text{dead carbon}} \times f_{\text{dead carbon}}) \quad (1)$$

$$\Delta^{14}\text{C}_{\text{dead carbon}} = -1000\text{‰} \quad (2)$$

$$f_{\text{PRC}} + f_{\text{dead carbon}} = 1 \quad (3)$$

$$\text{calculated } \Delta^{14}\text{C}_{\text{PRC}} = \{ \Delta^{14}\text{C}_{\text{TOC}} - (-1000 \times f_{\text{dead carbon}}) \} / (1 - f_{\text{dead carbon}}) \quad (4)$$

上記の式により補正された PY608E-PC 試料底部の校正年代は約 12,500 cal BP であり、堆積速度は 32 cm/kyr であった (Figure 1a)。本研究により堆積速度はほぼ一定であることが示され、安定した堆積環境が継続していたことが示唆された。次に、過去 12,500 年間にわたる PY608E-PC に含まれる TOC 含有量の経年変動を Figure 2 に示す。PY608E-PC の TOC は、陸上植物残査の ^{14}C 年代を用いて年代決定した PY409PC の TOC 深度分布 (Watanabe et al., 2010a) とよく一致した。この結

果は、PY608E-PC における TOC の ^{14}C 年代を基に作成した補正年代軸が十分に信頼できることを示す。両者の TOC 含有量は、完新世の気候最適期（およそ 9000 から 6000 cal BP）において極小値を示し、TOC が減少した時期は、湖の拡大時期と一致すると考えられる。今後、TOC の質量堆積速度（フラックス）を算出し、TOC 変動の要因を詳細に検討する必要がある。

PY608E-PC 試料の粘土鉱物組成は、イライトが主成分であり相対存在量は 74%から 88%であった（Figure 3）。他の粘土鉱物としてカオリナイト、クロライト、スメクタイトが検出されたが、相対存在量は少なく（カオリナイトで最大 13%, Figure 3）、PY608E-PC 試料の全層にわたり粘土鉱物の相対存在量に大きな変動は見られなかった。少なくとも、プマユムツォ湖堆積物中の粘土鉱物の供給源に関する情報は現段階で得ることはできなかった。湿潤化による加水分解作用の促進により、イライト中のカリウムが溶脱し、スメクタイトが増加することから、これまでに湖沼堆積物中のスメクタイト／イライト比が風化指標として古環境変動解析に用いられてる（Fagel et al., 2008）。しかし、PY608E-PC 試料におけるスメクタイトの相対存在量は 5%以下であり、スメクタイト／イライト比を乾湿変動の指標として使用することは困難である。チベット・プマユムツォ湖周辺は標高 5000m の山岳乾燥地帯であり、モンスーン活動の変動による乾湿・降水量の変化が粘土鉱物組成に与える影響は僅かであると考えられる。従って、乾湿変動に起因する粘土鉱物の風化過程をプマユムツォ湖の堆積物から復元するためには他の指標が必要となる。他の風化指標および粘土鉱物の供給源に関する指標として、イライトの半値幅が用いられているが（Horiuchi et al., 2000; Sakai et al., 2005）、PY608E-PC 試料のイライト半値幅についても明瞭な変動は認められなかった。プマユムツォ湖堆積物を対象として粘土鉱物から気候変動を読み取るためには、今後、新たな粘土鉱物の結晶度指標を用いた解析など、分析手法や解析手法の再検討が必要であると考えられる。

4. 結論

放射性炭素年代測定結果に基づき、プマユムツォ湖から採取した湖底堆積物（PY608E-PC）の年代軸を作成した。年代軸構築のため、堆積物に含まれる植物残査と TOC との放射性炭素年代値を比較し、湖外から供給される古い有機物の影響（Old carbon effect）と湖内生物由来の有機物に含まれる淡水リザーバー効果（Freshwater reservoir effect）の影響を評価した。PY608E-PC 試料の底部年代は約 12,500 cal BP であり、試料最上部の年代は約 700 cal BP であった。堆積速度はほぼ一定（32 cm/kyr）であり、PY608E-PC 試料にヤンガードリアス期以降の連続した堆積層が含まれることが明らかとなった。粘土鉱物は、イライト、カオリナイト、クロライト、スメクタイトで構成されており、主成分はイライトであった（74-88%）。粘土鉱物組成に関しては、PY608E-PC 試料の全層にわたり大きな変動は見られなかった。粘土鉱物の結晶度指標など、新たな解析を進める必要がある。

謝辞

名古屋大学年代測定総合研究センターのスタッフの皆様には、試料調製に際して大変お世話になりました。試料採取に関しては東海大学および中国科学院チベット高原研究所を中心とするチベット・プマユムツォ学術調査隊の皆様には深く感謝申し上げます。本研究の一部は、科学研究費補助金（日本学術振興会・特別研究員奨励費 No.20-4967, 研究代表者 渡邊隆広；日本学術振興会・二

国間交流事業共同研究 FY2009-2011, 研究代表者 西村弥重) の援助により行われました。

引用文献

- Dykoski, C.A. et al., *Earth Planet. Sci. Lett.* **233**, 71 (2005).
 Fagel, N. et al., *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* **259**, 230 (2008).
 Fleitmann, D. et al., *Science*. **300**, 1737 (2003).
 Friedrich, M. et al., *Quat. Sci. Rev.* **20**, 1223 (2001).
 Horiuchi et al., *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* **157**, 95 (2000).
 Hren, M.T. et al., *Earth Planet. Sci. Lett.* **288**, 20 (2009).
 Ji, J. et al., *Earth Planet. Sci. Lett.* **233**, 61 (2005).
 Juyal, N. et al., *J. Asian Earth Sci.* **34**, 437 (2009).
 Lister, G.S. et al., *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* **84**, 141 (1991).
 Lu, X. et al., *Chinese Sci. Bull.* **56**, 2931 (2011).
 Morrill, C. et al., *Quat. Res.* **65**, 232 (2006).
 西村ら, 2001 日中共同チベット・プマユムツォ湖学術調査・研究報告書. pp157 (2003).
 西村ら, 2004 日中共同チベット・プマユムツォ湖学術調査・研究報告書. pp127 (2007).
 Reimer, P.J. et al., *Radiocarbon* **51**, 1111 (2009).
 Sakai, T. et al., *J. Paleolimnol.* **33**, 105 (2005).
 Wang, R.L. et al., *Earth Planet. Sci. Lett.* **203**, 461 (2002).
 Wang, J. et al., *Nature*. **451**, 1090 (2008).
 Wang, J. et al., *J. Paleolimnol.* **42**, 303 (2009).
 Watanabe, T. et al., *Earth Planet. Sci. Lett.* **286**, 347 (2009).
 Watanabe, T. et al., *Chem. Geol.* **277**, 21 (2010a).
 Watanabe, T. et al., *Nucl. Instrum. Methods B* **268**, 1070 (2010b).
 渡邊ら, 名古屋大学加速器質量分析計業績報告書 (XXII) . pp191 (2011).
 Zhang, W. et al., *Quat. Int.* **154-155**, 32 (2006).

要旨

チベット高原南部における過去のモンスーン活動の影響を評価するため、プマユムツォ湖 (28°33'14"N, 90°28'17"E; 湖面標高, 約 5020 m) から長さ 3.77 m の湖底柱状堆積物を採取した (PY608E-PC)。現在のチベット高原南部はモンスーン活動の影響下にあり、本地域における環境変動を復元することにより、モンスーン活動の消長と変動メカニズムの解明に繋がることが期待される。PY608E-PC 試料に含まれる植物残査の存在量は極めて少ない。従って、堆積物中に含まれる全有機炭素 (TOC) の放射性炭素年代測定結果に基づいて PY608E-PC 試料の年代決定を試みた。堆積物中の植物片の年代値が既に得られている PY104PC 試料の年代測定結果から、湖外から供給される古い有機物の影響 (Old carbon effect) の混入割合を算出し、PY608E-PC 試料の TOC の年代値を補正した。PY608E-PC 試料底部の年代は約 12,500 cal BP であり、堆積速度は 32 cm/kyr であった。