# チベット高原南東域における過去 19,000 年間 に亘る水循環の歴史的変動

松中哲也<sup>1)</sup>・西村弥亜<sup>1)</sup>・中村俊夫<sup>2)</sup>・渡邊隆広<sup>3)</sup>・Liping Zhu<sup>4)</sup> ・寺井久慈<sup>5)</sup>・中野志穂<sup>5)</sup>・奈良郁子<sup>6),3)</sup>・今井章雄<sup>6)</sup>

1)東海大学大学院理工学研究科 (e-mail:nisimura@scc.u-tokai.ac.jp; phone: 054-334-0411) 2)名古屋大学年代測定総合研究センター

3) 東北大学大学院理学研究科

4)Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Science, China

5)中部大学大学院応用生物学研究科

6)国立環境研究所

#### 1. はじめに

チベット高原は広大で、かつ、高低差の大きい起伏に富んだ所であることから、そこにおけ る、気候・環境変動を明らかにするためには、その気候の違いに応じ、いくつかの地域に分け て研究を行う必要がある。最近 10 年間で、湖底柱状堆積物、もしくはアイスコアなど、高時間 分解能で連続した試料を使った古環境研究が数多くなされてきた。しかしながら、対象となっ た地域は、西部、中央部、東部および北東部に限られ(e.g. Wang et al., 2002; Wu et al, 2006; Hong et al., 2003; Ji et al., 2005)、年代的にも Last Glacial Maximum (LGM, 19~23 cal. ka B.P; Mix et al., 2001)を越える試料は、これ迄報告された 16 地点のうち、わずか 4 地点しかない。

チベット高原の中でも、ヤルツァンボ河東部域を中心とした、北緯 27°から 30°、東経 83°か ら 94°に位置し、高山温帯半乾燥気候区として区分される地域(以下、チベット高原南東域)にお ける湖底堆積物を用いた詳細な古環境研究は、ほとんど報告されていない。この地域の現在の 気候は、夏季において、主に湿潤な南西モンスーンによって、一方、冬季において、寒冷・乾 燥な北東モンスーン、および偏西風によって支配されて(Ben and Owen, 1998; Tian et al., 2001)、 気候・環境の変動に対しては、かなり敏感に応答する地域と考えられる。このことから、特に 水循環の歴史的変動に注目し、チベット高原南東域の LGM 以降の古環境復元を、ヒマラヤに 近いプマユムツォ湖(28°34′N, 90°23′E)から得た柱状堆積物を対象に行った。

#### 2. 研究地域と試料

プマユムツォ湖は、ヒマラヤの主脈から北へ 40km、標高 5030m に位置する、比較的規模の 大きい構造断層湖である(面積:約 280km<sup>2</sup>、最大水深:65m)。湖の西側には、ヒマラヤの氷河 を起源とする主要な流入河川が存在し、東側に一本の流出河川がある。

2001 年と 2004 年に、湖東部の水深 46.5m 地点と湖中央部に近い水深 62.2m 地点から、ピストンコアラーを用いて、約 4m の柱状堆積物(PY104PC と PY409PC)を採取した。また、後者からは、グラビティーコアラーを用いて約 50cm の表層堆積物(PY409G)を採取した。一方、湖周

辺と湖内の様々な地点から、堆積有機物の主な供給源となりうる、陸上植物、土壌、水生植物、 およびプランクトンなどを採取した。

## 3. 分析方法

## 3.1 Sand contents

柱状堆積物試料を 1cm 毎に細分し、Milli-Q 水を用いて、Wet-sieving 法で 125µm と 63µm の 篩にかけ、3 種の画分に分別した。125µm 以上の画分を、Plant Residues (P.R)と砕屑性の無機粒 子に分けた。これらのうち、Sand (63µm 以上の粒子)について、P.R を除いた堆積物に対する含 有量を求めた。

# 3.2 $\delta^{13}$ C

全有機炭素の安定炭素同位体比( $\delta^{13}$ C)の分析は、脱炭酸塩のための酸処理(6N-HCl, 2days)を行った堆積物(<63 $\mu$ m)と P.R を対象に、元素分析計(Thermo Flash 112 series)に連動した質量分析計(Thermo Delta X Advantage)を用いて行った。また、同様に酸処理を行った土壌試料(<63 $\mu$ m)、および生物体試料についても、 $\delta^{13}$ C を測定した。

# **3.3 Ca-Carbonates**

炭酸塩態 Ca の分析は、基本的に Tessier et al. (1979)に従い、概略以下の様に行った。1 試料 につき約 0.1g の乾燥堆積物(<63µm)を2 つ用意し、一方は、1M-MgCl<sub>2</sub> (pH=7.0, 10ml)で交換態 の Ca を、もう一方は、1M-CH<sub>3</sub>COONa+CH<sub>3</sub>COOH (pH=5.0, 10ml)で炭酸塩態+交換態の Ca を抽 出した。2 種の Ca を原子吸光光度計(HITACHI 180-80)で測定し、炭酸塩態 Ca を算出した。

## 4. 結果と考察

チベット高原南東域におけ る水循環の歴史を明らかにする ために、プマユムツォ湖に流れ 込む、陸水の流入量の変化につ いて、特に、 $\delta^{13}$ C、Sand、およ び Ca-Carbonates の深度変化を 基に解析を行った。

# 4.1 堆積有機物の供給源を支 配する湖水域の変化

各堆積物の  $\delta^{13}$ C の年代分布 を Fig.1 a に示した。各試料の 年代は、Watanabe et al. (2008) によって決定された。ここでは、 堆積物の時代区分の詳細につ いては割愛するが、堆積有機物 の質的な違いを基に、CN ratio と  $\delta^{13}$ C の変動特徴から、17,200



年前、15,000年前、および 9,300年前を境とし、Stage III、Stage II、Stage Ib、および Stage Ia に区分した。

 $\delta^{13}$ Cの深度変化は、Stage III と Stage II において、-19~-11‰と重い値を示したが、15,000 年前を境に、-16‰から-25‰へと急速に軽くなった。その後、Stage Ib と Stage Ia では、基本的に -25~-22‰の軽い値を示した。プマユムツォ湖における、堆積有機物の主な供給源となりうる 物質の $\delta^{13}$ C 値を、Fig.1 b に示した(湖周辺の土壌の値は Fig.1 a に示した)。それらを基にすると、 Stage III と Stage II における、堆積有機物の主要な供給源は、それらの堆積層に多量(数%~45%) に残存していた水生植物の *Potamogeton sp*.であることが解った。一方、Stage Ib と Stage Ia にお いて、P.R が、-25~-23‰の軽い $\delta^{13}$ C 値を示し、陸上植物であること(Fig.1 b)、および堆積物の  $\delta^{13}$ C 値が、およそ湖周辺の土壌の範囲( $\delta^{13}$ C: -26~-23‰)にあること(Fig.1 a)から、この時代に おける有機物供給源は、主に陸上植物を母材とした土壌有機物であることが示唆された。

これらのことから、PY104PC 地点周辺域は、Stage III と Stage II の時代において、Potamogeton が、かなり生育できる水深の浅い環境(水深数 m 程度)であったこと、および 15,000 年前以降、 湖水域が拡大することによって、Potamogeton が生育できない水深の深い環境になったことが 推測される。 Sand (%)

# 4.2 陸水の流入量と湖水域の歴史的変動

#### 4.2.1 Sand profiles

Sand の深度変化は、Stage III から Stage II にかけて、 増減を繰り返しながら約 50%まで漸増したが、Stage Ib において、今度は増減を繰り返しながら約 5%まで漸 減した。その後、Stage Ia では、突発的に高くなるい くつかの層を除くと、ほぼ 5%以下に維持された。一 般に、湖底柱状堆積物中の Sand 含有量の変化は、主と して陸水の流入量と湖水域の変化によって支配されて いることが知られている。従って、Stage III と Stage II における Sand の変動は、陸水の流入量が増減を繰り返 しながら、時代と共に増加したことを反映していると 考えられる。

一方、Stage Ib において、Potamogeton が認められな くなったことから、Sand の減少傾向は、湖水域が拡大 し、試料採取地点から湖岸までの距離が遠くなること





によって、Sand の運搬が徐々に淘汰される環境になったことを反映していると考えられる。す なわち、この時代における Sand の変化は、陸水の流入量が増減を繰り返しながら、時代と共に 増加したことを意味している。また、同様に、Sand の変化から、Stage Ib の中頃の Younger Dryas (YD)期に当る 12,800~11,600 Cal. ka BP において、陸水の流入量が徐々に増加したことが示唆 された。その後、Stage Ia における Sand の分布は、9,300 年前を境に湖がほぼ滞水状態に達し たことを意味し、陸水の流入量は、極めて高かったと考えられる。



#### 4.2.2 Ca-Carbonate profiles

特に Stage Ib における陸水の流 入量の増加は、Ca-Carbonates の深 度変化(Fig.3 a)から裏付けること ができる。一般に、湖沼堆積物中 の炭酸カルシウムの起源は、外来 性と自生性に分けられ、自生性と して生物由来と化学的に沈殿する ものがある。EPMA (Electron Probe Micro Analyzer)による電子顕微鏡 観察の結果、どの層においても、 石灰質の生物遺骸はなく、炭酸カ ルシウムのほとんどは、主に粘土 粒子の表面に沈着した状態で認め られ、湖内で化学的に沈殿したも のであることが解った。その主要 な生成プロセスとして、湖水の蒸 発量が陸水の流入量より高くなる

**Fig.3 Ca-Carbonates (a) と PY104PC の年代 (b) の鉛直分布図** ことによって析出することが知られている。

Stage Ib において、Ca は 15,000 年前から急速、かつ段階的に低下し、全く検出されなくなった。この変化は、15,000 年前を境に、湖水の蒸発量に比べて、陸水の流入量が急速に増大したことを意味し、Sand の分布特徴から示唆された、陸水の流入量が増加し、湖水域が拡大したことと一致する。

また、Stage Ib の中頃の、13,000~12,200 年前に、突如として高くなる Ca のピークが認めら れた。この時代は、およそ YD 期に対応することから、湖は、その影響を受け、一時的に湖水 の蒸発量が高くなったことが考えられる。しかしながら、その真っ只中である 12,200 年前頃か ら、Ca が急速に低下し、再び検出されなくなった。この 12,200 年前と YD 期の終わりの 11,600 年前との年代差は、この時代の誤差(±100 年)を考慮しても、明らかに有意な差であることが解 る。そこで、その原因として現在考えられることは、18,400~12,200 年前において、現在より 水位が低下していたため、PY104PC 地点は、主水域から独立した半閉鎖的な環境下にあったが、 特に 15,000 年前以降の水位の上昇によって、12,200 年前を境に主水域と繋がった可能性が挙げ られる。この可能性は、以下の 2 つの理由から支持される。1 つ目は、先に述べた様に、YD 期を通して、陸水の流入量が徐々に増加していたこと、および 2 つ目は、PY104PC 地点より中 央部に近い、水深 51.5m 地点で採取した他のコアには、YD に対応する時期に、同様の炭酸カ ルシウムのピークは全く検出されなかったことである(Wang et al., in press)。つまり、プマユム ツォ湖周辺において、YD による気候の乾燥化は、湖全域で炭酸カルシウムを析出させる程大 規模でなかったが、PY104PC 地点は、沿岸域に近く、かつかなり閉鎖的な環境下であったため に、YD の影響を明瞭に記録したと考えられる。 一方、Stage Ia において、Fig.3 b に示した堆積速度が Stage Ib に比べて3倍も高いことから、 明らかに、陸水の流入量が Stage Ib に比べて高いことが解る。しかしながら、Ca の分布は時代 と共に高くなる傾向を示した。これらのことは、この時代、湖水の蒸発量が徐々に高くなって いったが、陸水の流入量が高く維持されたことを意味する。従って、Sand の分布特徴から示唆 された様に、ほぼ湖が滞水状態に保たれていたと考えられる。

#### 4.2.3 陸水の流入量と湖水域のまとめ

これまでの議論から、プマユムツォ湖における、過去 19,000 年間の陸水の流入量と湖水域の歴史的変動について、以下のことが示唆された。

- 1) 18,400年前頃当時、陸水の流入量は少なく、プマユムツォ湖の水深は、現在よりも40m以上低下していた。その後、15,000年前にかけて、陸水の流入量は増減を繰り返しながら、時代と共に増加していたが、それよりも湖水の蒸発量の方が勝っていたため、湖水域は現在よりも縮小し、PY104PC地点は主水域から独立した半閉鎖的な環境であった。
- 2) 15,000 年前から、湖水の蒸発量より陸水の流入量が、著しく勝り、湖水域は急速に拡大し始め、12,200 年前に、PY104PC 地点は主水域と繋がった。その後も陸水の流入量は増加し、 9,300 年前頃に湖水域がほぼ滞水状態に達した。
- 3) 9,300 年前から現在にかけて、湖水の蒸発量は時代と共に増加していったが、陸水の流入量 が高く維持されていたため、湖は滞水状態に保たれていた。

#### 4.3 過去 19,000 年間に亘る陸水の流入量を支配する気候・環境要因

現在のプマユムツォ湖に流れ込む陸水は、氷河や永久凍土からの融氷水、および南西モンス ーン由来の降水の両方に由来する。ここでは、各 Stage における陸水が、主として何に由来す るかについて、世界的な気候イベントを背景に検討を行った。

Stage III と Stage II (18,400~15,000 年前)は、およそ LGM 後の Oldest dryas (OD)期に当たり、 世界的に未だ寒冷・乾燥的な気候であった。この時代、日射量の増加に伴って、チベット高原 を含む世界の多くの地域において、氷河や氷床が溶け始めたこと(Peltier, 1994; Benn and Owen, 1998)を考慮すると、湖に流入する陸水は、主として、周囲の山岳地帯の氷河や湖周辺の永久凍 土からの融氷水に由来していたと考えられる。

Stage Ib (15,000~9,300 年前)は、およそ Bølling/Allerød (B/A)期から Preboreal (PB)期の終わり 頃に当たり、世界的に温暖・湿潤的な気候へ移行する時代である。湖では、Ca-Carbonates の分 布から示唆された様に、陸水の流入量に比べて湖水の蒸発量が低下していたことを考慮すると、 融氷水に加え、降水の寄与が、著しく増加したことが示唆される。

Stage Ia (9,300 年前~現在)は、およそ Hypsithermal (HT)期から現在までの Neoglaciation (NG) 期に当たり、極めて温暖・湿潤的な気候から少し寒冷・乾燥化が進む時代である。湖周辺域で は、それまでの時代に比べて陸水の流入は最も活発化し、現在まで維持されていた。この陸水 の流入は、融氷水と降水の両方によると考えられるが、どちらの寄与が多いかに関する具体的 な情報は得られてない。

#### 5. 結論

チベット高原南東域における、過去 19,000 年間に亘る陸水の流入の歴史的変動について、 以下のことが示唆された。

- 1) OD 期において、特に 18,000 年前頃から deglaciation によって、主として融氷水に由来する、陸水の流入が活発化し、15,000 年前にかけて、増減を繰り返しながら徐々に活発化した。
- 2) B/A 期の開始時期より 300 年早い 15,000 年前から、さらに陸水の流入が活発化し、融氷水 に加えて降水の寄与が著しく増加した。
- 3) YD 期において、一時的に乾燥化が進んだが、陸水の流入が徐々に活発化し、必ずしも寒冷・ 乾燥的な気候ではなかった。
- 4) HT 期から陸水の流入がこれまでの時代に比べて最も活発化し、現在まで維持された。

## 謝辞

カルシウムの分析にあたって、東海大学の佐藤義夫教授と竹松伸博士に大変お世話になりま した。また、中部大学の南基泰准教授に、堆積物中の植物残渣の同定を行っていただきま した。ここに記して感謝致します。

# 引用文献

- Benn D.I. and Owen L.A., The role of the Indian summer monsoon and the mid-latitude westerlies in Himalayan glaciation : review and speculative discussion, J. of the Geol. Soc., 155 (1998) 353-363
- Hong Y.T., Hong B., Lin Q.H., Zhu Y.X., Shibata Y., Hirota M., Uchida M., Leng X.T., Jiang H.B., Xu H., Wang H. and Yi L., Correlation between Indian Ocean summer monsoon and North Atlantic climate during the Holocene, Earth and Planet. Sci. Let., 211 (2003) 371-380
- Ji J., Shen J., Balsam W., Chen J., Liu L. and Liu X., Asian monsoon oscillations in the northeastern Qinghai-Tibet Plateau since the late glacial as interpreted from visible reflectance of Qinghai Lake sediments, Earth and Planet. Sci. Let., 233 (2005) 61-70
- Mix A.C., Bard E. and Schneider R., Environmental processes of the ice age: land, oceans, glaciers (EPILOG), Quat. Sci. Rev., 20 (2001) 627-657
- Peltier W.R., Ice age paleotopography, Science, 265 (1994) 195-201
- Tessier A., Campbell P.G.C. and Bisson M., Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals, Analyt, Chem., 51 (1979) 844-851
- Tian L., Yao T., Numaguti A. and Sun W., Stable isotope variations in monsoon precipitation on the Tibetan Plateau, J. Meteorol. Soc. Jpn., 79(5) (2001) 959-966
- Wang R.L., Scarpitta S.C., Zhang S.C. and Zheng M.P., Late Pleistocene / Holocene climate conditions of Qinghai-Xizhang Plateau (Tibet) based on carbon and oxygen stable isotopes of Zabuya Lake sediments, Earth and Planet. Sci. Let., 203 (2002) 461-477
- Wang J., Zhu L., Nishimura M., Nakamura T., Ju J., Xie M., Watanabe T. and Matsunaka T., Spatial variability and correlation of environmental proxies during the past 18,000 years among multiple cores from Lake Pumoyum Co, Tibet, China, J. of Paleolim. (in press)
- Watanabe T., Nakamura T., Nishimura M., Matsunaka T., Minami M., Kakegawa T., Nara F.W., and Zhu L., Radiocarbon chronology of a sediment core from Lake Pumoyum Co in the southeastern Tibetan plateau, Verh. Internat. Verein. Limnol. 30(4) (2008)
- Wu Y., Lucke A., Jin Z., Wang S., Schleser G.H., Battarbee R.W. and Xia W., Holocene climate development on the central Tibetan Plateau : A sedimentary record from Cuoe Lake, Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol. 234 (2006) 328-340

# Historical change in water circulation on the southeastern Tibetan Plateau over the past 19,000 years

Tetsuya Matsunaka<sup>1)</sup>, Mitsugu Nishimura<sup>1)</sup>, Toshio Nakamura<sup>2)</sup>, Takahiro Watanabe<sup>3)</sup>, Liping Zhu<sup>4)</sup>, Hisayoshi Terai<sup>5)</sup>, Shiho Nakano<sup>5)</sup>, Fumiko Nara-Watanabe<sup>6), 3)</sup>, Akio Imai<sup>6)</sup>

> 1, Graduate School of Science & Engineering, Tokai University (nisimura@scc.u-tokai.ac.jp)

2, Center for Chronological Research, Nagoya University

3, Graduate School of Science, Tohoku University

4, Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Science, China

5, Graduate School of Applied Biological Science, Chubu University

6, National Institute for Environmental Studies

The reconstruction of palaeoenvironmental history on the Tibetan Plateau after the Last Glacial Maximum (LGM) is important for understanding the relationship of climate change between the Tibetan Plateau and various area in the world. Since 2001, we have been attempting to elucidate the historical change in water circulation after the LGM on the southeastern Tibetan Plateau, where little have been obtained about high resolution palaeoclimate records, using three sediment cores from Lake Pumayum Co located in a basin close to Himalayas.

In the present study, we aimed at making clear in detail the change in land water inflow, based on  $\delta^{13}$ C of TOC, Sand, and Ca-Carbonate records from PY104 and PY409 cores (ca. 4m in length) which date back to 18.4 cal. ka BP and 10.6 cal. ka BP, respectively. The following results have been obtained so far :

- In the Oldest Dryas period (19~14.7 cal. ka BP), the inflow of land water which derived from glaciers and frozen soils began to be intensified at 18 cal. ka BP due to deglaciation and gradually increased toward 15 cal. ka BP.
- 2) Before beginning of the Bølling / Allerød period (14.7~12.8 cal. ka BP), the inflow of land water rapidly became active from 15 cal. ka BP, and the contribution of precipitation remarkably increased together with increase in melting water.
- 3) In the Younger Dryas period  $(12.8 \sim 11.6 \text{ cal. ka BP})$ , although relatively dry condition prevailed temporarily, the land water gradually increased. Therefore, the climate in this area was not always cold and dry.
- 4) From the beginning of the Hypsithermal (ca. 9 cal. ka BP), the inflow of land water further increased and have been kept until present.