

チベット高原南東部における、最終氷期最寒冷期後の気候・環境変化に関する有機地球化学的研究

西村弥重¹, 松中哲也¹, 中村俊夫², 渡邊隆広², 寺井久慈³, 中野志穂³, Zu Liping⁴

1, 東海大学大学院海洋学研究科 (nisimura@scc.u-tokai.ac.jp)

2, 名古屋大学年代測定総合研究センター

3, 中部大学大学院応用生物学専攻

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

はじめに

現在、約 5,000m の平均標高で聳え立つ、広大なチベット高原は、少なくとも 700 万年前以降、モンスーンの前立を介して、アジアはもちろんの事、北半球全体の気候・環境に多大な影響をもたらしてきたことが、次第に明らかになってきた (例えば、Kuhle, 1987; Barnett et al., 1989; Yasunari, 1990; Prell and Kutzbach, 1992; Tanaka, 1997)。

しかし、チベット高原自体が、地球の気候・環境変動史の中で、どのような応答をしてきたのか、に関する解像度のよい研究は、極めて乏しく、面的にも年代的にも依然と限定されている。例えば、面的には、高原の中央部から北部域に偏り、年代的には、最終氷期最寒冷期 (Last Glacial Maximum: LGM) から程遠く、ほとんどは 14,000 年前迄にとどまっている (Gasse et al., 1991; Lister et al., 1991; Kashiwaya et al., 1995; Wang et al., 2002; Ji et al., 2005)。

我々は、チベット高原を中心としたモンスーンの復活につながる LGM 以降の Deglaciation と、それに続く温暖・湿潤な気候が、いつ始まったかの糸口をつかむため、高原のできるだけ南端近くにある湖 (プマユムツォ湖: Lake Pumayum Co) を対象に、有機地球化学的な手法で解析を行ってきた。ここでは、これ迄得られた、有機物供給源のプロキシとして有用な有機分子 Alkanes (直鎖状炭化水素) と堆積年代をもとに、チベット高原南東部に記録された最終氷期最寒冷期後の気候・環境変化について論じる。

試料と方法

プマユムツォ湖 (面積約 400km²) は、ヒマラヤ山脈を真近にしたチベッ

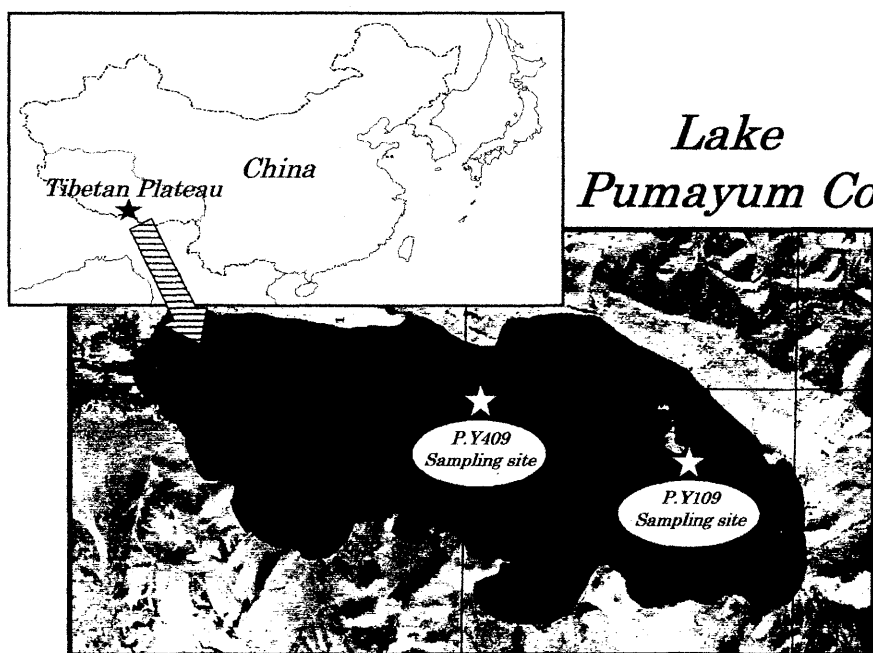


Fig.1 Map showing the location of Lake Pumayum Co and the sampling sites for PY409 and PY104 core samples.

ト高原南東部 (90° 13' 33"E, 28° 30' 38"N) の標高 5070m に位置した構造湖である (Fig.1)。主要な河川は、ヒマラヤ水系を水源とする西側からの流入河川一本と、東側に流出河川が一本あるのみの単純な水系となっている。この湖に関する湖沼学的な調査を現在進めている途中で、最大水深や湖盆形は明らかになっていない。

2001年、東海大学と中国科学院との共同学術調査で、水深 46m の地点 (PY104) (Fig.1) で、ほぼ LGM に達する柱状堆積物 (PY104PC, 約 4m) を採取し、解析を行った。その結果、LGM の頃に湖水域が大きく縮小し、水深が約 40m 迄低下し、かつ湖内には、かなりの水草 (沈水植物) が存在していたことが解った (西村ら, 2003 年)。このことを踏まえ、その水位低下によって、堆積作用ができるだけ乱されない深さ (低下時でも、水深 20m 以上) であったと考えられる、湖心域に近い水深 62m の地点 (PY409) (Fig.1) で、約 4m の柱状堆積物 (PY409PC) を、2004 年 9 月に採取した。この試料を対象として分析を行った。

コアは、深度方向に 1cm 間隔で細分され、各々を一試料とした。各試料を湿式法で篩いにかけて、 $63\ \mu\text{m}$ 以下の粒径サイズをもった画分を分析試料とした。

堆積物の Alkanes の分離・精製と同定・定量は、基本的に Nishimura & Baker (1986) に従った。概略的には、以下の様に行った。まず、水を含んだままの堆積物から Dichloromethane と Me-OH の混合溶媒で抽出される脂質を、 SiO_2 Column (Bed size: 12mm x 23.5 mm) 上で、各脂質化合物グループに分画することによって、Alkanes 画分を分離・精製した。Alkanes は、Gas Chromatograph-Mass Spectrometer (GC/MS) (JEOL Automass II) によって分離・同定を、GC (Shimadzu GC-17A ver.3) によって定量を行った。GC 用カラムは、いずれも、J&W 社の DB-5MS (Stationary phase: $0.25\ \mu\text{m}$, 0.32mm x 30m) を使用した。各分析条件は、常法通り行った。

結果と考察

1, “変動する” 堆積年代

PY409PC の層序を Fig.2 に示す。2001 年に採取した PY104PC と大きく異なって、最下層の 350~388cm 層に Silty clay、205~210cm 層に Fine sandy silt を含んでいるのみで、それ以外の層は一律な Clay からなっていた。このことから、この堆積物は、プマユム

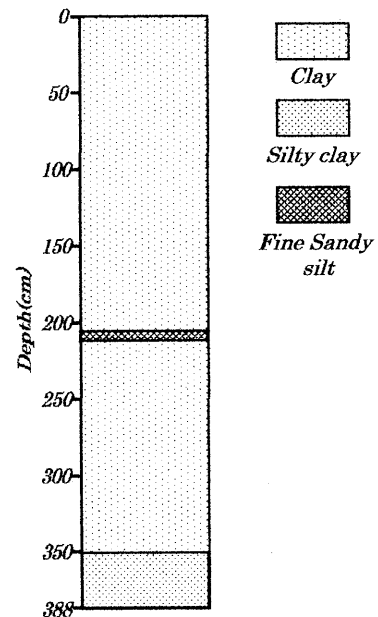


Fig.2 Sedimental facies of PY409 core sample from Lake Pumayum Co.

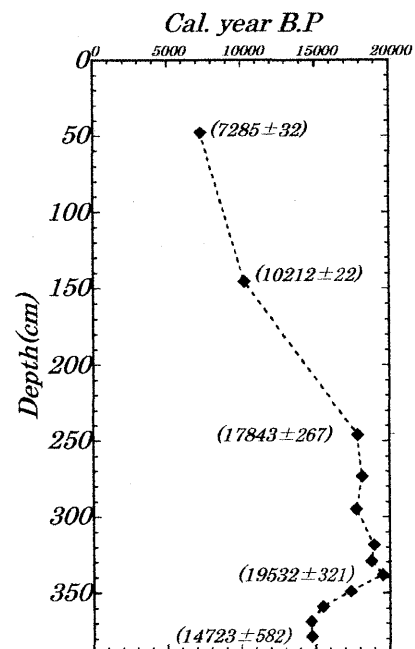


Fig.3 Vertical profile of ^{14}C ages in PY409 core sample.

ツォ湖の湖水域の変動による堆積作用の乱れをほとんど受けていない試料と判断された。しかしながら、Fig.3に示す、この堆積物の各層における年代測定結果は、一見してわかる様に、240cm以深で、17,000年前代から19,000年前代へと逆転を繰り返しながらも古くなり、340cm近くで、19,500年前代の最古年代を示した。その後、今度は逆に、深度と共に14,000年前代へと大きく逆行していく複雑な年代“蛇行”を示した。原因に関しては、モダン炭素による汚染をはじめとし、有機物供給源の変化、タービダイトの発生などが考えられる。この年代の問題については、有機物の結果を述べた後、改めて議論したい。

2, Alkanes からみた堆積有機物の供給源の変化

気候・環境の歴史的変化を明らかにする一つの方法として、堆積有機物の供給源の深度変化を情報源とする方法がある。ここでは、対象とする有機物は、構造的には単純な Alkanes であるが、一連の数多くの類似体の存在によって、様々な情報をもたらしてくれる。

1) TOC と C/N 比の深度分布

TOC (Total Organic Carbon) と C/N 比の深度分布を Fig.4 に示した。変化の特徴の一つは、370cm で 1.2% の TOC 量が 360cm 迄の 10cm 間で、0.5% に迄急減したこと、もう一つは、その

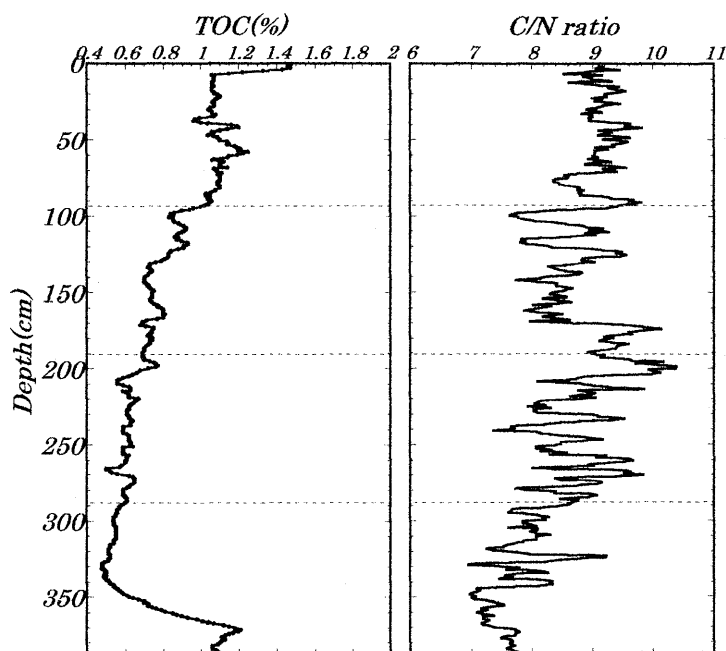


Fig.4 Vertical profiles of TOC and C/N ratio in PY409 core sample.

その後、表層に至る間でいくつかの段階を経て、もとの量に迄漸増したことである。この特徴は、一般に知られる LGM の直前から約 5,000 年前頃迄の有機物の深度分布に類似しているかのように見えるが、現時点では、上述の様に年代の確認は得られない。一方、C/N 比の深度分布は、約 170cm を境に、上下二層に大きく分かれるが、堆積物で広く知られている分布傾向とは違って、両者で下層から上層に向かって、それぞれ、7 から 10、8 から 9 へと上昇する傾向が認められた。このことは、このコア中の有機物が続成作用を比較的受けずに保存されていることを示唆している。従って、この C/N 比の深度変化は、陸起源有機物の相対寄与量が大きく変動しながらも、360cm 層から年代と共に漸増したことを示唆していると考えられる。

2) Alkanes の深度分布と供給源

Fig.5 に、プマユムツォ湖堆積物に存在する Alkanes の代表的な Gas Chromatogram を示した。主要な Alkanes は、構成炭素数が 20 から 33 (以下、C₂₀~C₃₀ と表記) の高分子成分から

なり、 C_{23} と C_{29} の 2 点に極大をもつバイモーダルな分布であった。これら全 Alkanes 量の深度分布を Fig.6 に示した。その分布の特徴は、基本的に TOC のそれ (Fig.4) と似ていた。チベット・プマユムツォ湖の高分子 Alkanes (High Molecular Alkanes: HMA) の主な供給源として、3 種類、つまり、(1)陸上植物 (草本植物) を母材とし、微生物学的変質を受けた土壤有機物、(2)湖内の水草 (沈水植物) を母材とし、微生物学的変質を受けた水草由来懸濁態有機物、および、(3)遠隔地から大気輸送される陸上植物起源 Wax が考えられる。このうち(3)については、次第に湿潤な気候へと変化したと考えられる 350cm 層より上層に向かって全 HMA 量が増加傾向を示すことから、その可能性は、極めて低いと判断される。従って、この湖の HMA の主要な供給源は、土壤有機物と水草由来懸濁態有機物であると考えられる。

3) Alkanes の各供給源からの相対寄与量の深度変化

上記のような続成変質を受けた 2 種の有機物の、堆積物への相対的な寄与量の変化を知るための一つの有用なパラメータとして、HMA の Carbon Preference Index (CPI) が知られている。そこで、まず、供給源となった湖周辺に分布する種々の陸上植物と土壤、および、PY104 コアのいくつかの堆積層に残っていた水草と、それが存在していた堆積物 (Sediments rich in aquatic plants) とを対象に、Alkanes の分析をし、各 CPI の比較を行った (Fig.7)。その結果、各 CPI の平均値は、陸上植物で 15.3 であるが、それを母材とした土壤で 8.1、一方、埋没水草では 12.7、その寄与を大きく受けている堆積物で、10.5 であった。この様に、各植物の HMA は、続成変質と共に CPI が低くなっていく。このことから、土壤の HMA は、湖に運ばれ、堆積していく過程で、更に続成変質を受け、8.1 より小さくなり、水草由来の HMA のそれと比べて、差がより明確になっていくと考えられる。

柱状堆積物における CPI の深度変化を、土壤、および水草からの有機物寄与を大きく受けた堆積物における、それぞれの CPI と共に Fig.8 に示した。驚くべきことに、350cm より上層部での CPI は、途中少々の変動をするものの、ほぼ 5 と一様な深度分布を示した。これは、その供給源が時代と共にほとんど変わらなかったことを示している。また、その値は、土壤の平均

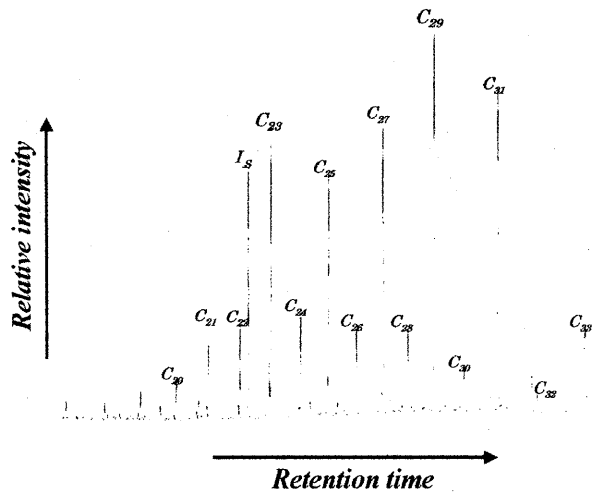


Fig.5 Gas chromatogram of alkane fraction from PY409 core sample.

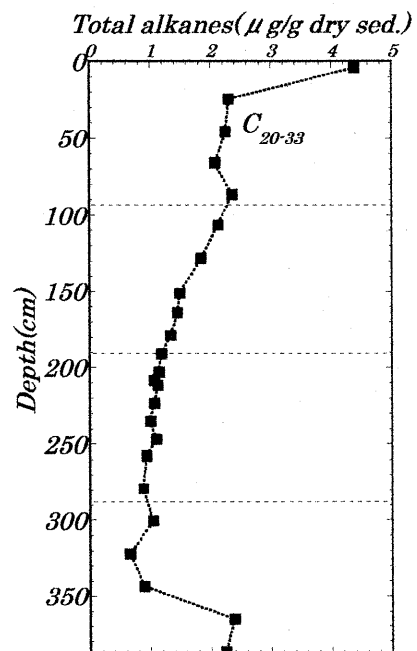


Fig.6 Vertical profile of Total alkanes in PY409 core sample.

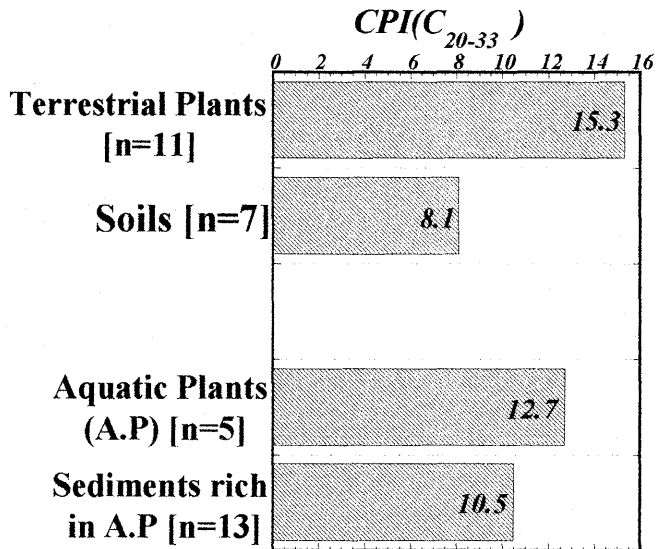


Fig. 7 Average CPIs in various sources of sedimentary organic matter in Lake Pumayum Co. $CPI = \sum [C_{21-33}]_{\text{odd}} / \sum [C_{20-32}]_{\text{even}}$

の影響を除いて、HMAの供給源をより明確にできるパラメータとして、Average Chain Length (ACL) 値がある。これは、例えば、土壌と水草のHMAの分布を比較すると、 C_{27} を境に土壌は、より高分子側 ($C_{29} \sim C_{33}$) の、それに対し、水草はより低分子側 ($C_{21} \sim C_{25}$) の成分をそれぞれ多く有している。その様な構成炭素鎖の分布の違いを数値で表そうとするもので、プマユムツォ湖における2種の供給源の変化を確認するには、より有効なパラメータとなりうる。

Fig. 9にACLの深度分布と共に、土壌、および水草有機物の寄与が大きかったPY104PCにおける各ACLを図示した。350cm以深では、水草由来の有機物の寄与が比較的多かったが、その後、急速に減少し、代わって土壌有機物の寄与量が急増したこと、およびその後も、土壌からの寄与量が100cm層にかけて漸増していったことが解る。

4) 有機物供給源の急変をもたらした気候・環境変動

以上述べてきたプマユムツォ湖柱状堆積物PY409PCにおける、深度による有機物供給源の変化と、Alkanes量やTOC量の変化とから、次に述べる様な気候・環境変化が起こったと考えられる。つまり、チベット高原南東部に、350cm層に対応するある時代から、Deglaciation

に近い値であった。上で述べたように、土壌のCPIは、湖底堆積物になっていく過程で、更に8より小さくなって、堆積物のCPI値5に、より近くなるはずである。従って、プマユムツォ湖の、少なくとも350cm以深を除く堆積層におけるHMAの主要な供給源は、土壌であると判断される。残る350cm以深では、水草由来の有機物の寄与が比較的增加したと考えられる。

一方、CPIとは違って、続成変化によるAlkanes組成の変質

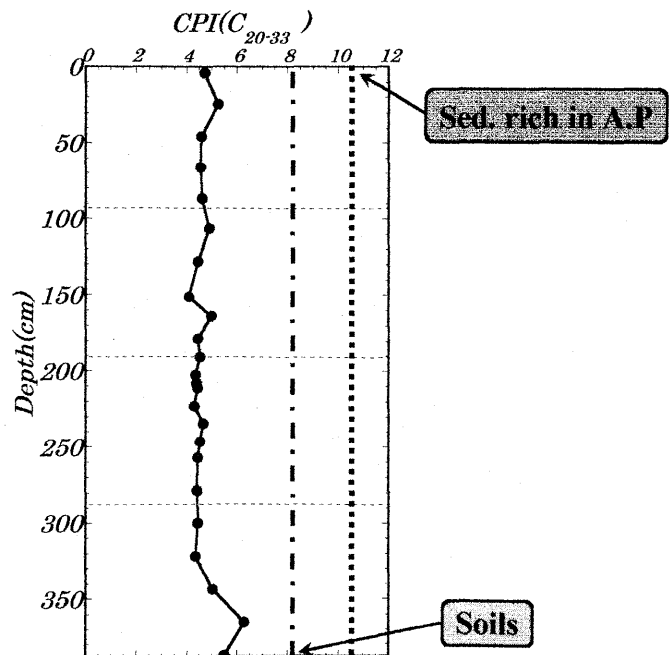


Fig. 8 Vertical profile of CPI in PY409 core sample.
 - - - : CPI in soils from lands surrounding the Lake.
 : CPI in the lake sediment rich in organic matter derived from aquatic plants.

か、あるいは本格的な温暖・湿潤な気候が始まり、それ迄湖水域が大きく縮小していたプマユツォ湖の水深が短期間で深まり、水草の分布域が急速に失われていった。その結果、水草由来有機物の堆積物への寄与が急減し、それに代わって、その時代を境に著しく活発となった水循環によって、陸から湖に運ばれてくる土壌有機物の寄与量が急増する。しかし、その後は、湖水域の拡大と共に、その寄与量はある一定レベルに収斂していったと考えられる。

この 350cm 付近における、「有機物供給源の急速な転換」が起こった時代が、いつ頃に対応するかについて、先に述べた様に、得られた年代が頻繁に逆転しているため (Fig.3)、現時点で確かなことを言うことはできない。しかしながら、310cm から 340cm の間にかけて得られた 4 点の時代のうち、1 点に逆転が見られるが、いずれも 19,000 年前に匹敵する年代を示していることから、350cm 付近の年代は、19,000 年前より新しくないと見方はできる。

もし、そうだとすれば、350cm 付近は、LGM に対応することになり、「有機物供給源の急速な転換」の原因は、考えられる水深の上昇の規模から判断して Deglaciation ではないかと考えられる。この正否の判断のためには、それ以深での年代の大きな逆行の原因が、何によるものかを明らかにしなければならない。

3. “変動する”年代と有機物供給源の変化との関連性

この年代の逆転・逆行の原因の可能性について、研究の過程で一つの示唆が得られた。Fig.10 に、その手掛りとなった ACL と 250cm 以深の測定年代の両深度変化を対比して示した。ACL の分析点数を更に増やさなければならないが、有機物供給源と年代の深度変化に、高い相関がある様に見受けられる。これは、水草からの有機物の寄与が多くなると共に年代は若くなり、逆に土壌起源有機

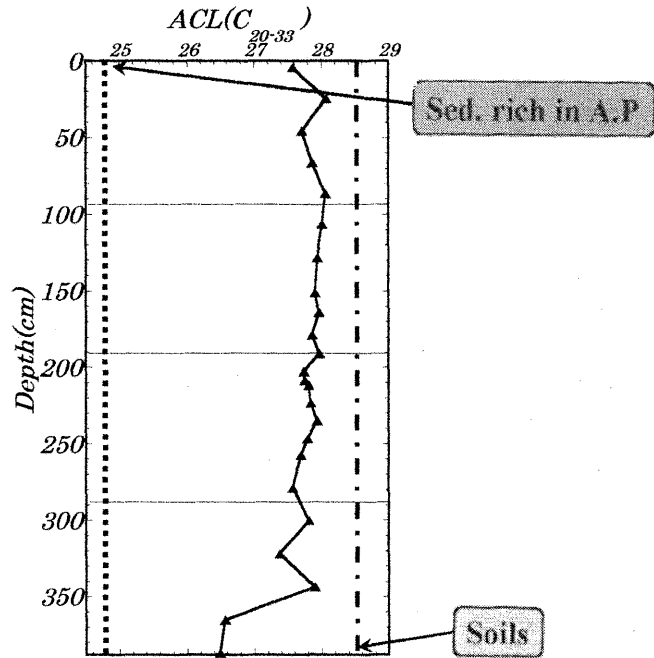


Fig.9 Vertical profile of ACL in PY409 core sample.
 - - - : ACL in soils from lands surrounding the Lake.
 : ACL in the lake sediment rich in organic matter derived from aquatic plants.
 $ACL = (21x[C_{21}] + 23x[C_{23}] + \dots + 33x[C_{33}]) / ((C_{21}] + [C_{23}] + \dots + [C_{33}])$

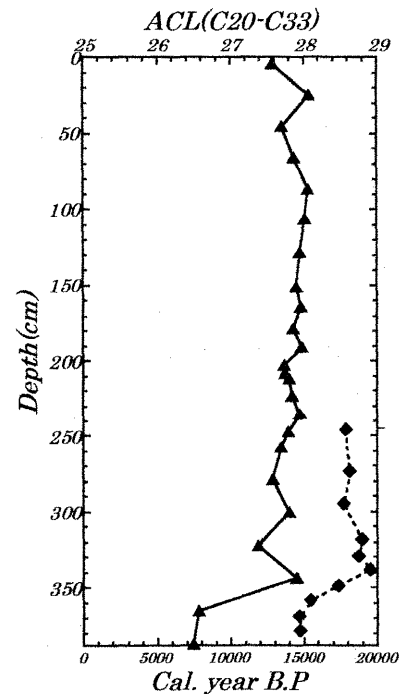


Fig.10 The comparison of the vertical profile of ACL with that of ^{14}C ages in PY409 core sample.

物の相対寄与量が増えると古くなることを示唆している。この可能性については、後者の年代に問題があるのか、それとも、他の植物と異なった CO₂ 同化システムを持つことが知られている水草に由来する有機物の年代に問題があるのか (Mook et al., 1974)、今後の検討を待たなければならない。

まとめ

チベット高原南東部域における最終氷期最寒冷期以降の気候・環境変動を明らかにする目的で、高原南東部に位置したプマユムツォ湖から柱状堆積物を採取し、Alkanes の分析を行った。その結果、以下のことが解った。

- 1) Alkanes による有機物供給源の指標となる CPI と ACL の深度変化は、350cm 層付近を境に、その湖底堆積物への主要な堆積物供給源が、水草から土壌へと急速に変化したことを示した。
- 2) 測定された ¹⁴C 年代は、270cm 以深から 340cm 間で、6 年代のうち 2 年代で逆転が見られ、340cm 以深で、深さと共に年代の若返りが見られた。この年代の深度変化と ACL のそれとが比較的高い相関を示したことから、認められた年代の逆転と若返りは、有機物供給源の変化を反映したものと考えられた。
- 3) 約 300cm 以深から 340cm 間で測定された 4 点の ¹⁴C 年代のうち 1 点で逆転が見られたが、全ての年代は、ほぼ 19,000 年前代を示していた。このことから、350cm 付近は、19,000 年前より新しくはないと判断された。このことから、350cm 付近で認められた有機物供給源の急速な変化は、Deglaciation が原因となって引き起こされた、比較的短期間での水深の上昇であることが示唆された。

引用文献

- Barnett, T., Dumenil, L., Schlese, U., Roeckner, F., and Latif, M. (1989) The effect of Eurasian snow cover on regional and global climate variations. *Journal of the Atmospheric sciences*, **46**, 661-685.
- Gasse, F., Arnold, M., Fontes, J.C., Fort, M., Gibert, E., Huc, A., Li, B., Li, Y., Liu, Q., Melieres, F., Van Campo, E., Wang, F. and Zhang Q. (1991) A 13,000-year climate record from western Tibet. *Nature*, **353**, 742-745.
- Ji, J., Shen, J., Balsam, W., Chen, J., Liu, L. and Liu, X. (2005) Asian monsoon oscillations in the northeastern Qinghai-Tibet Plateau since the late glacial as interpreted from visible reflectance of Qinghai Lake sediments. *Earth and Planetary Science Letters*, **223**, 61-70.

- Kashiwaya, K., Masuzawa, T., Morinaga, H., Yasukawa, K., Yuan, B., Liu, J. and Gu, Z. (1995) Changes in hydrological conditions in the central Qing-Zang (Tibetan) Plateau inferred from lake bottom sediments. *Earth and Planetary Science Letters*, **135**, 31-39.
- Kuhle, M. (1987) Subtropical mountain- and highland-glaciation as Ice Age triggers and the warming of the glacial periods in the pleistocene. *Geo Journal*, **14**(4), 393-421.
- Lister, G.S., Kelts, K., Chen, K.Z., Yu, J.Q. and Nissen, F. (1991) Lake Qinghai, China : Closed-basin lake levels and the oxygen isotope record for ostracoda since the last Pleistocene. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **84**, 141-162.
- Mook, W.G., Bommerson, J.C. and Stoverman, W.H. (1974) Carbon isotope fractionations between dissolved bicarbonate and gaseous carbon dioxide. *Earth and Planetary Science Letters*, **22**, 169-176.
- 西村弥亜、蓮池一哉、北川浩之、Zhu Liping、那須浩郎、Chen Yuansheng (2003) Pumayum Co 柱状堆積物に記録されたチベット高原南東部における、過去 18,000 年間の気候・環境変動. 2001 チベット・プマユムツォ湖学術調査・研究報告書, 157-177. 東海大学ヒマラヤ遠征委員会.
- Nishimura, M. and Baker, E.W. (1986) Possible origin of n-alkanes with remarkable even-to-odd predominance in recent marine sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **50**, 299-305.
- Prell, W.L. and Kutzbach, J.E. (1992) Sensitivity of the Indian monsoon to forcing parameters and implication for its evolution. *Nature*, **360**, 647-652.
- Tanaka, S. (1997) Uplift of the Himalaya and climatic change at 10Ma-Evidence from records of carbon stable isotopes and fluvial sediments in the Churia Group, central Nepal. *Journal of Geological Society of Japan*, **103**, 253-264.
- Yasunari, T. (1990) Impact of Indian monsoon on the coupled atmosphere / ocean system in the tropical Pacific. *Meteorology and Atmospheric Physics*, **44**, 29-41.
- Wang, R.L., Scarpitta, S.C., Zhang, S.C., Zheng, M.P. (2002) Later Pleistocene / Holocene climate conditions of Qinghai-Xizhang Plateau (Tibet) based on carbon and oxygen stable isotopes of Zabuye Lake sediments. *Earth and Planetary Science Letters*, **203**, 461-477.

Organic Geochemical Study of Climatic and Environmental Changes around the Southeastern Part of the Tibetan Plateau since the Last Glacial Maximum

Mitsugu Nishimura¹, Tetsuya Matsunaka¹, Toshio Nakamura², Takahiro Watanabe²,
Hisashige Terai³, Shiho Nakano³, Liping Zhu⁴

1, Graduate School of Marine Science & Technology, Tokai University
(nishimura@scc.u-tokai.ac.jp)

2, Center for Chronological Research, Nagoya University

3, Graduate School of Applied Biological Science, Chubu University

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

Little has been known about the details as to how the Tibetan Plateau had responded to global climatic oscillations in the paleoenvironmental history. Using a sediment core (ca. 4 m in length) from Lake Pumayum Co located in the southeastern part of the plateau, we have been attempting to elucidate when the deglaciation and the warm and wet conditions since the last glacial maximum (LGM) took place around the region.

For the purpose, we investigated the historical change of organic sources to the lake sediments with alkanes, an useful biomarker which can provide information on biological sources of sedimentary organic matter. The following results have been obtained so far :

- 1) The alkane source parameters (CPI & ACL) indicated that around 350cm in depth of the core, the relative contribution of organic matter from aquatic plants to sediments rapidly and strikingly decreased, while that of soil organic matter increased.
- 2) The ¹⁴C ages obtained sometimes reversed between 240cm and 340cm, and further went back to younger ages between 340cm and 390cm. Based on the basis of a good correlation between the vertical profiles of ACL and the ages, it was suggested that the variable ages might be due to the changes of major sedimentary organic sources from aquatic plants to soil.
- 3) Although among the four ¹⁴C ages obtained between 310cm and 340cm, one age reversed, all data showed the ages of almost 19,000 cal yr B.P. From this, it was implied that the rapid and striking change of the organic sources found around 350cm in core depth was caused by deglaciation.