

チベット・プマユムツォ湖の柱状堆積物に見られる年代逆転に関する一考察

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

1)東海大学大学院海洋学研究科 〒424-0902 静岡市清水区折戸 3-20-1

Tell: 0543-34-0411 E-mail: 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研究科

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

1. はじめに

現在、チベット高原は、アジアモンスーンを介して、世界の気候・環境に強い影響を与えている。しかしながら、チベット高原における、古環境変動に関する研究は乏しく、特に南部の研究例はない。我々は、最終氷期最寒冷期(LGM)以降、チベット高原におけるモンスーンの復活につながる脱氷期(Deglaciation)と、それに続く温暖・湿潤な気候が、いつ、どの様に始まったかを明らかにすることを目的とし、高原の最南端に位置するプマユムツォ湖(Lake Pumayum Co)から採取した2本の柱状堆積物を対象に、有機地球化学的な手法で古環境解析を行っている。

しかしながら、2004年に採取した柱状堆積物(PY409PC)の解析を進めていく中で、最下部から上方40cmの間で、年代が約14,200年前から、約19,500年前へと著しい逆転が認められ、古環境解析の進展を妨げている。

この逆転は、分析途中のコンタミから生じた可能性は極めて少なく、自然環境における“Old Carbon”の寄与によって引き起こされたと考えられる。ここでは、その供給源や量的変化を決めている要因などを明らかにすることを目的に、解析を行った。

2. 試料と方法

1)試料

2001年から、東海大学と中国科学院との共同で行っている、チベット・プマユムツォ湖学

術調査の第二次調査(2004年9月)において、湖中央部に近い水深62.2m地点(28°34.79 N,

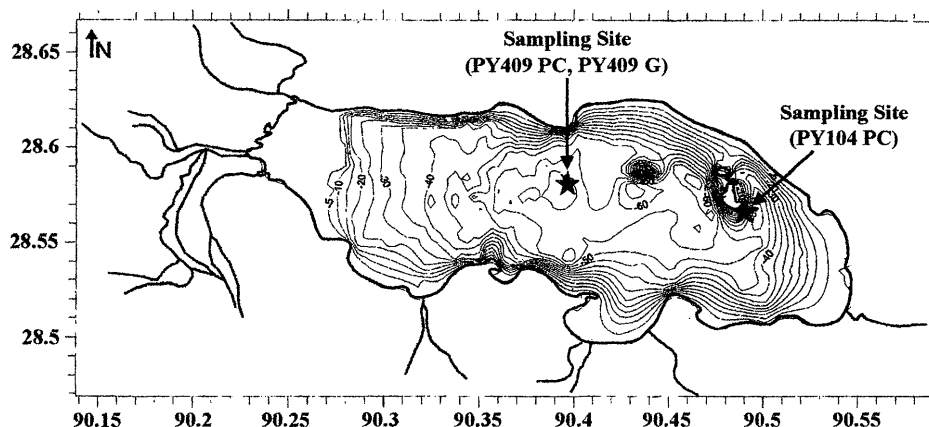


Fig. 1 The sampling sites for PY409PC, PY409G, and PY104PC in Lake Pumayumu Co.

90°23.80 E)から、ピストンコアラーを用いて長さ 388cm の柱状堆積物(PY409PC)を採取した(Fig. 1)。さらに、同じ地点から、グラビティコアラーを用いて長さ 44cm の表層堆積物(PY409G)を採取した。また、湖周辺と湖内から、堆積有機物の供給源となりうる、陸上植物、水生植物、動物プランクトン、そして土壌などの試料も採取した。

いずれの堆積物試料も、クリーンベンチ内で 1cm ごとに細分し、その各々を 1 分析試料とした。

2)方法

①TOC と TN の定量

脱炭酸塩のための酸処理(12N-HCl, 2days)をした堆積物試料について、CHN CORDER (Yanaco MT-6)によって全有機炭素(Total Organic Carbon : TOC)と全窒素(Total Nitrogen : TN)を定量した。検量線とキャリブレーションには、アンチピリン(C₁₁H₁₂N₂O)を用いた。

② $\delta^{13}\text{C}$ の測定

上記の酸処理をした堆積物試料について、Elemental Analyzer-IRMS system(Thermo Electron)によって炭素安定同位体比($\delta^{13}\text{C}$)の測定を行った。

③ Alkanes の分離・同定・定量

堆積物の Alkanes の分離・精製と同定・定量は、基本的に Nishimura et al.(2006)に従った。まず、堆積物から Dichloromethane と Me-OH の混合溶媒で抽出される脂質を、SiO₂ Column(Bed size : 12mm x 23.5 mm)上で、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 μm , 0.32mm x 30m)を使用した。

3. 結果と考察

1)逆転する ^{14}C 年代

Fig. 2 A に堆積有機物の ^{14}C age の深度分布を示した。上部に PY409G、その下部に PY409PC の各データを対で示す。一見して分かる様に、PY409PC の特に最下部から上方 40cm の間で、年代が約 14,200 年前から、約 19,500 年前へと著しい逆転が認められた。さらにその上方の 90cm にかけても年代の蛇行が確認された。この年代逆転を引き起こす要因として、まず、分析途中のコンタミが考えられるが、試料の前処理を、クリーンベンチとクリーンルーム内で行ったことから、その可能性は極めて少ないと考えられる。PY409G の表層の年代が 2,400 年前を示すことから、現在において、“Old Carbon” が堆積物に供給されていることが解る。このため、年代逆転は、自然環境における“Old Carbon”の寄与によって引き起こされた可能性が考えられる。ここでは、この湖の環境における、“Old Carbon”の供給源や量的変化を決めている要因などを明らかにすることを目的に、全有機炭素レベルと有機分子レベルで、その解析を行った。なお、年代逆転が、著しく認められた層を Stage Ib、その上層を Stage Ia とする。

2) 全有機炭素レベルで見た堆積有機物の供給源の変化

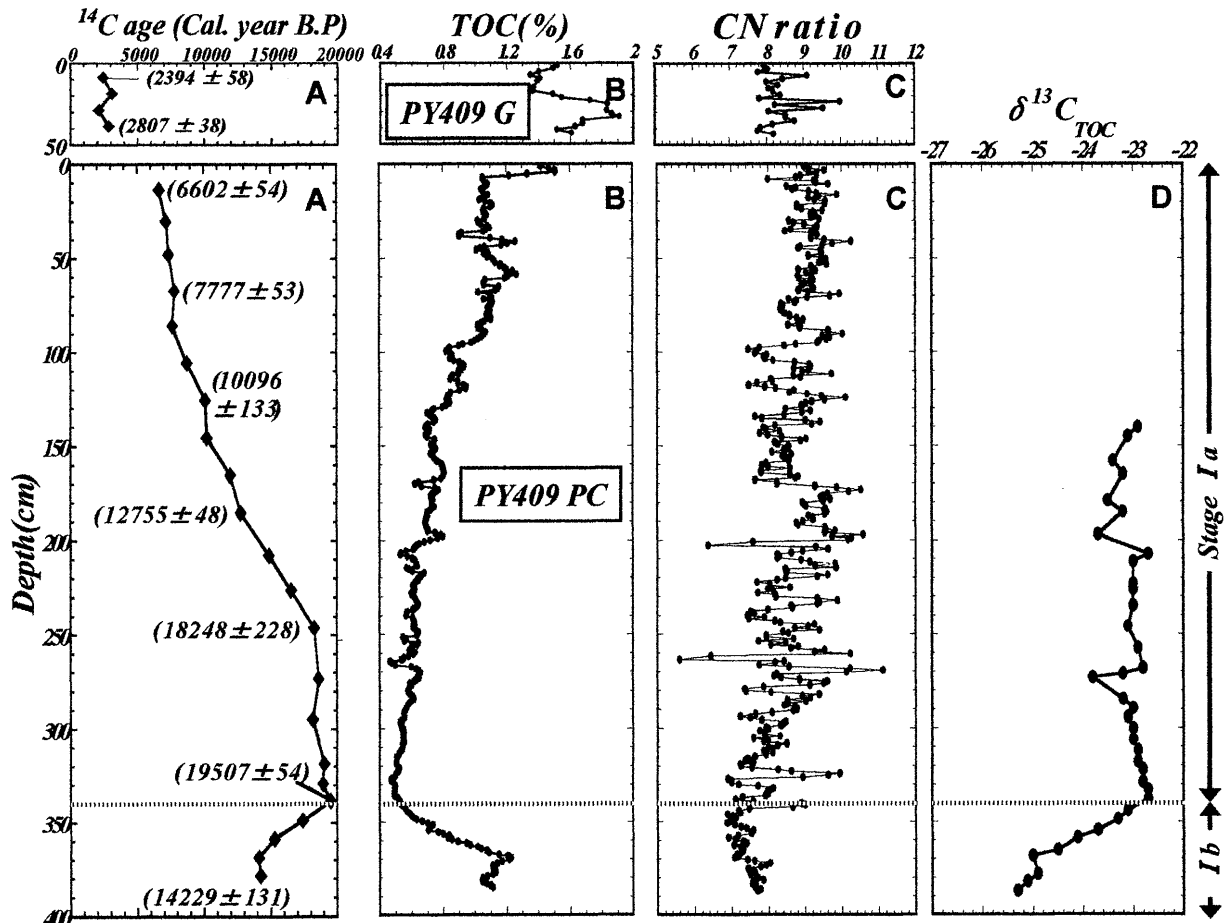
① TOC、CN 比、 $\delta^{13}\text{C}$ の深度分布 (堆積有機物の供給量と供給源の変化)

Fig. 2 Vertical profile of ^{14}C age of TOC (A), TOC (B), CN ratio (C), and $\delta^{13}\text{C}_{\text{TOC}}$ (D) in PY409PC (Bottom) and PY409G (Top).

Fig. 2 の B、C、D に、それぞれ TOC、CN 比、 $\delta^{13}\text{C}$ の深度分布を示した。特に、Stage Ib から Ia に亘る、それぞれの変化について注目すると、まず TOC は最下層で高く、Stage Ia に向けて急激に減少した。

CN 比は Stage Ib から Ia にかけて 7~8 とほぼ一定の値を示した。 $\delta^{13}\text{C}$ は Stage Ib から Ia に向けて -25‰ から -23‰ へと急激に変化し、同位体比が、軽い有機物から重い有機物への変化が認められた。

また、最下層から深度

240cm までの ^{14}C age と TOC、 ^{14}C age と $\delta^{13}\text{C}$ の深度分布を比較すると、それぞれ両者の変化が同期しており、 ^{14}C age と TOC に負の相関(相関係数=0.95, n=10)、 ^{14}C age と $\delta^{13}\text{C}_{\text{TOC}}$ に正の相関(相関係数=0.94, n=10)が認められた(Fig. 3 A, B)。これらのことから、

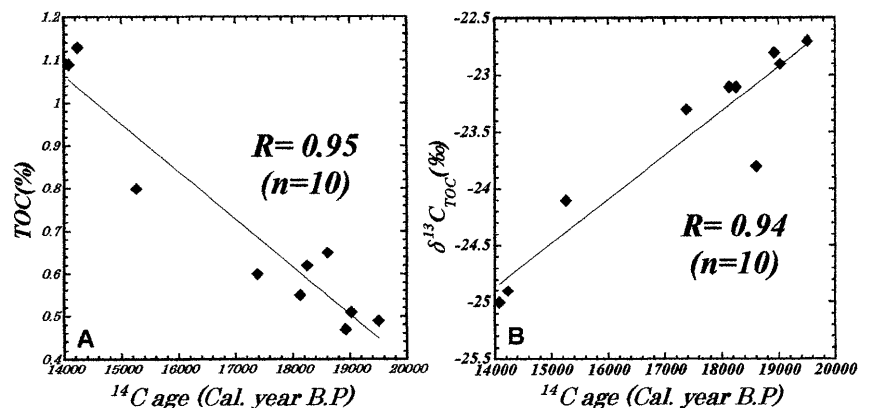


Fig. 3 Correlations between ^{14}C ages and TOC (A) and between ^{14}C ages and $\delta^{13}\text{C}_{\text{TOC}}$ (B).

Stage Ib から Ia にかけて、炭素同位体比の軽い有機物の供給量が急激に減少すると共に、相対的に重い有機物が増加することによって、年代の逆転が引き起こされたと考えられる。

次に、炭素同位体比の軽い有機物と重い有機物が、それぞれ、どのような供給源をもつかについて検討を行った。

② $\delta^{13}\text{C} / \text{CN}$ ダイアグラム (堆積有機物の供給源の絞り込み)

堆積有機物の供給源となる様々な有機物(陸上植物、水生植物、植物プランクトンなど)の $\delta^{13}\text{C}$ と CN 比は、大きな差を示すことがわかっている。そのため、堆積有機物の、 $\delta^{13}\text{C}$ と CN 比のダイアグラム($\delta^{13}\text{C} / \text{CN}$ ダイアグラム)を示すことにより、その供給源について評価することができる。

そこで、Fig. 4 A に、湖から採取してきた様々な試料と堆積物について、 $\delta^{13}\text{C} / \text{CN}$ ダイアグラムを示した。また、一般的な陸上植物(C_3 植物)と湖沼藻類の範囲を、実線で囲んで示した(Meyers, P.A., 1994)。水生植物、陸上植物、土壌、そして動物プランクトンのダイアグラム上の位置は、それぞれ大きく離れ、水生植物の $\delta^{13}\text{C}$ は $-16 \sim -5\text{‰}$ と重い値を示すのに対し、土壌は -23‰ と軽い値を示した。

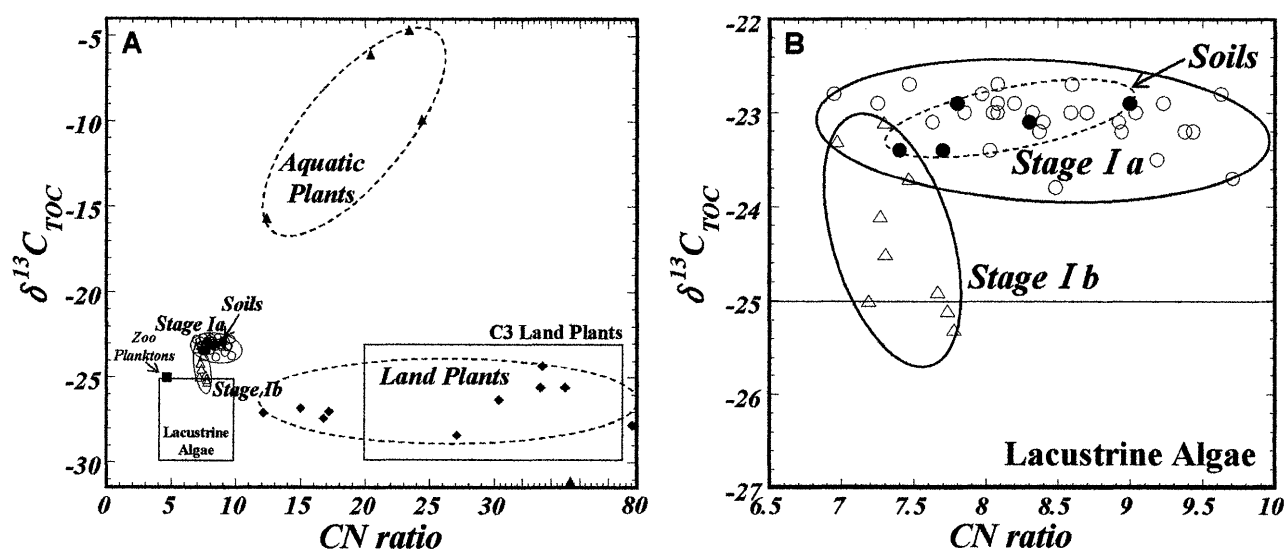


Fig. 4 $\delta^{13}\text{C} / \text{CN}$ diagram for PY409PC and various sources of sedimentary organic matter in Lake Pumayum Co.

次に、Stage Ia と Ib における堆積物のプロットを見ると、水生植物のそれとは大きく離れ、さらに、Stage Ia と Ib のプロットを拡大して見ると、Stage Ia のプロットは、ほぼ土壌と重なっていることがよく解る(Fig. 4 B)。従って、その主要な供給源は、土壌であることが解った。一方、Stage Ib では、より $\delta^{13}\text{C}$ が軽く、一般的な湖沼藻類の範囲と一部重なることから、1つ目の可能性として、Stage Ia と同じ土壌有機物に、植物プランクトンが加わった有機物であることが考えられる。

今回採取した動物プランクトンの90%は、カイアシ類(Copepoda)であり、植物プランクトンや土壌有機物を取り込むことが知られている。また、従属栄養生物の $\delta^{13}\text{C}$ 値は、取り込む有機物より $1 \sim 2\text{‰}$ 重くなるため(DeNiro, M. J. and Epstein, S., 1978)、プマユムツォ湖の植物プランクトンの $\delta^{13}\text{C}$ 値も、一般的な湖沼藻類の範囲内に入ると考えられる。

2つ目の可能性として、異なる $\delta^{13}\text{C}$ 値をもつ2種類の土壌有機物が混在していることが挙げられる。つまり、ダイアグラム上に示した土壌と、それより軽い $\delta^{13}\text{C}$ 値を示す土壌との混在である。

以上のことから、Stage Ia の供給源は土壌有機物であり、Ib では土壌有機物と植物プランクトン、もしくは2種類の土壌有機物が混在している可能性が示唆された。

3) Alkanes から見た堆積有機物の供給源の変化

次に、Stage Ib から Ia にかけて、堆積有機物の供給源を、分子レベルから絞り込むために、堆積物中の陸上植物由来の Alkanes の組成変化に注目した。

① Alkanes の供給源

Fig.5 に、各 Stage における Alkanes の代表的なガスクロマトグラムを示した。各 Stage の Alkanes はいずれも、構成炭素数 17~33 からなり、炭素数 23 と 29 に極大値を持つバイモーダル分布を示した。また、偶数成分に対し奇数成分の方が優位に存在する、奇数優位性を示した。

堆積物中の Alkanes の供給源として、陸上植物、水生植物、バクテリア、そして各種プランクトンなどが挙げられるが、一般に、炭素数 20 以上の Alkane 成分の主要な供給源は、陸上植物と水生植物であることが知られている (Eglinton and Hamilton, 1963, Cranwell, 1983, Fichen et al., 2000)。従って、プマユムツォ湖の堆積物に認められた Alkanes の主要な供給源は、陸上植物 (または、土壌) か水生植物であると判断される。

$\delta^{13}\text{C}/\text{CN}$ ダイアグラムの結果から、水生植物の可能性は排除されているので、Stage Ia と Ib の両堆積物の Alkanes の供給源は、主として土壌であると結論される。

各 Stage における、炭素数 20 以上の Alkanes の組成分布を比較すると、Stage Ia に比べて Ib では、炭素数 21 と 23 の成分が特異的に高いことが解る。また、炭素数 24 以上の成分では、特に違いが見られなかった。

② 平均炭素鎖 (ACL) と炭素優位性指数 (CPI) の深度分布 (Alkanes の供給源の変化)

堆積物中の炭素数 20 以上の Alkanes の組成分布を基に、堆積有機物の主要な供給源を知るためのパラメータとして、一般に、ACL と CPI が使われている。つまり、ACL は平均炭素鎖・Average Chain Length を略したもので、炭素数 20 以上の奇数成分について、

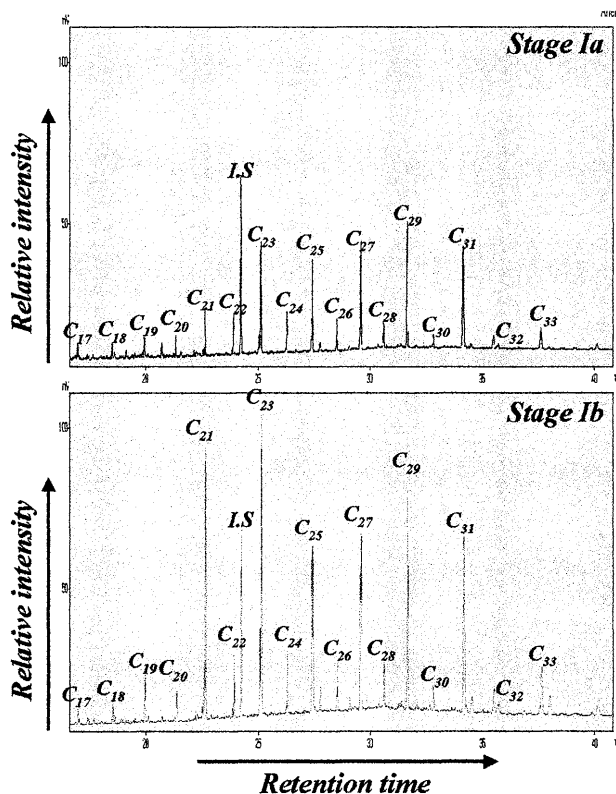


Fig. 5 Gas chromatogram of alkane fraction from PY409PC.

以下の式により算出した。[]内は各成分の濃度を示す。

$$ACL = (21x[C_{21}] + 23x[C_{23}] + \dots + 31x[C_{31}] + 33x[C_{33}]) / ([C_{21}] + [C_{23}] + \dots + [C_{31}] + [C_{33}])$$

また、CPI は、炭素優位性指数・Carbon Preference Index を略したもので、奇数成分の総和を偶数成分の総和で割ることによって算出し、奇数成分が偶数成分に対し、どれだけ優位性を示すかを数値で表したものである。

$$CPI = (\sum [C_{21-33}]_{\text{odd}} / \sum [C_{20-32}]_{\text{even}})$$

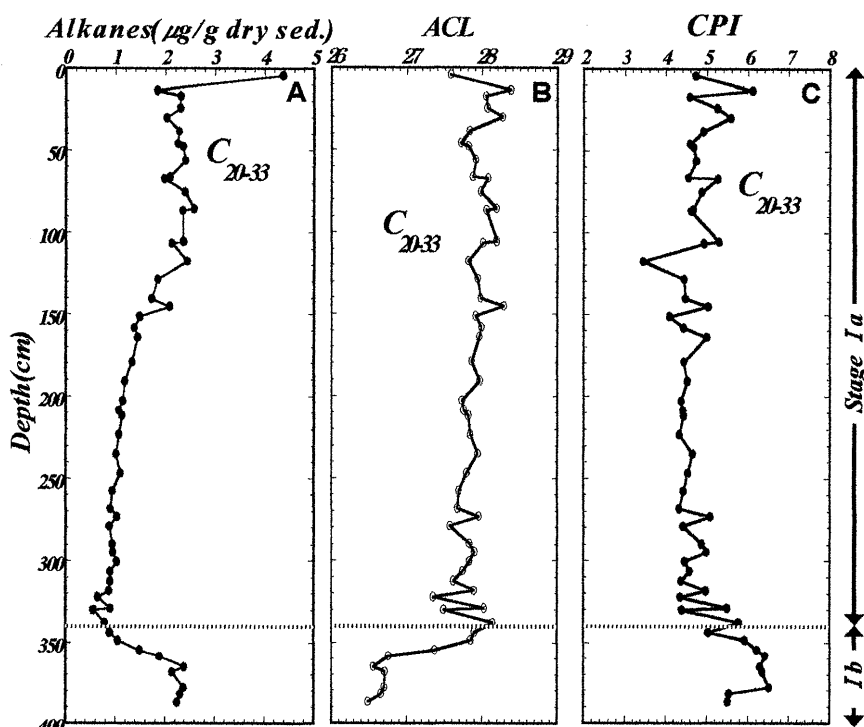


Fig. 6 Vertical profile of Alkanes (A), ACL (B), and CPI (C) in PY409PC.

もった 21 と 23 の 2 成分が高く、逆に、Ia に向けて、それらの成分が急激に減少することによって起こっている。

次に、最下層から深度 240cm までの ACL (Fig. 6 B) と $\delta^{13}C$ (Fig. 2 D) の深度分布を比較すると、両者の変化が同期し、正の相関 (相関係数 = 0.89, $n=25$) が認められることから、Alkanes の組成変化と全有機炭素の $\delta^{13}C$ の変化が示す供給源に関する情報は、基本的に同じであることが解った (Fig. 7)。このことから、以下の 2 つの事が示唆された。

① $\delta^{13}C$ / CN ダイアグラムから、植物プランクトンからの寄与によって、Stage Ib におけ

Fig. 6 に、炭素数 20 以上の Alkanes の存在量、ACL、CPI の深度分布を示した。存在量の深度分布は、基本的に TOC と同じ分布を示した。次に Stage Ib から Ia にかけての ACL と CPI の深度分布を見ると、ACL は 26.5 から 28 へと急激に変化し、CPI も 6.5 から 4.5 へと変化した。これらの変化は、Alkanes のガスクロマトグラム (Fig. 5) で見られた様に、明らかに Stage Ib の始めで、奇数の炭素数を

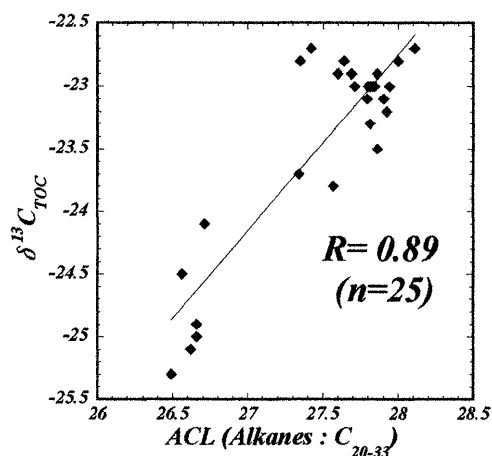


Fig. 7 Correlations between ACL and $\delta^{13}C_{\text{TOC}}$.

る $\delta^{13}\text{C}$ 値が軽くなる可能性が考えられたが、植物プランクトンは、その主な変動要因でないこと。

- ② $\delta^{13}\text{C}/\text{CN}$ ダイアグラムから、堆積有機物の主な供給源は、水生植物でないことが明らかであるため、水生植物が堆積物中の Alkanes の供給源にならないこと。

以上のことから、各 Stage の Alkanes の供給源は、主に陸上植物由来の有機物であり、その組成変化は陸上植物の種類の違いを表していることが解った。そこで、各 Stage における Alkanes の供給源を、ACL と CPI を基に絞り込んだ。

③CPI / ACL ダイアグラム (Alkanes の供給源の絞り込み)

Fig.8 に、土壌と堆積物について、CPI / ACL ダイアグラムを示した。Stage Ia と Ib のプロットは、 $\delta^{13}\text{C}/\text{CN}$ ダイアグラム上での位置と違って、いずれも土壌のプロットからかなり離れた所に位置づけられた。しかし、両者は、一部重なり合う範囲にあり、互いに類似した供給源をもつことが解る。前に述べた様に、 $\delta^{13}\text{C}/\text{CN}$ ダイアグラム上の位置から、Stage Ib の堆積有機物は、Stage Ia と同じ土壌有機物にプランクトン有機物が、ある程度加わった可能性が示唆された。もし、それが事実であれば、この CPI / ACL ダイアグラム上での Stage Ib の位置が Ia のそれと、ほぼ重なり合う程に近づくはずである。しかし、 $\delta^{13}\text{C}/\text{CN}$ ダイアグラム上で見られた両者の位置と比較して、特に、互いが近づいたとは見えない。従って、Stage Ib の堆積有機物の供給源も、主として土壌であると考えられる。しかし、Stage Ia のそれとは、種類の違う土壌が供給源となっていたと考えられる。

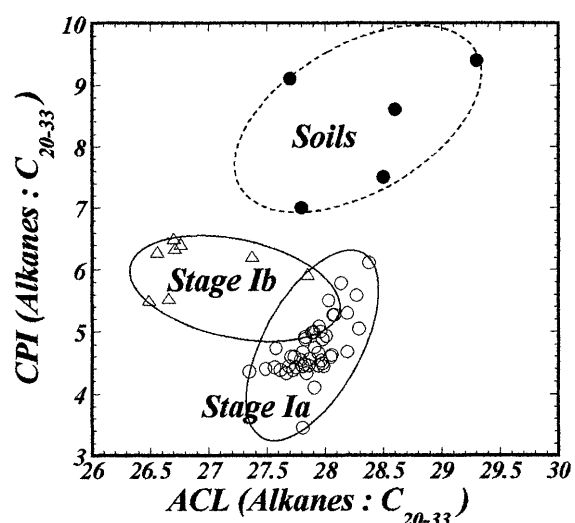


Fig. 8 CPI / ACL diagram for PY409PC and various sources of sedimentary organic matter in Lake Pumayum Co.

④炭素優位性指数(CPI)の深度分布(Alkanes の続成変質の度合い)

堆積物中の Alaknes の CPI は、堆積有機物が受けた、続成変質の程度を反映していることが知られている。

例えば、Fig. 9 に、湖から採取した陸上植物、土壌、表層堆積物中の、炭素数 20 以上の Alkanes を対象に、各々の CPI の平均値を示した。この図から、母材となる陸上植物の値は高く、それが土壌有機物になり、そして表層堆積物に供給される間に、続成変質を受け、CPI が 15.3 から 5.8 へと徐々に低くなっていることが解る。そこで、炭素数 20 以上の Alkanes の CPI を基に、Stage Ib から Ia にかけて、Alkanes が受けた、続成変質の度合いの評価を試みた。

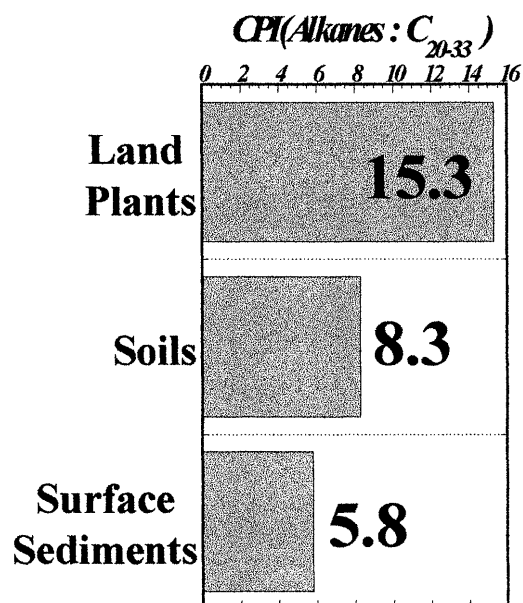


Fig. 9 Average CPIs in various sources of Sedimentary organic matter in Lake Pumayum Co.

ここで、Fig. 6 C に示した堆積物の CPI の深度分布を見てみると、Stage Ib の始めで高く、深度が浅くなるにつれて、次第に低くなった。この分布から、Stage Ib では、より続成変質を受けていない、比較的新しい陸上植物由来の有機物が、そして Stage Ia でより続成変質を受けた、陸上植物由来の古い有機物が供給されていることが解った。

また、Alkanes の存在量の深度分布と比較してみると、CPI が低くなると共に濃度も減少するため、陸上植物由来の新しい有機物の供給量が、Stage Ib から Ia にかけて減少していることが解った。

次に、今まで議論してきた、2 種類の土壌有機物による、堆積有機物の供給源の変化を引き起こす要因についてまとめた。

4) 堆積有機物の供給源の変化を引き起こす環境要因

2001 年に採取した堆積物(PY104PC)の、これ迄の解析から、LGM 終了間近の約 18,000 年前頃、水深は、現在より約 40m 前後低下していたが、その後の水循環の活発化によって、湖水域が徐々に拡大し、Stage Ib が始まる約 15,500 年前から、これ迄にない“急速で、大量”の陸水の供給が起こった可能性が示唆されている(西村ら, 2003, 2007)。その陸水の動きは、水位の低下で、当時、依然と露出していた周囲の湖底域を、洗い流す様な活発さを持ち、“急速”に湖水域を拡大させていったと思われる。この、かつての湖底であった陸域には、乾燥した本来の陸上と違った環境(例えば、湿地やそれに準ずる環境)を好む陸上植物が生育し、それらを母材とした、現在の湖周囲に存在する土壌有機物とは異なった種類の有機物が形成されていたはずである。それが、当時の活発になった水循環の働きによって運搬され、Stage Ib の主要な堆積有機物となったと考えられる。その様な有機物を供給した陸域は、急速な湖水域の拡大によって、再び湖底となり、340cm 層の時代に至る迄に、ほぼ失われてしまったと思われる。

4. 結論

以上の議論から、次の事が結論された。

- 1) 約 14,200 年前から、有機物供給量が減少すると共に、供給される主要な有機物種が、それ迄の湿地に繁る草本を母材とする土壌有機物から、現在分布している陸上植物を母材とし、かつ、現在の所、由来が不明な“Old carbon”を含んだ土壌有機物に次第に変

化した。これは、その頃迄縮小していた湖水域が、当時の水循環の活発化に伴い、急速に拡大し、湿地が失われたことによると考えられる。

2) 湖に供給される土壌有機物に、“Old carbon”が、バックグラウンド的存在として、常時、ある程度混入し、それは現在も続いていると考えられる。

以上のことから、各時代における、湖に供給される新しい有機物の供給量の減少度によって、全堆積有機物に対する、古い年代をもった有機物の寄与率が増加し、我々の試料に見られる年代の逆転が引き起こされると考えられる。

引用文献

- Cranwell, P. A. (1984) : Lipids geochemistry of sediments from Upton Broad, a small productive lake. *Organic Geochemistry*, 7, 25-37
- Eglinton, G. and Hamilton, J. (1967) : Leaf Epicuticular Waxes The waxy outer surface of most plants display a wide diversity of fine structure and chemical constituents. *Science*, 156, 1322-1335
- DeNiro, M. J. and Epstein, S. (1978) : Influence of diet on the distribution of carbon isotopes in animals. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 42, 495-506
- Ficken, K.J., Li, B., Swain, D.L., Eglinton, G. (2000) : An n-alkane proxy for the sedimentary input of submerged/floating freshwater aquatic macrophytes. *Organic Geochemistry*, 31, 745-749
- Meyers, P.A. (1994) : Preservation of elemental and isotopic source identification of sedimentary organic matter. *Chemical Geology*, 114, 289-302.
- 西村弥亜、蓮池一哉、北川浩之、Zhu Liping、那須浩郎、Chen Yuansheng (2003) : プマユムツォ湖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
- Nishimura, M., Shimokawara, M., Watanabe, T. and Mizuno, K. (2006) : Efficient GC/MS analysis of hydroxyl lipid compounds from geochemical samples using tertiary - butyldimethylsilyl etherification. *Organic Geochemistry*, 37, 1019-1035
- 西村弥亜、松中哲也、北川浩之、Zhu Liping、蓮池一哉 (2007) : プマユムツォ湖柱状堆積物に記録された、チベット高原南東部における最終氷期最寒冷期以降の気候・環境変動に関する研究 -Part I -PY104 コアからの新たな結果を基に- 「2004 チベット・プマユムツォ湖学術調査・研究報告書」 (印刷中)

Investigation on the age reversal found in a sediment core from Lake Pumayum Co in the southeastern part of the Tibetan Plateau

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

1, Graduate School of Marine Science & Technology, Tokai University
(nisimura@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 Research, Chinese Academy of Science, China

Little has been known in details as to how the Tibetan Plateau had responded to global climatic oscillations in the paleoenvironmental history. In order to elucidate when and how the deglaciation and the subsequent warm and wet climate after the last glacial maximum (LGM) started on the plateau, and then were linked to the restoration of the southwest monsoon, we have been trying to organic-geochemically analyze the paleoenvironments recorded in a 4m-long sediment core (PY409PC) collected from Lake Pumayum Co in a southeast part of the plateau. However, it was found that the sediment ages strikingly reversed from 14,220yrB.P to 19,507yrB.P between the bottom and 40cm in depth toward the top, and the age reversal is hindering us from going on the paleoenvironmental analysis. It appeared that the reversal was caused by the contribution of "old carbon" from certain natural source to the lake, rather than a contamination during sampling and analyzing. We attempted to make clear the old carbon source and the factors controlling the contribution, and obtained the following results:

- 1) As the supply of organic matter to the lake decreased since ca.14,200yrB.P, the type of organic matter deposited probably changed from soil organic matter originated mainly from a kind of grasses grown on relatively wet lands to those from recent terrestrial plants on ordinary lands with age. This is seemed to have been caused by the environmental change that the wet lands surrounding the lake at that time were lost by a rapid expansion of the water basin, due to the activation of water circulation.
- 2) It is likely that organic matter with "old carbon" has continuously contributed to the lake sediments as a background at least since ca.14,200yrB.P.

The results suggested that the age reversal found in our core sample was resulted from the increasing relative contribution of soil organic matter with "old carbon" to the sedimentary organic matter, coupled with the decrease in a supply of new organic matter from land with age.