

標高 5000m のチベット高原に生育する植物は低地の植物より ^{14}C 濃度が高いのか？中村俊夫¹⁾・渡邊隆広²⁾・松中哲也³⁾・西村弥亜³⁾・朱立平⁴⁾・太田友子¹⁾・南雅代¹⁾¹⁾名古屋大学年代測定総合研究センター

(correspond to: e-mail:nakamura@nendai.nagoya-u.ac.jp; phone:052-789-3082)

²⁾東北大学大学院理学研究科³⁾東海大学海洋学研究科⁴⁾中国科学院西藏高原研究所

1. はじめに

「標高 5000m のチベット高原に生育する植物は低地の植物より ^{14}C 濃度が高いのか?」。この表題の設問の意味は次の通りである。 ^{14}C 原子は、銀河宇宙線的作用により地球大気の上層で作られるが、その生成頻度は高度依存性があり、対流圏では、高度が高いほど生成頻度は高い。従って、大気中二酸化炭素の ^{14}C 濃度、すなわち、安定な炭素 ^{12}C (あるいは ^{13}C) に対する ^{14}C の存在割合は、同様な高度依存性があるのではないか。

このような質問を、著者の一人 (T.N.) は、10 年近くも前に講演会で受けたことがある。この質問に対しては、常識的な回答として、対流圏の大気は良く混ざっており、従って、対流圏内の二酸化炭素の ^{14}C 濃度は高度や場所に依らずほぼ一定と考えて良いと答えた。しかし、対流圏大気の混合速度は、 ^{14}C 原子生成の高度依存性を無視できるくらいに十分に速いのか。この答えは、あるいは簡単な概算を行うことで結論が出せるかもしれない。しかし、是非実測してみたいと、常々考えていた。

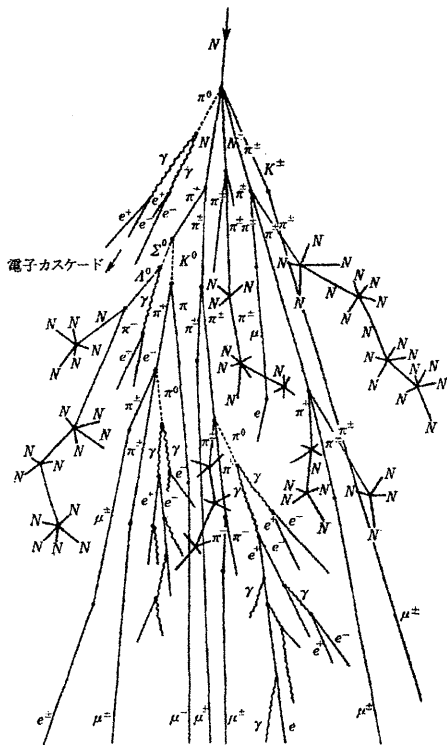
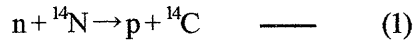
2006 年夏に、チベット高原の標高 5000m を超える所に所在するプマユツォ湖の調査に参加することができ、標高 5000m の地点に生育する植物の ^{14}C 濃度を測定するチャンスを得た。日本最高峰の富士山頂でも標高 3776m でしかない。しかも山頂には植物は生育していないため、日本では、目的とする試料の採取は困難であった。本稿では、この標高 5000m に生育する植物試料の測定結果を報告する。

なお、大気中の二酸化炭素の ^{14}C 濃度については、既に、海面近くから下部成層圏まで (高度にして、約 30km) の測定を実施し、対流圏内では、その ^{14}C 濃度はほぼ一定であることを確認している (Nakamura et al. 1992; 1994)。しかし、植物が光合成により大気中の二酸化炭素を固定する生理作用や、二次宇宙線強度が強い高所で、植物内での直接生成の可能性などから、是非、直接 ^{14}C 濃度を測定することを希望していた。

2. 大気中における ^{14}C の生成

放射性炭素年代測定に利用される放射性同位体 ^{14}C は、宇宙線生成核種である。太陽系外から地球に降り注ぐエネルギーの高い銀河宇宙線が、地球大気を構成する窒素、酸素などの原子核と衝突して核反応を起こし、生成された二次粒子がさらに核反応をおこし、反応の規模が拡大する。高エ

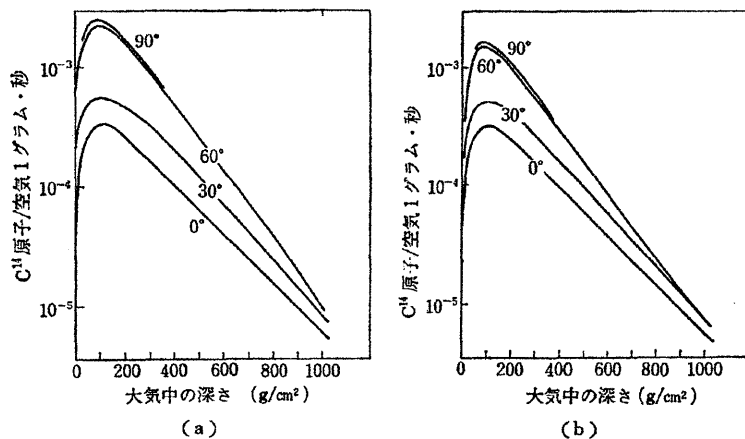
エネルギー宇宙線と大気中の原子核との衝突のモデルを図1に示す(小田 1972). こうした粒子衝突, 核反応過程において生成された中性子が, 窒素の原子核と反応して ^{14}C が生成される.



6-2 図 高エネルギーの1次宇宙線が大気上層で空気の原子核と衝突し, 核子カスケードと電子カスケードの集積としてあらゆる種類の粒子を作りながら発達, 消滅していくようす. これは粒子の数, その比率等を忠実に表わしたのではない.

図1 高エネルギーの一次宇宙線と空気の原子核との衝突における反応のモデル. 一つの反応により生成した粒子がさらに反応をおこし, 規模が拡大する.
(小田 1972 から引用)

(1)の反応の頻度は, 入射宇宙線のエネルギー分布, 地球大気の密度の鉛直変化により, 高度変化を示す. さらに, 地球磁場による緯度効果や, また太陽活動度の経年変動に応じて, 活動強度が極大の時は, 宇宙線入射に対する遮蔽効果が大きく ^{14}C 生成頻度が小さくなる. 逆に, 太陽活動の強度が極小の時は, 宇宙線入射に対する遮蔽効果が小さく ^{14}C 生成頻度が大きくなる. ^{14}C の生成率の高度分布の推定値を図2に示す(小田 1972). 図2では, 横軸は大気の深さが大気の圧力で示されており, $1000\text{g}/\text{cm}^2$ あたりが地表面である. 標高 5600m がほぼ $500\text{g}/\text{cm}^2$ にあたる. 図2から, 緯度が 30° 近傍では, 高度 5000m あたりの ^{14}C の生成率は 1×10^4 (^{14}C 原子/空気 1g /秒), 海面近くでは, 同じ単位で 1×10^5 と, 約 $1/10$ である.



6-19 図 大気中でおそい中性子によって C^{14} 原子が発生する様子。(a), (b) はそれぞれ太陽の活動が極小であった 1953/54, 極大であった 1957/58 の測定をまとめたものである。

図2 大気中における ^{14}C の生成率の標高依存性
太陽活動の極小, 極大期に応じて ^{14}C の生成率が変化する
(小田 1972 から引用)

2. 植物試料の採取

2. 1 高山の植物試料採取

チベット高原は、ユーラシア大陸の中央部に位置する高原であり、東西幅約 2,000km, 南北幅約 1,200km で、標高は 3,500m から 5,500m で、平均高度は 4,500m とされる。このチベット高原の南部域で、高度がほぼ 5,030m の場所に位置するプマユムツォ湖において、2001 年から、東海大学と中国科学院チベット高原研究所との共同調査研究が実施されている。このチベット・プマユムツォ湖学術調査の目的は、高山湖の特殊な位置とそこに生息する魚類や湖周辺の植生の関係、および過去の気候・環境情報の化石を記録している湖底堆積物を採取し、記録されている過去の気候・環境変動の情報を読み解くことである。

2006 年 8 月実施された東海大学および中国科学院西藏高原研究所のグループを中心とする第三次現地調査において、プマユムツォ湖の湖底堆積物のほか、湖水、湖畔の陸上植物や水草が採取された。今回は、陸上植物についての ^{14}C 濃度結果を報告する。

さらに、人口が密集する地域と人がほとんど居住しない地域における ^{14}C 濃度の値を比較するために、ラサ市周辺にて植物片を採取した。

2. 2 名古屋大学内松葉の採取

我々は、名古屋大学周辺大気、自動車排気ガス等による汚染の程度、状況を調査する目的として、名古屋大学東山キャンパス内の松葉を採集し、その ^{14}C 濃度経年変動を追跡調査している。2005 年に成長した松葉を、2006 年 3 月に採取した。この学内松葉の採取は、1983, 1988, 1989 年と、近年まで断続的に行っており、初期の成果は中村ほか (1991) に報告されている。2006 年の試料採取地点も、以前の地点をほぼ踏襲している。

2. 3 富士山 6 合目におけるハイ松の葉片の採取

著者の一人 (T.N.) が、富士山の環境調査を実施した際に、富士宮新五合目から山頂に向かった。その際に、六合目あたりの登山道の脇に生えていたハイ松 2 個体の葉片をごく微量採取した。1 本のハイ松については、2 つの枝からそれぞれ葉片を採取した。

3. 炭素同位体比の測定

採取した試料は、名古屋大学に持ち帰り、名古屋大学に設置されているタンデトロン加速器質量分析計を用いて ^{14}C 濃度測定を実施した。植物試料の ^{14}C 濃度測定のための試料調製はルーティンの方法による。適量の松葉試料を 200ml ビーカーにいれ、蒸留水を用いて超音波洗浄を数回繰り返し、表面の汚れを除去した。次に、1.2 規定塩酸、1.2 規定水酸化ナトリウム、1.2 規定塩酸と続く化学的洗浄処理を、それぞれ、植物試料が脱色されて白くなるまで繰り返した。洗浄処理を終えた試料を適量分取し、真空中で燃焼して二酸化炭素を生成し、さらにそれを水素還元法でグラファイトに変換して、 ^{14}C 分析計に用いるターゲットとした。

上述のようにして、木炭試料およびシュウ酸標準体から調製した固形の炭素試料について、タンデトロン加速器質量分析計を用いて ^{14}C 年代測定を行った (中村, 2001)。タンデトロン分析計では、 ^{14}C と ^{12}C の存在比 ($^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比 (=R)) が未知試料 (R_{sample}) と ^{14}C 濃度が既知の標準体 (R_{ADI950}) について測定され、 $R_{\text{sample}}/R_{\text{ADI950}}$ 比が得られる。また、タンデトロン分析計では $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比も測定できる。測定された $R_{\text{sample}}/R_{\text{ADI950}}$ 比について、 ^{14}C ブランクの補正を行い、さらにタンデトロン分析計で測定された $\delta^{13}\text{C}$ を用いて炭素同位体分別の補正を行ったのち、試料の ^{14}C 濃度 (同位体分別補正 ^{14}C 濃度) を算出した (表 1, 中村, 2001 ; 2003)。

試料の ^{14}C 濃度は、 $R_{\text{sample}}/R_{\text{ADI950}}$ 比を用いて示した。もちろん、試料及び標準体の $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比は、炭素安定同位体比 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ を -25‰ に規格化する、いわゆる同位体分別の補正が行ってある (中村 2003)。誤差は、同種の複数試料の測定データある場合には、ばらつきに基づく標準偏差 (1σ) を用い、データが一つしかない場合には ^{14}C 測定の誤差をそのまま用いた。

4. 結果及び考察

測定結果を表 1 に示す。大気中二酸化炭素の ^{14}C 濃度経年変動は、1950 年代後半以降、特異的な傾向を示す (中村ほか 2005)。すなわち、大気圏内核実験の影響である。1962 年には、大気圏内で大規模な核兵器実験が行われたが、1963 年には米ソ間の条約により中止され、それ以降は地表下での核実験が主流になった。1964 年に生育した樹木年輪に認められる ^{14}C 濃度経年変動のピークは、成層圏内で作られた ^{14}C の多くが対流圏に降下したためである。1964 年以降、対流圏内の ^{14}C は、海洋との二酸化炭素交換により大気中から海洋へと移行して、薄められてきた。ここで注意すべきことは、核実験の実施場所が、ほぼ米ソの領土内の限られた地点にあることである。従って、 ^{14}C 濃度経年変動のピークの大きさは、地表で核実験が行われた場所に依存して、強い緯度依存性を示すが、大気圏内核実験が停止された後は、経年と共に徐々に緯度効果は薄れる。しかしながら、実験が開始された前後の 1955-1970 年の間には、大気中二酸化炭素の ^{14}C 濃度には、緯度依存性が明らかに存在する (Hua and Barbetti 2004)。

2008 年現在、まだ、成層圏大気、対流圏大気、そして海洋水中には、核実験起源の影響が ^{14}C 濃度分布に残されており、実際、清浄な大気中二酸化炭素の ^{14}C 濃度は、核実験以前の ^{14}C 濃度に比べて若干であるが、しかし明白に高い値を示している。但し、化石燃料消費の増大に伴って、Suess

効果による, ローカルな ^{14}C 濃度の希釈効果も顕著に見られるようになっており, 現象が複雑になっている。

さて, 今回, かなり異なった条件で生育した植物を採取して, ^{14}C 濃度を測定した結果を比較すると, ^{14}C 濃度は, プマユムツォ湖周辺の試料で最も高く, ラサ周辺と富士山六合目の試料が互いに誤差範囲内で一致し, 中間的な値を示す。名古屋大学東山キャンパス内の松葉は, 最も低い ^{14}C 濃度を示す。この ^{14}C 濃度の順番は, 空気の清浄度に関係するように思われる。プマユムツォ湖周辺の植物試料は, 清浄な空気中の Suess 効果の影響が少ない二酸化炭素を固定していると考えられる。一方, 名古屋大学は, 日本の産業・商業の中核都市である名古屋市の郊外にあり, Suess 効果の影響は少なくないことが推定できる。また, 名古屋大学内で生育した松葉のうち, 一般公道に面して立っている松の木のそれは, 表1に示されるように明らかに ^{14}C 濃度が低い。このような測定データおよび解釈から, 『標高の高い所に生育する植物ほど高い ^{14}C 濃度を示す』ということを積極的に主張することはできない。今回のデータには, 海水面近くで, 清浄な大気のもとに生育した試料が欠けていることから, 明白な結論を導くことは難しい。しかし, 大気中の ^{14}C 生成率の違いほどには, そこに生育する植物の ^{14}C 濃度は違わないことが明白に示された。すなわち, 標高 5000m の大気中の ^{14}C 生成率 (^{14}C 原子/空気 1g/秒) は地表に比べて約 10 倍高いが, 今回測定した植物の ^{14}C 濃度には, 顕著な高度依存性は見られない。

一方, それぞれの植物試料の $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 値は, C3 植物に特徴的な値を示しているが, 大きな違いは見られない。プマユムツォ湖周辺の試料が, 他地点の試料に比べて $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 値がやや高いのは, 他地点の試料は樹木の葉片であるのに対し, 草本植物から構成されることによるかもしれない。

表1 植物試料の $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 値および ^{14}C 濃度

項目	名大内松葉	富士山六合目のハイ松の葉	プマユムツォ湖周辺の植物	ラサ周辺の植物
地点の標高	150m	2600m	5030m	4000m
植物の生育年	2005年	2006年	2006年	2006年
植物の採取年	2006年3月	2006年7月	2006年8月	2006年8月
$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ (‰)	Av.: -27.7 ± 1.3 (N=10, ±1σ)	Av.: -26.6 ± 0.3 (N=3, ±1σ)	Av.: -25.1 ± 1.2 (N=5, ±1σ)	Av.: -27 ± 1 (N=1, ±1σ)
^{14}C 濃度 ($R_{\text{sample}}/R_{\text{AD1950}}$)*	通常値: Av.: 1.017 ± 0.003 (N=8, ±1σ) 車排気ガス汚染: Av.: 1.001 ± 0.001 (N=2, ±1σ)	Av.: 1.051 ± 0.002 (N=3, ±1σ)	Av.: 1.081 ± 0.016 (N=5, ±1σ)	Av.: 1.055 ± 0.005 (N=1, ±1σ)

*) 炭素安定同位体分別の補正として, 試料及び標準体の $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ は, -25‰の値に規格化されている。また, 標準体の ^{14}C 濃度の減衰補正が施されている (中村 2003)。

さて, 図2に示される, 大気中の ^{14}C の生成率の高度変化は, 測定値ではなく, 宇宙線の線質, エネルギー分布, 核反応モデル, 大気の組成・高度分布などに基づく推定値である (小田 1972)。では, 大気中の ^{14}C の生成率の高度変化を検出できるであろうか。例えば, 大気循環を全く無視した場合に, 標高 5000m の空気 1g 中で1年間に生成される ^{14}C の個数と, 元々, その空気 1g 中にあ

る ^{14}C 原子の個数を比較すると、最大でも 1000 分の 1 程度である。現在の AMS システムによる ^{14}C 濃度測定精度は、0.2–0.5% 程度である。従って、この 1000 分の 1 程度の増加量を正確に測定することは現状では、かなり難しい。しかも、対流圏大気は、2 週間で地球を 1 周する程度の早さで循環しており、大気はかなり良く混合している。

このようなことから、今回の測定で見られた、標高 5000m 地点に生育する植物が示すやや高い ^{14}C 濃度は、清浄な大気のもとに生育したため、Suess 効果の影響が少ないことで説明できるものと考えられる。

参考文献

Hua, Q. and Barbetti, M. (2004) Review of tropospheric bomb ^{14}C data for carbon cycle modeling and age calibration purposes. *Radiocarbon*, 46(3) 1273-1298.

中村俊夫・中井信之・古川路明 (1991) 名古屋大学東山キャンパス内の松葉の ^{14}C 濃度測定. 名古屋大学加速器質量分析計業績報告書, II, 104-112.

Nakamura, T., Nakazawa, T., N. Nakai, H. Kitagawa, H. Honda, T. Itoh, T. Machida, and E. Matsumoto (1992) Measurements of ^{14}C concentrations of stratospheric CO_2 by accelerator mass spectrometry. *Radiocarbon*, 34, 745-752.

Nakamura, T., Nakazawa, T., Honda, H., Kitagawa, H., Machida, T., Ikeda, A. Matsumoto, E. (1994) Seasonal variations in ^{14}C concentrations of stratospheric CO_2 measured with accelerator mass spectrometry. *Nuclear Instrum. and Methods in Nucl. Physics*, B92, 413-416.

中村俊夫 (2001) 放射性炭素年代測定とその高精度化. 第四紀研究, 40 (6) 445-459.

中村俊夫 (2003) 加速器質量分析(AMS)による環境中およびトレーサ放射性同位体の高感度測定. *Radioisotopes*, 52, 3, 145-171.

中村俊夫・太田友子・西田真砂美 (2005) AMS ^{14}C 年代測定の法医学的利用 (II). 名古屋大学加速器質量分析計業績報告書, XVI, 120-125.

小田稔 (1972) 宇宙線. 裳華房

Is ^{14}C concentration higher for plants growing at high altitude Tibetan Plateau than those at the sea level?

Toshio NAKAMURA^{*a}, Takahiro WATANABE^b, Tetsuya MATSUNAKA^c, Mitsugu NISHIMURA^c,
Liping ZHU^d, Tomoko OHTA^a, and Masayo MINAMI^a

^a Center for Chronological Research, Nagoya University, Chikusa, Nagoya 464-8602 Japan

(corresponding author: e-mail:nakamura@nendai.nagoya-u.ac.jp, Phone:052-789-3082)

^b Graduate School of Science, Tohoku University

^c Graduate School of marine Sciences & Technology, Tokai University

^d Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, China

To answer a question whether ^{14}C concentration is higher for plants growing at high altitude locations than those growing at the sea level, we recently have collected plants samples from four sites at different altitudes: (1) plants from Lake Pumayum area at the altitude of 5030m; (2) plant samples from the suburbs of Lhasa city at the altitude of 4000m; (3) needle leaves from pine tree at 2600m-high location of Mt. Fuji; and (4) needle leaves from pine trees growing in the Higashiyama Campus of Nagoya University.

The plant samples were rinsed with distilled water, treated chemically by an acid-alkali-acid treatment, and finally dried in an electric oven. A part of the samples were combusted to produce CO_2 and the produced CO_2 was changed to graphite for ^{14}C measurements with an AMS ^{14}C system at Nagoya University. The measured ^{14}C concentration was given in a ratio of sample $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ to that of standard. For both sample and standard, isotopic fractionation was corrected. In addition, the decrease of ^{14}C concentration by radioactive decay for a standard from AD1950 to the year of sample collection was also corrected.

^{14}C concentrations were highest for the plant samples from Lake Pumayum showing a value of 1.081 ± 0.016 in average, followed by the values of 1.055 ± 0.005 for plants near Lhasa city, the values of 1.051 ± 0.002 for plants from Mt. Fuji, and finally 1.017 ± 0.003 for pine needles from Nagoya University. This clear altitude dependence may be explained preferably by Suess effect that is a dilution effect of modern ^{14}C concentration with dead carbon, containing no ^{14}C , produced by combustion of fossil fuel. The estimated altitude dependence of ^{14}C atom production is not strong and the resulting altitude dependence of ^{14}C concentration of CO_2 can fade out quickly by the strong air-mass mixing in the troposphere.