



Title	樹木年輪セルロースの酸素同位体比による古気候の復元を目指して
Author(s)	中塚, 武; Nakatsuka, Takeshi
Description	1章 10年~100年スケールの気候変動の観測, 気候復元とモニタリング
Citation	低温科学, 65, 49-56
Issue Date	2007-03-23
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/20454
Type	departmental bulletin paper
File Information	NAKATUKA.pdf





樹木年輪セルロースの酸素同位体比による古気候の復元を目指して

中塚 武 北海道大学

近年, 分析技術の発達により, 樹木年輪に含まれるセルロースの酸素同位体比を古気候復元に利用する取り組みが進められている。酸素同位体比は, 年輪幅や年輪の炭素同位体比と異なり, 樹木自身の生理生態学因子の影響をほとんど受けず, もっぱら降水の酸素同位体比と相対湿度のみに依存して変化するため, 日本のように降水量が多く森林内の樹木密度が高い地域においても, 過去の水循環変動の復元等に利用できる。また, 年層内の酸素同位体比の季節変動を詳細に測定することで, 樹木から過去の月単位の古気候情報を取得することも可能になりつつある。

1. はじめに — 樹木年輪研究と同位体比の可能性

樹木年輪とは, 我々が日常生活の中で目にする家具や建物にも必ず見られる木材の普遍的な特質である。と同時に, 1つ1つの年輪の間隔(年輪幅)は, 陸上の気候変動を復元できる最も信頼度の高い媒体として, 次のような優れた特質を持っている。1) 時間分解能の細かさ, 2) 時間スケールの長さ, 3) 空間被覆度の大きさ, 4) 気温・降水量などへの高い感度, である。1)は, 「年輪」という言葉が意味するように, 堆積物などの他の古気候復元媒体と比べて, 極めて精度の高い, 通常1年単位の古気候復元を可能にする。2)は, 一般に現生樹木の年齢(数百年~最大数千年まで)の制約を受けるが, 木材は他の古気候復元媒体と異なり, 倒壊・埋没, 伐採・加工後にも一般に保存が良く, その中の情報が損なわれにくい。それ故, 1万年を越える過去の樹木年輪試料を確保することも可能になってきている。3)は, 陸上であれば, 熱帯から極地, 島嶼から高山, 砂漠まで普遍的に分布するが故に, 面的な気候変動情報の復元を可能にする。4)は, 樹木の肥大成長量, 即ち年輪幅が, 一般に気温や降水量などの重要な気候要素に規定されて変化することを意味している。

このように樹木年輪による古気候の復元には大きな特長があるが, 同時に, そこには1つ大きな問題がある。それは樹木が生物であり, 肥大成長量, 即ち年輪幅の変動には, 気候学的因子だけでなく生理生態学的因子が大きく影響してしまうということである。一般に, 年輪幅は若い個体で広く老齢木で狭くなるが, 気候と関係の無いこうした要因による変化を生データのデータから取り除く際に, 長期の気候変動シグナルも同時に除去されてしまう。また, 日本のように降水量が多く, 森林内の樹木個体密度が極めて高い環境下では, 樹木の成長は気候因子以外

に, 隣接個体との局地的な光をめぐる競争の影響を大きく受ける。こうした隣接個体との関係は, 数年~数10年の時間をかけてゆっくりと, かつランダムに変化するものであるから, 年輪幅の中・長期スケールの変動には, 気候以外のランダムな要因が潜んでいることになる。

こうした問題に対して, 樹木年輪の同位体比, 特に年輪から抽出したセルロースの酸素同位体比には, 樹木の生物学的因子の影響をほとんど受けず, ほぼ純粋に気候学的因子のみを記録できるという特長がある。本論では, 筆者自らが過去数年間に亘って蓄積してきた知見の中から, 樹木年輪セルロースの同位体比, 特に酸素同位体比による古気候復元研究の可能性について, 述べたい。

2. 年輪セルロースの酸素同位体比とは? — その古気候復元の論理

2-1. 安定同位体比とは?

よく知られているように, 多くの元素には, 原子核の中の陽子の数が同じ(即ち, 同じ種類の元素)でも, 中性子の数だけが異なる「同位体」というものが複数存在する。酸素の場合, ^{16}O , ^{17}O , ^{18}O があり, 一番中性子の数が少ない ^{16}O の数が最も多く, 全体の99%以上を占めている。この3つの同位体は全て安定同位体であり, ここでは, その比($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$)に注目する。

安定同位体は, 年代測定などに利用できる放射性同位体とは違って, 放射壊変などを起こさない。同一の元素で質量数だけが異なる安定同位体のペアは, 地球上でおきる物理・化学・生物過程の中で殆ど全く同じように振舞うが, 分子の拡散や相転移, 化学反応, 酵素反応などのプロセスで, 質量の違いのため, ほんの少しだけ異なるスピードで動く。安定同位体比の研究では, このほんの僅かな変化の結果を, 同位体比測定専用の質量分析計で測定して明らかにする。変化が極めて微小であるため,

同位体比は、通常、試料の同位体比を国際標準物質の同位体比で割って、その1からのずれを1000倍に拡大した δ 値(千分偏差値)というもので表す。酸素の場合、それは以下のようなになる。

$$\delta^{18}\text{O} = \left[\frac{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{Sample}}}{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{standard}}} - 1 \right] \times 1000 \text{ (‰)}$$

ここで、酸素同位体比の国際標準物質には、VSMOW(ウィーンの国際原子力機関の管理する標準平均海水)が使われる。

これまで樹木年輪などの有機物試料の炭素同位体比は、燃焼型の元素分析計と同位体質量分析計を連結した装置で簡便に測定することができたが、同じ有機物でも酸素同位体比の場合は、試料を燃焼できない(燃焼すると酸化剤から酸素が混入する)ことから、測定が極めて難しかった。数年前、同位体質量分析計に連結した1400°Cに達する高温の熱分解炉の中で有機物中の酸素を全てCOガス化する技術が開発され^{1),2)}、以後、急速に年輪の酸素同位体比が、世界中で測られつつある。つまりこの研究は、今始まったばかりなのである。

さて、本論に戻ろう。樹木年輪の酸素同位体比が、気候変動を記録できるメカニズムとは何であろうか？ 樹木年輪の同位体比は、一般に年層を構成する木質全体に対してではなく、そこからセルロースという高分子だけを抽出して測定する。木材はセルロース、リグニン、ヘミセルロースという3つの代表的成分からなるが、この中でセルロースが最も安定であり、分子構造が単純かつ均質で、炭素・酸素・水素をすべて含み、かつ交換性の官能基をほとんど持たないからである。つまり、樹木年輪のセルロースは、生成後、何千年以上にも亘って、生

成時の同位体比の情報を保持し続けていると考えられる(ちなみに水素だけは、全体の3割がOH基の水素であり、生成後に周囲の水と交換する。そこで通常、このOH基をニトロ化してそのHを除去してから、水素同位体比の測定を行う)。同位体比と気候変動の関係を考える際には、このセルロースの同位体比が、どのように決まるかを、第一に考える必要がある。

2-2. 葉内における水の同位体比の変化

セルロースは樹幹部で生合成される高分子であるが、その元となる有機分子は、当然、葉内での光合成によって生成される。図1に、光合成産物の酸素同位体比を直接規定する葉内水の酸素同位体比がどのように決まるかについて、簡単な式とともに模式的に示した³⁾。葉内水と光合成産物の酸素同位体比はもちろん異なるが、一般にその同位体比の差は一定であると考えられているので、葉内水の酸素同位体比の規定要因が光合成産物の酸素同位体比を直接規定しているのである。葉へは根から茎を通して土壌水と同じ同位体比を持つ水が供給され(F1)、それは葉内で大きな同位体比の変化(相転移に伴う平衡論的同位体分別： ϵ_e)を伴って蒸発した後、更に、同位体比の変化(拡散に伴う速度論的同位体分別： ϵ_k)を伴いながら、気孔を通して大気中に放出される(F3)。一般に水が蒸発したり、気孔を通過したりする際には、軽い同位体(^{16}O)からなる水が優先的に動くので、残された葉内水の酸素同位体比は、土壌水のそれよりも高くなる。一方で、大気中にも水蒸気が存在するので、湿度が高いほど、気孔を介した逆向き水蒸気フラックス(F2)が大きくなり、葉内水の酸素同位体比の上昇が抑えられる。

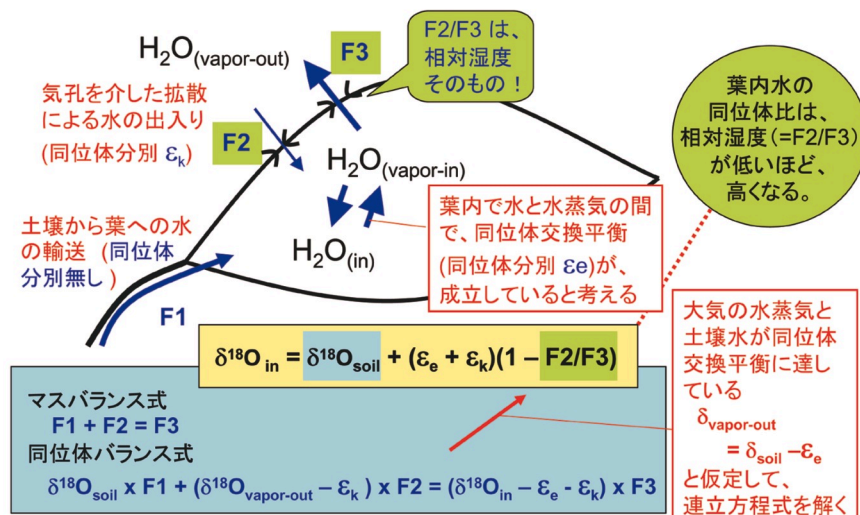


図1. 葉内水の酸素同位体比の変動メカニズム

このような状況下で葉内水とその酸素同位体比の収支を2つの式で表し、大気中の水蒸気と土壌水が同位体交換平衡に達していると仮定して連立方程式を解くと、葉内水の酸素同位体比は、「土壌水の酸素同位体比」と「相対湿度」の2つの要因によって決まっていることがわかる(図1の $\delta^{18}\text{O}$ の式参照)。正確には、後者は葉外と葉内の水蒸気圧の比(F_2/F_3)であるが、葉内の水蒸気圧は100%と仮定できるので、それは葉外、即ち大気中の相対湿度に等しくなる。つまり、「土壌水の酸素同位体比」が高いほど、または「相対湿度」が低いほど、葉内水の酸素同位体比は高くなる。「土壌水の酸素同位体比」は、降水の酸素同位体比を反映し、降水の酸素同位体比は気温や降水量、大気循環パターンなどの影響を受けて変化する^{4),5),6)}ので、葉内水の酸素同位体比は、「相対湿度」と共に、もっぱら気候因子の影響を直接受けて変化することになる。

ちなみに炭素の場合でも、その光合成産物の同位体比の規定式は、葉内における二酸化炭素の収支についての同様の連立方程式から求めることができるが、その式の中には、「光合成による二酸化炭素の固定速度」が含まれている。つまり炭素同位体比の場合は、年輪幅の場合と同様に、個体毎の光環境の差異などの生態学的影响を受けざるを得ないのに対し、酸素同位体比の特長は、その規定要因に生物学的因子が一切含まれて居ないことにある。

実際には、葉内水からセルロースに至るまでの間に、酸素同位体比は、更に、2つの大きな関門を経なければ成らない。「葉内での光合成」(1次的同位体効果)と「樹幹部でのセルロース合成」(2次的同位体効果)である³⁾。前者の同位体分別の大きさは一定であると考えられているが、後者については、有機分子内の一部の酸素が導管水(土壌水と同じ同位体比を持つ水)の酸素と置き換わってしまうことが知られており^{7),8)}、その効果の大きさが樹種や樹齢、季節ごとに変わることも分かっている(中塚,未発表データ)。こうしたメカニズムは、年輪セルロースの酸素同位体比も、必ずしも生物学的要因から完全に独立ではありえない可能性を示唆しているが、次章以降、実際の樹木の年輪セルロースの酸素同位体比を示して、その特長について考察しよう。

3. 樹木年輪同位体比の特長(1) — 個体間相関の高さ

樹木年輪セルロースの酸素同位体比が、図1で示したように、もっぱら気候学的因子の影響のみを受けて変化

するならば、同じ地域で採取された年輪試料の酸素同位体比の変動は、年輪幅や年輪炭素同位体比と違って、高い個体間相関を示すはずである。図2、図3に、北海道北部の雨龍研究林で採取されたミズナラの年輪セルロースの炭素同位体比と酸素同位体比の複数個体間での時系列変動のデータを示す⁹⁾。炭素同位体比の変動パターンが個体ごとに様々に異なるのに対し、酸素同位体比の変動は高い個体間の相関性を示し、光環境などに局地的な差異が見られる森林内でも、年輪セルロースの酸素同位

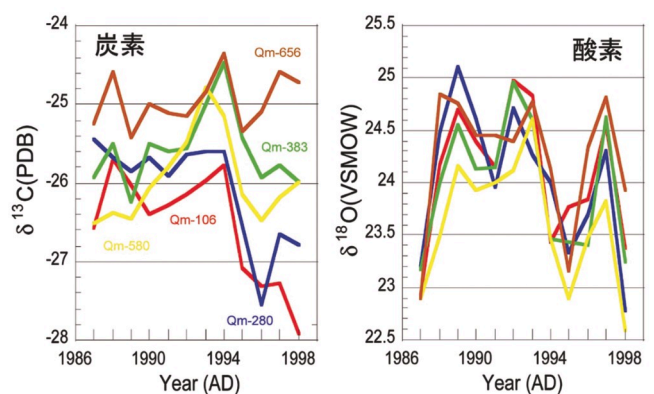


図2. 北海道・雨龍研究林のミズナラ5個体における12年間の年輪セルロースの炭素と酸素の同位体比の経年変動

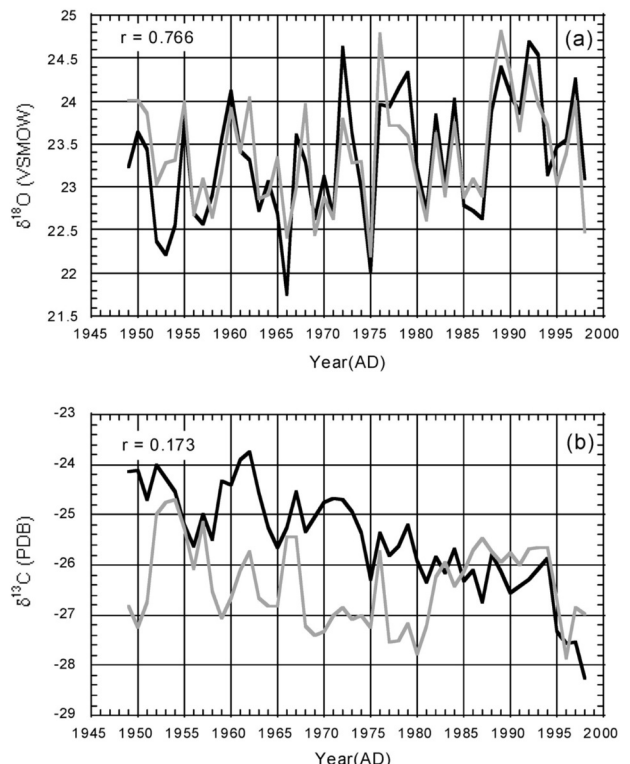


図3. 北海道・雨龍研究林のミズナラ2個体における50年間の年輪セルロースの酸素(a)・炭素(b)同位体比の経年変動. 図中のrは、2個体の変動の相関係数。

体比が、共通の環境因子、即ち何らかの気候因子を反映して変化していることが強く示唆される。

図4には、カムチャッカ中央低地の Kozyrevsk で採取された3個体のカラマツの酸素同位体比の経年変化のデータを示した。測定した3個体には、年輪幅及び、その変動パターンが全く異なるものを敢えて選んだ。150年以上に亘るその酸素同位体比の変動は、年輪幅の大きな違いにもかかわらず、短周期の変動、中・長周期の変動、同位体比の絶対値共に、3個体間で極めてよい一致を示しており、酸素同位体比が、樹木成長環境の局地的違いの影響を受けず、地域の気候変動を正確に記録している可能性を示唆している。ここでは、しかし、1850年以前の若齢期のみにおいて、酸素同位体比の変動の個体間の相関性が乱れるという事実も指摘しておく必要がある。若齢期において酸素同位体比が高くなることは、既存の限られた外国における長期時系列データでも報告されており¹⁰⁾、幼樹効果と呼ばれている。本試料では水素同

位体比のデータと比較することで、この幼樹効果が上述の「2次的同位体効果」との関係で発生していることを明らかにした(中塚, 未発表データ)。即ち、セルロース合成に至るまでの間の導管水と有機分子の間の酸素の交換率が、若齢木において小さいらしいのである。今後の研究では、この幼樹効果の有無・期間を個々の時系列データに対して、判定していくが必要になる。

4. 樹木年輪同位体比の特長② — 水循環変動への高い感度

図1に示したように、樹木年輪セルロースの酸素同位体比は、「土壌水(降水)の酸素同位体比」と「相対湿度」に規定されて変化するはずである。実際には、どうであろうか？

図5に、北海道・美唄の道立林業試験場で採取されたグイマツ4個体の酸素同位体比の経年変化とその気候因

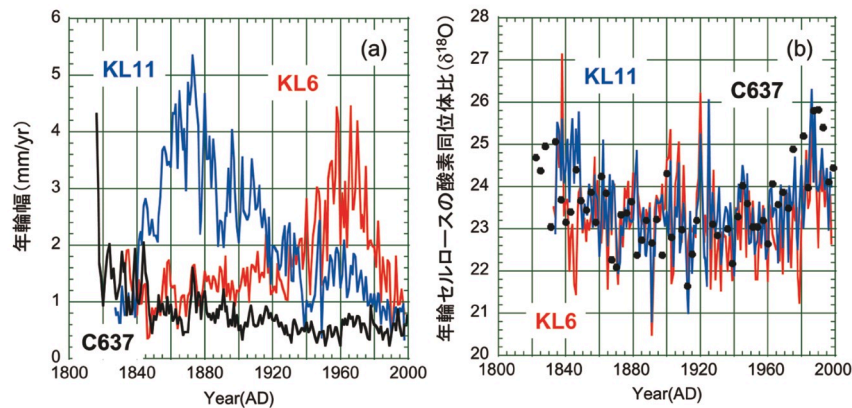


図4. カムチャッカ・Kozyrevsk におけるカラマツ3個体の年輪幅(a)と年輪セルロース酸素同位体比(b)の経年変動

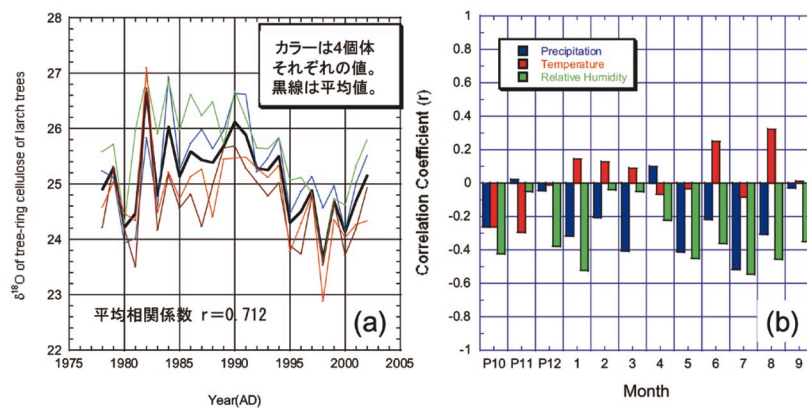


図5. 北海道・美唄におけるグイマツ4個体の年輪セルロース酸素同位体比の経年変動(a)とその平均値の月別降水量・平均気温・平均相対湿度との相関係数(b)。相関解析は、岩見沢で観測された「年輪前年の10月から年輪当年の9月まで」の気候因子に対して行った。

子との関係について示す。酸素同位体比の経年変動は高い個体間相関を示すので、ここでは、その平均値と美唄に隣接する岩見沢の気象測候所で観測された月別の気候要素（降水量、平均気温、平均相対湿度）との単相関係数を計算した。当地の年輪セルロースの酸素同位体比は、気温とは余り高い相関を示さず、もっぱら夏季の相対湿度や降水量と強い負の相関を示す。この「相対湿度」との強い負の相関性は、図1の葉内水の同位体比に関する理論的予想のとおりである。降水量は、相対湿度と正の相関を示すことから、夏季の降水量と酸素同位体比の負の相関は、相対湿度を介した間接的なものかもしれない。しかし、日本のようなモンスーン地域では、夏季の降水の酸素同位体比は、降水量と負の相関を示すことが知られている（降水同位体比に対する降水量効果）¹¹⁾。それ故、この降水量との負の相関は、直接、「土壌水の酸素同位体比」を経て与えられている可能性もある。

一方、美唄の年輪セルロースの酸素同位体比には、冬季の降水量や相対湿度とも、若干の負の相関が認められる（図5）。冬季の「相対湿度」が、直接、光合成時の葉内水の同位体比に影響を与えることはありえないので、この関係は、冬季の降水（当地では、降雪）が土壌水を経て、年輪の酸素同位体比に影響していると考えられることができる。実際、北海道のような北日本地域では、降水の酸素同位体比に大きな季節変化があり、冬季に最も低い酸素同位体比の水（雪）が降る¹¹⁾。北海道の日本海側では、大量の積雪が春に融解し、融雪水が土壌に夏季までとどまることも、土壌水の同位体比の時空間変化の観測から明らかになっている（中塚、未発表データ）。つまり、冬季の降雪量が多い年には、光合成が行われる季節の土壌水に対する冬季の降雪（ $\delta^{18}\text{O}$ が低い）の寄与率が高まって、年輪セルロースの酸素同位体比が低くなるものと思われる。こうした関係は、樹木年輪セルロースの酸素同位体比が、樹木の成長季節である夏季だけではなく、冬季の情報をも復元できるというプラスの可能性を示すと同時に、それが土壌の局地的な性質（空隙率や水の浸透性、土壌水の滞留時間など）の影響を受けてしまうというマイナスの可能性をも意味する。今後、冬季の水循環と年輪酸素同位体比の関連を明らかにしていくためには、土壌の性質の明らかに異なる様々な林地において、年輪の酸素同位体比を測定し、林地間の相互比較を行っていく必要がある^{12),13)}。

降水量の多い日本のような地域においては、気候の乾湿変動が樹木の肥大成長の制限因子になっていることは少ない。それ故、年輪幅から過去の水循環を復元することは、難しかった。その点、樹木年輪セルロースの酸素

同位体比は、その原理および実際の気候データとの比較から、水循環変動の復元に最も適した指標であると言える。

5. 樹木年輪同位体比の特長③ — 季節変動の解析

樹木年輪研究において同位体比の測定が持つ、明らかな利点の1つは、その「年層内の同位体比の変動」を分析技術の限界まで細かく明らかにできるということである。従来の年輪幅による解析では、原理的に1年につき1個のデータしか得ることはできなかったが、樹木年輪とは、そもそも樹木の内側から外側に向かって時間的に順番に形成されるものであり、堆積物試料などと違って、形成後に前後に混ざってしまう可能性も無い。つまり、樹木年輪の中には、1年よりも遥かに細かい時間解像度での、高品質の気候変動の情報が詰まっているはずなのである。これまでは、しかし、その情報を抽出する方法がX線による密度解析以外に存在しなかった。樹木年輪は組成一定な木材のみで形成されているため、堆積物などと異なり、含まれる情報に多様性が少ないからである。しかし同位体比には、その状況を一変させるきわめて大きな可能性がある。それ故、炭素・酸素・水素同位体比の測定技術の進歩により、古気候の季節変動解析の新たな展望が一気に広がりつつある。

図6に、北海道・苫小牧のカラマツ林で採取された2個体の年輪円盤から切り出した2001-2003年分の木材ブロックを、マイクロームを使って年輪面に平行に20 μm の厚さで薄片化し、10枚1組（つまり、1試料200 μm 厚）にしてセルロースを抽出して、その酸素・炭素同位体比を測定した結果を示す。炭素・酸素同位体比は、共に、極めて大きな年層内の変化を示し、気候の季節変化の情報が、同位体比の形で詰まっている可能性を示唆するが、炭素の場合は同位体比の絶対値、経年・季節変化パターン共に、個体間で余り対応せず、やはり個体毎での局地的な光環境などの違いの影響を受けていることを示唆している。一方、酸素同位体比は、個体間で絶対値、経年変化パターンが一致するのみならず、その季節変動パターンも、個体間でよく一致する。特筆すべきは、酸素同位体比の季節変化のパターンが毎年異なることである。2002年は一山のサインカーブのような変化を示すが、2003年はふた山型の変化を示し、また2001年は、季節変化の大きさが著しく小さい。こうした年毎に異なる季節変化のパターンが個体間で一致することは、これらの変化が、何らかの気候の季節変化の情報を記録してい

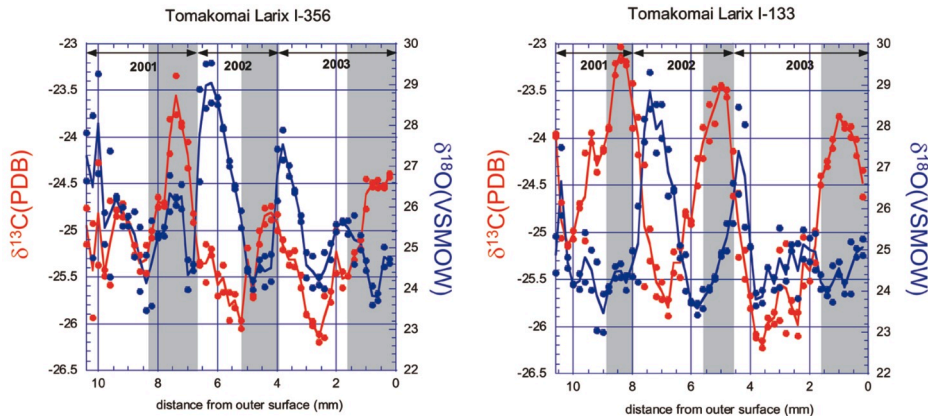


図6. 北海道・苫小牧におけるカラマツ2個体のセルロースの酸素・炭素同位体比の年層内変動(2001-2003). 赤が炭素, 青が酸素同位体比を示す. 点は2回測定それぞれの値. 線は, その平均値である. 図中の影の部分は, 晩材(秋材)で, それ以外の部分は早材(春材)に対応する.

ることを強く示唆している.

この苫小牧のカラマツのセルロース酸素同位体比に見られる年層内変動が, どのような気候因子の季節変化に規定されているのかを考察するために, 苫小牧の気象測候所で得られた2001-2003年の相対湿度の日平均データを30日間移動平均したもの(5月1日~8月31日)を, 酸素同位体比データ(1個体分)と共に, 図7に示す. 相対湿度の季節変化と同位体比の年層内変化は極めてよく一致しており, セルロースの酸素同位体比の年層内変化のパターンが, 過去の水循環変動の季節性を理解する上で, 極めて有用であることを意味している.

同位体比の年層内分析による気候の季節変化解析は, 樹木成長期(春~夏)にしか応用できないという限界はあるが, その時間解像度の限界については, まだ十分検討できていない. 今回は比較対象となる相対湿度に対して, 30日間の移動平均を行ったが, データの時間解像度が粗くなる理由には, 「試料の年輪幅が狭い」, 「光合成産物がセルロース合成前に樹体内でプールされて前後に混ざってしまう」等の植物学的理由以外に, 「年輪面が曲がっているので, 年輪ブロックの薄片化が完全に年輪成長面に平行には行えない」という技術的問題もある. 今後, 分析に必要な試料の量を限界まで少なくするなどの技術開発を経た上で, 古気候の季節変化の研究の精度を向上していくことが求められる.

6. おわりに — 今後の課題と可能性

樹木年輪セルロースの酸素同位体比は, 従来の樹木年輪研究・古気候復元研究に新たな信頼度の高い情報を大量に提供し始めているが, その古気候復元への全面的な

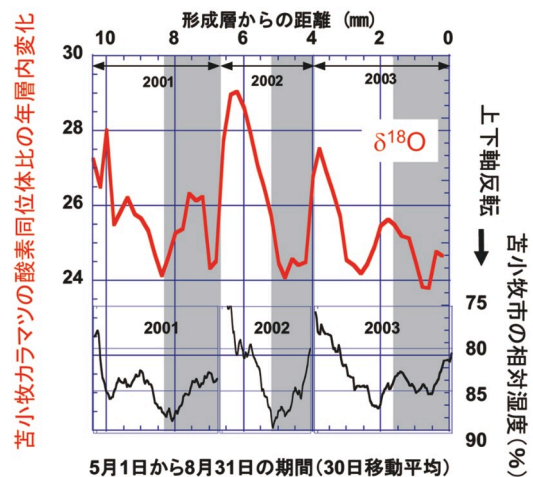


図7. 北海道・苫小牧におけるカラマツのセルロース酸素同位体比の2001-2003年間の年層内変動(赤)と苫小牧で観測された日平均相対湿度の30日間移動平均値(黒)の比較. 相対湿度の横軸は, 各年共に, 5月1日から8月31日までの4ヶ月間を, 均等に圧縮して表示. 図中の影の部分は, 晩材(秋材), それ以外の部分は, 早材(春材)を示す.

応用までの間には, 明らかに, 次の2つの課題がある.

1) 莫大な数の年輪試料を, いかにか迅速かつ正確に処理するか?

画像処理などの技術が応用できる年輪幅や年輪密度の計測と異なり, 同位体比データを取得するためには, 試料をまず年輪面に平行に正確に分割し, 多数の化学工程からなるセルロースの抽出作業¹⁴⁾を経て, 同位体質量分析計を用いて試料を測定することが必要である. 熱分解型の元素分析計—同位体質量分析計の登場により, 酸素同位体比の測定にかかる時間は, 正味, 100分の1のオーダーで短縮されたが, 地球の気候変動の高時空間分解能での復元のためには, 莫大な数の試料を処理しつづける

ことが常に求められており、試料の分割やセルロースの抽出作業に関しても、新たな技術開発が求められている。

2) 年輪セルロースの酸素同位体比に含まれる「降水同位体比」と「相対湿度」の2つの情報を、いかに分離するか？

図1に示したように、年輪セルロースの酸素同位体比は、「土壌水(降水)の酸素同位体比」と「相対湿度」という2つの因子によって、それぞれ独立に支配されている。両者は共に、気候変動の指標として極めて有用であるが、互いに似て非なる因子であるが故に、2つの情報を完全に分離して復元できない限り、年輪の酸素同位体比というデータの価値は半減する。現時点で、この両者を分離する方法については、 $\langle 1 \rangle$ 酸素同位体比と水素同位体比などの他の指標を組み合わせる^{15),16)}、 $\langle 2 \rangle$ セルロースの分子内酸素同位体比を計測する¹⁷⁾、 $\langle 3 \rangle$ 異なる樹種間・個体間・季節間の酸素同位体比の情報を組み合わせる等々、いくつかの提案がなされており、実際にこうした方向でより有用な情報が引き出されてきている。今後、こうした手法の開発を、積極的に進めることが求められている。

7. 謝辞

本稿に掲載した研究を進めるに当たっては、多くの方のお世話になった。年輪セルロース同位体比の実際の計測は、全面的に北大低温研の大西啓子さんに行ってもらった。雨龍研究林やカムチャッカの年輪試料は、北大低温研の原登志彦教授のグループに提供いただいた。道立林業試験場でのグイマツ試料の取得に際しては、現・千葉大の梅木清助教授の援助を得た。苫小牧のカラマツ林での試料採取・環境計測では、国立環境研の高橋善幸博士、犬飼孔博士に全面的にお世話になった。以上の方々をはじめ、多くの方に心より感謝する次第である。

参考文献

1) Werner, R. A., Kornexl, B. E., Rossmann, A. and Schmidt, H. L., *Anal. Chim. Acta* **319** (1996) p.159.

- 2) Sharp, Z. D., Atudorei, V. and Durakiewicz, T., *Chem. Geol.* **178** (2001) p.197.
- 3) Roden, J. S., Lin, G. and Ehleringer, J. R., *Geochim. Cosmochim. Acta* **64** (2000) p.21.
- 4) Dansgaard, W., *Tellus* **16** (1964) p.436.
- 5) Hoffmann, G. and Heimann, M., *Quat. Internat.* **37** (1997) p.115.
- 6) Araguas, L. A., Froehlich, K. and Rozanski, K., *J. Geophys. Res.* **103** (1998) p.28,721.
- 7) DeNiro, M. J. and Cooper L. W. (1991) *Geochim. Cosmochim. Acta* **53** (1991) p.2573.
- 8) Hill, S. A., Waterhouse, J. S., Field, E. M., Switsur, V. R. and ap Rees, T., *Plant, Cell, Environ.* **18** (1995) p.931.
- 9) Nakatsuka, T., K. Ohnishi, T. Hara, A. Sumida, D. Mitsuishi, N. Kurita and S. Uemura, *Geochem. J.* **38** (2004) p.77.
- 10) Treydte, K. S., G. H. Schleser, G. Helle, D. C. Frank, M. Winiger, G. H. Haug and J. Esper. *Nature* **440** (2006) p.1179.
- 11) 早稲田周・中井信行, 地球化学 **17** (1983) p.83.
- 12) McGuire, K. J., DeWalle, D. R. and Gburek, W. J., *J. Hydrol.* **261** (2002) p.132..
- 13) Tang, K. and Feng, X., *Earth Planet. Sci. Lett.* **185** (2001) p.355.
- 14) Loader, N. J., Robertson, I., Baker, A. C., Switsur, V. R. and Waterhouse, J. S., *Chem. Geol.* **136** (1997) p.313.
- 15) Anderson, W. T., Bernasconi, S. M., McKenzie, J. A., Saurer, M. and Schweingruber, F., *Chem. Geol.* **182** (2002) p.121.
- 16) Buhay, W. M. and Edwards, T. W. D. (1995) *Quat. Res.* **44** (1995) p.438.
- 17) Sternberg, L. S. L., W. T. Anderson and K. Morrison, *Geochim. Cosmochim. Acta* **67** (2003) p. 2561.

(2006年12月25日 改訂受付)

Reconstruction of paleo-climate using tree-ring oxygen isotopic ratios

Takeshi Nakatsuka
Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University

abstract:

The recent development of improved analytical methods means that oxygen isotopic ratios of tree-ring cellulose is now a new powerful tool in reconstructing past changes in climate. The oxygen isotopic ratio of tree rings is not affected by physio-ecological factors: it reflects only the precipitation isotopic ratio and relative humidity. Consequently, it is applicable in the reconstruction of the past water cycle, even in regions such as Japan where competition for light among densely populated trees makes it difficult to utilize tree-ring width or carbon isotopic ratios for climatic analyses. Moreover, recent progress in the analysis of the intra-ring oxygen isotopic ratio will soon enable the extraction of information regarding past seasonal changes in climate.

中塚 武

〒060-0819 札幌市北区北 19 条西 8 丁目
北海道大学 低温科学研究所
Tel: 011-706-5504 Fax: 011-706-7142
e-mail: nakatuka@lowtem.hokudai.ac.jp