

樹木年輪セルロースの酸素同位体比が明らかにした 日本史の背後にある気候変動

中 塚 武*

1. はじめに一年輪年代学の目的と課題

木材の中に含まれる、主に年輪幅の情報を用いて、木材の年代決定を行い、過去の気候変動を明らかにする年輪年代学という学問分野がある。年輪幅の変動パターンを、現生木だけでなく、古い建築材や遺跡の出土材、自然埋没木などから得られるデータとつなぎ合わせて、過去数百～数千年に亘って延伸していくこと（これを、標準年輪曲線の構築という）で、高分解能（1年単位）の気候復元と年代決定が可能になる。年輪年代学は、微細な年輪を計測するための顕微鏡と大量に得られるデータを解析するためのパソコンさえあれば、比較的低コストで実施できるため、世界中で研究されてきた。

年輪幅から気候変動の復元や年輪年代の決定を行うためには、同じ地域に生息する異なる樹木個体の成長速度が、共通の外部環境、すなわち気温や降水量などの気候因子によって一律に規定されている必要がある。高緯度や高山の寒冷地域や砂漠などの乾燥地域では、夏の低温や乾燥が樹木の成長を一律に阻害し年輪幅の変動パターンを規定するので、そのパターンを年代既知の木材と年代未知の木材の間でマッチングすることで、任意の木材の年輪年代が決められると共に、そのパターンから過去の気候変動が復元できる。しかしアジアの温暖で湿潤な地域では、森林内で樹木が密生しており、気候変動よりも光を巡る個体間の競争のような局所的な生態学的要因が年輪幅の変動を規定することが多く、研究にはさまざまな困難があった。日本でも、奈良文化財研究所などを中心

に、過去三千年に及ぶ標準年輪曲線の構築が進められてきた（光谷, 2005）が、その本格的な発展のためには、以下のようないくつかの難しい課題が残されていた。

- 1) 個体生態学的問題を克服し、精度の高い標準年輪曲線を得るには、各時代から数十個体以上の年輪幅のデータを取得して平均する必要がある。
- 2) 温暖で湿潤な気候が樹木の成長を速めるため、屋久スギや木曾ヒノキなどの一部の事例を除くと、日本には千年を越えるような現生木は存在しない。
- 3) 遺跡出土材や古い建築材、自然埋没木などの数は限られていて、数百年以上前の時代から数十を越える個体数を確保するのは、一般には困難である。
- 4) 日本では欧米やアジアの山岳地域と比べて、樹種の数々が極めて多いが、年輪幅の変動パターンは樹種ごとに異なるため、年輪数が少ないほとんどの広葉樹材には、年輪年代学を適用できない。

こうしたさまざまな困難を一気に解決できる可能性のある指標として、21世紀になって年輪のセルロースの酸素同位体比が測定され始めた。

2. 年輪酸素同位体比の特徴と原理

木材の年輪に含まれるセルロースの酸素同位体比を測定するためには、膨大な数にのぼる全ての年輪サンプルに対して、セルロースの化学的抽出処理を施し、高価で繊細な質量分析計を使って、

*総合地球環境学研究所教授

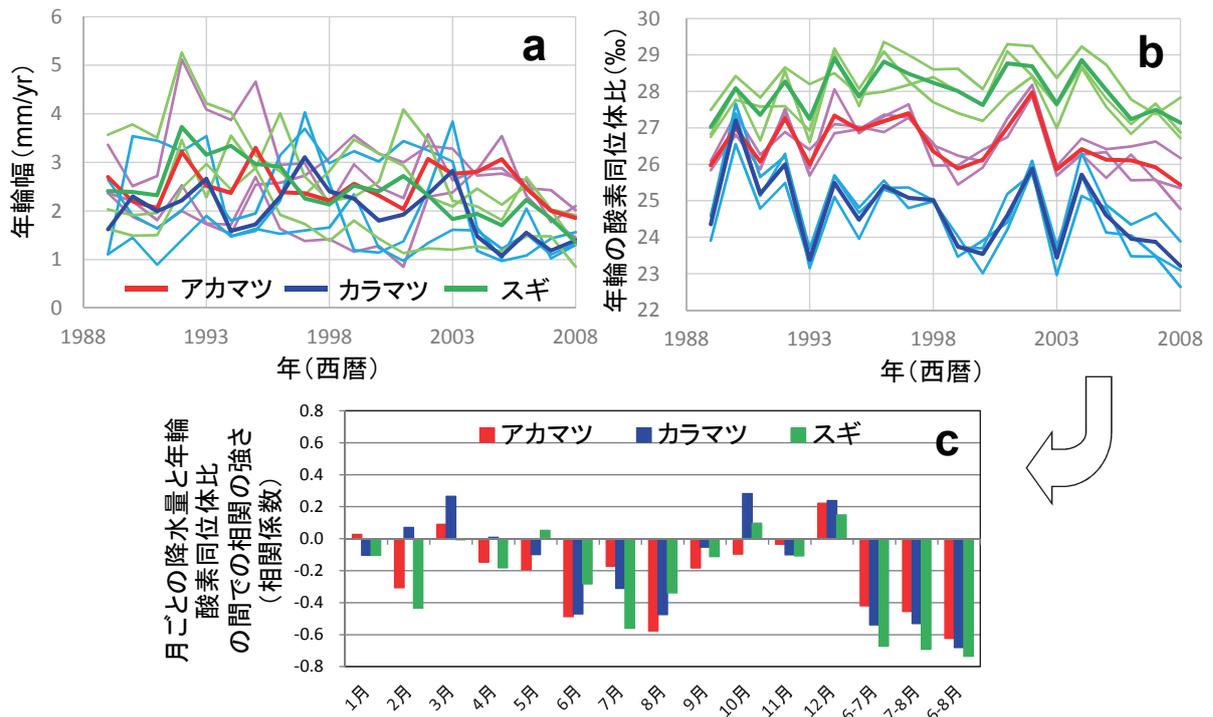


図 1. 信州大学構内で採取された 3 樹種 3 個体の年輪幅 (a) と年輪セルロース酸素同位体比 (b) の経年変動 (薄線が個体毎, 濃線が 3 個体の平均値) と年輪セルロース酸素同位体比と月別降水量の相関 (c).

慎重に同位体比を測定しなければならない。それは、年輪幅を計測するよりも遥かに費用（技術・時間・お金）が掛かるため、20 世紀の間は、ほとんどの年輪年代学者は手を出さなかったが、最近になってその高い費用に見合う効用が、理解され始めた。

図 1 は、信州大学構内の演習林で無作為に選んだスギとアカマツとカラマツの各 3 個体から得られた年輪幅と年輪セルロース酸素同位体比の変動パターンを、過去 20 年間に亘って比較したものである（中塚, 2012）。大学構内での樹木成長に対する生態学的環境の局所的不均質性を反映して、年輪幅の変動パターンには個体間での同調性がほとんどみられないが、酸素同位体比には極めて高い相関が確認できた。高い相関性は同一樹種の異なる個体間だけでなく、異なる樹種間でも見られる。高い相関の背景には、酸素同位体比の変動が同一の気候因子、すなわち夏の降水量の変動に規定されているという事実があった（図 1c）。

図 1 は、セルロースの酸素同位体比が日本の年

輪年代学に課せられた、さまざまな困難の多くを同時に解決できる指標であることを意味している。酸素同位体比であれば、少ない個体数の試料からでも、あらゆる樹種に適用可能な精度の高い標準年輪曲線が構築できる。つまり、これまでに得られている各時代の少数の木材を組み合わせれば、過去数百年～数千年前まで遡れる、精度の高いセルロース酸素同位体比の標準年輪曲線が構築できる。それは、夏の降水量という極めて重要な気候因子の変動の復元につながるだけでなく、全ての樹種の木材の年輪年代の決定にも使えるのである。

年輪セルロースの酸素同位体比は、セルロースの原料となるグルコースが光合成によって作られる夏の時期の「降水の酸素同位体比」と「相対湿度」によって規定される。それらが広域の大気中で、ある程度均質に分布しているため、生息場所の微小環境の違いに影響されず、その変動パターンは異なる個体間・樹種間で高い相関を示すのである。

図 2 に示すように、2 つの因子は、光合成が行

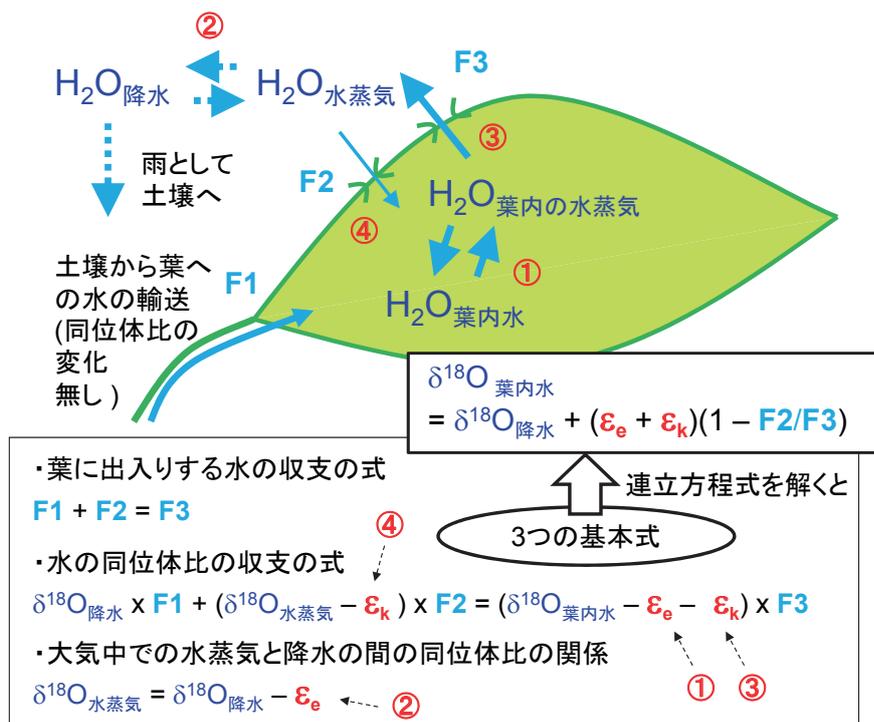


図2. 年輪セルロースの酸素同位体比を規定する葉内水の酸素同位体比の変動メカニズム (ϵ_e と ϵ_k は、それぞれ「水の蒸発」及び「水蒸気の拡散」の際の平衡論及び速度論的な同位体分別係数であり共に+の値). 葉内水が水蒸気で飽和している (相対湿度 100%) と仮定すると、 $F2/F3$ は外気の相対湿度に等しくなる.

われる葉内での水の収支と同位体比の収支を介して、葉内水の酸素同位体比を規定する.

具体的には、葉内で蒸発した水蒸気が、葉内と外気の水蒸気圧の差に従って気孔を介して大気に拡散していき、失われた分を補う形で根から導管を介して降水起源の水が吸い上げられる。水が蒸散する過程では、蒸発および拡散の際に、軽い酸素 16 からなる水分子が優先的に失われるので、葉内では重い酸素 18 からなる水分子が濃縮されている。

一連の過程を連立方程式に表し、簡単のために大気中の水蒸気と降水の間で、蒸発と凝結に伴う平衡論的な同位体分別が成り立っていると仮定して方程式を解くと、葉内水の酸素同位体比は、相対湿度とは負の相関、降水同位体比とは正の相関を示すことが分かる (図2)。一般に日本のような中緯度地域では、降水の酸素同位体比は降水量と負の相関を示し、相対湿度は降水量と正の相関を示すので、結果的に、葉内水さらに年輪セルロースの酸素同位体比は、光合成の季節の降水量

と負の相関を示すことになるわけである。

3. 分析化学的な2つのブレークスルー

図2の原理は、実は何十年も前から分かっていたが、セルロース酸素同位体比の分析の難しさゆえに、年輪年代学の研究に本格的に応用され始めたのは、21世紀になってからである。そこには越えねばならない分析化学的な2つの関門があった。

一般に軽元素の安定同位体比を測定するためには、試料を決まった形のガス分子に変換する必要があるが、年輪のような有機物をガスに換える最も一般的な方法は燃焼することである。しかし燃焼時には必ず酸素原子が外部から混入するため、有機物の酸素同位体比を測定することは、極めて難しかった (第一の関門)。20世紀末になって有機物の試料をヘリウムキャリアガスが流れる1400℃のセラミック炉の中で瞬間的に熱分解し、含まれる酸素原子を全て一酸化炭素にしてオンラインで同位体比質量分析計に送り込み、その酸素

同位体比を測定する技術が開発された (Werner et al., 1996). これにより, 第一の関門が突破された.

しかし, これだけでは年輪セルロース酸素同位体比のデータの爆発的な蓄積は起こらなかった. 莫大な数に上る微細な木材年輪を正確に切り分け, 粉末化して, さまざまな試薬を用いてセルロース以外のリグニンなどの成分を除去する工程が, 余りにも煩雑だったからである (第二の関門). この問題は, 木材から年輪面に直角な「厚さ1ミリ程度の薄い板」を切り出して, 板のままセルロースにしてしまう方法 (Kagawa et al., 2015) を開発することで, ほぼ解決した. 当初, 木材はセルロース繊維だけにしてしまうとバラバラになると考えられたが, その寸前で止めることができたのである. この技術により, 化学処理が必要なサンプルの数が激減しただけでなく, セルロースの板となった木材からは, 紙を切るように正確に年輪を切り分けることができ, 年輪幅が極狭 (0.1 mm 程度) の木曾ヒノキや屋久スギの年輪の酸素同位体比分析が可能になった.

4. 酸素同位体比の標準年輪曲線の拡充

年輪セルロースの酸素同位体比は, 夏の降水量の変動を記録しているため, 気候復元や年代決定のためには, 降水量の変動パターンの空間的相違に対応して, できるだけ密な空間解像度で標準年輪曲線を構築する必要がある. 現在までに日本列島のさまざまな地域から, 縄文時代中期 (紀元前3千年頃) 以降のさまざまな時代の酸素同位体比の標準年輪曲線が得られてきている (図3). 過去数百年間の現生木からなるものを除くと, その多くは, 標準年輪曲線としての統計的な要請に完全に応えられる段階には達しておらず, 現在も試料の収集と分析が続けられているが, それぞれが, 遺跡出土材の年輪年代決定に数多くの成果を挙げつつある.

その中でも, 中部日本のヒノキ, 屋久島のスギ, 青森のヒバを用いた酸素同位体比の標準年輪曲線

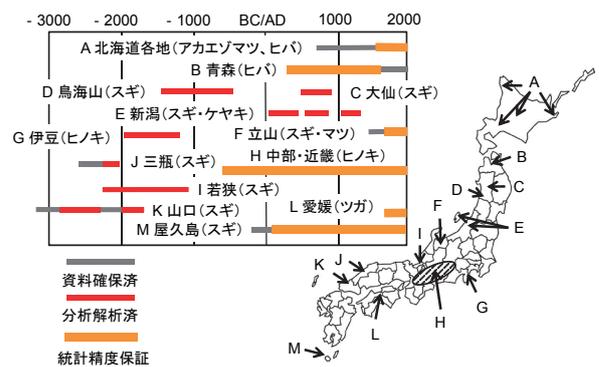


図3. 日本各地におけるデータ整備状況

は, それぞれ十分な数の試料にもとづいて, 必要な統計的精度を達成しており, 年輪年代の決定だけでなく, 気候変動の復元にも大きな役割を果たしつつある (それぞれ取りまとめた論文を投稿中). 屋久島と青森の標準年輪曲線が, 自然木と比較的少数の遺跡からの出土材を元に作成されたものであるのに対して, 最長の2600年の長さを持つ中部日本の標準年輪曲線は, 年輪酸素同位体比の変動に対する同一の気候特性を示す中部～近畿のさまざまな地域から, 文字通りあらゆる種類の木材 (現生木, 建築古材, 遺跡出土材, 自然埋没木など) をさまざまな関係者 (年輪年代, 林業, 文化財保全, 土木建設の研究者や実務者ら) の協力の下で10年以上の歳月をかけて収集し, 測定・構築されたものである.

以下に, この中部日本の標準年輪曲線を用いた気候復元と年代決定の研究成果の一端を紹介する.

5. 日本史の背後にあった気候変動の姿

屋久島のスギや青森のヒバとは異なり, 中部日本のヒノキには, 気候変動とは関係なく樹齢の経過 (正確には, 成長速度の低下) と共に酸素同位体比が低下していく「樹齢効果 (成長効果)」が顕著に表れ, 気候 (夏の降水量) の長期変動の復元の妨げになっていた. 筆者の研究グループでは, セルロースの水素同位体比の長期変動が, 酸素同位体比とは反対向きの樹齢効果を含む一方で, 気候変動に対応する短周期の変動パターンは, 水分子の酸素・水素同位体比が同じ方向に変わること

を反映して、正相関を示すことに着目し、同じ年輪セルロース試料から同時に分析できる酸素と水素の同位体比を組み合わせて、長～短のあらゆる変動周期の「気候変動」と「樹齢効果」を分離して復元することに成功した（取りまとめ論文を投稿中）。その結果、中部日本の夏の降水量の変動には、過去2600年間に以下のような大きな特徴があることが分かった。

- 1) 弥生時代中期の前～中葉（紀元前4-2世紀）と平安時代前期（10世紀）に最も乾燥し、古墳時代（3-6世紀）と江戸時代（17-18世紀）に最も湿潤になる、約1200年の長周期の変動があり、それはグローバルな気温の変化とも極めて良く同調（乾と暖、湿と冷が対応）していること。
- 2) 数十年周期の変動の振幅が、約400年に一度、紀元前5-3, 2, 6, 9-10, 13-14, 17-18世紀に拡大し、気候変動が激しくなった時期があること。

1) は、考古遺跡の高度分布の変化や文献史料の洪水・干ばつの記録ともよく一致し、2) は、その都度、日本史上の画期をなす政治体制の転換が起きていたことなどが分かっている（図4など）。気候変動に対して歴史上の日本社会がどのように対応したのかについて、今後の歴史学・考古学の詳細な研究の発展が期待できる（中塚, 2017など）。

6. 酸素同位体比年輪年代法の展開

図4に示すように気候変動の記録は、弥生時代まで遡って年単位になったが、先史時代の考古遺跡や遺物の年代観は、一般に土器の型式編年に基づいているため数十年程度の誤差があるのが普通であり、このままでは弥生時代の気候変動と社会応答の関係を年単位で議論することはできない。図3の標準年輪曲線は、この点でも画期的な進歩を考古学の世界にもたらしつつある（中塚, 2015）。年輪の「幅」の代わりに「セルロース酸素同位体比」を年輪年代決定のパターンマッチン

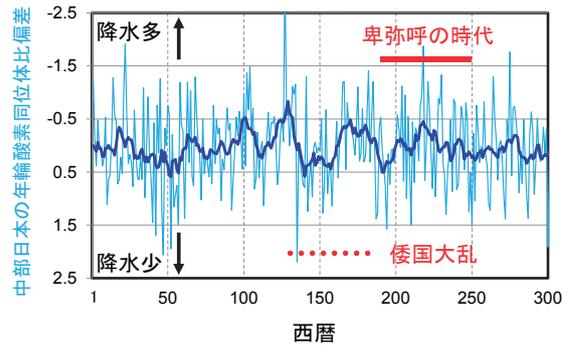


図4. 弥生時代後期（1世紀から3世紀前半）の気候変動と社会応答（太線は11年移動平均）

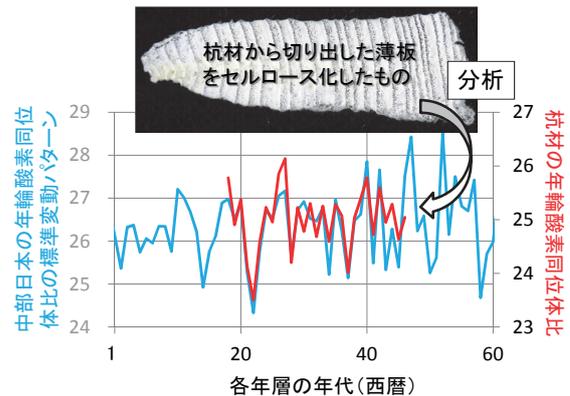


図5. 酸素同位体比による年輪年代決定の事例

グの指標に使う「酸素同位体比年輪年代法」である。

図5は大阪府の池島・福万寺遺跡における弥生時代後期の水田遺構の杭材の年代決定の事例である。酸素同位体比を使えば、年輪数の少ない広葉樹の柱・板・杭（加工度の低い材であるため、文化財の中でも破壊分析の対象にやすく、樹皮が付いていて伐採年代が決められると共に、過去に再利用された可能性がなく遺跡に直接対応する年代が得られる）が対象になるため、年単位の年代決定が可能な重要な遺跡出土材が、急速に広がりつつある。

7. おわりに—新たなフェーズへ

セルロース酸素同位体比のデータの高精度化は、年輪年代学だけでなく、林学、建築史学、考古学などの異分野の研究者、各々に関連する現業機関の人々との協働作業であり一朝一夕には達成できなかったが、信頼できるデータがようやく構築で

き，もう直ぐ世の中に公開され誰でも自由に利用できる環境が整いつつある。これまでは筆者の研究室や研究プロジェクトを中心とした一部関係者による先端的活用に留まっていたが，今後はあらゆる意味で広範な利用が進んでいくことを期待している。

8. 文献

Kagawa, A., M. Sano, T. Nakatsuka, T. Ikeda and S. Kubo (2015) An optimized method for stable isotope analysis of tree rings by extracting cellulose directly from cross-sectional laths, *Chem. Geol.* **393-394**, 16-25.
光谷拓実 (2005) 年輪年代法—実年代を探る。『文

化遺産の世界』 **16**, 1-11.

中塚 武 (2012) 気候変動と歴史学. 『環境の日本史①』 (平川 南編) 吉川弘文館, p. 38-70.

中塚 武 (2015) 酸素同位体比年輪年代法がもたらす新しい考古学研究の可能性. 『考古学研究』, **62**, 17-30.

中塚 武 (2017) 気候変動が古代日本人に与えたインパクト. 『科学』 **87**, 140-148.

Werner, R. A., Kornexl, B. E., Rossmann, A. and Schmidt, H. L. (1996) On-line determination of $\delta^{18}\text{O}$ values of organic substances. *Anal. Chim. Acta* **319**, 159-164.