

# 酸素同位体比年輪年代法の誕生と展開

中塚 武<sup>1)</sup>

●キーワード：年輪年代学 (dendrochronology), 酸素同位体比 (oxygen isotope ratio), セルロース (cellulose), 木質遺物 (wooden artefact), 広葉樹 (broad leaved tree)

## 1. はじめに

酸素同位体比年輪年代法は、2010年代になって始まったばかりの極めて若い研究分野である。その起源は、筆者が2011年度から始めた科研費・基盤A（酸素同位体比を用いた新しい木材年輪年代法の開発とその考古学的応用）の研究にまで遡るに過ぎない。実際、筆者らが名古屋大学において2011年秋に開催したシンポジウム「考古学における年代決定と気候変動研究の新展開—木材年輪試料の活用を中心として—」でも、酸素同位体比年輪年代法は未だ開発構想の段階にあった。当時、年代決定の物差しとなる酸素同位体比の標準変動パターンは、現生木を除けば、従来の年輪年代法で年代が決められていた弥生時代の針葉樹材の数点からしか得られておらず、それらを用いた遺跡出土材の年代決定の成果もわずか3つ（愛知県の遺跡から出土した板材2点と奈良県の古墳木棺材1点。共にコウヤマキ材）しかない状況であった。その後、わずか5年ほどの間に、日本における年輪年代法の第一人者である国立奈良文化財研究所の光谷拓実氏を初めとする数多くの年輪年代学、埋蔵文化財、建築史学の関係者の皆さんの協力を得て、応用可能な対象の時代・地域・樹種は、縄文時代中期から現在までのあらゆる時代の日本各地における広葉樹を含むあらゆる樹種に広がってきたが、その過程ではさまざまな発展途上の課題が浮かび上がってきている。ここでは、まだ草創期の段階から抜け出していない酸素同位体比年輪年代法の初期の歩みを振り返ることで、今後のより大きな発展にむけた課題の整理を行いたい。

## 2. 酸素同位体比年輪年代法の原理と初期の成果

年輪幅の変動パターンのマッチングを原理とした、いわゆる年輪年代法は、考古学における最も精度の高い年代決定法の一つであり、日本の先史時代の暦年代観の構築に大きな役割を果たしてきた（光谷：2005など）。日本におけるその実年代決定への応用は、一部の針葉樹種（ヒノキ、スギ、コウヤマキ）に対して先行して行われているが、その理由は、これらの樹種の木材には一般に年輪が数多く含まれており、年代決定の際の物差しとなる「地域を代表する年輪幅の標準変動パターン」の作成が比較的容易であると同時に、年代決定の対象となる材からも「十分に統計学的検証に耐えられる数の年輪幅のデータ」を取得しやすいという特長があるからである。またこれらの樹種には、アカマツやカラマツなどのその他の針葉樹や大部分の広葉樹とは違って、個体間で年輪幅の変動パターンの相関が比較的高いという特徴もあった。結果として、遺跡から大量に出土して樹皮がついていることも多い（伐採年代が決定できる可能性がある）広葉樹材などは、これまでは年輪年代法の応用の対象に入ることにはなかった。これに対して、年輪に含まれるセルロースの酸素同位体比が、物理化学的な同位体分別メカニズムを介して日本でも古気候の鋭敏な指標になりうること（Nakatsuka et al: 2004）を確認していた筆者は、それが年輪幅に代わる樹種を越えた年輪年代法の共通の指標になる可能性に気づき、愛知県埋蔵文化財センターの協力を得て2010年にその実用化のための研究を始め

<sup>1)</sup> 総合地球環境学研究所 〒603-8047 京都市北区上賀茂本山457-4

た。関連して2010年の秋に世界に先駆けて年輪からのセルロースの大量迅速抽出技術を確立する目処が立ったこと（後日、次の論文にその手法はまとめられた。Kagawa et al: 2015）も、出土材の年代決定という分析対象とすべき資料数が莫大になる研究を始めた理由の一つである。

酸素同位体比を年輪幅に代わる年輪年代決定の共通の指標にするという取り組みは、実のところ、未だ日本でしか行われておらず、ようやく中国や韓国などの東アジアの国々への展開が始まった段階にある。一方で、年輪

年代研究の先進地域である欧州や北米の寒冷地や乾燥地では、森林内の樹木個体密度が低く、年輪幅が隣接個体との競争などの個別的要因よりも、気温や降水量の変動などの広域的要因の影響を受けやすく、針葉樹と広葉樹を問わず、年輪幅の変動には個体間での高い相関性がある。また温帯や熱帯と違って遺跡から発掘される樹木の種類も少ないため、樹種毎に年輪幅の標準変動パターンを作成することにも余り無理はない。それゆえ欧州や北米では、年輪幅に比べてはるかに測定の手間が掛かるセルロースの酸素同位体比を使って年輪年代決定を行う

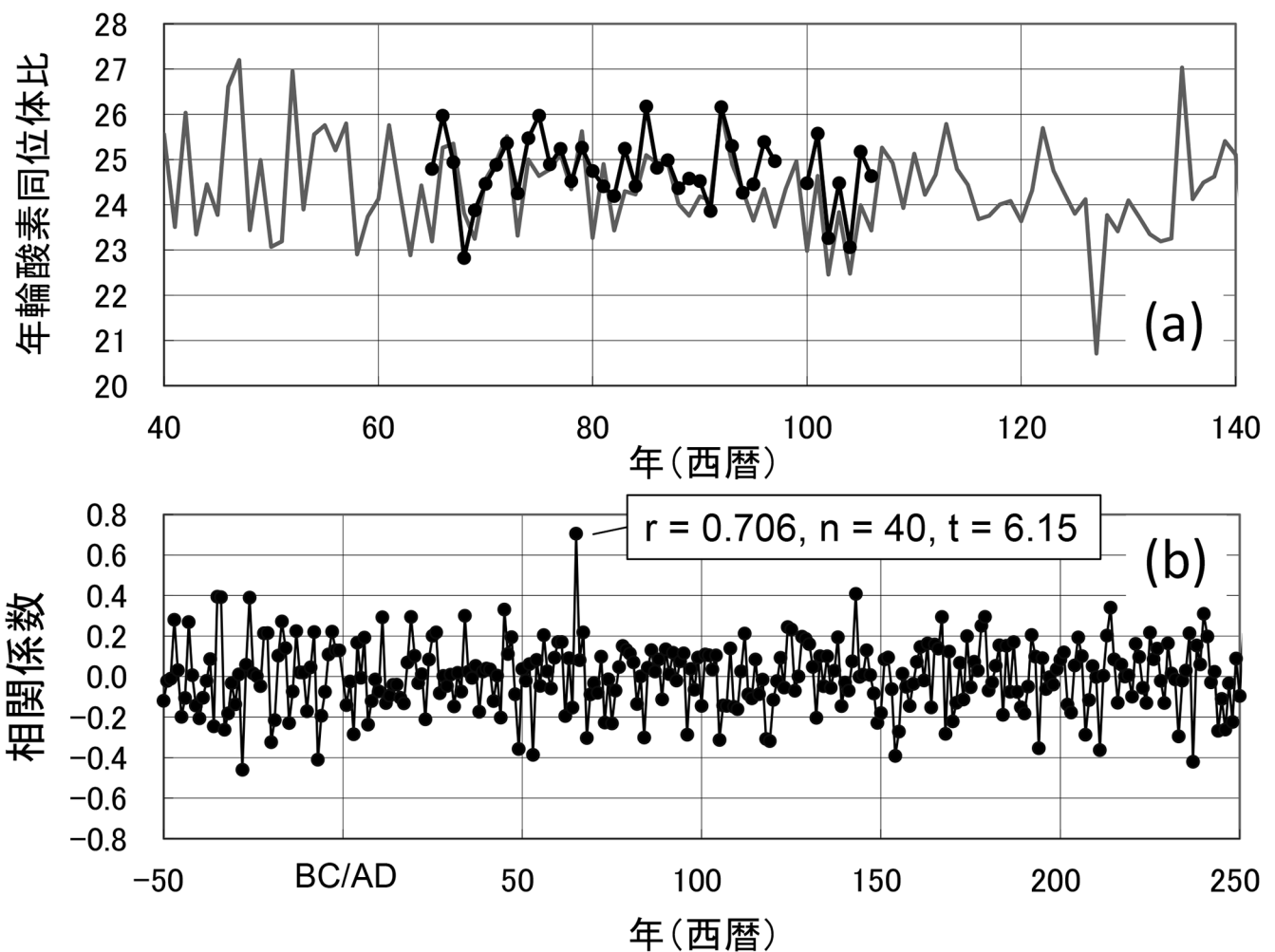


図1 (a)愛知県安城市の寄島遺跡から出土したコナラ節の柱材の断片（愛知県埋蔵文化財センター提供）に含まれる年輪（黒）と長野県飯田市における従来の年輪年代法により年代が既知の埋没ヒノキの年輪（灰）からそれぞれ得られたセルロース酸素同位体比の変動（両者が最も良く合う年代で重ねて表示）、(b)上記の2つのうちコナラ節のデータをヒノキのデータの上でスライドさせて計算した相関係数の変化（コナラ節の最内測定年層に対応する年代上に表示）。合致年代における相関係数は0.706であり、計測年輪数40年に対して、t値は6.15で（閾値5よりも高く）十分な年代決定の精度を有している。

Fig.1 (a) Variations in tree ring cellulose oxygen isotope ratios obtained from an oak pillar wood excavated at Yosejima remain, Anjyo city, Aichi prefecture (black) and dendro-chronological age predetermined cypress woods in Iida city, Nagano prefecture (gray). The former is displayed on the latter at their most coincident intervals. (b) Variation in correlation coefficients of the two time-series in (a) by sliding of the former on the latter (X axis is the innermost ring age in the former wood). Correlation coefficient 0.706 with ring number 40 results in the t-value of 6.15 at the most coincident interval, higher than the threshold t-value of 5.0, ensuring the sufficient accurate dendrochronological dating.

ニーズは、ほとんどなかった。この点、遺跡からさまざまな樹種の木材が発掘され、ほとんどの材について年輪幅の変動パターンから年代決定を行うことが不可能であった日本およびアジアの国々においては、酸素同位体比年輪年代法の効力は明確であり、それが更に後述するように、降水量変動の精密復元という大きな副産物をもたらすことにもなった（中塚：2016 など）。

さて、針葉樹の年輪から得られたセルロースの酸素同位体比が、広葉樹を含む全ての樹種の年輪年代の決定に応用可能であることは、当初から理論的には予想されていたが、実践的には2011年の年末に、弥生時代後期の愛知県の遺跡から出土したコナラの柱材断片の年輪セルロースの酸素同位体比を試験的に分析し、その変動パターンが長野県南部の同時代のヒノキのものとぴったり

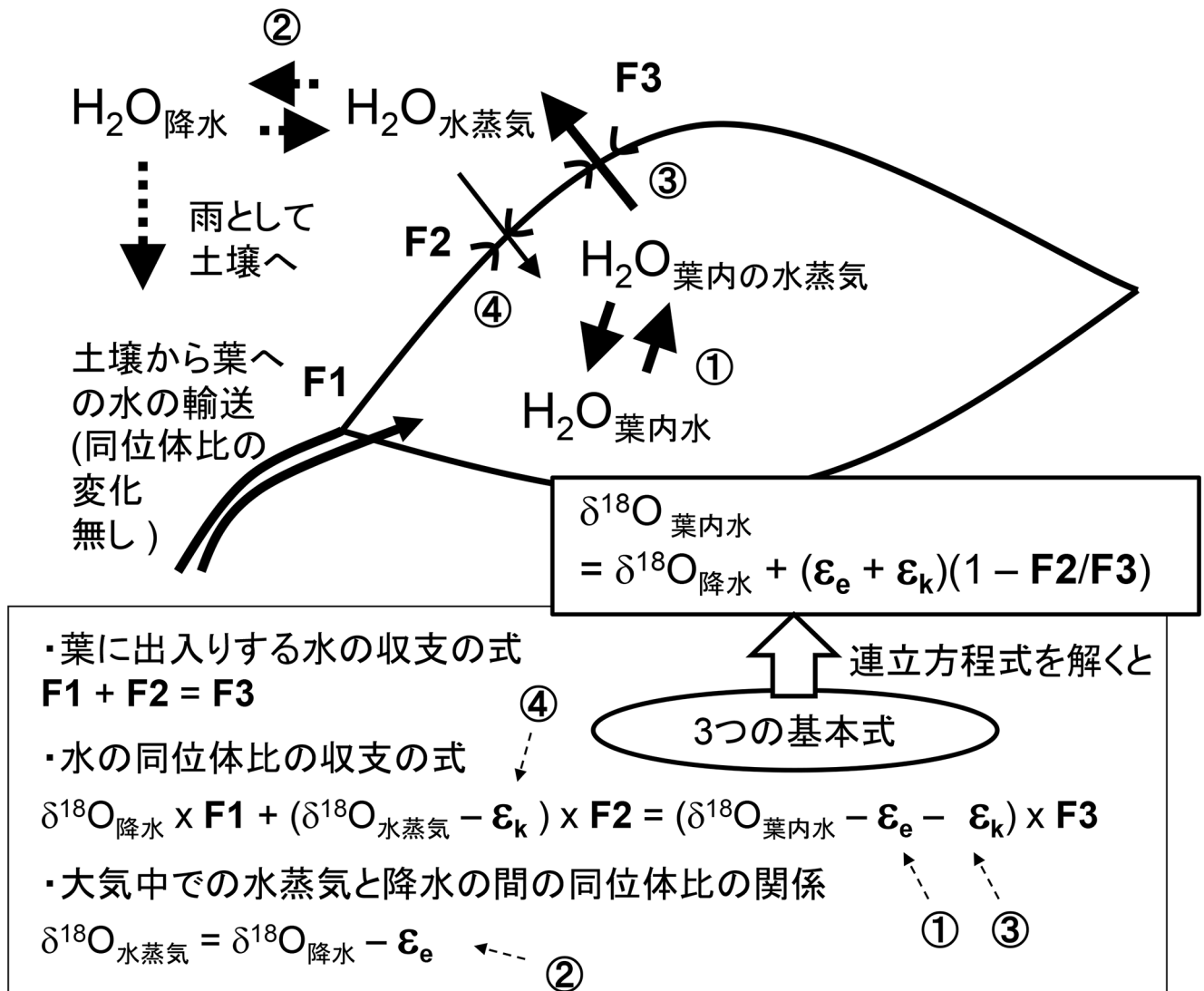


図2 年輪セルロースの酸素同位体比を規定する葉内水の酸素同位体比の変動メカニズム。図中、F1, F2, F3は、それぞれ、土壌から葉、大気から葉、葉から大気への水（または水蒸気）のフラックスを示す。 $\delta^{18}O$ は酸素同位体比の表記法（ $\delta^{18}O = [({}^{18}O/{}^{16}O)_{\text{サンプル}} / ({}^{18}O/{}^{16}O)_{\text{国際標準物質}} - 1] \times 1000$  (‰)）である。 $\epsilon_e$ ,  $\epsilon_k$ は、それぞれ、水（水蒸気）が「蒸発（凝結）するとき」(①, ②)及び「気孔を通り抜ける時」(③, ④)の $\delta^{18}O$ の変化（同位体分別という）の大きさを表す。F1, F2, F3は気象条件や生物活動に応じて変化するが、 $\epsilon_e$ ,  $\epsilon_k$ は定数である。F2とF3は、それぞれ大気と葉の中の水蒸気圧（≒湿度）に比例するが、葉内の湿度は100%であると仮定できるので、F2/F3は大気中の湿度（相対湿度）に対応している。

Fig.2 Mechanism of variations in leaf water oxygen isotope ratio regulating the tree-ring cellulose oxygen isotope ratio. F1, F2 and F3 are water (vapor) fluxes “from soil to leaf”, “from atmosphere to leaf” and “from leaf to atmosphere” respectively.  $\delta^{18}O$  is the notation of oxygen isotope ratio, where  $\delta^{18}O = [({}^{18}O/{}^{16}O)_{\text{sample}} / ({}^{18}O/{}^{16}O)_{\text{standard}} - 1] \times 1000$  (‰).  $\epsilon_e$ ,  $\epsilon_k$  are the  $\delta^{18}O$  change (isotope fractionation) during evaporation and condensation processes (①, ②) and diffusion through stomata (③, ④). While F1, F2 and F3 are variables depending on meteorological condition and biological activity,  $\epsilon_e$  and  $\epsilon_k$  are constant. Because F2 and F3 are proportional to water vapor pressures in atmosphere and leaf, respectively, and leaf interior can be assumed to be saturated with water vapor, F2/F3 is corresponding to the relative humidity in atmosphere.

一致して、統計学的に十分な精度での年代決定が可能であることを確認したことが最初である（図1）。直後に、新潟県青田遺跡の縄文晩期の掘立柱建物群の多数のコナラの柱列の年輪年代を、枯死年代が既知の鳥海山の埋没スギの年輪年代から決定することに成功し、正に世界初の酸素同位体比年輪年代法の考古学的な応用例となった（木村ら：2012）。その後、大きく種類が異なる樹木間で年輪セルロース酸素同位体比の変動パターンを対比する手法は、日本全国はもとより韓国南部までを含む広い地域の多くの遺跡において、広葉樹の年輪年代を決定するための普遍的な手法となりつつある（中塚ら：2016a など）。

年輪セルロースの酸素同位体比の経年変動パターンが、近隣の地域内で、異なる樹種を含む多くの樹木個体間でよく一致する理由は、その同位体比の決定メカニズムにある（図2）。セルロースの酸素同位体比は、原料となるブドウ糖が光合成によって生産される葉内の水の酸素同位体比の変動を反映するが、この葉内水の同位体比は、年輪幅を大きく左右する「光合成速度」のような個体間・樹種間で大きく変化する生物学的因子の影響を受けず、「相対湿度」と「降水同位体比」という純粋に気象学的な2つの因子のみによって決まる。これは、同じセルロースに含まれる同位体比の中でも、光合成速度の影響を強く受ける炭素同位体比とは異なる大きな特長である（中塚：2014a）。このことが、セルロースの酸素同位体比に、「樹種を越えた年輪年代法の共通の指標」としての役割を与えると同時に、「異なる樹木個体間での変動パターンの高い相関性」をもたらす。それが結果として後述のように、年輪年代の決定に必要不可欠な「地域を代表する信頼できるセルロース酸素同位体比の標準変動パターン」を、埋没木や考古木質遺物、建築古材などから入手できる比較的少数の年輪資料を使って、急速に構築することを可能にした。現生木から年輪資料が多数取得できる過去数百年間とは異なり、日本の考古学の主な研究対象となっている古墳時代以前の先史時代を対象に、信頼できる酸素同位体比の標準変動パターンを取得していく上で、図2に示した変動メカニズムの単純性は、最も重要な推進力であったのである。

### 3. 克服しつつある課題（1）—埋蔵文化財関係者からの認知の獲得

2011年に、科研費を使って正式に酸素同位体比年輪年代法の研究を始めたあとに、最も重視したことが、全国の埋蔵文化財発掘調査関係者からの認知を得ることであった。後述するようにこの方法は、同じ木材年輪の年代決定法である「年輪幅にもとづく年輪年代法」や「放射性炭素の濃度計測による方法」とは異なり、本格的な破壊分析を伴うものである。一方で公共の財産である埋蔵文化財にとっては、その外観から得られる情報が極めて重要であり、酸素同位体比年輪年代法とは相容れない大きな壁があった。破壊・非破壊の問題を含めて、現時点で考えられる酸素同位体比年輪年代法の利点・欠点を客観的に記述したものが、表1である。従来の年輪年代法や放射性炭素法と、酸素同位体比年輪年代法の間には、それぞれに一長一短があり、それらは相補的に活用されていくべきものであるが、新参者である酸素同位体比年輪年代法の場合、認知度が低く、測定できる施設の数も極端に少ないため、破壊分析というデメリットだけを抱えたままでは文化財研究への浸透は望めず、全国の関係者に対する積極的な効用の説明が必要であると考えられた。

日本文化財科学会および日本植生史学会において、2012年度から毎年、筆者およびその共同研究者が、酸素同位体比年輪年代法の基礎と応用に関する研究発表を行ってきたほか、2015年度の考古学研究会での特別研究報告（中塚：2015）や全国各地の埋蔵文化財発掘調査機関との間での出土木質遺物の分析に関する共同研究（樋上ら：2015、中塚ら：2014、2016a など、箱崎ら：2017）などを通して、おかげさまで今日までの間に、全国の埋蔵文化財発掘調査関係者の間での酸素同位体比年輪年代法の認知度は、急速に向上してきたものと思われる。その過程で、短期間での分析処理能力をはるかに越える数の資料の収集を進めた結果、共同研究の成果報告が滞っている事例が少なからずあって、ご迷惑をおかけすることになってしまったことは恐縮至極であるが、その間に潜在的ニーズの大きさを確信できたことも事実であった。今後は、後述するように分析解析の体制をしっかりと



表1 木材年輪年代決定法の一つとしての酸素同位体比年輪年代法の利点と欠点

Table 1 Advantages and disadvantages of the oxygen isotopic dendrochronology as a dendrochronological dating method.

	年輪幅	$^{14}\text{C}$	酸素同位体比
測定の容易さ(費用・時間)	◎	△	○(低コスト・迅速)
サンプルへのダメージ	◎	△	×(大きな破壊)
年代決定の精度	◎	○	◎(1年単位)
物差の普遍性(樹種)	△	◎	○(樹種に依らず)
物差の普遍性(空間)	○	◎	○(日本の地域毎)
物差の普遍性(時間)	△	◎	△(年代絞込必要)
PEG処理との親和性	◎	×	◎(影響受けない)
年代決定の成功率	△	◎	○(50年輪ほどで可)
現地気候への感度	○	△	◎(水環境に高感度)
セルロース分解の影響	◎	◎	○(劣化材でも可能)

と構築して、より計画的かつ大きな取り組みにしていく必要がある。

酸素同位体比年輪年代法を推進していく上で、このように全国各地の埋蔵文化財発掘調査関係者とのネットワークを構築していくことには、3つの大きな意味があると考えている。第一に、酸素同位体比を用いた年輪年代決定の利用を広げていくためには、全国の各地域・各時代を代表する年輪セルロース酸素同位体比の標準変動パターンの構築、すなわちその時間的延伸、地域的拡大、多資料データの統合による高精度化を実現していくことが必要であるが、そのためには、さまざまな地域・時代の遺跡から発掘されるヒノキやスギ、コウヤマキ、ケヤキなどの年輪数の多い出土木材資料の情報を、いかに多く収集していけるかが鍵になる。第二に、酸素同位体比年輪年代法はその高い年代決定精度を通して、先史時代の時代区分を代表するような遺跡や土器型式に対してピンポイントで暦年代を導入していくポテンシャルをもつが、それが真に効果を発揮するためには、土器との一括性が明確な樹皮付きの木器や、遺跡の時代を代表する地層の上下から取得された自然木など、出土材の発掘現場の状況を熟知した調査担当者との綿密な情報交換が必要になる。第三に、水田の杭列や集落の柱群などの従来で

あれば保存処理されて来なかったような膨大な数の広葉樹を中心にした樹皮付の小径木の伐採年代を、発掘直後に酸素同位体比年輪年代法によって大量に決定することができれば、遺跡の形成・維持・解体過程の詳細や、多地域間でのその関係性及び、環境変動（特に酸素同位体比自身が明らかにする降水量などの気候変動）との関わりへの解析などに、全く新しい展開をもたらす可能性があるが、そのためには低湿地を中心にした遺跡における発掘情報を日々把握していることが重要である。今後もさまざまな機会に全国の埋蔵文化財発掘調査関係機関との連携を強めると共に、酸素同位体比年輪年代法の認知度と活用機会の更なる向上によって、本方法を軸とした研究のネットワークが自律的にできあがる状況を早期に作っていきたい。

#### 4. 克服しつつある課題(2) —出土劣化材への応用の開始

酸素同位体比年輪年代法には、本格的な破壊分析であるということに加えて、当初、従来の年輪年代法や放射性炭素測定法にはない、大きな欠点があった。それは、セルロースの大部分が分解消滅しているような高度な劣化材では、当然のことながらセルロースの酸素同位体比

の測定は難しく、本方法の適用はできなかつたことである。実際、低湿地の地下に何千年も埋まっていた木材の場合、褐色腐朽菌の作用によりセルロースが選択的に分解されて、材全体が柔らかくなっているものが多い。こうした材を、従来のセルロースの抽出工程（リグニンの除去工程）にかけると、ほとんど全ての部分が消失してしまうという困難に直面していた。その結果、縄文時代の出土材の大部分、弥生時代の出土材でもその7、8割は、分析の対象にすることができないという状況にあった（中塚：2015）。

こうした状況は、しかし、ここ2年ほどの間に、新しい分析手法の導入により急速に改善されつつあり、今では柔らかくなった材を含む殆ど全ての出土材について、年輪セルロース酸素同位体比のデータを得ることができ

ようになった。新しい手法とは、具体的には大型の試料の処理を可能にする反応容器の製作と、簡易的な凍結乾燥技術の導入である（中塚ら：2016b）。そもそも2010年に開発した年輪からの大量迅速なセルロース抽出技術の核心は、それまで「年輪を1年ずつ切り取って粉末もしくはフレーク状にしたのち、年毎に個別にセルロース抽出処理を行っていた」のに対して、「何十年～何百年分の年輪が含まれた木口面に平行な薄板を、板のままセルロース化すること」に成功したことにある（Kagawa et al: 2015）。そのことによりセルロース抽出にかかる時間が、数十から数百分の一まで短くなっただけでなく、セルロース化した板は元の板よりもはるかに柔らかいため、複雑な曲線になることが多い年輪境界に沿って正確に年輪を切り取ることができ、年輪酸素同位体比の分析

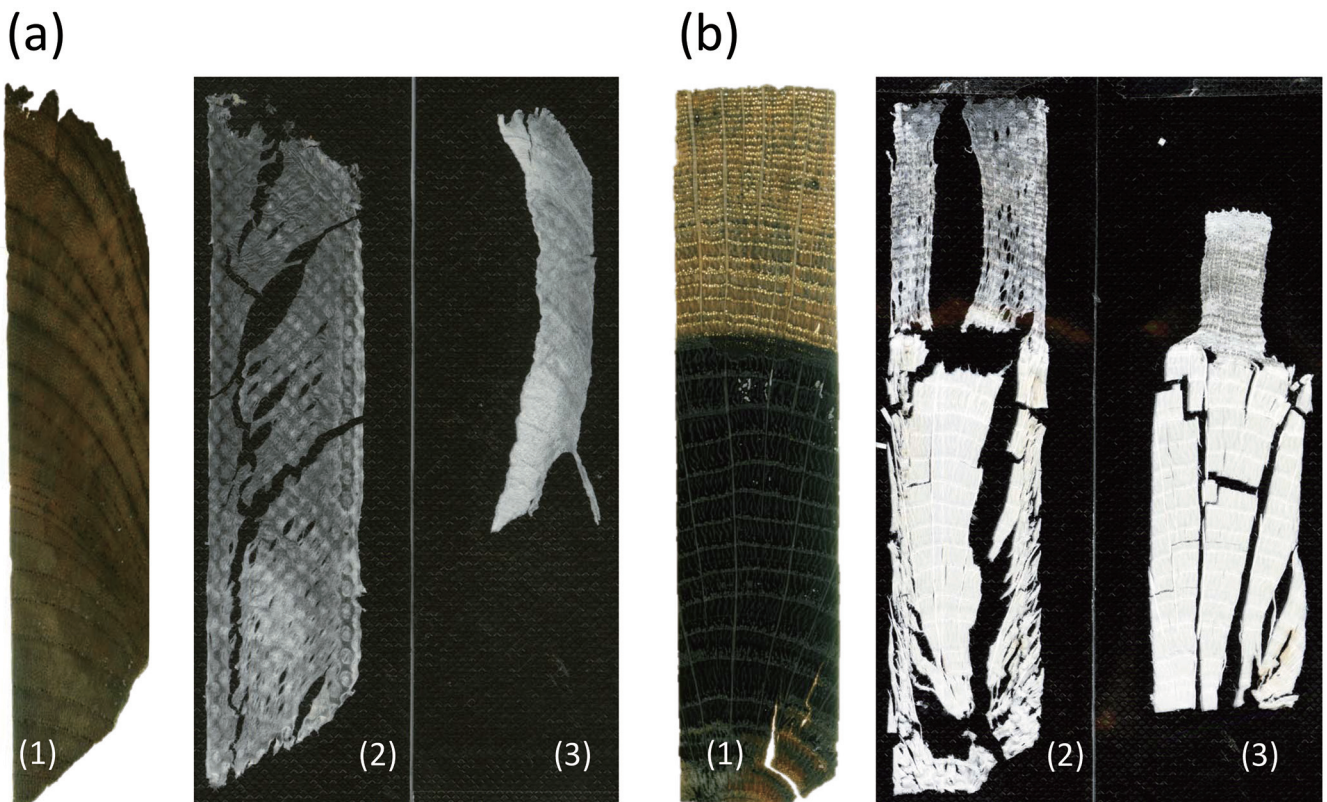


図3 出土劣化材から作成した薄板のセルロース抽出工程における変化。平城宮址から出土した8世紀のケヤキ(a)とコナラ(b)の切り株（国立奈良文化財研究所提供）から作成した薄板の反応前（1）と反応後（2,3）の状態。2は四辺を固定して強制的に収縮を止め、3は自然に収縮させた。共にシリカゲルを用いた簡易凍結乾燥の後の状況である（中塚ら：2016b）。劣化によりセルロース残存量が極度に少なくなっているため、強制的に収縮を止めると薄板が薄くなりすぎて却って年輪が判読しにくい。(b)の心材部はほとんど劣化していないので、劣化した辺材部とのセルロースの残存率の違いが顕著である。

Fig.3 Conditional changes in degraded laths made of zelkova (a) and oak (b) stumps excavated from Heijyokyo palace, provided by Nara National Research Institute for Cultural Properties, before (1) and after (2, 3) cellulose extraction processes. Plates (2) and (3) are cellulose laths, fixed and free during the chemical extraction respectively, both of which had been processed by freezing dry method (Nakatsuka, et al., 2016b). Because of the extremely decreased cellulose contents due to degradation, it is not easy to recognize ring boundaries for the “fixed” samples. Case (b) clearly demonstrates the difference in remaining cellulose contents between heartwood and sapwood.



精度が飛躍的に向上することになった。ところが、劣化してセルロースが選択的に分解した出土材の場合は、このセルロース抽出処理の過程で、「薄い板」が「細い糸」のように変わってしまっ、年輪の判別が全くできなくなってしまっていたのである。しかしここで重要なことは、「細い糸」であっても何らかの白い繊維が残ることは事実であり、セルロース抽出の過程で完全に何もなくなってしまうことは、まずなかったことである。つまり、この僅かに残ったセルロース様物質を年輪の形状を保ったまま確実に取り出すことができれば、セルロースの酸素同位体比を年毎に測定できる可能性があった。そのためには、凍結乾燥などの技術を応用して乾燥時の収縮を防ぐと共に、劣化材の中で極端に少なくなってしまったセルロースの含有量を前提にして、より大きな薄板を処理できる容器を開発する必要があった。試行錯誤の末に、図3のようにほぼ全ての出土材について年輪の形状を認識可能なレベルに保ったまま、セルロースの抽出ができるようになり、その酸素同位体比を分析することによって、十分な数の年輪（30～50年以上）が含まれる木材遺物であれば、現在は、高い確率で年代決定ができるようになってきている。

## 5. 克服しつつある課題（3）—気候の復元と標準変動パターンの公開

年輪年代法を普及していく上で最も重要な取り組みは、年代決定の際の物差しになる信頼できる「年輪幅や年輪セルロース酸素同位体比の標準変動パターン」の構築と公開である。幸い日本では、非常に多くの関係者の方々の協力を得て、セルロース酸素同位体比についても、図4に示すように、わずか数年の間に一気に日本各地で縄文時代中期から現在に至るさまざまな時代を対象に、標準変動パターンの構築が進んだ。特に長野県南部から近畿中央部までの広域におけるヒノキやコウヤマキなどの現生木、建築古材、遺跡出土木材、自然埋没木などを組み合わせて作成した、過去約2500年間に及ぶセルロース酸素同位体比の標準変動パターン（中塚ら：未公表データ）は、自然木だけから作成することに成功した屋久スギの標準変動パターンと共に、ようやく2017年になって、ほぼ全ての時代について、地域を代表するに足る十

分な統計学的精度を保証できるデータの重複度（中部日本の時系列全体では、約70個体。約2500年の全ての年毎に4から10個体のデータの重複度）を達成するに至っている。裏を返せば、それ以外の地域・時代の標準変動パターンについては、未だ分析個数（データの重複度）が少なく、その時代と地域を代表できる標準変動パターンとして、完全な統計学的精度は達成できていない。しかし年輪年代の決定に際しては、「年代既知の年輪データの変動パターン」と「年代未知の年輪データの変動パターン」との間で、統計学的に十分な一致が認められるかどうかによって、個別に年代決定の成否が判定できる（誤った判断は確実に排除できる）。それゆえ、標準変動パターンの統計学的精度の向上が道半ばであっても、つまり部分的に年代決定の成功確率が低い時代が残っていても、その暫定的な標準変動パターンを年輪年代決定に利用し始めることができるのである。そのため、図4の年輪セルロース酸素同位体比の標準変動パターンは、これまでも、日本各地の縄文時代から現在までのさまざまな時代における木材の年輪年代の決定に、しばしば成功裏に利用されてきた。

年輪幅や年輪セルロース酸素同位体比の標準変動パターンが、「対象とする地域と時代の全体を完全に代表できる精度のものに向けて、徐々に進化しつつある途中の段階であっても、それらを年輪年代の決定に利用し始められる」という年輪年代法の特徴は、標準変動パターンの「構築」、「利用」、「公開」の時期的な関係性に微妙な影響を及ぼす可能性がある。なぜならば、その出土材の年輪年代決定への「利用」は、埋蔵文化財発掘調査の関係者から一日も早く行うことが期待される一方で、標準変動パターンそのものは、通常、その全体が、完全になったことが統計学的に論証できるようになってから、「公開」されるべきものだからである。特に年輪セルロース酸素同位体比の場合は、図2に示したように「相対湿度」と「降水同位体比」という2つの気候学的因子を介して、光合成が起きる夏季の「降水量」と非常に高い負の相関を示すこと（中塚：2014a）がわかっており、「地域と時代を代表する標準変動パターン」とは、「その地域と時代の夏の降水量の経年変動パターンについての高い精度の復元結果」にほかならない（中塚：2016）。同じことは、気

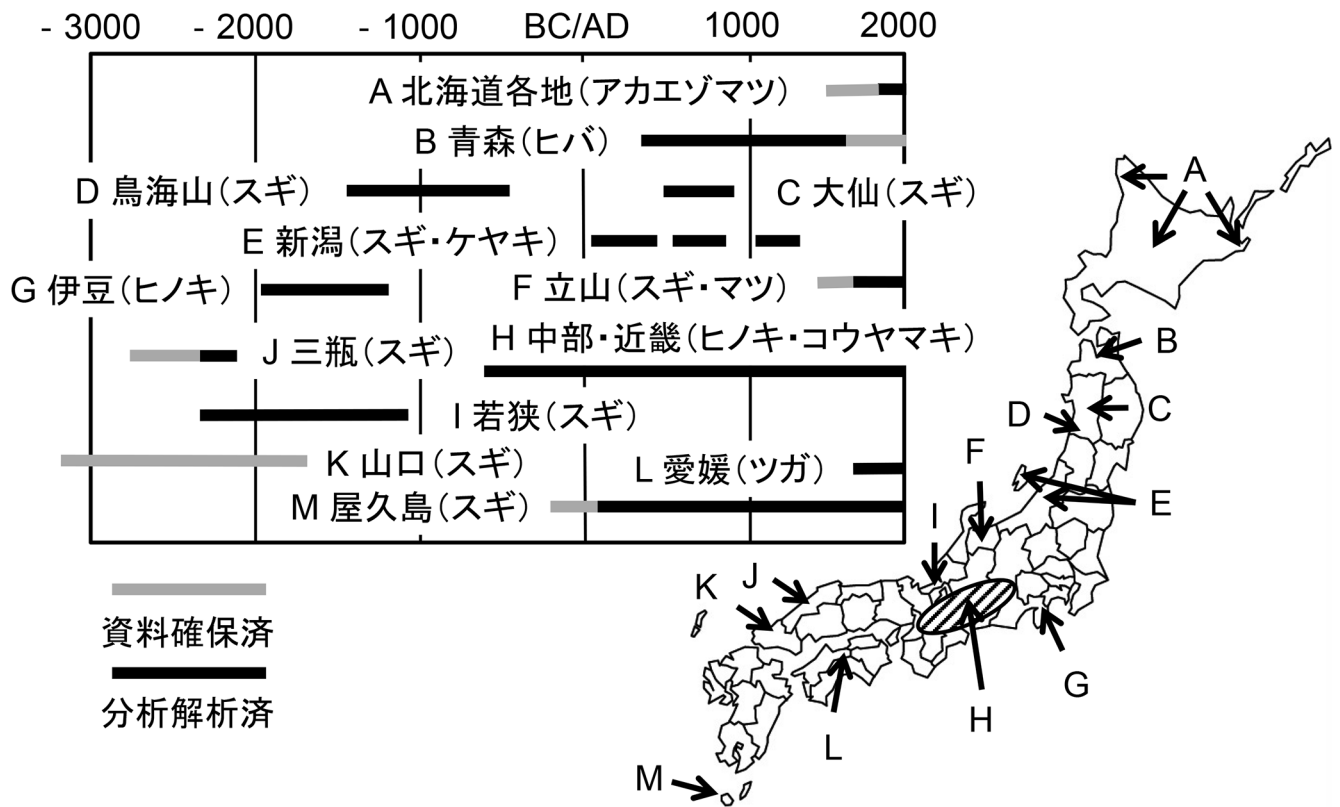


図4 日本各地での年輪セルロース酸素同位体比の標準変動パターンの作成状況 (2016年11月現在)

Fig.4 Present status to establish master chronologies of tree-ring cellulose oxygen isotope ratios over Japan (Situation in November, 2016).

候変動の影響を受けて変化することが期待される年輪幅の標準変動パターンについても言えることであり、そうしたデータを形成途上の段階で公開してしまうと、部分的な不十分さが残された古気候データが一般に流布してしまうことになりかねない。それゆえ、構築中のデータを全面的に公開することは難しく、「年輪年代の決定は始めているのに、その元となる標準変動パターンが公開されていない」という、一般的に言えば摩訶不思議な状況が生まれることにもつながってきた。

もとより年輪年代法がよって立つ基盤である年輪情報の標準変動パターンは、それが年輪幅であれ、年輪セルロース酸素同位体比であれ、「公開」の上で「利用」するのが望ましいことは言うまでもない。しかし、日本全国の埋蔵文化財の発掘調査現場で年輪年代決定の莫大なニーズがある一方で、年輪年代に携わる日本の研究者の数は、年輪幅に基づく年代決定が当初簡単ではないと考えられていたことも反映して、欧米や中国と比べて極端に少なく、年輪研究者が標準変動パターンの統計学的な精度の向上に専念できる状況にはなかったと思われる。また短期間のうちに、日本考古学の主な研究対象の一つ

である弥生時代まで遡れる2千年、3千年の長さの標準変動パターンを作成しなくてはならなかったという状況も考慮すると、日本における年輪年代法の標準変動パターンの「公開」が、その「利用」よりも遅れてきたことは、不可抗力の側面もあったと言えるかもしれない。幸い年輪セルロース酸素同位体比の場合は、多くの関係者の皆さんの協力を得て、既に中部日本と屋久島の2ヶ所において、2千年前後に及ぶ長期の標準変動パターンの全体に対して、地域と時代を代表できる十分な年輪資料の重複度にもとづく十分な統計学的精度のデータ（すなわち夏の降水量の高分解能復元データとしても十分な信頼性）を獲得できつつある。今後、そうしたデータを早期に出版・公開することで、気候変動の理解とその人間社会との関係の解析に大きな貢献ができると同時に、酸素同位体比年輪年代法を含む、日本における年輪年代研究の更なる普及促進に寄与していきたい。

## 6. これからの課題 (1) 一人材育成と体制構築

酸素同位体比年輪年代法は、その誕生から未だ数年の



年月しか経っていないが、その間にも上述のように、社会的認知度の拡大、劣化材の分析技術の改良、標準変動パターンの高精度化などの、さまざまな発展を遂げてきた。しかし今後の本格的な展開を考える際には、より大きな暗雲の存在に気が付く。それは人材育成と体制構築の壁である。実際、過去数年間の全国の埋蔵文化財発掘調査機関との出土木質遺物の年代決定を巡る共同研究においても、非常に重要な多数の資料の提供を受ける一方で、その年輪セルロース酸素同位体比の分析は、筆者の研究室の人的能力の不足から、時に大きく滞り、共同研究の相手の皆さんにしばしば大きな迷惑をかけることになってしまった。2017年現在、全国の自治体での「団塊の世代」の埋蔵文化財発掘調査員の大量退職に対応して、その補充のために若い考古学関係者の人手不足が続いており、酸素同位体比年輪年代法という新しい技術を伝える相手がなくなっている（筆者の研究室で直接雇用できる考古学関係者がいないことはもちろん、自治体の発掘調査関係者に対して短期の技術指導を行うことも時間的に難しい）ことが一つの原因である。一方で、科研費や研究所のプロジェクト経費といった短期的な予算だけを用いて研究スタッフや分析装置の手当てを行い、酸素同位体比年輪年代法の運用を進めている現状も、決して持続可能なものではなく、本方法の定着と発展のためには、全国の埋蔵文化財発掘調査関係者及びその周辺の民間調査機関に対して、早期に本方法の技術移転を進めていく必要がある。

酸素同位体比年輪年代法は、同位体地球化学という考古学や文化財科学の外からもたらされた手法であり、大学や自治体、さらに民間の会社を含む考古学の既存の研究室の中には、その技術をそのまま受容できる組織はない。同じ木材年輪の年代決定法である「年輪幅にもとづく年輪年代法」や「放射性炭素の濃度計測による方法」の場合も、考古学研究室の多くに技術移転がされている訳ではないが、年輪幅の計測は、酸素同位体比の測定よりも時間的・費用的にはるかに小さな負担で遂行可能であり、小さな専門の研究室があれば全国の資料の分析と解析を担っていきける可能性がある。また全国の埋蔵文化財発掘調査機関でも、標準変動パターンの情報さえあれば、独自に分析解析を行うことも可能であろう。逆に放

射性炭素濃度の測定には、非常に大きな装置と技術、資本が必要になるが、放射性炭素の計測には木材の年代決定以外にもさまざまなニーズがあり、早期から民間の会社への技術移転が進んでいて、全国の埋蔵文化財発掘調査関係者は、予算の裏づけさえあれば、自由に放射性炭素の分析を依頼できる立場にある。この点、酸素同位体比年輪年代法の場合は、年輪幅と比べて技術的なハードルがそれなりに大きい一方で、放射性炭素と比べると汎用性が小さく、民間への技術移転も簡単には進みにくい状況にあると思われる。改めて人材育成と体制構築の構想を練る必要がある所以である。

2017年の現時点において、日本中の遺跡から出土する木質遺物の酸素同位体比年輪年代測定は、筆者の研究室、もしくは筆者の研究室に最終的なセルロース試料を年輪酸素同位体比の測定のために送付できるだけの木材年輪からのセルロース抽出技術を持った全国数ヶ所の大学や研究所、民間の研究室のみによって、担われている。いずれにしても、最終的な酸素同位体比の測定は、筆者の研究室のたった一つの装置（熱分解元素分析計と同位体比質量分析計のオンライン装置であるサーモフィッシャーサイエンティフィック社の TCEA/IRMS）によって行われており、装置の故障が、測定全体の停止に直結する極めて不安定な状況にある。まずは日本の数ヶ所の理系研究室の中にもある同種の有機物専用の酸素同位体比測定装置を、出土材の年輪年代決定にも活用できる体制を構築していくと共に、将来的には花粉分析や木材の樹種鑑定、あるいは木器の保存処理技術と同様に、民間の調査会社や全国のいくつかの拠点となる埋蔵文化財発掘調査機関に対して、酸素同位体比年輪年代法の技術を広く普及・定着させていくことが理想である。そのためには、年輪セルロース酸素同位体比の標準変動パターンの構築と公開を進めると共に、その知見を、セルロース抽出の手法や酸素同位体比測定の技術とセットにして、頻繁な講習会の開催などを通して、官民、即ち地方自治体の埋蔵文化財発掘調査機関や民間の調査会社に移転する取り組みを進めて行くことが必要になる。実のところ、セルロース酸素同位体比の測定には、人件費や同位体比測定装置の減価償却費を除けば、1サンプル（1年輪）当たり10円単位のコストしか掛からない。官民への

技術移転さえ進めば、日本中で気軽に活用できる年代測定法の一つになることに疑いはないのである。

## 7. これからの課題（2）—技術革新と対象拡大

表1に示したように、酸素同位体比年輪年代法には木材年輪年代の決定法として、さまざまな利点があるが、デジタル写真でも解析できる年輪幅にもとづく従来の年輪年代法と比べると、「大きな破壊を伴う分析である」という明らかな欠点があり、年輪を伴わない木片からでも年代が出せる放射性炭素の濃度測定法と比べても、「年輪数が数十年以上はないと年代決定には至らない」という大きな制約がある。この「破壊分析」という欠点を乗り越えることができれば、文化財としての重要性が明確な（つまりその暦年代の決定にも明確な意義がある）木製品を1つ1つ分析していけるであろうし、「数十年の年輪数」という制約を外すことができれば、低湿地の遺跡から出土する文字通り「全て」の樹皮付の柱や杭、板などの伐採年代を年単位で決定して、そうした遺跡の時空間変動の実態を余すところなく明らかにしていけるであろう。

「破壊分析」という欠点を最小限にするためには、遺物の表面に最小限の傷跡しか残さないように直径1 cm前後のドリルで、年輪コア試料を採取できるようにすることが重要である。現時点では、劣化のほとんど進んでいない現生木や建築古材のほか、ポリエチレングリコール(PEG)などによって資料が堅牢に固められた出土材に対しては、ドリルによる年輪コアの採取が有効であることが分かっているが、水漬け保存されただけの生の出土材の場合は、ドリルでは、回転中に資料の形状が保持できなくなるためコアの採取はできないことが分かっている。PEG処理されていた大阪の難波宮の柱根の年代を、ドリルによって採取された年輪コアの酸素同位体比分析からきれいに決めることができた事例(中塚:2014b)のように、PEG処理済の貴重な木器試料に対する分析の成功事例を積み重ねていくことも、信頼の獲得には重要であると思われる。

「数十年の年輪数」という制約を乗り越える可能性のある1つの方向性が、年層内のセルロース酸素同位体比

の季節変動の解析である(中塚:2006)。セルロース酸素同位体比は、図2に示したように、原料となる糖類が葉の中で光合成によって作られた際の葉内水の酸素同位体比を反映するが、葉内水の酸素同位体比自身は、降水の酸素同位体比や相対湿度の変動を反映して、一日の間でも、一年の間でも、そしてもちろん年輪に対応した数年から数百年の範囲内でも、あらゆる時間スケールで変動している。このうち一年の間での葉内水の酸素同位体比の変動は、一つの年輪の中のセルロース酸素同位体比の年層内変動(季節変動)と言う形で記録されていることが分かっており、その記録はセルロース酸素同位体比の精密分析によって明らかにすることができる。重要なことは、「降水同位体比や相対湿度の季節変動パターンは年毎に異なる」、すなわち、光合成が活発に行われる季節の中でも、初夏が空梅雨になったり、盛夏に台風が来たり、水環境の変動パターンは年毎にさまざまなことである(庄:2016)。それが転写される「セルロース酸素同位体比の季節変動パターン」の情報量は、1年に1つしか計測しない年層毎のセルロース酸素同位体比の場合よりも、何倍・何十倍にもなる可能性があり、これを用いれば、年輪数がわずか数年しかない木材であっても、理論的には暦年代の決定に至る可能性がある。実際には、梅雨が来たり来なかったりする北海道はともかくとして、本州以西の地域では水環境の季節変動パターンは毎年それほど大きく変わるわけではないが、年毎に微妙な違いがあることを我々が日々実感しているのも、また事実である。今後、さまざまな樹種の現生木を用いた基礎研究を行うと共に、弥生時代末期などの遺跡出土木材の多くが集中する時期を対象に、年層内酸素同位体比のデータベースの作成が進めば、近い将来、わずか数年の年輪数の木材でも暦年代が決定できるようになることは、夢ではないのかもしれない。

## 8. おわりに

セルロース酸素同位体比を用いた年輪年代決定法の特長は、広葉樹を含むあらゆる樹種の木材の年代が決定できること、そして従来の年輪年代法では、ヒノキやスギなどの針葉樹の中でも年輪数が百年を越えるような出土材に対してしか、年代決定できなかったのに対して、年

輪数が数十年のものでも高い確率で年代決定ができるようになってきたこと、そして上述のように、最終的には年輪数が数年しかない木材に対しても年代決定ができる可能性が出てきたことにある。年輪が百年以上あるような針葉樹材は、製材されて樹皮がついていない場合が多く、その貴重さゆえに転用される可能性も高いが、広葉樹の小径木からなる竪穴住居の柱や水路の杭、水田の矢板などには、樹皮が付いた転用の可能性の低い材が無数に使われている。これまでは、その樹種の違いによって、あるいは、年輪数の少なさによって、そうした広葉樹の小径木は、年輪年代決定の対象になることはなかったが、

酸素同位体比年輪年代法の活用の進展によって、低湿地の遺跡から出土するあらゆる小径木に対して年輪年代の決定ができるようになれば、年輪セルロース酸素同位体比自身が明らかにする気候変動の実態とも対応させて、年代の分布を解析することで、当該遺跡の形成・維持・廃絶の全過程を、その理由を含めて徹底的に明らかにして行ける可能性がある。その全ては、酸素同位体比年輪年代法の技術の改良と普及を、いかに実現していけるかに掛かっている。これまで以上に、そのために力を注いで行きたい。

### 引用文献

- 木村勝彦・荒川隆史・中塚 武 2012 「鳥海山の神代杉による縄文晩期をカバーする年輪酸素同位体比の物差しの作成と実際の適用例」日本植生史学会第 27 回大会・講演要旨集 pp. 46-47
- 庄 建治朗 2016 「年輪セルロース酸素同位体比の年層内変動データを用いた年代照合の可能性に関する検討」総合地球環境学研究所・気候適応史プロジェクト成果報告書 1 pp.55-63
- 中塚 武 2006 「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」低温科学 65 pp.49-56
- 中塚 武 2014a 「樹木年輪セルロースの酸素同位体比による気候変動の復元」『現代の生態学⑩ 地球環境変動の生態学』（原登志彦編）共立出版 pp.193-215
- 中塚 武 2014b 「研究最前線一年輪セルロース酸素同位体比による年代測定」総合地球環境学研究所・気候適応史プロジェクト Newsletter 1 pp. 4-5
- 中塚 武 2015 「酸素同位体比がもたらす新しい考古学研究の可能性」考古学研究 62 pp.17-30.
- 中塚 武 2016 「高分解能古気候データを用いた新しい歴史学研究の可能性」日本史研究 646 pp.3-18
- 中塚 武・許 晨曦・佐野雅規 2014 「年輪セルロース酸素同位体比を用いた出土木材の年代決定」『愛知県埋蔵文化財センター調査報告書 第 186 集 一色青海遺跡Ⅲ（第 2 分冊）』pp.128-137.
- 中塚 武・佐野雅規・村上由美子・許 晨曦 2016a 「八日市地方遺跡から発掘された木材の年輪セルロース酸素同位体比による年代決定」『八日市地方遺跡発掘調査報告書・第 6 部』pp.255-262.
- 中塚 武・佐野雅規・李 貞 2016b 「酸素同位体比年輪年代測定のための劣化した考古材からのセルロース抽出法の開発」日本文化財科学会第 33 回大会・講演要旨集 pp.38-39.
- 箱崎真隆・木村勝彦・佐野雅規・李 貞・對馬あかね・小林謙一・設楽政健・木村淳一・中塚 武 2017 「中道遺跡・川原館遺跡出土木材の酸素同位体比年輪年代測定（第 3 節）」『川原館遺跡・中道遺跡・東早稲田遺跡 発掘調査報告書（第二分冊）』（青森市教育委員会）pp.256-259.
- 樋上 昇・中塚 武・大石恭平 2015 「稲沢市下津宿遺跡出土井戸枠の酸素同位体比年輪年代測定結果について」愛知県埋蔵文化財センター研究紀要 16 pp.49-68
- 光谷拓実 2005 「年輪年代法—実年代を探る」文化遺産の世界 16 pp.1-11
- Kagawa, A., Sano, M., Nakatsuka, T., Ikeda, T. and Kubo, S. 2015 “An optimized method for stable isotope analysis of tree rings by extracting cellulose directly from cross-sectional laths”, Chemical Geology 393-



394 pp.16-25

Nakatsuka, T., Ohnishi, K., Hara, T., Sumida, A., Mitsuishi, D., Kurita, N. and Uemura, S. 2004 "Oxygen and carbon isotopic ratios of tree-ring cellulose in a conifer-hardwood mixed forest in northern Japan" *Geochemical Journal* 38 pp.77-88

(2017年4月6日受付, 2017年10月24日受理)

# Establishment and Development of Oxygen Isotopic Dendrochronology

---

Takeshi NAKATSUKA<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Research Institute for Humanity and Nature, 457-4 Motoyama, Kamigamo, Kita-ku, Kyoto 603-8047, Japan.

---

## Abstract

Oxygen isotopic dendrochronology is a very new methodology to date wood samples using the tree-ring cellulose oxygen isotope ratio instead of tree-ring width. The tree-ring cellulose oxygen isotope ratio reflects relative humidity and precipitation isotope ratios during photosynthesis seasons, irrespective of the tree species and independent of the ecological conditions of trees. Accordingly, it can be used as a universal dendrochronological index applicable to tree-ring dating by making comparisons between different individual trees and species, including broad-leaved trees. Although this technique has only been used since 2011, the method has encountered many initial problems, some of which have been partly overcome. (1) The advantages of oxygen isotopic dendrochronology, including its universal applicability across tree species and high sensitivity to local climate variation, have become gradually known by many Japanese archaeologists through presentations and direct collaborations focused on dating wooden artifacts excavated from archaeological sites across Japan. (2) Improvements in the analytical procedure have enabled the measurement of tree-ring cellulose oxygen isotope ratios even for highly degraded wood. (3) Repeated isotopic measurements of numerous tree-ring samples from the last 2600 years in central Japan have made the current very long oxygen isotopic tree-ring chronology highly reliable for both dating wood samples and reconstructing past climate variation. However, there remain considerable unsolved challenges. (A) The transfer of oxygen isotopic dendrochronology technologies to local governmental centers and private companies for archaeological excavations is urgently needed. Because oxygen isotopic measurements for dendroarchaeological purposes are currently conducted in only my laboratory, any kinds of instrumentation failures can suddenly stop the entire body of relevant research activities in Japan. (B) Further technological improvements are desirable to extend the applicable targets of oxygen isotopic dendrochronology, such as the development of methods to collect tree-ring cores without causing significant damage to precious wooden cultural artifacts and the establishment of a database of intra-ring (seasonal) variation in cellulose oxygen isotopic ratios to enable the dating of small excavated wood samples that contain only several years of rings.