

「文化財科学研究の最前線 年代測定」 年輪年代学の最近の進展

大山 幹成

●キーワード：年輪年代学 (dendrochronology), 木材産地推定 (dendroprovenancing),
年輪幅 (tree-ring width), クロスデーティング (crossdating)

1. 研究の背景と歴史

1.1 緒言

ほとんどの温帯の樹木は、1年に1層の年輪を形成する。このとき、樹木は、気候の好適・不適に応じて広狭の年輪を形成していくが、似通った気候条件下にある同一種では、共通の環境変動を記録するため、個々の年輪パターン間の比較による年代の特定が可能となる。この単純な原理を利用して、正確な年代を得る方法が、年輪年代法 (dendrochronology) である (Fritts: 1976, Baillie: 1995)。また、年輪は、気候だけでなく、様々な環境情報を記録しているため、古環境変動や歴史的なイベントについても記録している。そのため、年輪年代学は、狭義では、年輪の年代を決定する年代決定法を指し、広義では、年輪に記録された過去の環境変動を解明していく学問分野を指す (Schweingruber: 1988, Speer: 2010)。

広義の年輪年代学には、年輪考古学 (dendroarchaeology)、年輪気候学 (dendroclimatology)、年輪生態学 (dendroecology)、年輪地形学 (dendrogeomorphology) など様々な亜分野があり、生物学、生態学、古気候学、地形学など広範な分野に関係しているが、本稿では、文化財科学に関係すると考えられる年輪考古学分野、特に年代測定と木材産地推定を中心に扱う。

また、年輪年代学は自然科学であるため、本稿で取り扱う成果は、原則として査読を経た論文のみとし、ごく最近の成果など、やむを得ない場合のみ、それ以外の文献からも引用を行った。また、年輪年代学の日本語の用

語は必ずしも統一されていないが、本稿では、標準的な年輪変動を示す年輪曲線 (master chronology あるいは chronology) (Kaennel and Schweingruber: 1995) を「標準年輪曲線」(米延: 2004) と記述する。これらの点を、予めお断りしておく。

1.2 年輪年代学の歴史

年輪年代学は、アリゾナ大学の天文学者アンドリュー・エリコット・ダグラス (Andrew Ellicott Douglass) により 20 世紀初頭に創始された。太陽黒点の活動を研究するため樹木年輪の研究を始めたダグラスは、やがて、ポンデローサパイン (*Pinus ponderosa*) の年輪変動が、アリゾナ州の広範囲で共通していることを見出し、クロスデーティングの原理とクロノロジーの考え方を確立した (Fritts: 1976)。ダグラスの研究に興味をもった考古学者からの誘いもあり、ダグラスはその後、北アメリカ大陸南西部の先住民が遺した遺跡の暦年代決定に取り組み、1929 年までに、数多くの遺跡の暦年代決定と、同地域における AD701 年以降の標準年輪曲線を確立した (Fritts: 1976)。

その後、年輪年代学は 1930 年代にヨーロッパに導入され、ドイツのブルノ・フーバー (Bruno Huber) らにより、ナラ類を対象とした研究が進展した。1970 年代以降、コンピューターの導入により、移動相関などの統計値の計算が容易になったことから、研究が一気に進展した。アイルランド、ドイツ、イングランドなど各地でナラ類 (*Quercus robur* と *Q. petraea*) の長期の標準年輪曲

表1 世界の長期標準年輪曲線 (Speer (2010) を一部抜粋)
Table 1 Long-term chronologies around the world (modified from Speer (2010))

種	場所	到達年代 (西暦)	長さ (年)
<i>Pinus, Quercus</i>	ドイツ	10,461 BC	12,460
<i>Pinus sp.</i>	ドイツ	9494 BC	11,370
<i>Quercus petraea, Q. robur</i>	ドイツ	8021 BC	10,076
<i>Juniperus sp.</i>	地中海東部	7020 BC	9,000
<i>Pinus longaeva</i>	カリフォルニア (アメリカ)	6716 BC	8,700
<i>Quercus petraea, Q. robur</i>	アイルランド	5218 BC	7,272
<i>Quercus petraea, Q. robur</i>	フランス	3659 BC	5,659
<i>Fitzroya cupressoides</i>	チリ	1634 BC	3,622
<i>Sabina przewalskii</i>	中国	1580 BC	3,585
<i>Sequoiadendron giganteum</i>	カリフォルニア (アメリカ)	1229 BC	3,220
<i>Pinus aristata</i>	アリゾナ (アメリカ)	662 BC	2,262
<i>Quercus petraea, Q. robur</i>	ポーランド	474 BC	2,474
<i>Pinus sp., Pseudotsuga sp.</i>	アメリカ南東部	322 BC	2,327

線が構築された (例えば Pilcher et al.: 1984, Baillie : 1995)。現在、最も長い標準年輪曲線は、ヨーロッパで紀元前 10461 年まで達するほか (Friedrich et al.: 2004)、北アメリカ大陸でも *Pinus longaeva* で紀元前 6716 年までの標準年輪曲線が構築されている (Ferguson et al.: 1985)。表 1 に世界の主要な長期標準年輪曲線を示した (表 1)。これらの一部は、放射性炭素年代測定 of 較正曲線作成に重要な役割を果たしている (Reimer et al.: 2013)。

このようにして、構築された標準年輪曲線を利用して、ヨーロッパを中心にして、遺跡の出土木材 (例えば Eckstein : 1978, Baillie : 1982, Hillam et al.: 1990)、建造物 (例えば Miles : 1997, Eckstein : 2007)、絵画 (例えば Bauch and Eckstein : 1981, Fraiture : 2002)、彫刻などの美術品 (例えば Haneca et al.: 2005a)、バイオリン (例えば Topham : 1998) など、各種木質文化財の年代が測定され大きな成果を挙げてきた。なお、こうした年輪考古学の成果について、詳細は各総説論文を参照されたい (Nash : 2002, Towner : 2002, Čufar : 2007, Haneca et al.: 2009)。

ヨーロッパにおける年輪考古学の一つの大きなトピックは、木材産地推定である。類似した環境下で生育した樹木は似たような年輪変動を示すため、クロスデーティングが可能となるが、地理的に遠く離れた場所の樹木は、異なる気候環境下で生育するため、異なる年輪変動パターンを示す。従って、各樹木は、生育した場所特有の年輪パターンを示すことが期待される。そこで、各個体

の年輪変動パターンを各地の標準年輪曲線と比較すると、生育していた場所と最も類似した変動を示すことになる。このようにして木材産地推定を行うが、こうした研究を行うには、空間的に密に張り巡らされた標準年輪曲線ネットワークの構築が必要である。

上記のような木材産地推定によって過去の木材移送が示唆される事例は、ヨーロッパの標準年輪曲線ネットワークがまだ不十分なうちから、いくつか示されていたが、大きな注目を集めたのは、Eckstein et al. (1986) の研究である。1970 年代、イングランドやオランダでは、年輪幅が狭く、個体間でよく同調する試料群が認識されていたが、同地域の標準年輪曲線では年代決定ができず、長らく産地不明のフローティングの標準年輪曲線となっていた。ドイツの Eckstein とポーランドの Wazny は、冷戦下の鉄のカーテンを超えて、ポーランドの Gdansk の標準年輪曲線を構築し、この曲線を用いてフローティング曲線の年代を決定した。そして、この産地不明の木材群は、バルト海沿岸部からハンザ同盟によって移送された木材であることを明らかにした (Eckstein et al.: 1986)。この後、バルト海沿岸部からの木材移送に関する研究は文献資料との比較も含め、大きな進展を見た (例えば Haneca et al.: 2005b, Eckstein and Wrobel : 2007)。

我が国では、特に、1980 年代から複数の研究者が日本産木材を用いた年輪年代学研究に本格的に取り組み始めた (例えば、野田ら : 1983, Kojo : 1987, 光谷 : 1987a, 光谷 : 1987b)。このうち、最終的に木質文化財の年代決定に利用可能な長期標準年輪曲線を構築したのは、奈良国立文化財研究所の光谷である。光谷は、木曾産のヒノキを中心に 100 点以上の現生老齢樹の円盤標本を収集し、個体内、個体間での同調性について基礎的な検討を行った。その結果、ヒノキが年輪年代学の適用可能な樹種であり、ヨーロッパ流のクロスデーティングの手法を用いて年代決定が可能であることを明らかにした (光谷 : 1987a, 光谷 : 1987b, 光谷 : 1988)。また、この手法が、スギやヒノキアスナロ、コウヤマキなど歴史的に木材として多用されてきた樹種にも適用可能であることを明らかにした (奈良国立文化財研究所 : 1990, 光谷 : 1995)。光谷は、これらの知見に基づき、建築部材、遺跡出土材

などから多数の年輪試料を収集し、近畿～中部地方を中心に BC317 年から AD1984 年までのヒノキの標準年輪曲線を構築した。さらに、これにリンクさせる形で、東北地方や静岡県でスギ、東北地方でヒノキアスナロ、奈良県でコウヤマキ、といった暦年代の得られた標準年輪曲線を構築した。そして、これらの標準年輪曲線を利用して、紫香楽宮など多数の年代測定を実践し、日本で初めてとなる文化財試料の年輪年代測定で多くの成果を挙げた（奈良国立文化財研究所：1990）。

その後、1990 年代に入ると、我が国でも年輪気候学による古気候復元や年輪生態学的解析を意図した日本産樹種の研究が、特に北海道のアカエゾマツを中心として、進展し、複数の現生木標準年輪曲線が構築された。これらも後述するように、年代測定の標準年輪曲線として活用される可能性が高い（例えば Yasue et al.: 1997, Yasue et al.: 2000, Davi et al.: 2002）。

また、時代が古くなるが、埋没林に年輪年代学を適用した事例もある。寺田らは、青森県十和田湖東麓で確認されている十和田八戸テフラに埋没した最終氷期（約 12,650 年前）の埋没樹木 22 個体（トウヒ属、カラマツ属、モミ属）に年輪年代学を適用し、トウヒ属 8 個体、モミ属 3 個体の最終形成年輪が一致したことから、これらが十和田火山の噴火により一斉に枯死したことを明らかにしている（寺田ら：1994）。

2. 試料と方法

この章では、年輪年代学の試料、方法、使用機器、ソフトウェアなどについて、最近の動向も交えながら記述する。

2.1 試料

温帯地域ではほとんどの樹木が年輪を形成するが、すべての樹種が年輪年代学に適した樹木というわけではない。Baillie(1995) や Haneca et al. (2009) を参考に年輪年代測定という視点から考えると、好適な樹木というのは、1) 年輪界が明確であること、2) 長寿命であること、3) 気候変動など外部環境の変化に感受性が高く、年輪幅変動が顕著なこと（種の遺伝的要素や優占種かといった森林生態学的要素が関係）、4) 木材として有用で、

長期にわたり継続的に大量に使用されていること、5) 木材の保存性が良好で、遺物として残りやすいこと、という条件が挙げられる。また、長期の標準年輪曲線を現代から連続的に構築することを考えると、現生の老齢樹が豊富に残存していることも重要な要素であろう。

このような条件を考えると、日本での好適な種としては、これまで研究対象とされてきたようなヒノキ、スギ、アスナロ（変種ヒノキアスナロを含む）などのヒノキ科の樹種が第一に挙げられる。また、ヒノキとクロスデーティングが可能なが知られているコウヤマキ（奈良国立文化財研究所：1990）や、ツガ（藤井：2014）も好適な試料である。また、木質遺物による延長は容易ではないものの、ブナ（星野ら：2006）やトウヒ属（Yasue et al.: 1997）も、江戸～近代を対象と考えれば好適な樹木といえる。ヨーロッパや北米大陸では、ブナ科（コナラ属、ブナ属）やヒノキ科、マツ科（マツ属、トウヒ属、モミ属）が主要な研究対象であり、これらの年輪試料としての優れた性質を考慮すると、今後、我が国においてもコナラ属、マツ属、モミ属などで研究を展開する余地があると考えられる。

2.2 年輪測定

木質文化財を測定対象とする場合、年輪データの計測は「非破壊」で実施するのが原則である。ただ、こうした非破壊測定の際も、必要に応じて、刷毛や雑巾などで表面の汚れや埃を取り除くクリーニングを行い、年輪を可視化することがある。また、表面劣化が著しく年輪の可視化が困難な場合は、所有者の許可を得て、カミソリによる表面の切削や試料の切断を行うケースも稀に存在する。

年輪幅の計測は、木口面（横断面）もしくは柃目面（放射断面）で、0.01 mm の精度で行うのが一般的である（Speer: 2010）。計測には、双眼実体顕微鏡と移動ステージを利用した変位計測法がよく用いられており、代表的なものとして Velmex（Velmex 社）や LINTAB（Rinntech 社）の計測システムがよく用いられている（図 1）。また、近年、フラットベッドスキャナもしくは高性能デジタルカメラで取得した高解像度の画像を用いて、年輪幅を計測することも盛んに行われるようになった。



図1 ベルメックス年輪計測器。実体顕微鏡の片方の接眼部には、十字線が装備されている。(米延仁志氏提供)

Fig.1 Velmex measurement system featuring stereo microscope with a crosshair reticle in one eyepiece.

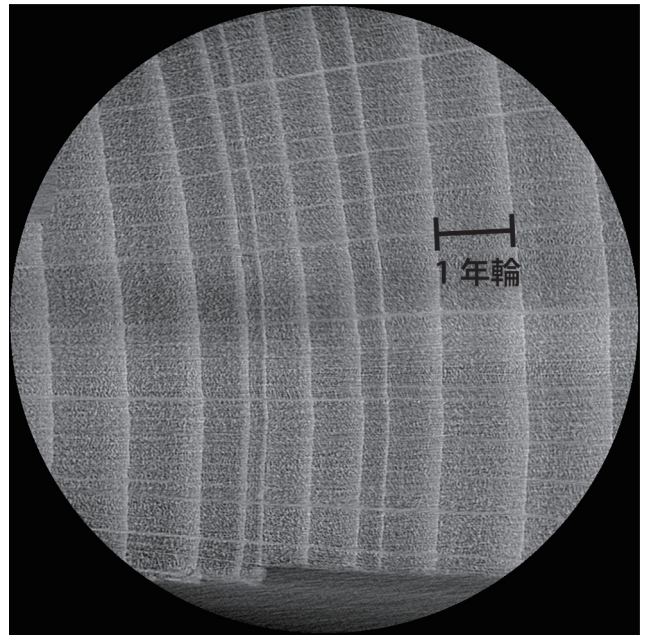


図3 ブナ横断面のマイクロフォーカス X 線 CT 画像 (星野安治氏提供)

Fig.3 Micro-focus X-ray CT image of a cross section for Japanese beech



図2 デジタルカメラによる天井板の撮影。カメラはタブレット端末から遠隔操作が可能である。

Fig.2 Photography of a ceiling board using a digital camera. The camera can be operated by remote control on a tablet computer.

画像計測用のソフトとしては、CooRecorder (Cybis 社), WinDENDRO (Regent Instruments 社), Lingovision (Rinntech 社), 統計ソフト R の measuRing パッケージ (Lara et al.: 2015) などが挙げられる。画像計測法は、偽年輪の判別や非常に狭い年輪の観察では顕微鏡観察に一步譲るものの、計測経過が画像上で確認できるため見直

しが容易なこと、様々な試料の形状に対応できること(例えば現存建造物の天井板など)(図2)、収蔵庫などで画像の取得が可能のため試料借用の必要がないこと、などの利点が多く、デジタルカメラの高性能化も相まって、今後ますます活用されることになる見込みである。

また最近の大きな進展として、年輪画像の取得にマイクロフォーカス X 線 CT が導入されたことが挙げられる (Okochi et al.: 2007, Hoshino et al.: 2008a, Bill et al. 2012) (図3)。この方法は、試料の大きさに制限はあるものの、対象試料の任意の断面を切りとって年輪画像を取得できることが大きな利点であり、木彫像など、試料の表面観察では年輪幅計測が難しい木質文化財や遺物を対象にした活用が期待される (Okochi : 2016)。

2.3 方法

年輪年代学における年代決定法については、最近の「考古学と自然科学」の論文 (米延ら : 2010) に詳細な解説があるので、ここでは、この論文をまとめる形で、要点のみを記述する。

クロスデーティングは年輪年代学の方法の中で最も重要な方法であり、複数の年輪時系列データの年輪変動の相互比較により、年輪の形成された年を決定する方法で

ある (Kaennel and Schweingruber : 1995)。クロスデーティングには、研究対象地域の特色を背景に、大きく分けて2つの方法があるが、本質的には同等である。年輪研究発祥の地である北アメリカ大陸南西部の乾燥地域では、極端に幅が狭い年輪のみについて時間軸上にプロットした縦棒の位置を試料間で比較照合する方法 (スケルトンプロット法) (Stokes and Smiley : 1996) と統計的クロスデーティング (Holmes : 1983) を使用している。一方、ヨーロッパにおいては、片対数グラフにプロットした年輪幅時系列間の全体的な照合の良さ (指標年やローカルな成長傾向の相同性など) を目視で評価する。目視評価の前段階として、年代候補を絞り込むために統計的クロスデーティングを行うが、このとき相関係数への年輪数の影響を考慮して student の t 値を用いる (Baillie : 1982)。日本の場合は、この後者を用いている。いずれにおいても、統計的クロスデーティングは候補年代を絞り込むために使用し、最終的な決定は目視クロスデーティングによって行う。また年代決定は、試料に関する他の知見とは独立に行われることが重要である。

年輪年代学の専門家以外には、上記手法は主観的・恣意的という印象を与えるかもしれないが、これは年輪年代学に対する国際的な認識とは異なる。目視クロスデーティングでは、すべての専門家が同じ結論に至ることが年代決定の大前提であり (Baillie : 1982)、また最低限の倫理指針として、外部の専門家による追試の機会が保証されているということが重要である (実際にヨーロッパでは研究機関間の年代測定依頼で相互チェックが行われている) (Baillie : 1995, p.28)。このような前提に基づいて、慎重に成果が積み上げられてきたことで、樹木年輪は ^{14}C 年代の暦年代較正 (Reimer et al.: 2013) における重要な試料となっている。

ヨーロッパのクロスデーティングにおける具体的な手法は以下の通りである (図4)。まず、相互相関法による統計的クロスデーティングを行う。このとき、2つの年輪幅時系列について5年移動平均による標準化と自然対数変換を行う。そして、試料を1年ずつ移動させながら両者が重なり合う区間でのピアソンの積率相関係数から学生 t 値を逐次算出する。この t 値が所定の基準値を超えたときに年代を拾い上げ、目視クロス

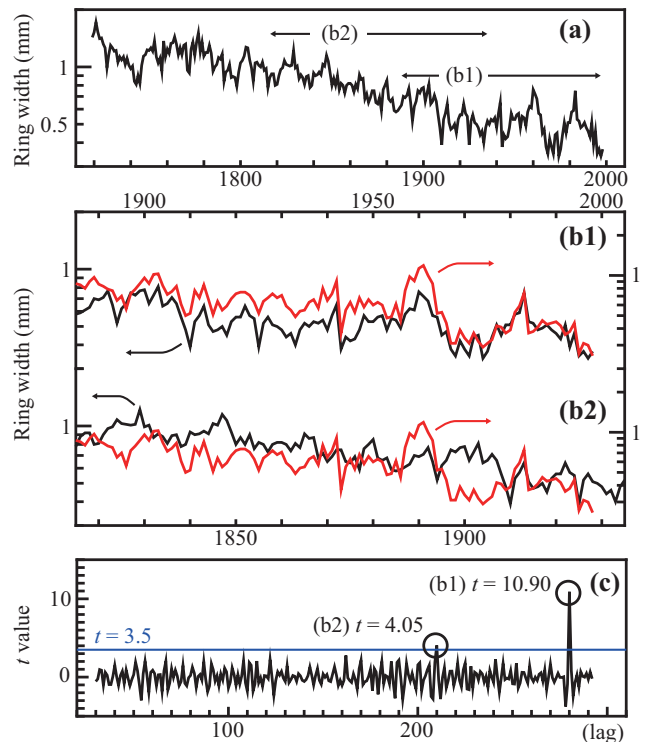


図4 クロスデーティングの概略図。(a) 木曾ヒノキ現生木標準年輪曲線 (AD1719~1998)。(b) 目視クロスデーティングの1例。黒および赤で示した線は、それぞれ標準および試料年輪幅パターン。(b1)、(b2)は t 値((c)参照)が有意($p < 0.1\%$)に高い年代での結果だが、(b1)では年輪変動に良好な照合が得られるものの、(b2)では良い対応が認められない。(c) 統計的クロスデーティング。青線はヨーロッパの年輪考古学で一般的に用いられる基準値 (Baillie : 1982)。(米延 (2010) を一部改変)

Fig.4 Schematic representation of crossdating process. (a) Hinoki cypress raw ring-width chronology (AD 1719-1998). The vertical scales are semilogarithmic. Horizontal arrows show the intervals used in other panels. (b1) Example of good ring pattern matching. Black and red lines show the master and sample chronologies, respectively. On the other hand, visual crossdating in (b2) rejects the matching, even though the sample correlated significantly with the master. (c) The result of statistical crossdating for (b). The blue horizontal line shows the threshold ($t = 3.5$) suggested by Baillie (1982). (modified from Yonenobu *et al.* (2010))

デーティングを行って年輪年代を決定する (図4)。基準値としては、 $t = 3.5$ (自由度 100, 有意水準 99.9%での t 値に近い) が用いられてきたが (Baillie : 1982, English Heritage : 1998)、これは便宜的な数値であり、目視クロスデーティングに成功する試料では通常これを大幅に超える値を示す。現生木曾ヒノキを用いた統計的クロスデーティングのシミュレーションでは、上記基準値は現実的な有意水準としては低めに設定されたものであることが示唆されている (米延ら : 2010)。

また、試料の年輪数も非常に重要な要素である。年輪

年代学では、年輪変動のパターンがある年代範囲だけに一意的に起こっており、それ以外では同じ変動パターンが繰り返されていないことが前提条件である。そのため、年輪数が多い試料ほど同じパターンの出現確率が激減するため、試料として適していることになる。一般的には100年を超えることが望ましいとされており、50年以下は原則的に測定の対象から外される(English Heritage: 1998)。木曾ヒノキによるシミュレーションでも50年より短い年輪数では高い頻度で大きな t 値が得られることが示されている(米延ら: 2010)。

以上のようなクロスデーティングの作業においては、1組(1対1)の試料だけで年代決定を行うことはほとんどなく、実際には、複数の試料間(試料群、試料平均、標準年輪曲線)全てで繰り返し照合を行い、矛盾のない年代関係が得られるか繰り返し検証を行う。この反復検証(replication)は、結果の信頼性を得るために極めて重要である。

また、このことから考えると、当然のことであるが、年輪年代の調査においては、1つのサイトで好適な試料のみを少量だけ選択して調査するのではなく、遺跡内あるいは建造物内で悉皆的な調査を行って、使用木材の編年を行うことが結果の信頼性を高める上で重要である。またこのような調査により、遺跡内の遺構の編年、建造物の建築年、修理履歴、再利用材の検出などより多くの情報を引き出すことが可能になると期待される。

暦年代の確定した長期の標準年輪曲線は、年輪年代学研究の基盤である。標準年輪曲線とは、ある特定の地域で、標準的な年輪変動を示す年輪時系列データのことである(Kaennel and Schweingruber: 1995)。標準年輪曲線は、クロスデーティングが厳格に行われた試料を対象にして、1) 個体内の複数のデータのアンサンブル平均、次いで、2) 全個体のデータのアンサンブル平均、を行って構築する。これにより、個体固有の変動は薄められ、個体間で共通の変動が強調されることになる。なお、古気候復元など研究目的によっては、不必要な信号成分を取り除くため、平均の前に各個体の標準化が実施される(Fritts: 1976, Cook and Kairiukstis 1990)。

標準年輪曲線構築に必要な試料数については客観的な基準はないが、統計的には多ければ多いほど変動が安定

するのは明らかである。質的評価の一つの目安としては、個体間相関係数の平均値と個体数から算出される Expressed population signals (EPS) (Wigley et al.: 1984) がある。この値は、標準年輪曲線に含まれる試料の共通成分の信号の強さを定量的に示す値であり、この値が0.85を超えることが一つの目安となっている。

このような手順で伐採年代の明らかな現生材で標準年輪曲線を構築し、さらに木質遺物から得られた標準年輪曲線との間をクロスデーティングで連結することによって長期の標準年輪曲線を構築することになる。

2.4 年輪解析用ソフトウェア

2.3で示したようなクロスデーティングなどの解析を実施するに当たっては、現在ではコンピューターのソフトウェアを使用するのが一般的である。ヨーロッパ流のクロスデーティング、標準年輪曲線構築を実践する際に便利なソフトウェアとしては、PAST5 (SCIEM社)、TSAP (RINNTECH社)などがある。また、北アメリカ南西部流の統計ソフト(クロスデーティングの品質管理プログラム)としては、COFECHA (Holmes: 1983)が著名である。各種標準化と標準年輪構築、EPS算出にはARSTAN (Cook: 1985)が用いられている。またこれ以外にもDendro Program Libraryとして各種ソフトウェアが公開されている。最近では統計ソフトRの様々な年輪解析用パッケージが公開されている(例えばBunn: 2008, 2010)。

2.5 辺材年輪数と伐採年代の推定

年輪年代測定の対象となる木材試料は、木材のどの部分が残存しているかによって大きく3つのタイプに分けられる(図5)。1つめは、樹皮直下の年輪が残存している試料で、この場合は、樹木の伐採年、場合によってはその季節まで特定が可能である。2つめは、樹皮直下の年輪はなくても辺材が残存している試料でこの場合は、伐採年の推定がある程度可能である。辺材とは、樹皮直下の幹の外側に当たる部分で、樹木の生存時には柔細胞が生存している部分である。3つめは、辺材が残存せず心材だけが残っている場合で、この場合は *a terminus post quem*, すなわち樹木がこれ以降に伐採されたとい

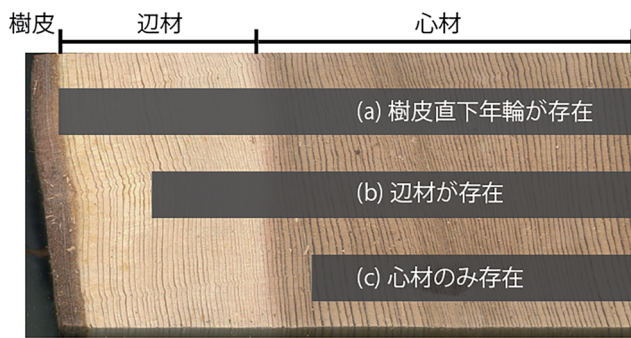


図5 年輪試料の3つのタイプ。(a) 樹皮直下の年輪が存在している試料。(b) 辺材の一部が存在している試料。(c) 心材のみが存在している試料

Fig.5 Three possible conditions of tree-ring samples. (a) Tree ring is present immediately below the bark. (b) Part of the sapwood is present. (c) Only heartwood is present.

う年代あるいは、伐採された可能性のある最も早い年代情報のみが提供されることになる (Haneca et al.: 2009) (図5)。

上記2番目、3番目の試料において、より正確な伐採年代を推定するために、ヨーロッパではナラ類の辺材年輪数が詳細に調べられてきた (例えば Hughes et al.: 1981)。その結果、辺材年輪数には地理的な傾向があることが認められており、ヨーロッパ西部 (例えばイギリスでは 23.70-32.40 年) から東部 (例えばバルト3国では 12.76-18.20 年) にいくにつれて減少することが明らかになっている (Haneca et al.: 2009)。我が国においては、辺材年輪数についてはまだほとんど検討が進んでいない。光谷は、木曾、三重などの現生ヒノキ試料 112 点 (平均年輪数 250 年) の辺材年輪数を調べ、平均 50.3 年、標準偏差 16.7 という数値を報告している (奈良国立文化財研究所: 1990)。また詳細は不明であるが、木曾ヒノキの成熟材で、 56 ± 13 年という数字も報告されている (米延: 2004)。

3. 最近の研究の進展と話題

ここからは、最近 10 年ほどの年輪年代学研究的の進展について、特に読者にとって関心が高いであろうと考えられる日本の木質文化財年代測定に関連する研究を中心に取り上げる。

3.1 我が国における現生材標準年輪構築と応用研究の展開

最近の新しい動きとして目を引くのは、奈良国立文化財研究所 (1990) 以来、長らく新たに取り組みられてこなかった長期標準年輪曲線構築が、日本各地、様々な樹種を対象として進められていることが挙げられる。

中部地方においては、現生木曾ヒノキにより、AD1716~2001 年の標準年輪曲線が構築され、さらにこの標準年輪曲線を用いて、飛騨高山における 2 月~4 月の平均気温が復元された (Yonenobu and Eckstein: 2006)。この古気候復元は、年輪気候学において厳格とされる統計的検定を経て得られた本州地域における初めての復元結果であり、我が国のような温暖湿潤な中緯度地域でも年輪幅による気候復元が可能であることを示した大きな成果である。またこの復元では、1780 年代、1810 年代、1830 年代の寒冷化が示唆されており、韓国での年輪気候復元結果や様々な文献記録とも一致していた。

東北地方においても、ヒノキ科樹木の長期標準年輪曲線構築を目指した取り組みが続いている。青森においてはヒノキアスナロ (ヒバ) を対象に下北半島で 1753~2000 年、津軽半島で 1715~2000 年の年輪幅標準年輪曲線が構築された (Ohyama et al.: 2007)。さらにこれらの標準年輪曲線を用いて、津軽半島市浦に位置する旧営林署建物から採取した 10 点の梁材の年代測定が行われ、1 点が 1931 年晩夏~秋、もう 1 点が 1931 年冬~1932 年春にかけて伐採された材であることが明らかとなった。同営林署の記録では、この建物は 1932 年 11 月に建築されたことになっており、年輪年代の結果と整合的であった。また、これらの材が津軽半島で構築した標準年輪曲線とのみクロスデーティングが可能であったことから、材の産地が津軽半島である可能性が高いことが指摘されている。この結果は、青森県という比較的狭い範囲であっても産地推定が可能であることを示唆している点で重要であり、今後の我が国における産地推定の可能性を示すものである。

また、秋田スギを用いた標準年輪曲線構築も進展しており、秋田県藤里のスギを用いて、1784~2003 年の年輪幅標準年輪曲線が構築された (Ohyama et al.: 2013)。この論文においては、このスギの標準年輪曲線と、木曾ヒノキ (Yonenobu and Eckstein: 2006)、朝鮮半島のイチイ、チョウセンゴヨウ (Choi et al.: 1994) を用いて、東北

アジアの広域的な気温の復元を試みており、北緯 35~40 度、東経 125~140 度の 3 ~ 5 月のグリッド気温 (CRUTEM4) (Jones et al.: 2012) を 1784~1990 年の年代で復元している (図 6)。この結果から、この地域の気温が、時期による相違はあるものの、変動に共通点が見られることや、寒冷期が文献記録と一致することが示唆されている。

また滋賀県の田上山においては、ヒノキの年輪幅および炭素安定同位体比の 300 年間の標準年輪曲線が構築されている (Sho et al.: 2009)。この研究においては、年輪

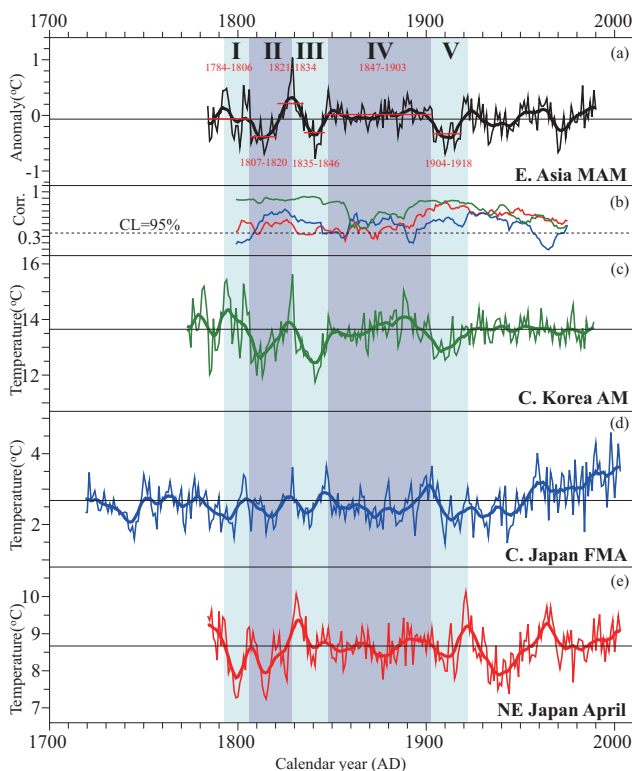


図 6 (a) 東北アジアにおける 3 - 5 月気温の広域的気候復元。赤線は Intervention 解析によるレジームシフトを示す (Rodionov : 2004)。 (b) (a) の復元結果と各地域の気温復元結果 (c-e) との 31 年移動相関係数。 (c) 朝鮮半島中部における 4 - 5 月の平均気温復元結果 (Choi et al.: 1994)。 (d) 日本中部における 2 - 3 月の気温復元結果 (Yonenobu and Eckstein : 2006)。 (e) 日本東北部における 4 月の気温復元結果 (Ohyama et al.: 2013) (Ohyama et al. (2013) を一部改変)

Fig.6 (a) Reconstructed spring (March-May) temperature for northeast Asia (R-NAST). The horizontal red lines show regime shifts detected using intervention analysis (Rodionov : 2004). (b) 31-yr running correlation between R-NAST and the regional reconstructions (c-e) Regional reconstruction : (c) April-May temperatures in central Korea (Choi et al.: 1994), (d) February-April temperatures in central Japan (Yonenobu and Eckstein : 2006), (e) April temperatures in northeastern Japan (Ohyama et al.: 2013) (modified from Ohyama et al. (2013))

幅が初春の気温と初夏の降水量、炭素安定同位体比が初夏の降水日数に影響を受けて変動していることが示され、両者から 220 年間の大津の 5 月の降水日数が復元されている。

また、年輪年代学の適用を新たな樹種へ広げる動きも見られる。ブナは、北海道から九州まで広域的に分布する冷温帯を代表する落葉広葉樹であるが、材としての有用性がやや低いことから、これまで年輪年代学的適用の可能性が示唆されるにとどまっていた (国立奈良文化財研究所 1990)。しかし、星野ら (2006) は、東北地方~中部地方において 10 カ所のブナ現生材を対象に標準年輪曲線構築に取り組み、17 世紀から 20 世紀をカバーする標準年輪曲線を各地で構築した。さらに、これらの年輪変動が地域ごとに類似することを見だし、4 つのグループにまとめられることを示した (星野ら : 2006)。また、青森県 2 カ所の標準年輪曲線を用いて、ブナの年輪成長に影響を与える気候要素が前年夏の気温であることを明らかにするとともに、ブナ果実の豊作年に年輪幅成長が急激に落ち込むことを示した (Hoshino et al.: 2008b)。

3.2 標準年輪曲線の延長と年代測定

3.1 においては、現生材を対象とした標準年輪曲線構築と、それらの応用例について述べたが、ここでは、木質遺物を対象とした標準年輪曲線延長や、年代測定について最近の進展をまとめる。

我が国においては、近年、埋没林から得られる埋没木が長期標準年輪曲線の構築に重要な役割を果たしている。埋没林とは、過去、生育していた森林が火砕流、土石流、洪水など何らかの自然現象でそのまま地面下に埋没し、再度出現あるいは発掘されたものであり、かつての森林のタイムカプセルともいえる貴重な試料である。ヨーロッパ北西部の広大な泥炭地では、泥炭採掘に伴ってナラ類の埋没木が大量に発掘され、標準年輪曲線構築に重要な役割を果たしてきたが (Baillie : 1982)、我が国では、低湿地の調査で時々発見されることはあっても年輪年代学的に活用される事例はほとんどなかった。しかしながら、箱崎らは、山口県宇生賀盆地の埋没林から得られたスギ材を用いて、31 試料から 4 つの標準年輪曲線

を構築した (Hakozaki et al.: 2012)。これらは、放射性炭素年代測定により、およそ 5300-3700 cal BP (2σ) の 1600 年間に相当することが示唆されており、現時点で最も古いヒノキ科の標準年輪曲線である。また、東北においては、青森県猿が森埋没林から得られたヒノキアスナロ材 44 点を用いて、929~1589 \pm 13 cal AD の 661 年間にわたる標準年輪曲線が構築されている (箱崎: 2012)。

奈良県西大寺の食堂院跡推定地の調査において、井戸の遺構材 16 点を対象に、年輪年代測定が実施された (Obayashi and Okochi: 2013)。樹種はいずれもヒノキで、樹皮直下の年輪を持つ 3 点 (767 年)、辺材を持つ 5 点 (717~751 年) を含む、15 点の年輪年代が確定した。これらの編年から、井戸材が、767 年の冬~777 年初春にかけて伐採されたと結論づけられている。767 年には、「続日本紀」に造西大寺司が任命されたことが記されており、この直後に材が用意されたと推定されている。また、この論文においては、共伴する遺物から、井戸が食堂院の井戸であること、約 30 年の使用を経て、8 世紀の終わりには廃絶されたことが推定されており、年輪年代

を含めた総合的調査の好例である。

民具を対象とした年輪年代測定の例もある。北陸には「ばんば」と呼ばれるシャベル状の木製の雪かき道具が使用されていた。星野らは、3.1 で述べた中部地方のブナの標準年輪曲線を用いて、飛騨地方のばんば 44 点の年代測定を実施した (Hoshino et al.: 2008a)。その結果、樹皮直下の年輪が存在する試料 6 点を含む 26 点の年代を確定させ、これらが明治~昭和時代のものであることを明らかにした (図 7)。この測定には、1 点でマイクロフォーカス X 線 CT による撮像も行われている。また、論文中には特に言及されていないが、これらが中部地方のブナの標準年輪曲線とのマイクロステータリングが可能であったことから、地元産の材を用いた可能性があると解釈される。

建造物においても、法隆寺西院伽藍の調査結果が公表されており、西院伽藍再建に関わる重要な木材の年輪年代情報を提供するとともに、金堂→五重塔→中門という建立順序を確定し得たと結論づけている (光谷・大河内: 2010)。

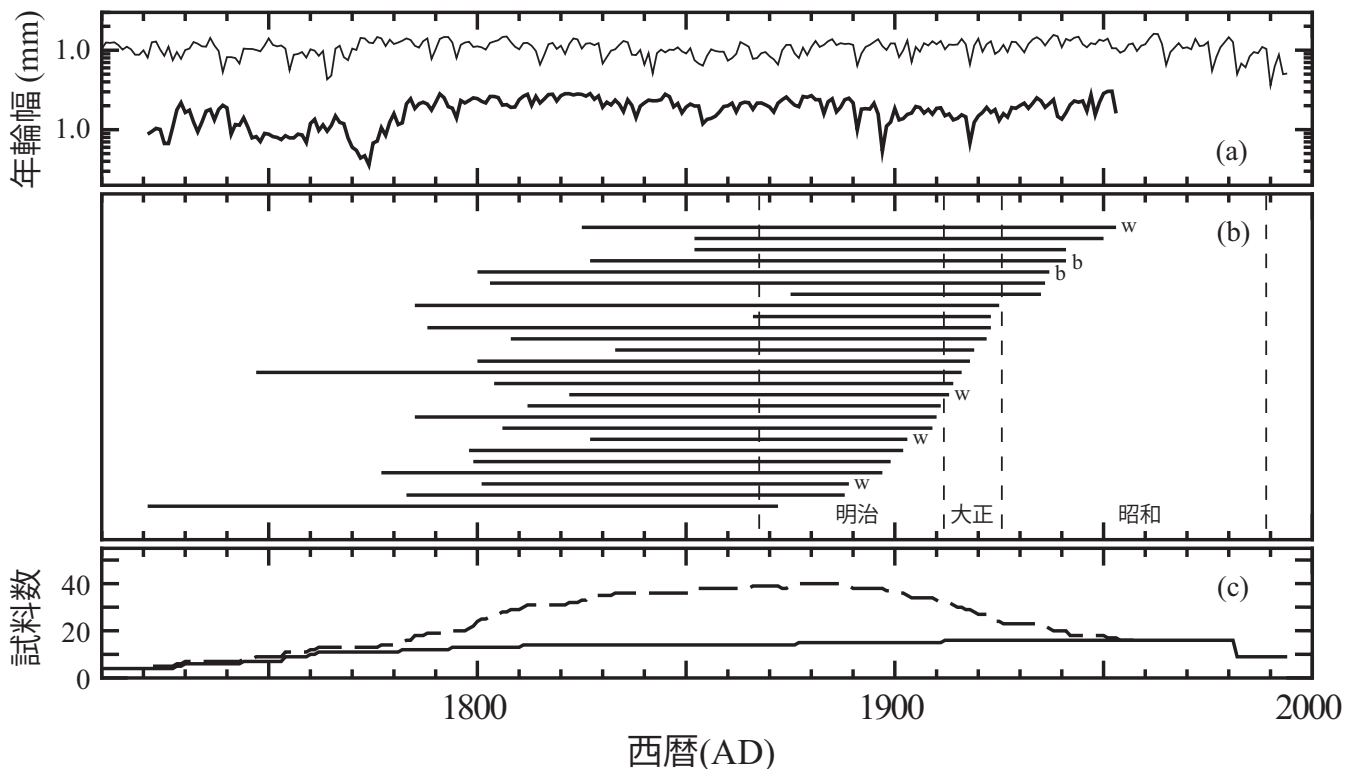


図 7 ブナ製「ばんば」(雪かき道具)の年代測定結果 (Hoshino et al.: 2008a を一部改変)

(a) 「ばんば」の標準年輪曲線 (太線) と中部日本の標準年輪曲線 (細線) (b) 横棒は個々のばんばの年代範囲 (b は樹皮存在, w は樹皮直下の年輪が存在) (c) 中部日本の標準年輪曲線の試料数 (実線), 破線はこれに「ばんば」の試料を加えた試料数を示す。

Fig.7 (a) Raw chronology for folk crafts (bold line) crossdated by the reference chronology in central Japan (thin line). (b) horizontal bar plots of the individual tree-ring series of the folk crafts (b = bark, w = waney edge). (c) sample depth for the livid line.

西日本においては、建造物古材、現生材からツガの標準年輪曲線構築が進展しており、近畿地方、四国地方の材で1359~1979年の標準年輪曲線構築が発表されている（例えば藤井：2014）。

上記以外の新しい展開としては、明治期のバイオリン材の木材産地推定の研究がある。これらの研究では、1.2で述べた北海道のアカエゾマツの標準年輪曲線を用いて、明治以降に生産された鈴木政吉工場製のバイオリンの年代測定と木材産地推定を行っている（大河内・安江：2015）。まだ学会発表の段階であるが、今後の展開が期待される。

3.3 東アジアにおける研究状況

歴史的に日本と密接な関係にある韓国、中国の年輪年代研究についても触れておきたい。韓国では、忠北大学の Won-Kyu Park らによって標準年輪曲線の構築と年代測定が進められてきた。主な対象樹種はアカマツ (*Pinus densifolia*) で、韓国南部の智里山 (Mt. Chiri) や東部の雪岳山 (Mt. Sorak) など6カ所で標準年輪曲線が構築され、もっとも長いものはAD1250年まで達している (Park and Yadav : 1998, Park et al. : 2001, Park et al. : 2007)。これらの標準年輪曲線を用いて、李氏朝鮮の宮殿である景福宮の神武門の年代測定が行われ、供試した10点の材の標準年輪曲線が、西側の雪岳 (Mt. Sorak) の標準年輪曲線とのみクロスデーティング可能であることを示し、年代を決定した。この事実と、文献記録から、木材の産地が西側の雪岳 (Mt. Sorak) であると推定している。また、年代測定結果では、1868年夏~1871年春伐採が示され、朝鮮王朝の王 (高宗) の日記に記された1865年景福宮完成という記述とは齟齬があったが、その後、日記に1872年4月に神武門再建を示唆する記述が見つかり、年輪年代の結果と総合して、1870年秋から1872年春の間に神武門再建が始まったと結論づけられた (Park et al. : 2007)。また、これ以外にも、木棺の年代測定 (Park and Lee : 2009, Lee et al. : 2013) や¹⁴C ウィグルマッチングと組み合わせた木彫像の年代測定 (Kim et al. : 2013) も行われ、研究が進展しつつある。しかしながら、2014年、研究を主導してきた Won-kyu Park が亡くなったため、今後の展開がやや不透明な状況にある。

中国においては、近年、年輪気候学、年輪生態学研究のために、現生材を用いた膨大な数の標準年輪曲線が構築されている。そのうち一部は、木質遺物も含めた長期標準年輪曲線として構築されており (例えば Zhang et al.: 2003, Yang et al.: 2014)、最も長いものは、3585年長である (Shao et al.: 2009)。また、墓に使用された木材の年代測定のような考古遺物の年代測定も行われている (例えば Li et al.: 2015)。興味深い例としては、シルクロードの一つ、青海 (Qingha) ルートの年代に関する研究がある。このルートは、従来5~6世紀に使用され、7~8世紀には主要な交易ルートではなくなっていたと考えられていたが、ルート沿いの14の墓に使用されていた木材の年代測定結果と、出土した遺物の調査から、このルートが7世紀前半から8世紀後半も重要なルートの一つであったことが推定されている (Wang and Zhao : 2013)。以上のような研究例はあるものの、これまで構築されたほとんどの標準年輪曲線は、チベット高原周辺や、中国北部、中国南西部に集中しており、長年の森林資源収奪のためか、いわゆる中原や長江流域で、暦年代の明らかな現生材から連続的につながった標準年輪曲線を構築するのは極めて難しい状況にあるのではないかと推定される。

東アジアにおける今後の研究の可能性を示す例として、14世紀の中国 (元) の貿易船で、陶磁器などを積んで日本に向かう途中に韓国沖で難破した新安船を対象とした研究が挙げられる (Kim et al.: 2013)。この研究では、積み荷が納められていた木箱が研究対象となっており、まず光学顕微鏡を用いた樹種同定から材が、コウヨウザン (*Cunninghamia* spp.) もしくはスギ (*Cryptomeria japonica*) と同定され、分布から産地が日本、中国、台湾に絞られている。さらに、25点中21点の材が西日本のスギの標準年輪曲線により、年代決定がされたことから、西日本産のスギ材を用いて作製された木箱であると結論づけられている。この「西日本」という限定については、年代測定に使用された標準年輪曲線構築の経緯から、疑問が呈されているものの (藤井：2016)、日本産という結論は妥当であり、当時の国際交流について木材という新たな物的証拠の面から光を当てたことは高く評価される。

3.4 ヨーロッパでの研究の進展

年輪年代学の研究先進地であるヨーロッパでは、引き続き、年代測定や木材産地推定の研究が活発に行われている (Haneca et al.: 2009, Bridge: 2012)。一つの方向性としては、年輪考古学に利用される長期標準年輪曲線ネットワークが、これまで研究の中心地であったヨーロッパ北部だけでなく、バルト海沿岸部 (例えば Eckstein and Wrobel: 2007) やヨーロッパ東南部 (例えば Čufar et al. 2008, Prokop et al.: 2016), イベリア半島 (Domínguez-Delmás et al.: 2015) へ広がりを見せ、それに伴って、これらの地域でも年代測定などの研究報告が増加している (例えば Čufar et al. 2014, Rodríguez-Trobajo and Domínguez-Delmás: 2015)。また、このネットワークの面的な拡大と充実がさらに研究を進展させており、ヨーロッパ広域での木材交易 (Crone and Mills: 2011) や過去の欧州社会への気候変動の影響を論じた研究例もある (Büntgen et al.: 2011)。木材産地推定研究が対象とする時代も、以前は中世、ハンザ同盟の木材移送が関係する研究が多かったが、ローマ時代に関するものなど (Domínguez-Delmás et al.: 2014, van Lanen et al.: 2016), 新しい展開を見せている。

3.5 ^{14}C スパイク (Miyake event)

年輪年代測定と放射性炭素年代測定が密接な関係にあることは既述の通りであるが、近年、年輪年代学の進展に大きな影響を与えるような放射性炭素の研究成果が得られている。三宅らは、屋久スギや長野県のヒノキで 774~775 年と 993~994 年の年輪に急激な ^{14}C 濃度の上昇があることを発見した (Miyake et al.: 2012, Miyake et al.: 2013, Miyake et al.: 2014)。この原因は、太陽フレアによる大規模な太陽陽子放出現象による宇宙線の急増が原因と考えられており (Miyake et al.: 2013), 日本だけではなく、北アメリカやヨーロッパ、ニュージーランドなどでも同じ年に同様の濃度上昇が認められたことから、地球規模の現象であることが明らかになっている (Dee and Pope: 2016)。

この事実は、暦年代の確定していないフローティングの標準年輪曲線において、これらの年代の年輪を ^{14}C 測定で特定することにより、ピンポイントで暦年代をあた

えうるタイポイントができたことを意味している。つまり、暦年代の明らかな現生木から標準年輪曲線を延長するという作業が必須ではなくなる可能性がでてきたことになる。また、現時点で知られているイベントは上記 2 回であるが、過去にも発生していたと推定されており、今後、暦年代の確定した世界各地の長期標準年輪曲線を試料として同様のイベントが過去にさかのぼって発見されれば、将来的には、連続的な曲線構築が難航している地点、例えばエジプトなどでも、数千年前の標準年輪曲線に直接、暦年代を与えられるようになる可能性がある (Dee and Pope 2016)。3.2 で記述したように、現在からの連続的な標準年輪曲線構築が難しい中国の中原などにおいても、今後、遺跡出土材からなる標準年輪曲線に暦年代を与えることが可能になるかもしれない。

この ^{14}C スパイクを利用した研究で、我が国における編年に重要な意味を持つ成果は、B-Tm 火山灰をもたらしした中国と北朝鮮の国境にある白頭山噴火年代の特定である (Oppenheimer et al.: 2017)。この研究では、噴火で埋没した樹皮付きのカラマツ材年輪の放射性炭素を年輪単位で測定して、774~775 年の年輪を特定し、そこから、噴火年を 946 年後半と特定した。また、単木の年輪計数だけでは、欠損輪の可能性を考慮すると証拠として不十分であるため、アイスコアや年輪による北半球気候復元、古文書などの検討も含めて総合的に結論を導いている。

3.6 安定同位体比年輪年代学

安定同位体比を用いた年輪年代法については、別稿があるが、本稿でも簡単に触れておきたい。年輪 (木材) に含まれる炭素、酸素、水素の安定同位体比は、相対湿度や気温、土壌水のような環境を反映して変動するため、1970 年代ぐらいから古環境、古気候復元のため研究の対象となってきた (McCarroll and Loader: 2004)。近年、分析装置の改良などにより、以前に比べると容易かつ迅速にデータが得られるようになり、炭素、酸素の安定同位体比を用いるクロスデーティングに関する論文 (Roden et al.: 2008) や年単位の 2000 年間の長期気候復元 (Treydte et al.: 2006), 中緯度地域における異樹種間での一様な気候応答性能 (例えば Hartl-Meier et al.: 2015), 木材産地推定の可能性 (Kagawa and Leavitt:

2010) が示され、そのポテンシャルの高さが期待されている。我が国においても、北海道のミズナラを対象に酸素安定同位体比を用いて夏期の相対湿度を復元した研究があり (Tsuji et al.: 2008)、最近では、迅速なセルロース抽出法の開発 (Kagawa et al.: 2015) も相まって、ヒノキを用いた長期古気候復元に向けた研究が進展している (Kurita et al.: 2016)。

これまでに得られた成果から推察すると、日本では、酸素安定同位体比による年代決定能力が年輪幅より高い可能性があるが、この方法では、年輪幅と同じく、各年輪の酸素安定同位体比を連続的に何十年以上に渡って測定する必要があるため、木質文化財を測定対象とする際には、かなり大きな破壊分析となり、貴重な文化財ほど測定対象になり得ないというジレンマを抱えている。また、依然として、年輪幅測定と比べると格段に時間と労力、測定費用を要する。そのため、文化財試料を対象とする場合、現実的には、年輪幅で構築した木質遺物の標準年輪曲線に暦年代を与えるため、一部の試料を測定したり、異樹種間の標準年輪曲線のクロスデーティングを試みたりする際に使用するなど、対象遺物数を絞った「切り札」としての使用が主になるのではないかと考えられる。

4. 今後の課題と展望

3.1 で述べたように、我が国でも、各地で長期標準年輪曲線構築が進められているが、現状では、現在から連続的につながっている長期標準年輪曲線は、中部～近畿地方のヒノキ (奈良国立文化財研究所 1990) だけである。そのため、日本各地、各年代で木質遺物の年代測定や産地推定が可能、という状況にはほど遠く、早急に日本の各地域、特に中部～近畿地方以外で標準年輪曲線を充実させていかなければならない状況にある。

各研究者の努力にもかかわらず、曲線構築がなかなか進展しない最大の原因は、藤井 (2016) が「年輪パターンの崖」と呼ぶ現生材試料と木質文化財試料との間に存在する、17 世紀後半～18 世紀前半にかけてのギャップにある。3.1 で述べた多くの現生材の成果で示されているように、現在、我が国で天然性とされる森林から現生材試料を収集し、標準年輪曲線を構築しても、年輪数は

150～300 年程度であり、長くて 18 世紀初頭までの標準年輪曲線しか構築できない。一方、江戸時代の木質遺物で標準年輪曲線を構築しても、年輪幅でのクロスデーティングに耐えうる年輪数の試料を選別すると、17 世紀中葉以前が限界で、この時期よりも新しい年代の曲線は得られない。この時期以降は、樹種がヒノキ、サワラからマツやモミ主体に変わり、年輪幅が広く、年輪数の少ない木材が大半を占める傾向が認められる。この傾向は、江戸の遺跡においても定量的に報告されているが (鈴木・能城: 2006, 鈴木・能城: 2008)、経験的には全国各地の遺跡でも同様の傾向があり、藤井 (2016) でも同様の印象が報告されている。そのため、現生材と木質遺物の曲線の間には、17 世紀後半から 18 世紀初頭にかけて大きなギャップがある上、標準年輪曲線間のクロスデーティングには、重なり合う年代が最低 100 年程度必要ということ を考慮すると、連結が非常に厳しい状況にあるのは明らかである。奈良国立文化財研究所 (1990) では、天明期に修理された東大寺二月堂参籠所の古材と樹齢の極めて高い少数の現生材試料を用いることで、このギャップを乗り越えているが、記述を見る限り、当時は、該当する年代の試料数が少なかったことが推察される (なお、現在の状況は不明である)。

このようなギャップが生じた原因は、織豊～江戸初期の建築ラッシュによってヒノキ科樹種を中心とした天然林過剰伐採が全国的に起こり、優良な木材資源が枯渇したことにありとみて差し支えないだろう。文献資料からは、17 世紀後半には、木曾、秋田など主要産地で資源が枯渇して出材量が減少し、様々な森林資源保護政策や植林が進められたことが明らかになっている (所: 1980, タットマン・コンラッド: 1998, 徳川林政史研究所: 2012)。このことは、上述の通り、江戸の遺跡の用材変遷とも一致する (鈴木・能城: 2006, 鈴木・能城: 2008)。

こうしたギャップを乗り越えるには、近代和風建築の調査 (藤井 2016)、江戸後半～明治にかけての遺跡や、この時代に修復された建造物の調査を通して、地道に試料の蓄積を図っていくことに加え、3.4 で取り上げた¹⁴Cスパイクなど新しい研究成果を応用して、17 世紀以前の木質遺物からなる標準年輪曲線に暦年を与え、そこを起点に各地で長期標準年輪曲線を構築していく必要がある

と思われる。

我が国における標準年輪曲線構築の到達点がどのあたりになるか、判断が難しいが、分布範囲の広さや複数の埋没林の存在を考えると、樹種として、最も可能性の高いのはスギであり、Hakozaki et al. (2012) で示された年代が一つの到達点になると考えられる。

奈良国立文化財研究所 (1990) での現生材での検討や、星野ら (2010)、Ohyama et al. (2007) で示唆されているように、我が国においても、年輪変動の地域間変動類似を利用した木材産地推定は十分に可能であると見込まれる。ただ、木材産地推定には、ヨーロッパで示されているように、産地の確かな標準年輪曲線による広域的なネットワークが必要であり、この点に関して、我が国ではまだ整備が不十分な状況にある。

そのため、現状でまず着手すべきは、各地で現生材を用いた標準年輪曲線を構築し、既存の曲線も含めて年輪変動の地域間類似を検討して、年輪変動の地域的なグループ分けを行っていくことであろう。幸い、江戸時代は、北前船などで木材の移送が活発に行われ、かつ文献資料も豊富に残っており (例えば、黒瀧:2005)、遺物の木材産地推定と文献資料の比較を行う上でも格好の時代である。まずはこの時代に焦点を当てていくことで、木材交易や森林伐採に関わる新しい知見が得られるのではないかと期待される。

次のステップとなる、現生材から過去への延長は、藤井 (2016) の指摘にもあるように、「産地の確かな材を集める」という難題があるため容易ではないことは明らかである。それでも、現地性の高い埋没木の活用、現地性の高い古材・遺跡出土材の年輪試料としての選定、文献資料や樹木の分布範囲から材の産地が特定されるような試料の活用、現生材による地域間類似との比較、など様々な情報を駆使して、地道に地域ごとの標準年輪曲線構築

を行っていくしかないと思われる。

木材産地推定については、年輪幅だけではなく、安定同位体比など、パラメータを導入することにより、より産地を局限したり、確度を高めたりできる可能性も示されている (Kagawa et al.: 2010)。こうしたパラメータを導入していくことも重要であろう。

我が国におけるもう一つの大きな課題は、年輪年代測定が適用できる樹種の拡大である。気候への応答感度は主として遺伝的な要素に左右されるので、例えば、他地域で活用されているナラ類、マツ属 (アカマツなど)、モミ属、トガサワラ、そしてすでに研究が始まっているツガなどは、今後、研究の対象とすべき樹種である。このうちの一部はすでにその適性が奈良国立文化財研究所 (1990) で評価されている。従来、これらの樹種では老齢木の現生材を多数得ることが困難で、現生材起点の標準年輪曲線構築が難しく、研究に取りかかりにくい状況であった。しかし、 ^{14}C スパイクや異樹種間でのクロスデーティングの可能性が示唆される安定同位体比を用いることで、1カ所の遺跡や建造物で構築されたようなフローティングの標準年輪曲線にも暦年代が与えられる可能性がでてきたことは、大きな可能性を感じさせる。また、従来、年輪幅変動の同調性が低く、研究対象となりにくかった樹種、例えば縄文時代のクリや建築材のケヤキなども、安定同位体比の活用により、年代測定試料として活用できる可能性があり、今後の展開が期待される。

以上のような研究を発展させていくには、ヨーロッパの研究史が示しているように、日本の各研究者の協力関係が不可欠である。年代測定依頼など様々な方法で互いの情報を共有することが、情報量の増大につながり、それが、年代測定の信頼性向上、標準年輪曲線ネットワークの拡充、木材産地推定といった我が国の年輪年代学のさらなる飛躍に繋がっていくことを期待したい。

引用文献

- 大河内隆之・安江 恒 2015 「年輪年代学の視点から見た鈴木政吉工場製ヴァイオリンの年代測定と産地推定」日本文 化財科学会大会研究発表要旨集 32
- 黒瀧秀久 2005 『弘前藩における山林制度と木材流通構造』北方新社 弘前
- 鈴木伸哉・能城修一 2006 「東京都新宿区崇源寺・正見寺跡から出土した江戸時代の木棺の形態と樹種」植生史研究 14 pp.61-72

- 鈴木伸哉・能城修一 2008 「東京都中央区日本橋一丁目遺跡出土木材からみた江戸の町屋における土木・建築用材の変遷とその背景」 植生史研究 16 pp.57-72
- タットマン・コンラッド 1998 『日本人はどのように森をつくってきたのか』 築地書館 東京 p211
- 寺田和雄・太田貞明・鈴木三男・能城修一・辻誠一郎 1994 「十和田火山東麓における八戸テフラ直下の埋没林への年輪年代学の適用」 第四紀研究 33 pp.153-164
- 徳川林政史研究所（編）2012 『森林の江戸学』 東京堂出版 東京 p294
- 所 三男 1980 『近世林業史の研究』 吉川弘文館 東京 p858
- 奈良国立文化財研究所（編）1990 『年輪に歴史を読む—日本における古年輪学の成立—』 同朋社出版 京都 p195
- 野田真人・東村武信・東村隆子 1983 「年輪年代法」 考古学と自然科学 16 pp.17-42
- 箱崎真隆 2012 「完新世後期針葉樹埋没林の年輪年代学的研究」 東北大学大学院生命科学研究科 博士論文
- 藤井裕之 2014 「日本産ツガ属の年輪年代測定（その7）—四国地方の文化財建造物における調査—」 日本文化財科学大会研究発表要旨集 31
- 藤井裕之 2016 「日韓交渉史研究と年輪年代学—日本における課題—」 奈良文化財研究所学報 日韓文化財論集 III pp.301-318
- 星野安治・米延仁志・安江 恒・野堀嘉裕・光谷拓実 2006 「東日本におけるブナ年輪幅変動パターンの広域ネットワーク構築」 考古学と自然科学 54 pp.69-79
- 光谷拓実 1987a 「わが国における年輪年代学の確立とその応用-1- 現生木のヒノキによる年輪変動パターンの特性検討」 木材学会誌 33 pp.165-174
- 光谷拓実 1987b 「わが国における年輪年代学の確立とその応用-2-産地を異にするヒノキ相互間およびヒノキと異樹種間との年輪変動パターンの相関分析」 木材学会誌 33 pp.175-181
- 光谷拓実 1988 「ヒノキを用いたわが国における年輪年代学の確立と応用」 京都大学農学研究科博士論文
- 光谷拓実 1995 「古墳の年代を年輪から計る」 考古学と自然科学 31-32 pp.11-20
- 光谷拓実・大河内隆之 2010 「年輪年代法による法隆寺西院伽藍の総合的年代調査」 佛教藝術 308 pp.39-77
- 米延仁志 2004 「年輪考古学」 安田喜憲（編）『環境考古学ハンドブック』 朝倉書店 pp.254-260
- 米延仁志・大山幹成・星野安治・光谷拓実・Dieter Eckstein 2010 “年輪年代学におけるクロスデーティングのガイドライン—日本産材を用いた方法論の分析とモンテカルロシミュレーションによる統計的クロスデーティングの再検討—” 考古学と自然科学 60 pp.1-12
- Baillie, M.G.L. 1982 “Tree-ring dating and archaeology” The University of Chicago Press, Chicago
- Baillie, M.G.L. 1995 “A Slice through time: dendrochronology and precise dating” B.T.Batsford Ltd., London p180
- Bauch, J., and Eckstein, D. 1981 “Woodbiological investigations on panels of Rembrandt paintings” Wood Sci. Technol. 15 pp.251-263 doi:10.1007/BF00350943.
- Bill, J., Daly, A., Johnsen, Ø., and Dalen, K.S. 2012 “DendroCT - dendrochronology without damage” Dendrochronologia 30 pp.223-230 doi:10.1016/j.dendro.2011.11.002.
- Bridge, M., 2012 “Locating the origins of wood resources: a review of dendroprovenancing” Journal of Archaeological Science 39 pp.2828-2834 doi:10.1016/j.jas.2012.04.028.
- Bunn, A.G. 2008 “A dendrochronology program library in R (dplR)” Dendrochronologia 26 pp.115-124 doi:

10.1016/j.dendro.2008.01.002.

- Bunn, A.G. 2010 "Statistical and visual crossdating in R using the dplR library" *Dendrochronologia* 28 pp.251-258 doi:10.1016/j.dendro.2009.12.001.
- Büntgen, U., Tegel, W., Nicolussi, K., McCormick, M., Frank, D., Trouet, V., Kaplan, J.O., Herzig, F., Heussner, K.-U., Wanner, H., Luterbacher, J., and Esper, J., 2011 "2500 years of European climate variability and human susceptibility" *Science* 331 pp.578-582 doi:10.1126/science.1197175.
- Choi, J.-N., Park W.-K., and Yu K.B. 1994 "Central Korea temperature changes reconstructed from tree rings of subalpine conifers: A.D. 1635 to 1990" *Dendrochronologia* 12 pp.33-43
- Cook, E.R. 1985 "A time series analysis approach to tree-ring standardization" (Ph. D. Thesis) University of Arizona, Arizona
- Cook, E.R., and Kairiukstis, L.A. 1990 "Methods of dendrochronology: applications in the environmental sciences" Kluwer Academic Publishers, Dordrecht
- Crone, A. and Mills, C.M. 2012 "Timber in Scottish buildings, 1450-1800: a dendrochronological perspective" *Proc. Soc. Antq. Scot.* 142 pp.329-369.
- Čufar, K. 2007 "Dendrochronology and past human activity-a review of advances since 2000" *Tree-Ring Research* 63 pp.47-60
- Čufar, K., Bizjak, M., Kitek Kuzman, M., Merela, M., Grabner, M., and Brus, R., 2014 "Castle Pišce, Slovenia - building history and wood economy revealed by dendrochronology, dendroprovenancing and historical sources" *Dendrochronologia* 32 pp.357-363 doi:10.1016/j.dendro.2014.08.002.
- Čufar, K., Luis, M.D., Zupančič, M., and Eckstein, D. 2008 A 548-year tree-ring chronology of oak (*Quercus* spp.) for southeast Slovenia and its significance as a dating tool and climate archive *Tree-Ring Research* 64 pp. 3-15.
- Davi, N., D'Arrigo, R., Jacoby, G., Buckley, B., and Kobayashi, O. 2002 "Warm-season annual to decadal temperature variability for Hokkaido, Japan, inferred from maximum latewood density and ring width data" *Climatic Change* 52 pp.201-217 doi:10.1023/A:1013085624162.
- Dee, M.W., and Pope, B. J. S. 2016 "Anchoring historical sequences using a new source of astrochronological tie-points" *Proc. R. Soc. A* 472: 20160263 doi:10.1098/rspa.2016.0263.
- Domínguez-Delmás, M., Alejano-Monge, R., Van Daalen, S., Rodríguez-Trobajo, E., García-González, I., Susperregi, J., Wazny, T., and Jansma, E., 2015 "Tree-rings, forest history and cultural heritage: current state and future prospects of dendroarchaeology in the Iberian Peninsula" *Journal of Archaeological Science* 57 pp.180-196 doi:10.1016/j.jas.2015.02.011.
- Domínguez-Delmás, M., Driessen, M., García-González, I., van Helmond, N., Visser, R., and Jansma, E., 2014 "Long-distance oak supply in mid-2nd century AD revealed: the case of a Roman harbour (Voorburg-Arentsburg) in the Netherlands" *Journal of Archaeological Science* 41 pp.642-654, doi: 10.1016/j.jas.2013.09.009.
- Eckstein, D. 1978 "Dendrochronological dating of the Medieval settlement of HAITHABU(Hedeby)" *BAR International Series* 51 pp.267-74
- Eckstein, D. 2007 "Human Time in Tree Rings" *Dendrochronologia* 24 pp.53-60 doi:10.1016/j.dendro.2006.10.001.

- Eckstein D., Wazny T., Bauch J., and Klein P. 1986 "New evidence for the dendrochronological dating of Netherlandish paintings" *Nature* 320 pp.465-466 doi:10.1038/320465a0.
- Eckstein, D. and Wrobel, S. 2007 "Dendrochronological proof of origin of historic timber - retrospect and perspectives" *Proceedings of the DENDROSYMPOSIUM 2006* pp.8-20
- Ferguson, C.W., Lawn, B., and Michael, H.N. 1985 "Prospects for the extension of the bristlecone pine chronology: radiocarbon Analysis of H-84-1" *Meteoritics* 20 pp.415-421
- English Heritage 1998 "Dendrochronology: guidelines on producing and interpreting dendrochronological dates" <https://historicengland.org.uk/images-books/publications/dendrochronology-guidelines/>
- Fraiture, P. 2002 "Contribution of scientific methods to the understanding of the work of the 16th century painter, Henri Bles" *Dendrochronologia* 20 pp.285-299 doi:10.1078/1125-7865-00022
- Friedrich, M., Remmele, S., Kromer, B., Hofmann, J., Spurk, M., Kauser, K.F., Orcel, C., and Kuppers, M. 2004 "The 12,460-year Hohenheim oak and pine tree-ring chronology from Central Europe; a unique annual record for radiocarbon calibration and paleoenvironment reconstructions" *Radiocarbon* 46 pp.1111-1122
- Fritts, H. C. 1976 "Tree-rings and climate" Academic Press, London p567
- Hakozaki, M., Kimura, K., Tsuji, S. and Suzuki, M. 2012 "Tree-ring study of a late Holocene forest buried in the Ubuka basin, southwestern Japan" *IAWA Journal* 33 pp.287-99 doi:10.1163/22941932-90000094.
- Haneca K., Čufar K. and Beeckman H. 2009 "Oaks, tree-rings and wooden cultural heritage: a review of the main characteristics and applications of oak dendrochronology in Europe" *Journal of Archaeological Science* 36 pp.1-11 doi:10.1016/j.jas.2008.07.005.
- Haneca, K., De Boodt, R., Herremans, V., De Pauw, H., Van Acker, J., van de Velde, C., and Beeckman, H. 2005a "Late Gothic altarpieces as sources of information on medieval wood use: a dendrochronological and art historical survey" *IAWA Journal* 26 pp.273-98
- Haneca, K., Wazny, T., Van Acker, J., and Beeckman, H. 2005b "Provenancing Baltic timber from art historical objects: success and limitations" *Journal of Archaeological Science* 32 pp.261-271 doi: 10.1016/j.jas.2004.09.005.
- Hartl-Meier, C., Zang, C., Büntgen, U., Esper, J., Rothe, A., Göttelein, A., Dirnböck, T., and Treydte, K. 2015 "Uniform climate sensitivity in tree-ring stable isotopes across species and sites in a mid-latitude temperate forest" *Tree Physiology* 35 pp.4-15 doi:10.1093/treephys/tpu096.
- Hillam, J, Groves, C.M., Brown, D.M., Baillie, M.G.L., Coles, J.M. and Coles, B.J. 1990 "Dendrochronology of the English neolithic" *Antiquity* 64 pp.210-20
- Holmes, R.L. 1983 "Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement" *Tree-Ring Bulletin* 43 pp.51-67
- Hoshino, Y., Okochi, T., and Mitsutani, T. 2008a "Dendrochronological dating of vernacular folk crafts in northern central Japan" *Tree-ring Research* 64 pp.109-114
- Hoshino, Y., Yonenobu, H., Yasue, K., Nobori, Y., and Mitsutani, M. 2008b "On the radial-growth variations of Japanese beech (*Fagus crenata*) on the northernmost part of Honshu Island, Japan" *J Wood Sci.* 54 pp.183-188 doi:DOI 10.1007/s10086-007-0935-3.
- Hughes, M.K., Milsom, S.J., and Leggett, P.A. 1981 "Sapwood estimates in the interpretation of tree-ring

- dates" *Journal of Archaeological Science* 8 pp.381-390 doi:10.1016/0305-4403(81)90037-6.
- Jones, P.D., Lister, D.H., Osborn, T.J., Harpham, C., Salmon, M., and Morice, C.P. 2012 "Hemispheric and large-scale land-surface air temperature variations: an extensive revision and an update to 2010" *J. Geophys. Res.* 117, D05127. doi:10.1029/2011JD017139.
- Kaennel, M. and Schweingruber, F.H. 1995 "Multilingual Glossary of Dendrochronology" Paul Haupt Publisher, Berne
- Kagawa, A. and Leavitt, S.W. 2010 "Stable carbon isotopes of tree rings as a tool to pinpoint the geographic origin of timber" *Journal of Wood Science* 56 pp.175-83 doi:10.1007/s10086-009-1085-6.
- 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 doi:10.1016/j.chemgeo.2014.11.019.
- Kim, Y., Son, B., Imamura, M., and Park, W.K. 2013 "Tree-ring dating and radiocarbon wiggle matching of buddhist arhat statues at Heungkuksa temple in Namyangju, South Korea" *Dendrochronologia* pp.286-289 doi:10.1016/j.dendro.2012.11.001.
- Kim, Y., Yoon, Y.H., Mitsutani, T., Moon, W.S., and Park, W.K. 2013 "Species identification and tree-ring dating of wood boxes excavated from the Shinan shipwreck, Korea" *Dendrochronologia* 31 p.266-272 doi:10.1016/j.dendro.2013.01.002.
- Kojo Y. 1987 "A dendrochronological study of *Cryptomeria japonica* in Japan" *Tree-Ring Bulletin* 47 pp.1-21
- Kurita, N., Nakatsuka, T., Ohnishi, K., Mitsutani, T., and Kumagai, T. 2016. "Analysis of the interdecadal variability of summer precipitation in central Japan using a reconstructed 106 year long oxygen isotope record from tree ring cellulose" *J. Geophys. Res. Atmos.* 121, 2016JD025463. doi: 10.1002/2016JD025463.
- Lara, W., Bravo, F., and Sierra, C.A. 2015 "measurRing: an R package to measure tree-ring widths from scanned images" *Dendrochronologia* 34 pp.43-50 doi:10.1016/j.dendro.2015.04.002.
- Lee, K.H., Son, B.H., and Park W. K. 2013 "Tree-ring dating of coffin woods excavated from Shinnae-Dong in Seoul, Korea" *Journal of the Korean Wood Science and Technology* 41 pp.406-14 doi: 10.5658/WOOD.2013.41.5.406.
- Li, M., Shao, X., Yin, Z.-Y., and Xu, X., 2015 "Tree-ring dating of the Reshui-1 Tomb in Dulan county, Qinghai Province, north-west China" *PLOS ONE* 10, e0133438. doi:10.1371/journal.pone.0133438
- McCarroll, D. and Loader, N.J. 2004 "Stable isotopes in tree rings" *Quaternary Science Reviews* 23 pp. 771-801 doi:10.1016/j.quascirev.2003.06.017.
- Miles, D. 1997 "The interpretation, presentation and use of tree-ring dates." *Vernacular Architecture* 28 pp.40-56 doi:10.1179/030554797786050563.
- Miyake, F., Masuda, K., Hakozaki, M., Nakamura, T., Tokanai, F., Kato, K., Kimura, K., and Mitsutani, K. 2014 "Verification of the cosmic ray event in AD 993-994 by using a Japanese hinoki tree" *Radiocarbon* 56 pp.1189-94
- Miyake, F., Masuda, K., and Nakamura, T. 2013 "Another rapid event in the carbon-14 content of tree rings" *Nature Communications* 4, 1748 doi:10.1038/ncomms2783.
- Miyake, F., Nagaya, K., Masuda, K., and Nakamura, T. 2012 "A signature of cosmic-ray increase in AD

- 774-775 from tree rings in Japan" *Nature* 486 pp.240-42 doi:10.1038/nature11123.
- Nash, S. E. 2002 "Archaeological tree-ring dating at the Millennium" *Journal of Archaeological Research* 10 pp.243-75
- Obayashi, J. and Okochi T. 2013 "Tree-ring, plant seeds, pottery and wooden cooking tools dated a wooden well at Saidaiji temple in Japan" *Dendrochronologia* 31 pp.52-57 doi:10.1016/j.dendro.2012.07.002.
- Ohyama, M., Ohwada, M. and Suzuki, M. 2007 "Chronology development of hiba arbor-vitae (*Thujaopsis dolabrata* var. *hondae*) and dating of timbers from an old building" *J Wood Sci* 53 pp. 367-73 doi:DOI 10.1007/s10086-006-0868-2.
- Ohyama, M., Yonenobu, H., Choi, J.-N., Park, W.-K., Hanzawa, M., and Suzuki, M. 2013 "Reconstruction of northeast Asia spring temperature 1784-1990" *Clim. Past* 9 pp.261-266 doi:10.5194/cp-9-261-2013.
- Okochi, T. 2016 "A nondestructive dendrochronological study on Japanese wooden shinto art sculptures using micro-focus X-ray Computed Tomography (CT): reviewing two methods for scanning objects of different sizes" *Dendrochronologia* 38 pp.1-10 doi:10.1016/j.dendro.2016.01.004.
- Okochi, T., Hoshino, Y., Fujii, H., and Mitsutani, T. 2007 "Nondestructive tree-ring measurements for Japanese oak and Japanese beech using micro-focus X-ray computed tomography" *Dendrochronologia* 24 pp.155-164 doi:10.1016/j.dendro.2006.10.010.
- Oppenheimer, C., Wacker, L., Xu, J., Galván, J.D., Stoffel, M., Guillet, S., Corona, C., Sigl, M., Di Cosmo, N., Hajdas, I., Pan, B., Breuker, R., Schneider, L., Esper, J., Fei, J., Hammond, J.O.S., and Büntgen, U. 2017 "Multi-proxy dating the "Millennium Eruption" of Changbaishan to late 946 CE" *Quaternary Science Reviews* 158 pp.164-171 doi:10.1016/j.quascirev.2016.12.024.
- Park, W. K., Kim Y.J., and Lee J.H. 2001 "Development of tree-ring chronologies of *Pinus densiflora* from Mt. Sorak and dating the year of construction of Kyunghoe-Ru Pavilion in Seoul" *Journal of the Korean Physical Society* 39 pp.790-95
- Park, W.K. and Lee, K.H. 2009 "Tree-ring dating of coffin woods from Naeheung-Dong, in Gunsan, South Korea" *IAWA Journal* 30 pp.459-68
- Park, W.K. and Yadav, R.R. 1998 "A Dendroclimatic Analysis of *Pinus Densiflora* from Mt. Chiri in Southern Korea" *Annals of Forest Science* 55 pp.451-59
- Park, W. K., Kim, Y.J., Seo, J. W., Lee, J.H., and Wazny, T. 2007 "Tree-ring dating of Sinmu-Mun, the north gate of Kyungbok Palace in Seoul" *Tree-Ring Research* 63 pp.105-109
- Pilcher, J.R., Baillie, M.G.L., Schmidt, B., and Becker, B. 1984 "A 7,272-year tree-ring chronology for western Europe" *Nature* 312 pp.150-152 doi:10.1038/312150a0.
- Prokop, O., Kolář, T., Büntgen, U., Kyncl, J., Kyncl, T., Bošela, M., Choma, M., Barta, P., and Rybníček, M. 2016 "On the palaeoclimatic potential of a millennium-long oak ring width chronology from Slovakia" *Dendrochronologia* 40 pp.93-101 doi:10.1016/j.dendro.2016.08.001.
- Reimer, P.J., Bard, E., Bayliss, A., Beck, J.W., Blackwell, P.G., Ramsey, C.B., Buck, C.E., Cheng, H., Edwards, R.L., Friedrich, M., Grootes, P.M., Guilderson, T.P., Hafliadason, H., Hajdas, I., Hatté, C., Heaton, T.J., Hoffmann, D.L., Hogg, A.G., Hughen, K.A., Kaiser, K.F., Kromer, B., Manning, S.W., Niu, M., Reimer, R.W., Richards, D.A., Scott, E.M., Southon, J.R., Staff, R.A., Turney, C.S.M., and Plicht, J. van der 2013 "IntCal13 and Marine13 radiocarbon age calibration curves 0-50,000 years cal BP"

- Radiocarbon 55 pp.1869-1887
- Roden, J. 2008 "Cross-dating of tree ring $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ time series" *Chemical Geology* 252 pp.72-79 doi: 10.1016/j.chemgeo.2008.01.007.
- Rodionov, S.N. 2004 "A sequential algorithm for testing climate regime shifts" *Geophysical Research Letters* 31. L09204 doi:10.1029/2004GL019448
- Rodríguez-Trobajo, E. and Domínguez-Delmás, M. 2015 "Swedish oak, planks and panels: dendroarchaeological investigations on the 16th century Evangelistas altarpiece at Seville Cathedral (Spain)" *Journal of Archaeological Science* 54 pp.148-161 doi:10.1016/j.jas.2014.11.039.
- Schweingruber, F.H. 1988 "Tree Rings: basics and applications of dendrochronology" Kluwer Academic Publishers, Dordrecht p276
- Shao, X., Wang, S., Zhu, H., Yan Xu, Liang, E., Yin, Z. Y., Xu, X., and Xiao, Y. 2009 "A 3585-year ring-width dating chronology of Qilian juniper from the northeastern Qinghai-Tibetan plateau" *IAWA Journal* 30 pp.379-94 doi:10.1163/22941932-90000226.
- Sho, K., Takahashi, A.H., Miyai, H., Ikebuchi, S., and Nakamura, T. 2009 "Tree-ring width and stable carbon isotope composition of Japanese cypress in the Lake Biwa area, central Japan, and their hydrologic and climatic implications" *IAWA Journal* 30 pp.395-406
- Speer, J.H. 2010 "Fundamentals of tree-ring research" The University of Arizona Press, Tucson p368
- Stokes, M.A. and Smiley, T.L. 1996 "An introduction to tree-ring dating" University of Arizona Press, Tucson
- Topham J. 1998 "A dendrochronological investigation of British stringed instruments of the violin family" *Journal of Archaeological Science* 25 pp.1149-57
- Towner, R. H. 2002 "Archeological dendrochronology in the southwestern United States" *Evolutionary Anthropology* 11 pp.68-84 doi:10.1002/evan.10009.
- Treydte, K. S., Schleser, G. H., Helle, G., Frank, D.C., Winiger, M., Haug, G.H., and Esper, J. 2006 "The twentieth century was the wettest period in northern Pakistan over the past millennium" *Nature* 440 pp.1179-82 doi:10.1038/nature04743.
- Tsuji, H., Nakatsuka, T., Yamazaki, K., and Takagi, K. 2008 "Summer relative humidity in northern Japan inferred from $\delta^{18}\text{O}$ values of the tree ring in (1776-2002 A.D.): influence of the paleoclimate indices of atmospheric circulation" *Journal of Geophysical Research* 113 D18103, doi:10.1029/2007JD009080.
- van Lanen, R.J., Jansma, E., van Doesburg, J., and Groenewoudt, B.J. 2016 "Roman and early-medieval long-distance transport routes in north-western Europe: modelling frequent-travel zones using a dendroarchaeological approach" *Journal of Archaeological Science* 73 pp.120-137 doi: 10.1016/j.jas.2016.07.010.
- Wang, S., and Zhao, X. 2013 "Re-evaluating the Silk Road's Qinghai Route using dendrochronology" *Dendrochronologia* 31 pp.34-40 doi:10.1016/j.dendro.2012.05.001.
- Wigley, T.M.L., Briffa, K.R., and Jones, P.D. 1984 "On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology" *J. Climate Appl. Meteor.* 23 pp.201-213
- Yang, B., Qin, C., Wang, J., He, M., Melvin, T.M., Osborn, T.J., and Briffa, K.R. 2014 "A 3,500-year tree-ring record of annual precipitation on the northeastern Tibetan Plateau" *Proceedings of the National*

Academy of Sciences 111 pp.2903-2908 doi:10.1073/pnas.1319238111.

Yasue, K., Funada, R., Fukazawa, K., and Ohtani, J. 1997 "Tree-ring width and maximum density of *Picea glehnii* as indicators of climatic changes in northern Hokkaido, Japan" *Can. J. For. Res.* 27 pp. 1962-1970 doi:10.1139/x97-154.

Yasue, K., Funada, R., Kobayashi, O., and Ohtani, J. 2000 "The effects of tracheid dimensions on variations in maximum density of *Picea glehnii* and relationships to climatic factors" *Trees* 14 pp.223-229

Yonenobu, H., and Eckstein, E. 2006 "Reconstruction of early spring temperature for central Japan from the tree-ring widths of hinoki cypress and its verification by other proxy records" *Geophysical Research Letters* 33(10) L10701. doi:10.1029/2006GL026170.

Zhang, Q.B., Cheng, G., Yao, T., Kang, X., and Huang, J. 2003 "A 2,326-year tree-ring record of climate variability on the northeastern Qinghai-Tibetan Plateau" *Geophysical Research Letters* 30(14) 1739 doi:10.1029/2003GL017425.

(2017年3月29日受付, 2017年10月16日受理)

Recent Advances in Dendrochronological Studies in Japan

Motonari OHYAMA

Botanical Gardens, Tohoku University, 12-2 Kawauchi, Aoba-ku, Sendai, Miyagi
980-0862, Japan

This review summarizes the history, materials, methods, and recent advances in dendrochronology, with a focus on topics related to dendroarchaeology in Japan. In the 1980s, a method for tree-ring dating developed in Europe was introduced to Japan, and a two-millennium-long chronology was successfully developed for central Honshu Island. Based on this chronology, a number of remarkable dating analyses have been performed for wooden archaeological remains. Despite many recent efforts, long-term, continuous chronologies have not been established for other regions of Japan. This can be attributed to the gaps between living tree chronologies and those derived from wooden remains from the late 1600s well into the 1700s. Although several promising results have been obtained, a shortage of reference chronology networks has somewhat limited Japanese studies, driving the development of dendroprovenancing for preliminary studies. Recent research has begun to adopt alternative approaches. Additionally, advances in dendroclimatology have shown that spring temperatures can be reconstructed in Japan. The recent development of non-destructive instruments, like digital cameras and micro-focus X-ray CT, which provide fine-scale digital images, has enabled us to access tree-ring data from various objects, such as wooden sculptures, that have not been collected using traditional methods.

To establish a well-developed network of reference chronologies in Japan, future efforts should concentrate on the collection of tree-ring data, with close cooperation among laboratories. Continued innovation in data collection will be of critical importance.