

炭素 14- ウィグルマツチ法による 年代研究の可能性

坂本 稔* 中尾 七重**

1. 炭素 14 年代法

炭素 14 年代法は、年代を数値で表すことのできる、自然科学的な年代測定法の一つである。天然に存在する炭素の同位体（原子核中の中性子の数が異なるため、同じ化学的な性質の元素でありながら異なる重さを持つ原子）のうち、8 個の中性子を持つ炭素 14 (^{14}C) は放射性同位体と呼ばれ、放射線を出しながら他の元素に変わっていく。放射性同位体が壊変する速度は様々な条件下でも一定で、炭素 14 の場合はおよそ 5,700 年で元あった量の半分に減少する。

カリウム 40 やウラン・トリウムなど、放射性同位体を用いた様々な年代測定法が提案されているが、炭素 14 を用いた年代測定にはこれらの方法に比べ多くの特徴がある。まず、炭素が自然界に普遍的に存在する元素で、なかでも有機物からなる生物には必ず含まれることが挙げられる。すなわちさまざまな種類の資料が測定の対象となり、有機質資料を対象とすることの多い歴史学や考古学、人類学などでの応用が進んでいる。

自然界における炭素 14 の消長についての理解も進んでいる。炭素 14 は大気圏上層において、宇宙から飛来する強力な放射線（一次宇宙線）が大気成分の原子核を破碎し、放出された中性子（二次宇宙線）が炭素 14 の原子核に捕獲されて生成する。生成速度と壊変速度が平衡状態にあるため、濃度（炭素 14 の同位体比： $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ ）は極めて低い（ $\sim 1.2 \times 10^{-12}$ ）ものの、一定量の炭素 14 が大気中に存

* 国立歴史民俗博物館・総合研究大学院大学

** 山形大学

在する。

生成した炭素 14 は酸化され、二酸化炭素として大気圏に拡散する。植物が光合成で二酸化炭素を固定し、次いで動物が植物や他者を摂食し、炭素 14 が生物圏に取り込まれる。動物は呼吸や排泄などの代謝活動で炭素を交換しているが、その速度が炭素 14 の半減期と比べ十分に短ければ、体内の炭素 14 濃度は周辺とほぼ等しい。ところが、生命活動が途絶すると炭素が交換されなくなり、炭素 14 だけがその濃度を減じていく。すなわち、炭素 14 年代法が示す年代は「資料が外界との炭素交換を行わなくなった時」である。

2. 年代の較正

放射性同位体は 10 半減期の経過時間で濃度が 1000 分の 1 程度に減少する。炭素 14 の場合は 5 万年ほどで検出の限界を迎えるが、偶さかこのスケールは更新世の末から完新世の年代を測定するのに適した長さである。ただし炭素 14 年代法による年代測定の場合、一般的に、半減期に基づいた経過時間の算出は行わない。

放射性同位体による年代測定の場合、経過時間は壊変で失われた量に相当する。ところが炭素 14 年代法の場合、測定できるのは壊変せずに残っている量である。初期値となる大気中の炭素 14 濃度は過去、太陽活動などに影響された一次宇宙線の強度変動に伴って生成速度が変動していたため一定ではなかった。そのため残存する炭素 14 を測定しても壊変量は分からない。そこで未知試料の炭素 14 濃度を、年代の判明した資料に残る炭素 14 の濃度と比較して年代を導く「較正 (calibration)」という方法を取り、得られた年代を「較正年代 (calibrated age)」と呼ぶ。

年代の判明した資料として、年輪年代法で年代を判定した樹木年輪や、ウラン・トリウム法などで年代を測定したサンゴなどが用いられる。樹木は光合成で大気中の二酸化炭素を固定し、樹皮直下の層で形成した細胞を積み重ねていく。樹木年輪は季節による細胞の形成速度の違いが縞模様となって現れたものである。年輪の細胞壁は炭素を交換しないので、その炭素 14 濃度は形成された年の大気中

の値から時間の経過とともに減少していく。年輪の形成年は、年輪年代法により 1 年単位の分解能で決定できる。すなわち年輪には 1 年単位の大気中炭素 14 濃度の初期値が記録されていて、ある試料の炭素交換が年輪の形成年に途絶えていれば、炭素 14 濃度はその年輪と同じである。

放射性同位体の壊変速度は変わらないので、同時に炭素交換が途絶えた資料同士の炭素 14 濃度は、時間の経過に関わらず常に等しい。すなわち較正の考えに基づけば、炭素 14 の半減期自体が相殺できる。W. F. Libby らが炭素 14 年代法を実証した論文¹では $5,720 \pm 47$ 年という半減期が示されているが、その後、Libby らは種々の値の加重平均により 5,568 年という値を示した²。この値は「Libby の半減期」とも呼ばれ、炭素 14 濃度を経過時間に読み替えた「炭素 14 年代 (radiocarbon age)」を計算するのに用いられる³。炭素 14 濃度の比較はこの炭素 14 年代に基づいて行われているが、仮により確からしいとされる炭素 14 の半減期 ($5,730 \pm 30$ 年⁴) を用いて計算された値同士を比較しても、較正年代は変わらない。

3. 較正曲線

過去の大気中炭素 14 濃度が一定ではなく、年代測定に較正が必要であることは、炭素 14 年代法が実用化された直後の 1950 年代には既に認識されていた。日本でも木越邦彦が屋久スギの年輪を用い、炭素 14 の濃度を暦年代に修正するための「補正值」を 1967 年に提案している⁵。

1985 年の国際会議⁶で、それまで研究機関が各々蓄積してきた、2500BC から

¹ Arnold, J. R. and Libby, W. F., Age determinations by radiocarbon content: Checks with samples of known age, *Science*, **110**, 678–680 (1949)

² Arnold, J. R. and Libby, W. F., Radiocarbon dates, *Science*, **113**, 111–120 (1951)

³ Stuiver, M. and Polach, H. A., Discussion: Reporting of ¹⁴C data, *Radiocarbon*, **19**, 355–363 (1977)

⁴ Godwin, H., Half-life of radiocarbon, *Nature*, **195**, 984 (1962)

⁵ 木越邦彦、炭素-14 による年代測定の誤差とその補正、*第四紀研究*, **6**, 151–157 (1967)

⁶ Stuiver, M. and Kra, R. S. eds., International Radiocarbon Conference, 12th Proceedings, *Radiocarbon*, **28(2B)**, 226p (1986)

AD1950 にかけての樹木年輪の炭素 14 濃度 (炭素 14 年代) を統合したデータセットが提案される⁷。これは国際的な較正曲線 (internationally accepted calibration curve) と呼ばれ、測定機関は自らのデータセットを用いることなく炭素 14 年代を暦年代に修正できるようになった。その後較正曲線は 1993 年⁸、1998 年⁹と改訂され、1998 年には初めて「INTCAL」という名称が登場する。

較正曲線は樹木年輪などの炭素 14 年代を統計的に平滑化したものであるが、過去の大気中炭素 14 濃度が変動していたことから、さまざまな周期の変動を描

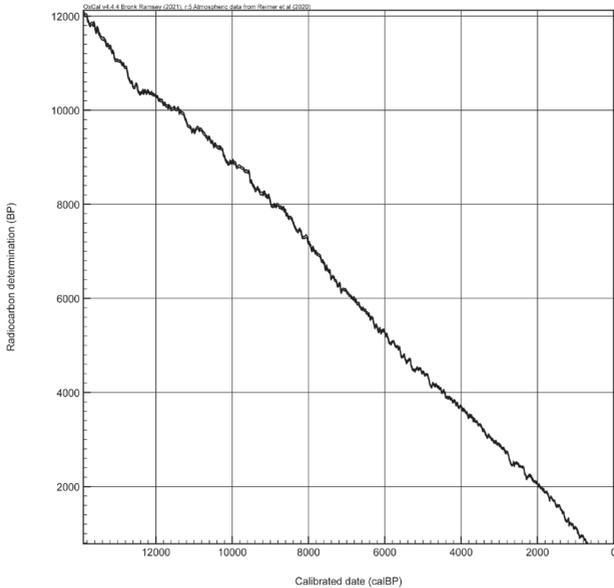


図 1 現行の較正曲線 IntCal20 のうち、主に樹木年輪で構成された範囲 (~ 13,900 年前) を示す (IntCal20 自体は 55,000 年前まで到達)。横軸の暦年代と縦軸の炭素 14 年代は直線関係になく緩やかに蛇行している。また、較正曲線には細かな凹凸も認められる。

⁷ Stuiver, M. and Becker, B., High-precision decadal calibration of the radiocarbon time scale, AD 1950–2500 BC, *Radiocarbon*, 28(2B), 863–910 (1986)
⁸ Stuiver, M. and Becker, B., High-precision decadal calibration of the radiocarbon time scale, AD 1950–6000 BC, *Radiocarbon*, 35, 35–65 (1993)
⁹ Stuiver, M., Reimer, P. J., Bard, E., Beck, J. W., et al., INTCAL98 radiocarbon age calibration, 24,000–0 cal BP, *Radiocarbon*, 40, 1041–1083 (1998)

きつつ推移している（図 1）。特徴的なのは、周期的な太陽活動により宇宙線強度が変動し、炭素 14 濃度の生成速度が変動したことを反映した細かな凹凸（wiggle）である。その結果、異なる時期の資料が同じ炭素 14 年代を示すことが起こりうる。すなわち炭素 14 年代が同じでも、年代が同じとは限らないのである。

コンピュータの普及もあり、炭素 14 年代を較正曲線と比較して較正年代を計算するプログラムが提案されている^{10, 11, 12}。その多くは年代をある確率を持った範囲で表し、当該時期の較正曲線の形状によってその範囲が複数にわたることもある。しかしながら、資料の「年代」は本来一意である。較正年代の範囲はその年代が（ある確率で）含まれている可能性、すなわち資料の年代がその範囲に含まれていれば、測定で得られた炭素 14 年代を示すであろうことを意味する。残念ながら、炭素 14 年代の測定精度や較正曲線の一層の整備が進み誤差が極小に抑えられても、較正年代を一意的年代に絞り込むことは原理的に難しい。

4. 炭素 14- ウィグルマッチ法

この厄介な較正曲線の凹凸を逆手に取り、較正年代の絞り込みを可能にするのが「炭素 14- ウィグルマッチ法（¹⁴C-wiggle matching）」である。

樹木年輪のように 1 年に 1 層ずつ縞模様を刻む資料は、たとえ年代が付されていなくてもその数（番号）を数えることができる場合がある。複数の年の炭素 14 年代を測定し、その結果を較正曲線のウィグルと照合すれば、較正年代を特定の時期に絞り込むことができる。条件次第ではあるが、較正年代が数年から 10 数年といった範囲に改善されることもあり、考古資料のみならず、より高い分解能での議論が必要になる歴史資料の年代測定に対しても有効である。

較正曲線の形状を再現するためにも、炭素 14- ウィグルマッチ法は多くの年輪・

¹⁰ Stuiver, M. and Reimer, P. J., Extended ¹⁴C Data Base and Revised CALIB 3.0 ¹⁴C Age Calibration Program, *Radiocarbon*, 35(1), 215-230 (1993)

¹¹ Bronk Ramsey, C., Bayesian analysis of radiocarbon dates, *Radiocarbon*, 51, 337-360 (2009)

¹² 坂本稔、表計算ソフトによる炭素 14 年代較正プログラム RHC バージョン 4、*国立歴史民俗博物館研究報告*、176, 169-178 (2012)

年層数を持つ資料を対象に、密な炭素14年代測定が必要とされる。しかしながら、資料によっては十分な数の年層が確保できない場合もある。いわゆる「雑木」が用立てられた木杭や古民家の建築部材などは年輪数も少なく、年輪幅も広いことから、例えば10年おきに3点、といった試料採取に限られることが多い¹³。

大気中炭素14の濃度変動を反映し、較正曲線には不安定な形状で推移する時期が見られる。例えば、16世紀は一度下降した較正曲線が上昇に転じ、17世紀に入ると急激に下降する。江戸期に入ると較正曲線はさらに不安定となり、18世紀は上昇、19世紀は平坦、20世紀に入ると再び上昇する（図2）。このような

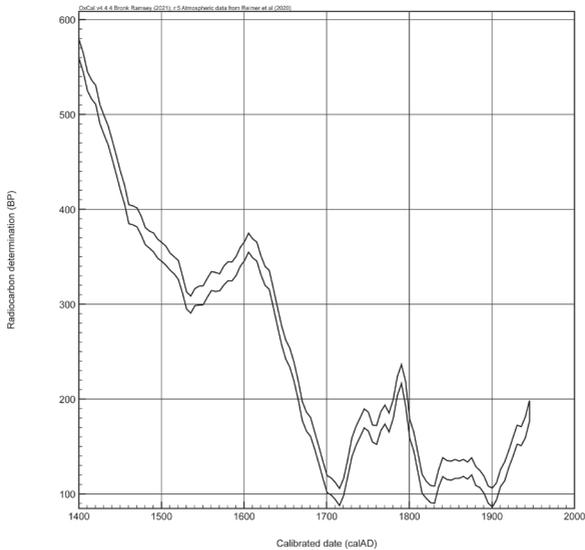


図2 較正曲線 IntCal20の拡大図。縦軸の炭素14年代は下方ほど新しい、すなわち炭素14濃度が高い。経年とともに炭素14年代が下降する時期は太陽活動が衰えて一次宇宙線の入射量が増え、大気中の炭素14濃度が増加に転じている。一方で平坦、あるいは上昇する時期は太陽活動が盛んで一次宇宙線の入射が阻まれ、大気中の炭素14濃度が減少していく。1950年以降の較正曲線が途絶えているのは、その前後で頻発した大気圏内核実験の影響で大気中の炭素14濃度が2倍近くに急増し、下方にスケールアウトしている。

¹³ 中尾七重・坂本稔、古建築部材¹⁴C短年輪3点ウィグルマッチ法について、日本文化財科学会第34回大会研究発表要旨集、46-47(2017)

時期は較正年代の絞り込みが難しいことは確かで、より多い年層の炭素 14 年代の測定が必要だろう。ただしそれはウィグルマッチ「だけ」で年代を判定しようとするからであり、実際の年代研究においては情報の総合化が求められる。例えば、発掘所見や文献などとの照合、建造物であれば当初材や後補材、前身建物の部材の再利用などがないか。何よりも複数資料の測定が必要であり、適切な資料の選択が行われていれば測定結果は自ずと収束する。

建造物の年代を判定する上で、実は年輪数の少ない、年輪幅の広い部材の方が有利なこともある。そのような資料には年輪の周縁をあらわす「辺材」が見られたり、表皮が残っていたりすることが多い。すなわち、部材の最外層は伐採年に近い年代を示す可能性が高い。また年輪数が少なく年輪幅の広い樹木を部材に用いる場合、目一杯の寸法で製材する必要がある。強度面で本来避けるべき樹芯を含むような部材は、恐らくその外周に多くの年輪を含まない。一方で年輪数の多い、年輪幅が狭く辺材の見られないような部材は、たとえ多くの年輪の炭素 14 年代を測定して精度の高い較正年代を得たとしても、最外層の年代は伐採年よりも遡ってしまい、建築年代の判定には結びつかない¹⁴。

5. 炭素 14- ウィグルマッチ法の応用：広島県三次市奥家住宅木小屋の年代研究

5-1. 2024 年に発見された指梁（さしばり）墨書

奥家住宅の宅地指定の願いと古建築年代調査研究のために、2014 年に奥家木小屋年代調査を行った。その結果、柱と指梁の最外層年代が 18 世紀末と判明し、日本建築学会で経緯と結果を発表した¹⁵。2016 年 7 月には、土蔵および、木小屋等の建物を含む宅地が重要文化財に追加指定された。それまでは重要文化財指定は主屋単体だったのである。

¹⁴ 中尾七重、古建築 ¹⁴C 年代調査における建築史学の役割、武蔵大学総合研究所紀要、24、127-141 (2015)

¹⁵ 中尾七重、重要文化財奥家住宅の付属屋（木小屋）年代調査、日本建築学会大会学術講演梗概集、9240 (2016)

2024年に奥家住宅主屋、土蔵、宅地内建物（木小屋、物置及び漬物小屋）の保存修理工事が始まった。木小屋を解体すると、指梁の柄に墨書「文化二年乙子（ママ）仲春 佐々木武十郎代 大工喜八作之」が発見された（図3）。奥家住宅の普請帳（重文附指定）に「天明八年 敷地村 本宅普請萬覚帳 岡垣内 申九月ヨリ 武十郎」¹⁶とあり、墨書の佐々木武十郎と同一人物と分かる。但し、文化二年は乙丑なので、誤って乙子としたと思われる。



図3 「い八一十」指梁の柄に書かれていた墨書 所有者（奥博光氏・まり子氏）提供

墨書に記された文化二年（1805）は、2014年の¹⁴C年代調査で得られた部材最外層形成年に製材時削除年輪数を加算した推定部材伐採年と整合すると判断できる。2014年の¹⁴C年代調査では、「い十」柱¹⁷が2σで1657-1681年（64.1%）・1791-1806年（29.6%）・ピーク値1669年または1798年、「ほ八～ほ十」指梁¹⁸が2σで1784-1804年（95.4%）・ピーク値1798年¹⁹であった。「い十」柱は、芯持²⁰

¹⁶（公財）文化財建造物保存技術協会編著、重要文化財奥家住宅保存修理工事報告書、70p.（2010）

¹⁷ ¹⁴C年代調査番付（2014）では「い一」、解体番付（2024）では「い十」

¹⁸ ¹⁴C年代調査番付（2014）では「ほ一～ほ五」、解体番付（2024）では「ほ八～ほ十」

¹⁹ 2014年の測定結果をIntCal20で再計算した

²⁰ 心材（赤身）を持つのか、芯を持つのかを区別するため、「芯持」と表記する。

柱側面の板目面で試料採取を行ったので、確認できた年輪数は少なく、その 15 年輪のうち 1-5 年輪試料と 11-15 年輪試料を採取測定した (表 1)。IntCal 較正曲線が蛇行している年代域であることと、奥家木小屋ウィグルマッチ試料の間隔が狭いことのため、解析では 2 つの年代域となり、絞り込むことはできない。この 2 つの年代域は、どちらの可能性が高いということはなく、真の年代はいずれでもあり得る (図 4)。「ほ八〜ほ十」指梁は IntCal20 とのマッチングが若干ズレて見えるが、日本産樹木年輪データベースに良く整合している (図 5)。

表 1 ^{14}C 年代調査の結果。炭素 14 年代測定は山形大学高感度加速器分析センターで実施。ウィグルマッチは IntCal20 に対し、較正プログラム RHC で計算。

部材	位置	樹種	測定番号	年輪位置 外から	^{14}C 年代 (yrBP $\pm 1\sigma$)	最外層の 較正年代 (確率)、 ピーク値
柱	い十 (旧いー)	クリ	YU-2533	1-5 年輪	206 \pm 19	1657-1681 (64.1%)、1669 1791-1806 (29.6%)、1798
			YU-2534	11-15 年輪	231 \pm 19	
指梁	ほ八〜ほ十 (旧ほ一〜ほ五)	アカマツ	YU-2535	1-5 年輪	232 \pm 19	1784-1804 (95.4%)、1798
			YU-2536	51-55 年輪	220 \pm 19	
			YU-2537	76-80 年輪	168 \pm 19	

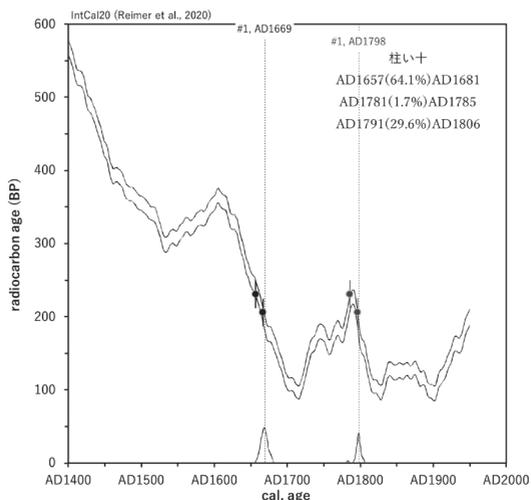


図 4 炭素 14- ウィグルマッチ法による「い十」柱の年代。2 点の測定にとどまるのでピーク値はどちらの可能性もありうる。

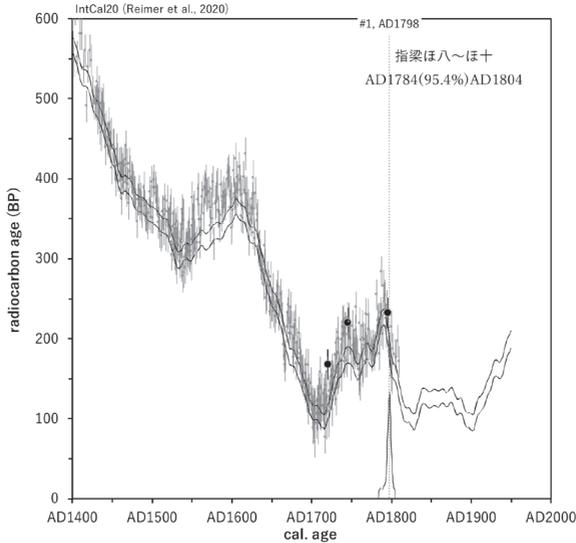


図 5 炭素 14- ウィグルマッチ法による「ほ八～ほ十」指梁の年代。背景は日本産樹木年輪の単年輪炭素 14 年代。

建築調査より「い十」柱・「ほ八～ほ十」指梁（図 6）が当初材であるから、いずれも伐採年は 18 世紀末～19 世紀初頭となり、墨書の年代と同時期である。このように、年代調査で得られた年代と、墨書に記された年代が同時期の場合、「建築年代が自然科学的調査で証明された」と短絡的に理解されてきたが²¹、建築年代を自然科学的調査で証明するために、以下に述べるように、木取や痕跡などの部材調査・改造などの建築調査・変遷背景などの歴史調査など、確認しなければならない手順がある。

²¹ 中尾七重、測定と調査－¹⁴C 年代測定と古建築年代調査について－、日本文化財科学会第 40 回記念大会要旨集、50-51 (2023) 「専門権威者の評価・価値づけ—中略—裏付けの年代測定調査は、その年代観に沿うように確認バイアスが働きやすい。」筆者（中尾）も、古建築年代調査で誤った結論を導いてしまったことがある。

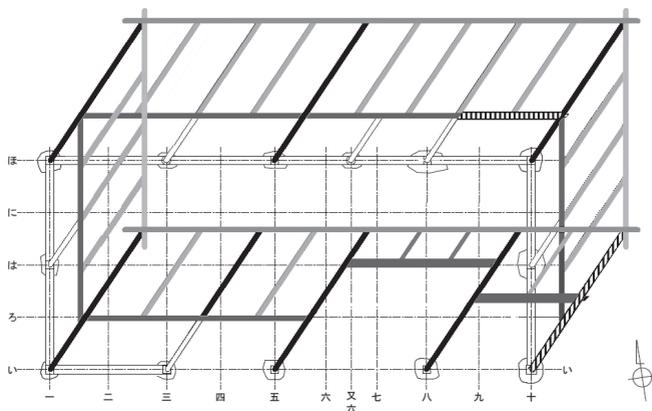


図 6 ^{14}C 年代調査部材（縞柄）位置図、ノタ付部材（黒色）、丸鋸製材部材（灰色）、管柱（白ぬき）、2階床梁や束柱など一部省略、解体番付図をもとに作成。

5-2. 最外層年代と伐採年と部材年代

^{14}C 年代調査・年輪幅年輪年代調査・酸素同位体比年輪年代調査などの自然科学的年代法で得られる年代は、それぞれの部材の最外年輪形成年である。この部材最外層年代に製材時削除分を推定加算し、部材の伐採年を求める。伐採から建築材として使用された期間を加算したものが部材年代である。流木が建築に用いられた場合は、伐採年と部材年代は大きく異なる²²。伐採後直ちに用いられた場合は、伐採年と部材年代は近接する。奥家住宅木小屋の場合、年輪幅が大きく年輪数の少ないクリ材とマツ材を最小限の製材で用いており、最外層年代と部材年代が近接していると考えられる。

5-3. 部材年代と建築年代

その建物が、建設時に伐採された用材だけで建てられた新築の場合は、部材年

²² 上野勝久・中尾七重、鏝阿寺本堂の部材の年代判定について、日本建築学会計画系論文集、77(678)、1939-1947(2012) 鏝阿寺本堂に用いられていたアスナロ材は最外年輪層が鏝阿寺成立以前の12世紀となった。当初建築時に用いられたと伝承される流木材の可能性はある。

代と建築年代は近接するとみなしてよい。江戸中期の河川下流域開発に伴う新田民家は新材新築が多い。利根川流域の民家や荒川流域の民家の場合、民家1棟を構成する部材の伐採年代は同時期であった。このような場合、伐採年と建築年は近似する²³。

一方、前身建物部材や古材を用いて建築された場合、1棟を構成する部材は複数の年代となる。このような事例では、「当初材と思われる表面劣化が進んだ部材」「削り直しされたかもしれない四方桁で品質の良い軸部構造部材」を年代測定すると、思いがけなく古い年代や由緒伝承に合致する年代が出ることがある。「古ければ古い方が価値は高い」とする風潮において由緒伝承年代と測定年代が合致すると、「最古」や「伝承」が「自然科学的調査で検証された」と言いたくになってしまう。しかし、古い年代の出た部材は、前身建物や別の建物の古材かもしれない。品質の良い木材を材料として再利用する場合、前身建物の由緒を伝えるために少数の前身古材を再利用する場合、急いで建築するため他の建物の軸部主要部分を再利用する場合など、古材の再利用には、その時々事情が反映する。古い年代・望ましい年代が出たからといって、短絡的に建築年代に結び付けることは、却って自然科学的年代調査を疑似科学に貶めることになる。

ここで必要なのは、建築調査を行い、測定した部材の素性を明らかにすることである。建築時伐採の新材だったことを実証するのはたいへん困難であるが、木構造や痕跡から部材の入れ替えや再利用の可能性を調べ、建物を構成する推定当初材最外層年代の多くが集中する年代域を確認し、古記録から移築や再建の歴史的背景と建築の経緯を調査する。このような学術的手続きを経ることにより、個々の部材の伐採年を求める自然科学的年代測定を、自然科学的年代調査法を用いた古建築年代調査とすることができるのである。

千葉県指定文化財旧藪家住宅は3度の移築を経ていることが判明した。¹⁴C年代調査の結果、1次所在地での前身建築部材年代、2次所在地での当初建築部材

²³ 中尾七重、荒川流域古民家と地域開発政策の関連について－和光市指定旧富岡家住宅・重要文化財旧高橋家住宅、日本建築学会大会学術講演梗概集、107-108(2020)

年代、3次所在地での復原建築部材年代の、3期の年代が得られた。2次の年代が旧藪家住宅の建築年代である²⁴。国宝犬山城天守は、美濃金山城天守の軸部材を用いて犬山で新築された可能性が高い。年輪幅年輪年代調査で得られた年代は、美濃金山城天守に由来する古材の年代で、金山城天守の建築年を示唆するものであって、犬山城天守の建築年代ではないと考えられる²⁵。

5-4. 木小屋の建築年代

奥家住宅木小屋の柱材はノタ付の曲がり材（通し柱・指梁）と、細い曲がり材（指梁下管柱）と、丸鋸製材された用材の3種類が観察される。ノタ付曲がり材は当初材、製材された用材は後補材と思われる。細い曲がり材は、2014年の調査時には当初か後補か不明であったが、今回の解体修理で、別の建物の転用材と推定されている。当初材のノタ付曲がり材の位置と高さから、改修工事で木小屋の規模や桁高は変更されなかったと考えられる。これより、ノタ付曲がり材の部材年代が建築年代に近似すると判断される。果たして、ノタ付曲がり材「い八一十」梁の墨書年代が、ノタ付曲がり材の「い十」柱と「ほ八-ほ十」梁の¹⁴C年代調査結果と符合し、墨書に記された文化二年（1805）の建築年代が¹⁴C年代調査で裏付けられた。但し、1805年時点の木小屋に二階部分があったかどうか、表面の形状が現状と同じかどうかは不明である。現状の木小屋の外観が当初とは異なっている可能性も否定できない。

奥家住宅主屋は天明八年（1788）、土蔵は文化九年（1812）²⁶、木小屋は文化二年（1805）の建築と判明した。主屋の建築経緯は普請帳に記されており²⁷、木小屋も屋敷地の整備を含めた一連の普請として行われたと考えられる。

²⁴ 中尾七重、千葉県指定文化財 旧藪家住宅の建築年代と変遷、2020年度日本建築学会関東支部研究報告集、2021.3

²⁵ 中尾七重・安井妙子、犬山城天守と金山越、日本建築学会東海支部研究報告集第62号、pp.601-529、2024.2

²⁶ 重要文化財奥家住宅リーフレット

²⁷ 奥麻巳子、家の建て替え（江戸時代の場合）、<https://note.com/edonotatekae/n/n7ab7c41c4e6e>、2024年12月12日閲覧

2014 年の科学研究費補助金²⁸による¹⁴C年代調査の建築調査および年代調査は不十分であった。現状（建ったまま）の調査のため、木小屋内部・二階・一～五通りの部材観察は不可能で、妻面は落とし込みあるいは小屋束による構造の詳細も確認できなかった。試料採取は外部露出面で行い、2部材のみ実施した。後補と思われる丸鋸製材された用材は年代調査していない。2024年からの保存修理工事での調査や新たな発見が期待される。

6. 較正曲線の現在

20世紀後葉に普及した加速器質量分析法による炭素14年代測定(AMS-¹⁴C法)は、測定資料の僅少化と測定の効率化をもたらした。樹木年輪の測定も精力的に行われるようになり、大気中炭素14濃度の詳細が次第に明らかになりつつある。

2004年には、欧米の研究者が中心となったワーキンググループ(IntCal Working Group)が較正曲線の改訂を行い²⁹、南半球陸域の較正曲線 SHCal³⁰と表層海域用の Marine³¹を提案した。海水には二酸化炭素が大量に溶存しているが、海洋大循環による時間の経過とともに炭素14が壊変・減少するため、同時期の大气よりも低い炭素14濃度を示す。北半球よりも海域が広い南半球はその影響を受けて、大気中の炭素14濃度が若干低くなっている。この事実は大気中の炭素14濃度が地域により異なっていることを示唆するものだが、既に1966年には木越が屋久スギ年輪の炭素14濃度が北米産樹木よりも低いことを指摘し³²、その原因を屋久島周辺の海域に求めている。

²⁸ 中尾七重・坂本稔ほか、放射性炭素年代法の古建築適用研究、日本学術振興会科学研究費助成事業 基盤研究(B)15H02949, 2015.4 - 2018.3

²⁹ Reimer, P. J., Baillie, M. G. L., Bard, E., Bayliss, A., et al., IntCal04 terrestrial radiocarbon age calibration, 0-26 cal kyr BP, *Radiocarbon*, **46**, 1029-1058 (2004)

³⁰ McCormac, F., Hogg, A., Blackwell, P., Buck, C., et al., SHcal04 Southern Hemisphere calibration, 0-11.0 cal kyr BP, *Radiocarbon*, **46**, 1087-1092 (2004)

³¹ Hughen, K., Baillie, M., Bard, E., Warren Beck, J., et al., Marine04 marine radiocarbon age calibration, 0-26 cal kyr BP, *Radiocarbon*, **46**, 1059-1086 (2004)

³² Kigoshi, K. and Hasegawa, H., Secular variation of atmospheric radiocarbon concentration and its dependence on geomagnetism, *J. Geophys. Res.*, **71**, 1065-1071 (1966)

北半球陸域の較正曲線 IntCal は 2013 年³³、福井県三方五湖の一つである水月湖に堆積した年縞堆積物のデータを採用した。湖や海盆などには陸上から土砂や植物遺体などが流入しているが、堆積物には流入の季節変動を反映した年層が見られることがある。堆積層に噴出年代の判明した火山灰などが含まれていない限り年代を数値で表すことは難しいが、炭素 14- ウィグルマッチ法により樹木年輪で構築された較正曲線と接続することで、その延伸が図られた。

現行の北半球陸域用の較正曲線は、2020 年に改訂された IntCal20³⁴である。そこには日本産樹木のデータが東アジア地域の資料として初めて採用された。木越の指摘通り、日本産樹木年輪の炭素 14 濃度には欧米産樹木よりも低い時期があ

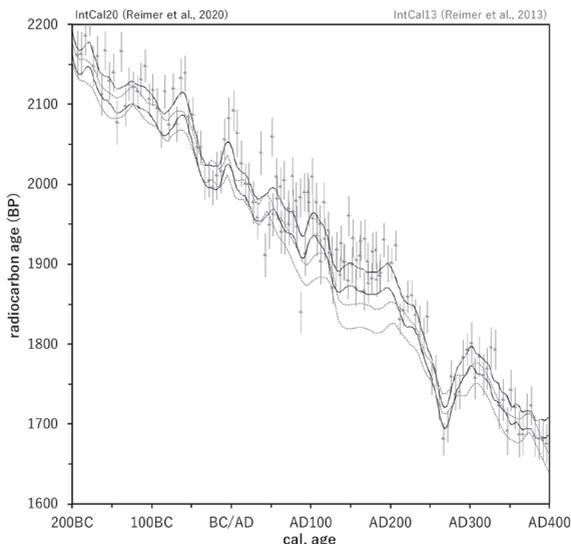


図7 較正曲線 IntCal13 (破線) と IntCal20 (実線) との比較。背景に表す日本産樹木年輪のデータ採用を受けて、1～3世紀の形状が大きく見直された。

³³ Reimer, P. J., Bard, E., Bayliss, A., Warren Beck, J., et al., IntCal13 and Marine13 radiocarbon age calibration curves 0–50,000 years cal BP, *Radiocarbon*, 55, 1869–1887 (2013)

³⁴ Reimer, P. J., Austin, W. E. N., Bard, E., Bayliss, A., et al., The IntCal20 Northern Hemisphere radiocarbon age calibration curve (0–55 cal kBP), *Radiocarbon*, 62, 725–757 (2020)

り、その採用を受けて西暦2～3世紀の形状が見直されている。これは IntCal が北半球の陸域を代表する汎用的な較正曲線として、想定される炭素 14 濃度の地域差を包含したからであり、濃度差を考慮した地域ごとの較正曲線は用意されなかった。なお、炭素 14 濃度の低下は箱根や飯田市といった内陸部の樹木にも確認されている（図7）。その理由は屋久島のように「海に囲まれた」といった単純な図式ではなく、広大な太平洋に面し、アジアモンスーンの影響を受けている日本列島の立地が関係する可能性がある。炭素 14 ウィグルマッチ法による日本産資料の年代判定には、あるいは日本版といった独自の較正曲線が必要になるかも知れない。

7. 単年輪の可能性

IntCal20 は、単年輪のデータを多く採用しているのも特徴である。AMS-¹⁴C 法の普及により年輪 1 層ずつの炭素 14 年代測定が現実的になったものの、測定試料調製の煩雑さに加え、炭素 14 の生成に関わる太陽活動の「11 年周期」を相殺するため、IntCal には 10 年輪といった複数の年輪層を 1 試料とした測定が多く蓄積されてきた。ところが 2012 年、太陽物理学の見地から屋久スギの単年輪測定が実施され、炭素 14 濃度が 774 年から 775 年にかけて急上昇していたことが見出される³⁵。この現象は一次宇宙線の影響よりも、太陽（規模の恒星では想定されていなかった）表面の大爆発により放出された高エネルギー粒子が地球に届き、大気圏内の炭素 14 濃度を急増させたためと理解されている。Miyake Event とも呼ばれるこのイベントを検証するため、あるいは過去発生したイベントの頻度と規模を解明して今後の宇宙線災害に備えるため、世界中の樹木年輪の単年輪炭素 14 年代測定が急速に進展している。この規模のイベントが現代で発生すれば、社会を支える電子・電気機器が壊滅する恐れもあるからである。

単年輪のデータが蓄積されるにつれ、大気中炭素 14 濃度の微細な変動や地域

³⁵ Miyake, F., Nagaya, K., Masuda, K. and Nakamura, T., A signature of cosmic-ray increase in AD 774-775 from tree rings in Japan, *Nature*, **486**, 240-242 (2012)

差も明らかになりつつある。上述したように較正曲線は汎用性を重視し、複数年輪の測定やデータの平滑化などが行われたため、微細構造は隠されている (IntCal20 は 5000 年前まで 1 年刻みのデータだが、統計処理で均されたもので微細構造を再現していない)。他方、少ない点数によるウィグルマッチでは、全体としての挙動は較正曲線の形状に類似するものの、測定値はむしろこういった微細構造と合致する例が多い (例えば図 5)。炭素 14- ウィグルマッチ法の精度・確度の向上には、較正曲線のみならずそれを構成する元データ、可能であれば資料に近い地域のデータとの比較も必要である。

ただし単年輪同士の比較、すなわち未知資料の単年輪を較正曲線の元データとなる単年輪と直接比較することは慎重になるべきである。大気中の炭素 14 濃度に地域差のあることは今や共通理解となったが、その絶対値を議論するには時間的・空間的にデータが十分ではない。また資料自身の均一性や試料採取、前処理などの再現性にかかる「ばらつき」は時に「測定誤差」を上回る。現状では、炭素 14- ウィグルマッチ法を適用する資料からは単一の層ではなく、3 層、5 層といった複数の年輪を採取、測定し、「平均的な値」として較正曲線ないし元データとの比較を行うのが適切だろう。

8. おわりに

較正曲線の形状と測定値を照合する炭素 14- ウィグルマッチ法は、較正年代の絞り込みに有効である。年縞堆積物なども測定の対象となるが、高い精度・確度での年代判定が求められる歴史的木造建築物への応用が進んでいる³⁶。数点の測定にとどまるマッチングの有効性に対する方法論的な批判も見受けられる³⁷が、マッチングに必要な追加測定を行い、調査部材数を増やして改造変遷年代を明らかにし、部材の年代をもとに建築年代を絞り込むための現実的な対応を行ってい

³⁶ Nakao, N., Sakamoto, M., Imamura, M., ¹⁴C dating of historical buildings in Japan, *Radiocarbon*, **56**(2), 691-697 (2014)

³⁷ Bayliss, A., Marshall, P., Tyers, C., et al., Informing Conservation: Towards ¹⁴C Wiggle-Matching of Short Tree-Ring Sequences from Medieval Buildings in England, *Radiocarbon*, **59**(3), 985-1007 (2017)

る。建築年代を判定するには部材自身の情報、すなわち樹種、年輪幅や辺材の有無、当初・後補あるいは前身建物の転用といった識別に加え、発掘や文献などを総合的に調査し、複数の部材のウィグルマッチを行うことで十分な成果を得ることができる。

建築史学と自然科学が協業した精緻な年代研究は、残念なことに国内外ともにその例を見ることが少ない。今後、正しい理解のもとに、炭素 14-ウィグルマッチ法による建造物の年代研究が発展することを願って止まない。

本稿の執筆に際し、奥博光様、奥まり子様、公益財団法人文化財建造物保存技術協会のご理解とご協力を賜った。記して深謝する。