

炭素14年代法と較正年代

坂本 稔

Sakamoto Minoru

1. 炭素14年代法とは

炭素14年代法（放射性炭素年代法）は、放射壊変によりおよそ5,700年で半減する ^{14}C の性質を用いた年代法である。 C は自然界に広く分布し、生体を構成する有機物には必ず含まれていること、半減期が過去の人々の営みを議論するのに適切な長さであること等を理由に、考古学・歴史学の分野で広く応用が進んでいる。

自然界の ^{14}C は、大気圏上層で宇宙線の作用による核反応で生成し、 CO_2 として大気中を拡散する。炭素は植物の光合成で生物圏に取り込まれ、動物は摂食や排泄・呼吸等の生命活動により体内の炭素を交換する。生物圏の ^{14}C 濃度は放射平衡状態にあるが、生命活動の途絶等で炭素交換が行われなくなると、 ^{14}C だけが放射壊変により減少する。すなわち、炭素14年代法が示すのは、資料が外界と C を交換しなくなった年代である。

2. 較正曲線と較正年代

^{14}C の生成に関わる宇宙線の強度は、太陽活動等の影響を受けて変動している。それに伴い大気中 ^{14}C の初期濃度が変動するため、炭素14年代法では半減期に基づいた年代測定が困難である。そのため未知試料の年代はその ^{14}C 濃度を、炭素交換を行わなくなった年代の判明した試料の ^{14}C 濃度と比較して求める。

^{14}C 濃度の記述には、 C の安定同位体比（ $\delta^{13}\text{C}$ 値）が-25‰になるよう同位体分別効果の影響を補正した上で、半減期を5,568年と仮定し、経過年数の起点を西暦1950年に置いた「炭素14年代」が用いられる（単位： ^{14}C BP）。年輪年代法で生育年の判明した樹木年輪等の炭素14年代を集成した「較正曲

線」が提案されていて（図1）、資料の炭素14年代を較正曲線と比較して得られるのが「較正年代」である。

較正曲線には誤差が見積もられ、また過去の大気中 ^{14}C 濃度の変動を反映した凹凸があるため、較正年代は炭素14年代と1対1に対応せず、ある確率を持った年代幅で表示される。真の年代はその範囲のいずれかにあるが、これはこの年代範囲にある資料を測定すれば、その確率で得られた炭素14年代を示すことを意味する（図2）。

自然界の CO_2 の多くは海水に溶存するが、海水中の ^{14}C 濃度は海洋大循環等による滞留時間の経過を受け、放射壊変により同時期の大气よりも低くなる（海洋リザーバー効果）。平均的な表層海水の炭素14年代を暦年代に修正する較正曲線が用意され、

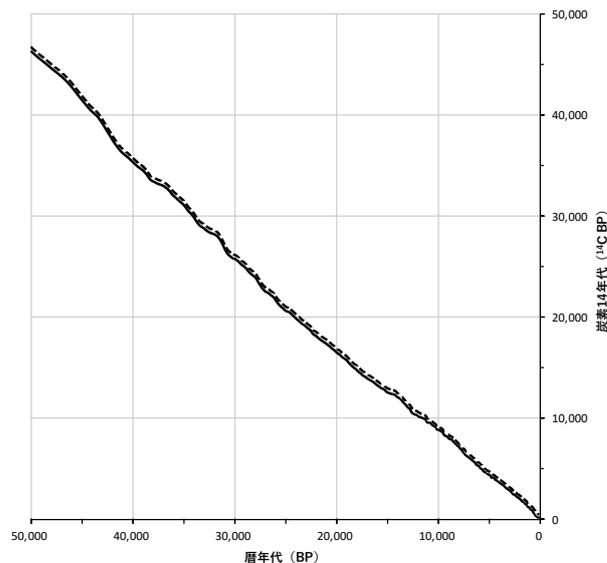


図1 較正曲線 IntCal13（実線）と Marine13（破線）

炭素14年代は ^{14}C 濃度に相当し、暦上の年代（BP：西暦1950年を0BPとした遡上年）とは合致しない

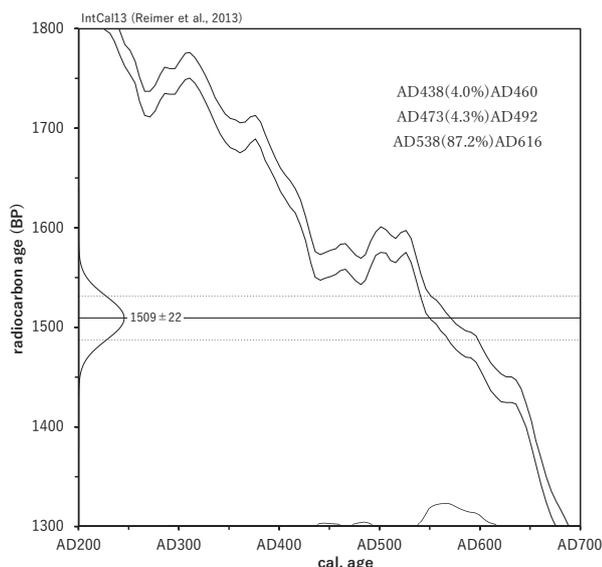


図2 較正年代の概念図

横軸に確率密度分布を重ねて示す。較正年代の範囲は複数得られるが、これらはその範囲にある年代の資料の炭素14年代が測定値である確率を表す

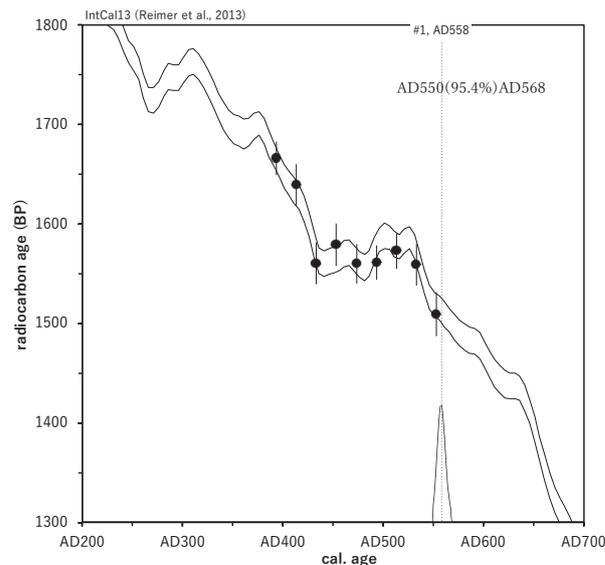


図3 炭素14-ウィグルマッチ法

ある年数間隔で複数試料の炭素14年代を測定し、較正曲線の凹凸と照合して較正年代を絞り込む

海域ごとに異なる¹⁴C濃度（ローカルリザーバー効果）を考慮して年代較正を行う。

大気成分の拡散は東西方向には十分に速いが、南北方向には若干の時間差が生ずる。¹⁴C濃度の低い海洋の面積の違いにより、南半球の大気中¹⁴C濃度は北半球よりも低い値を示す。北半球には「IntCal」¹⁾、南半球には「SHCal」²⁾較正曲線が用意される。

IntCalは年輪年代法で生育年の判明した過去12,000年を超える樹木年輪、ウラン・トリウム法で年代を測定した鍾乳石、あるいは湖底の年縞堆積物中の植物遺体等の炭素14年代に基づく。他方、SHCalは南半球産樹木年輪の測定が過去2,200年しか及んでおらず、大部分の時期は表層海水用較正曲線「Marine」と共に大気循環モデルに基づいて計算されている。IntCalに対しSHCalはおよそ80炭素年（¹⁴C yrs）、Marineはおよそ400炭素年古くなっていて、これは同時期の北半球の陸産資源と比べ、南半球の陸産資源や表層海水の炭素14年代がそれぞれ古いことを意味する。

3. 炭素14-ウィグルマッチ法

前述したように、較正曲線には過去の大気中¹⁴C濃度の変動を反映した凹凸（ウィグル）があるため、炭素14年代を較正曲線と比較して得られる較正年代にはある程度の幅が生じてしまう。一方、樹木年

輪や年縞堆積物等、既知の年数間隔で試料を採取・測定できる資料は、炭素14年代を較正曲線のウィグルと照合して較正年代を絞り込むことができる（図3）。これが「炭素14-ウィグルマッチ法」である。条件次第では数年程度の範囲の較正年代が得られることもあり、樹木年輪等資料の種類は限られるものの、より高い精度・確度が要求される歴史資料の年代研究にも応用が可能である。

炭素14-ウィグルマッチ法では、年輪数の多い樹木を細かく分割して測定すれば、より精度の高い較正年代が期待できる（ただし、対照される現行の較正曲線は5年間隔のデータに平滑化されているので、1年刻みといった過度の細分化には意味がない）。しかしながら、切断を伴うような大規模な試料採取が困難な資料、あるいは年輪数の少ない資料であっても、数点の測定・マッチングで十分な精度が得られる。

一例として、福井県坂井市に所在する丸岡城天守の年代研究を挙げる。以下は、坂井市教育委員会が平成31年3月に発行した『丸岡城天守学術調査報告書』の内容に基づく³⁾。

4. 丸岡城天守の年代調査

丸岡城天守（図4）は、日本に現存する最古の天守閣の1つとされている。その古拙な建築様式から、



図4 丸岡城天守近景
(提供：坂井市教育委員会)

天正4(1577)年に柴田勝豊が築城したと言われていた。一方で、天守が後の絵図に描かれていないこと等から、本田成重が入城した慶長18(1613)年以降に築城、ないし増築されたとの見解もあった。丸岡城は1940年から42年にかけて解体・修理が行われたものの、1948年の福井地震で倒壊、1950年代に旧材を用いた復元再建が図られた。すなわち、現存天守の構造材には築城当時のものが多く残されていて、築城年代を示すことが期待された。

建築部材の年代測定で留意すべきなのは、資料に残された最も外側の年輪が「伐採年」を示すとは限らない点である。樹木は樹皮直下の形成層における細胞分裂で年輪を形成し、その際に生育年の大気中CO₂に由来するCを固定する。しかしながら、製材の際に外周の年輪が切削・除去されていれば、最外年輪は伐採年より前の年代を与えてしまう。

建築部材に樹皮を剥いだだけの「ノタ」が残されていれば、その層は伐採年に相当する。また、樹木年輪の外周には淡色で水分の多い「辺材」がある。建築部材の外周に辺材と思われる色調の違いや虫食い等が見られれば、最外年輪は伐採年に近いと推測される。一方、建築部材にノタや辺材が認められない場合、伐採年までの年輪数は基本的に分からない。それでも、建築部材の樹種や年輪幅、あるいは樹木の製材箇所である「木取り」(建築部材は割れを防ぐために樹芯を外して製材されることが多いが、小

径木から必要な寸法の材を得ようとする、樹芯を含まざるを得ない。そのような部材の場合、製材時に削られた外周の年輪数は多くないと推定できる)等を検討することで、伐採年に関連づけられた議論も可能である。何よりも、当初材や後補材等、建築史的に裏付けられた部材の年代を複数得ることで、より確からしい年代観の構築が可能となる。

炭素14年代測定は、柱や梁等天守の現状構造部材、1950年代の復元で用いられなかった保存古材、丸岡城不明門の遺構材と伝わる高椋家表門部材の計23点に対して行なわれた。16世紀以降の較正曲線は不安定な挙動を示しているため、ウィグルマッチングによる較正年代の絞り込みが有効である。資料への影響を最小限にするため、一部材からの試料採取は数か所にとどめられた。

測定・解析の結果、建築部材の多くが1600年前後から17世紀の較正年代を示した。切削された外周年輪を考慮すれば、部材に用いられた樹木の伐採年代は17世紀以降と考えられる。ただし、炭素14-ウィグルマッチングにより較正年代の範囲は絞り込まれているものの、複数の可能性は残されたままであった。

調査では、年輪年代法による建築部材の調査も実施された。年輪年代法は年輪の生育年を、誤差のない1年単位で決定できる優れた年代測定法である。その結果、辺材の残る床板の1つに1620年、二・三層通し柱(床下古材#1)に1626年という年代が与えられた。後者は天守の構造上要となる部材で、炭素14-ウィグルマッチングでも1610~1638年(95.4%)という較正年代が得られている。学術調査では他にも文献、建築部材の加工痕(道具の推定)、石垣の構造等多角的・総合的な取り組みがなされたが、年代測定からは、現存する丸岡城天守が寛永期に築造されたことを支持する結果となった。

5. 較正曲線の地域効果と微細構造

炭素14年代法による年代測定は、較正曲線によるところが大きい。現行の北半球用較正曲線IntCal13には福井県三方五湖の1つ、水月湖の年縞堆積物のデータが反映される等、較正曲線は数年ごとに改訂されているが、主な元データは欧米の高緯度地域に生育した樹木年輪の炭素14年代である。これは大気成分が東西方向には速やかに攪拌されるこ

とを前提とし、較正曲線の「汎用性」を重視したためである。従来は炭素 14 年代法の測定誤差も大きく、文字資料の残らない時期の年代測定に較正曲線は十分な役割を果たしてきた。

近年は加速器質量分析法（AMS: Accelerator Mass Spectrometry）による炭素 14 年代測定（AMS- ^{14}C 法）が主流となり、試料の僅少化、測定の高精度化と高効率化が進んでいる。それに伴い、これまで較正曲線に隠されてきた、「地域効果」とも呼ぶべき大気中 ^{14}C 濃度の挙動が明らかになりつつある。

北半球に位置する日本列島周辺の資料の炭素 14 年代は、本来は IntCal に基づいて較正年代に修正される。ところが日本産樹木年輪の炭素 14 年代が蓄積されるにつれ、日本列島周辺の大気中 ^{14}C 濃度が SHCal に近い挙動を示すことが明らかになってきた⁴⁾。アジアモンスーン等の影響により、南半球の大気も日本列島周辺まで進入していたことが想定される。この傾向は紀元前後から 2 世紀にかけて特徴的だが（図 5）、時期によっては IntCal と SHCal の中間⁵⁾、あるいは IntCal に近いこともある。

IntCal の元データは 11 年周期とされる太陽活動の影響を除くため、10 年ないし 20 年の年輪を 1 試料とした測定値が多い。較正曲線の汎用性のためにそれらは統計処理で平滑化されているが、本来見られるはずの微細な変動も隠されてしまう。

AMS- ^{14}C 法の普及もあり、宇宙線の強度変動や太陽活動の解明を目的とした単年輪の炭素 14 年代測定が進んでいる。屋久スギの単年輪測定で、774 年から 775 年にかけて大気中 ^{14}C 濃度が急激に上昇していたことが見出され、太陽表面で大規模フレアが発生したことが示唆されている⁶⁾。同様なイベントの検出を目的とした樹木年輪の炭素 14 年代測定が各地で進められ、それに伴い、較正曲線の元データが急速に充実しつつある。

多くの場合平滑化された較正曲線は妥当な較正年

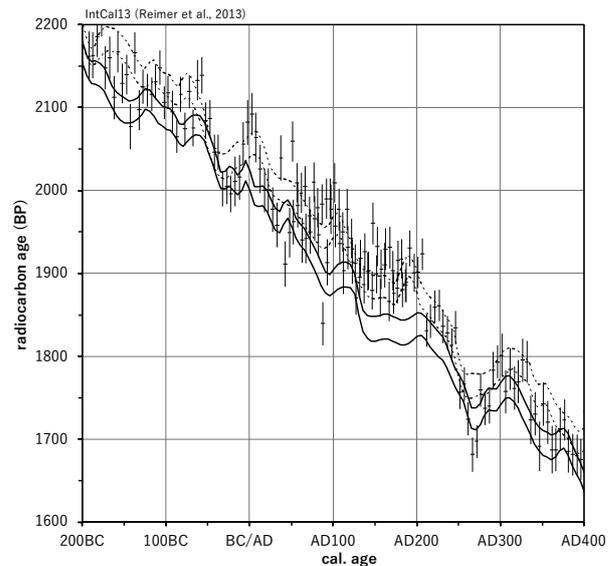


図 5 紀元前後の日本産樹木年輪の炭素 14 年代の挙動

実線で示した IntCal13 の範囲よりも、破線で示した SHCal113 の範囲に近い挙動を示している

代を与えるが、その微細構造は、例えば数か所の測定による炭素 14 - ウィグルマッチ法にも影響する。測定値が微細構造を捉えていれば、平滑化された較正曲線とのマッチングが成立しにくくなる。歴史学・考古学から要請される時間軸の精緻化に 대응するためにも、地域効果や微細構造を考慮した較正曲線の高精度化が求められる。

参考文献

- 1) P. J. Reimer, *et al.*, *Radiocarbon*, **55**, 1869-1887 (2013)
- 2) A. G. Hogg, *et al.*, *Radiocarbon*, **55**, 1889-1903 (2013)
- 3) 坂井市教育委員会, 丸岡城天守学術調査報告書, 190 (2019)
- 4) 尾寄ほか, 日本地球化学会第 58 回年会 (2011)
- 5) T. Nakamura, *et al.*, *Radiocarbon*, **55**, 763-770 (2013)
- 6) F. Miyake, *et al.*, *Nature*, **486**, 240-242 (2012)

(国立歴史民俗博物館・総合研究大学院大学)