

## 新しい暦年較正曲線 IntCal20

2020年夏、放射性炭素 ( $^{14}\text{C}$ ) 年代から暦年代を求める際に使われる暦年較正曲線 IntCal20 が公開されました。前版 (IntCal13) から7年ぶりの更新となります。較正曲線の更新は測定された試料の年代的な位置づけに直接関わるため、 $^{14}\text{C}$  年代を利用して過去を研究する上で重要な変化をもたらす場合があります。ここではまず暦年較正について簡単に述べた後、IntCal20 の基本文献 (Reimer et al. 2020) を主に参照し、その概要と注目される特徴を解説します。

### 1. $^{14}\text{C}$ 年代の暦年較正

① $^{14}\text{C}$  年代 炭素の同位体には  $^{12}\text{C}$ 、 $^{13}\text{C}$ 、 $^{14}\text{C}$  の3つがあります。このうち  $^{14}\text{C}$  だけが時間経過により一定割合で崩壊する放射性炭素です。 $^{14}\text{C}$  はほぼ一定速度で大気中に作られ、同時に減少していくので、大気 (二酸化炭素) 中の炭素における  $^{14}\text{C}$  の割合 ( $^{14}\text{C}$  濃度) はおおむね一定です。陸上植物も光合成で大気から炭素を取り込み、動物は植物を食べて炭素を得る (≒いずれも大気が炭素源) ので、これら生物の体もおおよそ大気と同じ  $^{14}\text{C}$  濃度を示します。しかし、生物が死ぬと炭素が取り込まれなくなり、体の  $^{14}\text{C}$  濃度は減少していくので、大気  $^{14}\text{C}$  濃度よりどの程度少ないかを調べることで、死後の経過時間を推定できます。これが  $^{14}\text{C}$  年代です。

②暦年較正  $^{14}\text{C}$  年代は大気  $^{14}\text{C}$  濃度が一定である前提に立ちます。しかし大気  $^{14}\text{C}$  濃度は厳密には変動するので、 $^{14}\text{C}$  年代と実際の年代 (暦年代) の間にはずれがあります。このずれを補正し、暦年代に近づける作業 (暦年較正、または単に較正) の基準となるのが暦年較正曲線で、次のように作られます。

年輪年代学 (年輪幅の変動パターンで樹木の年代を推定する手法) など、 $^{14}\text{C}$  年代測定以外で年代が確認された試料を対象に  $^{14}\text{C}$  年代測定を行います。樹木年輪試料ならば、年輪数で相互の年代関係がわかるよう分取した試料 (1~複数年輪単位) を測定し、1つの樹木から多数の連続した  $^{14}\text{C}$  年代値のデータを得ます。このように  $^{14}\text{C}$  年代値と暦年代の対応関係を示すデータを集め、統計処理で連続した曲線に

統合されて較正曲線となります。

図1は新たに公開された較正曲線 IntCal20 の一部 (西暦 750~1250 年に相当する区間) と、その元となった測定試料のデータ分布です。図のように、年輪年代学で暦年代がわかる数多くの樹木年輪試料の  $^{14}\text{C}$  年代値を集めて較正曲線が作られます。図2はこのように作られた較正曲線を用いて、ある試料の  $^{14}\text{C}$  年代値から暦年代を算出した例です (表示された較正曲線は図1 とほぼ同じ年代区間)。較正年代は較正 (calibrate) されたことを示す「cal」を冠して「cal BC/AD」 (西暦) または「cal BP」 ( $^{14}\text{C}$  年代の基準年である西暦 1950 年から何年前かを表す; Before Present) と表記します。

### 2. 暦年較正曲線 IntCal

$^{14}\text{C}$  年代の暦年較正に関する研究が重ねられてきた成果として、最も代表的な較正曲線が IntCal シリーズです。北半球の大気を炭素源とする試料 (木片、種子、動物の骨などの主な陸上生物試料) の  $^{14}\text{C}$  年代値を暦年較正するのに用いられます。1998年公開の IntCal98 以降、IntCal04、IntCal09、IntCal13 と数年ごとに更新され、較正可能な年代範囲の拡張など発展を遂げてきました。著名な日本の水月湖年縞堆積物データは IntCal13 から採用されました。

なお、大気  $^{14}\text{C}$  濃度が北半球と若干異なる南半球の陸上生物試料に SHCal、古い炭素が滞留する海洋の試料に Marine、大気核実験で  $^{14}\text{C}$  が急増した西暦 1950 年以降の試料には Bomb という別の較正曲線があり、各々 SHCal20、Marine20、Bomb13 が最新です。

### 3. IntCal20 の構成

IntCal は北半球の大気  $^{14}\text{C}$  濃度に基づいて暦年代を求める較正曲線ですので、大気 の値を直接反映し、かつ確実に連続する試料データで構築することが理想です。しかし、そのようなデータが十分に得られているわけではないため、IntCal20 は樹木年輪データのみの区間と様々な試料種を組み合わせた区間に大きく分かれます (図3)。

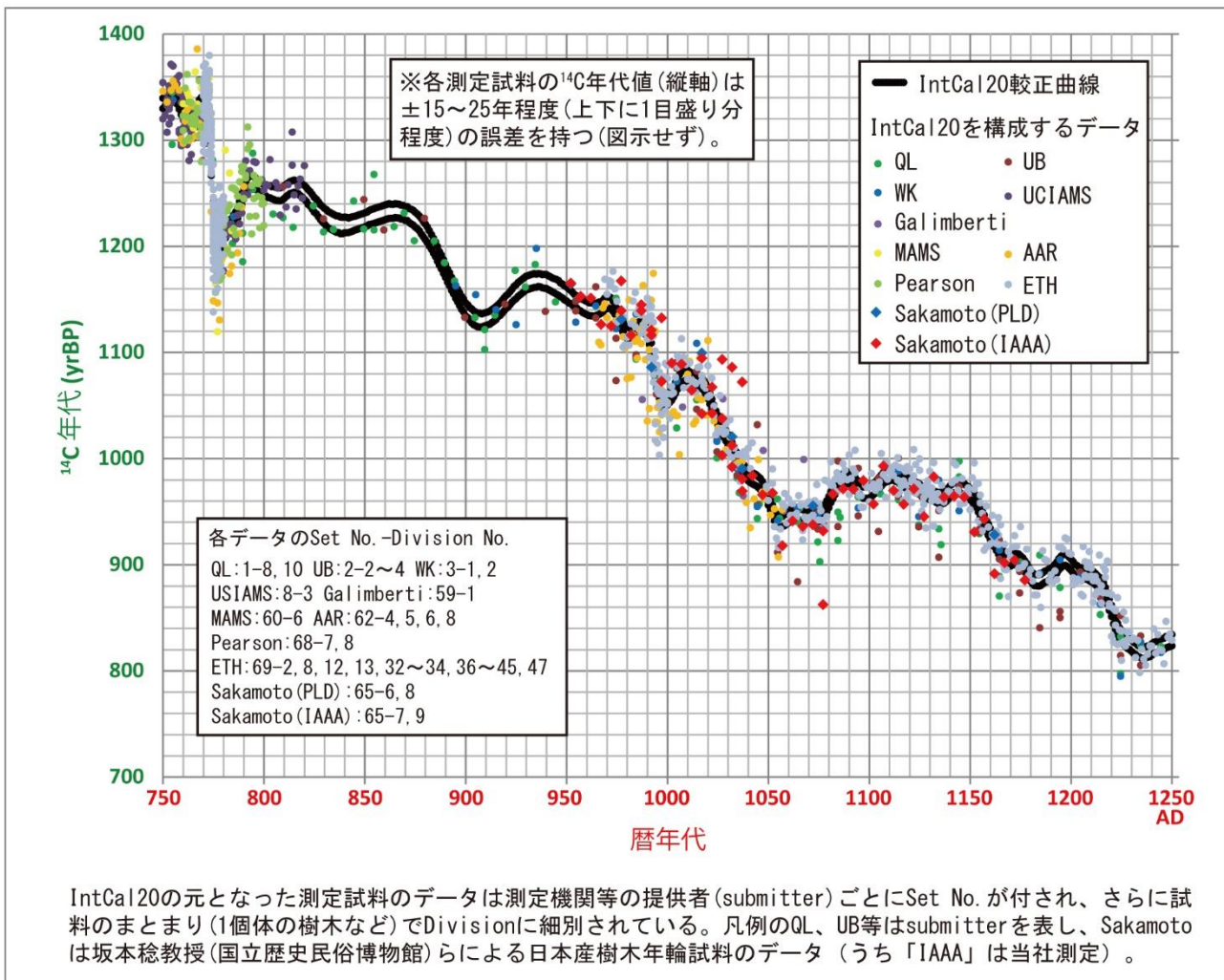


図1 IntCal20 校正曲線とそれを構成する測定試料データの分布 (AD750 ~ 1250 の区間)

IntCalウェブサイト公開データより作成。測定試料には北米、欧州、アジアなど北半球各地の樹木年輪試料が含まれ、世界各地の機関によって測定されている。また、単位試料ごとの年輪数も一様ではない。それらが統計処理され構築された校正曲線は、多くの試料の誤差範囲周辺を推移している。

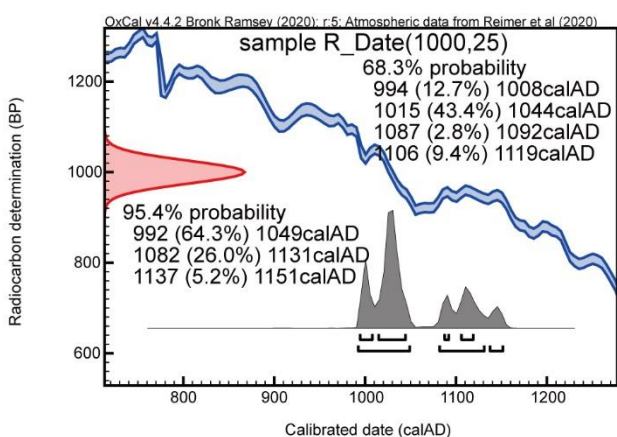


図2 暦年校正結果の例

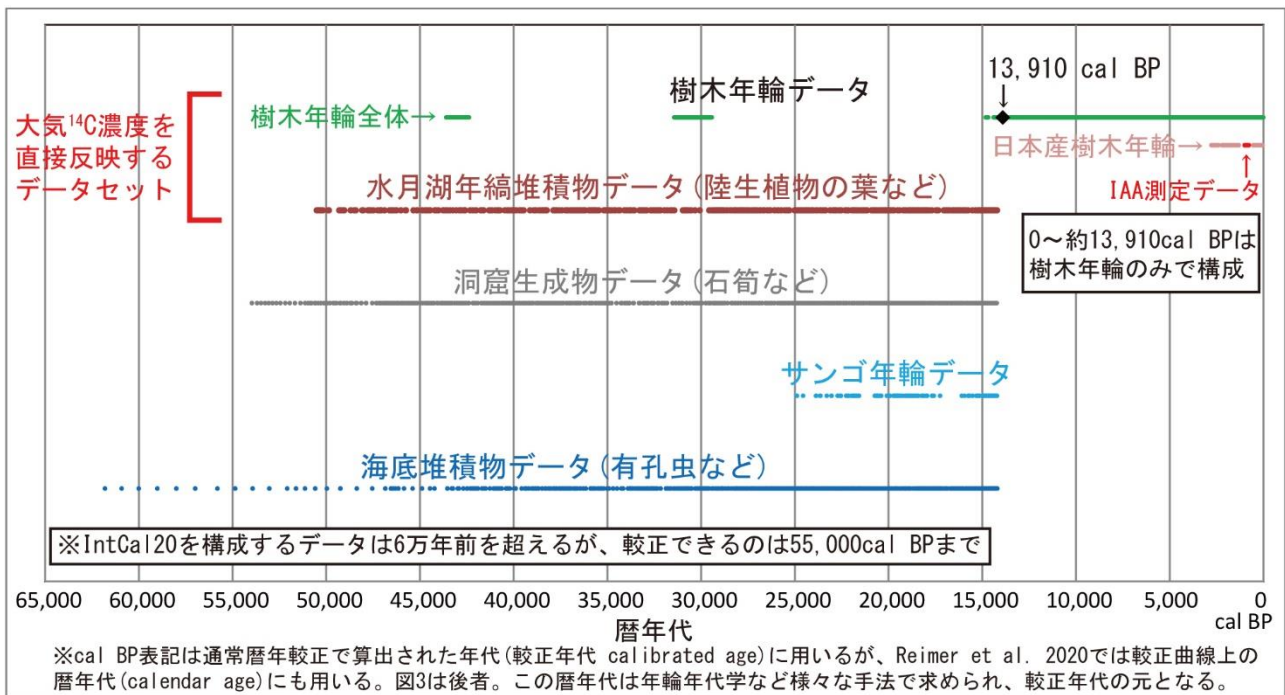
IntCal20校正曲線(Reimer et al. 2020)に基づき、OxCal v4.4校正プログラム(Bronk Ramsey 2009)を用いて校正。1000±25yrBPの<sup>14</sup>C年代値(縦軸)に対応する校正年代(横軸)が68.3%、95.4%の範囲で示されている。なお、表示された校正曲線は図1とほぼ同じ区間。

①樹木年輪データのみで構築された区間 (0~約13,910cal BP)

IntCal では上記の理想に最も近い樹木年輪データが特に重視されます。年輪年代学は1年単位で試料の年代を推定でき、信頼性も高いためです。IntCal20の樹木年輪記録のみを繋いで遡れる範囲は約13,910cal BPまでとなっており、この区間は完全に大気<sup>14</sup>C濃度を直接反映するデータです。

また、これまで樹木年輪記録による<sup>14</sup>C濃度の暦年推移は、主に5年輪や10年輪といった複数年輪単位に分割測定された連続データで構成されてきましたが、IntCal20では単年輪単位の連続データが多く加わったことにより詳細さが増えています。これには測定技術の向上に加え、近年単年輪精度の研究で<sup>14</sup>C濃度が一時的に急増した現象の調査が進んだことが貢献しました。中でもAD774~775年の激しい太陽活動によると見られる<sup>14</sup>C急増(発見者にちなんでMiyake eventとも呼ばれる)が知られています。





②様々な試料種データを統合した区間 (約 13,910 ~55,000cal BP) IntCal のうち樹木年輪データだけで遡れる区間から先、較正曲線の限界までの間には、他の試料種データが組み合わせられます。IntCal20 では前述の約 13,910cal BP より古く、限界である 55,000cal BP までが該当します (IntCal13 の古さの限界は 50,000cal BP まで)。これは現在行われる  $^{14}\text{C}$  年代測定の技術的限界に近い古さに達しています。

この区間にある樹木年輪データは、主に前述の樹木年輪のみで遡る連続データに接続しない floating (浮かんでいるの意) と表現されるデータセットですが、それでも該当する時期の大気  $^{14}\text{C}$  濃度変動を高精度で確認できる試料として組み込まれています。

水月湖年縞堆積物も大気  $^{14}\text{C}$  濃度を直接反映し、この区間のほぼ全体をカバーする貴重なデータです。年縞堆積物とは特殊な環境の湖底や海底に年単位で積層し、断面が縞状になる堆積物を言います。縞を数えつつ年ごとに湖底に溜まった葉などの陸上植物遺体を多く年代測定することで、水月湖試料からは 5 万年を超えるデータが得られています。年縞形成や保存状態などの条件が揃うことは極めて稀なため、湖底堆積物データとしては水月湖の年縞のみが採用されました。IntCal20 への採用に当たり、水月湖の年縞の数え直しが行われています。

石筍などの洞窟生成物も、長期にわたる大気  $^{14}\text{C}$  情報が詳細に分析された、この区間の重要なデータセットです。ただしこれらが形成される際に、石灰

岩などに由来する古過ぎて  $^{14}\text{C}$  を含まない炭素も取り込まれます。このため、大気  $^{14}\text{C}$  濃度を間接的にしか反映せず、補正の上で採用されます。IntCal20 では Hulu 洞窟 (中国) のデータが 5 万年以上前まで延長され、重要な貢献となったようです。

サンゴ年輪や海底堆積物中の有孔虫などの海洋試料も貴重な連続データです。特にカリヤコ海盆 (ベネズエラ) の年縞堆積物データは最も古くまで及ぶため、IntCal20 の最古の部分 (約 53,970cal BP 以前) は唯一このデータから構築されています。ただし、海洋試料も海に滞留した古い炭素から形成されるので補正が必要です。IntCal20 ではこの補正が改善され、海洋と大気の大気  $^{14}\text{C}$  濃度のずれにおける経時変化を初めて考慮したこと等の進展が指摘されています。

このように約 13,910cal BP より古い区間は、樹木年輪だけによる区間に比べ多様なデータが複雑に処理されています。課題は残るものの、上述のような進展や、各種補正に新統計手法が導入されたことなどによって前版よりデータの統合が改善されました。

③日本産樹木年輪データの採用 IntCal を構成する樹木年輪データは欧州や北米の試料が中心ですが、IntCal20 には日本産樹木のデータも採用されました。最近約 3000 年間に含まれる 11 群のデータ (国立歴史民俗博物館の坂本稔教授ら提供) が Dataset No.65 として組み込まれています (文末に掲げた同館ウェブサイトに関連記事あり)。なおそのうち Division No.7, 9 (図1に表示) は当社で測定されています。

**④データの採用基準・検証** IntCal へのデータの採用には、試料やその処理、測定などについて基準が設けられています。今回の更新では新たなデータや知見の蓄積が進んだことで、採用の基準にも条件が追加されました。また前版の採用データも再検証され、訂正や除外が行われました。

データが蓄積され、研究がより精緻になるに従い、データの審査や検証も詳細、複雑になっています。<sup>14</sup>C 年代に影響する可能性がある要素として、例えば南北半球大気境界が変動している低緯度地域や海水の湧昇海域に近いなどの地理的要因、樹木が生育する季節と大気動きの関係などが指摘されています。これらは基本的に測定機関間の誤差と明確に区別できないレベルのようですが、今後考慮される可能性があります。

#### 4. IntCal20 への更新による較正曲線の変化

既に述べた較正可能な年代の延長など以外に次のような変化があります。

**①較正曲線の凹凸 (wiggle) の詳細化** 樹木年輪データに単年輪データが多く加えられたことや、古い区間の floating な樹木年輪データの知見が更新されたことなどで、<sup>14</sup>C 濃度の変動がより細かく捉えられ、較正曲線の凹凸 (wiggle) の表現がさらに詳細になった区間があります。これにより、年代の絞り込みやウィグルマッチング (樹木年輪で相互の年代関係がわかる複数の試料を年代測定し、<sup>14</sup>C 年代値の試料間の変化を較正曲線の凹凸に重ねて年代を絞り込む手法) の適合が改善される可能性があります。

代表的な時期としては、長期間にわたり較正曲線が平坦に推移する 800~400 BC (Hallstatt plateau、日本では縄文から弥生時代への移行期) の時期が挙げられます。今回この時期の前半に単年輪データが得られ、年代が絞り込み易くなったとされています。

他に AD 290~486 や BC2 千年紀なども単年輪データにより詳細化しました。さらに古くは完新世後期やヤングドリアス/GS-1 期も単年輪データで、ベーリング/GI-1e 期と最終氷期は floating な年輪データの統合で、やはり詳細化しています。

**②前版 IntCal13 と明確に異なる時期** 次の 2 時期が特に注意されます。

2,000~1,700cal BP (約 1~3 世紀) 頃は、主に日本産樹木年輪データが加わったことで変化しました。日本考古学では弥生から古墳時代に移行する注目度の高い時期です。これまで IntCal の較正年代が考古学の年代観と一致せず、また日本産樹木の測定値も

IntCal と系統的にずれるとされてきました。今回の更新で IntCal20 は日本産樹木の値に近づいており、今後多方面からの検証が求められます。

34,000~50,000cal BP 頃にも大きな変化があります。34,000~42,000cal BP 頃では IntCal13 で較正するより約 700 年古くなる一方、42,000~50,000cal BP 頃では約 1,000 年若い結果になるとされます。

#### 5. 較正曲線の更新と利用者の対応

<sup>14</sup>C 年代測定の研究が今後も進められる過程で、IntCal などの較正曲線の更新も続くと考えられます。以前の測定結果を再検討する場合、較正前の <sup>14</sup>C 年代値が必要になります。また較正年代はどの較正曲線・プログラムによる値かわからなければ正確に扱えません。このため、<sup>14</sup>C 年代値と較正に使用した較正曲線・プログラムの情報は必ず保存し、論文などにも記載することが望まれます。現在では較正プログラムがインターネット上に公開されているので、最新の較正曲線で利用者が自らデータを較正し、変化を確かめることも容易になっています。

[執筆：長谷川尚志・早瀬亮介 (株式会社加速器分析研究所) ]

#### 文献

Bronk Ramsey, C. 2009 Bayesian analysis of radiocarbon dates, *Radiocarbon* 51(1), 337-360

Reimer, P.J. et al. 2020 The IntCal20 Northern Hemisphere radiocarbon age calibration curve (0-55 cal kBP), *Radiocarbon* 62(4), 725-757

#### 関連ウェブサイト

*Radiocarbon* 誌 IntCal20 特集号

(<https://www.cambridge.org/core/journals/radiocarbon/calibrations/intcal-20>)

暦年較正曲線 IntCal

(<http://intcal.org>)

暦年較正プログラム OxCal

(<https://c14.arch.ox.ac.uk/oxcal.html>)

IntCal20 への日本産樹木年輪データの採用 (国立歴史民俗博物館)

(<https://www.rekihaku.ac.jp/outline/press/p200825/index.html>)

IAA ニュースレター No.1

2020年12月15日発行

編集・発行 株式会社加速器分析研究所  
〒214-0013 神奈川県川崎市多摩区登戸新町129-1  
TEL: 044-934-0020 FAX: 044-931-5812  
E-mail: [office@iaa-ams.co.jp](mailto:office@iaa-ams.co.jp)