

# 表計算ソフトによる 炭素 14 年代校正プログラム RHC バージョン 4

Radiocarbon Calibration Program Using Spreadsheet Software: RHC Version 4  
SAKAMOTO Minoru

坂本 稔

## ①はじめに

炭素 14 年代法によって報告される値「炭素 14 年代 (Radiocarbon age, Libby age)」は、試料中の炭素 14 ( $^{14}\text{C}$ ) の濃度、すなわち  $^{14}\text{C}$  と他の炭素の同位体との比から、半減期に基づいて経過時間を機械的に計算したものである。放射性同位元素である  $^{14}\text{C}$  は一定の割合で壊変し減少していくが、5,568 年という半減期が用いられていること、初期濃度である大気中の値が過去一定でなかったことなどから、炭素 14 年代をそのまま実際の暦上の年代 (実年代・暦年代) として扱うことはできない。

炭素 14 年代は、年輪年代法などであらかじめ年代の判明した試料の炭素 14 年代と比較することで、暦年代に修正される。基準データである校正曲線は主に国際学会が中心となった IntCal Working Group によって整備が続けられ、最新版は 2009 年末に提案された IntCal09 [1] である。一方、校正曲線に基づいて炭素 14 年代を暦年代に修正するプログラムは、種々の機関により独自のものが作成されている。CALIB [2], CalPal [3], OxCal [4] などは国際的に広く利用されている標準的な校正プログラムであり、インターネット上のホームページでも公開されている。これらのプログラムは基本的に英語表記で、日本国内の研究者にとって必ずしも敷居の低いものではなかったが、2010 年に OxCal の日本語版が公開され [5]、今後国内でも利用が広がっていくと期待される。

国立歴史民俗博物館では、今村によりベイズ統計の手法を用いた校正プログラム RHC が作成され、バージョン 3.2 として報告されている [6]。一般的な校正プログラムはその保護の観点から利用の自由度が制限されているのに対し、RHC は Microsoft 社の表計算ソフト Excel 上で動作する。環境を整えば市販の一般的なコンピュータで自由に使うことができ、計算過程の可視化が図られているのが特徴である。

RHC は小変更を加えられながら、主に国立歴史民俗博物館における共同研究や報告書などに用いられてきた。しかしながら改変が容易なことからいくつかの版が混在し、計算結果に若干の差が見られることもあった。また今後、日本版を含めた校正曲線の継続的な見直しも予想される。そこ

で IntCal09 の提案を機に RHC のバージョンアップを行った。

## ②RHCにおける年代較正とその概念

計算に関する基本的な概念は RHC3.2 を踏襲している。ベイズ統計で、事象  $A_i (i = 1, 2, \dots, n)$  に対して事象  $B$  が観測される確率が  $p(B|A_i)$  であるとき、事象  $B$  の観測から事象  $A_i$  の起こる事後確率  $P(A_i|B)$  は次式で推定される。

$$P(A_i|B) = \frac{p(A_i) \cdot p(B|A_i)}{\sum_i (p(A_i) \cdot p(B|A_i))} \quad (1)$$

ここで、 $p(A_i)$  は事象  $B$  に関わらず事象  $A_i$  が観測される確率（事前確率）である。

未知試料の炭素 14 年代が  $T \pm \delta$   $^{14}\text{C}$  BP と測定されるとは、中心値  $T$ 、分散  $\delta^2$  の正規分布で推定できるということである。暦年代  $t_i$  BP に対応する炭素 14 年代が  $f(t_i) \pm \sigma(t_i)$   $^{14}\text{C}$  BP で与えられている較正曲線において、 $t_i$  BP という事象に対して  $T \pm \delta$   $^{14}\text{C}$  BP という事象が観測される確率  $p(T|t_i)$  は、ガウス密度関数を用いて次式で計算される。

$$p(T|t_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi(\delta^2 + \sigma(t_i)^2)}} \cdot e^{-\frac{(T-f(t_i))^2}{2(\delta^2 + \sigma(t_i)^2)}} \quad (2)$$

したがって、炭素 14 年代が  $T \pm \delta$   $^{14}\text{C}$  BP と観測される暦年代  $t_i$  BP は、

$$P(t_i|T) = \frac{p(t_i) \cdot p(T|t_i)}{\sum_i (p(t_i) \cdot p(T|t_i))} \quad (3)$$

という事後確率で推定される。ここで、炭素 14 年代測定以前には暦年代を推定する情報が存在しないため、事前確率  $p(t_i)$  は全ての  $t_i$  BP に対して等しい確率をもつ。したがって式 (3) は

$$P(t_i|T) = \frac{p(T|t_i)}{\sum_i p(T|t_i)} \quad (4)$$

となる。

較正年代を確率密度分布曲線の形で表すために、すべての  $t_i$  BP について  $p(T|t_i)$  を計算し、その総和 ( $\sum_i p(T|t_i)$ ) で規格化する。すなわち確率密度分布曲線の面積は 1 になるが、任意のしきい値を上回る年代を採用して、確率を例えば  $2\sigma$  (95.4%) といった値に絞り込む。ただし較正曲線は 5 年おき、20 年おきといった離散的なデータで構成されているため、それぞれを直線で内分して面積を計算する (図 1)。つまり、較正年代の推定範囲として示される値は確率密度分布曲線としきい値との交点 (図 1(c)) であり、確率はその面積である。

全ての  $t_i$  BP を用いるのは現実的でないので、実際は予想される較正年代の前後のデータを抽出して較正年代を計算する。RHC3.2 では 3000 年分のデータを抽出したが、バージョン 4 (以下 RHC4) では 2000 年で十分と判断し、計算に用いている。

## ③RHC4の構成

RHC4 では、較正曲線データのファイル (cals) と各計算用のファイル (RHCs, RHCm, RHCw) をリンクさせて使用する。較正曲線のデータを分離することで、計算用ファイルのサイズは

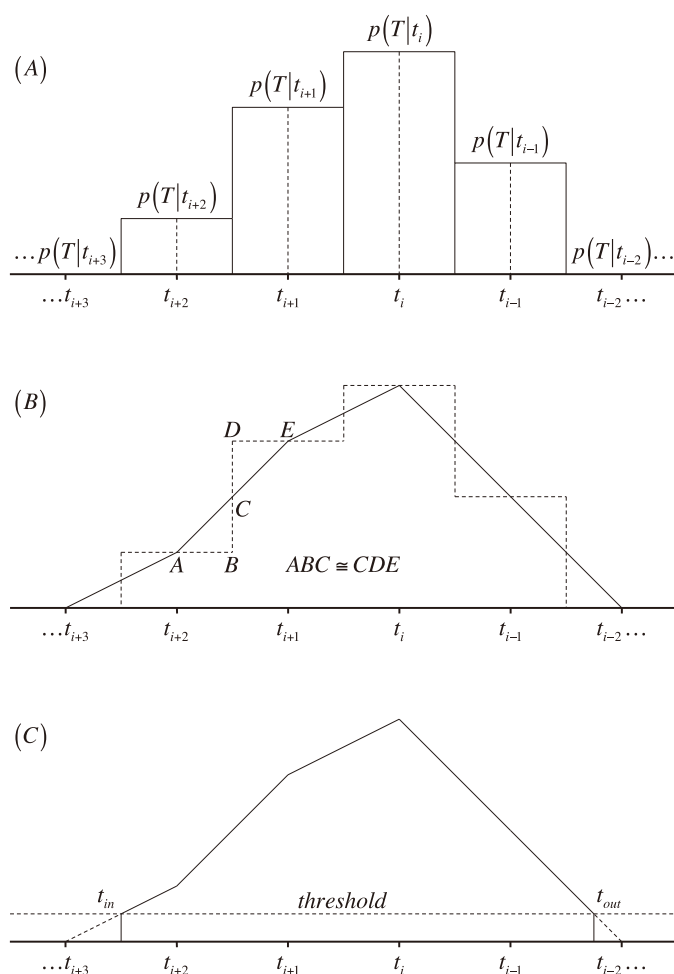


図1 確率計算の概念図

暦年代  $t$  に対する確率  $p$  は、(A) 図の実線で示した長方形の面積に相当する。(B) 図でそれぞれを直線で結ぶと、例えば図形  $ABC$  と  $CDE$  は同じ面積であり、実線で示した多角形の面積は破線で示した面積に等しい。この多角形を確率密度分布曲線とし、面積を1とする。(C) 図でしきい値 (*threshold*) を変化させ、実線で囲まれた図形の面積が  $2\sigma$  になるようにする。 $t_{in}$ ,  $t_{out}$  は前後の ( $t$ ,  $p$ ) から幾何学的に導出され、確率密度分布曲線から除外すべき両端の三角形の面積も計算できる。

RHC3.2 に比べ大幅に小さくなった。cals には IntCal09 に加え、前版の IntCal04 [7], 南半球用の SHCal [8], 海洋表層試料用の Marine09 [1], 1 年刻みの校正曲線として提案された Stuiver et al., [9] のデータが収録され、計算ファイルからこれらの校正曲線を選択する。校正曲線が変更・追加された場合も、cals に新しいデータを挿入し、計算用ファイルを微調整することで容易に対応できる。なお、計算用ファイルとリンクさせるため cals は常に開いておく必要があるが、その改変を防ぐため初期状態では画面上に表示されない。

機能のほとんどは RHC3.2 を引き継いだが、RHC4 では個々の計算を同じ条件で実施できるよう、校正年代の確率密度 (信頼限界) を  $2\sigma$  に固定し、計算に一定の制約条件を与える境界条件の項目を廃止した。

### 単試料用計算ファイル RHCs

RHCs は、試料 1 点の炭素 14 年代から校正年代を求める計算ファイルである (図 2)。画面左上に校正曲線、炭素 14 年代とその測定誤差、横軸上に確率密度分布曲線のグラフを表示する。グラフはスクロールバーとスピンボタンを用いて、倍率、縦軸・横軸方向の移動、および確率密度分布

172

みで表記される。11,200 BP 以前であっても、炭素 14 年代の測定誤差が 50 BP を超える場合は 10 年で丸めることになるため、チェックを外して手動での計算が必要である。

### 海洋試料用計算ファイル RHCm

海洋は大量の二酸化炭素を溶存し、地球上の大きな炭素の容れ物（リザーバー）の一つである。海水が長時間かけて循環するうちに  $^{14}\text{C}$  の放射壊変が進むため、海洋は同時期の大气よりも古い炭素 14 年代を示す。この「海洋リザーバー効果」の影響を考慮した較正曲線 Marine09 が提案されているが、基本的には IntCal09 からモデル計算により作成されたものである。

平均的な海洋表層の値は大气に比べ炭素 14 濃度が 5% ほど低く、炭素 14 年代にして 400 年程度古い。ただし海洋リザーバー効果の影響は海域によって異なり（ローカルリザーバー効果）、その差は Marine09 からの偏差（ $\Delta R$  値）で表される。一部の海域では  $\Delta R$  が見積もられていて（例えば英クイーンズ大学ベルファストのホームページ、<http://calib.qub.ac.uk/marine>）、較正年代の計算には Marine09 のデータに  $\Delta R$  を加えた値が用いられる。

RHCm は、海洋試料用の炭素 14 年代から較正年代を求める計算ファイルである（図 3）。基本的な操作は RHCs に準ずるが、汽水域のように陸上成分の影響が認められる試料について、北半球

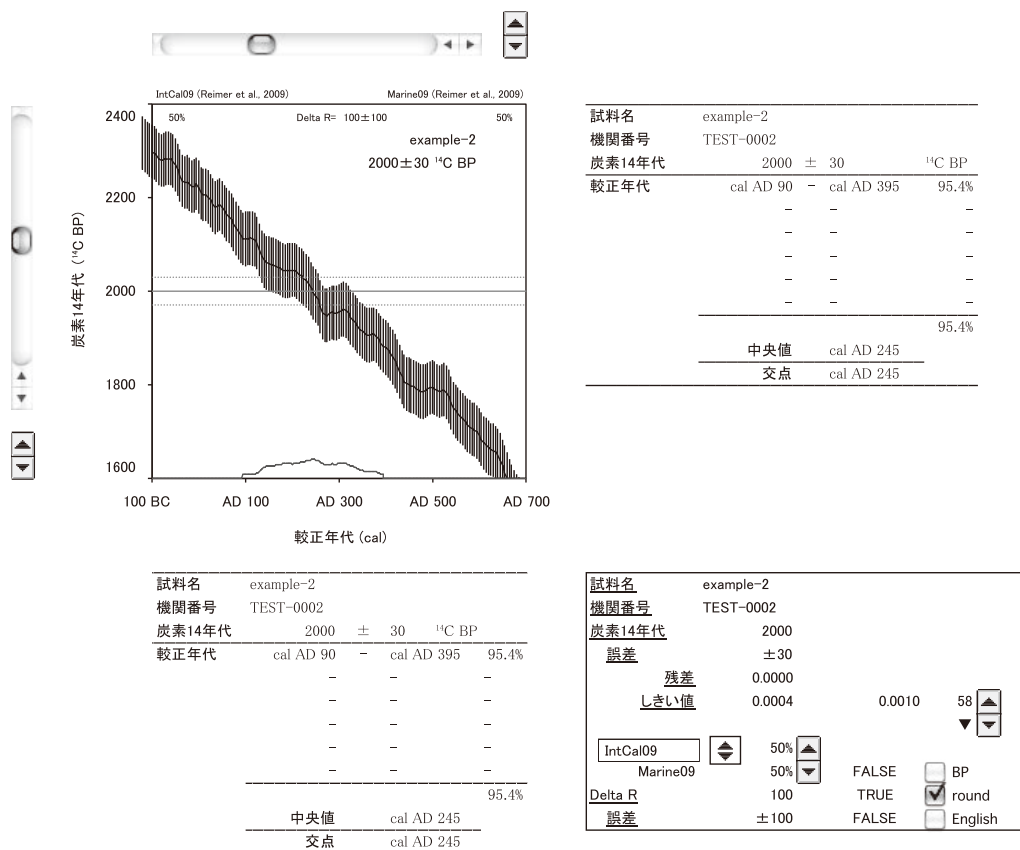


図3 海洋試料用計算ファイル RHCm の操作画面

の IntCal09 または南半球の SHCal04 との混合比を指定することができる。陸上成分、およびローカルリザーバー効果の影響を考慮した海洋成分の炭素 14 年代を、現代炭素 (modern carbon) の値を 100 とした炭素 14 濃度 (percent Modern Carbon: pMC) に換算し、両者の混合比が  $x:1-x$  (ただし  $0 \leq x \leq 1$ ) の場合の炭素 14 濃度を炭素 14 年代に戻して較正年代を計算する。混合比はスピンボタンにより、5% 刻みで変化させることができる。なお、炭素 14 年代  $T$   $^{14}\text{C}$  BP と炭素 14 濃度  $C$  pMC の関係は、 $^{14}\text{C}$  の半減期が 5,568 年と定義されているので、次式で表される。

$$T = -\frac{5568}{\ln(2)} \cdot \ln\left(\frac{C}{100}\right)$$

RHCs でも Marine09 を選択することができるが、ローカルリザーバー効果を入力できないため、使用は推奨されない。

### ウィグルマッチ用計算ファイル RHCw

樹木年輪など、既知の年数間隔を持つ試料の炭素 14 年代を、較正曲線に見られる凸凹 (wiggle) と照合し、高精度の較正年代を導くのが炭素 14 ウィグルマッチ法である。統計学的な照合のため、RHC ではベイズ統計に基づく方法を採用し、 $\chi$  二乗検定および平均値解析による検定を行っている。ただし OxCal に実装されている、マルコフ連鎖モンテカルロ法 (MCMC) によるベイズ統計とは異なっている。

計算に関する基本的な概念は RHC3.2w を踏襲した。樹木年輪を例とすれば、対象となる年輪層 (暦年代  $\tau$  BP) に対して  $x_k$  年 ( $k = 1, 2, \dots, n$ ) 離れた年輪層 (暦年代  $\tau + x_k$  BP) の炭素 14 年代の測定値を  $T_k \pm \delta_k$   $^{14}\text{C}$  BP とする。 $x_k$  それぞれに対し較正年代の確率密度分布を計算したものは対象となる年輪の暦年代より  $x_k$  年ずれているので、それぞれの時間軸を  $x_k$  年戻して積をとり、規格化したものを対象となる層に対する較正年代の確率密度分布とする。暦年代  $\tau + x_k$  BP に対応する炭素 14 年代が  $f(\tau + x_k) \pm \sigma(\tau + x_k)$   $^{14}\text{C}$  BP である較正曲線との凸凹の適合度は、測定値  $T_k \pm \delta_k$   $^{14}\text{C}$  BP との差の二乗を分散で規格化した値

$$\chi_k^2 = \frac{(T_k - f(\tau + x_k))^2}{\delta_k^2 + \sigma(\tau + x_k)^2}$$

を平均値 0、分散 1 の標準正規分布の母集団から抽出した標本とみなし、それらが  $\chi$  二乗分布に従っているかを検定する。また較正曲線からの偏りは、測定値との差を分散の平方根で規格化した値

$$\chi_k = \frac{T_k - f(\tau + x_k)}{\sqrt{\delta_k^2 + \sigma(\tau + x_k)^2}}$$

が標準正規分布に従っているかを検定する。

RHCw は、炭素 14 ウィグルマッチ法により較正年代を求める計算ファイルである (図 4)。一連の試料名、測定機関による機関番号、炭素 14 年代、測定誤差、ならびに年輪番号を画面右側のテーブルに入力する。テーブルには最大 30 点の試料が入力できる。年輪番号は相対的な位置で、必ずしも最外層を起点とする必要はない。試料によっては計測の方向が内外逆になることもあり、その場合はテーブル上の reverse にチェックを入れて順序を反転できる。テーブルのマーカー列はウィグルマッチに用いる試料を指定する。v で基準となる試料を指定し、計算に用いる試料には o を入

力する。列を x または空欄にするとウィグルマッチから除外されるが、x の試料のデータはグラフ中に淡色で示される。

テーブル入力後の基本的な操作は RHCs に準ずるが、レポート作成のために一連の試料を代表する試料名を欄内に入力する。v で指定された基準となる試料名が表示されるので、基準試料の欄に改めて入力する。レポート中に表示される基準試料の年代は試料中央の層に対して求められた年代値で、最外層などに対しては対象となる層までの年輪数をオフセット欄に記入する。反映される変化量はレポート中に表示されるオフセットを加えた年代、校正年代の範囲、さらにグラフ中の確率密度分布曲線と、対象となる層を表す縦線の左右方向への位置に反映される。この場合、測定値全体の位置は移動しない。

枠内のスクロールバーを用い、測定値全体の暦年代を 1 年単位で移動させることができる。移動量を  $\pm 0$  とすると、対象となる層は確率密度分布曲線の最も高い位置、すなわち最も適合した年代に合わせられるが、分布曲線の形から複数の候補が挙げられる場合、あるいは年輪年代の定まった試料をマッチングさせる場合に、測定値全体を移動させて適合度を判断する。95% の信頼区間で  $\chi^2$  二乗検定、平均値解析が合格していればそれぞれ TRUE が表示される。この場合、確率密度分布曲線の位置は移動しない。

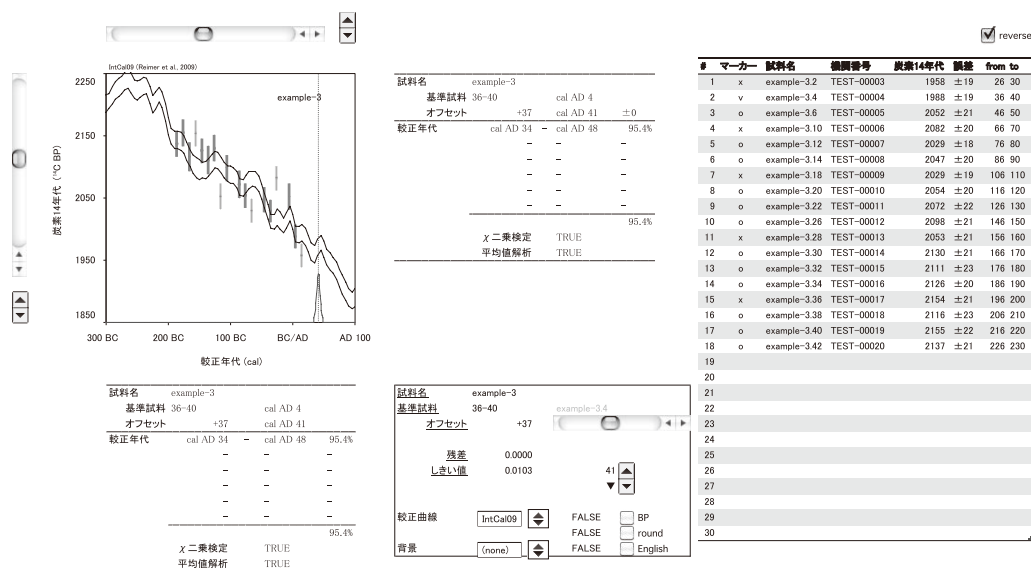


図4 ウィグルマッチ用計算ファイル RHCw の操作画面

#### ④ OxCal との比較

試料の実年代は本来一意で、その値は校正プログラムによって統計的に計算される「校正年代」の範囲に含まれることになる。校正プログラムによって計算結果が異なるのは好ましいことではないが、概念や計算方法の違いにより校正年代に若干の相違が生ずることも予想される。

同じ炭素 14 年代を RHCs, RHCm, RHCw と OxCal (バージョン 4.1.7) とに入力し、得られた校正年代を比較した。IntCal09 に基づいて炭素 14 年代  $2000 \pm 30$   $^{14}\text{C}$  BP を校正すると、RHCs で

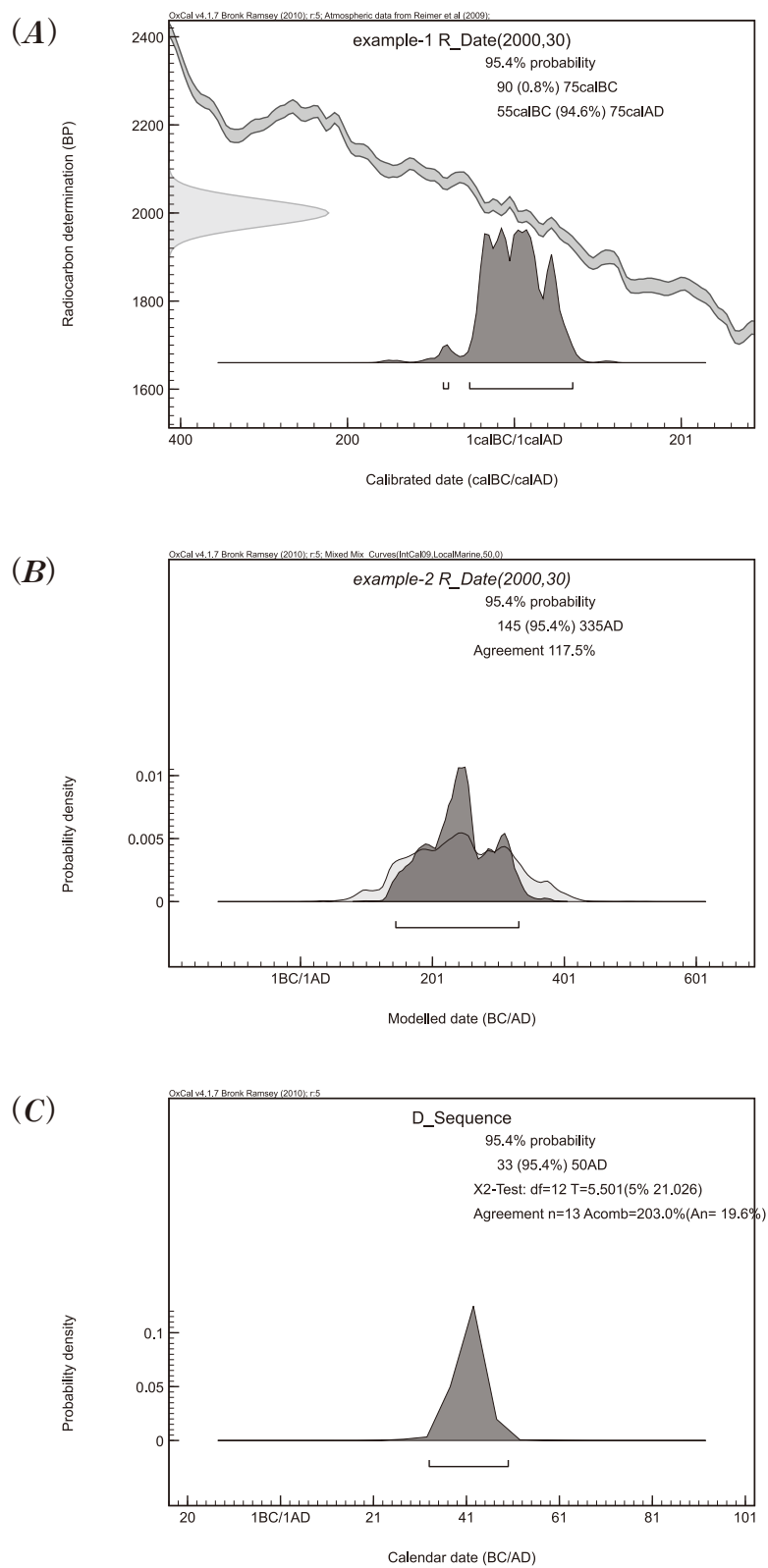


図5 OxCal による較正年代の導出

は 86 cal BC～81 cal BC (0.9%), 56 cal BC～cal AD 70 (94.5%) となった (図 2) が, OxCal では 90 cal BC～75 cal BC (0.8%), 55 cal BC～cal AD 75 (94.6%) となった (図 5A)。どちらの値も 5 年単位で丸められたもので, 若干の相違はあるもののほぼ同じ較正年代が得られている。

大気成分と海洋成分の混合を 50% ずつと仮定し, ローカルリザーバー効果を  $100 \pm 100$   $^{14}\text{C}$  yr とした際, 炭素 14 年代  $2000 \pm 30$   $^{14}\text{C}$  BP の較正年代は, RHCm (図 3) で cal AD 90～cal AD 395 (95.4%), OxCal (図 5B) で cal AD 95～cal AD 395 (95.4%) となった。OxCal の Single Plot で表示される cal AD 145～cal AD 335 (95.4%) はローカルリザーバー効果の誤差 ( $\pm 100$ ) を考慮しない値で, 同条件で RHCm により計算すると cal AD 140～cal AD 335 (95.4%) となった。いずれも 5 年単位で丸められた値で, ほぼ同じ較正年代が得られている。なお, OxCal では両成分の混合比の誤差も入力することができるが, RHCm では実装されていない。

図 4 で用いたデータを元に, OxCal でもウィグルマッチによる較正年代の導出を行った。この試料は最外層から年輪層を計数したため, 最外層に外挿した較正年代は RHCw (図 4) で cal AD 34～cal AD 48 (95.4%), OxCal (図 5C) で cal AD 33～cal AD 50 (95.4%) となった。確率密度分布曲線のピークトップは RHCw で cal AD 41, OxCal で cal AD 42 である。なお, OxCal は 30 点以上のデータを入力することができ, 較正曲線との適合度を一覧表で表示することもできる。

以上から, RHC4 の計算結果は OxCal と完全に一致しないものの, ほぼ整合的であることが分かった。この相違は, 確率密度分布曲線や有効数字の扱いなどによるものと推測される。したがって較正年代を報告する際には, 基づいた較正曲線のみならず使用した較正プログラムについても記述が必要であろう。

## ⑤おわりに

OxCal をはじめとしたインターネット上で公開されている較正プログラムは, 常に最新版を入手することができ, 動作環境も Web ブラウザを用いるなどして汎用性を高めている。一方, RHC4 は Excel の機能に依存し, 一般的に普及しているパーソナル・コンピュータで動作するもののその計算速度は必ずしも十分ではなく, 最新版の配布という点でも課題が残る。また印刷出力が機種に依存するため, Windows 機と Mac 機ではレイアウトが異なってしまうという問題を抱えている。日本語環境で動作する較正プログラムも, 次第に OxCal に移行していくことになると思われる。

それでも計算過程を可視化し, OxCal とほぼ整合的な結果を与える RHC シリーズの需要は十分にありと期待される。互換性をより追究することで存在意義を高めていきたい。

## 註

(1)——2010 年に発表された Mac 用の OS である OS X Lion ではスクロールバーの矢印ボタンが廃止され, OS 上で動作する表計算ソフト Excel でも有効にならない。そのため, 本文中の操作方法ならびに操作画面に変更が生じている。OS やプログラム (Excel) のバージョン変更により, 今後も操作性の変化が予想される。

(2)——投稿後に RHC の見直しを行った。バージョン

4 の較正曲線データファイル calcs には, 各較正曲線を 1 年単位に内挿した値を収録してある。ところがウィグルマッチ用計算ファイル RHCw において, 例えば 10 年輪を 1 試料とすると中央は 5.5 という仮想的な年数になり, 1 年単位の内挿値に対し 0.5 ずれてしまうことになる。そこで calcs のデータを 0.5 年単位の内挿値とし, 偶数年輪を測定した際の「中央」の扱いを厳密化した。較正年

代自体は丸められるため、基本的にはバージョン4の計算結果と変わらない。また、基準層を「v」で示す方法を廃し、基準となる年輪番号を直接入力する方法に改めた。OSのバージョン変更を受け、操作画面にも若干の

変更が施されている。海洋試料用計算ファイル RHCm への実装が済み次第、一連のプログラムを「バージョン5」とする予定であるが、概念や構成はバージョン4と同じである。

## 文献

- [1] Reimer, P. J., Baillie, M. G. L., Bard, E., Bayliss, A., Beck, J. W., Bertrand, C. J. H., Blackwell, P. G., Buck, C. E., Burr, G. S., Cutler, K. B., Damon, P. E., Edwards, R. L., Fairbanks, R. G., Friedrich, M., Guilderson, T. P., Hogg, A. G., Hughen, K. A., Kromer, B., McCormac, G., Manning, S., Ramsey, C. B., Reimer, R. W., Remmele, S., Southon, J. R., Stuiver, M., Talamo, S., Taylor, F. W., van der Plicht, J. and Weyhenmeyer, C. E. (2004). IntCal04 terrestrial radiocarbon age calibration, 0–26 cal kyr BP. *Radiocarbon* 46, pp. 1029–1058.
- [2] Stuiver, M., Reimer, P. J. and Reimer, R., CALIB radiocarbon calibration, execute version 6.0 <http://calib.qub.ac.uk/calib/>.
- [3] Weninger, B., Jöris, O., Danzeglocke, U., CalPal-2007. Cologne Radiocarbon Calibration & Palaeoclimate Research Package. <http://www.calpal.de/>.
- [4] Bronk Ramsey, C. (2009). Bayesian analysis of radiocarbon dates. *Radiocarbon*, 51, pp. 337–360.
- [5] 大森貴之, 西本寛, 中村俊夫 (2010) 「較正解析プログラム OxCal の日本語化について」『日本文化財科学会第27回大会研究発表要旨集』日本文化財科学会, pp. 144–145.
- [6] 今村峯雄 (2007) 「炭素14年代較正ソフト RH3.2 について」『国立歴史民俗博物館研究報告』137, pp. 79–88.
- [7] Reimer, P. J., Baillie, M. G. L., Bard, E., Bayliss, A., Beck, J. W., Bertrand, C. J. H., Blackwell, P. G., Buck, C. E., Burr, G. S., Cutler, K. B., Damon, P. E., Edwards, R. L., Fairbanks, R. G., Friedrich, M., Guilderson, T. P., Hogg, A. G., Hughen, K. A., Kromer, B., McCormac, G., Manning, S., Bronk Ramsey, C., Reimer, R. W., Remmele, S., Southon, J. R., Stuiver, M., Talamo, S., Taylor, F. W., van der Plicht, J., and Weyhenmeyer, C. E. (2004). IntCal04 terrestrial radiocarbon age calibration, 0–26 cal kyr BP. *Radiocarbon*, 46 (3), pp. 1029–1058.
- [8] McCormac, F. G., Hogg, A. G., Blackwell, P. G., Buck, C. E., Higham, T. F. G. and Reimer, P. J. (2004). SHCal southern hemisphere calibration, 0–11.0 cal kyr BP. *Radiocarbon*, 46 (3), pp. 1087–1092.
- [9] Stuiver, M., Reimer, P. J., & Braziunas, T. F. (1998). High-precision radiocarbon age calibration for terrestrial and marine samples. *Radiocarbon*, 40 (3), pp. 1127–1151.

(国立歴史民俗博物館研究部)

(2011年7月14日受付, 2012年3月16日審査終了)