

## 水月湖年縞堆積物の $^{14}\text{C}$ 年代測定

北川 浩之  
Kitagawa Hiroyuki

炭素 14 年代法は過去 5 万年間に適用できる年代測定法です。しかし、考古学や古気候研究に必要な暦年代を知るためには、炭素 14 年代を較正する必要があります。水月湖年縞堆積物の研究で、炭素 14 年代の較正に必要な炭素 14 年代キャリブレーションデータがようやく求められました。

### 1. 炭素 14 年代とそのキャリブレーション

放射性炭素同位体 ( $^{14}\text{C}$ ) は、宇宙線生成核種であり、宇宙線の二次中性子と窒素原子との核反応で絶えず生成されています。過去数万年間にわたって、宇宙線強度はほぼ一定であることから、 $^{14}\text{C}$  の生成速度と壊変速度 (半減期 5,730 年) がつり合い、大気中の二酸化炭素の  $^{14}\text{C}$  濃度はおよそ一定の値です。したがって、大気中の二酸化炭素を光合成で固定している植物、また植物を摂取している動物の  $^{14}\text{C}$  濃度は時代によって変化しないこととなります。親核種と娘核種の時間変化に着目した年代測定法 (例えば、K-Ar 法や Rb-Sr 法など) とは異なり、年代測定の対象試料に含まれる親核種 ( $^{14}\text{C}$ ) を測定するだけで、壊変した  $^{14}\text{C}$  が求められ、動植物の死後の年代を決めることができます。これが  $^{14}\text{C}$  年代測定法の基本です。

しかし、炭素 14 年代測定法の初期値が一定という仮定は、厳密には正しくないことは古くから知られていました<sup>1)</sup>。動植物の  $^{14}\text{C}$  濃度は時代によって刻々と変化し、炭素 14 年代と実際の年代 (実年代あるいは暦年代) は同じ年代

となりません。“炭素 14 年代時計の狂い”を較正して実年代を決定するためには、炭素 14 年代と実年代の関係を示した炭素 14 年代キャリブレーションデータが必要です。

### 2. 炭素 14 年代キャリブレーションデータセット

炭素 14 年代キャリブレーションデータは、年代が既知である試料を高精度に炭素 14 年代測定することで求められてきました。年輪年代学的手法で年代決定できる樹木年輪は、最も優れた研究対象です。1986 年、樹木年輪年代学的手法で各年輪の形成年代が決定されたドイツ産のオーク、北アメリカ産プリスルコーンマツの高精度測定の結果がまとめられ<sup>2,3)</sup>、紀元前 7,200 年 (9,150 BP; BP は西暦 1950 年を基準年として過去に何年遡るかを示す) までの炭素 14 年代キャリブレーションデータが、国際標準パッケージ (あるいは、専門研究者からの推奨データ) として配布されました。1993 年には、ドイツ産オークとマツの新たな分析結果を用いて、11,400 BP まで拡張されました<sup>4)</sup>。さらに、サンゴ化石の  $^{230}\text{Th}$  及び  $^{234}\text{U}$  分析で得られる実年代 ( $^{230}\text{Th}$ - $^{234}\text{U}$  年代) と炭素 14 年代を比較することで、過去 3 万年間の大まかな炭素 14 年代キャリブレーションデータが求められました<sup>5)</sup>。サンゴ化石の分析から得られた炭素 14 年代キャリブレーションデータによると、3 万年前には炭素 14 年代が実際の年代より 4,600 ± 600 年ほど若い年代であり、炭素 14 年代

を使い時代編年を行ってきた研究者に衝撃を与えました。この発見によって、炭素 14 年代キャリブレーションデータセットを過去へ拡張することの重要性が広く認知され、過去 5 万年間の詳細な炭素 14 年代キャリブレーションの整備を目指した研究が世界各地の研究機関で開始されました。その 1 つの取り組みは、福井県にある水月湖の年縞堆積物の研究です<sup>6,7)</sup>。

### 3. 水月湖の年縞堆積物

水月湖には葉理構造（薄い層が重なった堆積構造）を持つ堆積物が存在していることは古くから知られていました。1991 年の表層試料の採集と、その後の解析の結果を踏まえ、1993 年には水深 34 m の湖底から基底に達する 73 m の堆積物コア（SG93 コア）の採集を行いました<sup>8)</sup>。水月湖の粘土質な堆積物には肉眼で確認できる明暗の葉理構造が刻まれていました（図 1）。水月湖堆積物の葉理構造は堆積の季節変化で形成されることが明らかにされ、日本で初めて Varve の存在が確認されました。当時、Varve の適切な日本語訳はなく、SG93 コア研究の代表者だった安田喜憲氏によって、“年縞”と名付けられました。

年縞は、湖底に季節によって異なる粒子が供給され、しかも堆積後に底棲生物などによって二次的な攪乱を受けない場合に形成されます。水月湖の場合は、春季にはケイ藻（*Aulacoseira* spp.）の遺骸、菱鉄鉱（ $\text{FeCO}_3$ ）の微粒子やおそらく中国の内陸部から飛来した黄砂、夏季には有機物を多量に含む層、秋には春とは別種のケイ藻（*Encynerema*）の遺骸とやや大粒の菱鉄鉱、秋から冬にかけては粘土が堆積して年縞が形成されています。堆積物の上部 40 m（過去



図 1 水月湖年縞堆積物

7 万年間の堆積物）には、肉眼でも識別できる年縞が認められます。樹木年輪と同じように、毎年繰り返されるパターンを正しく識別できれば、水月湖の堆積物に 1 年の目盛りを入れることが可能です。年縞計数によって堆積物コアの編年を構築し、堆積物に含まれている植物化石の炭素 14 年代測定を実施すれば、炭素 14 年代キャリブレーションデータセットを求めることが可能です。

### 4. SG93 コア解析から Lake Suigetsu 2006 プロジェクト

SG93 コアから炭素 14 年代キャリブレーションデータセットを求める作業に約 5 年を要しました。正しく年縞を識別する作業は、当初に予想していたよりずっと手間と時間のかかるものでした。当時、年縞を識別するマニュアルはなく、思考錯誤を重ねて年縞数の計測を行いました。時には、堆積物の一部を樹脂で固定して作成した薄片の顕微鏡観察、電子顕微鏡像やエネルギー分散型 X 線分析装置（SEM-EDS）を使い堆積物を構成する粒子の季節変化パターンの認識も試みました。年縞が比較的明瞭で識別しやすい深度 10.43~30.45 m には、29,000 年分の年縞が確認されました。樹木年輪からの炭素 14 年代キャリブレーションデータセットと比較することで、この年縞堆積物が 8,830~37,930 年前に形成されたと結論しました。

水月湖の堆積物に含まれている 250 試料以上の葉や昆虫の化石の炭素 14 年代測定を実施し、炭素 14 年代キャリブレーションデータセットを求めました<sup>9)</sup>。水月湖の年縞堆積物が炭素 14 年代キャリブレーションデータセットを過去へ拡張するのに有効であることが広く認知されました。その後の研究で明らかにされたのですが、SG93 コアから得られた炭素 14 年代キャリブレーションデータセットには主に 2 つの問題があります。堆積物採集の技術的な問題による堆積物の連続性の欠如（予算的な制約から 1 つの掘削穴から試料を採集）と、年縞の識別の

甘さ（未識別の年縞の存在）に要約されます。これらの問題は、イギリス・ニューキャッスル大学の中川毅氏らのプロジェクト“Lake Suigetsu 2006”によって解決されました。

Lake Suigetsu 2006 では、4つの掘削孔から深度を重複させて堆積物コアを採取して堆積物の連続性の欠如の問題を解決しました。ドイツ・ポツダム地質学研究所とイギリス・ウェールズ大学の研究グループが年縞数の計数を担当しました。マイクロ蛍光X線スキャナーを使った元素組成の深度プロファイル<sup>10)</sup>や全層から作成した薄片の顕微鏡下での観察<sup>11)</sup>を基に、信頼性の高い年縞編年が構築されました。SG93 コアの解析での問題点は、Lake Suigetsu 2006 プロジェクトでほぼ克服され、年縞編年の信頼性が格段に向上しました。

SG93 コアとSG06 コアの対比から<sup>12,13)</sup>、SG93 からの250 試料の炭素14年代測定の結果<sup>9,14)</sup>とオックスフォード大学とイギリス自然環境研究協会(NERC)の加速器質量分析機関で実施されたSG06 コアからの約600 試料の炭素14年代測定結果は1つのデータセットにまとめられ、過去5万年間の高い時間分解能を備えた炭素14年代キャリブレーションデータセットが得られました<sup>15)</sup>。

### 5. 水月湖年縞堆積物からの炭素14年代キャリブレーションデータセット

図2には、水月湖年縞堆積物からの炭素14年代キャリブレーションデータとIntCal09をプロットしています。IntCal09は、木材年輪の炭素14年代測定の結果(12,500 BPまで)と<sup>230</sup>Th-<sup>234</sup>U年代法で年代決定されたサンゴ化石と海洋の年縞堆積物の浮遊性有効虫の炭素14年代測定の結果を基に作成されています<sup>16)</sup>。海

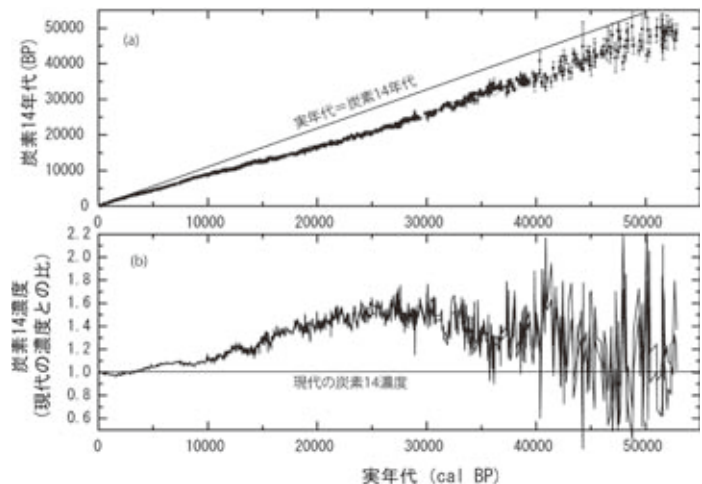


図2 過去5万年間の(a)炭素14年代キャリブレーションデータと(b)大気中の<sup>14</sup>C濃度変化<sup>15)</sup>  
IntCal09(図2(a)のグレーライン)はほとんどの時代において水月湖年縞堆積物からのデータと一致している。実年代と炭素14年代は最大5,000年程の違いがある

洋からのサンゴ化石と浮遊性有効虫の炭素14年代は、表層海水の炭素14年代を反映しています。海洋の表層海水と大気中二酸化炭素(あるいは陸上試料)の炭素14年代にはおおまかに400年ほどの違いがあり(“海洋のリザーバ年代”と言われていいます)、IntCal09は、海洋のリザーバ年代の経験的な補正が行われたうえで作成されています。一方、水月湖年縞堆積物からのデータは、堆積物に含まれた陸上植物の炭素14年代から求められ大気(あるいは陸上試料)の値を示し、海洋のリザーバ年代補正の必要がありません。ようやく、不確かさが残される海洋のリザーバ年代補正の必要がない、陸上試料の炭素14年代キャリブレーションデータを求めることができました。このデータは、次回のIntCal09の更新に使われる予定です<sup>17)</sup>。

図2には、炭素14年代キャリブレーションデータと合わせて大気中の<sup>14</sup>C濃度の経年変化をプロットしています。過去5万年間に大気中の<sup>14</sup>C濃度が大きく変動することが認められます。42,000年前後の<sup>14</sup>C濃度の増加は、地磁気強度が極小の時に地磁気方位が大きくゆらぐ現象で

ある地磁気エクスカッションによると解釈されています。過去へ遡って大気の $^{14}\text{C}$ 濃度が徐々に増加する傾向は、地磁気の強度変化に伴う大気上層での宇宙線の強度変化によると解釈されています。しかし、過去の地磁気の強度変化や $^{14}\text{C}$ と同様のメカニズムで生成される $^{10}\text{Be}$ 変化から推定された宇宙線強度の変化だけでは、この $^{14}\text{C}$ 経年変化を説明することはできません。最終氷期に、現在とは地球規模の炭素循環が大きく違い、地球システム内での $^{14}\text{C}$ の分布が大きく異なっていた証拠です。水月湖年縞堆積物から解明された過去5万年間の大気中の $^{14}\text{C}$ 経年変化は、炭素14年代の較正に必要なだけでなく、地球環境変動を解明するためにも有効であることを最後に述べておきます。

#### おわりに

水月湖の年縞堆積物の研究が開始から20年が経過しました。研究当初に想定した目標“炭素14年代法が利用できる年代範囲(過去5万年)の炭素14年代キャリブレーションデータを求める”がようやく達成されました。次の段階は、このデータの信頼性の検証や時間分解能を高めることだと思います。また、水月湖年縞堆積物には、炭素14年代キャリブレーションデータに関する情報だけでなく、気候変動などの地球システム変動に関する興味深い情報が記録されています。現在、世界各地の研究者により、これらの情報を詳しく解読する研究が実施されています。

#### 参考文献

- 1) de Vries, H., Variation in concentration of radiocarbon with time and location on earth, *Proc. Koninkl. Nederl. Akad. Wetenschappen*, **B61**, 1-9 (1958)
- 2) Stuiver, M. and Kra, R., Radiocarbon Calibration Issue, *Radiocarbon*, **28**(2B), 805-1030 (1986)
- 3) Stuiver, M. and Pearson, G.W., High-Precision Calibration of the Radiocarbon Time Scale, AD 1950-500 BC, *Radiocarbon*, **28**(B), 805-838 (1986)
- 4) Stuiver, M. and Reimer, P., Extended  $^{14}\text{C}$  data base and revised CALIB 3.0  $^{14}\text{C}$  age calibrating program, *Radiocarbon*, **35**(1), 215-230 (1993)
- 5) Bard, E., Arnold, M., Fairbanks, R.G. and Hamelin, B.,  $^{230}\text{Th}$ - $^{234}\text{U}$  and  $^{14}\text{C}$  ages obtained by mass spectrometry on corals, *Radiocarbon*, **35**(1), 191-199 (1993)
- 6) Kitagawa, H., Fukusawa, H., Nakamura, T., Okamura, M., Takemura, K., Hayashida A. and Yasuda, Y., AMS  $^{14}\text{C}$  dating of varved sediments from Lake Suigetsu, central Japan and atmospheric  $^{14}\text{C}$  change during the last Pleistocene, *Radiocarbon*, **37**(2), 371-378 (1995)
- 7) Kitagawa, H., Lacustrine varve counting as a dating technique: advantage and disadvantage, *The Oxford Handbook of Wetland Archaeology* (eds. F. Menotti and A. O'Sullivan), pp.633-647, Oxford University Press (2013)
- 8) 竹村恵二, 北川浩之, 林田明, 安田喜憲, 三方湖・水月湖・黒田低地の堆積物の層相と年代一三方低地の最終間氷期以降の堆積環境一, *地学雑誌*, **103**(3), 233-242 (1994)
- 9) Kitagawa, H. and van der Plicht, J., Atmospheric radiocarbon calibration to 45,000 BP: late glacial fluctuations and cosmogenic isotope production, *Science*, **279**, 1187-1190 (1998)
- 10) Marshall, M., Schlolaut, G., Brauer, A., Nakagawa, T., Staff, R.A., Bronk Ramsey, C., Lamb, H., Gotanda, K., Haraguchi, T., Yokoyama, Y., Yonenobu, H. and Tada, R., SG06 project members. A novel approach to varve counting using mXRF and X-radiography in combination with thin-section microscopy, applied to the Late Glacial chronology from Lake Suigetsu, Japan, *Quaternary Geochronology*, **13**, 70-80 (2012)
- 11) Schlolaut, G., Marshall, M.H., Brauer, A., Nakagawa, T., Lamb, H.F., Staff, R.A., Bronk Ramsey, C., Bryant, C.L., Brock, F., Yokoyama, Y., Tada, R., Haraguchi, T. and Suigetsu 2006 project members, An automated method for varve interpolation and its application to the Late Glacial chronology from Lake Suigetsu, Japan, *Quaternary Geochronology*, **13**, 52-69 (2012)
- 12) Staff, R.A., Bronk Ramsey, C., Nakagawa, T. and Suigetsu 2006 project members, A re-analysis of the Lake Suigetsu terrestrial radiocarbon calibration dataset, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B*, **268**, 960-965 (2010)
- 13) Staff, R.A., Nakagawa, T., Schlolaut, G., Marshall,

- M.H., Brauer, A., Lamb, H.F., Bronk Ramsey, C., Bryant, C.L., Brock, F., Kitagawa, H., van der Plicht, J., Payne, R.L., Smith, V.C., Mark, D.F., MacLeod, A., Blockley, S.P.E., Schwenninger, J.-L., Tarasov, P.E., Haraguchi, T., Gotanda, K., Yonenobu, H., Yokoyama, Y. and Suigetsu 2006 project members, The multiple chronological techniques applied to the Lake Suigetsu SG06 sediment core, central Japan, *Boreas*, 10.1111/j.1502-3885.2012.00278.x (2012)
- 14) Kitagawa, H. and van der Plicht, J., Atmospheric radiocarbon calibration beyond 11,900 cal BP from Lake Suigetsu laminated sediments, *Radiocarbon*, **42**(3), 369–380 (2000)
- 15) Bronk Ramsey, C., Staff, R.A., Bryant, C.L., Brock, F., Kitagawa, H., van der Plicht, J., Schlolaut, G., Marshall, M.H., Brauer, A., Lamb, H.F., Payne, R.L., Tarasov, P.E., Haraguchi, T., Gotanda, K., Yonenobu, H., Yokoyama, Y., Tada, R. and Nakagawa, T., A complete terrestrial radiocarbon record for 11.2 to 52.8 kyr B.P., *Science*, **338**, 370–374 (2012)
- 16) Reimer, P., Baillie, M., Bard, E., Bayliss, A., Beck, J., Blackwell, P., Bronk Ramsey, C., Buck, C., Burr, G., Edwards, R., Friedrich, M., Grootes, P., Guilderson, T., Hajdas, I., Heaton, T., Hogg, A., Hughen, K., Kaiser, K., Kromer, B., McCormac, F., Manning, S., Reimer, R., Richards, D., Southon, J., Talamo, S., Turney, C., van der Plicht, J. and Weyhenmeyer, C., IntCal09 and Marine09 radiocarbon age calibration curves, 0–50,000 years cal BP, *Radiocarbon*, **51**, 1111–1150 (2009)
- 17) Reimer, P., Refining the Radiocarbon Time Scale, *Science*, **338**, 337–338 (2013)

(名古屋大学環境学研究科)