

# 炭素-14 を用いた高精度年代測定と考古学

名古屋大学 年代測定総合研究センター

教授 中村 俊夫

## 1. 放射性炭素年代測定とは

加速器質量分析は、accelerator mass spectrometry(AMS)の和訳である。AMS とは、粒子イオンを加速する装置（加速器）とその重さ（質量）を区別する磁場装置（質量分析計）を結合して、粒子イオンを質量数について分離し、それらの存在量を測定する方法である。天然の炭素は、放射性的炭素原子（ $^{14}\text{C}$ ）と安定な炭素原子（ $^{12}\text{C}$  及び  $^{13}\text{C}$ ）からなる。記号 C は炭素を表し、左肩の数字は質量数を表す。AMS により、試料炭素に含まれる  $^{12}\text{C}$ 、 $^{13}\text{C}$  および  $^{14}\text{C}$  の個数の比率を正確に割り出すことができる [文献 1]。この比率と年代にはどのような関係があるのか。実は、 $^{14}\text{C}$  は放射性的炭素原子であり、時間が経つと、別の元素（窒素）に変わってしまう。この放射性壊変は、物理学の原理に基づき、規則正しく起こる。従って、放射壊変は正確な時計として利用でき、この放射壊変による  $^{14}\text{C}$  の減少量を測ることで、試料が形成されてからの経過時間がわかる。これが、 $^{14}\text{C}$  年代測定法である。

炭素は、生物に含まれる主要元素の一つであることから、生物に由来するさまざまな物質に含まれている。従って、さまざまな炭素を含む物質が  $^{14}\text{C}$  年代測定の対象となる。

$^{14}\text{C}$  は、宇宙から降ってくる宇宙線の作用により地球の大気中で形成される。 $^{14}\text{C}$  は酸化されて二酸化炭素（ $^{14}\text{CO}_2$ ）となり、大気中に存在する他の二酸化炭素とよく混合して、 $^{14}\text{C}$  濃度（ $^{12}\text{C}$  に対する  $^{14}\text{C}$  の割合）が一定になったあと、光合成、食物連鎖により生物体内に移行する。宇宙線による  $^{14}\text{C}$  の生成が時間的に変動しなければ、放射壊変により減少する  $^{14}\text{C}$  の個数と生成される個数とが釣り合って、地球上の  $^{14}\text{C}$  の個数は時間的に変動しない。このため、炭素試料の  $^{14}\text{C}$  初期濃度がほぼ一定であり、試料中に残存している  $^{14}\text{C}$  濃度と試料の年代との関係はほぼ指数関数で表される。様々な炭素含有物質のうち、炭素固定を行った時期が数万年前より新しいものでは、まだ  $^{14}\text{C}$  が残っており、その  $^{14}\text{C}$  濃度を測定することで、炭素固定の年代が測定できる [文献 1]。

1950 年頃、Libby により開発された  $^{14}\text{C}$  年代測定では、 $^{14}\text{C}$  の検出は、 $^{14}\text{C}$  が放射壊変する際に放出する放射線を検出することにより行われた。この方法では、1g 以上の炭素が必要とされる。一方、AMS による  $^{14}\text{C}$  年代測定は、炭素 0.2~1mg で実施できる。このことから、さまざまな考古学的試料の直接測定が可能となった。従来は、小型の貴重な考古遺物は年代測定をあきらめて入念に保存し、代わりに同一層準から出土した大型の木材などについて年代測定を行い、それを遺物の年代として代用した。代用試料で済ませたことから、考古試料の  $^{14}\text{C}$  年代による編年に曖昧さが残った。AMS では、ほとんどの試料について、保存状態さえよければ直接測定が可能

である。

実際、AMS による  $^{14}\text{C}$  年代測定の結果から、1950 年代に栃木県安蘇郡葛生町で発掘され、50 万年前に遡る旧石器時代人とされてきた“葛生原人”の骨が実は 15 世紀頃のものであることが、また三ヶ日人の骨が実は縄文人の骨である可能性が高いことが明らかになってきている。葛生原人や三ヶ日人の骨の発掘は、注意深く行われ、層序関係や骨と共に出土した遺物から、旧石器時代人の骨と総合的に判断されていたが、その年代推定については疑問が持たれていた。AMS を用いた人骨化石の直接測定により従来の推定よりもずっと新しいものであることが明らかにされたのである。

## 2. 名古屋大学タンデトロンによる $^{14}\text{C}$ , $^{13}\text{C}$ , $^{12}\text{C}$ 測定

名古屋大学に設置されている加速器質量分析計の全体像を写真 1 に示す。試料から特定の炭素成分が抽出され、グラファイトに変えられる。分析計のイオン源で、炭素の陰イオンを作る。タンデム加速器を用いて加速したあと陽イオンに変換して再加速し、質量分析電磁石により、 $^{12}\text{C}$ ,  $^{13}\text{C}$ ,  $^{14}\text{C}$  に分離する。 $^{12}\text{C}$  および  $^{13}\text{C}$  の陽イオンは電流読みとり装置で定量する。 $^{14}\text{C}$  は、気体電離箱検出器へ導き、 $^{14}\text{C}$  であることを確認した後に計数する。大気中  $\text{CO}_2$  の炭素同位体組成は、 $^{12}\text{C}$  が 0.989 に対して  $^{13}\text{C}$  が 0.011、また  $^{14}\text{C}$  は 0.000000000001 ときわめて微量にしか存在しない。AMS は、ごく微量の同位体が検出できる超高感度の測定方法である。

名古屋大学のタンデトロン加速器質量分析計による  $^{14}\text{C}$  年代測定は次の様な特徴を持つ[文献 2]。

- (1) ごく少量の炭素試料で測定が可能である。すなわち最終段階で分析計に用いる試料は、炭素として 0.2 ~ 2 mg あればよい。
- (2) 測定誤差は、数千年前までの比較的新しい試料については、定常的な年代測定では  $\pm 20 \sim \pm 40$  年程度である。試料の年代が古くなると誤差はこれより大きくなる。
- (3) ごく低い  $^{14}\text{C}$  濃度の測定が、すなわち古い年代の測定が可能である。5 万 ~ 6 万年前まで遡って年代測定ができる。
- (4) 測定に要する時間が短く、1 試料あたり 0.5 ~ 1 時間でよい。

## 3. AMS による $^{14}\text{C}$ 測定に用いられる試料の選別とその処理方法

試料として、木片・草片・竹片、木炭・炭化物、泥炭、骨・牙・歯、動物の筋肉・体毛、絹糸・綿糸・紙片、土壌、湖底・海底堆積物、貝殻・サンゴ・プランクトン、淡水・海水中の溶存無機炭酸・有機態炭素、大気中の  $\text{CO}_2$ ・ $\text{CH}_4$ 、古代鉄中の炭素などが用いられる。比較的大量に採取できる木片、木炭、泥炭、土壌、貝殻、サンゴなどを除くと、これらの試料の年代測定は AMS の開発によって初めて定常的に実施できるようになった。特に、考古学の分野では、炭化した穀物(コメ、ヒエ、アワ、など)、炭化種子、花粉、骨などのきわめて微量な試料、また、文化財の関連

では、古文書、古絵画、木製品、骨角製品、鉄製品などの貴重な資料の測定が定常的に可能となったことが特筆される。

#### 4. $^{14}\text{C}$ 年代から暦年代への較正

樹木年輪や海底堆積物の年縞の計数及びサンゴの U-Th 年代測定から得られる暦年代とそれらの試料の  $^{14}\text{C}$  年代の関係を図 1 に示す。これが、全世界的に、 $^{14}\text{C}$  年代を暦年代へ較正する際に使われている“ $^{14}\text{C}$  年代-暦年代較正曲線(IntCal04 データベース、あるいは旧版の IntCal98 が使われる)”である。図 1 から、 $^{14}\text{C}$  年代は暦年代からずれていることがわかる。おおよそ AD 1 年以前では、 $^{14}\text{C}$  年代は暦年代よりも系統的に若い値を示し、そのズレは年代が古くなるほど大きくなる。数千年前では  $^{14}\text{C}$  年代は暦年代よりも 500~800 年若く、数万年前になると 3 千~5 千年若い。また、現代から 12,400 cal BP の間は、樹木年輪を用いて過去の  $^{14}\text{C}$  濃度が詳細に測定されており、 $^{14}\text{C}$  濃度のデコボコ ( $^{14}\text{C}$  ウィグル) が知られている。

考古学的イベントの時間的周期性(例えば、一つの土器形式の使用期間や形式の移り変わりなど)を解析しようとする際には、歪んだ時間尺度である  $^{14}\text{C}$  年代を使ってはいけない。代わりに暦年代を用いる必要がある。そこで、図 1 に示されるデータを用いて  $^{14}\text{C}$  年代から暦年代への較正が行われる。較正法の実際については、文献 [3] を参照されたい。現状では、較正が比較的正確にできるのは、現代から 12,400 cal BP までである。 $^{14}\text{C}$  年代測定が可能とされる 5~6 万年前までの古い年代域で、正確な年代較正が出来るように、さまざまな研究が継続されている。

#### 5. AMS による $^{14}\text{C}$ 年代測定の応用

AMS による  $^{14}\text{C}$  年代測定は、測定に必要な炭素量がごく少量であるため、これまで測定できなかったさまざまな試料の測定が可能になった(文献[1,2])。ここでは、(1)土器付着炭化物、(2)火山の巨大噴火、(3)アフガニスタンのバーミヤーン仏教壁画資料の年代測定について応用例を紹介する。

##### 5.1 土器付着炭化物の $^{14}\text{C}$ 年代測定

最近、弥生土器表面の付着炭化物を AMS で直接年代測定した結果、弥生時代が 900BC 頃に始まったことが結論できるとの研究報告があり、反響を呼んでいる。土器に付着する炭化物は、土器が食物の煮炊きに使われた際に残ったオコゲであり、土器の使用年代を推定するための最適な試料である。この報告の信頼性は高い。

著者らは、かつて青森県大平山元 1 遺跡で、旧石器の特徴を残す長者久保文化期の石器に伴って出土した無文土器の破片について、付着炭化物を年代測定し、世界最古級の年代値 ( $^{14}\text{C}$  年代値で 12,680~13,780BP、較正暦年代で 15,320~16,540calBP) を得た。この際、土器と同層から採取された木炭片 3 点の  $^{14}\text{C}$  年代は、土器片と一致する年代と大きく食い違う年代の 2 つに分かれた (13,480, 7710, 7070BP)。この例では、付着炭化物の年代が求まっていることから、古い方の年代が

正しいことは明かである．土器が使用された年代を知るためには，土器の使用に直接関係する試料を測定するべきであるという教訓を得た．

## 5.2 $^{14}\text{C}$ ウイグルマッチングによる巨大噴火の年代決定

中国と北朝鮮の国境にある長白山（白頭山）は 10 世紀に大噴火を起こした．その周辺にあった渤海国は 926 年に滅亡したが，火山災害で国力が弱まったためであると疑われている．歴史時代の噴火であるが，噴火年代を決定できる歴史的な記録は今のところ見つかっていない．著者らは，2000～2001 年にかけて，長白山山麓の火砕流堆積物を調査し，樹齢 100 年で樹皮が付いた炭化材を採取した．

従来は，樹木が火砕流により焼けた年を示すはずの最外年輪を含む数年輪について高精度で年代測定し，それを噴火年代とした．AMS では，1 年輪単位で測定できる．実際には，1 年輪ごとの分割は困難であったため，外側の 20 年輪は 2 年分をまとめて，それより内側は 1 年輪毎に分割し，その中から 35 試料を選別した．こうして，年輪番号による  $^{14}\text{C}$  年代値の変動を得た（図 2）．この変動パターンを，前出の IntCal98 データベースの年輪年代に対する  $^{14}\text{C}$  年代値の変動と絵合わせすることによって，炭化材の最外年輪の暦年代を高精度に決定することができる．ここでは，最外年輪の暦年代として， $935^{+8}_{-5}$  年と得られた．この暦年代推定には，測定された 35 個の年輪の  $^{14}\text{C}$  年代値の全てが寄与しており，推定の信頼度は格段に高い．条件さえ整えば， $^{14}\text{C}$  ウイグルマッチング法で 1 年の精度で年代決定ができるようになるかもしれない．なお，長白山の噴火は，渤海国の滅亡には無関係であったと結論できる．

## 5.3 アフガニスタンのバーミヤーン仏教壁画資料の $^{14}\text{C}$ 年代測定

アフガニスタンのバーミヤーン遺跡は，2 体の巨大石仏と多数の洞窟で構成され，石仏の周囲や洞窟内の壁面には土壁が作られており，その壁面に仏教画が描かれている[文献 4]．AMS による  $^{14}\text{C}$  年代測定をバーミヤーン遺跡の仏教壁画が描かれている壁面から採取されたスサ（麦わら）および木材資料に適用した．スサ資料は，最近の同国内の紛争により破壊された洞窟壁画の壁面やそこから剥げ落ちた土壁破片から少量ずつ採取されたものである．年代測定の目的は，スサおよび木材資料の  $^{14}\text{C}$  年代から，それぞれの洞窟壁画が作製された年代に関する情報を読み解くことである．

バーミヤーン遺跡の主崖窟の土壁から採取された 43 個のスサ資料および 1 個の木材資料について得られた  $^{14}\text{C}$  年代及び  $^{14}\text{C}$  年代から較正された暦年代による編年区分は，以下のようにまとめられる．

5 世紀中頃から 6 世紀中頃：M(文献 3 の Table 1 の整理番号：26), Jb(28,39), Jg(29,30), Jd(31), Je(32)

6 世紀中頃から 6 世紀末頃：Ca<sub>vestibule</sub>(12,13), Cc(11)

6世紀中頃から7世紀前半：D1(16, 27), A<sub>low</sub>(7,8)

7世紀前半から7世紀後半：Da-A-a(42,43), D<sub>vestibule</sub>(14), D(15), S(44), Na(33)

7世紀中頃から7世紀後半：Ba(9), Fa(17,18), East-III(21)

7世紀後半から8世紀後半：Bd(10), K3(40,41), Ee(22,23,24,25), I(34)

8世紀後半から9世紀後半：Fc(19,20), Z1(35)

これらの理化学的な年代測定結果は、仏教美術に基づく壁画の編年とおおよそ矛盾しないことが明白となり[文献4]、<sup>14</sup>C年代測定適用の有効性が示された、また、パーミヤーン遺跡の壁画作成が古く5世紀中頃まで遡る可能性が示され、シルクロード周辺に残る仏教壁画の総合的な編年の研究が、<sup>14</sup>C年代測定を適用して推進されることが期待されている。

## 6. 今後の展望

<sup>14</sup>C年代測定は、AMSの開発により大発展を遂げた。今や、数千年前程度の比較的若い試料については±20～±40年の誤差で測定できる。また、測定可能な試料数は、年間2000個を越えることが可能である。今後の技術改良によってさらに、正確度、精度の向上、測定効率の向上が進められるであろう。また、測定に必要な炭素試料の量についても、マイクログラム程度のごく微量試料で<sup>14</sup>C年代測定を可能にするための研究が進められている。このような年代測定技術の進歩に伴って、日本人の起源や日本での定住過程、土器編年、コメや鉄の日本への伝搬などの考古学研究[文献5]、また古文書、古絵画、古代鉄などの古文化財研究への応用がさらに発展するものと期待される。

## 参考文献

- [1] 中村俊夫(1999)放射線炭素法。「考古学のための年代測定学入門」。長友恒人(編)、古今書院、1-36.
- [2] 中村俊夫(2003)放射性炭素年代測定法と暦年代較正。環境考古学マニュアル、松井章編著、同成社、301-322.
- [3] 中村俊夫(2000)<sup>14</sup>C年代から暦年代への較正。「日本先史時代の<sup>14</sup>C年代」、日本第四紀学会(編)、21-39.
- [4] 文化財研究所・名古屋大学(編)(2006)パーミヤーン仏教壁画の編年・放射性炭素による年代測定。アフガニスタン文化遺産調査資料集第2巻、明石書店。
- [5] 西本豊弘(2006)弥生時代の新年代。「新弥生時代のはじまり」シリーズ、第1巻、雄山閣



写真 1 . 名古屋大学タンデロン加速器質量分析計

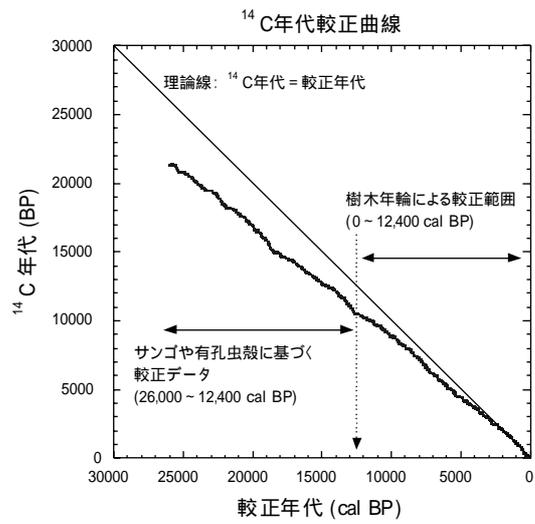


図 1  $^{14}\text{C}$  年代較正曲線 (IntCal04 データセット)

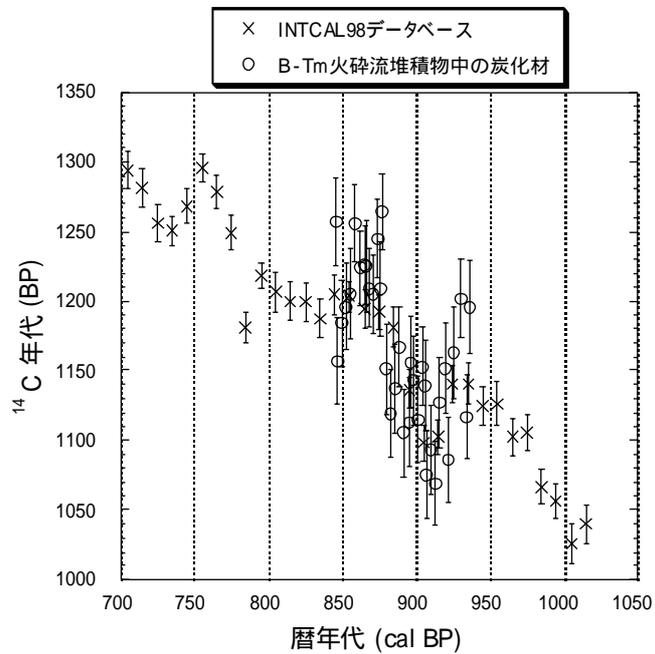


図2 長白山噴火(B-Tm)の火砕流堆積物中から採取された炭化材の年輪ごとの $^{14}\text{C}$ 年代のウイグルマッチングの結果

炭化材の年輪ごとの $^{14}\text{C}$ 年代を、INTCAL98データベースに絵合わせして最良の重なりを捜す。こうして、炭化材の最外年輪の暦年代が推定できる。