測定値の平均化とウイグル・マッチング

—— 高精度年代決定のための二、三のテクニックについて ——

古 城 泰*

同一遺構から得られた複数試料の年代測定値の平均化および高精度 ^{14}C 樹輪補正曲線を使用した ^{14}C ウイグル・マッチングは、条件さえうまくあえば、高精度で年代を決定するための有効な手段となる。このことを筆者が北アメリカ南西部および西日本の遺跡から採取した遺物を用いて行った研究例で示す。ここで示した 10 年単位の ^{14}C ウイグル・マッチングは、試料木材が大量に必要なこと、試料の調製・測定に相当な時間と労力がかかること、試料木材の年代によっては測定ができない場合があること等の問題がある。これらの問題の解決策のひとつとして、炭素ないし酸素の安定同位体比を用いた 1 年単位のウイグル・マッチングの可能性についても述べる。

キーワード：高精度年代決定、複数試料年代測定、平均化、ウイグル・マッチング

I. はじめに

年代測定において、非常に小さな誤差の年代を得ることとは、樹木の年輪や湖沼堆積物の年周期性にもとづく少数の年代決定法を除けば、一般に難しい。しかし、必ずしも不可能なことではない。ここでは、既存の年代測定法またはほかの測定法を使用して、従来のものより高精度の年代を得るためのテクニックについて述べる。

II. 測定値の平均化による精度の向上

同一遺構出土の複数試料の年代測定結果を平均化することによって、高精度で実年代を得ることができる場合がある。これは各測定に伴うランダムな誤差を相殺することによる。ただし、測定誤差の多くが必ずしもランダムに分布しているとは限らないから、複数測定値を平均化することにより、必ず実年代に近い値が得られるとは限らない。しかし、誤差の多くがランダムに分布している場合、複数測定値の平均化が高精度な実年代を得るための有効な手段となる。

図 1 および表 1 は、アメリカ合衆国南西部にある 2 遺跡から出土した土器の熱ルミネッセンス年代とそれらの平均値を示したものである (Kojo, 1991)。これらの遺跡では、年輪年代法により居住開始年と廃絶年がほぼ確実にわかっており、土器試料の最終加熱年を 2~11 年の範囲でおさえることができる。チョーディスタス・

プエブロ (Chodistaas Pueblo) (18 室からなる集落址) からは 100 例以上の年輪年代が得られており、それら

図 1 Chodistaas Pueblo および AZ 1:1:17 (ASM) 出土試料の熱ルミネッセンス年代 (含水率補正後) の分布
 コラム I は個々の試料の年代 ($\pm 1\sigma$), II は平均年代 (Mean) と期待年代 (Expected) とを示す。

1995 年 1 月 6 日受付, 1995 年 4 月 10 日受理, 1994 年度日本第四紀学会大会シンポジウムにおいて講演。

* 早稲田大学校地埋蔵文化財調査室 〒202 保谷市東伏見 2-7-5。

表1 チョーディスタス・プエブロおよび AZ I: 1: 17 (ASM) 出土試料の熱ルミネッセンス年代測定結果

試料 番号	等価線量 (rad)	Supralineality Correction (rad)	蓄積線量 (rad)	β 線年間 線量(無 水状態,rad)	Saturation content	β 線年間 線量(含 水状態,rad)	γ 線および 宇宙線年間 線量(rad)	測定年	TL年代(AD)	
									*	**
Chodistaas Pueblo										
1	280	15	295	0.23	0.14	0.20	0.19	1985	1,280±50	1,230±50
2	290	15	305	0.23	0.14	0.20	0.19	1985	1,260±50	1,200±50
3	235	10	245	0.25	0.11	0.22	0.19	1985	1,430±60	1,390±60
4	260	25	285	0.24	0.11	0.21	0.19	1986	1,320±50	1,270±50
5	255	35	290	0.24	0.11	0.21	0.19	1986	1,310±60	1,260±60
								平均	1,310±20	1,270±20
AZI:1:17(ASM)										
1	315	15	330	0.24	0.10	0.22	0.15	1986	1,140±60	1,090±60
2	370	5	330	0.25	0.13	0.22	0.15	1986	1,050±80	970±80
3	320	5	325	0.24	0.11	0.21	0.15	1986	1,150±70	1,080±70
								平均	1,120±40	1,060±40

* 含水率補正なし

** 含水率補正後

の分布から住居の建築が AD1263~1285 年の間に行われ、1289~1300 年の間に遺跡が廃絶されたことがわかっている。試料としたのは、この遺跡の一室の床面に残されていた 2 個体の土器である。試料 1, 2 および試料 3~5 はおのこの土器を 2 つおよび 3 つに分けて試料としたものである。この遺跡は廃絶時に遺跡全体が焼かれており、このとき床面に残された土器はアニーリング温度 (300~500°C) まで再加熱されたと考えられる。したがって、熱ルミネッセンス年代の期待値は 1289~1300 年となる。

一方、AZ I: 1: 17 (ASM) (隣接した 4 軒の住居からなる集落址) からは、97 例の年輪年代が得られており、やはりそれらの分布から 4 軒の住居は AD1049~1058 年の間に建設され、1064~1065 年に廃絶されたものと考えられている。この遺跡の試料は、4 軒のうち 2 軒の住居の床面に残された土器各 1 個体ずつ、および住居の近くでみつかった土器製作遺構に伴う土器 1 個体の計 3 個体の土器である。この遺跡もやはり廃絶時に遺跡全体が焼かれており、期待年代は 1064~1065 年になる。

各遺跡における年間線量は、銅製チューブにおさめた高感度線量計 (CaSO₄: Tm) を各遺跡に埋め込んで測定を行った。チョーディスタス・プエブロにおいては、試料としたおのこの土器が出土した床面上の位置に、線量計をひとつずつ設置した後、掘りあげられて部屋の周囲に放置されてあった住居跡覆土を線量計上 30 cm 以上のレベルまで埋め戻した。一方、AZ I: 1: 17 (ASM) は、発掘後道路工事により破壊されたため、遺跡のすぐ近くの同質土壌の地点の地下約 30 cm のとこ

ろに線量計を埋め込んだ。チョーディスタス・プエブロでは、1985 年 7 月中旬から 1986 年 2 月初めまでの約 6 か月間、AZ I: 1: 17 (ASM) では 1986 年 10 月初めから 1987 年 1 月末までの約 4 か月間の線量測定を行い、おのこの測定値を 2 倍および 3 倍して年間線量を求めた。

土器試料および線量計の放射線量測定は、奈良教育大学の故市川米太教授によって行われた。すべての土器試料は、単結晶および多結晶の石英粗粒砂を多量に含んでいるため、Quartz-inclusion 法 (Fleming, 1979: 40-57) による測定が行われた。測定作業の詳細については別稿 (Ichikawa *et al.*, 1978; Kojo, 1991: 369-370) を参照されたい。

測定年代は、遺跡土壤中に土器が埋没していたときの推定含水率にもとづいて補正を行った値 (Aitken, 1985: 75) と行っていない値の両方を示した。推定含水率はアメリカ合衆国南西部に位置する別の 2 遺跡から出土した土器片おのこの 10 例および 18 例について測定した結果 (0.9 $\pm$ 0.07) を用いた。

各遺跡試料の年代を平均化する前に、逸脱した年代を排除するための検定を Ward and Wilson (1978: 21) の考案した方法によって行った。その結果、95% の信頼度で逸脱年代のないことが確認されたので、すべての試料の年代をおのこの標準偏差の大きさの逆数で重みづけして平均化を行った (Ward and Wilson, 1978: 21)。

チョーディスタス・プエブロにおいては、含水率の補正を行わない場合の平均年代は 1,310 $\pm$ 20 年、年代補正の平均値は 1,270 $\pm$ 20 年で、両方とも測定誤差 ($\pm 1\sigma$)

内で1,289~1,300年の範囲を一部含んでいる。しかし、平均化する前の個々の年代は補正なしの場合5例中1例、補正年代は5例中3例がこの範囲を含んでいない。一方、AZ I: 1: 17(ASM)においては、補正なしの平均年代は $1,120 \pm 40$ 年で推定年代(1,064~1,065年)から大幅にずれているが、補正年代の平均値は $1,060 \pm 40$ 年で期待年代とよく一致している。しかし、平均化する前の個々の年代のうち、3例中1例は期待年代を含まない。一方、補正なしの年代3例のうち、2例も期待年代を含んでいない。いずれにしても両遺跡における補正年代についてみると、各試料の年代はかなりばらついてはいるが、平均年代は誤差範囲で推定年代とよく一致しているといえる(図1)。

III. ^{14}C 年代によるウイグル・マッチング

^{14}C 年代を利用した高精度年代決定のテクニックのひとつにウイグル・マッチング(Wiggle-matching)がある(Bowman, 1990: 48-49)。この方法では、現在のところ条件さえうまくあえば、 ± 5 年以内の誤差で試料とした木材の最外輪年を知ることができる。この条件とは、(1) 試料木材から連続する10年分の年輪を風乾重量で60~70g以上、40~50年分以上採取できること、(2) 試料木材年輪群の開始年の1の位が0~3ないし7~9であることである。大気中の ^{14}C 濃度は時間的に変化しているが、ウイグル・マッチングではこの変化パターンを利用して年代測定を行う。すなわち、年代既知の木材試料にもとづいて測定された ^{14}C 濃度の時間的変化パターンと、遺跡出土木材を試料として測定された ^{14}C 濃度の時間的変化パターンとを照合し、一致する部分を見つけて、出土木材の最外輪年を決定する。これはちょうど、年輪年代法における年輪幅変化のパターンのかわりに ^{14}C 濃度の変化パターンを用いるものと考えればよい。都合のよいことに、 ^{14}C 濃度の時間的変化の標準曲線として、すでに公表されている ^{14}C 年代の樹輪補正曲線(たとえば Stuiver, 1982; Stuiver and Becker, 1986)をそのまま利用することができる。

ウイグル・マッチングの成否は、標準曲線の正確さに大きく依存する。また、年代決定の精度は、どのくらい細かい間隔で測定された標準曲線が使えるかによって決まってくる。たとえば、現在までに公表されている補正曲線のうち、もっとも高精度で測定間隔が細かい(10年単位)と思われる Stuiver らの補正曲線(Stuiver, 1982; Stuiver and Becker, 1986)を使うと、 ± 5 年の精度で年代決定を行うことが可能である。以下、そのような試みの実例を紹介する(Kojo *et al.*, 1994)。

試料とした木材(長さ約30cm、直径約5.5cm)は、

図2 纏向石塚古墳測定試料木材出土位置(A)

実線で囲んだ部分は発掘範囲を示す。

桜井市教育委員会(1989)による。

奈良県桜井市所在の纏向石塚古墳(桜井市教育委員会, 1989)周濠から出土した樹齢60年のヒノキの枝(発掘時長さ約4m)の一部である。本木材には加工痕がみられず、樹皮は残っていないものの、最外輪が伐採年もしくは枝の落ちた年をあらわすことは確実である。この木材は墳丘括れ部に近い周濠中から出土したが(図2)、周濠底に密着して出土したのではなく、底から数10cm上に堆積した植物腐植土層上部から出土したものである。したがって、試料の最外輪年は古墳の築造年そのものではなく、築造年の下限を示すものといえる。

試料の最外輪から内側に向けて、10年ずつ50年分の年輪群を切り離し、これら5つの年輪群のおのおのについて液体シンチレーションによる高精度 ^{14}C 年代測定が、アリゾナ大学放射性炭素研究室において Long 教授および Kalin 博士によって行われた(Kalin and Long, 1989; Long and Kalin, 1990)。測定は各年輪群からセルロースのみを抽出して行われたが、最外部の10年の年輪群は試料が少なく、充分量のセルロースが抽出できなかったため、内側の40年分(4試料)についてのみ高精度年代測定($\pm 14 \sim 15$ 年)が行われた。アリゾナ大学の液体シンチレーション年代測定は、通常3gのサンプル・ベンゼンについて2,000分間の測定を行うが、今回はサンプル、バックグラウンド、スタンダードのおのおのについて7gのベンゼンを用いて、サンプルについては10,000分間、スタンダードについては20,000分間、バックグラウンドについては17,000分間

表2 纏向石塚古墳出土土試料 ^{14}C 年代測定結果

測定番号 (アリゾナ大)	年輪採取部位	試料風乾 重量 (g)	セルロース 重量 (g)	重量減 少率 (%)	^{14}C 年代 (BP) $\pm 1\sigma$	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	試料 番号
A-5874	外から5番目の10年	71.8	26.5	63.1	1,723 $\pm$ 14	-20.76	1
A-5875	外から4番目の10年	61.0	20.5	66.4	1,757 $\pm$ 15	-20.61	2
A-5876	外から3番目の10年	86.0	28.4	66.9	1,721 $\pm$ 15	-21.01	3
A-5877	外から2番目の10年	60.0	19.0	68.3	1,812 $\pm$ 14	-21.36	4
A-5878	最外部の10年	42.0	11.3	73.1	(測定できず)		

Quantulus低バックグラウンド・カウンターによる測定が行われた(表2)。

なお、試料の分析に先立って年代測定室間の測定値の一貫性を確かめるため、Pearson *et al.* (1986)が高精度補正曲線をつくる際に使用した木材から、年代のわかっている二つの年輪群サンプル(おのおの20年分)を入手し、それらについて年代測定を行い、その結果をすでに発表されている年代値と比較した。その結果、補正曲線において4,669 $\pm$ 18 yrs BPおよび3,960 $\pm$ 13 yrs BPとされたものが(Pearson *et al.*, 1986: 931-932), おのおの4,640 $\pm$ 18 yrs BPおよび3,977 $\pm$ 15 yrs BPと測定され、両方とも $\pm 2\sigma$ の範囲内でよく一致した。

一方、纏向石塚古墳出土試料の ^{14}C 年代変化のパターンは、Stuiver and Becker(1986)の作製した高精度補正曲線のAD270年から310年の部分の変化のパターンと、非常によく一致する(図3)。単に、年代値の相対的な変化のパターンがよく一致するだけでなく、おのおの試料の年代そのものからみても、この部分が一致することは明らかである。したがって、試料とした木材の最外輪年は、セルロースの量が不十分で測定できなかった最外部の年輪群(10年分)を加えて、確実にAD320 $\pm$ 5年の年代幅の中に入っているものといえる。結局、本古墳はAD325年以前に築造された可能性が非常に高いことになる。

ここでウイグル・マッチングに用いた補正曲線は、主として北アメリカ北西部で採取された木材(Douglas fir)を用いて作製されたものである。この曲線をつくったStuiver and Becker(1986)は、この曲線が北半球の大部分の地域で使用可能であると述べている。今回のウイグル・マッチングにおけるパターンの良好な一致は、この主張が正しい可能性を示唆するものである。なお、この10年単位の高精度補正曲線は、AD1950年から2500年BCまでの約4,500年分について作製されている。

木材の最外輪年を求めるのにもっとも優れた方法は年輪年代法であり、この方法が使える場合、ウイグル・マッチングを含めてほかの年代測定法を試みる必要はな

図3 纏向石塚古墳出土試料のウイグル・マッチング

3本の折線は高精度補正曲線(Stuiver and Becker, 1986)の平均値と測定誤差($\pm 1\sigma$)を示す。各測定値上の数字は試料番号(表2参照)、上下のバーは測定誤差($\pm 1\sigma$)を示す。

い。しかし、年輪年代法の適用は出土木材の樹種、部位、年輪数ほかのさまざまな条件によって制約を受ける。今回、ここで用いた試料もウイグル・マッチングに先立ち、年輪年代法の適用が試みられたが、年輪幅標準曲線とのパターンの一致がみいだせず、測定が断念されたものである(奈良国立文化財研究所 光谷拓実氏談)。ウイグル・マッチングにおいては、試料となる木材の樹種や部位に制限はなく、年輪数も50年程度あればできるので、年輪年代法よりは適用範囲が広がる。しかし、年輪群の試料を充分量(風乾重量60~70g以上)確保するためには、試料となる木材(年輪数40~50以上)がかなり大量に必要であること、年輪群の切り離しおよび高精度 ^{14}C 測定に相当の時間と労力が必要であること等の難点もある。これらの難点に加えて、この方法のもっとも大きな問題点は、出土木材の年輪群試料の開始年によっては、すべての操作を正確に行ってもパターンの一致が得られない場合があることである。たとえば、ここで用いた補正曲線は1950年を基点として(例

外もあるが), 10年ごとに年輪を分離して作製されたものである。もし出土木材の最外輪年の1の位が4~6年であった場合, 補正曲線とのパターン的一致はいかに正確な測定を行っても望むことはできないと思われる。逆にいえば, 今回のように補正曲線と試料曲線の変化パターン的一致が非常によい場合, 最外輪年は $AD320 \pm 1 \sim 2$ 年の年代幅の中におさまっている可能性が高いものともいえる。

先に述べたように, ウイグル・マッチングによる年代決定の精度は, 使用する標準補正曲線の精度によって決まってくる。理論的には, 1年ごとの高精度測定による補正曲線が利用できれば, 誤差なしの年代決定が可能となる。そしてその場合は, 上に述べたような出土試料年輪群と補正曲線年輪群の開始年の違いによって, マッチングの成否が左右されるといった問題も解消される。しかし, 1年ごとの高精度測定による補正曲線を何百年分も作製するには莫大なコストがかかるため, 実現には相当な困難が予想される。また, 仮に1年ごとの測定による補正曲線が利用できたとしても, 高精度年代測定に必要な量(約20g以上)のセルロースを得るためには, 出土木材の1年分の年輪が60~70g以上ある必要があり, せっかくの年代測定法もごく限られた場合だけにしか適用できないことになる可能性がある。ただし, この試料木材の量的問題と測定コストの問題は, 将来加速器による年代測定誤差が改善され, ランニング・コストが現在よりも大幅に小さくなれば, 一挙に解決される可能性がある。なお, $AD1510$ 年~ 1625 年, $AD1820$ 年~ 1952 年については, すでに1年ごとの高精度年代測定がStuiver(1982)によってなされている。

IV. 安定同位体によるウイグル・マッチング

以上に述べた ^{14}C ウイグル・マッチングの難点を克服するための当面の方法としては, 炭素ないし酸素の安定同位体比を用いた1年単位のウイグル・マッチングの可能性が考えられる。 $\delta^{13}C$ と $\delta^{18}O$ は質量分析計を用いることにより, 微量の試料でも高精度の測定が可能であり, 小さな木材の年輪1年ごとの測定も難しいことではない。また, 試料の調製や測定にかかる時間と労力も小さく, 1年きぎみの標準曲線を何百年分もつくることも比較的容易にできる。樹木の年輪の基本的な $\delta^{13}C$ の値は光合成のメカニズムにより決定されているが, この値も ^{14}C 濃度と同じく時間的に変動している。この変動の要因ははっきり解明されているわけではないが, 大気中の CO_2 濃度および降水量と高い相関を持つ可能性が指摘(Leavitt and Long, 1986)されている。一方,

年輪中の $\delta^{18}O$ の変動については, 気温変化との相関が指摘(Libby, 1983: 34-40)されている。もし, これらが樹木年輪中の $\delta^{13}C$ および $\delta^{18}O$ の主たる決定因子であるなら, これらの環境因子が共通する地域内に生育していた樹木については, $\delta^{13}C$ もしくは $\delta^{18}O$ の変動パターンによるウイグル・マッチングができる可能性がある。

引用文献

- Aitken, M. J. (1985) *Thermoluminescence dating*. 359 p, Academic Press
- Bowman, S. (1990) *Radiocarbon dating*. 64 p, British Museum Publ.
- Fleming, S. (1979) *Thermoluminescence technique in archaeology*. 233 p, Clarendon Press
- Ichikawa, Y., Nagatomo, T. and Hagihara, N. (1978) Thermoluminescence dating of Jomon pattern pottery from Taishaku valley. *Archaeometry*, 20: 171-176
- Kalin, R. M. and Long, A. (1989) Radiocarbon dating with the Quantulus in an underground counting laboratory: performance and background sources. *Radiocarbon*, 31(3): 359-367
- Kojo, Y. (1991) The reliability of thermoluminescence dating: a pilot experiment. *Geoarchaeology: An International Journal*, 6(4): 367-374
- Kojo, Y., Kalin, R. M. and Long, A. (1994) High-precision "wiggle-matching" in radiocarbon dating. *Jour. Archaeol. Sci.*, 21: 475-479
- Leavitt, S.W. and Long, A. (1986) Trends of $^{13}C/^{12}C$ ratios in pinyon tree rings of the American Southwest and the global carbon cycle. *Radiocarbon*, 28(2A): 376-386
- Libby, L. A. (1983) *Past climates: tree thermometers, commodities, and people*. 142 p, Univ. of Texas Press
- Long, A. and Kalin, R. M. (1990) A suggested quality assurance protocol for radiocarbon dating laboratories. *Radiocarbon*, 32(3): 329-334
- Pearson, G. W., Pilcher, J. R., Baillie, M. G. L., Corbett, D. M. and Qua, F. (1986) High-precision ^{14}C measurement of Irish oaks to show the natural ^{14}C variations from AD 1840 to 5210 BC. *Radiocarbon*, 28(2B): 911-934
- 桜井市教育委員会 (1989) 纏向石塚古墳—範囲確認調査(第4次)概報. 23 p, 桜井市文化財協会
- Stuiver, M. (1982) A high-precision calibration of the AD radiocarbon time scale. *Radiocarbon*, 24(1): 1-26
- Stuiver, M. and Becker, B. (1986) High-precision decadal calibration of the radiocarbon time scale, AD1950 - 2500BC. *Radiocarbon*, 28(2B): 863-910
- Ward, G. K. and Wilson, S. R. (1978) Procedures for comparing and combining radiocarbon age determinations: a critique. *Archaeometry*, 20: 19-31

Averaging of Multiple Assays and Wiggle-Matching : Some Techniques for Accurate Age Determinations

Yasushi Kojo*

In the right combination of circumstances, remarkably accurate age determinations are possible by (1) averaging multiple assays of samples obtained from the same provenance or (2) wiggle-matching in radiocarbon dating using high-precision radiocarbon calibration curves. This is indicated by results of the

dating projects conducted by the author in the American Southwest and western Japan. Also, the feasibility of single-year wiggle-matching using stable isotope ratios of carbon and/or oxygen is mentioned as a potential means for solving problems associated with the decadal ^{14}C wiggle-matching.

* Office for Investigations of Buried Cultural Properties, Waseda University. 2-7-5 Higashi-Fushimi, Hoya-shi, Tokyo 202.