

易しい炭素年代の 科学と統計学

あら
い
ひろし
新井 宏

(数理考古学者
韓国国立慶尚大学招聘教授)

最近、安本美典氏と炭素14年代の統計処理について、電話で、お話しする機会が何回あった。ご存知のように安本氏は、文系として統計学を駆使して、数多くの業績を挙げ、て来られた方であるが、私も近年、数理考古学者などと自称しているように、趣味として学んだ統計学を、職場生活、教育の場、あるいは考古学研究において活用してきており、文系と理系の視点差からの議論には学ぶ点も多かった。

その中で、安本氏から、炭素14年代に関連した統計処理について、理系の立場で易しく解説して欲しいとのご依頼があった。

もちろん、統計学は非常に奥の深い学問であり、易しく

解説するとかえって誤解を招く恐れもあるが、あまり堅く考えずに、面白い話題をコラム風に紹介するのでよろしければとお引き受けた。ついでに、論文では取り上げにくい科学的な内容も、軽い形でなら紹介できそうである。とにかく、力まずに書いて見たい。

本誌『邪馬台国』の読者の中には、レベルの高い理系の方もたくさん居られる。そういう方々には、拾い読みして頂くだけで、十分に理解して頂けるように書きたい。また一般の方々には、炭素年代の全体像と共に、面白いトピックスだけをお読みして頂いても、十分に楽しめる内容になることを目指したい。

表1 各中学校の四葉クローバー比率調査結果

学校名	調査した クローバー数	四ツ葉 の数	四ツ葉比 (1万当り)	四ツ葉比(1万当り)	
				偏差	平方値
A中学校	678,000	51	0.752	-0.207	0.0428
B中学校	892,000	95	1.065	0.106	0.0112
C中学校	312,000	34	1.090	0.131	0.0172
D中学校	554,000	61	1.101	0.142	0.0202
E中学校	932,000	82	0.880	-0.079	0.0062
		平均	0.978	合計	0.0977
合計	3,368,000	323	0.959	ボアソ偏差	0.053

四ツ葉のクローバーを見つけた人には幸運が訪れるとう。トランプのデザインでなじみの三ツ葉のクローバーは、キリスト教の三位一体の象徴であるが、希少な四ツ葉のクローバーは、その上に悪霊を避けてくれるパワーが付け加わるからだという。

1 四ツ葉のクローバーの確率は

四ツ葉のクローバーの存在比は一万分の一程度、更に五ツ葉のクローバーになると極めて珍しく、天然のものでは百万分の一程度である。

いま、夏休みの研究として、地域の五つの中学校が参加し、各地域の四ツ葉のクローバー比率を正確に算出することを目的に、表1のようなデータを得たとする。

さて、報告書を作成する段階で四ツ葉のクロー

バーの比率とその分散（標準偏差）にどの値を採用すべきか問題が生じた。

まず各中学校が算出した比率の平均値をとるならば一万個当たり〇・九七八個である。しかし、C中学校は調査標本数が著しく少なく公平ではないとの意見があり、各校のデータを総合計してから比率を求めることにした。その場合一万個当たり〇・九五九個である。

次に問題になったのはこの〇・九五九の値に対して標準偏差をいくらに評価するかであった。その場合、各中学校の偏差は平均値〇・九五九との差で計算することになり、分散和（偏差平方和）は〇・〇九七七と計算される。しかし本当の四ツ葉のクローバーの比率（統計学では母集団の比率という）はまだ判っていないので、仮に採用した〇・九五九を使った計算では、不偏分散や不偏標準偏差を採用しなければならぬ。すなわち、学校間の分散は5で割るのでなく4で割って〇・二四四とし、そのルートが標準偏差〇・一五六となるので、総平均の信頼度を示す標準偏差は〇・一五六を更に $\sqrt{5}$ で割って〇・〇七〇とするのである。

かくして一万個当たり〇・九五九 $\pm$ 〇・〇七〇との結論を得た。とりあえず、めでたしめでたしである。しかし、なお問題が残っていた。調査数の多い学校と少ない学校の偏差を平等に扱って良いかという疑問である。ここで行き止まってしまい、数学の先生のところ相談に行った。

そうすると先生は、そんなに面倒な計算をしなくても、標準偏差は、四葉のクロローバーの総合計値三二三の平方根を全調査数の三、三六八、〇〇〇で割れば、一万個当り〇・〇五三個と計算できるよと教えてくれた。すなわち一万個当り〇・九五九±〇・〇五三個となり、苦勞して計算した結果よりもかえって誤差が少ない。しかも、各中学校の四ツ葉のクロローバーの分布が同じ母集団に属しているとすれば、こちらの方が理論的にも正しいのだと言う。

数学の先生は、四ツ葉のクロローバーの分布が統計学でしばしば出てくるポアソン分布になることを応用しただけなのである。どうやらポアソン分布を知っているとご利益があるらしい。実は、炭素14年法の測定の基礎に、このポアソン分布が大きく関係しているのである。

2 知っていると便利なポアソン分布

ところでポアソン分布は「所与の時間間隔で発生する離散的な事象を数える特定の確率変数Nを持つ離散確率分布」などとややこしく定義されているため、とっつき難いが、要は毎日の交通事故の発生件数とか、月別の自殺件数とか、時間当たりの車の通過台数とか「一定の範囲内に発生した数値」を何十回も集めて分布図に描くと、その平均値と分散（標準偏差の二乗）が全く同じ値になるという分

布なのである。

したがって、世論調査で与党支持者が千名中二七六名いたとすれば、その誤差は二七六の平方根すなわち一六・六名であり、支持率は二七・七±一・七パーセントと評価されるのである。

このような原理が炭素14年代の測定にも使われている。すなわち、炭素14年代が一、八二二±二五年とか一、六九〇±六〇年とか表示されているのは、同じ試料を何回も測って、バラツキを求めた結果ではなく、単に炭素14の原子の数をいくつ測ったか(N)によって、相対誤差を $\sqrt{N}$ 分の一と求めた結果を利用しているのである。

ただし、炭素14比の対数を取ったものが、炭素14年と比較する関係があることから、カウント数の相対誤差が、そのまま炭素14年の相対誤差となるわけではない。

ここでは結論のみを先に示すと、炭素14比のパーセントの変化が炭素14年の±八〇年に対応しているので、炭素14の原子のカウント数(N)と±a年の関係は、

$$a \approx 80 \div (\sqrt{N} \div 100) \approx 8000 \div \sqrt{N}$$

となっている。すなわち、Nが一六〇、〇〇〇であれば、±二〇年と計算されるのである。

ただし、この八、〇〇〇の値は、標準試料との比較などによる誤差増加を考慮して、実際には $\sqrt{2}$ 倍の一、三〇〇程度を用いているようである。

3 ごく微量の炭素14の分析法と誤差

このように、炭素14の分析では原子の数を数えるのが基本である。それは、炭素14の存在比があまりにも少なく、通常の化学分析では量れないからである。どれほど微量であるか、クロローバーと比較してみよう。

四ツ葉のクロローバーなら一万分の一、五ツ葉のクロローバーなら百万分の一の存在比であるが、炭素14の場合はなんと八千億分の一しか存在せず、大気中を全て合計しても六百キログラムにしかならないのである。これなら一トン車でも運べる分量だ。

それでは炭素14の原子の数を数えるにはどんな方法があるだろうか。

〔β線法〕

幸いなことに炭素14は放射性同位元素であり、β線を出して窒素14に壊変する性質がある。その半減期は五、七三〇年であり、時間当たりに直すと七千万分の一という気の遠くなるほどゆっくりした壊変であるが、一グラムの炭素の中には炭素14が少ないとはいえ、六百億個も含まれているので、時間当たり八六〇カウントの壊変が起こる。したがって、相対誤差を $\circ \cdot 五$ パーセントに押さえるため

に必要な四万カウントは試料五グラムなら約一〇時間で得られる。

しかし、実際には標準試料との較正、バックグラウンドの計測、計器のカウント効率などによって、数倍の時間を要し、一日当たり一万カウントが現実的であり、相対誤差は二パーセントよりも大きい場合が多いようである。もちろん試料の重量を増やせば、精度向上を図れるが、均質な試料を多量に調整するのは、測定時間増大よりも困難な場合が一般的であり、その結果としてβ線法の誤差は ± 80 年などと示される場合が多いのである。

〔AMS法〕

このように放射性壊変を利用したβ線法の測定に對して、一九八〇年代から急速に普及したのがAMS (Accelerator Mass Spectrometry: 加速器質量分析計) 法である。これは炭素をイオン化して電磁界を掛けて加速し、原子の数を直接カウントする方法なので、試料は一ミリグラム以下で良く、装置の性能にもよるが、実測定時間も一時間内と大幅に短縮できる。標準試料との較正、バックグラウンドの計測、計器のカウント効率など問題から、実質的な一件当たりの測定時間は数時間であるが、それでも年間二千件ほどの測定能力を有しているという。炭素年代の測定誤差として報告されている例には、 ± 20 年から ± 40 年が多いことから判断して、十萬カウント程度が測定

の目安になっているようである。

A M S 法による測定を営業的に行っている株式会社加速器分析研究所の資料によれば、一件当たりの受託分析費用は十万円弱である。歴博などが行った学術創成研究『弥生農耕の起源と東アジア』の総研究費は四億円強であるが、そこで行われた分析件数がおおよそ四千件あるので、これだけで総研究費の四億円に達してしまう計算になる。

しかし、実際には大量発注による割引もあったろうし、名大や東大などにおける分析は無償あるいは低価で行われた可能性もあるので、おおまかにはバランスしているようである。それにしても、炭素14年分析の費用の多額であることには留意すべきであろう。だからこそ、無意味な分析は避けなければならないのである。

「誤差の評価」

ごく微量の炭素14を測定するには、炭素14の原子の数をカウントする方法しかなく、その測定精度を支配するのは、カウント数Nであり、その相対誤差はポアソン分布に基づき、Nの平方根の逆数となることを説明した。

もちろん、ここまで述べた相対誤差は、単純な数学モデルによるものであり、実際の分析誤差では、この他に装置の安定性が大きな意味を持っている。たとえば、全く同一の標準試料を二五万カウント測定してその相対誤差を測定しても、理論の予測する0.2パーセントに収まるとは

限らない。計器系の不安定性から来る誤差をいくら消去するように工夫しても不可避的な誤差が存在するからである。これが分析機器としての限界の精度であるから、むやみにカウント数を増やしても、最終の精度が向上するわけではない。

しかも、各測定機関が炭素14年を ± 20 年とか ± 30 年などと報告しているのは、カウント数から計算された相対誤差を基にして、炭素14年の誤差に換算した結果であり、計器系の誤差をどう取扱っているのかは知り得ない。しかし、カウント数からの計算値として問題はないと考えている。

4 炭素14年(BP)の求め方

β 線法のところで、炭素14が放射性同位元素であり、五、七三〇年で半分になることを説明した。そこでは、もっと重要な説明を後回しにしてしまったが、この炭素14の放射性壊変こそが、炭素14年法の原理なのである。ちよつと説明して置きたい。

この炭素14の半減期五、七三〇年を利用すると、試料の炭素14比測定結果を、試料が出来た時の炭素14比で割った値(炭素14減少率)によって、次式で試料の経過年数を計算できる。

経過年数 = $-5.730 \times \log (\text{炭素14減少率}) \div \log 2$

要は、五、七三〇年で半分になるのであるから、四分の一になるには一一、四六〇年かかるという計算である。

しかし、現実の話として、試料が出来た時の炭素14比を知ることは困難であり、また測定日から何年前かを示しても混乱するだけである。そこで登場したのが、炭素14年という概念であり、実際には一九五〇年を基準にして、何年遡るかを炭素14年 (BP) として示すのが約束事である (BP は Before Present あるが、Before Physics の略)。

すなわち、試料の出来た時の炭素14比の代りに、一九五〇年の炭素14比を使い、測定結果も一九五〇年に測定したものとして補正した値を使い、基準化した炭素14の減少率を求め、実際の炭素14年 (BP) を次のように計算するのである。

炭素14年 (BP) =

$$-5.68 \times \log (\text{基準化した炭素14減少率}) \div \log 2$$

あれれ！ 五、五六八は五、七三〇の間違いではないかって……。その通りなのであるが、おかしなことに、炭素14年を求める時だけは、開発者でノーベル賞を受賞した W. Flibby 博士が当初使用していた五、五六八年を使うことになっているのである。それは、既に半減期を五、五六八年の基準で計算した炭素14年 (BP) が数多くあり、切り替えることによって大混乱が生じるからであるが、もうひと

つの理由は、試料の生成した時期をこの炭素14年 (BP) で表示することを今では半ば諦めているからである。

それは、昔の精度ならば、大気中の炭素14比はいつの時代も同じだと近似しても良かったが、現在、年代の判る樹木年輪を測定して見ると、かなり大きく変化していることが判明したからである。

昔は良かった。いつの時代の試料も、炭素14比の分析値が出ると一義的に試料の年代を計算できた。しかし、年輪試料の炭素14が判ってからは、炭素14年 (BP) が決まっても、時には、実際の暦年代が三百年も幅を持つ範囲でしか、決まらなくなってしまったのである。

その典型例が弥生時代で問題になっている「二四〇〇年問題」である。図1を見て頂きたい。点線で示したのが、昔の計算方法である。これなら、炭素14年 (BP) が決まれば、暦年も一義的に決まる。しかし、実際の年輪の炭素14比から求めた炭素14年は、実線のようにうねりを持っていて、炭素14年が二、四五〇年に相当する暦年は、紀元前七百から紀元前四百年まで、いたるところで交絡している、一義的に暦年が定まる状況にないのである。

その上に、もっとやっかいな問題が生じた。同じ年なら世界中どこでも大気中の炭素14比が同じだという「仮説」も測定精度の向上につれてくずれ始めたのである。南半球や日本のように、海洋性気候の影響をもろに受けるところ

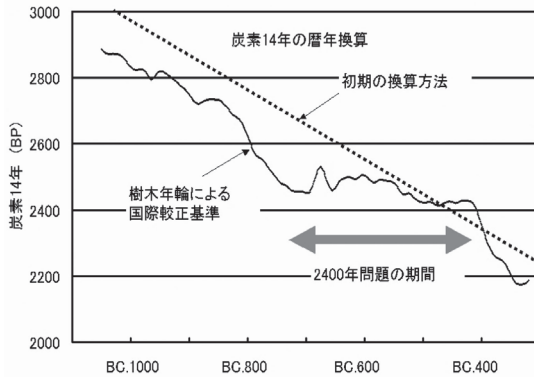


図1 炭素14年 (BP) から暦年代を求めるふたつの方法

気中の炭素14比がなぜ減少しないのか。それは太陽などからやってくる宇宙線によって、大気中の窒素が新たに炭素14に変わり続けているからなのである。もちろん、宇宙線の量

では、大気の炭素14比が海水の影響を受けて、小さくなる傾向（炭素14年が古くなる傾向）がはっきりしてきたのである。

海水中の炭素14比が小さいのは、海水に閉じ込められた炭素14が、なかなか大気中に戻ることができず、その間に放射性壊変を起こして、どんどん少なくなってしまったからである。これを海水リザーバー効果と言って、海水中で育った魚介類や海藻類の炭素14年（BP）が五百年ほど古く

出る原因なのである。

は年によって違うし、大気と海水の炭酸ガスの交換も気象条件によって大きく異なるので、結果として毎年の大気中の炭素14比が一定では無くなっているのであるが、大まかな近似として、昔は一定としてきたのである。

また、少し力んでしまったが、ついでに言えば、宇宙線による炭素14の生成が盛んで、気温が低く海水からの炭酸ガス放出が低調な時代、すなわち、図1で実線が下に落ち込んでいる時期は、地球の寒冷期に該当し、縄文から弥生へ、あるいは弥生前期から中期へ、あるいは弥生終末期から古墳期へなどと時代の交代期に対応しているようなのである。

熊本大の甲元眞之教授が、気象考古学の観点から、縄文から弥生への移行期に寒冷期があったことを理由に、弥生時代の始まりを歴博より二百年新しい紀元前七七〇年頃とする見解を発表している、図1で見ても紀元前七五〇年頃に校正曲線の落ち込みが見られ、一致しているのである。

同様なことが、弥生から古墳期への移行期にもあったとするならば、西暦二七〇年に校正曲線の落ち込みが見られるので、古墳時代の始まりは二八〇年頃となるのであるが、如何なものだろうか。

5 分散の加成法則

統計学の初歩の教科書に、分散の加成法則というのが必ず出てくる。

分散 $(X_1 + X_2 + X_3) =$ 分散 $(X_1) +$ 分散 $(X_2) +$ 分散 (X_3) と示される式である。 X_1 、 X_2 、 X_3 の独立データがある時に、その合計値 $X_1 + X_2 + X_3$ の分散は、それぞれ X_1 の分散、 X_2 の分散、 X_3 の分散の和となるという法則である。一般的には、

平均値の誤差 $\parallel$

$[\text{分散}(X_1) + \text{分散}(X_2) + \text{分散}(X_3)]$ の平方根 $\div 3$ として利用されることが多い。

もう二年ほど前になるが、寺沢薫氏が報告している箸墓布留0式期のふたつの桃核の炭素14年のデータについて、加成法則を利用して平均値とバラツキを求めたことがある。

実際には、一、六二〇 $\pm$ 八〇年と一、八四〇 $\pm$ 六〇年というデータの平均値と誤差がいくらになるかという問題であったが、これは単純に一、七三〇 $\pm$ 五〇年と計算できる。ここに、五〇年は $(80^2 + 60^2)$ の平方根 $\div 2$ である。これで全く問題ないはずである。

ところが、別の時に、例えば、一、八二〇 $\pm$ 六〇年と一、六九〇 $\pm$ 二〇年というように、炭素14年の値もその標準偏

差も大きく異なる場合でも、分散の加成法則をそのまま使っても良いのかという問題が安本氏から出された。加成法則の計算結果では一、七五五 $\pm$ 三二年であり、一、六九〇 $\pm$ 二〇年よりも誤差が大きくなってしまっているからである。

実は、この指摘はなかなか核心を突いていたのである。それは、炭素14年がポアソン分布に基礎を置いているからである。一、八二〇 $\pm$ 六〇年が示す $\pm$ 六〇年は、炭素14比の相対誤差に直すと $\cdot$ 七五%であり、炭素14原子の数を一七、七七八数えなければならぬ。同様に一、六九〇 $\pm$ 二〇年の場合は、一六〇、〇〇〇である。

四ツ葉のクローバの所で述べたように、この二つのカウント数の重み付け、 $\cdot$ 一と $\cdot$ 九を使って、平均値や誤差を計算する方が良いのである。そうすると答えは一、七〇六 $\pm$ 一九年となる。

誤差項の重み付け計算は $(60 \times 0.1)^2 + (30 \times 0.9)^2 \parallel 360$ の計算をしてから 360 の平方根 $\parallel 19$ と求めても良いが、計算が煩雑なので、 N の合計値一七七、七七八を使って、前出の N と a の関係式から $a \parallel 19$ と計算しても良い。これもポアソン分布の御利益である。

このようにすれば、誤差の大きい一、八二〇 $\pm$ 六〇年のデータは、結果に対して過度に反映されることがなくなるのである。

ちなみに箸墓布留0式期の桃核のデータ一、六二〇 $\pm$

八〇年と一、八四〇±六〇年について、同様な計算を行うと一、七七三±四八年となる。誤差の方は加成方式とあまり異ならないが平均値では四三年も大きくなる。安本氏の指摘は、鋭かったということである。

6 サンプルングと試料種別の差

誤差の問題に戻ろう。

炭素14年の報告値につけられた±誤差について、同一試料の分析を五回とか一〇回行つて、そのバラツキから求めていると誤認している方がいる。通常の化学分析では、個々の分析値にいちいち±誤差を表示することなどないのに、わざわざご丁寧にも、異なった±誤差が付いているので、特殊なサービスだと思つてしまふらしい。

しかし、このような±誤差が、カウント数の反映に過ぎないことは既に述べた。

残る統計学的な問題は、サンプルングである。

一般的に言えば、AMS法はカウント数を稼ぎやすく精度が高いのが特徴であるが、その一方では、極く少量の試料を採取するため、サンプルング上に問題を生じ易い。たとえば土器の場合、どの部分に付着したものか、煤かコゲか、土器を掻き取っていないか、どんな前処理を施したかなどによって、分析値が変わることは十分に予想されるこ

とである。

すなわち、採取された試料が何を代表するものかが問われると同時に、五ヶ所とか一〇ヶ所、分析すると、分析値の誤差よりも遙かに大きなバラツキを示す場合があり得る。

ましてや、同一遺跡の同一時期の遺物であっても、試料に種子とか土器付着物とか異種のもものが混在している場合には要注意である。かねてから主張しているように、土器炭化物では、弥生末から古墳初期のデータを見ると、百年以上も系統的に古く出ているからである。この点は本誌一〇五号に「土器付着炭化物の炭素14年問題」として詳しく書いたので参照願いたい。

しかし、せっかく、ここまで踏み込んだのだから、もう少し定量的に示そう。

今までに、歴博などを中心として、炭素14年を測定したデータのなかに、同じ遺跡で、かつ同じ時期（同じ地層）に限定して、種実と土器付着物の炭素14年を直接比較できる例が一六件あるが、その全てにおいて、土器付着炭化物の方が百年単位で古くでているのである。表2にその状況を示す。

歴博は、これらのデータの内、対雁二遺跡、生測二遺跡など土器付着炭化物について、海洋性の食物のコゲが付着した海洋性リザーバー効果のためと説明してきたが、状況がクリアになったわけではなく、ますます迷走を続けている。

表 2 同一遺跡・同一時期の種実類と土器付着物の炭素 14 年の差

遺跡の所在、遺跡名		時期	文献	種実類の炭素14年			土器付着物の炭素14年			差
北海道	生淵2	V層中位	1	クルミ	2675			3025 3190 3080		
					平均 2675			平均 3159		484
		V層上位	1	クルミ	2695 2610 2720 2690			3135 3210		
					平均 2679			平均 3173		494
北海道	対雁2		2	オニグルミ	2470 2410 2480 2340 2480 2510 2560 2470 2510 2560 2530 2540 2450 2510 2520 平均 2489			2920 2810 2930 2970		
								平均 2908		419
北海道	浜中2	R地点V層	3	モミ属 広葉樹	2980 3035		焦	3715 3805 3815 3840		
					平均 3007			平均 3794		787
北海道	日尻小学校	ホッケ澗 ～堂林式	4	クリ	3270 3280 3205 3270			3530 3855 3385 3855 3645		
					平均 3256			平均 3654		398
										595
青森	東道ノ上(3)	IV層貝14	3	オニグルミ	4910		焦	5505		
青森	風張(1)	十腰内 4～5式	5	クルミ	3090 3175 平均 3132		焦	3550		418
青森	三内丸山	大木10式 最花	4	オニグルミ オニグルミ	3985 3900 4030		焦	4160 4340 4320 4220 4550		
					平均 3972			平均 4318		346
神奈川	上土棚南	加曽利B1	5	種実	3530		焦	3680		150
神奈川		中里	*	コメ	2320		焦	2490 2260 平均 2375		55
愛知		欠山式	*	コメ	1860		焦	1890		30
奈良	唐古・鍵	大和Ⅰ-2a	4、5	コメ	2445 2490 2335 2320		焦煤	2491 2470		
					平均 2398			平均 2481		83
		大和Ⅲ-3	4、5	コメ	2069 2050 2070 2065 2070 2080 2065 2025 2100 2090		煤 焦	2139 2056 2121 2157 2139 2143		
					平均 2068			平均 2126		58
奈良	東田大塚	布留0古	6	ウリ モモ	1850 1730		煤 焦	1860 1780 1820		
					平均 1780			平均 1820		40
奈良	矢塚	庄内3?	6	モモ	1790 1800 平均 1795		煤	1820		25
熊本	上小田宮の前	天城式	5	ドングリ エゴ	3030 2940		焦 煤?	3040 3110		
								3190 3160 2960 3050 3030 3150		
					平均 2985			平均 3086		101

1) 『北檜山町生淵 2 遺跡』 北海道埋蔵文化財センター、2005

2) 西田茂「年代測定値への疑問」『考古学研究』199.2003。同「ふたたび年代測定値への疑問」『考古学研究』201

3) 宮田佳樹「遺物にみられる海洋リザー効果」『新弥生時代のはじまり第 4 巻』2009

4) 『新弥生時代のはじまり第 2 巻』2007

5) 『新弥生時代のはじまり第 1 巻』2006

6) 小林、春成、坂本「桜井市東田大塚・矢塚古墳出土土試料の 14 C 年代測定」『桜井市報告書』30 集、2006

*) 『弥生農耕の起源と東アジア』研究成果報告書、2009 に記載されているデータであるが、未発表の資料の引用を控えるようにとコメントが付いている。そのため、遺跡名などを空欄とした。

海洋性リザーバー効果については、別に項を設けて説明するが、そんなことよりも、最も重要なことは、種実と土器付着炭化物の間に、系統的に差が生じていることである。

どちらが正しいのであろうか。そんなのは決まり切っている。土器付着炭化物のように、腐植酸除去のために、通常のアルカリ処理をする、ほとんどが溶けて無くなってしまいうような試料に信頼性があるわけがない。このあたりにについても本誌一〇五号に詳しく書いたので参照してほしい。

その一方で、試料のサンプリングとして、極めてすぐれているのが種実類である。西田茂氏は江別市対雁二遺跡のクルミについて、極めて貴重なふたつの基礎調査を行っている。

第一の調査はひとつのクルミを二十に分割して、炭素14年の分析精度を20年で分析した結果である。測定値を羅列すると次の通りである。

2520 + 20, 2530 + 20, 2520 + 20, 2530 + 20, 2510 + 20,
2540 + 20, 2540 + 20, 2505 + 20, 2535 + 20, 2510 + 20,
2555 + 20, 2520 + 20, 2525 + 20, 2520 + 20, 2510 + 20,
2545 + 20, 2595 + 20, 2525 + 20, 2495 + 20, 2510 + 25

これらの分析値の平均値は二、五二三年、その標準偏差は±18年である。注目すべき点は、分析精度として示され

ている±20よりも実際の標準偏差の方が小さいのである。

このことは、ひとつのクルミのどの部分を選んでも実用上は全く差がないことを示唆している。もし、部分によって差があるなら、±20よりも大きくなってしかるべきだからである。これによって、クルミの場合はどの部分をサンプリングしても安全である。

次に、西田氏の第二の調査では、ある土坑から出土した二〇個のクルミ殻の炭素14年について、同じく±20年の精度で分析している。これらのクルミ殻はすべて同じ年の秋に実ったと考えられているので、個体間のばらつきを見るには良好な試料である。結果は次の通りである。

2535 + 20, 2520 + 20, 2510 + 20, 2490 + 20, 2505 + 20,
2515 + 20, 2500 + 20, 2515 + 20, 2535 + 20, 2540 + 20,
2560 + 20, 2515 + 20, 2530 + 20, 2495 + 20, 2490 + 20,
2520 + 20, 2500 + 20, 2540 + 20, 2505 + 20, 2540 + 20

これらの分析値の平均値は二、五一七年、その標準偏差は±19年である。したがって、同一年に実ったクルミ殻の個体間にも、分析精度以下のバラツキしか認められていないのである。とにかく、サンプリングの面では、極めて安定している試料と言えるであろう。

これに対して、表2に示した土器付着炭化物はどうにも手がつけられない。種実に対するバイアスも数百年ある

し、相互間のバラツキも大きい。このような試料を次々に分析しているのは、統計学の最も基本的なサンプリングに対する理解が全く欠けていることを意味している。研究費の無駄遣いに留まらず、旧石器捏造事件のように、事実の認識を誤誘導する危険性さえあるのである。

7 同位体効果とリザーバー効果

炭素14年（BP）の計算方法について説明した項では省略したが、炭素14年の測定では、無視し得ないのが同位体効果である。

炭素には原子量の異なる炭素12と炭素13と炭素14があり、これらを同位体とか同位元素というが、化学的な性質は同じであるものの、物理的な性質は異なる。

その典型的な例が樹木の成長、すなわち光合成において見られる。大気中の炭素14比に比べると生成した樹木中の炭素14比は、平均的に見て五パーセントも低く、炭素14の取入れを嫌っているのである。炭素14比の一パーセントの差は、炭素14年に換算すると八〇年であるから、そのまま計算すると四百年も古くなる。

こんな大問題を、なぜ初めから説明しなかったのかと言われるかも知れない。それは、炭素13を利用して、極めて巧妙に、この影響を除去できる方法があるからである。す

なわち、光合成において、炭素14の取込み比率が五パーセント少ないことに対応して、炭素13の取込み比率もちょうど半分（二・五パーセント）と少なくなっているのである。しかも、炭素13は炭素14のように放射線変換することがないので、樹木中に固定されてからの比率が年々変わることもない。だから炭素13の比を知れば、簡単な数式で補正した炭素14年を出せるのである。近年では、何もコメントがなくても、この炭素13による補正が必ず行われているのが常識である。

したがって、AMS法では報告書に記載されているか否かは別として、炭素13比の測定は必ず行われて、その結果の表示には $\delta^{13}C$ （‰）が用いられている。これは標準（全地球平均）から千分率でいくらシフトしているか示すもので、マイナス二五・〇‰とあれば、二・五パーセント少ないことを意味する。

ところで、この $\delta^{13}C$ は物質によって異なる。たとえば、陸上植物ではマイナス二五‰前後、海のプランクトンやプランクトンを餌とするイルカや魚類ではマイナス一五‰前後、海の貝類や軟骨動物では零‰前後である。ヨーロッパにおける、海洋性食物を含んだ残渣の測定結果を見ると、マイナス一七‰～マイナス二九‰であり、最頻値がマイナス二三‰である。

このように、陸上植物に比較して海洋の魚介類では $\delta^{13}C$ が

高めであり、このことから歴博では $\delta^{13}\text{C}$ がマイナス二四%より0に近い土器付着炭化物試料の場合、海洋リザーバー効果の疑いが高いとしているのである。事実、データを見ると海洋リザーバー効果を疑った試料に炭素14年の異常に古い場合が多いようであるが、同時に採取された試料の中には、 $\delta^{13}\text{C}$ が陸上植物のマイナス二五%前後であるにもかかわらず、炭素14年の非常に古い例も多くあり、 $\delta^{13}\text{C}$ だけでリザーバー効果を評価することには限界がある。

スウェーデンの例では、海水リザーバー効果と同様に、淡水リザーバー効果というものもあり、その場合には $\delta^{13}\text{C}$ がマイナス二五%以下であり、 $\delta^{13}\text{C}$ を利用してリザーバー効果を見つたり補正したりする上手い方法はないと述べている。この文献については、本稿の「あとがき」の中でも紹介しているので参照していただけたらありがたい。

なお、宮田佳樹氏の論文「遺物にみられる海洋リザーバー効果」『新弥生時代のはじまり』第四卷（二〇〇九）は、土器付着炭化物に異常に古い炭素14年代を示すものがあることを念頭において、その解明を試みたものであるが、海中生育物であるアサリやスズキ、ニホンアシカなどよりも、土器に付着しているコゲが百年も古く出ている、説明に苦慮している。

それにもかかわらず、論文において海洋リザーバー効果

を主題としながら、 $\delta^{13}\text{C}$ の値を明示していないのは、どうしたことであろうか。通常、必要がなければ、特別に分析を行うことはないのであるが、炭素14年を測定するには $\delta^{13}\text{C}$ の値が不可欠なのであるから、その値を参考値としても示すのが常識なのではないかと思う。 $\delta^{13}\text{C}$ のデータが提示されていないと、そこに意図的なことがあるのではないかと余計な疑義さえ生じるのである。

8 炭素14年問題と地球温暖化の問題

炭素14年の樹木年輪による較正曲線が、気候とも関係があることを述べた。このことはもっと注目されて良い内容なのである。地球温暖化の主犯格に炭酸ガスの増大があげられているからである。

事実、化石燃料が大量に使用される産業革命前には、大気中の炭酸ガス濃度は二八〇ppmほどであったが、現在では三九〇ppmほどまで上昇している。もっとも、使用された化石燃料の炭酸ガスが全て大気中に残るのではなく、その多くは海水に吸収される。

すなわち、地球温暖化の研究において、大気中の炭酸ガスと海水中の炭酸ガスがどのように交換されているかの研究は、きわめて重要であり、その予測次第で、温暖化の評価も異なるし、炭素14年の研究にも大きな影響をもたらす

のである。

実は、海に囲まれた日本のような海洋地域では、大気と海水の間の炭酸ガスの交換がどのようにして行われているかを知ることが、炭素14年の理解に大きな助けになる。たとえば、海岸の波打ち際のように白波の立つところでは、その交換が極めて盛んであり、海岸遺跡ではその影響を受ける可能性があると私はかねてから指摘しているのである。

また、エルニーニョ現象やラニーニャ現象によって海水温度が変動すると、大気中の炭素14年が百年単位で変わることも明らかにあり、私としてはその研究動向を鋭意注視していると私ではある。

最後に、最近の温暖化研究などにもなって、急速に明らかになりつつある地球規模の炭酸ガスの循環について紹介してこの稿を閉じたい。

資料としては、気象庁のホームページに掲げられた「海洋の炭素循環」を基にして、そこに炭素14の関係を付記して作成した表3を見て頂きたい。

表3では、地球上の炭素の存在量に関して、まず産業革命以前を基準にして、大気中、海水中、陸上有機物、海中有機物、化石燃料などに分けて示し、その上で、産業革命以降の化石燃料による炭酸ガスの変化状況を示す。それと共に、大気と海水の間、大気と地上有機物の間などの

表3 地球上の炭素の存在位置と大気・海洋間の循環

区分	項目	炭素量 (億トン)			炭素14 (kg)	
		産革前	化石燃料	現在	産革前	核実験
存在量	大気中	5,970	1,650	7,620	700	30
	陸上有機物	23,000	-390	22,610	2,300	100
	海水中	380,000	1,180	381,180	36,000	500
	海中生物	30		30		
	海中堆積物	1,500		1,500	80	
	化石燃料	37,000	-2,440	34,560	0	
	合計	447,500		447,500	39,080	
年交換量	大気から海水へ	-700	-222	-922	-82	
	海水から大気へ	706	200	900	83	
	大気から地上有機物へ	-1,200	-26	-1,226	-140	
	地上有機物から大気へ	1,196	16	1,212	139	
	宇宙線による生成 放射性壊変				47 -47	

在しないことである。

また、大気を基準にして、海水中の五百年も古い炭酸ガスが毎年一二パーセントも大気中に戻ってきていることもすぐに判る。これは、大気と海水のガス交換によって、毎年炭素14年が六十年も古くなることを意味している。大気

炭酸ガス（炭素）の交換状況を年基準で示す。いずれも炭素の重量基準で、単位としては億トンを採用している。

この表からすぐに判ることは、炭酸ガス（炭素）の大部分は海水中に存在している、大気中には一パーセント強しか存

中の炭素14比が気候によって如何に大きな影響を受けているかを明示していると共に、ガス交換の活発な地域における炭素14年が古く出る現象についても、理解出来るであらう。

なお、炭素14に関しては、自然によらない人為的な大変換、すなわち炭素14を持たない化石燃料の大量放出によるスース効果と、一九五〇年代から始まった大気中の核実験のことをぜひ知って欲しい。

このスース効果により、大気中の炭素14比は毎年一パーセントほど下がり続けている反面、大気中核実験の盛んであった一九六五年には、大量の炭素14が放出され、一気に二倍の水準まで上がってしまった。

現在では、時間の経過によって、海水との交換も進み、大気中では昔の基準のほぼ数パーセント増の水準まで戻っているが、これらのふたつのことがあって、地球上の炭素14はシツチャカメツチャカになってしまい、現在のデータを基にして炭素14年の基礎的な再現実験を行うことが著しく困難になってしまったのである。もっとも、これらのふたつの効果によって、地球規模の炭素循環が明らかになった面も大きいのであるが。

あとがき

本稿を書く際に、リザーバー効果についての外国文献として、Anders Fischer & Jan Heinemeier 'FRESHWATER RESERVOIR EFFECT IN 14C DATES OF FOOD RESIDUE ON POTTERY' RADIOCARBON 45:3 (2003) とどう興味ある文献を引用した。

内容は、スエーデンの淡水湖にすむ現代の魚貝類にも千年ものリザーバー効果が認められるというもので、その理由は化石化した古い炭酸塩が地下水に溶け込み、湖に流入したことにあろう。

論文の主な目的は五千年ほど前の土器の内部に残存した食物残渣が三百年も古い炭素14年を示すことの解明にあるが、内容とは別に、その統計処理のやり方が非常に正確であることを発見して、うれしくなったのである。

私が今回、ポアソン分布を中心にして、測定精度の異なる炭素14年のデータの平均値や標準偏差を計算するに当たっては、仮想のカウント数に基づき、重み付けをして計算する必要があると述べたことが、そのまま計算に用いられているのである。もちろん、そんな計算方法については、一言もふれていないが、「重み付け平均」という言葉があったので、念のために、今回紹介したやり方で検算を

したところ、完全に一致したのである。

ただそれだけのことであるが、そこには研究者の質の高さを感じる。だから、日本における土器付着炭化物の異常値についても、やみくもに海水リザーバー効果を持ち出すのではなく、古い炭酸塩の影響なども考慮した慎重な研究態度が望まれるのである。

第一、炭素14年法は、大気中の炭酸ガスの光合成を前提として成立している学問体系である。試料は陸上の光合成によるものに限定されなければならないのが常識である。

そこに、海水中とか淡水中とかの、大気とは異なる環境で育った魚貝類などあるいはそれらの食物残渣が登場することはあっても良いが、あくまでも二次的な参考資料にすぎないことを前提として、徹底した検証をした後で無ければ、年代測定に利用してはならないのである。

考古学は、数多くの不確かな情報を対象とした学問であり、その推理過程において、仮説と検証を繰り返して行かねばならないのが宿命である。

仮説と検証の手続きにおいて、もっとも完成度が高いのが統計学である。適切な試料のサンプリングを初めてとして、データ処理についても、主観的、恣意的な取扱いは徹底して避け、一つずつ検証を繰り返して行かねばならない。その意味では考古学においては、統計学的な考え方が必須条項なのである。

新井 宏（あらい ひろし）

数理考古学者（前韓国国立慶尚大学招聘教授、元日本金属工業常務）。

一九三七年東京都生まれ。

東京工業大学物理コース卒業、工学博士。

著書『まぼろしの古代尺』（吉川弘文館）、『金属を通して歴史を観る』（バウンダリー・コンパス社）、『理系の視点からみた考古学の論争点』（大和書房）。

論文「鉛同位体比による青銅器の鉛産地をめぐって」『考古学雑誌』85・2、「古墳築造企画と代制・結負制の基準尺度」『考古学雑誌』88・32、「鉛同位体比から見た弥生期の実年代に関する一試論」『考古学雑誌』91・3、「炭素十四による弥生時代遡上論の問題点」『東アジアの古代文化』127、「古代日本に間接製鉄法があったか」『ふえらむ』5・10、「古代結負制の復元と代制の紀元」『韓国古代史研究』30（韓国語）、「古韓尺」で作られた纏向大型建物群」『季刊邪馬台国』104号ほか多数。