
放射能で年代をはかる

1989年12月9日

学習院創立百周年記念会館において

学習院大学理学部 木 越 邦 彦

本日の話のテーマは「時」を放射能ではかるということですが、一般には放射能ではかることのできる時間は短い時間から長い時間まで広い範囲にわたっています。ここでは極端に長い時間をはかる話で、歴史的記録のない昔の出来事が何年前のことかという、いわゆる年代を測定する話であります。

身近にあるいろいろの物、山、岩石、地形、動物など、いつごろから現在のような姿になっていたものか、あるいは祖先の残した遺物あるいは昔の人の生活の跡と思われる遺跡がいつごろつくられ、使われたかは、だれもが知りたいと思います。自然現象については、それぞれが何年前におこったことか、ま

た何年位の時間をかけて変化してきたものかが問題になります。たとえば、芦ノ湖の湖底にところどころに多数の木が立ったままずんではいます。これはおそらく大きな地震で山の斜面が地すべりをおこし林がそのまま湖底にずりこんだものと思われます。放射性の炭素を用いる年代測定でこれらの木が生存していたのが何年前であるかを知ることができるので、このような地すべりや地震がいつ頃、何回あったかということを調べることができます。過去の地震の記録を有史前の長い期間にまで広げることになります。またあるいは地球の磁場の強さと南北の極の位置がいままでどのように変化してきたかが長い期間にわ

たってわかってくると、それによって地球の磁場がどのようにしてつくられているかを知る手がかりの一つになります。年代がしれることは、時間のスケールのはいった自然についての知識が加わることに大きな意味があるといえます。

自然科学は、自然についての人類のもつ正確な知識の集積と考えることができます。時間のスケールのはいった自然についての知識がそれに加わることは、自然科学にとって重要なことで、古い年代の測定は過去の出来事についての好奇心を満足させるだけのことで

はないわけであります。

過去の時をはかるために、時と共に変化するものを時計の代りにする必要があります。ふつうの時計は針がゆっくりと一方向にまわっています。時をはかるためには、逆もどりをしないで一方向に規則的に進んでゆく現象が必要です。19世紀の地質学者は、地層が堆積してゆく現象で時間の経過を推定し、それぞれの地層の中に含まれている生物の化石から、その堆積した時に栄えた生物をその時代を示す目盛につかってきました。この図（図1）はグランド・キャニオンのある断面図で

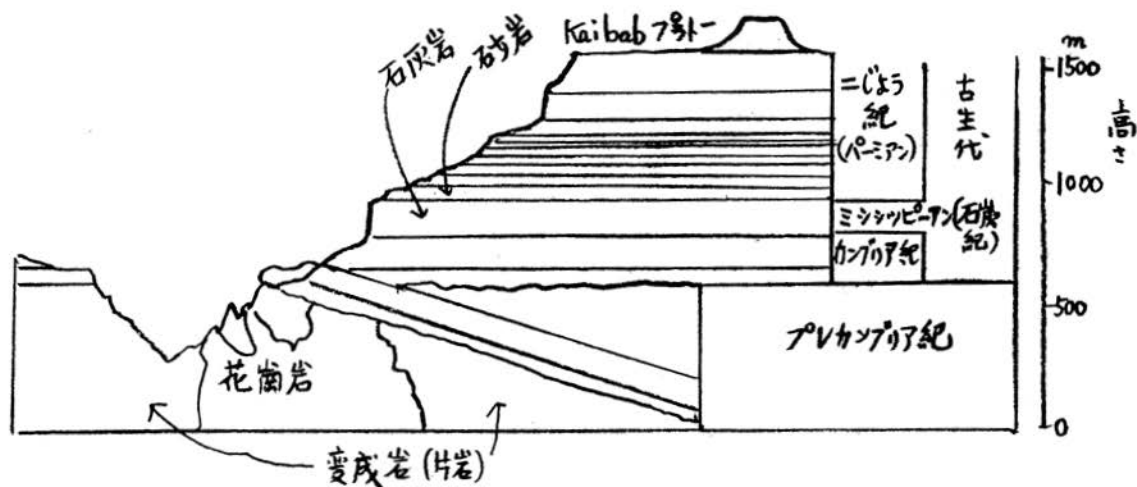


図1 グランド・キャニオンの断面図

すが、ここでは2億年以上にわたって堆積をつづけた水成岩が1,500mもの厚さの地層をつくり、それがごく最近、といっても100万年より前ですが、コロラド川の浸食で溝がほられてこのような地層の断面を見ることができます。横線で区切って示した地層は石灰岩と砂岩の層が交互に重なっている地層を示して

います。これを下から見ていくと、ほとんどが植物の世界から原始的な魚・両棲類・哺乳類と生物が進化していく図2のような有様をみることができ、時の経過を実感することができます。この時の経過を、主に生物の変化を目安として区分し、石炭期とか白亜期といった名前が19世紀につけられましたが、それ

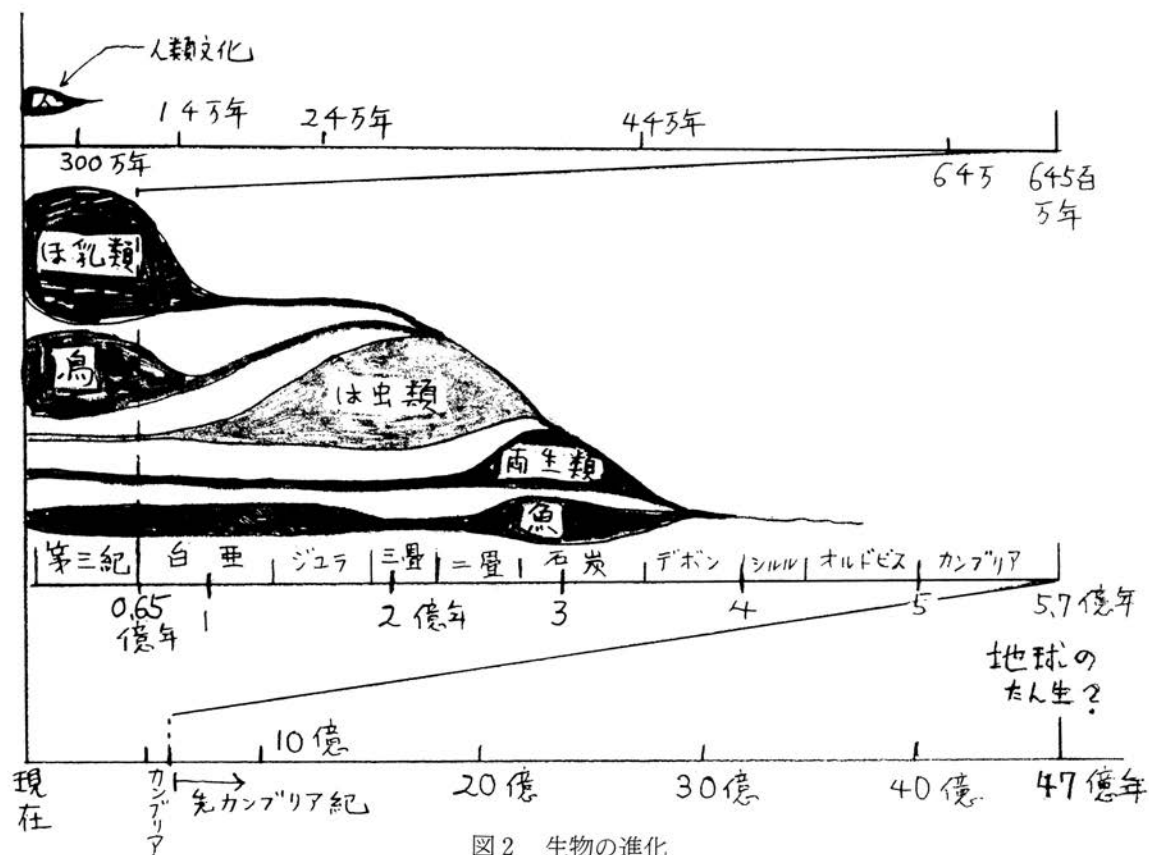


図2 生物の進化

それぞれの時代が何年前かということは、ごくゆっくりしかも時と場所で大きく変わる堆積の速度は全くの推定値でしかないため、現在の知識でみるとその推定値は10倍から100倍あるいはそれ以上くるっていたわけでありませう。

このようにゆっくり進む現象はその進みかたを正確に知ることはふつうではできません。たとえば、もし亀の寿命がほんとうに1万年だとすると、10匹とか100匹の亀を飼って次第に死んで減少するのを見ようとしても1年や10年ではまったく減少はみられないでしょう。しかし、亀を10万匹飼っていれば1年に10匹程度は死んで亀の数がへることが見られるはずで、実際に10万匹の亀の数を正確にかぞえてその減少を見ることはかなりむづかしい仕事になります。しかし、死んだ亀の数だけが数えられれば、このゆっくり進む現象を正確に知ることができます。観測する固体数をふやすことによって、ゆっくり進む現象を実際にみることができるといふ原理をつかって、ゆっくり進む放射壊変のはやさを知り、それを時計として長い時間をはかるという話をこれからするわけです。

時計として 使われる放射能

放射能は原子核が安定でないとき放射線を出して安定なものに変化する現象です。たとえば、通常のカリウムの原子核をみると、重さのちがうものが3種類あります。同位体が3種あるというわけです。その中の重さが40の原子核 ^{40}K は19個の陽子と21個の中性子でつくられています。原子核の中では中性子が2個あるいは陽子が2個ペアになっていると比較的安定で更に中性子2個、陽子2個のヘリウムの原子核 (^4He) の組合せになるといっそう安定になるという一般則が成立しています。この図(図3)のように ^{40}K の原子核の中の1個の陽子が中性子にかかわると、19個の陽子が18個に、21個の中性子が22個となって安定な原子核 ^{40}Ar になります。また、1個の中性子が陽子になると、陽子の数は20個となり中性子は一つ減って20個となり、これも安定な原子核 ^{40}Ca になります。このような原子核の変化を通常図4のように表しています。 ^{40}K から ^{40}Ca になるときは、 ^{40}K の原子核の中で中性子が陽子にかかわるため、核の中の正負の電気の収支が合うように負の電気をもつ電子が放出されます。これが核の壊変にともなって出る放射

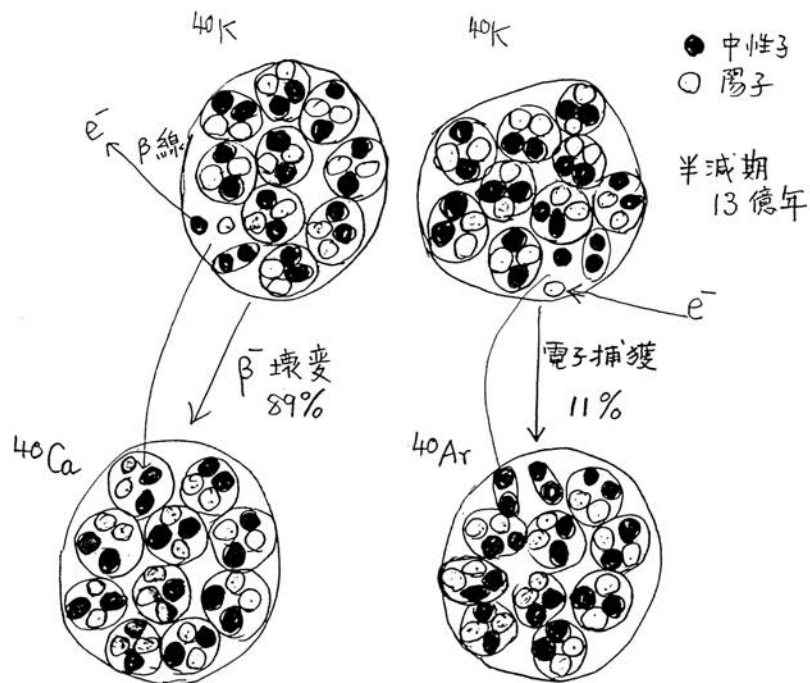


図3 ^{40}K の壊変にともなう核内の変化

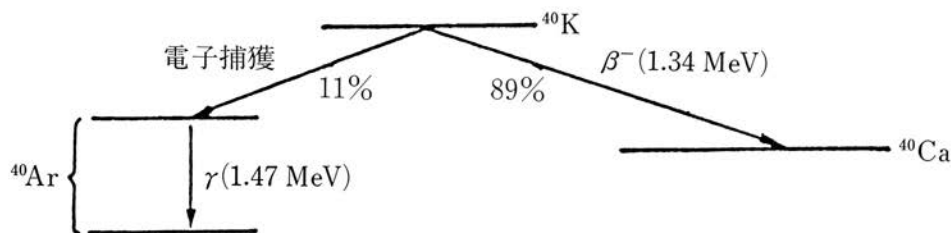


図4 ^{40}K の壊変

電子捕獲の壊変定数 $\lambda_e = 0.584 \times 10^{-10}/\text{年}$

β 壊変の壊変定数 $\lambda_\beta = 4.72 \times 10^{-10}/\text{年}$

^{40}K の半減期 $T_{1/2} = 1.31 \times 10^9/\text{年}$

線 β 線となります。 ^{40}K が ^{40}Ar になるときは、逆に電子を吸収する必要があります、原子核は核の外にある軌道電子を吸収します。この壊変を電子捕獲とよんでいます。このときには核からは、安定な ^{40}Ar となったとき余分になったエネルギーを電磁波の γ 線として放出します。いずれにせよ、 ^{40}K が安定な ^{40}Ar か ^{40}Ca の原子核にかわるとき、放射線として β 線か γ 線を出すことになり、この放射線を測定して壊変がおこったことを知ることができます。

1 個の ^{40}K の原子核に注目してそれが ^{40}Ar にかわるか ^{40}Ca にかわるかを予測すること

はできませんが、確率的には11%が ^{40}Ar に、89%が ^{40}Ca になることが知られています。

この放射壊変は、実はめったなことではおこらないので、さきほどの亀の話のように100個や1,000個の ^{40}K の原子核を見ていたのでは一生かかっても壊変を見ることはできません。しかし原子の数は原子量グラムの重さ、すなわち ^{40}K なら40g のものの中に 6×10^{23} 個という途方もない数がありますから、ごく少量の ^{40}K について見ていても、壊変で出る放射線をかなりの数観測することが出来ます。 ^{40}K の原子核の数と毎分あたり何個が壊変するかを放出される放射線のかぞえて

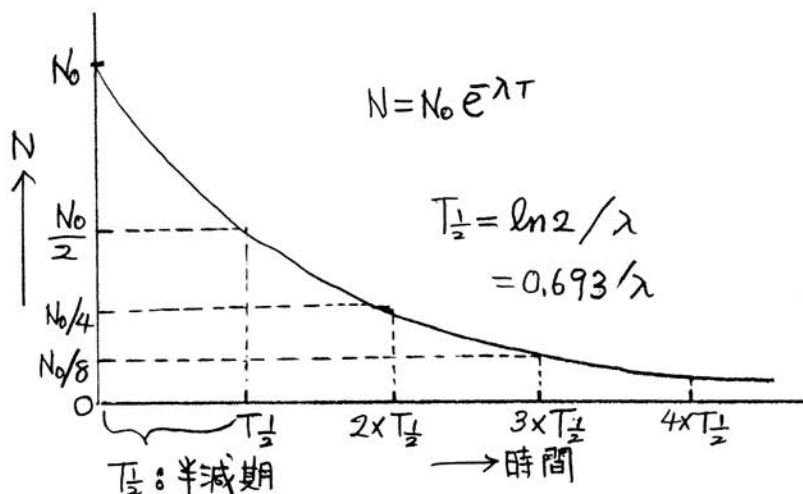


図5 壊変による原子数の減少

測定し、 ^{40}K の原子核の平均寿命を出すことができます。 ^{40}K の平均寿命19億年という長い寿命も、原子の個数が途方もなく多いためにきめることができることになります。

壊変の速さは、1個の原子核に注目してそれが壊変するまでの時間の平均「平均寿命」で表す方法と、多数の原子核に注目してそれが半分に壊変で減少するまでの時間「半減期」で表す方法があります。 ^{40}K の場合、図5のようにはじめにあった量が半分に減少するまでの時間、図で $T_{1/2}$ と書いた時間は13億年で、平均寿命の0.69倍ですが、さらに13億年たてば半分になったものがさらに半分すなわちはじめの1/4となり規則的にこの図に示した指数関数とよばれる曲線にそって減少していきます。

放射能というと、害
時計の針はどの
ようにして読むか
のあるもので、そう身
近にはないと思われて
いることが多いようですが、今話をしている
カリウムは植物の生育にも必要な元素として
知られており、岩石や土壌1トン中に平均と
して25kg含まれています。放射線を出す ^{40}K
は25kgのカリウムの中に2.8g含まれていま
す。1トンでなく1グラムの岩石や土壌を考

えると ^{40}K の平均の含有量は100万分の2.8gと少量になりますが原子核の数は 4×10^{16} 個、4兆の1万倍あり、13億年で半分に減少するとすると毎分42個の ^{40}K が通常の岩石や土壌約1グラムのなかで常に壊変していることになります。

とけた岩石が地球の深いところから地上に、あるいは地表近くに噴出して固化して現在地上でみられる火成岩がつくられたものであることは、現在見られる火山活動から推定できます。冷蔵庫の中の氷に、水にとけていた空気がおい出されて白い気泡となっているように、岩石も固化するときには溶岩のときとけこんでいた気体をほとんど放出します。固化した岩石の結晶の中には気体はごくわずかしき含まれていません。岩石の中の ^{40}K の放射壊変でできた ^{40}Ar は結晶の原子の間にしっかりとつかまえられて固化した岩石中に蓄積しています。たとえば、2.5%のカリウムを含む岩石、これはごく普通の岩石ですが、その岩石1gの中で1億年の間壊変でできたアルゴンが蓄積したとすると、毎分あたりでは壊変するカリウム42個の11%で4.6個のアルゴンしかできませんが、1億年では 0°C 1気圧で 10^{-5}ml 、すなわち10万分の1mlの量に

なります。この気体の量は、現在の分析技術ではその量を正確に測定するために充分すぎる量といえます。この蓄積されたアルゴンの量と、岩石中のカリウムの含有量から、蓄積に要した時間を計算することができ、岩石が固化してから現在までの経過時間を知ることができます。

もちろん蓄積した時間、すなわち岩石が固化してから現在までの時間が短くなれば、ほぼそれに比例して蓄積されたアルゴンの量は少なくなり、その量を測定することが困難になってきます。現在では岩石の年代が100万年以上であればかなりの精度で岩石の固化年代を測定することができます。

カリウム以外にも長寿命の放射性の元素が

表1 長寿命の放射性核種
半減期(年)

カリウム (0.012%) ^{40}K	$1.3 \times 10^9 (\beta^-, \text{電子捕獲})$
ルビジウム (0.24%) ^{87}Rb	$4.8 \times 10^{10} (\beta^-)$
レニウム (62.9%) ^{187}Re	$4.3 \times 10^{10} (\beta^-)$
ウラン (99.3%) ^{238}U (0.7%) ^{235}U	$4.5 \times 10^9 (\alpha)$ $6.5 \times 10^{15} (\text{核分裂})$ $7.1 \times 10^8 (\alpha)$
トリウム (100%) ^{232}Th	$1.4 \times 10^{10} (\alpha)$

表1に示したように多数知られています。この中でウラン・トリウム・ルビジウムなどがカリウムのときと同じような原理で岩石の固化年代をきめるのに使われています。

岩石が固化してから現在までの経過時間がわかれば、溶岩の年代から過去の火山活動の年代は直接知ることができます。溶岩が堆積岩の上にあり、噴出したての溶岩の熱で堆積岩が変質していれば、堆積岩のできた年代は溶岩の年代より古いことは確実です。逆に溶岩の上ののっている堆積岩の堆積した時代は溶岩の年代より新しいと考えられます。このようにして火成岩の年代を多数はかることによって、堆積岩の中の生物化石で区分された地質年代に実際の年数を入れることができます。現在では地質学で詳細に調べられた地球の歴史に実際の年数がかなりの精度であてはめられています。

放射性の元素の量
“ゆっくり”進む時計
と“はやく”進む時計
は壊変によって時と共に減少しますが、
逆に過去にさかのぼると現在よりも多かったこととなります。たとえば、ウランの同位体の ^{235}U は7億年で半分に減少しますが、7億年前には現在の2倍の量あったことになりま

す。7億年ごとに2倍あったことになり、地球の年齢と考えられている47億年前にさかのぼると現在ある量の約100倍になります。現在、天然にあるウランは ^{238}U が99.3% ^{235}U が0.7%で構成されていますが、47億年前には ^{235}U を25%含んでいたことになります。原子炉の燃料にするために苦勞して ^{235}U の含有量をふやした濃縮ウランを現在つくっているわけですが、何十億年昔にさかのぼれば天然にそのままあったはずです。実際にアフリカのウランを掘り出しているオクロ鉱山には、約20億年前に天然で原子炉が働いていた痕跡が残されておりま。

過去にさかのぼると放射性元素が現在よりはるかに多量存在していたことになるので、あまり遠い過去を考えるといろいろの話のつじつまが合わなくなってしまう。話のつじつまを合わせるためには、地球上の元素のほとんどのものは50~60億年前に軽い元素から核反応で合成されたものであると考えざるを得なくなります。現在地球上にある何億年あるいはそれ以上長い半減期の元素は、この元素の合成核反応のときにつくられて現在まで生きのびてきたものと考えられます。1億年以下の短い半減期のものは50億年の間に

10^{15} 分の1になることになり、実際にそのようなものは次に述べる例外を除いてまったく見出されていません。

表1にあげた長寿命の放射性の元素は、地球上の物質のつくられたときの生きのこり、すなわち生き証人であり、その放射能は物がつくられた大事件の残り火といえます。

表1の中の最も重い元素のウランの同位体 ^{238}U 、アクチノウランと呼ばれている ^{235}U およびトリウム ^{232}Th はそれぞれ45億年、7億年および140億年の半減期で α 線（ヘリウム原子核）を放出して壊変します。これらの壊変でできた娘の原子核が再び放射能をもちまた壊変をするということがつぎつぎにおこって一連の放射性元素が鉛になるまで続きます。たとえばウラン系の場合には図6に示したように ^{238}U から ^{206}Pb に至るまで ^{238}U に比べれば短い半減期の一連の放射性元素が続きます。この中には年代測定に利用するのに手頃な半減期をもつもの、半減期25万年の ^{234}U 、7.5万年の ^{230}Th 、1,600年の ^{226}Ra などがありますが、これらの放射性元素は親からの供給があってはじめて天然に存在するものであるため、かぎられた条件の下でないとな年代測定に利用することができません。今世紀

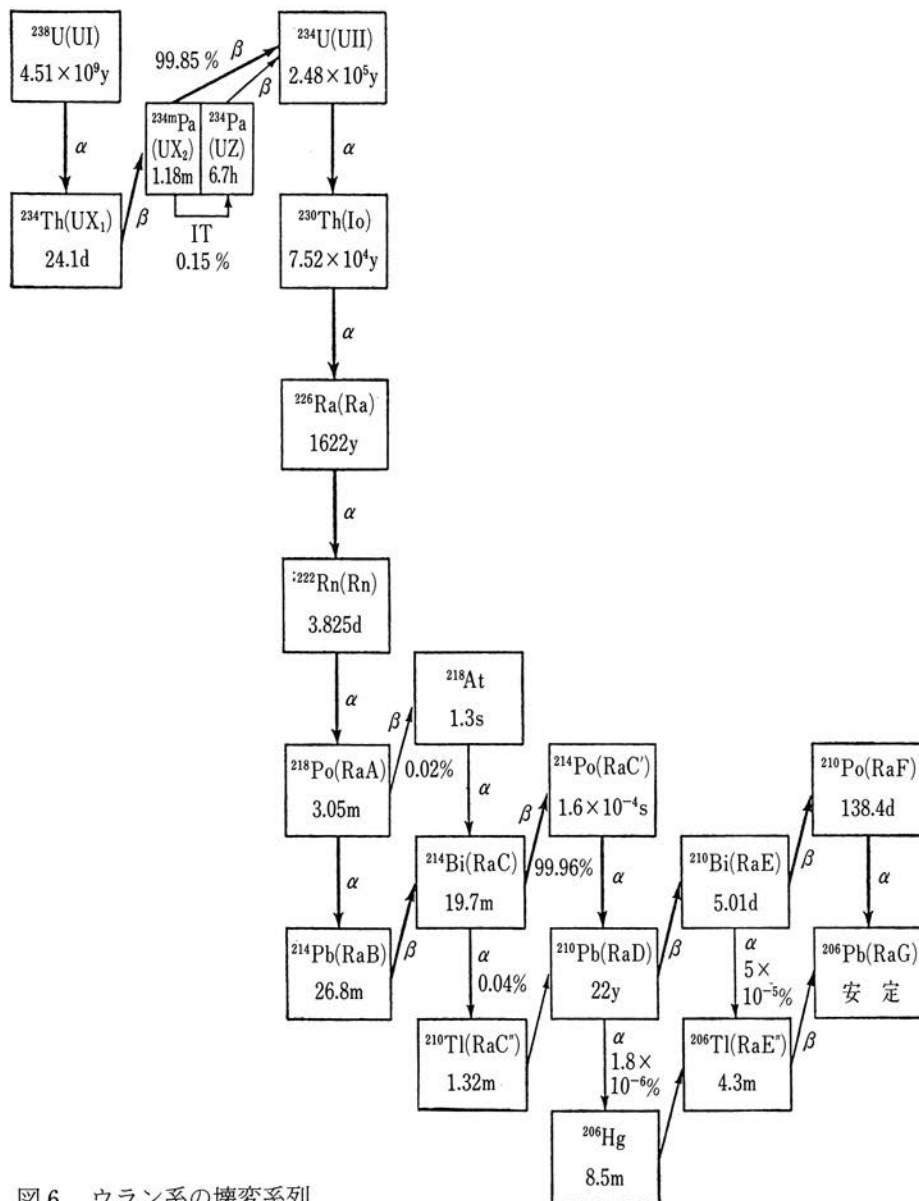


図6 ウラン系の壊変系列

前半では、これらの比較的速く進む放射能の時計をつかった年代測定はごくわずかしかわれず、長寿命の放射性元素をつかって何千万、何億年前の地球上の出来事についての年代測定が主として行われてきました。

短い寿命の放射性の原子核が地球上で原子核反応で、もちろん人工でおこしたものでなく、自然界でおこる核反応で、つくられている可能性は今世紀前半にすでに考えられていましたが、それが意外に多量にあり年代測定にも利用しうるのは、W.F. Libby が大気中に放射性炭素が存在することを発見してはじめてわかったことであります。1947年に ^{14}C を Libby が発見して以来隕石の中に、隕石が宇宙空間をとんでいる間に宇宙線による核反応でつくられた放射性のいろいろの原子核が見出されました。また ^{14}C と同様に大気中で宇宙線で作られた半減期12年の水素 ^3H 、

表2 宇宙線で作られて天然にある放射性核種
半減期(年)

水素(トリチウム) ^3H	12
ベリリウム ^{10}Be	1.6×10^6
炭素 ^{14}C	5730
アルミニウム ^{26}Al	7.2×10^5
ケイ素 ^{32}Si	150
塩素 ^{36}Cl	3.0×10^6

160万年のベリリウム ^{10}Be 、74万年のアルミニウム ^{26}Al 、150年のケイ素 ^{32}Si などが見出され、いずれも年代測定に利用されていますが、ここではもっとも適用範囲が広く多数の測定が行われている放射性炭素による年代測定についての話をいたします。

炭素原子の安定な原子核は重さが12のものから壊変するまで

と13の2種類があり、

地球上の炭素は99%が重さ12の炭素で1%が13の重さのものになっています。この安定な炭素の原子核に中性子をふやすと重さが14、15と重い炭素の同位体ができ、へらせば11あるいはそれ以下のものもできますが、図7に示したようにこれらの同位体はいずれも放射性で、壊変して窒素かホウ素にかかります。この中で ^{14}C は特に半減期が長いということはかなり安定な原子核に近いことを示しています。はじめにお話したように核の中では中性子2個と陽子2個がこの図のように集まってグループをつくり、半端になった陽子と中性子も2個同じものがペアとなっているほうが安定になるのが一般的な通則です。この図でみられるようにこの通則に従えば ^{14}C のほうが ^{14}N より安定なはずですが、この場合

^{11}C		β^+ , EC 半減期 20 秒
^{12}C	99%	安定
^{13}C	1%	安定
^{14}C ($10^{-10}\%$)		β^- 半減期 5730 年
^{15}C		β^- 半減期 2.5 秒

β^+ : 陽電子を出す

EC : 電子捕獲 γ 線を出す

β^- : β 線を出す

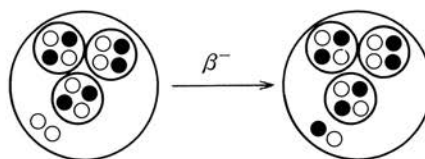
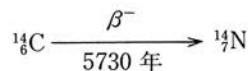


図7 炭素の同位体と ^{14}C の壊変

は稀な例外で ^{14}N は普通にある窒素の主成分となっている安定な原子核ですが逆に ^{14}C は放射性で不安定になっています。しかし、 ^{14}C は安定状態に大変近いので壊変しにくく、長い半減期をもっていると考えられます。

^{14}C は β 線を出して核の中の中性子が陽子にかわって ^{14}N に壊変します。逆に ^{14}N に中性子が加わると核から陽子が放出されて ^{14}C ができる核反応が大変おこりやすいことが実験室で確かめられています。大気中にある ^{14}C は、宇宙線で作られた中性子が空気の窒素に吸収されてこの核反応がおこって、つくられたものと考えられます。

宇宙線は宇宙空間にある原子の電気をもったイオンが加速されてできた放射線ですが、

主成分は水素の原子核すなわち陽子の加速されたものです。非常に高エネルギーに加速されたものが空気中にはいつて来ると、空気の成分となっている窒素、酸素、アルゴンなどの原子核と衝突してこれらの核から陽子、中性子および中間子をたたき出す激しい核反応をします。このときできた中性子の約80%が空気中の ^{14}N に吸収されて ^{14}C をつくり出します。

大気は水銀柱で76cm に相当する重さの空気が地表にのっています。かりに上空でも1気圧とすれば、10km の厚さになります。実際には8 km の高さのヒマラヤの上では約1/2.6気圧に圧力が下がります。そのため数十km の上空でもかなりの空気があり、大気に突入した宇宙線の大部分はこの程度の高さの

成層圏でほとんどすべて空気の原子核と衝突して二次的にできた宇宙線に変わります。このときに放出される中性子で ^{14}C がつくられるので、 ^{14}C は数十 km 以上の成層圏でつくられ、ただちに酸素と結合して ^{14}C のはいった二酸化炭素 $^{14}\text{CO}_2$ となります。この二酸化炭素は通常の二酸化炭素、炭酸ガス CO_2 と化

学的には同じ性質をもち均一に混合して地表近くの大気対流圏に供給されます。

大気中には0.03%の炭酸ガスが含まれていますが、その中にごく小量ですが ^{14}C のはいった炭酸ガスがまざっているわけです。地球の表面では炭酸ガスは植物に吸収されて有機物にかわり、それを動物がたべて動物の体を

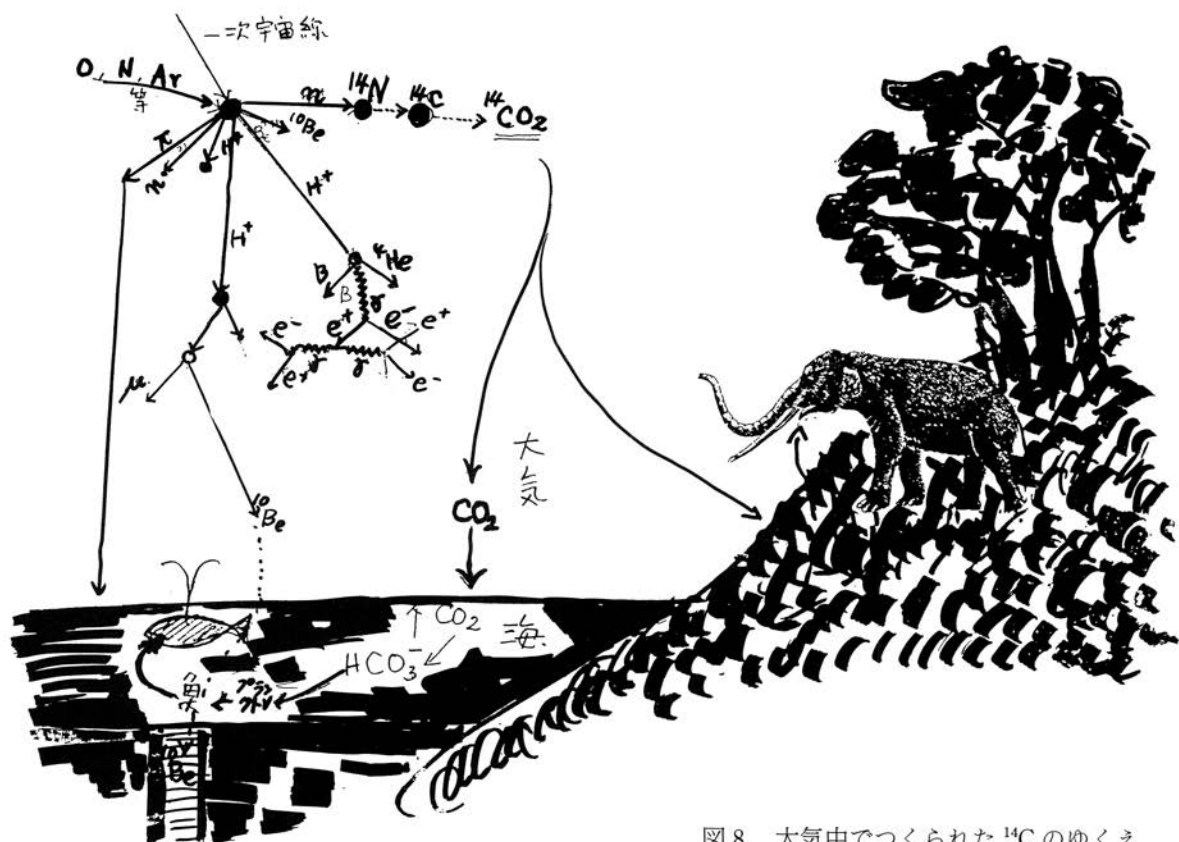


図8 大気中でつくられた ^{14}C のゆくえ

つくるので、空気中の炭酸ガスと同じ組成の炭素が生きている動植物の体をつくる炭素にゆきわたることになります。(図8参照)。海の表面では大気中の炭酸ガスが溶けこむことと、海水中の炭酸イオンからできた炭酸ガスが放出されることが同時におこって、表面の海水中の炭酸の炭素も大気中の炭酸ガスの炭

素と同じ組成のものとなります。海の中では植物プランクトンが炭酸を有機物にかえ、それを動物がたべるという陸上と同様のことが行われて、海の生物にも ^{14}C が均一に分布することになります。

^{14}C の半減期5,700年よりはるかに短い時間の間に、すなわち ^{14}C が壊変してしまう前

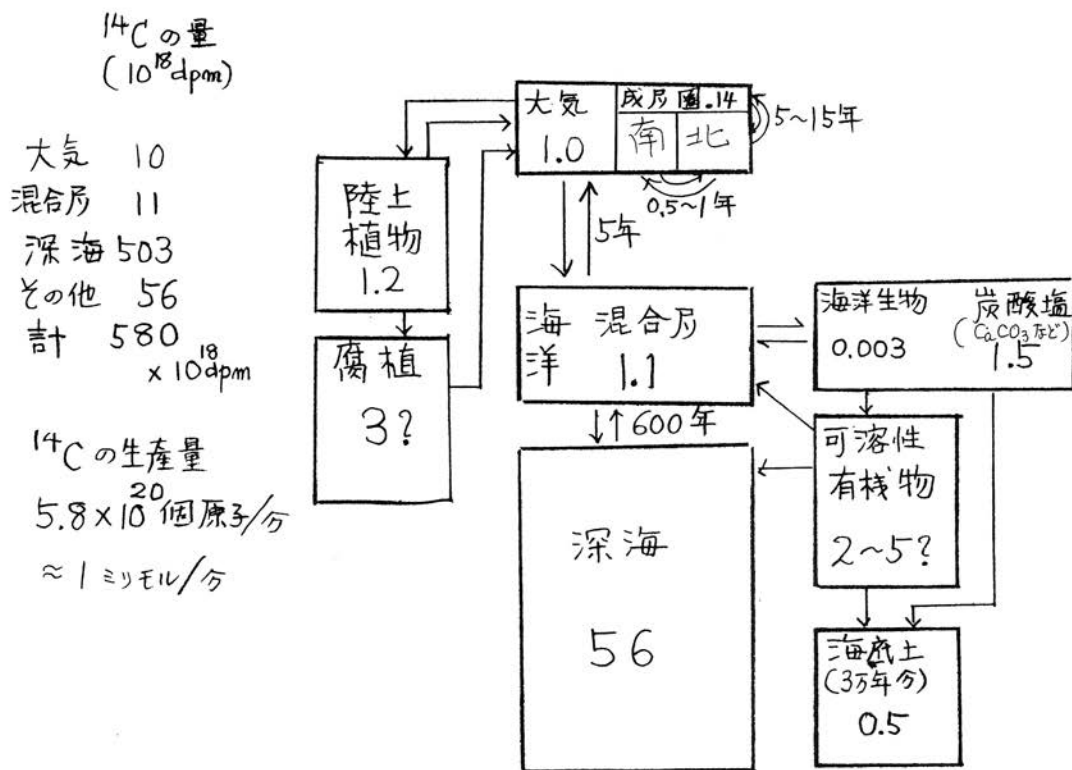
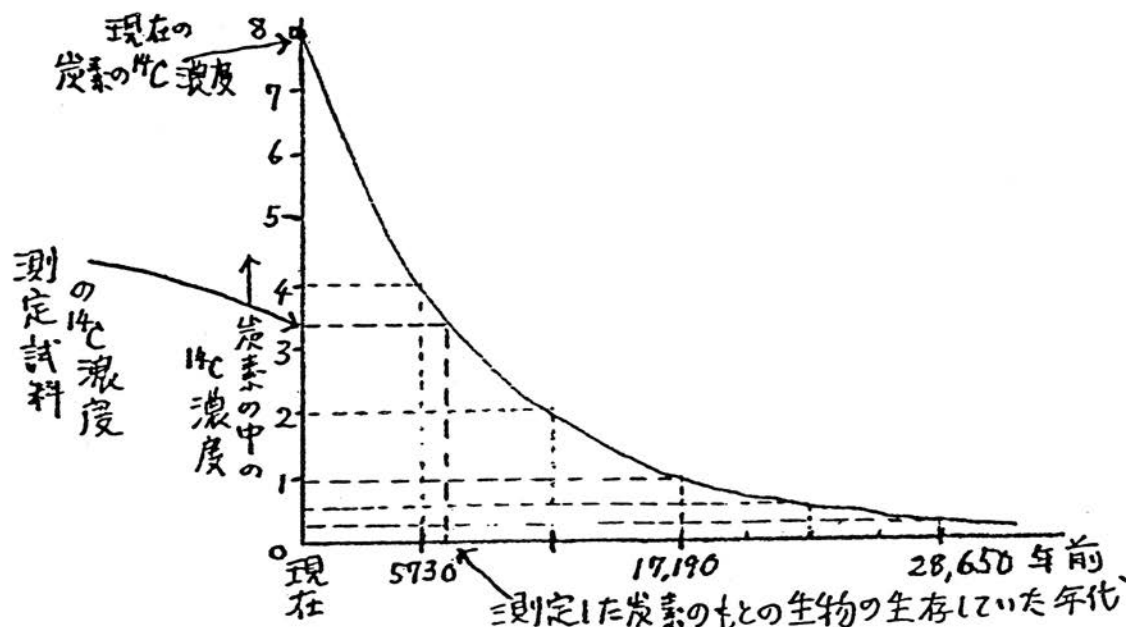


図9 地球上の炭素の貯蔵庫と移動の速度
(炭素の量1が $6.6 \times 10^{12}\text{kg}$ に相当する)

に、大気中の炭酸ガスの炭素が、地球の表面にあるどの位の量の炭素にゆきわたるかを示したのが図9です。この図で炭素の量の単位として用いた1に相当する量は、大気中の炭酸ガスの炭素の総量で $6.6 \times 10^{12} \text{kg}$ になります。地表上の炭素の貯蔵庫の炭素の量がこの単位で図の中に数字で示してあります。この中で特に多量の炭素をもつ貯蔵庫は深海の海水すなわち海水中の炭酸イオン、主として炭酸水素イオン HCO_3^- の炭素です。ここで海洋を混合層と深海にわけていますが、混合層は海水の表面約100m位の深さの部分で、上下の混合がよく行われほぼ均一の濃度で ^{14}C を含んでいます。深海の水は上下のかくはんがあまりよくないので、約600年で半分の炭素が混合層の炭素と入れかわるという意味で深海と混合層の貯蔵の間に矢印でこの混合の速度600年を示してあります。大気と混合層の間、あるいは南北両半球の大気の間および成層圏と対流圏の間の混合速度も同様に半分が入れかわる時間をそれぞれ数字で示してあります。これらの値は、1960年から約2年間の間に行われた核爆発実験で天然の状態で存在していた大気中の ^{14}C の総量にほぼ等しい量の ^{14}C が大気に加えられましたが、この人工

の ^{14}C の行方を追跡して得られたものです。

地球上の炭素の貯蔵庫の炭素の中にある ^{14}C の量は図9の左側にdpmで示してあります。dpmはdisintegration per minute(毎分あたりの壊変数)の略で ^{14}C の炭素の量にすると1dpmが 10^{-13}g に相当します。グラムにすると大変小さい数になるので毎分あたりの壊変数で ^{14}C の量を示してあるわけです。このように地球上の ^{14}C は大部分が海水中に炭酸イオンとして存在しますから、 ^{14}C が壊変で失われていくのも大部分は海水中ということになります。失われた ^{14}C は、成層圏でつくられたものが対流圏にはこぼれ、海面からとけこんで混合層を経て深海に供給されているはずで、 ^{14}C の半減期5,700年よりはるかに遠い昔からこのような ^{14}C の供給と崩壊が続けられていますから、壊変で地球上で失われる量と同じ量がいつも成層圏でつくられているはずで、もし、つくられる量が失われる量より多ければ、地球上の ^{14}C の量は増加して壊変で失われる量もふえて生産量と同じになるように変わるはずで、また ^{14}C の生産量が壊変する量より少なければ、地球上の ^{14}C の全量が減少して壊変するものも減り生産される割合と等しくなるはずで、した

図10 生物遺体の炭素中の ^{14}C の量

がって、宇宙線で毎分あたり生産される ^{14}C の数は、図9の左側に示した地球上での ^{14}C の毎分あたりの壊変数 $580 \times 10^{18} \text{dpm}$ と等しいことになります。地球の表面積が $5.1 \times 10^{18} \text{cm}^2$ ですから、地表 1cm^2 あたりに換算すると、毎分114個、毎秒にすると約2個の ^{14}C 原子が宇宙線で作られていることになります。この値は、地球上の海水の全量と、海水中の平均の ^{14}C 濃度でほぼきまる値で、両者の測定値に大きな誤りは考えられないのでかなり信頼のおける値といえます。

放射性炭素 ^{14}C による年代測定

^{14}C の地球上の分布は、宇宙線の入射量と地球上の炭素の分布と移動で左右されますが、両者とも昔からそれほど変化していないと一応考えられるので、地球上での ^{14}C の濃度分布は数万年前から一定であったと一応考えられます。もし一定だとすれば、昔の生物が生きていたときは、その生物体の炭素は現生の生物と同じ ^{14}C 濃度をもっていただはずです。昔の生物の炭素の中にあつた ^{14}C は、生物が死んでからは ^{14}C の

補給がないためその半減期に従って壊変で減少しているはずです。5,700年前の生物遺体であれば現在の生物の半分に、11,400年前の生物の遺体であれば半分の半分、1/4に減少しているはずです。逆にこの炭素中の ^{14}C 濃度の減少量をはかれば、その生物が生きていたのが何年前であるかを知ることができます(図10参照)。

この年代測定は、過去に生きていた生物の年代、すなわち生きていたのが何年前かを測定しているのですが、いろいろの過去の出来事が何年前であったかを知る方法として用いることができます。遺跡に残された木炭あるいは食料として保存されていた木の実の年代から遺跡が使用されていた年代を知ることができます。地層が堆積した年代は、その地層中にある木片あるいは地表面であったとき生育していた植物の腐植の ^{14}C 年代で推定することができます。火山噴火による溶岩の流出年代は溶岩で焼かれた木炭から正確にその年代を知ることができます。地震、地すべりなどもそのとき、あるいはほぼそれと同時期に生きていたと考えられる生物遺体の ^{14}C 年代でその時期を推定することができます。

適用範囲はかなり広いのですが、測定しう

る年代には限界があります。 ^{14}C の半減期が5,700年過去にさかのぼるたびに1/2になるので3万年前の生物の遺体に残っている ^{14}C は、現在のものの1/38に減少し、5万年前のものは1/437に減少します。もちろん10万年以上の古さのものであれば全くないといえるほど ^{14}C の量は減少します。そのようなものでも、 ^{14}C を測定しようとする炭素に現在の炭素すなわち空気中の炭酸ガスの炭素あるいは有機物の炭素が1/400位混入していれば5万年の年代を与えてしまいます。4～5万年を超す古さのものについての ^{14}C 年代測定は、よほど試料について良い条件がそろっていて注意深く測定するのでない限り信頼のおける年代値は得られないことになります。

また新しいものについては、物理化学的な測定に常にともなう誤差と、これから述べる原理的なことからくる誤りのため100～50年程度の不確かさはのぞくことができません。200～300年前のものについて100年も不確かさがあっては意味がなくなるので新しいものについても限界があることになります。

^{14}C 年代測定はしたがって数百年から3～4万年前の生物の遺体について、その生物の生きていた年代を、もし次の条件が成立し

ているならかなり正確に測定できるはずで
す。その条件は、

1) 大気中の炭酸ガスの中の ^{14}C の濃度が
数万年前から現在まで一定であったこと（経
年度化がなかったこと）

2) 大気中の ^{14}C の分布に地域的な不均一
がないこと（地域による不均一性のないこと）

3) 生物が ^{14}C と ^{12}C を区別せずに取りこ
むこと（同位体効果がないこと）

の三つですが、いずれも厳密には成立してい
ません。どのように成立していないかが明確
になれば、それに応じて補正を加えることに
より成立しているときと同じように正確な年
代値への換算ができます。これらの3点を明
らかにすることは、 ^{14}C 年代測定の値を実際
の年数に近づけるために必要ですが、これら
の点を明らかにすることで新しい興味ある自
然の姿が浮かび出てきたことをこれからお話
しようと思います。

大気中の ^{14}C 濃度 の経年変化

大気中の ^{14}C 濃度は
成層圏で ^{14}C が宇宙線
によってつくられる

量、これは前に定常状態になっているなら毎
秒あたり ^{14}C 2 原子になるといった量です
が、これが変化すれば、その増減に比例して

変化することが予想されます。大気に到達す
る宇宙線は図11に示した磁石としての地球の
つくる磁気圏を通過しなければなりません。
この図で、地球の大きさは半径が6,300km で
すから大気がある100km 位の層は地球をか
いた円の線の幅位にしかありません。宇宙線
は電気を帯びた加速された粒子ですから、電
流を流している電線が磁場の中で力をうける
ように、この粒子に力が加わり進路がまげら
れてしまいます。エネルギーの小さいおそい
粒子は地球の表面まで到達できず、ファンア
ーレン帯のところに集まって放射線の強い場
所をつくります。高エネルギーの宇宙線、あ
るいは南北の極地に垂直にとびこんできた宇
宙線が地球の大気に到達して ^{14}C をつくること
になります。したがって、地球の磁気圏の
変化によって ^{14}C の生産量が変化すること
になります。地球の磁気圏の姿はこの図のよ
うに太陽風とよばれている太陽からふきつける
イオンの風で大きく変形していますから、太
陽活動にも依存しますが、地球の磁石の強さ
が変化すればそれに応じて当然変化します。

昔の地球の磁場の強さと方向が地上でどの
ように変化したかを知る方法があります。昔
といってもいつかということは ^{14}C 年代測定

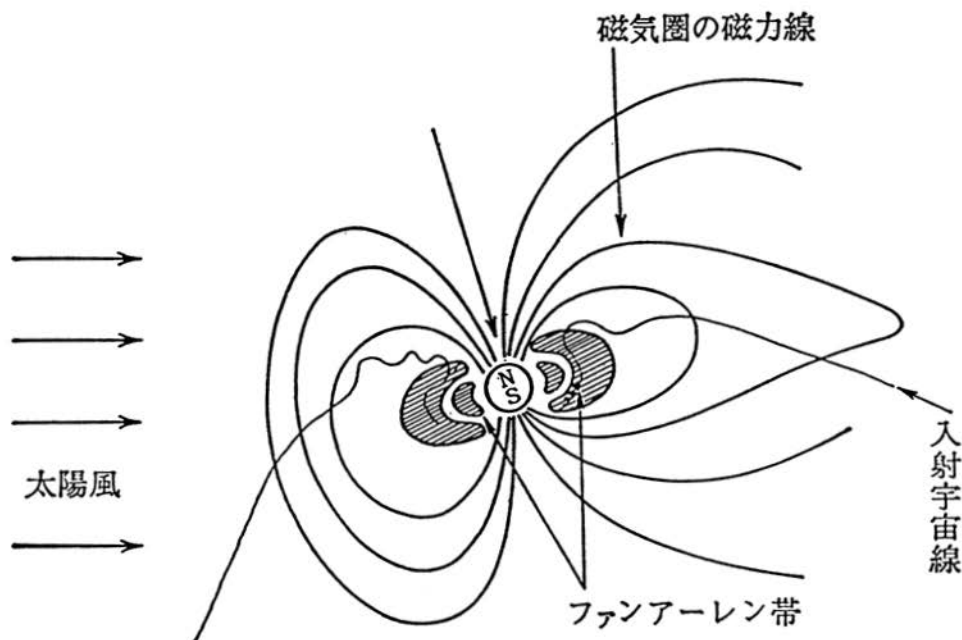


図11 地球の磁気圏

できめるわけですが、何年かしられている過去のある時に焼かれた土、石など、もちろん土器でもよいのですが、これらのものはもっている磁気を高温になったとき一旦失います。低温にもどるとき、その時その場所の磁場によってふたたび磁化されるため、その時の磁場の強さと方向をこれらの残された磁気、熱残留磁気を測定して求めることができます。図12はこの方法で求めた過去の地上の

磁場の強さから求めた地球を磁石と考えたときの強さの経年変化を示したものです。地球の磁場が強くなれば、入射した宇宙線は強く進路がまげられ大気に到達しにくくなります。当然 ^{14}C の生産量が減少して大気中の ^{14}C 濃度が減少することが予想されます。実際にこの図でみられるように地球の磁石の強さ、磁気双極子能率は1.5から0.7と約2倍近くこの数千年の間に変化をしていますから、大気

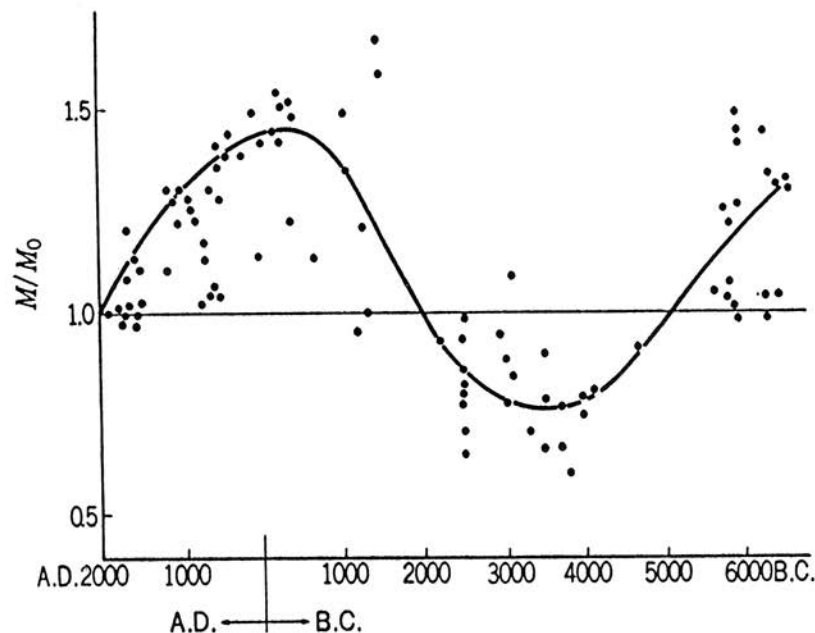


図12 地磁気強度の経年変化

縦軸は現在の地球磁場と過去の磁場の強度比

中の ^{14}C 濃度もかなりの変化がこれで引きおこされることになります。大気中の ^{14}C 濃度の変化は図13に示してありますが、この地磁気の変動とよく逆相関を示し、5,000年の間に10%近く変動しております。10%変動しますと年代値としては800年のくるいを生じます。現在から4,000~5,000年前のもの、たとえばエジプトの古い時代の遺物、あるいは縄文中期の出土品の ^{14}C 年代は600~700年位新しすぎる年代値を示すことになります。

図13の過去の大気中の ^{14}C 濃度の値は、この図の点一つひとつが実測値で、生育した年代が何年前かわかっている木材についてその炭素中の ^{14}C 濃度を測定して求めたものです。樹木は1年の間に葉の所で空気中の炭酸ガスを原料にして合成した有機化合物を用いて幹の外側に一つの新しい年輪をつくります。生きた木を切断して、外側から10番目の年輪をつくる木材を取り出せば、10年前に生育した、すなわち10年前の大気中の炭酸ガス

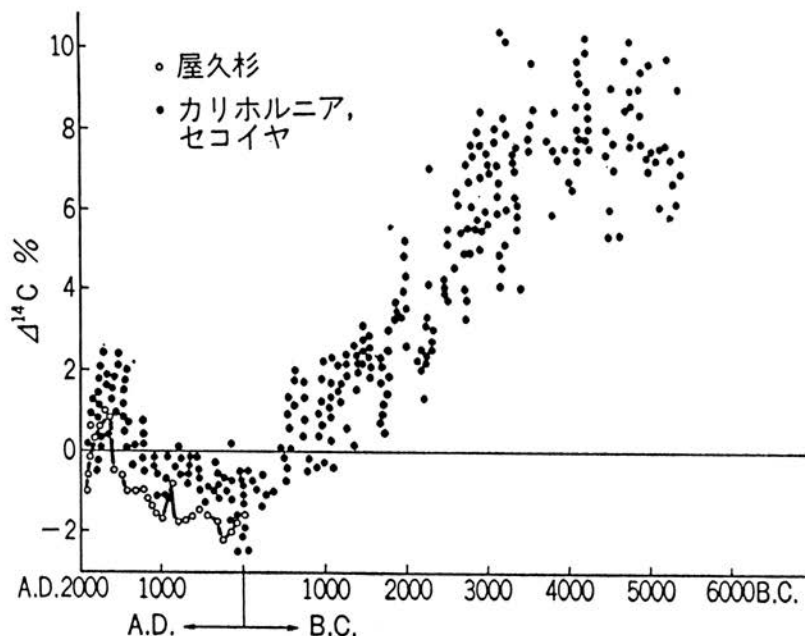


図13 大気中の ^{14}C 濃度の経年変化

白丸は屋久杉についての測定値，黒丸はカリフォルニア産セコイヤについての測定値

でつくられた木材を得ることができます。図13の左側に白丸で示した測定値は、屋久島の杉について測定した値で、この屋久杉は1,830の年輪をもっていたので、約2,000年前までの日本の近くの大気中の ^{14}C 濃度が測定できたわけです。この図の黒丸で示した測定値はアリゾナとカリフォルニアの間の山で見出された巨木について測定されたものです。この地方では生きている木で4,000位の年輪をもつものが何十本も見出されています。

年輪は、それができた年の気候によって生育のよかった年は幅の広い年輪が、生育の悪い年はせまい幅のものができ図14のようなパターンをもっています。異なった木でも育った場所が近ければ同じようなパターンをもつので、図のように生きた木と枯木をつないで年輪をかぞえることで4,000年よりさらに古い時代に生育した材を得ることができます。アリゾナ大学の年輪年代学研究所ではこの方法で7,000年前までの生育年代の知れた材

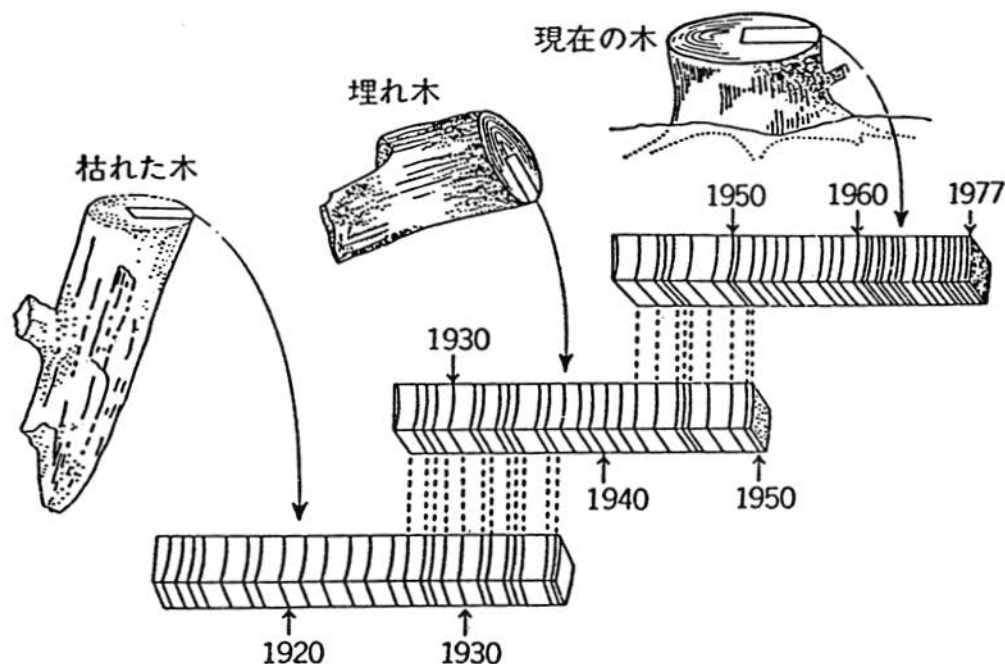


図14 年輪の幅のパターンと年代

を、 ^{14}C 年代測定を行っている研究室に供給しています。図13の黒丸の測定値はこの材についてアリゾナ大学、ペンシルベニア大学およびカリフォルニア大学で測定した値です。

長期間の大幅な ^{14}C 濃度の変動はこれらの測定で明確に示され、それが地磁気の変動に関連していることは現在一般に認められています。この長期の変動の上に100~300年程度の短い周期でおこる変動が重なっていることがこれらの測定値で見られます。図15は多数

の測定値から求めたものですが、このこまかい変動の中で特に約200年前に大きな極大を示すピークがあります。発見者の名をとって de Vries ピークとよんでいます。ちょうどこの時期 AD1650~1750年の間に Maunder Minimum とよばれる太陽黒点が消失した時期が重なっています。太陽の表面にでる黒点の数は図16の右側の所を書いてあるような11年周期の増減が通常みられるのですが、Maunder Minimum のところでは黒点がほ

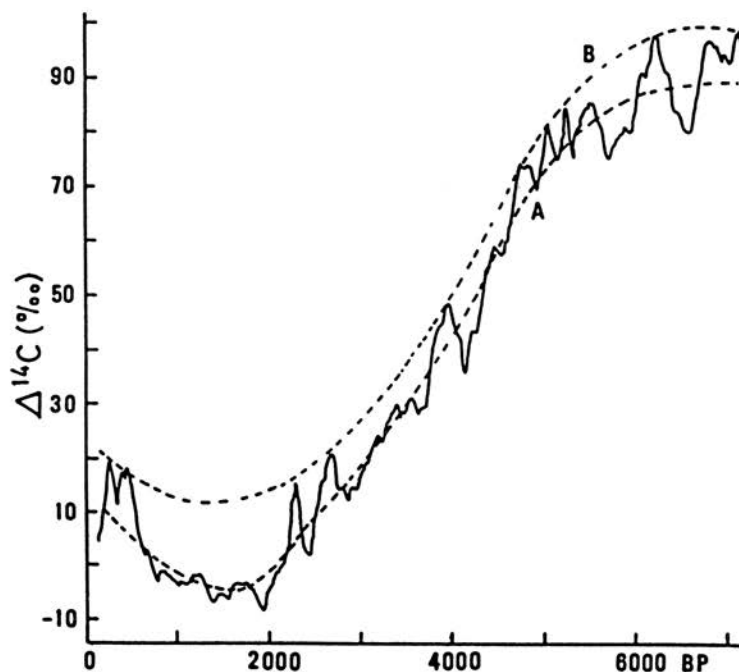


図15 大気中の ^{14}C 濃度の経年変化の測定値の平均値

とんどみられず、太陽の活動が衰えていたことを示しています。この太陽の黒点数とその時期の大気中の ^{14}C 濃度の変動が関連していることは図16の上の二つの図から考えられます。しかし11年周期で測定される宇宙線強度と太陽黒点の数との関連から計算すると、Maunder Minimum のときの ^{14}C の大気中の増加量は実測値の1/3にしかありません。

Eddy が1976年に Maunder Minimum についての論文を出した直後に気象学者がこの

時期の太陽活動の衰えと火山噴火による空のよごれから地球全体の平均気温が図16の下グラフのように約 3°C 近く下がったという計算結果を出しています。この時期に寒かったという定性的な記録としては、アルプスの氷河が麓のほうまでのびていたとか、飢饉が続いたといったものがあり、寒い時期が続いたことは誤りないようです。この時期を小氷期とよぶこともあります。平均気温が 3°C 下がるとすると、通常の化学反応では 10°C かわる

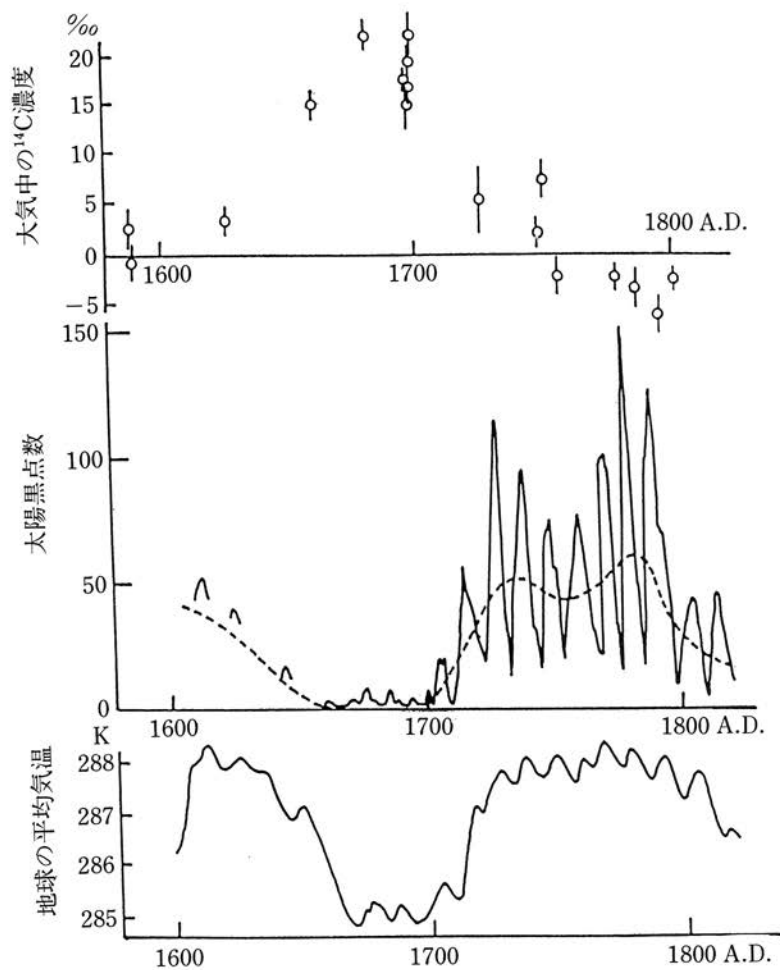


図16 AD1600年から1800年の間の大気中の ^{14}C 濃度, 太陽黒点数, 地球の平均気温の変化

と反応速度が2倍位かわりますから、大気中の ^{14}C が海洋にとけこんで移動していく速度も30%近くは遅くなることが予想されます。成層圏でつくられた ^{14}C の大部分は海洋にとけこみそこで壊変して消失するわけですが、大気から海洋への移動が妨げられれば大気中にたまる量が増加して大気中の ^{14}C 濃度が増加するはずです。平均気温によって ^{14}C の大気から海洋への移動速度が変化するとして計算すれば、de Vries ピークの大きさを説明することができます。de Vries ピークの説明にはいろいろの説があり、まだこの考えかたは一般に認められているとは言えませんが、大気中の ^{14}C 濃度の短い周期の変動は、気候変動を示している可能性が大きいと思われる。

大気中の ^{14}C 濃度の経年変化は、現在のところ木材の年輪を用いて7,000年前位まで実測値が出されて、いま述べたように変動の機構も次第に明らかになりつつあります。変動の原因が明らかになれば、大気中の ^{14}C 濃度が直接測定されていない1万年より古い時代の変動の大きさの可能な上限、すなわち ^{14}C 年代がどこまで信用しうるかについての解答が与えられることになります。

^{14}C 濃度の 地域的な不均一

大気中の ^{14}C 濃度が地域的に異なることはほとんどないと考えられています。前にも述べましたように、南半球の大気、もちろん対流圏の大気ですが、これが北半球の大気と半分まざる時間は半年から1年程度で ^{14}C の半減期からみれば非常に短い時間で混合しているので、地域的には均一と一般に考えられています。局所的に ^{14}C を含まない炭酸ガスを放出している火山の噴気孔などの近くではごくせまい地域で多少の影響があることは報告されていますが、広い地域にわたる変化は報告されていません。

図13の屋久杉の年輪についての測定値が他のアメリカ大陸で生育した木の年輪の値と比べると0.5%位低い値になっています。これは日本のように海洋性の気団に大気になることが多いことに関連している可能性があります。 ^{14}C は成層圏でつくられ海洋に移動します。この移動は海面では ^{14}C について大気との完全な平衡値より濃度がうすくなっているためにおこるはずですから、海面に長時間接していた気団の ^{14}C 濃度は、大陸の気団に比べて多少濃度がうすくなっている可能性があるわけです。しかしこの差は、通常の ^{14}C の濃

度測定の見誤差約1%以下と考えられるので、まだ確実な事実とはいえず、可能性が考えられるという程度のことです。

生きた生物中の ^{14}C 濃度について地域的な大きな不均一が南極で見出されています。日本が南極に基地をつくった頃、南極の氷原の中に列をつくって死んでいるアザラシの肉の年代測定を依頼されたことがあります。約2,000年前という測定値は古すぎるようにも思いましたが環境が想像を超える所ですからこの年代が正しいかとも考えました。翌年、比較のため生きていたアザラシの肉をもって来られたので、それを測定したところ約1,500年前とでておどろいたことを憶えています。極地では深海水が上昇して表面に出てくるため、深海で長い期間保たれていたため ^{14}C が壊変して減少した古い水が表面に供給されているためとも考えられます。しかし深海の水について、多くの方がいままで測定した値は高々10%程度 ^{14}C 濃度が表面海水より低い値で、1,500~2,000年の年代を与える ^{14}C 濃度すなわち20~25% ^{14}C の濃度の低い海水が南極の海面に出てきているとは考えられませんが。その後しばらくして、南極の基地の近くでとれた魚、ひとで、貝など数種類の生物に

ついて測定した結果、やはり1,500~2,000年前の年代値をいずれも示すことがわかりました。

南極のように寒いところでは有機物を分解して炭酸ガスとして大気にもどすバクテリアなどの生物がほとんどいないため、一旦極地でつくられた有機物あるいは移動してはいった生物体の有機物は、その生物が死んでも有効に他の生物の食料となると考えられます。生物が死んでもその生物の有機物が他の生物に引きつがれて何千年もの間有機物として生きながらえてきたと考えるのが妥当だと思います。このような世界では通常の ^{14}C 年代測定はそのままでは通用しません。しかしこの興味ある生物の物質代謝の姿をこれから明らかにするためには ^{14}C が重要な役割りをすることは確実です。

大気の炭酸ガスの中
生物は重い炭素と軽い炭素を区別するか
の ^{14}C が、植物が光合成で有機物をつくるとき、またその有機物を食べて動物が体をつくるとき、炭素の中の ^{14}C の含有量、すなわち ^{14}C 濃度は全く変わらないと仮定して通常は ^{14}C 年代が出されています。しかし ^{14}C は重さが14、すなわち原子量が14の炭素で通常の

炭素の主成分の ^{12}C と比べると重さが20%近く異なりますから化学的に全く同じ行動をするとは考えられません。実際に1~2%の差はいろいろの化学反応でみられます。炭素原子の重さのちがいでおこる差は、安定な炭素原子の中に13の重さの ^{13}C が約1%はいつているので $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 原子比を測定することでみることができます。 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ の原子比はほぼ1/100ですが、これが例えば大気中の CO_2 の炭素についての値と、植物がつくった繊維やでんぶんの炭素についての比とどれだけ差があるかをみるわけです。この差が何パーミルあるか（パーミルで言うとパーセントの場合の10倍の値になる）それをデルタ ^{13}C ($\delta^{13}\text{C}$) で表しています。差をとるので標準になるものをきめてあります。 $\delta^{13}\text{C}=+10$ のときは、標準のものより ^{13}C が1%多く含まれていることを示すことになります。 ^{14}C は ^{13}C よりさらに重いので ^{14}C が壊変をしないものなら2倍になる。例えば $\delta^{13}\text{C}=-5\%$ なら $\delta^{14}\text{C}=-10\%$ になることが実験的にも確かめられています。このことを用いて、年代を測定する炭素について $\delta^{13}\text{C}$ の値を測定すれば、炭素原子の重さが異なるための年代値のくりを完全に補正することができます。実際の補正

値は多くの場合50年以下でその他の誤差より小さくなりますが、物によっては100~200年といった値になることもあります。いずれにせよ完全に補正することができるので、年代測定の問題としては解決がついていることになります。この補正を行うために、いろいろの植物について $\delta^{13}\text{C}$ を測定した結果から面白い事実が見出されました。植物が空気中の炭酸ガスと水を結合させて繊維やでんぶんのような有機化合物を合成する過程については、人工でつくられた ^{14}C を用いて CO_2 の C がどのような化合物の中に取り入れられてゆくかを追跡していく有名な Calvin の研究があります。この種の一連の研究の結果、現在では合成の経路の異なるものが3種類あることが判明し、すべての植物はこの3種類の合成方法のうちの一つを用いて光合成を行っていると考えられています。植物をこの光合成の方法で分類すると、植物の発生あるいは進化が同一系統にのつているものを分類したことになり、有効な分類方法となります。従来植物体の $\delta^{13}\text{C}$ の値は-10から-35パーミルの広い範囲の値をとることしか知られていなかったのですが、この光合成の分類によって $\delta^{13}\text{C}$ の値を整理すると、図17のように光合成

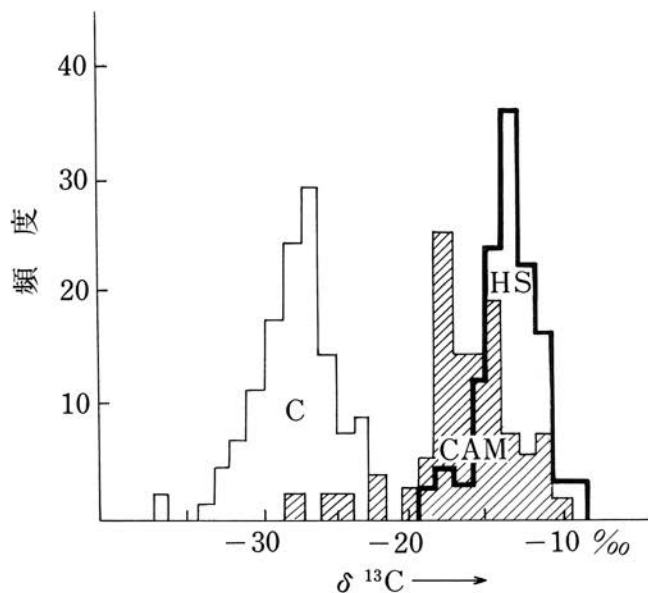


図17 植物による炭素同位体の分別

反応の経路がきまれば $\delta^{13}\text{C}$ の値はかなり限られた範囲の値になることが判明しました。この仕事は、アリゾナ大学で ^{14}C 年代測定を行っている研究室で Lerman が行った仕事ですが、現在では植物学あるいは農学で広く利用されています。

図17の C で示した $\delta^{13}\text{C} = -27\text{‰}$ にピークのあるヒストグラムは、Calvin サイクルとよばれる光合成反応を行う一群の植物で、通常の温帯の樹木あるいはシダや牧草のような多

くの植物がはいります。これらは現在では C3 植物とよばれることが多いようです。Calvin サイクルの発見後 Hatch・Slack によりさとうきびやとうもろこしがこれと異なる経路で光合成反応をすることが見出されました。図で HS で示したヒストグラムが現在 C4 植物とよばれているものの $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ の値になります。CAM で示した $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比がかなり広い範囲にまたがるものは、ベンケイ草科の植物、サボテンのような多肉質の葉をもつものが属

し、化学反応としては C3 と C4 の植物の行うものを共に行うため両者にまたがる分布を示していると考えられています。いずれにせよ、植物は原料の CO_2 の炭素から $\delta^{13}\text{C}$ が小さくなる、すなわち軽い炭素を多少選択的に取り入れて有機化合物を合成していることになります。

動物の体あるいは骨の中の有機物の炭素の $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ の比は、動物の食物に主として依存するので、 ^{14}C による年代測定を行った動物遺体の $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比の測定を行えば、炭素原子の重さの差からくる年代値のくるいの補正ができると同時に、その動物の主食についてのある程度の推定が可能になります。たとえば、昔の人がどのような主食をとっていたかの手がかりが得られることになります。

^{14}C 年代の信頼性 7,000年位前から300年前の間の生物の遺体についての ^{14}C 年代は、その生物が南極のような特殊な環境で生活していたものでない限り、可能性のある誤りは、いままで述べたようにかなり細部にわたって検討されているので、暦年代とのくるいは100年以上にはならないと考えてよさそうです。7,000年を超すと、大気中の ^{14}C 濃度についての正確な知識がな

いので、その信頼の限界は大気中の ^{14}C 経年変化の原因をどのように考えるかに依存してきます。ここで述べたように、その主な原因が地磁気と気候の変動によるのであれば、暦年代との差は1,000年以下と考えられます。何万年前という遠い過去で暦年代に合わせることにどのような意味があるかのほうがむしろ問題かもしれません。

年代測定は過去におこったある事件について、それが何年前のことかを知るために行います。しかし、 ^{14}C 年代測定では、生物遺体についてその生物が生きていたのが何年前であるかしか知り得ないのです。知りたいある事件のおこった年代と測定したい年代は、多くの場合仮定にもとづいた想像でつながりをつけないければなりません。たとえば、土器と炉跡にのこされた炭が一つの遺跡の発掘で見出され、炭の ^{14}C をその土器の使用されていた年代と考えるためには、土器の使用者がその炉を使用し、燃料とした木は古い流木のようなものでなく、その当時では比較的新しい木材や枝の類であったことを仮定しなければなりません。大きな誤りはこのような仮定が成立していないためおこることになります。また測定に用いた炭素が単一の生物の遺体でな

いことも多く、それらの生物が同一時期に生存していたものでないために予想と異なった年代値が測定されることも多いようです。厳密に言えば、土の中にあった木片でも炭でも必ず上部からの雨水によってとかし出された表面近くの新しい植物の腐植の供給をうけているので単一の生物遺体とはいえません。有機物の含有量の多い泥炭質とよばれる土壌や粘土が堆積した年代は3万年よりはるかに古いことが確実な深い地層にあっても、上部から地下水の供給が常にあるときは ^{14}C 年代が2万年以下の新しい年代となることが多いようです。このように試料によって引き起こされる誤りは、原理的な点での誤りより一般には大きいといえます。 ^{14}C 年代については、はかられた年代は生物の生存していた年代であることを忘れずにその値をみていただきたいと思います。

^{14}C 年代測定でわかってきたことの例 日本での遺跡、地層その他いろいろのものについて行った ^{14}C 年代測定の数私の所だけでも1万数千件ありますから全体では3万件近いとおもわれます。日本の遺跡、過去の地形や火山活動の歴史などについてかなりの知識が蓄積されつつ

あります。身近なものの例として関東平野の海岸線のうつりかわりについての研究結果を春成さんと小池さんがまとめられた図をお目にかけます。(図18)。

点線で示してある小型になった東京湾の時代は1万年前の海岸線です。1万年前は、第四紀の最後の氷河期のおわりにあたり、東京湾はこれでも多少大きくなった姿で、この当時の海面は現在より数十m下がっていたようです。氷河期では大陸に多量の水が氷として上がっているため海水が減少して海面が下がり、最盛期には100m以上下がっていたと思われます。何分当時の海岸線は現在海底にあるわけですから、海岸線あるいはごく浅い所にしか棲息しない貝などを海底から取り出して年代を測定することで推定をすることになります。

1万年前から6,000年前までの間に気候は急速に暖くなり海面も急速に上昇してきました。6,000年前の海岸線は図で実線で示されていますがこの推定は海の貝の残されている貝塚で約6,000年前のものの位置を手がかりとして書かれたものです。

1万年近く、あるいはそれ以上古い貝塚は通常は現在の海面下にあるわけで発見される

ことはほとんどありません。横須賀市の北の夏島で9,000年前の貝塚が見出されていますが、これは三浦半島の先端の所の隆起がはげしかったための例外と考えられています。6,000年前の海面の上昇はかなり激しく、荒川は大宮ですでに海につながり、江戸川は高崎に近い藤岡まで海水がはいっていたことが貝塚の年代で示されているわけです。

このような海岸線のうつりかわり、あるいは地形の変化が3万年前から現在までどのようになっていたかが日本全土にわたって次第に明らかになりつつあります。過去の大幅な気候と地形の変動についてのこれらの知識は未来を予測する上で大変役立つものと期待されています。