

加速器質量分析による年代測定法の大改革
— 退官記念講演 —

名古屋大学年代測定資料研究センター 前センター長
名古屋大学理学部地球科学教室 名誉教授

中井 信之

日時：平成4年3月23日（月）

午後2時～4時

場所：名古屋大学年代測定資料研究センター
古川総合研究資料館 講義室

司会 本日はお忙しい中、皆様お集まりいただきましてありがとうございます。年代測定センターの中村です。型どおり、先生の経歴等を御披露させていただきます。

中井先生は、昭和3年に大阪でお生まれになり、高等学校卒業まで大阪でお過ごしになりました。昭和27年に名古屋大学を御卒業されまして、その後すぐに名古屋大学理学部地球科学科に助手として奉職されました。昭和37年に地球科学科の助教授、52年に教授になられまして、40年間奉職されたわけです。この間、同位体地球化学の分野で研究をされてきました。

3月14日に、先生のお弟子さんたちを集めての理学部の方の講演会がございまして、そこでいろいろとご研究のお話を伺いました。40年間の研究生活の中で、非常にシステマティックに、10年ごとに研究を発展させられたそうです。最後の10年間は、ここの年代測定資料研究センターの一つの大きな柱になっておりますタンデム加速器質量分析計を導入されて、それを運営してこられた。先生にとっては、非常に充実した働き盛りの10年間のほとんどを加速器の方に力を割いていただきました。どちらかといいますと、先生の教室、講座のお仕事はそっこのけにされて、教室の方から、多少文句が出たんじゃないかというくらいの熱意でやっていたいただきました。

特に最後の2年間は、年代測定資料研究センターが発足しまして、そのセンター長として御活躍いただきました。中井先生は非常にソフトな方で、センター長という職務に非常に向いている方だと僕はずっと思っていたんです。ところが、年代測定センター長の職務を勤められて1年、2年、胃炎を患われたと言っておられましたので、やはりそういう適任の方でも大変なことがあるんだなと思います。あとに残った者たちは大変ですけれども、頑張っていきたいと思います。

早速、講演に移らせていただきます。演題は、「加速器質量分析による年代測定法の大改革」です。中井先生、どうぞよろしく願いいたします。

「加速器質量分析による年代測定法の大改革」

長の器

今日は、天候が悪くなってきた中をお集まりいただきまして、ありがとうございます。今、中村君から御紹介がありましたように、最終的に年代測定資料研究センターをつくることができ、ある意味では、いい置き土産ができたと思っております。私が非常にソフトで、年代測定センターのセンター長に適任だという話がありましたけれども、長の器ではないがために、胃炎にかかるという程度の人間ですから、長には向いた器でないと私は思っております。

今日のこの演題にあります「大改革」の「大」というのは大き過ぎると思うんですけども、年代測定のための放射性元素の定量に関しては革命だったと思います。大がつかない程度の革命だとおとりいただきたい。今日は、この加速器による質量分析がなぜ革命であるのかというお話と、それから、名古屋大学にこの装置が入って以来、非常に多くの方々に利用していただいて、現在までに、どのような新しい仕事が為されてきたかというトピックスをお話したいしたいと思います。

私の経歴－樋田先生の感化

最初に、私の経歴をちょっと御紹介しておきます。なぜ経歴を御紹介したいかというのと、それは後でわかっていただけだと思います。

私は大阪生まれで、大学に入る前に1年間浪人しました。その前は、化学をやることも物理をやることも思っていませんで、生物学を志していたんですが、大学に入れなくて、1年間阪大理学部の化学科に研究補助員として勤めました。もう研究補助員という制度はないんですが、今でいえば技官のような仕事でございます。その講座が無機化学の樋田龍太郎先生の講座でございました。毎日、先生と一緒に弁当を食べて、いろいろな雑談をしているうちに、いつの間にか化学が好きになってしまいました。樋田龍太郎先生というのは非常にユニークな先生で、話を聞いているうちに、化学が非常におもしろくなってしまったんです。そこで1年後に、この名古屋大学理学部化学科を受ける気になった。旧制中学の2年生のころ、1学期の中間テストのときに、「きょうは化学の試験があるから学校に行くのが嫌だ」と言って、おやじに怒られて追い出されたというぐらい化学嫌いでした。ところが阪大に勤めているうちに、樋田先生の感化を受けて化学が好きになってしまった。いかに指導する先生が大事であるかということ、そのときにつくづく感じたわけです。

それから後、名古屋大学を卒業しまして、昭和27年に地球科学科の助手になり、37年に助教授になり、52年に教授になった。これも計画的にやったわけではございませんけれども、10年間助手をやって、15年間助教授をやって、15年間教授を勤めて退官になる。10年、15年、15年という道を歩んできた。それから、昭和34年にエール大学の年代測定実験室に参りまして、この時は放射性の元素ではなくて安定同位体を測る仕事をやってきました。

因果は巡る

このような経歴を眺めてみますと、まず最初に年代測定実験室にいて、定年より10年ほど前に年代測定を手がけるようになったという因果関係が一つございます。もう一つは、阪大に勤めます前は生物が好きであった。これは非常におもしろいもので、私の今までの研究経歴を見てきますと、最初は生物が好きで、化学が好きになって、化学を専門にやってきたけれども、最終的にこの10年間ほどは、生物的な仕事に戻ってきたという因果関係があるように思います。やはり最後は、自分の好きなものに帰ってくるということがあるのではないかとということで、これをお見せしたわけです。

そして、本当にぴったり10年間隔の研究をしてきた気がいたします。これは、手段としての質量分析計とか装置の話でございませうけれども、まず、私が大学を卒業して地球科学科に助手として来ましたときに、私の先生の小穴先生から、「これからアイソトープが研究手段として非常に有力なので、それをおまえやらぬか」という話でございました。それで、安定同位体を測って、いろいろな天然現象をとすることを志したわけですが、残念ながら、私が卒業しました昭和27年ごろは、日本ではまだ天然物の安定同位体が測れる質量分析計がなかった。手をこまねいていてもしょうがないということで、1959年にエール大学に参りました。そして、1960年になって初めて、エール大学の装置を使って安定同位体を測ったわけです。そのときに、質量分析計を本当にマスターするためには、自分で少し組み立ててみる必要があるということで、たまたまエール大学の電気の教室で簡単なガス分析用の質量分析計の組み立てをやっておりましたので、そこへ参りまして組み立てをやらせてもらったことがございます。

それからちょうど10年たちまして1970年（昭和45年）、我々の名古屋大学理学部地球科学科に質量分析計が入ったわけです。自分のところで測れるようになったということで、硫黄、炭素、酸素の安定同位体比を測り、それから後4年ほどたちまして、今度は重水素用の質量分析計を入れたことがございます。その後10年たちまして1980年。これも全くの偶然でございませうけれども、ここでタンデトロンの加速器が認められて組み立てが開始されたということがございます。さらに10年たちまして1990年（平成2年）に、名古屋大学の年代測定資料研究センターが設立されたという、10年区切りの経緯をたどったわけがございます。

いつも思うんですが、質量分析にしても加速器にしても、すべて、戦争中の核兵器に関連した核反応の実験技術が終戦後取り込まれて、我々の研究分野に入ってきた気がいたします。例えば1947年、もう亡くなられましたが、シカゴ大学のユーレー先生が、もしも、貝殻の炭酸カルシウムの安定同位体を測ることができれば、古代の海水温が計算できるということを理論的に割り出して講演されております。そして1951年になって、天然物の安定同位体の測定技術が完成いたしまして、酸素の安定同位体により測定される古代海水温のことを、地質温度計と呼ぶようになってきたわけです。

海水温は、貝殻の化石の酸素の同位体を測ることによって出すことができますが、これを契機にしまして、今度はもっと温度の高いところ、例えば、岩石が固結した温度はどれくらいかという、もう数百度から千度という高温のところ

まで、いろいろなアイソトープを使って測れるように拡張されていったわけです。これもやはり安定同位体比を測るといふ、質量分析計の技術がここに導入されてきた。

次の放射性の同位体について見てみますと、ちょうどユレーが古代海水温について言い出した1947年、リビー先生がこれを理論的に考えて、「大気中には放射性の炭素があるはずだ。これは宇宙線によってできるはずだ」ということを理屈の上で発表した。そして、全く同じ1951年に、ジオロジーという学術雑誌に¹⁴Cの測定の確立を発表したわけです。こういうように終戦後、戦時中のいろいろな核反応の測定技術が我々の分野にどんどん入り込んできた段階があって、放射性炭素による年代測定はリビーが方法を確立したわけです。

放射性炭素¹⁴C年代測定の原理

きょうお見えになっている方々で、まだ御存じない方もあるかと思しますので、ここで原理的なこととお話ししておきますと、リビーが予言いたしましたように、大気中の二酸化炭素(CO₂)の炭素には放射性の炭素が必ずある。この放射性の炭素を含んだ二酸化炭素が光合成で、例えば地球の表面ですと、どんどん植物にとられていく。従いまして、今生きている植物は一定濃度の放射性炭素を含んでいる。また、この植物を食べた動物の体の中にも、一定濃度の放射性の炭素が含まれている。そのほか、海の中のプランクトンとか植物、貝の炭酸カルシウムの炭素の中にも、生きているものには必ず一定濃度の放射性の炭素が含まれている。

ところが、生物が死んでしまいますと、もう光合成では大気中の二酸化炭素を取り入れないものですから、あとは、放射性炭素が一定の速度で放射崩壊してどんどん減っていくばかりである。その減っていく速度を示すために半減期があります。この放射性炭素の場合には、5,730年たてば半分に減る。そしてさらに、5,730年たてば、また半分という速度で減っていくわけです。従いまして、生きている生物は必ず一定濃度の¹⁴Cを含んでいるんですが、死んでしまえばもう取り入れることがない。あとは減っていくばかりです。ですから、例えば動物の死骸や化石をとってきて放射性炭素を調べてみて、放射性炭素が、生きているものに比べてどれくらい減っているかで年数が計算できるというのが、放射性炭素の年代測定になるわけです。こういうようにして、放射性炭素による年代測定は1950年ごろ確立されたわけです。

¹⁴Cの測定方法

放射性炭素による年代測定のいろいろな基礎的な研究、データを皆さんがお出しになってきたわけですが、天然にある放射性元素の定量、どれくらい放射性炭素が含まれているかというのは、従来は、放射崩壊の数を計数することで行われてきました。放射崩壊すると放射性炭素が減っていく。放射崩壊するときに放出するβ粒子の数を勘定して、放射性炭素の量を決めていたわけですが、それが余り能率のいい測定法ではないということで、今度は加速器の方に移ってきたわけです。

1977年にRITグループ、これはアメリカのロチェスター大学、General IONEXと

いう加速器の会社と、カナダのトロント大学の三者が協力して、放射性の元素を加速器で測れるという発表があったわけです。

今お話ししましたのは放射性炭素だけですけれども、放射性炭素以外の放射性の物質でも、加速器で非常に能率よく決められるというわけで、加速器を利用して放射性の元素を測定するのに、今のところベリリウム¹⁰(¹⁰Be)、放射性炭素(¹⁴C)、こういういろいろなものが挙げられるわけです。

それでは、放射性の物質を放射能も測らないで、なぜ加速器で測定するのかといいますと、放射線を測ることは非常に能率が悪いわけです。例えば、この放射性炭素にしてみても半減期は 5,700年です。5,700年たって初めて、放射性炭素の原子の数が半分になるという速度でしか崩壊が起こらない。崩壊が起こるといことはβ線を出すということです。ですから、非常に気の長い話になってくるわけです。放射性炭素は割に半減期が短くて 5,730年ですけれども、ヨードの 129(¹²⁹I) なんかになりますと、1,600万年たって初めて半分に減る。こういうもののβ線を勘定しようとするすると、一生のうちに1個ぐらいβ線が出てくることもあり得るわけで、それではとても使い物にならない。

そこで、きょうの演題にありますような「革命」という話が出てくるわけです。それでは、なぜ革命と言うのかを、これからお話しいたします。

放射性炭素の場合だけを例にとってお話ししますと、天然にある炭素を含む物質の炭素の同位体は3種類あるわけです。例えば、木の中に含まれている炭素一つをとってみても、必ず原子量が12と13と14というように、3種類のアイソトープが存在しているわけです。原子量が12と13のものは放射能を出さない。ですから、いつまでたってもその量は変わらない。けれども、この放射性炭素¹⁴Cは放射性の同位体である。これは、高層大気中で宇宙線の作用によって一定速度で生産されているもので、半減期が 5,730年で、窒素14(¹⁴N) にどんどん変わっていつているものであるわけです。

今お見せした3種類の同位体が天然には必ずあるわけですが、それでは、どれくらいの割合で存在しているかといいますと、現在生命を持って生きた状態で、光合成で大気中の二酸化炭素を取り入れている。大気中の二酸化炭素を取り入れた植物、またそれを食べる生きた動物の¹²Cと¹³Cと¹⁴Cの割合は、12という原子量を持っているものを1といたしますと放射性炭素は 10^{-12} 。これはものすごく量が少ない。さらに 5,700年も年代がたっているものと、この放射崩壊が半分に減ってしまいます。さらに 57,000年たってしまいますと今度は 10^{-15} 。生きているものに比べますと、千分の1にまで量が減ってしまう。これだけ量の少ないものを普通の化学分析では定量できないものですから、やむを得ず、今までは放射能を測るという手段で量を決めてきたわけです。今まではそういう手段しかなかったわけです。

β線計数法

ところが、β線で測定する場合に、β線の数を勘定するのはいかに大変なことか。今、現在地球上で生きているものは、放射性炭素が一番たくさん含まれていますが、その炭素を 1 mgとってきます。そういうものでも、1 mgの炭素から1分

間に放出されてくるβ線の数は1時間に1個あるかないか。1時間待って、β線が1個しか測定できないというわけです。さらに57,000年と古いものになってきますと、1 mgの炭素ですと、50日間待って1個しか出てこない。10万年も古くなってしまいますと、25年待って1個β線が出てくる。測り始めてから25歳年をとって、ようやくβ線が1個測定できた。これ1個ではとても定量できません。やはりβ線の数を測定する場合には、総計数が1万個、2万個というようにしないと、誤差が非常に大きくなるわけです。これはとても生きていう中には測定できないということになります。したがって、現在までは、試料を1 mgではなくて、炭素として5 gとか10 gとか大量の試料を使ってβ線を測定することによって、何とか年代を測定してきたわけです。それで、β線を測って測定するのは、非常に時間のかかる仕事であることはわかりただけだと思います。

加速器を用いて¹⁴Cを数える

しかしながら、もしも放射性の炭素、原子量が14という炭素の原子の数を1個1個測定できたならば、どれだけ能率がいいかということ計算上挙げてみます。1 mgの炭素でも、その中に含まれている放射性炭素、¹⁴Cの原子の数は、現代の炭素ですと10⁷個もあるんです。10万年たったものでも、たとえ1 mgの炭素であっても、放射性炭素の¹⁴Cはまだ300個残っている。もしも原子の数を1個1個測定できたとすれば、いかに能率がいいかということは、もう申すまでもないことだと思います。そこで、原子の数を測定する方法として、加速器質量分析計が開発されたわけです。

それには加速器質量分析計と質量分析計がございます。質量分析計は、従来、安定同位体、すなわち放射能を出さない同位体を測るのに使われてきたわけです。それでは質量分析計で安定同位体が測れるなら、¹⁴Cという放射性炭素だって測れるはずだ。しかし、そこには大きな障害があったわけです。それはどういう障害かと申しますと、これは炭素の14で御説明しますと、同重体の関係にあるものが邪魔をするわけです。放射性炭素は重さが14。そして空気中にある窒素原子も重さが14。普通の質量分析というのは、質量の違い、すなわち重さの違いを振り分ける装置ですから、もしも大気中の¹⁴Nが装置の中に残っているとすると、この¹⁴Cと区別することができないという宿命が必ずあります。特に放射性の¹⁴Cの場合には、空気の¹⁴Nが非常に大きな妨害をいたします。

と申しますのは、大気の主成分は窒素、¹⁴Nです。もちろん質量分析計は高真空、10⁻⁷ Torrというようなところでやっているわけですが、その圧力を示すものは何かというと空気なんです。その空気の主成分たるや¹⁴Nなんですね。天然物の中には放射性炭素¹⁴Cは非常に濃度が低い、量が少ないものですから、実際に質量分析をやってみますと、ブランクの¹⁴Nのピークの方が大きくて、その大きなピークの中に、これから測ろうとする放射性炭素¹⁴Cのピークが中に隠れている。これではとても測れる代物ではないわけです。それからもう一つ、β崩壊する放射性元素というものは宿命がございまして、例えば、¹⁴Cがβ崩壊すると、子供に何ができるかといったら¹⁴Nです。β崩壊するんですから、質量数は変わらない。親と子供は重さが変わらない。親が子供を産むと、子供が同じ重さを持っているもので

すから、必ず邪魔をするという宿命にあるわけです。

そこで、私もよく試験問題に出したことがあるんですが、「同重体とは何ぞや」。必ず皆さんは、文字どおり重さが同じだ。 ^{14}N と ^{14}C の関係がそうで、「重さが同じもののことを言う」と答えるんですけども、それ以上にこの同重体は、 β 崩壊するものの親と子の関係にある。それも一つの重要な関係であるんです。

現在、加速器で測定が可能になった放射性同位体をこの表で見てくださいと、例えば ^{10}Be は、妨害同重体の ^{10}B が邪魔をいたします。必ずそういう関係になっています。例えば ^{36}Cl ですと、 ^{36}Ar とか ^{36}S が天然にございますので、こういうものがどうしても妨害する。したがって、同重体の妨害を何とか除かなければいけない。その同重体の妨害を除くために加速器を使うというわけです。

そこで、実際には、試料を個体状の炭素にしてセシウムのイオンをぶつけて、炭素をマイナスのイオンとして引っ張り出してくるんです。マイナスイオンを造るところに大きな意味がございます。炭素と窒素、両方ともマイナスのイオンで取り出してくるんですが、Nのマイナスイオンは非常に不安定で、すぐに電荷を失ってしまいます。ところが、炭素の方は電荷を失わないでマイナスのイオンの状態で保っている。電荷がなくなると、質量分析をする場合でも、もう経路を曲げたりしなくなってしまうんです。もう全然妨害がなくなってしまう。イオンの状態にいるからこそ、分析ができるわけです。そういうふうに、まずマイナスのイオンをつくることによって ^{14}N の妨害を除こうということが一つございます。

それでも 100%除けるわけではございませんので、第2番目にどういうことをやるかといいますと、 ^{14}C と ^{14}N との両方、すなわち同重体の関係にあるものが飛んできます。そして加速器でうんとエネルギーを与えます。エネルギーを与えるということは、その粒子が物を透過する力ができてくる。薄膜を置いても突き抜けてしまうという力を持たせる。たとえ薄膜を突き抜けるにしても、どうしても通過するときエネルギー損失があります。そのエネルギー損失はこういう関係で示されまして、この障害物の中の単位距離を通過する間にどれだけエネルギーを失うかというのが右辺のような関係になってきまして、原子番号の2乗に比例する。そして、そのときの速度の2乗に反比例するという関係が出てまいります。このKは比例定数で、障害物の物性によって変わってくるものです。

簡単に考えていただいて、原子番号の2乗に比例する。そのエネルギーの失われ方は、原子番号が大きくなればなるほど大きくなっていく。炭素の方は原子番号6、窒素の方は7です。そういたしますと、窒素の方は原子番号が大きいですから、エネルギー損失が大きくて、障害物も通過しにくくなるのを利用するわけです。ここでふるいにかけてやる。しかし、そう簡単なことではないので、加速器でこの粒子に与えるエネルギー、すなわち V^2 という速度の自乗がきいてきますので、炭素と窒素のイオンにどれだけエネルギーを与えるかが問題になります。

もう一つは、薄膜自身の物性、それから薄膜の厚さにも関係してきます。ですけども、理想的にいけば、 ^{14}C は原子番号が小さいから素通りするけれども、窒素の方は通りにくい、そこでストップしてしまいます。こういうようにして分ける。もちろんもっと難しいことを言いますと、Heavy ion detectorと書いてありますが、ここでもってエネルギー分析をやったり、もう少しややこしいことをやって

おりますけれども、簡単に申しますと、この加速器を使う意味は、質量数、重さを振り分けるだけでなく、原子番号の違いを識別するということになってくると思います。

このようにして第1に、マイナスのイオンがつかれるようになった。それから第2番目に、ふるいにかけることができるようになったことで、原子の数を直接測定できるようになった。これが私の言いたい「革命」であったわけです。そして、なぜ加速器のようなずうたいの大きいもの、金のかかるものを使うかという、原子番号の違いを識別することにあると御理解いただければいいと思います。

加速器法の利点

加速器自身は、皆さんごらんになっているだろうと思いますので、写真の方は控えておきますが、この加速器質量分析が可能になったことで、どういう利点があるかと申しますと、測定に必要な試料の量が、炭素として2 mgから5 mgで済むようになったことが非常に大きいことであると思います。それから第2番目は、測定できる年代が非常に長くなって、60,000年から65,000年ぐらいのところまで測定できるようになったということです。従来のβ線で測る場合ですと、試料が非常にたくさん要ったということと、測れる年代が30,000年とか35,000年ぐらいまで。それ以上になりますと、非常に誤差が大きくなっていくと言われていたわけです。さらにもう一つは、測定時間が非常に短くなって、3～5時間。従来、β線を測るのも随分改良されてきて、時間が短くはなっておりますけれども、少なくとも50時間や60時間は測らないといけない。昔のガスカウンターを使っている当時ですと、1週間くらい測りっ放しにしておくということもあったわけです。

それから年代測定の誤差はどれくらいかと、考古学の先生方も、すぐ「誤差は」とおっしゃるんですが、誤差の方はβ線の場合とそれほど変わりませんで、プラスマイナス1% (±1%) 程度。しかしながら、この誤差ということでは、いろいろな試料について、試料の保存状態、二次的な汚染を受けていないかどうかの細かいチェックが、この加速器の場合には可能である。

例えば、今β線で測定する場合には、炭素として5 gの試料が必要であるとすると、貝殻の場合、炭酸カルシウムにすると50 gになるわけです。ですから、どこかから化石をとってくるにしても、貝殻の50 gといたら相当な量になるんです。それで、ともかく1回¹⁴Cの測定をやったら精いっぱいです。いろいろなことを検討してみるということができない。しかしながら加速器を使いますと、炭素として2 mgから5 mgと非常に量が少なくて済む。ですから、ちょっと試料をとってきても、それでもって、いろいろな前処理の仕方を変えて検討してみることが可能である。そういう意味では、誤差がβ線の場合と同じだと申しますものの、正確な年代を出すことが加速器で可能であるととっていただければいいと思います。

学際的な応用例

次に、いろいろな測定例をこれからお目にかけます。この加速器で年代測定が可能になって以降、どういうものに新しく年代測定が適用できるようになったかという話をこれからいたします。

まず、放射性炭素の測定による学際的な応用です。私たちのところに、今から約10年前に加速器質量分析計が完成いたしましたときから、私が皆に申しあげたことが二つございます。一つは、今まで測れなかった年代をどんどん出していく。それから正確な年代を出すということを言っておりましたけれども、もう一つ、第2番目の大きな応用があったということです。

核実験起源の ^{14}C をトレーサーに用いる

と申しますのは、1955年ごろから、大気中の二酸化炭素の中の放射性炭素 ^{14}C の濃度が核実験のためにぐっとふえてきたわけです。そして、1964年にそれがピークに達した。その1964年のピークはどの程度であったかと申しますと、核実験のないときの天然レベルに比べて約2倍、正確に言いますと1.9倍ぐらいだったんです。大したことはないようにおとりかもしれませんけれども、2倍にふえるということは大変なことで、放射性炭素の濃度が半分に減るためには5,700年かかるわけですから、2倍になるということは、いかに大きいか納得いただけるだろうと思うんです。

それ以後、原爆実験の地上実験が世界的に中止されたために、その濃度は減ってしまいました。このピーク時の放射性炭素をトレーサーに利用して、炭素のサイクルを追いかけるんじゃないか。これが一つ、大きなテーマだろうと思っていたわけです。こういうように、大きな二つの応用をともかく我々はやっていくべきだと一番最初に感じたわけです。

^{14}C 年代測定の新展開

そこで、どんなものが年代測定できるようになったかをまとめてみますと、まず一番初めには、従来、年代測定はやられていたけれども、量が非常に少ないがために年代測定ができない。例えば埋もれ木、大きな木の切り株でも残っていればいいですけども、ほんのかけらが出てくる場合がよくあるわけです。マッチ軸のようなかけらが出てきたのでは、従来の方法では年代測定ができないので、あきらめていたんです。そういうものでも年代測定が可能になるというのがございます。

今までの方法では測定できなかったが、加速器法によって初めて年代測定が可能になったもので、まず骨、人間も含めて人骨、獣骨、これが1gあれば、年代が非常に正確に出るわけです。従来ですと、年代測定しようとする、人間の骨でも5kgぐらい要った。人類学者に、「これはいい試料だから5kgの骨をくれ」と言うと、目をむかれる。とって手に入るものではなかった。1gぐらいなら手に入るというわけで、どんどんこの方面の仕事が進んでおります。

それから次の穀物とか花粉。穀物は、もちろん地学関係の人も利用できますし、考古学関係の、遺跡から出てくる穀物。炭化米ですと、1粒あれば年代が出る。それからトウモロコシなんかは、アメリカで随分仕事が行われました。遺跡から

出てくる穀物、カボチャの皮というものについて、この加速器を使って年代が決められました。昔、狩猟民族がいて、狩猟でいろいろな動物を矢で射て食物にして生きてきたけれども、それがだんだん農耕生活に変わっていきますね。いつごろから農耕生活に変わったかということが、これで割り出されたという貴重な仕事の例もございます。

この花粉の方は大変だろうと思うんですけども、今から何千年前か、何万年前かに木が生えていて、花が咲いて花粉が飛ぶ。それが土の中に混ざっている花粉の種類を調べて、そのころの気候を調べたり、花粉をうまく利用して年代測定をしたらどうかということで、これはこの前の国際会議のときに、その可能性をもう発表された方がございます。これは花粉を集めるのが気の遠くなるような話だと思いますが、そういうところまで手が届いてきているという例でございます。

さらに、有孔虫というのがある。有孔虫は、海の中に住んでいる微生物で、顕微鏡で眺めてやっと見える程度の小さなものです。その遺骸が堆積物の中に入っていて、これを年代測定をすることも可能になってきています。これはもう随分やられて、この名古屋大学でも、既に水圏の先生たちも取り組んでおられます。

特に堆積物で、海の底の泥の中から出てきます有孔虫の形を見て、これは海水の表面にすんでいた有孔虫だ、これは海底近くですんでいたというように、分けて年代を出すことも可能になってきています。例えば、同じ堆積物の同じ場所から出てくる有孔虫でも、年代を測定してみますと、表面にすんでいたのと海底にすんでいたのでは年代が必ず違う。その違いが、また非常に興味があるわけです。これはむしろ専門の方に講義していただいた方がいいと思いますけれども、同じところにあるものでも、表層のものとは下層のものでは年代が違う。これは海水の循環とか、いろいろなことと関連づけられているわけです。その次は、水の中に閉じ込められている昔の空気中の二酸化炭素、CO₂の放射性炭素¹⁴Cを測って、氷の年代を出すことができる。一番最初に私が国際会議でこの応用例を聞きましてのは、スイスのETH中間エネルギー物理学研究所の人たちだったと思いますが、5 kgから10 kgの水を真空中で砕いて、氷の中に閉じ込められている空気を集めて二酸化炭素の年代を決める。南極の氷は、ガラスのコップに入れて水を入れるといい音がするのを、皆さんお聞きになったと思います。これは、昔の空気が圧力がかかった状態で氷の中に閉じ込められていて、氷が解けていくとそれがはじくというわけです。昔の空気を氷から引っ張り出して年代を決めることが、今では可能になっていきます。

これに類した仕事ですと、例えば、氷の中に木の葉っぱとか植物が挟まれていることがございます。その¹⁴Cから年代を出すことも可能で、これは名古屋大学の水圏の樋口先生の研究室の方々がよくおやりになっておりました。日本で一番古い氷が1,700年前だということをお出しになったり、いろいろな仕事に利用されているわけです。

それから次に海水ですが、海水の年齢を決めてみようじゃないかと。海水の年齢という意味は、例えば、海の表面にあった海水が1,000 mぐらいのところまで何年ぐらいかかって行くか。表面に水があるときに0歳という意味です。表面からどれだけ年代がたったものか、潜り始めてから何年たった水だろうかという年齢で、これはまだ細かく見ますといろいろ問題があるんですけども、従来β線で

も随分データが出されておりました。これは大変な仕事で、 β 線で測る場合には、海水が約 200リットル必要なわけです。この加速器の場合は感度が非常にいいものですから、大体 500 ccから1リットルあれば十分だということで、非常にやりやすくなった。

一番最後の隕石の中の炭素化合物で、隕石の中には石墨とか、いろいろな形で炭素があります。それについての放射性炭素を測るということで、宇宙線との相互作用とか、いろいろな問題を解決していくことができるだろうと思いますが、まだ私自身、隕石中の ^{14}C の寿命を測って、どういうことがやれるかということに対するアイデアがないわけですが、こういうように応用範囲は広まってまいりました。

タンデトロンを用いた研究成果（図1を参照のこと）

そこで今度は、名古屋大学のタンデトロンに限って、今までやってこられた仕事をまとめてみると、もうこれだけの範囲内のことを皆さんがやっておられたということです。まず、年代測定に利用するということと、核実験でできた ^{14}C をトレーサーとして仕事をやっていくという二つに大きく分かれます。

この年代測定の方は、地球科学の方ですと、堆積物の堆積速度を正確に出す。それから動物化石の蛋白質の年代を決める。海底林の年代を決めるというように、いろいろな仕事があります。ただ、堆積物の堆積速度を決めるといったって、どういう意味があるかは、なかなか皆さんに御理解できないと思いますので、その一つの例をお目にかけておきます。

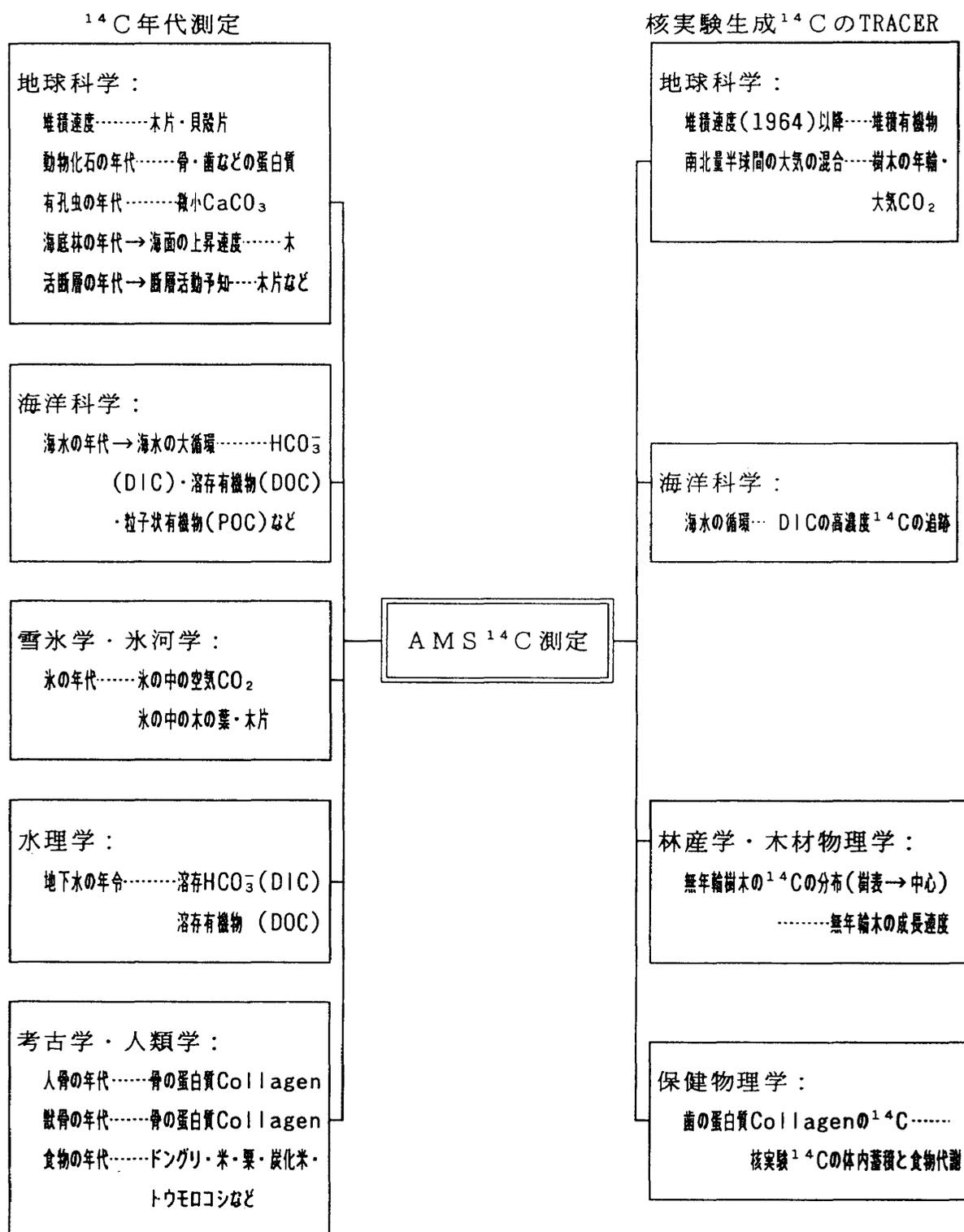
海底堆積物の年代測定

これは実は、私がこの加速器を入れて、 ^{14}C で詳しい年代を出さなければだめだと思った、その一番のもとになるわけですが、海底の堆積物のボーリングをやって、違った深さのものをとってきます。柱状の試料をとって、泥の上から順番に深い方へ追いかけていったら、過去の環境の記録がずっと残っているはずなので、現在から過去に向かっての気候変化が追いかけられる。これを随分長い間やってきました。

ところが、ここでこういうパターンが出ておりますけれども、両方とも、上の方に行くほど暖かい時期で、下の方ほど寒い時期だと簡単に思っていたら結構です。それから、暖かい時期には海水準、海水面が高かった。冬の寒いときには海水面がずっと下がってしまったという、海水準との関係もございます。こういうようにして、もっともらしい線はかけるんですけども、この横軸にかいています年代に不確かさがあったわけです。これは1万年ぐらい前、それから後のところを言っているわけですけども、この年代値が非常に不確かなんです。

と申しますのは、これも一つの例ですけども、海の底の泥を表面からずっとボーリングして、50 mぐらいの深さまでサンプルをとるわけです。ですけども、とれるサンプルというのが直径が5センチぐらいで、そういうところから例えば貝殻が出てくる。そういうもので年代を決めていく。木片が出て、それで年代を決めるんですけども、 β 線で行っていた当時というのは、浅いところで1カ所、深いところで1カ所ぐらいしか年代が出せない。浅いところの1 mぐらいの長さ

図1. 加速器質量分析による ^{14}C 測定の学際的応用



のサンプルから、年代測定に利用できるものは全部かき集めて、年代を一つ出すのが精いっぱいですから、この深いところから浅いところまで、堆積の速度が一定であると仮定して年代を計算してしまふ。堆積の速さは決して一定ではないわけですが。したがって、こういうところでちょっと寒いところが出てきたらしい。これが本当に地球上どこでやってもこういうのが出てくるのか、それとも私がたまたまボーリングをやったところだけが、ローカルにこういうのが出てくるのかという区別がつかないんです。横軸、年代がはっきりしていないものですから、絵合わせできない。ということで、これは50 mほどのものですが、年代はずっと詳しく出したわけです。

そういうことをずっと続けて、日本のあちこちのボーリングのサンプルを使ってやりますと、そこでわかりましたことは、これは11,000年前ぐらいの年代ですが、最終の氷河期がこの辺で終わって、そしてだんだん暖かくなる。そして今から6,000年前から4,000年前あたりは、非常に暖かかった時期で、現在よりも温度の高い時期だというわけです。そしてまたここで寒くなって、現在に向かって暖かくなっていく。横の年代軸を正確に出すことによって、どこでやっても例外なく全部出てくる。同じ年代のところに必ずこのへこみが出てくるということが確かめられたわけです。そしてさらに、このへこみが今まではほとんど注目されていなかったのを、大体7,500年から8,000年前のところで一度、小氷河期があったということを経験したことを国際会議で発表したことがございます。

そのときに、実はバーガーという氷河屋さんが、「アメリカ大陸では、この8,000年前のところに必ず氷河期がある。もしも日本の近くでそれがあれば、これは全体的な地球規模の変化であろう」というコメントをしてくれたことがございます。こういうふうに、いろいろの気候変動を追跡していくことが可能であるというわけです。

それから、こういう気候変動をやって興味を持つのは、今から1万年ぐらい前に氷河期が終わって、暖かくなってきて海水準が上がってきたけれども、どれぐらいの速度で海水準は上がってくるものだろうか。これは今、汚染による地球の温暖化によって温度が上がってくる。また海水準も上がってくるとみんな言っているけれども、一体どれぐらいの速度で温度が上がれば、どれぐらいの速度で海水準が上がってくるものかという基礎的なデータは全くございません。

これは、富山大学の藤井先生と中村君が協力してやってくれた仕事ですが、富山湾に海底林がございまして。その海底林の深いところから浅い方へ追いかけて年代を測定していけば、海水準が上がってきた速度がわかるはずだということで、水際に生える木を選んで年代測定を徹底的にやったわけです。

例えば、柳の木は水際に生えるんです。そういうようにして試料をとってきて、木の同定をする。これは薄片をつくれればできるわけで、木の同定をして海際に生える木を選んで年代をとって測定しますと、縦軸の方が、現在海底林のあるところの水深です。大体40 mぐらいの深さのところから20 mぐらいのところまで、海底林がずっと続いているわけです。40 mぐらいの深さのところだと、年代が今から大体9,000年前ぐらいのものだ。そして、辺の20 mぐらいの水深のところにある木は7,600年とか7,800年前だ。そして、これを強引に直線を引いてしまつて、浅くなっていく速度を出していきますと、19.7 mm/年ですから、1年に

2 cm程度の速さで上がってきたというわけです。それではどれぐらいの速度で温度が上がっていったのかということも、これから解析をしていかなければいけないと思いますが、1年間に2 cmぐらいのところだろうということが、これでつかめたということです。

活断層

あと、海洋科学の方の応用例になりますが、活断層の年代を決める例を幾つか出しました。断層があったとしますと、断層の両側でボーリングをして、年代を徹底的に垂直に調べるわけです。同じ年代で、どれくらい地層がずれているかを上から下まで見るわけです。その結果をまとめますと、その活断層の運動が、現在に向かって活発になってきているのか、それとも衰退してきているのか、想像がつくのがこの例です。

海水中溶存炭酸の ^{14}C 濃度

それから次の海洋科学は、海水の中に溶けています重炭酸 HCO_3^{2-} の ^{14}C を測ることによって、ある程度年代が出せるというわけで、簡単に御紹介しておきます。

これは太平洋の真ん中で、西経170度あたりのところを南北に側線を引いて調べたものですが、縦軸が水深です。0が表面の海水。これを見ていただきますと、横軸が ^{14}C 、放射性炭素の濃度です。マイナスの方にいくほど放射性炭素が非常に少なくなっていて、プラスの方は放射性炭素が多い。これが深くなるほど、みんな放射性炭素が少なくなる方になっていますけれども、見ていただいでわかりますように、中間的な2,000 mや3,000 mあたりのところが、どの場所でもすべて放射性炭素濃度が最も少なくなっている。そして一番底の方にいくと、また再び放射性炭素が増えている。明らかに、底の水の方が中間層よりも新しい水だということがわかるわけです。

それから、上の表面の海水を見ていただきますと、普通、核実験のない、核実験で生成した放射性炭素が大気中にない場合は、表面の海水はマイナス60ぐらいの値が普通です。ところが、それよりも大部分のものが、プラスの方に放射性炭素がものすごくふえています。これは明らかに核実験の影響です。核実験でできた放射性炭素を含んだ二酸化炭素が海水にどんどん溶けて、プラスの方へいってしまう。

それでは、これで年代を計算してみるとどうなるかといいますと、非常に大ざっぱな年代の計算になってきますけれども、下の横軸に年代がとってありまして、0年というのが現在、そして500年、1,000年、2,000年ととってありますが、もう2,000年前ですから、表面にあった水が底まで来るのに2,000年かかった。これを見てわかりますように、表面海水は年代がマイナス1,000年になってしまう。マイナス1,000年という未来になってしまうわけですがけれども、核実験によって放射性炭素がどんどん溶け込んだために、これだけのことが起こっている。

中間層の1,500 mから3,000 mぐらいの深さですと、表面からこの深さまでやってくるまでに大体2,000年前後かかっているわけです。それに比べて、底層水は1,000年前後というように、底の水の方が新しい。それでは、中間の深さの水はそれほど新しくなくて、新しい水がどのようにして回ってきたのか。これはい

ろいろなことが考えられるわけで、むしろ極地の水は温度が低いですから、密度が高くなってどんどん下へ潜って行ってしまいます。それがずっと赤道近くまで来て、今度湧昇流とって、表面に向かって湧き上がってくるという循環をしていますので、その循環の円の真ん中あたりの中間層のところは古い水で、取り残されているということで解釈ができるわけです。

地下水の年齢

それから、次の水理学は、地下水の年齢と書いてございますけれども、これも年代を計算するのにいろいろな補正を加えないといけないんですが、例えば、名古屋に近いところで土岐市に動燃のウランの鉱山があります。そこに非常に深い地下水がございまして、それについて年代を決めてみますと、いろいろな結果が出てまいります。例えば、今から 12,000年前に地表から潜り込んだ水が、現在地下水として土岐のあたりに存在するという結果が出てきたり、12,000年前は氷河期の終わりごろで、そのころに潜り込んだ水があるということも、だんだんと解析されてきております。

次の考古学、人類学は、また最後に詳しくお話しをさせていただきます。

それから次に、原爆実験の ^{14}C ですけれども、これについて、堆積速度にも利用できる。これは省略させていただきます。

樹木年輪中の ^{14}C

南北両半球の大気の混合ということに対して、非常におもしろい結果が出ております。これはもう皆さん何回かごらんになったことがあると思いますが、木曾ヒノキの年輪1年1年で放射性炭素を測った結果で、これは1983年に切り倒した木曾ヒノキでございまして、その木の年輪の西暦年代は、ここから年輪を勘定すればすぐわかるわけで、各年の年輪について放射性炭素を測ってみますと、例えば1945年の年輪はこういうように変化して、1964年でピークになって、あといろいろな変化をすることがわかってきております。

なぜこんな形をとるかという議論もございまして、これ以前の1962年にものすごくたくさんの実験をやった。その結果、2年後にそのピークがあらわれたとか、いろいろな議論がございまして。北半球である日本では、このピークが1964年の年輪に出てまいります。これは農学部の木方先生がおやりになったんですが、南半球へ行きますと、南半球の木では1964年にこのピークが出てまいりません。1年半とか2年おくれてピークが出てきます。必ずおくれる。これは北半球でほとんど原爆実験が行われたことと関係するわけですけれども、もう一つそこで意外なことを見つけたわけです。

それはどういうことかといいますと、このピークのずれが起こるところの境目が南半球と北半球の非常に狭い範囲で起こっている。例えば、北半球の南緯6度ぐらいのところの木は、まだ1964年のところにピークが出ている。北緯6度ぐらいだと、まだ日本と同じです。ところが、その赤道をまたいで南緯7~8度のところへ行きますと、ぴったりとこのピークがずれてくる。赤道あたりを境にして、南半球と北半球の空気が非常にまざりにくいことの証拠になるだろうと思っております。気象屋さんなんかはこのことを話しますと、それはおもしろいんじゃない

いか。赤道付近では、温度が高いために、空気も含めて水蒸気の上昇気流が起こって、あそこに壁ができてから、北半球から南半球へ大気が移動しようとする、ひょっとして成層圏から回ってきたものしかないんじゃないかということが考えられます。ある意味では、混合していく速度を数字である程度出せてきたのではないか。もう少し詳しい仕事が今現在も続けられております。これが南半球と北半球の混合の問題です。

それから、もう一つおもしろい応用がありまして、今1964年にピークがあると申しました。それをうまく利用して、ラワン材のような年輪のない木について成長速度を出したい。普通だったら年輪を勘定して、何年かかって、どれくらい成長したのか測ればいいわけですがけれども、年輪のないものはどうしても年代が出せない、どれだけの時間がかかって成長したのかわからない。

私、木方先生と食堂で昼飯を食べている最中に、木方先生が「何か出す方法はありませんか」という話で、「1964年のピークを見つければ、それで成長速度が出せるんじゃないですか」。木方先生もなかなか実行力のある先生でして、すぐそれをおやりになりまして、その結果、これも一つの応用例になるだろうと思うんですが、こういう点線で示してございますのが木曽ヒノキの変化です。それに比べて、今のセラヤ材ですけれども、ピークになったところが1964年だろうとすることが出来るわけです。それで、木の表面からの長さを調べまして、1年間に0.5センチ成長しているということがわかってきた。これを木方先生が国際会議で発表されまして、えらく評判がよくて、それぞれの国で加速器を持っているところはこれをどんどんやろうじゃないか。そして次の国際会議のときにはシンポジウムをやりたいという話にまでなりまして、木方先生がお喜びになったことがございます。

歯に残る原爆実験の歴史

ついでながら、これはアイソトープ総合センターの西沢先生がおやりになった保健物理の医学関係のお仕事ですが、上の絵は、木曽ヒノキの放射性炭素の量がここでピークになるという図ですが、下の方は人間の歯。人間の歯の中には蛋白質、生きていた当時に食べた食物が残っているわけです。その放射性炭素を測って見たらというのでやられた仕事がこれで、愛知県のあちこちの歯医者さんから、得体の知れた歯を集めておやりになった。これを見ていただきますと、放射性炭素の濃度が縦軸、横軸がその人の生まれた年です。放射性炭素の量はこの辺はずっと変わらない。ところが、この辺からどんどん増え始めて、何か木の年輪を追いかけている場合と同じパターンを描いている。しかも、ここでその人の生まれた年を調べてみますと、このピークのあたりは1950年です。きょう、ここにお見えの方も、このあたりの年ごろの方がおられるんじゃないかと思えますけれども、今40歳ちょっと超されたぐらいの方の歯の中に ^{14}C が蓄積している。これだけだと、ただ興味本位の話になってしまうわけですがけれども、大臼歯とか、いろいろな歯の種類によって、このパターンが変わってくるんです。

それから、なぜ1950年の人に残っているかということ、これは永久歯を調べているものですから、こういうことになってしまうんです。乳歯は抜けてしまいますから、永久歯の歯根ができた年代をあらわしている。1964年ごろに歯根ができた

人ということになるわけです。西沢先生、今まだまだ詳しい解析をしておられまして、いろいろな食べ物の生理作用とか、人間の生理作用ということと結びつけて、歯だけではなくて、いろいろな内臓の方の関係も、これからデータが出てくるのではないかと期待しているわけです。

こういうようにして、考古学の話はまだしておりませんが、考古学、地学、海洋科学、それからついには生理作用と関係のある医学の方面にまで伸びてきたというわけです。

骨1グラムから何がわかるか

私がおく最近やりました、「骨1グラムから何がわかるか」という話をさせていただいて、きょうの話の終わりにします。

実は今、文部省の重点領域でもって「先史モンゴロイド集団の拡散と適応戦略」をやっています。なぜモンゴロイドの追跡に引っ張り出されたかといいますと、やはり骨から年代が決められる。直接人間の骨から年代を出すことが一番正確なわけです。私は初め、重点領域の第四紀の環境の方の仕事、「先史モンゴロイドの拡散地域の自然環境」だったらできると思っていただけですけど、A03班というのは「同位体による食生態と時空分布」。同位体を測ることによって、昔の人は何を食べていたか。それからまた時間的にどう動いていたかということ調べる班で、同位体の方に関して、安定同位体と放射性同位体の両方を理解できる人がほとんどいないということで引っ張り込まれて、組織することになったわけです。

化石骨による食性解析

そこでまず、古人骨、遺跡から出てくる人間の骨。私は、人間の骨に余り興味を持っていないんですが、モンゴロイドをやる限り、人間の骨をやらざるを得ぬというわけで、人間の骨をやるなら、何ができるかを考えてみたわけです。そうしますと、たまたま三菱化成生命科学研究所の南川さんと一緒にやっています、骨の中に蛋白質のコラーゲンが残っている。それはやはり食べ物です。生きていううちに食べたものが骨の中に残っている。それはコラーゲン（硬蛋白質）と言う”にかわ”です。我々子供のころには接着剤として使ったわけですが、にかわ質のものが残っているわけです。これはその当時の食べ物で、骨の安定同位体、炭素の安定同位体と窒素の同位体を測ることによって、生きていたときに何を食べていたか、海産物を食べていたか、それとも陸の野菜を食べていたかということがわかるようになってきたわけです。

もっと詳しく、例えば、海のものでも、貝を食べていたのか、魚を食べていたのか。それとも海獣類を食べていたのかという区別も実際はできるようになっています。それは、海獣の ^{12}C と ^{13}C の比と ^{14}N と ^{15}N の比が、物によって違うわけです。それをずっと調べることによって、まず生前に何を食べていたか。それから、何を食べていたかということは、食資源そのものの同位体組成を調べないといけない。基礎的な仕事が必要だろう。それから、我々の加速器を使って年代を決めようじゃないか。最初の年はこういうことを考えたわけです。

そこで、ちょうど2年ほど前ですけど、科学研究費を流用しまして、名古屋

屋大学に全国からいろいろな専門家を呼びました。その中には遺伝子のことを行っている人もありましたし、我々のように地球化学でアイソトープを行っている人間もいましたし、それから地学関係の古生物を行っている方や人類学者もいましたし、考古学者もいた。約20人あまりが集まったんじゃないかと思います。そこで、骨 1 g あったら、これだけのことができるんじゃないかと、私が一席ぶりました。これは理学部の地球化学科の教室でやりました。

皆さん、それぞれの専門家の方は、こういうことができるということを御存じないんです。地学でアイソトープを測っている人はいるけれども、例えば考古学でアイソトープを測ったらどういうことがわかるみたいなのを知っている人は誰もいない。学際的な研究をやろうとしても、横の連絡が全然とれていない。そこで、皆さんで放談会をやって、どんどん次へ伸ばしていこうということをやったことがございます。

古気温の解析

次に、2年度になりまして、もちろん何を食べていたかは続けてやる。年代測定もやる。そして、今から 5,000年前、6,000年前の人骨からも遺伝子を抽出して調べることができるようになったというので、ついに遺伝子が入ってきたんです。それから、骨の中に残っているコラーゲン（蛋白質）で食性を決める。年代を決めるということだけではなくて、骨の主成分である磷酸カルシウム。磷酸ですから酸素があります。その酸素のアイソトープを測れば、何がわかるかというおもしろい論文が出たわけです。

これは動物にしても人間にしても、生きている当時に飲んだ水の安定同位体比がわかる。酸素の同位体がわかる。 ^{18}O 濃度がわかる。生きていた当時飲んでいた水の ^{18}O のアイソトープの濃度がわかっても、これは痛くもかゆくもないんです。しかし、そこで私が気がついたのは、例えば、昔の人も含めて我々が飲む水は、もとはその人たちが住んでいる地域に降ってきた雨水ですね。その雨水の同位体組成というのは、私は昔から嫌というほどやってきたわけです。今日出席している菊田さんなんかも、卒論から修論まで水のアイソトープを測っていたわけですね。水のデータに関しては、私も非常に詳しく。空から降ってくる雨の酸素の同位体、 ^{18}O の濃度は気候にものすごく敏感なんです。寒いときに降ってくる雨というのは ^{18}O が少なく、軽い水です。温度の高い時期にふってくるのは重い。飲んでいた水の酸素の同位体比が骨の酸素の同位体組成として残っているとすれば、それを調べることによって、飲んでいた水の同位体組成がわかる。ということは、住んでいた当時の気候がわかるはずで、そこに気がついた。

そういうこととは関係なく、海の中に住んでいる鯨の骨の酸素の同位体を測っている人が富山大学の吉田さんです。その人を我々の研究班に引っ張り込んだんです。というように、何とかここまで話が進んできて、いろいろなおもしろい結果が出ております。それは我々のタンデトロンの報告集の中に書いてありますので、またそれをごらんになっていただければいいと思います。

3年度目になりまして、いつまでも人骨ばかりやっていると、理学部の地球化学教室を定年になる前に追い出されるんじゃないかと思い出したわけです。それで、骨だったら人骨だけじゃない獣骨がある。これこそ化石を利用したらおもしろ

ろいんじゃないかということに一つ気がつきました。それからもう一つは、動物でも、草食動物を選べば、食べているものは草だけ、植物だけなんです。植物が光合成で二酸化炭素をどんどん取り入れていくときに、温度の高いときは重い炭素、 ^{13}C の方を選択的に取り入れるし、寒くなってくると軽い方を取り入れるようになってくる。そういう知識があったものですから、雑食だと困るけれども、植物だけだったら、食べ物の一部が骨の中、歯の中に蛋白質として残っているから、その炭素のアイソトープ、 ^{13}C を測れば、食べていた植物の ^{13}C がわかるはずだと。植物の ^{13}C の濃度は温度に関係してくるから、明らかに気温の変化がわかる。年代別にいろいろな試料をとってきて、順番に測っていけばわかるはずだということに気がつきました。

野尻湖のナウマン象

そういうことで、実際にそれを応用しましたのは野尻湖の例でございます。野尻湖は御存じのように、毎年のように発掘をやっていますね。あそこからはたくさんナウマンゾウ、オオツノシカの化石が出てくる。それについて年代測定をやり、いろいろな安定同位体の仕事をやってみようというわけで、この瓶の中に入っています白い綿のようなものが、骨とか歯の中に残っていたコラーゲン（蛋白質）を抽出したものです。これを炭化しまして、タンデトロンにかけて年代を出す。それから、安定同位体も測定できるということを知ったわけです。

その結果をお目にかけてみますと、野尻湖以前の日本のナウマンゾウの結果をごらんに入れておきますと、ナウマンゾウは山陰沖とかいろいろなところから出てきておりますが、この年代を見ていただいでわかりますように、大体3万年よりも古い年代が出ております。それに比べて、知床沖とか海底から出てきたマンモスゾウの場合には、例が非常に少ないので何とも申し上げられませんが、年代的に2万年代で、年代的には差が出てきているように思います。

真贋判定

この下のところ、年代がマイナスに出ています。マイナス 320年とかマイナス 1460年。これはちょっとしたストーリーがございまして、今御存じのようにワシントン条約で、生きている象を殺せないし、生きた象の象牙は輸入できない。それを輸入する業者がいたわけです。あるとき、成田税関から文部省の方に問い合わせがあって、象牙の印材を千数百個、密輸入で持ち込んだ者がいる。台湾の税関のお役人だったそうです。成田の税関にひっかかっちゃった。持ち込んだ本人は、「マンモスの牙だから。これはもう化石の牙だから」と言うんだそうですけれども、何の証拠もないわけです。見てもわからない。それで文部省へ成田税関から問い合わせせて、年代を測定できるところはないかと言って相談したところ、「それは中井のところへ持っていけばできるはずだ」と言うので持ってこられて、それを測定したのがこういうものです。

台湾から持ち込まれた象牙の ^{14}C 年代を出してみますと、マイナス 1,400年です。マイナスと言いますと、未来の象なんです、まだこの世の中に出てきていないはずなんです。これはもう明らかに、原爆実験が盛んだった1964年ごろ、 ^{14}C が大気中に増えたところに草を食べて生きていた象に違いない。それ以外は絶対に考えら

れないという結果が出るわけです。それから、税関の方も味をしめられましていろいろ持ってこられたんですが、象牙のブローチをやってみましたら 48,000年前と出ましたので、悪い例ばかりでなくて、いい例も出てきたというわけです。一時は非常に心配いたしましたして、「新聞記事に絶対に名前は載せないでくれ」と言ったところが、名前を載せてしまったので、いつ暴力団におどかされるかと思っぴやひやしておりましたけれども、いまだに無事で生きております。そういういろいろな応用例がございます。

野尻湖のナウマン象

それから、これが野尻湖の年代データで、野尻湖の下の方にいくと深い地層になっていきます。横軸が我々が出した年代です。これが 30,000年前、35,000年、40,000年前となります。ここで例えば、この点線よりこちら側に出ているのは、非常に変質を受けている。そういう証拠がちゃんと出せました。例えば、同じ深さだったら、同じ年代で出てきてほしいんですが、ものすごく年代がずれています。この変質の度合いは何によって見きわめるかといいますと、まず、歯とか骨の中に残っている蛋白質が、本当に蛋白質であるかどうか。蛋白質の性格を持っているかどうか。これは炭素と窒素の比を測りますと、それによって蛋白質であるかないか、変質を受けているかがわかります。我々のやりました結果では、CとNの比が3から4の間のもを選ばないといけない。4以上のものになってしまうと、年代が 6,000年とか 8,000年というふうに若いものが出てしまうということもわかりました。

この点線よりもこちらのところは、CとNの比が非常に大きな値をとっています。それと同時に、0.29とか 0.21というのは、骨とか歯の中に残っている蛋白質の含有量です。その含有量が全部こちらは低い。我々の結果では、蛋白質の含有量が 0.7%ないし 0.8%を割ってしまうと、年代が極端に若く出るという結果になってきております。そういうことで正確な年代を出すと、細かい検討も可能であるということの例をお示しました。

こういうふうにして、変質を受けていないものだけのデータをプロットしていきますと、黒い丸がナウマンゾウの臼歯から出した年代。この白い丸がオオツノシカの歯から出した年代です。この×印が木片から出した年代です。こういう年代が出まして、少なくともナウマンゾウは、今から約 50,000年前から 35,000年前の間に生存していたということがわかりました。この結果を簡単に、考古学の方の価値だけをお話いたします。

幻の野尻湖人

このナウマンゾウの骨、歯、それからオオツノシカの化石が出てくる地層からは、必ず石器とか、人間が使っていたいろいろな道具類が出てくるわけです。ですから、このあたりで、ナウマンゾウと人間が共に生きていたということは間違いがない。ところが、人間の骨はみんな風化されて一切出てこない。4万年も5万年も前ですから、なくなっている。ナウマンゾウでも、臼歯、奥歯しか残っていなかった。それで、人間が住んでいたらしいということで、考古学関係の人は幻の野尻湖人と呼んでいたわけです。

今のナウマンゾウの年代からいって、50,000年前から 35,000年前ぐらいまで野尻湖人は住んでいたということが初めてわかったわけで、今までの推定値よりも15,000年ぐらい古い数値になった。ある意味で考古学の人には慌てたようでございますけれども、そういう結果が出ております。

さらに、35,000年とか 50,000年ということになってきますと、これは人間でも新人ではない。いわゆる旧人、ネアンデルタール人に類するものになってくるということが、これで初めてわかったということがございます。

将来計画

こういうように、加速器質量分析計で、質量の差だけではなくて、原子番号を区別するという技術が開発されて、今まで年代測定ができなかったようなものまで年代が出せるようになった。そういう意味で、これは「革命」だと言っているわけです。私自身は、 ^{14}C だけで満足しているわけではございません。

例えばヨードの 129 というのを、地球科学教室で、前に将来計画のときにお話ししたことがございましたけれども、「そんなものできるか」と言って笑った人がそのときございました。いまだに覚えていますが、しかしながら、私のところを卒業した学生をトロント大学のマスターに行かせまして、 ^{129}I を向こうでやらせました。それで、いろいろ年代測定をやりましたけれども、ともかく何百万年、何千万年前の第3期の地層の年代を測定させまして、まだ非常にラフではあるけれども、だんだん使い物に近づいてきていると申し上げていいのではないかと考えております。非常に具体的なデータが出始めまして、新潟とか秋田あたりの石油層の年代を出させたというところまでこぎつけました。しかし、私はこれ以上お世話できませんので、またこれから皆さん頑張っていたきたいと思うわけです。

これからのいろいろな将来計画についても、お話しするつもりでオーバーヘッドを持ってきているんですけども、これは中村君の方にお渡ししておきますので、それを御参考にますます頑張っていたきたいと思えます。

これからの年代測定センターの発展を祈り、また、大学全体の皆さんが大いに利用していただいて、日本では一番大きい年代測定センターに発展していただくことをお祈りして、私の話を終わらせていただきます。どうもありがとうございます。

司会 先生の40年間という長い研究生活の中の最後の10年間のお話をさせていただきました。10年間のお仕事を、わずか2時間ではなかなか入り切らないようで、ずいぶんはしょって頂いたところもあるかと思えます。

今日は、年代測定になぜ加速器が必要なのかという、非常に基礎的な話から、さまざまな応用の話までしていただきました。ここにお集まりいただいた研究者の方は、今日お話し頂いたことと共通するような研究をなさっている方が相当いらっしゃるのではないかと思いますけれども、ここで、何かお聞きしておきたいという質問がございましたらどうぞ。

中井 こういうダイヤグラムで、骨 1 gあればこういうことができるんだという

ことを最後にお見せしようと思ったんですけども、遺伝子を使って人類集団の系統樹解析ができる、そして年代がわかるということで、これからこの2～3年随分これが進むのではないかと考えております。骨の年代がわかってDNAがわかれば、どの時代にどういうのが混ざった結果、なってきたのかがわかる時期が来るのではないかと考えております。それにしても、年代が出せなければ絶対にできない仕事の一つだろうと思います。

これは人骨に余りこだわるので、どうしても草食動物の方も入れておかないと。これは最初に申し上げましたように、私が生物が好きだったということで、最後の私の仕事がこういう生物的なところへ戻ってきたということです。

[スライド]

昨年の11月にシンポジウムを開くので、早川幸男先生にプログラムをつくって持っていったんです。そのときに私、早川先生の体が悪いということの内々お聞きしておりましたので、早川先生にしゃべっていただくのは気の毒だと思って、プログラムから抜いていたんですね。それをお見せしましたら、「おれには話をさせないのか」と言って、逆に怒られまして、「いや、先生、お忙しいですから御遠慮していたんですけども、やっていただけるのなら」ということで、11月29日の朝9時半から30分間ここで、加速器質量分析のいろいろなことについて話をしてくださいました。終わってからも、一番前のこの席にお座りになって帰られないんです。「先生、お忙しいようで、秘書の方はすぐに部屋へ帰るようにとおっしゃっていたんですが、大丈夫ですか」。「いや、私は聞きたいからここにいる」と、1時間ほどここでお話をお聞きになっていたことを思い出します。

[スライド]

これは、古川資料館を寄附していただいた古川為三郎さんです。ちょうど年代資料研究測定センターの開所式の後のパーティーで撮った写真で、古川さんがここへお見えになったときが、ちょうど100歳と4ヶ月ぐらいのときですから、今は102歳ですか。先日、一月ほど前に古川さんのところにあいさつに行っていました。まだ非常にお元気で、ここの資料館とタンデトロンの報告書を持っていてお見せしましたら、1枚1枚ページを繰って「おお、難しいね」と言っておられました。非常にお元気でした。以上です。