特集

北大は顕微鏡で宇宙を観る

宇宙を観る道具は望遠鏡だけではない。独自の顕微鏡を駆使して空から降ってきた岩石のかけらに残されたメッセージを解読し、惑星誕生前の太陽系から先代の星々まで、時空を超えた旅をしている圦本尚義教授にお話をうかがいました。

interview

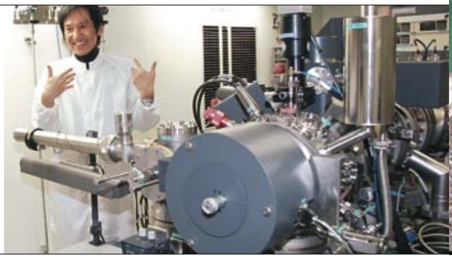
隕石中の同位体を手がかりに太陽系の起源へさかのぼる

理学研究院・理学院　圦本 尚義

隕石の中には"エイリアン"が混じり込んでいる

——宇宙化学研究室はどのような研究をしているのですか。

□ひとことで言えば、太陽系の起源と進化を物質に着目して解明することですね。最近では太陽以外にも惑星を持つ恒星がたくさん見つかってきたんですが、こうした恒星と惑星からできているシステムを太陽系も含めて惑星系と言います。惑星系の形成の理論もこの一〇年ですごく進んだのですが、宇宙に漂うガスと塵の雲がどう縮んで星になるのかとか、塵がどう集まって惑星の大きさになるかとか、運動的な



面に重点が置かれ、物質がどのように変化してゆくのかについては無視されていました。

——物質の変化が分からないと、たとえば、なぜ地球は他の惑星とは違っているのかといったことに答えられないでしょうね。

□その通りです。わたしたちは、これまで地球そのものや地球外の物質から読みとられていなかったまったく新しい情報を得ることで、宇宙空間にまばらに散らばっている原子・分子から惑星系へいたる物質の進化をたどることができたんです。

——そのまったく新しい情報とは、どのようなものなのでしょう。

□隕石は宇宙から飛んできた小惑星の破片ですが、その中には太陽系で固体粒子ができた当時の情報が保存されています。その時に起こった化学反応でいろんな記録が刻まれているわけです。たとえばこの隕石、ここに白い粒がありますよね。これが四五億六七〇〇万年前にできたことが、放射性同位体①の半減期を利用してわかるのです。放射性同位体は時間とともに一定の割合で壊れつづけ、別の同位体に変わっていくのですが、それが"時計"の役割を果たすわけです。

——四五億年以上も前にできたものが今目の前にあって触れられるというのは、すごいというか不思議な気が湧いてきます。

□実はこれよりもっと前にできた粒もあるんですよ。ただしこれは顕微鏡を使わないと見えません。いろいろな同位体を測定してゆくと、隕石の一部には明らかに同位体の成分が異なる粒子が見つかります。ということは、その粒子は普通の粒子とは起源が違うということなんです。隕石の中に"エイリアン"が混じり込んでいるわけですね。

——そのエイリアンの正体は何なのですか。

□実はこれは地球や太陽の基となった「赤色巨星」の残骸なのです。隕石を作っている粒子の大部分は同位体の成分が一緒です。太陽系が誕生したときに大部分の物質は激しくかき混ぜられてむらなく一様になったようなのです。惑星の材料である酸素や珪素などの元素は、もともと星の中で生まれ、星が年老いて赤色巨星になると、宇宙空間に塵として放出されます。太陽系を作った物質は由緒をたどればいろいろな先祖の星から来ているので、もともとは塵の一粒一粒の同位体の成分はばらばらだったはずです。私たちが見つけたエイリアン粒子は、四六億年前より以前に出来た岩石質の塵が、太陽系のできるときの激しいかき混ぜをかいくぐって生き延びたものなのです。

——太陽系が誕生する前まで、わたしたちの起源をさかのぼれるわけですね。

□そうです。わたしたちの系図をさかのぼると、太陽系を超え銀河へ途切れることなく続いているんです。

地球の酸素は宇宙の氷からやってきた

——太陽系がどのように生まれ、進化したのかを、ざっとデッサンしていただけますか。

□いまから約四五億七〇〇〇万年前、銀河系のあると

□圦本 尚義
Yurimoto Hisayoshi
●プロフィール／理学研究院・理学院教授
二〇〇五年より北大教員、研究分野は宇宙化学を中心に地球惑星科学、天文学、環境学、生命科学にわたる。

（1）元素はそれぞれ原子核の質量が少しずつ違う原子からなる。原子核の重さの違う原子それぞれを同位体という。同位体は放射能を持たない安定同位体と放射能をもつ放射性同位体に区別できる。

ころに分子ガスと固体微粒子でできた星々の間に漂う雲ができ漂い始めました。これが、われわれの太陽系の基となる「分子雲」と呼ばれるものです。それから三〇〇万年後に、この分子雲は縮みはじめ、原始の太陽の周りに現在の太陽系の二倍もの大きさの巨大な円盤状星雲が生まれました。この星雲の質量の九九%までは水素分子などのガスですが、残りの一%が惑星の基となる直径一ミクロン足らずの無数の固体微粒子でした。このころの太陽は、まだ核融合するほど成長していなかったものの、「双極流」と呼ばれるジェットを噴射していました。星雲に含まれている微粒子やガスは、太陽へ重力によって引き寄せられる一方、塵どうしは互いにくっ付きあって徐々に大きな塊となり、直径数十キロ程度の大きさの微惑星に成長します。微惑星どうしはさらに衝突合体し、溶融を起こして、核やマントルをもつ構造となり、現在とほぼ同じ大きさの惑星になります。そして、四四億七〇〇〇万年前から太陽が核融合を始めたんです。

――同じ円盤状星雲から生まれたのに、地球は他の惑星と明らかに違いますね。これはなぜなのでしょう。

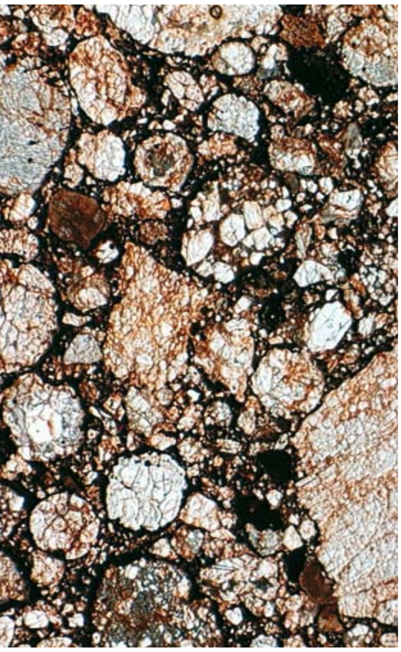
□実は物質的にはあまり違いがないんです。金星や火星とだいたい同じ物からできている。ですが太陽からの距離の違いで、水が液体として存在できるかどうかといったことが地球と他の惑星の違いをもたらしています。詳しく見れば惑星によって物質の成分に偏りがあるのも事実です。太陽の近くに残った微粒子は、循環しつづけるうちに、熱されて融けたり、蒸発したり、あるいはまたガスから昇華したりして、元の物質から成分や化学式などが変化します。このときの変化の程度や回数の違いがあるからだと考えられます。

――地球には、他の惑星に比べてかなり多くの酸素があり、水がありますね。

□大気だとか海だとか地球の表面だけに着目すれば、これも太陽からの距離の違いだったり、光合成をす

隕石

――宇宙の歴史のロゼッタストーン

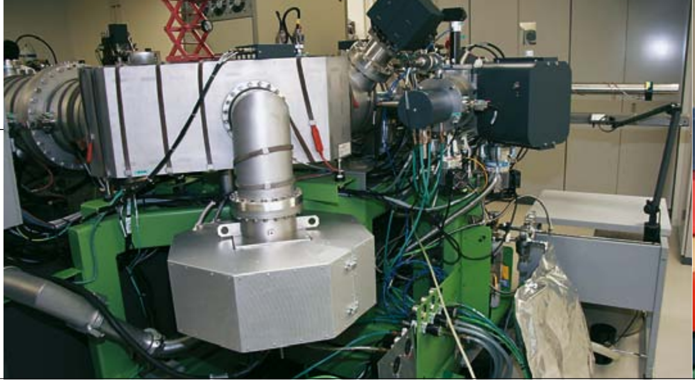


宇宙は広い。私たちの観察できる宇宙は、光の速さでも到達するまでに一三〇億年以上を要する範囲まで広がっている。光が一年間で進む距離のことを一光年という。例えば百億光年彼方の銀河から届いた光は、その銀河の百億年前の姿を表していることになる。だから望遠鏡によってより遠くを観測することは、宇宙の歴史を調べる正攻法の一つだ。

しかし私たちの住む星である地球や、太陽系の歴史を探ろうとすると、このアプローチは使えなくなる。なにしろ太陽系の果てすら、光の速さでは一日程度で到達してしまうからだ。

かつてアインシュタインは、実験による自らの相対性理論の証明を待っていたとき「神は老獪である。自然が本性を隠したがるのは、その高貴さの故であって、意地悪だからではない」と述べた。自然界には困難に思えても私たちを自然の正しい理解へ導いてくれる手がかりが存在するものだ、という意味である。自然界が巧妙に残してくれた宇宙の歴史を知るためのもう一つの手がかり。それが、隕石である。

隕石は英語でmeteoriteと記し、気象



る生物がいるかいないかといったことが一番影響しています。ところで地球で一番数の多い元素は何かご存知ですか。

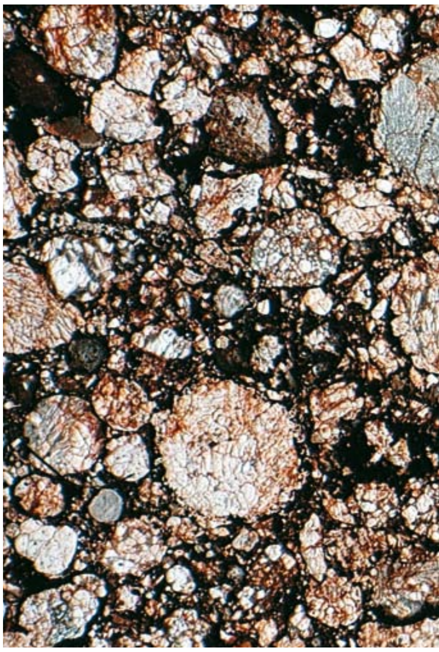
――大気なら窒素でしょうし、海では水素、全体ではどうでしょうね。

□答えは酸素なんです。地球は岩石型惑星といわれますが、岩石というのは金属の酸化物なので、酸素をたっぷり含んでいます。同位体の研究で地球の酸素ははじめから岩石と結びついていたんではなく、太陽系の誕生より前、星の間を漂うガスと塵の雲の時代には大部分が水分子になっていたらしいことが分かってきました。

――生命は水があるからこそ生まれたといわれていますが、地球もそうだということなのでしょうか。

□そういえるかも知れません。酸素には質量の異なる三種類の同位体があります。ガスと塵の雲には一酸化炭素分子が含まれています。これに紫外線が当たると、重い酸素同位体からできた一酸化炭素分子が優先的に分解され、このとき放出された重い酸素同位体は周囲の水素原子と結合して氷(水分子)になります。私たちは地球の酸素の同位体の成分はこの氷と同じく、重い同位体の割合が高いことに気がつきました。ガスと塵の雲はやがて縮んで円盤状星雲になりますが、気体か固体かの違いでガスよりも氷をまとう塵粒子のほうが早く中心部に集まってきます。それで、太陽に近い惑星の酸素は氷由来の重い同位体が多く、遠い惑星ではガス由来の軽い同位体が多くなるわけです。

――わたしたちが呼吸している地球の酸素は、宇宙の氷からやってきたわけですね。



コンドライトを0.05mmの厚さにスライスし、背後から光を当てて光学顕微鏡で観察した。
内部に無数の割れ目があるが、全体として丸い形をしているものがコンドリュールである。
これらは原始の太陽系で、岩をも融かす、強烈な加熱イベントがあったことを示している。
(大きさは横6mm×縦4mm)

学を表すmeteorologyと「大気現象」を意味する接頭辞"meteor"を共有している。隕石が引き起こす自然現象としてはまさにその通りで、大火球(非常に明るい流星)として大気中を落下してくることがしばしば目撃される。火球となるのは、隕石は秒速一〇キロメートル以上の非常に大きな速度で落下し、大気との摩擦熱によって白熱するからだ。そのため隕石は表面が黒く焼け焦げているのが特徴だ。

隕石は小惑星のかけらに由来すると考えられている。一九五九年、隕石をもたらした火球の軌道を決める写真観測が始めて成功し、この隕石は太陽をめぐる楕円軌道をもち、遠日点は火星の木星の間に存在する小惑星帯にあることが突き止められた。その後もいくつかの隕石の落下が観測され、ほとんどが遠日点を小惑星帯にもつ軌道を持っていた。隕石が小惑星のかけらであることを示す別の証拠には、隕石と小惑星の「色」を比較すると両者が良く似ているということも挙げられる。

隕石は表面こそ焼けただれているが、熱されている時間がほんの数秒たらずなので、内部はもとの状態に保たれている。ごく一部の隕石を除くと、隕石に取り込まれている物質は地球で手に入る物質の中で、もっとも古い放射性年代を示す。そのなかでも最古のものは四五億六七〇〇万年前―偶然だが大変覚えやすい数字―にできたものだ。

隕石には様々なタイプのものがあるが、惑星が誕生する以前の太陽系の歴史を記録しているのは、コンドライトと総称されるものだ。このタイプの隕石には直径一ミリメートル前後の丸いビーズのような粒子が、より細かい粒子と一緒にびっしりと詰まっている。このビーズのような粒子をコンドリュール(球粒)といい、コンドライトの語源の由来となっている。

これらの球粒は、漂っていた固体の塵が瞬間的に熱されて液滴になり、それらが一時間足らずで冷えてできたものだ。このような現象は、小惑星上では起こらない。また粒子によって、液滴になった時代には一〇〇万年以上もの違いがあることも分かっている。つまり、これらの隕石は、原始太陽系で固体の大部分がまだ塵だった状態のときに生じた物質が、機械的に寄せ集まってできたものなのである。

コンドライト隕石は、地球誕生以前の太陽系の歴史と姿を教えてくれる、自然界が巧妙に残してくれたロゼッタストーンと言うことができる。同位体顕微鏡はその中に秘められた暗号を解読する最新の技なのだ。

□生命のもととなる有機物を含んだ塵が宇宙でつくられ、氷に閉じこめられて地球に届けられたという説もあるんですよ。

同位体顕微鏡に"網膜"を取りつける

――さきほど、隕石の一部には明らかに同位体の成分が異なる鉱物が含まれていて、それは起源の異なるものだというお話がありましたが、それを究明するのが「同位体顕微鏡」なんですね。

□物質からこれまでにない新しい情報を得るためには、それを解析するための新しい方法や装置が必要です。そのため、わたしたちは機械の設計や開発も同時に行ってきました。同位体顕微鏡はいま、わたしたちの研究のもっとも基本的な装置になっています。

――どのような仕組みなのですか。

□まず、隕石の切片を、真空装置のなかにセットします。これにイオンビームを当てると、ビリヤードの初打の要領で隕石を作っている元素がイオンになって叩き出されるんです。大部分は真空容器の内壁に貼りついてしまうんですが、一%以下のわずかなものだけを拾い出すことができます。それをまず電圧をかけて加速し、特定の運動エネルギーをもつようにします。次にそのイオンを、電磁石を使って曲げ、今度はイオンのもっている運動量に応じて分ける。この二段階の操作で、イオンを質量ごと、すなわち同位体ごとにより分けられることになります。

――それぞれの同位体の数を数えるわけですか。

□そうですね。一〇億分の一、地球でいえば一〇億人のなかの一人を見分けられるだけの精度をもっています。わたしたちはさらに、それを眼で見えるように、新しい装置を開発しました。いわば網膜の役割を果たすものを作ったのです。が、それがあるのはこの同位体顕微鏡だけです。網膜は眼が見たものを脳に伝える役割を果たしていますが、この装置は同じようにイオンを感知して視覚化できるんです。

――この先端につけられているものですか。

□手づくりなので、ハンダ付の歪んだ跡が残っているし、カッターで切った跡もギザギザになっているでしょう。デジタルカメラに搭載されているCCD(2)は光を感知する素子でできていますが、これは同じようにイオンを感知する素子でできているんです。六〇〇×六〇〇個のトランジスターが視神経と同じ働きをしているんですよ。

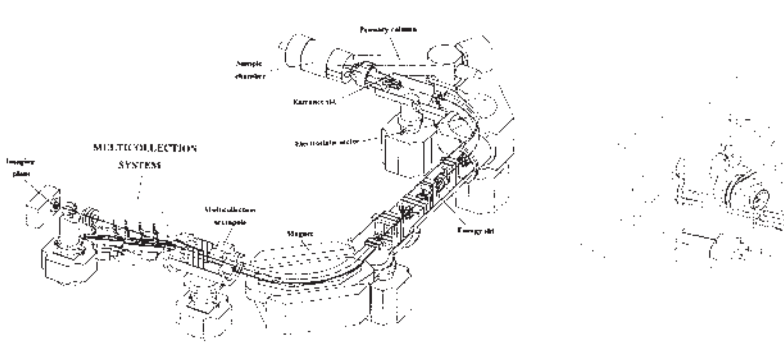
――それにしても、同位体顕微鏡は巨大な装置ですね。

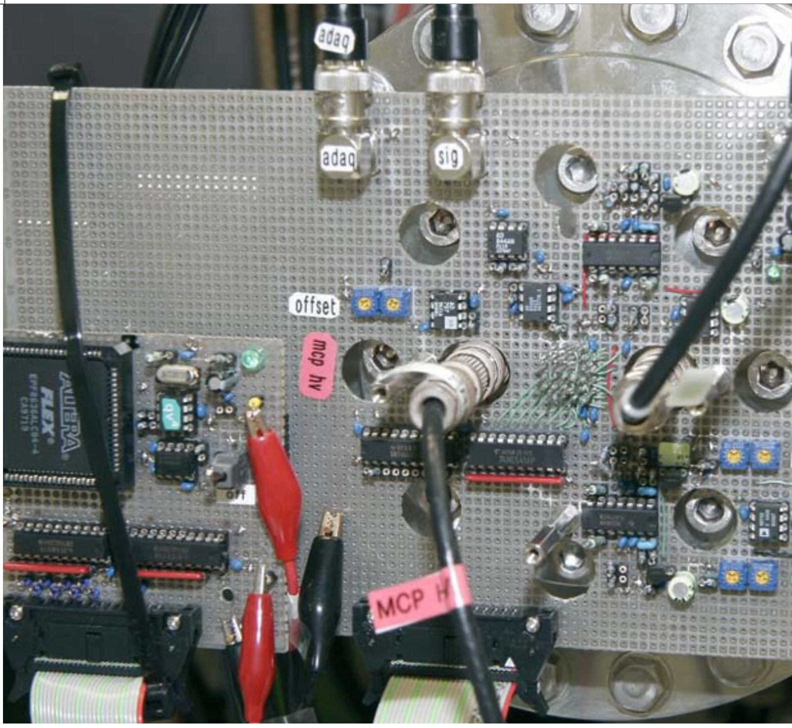
□重さが約一〇トンあります。これを分解して、東京工業大学から運んできたときは大変でした。院生とメーカーの人が、二カ月かかりきりで分解して、また組み立てたんです。

――それにしても、装置まで自分で開発してしまうという

少年時代から宇宙が好きだった

（2）Charge coupled device（電荷結合素子）の略で、受けた光に量に応じて電荷を発生させる働きを持つ受光素子を面にびっしり並べることで、電気信号として画像を得ることができる。





のは、すごい情熱ですね。

■どうしても、見たいという気持が強かったんです。見るというのは複合的な仕事ですから、他の分野の知識も必要になるんですよ。好きなことには、とことんのめり込んでしまいますね。

――圦本さんは少年時代から、宇宙が好きだったんですか。

■少年時代に望遠鏡を買ってもらって、いつものぞいていました。いまは地球が誕生した四六億年以前の宇宙の記憶をたどることに、いちばん興味をそそられます。隕石中の同位体は太陽系誕生期のロゼッタストーンに書かれた文字にあたります。そこには太陽系の誕生以前の時代の記録も残されています。それを解読すれば、太陽系の新しい起源論を展開できると確信しているんです。

（ゆりもと　ひさよし）

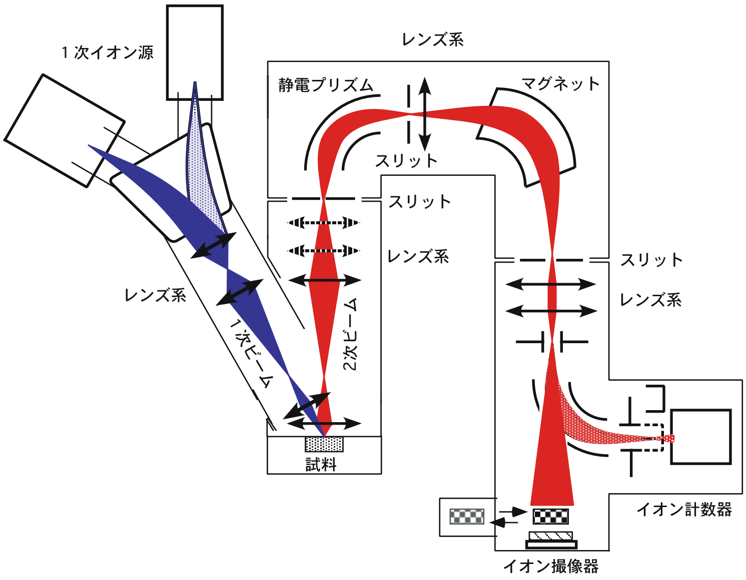
▼聞き手：逸見　勝亮

宇宙を観る新しい目、同位体顕微鏡の仕組み

同じ元素でも、原子一個の質量は必ずしも等しくない。それは原子核に含まれる中性子の数が違うことがあるからだ。中性子一個の質量は陽子とおなじで、一グラムを高校の化学でならうアボガドロ数で割った値に等しい。アボガドロ数は六の下にゼロが二十三個並んだ数なので、質量の違いはごく小さい。じつは全ての元素はこのような中性子の数が一個から数個違った原子の集合体である。それぞれの元素について中性子の数が同じ、つまり質量がぴったり同じ原子のことを同位体という。たとえば核燃料に使われるウラン235はウランの同位体の一つだ。235という数字は原子核の陽子と中性子の個数の和（質量数）を表す。天然にはウラン238というもう一つの同位体がある。酸素では同位体は三つあり、白金（プラチナ）では六つも同位体がある。

同位体の成分を調べるには、元素を同位体ごとにより分ける必要がある。これを可能にしたのが質量分析計で、その原理はこうだ。まず原子から電子を奪うか逆に与えるかして電気を帯びさせ（電気を帯びた原子をイオンという）、これに一定の電圧をかけて真空容器中で加速する。このとき得るエネルギーは奪った（あるいは加えた）電子の個数が等しければ原子の質量によらず

等しい。しかしエネルギーは質量と速度の二乗で表せるので、質量が違えば速度はまちまちになる。次に加速された原子に磁場をかけて軌道を曲げる。この曲がり方は質量と速度の積で決まるので、原子の質量によって違うことになる。こうして原子を同位体ごとにより分けられるのである。より分けた同位体それぞれの個数は電流値としてカウントされ、このカウント数の比率が同位体の成分を表す。

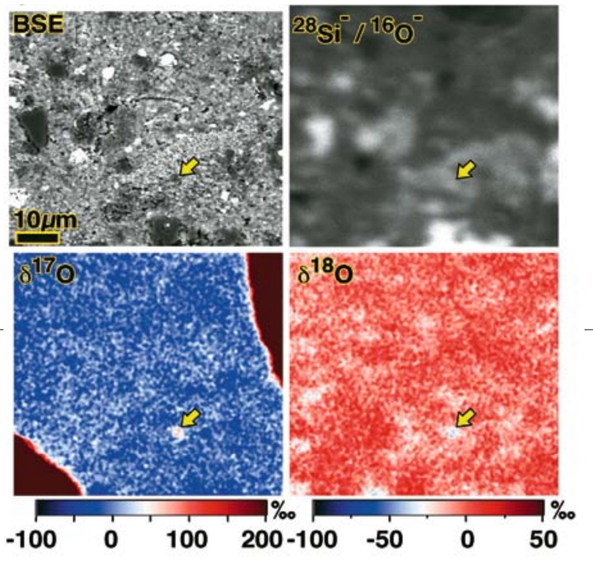


従来は同位体の成分を測るには、試料を化学処理して調べたい元素だけを抽出し質量分析計にかけていた。試験管やフラスコを駆使するこの化学処理はとても面倒で、しかも、この方法では成分が物質の場所ごとに違っていても、それらはならされてしまい、せっかくの貴重な情報が一つ失われてしまう。これらの欠点を一挙に解決したのが「シムス」、二次イオン質量分析計である。シムス(SIMS)はこの装置の英語の頭文字をとった略称だ。この装置ではまず加速したイオンビームを試料に当て、玉突きの要領で試料の原子をたたき出す。このときイオンビームから電気を受け取ったり、化学結合が切れたとき電気を分け合ったりしてたたき出された原子がイオンになる。これを質量分析計へ導いて同位体ごとにより分けるわけである。イオンビームはごく細く絞ることができるので、この技術は試料の細部の同位体の成分測定を可能にした。

この技術をさらに発展させたのが同位体顕微鏡だ。同位体顕微鏡ではこの細く絞ったイオンビーム内部の同位体分布も観察できる。同位体顕微鏡がもつ質量分析計の電圧や磁場は光学顕微鏡で言えば光線を曲げるレンズの役割をする。たたき出されたイオンは、もとの位置情報を保ったまま、質量分析計の検出器へ導かれるのである。同位体顕微鏡の心臓部はこの検出器、イオン撮像器にある。位置情報を正しく読み出すために、宇宙化学研究室では一〇〇平方ミリメートルに二五万個の素子を配列し、各素子は一個から一〇〇万個の入射イオンの個数を測ることができる検出器を設計・開発したのだ。これによって試料の約一〇〇平方ミリ四方について一ミクロンより高い解像度で同位体の成分地図をつくることが世界で初めて可能になった。

実際の成分地図つくりはこんな要領でやる。例えば酸素16と酸素17の比率の地図を作りたいとしよう。このときは原子時計に使われていることで知られるセシウムのイオンビームを分析したい領域に当てる。まず質量分析計の磁場の強さを調整し、酸素16の濃度の地図をつくる。このとき一緒にたたき出された酸素17は磁場であさっての方向にまげられて、検出器には入らない。そして次にもう一度磁場の強さをコントロールして、おなじ場所の酸素17の濃度の地図をつくる。この二枚の地図を合成すれば、比率の地図が得られるというわけである。

(ゆりもと ひさよし・くらもと きよし)



図：同位体顕微鏡は隕石中に赤色巨星から来た微粒子を発見した（矢印の部分）。周囲とは同位体の成分（δ17Oとδ18O）がまったく違う。δ17O（δ18O）は酸素16に対する酸素17（酸素18）の比率が基準値からどれだけずれているかを千分率で示した、同位体の成分を表す数字である。BSEと記したのは同じ領域を電子顕微鏡で観たもので、これだけではどれが特別な粒子か判別できない。