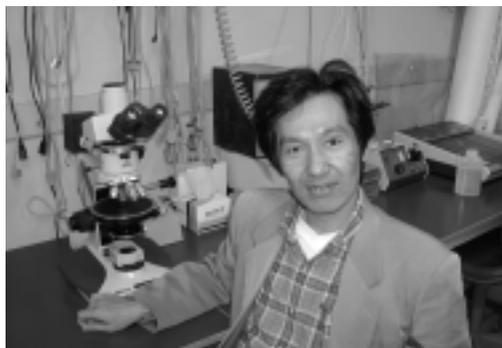




# 同位体で宇宙の歴史を探る

## 垠本研究室 ~ 地球惑星科学専攻



垠本 尚義 助教授

宇宙から地球に多数飛び込んでくる隕石。それらは昔の情報を今に伝えてくれるタイムカプセルだ。地球惑星科学専攻の垠本尚義助教授は、その隕石を分析することで太陽系の歴史を解き明かそうとしている。

垠本研究室では、隕石に含まれる安定同位体に着目して研究を行っている。また、より素早く正確に同位体の検出ができるよう、新しい観測機器の開発も並行して行っている。同位体から一体何がわかるのだろうか。これから垠本研究室の研究を覗いてみよう。



## 隕石からわかる昔の太陽系

今から約45億7000万年前、銀河系のあるところに気体や固体微粒子からなる高密度の部分が現れた。これが我々の太陽系の素となる分子雲と呼ばれる状態である。その300万年後にこの分子雲は収縮し始め、太陽を中心としてその周りに現在の太陽系の約2倍もの大きさの巨大な円盤状星雲を持つ構造へと変化した。図1(a)はこの様子を模式的にあらわしたものである。この星雲の99%までは水素などのガスであったが、残りの1%に惑星の素となる直径1mm以下の固体微粒子が含まれていたのである。

一方、このころの太陽はまだ核融合するほど成長してはいなかったものの、「双極流」と呼ばれる高速の流れを作り出していた。図1(b)を見てもらいたい。円盤状星雲に含まれている微粒子やガスは矢印Aのように太陽の重力によって引き寄せられ、双極流B,Cによって吹き飛ばされている。このとき微粒子やガスの大部分は矢印Bの流れに乗ってそのまま太陽系の外に吹き飛ばされてしまうが、一部の微粒子は矢印Cの流れに乗って循環し続ける。この間に微粒子同士は化学反応を起こして様々な物質に変化する。現在、地球には

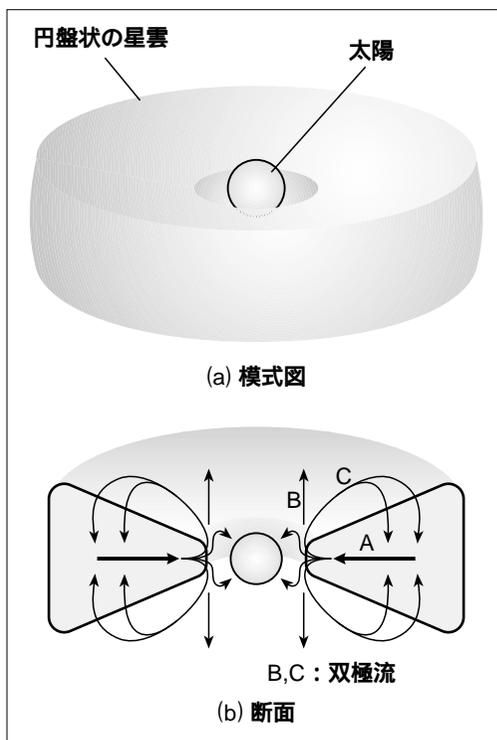


図1 円盤状星雲のようす

他の惑星に比べてかなり多くの水が含まれている。このように、惑星によって存在する物質には偏りがあるが、これはこのときの化学反応の回数の違いが現れているのだ。

その後しばらく微粒子は反応を繰り返しながら徐々に大きな塊となり、直径数十km程度の大きさの微惑星にまで成長した。このことで太陽に引き込まれる固体微粒子は減り、またガスはほとんど全て太陽系外に吹き飛ばされて、双極流はなくなってしまった。微惑星はさらに熔融と冷却を経て核やマントルを持つ構造となり、現在とほぼ同じ

大きさ惑星になった。そして、44億7000万年前に太陽は核融合を始めるのである。

以上は観測事実及び隕石の分析から塚本先生が提唱している太陽系の歴史のモデルである。隕石にはそれができた場所の当時の情報が記憶されており、隕石がいつ、どこでできたかを知れば当時のその場所がどのような環境であったかを知ることができるのだ。隕石ができた時期は放射性同位体の半減期を利用してわかる。塚本研究室では隕石のできた場所の特定に主眼を置いて研究を進めている。



## 隕石のできた環境を探る

先生が目じたのは隕石に含まれる安定同位体である。例えば火星の $^{17}\text{O}$ と $^{18}\text{O}$ の $^{16}\text{O}$ に対する比は地球よりもそれぞれ1%ずつ多いというように、元素を構成する同位体の存在比は天体によって異なることが知られている。そして化学反応では同位体の違いは区別されないため、反応の前後で物質中の同位体比が変わることはない。そのため、隕石にはできた場所に固有の同位体比がそのまま保存されているのである。先生はこのことを利用した。つまり隕石を同位体比ごとにグループ分けし、その上でそれぞれのグループと同じ同位体比の天体を見つけることで隕石がどこでできたかを解明しようというわけだ。さらに、隕石と同じ同位体比を持つ天体を見つけることによって得られる情報は隕石のできた場所に関するものだけにとどまらない。具体的にどの物質がどのように動いたかなど、物質の流れに関することまでも同位体比から知ることができるのである。

こうした同位体の情報に他の分析で得られた情報を重ね合わせると、隕石ができた環境が浮き彫りになってくる。例えば隕石内の一部に同位体比

が違う鉱物が含まれていれば、その部分は他の部分とは起源が違う、つまり別の場所のできた隕石の破片が混ざっているということがわかる。また、隕石内の同じ鉱物でも同位体比が違う部分があることもある。これは、同じ鉱物でも結晶が成長した環境が違うことを意味している。

こうした分析を繰り返し、先生は太陽系の歴史を研究している。突き詰めていけばいつか宇宙全体の歴史が解明される日が来るかもしれない。



地球に落ちてきた隕石



## 隕石をどうやって分析するのか

それでは、実際の分析はどのようにして行っているのだろうか。大きな流れとして、

- 1) 試料作成
- 2) 元素分析
- 3) 質量分析

の3つの段階に分けられる。

まず1)の試料作成は隕石を薄く切断し、表面を磨いて試料を作る段階である。分析に適した、表面が滑らかな試料を作るために時間をかけて行う必要があるため、大きい試料では切断に一晩、研磨に一日かける場合もある。

次に、表面の元素分布を得るために電子顕微鏡

を用いて2)の元素分析を行う。物質に電子が衝突すると元素に固有の波長のX線が出てくる。この現象を利用し、X線の波長から元素を特定するというわけだ。こうして試料表面の元素組成が得られたら、そのデータを画像として見られるように加工する。これは3)の準備のために行うもので、調べたい元素（例えば酸素）の濃度に応じて色を付け、次の3)では色が著しく異なる部分に注意して分析する。元素組成が違うということは鉱物が違うということで、これはできた場所が違う、すなわち同位体比が異なる可能性が高いと考えられるからである。図2(a)はある隕石の分析例で、黒い部分は酸素が多く、白い部分は酸素が少ないこ

とを意味している。なお、黒い部分はスピネルという鉱物でMgとAlの酸化物、白い部分はメリライトという鉱物でCaとAlのケイ酸塩である。

元素分析を終えたら、いよいよ同位体比を得るために3)の質量分析に移る。まず、数KeV程度のエネルギーを持つイオンビームを試料に照射する。するとビームに弾かれて試料表面からイオンなどが放出される。こうして出てきたイオンをまず電場に通し、特定の運動エネルギーを持つものだけを選別する。次にそのイオンを磁場に通し、今度はイオンを持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分別でき、元素の同位体比が得られるのである(図3)。このときイオンビームを平面にまんべんなく照射すれば同じ面内の組成が得られるし、イオンビームにより試料表面が削れていくので同じ箇所を分析を続けていけば表面から深さ方向の組成分布を知ることできる。またこの方法はイオンを使用するため、他の同位体分析法に比べて非常に細かい部分まで分析ができることも特徴である。

質量分析ではイオンは一個一個出てくるので、分析するのに十分な量を貯めるには時間がかかる。そのため、しばしば徹夜の作業になることもあるそうだ。しかし、一つ一つの粒子がどこからやってきたかを決定する実験を行っている研究室は世界でも少ないので、自分の導き出した結論が世界で一番最初にやった仕事になる。この事実はとても励みになると先生は言う。

さて、前述の方法で同位体比を得るためにはイオンの数を数えることが必要である。このために、『イオンカウンター』と呼ばれる装置を使う(図4)。この装置にはイオンを受けるための電極が付いている。この電極にある程度のエネルギーを持ったイオンが衝突すると、電極金属の原子核の周りに存在する電子が弾き出される。このとき電子が抜けることによって生じた正の電荷は半導体チップ内にあるコンデンサに蓄えられる。これはコンデンサに電圧をかけたことに相当し、この電圧と同じ電圧が半導体チップ内にあるトランジスタにかかる。トランジスタはかかる電圧によって通過する電流が変わるスイッチのような働きをするので、トランジスタを通過してきた電流を計測すれば電極にどれだけイオンが衝突したかがわ

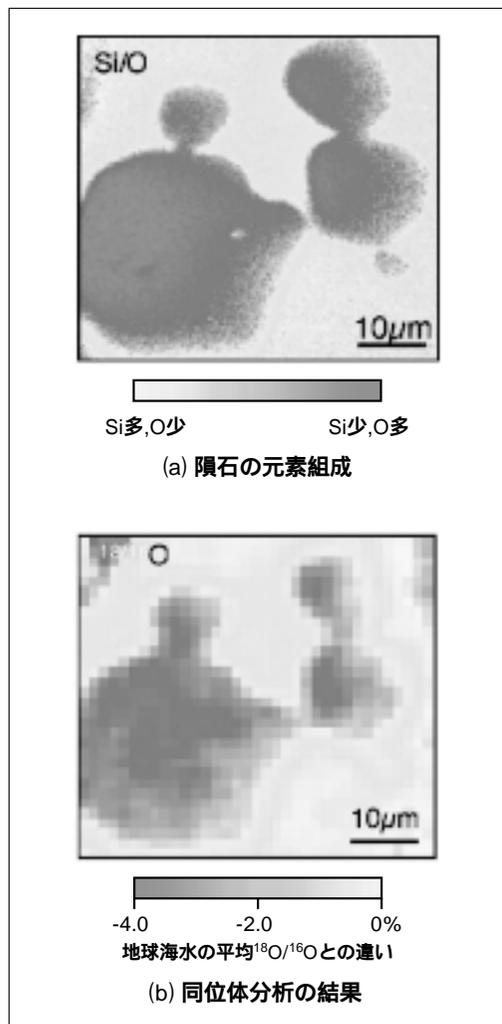


図2 ある隕石での分析例

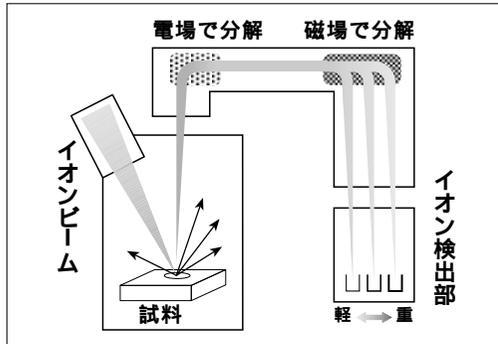


図3 質量分析計

かるという仕組みである。

以上の操作で隕石の同位体比が得られる。さらに、必要に応じて画像処理を加えて結果を見やすくすることもある。図2(b)はそうして得られたものである。この図を見ると、図2(a)と白黒の位置がおよそ一致している。さらに、図2(a)で黒かった部分(スピネル)は $^{18}\text{O}$ が地球上に比べて4%少なく、白かった部分(メリライト)の $^{18}\text{O}$ は地球上とほぼ同じであることがわかる。この隕石は原子太陽系の初期段階にできたことは既に分かっているので、そのときの円盤状星雲には $^{18}\text{O}$ が現在の地球より4%少ない成分(スピネル)と、 $^{18}\text{O}$ が現在の地球とほぼ同じである成分(メリライト)が含まれていたことがわかる。

本研究室ではさきほど説明したイオンカウンターに加え、平面画像が得られるように改良したものも使用している。この装置には電極とコンデンサとトランジスタの組が縦横それぞれ500個もあり、250,000点の同位体比のデータが同時に取れるようになっている。図2(b)の元となったデー

タもこの装置を使用して得られたものだ。

その改良したイオンカウンターを利用し、本研究室では現在『同位体顕微鏡』を開発している。顕微鏡とは表面の状態を拡大して見る道具なのだが、この場合は同位体の分布を拡大して見えるようにしようというのである。この装置の原理を簡単に説明すると、まず同位体を質量分析装置で分け、分けた同位体をイオンカウンターで数えて、そのデータを2次元の映像にするというものである。この、データを映像化する装置を現在作成しているそうだ。そのようなものが本当にできるのかと思われるかもしれないが、同じような装置は光の場合にはCCD (Charge-Coupled Device) という半導体素子ですでに実現されていて、デジタルビデオカメラなどで広く利用されている。そのような素子で、光ではなく同位体を感じ取るものを作ろうとしているのだ。この同位体顕微鏡が完成すれば、安定同位体の分析が素早く正確にできるようになり、新しい発見、ひいては宇宙の歴史の解明に大いに役に立つだろう。

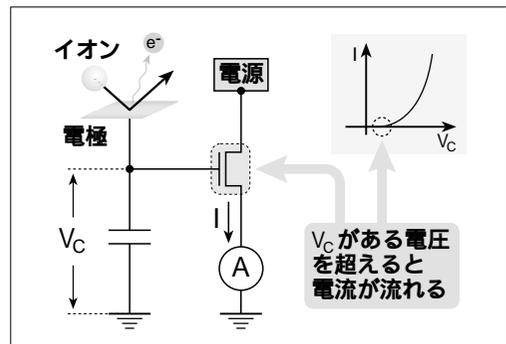


図4 イオンカウンター回路図

現在本研究室には海外から研究者が来ているため、学生の英語力向上を目的としてセミナーを英語で行っている。学生、特に学部4年生にとって、研究の場に英語を積極的に導入することは大変なことである。確かに、英語を聞き取るときには相手のペースに合わせないといけないので難しい。しかし、英語を話す際には必要に応じて身振り手振りや図式を多用することでコミュニケーションを取ることができる。実践の場に英語を導入し、このようなやりとりを繰り返すことで学生

の英語力が随分上達したとのことだ。そばにネイティブの人がいて話してくれる。それに対して、こちらも身振り手振りに図や式も使ってコミュニケーションを取る。そうした環境が英語力の向上には有効なようだ。

最後に、お忙しいところ取材に応じていただいた本研究室に御礼申し上げますとともに、これからの更なる発展をお祈りいたします。

(小原 俊樹)