



アルゼンチンで発見されたカンポ・デル・シエロ (Campo del Cielo) 隕石。鉄隕石に分類され、これまでに約37,000kgの隕石が発見されている。(画像提供：国立科学博物館)

# 隕石がひもとく 原始の太陽系の姿

広大な宇宙には、解明されていない謎が数多く残っている。太陽系の形成過程もその一つである。これを解明する重要な手がかりが隕石である。隕石の中には鉄が含まれるものも多く、化学成分や結晶構造を調べることは、何億年も前の太陽系の姿を解明することに役立つ。鉄隕石をはじめとした隕石研究と天文学などの研究成果が描く、太陽系創成期の様子を紹介する。

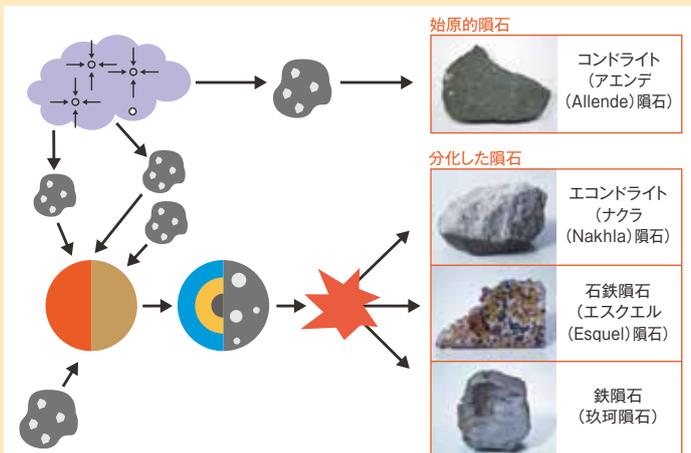
## 隕石は太陽系の「タイムカプセル」

欧州では18世紀まで、「空から石が落ちてくることは考えられない」と隕石は迷信だと考えられていたという。しかし、現代科学は隕石を分析することによって、太陽系形成の謎に迫ろうとしている。

現在、隕石は組成や組織などから数十種類に分類されている。これらは、隕石の成り立ちを元に「始原始的隕石」と「分化した隕石」に二分できる(図1)。始原始的隕石はコンドリュール(chondrule)と呼ばれる粒状の岩石の集合体で「コンドライト(chondrite:球粒隕石)」と呼ばれ、太陽系初期の状態を残していると考えられている。太陽系全質量の99%以上を占める

### ●隕石の成り立ちと分類(図1)

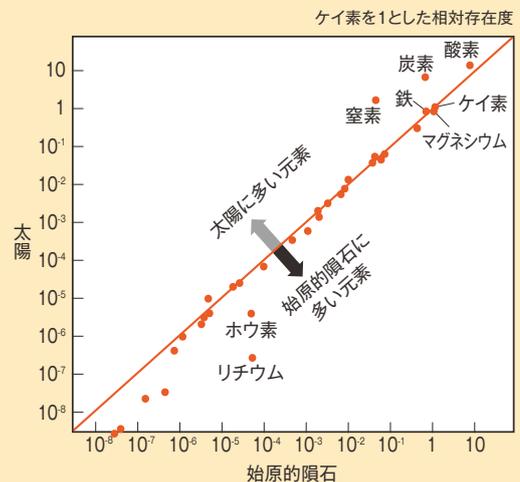
塵やガスが宇宙空間を漂っているが、互いに衝突・合体して、コンドライト的な微惑星を形成するようになる。微惑星はさらに衝突や合体を繰り返して、小惑星に成長し、大きなものはやがて衝突の熱や放射性物質の崩壊熱などにより、内部が溶解し始める。その際、金属は小惑星の中心部に落ち込んで行く。このようにして、微惑星が表層部(エコンドライト)、境界部(石鉄隕石)、中心核(鉄隕石)を持つ小惑星になったと推測されている。



(画像提供：国立科学博物館)

### ●コンドライトと太陽の元素組成の比較(図2)

それぞれの元素濃度がよく一致していることが分かる。このことは太陽大気を冷却することで小惑星が形成されることを意味し、隕石が原始の太陽系の組成と同等であることを示している。



「CIコンドライトと太陽の元素組成の比較(新版地学教育講座 第12巻 太陽系と惑星、東海大学出版会、1995年)」を元に作成。

INTERVIEW

## 約9,000個の隕石を南極で採取

5回の南極観測に参加し、日本が保有する南極隕石の半数以上の採取に関わった国立極地研究所の小島秀康名誉教授にお話をうかがった。

— 隕石はどのように採取するのですか。

南極の氷の上に落下した隕石は、風化や侵食されにくだけでなく、氷河の運動によって特定の地域に集まる仕組みがあり、そのメカニズムの仮説を日本隊が提案しました。

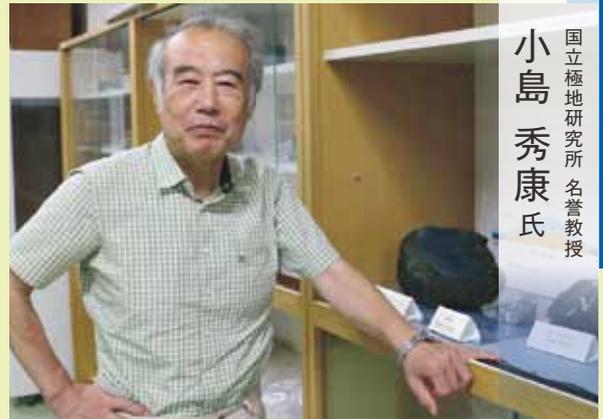
南極のやまと山脈は隕石が集まる場所ですが、昭和基地からは2週間かけて約300kmを移動します。天候によっては、雪



上車から一歩も出られない日もあります。隕石は肉眼で探します。小豆大から数十キロの大きなものまで様々です。世界各国の調査隊も探しているので、早い者勝ちです。これま



(左)南極での隕石採取の様子(右)南極で採取された月隕石  
(画像提供：国立極地研究所)



国立極地研究所 名誉教授  
小島 秀康 氏

でに約42,000個の隕石が南極で発見されていますが、日本隊は約17,500個を発見しています。

— 月隕石や火星隕石も発見したとうかがいました。

南極では35個の月隕石が発見されていて、そのうちの9個は日本隊が発見しました。火星隕石は198個で、南極で発見された30個のうち、13個が日本隊によるものです。

南極の隕石は雪に埋もれかけているものもあれば、氷の上にちょこんと置かれたようになっているものもあります。多くの隕石は黒っぽい色なのですが、月隕石は白っぽく見えて、何か違う、と直感しました。たくさんの隕石を見ているから、ピンときたのでしょう。

国立極地研究所には多数の隕石が保有されていますので、これらのデータベースを整理して、研究者が利用しやすい環境を整えていくことが必要だと思っています。

太陽は、核融合に関係する水素とヘリウムを除けば、太陽系初期の元素比率を残しているものと予想できる。実際に太陽大気とコンドライトの構成元素比を比較すると非常に一致していることが分かる(図2)。

一方、分化した隕石は、宇宙を漂っていた微粒子が衝突を繰り返して大きな小惑星に成長した際の熱や放射壊変による熱によって、溶融した経緯を持つ隕石である。コンドリュールを含まない「エコンドライト(achondrite:無球粒隕石)」、金属部分と岩石部分が混じり合った「石鉄隕石」、主に金属鉄で構成される「鉄隕石」に分類される。これらの隕石からは惑星形成の過程や、地球などの岩石惑星の構造の解明に役立つ情報が得られると期待されている。

### 隕石の宝庫、南極大陸

地球には10g以上の質量を持つ隕石が1日に100個程度落下していると見積もられている。しかし、その多くは海洋に落下していると考えられる。地球上で最も隕石が採集される地域が南極大陸である。国際隕石学会に登録されている隕石のうち

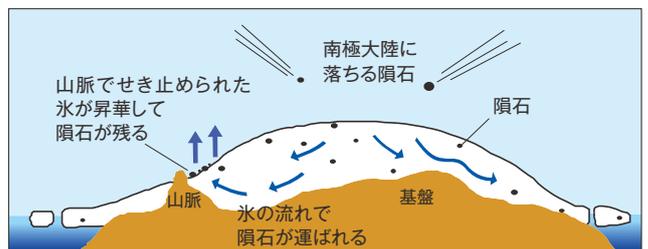
約70%が南極で採集されたものといわれる。

日本は、1969年の「やまと隕石」の発見以来、約17,500個の隕石を採集し、総重量は約2,500kgにおよぶ。中には月隕石や火星隕石も含まれている。

隕石が多く発見されるのは南極の山脈の内陸側で、昭和基地から南西へ300kmの地点にある標高2,000mのやまと山脈は数多くの隕石が発見されている地域である。

山脈の麓に隕石が集積するメカニズムについては、日本の調査隊が次のような仮説を提案している(図3)。南極の氷床に落下した隕石は、降り積もった雪に埋没していき、深く積もっ

### ●南極で隕石が採取しやすい理由(図3)



このような仕組みで、やまと山脈に隕石が集まると推測されている。  
(画像提供:国立極地研究所)

## 宇宙が形づくった ウイドマンシュテッテン構造

ウイドマンシュテッテン構造 (Widmanstätten pattern) とは、鉄隕石に見られる特有の構造で、700℃以上の熱い状態から、100万年に数度といったゆっくりと冷却されることにより生じる。

この紋様は、鉄-ニッケル合金である鉄隕石の中で成長したオクタヘドライト (八面体晶: Octahedrite) 系のニッケルの少ない結晶によるものでラメラ構造と呼ばれる。鉄の中に重量比5~15%のニッケルが含まれ、太陽系初期の成分のままだと推測されている。

鉄隕石以外に地球上ではこのような鉄-ニッケル合金の鉱物は発見されていない。地球形成の過程で親鉄性のニッケルは主に地球のコアに集まり、親石性もある鉄は地表面にとどまったと考えられる。現在の鉄鉱床は微生物による海の酸化により沈殿した鉄酸化物が集まったものと推測されている。



ウイドマンシュテッテン構造に特有の帯状の紋様が確認できる。(画像提供: 国立極地研究所)

た雪は圧力により氷床の一部になり、隕石は氷床に取り込まれる。氷床は標高の低い方に徐々に移動していくが、山脈などにせき止められた氷床の一部は上昇流を形成する。上昇した氷床の表面部分は強風による風化と日射による昇華により、隕石だけが氷床表面に残されることになる。

## 隕石の故郷を探る

これらの隕石はどこから飛来してきたのだろうか。多くの隕石は火星軌道と木星軌道の間にある小惑星帯から飛来したと考えられている。

小惑星はその反射スペクトルから、炭素質のC型小惑星、ケイ素質 (岩石質) のS型小惑星、金属質のM型小惑星などに分類されている。これらの反射スペクトルを隕石の反射スペクトルと比較すると、C型小惑星は炭素質コンドライトと、S型小惑星は石質隕石 (コンドライト) と、M型小惑星は鉄隕石と酷似していることが分かっている。

隕石の故郷となる小惑星が特定されている例もある。2011年、NASAの探査機「ドーン (Dawn)」が小惑星帯の中でも大きい小惑星「ベスタ (Vesta)」の調査を行った。ベスタは南極付近に大きなクレーターが存在することが知られており、調査では露出した小惑星内部の反射スペクトルが測定された。ベスタの反射スペクトルと一致するエコンドライトにはホルワダイト

(Howardite)、ユークライト (Eucrite)、ダイオジュナイト (Diogenite) があり、頭文字をとって「HED隕石」と呼ばれる。これらはベスタが過去に受けた大きな衝撃で破壊されたときの地殻の破片であると考えられている。

直接、小惑星からサンプルを持ち帰った例もある。2010年6月13日に世界で初めて、小惑星から表面の物質を地球に持ち帰ることに成功した日本の探査機「はやぶさ」である。はやぶさが向かったのは、S型小惑星の「イトカワ」で、持ち帰ったサンプルを分析した結果、コンドライトで構成されていることが明らかとなった。これにより落下する隕石の約90%を占めるコンドライトの故郷がS型小惑星であることが判明した。

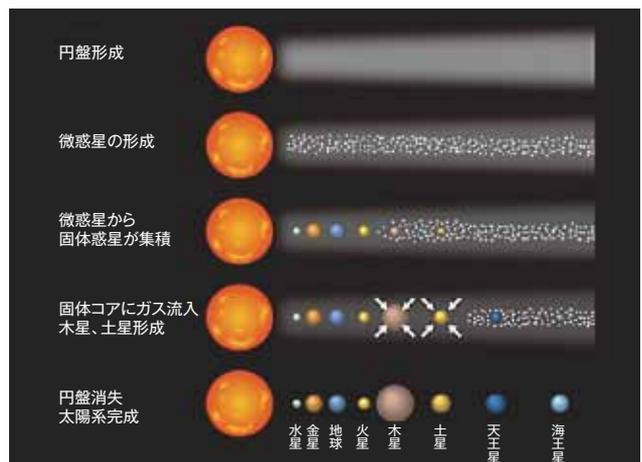
小惑星由来以外の隕石も存在する。南極で日本隊が発見した「Yamato-791197」と名付けられた隕石は、アポロ計画で持ち帰られた月の石によく似ていることから、月起源の隕石と同定された。これまでに311個の月隕石が発見されており、その研究成果は月の歴史の見直しにつながっている。

また、火星由来の隕石も発見されている。その根拠として、隕石の結晶が形成された年代が若く、長期間の火成活動が続くためには大きな天体であることが必要で、火星はその条件を満たしている。さらに、1976年に行われたNASAのバイキング計画 (Viking program) で測定された火星の大気組成と隕石に含まれるガス成分が一致したことにより火星起源と同定されている。

現在、日本の探査機「はやぶさ2」がC型小惑星の「リュウグウ (Ryugu)」に向かって飛行中である。リュウグウは有機物や含水鉱物を多く含んでいると考えられており、この調査によって、生命の起源に関する情報が得られるものと期待されている。また、NASAは小惑星「プシケ (Psyche)」を探査する計画を進めている。プシケは、鉄とニッケルからなる小惑星のコアがむ

### ●太陽系の惑星形成のモデル図 (図4)

太陽が生まれ、塵が集まり、小惑星や微惑星がほぼ同時期に生まれる。水が氷の状態では存在できない内側の軌道では、岩石惑星が生まれる。水が氷の状態では存在する軌道では、岩石と水が集まることで大型化し、ガス惑星を形成する。しかし、天王星などの外周の惑星は、惑星が成長する前にガス円盤が消失するため、氷の惑星を形成する。



(出典: 理科年表オフィシャルサイト(国立天文台・丸善出版))

## INTERVIEW

## 同位体測定が隕石研究を推進する

隕石の年代測定には、質量分析計を用いた放射性同位体分析が用いられる。国立科学博物館で隕石の年代測定などの研究に携わる米田成一博士にお話をうかがった。

— どのようにして年代測定を行うのでしょうか。

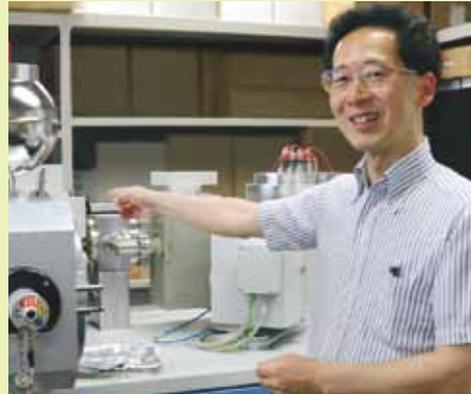
質量分析の技術は1940年代から急速に進歩して、現在数十種類の年代測定方法が用いられています。隕石中で発見された太陽系最古の固体の年代は45億6720万年(±60万年)と報告されています。

カリウム-アルゴン法、ルビジウム-ストロンチウム法、ウラン-鉛法、タングステン-ハフニウム法など様々な方法が用いられています。親核種がどのくらい減少したのかを測定するだけでなく、娘核種の安定同位体の比率を測定することで、正確な年代測定が可能になっています。

— 太陽系外に起源をもつ隕石もあるとうかがいました。

質量分析計の性能向上は、少量の試料の分析を可能にしたり、固体のまま分析することを可能にしました。隕石に含まれる微小な結晶の中には、超新星爆発で生成すると予想される結晶が発見されています。これはナノメートルサイズのダイヤモンドで、恒星の進化の仮説を裏付ける同位体比であることが分かりました。

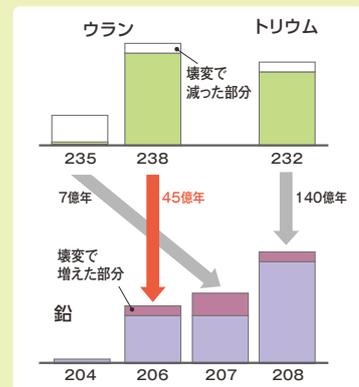
また、隕石中の微小結晶に加えて、微隕石(マイクロメテオライト: Micrometeorite)と呼ばれる非常に小さい隕石の研究が進んでいます。これらの微小結晶や微隕石の研究が進むことで、太陽系を構成する物質はどこからきたか、という謎を解明する糸口がつかめるかもしれません。



国立科学博物館  
理化学グループ長  
米田成一氏  
理工学研究所

## ●年代測定法の例

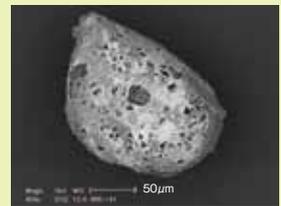
ウランの同位体U-238の半減期は約45億年で、壊変して鉛の同位体Pb-206になる。年代測定では、Pb-206の増加量を測定することが多い。壊変とは無関係のPb-204の量などと比較して、年代を推定する。



## ●マイクロメテオライトの走査型電子顕微鏡画像

分析技術の発達により、微小な試料の分析が可能になり、隕石から今後より多くの情報が得られることが期待される。

(画像提供: 国立極地研究所)



き出しになっている珍しいタイプのM型小惑星で、鉄隕石の起源や小惑星の中心核に関する新たな発見が期待されている。

## 隕石から明らかになる太陽系の歴史

隕石の分析などから、現在、太陽系の年齢は45億6700万年と推定されている。従来の太陽系形成のイメージは、生まれたばかりの太陽の周りに形成された塵とガスの回転円盤の中で、塵やガスが微小天体になり、微小天体が集まって微惑星に成長し、微惑星から固体惑星へ成長していくという直線的な進化の過程であった。その中で、地球内部が金属の中心核とマントル、地殻に分離し、表面がゆっくりと冷えていったのが約40億年前と考えられていた(図4)。

しかし、最近の隕石研究によって、約6億年をかけて、太陽系は粛々と形成されていったというイメージは覆され始めている。原始太陽でガスや塵の回転円盤を形成してから約1000万年という短期間で惑星が生まれ、その約3億年後には表面に

液体の水を湛えた地球が生まれていたというものだ。

これは、コンドライトと分化した隕石の結晶が形成された年代がほぼ同じであることなどから推定されている最新のシナリオである。また、恒星のごく近い軌道を周回する巨大ガス惑星「ホット・ジュピター(hot Jupiter)」などの発見により、太陽系の惑星軌道が現在の位置に安定するまでに、様々に変化した可能性も示唆されている。これまでに想像されていたよりも、太陽系はダイナミックに形成されたと考えられている。

このような太陽系の形成モデルが、実際に観測され始めている。南米チリの標高5,000mの高地に建設されたアルマ望遠鏡ではおうし座の太陽型原始星を観測して、原始惑星系円盤が形成されつつあることを発見している。隕石研究に加えて、他の研究成果と合わせることで、太陽系の起源や惑星系発達の仕組みが解明できるようになる。隕石研究が進むことにより、太陽系の形成過程、生命誕生の秘密、惑星系の起源など宇宙の謎が明らかになっていくことが期待される。

●取材協力 国立極地研究所、国立科学博物館 ●文 石田 亮一