

2億1,500万年前の巨大隕石衝突の 事実を解明

—ICP 質量分析と放射化分析による成果—



海老原 充

Ebihara Mitsuru

(首都大学東京大学院)

1 月のあばたは地球にも

我々の住む地球や月も含めて、太陽系は今から45.68億年前に、太陽系の原材料ともいべき原始太陽星雲からできたことが分かっている。少なくとも内惑星（地球より太陽に近い惑星）領域ではガスと微粒子からなる原始太陽星雲は一度加熱されてガス化され、その後冷却されて固体の微粒子が生成した。この時生成した物質の中で、カルシウムとアルミニウムに富む物質の生成年代が求まっていて、この年代を太陽系の年代（45.68億年）と呼んでいる。こうした太陽系最初期に生成した固体物質が幾多の変遷を経て現在の惑星にまで成長するわけであるが、その過程は衝突の歴史であるといっても過言ではない。地球を含めた惑星も太陽系形成過程の初期に起こった天体（小惑星）の衝突合体によってできたものである。

月の表面には多くのクレーターが存在することはよく知られている。このクレーターは、月にかつては火山があり、その噴火によってできたとする説もあったが、今では月の外から飛んできた物質が月の表面に衝突してできたものであることを疑う人はいない。こうしたクレーターは月に限られるものではなく、探査ロケットで撮られた写真で知られるように、固体表面を持つ惑星や衛星では共通に見られる事象である。このようなクレーターの多くは今から38

億年～40億年前に作られたものが多いことが知られていて、この時期を（あるいはこの前後を含めて）後期重爆撃期（late heavy bombardment period）と呼ぶ。この頃に境に太陽系空間を飛び交っていた小天体はその数が減少し、天体同士の衝突の機会が急激に減少したことが分かっている。

地球も小天体の爆撃に曝されていたことは言うまでもなく、月同様、かなりのクレーターが作られたはずである。しかし、現在の地球は青い惑星（blue planet）と呼ばれるように、月のようなあばた面ではない。地球は火山や地震による地殻変動が今でも続いているし、降雨・風雪によって地表面が浸食を受けているので、クレーターができて地質学的時間スケールとしては比較的短い時間のうちにクレーターの輪郭が崩れて、やがてあばた面が修復されてしまうためである。しかしながら、比較的最近できたクレーターは地球上でも観測されている。有名なものとしては、米国アリゾナ州にあるメテオールクレーター（meteor crater）がある。これは今から4万年前に落下した隕石によってできたクレーターで、幸い、砂漠に落下したために大きな被害はなかったであろう。クレーター形成後の保存状態も良く、観光名所になっている。

2 地球と隕石の違い

隕石は地球の外から地球に落下する固体物質で、“石”という文字がケイ酸塩主体の固体を想定させるが、金属からなる隕石（いわゆる隕鉄）もある。英語の meteorite は流星 meteor の語尾に鉱物名に使われる -ite を付加したもので、流れ星が地表に達したもの、ということの意味する。多くの隕石は今から 45 億年以上前に他の太陽系物質と一緒に形成されたことが分かっている。地球も隕石と似た物質から作られたことは間違いないが、それほど古い年代を持つ物質は得られない。これは、地球の原料物質は隕石物質同様、古い年代を持っていたが、地球上での火成活動のために古い年代値がリセットされ、年代値が若返ったためである。この地球物質と隕石物質の違い、つまり、隕石は生成以来ほとんど変質を受けていないのに対して、地球は大規模な火成活動による変質を受けているという違いは、その組成の違いにも大きく反映されている。

太陽系はその原物質となる原始太陽系星雲から造られたが、この物質の元素組成を太陽系の元素組成と呼ぶ。この組成は多くの元素で太陽の元素組成と近似的に等しい。これは、太陽の質量は太陽系の質量の 99% 以上を占めることから明らかである。地球に落下する隕石の大半はケイ酸塩主体の隕石（石質隕石）で、その多くは中につぶつぶの組織を持つ。このつぶつぶをコンドルール（球粒）と呼ぶが、このコンドルールを持つ隕石をコンドライト（質）隕石（球粒隕石）と分類する。このコンドルールの存在は隕石を特徴付ける最も顕著な特質であるが、その成因については諸説あり、まだ決着がついていない。このコンドライト隕石は年代的に非常に古いのと、多くの元素で太陽の元素組成に近い組成を持つことで共通している。つまり、このコンドライト隕石は太陽系の化石と呼んでも差し支えない物質である。中でも CI コンドライト隕石と分類される隕石はわずかな元素を除いて、太陽の元素組成、したがって太陽

系の元素組成とも等しく、正に太陽系の化石と呼ぶに一番ふさわしい隕石である。

一方、地球の元素組成は隕石の組成に比べて複雑である。地球の元素組成を直接求めることは事実上不可能で、現状では太陽系の元素組成、すなわち CI コンドライト組成から間接的に、幾つもの仮定をおいて計算により求められる。また、地球のような固体型惑星で共通する特徴であるが、いわゆる殻構造を持つので、垂直方向に大きな組成変化を示す。よく知られているように、地球の中心には金属質のコアがあり、その周りをケイ酸塩岩石層のマントルが取り囲み、その一番外を地殻と呼ばれる岩石層が覆う。こうした殻構造は地球誕生間もないときに起こった全地球規模での大熔融と、その後絶え間なく起きている火成活動によって作られたもので、その結果、元素の大規模な分配が生じた。一番顕著な分配は親鉄元素と親石元素に見られる。親鉄元素の代表として、例えば白金族元素（ロジウム、パラジウム、ルテニウム、オスミウム、イリジウム、白金）が挙げられるが、これらはその大半がコアに濃集しているので、地表では枯渇しており、その価値が高くなって貴金属と呼ばれるようになった。一方、その逆の傾向を示す元素が親石元素で、例えば希土類元素（レアアース）やウラン等である。レアアースは文字通り希少元素ではあるが、これでも地表上に大幅に濃縮しているのである。このように、地球の地殻物質と隕石の中で最もありふれたコンドライト隕石を比べると、地殻物質はコンドライト物質の $10^{-3} \sim 10^{-4}$ 程度の白金族元素しか含まない反面、 $10^2 \sim 10^3$ 倍のレアアースやウランを含むことが分かっている。

3 三疊紀後期の出来事

岐阜県さかほぎ坂祝町の木曾川河床から採取されたチャート（二酸化ケイ素 SiO_2 から成る堆積岩で、生物の遺骸が海中に堆積して形成されたもの）主体の岩石試料（写真 1）を古生物学、鉱物学、地球化学、宇宙化学の研究者がそれぞれの専門

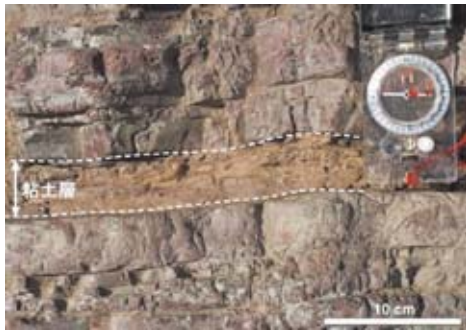


写真1 隕石衝突が記録された粘土層
粘土層の上下はチャート



写真2 カナダ・ケベック州のマニクアガン
クレーターの航空写真
クレーターの直径は約 100 km

の見地から調べた結果、このチャートに挟まれた粘土層が巨大な隕石衝突によって形成されたことが明らかになった。また、この粘土層とその上下のチャート中に含まれる微化石を調べた結果、この衝突が今から約2億1,500万年前の三畳紀後期に起こったことが分かった。この時期に作られたクレーターとしてカナダ・ケベック州のマニクアガンクレーター（写真2）が知られており、木曽川河床で見付かったチャート中の粘土層はこのクレーターを作った隕石の衝突によって放出された物質が堆積したものであると推定した。

次章より、この出来事の解明のために筆者らが行った地球化学的分析について述べたい。

4 ICP質量分析による隕石物質の検出

第1章で述べた通り、地球も月同様、これまで絶えず地球外物質の衝突を経験してきた。月と違って地球は生きているので、その衝突の痕跡の多くは時間とともに風化し、消えてしまった。しかし、地表物質と隕石はその化学組成が大きく違うので、形状が風化してしまっても、元素組成にその衝突の証拠が残っていることはある。特に、隕石に多く存在し、地表上に少ない元素、例えば白金族元素に着目すれば、その証拠をつかむことができる。本研究の目的の1つはこうした証拠を提示することである。コンドライト隕石中には白金族元素はそれほど枯渇していないとは言うものの、その存在量は隕石1g当たり 10^{-6} gかそれ以下で、濃度としては1ppm(1mg/g)以下である。したがって、それらが付加した証拠を明らかにするためには非常に高感度な分析法を用いる必要がある。また、信頼性の高いデータを得ることも重要である。本研究では、筆者らは誘導結合プラズマ質量分析(inductively-coupled plasma mass spectrometry, 以下ICP-MSと略)と中性子放射化分析(neutron activation analysis, 以下NAA)法を用いた。ここではICP-MSによる白金族元素の分析法について簡単に紹介する。

ICP-MS法は近年、微量元素分析法として最もよく利用される元素分析法である。通常、溶液試料を用いてアルゴンのプラズマガス中に噴射し、溶液中の元素をイオン化する。イオンは質量分析部に導入され、質量ごと(同位体ごと)に分けられた後にそのイオン強度を計測し、同位体比を求めるものである。同位体分離は四重極型と磁場型の2通りの方法があるが、本研究では前者の四重極型によるICP-MS装置を用いた。粘土試料中に含まれる白金族元素を硫化ニッケル中に抽出し、塩酸に溶解して不溶性白金族硫化物を分離した後、硝酸と過酸化水素で溶解し、適当な濃度に希釈後、ICP-MS装置に導入する。白金族元素のうちルテニウム、パラジウム、オスミウム、イリジウム、白金は

複数の安定同位体を持つのでそれぞれの元素の濃縮同位体を用いて、同位体希釈分析法で定量した。ロジウムは単核種元素なので、比較法で定量した。図1はICP-MS法で求めた粘土層中の白金族元素の濃度を太陽系の元素組成(=CIコンドライト中の濃度)との比較で示したものである。粘土層から採取された1試料(NH-52.2)からは特異的に高い濃度の白金族元素が検出され、また、その濃度はCIコンドライトの数十分の一程度で、どの元素もほぼ一様の相対存在度を示した。

かつて、今から6,500万年前に起こった恐竜絶滅を招いた原因として、巨大隕石衝突説と大規模火山噴火説が提出され、大きな論争になったことがあった。論争のきっかけは恐竜絶滅時期に対応する地層中にイリジウムが濃縮していることが見付かったことで、どちらの説もこの“イリジウム異常”を説明できるとした。その後、イリジウム以外にもほかの白金族元素の濃縮も確認され、その元素間の相対存在度がコンドライト隕石の値とほぼ等しいことが分かり、隕石衝突説に軍配が上がった。“イリジウム異常”という表現は今でも使われるが、イリジウムの分析値だけでは地球外物質の存在を議論するのに十分な証拠とはならない。その意味で、ICP-MSによるデータは本研究で決定的な意味を持つことになった。

5 中性子放射化分析による隕石物質の検出

中性子放射化分析法は隕石試料の元素分析に最も適した分析法と言っても過言ではなく、第2章で述べた太陽系の元素組成の多くの値は中性子放射化分析によって求められている。中性子放射化分析は周期表上のほとんどの元素を定量できるが、特に原子番号の大きな元素に高い感度を持つ。白金族元素もそうした元素群であるが、とりわけイリジウムに対する感度は非常に高い。中性子放射化分析では分析試料に中性子を照射し、試料中の安定核種との間で核反応を起こし、生成した放射性核種の壊変によって

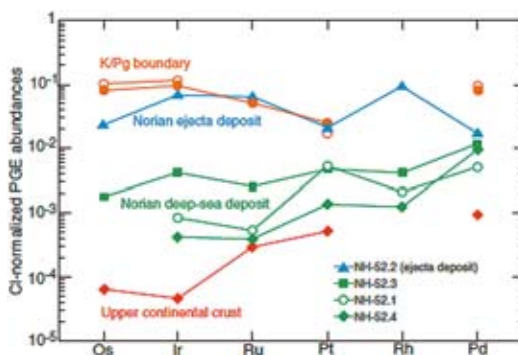


図1 白金族元素の存在度

縦軸はCIコンドライト隕石の値に対する相対値。
NH-52.2は粘土層の中でも隕石物質の寄与が最も大きい試料
K/Pg boundaryは恐竜絶滅時の境界地層、Upper continental crustは地球表層(地殻)物質を表わす

放出される放射線を測定して、安定核種の定性・定量を行う核種分析法である。天然における同位体組成が一定であるという条件の下では、核種分析を元素分析と置き換えて考えることができる。1970年代以降、ゲルマニウム半導体検出器が普及して以来、測定する放射線としてγ線を利用することが一般的になった。中性子とγ線は共に物質に対する透過能が高く、また、ゲルマニウム半導体検出器のエネルギー分解能が高いので、小さな試料であれば試料に化学操作を加えずに、非破壊で元素分析できるようになり、中性子放射化分析は分析法として大きな飛躍を遂げた。研究用原子炉は安定した中性子源として中性子放射化分析に最もよく利用されてきたが、検出器の普及と相反して、利用できる施設が時代とともに少なくなっている。これは世界の趨勢でもあるが、日本においては現在、京都大学原子炉実験所の研究用原子炉1基のみ稼働しているという危機的状況にある。

本研究では堆積物試料中のイリジウムを中性子放射分析法で測定した。イリジウムには¹⁹¹Irと¹⁹³Irの2つの安定同位体があるが、¹⁹¹Ir(n, γ)¹⁹²Irの中性子捕獲核反応を利用の方が感度の

点で有利である。生成する ^{192}Ir の壊変に伴ってエネルギーの異なる多数の γ 線が放出されるが、通常はこの γ 線を1台のゲルマニウム半導体検出器で測定する。本研究では複数のゲルマニウム半導体を組み合わせた多重 γ 線測定装置を利用して測定した。この装置は回路に工夫が凝らされていて、 ^{192}Ir の壊変によって放出される複数の γ 線のうち、特定の2本のエネルギーの異なる γ 線がいずれかの検出器で同時に検出されたときだけ、シグナルとして計測する仕組みになっている。放射線の計測には通常、バックグラウンドと呼ばれるノイズがつきものであり、本来のシグナルとの比（いわゆるS/N比）を大きくすれば測定の感度が良くなる。隕石衝突の記録を留めていると思われる粘土層中のイリジウム濃度は約40 ppb (40 ng/g)と求まり、ICP-MSの値と整合した。この粘土層の上下のチャート中のイリジウム濃度は約0.2 ppb (0.2 ng/g)と粘土層の値に比べて約2桁低く(図2)、粘土層には明らかにイリジウムに富む物質が加わったことが確認された。1 ppbを下回る濃度範囲の定量値が非破壊的に求められるのは多重 γ 線測定装置ならではのものである。

6 終わりに

第4, 5章で述べたとおり、筆者らはチャートに挟まれた粘土層中の元素組成から、この粘土層中に隕石に代表される地球外物質が含まれることを明らかにした。また、古生物学の研究者はこの粘土層の堆積した年代を粘土層を挟む上下地層中の微化石を観察して推定し、鉱物学の研究者はこの年代と粘土層中の地球外物質の存在から、粘土層を作ったイベントを割り出し、その地球外物質の衝突イベントによって地球環境にどのような変化が起こったかを推定した。このように幾つかの、一見ばらばらに見える情報を論理的に組み立てて、地球と地球外物質の関わりを明らかにし、その結果として、衛星からでないこと確認できないような巨大クレーターが形成され、地球上に生態環境の大きな変

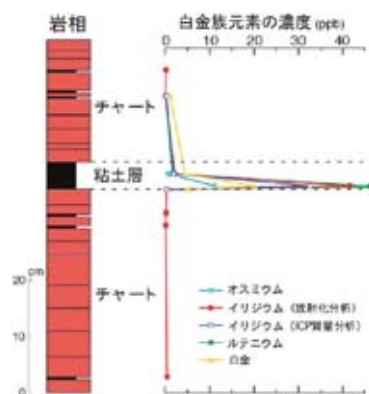


図2 地層中の白金族元素の垂直変化
粘土層に特異的に白金族元素が濃集している

化が引き起こされたことまで説明できたことは、正に地球科学研究の醍醐味といえよう。

本稿執筆中の2月15日にロシアに落下した隕石(チェバルクリ隕石)は世界中を驚かせた。回収された隕石の量はわずかであり、その落下由来と考えられるクレーターの大きさも本稿で述べたカナダのマニクアガンクレーターとは比べものにならないくらい小さなものである。逆に、あの程度の隕石落下ですらあれだけの影響をもたらしたことを考えると、マニクアガンクレーターを生んだ隕石衝突が地上の生態系を変えてしまったことも理解できようというものである。今から6,500万年前の恐竜絶滅がやはり大きな隕石の衝突によって引き起こされたこともほぼ定説となってきた。歴史に“もし”は意味のないことと言われるが、しかし、もしこうした隕石衝突がなかったら人類が今この時に存在しなかったかもしれないし、また、もし別の大きな隕石が有史以降地球に衝突していたら、現在の社会の姿は異なっていたに違いない。一方で、隕石衝突が生命体を地球にもたらしたとの説も有力視されている。地球と地球外物質の関係は偶然に支配され、我々人類の誕生もそうした偶然の結果であると考え、感慨深いものがある。