



Title	同位体顕微鏡で覗く太陽系の起源
Author(s)	塚本, 尚義
Description	特集 : 複雑な物質・材料解析への新たなアプローチ
Citation	金属, 78(11), 1024-1028
Issue Date	2008
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/48593
Type	journal article
File Information	metals.pdf



同位体顕微鏡で覗く太陽系の起源

坂本 尚義

最近、隕石中に太陽系誕生以前の物質が含まれていることが明らかになった。この物質は化学組成からでは判別することができず、同位体組成によってのみ特定できる。この物質の研究を進めることにより、太陽系の起源でとぎれていた我々の歴史が宇宙史の中に位置づけられる日が来るだろう。

はじめに

天然に存在する元素は90種類を超える。この多成分系の中で種々の結晶が生成、消滅を繰り返しているため、天然結晶(鉱物)中には多数の元素がいろいろな濃度で含まれている。また、一つの元素には通常複数の同位体があり、その同位体比も変動している。したがって、これらの組み合わせは膨大な数になるため、化学組成と同位体組成が全く等しい鉱物を見つけることは事実上不可能である。この意味で鉱物とその集合物である岩石は複雑な物質を代表するものである。

これらの鉱物や岩石を分析し、その結果に物理化学的解析をくわえ、その生成環境と時間変動を決定するのが、地球化学の方法論である。そのため、複雑な物質を分析する多くの分析・解析法が開発されてきた。ここでは同位体顕微鏡という筆者らのグループで開発されてきた分析法で隕石を観察すると、今まで普通の鉱物とされていたものの中に、太陽系誕生前の時代に生まれていた鉱物が混じっていることが判明したことについて紹介する。

隕石：太陽系最古の天体の破片

地球は約46億年前に誕生したと言うことは現在ではほぼ常識となっている。しかし、地球が46億

年前に生まれたことを直接示す証拠がないことは一般にはあまり知られていない。

地表を覆う岩石の年代とその面積の関係を図1に示す。岩石は主に火山活動によりつくられるため、火山活動が活発な時代は岩石が多くつくられる。例えば、地球において5億年前や10億年前に岩石分布頻度のピークが現れているのはそのためである。地球のもう一つの特徴は20億年前あたりより古い岩石が徐々に少なくなっている。これは地表の浸食作用や風化作用により古い岩石がどんどん壊されていった結果である。現在のところカナダ北部のハドソン湾近くに露出する43億年前の岩石が世界最古の岩石である。また、鉱物では44億年前のジルコンが一粒、オーストラリアの約30億年前の地層から2001年に見つかった。このこと

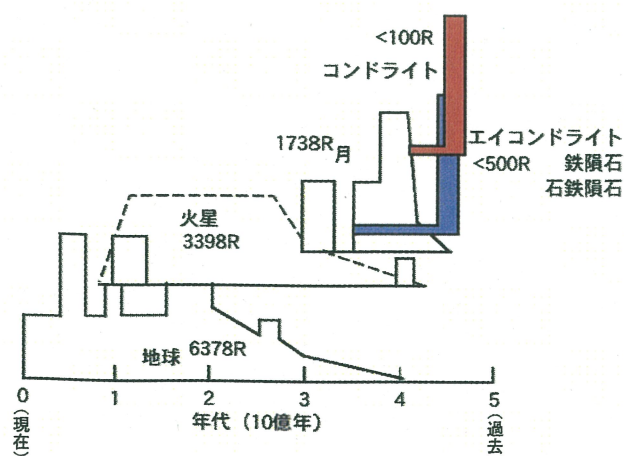


図1 太陽系天体の岩石の形成年代とその頻度分布。図中の数字は天体の半径 (km)。

は地球では新しい時代の地質活動により古い時代の物質がどんどん壊されていくので、地球が誕生したときの岩石を探すことは難しいためであり、現在やっと44億年前の物質までたどり着いたところである。現在でもそれ以前の物質が現存しているかどうかは定かではない。つまり、地球の年齢は44億年より古いというのが、現時点での直接の証拠である。そこで地球の年齢46億年は、次のようにして推測されている。

人類が現在手にしている地球以外の天体の試料は火星、月、隕石である。これらの試料の年代測定は現在も進行しているが、これまで次のことが判明している。

火星では、大きく分けて2種類の年代が報告されている(図1)。一つは約10億年前、もう一つは40~45億年前である。一方、月では30億年~40億年前の岩石が多く分布している。月の40億年より古い岩石は大きな割合ではないが、地球に比べるとその量ははるかに大きい。これは、火星や月では地球より古い時代に地質活動が終焉しているためより古い岩石が壊されないで残っているためである。

地質活動が終了する時間は天体の大きさと関係しており、小さい天体ほど早く終焉する。隕石は半径500km以下の天体の破片が地球に落下したものである。隕石にはコンドライト、エイコンドライト、鉄隕石、石鉄隕石などの種類があるが、どの隕石も約46億年という年代をもつことが知られている(図1)。46億年より古い年代をもつ隕石は一つも発見されていない。地球やその他の惑星も隕石が集まってできたと考えられているので、隕石で求められた年代が地球誕生の年代に相当していると考えられている。

隕石の中でもコンドライトと呼ばれる隕石は他の天体の岩石にはみられない特異な特徴を持っている(図2)。肉眼ではmmサイズの物体が細粒のマトリックスに埋まっている構造をしている。コンドライトを薄片にしてみると、これらmmサイズの物体は結晶の集まりであることがわかる。この物体は2000℃近い温度で岩石成分が熱せられた環境で形成したことがわかっている。その周りのマ

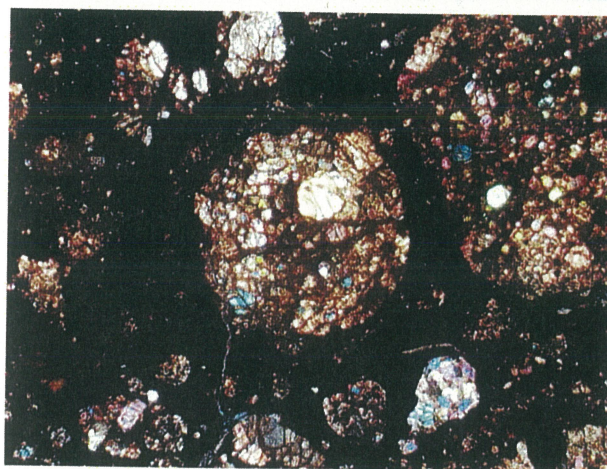
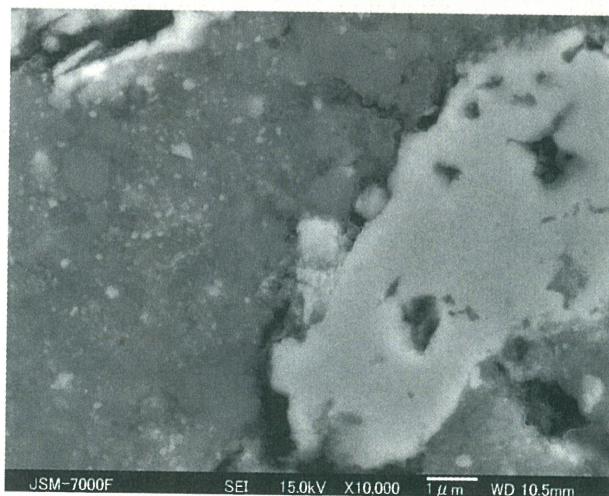


図2 拡大率の違いによるコンドライトの写真。上：マクロ撮影(横幅5cm)、中：偏光顕微鏡写真(横幅3mm)、下：電子顕微鏡写真(横幅10μm)。

トリックスは極細粒であるため顕微鏡下でも不透明である。電子顕微鏡で観察すると、マトリックスはnmサイズからμmサイズの結晶により成り立っていることがわかる。結晶と結晶の間にはアミノ酸などの有機物も介在している。アミノ酸は100℃以上の温度では分解してしまうため、コンドラ

トの温度は形成以来100℃を越えていない。したがって、コンドライトを構成している物質はコンドライト形成時にできたものではなく、元々別の所でつくられていた物質が物理的に集合した結果コンドライトになったということを物語っている。これが46億年前のことである¹⁾。

コンドライトになる前はそれらはバラバラで宇宙空間に漂っていた。この宇宙に漂っていた物質の起源については未だほとんど理解されていないため、46億年前以上前の宇宙の歴史の理解については物証に基づいたものではなかった。

同位体顕微鏡

コンドライトは46億年以上前の宇宙空間に漂っていた物質の集合により形成されたので、コンドライト中で隣り合っている結晶でさえ因果関係をもっているのは特別な場合であり、基本的には別々の独立した関係である。したがって、ナノメートルサイズに至る小さな個別の結晶を分析し、そ

の分析結果だけから結晶の起源を決定しなければならない。このようなことが可能になれば、46億年より前、つまり、太陽系ができる前の宇宙の歴史と太陽系の歴史のつながりが理解できるようになる。

この分析法の確立は、現在でも十分とはいえないが、その第一歩が筆者らが推進している同位体顕微鏡の開発である²⁾。同位体顕微鏡を用いると視野約100μmの領域の同位体分布をサブミクロンレベルの分解能で観察することができる(図3)。次節では、同位体顕微鏡によりコンドライトを観察した結果判明した成果の一例を紹介しよう。

太陽系をつくった原材料物質：プレソーラー粒子

図4にコンドライトのマトリックス部の酸素同位体分布について同位体顕微鏡を用い観察した例を示す。酸素は宇宙で3番目に豊富にある元素である。また、酸素は地球をつくる全元素の内飛び抜けて多く、その存在度は50%をはるかに越える。したがって、酸素の生い立ちを探ることは地球や

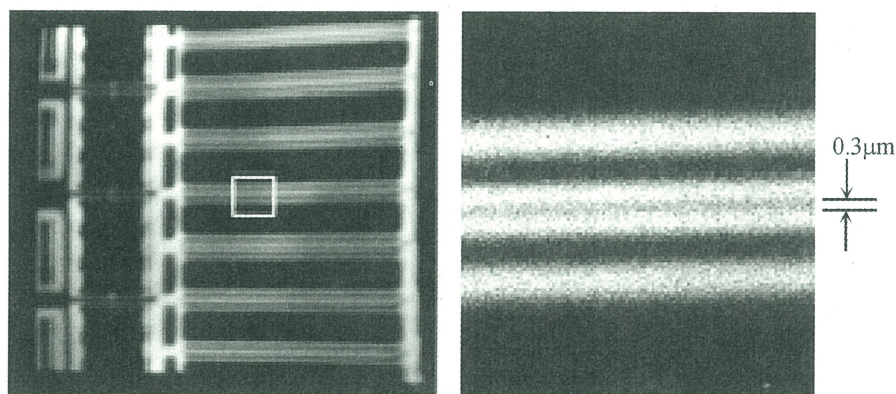


図3 同位体顕微鏡による半導体のSiO₂パターン。¹⁶O二次イオンのイメージ。右図は左図の四角部の拡大。

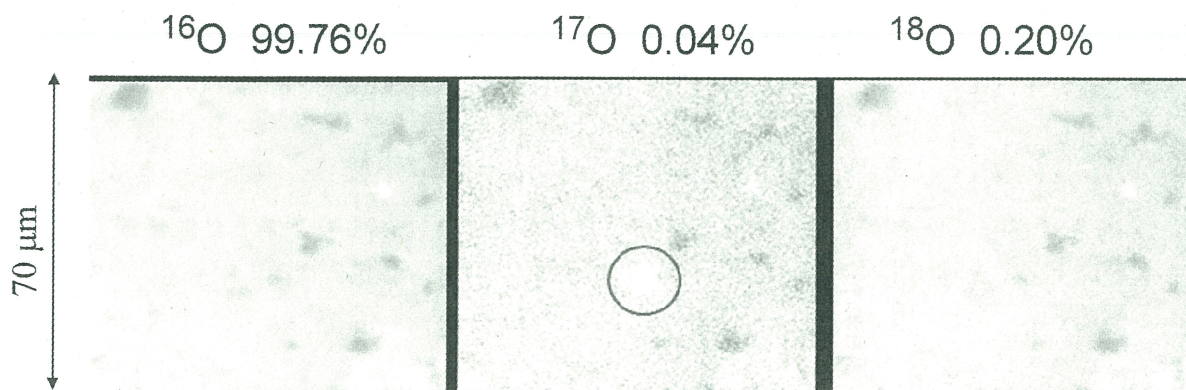


図4 コンドライト(Adelaide隕石)のマトリックス部の酸素同位体分布。¹⁷O図の中央丸印部に他の図にはみられない輝点があることがわかる。この輝点がプレソーラー粒子の存在場所を示す。

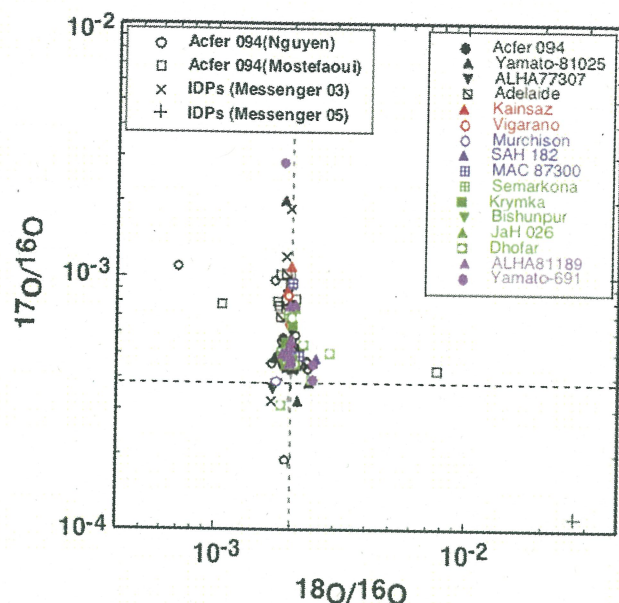


図5 種々のコンドライトから発見されたプレソーラー粒子の酸素同位体組成。点線の交点は地球上の酸素同位体比の値を示す。

惑星の起源を探ることに他ならない。

酸素には3つの同位体があり、地球におけるその同位体存在度は $^{16}\text{O} : ^{17}\text{O} : ^{18}\text{O} = 99.76 : 0.04 : 0.20$ である。 ^{16}O 図にみられる濃淡はマトリックスを構成する結晶固有の酸素濃度が鉱物間で異なるために現れるものである。もしすべての結晶が一定の同位体比をもっているのならば他の酸素同位体図においても同様な濃淡パターンが現れる。事実、同じ濃淡のパターンが ^{18}O 図にみられているので、 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 比はすべての鉱物において等しいことを示している。

一方、 ^{17}O 図には中央丸印部の1点を除き、同様の濃淡パターンがみられている。しかし、丸印部に輝点が存在している。これは、この部分の結晶にだけ ^{17}O 成分が著しく濃縮していることを示す。このような大きな同位体変動は、地球上はもちろん隕石においてもこれまで観察されたことはなかった³⁾。このような大きな同位体変動をもつ結晶はマトリックスの結晶粒の数十万個に一つの割合で含まれており、現在までにいろいろなコンドライトから総数で100個近い数が発見されている(図5)。

このような大きな同位体変動をもつ粒子はプレソーラー粒子と呼ばれており、その起源は46億年



図6 図4の輝点部にある結晶の電子顕微鏡写真。この結晶は輝石と呼ばれる結晶である。

前までに消滅してしまった恒星に起因するものであると考えられている。なぜならば、元素合成以外でこの大きな同位体変動を引き起こす現象は考えにくく、ビッグバン後の水素合成以来、宇宙の元素合成は主に恒星内部で起こっているからである。

大多数のプレソーラー粒子の同位体変動は図4にみられるのと同様な ^{17}O 成分の過剰をもつ。 ^{17}O 成分の過剰をもつ酸素は、AGB星においてつくられると考えられている。AGB星とは恒星の種類の一つで、太陽程度の質量をもつ恒星が終焉を迎える一歩手前の段階の星である。太陽の場合、約50億年後に一生を終え終焉を迎えるわけであるが、その時、太陽は現在の主系列星からAGB星に進化している。AGB星は自身を構成している物質の大部分を周りの宇宙空間に放出し、その一生を終える。 ^{17}O 成分の過剰をもつプレソーラー粒子はこの放出ガス中で形成されたと考えられる。つまり、太陽系をつくった原材料物質は46億年より以前に消滅してしまった恒星の残骸であることがその同位体比より実証されたのである。

図6は図4の輝点部領域の電子顕微鏡写真である。輝点部には約 $1\mu\text{m}$ の大きさの輝石という鉱物名の結晶が存在していた。輝石は地球上にも普通にある鉱物で珍しいものではない。プレソーラー粒子として見つかった輝石以外の鉱物はかんらん石等であり、これらも地球上に普通に産する鉱物である。鉱物名は化学組成と結晶構造によりつ

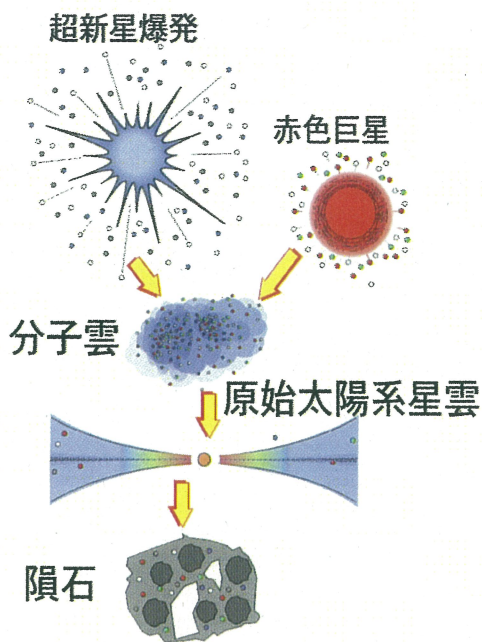


図7 プレソーラー粒子から隕石までの歴史の模式図

けられるわけであるから、宇宙でできたプレソーラー粒子といえども、特別な鉱物ではない。しかし、その同位体比が分析できたので、初めてそのアイデンティティが示されたのである。

おわりに

銀河の中で恒星が誕生し死んでいくという現象がこれまで何回も繰り返されてきた。新しい恒星は前の世代の恒星の残骸を材料にしてつくられる。恒星内部では新しい元素がつくられていくため、新しく生まれる恒星の化学組成と同位体組成はどんどん変化していく。太陽系のような惑星系はこの恒星の輪廻の中で恒星誕生に伴う副産物としてつくられる。したがって、太陽系最古の天体である隕石の中に前世代の恒星の残骸からつくられたプレソーラー粒子が見つかったことは当然の結果であるといえるかもしれない(図7)。しかし、この発見により次の不思議な点が浮かび上がった。

恒星には太陽のような大きさの星も多いが、太陽よりずっと重い星もある。重い星は太陽より寿命が短く、超新星爆発という華々しいイベントでその最期を遂げる。超新星爆発の残骸からできる粒子の酸素同位体組成は ^{17}O に乏しいと考えられている。だから、AGB星起源のプレソーラー粒子と超新星起源のプレソーラー粒子が足しあわされて太陽系がつくられることにより地球で観測される酸素同位体比を再現できる。しかしながら、今まで超新星起源と思われる酸素同位体比をもつプレソーラー粒子の発見は多くない(図5)。なぜ超新星起源のプレソーラー粒子が期待されるほど発見されないのか不思議である。

さて、プレソーラー粒子は何年前にできていたのだろうか？ その年代は46億年より古いことは疑いがないだろうが未だ測定に成功した人はいない。宇宙の年齢は137億年、太陽系誕生は宇宙誕生後91億年後の現象である。プレソーラー粒子の年代を測定できれば太陽系の素になった星々の歴史を知ることができる。これは銀河の歴史を知る第一歩でもある。

同位体分析の進歩により隕石の中に太陽系の歴史よりも古い鉱物が潜んでいることが明らかになってきた。この古い鉱物を研究することにより我々の知の探求の最前線は太陽系誕生の時代を越え、さらに古い時代へと広がっていく。

参考文献

- 1) 松田准一・坂本尚義共編：宇宙・惑星化学，培風館（2008）。
- 2) 坂本尚義：顕微鏡，41（2006），134。
- 3) K. Nagashima, A. N. Krot, H. Yurimoto: Nature, 428（2004），921。

ゆりもと・ひさよし YURIMOTO Hisayoshi

1985 筑波大学大学院博士課程地球科学研究科修了，筑波大学地球科学系助手，講師，東京工業大学理学部助教授を経て，北海道大学理学部教授，現在に至る。理学博士。専門：宇宙化学。