HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	地球・太陽系の起源を探る ： 石になった星
Author(s)	圦本, 尚義
Citation	学術月報, 59(3), 173-178
Issue Date	2006-03
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/28232
Type	journal article
File Information	y59-3.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

地球・太陽系の起源を探る―石になった星―

Towards decoding of the presolar history

圷本尚義
北海道大学大学院理学研究科　教授

１．太陽系と星間物質

私たち地球を含む太陽系の形成は宇宙空間の希薄なガスと微粒子（星間物質）が自己重力で収縮することにより始まった。その物質の大部分は中心に集まり太陽を形成し，わずかに残った物質が太陽の周りを円盤状に取り巻いた。この円盤中で微粒子が集まり最初の天体を形成した。地球などの現在の惑星は，この天体同士が合体するプロセスを何度も繰り返して成長した何世代も後の天体である。天体同士が合体成長する過程で、衝突エネルギーが解放され、大きくなった天体では溶融がおこった。したがって，現在の太陽系に存在する地球のような惑星においては、太陽系を作った原材料である星間物質はすべて別の新しい物質へ変化してしまった。しかし、円盤中で最初に集積した小天体（微惑星）は溶融しておらず、その結果、太陽系を作った星間物質が現在までそのままの状態で生き残っているかもしれない。

太陽系最古の年代（46 億年）はコンドライトと呼ばれる隕石中から見つかっている。コンドライトは地球に落下する隕石の約 80%を占め、昨年、日本の惑星探査機「はやぶさ」が着陸した小惑星「イトカワ」もコンドライトにより構成されている小天体と考えられている。コンドライトは数 10km の大きさをもっていた天体の破片と考えられており、形成後、一度も溶融したことが無い天体である（図１）。1987 年、米国のシカゴ大学とワシントン大学の研究者達が、コンドライト中から生き残っている星間物質を初めて分離することに成功した[1)]。しかしながら、発見された星間物質は炭化ケイ素やグラファイトのような炭化物であり、地球のような惑星の主要成分であるケイ酸塩化合物（鉱物）から星間物質を示すシグナルを見つけられなかった。もちろん，コンドライトの大部分の体積はケイ酸塩鉱物により占められているのだが。

２．星間物質とスターダストと同位体

ここで，星間物質を示すシグナルとは何か説明しておこう。それは同位体比である。固体の星間物質は年老いて死にゆく恒星の周りで恒星から放出される高温ガスが凝縮することにより作られると考えられている。一生を終える星はその最期に自分自身の高温ガスを宇宙空間に放出する。つまり、星間固体物質は星のかけら、スターダスト、なのである。このとき生産されるスターダスト

の種類は恒星のもつ酸素／炭素比により全く異なる。この比が約１より大きいとケイ酸塩鉱物を主とする酸化物ができ，逆に１より小さいと炭化物ができる。太陽系の平均組成はこの比が 1 より大きいので、その形成にあたり炭化物よりケイ酸塩鉱物の星間固体物質が多く集められたはずである。

一方，恒星内部では元素合成がおこっており、恒星の種類により元素の同位体存在度が著しく異なっている。つまり，スターダストの同位体比によりそれを作った恒星の種類がわかる。太陽系の同位体存在度は一つの恒星由来の元素からではうまく説明できず，たくさんの種類の恒星からやってきた元素が混じり合った平均値であることが知られている。これは，太陽系の原料になった星間物質がたくさんの恒星から由来していることを示している。従って，単純にいうと，地球と異なる同位体比をもつ鉱物は星間物質であり，その同位体比は一つではなく色々な値を示すはずである。

地球がケイ酸塩鉱物からできているということは，太陽系の原料は炭素より酸素が多い恒星からの寄与が大きかったことを示唆している。しかしながら，コンドライト中のケイ酸塩鉱物からはスターダストのシグナルは見つかっていなかった。これは太陽系形成当時、太陽の周りの円盤が高温だったため，天体ができる前にケイ酸塩スターダストが破壊されてしまったことを示すのだろうか？1970-1980 年代にはこの高温円盤モデルが信じられていた。しかし，そうだとするとこの円盤は酸化的になるため，炭化物は速やかに酸化し蒸発してしまう。これは，炭化物のスターダストがコンドライト中に残っていることと矛盾する。どこかにケイ酸塩スターダストがあるはずである。

３．同位体顕微鏡によるケイ酸塩スターダストの発見

ケイ酸塩スターダストが見つからないのであるならば，その理由は、存在確率が非常に小さいので今まで誰も見つけられなかったのか，または，微粒子でよく混ざっているため従来の分析法では平均化されてしまって見つけられなかったかのどちらかである。あるいはその両方かもしれない。そう考えた筆者たちのグループは，サブ μm の空間分解能を持ち，同位体比の 1/1000 の違いを検出できる顕微鏡を考案し，その開発に取りかかった[2, 3]。約 20 年前のことである。

約 5 年前に同位体顕微鏡がほぼ満足できる性能に達し，2 年間の分析法開発のあと，隕石中のスターダストサーベイに取りかかったのは 3 年前の初夏のことである。我々は，コンドライトの中でもより始原的と考えた約 100nm の微粒子の集合部分の酸素とケイ素の同位体比を，同位体顕微鏡を用い，丁寧に分析を続けた。そして，ある秋晴れの朝，ポスドクの永島君が眠そうな目でニヤニヤしながら部屋に入ってきた。彼は、現在の同位体顕微鏡を開発した主力メンバ

ーの一人である。「明け方（スターダストが）一粒ありました。^{17}O の同位体異常です。（図２）」この同位体異常を示す領域を電子顕微鏡で精査してみるとその中心に確かにケイ酸塩の微粒子が存在していた（図３）。隕石中からケイ酸塩スターダストを、しかも、その場分析で同定した世界で初めての例であった[4]。

４．ケイ酸塩スターダストの特徴

現在までに，15 種類のコンドライトが精査され、見つけられたケイ酸塩スターダストは 79 粒になった。その平均的なサイズは約 300nm であり，最も大きなもので 1μm である。いずれのスターダストも大きさと元素組成がほぼ等しい微粒子中に埋没しているため，同位体比以外の特徴のみがスターダストを識別する唯一の手がかりである。ケイ酸塩スターダストの存在確率は予想通り大変小さく，コンドライト中の微粒子百万個に数個の割合であった。しかしながら，百万分の一の存在確率は炭化物のスターダストに比べると大きい値である。このことは，太陽系の原料としてケイ酸塩鉱物の星間物質が固体成分の中で最も多量であったとする予想と調和的である。

今回発見されたスターダストの多くは，大きな ^{17}O の正の同位体異常と小さな ^{18}O の異常をもち（図４），ケイ素同位体には有意な同位体異常は見つからなかった。このような特徴は，スターダストの多くは赤色巨星に由来していることを示している。赤色巨星は太陽と同程度の質量をもつ恒星の年老いたフェーズである。

５．開かれた先太陽系史への扉

太陽系の平均元素組成から、太陽系の原料として最も普遍的であると考えられていたケイ酸塩スターダストの存在が隕石中から実証されたことは，我々の系図の源を、地球誕生を遡り、太陽系誕生時代以前の歴史（先太陽系史）へと直接つなぐことができる物証を人類が手にしたことを意味している。太陽系誕生時に起こった激しい活動（これもベールに包まれた興味ある現象であり，我々もこの解明に躍起になり研究を進めているのであるが）によりスターダストの大部分は壊されてしまったが，一部は生き残っていたのである。この先太陽系史解明への扉は現在のところ全開の百万分の一という小さな隙間しかないが、そのわずかな隙間から扉の向こうに如何に踏み出すかが今後の課題である。そのためにまず解明しなければならない課題をあげて本稿の結びとしよう。

何故，赤色巨星由来のスターダストばかりが見つかるのか？理論上は超新星起源のスターダストもほぼ同数あっても良いのである。スターダストは太陽系誕生の何年前にできたのか？前者の疑問に答えるためには，現在見落としてい

るかもしれない 100nm 以下の大きさのスターダストの存在度と同位体組成を調査する必要がある。また、後者の疑問に答えるためには、10 nm 領域の年代測定を行う必要がある。そのために、nm レベルの分解能を持つより高感度に進化した新しい同位体顕微鏡の開発に挑戦し、先太陽系史のフロンティアを開拓して行きたい。

参考文献

1) 甘利幸子 (1995) 隕石に閉じ込められた星間塵. 科学 **65**, 79-87.

2) 坂本尚義 (1997) 同位体顕微鏡. 科学 **67**, 561-567.

3) Yurimoto, H., Nagashima, K. and Kunihiro, T. (2003) High precision isotope micro-imaging of materials. *Appl. Surf. Sci.* **203-204,** 793-797.

4) Nagashima, K., Krot, A. N. and Yurimoto, H. (2004) Stardust silicates from primitive meteorites. *Nature* **428,** 921-924.

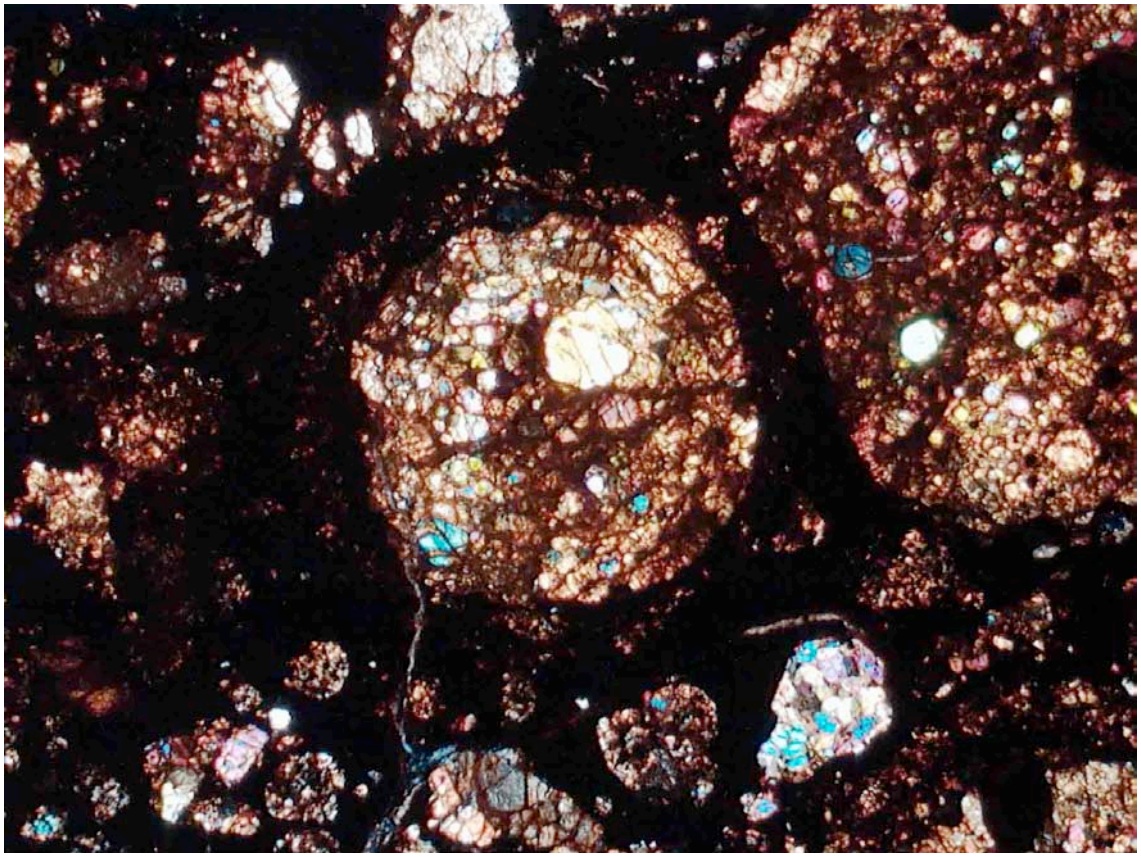

図１　コンドライトの光学顕微鏡写真。透明な部分は主にかんらん石というケイ酸塩鉱物。黒い部分も主にかんらん石からなっているがその一粒一粒の大きさが 100nm の微粒子のため不透明となっている。このような組織はこの岩石が一度も溶融したことが無いことを示している。スターダストは黒い微粒子部分

に含まれる。中央の丸い組織の直径が約 1mm。

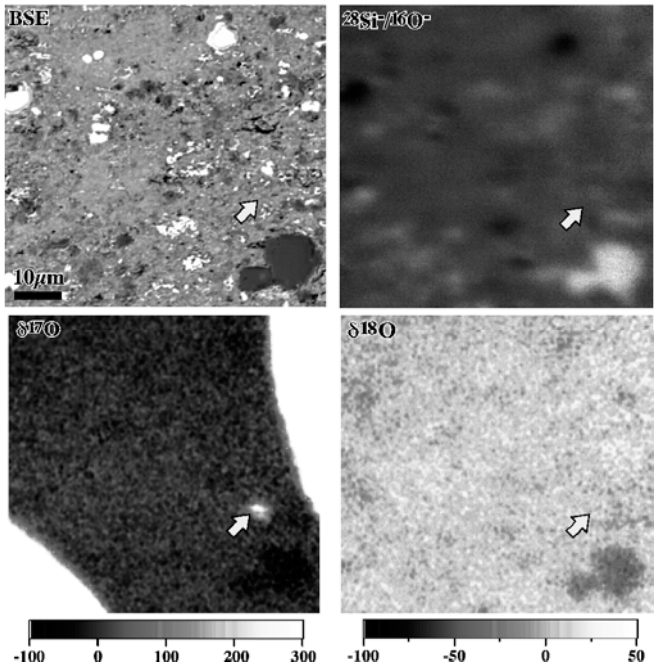

図２　ケイ酸塩スターダスト（矢印部分）の反射電子像（左上）とそれに対応する領域の同位体顕微鏡画像。この画像領域は図１の黒い部分の一部（70 μm 四方）。^{17}O の同位体異常がホットスポットとして現れている。他の同位体画像にはこのような極端なホットスポットは見られない。

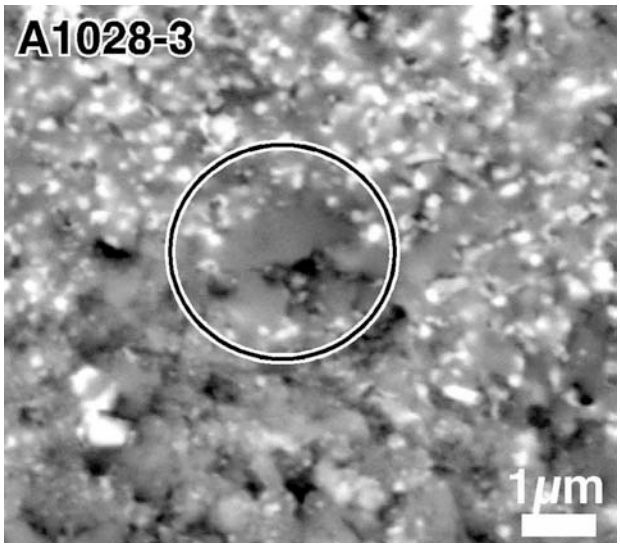

図３　図２の同位体顕微鏡画像のホットスポット部分の高倍率電子顕微鏡画像。中央円内に約１ミクロンのケイ酸塩スターダスト結晶がみえる。このスターダ

ストは見つかっているうちで最大級のもの。他のスターダストは 100nm の大きさである。この結晶はかんらん石という鉱物。かんらん石は普通に地球にも存在する鉱物であるが，このカンラン石は地球のものと比べ酸素同位体比が著しく異なる。

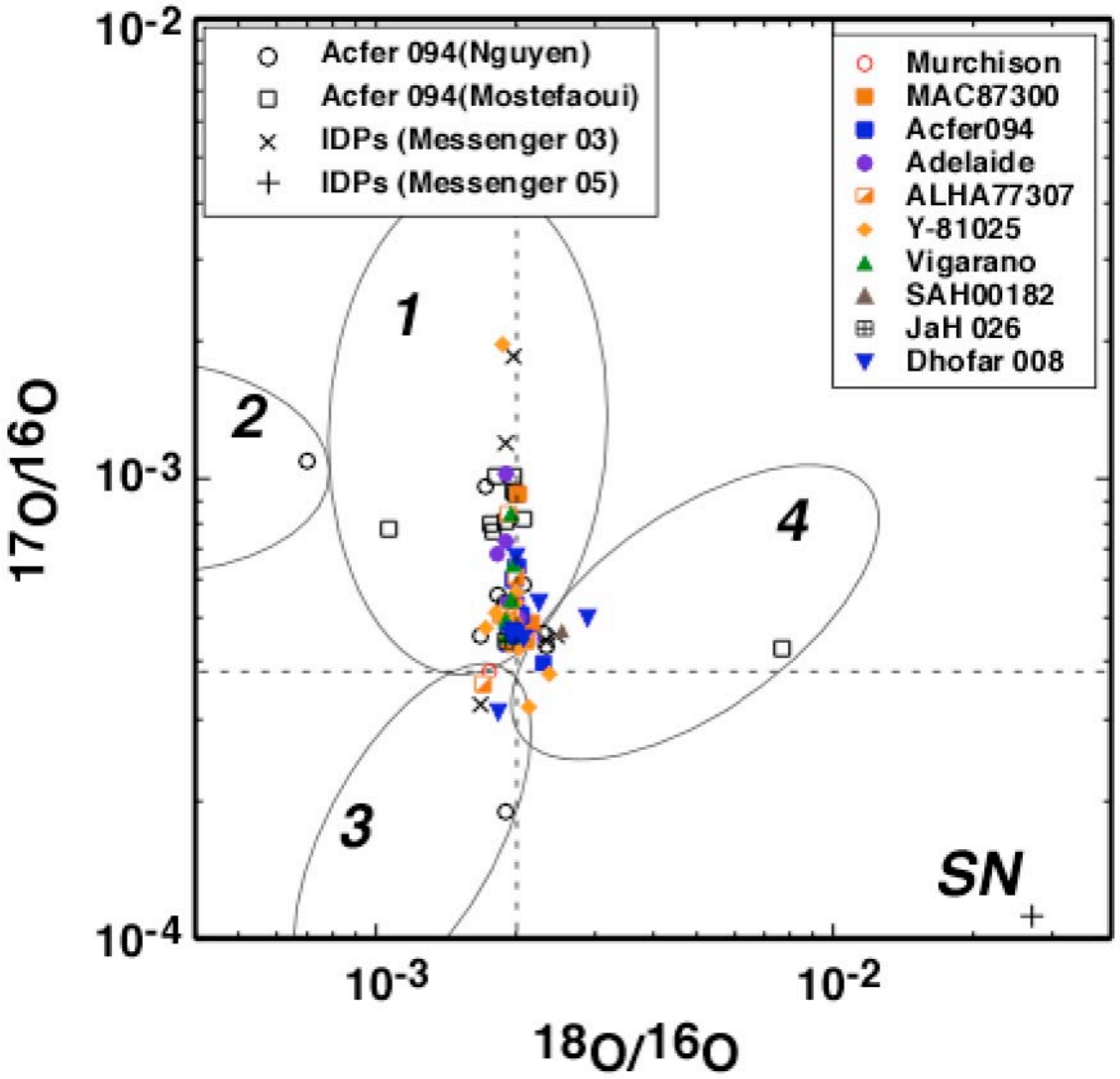

図４　ケイ酸塩スターダストの酸素同位体比。点線は太陽系の同位体比。ほとんどのスターダストは ^{17}O 成分に富んでいる。これらの粒子は赤色巨星に由来する。超新星に由来するスターダストは 1 粒だけ見つかっている（SN の所のプロット）。