

# 原始太陽系の解剖学

北海道大学 大学院理学研究院／北海道大学 創成研究機構 坂本 尚義

物質の生成過程を記録している結晶成長組織・構造とその同位体分布とを対照させ解析する同位体組織学 (Isotopography) の手法を用い隕石を解剖していくと、太陽系創世時代の物質進化を遡り、銀河における先太陽系時代の出来事や銀河内物質循環へとシームレスにつながっていく。隕石の解体新書をつくる一連の研究において意外性のある重要な発見をしてきたのは、好奇心旺盛で失敗を恐れない向こう見ずの若者たちの集中力である。

## 原始太陽系の解剖学とは

「原始太陽系の解剖学」、これは昨年度から開始した科研費特別推進研究の課題名である。この課題は「太陽系原料物質を作った元素合成から太陽系創世期までの銀河内物質大循環についての物理と化学のバランスのとれた解明を目指す」という壮大な構想のうち、隕石分析に集中したものである。大風呂敷を広げる前に、隕石中に我々人類の気がついていない神様の贈り物がどれだけあるのか示してみようということだ。

「原始太陽系の解剖学」は図1に示す項目を研究対象とする。「銀河内物質循環って何?」「隕石から太陽系ができた頃のことをわかったとしても銀河のことまでわかるのかね」という声が聞こえてきそう。神様が完全ならごもっともであるが、神様はいたずら好きで、過去をすべてリセットせず、少しだけちょこちょこ残して、我々の能力を試しているみたいなのである。隕石研究の歴史を振り返るとその様子が見えてくる。

## 不均質太陽系の発見

隕石による太陽系起源進化研究の基礎は「凝縮モデル」である。凝縮モデルが正しいとすれば、すべての物質は太陽系形成時にリセットされており、化学的に均質な太陽系が初期状態である。その結果、我々は先太陽系時代の銀河の出来事の直接の物証を得ることはできない。

1973年、R. N. クレイトンは隕石中の鉱物に酸素同位体のうち $^{16}\text{O}$ 成分だけが地球に比べ多くなっている証拠をみつけた。これが太陽系における酸素同位体異常存在の発見であり、この結果が不均質太陽系へと発展した。太陽系の酸素同位体異常とは、酸素の同位体分別が熱力学により支配されない過程により起こされたことを示す同位体比のことをさし、主に $^{16}\text{O}$ 成分だけが増減する過程や原子核合成過程に由来する。

酸素同位体異常は惑星間にも見られる。惑星間の同位体異常は「凝縮モデル」に矛

盾し、太陽系を構成する物質が均質なものから進化していないことを示す。酸素同位体異常の大きさは、惑星間で数分の一%、隕石間で数%、コンドライト構成要素間では数百%、コンドライトのマトリックスを構成する微粒子間では数千%におよぶ。これは原始太陽系星雲中の微粒子が、集積合体により混合し、惑星形成過程で酸素同位体比が平均化されたことを反映している。

## 同位体顕微鏡

コンドライトマトリックス中にみられる最大の酸素同位体異常(数千%)の担体は、プレソーラー粒子である。この異常はプレソーラー粒子に材料を供給した恒星の酸素同位体合成結果を反映している。一番多量に発見されているプレソーラー粒子はAGB星由来のもので $^{17}\text{O}$ 成分に著しく富む。

銀河のどこかにあった恒星の周りで誕生したプレソーラー粒子がマトリックス中に埋まっている状態を最初に観察したのは東工大ポスドクであった永島一秀(現ハワイ大)である(坂本, 2006)。この発見には、国広卓也(現岡山大)とともに、彼らの東工大での学生時代6年間を費やして開発した同位体顕微鏡が用いられた。

プレソーラー粒子によるものを除くその

他の太陽系の酸素同位体異常は $^{16}\text{O}$ 成分だけの増減に起因し起こる。国広は様々な隕石で発見されるすべての $^{16}\text{O}$ 成分の増減による酸素同位体異常をもつ物質が一つの隕石のコンドライトマトリックス中に観察できることを同位体顕微鏡により初めて示した。同時になされた重要な提案は、様々な恒星に起源をもつプレソーラー粒子が現存しているとすれば、マトリックス1ミクロン四方中に均質に混合されていなければならないという予測である。この均質混合は銀河中で起こったと考えられるが、その物理は明らかではない。

## 酸素同位体異常をもつ環境の解析

不均質太陽系を記録する $^{16}\text{O}$ 成分に富む鉱物と欠乏する鉱物がどのようにして生成したのかを考察するにはCAIと呼ばれるコンドライトの構成要素を対象とするのが都合良い。CAIにはいくつかの種類があるが、この目的に適するのは液滴から結晶化したCAIである。太陽系最古の年代45億6700万年はこの液滴CAIから得られており、太陽系開闢年代としてあつかわれている。

液滴CAIは主にスピネル、メリライト、透輝石、灰長石の4種類の鉱物からなる。冷却に伴いこの順番で鉱物が結晶化し、鉱物の酸素同位体組成は液のそれと等しくなる。液滴CAI中の鉱物は酸素同位体的に不均質である。大概是、スピネルと透輝石が $^{16}\text{O}$ 成分に富み、メリライトと灰長石が $^{16}\text{O}$ 成分に乏しい。したがって、各鉱物間の不均質を実現するためには、冷却の途中

### 同位体顕微鏡によるサーベイ+同位体ナノスコープによるピックアップ

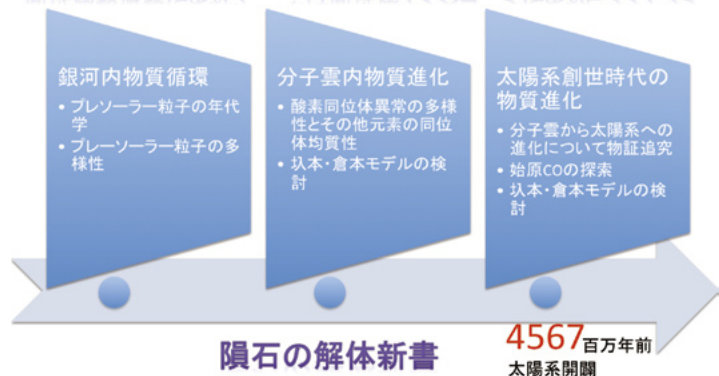


図1 原始太陽系の解剖学が目指すもの。同位体顕微鏡によるnmレベル分解能の隕石広域サーベイ分析と同位体ナノスコープによる注目物質のピックアップ分析を組み合わせ隕石の解体新書を作る。

で液滴の酸素同位体比が変わるか、結晶化後特定の鉱物の酸素同位体が入り替わるかである。いずれの場合も $^{16}\text{O}$ 成分に富む環境と欠乏する環境の2つが必要である。

これらの2種類の環境が原始太陽系星雲ガスとして準備されていたことが明らかになりつつある。ミクロン分解能の酸素同位体局所分析法が開発され、CAI中の酸素同位体比を分析できる様になった成果である。前段落で大概と書いたCAI中の酸素同位体異常の鉱物間分布は、鉱物別に完全に成り立っているCAIが大多数であるのだが、CAIであっても部分的ではあるが化学反応の跡を残す中間的な分布が残されていることも明らかになってきた。神様は過去を完全にリセットしなかったのだ。

1997年クリスマス、伊藤元雄(現LPI)は $^{16}\text{O}$ 成分に富むメリライトと $^{16}\text{O}$ 成分に乏しいメリライトが隣接するCAIを見つけた。しかも、その結晶境界の両側にはこの二つの結晶が液から成長したことを直接示す固溶体のゾーニングをもっていた。伊藤は自ら開発したミクロン分解能の酸素同位体局所分析を用い、酸素同位体組成がメリライトの結晶成長とともにどう変化するかの測定を始めた。酸素同位体比は、 $^{16}\text{O}$ 成分に富むメリライトが固溶体ゾーニングをもち始めると、突然 $^{16}\text{O}$ 成分に乏しくなった。つまり、このメリライト結晶は $^{16}\text{O}$ 成分に富む中心部分と $^{16}\text{O}$ 成分に乏しい周辺部分からなっていたのである。 $^{16}\text{O}$ 成分に乏しい組成は結晶成長が終了する結晶境界まで一定に保たれた。一方、 $^{16}\text{O}$ 成分に乏しいメリライトは中心から結晶境界まで $^{16}\text{O}$ 成分に乏しい一定の組成を保っていた。この結果はメリライトを晶出した液の酸素同位体組成の $^{16}\text{O}$ 成分が2段階に変化したことを示す。CAIは原始太陽系星雲内に浮かんでいたの、液相の酸素同位体組成の変化は、周囲の星雲ガスの酸素同位体組成の変化に対応する。このCAIは原始太陽系星雲ガスが $^{16}\text{O}$ 成分に富んだものから乏しいものへと変化したときのことを記録していたのだ(伊藤・塚本, 2000)。伊藤は時間が経つのも忘れ測定を続け、一連の測定が終了したのは正月2日早朝だった。

## 酸素同位体異常の塚本-倉本モデル

原始太陽系星雲ガスのもつ酸素同位体異常が隕石鉱物に記録されたことは、酸素同位体組成の変化を結晶成長という物質科学の素過程から理解することにより明らかにできる。しかし、もし酸素同位体異常をもつ星雲ガスがあったとしても、星雲ガスはどのように2種類の異なる酸素同位体異常

を保存したのだろうか? 2種類のガスはすぐに混合して1種類になってしまう。

この問題を筆者は2001年秋頃に真剣に考えはじめた。酸素同位体異常が起こったとしよう。これは原子または分子スケールの分離である。このスケールで分離した別々の分子を別々のガス領域にまで長距離輸送する必要がある。同位体異常をもった酸素を氷に閉じ込めよう。この氷を内惑星領域に輸送し星雲ガスを汚染させてはどうだ。さて、どうやって氷だけを輸送するか?

筆者はこのアイデアを北海道大の倉本圭の協力を得て、酸素同位体異常を定量的に説明する塚本-倉本モデルへと発展させた(図2, 倉本・塚本, 2005)。モデルによれば、星間物質の時代に端を発する酸素同位体異常は、やがて原始太陽系星雲において、内惑星領域の星雲ガスの酸素同位体組成を $^{16}\text{O}$ に富む組成から $^{16}\text{O}$ に乏しい組成へと進化させる。2種類の酸素同位体異常をもつ星雲ガスの存在は、原始惑星系円盤がもつダイナミクスが引き起こす時間発展の必然の帰結だったのだ。

## 隕石の解体新書と銀河内物質循環

塚本-倉本モデルは氷の同位体比を予想したが、筆者はこれに対応するものが発見されるとは思っていなかった。しかし、東工大院生の坂本(現北大)が、同位体顕微鏡で偶然発見した宇宙シンプレクタイト(COS)は、モデルが予想した氷の酸素同位体異常をもっていた(塚本, 2008)。最近、学生たちの新しい結果をみると、神様が隠している未知物質や未知構造がまだ隕石中に眠っていることを予感する。これが隕石の解体新書を作る動機である。

同位体組織学的に隕石を解剖していくとシームレスに先太陽系時代の銀河における出来事や銀河内物質循環へとつながっていくことがわかる。ここで、本論で時間の話題がなかったことに注意してほしい。隕石の解体新書に時間を入れるテーマのうちで最も野心的なものが銀河内物質循環のタイムスケールの決定である。隕石中には先太陽系時代に形成した物質が多数存在しているが、その年代測定に誰も成功していない。我々は阪大の石原盛男, 九大の内野喜一郎, 日本電子の坂口清志と共同で宇宙試料分析

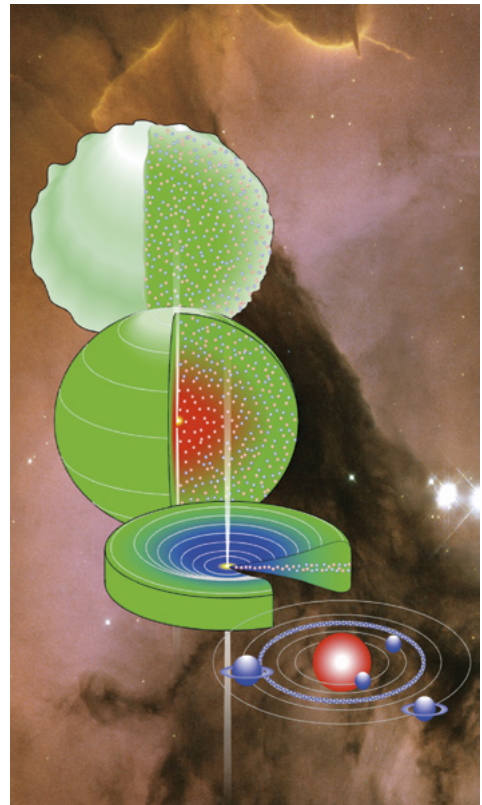


図2 塚本-倉本モデルによる惑星系形成における酸素同位体進化の概念図。概念図は上より分子雲コア, 原始星, Tタウリ星, 惑星形成の各時代を表す。色は酸素同位体組成を表す, 赤: $^{16}\text{O}$ に富む組成(太陽系平均組成), 青: $^{16}\text{O}$ に乏しい組成, 緑:太陽系平均組成よりさらに $^{16}\text{O}$ に富む組成(この組成は未同定)。

用の超高感度極微量質量分析システムをJST先端計測分析技術・機器開発事業のもとで製作中である。このシステムはプレソーラー粒子1粒の同位体分析ができる性能を目指している。システムが完成すれば、銀河物質の年代測定に着手できる。そのため、プレソーラー粒子の研究により北大で博士をとったばかりの江端新吾(現阪大)が開発に携わっている。

—参考文献—

伊藤元雄・塚本尚義(2000) *地学雑誌*, **109**, 836-844.

倉本 圭・塚本尚義(2005) *遊星人*, **14**, 193-200.

塚本尚義(2006) *学術月報*, **59**, 173-178.

塚本尚義(2008) *パリティ*, **23**(1), 62-64.

### ■一般向けの関連書籍

日本地球化学会監修 松田准一・塚本尚義共編(2008) *地球化学講座2 宇宙・惑星化学*, 培風館。