

隕石中の酸素同位体：太陽系誕生期のトレーサー

東京工業大学大学院理工学研究科地球惑星科学専攻
塚本尚義

Oxygen isotopes in meteorites: a tracer for the solar system evolution

YURIMOTO, Hisayoshi

Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology

表面科学 20, 658-664 (1999)掲載

Synopsis

Stratigraphy of oxygen isotope anomaly in Ca-Al-rich inclusions (CAIs) in primitive meteorites has been determined by secondary ion mass spectrometry. The results show that the CAIs have experienced multiple heating event in the protoplanetary disk as well as in vacuum. Oxygen isotope anomaly in CAIs was introduced by isotopic exchange reaction between the ^{16}O -rich melt and the surrounding ^{16}O -poor gas during the heating. A candidate for an energy source for the multiple heating would be flares of active protosun. The proto-CAIs generated near the protosun were launched into the meteorite forming region in the protoplanetary disk by bipolar out flow.

1. はじめに

今から約 45.7 億年前、銀河系の星間空間にガスやダストの密度が大きい領域が誕生した。これが太陽系の素となる星間雲である。この星間雲は 45.67 億年前に収縮し始め、中心部に太陽、その周りに円盤状のガス星雲を形成していった。惑星はこのガス星雲中に数%含まれていた固体微粒子が集積したものである。惑星形成は、微惑星(45.63 億年前)、原始惑星(45.58 億年前)の段階を経て、惑星(地球、火星：45.5 億年前)の順に段々と成長した。太陽が現在のように定常的な核反応を行う恒星(主系列星)に進化したのは、この後の 44.7 億年前のことである^{1), 2)}。

直径数十 km の大きさを持った微惑星が原始惑星を経て現在の大きさの

惑星まで成長する過程を支配する主な物理法則は、太陽およびその周りを公転する天体群との間の力学的相互作用である³⁾。また、惑星の成長に伴う加熱により、惑星物質は化学反応をおこし惑星内部まで物質分化が進行する⁴⁾。これらのプロセスは複雑ではあるけれども、支配する物理的過程が明確であり、その時の化学反応も解明されてきたので、現在ではかなり具体的な進化の描像が得られている。これらの成果によると、ほとんどの微惑星は原始惑星を経て惑星へと成長してしまった。それが故、微惑星形成以前の物質進化については情報が極端に少なく、断片的な知見が得られているにすぎない。

現在わずかに生き残っている微惑星や原始惑星は太陽系の小天体、つま

り，彗星や火星と木星の軌道の間によく存在する小惑星や冥王星の外側に最近続々と発見されているカイパーベルト天体が相当する．これらの太陽系小天体の物質は直接探査されたことが未だないため，小天体の全体像は現在もほとんど解明されていない．しかし，地球に落下する隕石の大部分はこれら小天体の破片であると考えられている．

隕石にはいくつかの種類があるが，全体の 80%以上はコンドライトと呼ばれている種類である．コンドライトは微惑星の破片で，微惑星時代に天体内部で変成作用による加熱を受けた形跡を残す．しかし，溶融するほどの高温過程は経験していない．このうち，変成のほとんどないものも見つかり，その解析から，コンドライトは，mm からサブミクロンまでの種々のサイズの物質が渾然一体となった集合体であり，その物質には粘土鉱物あるいは有機物といった低温でのみ安定な物質からカンラン石のような 1000 以上の高温下で結晶化する鉱物まで含まれている．このように広い範囲の温度条件で形成した物質が混じり合っているコンドライトの組織から，微惑星という天体は太陽系の原料である種々の起源を持つ微粒子を集めた天体であることは間違いない．事実，これらの鉱物の中には，星間物質もわずかに混入していることが判明している⁵⁾．

これらの事実より，コンドライトは

原始太陽の周りを取り囲んでいた希薄なガス円盤中に浮遊していたダストを現在まで保存しているコンテナであることがわかる．したがって，個々の微粒子を研究すれば太陽系において天体が生まれる以前の状態がわかるに違いない．小論では，星間雲から微惑星へと太陽系が進化する間に何が起こっていたのかを太陽系最古の物質中の酸素同位体比を鍵として迫ってみよう．

2. 太陽系最古の年代を持つ物質：

CAI

コンドライトを構成する物質の大部分は結晶である．これらのすべての物質について結晶化した年代を決定することは現在の分析技術を持ってしても難しい．CAI とよばれる物質はウランを比較的多量に含んでいるため，45.66 億年の年代が求められている．この年代は，現在知られているうちで最も古い年代である²⁾．

CAI とはコンドライト中に存在する CaO 成分と Al_2O_3 成分に富んだ結晶からなる包有物(Ca-Al-rich inclusion の頭文字)のことである．このような組成を持つ物質が天然に存在することは説明が必要である．なぜなら，固体物質が太陽系の平均的組成をもつ Mg, Si, Fe の 3 元素により構成金属元素の 90%以上が占められるからである．これら 3 つの主成分元素の次には Na, Al, Ca, Ni という副成分元素が続く．このうち Ca や Al は宇宙空間において最も蒸気圧が小さい元素群の一つに数えられる．したがって，Ca と Al 成分に富む鉱物のみから構成されている CAI は太陽系の固体物質が蒸発してしまう直前の物質か，あるいは，完全に蒸発してしまったガスからの最初の凝縮物質であることを

* 現在，文部省宇宙科学研究所において進行中のミュージーズ C 計画は，人類初の小惑星サンプルリターン計画である(<http://www.muses-c.isas.ac.jp/>)．この計画により太陽系小天体の直接探査が始まり，太陽系起源の研究が飛躍的に進展すると期待されている．

示している。CAI の存在は、蒸発起源説の場合でも凝縮起源説の場合でも、太陽系誕生期において 1500 を越える高温過程があったことを強く示している。

Fig. 1 に CAI のいくつかの写真を紹介する。(a)は全体の大きさが cm サイズあり、構成鉱物の粒度も最大 mm に達する CAI の例である。このような CAI は粗粒 CAI とよばれ、以前から最も研究が行われていた種類である。後述するように、これまではこのような粗粒 CAI においてのみ鉱物別の酸素同位体比測定が可能であった。(b)に示す CAI は、全体の大きさこそ cm サイズであるが、個々の結晶粒の大きさは 0.1mm 以下と細かい。この CAI の特徴は内部の所々にやや粗粒の結晶で構成される球状の領域 (PB#1, PB#2 とラベルしている部分) を含んでいることである。この領域は細粒のスピネルにより(図中の黒い物質)外部と区切られている。(c)に示す CAI は全体のサイズが 100 μ m しかなく、個々の結晶粒は 10 μ m 以下である。また、全体の形状は前二者が丸い外形をしていたのに対し、フレーク状の不規則な外形を持っている。実は、CAI 全体の中でこのような細粒の CAI の個数が圧倒的に大多数を占めている。従来も細粒 CAI の存在は知られていたが、うまく分析することができなかつたため、研究はほとんどなされていなかった。

3. 酸素同位体

ここで、酸素同位体についてふれておこう。太陽系の固体物質の大部分は酸化物である。地球も隕石も CAI もこの例にもれない。したがって、天然物質の多くは固体構成元素の

50%以上が酸素からなり、残りが金属元素からなる。酸素には、 ^{16}O , ^{17}O , ^{18}O の 3 つの同位体があり、空気中に

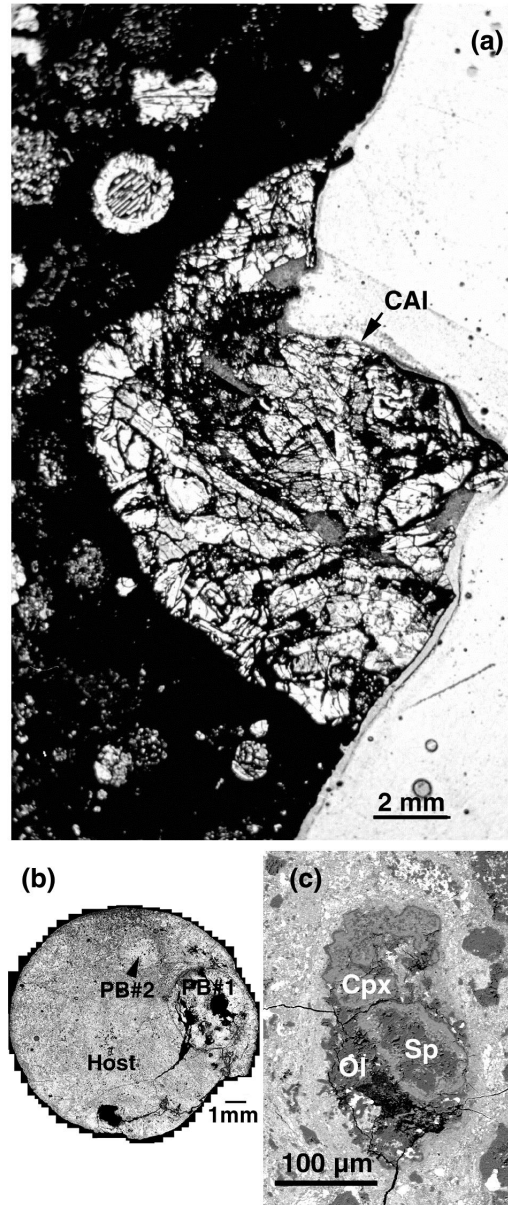


Fig. 1. (a) Optical microphotograph of coarse grained CAI, HN3-1 from the Allende carbonaceous chondrite. (b) Back scattered electron image of SS-02 CAI from the Allende meteorite. (c) Back scattered electron image of a fine CAI from Murchison carbonaceous chondrite. Ol: olivine, Sp: spinel, Cpx: clinopyroxene.

おける同位体存在度は，それぞれ，99.762%，0.038%，0.200%である．

蒸発や凝縮などの化学反応に伴い各物質における元素組成は大きく変化するが，同位体比の変動は小さい．一般に熱力学が支配するプロセスにおいて同位体変動の割合は質量差に比例(M/M 則)する．この同位体比の変化の割合は 値で表現することが多い．酸素の場合，標準平均海水(SMOW)の同位体比を基準にとり，

$$^{17}\text{O}_{\text{SMOW}} = \left\{ \frac{(^{17}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{試料}}}{(^{17}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{SMOW}}} - 1 \right\} \times 1000 \text{ [‰]},$$

$$^{18}\text{O}_{\text{SMOW}} = \left\{ \frac{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{試料}}}{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{SMOW}}} - 1 \right\} \times 1000 \text{ [‰]}$$

の千分率で表す． $^{17}\text{O}_{\text{SMOW}}$ を縦軸， $^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ を横軸にとった 3 酸素同位体図上で M/M 則にしたがう同位体変動は傾き 1/2 の直線上を動く(Fig. 2)．したがって，1/2 以外の傾きを持つ曲線は同位体比の異なる端成分間の混合を伴う必要がある．つまり，3 酸素同位体図上においては質量分別効果による変動と混合による変動が明確に分離できるのである．ちなみに地球上の地圏，水圏，対流圏における酸素同位体比は SMOW の値(0,0)を通る傾き 1/2 の直線(地球型分別曲線)上を変化している．

米国シカゴ大学の Clayton たちは 3 酸素同位体図上で地球型分別曲線以外の場所にプロットされる値を隕石中に初めて見いだした⁶⁾．その新しい点はすべて傾き 1 の直線上にプロットされた．中でも CAI の分析値において最も明確に観察され，地球の値に比べ ^{16}O 成分に富んでいた(Fig. 3)．CAI 中で最も ^{16}O に富む酸素同位体比を持つ鉱物はスピネルという鉱物で，海水の酸素同位体組成に比べ約 4% だけ ^{16}O 成分に富む(Fig. 3 の B 点)．酸素同位体比が最も ^{16}O に乏しい鉱物は

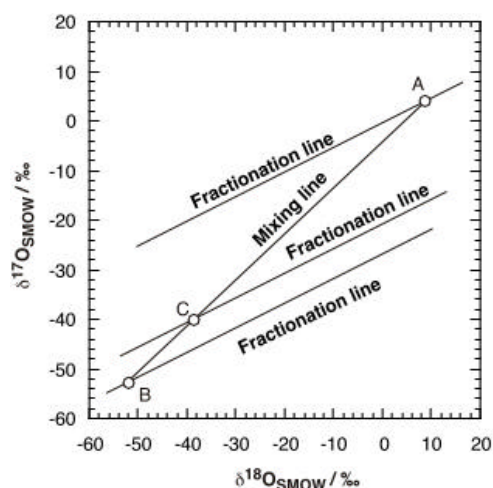


Fig. 2. Three isotopes diagram for oxygen. Mass dependent fractionation occurs along a slope 1/2 line. Mixing between points A and B occurs along the line AB.

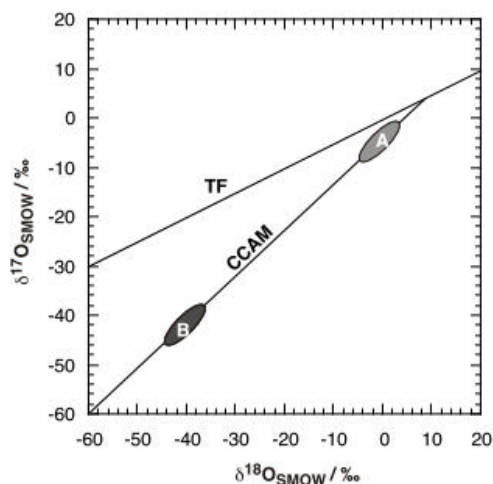


Fig. 3. Carbonaceous chondrite anhydrous minerals (CCAM) line. Oxygen isotope ratios of CAI minerals are scattered onto the line AB. Typical minerals of ^{16}O -rich and ^{16}O -poor endmembers are spinel and melilite, respectively. TF: terrestrial isotope fractionation line.

メリライトと斜長石という鉱物で，ほぼ海水と同様の値を持つ(Fig. 3 の A 点)．A 点と B 点の間の値を持つ鉱

物ももちろん存在する。これらの鉱物間において酸素同位体比が連続的に変化するのではなく離散的であることも特徴である。この事実は、太陽系誕生期において ^{16}O に富む成分(B)と ^{16}O に乏しい成分(A)の2種類の端成分が存在しており、両者間で混合が鉱物毎にあったことを示す。

これらの発見は、CAIの起源を解明するためには、酸素同位体比の異なる端成分の起源とそれら端成分間の混合プロセスを別々に研究しなければならないことを明らかにした。そのためには、個々の結晶が成長する何時の段階で酸素同位体比の混合が起こったのかを明解にすることがまず必要である。このために μm レベルの酸素同位体比の局所分析が要請され、そのような分析が実現されたのは最近のことである。

4. 二次イオン質量分析法 (SIMS) による酸素同位体比分析

酸素同位体比を測定する従来の分析法は、物質中の酸素を酸素ガスとして抽出し、それを気体用質量分析装置に導入して測定していた。この方法では、1回の分析に最低数mgの粉末試料を必要とする。そのため、CAIの様な微細結晶の集合体の各結晶の酸素同位体比を測定するためには、CAIを細かく粉砕し、鉱物の種類別に分離することにより測定に必要量を確保する必要がある。この様に前処理され測定された各鉱物の酸素同位体比はその平均値を表しているにすぎない。もし鉱物中の場所により酸素同位体比が異なっていたとしても、そのことを証明することはできなかった。

最近、レーザー光線を用いて酸素ガスを抽出する方法が開発されたが、

それでも $100\mu\text{m}^3$ オーダーの体積の試料を必要としている⁷。このレーザーを用いる分析法により、CAI中の鉱物1粒1粒の酸素同位体比を測定可能になった。しかしながら、鉱物粒子内の同位体比分布を測定するためには、マイクロメーターの分解能を持つ局所分析が要請される。このような局所分析が二次イオン質量分析法(SIMS)を用いて実現した。

SIMSは細く絞った1次イオンビームにより試料表面をスパッタし、その結果放出される2次イオンを質量分析する分析法である。著者たちは直径 $2\mu\text{m}$ の Cs^+ ビームを用いる酸素同位体比局所分析法を開発した。用いた2次イオン質量分析装置はカメラims-1270という大型の分析磁石を持つ高質量分解型SIMSである。

酸素同位体比は、 ^{16}O 、 ^{17}O 、 ^{18}O の負の二次イオン強度比から求められた。これらの目的の2次イオンを妨害するイオンとして $^{16}\text{OH}^-$ 、 $^{17}\text{OH}^-$ 、 H_2O^- イオンが存在する。特に、 $^{16}\text{OH}^-$ と $^{17}\text{O}^-$ の質量差は 0.0036amu と小さく、また、試料表面は空気中の水蒸気を吸着しているため $^{16}\text{OH}^-$ 強度は $^{17}\text{O}^-$ の数百倍の強度をもっている。したがって、酸素同位体比を正確に測定するために質量分析装置を調節し、これらの妨害イオンの寄与を目的イオンの0.05%以下となるように設定した(Fig. 4)。この分析条件で磁場によるピークジャンプにより質量順に酸素ピークの測定を繰り返し、 $^{17}\text{O}^-$ 強度の統計変動が0.2%以下になるまで各二次イオン強度を積算した。このとき、検出系は二次電子増倍管を用いたパルスカウンタ方式をとっているため、数え落とし補正を行っている。

このようにして求められた酸素同位体の二次イオン強度比は、分析時に

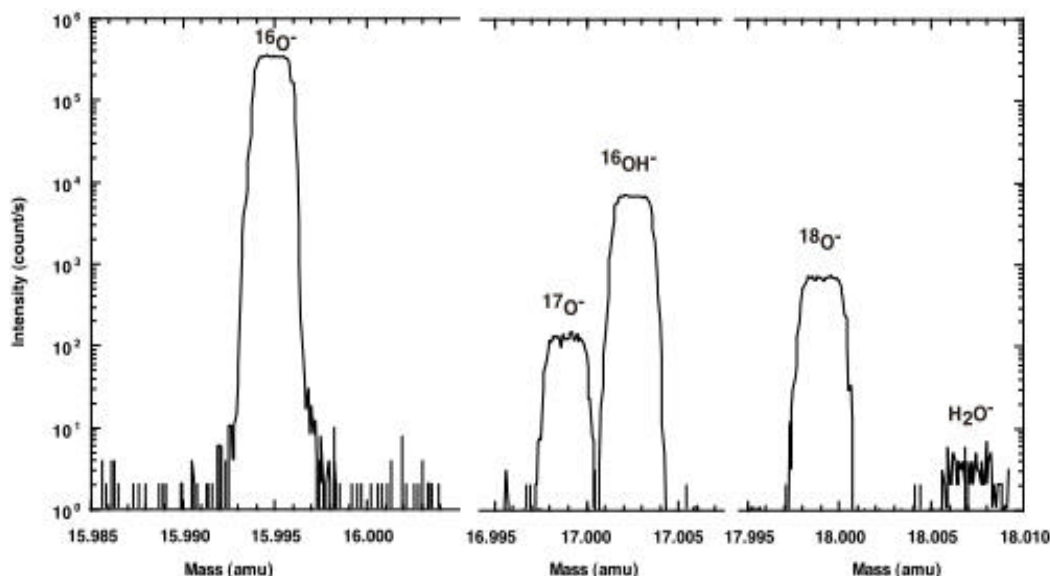


Fig. 4. Mass spectra for masses 16, 17 and 18.

M/M 則にしたがう質量分別をうけている．このため，測定した二次イオン強度比と真の酸素同位体比は 1 質量差当たり数 % 異なる．また，この質量分別効果の大きさは，日毎のわずかな分析条件の差によっても異なるのみならず，試料のマトリックス組成にも依存する．これらの質量分別効果は試料と同位体比が既知な標準試料を同一条件で交互に分析・比較することにより補正できる．このようにして μm 領域において分析時の総合的な誤差(確度)が 0.5% 以下の酸素同位体比分析が可能になった．0.5% の分析誤差は Fig. 3 に示された CAI 鉱物間の酸素同位体比の違いを検出するに十分なものである．次節にこの新開発の分析によりわかってきた CAI 中の酸素同位体比に関する新事実を述べていこう．

5. 酸素同位体比ゾーニングの発見

Fig. 5 は 7R-19-1 と名付けられた CAI 中のメリライト結晶の化学組成分布

と酸素同位体比分布との関係である．メリライトはゲレナイト ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$) とオケルマナイト ($\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$) 成分の間で連続固溶体をつくり，高温下では Al 成分に富む結晶が晶出し，低温になるにつれ Mg 成分に富む結晶になる．Fig. 5 に示すメリライト結晶は粒界の近くで Mg 成分に徐々に富むことから結晶成長が起こっていることがわかる．一方，この結晶の酸素同位体比は結晶中心部で Fig. 3 の B 点の組成を持っているが，結晶粒界近くで突然 ^{16}O 成分に乏しい A 点の組成に変わる．この関係により，B 組成のメリライトが元々存在しており，後に，A 組成のメリライトがそれを覆うように成長したことが明らかである．

塚本たち⁸⁾はこの事実から，A 点の酸素同位体比をもつガス成分と B 点の組成を持っているダスト成分が共存している原始惑星星雲内で加熱作用が起こったためだと考えた．この考えによるとダストは元々 A 点の組成であるために中心部が ^{16}O に富む酸

素同位体比を持っていることは不思議ではない。その後、再加熱が起こると、その加熱条件が適当であれば、元々の固体が部分的に溶融を起こす。メルト中の酸素の拡散係数は固体中に比べはるかに速やかに進行するため、この部分溶融中にメルト部において周りのガスとの酸素同位体交換反応が進行する。この状態から冷却すると、メルトから結晶化した部分は A 点の酸素同位体比を持つことになる。

Fig. 1(a)の粗粒 CAI 中の鉍物の酸素同位体比は 7R-19-1CAI とは少し異なる分布を持つ。Fig. 3 の A 点と B 点の値を持つ鉍物があることは同様であるが、さらに、A と B の中間の値をもつ鉍物も存在する。しかも、これらのどの鉍物中においても 7R-19-1CAI にみられるような空間的な酸素同位体不均一は観察されなかった⁹⁾。この結果も上述の部分溶融モデルを用いて説明できる。

もし再加熱が 2 回起こり、1 回目の再加熱で溶かされた部分と周りのガス成分との酸素同位体交換反応が不十分のまま終了すれば、中間の酸素同位体比を持つ結晶を生成できる。その後 2 回目の再加熱が起こりメルト内で酸素同位体交換反応が十分進行すれば周りのガスと同じ酸素同位体比を持つ結晶を生成できる。この様な不十分な化学反応をおこす加熱温度と時間について定量的な知見を得ることができれば、加熱機構を特定する重要な情報となるに違いない。

Fig. 1(b)の CAI における鉍物間の酸素同位体比分布はさらに複雑である¹⁰⁾。宿主部ではすべての種類の結晶が B 点の組成の酸素同位体比を示した。一方、PB#1 や PB#2 のように結晶が粗粒の部分は、Fig. 1(a)の CAI の様に

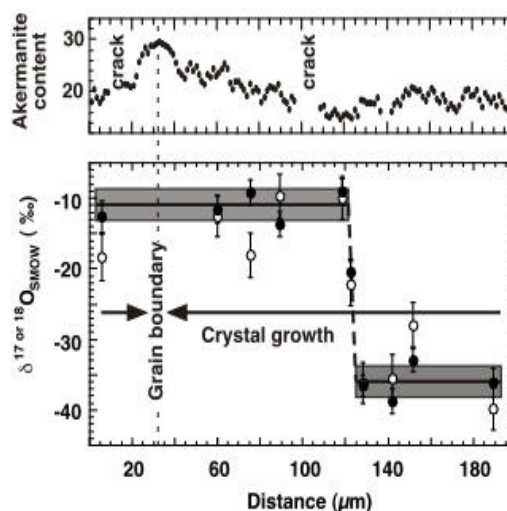


Fig. 5. Oxygen isotopic zoning and compositional growth zoning observed in 7R-19-1 CAI from the Allende meteorite.

鉍物種により A 点の酸素同位体比を持つもの、B 点の酸素同位体比を持つもの、A と B の中間の同位体比を持つ結晶が共存している。したがって、この CAI では Fig. 1(a)の CAI のように星雲ガス中で何回も再加熱された CAI(PB#1, PB#2 の部分)の周りに円盤中を落下してきたダスト成分が新しく付着し、その後真空中で再び加熱され部分溶融・再結晶したことを示している。最後の加熱が真空中であったと考える理由は、宿主部のすべての鉍物がダスト成分本来の酸素同位体比を持っているからである。

Fig 1(c)の CAI は個々の鉍物粒子が細粒で、かつ全体の大きさもサブミリメートルサイズである。また、断面がリボンのような形状を持つ層が幾重にも環状に取り巻いている。この様な組織は真空中で鉍物が気体から直接固体に凝縮してくるとき形成されたと考えるとうまく説明できる。

事実, CAI の中心部から外側の層に向かうにつれ, 太陽組成のガスが冷却したとき結晶化する順番になっている. これら全鉱物の酸素同位体比は Fig. 3 の A 点の値, つまり, ダスト成分本来の値をもっていた¹⁾. したがって, この微細 CAI が真空中で加熱蒸発したダストの再凝縮物であると考えことは合理的である.

6. CAI 形成モデル

酸素同位体の分布様式から CAI には真空中で凝縮したもの, 真空中で加熱を受けたもの, 原始太陽系円盤ガス中で加熱を受けたもの等の種々のバリエーションがあることがわかった. またこの加熱も一つの CAI につき一回とは限らず, 複数回のことが普通であることもわかってきた. このような複雑な環境が同時に実現される場所は原始太陽周辺においてである.

太陽系誕生期では原始太陽の周りを平べったいドーナツ状の形状をもつガスとダストからなる円盤(原始太陽系円盤)が取り囲んでいた¹⁾. 原始惑星系円盤の内縁は原始太陽からの放射によりガス成分がプラズマ化する領域で決定される. 原始惑星系円盤中を重力作用により螺旋を描きながら落下してきたガス成分は, 太陽近傍のプラズマ化領域で電離されると速やかに原始太陽の磁力線にトラップされ, 原始太陽に落下, あるいは, 宇宙空間に向かい放出されるからである. サブミリメートルサイズのダストもこの気体成分の運動により引きずられ, 気体と同じ運命をたどる. 一方, mm サイズ以上の粒子は気体による引きずり作用の影響をほとんど受けないため, 原始惑星系円盤内縁付近にそのまま滞在する(Fig. 6).

この内縁付近の温度は太陽の放射熱により決定され, 1500K を越える. そのため, 円盤内縁付近の固体は元々の主成分であった Mg, Si, Fe 成分のほとんどを落下中に蒸発により徐々に失い, Ca, Al に富んだ粒子, つまり, CAI 組成の粒子に変化していく. このとき, 円盤中の圧力は 10^{-3} 気圧以下の低圧であるので, メルトは安定に存在できず, 蒸発は固体から直接気体に昇華する. この内縁付近の粒子をプロト CAI と呼ぶことにする. プロトを付ける理由は, プロト CAI はその化学組成が CAI その物であるが, この段階では酸素同位体的特徴まで説明できていないからである. プロト CAI は原始太陽の周りを公転する間にお互いに付着を繰り返し, 最大 cm 級の大きさまで成長したと思われる. プロト CAI 層の内縁は最も難揮発性成分である Al_2O_3 の蒸発温度で決定される. したがって, Fig. 6 に見られるようにプロト CAI はガス円盤の内縁より太陽近傍の真空領域にも存在している.

このとき, もし原始惑星系円盤を構成するガス成分とダスト成分が Fig. 3 の A 点, B 点のようにそれぞれ異なる酸素同位体比を元々持っていたならば, 真空中で加熱を受けた場合と, ガス円盤中で加熱を受けた場合とでその結果生成する物質中の酸素同位体比は異なってくる. 具体的に説明すると, 太陽近傍の真空領域で蒸発・凝縮・溶融を経験するプロト CAI の酸素同位体比の変動は M/M 則に従う(Fig. 2 における傾き 1/2 の直線に沿う)だけで, 実際の CAI 中に見られる Fig. 3 上の傾き 1 の直線に沿う変動は考えられない.

一方, ガス円盤内部でプロト CAI が加熱を受けると, 円盤中のガス成

分との間で、徐々に同位体交換がおこる。しかしながら、この反応は物質中の自己拡散によりゆっくりと進行するので、プロト CAI が固体である時は酸素同位体比の変化は実質上起こらないといってよい。つまり、ところが、溶融が起こると、メルト中における拡散係数は固体中に比べ何桁も大きくなるので、短時間（cmサイズの球で数時間）でメルトとガスは同位体平衡に達することができる。また、蒸発した成分が凝縮する場合も、凝縮成分が気相である内に円盤内のガス成分と同位体交換を起こす。これらの特別なプロセスにより、ガス円盤内のプロト CAI は次第に酸素同位体比が円盤ガスの組成に近づいていく。

では、プロト CAI が溶融する様なことは起きるだろうか？前述したように、原始惑星系円盤は低圧である。そのため、物質は通常昇華し、溶融しない。このような条件下でメルトを生成させるには瞬間的な加熱による非平衡過程の溶融作用が必要である。最近の天体観測によると、原始星は非常に活発にエネルギーを解放しており、星表面において頻繁（数時間～数日の間隔）にフレア（爆発）を起こしている。また、一つ一つのフレアの規模も現在の太陽と比べると桁違いに大きい。したがって、1回のフレアでプロト CAI を溶融させることが十分可能である。また、フレアの活動に伴い原始惑星系ガス円盤の内縁と原始太陽との距離は著しく変動するだろう。この変動によりガス円盤内にあったプロト CAI は真空中に引き出されたり、その逆になったりする。

要するにフレアはプロト CAI を瞬間的に何回も加熱する作用ばかりで

はなく、プロト CAI 周囲の酸素同位

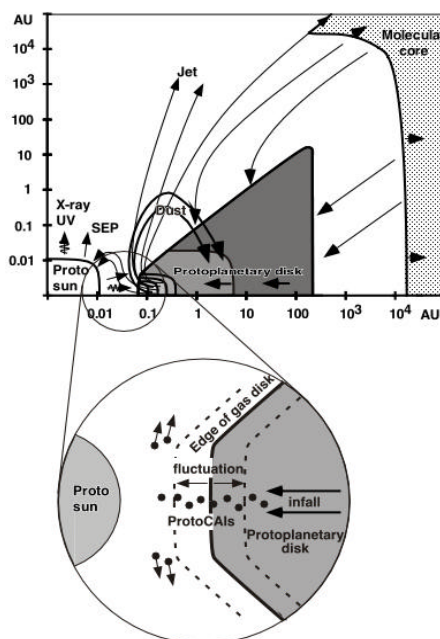


Fig. 6. Schematic view of CAI formation field.

体環境も同時に変化させるのである。この太陽近傍における原始太陽と原始惑星系円盤の相互作用の結果が物質に反映したものが Fig. 1(a)や(b)に見られる粗粒 CAI であると考えられる。この様にして形成された CAI は、やはりフレアにより作りだされた強い双極流により太陽近傍から打ち上げられ、遠部へと運び出された(Fig. 6の矢印のついたプロト CAI)。また、Fig. 1(c)の様な微細 CAI は、ガスの運動とともに太陽に落下してきたダストが溶融することなく太陽近傍の真空領域に至り昇華した成分が、双極流に乗り、原始太陽から遠ざかるときに凝縮したものであろう。これらの太陽近傍で形成された CAI のうち原始惑星系円盤低温部に環流したものは、そこに存在する他のダストと

一緒になり，微惑星を形成した．

最後に残された問題は，ガス成分とダスト成分が，如何にして異なった酸素同位体比を初めに獲得したかである．一つのモデルは，星間雲中あるいは原始惑星系円盤外縁部において M/M 則に従わない傾き 1 の酸素同位体分別が起こっていた可能性である．例えば，紫外線による光化学反応により特定の気体種間で傾き 1 の同位体分別反応が起きることが報告されている¹²⁾．星間雲は紫外線をはじめとする放射線が豊富な環境であり，また真空中で極低温の環境は熱力学的効果が小さくなるので，光化学反応効果の影響が大きくなるだろう．もし，反応の片方の分子種のみを固相にトラップする機構があれば，星間ダストと星間ガス間において別々の酸素同位体比を持つことができる．筆者はオゾンと有機物間の反応が有力なプロセスであると考えて実験を進めている．いずれにせよ非質量依存性の酸素同位体分別を起こした分子種を固相にトラップするプロセスを探ることが，原子惑星系円盤から星間雲へと研究のフロンティアを拡大していくための重要な研究テーマである．

文 献

- ¹ 坂本尚義, 倉本圭: 科学 **68**, 637 (1998).
- ² 坂本尚義: ぶんせき **291**, 219 (1999).
- ³ 渡邊誠一郎, 井田茂: 比較惑星学, 131(岩波書店, 1997).
- ⁴ 阿部 豊, 地球の誕生と初期進化, 科学, 62 (2), 100-107, 1992.
- ⁵ トマス・ベルナトビッツ, ロバート・ウォーカー, (甘利幸子訳): パリテイ **13**, 15 (1998).
- ⁶ R.N. Clayton: Annu. Rev. Earth Planet. Sci. **21**, 115(1993).
- ⁷ E.D Young., D.W. Coutts, and D. Kapitan: Geochim. Cosmochim. Acta **62**, 3161 (1998).
- ⁸ H. Yurimoto, M. Ito and H. Nagasawa: *Science* **282**, 1874 (1998).
- ⁹ H. Yurimoto, H. Nagasawa, Y. Mori, and O. Matsubaya: *Earth Planet. Sci. Lett.* **128**, 47(1994).
- ¹⁰ G.L. Kim, H. Yurimoto and S. Sueno: In Lunar and Planetary Science **XXIX**, Abstract #1344, Lunar and Planetary Institute, Houston (CD-ROM) (1998).
- ¹¹ T. Sakai and H. Yurimoto: In *Lunar and Planetary Sciences XXX*, Abstract #1528, Lunar and Planetary Institute, Houston (CD-ROM) (1999).
- ¹² M.H. Thiemens: *Science* **283**, 341(1999).